

土木施工法変遷の考察と工学的評価に基づ
く合理的選定法に関する研究

Examination into Historical Change of Construction
Method of Civil Engineering Works and Proposal for
Rational Determination Procedures of Construction
Method Based on Engineering Assessment

2003 年 4 月

学位論文：博士(工学) 甲208

新美 孝之介

目 次

第1章 諸論	1
1.1 はじめに	1
1.2 研究の背景と目的	5
1.2.1 はじめに	5
1.2.2 社会的背景	5
1.2.3 建設産業・土木技術者の責務	6
1.3 論文の構成	7
参考文献	10
第2章 土木施工法の体系化に関する考察	12
2.1 はじめに	12
2.2 建設産業の特殊性	13
2.3 体系化の必要性	13
2.4 生産（施工）システムの構成	16
2.5 建設技術の位置付け	20
2.6 施工法の分類と位置付け	21
2.6.1 施工法分類	21
2.6.2 施工システムを構成する要素	22
2.6.3 作業工程・稼働率・作業効率	28
2.6.4 生産システムの経済特性	31
2.7 まとめ	32
参考文献	33
第3章 社会資本形成と施工法の変遷	34
3.1 はじめに	34
3.2 社会的要素による土木施工法への影響	34
3.2.1 概要	34
3.2.2 工事構成要素の経済性, 供給性による施工選択	36
3.3 社会経済の要請と建設産業および施工法の変遷	39
3.3.1 概要	39
3.3.2 戦後復興期(1945年～1955年)	41
3.3.3 高度成長期前期(1956年～1965年)	42
3.3.4 高度成長期後期(1965年～1975年)	44

3.3.5	安定期(1975年～1985年)	47
3.3.6	バブル形成期(1985年～1995年)	50
3.3.7	バブル崩壊、停滞期(1996～現在)	53
3.4	まとめ	55
	参考文献	66
第4章	施工法の体系化分類による工種の変遷	68
4.1	はじめに	68
4.2	目的対象物施工法の変遷(ダム施工法)	68
4.2.1	ダムの変遷	68
4.2.2	日本のコンクリートダム施工法の変遷検証	68
4.2.3	まとめ	72
4.3	専門工法(法面防護工法)の変遷と評価	73
4.3.1	法面安定工法の変遷	73
4.3.2	工法変遷の評価	75
4.3.3	まとめ	76
4.4	建設機械の変遷と評価	76
4.4.1	はじめに	76
4.4.2	建設機械変遷の評価	77
4.4.3	まとめ	79
4.5	骨材の変遷と評価	80
4.5.1	はじめに	80
4.5.2	骨材品質の地域性と変遷	81
4.5.3	骨材需要と生産体制の変遷	84
4.5.4	まとめ	91
4.6	コンクリート工の変遷と評価	92
4.6.1	はじめに	92
4.6.2	基本作業の変遷と評価	92
4.6.3	まとめ	103
	参考文献	104
第5章	施工事例による問題提起	109
5.1	はじめに	109
5.2	コンクリート不具合事例の検証	109

5.2.1	コンクリート劣化報道	109
5.2.2	水セメント比調査事例	114
5.2.3	三省調査委員会の調査報告	116
5.2.4	構造物の種別による調査事例	118
5.2.5	山陽新幹線トンネル調査事例	120
5.2.6	コンクリート構造物の不具合調査	125
5.3	まとめ	127
	参考文献	128
第6章	価値観の変遷と動向	131
6.1	はじめに	131
6.2	社会資本整備と価値観の変遷	131
6.3	価値観の比較	135
6.3.1	はじめに	135
6.3.2	欧州との比較	135
6.3.3	まとめ	137
6.4	日本の価値観動向	137
6.4.1	価値観の変遷	138
6.4.2	現代の価値観と将来の価値観	138
6.4.3	建設工事の価値観	140
6.4.4	まとめ	142
6.5	主観的評価の変遷	142
6.5.1	景観に対する評価	142
6.5.2	構造物形態の変遷に対する評価	144
6.5.3	デザインの変遷に対する評価	146
6.6	I S M法による意識の階層化	148
6.6.1	価値観の位置付け	148
6.6.2	将来の社会展望	149
6.6.3	I S M法による意識の階層化	150
6.6.4	まとめ	159
	参考文献	159
第7章	既存の施工評価	163
7.1	はじめに	163

7.2 既存の施工評価法	164
7.2.1 エネルギー消費量および二酸化炭素発生量 によるダム事情評価	164
7.2.2 地下鉄工事の設計比較による評価例	168
7.2.3 施工プロセスが環境に及ぼす影響を考慮した 建設技術の総合評価システム	171
7.2.4 数理的評価による工法選定	175
7.2.5 法面防護工の評価事例	177
7.2.6 まとめ	178
7.3 設計法による定量的評価法	180
7.3.1 コンクリート構造物の耐久性設計指針案	180
7.3.2 耐久性限界に基づくコンクリート構造物の耐久性設計	185
7.4 本研究との相違点	189
参考文献	190
 第8章 施工法の工学的評価に基づく合理的選定法の提案	 192
8.1 はじめに	192
8.2 コンクリートの耐久性要因	192
8.2.1 長寿命化と耐久性	192
8.2.2 ひび割れ要因と施工の関連	194
8.2.3 要因の抽出	196
8.3 施工因子と水準による温度応力解析	200
8.3.1 はじめに	200
8.3.2 施工環境による解析ケース	200
8.3.3 解析手法	201
8.3.4 因子の選択	201
8.3.5 解析組合せ	204
8.3.6 温度応力解析	205
8.4 解析結果の分析方法	217
8.4.1 実験計画法	217
8.5 分散分析	234
8.5.1 寒中コンクリート	234
8.5.2 暑中コンクリート	243
8.5.3 分散分析結果のまとめ	251

8.6 施工法の工学的評価に基づく合理的選定の提案	254
8.6.1 はじめに	254
8.6.2 提案の概要	254
8.6.3 具体的提案事例その1	257
8.6.4 具体的提案事例その2	261
8.6.5 まとめ	267
参考文献	268
 第9章 現場計測による温度ひび割れ対策工の評価	271
9.1 はじめに	271
9.2 ダム施工概要	271
9.3 計測工	272
9.4 事前解析による施工法選定	274
9.5 温度ひび割れ対策工の評価	280
9.6 現場計測結果	284
9.7 まとめ	287
参考文献	287
 第10章 結論	288
 謝辞	291

第1章 緒論^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)}

1. 1 はじめに^{9, 10, 11, 12, 13)}

20 世紀は、科学による真理の追求、工学の進歩発展、技術革新による産業基盤の充実により、人類の多くの夢が達成された。戦後のわが国経済は科学技術を駆使した産業のめざましい発展により、国内総生産は世界屈指の急成長を遂げた。この間、世界に例を見ない速度で社会資本基盤を整備し今日の国土を創り上げてきた。(図 1.1 参照) 特に近年の 30~40 年間に生活の利便性は、格段に向上した。日常生活における電化製品、生産活動における移動手段の多様化、嗜好的需要に対する多種多様の製品等々の量的、利便性の面で日本は、消費生産型社会の成熟期に至った。しかし現在の経済状態は、バブル経済崩壊後多くの産業が右下がりの様相を示し不確実な状況にある。高度経済成長期(1956 年~1965 年高度成長前期, 1966 年~1976 年高度成長後期)以降、そのひずみは自然環境、生活環境を脅かすこととなった。社会的要請の潮流は、量的需要から質的需要に変化し「ものの豊かさと心の豊かさが両立する社会の実現」が望まれるようになってきた。当然のこととして、社会資本の役割や性格は、社会環境、経済構造、ライフスタイル、価値観の変化に呼応して変遷をする。

社会資本の概念は、戦後より続いた「与える最大効果」から「選択する(費用対効果の高い)最小被害」と変化しつつある^{14, 15)}。(図 1.2 参照) 言い換えれば「国民的コンセンサスを得て限られた中での選択」により社会資本整備の方向性を決する時代となった。この根底には、地球規模の自然環境保全や日本の国勢である少子高齢化といった課題や現象がある。地球環境の深刻化により社会の在り方や社会的価値観は、世界的に変革期を迎えている。現在を時代の変化点「パラダイム」と称する所以でもある。巨大経済化した国家はグローバル化と情報化による広域的交流発展と共にその活動に一定の制約を受ける時代となった。その例として「地球温暖化防止」に代表される人間の活動による地球環境への配慮と対策義務がある。二酸化炭素による地球温暖化は既に 19 世紀頃指摘されていたが、二酸化炭素濃度の観測データーが蓄積された 1970 年頃から深刻にその影響が警告された¹⁶⁾。1997 年 12 月「地球温暖化防止京都会議」での「先進国に温室効果ガスの排出規制を義務づけ」は、極めて厳しい国際的約束がなされ社会に大きなインパクトを与えた^{*}。このことは、2000 年に成立した「循環型社会形成推進基本法」の機縁となり、国民生活における生産消費スタイルを国の方針として循環型社会

^{*}わが国の温暖効果ガスの排出を 2010 年までに 1990 年レベルより 6%削減とする。

に転換することになる。今世紀、地球温暖化をはじめとする地球環境問題が国の将来像を考える上で不可避な課題であることは明らかである。社会構造の転換は、日本の産業構造全体に大きな影響を与え、建設産業もそのあり方を見直す時宜となった。

この社会情勢を受けて、建築学会、土木学会はともに「地球環境・建築憲章」「社会資本と土木技術に関する 2000 年仙台宣言」を宣言している^{17, 18, 19)}。両宣言の概要とその共通性を表 1.1 に示す。表現の差違はあるが、両宣言は、20 世紀の物質文明に関わる技術領域の拡大と多様化が地球規模の多くの問題「温暖化、生態系の破壊、資源の濫用、廃棄物の累積」があらゆる生命を支える地球環境を脅かす状況にあるとしてその責任と責務を果たすべき活動の方向性を示している。

この宣言による国家像は、「地域の主体性を尊重し、自然との共生による継続可能な循環型社会(省エネ、省資源)の発展と実現」である。建設産業を支える工学、建築、土木工学の理念とその施策を示したものである。工学の実践である施工の方向性も示唆している。方向性は、図 1.2 に示す社会資本の概念転換要因となる社会的要請の検証と対応策と不可分な関連性を持つ。

建設産業は、このような社会的変革期に何を求められているか。

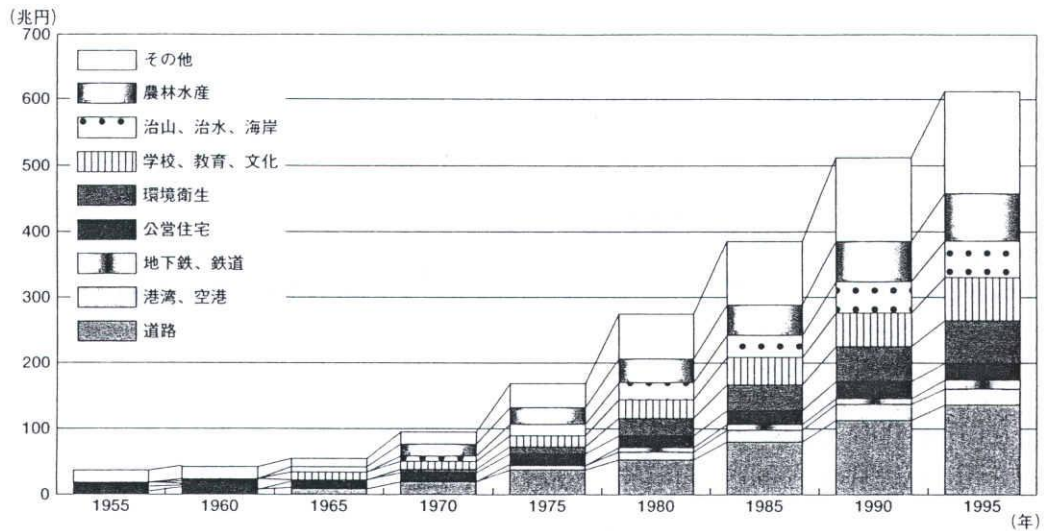
環境と調和した「美しさ」を持った国土、社会資本を「多様な技術の方向性や異分野との連携も視野に入れ、どんな技術手段、手法」により実現するのかが問われている。良質の社会資本の蓄積と後生への継承は、「施工」に携わる「土木技術者」、自然の保存と破壊のインターフェースといえる「土木技術者」の責務である。

社会資本の根幹構造物であるコンクリート構造物は、耐久性、機能性に優れた維持管理の容易な構造部として蓄積され、「安全性、信頼性」の評価を得てきた。

しかし、現在その耐久性、安全性に疑問を投げかける事例が多発するとともにこれまで以上に耐久性の優れた構造物が要望されている¹³⁾。そのためには、建設技術(施工法)の発展経緯、使用材料の変化、施工対象の機能変遷、施工環境の変遷等を多面的な切り口で検証し、今後の社会資本の構築に関する方向性を体系的に確立することが社会的要請となっている。

表 1.1「地球環境・建築憲章」と「社会資本と土木技術に関する 2000 年仙台宣言」の共通性^{17, 18, 19)}

建 築 憲 章	2000 年 仙 台 宣 言
<p>世代を越えて使い続けられる価値ある社会資産となるように企画計画設計建設運用維持：【長寿命化】</p> <p>〈住民参加による合意形成〉</p> <p>〈新しい価値の形成〉</p> <p>〈建築を維持する社会システム〉</p> <p>〈維持保全しやすい建築の構築〉</p> <p>〈変化に対応する柔軟な建築〉</p> <p>〈高い耐久性と更新の容易性〉</p> <p>〈長寿命を実現する法制度の改革〉</p>	<p>「美しい国土，安全にして安心できる生活，豊かな社会」をつくり，育むために社会資本を建設し維持，管理，活用する</p> <p>：【社会資本の整備意義】</p>
<p>建築は自然環境と調和し，多様な生物との共存をはかりながら良好な社会循環の構成要素として形成される：【自然共生】</p> <p>〈自然生態系を育む環境構築〉</p> <p>〈都市部の自然回復，維持，拡大〉</p> <p>〈建築の環境影響への配慮〉</p>	<p>自然を尊重し，現在のみならず将来世代の安全，福祉，健康を増進することを最優先に人類の持続的発展を目指して自然，地球環境の保全と活用の調和を図る</p> <p>：理念【自然との調和，持続可能な発展】</p>
<p>生涯エネルギー消費は最小限に留められ，自然エネルギーや未利用エネルギーは最大限に活用される：【省エネルギー】</p> <p>〈地域の気候にあった建築計画〉</p> <p>〈省エネルギーシステムの開発と定着〉</p> <p>〈建設時のエネルギー削減〉</p> <p>〈地域エネルギーシステムの構築〉</p> <p>〈自然エネルギーの活用に対応した都市の空間構成〉</p> <p>〈省エネルギーに寄与する交通のための都市空間〉</p> <p>〈省エネルギー意識の普及・定着〉</p>	<p>画一的な整備方針ではなく，地域の主体性を尊重し，個性ある自律的な地域社会の形成に寄与する：理念【地域の主体性と尊重】</p> <p>歴史的遺産，地域固有の文化，風土，伝統を尊重するとともに新たな文化，文明の創造に努める：理念【歴史的遺産，伝統の尊重】</p>
<p>可能な限り環境負荷の小さい，また再利用，再生が可能な資源・材料に基づいて構成され，建築の生涯の資源消費は最小限：【省資源，循環】</p> <p>〈環境負荷の小さい材料の採用〉</p> <p>〈再使用，再利用の促進〉</p> <p>〈木質構造および材料の適用拡大〉</p> <p>〈建設副産物の流通促進による廃棄物の削減〉</p> <p>〈生活意識の変革と行動への期待〉</p>	<p>社会資本の整備にあたっては専門家として負託された目的を認識し社会の合意形成のために，その必要性を具体的に説明するなど，積極的な対話に努める</p> <p>：方策【社会との対話，説明責任の遂行】</p>
<p>多様な地域の風土，歴史を尊重しつつ新しい文化として創造され，良好な育成環境として次世代に継承：【継承性】</p> <p>〈よき建築文化〉</p> <p>〈魅力ある街づくり〉</p> <p>〈子どもの良好な生育を促す環境整備〉</p> <p>〈継承のための情報の整備〉</p>	<p>国土づくり，地域づくりの中長期ビジョンを掲げ，そこへ道筋を明快に示す社会資本の整備の計画を積極的に提案する</p> <p>：方策【ビジョン，計画の明確化】</p> <p>事業の実施にあたっては，費用削減努力に加え，計画から運用までの全ての段階において，事業の遅延がもたらす機会損失や時間短縮による社会的便益を勘案した時間管理概念を導入する</p> <p>：方策【時間管理概念の導入】</p>
	<p>学際的，国際的に競争力ある技術ならびに人材の開発，育成，技術者資格制度の充実，技術，技能，知的創造の正当な評価のもとで個人および組織の競争選抜の促進に努める</p> <p>：方策【公正な評価と競争】</p>
	<p>自ら切磋琢磨し，技術，技能の不断の向上に努める．とりわけ効率的で環境と調和した社会資本の整備のために，プロジェクトマネジメント能力の向上やコスト縮減リサイクルなどの新技術ならびに国際貢献に資する技術の開発に努力を傾注する：方策【社会資本整備のための技術開発】</p>



注) 1.経済企画庁総合計画局「日本の社会資本」(1998年3月)により作成。
2.旧国鉄および旧電々公社分のストック額は含まない。

図 1.1 公的社会資本のストック推移(1990 暦年基準)²⁰⁾

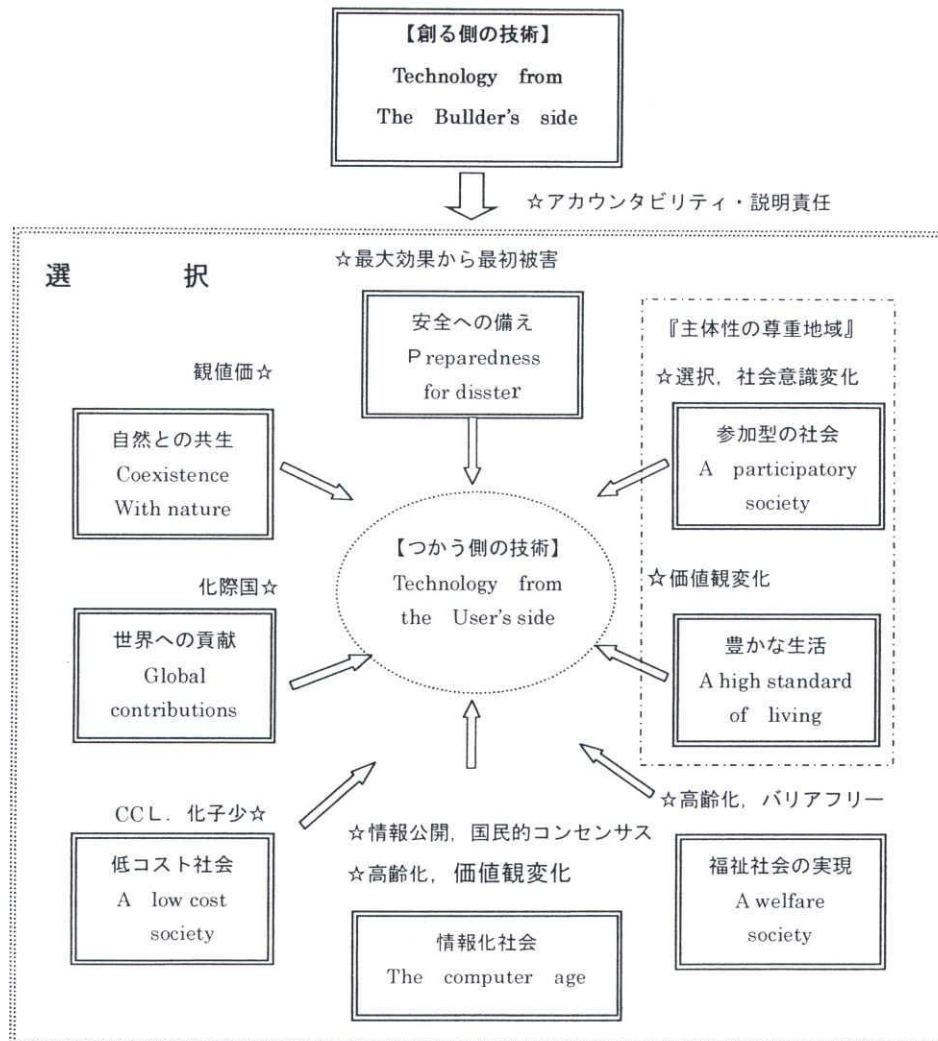


図 1.2 社会資本整備の基本認識の転換²¹⁾

1. 2 研究の背景と目的^{22, 23, 24, 25)}

1. 2. 1 はじめに

地球規模の環境問題、消費社会から循環社会へ転換とパラダイムの変革期を迎えた現在、「どんな社会を、何を目的につくるか」は、大きな課題である。その課題の一つは、社会資本の整備に関する方向性である。当然、建設産業、土木技術者にもパラダイムシフトが求められている。持続可能な社会を構築するために「何を目標とすべきか」を明らかにすることは、建設産業・土木技術者の責務の一端である。そのためには、戦後蓄積された社会資本の安全性、信頼性が問われる事例の発生に対する検証を踏まえて将来性を展望することが目標達成の一助となると考える。また永年施工に携わった者の視点からその課題に対する考察が必要であるとの認識が本研究の背景となっている。

1. 2. 2 社会的背景

国際的な地球環境保全の規制や少子高齢化を迎える将来の国勢に対応して、社会構造は消費型から循環型社会への転換期を迎えている。社会資本の価値観、性格が変化する中で建設産業への社会的要請も変化する。土木学会でも社会的動向を「20世紀の繁栄は資源の大量消費により達成されたが、その代償として地球規模の環境問題を招来した。21世紀に人類社会の継続的な発展のためには、20世紀の繁栄をもたらした消費型から循環型の社会構造への転換が必要」として、今現在がその時であるとの危機感を示している^{19, 22, 23)}。土木事業や土木技術・土木技術者が21世紀社会に的確に適応していくために「土木技術は、その社会資本を取り巻く環境の急速な変化に対し適応力を欠いている。その打開には工学や土木技術のパラダイム転換が求められている」としてパラダイム転換に関わる議論が吉川、内藤、芝山、國島らにより整理されている²⁶⁾。

- ①領域工学の高度化を乗り越える総合化の論理の必要性(専門化、細分化による領域工学の客観化、高度化が時代要請に対応できない)
- ②無限パラダイムから有限パラダイムへの転換(20世紀の資源、環境の消費から21世紀社会は、資源、環境の有限パラダイムの下で持続的发展を目指す)
- ③知識吸収・蓄積型教育から問題発見・解決能力型教育
- ④集団主義、合理主義から協同体的な人間活動、ポストモダンの文化創造へ

この中で建設産業における「施工」との関連に注視すると②項目が社会資本概念の転換思想の根幹である。一般の消費財の場合、リユースやリサイクルなどの循環を推進することが資源の有効活用や環境負荷低減のためには効果的である。しかし、もともと長寿命で、一品生産的な土木構造物では資源の有効利用や環境

負荷低減の目的のためには、さらなる長寿命化が必要となる^{27) 28)}。少子高齢化の進展、財政の縮小化、地球規模環境の深刻化といった直面する時代の社会的課題を図 1.3 に示す。

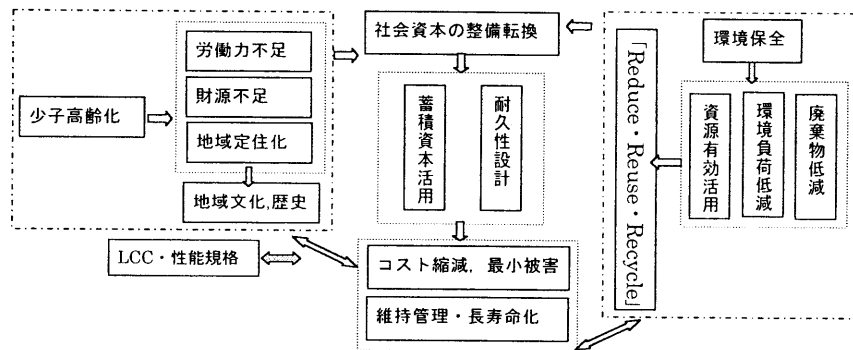


図 1.3 社会的課題の模式図

1. 2. 3 建設産業、土木技術者の責務

一方蓄積された社会資本を構成するコンクリート構造物はメンテナンスフリーで耐久性に優れた施設と考えられてきた。しかし、最近のコンクリート塊の落下、剥落事故によりその信頼性が損なわれている。健全で耐久性に富むコンクリート構造物の不具合は、経年劣化以外に、自然要因と人為的要因により起こる。自然要因とは、主に構成材料である骨材の材質や気候による酸性雨であり、人為的要因は、設計、施工計画、製造、施工の段階におけるマネジメントであり、ともに品質に大きく影響する。建設＝施工時点での不健全は、後年早期劣化を促進する大きな原因となる。建設産業は、技術の対象が自然と要求性能であり、人間と機械の接点に建設行為が成立するマネジメントの重要度が高い産業である。現場の対応に結びつく技術とは、それを可能にするマネジメントが重要となる。その重要ポイントは品質管理である。社会の建設産業への要請は、より高い品質管理による精度と環境保全に則した施工システムといえる。その施工システムを管理する最終的チェック機能は現場における技術者と技能者である。従い、施工に携わった者として、本研究が、今後の量産システムの中で品質の保証された社会基盤を次世代に残す施工者側からの提案となることを意義と考える。

建設産業、施工に対する問題指摘は、その生産システムによる特異性にもある。建設産業の製品であるコンクリート構造物は、他の工業製品と異なり自然現象、空間的制約、時間的制約等の複雑な施工条件での屋外生産である。言い換えれば建設産業の本質は、労働集約的であり資源多消費型の付加価値が低いことが特徴でもある。この本質に内在する問題に起因することも当然予想される。

一方、連続的に多くの欠陥構造の発生した背景は、高度経済成長期以来、コンクリート構造物を造るコンセプトが品質優先から量産優先に変わったことに起因要

素があるとの指摘もある²⁹⁾。社会的要請や価値観の変遷は、その時代ごとの社会経済情勢による社会的需要、生活環境を背景に、「建設産業や施工」に対して大きな影響を及ぼしているとの指摘である。

急激な経済成長の中にあった昭和40年代、一次オイルショック以降の省資源、省エネルギーが重要課題となった昭和50年代、高性能化、自動化時代となった昭和60年代、と各年代の産業、技術の発展とともに施工技術は変化し進歩してきた。

その方向は一貫して工事の効率化、省力化を目指す機械化、自動化による量産向上であった。その支えとなった背景には、学術に基づく技術、材料並びに機械器具の進歩による施工技術の発展がある。多くの施工経験による実績は、示方書や、スペックに反映され、「基本原則＝基礎工学的検証＋規定仕様」による施工規準となり、生産手段、施工を導いてきた。しかし施工欠陥による早期劣化が起因となり事故が起き、今後同種原因による事故も想定される。

この指摘は、基本原則と実施工の遊離問題や施工法の質的な変遷、あるいは使用材料、施工対象物の機能、建設条件等の外的変化への適切な施工対応問題等が含まれている。

これらの指摘は、「土木施工法とは何か」の問いかけである。本研究は、土木施工法の構成や目的に至る本質的課題とその変遷に係わる多面的要素を検証しその課題を明らかにする。検証された課題に対応する信頼性と安全性の確保できる構造物の施工システムとして、従来の経験的な定性的選択手法から工学的定量的評価による合理的選択手法を提案することが本研究の目的である。

1. 3・ 論文の構成

本論文は、施工法の工学的評価に基づく合理的選択手法を提案し、環境保全、循環社会に適応する構造物の長寿命化施工の具体化を目的とした研究であり、10章から構成されている。施工は、社会的要請により進化し、時代の価値観による評価を受ける。今後の環境保全、循環型社会において建設産業、施工法に求められるものは、安全性、信頼性の高い構造物の構築でありその具体化は、「コンクリートの高品質、高性能、長寿命化」に至るとの結論を導いた。この結論から代表される「コンクリート耐久性」を構成する要素、要因から「コンクリートのひび割れ制御」に施工法の選択が大きく影響することは、明らかである。「コンクリート構造物で問題となる若材齢時のひび割れは、多くの場合水和熱に起因する温度応力である」ことに注目した工学的評価による施工法選択の提案を以下の論文構成により行う³⁰⁾。コンクリート構造物の温度応力は、構造物の施工から供用に至るまでの各段階において種々の原因により発生するが、中でも構造物の施工中に発生する温度応力

は、セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇が原因となるものである。この事象から施工組合せによる因子は、コンクリートの熱特性要因から抽出した。抽出した施工因子の組合せには、実験計画法を導入し効率的な数値実験をFEM解析により実施した。その解析結果を時系列、解析モデルの要素別に「ひび割れ指数、コンクリート温度」を特性値として統計処理（分散分析）を行った。

本論文の目的である工学的評価による合理的施工法選択手法の提案として、有意とされる要因組合せ＝施工組合せにより算定される工程平均を指標とした施工法選択を提案するに至った。工学的評価による定量的選択は、リスクマネジメントおよび最適施工法の選択いずれにも適用できる手法である。また施工中における施工環境の変化対応が可能であり、さらに要求性能に適合する経済性による最適施工法組合せの選択が可能となる。本論文は、10章から構成しそのフローを図1.4に示す。

第1章：本研究の意義と目的を明らかにする。

第2章：本研究の背景となる課題を明確にするために土木施工法の体系化をする。建設産業における生産活動として「土木施工法」を捉え、その構成、システムを明らかにし、一般の生産産業と異なる生産活動の工学的評価の必要性和施工主体の位置付けを明らかにする。

第3章：本研究の目的を明らかにするために背景となる「社会構造の転換」と「建設産業」の関わりを検証する。検証により建設産業、施工の変遷に関わる要素を明確にする。また変遷過程での問題点を明らかにし、本研究の必要性を明らかにする。

第4章：第2章による施工体系による施工法分類による施工システムの位置付けと第3章による建設産業の変遷過程での「施工の基本作業・専門・分業工種」を検証する。

第5章：3章による社会資本の変遷、4章による施工法の変遷により蓄積された社会資本が提示する課題を明らかにし3、4章の検証を整合する。信頼性、安全性に関わる課題と建設産業の生産システムの関連を明確にして本研究目的である提案内容の必要性を明らかにする。施工が工学の実践であることの検証でもある。

第6章：建設産業の展望と評価に関わる価値観の動向を明らかにして、本研究の方向性とキーワードを抽出する。

第7章：本研究の目的に関する既存の研究を検証する。本研究の目的との相違点を明らかにする。

第8章：第7章までの検証を踏まえ将来の社会資本整備に関わる建設生産システムを構成する施工法の工学的評価による合理的選定法を提案する。

第9章：第8章で提案した手法による現場実績を検証する。

第 10 章：本研究で得られた結論をまとめる．

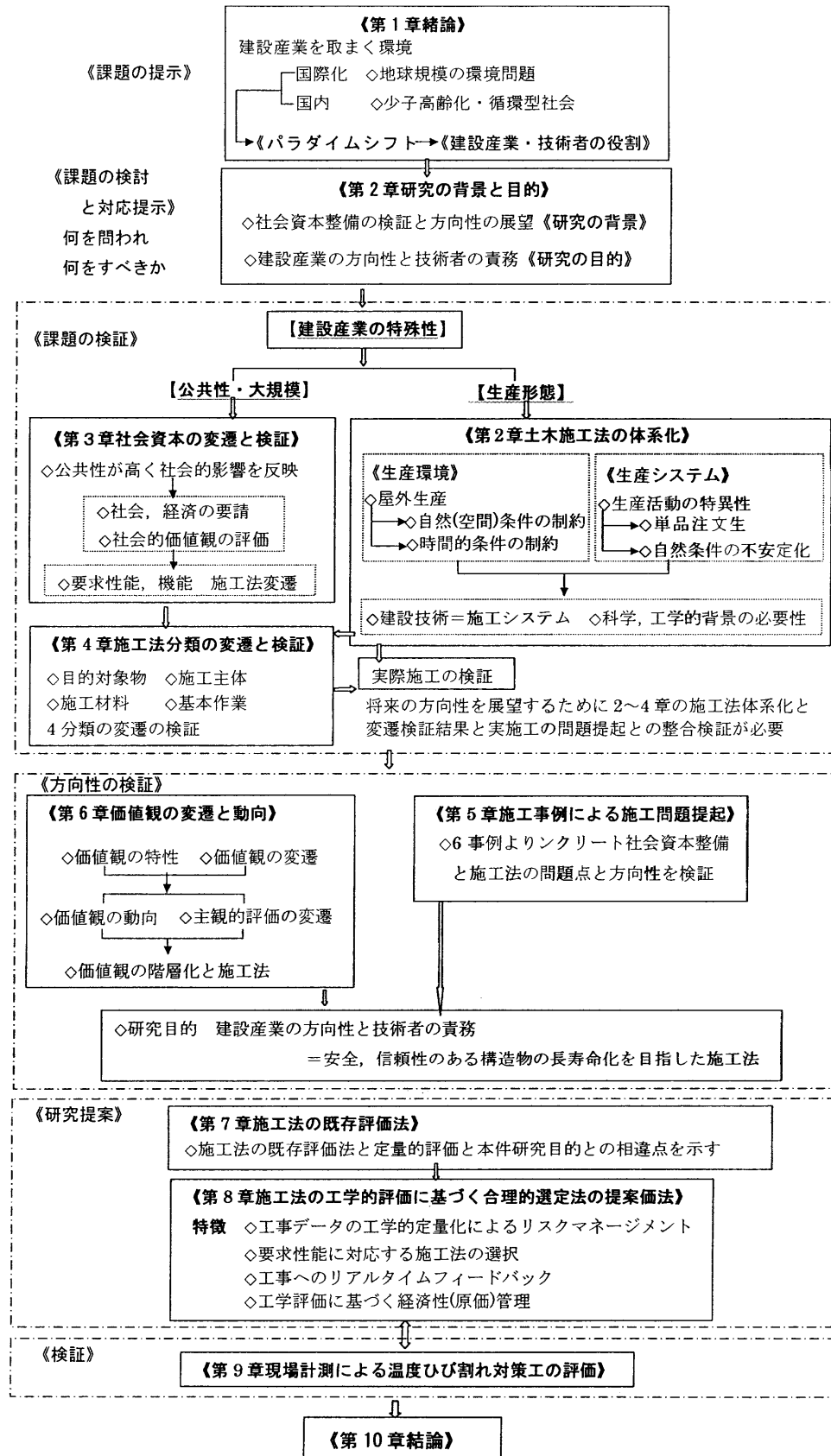


図 1.4 論文構成フロー

第1章 参考文献

- 1) 財団法人建設経済研究所：日本経済と公共投資 No. 35, pp. 27～29, 2000. 7
- 2) 嘉門雅史：地盤環境・リサイクル技術，土と基礎，47-11(502)，pp. 74～77，November, 1999
- 3) 鹿野正人：21 世紀に向けた建設技術の新たな展開について，積算技術 1997 年 9 月号，pp. 74～79
- 4) 内田俊一：人口減少期の社会資本整備，全建ジャーナル 1999 年 8 月号，pp. 5～7
- 5) 建設省建設経済局建設振興課労働資材対策室・少子・高齢化社会に向けての建設業における労働生産性向上に関する研究会提言の概要，全建ジャーナル 1999. 9 月号，pp. 12～20
- 6) 建設産業技術戦略検討会：建設産業技術戦略，pp. 1～36，平成 12 年 3 月
- 7) 竹村公太郎：河川人々の暮らしとともに，建設業界 2000. 10，pp. 14～19
- 8) (社) 日本土木工業協会・経営企画委員会：土木建設市場の変化と対応，平成 11 年 1 月
- 9) 読売新聞社説：「世紀を越えて」：2000 年 10 月 22 日
- 10) 土木学会：人口減少下の社会資本整備のあり方ー拡大から縮小への処方箋，平成 14 年 5 月
- 11) JAPIC No. 71 '99：「21 世紀の技術（技術進歩と環境の調和）」，pp. 13～14
- 12) 馬場 敬三：「建設産業進化論」要求される歴史的変身，建設産業進化論骨子建設オピニオン H11-11 月号，P30～36
- 13) 土木学会：コンクリート構造物の耐久設計指針（案）・コンクリートライブラリー-82, 平成 7 年 11 月
- 14) 近藤徹：平成 7 年度ダム技術者研究発表会全国大会特別講演「これからの土木技術者の社会的責務」，ダム技術 No. 115，p 3～10，1996. 4
- 15) 小澤一雅：「建設技術の評価」，積算技術 1997 年 1 月号，pp. 5～9
- 16) 「環境白書」平成 9 年度版：地球温暖化防止京都会議の成果と対応
- 17) (社) 日本建築学会，日本建築士事務所連合会，日本建築士協会，建築業協会，日本建築家協会：2001 年地球環境建築憲章，2001 年 6 月
- 18) 仙田満：地球環境・建築憲章運用のための指針，建設マネジメント技術，2000 年 12 月号，pp. 59～63
- 19) 土木学会：土木界の目指すべき方向に関する学会の取り組み，pp. 3-7～3-18
- 20) (社) 日本土木工業協会・経営企画委員会：土木建設市場の変化と対応，p16，平成 11 年 1 月
- 21) 鹿野正人：建設技術開発と民間新技術の活用，積算技術 1997 年 1 月号，p10

図-1：建設省技術五箇年計画における基本認識の転換を参考

- 22) 土木学会・建設マネジメント委員会運営小委員会：21 世紀社会に土木技術者は
いかに生きるべきか，1998 年 2 月
- 23) (社) 日本土木工業協会・経営企画委員会：これからの社会資本を考える，pp.
31～61，2002 年 8 月
- 24) 土木学会・企画委員会：2000 年レポート土木界の課題と目指すべき方向，2000
年 4 月 17 日
- 25) 布村明彦：自然豊かな魅力ある川づくりを目指して，日経コンストラクション，
pp114～118，2000. 7. 14
- 26) 土木学会：建設マネジメント委員会運営小委員会：21 世紀社会に土木技術者は
いかに生きるべきか，p9，1998 年 2 月
- 27) 河野広隆：社会基盤の今とこれから・既設コンクリート構造物のライフサイク
ルコスト，JSCE Vol. 186，pp. 23～24，Dec. 2001
- 28) 古賀裕久，河野広隆，渡辺博志：コンクリート構造物の健全度に関する実態調
査，土木技術資料 Vol. 42，No. 12，pp. 58～63，2000/12
- 29) 土木学会誌：特集「新世紀のコンクリートを考える」，Vol. 85，pp. 5～25，
Apr. 2000
- 30) 森本博昭：マスコンクリートの温度ひび割れ危険度評価ならびに温度応力のリ
ラクセーション解析に関する基礎的研究（京都大学・博士論文），p. 1，平成
元年 10 月

第2章 土木施工法の体系化に関する考察^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)}

2.1 はじめに

図 2.1 に示す土木施工を取り巻く現在の環境は、将来の国勢を勘案した社会資本、価値観、評価の社会変革期を示している。その要請に応えるべき建設産業は、「何をすべきか」問われている。初期施工の不具合による劣化の促進が原因と指摘されたコンクリート事故は、戦後類を見ない社会資本の発展を支えてきた建設産業の発展経緯に遡る検証を必要とする。公正な検証と評価は、建設産業の将来を展望する上でも不可避条件でもある。図 2.2 に示す多面的な検証結果からメンテナンスフリーで耐久性に優れたコンクリート構造物により信頼性、安全性の高い社会資本が確保できる施工システムを明確にする。本章では、建設産業の生産手段である原点の「土木施工」を生産システム、工学的側面からその本質を考察する。

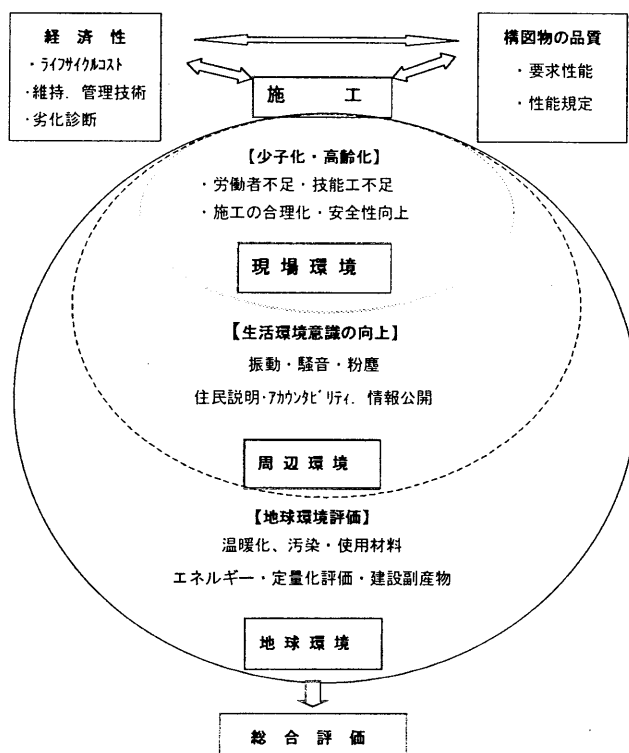


図 2.1 土木施工を取り巻く環境⁸⁾

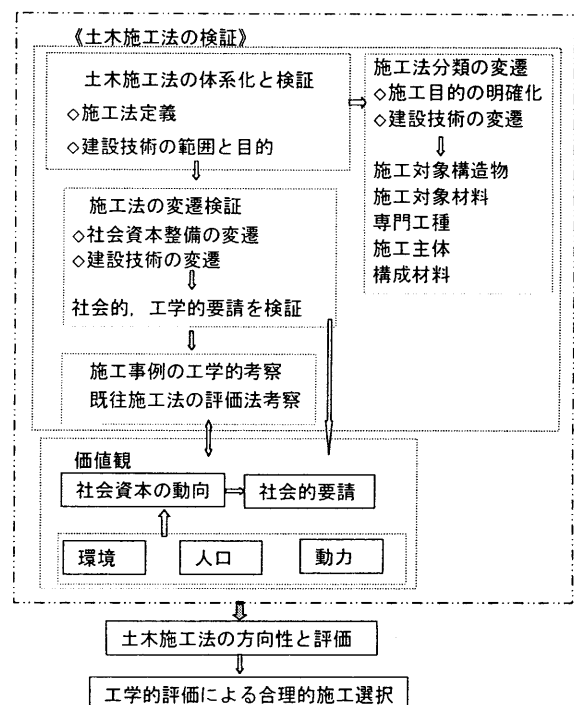


図 2.2 土木施工の検証項目とフロー

2. 2 建設産業の特殊性^{9, 10)}

建設産業は他の産業と同様に生産する機能を持っている。しかし、その生産活動には制約条件が多く、容易に機能を満たすことが困難である。他産業は、固定された場所（工場）での生産活動、自然条件の影響を受けない生産環境、材料の加工工程を移動する生産システムにより大量生産が可能となるのに対して、建設産業の生産は、①～⑥の特殊性がある。

- ①需要地域が限定されず散在する
- ②屋外生産による天候、地形、地質等の自然条件の影響を受ける
- ③注文生産であり、構造物規格、構造、作業条件に基づく量、質的、空間的な生産条件が全て異なる
- ④公共性が強く行政の影響を受ける。社会生活、経済、環境等の要請により需要、評価が左右される。
- ⑤生産条件（時間的、空間的、量的、質的条件）による材料の輸送、使用機械、労働条件など人為的な選択条件により生産活動が大きく影響される
- ⑥単純な数理計算が本質を成しているのにもかかわらず経験者の判断により、工事の進捗、経済性が大きく変わる。

この特殊性で明らかなように建設産業は、制約条件が多く受動的で定量化できない社会的、人為的要素の強い産業である。要求された品質性能や形状の構造物を生産するためには、固有の生産計画が必要となる。目的に沿った最も合理的な計画とその計画に基づき作業を遂行するためには、②に示される多くの自然条件に対応する「地質学、水理学、構造力学、コンクリート工学、土質力学」等の土木工学に基づいた十分な工学的裏付けが必要となる。さらにその工学的に裏付けされた技術を遂行する人的要素である高度な知識及び豊富な経験を持つ技術者と組立、運搬、機械操作等の作業における技能労働者が必要となる。

2. 3 体系化の必要性

建設産業の制約条件は、図 2.3 に示される。生産活動の立地条件による時間、空間的制約の中で、施工システムにより 4M (Man, Machine, Material, Money) を使い、要求性能が確保された構築物に加工組立する産業である。施工システムは、時系列による複数の作業システムから構成されて実施される。気象、地形、地質、水文等の自然条件と周囲を取り巻く社会環境が、生産場所、時間経緯とともに変化する。また要求機能、性能もダム、トンネル、橋梁等の施工対象構造により多様化する。これらの事由により建設産業での生産行為は、下記に示す特異

性がある。

1. 現状を変化させる(一時的でも安定状況を壊す)ため生じる自然破壊の対応が不可欠
2. 大規模で公共性が高いため社会経済、生活環境と直面する摩擦が不可避
3. 建設条件は固有であり目的も異なり一義的な対応が困難
4. (長年にわたり)経験的技能による定性的対応による施工

これらの特異性も社会の変革にともなう要請内容により対応は変化、変動する。時代の要請は、工事規模の大型化や要求性能の高機能化であり、国際化、複雑化である。これらの要請は、社会経済、環境条件の変化を起因として、建設産業には規制や評価となる。このような状況下の現在、建設産業はより高度な技術、管理および社会への情報伝達、施工説明を求められている。少子高齢化を迎える将来の国勢下、施工主体である人的要素の技術者、熟練工の確保は、ますます困難になる。建設産業の生産特異性である経験、技能の定性的表現による管理は、まさに必然的な転換期である。

建設産業は、施工主体の人的エネルギーを機械的エネルギーに変化させ急速な発展を遂げてきた。将来の国勢は、より機械的エネルギーへの質的転換を余儀なくする情勢にある。また、5全総「国土のグランドデザイン」に示される21世紀の国土創造には、従来の諸外国の模倣的技術より脱し、地域にあった創造技術が要請されている[※]。

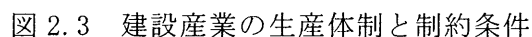
時代要請に合致する建設産業の生産システム化は、システムを支える建設技術や施工システムを見直すことになる。社会情勢に相応する生産システムの管理体制は、生産構造物の高品質化と社会資本の価値観に適合することを求められている。そのためには、建設産業の生産システム、技術を体系的に捉え考察することが必要となる。体系的に考察することで、建設産業における生産手段の目的や建設技術の相互関係も明らかになる。

矢野によれば建設生産の体系は、「近年、建設工事は従来までの単なる建設技術のみでは遂行することが困難であり、生産工学としての要素と建設技術の要素が互いに結び合って初めて可能となる。各要素の結合状態は建設工学と呼ばれるものである。」と建設技術(生産手段)を生産工学に位置付けている¹⁾。また科学的体系化がなされていないとして「建設技術が有史来の社会的背景を持つ経験工学、屋外作業という他の産業にみられない特殊性が建設工事に対し生産工学としての理解を妨げてきた結果である。」と指摘している。

建設産業の生産システムは、土木工学の実践である。生産システムは、工事目

※五全総：第5次全国総合開発計画の正式名称が「二十一世紀のグランドデザイン」ー地域の自立の促進と美しい国土の創造ーである。1962年よりの第1次計画から1987年の四全総までのプロジェクトと大きく異なる。

建設産業の生産活動は、実施手段の選定(基本作業システム)が的確に作業目的と連結することが原点となる。その原点から、選択された施工主体により施工システム(施工法)が効率的に機能することになる。また最適な建設技選択と適宜な資材の供給は、施工システム、生産システムを展開する上での人為的管理要素となる。以上のようなことから土木施工法の体系化を生産、工学的の側面で捉える必要がある。建設産業の工事施工構成概念図を図2.4示す。



15

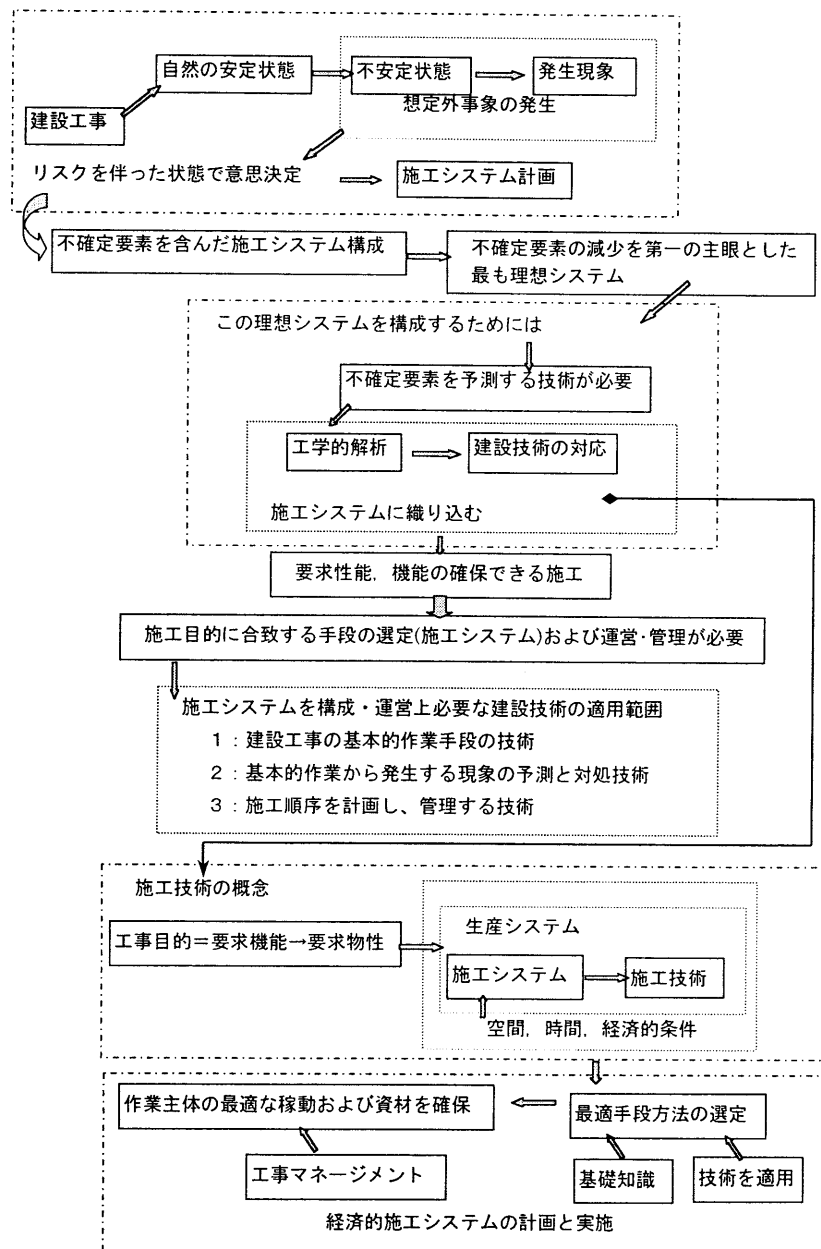


図 2.4 建設産業の工事施工構成の概念図

2. 4 生産(施工)システムの構成

図 2.5 に建設産業と生産システムの概念図を示す. 建設産業の生産システムは, 構造物の機能を最も合理的な手段で, 信頼性のある構造物として構築するため施工手段である. 合理的な手段とは, 施工能力の効率化と品質の均一性, 性能確保という項目で方向づけられる施工の実施である. システム計画には, 土木工学に基づく施工技術の目的と原理に係わる知識と施工に関する専門的知識(施工環境による施工性等)に加え機械工学、電気工学等の他分野の工学に関する知識と実績も

必要となる。施工システムは、工学等による技術理論の下で施工機械、施工材料などを選択し組み合わせたものである。

施工システムは、個々の作業システムから成立している。この作業システムは、施工目的に即した施工主体の集合体として実施される。時系列的に専門化された作業集団が、各々の施工主体である人、建設機を使用し一つの作業を完成させ、次に作業には、同様の他の施工主体が次の作業を完成させる。一つの施工目的対象物を中心に施工主体がその場に移動して作業を時系列で積み重ねる生産システムである。図 2.6 に示すフローは、建設産業の生産システムの原則的な例であり、作業量、作業の難易度、労務事情により適宜変化させるのが通常である。つまり、作業主体を前後の作業への転用、活用により作業の連続性を図りながら施工実施する場合が多い。

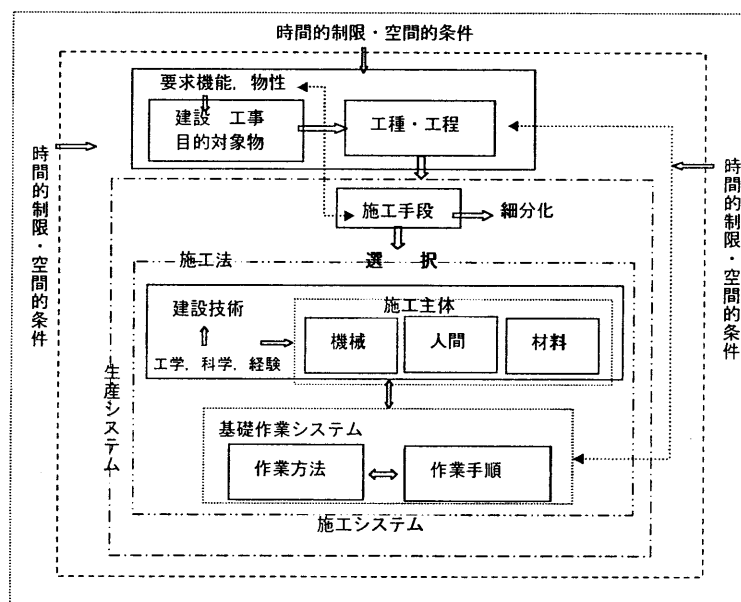


図 2.5 建設産業の生産システム概念図

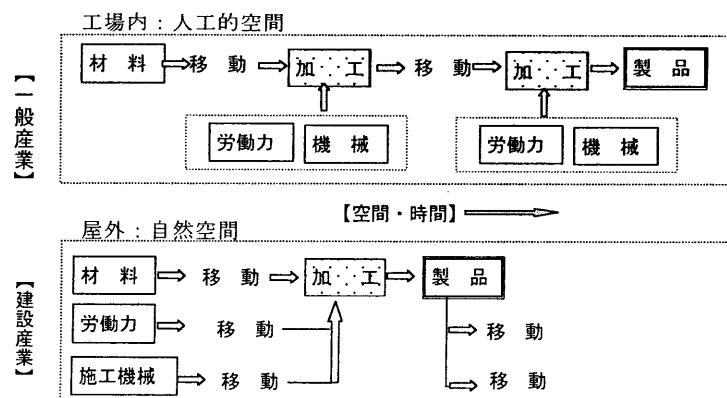


図 2.6 産業別の生産システム概念図 11)

※施工主体：建設工事の作業員＝労務者、機械力による施工へと作業主体が人力から機械力に転換

他産業と比較した建設産業の生産システムの特徴を表 2.1 に示す。

表 2.1 建設産業の生産システムの特徴

項目	特 徴
1	作業工程が進捗する度に工種が変わり作業の段取り替えが必要となる。(施工主体の移動, 変更) このため時間的ロスが生じる(稼働率, 作業効率の概念)
2	作業環境に応じ相当期間の準備期間が工期内に必要となる
3	自然, 人工的な要因により作業能力が変化し, 作業効率が一定化しない
4	工種が多く, 作業条件が一定でないため, 作業の未熟や準備不足により失敗が起こりやすく作業が不安定
5	工程, 工種が複雑に輻輳するので, 施工管理, 特に十分な品質管理を必要とする

これらの特徴は, 建設産業の特殊性である屋外生産の条件を起因とする。空間, 時間条件が単一でなこと(作業環境の変化)および1つの目的物の生産過程でも時系列的にその条件が変化することの理由による。建設産業は, 固有の生産環境による生産システム, 施工システム, 作業システムが必要となる。他産業のように一般化した計画とはならない大きな特徴がある。

生産システムの構造は長期的で広範な工事計画よりその構成が検討される。施工システムは, 時系列的な個々の作業の基本的目的から作業や部分的作業の施工主体の構成が決まる。施工目的からその実行作業までの各段階で分担目的が明確になればその実行システムが主, サブシステムにより構成される。その段階で建設技術, 施工機械の選択がなされる。施工システムの構成は作業過程の段階ごとに種々の主要システムとサブシステムより構成される。図 2.7 はその基本的な生産システムの段階図を示したものである。

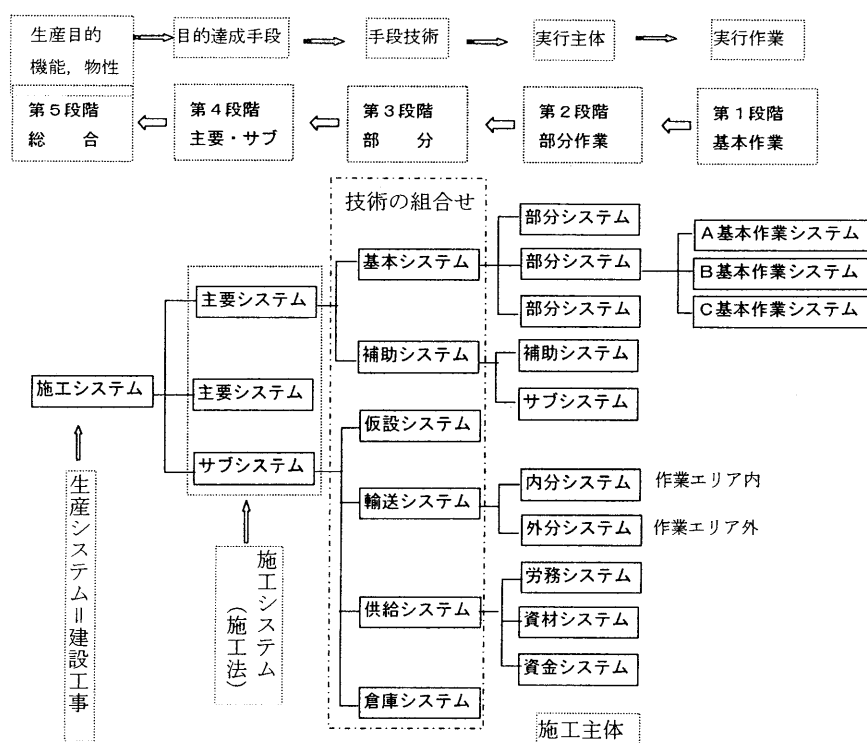


図 2.7 生産システム段階図

作業時間の特性により，その実行サイクルの形態を表 2.2 に示す．この分類方法によって作業内容とその特性が明確に示される．一連の作業循環に要する時間をサイクルタイムと称し，作業能率の向上は1サイクルに要する時間の短縮が大きな要素となる．

建設工事は，マクロ的視野では，断続的作業であり，ミクロ的視野では，コンクリート工、基礎工、土工事等の基本的工種で見られるようにサイクル作業が多い．作業の単純化，機械化が導入されて規模の拡大と時間短縮による効率化による経済効果が図られてきた作業形態である．表 2.3 に建設産業の主な基本工種，施工主体，基本作業システムを示す．

表 2.2 時間特性による作業区分

作業分類	作業構成の特異性	作業の特徴
断続的作業	工事量が少なく、構成されている作業数が多い、建設工事の作業の多くが該当する	イ) 各作業の準備時間が必要 ロ) 前後作業の緻密な連携計画が必要 ハ) 作業の質と作業量の増減によって施工主体の調整が必要となる ニ) 断続的作業のため能率を向上する時間が少ない
連続的作業	作業システムの理想形、作業の内容が単純で作業量が時系列で平均化する	ロ) 最大の作業速度、最小のコストとなる ロ) 作業手段、使用材料を最大に利用できる
サイクル的作業	同種の作業における断続的な規則的時間による作業の繰り返し	イ) 基礎作業の組合せによる作業の繰り返しである ロ) 建設工事でのサイクル工事は基礎作業の組合せによる作業繰り返しとなる
定期的、不定期的作業	主作業に対するサブ的構成となる運搬、機械作業	イ) 修理、点検等の作業 ロ) 定められた時間内での定期的作業と時間の制限のない不定期作業に区分される

表 2.3 施工主体と基本作業システム

工種	分類—施工法	施工主体（機械）	サイクル構成—基本作業システム
土工	土工事全体 掘削作業 運搬、転圧作業	バックホー ブルドーザー ダンプ、ローラ	掘削・積込み・運搬 バケット・掘削・旋回・放出・旋回 リッピング・押土・前進・後進 運搬・排土・前進・後進 敷均し・転圧
基礎工	基礎工全体 杭打ち作業 グラウト作業	パイルハンマー グラウト機器	位置決・削孔、杭取付・打込・グラウト・移動 連続打撃 混合・注入
コンクリート工	コンクリート全体 混合作業 運搬作業 締固め・養生 型枠作業	ミキサー ミキサー車、ポンプ車 バイブレータ・給水設備	鉄筋・型枠・足場・打設・養生・解体 計量・投入・回転・放出・混合運搬・打設 投入・運搬・放荷・移動 打設・養生 設置・解体・移動
削岩孔	全体 削孔作業 爆破作業 搬出作業	ドリル ホイール、レール	削孔・爆破、ズリ出し 測量・穿孔・移動 清掃・装薬・結線・点火 掘削・積込・運搬・捨土・移動

表 2.3 に示す基本工種の施工システムは、基本作業の作業形態がサイクル作業により構成されている。土木構造物の生産システムの多くは、サイクル作業形態の基本工種により構成されている。そのため基本作業は、サイクルタイムの作業計画、管理が作業効率、作業能力に大きく影響する。

建設工事は、固有の空間的、時間的条件の中で、経済的、技術的の制約を受け、時系列的に順次施工主体が変化して土工、基礎工等の施工システムがサイクル化する生産システムの集合体と表現できる。各工種の第一段階である基本的作業のサイクルが一つの施工目的を果たし、次の段階の施工目的に進展させ、最終的な仕上げ段階であるコンクリート工により所要物性、機能を確保するのが一般的な生産システムともいえる。コンクリート工が主システムでその過程の施工システムはサブシステムとも表現できる。施工の目的である要求性能を満足させることは、この最終工程の施工システムの可否と極言できる。コンクリート工での作業段階ごとの基本作業を一覧すると、サイクル構成の基本作業を効率的なシステム化として分業、専門化が図られたことが明らかになる。

一方、一般的な生産活動の目的(効率性、迅速性)から基本作業の目的(工学的目的)を不明確にする分業、専門化は、効率化として一義的に判断してはならないことも明らかである。施工は作業段階の積重ねで進捗するが、各々の作業目的は最終の要求性能から派生して位置付けられなければならない。専門化、効率化がこの施工目的の基本条件と合致していなければ問題が発生することになる。

「基本作業システムが工学的目的(物性値)を確保した上での変遷」であったか、「その評価がどんな手段でなされたか」は、施工を起因とする早期劣化の検証を行うにあたっての着目点である。また構造物の耐久性に対応する施工法の展望は、一般的に目的対象物の要求性能、機能を確保する「コンクリート工」が最終工種となり、その施工手法に収束できることも同時に明らかとなる。

2. 5 建設技術の位置付け

建設技術は、土木技術の中で直接工事を実施する技術であり、土木技術は、「自然の持つ偉大な資源を人類の使用と便益に役立たしめる技術」とイギリス土木学会の創立時に定義されている。

建設技術は土木技術の中に存在し、土木技術は、土木工学を背景としている。施工環境である自然条件への対応技術は、土質、水理、地質、水文学等の解析、研究が背景となる。一方要求性能、機能に対応する技術は、材料力学、構造工学が背景となる。その他、工事の執行には計画学、環境工学、景観工学等や多くの他分野工学が必要となる。土木技術により具現化される建設工事は、社会経済基

基盤の要請を背景に実施される。社会的、経済的要請は、その時代の価値観によりその内容、性格が変化する。

建設技術は、固有の自然、社会条件の制約の中で、要求性能を満足する構造物を(設計図および仕様書に従い)構築する技術で、自然条件の地形・地質および地下水位、水量に適合する方法や組合せおよび施工手順により構成される。目的は同じでも、建設技術によって使用機械、材料、施工手順も変わる。最も合理的な生産システムは目的構造物により一つ一つ固有のものとなる。図 2.8 に示す建設技術の位置付けは、空間的条件である自然条件(建設立地)と施工の時間的条件の制約と社会経済の価値観による評価を受けた複数の施工システムの組合せとして整理および位置付けられる。

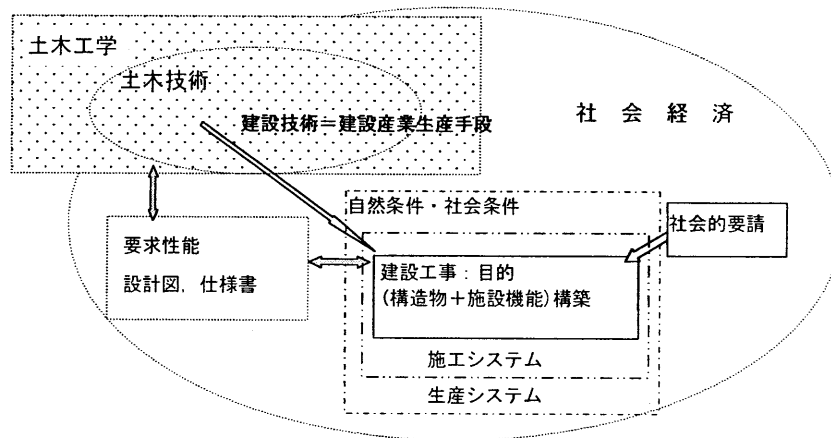


図 2.8 建設技術の位置付け

2. 6 施工法の分類と位置付け

2. 6. 1 施工法分類

建設技術が建設産業の生産手段とすれば施工システムは、それらの多種多様な組合せ(施工法)となる。生産手段の目的別集合である。建設産業の生産システムは、幾つかの建設技術が組合せにより構成された複数の施工システムを、その時系列(工程順序)により遂行して目的構造物を構築すると表現できる。

施工法は、施工対象物、施設機能、使用材料、基本作業による分類がある。施工目的である構造物名称により、ダム施工法、トンネル施工法等となる。施設機能は複数構造物の集合体である道路、鉄道の交通施設や上下水道等の社会経済、生活基盤施設である。また使用(構成)材料によってコンクリートダム、ロックフィルダム、RC 構造、PC 構造等に分類される。

施工システム(基本作業により構成)では、土工事、コンクリート工事、岩掘削工等々

の分類がある。工事を工程の進捗による時系列である基本作業で分類すれば掘削工、鉄筋工、型枠工、コンクリート打設工等となる。工事構成では、躯体工、付帯工、仮設工といった分類になる。更に基本作業である掘削工法は、その形状や使用機械によっても細かく分類される。例えば、トンネルにおける全断面、小ベンチ、先進導坑上部半断面掘削工法は、その岩質による掘削断面、手順であり、発破掘削、機械掘削工法は、使用機械、材料による分類である。

コンクリートダムのようにコンクリート打設形状により面状工法、柱状工法といった分類や使用コンクリートの性状により RCD 工法、有スランプ工法と分類されることもある。

このような種々の分類は、建設産業の生産システムの特殊性を象徴している。特に、注文生産、単品生産、屋外生産といった条件により、生産目的対象物が同じでも、自然、建設環境条件によって手段としての建設技術が全て異なるからである。さらに建設技術が同一でも、構造物の形状、構造によってその施工システムの執行形態（施工主体、材料）や規格、規模が異なる。これらのことは、建設工事の生産システムが、一般生産産業と異なる経済的特性を有する所以である。建設産業の生産システムを考察する場合、全体の施工システムの組合せ、執行手順が適正か否かの判断材料として経済性の比較が不可避となるのは、これらの理由による。図 2.9 に建設産業の生産システムの特異性を示す。

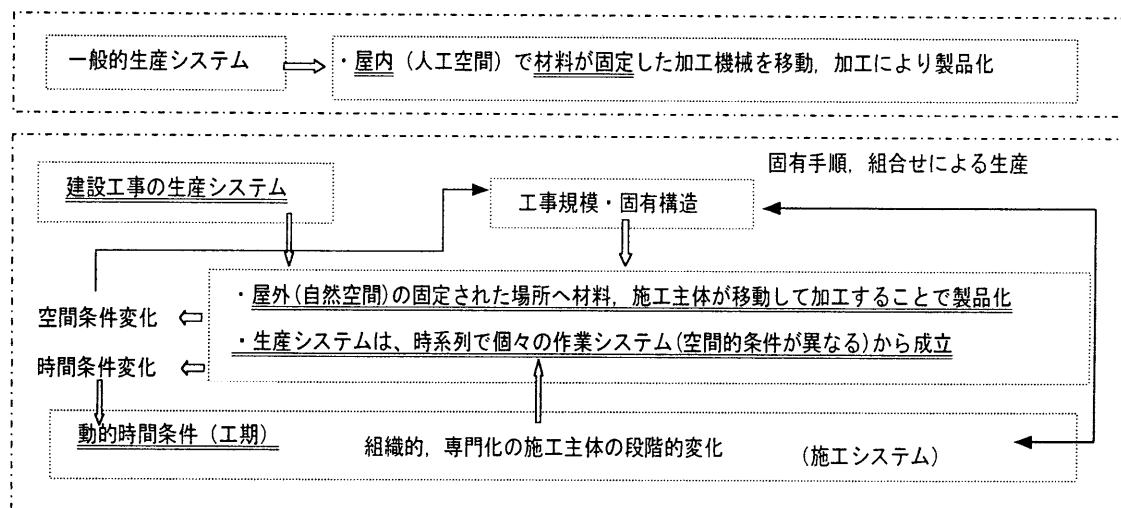


図 2.9 建設産業の生産システムの特異性

2. 6. 2 施工システムを構成する要素

施工システムは、要求性能、機能を満足する品質、形状の信頼性の高い構造物を固有の建設条件で構築するため表 2.4 に示す事項が必要とする。

表 2.4 施工システムの必要事項

必 要 項 目	目 的	施工システムに必要となる事項
1. 最も合理的な生産計画	経済性・費用対効果	工事要素分析，技術開発
2. 計画に基づく作業を遂行するために土木工学に基づいた十分な技術的裏付け	安全性，信頼性	施工計画＋建設技術
3. 高度な技術及び豊富な経験を持つ技術者や組立、運搬、機械操作等の作業における技能労働者	施工管理，品質確保	作業のシステム化＋技術の体系化による安定的な品質確保
4. 施工要素と施工機能の合理的整合を図る管理	施工機械，材料，建設技術管理＝工事管理工程，原価，安全管理	時間，経済的管理 人的システム管理

施工 (execution : construction) は，工事を実際に行うことであり，施工システムは，「作業主体である人間が，自身，工具，機械を使用＝建設技術の組合せにより施工を行うこと」により構成される．施工システムは，基礎作業システムの組合せにより構成され，作業手順により時系列に施工目的を遂行することになる．

施工システムにより構成される生産システムは，施工主体となる人の介在を主観および客観的に見ることにより着目点が異なる．主観的に見た場合は，人の意思による選択を重視する工事管理手法となる．客観的な視点では，建設工事そのものを自然で必然的に見る場合で，生産手段を生産システムとして一義的に見ることになる(効率的，経済的生産を目的とする)．客観的に工事を遂行する生産手段は施工の重要な構成要素(機械，材料)であり，その運用を行うのが主観的な工事管理(機械規格，能力の選択およびその運転管理等)といえる．生産システムはその両面が必要となる．したがい，生産システムは，客観面での施工主体，主観面での人的要素のマネジメントの重要度が高くなる．つまり，施工システムの手段となる技術は，それを可能にするマネジメントが重要な要素となる．

そのマネジメントの重要ポイントは，各施工段階の施工目的（要求性能，物性，機能）を確保できる施工手段を選択するシステム(本研究の目的)にある．実行手段は，施工段階ごとの目的をいかに確保し，最終目的の機能，物性を有する方法であるかが基本条件となる．

次に工事を実施する場合，施工の構成要素は下記の項目により分類できる．

- ①工事対象となる施工目的物
- ②．施工主体（作業者、機械）
- ③空間的条件（建設立地による自然空間および社会環境保全，人為的条件）
- ④時間的条件（単位時間と工期、施工時期の条件）
- ⑤施工手段（建設技術，施工法）
- ⑥管理手段

①～④の項目を概観的に整理する。(⑤の項目は前節)

①工事の対象となる施工目的物

施工目的物は、単位構造物と複数の構造物で構成された機能施設に大きく分類して称される。一般的に単位構造物は地盤を支持力として静止が常態の機能施設であるダム、トンネル、橋梁等である。機能施設は単位構造物の複合体として機能を発揮するもので主たる社会経済、生活基盤施設となる道路、鉄道の交通施設や上下水道等である。

②施工主体（人力と機械、その組合せ）

現状の施工主体は、工事規模拡大、労働力不足に対応する機械の進歩発展により大半が機械力である。機械化の傾向は今後も強まり、施工システム自体に強い影響を及ぼす。機械化は一般的に施工の量的目的(客観的＝生産管理)が優先し、質的目的(要求性能、物性)を確保するための管理(主観的＝人為的管理)が必要となる。機械化による量的な変換は、施工の専門化、分業化、汎用化を促し、建設産業は、総合企業（General contractor）と専門企業（Sub contractor）による構成となった。品質管理の総合的管理は、専門、分業管理化から構成される傾向となる。現在問題化される不適施工の因子は、この専門、分業化にも一端があると思われる。別章にて専門工種の変遷を考察することで検証を試みる。作業主体の変遷に対応する建設産業の生産体制変遷を図 2.10 により示す。

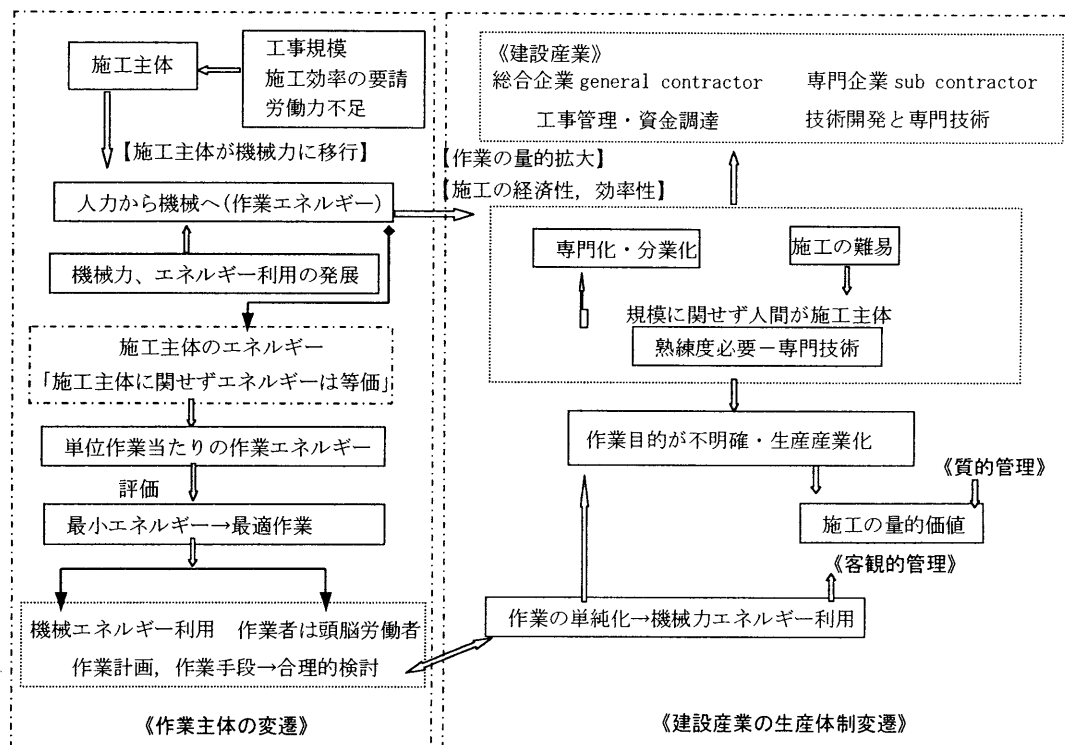


図 2.10 作業主体の変遷と建設産業の生産体制変遷

研究開発により機械化が進み、介する動力が異なる施工組合せでも仕事に費やされるエネルギーである運動量は本来等価である。合理的作業は、最小のエネルギーにより実施されることを理想とする。そのためには適正な計画による作業実施の実施手段を選択することが必要である。この考えは小澤による工法評価にも取り入れられている^{12, 13)}。

評価としては、単位作業当たりの作業エネルギーで示され、(単位エネルギー当たりの作業人員で示される場合もある)最小となることが最も合理的な作業と評価されている。この意味での機械化を評価すると次の2点が挙げられる。

1. 作業主体の変化である機械エネルギーの利用は、工事の量、質の両面での変革をなし、工事の経済特性の要因となった。
2. 生産システムの分業化、専門化の大きな要因となった。

以上の二点は、建設産業変遷の大きな要因である。

施工主体の役割分担による、施工目的の明確化と機械化エネルギーの意義の考察は、施工法変遷の検証と評価に不可欠といえる。今後の作業主体における機械機能の方向性を図 2.13 に示す。

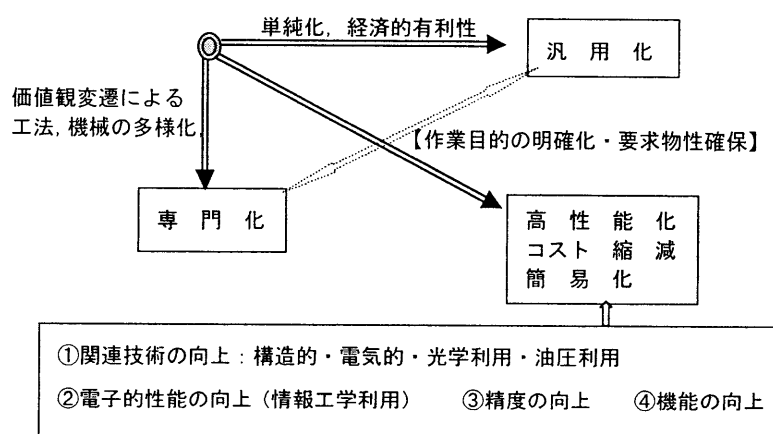


図 2.13 機械化の機能の方向性

③空間的条件

施工における作業環境は、空間条件である。建設立地における自然条件は、静的空間を支配する条件であり、その静的空間を活動の場とした作業活動としての動的空間に影響を及ぼす。この空間条件は工事の進捗状況＝時間的条件と共に作業活動の基本的条件となる。建設工事の生産環境は、静的条件の制約による作業範囲、施工設備配置が限定され、目的物の施工規模に対応する作業活動の運搬距離等の動的条件(運動エネルギー条件)から空間条件が構成されている。

表 2.5 に静的空間を図 2.14 に動的条件を示す。

静的空間は、工事の存在する場所（構造物を構築する場所）の自然条件と人為的条件（工事の進捗＝時系列での空間変化は、施工主体、施工設備等の配置条件及び既存施設）から構成されて作業活動を支配する。建設工事の生産活動において、作業能率を高めるには、自然条件を科学的、統計的に把握して動的空間を合理的に配置し、作業活動空間の拡大と施工主体の移動の最小化が重要となる。

建設工事の生産構造の特性は、施工主体である労働力や機械が直接、間接的に移動して生産活動を行うことである（図 2.6 参照）。建設工事における作業進行では、静止の常態である目的構造物に対して、作業主体や材料の位置が絶えず変化しての生産活動となる。つまり動的空間は、作業主体の移動空間となり建設工事の進捗、原価、施工システムの重要な要素となる。建設工事では、具体的な移動量、移動回数、移動距離となって直接、間接的に工事費や安全性に大きな影響を及ぼす。一般に材料や機械の移動は、その積み込み、積み下ろしを併せて運搬作業と称される。動的条件による運動エネルギーの最小値は、経済的に優位となる。

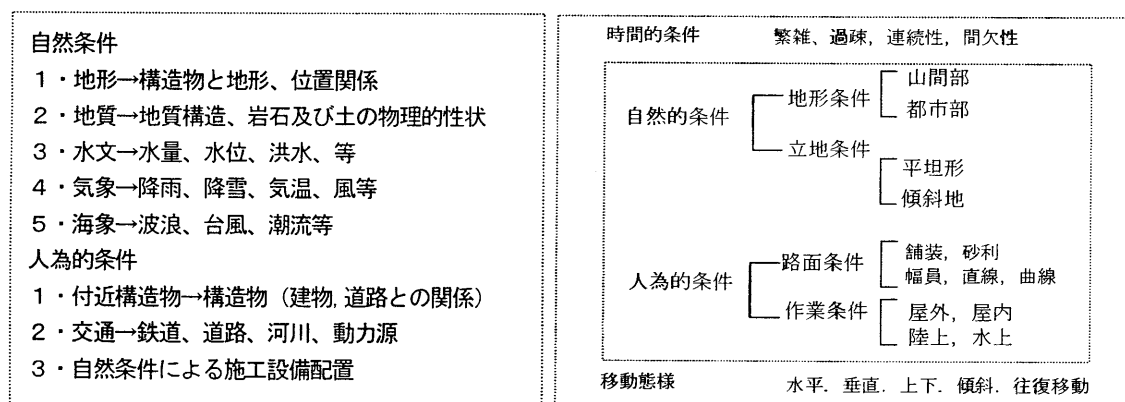


表 2.5 空間条件における静的条件

図 2.14 空間条件における動的条件

④時間的条件の構成要素

時間条件は、生産活動である施工システムの基本的な選択条件となる。構造物を構築する所要期間である。時間的条件には、施工量、施工能力である一定の静的な時間の要素と工事進行の暦日時間である動的な時間の要素に分けられる。動的な時間は日程、工程あるいは工期と称される一方向に経過する時間の概念で工事施工期間を意味することになる。表 2.6 は、動的時間を作業特性である作業頻度、作業の許容時間、作業の時間的制約の項目により分類したものである。

表 2.6 動的時間の分類と種別

分類	項 目
頻度	連続的、断続的、定期的、不定期的、偶発的
時間	等速度、変速度、同時化、迅速、緩慢
時期	昼間、夜間、季節、周期、短期、長期

静的な時間は、工事の単位施工量や単位施工能力を表す単位として使用される。静的な時間で示された単位時間の施工量は、延べ施工日数との加減乗除により全施工量を算出するのに用いられる。したがい、施工設備規模、施工主体の規格、投入数量の根拠は、両者の相関関係により決まる。

単位時間は、1時間当り、1日当り、1月当り、重量、容量は、一個当たり。一回当りの数量で示される。例えば施工量は、 Q (全施工量)は、 N (工期・実作業日数 D)と q_u (一日当りの施工量)の乗算となる。機械施工の場合は、延べ作業時間 \times 機械作業量 \div 時間 \cdot 台 \times 台数により算出される。

つまり時間的条件＝動的時間条件 \times 静的時間条件となる。したがい、工期短縮は、単位施工量を増加させるか、作業頻度を増加させることで可能となる。具体的には、作業主体である作業者の人数や建設機械の台数の増加、能力、規模変更である。動的時間と静的時間の各要素の関係は、実際の作業期間の施工量と日程の関係で表すと式 2.1 になる。

$$T = T_n \times T_q \quad (2.1)$$

T : 時間的条件「全作業量」 $\cdot T_n$: 動的時間条件「作業時間又は工期」

T_q : 静的時間条件「単位時間施工量又は単位日施工量」

静的時間条件が一定なら動的時間条件が大きくなれば静的時間は小になるという反比例の関係となる。

動的時間(作業時間又は工期) T_n は、 m (頻度)と t (単位当りの必要作業時間)の積で表すことができ、式 2.1 に代入すると

$$T = m \times t \times T_q \quad (2.2)$$

全作業量＝頻度 \times 単位当りの必要時間 \times 単位時間当りの作業量となり、時間条件を一定にすると静的時間条件は頻度と時間に相反する。作業量 T_q を最小にするためには、頻度が無限大となれば良い。このことは、作業の連続化を意味する。作業エネルギーの最小値は、連続作業によることが理想となる。

このように、時間的条件は、単位施工量と所要日数の関係により施工方法、所要施工設備、機械、人員を決める要素である。また単位作業量を最小にするには連続的作業に近づける施工計画が最適であることが上式から明らかになる。

以上空間的条件と時間的条件を図 2.15 にまとめる。

2. 6. 3 作業工程、稼働率、作業効率

①作業工程は、次の3構成に分類できる。

- a) 直列作業工程：一般的には分割できない単純な工事に適用し、能率の向上が図れない工種工程である。
- b) 並列作業工程：作業を分散して並行に進展して工程の短縮を図る。

c) 複合作業工程：工事は複雑な形態により構成される．一般に建設工事はこの形式を取ることが多い．

建設工事の合理的実施とは，工期の短縮と工費の削減に置き換えて評価する場合がある．生産産業における理想システムとは、連続的作業であり，このシステムを可能にするには，次の作業条件が必要となる．

1. 作業の単一化・2. 作業環境の維持・3. 作業工程の確保
4. 単一施工主体による作業組合せ

またこの作業の実行には，障害となる事前対策や作業自体のサイクル，能力管理と労働力，動力，材料の供給が必要となる．

連続的作業が可能になる基本は，施工主体の作業能力が定量化できることにある．しかし建設産業の場合，固有の自然，時間的条件である作業日の気象，工程の進捗により作業領域や作業環境が変化し，作業量の定量化を図ることは困難である場合が多い．また，その環境変化による一つの基本作業のトラブルが次段階の作業を全面的に停止に至らせることもある．このような連続作業の短所は，屋外での生産諸条件が時間経過とともに変化する建設作業への適用が困難であることを明らかにしている．

連続作業に近づけることは，事前の計画とそのマネジメントといった人的要素に比重がかかることも明らかである．

生産工学的な判断で建設産業の生産活動を理想化することには問題があり，建設産業では，生産環境を反映した固有の生産システム，施工システムが必要となる．建設産業の発展を象徴する「大規模，迅速性による効率化，機械化による合理化」の検証は，建設産業の生産目的を明確にする面で大きな意義を持つ．

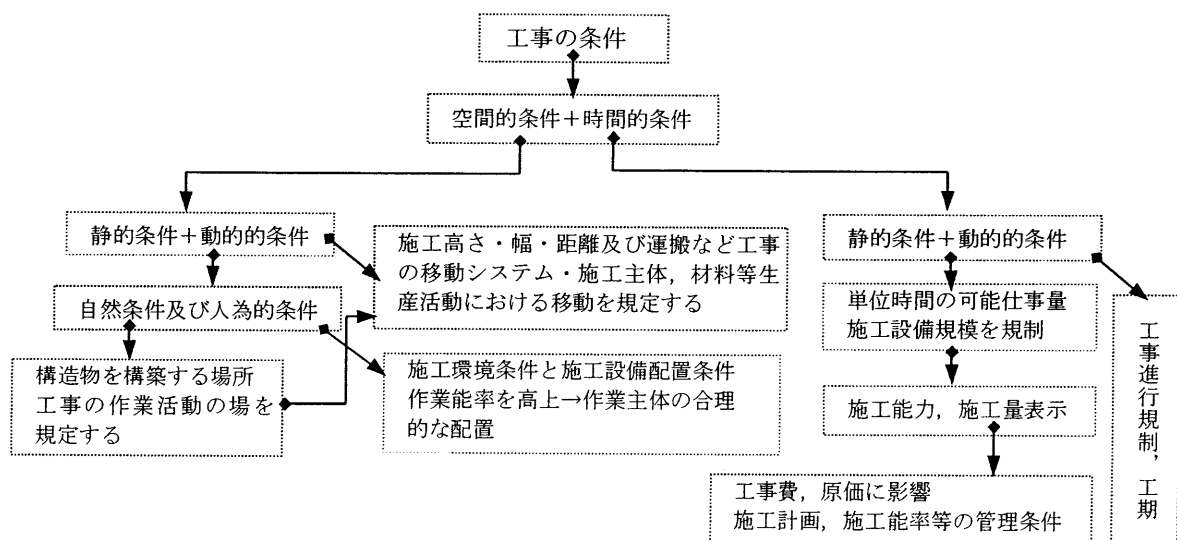


図 2.15 工事に係る空間，時間条件構成図

②稼働率，作業効率

一つの単位作業において施工主体は、諸条件により全作業時間が 100%有効に作業活動時間とならない。単位作業の時間経過における時間構成を図 2.16 に示す。

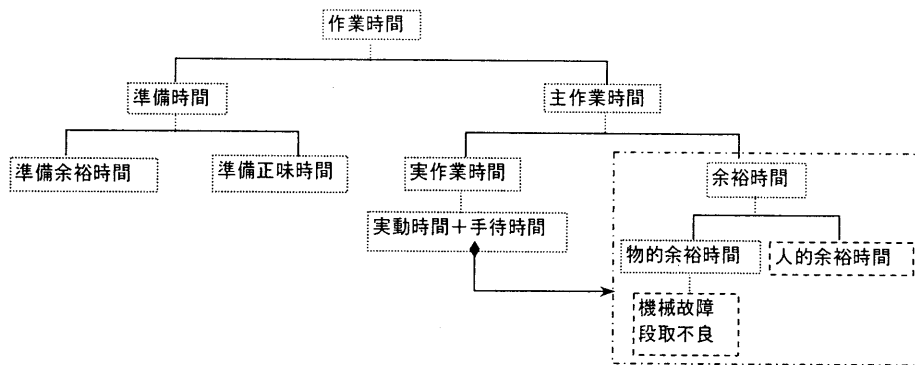


図 2.16 単位作業の時間構成

作業時間は主作業と準備時間より構成される。そこで実働時間に対する実際の作業時間（準備作業等を除く）比率が稼働率と定義される。この稼働率が高いほど固有の施工条件に適合した合理的な生産、施工システムと評価される。稼働率は、必要に応じた単位時間により時間、日、月、年により使い分けられる。

稼働率は、空間的な自然的条件と施工システムでの人為的要因によって生じる。影響する要因は動的時間の単位により異なる。例えば自然条件（気象、水文、地質、地形）は、工事期間を通して稼働率に影響する。

施工計画の基本は、気象条件で算出される作業可能日数と、自然条件への対応を勘案できる施工主体と施工システムの検討である。気象、水文条件による作業可能稼働日数は、建設工事における工期を左右し、作業主体の規格能力を決める条件となる。適切な施工計画は、工期を通して施工システムを構成する人員、機械等の能力、台数を平準化することである。平準化は、作業主体の移動、入換えを最小とする施工システムとなるが建設産業の工事においては容易ではない。

一方人為的な要因は日作業サイクルである時間稼働率に影響するが時間的には短期間である。要因は、作業における作業、機械、労務のマネジメント業務や労務管理に属することが多い。

稼働率は、作業結果を単位時間で評価するのに対して、作業効率は、具体的な施工量を標準施工量に対する指標として作業の能率を示す。

単位時間の標準作業量に対する実施施工量の比率は、本来 100%であるが、標準作業量の算出条件の作業環境条件が異なることによって変動する。

作業効率を支配する要素も稼働率と同様に、自然条件の要因と人為的要因に二分できる。屋外での作業環境は、固有の施工条件となり施工可能日数や作業主体

の配置等の時間的，空間的な制約として作業能率に大きく影響する。

稼働率，作業効率は，生産システムの形態，施工システム（施工法）の検討，選択の条件となる。また，作業主体が人であり，人的要素により建設行為が成立する建設産業は，マネジメントの影響が強い。自然条件や人的要因の複雑な取り合わせが時間的に変化して重なり合い影響する作業効率を理論化した数値で議論することは困難であり，現段階では，ある特定の要素に着目して決められている。例えば，地質や地形に左右される土工事作業量は，土の種類，土の状態，作業勾配，距離等の要素による作業の難易度ランクの数値を作業効率と決めて，その組合せを標準作業量に乗算して算定される。

作業効率の向上は，作業の単純化，簡易化により作業量を定量化して生産性の安定が基本となる。その手段として機械，工具の利用がある。人為的要因の削減による差異のない作業量化である。そのために作業環境に適応できる機械，工具類の使用方法や作業順序を適格に選択しなければならない。使用方法，作業手順を体系的に適用するためには，建設技術による定量化と施工法の合理的選択システムを確立する必要がある。その概念図を図 2.17 に示す。

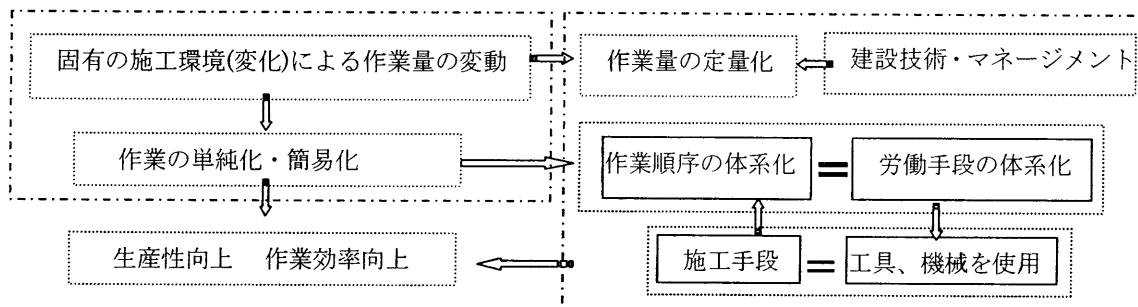


図 2.17 使用機械，作業手順の秩序化概念図

2. 6. 4 生産システムの経済性特性

工事費は工事期間と工事数量により支配される。また生産システムの特異性は，建設工事の経済性に大きく影響する。生産システムの経済的な最適化の一つは，実施工事期間中の工事施工量が平準化する生産工程の確立である。

工事の規模に応じた人員，機械を工事の進捗と仕事量に応じて必要量投入すれば良い。この際人員，機械の出入は，経済的，時間的(待機時間)にも得策とならない。特に機械に関する変動(台数，機種)は，工程管理，原価管理上少なくすることが施工実施にあたり重要となる。作業の継続性は，品質管理上でも重要となる。機械エネルギーによる作業は，作業量の増大を図ることは容易であるが工事原価に影響が大きい。工事原価の管理において，機械エネルギーの利用による省力化と施工速度の改善は，機械の特性と機械経費を十分理解して対応しなければ

ならない。工事費変動は、工事施工量に応じて増減する一方、固定費は工事施工期間に比例して増加する傾向にある。

図 2.18 に示す建設工事生産システムの経済特性は、工事条件に加え人為的要素が影響し、建設工事ごとの固有原価が存在する。更に施工主体の機械化が建設生産システムの経済性に及ぼす影響は強い。

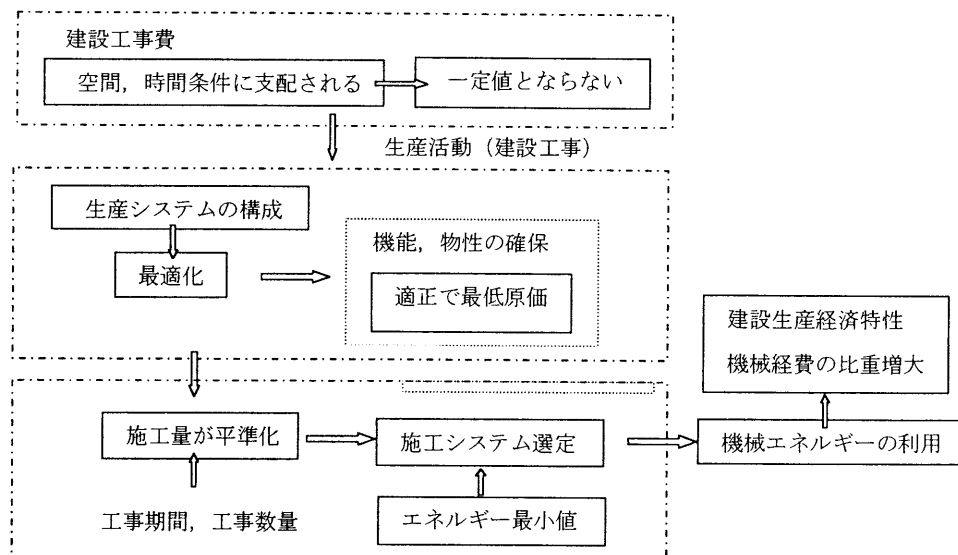


図 2.18 生産システムの経済的特性

2. 7 まとめ

建設産業の建設工事を生産産業の生産システムとして体系化を検証した結果をまとめる。

①建設産業の生産システムは、他産業の生産システムと異なる。その理由は、建設産業の生産条件が多くの特異性を有していることに起因する。その特異性を大別すると需要に係わる条件と生産に係わる条件になる。

②需要に係わる条件とは、国内外の社会、経済環境による要請による「要求性能、価値観」の影響である。（第 3 章にて検証）生産に係わる条件とは、需要による単一注文と屋外生産である。この生産条件による特異性を体系化することで本研究の目的である施工法の工学的評価による合理的選択の必要性がより明確となった。

③建設工事は、生産活動が単一注文と屋外生産により他産業の理想とする「流れ作業」形態や画一化ができない。しかし生産活動の最適化指標は、運動エネルギーを最小値とする物体移動＝最適施工である。

④注文内容は、所要性能、物性値の確保であり、建設条件は、自然条件と社会環境が時系列変化をする非常に複雑化したものである。建設の生産活動は、安定し

た自然条件を不安定状態にする。その対応方法が、工学を背景とする建設技術を組み合わせた施工システム(施工法)となる。施工システムは、時系列変化する空間条件に適合した基本作業から構成される。その基本作業は、構築物の要求性能、物性を確保する基本的目的による選択される。

⑤目的構造物を構築する場合、仮設、掘削、型枠等の工種は、次の工程工種の目的を確保することが基本作業の目的となる。つまり多くの場合、要求性能、物性は、多工種を経由して「コンクリート工」に収束化されてその目的が確保される。施工システムを構成する基本作業の組合せを検証する最適例は、コンクリート工といえる。

⑥作業主体である建設機械は、施工システムの経済特性を左右する。その選択には、工学的背景との検証が必要である。

⑦施工は、自然条件に対応する工学的背景とともに人的要素を含んでいる。その管理は、作業効率、経済性となって生産システムを評価する。

第2章参考文献

- 1) 矢野信太郎：土木施工計画論・鹿島出版会，1992. 2
- 2) 石井一郎：土木工学概論・鹿島出版会，1998. 3
- 3) 小西一郎監修，高橋裕，石綿知治，小西重郎：土木工学概論「土木とは何か」第2版・森北出版，1999. 3
- 4) 榎木亨，柴田徹，中川博次編著：土木へのアプローチ・技報堂出版，1999. 1
- 5) 建設費の内外価格差とコスト低減，pp. 19～30，社団法人日本建設業団体連合会・建設業基本問題研究委員会，平成9年3月
- 6) 機械施工システムを考える・生産性向上と原価低減，新キャタピラ三菱
- 7) 土木施工管理テキスト pp2～17・財団法人全国建設研修センター1984年版
- 8) 小澤一雅：「建設技術の評価」，積算技術1997年1月号，pp. 5～9
- 9) 河上省吾編著：土木計画学・鹿島出版，pp. 6～9，1996. 1
- 10) ジョン・フィッチェン著，藤本一郎訳：機械化前の建設技術としくみ，pp. v～viii
- 11) 矢野信太郎：土木施工計画論，p47 図2-8，2-9 参考
- 12) 小澤一雅：小澤一雅，三木孝司：施工のプロセスが環境におよぼす影響を考慮した建設技術の総合評価システム，建設マネジメント研究論文集 Vol. 3，pp. 81～92，1995
- 13) 小澤一雅：建設技術の評価，積算技術1997年1月号，pp. 5～13

第3章 社会資本形成と施工法の変遷^{1～15)}

3. 1 はじめに

戦後焦土と化した日本は、世界への加工生産品の輸出国として復興し発展を遂げてきた。現在に至る社会経済の復興，発展は社会資本整備が適宜行われてきた成果と評価できる^{*}。しかし現在，産業構造の空洞化，消費社会から循環社会への転換，地球規模の環境問題の発生，財政悪化，少子高齢化社会等々の事象によりパラダイムの変革，価値観の変化が著しい時代である。21世紀を迎えた現在が明治維新による開国，戦後の焦土復興に匹敵する大改革期といわれる所以でもある。建設産業は社会資本の基盤施設を構築することで社会の発展に寄与してきた。その源である建設技術は社会の要請に呼応し，基礎工学を担保に細分化、専門化され高度化，高性能化してきた。その技術水準は世界的にも認知されている。しかし近年，本研究の背景となった施工を起因とするコンクリートの早期劣化対策とグローバルな社会的要請である環境保全，蓄積資本の長寿命化は建設産業の課題となっている。その課題に対して施工技術は今後の方向性を展望することは，自然環境と開発のインターフェースである土木技術者の課題であり本研究の目的として位置付けた。

本章では，その展望を社会資本が蓄積された歴史的経緯から検証する。

建設技術，工法変遷(工法の選択理由)の考察によりその開発発展を促した社会的要請の関係を検証する。社会的要請と建設産業やその支えとなった建設技術の変遷を検証することから，将来の社会的価値観の動向による建設産業の役割，施工の目的とすべき方向性を展望する。考察は，10年ごとの年代区分として，「社会的要請である社会テーマの変遷，」「社会資本整備の推進計画となる関連法案」「産業基盤，社会経済の動向」「自然災害」「新技術，プロジェクト」との関連に注目して土木施工法の変遷を検証した。章末に年代表を表 3.8(p59～65)として示す。

3. 2 社会的要素による土木施工法への影響

3. 2. 1 概要

社会的要素とは，産業基盤，経済状況，社会生活環境，自然災害，環境保全等である。これらの要素は，各年代の「社会的要請」となり「国家プロジェクト」

※：社会資本は，昭和 35 年「所得倍增論」で初めて使用された。従来は，公共投資と表現

として社会資本基盤を蓄積してきた。国勢の推移による社会環境の変遷が、建設産業の生産手段である施工法、施工技術にどんな影響を与えたのか整理すると次の6項目に分類できる。

①社会基盤(道路、鉄道、港湾の整備)や産業基盤(生産基盤による量産、品質規格)

国勢による経済性、施工性から施設構造、材料が決められる。その結果に施工法は追随して施工要素「人、材料、機械」の選択に大きな制約を受ける。コスト縮減等の目的で代替工法が選択される。

②産業基盤、社会生活基盤の整備、開発計画

食料計画による干拓、産業基盤施設となる道路、鉄道、港湾、生活基盤となる上下水道等は、施工法、施工技術の専門化、分業化を促しその発展に大きな影響を与えた。

③自然災害と自然条件

治山、治水等の主目的に対応する防災技術(地滑り、耐震、法面工)、設計法や自然条件に合致する施工型式、資機材の開発に影響を与えた。

④生活環境、自然環境

施工目的(要求性能)には直接的関係しないが、社会的価値観による評価や都市化による施工場所、時間等の規制が施工法選択や技術開発の要因となる。公害対策工法(無騒音、振動：場所打ち基礎、地下連壁)や交通障害回避工法(地下利用：シールド工法の多様化、時間規制：施工の短縮化、製品のプレキャスト化)は、軟弱地盤上に立地する都市での施工法には不可避な要素となっている。また近年、自然環境の修復に供する施工法や資源循環に係わるリサイクル化施工法(ゼロエミッション化＝材料の規格化、再生材料使用)の進展は、施工法に対する社会的価値観の影響度を示す事例である。

⑤巨大建設プロジェクト

関西国際新空港、東京湾横断道路等の洋上、水中建設技術、本州四国連絡橋の実現は、測量、軟弱地盤に始まりの塗装、材料の開発、架設技術に至る特化された高度な総合分野の集結化である。巨大プロジェクトは、建設産業が社会資本と直結し、総合工学、産業の技術水準により構成された時代の象徴となる^{16, 17)}。

⑥その他

安全、省人化対策としての無人化機械化施工法、宇宙工学の利用による測量法、構造物の維持管理に供する非破壊検査は、建設産業を取り巻く環境と要請を受けた科学、産業の輻輳する分野から建設産業に展開する施工法といえる。

建設産業、建設技術、施工法の開発、選択に影響した要因は、①項目に挙げた社会産業構造の状況から工事構成要素の供給性、経済性を重視した構造設計例お

よび合理化，コスト縮減策と②～⑥項目に挙げた時代の進展や社会的要請に大別できる。

①の項目は，ダム工事の事例による考察，②～⑥は，年代区分による時代の社会テーマ，動向と建設産業，施工法の変遷を考察し，施工法に与えられた課題と将来の方向性を展望する。

3. 2. 2 工事構成要素の経済性，供給性による施工選択

目標対象物の構造設計，施工法を選択する場合，工事構成要素の検討は，材料，労務，機械等の施工手段の経済的，時間的(工程，経済効果)比較が一般的に行われる。材料，労務費，機械費といった工事を構成する要素は，その時代における社会情勢と産業発展や社会経済の影響を受ける。

(1) ダム施工事例

基盤整備がなく産業活動が制限されていた戦後復興期は，材料生産と需要供給に対応する輸送力不足により安価で潤沢な労働力(52 年国民所得約 60,000 円)が経済的に優位な時代であった。電力，水資源の確保の要請を受けた 50 年代から 60 年代のダム施工におけるダム型式，コンクリート施工への対応は，セメント材料の縮減を工学と施工両面で図った適例である。また対応策から多くの新技術，材料開発が生み出された。

セメント量低減策は，AE 剤(48 年導入)やフライアッシュ(50 年に紹介)等の材料開発の機縁となる。表 3.1 は，ダム工事の単位体積当たりセメント使用量例を竣工年で示した。1961 年竣工の奥只見ダムの単位セメント量は現在の一般的配合と同等までに至っている。

表 3.1 竣工年とダム単位セメント使用量¹⁴⁾

竣工年	ダム名	単位セメント量 kg/m ³
38	塚原ダム	220
43	三浦ダム	220
55	佐久間ダム	160
61	奥只見ダム	140(フライアッシュ 30%42kg)

セメント材料の低減による施工法への影響は，練混ぜやワーカビリティーに対応する工種に生じ，混合設備や締固め作業の機械的改良や施工設備開発を活発化させた。また設計段階でのセメント容積の削減策は，人件費と材料費の経済比較による構築物型式の選択となった。一般的重力式ダム型式に比較して 10～25%のコンクリート量が減量できる中空重力式型式の採用は，その反面で型枠や足場施工が多くなるが，材料の需要供給を人的要素が代行した例である。57 年日本最初の

中空重力式により井川ダムが完成している。中空重力式は 60 年代前半まで採用されるが(62 畑薙第一ダム完成)それ以降は産業基盤の整備による材料生産、供給や施工の機械化が進み経済的、施工面での利点が少なくなり採用されなくなる。

中空式と比較して更に体積比の小さいアーチダムがこの年代にフランスなどヨーロッパで建設されていたが耐震性に対する安定性の確認といった工学的理由により日本では採用が遅れた型式もある^{※1}。アーチ式ダムは作用する荷重を水平アーチ要素と鉛直の片持ちばり要素との相互作用によって周辺の岩盤に応力伝達をする三次元構造で、基礎岩盤として堅岩で剪断抵抗強度を要する自然条件が前提となる。アーチダム施工を可能にしたのは工学を背景とする構造設計である。構造物が年代の工学、技術水準と社会経済を象徴する所以である。

具体的な例として上椎葉ダム(1955 年竣工)のコンクリート単位単価を表 3.2 に示す¹⁹⁾。人件費は 200～300 円／人に対してセメント費は 12,000～13,000 円／t である。

表 3.2 上椎葉ダム・コンクリート単価表

項 目	打込み費	碎石,砕砂	原石採取	型枠費	セメント	AE 剤	合計
単価・円	1,272	1,388	2,537	330	2,771	21	8,319
百分率	15	17	30	4	33	0.2	100%

年代による人件費と材料費の格差は明確である。それ以外に単価構成比率を現状と比較して原石採取運搬費比率が高いのは、機械、燃料費が原因と推測できる。社会産業基盤である電力、道路、鉄道等が未整備な年代では、材料生産費や資機材の運搬費が施工法の選択に経済的な影響を大きく与えている。その代替として低賃金の労働力による人海戦術が当時の施工法選択要因となっている。以降の機械化による構成単価削減と構成比率の変動は、施工法発展の方向性と選択に大きく影響をする。

(2)コスト縮減対策による省力化、合理化工法

コスト縮減の要請による省力化、合理化による工期短縮や資機材の開発による施工法の選択は、初期段階では、施工の機械化がその代表的要因となる。

施工の機械化は建設技術の発展上でも極めて大きな要素となる。施工の機械化は、大規模、大量施工による迅速施工による工程短縮を可能にして経済効果を発揮する。材料が経済成長とともに安定して生産供給されると、大規模、大量施工は、時代の要請となり機械化を一層押し進める。工事期間の短縮は、工事単価が同等であっても直接工事費以外の間接経費の縮減に波及効果がある^{※2}。

※1 アーチダム：動水勾配比で重力式の約 50%、単位セメント量は重力式の約 2 倍¹⁸⁾

※2 間接費の内機械損料、役務費、現場管理費等は工程により左右される

1955 年完成した佐久間ダムはその機械化による施工が、時間的優位を示す象徴的な施工事例である²⁰⁾。佐久間ダムは我が国で初めて 150m を超すハイダム(堤高 156m, 重力式コンクリートダム, 電源開発)である。アメリカ式の大規模な機械化施工技術が導入されたことにより, 1953 年着工から 2 年 4 ヶ月で全堤体を完成している。掘削機械類に見るその具体は, 仮排水路トンネル掘削に大型ジャンボ(16 台の削岩機搭載)を使用して全断面掘削により直径 10.5m, 延長 650m を 11 ヶ月で施工を完了している。

河川仮締め切りにはブルドーザーが使用され, 堤体基礎掘削工事では, 2.0m³のパワーショベル 5 台と 15t ダンプ 30 台等が使用されている。

コンクリート打設は, ケーブルクレーンを駆使した画期的な機械化施工により打設量は日平均 3,600m³, 日最大 5,180m³で, 124 万 m³のコンクリートを 20 ヶ月で完了している。現在の施工量と比較しても驚異的施工量である。

佐久間ダム完成の翌年 57 年に本体着工をした御母衣ダムは, 早急な電力確保という社会的要請の下, 膨大な土工量を短期間施工するため超大型重機を輸入し, 月平均 30~40 万 m³の土量が運搬されている。表 3.3 に示す重機械によりされ堤体積 800 万 m³の盛立てを 26 ヶ月で完成している²¹⁾。

表 3.3 御母衣ダム土工使用の重機名称と台数

工種	掘削積込み	運搬	敷均し転圧
機械名	パワーショベル	ダンプ	ブルドーザー
規格・台数	4.5m ³ (330HP)~1.5m ³ 19 台	22t—40 台, 15t—30 台 12t—20 台	D9(45t 級)10 台 D8(30t 級)9 台

現在の機械施工と比較しても遜色のない重機規模と配置である。機械の能力規格に対して台数が多いことは, 機械性能が悪く稼働率が低い時代であることを示している。人が重機施工を支えた時代で, 重機総台数 230 台に対して 700 名のオペレータや整備員が従事していた。57 年 6 月~60 年 12 月の 2 年半の稼働率(実作業時間/稼働時間)は 52.3%と約 2 分の 1, 稼働率(稼働日数/暦日日数)との乗数である機能率は 33.8%と約 3 分の 1 程度である。表 3.4 は, 重機稼働状況(総稼働時間は 24 時間/日・単位千時間・下段は総稼働比率)を示したものである。

表 3.4 御母衣ダム重機稼働状況

時間内訳 項目	総稼働 時間	実作業 時間	日常整 備時間	定期整 備時間	故障 時間	修理 時間	休息 時間	待機 時間
累計時間	3180	1662	187	11.3	1.17	136.9	221.3	959
総稼働時間比率	1	0.52	0.06	0.004	0.0004	0.043	0.07	0.30

総稼働時間に対して点検修理等の時間と待機で約 40%と稼働率、機械性能が不十分であったことを示している。佐久間ダムを始めとする機械化施工は、ダムという工種の施工に機械を導入し、省力化、合理化といった工法革新の意義だけでなく、広域的な土木事業を可能にし、施工範囲の可能条件を拡大した。代替工法や他資機材の選択肢が多くない年代における社会資本整備事業の大量、急速施工といった社会的、経済的要請に対応する施工法選択は、機械化施工が最大要素となる。しかし機械化は、工学の進歩や新資機材の開発された多くの新工法の産出する年代になると工法を支える一つの要素に変化する。産業発展は、土木以外の機械、素材等の他分野でも急速な進歩を遂げた。その結果、機械化が主目的ではなく、工法を実現するための機械開発、改良が行われる年代に移行する。施工主体が人力から機械に変わる時代が復興期であり、高度成長期には機械化が工法選択の主要因となる。成長後期、安定期では、工法の一要素となる。

(3)まとめ

社会経済状況による工事構成要素からの工法選択

①使用材料の低減策は、構造物の要求性能を満足する範囲での工学的裏付けや材料開発が必要である。この場合施工法は、その結果を受けた施工能力を有する機械改良や労働力、品質管理での対応となる。従い工法選択は計画、設計段階の検討結果に対応することになり施工段階の選択的要素は少ない。施工段階よりも計画設計段階での選択と言える。

②施工法の選択は実施段階での選択となる。年代による社会経済状態と周辺技術の進歩程度により、経済性と時間効果の優先度が異なる場合もあるが、共に工法選択の段階では合理化、省力化工法が採用される。

開発、研究費のコスト編入と期間を考えると合理化、省力化が絶対的に経済的優位を発揮すると断言はできない面もある。社会的要請での少子化に対応する「無人化」や高品質化、環境対応となる「プレキャスト化」は、その例といえる。

一般的に工期の短縮は、工事の経済効果に優位となる。多くの場合、施工の機械化による効率拡大と大量施工に依って図られたと言える。機械化施工は、工事要素、経済性の選択肢として設計、計画と施工段階の各段階での選択検討が必要となる。施工段階での機械化は、建設機械の変遷の検証により時代背景が考察できる。

3. 3 社会経済的要請と建設産業および施工法の変遷

3. 3. 1 概要

社会経済の開発計画を受けた社会資本の蓄積は建設産業の施工法や施工技術が共に歩んできた道程である。施工法、施工技術の変遷は、どのような社会的要請により選択され進展してきたのか、またその影響をどのように受け止めたかという視点で考察する。社会資本の整備過程は、国家の施策であり、それは公共事業関連法案の流れからも判読できる。社会資本の整備画は、社会の安定と発展を目的として、産業基盤と社会生活基盤に供する機能施設分野ごとに進められてきた。道路、鉄道、河川、海岸、下水道等はその例である。その年代の社会的要請は、社会テーマ、国民活動の動向、価値観となり建設産業に影響を与える。社会テーマと社会資本の動向を表 3.5 に示す。次節で年代の社会テーマと社会資本動向と建設産業、施工法と関連を年代ごとに考察する。

表 3.5 年代別社会テーマと社会資本の動向

年代	社会テーマ	社会資本の動向
戦災復興期 1945 年～1955 年 昭和 20 年代	戦災からの復興	食料の確保、国土復興に関わる治水治山や住居確保に関わる土地区画整理が命題の時代
高度成長前期 1956 年～1965 年 昭和 30 年代	高度成長経済への移行・56 年経済白書「戦後ではない宣言」 61 年経済白書「所得倍増計画」	産業基盤の拡大(臨海工業地帯)地域的集中投資による新産業都市建設、輸送手段の整備(交通網の拡充)と人口集中による都市化に対応する上下水道整備、治水利水による多目的ダム建設が最盛期。
高度成長後期 1966 年～1975 年 昭和 40 年代	高度成長経済の熟成とひずみ 「72 年列島改造論」	高度成長の基礎となる産業発展に対応する社会資本の充実(高速道路網整備と大都市住宅の大量供給) 72 年列島改造論による国土の大規模開発 「地方の過疎化、高度経済成長とひずみ＝公害(ヘドロ等)の顕著化・71 年東京都ゴミ戦争宣言」等の対応。 年代後半には高度成長の終焉ー73 年オイルショック、74 年戦後初のマイナス成長
安定期 1976 年～1985 年 昭和 50 年代	人間住居の総合的環境の整備	高度経済期の産業、国土開発から国土資源を人間と自然の調和を図り健全な総合的環境が目標となる。一極集中から地方分散での定住構想でもある。年代後半では、地球規模の環境保全が大きなテーマとなる。生活重視による価値観の変革時期
バブル形成期 1986 年～1995 年 昭和 60 年 ～平成年代	開発から自然との調和による健康で文化的生活圏の構築	金融自由化による日本市場の急速な国際化と情報化に対応する都市再開発が展開。産業構造の転換による臨海工業地帯でのウォーターフロント開発が展開。 国土資源のバランス崩壊による中央と地方の格差拡大の是正が課題。 心の豊かさの追求や将来の少子化による財源難に対応する最大効率主義から最小被害主義といった価値観、評価の変革。
バブル崩壊期 平成不景気 1996 年～	多自然住居地域の創造、都市のリノベーション(経済的豊かさから精神的豊かさの重視、多軸型国土構造に転換ー多様性に富んだ国土空間の創造)・多極分散型国土の構築と国際化	少子高齢化社会を念頭に消費型社会から循環型社会への転換期。 コスト縮減、リサイクル、維持管理の重要性 精神的豊かさは、グローバルな課題である自然環境の保全、共生が不可欠との認識。 社会資本は、最大効果から最小被害の選択がなされる時代。情報化技術の進歩による新しい価値観の変革は、社会のパラダイム変革

3. 3. 2 戦災復興期・1945 年～1955 年. 昭和 20 年代

不足する食糧の確保、物資不足に対する配給制度、多発する災害と事故、輸送力住宅不足と不法占拠、消費財の供給不足、猛烈なインフレ、雇用確保のため失業対策の不足等々の多くの社会不安に加え GHQ の統制下で国の仕組みについての改革自体が大きな課題となった年代である。1950 年代前半にその後の社会資本整備の方向を規定する法律、五カ年計画等各種計画、財源策が策定されている。

産業設備、農業基盤の崩壊、人口の急増、インフレーションの急速進行といった混乱状況で「生活環境の安全」と「衣食住」の確保といった人間、社会にとっての最低条件確保が求められた時代である。

第一課題は食料の確保で農地開拓が社会資本整備の始まりとなる。人力による開拓は計画通り進展せず(51 年までの開墾面積 43.6 万 ha 、目標の約 35%)、既存田地の改良が速効性に優る効果があった。55 年に農地開発機械公団の設立により開拓が機械化して幕を開ける。戦後を代表する土地改良事業である愛知用水事業や八郎潟干拓は次年代の 57 年に着工している。愛知用水はアメリカからの大型機械を輸入して 5 年間で幹線水路 112km、総延長 1135km を完成し年間約 2.5 億 m^3 を木曾川水系王滝川の牧尾ダムより供給した^{22, 23, 24)}。工事完成の 60 年代になると高度成長期による産業の急速発展により、都市化、工業化による水需要が急増し進み、供給先は農業から工業にシフトする。愛知用水事業による施工は、給水地域が複雑なため、水路型式に開水路、暗渠、トンネル、サイホンと多くの工種が採用され、設計、施工両面での技術の進展がなされた。工法としては、開水路構造にはコンクリートの「薄いライニング」方式が用いられ、施工面での品質管理、施工管理が重要性を増した。また資機材面では、幹線水路のゲートにはフランス製のアルミゲートを採用する等多くの新規試行が見られる。

社会情勢の急速変化は、その要請として機械化による急速施工を求め、その結果として多様な施工条件に対応する多くの工種の施工法をもたらした。

食糧とともに安全な社会維持の要請が治水治山である。生命、生活圏の安全と確保は、人間の生活を維持できる安全な国土整備である。生命、生活の安全確保の第一義は、自然災害から国土を守ることでもある。戦後 4 年の間に台風、地震等の災害により約 12,000 人の死者を出している。災害の規模が大きくなったのは、森林資源の荒廃と国土保全施設の遅れや産業荒廃による河川改修のセメント、鉄鋼等の資材不足と気象に関する情報、技術の未発達、防災体制の不足が大きく影響している。森林の乱伐は、水源山地の崩壊による土砂流出を起こし、資材の不足は国土保全施設の整備を遅れさせた。

複数のダムによる洪水調整は、流域、雨量等の分析に高い精度の水文学を要求した。米国の TVA 計画の根幹となる水文学は 1930 年代から 1940 年代にかけてア

アメリカで著しい発展を遂げた。水文学の発展は、気象学、地球物理学、地理学、地質学、農業工学、林学等の他分野工学との交流を踏まえたものであり、50 年以降の多くの工学が学際的な発展をする先例でもある。その基礎工学を基に日本の治水計画も実行された。その一例がカスリーン台風による利根川右岸決壊による東京都の浸水による首都圏治水計画である。河川治水計画は、遊水池の利用(渡良瀬遊水池 1.5 億トンの洪水調整容量)や、支川調整による本川の負担を削減する総合的対策が施行された。

自然災害は、自然の猛威を再認識させ、自然環境保全の重要性を再喚起し、その利用と効果の見直しを工学的に反映させたとも言える。産業基盤である輸送力は、鉄道の回復が遅れ、道路事業もこの時期には、既存の道路維持補修が優先され、本格的な整備は道路特定財源制度が確立されてからとなる。

この年代の社会的要請は「衣食住の確保」であり「生命、安全」に対応する社会資本の基盤整備であった。建設産業の内情は、生産性は人海戦術であり、資金調達も厳しく施工法を自身で選択する段階ではなく、官主導による施工が主であった。49 年建設業法や 52 年公共工事の前渡金制度(消化工事費の 3~4 割)による資材、労務の確保を容易する法律による業界の育成時期であった。しかし施工能力の不十分な業者の乱立状態に近いもので粗悪な施工が多かったとされる。後半、材料の不足を人海戦術が補う施工方法から産業復興による材料供給と輸入による機械化施工が緒に就いた時代と総括できる。以降、迅速施工による経済効果が施工法の選択の大きな要因となる。また基礎工学の進歩進展、新規材料が大きな役割を果たした年代であり、その影響をうけ施工主体が人から機械への移行する時代である。

3. 3. 3 高度成長前期 1956 年~1965 : 昭和 30 年代

高度経済成長時代の根幹は産業復興である。この年代の社会的要請は産業基盤の整備である。社会資本の整備計画は、機能別に産業基盤(道路、港湾、農林水産)社会基盤(住宅、環境衛生、厚生福祉)及び国土保全等に分類される。

大都市圏での産業基盤資本が社会基盤資本に優先して強化する施策がとられ、その結果社会基盤資本の整備計画は後半期に先送りとなっている。

我が国の本格的経済計画である「所得倍增計画(10 年計画)」が 1961 年に始まり高度経済成長の緒に就いた。産業活動の活発化は、新産業都市、工業整備特別地域に象徴される臨海重化学工業の全国展開による物流動員計画に連動し、先ず道路網の抜本的整備を促した。都市間の道路網整備と高速自動車国道の建設を併せて行う本格的な道路整備が開始される。64 年の東京オリンピック開催に併せた、首都高速道路、名神高速道路の完成、東海道新幹線の開通は道路、鉄道旅客運輸

における高速時代の幕開けとなった。高速道路による流通，新幹線輸送による動員は機動性に富む産業活動の原動力となった。

産業活動を優先した公共投資は，急激な経済成長をもたらした反面，都市化現象に拍車をかけた「一極集中の弊害」を生み出した。大都市圏への人口集中に公共施設の整備が追従できない状況となる。都市用水の需要は，地下水の利用による地盤沈下被害を発生させた。その結果工業用水の供給や大都市地域の水不足の対応策がダムに求められ，多目的ダム建設が増加する。産業優先の施策による大都市と地方の格差は，当年代後半の社会的要請となる。62年の全国総合開発計画は大都市への集中を阻止する拠点開発方式となった。内容は，産業と人口の大都市地域以外の地域への誘導（衛星都市への分散）と大都市の構造改革計画である。治水整備は，財源制約と産業投資の優先により遅れた。59年の伊勢湾台風は5041名の人命と2兆3000億余の被害を出している。この災害を契機に海岸保全の重要性和緊急性が再認識され60年治水事業10カ年計画が始まった。

この時代をまとめると復興期の規模の大きいプロジェクトの完成や新規計画の年代となっている。臨海工業地帯，新産都市、東海道新幹線、名神高速道路、黒四ダム等産業基盤が完成した。千里、多摩ニュータウン、新宿副都心事業が開始されている。日本が高い所得水準の確保を可能したのは，この時代の社会資本整備による成果である。東京オリンピックは戦後復興の総仕上げと工業先進国としての象徴イベントとなった。社会生活基盤は，56年の都市公園法，58年の上下水道法の制定が転機となる。産業基盤整備である道路、港湾、鉄道および社会生活基盤である住宅、環境衛生と国土保全等の施設機能に分類された形で土木技術や施工法が体系化された年代といえる。特に日本を縦断する東海道新幹線や名神高速道路は多種多様な自然条件と施工条件に遭遇して施工法や技術の体系化をなしたプロジェクトである。名神高速道路は道路土工，舗装技術の確立をなした。その設計法でもクロソイド曲線，透視図法等の交通工学概念を取り入れた線形計画の先駆けとなり交通工学の発展にも大きく寄与した。東海道新幹線もトンネル技術の体系化と橋梁の長大化技術，軟弱地盤対策等様々な土木技術，工法を大きく進歩させた。

産業活動とその基盤整備を背景にした資材生産，品質の確保，供給の安定により，施工法の種別と選択肢が生まれた年代でもある。材料による施工の効率化の代表例として鋼製支保工の採用がある。56年大原トンネルで最初に使用され61年から東海道新幹線工事（名神高速道路の天王山トンネルは60年採用）にH型鋼の鋼アーチ支保工が採用されトンネル施工法に大きな進歩を与えた。鋼製アーチ支保工による自由空間の確保は掘削の機械化を可能にした。その結果ドリル・ジャンボと大型ズリ込み運搬機械等による急速施工がなされた。

都市化による施工環境の改善が新しい工法を産出したのもこの年代である。

過密な都市トンネル施工にシールド工法が 59 年採用され、従来のオープン掘削工法による交通渋滞の解消がなされた。軟弱地盤である沖積層に人口の約 50%が生活する我が国の建設業の得意とする工法の一つになる。首都高速道路も過密化した都市での高架施工を要求され、工事、形状に大きな制約の中で種々の施工技術を生み出している。基礎工事に低振動、低騒音の場所打ち杭工法であるベノト、リバーサーキュレーションやアースドリルの開発を促した。

設計段階では、橋脚と橋桁を一体としたラーメン構造の採用がこの年代である。

施工の機械化による専門化、分業化もこの年代に始まる。人力によるコンクリート打設は、大量施工、急速施工の大きな課題であった。コンクリートポンプ車の普及は、土木施工に大きな転機を与えた。コンクリート打設の施工目的は、要求性能に応える物性を確保したコンクリート構造物の構築であり、コンクリートの大量輸送や迅速施工ではない。これらの観点からすると製造、運搬、輸送、受入、打設が施工の効率化と機械化による分業形式となったことは、基本作業目的や施工責任も分割されることになり施工法の本質的課題に問題を残したと考える。(コンクリート工の変遷参照)

ソフト面（主観的判断）の影響が施工、技術といったハード面の方向性に変化を与えた事象も見られる。住居が中層化鉄筋コンクリート構造の建物に変化し、新しい生活スタイルが導入された。この生活環境の変化は、従来の「生活感」による「価値観」に変化を起こした。この価値観の変化は、社会資本の整備に対する「要請や評価基準」となって社会資本整備の方向性に影響を与えることになる。

3. 3. 4 高度成長期後半 1965 年～1975 年：昭和 40 年代

高度成長の成果と弊害両面を併せ持つ時代である。生活の利便性、住宅の整備、福祉の充実といった成果の一方で、大都市と地方の格差や化学、電力、石油コンビナート等の固定発生源や車等の移動発生源による公害問題、更に 71 年の東京都における「ゴミ戦争」等の弊害が深刻化した年代といえる。大別すれば、「大量消費時代の功罪＝豊かさとそのひずみ問題」と「地域格差問題」を抱えた年代である。

年代後半の経済状況は、73 年の石油ショックを契機に成長期から安定成長期に入る。50 年代後半に問題化し、60 年代前半では解消されなかった地域格差の是正に必要な社会資本整備が主要課題となる[※]。69 年の第二次新全国総合開発計画(大規模プロジェクト方式)の流れに沿って新幹線や高速道路の高速ネットワークの拡大および遠隔地大規模工業基地などの大規模開発プロジェクトにより地域も成長、高度化した。70 年策定の「新経済社会発展計画」は、地域格差の是正に関して「ナショナルミニマムを得るように地方における生活基盤、産業基盤等の社会資本の

※地域格差：地域間の所得格差による生活水準格差を意味する

整備を行う」と表現し、政策の最重要課題であると明言している※。

都市から地方への高速化は、69年東名高速全線開通、72年北陸自動車道部分開通、73年中国自動車道、九州自動車道の開通、75年山陽新幹線博多開業と日本列島を縦断した。高速道路、マイカー時代に代表される利便性は、食料の広域流通により生活環境をより豊かにした。66年に貨物輸送で自動車が敏速性、機動性により鉄道の分担比を越えている。国民感覚は「67年の国民生活白書によれば一国民の9割は中流意識」となる。生活面でも「冷蔵庫、洗濯機の普及率90%（72年調査）」等の数字に示されるように国民のライフスタイルも大きく変化した。戦後復興は、衣食住の全面的繁栄の頂点に達した年代である。

豊かな生活の享受する一方で高度成長のひずみは、産業活動による工場騒音、大気汚染、河川、湖沼、海の汚濁等の公害による生活環境の悪化と地価高騰現象となって現れる。また都市化は、地価の高騰現象による住宅難に深刻度を増してスプロール現象による都市郊外の環境悪化を引き起こした。

公害による生活環境悪化は、60年代後半から70年代にかけて地域格差の是正政策とともに大都市圏に止まらず地方圏に波及する。67年の四日市ぜん息大気汚染公害訴訟はその代表的事例である。さらに利便性の反面性である車公害が新たに加わる。交通渋滞、排気ガス、騒音振動の発生と事故の増加である。これらの公害に対応する法律規制は、68年の公害対策基本法、70年騒音、大気汚染公害規制法の成立により大成化された。78年に成立した窒素化合物対策は世界でも厳しい環境基準の一つとなっている。

生活様式の変化、生活水準に注目すると水需要が大きく変動している。都市（生活、工業）用水の伸びが大きく、65年年以降、生活用水は10年間で63億 m^3 から123億 m^3 と2倍、工業用水は126億 m^3 から183億 m^3 と1.5倍になる。生活用水は、住宅資本の改善による生活様式の変化から176 リットル /日から273 リットル /日と1.6倍になった。併せて65年の下水道の対象人口普及率は8%から23%とほぼ3倍になった。このような急激な水需要の増大は、都市型渇水（64年東京・67年北九州・73年淀川等）の一因となった。これらの水需要の要請により多目的ダムの建設が一層進み75年末には国所管の170ダムを完成し、約74億 リットル /年の水資源開発が完了している。その中でも早明浦ダム（78年完成）は、四国全県の人口の約36%にあたる150万人の生活に影響する大きなプロジェクトであった。

利便性や住宅環境が社会生活循環を変えることで、個々のライフスタイルの変化は社会に対する要請や評価（価値観）をより鮮明にして建設産業、施工法に影響を及ぼすことになる。河川を排水対象といった機能主義から水辺環境を見直すといった転機もこの年代である。また74年に完成した東京海上ビルは、周辺環境と

※国民誰もが享受する権利を持つ最低限の生活水準

の美観論争を起し「美的価値観」を施工の評価項目とした先駆的事象である。また社会的要請は、社会資本の整備により達成された社会経済結果から新たな要請を生み出している。道路基盤整備の充実により発生した公害対策もその一つである。バイパス(生活圈と道路分離)や道路施設の充実、歩道設置は、道路の基本機能に他の機能も合わせて要求されたものである。一定の整備後は機能の多様化と高度化の要請となってくる。

建設産業への要請に注目すると、69年の第二次新全国総合開発計画(大規模プロジェクト方式)による新幹線、高速道路、大規模工業基地の構築にあたり大量、急速施工による施工効率化が主流となる※。この新全総は、新幹線、高速道路等の高速ネットワーク、遠隔地大規模工業基地などの大規模開発プロジェクトと称されるが、根底は経済と環境保全の両立にあったが、結果はこの思想が反映されない場面が多々あった。施工に求められた大規模、大量、急速施工という経済的側面に主として応えたのは、施工機械の多様化と高性能、高能力化である。※

その背景は、65年以降河川工事やダム建設ブームによる建設事業の多様化による建設機械の種類の増加、専門工種の分業化、リース産業の発足等がある。その成果の一端は、道路、鉄道トンネルの長大化に見る。その施工法は、ジャンボ掘削機の使用、ズリ運搬機械や施工の機械化システム改良(型枠の自動化、打設ポンプ改良等)による施工環境の改善と効率化によるものである。

コンクリート工事の分業化であるポンプ圧送は、高性能化して大量輸送が可能となり汎用化する。コンクリート打設の効率化(輸送量の拡大と迅速性)は、後年「施工不良」の潜在的要因となり、耐久性確保に問題を残した。その要因は、経済性の重視による急速輸送、大量施工および分業化が締固め、輸送量制御、養生等の工学的根拠による基本作業の施工目的を不明確にしたことにある。

さらに、この年代に同時進行した多くのプロジェクトは、コンクリートの構成材料である骨材問題を内在することになる。60年代後半に公害、環境問題が社会化し、環境保全対策の一環として河川砂利の採取規制が66年に行われた。その結果、不足する細骨材を補うために大量の海砂使用が始まった。特に西日本では、新幹線、高速道路の延伸工事の最盛期と重なり、瀬戸内海の家砂利用は顕著であった。この時期、簡易で精度の良い塩分濃度測定技術も未熟であり、特に規制はされず十分な水洗いもなく使用された結果、海砂に付着する塩分がコンクリート劣化の原因として後年問題を引き起こすことになる。海砂塩分量の規定は74年に土木学会「コンクリート標準示方書」の改訂を待つことになる。時代と共に施工を取り巻く社会、自然環境条件の変化が、施工の前提となる構成材料の品質にまで遡って検証を必要とする状況であることの警鐘である。コンクリートの主容積

※第二次全国総合開発計画は、新全総と称する

を占める骨材は各生産地による材種特性がありバラツキも多いことは、施工法の将来的にも大きな課題でもある。

前期の生活様式の変化による繁栄のあり方，社会環境，生活等の価値観が転換する時期となる。

3. 3. 5 安定期 1975 年～1985 年：昭和 50 年代²⁵⁾

高度成長期後期の「地方格差の是正＝ナショナルミニマム拡充」という社会資本の形成理念が，高度成長の終わりとともに財政的理由により大きく転換される年代となる。79 年策定「新経済社会 7 カ年計画」では，60 年代後半からの公共部門の拡大傾向に反省を促し「国民の生活関連社会資本の整備や社会保障の充実等の要求を高度成長期のような公共部門に依存した方法で充足すれば公共部門が肥大化し経済社会の非効率性を

もたらす恐れがある」と警告している。80 年頃から財政再建が最も大きな課題となり，公共投資は，81 年以降 85 年まで厳しく抑制されることになる。

社会経済環境の変化は，公共投資の理念を成長期の量的，効率主義から安定期の質的向上に変革させ，社会の価値観も大きく変えた。その現れとして，戦後一貫して続いた三大都市圏への人口集中も 78 年に終わり，「地方の時代」が流行語となる。生活感，社会観の変化に加え人口の年齢構成変化も価値観変化の大きな要素となった。76 年には戦後生まれが過半数となる。価値観の変化は，都市環境への関心となって社会資本整備の方向を転換させた。社会資本整備は，成長期の産業基盤整備から下水道，公園，都市河川，生活道路など身の回りの生活環境整備へと変化する。価値観は，生活の質やゆとりを重視し，余暇，レジャーを楽しむ生活の多様化現象となる。これらの変化を受け 77 年制定の第三次全国総合開発計画は，「従来の工業開発優先から国土の資源を人間と自然との調和を取りつつ利用し，健康で文化的住居の安定性を確保しその総合的環境の形成を目指す」としている。目標として全国を 200～300 の定住圏に分割し地方振興を図りながら新しい生活圏を確立する「定住圏構想」といわれ一極集中から分散化を意図した計画である。開発と自然，人間との関わりを見直し，国土の将来像を求めたとも言える。物質的，量的な豊かさと精神的，質的豊かさへの価値観変化といえる。この年代の後半 80 年には地球温暖化問題が提起され，85 年には環境問題がグローバル規模の共通課題に発展する。

産業構造にも変化が起きる。素材型の重化学工業から加工組立産業への移行である。高度成長期は社会基盤の量的拡大，拡張とともに鉄鋼、石油化学，造船等の素材型工業が発展したがこの時代に至り慢性的な不況に陥った。変わって自動車、家電、工作機械、エレクトロニクス等の付加価値のある技術集約型の加工

産業が活発化した。多くの産業では、付加価値を高める技術開発、研究開発への投資が高まった。産業構造の変化は、製品の重厚長大から軽薄短小への変化と高速道路網の整備、輸送力増強の両面により臨海部に限定された産業立地を内陸に拡大する。それを支える基盤整備面では、高速道路網と新幹線の整備が最終段階となる。76年近畿自動車道(東大阪～門真)、79年名神高速道路と中国自動車道直結、82年中央高速道路全線開通、九州自動車道全線開通等を経て高速道路延長は3,000kmを超える。83年中国自動車道全線開通、85年関越自動車道全線開通と引き続き延伸される。新幹線も82年に東北新幹線、上越新幹線が開業し、ほぼ高速道路、新幹線が日本を縦断した。78年に本四架橋児島～坂出ルートに着工、79年三島大橋完成、83年尾道～今治ルート完成、青函トンネル先進導坑貫通、85年明石大橋着工等々、日本列島連結の最終段階を迎える。

またこの年代は、将来を展望する新時代技術の試行がいくつか行われている。76年大飯原子力発電・出力117.5万kw、77年九州電力八丁原地熱発電試験開始・5万kw(80年5.54万kw)、81年電源開発仁尾太陽発電試験発電等のエネルギー開発や82年リニヤモータ有人運転等である。

この年代を総括すると、大都市から地方の時代、臨海から内陸と産業移転、産業基盤から社会生活基盤の整備、量的効率から質的向上、環境は日本から地球問題と様々な分野で大きな変革期である。成長期が終わり次の時代の選択年代ともいえる。

建設産業と施工法にも明らかな変化が窺える。前年代は、資機材の開発、改良による大量施工の急速化を機械力がなした年代であった。総じて施工法は、巨大なプロジェクトを可能にするほど発展進歩し、管理手法の精度も向上する。

将来の国勢による財政問題と生活環境基盤の整備が主流となりコスト縮減と環境保全に社会的テーマが転じその影響を受けることになる。

この年代を代表する施工技術を見ると、トンネル施工法における NATM(New Austrian Tunneling Method)工法、ダム施工法における RCD(Roller Compacted Dam Concrete)工法、長大吊橋施工法等の長大、巨大化する施工規模に対する合理化施工法の開発や高品質管理の確立、普及がなされた重要な年代となっている。その背景には、工学的研究や資機材料、測量技術等の他分野の発展がある。トンネル施工法「NATM.」は土圧を支保工により受ける従来工法と違い、地山の安定をモルタル吹き付けで図りアーチアクションで自立させる方法である。ラブセビッチ教授が1948年に出願した特許工法をもとに発展した。1975年オーストリアのタウエルン・トンネルで体系化され本格的に普及した。日本では76年上越新幹線の中山トンネル(82年完成)で最初に採用され、79年には向山トンネルが全区間を NATM 工法により完成している。この工法は従来工法の支保工と矢板組合せと比較

して、省人化による経済性と安全性、作業性等多くの点で優位な工法として急速に普及し、トンネルの標準工法となる。

ダム施工にも合理化工法が開発されている。従来の有スランブコンクリートに変わり超固練りコンクリート(スランブゼロ)を土工事に使用する汎用的重機による運搬、締固めにより施工する RCD 工法である。この工法は、ダム建設の地質条件による堤体積の増加に対応しセメント材料の低減と施工の合理化によるコスト縮減を目指した工法である。またロックフィルダム型式と比較して環境保全からも優位とされる工法である。74 年「コンクリートダム合理化施工検討委員会」の発足により開発が図られ 78 年に佐波川の島地川ダムに採用され、その優位性が確認され以降大規模ダムの施工法となった。

橋梁部門でも 76 年から本州四国連絡橋に係る各種の設計基準が制定され、長大橋の設計技術、施工法が一気に体系化される。設計法としてのたわみ理論、耐風設計に始まり、水中基礎、海洋気候等材料への影響等多くの技術や材料開発をともなった。高強度、水中不分離コンクリート、耐候性鋼材、高張力鋼の材料開発、施工における精度管理、非破壊検査技術等、列挙するには余りある数に上る。基礎掘削時の精度管理は、「多素子精密測深システム」で行われた。ビッグプロジェクトで工場管理システム同等の精密な施工管理を可能したのは、測量(GPS 活用)、計測技術(情報化技術)、コンピュータ(小型、高性能化)等電子技術の急速な発展が大きく影響している。

前年代に問題化したコンクリート塩分規制は、77 年コンクリート標準示方書改訂により塩分イオン重量比、81 年塩分総量規制により明確に示された。82 年には海砂塩分や飛来塩分による「塩害実態調査」が建設省道路局によりなされた。(その後塩分総量規制に加えアルカリ骨材制御対策が 86 年に建設、運輸両省より通達されコンクリート骨材に関する制御対策に関する通達、改訂が完了した)。

翌 83 年 NHK による「コンクリート劣化問題」、84 年「コンクリートクライシス」の放映によりコンクリートの耐久性が社会的問題となる。クライシスという言葉により「土木構造物」の存在、コンクリート物性の重要性が社会資本基盤の認識とともに一般化した。

社会的価値観の変化を示す事例もこの年代に見られる。77 年に行われた四架橋坂出～児島のルート選考は、環境評価案が工事目的の直接的評価に優先して採択された事例である。また都市河川の治水対策にもその影響が示されている。55 年以来人口や産業の都市への集中化は、周辺部の樹林地や水田を宅地化して形成された。その結果自然の保水、遊水機能が失われ、洪水が短時間に増大して浸水被害を頻発するようになった。これらの状況より治水の考えは、従来の堤防強化(浚渫、拡幅)や排水機場整備等の治水対策に代わり流域の保水、遊水機能を保存して

流出を抑える本来の河川機能に復する策に転換することになる(79 年総合治水対策が導入)。

この二例は、社会資本のあり方が機能最優先から自然の力、共生を重視に大きく変化をしていること明らかにしている。この変化は、三全総の「国土の資源を人間と自然との調和を取りつつ利用」の精神とも一致する。価値観の変化は、「自然」の見直しでもあることが読みとれる事象である。社会資本の提供方式が「与える」から「選択」への変化の兆しでもある。限られた財源、限られた資源を環境保全の中でいかに「有効活用」できるかの問いかけでもある。社会生活環境の変化とともに社会的価値観や認識が大きく変化してきたことを示している。

環境のグローバル化と共に経済市場の国際化の年代でもあり、建設産業を取り巻く市場変化が起きた年代でもある。オイルショック以降「造注」の言葉通り周辺関連分野への進出が模索され、その一つが海外市場への進出である。75 年香港の地下鉄受注をはじめイラン、イラクの中近東産油国が有望市場として開拓され 83 年に海外工事の受注額は 1 兆円を超した。国内では、財政再建策のため長期間の抑制を受ける公共投資に変わり、民間資金により社会資本を整備する発想が生まれた。民間活力の活用である。その代表的民活プロジェクトとして、東京湾横断道路、関西国際空港が着工されている。この民活は次年代のバブル経済と共に第三セクターによる地方開発を進めることにもなった。

3. 3. 6 バブル形成期 1985 年～1995 年：昭和から平成へ

国際化、地球規模といった世界的な経済、環境問題が日本社会に大きく影響する年代である。本格的な国際化時代を迎え、国内交流が高速化した反面、日本の港湾、国際空港、情報通信等の社会資本は、アジア諸国の整備と比較し設備規模、利用コスト、利便性等のソフト面で劣ることが問題となり、産業発展、国際競争力に悪影響を及ぼす懸念が生じ始めた年代でもある。国土の均衡ある発展と豊かな国民生活の実現というナショナルミニマム思想は社会資本整備の理念であるが、その整備における国際的対応が次の課題として具体化した年代である。

85 年プラザ合意の後半に生じた急激な円高不況と国内産業の空洞化対策として金融緩和、公共支出による内需拡大が図られた。内需拡大は 87 年総合保養地域整備法、88 年ふるさと創生事業、90 年公共投資基本計画「430 兆円」と連続的に法制化された。この需要拡大政策と大都市圏の地価高騰傾向が増幅しバブル景気が生まれた。バブル景気は、円の国際化から金融市場として活況する東京へ再び一極集中状況をもたらした。この背景から 87 年策定された第四次全国総合開発計画は、一極集中から多極分散型国土形成を骨子として地方に発展の可能性を与え、人的交流条件を整える構想となった。自然と人間を基調に国際化、情報化に対応

した地方都市開発である。具体的な交流ネットワーク構想の手段は、日本列島の高速連絡網配備である。先ず 14,000km の高規格幹線道路網の整備が掲げられ、91 年には高速道路は 5,000km に達している。鉄道も 88 年には青函トンネル開通、本州四国連絡橋瀬戸大橋開通、と日本列島が陸続きとなった。

建設産業の国際化は、88 年の関西国際空港、東京湾横断道路、明石海峡大橋他 17 件の大型公共工事に外国企業が参入することになり本格化した。

その他、臨海部から内陸部への産業移転による未利用の臨海工業地帯の複合都市再開発「ウォーターフロント」が都市拠点づくり事業として行われた。

地方圏では、県単位として空港、港湾をはじめ地域に不相応な社会文化施設などが第三セクターの事業として行われバブル景気を助長した。

建設産業の動向は、国際化とバブル景気の影響に大きく左右される一方、環境保全対策やその技術開発、維持補修技術等の新たな市場展開が始まった。

社会資本の整備思想は価値観の変化がこの年代に明確となり多くの建設分野で具体化する。生活基盤の整備は、主観的価値である住空間全体を捉えた街並みの景観、色調、配置といった美観評価に広がってくる。地域の歴史や風土、地域文化の見直しは、客観的価値観の量から主観的価値観の質への変化、多様化である。

92 年の都市計画法の改正では市町村のマスタープランを地域の人々の幅広い参加による策定することが義務付けられた。この発想は、従来の大きな与えられた空間から個々の社会生活基盤を考える発想とは異なり、小さな住居空間発想を広げ地域の個性を活かした地方都市を構築する新しい考え方である。

生活環境における自然との関わりが関心度を高める中で「多自然型川づくり」が脚光を浴びることになる[※]。自然を完全に制御できないことを前提にした人間と自然の共生思想で「豊かな生態系と美しい景観の創造」を目指したものである。前年代の河川機能の見直しによる治水対策から「洪水は起きるものとして、防御から最小被害を目的とする」97 年の河川法改訂の理念として継続される姿勢がより明確に示される。機能主義からの転換である。「自然との共生」が社会資本整備を進める上で大きな評価条件となった。自然が市民権を得たとも言い換えられる。

建設産業への要請に注目すると、価値観の変遷による社会資本整備の考え方、整備手法が確実に変わった年代である。価値観が機能といった客観的なものから「美的」「歴史、風土、文化」といった主観的なものに移行し、その評価を社会資本整備計画や実施に導入するシステムが課題となる。限られた財源で、継続可能な社会を維持発展させるためには、国民的コンセンサスを得るシステム、評価方式が不可欠となる。

※多自然型川づくり：スイス、ドイツで始められた近自然河川工法をモデルに極力自然に近い形での治水を考える方式

外国企業参加の国際入札を契機として建設業の入札制度の見直しが始まった。従来の指名競争入札制度に一般競争入札制度の導入と工事完成保証人制度から履行保証制度への移行が示され建設産業の体質改善が図られた。

少子高齢化社会の国勢を反映して、財政難に対応するコストダウンおよび国際競争力課題である内外価格差は、この年代より現在に至る大きな影響を建設産業にあたえている。特に95年「公共工事の建設費の縮減に関する行動指針計画」に示された10%の縮減目標は、表3.6に示す施策に分類できる²⁶⁾。

表 3.6 施工面におけるコスト縮減具体策

項 目	具 体 的 施 策 内 容
資機材	海外資機材利用
生産性の向上	構造物の規格化、標準化仕様、合理化、省人化施工法、情報の活用
技術開発	施工法、材料開発、設計基準の検討

具体的項目は、建設産業の生産システム、施工システムに密接に関連し施工法選択や技術開発、機械改良等ハード面の課題を突きつけた。

また表3.7に示す設計、発注、契約といったソフト面の段階に即応した課題も同時に提起した。

表 3.7 コスト縮減具体策・設計、契約等

項 目	具 体 的 施 策 内 容
発 注	発注ロット、発注時期の平準化
設 計	仕様、規格の標準化、規制緩和による性能規定
契 約	審査、認定等の手続きの簡素化

これらの項目は、発注者、資機材メーカ、流通業界を含んだ広範な課題となる。国際化に呼応する建設界の体制、業務の見直し要請と言い換えられる。つまり国内的要請に国際的要請が加わる時代の始まりである。

一方地球環境と自然災害も従来の考え方を見直す事象がこの年代に起きている。自然現象、異常気象は、従来設計のデータを越えた多くの災害をもたらした。93年の記録的冷害、同8月の記録的豪雨と翌年94年の記録的猛暑と渇水は、地球環境の異変が一端ともいわれている。この年代の後半には、91年普賢岳噴火、火砕流発生、93年北海道南西地震による津波、95年阪神淡路大地震と予測できない大きな自然災害を受ける。阪神淡路大地震の衝撃は大きく、日本の社会資本施設の安全神話を一瞬で崩壊した。災害に対してハード面の構造物的防災と同等に情報を含むソフト面の非構造物的防災の整備が社会的、経済的に重要であることを教訓として認識させた。また耐震基準は、二段階設計方式が導入され性能設計の概念が新たに加わった。仕様規定から性能規定にシフトも、ハード思考からの脱却

による新技術、新工法の導入効果を図るものであり、示方書の多くがこの転換を受けて改訂を進めることになる。

限られた財源による社会資本整備は、国民のコンセンサスの下に選択、優先度が必要となる。年代後半は、資本整備の「目的」をより明確に評価し、その情報を開示することが重要課題として提起される。

設計、技術面でも国際化、地球規模等から派生した「コスト縮減、環境、安全」が、従来と異なったキーワードとなる。地盤アンカーの構造物一体化や超高強度地下連続壁による仮設費削減、限界状態設計法における安全率、係数の見直し、土壤汚染対策技術、水質環境予測技術が該当する。

また情報通信分野の進歩は著しく、建設分野の計測技術や情報解析を進展させている。計測技術は、災害時データを蓄積して耐震、免震構造の開発、液状化対策技術に貢献した。GPS を利用した測量技術と連動した計測技術は、海上空港建設、普賢岳復旧での無人化施工等に展開する。

3. 3. 7 バブル崩壊、停滞期 1996 年～現在²⁷⁾

92 年の地価下落により経済は低迷しマイナス経済成長時代となる。社会資本の整備も 97 年の「財政構造改革、規制緩和計画」により公共事業に対し依存度の高い地方経済は大きな打撃を受け、不景気を増幅させて現在に至っている。

バブル期の公共投資に対する非効率性と不合理性の非難報道は、財政改革の必要性認識により社会資本整備の不要論にまで展開している。

先進国欧米を見ると、経済成長と国家安定の必要条件として高速交通体系、情報体系の再構築に投資を拡大している。戦争のない世紀で、将来の社会を考え、社会資本の重要性、必要性に関して、短期、長期的観点から何に投資すべきか冷静に論ずる時代となった。

98 年の第五次全国総合開発計画は、「21 世紀の国土のグランドデザイン」により将来の社会構築を示している。そのコンセプトを概観する^{28, 29, 30) ※}。

超長期の国土の姿を「4 つの国土軸で構成する庭園の島」と表現し、「歴史と風土に根ざした文化と豊かな生活様式を持つ人々が住む美しい国土が地球時代の我が国のアイデンティティ」との基本理念が示されている。これからの社会資本整備は「地域住民の厚生最大化」を基本として、国土、風土に合致した実行策が必要になる。価値観は、明確に量から質、機能から感性へと変革している。また社会構造も消費社会から循環型社会への方向転換をすることになった。エネルギーも自然の利用(風力、太陽光)技術が活発になり、総じて自然回帰の時代といえる。

※第 1 次～4 次の全総の延長線上にない計画として略称を使用せず「21 世紀のグランドデザイン」が正式名称

建設産業への要請は、国土グランドデザインの具体的な推進に方向づけられる。その具体策をみると

①多自然住居地域の創造 ②大都市のリノベーション ③地域連携軸の展開
④広域国際交流圏の形成 の4施策から構成されている。これらの4施策は「参加と連携」をコンセプトとして人口600万～1000万の地域が国際経済的に自立していける社会の構築を目標にしている。広域圏ごとの社会資本の整備計画と投資のあり方が、今後の全体社会の方向を決定づけることになる。

緊急に対応すべき要請として環境問題がある。建設産業の生産活動が多くの面で環境負荷発生源となり、緊急の対応策が必要な課題となっている。

発生源は、①材料、使用機械からの二酸化炭素の発生②施工による廃棄物の発生および建設公害である。発生源は、材料、機械の使用を含め工学、化学、機械等複数分野の総合的課題となる。

炭酸ガス発生抑制は、97年地球温暖化防止京都会議により二酸化炭素の削減数値目標(2008年～2012年の間に1990年比で5%の削減)が設定され世界的に環境意識の高揚とともに日常的意識となった。

施工法の評価面でも二酸化炭素発生は、主要な位置付けをされて考察されている。主なる発生源はコンクリートの主材料であるセメントと建設機械の化石燃料、電力等である^{31,32)}。現時点での発生源対策は、セメントに変わる新素材の開発よりも「セメント使用量」の減量化となる設計(安全率、設計手法)、構造(建築の鋼管コンクリート構造 CFT)や形状の見直しおよび仮設構造物の活用化(地下連壁)工法等の研究が多くなっている³³⁾。

一方廃棄物発生抑制の観点による二酸化炭素の発生抑制は、「耐久性設計による」品質向上を図り、更新構築を最小限にする考え方や蓄積構造物コンクリートの長寿命化を図る方法、システムの研究等が現在多くの分野で進行中である。

99年に発生した山陽新幹線トンネルコンクリート塊落下事故以後、コンクリートの長寿命化に関する維持補修技術や診断方法の要請が急速に高まっている。

国の機関である国土技術政策総合研究所では社会資本ストックの延命化実現のため、維持管理技術を体系化した「戦略的ストックマネジメント計画システム」を2004年までに完成し、施設ごとの役割や特性に応じて計画的維持管理を行い更新の平準化を図るとしている。「構造物診断、維持、管理」は、既に構築されたものが対象であるが、これから造るものを対象にする場合、「何をすべきか」という問いかけに対して、土木学会は、89年「コンクリート構造物の耐久性指針(試案)」の試案をまとめている。その改訂が96年「コンクリート構造物の耐久性指針(案)」として発刊されている。環境指数、耐久指数等の諸指数による設計、施工に至る具体的指針である。耐久性の重要性を施工面で体系的かつ数値表現で示された指

針は、本研究の指針ともなった。

二酸化炭素の発生と共に環境保全課題である廃棄物の発生制御は、施工にかかわる要素である材料開発と施工法の技術改良が進んでいる³⁴⁾。廃棄物に関する研究は、91年廃棄物処理法、副産物に関する総プロ（92～96）よりの実質10年に急激に件数を増している。施工法や施工管理面で具現化されている手法は、発生抑制とリサイクルの組合せにより実施されている。

表3.8は発生抑制・分別・リサイクルを三手段により実施している建築現場の一例（材料規格、ゼロパック、材料再生の具体化）である³⁵⁾。

表 3.8 廃棄物発生抑制対策

対策	百分率	分別品目	リサイクル製品
ゴミの発生抑制	25%	柱等実寸注文・梱包材の簡素化	
徹底分別による再資源化	45%	25% コンクリート塊、金属スクラップ、段ボール	再生砕石、鉄筋、かたどり管
		8% 石こうボード端材	石こうボード
		12% 木屑	床材
リサイクル先の開拓	30%	20% 廃プラスチック	コークス代替品
		10% 混合廃棄物	ゴミ発電燃料、舗装ブロック原料化

廃棄物の発生制御は、リサイクル材活用と建設発生材の分別、加工製品の適用規格化等、コスト縮減、省力化とも連動する項目も多く今後の施工法にとって必要条件となる。

施工法は、従来の「造る」ことの目的からは、「長寿命化」、造った物へは「維持管理」、造る方法では「環境評価」、その思考は「ソフト面」発想を必要とする等々の大きな転換期を迎えている。また社会経済環境面からは、更なるコスト縮減策や少子高齢化対策としての省人、合理化が求められている。このような施工環境の厳しさに加え、高品質、長期耐久性の確保が一層強く求められている現況から、施工管理の見直しも重要な課題となっている。

3. 4 まとめ^{36, 37, 38)}

戦後から現在に至る間の年代を6区分し、社会情勢と社会経済の開発計画による建設業界、施工法、施工技術の変遷を概観した。年代ごとの国勢や社会生活環境の要請は、産業基盤、社会生活基盤の整備順位を決める。国土を縦横する基盤施設の構築は、多くの自然条件や社会環境に対応する施工技術、施工法を要請した。その成果は、施設構造物である道路、鉄道、河川、港湾、空港等に分類、体系化されて発展してきた。建設産業は、2章に示す通り多くの特殊性をもちその生産活動を行っている。その生産活動の手段である建設技術、施工法の変遷は、

時代の要請，評価により方向付けられ発展をしてきた．その変遷を検証することで将来の展望と施工法の発展に潜在する問題点を考察した．

(1) 施工法変遷と社会要請の関連

① 工事構成要素による工法選択

年代による工事要素の状況が経済性や効率性に大きく影響して設計，計画を決める．構造物型式は，その影響を反映して決められる．施工法はその決定に追随して選択される．産業基盤による材料供給と輸送力，国勢による労働力，機械化，動力等の需要と供給の関係が主要因である．材料の減量や構造物型式の選択はその設計法の整備と材料の物性確保が前提となる極めて工学的な選択といえる．産業基盤の未整備期のダム工事において，材料の供給，品質の確保，および経済性課題に対して潤沢な労働力を有意とする形状を決定した例は，年代の社会情勢の典型である．当時の評価は，経済性と品質確保，短縮施工等が考えられる．

近年，工事要素や構築対象物の主目的とは無関係な要素の組合せが，構造物型式の選択や施工法の選択をするケースがある．工事全体の評価を決する項目が社会的価値観の変化により客観的性能から主観的要素にシフトされたためである（施工評価例として第7章にて検証する）．

② 時系列での工法選択

工事全体を設計，計画段階で評価し，それに対応する工事要素を施工段階で再評価する場合もある．現場打設工法に替えてプレキャスト製品の採用例は，施工の効率化，高品質，工期短縮化と経済性比較により選択された施工法である．施工段階の選択要素は，一般的に省力化，合理化による経済性や品質の確保，迅速性である．近年は，前述の直接的施工要素ではない環境保全，廃棄物発生等の要素が施工選択要因に加わる例が多い．環境評価や自然環境，社会環境保全の評価は，計画，施工，何れ段階でも不可欠要素となりつつある．

国勢である少子化，熟練労働者不足に対応する製品化や高品質化，環境対応（型枠転用等）となる「プレキャスト化」は，今後多用される施工法といえる．

工事構成要素からの施工法選択を時系列で整理すると

- ① 一般的には施工段階での選択となる場合が多い
- ② 選択の要素は省力化，合理化による経済性や品質の確保，迅速性である
- ③ 評価項目は，年代の社会経済情勢や価値観により優先順位が決まる．そのため工事要素以外の主観的评价等が優先する場合や工事の緊急性による場合もある．

(2) 年代による施工法の変遷の考察

日本の近代社会資本は，戦後復興期より整備，蓄積されてきた．その基盤施設

を構築した土木施工法の変遷について10年を単位に社会の動向との関連を考察し、次のような結果を得た。

- ①工事構成要素による施工法選択は、社会経済状況による評価項目と時系列により判断される。設計、計画段階で基本的な工法が決まり、施工段階では、機械化、効率化といった経済的評価による選択となる傾向にある。
- ②施工の機械化目的が工種単位の効率化による経済性として採用された場合、本来の施工法との関連が不明確になる場合がある。施工完了後の問題を内在した。
- ③時代の要請は産業基盤整備から社会生活基盤の整備に至り、単一目的から多目的に推移する。成長期には、施工環境である過密化都市での施工に対応する施工法の開発が要請される。自然条件、技術条件が同等でも建設地の周辺環境等により施工法の開発が要請される。自然条件、技術条件が同等でも建設地の周辺環境による施工法の細分化、多様化が要求される。その結果、専門工種が分業化される。建設産業の構造も時代の要請による影響を受け推移する。
- ④施工法の体系化は、機能別の産業基盤整備により体系化された
- ⑤年代により工法の機械化と合理化に区分される

成長前期は「産業基盤の早期整備」、単一的な「急速施工」を工種単位の機械化施工により遂行される。施工法の主材料である鉄鋼の高品質化と供給により機械化が促進される。機械化の条件に施工材料の品質と供給が大きな影響を及ぼす。安定期は小子化、コスト縮減、環境保全、安全性等々の多目的に全体的「工法」により合理化を遂行。対象構造物により体系化される施工法は、多くの専門工種と汎用工種より構成されている。体系化された工法は、工学的設計を背景に材料、機械開発を含めたものとなる。

- ⑥社会的要請への対応方法は年代の進展とともに単一工種から全体工種によるシステム化へと推移する。安定期以降、社会的要請は「造る」ことに価値観を付加した要請となる。従い施工法も体系化した構成工種と施工管理面を含めた対応が必要となる。バブル以降この傾向が更になる。
- ⑦プロジェクトにより多種多様な工種での新工法、技術改良が進む。その開発は多分野を必要とする。その成果が他工種の進展を誘導し施工法全般に影響する。
- ⑧バブル期以降、施工法の評価に社会の価値観が直接影響をするようになる。
時系列的にも計画、設計段階の事業計画から施工段階の細部施工まで影響を及ぼすようになった。
- ⑨工法評価基準となる価値観が客観的な機能から主観的な「文化、美」に変化した。事業目的やその手段の明確化や合意形成システムが工法選択に大きな影響を与える。造るという施工法の機能目的が社会、地球価値観等の間接的項目により評価される。施工法の手段を「社会資本整備」の二次的概念とすべきであ

る。概念が「つくること」から「つくりかた」に変化している。

- ⑩国際化、環境保全等のグローバル課題が、建設産業、施工法に新分野と基本回帰の課題を提起している。新分野とは「造る機能」から「維持する」機能の施工法である。維持するための診断、補修技術とそのシステム化された施工法の確立を要請されている。基本回帰とは、地球命題である環境保全の見地による環境負荷低減に関する施工法目的の本質を問うことである。造るものの所要物性値を満足させる、物性値の時系列指標となる「耐久性」を向上させる施工法を見直すことである。耐久性を向上させるため施工の重要性を施工面で体系的かつ数値表現で示された指針は、第一章に示す本研究目的の論拠でもある。

一般的に施工法による構築の最終目的である機能は、コンクリート工の物性値が担っている。つまり工学的担保による施工法が施工段階の細部手段に反映されているかの問いでもある。特に阪神淡路大震災や山陽新幹線のコンクリート剥落がその警鐘、要請ともいえる。

- ⑪国際化の影響は、建設産業の在り方が問われている。その要請から施工法には、生産性の向上や設計手法の見直しの他、性能照査型による自主的な施工法の選択が必要となる。

施工法と社会的要請は不可分であり、方向性もそれに左右されていることが明白となった。年代による施工法の概観ではその方向性を展望するには不足する項目がいくつか明らかになっている。大きくは、3点である。

- ①多様化、多機能化する施工法の定義が必要である。
 - ②価値観の変遷と動向を分析する必要がある。
 - ③既存の評価法を考察する必要がある
- これらの項目は、別章にて検証する。

表 3.8 社会資本形成と施工法の変遷年表－1^{39～45)}

<p align="center">《戦災復興期 1945 年～1955 年昭和 20 年代》</p> <p>「社会テーマ」:「戦災からの復興」</p> <p>「土木技術に課せられた目標」: 国土復興と自然災害復旧, 輸送力増強</p> <p>「社会資本の動向」: 食料の確保, 国土復に関わる治水治山, 住居確保に関わる土地区画整理が命題の時代 45 年の人口 7200 万人</p> <p>「自然災害」(数字死者)</p> <p>45 枕崎台風 3756 人, 三河地震 1961 人 ・46 北海道地震 1464 人</p> <p>47 カスリーン台風(利根川, 北上川氾濫)2247 人, 浅間山噴火</p> <p>48 アイオン台風 2368 人, 福井地震 3769 人 ・49 キティ台風 160 人</p> <p>50 ジェーン台風 509 人 ・51 ルース台風 1200 人 全国異常渇水</p> <p>52 十勝沖地震, 鳥取大火 5200 戸焼失 ・53 南紀豪雨 1124 人, 13 号台風 478 人</p> <p>54 洞爺丸台風 1155 人 ※戦後 45～48 年の 4 年間で自然災害により 12,000 人の死者</p> <p>「公共事業関連法案・国土計画・経済計画」</p> <p>45 戦災復興院設置 ・46 特別都市計画法・第二次農業改革・復興金融公庫</p> <p>47 国土計画計画審議会設置 ・48 建設省設置 ・49 農林, 通産省設置・国鉄発足</p> <p>50 建築基準法, 国土総合開発法公布</p> <p>51 河川総合開発事業開始 ・9 電力株式会社発足</p> <p>52 道路法一級国道 41 路線指定・電源開発促進法・食糧増産 5 カ年計画</p> <p>53 港湾整備促進法 ・54 第一次道路整備計画</p> <p>55 治水 5 カ年計画(建設省)・日本住宅公団設立・農地開発機械公団設立</p> <p>「新技術, 施工法, 材料, 設計, プロジェクト, プロローグ」</p> <p>47 ☆国鉄「土木標準示方書」制定 ・48 ☆AE 剤導入</p> <p>49 ☆レディミックスコンクリート販売開始 : 朝鮮戦争特需</p> <p>50 高張力鋼(50 キロ級)・☆コンクリートポンプ車の国産実用機開発 ☆JISR5210「ポルトランドセメント」制定・フライアッシュ紹介</p> <p>51 バッチャープラント国産化開始・小型ディーゼルハンマー国鉄による輸入</p> <p>52 我が国初の PC 橋(長生橋完成)・サンドドレーン工法工法採用(長崎港護岸復旧) 東京国際空港(羽田)供用開始 : 国民所得約 60,000 円</p> <p>53 初のウエルポイント工法(名古屋鉄道名古屋駅)・初のポストテンション方式 PC 橋(福井県東十郷橋)・参国国道改良工事完成(初の有料道路)</p>	<p>53 ☆JISA5308「レディミックスコンクリート」制定</p> <p>54 戦後初の地下鉄開通(丸の内～御茶ノ水)・初の列車集中制御装置採用(京浜急行久里浜線)・ディゼルパイルハンマー開発・モータスクレーパー開発・ベノトボーリングマシン国鉄による輸入・丸山ダム完成 : 神武景気「冷蔵庫, 洗濯機, テレビ」三種の神器 水道用ダクタイル鋳鉄管生産</p> <p>55 初のトンネル全断面掘削工法(東上田発電所 4 号 T)・同工法を鉄道工事で採用(飯田線大原 T)ジャックボドリル使用・我が国初の高堰堤アーチ式上椎葉ダム・鋼アーチ(支間 216m)西海橋完成・堰堤基礎に初のニューマチックケーソン(姫川第三発電) 60 キロ級高張力鋼生産・上松川橋(道路 PC 橋) ☆土木学会「PC 設計施工指針」制定</p>
<p>「新技術, 施工法, 材料, 設計, プロジェクト, プロローグ」</p> <p>47 ☆国鉄「土木標準示方書」制定 ・48 ☆AE 剤導入</p> <p>49 ☆レディミックスコンクリート販売開始 : 朝鮮戦争特需</p> <p>50 高張力鋼(50 キロ級)・☆コンクリートポンプ車の国産実用機開発 ☆JISR5210「ポルトランドセメント」制定・フライアッシュ紹介</p> <p>51 バッチャープラント国産化開始・小型ディーゼルハンマー国鉄による輸入</p> <p>52 我が国初の PC 橋(長生橋完成)・サンドドレーン工法工法採用(長崎港護岸復旧) 東京国際空港(羽田)供用開始 : 国民所得約 60,000 円</p> <p>53 初のウエルポイント工法(名古屋鉄道名古屋駅)・初のポストテンション方式 PC 橋(福井県東十郷橋)・参国国道改良工事完成(初の有料道路)</p>	<p align="center">《高度成長前期 1956 年～1965 年昭和 30 年代》</p> <p>「社会テーマ」:「高度成長経済への移行」56 年経済白書「戦後ではない」宣言</p> <p>「土木技術に課せられた目標」 重厚長大型社会資本整備 都市化に対応する生活(交通, 水, 住居)資本整備の短期達成</p> <p>「社会資本の動向」: 産業基盤の拡大(臨海工業地帯)地域的集中投資による新産業都市建設・輸送手段の整備(交通網の拡充)と人口集中による都市化に対応する上下水道整備・治水利水による多目的ダム建設 61 年所得倍增計画</p> <p>「自然災害」(数字死者)</p> <p>57 九州西部水害 964 人 ・58 狩野川台風 1269 人 ・59 伊勢湾 5041 人</p> <p>60 チリ沖地震津波 ・61 第二室戸 202 人, 梅雨豪雨 357 人, 伊奈谷土石流災害</p> <p>63 日本海側豪雪 ・64 新潟地震 25 人全壊全焼 3019 戸, 東京都異常渇水</p> <p>「公共事業関連法案・国土計画・経済計画」</p> <p>56 科学技術庁・日本道路公団設立・首都圏整備法, 海岸法, 都市公園法, 工業用水法 空港整備法等公布 ・57 国鉄第一次 5 カ年計画, 技術士法, 水道法制定公布 高速自動車道法, 多目的ダム法公布 ・58 道路構造令公布, 地すべり等防止法公布</p> <p>59 首都高速道路公団設立 ・60 新宿副都心計画決定, 治山治水事業 10 カ年計画</p> <p>61 国鉄第二次 5 カ年計画, 農業基本法, 災害対策基本法, 宅地造成等規制法公布</p> <p>62 全国総合開発計画(拠点開発方式)・第一次港湾整備 5 カ年計画</p>

表 3.8 社会資本形成と施工法の変遷年表－2

<p>62 水資源開発公団・阪神高速道路公団設立, 新産業都市建設促進法公布 ・63 新住宅市街地開発法公布 ・64 日本鉄道建設公団設立, 新河川法, 宅地造成事業法公布</p> <p>65 第一次下水道整備 5 カ年計画・首都圏整備法改正公布</p>	<p>：いざなぎ景気・年間総労働時間 2315 時間・戦後初の赤字国債発行</p> <p>その他</p> <p>60 年代より海砂の使用が増加, コンクリート施工の分業化が始まる・杭施工法でアースドリル・ベノト・リバースサーキュレーションが採用・デッキプレート・ハイデンションボルト(材料)が使用される</p>
<p>「公共事業関連法案・国土計画・経済計画」</p>	<p>《高度成長後期 1966 年～1975 年昭和 40 年代》</p>
<p>56 東海道本線全線電化(米原～京都)・佐久間ダム完成(重力式コンクリートダム, 機械化施工)大原トンネル(鋼製支保工使用)：女子就業者数が雇用労働者の 30%を越す</p> <p>57 初の地下商店街開業(名古屋駅前)・地下鉄(栄～名古屋)開通・モノレール開通(上野公園)・名神高速道路, 愛知用水着工・小河内(東京都水道用水), 井川(初の中空式重力ダム), 鳴子ダム完成(薄肉アーチダム)・八郎潟干拓業起工・サトコンパクション工法</p> <p>58 関門トンネル(ルーフシート初使用)開通・大阪国際空港供用開始・東京タワー完成 東京～大阪「こだま」6 時間 50 分(110km/h)：栄養白書「4 人に 1 人が栄養失調」藤原. 相俣(利根川), 大倉(名取川)ダム完成</p>	<p>「社会テーマ」：「高度成長経済の熟成とひずみ課題」</p> <p>「土木技術に課された目標」</p> <p>大規模開発, 大量生産, 急速施工</p>
<p>59 東海道新幹線起工・世界初の真空沈設工法(神戸港)・初の可逆式ポンプ水車による揚水発電(大森川)・芝浦下水場拡張工事完成・城ヶ島大橋(本格的鋼床版箱桁)完成 北陸鉄道トンネル完成(21 ブームジャンボ, 460m ロープサスペンションコンパクション使用)</p> <p>60 名神高速天王山トンネル H 型鋼アーチ支保工初使用・80 キロ級高張力鋼・田子倉ダム完成・バイプロパイルハンマー輸入・スパイラル鋼管</p>	<p>「社会資本の動向」：高度成長の基礎となる産業発展に対応する社会資本の充実(高速道路網整備と大都市住宅の大量供給)更に 72 年列島改造論による国土の大規模開発が進む 一方「地方の過疎化, 高度経済成長とひずみ＝公害(ヘドロ等)の顕著化・71 年東京都ゴミ戦争宣言」等の対応. 年代後半高度成長の終焉を示すー73 年オイルショック, 74 年戦後初のマイナス成長</p>
<p>61 愛知用水完成(年間給水 2.5 億 m³, 幹線水路 112km)・消雪パイプ埋設道路(長岡市) 御母衣(大規模ロックフィル, 21.5kw, 795 万 m³)ダム完成・金慶橋(アルミニウム合金合成桁)完成：大都市圏への人口流入ピーク・核家族化が進み全世帯の 70%弱</p> <p>62 北陸トンネル(鋼支保工, 大型掘削機採用)・若戸大橋開通(鋼製長大吊橋)・都市トンネルでシールド工法(覚王山)・PC 杭の初使用(首都高速 1 号線)・奥只見, 畑薙ダム完成 東京ー新潟間天然ガスパイプライン完成・リバースサーキュレーションドリル機輸入・ポリエチレン樹脂管生産・高性能減水剤発明</p>	<p>「自然災害」(数字死者)</p> <p>66 台風 26 号 314 人 ・67 西日本干害, 長崎異常渇水 ・68 十勝沖地震 50 人・飛騨川バス転落事故(74 年判決) ・72 梅雨前線による全国的豪雨 444 人 ・73 高松市他渇水</p> <p>74 台風 16 号多摩川決壊・伊豆半島地震 ・75 大分中部地震・東北地方集中豪雨渦・石狩川破堤氾濫</p>
<p>63 青函トンネル調査抗開始・首都高速 1 号完成・黒部川第四発電所(25.8 万 kw, H=186m) 完成・名神高速道路尼崎～栗東開通・初の横断歩道(大阪駅前) ☆セメント製造省エネ型 SP キルン導入(アルカリ分増加)</p> <p>64 東海道新幹線東京～大阪開通・新丹那トンネル完成・羽田モノレール開通・伊勢湾高潮防波堤完成・琵琶湖大橋(鋼床版箱桁橋)完成・首都高速道路羽田海底トンネル貫通 大阪高速道路 1 号新大阪～梅田開通・青函トンネル着工</p> <p>65 名神高速道路全線開通・商用原子力電気送電(東海村)・UOE 方式大径鋼管製造 富士山レーダ運用開始 ☆この頃からポンプ車圧送が普及</p>	<p>「公共事業関連法案・国土計画・経済計画」</p> <p>66 新東京国際空港公団設立, 高速道路国道の構造基準設定</p> <p>67 公害対策基本法公布. 京浜, 阪神外易埠頭公団設立 ・68 都市計画法, 騒音規制法公布</p> <p>69 新全国総合開発計画(大規模プロジェクト方式), 土木施工管理検定制度制定</p> <p>70 本州四国連絡橋公団設立・水質汚濁防止法・道路構造令改正公布・自動車重量税 過疎地域対策緊急措置法・公害国会で公害関係 14 法案成立</p> <p>71 環境庁発足・騒音環境基準制定 ・72 自然環境保全法, 労働安全衛生法公布・列島改造論・沖縄開発庁設置 ・73 工場立地法・都市緑地保全法公布・初の環境白書</p> <p>74 国土庁発足・地域振興整備公団発足・国土利用計画法公布</p> <p>75 宅地開発公団発足・下水道事業団発足・初の国土利用白書</p>

表 3.8 社会資本形成と施工法の変遷年表－3

<p>「新技術、施工法、材料、設計、プロジェクト、プロローグ」</p> <p>66 松川地熱発電所建設完成・川俣(鬼怒川)、菰原(利根川)ダム完成・尾道大橋(PS アンカー工法)・天草 5 橋(長大鋼トラス)完成・上越線新清水トンネル(ジャンボ掘削機使用) : 貨物輸送で自動車が鉄道の分担比をこえる ☆河川砂利採取の規制・PC パイル実用化</p> <p>67 四日市ぜん息大気汚染公害訴訟・首都高速全線開通・千里ニュータウン・矢木沢ダム完成・神戸港摩耶埠頭完成・阪神高速道路福島第一高架橋完成 ☆示方書への人工軽骨材の採用・高炉スラグ微粉末、膨張材 : 国民中流意識 90%以上</p> <p>68 下久保、大津岐ダム完成・東名高速道路部分開通・都営地下鉄 1 号全通・琵琶湖総合開発事業着工・利根大堰完成・京葉シーバース完成・霞ヶ関高層ビル ☆ 建設省「PC 道路橋示方書」制定・高強度鉄筋モルタル杭開発 : 住宅戸数が世帯数を超す</p> <p>69 東名高速道路全線開通・印旛沼開発、八郎潟干拓事業完成・梓川電源開発(90 万 kw) 鹿島港海港・高山ダム完成・イオウ酸化物大気汚染環境基準 ☆超早強ポルトランドセメント</p> <p>70 万国博覧会開催・山陽六甲トンネル完成・安治川防潮水門完成・吉井川橋梁・神戸大橋・加古川橋等完成・京葉線羽田トンネル(密閉型シールド工法) : 大阪地下鉄事故 78 死亡 ☆超速硬セメント導入・高強度 PC 杭開発</p> <p>71 多摩ニュータウン完成・成田空港着工・札幌市営高速南北線開通・福島原子力発電運転開始・利根川河口堰完成・鹿島臨海工業地帯生産開始 ☆耐震設計技術の普及 : 旅客輸送で自動車が鉄道を逆転する</p> <p>72 山陽新幹線 大阪～岡山開通・北陸自動車道部分開通・東北自動車道宇都宮～岩槻開通(低盛土方式) : 公害苦情件数ピーク・冷蔵庫、洗濯機普及率 90%・外食費 7.6%・米の生産調整始まる新戸住宅戸数戦後最高水準</p> <p>73 関門自動車道、中国自動車道、関門大橋完成・九州自動車道一鳥栖～南関開通 : オイルショック・狂乱物価 ☆73 頃骨材不足深刻化</p> <p>74 中央自動車道恵那山(TBM 全段面)・山陽新幹線新関門導坑全通・安芸トンネル開通・香川用水完成・加治木、土師ダム完成・中国、東北自動車道部分開通・石狩、真名川ダム完成・土圧式シールド工法開発 ☆土木学会「RC 示方書」改訂海砂塩分量規定、一般 RC—NaCl 換算 0.1%以下、海砂問題 : 美観論争東京海上ビル竣工、経済マックス成長</p>	<p>75 山陽新幹線岡山～博多開業・中央自動車道中津川～瑞浪開通(恵那山トンネル) 東京港海底 T 貫通、池田ダム(吉野川)完成・関越自動車道 川越～東松山開通・北陸自動車道 丸岡～福井開通・流動化コンクリート普及 : 沖縄海洋博・香港地下鉄日本企業受注・加治川水害訴訟・大阪空港公害訴訟・カラーテレビ普及率 9 割</p> <p>その他 : 動的設計法(超高層建物)・耐震設計・石油類地下タンク設計法及び環境アセスメント。 工法としては、長大トンネル施工法・地下大空洞建設技術等は成長期の特徴、地下連続は地中構造物(都市部)の増加と共に進歩、施工は材料、機械の進歩があった。例は、コンクリート圧送・大型 H 型鋼・軽量骨材等の普及、開発利用がある。 70 年頃海砂、山砂の多使用・60 年後半頃 有限要素法、CAD の導入がある。</p> <p>《安定期 1976 年～1985 年昭和 50 年代》</p> <p>「社会テーマ」 「人間住居の総合的環境の整備」開発から自然との調和による健康で文化的生活圏の構築</p> <p>「土木技術に課された目標」 環境問題への対応、経済性の追求、都市空間の有効活用</p> <p>社会資本の動向 : 高度経済期の産業、国土開発から国土資源を人間と自然の調和を図り健全な総合的環境が目標となる。一極集中から地方分散での定住構想でもある。年代後半では、地球規模の環境保全が大きなテーマとなる。生活重視による価値観の変革時期</p> <p>「自然災害」(数字死者)</p> <p>76 台風 17 号により長良川堤防決壊、小豆島土石流・鹿児島集中豪雨シラス災害 77 有珠山噴火・日本海側豪雪 ・78 伊豆大島地震、宮城沖地震・新潟集中豪雨・妙高土石流災害・福岡市洪水 ・79 御岳山噴火 ・80 東北地方冷害、被害面積 289 ㌥</p> <p>81 石狩川水系氾濫、利根川支線小貝川破堤 82 長崎水害 299 人・台風 10 号国鉄富士川橋梁流失(河床洗掘)・千曲川支線樽川破堤 83 台風 10 号千曲川本川決壊・日本海中部地震(津波)102 人・山陰地方集中豪雨 84 長野西部地震 29 人・日本海側大豪雪(45 に匹敵)</p>
---	---

表 3.8 社会資本形成と施工法の変遷年表－4

<p>「公共事業関連法案・国土計画・経済計画」</p> <p>76 国土利用計画、初の環境アセス(川崎市)・振動規制法公布：ティートンダム崩壊</p> <p>77 第三次全国総合開発計画(定住圏構想)</p> <p>78 第8次道路整備計画・県レベル初環境影響条例(北海道)・大規模地震対策特別措置法</p> <p>79 初の交通公害白書 ・80 過疎地域振興特別措置法</p> <p>83 第9次道路整備計画・湖沼水質保全特別措置法 ： 毎年の減反目標 670ha となる</p> <p>84 電気通信事業法、テクノポリス構想(15 地域指定)</p> <p>85 首都改造計画、男女雇用機会均等法</p>	<p>電源開発仁尾太陽熱試験発電・島地川ダム(RCD 工法) ： 入札談合問題指摘 耐候性鋼による第三大川橋梁完成</p> <p>☆建設省総プロ「コンクリートの塩分総量規制」・新耐震設計法・飛来塩分問題化</p> <p>82 初の石油地下備蓄実証プラント完成・中央高速道路全線開通・上越新幹線大宮～新潟 開通・東北新幹線盛岡～大宮開通・九州横断自動車道全線開通・リニヤモータ有人運 工法中山トンネル(日本初の NATM 採用)完成、</p> <p>： 高速道路 3,000km 達・高知地滑り訴訟長良川水害訴訟共住民勝訴</p> <p>☆建設省道路局「塩害実態調査」・JISA6204 コンクリート用化学混和剤制定</p>
<p>「新技術、施工法、材料、設計、プロジェクト、プロローグ」</p> <p>76 泉大津大橋(ローゼ橋)・東北新幹線阿武隈橋梁コンクリート橋梁鉄道橋世界一径間 岩屋、草木ダム完成、近畿自動車道 東大阪～門真開通・大飯原子力出力 117.5 万 kw ☆高炉スラグ紹介 ： 戦後生まれ過半数となる・自動車台数 3000 万台越す</p> <p>77 真名川ダム完成(日本最大アーチ式ダム)・九電八丁原地熱発電試験開始 5 万 kw 鉄道、道路で初の環境評価案提示(児島～坂出ルート)・六甲大橋(ダブルデッキ斜張橋)</p> <p>☆土木学会[RC 示方書改訂]海砂塩分量、塩分イオン重量 0.006%以下規定、凍結防止剤 (塩化カルシウムから塩化ナトリウムに変化)・超遅延剤開発</p> <p>78 新東京国際空港開港・長良川河口堰工事着工・本四架橋児島～坂出ルート着工 早明浦ダム、寺内ダム完成・有明干拓事業完成・リニヤモーターカー347km/h ： 東京圏人流入止まり「地方の時代」・綾土橋工事中落橋・杉並清掃工場工事協定 ☆建設省「土木工事に係わるコンクリート細骨材としての海砂使用について」通達 ☆「道路橋示方書Ⅲコンクリート編」改訂・土木学会「PC 標準示方書」改訂 ☆JISA5308「レディミックスコンクリート」塩分量規制・環境問題2次水再利用</p> <p>79 幕張人工海浜完成・向山トンネル(我が国初の全行程 NATM)・上越新幹線清水 T 貫通 本州四国連絡橋公団大三島橋完成(日本最長アーチ橋)・名神高速と中国自動車道直結 手取川ダム(大型機械施工導入、転圧工法の発展、土質物性把握向上) ☆水中不分離コンクリート西ドイツ技術輸入</p> <p>80 山神、白川、御所ダム(複合ダム)完成・九電八丁原地熱発電 5.54 万 kw(世界最大) ： 地球温暖化問題・東京都人口戦後初の減少・明日香村保存法成立、新幹線訴訟住民敗訴</p> <p>81 神戸ポートアイランド完成(日本初ダブルデッキ長大橋、底開式バージ採用埋め立て)・島地 川ダム(初の RCD 工法)・新高瀬川発電所(東洋一揚水式 128 万 kw)・寒河江ダム完成</p>	<p>83 青函トンネル先進導坑貫通・中国自動車道全線開通・本四架橋尾道～今治ルート完 ☆NHK「コンクリート崩壊、忍びよる腐食」によるコンクリート劣化の報道 ： 三陸鉄道(初の第三セクター開業)・建設産業海外受注 1 兆円</p> <p>84 首都高速道路全線開通・関越トンネル開通(道路トンネル最長)・異形断面シールド工 法採用(東京電力管路) ： 国民 2/3 がマイカー所有・大東、長良川水害訴訟判決 ☆建設省「生コン中の簡易塩分量測定器」「道路橋の塩害対策指針」制定・NHK「コンク リートクライシス」の放映によるコンクリート問題が社会問題へ</p> <p>85 環状 7 号全線開通・青函トンネル本坑貫通・東北新幹線上野～大宮開業・本州四国連 絡橋大鳴門大橋完成・明石大橋着工・関越自動車道全線開通・つくば万博開催 ： プラザ合意(ドル高是正)</p> <p>その他</p> <p>本四架橋に関連して設計技術として PC 斜張橋や免震構造関連が進展し、施工法として 長大吊橋施工法が展開する。石油ショックを受けての石油備蓄に関する洋上備蓄基地施 工法、長大トンネルにおける省力、合理化施工法 NATM 工法、大規模ダムでの合理化コン クリート(超固練りスランプゼロ)及びその工法 RCD 工法、都市トンネルのシールド工法 は多くの開発改良が進み異形断面シールド工法が登場。専門工種では杭工法における拡 底杭がある。本四架橋の施工に関連し海中施工として流動化、高強度、コンクリートの 開発 81 水中不分離コンクリート、高炉スラグ混和材、耐候性鋼材、高張力鋼、溶接部 の超音波探索等々大プロジェクトによる付帯技術、材料の開発は、多種多様のものがあ る。計測技術、測量技術等も大きく進歩。</p>

表 3.8 社会資本形成と施工法の変遷年表－5

《バブル形成期 1986 年～1995 年 昭和 60 年～平成年代》	
<p>「社会テーマ」 ：「多極分散型国土の構築と国際化」</p>	<p>92 地方拠点都市地域整備法・第 1 次森林整備事業計画・第 8 次治水治山 5 カ年計画 93 環境基本法成立 ・94 建築基準法改正・緑地法改正・公共投資基本計画 630 兆円 95 河川法一部改正・被災市街地復興法</p>
<p>「土木技術に課された目標」 環境保全及び技術，評価法・リサイクル技術と手法・地域及び国際化交流の促進</p>	<p>「新技術，施工法，材料，設計，プロジェクト，プロローグ」</p>
<p>「社会資本の動向」： 金融自由化による日本市場の急速な国際化と情報化に対応する都市再開発が展開，産業構造の転換による臨海工業地帯でのウォーターフロント開発である，革が進む一方国土資源のバランス崩壊による中央と地方の格差拡大の是正が課題となる，心の豊かさの追求や将来の少子化による財源難に対応する最大効率主義から最小被害主義といった価値観，評価の変革が進む</p>	<p>86・諫早干拓事業着工・東北自動車道全線開通・本四架橋明石海峡大橋着工：平成景気 ☆建設，運輸「コンクリートの塩分総量規制，アルカリ骨材反応暫定対策」通達 JISA レディミックスコンクリート塩分総量規制 300g/m³，海砂塩分含有量 0.04%以下 アルカリ骨材反応制御対策方法・アルカリ総量 3.0kg/m³・高性能 AE 剤の開発 JISR5210「ポルトランドセメント，低アルカリセメント」新設 87 青函トンネル開通(止水地盤注入工法・長尺先進ボーリング)・関西新空港建設着手・首都高葛飾川口，江戸川開通(青森～熊本間高速道路で結ばれる)・北陸自動車道全通 ：GDP アメリカを抜く・農林人口 10%を割る</p>
<p>「自然災害」(数字死者) 86 三原山爆発 90 人雲仙普賢岳噴火 91 台風 19 号日本列島縦断 93 北海道南西地震 230 人，列島冷害，8 月豪雨 94 猛暑と列島渇水，北海道南西沖地震 230 人 95 阪神淡路大震災 6308 人</p>	<p>88 津軽海峡線開業・常磐自動車道全通・北陸自動車道全通・長良川河口堰着工 東名～名神～中央～北陸～関越の大環状高速道路網完成・本州四国連絡橋瀬戸大橋開通 ：大型公共工事に外国参入・21 世紀に向けての水資源計画発表 89 新高松空港開港・東京湾横断道路着手・北海道縦貫自動車道開業・ベイブリッジ開通 ：乗用車数 3000 万台突破 ☆建設省「アルカリ骨材反応制御対策」通達 90 長崎自動車道開通・大阪花博(電磁式連続輸送システム)・多々良大橋，リニヤ実験線等 起工・都庁竣工：公共投資基本計画 430 兆円・高齢者同居率 50%以下 ☆酸性雨によるコンクリート劣化問題化</p>
<p>「公共事業関連法案・国土計画・経済計画」 86 国土建設長期構想発表(2000 までに官民 934 兆円投資)・内需拡大政策提言・高速道路網計画策定(基本計画路線 7,122km・整備計画路線 6,411km) 87 第 4 次全国総合開発計画(多極的分散型国土の形成，交流ネットワーク構想，全国 1 日通勤圏形成，大型リゾート開発，投資 1000 兆円)・スーパー堤防整備計画・全国総合水資源計画(ウォータープラン 2000)・リゾート法制定：国鉄民営化・ルール合意(内需拡大) 88 ふるさと創生 1 億事業・経済運営 5 カ年計画 ・89 土地基本法 90 公共投資基本計画(430 兆円投資計画)・多自然型川づくりの推進通達 91 総合土地対策推進要綱(土地神話の打破)・河川法改定(高規格堤防区域制度)</p>	<p>91 奈良俣ダム完成・東京湾横断道路人工島・中部国際空港全体構想・東北新幹線盛岡～青森起工・九州新幹線八千代～西鹿児島起工 ：普賢岳噴火・・・高速道路 5000km を越える・湾岸戦争・いざなぎ景気と並ぶ ☆海砂塩分量 NaCl 換算 0.03%以下 92 山形新幹線開業・新東京国際空港第二ターミナル開設・神戸ハーバーランド完成 布目ダム(拡張レヤ工法初)：ブラジルで地球サミット開催 バブル経済崩壊(地価下落) 鶴見緑地線(リニア地下鉄)開通 ☆JIS ポルトランドセメント全アルカリ量 0.75%以下 93 レインボーブリッジ開通：横浜ラウンドタワー完成(日本一高さ 296m) 94 阪神高速道路湾岸線開通・関西国際空港開港，宮ヶ瀬ダム完成</p>

表 3.8 社会資本形成と施工法の変遷年表－6

<p>八汐ダム(アスファルト表面遮水式ロック式ダム,世界最大堤高 90.5m)</p> <p>95 阪神高速道路倒壊・九州自動車道人吉～えびの間開通・ (青森～鹿児島間 2150km 高速縦貫道全線開通,32 年間費)</p> <p>☆ JISA6204 改訂高性能 AE 減水剤の追加・土木学会「コンクリート構造物の維持管理指針案」制定</p> <p>その他</p> <p>設計関連では、実測値測定技術の進歩と長年の実績により安全率等の見直し、検討が進み限界状態設計法 (86 標準示方書) や地震に対する耐震構造、免震構造、液状化対策等の設計法の展開。術的には環境保全に呼応する土壌汚染対策技術、水質環境予測技術の研究開発が進む。大規模プロジェクト施工に関連した高精度、細部品質管理が情報化技術(GPS, 計測, 解析)により展開。また海上施工の多くの工法技術が開発。特に 88 年完成の瀬戸大橋は大地溝帯における施工と耐風,耐震設計が大きな進歩した。基礎工事でも海中発破,海中コンクリート打設に最新の技術開発。材料面でも高張力鋼材,電波吸収塗料の開発等がある。専門的施工法では基礎関係の高度化、精度アップが一層進む。大深度地下連続壁、超高度地下連続壁、本設地盤アンカー(仮設構築物を本設構造物活用)の開発。材料面では高流動コンクリート、埋設型枠その他新素材利用が多分野で開発され土木施工に展開。</p> <p>80年代後半として、87以降高透水性舗装の普及。同年大深度地下に関する実証実験(建設省)や 90 年には多自然型川づくりの創設等々次世代技術の基礎研究がある。</p>	<p>ある自然環境の保全、共生が不可欠との認識。社会資本は、最大効果から最小被害の選択がなされる時代。情報化技術の進歩による新しい価値観の変革は、社会のパラダイム変革となる</p> <p>「自然災害」(数字死者)</p> <p>96 豊浜トンネル崩落事故</p> <p>98 ゲリラ豪雨、台風各地で被害</p>
<p align="center">《バブル崩壊期(平成不景気)1996 年～》</p> <p>「社会テーマ」</p> <p>多自然住居地域の創造、都市のリノベーション(経済的豊かさと精神的豊かさの重視、多軸型国土構造に転換—多様性に富んだ国土空間の創造)</p> <p>「土木技術に課された目標」</p> <p>環境保全、資源再生、ユニバーサルデザイン、高度情報化維持管理システム</p> <p>「社会資本の動向」</p> <p>：少子高齢化社会を念頭に消費型社会から循環型社会への転換期。更なるコスト縮減リサイクル、維持管理の重要性が望まれている。精神的豊かさは、グローバルな課題で</p>	<p>「公共事業関連法案・国土計画・経済計画」</p> <p>96 海洋法に関する国際連合条約</p> <p>97 環境影響評価法、財政構造改革・河川法改定(河川環境整備、住民参加、渇水調整の円滑化等・防御から最小被害への基本的発想の変換)・890 項目規制緩和推進計画 ：臨海部副都心開発 15 年先送り・住民投票による原発建設拒否</p> <p>98 第 5 次全国総合開発計画(21 世紀のグランドデザイン) 新道路整備 5 カ年計画・コスト縮減行動指針</p> <p>「新技術、施工法、材料、設計、プロジェクト、プロローグ」</p> <p>96 世界最大断面泥水シールド機使用 (都営地下鉄 7 号線) 阪神高速道路 622 日ぶりに開通 ☆阪神淡路大地震による地震時保有水平耐力法の導入</p> <p>97 秋田新幹線・長野新幹線高崎～長野間開業・有明海諫早堤防閉鎖 東京湾アクアライン開通(サンドドレーン工法による海底軟弱地盤改良・大断面シールド工法・大型船舶航路での橋梁建設)・騒音低減効果の吸音板開発 ：地球温暖化防止京都会議 ☆低発熱ポルトランドセメント JIS 規定</p> <p>98 長野冬期オリンピック・明石大橋開通(180kgf/mm² 鋼線採用)神戸淡路鳴門自動車道全線開通)</p> <p>99 山陽新幹線トンネルコンクリート塊落下事故・以降コンクリート剥落事故連続的に発生し コンクリート耐久性の社会的問題化・メガフロート実証浮体完成</p>

表 3.8 社会資本形成と施工法の変遷年表ー7

00 建設省 ISO 導入・常磐新線にプレキャスト型枠工法採用

☆コンクリート標準示方書施工編ー耐久性照査型への移行

鋼材腐食発生限界濃度 1.2kg/m³ 以下

01 コンクリート標準示方書維持管理編制定

06 年頃にコンクリート標準示方書全編性能照査型に訂正, 工事発注も性能照査型移行を目指す。

その他

兵庫南部地震を受けて制震, 制振高度化技術の開発が進む。更に少子高齢化社会における限定された財源でのコスト縮減策, 規制緩和策として性能照査型設計技術や示方書の改訂が進む。また省力化, 合理化に向けて情報化技術の展開による無人化土工システムが行われている。シールド工法でもコスト縮減化を目指して履工合理化の技術開発。ダムにおける施工自動化, 省力化施工や骨材有効活用も活発である。少子高齢化といった社会現象による財政事情は, 社会資本の長寿命化を図る構造物の診断, 補修技術, 材料開発等のシステム研究を非常に活発化させている。

循環社会への転換と環境保全の高まりによるリサイクル, 長寿命化の技術, 建設廃材リサイクル技術, 材料開発も進む。関連して最終処分場建設(旧法による不適切処分場の改修技術ー減容化, 固結化等)技術, 長寿命化建築技術の開発。湖沼の浄化, 河川の自然工法採用, 緑化コンクリート等環境復元技術の開発や改良も活発な展開。

エネルギー開発の面でも自然(太陽光, 風力, 躯体蓄熱の実用化等)の力を活用研究開発が多い。専門的技術では大口径ジェットグラウト工法, SRC 地下連続壁工法, 鋼管コンクリート建築構造(CFT)等がある。材料では高性能コンクリート, 混和材がある。光ファイバー, GIS 情報利用等の情報化施工も一段と高度化している。

第3章参考文献

- 1) 土木学会編：人は何を築いてきたか・日本土木史探訪，pp. 250～329，山海堂 1995. 8
- 2) 松浦茂樹：近代治水事業の歴史的展開，ダム技術 No. 110，pp. 3～11，1995. 11
- 3) 土木学会：日本の土木技術(近代土木発展の流れ)・1975. 7
- 4) 社団法人日本土木工業協会：土木建設市場の変化と対応，平成 11 年 1 月
- 5) 社団法人日本建設業団体連合会・社団法人日本土木工業協会・社団法人建築業協会：建設業ハンドブック 1993～2002
- 6) 日経コンストラクション 1998. 2. 13：知ってるつもり「土木の整備水準」，pp. 46～68
- 7) 竹内良夫監修，柏原英郎編著：築土経国「土木学への提言」，山海堂，2001. 11
- 8) 国土庁長官官房水資源部編：平成 12 年版日本の水資源，pp. 57～77
- 9) 八十島義之助編著：土木学会編新体系土木工学別巻日本土木史・技報堂出版，1994. 7
- 10) 森屋茂，屋井鉄雄：社会資本の未来，日本経済新聞社，1999. 3
- 11) 監修建設省・朝日新聞社：国土建設の 50 年，1996. 3
- 12) 梅棹忠夫：日本とは何か(日本近代文明の形成と発展)・NHK ブックス，1999. 2
- 13) 成岡昌夫：土木学会編新体系土木工学・別巻土木資料百科，技報堂出版，1997. 4
- 14) 高橋裕：現代日本土木史・彰国社刊，1997. 3
- 15) 榎木亨，柴田徹，中川博次：土木へのアプローチ・技報堂出版，2000. 2
- 16) 社団法人土木学会：関西国際空港の施工技術（大水深，軟弱地盤における海上空港建設技術），平成 4 年 3 月
- 17) 社団法人日本海洋開発建設協会：わが国の海洋土木技術，平成 9 年 5 月
- 18) 九州電力土木部編：上椎葉アーチダムの計画と施工・丸善出版，昭和 32 年
- 19) 志水茂明：ダム施工の実際・(社) 全日本建設技術協会，p16，昭和 60 年 1 月
- 20) 土田茂：佐久間ダム，コンクリート工学 Vol. 40，No. 1，pp. 151～154，2002. 1
- 21) 都木清，前田佑正，株式会社 間組：御母衣ロックフィルダム工事誌・山海堂出版，昭和 39 年 7 月
- 22) 水資源開発公団 30 年史，pp. 79～85
- 23) 高橋裕：現代日本土木史・彰国社，pp. 134～135，1997. 3
- 24) 成岡昌夫：新体系土木工学・土木資料百科・技報堂，p338，1997. 4
- 25) コンクリート工学：コンクリート技術の変遷年表，Vol. 37，No. 1，pp. 112～140，1999. 1
- 26) 社団法人日本建設業団体連合会・建設業基本問題研究委員会：建設費の内外価格差とコスト低減，平成 9 年 3 月

- 27) 日経コンストラクション 2000. 3. 24 : 建設廃棄物とリサイクル pp. 8~12
- 28) 国土審議計画部会, 国土庁計画・調整局編 : 21 世紀の国土グランドデザイン平成 7 年 12 月 :
- 29) 国土庁計画・調整局監修・時事通信社 : 21 世紀の国土グランドデザイン(新しい全国総合開発計画の解説), 1994. 4
- 30) 松原裕 : 「地域の自立の促進と美しい国土の創造」多軸型国土構造に転換, 月刊建設オピニオン, pp. 20~29
- 31) 和田一範, 井上直樹 : ダム建設における Co2 発生量の把握とその抑制方策, ダム日本 No. 670, pp. 41~54
- 32) 植田 和弘 : 環境時代の土木工学の課題, 土木学会誌, Vol. 84, Oct. pp. 39~42, 1999
- 33) 吉田等, 佐々木隆, 町田宗久, 大滝嘉孝 : フライアッシュ 1 種置換によるダムコンクリートの CO₂ 削減効果, ダム技術 No. 117, pp. 25~30, 2000. 12
- 34) 阿部道彦 : ゼロエミッション化とコンクリート材料, コンクリート工学, Vol. 37, No. 12, pp. 3~9
- 35) 塩田泰之 : 建設現場におけるゼロエミッション, 発電土木 No. 296, pp. 107~110, 2001. 11
- 36) 三木博史 : 土木研究所におけるリサイクル技術開発の取り組み, 月刊建設 01-10, pp. 20~22
- 37) 山下尚 : 建設リサイクルの推進について, 月刊建設 01-10, pp. 6~8
- 38) 徳長政光 : 建設機械の排出ガス対策が新たな局面へ, 月刊建設 01-9, pp. 52~54
- 39) コンクリート工学 : 20 世紀のコンクリート工学発展史, Vol. 40, No. 1, pp. 3~6, 2002. 1
- 40) コンクリート工学 : コンクリート技術の変遷年表, Vol. 37, No. 1, pp. 112~140, 1999. 1
- 41) 森地茂, 屋井鉄雄編著 : 社会資本の未来・日本経済新聞社 pp. 330~342(年表)
- 42) 山本剛 : コンクリートに関する最近の話題, 建設マネジメント技術 1999 年 11 月号, pp. 7~11
- 43) 中村靖治 : 土木は何をしてきたか, 土木施工 40 巻 11 号(1999. 11), pp. 9~12・付録戦後土木史年表
- 44) 土木学会 : 第 3 編社会資本整備と技術開発の方向に関する検討委員会報告書・参考資料編, 参考資料 1 技術年表 3-19~3-24
- 45) (社) 日本建設機械化協会 : 建設機械化の 50 年, pp. 226~268, 平成 11 年 5 月

第4章 施工法の体系化分類による変遷と検証

4. 1 はじめに

本章では、施工法を①目的対象物ーダム、②専門工種(分業、専門化工種)ー③法面防護工事、④施工主体である建設機械、⑤工事構成材料である骨材、および施工法の最終工程で要求性能を確保する基本作業である⑥コンクリート工の5項目の変遷について検証する。施工法の工学的体系への位置付け、施工法の方角性に対する課題、施工法の工学的評価等の視点で検証する。

4. 2 目的対象物施工法の変遷 (ダム施工法^{1~10)})

4. 2. 1 ダムの変遷

ダムは、人間の生活、食糧生産に不可欠な水の供給源として有史以来築かれてきた。ダムは、その建設件数、型式および堤高の推移が時代の社会経済状況と土木技術の変遷を示すといっても過言ではない程多くの工種を含み大規模な土木事業である。ダムは、その構成材料による大きくロックフィルダムとコンクリートダムに分類される。本節では、コンクリートダムに関して考察する。

ダムの歴史は、古代エジプト王朝時代 B.C. 300 年頃に堤高 15m、堤長 450m の Kosheish メンソリーダムの築造にまで遡る。最古のアーチダム、Keber(テヘラン近郊、堤高 26m)は A.D1290 年前後に完成している。これらの多くのダム技術は経験的な積み上げにより施工されたもので近代のダム技術とは異なる。

ダムの設計理念である、静水圧による転倒モーメントは、1750 年に B.F. de Belidor により初めて計算された。さらに 1758 年 M. De. Sazilly により単位幅の片持ち梁の曲げ理論が重力式ダムに取り入れられた。その後現在のいわゆるミドルサード条件の適用が Delocxre により提唱され現在の設計基礎となる。

4. 2. 2 日本のコンクリートダム施工法の変遷検証

(1)1940 年以前

日本における最初のコンクリートダムは、神戸市が上水道用として建設した「布引五本松ダム(1900 年完成、堤高 33m、堤長 110m)」である。このダムは、粗石にモルタルを充填し上下流面を石材で被覆したメンソリー構造である。明治末期から大正(1910 年以降)にかけて水力発電の発展と共にダム建設が始まるまでは本格的なダムはない。本格的なコンクリートダムは、1924 年木曽川に発電用に造られ

た大井ダム(堤高 53m, 堤長 276m, 関西電力)である。設計外力は、水圧、土圧、揚圧力であり、収縮目地は 21~27m 間隔、排水孔が設けられている。

1920 年代に施工された草創期のダムは、単目的の水道用、発電用ダムにより始まった。社会資本基盤における生活、産業基盤の第一段階である。この時代のダム規模は、高さ 15~35m 程度のものが大半で地震力と動水圧を考慮してないため上下流勾配が各ダムで異なるのが特徴でもある。ダム型式は重力式が多く、産業、流通事情から安価な人力により所要資材を少なくするバットレスタイプが採用されている。その後、揚圧力、内部温度の研究、漏水対策グラウト等の設計技術は急速に進歩する。

1930 年完成の小牧ダム(堤高 79m, 庄川)では、等値水平震度による設計法の導入や基礎排水孔、横継目の施工が行われた。初めて温度計が埋設され、堤体内部温度上昇が注目された。このことにより単位水量を低減した硬練りコンクリートの施工技術に関する研究が始まった。1938 年完成の塚原ダム(耳川, 堤高 87m)は、骨材生産からコンクリート打設(ケーブルクレーン)まで一貫した機械化による施工が行われた。締固め作業での圧縮空気式バイブレータの採用や中庸熟ポルトランドセメントの使用とダム施工技術が多く面で集大成された工事となった。

コンクリート工に着目すると、コンクリートの中に玉石、割栗を入れた施工が 1925 年(大正年代まで)頃まで行われていた。コンクリート骨材のほとんどが天然産材であったが、1920 年代に完成した宇治川、大井ダムでは掘削岩石をクラッシャー機械により粗骨材の製造が行われている。

1920 代までのコンクリート配合は、セメント：砂：砂利が内部コンクリートで 1：3：6、外部コンクリートでは、1：2：4 とされた。コンクリート打設は、2 列の鉄製トレススルよりの傾斜シュート打設により施工された。シュート方式の施工では、水セメント比 60~80%、スランプ 10cm 以上の軟練りコンクリートが採用されている。傾斜シュートから立シュートの採用によりスランプ 5~6cm の打設が可能となり、さらにケーブルクレーンによるバケット打設方式によりスランプ 3cm 以下の硬練りコンクリート打設が可能になっている。まさにこの間の打設方式の改善は、施工技術(機械開発)によるコンクリート品質の向上(硬練りコンクリートの施工技術)といえる。練混ぜ設備機械は、スミス式ミキサ(0.8m³)が使用されていた。同ミキサ 4 基で日最大 700m³程度の打設(二交替制)が可能であった。

この年代における材料のセメント、砂の供給は、鉄道輸送が主であり山間地への供給は、事業規模を拡大する大きな要因であった。

(2)1940 年代後半~1950 年代

戦争による山林の荒廃、大型台風による洪水災害が戦後多発し、治水の重要度が一段と高まると同時に国土復興のための電力、水資源開発を目的とした大規模

ダム（堤高 100m 以上）が，外国からの施工技術や建設機械の導入の活発化により相次いで建設された年代である．表 4.1 に示す 1950 年代の重力式コンクリートハイダムは，現代においても日本を代表するものである．

表 4.1 1950 年代に完成した重力式ハイダム

ダム名および河川名	完成年	ダム高	所管
五十里ダム，利根川	1956	112m	建設省
佐久間ダム，天竜川	1956	156m	電源開発
小河内ダム，多摩川	1957	149m	東京都

施工に注目すると，100m を越す重力式ダムは，堤敷幅が 80m 以上となり，従来の層状工法では打設が困難となり，柱状工法による打設が本格化する．柱状打設による生じる継目を開口してグラウトするために人工冷却が必要となり五十里，佐久間，小河内ではパイプクーリングが採用される．中でも佐久間ダムは，堤高 150m 以上となり従来の工法では建設が不可能とされ，アメリカから大型施工機械が導入された．20t のセメントトレーラ，ワンマンコントロールミキシングプラント（112 切×4 基），主打設設備 25t ケーブルクレーン，トランスファーカー方式によるバケット運搬，650t/h 骨材プラント等々である．これらの一連の施工機械の組合せ，機械運用は，以降のダム施工フローに反映されている．

品質面でもコンクリート温度は，粗骨材，セメント，砂のプレクーリング，パイプクーリングにより最高温度 38 度（中庸熱ポルトランドセメント，河床砂礫骨材，AE 剤使用）に抑えた施工を行っている．平均日打設 3000m³，日最高 5180m³ の施工を記録し 3 年の工期で完成させた佐久間ダムの機械化は，国産大型機械の製造や性能向上の大きな刺激となった．佐久間ダムでの機械化施工は，コンクリートの要求性能を発揮させるための施工設備，機械化であり，施工能力向上，省人化は二次的効果として生じている．

材料の安定供給，経済性という命題に対応して骨材生産設備が目覚ましい進歩を遂げている．上椎葉アーチ式ダムは，初めてロッドミル（70t/h）により製砂に成功し，全数量を人工砂でまかなっている．練混ぜ設備は，操作の自動化と計量精度の向上により品質の安定したコンクリート供給が可能となった．

柱状打設のコンクリート主運搬は，ケーブルクレーンが主流となり 4.5，9.0，13.5，25 t と次第に大型化，高性能化している．1960 年代までに柱状打設に関する施工の基本形はほぼ完成している．

またこの年代は，産業基盤，輸送手段の未整備によるセメント材料の量産，供給が不安定で人件費より材料費が高い時代であった．堤体積の削減による経済性が可能なアーチダムの建設技術に関する研究が始まり，1955 年に塚原ダムと同水系耳川に最初のアーチダム上椎葉ダム（堤高 110m）が完成する．続いて 1958 年に鳴

子ダム（堤高 95m, 北上川）が完成する。同様な経済性の追求を図った中空重力ダムが 1957 年井川ダム（堤高 104m, 大井川）が完成している。

（３）1960～1970 年代前半

この年代は、1959 年に起こったフランスの Malpasset ダム（堤高 67m・アーチダム）の決壊事故による基礎岩盤の重要性認識による原位置岩盤の試験法の開発および放物線アーチダム（1970 年完成矢作ダム，堤高 100m, 矢作川）の開発，重力式ダムにおけるフィレットの設計法の開発（1977 年完成早明浦ダム，堤高 106m・吉野川）等設計における研究開発成果がある。

これらの研究，技術開発によって設計技術の体系化が図られる。1969 年に日本大ダム会議から「改訂ダム設計基準」が策定されさらに 1976 年に「河川管理施設等構造例」が策定される。

次に施工技術面を見る。前年代には、打設設備の開発による硬練りコンクリートの実現があった。さらに減水剤, AE 剤, フライアッシュの活用により単位水量を減じた硬練りコンクリートの安定した施工が締固め機械の性能向上（振動数 8000rpm 以上）により迅速に可能となっている。この手法は、大型棒状振動機数 6 本を一組にして機械的操作により完全な締固めを行うことで実施された。1962 年完成の坂本ダム，1964 年完成の黒部ダムの単位水量 $89\text{kg}/\text{m}^3$ の硬練りコンクリート施工を可能にした。コンクリートの水セメント比低減という工学的目的を材料改良と機械化が可能にした。施工法技術の目的背景（要求性能，物性の確保）を明確にする事例である。

（４）1970 年代後半以降^{11, 12)}

1960 年代後半から 1970 年の高度成長期になると人件費の高騰がダム建設費に重大な課題となり，ダムの合理化が研究課題となる。その結果「RCD—Roller Compacted Dam Concrete」の開発がなされた。

1981 年完成の島地川ダム（堤高 89m, 佐波川）に 1978 年初めて採用され，引き続き 1990 年完成の玉川ダム（堤高 100m, 雄物川）に採用され技術的に体系化された。その成果を基に 1981 年「RCD 工法技術基準」が策定された。

施工の合理化は、既存の技術を組み合わせて施工システムの改良によるものと施工設備機械の開発によるものがある。

コンクリートダムの長所（水密性，耐久性が高い，解析の信頼性が高い，維持管理が容易）を生かしフィルダムの短所（堤頂越流に弱く，安全性を高くする必要がある，堤体内に洪水吐設置ができない，大規模開発）を補うためコンクリートダムの短所（地質条件に制約が多い）を改善してフィルダムの急速施工による工期の短縮，省力化による経済性を高めることを目的に研究開発された。そのため RCD

工法は、コンクリートにも堤体材料としての性状を見直すという設計思想とリンクされた施工システムの改良による合理化である。貧配合超固練り（スランプゼロ）コンクリートをトラック、ブルドーザー、振動ローラ等の汎用機械で運搬、敷均し、転圧して要求性能を満足するコンクリートを施工するものである。ダム軸方向に数ブロックを連続して打設するため目地は振動目地切機で造成する一連のシステム施工法である。従来の柱状ブロック打設工法とことなりダム軸方向に水平打設をすることから面状打設工法とも称され施工の安全性も確保される。さらに打設設備設置と比較して環境保全での優位性、機械施工による品質の安定等施工面での多くの利点がある。

コンクリートに対する要求性能である水密性、耐久性に関しては、超固練りによる単位セメント量、水量の低減および発熱量の低減効果がある。RCD 工法の開発を契機にベルトコンベヤ工法、PCD 工法（Pumped Concreted for Dams）、拡張レヤ工法、等の新しい施工法が開発された。ベルトコンベヤ工法は、1990 年完成の高滝ダム（堤高 25m、養老川）、ポンプ工法は、1985 年完成の長与ダム（堤高 36m、長与川）、拡張レヤ工法は、1991 年完成の布目ダム（堤高 72m、淀川）で採用され、以降多くのダムで採用される。

ベルトコンベヤ、PCD 工法は、コンクリートの主運搬設備に関するもので、拡張レヤ工法は、有スランプコンクリートを使用した面状打設工法である。

4. 2. 3 まとめ

ダムの変遷を見ると、社会経済の要請によりダム目的が、生活用水、電力の単一目的から、治水、利水の複数機能を目的とする多目的に変化する。

1970 年前半までは、時代の社会経済、社会資本整備状態を反映し、バットレス、ホローグラビティ、アーチ式のダム型式による材料低減からの経済性追求および設計理論の研究開発が進んだが、それ以降は、施工合理化による施工システムによる経済性の追求となり RCD 工法他の新工法が展開する。これらの進展と相まってダム設計、施工技術は、他分野技術の進歩も吸収し急速に体系化する。

施工面の変遷に注目する。ダムのような水密性、耐久性が要求されるマスコンクリートの品質を確保する上で、コンクリート水和熱は、温度応力によるクラック発生要因となる大きな課題である。その物性値は、水セメント比によって支配され、単位セメント量を減ずるためには施工が可能な限り単位水量の削減が必要となる。その結果である硬練りコンクリートは、施工性（分離、乾燥）、流動性が悪くなる。このようなダムコンクリートのより良質な要求性能を確保する施工条件のもとに、施工設備、施工機械の開発改良が経済性追求のため急速に進展する。

1938 年完成の塚原ダムは、硬練りコンクリートの打設および締固め、骨材生産による砕骨材の使用等一貫した機械化施工の先駆となる。1956 年完成の佐久間ダ

ムに至り、アメリカからの技術導入ではあるが、柱状打設方式の機械化施工はほぼ現形となる。コンクリート運搬、締固め等コンクリート工やグラウトの機械化による施工合理化は、経済性ととも品質の安定性、作業の安全性にも大きな効果を発揮した。

コンクリートの性状、品質は、骨材生産、セメント種別、混和剤(材)といった多くの面から向上した。骨材生産による粗骨材の種別管理、骨材の粒度調整、貯蔵による表面水量管理は、計量精度、配合の安定性や単位水量の減少等コンクリート品質の基礎的改善となった。さらに混和剤の開発は単位水量の減少に大きな役割を果たした。1950年頃から使用されたAE剤は同スランプで約10%の減水効果と凍結融解に対応する耐久性の向上効果も発揮した。また同時期に使用されたAE剤と分散剤のAE減水剤は、AE剤よりさらに減水効果を発揮した。(AE剤より6~10%)単位セメント量の削減にフライアッシュを使用したのも当年代である。最初に佐久間ダムで用いられ、その後1956年奥只見ダムの使用に至りワーカビリティの改善効果が実証された。

このようにダム施工法の変遷は、コンクリート工の変遷でもある。構築対象目的物であるダムの要求性能を構成する主材料コンクリートの物性値に関する材料、施工技術の変遷である。ダム型式、ダム設計は、社会経済を反映する施工法の経済性追求の変遷といえる。その側面として施工の機械化は、施工の均一性、迅速性、施工範囲の拡大を可能した。そして一連の施工体系が確立された後、施工法や作業システムおよび構成材料の開発、改善による合理化が蓄積されて現在に至っている。固有条件の生産システムを構成する施工システム(施工法)の機械化、合理化は、構成材料の物性値を確保することが前提である。ダム施工では、一連の施工システムは、分業化、専門化され構成されるが、要求性能から逸脱した作業の合理化、効率化は発生していない。その大きな理由は、ダムの生産システムが骨材生産から打設に至る全行程を統括管理する体制により施工されることにある。しかし、コンクリートの硬練りのコンクリートを所定の位置に運搬し所定の時間内に締固め、養生をするといった施工システムは施工条件による選択(作業性、経済性、環境性等の評価基準による)がなされるが、施工システムを構成する基本作業(締固め、養生、運搬等)の管理基準は定性的であり定量化されていない。

4. 3 専門工法(法面防護工法)の変遷と評価^{13, 14)}

4. 3. 1 法面安定工法の変遷

法面とは人工的な斜面である。つまり人為的に発生した斜面である。法面防護工は安定勾配と法面の排水を基本に土質に適した工法の選択により実施される。法面防護の目的は降雨による表流水、地下浸透水及び凍上作用等により斜面の地

盤が風化したり浸食を受けたり、緩むのを抑制することである。

法面保護工は、勾配、土質、気象条件、工法の特徴、将来の維持管理を総合的に検討し経済性と施工性を検討して工法を選定することになる。また法面緑化の基本は植物の生育の成否による。そのため法面勾配は樹木の安定と施工の簡易性を考え緩勾配が望ましいが経済性によるコストの面からの工法が限定される場合もある。このような状況で施工される斜面（広義の法面）保護工は昭和 50(1980～)年中后期を境に施工法の変化が生ずる。上記に示した機能を優先した以前の施工目的に加え環境に配慮した景観を重視した施工法に変化する。機能優先の時代は、経済的で管理の比較的安易な外来種草本類の吹付が主に実施された。構造物による法面防護においても法枠の中に碎石の充填等の整備方法が多く採用されたが、環境と景観に配慮した法枠内の緑化手法に変化する。法面防護工は、緑化工法の多様化時代を迎えている。その緑化も従来の外来種ではなく在来の草木類の播種や植栽による地域の自然環境維持が主目的となっている。表 4.2 に年代を代表するプロジェクトと法面防護工の変遷を対比して技術進歩を示す。

表 4.2 法面防護工法の年代別技術進歩

年 代	年 代 技 術 と 進 歩 状 況
1945 ～ 1954	土工分野における機械化施工の啓蒙期・米国の建設機械になじみ我が国の土質への適用性についての研究・1952 年戸塚国道改良にてタンピングロー転圧による締め固め。 佐久間ダム「1953～1956」をきっかけに米国式機械化土工が広がる
1955 ～ 1964	道路治山治水下水道住宅関係長期計画、五箇年計画の作成による国土復興の本格化 1955 年に日本住宅公団・1956 に日本道路公団さらに首都高速道路公団、水資源開発公団が設立 道路例・国道改良と高速道路建設が活発する。機械化土工による工事規模、工事内容となる。 名神高速道路 1957～1965 年は、大型の施工機械による本格的大規模土工。当時広く普及し始めた「土質工学」の理論を実際に応用した画期的な工事。その実績が「道路土工指針」等の技術基準類に反映。
1960 ～ 1974	高度成長期で都市化とモータリゼーションの進展 鉄道に代わり道路が交通の大動脈として重要視される。大規模土工を伴った高速道路網の開通。1962 年着手の中央高速道路は、特殊土（火山灰質粘性土－関東ローム）保有工法が開発される。間隙率による締め固め基準、フィルターの設置、石灰安定処理の適用等。 自動車交通の産業幹線化により道路法面の崩壊等による長期通行止めが社会問題化するとともに道路管理者責任問題の提起。 法面防護工は 1964 年以降東名高速道路において省力化が図れる種子吹付の採用や構造物を伴う法面防護としてコンクリートブロック積やプレキャスト法枠工の採用が始まる。 岩盤斜面風化や落石防止にコンクリート、モルタル吹き付けが多用 地滑り対策では横ボーリングが深層地下水の排水に利用。1962 年(昭和 39 年)ライナープレートを応用した集水井が開発され急速に普及する。
1975 ～ 1984	石油ショックを経て「生活の質」が重視される 社会資本整備が生活関連施設の整備や環境保全に注目される。 法面防護も従来モルタル系に代わり「緑化」がキーワードとなり中詰め緑化が可能な現場打法枠工が増える。1980 年以降になると種子散布工、客土吹付、植生マット工に加え厚層基材吹付が各種基準類に盛り込まれる。 アンカー工やシャフト工による斜面安定工や地滑り対策工が採用される。
1985 以降	瀬戸大橋、青函トンネル、関西新空港等高度技術による国家プロジェクトが完成。土工用新材料と新工法開発として、発砲スチロールを用いた軽量盛り土工法、ジオテキスタイル等の補強材を用いた補強盛土工法の普及、および建設発生土の有効利用を図る各種土質安定処理工法が実用化する。一方普賢岳噴火や北海道南西沖地震、兵庫県南部地震の自然災害等多発する。法面工や斜面安定工は標準構造に準ずれば地震に対しても安定であり、被害を受けても復旧が容易であるが耐震性の検討が必要との考えが主流になり道路土工指針でも具体検討がなされる。土構造物も従来以上に耐震性確保に調査研究の推進が必要

4. 3. 2 工法変遷の評価

工法の主目的が明確である専門工種にも社会経済の背景による価値観の変化からの要請を受けて工法内容が変化することが明らかにわかる。緑化の主目的は、斜面安定、法面保護目的から要求される機能である。社会的要請に呼応する付加価値的機能の拡大を高速道路の法面防護工にて考察する。

高速道路は、豊田によれば年代は、表 4.3 に示す分類となる¹⁵⁾。

表 4.3 高速道路の年代区分

年 代	年 代 総 称
昭和 3 0 年代	名神高速道路の時代
昭和 4 0 年代	東名、中央道の時代
昭和 5 0 年代	新規五道時代前期
昭和 6 0 年代	新規五道時代後期、横断道時代
平成元年以降	環境時代

昭和 30 年代・緑化は、名神高速道路での眩光防止と視線誘導といった「安全」の観点より中央分離帯の植栽から始まる。6 m 間隔の一カ所 3 本植の植栽が直営方式で施工された。切土の張芝工、盛土の筋芝工による法面の植生保護工では、大規模法面に対応できず、急速緑化工の開発、改良が課題となっているが「種子吹付工法」の適用により法面緑化の急速施工が可能となった。

昭和 40 年代・道路緑化では「機能植栽」の概念が確立し路傍植栽が定着する。

昭和 50 年代・高度経済成長とともに始まった産業構造の変化は人口の都市集中や公害発生を引き起こした。道路も騒音、排ガス対策が大きなウェイトを占め、道路緑化でも環境保全への対応が重要課題となる。従来の道路使用者にだけ向けられていた道路緑化の視点を道路外部にも拡大する設計思想となる。住宅地域の生活環境保全対策とした法面植栽は、植栽による一時目的を確保し、その施工材料、施工位置、景観等の空間的価値観を導入して二次的目的つまり複合効果を果たした工法となっている。

昭和 60 年代・道路機能は地域性の発揮と特有化を求められる。法面防護工も緑化（植物）が本来有する心理効果の活用を図る発想となって具体化する。従来の機能追求と異なる付加価値添加による工法変化の要請となる。工法の供する道路機能の価値観、評価基準の変化がその原点にある。専門工種は、その上位工法の価値観変遷により大きく変化する。

平成元年以降・地球温暖化が地域環境問題から国際的課題に拡大する。それを受け、森林の保護や資源の有効活用等「開発と環境の調和」が社会資本の整備にとっても命題化する。この命題による社会要請は、環境との共生に対する内容の高度化、複雑化したものとなっている。道路においては、路線選定からの開発規模や工法選択（盛土式、高架式）による炭酸ガス発生比較および景観調和、地域

性の発揮等が課題となる。

盛土法面の樹林化による炭酸ガス固定を経済的比較により評価する場合、用地費が高い地域では、設計段階で高架式と比較対照すると盛土の所要面積は高架式の4倍程度となり絶対値の格差が大きくなり正当な結果とならない。他のエネルギー消費や二酸化炭素発生量も同様である。最終評価を二酸化炭素発生量としての比較する場合、経済的数値による総合的比較によると環境評価の効果が正当に評価されないことにある(別章による工法評価でも指摘^{16, 17)}。

しかし、事業計画で、長期的な地域環境との調和、地球環境への影響に選択の優位性があれば、盛土方式が前提条件となり工法評価がなされる。評価の目的がどこにあるかが非常に重要な事項である。

高速道路の緑化において注目すべき発想は、クローズドシステムーリサイクル方式による緑地の管理発想である。植生廃棄物収支も企画され、刈草や剪定発生植物を焼却せず植栽発生材から堆肥とチップを製造して炭酸ガスの固定化をする計画である。公共性による利便性が優先された時代から、価値観変化による社会資本の性格が高機能、多様化した結果、事業計画の評価軸が、時間的には長期となり、空間的には地球規模と非常に大きくなった現状を物語る事例である。

4. 3. 3 まとめ¹⁸⁾

法面防護工における緑化工法の改良、開発の方向性は二酸化炭酸の固定化を効率的にする樹種構成や樹林の管理法、切土法面の樹林化や自生種を用いた緑化の技術とされる。工法の主目的以上に付加価値が工法への要求性能となっている。

新技術、新工法の発想は、もはや土木に限定された技術ではなく総合科学、工学の多分野が必要である。一次目的は工法の機能であり防災を担保に付加価値を最大限発揮できる技術との組合せを必要としている。

専門工種の変遷は、上位施工法や工学的背景による一次目的から、多くの機能による複合効果を求められている現況にある。つまり社会的価値観による付加価値の具体化が望まれている。法面防護工では、維持管理といった将来テーマの目的との連携による急崖斜面や滑り地の崩壊計測・モニタリング技術と一体化された高機能工種に変化する可能性がある。情報化社会では、多分野との連携による情報化が付加され高機能な専門工種を頂点とする体系化が進むことも予測される。

4. 4 建設機械の変遷と評価^{19, 20, 21)}

4. 4. 1 はじめに

建設工事に使用される機械類を総称して「建設機械」という名称が使用されたのは戦後のことである。日本における建設機械の歴史は、戦後復興期からとなる。

それ以前は、ミキサ、ウインチ程度の簡易的機械程度が建設機械であった。建設機械は施工法を生産産業として体系化すれば、施工主体として位置付けられる。その変遷は、施工法を左右する大きな影響を与えた。建設産業の体制を分業、専門化させたのも建設機械の多様化、高性能化である。建設の機械化とは、施工主体が人力から機械による施工となり急激な施工量、施工範囲の拡大、短縮施工を意味する。建設機械の開発は、建設技術の施工能力を発展させ、多くの施工環境での諸工事を可能にしてきた。建設機械の変遷を施工面、社会環境、安全に対する施工技術の観点で整理すると「社会経済、社会環境への要請」に対処する建設技術の最前線の状況として観察できる。

4. 4. 2 建設機械変遷の評価

戦後、軍需産業に携わっていた重工業が業務転換により建設機械を生産したことが建設機械化を推進する背景となる。機械化は、国土の急速復興に大きく貢献する。1945 年代の建設工事は、国による直轄および直営工事が多く、建設機械も国が直接保有する形態で施工されていた。戦後 10 年を経た 1955 年頃になりブルドーザー(9t~13t 級)が国産化された。

1945 年~1955 年にかけて国土復興を図る治山治水事業や電力開発、道路等の産業基盤整備が一気に始まった。それに付随して建設機械需要も増大した。建設産業の活発化と共に 1955 年代には、建設機械の保有形態は、民間建設業者にシフトする。1964 年に開催された東京オリンピックは、戦後復興のシンボルとして捉えられる。東海道新幹線、名神高速道路、首都高速道路等の開通は、新しい時代の幕開けに相応しい社会基盤施設となった。それ以降遅れていた社会生活基盤の安定に供する河川工事、ダム工事が集中的に増加する。

高度経済成長を背景とした急速な社会資本整備は、建設事業を多様化した。

建設機械への要求機能も多様化した。工事工種ごとの需要による個別保有は、継続使用率の低下や整備、点検の専門化も必要となり不採算性を伴うものであった。このような背景を受けて建設機械のリース、レンタル化が普及し始める。同時におよび重機工事を専業とする専門化、分業化が始まった。クレーン・機械土工・コンクリート圧送・基礎工事等の特殊機械による工事は、特に専業化して進展することになる。機械化による専門化、分業化は、工種施工による施工の分割化を促進し、現在の建設業の請負形態を形成する。専門化することで固有の技術的進展は図られたが、施工分割による作業の境界責任、品質管理の所在等の問題を内在することになる。

1973 年オイルショックによる社会経済変化は、建設機械と要員の自社保有から外部調達方式による施工形態を一層加速しリース、レンタル化を進め、現在の建設産業の生産スタイルが固定化した。年代別に建設機械と土木技術との関連を考

察する。

(1) 1950～1970 年

建設機械の開発は、汎用的工事の土工事機械であるブルドーザ、パワーショベル、スクレーパ、ダンプの導入、トンネル工事でのディーゼル機関車によるトロッコ運搬および専門的工種であるダム施工設備の骨材生産機械やバッチャプラント、ケーブルクレーン等の幅広い建設機械が導入された。

施工の機動性と能力向上が図られた。この期間は、輸入機械から国内生産および機械動力の変化と機動性の改良であった。

1954 年第一次道路五カ年計画を契機として日本の道路整備は本格化する。これと歩調を合わせ道路建設用機械の開発普及が進展する。モータグレーダ、マカダムローラ、振動ローラ、タイヤローラ、およびアスファルトプラント、フニッシャ等である。道路土工の運搬、敷均し、転圧機械、とアスファルト舗装の各分業施工の目的に対応する機械化である。作業全体の機械化により品質規格、物性値の安定化や工事の省力化、迅速施工による工程計画の確実性等多くの成果が得られた。オリンピック開催に併せ建設が促進された首都高速道路、東海道新幹線工事は、建設機械の開発を急速に進展させた。東海道新幹線は、東京～大阪間の都市を縦断する広範囲な地盤条件、首都高速道路は、都市部の沖積層からなる軟弱地盤帯条件を課題とした。特に構造物の基礎工は、不可欠な重要な課題となった。

施工課題は、都市周辺での狭小地施工と建設公害の低減対策となった。建設公害は、1955 年頃から高度成長期のひずみとして公害問題に呼応して建設産業による騒音、振動、粉塵に関する課題である。前述の基礎工事の機械化要請と併せて技術開発が進展する。既製杭施工のディーゼルパイルハンマーによる騒音、振動と施工空間条件をクリアーするためにベント掘削機他場所打ち杭施工機械の開発が行われた。また交通量の増加と道路の整備進捗により道路管理業務が必要となり「維持、管理」に関する機械化も始まった。路面清掃車、路面補修車維持管理作業車等である。寒冷地の除雪機械の開発も本格化した年代である。

(2) 1971～以降

1971 年頃より省力化や特殊機械の開発が活発化している。機械化の第二段階である効率向上と高性能化の開発である。水陸両用ブルドーザ、無人潜函掘削機、ヘドロ浚渫船等の開発も行われた。機械化は広範な社会要請に対応できる体制に成長した。1975 年頃の社会は規格化された大量生産から多品種少量生産や多様生産の時代となり、機械も多機種、多機能化が求められた。1980 年代は、建設機械の性能とともに質的向上が課題となる。1983 年には低騒音低振動型建設機械指定制度の発足により騒音振動対策建設機械の使用が促進される。²⁰⁾

(3)1989 年（平成元年）

建設産業の施工環境の改善，将来の少子高齢化，熟練工不足の時代に対応するため，ロボット化，プレハブ化技術を活用した施工合理化を円滑かつ効率的に進めるため「施工合理化技術開発ビジョン」がまとめられた．建設機械技術の高度化は，建設事業のイメージアップ、労働力の確保、生産性の向上の重要な要素となる．1994 年の雲仙普賢岳の噴火対策工はロボット化の成果として挙げられる．噴火土石の運搬搬出をブルドーザ，油圧ショベル，ダンプトラックの遠隔操作による無人化運転で施工している．

(4)将来性

今後は GPS 技術の普及と精度の向上により施工範囲も拡大すると予測される．丹羽，大倉等は，ロックフィルダムの締固め作業において，締固め機械タンピングローラと GPS 技術を組合せ施工誤差，幅 20cm，高さ 5cm 以下として施工管理を 1999 年に実施している²³⁾．このような取り組みは，情報化技術に代表される先端技術を機械施工技術に活用し，従来の施工と管理の概念から脱却して，施工と出来高管理、品質管理を一体化したものである．一般に情報化施工といわれる方法は将来の合理化施工のキーワードである．今後，技術のボーダレス化が進み，建設機械施工技術に自動車、航空、宇宙、医療福祉機器等に関する異分野の最先端技術の導入により建設施工の改革を図る時代となる．

4. 4. 3 まとめ

表-4.4 に市場背景と機械化の動向をまとめる．建設機械の機種，生産数量，機能は，日本の復興と歩調を合わせた工事分野での普及，開発が行われてきた．

総じて建設機械施工の発展は，社会経済の要請に応え工事規模の大型化を可能にし、生産性の向上による工期短縮・省力化を果たしてきた．また品質の向上，安全性の向上，工事の経済性にも大きく貢献した．

建設機械の高機能化を支えたのは，機械，電気工学における油圧，電子制御の進歩である．成果は他産業，多工学との協調から生まれた．

建設事業の多様化による多品種化は，リース，レンタル化を推し進め建設機械の使用を簡易にする一方，運転技能，技術力不足による重機災害を生み出す一因ともなっている．専門工種による専門化は，日本における建設産業の生産体制を支えているが，施工責任，品質保証の視点では，体制の是非は今後の課題となる．

建設機械による施工は，生産性，省力化と言った施工面だけでなく情報技術で結ばれ品質管理と一元作業となることが想像される．そのためには，高度化、情報化に対応する人材の育成確保が必要となる．工事情報のデータを機械化施工に反映させることは，施工効率，精度，品質を定量的に管理する手法の原点となる．

表 4.4 建設機械の市場背景と動向

年代	市場背景	建設機械の動向
・創成期 1950年代	1. 国土復興・食料確保・電力確保 治山治水, 開墾干拓, ダム建設 2. 建設機械化運動(建設機械化整備費の予算化)	1. 建設機械基本機種の国産化 2. 建設機用ディーゼルエンジン開発とトルクインバータ 3. 流体継手の普及 4. 建設機械の耐久性向上とメンテナンス技術力のアップ
・成長期 1960年代	1. 産業興隆基盤整備 道路, 鉄道, 空港, 港湾 2. 建設業の機械施工力アップ 3. 周辺技術の進歩 機械要素, 油圧技術, 土質工学	1. 外国より技術導入 2. 大型機械の普及と高出力 3. トラフカビリティアップと活動範囲の拡大 4. 油圧化(高圧化) 5. 機械の高速化とホイール機への指向
・反省期 1970年代	1. 高度成長 前期: 高速度道路, 産業施設, 大型団地等大規模社会資本投資による事業量増大 後期: オイルショック. 2. 環境保全の要求と工事小型分散化. 後期	1. 機種拡大と応用(アタッチメント)多様化製品 2. 機械の大型化飛躍的進展 3. 小型機種の進歩 4. 公害対策型機械, 省エネ機開発 5. 主動力の油圧駆動化(HST)油圧利用増加 6. 振動利用機械, モーメントリミッタ開発
・成熟期 1980年代	1. 安定成長と労働者不足 2. 都市工事の活発化と安全要求 3. 専門工事業の発展 4. 建設機械市場の急速な国際化	1. 大型化と作業速度アップ, 高能力化 2. 小型化と省力機械化の徹底 3. 作業装置バリエーションの増加 4. 外観, 内装, カラーデザインの優美化, 高級化 5. カット化, 油圧技術高度化(操作性, 安全性向上) 6. 建設ロボット登場 7. ゴムクローラ機, ホイール式機増加
・転換期 1990年代	1. 建設副産物リサイクル化 2. 建設業による新技術, 新工法開発の活発化 3. 建設レンタル需要急増 4. 財政構造改革と建設工事のコストダウン策検討 5. 機械化施工第2世代への模索(情報化施工, 異分野技術応用, 人間社会との共存同質化)	1. 自動化, ロボット化システム施工大きく進展 2. 細部施工機械, 省力機械, 多機能機械の進歩 3. ミニ機械, アダプティビリティ, 高揚程, 低空頭機身長 4. 低騒音化, 排気改善等対公害防止機械普及 5. 建機仕様の多様化 6. 操作性, 安全性向上

4. 5 骨材の変遷と評価^{24～31)}

4. 5. 1 はじめに

骨材は、コンクリート容積の70～80%を占め、コンクリートの物性値に影響する大きな要素であり、施工法の重要な構成要素である。現在、構造物の耐久性が議論されるなかで、海砂による中性化促進、アルカリ性骨材によるクラック誘発等の現象が早期劣化要因として骨材の課題として提起されている。骨材の賦存量、品質の確保、生産体制も含めた骨材全体の課題である。コンクリート骨材は、従来豊富な川砂利と川砂に依存していたが、コンクリートの需要の増加による河川

砂利の賦存量減少や採取時の河川環境問題による規制もあり陸砂利、海砂、砕石、砕砂の需要供給が増加している。実態調査結果によりコンクリート用骨材の変遷と実態の考察より品質、需要、生産体制に注目し今後の課題を提起する。

4. 5. 2 骨材品質の地域性と変遷

表 4.5 は、東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州の 8 ブロック内での 10 カ所の現場調査を 1992～94 年度と 99 年度に実施した結果である³²⁾。

表 4.5 骨材物性の全国平均値

調査	細骨材				粗骨材							
品質と示 方書規格	絶乾密度 2.5g/cm ³ 以上		吸水率 3.5%以下		絶乾密度 2.5g/cm ³ 以上		吸水率 3%以下		実績率(%)			
区分 年度	天然 砂	砕砂 混合	天然 砂	砕砂 混合	砂利	砕石	砂利	砕石	Gmax40		Gmax20, 25	
									砂利	砕石	砂利	砕石
1992 年	2.53	2.56	1.66	1.50	2.59	2.70	1.33	0.88	65.1	59.7	62.6	58.7
1999 年	2.53	2.58	1.88	1.69	2.60	2.67	1.31	1.08	63.2	60.0	62.4	59.4

※川砂、山砂、陸砂、海砂、真砂を天然砂として砕砂混合は、天然砂に砕砂を混合したものである。

(1) 細骨材の絶乾密度、吸水率

絶乾密度の経時変化は、ほとんどない。東北地方の約半数が 2.5g/cm³ を下回るがその他地域は 2.5～2.6g/cm³ の範囲である。吸水率の経時変化は、全国平均で 0.2%程度増加している。東北地方の天然砂が 2～3.5%，その他地域では 1～2.5%の範囲である。天然砂は砕砂より 0.2%程度小さめである。

(2) 粗骨材の絶乾密度、吸水率、実績率

絶乾密度品質の径時変化はないが、砕石の使用率が増加している。地域的には、東北地方で砂利の絶乾密度が 2.5g/cm³ を下回るがその他地域は、2.6g/cm³ 前後である。砕石は、岩種により 2.5～3.0 の範囲にある。吸水率の経時変化はほとんどない。細骨材と同じく東北地方が 2～3.5%と大きく、その他地域では 2%以下である。砕石の吸水率は砂利よりやや小さい傾向にある。実績率の径時変化はない。実績率は、砂利が 60%以上、以下が砕石と分類できる。砂利実績率が 3～4%高い。

(3) 品質変遷のまとめ

環境保全や天然資源枯渇の情勢下で砕石、砕砂が増加している。所要物性値を持つ材料により構成されたコンクリートの供給が施工の前提である。骨材製造の

実態と生産骨材の物性値特性，原石性状を把握することは，今後のコンクリート工の品質，施工にとって極めて重要なことである。

調査結果は，碎石，砕砂の方が天然材より密度，吸水率は良好な結果となっている。コンクリート標準示方書の規格値も満足している。しかし別途報告書では，密度は低め，吸水率は高めの傾向があるとされる^{33, 34)}。特に細骨材の密度が 2.5g/cm^3 を下回ると警告している。骨材の強度（絶乾密度），耐久性（吸水率）以外に粒度分布，形状による実績率は，単位水量に影響を及ぼす。実績率が悪いと同一のコンシステンシーを得る単位水量が増加する³⁵⁾。単位水量の増加はコンクリートの初期物性に影響し乾燥ひび割れの発生を誘発する要因になる。単位水量は，細骨材粒度による影響も受ける^{36, 37)}。砂の粗粒率は，製造過程で $2.5\sim 3.0$ に調整されているが生産過程では，表 4.6 に示す要因により品質のバラツキが生じやすい。その結果，ブリー징の過多やコンシステンシーの不良がワーカビリティに悪影響を及ぼしコンクリートとしての物性値，品質に大きく関与する。

表 4.6 製砂過程における品質の問題

原因	内容
原砂の岩種	原石破碎特性による扁平化等
製造方式	ロッドミル製砂方式によるロッドと水量による調整バラツキ
生産過程における回収方式	クラッシュファイヤ性能による微粒分の消失
堆積，運搬	微粒分の消失

自然環境保全，天然骨材の枯渇現況の対応策として，骨材の性状を中心とした規格（吸水率，絶乾密度，安定性，すり減り）を用途からの視点で評価判断する研究もある。廣瀬らによるコンクリートダムにおける最適骨材評価は，有限資源を有効利用して原石の廃棄量低減による環境保全を推進するものである³⁸⁾。原石岩種を使用目的（所要物性値）により定量評価することが必要となる。図 4.1，4.2 は，ダム原石採取の実態と判定内容の一例である³⁹⁾。適用判定には，岩種に係わらず「岩の硬さ，脆さ」が調査 19 ダム全数で実施されている。その判定は，ロックハンマー打撃が 100%，削孔時のくり粉色を併用したものが約 42%である。その他割れ目，色調を併用しているダムが約半数あるが何れもその手段は目視が大多数である。客観的な定量的試験は，製品の定期的な物理試験となる。

骨材の課題と社会環境を図 4.3 に示す。品質と生産が課題の中心となる。骨材の生産状況が複雑化する将来，コンクリート品質の安定的条件となる骨材品質評価は，できるだけ早い時期，つまり原石採取時に定量的な判断が可能となることが望ましい。筆者らによる色素色彩計を応用した岩種判定は，自然という原始形とデジタル計測という未来形の組合せによる原石採取時に可能な原石劣化の定量

的判定提案である⁴⁰⁾。また見かけ比抵抗を用いた手法も同様に原石の賦存状況を把握する有効な手段となる⁴¹⁾。碎石、砕砂の品質で変えられるのは粒度と粒形だけで物理的性質は不変である。そのためには先ず骨材原石の鉱物特性、生産地による工学的リスクを指標化したマネージメントが必要となる。品質と生産に関する現況を考察する。

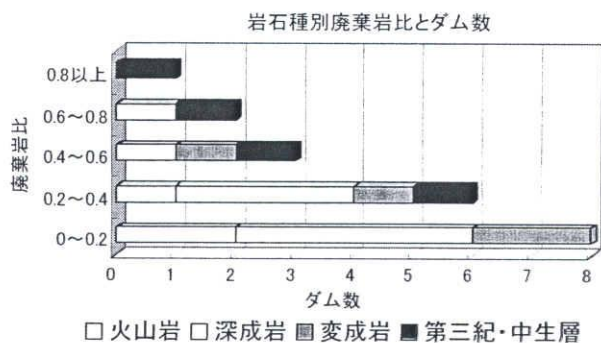


図 4.1 岩種と廃棄岩率

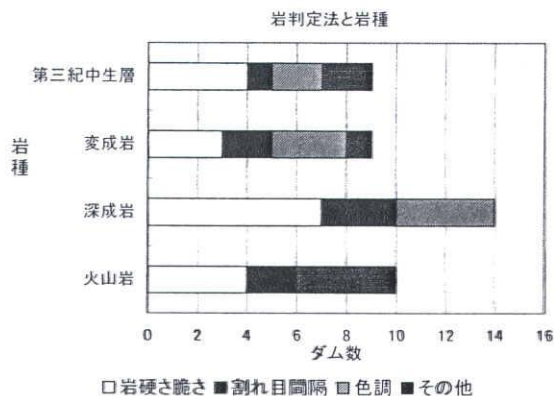
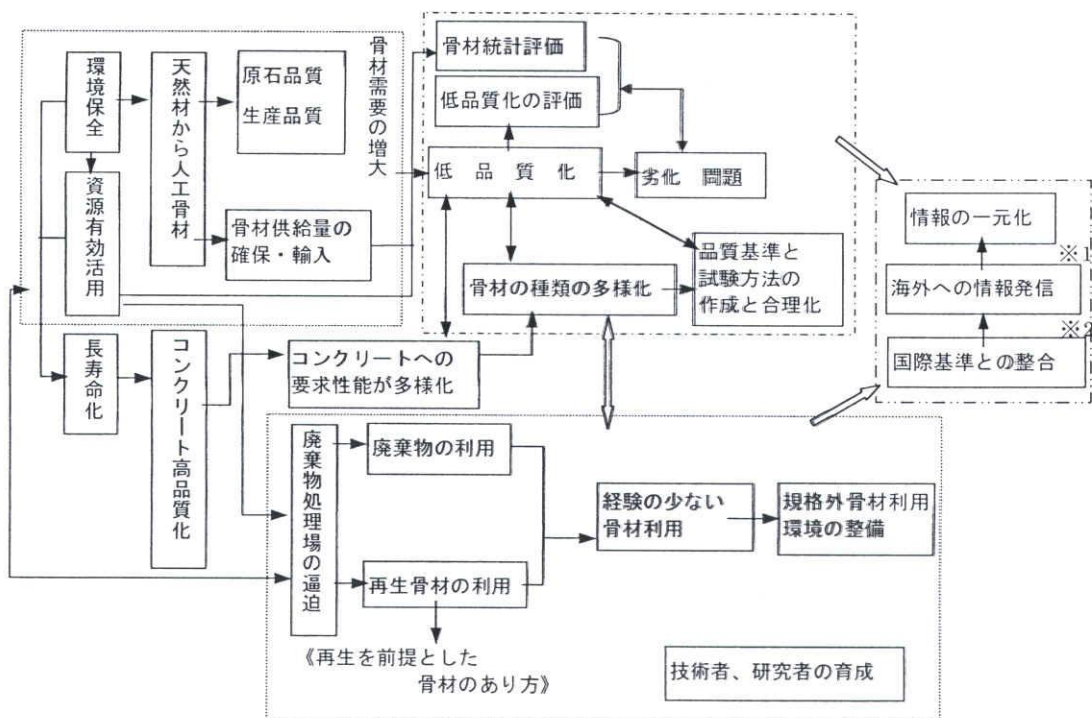


図 4.2 岩判定と岩種



※1 海外への情報発信は海砂、アルカリ骨材反応等骨材に起因するコンクリートの早期劣化の研究成果

※2 国際基準とは、骨材の試験方法の国際規格

図 4.3 骨材の課題と社会環境⁴²⁾

4. 5. 3 骨材需要と生産体制の変遷 ^{43, 44, 45, 46)}

(1) 骨材需要と供給

骨材の現況課題が品質と生産に係わることが明らかになった。そこで骨材需要と生産体制に関して変遷と現況を把握して施工法との関連を検証する。

骨材需要は、社会資本整備の実施状況により左右される。河床低下、水質汚染防止等の河川環境保全や社会的環境に対する意識高揚の中で砂利採取規制が強化され地域的に砂利の安定供給が困難となり碎石、砕砂の供給量が増加している。碎石の原石採取も周辺の景観や環境保全の規制条件により厳しい状況にある。品質面からは、天然材は、地質学的変成作用（自然淘汰）による良質形状であるが、人工骨材は、原石性状と破砕機の破砕特性等によって物理的性状や品質が変動する。そのため原石の性状認識と生産管理が必要となる。良質のコンクリートを製造するための前提は、使用骨材の清浄、堅硬であり物理的、化学的に安定であることと適切な粒度を有することである ⁴⁷⁾。

我が国の骨材の需要量と供給量の推移を図 4.4 に示す。

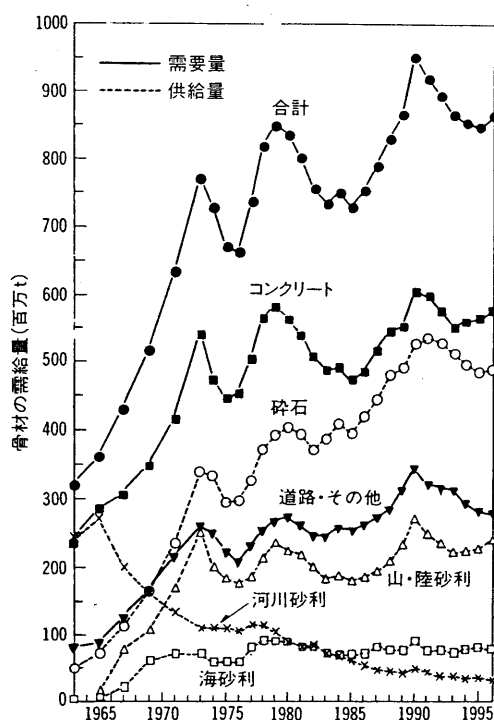


図 4.4 骨材需要量と供給量の推移 ⁴⁸⁾

表 4.7 砂利の採取地別採取量比率 ⁴⁹⁾

年度 採取地	1963 年	1996 年
河川	93.6%	9.8%
山	2.8%	27.2%
陸	3.6%	40.3%
海	0	22.7%

1955 以前の骨材は全て天然の砂利、砂で、その採取地の大半が河川であった。1960 年頃には河川骨材 3 億トニが使用されている。需要のピークは、1967～1995 年の間で 1990 年に 9 億 5 千万トンとなる。この数年は、年間 8 億トン～9 億トンの需要量で推移している。この骨材需要に対して砂利、碎石により約 90%を供給している。

スラグ，輸入骨材が約 10%程度である。

供給量を見ると河川砂利は 1965 年の 2.6 億トンをピークに減少し 1995 年には 3500 万トンまで落ち込んでいる。他の天然材料では，1965 年より山，陸砂利が急増し 1973 年には 2 億 5 千万トンに達しているが，その後は 2～2.5 億トンで変動している。海砂利は，同 1965 年より採取され 1978 年に 9000 万トン程度となりその後は 8000 万前後の水準を維持している。表 4.7 に 1963 年と 1996 年の 30 年間における採取地の変動を示す。採取地の変化が歴然とする。1963 年の砂利，碎石供給量比率は，84:14(250 百万トン:43 百万トン)に対して 1996 年では 41:57(357 百万トン:487 百万トン)と逆転している⁵⁰⁾。(碎石はコンクリート用骨材として JIS 規格に制定された 1961 年頃から河川砂利と相反して生産が急増する。砕砂は 1970 年に追加)

次に碎石に注目して見ると，1963 年の生産量が 4,300 万トンで，用途は主に道路，鉄道が約 78%を占めコンクリート用は約 20%前後である。1972 年には 3 億トンを越し 1991 年の 5 億 3 千万トンをピークとするが，その後は 5 億トン程度に漸減している。

1996 年度の需要量 8 億 6 千万トン(コンクリート用 5.8 億トン)に対して供給は，碎石 4 億 9 千万トン(57%)，砂利 3 億 6 千万トン(43%)である。表 4.8 に 1996 年度の碎石の地域別用途別生産量を示す。

表 4.8 地域別用途別の骨材生産量：単位千トン 1996 年²⁹⁾

地域名	道路用		コンクリート用		その他用
	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	
北海道	13247	172	5366	590	3620
東北	40102	534	12901	2281	5286
関東	62691	2605	25506	14261	17460
中部	20302	913	4807	1166	4377
近畿	22637	2145	22897	4183	6270
中国	18009	829	14260	4103	4223
四国	8645	156	10941	3983	2116
九州	31674	1217	29382	5121	9860
全国計	217307	8572	126061	35687	53212

碎石の用途別生産数量は，道路用約 51%，コンクリート使用が約 37%(平成 6 年 34.4%)となっておりコンクリート用が増加している。同年の細骨材は，道路用 3.8%，コンクリート用が 22.1%と碎石に比較して低くなっている。^{29), 51)}。コンクリート用粗骨材の生産地域では関東，近畿，九州が多く，細骨材は関東と近畿以西が多くなっている。中部，東北，北海道は，比較的河川砂利に恵まれ碎石製造数量が少ないと推測できる。表 4.9 に地域別の砂利採取量を示す。表 4.10 に 1994 年度の地域別の碎石生産量とコンクリート使用比率を示す。表 4.9 から河川砂利は，関東が 50%強，中部，近畿を含めれば 76%を占める。山砂利も関東が 65%，東北を含め 82%である。陸砂利は，北海道を主に関東以北で 92%，海砂利は，中国以西で

ほぼ 100%である。これらの情勢から採取地，採取場所から骨材の供給状況と今後の予測，また包含される課題が推定できる。塩分に関する危険度は，近畿以西であり，碎石原石の品質が課題となる地域もほぼ同様と推測できる。

表 4.9 砂利採取の地域別採取量と比率：単位千 m³（1996 年度）²⁹⁾

地域及び採取地と比率	比率※	河川	比率1	比率2	山	比率1	比率2	陸	比率1	比率2	海	比率1	比率2	その他	比率1	比率2	合計
北海道	15	769	5	3	2265	5	9	21366	33	88	7	0	0	0	0	0	24407
東北	12	1281	8	6	7104	16	35	11725	18	58	82	0	0	123	8	1	20315
関東	33	8176	52	15	29027	65	54	15698	24	29	19	0	0	454	28	1	53374
中部	10	2383	15	14	2692	6	16	11170	17	67	10	0	0	419	26	3	16674
近畿	4	1481	9	22	2385	5	36	2229	3	34	0	0	0	528	33	8	6623
中国	6	282	2	3	379	1	4	474	1	5	8522	23	88	0	0	0	9657
四国	7	513	3	4	116	0	1	518	1	5	10335	28	90	0	0	0	11482
九州	13	927	6	4	362	1	2	2075	3	10	17689	48	84	100	6	0	21152
全国計	100	15812	100		44330	100	27	65255	100	40	36664	100	22	1624	100	1	163684
採取地別比率		10			27			40			22			1			100

※比率は各地域の総採取量の全国比率

比率1は採取場所の全国に対する地域の比率

比率2は各地域の採取量に対する採取場所比率

表 4.10 コンクリート用碎石の生産統計・平成 6 年度・単位千ト⁵¹⁾

地域	事業所数	碎石全生産量	コンクリート用碎石			コンクリート	
			コンクリート計	単粒度	砕砂	使用比率	砕砂比率
北海道	136	21,000	5,154	4,673	481	24.54	9.33
東北	260	57,232	14,778	12,710	2,068	25.82	13.99
関東	206	99,096	27,300	17,067	10,234	27.55	37.49
北陸	99	15,171	3,323	2,094	1,230	21.91	37.00
東海	108	32,808	5,583	4,582	1,001	17.02	17.93
関西	145	52,705	21,677	18,453	3,223	41.13	14.87
中国	208	42,416	18,872	15,178	3,694	44.49	19.57
四国	89	24,035	13,817	10,589	3,227	57.49	23.36
九州	294	73,362	32,310	27,996	4,313	44.04	13.35
沖縄	35	6,462	3,102	2,407	695	48.00	22.40
全国系	1580	424,287	145,916	115,749	30,166	34.39	20.67

表 4.10 から地域別の碎石生産量に対するにコンクリート使用比率に注目すると関西以西では 40%～48%と高く，表 4.9 で示した砂利採取状況が裏付けられる。関東，北陸の砕砂使用率が全国平均の 1.85 倍と高い。今後骨材需要と供給環境を考えると天然砂利から碎石，砕砂への移行がさらに進むと推測される。骨材の品質を確保する前提として原石に対する留意がより重要になる。

(2) 砕石資源原石^{29, 30)}

表 4.11 に骨材資源岩石の使用量順位，表 4.12 に地域別の原石使用順位を示す（資源エネルギー庁鉱業課第 11 条報告による平成 6，8 年）。安山岩，砂岩が全国的に砕石原石の約 2/3 を占めている。若干の変化はあるが，砂岩，安山岩の占める割合は変動していない。

表 4.11 骨材資源原石使用率

ランク	1	2	3	4	5	6
骨材名	砂岩	安山岩	粘板岩	粗面岩	花崗岩	輝緑岩
H6 年利用率%	34.3	25.5	3.5	2.2	2.2	3.3
H8 年利用率%	37.6	29.2	4.4	3.7	3.7	3.2

表 4.12 地域別の原石使用順位

岩 種 地 域	花 崗 岩	橄 欖 岩	斑 岩	輝 緑 岩	粗 面 岩	安 山 岩	玄 武 岩	礫 岩	砂 岩	粘 板 岩	凝 灰 岩	片 麻 岩	結 晶 片 岩
北海道				3		1	2		4	5			
東北				3		1	4		2	5			
関東						2		3	1	5	4		
中部	4	5				2			1			3	
近畿	5		4		2	3			1				
中国	4					1			2	3			5
四国	4			3		2			1				5
九州	5					1	4		2				3

砕石の使用量の多い関東，近畿，九州での原石は，砂岩，安山岩の利用率が高い。一般にセメントペーストは骨材より熱膨張係数は大きい。骨材量が多くなるに従ってコンクリートコンクリートの熱膨張係数への影響要因となる。骨材岩種によるコンクリートの熱膨張係数を表 4.13 に示す^{52, 53)}。

岩石のシリカ(SiO₂)の含有量が多いと熱膨張率が大きくなる。細骨材、粗骨材の組合せによっても熱膨張係数は異なるが，石英原石の骨材を使用したコンクリートの熱膨張係数が大きくなり，石灰岩原石骨材のコンクリートが小さくなる。骨材の熱膨張係数が小さいことはセメントペーストとの熱膨張係数の差が大きいことを意味する。このことは強度特性、耐久性等の面でマイナス要因となり注意が必要となる。骨材原石となる火成岩系のシリカ含有を表 4.14 に示す^{52, 53)}。

花崗岩、安山岩、玄武岩の順にシリカの含有量が少なくなる。堆積岩では石英、チャート、砂岩、石灰岩の順にその含有量が少ない。熱伝導率(kcal/m・h・℃)もシリカの含有量の多い花崗岩，流紋岩，安山岩の順となる。熱拡散率も同様の傾向であり，同種の石質では比重の大きいほど大きい。（石灰岩を除く）

表 4.13 原石，コンクリート熱膨張係数

岩石種別	シリカ含有量	骨材の熱膨張係数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$				コンクリート熱膨張係数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
		最小	最大	変化	平均	最小値	最大値
チャート	94	7.4	13.0	5.6	11.8	11.4	12.2
珪岩	94	7.0	13.2	6.2	10.3	11.7	14.6
石英岩	94					9.0	13.2
砂岩	84	4.3	12.1	7.8	9.3	9.2	13.3
大理石	僅少	2.2	16.0	18.2	8.3	4.1	7.4
珪酸質石灰岩	45	3.6	9.7	6.3	8.3	8.1	11.0
花崗岩	66	1.8	11.9	10.1	6.8	8.1	10.3
輝緑岩	50	4.5	8.5	4.0	6.8		
玄武岩	51	4.0	9.7	5.7	6.4	7.9	10.4
石灰岩	僅少	-1.8	11.7	13.5	5.5	4.3	10.3
砂利	5-95					9.0	13.7

表 4.14 原石シリカ含有量・熱伝導率

岩種	火 成 岩			
Sio2 含有量	66%以上	66～52%	52～45%	45%以上
区分	酸性岩	中性岩	塩基性岩	超塩基性岩
岩石名	花崗岩 73.7% 流紋岩 72.7% 粗面岩	安山岩 54.2% 閃緑岩	玄武岩 45.8% はんれい岩	石灰質斜長石 蛇紋岩
岩種	堆 積 岩			
Sio2 含有量	大 ←──			

骨材の品質は天然材から砕石，砕砂が多くなる現況で，近年特にコンクリートの高強度化が求められ骨材の役割が重要になっている．コンクリートの長期安定性の確保は，使用骨材の物性値が適性でなければならない．

有限資源である骨材の有効利用は，原石固有の鉱物特性を事前に把握することと生産管理による品質の確保が必要である．社会環境，自然環境の変遷は，生産システムの管理を基本となる主要構成要素から見直す大きな課題を提起している．

現在の生産量，採取地状況の考察から各地域の骨材原石特性が把握できる．原石岩種の工学的定量評価による使用範囲の限定，使用条件の指標は，今後必要となる．コンクリートの圧縮強度と粗骨材の破碎値の関係を骨材の品質特性 17 項目と JIS 品質，配合計算に関する品質，硬化したコンクリートに影響する品質，コンクリート中の鉄筋を腐食する品質の 4 項目に分類してその関係を一覧表にした研究もある⁴⁷⁾．骨材の有効利用を図るためには，コンクリートの重要度による骨材の適性化研究や評価手法の開発が必要である．筆者らが試みた色彩色差計による原石風化判定も今後光学的改良により現場での定量評価に供すると思われる⁴⁸⁾．

(3) 生産体制の変遷

原石の品質と同等に重要な課題は，生産による品質管理である．生産体制の変遷から品質管理について考察する．表 4.15 に今後の骨材需要の用途別推測を，表 4.16 にその品質の内訳を示す．

今後の骨材の需要に対応する供給は，再生骨材の使用も含めた用途の多用化に合わせた資源の有効活用が必要となる．将来的には，砕石は再生骨材に代替され低減し砕砂の需要が増加すると予測できる．砕石，砕砂の生産量は，6 億トと推定されている．

今後の骨材の需要に対応する供給は、再生骨材の使用も含めた用途の多用化に合わせた資源の有効活用が必要となる。将来的には、碎石は再生骨材に代替され低減することと砕砂の需要が増加すると予測できる。碎石、砕砂の生産量を 6 億トンと推定されている。

表 4.15 用途別骨材需要予測量²⁹⁾

用途	コンクリート用					道路用					合計
細目	普通 コン	特殊 コン	低品 質コ	再生 骨材	計	舗装 材	特殊 舗装	路盤材		計	
								クラッ	再生		
万ト	20000	5000	4000	1000	30000	10000	5000	10000	50000	30000	60000
構成比%	33.3	8.3	6.7	1.7	50	16.7	8.3	16.7	8.3	50	

表 4.16 骨材品質別内訳量²⁹⁾

品質内訳	JIS 規格品	規格外品	特殊高品質品	再生骨材	計
万トン	40000	4000	10000	6000	60000

用途は、コンクリート、道路が均等する状態である。従来の主生産製品であるクラッシャランの構成比が減率し、再生骨材が増加する。反面、コンクリート、舗装用は、全体の 2/3 に増加する。骨材製品は、前述の通り高品質生産指向になると予測される。高品質の骨材は、採取原石管理と生産管理が求められる。生産における粒度、粒形は、原石の破碎特性と破碎機械による。コンクリート用骨材は、粒度、粒形による実績率が単位水量に反映し、コンクリート性能へ影響する。

一般的に破碎後の状態で 10～50%の扁平石が含まれると言われている。碎石原料の主原石である砂岩は、比較的良好であるが安山岩は、扁平に破碎しやすい傾向にある^{26, 54, 55)}。品質確保には、原石にあった破碎機の採用やふるいの規格変更および機械開発等の多分野の対策も必要となる^{55, 56)}。例えば 2001 年に完成した温井ダム（アーチダム、堤高 156m、堤体積 80 万 m³）では、骨材の粒子形状の改善に堅型回転式遠心砕塊装置を使用している。この結果砕砂の実績率は、57.4 から 58.9 と 1.5%向上し、FU 値（凸凹係数）において 0.04%増加したと報告されている。

次に生産体制を支える事業規模と原石賦存量を見る。1985 年～1995 年の 10 年の推移をもとに考察を行う。表 4.17 に碎石場数を、表 4.18 に従業員数を、表 4.19 に生産量を示す。そして表 4.16～4.19 から算出した企業規模と生産能力を表 4.20 に示す^{57, 58)}。

表 4.17 碎石工場数の推移

地域	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	計
1985 年	191	436	461	192	230	290	86	503	2389
1995 年	191	343	344	180	176	215	81	324	1854
減少率	0	21%	25%	6%	23%	26%	6%	36%	22%

表 4.18 従業員推移：単位・人

地域	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	計
1985 年	1883	4743	4875	2014	2627	3125	1049	5176	25547
1995 年	2100	4335	4974	2396	2298	2969	1187	4514	24773
1995 年 人員/工場	11.0	12.6	14.5	13.3	13.0	16.9	14.7	13.9	13.4

表 4.19 生産量：単位千トン

地域	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	計
1985	16622	49179	98610	35073	44474	36000	12197	51503	344666
1995	22739	69706	105199	35996	60665	37952	20362	63489	416108
1995 年 千トン/工場	119	203	306	200	345	177	251	196	224

表 4.20 企業規模，生産能力

年度	総生産量	工場生産量	企業規模	生産時間能力
1985 年	3.44 億トン	144 千トン/工場	10.7 人/工場	60～80 t/H
1995 年	4.16 億トン	224 千トン/工場	13.4 人/工場	100～120 t/H

約 10 年間で工場数は 22%減少，骨材生産量は，7100 万トン/年増加しているが従業員はほぼ横ばいである．その結果，1 工場当たりの従業員数は増加し，1 工場当りの生産量は，1985 年の 144 千トン/工場から 1.6 倍の 224 千トン/工場に能力アップされている．1995 年における砕石業の全国平均は，1 工場 13 人規模で年間生産規模である．生産能力の平均は，概ね 100～120 トン/時間である．砂利採取より規模は大きいが小規模企業が大半である．

(社)日本砕石共同協会の幹線道路地域にある全国工場数の約 50%に当たる 943 工場の調査結果では，11.5%の工場が硬質砂岩に近い比重 2.7，吸水率 1.5%以下，すり減り減量 16%以下に適合している．この 3 基準全てに達しないが比重 2.65 以上は 85%，吸水率は 1%以下が 50%，すり減り減量の 16%以下が 45%と報告されている⁵⁹⁾．この調査内容から今後の高品質需要にも一応の対応が可能と思われる．また，要求性能にあった資源の有効利用の必要性も示している．

今後骨材に対する要求性能が高品質化するのに対し，良質な原石の確保，採取地選定および運搬が自然，社会環境の規制により厳しくなる情勢にある．そのためには，生産工場の原石品質内容の情報開示による地域的管理の必要性和要求性能にあった骨材使用が望まれる．骨材の供給は，建設産業の生産活動の課題として検討する必要がある．適正な骨材生産体制の確保は，原石品質と同等にコンクリートの長期的要求性能には不可欠となる．今後の建設産業の生産活動は，前提となる構成要素の品質に関して，分業化による責任転嫁を見直す段階になった．

(4) 原石の賦存量

原石山は、砕石業の経済性と採取地域の自然、社会環境により大きく制約を受ける。経済性は、需要圏と輸送による流通機構の確保である。各工場の現状生産規模で原石の賦存量を除した推計年数表を表 4.21 に示す。10 年未満が約 30%, 20 年以上が概ね 30%である。

表 4.21 現有原石山の賦存量⁵¹⁾

確保年数	4 年未満	9 年未満	14 年未満	20 年未満	20 年以上
北海道	18	14.6	16.8	19.1	31.5
東北	6.5	23.4	21.7	17.8	30.6
関東	14.8	20.4	27.7	11.1	26
北陸	14.2	21.4	21.4	10.8	32.3
東海	10.5	28	26.3	19.4	15.8
関西	10.5	19.3	21	8.8	40.4
中国	4.4	20.8	19.8	26.5	28.5
四国	12.5	17.5	27.5	15	27.5
九州	14.7	16.8	24.4	18.9	25.2
全国計	11.4	20	22.5	17.7	28.4

一覧表によると 10 年区切りで 30% 近くの原石山が減少する傾向を示している。地域的には、東海地域の残存賦存量が少ない。骨材需要、原石山周辺環境および再生骨材使用率による変動もあり現在の賦存量による骨材供給が困窮することはないが、今後の骨材情勢は、品質、生産体制、賦存量とも厳しい条件である。

4. 5. 4 まとめ

骨材の変遷は、骨材資源の確保の歴史でもある。社会的価値観の変化による環境保全の重視、資源採取による自然環境の悪化（海砂利に対する潮流変化、海岸浸食、漁業水域の変化、陸砂利採取による地下水の混濁、河川砂利による河床洗掘等々）により天然材料から砕石、砕砂に 1960 年頃より移行する。しかし骨材の製造においても、都市近郊の山林周辺での宅地化による環境保全問題の提起、住民同意条件による採掘可能量の減少（森林伐採、再植林に対する抵抗感等）、経済性の低下（運搬時間規制、運搬路指定、交通渋滞等による効率悪化、振動、騒音、濁水対策）により天然材採取に劣らない厳しさである。しかし、社会資本の基盤整備においては、骨材は不可欠である。骨材需要の 2/3 が公共事業で占められている。現状は、天然材料から製造骨材に転化することで需要に対応した供給がなされている。

施工法の重要な構成要素である骨材の品質、製造、賦存量の変遷から現状にお

ける骨材の課題と展望を考察した。良質な社会資本を構築するためにコンクリートの高強度、高流動、長期耐久性等に対応する要求性能が骨材にも求められる。地球を取り巻く環境から資源の有効利用と環境保全の要請もある。

製造骨材の固有物性は、原石の鉱物構成により決まるがコンクリートの単位水量に影響する粒度、粒形は生産技術による。骨材は、品質、製造、賦存量の三位一体の管理が必要となり、分業化された企業ではなく建設産業全体の連携による管理、改善が必要となった。今後の骨材に対する課題の対応策を以下に集約する。

①原石の熱性状や物理的性状を用途別に評価(定量的指標化)したランク分け

- i : 資源の有効利用と適性利用による品質確保
- ii : 再利用の重要性と研究の必要性
- iii : 製造工程に対する品質確保(粒度調整技術の向上)

②原石山賦存量と原石種別(品質)による生産地域の集約化と情報の開示

- i : 製造管理の強化と製造技術、設備の充実による品質確保、安定供給
- ii : 少子高齢化の国勢に対応する生産合理化による省人化
- iii : 骨材の流通の改善(約17万台のダンプトラックに依存)
- iv : 各機関との調整連結、農地の構造改善、宅地開発、河川整備等との連携による死蔵する資源回収

4. 6 コンクリート工の変遷と評価^{60, 61, 62, 63, 64)}

4. 6. 1 はじめに

土木施工を体系化した場合、生産システムは施工システムで構成される。コンクリート工を施工システムとした場合、それは練混ぜ、運搬、締固め、養生の基礎作業システムにより成り立っている。土木施工が目的とする構造物の物性、機能は、土工事、基礎工事等いくつかの工程を経てコンクリート構造物により果たされる。土木施工法を体系的に考察し、工学的評価する上でコンクリート工は重要な施工法(システム)として位置付ける。以下施工順序に従い変遷を検証する。

4. 6. 2 基本作業の変遷

(1)練り混ぜ⁶⁵⁾

コンクリートの練混ぜの歴史は、機械化(ミキサ)の歴史である。動力による練混ぜが出現するまでは人力による練混ぜ攪拌であった。

日本で最初の鉄筋コンクリートを採用した京都疎水工事(1885年起工)の練混ぜに関して「イ・空練り(砂+セメント)回数の規定 ロ・練混ぜ投入順序(粗骨材→水の半分→練混ぜ→水の残り→練混ぜ)の規定 ハ・コンクリート材料へのゴ

ミ、泥等の混入の注意」が当時の施工法書籍に記載されている。コンクリート練混ぜや使用材料および施工への細心の注意がよく示されている。

電力の供給不足や産業の未整備によるセメント生産量が少なく輸入に頼っていた社会的背景もあり 1907 年以降鉄筋コンクリートの適用が推奨されるまでは、ほとんど大断面の無筋コンクリートが多かった。戦後復興期に至るまでの我が国のコンクリート練混ぜ機械の推移を表 4.22 に示す。

表 4.22 練混ぜ機械推移 (1900～1950 年)

年 代	練 り 混 ぜ の 機 械 化 記 事
1910 年	国鉄が制定した「鉄筋混凝土橋梁設計心得」ではコンクリートは、用途により乾（硬練り）、湿（軟練り）に分割。以降 10 年間は土木におけるコンクリートの設計施工の基準。配合は容積比 1:2:4
1923 年	関東大震災後の復興工事に縦型ミキサ、鉄筋コンクリートの多用
1930 年	ウォーセクリータ (Wa-Ce-Creter) が計量器として作製（計量装置の開発による機能効率アップ）
1931 年	土木学会「コンクリート標準示方書」制定。練混ぜはミキサを主とする規定
1951 年	土木学会示方書「練混ぜはバッチミキサによること」明示 重量計量によるコンクリート製造が、舗装、ダム工事等で一般化

1920 年代の縦型ミキサは、不傾式で木製の樽の中で、縦軸の回りに水平の攪拌翼を回転する簡易方式であった。1920 年以降は、ドラム形ミキサがアメリカから輸入され普及するにつれ大容量化する。1930 年ウォーセクリータ (Wa-Ce-Creter) が計量器として開発されて、ミキサの機能効率は大きく進展する。

ウォーセクリータは骨材の含水比を考慮して、所定の水セメント比に応じ、水とセメントを練混ぜセメントペーストを作り、このペーストに細骨材、粗骨材をミキサに加えて練混ぜコンクリートに仕上げる方式であった。1931 年土木学会示方書は、水セメント重量比はコンクリートの所要強度に応じて試験で決めるように規定し、練混ぜはミキサを主とするよう規定した。1951 年土木学会示方書は、練混ぜはバッチミキサによることを明示し、練混ぜの機械化(コンクリート製造は、重量計量方法)が一般化された。

復興期に至る 1950 年代以前の練混ぜ機械の 80%が小容量 (0.2 m^3 ～0.4 m^3) のドラム形不傾式であった。戦後の社会資本の急速整備によるコンクリート需要の増加に呼応して、計量装置の自動化は、可傾式ミキサの導入(1953 年頃より)と並行し研究開発された。その結果、ミキサはスランプ数 cm 以上の硬練りコンクリート製造にも適合する性能とともに大容量化する。それ以降は機械的改良による効率化と省力化が加えられた。現在、プレストレスコンクリートの利用増大やスランプ 0 のような超固練り RCD ダムコンクリート製造に 2 軸強制練りミキサ(パグミル形ミキサ)が普及している。強制練りミキサは、重力式に比べ練混ぜ時間が短く小容

量で同等能力を確保でき、設置スペースが小さい利点もある。混合方式は、重力ミキサの拡散混合、アスファルトミキサの対流混合、強制練りミキサのせん断混合に分類できる。

練混ぜ方法の発展過程をまとめる。練混ぜは、供給された材料を計量、攪拌して所要性能を満足するコンクリートを製造する過程で、現在その全作業は機械化されている。機械化による以前は、教科書的指導により人間の経験と確認がなされた生産方法であった。練混ぜ方法の進歩は、動力が人力から機械に移転し、分業化を可能にした。その背景は、社会基盤施設の整備によるコンクリート需要の増加であり、能率化は経済的要求といえる。生産の増大、効率化を実現するため品質の保持、確保と言った計量、攪拌技術が機械開発、改良によりなされた。

現在の初期施工における問題の一因は、コンクリートが生産者と使用者に分業化、専門化されたことと、タイムラグによる品質の確認、責任所在の不明確さに一端が窺える。建設産業が機械化による合理化、効率化を遂げる生産産業でありながら、本来の目的を達成できない生産結果の発生は、生産の特異性に起因する一面を示している。今後益々機械化を必要とする国勢にあつて、生産方式の特異性を構成する施工システム、基本作業が工学的評価により位置付けられることは、施工の要求性能を確保する重要な意味を持つ。

(2) 運搬、打込み工法の変遷⁶⁶⁾

運搬とは練混ぜたコンクリートを分離しないように所定の時間内に、所定の位置まで運搬することである。

コンクリート工事の草創期、一般的なコンクリート運搬は、バケツやセメント樽にコンクリートを入れ人力運搬をした。明治末期から大正初期頃からコンクリートタワー（コンクリートエレベータ）による打設が始まった。この方法は、1960年代中頃のコンクリートポンプが急激に普及するまで運搬工法の主流となる。この方法はコンクリートを垂直運搬するために考え出された。バケツに入れて鉄製タワー内のガイドレールに沿ってウインチにより所定の高さまで巻き上げられる仕組みとなっている。垂直運搬されたコンクリートは、バケツの転倒によりホッパに移される。水平移動は、シュート（流し樋）やカートにより施工された。

1924年竣工の丸ビル工事で初めて使用されたカートは手押し車で、一輪車、二輪車の種類があり、人力による平面運搬の日常的道具となった。カート車による方法は、コンクリート性状から勾配と距離に限度があることと打設範囲全体に仮設通路を必要とした。ポンプ車の出現まではコンクリート運搬の主流となる。

現在一般化したコンクリート運搬の機械化は、コンクリートポンプから輸送管を經由して所定の場所まで圧送する工法である⁶⁷⁾。表 4.22 のポンプ輸送の発展経

緯を示す⁶⁸⁾。

表 4.23 ポンプ輸送の発展経緯

年 代	練 り 混 ぜ の 機 械 化 記 事
1910 年	国鉄が制定した「鉄筋混凝土橋梁設計心得」ではコンクリートは、用途により乾（硬練り）、湿（軟練り）に分割。以降 10 年間は土木におけるコンクリートの設計施工の基準。配合は容積比 1:2:4
1923 年	関東大震災後の復興工事に縦型ミキサ、鉄筋コンクリートの多用
1930 年	ウォーセクリータ（Wa-Ce-Creter）が計量器として作製（計量装置の開発による機能効率アップ）
1931 年	土木学会「コンクリート標準示方書」制定。練混ぜはミキサを主とする規定
1951 年	土木学会示方書「練混ぜはバッチミキサによること」明示 重量計量によるコンクリート製造が、舗装、ダム工事等で一般化

ポンプ車の普及は、社会経済の背景を象徴するように、労働力の豊富な戦前は、経済的にも必要性が低く普及せず、労働者不足となる 1950 年代中頃に土木工事に使用されるようになる。建築工事での採用はこれ以降となる。

ポンプの圧送機構の発展経緯は、その輸送能力とコンクリート性状に関連する重要なものである。初期のポンプ圧送機構は、機械式クランクによる駆動方式で能力は限定されていた⁶⁹⁾。1953 年ドイツで油圧式コンクリートポンプが開発され、能力、操作性が飛躍的に改良された。これが現在の機械の原型となる。

1964 年定置式ポンプをトラックに搭載したプロトタイプの車輛搭載式が製作されコンクリートポンプの機動性が付加されて、飛躍的に採用範囲が拡大する。

同時期に従来のピストン式圧送型式に加えスクイズ式が技術導入された。この方式はピストン式の管詰まりトラブル（異形骨材による）によるを減少させ、ポンプ輸送に対する信頼性を得るものとなった。

ポンプ打設の課題は輸送管の配管作業であった。1966 年アメリカから継足式ブーム付きポンプ車の輸入により作業性改善と省力化が一気に解決された。これを契機に国産のブーム付きポンプ車が主流となる。1997 年集計では、30m を超えるロングブーム車が全体の 40%まで普及している。

コンクリート輸送をまとめる。コンクリートの流動性を利用した輸送の機械化は、ポンプ車の普及により果たされる。その普及経過は、社会資本の急激な整備状況に伴う需要と要請「早く、安く、大量、＝効率化、経済的、省力化」に応じた施工法の代表的な技術開発例である。「輸送作業」が機械化による効率的、採算性により分業化を可能にした一方で潜在する課題もある。

- i：技術的裏付け（締固め、分離、スランプ低下等対応）
- ii：施工での受入れ体制（打設速度、打上り速度）
- iii：使用基準（流動性、水セメント比）

iv：責任分化(製造，運搬，締固めが完全分業し境界責任が不明確)

等が検討，理解されないまま機械化施工の利便性，経済性による急激な普及は，後年に品質問題の一因となっている．

コンクリート輸送という物体移動作業に対して，作業に要求される基本性能（コンクリート物性値の維持，管理）よりも作業工程に求められた要請を機械的効率で対応した他工法の発展過程と類似している．

コンクリート輸送の技術的な裏付けは，1983 年労働省の「コンクリート圧送技士」認定制度および 1985 年土木学会の「コンクリートポンプ施工指針(案)」等の制定によりなされている．

コンクリート輸送作業に対する要求性能は，所要の物性値を得るコンクリートを移動させることであり，短時間で大量に輸送することが目的ではない．

要求性能を発揮できるコンクリート性状を維持して，安定的，早期移動の目的に対する機械化が本来のポンプ車利用であり，機械開発目的である．

施工に起因する問題は，これらの基本作業システムに求められる工学的要求性能に対して施工法が工学的評価にリンクして選択されていないことにある．コンクリートの要求性能に合わせた輸送手段を選択するのが本来の施工法である．土木施工は，経済性，効率性による迅速な大量施工が主目的ではない．本研究は，この他産業の理想とする生産方式と建設産業の生産方式が異なる点に注目し，その生産方式の工学的選択提案を目指したものである．

(3) 締固め作業⁷⁰⁾

締固め工は，コンクリート工の草創期，練混ぜ工と混在していた．その施工法は，表面に水がしみ出る頃合いを締め固めの程度とされていた．

突き固めの道具は，「蛸」と称した棒状の道具で，重力落下を繰り返し締固めた．取り扱う人工数でその重さが異なり 1 人用は 5.6kg，2 人用は 16.9kg 程度であった．機械による突き固めは圧気を利用したリベット打ち機用が一部使用された．締固めには，1m³につき 1～1.5 人程度が必要とされた．

締固めの機械の開発は，当初衝撃による方法から，舗装コンクリートで用いられる表面振動やアメリカ，フランスでの圧気による型枠振動機のような外部からの締固め機械の開発から始まった．

1926 年ドイツで M. Danian が「コンクリート内部へ振動機を挿入することによって流動性を高める方法」の特許を取得し，内部振動機による締固め方法が公開された．表 4.24 に飯田による振動機械の概略史を示す⁷⁰⁾．日本での内部振動機による締固めは，1934 年の国鉄信濃工事局に始まり，1938 年完成の塚原ダムで本格的に行われた．アメリカ製の電動，気動式を始め，国産の電気式 1～3 型（振動

表 4.24 振動機機械の概略史

年代	事項	年代	事項
大正時代	欧米で表面振動機，次に型枠振動機開発	昭和 28 年	建築の仕様書に振動機の使用規定追加
昭和元年	ドイツで内部振動機による締固め法特許	昭和 30 年代	大型工事で振動機多用，振動機高性能化
昭和 5 年	日本で振動締固め工法紹介	昭和 36 年	棒型振動機，内部振動機，JIS 規定
昭和 9 年	信濃川発電工事で輸入内部振動機使用	昭和 40 年代	締固めに内部振動機の使用が一般化
昭和 10 年代	国産品によるダム工事で内部振動機使用	昭和 50 年代	振動機の高性能化，多品種化
昭和 15 年代	土木学会の標準示方書に振動機の使用規定	昭和 60 年代	締固めの自動化，ロボット化の試み

機回転数＝3000～5000rpm）を使用して硬練り（スランプ 4cm）コンクリートの締固め作業を施工している。

1940 年に土木学会コンクリート標準示方書に振動締固め方法が示され一般化するが，普及は戦後の電動式振動機によることになる。

1950 年代～1960 年代にかけて電力増産を背景にダム建設が急増した。ダムコンクリート締固めは，高周波三相誘導 120～125v で 7200～7500rpm の回転数を有する大型の振動機が用いられている。

内部振動機は，1961 年 JISA8610「コンクリート用棒形振動機」により振幅，振動数等が規定され，その所要能力が明示されるようになった。しかし，内部振動機による締固めメカニズムは，使用骨材径，スランプ等複雑で多くの要素があり明確ではないが，一般的には振動筒直径の 10 倍程度が効果範囲とされている。

締固め作業をまとめる。コンクリートの草創期に「蟬」と称される搗き棒による締固めが，衝撃，外部振動，型枠振動等の方法を経て，コンクリート締固め作業が内部振動機による現在の施工法となったのは 1940 年代であり，使用機械が規格化され信頼性能を有する改良が完了するのは，20 年後の 1960 年代である。

コンクリートの締固め目的は，打込み時に混入される空隙を排除し，鉄筋の周囲や型枠の隅々にまでコンクリートを充填することである。コンクリートに要求される所要物性は，締固めが不十分となれば不完全なものになる。

締固め作業は，コンクリート施工の最終段階における重要な作業であるとともに施工対象物の機能，性能を確保する工程である。

締固め方法はフレッシュコンクリートの性状や構造物の形状寸法，あるいは配筋の程度などに対応する機械性能や作業システムの改良（打設時間，打設量の調整，流動化剤の利用等）を積み重ね発展してきた。

締固め機械の高性能化は，作業の省力化と効率化により経済性効果を発揮するとともに急速施工化の一端を担ったといえる。しかし締固め作業の定量化された基準は明確でなく，従来の経験的判断により施工されているのが現況である。特

に省力化は「高齢化、熟練工不足」の将来の社会条件に対応する課題である。安定した品質を得るためには経験的判断からの脱却が不可欠であることを明示している。

コンクリート標準示方書（施工編－11 年度）では「内部振動機を用いること」を原則と、その使用方法を規定している。同解説によれば「振動締固めが十分である証拠の一つは、コンクリートとせき板との接触面にセメントペーストの線が現れることである。また、コンクリートの容積が減っていくのが認められなくなり、表面に光沢が現れコンクリート全体が均一に溶けあったように見えることなどからわかる。」といった定性的な表現となっている。

過不足のない締固め施工が、コンクリートの品質確保に重要である認識を定性的表現でなく定量化する研究もある。コンクリート締固め時の加速度変化とコンクリートの強度、密度の関係が明らかした研究もある⁷¹⁾。また林らは、現場の締固め管理を目標に、「締固め機械＝バイブレータの音とコンクリートの物性値（強度、密度）」に注目し現場の適用結果を報告している⁷²⁾。バイブレータから発生する音の変化は、コンクリートの締固め時の現象と、密接な関係があり、「音圧が大きくなる時間ではコンクリートの振動領域が拡大、また音圧が減少傾向を示す時間ではコンクリート内の水、空気が上昇することにより密度増加する。」と結論付け音圧変化パターンを組込んだ判定装置により実工事適用が可能となったとしている。また、締固め時間によるコア観察により過度の締固めは骨材の粒土分布が不均一となりコンクリートの品質低下を招くとして、締固め作業の定量評価の重要性を強調している。

施工法による経験的判断から定量化による具体的判断を実証した一例である。判断基準に音の利用をすることは、現代の技術力である計測、解析と自然との合体した自然回帰手法の一つである。筆者による色彩、比抵抗等の利用による品質管理手法も同様に工事のデータ化による施工の定量評価である^{40, 73)}。

(4)養生^{64, 74, 75, 76, 77, 78)}

養生の必要性、重要性は、古くから認識され、明治末期に示された施工法書籍には、その期間、外力等に対する注意が細部にわたり記載されている。その概要は「脱型の時期を工事の重要度、天候による目処を示すとともに、型枠の存置期間の注意としてコンクリートに振動を加えないこと、また脱型後は、直射日光、温度の激変を避け、酷寒酷暑にさらしてはならない」と記載し、さらに具体的養生方法は、「脱型後2週間は、湿布、ぬれむしろで覆い、最初の一週間はしばしば散水すること」としている。養生の重要性を認識し、コンクリート工事の本質、核心を示している。1930 年制定の土木学会コンクリート標準示方書で初めて養生

に関して成文化がなされた。最新の平成11年土木学会コンクリート標準示方書(施工編)では「コンクリートは、打込み後の一定期間を硬化に必要な温度および湿度を保ち、有害な作用の影響を受けないように、十分これを養生しなければならない。」としている。細部の基本項目として、「湿潤養生」「温度制御養生」「有害な作用に対する保護」がある。「湿潤養生」では、方法と日平均気温とセメント種別による標準日数を示し「温度制御養生」では、初期養生の重要性と養生期間の考え方、およびセメントの水和反応による発熱、外気温等による温度応力ひび割れ抑制の必要性を示している。「有害な作用・・・」では、若材齢時のコンクリート性質を理解しての取り扱いを示している。示方書内容の変遷を表4.25に示す。

表 4.25 コンクリート標準示方書における「養生」の変遷

年度	項目	内 容	特 記
1930年	方法 期間 型枠	むしろ、布で覆いこれに散水 最低7日間湿潤にする。低温期10～14日程度 標準存置期間を最低気温15℃、3℃以上に分割し部材、構造物の種類で所要日数を規定	気温5℃以下では寒中コンクリートの取扱い規定
1940年：早強セメント使用の場合を追加			
1949年：セメント種類の追加。脱型時期は部材面種類によりコンクリートの最小圧縮強度に応じるように規定。ACIの1940年示方に準拠			
1956年：鉄筋コンクリートに対して暑中コンクリートの章を設ける			
1967年	項目	内 容	特 記
	方法 型枠	湿潤養生 セメント種別、コンクリート配合、構造物の種類、重要性、部材の大きさや種類、部材の受ける荷重、気温天候等、を考え定める原則の記載	詳細を解説に転記 脱型時期の留意事項を詳細に示す。使用セメント、配合により養生期間を明示
1974年	方法 寒中	打設後硬化を始める迄の湿潤養生として、普通ポルトランドセメントを用いる場合、最低5日間湿潤状態の保持を規定 日平均気温4℃以下寒中コンクリート工法としAEコンクリート、打込み温度、養生中コンクリート温度の規定、マスコンクリートの章を設ける。	初期養生の規定、強調
最近の傾向を見る。湿潤養生、温度制御養生、有害な作用に対する保護、促進養生の項目			
1991年	方法 期間 養生 温度	硬化に必要な温度および湿度に保ち養生する 構造物の種類、施工、立地、環境条件による個々の状況に応じる 湿潤養生期間標準は1974年と同じ 若材齢の温度制御による養生、外気温、部材形状による温度応力発生によるひび割れ注意、寒中、暑中、マスコンクリート対応	
1996年：促進養生の項目を温度制御養生に含める			
1999年：外気温、セメント種別による湿潤状態を保つ期間の記載を解説より一覧表示。			
2002年	温度制御 有害作用	解説、促進養生を工場製品に記載 海水の影響に関してセメント種別による養生期間の記載追加	

示方書は、研究成果、実証結果等により改訂がなされてきた。基本的内容は、養生概念とその重要性、定性的目的が示されている。

強度、水密性を長期にわたり維持するため、特に若材令における養生は、コンクリートの温度ひび割れ制御目的として重要な作業である。その実際の施工との

関連に注目すると、セメント種別による熱特性と外気温による積算温度による圧縮強度発現を想定して湿潤養生期間の標準値および目的別養生方法の記載項目は、施工条件による現場養生方法の選択に該当する。土木学会による「コンクリート構造物の耐久性指針(案)平成 7 年」の耐久性指数の算定方式では、その影響を大きく評価している。

しかし示方書等による規定は、固有条件による生産システムの特異性に適宜定量的指標で対応するには十分とは言えない。施工は、経済性や工程、自然条件の変化をうける。養生方法も施工条件（外気温、セメント種別、結合材量）の組合せと外的条件変化に適した期間、材質の選択が必要となる。そのためには、養生を工学的に評価し指標化すれば合理的選択が可能になる。

コンクリートの養生方法は重要であるが具体的進歩がなされていない施工法である。養生方法、養生期間、型枠の脱型時期等が示方書改訂時に順次追加され、養生の標準が示されてきた。最新の示方書(2002 年改訂施工編)でも「コンクリートは、打込み後の一定期間を硬化に必要な温度及び湿度を保ち、有害な作用の影響を受けないように、十分これを養生しなければならない。」としている。

施工における養生の実態は、工学的重要性の認識とは整合していない。養生方法の選択は多くの場合、経験的判断で実行され、その良否は短期のコンクリート品質が目安になっている現状にある。通常的环境条件下においては、養生の良否が、短期間にはコンクリートの欠陥として顕在化しないこともその一因である。

しかし現在、環境保全、循環社会の要請として、コンクリートの耐久性の見直し、施工に起因する早期劣化が注目されている。耐久性に影響するコンクリートのひび割れの内、温度応力ひび割れは若材齢コンクリートの養生が大きく影響する。そして初期のコンクリートひび割れは早期劣化を誘発する。養生の良否が長期的なコンクリートの耐久性に大きく影響することは明白である。耐久性は、構造物の施工ともなう新たな産業廃棄物の発生やセメント製造にともなう二酸化炭素発生等の環境保全面でも有効なキーワードとなる⁷⁹⁾。

養生期間、脱型時期は、セメント種別、配合、打設部材、荷重、外気条件と養生方法を条件に解析したコンクリート性能＝強度発現を根拠に算定できる。養生方法の具体的効果により、養生期間、脱型時期が決まる。養生は、工事工程を左右する経済性を品質の確保と同時受け持つクリティカルな作業と言える。

養生効果を左右する条件は、セメントの水和反応に関連する温度特性である。外気温、拘束条件の外的条件と打設環境である。打設環境は、セメント種別、単位結合材量、水セメント比、打設温度、打設間隔、養生方法である。打設環境の組合せによりコンクリートの性状を解析することで養生方法の差別化が可能となる。コンクリート工という施工システムは、輸送、締固め、養生等の基本作業に

より構成される。基本作業は、全て工学的根拠により裏付けられた作業である。

施工の主目的である諸物性を確保するためには、その作業も工学的評価による選定で実行される必要がある。

(5) 型枠工⁸⁰⁾

型枠工は、構造物の機能を発揮する構造体の構築および鉄筋、コンクリートの要求性能を発揮させるための重要な工種である。コンクリート工の成立に必要な段階的工種で基本作業システムを構成する。型枠の役割と重要性を表 4.25 に示す。

表 4.26 型枠の機能

役 割	影響する機能要素
必要部材の形状、寸法の確保	構造物の機能
水和反応の進行補助	コンクリートの性能
構造体の精度確保	構造物機能
鉄筋のかぶり厚さ確保	コンクリートの性能
コンクリートの表面仕上げ	コンクリートの性能と構造物の機能、美観等

次に型枠の変遷を見る。型枠のプレファブ化は 1920 年にバラ板と栈木の組合せにより考案された框式パネルが最初とされる。1965 年以降に合板パネルが普及するまでの約 50 年にわたりこのパネルは、型枠の主流として使用された。

型枠の変遷は、日本の経済成長を背景にした材料産業の発展過程と連動する。合板パネルは、生産背景（原材料を輸入し加工する加工産業の活況化）による経済性（材料輸入、大量生産、転用性）と材料の使用性（経済性、軽量、加工性）により一気に使用率が高まる。また、合板パネルが使用され始めた 1965 年以降（昭和 40 年代）、日本経済は高度成長期にあり工事量の増大がその普及を促進した。

この年代は、建設機械の普及による省力化、合理化、短縮施工が浸透した時期である。機械化による移動、運搬が可能となり大型型枠（大判サイズ、組立方式）、システム型枠（スライド式）の開発もされた。

一方、木材以外の材料では、1955 年以降（昭和 30 年代）に日本住宅公団が省力化の一環として、メタルホーム（鋼製パネル、アングル材により構成）を採用したが、重量的に大きく、細部加工が困難であることから汎用的とはならなかった。しかし合板と比較して転用使用に対応できることから繰り返し作業により構築される構造物ではシステム化されて（ダム工事におけるスライドホーム、トンネル工事のスライドセントル）使用されている。同時期にアルミ、プラスチック製品等による型枠材料の多様化が図られたが加工、費用の面で使用範囲が限定され普及には至らなかった。

1975 年以降（昭和 50 年代）建築分野で施工合理化の一環として打込み型枠工法

が開発された。型枠材をコンクリート材料と一体化する工法で、構造機能やコンクリートの物性に影響を及ぼさない材料としデッキプレートの使用が代表的な例である。打込み工法は型枠解体作業がなくコスト縮減と工程短縮等の利点以外に環境対策(合板低減による森林保護)の観点でも採用される傾向である。

最近の構造物基礎部の土留め工法によるセメント系壁を外型枠とする工法も打込み型枠の一種と言える。土留め工法である連続地中壁を外型枠として使用し地山との密着も合わせて図り、経済性と構造上の優位性を確保する施工法として近年採用が多くなっている。

構造の一部をプレキャスト化して型枠とする工法も開発されてきた。建築工事における、薄肉レキャスト板と立体鉄筋トラス筋を組合せた合成床工法で1973年頃より広く採用されている。土木工事では1997年に完成した石小屋ダム(宮が瀬ダム副堤)は、上下流面に自然石に意匠されたプレキャスト大型ブロック(1.4~2.9t)が型枠として、また構造体の一部として使用された。その他ダム工事では、工期短縮、安全性の向上、熟練工不足等の対策としてプレキャスト製品による堤体内構造物の構築が数例実施され、今後も採用が増える傾向にある^{81, 82, 83, 84, 85}。

型枠工法の変遷は、材料変遷と社会要請による合理化対応といえる。材料の主流は、せき板、框式パネル、合板パネルと変化しているが木材である。型枠に要求される役割を果たすためその材料は、細部加工が不可避であるという特異性があり、合板パネルの使用が長く続いている。

今後の型枠の課題の1つには、少子高齢化時代における熟練工と労働力の不足が進行する国勢への対応がある。構造物の設計、企画段階に遡り形状もライフサイクルコストを考慮した規格化、単純化もその対応策として必要となる。前述のプレキャスト化、型枠の機能と構造物の機能を複合的に扱う工法等は、その具体策に含まれる。型枠のプレキャスト化は、工事の建設地条件から運搬重量、運搬距離、生産量等で経済的課題もあるが、工場生産による品質管理と、省力化による工程短縮に有効な工法である。更に耐久性を必要とする構造物表面の物性値を確実に確保できる構造上の利点も有している。将来の熟練工不足と労働力問題は、コンクリート工の基本作業システムを構成している単に型枠作業に留まらず、初期施工不良による耐久性、機能性、美観、環境等の問題に波及する。建設産業におけるこれらの多くの課題にとってもプレキャスト化は有効な工法となる。

今後の課題の二つ目は、1990年代になり地球規模の環境保全の一つである熱帯雨林保護や建設廃材の減容化に呼応し、合板パネル活用に対する代替材料、工法開発、改善の研究である。

型枠工は、材料、工法の複合化、システム化といった総合的思考による展開で開発が図られると考える。前述の社会経済、自然、社会環境からの建設産業への

要請内容は、型枠に見られるように地球規模から工種の細部にわたっている。

一つの施工法、一つの工種に限定された対応では困難になりつつあるのが現状である。図 4.5 に将来の型枠工法の概念図を示す。

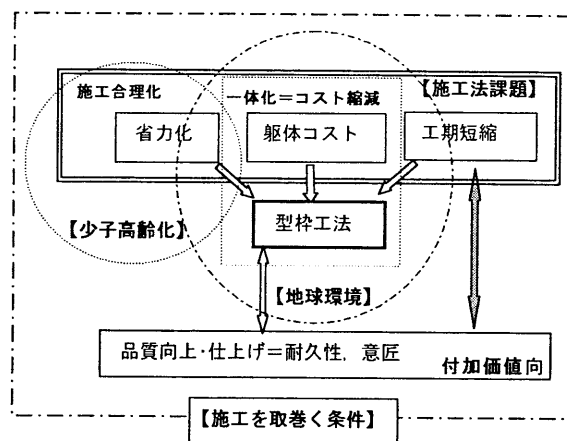


図 4.5 型枠工法概念図

4. 6. 3 まとめ

練混ぜ、輸送、締固め、養生、型枠とコンクリート工の作業システム構成する基本作業の変遷を考察した。コンクリート工が、建設工事における要求機能、要求性能に対応する最終工程となる。掘削、土留め、止水工等々は、コンクリート工を施工する準備、仮設段階（本工事として工事完成以降その機能を残す場合もある）といえる。準備、仮設工事、土工事等の工種目的は、要求性能、機能を満足するコンクリート工を施工することに収束する。生産システムはこの目的のために施工システム、基本作業を選択する。一方で経済性の重視という社会要請に対して、分業化、専門化による運営等の優位性による効率化が図られた。その結果コンクリート工の基本作業は、練混ぜ、輸送と締固め、養生が分業、専門化された。

練混ぜ、輸送は、機械化による性能向上と大量施工による経済性が発揮された。一方で分業、専門化された基本作業は、独立作業的な目的が優先される面も生じた。各作業に課せられた工学的施工目的の希薄化、責任の境界が不透明等の欠点に対して各工法の変遷を通して検証された形跡はない。機械化の変遷面の評価でしかない。システムとしての前提を見直す時期でもある。

一方各作業の位置付けは定性的であり作業目的の優劣が作業員の経験と能力に依存している現況も指摘できる。

特に締固めと養生における施工法の作業規格、選択手法に工学的指標は示されているとはいえない。その点を指摘し、音による締固めの定量的判断を提案する

研究もある。本研究の目的もコンクリート工の重要性とその施工評価と定量化にある。時代の要請、価値観は、施工法の変遷に大きく影響を与えている。その背景が従来の消費社会による量的生産の拡大から、循環社会による質的改善による効果の検証に変化してきた。建設産業の生産に関わる施工機械、施工材料の選択、施工法の選択、全てを関連させた総合的な評価もパラダイムシフトが必要とされる。持続する社会資本の構築が目標とする要求性能を施工法がいかに果たすかが問われている。多くの場合、その要求性能はコンクリート構造により目的が果たされてきた。施工法は、要求性能、機能を合理的実現する必要がある。合理的とは、要求性能、機能が工学的設計に基づくと同様に工学的評価を担保として選択されることである。本研究の目的とする所以である。

第4章参考文献

- 1) 志水茂明：ダム施工の実際・(社)全日本建設技術協会出版，pp. 1～7, 18～31, 昭和 60 年 1 月
- 2) 加藤徹夫、舎川徹：ダムにおけるコンクリート施工法の移り変わり，コンクリート工学 Vol. 19, No. 10, p 69-75, 1981 年 Oct
- 3) 坂本忠彦，藤沢侃彦，永山功、吉田等、柏井条介：ダム技術史，土木技術資料 8-11, pp. 32-37, 1996
- 4) 竹村公太郎：ダムと日本文明，ダム工学 Vol. 11, No. 3, pp. 195-210 (2001)
- 5) 藤本保：講演会資料「ダムを取り巻く最近の話題」1995 年 9/13
- 6) 坂田憲次：我が国のコンクリートダムの現状と課題，コンクリート工学 Vol. 38, No. 3, pp. 3～8, 2000. 3
- 7) 糸林芳彦編著：新体系土木工学 76・ダムの施工，pp. 9～21, 技報堂出版・1980
- 8) 吉田等：ダム，コンクリート工学 Vol. 39, No. 5, pp. 48～51, 2001. 5
- 9) 山住有巧，播田一雄，田中靖：面状工法の構成とコンクリート運搬・打設システムその 1，ダム技術 No. 82, pp. 50～64, 1993,
- 10) 山住有巧，播田一雄，田中靖：面状工法の構成とコンクリート運搬・打設システムその 2，ダム技術 No. 89, pp. 33～49, 1994
- 11) 佐原晴也，庄司芳之，深井大二郎：PCD 工法と高流動コンクリートの組合せによるコンクリートダムの施工法，電力土木 No. 280, pp. 118～120, 1999. 3
- 12) 財団法人日本ダム協会・ダム合理化施工委員会：平成 8 年度「PCD 工法調査報告書」pp. 109～153
- 13) 地盤工学：50 年の歩みと展望，2000/7/16
- 14) 三木博史：総括：50 年の歩み「切土・盛土・斜面安定」，土と基礎 47-11(502)，

- pp. 54～57
- 15) 豊田正夫：高速道路における時代背景と緑化，日経コンストラクション 2000-3-24
 - 16) 和田一範，井上直樹：ダム建設における Co2 発生量の把握とその抑制方策，ダム日本 No. 670, pp. 41～54
 - 17) 西淳二，清水隆文，加藤貴也，田中正：環境面から見た地下鉄建設工法の評価，トンネルと地下第 30 号，pp. 47～53, 1999
 - 18) 杉浦省悟：環境に配慮した土地開発と防災各論 宅地開発での法面保護と自然斜面への配慮，基礎工 1999-10, pp. 74～77
 - 19) (社) 日本建設機械化協会：建設機械の 50 年史，平成 11 年 5 月
 - 20) (社) 日本建設業団体連合会：日建連三十年史
 - 21) 中村靖治：公共事業戦後 50 年の変遷・土木施工 40 巻 11 号，pp. 9～15, 1999. 11
 - 22) 徳長政光：建設機械の排出ガス対策が新たな局面へ，月刊建設 01-9, pp. 52～54
 - 23) 丹羽誠，大倉浩二：GPS によるロックフィルダムコア材の締固め管理，第 53 回土木学会年次講演会概要集第 6 部門 VI, pp. 668～669
 - 24) 藤野順也，山崎建雄：骨材製造について，コンクリート工学，Vol. 39, No. 5, pp. 23～26, 2001. 5
 - 25) 十河茂幸，信田佳延，栗田守朗，宇治公隆：コンクリート名人養成講座，pp. 24～68, 日経 BP 社. 2000, 10
 - 26) 阿部道彦：コンクリート用骨材の課題・コンクリート工学，Vol. 34, No. 7, pp. 4～7, 1996. 7
 - 27) 古川孝雄：骨材産業のあり方について，コンクリート工学，Vol. 34, No. 7, pp. 8～12, 1996. 7
 - 28) 江良誠至：砕石，コンクリート工学，Vol. 34, No. 7, pp. 18～25, 1996. 7
 - 29) セメント・コンクリート：特集「これからの骨材はどうなるのか」No. 618, 1998. 8
 - 30) コンクリート工学：特集「骨材問題を考える」Vol. 34, No. 7, 1996. 7
 - 31) 通商産業省生活産業局窯業建材課：骨材問題研究会中間報告書（案）平成 4 年 7, pp. 1～22
 - 32) 片平豊，河野広隆：1992～1999 年に実施したコンクリート用骨材の実態調査，土木技術資料 42-8, 2000
 - 33) 河野広隆，森濱和正：レディミックスコンクリートの品質実態調査，土木研究所資料 No. 3409, 1996. 1
 - 34) 山本泰彦：コンクリートのワーカビリティおよび強度に及ぼす粗骨材の特質，コンクリートジャーナル，Vol. 7, No. 11, p. 11～21, 1969

- 35) 岡田清, 明石外世樹, 小柳洽: 新編土木材料, pp. 125～126, 国民科学社 1994.
- 36) 吉兼亨: コンクリートの製造, コンクリート工学, Vol. 39, No. 5, pp. 27～30, 2001. 5
- 37) 片平豊, 河野広隆: 砕砂を使用したコンクリートの単位水量低減手法の検討, 土木技術資料 44-1, pp. 26～31, 2002
- 38) 廣瀬利雄, 藤沢侃彦, 永山功: コンクリートダムにおける骨材有効利用技術の構築, 最適骨材評価コンクリートの開発に向けて, ダム技術 No. 128, pp. 3～6, 1997. 5
- 39) (財) 日本ダム協会: 施工技術研究会第二部: 「ダム用骨材の採取・製造に関する実態調査」・平成 10 年 3 月
- 40) 新美孝之介, 片岡昌裕, 大倉浩二: 岩の色彩に着目したロック材料のゾーン判定方法の開発, 電力土木 2001No. 294, pp. 113～115
- 41) 例えば, 植野修昌, 新美孝之介, 丹羽誠, 松井保: 見かけ比抵抗を用いた盛土管理手法の開発と適用事例, 地盤工学会誌第 48 巻第 4 号, pp. 29～32, 2000
- 42) 阿部道彦: コンクリート用骨材の課題, コンクリート工学 Vol. 34, No. 7, p5・図-1, 1996. 7
- 43) 石倉武, 最首貞則, 助清満昭, 友澤史紀: 高品質再生骨材製造技術の開発, コンクリート工学 Vol. 37.]No. 7, pp. 16～23, 1999. 7,
- 44) 建設通信新聞 2001 年 6 月 18 日: 国土交通省 骨材需要動向調査
- 45) 黒田正和, 渡辺知秀, 山田智広: 道路工事における地域骨材再利用計画, 土木学会論文集 No. 678/VII, pp. 31～36, 2001. 5
- 46) 石塚忠範: 骨材需要動向調査, 月刊建設 01-10, pp. 52～53
- 47) 國分正胤: 粗骨材の破碎値とコンクリートの圧縮強度, コンクリート工学 Vol. 128, No. 2, pp. 41, Feb. 1990
- 48) 日本砕石年間(平成 7 年版), 砂利採取業務報告, 及び 11 条報告
- 49) 工藤勝弘: 骨材産業の現状と今後の課題, セメント・コンクリート No. 618, p15 表 1(砂利採取業務報告書)
- 50) 工藤勝弘: 骨材産業の現状と今後の課題, セメント・コンクリート No. 618, p17 表 6 骨材需給の推移(通産産業省生活産業局窯業建材課推計)
- 51) 江良誠至: 砕石, コンクリート工学 Vol. 34, No. 7, pp. 18～25, 1996. 7
- 52) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和己: コンクリートの科学と技術, pp. 41～54 山海堂平成 8 年
- 53) (社) コンクリート工学協会: マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, pp. 7～9, 1985. 11
- 54) 社団法人日本建設機械化協会編: 骨材の採取と生産, pp. 57～59, 290～299,

- 技報堂, 1988. 4
- 55) 岩崎孝: 骨材資源の現状と課題, その品質を検証する, セメント・コンクリート No. 618, pp. 28~49
- 56) 鈴木澄江, 信田佳延: コンクリート用骨材の国際規格と JIS と ISO の試験方法の比較と現状, コンクリート工学 Vol. 37, No. 10, pp. 11~23, 1999
- 57) 資源エネルギー庁鉱業課, 砂利採取業務報告書表
- 58) 古川孝雄: 骨材産業の今後のあり方について, コンクリート工学 Vol. 34, pp. 8~12
- 59) 江良誠至: 碎石・砕砂, セメント・コンクリート No. 618, pp. 50~57, Aug. 1998
- 60) 長瀧重義: コンクリート施工法の変遷と今後の方向, Vol. 23, No. 7, pp. 24~32, July 1985
- 61) 田村浩一, 近藤時夫, コンクリートの歴史・I 設計編, II 材料・施工編, pp. 281~326, 山海堂 1984. 7
- 62) 國分正胤: 土木におけるコンクリート施工の移り変わり, コンクリート工学 Vol. 18, No. 6, pp. 71~78, 1980. 6
- 63) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和己: コンクリートの科学と技術・山海堂平成 8 年 3 月, pp. 9~152
- 64) 岡田清: 練混ぜ, 締固め養生方法の移り変わり, コンクリート工学 Vol. 19, No. 5, pp. 70~78
- 65) 渡部正: 練混ぜ技術, コンクリート工学 Vol. 33, No. 3, 1995, pp. 42~46
- 66) 横須賀誠一: 運搬打込み工法の変遷, コンクリート工学 Vol. 30, NO. 5, pp. 97~101, 1992. 5
- 67) 榎本精一: コンクリートポンプ圧送, コンクリート工学, Vol. 40, No. 1, pp. 72~76, 2002
- 68) 高橋久雄, 中根淳: 建築における施工機械の移り変わり, コンクリート工学 Vol. 19, No. 9, 1981. 9
- 69) (社) 全国コンクリート圧送事業団体連合会監修: コンクリートポンプ圧送マニュアル改訂版 pp. 1~10, 平成 11 年 3 月
- 70) 飯田一彦: 締固め工法, コンクリート工学 Vol. 33, No. 1, pp. 81~84, 1995. 3
- 71) (社) 日本コンクリート工学協会・フレッシュコンクリートの挙動研究委員会振動締固めワーキンググループ: コンクリートの振動締固めに関する実験報告書, 1990 年 3 月
- 72) 林正造, 堺逸郎, 萩野守, 石橋則秀, 栗本雅弘: 「バイブレータ音を利用したダムコンクリート締固め判定」, 平成 12 年度ダム工学会技術開発賞公開審査会参考資料 p55~62

- 73) 植野修昌, 新美孝之介, 丹羽誠, 松井保: 見かけ比抵抗を用いた盛土管理手法の開発と適用事例, 土と基礎 Vol. 48, pp. 29~32, 2000. 4
- 74) 十河茂幸, 信田佳延, 栗田守朗, 宇治公隆: コンクリート名人養成講座, pp24~68, 日経 BP 社. 2000, 10
- 75) コンクリート工学: 20 世紀のコンクリート工学発展史, Vol40, No. 1, pp. 3~6, 2002. 1
- 76) コンクリート工学: コンクリート技術の変遷年表, Vol.37, No. 1, pp. 112~140, 1999. 1
- 77) 土木学会: 1974, 1991, 1996, 1999, 2002 年制定コンクリート標準示方書(施工編)
- 78) 堺孝司: 寒冷環境におけるコンクリートの養生, コンクリート工学 Vol. 33, No. 3, pp. 89~92, 1995. 3
- 79) 長瀧重義, 久保田真: 「コンクリートの技術の変遷と将来展望」, コンクリート工学 Vol. 37, pp. 5~12, 1999
- 80) 吉野次彦: 型枠工法, コンクリート工学 Vol. 33, No. 3, pp. 93~92, 1995. 3
- 81) 西田博, 渋谷文利: 宮が瀬副ダムの PCD 工法, ダム技術 No. 154, pp. 26~43, 1997. 7
- 82) (財) 日本ダム協会: ベルトコンベヤ, ポンプ工法施工事例調査報告書平成 10 年 3 月 pp.109~163
- 83) 三上章, 井川貴史, 床田政弘, 宮下芳高: 「ダム堤体内構造物(通廊)のプレキャスト化施工ー大滝ダム建設工事」, コンクリート工学 Vol, 38, No. 4, pp. 33~37, 2000. 4
- 84) 永山功, 真下和彦, 稲留裕一, 佐藤健一, 赤坂雄次: 「宇奈月ダムの施工の特徴について」, ダム日本 No. 666, pp. 55~66 ダム技術 No. 154, pp. 26~43, 1997. 7
- 85) 永山功, 渡辺和夫: 「ダム」, コンクリート工学 Vol35, No3, pp. 28~31, 1997. 3

第5章 施工事例による問題提起^{1, 2, 3, 4, 5, 6)}

5. 1 はじめに

施工現場に携わる土木技術者として、施工に起因する土木構造物の信頼性への不信、不安を起こした事例は、本研究の最大の背景である。

時代の転換期を迎え土木構造物への社会的要請は、造る側と使う側の一体化した価値観により評価されることがより不可欠となった。むしろ現在では、設計側の理論、施工側の理論以上に、社会的価値観に有意性がある。

環境、安全は、人間の社会生活に直結する地球的命題となっている。環境は、自然環境との共生であり、地球環境保全に対処する循環型社会の構築である。安全は、ライフサイクルコストを考えた長期的な確保が必要である。この両者に共通する土木構造物への要求性能は、大半の構造物を構成するコンクリートの長寿命、耐久性でもある。

日本における近代社会資本の整備は、戦後60年の間に世界的にも類を見ないほど急激な進展をした。整備された基盤施設の維持、管理や修理および更新時期の問題は、近年多くの場面で多く提起されている。その前提となるのは、適切な施工であり、適切な施工は、適切な手法、良質な材料が基本となる。現在、特に問題とされているの耐久性は、不適切な施工による早期劣化である。その不適切と指摘される施工の問題点を以下の報道事例、調査事例により考察する。考察から本研究の目的である施工法の工学的評価による合理的選択手法の提言目的を明らかにする。

取り扱う事例は、1. 報道事例、2. ポンプ車の現状(水セメント比)、3. 三省調査委員会報告、4. 山陽新幹線トンネル履工技術に関する検討報告、5. コンクリート構造物の不具合調査事例である。

5. 2 コンクリート不具合事例の検証^{7, 8)}

5. 2. 1 コンクリート劣化報道^{9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)}

コンクリート劣化報道のキャンペーン記事に示される原因、事実を時系列にまとめて見る。見識者の意見についても検証する。

(1) 新聞報道事例

1) 事例1¹⁶⁾

『福岡トンネルは1970～1975年にかけて「コンクリートポンプ車」によって連続的にコンクリートを流し込む工法で建設された。トンネルコンクリートは、全体を一体化させるため乾かないうちに次のコンクリートを打継ぐ必要があるが、①機械の故障②パイプの詰まりのため、コンクリートの一体化が不十分である』とJR西日本の調査で指摘。さらに同年7/26日同調査の中間報告には『①コンクリート強度と水セメント比、海砂による塩害等の材料の問題②コンクリートポンプ圧送の未発達③漏水の影響④列車振動と空気圧変動等の複合要因が剥落原因』と設計、施工、施工後にわたる全行程の原因が指摘されている。

2) 事例2¹⁷⁾

高架のコンクリート片落下事故に関して『アルカリ性だったコンクリートが次第に浸透していった空気中の炭酸ガスと反応して中性化し、鉄筋の表面の保護膜が損なわれる「中性化現象」が発生、鉄筋がさびて膨張したため、コンクリートがひび割れて落下した。』と報道された。これは、その劣化進行が自然環境の変化（気象、雪害等地域及び地球環境による）に影響されるとの指摘である。コンクリート構造物は建設される環境、特に厳しい気象条件や施工後の周辺環境により劣化速度が異なるとの警告でもある。構造物の建設立地環境を考慮したコンクリート設計、施工が必要であるとの指摘と捉えられる。

3) 事例3^{18, 19, 20)}

『山陽新幹線の全トンネル142本(約280km)を目視検査の結果、コールドジョイント現象が93本で多数の施工不良カ所計2049カ所が見つかった』と報道。さらにその原因分析として『72年3月開業の新大阪～岡山間（トンネル数31本）の61カ所に対して75年開業の岡山～博多間（トンネル111本）では1988カ所（全体の97%）と集中している。1km当りに換算すると岡山以东のトンネルは1.1カ所、以西では8.9カ所になる。この現象を地域分析した結果として広島、山口県で12.4カ所と集中している。

岡山以西にコールドジョイントが集中している理由に関して、①建設時期が70年前半の高度経済成長期における突貫工事②石油ショックと重なり、良質な砂やセメントなどのコンクリート材料が不足』と調査報告と見解が示されている。施工年代の社会経済情勢における建設産業への影響や施工体制を指摘している。これらの事故以後も、コンクリートの落下事故等が続き、種々の報道及びその原因の解析コメントや構造物の維持、点検方法のあり方も併せて報道されている。その何点かを事例として取り上げ起因とされる施工法の問題点を抽出する。

4) 事例4^{21, 22)}

小林一輔氏は、『岡山以西のトンネル工事は、地下水に悩まされ非常に難航した。工期に追われたことが、コールドジョイント多発の原因ではないか。』と工事条件

の地質に対する施工対応と経済成長期の社会的要請でもあった急速施工の問題を指摘している。大西有三氏は『コールドジョイントだけでコンクリート落下する可能性は低いが、他のひび割れなどと組合わされると危険性が高くなる。壁の内部でひび割れが進む場合もあり、目視検査の結果だけで安全かどうか判断するのは早急』と複合作用の危惧を指摘している。

特に注目する指摘は、不適切な施工によるコールドジョイントやひび割れが他の要因と複合的に組合わされた場合の危険性である。つまり不適切な施工により起こる不良現象は単一に留まらず複合化するとの指摘である。

また工法に関して、江崎哲朗は 1999/7/6 に『トンネル上部からコンクリートを流し込む〈引き抜き工法〉工法が均等にコンクリートを充填できず事故の原因』と 1970 年代のコンクリート打設工法技術の問題をあげている。さらに『70 年代以前は海砂を使用したり、打ち込み方や湿度、温度管理に未熟な面があった。』と当時の材料問題や全般的な施工技術、施工管理面の問題を指摘している。この指摘は、施工年代における技術面での問題、併せて施工時の品質の管理内容と方法の把握が、今後の維持補修技術を考えるのに必要不可欠であることを示唆している。

5) 事例 5²³⁾

『山陽新幹線の高架におけるコンクリートの中性化事実が既に 1987 年に把握されていた』と「情報の公開」に関しての不備を指摘する報道がある。そしてその中性化事実として、『中性化は通常 20～30 年で 1cm 程度しか進まないのに僅か 10 年で平均 1.5cm と通常の 2～3 倍の速さで進んでいる。最大 3.2cm, 2cm 以上の中性化は 90 カ所に上る』と報道し、この中性化進捗の原因をコンクリートの品質不良と施工不良が原因と断定している。

この報道は、従来と違い「安全性」に関する危惧、「危険箇所の明示」等の情報公開の問題と早期劣化の原因が施工にあるとの報道である。危険性の情報開示は、建設産業のみならず日本の社会システムの変革を促すものである。

この事象は、今後情報公開、説明責任等により施工法の技術的評価が、第三者の価値的判断を必要とすることを示唆している。

6) 事例 6^{24, 25)}

宮本文穂氏は、『事故の可能性をゼロにするためには国民もそれだけの費用を負担する覚悟が必要』と事例 5 に示す情報の開示と説明責任に関するコメントを示している。社会資本整備の選択時代における国民の認識合意の重大性を指摘している。今後の社会資本整備は、事業の必要性と同様にその執行形態やその実施手段である施工法の選択が各々の位置づけにより系統化されるシステム的に評価される必要がある。

7) 事例 7 ²⁶⁾

魚本健人氏は赤外線調査による施工段階でコンクリートの均一性を確認する方法の提案として『施工状況がリアルタイムに分かれれば作業員の意識向上につながる、工事内容を現場レベルでデータとして評価することが大切』と指摘している。施工段階での品質確保とその重要性、及びその認識レベルを作業員に周知する重要性を強調している。

この提案は、本研究の施工法の量的評価と同根発想と考える。工事内容をデータ(例えば施工中のコンクリート水分量の測定値と水セメント比)として評価することは、データに基づく必然的な施工法選択となる。対応する施工法もデータ評価が必要となる。工事内容と施工法のデータ評価は「施工の目的、施工法の役割」を明確にし、リアルタイムな管理ができる大きな要素である。

さらに魚本氏は、『将来の危険性として仕様規定から性能規定への変革が進む中、適切な工事チェック体制は、節目ごとに行う必要がある』と指摘し従来のやり方では、施工の適、不適は表面上判断が困難とし、耐久性や強度のチェックが必要としている。

これらの指摘は一連のコンクリート事故における「施工体制、施工法」の問題を具体的対策とともに指摘している。施工にかかる比重の重要性が「造る」といった生産システムからそのシステムにおける「品質、要求機能の確保」といったマネジメントに変わる必要を指摘している。この指摘を施工法に展開することは、経験的で定性的施工を「品質、機能」の「具体的、量的」評価により選択して実施するシステムが必要となる。本研究での提案は、現場レベルでの施工手段が、工学的評価による指標を示すことで、作業段階でのリスクマネジメント体制が明確になるという発想である。

8) 事例 8 ²⁷⁾

10月に発生した北九州トンネルの事故は、図 5.1 に示すトンネルのアーチ部と側壁の接続部で起こった。『工法そのものには問題がなく、施工ミスの疑いがある』と指摘された。本来ないはずの不連続面の発生と「急速施工」によりコンクリートを一気に流し込んだため側壁内部のコンクリートの比重にばらつきが生じ、(上部が軽い)打ち込み口の下部からひび割れの起こる可能性が高くなった。』と小林氏は指摘している。

本来ないはずの不連続面は、施工時の湧水処理が十分でなく打設時点で打ち継

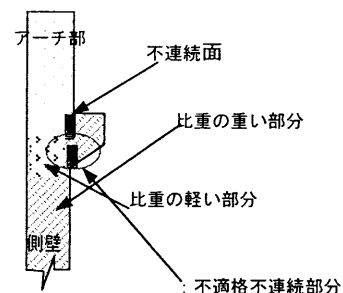


図 5.1 コンクリート落下部分図

目に沿って生じたと判断できる。施工目的が把握されない施工管理である。

また指摘された急速施工による不適箇所の発生は、「施工手段の適正化＝施工の機械化と分業化」が本来のコンクリート構造物構築過程においてその施工役割をどう果たしてきたかを問う必要がある。施工の省力化と要求性能の確保の整合は、事例 7 での指摘通り、工事内容を現場レベルでデータとして評価することで工学的に可能になる。施工段階での品質確保とその重要性、及びその認識レベルを作業員に周知させるには、施工法の具体的な内容の提示が必要となる。例えば、要求性能を満足するコンクリートを打設する目的に対して、輸送の所定時間、打上り高さを管理する打設速度の制御と締固め管理を定量的に具体化する必要がある。

(2) まとめ

山陽新幹線のコンクリート剥落事故以来、その原因や類似するコンクリートに関する事故に関して、一般紙が大きく報道した。その報道内容から 8 事例を抽出した。示された解説でコンクリートが本来的に有する性能劣化ではなく、施工による原因とする所見箇所にアンダーラインを引き識別した。その指摘事項を 3 項目別に整理する。

1) コンクリート材料および品質管理に関する問題は

①材料に関する問題－海砂の使用，良質でない材料の使用

②コンクリートの品質管理の問題

一水セメント比管理，打込み方(急速施工，充填不足)，温度管理等の未熟さ

③施工とひび割れの複合作用(急速施工による壁内のコンクリート比重差によるひび割れ，品質管理不足によるひび割れ)

2) 施工に関する問題

①施工法の技術水準や建設機械能力の問題

②建設環境(＝経済情勢による社会的要請)に対応した施工の問題

◇突貫工事，急速施工等と施工法の関連

③地質，地下水等の施工条件(周辺自然条件と施工の時系列変化)と施工法の整合問題 ◇施工法の適正選択と適正手順の確認

④施工法における末端作業の目的の認識と品質管理の問題委

◇定性的指示，経験的施工および一般的生産目的による機械化施工(施工効率，経済的理由による専門業種化と分業化施工)

⑤施工段階(工事現場)での工事内容のデータ評価による構造物構成要素の基本機能確保の問題

⑥作業員の意識向上による品質確保の問題(リアルタイムな状況判断方法による)

◇品質，機能確保の問題の原点が現場，作業員にあるとの指摘

◇現在の施工法の実施方法照査と実施形態の確認

3) 情報開示に関する課題

①情報公開による技術，研究の水平展開

②施工データの共通認識による点検，補修システムの確立（施工方法と利便性の選択，機能維持の評価による選択）

◇情報公開の範囲，方法，手段の確立

◇維持，補修に関する合意形成システムとライフサイクル認識

③公共投資，社会資本整備に関する国民の合意

◇供与の時代から選択の時代へのパラダイムシフト（工法以外の評価）

◇目的の明確化．利便と代償選択（施工代替案選択→施工法の選択理由）

以上を施工法の内容で総括すると以下の3点にまとまる．

a：施工全体の問題（塩害，自然環境による劣化進行，骨材問題，工法不適合）

b：実施段階での施工問題（リアルタイムの基本作業の工学的評価と施工管理）

c：社会情勢変化による施工法評価（情報公開による合意形成システムの確立）

5. 2. 2 水セメント比調査事例²⁸⁾

「水セメント比」に関して「生コンへの加水」の現状として全国生コンクリート工場 3600 のアンケート結果がある．

内容は，「加水」要求の有無，頻度，加水の原因について「コンクリート工」の実情を示している．

(1) アンケートの結果

1) 建築，土木(5 種類のスラブ種別調査) 共通で，加水要求は全国で 5～6% と少ないが都市型地域では 30% と高い．現場の要望は「スラブを 2～2.5cm 下げる」との結果でありその理由を以下に列記する．

①都市部で多くなる原因は，鉄筋コンクリート構造物の強度が高まるのに伴って配筋量の増加と経済性による設計断面の縮小が背景にある

②都市部ではコンクリートの打設時間の短縮．

その原因は，作業時間の制限である．理由は生活環境保全＝通学，生活時間帯の不施工，工事占用の時間制限，騒音，振動等の規制増加等の社会的な施工環境規制による純労働時間の削減現象にある．

③狭小地作業と作業面積の限定

都市部では荷下ろし地点と打設地点の距離が長い工事が多い．この場合，季節や配管径，打設時間帯等により一様ではないがスラブが低下する．

①～③に示された理由は，施工実態の一端である．

2)分類された項目の考察²⁹⁾

①に示される項目は設計，計画段階に遡る問題である．図 5.2 に建設事業の実施過程における工事当事者の役割分担を示す．わが国では，計画，設計，施工の機能別に業務が分担されている．施工の実情が業務の異なる設計段階に遡ることは，殆ど無い．

研究開発	日 本			アメリカ		ドイツ		
	官公庁	大学等	建設会社	官公庁	大学等	官公庁	大学等	建
企画	官公庁		大 建	官公庁	大学等	官公庁	大学等	建
設計	官公庁	大学等	建	官公庁	大学等	官公庁	大学等	建設
施工	建設会社			建設会社		官	建設会社	

図 5.2 建設事業の実施過程における工事担当者の役割り分担の比較³⁰⁾

明治 30 年以来，昭和 30 年代に至るまで企画，設計及び施工段階の技術的業務は直営方式であった．欧米先進諸国と比較して発注者の役割が大きいことに特徴がある．請負方式による工事施工においても，発注者は設計，施工にも関与し発注者の指示通りに施工することが基本となっていた．1998 年に策定された「公共工事の品質確保等のための行動指針」は，施工の役割と責任分担を明確にする考え方を示した．これにより建設産業は，施工の責任と同時に設計，施工技術の提供ができる範囲が拡大したといえる．施工の自由裁量範囲が拡大しても設計による要求性能を満足させる原点が現場での確実な施工にあることを特に強調したい．つまり設計思想を反映するためには，現場における施工実態のフィードバックシステムが確実，迅速また水平展開されるシステムが必要である．

設計の高度化，複雑化，経済性による施工難度に対する施工性の配慮は不可欠である．特に最終目的構造物の機能，物性が求められるコンクリート工設計は，経済性評価による断面の縮小化からライフサイクルコスト概念による材料や断面の検討や施工性に及ぼす影響まで詳細に検討すべきである．その目的を遂行するには性能規定の導入による施工側からの発想が有効手段にもなる．

②に示される施工環境は都市部に限らず地方でも厳しくなっている．生活環境の保全は，年代とともに複雑化して施工性や工程に大きく影響している．施工の時間規制は，施工目的，経済性や施工計画全体にまで影響を与える場合がある．

施工能力は，施工目的と作業条件により施工法，使用機種，機械規格，投入台数を選定する．しかしその能力算定は，実稼働時間を根拠に算定される．従いその時間が確保できない場合は，極めて広範囲で大きな影響を与えることになる．極端な例では構造物の分割施工や工程遅延による長期打継ぎ放置等も起こり得る．

一般的に施工段階では，日当りの実質施工時間内で対応するための効率化を図

る。この場合に、所要機能や材料物性値の確保の施工目的から逸脱して単なる生産手段とならない歯止めが必要となる。施工目的(工学的所要物性値)と工事内容のデータ化による施工法の選択と管理が、明確な歯止めとなる。

③に示される事項は、土木学会コンクリート標準示方書では打ち込み箇所までのスランプ変化を考慮して荷下ろし地点でのスランプを選ぶことになっている。従い、上記③に示す条件でスランプを設定すると JIS と整合しない。

加水は水セメント比を同じにして強度が変わらないように配合修正、AE 減水剤の増量、高性能 AE 減水剤への変更等がある。これらの方法は、材料物性を確保した上での施工対応であるが、アジテーターカーへの加水は施工性だけの判断となる。施工法は、目的のある生産手段でなければならない。急速施工の問題もこの点に原因があると考えられる。

(2)まとめ

①～③の問題には、コンクリート施工において施工環境に対する安易な対応と分業化による責任境界の不明さがある。

生産現場における施工実態のフィードバックシステムが確実、迅速また水平展開されるシステムがないことも指摘できる。今後施工環境の厳しさを予測すると事業展開の役割分担と責任境界は見直しが必要となる。

5. 2. 3 三省調査委員会の調査報告^{31), 32)}

建設省、農林省、運輸省の三省合同の「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会」から 2000 年 3 月「土木コンクリート構造物の耐久性維持向上等に関する提言」が発表された。都道府県ごとに、竣工年 1965 年以前、1965 年～1974 年、1975 年～1984 年、1985 年以降の四分割に該当する構造物を 2 件ずつランダムを選定しての調査結果である。総数は、2344 箇所。内訳は、橋梁上部工 371 例、橋梁下部工 390 例、擁壁工 348 例、カルバート 370、河川構造物 364 例、トンネル 256 である。

(1)調査結果

1) 調査結果の総括

①劣化が認められ追跡調査が必要とされる程度の構造物は、全体の 5%。その劣化原因は経年によるものが最大となっている。

②劣化現象は、時間の経過により一様に劣化していない。(竣工後 35 年以上の経過でも約 60%のコンクリートに劣化兆候はない。

③経年以外の劣化原因は、「コンクリートの低品質(豆板、コールドジョイント、

遊離石灰、ひび割れ等)と「配筋不良(鋼材露出、錆汁)」に起因するものが多く、塩害やアルカリ骨材反応に起因する劣化事例は少ない。

④構造部の竣工年による分類では1964年を前後に比較すると23:77と概ね1964以降の竣工件数が3倍となる。

2) 施工年代と劣化度

施工年代別の劣化件数比較を経済的安定成長期の1975年(昭和50年)と高度成長期前期末の1964年で行う。(数字は1964年:1975年の比)当調査の劣化度基準を表5.1に示す。

①1975年以前と以降では、総件数は49:51とほぼ同件数となっている。

②劣化度で見ると劣化度ⅰ・42:58, 劣化度ⅱ・65:35, 劣化度ⅲ・84:16
劣化度ⅰ以外は、経年の劣化比較は、順当である。

1964年以降の施工が劣化問題を多く引き起こしている。本来、時代の推移と共に技術、機械とも向上、進歩を遂げ品質問題は減少するはずが調査結果では、逆に増加している。骨材、急速施工の問題が指摘された年代が特に要注意期間である。

表 5.1 劣化度基準

劣化度	一般的状況
V	劣化が著しく補修、補強を行う必要がある。劣化のため構造物の耐力や使用性が低下していることが明白なもの
IV	劣化が著しく詳細調査を行い補修するかどうか検討する必要がある。劣化のため構造物の使用性に悪影響がでているおそれがあるもの。あるいは放置するとさらに劣化が進行することが十分予想されるもの
III	劣化が認められ追跡調査を行う必要があるもの。現時点では即座に構造物の使用性に影響を与えないが、将来的には劣化が進行することも予想されるもの
II	劣化の兆候が認められる。軽微なひび割れや錆汁等が認められ、条件によっては劣化が進行することも予想されるもの
I	劣化の兆候が認められず、健全な構造物

3) 劣化と施工法の関連

経年劣化以外の劣化度ⅱ～ⅴまでの劣化件数755件の調査結果を見る。内訳を表5.2に示す。劣化原因の推移を図5.3に示す。

概要は「コンクリート低品質」件数が310件(41%),「鉄筋不良」が25件(34%)と両件で全体の75%を占めている。コンクリート経年劣化以外の主要因は、使用コンクリート材料が内包するものとコンクリート施工管理から発生している。

表 5.2 年代と劣化原因

劣化原因 \ 年代	～1964	1965～1974	1975～1984	1985～	合計
コンクリート低品質	111	103	71	25	310
鉄筋不良	98	86	51	16	251
合計	209	189	122	41	561

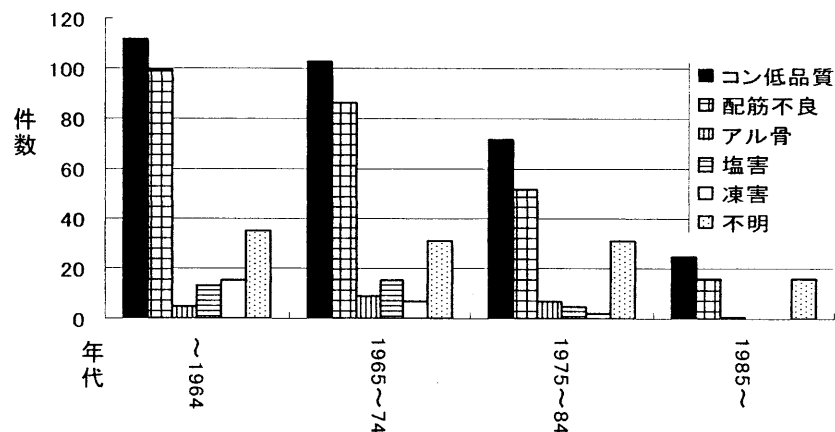


図 5.2 劣化原因の年代推移(トンネル以外・劣化度Ⅱ～Ⅴ)

原因とされた「コンクリート低品質と鉄筋不良」の施工年代に注目する。1985年以降コンクリートの低品質，鉄筋不良の両原因は，一気に減少している。「コンクリートの低品質」の中には「施工不良一打ち込み，締め固め，養生等の不良」があり，「配筋不良」の中には「施工上の問題と過密配筋によるものと基準，設計の不備」がある。その原因を明らかにする解明手法のひとつは，その時代の設計，施工技術に遡ることである。図 5.2 に示す劣化原因の推移を考察する。

1965年～1974年の10年間の件数は，1964年以前と比較しても減少していない。この年代は経済高度成長期の後期にあたり，前期から始まった大型プロジェクトの完成期であり，都市の巨大化と地方の過疎化，高度成長のひずみとして環境問題が提起された社会情勢であった。潤沢な工事費による大量施工は，経済効果を高めるため急速施工，効率施工が要請された。その目的のために建設産業全体が機械化され，機械化されたものは大型化，高能力化された時代である。

また公害に始まる環境問題が提起された年代である。河川砂利採取の規制（1960年以降）により骨材需要に供給や急増する工事により熟練工，技術者が不足する事象も起きている。建設産業に求められた社会的要請である急速，大量施工と施工技術，施工管理のアンバランスが問題を後年引き起こす要因となったと推測できる。

5. 2. 4 構造物の種別による調査事例^{33, 34)}

独立法人土木研究所による既存の下記構造物 131 件の劣化調査は，施工状況調査を含み施工による劣化原因をより明確にしている。構造物の種別調査件数を表 5.3 に示す。

表 5.3 構造物種別件数

構造物名	河川構造物	橋脚	橋台	カルバート	擁壁	その他
件 数	25	48	21	12	22	3

(1)調査内容と結果

調査内容である施工条件の打設時期と劣化現象に注目して考察する。

表 5.4 にコンクリート工の施工月を表 5.5 に劣化現象をそれぞれ該当件数で示す。

表 5.4 構造物施工月件数

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	不明
件数	2	6	9	15	9	19	22	36	43	27	6	2	18

表 5.5 劣化現象件数

劣化現象	ジャンカ	コールドジョイント	ひび割れ
件数	5	7	35

劣化現象を見ると、コンクリート打設、養生等の初期施工の管理が十分でなかったと推測される。特にひび割れは全体の 35%の件数となっている。初期ひび割れは、他の要素と複合作用を誘発し早期劣化の要因となることが想像される。

ひび割れ状況を構造物種別に見ると、カルバーとボックス、橋台のひび割れが多く、ひび割れ状況の調査結果は、一定間隔で鉛直方向に発生している事例が多いと報告されている。ひび割れ状況より、その原因をセメントの水和熱とコンクリートの乾燥収縮と推測している。推測根拠として、表 5.4 に示した打設時期が夏期（7 月～9 月）に多い（調査件数の 47%）ことと比較的マスコンクリートに多いことを挙げている。つまり初期条件として温度応力によるクラックが発生しやすい条件が重っていることを指摘している。直接的原因とは特定できないが、セメント水和熱の可能性が高いとの推論である。

(2)施工法との関連

この報告は、コンクリートの不良箇所を施工面からの切り口で詳細に調査している。ひび割れ状況から、その原因を構造物と施工月に注目し、水和熱による温度応力ひび割れが原因と推測している。水和熱による乾燥収縮は初期施工の課題となる。施工環境の厳しい夏期施工が多いことも付加して初期施工のいくつかの原因が考えられる。施工条件のセメント種別、単位セメント量と施工環境の外気温等の組合せによりコンクリートの発熱特性は影響を受ける。特に若材齢の施工管理が重要となる。施工の適否は、コンクリート製造から運搬、打設、締固め、養生の基本作業での温度制御管理、施工法の選択による。

コンクリートの要求性能の長期的安定、耐久性の確保には、初期施工の管理と施工法が大きな影響を与える。特に温度ひび割れは、劣化促進要因として制御、管理されることが不可欠である。選択された施工法の根拠もそれらの工学的評価により管理されることが必要となる。

平成 13 年 4 月より重要構造物は、施工結果として 0.2mm 以上のクラック展開図の作成が義務付けられ、将来の維持管理のデータベース化が開始された。データ

ベース化によりクラックに対する具体的な対策が、従来個別に検討されてきたが、今後は総合的に、コンクリート施工の時系列作業を通しての制御施工が検討されることになる^{35, 36)}。

5. 2. 5 山陽新幹線トンネル調査事例^{37, 38)}

トンネル履工コンクリートの剥落事故原因調査報告書から東海道、山陽、北陸、東北(盛岡以北)、九州の各新幹線のコンクリート工と施工に関する項目である施工法、細骨材、セメント等に注目して考察する。

(1) コンクリート打設工法

図 5.3 にコンクリート打設方法を幹線別に件数で示す。表 5.6 に開業年を示す。

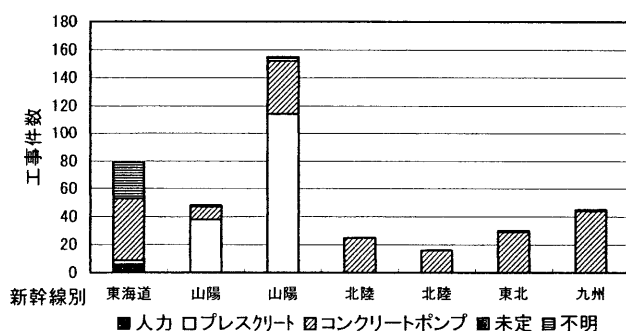


表 5.6 幹線別開業年

幹線名	東海道 東京～ 大阪	山陽 大阪～ 岡山	山陽 岡山～ 博多	北陸 高崎 ～長野	北陸(長野以北) 東北(盛岡以北) 九州(福岡～鹿児島)
開業年	1964年	1972年	1975年	1998年	施工中

図 5.3 コンクリート打設方法

図 5.3 より東海道新幹線と山陽新幹線の工事件数の違いによる工事規模と打設工法の機械化の推移が鮮明にわかる。

コンクリート打設工法は、東京～大阪間は人力、ポンプ打設で約 70%が施工されている。一方山陽新幹線では、プレスクリート工法により 70～80%と多くなっている。山陽新幹線の完成以降はほぼ 100%がポンプ打設となっている。

プレスクリート工法は、圧縮空気コンクリートを搬送する工法である。この工法は横型円筒型内圧容器を回転しながら、収容されたコンクリートをエアピストンによりコンクリートとエアの比率を調整しながら圧送するもので、レール方式が多い年代に採用例が多い※。圧縮空気の圧力調整による搬送量、圧送距離による搬送量に熟練を要する工法である。後年問題となるコールドジョイント、締固め不足による剥落等の原因もこの搬送方式に起因することは否定できない。

(2) コンクリート製造方法

図 5.4, 5.5 にコンクリートの製造方法を示す。年代とともに工種の分業化が進展する状態が明らかである。

※レール式：鋼製支保工以前、及び従来工法では掘削運搬ではレール式を多く採用

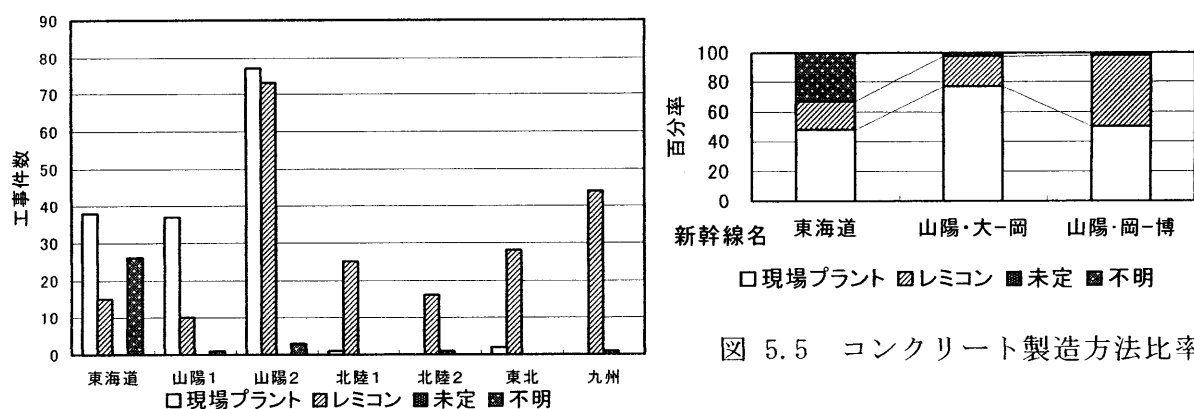


図 5.4 コンクリート製造方法

東海道、山陽(大阪～岡山)新幹線の年代(1972 年開業)は現場プラントが多い。山陽新幹線の岡山～博多間になると、現場プラントとレディミットコンクリートがほぼ同数となり、それ以降はほぼ全件数がレミコンとなる。

現場プラントの場合、現場の施工全般の状況に即応した生産が可能となる反面、不経済性とプラント運転管理によるコンクリート品質のバラツキが生じやすい。レミコンに移した年代は、バッチャの自動化技術、分業による採算性(工事量の増加)、工事の分割発注(工事件数増大)等の社会的背景がある。

(3) 使用セメント種別

使用セメント種別を図 5.6 に示す。普通ポルトランドセメントが多く採用されている。高炉セメントは 67 年山陽新幹線岡山～博多間で採用されている。フライアッシュの使用は、山陽新幹線の工事以降である。セメント種別が施工、品質管理で問題を発生したかは不明とされる。セメントによる熱特性値の違いがあえて施工法に反映されたとも推察できない。施工法は本来、打設温度、打設速度、養生において、セメント種別によるフレッシュコンクリートの特性を考慮する目的を必要とする。この点が本研究で取り上げたい施工法の本質的問題である。

(4) 使用細骨材種別

図 5.7 に使用砕骨材種別を示す。海砂による塩害が問題化する実態が施工時期、施工区間で明らかに示される。岡山、博多間での海砂使用が突出している。その後も海砂は東北、九州地域により採用されている。砕砂の使用は現在施工中の北陸、九州で使用されている。骨材事情が年代により鮮明となっている。骨材の種類による違いが単位水量(練混ぜ)、流動性(運搬、打設)、ワーカビリティ(施工性)等のコンクリートの性状が施工法にどう反映されたか不明である。また生産過程、採取場所による品質管理が施工法へフィードバックされなかったことは今後の反

省材料である。

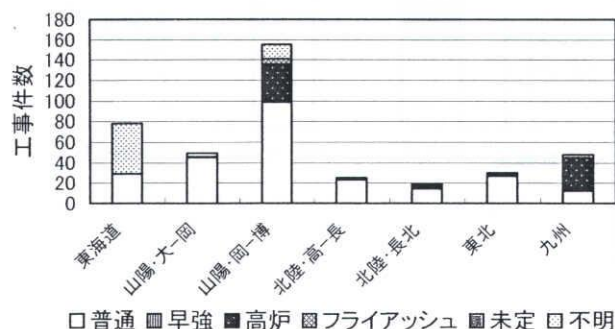


図 5.6 使用セメントの種別

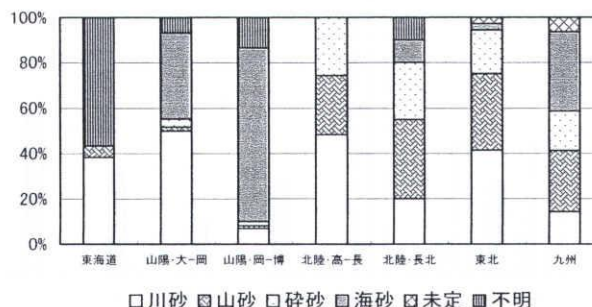


図 5.7 使用細骨材の種別

(5) 東海同新幹線と山陽新幹線の比較によるまとめ

現在コンクリート劣化の問題は、大半が山陽新幹線で発生している。コンクリート工と施工に関して 4 項目の調査結果の考察をまとめる。表 5.7 に東海道と山陽新幹線との比較を示す。

表 5.7 東海道新幹線と山陽新幹線の比較

路線名	延長、トンネル数	建設年代	支保工	
東海道	552.6Km 67 本(68.53km)	1959～1964 年	木製から鋼アーチ支保工過渡期	
山陽	622.3km 142 本(280km)	1967～1975 年	鋼アーチ支保工	
			大阪～岡山 67-71 年	岡山～博多 70-75 年
			普通ポルトランド 粗骨材→川砂利、砕石 細骨材→川砂 50%	高炉 B が多くなる 粗骨材→砕石急増 細骨材→海砂急増

両新幹線の施工は、時代背景により大きく特徴づけられる。

①社会環境による施工法への要請：東海道新幹線は戦後復興の象徴として開催された東京オリンピック開催を目標に建設された。山陽新幹線の建設が始まった 1970 年初頭は、復興期を経ての高度成長の最盛期で高速道路網の整備事業の拡大期と重複する年代である。トンネル工事量は昭和 30 年代(1955 年～)に比較し 40 年代(1965 年～)は約 10 倍といった社会基盤整備、経済状況の大きな違いがある。この社会的背景は、建設産業の施工環境条件として大きな影響を与えている。施工の急速化に呼応する機械化、効率化の歩調と施工に携わる技術者や資機材の供給対応の整合が適正に検証されたか問題である。また効率化も同様である。施工法は、要求機能を確保する技術手段である基本目的がある。施工量を満足するのはその一機能である。

②施工法：山陽新幹線は、鋼アーチ支保工の年代にあり施工は機械化による迅

速施工期である。一方、東海道新幹線は木製支保工からの移行期にある。特にトンネルにおいて鋼製支保工の適用は、作業面積を拡大し機械化を推進した。施工法の違いは、作業量の増加となり施工目的に準拠した付帯機器を必要とする。量的目的が優先された点も指摘できる。

③立地条件：東海道新幹線は平地での建設が多く、山陽新幹線は山間部での建設が主体となっている。山陽新幹線は、東海道新幹線に比ベトンネル件数は約 2 倍、トンネル総延長は約 4 倍、トンネル 1 本当りの長さは、約 2 倍と長大化している。長大化は支保工に見る資機材の開発と施工機械の高性能化により可能となった。

④コンクリート材料の施工への影響：海砂による塩害は、施工後にその被害を発生させるが、海砂が施工時に影響した点もある。海砂は、粗粒率が小さく、均等係数が大きい。つまり細かい粒径分が多く一定粒度で集中的に存在している。骨材表面積が大きく、空隙比が大きくなる。このような骨材を使用したコンクリートは、施工性が悪くなる。施工面への影響としては、コンクリート輸送、締固めに問題が生じる。コンクリートの材料分離を起こしやすく、ポンプ圧送中に管内閉塞を起こす確立が高く、結果としてなりコールドジョイントを生じる原因となる。

碎石も川砂利より角張ったもの、扁平なものが多く骨材表面積が多くなる。流動性の悪化によるポンパビリティーの低下原因となる。

施工目的を主体にして考えると、施工法の前提条件となる材料(コンクリート)物性が構成原材料により変化すれば、工法を見直すか、材料物性を変えることが必要となる。練上り性状に合わせた運搬が出来る方法、機械選定が必要であり、それが本来の施工法の選択となる。例えば、コンクリート運搬施工法の選択概念は、ポンパビリティーを圧送指標（コンシステンシー、プラスティシティ）として機種、規格を選定することが本質である。骨材の粗粒度、実績率とセメント種別およびスランプ値（圧送性指標に仮定）との関連から要求性能を損なわない範囲の水セメント比、セメント量（混和剤量調整）の修正により施工物性値を変更することは選択手法の一つである。機械の機種、規格に合わせた物性に変更して施工効率を確保することは、施工選択ではない。図 5.8 にその概念を示す。

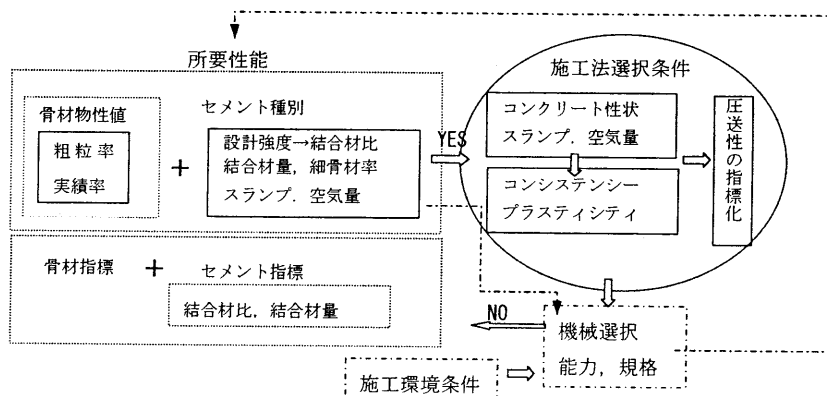


図 5.8 コンクリート運搬工法の選択概念図

⑤機械技術と施工性³⁹⁾：1960年代に採用されていたポンプ車は、プランジャーポンプで圧送能力も小さく閉塞による作業中断が多く発生した。1965年頃に開発されたコンクリート打設工法は圧縮空気の使用によるプレスクリート、スクリュークリート工法である。山陽新幹線での採用が多くなった理由は、ポンプを上回る打設能力とトンネルの多い山陽新幹線での掘削運搬工法であるレール方式との組合せによる。しかしこの圧送方法は、圧縮空気によるため空気容量と圧力調整が難しく材料分離をおこし易い欠陥を持っていた。年代の施工限界を示している。

⑥施工法による施工量の適性化判断：打設機械能力の向上は、施工速度の向上により経済効果を高めた。スクリュークリートによりセトルは長 10.5m から 12.0~15.0m まで使用が可能となった。その反面、当時の配管打設は、施工延長が延びるとコンクリートの運搬、充填等の施工性に問題を生じた。施工性を満足するため高スランプで水セメント比の大きなコンクリートが必要になるという施工目的から逸脱した現象が起こる。

水セメント比を大きくすれば、乾燥収縮によるクラックを生じる危険性は高くなる。さらに配管内での材料分離を引き起こし管閉塞によるコールドジョイントを発生させる問題も生じる。

この例は、施工性を優先した場合、本来の施工の目的が失われる危険性があり、施工法の選択に際して大きな警鐘と、施工法選択の重要性を提起している。

「ある量を決められた場所に運搬する」ことは、目的であり、その目的は所要機能を果たすことが条件となる。目的に見合う手段を選ぶことが必要であり、手段に合わせた条件を要求することは誤りである。この点が建設産業における生産活動の特異性である。経済性、効率性よりも性能確保が優先し、その手段(施工法)はそのために選択されねばならない。従いその選択には、要求性能に対する工学的評価が必要となる。施工選択の適否を評価する基本となる。

施工計画において、基本工程の算定は、施工量、施工時間、施工機械能力等の要素で決まる。単位施工量は、施工計画の立案では非常に重要な要素となる。

本来施工計画では、施工の目的から施工性を考えた施工能力、施工数量により施工量の適正な算定が重要である。基本機能に対する(所要物性値の確保)評価を先ず行った上での工法、規格を選択することが基本条件となる。

①~⑥に共通することは、その時代の背景と施工法の選択の関連がどのような評価を工事中になされたかの検証である。施工の本質に立ち返った判断がなされたかとの疑問である。図 5.9 に本事例によるコンクリート施工面から見た品質問題発生フローを示す。

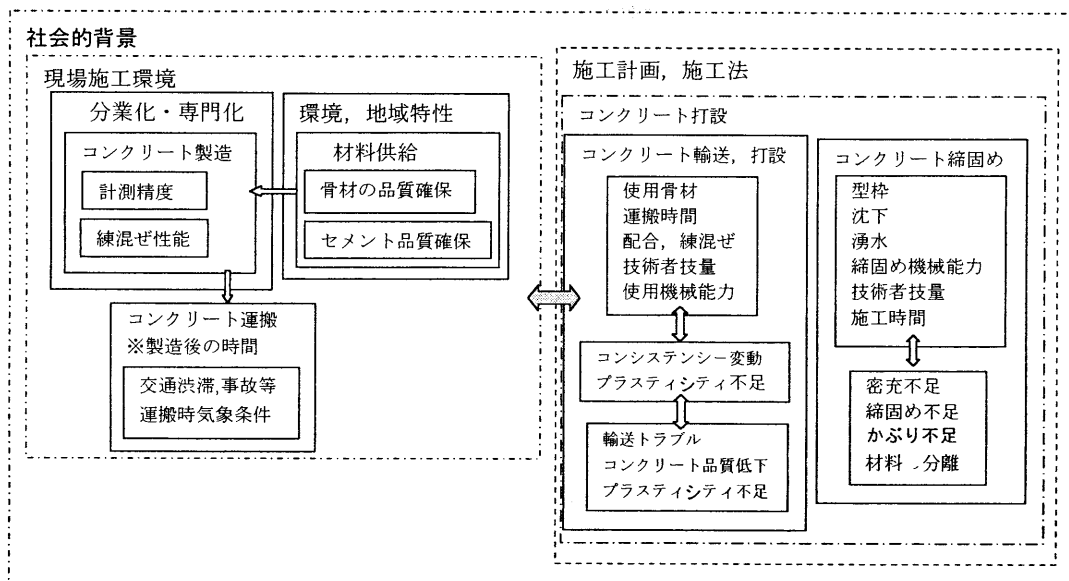


図 5.9 コンクリート施工による品質問題発生フロー

5. 2. 6 コンクリート構造物の不具合調査^{40, 41, 42)}

不具合の定義を「施工中あるいは完成後において材料や構造物が所要の性能を満足しない現象」として、その現象は設計、施工計画、製造、施工段階の各々のプロセスに起因する「ミス、失敗、不注意、故意、未整備な基準類」等の原因により起こるとの概念による調査報告がコンクリート工学会、コンクリート施工基本問題検討委員会より報告された。調査では、267 件の不具合事例が整理されている。不具合の発生原因と施工法選択との関連を検証する。

(1) 調査結果

図 5.10 に不具合の概念図を示す。

性能区分では、施工性能と供用性能の不具合件数は、 $34:233=13:87$ と圧倒的に供用後性能に関するコンクリート不具合現象が多い。不具合発見時期で見ると、設計：運搬施工時：打設施工時の比率は $15:24:61$ と打込み時におけるスランプ、材料分離等コンクリート物性値の異常が多い。その内容を図 5.11 に示す。構造物の供用性能に関する不具合 233 件中 45%の 106 件がひび割れ、ジャンカ 28 件 12%、漏水 7%、コンクリート強度不足 5%、鋼材腐食 6%と 5 項目で 91%を占めている。ひび割れは全般の工事により発生している。

(2) 不具合内容と施工法の関連

この調査は、コンクリート工の時系列による不具合を要求性能による分類しているので、施工の適否がどの時点の問題かを整理出来る。脱型後の現象として約

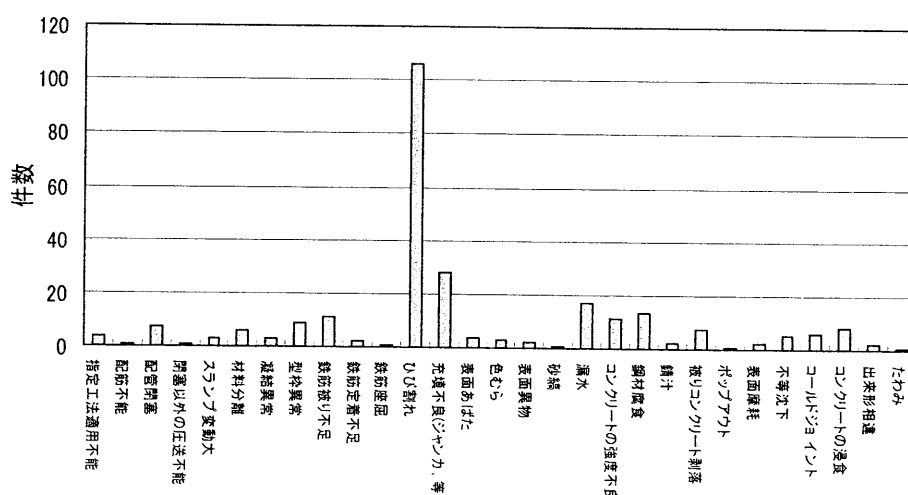


図 5.11 不具合現象別件数

90%以上がひび割れ，充填不足，漏水，強度不良，鋼材腐食の5項目に集中している．その他は鉄筋のかぶりに付随する事項が多くなっている．これらの主たる不具合項目には，相互関係が考えられる．またひび割れとの複合作用によりその程度が増減する．

設計，施工計画段階でのひび割れの主要因は，セメント量，種別による熱特性および水セメント比，使用材料の適否等と鉄筋かぶりの項目が考えられる．施工段階では，コンクリートの熱特性に関連する施工法と打設条件である．各工程における要因を表 5.7 に示す．

表 5.7 施工段階のひび割れ発生要因

製造段階：材料の適否，練混ぜ性能適否
輸送段階：打設速度，輸送量，輸送時間の適否
締固め段階：輸送，締固めの適否
打設方法：材料分離と打設速度の適否，仕上げの精度
打設環境の整備：湧水処理，型枠不良，地耐力不足，鉄筋かぶり，配筋状況等
打設後：養生方法，養生期間および脱型時期

問題は，大半の不具合発見時期が脱型後となることにある．設計思想と施工法の機能リンク，工学的評価が施工法にフィードバックされていないと考える．施工段階で本来管理すべき「ひび割れ」制御と施工システムを構成する基本作業が認識されずに実施されている現状と考える．発生リスクが施工法選択段階で定量的に評価されていれば，施工前検証が確実に施工に反映できる．

(社)日本土木工業協会によるアンケート調査に，当調査内容と少し切り口が異なる品質とフレッシュコンクリートの物性に関する調査がある．図 5.12 にクレーム品質に関するクレーム内容の内訳と図 5.13 にフレッシュコンクリートに関する問題件数比率を示す．

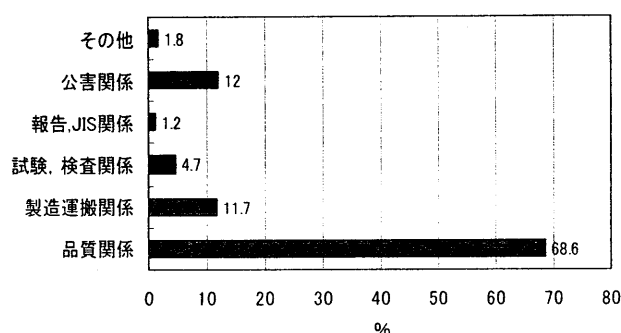


図 5.12 クレーム内容の件数比率

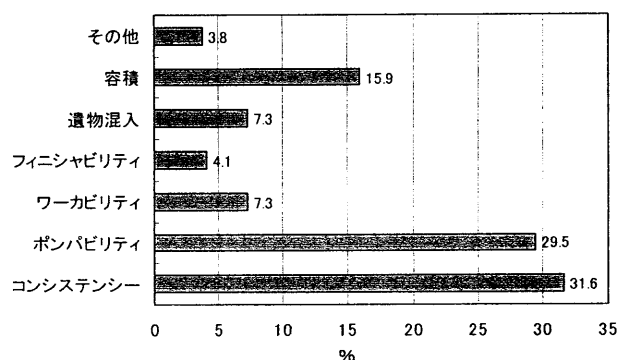


図 5.13 施工時のフレッシュコンクリートに関するクレーム内容と件数比率

フレッシュコンクリートに関する施工時点でのクレーム内容の約 60%以上が施工性に関するコンシステンシーとポンパビリティとなっている。当然基本設計に従ったコンクリート物性に対する施工性は、計画段階で十分検討され消化される項目であり、効率アップは、機械仕様、能力により改善されるべき項目である。この調査でも設計と施工のリンクがされていない実態が示されている。

構造物のクレームの約 70%がコンクリートの品質に関するもので、大半は不具合の項目に示されたひび割れ、未充填等施工後の外観形状に関するものである。

これらの調査結果から、コンクリートの不具合の原因と発生現象が基本設計でのコンクリート仕様に対して施工性の問題を提起している項目件数が 60～70%遠い。施工段階で対応できる内容は、約 20%～30%である（不具合比率と要因関連から推定）。施工内容の実情が設計、計画にフィードバックされていない現状といえる。またコンクリートのひび割れがクレームとして挙げられていることは、設計と施工の検証が必要であるといえる。

5. 3 施工事例による問題提起のまとめ

本章では、社会資本の信頼性を失う事例としてコンクリート構造物の事故、不具合事例を、報道、ポンプ車輸送問題、三省による調査、JR による調査、コンクリート工学会調査の 6 項目を取り上げた。特にその中から施工に関する問題を抽出し、本研究の意義と必要性を明らかにした。

施工法は、社会的要請による価値観、評価に追随して変遷する。社会経済情勢を反映した大量、急速施工と施工技術、技能者数、供給材料とのアンバランスがコンクリート不具合原因の要素と推論している。建設産業は、生産産業であるが、現地生産による固有条件による単品生産であり、一義的に効率化を図れる産業ではない、施工システムの性能目的が生産合理化により不明確になった年代があったことが考察できる。

施工不良による社会資本の安全性に対する不信は、一般化した認識となっている。施工不良は、後年劣化を促進して問題を発生させる大きな要因である。

効率化，合理化要請による分業化，専門化は，施工目的から生産目的になり後年品質に関する問題を発生する要因も含んでいた。効率化，機械化は，施工法の体系に位置付けられ性能に対する検証が必要である。そのためには工事内容をデータ化して施工目的を明確に管理することが必要となる。また施工法の選択は，その目的とする工学的要求性能に対する評価が必要となる。その選択は，情報公開と評価制度が必要な点も指摘されている。

ポンプ車の輸送問題からは，設計，施工計画に含みきれない実際の施工環境による施工不具合の発生の実態が報告された。

設計の高度化，複雑化，経済性の検討には，設計と施工実態のフィードバックシステムが確実，迅速また水平展開されるシステムが必要である。分業による施工は，生産システムとなり施工目的の明確性に欠ける点明らかにされている。過密化，複雑化する社会の実情(施工環境)と整合した施工量を適性に判断することが施工法選択の要素となる。

構造物分類による不具合調査からは，施工時期，施工対象物によるコンクリートの熱特性と施工法の問題が考察できる。この事例による施工問題は，コンクリート施工システムを構成する基本作業のコンクリート製造，運搬，打設，締固め，養生が工学的評価による適否の判定が方法されれば対応できる。

今後の問題として，施工法を決定する前提条件となる材料(コンクリート)物性が，その構成原材料により変動すれば工法を見直すか，所要性能を確保した上で材料物性を変えることが必要となる。

工法の変遷は，社会の価値観の変遷でもある。そして定性的な判断による経験的な工法選択は，建設産業の生産目的とする固有特性を逸脱した合理化，経済性となる危険性がある。今後より高度化，複雑化する社会の要請である「長寿命化による循環型社会への転換」に対応する施工法は工学評価による選択による管理が不可欠となる。今後は，リスク制御施工が必要となる。性能照査による施工が必要となる。これらの調査内容からも本研究の意義の有意性が示された。

第5章参考文献

- 1) 山本泰彦，中根淳：コンクリートの品質の展開「耐久性」「施工性」，セメント・コンクリート No500，pp. 111～118，1988. 10
- 2) 日経コンストラクション：問題の本質，改善への提案・製造，施工の過程に根強い不信感，pp. 64～69，1999. 10. 22

- 3)坂田憲次：品質管理の重要性―土木の立場から，コンクリート工学 Vol. 39, No. 5, pp. 9～18, 2001. 5,
- 4)魚本健人：コンクリート構造物の建設と劣化対策．S. Q. C 構造物開発・普及協会平成 12 年度特別講演，平成 12 年 11 月 13 日
- 5)河野広隆，古賀裕久：コンクリート構造物の基準類の性能規定化と検査のあり方に関する考察，土木学会論文集 No. 651／VI－47, pp. 1～10, 2000. 6
- 6)小林一輔，岡村甫：特集新世紀のコンクリートを考える，JSCE Vol. 85, pp. 5～12, Apr. 2000
- 7)小林一輔：コンクリートが危ない・岩波新書 616, pp. 45～70
- 8)山本剛：コンクリートに関する最近の話題，月刊建設 99-11, pp. 44～45
- 9)毎日新聞：「年間通常量の 2.5 倍はがす」山陽新幹線高架コンクリート劣化，1999. 7. 20
- 10)毎日新聞：鉄筋切断，雨ざらし「誰も止められなかった」現場責任者「開通しても乗らん」1999. 7. 26
- 11)毎日新聞：さび放置／水分多いコンクリート，手抜き横行，証言 70 年代はじめ，工期優先で設計無視，1999. 7. 27
- 12)読売新聞：安全へ抜本策待ったなし，複合要因―コンクリート脆さ指摘，1999. 7. 26
- 13)毎日新聞：半数の業者，海砂使う「除塩の程度，不明」，1999. 10. 8
- 14)毎日新聞：緊急点検，3 カ所で異常音「信じてもらえるか」，1999. 10. 9
- 15)毎日新聞：コンクリート塊また落下，崩壊安全神話，後手後手の事故対応，1999. 10. 10
- 16)毎日新聞：新幹線トンネルコンクリート崩落「注入作業手抜き」，1999. 6. 29
- 17)毎日新聞：山陽新幹線・高架のコンクリート片落下，1999. 7. 6
- 18)読売新聞：コンクリート落下多発「未熟工法が原因」当時は標準，剥落しやすく，1999. 7. 6
- 19)毎日新聞：2029 カ所で施工不良，97%が岡山以西・山陽新幹線トンネルコールドジョイント，石油危機時に建設，1999. 7. 7
- 20)毎日新聞：通電しコンクリート延命「止めず，工事」要請へ，1999. 10. 24
- 21)毎日新聞：突貫工事のツケ？新幹線のトンネル施工ミス「安全神話揺らぐ」，1999. 7. 15
- 22)毎日新聞：崩壊・安全神話「新幹線コンクリート落下」下，1999. 7. 16
- 23)読売新聞：コンクリート異常劣化 JR，87 年には把握，1999. 7. 8
- 24)読売新聞 JR トンネル施工不良部抜本補修と点検実施・1999. 7. 15
- 25)倉田敬子：現代社会における「技術」と「情報」，ダム技術，No. 157, pp3～7,

1999. 10

- 26) 毎日新聞：新幹線トンネル壁崩落「崩壊コンクリート神話」現場のモラル尊重に限界，急がれるチェック体制，1999. 8. 4
- 27) 毎日新聞：山陽新幹線トンネル事故落下部分施工ミスか，1999. 10. 11
- 28) 日経コンストラクション：「生コンへの加水の現状」，2001. 6. 22， pp. 54～57
- 29) 國島正彦：庄司幹雄編：建設マネジメント言論・山海堂 1994
- 30) (社) 日本土木工業協会・経営委員会：土木建設市場の変化と対応，p30，平成 11 年 1 月
- 31) 社団法人土木学会：土木構造物の維持管理と今後の方向性，pp. 4～13，平成 14 年 9 月
- 32) 建設省，運輸省，農林水産省：土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言，平成 12 年 9 月
- 33) 古賀裕久，河野広隆，渡辺博志：コンクリート構造物の健全度に関する実態調査結果，土木技術資料 Vol. 42，pp. 58～63，No. 12， 2000. 12
- 34) 河野広隆，古賀裕久：新設コンクリート構造物のひび割れ等に関する調査，土木技術資料 43-11，pp. 12～13，2001
- 35) 大臣官房技術調査課建設コスト管理企画室長「土木コンクリート構造物の品質確保について」，同運用について，平成 13 年 3 月 29 日
- 36) 大臣官房技術調査課建設コスト管理企画室長「レディミックスコンクリートの品質確保について」について，同運用について平成 13 年 5 月 16 日
- 37) 社団法人日本鉄道建設業協会：山陽新幹線トンネル履工技術に関する検討報告書，pp. 1～42，平成 12 年 3 月
- 38) 小林一輔：コンクリートが危ない・岩波新書 616，pp. 45～70
- 39) (社) 日本トンネル技術協会：トンネル工事用機械便覧・山岳編，p220～226，平成 8 年 2 月
- 40) (社) 日本土木工業協会土木工事技術委員会：コンクリート構造物の施工に関するアンケート報告書，平成 12 年 12 月
- 41) コンクリート工学会：コンクリート施工基本問題検討委員会報告書Ⅱ，pp. 1～34，2002 年 6 月
- 43) 栗田守朗：コンクリート工事の施工管理の現状と課題(土木)，コンクリート工学 Vol. 39，No. 5，pp. 31～39，2001. 5

第6章 価値観の変遷と動向^{1, 2, 3)}

6. 1 はじめに

土木施工の定義，体系化を考える中で，建設産業の生産システムが生産工学の理想とする連続作業システムの評価，位置付けと異なることを指摘した．建設産業の場合，生産システムを構成する施工システム（土木施工法）の各基本基本作業は，生産の理想とする合理化，効率化以前に工学的要求性能が作業の目的としてある．しかし合理化，経済性，迅速性等の社会的要請を安易に迎合しその目的が希薄になった年代の施工が，後年に社会資本基盤の事故，不具合要因となった．

結果として、建設産業の信頼性を損なうこととなった．不具合が発生した経緯，要因を多くの事故事例，調査結果および施工法の変遷等を前章にて考察した．施工を原因とする不具合の発生を今後なくするためには，作業目的の明確化が不可欠である．明確化するためには，作業と工学的根拠との関連性が具体的指数等により表現されることが望ましいが，現在それは，定性的な表現手法が一般的となっている．多くの要素が関連する作業組合せの中で作業目的を明確にするには，選択され実施される施工システムを構成する基本作業が工学的評価により定量的認識される必要がある．定量化，指標化された上で選択された施工法は，一方で要求性能に対する具体的リスクも容易に把握できる．したがって施工実施段階での作業目的が要求性能との関連で捉えられることで，作業条件によるリスクマネジメントが可能となる．

社会資本整備に求められる要求性能は、社会的価値観による評価を受ける．施工法を評価し，その方向を展望するにはその動向を考察することが必要となる．

本章では，6.2 社会資本整備と価値観の変遷，6.3 日本固有の価値観、6.4 価値観の動向を取り上げる．また 6.5 では、主観的価値観の変遷から建設産業に注目する．最終節 6.6 では ISM 法による意識の階層化を行い「望まれる社会」に対応する「建設産業の目標」とするキーワードを展望する．

6. 2 社会資本整備と価値観の変遷^{4, 5, 6, 7, 8, 9)}

社会資本の基盤施設構造物を構築してきた建設技術の変遷は，社会的要請の影響を大きく受けて改良，開発されてきたことは，戦後の近代社会資本の構成変遷や対象構造物の施工法，専門工法およびその施工主体である建設機械の変遷等々，

多岐の側面からも考察された。また社会的要請は、時代の社会経済、社会生活における国民の価値観による評価の優位性を反映することも明らかになった。

社会的要請を展望するためには価値観の動向を知ることが前提になる。価値観は事象の評価内容や基準に影響して施工法にも波及する。

この価値観の動向による建設産業や建設技術、施工法に求められる将来的要請を時代変遷から類推し考察する。

人間の要求と社会資本の関係を図 6.1 に示す。

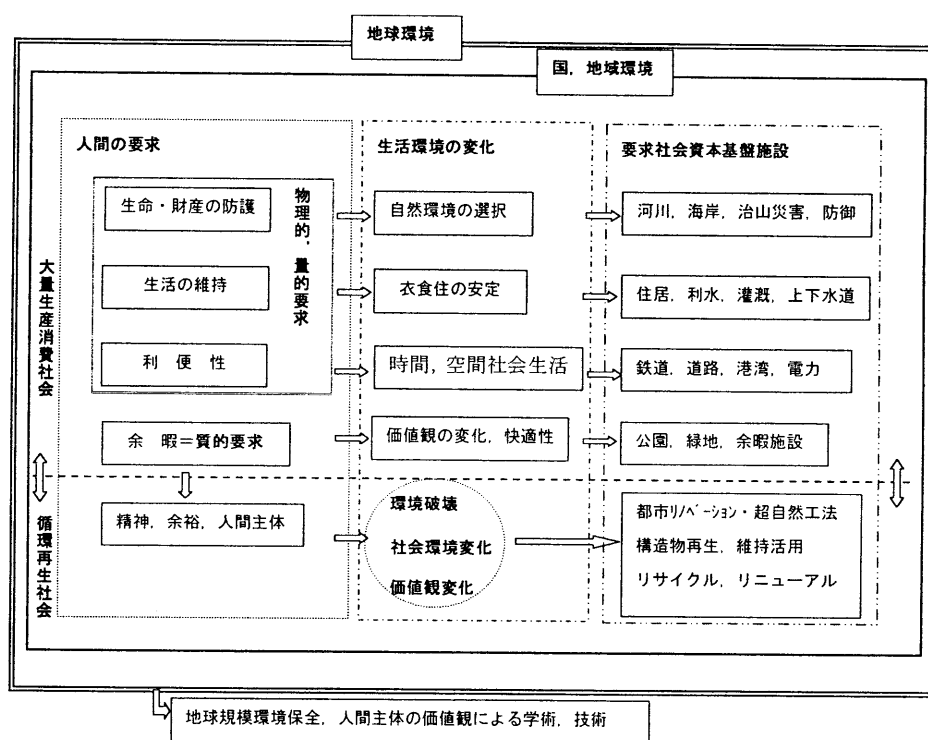


図 6.1 人間の要求と社会資本整備

社会資本整備の変化は人間の生活変化である。「生命の維持」に始まる単一目的から「自然との共生、利便性、心的余裕性格」を併せ持つ複合目的となる要請、いわば発展的な目的の積み上げとも言える。

社会基盤施設に対して、人間の欲望は生活の物理的、量的満足がなされると質的向上の要求に変化する。その結果、人間の要求は、大量生産と消費時代による地球環境の劣悪化に対する危機感から質的要求に転換する。自然と共生による持続可能な発展を求めて環境保全を図る時代となったことは、多くの事象からも明白である¹⁰⁾。資源の有効利用の認識は、再利用、再使用の技術開発を活発化させ、消費から循環社会への転換を多面的に推進しつつある。図 6.2 は「創造の円環的展開」として約 30 年前に社会の発展過程と科学の発展過程を示したものである¹¹⁾。人間の思考と生活変化を含めた科学、技術の変化との関連を的確に予測している。

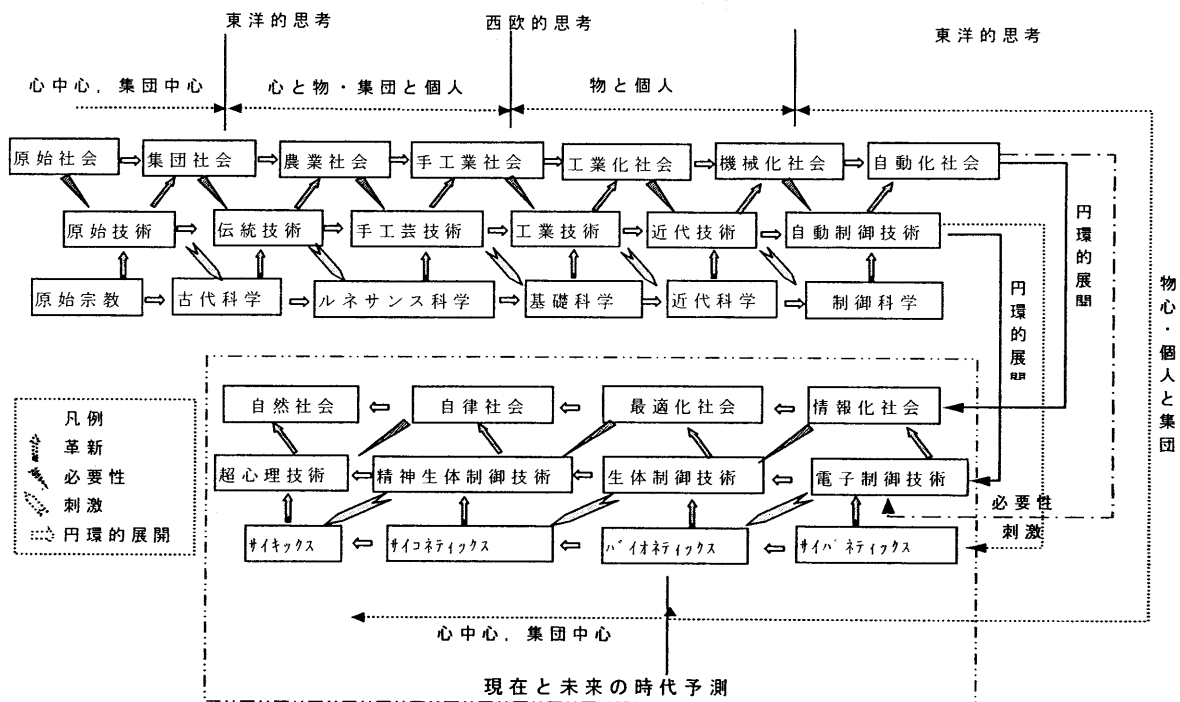


図 6.2 創造の円環的展開

この予測によると心による主観的、感性が問われる集団(地域特性)の時代を、最適化社会として表現している。まさに五全総による国土観に的中した表現である。

時代の転換は、科学の進歩と技術の進歩展開による社会の変化でもある一方で思考変化による価値観の転換でもあることが示されている。当然、科学、技術に由来する土木工学、建設技術の転機も同様に起きている。

人間の要望、要求の積み上げとして社会資本整備を見た場合、その心理変化に注目する。人間の心理変化の進歩と生活水準＝社会資本整備の関係を表 6.1 に示す。心理学者マズローの人間の欲求五段階と土木事業の四段階説を対比したものである。この表によれば、社会資本の整備は、時代と共に人間の心理的欲求を重ね合わせて進展してきたとも言える。

第一段階の欲求は、生理的欲求、生命を支えるために不可欠なもの。

第二段階は、安全の欲求である。この段階までが、社会資本の産業、社会の基礎資本となる。第三段階は、自己(地域＝自分の生活環境)を社会の一員として集団に帰属させたいという欲求である。ある意味では、ミニマム思想(普遍的利便性の拡大)である。この段階でほぼ地域的にも最低限の土木事業による社会基盤が整備される。この段階でほぼ地域的にも最低限の土木事業による社会基盤が整備される。第四段階は、質的充実の欲求となる。なれる可能性のある最高の存在＝自己実現の欲求は、社会資本でいえば地域の歴史・文化・自然環境を活かした

新しい日本文化と生活様式の創造を目指した国土、つまり気候、風土等の自然的、地理的条件及び文化的条件等において共有性を有する地域の創造である。この心理変化は、図 6.1 に示した社会変化と整合する。

表 6.1 マズローの欲求五段階説と土木事業の4段階説(部分)¹²⁾

マズローの欲求五段階	マローズの5段階	土木事業の4段階
①生理的欲求 性欲, 食欲, 睡眠欲, 体温調整等	ファッキング・性欲 フィーディング・食欲	①人類の生存と生活を支えるための地域社会基盤施設形成を目指す土木 ②地域の社会経済活動を支えるための量的充足を目指す土木 ③地域の社会経済活動を支えるためのより質的充足を目指す土木 ④地域の個性を発揮した発展を祈願する, 地域の誇りとなる建設を目指す土木
②安全の欲求	フリーイング・逃走	
③所属と愛の欲求	フロッキング ・群れる	
④承認の欲求 自尊心を満足させたい欲求	ファイティング ・攻撃・征服	
⑤自己実現の欲求		

心理変化による社会資本の整備事業の展開には、土木工学に求められる範囲も当然広がっている。竹村による「土木工学の展開」として土木工学の追求真理が機能追求「用＝用途と強＝強度」の工学から「美」が加わった展開であるとして風土工学序説に述べられている。図 6.3 はその変遷を示したものである。

追求真理	六大	把握方法	その内容	土木工学の分野	土木工学の展開
強と用	地圏 気圏 水圏	土質 地質調査	土質地質等を基礎としての性状調査	基礎設計 地盤工学	<div>【昔からの土木工学】</div> <div>【従来の土木工学】</div> <div>【現在の土木工学】</div> <div>【これからの土木工学】</div>
		材料調査	土石盛立材料 コンクリート・鉄等	材料設計 材料工学	
		大気調査	風力評価 波力評価	構造設計	
		地形測量	地形起伏量の測定 ベーパーロケーション	形状設計	
強と用	水圏	水門調査	水文現象の把握 評価	水文評価	
		水理調査	水理現象の把握 評価設計	水理設計	
用	活力源圏	需要調査 地域社会 経済調査	交通量・水需要量等の 推定、計画フレーム	土木計画学	
美	生活圏 地水気圏	環境調査	環境調査対象 自然との共生 環境創造	環境工学	
	社会文化圏 地・水・気圏 生物圏	風土文化 調査	地域風土分析 地域風土に馴染む 地域風土文化を形成 する	風土工学	

図 6.3 価値観と土木工学の変遷¹³⁾

図 6.3 に示される理念から将来的「価値観」は、工学的評価＝客観的評価と異なり主観的評価によるものに変化する¹⁴⁾。

初期の土木工学は、構造物設計に必要な地盤，材料，構造，水理工学にベースを置き，その対象は空間＝自然環境は地，水，気圏である．機能性追求の工学が中心であった。

その後社会構造の複雑化，大規模化する中で長期計画の必要性に呼応して土木計画学が導入された．さらに現在では，安定した社会基盤の中で「人間性，質的要望」による環境との調和が見直されることになり環境工学が重要な部門に位置づけられた．今後の土木事業の対象空間は生物圏＝生態学を加え，「自然との共生」を評価することが最重要課題とされている。

その課題の枠組み構築の要求は主観である「美」の領域となる．その「美」の基本理念として，社会経済の成熟期における社会資本整備は，地域の風土に馴染む，地域の個性を発揮する風土文化を形成することになる．自然に整合する工学と文化の融合が必要となる。

価値観の変化は人間，文化，地域，自然を基調に変遷し量的，機能的な評価から「美」に代表される質的，主観的評価に変化していることが明らかである．土木工学に変遷も合致するものとなっている。

6. 3 価値観の比較^{15, 16, 17)}

6. 3. 1 はじめに

戦後の近代日本の社会資本は，先進国へのキャッチアップ方式で進められてきた．先進国となった日本において五全総に示される理想の国土は，前述の地域の特性を活かした美しい地域の連帯社会である．価値観の根底に日本文化，日本国土がなければならない．当節では日本固有の価値観について考察する。

6. 3. 2 欧州との比較

表 6.2 に西による日本と欧州の地下空間の利用に関する比較を示す¹⁷⁾。

表は宗教，国土（風土，水），交通，都市景観の実現手法を比較したものである。

国土，風土の違いによる使用材料の特性は，建設技術の開発，評価の方向性に大きな影響を及ぼしている．歴史，文化の違いによる国民性は価値観となり，建設事業の計画，実施方法に至る手法の決定に大きく影響していることが明らかである．国民の感性として，個人の庭園や盆栽という部分に目が向く日本人に対してヨーロッパの国民は「構造物は地域の景観を酷悪にしたり，破壊したりしないように」という都市景観保全に価値観を見いだす感性が国民的背景にあると西は

指摘している。

表 6.2 欧州，地下空間利用と人間の生存（日欧比較）

テーマ	日本	欧州の特徴	地下利用の事例
宗教的思想	諦観	「生き残り」：生き残ること (Survival) が人間の使命であるとする思想が確立 (人権、自由、生存) ・保存／古いものを残す／美観 (景観保存)	核シェルターコントロールセンタ Klara 教会地下核避難施設 ローマ/カタコンベ (宗教迫害から生き残る) ・石油備蓄システム (Boliden WP—Contech) WP—Cave コンセプト核廃棄物処理システム
材質 (風土)	土、木	「岩、石」：石による建造物であるから耐用年数が非常に長い (壊す手間を要する) 必要性からも岩盤掘削技術が進歩	都市開発、運河再開発に古い建物、街並み保存によるコンセプトの導入による活性化
交通史	直接 人→車	「馬車の時代」：人と馬車の共存が長かったため人車分離の思想、人間空間部分確保が確立	ロンドン郵便地下輸送システム (馬車の混雑、交通渋滞からの発想 1907 年着手 1926 年完成) 中層地下歩道 (バッキンガム) 運河の再開発 (パリ) ・地下鉄による交通ネットワークの再編 (フランクフルト)
水 (運河、港 下水、観光)	単目的	「多目的利用 (保存)」：水運の他に排水、水供給、公園、発電、ゴミ搬送、観光、スポーツ等に利用	運河再開発 (パリ) レマン湖 (港、水力発電、水道、観光用噴水) パリ下水道システム (ゴミ搬送にも利用) グランドジャクソン運河 (ロンドン～バーミンガム) の保全と空間利用
都市景観 美観	経済性 重視	「景観に高価値」：醜いものは地下へという思想が確立 (経済性以前の問題として) ・保存／景観保全	パリ下水道システム ロンドン地下鉄道システム 都市再開発 (各都市)
実現手法 (計画手法)	多数決合 意でスタート 後付け設計	「ディベート Debate」：討論、熟考 (何年、何回でも) によりコンセプトを確立してから実施もしくは非実施	英仏海峡トンネル フランクフルト都市再開発 フォーラム・デ・アール (パリ)
総合	地下鉄、地下街以外 の利用は特殊 (経済性)	地下でも構わない施設は積極的に、むしろ原則として地下空間を利用する (国土防衛、生き残る、醜いものは地下へ、岩盤であるから経済性もある)	※地下街については、ストックホルム、ジュネーブ、パリに一部存在するが日本の方が盛んである

その代表的な例として電柱、電線がなく、地下部を入れると面積が倍増するパリの街を挙げている。フランスでは、電線類の地中化は昔から国民的常識と言われている。1370 年に造られたモンマルトル街の下水道に遡る歴史を物語る。ライフラインを地下に納め地上部の歴史的景観を守るという基本姿勢は欧州の価値観の真骨頂であり、国の歴史、文化が国民的価値観を方向付けることを示している。この伝統的というべき国民的価値観は現在の循環社会における社会資本の整備に対する「建設投資」に明確に現れている (表 6.3 参照)^{18, 19, 20, 21)}。

日本との建築投資額の比較を見る。() 内 98 年度日本建設産業売上高である。

97 年度の欧州 8 カ国建設投資額の売り上げ合計額 3 兆 8470.5 億フラン (98 年度日本 3 兆 2000 億フラン) となっている。

その内訳：は建築 3 兆 1460 億フラン (1 兆 8000 億フラン) 土木 7010.5 億フラン (1 兆 4000 億フラン) その内訳を表 6.3 に示す。

表 6.3 欧州 8 カ国の建築費の内訳区分・単位フラン

項目	住宅	非住宅	維持修繕	合計
売上高	1 兆 1280 億	7430 億	1 兆 2740 億	3 兆 1450 億

日本の投資との比較から次のことが明らかになる.

i : 欧州では、土木 20%に対し建築 80%と建築の占める割合が極端に高い

98 年度の日本での割合は建築 56 : 土木 44%

ii : 建築の内訳から維持修繕費の突出が目立つ

西ヨーロッパは成熟国が多く 98 年は、投資 100 に対し維持補修 73 となっている. 建設投資は GDP 比 5.6%であるが維持補修を加えて 9.7%となる.

「石の構築物、景観保存＝「古い町並みを残す」というヨーロッパの風潮は、法律化され、維持修繕のシェアが高くなる必然性もある. それは、国民合意の下に景観保存が法規制により実施できる国民性であるといえる.

6. 3. 3 まとめ

歴史は、伝統的な文化としての価値観となり社会資本の整備の根幹的発想となっている. その実施手法や維持保守を特徴あるものになっている. 世界に類を見ない急速な発展をとげた日本の社会資本整備は、先進国へのキャッチアップを第一義として、経済性、合理性の追求を一義的にして遂行された. 現在その評価が、日本固有の価値観、地域特性といった主観による判断に変化している.

価値観の根底には国土、風土があり、その変遷の背景に歴史、文化の影響がある. 日本は、「列島の中央に脊梁をなす 3000m の山脈から海拔 0m と非常に起伏が強く、人口の約 50%が国土面積の 10%の沖積層平野(軟弱地盤)で生活をしている地震国」である国土の特徴を勘案し、歴史、文化、地域性による価値観の発想による国土構築が望まれる. ^{22, 23, 24)}

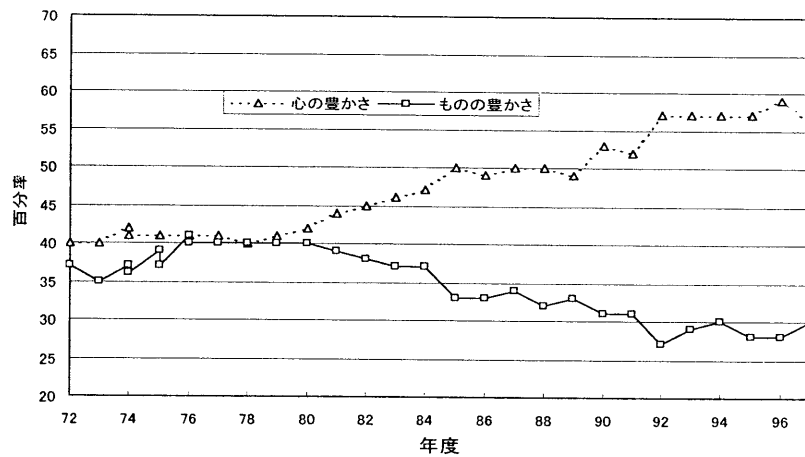
特に地域性の価値観の評価による社会資本整備が重要である. 価値観の地域性は、前述の竹村が示す将来の土木工学分野と整合し、五全総の国土観にも合致する. 建設技術も要求性能に対する客観的評価と同時にこのような主観的価値観による認知が非常に大きくなることが明らかになった.

6. 4 日本の価値観動向 ^{25, 26)}

価値観の動向を検証するため、価値観の変遷と現在の価値観と将来に対する価値観について調査事例より検証を行う. また建設工事に関する価値観についても検証する.

6. 4. 1 価値観の変遷²⁷⁾

図 6.4 は平成 6 年 5 月に総理府「国民生活に関する世論調査報告」に示された心の豊かさとものの豊かさに対する価値観(国民生活の変化)比較調査を示す。



※ 百分率は、心の豊かさ、ものの豊かさの二者択一による人数比率を示す

図 6.4 価値観調査²⁸⁾

1980 年を境に物質的、量的価値観より精神的、質的価値観が高くなる。
1975 年～1985 年は、高度成長期から安定期に移行する年代である。高度成長経済の熟成とひずみの課題から人間住居の総合的環境整備が社会的テーマとなった年代である。一極集中から地方分散での定住構想がなされ、この年代の後半になると地球環境の保全が大きなテーマとなる。生活重視による価値観の変革期として評価されることを良く示している。

6. 4. 2 現代の価値観と将来の価値観

(1) 生活環境に関する関心度

図 6.5 は平成 7 年時事通信社地域情報センター調査による生活環境への関心度を示したものである。安全をトップに自然に対する関心度の高さが明確に出ている。気候、風土、町並み等の地域特性より住居地周辺環境に対する関心度が高い傾向にあるのが「最近の日本人気質」として窺える。

(2) 望まれる国の姿

読売新聞による全国世論調査結果(2001 年 1 月 10 日)を図 6.6 に示す。
調査は、年齢構成 (70 代 12%、60 代 18%、50 代 25%、40 代 17%、30 代 16%、20 代 12%) と大生活圏 20% (大都市=政令市と東京区部)、中都市 38% (人口 10 万以上)、小都市 19% (人口 10 万以下) 町村 23%、および男性 47% : 女性 53%と

幅広く、普遍性に配慮されている。

この結果は、「自然や地球環境を大切にする国」「福祉の充実＝安心して住める国」と環境問題と精神的安らぎを重要課題に捉えている国民が多い。

同世論調査では、「生活の利便性、快適性を損なっても自然や地球環境の保護に

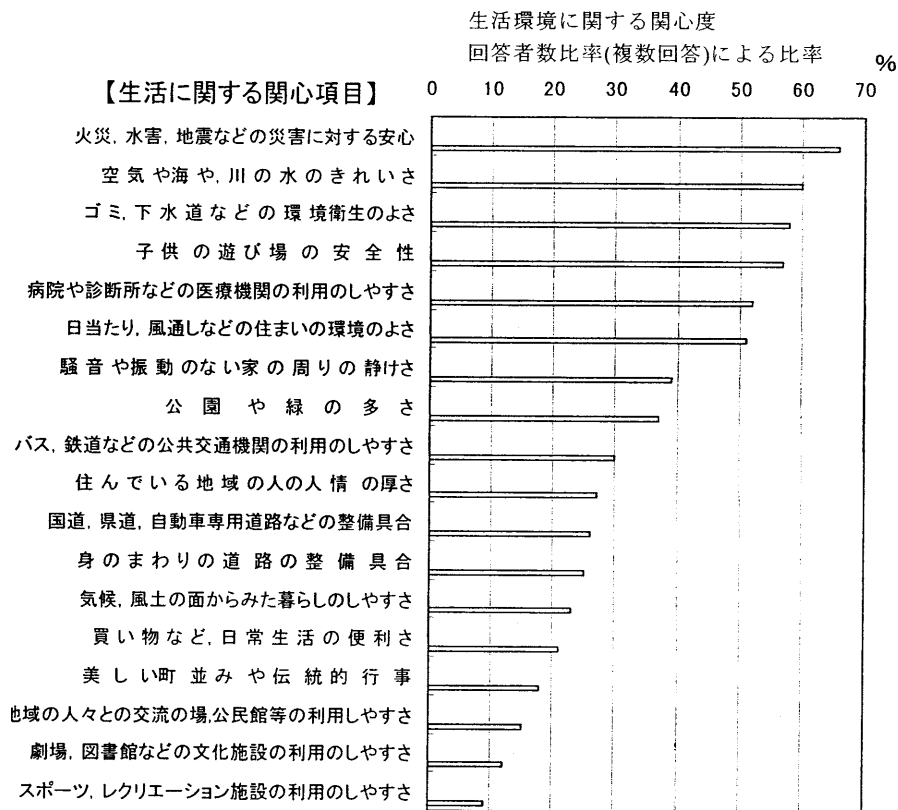


図 6.5 生活環境関心度調査 ²⁹⁾

【21世紀の日本はどのような国であってほしいか】

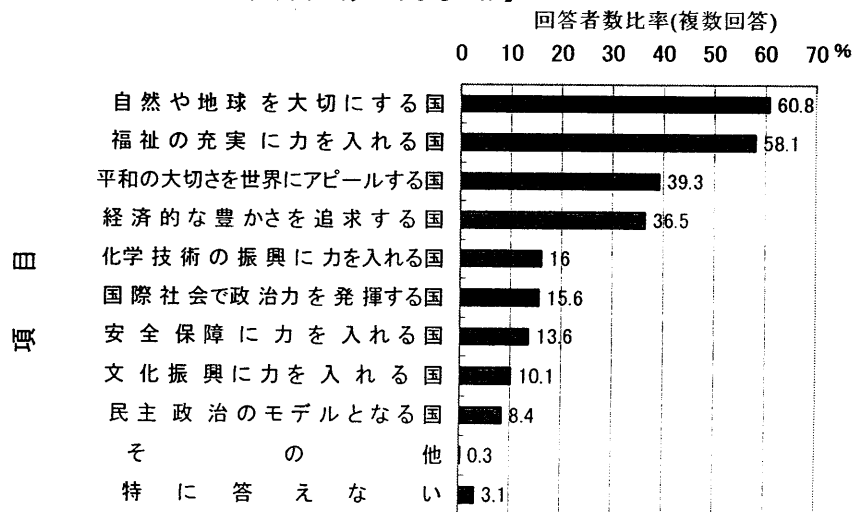


図 6.6 期待する国の将来像 ³⁰⁾

力を入れていくべきか」の質問に 77%が「そう思う」と答えている。自然環境の保全に対する関心度、優先度は非常に高い。

ただ 3 人に 1 人が「経済的に豊かな国」であることを求めていることから「自然保護、環境保全」との調和が容易でないことも示している。消費型社会の反省はあっても循環型社会のライフスタイルへの転換が浸透していないこともあり、現実には環境問題と自身の問題が必ずしも整合していないと判断される。

社会資本の整備に関し国民合意を得る社会的システムの構築が重要かつ必要となる。このギャップを埋めていくのも今後の土木技術者の使命課題となる。建設技術のようなハードな面から説明責任、情報開示といったソフト面での対応が求められることになる。この不整合は、歴史、文化的価値観より経済性、合理性による急激な社会資本整備を遂行したひずみと推察できる。

(3) 日本人の社会問題への関心度

各種の社会問題意識調査（2000 年 01 月 08 日）を図 6.7 に示す³¹⁾。

この結果は、前述の世論調査と同様の結果が見られる。環境に関する関心度は、4 人に 3 人が持っている。ほぼ同程度に経済的関心も高い。科学技術への期待する漠然たる進歩的歴史観が自己負担を直視させていないとも考察できる。

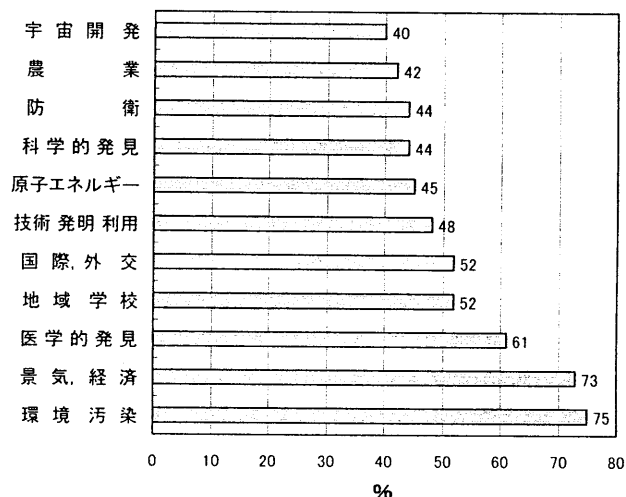


図 6.7 社会問題関心度³¹⁾

6. 4. 3 建設工事の価値観^{32), 33)}

(1) 工事と調査概要

従来型の土木工学的な考え方や管理者側だけの理論で問題を解決するには昨今限界がある。東名高速道路メンテナンス工事(集中工事)に対する供用側(5000 人)の評価意識調査を図 6.8 に示す。当道路は、全国的高速道路利用台数の約一割に該当 40 万台／日の利用と台数、物流の輸送量（トンキロベース）では全交通機関に対する 6%を占める日本の経済活動と国民生活に重要な役割を担う重要な社会資本である。次世代に社会資本を引き継ぐため今後、多くの設備でメンテナンスが必要となる。その施工の執行方法の是非は、施工の価値観的(ソフト面)評価に該当する大きな課題となる。

社会資本を選択による整備する時代にあたり供用側との合意形成は既に前章で考察通り重要な課題となる。その一例とも言える。

(2)調査結果

集中工事は渋滞件数，計経済損失に対してその有意性が明確に出ている³³⁾。しかし供用者側の判断結果は，消極的賛成も含めると約 80%が合意となるが積極的な支持は 50%である(図 6.8)。また 10 日間の連続工事に対して現状日数と年間を通じての工事期間のアンケートでは，約 63%である。約 3 人に 1 人はその執行に異議を示している。

図 6.9 は、工事の必要性の内容調査を示したものである。注目すべき点は，道路機能の本質工事の必要性和情報の提供を求める意見が同程度となっていることである。この意見に見られる施工技術以上に供用者側の評価は，施工以外の情報等のソフト面に重要性を示している。工事に対する評価が，ハード面と同等の情報提供，説明義務といったソフト面である施工運営，管理面により左右されることを意味する。

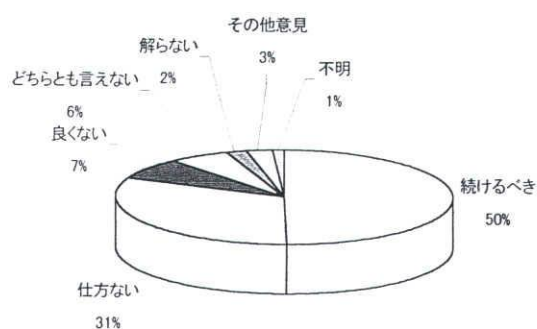


図 6.8 集中工事の評価

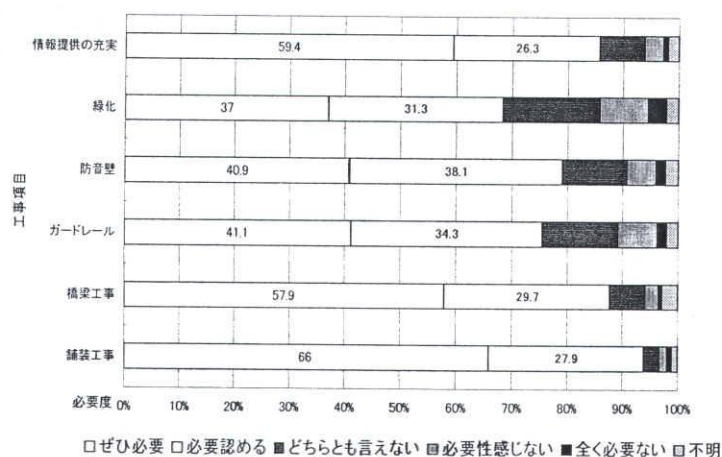


図 6.9 工事の必要性項目アンケート

(3)まとめ

今後の社会資本の整備は，本質的価値観とは別の評価が優先する可能性がある。その対応は，工事執行での合意形成システムの確立が重要なポイントになる。

その目的を達成するには，情報の提供，説明責任が必要となる。情報，説明には，従来の工学と異なる言語，地域，歴史といった人文科学の知識が必要となる。

社会資本の整備は，単なる建設工事の範疇では評価されない時代になったと認識すべきである。前述の風土工学的思考が必要となる。

6. 4. 4 まとめ³⁴⁾

これらの調査結果から国民の価値観の動向を以下のように推察する。

今後の社会資本の整備を執行する手法は、機能面(ハード面)と同等に施工運営、管理といったソフト面の付加価値的評価により左右される。

特に与える社会資本から選択する社会資本への変換には、合意形成が必要となる。そのためには、工学の枠を超えた総合科学の知識と思考による情報開示、説明責任が必要になる。今回の6.4.1~6.4.3に取り上げた事例で明らかになった価値観の変化がそれを裏づけている。

①心の豊かさがものの豊さより優位とする傾向。物質面より質的評価が高い。量的客観評価から質的主観評価の優位性に変化している。

②価値観は、環境、自然、安全等の、自然、生活環境が利便性より優先する。

実際は、生活実感とは整合していない面もある。世論調査による「利便性、快適性より自然、地球環境保護」と相反する「経済的に豊かな国家像」の願望が多いことである。ライフスタイルが消費型から循環型へ転換に至っていない過渡期でもある。

③社会資本の整備は、その計画、その実行手法に関して国民の合意形成システムが不可欠である(第1章,2章に示す)。そのためには、いかに事実を理解させるか言語に始まる人文科学等の幅広い知識が必要であり、事実の開示が不可欠となる。

従来の価値観は、確実に変化している。経済性、効率化といった物質的な量的評価から質的な主観的価値観による評価への移行である。人間と自然の共存の原点である生活の自然回帰でもある³⁵⁾。そのため、既に自然の力の見直しが始まりエネルギー関連を筆頭に多くの分野で高度化された技術の応用と解析手法(コンピュータの小型化、高性能化)により活用されている。

新美らによる電気抵抗、色彩色差の利用による品質管理手法、化石による水質浄化もその一例である^{36, 37, 38)}。

6. 5 主観的評価の変遷

量から質へ推移した価値観を検証するため、主観的価値観として景観、デザインの変遷に注目する。

6. 5. 1 景観に対する評価^{39, 40)}

(1)概要

一般的に土木構造物の感性と言えはその造形美であり、周辺環境との調和、自

然環境との共生が評価対象となる。土木構造物の造形作用における要素と影響の系統化を図 6.10 に示す。造形作業は、新たな景観を創り出す。景観は多くの要因により成り立っている。その要因は自然的要因（地形、水系、植生、気候、地質）と人為的要因（道路、橋梁、建築等の人間の活動に起因する施設）に大別される。

基本的な要因は自然的要因であるが、人為的要因に対する土木構造物の造形作用の影響は極めて大きいものがある。造形作用は、単体の存在とその周辺景観との複合作用により、二次、三次的影響を及ぼす。

大規模な土木構造物施設は、それ自体が新しい景観の是非を支配する大きな要素となり直接的な造形作用となる。

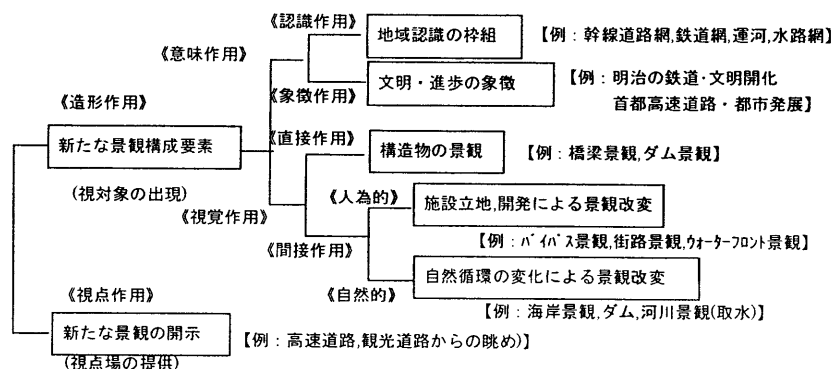


図 6.10 土木構造物の造景作用(景観形成の働き)⁴¹⁾

土木構造物は、土木工学や周辺工学により構成される土木技術が施工という具体的な実践行為として遺す文明の象徴となる。見方を換えれば、土木構造物による基盤施設は、地理的認識として地域の枠組み、風土にもなる。まさに文明のシンボル表現とイメージ作用を持つ社会的造形要素となる。

(2) 景観設計の変遷⁴²⁾

景観設計が注目されるのは、1980 年代後半から 1990 年前半のバブル期である。この年代には、急上昇する経済的背景を受けた社会的需要と要請による様々な新しいデザインの試みによるが行われた。この間の結果について篠原は、「見事な程までにきっぱりと二分される。一方には、専門のデザイナーや腕のよいエンジニアが関与する優れた作品とその対極には、素人の付け焼き刃の、あるいはメーカーのインハウスデザイナーが関与した、住民に媚びた、マスコミ受けを狙った大量の駄作がある。」とし、その原因は「デザインとは何かを問わなかった事業者とエンジニアデザイナーの能力不足」と指摘している。

1989 年～1999 年の 10 年間に、土木構造物の中で従来からデザインに力を注いできた橋梁分野から、従来はデザインの思考の少なかった街路、河川構造物、ダ

ムへと広がりを見せ、土木デザインの対象が全ての土木施設にまでおよぶ設計段階の評価要素となった。

そのデザイン評価内容は、自然との共生、調和も包含した空間での評価が不可欠になりつつある。従い日本における社会資本基盤施設における景観、デザインの本格的評価の導入は、1990年代よりと言える。いわゆる価値観変化と「質」の見直し時期に連動する。その具体化は1989年に建設省「シビックデザイン導入手法検討委員会」による公共土木施設の質の向上（デザイン）への取り組み宣言ともなった。それ以降、設計思想に転機を画し景観デザイン教育の実施等による第一線のデザイン水準の向上が図られるようになる。

1990年前後の時代に求められた「価値観変化」、「質の見直し」の年代背景との要因関係、社会的需要、要請に注目する。

バブル形成期の1980年代後半から1990年前半における社会は、多極分散国土の構築と国際化がテーマとなっていた。もう一つの背景は、国土資源のバランス崩壊による中央と地方の格差拡大の是正課題である。これらの社会背景と将来の国勢、自然環境の保全、共生に対する危機感が相乗し消費型社会から循環型社会へ転換させる大きな要因となった。成熟期社会にとって自然環境の保全、共生が最大の課題である認識の浸透とともに社会的価値観は、質的な豊かさに変化する。

「美」という主観的評価である景観は、時代的背景による社会的要請、価値観、評価による枠組みの中で変遷してきた。

現在、土木構造物による景観変化への認識は、環境の空間条件に含められた新しい価値観の主流となっている。大型土木構造物の造形作業は、新たな景観を創り、その作用は、年代の文明を象徴する周辺景観、環境、周辺文化、風土を創出することになる。

6. 5. 2 構造物形態の変遷に対する評価^{43, 44, 45)}

(1)概要

設計と心理の関係について磯崎は「設計の成果がこれを利用し、接する人に与える心理的影響と設計を担当する人の心理が設計成果に及ぼす影響の二側面がある。」として設計者に十分な技術的知識と幅広い見識を求めている。

構造物には構築年代による、使用材料特性や設計規定、基準、社会的制約とその時代技術的、社会的評価、美的判断が織り込まれ、その評価は、時代の価値観と技術水準が集約された設計水準、思想といえる。本節では、構造物形態の変遷を土木構造物の設計、施工の変遷から評価した研究に注目する。

(2) 磯崎の研究⁴⁴⁾

磯崎は、「人間の生活向上に要望の増大，多様化により土木構造物設計は，研究開発，新構造物材料，新工法等により分極化，細分化し，根底にある設計本来の姿を見失う．」と警告している．この考えは，施工法において生産効率の一義的評価による作業目的を見失った事象に通じる重要な警告である．磯崎は「構造物の場合，その構成材料の持つ構造形成上のポテンシャルに対して，最も安定した形態を「球」であるとしてこれを基に実際の構造物の形態を数字で表すことが出来れば比較評価の基礎としては他の影響を受けず簡単な方法として採用出来る．全ての構造物材料を同次元で比較でき，且つ簡単なものが望ましい．」として構造物を共通の場に置くことで，不必要な形態の排除が可能と断言している．「比表面積係数(Specific Surface Factor=SSF)」は式 6.1 に示すように構造物の全表面積から同体積の球体の表面積を差し引いた値をどの球体表面積で除した指数である．

$$SSF = (A - A_0) / A_0 \quad (6.1)$$

A=構造物の全表面積・A₀=その構造物と同じ体積を持つ球の表面積

磯崎による SSF を指標とした構造物と許容応力度，構造物比表面積と構造物区分，を図 6.11，6.12 に示す．

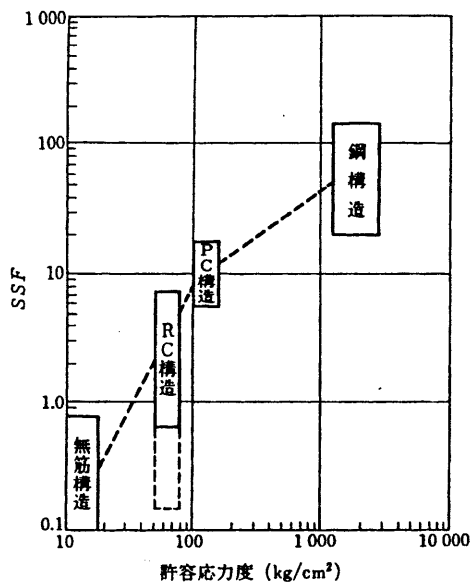


図 6.11 比表面積係数と許容応力度⁴⁶⁾

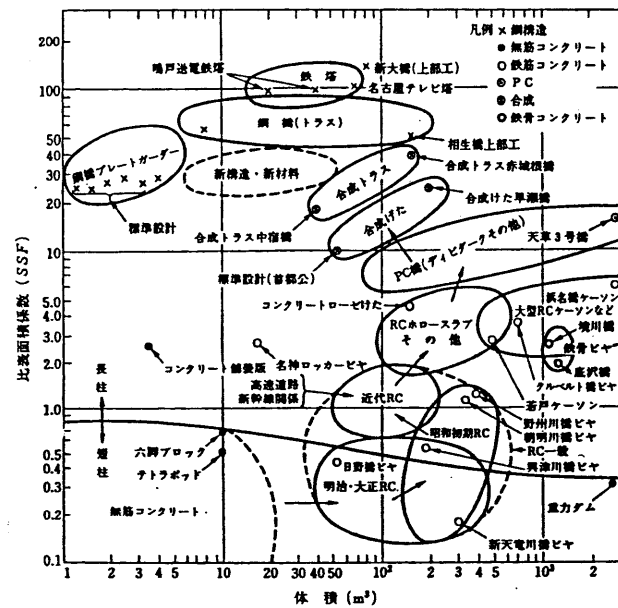


図 6.12 比表面積係数と構造区分⁴⁷⁾

構造物の形態は，初期段階では，重厚な安全設計となりやすいが，材料，設計，施工方法等の研究開発により経済性，機能性を増してスリム化する．

スリム化は，構造物を構成する材料物性の進歩による機能拡大効果が要素となる．コンクリート構造が，無筋コンクリートから鉄筋コンクリート，プレストレスコンクリートへの進歩による形態変化や鋼材の鋳鉄，鍛鉄，鋼鉄，高張力への

進歩による構造形態変化でも明白である。

図 6.11 から無筋コンクリートは、SSF が一番小さく 1.0 以下。鉄筋コンクリートでは 1.0 前後、PC の場合は 10.0 前後と急激に大きくなる。鋼構造の場合は一般に 20～80 の範囲に入る。これらの範囲が、材料による形態の自由度の領域と考えれば、前述の篠原が指摘する土木構造物の「大衆に迎合するデザイン」はこの領域外(装飾的形態による比表面積が大きくなる)となり、設計面から「指数」により定量的評価(合理的形態の範囲)を下すことも可能となる。

図 6.12 から設計、技術水準の変遷による形態変化は、鉄筋コンクリート領域で SSF 値区分により明確に示されている。名神高速道路の RC 橋脚は、厚さは同じで横方向の幅員が広く SSF 値が 0.1～0.5 であるのに対して、東名高速道路、首都高速道路、東海道新幹線期の橋脚の SSF は、2.0 と大きくなる。

SSF が大きくなることは、体積の縮小化であり、形態の複雑化といえる。言い換えれば設計と施工両面の進歩は、形態要求の自由度の拡大となる。重厚鈍重から軽快華麗への変化が可能となる。形態設計は、設計、施工両面の技術進歩により可能となる。しかし、無意味な複雑化は耐久性、安全性の基本的性能に対する危険性を増す場合が多い。また複雑化された造形作用は一時的に満足させるが自然環境、風土分化として根づかないことは、多くのバブル期の例が象徴している。

篠塚の指摘を工学的見地から裏付け、領域を逸脱しない景観技術領域に対する定量評価手法の一例と考える。

(3)まとめ

構造物形態は、設計思想が最終的に帰結する具象といえる。造形設計は、構造材料の進歩により自由度が拡大した。その具象表現は建設技術の進歩により可能となった。その結果、構造物の造形は繊細で複雑な形態が可能になった。

形態と設計とのコンセンサスは、設計の要求性能を満足し、創出される景観が風土分化と一体化することである。土木構造物は地域の枠組み、風土にもなる。年代の文明水準の表現を持つ社会的な造形要素と認識すべきである。構造物の造形は、価値観による評価変遷に対し、その目的性能、機能を基本として奇抜、装飾的なデザインと一線を画する合理的性判が必要である。

6. 5. 3 デザインの変遷に対する評価^{42, 48)}

(1)概要

社会経済の背景とデザインの関連に注目して考察する。土木構造物には、照明灯、橋梁等の工業デザインによる量産された製品が使用されている例は多い。工

業デザインの変遷から、多様、複雑な美的価値観と社会需要と要請の関連を考察する。

(2) 工業デザインの変遷

デザインの主眼は、「見た目を美しく魅力的」による装飾性と「使いやすいこと」による機能重視に分類できる。前者は、1920年代末の代表的な流体力学による「流線型」デザインがその例である。後者は、人間工学がデザインに導入された20世紀初頭のドイツを中心とするデザインがその例である。機能性によるデザインは、目的「人間が使うもの」に対する要求性能が本質である。技能職人「マイスター」を高く評価するドイツの文化、風土による感性、価値観に通じる。価値観が国、地域の歴史、伝統に無関係ではないことは前述の価値観比較でも明らかである。

20世紀は世界的な価値観として「機能と合理主義」が社会資本整備の評価に重要な位置を占めてきた。日常生活を通し機能、合理性を最優先する考えは、生活様式にあった美的価値観により居住者の主観、感性に大きな影響を与えた。この機能性の重視もやがて画一的な形式となり形骸化する。

日本では、1950年代後半、高品質と独自性による国際的商品の開発による輸出により産業を活発化させる。戦前の機能性デザインから付加価値デザインへの転換となる。これを契機に日本のデザインは社会的需要と要請に基づく、機能と利便性を一体化した創造性を増すことになる。1954年三輪トラック、1955年電気炊飯器、1958年トランジスターラジオが代表例である。

高度成長期を迎え話題性、刺激性による装飾的なデザインが増加する。短期的な商業的消費を目的とするといった「使い捨て」的なデザインといえる。

過剰な多様性に迎合した総花的デザインは外観、機能の問題を後年生じることになる。無秩序な主観的评价に左右され機能的評価されなかった年代の象徴的事象である。

1980年代後半になると、量より質の向上、心の豊かさに価値観が変化する。地域文化、歴史、自然に根ざした「感性の豊かさ」を織り込んだデザインが注目されるようになる。

(3) まとめ

西沢は、「形骸化した近代主義デザインの画一性は人間を疎外するものとの反省に、ポストモダンの時期に花開いた「感性」を大切にしてみよう一度機能主義デザインを作り上げた理性を取り込んでいくことが必要」とデザインの方向性を明言している。

土木構造物を構成する工業デザインの流れは、時代の社会経済を反映し、社会

資本の整備に対しても無縁ではない。デザインの大きな変遷は、装飾性から機能性、短期的話題性から「感性の豊かさ」に至っている。この流れは、別章で考察した社会経済環境の変化による社会資本の整備手法の内容と一致する。

感性、価値観は、その時代、国、地域により個性があり、変化し、性格を変えているものである。現代は、社会資本の整備、整備手法に対する評価軸に感性、価値観が含まれ大きな影響を持つ時代である。価値観の動向は、社会資本の整備の方向性を決定づけるといっても過言ではない。

社会資本に対する評価は、認識のレベルがその評価を左右する。

西沢によれば『デザインの創造範囲をどこに置くか。不特定多数を対象とする「公」は共有される理性が重要である。「私」は個人の感性が優先される。都市は「私」と「公」とその中間に位置する曖昧な領域で混じりあっている。「公」は都市の基盤を支え、都市環境の骨格を造っている。樹木の幹である。「私」は葉の存在。感性と理性が共に必要であり相関的依存性がある。使用者は同じ生活者である。』と表現している。

社会的合意の形成も同じことで「社会資本整備、その建設手法」の方向性を掌握するには、評価項目である『感性、価値観』である主観的評価をいかに客観的に適正評価するかが大きな課題となる。

6. 6 I S M法による意識の階層化^{49～58)}

建設産業、建設技術、施工法は、社会経済要請の変遷により方向付けられる。それらの評価に大きな影響およぼす価値観の変遷と展望を6.2～6.5の項目で考察した。本節では、I S M法による価値観意識の階層化を行い将来の価値観を検証する。

6. 6. 1 価値観の位置付け

6.2～6.5節で考察した価値観は以下に分類できる。

- ①社会資本整備と価値観の変遷について（人間と社会の関係）
- ②価値観の比較（価値観の固有性）
- ③日本の価値観動向（意識動向による価値観変化、感性、主観的評価）
- ④主観的評価の変遷（景観、構造物形態、デザイン変遷等主観的価値観動向）

施工法の開発、選択は、その時代における価値観評価の影響を受ける。

価値観は、年代により性格を変え、社会資本整備に供する建設技術の評価項目を左右する。評価項目は、パラダイム変化(消費社会から循環社会への変革)により、機能、経済を優位とする客観的価値観から人間性、感性に代表される質的価

価値による主観的評価に比重が大きく変化している。しかし価値観が単なる主観では、人間の生活向上に対する要望の増大による多様化により分極化、細分化して根底にある本質を評価する本来の姿を見失うことにもなる。

価値観を位置付けるには、その動機付けが必要となる。そのために建設産業が「社会の要望」に応える社会基盤を構築する目的と役割の位置付けを明確にしなければ、その手段となる施工法を評価する価値観は把握できない。

6. 6. 2 将来の社会展望

将来の社会にとって社会基盤施設の構築の意義と必要条件という視点により考察する。図 6.13 に「どんな社会を実現するか」との命題に対する 5 段階のフェーズを示す⁵⁹⁾。

第 1 フェーズ：「どんな社会を創るか」は、社会の要請の把握＝社会資本基盤は如何にあるべきかという、人間社会の問いかけでもある。時代、社会の価値観である。何を第一義として思想の原点と成すかである。日本の歴史、文化、地域性に合致した社会、例えば五全総の基本理念である「自然は現世代が将来世代と共有する財産である認識にたち、生物の多様性と健全な自然の物質循環に基礎を置いた人と自然の共存を目指す。世界の中の日本と言う視点で人類史的貢献を目指すという認識を持ち生活の豊かさと自然環境の豊かさが両立する世界に開かれた活力ある国土」の構築である。

第 2 フェーズ：「その要請に応えるには「なにを創ればその効果があるか」という事業の評価項目の選定である。この項目は社会資本の評価手法と合意形成に関するものである。費用対効果、周辺環境との調和（美観、地域特性）、環境保全、耐久性等は、社会資本を建設する際の重要な評価項目となる。その評価項目の基準となる「機能、効果、満足度」は、施工法や技術評価にも連動する。

第 3 フェーズ：「事業プロセス、生産システムの効率化」の方策である。その 1 つは、社会的ニーズの的確な把握であり、その手段が課題となる。これらは、説明責任、住民参加、情報公開等がキーワードとなり既に種々の試行がなされている。この中には PFI (Private Finance Initiative), BOD (Build and Transfer System) 等の民間財源による社会資本整備も含まれる。現在の仕様規定から性能規定の導入は、民間の技術開発、技術活用となる。それは、技術のより具体化された「施工法」と密接な関係を持つ。

第 4 フェーズ：「入札、契約システム」は、第 3 フェーズを受けるとともに国際化、建設産業の体制改革でもある。

第 5 フェーズ：「建設産業の技術開発、育成、継承」に関する課題となる。ミクロ的視野では、建設産業の施工部門は第 5 フェーズとなるが、第 1 フェーズから

の連鎖する枠組みでの存在が不可避である。

このフェースの展開から時代、社会の要請により求められる機能と価値観を位置付けることは、建設産業＝土木技術の方向性を明らかにする。

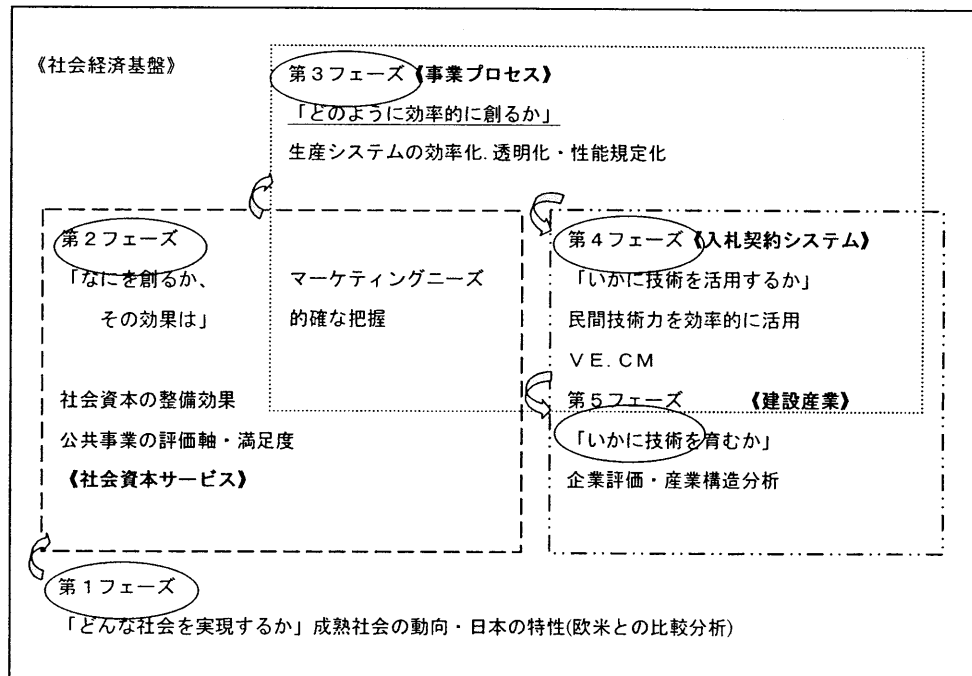


図 6.13 どのような社会を実現するか

6. 6. 3 I S M法による意識の階層化^{60, 61)}

図 6.13 のフェーズに該当するキーワードから機能と価値観を I S M 法により階層化する。

(1) I S M (Interpretive Structural Modeling) 法

ワーフィールドにより開発された手法(Warfield, 1974)である。社会問題、経済問題の論理展開等についてその因果関係の階層構造を作成する数学的手法である。階層構造は、行列表示により示される。この方法は、図 6.14 に示すプロセスで構成されている。

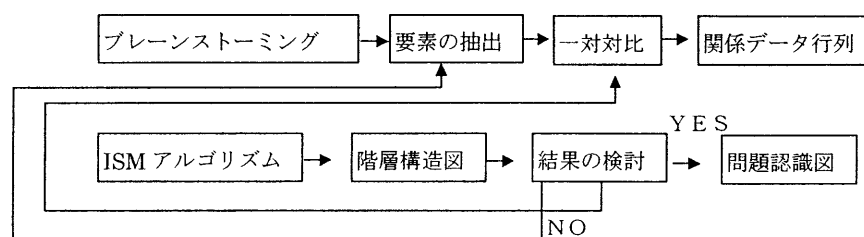


図 6.14 I S M法のプロセス

I S M法の基本概念は、問題に対してブレインストーミング等によって関連する要素が抽出され、それらの要素の集まりを要素集合Aとする。次に各要因間の直接的な因果関係を表す隣接行列 $A = (a_{ij})$ を決定することから始める。隣接行列の成分は、目的の要素となりうる n 個の要因のうち要因 i から要因 j への直接的な因果関係の有無によって $a_{ij} = 1$ または $a_{ij} = 0$ の値をとる。要因間の因果関係図を図 6.15 に示す。図 6.15 のモデルでは、隣接行列は以下のように与えられる。

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

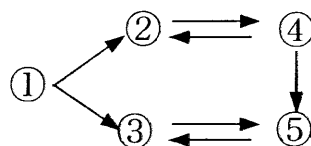


図 6.15 要因間の因果関係

この行列は一つの矢印で結ばれた隣接する要因間を 1 で繋いでいる。次に 6.2 式のような隣接行列間の演算を定義する。

$$(A^2)_{ij} = \bigvee_k (a_{ik} \wedge a_{kj}) \quad (6.2)$$

ここに \wedge は、真を 1、偽を 0 と見た場合の論理積を \bigvee_k は、 k についての論理和を表すものとする。この行列 A^2 は、最大 2 つの矢印を通して到達できる要因間を 1 ここに \wedge は、真を 1、偽を 0 と見た場合の論理積を \bigvee_k は、 k についての論理和を表すものとする。この行列 A^2 は、最大 2 つの矢印を通して到達できる要因間を 1 で繋いでいる。この演算を繰り返すと、これ以上変化しない行列式 R に到達する、これが可達行列となる。可達行列の成分が 0 になった要因間には、因果関係がないものと解釈される。可達行列は、因果関係の階層構造を表しているがこのままでは、関連が把握しにくいので階層の順序に従って要因を並べ替えた行列が階層化可達行列と称され R^* で表される。前述の例では可達行列 R と階層化可達行列 R^* は式 6.3 として以下ようになる。

$$R = A^3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow R^* = \begin{pmatrix} \boxed{1} & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & \boxed{1} & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & \boxed{1} & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \boxed{1} \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

ここで並べ替えの順番は、(1, 2, 4, 3, 5) となる。階層化可達行列中の四角内が同じ階層を表す。この階層構造をネットワーク図により示し認識を明確に位置づける手法である。

(2) 要因(キーワード)抽出^{62, 63, 64)}

I S M法による階層化を行うキーワードは、下記の i ~ v の資料より抽出した。

- ①「社会資本と土木技術に関する 2000 年仙台宣言」⁶⁵⁾
- ②国民の意識調査による社会像⁶⁵⁾
- ③土木学会による社会資本整備と技術開発の方向に関する検討委員会報告資料⁶⁵⁾
- ④建築学会による建築憲章^{66, 67)}
- ⑤表 6.4 に示す高い頻度で新聞が取り上げた用語⁶⁸⁾

表 6.4 新聞高頻度用語要素

用 語	分類 頻度	事業評価	合意形成	役割分担 選択責任	環境第一 主義	L. C. C	技 術	情報化
NPO	3052							
バリアフリー	1718							
ISO14000シリーズ	1547							
少子高齢化	843							
GPS	648							
PFI	562							
ゼロミッション	466							
時のアセスメント	362							
環境評価法	301							
コスト削減	269							
アカウンタビリティ	203							
ISO9000シリーズ	169							
VE	123							
GIS	120							
公共事業評価	82							
性能規定	49							
社会実験	36							
建設CALS	24							
上請け	24							
経常IV	22							
ライフサイクルコスト	16							
PM	11							
費用便益分析	10							
CM	10							
技術提案総合評価方式	8							
発注者責任	7							
パブリック・インブルメント	4							
減災	3							
設計、施行一括発注方式	2							
不良不適格業者	1							

図 6.14 に資料①～⑤によるキーワードを KJ 法によるグループ化して示す。

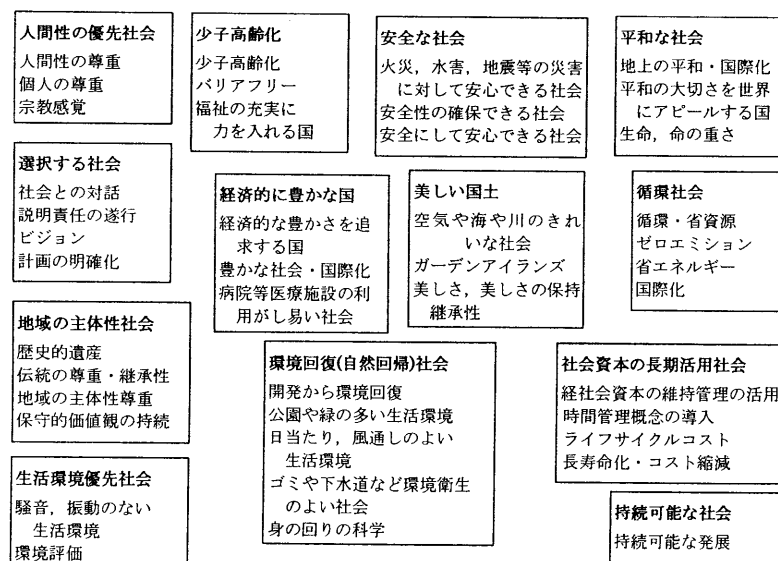


図 6.14 K J 法によるキーワードのグループ化

(3) 「どんな社会をつくるか」階層化

抽出したキーワードを13のグループ化とした。ISM法による階層化を行うに当たり、13フレーズ全体で行う場合と、人間社会の将来の目的として明確である「継続可能な社会」に対する12フレーズの階層化を比較し後者に決定した⁶²⁾。マトリックスの作成は、50以上の語句を13のフレーズに集約した内容を十分熟知した3人の技術者、専門家の意見により作成した。「どんな社会をつくるか」についての結果を図6.15関係行列、図6.16可達行列、図6.17階層化可達行列、図6.18骨格行列、図6.19階層化ネットワーク図を示す。

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
次数M=	12											
A:関係行列(Binary Matrix)												
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1						1	1	1	1	
2		1				1						
3			1							1		
4				1		1						
5					1					1		
6		1				1	1					
7							1					
8								1				
9								1	1	1	1	
10					1					1		
11										1	1	
12										1		1
	項目											
	①選択する社会											
	②少子高齢化社会											
	③安全な国											
	④平和な国											
	⑤循環社会											
	⑥豊かな社会											
	⑦人間性の優先社会											
	⑧生活環境優先社会											
	⑨自然共生、調和社会											
	⑩社会資本の長期活用社会											
	⑪地域の主体性社会											
	⑫美しい国											

図 6.15 関係行列

AA:可												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
2	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
4	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
6	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1

図 6.16 可達行列

レベル分割(Level Partitio												
	3	2	2	3	1	2	1	1	2	1	2	2
行列順序替え(Rearray o												
	5	7	8	10	2	3	6	9	11	12	1	4
5	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
11	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
12	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
4	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1

図 6.17 階層化可達行

骨格行列(Skeleton Matrix)												
	5	7	8	10	2	3	6	9	11	12	1	4
5	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
11	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
12	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0
4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1

図 6.18 骨格行列

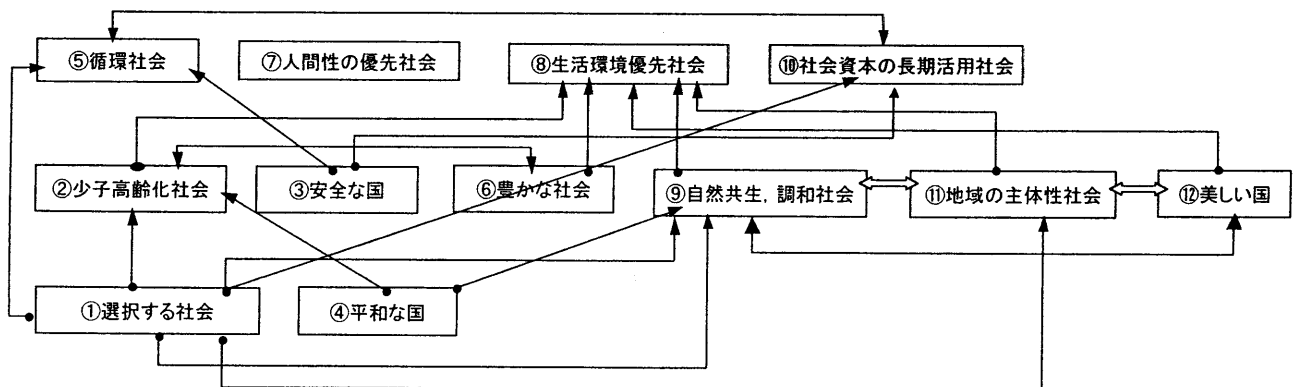


図 6.19 階層化ネットワーク図

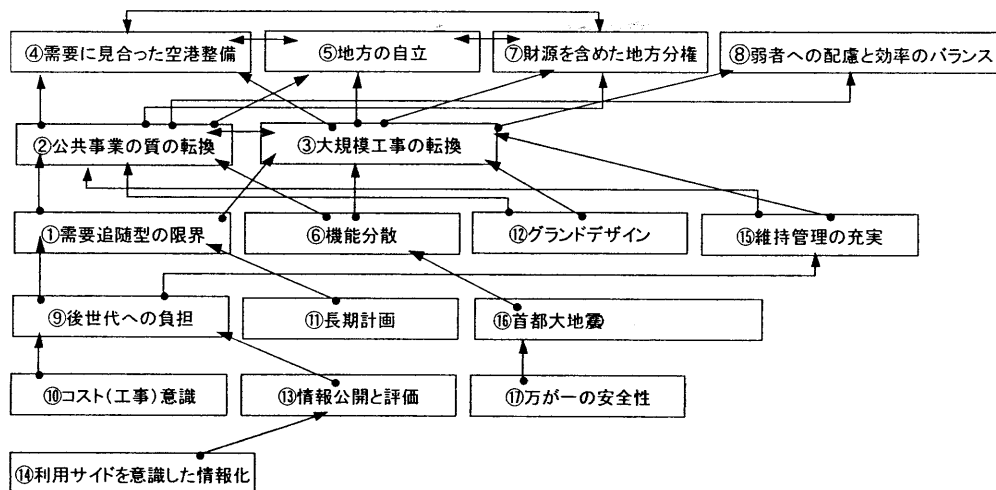


図 6.24 「何をつくるか」階層化ネットワーク図

この階層図より「何をつくるか」は、利用者側との合意形成をもとに情報を提供することが基本条件となる。この階層化でも「選択される社会資本の整備」が条件となる。情報開示の内容は、多種多様な要素がある。コスト、リスク、長期展望、需要と供給バランス、環境評価等々である。それらの情報は開示されることにより評価を受ける。評価者は、負担者である国民＝エンドユーザーとなる。「何をつくるか」の選択合意に至るシステムの確立が急がれる所以である。それには先ず、「需要、環境、費用対効果、地域の独自性、将来の国勢」等の多くの要素事実を開示することが前提となる。価値判断は、求める社会の持続的発展が後世代へ継承可能か否かによる。表 6.5 は、社会資本の属性による分類 (classification of infrastructure by attribute) を示す。この社会資本の属性による分類は、社会資本の整備のあるべき姿や内容および整備程度等の指標を示すものとなる⁷⁰⁾。

表 6.5 社会資本属性分類表

公的介入の根拠財 の諸特性	公共財的性格（排除困難）		排除可能財		公的供給による 特定の政策 意図の実現 Ⅲ	市場性
	排除不可能 Ⅰ－Ⅰ	技術的に排 除可能又は 受益範囲の 特定が可能 Ⅰ－Ⅱ	その性格から存在量が 不足する財			
			技術的外部経済 社会的利益）個 人利益 Ⅱ－Ⅰ	費用過剰産業で 地域独占が生じ やすいもの Ⅱ－Ⅱ		
サービス供給 の目的効果						
基本的なサービス の供給 1 国土、生命、 財産の保全 2 住居環境 保健衛生	治山、治水 海岸 下水道雨水等	一般道路 都市公園 自然公園 農道、林道 灌漑、排水 漁場整備等	保健衛生 下水道汚水 産業廃棄物処理 教育等	水道 電気家庭用 ガス 鉄道、有料道路 空港、港湾 電気通信 漁港 工場用水道 電気業務用	救急医療 社会福祉 公共賃貸住宅 郵便 研究所 園地整備 土地造成 文化社会教育 体育	小 大
経済社会の活力 の維持、増進 1 産業振興、国土の均 衡ある発展 2 国民の創造的活動 の支援等高次のサ ービスの提供						
市場性	無		有			

(5)第3フェーズ、第4フェーズは、今回の研究テーマ外として省略する。

(6)「いかに技術を育むか」階層化

第5フェーズに関しては、建設技術の課題をキーワードとして方向性を考察する。建設技術は、いろいろな社会的要請、価値観を要素、要因として変遷してきたことは各章、各節の考察により十分明らかになった。表 6.6 に技術面に関する変遷概要を示す。

表 6.6 建設技術の変遷概要

建設産業を取り巻く環境変化	環境変化による技術への要請	技術の対応
輸送力の増大、高速化	施設の大型化、特殊化	輸送手段の専門化、分業化、施工範囲の拡大、建設機械大型化によるコスト縮減、短縮施工化
エネルギー利用の開発、汎用化	公害発生防止	エネルギー源の多様化利用と機械開発、工法開発
材料の特性変化、物性の高性能化	高品質、高性能に対応する設計技術と技術開発	建設材料の活用による設計、施工の高度化、解析技術、建設技術開発
情報、計測技術の発展	細部、詳細設計、対応施工技术、災害防止設計のスリム化	解析技術による詳細設計の高度化 危険予知技術の発展
少子化、機械化（エネルギー変化）	合理化、省力化、迅速施工、大量施工、コスト縮減	機械化による合理化施工 施工管理システムの普及
解析技術の高度化、情報化社会（計測技術）	省力化、高度、コスト縮減化、高速判断対応	解析技術簡易化、ビジュアル化、個人判断から集団的判断、リアルタイム対応の情報化施工、
生物、有機物の生命若しくは耐久性の延長	耐久力の延長、ライフサイクルコストの視点	維持補修技術の発展と予知技術の開発および計測、情報技術の応用
市場の変化	国際化による経済的コストの低減	国際競争力となる高度技術とコスト縮減
価値観変化	主観的評価、人間の主体性、社会生活環境対策	景観設計、環境評価設計、耐久性設計、性能設計、環境、公害対策施工、施工技术（機械開発）

土木学会の有識者により提起された技術的課題のフレーズを下記の 7 項目に分類する⁶⁵⁾。

- ①開かれた土木技術：環境評価等の情報開示と説明責任を含む技術
- ②エネルギー問題：施工、材料による二酸化炭素の発生、ライフサイクルアセスメント、事業代替案等を含む技術
- ③IT：情報化施工と技術、少子高齢化による労働条件対応
- ④建設廃材の利用、基礎および躯体の老朽化：ゼロエミッション、リサイクル技術等環境対応と維持管理技術を含む、ライフサイクルコスト
- ⑤国土管理の衛星利用：無人化、情報化施工、計測技術、解析技術
- ⑥環境問題と生態系の知識：自然との共生調和、技術の質的評価、総合教育
- ⑦自然の学習：自然回帰、自然との調和、生態系の知識、持続可能な社会観
- ⑧千年持続学：少子高齢化の国勢対策、環境保全、循環社会技術、ライフサイク

ルコスト(維持, 補修, 更新の判断基準)

- ⑨都市部の洪水対策：都市化現象課題，環境変化課題技術，機能維持技術
- ⑩都市問題：21 世紀の社会課題，リノベーション技術
- ⑪省エネ：環境，循環社会対応技術（再使用，利用等）
- ⑫健康モデル住宅：生活環境保全技術
- ⑬21 世紀の都市モデル事業：新時代都市実現技術

この 13 フレーズによる階層化から将来の技術課題を考察する．ISM 法による関係行列，可達行列，階層化可達行列，骨格行列，階層化ネットワーク図を図 6.25 ～6.29 に示す．

A:関係行列(Binary Matrix)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		1	1										
2			1	1									
3				1	1								
4					1	1							
5						1							
6							1	1					
7								1	1				
8									1	1			
9										1			
10											1	1	
11												1	1
12													1
13													

項目
21世紀型都市のモデル事業
省エネ、健康モデル住宅
都市問題
都市部の洪水対策
千年持続学
自然の学習
環境問題と生態系の知識
国土管理への衛星利用
基礎、躯体の老朽化
建築廃材の利用基盤
IT
エネルギー問題
開かれた土木技術

AA:可達行列(Reachability Matrix)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
9	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
10	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1

図 6.25 関係行

図 6.26 可達行

レベル分割(Level Partition)

1	1	2	2	2	2	2	3	3	4	4	5	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

行列順序替え(Rearray of Matrix)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	12
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
9	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
10	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
12	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1

図 6.27 階層化可達行列

骨格行列(Skeleton Matrix)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	12
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1

図 6.28 骨格行列

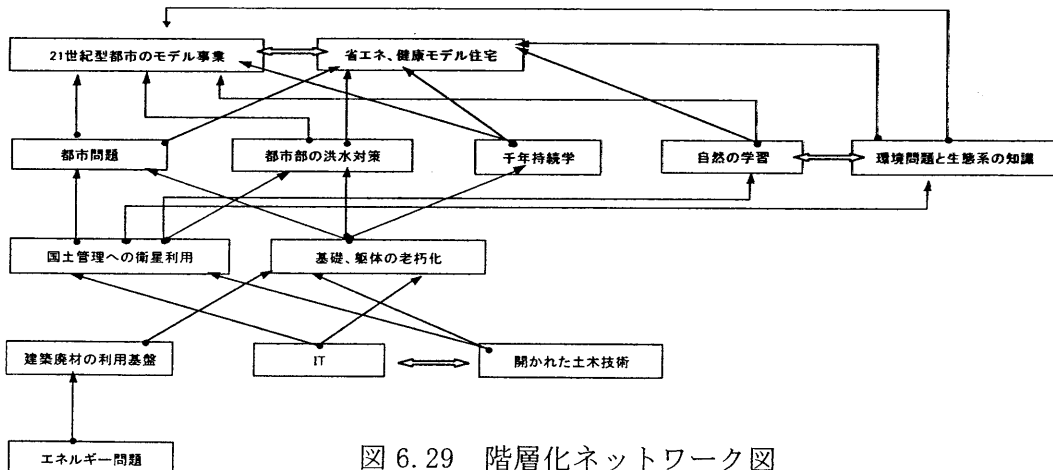


図 6.29 階層化ネットワーク図

エネルギー問題は、自然環境、地球環境保全に係わるグローバル課題である。この問題は、建設事業、建設産業の執行形態、生産システム、評価項目でも重要な位置を占める。特に少子高齢化の国勢、循環社会への転換期に至る現在、技術課題は、この問題の枠組みの中に存在する。

炭酸ガス発生抑制は、地球規模の課題であり社会的要請である。現在、社会資本の整備における具体的展開は、廃棄物削減、リサイクル、リユース等の環境に関する技術と維持補修技術の開発とその側面的技術である情報の活用、管理技術が主題となっている。この動向は、環境技術の枠組みへの収束化として捉えられる。構造物の長寿命化技術（維持、管理、更新や廃棄物は全てエネルギー問題となる）もその枠組みの中で位置付けられる。

(7) ISM法による階層化のまとめ

「どんな社会を目指し、そのためには、何をつくるか」そして今後「どんな技術を育むか」をISM法により階層化した。

目指す社会は、図 6.19 に示される「地域の主体性と自然との共生、美しい国」は循環社会と人間優先の社会により達成される。地球環境、自然環境の保全は、有限資源を念頭にする循環社会の構築を必要となる。少子高齢化時代の豊かさは、循環社会に求められる。それは、量より質を重視する価値観や利便性より生活環境を優先する社会である。現実の国勢による限定財源、地球温暖化等の課題は、循環社会による資源(社会資本基盤)の有効活用(廃棄物や炭酸ガス発生抑制)に連動する。

資源の有効活用から建設産業、建設技術に求められる課題は、「社会資本の長期活用」技術、施工といえる。その条件、手法は、前節で検証した価値観による評価を受ける。価値観は、時代とともに性格を変え評価基準、評価項目を変える。廃棄物、エネルギー問題は、ライフサイクルコストを含めた維持、管理技術でもある。構造物のライフサイクルは、使用材料、工事による二酸化炭素発生、資源使用量、廃棄物発生量を左右する。これらの基軸に耐久性がある。社会資本の長寿命化は、循環社会による環境保全、基盤施設への信頼性、財政への貢献等多くの将来の国勢に必要技術となる。一方、地球、国土、社会情報を的確に把握し活用することは、解析、設計、建設技術の方向性を支える重要な事項となる。

「何をつくるか」は、需要と供給バランス、環境保全、地域の主体性等の多種多様な要素からの「選択」を必要とする。エンドユーザーである国民により選択が可能となる「情報の開示、説明、評価、選択」に至るシステムが必要となる。

社会資本の整備手順、評価の転換期である。評価は、機能評価のハード面と主観的評価といったソフト面の両面により検証されることになる。社会的要請を建

設技術の本質的目的と整合させるにはソフト面の動向把握が不可避の課題となる。

6. 6. 4 まとめ

社会的要請は、その時代の価値観となり建設産業、建設技術の評価にも影響する。近代社会資本整備にとって合理化、効率化が一義的優位性であった時代、建設産業は、分業化、専門化等によりその目的を達成してきた。その過程で工学的性能を確保する目的が施工システムにおいて希薄となった一因に、施工法の選択が定性的、経験的であることを指摘した。構造物の要求性能が高度化、高性能化する中で建設産業における施工管理は極めて重要な位置付けとなる。施工におけるリスクを管理するには、施工段階の行為を工学的に定量化、指標化により評価することが必要であると提起した。特に建設産業における施工においてその重要性が高い工種が「コンクリート工」であることは、施工法の体系化の中で明らかにした。コンクリート工における基本作業を工学的に評価するにあたり、将来の社会的要請を展望しその評価の必要性と位置付けを明確にするために本章の考察(価値観変遷と展望)を行った。

その結果は、目標とする循環社会を建設するために建設産業が求められる技術は、「長寿命化」に代表されるフレーズである。将来の目標とする社会像と求められる技術課題を階層化分析した結果でも「社会資本の長期活用」「千年持続学」「維持管理の充実」というフレーズは重要な位置を占めている。

異なる視点で述べた第一章、第二章における本研究の背景、目的から求められた結論とも整合する。本章で得られた結果「社会資本の長寿命化」を次章においてコンクリート工、施工法の工学的評価による選択として具体的に考察する。

第6章参考文献

- 1) 土木学会：2001 年制定環境負荷低減型土木構造物設計ガイドラインコメンタリ pp. 1～29, 平成 13 年 4 月
- 2) 木村洋行, 植田政明, 渡部義信, 大林芳久, 藤田武彦, 草柳俊二, 松尾哲彦：土木技術の市場価値を高める, JSCE Vol. 86, pp. 5～26, Nov. 2001,
- 3) 土木学会誌 Vol. 86, Sept：あなたは土木に何を求めますか, pp. 7～61, 2001
- 4) 中村英夫：これからの社会資本づくり, 青山 吉隆：21 世紀国土づくりのシナリオ, 21 世紀の社会資本を創る第 10 回・21 世紀の視点その 2, 土木学会誌, Vol. 84, Oct. pp. 43～50, 1999
- 5) 竹林征三：風土工学序説・技報堂出版, 1997. 8
- 6) 高木善之：選択可能な未来. 地球大予測・綜合法令出版 1996. 2

- 7) NHK放送文化研究所・現代日本人の意識構造・日本放送出版協会, 1998. 6
- 8) 日経コンストラクション 1999. 7. 23: 生き延びる土木遺産, pp. 74~93
- 9) 鈴木理生: 江戸時代の社会資本整備(江戸の土木技術), 建設マネジメント技術 2000年9月号, pp. 54
- 10) 植田和弘: 環境時代の土木工学の課題, 土木学会誌 Vol. 84, pp. 39~42, Oct. 1999
- 11) ダイヤモンド: 創造の円環的展開, 1969年7.7日号, p62
- 12) 竹林征三: 風土工学序説 p127
- 13) 竹林征三: 風土工学序説 p130
- 14) 竹林征三: 風土工学誕生の歴史的時代背景, 土木技術資料 38-11, pp. 20~25
- 15) 日経コンストラクション 1999. 7. 23: 生き延びる土木遺産, pp. 74~93
- 16) 荒巻英城: ヨーロッパの建設事情, 日刊建設通信新聞 1999. 11. 5
- 17) 西淳二: 欧米の地下空間活用 of 思想と背景, 土木学会誌 1996年5月号, pp. 22~25
- 18) (社)日本土木工業協会経営企画委員会: これからの社会資本を考える, pp. 1~30, 2002. 8
- 19) (財)建設経済研究所: 日本経済と公共投資 No. 35, pp. 129~141, 2000年7月
- 20) 建設通信新聞: 西欧の住宅市場維持補修投資さらに増加, 2000. 7. 12
- 21) 鈴木一: アメリカ, ヨーロッパおよびアジアの建設市場と建設産業の動向, 建設業界 2000. 5, pp. 14~29
- 22) 建設省河川局開発課監修: ダムの必要性と効果・発行 (財)日本ダム協会
- 23) 竹村公太郎: 河川人々の暮らしとともに, 建設業界 2000. 10, pp. 14~19
- 24) トンネルと地下: トンネル技術者のための応用地質学入門・第一編トンネル工事に必要となる基礎的地質学-1999-8月号 p65~75
- 25) 竹内良夫監修: 土木学を語る「21世紀をどう生きるべきか」・都市計画通信社, 1999. 11
- 26) 三菱総合研究所 MRInews: 豊かさ指標と行政施策の評価
- 27) NHK放送文化研究所: 現代日本人の意識構造, 日本放送出版協会, 1998. 6
- 28) 総理府: 「国民生活に関する世論調査報告」, 内閣総理大臣官房広報室「世論調査報告書平成6年5月調査」 p48
- 29) 時事通信社・地域情報センター: 「生活環境に関する関心度調査」平成7年度
- 30) 読売新聞: 「日本の国の将来像」世論調査, 2001. 1. 10
- 31) 文部省: 社会問題への関心度調査, 2000. 1. 8
- 32) 千田洋一: 公共事業の円滑な推進, 月刊建設, 1999. 12
- 33) 豊田正夫: 高速道路緑化のあゆみと最新動向, 日経コンストラクション 2000.

3. 24, pp. 115～118
- 34) 仙田満：地球環境・建築憲章運用のための指針，建設マネジメント技術，2000年12月号，pp. 59～63
- 35) 例えば松井渉，若月学：特集「河川の伝統技術再評価」，建設マネジメント技術，2000年12月号，pp. 15～24
- 36) 植野修昌，新美孝之介，丹羽誠，松井保：見かけ比抵抗を用いた盛土管理手法の開発と適用事例，土と基礎，Vol. 48，pp. 29～32，2000. 4
- 37) 新美孝之介，片岡昌裕，大倉浩二：岩の色彩に着目したロック材料のゾーン判定方法の開発，電力土木No. 294，pp. 113～115，2001. 7
- 38) 新美孝之介，関野秀男：天然カルシウム系材料による水質浄化技術，電力土木Vol. 298，pp. 40～43，2002. 3
- 39) 土木学会編：新体系土木工学別巻日本土木史，pp. 38～73，技報堂 1994. 7
- 40) ジョン・フィッチェン著，藤本一郎訳：機械化前の建設技術としくみ，pp. v～viii，鹿島出版会
- 41) 土木学会編：新体系土木工学別巻日本土木史，pp. 39，技報堂 1994. 7
- 42) 篠原修：シビックデザイナー—身近な土木のかたち，JSCE Vol. 84，pp. 6～8，Nov. 1999
- 43) 三井秀樹：美の構成学，pp. 64～68，117～121，中央新書. 1996. 4
- 44) 磯崎正晴：デザイン・マネジメント・pp. 111～144，山海堂. 1991
- 45) 磯崎正晴，手塚薫：橋梁設計とその構造形態について，セメント・コンクリート No. 289
- 46) 磯崎正晴：デザイン・マネジメント・p 126
- 47) 磯崎正晴：デザイン・マネジメント・p135
- 48) 西沢健：工業デザインの戦後史とその教訓・新しい土木空間デザインへ向けて，土木学会誌 Vol. 84，pp. 9～15，Nov. 1999
- 49) 吉川和弘著：土木学会編新体系土木工学 52 土木計画のシステム分析，pp. 29～34，44～56
- 50) 土木学会：土木界の目指すべき方向に関する学会の取り組み，pp. 3-1～3-18
- 51) 長瀧重義，久田真：土木コンクリートの技術の変遷と将来展望，コンクリート工学 Vol. 37，No. 1，pp. 4～12，1999. 1
- 52) 坂田憲次：地球環境とコンクリート，ダム技術 No. 188，pp. 1～7，2002. 5
- 53) コンクリート研究室：コンクリート構造物の長寿命化に関する取り組み，土木技術資料 43-2. pp. 16，2001，
- 54) 森谷正規：21 世紀の技術開発の方向，ENGINEERS1999 年 6 月，pp. 1～9
- 55) 渡辺和足：建設技術の新たな展開について，月刊建設 98-11，pp. 6～8

- 56) 栗原真行：社会資本政策のベンチマーク評価について，建設マネジメント技術 2000 年 11 月号，pp. 8～11
- 57) 木下賢司：マネジメント時代の土木技術，土木技術資料 40-11 (1998)，pp. 18～19，グラビア
- 58) 日経コンストラクション：「ことば」から始める住民説明，2000. 12. 8，pp. 74～85
- 59) 土木技術資料 Vol. 40, No. 11：「建設マネジメント特集」他公開討論会資料「建設マネジメント研究の可能性と課題」1998，4，（建設省土木研究所建設マネジメント研究センターによる「豊で快適な社会を創出するための建設事業をいかに展開するか」の研究領域の分類）
- 60) 竹村哲：問題解決の技法・pp. 35～63，海文堂出版株式会社，2000，10
- 61) 福井正康：社会システム分析のための総合化プログラム 5—システムの改良・ISM，URL：[http://www. Heisei-u. ac. jp/~fukui/pp1~13](http://www.Heisei-u.ac.jp/~fukui/pp1~13)
- 62) 日経コンストラクション：キーワードで読み解く建設新時代，1997. 7. 23，pp. 46～57
- 63) 大石久和，月尾嘉男，宮崎陸治，栗原和夫：特集・21 世紀に向けた新技術の夢・未来・暮らしと建設技術 1～3，建設オピニオン 1993. 3，pp. 8～25
- 64) 社団法人土木学会：21 世紀社会に土木技術者はいかに生きるべきか，土木技術者ビジョン調査研究報告書，1998，2
- 65) 土木学会：土木界の目指すべき方向に関する学会の取組み，平成 13 年 9 月
- 66) (社) 日本建築学会，日本建築士事務所連合会，日本建築士協会，建築業協会，日本建築家協会：2001 年地球環境建築憲章，2001 年 6 月
- 67) 仙田満：地球環境・建築憲章運用のための指針，建設マネジメント技術，2000 年 12 月号，pp. 59～63
- 68) 日経コンストラクション 1997. 7. 23，p 56 (1997 年以降 1999 年 7 月までに 7 紙 (日本経済、日経産業、流通、金融新聞、朝日、読売、毎日新聞) が取り上げた将来の社会像となる用語の一覧表
- 69) 社団法人日本土木工業協会・経営企画委員会：これからの社会資本を考える，pp. 1～30，2002. 8
- 70) 社会資本整備研究会・森地茂，屋井鉄雄編著：社会資本の未来，p137 (土木工学ハンドブック第 1 巻 1989)

第7章 既存の施工評価^{1~9)}

7. 1 はじめに

社会基盤施設である土木構造物を構築するためには、調査、計画から設計、積算、施工、供用後の維持管理および廃棄・再利用至る各段階で多くの建設技術が必要とする。この建設技術を適宜組み合わせて実施する社会基盤整備を合理的に実施していくためには各段階における建設技術の評価が必要となる。

計画を時系列構成で区分すると、基本構想→基本計画→実施計画となる。社会資本の基盤整備における基本構想は、問題意識（あるべき社会の姿＝社会の将来像）から出発する。次に、その問題意識の改善策と目標（行動目的とその目的の必要機能の明確化）を基本計画として立案する。そして経済的、時間的、効率的等の多くの評価により適正な実施方法＝実施計画が選択される。

問題意識や評価は、時代における社会の要請であり、その性質や価値観が変化する。従い建設技術の評価は、時代の価値観を踏まえた要請である社会基盤施設の整備に必要な技術と言い換えられる。技術開発が目指す一つの方向は、コストの低減であり整備の質の向上である。

現在、この目標の考え方は、時代の転換期によるパラダイム変革により、時間軸及び空間軸が長くそして広がってきている。時間軸の評価であるライフサイクルコストを考えたトータルコストの低減が重要であり、要求機能に対応する物性の時間軸評価は耐久性となる。空間軸では社会環境の複雑化、国際化、自然環境の保全等の現況から施工場所、地域、日本、そして地球環境への負荷を考慮した広義の質の向上が望まれている。

本来、構造物の性能を事前に評価しておく必要があるのと同様に施工段階における性能も評価(本研究の目的)しておく必要がある。建設工事は、注文生産であり同一工事のない固有の建設条件を有する特徴がある。この特徴から建設技術を合理的に評価することは、多岐にわたる要素が複雑に組合わさり困難ではあるが重要である。構造物には種々の性能が要求される。「安全性・耐震性・耐疲労性・機能・景観・美観」等の性能である。

設計の評価については、土木学会コンクリート標準示方書で「任意の設計、計画に基づく構造物性能を任意の荷重、環境条件に対して所要の耐用期間まで時間軸上で評価する技術の開発を目指すこと＝構造物の性能を供用開始から耐用期間までその劣化や維持補修を考慮して正確に評価」することが唱われている。本研

究が目的とする施工に関する既存評価を本章で検証する。

本章では施工法に関する評価法として、(1) 環境への負荷等の観点での評価法 (2) 工法比較による事業評価 (3) 施工段階における性能を工期や現場の安全性、投入される労務やエネルギー等の比較および二酸化炭素の発生に注目した環境比較の研究 (4) AHP 法による工法選定 (5) 法面防護工評価を 7.2 節で検証する。7.3 節では、施工に関する定量的評価が示されている耐久性設計指針に関する 2 例を検証する。

本章で取り上げる既存の評価法、定量化手法例を施工段階での視点により建設技術を手段とする施工システム＝施工法の評価への展開を検索すると同時に本論文の目的とする評価法の目的、手法との相違点を明らかにする。

7. 2 既存の施工評価法

7. 2. 1 エネルギー消費量および CO₂ 発生量によるダム事業評価^{10, 11, 12)}

(1) 概要

建設産業における生産に要するエネルギー消費は、施工主体による質量の移動であり同一施工システムなら等価である。その値の最小化は生産システムの合理性を示す。同時にエネルギー消費に伴い発生する二酸化炭素量も減少する。

建設から耐用期間を通してのエネルギー消費と二酸化炭素の発生量および建設工法に伴った周辺環境変化による二酸化炭素発生量に着目した事業研究である。事例は、建設産業における作業工種の大半を含むダム工事である。

(2) 算定概要

- ①モデルダムでの試算は主要工種の材料、建設機械の運転時間、機械の消耗を積み上げ方式により算定
- ②現場で使用する重機械、機器類については、製造過程におけるエネルギー消費量及び CO₂ 発生量を考慮して、他現場における減価償却やスクラップ控除分も見込んだエネルギー消費量と CO₂ 発生量の算出
- ③維持管理段階におけるエネルギー消費と CO₂ 発生量について維持管理の期間は 100 年と設定 (年間消費電力量 KWh=設備容量×負荷率×24h×365 日で算出)
- ④森林伐採による CO₂ 放出量と吸収量の減少比較

ダム建設により森林面積が減少し、本来光合成により吸収されるべき CO₂ は吸収減量を初めて算定している。表 7.1 に放出量、吸収量の根拠を示す。エネルギー消費による二酸化炭素発生量の算定法と発生要因を表 7.2～7.3 に示す。

表 7.1 炭酸ガス吸収、放出量の算定根拠¹³⁾

C02 吸収量の減少 (t - c)
＝湛水面積 (ha) × 森林の単位面積当年間 C02 固定量 (t-c/ha/年) × 100 年
C02 放出量 (t - c)
＝湛水面積 (ha) × 森林の単位面積 C02 固定量 (t-c/ha)

表 7.2 二酸化炭素発生量算定方式

算出方式	算定方法	算定対象
積み上げ方式	算定対象を構成要素に分類し、各要素でエネルギーを積算する方法	ここの商品や技術に適している
産業関連分析法	産業関連表に示される各産業について、生産された財単位当たりに必要な一次エネルギー量をその財のエネルギー濃度と定義し、製品の価値を乗ずることにより、エネルギーを算出する方法	比較的大きな分類の商品や産業のエネルギー濃度を概算する場合に望ましい

表 7.3 二酸化炭素発生要因

発生区分	要 因	内 容
素材	資材生産によるもの	建設工事に用いる資材の生産（現場外）によるエネルギー消費量及び CO2 発生量
建設機械	燃料消費によるもの	建設工事に用いる建設機械の燃料消費によるエネルギー消費量及び CO2 発生量
	機械損耗によるもの	建設機械を製造するに当たってのエネルギー消費量及び CO2 発生量を損料分だけ計上

二酸化炭素の発生量の把握は、土木学会コンクリートライブラリー・建設省総合技術開発プロジェクト報告書等により行われている。その算出は、積み上げ方式と産業関連分析法および一部併用となっている。ダム工事の工種とエネルギー消費および二酸化炭素発生量の算定式フローを図 7.1 に示す。

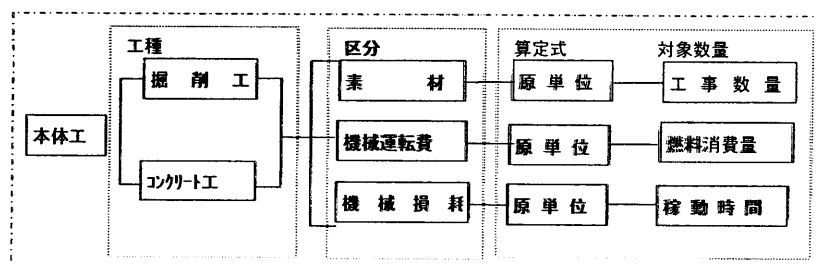


図 7.1 工事工種、発生要素と算定式フロー

算定は表 7.4 に示す素材の原単位エネルギー消費量 (kcal) と二酸化炭素発生量 (kg-C) に数量の乗算による。機械運転も同様に建設機械の稼働時間に時間当たりエネルギー消費量又は二酸化炭素発生量を乗じて求める。時間当たりの消費量、発生量は、機関出力、単位当たり燃料消費量等から算定される。建設機械については、運転時間の多い機種 3 種（油圧ショベル、トラクターショベル、ダンプトラック）の平均値が建設機械の原単位とされている。

(3)適用例

重力式ダム (78 万 m³)，ロックフィルダム (700 万 m³) 建設工事における算定結果として示されたエネルギー消費と二酸化炭素発生量を表 7.5，7.6 に示す。

表 7.4 原単位エネルギー消費量，二酸化炭素発生量

単位一覧表		エネルギー消費原単位 (kcal/kg)	CO2 発生原単位 (kg-C/kg)
素 材	鋼材	9.84E+02	1.17E-01
	セメント	7.27E+02	1.87E-01
	ダイナマイト	2.40E+04	1.84E-00
	AN・FO	5.19E+03	3.99E-01
	雷管	5.63E+03	3.90E-01
	生コン	3.35E+05	6.56E-01
	砂	4.77E+04	3.96E-00
	モルタル	3.43E+05	4.48E-01
燃 料 消 費	軽油	9.20E+03	7.21E-01
	ガソリン	8.40E+03	6.43E-01
	電気	8.60E+02	1.20E-01
機械消耗		1.20E+04	1.00E+00

表 7.5 エネルギー消費量・二酸化炭素発生量
(重力式ダム)

工事名	エネルギー消費量	百分率	CO2 発生量	百分率
堤体工	140,436,671	67.7	27,809	79.5
濁水処理	16,595,175	8	1,889	5.4
掘削工	16,595,175	8	1,329	3.8
転流工	10,579,424	5.1	1,224	3.5
基礎処理	6,430,630	3.1	1,154	3.3
その他工種	16,802,615	8.1	1,574	4.5
	207,439,692	100	34,980	100

表 7.6 エネルギー消費量・二酸化炭素発生量
(ロックフィルダム)

工事名	エネルギー消費量	百分率	CO2 発生量	百分率
堤体盛立工	246,978,144	50.4	20,920	40.6
洪水吐工	47,043,456	9.6	9,481	18.4
掘削工	104,867,704	21.4	8,348	16.2
転流工	55,864,104	11.4	7,678	14.9
基礎処理	15,191,116	3.1	2,679	5.2
付替道路	17,641,296	3.6	2,061	4
その他工事	2,450,180	0.5	361	0.7
合計	490,036,000		51,528	

※単位：エネルギー消費量・Mcal 二酸化炭素発生量・t-C

結果は，重力式ダムでは，堤体工がエネルギー消費，二酸化炭素とも発生量が多い。その内訳を表 7.7 に示す。コンクリート工事の関連がエネルギー消費で 75%、二酸化炭素発生量で 90%を占めている。コンクリートダムにおけるエネルギー消費量，二酸化炭素発生量は，主要因がセメントに在る。セメントの使用量を減少させることがダムのエネルギー課題であると指摘している。

表 7.7 重力式ダムのエネルギー消費量，二酸化炭素発生量内訳

エネルギー消費量	数量	百分率	CO2 発生量	数量	百分率
セメント	91,838,173	65.4	セメント	23,552	84.7
骨材採取製造	30,893,575	22	骨材採取製造	2,669	9.6
コンクリート製造打設	15,868,064	11.3	コンクリート製造打設	1,418	5.1
型枠工	1,263,828	0.9	型枠工	83	0.3
鉄筋工	702,127	0.5	鉄筋工	83	0.3
	140,425,341			27,806	

※単位：エネルギー消費量・Mcal 二酸化炭素発生量・t-C

ロックフィルダムでみると、堤体工盛り立工 40%・洪水吐け 20%・基礎掘削、転流工 15%と機械施工による工種がエネルギー消費量、二酸化炭素発生量とも多い。次いでセメント使用による工種となる。

ロックフィルダムでの二酸化炭素発生量の抑制には掘削、盛立に用いる大型重機の燃料効率の改善、土工事量の削減、運搬距離の縮小等運動エネルギーの最小化となる施工システムが効果的となる。

環境評価である二酸化炭素の発生抑制は、重力式ダムでは基本的構成材料であるセメントの減量、ロックフィルダムでは施工システムの合理化に帰着する。

(4)まとめ

このダム工事評価は、今後の施工評価における環境保全の重要視の観点より二酸化炭素の発生に焦点を絞り考察をしている。土木工事の代表的な工種であるダムを取り上げることで、構造物の構成材料であるコンクリートの生産特性による問題と化石燃料を使用する重機稼働の効率、施工システムの合理化の重要性を指摘している。

事業計画全体の定量評価として、工事期間中に留まらず供用期間における二酸化炭素の発生量を森林の持つ二酸化炭素の吸収量、放出量等と比較して評価していることは特筆すべき事項である。その結果を図 7.2 に示す。

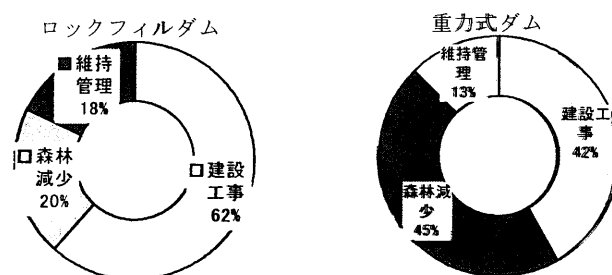


図 7.2 供用期間における二酸化炭素発生量比較

コンクリートダムとロックフィルダムの環境対応の（開発面積と湛水面積の両面）優位性比較は、建設立地条件により固有条件が存在するため比較評価はできない。しかしこの結果からは、同規模クラスのダムでは、ロックフィルダムは、建設工事における環境への影響が供用期間比率で大きい。

この研究は、二酸化炭素発生量に注目した工種評価と供用期間における事業評価として捉えられる。施工法の視点では、生産システムを環境面による評価した研究例となる。コンクリート工事におけるセメント(要因)による二酸化炭素の発生問題は、設計、施工技術による課題以上に材料問題として捉えるべきであり、その研究も行われている¹⁴⁾。

7. 2. 2 地下鉄工事の設計比較による評価例^{15, 16, 17, 18, 19)}

(1) 評価法概要

環境評価を経済性比較に置き換えることで設計案の評価をした事例を示す。

都市の地下占有が進んだ現在では、周辺環境に対する影響の少ない設計による施工選択が重要となる。

企業者側の工事積算金額は、従来直接工事費に用地補償分を上乗せした程度をコスト比較範囲としてきた。しかし工事による将来的な響影として周辺建造物沈下、地下水変動に伴う補償や工事期間に発生する交通渋滞が及ぼす社会的利益損失と付帯して発生する環境への負荷等を加味したトータルコストの比較が必要になるとの認識により開削工法(65例)とシールド工法(18例)の比較により考察がなされている。

(2) 設計工法とコストの関係

施工条件、工事数量について開削工法 65、シールド 18 例の実績より単価の推移の評価が示されている。(地域を固定)その概観を表 7.8 に示す。

表 7.8 設計法と単価比較

比較対象	開削工法	シールド工法
i : 深度と掘削単価比較	深度が大きくなると単価上昇 * 土圧、地下水の影響で土留壁等の工事が大きくなる	深度に縦坑以外影響なし
ii : 掘削量と単価比較	掘削量に関係なく一定	掘削量の増加により単価は下降する * 工費の中で占める割合の高いシールド機械が各工区単位による減価償却される発注方式による。
iii : 年次と単価比較	上昇 * 年度毎の上昇傾向は地表条件に制約される施工効率の低下、環境対策費等純工事費以外の要素がある	1960 年代工法確立期ばらつき 1980 年代工法確立後工費収れん * 開削工法と比較し技術開発の結果地下構造物地下水周辺環境などの制約が小さくなり単価上昇はやや緩和されている

(3) 環境への影響と経済評価

工法により異なる材料、工法により発生する二酸化炭素と工事の直接的影響である大気汚染・振動・地下水低下および間接的影響である交通渋滞による経済的な時間損失と燃料損失を金額変換して総合的経済性の比較が考察されている。

その算出方法の概略を以下にまとめる。

- ① 大気汚染については、建設資材から発生する二酸化炭素量及び建設資材を運搬することにより発生する排出ガス量の算出を金額換算し、騒音は基準値内として除外。振動、地下水は家屋補償額により概略想定。

②建設資材製作に伴い発生する二酸化炭素量算出方法は、土木学会 LCA 小委員会 奨励値（酒井 寛二：土木建設物の二酸化炭素排出量，土木学会 1996）を使用している。

1) 設計工法による使用材料比較による二酸化炭素発生量

工法に係わる資材から発生する二酸化炭素（t）比較を表 7.9 に示す。

表 7.9 資材から発生する二酸化炭素発生量(t)

資材名称	CO ₂ 排出原単位	開削工法		シールド工法	
		資材量 t	発生量 t	資材量 t	発生量 t
コンクリート	0.0849 (tC/m ³)	111.000	9.300	53.000	4.500
棒鋼	0.411 ((tC/C))	11.000	4.500	2.100	900
貸与品(鋼棒)	0.411 ((tC/C))	6.200	2.500	4.400	1.800
合計			16.300		7.200

開削工法がシールド工法と比較してコンクリート約 2 倍・棒鋼約 3 倍の量を必要とする。その結果、二酸化炭素発生量は約 2.3 倍となる。

要求性能，機能に対して，異なる設計手法による使用材料の差違から二酸化炭素発生量の比較した工法の側面的評価となる。

2) 設計手法による生産システム比較

地下鉄 1km の建設に対する，平均的資材量，工事数量（掘削，埋め戻量）の違い（運搬工）による二酸化炭素発生量の比較が示されている。

比較の前提条件として，運搬条件である「運搬対象工種，運搬距離，平均量，資材重量」を設定する。さらに作業項目である「資材運搬，掘削運搬，埋め戻し運搬量，積載量，重量」を設定する。運搬による排ガス発生量は表 7.10 に示すトラック 20km/h の場合の発生原単位（単位 g/台・km）により算定されている。

運搬時(掘削土，埋戻し土)の算定結果を表 7.11 に示す。

表 7.10 排ガス発生原単位

NO	CO	CO ₂
6.6546	5.0282	1038.3

表 7.11 運搬に伴う排ガス発生量集計結果

工法/排ガス	NO・t	CO・t	CO ₂ ・t
開削	6.2	4.7	970
シールド	2.4	1.8	380

何れの排ガスにおいてもシールド工法の優位性を示している。シールド工法が開削工法に対し環境に及ぼす影響が少ないことを示される。

3) 経済的比較による評価

工事により生じる振動・地下水等の補償金額，交通渋滞による時間損失，燃料費増加，排ガス増加を経済的損失として扱い，工事の経済的比較を行った例が示されている。工事の間接的影響を評価項目とする例は，現段階では少ない。

振動，地下水の補償金額は，過去の実績による推定値である。時間的損失の算

出は汎用的でもあるので以下にその内容を示す。

条件としては、交通渋滞の影響範囲を施工地点の上下 3km と設定している。燃料費の増加は、日産自動車交通研究所の実測データ曲線(自動車交通渋滞 1993)により算出し、排ガス増加量は車両別に石田式(車両大型化の自動車排出ガスへの影響、土木技術 1996)により算出している。

燃料消費についてはガソリン価格、排出ガスについては、ノルウェーで導入されている環境税を適用している。各車両の時間価値については、「建設省道路局監修：道路行政、平成 7 年版、全国道路利用会議、1995」から引用している。

各損失の金額的原単位の金額換算方法を表 7.12 に示す。

表 7.12 損失の金銭的原単位

炭素税 (円／t)		備考	時間価格(円／t)	
				1996 度価格
NOx	260,000	ノルウェー の環境税を 参考	普通貨物車	56.07
CO	1,690		小型貨物車	41.88
CO	10,000		バス	289.08
ガソリン価格：1 $\frac{\text{リットル}}{\text{トン}}$ = 100 円			乗用車	54.25

時間的損失は、車両別に 3km 区間の走行速度と車両台数調査により、1 日当たり乗用車 356 時間、普通貨物車 217 時間、小型貨物車 83 時間で算定している。

建設地点より上下 3km における交通渋滞による 1 日当り経済的損失の比較結果を表 7.13 に示す。

表 7.13 経済損失比較 単位：円

損失項目	燃料費増	排ガス増	時間的損失
金額	105,000	264,000	2,330,000

時間的損失による経済性が桁違いに大きくなる結果である。この結果に建設資材から発生する二酸化炭素の金額換算と地下水、振動等の補償額および建設資材運搬時に発生する排気ガスの金額換算を総合計した金額による比較を行っている。

4) 比較項目の総計による経済比較

工事による発生する二酸化炭素(材料、運搬工による)の金額換算と周辺環境への影響(間接的損失)金額および工事渋滞による損失時間金額換算の合算による建設工法比較(特定地域、影響範囲の限定による)の研究である。しかし交通渋滞による損失は、環境損失金額全体の約 80%、工期 3 年の場合約 92%にもなる。

二酸化炭素の発生量換算金額と間接的影響の損失金額および損失時間の金額換算は、換算金額の単位の違い、換算と実績による推定等違和感がある。換算方法と間接的影響を包含する総合的経済性に着目した点は今後の工事評価には活用で

きと思われる。比較する要素の選定は、その目的(機能性、主観的感性)による同一レベルの対象に着目する必要がある。

(4)まとめ

本研究は、第一段階で設計による異なる工法を環境面での指標となる二酸化炭素等の発生量による比較を行い、次の段階として、二酸化炭素発生量をノールウェーの環境税による金額変換と二次的影響である交通渋滞の経済的損失、地下水、振動による対策費等を合算して施工損失金額を算出した経済比較での評価を行っている。この施工損失金額比較の結果では、交通渋滞による経済損失が他要素とかけ離れた数値となっている。土木事業の環境評価を経済的換算により算定する場合、算定する対象項目の選定レベルにより評価目的や施工システム内容と異なる結論を生じる。工事による間接的、二次的影響は、工事地域、工事内容による特性により大きく変動する。間接的な経済的損失は、事業の経済的効果により評価される項目と考える。また二酸化炭素発生による環境評価は、経済性が必ずしも一致するとは断言できない。

7. 2. 3 施工のプロセスが環境に及ぼす影響を考慮した建設技術の総合評価システムについて^{20, 21, 22)}

(1)研究の概要

小澤、三木らによる現設現場における工期や現場の安全性、投入される労務やエネルギーおよび周辺及び地球環境への負荷への観点から体系的に総合評価するシステムが提案されている。図 7.3 にシステム概要を模式図化して示す。

建設現場における省人化の程度、労働安全性の程度、施工機械の騒音等による周辺環境に及ぼす影響の程度を定量的に評価することで貨幣単位に換算した労務費・安全費・周辺環境・地球環境費とした金額に材料費や機械の損料等を加算し直接工事費等に相当するレベルで総合的に評価するシステムである。貨幣単位に換算する過程でそれぞれの技術の重要度を考慮して貨幣換算を決定できるこの総合評価システムを用いて技術開発の方向性を示すことが可能であるとしている。

評価項目の採用は、少子高齢化による作業の効率化や現場の安全性向上など施工合理化の必要性、建設工事における騒音振動など周辺環境に与える影響を採用している。さらに耐久性—ライフサイクルコストと維持管理の時間軸としての環境は、空間軸で評価する必要があるとして、地球環境—森林破壊、地球温暖化等を項目として採用している。施工の合理化に関する指標は袴田の用いた評価指標を使用している。施工の合理化を効率性、確実性、簡略性、安全性と定義し、安

全性以外は施工性指数を用い、安全性に関しては安全指数を採用している。当初コンクリート工事を対象としたが三木浩司により施工全体に対して適用可能であることが確認されたとしている²³⁾。

(2) 具体的な指数

① 施工指数

施工数量と施工歩掛を基に、縦軸に各作業員を横軸に作業日数をとった作業工程図を書き全作業員について各作業員の技能指数を考慮しながら拘束日数の和を取ることで求める※。(各作業員の拘束日数とは、施工の開始から終了までに確保しておかなければ作業員の技能を考慮した延べ作業日数。単位は人・日で、施工指数は0以上の値をとりその値が小さいほど施工は効率的、確実性、簡略性の高い施工を示す。)

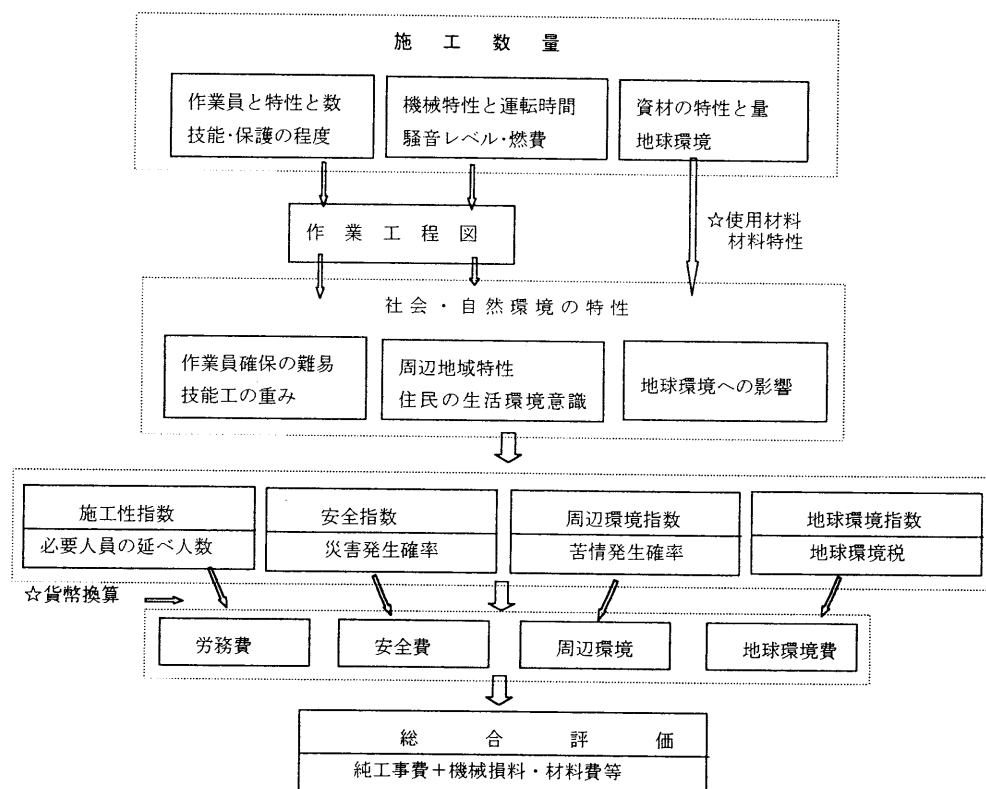


図 7.3 総合評価システム概要模式図

② 安全性指数

施工中の全作業員の全作業に関して、作業中に死亡事故が発生する確率を積分したものとして求める。その単位は人・日である。安全性指数は0以上の値をとりその値が小さいほど安全性の高い施工を示す。

※技能指数：作業員の保持する技能に対して重みを考えた数値

③周辺環境への影響の評価¹⁶⁾

建設公害といわれる騒音・振動・粉塵・濁水・地盤沈下・産業廃棄物の問題を評価している。これらの建設公害に関しても安全指数と同様に予想苦情発生件数を施工の全日数において式 7.1 により算定するとしている。

$$\text{周辺環境指数} = \frac{\text{全作業数}}{\Sigma} (\text{各作業日における予想苦情発生件数}) \quad (7.1)$$

指数は 0 以上の値を取りその値が小さいほど周辺環境への影響が少ないことを示す。更にその苦情発生件数は、発生原因となる建設機械の運転時間と騒音振動の大きさが、建設現場からの距離とその地域の特性（人口密度）によるとして式 7.2 を提案している。

$$\text{各作業日の予想苦情発生件数} = \text{時間係数} \times \frac{\text{全周辺地域}}{\Sigma} (\text{地域係数} \times \text{苦情発生確率}) \quad (7.2)$$

苦情発生確率は、騒音振動の大きさを変数に取ったものとして、さらに騒音と振動の大きさはある程度相関が認められることから、騒音に限定して騒音レベルより回帰関係を提案している。図 7.4 に環境指数の概略を模式図にて示す。

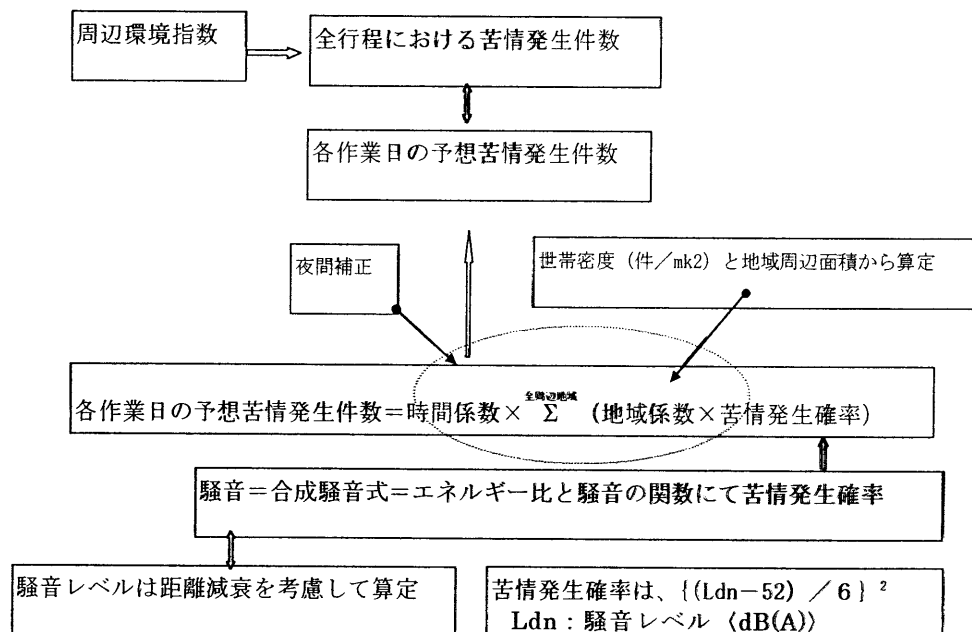


図 7.4 環境指数概略模式図

④地球環境への影響の評価

建設工事が地球環境の及ぼす影響として南洋材の型枠使用と工事による生態系の破壊および廃棄物の排出・エネルギーの消費を評価項目としている。建設工事で使用される材料および燃料について、材料、燃料の「質」として地球環境指数を

表し、使用する量を掛け合わせその総和で示すことを式 7.3 で提案している。

$$\text{地球環境指数} = \sum_{\text{全資材・燃料}} (Q \times V) \quad (7.3)$$

Q：ある資材・燃料の持つ単位量あたりの地球環境に及ぼす影響に関する質

V：ある資材・燃料の使用量

「質」とは、地球環境に対しての損失を与える程度で、材料のリサイクルや転用回数を考えることで施工数量から求めることができるとしている。

例えば、熱帯型枠を評価するには森林からの伐採運搬加工使用に至る過程で種々の活動を評価する必要がある。空間的・時間的評価し積分した値が各資材および燃料の「質」を表すものとし、具体的には資材燃料が製品として現場に搬入されるまでの活動をリストアップし再生可能な資源と再生不可能な資源を分けて地球環境に及ぼす影響を熱帯型枠に対する相対的な評価として、表 7.14 に示す質を表す特性値（単位使用量当り）を提案している。

表 7.14 質の特性値と地球環境税換算値

資材燃料	鋼材 kg	熱帯型枠 m ²	複合型枠 m ²	鋼製型枠 m ²	コンクリート m ³	軽油 t
特性値	0.016	1.0	0.65	3.7	1.3	0.03
税額	12	753	490	2786	979	23
単価	40	753	734	5111	11300	81
税率	30	100	67	55	9	28

合板：900×1800mm 鋼製：30×1800 複合型枠：熱帯産と針葉樹の単板層構成合板

(3) 貨幣単位に換算

施工性指数・安全性指数・周辺環境指数・地球環境指数を一元的に評価するために貨幣単位に換算しその合計で最終評価としている。

施工性指数、安全性指数の貨幣換算に関しては、袴田提案の施工性指数 1 = 普通作業員 1 日あたりの労務費とし、安全性指数は施工期間中に予想される事故による死者の数を表すので安全性指数 1 = 7000 万円と仮定し安全費（積算体系の中で共通仮設費に含まれる安全対策費に相当）を計上する。

周辺環境指数の貨幣価値変換は、1 件当りの苦情処理（積算体系の中で共通仮設費に含まれる事業損失防止施設費に相当）として 3000 円を想定している。

地球環境指数の貨幣換算は、質×量の定義通り、資材、燃料の単位使用量当たりである特性値に地球環境税の考え方導入している。質を表 7.14 に示す地球環境税（熱帯型枠の税率 100%が基準、単価は物価による）という貨幣単位で表している。

(4) まとめ

小澤らによるこのシステムは、非常に具体的に現場における施工の合理化、周

辺環境への影響，使用する資材および機械の地球環境へ及ぼす影響を考慮して建設技術の評価する総合評価システムとして提案されている．各指数の特性値が技術をどの程度評価するかを示すとしている．材料費や機械損料も含めて評価するのでバランスを考慮した評価が特徴となっている．

この評価法は，施工主体に対しての着目点はエネルギー消費であり生産システムの合理性を評価するものである．定量化が困難である安全，環境に対する斬新な数値的手法により定量評価に導いている．各要素を貨幣換算による総合評価の方法は，地下鉄の建設工法評価と同様に各要素の換算値のバランスに注意が必要と思われる．経済，環境評価を最終的に総合評価として貨幣換算する方法は，全体の事業評価として経済的には有意であるが，評価項目の優位性も考慮して行う必要がある．従い、施工法や作業システムの工学的検証は，この提案による事業評価を受けた実施段階の詳細評価に位置すると考える．

7. 2. 4 数理的評価による工法選定^{24), 25)}

(1)概要

施工システム選択の透明性，妥当性を確保するために感性等を定量的に分析できる AHP 手法を適用し数理的評価によるダムコンクリートの運搬方法に関するケーススタディに関する事例である．施工方法の妥当性について施工技術，施工設備を合理的かつ的確に評価する研究が十分行われていないとして，その理由が「施工技術は効用関数等を把握して定量的に評価するのが困難な場合が多い」と評している．この理由のため技術者の施工経験による主観や感性による定性的評価に頼らざるを得ないと現況を位置づけている．この経験による主観や感性は，流動する心理現象であり工学的には扱えないが，感性は一方向のベクトルをもった研磨性のある概念であり，数理的に測定し工学的な対象となる研究も行われていることに着目して AHP 手法を施工法の選択に適用した事例である．

(2)AHP 手法と従来の総合評価法の比較

従来の総合評価法が○△×の相対的優劣表による評価者の定性的選択に対して AHP 手法の適用は，評価の差異を定量化して選定結果の妥当性を明確化する． AHP (Analytic Hierarchy Process=階層分析法) は，意志決定支援手法の一つで，価値観や感性の尺度を定義することで定量化できる．多目的な決定問題をシステムチックに処理する方法として多方面に応用できる手法である．この手法の核になっているのが一対比較という技法で，二個ずつの組を作り一対ずつの優劣か優先度による相対比較により順序付けを可能にする．つまり一対比較の繰り返しで

主観的価値を割り当てることにより，代替案の評価を簡単に定量化できる．（数学的背景は省略する）

（３）ケーススタディ内容²⁶⁾

AHP 手法よりダムコンクリート運搬工法の施工法選択をケーススタディとしている．図 7.5 に施工法選択の階層手順を示す．

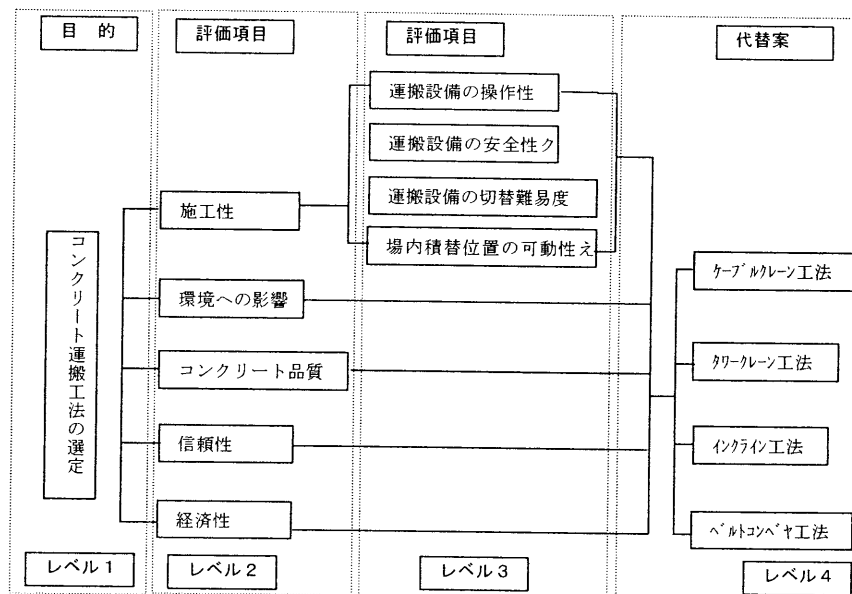


図 7.5 コンクリート運搬施工法の選択階層図

評価項目を施工性，環境への影響，コンクリート品質，信頼性，経済性の5項目，施工性をレベル3に示す4項目に細分化している．

○，△，×の定量尺度を表 7.15 に示す一対比較表（評価項目の重要度，優先度）の9段階に定義している．各レベルの要素間での重み付けを評価項目ごとにアンケート形式で複数人により行い算定する手法である．表 7.16 はその一例である．

表 7.15 一対対比表

一対対比值	定義
1	同じ位優れている or 同じ位重要である
3	やや優れている or やや重要である
5	優れている or 重要である
7	かなり優れている or かなり重要である
9	極めて優れている or 極めて重要である
2, 4, 6, 8	中間の時用いる上記の逆数，上記の逆の評価を表す

表 7.16 要素の重要度例

	施工性	環境	コンクリート品質	信頼性	重要度
施工性	1	1/2	1/2	1	0.1575
環境	2	1	1	3	0.4189
コンクリート品質	2	1/2	1/2	3	0.2952
信頼性	1	1/3	1/3	1	0.1284

表のように評価項目の重要度、優先度が定量的に表現される。複数人のバラツキに関しては、その平均値や複数人の合意による一対比較表等によるバラツキを考慮して評価を行うとしている。

評価項目の中で定量化が可能である経済性の取り扱いに関して、経済性も AHP 手法による処理をするか、費用便益分析の適用をするか検討がなされ、便益ウェイトを費用ウェイトで除した費用便益比（単位費用当たり便益）により経済性の効用度を評価する独自の考察を示している。

(4)まとめ

AHP 手法による施工方法の選択は経験的である主観的、感性的な評価を定量化することには有効である。評価に用いる一対対比値の採用のバラツキは、複数人の評価により平準化が可能とされる。従来の主観、感性による優先度に対してそれらを数理的処理により定量化した手法である。特に価値観が多様化する中での主観的判断の評価は、説明責任を必要とする社会的要請に有効な手法となる。しかし、この手法も経験者による主観、感性の一対比較による手法であり、工法の選択の工学的評価、定量化とは異なる。また選択する工法の作業システムに求められる性能目的よりも工法の優先度の定量化となりやすい。

7. 2. 5 法面防護工の評価事例（セメント安定処理による法面防護工）^{27, 28)}

(1)概要

現場施工中における工法評価が事業、設計段階とは異なる事例を示す。

法面防護工の施工法は、現場における施工条件により段階的な評価により決定される。施工目的は、強風化の進む花崗岩の法面防護である。

施工方法の決定に当たり先ず周辺の基盤である強風化花崗岩の特徴を分析し、その性状から施工法選択の根拠を表 7.17 に示す。

(2)施工選択の評価項目

法面保護（施工目的）には、二次的要求事項＝工事の重要度と緊急性による優先度がある。重要度は、法面防護目的である保全対象の構造物項目をランク付けして判定をしている。危険度とは、斜面勾配、地表水流入といった地形、地質的要因、により判定をしている。重要度、優先度の目的を遂行するためには、施工時期と施工範囲の決定が必要となる。重要度と危険度の判定による施工範囲と施工法を決定する。従い重要度、危険度からは、施工期間が優先されそれに見合う施工能力が算定される。この段階で、現地適応性をもとに、適応工法の検討がな

される。この段階での施工法選択は、本来施工目的や施工法が評価される手順と異なる。施工法の評価は、評価目的により決定順序や評価項目、評価基準が左右される。その目的が明確でないと選択手法の有意性に問題を生じる。施工法は、施工条件、実施状況により、工事の二次的要求条件による評価選択される場合もある。危険度、重要度ランクによる工法分割は、要求性能に対する工学的担保を前提に工法の持つ能力による選択といえる。現場では、時系列による空間条件、特に自然条件（危険度）が最優先し、それを他の付加価値条件（重要度）が詳細条件となって工法の設計条件や施工手順を決めた後に工法評価が行われることを示した事例である。これも建設産業の特異性に起因する要素である。

表 7.17 施工法選択根拠

花崗岩の特徴	施工法選択の根拠
粘着力の少ない砂質土で一旦解放されるとせん断力の低下に伴う表面水の浸食や凍結融解の作用を受けやすい。	一般的性状と物性による工法の選択範囲
乾燥しやすく、保水力、保肥力に乏しい	工法選択の複合将来的要素（二次的強度性能とは別の要素）要求性能との関連
粘性土が部分的に筋状に斜行しているため風化進行に伴い当部を境界に滑利を生じる	斜面の（風化岩の賦存状態）全面的情報、基本的情報→一次的要求性能、強度に関する基本事項
切土後硬質であっても急速に風化が進行する特性による表面滑落	施工法、防護工に対する要求性能→風化防止が必要、表面滑落による作業性、危険性、設備に関する情報→基本的に安定状況を工事による不安定要素にすることへの現象対応
4・風化部分と未風化部分が介在、風化度の低いタマネギ状の岩質が抜け落ち崩壊する危険性	工法の基本強度及び要求性能と施工段階での情報
・弱風化岩帯は、発破、掘削により亀裂がは入りブロック状に崩落する危険性が高い	施工に関する条件、工法の選択範囲及び危険情報＝掘削、発破の作業に関する検討事項
硬質マサ土は植物の根の侵入が困難	工法への情報、要求性能に対する工法規制条件緑化の要求性能を如何に満足させるか

7. 2. 6 まとめ

最近の施工法に関する5事例の評価法を概観と考察を行った。

ダムの事業評価例（事例1）、地下鉄建設工事比較（事例2）、施工プロセスの総合評価法（事例3）、AHP手法による工法選定（事例4）、法面防護工の工法選定（5事例）について評価手法、評価項目、評価範囲、評価内容の項目に整理してまとめ、本論文の目的とする施工法の工学的評価法との違いを明らかにする。

(1) 評価手法

事例1～3は、工事によるに着目した環境評価を主とした手法である。また、工事による周辺環境への影響を個々の金額換算により経済性比較を試みている。事業評価、設計評価に該当する。

事例4は、施工法選択に関する従来の主観、感性による優先度を数理的処理により定量化した手法である。1つの施工システム(工程の階層)全体を評価している。

事例5は、1～4とは異なり、施工段階における緊急性と重要性による施工能力、要求性能が優先された工法選択である。建設産業の特殊性を示す評価である。

(2) 評価項目

事例1～3は、直接工事施工に係る直接的影響である、材料、施工等全般のエネルギー消費量と二酸化炭素発生量二酸化炭素の発生量および間接的影響である安全、周辺環境への影響に至る環境項目、損失時間等である。

事例4は、工事全般ではなく工種の1工法の選択を評価範囲にしている。評価項目は、施工に係わる直接的な施工性、環境、品質、信頼性、経済性である。

事例5は、施工段階の二次的要求事項により工法選定される建設産業の特異性を示した例である。二次的要求は、重要性(優先度)、緊急性(危険度)である。

(3) 評価範囲^{1, 29)}

評価の範囲は、時系列および評価目的により事業評価、設計評価、施工評価、施工システム(施工法)評価に分類できる。

図7.6に各事例の評価範囲を示し明らかにする。

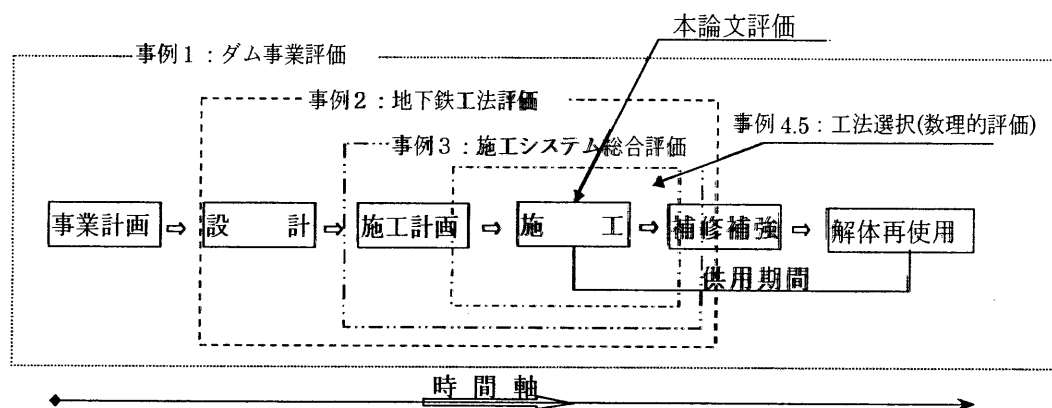


図 7.6 施工法評価範囲

(1)～(3)の項目整理により、既存の評価法が本論文の目的と異なることは、評価範囲で明らかになる。評価範囲は図7.6に示す建設事業の執行過程による時間軸上に位置付けられる。環境評価、工事による間接的影響等々が計画、設計段階による検討、評価を経て決定された実施段階が本研究対象とした時間軸である。評価範囲が異なれば評価目的、項目、手法も異なる。図7.7に示すコンクリート工事フロー例で本研究の施工を評価範囲の目的、項目が明らかなる³⁰⁾。

本研究は、建設産業の生産システムの特異性により基本作業が工学的担保を必要とする点への着目である。施工に対す

本研究は、建設産業の生産システムの特異性により基本作業が工学的担保を必要とする点への着目である。施工に対する評価項目は時代の要請、価値観により性格も変化するが、施工の基本作業目的がそれらに左右されない工学的背景を有する点に留意しなければならない。

そのためには、施工段階の施工システムを構成する基本作業の工学的評価を明らかにする必要がある。本来施工の所要性能の確保は基本作業システムによる。その基本作業の評価が定量化さ

れていないことに本研究の着目点がある。例えば、事業評価の価値観評価の最優先項目が環境保全であれば構造物の長寿命化によってエネルギー、廃棄量の最小化が可能となる。長寿命に対応する初期施工におけるひび割れ防止(工学的評価)は、基本作業「コンクリート受入(鍊上り条件)、運搬(温度設定)、打込み(型枠条件)、締固め(セメント単位量、種別)、仕上げ、養生(種別、時間)」の工学的評価による選択により合理的に構成できる。

7. 3 設計法による定量的評価法

7. 3. 1 コンクリート構造物の耐久性設計指針案^{31, 32)}

(1)はじめに

施工法に関する工学的定量化に関する既往の研究、指針として土木学会による「コンクリート構造物の耐久性設計指針案」がある。この指針案は、昭和 63 年 4 月に設置された「耐久性設計小委員会」の成果である「コンクリート構造物耐震設計指針(試案・平成元年 8 月)」に対して適用の疑問、問題点を提示されたのを受け、

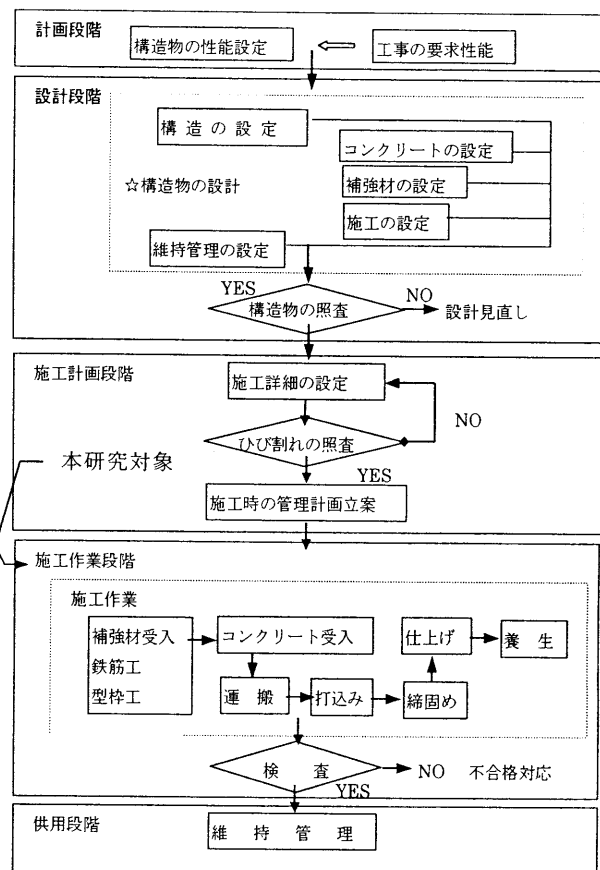


図 7.7 コンクリート工事フロー

平成 4 年 1 月コンクリート標準示方書改訂小委員会の中に「耐久性，耐久設計部会の設置」総合的かつ定量的な耐久設計方法や具体的な環境指数と耐久性指数を提示して改訂されたものである。その指針案の序文に以下の記載がある。

「コンクリート構造物は，維持管理の容易な構造物として社会資本の蓄積に多大な貢献をした。耐久性に疑問を投げかける事例の発生。何故か，施工法の進歩に問題があったのではないか。或いは使用材料の変化，施工対象の機能変遷，建設条件等の問題検証を必要とする。」と当指針案作成の背景と目的を示している。本研究の背景と目的と合致する内容である。

指針案内容の概観は，「耐久性の概念，環境指数，耐久指数の概念と要因を示し，耐久性を検討する手順およびメンテナンスフリーの期間設定や，施工環境，施工方法による環境指数，耐久性指数の細部化による算定方法」である。

「耐久性」の重要性について当指針案では，「コンクリート構造物の高い耐久性は，同じ条件での長期使用による社会資本への費用対効果及び信頼性のためにもその確保は重要」と社会資本の基本理念である「安全，信頼性，経済性」に整合する基本機能と位置付けている。その機能は，環境条件の厳しい構造物に特に必要であると重み付けをしている。また経済的視点からも「耐久性」が構造物のライフサイクルにおいて大きな比重を占める現下の課題としている。

以上のような認識から耐久性の確保を目的として，設計段階で施工環境や施工方法の細部化による指数算定を行い評価することが提案されている。

特に当研究の提案内容と比較するため「施工時の重要性」問題を取り上げた耐久性ポイントを示した第 5 章に注目してその内容を考察する。当指針に示される耐久性は，構造物の新設を対象とした設計，施工であり当研究の施工法選定と同じ時系列設定であることから既往の研究として比較する。

(2) 指針内容と構成要素について

1) 指数の定義，考え方

- ① 耐久性を定量化するために，環境指数，耐久指数，耐久性ポイントを定義して算式としている。指数は，設計条件，施工材料，施工条件や耐久性に影響する要因を考慮して決められた値となっている。表 7.18 に指数の定義を示す。

表 7.18 指数の定義

「環境指数」：建造される構造物に作用する環境条件及び構造物に要求されるメンテナンスフリーの期間より定義される指数： S_p
「耐久指数」：構造物の詳細設計，使用材料及び施工条件の具体的内容から， <u>構造物の建造前の設計時</u> 及び施工計画作成時に算定される指数： T_p
「耐久性ポイント」：耐久指数の算定に際して，構造物の耐久性に及ぼすこの要因の影響を定量化した値
「メンテナンスフリー」：目視観察等により構造物が耐久的であると判断でき，補修，或いは補強をしなくても良い状態

- ②指針による判断基準は，構造物の設計段階で，実際の様態による材料及び施工の想定による耐久性指数 T_p が S_p 環境指数を上回らなければ，設計材料，施工の再検討を行うか施工しない。
- ③実際施工環境を示す環境指数は，メンテナンスフリーの期間を考慮して，構造物の設置される自然環境条件による塩分の影響，凍結融解(凍害サイクル)が構成要素となっている。
- ④施工材料，施工計画に関わる耐久指数は，環境条件による影響度を区分しては耐久指数に反映させることは困難として，現時点で定性的に得られる知見を集約し耐久性に影響を及ぼす個々の要因の影響度を $T_p = 30 + \Sigma T_p(I, J)$ 式により一義的に算出する方法としている。

耐久性指数の範囲は，概ね設計，材料，施工を三分割した配分となっている設計作業，施工における人的要因の定量化は含まれない。表 7.19 に示す 8 項目により算定される耐久性ポイントは，詳細な条件によるポイント配分が設定されている。その内容を考察する。

i ～ iii に関する項目は，構造物の耐久性に及ぼす構造設計，形状とその施工性に関する内容となっている。

表 7.19 耐久性ポイント項目

- i ・ 設計，部材形状，補強材の種類，詳細，設計図に関する耐久性ポイント
- ii ・ 設計ひび割れに関する耐久性ポイント
- iii ・ 特別な型枠表面防護工に関する耐久性ポイント
- iv ・ コンクリート材料に関する耐久性ポイント(材料固有の影響を定量化)
- v ・ コンクリートに関する耐久性ポイント
- vi ・ コンクリート工に関する耐久性ポイント
- vii ・ 鉄筋工，型枠工，支保工に関する耐久性ポイント
- viii ・ PC 工の補足事項に対する耐久性ポイント

i) に示される内容は，構造，形状により耐久性に影響する⑧コンクリートの防錆機能⑨劣化外力に対する抵抗性⑩補強材の種類⑪打継目種類の細分化である。またその施工性に関する内容は，⑧コンクリートの流動性，分離抵抗性⑫設計図の良否⑬かぶりである。さらに施工体制では，主任技術者の良否等の影響を考慮した内容となっている。

設計に関するこれらの項目は，コンクリート構造物の設計段階で，施工手順を想定して使用目的に適した安全性と耐久性の確保に十分配慮することの重要性を意図している。また設計に従事する主任技術者を資格と経験年数により評価して加えたことは，設計主体が設計意図を理解することが基本であることの再認識と理解される。一義的価値観(経済性，効率性，仕様主義)による設計に対する反省

と思われる。ii～iiiについては、施工面との関連が少ないので省略する。

iv)は、コンクリートの構成材料であるセメント、骨材（吸水率・粒度）、混和材の4種に関するマイナス要因と使用の適正化（発熱特性、基準値、種別）を評価している。コンクリートは、施工段階では完成された製品として安定供給を前提にするのが一般的である。従い施工法の選択には、含まれない要素である。

特に骨材は資源枯渇による品質のバラツキや低品質化が、骨材の再生再利用と共に今後の課題となる。天然砂に変わり砕砂が増加し施工性（ワーカビリティ）を損ない水セメント比にも影響を及ぼす事もある。また採取場所による塩分、原石特性によるアルカリ骨材反応が施工後の早期劣化の内在要因となり耐久性を損なうことは既成の事実である。骨材課題は、地域と原石を特化した指標マップと適用環境、構造物の関連で設計に見込まれることは、コンクリート施工の事前確認をすべき事項である³³⁾。

v)は、コンクリート（練上り製品）の充填性、堅硬性（水セメント比）、単位水量、塩化物含有量とコンクリート製造工場の管理が事項として挙げられている³⁵⁾。これらの事項は、コンクリート配合設計と練混ぜ（製造）に関する事項である。またスランプ、材料分離、堅硬性の項目は「単位水量」に帰着し、コンクリート性能と施工性に影響する要因である。これらも前項と共に施工の事前確認事項であり、性能確保の前提となる。既に耐久性の向上の目的として一般的環境条件で鉄筋コンクリートについての水セメント比は55%以下、無筋コンクリート60%以下とする指導が通達されている。

vi)に示されるコンクリート工に関する耐久性ポイントを表7.20に示す。この項目には、①コンクリート工事に従事する主任技術者の良否②コンクリートの受入れ③運搬④打込み⑤締固め⑥表面仕上げ⑦養生⑧打継目の良否等コンクリート施工の様態評価であり、条件評価となっている。

耐久的なコンクリート構造物を実現するために適切な人的機構と技術者の配置等定量化し難い人的要素の重要性を指摘している。技術者の資質と技術が耐久性に影響する指摘は、施工の範囲を含む土木界の領域となる。国勢である少子高齢化による「熟練工、若年労働者の不足」といった社会的課題のコンクリート物性への影響を評価するには、条件評価によるランク付以外には困難と思われる。

注目点は、コンクリート構造物が耐久的であるためには部材表面付近のコンクリートが緻密で空隙の少ない蜜実なコンクリートであることが必要であるとしてより具体的施工方法の表面の仕上げ方法と養生方法の重要性、関連性の強調である。標準示方書では、工学的根拠により一般的な養生日数が示されているが施工内容と結びつけてはいない。当指針は、現実の施工（設計条件に示す）を想定しての考えは、より現実的である。仕上げ作業と作業内容を工学的に定量化して評価する

ことは、現時点では条件によるランク評価であるが、前章で示したバイブレータの音による管理や筆者等による色彩色差や比抵抗の利用提案は、作業機能を工学的評価による定量的評価を可能にする手法となる。

コンクリート工に関する耐久性ポイント T (6, J)

表 7.20 耐久性ポイント

J	K	小項目	Tp (6,J)
1	1	【施工主任技術者】特 A・A・B・C	25・15・5・-10
2	1	【受け入れ】受け入れ場所に元請け技術者を常駐させない場合	-5
	2	製造工場における各バッチの材料の計量印字記録によって配合を現場到着時点で直ちに確認する場合	5
3		【運搬・打込み・締固め】	
	1	工事指揮者が打込み場所に常駐しない場合	-5
	2	コンクリートの 1 リフトの高さ	Tp(5,1)で考慮
	3	$2(1.5 - F_{33}) \cdot F_{33}$: コンクリートの自由落下高さ m	0~-5
	4	$20 - F_{34} \cdot F_{34}$: 一カ所の打込み口からの最大打込み速度 m ³ /h	10~-10
	5	工場で型枠振動機による締固めを行う場合 現場で型枠振動機と内部振動機を併用する場合 内部振動機により通常の締固めを行う場合 内部振動機による締固めを行わない場合	10 5 0 -25
4	1	【表面仕上げ・養生】※F ₄₂ 養生期間 被膜養生剤を使用する場合 通常の表面仕上げを行う場合 梁、柱等でタンピングを行わない場合 表面積の大きなスラブ部材等でタンピングを行わない場合	5~-30
	2	普通セメントの場合 : $2(F_{42}-5) \rightarrow F_{42} \leq 5 \cdot F_{42}-5 \rightarrow F_{42} < 5$ 早強セメントの場合 : $3(F_{42}-3) \rightarrow F_{42} \leq 3 \cdot 1.5(F_{42}-3) \rightarrow F_{42} < 3$ 高炉・フライッシュセメント場合 : $2(F_{42}-7) \rightarrow F_{42} \leq 7 \cdot (F_{42}-7) \rightarrow F_{42} < 7$	3~-8 3~-8 3~-10
	3	寒中コンクリートに対して寒中養生を行わない場合 暑中コンクリートに対して暑中養生を行わない場合	-20 -15
5	1	【打継目の施工】	T (1,7) で考慮

vii)には、鉄筋、型枠工、支保工に関する耐久性ポイントが示されている。鉄筋は④加工⑤組立⑥スパーサの種別、数量をランク評価し、型枠は④かぶりの確保⑤セパレータ、コーン等のコンクリートへの影響を与える施工精度と材料(材質)等が挙げられている。支保工も同様の視点による項目である。鉄筋、型枠、支保工は、コンクリート工の一部と捉えその施工精度と施工材料による耐久性に対するマイナスランクがポイントとなっている。

(3)まとめ

①耐久性設計指針に示される施工内容の定量的評価は、施工組合せによる評価ではなく一つ一つの項目の標準的環境、材料、施工との比較によるランク付け評価(これらの根拠は、工学的評価であるが)となっている。

②耐久的なコンクリート構造物を実現するためには、設計、施工に関与する人的要素が重要であることを指摘し、定量化し難い内容をランク評価により総合的に

組み入れている。また耐久性ポイントの項目組合せは、設計と施工が不可分で一体であることを強調している。従来このような考えは、定性的にあってもこの指針のように具体的数値として示された例はない。

7. 3. 2 耐久性限界に基づくコンクリート構造物の耐久性設計^{32, 34)}

(1) 基本的な考え方,

1) 耐久設計を時系列に、ミクロレベル(理論的, 物理的モデルに完全に立脚), メゾレベル(理論的, 物理的なモデルを考慮しながらこれを簡素化することにより適用の容易さに配慮したもの), マクロレベル(理論的に完全な裏付けは伴わないが耐久性に関する知見を集約したもの)と区分し, どのレベルでも耐久性に関する設計, 材料, 施工の要因及び環境条件を取り込む。

2) 耐久性の経時変化に対応するためには, 明確な劣化予測モデルを有するミクロレベル, メゾレベルの耐久設計が必要となるとして, 適用システム, 耐久性確保のための基本仕様, 耐久性限界期間の算定法を示している。

3) 目的は, 対象とする鉄筋, プレストレスコンクリート構造物を計画, 設計, 施工, 維持管理していく際に耐久性の観点から問題が生じないことである。

この基本的考えから耐久設計の特徴は, 以下の3点として表現される。

- ① コンクリート構造物の劣化予測モデルを定め耐久性の経時変化に対応
- ② コンクリート構造物の耐久性に関する材料, 設計, 施工の要因に加え環境条件を定量的に取り込む
- ③ 適用システムについての提案を含み, コンクリート構造物の建設及び維持管理の一連の工程の中における耐久設計に位置づけを明らかにした

(2) 適用システム

適用システムは, 耐久性確保に必要な材料, 設計, 施工の要因を総合的に考慮した設計の実施段階での適用(執行者, 方法)を明確にする目的も含まれる。

図 7.8 は、コンクリート工事と耐久性の段階的検討を簡素化したフローである。このフローに沿って耐久性に関する種々の因子を定量的, 直接的に取り込んだ劣化モデルに基づいた劣化予測式を有する設計を前提とした適用システムが提案されている。システムの適用は, 現場打ち鉄筋, プレストレス構造物を対象としている。具体的適用にあたり, 基本仕様が「一般の環境条件下に設けられる鉄筋コンクリート構造物が必要最小限の耐久性つまり 30 年間特に大きな劣化を生じることなく所要の機能を満足するために必要とされる材料, 設計, 施工に関する要求仕様」と定義されている。一般の環境下とは, 中程度の日光, 風を受け, 相対湿

度が 50～80%，年平均気温が 10℃以上 20℃以下且つ塩害の影響が顕著でない条件定義している。

(3) 基本仕様

本設計の特徴②にも示されるように基本仕様を実験的，理論的，実績当の明確な根拠に基づき定量化することが原則となっている。しかし現実にはすべての因子を定量化することが不可能であるとして図 7.9 に示す構成となっている。

基本仕様に示される項目の一覧を表 7.21 に示す。基本仕様で示される施工内容を基本仕様の構成別に考察する。

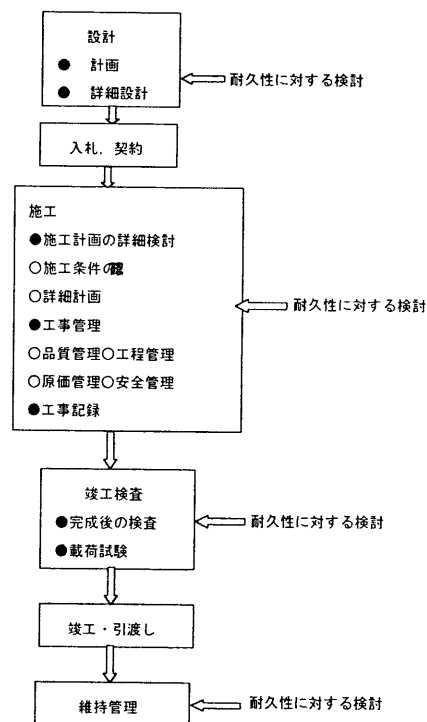


図 7.8 コンクリート耐久性
段階的検討フロー

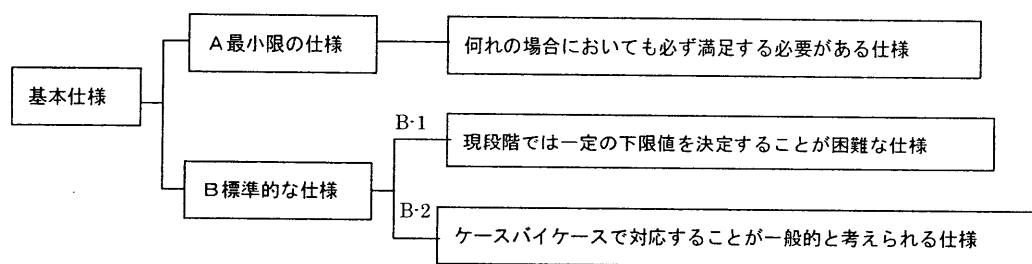


図 7.9 基本仕様構成図

1) 要求仕様 A 基準

①コンクリート材料関する項目は，セメント，骨材、混和材料，鋼材で，JIS 規格，土木学会規準が基本となっている。コンクリート配合に関する 8 項目は，具体的数値基準と土木学会規準により規定されている。その具体的値は

㊶強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ 以上 ㊷水セメント比 65-55%以下 (H13 年度には鉄筋コンクリート 55%以下，無筋 60%以下の通達が既に通知³⁵⁾) ㊸単位水量 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下 ㊹粗骨材の最大寸法(コンクリート標準示方書—施工編 4.6 項) ㊺スランプ(コンクリー

ト標準示方書－施工編 4.7 項) ④細骨材率 0.4 以上Ⅶ空気量－2～3%or4～8%(凍害を受ける場合) ⑤塩化物含有量－全塩化物イオン量 0.30kg/m^3 以下

②施工に関する A 規準は、養生、打継目、品質管理の 3 項目となっている。③養生については、養生方法(湿潤、温度制御等の留意事項)と日数がセメント種別による分類される。(日平均気温や相対湿度による調整)

⑥打継目については、処理方法、例えばレイタンス、ブリーディングの除去、の方法や逆打ち対策としてグラウト処理や膨張性コンクリートの使用を耐久性算定式に反映させる。さらに打継目の位置、方向についても算定式係数として反映させる。

③品質管理については、3 項目あり i) フレッシュコンクリートの品質(スランプ・空気量、温度)と防錆機能となる ii) 鋼材の保護、品質を鋼材かぶり、表面状態で規準化している。その他コンクリート打設時の iii) 環境条件(打込み時、養生時の大気温度、相対湿度)他 PC 関連事項が規準化されている。

2) 標準的な B 規準仕様

①コンクリート運搬、打設、表面仕上げ等の具体的施工法が挙げられている。

④運搬方法は、B-2 仕様で施工条件によりポンプ、バケット等の選択区分である。

⑥打込み方法は、B-1 仕様としてコンクリートの締固めにかかわる区画における一層の高さ(0.5m 程度)、バイブレータ挿入間隔(0.6～0.5m)や材料分離に関する落下高さ等の項目が挙げられている。④と⑥の関連する練混ぜから打込みまでの時間は、気温が 25°C 以上の場合は、1.5 時間以内、以下の場合は、2 時間以内に打込み仕様としている。

③表面仕上げ方法は B-2 仕様で余剰水、レイタンスの除去と不完全箇所(豆板、ひび割れ)の除去等の一般的項目となっている。人的管理要素である④管理技術者は、B-1 仕様として、打込み時最初 2 名常駐、一名当たり担当者 $50\sim 100\text{m}^3/\text{日}$ のように具体的数量が示されている。

その他の施工に関する鉄筋、型枠は各々 B-1、B-2 仕様となっている。

鉄筋は、防錆戸の関連であるかぶり確保に関するスペーサの位置、数量(スラブ 4 個/ m^2 以上)および設置ピッチ(はり 1.5m 間隔以下、柱 1.0m 間隔以下)等が含まれている。さらにスペーサの材質や配筋のピッチに関しても、粗骨材の最大寸法の 1.25 倍以上および内部振動機による締固めが可能な空きを有することが仕様として記載されている。型枠は、材質等にとどまっている。施工に関する基本仕様区分と内容の概観は以上の通りである。

(4) 耐久限界期間の算定

耐久限界期間 T_s (T_p ＝設計耐用期間)の算定式 7.1 に基本仕様に含まれる種々

の要素が具体的な係数として含まれる.

$$T_s = T_{cr} + T_{ck} \quad (7.1)$$

T_{cr} : 一般の環境下で供用後鉄筋腐食が開始(コンクリートの中性化が鉄筋の位置に到達する)されるまでの期間

T_{ck} : 鉄筋腐食後コンクリートに腐食ひび割れが発生するまでの期間

T_{cr} 、 T_{ck} の算定には、腐食開始時期に関わるコンクリートの品質係数 Q_{cr} とコンクリートにひび割れが発生するまでの期間に関わるコンクリートの品質係数 Q_{ck} が適用される. コンクリートの品質係数の中には、コンクリートの水セメント比、セメントや骨材の種類、打継目の有無、養生条件及びひび割れなど、直接コンクリートの品質に影響を及ぼす要因の他コンクリートの施工性に影響を及ぼす鉄筋の配筋状況についても考慮して含まれる. これらの項目区分は腐食開始時期に関わるコンクリートの品質係数 Q_{cr} は式 7.2 で算定される.

$$Q_{cr} = Q_{wc} \cdot Q_m \cdot Q_l \cdot Q_{dc} \quad (7.2)$$

Q_{wc} : コンクリートの水セメント比に関わる係数

Q_m : コンクリート材料に関わる係数

$= Q_{cm}$ (セメントに関わる係数) \times Q_{ag} (骨材に関わる係数)

Q_l : ひび割れ幅に関する係数 Q_{dc} : 設計、施工及び養生に関わる補正係数

Q_{dc_1} : 鉄筋と配筋状況に関わる補正係数

$=$ 鉄筋の段数 n_1 と鉄筋の水平空き／粗骨材の最大寸法 n_2 による

Q_{dc_2} : 打継目の処理方法に関わる係数

Q_{dc_3} : 型枠の種類による係数

Q_{dc_4} : 養生期間に関わる係数 $Q_{dc} \geq 1.2$ の場合 $Q_{dc} = 1.2$ とする

コンクリートにひび割れが発生するまでの期間に関わるコンクリートの品質係数 Q_{ck} は、鋼材の腐食進行速度に及ぼすコンクリートの品質の影響程度を評価する. この場合、鋼材腐食はコンクリート中の酸素の拡散に律則される現象として捉え、その評価も酸素の拡散性に対する評価に置き換えて示される. Q_{ck} で取り扱う影響因子及びその影響の程度はその拡散の対象は異なるものの、コンクリートの物質拡散性を評価した Q_{cr} の場合と基本的に同じとして取り扱われて式 7.3 で算定される.

$$Q_{ck} = Q_{wc} \cdot Q_m \cdot Q_l \cdot Q_{dc} \quad (7.3)$$

(5) まとめ

耐久性設計指針案は、施工内容のランク区分を指数化して耐久性を重み付け評価している. 本耐久性設計は、耐久性の具体化(30 年間)によりその設計、材料、施工を基本仕様による実験的、理論的、実績等の明確な根拠に基づき定量化、算

定式により示している。

表 7.21 基本仕様項目

分野	項目	小項目	区分
材料・配合	材料	セメントー品質、種別	A
		骨材ー粒度、有害含有量	A
		混和材料ー品質、種別	A
		鋼材【鉄筋,PC鋼材】ー品質、種別	A
	配合	強度	A
		水セメント比	A
		単位水量	A
		粗骨材の最大寸法	A
		スランプ	A
		細骨材率	A
		空気量	A
		塩化物含有量	A
施工	計量、練混ぜ 運搬、打込み 仕上げ	計量、練混ぜ機器（自動、手動）	B-2
		運搬方法ーポンプ	B-2
		打込み方法ー打込み高さ等	B-1
		表面仕上げ方法ー留意事項	B-2
		管理技術者（打設量と技術者数の関係）	B-1
		特殊コンクリート(高流動化対応)	B-2
	養生	方法ー留意事項	A
		日数ーセメント種別、温度、湿度、部材厚	A
	打継目	処理方法ー留意事項	A
		位置ー設計図表示	A
	鉄筋	組立ースパーサの配置、材質	B-1
		配筋	B-1
	型枠、支保工	材質ー鋼製	B-2
		特殊型枠ープレキャスト	B-2
設計	品質管理	品質管理ー項目規定、PC工	A
	ひび割れ 制 御	ひび割れ幅(但し温度ひび割れは温度ひび割れ指数)算定法、制限値	A
	かぶり	部材毎の最小値	A

7. 4 本研究との相違点

施工法に関する既往の定量的評価内容をまとめる。

①取扱った事例は、何れも耐久性設計法に関する研究成果である。その中での施工法を工学的に評価した定量化は、指数や算定式に含まれる係数として示されている。各々の施工因子を選択した場合、独立した数値として取り込まれ耐用期間への影響を示すが、施工因子条件によって生じる差異を施工法に反映させ比較(耐用期間と施工法の関連性を具体化)することは難しい。

②コンクリートの構成材料、配合、混合の条件および施工環境の評価が定量化され採用されている。施工法評価は、耐久性設計法を前提としたコンクリートを製品として取扱う生産手段の評価である。従い評価の時間軸として見た場合、別時系列の対象とした方が評価し易く明確となる。

③本節での事例で示された施工に関する定量化を施工法の選択評価とするには、定量化の規準が統一化されていない。

本研究の目的は、耐久性を確保するために「施工を起因とする温度ひび割れ制御」が重要であることに注目して、施工時に対応する要因の水準組合せ(施工法選

択)を工学的評価により定量化することにある。従い本事例に含まれ施工要素をより具体的数値に置き換えて解析する必要がある。具体的な指標により、計画段階でのリスクマネジメント化(重要度による施工法選択, 所要性能を確保した上での経済比較による施工法選択)および施工段階でのリアルタイムな施工法の変更が具体的により示される。そのためには、従来より定性的に扱われた型枠, 養生等の工法を所要性能へ影響する工学的データに置き換えた評価が必要となる。コンクリートの熱特性に着目し「ひびわれ指数」を指標として工法を評価する手法が本研究の提案となる。

第7章参考文献

- 1) 森康男, 新田保次編著: 土木システム計画・朝倉書店, 1998. 4
- 2) 河上省吾編著: 土木計画学・鹿島出版, pp. 36~42, 1996. 1
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー81 コンクリート構造物の維持管理指針 (案)平成7年10月
- 4) 日経コンストラクション: 特集土木工法99・2010年の注目技術, pp. 64~93, 1999. 6-25
- 5) 中村俊彦, 明嵐政司: エコセメントの鉄筋コンクリートへの適用, pp. 50~51 月刊建設 01-10
- 6) 河野広隆, 田中良樹: コンクリート構造物の診断支援システムの開発, コンクリート工学 Vol.39, No. 2, pp. 8~13, 200.2
- 7) 朝倉義博, 村松聡光, 持丸修一, 新田恭士: 工事中の環境影響評価法, 土木技術資料 41-8(1999), pp. 42~47
- 8) 奥村樹郎: 環境負荷の低減は至上の命題, 月刊建設 1999.3, p. 1
- 9) 笹口裕二: 社会資本整備における費用効果について, 積算技術 1997年9月号, pp. 54~57
- 10) 和田一範, 井上直樹: ダム建設におけるCO₂発生量の把握とその抑制方策, ダム日本 No. 670, pp. 41~54
- 11) 永山功, 宮内茂行: コンクリートダム建設に伴って発生する二酸化炭素の分析, 土木技術資料 41-11, pp. 36~41, 1999
- 12) 佐和隆光: 地球温暖化を防ぐー20世紀型経済システムの転換・岩波新書 529. 1997
- 13) 林野庁ホームページ
- 14) 吉田等, 佐々木隆, 町田 宗久, 大滝 嘉孝: フライアッシュI種置換によるダムコンクリートのCO₂削減効果, ダム技術 No.117, pp. 25~30, 2000. 12

- 15) 西淳二, 清水隆文, 加藤貴也, 田中正: 環境面から見た地下鉄建設工法の評価, トンネルと地下第 30 号, pp. 47~53, 1999
- 16) 武田準一郎: より環境に優しい施工を目指して・建設機械の排ガス対策, 月刊建設 1999 年 9 月号, pp. 50~51
- 17) 建設省経済局調整環境調査室: 環境評価法について, 積算技術 1997 年 9 月号, pp. 4~7
- 18) 笹口裕二: 社会資本整備における費用対効果について, 積算技術 1997 年 9 月号, pp. 54~59
- 19) 杉本隆男: 都市の地下工事, 土と基礎 47-7, pp. 1~4, July, 1999
- 20) 小澤一雅, 袴田英宏: コンクリート施工の合理化を評価する手法の開発, 建設マネジメント Vol. 2, pp. 107~116, 1994
- 21) 小澤一雅, 三木孝司: 施工のプロセスが環境におよぼす影響を考慮した建設技術の総合評価システム, 建設マネジメント研究論文集 Vol. 3, pp. 81~92, 1995
- 22) 小澤一雅: 建設技術の評価, 積算技術 1997 年 1 月号, pp. 5~13
- 23) 只木良也: 森と人間の文化史・NHK ブックス 560, p136 参考
- 24) 福本洋一, 嶋田洋, 池田尚次: 工法選択のための数理的評価手法について, ダム工学 Vol. 9, No. 2, pp. 113~124
- 25) 福本洋一, 嶋田洋, 池田尚次: コンクリート運搬工法の開発とその評価について, ダム工学 Vol. 10, No. 1, pp. 42~45, 2000
- 26) 石井昌次, 金子研一, 石島洋二: AHP 法による提案技術の総合評価に関するシミュレーション, 第 15 回建設マネジメント問題に関する研究発表会・討論会講演集 1997 年 12 月, pp. 117~122
- 27) 三木博史: 13 切土・盛土・斜面安定, 47-11(502), pp. 54~57, November, 1999
- 28) 杉浦省吾: 宅地開発での法面防護と自然斜面への配慮, 基礎工 1999. 10, pp. 14~17
- 29) 吉川和弘著: 土木学会編新体系 52 土木計画のシステム分析, pp. 1~28
- 30) 土木学会: 平成 11 年度コンクリート標準示方書「施工編」
- 31) 土木学会: コンクリートライブラリー65・コンクリート構造物の耐久設計指針(試案), 1989. 8
- 32) 土木学会: コンクリートライブラリー82・コンクリート構造物の耐久設計指針(案), 平成 9 年
- 33) 土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(案)付録 p89
- 34) 土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(案)付録
- 35) 大臣官房技術調査課長通達(各地方整備局企画部長宛): 土木コンクリート構造物の品質確保について, 2001. 3. 29 付

第8章 施工法の工学的評価に基づく合理的選定法の提案^{1~5)}

8. 1 はじめに

前章までの考察により社会資本の整備を展望するには、コンクリート構造物の長寿命化がキーワードであると結語した。

コンクリートが、鉄とともに建設材料の根幹を占めるようになった20世紀は「コンクリート構造物の構築」時代であった。21世紀に至り社会は、消費から循環へと転換し「地球環境の時代」となった。コンクリートを構成するセメントは、製造過程で大量の二酸化炭素を発生させ地球温暖化への影響が問われ、構造部の更新は、廃棄物の発生源となりその再生活用が課題となっている。更新は、維持補修を含めた構築時のライフサイクル評価の中に位置付けられる。

21世紀のコンクリート課題は、建設ストックの活用と高性能化、高品質化に方向付けられる。高性能、高品質化の要求は、設計、施工にも影響を及ぼす。コンクリートにおける高性能、高品質の中枢をなす性状として、コンクリート構造物の耐久性設計指針案の総則に「通常の使用目的な適う使用性、施工中、供用中に作用する荷重に対する構造物の安全性および供用期間中に構造物が十分な耐久性を保持する必要がある」と示される耐久性に焦点を絞って考察することは、前述の社会環境および建設技術の将来展望に合致すると考える。

本章の構成を図8.1のフローにより示す。

8. 2 コンクリートの耐久性要因^{6, 7, 8)}

8. 2. 1 長寿命化と耐久性

コンクリートに対する代表的性能要求は、強度、水密性、美観多くの項目がある。コンクリートの高性能化は、水セメント比、単位水量、単位セメント量、単位体積重量、コンクリート含有塩化物量、等の配合規定化や施工時の打設温度、練混ぜ、運搬時間、打込み方法、締固め、養生期間、養生方法、等の規定により図られてきた。これらの項目は、コンクリート施工の初期状態における管理の重要性を示している。フレッシュコンクリートは、製造から施工に至る段階で多くの作業主体の変化とともに加工、移動によりその性状を変化させる。フレッシュコンクリートの性状は、これらのコンクリート自身の事由に施工環境変化が加わることで非常に多岐にわたる影響を受ける。要求性能を満足する性状を確保する

ために施工に問われる要素と要因を整理する．一般的にコンクリートの「寿命」とは，コンクリート物性の強度，水密性を時系列に見た場合の耐久性と同意であり，長寿命化は，耐久性の長寿化である．コンクリートは構成するコンクリートと鉄筋が要素となる劣化現象によりその物性に支障を来すまでの期間が供用期間＝耐用期間となる．図 8.2 に鉄筋コンクリートに生じる劣化現象の分類を示す⁹⁾．

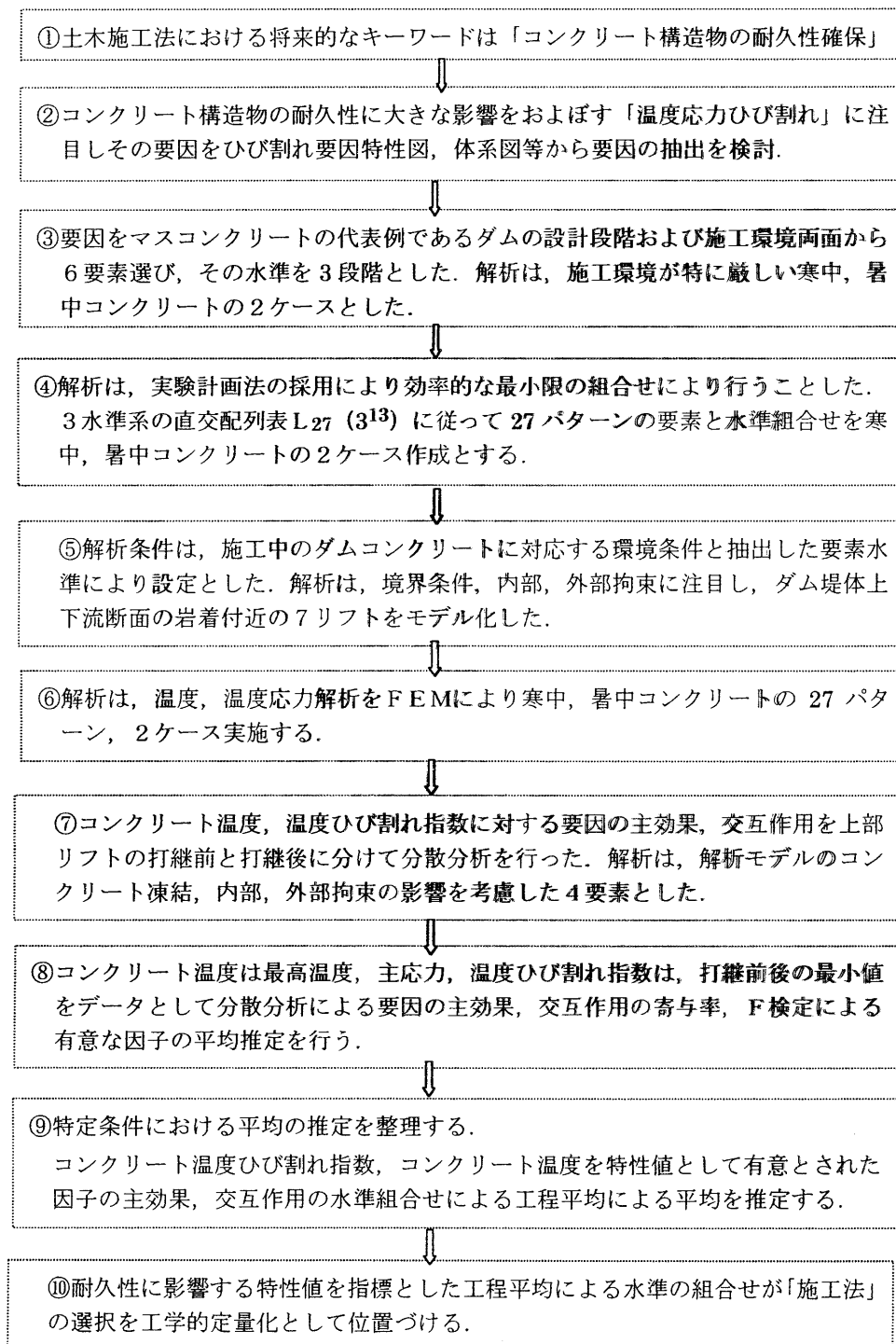


図 8.1 8 章構成フロー図

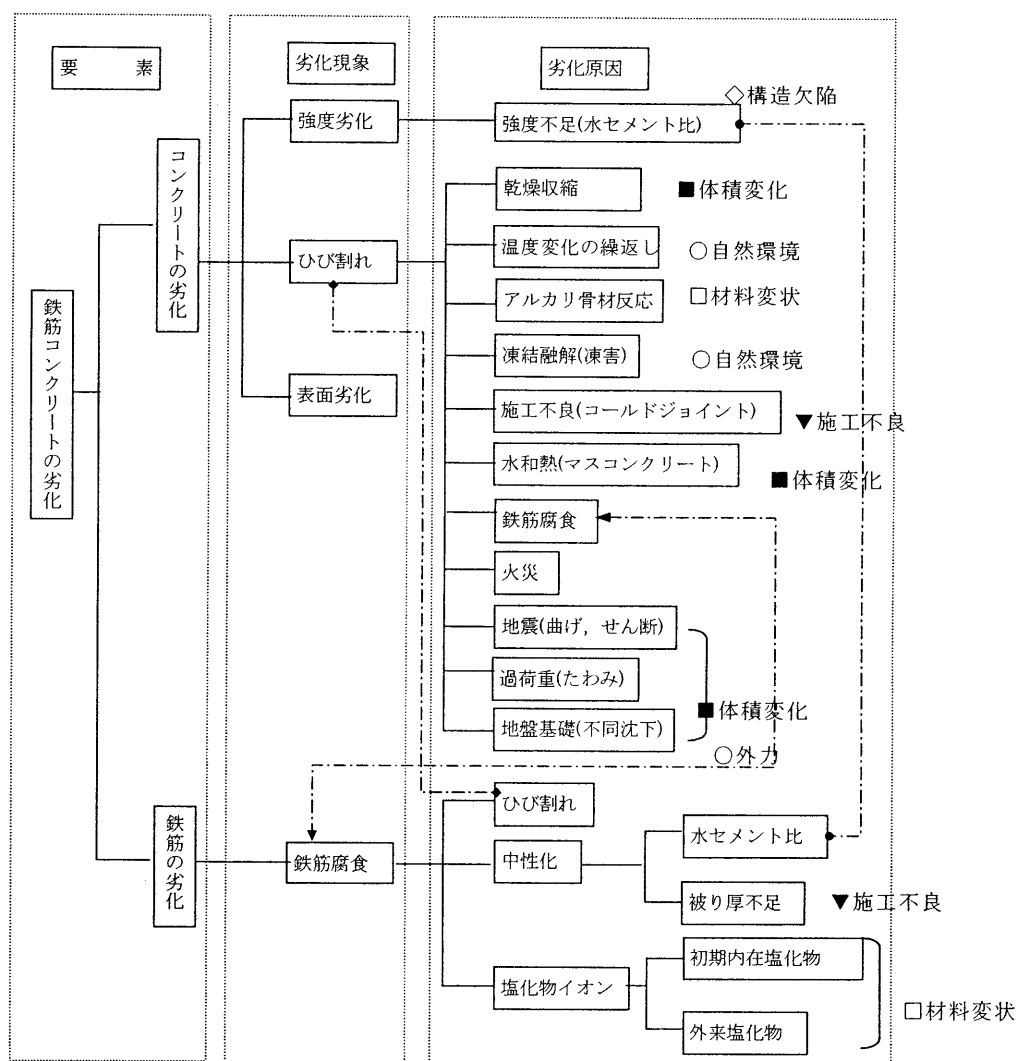


図 8.2 劣化現象の分類

8. 2. 2 ひび割れ要因と施工の関連^{10, 11)}

コンクリートのひび割れや剥落による断面欠損による耐力低下により構造物の安全性は低下する。安全性の低下は、コンクリート、鉄筋の耐力による耐用期間に優先して供用期間を決定づける。従い長寿命化を実現するためには、経年劣化を促進する要因を施工の段階で除去することが必要である。言い換えれば確実に物性を確保する施工が先ず前提となる。要求性能に見合ったコンクリートの物性を確保するためには下記の①～③の抑制が重要となる¹²⁾。

- ①有害物質の侵入抑制 ②ひび割れ等の劣化原因の抑制
- ③工段階での欠陥発生の抑制

この抑制に係わる施工段階での品質管理要因と劣化現象の関連を図 8.3 に示す。有害物質の侵入抑制とは、コンクリートを変質させる骨材、鉄筋を腐食させる物質をコンクリートに混入させないことである。配合設計からは、水セメント比を

小さくして組織を緻密化することや、混和剤の利用による有害物質の固定化（コンクリート内の拡散抑制）等がある。

ひび割れ等の劣化原因の抑制は、①による対策により製造されたコンクリートの施工段階による乾燥収縮，温度応力，温度変化によるひび割れの発生対策である。ひび割れの発生は，コンクリート中に有害物質の侵入や劣化促進の大きな要因となる。

施工欠陥の発生抑制は，②の対策が配合設計や施工法に係わる要因であるのに対して，フレッシュコンクリートの施工計画，施工法，施工精度や施工管理に関連する「じゃんか，コールドジョイント，かぶり不足」対策である。

この①～③項目の中で施工に関する②，③の項目について注視する。③については，コンクリート工の変遷，施工法の体系化の章において，生産工学と建設産業における生産システムの違いを明らかにした。基本作業の作業目的が工学的背景にあるにも関わらずその指標の多くが定性的である。それがひとつの施工欠陥の要因となる。その制御として定量的指標の必要性を提起した。コンクリート締固めや筆者等の提案による音，色，電気抵抗等に注目した方法によりその定量化が提案される現況である。

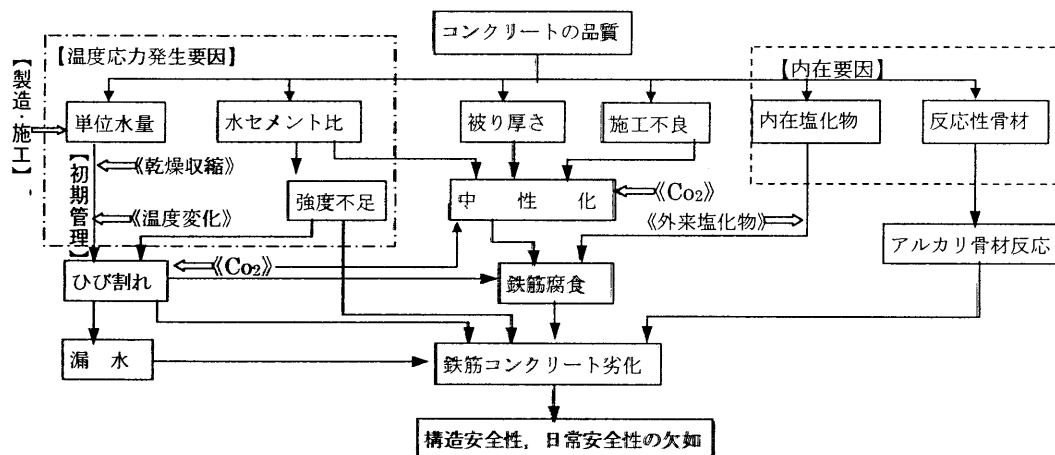


図 8.3 品質管理要因と劣化現象

②に示されるひび割れ抑制について詳細に注目する。コンクリート劣化原因は，強度不足と表面劣化，ひび割れに分類される。ひび割れは，コンクリート配合，骨材，凍結融解（外気条件），水和熱，その他外力等の多くの要因により発生する。これらの要因は，施工計画の中で施工法を検討する段階の条件となる。

①コンクリート配合，単位セメント量，セメント種別は，水和熱による温度応力によるひび割れ要因となる。

②外気条件は，打設時期によりコンクリート内部温度勾配に影響を与え，水和熱発

生と相乗して温度ひび割れ要因となる。

◎施工期間(冬期, 夏期, 長期, 短期)や打設間隔もコンクリート温度勾配に影響し温度ひび割れ要因となる。

これらの要因は, コンクリートの熱特性に収束される。熱特性によるコンクリート体積変化に外力, 自然環境, 材料の変状, 構造欠陥, 施工不良等多くの要因が関連して発生する。従いこれらのひび割れ要因対策が抑制策となる。

その具体化として図 8.3 からひび割れ発生を時系列に見る。製造時に内在する要因と製造, 施工中, および初期施工期間に大きく分類できる。このことは, 多くの発生要因がコンクリート仕様, 施工時期等の施工計画段階, 施工法を選択する段階である程度の想定が可能であることを意味する。ひび割れの要因の内, 想定外の外力や構造欠陥以外はコンクリートの体積変化に起因すると考えられる。自然環境は, フレッシュコンクリートの強度発現と体積変化との関連, 施工では, 打設間隔, 型枠材料, 養生方法の選択に関連する。材料の変状はコンクリート骨材の品質管理で製造時に制御が可能である。施工不良は, 作業目的を工学的な定量化により明瞭にすればリスク管理としてより確実な施工が可能となる。これらのひび割れ要因を要素と過程の分類から, コンクリートの体積変化と施工の関連を工学的に定量化できればコンクリートひび割れの抑制の有効手段となる。

コンクリートの体積変化によるひび割れは, 内部温度応力により発生する。温度応力の発生は, コンクリートの水和熱により, 水和熱は, セメント種別, 単位セメント量, 打設温度等の断熱温度上昇特性による発生量となる。発生した熱は, 熱伝導率によりコンクリート内部から接する型枠, 養生, 岩盤の熱伝達率により発散される。この熱伝達フローは, 型枠材料, 養生方法, 打設間隔等の施工法選択によりコンクリート内部温度の上昇, 下降勾配が左右されコンクリートひび割れ発生に影響を及ぼす。さらに自然環境は, 施工時の気象条件として, コンクリート自身の体積変化は, コンクリートの仕様として施工の前提条件とし, 施工法の選択との組合せを考えれば事前にコンクリートひび割れ発生確率を把握できる。

コンクリートの耐久性や機能性の低下を招く要因は, コンクリート劣化現象による。その主要因であるコンクリートひび割れが, 施工による受ける影響を工学的解析により定量化する方法として, 施工要因を体積変化に関わる熱特性に置き換えた組合せにより考察する。

8. 2. 3 要因の抽出 ^{13, 14, 15, 16)}

コンクリートの体積変化は, 温度変形, 乾燥収縮, 自己収縮等による。その変化要因であるコンクリートの断熱温度上昇の特性要因図を図 8.4 に示す。

断熱温度上昇量は, 配合, 打込み温度, 使用材料, 試験方法の大きな4 骨によ

り構成される。また図 8.5 に示す温度ひび割れ系統図には、ひび割れ要因に対する現場施工対策との関連を示す。図 8.4、8.6 から、ひび割れ要因と制御施工方法の組合せを作成する。

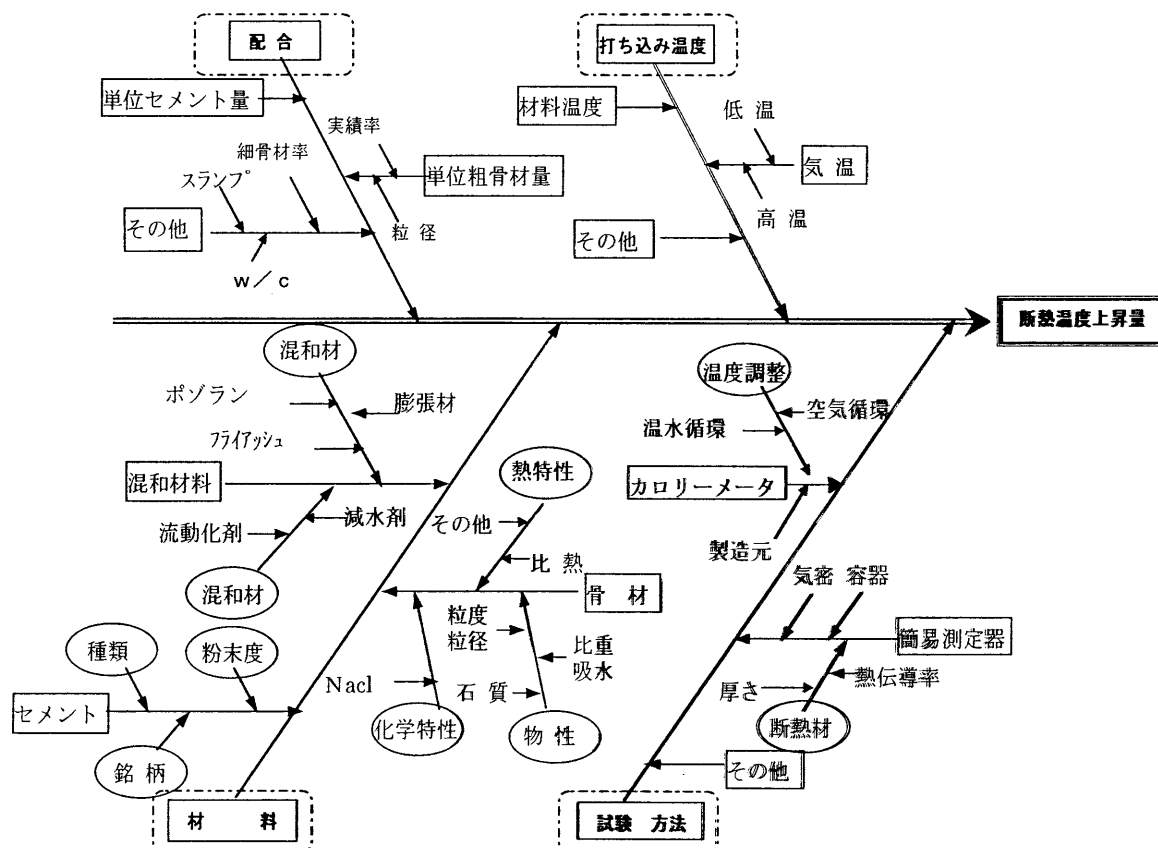


図 8.4 断熱温度上昇特性要因図

ひび割れ発生確率の低下を目的とした施工法への展開は、

①コンクリート温度 ②応力緩和(若材齢時の引張応力) ③ひび割れ抵抗性の側面が考えられる。

①については、コンクリート自体の温度調整と施工環境に分割できる。コンクリート自身については下記の対策がある。

④最大温度の抑制 ⑤内部温度差低減 ⑥温度勾配の緩和

この対策の要素となるのは、

セメント種別、セメント量、打設間隔、打設厚、養生および打設時間帯等である。施工環境に関しては、

④外気との接触であり、暑中、寒中施工の養生方法となる。

②の応力緩和については、外部拘束と内部拘束に分割される。外部拘束については、下記の対策がある。

④新旧コンクリートの温度差 ⑤外部拘束低減

この対策の要素となるのは、

打設間隔、養生、打設ブロック形状の縮小、拘束体との接触面改善等である。

内部拘束に関しては、以下の対策がある。

⑥コンクリート物性 ⑦内部拘束の低減

の対策があり、その要素は

線膨張係数・弾性係数の低減、内部温度差低減（外部拘束に準じる）等がある。

③のひび割れ抵抗性については、コンクリート自体と補強に分割できる。補強に関しては、焦点が異なるので対象としない。コンクリート自体の問題は、

⑧強度の向上 ⑨施工品質の向上

等の対策がある。その要素を集約すると、配合設計（W/C）、施工環境、適切な施工法の選択と集約できる。

以上のことから図 8.4 断熱温度上昇特性要因図、図 8.6 温度ひび割れ系統図等から施工法との関連性を図 8.5 に示す 6 要因、3 水準とする。（◆が選択要因）

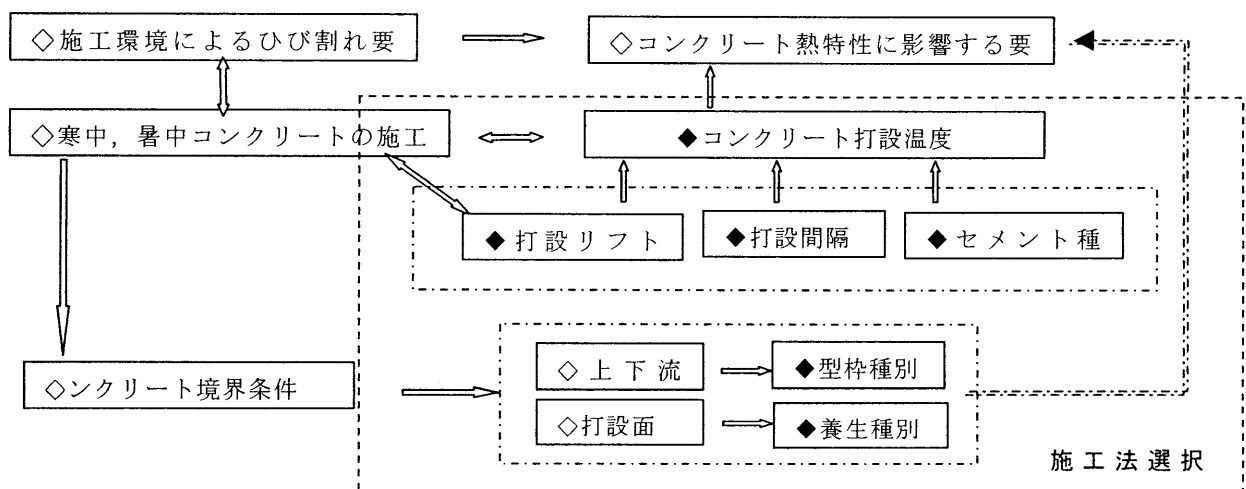
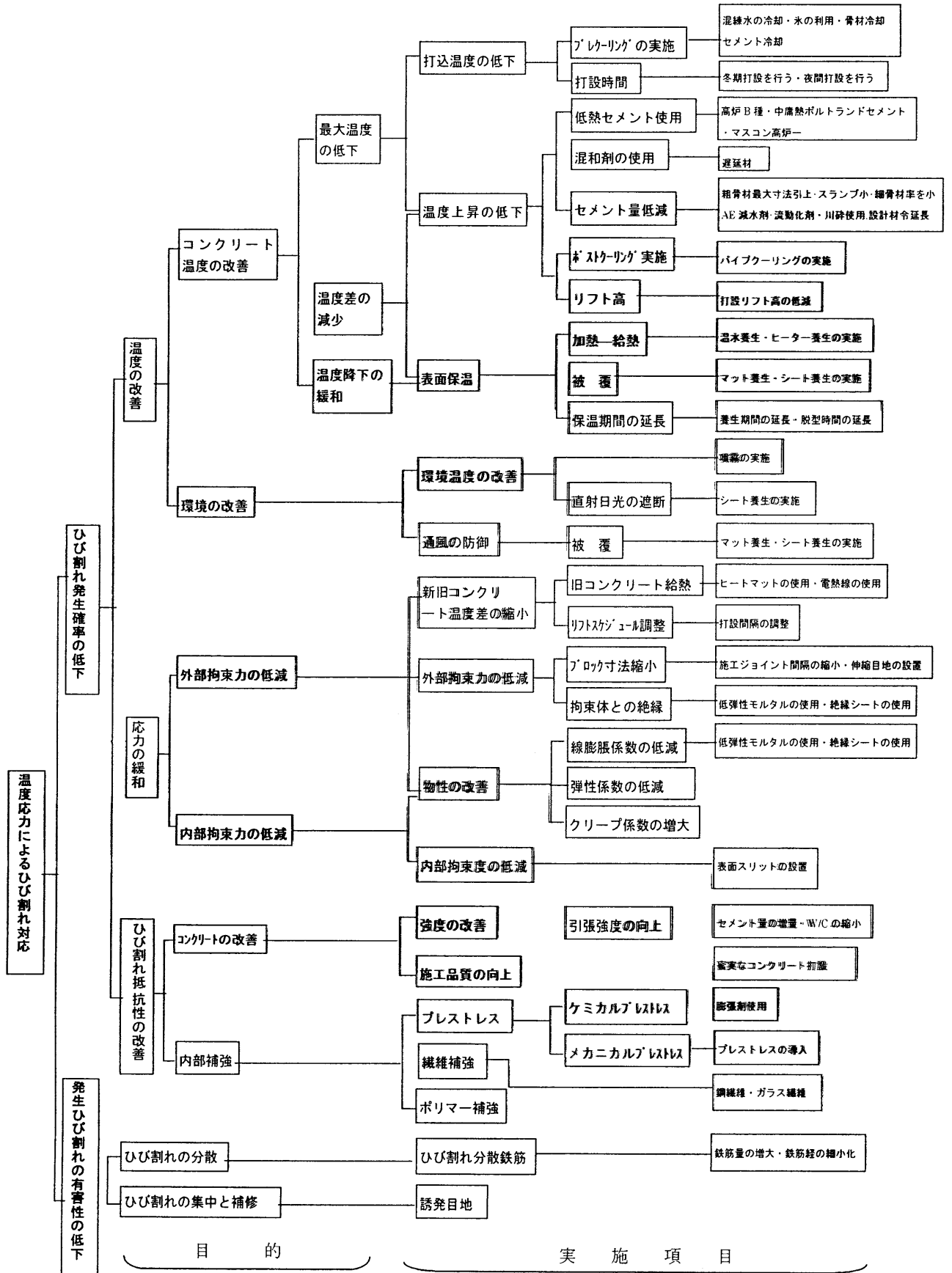


図 8.5 施工法関連要因図

《温度ひび割れ系統図》



8. 3 施工因子と水準による温度応力解析

8. 3. 1 はじめに

建設産業における生産手段である施工システムを構成する施工法の方方向性に関する課題について多面的な分析を行い、「コンクリートの耐久性」が特に重要課題であると結論付けた。耐久性にひび割れが大きな影響を及ぼすことから、ひび割れ要因と施工要因の関係を前節 8.2 で明らかにした。その結果を図 8.5 に示した。

本節は、コンクリートひび割れ対策を施工実施面から具体的に展開する。

8. 3. 2 施工環境による解析ケース^{19, 20, 21)}

コンクリート施工は、種々の施工環境、施工項目の組合せから実施される。施工環境は、建設産業特有の屋外生産、注文生産に対応するコンクリート性状に対する外的条件となる。言い換えれば施工環境は、気象作用として凍結融解を含む温度変化、乾燥や水の浸透による水分変化によりコンクリート性状に影響する。

工学的物性値としては、外気温変化により捉えることができる。外気温変化は、コンクリート練混ぜ温度、打設温度、水和作用の速度に影響することで、コンクリートの性状や物性値を変化させる。そのため、特に施工環境の厳しい冬季、夏季はそれぞれ寒中、暑中コンクリートとして施工の留意点がコンクリート標準示方書に示されている。各々の定義は、及び問題点となる項目を表 8.1 に示す。

表 8.1 寒中コンクリート・暑中コンクリートの定義と問題点

種 別	定 義	問 題 点
寒中 コンクリート	日平均気温が 4℃以下においての施工されるコンクリート	・水和反応の遅延による凝結、硬化の遅れ ・初期凍害における強度低下、ひび割れ、耐久性低下
暑中 コンクリート	打込み温度が 25℃を超えるおそれがある場合に施工されるコンクリート	・水和反応の促進による凝結、硬化の早化 ・水和熱による温度応力ひび割れ ・収縮、乾燥ひび割れの発生

本来コンクリート構造物が損傷を受ける原因は、長期にわたる荷重、疲労及び材料の劣化、自然災害等である。コンクリートの物性値を時間軸で評価する耐久性を確保するには、若材齢コンクリートの施工管理が重要となる。特に外部、内部拘束による温度ひび割れや凍結に対応する施工法の選択は、耐久性に大きな影響を与える。前章で指摘した施工法を起因とする早期劣化原因の明確な防止対策には、施工法の選択を従来の経験的選択から工学的根拠に基づく選択が必要である。当研究では、特に施工環境が厳しい寒中、暑中コンクリートとマスコンクリートの組合せ事例を解析しその選択手法を提案する。

8. 3. 3 解析手法^{22), 23)}

施工法である工事データを工学的数値に置き換え、その施工組合せによる「温度ひび割れ指数」「コンクリート温度発現」をFEM解析により行う。施工組合せ因子効果の有意性は実験計画法による分散分析による。

8. 3. 4 因子の選択

(1) コンクリートの温度発現に関連する因子

前章のひび割れ特性要因図、温度応力系統図等から設計、外的条件と施工段階の両面から各3因子ずつ選択した。

1) 施工（設計、外的条件）による温度応力に影響を与える因子として

①セメント種別 ②施工時期（打設温度） ③リフト厚

2) 施工法（施工選択）による温度応力に影響を与える因子として

①型枠材料 ②養生方法 ③打設間隔

(2) 各因子の水準²⁴⁾

1) 設計、外的条件

因子のうちコンクリート打設温度は、寒中コンクリート、暑中コンクリート各々で設定する。他の因子は、寒中、暑中コンクリートも同一水準とする。

因子の水準内容は、ダムコンクリートの施工に基づく3水準とした。

①打設温度²⁵⁾

寒中、暑中コンクリート定義である「5℃、25℃」と施工組合せによるセメント種別による断熱温度上昇量効果、養生効果、プレクーリング、プレヒーティング効果の検証を考慮し表8.1に示す設定とした。また図8.7、表8.2に示す全国の月別平均気温調査による汎用性も考慮した。²⁶⁾

表 8.2 打設温度水準

コンクリート種別	水準1	水準2	水準3
寒中コンクリート	5℃	8℃	10℃
暑中コンクリート	22.5℃	25.0℃	28.0℃

寒中コンクリートは、コンクリート凍結、部材厚を考慮した場合の安全とされる10℃を最大値、最低温度5℃及びその中間値を8℃とした。

暑中コンクリート温度は、示方書で示される25℃、プレクーリング実績22.5℃、理科年表による夏季の平均気温（施工可能日数との関連による）を考慮し28℃と設定した。理科年表による30年間の平均気温を12地域に分割しグラフ化した。それによると7月中旬から9月に至る夏期において月平均気温25℃以上となる地域

は 10 地域、また最高気温は 28℃以下であることも設定理由である。同様に冬期月平均気温が 5℃以下となるのは 11 月上旬より 3 月中旬の間で期間的に 6 地域～11 地域が該当する。10℃以下で見ると沖縄地区以外の全ての地域で 10 月初旬から 4 月中旬までの約半年間が該当する。今回の練上り温度設定は、多くの地域での施工に十分活用できる範囲となる。

表 8.3 地域別月平均気温データ

地域・月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均
北海道	-6.4	-6.1	-1.6	5.2	10.8	14.5	18.5	20.2	16.2	10.0	3.3	-2.6	6.8
東北	-0.6	-0.3	2.9	9.3	14.7	18.5	22.3	24.1	19.4	13.0	7.3	2.3	11.1
関東	3.7	4.2	7.2	12.8	17.4	20.5	24.0	25.9	22.0	16.4	11.3	11.3	14.3
北陸	-0.6	0.0	2.9	7.8	12.0	14.9	18.0	19.6	16.6	12.3	8.2	5.7	13.7
信越	0.4	1.5	5.0	11.9	16.8	20.5	24.2	25.4	20.9	14.3	8.5	2.9	12.7
東海	4.7	5.3	8.3	13.9	18.3	21.8	25.5	26.8	23.2	17.4	12.3	7.1	15.4
近畿	4.6	5.0	8.0	14.0	18.6	22.3	26.3	27.4	23.5	17.4	12.1	7.1	15.5
山陰	5.5	5.7	8.5	13.7	17.7	21.4	25.3	26.5	22.7	17.4	12.8	8.2	15.5
中国	5.4	5.7	8.7	14.2	18.5	22.4	26.6	27.8	24.0	17.9	12.6	7.7	15.9
四国	5.3	5.8	8.8	14.4	18.6	22.2	26.3	27.2	23.6	17.9	12.7	7.8	15.9
九州	5.9	6.8	10.0	15.2	19.2	22.6	26.8	27.5	24.0	18.6	13.2	8.1	16.5
沖縄	15.1	15.5	17.4	20.6	23.2	25.9	28.4	28.1	26.9	23.9	20.6	17.1	21.9

北海道	札幌	帯広	網走					近畿	京都	大阪	神戸	奈良	和歌山
東北	青森	盛岡	仙台	秋田	山形	福島		山陰	湖岸	鳥取	浜田		
関東	水戸	宇都宮	前橋	熊谷	銚子	東京	横浜	中国	岡山	広島	下関		
北陸	新潟	富山	金沢	福井				四国	徳島	高松	松山	高知	
東海	岐阜	静岡	名古屋	津	尾鷲			信越	甲府	長野			
福岡	佐賀	長崎	熊本	大分	宮崎	鹿児島		沖縄	名瀬	那覇			

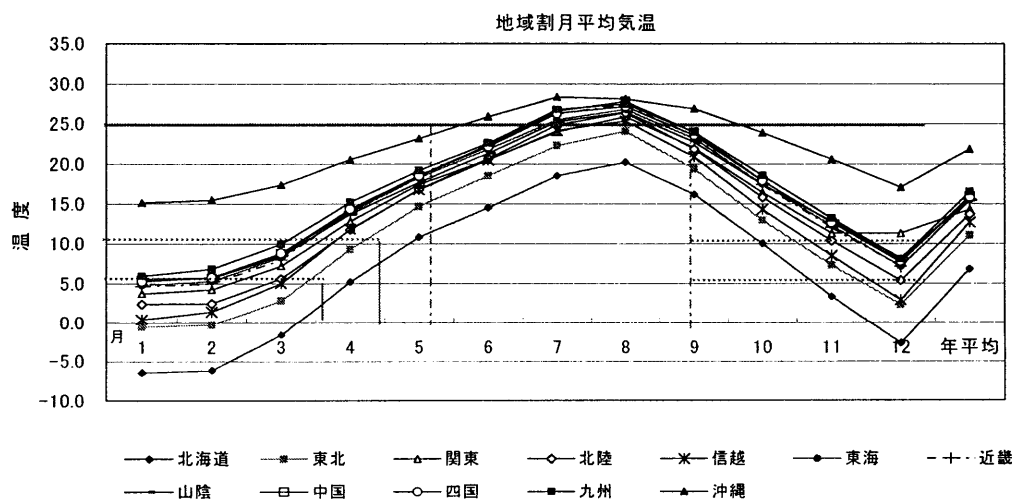


図 8.7 地域別の月平均気温

②セメント種別

セメント種別は、設計、施工計画段階での所要物性値、経済性等の諸条件により決定される。ダム施工で施工実績のある高炉B種セメント、中庸熱ポルトランドセメント、フライアッシュ中庸熱セメントを3水準とした。断熱温度上昇量の特性による効果を注目点とした。

③リフト厚

柱状打設におけるダムコンクリートの一般的リフト厚である 150cm 及びそのハーフリフト厚 75cm(拡張レヤの一般的リフト厚)及びその中間値 100cm を水準にした。リフト厚による温度上昇、内部、外部拘束等を注目点とする。

(2) 施工法，施工選択による因子水準

施工システム，施工法として経験的判断による汎用的工事項目を選択した。コンクリートの境界条件となり温度特性に影響する型枠，養生の 2 因子に関しては，材料による熱伝達率を考えた水準とした。施工法の選択による工程管理(経済性も含めた設備能力選定)と品質管理との整合に注目した打設間隔の水準を設定した。

① 型枠

汎用的型枠であるメタル，木製と寒中コンクリート対策として発泡ウレタン(断熱材)吹付け型枠を 3 水準とした。型枠の養生効果，保温効果等の効果とコンクリート発熱特性を注目点として水準化した。

② 打設面養生

一般的に行われる散水とダムコンクリートの汎用養生である湛水，及び寒中コンクリート対策の断熱マットの 3 水準とした。養生効果の定量化を注目点とした。

③ 打設間隔^{27, 28, 29)}

打設間隔は，施工可能日数，施工時間との関係で工事工程，全体工期を決する時間条件の大きな要素である。また打設能力に関連し設備規模，能力を決する経済的条件ともなる。この因子の効果は，コンクリート品質確保を担保として初めてその有意となる。拡張レヤ打設による実施ダムのリフトスケジュールを中間値とし，最小打設間隔は，フルリフトを打継場合の最短工程である中 4 日養生確保する(ハーフリフトの場合中 2 日により連続的打設工程の場合 4 日となる)5 日と設定した。最大打設間隔は，同ダムを柱状打設した場合の打設間隔 21 日とした。6 因子の水準を表 8.4 に示す。

表 8.4 因子水準表

水準 因子	特性値：単位		水準 1	水準 2	水準 3
上下流面型枠	熱伝達率：Kcal/mm ² hr℃		メタル型枠 1.2×10 ⁻⁵	木製型枠 7×10 ⁻⁵	断熱型枠 1.5×10 ⁻⁶
打設温度	温度：℃	寒中コンクリート	5	8	10
		暑中コンクリート	22.5	25.0	28.0
打設間隔	日数：日		10	5	21
セメント種別	断熱温度上昇量：℃		中庸熟フライアッシュセメント	中庸熟ポルトランドセメント	高炉 B 種
打設面養生	熱伝達率：Kcal/mm ² hr℃		散水養生 12×10 ⁻⁵	湛水養生 5×10 ⁻⁵	断熱マット 2.2×10 ⁻⁶
リフト厚	コンクリート厚：cm		75	100	150

8. 3. 5 解析組合せ

解析組合せは、実験計画法による直交表を採用した。³⁰⁾ 直交表は、取り上げた因子が全て3水準であること、各因子の交互作用を求めたいことから $L_{27}(3, 13)$ を使用した。解析組合せは、寒中コンクリート、暑中コンクリートの2ケースを行った。打設温度以外は、共通因子水準である。直交表による解析組合せを表 8.4 に示す。

表 8.5 直交配列表による因子組合せ

項目	上下 流養 生	打 設 温 度			打 設 間 隔				セ メ ン ト	打 設 面 養 生		リ フ ト 厚		備 考	
														【因子と水準の配置】	
1水準	メ	低			間				フ	散		薄		メ：メタル・木：木製・断：断熱	
2水準	木	基			短				庸	湛		中		低：5or22.5℃・基：8or25℃	
3水準	断	高			長				炉	断		厚		高：10or28℃	
要因	A	B	A × B	A × B	C	A × C	A × C	B × C	D	E	B × C	F	e	短：4日・間：10日・長：21日	
No 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	《因子水準組合せ》	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	A1B1C1D1E1F1	メ低間フ散薄
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	A1B1C2D2E2F2	メ低短庸湛中
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	A1B1C3D3E3F3	メ低長炉断中
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	A1B2C1D2E2F3	メ基間庸湛厚
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	A1B2C2D3E3F1	メ基短炉湛薄
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	A1B2C3D1E1F2	メ基長フ散中
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	A1B3C1D3E3F2	メ高間炉断中
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	A1B3C2D1E1F3	メ高短フ散厚
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	A1B3C3D2E2F1	メ高長庸湛薄
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	A2B1C1D2E3F2	木低間庸断中
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	A2B1C2D3E1F3	木低短炉散厚
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	A2B1C3D1E2F1	木低長フ湛薄
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	A2B2C1D3E1F1	木基間炉散薄
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	A2B2C2D1E2F2	木基短フ湛中
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	A2B2C3D2E3F3	木基長庸断厚
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	A2B3C1D1E2F3	木高間フ湛薄
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	A2B3C2D2E3F1	木高短庸湛薄
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	A2B3C3D3E1F2	木高長炉散中
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	A3B1C1D3E2F3	断低間炉湛厚
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	A3B1C2D1E3F1	断低短フ断薄
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	A3B1C3D2E1F2	断低長庸散中
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	A3B2C1D1E3F2	断基間フ断中
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	A3B2C2D2E1F3	断基短炉散厚
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	A3B2C3D3E2F1	断基長庸散薄
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	A3B3C1D2E1F1	断高間庸散薄
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	A3B3C2D3E2F2	断高短炉湛中
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	A3B3C3D1E3F3	断高長フ断厚

8. 3. 6 温度応力解析

下記マスコンクリート温度応力解析プログラムを用いてF E M(2次元)温度応力解析及びF E M(2次元)応力解析を実施しひび割れ指数よりクラックの発生を予測する．解析プログラムは，A S T E A－M A C S(計算力学研究センターRCCM)を使用した．

(1)解析要素物性値

1)外気温

実施工ダム地点の10年間気温データより最高温度，最低温度を記録した日変化気温を採用する．解析時間は，打設開始から10日間は，4時間刻みの6ステップとしそれ以降は12時間刻みの2ステップとして対応する温度を付与する．

表 8. 5, 図 8. 8 に気温の経時変化を示す．(日平均最高気温 1999. 8. 2, 最低同年 2. 4)

表 8. 6 最高，最低気温経時変化・単位：℃

時刻	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
最高	25.0	24.6	24.3	24.2	23.7	23.6	24.8	26.3	28.4	30.1	32.4	32.8
最低	-5.5	-6.3	-6.6	-6.7	-7.0	-6.8	-7.1	-6.3	-4.1	-2.4	0.3	3.1

時刻	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
最高	34.4	33.6	34.0	33.2	32.1	30.2	29.2	27.9	26.5	26.3	25.8	25.5
最低	2.3	3.5	3.9	3.9	3.5	1.4	-0.3	-1.2	-1.4	-2.0	-2.4	-2.8

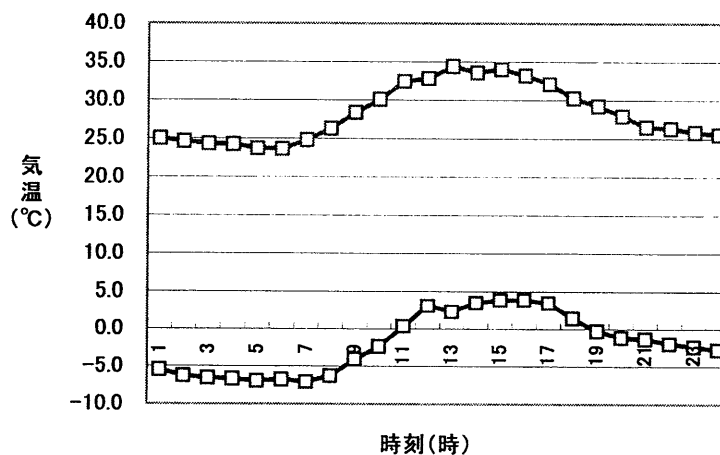


図 8. 8 寒中・暑中気温経時変化(1999 年記録)

寒中，暑中時対応の外気温の平均及び最低，最高気温を表 8. 6 に示す．

表 8. 7 平均，最高，最低温度

区分	日平均気温	日最高気温	日最低気温
寒中コンクリート	-2℃	3.9℃	-7℃
暑中コンクリート	28℃	34℃	24℃

2) ダムコンクリート配合

耐久性を必要とする A 種，重量を必要とする B 種の 2 種類を設定し，表 8.7 に示す。

表 8.8 コンクリート配合表

Notation	W/C %	S/a %	Unit Weight (kg/m³)						Ad AE agent
			W	C	S	G			
						G1	G2	G3	
						80mm	40mm	20mm	
A	51.4	32	113	220	637	495	424	495	0.55
B	72.5	34	116	160	693	491	424	421	0.44

※フライアッシュの混入率は 30%

3) コンクリートの発熱量^{31, 32, 33, 34)}

セメント水和熱から定める方法とコンクリートの断熱温度上昇特性から評価する方法がある。コンクリートから求める場合，セメント種別，単位セメント量，コンクリート温度要素より t 時における断熱温度上昇量を求めることができる。水準に選定したセメント種別の熱的特性は製造元の実験資料より採用した。また境界条件となる断熱材も同様とした。その他材料の特性は，コンクリート標準示方書等から採用した。採用した熱的性質を以下に示す。

①断熱温度上昇特性

断熱温度上昇量の算定は，式 8.1 による。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp^{-\alpha t}) \quad (8.1)$$

Q(t)：材令 t 日における断熱温度上昇量 (°C) Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量 (°C)

α ：温度上昇速度に関する定数

t：材令 (日)

セメント種別，配合（単位セメント量）にコンクリート温度による補正を加えた K， α 値を表 8.9，8.10，8.11 に示す。

表 8.9 寒中コンクリート打設温度と K， α 値

区別項目 セメント種別	練上温度 配合	K_{20}	α_{20}	寒中コンクリート					
				5 °C		8 °C		10 °C	
				K	α	K	α	K	α
中庸熱フライアッシュセメント	A	29.6	0.551	35.52	0.138	33.63	0.220	32.86	0.276
	B	22.44	0.528	26.93	0.132	25.49	0.211	24.91	0.264
中庸熱ポルトランドセメント	A	30.22	0.704	36.26	0.176	34.33	0.28	33.54	0.352
	B	22.36	0.678	26.83	0.169	25.40	0.271	24.82	0.339
高炉 B 種セメント	A	38.58	0.554	46.30	0.139	43.83	0.222	42.82	0.277
	B	30.54	0.446	36.65	0.111	34.69	0.178	33.90	0.223

表 8.10 暑中コンクリート打設温度とK, α 値

区別項目 セメント種別	練上温度 配合	K_{20}	α_{20}	暑中中コンクリート					
				22.5℃		25.0℃		28.0℃	
				K	α	K	α	K	α
中庸熱フライアッシュセメント	A	29.6	0.551	29.30	0.615	29.01	0.689	28.71	0.771
	B	22.44	0.528	22.22	0.590	21.99	0.660	21.77	0.739
中庸熱ポルトランドセメント	A	30.22	0.704	29.92	0.786	29.62	0.880	29.31	0.985
	B	22.36	0.678	22.14	0.757	21.91	0.847	21.69	0.949
高炉B種セメント	A	38.58	0.554	38.19	0.619	37.81	0.693	37.42	0.776
	B	30.54	0.446	30.23	0.498	29.93	0.557	29.62	0.624

表 8.11 寒中, 暑中コンクリート打設温度K, α 補正值

打設温度	5℃	8℃	10℃	22.5℃	25℃	28℃
K_t / K_{20}	1.2	1.136	1.11	0.99	0.98	0.97
α_t / α_{20}	0.25	0.40	0.50	1.117	1.25	1.40

②温度特性を表 8.12 に示す.

表 8.12 温度特性

特性	比熱	熱伝導率	熱伝達率	密度
単位	Kcal/kg℃	Kcal/m hr °C	Kcal/mm ² hr °C	Kg/m ³
コンクリート	0.3	31	12	——
岩盤	0.49	1.23	——	1.800

③熱伝導率 (10⁻⁵Kcal/mm² hr °C) を表 8.12 に示す.

表 8.13 熱伝導率

型 枠			養 生		
メタル型枠	木製型枠	断熱型枠	散水	湛水	断熱マット
12	7	1.5	12	5	2.2

④その他解析要素データを表 8.14 に示す.

表 8.14 その他解析要素

項 目	物 性 値	項 目	物 性 値
ヤング率 (N/mm ²)	JSCE 圧縮強度より	乾燥収縮ひずみ	JSCE 実験式
ポアソン比	0.18	圧縮強度	圧縮強度結果
線膨張係数 (μ /°C)	10	引張強度	JSCE 圧縮強度より
初期温度 (°C)	打込み温度		

(2) 圧縮強度の算定^{34, 35)}

圧縮強度は、3 種セメント使用ダムの実績より強度発現式を算定した。
強度発現式の算定については、コンクリート標準示方書施工編に「温度ひび割れの発生を推定するためには、打ち込まれたコンクリートの引張強度を適切に定めなければならない。コンクリートの引張強度は、セメント種類、水セメント比、骨材の種類、温度履歴、材齢等によるのであらかじめ試験によることが望ましいが近似的に引張強度を求める場合には、次式により圧縮強度を求め圧縮強度から式 8.2, 8.3 を用いて引張強度の近似値を求めるのが一般的である。」として以下の手順が示されている。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+b} f'_c(91) \quad (8.2)$$

$$f_c(t) = c \sqrt{f'_c(t)} \quad (8.3)$$

$f'_c(t)$: 材令 t 日のコンクリート圧縮強度 (N/mm²)

$f_t(t)$: 材令 t 日のコンクリート引張強度 (N/mm²)

$f'_c(91)$: 材令 91 日のコンクリート圧縮強度 (N/mm²)

a, b : セメント種類によってばらつくが表 8.15 表を標準とする。

c : コンクリートの乾燥の程度により異なるが、0.35 を標準とする。

表 8.15 a, b 値

セメントの種類	a	b
普通ポルトランドセメント	4.5	0.95
中庸熱ポルトランドセメント	6.2	0.93
早強ポルトランドセメント	2.9	0.97

※高炉 B 種は、中庸熱ポルトランドセメントと同等値とする。

T ダムのコンクリート温度、ひずみ測定の実測値と FEM 解析値との比較検証するために強度発現式を式 8.2 により推定した。T ダムはフライアッシュ中庸セメントを使用している。同セメントとの整合性も合わせて検証した。式 8.2 より

$$f'_c(t) = t \times f'_c(91) / (a + b \times t) \quad (8.4)$$

$$t / f'_c(t) \times f'_c(91) = (a + b \times t) \quad (8.5)$$

と変形し実測値の圧縮強度を代入し a, b の値より得た式による推定と実測を比較した。A, B 配合の材齢による圧縮強度試験結果をそれぞれ表 8.16, 8.17 に示す。強度発現グラフを図 8.8, 8.9 に示す。

表 8.16 A D配合圧縮強度結果

t (材齢) : 日	f'c(t)	t / f'c(t) × f'(91)
1	3.2	11.3
3	5.9	18.8
7	8.6	29.9
14	13.4	38.7
28	20.8	49.6
91	36.9	91.0

表 8.17 B配合圧縮強度結果

t (材齢) : 日	f'c(t)	t / f'c(t) × f'(91)
1	1.2	16.3
3	1.8	32.2
7	2.3	58.5
14	3.9	67.1
28	7.9	76.1
91	18.9	91.0

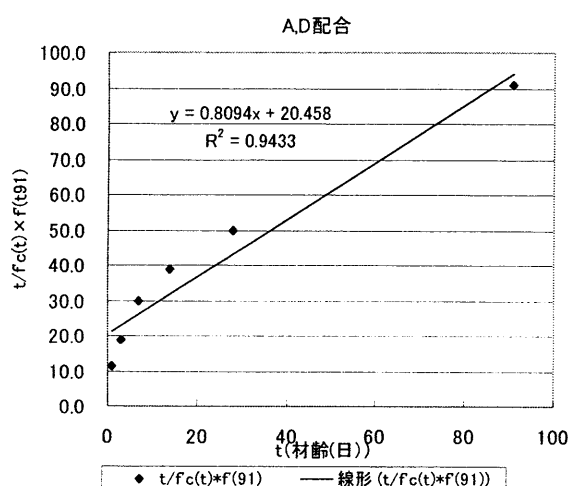


図 8.8 A 配合強度発現グラフ

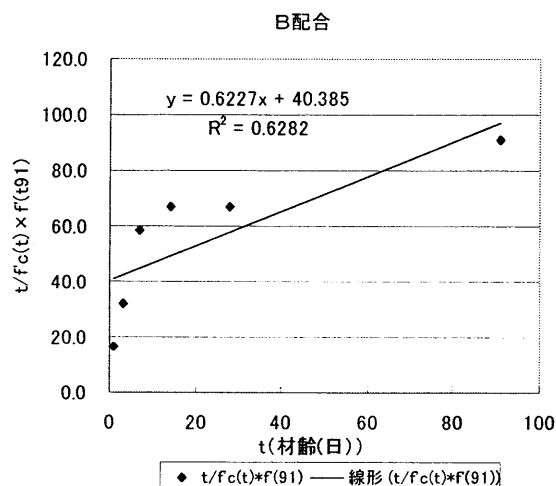


図 8.9 B 配合強度発現グラフ

強度発現グラフより求めたA, B配合の(a + b t)式は8.6、8.7式となる。

$$t/f'c(t) \times f'c(91) = 20.458 + 0.8094 \times t \quad (8.6)$$

$$t/f'c(t) \times f'c(91) = 40.385 + 0.6227 \times t \quad (8.7)$$

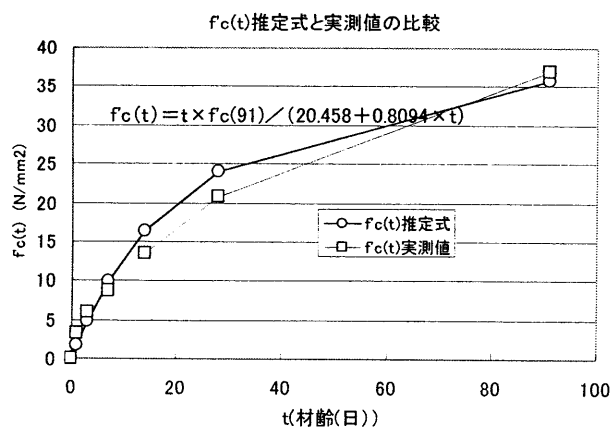


図 8.10 A 種配合推定式と実測値比

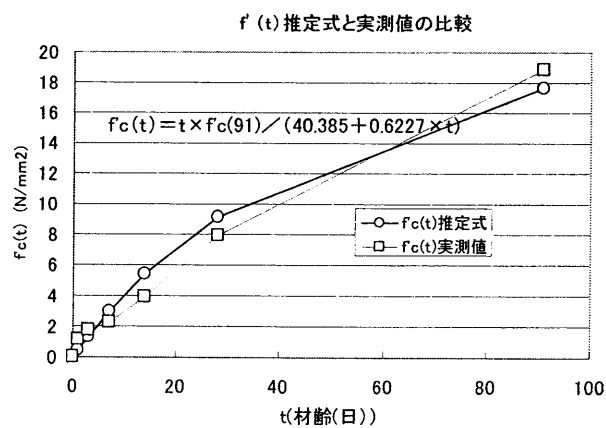


図 8.11 B 種配合推定式と実測値比

表 8.18 A 配合推定式と実測値比較

t (材齢) : 日	f'c(t)推定式	f'c(t)実測値
1	1.7	3.3
3	4.8	5.9
7	9.9	8.6
14	16.3	13.4
28	24.0	20.8
91	35.7	36.9

表 8.19 B 配合推定式と実測値比較

t (材齢) : 日	f'c(t)推定式	f'c(t)実測値
1	0.5	1.2
3	1.3	1.8
7	3.0	2.3
14	5.4	3.9
28	9.1	7.9
91	17.7	18.9

低発熱混合セメントの圧縮強度発現式の係数 a, b の参考値 (表 8.20) と試験結果による推定式係数と水セメント比を表 8.21 に示しこの結果を比較する³²⁾.

表 8.20 低発熱セメント強度発現式係数(参考値)

水セメント比 : %	f' c(t)=f' (91)・t / (a+bt) の各係数		
	a	b	
45	13.5	0.87	40.0
50	13.9	0.86	31.5
65	15.5	0.84	26.0

表 8.21 実測値による推定式係数

水セメント比	配合	a	b	f' (91)
51	A 種	20.46	0.81	37
72.5	B 種	40.39	0.62	19

配合と水セメント比により a 値が大きく異なる. 他のセメント種別と比較して a 値は 1.5 倍~2.5 倍程度の値を示している. b 値は, 中庸熱ポルトランドセメントと比して 2/3 程度~0.9 程度と小さくなっている. この結果からは, 低発熱セメントの初期強度発現の特性は, 母材セメント成分, 混合材の種類と混合割合, および粉末度等によりその強度発現がかなり相違すると考えられる. A 種配合の係数に関しては, 参考値に比較的近い値となった.

しかし, 圧縮強度実測値と推測値との値は精度のよい整合とはいえないため, 積算温度による強度発現式の算定を行った.

前式によるグラフを注目すると材齢により強度発現勾配が異なる点に注目し, 積算温度 (対数換算をしない) を 20,000 (材齢 28 日 20,160) °C h を境界に二分し圧縮強度との関連による近似式を算定した. 図 8.12 に積算温度と圧縮強度グラフ、表 8.22 に近似式による値と実測値を示す.

表 8.22 推定式と実測値比較

材齢(日)	積算温度 M ℃h	f _c (t) (N/mm ²)	強度発現式 (N/mm ²)
1	720	3.3	4.4
3	2160	5.9	5.7
7	5040	8.6	8.3
14	10080	13.4	12.8
28	20160	20.8	21.9
91	65520	36.9	36.9

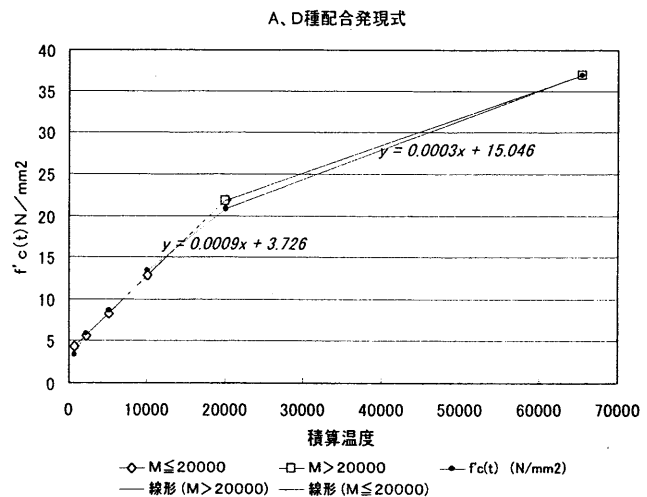


図 8.12 積算温度と圧縮強度

この結果、近似式と実測値はほぼ整合する。従いこの手法によりダムコンクリートの使用実績のセメント種別による強度発現を推定式にまとめ、当解析の強度発現に採用した。セメント種類、配合は以下の通りである。それぞれ 3 種類による検討を行った。セメント種別および配合を表 8.23 に示す。

表 8.23 セメント種別配合表^{36~40)}

中庸熱ポルトランドセメント															
ダム名	配合種別	粗骨材最大寸法	スランプ	空気量	水セメント	フライアッシュセメント	細骨材比	水	セメント	細骨材	150mm	80mm	40mm	20mm	混和剤
蓮ダム	内部	150	4±1	3.0±1	68.8		26	110	160	541	316	473	395	395	136cc
	外部	150	4±1	3.0±1	47.4		22	109	230	446	324	486	405	405	196cc
	構造物	80	7.5±1	4.0±1	50.4		31	141	280	589		470	470	403	154cc
一庫ダム	内部	150	4±1	3.0±1	70		27.5	112		612	50~70mm, 70~30mm, 30~5mm				84cc
	外部	150	4±1	3.0±1	50.5		24.5	111		549					126cc
	構造物	70	5±1	3.5±1	50		29	125	250	601		705	796		150cc
高炉B種・大島スラグ55%:岩村スラグ51%															
大島ダム	内部	150	4±1	3.5±1	65.8	0	24	102	155	559	150~60	60~20		20~5	
	外部	150	4±1	3.5±1	50	0	26	97	194	511	606	478		510	3.88
	構造物	60	8±2	4.5±1	48.5	0	30	126	260	591	616	486		519	5.24
岩村ダム	内部	80	4±1	3.5±1	74	0	28	111	150	577		80~40	40~20	20~5	
	外部	80	4±1	3.5±1	54	0	28	114	210	560		594	440	490	0.375
	構造物	40	8±2	4.5±1	58	0	38	145	250	708		576	428	477	0.525
中庸熱フライアッシュセメント															
三春ダム	内部	150	4±1	3.5±1	80	42	23	112	98	501	425	426	425	423	3.88
	外部	150	4±1	3.5±1	48	72	23	115	168	478	404	406	404	403	5.24
	構造物	60	8±2	4.5±1	48	75	25	125	175	504		552	520	488	5.72
竹谷ダム	内部	150	4±1	3.5±1	72.5	48	34	116	112	693		80~40	40~20	20~5	
	外部	150	4±1	3.5±1	51.4	66	32	113	154	637		491	424	421	0.400
	構造物	60	8±2	4.5±1	44.8	75	31	112	175	609		495	424	495	0.550
												496	424	425	0.625

配合による強度試験結果を積算温度により整理すると図 8.13～8.15 の結果となる。

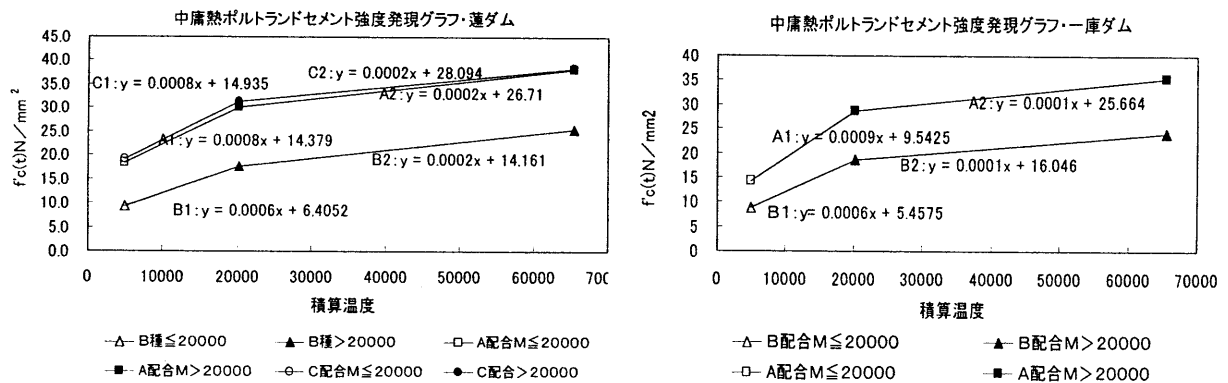


図 8.13 中熱ポルトランドセメント

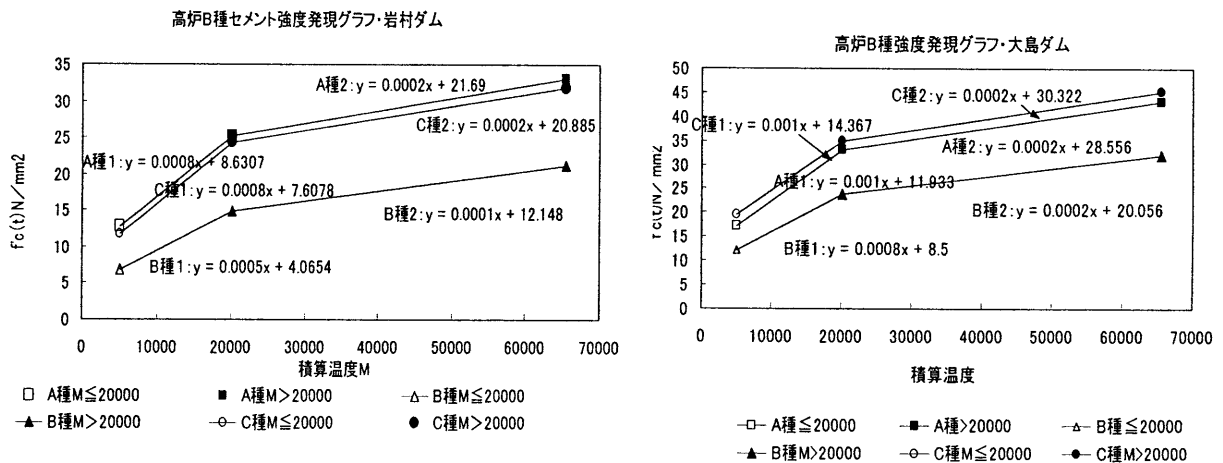


図 8.14 高炉B種セメント

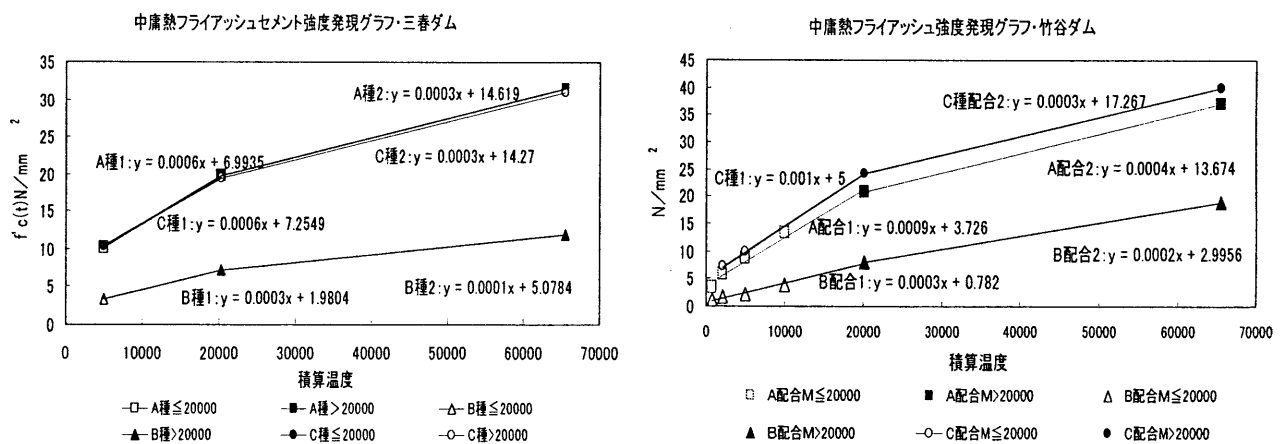


図 8.15 中熱フライアッシュセメント

セメント種別、配合別に強度発現勾配に注視し近似式の係数を表 8. 23 に整理する。

表 8. 24 セメント種別，配合別による強度発現勾配

種別	積算温度：M≤20000						積算温度：M>20000					
	中庸熟フライッシュ		高炉B種		中庸熟ポルトラン		中庸熟フライッシュ		高炉B種		中庸熟ポルトラン	
配合	竹谷	三春	岩村	大島	蓮	一庫	竹谷	三春	岩村	大島	蓮	一庫
A	0.0009	0.0006	0.0008	0.0010	0.0008	0.0009	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001
B	0.0003	0.0003	0.0005	0.0008	0.0006	0.0006	0.0002	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0001
C	0.001	0.0006	0.0008	0.0010	0.0008		0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	

この結果を各セメント種別，配合別に考察する。

①セメント種別

②中庸熟ポルトランドセメント（表 8. 25）

表 8. 25 中庸熟ポルトランドセメント

	セメント量	M ≤ 20000	M > 20000
蓮	160	0.0006	0.0002
一庫	160	0.0006	0.0001
蓮	230	0.0008	0.0002
一庫	220	0.0009	0.0001

M≤20,000 の場合単位セメント量により強度発現勾配は 1.3～1.5 倍となるが M>20,000 となると変わらない。積算温度が M≤20,000 と M>20,000 での強度発現勾配は、単位セメント量が多いほど勾配が大きく変化する。1.3～1.5 倍(1:3→1:4, 1:6→1:9) となる。

③高炉セメント

表 8. 26 高炉B種セメント

	セメント量	M ≤ 20000	M > 20000
岩村	150	0.0005	0.0001
大島	155	0.0008	0.0002
岩村	210	0.0008	0.0002
大島	194	0.001	0.0002

積算温度区分による強度発現勾配は単位セメント量に変化しても大きな変化はない。(5:1→4:1・4:1→5:1)

中庸熟ポルトランドセメントと同様に積算温度 M≤20,000 では、単位セメント量により 1.5～1.3 倍程度となるが M>20,000 では大きな変化はない。

③中庸熱フライアッシュセメント

表 8.27 高炉 B 種セメント

	セメント量	$M \leq 20000$	$M > 20000$
竹谷	160	0.0003	0.0002
三春	140	0.0003	0.0001
竹谷	220	0.0009	0.0004
三春	240	0.0006	0.0003

積算温度 $M \leq 20,000$ で単位セメント量により発現勾配が 2~3 倍と大きく変化する。他のセメントと比較して一番大きな変化である。積算温度 $M > 20,000$ 以上でも単位セメント量により 2~3 倍の発現勾配となっている。

同一セメント量の発現勾配は、積算温度分界点 $M \leq 20,000$ と $M > 20,000$ 以上では他のセメント (5:1.8:2, 10:2, 6:2, 8:2 等) と比較して勾配差 (3:2, 3:1, 9:4, 6:3) が小さい。

②セメント種別のまとめ

中庸熱フライアッシュセメントは、単位セメント量により強度発現勾配が中庸熱ポルトランドセメント、高炉 B 種セメントと比較して大きく (2~3 倍) 変化する。また積算温度 $M \leq 20,000$ と $M > 20,000$ の強度発現勾配変化は他の 2 種と比較して小さい。中庸熱ポルトランドセメントと高炉 B 種セメントは、 $M \leq 20,000$, $M > 20,000$ 以上の強度発現勾配は比較的近似している。積算温度 20,000 を境界とした勾配を比較すると $M \leq 20,000$ の方が 3~5 倍大きくなっている。

またこの 2 種の単位セメント量による勾配を比較した値は、単位セメント量の 60~80kg 増加に対して 1.3~1.5 倍程度の変化である。

③配合別 (単位セメント量による比較) のまとめ

A, B 配合によるセメント種別ごとの強度発現を同一グラフにして図 8.16、8.17 に示す。このグラフで前述の比較が明白に示されている。

長期強度発現は、単位セメント量が $200\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の A 種では、セメント種別による大きな変化がなくなるのに対し $150\text{kg}/\text{m}^3$ 前後の貧配合では、明確な違いが生じる。

圧縮強度発現について、3 種類のセメントについて 2 ダムを比較検討した。3 種のセメント、配合別ともに積算温度 $20000^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ を境界の求めた近似式が実測値と整合することを確認した。本解析にはこの結果による近似式を適用する。

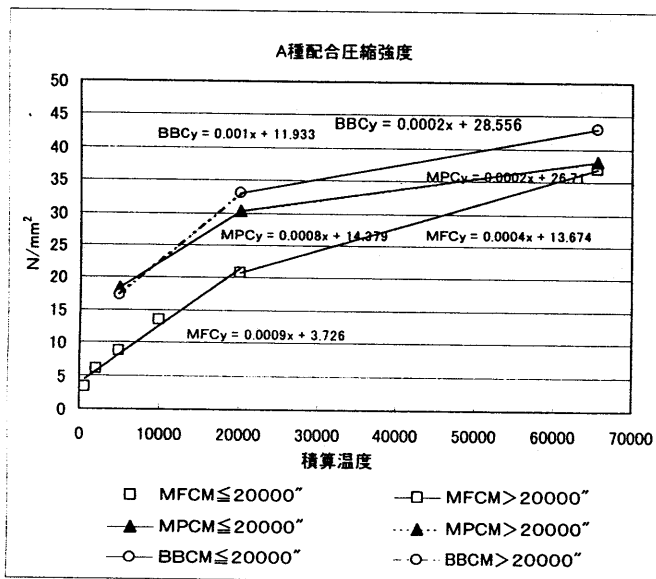


図 8.16 A 種配合・3 種セメント圧縮強度と積算温度

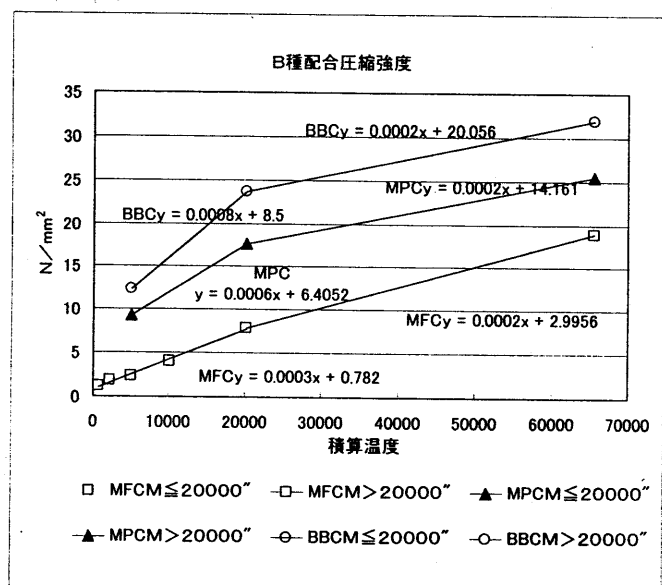


図 8.17 B 種配合・3 種セメント圧縮強度と積算温度

(3) 解析モデル

施工中のダム（図）8.18）をモデル化して図 8.19 に示す。

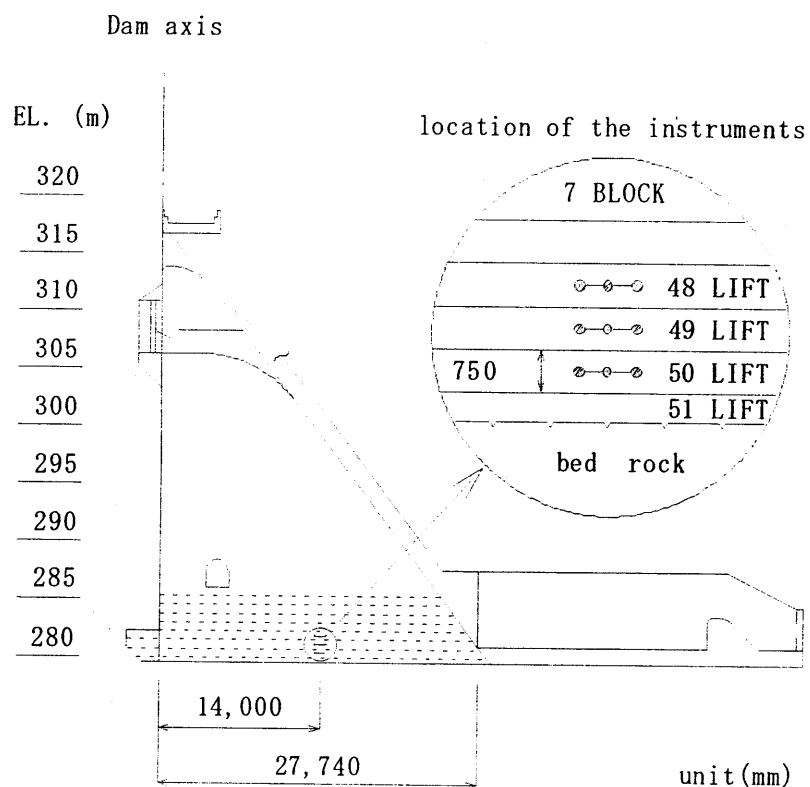


図 8.18 施工中ダム標準断面およびリフト図

解析要素の選択は下記の理由による。

要素 1：表面部 10 c m 耐久性を必要とする部位。寒中コンクリートにおいては、コンクリート温度の保持が重要な部位となる。

要素 2：ブロック全体の温度応力(クラック)に対する外部拘束(岩盤による)が大きく危険な位置

要素 3：内部応力による温度拘束ひび割れの危険性が高く、打設リフトの影響が顕著に現れる部位

要素 4：打設による(打継による)、内部、外部拘束によるひび割れの危険性の高い部位

8. 4 解析結果の分析方法^{41, 42, 43, 44, 45)}

解析は、実験計画法による組合せを F E M 解析し、要素ごとの注目点による「指標」の整理は分散分析手法によって行う。

8. 4. 1 実験計画法

(1)はじめに

問題を解決する一般的方法として、特性要因図がよく用いられる。問題とする(特性)を形成する原因と考えられる(要因)の列举により骨格状にまとめるかあるいは系列図に整理する方法である。これらの手法の欠点は、その作用に対応する検証が定量的に明確とならないことである。つまり概念としての定性的な判断評価にとどまることである。これに対して、要因のレベルを動かして結果の変化より要因の寄与率(要因による純変動＝誤差の影響を除いた要因効果の総平方和に対する割合)をデータにより把握する解析が実験計画法である。

実験計画法 (Design of Experiments) は、1925 年頃英国の R. A. Fisher によって農業実験の合理化のために開発された実験設計の方法論である。この論文は、ラテン方格と呼ばれる実験配置法に関するもので、無作為配置法の提案である。実験配置を考える場合には、先ず局所管理の原理により系統的な誤差をできるだけ固有技術の知識を利用して取り除き、それでも残る無意識な系統誤差を無作為の原理により偶然誤差に転化させ、さらに反復の原理によりそれらの誤差の大きさを誤差分散として評価する。実験計画法は、試験または比較実験 (Comparative Experiment) を前提としている。従い実験誤差の性質を正しく把握し推計学的な判断基準が必要となる。

(2) 実験計画の分類

実験計画法は以下の①～③の手法がある．一般に実験結果を解析する場合，求めたデータの成り立ちを固有技術の知識および最初の実験の計画に従っていくつかの成分に分けて示す式構造模型により各方法を示す．

構造模型は，式 8.8 で示される．

$$y_{ij} = A_i + B_j + e_{ij} \quad (8.8)$$

A：実験の因子の効果を表す成分 B：層別された実験の場の効果を表す成分

e：実験の環境からくるバラツキ（実験誤差）

①完全無作為化法（Completely Randomized Block）

実験の場全体に対して 1 因子の各水準を時間的，空間的に全く無作為に割り付ける方法である．構造模型は式 8.9 で表される．

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij} \quad (\mu : \text{平均値}) \quad (8.9)$$

②乱塊法（Randomized Blocks）

実験の場を構成する実験条件の中の 1 つを層別することによりその異質性を実験誤差の中から取り去り制御因子の各水準間比較の効率を高めようとする割付である．構造模型は式 8.10 で表される．

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij} \quad (8.10)$$

α ：水準効果 β ：層別因子の層効果 e_{ij} ：実験誤差を示す

③ラテン方格法（Latin Square）

この配列は，実験の場を構成する実験条件の中の 2 つを層別することによりその異質性を実験誤差の中から取り去るよう工夫された割付である．図 8.21 に示す．

因子 水準 \	C 1	C 2	C 3	C 4
B 1	A 1	A 4	A 2	A 3
B 2	A 4	A 3	A 1	A 2
B 3	A 3	A 2	A 4	A 1
B 4	A 2	A 1	A 3	A 4

図 8.21 ラテン方格割付図

構造模型は 8.11 式で表される．

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + e_{ijk} \quad (8.11)$$

α ：制御因子の i 番目の水準効果 β ：方格の j 番目の行効果

γ ：方格の k 番目の列効果 e_{ijk} ：実験誤差を示す

いずれの実験計画も，種々の条件の変更実験を行い，有用な条件（要因）を探

し（解析），ある処理を施した結果，特性値の平均が μ_0 から μ_1 に変化した場合， $\mu_1 - \mu_0$ を処理による効果と称し，この μ_0 ， μ_1 の変化についてデータの変動か，効果かを統計的に判断する手法である．その判断手順を図 8.22 のフローで示す．

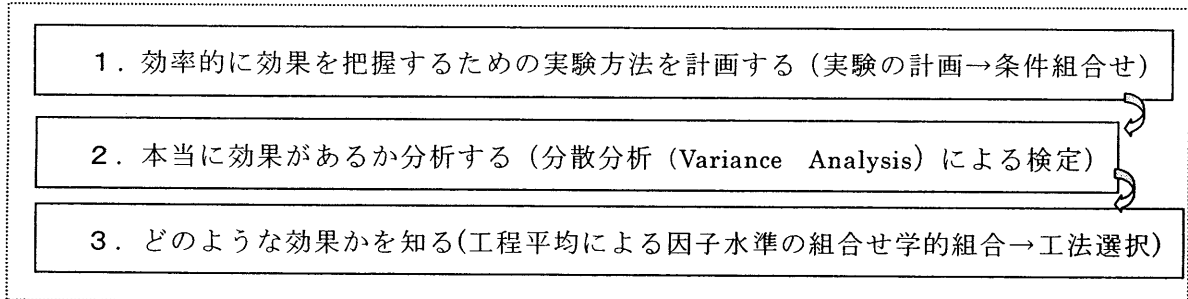


図 8.22 実験計画法による統計処理手順図

（3）直交配列による条件組合せ

特性の要因を解析するために取りあげた因子 A, B, C, … についてそれぞれ a, b, c 水準を選び各水準の組合せの全てを実験するものを要因実験と称し，因子数により一次元配置，二次元配置と呼ぶが 3 因子以上の場合を多次元配置と称する．このような多次元配置による，特性の改善に寄与すると考えられる因子を三つ以上取りあげて A, B, C, … についてそれぞれ a, b, c 水準として合計 abc… 種類の組合せ実験をランダムな順序で行った実験を多次元配置実験といい，因子水準数が不揃いの場合や，比較的簡単に多くの実験ができる場合には，多次元配置実験を行えば全ての因子間の交互作用（二つ以上の条件を組合わせた場合それぞれの効果の和では表せない場合に交互作用があるといい，ある因子の水準の変更により特性が変わることを意味する）も検証できる．また誤差の自由度も大きくなるため精度の良い推定が可能となる．

多次元配置実験に対して，取り上げた因子水準の全ての組合せを実施する実験を要因実験というが，この方法では，因子の数が増えると急激に実験数が増加する．多くの因子から 1 因子を取り出して，他の因子水準を一定にして行う因子実験に比べていくつかの因子を同時に取り上げる因子実験が優れているのは交互作用が見られる点と多くの因子を同時に取り上げることによって実験結果の普遍性，再現性が高まる点である．問題は，数多く考えられる因子をどのように限られた実験処理の中におり込むかということになる．一般的に考えれば，因子の数を減らすか水準数を減らすかということになる．p 水準の q 因子を取り上げる要因実験を p^q 型要因実験と称し，例えば全て 2 水準の 10 因子とすれば，その処理数は $t = 2^{10} = 1024$ となり実施不可能に近い．一方交互作用は，それより低次の要因を定義して行った残りとして，順次定義されるのであって，2 因子交互作用は技術的に

も重視すべきであるが一般的には高次交互作用の効果は無視できる場合が多く4因子交互作用以上になると具体的な意味を求めることも困難になる。繰り返しのない多因子要因実験では、普通これら高次の交互作用は存在しないものとして誤差と見なす計画解析が行われる。因子の増加にともなって残りの自由度があまり増えるのはむだと考えられる。

表 8.28 p^q 型要因実験 (p 因子 q 水準)

実験の型	処理数	自由度の配分		
		主効果	2因子交互作用	残り
2^4	16	4	6	5
2^5	32	5	10	16
2^6	64	6	15	42
2^7	128	7	21	99
2^8	256	8	28	219
2^9	512	9	36	466
2^{10}	1024	10	45	968
3^3	27	6	12	8
3^4	81	8	24	48
3^5	243	10	40	192
3^6	729	12	60	656
4^3	64	9	27	27
4^4	256	12	54	189
4^5	1024	15	90	918
		$(p-1) \times q$		

そこで技術的に解釈の難しい高次の交互作用や、固有技術面の検討によって存在しないとわかった交互作用を無視すれば全ての水準組合せの実験をしないで一部分だけの実験（一部実施法）ですますことができる。一部実施実験は、限られた実験で必要な因子効果を能率よく求める方法として採用される。この方法に有効な手段が直交表を用いた実験である。その処理の決定として、直交ラテン方格を発展させた直交表（直交配列表：orthogonal array）が採用される。

直交表の採用には、各因子の水準数が全て等しい場合（ p 水準）が基本となる。直交表には、二水準系の $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{16}(2^{15})$, $L_{32}(2^{31})$ と三水準系 $L_9(3^4)$, $L_{27}(3^{13})$ がある。直交表は、どんな列を選んでも各組合せが同数回ずつ現れる組合せである。その直交計画の特性である直交（Orthogonal）は、実験計画法で、無作為、繰り返し、層別と並ぶ重要な原理である。⁴⁶⁾ 乱塊法では、第 j 処理を施したデータ y_{ij} は、処理効果と同時にブロックの影響を受けるが、全体としては、ブロックの影響は、各処理について均等であるから処理平均の比較はブロック効果と無関係に行われる。AB 2 因子による二元配置でも AB の主効果は独立に求められ、水準間の比較は独立に行える。このような実験は、1つのデータ y_{ij} が y_i と y_j の二重に使える点で単因子実験より効果が高い。これは、要因実験の要因効果が

お互いに直行する空間で考えられているところからきている．このような性質を幾何学的な概念である直行ということばを使って直交性といい，直交性を持った実験を直交計画と称する．直交表による一部実施実験は，さらに直交原理を取り入れて1つのデータを何重にも使って効率を上げようとするものである．

ABの2因子による二元配置実験で $A_i B_j$ の処理を受けるデータ y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b$) はa行b列の2元表に書くことができる．

y_{ij} を成分とする $t = ab$ 次元のベクトルを y ，第 i 行に相当する成分のみ1で他は0であるベクトルを u_i ，第 j 列に相当する成分のみ1で他は0であるベクトルを v_j とすると， u_i, v_j には次の性質がある ($u \cdot v$ はベクトル u, v の内積をあらわす)

$$u_i \cdot u_i = b \quad u_i \cdot u_{i'} = 0 (i \neq i') \quad (i, i' = 1, \dots, a)$$

$$v_j \cdot v_j = a \quad v_j \cdot v_{j'} = 0 (j \neq j') \quad (j, j' = 1, \dots, b)$$

$$u_i \cdot v_j = 1 \quad (i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, b)$$

$$\sum_{i=1}^a u_i = \sum_{j=1}^b v_j = u_0 \quad u_0 = (1, \dots, 1) \quad (8.12)$$

u_i の組， v_j の組では， u_i と v_j の組では， u_i と $u_{i'}$ ， v_j と $v_{j'}$ の内積は全て0であるから2組はそれぞれ直交ベクトル系である．(原点を通る二直線が直交すればその二点の積の和はゼロとなる)

$$y_a \equiv \sum_{i=1}^a \overline{y_i} u_i, y_b \equiv \sum_{j=1}^b \overline{y_j} v_j : y_0 \equiv \overline{y} u_0 \quad (8.13)$$

$$y_a - y_0 = \sum_{i=1}^a (\overline{y_i} - \overline{y}) u_i \quad y_b - y_0 = \sum_{j=1}^b (\overline{y_j} - \overline{y}) v_j \text{ とおくと}$$

$y_a - y_0$ はABの主効果を表すベクトルでそれぞれベクトル u_i, v_j の在る空間にあるが $\overline{y_i} - \overline{y}$ ， $\overline{y_j} - \overline{y}$ は次式の制約があるので，あらゆる値を自由とるわけでない．その次元(自由度) $a - 1$ ， $b - 1$ 次元の部分空間内で行われ両者は独立となる．

$$\sum_{i=1}^a (\overline{y_i} - \overline{y}) = 0, \sum_{j=1}^b (\overline{y_j} - \overline{y}) = 0 \quad (8.14)$$

$y - y_0 = (y_a - y_0) + (y_b - y_0) + (y - y_a - y_b + y_0)$ とすれば右辺の3つのベクトルはお互いに直交する．左辺のベクトルの長さの2乗はその直交成分 $y_{ij} - \overline{y}$ の2乗和すなわち y_{ij} の全平方和 S であり，これは，右辺のお互いの直交する3つのベクトルの長さの2乗和で表される(平方和の直交分)下記式が成立する．

$$S_e = S - (S_A + S_B), \quad \phi_e = \phi - (\phi_A + \phi_B) = (a - 1)(b - 1) \quad (8.15)$$

ただし

$$S = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - CT, \quad \langle \phi = N - 1 = ab - 1 \rangle, \quad \langle V_e = \frac{S_e}{\phi_e} \rangle$$

$$S_A = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^a T_{i\cdot}^2 - CT, \phi_A = a - 1, V_A = S_A / \phi_A \quad (8.16)$$

$$S_B = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^b T_{\cdot j}^2 - CT, \phi_B = b - 1, V_B = S_B / \phi_B \quad (8.17)$$

従い $a = b = p$ のとき $t = p^2$ 次元で考えることになる. $p \times p$ ラテン方向に第 3 の実験因子 C を対応させ第 k 水準のみ 1 で他は 0 である p 次元のベクトル w_k ($k = 1, 2, \dots, p$) を u_i, v_j に加えて同様に $y_c - y_0$ を考える. これは $y_a - y_0, y_b - y_0$ と直交し平方和 S は A, B, C の平方和との残差の平方和に直交分解される. p が素数または素数のべきであれば, $p \times p$ のお互いの直交するラテン方格が $p - 1$ 個存在するからこれらを用いてそれぞれ $p - 1$ 次元のお互いに直交する 2 (行, 列) + $(p - 1) = p + 1$ 個のベクトルを考えることができ, 平方和 S については自由度 $(p - 1)$ の $(p + 1)$ 成分への直交分解が成立する. 当研究で使用する水準数 3, 交互作用を含む場合の直交表 3^q 型要因実験は, 直交の各交互作用を各因子の水準 i, j, k から $(m_{1i} + m_{2j} + m_{3k} + \dots \text{mod. } 3)$ で表される自由度 2 の直交成分に分解することにより一般の直交表 $L_t(3^k)$ により作成される.

・ $t = 3^q$ は処理数 (行数) ・ k は列の数 $\{k = (t - 1) / 2\}$ を表す.

この行列に求めるべき要因を割り付けることにより 3^q 型要因実験 ($q' > q$) の一部実施実験の処理が決定される. 3^3 型から $t = 3^3 = 27, k = (27 - 1) / 2 = 13$ $L_{27}(3^{13})$ および交互作用表は, 表 8.29, 表 8.30 となる.

割付成分	A	B	AB	AB	C	AC	AC	BC	D	e	BC	e	e
群	A	B	AB	A ² B	C	AC	A ² C	BC	ABC	A ² BC	B ² C	AB ² C	A ² B ² C
No 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	3	1	2	3	1	2	3	1
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

表 8.29 $L_{27}(3^{13})$ 直交表

No 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	※	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11
2		※	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12
3			※	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6
4				※	2	13	11	12	12	13	11	10	8
5					※	10	8	9	6	7	5	7	5
6						※	12	13	11	13	11	12	9
7							※	1	1	2	3	4	3
8								※	7	6	11	13	12
9									※	3	4	2	3
10										※	12	11	13
11											※	1	4
12												※	8
13													※

表 8.30 $L_{27}(3^{13})$ 直交表

3 因子交互作用の分解にはいくつかの可換成分がある。A×B を AB と A²B に分けておいてこれに C をかけると考える。AB と A²B に C をかけるときにそれぞれ 2 通りの方法をとると 3 因子交互作用は以下の 4 つの成分に分かれる。

$$AB \times C \quad \begin{cases} ABC : (\alpha \beta \gamma)_{i+j+k} \\ A^2B^2C : (\alpha^2 \beta^2 \gamma)_{2i+2j+k} \end{cases}$$

$$A^2B \times C \quad \begin{cases} A^2BC : (\alpha^2 \beta \gamma)_{2i+j+k} \\ (A^2B^2)^2C \rightarrow AB^2C : (\alpha \beta^2 \gamma)_{i+2j+k} \end{cases}$$

$$(\alpha \beta \gamma)_{i+j+k} = (\alpha \beta \gamma)_{i+j+k} + (\alpha^2 \beta^2 \gamma)_{2i+2j+k} + (\alpha^2 \beta \gamma)_{2i+j+k} + (\alpha \beta^2 \gamma)_{i+2j+k} \quad (8.18)$$

$$i+j+k, 2i+2j+k, 2i+j+k, i+2j+k = 1, 2, 3 \pmod{3}$$

$$\langle \langle 3^3 \text{型から } t=3^3=27, k=(27-1)/2=13 \rangle \rangle$$

この 3 水準系の直交表の性質は

④各列の水準 (1, 2, 3) は必ず同回数 (t/3) 表れる。

⑤任意の 2 列をとると水準組合せ (1, 1) (1, 2) (1, 3) (2, 1) (2, 2) (2, 3) (3, 1) (3, 2) (3, 3) は必ず同回数 (t/9 回) 表れる。

⑥任意の 2 列 X Y の水準を i, j (1, 2, 3) とするとき水準記号が i+j, または 2i+2j (mod. 3) と一致する列が k 列中にただ 1 列存在する。

$$(1, 1) (2, 3) (3, 2) \rightarrow 0$$

$$(1, 2) (2, 1) (3, 3) \rightarrow 1 (i+j) \text{ または } 2 (2i+2j)$$

$$(1, 3) (3, 1) (2, 2) \rightarrow 2 (i+j) \text{ または } 1 (2i+2j)$$

となる Z 列が存在する。列の成分を X, Y, Z とすると

$$i+j \text{ と一致する場合 : } XY=Z \quad 2i+2j \text{ と一致する場合 : } X^2Y^2=Z$$

⑦は⑥と同様に任意の X, Y 列をとったとき水準記号が 2i+j または i+2j (mod. 3) と一致する (Z') 列がただ 1 列存在し次の関係がある。

$$2i+j \text{ と一致する場合 } X^2Y=Z' \quad i+2j \text{ と一致する場合 : } X^2Y^2=Z'$$

の 4 項目である。

交互作用の割付について、X, Y 列に因子 A, B を割り付けるとき、A×B (φ_{A×B}=4) は Z, Z' 列に分解される。従い A×B を求める必要があるときこれを Z, Z' にわりつけ、他の要因に個々に割り付けないようにする。Z, Z' 列は、交互作用表により与えられるが成分記号 X, Y から Z, Z' を求めることができる。例えば 8, 12 列に AB を割り付けると X=BC, Y=AB²C と A×B は 3, 7 列となる。

$$X^2Y^2 = (BC)^2 \cdot (AB^2C)^2 = A^2B^6C^4 \rightarrow A^2C (7) \text{ 列} \quad X^2Y \rightarrow A^2C \text{ の列はない}$$

$$X^2Y = (BC)^2 \cdot (AB^2C) = AB^4C^3 \rightarrow AB (3) \text{ 列} \quad XY^2 \rightarrow A^2B^2 \text{ の列はない}$$

(7) (3) 列は X²Y², X²Y に相当するから (8) (12) 列の水準を i, j とすると

$$(\alpha \beta)_{ij} = (\alpha^2 \beta^2)_{2i+2j} + (\alpha^2 \beta)_{2i+j}$$

のように $A \times B$ の $A^2 B^2$ および $A^2 B$ 成分が (7) (3) 列になる. $A \times B$ の直交性分による分解は以下の 4 通りとなり, これらは可換である.

$$\text{i : } AB \text{ (又は } A^2 B^2) + A^2 B \text{ (} AB^2) \quad \cdot \text{ ii : } (\alpha \beta)_{ij} = (\alpha \beta)_{I+j}$$

$$\text{iii : } (\alpha^2 \beta^2)_{2i+2j} + (\alpha^2 \beta)_{2i+j} \quad \cdot \text{ iv : } (\alpha \beta^2)_{i+2j}$$

つまり, AB と $A^2 B^2$, $A^2 B$ と AB^2 は 2 乗してベキを mod. 3 で計算すると一方から他方に移行する. 直交表の成分記号(表 8.29)はこの可換成分のどれかを使っている. 直交表可換成分を表 8.31 に示す.

表 8.31 直交表可換成分

$$\begin{aligned} (AB)^2 &= A^2 B^2, (A^2 B^2)^2 = A^4 B^4 \rightarrow AB, \\ (A^2 B)^2 &= A^4 B^2 \rightarrow AB^2, (AB^2)^2 = A^2 B^4 \rightarrow A^2 B \end{aligned}$$

(4) 要因の割り付けと点線図⁴⁷⁾

直交表を用いて交互作用のある実験を行う場合, 取り上げた因子の交互作用の計算される列番が決まっているので列番に割り付ける要因は決まっている. 列番の因子割付が正しくないとその平方和には交互作用を示す両者の効果が交絡して分離できなくなる. 従い交互作用については, 技術的な見地から十分協議して実験をはじめる前に取捨選択することが必要になる. 必要な主効果と交互作用とを交絡することなく得る実験を計画する方法として線点図を用いる. 因子をどの列に割り付けたら良いかを簡単にわかるように作られたのが線点図である. 線点図は, ①点も線もそれぞれ一つの列を表している. ②点と点の間の線は交互作用の現れる列を表している. $L_{27}(3^{13})$ の点線図に, 当研究の解析因子を当てはめその交互作用列を図 8.23, 8.24 に示す.

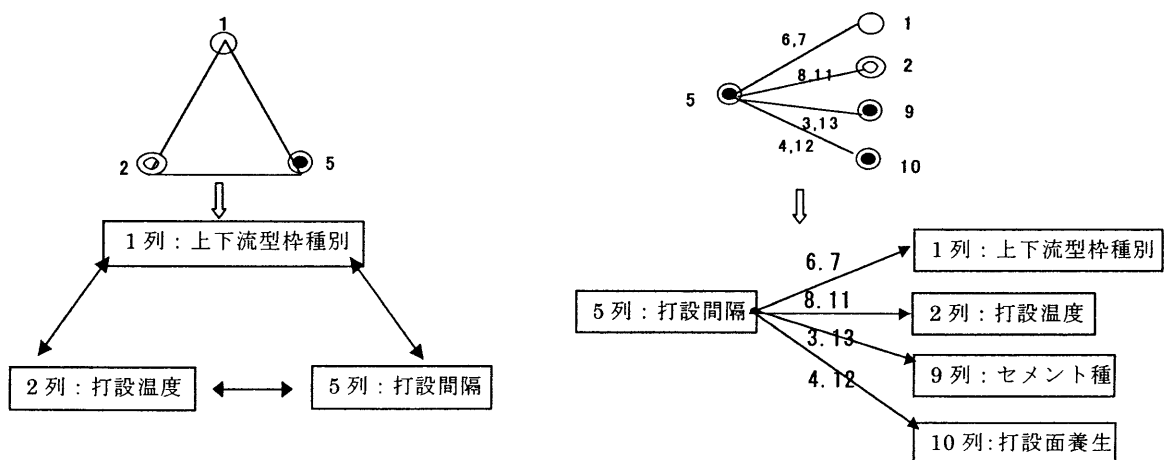


図 8.23 $L_{27}(3^{13})$ の点線図

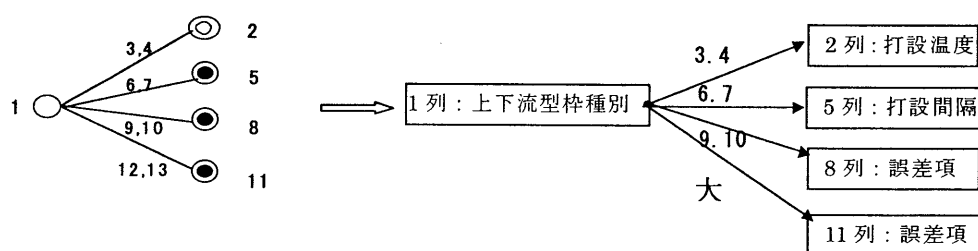


図 8.24 $L_{27} (3^{13})$ の点線図

(5) 実験計画法における効果の分析と分散分析 (Variance Analysis) による検定

1) 概要

土木材料の選定，配合，または施工方法を決定するに当たり，事前に多くの実験等により決定しなければならない．この場合，実験条件を数段階変えて行い，実験値の平均値，差を比較評価して判定することが必要となる．実験値の差を比較評価する際に，その有効差を統計的に裏付ける必要がある．その統計処理として分散分析を用いる．検討すべき条件が多い場合，実験計画法はその検討数を少なく，相互の影響までの確に求めることができる手法である．

実験計画法では，個々の実験値（解析値）を規定しそれに影響を及ぼすものを因子 (Factor) A, B, その変化を水準 (Level) A_i, B_j およびこれらの条件により得られる実験値を X_{ij} で表す．実験値を因子の水準により分類しそれを小分けして考察することを層化 (Stratification) といい実験計画法における，直交，無作為，繰り返しと並ぶ原理である．

無作為化とは，同一層内部における X の値の動揺は，偶然誤差と見なされる．層と層との間における X 値の変化は，因子，処理の X に対する影響を表すものと見なされる．前者の動揺は級内 (Intraclass) 変動，後者は級間 (Interclass) 変動と区分される．ある因子の水準の変化により，偶然誤差以上の変化がなければその因子は実験値に対して影響があるとはいえず，因子の影響を確認するためには，級間変動は級内変動に対して大きくなるはずである．したがって因子の効果を検出するには，偶然誤差を小さく抑える必要があり，同一層内部における測定反復数 $v = 1, 2 \cdots n$ を多くとることもその方法となる．一つの X_{ijv} に混入するかも知れない偶然的変動の分散を σ^2 とすれば，

$$\overline{X}_{ij} = \sum_{v=1}^n X_{ijv} \quad (8.19)$$

により \overline{X}_{ij} に対する偶然的変動の分散の大きさは， σ^2/n に縮小するが，実際には無制限に n を大きくすることは不可能である．また偶然誤差を小さくしない場合もある．

実験計画法は，このような水準と因子の関係を直交配列表による実験組合せに

より実現するものである。次にその組合せによる解析結果である主効果や交互作用の値に対する有意性を分散解析 (Variance Analysis) により判定する⁴⁸⁾。

2) 実験計画法における主効果

一つの要因をとりあげて全ての実験値をその因子の各水準のみにより分類し、他の因子がどの水準にあっても、その因子の同じ水準のものは全て一つにまとめて、各水準の実験値の平均を求める。この際に、考えていない因子の各水準の影響が全て相殺されるように計画する。

例えば、一般的な表現として全実験の平均を全平均 \bar{X} 、因子 A が i 水準、B 因子が j 水準、C 因子が k 水準による実験を行ったとき

因子数 (i, j, k) とその水準 (l, m, n) とした場合全平均 \bar{X} は式 8.20 で示される。

$$\bar{X} = \frac{1}{lmn} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{i,j,k} \quad (8.20)$$

l m n は実験値の総数であるので N により表すと式 8.21 により表される。

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{i,j,k} \quad (8.21)$$

l × m × n が組合せ総数となる。

特性値として測定した値を各水準に分類して、平均値 \bar{X}_i を求める。

因子 A についての分類は式 8.22 で表される。

$$\bar{X}_{1..} = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{1jk} \quad \bar{X}_{2..} = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{2jk} \quad \bar{X}_{3..} = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{3jk} \quad (8.22)$$

同様に B 因子に関しても式 8.23 で表される。

$$\bar{X}_{.1.} = \frac{1}{ln} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n X_{i1k} \quad \bar{X}_{.2.} = \frac{1}{ln} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n X_{i2k} \quad (8.23)$$

$\bar{X}_{1..}$, $\bar{X}_{2..}$, ..., $\bar{X}_{.1.}$ 等と全平均 \bar{X} との差を A1, A2, B1, B2 の各因子、各水準の主効果といい、因子の記号を小文字にして、水準のナンバーを添字につけて表す。この主効果から各水準の特性値への影響の差が求められる。

$$a_1 = \bar{X}_{1..} - \bar{X} \quad a_2 = \bar{X}_{2..} - \bar{X} \quad b_1 = \bar{X}_{.1.} - \bar{X} \quad b_2 = \bar{X}_{.2.} - \bar{X}$$

実験値より直接主効果を求める場合、計算を容易にするために次のように変形した式 8.24、8.25 を求める。

$$a1 = \frac{l-1}{lmn} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk} - \frac{1}{lmn} \left(\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk} - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk} \right) \quad (8.24)$$

$$b_l = \frac{m-1}{lmn} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n X_{ijk} - \frac{1}{lmn} \left(\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk} - \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n X_{ijk} \right) \quad (8.25)$$

一つの因子について各水準の主効果の和はゼロとなる.

$$\sum_{i=1}^l a_i = 0, \sum_{j=1}^m b_j = 0 \quad (8.26)$$

これは式 8.27 により明らかとなる.

$$\sum_{i=1}^l a_i = \frac{l-1}{lmn} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk} - \frac{1}{lmn} \left(\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk} - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk} \right) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{l-1}{lmn} - \frac{1}{lmn} (l-1) \right\} = 0 \quad (8.27)$$

実験計画法による直交配列表による実験組合せは、このように因子に注目して各水準のグループに特性値を分類したとき、各グループに他の因子の各水準の測定値が同数含まれる.

3) 交互作用 (Interaction)

一つの因子を取りあげて、各水準の主効果を求めたとき、他の因子の影響が直行配列によって相殺される. 例えばセメント量のコンクリートの強度に及ぼす影響が単位水量の大小によって異なっているにもかかわらず主効果だけではこれを判定できない. 因子 A の水準が i, B の因子水準が j のものだけを取り出したときの特性値の平均を \bar{X}_{ij} として式 8.28 で表される.

$$(ab)_{ij} = \bar{X}_{ij} - (a_i + b_j + \bar{X}_{..}) \quad (8.28)$$

式 8.28 を A_i と B_j の交互作用という.

a_i , b_j は A_i と B_j の主効果, $\bar{X}_{..}$ は全平均値である. この交互作用を求めるには、予め交互作用の存在するものを予想して計画に組み込む必要がある.

主効果や交互作用の値が全体の実験値の誤差と比較して、それらの因子が特性値に影響を与えることを有意差といい、判定する統計的手法に分散分析がある.

因子、各水準の主効果、交互作用と特性値として、全実験で得られた全ての特性値のバラツキ (実験誤差) とを比較するために、各因子の水準間のバラツキを不偏分散 V (不偏分散は、主効果と交互作用の二乗和をそれぞれの自由度で除した値) で表すと以下の式で表される.

二乗和を S , 自由度を Φ として添字で要因を示せば式 8.29、8.30 で示される.

$$V_A = \frac{S_A}{\Phi_A}, V_B = \frac{S_B}{\Phi_B} \quad (8.29)$$

$$V_{A \times B} = \frac{S_{A \times B}}{\Phi_{A \times B}} \quad (8.30)$$

※バラツキ度は標準偏差 = {(測定値 - 平均値)² の和 / データ数}^{1/2}

= (偏差平方和 / データ数)^{1/2} = 分散^{1/2}

$V_E = \frac{S_E}{\Phi_E}$ で示される誤差の不偏分散に相当する値が誤差分散となる。主効果の二乗和は、その因子水準の主効果の自乗和に各水準の繰り返し実験数を乗じたものとなる。つまり式 8.31 となる。

$$S_A = mn \sum_{i=1}^l a_i^2, S_B = lm \sum_{j=1}^m b_j^2 \quad (8.31)$$

また交互作用の二乗和は、両因子の各水準組合せの交互作用、例えば (ab) _{ij} の自乗の和に各組合せにおける実験数を乗じた式 8.32 となる。

$$S_{A \times B} = n \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (ab)_{ij}^2 \quad (8.32)$$

誤差の自乗和は、先ず実験の個々の値についての全自乗和 S_0 は式 8.33 で求める。

$$S_0 = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X_{ijk} - \overline{X_{...}})^2 \quad (8.33)$$

全ての要因の自乗和を差し引いてた S_E は式 8.34 で求める。

$$S_E = S_0 - S_A - S_B - S_{A \times B} \quad (8.34)$$

これらの自乗和の計算を簡単にするために先ず修正項 CT. 式 8.35 により求める。

CT (全実験値の和 / 全実験数) は、

$$CT = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X_{ijk})^2}{lmn} \quad (8.35)$$

$$S_A = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^l (\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{ijk})^2 - CT \quad S_B = \frac{1}{lm} \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n X_{ijk})^2 - CT$$

$$S_{A \times B} = S_{AB} - S_A - S_B \quad S_{A \times B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (\sum_{k=1}^n X_{ijk})^2 - CT \quad (8.36)$$

4) 主効果、交互作用、誤差の自由度

主効果の自由度は、その因子の水準数より 1 を減じたものである。

$$\Phi_A = l - 1, \Phi_B = m - 1 \quad (8.37)$$

交互作用 A × B の自由度は、因子 A と B の主効果の自由度の積となる。

$$\Phi_{A \times B} = (l - 1) \times (m - 1) \quad (8.38)$$

全測定値 (特性値) の自由度は、全実験測定値の数より 1 を減じたものとなる。

$$\Phi_0 = imn - 1 \quad (8.39)$$

さらに誤差の自由度は、全測定値の自由度から全ての主効果と交互作用の自由度を引き去った値となる。

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \Phi_0 - \Phi_A - \Phi_B - \Phi_{A \times B} \\ &= imn - 1 - (l - 1) - (m - 1) - (n - 1) = lm(n - 1) \end{aligned} \quad (8.40)$$

となる。主効果と交互作用と誤差の自由度の和は、全測定値の自由度である。

5) 主効果、交互作用の有意性について (F 分布, および F 検定)

主効果や交互作用の不偏分散の誤差分散に対する比を分散比といい F_0 で表す。A 因子に対して V_A/V_E , B 因子に対して V_B/V_E , A×B 因子に対して $V_{A \times B}/V_E$ により算定する。正規分布をする無数の測定値のうちから n_1 と n_2 個のデータを選び出しそれぞれの分散 V_1, V_2 を計算し F_0 を求める。分散比 F_0 は、 V_1/V_2 となる。

ここでの分散は、不偏分散、又は誤差分散と同じくそれぞれ n_1, n_2 のデータの自乗和を自由度 $(n_1 - 1)$ と $(n_2 - 1)$ で除した値となる。

選び出す n_1 と n_2 のデータを種々替えて計算して得られる F_0 の値は、ランダムに選び出したデータに応じて変化しその分布は図 8.28 に示す分布となる。この分布が F 分布となる。

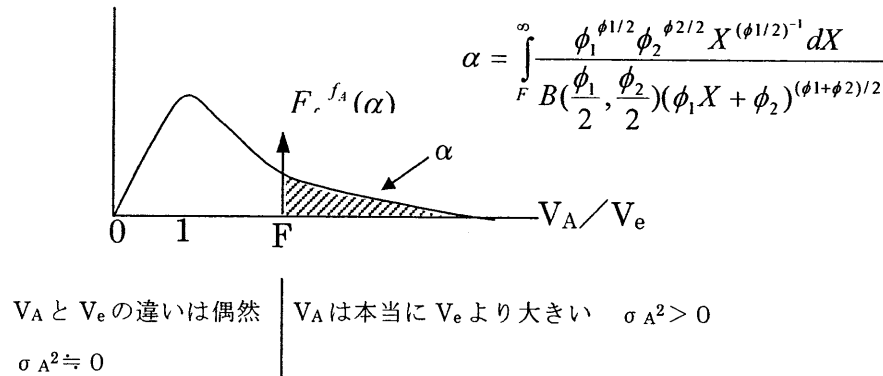


図 8.25 F 分布図 (F 検定)

F の分布形は、分子、分母の分散の自由度によって異なる。分子の自由度 Φ_1 , 分母の自由度 Φ_2 の F 分布で斜線の部分が全体の $\alpha\%$ であるときの F 値をこの F 分布の $\alpha\%$ 点といい $F(\Phi_1, \Phi_2: \alpha)$ の記号で示す。同じ値を示すデータの内から n_1 個と n_2 個のデータを選び出してその分散の比をとったときその値が $F(\Phi_1, \Phi_2: \alpha)$ ($\Phi_1 = n_1 - 1, \Phi_2 = n_2 - 1$) より大きくなる確率は $\alpha\%$ 以下しかないと示す。分散分析においては、その材料そのものの品質のバラツキ程度から考えて例えば 10%, 5%, 1% 程度しか同一品質のものと考えられない分散比が得られたときは、それぞれ危険率 10%, 5%, 1% で有意差があると考ええる。このような検定を F 検定といい実験因子の効果を統計的に検証する方法である。

言い換えれば、誤差が小さく各水準の平均値の近傍にデータが集まれば水準の変化によって特性値が変化することが明らかになる。誤差が大きいと平均値は計算上では変化するがバラツキが大きく因子 A_i での個々の値もあまり効果は考えられない。従い A の効果は、 S_A の大きさではなく誤差の大きさとの比較により判断されるべきものである。その両者の比によって A の効果の有無を調べることが F

検定である．因子に実験値を A_i とすることで母平均は， μ から a_i だけ変化するものと設定する． A_i における平均 μ_i は $\mu_i = \mu + a_i$ で示される．この関係を図 8.25 に示す．

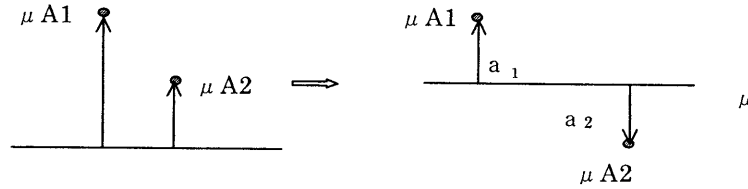


図 8.26 母平均と平均値

$\sum \mu_i / \text{水準数} = \mu$ と定義すると $\sum a_i = 0$ となる．

$A_1 \sim A_a$ での平均値 $\mu_1 \sim \mu_a$ が同じくらいと考えて良いかどうかを判断するために $\mu_1 \sim \mu_a$ のバラツキを定義してこの大きさで判断する．

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{a-1} \sum_{i=1}^a (\mu_i - \mu)^2 = \frac{1}{a-1} \sum_{i=1}^a a_i^2 \quad (8.41)$$

式 8.41 で σ_A^2 が大きければ A の水準変更により特性が大きく変わることの意味している． σ_A^2 が 0 ならば A は特性にそれほどの影響を与えないことになる．A の i 水準における j 個目のデータ x_{ij} は， A_i のときの平均 μ の回りに ε_{ij} の誤差（バラツキの大きさを σ_e^2 とする）が加わった形で「 $x_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + a_i + \varepsilon_{ij}$ 」と表現と表現（構造模型）される実験値として得られる．

A の効果を現す S_A を求めその自由度 $(a-1)$ で割って V_A （分散）を求めることで σ_A^2 の大体の大きさがわかるが， V_A は誤差 ε_{ij} を伴うデータから計算されたもので A の効果 σ_A^2 と誤差変動 σ_e^2 を含んでいる．統計量がどの程度の大きさで真の値の回りをバラついているかを表すのが期待値＝工程平均（Expected Value）で， V_A の期待値は，式 8.42 により表される．

$$E(V_A) = \sigma_e^2 + n\sigma_A^2 \quad (8.42)$$

残差の変動から求めた V_e は $E(V_e) = \sigma_e^2$ である．

次に σ_A^2 の大きさを調べるために仮設 (H_0 と書き帰無仮設という) を立てる．

$$H_0: \sigma_A^2 = 0 \quad (\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a) \quad H_0 \text{ が正しい場合} \quad E(V_A) = E(V_e)$$

この場合の V_A/V_e が F 分布と呼ばれる分布である． $\sigma_A^2 \neq 0$ であるなら $E(V_A) > E(V_e)$ であるから V_A が V_e より大きくなるのは当然である．

V_A/V_e が F 表に示されている値よりも大きくなった場合の判断として

① H_0 は正しいが H_0 では起こりにくいことがたまたま起きた．つまり A の効果はないが V_A/V_e の値がたまたま F 表の値より大きくなった．

② H_0 は正しくないから H_0 では起こりにくいことがたまたま起きた．つまり A の効果があるから V_A/V_e の値が F 表の値より大きくなった．

①②のいずれかとなる。

統計的検定では、の判断をする。つまり V_A/V_e が F 表より大きくなった場合には、 $\sigma_A^2 \neq 0$ 、すなわち A によって平均が変わると判断することになる。これを仮説を棄却するといひ、 μ_i 間には有意な差があるという。また 1 % の F 表の値より大きくなった場合には、高度に有意であるという。検定の考え方を図 8.30 に模式化して示す。本当は $\sigma_A^2 = 0$ であっても V_A/V_e の値が F 表の値より大きくなってしまふことも 5% ありうる。(これを危険率という) しかしこの場合は、単なるバラツキで起きたと考えるよりも平均の間に本質的な差があると考えて行動を起こす「意味がある」という意味で“有意である”といひ有意水準 5% という言葉が用いられる。一方、有意とならない場合も A i によって平均が変わらないとはいひ切れない。平均が変わって、 $\sigma_A^2 \neq 0$ であってもデータから計算した分散比が 1 に近くなることは大いにあり得るからである。

特性値として測定した実験データを以上の手順で F 検定を行ったとき当初、有意差を示すと予想した因子の主効果や、二因子間の交互作用の分散比が小さく現れて有意差があると認められない場合には、その因子の自乗和 S と自由度 Φ とを誤差の自乗和と自由度に加えて新たに誤差自乗和 S_e' と自由度 Φ_e' を求めこれにより誤差分散 V_e' を計算し直しこれを分母として分散比 F_0 を求めて F 検定を再度行う。これを有意差のない要因を誤差にプールするという。誤差の自由度が小さい場合、分散の値の比較堤小さい因子を誤差と見なし再度 F 検定を行い、残った因子の効果の有意性を推定するものである。

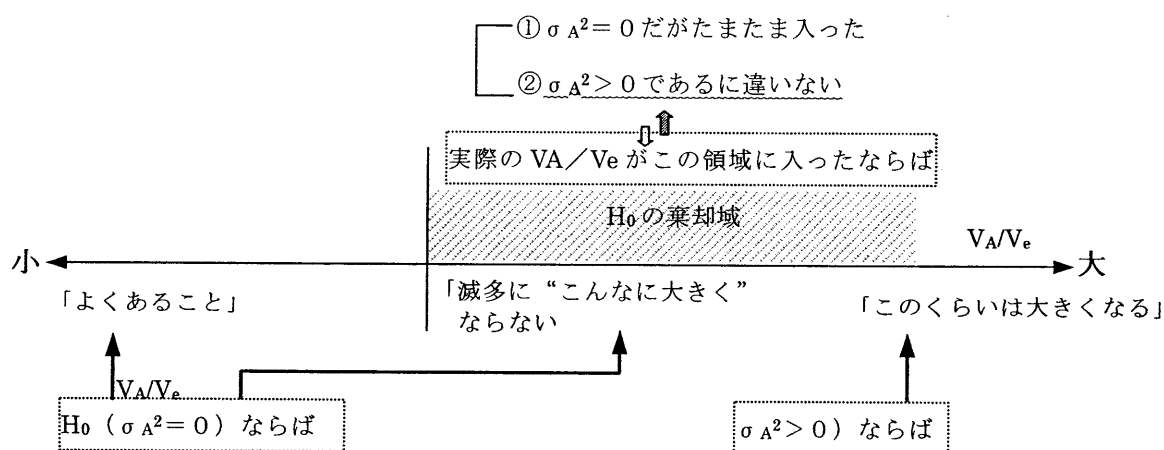


図 8.27 F 検定の考え方模式

6) 寄与率

F 検定によって有意性を検定するだけでなく要因によるバラツキが全体の変動に対しどのくらいを占めているかを寄与率で示す。

$$\text{寄与率} : \rho_{\text{要因}} = S_{\text{要因}} / f_{\text{要因}} V_e / \text{全体変動 } S_T \times 100 (\%) \quad (8.43)$$

寄与率で要因の実験値に対する影響，効果の大きさが推定できる．誤差のプーリングをする際の指標にもなる．

7) 平均の推定

F 検定で有意となった要因に対し平均の推定を行う．バラツキのあるデータから計算された平均値は，母平均とは必ずしも一致しない．任意の n 個のデータを用いて母平均はどのくらいかを予測することを平均推定といい，得られた実験値の信頼度を表すために用いる．母平均をある区間の範囲内にあることを推定する方法を区間推定といい式 8.44 で示される．

$$\bar{x} - t(n-1, 0.05) \sqrt{\frac{V}{n}} < \mu < \bar{x} + t(n-1, 0.05) \sqrt{\frac{V}{n}} \quad (8.44)$$

\bar{x} : 実験値の平均 μ : 母平均 n : データ数

μ の値として予想される限界を信頼限界といい，信頼限界に挟まれた区間が信頼区間である．この信頼区間内の値は，データ値が 95%（信頼率）の確立で存在する範囲として推定される．

図 8.27 は，正規分布におけるバラツキの範囲を示すものである．平均の回り $\pm 2\sigma$ の範囲に特性値の益 95%が含まれる．（ σ : 標準偏差）標準偏差もわからない一般の場合，2 という係数よりも少し大きめの係数を用いて少し広めの範囲を推定することになる．

この係数は， $t(\Phi, P)$ として自由度 Φ 両側確立 P から式 8.45 により求めた表で示される．

$$P = 2 \int_0^{\frac{\Gamma(\frac{\phi+1}{2})}{\sqrt{\phi\pi}\Gamma(\frac{\phi}{2})(1+\frac{v^2}{\phi})^{\frac{\phi+1}{2}}}} dv \quad (8.45)$$

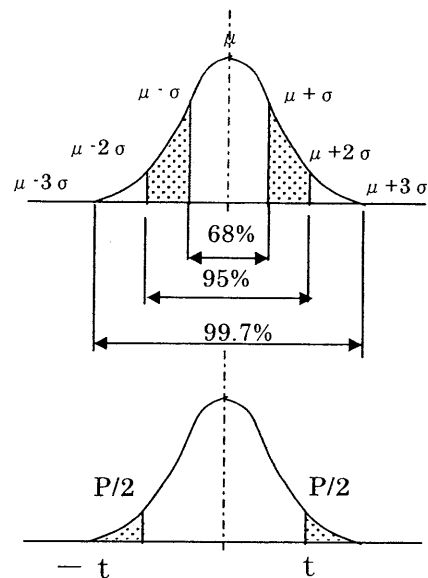


図 8.28 正規分布バラツキ範囲

個々のデータの 95%の存在範囲の推定式は式 8.46 で表される．

$$\bar{x} \pm t(n-1, 0.05) \sqrt{V(1 + \frac{1}{n})} \quad (8.46)$$

8) 特定条件における平均の推定（工程平均）

実験結果からどの因子の水準をどう動かすと特性がどのように変化するかわかる．言い換えればどんな条件にしたら特性が最も好ましいレベルになるかを以下の手順で検定する．

- ①有意となった交互作用に関する二元表より好ましい水準を選択
- ②有意となった主効果の内①で決定していない因子については、各水準のデータの合計又は平均値から好ましい水準を選択
- ③その他の因子については、経済性や技術面から適切な水準を選択する。
- ④いくつかの交互作用が有意となり①では最適な条件が異なり決定できない場合は、各組合せの平均を推定して決定する。

具体的には有意となったいくつかの因子水準の組合せによる母平均の推定は、 T_A の中で最適値を T_{Ai} 、 T_B の中での最適値を T_{Bj} とする。2 因子とも有意の場合、 A_iB_j が最適な水準の組合せとなる。この組合せ時の平均の推定値は $\tilde{\mu}$ (A_iB_j) は式 8.47 で表される。

$$\tilde{\mu}(A_iB_j) \pm t(f_e, 0.05) \sqrt{\frac{V_e}{n_e}} = \bar{A}_i + \bar{B}_j - \bar{T} \pm t(f_e, 0.05) \sqrt{\frac{(a+b-1)V_e}{ab}} \quad (8.47)$$

$\tilde{\mu}$: μ の推定値

n_e (有効反復回数) : 総データ数 / 1 + (推定に用いた要因の自由度の和)

A, B 因子の場合

$$n_e = N / 1 + f_A + f_B = ab / 1 + (a-1) + (b-1) = ab / a + b - 1$$

有効反復回数は、実験結果を用いてある条件での平均を推定するとき、その条件の実験を何回やったことに該当する推定精度が得られているかを示す。

以上の実験計画法による解析組合せと分散分析による分析の概略を示した。

(6) 実験計画法分析のまとめ

実験計画手法による解析結果の分析フローは以下の内容となる。

- ①1 章～6 章までの多面的な検討から土木施工法における将来展望の重要なキーワードは「コンクリート構造物の耐久性確保＝長寿命化」であるとの結論
- ②コンクリート構造物の耐久性に大きな影響をおよぼす「温度応力ひび割れ」に注目しその要因をひび割れ特性要因図、ひび割れ体系図等から抽出
- ③要因はダムの設計条件および施工環境条件の両面から 6 要素、3 水準に決定
- ④解析条件組合せは、実験計画法の採用により 3 水準系の直交配列表 L_{27} (3^3) による 27 パターン作成
- ⑤解析モデルは、ダム堤体上下流断面の岩着付近の 7 リフト
- ⑥温度応力解析は、寒中、暑中コンクリートの 2 ケースおよび上部リフト打設前後の 2 パターン
- ⑦解析要素は、境界条件、内部、外部拘束に注目した 4 要素
- ⑧解析結果は、寒中、暑中コンクリート毎に 4 要素におけるコンクリート最高温

度，主応力，最小ひび割れ指数を特性値として整理
 ⑩特性値以について分散分析による解析を次節にて行う。

8. 5 分散分析

実験計画法に基づく条件組合せ 27 ケースについて F E M 解析を行い，解析モデルの要素 1 ～ 4 について寒中，暑中コンクリートとともに上部リフト打継前後の「ひび割れ指数」の最小値をデータとして整理した．その分散分析結果について以下考察する^{49, 50, 51, 52)}．

8. 5. 1 寒中コンクリート

(1) 因子組合せと解析結果

要素 1 については，コンクリート表面の凍結が耐久性に大きく影響するためコンクリート温度(最高温度)の解析結果も分散分析を行った．

因子配列と水準条件を表 8. 32 に示す．

表 8. 32 寒中コンクリートの因子組合せ

項目	上下流 養 生	打設 温度			打設 間隔				セメ ント	打設面 養 生		リフト厚
1水準	メタル	低=5℃			実施				フライ	散水		薄=75
2水準	木製	基=8℃			短				中庸	湛水		中=100
3水準	断熱	高=10℃			長				高炉	断熱		厚=150
要因	A	B	A×B	A×B	C	A×C	A×C	B×C	D	E	B×C	F
行No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

要素別解析データによる特性値(ひび割れ指数)結果を表 8. 33 に示す．

表 8. 33 寒中コンクリートの要素別解析結果

※前：上部リフト打設前
 後：上部リフト打設後

要素 打継 列番号	解析因子水準組合せ	1			2		3		4	
		温度	温度a	前指数	前	後	前	後	前	後
1	A1B1C1D1E1	メ低間フ散薄	5.5	6.5	6.7	14.4	3.6	6.3	3.3	5.3
2	A1B1C2D2E2	メ低短庸湛中	6.9	8.6	4.5	20.0	1.8	20.0	1.4	2.4
3	A1B1C3D3E3	メ低長炉断中	9.2	12.0	1.5	20.0	3.8	20.0	1.3	2.1
4	A1B2C1D2E2	メ基間庸湛厚	10.1	13.1	1.3	20.0	6.4	2.5	2.8	3.6
5	A1B2C2D3E3	メ基短炉湛薄	8.5	10.8	6.4	20.0	1.2	20.0	1.0	1.8
6	A1B2C3D1E1	メ基長フ散中	8.0	9.1	4.0	2.2	1.8	2.2	4.5	2.5
7	A1B3C1D3E3	メ高間炉断中	10.2	13.3	4.4	9.5	1.4	1.6	1.0	1.8
8	A1B3C2D1E1	メ高短フ散厚	10.0	13.0	1.2	20.0	4.6	3.8	8.1	3.3
9	A1B3C3D2E2	メ高長庸湛薄	10.0	11.0	6.2	2.0	1.6	1.7	2.9	2.4
10	A2B1C1D2E3	木低間庸断中	8.9	10.4	6.3	20.0	1.7	2.5	1.2	2.5
11	A2B1C2D3E1	木低短炉散厚	11.2	13.3	1.3	20.0	10.5	20.0	2.7	5.5
12	A2B1C3D1E2	木低長フ湛薄	6.9	7.8	8.3	4.3	3.3	2.8	2.9	7.1
13	A2B2C1D3E1	木基間炉散薄	9.1	10.6	5.3	3.3	2.3	2.0	2.3	3.5
14	A2B2C2D1E2	木基短フ湛中	9.3	11.0	5.1	20.0	1.9	3.1	1.8	2.3
15	A2B2C3D2E3	木基長庸断厚	13.3	16.0	1.4	20.0	4.8	20.0	3.4	6.1
16	A2B3C1D1E2	木高間フ湛薄	16.8	20.3	1.3	20.0	2.8	5.8	20.0	3.5
17	A2B3C2D2E3	木高短庸湛薄	11.2	13.1	8.3	20.0	1.4	3.0	1.2	2.5
18	A2B3C3D3E1	木高長炉散中	11.9	14.0	3.1	1.8	1.3	1.6	2.9	1.9
19	A3B1C1D3E2	断低間炉湛厚	19.9	20.9	1.6	20.0	3.8	2.3	1.3	1.9
20	A3B1C2D1E3	断低短フ断薄	12.1	12.6	7.0	20.0	2.5	5.8	2.2	3.8
21	A3B1C3D2E1	断低長庸散中	11.4	11.8	4.9	3.8	2.2	2.4	3.0	5.1
22	A3B2C1D1E3	断基間フ断中	15.2	15.9	6.9	10.1	2.2	2.0	1.8	2.9
23	A3B2C2D2E1	断基短炉散厚	20.7	21.7	1.3	20.0	6.8	2.7	2.1	3.3
24	A3B2C3D3E2	断基長庸散薄	14.3	15.0	6.9	2.5	1.8	1.9	2.5	3.2
25	A3B3C1D2E1	断高間庸散薄	13.7	14.3	5.7	2.2	1.8	1.8	3.0	3.2
26	A3B3C2D3E2	断高短炉湛中	19.2	20.0	3.9	20.0	1.2	5.1	1.0	1.5
27	A3B3C3D1E3	断高長フ断厚	23.0	24.1	1.7	20.0	3.8	5.9	5.3	5.4

(2)要素 1—上部リフト打継前—表面コンクリート温度

1)分散分析結果を表 8. 34 に示す.

表 8. 34 要素 1 温度・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
A	2	298.299	149.149	112.8533	0.0000	**	56.2
B	2	64.241	32.120	24.30378	0.0000	**	11.71
F	2	112.472	56.236	42.55074	0.0000	**	20.88
A*F	4	29.881	7.470	5.65243	0.0049	**	4.68
e	16	21.146	1.322				6.53
Total	26						100

2)有意要因の効果推定を表 8. 35 に示す.

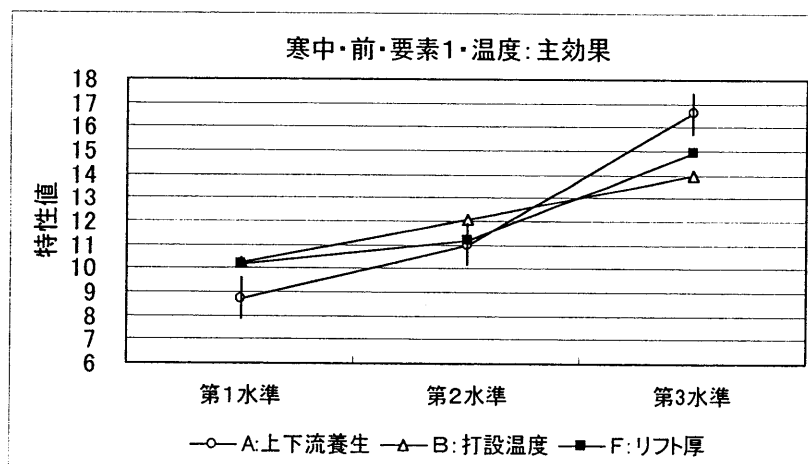
表 8. 35 要素 1 温度・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
A	8.711	10.956	16.611	± 0.812	± 1.119
B	10.222	12.056	14.000	± 0.812	± 1.119
F	10.144	11.222	14.911	± 0.812	± 1.119

A * F	F1	F2	F3	95% 信頼区間	99% 信頼区間
A1	8.000	8.367	9.767	± 1.407	± 1.939
A2	9.067	10.033	13.767		
A3	13.367	15.267	21.200		

総平均 : 12.093

3)要因効果図を図 8. 29 に示す.



※グラフ中の—は、水準の 95%信頼区間を示す

図 8. 29 要素 1 温度・要因効果図

4)考察

表面温度に関する主要因効果として上下流養生, 打設温度, リフト厚が有意と

された。寄与率から養生効果（型枠種別）が打設温度より大きく影響することが明らかであり養生方法の重要性が示されている。水準による温度差は、養生効果が打設温度の約2倍、リフト厚の1.5倍となっている。リフト厚は、75cm～100cmではあまり差は生じていないが150cmになるとその効果は大きくなる。寄与率は低いが、図8.30に示すA*Fの交互作用の効果推定を見ると養生とリフト厚の組合せによるコンクリート温度への影響が明白となり施工条件への反映が期待できる結果となった。

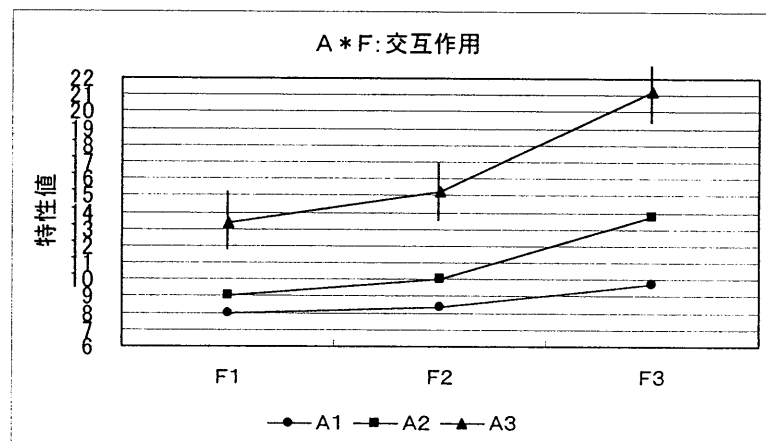


図 8.30 要素1温度・A*F交互作用効果推定図

(2)要素1—上部リフト打設前—表面150cm内部コンクリート温度

1)分散分析結果を表8.36に示す。

表 8.36 要素1温度(-15cm)・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
A	2	200.669	100.334	85.43141	0.0000	**	39.19
B	2	85.376	42.688	36.34721	0.0000	**	16.41
E	2	13.816	6.908	5.88174	0.0140	*	2.27
F	2	168.709	84.354	71.82498	0.0000	**	32.87
A*F	4	21.056	5.264	4.48202	0.0154	*	3.23
e	16	16.442	1.174				6.03
Total	26	506.067					100

2)有意要因の効果推定を表8.37に示す。

3)要因効果図を図8.31に示す。

4)考察

各因子の効果は、表面温度とほぼ同じ傾向で養生の熱伝達率により水準効果を示している。表面と比較する打設面養生の効果が寄与率としては低い有意性が示されている。上下流面養生の寄与率が低下する分リフト厚に寄与率が向上して

いる。表面温度と同様に低い寄与率であるが A*F の交互作用が有意とされ、図 8.32 から表面養生とリフト厚の組合わせ効果を見ると表面養生の効果がリフト厚水準効果以上に影響していることが明らかに示されている。

表 8.37 要素 1 温度・有意要因効果の推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
A	10.822	12.944	17.367	±0.775	±1.075
B	11.544	13.689	15.900	±0.775	±1.075
E	12.700	14.189	14.244	±0.775	±1.075
F	11.300	12.678	17.156	±0.775	±1.075

A * F	F1	F2	F3	95% 信頼区間	99% 信頼区間
A1	9.433	10.333	12.700	±1.342	±1.863
A2	10.500	11.800	16.533		
A3	13.967	15.900	22.233		

総平均 : 13.711

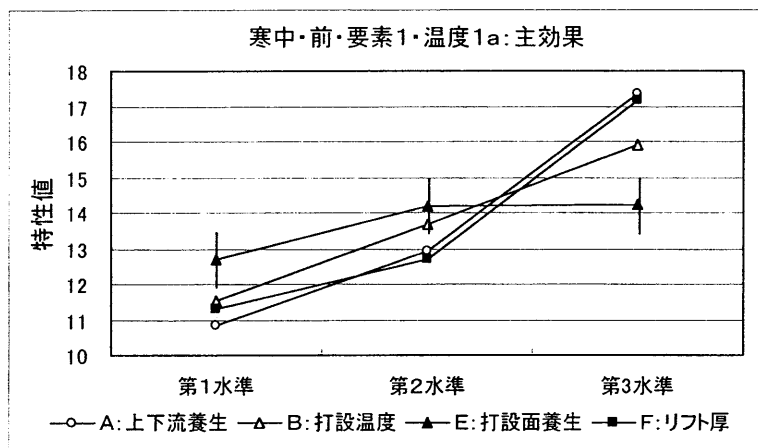


図 8.31 要素 1 温度・要因効果図

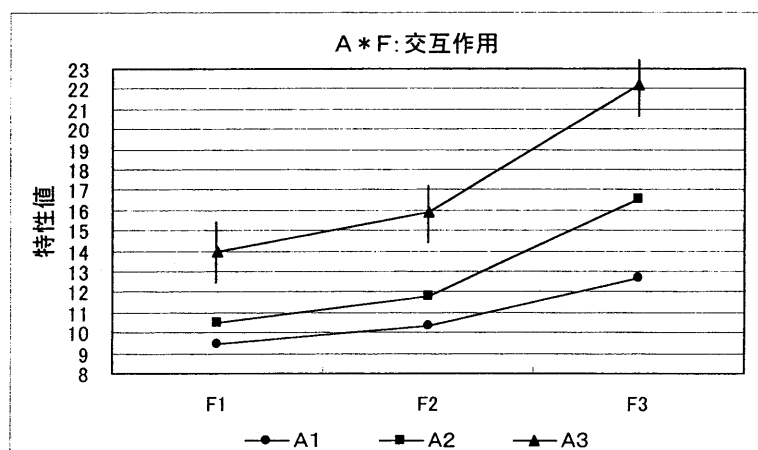


図 8.32 要素 1 温度・A * F 交互作用効果推定図

(3)要素1－上部リフト打継前一ひび割れ指数

1)分散分析結果を表 8.38 に示す.

表 8.38 要素1・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
D	2	3.570	1.785	3.39941	0.0536		1.66
E	2	6.021	3.010	5.73363	0.0108	*	3.27
F	2	132.103	66.051	125.8035	0.0000	**	86.11
e	20	10.501	0.525				8.97
Total	26	152.194					100

総平均：4.315

2)有意要因の効果推定を表 8.39 に示す.

表 8.39 要素1・有意要因効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
E	3.722	4.344	4.878	± 0.504	± 0.687
F	6.756	4.789	1.400	± 0.504	± 0.687

3)要因効果図を図 8.33 に示す.

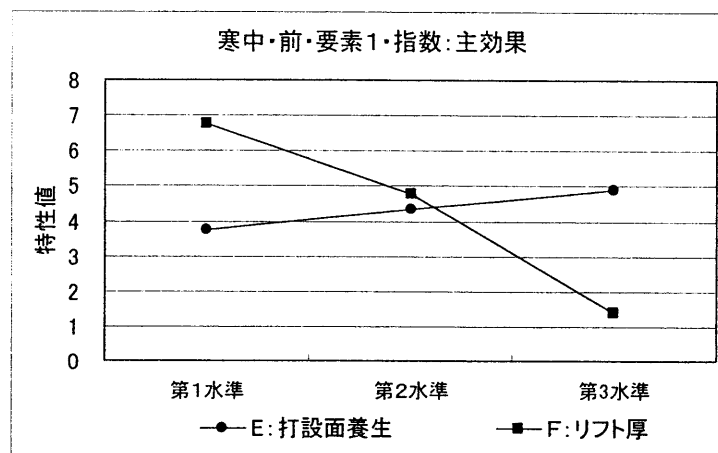


図 8.33 要素1・要因効果図

4)考察

リフト厚水準による特性値への寄与率は高く、主効果図からも寒中コンクリートにおける内部拘束によるひび割れに対する影響が大きい。リフト厚は、コンクリート温度の向上と温度ひび割れの危険性の相反する両目効果となる。またセメント水準が有意要因であることは、セメント種別の発熱特性とリフト厚の組合せがひび割れ制御に有意であることを明らかにしている。この組合せは、寒中コンクリート対策として展開できる。

(4) 要素 2—上部リフト打継前—ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.40 に示す.

表 8.40 要素 2・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
C	2	599.712	299.856	27.02559	0.0000	**	35.48
E	2	289.165	144.583	13.03102	0.0002	**	16.40
F	2	516.894	258.447	23.29347	0.0000	**	30.39
e	20	221.905	11.095				17.72
Total	26	1627.676					

2) 有意要因の効果推定を表 8.41 に示す.

表 8.41 要素 2・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
C	13.278	20.000	8.511	±2.316	±3.159
E	9.744	14.311	17.733		
F	9.856	11.933	20.000		

総平均 : 13.92

3) 要因効果図を図 8.34 に示す.

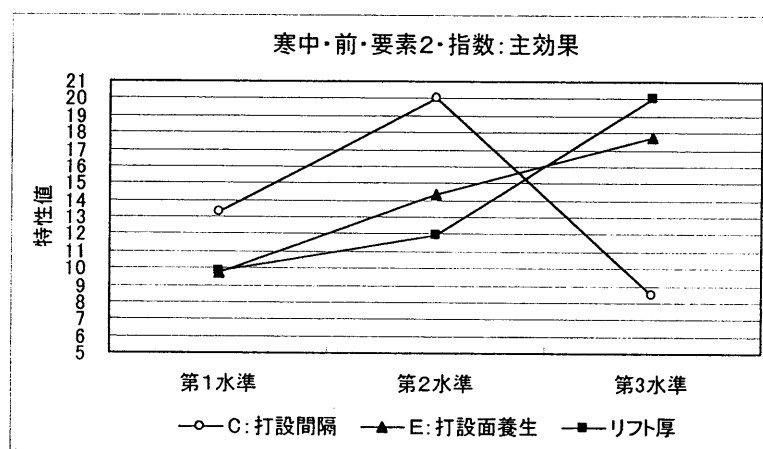


図 8.34 要素 2・要因効果図

4) 考察

要素 2 は, 外部拘束を受ける要素として選定した. リフト厚の水準効果は, 岩盤拘束度を用いたコンクリート温度応力式 $\sigma = R \cdot E_c \cdot \alpha \cdot \Delta\phi$ に示される岩盤拘束度 R を表す関数形 $R = R(\frac{E_c}{E_R}, \frac{H}{L}, \frac{y}{H}, \frac{x}{L})$ の有限要素法を利用した解析から, 拘束度は E_c/E_R , H/L が大きいほど小さくなることを明らかにしている.

打設面養生は, コンクリート温度勾配を小さくすることで外部拘束制御となっていると考察できる. 打設間隔の主効果は, 解析データのひび割れ指数が打設時点

から打継まで間隔水準 10 日，5 日，21 日の最小値であることから，コンクリートの初期段階における圧縮域から引張域の移行期における値であると判断できる．打設間隔が短いほど圧縮域から引張域の近傍値を示している．打設間隔が短いほど内部温度勾配が緩く結果として外部拘束を緩和していると考察できる．

(5) 要素 2－上部リフト打設後一ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.42 に示す．

表 8.42 要素 2・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
B	2	10.347	5.174	3.33373	0.0563		6.16
E	2	9.472	4.736	3.05164	0.0697		5.42
F	2	66.670	33.335	21.47964	0.0000	**	54.09
e	20	31.039	1.552				34.33
Total	26	117.527					

2) 有意要因の効果推定を表 8.43 に示す．

表 8.43 要素 2・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
F	2.167	1.722	5.256	± 0.866	± 1.182

総平均：3.048

3) 要因効果図を図 8.35 に示す．

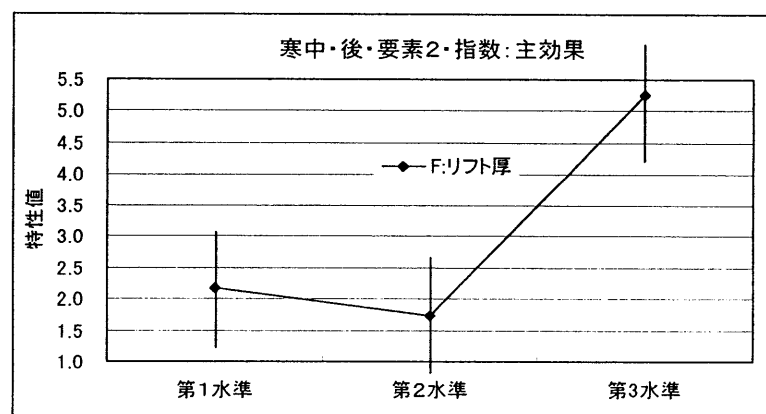


図 8.35 要素 2・要因効果図

4) 考察

上部リフト打設後はリフト厚が有意とされる．打継前と同様の H/L の効果と考察できる．水準 1 と 2 は，95% の信頼区間で見ればほぼ変わらないがリフト厚が 150cm になるとその効果は大きくなる．また寄与率は，打設前に主効果要因であった打設間隔の寄与率を合算した値となっている．

(6)要素3－上部リフト打設前一ひび割れ指数

1)表 8. 44 に示す通り，分散分析結果では，有意ある因子はない。

表 8. 44 要素3・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob	ρ
A	2	132.494	66.247	9.39773	0.0962	9.77
B	2	149.072	74.536	10.57358	0.0864	11.14
C	2	179.436	89.718	12.72732	0.0728	13.64
D	2	75.254	37.627	5.33773	0.1578	5.05
E	2	100.634	50.317	7.13792	0.1229	7.14
F	2	120.392	60.196	8.53933	0.1048	8.77
A*B	4	163.155	40.789	5.78624	0.1528	11.14
A*C	4	68.317	17.079	2.42284	0.3129	3.31
A*F	4	209.055	52.264	7.41407	0.1224	14.92
e	2	14.099	7.049			15.12
Total	26	1211.907				100

(7)要素3－上部リフト打設後一ひび割れ指数

1)分散分析結果を表 8. 45 に示す。

表 8. 45 要素3-2・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob	ρ
B	2	45.476	22.738	3.26524	0.0738	8.92
D	2	74.423	37.211	5.34363	0.0219 *	17.11
F	2	54.605	27.303	3.9207	0.0489 *	11.51
A*C	4	54.255	13.564	1.94777	0.1671	7.47
A*F	4	41.237	10.309	1.48043	0.2688	3.78
e	12	83.564	6.964			51.21
Total	26	353.561				100

2)有意要因の効果推定を表 8. 46 に示す。

表 8. 46 要素3-2・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
D	5.544	2.333	1.778	±1.917	±2.687
F	2.367	2.067	5.222	±1.917	±2.687

総平均：3.219

3)要因効果図を図 8. 36 に示す。

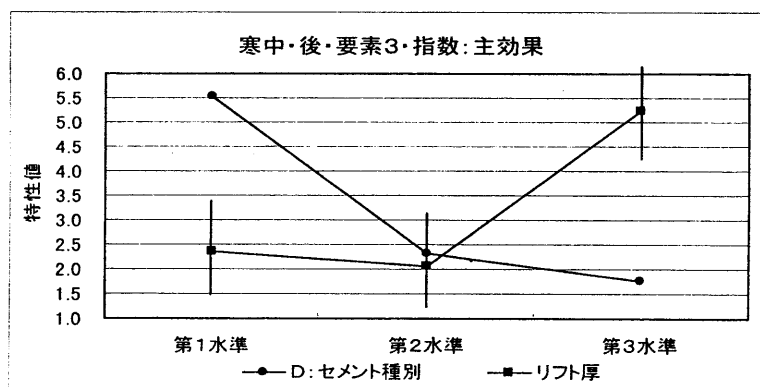


図 8. 36 要素3-2・要因効果図

4) 考察

セメント種別，リフト厚が有意要因となるがその寄与率は低く信頼区間も大きな値となっている．内部拘束に注目した要素 3 は，セメント水準による発熱特性による効果がフライアッシュ中庸熱＞中庸熱＞高炉と明らかになっているが，信頼区間をみると高炉セメントと中庸熱ポルトランドセメントの明らかな差は見られないがフライアッシュ中庸熱セメントの効果は明らかとなっている．

リフト厚の効果は，上部リフトが打継がれた時点で内部拘束より外部拘束の影響が強く H/L の効果と考える．

(8) 要素 4—上部リフト打設後—ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.47 に示す．

表 8.47 要素 4・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
A	2	5.232	2.616	2.5886	0.1162		5.64
B	2	5.925	2.963	2.93165	0.0919		6.86
C	2	5.532	2.766	2.73704	0.1049		6.16
D	2	9.401	4.700	4.65127	0.0320	*	12.96
F	2	8.921	4.460	4.41378	0.0366	*	12.12
A*C	4	9.810	2.453	2.42697	0.1051		10.13
e	12	12.127	1.011				46.14
Total	26	56.947					100.00

2) 有意要因の効果推定を表 8.48 に示す．

表 8.48 要素 4・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
D	4.011	3.465	2.578	±0.730	±1.024
F	3.644	2.544	3.856	±0.730	±1.024

総平均：3.348

3) 要因効果図を図 8.37 に示す．

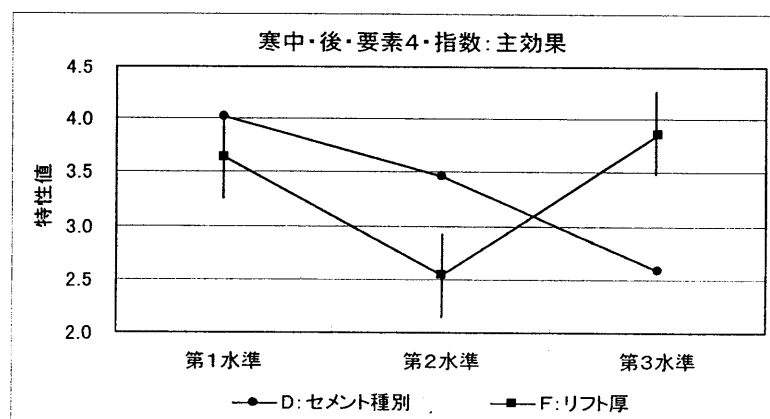


図 8.37 要素 4・要因効果図

4) 考察

セメント種別は、熱特性による効果であり、リフト厚は外部拘束のH/Lによる低減効果と考察できる。今回の寒中コンクリートの解析条件では、上部リフトが打継がれた段階では、要素4のひび割れ指数がリフト厚よりセメント種別水準による効果を強く受ける結果となった。寄与率はほとんど同じであるが内部拘束要因の方が効果は大きくでている。

8. 5. 2 暑中コンクリート

暑中コンクリートの要素1～4に関しては、コンクリートの発熱特性による温度応力によるひび割れ対策が主題と考え解析の特性値は全て「ひび割れ指数」とした。解析は、上部リフトの打設前後により因子効果の内部、外部拘束に対する影響にも注目した。

(1) 因子組合せと解析結果

因子配列と水準条件の組合せを表 8. 49 に示す。

表 8. 49 暑中コンクリートの因子組合せ

項目	上下流養生	打設温度			打設間隔				セメント	打設面養生		リフト厚 cm	
1水準	メタル	=22.5			10日				フライ	散水		薄=75	
2水準	木製	=25.0			5日				中庸	湛水		中=100	
3水準	断熱	=28.0			21日				高炉	断熱		厚=150	
要因	A	B	A×B	A×B	C	A×C	A×C	B×C	D	E	B×C	F	e
行No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

要素別解析データによる特性値(ひび割れ指数)結果を表 8. 50 に示す。

表 8. 50 暑中コンクリートの要素別解析結果

要素 番号 打継 条件 列番号	解析因子水準組合せ			1		2		3		4
				前	後	前	後	前	後	後
1	A1B1C1D1E1F	メ低間フ散薄		5.9	7.1	1.2	1.1	1.4	2.3	1.6
2	A1B1C2D2E2F	メ低短庸湛中		5.2	20.0	2.7	1.0	1.7	1.2	1.9
3	A1B1C3D3E3F	メ低長炉断中		1.3	20.0	20	1.3	4.3	4.0	1.9
4	A1B2C1D2E2F	メ基間庸湛厚		1.1	20.0	20	1.6	2.5	4.2	3.0
5	A1B2C2D3E3F	メ基短炉湛薄		9.7	20.0	2.2	0.9	1.5	0.9	1.5
6	A1B2C3D1E1F	メ基長フ散中		3.9	8.7	1.1	0.9	1.4	3.0	1.3
7	A1B3C1D3E3F	メ高間炉断中		4.8	20.0	1.3	0.7	1.0	1.2	1.7
8	A1B3C2D1E1F	メ高短フ散厚		1.1	16.0	20	0.7	1.8	1.2	2.5
9	A1B3C3D2E2F	メ高長庸湛薄		6.6	2.0	0.9	0.8	0.9	1.9	1.1
10	A2B1C1D2E3F	木低間庸断中		9.7	2.0	1.6	0.9	1.3	1.4	2.3
11	A2B1C2D3E1F	木低短炉散厚		1.1	2.2	20	1.5	1.6	2.1	1.7
12	A2B1C3D1E2F	木低長フ湛薄		8.8	4.3	1.2	1.1	1.2	1.9	1.4
13	A2B2C1D3E1F	木基間炉散薄		4.9	20.0	1	0.9	1.1	1.9	1.3
14	A2B2C2D1E2F	木基短フ湛中		5.8	20.0	2.1	1.1	1.5	1.6	1.8
15	A2B2C3D2E3F	木基長庸断厚		1.4	20.0	12.1	1.4	4.4	6.7	2.0
16	A2B3C1D1E2F	木高間フ湛薄		1.5	20.0	6.1	1.4	2.7	11.8	2.3
17	A2B3C2D2E3F	木高短庸湛薄		10.3	20.0	1.5	0.9	1.4	1.1	1.8
18	A2B3C3D3E1F	木高長炉散中		2.7	3.1	0.9	0.7	1.0	2.8	1.0
19	A3B1C1D3E2F	断低間炉湛厚		1.5	4.0	20	1.5	2.6	2.8	2.2
20	A3B1C2D1E3F	断低短フ断薄		14.7	20.0	2.3	1.3	1.6	1.4	2.1
21	A3B1C3D2E1F	断低長庸散中		4.8	6.2	1.1	0.9	1.4	2.4	1.3
22	A3B2C1D1E3F	断基間フ断中		11.8	20.0	1.2	0.9	1.1	1.3	2.2
23	A3B2C2D2E1F	断基短炉散厚		1.3	2.8	20	2.1	1.5	2.7	2.9
24	A3B2C3D3E2F	断基長庸散薄		9.4	2.8	1	0.8	1.0	1.5	1.2
25	A3B3C1D2E1F	断高間庸散薄		6.6	2.7	0.9	0.8	1.0	1.6	1.1
26	A3B3C2D3E2F	断高短炉湛中		5.4	20.0	2.2	0.8	1.3	1.1	1.4
27	A3B3C3D1E3F	断高長フ断厚		2.7	17.7	2.3	1.3	3.5	13.7	1.7

(2)要素1－上部リフト打設前－ひび割れ指数

1)分散分析結果を表 8.51 に示す.

表 8.51 要素 1・分散分析結

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
A	2	19.760	9.880	5.40219	0.0182	*	4.32
D	2	13.342	6.671	3.64763	0.0531		2.60
E	2	65.816	32.908	17.99332	0.0001	**	16.69
F	2	233.047	116.523	63.71264	0.0000	**	61.58
A*B	4	14.951	3.733	2.04374	0.1432		2.05
e	14	25.064	1.829				12.76
Total	26	372.520					100.00

2)有意要因の効果推定を表 8.52 に示す.

表 8.52 要素 1・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
A	4.400	5.133	6.467	± 0.967	± 1.342
E	3.599	5.033	7.378		
F	8.544	6.011	1.444		

総平均 : 5.333

3)要因効果図を図 8.38 に示す.

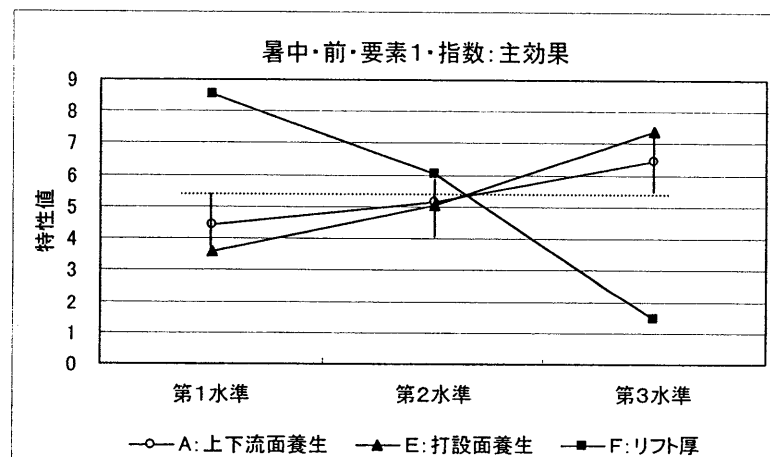


図 8.38 要素 1・要因効果図

4)考察

要素 1 は, 材料特性である打設後数日間のクリティカル現象として内部拘束による影響を注目した. その結果, 上下流面, 打設面養生効果が有意とさその効果を示している. リフト厚による特性値は, リフトが厚いほど内部拘束が大きくなることを示し, 上下流面養生の 3.5 倍, 表面養生の約 2 倍程度の水準効果が算定された. コンクリート表面においては, リフトが厚くなることで水和反応促進およ

び熱放散の遅延による内部温度勾配が高まることを示している。一方、境界条件である養生条件では、特性値である熱伝達率による内部温度勾配の緩和効果は、信頼範囲も考慮してもその効果は示されている。断熱養生の暑中コンクリートに対する影響は、施工現場の計測でもその有効性が確認されている。また打設面養生とリフト厚の関係に注視すると、水準組み合わせによりひび割れ発生に対する施工リスクを事前に把握できる。

(3)要素1—上部リフト打継後—ひび割れ指数

1)分散分析結果を表 8.53 に示す。

表 8.53 要素1後・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
B	2	140.392	70.196	3.10291	0.082		5.62
C	2	176.092	88.046	3.89182	0.0498	*	7.73
E	2	459.143	229.571	10.14755	0.0026	**	24.46
A*B	4	379.510	94.878	4.19379	0.0237	*	17.08
A*F	4	265.250	66.313	2.93116	0.0664		10.33
e	12	271.480	22.623				34.77
Total	26	1691.867					100.00

2)有意要因の効果推定を表 8.54 に示す。

表 8.54 要素1後・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
C	12.867	15.667	9.422	± 3.454	± 4.843
E	7.644	12.567	17.744		

総平均=12.652

3)要因効果図を図 8.39 に示す。

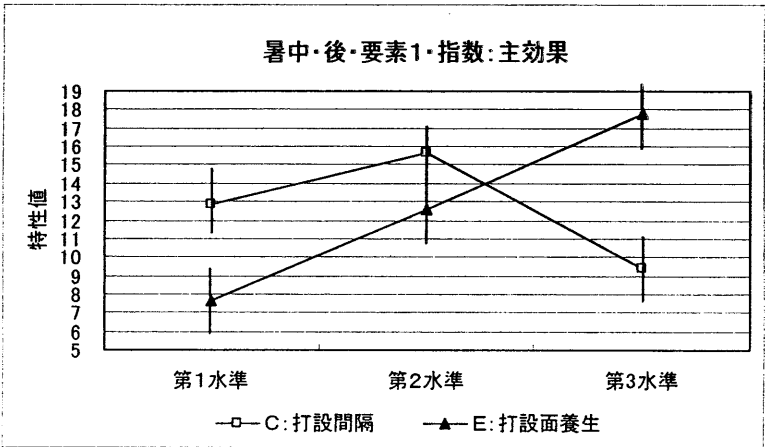


図 8.39 要素1後・要因効果図

4) 考察

有意要因は、打設間隔と打設面養生となる。共にコンクリート内部温度に影響する因子として直接的に影響を及ぼす。打設面養生効果による内部拘束の低減効果が直線的に示されている。打設間隔は、特性値が 5>10>21 日となっているのは、内部温度降下と打継リフトによるコンクリート温度上昇の関係による内部拘束の大小を示すと考察できる。境界条件（養生方法の選択）によるコンクリートの乾燥収縮による内部拘束の影響がコンクリート表面部にもおよび、その重要性が注目される。

(4) 要素 2—上部リフト打継前一ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.55 に示す。

表 8.55 要素 2・分散分析結果

Source	f	S	V	Fo	Prob		ρ
A	2	31.756	15.878	1.50295	0.2523		0.67
B	2	64.234	32.117	3.04004	0.076		2.70
C	2	55.961	27.98	2.64848	0.1015		2.18
D	2	54.227	27.114	2.56645	0.108		2.08
F	2	1219.547	609.774	57.71816	0.000	**	75.15
e	16	169.035	10.565				17.22
Total	26	1594.761					100

2) 有意要因の範囲推定を表 8.56 に示す。

表 8.56 要素 2・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
F	1.356	1.578	15.722	±2.297	±3.165

総平均：6.219

3) 要因効果図を図 8.40 に示す。

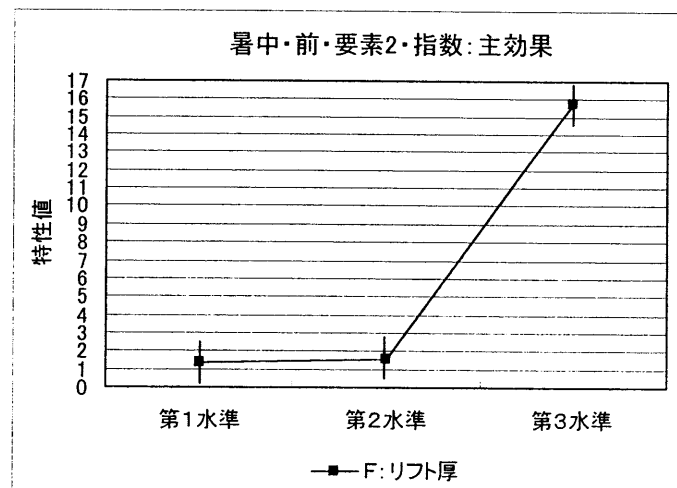


図 8.40 要素 2・要因効果図

4) 考察

外部拘束が卓越する箇所である要素2は、リフト厚によるH/Lの関係からリフト厚が大きいほど拘束度は小さくなる。水準による特性値差を見ると、マスコンクリートの暑中コンクリートの施工段階でH/Lの検討が留意点として挙げられる。

(5) 要素2－上部リフト打継後一ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.57 に示す。

表 8.57 要素2後・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
B	2	0.463	0.231	6.55594	0.0073	**	13.10
F	2	1.561	0.780	22.1014	0.0000	**	49.77
A*C	4	0.335	0.084	2.37063	0.0911		6.47
e	18	0.636	0.035				30.66
Total	26	2.994					100.00

2) 有意要因の効果推定を表 8.58 に示す。

表 8.58 要素2後・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
B	1.178	1.178	0.900	± 0.132	± 0.180
F	0.956	0.878	1.422		

総平均=1.085

3) 要因効果図を図 8.41 に示す。

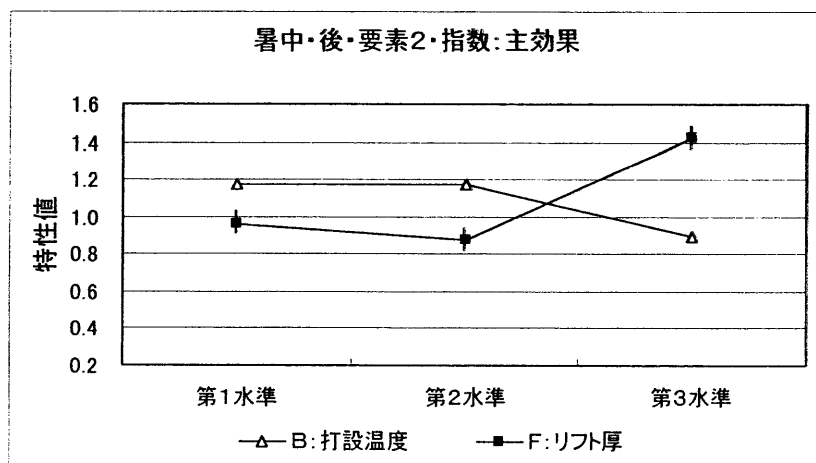


図 8.41 要素2後・要因効果図

4) 考察

打設温度が高いほど外部拘束は高くなるが、材料特性のクリティカル現象の終わった段階での上部リフト打設の影響はさほど大きくない。同様にリフト厚も打継前と比較するとH/Lの効果は確認できるが非常に小さい効果となっている。

(6) 要素3－上部リフト打継前－ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.59 に示す。

表 8.59 要素3・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
C	2	1.742	0.871	15.87848	0.0002	**	6.80
E	2	3.509	1.754	31.97975	0.0000	**	14.15
F	2	13.520	6.760	123.2203	0.0000	**	55.83
A*B	4	4.371	1.093	19.91899	0.0000	**	17.28
e	16	0.878	0.055				5.94
Total	26	24.020					

2) 有意要因の効果推定を表 8.60 に示す。

表 8.60 要素3・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
C	1.633	1.544	2.122	± 0.166	± 0.228
E	1.356	1.711	2.233		
F	1.233	1.300	2.767		

総平均=1.767

3) 要因効果図を図 8.42 に示す。

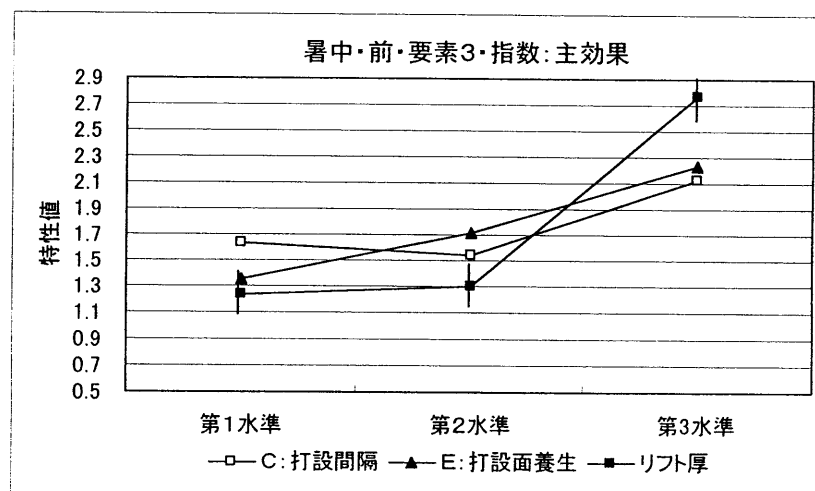


図 8.42 要素3・要因効果図

4) 考察

打設間隔の水準 1, 2 は信頼区間を考慮すればほぼ同等の特性値を示している。水準 3 の段階（打設後 21 日）では、指数が向上するのは引張域から圧縮域に移行することが理由と考える。打設面養生は、内部拘束の低減、リフト厚は、 H/L による外部拘束の低減効果を明らかにしている。要素 3 は、内部、外部拘束両面を受けることからこれらの 3 因子が有意要因となり寄与率も 77% と高くなっている。

(7) 要素 3 — 上部リフト打継後 — ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.61 に示す。

表 8.61 要素 3 後・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
B	2	17.143	8.571	2.23764	0.1573		3.81
C	2	34.243	17.121	4.46967	0.0410	*	10.68
D	2	23.890	11.945	3.11827	0.0886		6.52
F	2	85.503	42.751	11.16054	0.0028	**	31.26
A*B	4	27.355	6.839	1.78529	0.2083		4.83
A*C	4	22.548	5.637	1.47158	0.2819		2.90
e	10	38.306	3.831				40.00
Total	26						100.00

2) 有意要因の効果推定を表 8.62 に示す。

表 8.62 要素 3 後・有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
C	3.167	1.478	4.211	± 1.454	± 2.068
F	1.611	1.778	5.467		

総平均：2.952

3) 要因効果図を図 8.43 に示す。

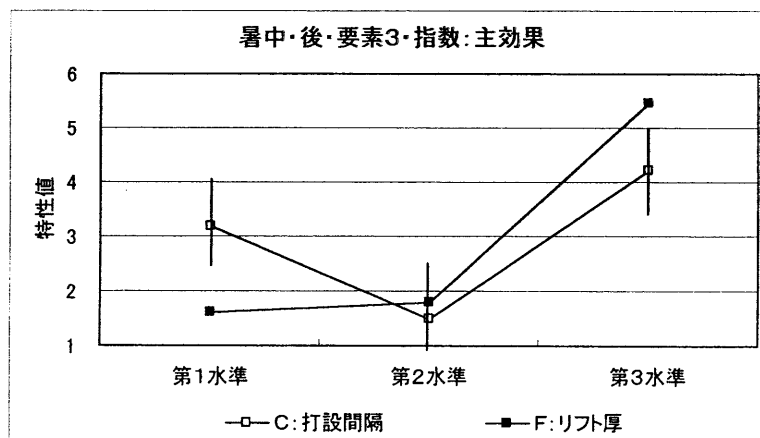


図 8.43 要素 3 後・要因効果図

4) 考察

上部リフト打設前と比較し、境界条件である打設面養生因子以外の打設間隔とリフト厚因子の効果が有意となっている。要素 3 は、内部拘束に加え上部リフトの体積変化による反力を外部拘束として受ける箇所である。従いリフト厚は、 H/L による外部拘束の低減と考える。寄与率は、上部リフトが打継がれることで内部拘束因子が 1.5 倍、外部拘束因子が 0.56 倍に変化しているが、特性値の水準間格差は、信頼区間を考慮すれば大きく変化していない。要素 3 は、上部リフトの打継前後で打設間隔、リフト厚による内部、外部拘束をうけ水準組合せによっては、非常にひび割れ指数が低くなる。

(8) 要素 4 - 上部リフト打継後 - ひび割れ指数

1) 分散分析結果を表 8.63 に示す。

表 8.63 要素 4 後・分散分析結果

Source	f	S	V	F0	Prob		ρ
B	2	0.394	0.197	14.37838	0.0149	*	5.01
C	2	1.672	0.836	61.00000	0.0010	**	22.48
D	2	0.796	0.398	29.05405	0.0041	**	10.51
E	2	0.356	0.178	13.00000	0.0178	*	4.50
F	2	3.027	1.514	110.45946	0.0003	**	41.02
A*B	4	0.435	0.109	7.93243	0.0348	*	5.20
A*C	4	0.270	0.068	4.93243	0.0757		2.95
A*F	4	0.308	0.077	5.62162	0.0615		3.46
e	4	0.055	0.014				4.87
Total	26	7.314					100.00

2) 有意要因の効果推定を表 8.64 に示す。

表 8.64 要素 4 後・有意要因の効果推

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
B	1.822	1.911	1.622	± 0.108	± 0.180
C	1.967	1.956	1.433		
D	1.878	1.933	1.544		
E	1.633	1.811	1.911		
F	1.456	1.656	2.244		

総平均 : 1.785

3) 要因効果図を図 8.44 に示す。

4) 考察

上下流養生以外の因子効果が有意とされた。打設温度が高いほど特性値は、低くなるのは内部拘束が大きくなる結果である。打設間隔は、水準 1, 2 の 10, 5 日に対して水準 3 で特性値が小さくなるのは、上部コンクリートとの温度差による外部拘束が大きくなるからと考察できる。セメント種別による特性値への影響は材

料特性である。寄与率は打設温度、打設面養生の約 2 倍となっている。暑中コンクリートの打継によるひび割れの危険性に対して、セメントの発熱特性にたいする検討の有意性を示している。打設面養生は、熱伝達率による断熱効果の効果を示している。リフト厚は、H/L による外部拘束の低減効果である。

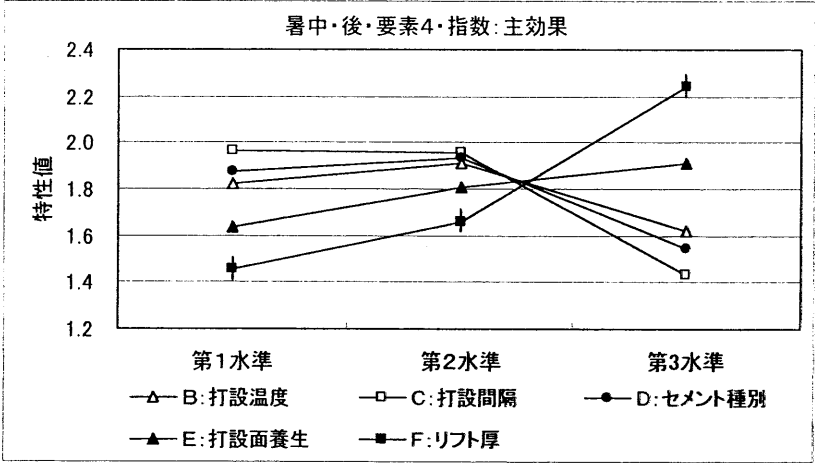


図 8.44・要素 4 後・要因効果図

8. 5. 3 分散分析結果のまとめ

分散分析による「ひび割れ指数」に有意とされた主要因を寒中、暑中コンクリート、解析要素および上部リフト打設の前後に区分し整理する。解析総括表を表 8.65 に示す。

表 8.65 分散分析有意要因総括表

要素	区分 因子	上部リフト打設前						上部リフト打設後					
		A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
1	寒中	—	—	—	—	○	◎						
	暑中	○	—	—	—	◎	◎						
2	寒中	—	—	◎	—	◎	◎	—	—	—	—	—	◎
	暑中	—	—	—	—	—	◎	—	◎	—	—	—	◎
3	寒中	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	○
	暑中	—	—	◎	—	◎	◎	—	—	○	—	—	◎
4	寒中							—	—	—	○	—	○
	暑中							—	○	◎	◎	○	◎

※ ◎99%の信頼率で有意とされる因子・○95%での信頼率で有意とされる因子

(1) 要素の考察

要素ごとに寒中、暑中コンクリート、上部リフトの打設による影響を比較する。

要素 1 : 耐久性を必要とする部位で内部拘束に注目した解析位置である。打設面養生とリフト厚による内部拘束の効果が有意要因となっている。暑中コンクリートの打継ぎ後は、打設間隔が長くなると外部拘束によりひび割れ指数の低下し、打設スケジュール＝工程管理が品質管理面で重要なことを示している。

要素 2 : 上部リフトの打設前では、暑中コンクリートと比較して寒中コンクリートは、リフト厚 (H/L による拘束度) 以外に打設面養生、打設間隔も有意要因となっているのは、強度発現の時間差と考察できる。寒中コンクリートにおける外部拘束には、内部拘束を最小限に止める留意が必要となる。上部リフト打設後の場合には、強度発現の早い暑中コンクリートの打設温度が高いほど内部拘束の反力による外部拘束が大きくなる。

要素 3 : 内部拘束の卓越する部位である。寒中コンクリートより体積変化現象の早い暑中コンクリートに打設間隔、打設面養生、リフト厚等内部拘束に影響する因子が有意とされる。一方寒中コンクリートでは、上部リフト打設後の段階でセメント種別による発熱特性、リフト厚が有意とされる。寒中と暑中での体積変化の速度差が、内部拘束の有意要因に影響する結果と考察できる。

要素 4 : 上部リフトが打継がれることで生じる内部、外部拘束は、寒中コンクリートが、セメント種別、リフト厚を 95% の信頼率で有意とし、暑中コンクリートは、この要素を 99% の信頼率で有意、さらに打設温度、打設面養生を有意とする結果である。要素 3 での考察で示した強度発現による体積変化の時間的差異が影響をすると考えられる。上部リフトの打設による影響への留意は、暑中コンクリートの施工組合せによるとも言い換えられる。

全体的に外観すると、今回設定の 6 因子 3 水準による組合せ解析結果は、リフト厚が多くケースで有意要因とされた。その他、初期における打設面養生、打設間隔の有意性も確認された。セメント種別の効果は、上部リフト打設後に有意性を示し、リフト打設によるマスコンクリートの内部拘束の低減を示している。

「ひび割れ指数」を特性値として分散分析により効果の有意性を検証した。特性値は、有意因子およびその水準組合せにより大きな値の変動を示している。解析条件の範囲での施工条件、施工方法の選択により特性値の信頼区間を含めた予測が可能であることが明らかになった。

(2) 上部リフト打設の影響

寒中コンクリート、暑中コンクリート別に要素、時系列に比較する。表 8.66,

8.67 に整理して示す。寒中コンクリートの場合要素1, 2は, 境界条件による外部拘束となる打設面養生, リフト厚が有意とされた。要素3, 4において上部リフトの打設前後を比較すると有意要因は, 内部拘束(セメント種別), 外部拘束(リフト厚)で寄与率もほぼ同じである。

表 8.66 寒中コンクリート上部リフト打設の影響

区分	ケース	上部リフト打設前						上部リフト打設後					
	因子	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
寒中	要素1	—	—	—	—	○	◎	/	/	/	/	/	/
	要素2	—	—	◎	—	◎	◎	—	—	—	—	—	◎
	要素3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	○
	要素4	/	/	/	/	/	/	—	—	—	○	—	○

表 8.67 暑中コンクリート上部リフト打設の影響

区分	ケース	上部リフト打設前						上部リフト打設後					
	因子	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
暑中	要素1	○	—	—	—	◎	◎	—	—	○	—	◎	—
	要素2	—	—	—	—	—	◎	—	◎	—	—	—	◎
	要素3	—	—	◎	—	◎	◎	—	—	○	—	—	◎
	要素4	/	/	/	/	/	/	—	○	◎	◎	○	◎

暑中コンクリートの場合, 上部リフトの打設前は外部拘束因子(打設面養生, リフト厚)が多く, 打設後は内部拘束因子(打設温度, 打設間隔, セメント種別)が加わる結果である。特性値に影響する因子は, 寒中コンクリートに比べ多くその分ひび割れの危険性が高いといえる。また寒中コンクリートと同様に因子, 水準組合せにより変動幅が大きく, 組合せによるリスクマネジメントの必要性を示す。

(3) 寒中コンクリートの温度

寒中コンクリートにおいては, 凍結による耐久性が大きな留意である。その評価としてコンクリート表面温度について解析した。結果を表 8.68 に示す。

表 8.68 寒中コンクリート表面温度の有意要因

要素	位置	表面コンクリート最高温度						表面・15cm 内部最高温度					
	区分	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
1	寒中	◎	◎	—	—	—	◎	◎	◎	○	—	○	◎

表面と内部 15cm を因子と寄与率で比較すると, 表面では, 境界条件となる型枠材料(養生条件)のが 56%, リフト厚 21%, 内部 15cm では 39%, 32%と変化する。打設温

度では、12%から16%となる。コンクリート表面より15cm内部では外部拘束から内部拘束の影響に移行している。寒中コンクリートの凍結対策は、打設温度、打設面養生以上に境界条件が重要であるといえる。実施工では、打設面養生、打設温度の計画は、工学的根拠による選択が試行される例が多いが、型枠養生はシートによる外気遮断、練炭、ジェットヒーター等加熱といった経験的手法が多い。今回工学的解析により養生効果が明らかになったことで施工法を選択が「特性値」に対して工学的、定量的(温度、ひび割れ指数)指標に対処できる。

8. 6 施工法の工学的評価に基づく合理的選定の提案^{50, 51)}

8. 6. 1 はじめに

前章での工法変遷の考察から、少子高齢化の国勢、循環型社会の将来に整合する土木施工法に求められ目的は「社会資本の長寿命化」であると結語し、その確保を「コンクリート構造物の耐久性」に求めた。施工法の変遷を考察する中で「安全性、信頼性の普遍性」の確保には、「経験的、定性的ではなく合理的で定量的な手法による施工法選択」＝「工学的評価に基づく施工法の合理的選定」が不可欠であり、仕様施工から性能照査に変革しつつある施工にも不可避となる。当研究の目的は、その選択手法の提案である。

土木施工法は、機械、化学、電気等々他分野の研究成果を取り込みながら土木工学を背景として社会的要請に呼応して発展してきた。施工主体の機械化による急速施工、大量施工、施工条件の拡大にもかかわらず、施工段階での施工手段は、目的とその手段といった定性的、経験的選択が「経済性、効率性」を評価軸として踏襲されてきた。前節でも記述した施工システムを構成する基本作業は、「流れ作業」を理想とする生産効率の向上を単一的に目的とする一般生産産業と異なり工学的目的を有するものである。そのためには、施工法の問題提起の考察で示した「工事データの工学的定量化」をいかに施工に直結させるかが課題となる。

その手法の提案を目的として、本研究では、「コンクリート構造物の耐久性」の確保に大きな影響を及ぼす「温度ひび割れ」に注目し研究を展開した。

8. 6. 2 提案の概要

本研究の目的である提案は、段階的な四つの目的により展開、構成した。

第一目的：土木施工法の将来展望の検証、その結果である「コンクリート構造物の耐久性」を確保する施工課題の提起。

第二目的：耐久性確保に関する初期施工における最重要課題として「温度ひび割れ」を対象とした施工要素の工学的定量化と展開

第三目的：第二目的の手法として実験計画法の採用と展開。

コンクリートの温度ひび割れは、若材齢時の体積変化に起因する。コンクリートの体積変化は、施工環境、材料条件等により径時的に変動する熱特性が主要因の一つである。コンクリートの熱特性に影響する要因種別と変動幅の組合せ実験を行えばその影響度合いが解析できる。実験計画法の採用に関して、大浜によれば「土木材料、施工方法の選定にあたり事前に実験によって決定しなければならないことが多い。従来行われてきた実験では、条件を数段階に変えて実験を行い実験値の平均値の差を出して判定することが多かった。しかし最近では、実験値の差を比較評価する際にその有効差を統計的に裏付けることの必要性がある。この目的に分散分析が用いられ、実験そのものを予め統計的に処理できるように実験を行う必要がある。」として実験組合せの合理性を指摘している⁴⁸⁾。実験計画法による組合せ解析は、実験結果を数値解析(多くの実験結果による算定式に基づく熱特性の径時変化)による数値実験と位置付けた。従いその要因と水準の組合せによる特性値を解析し、その結果を統計学的処理(分散分析)することで有意とされる主効果や交互作用の推定が可能である。解析は、与えられた熱特性条件による経時変化を算定した応力、温度であり、解析値の変動は、因子、水準の変動によるものである。従い変動の誤差を解析することにより因子、水準の有意効果の推定が可能となる。

第四目的：以上の手順により得られた成果を土木施工法の工学的評価による合理的選択法(ひび割れ指数の定量化によるリスクマネジメント手法)として提案。

有意要因とされる因子、水準の組合せによる特性値(ひび割れ指数等)の工程平均の推定(出現確率の信頼性)による施工法の選択手法。有意要因の特定は、工学的評価によるものである。有意因子の組合せに求められる特性値の工程平均は、施工法を工学的評価により定量化することで施工法の合理的選択指標となる。以上の4目的に対して前章までの展開を以下に集約して示す。

第一段階として、温度ひび割れ発生の特性要因を抽出した。コンクリートの耐久性に影響を及ぼす温度ひび割れは、コンクリートの若材齢時の施工管理が大きく影響する。施工管理の原点は、施工法を構成する基本作業がもつ性能目的の位置付けである。因子は、施工計画段階の要因と施工法の選択要因から抽出した6要因とした。抽出した因子の水準は、施工環境の厳しい寒中、暑中コンクリートの2ケースについて、実施工中のコンクリートダムをモデル(計測による効果の確認を考慮した)に標準的な3段階を設定した。水準は、温度応力解析条件の要素となる材料の熱特性に関する項目が比較できるように設定した。

若材齢時の体積変化を起因とする温度ひび割れ現象に因子と水準の組合せの有意効果をFEMによる温度応力解析により構造モデルの4要素について検証した。

また上部リフトの打設による影響も検証を行った。

この段階で施工に関わる施工環境＝外気温、使用材料＝セメント種別、施工設備および施工法＝打設間隔・打設温度・リフト厚・打設養生・型枠種別を熱特性に関連する工学的データに置き換え解析することで「施工工事データ」を工学的特性値として取り入れた。

第2段階では、解析ケースの因子水準の組合せの選定に実験計画法を適用した。今回の抽出因子、設定水準の組合せは、 $3^6=729$ ケースになるが、実験計画法の導入により27の組合せにより効率的に行うことができた。

温度応力の注目点となる4要素について、寒中、暑中、上部リフト打継ぎ前後の4パターンを解析し、ひび割れの特性値として「ひび割れ指数」の最小値を求めた。寒中コンクリートでは、凍結が耐久性に大きく影響するのでコンクリートの表目温度と表面より内部15cmについても解析した。

第3段階では、解析値をデータとして分散分析による有意要因をF検定により検証した。

第4段階では、分散分析により有意要因効果と検証された因子、水準に関して考察を行った。因子、水準の組合せによる特性値の信頼区間は、施工法の組合せによる「温度ひび割れ＝耐久性要素」に呼応するリスクマネジメント手法として活用できるとの結論を得た。

本節が最終目的に対応する第5段階となる。

分散分析により検証される有意な要因の効果推定は、有意因子の水準による特性値の信頼範囲を示す(因子の水準効果が明らかになる)。このことは、主効果や交互作用から実験条件(因子の水準組合せ)に応じた特性値の期待値(工程平均)を有意要因の効果推定から容易に求めることができる。言い換えれば「施工法を工学的に評価し、その選択を特性値として定量化」が可能となる。

分散分析による因子水準の組合せによる特性値＝工程平均(最適条件)の推定による「施工法の工学的評価に基づく合理的選定」である。

工程平均による信頼範囲は、因子水準組合せがいくつかのデータの平均と見なせるか(有効反復回数)により決まる。これは、有意となった一つの因子に関して異なる水準で母平均がどれほど異なるかを推定する場合の平均データ数となる。つまり実験計画法解析では、その組合せが1回でもこの有効反復回数の情報となり信頼率が高くなる。今回提案する95%での信頼区間の特性値は、施工へ反映してもその信頼性確保が可能である。

本節は、前節8.5での分散分析結果の考察による施工組合せの工学的評価をもとに特定条件における工程平均の推定を行う。

工程平均の推定は、有意とされた因子の主効果、交互作用の水準組合せによる

による特性値(ひび割れ指数, コンクリート温度)の変動を示す. その組合せによる変動範囲は, 所要性能を指標とした工学的根拠による施工法(水準の組合)選択を合理的に可能とする手法になる. その具体的展開をグラフ, 表を用いた手法を以下に提案する.

8. 6. 3 具体的提案事例その1

(1) 第一例: 主効果が2因子の場合

寒中コンクリートの上部リフト打設後要素3の場合

解析値の分散分析による有意要因の効果推定は, 表 8.66 に示す.

水準効果推定表からセメント種別とリフト厚の特性値に対する水準の傾向が概ね推測される. 上記表を基に水準組合せによる9通りの行程平均の推定を行う.

表 8.69 有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
D	5.544	2.333	1.778	± 1.917	± 2.687
F	2.367	2.067	5.222	± 1.917	± 2.687

総平均 3.219


工程平均推定, 有効反復回数は表 8.67、8.68 で示す.

表 8.70 工程平均の推定

	F1	F2	F3
D1	4.69	4.39	7.55
D2	1.48	1.18	4.34
D3	0.93	0.63	3.78

表 8.71 有効反復回数と信頼区間

有効反復回数	95%信頼区間	99%信頼区間
5.4	± 2.474	± 3.469

95%信頼区間(± 2.47)により, ひび割れ指数2以上の確保ができる施工組合せを考察する. 表からは, $F1 * D1$, $F2 * D1$, $F3 * D2$, $D1$ の組合せ以外はひび割れ指数2以上を確保できない結果となる. 要素3は, コンクリート内部拘束を注目した要素である. フライアッシュ中庸熱セメントはリフト厚に関係せず満足できるが中庸熱ポルトランドセメント, 高炉セメントは, リフト厚の選択によりひび割れを引き起こす危険率が高いことになる. この結果を受け危険率の少ないセメント種別とリフト厚による施工を選択すれば問題はない. 因子の水準は, セメント種別では, 打設温度, 単位体積重量によりまた, リフト厚は, 施工の工法, 工程により変化させることができる. 2因子水準の関係を図 8.45 に等高線グラフにして示す.  で表示される上部以上が条件を満足する範囲である. このグラフから特性値の推移区間を想定できるので, 表による判断と併せることで工法の組

合せや施工材料条件の工夫による施工法の選択肢(経済的要素の組み込みも含み)が多くなる。要求性能規準とひび割れ指数を対比させたリスクマネジメントによる合理的な施工法の選定となる。

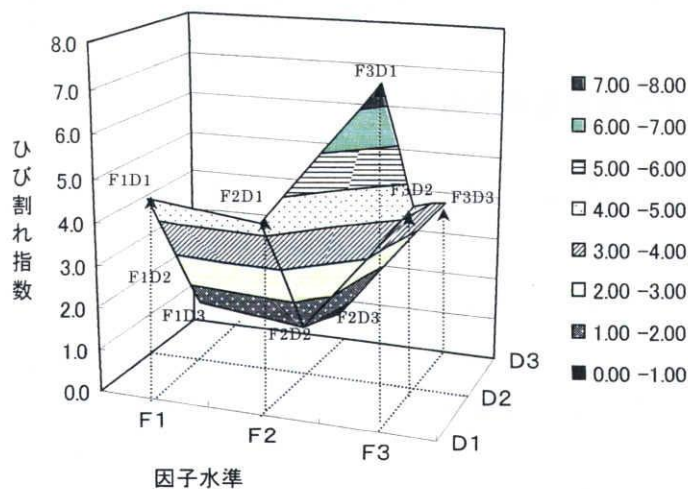


図 8.45 水準等高線グラフ

(2)第2例：主効果が3因子ある場合の工法選定について
上部リフト打設前における要素2の有意要因の効果推定を表 8.72 に示す。

表 8.72 有意要因の効果推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
C	13.278	20.000	8.511	± 2.316	± 3.159
E	9.744	14.311	17.733		
F	9.856	11.933	20.000		

総平均 13.920

因子の寄与率を表 8.73 に示す。

表 8.73 有意因子の寄与

因子	C	E	F
寄与率	35.48	16.40	30.39

3因子3水準の組合せは表 8.74 に示す 27 ケースとなる。工程平均は以下の結果となる。組合せとして分散分析における寄与率の高い因子水準を第 1 に固定した組合せにより算定した。有効反復回数、信頼区間を表 8.75 に示す。

表 8.74 因子水準組合せ

列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
E	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
F	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3
特性値	5.0	9.6	13.0	7.1	11.7	15.1	15.2	19.7	23.2	11.7	16.3	19.7	13.8	18.4	21.8	21.9	26.5	29.9	0.3	4.8	8.2	2.3	7.0	10.3	10.4	15.0	18.4

表 8.75 有効反復回数と信頼範囲

有効反復回数	95%信頼範囲	99%信頼範囲
3.857	±3.538	±4.826

この結果を図 8.47 に示す。因子の寄与率高い打設間隔水準をベースに他の因子水準効果による変動形態がパターン化していることがわかる。

95%の信頼範囲を考慮して、ひび割れ指数 2 の確保を目標とする場合、特性値 5.5 以上の組合せによる施工を行えば良いことになる。散布図から打設間隔水準 1 と 3 についてひび割れ指数の目標値以下となる組合せについて検討すればよいことがわかる。

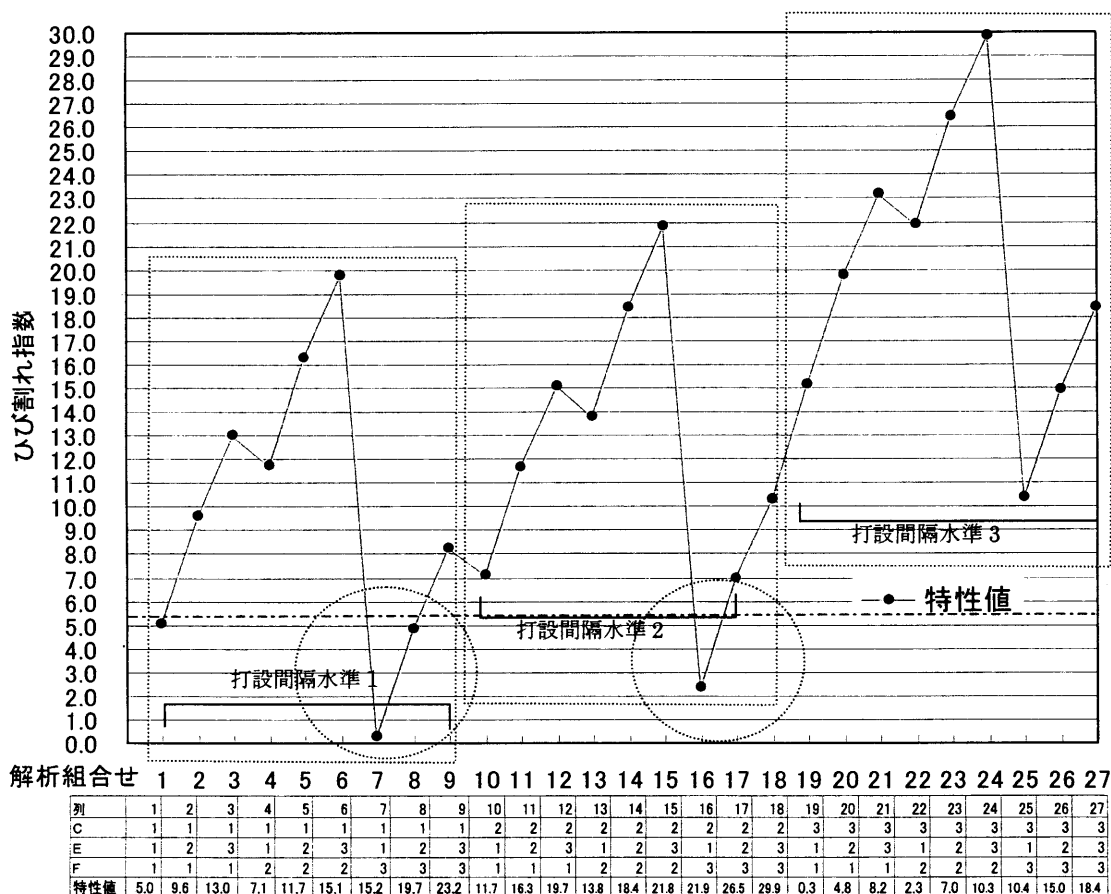


図 8.46 因子・水準散布図

1) 打設間隔水準 1 の場合

打設間隔水準を 1 に固定した場合の打設面養生とリフト厚の工程平均は表 8.73 に示す。表から E 1 * F 1 の組合せの危険率が高いと判断できる。リフト厚が薄い場合の打設面養生の方法がひび割れ効果として提示されている。

表を等高線で示すと図 8.49 になる。F 1 から F 2, E 1 から E 2 に移行する段階で目標とする指数が確保できることがわかる。施工方法への反映としてリフト厚

75cm～100cm，養生方法を散水～湛水の条件設定の検討が可能となる。

表 8.76 工程平均

打設間隔水準1			
	F1	F2	F3
E1	5.02	7.10	15.16
E2	9.59	11.66	19.73
E3	13.01	15.08	23.15

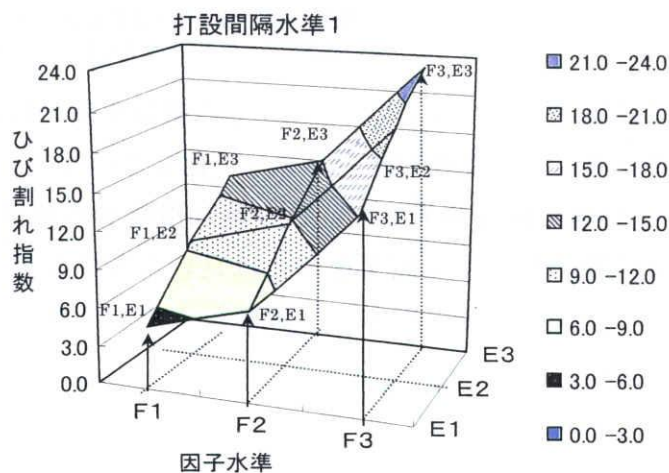


図 8.47 水準等高線グラフ

2) 打設間隔水準が3の場合

工程平均は表 8.77 となる。また検討 1 と同様に水準等高線グラフを図 8.48 に示す

表 8.77 工程平均

打設間隔水準3			
	F1	F2	F3
E1	0.25	2.33	10.40
E2	4.82	6.99	14.96
E3	8.24	10.32	18.38

表から，ひび割れ指数が6以上となるのは，F水準が1の場合E水準3となる。F水準2の場合も同様である。F水準が3の場合はE水準は1～3でも良いことになる。

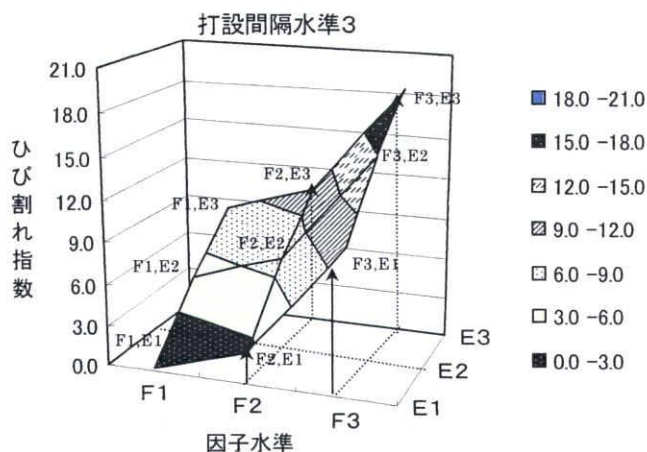


図 8.48 水準等高線グラフ

グラフで見ると $F1 * E3 \sim F2 * E2, 3$ および $F3 * E1, 2, 3$ にかけてひび割れ指数の変化が明瞭となる。外部拘束を注視した要素2は，上部リフト打設前では，所要ひび割れ指数確保をする施工条件は，打設間隔により異なり打設間隔水準が1，2の場合，リフト厚により打設面養生水準(境界における熱伝達率)を精査する必要がある。10日間隔で打設する場合では，75cmリフトでは，湛水か断熱養生が必要となる。5日間隔で打設する場合では，75cmリフトでは，断熱養生以外は所要指数が確保できない。100cmリフトでは，湛水以上の養生施工が必要とされる。

(3)まとめ

今回解析した寒中コンクリートで有意要因とされた因子の組合せが、各要素4においてひび割れ指数2以上を95%の信頼率で確保できる組合せ条件を整理する。
上部リフト打継前での結果

要素1：F3*E1, E2, E3

要素2：打設間隔C1の場合－F1*E1

打設間隔C3の場合－F1*E1, E2・F2*E1

上部リフト打設後

要素2－F3, 要素3－F1*D1, F2*D1, F3*D2, D1

要素4－F1*D1, F3*D1

これらのリスクを反映した細部の施工計画，施工法の選択が可能になる．工学的評価によるひび割れ指数をもとに要求性能に対応する段階的な施工選択が合理的に可能となる．要求性能に対応する施工選択は，品質を担保とした経済的比較も可能となる本来の原価管理といえる．

8. 6. 4 具体的提案事例その2

(1)暑中コンクリートで上部リフト打設前における要素3は，有意要因となる因子3，交互作用1となる．この有意要因の効果推定を表8.78，8.79に示す．

表 8.78 要因効果の推定

要因	第1水準	第2水準	第3水準	95% 信頼区間	99% 信頼区間
C	1.633	1.544	2.122	±0.166	±0.228
E	1.356	1.711	2.233		
F	1.233	1.300	2.767		

表 8.79 要因効果の推定

要因	B1	B2	B3	95% 信頼区間	99% 信頼区間
A1	2.467	1.800	1.233	±0.287	±0.395
A2	1.367	2.333	1.700		
A3	1.867	1.200	1.933		

分散分析の寄与率はF=56%，A*B=17%，E=14%である．交互作用の影響も考えA, B 因子組合せでの特性値の低い条件と最低値を示した列組合せを固定して3つの主効果による工程平均を求め散布図(図8.49)を作成した．この工程平均の有効反復回数，信頼区間を表8.80に示す．

表 8.80 有効反復回数・信頼区間

有効反復回数	95%信頼区間	99%信頼区間
1.800	±0.370	±0.510

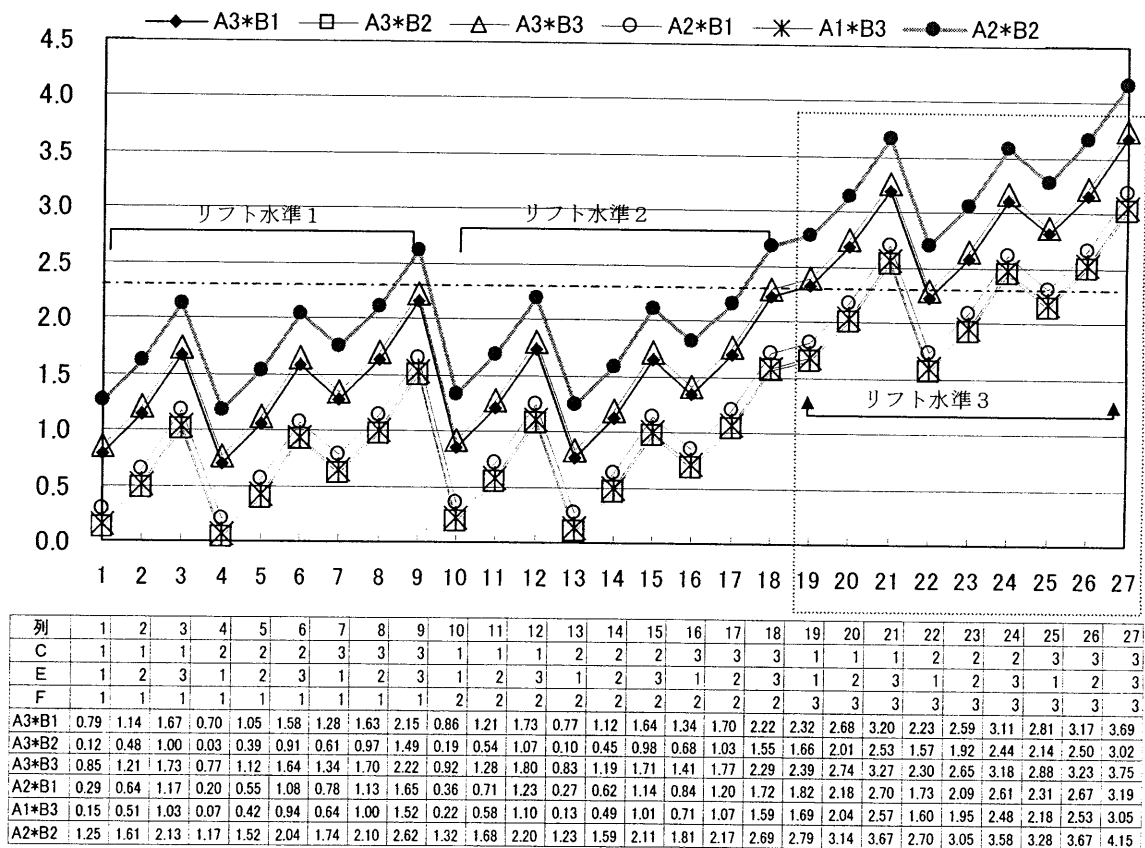


図 8.49 因子水準散布図

ひび割れ指数の確保目標値を 95%の信頼区間をふくめ 2.37 として考察する。この分散図の特性値は、 $A3*B2 < A1B3 < A2B1 < A3*B1 < A3*B3 < A2B2$ (特性値=1.200<1.233<1.367<1.867<1.933<2.333) となっている。A と B 因子の水準組合せの効果と同じ特性値順位で推移している。

散布図で特性値の下降点の因子水準組合せを一覧にすると E1 が共通していることがわかる。リフト厚、打設間隔の水準に関せず打設面養生方法の水準 1 が影響していることが推定できる。この関係を表 8.81 に整理する。

表 8.81 因子と水準組合せ

因子, 列	1	4	7	10	13	16	19	22	25
C	1	2	3	1	2	3	1	2	3
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F	1	1	1	2	2	2	3	3	3

目標値を満足する組合せは、 $A2*B2$ 以外は、リフト厚水準 3 の組合せに限定される。 $A2*B2$ では、リフト厚 3 水準以外は、 $C3*E3*F1$, $C3*E3*F2$ の組合せが目標値を確保できる。他の A, B 因子水準で目標値を満足する組合せは、リフト厚水準 3 を検討すれ

ばよいことが推察できる。

検討組合せとなる A2*B2 以外の列 19～27 の特性値を A,B 組合せに整理(表 8.82)して特性値を等高線グラフにして検証する。

表 8.82 交互作用と因子水準組合せ

列	19	20	21	22	23	24	25	26	27
C	1	1	1	2	2	2	3	3	3
E	1	2	3	1	2	3	1	2	3
F	3	3	3	3	3	3	3	3	3
A3*B1	2.32	2.68	3.20	2.23	2.59	3.11	2.81	3.17	3.69
A3*B2	1.66	2.01	2.53	1.57	1.92	2.44	2.14	2.50	3.02
A3*B3	2.39	2.74	3.27	2.30	2.65	3.18	2.88	3.23	3.75
A2*B1	1.82	2.18	2.70	1.73	2.09	2.61	2.31	2.67	3.19
A1*B3	1.69	2.04	2.57	1.60	1.95	2.48	2.18	2.53	3.05
A2*B2	2.79	3.14	3.67	2.70	3.05	3.58	3.28	3.67	4.15

表 8.83 交互作用区分による工程平均

A3*B1	E1	E2	E3
C1	2.32	2.68	3.20
C2	2.23	2.59	3.11
C3	2.81	3.17	3.69

A3*B2	E1	E2	E3
C1	1.66	2.01	2.53
C2	1.57	1.92	2.44
C3	2.14	2.50	3.02

A3*B3	E1	E2	E3
C1	2.39	2.74	3.27
C2	2.30	2.65	3.18
C3	2.88	3.23	3.75

A1*B3	E1	E2	E3
C1	1.69	2.04	2.57
C2	1.60	1.95	2.48
C3	2.18	2.53	3.05

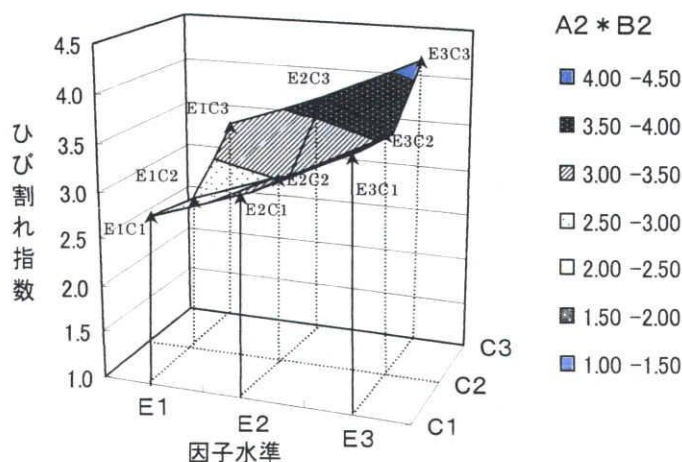
A2*B1	E1	E2	E3
C1	1.82	2.18	2.70
C2	1.73	2.09	2.61
C3	2.31	2.67	3.19

A2*B2	E1	E2	E3
C1	2.79	3.14	3.67
C2	2.70	3.05	3.58
C3	3.28	3.67	4.15

リフト厚 3 水準で全般的に E 水準が 1～3 に移行するとひび割れ指数は上昇し、C 水準は 1～2 で少し下降し 3 水準で上昇することが特徴としてわかる。打設面養生と打設間隔が関連することが示されている。解析したケースを考察する。

①：A2*B2*F3 の場合

全て目標値を確保できる。E 因子は水準 1～3 で上昇し C 水準は 1～2 で僅かに下降し 3 で上昇する。このケースの場合には、全般的な傾向となる。この関係を図 8.50 水準等高線グラフにより表す。



② : $A3 * B3 * F3$ の場合

$E1 * C1$, $C2$ が目標値の境界になる。

$E2$ 水準となれば C 因子の水準は問題とならない。この関係を図 8.54 水準等高線グラフにより表す。

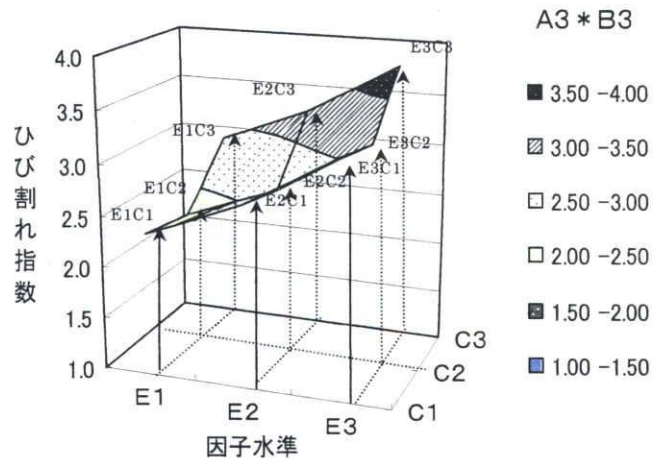


図 8.51 水準等高線グラフ

③ : $A3 * B1 * F3$ の場合

$E1, 2 * C1, 2$ が目標値を満足できない。

$E1$ であっても C 因子が 1 から 3 に移行する段階で目表値が得られる。この場合養生方法が散水とすればリフト厚 150cm では、打設間隔は、10～21 日の間で検討して施工することが必要となる。この関係を図 8.55 水準等高線グラフにより表す。

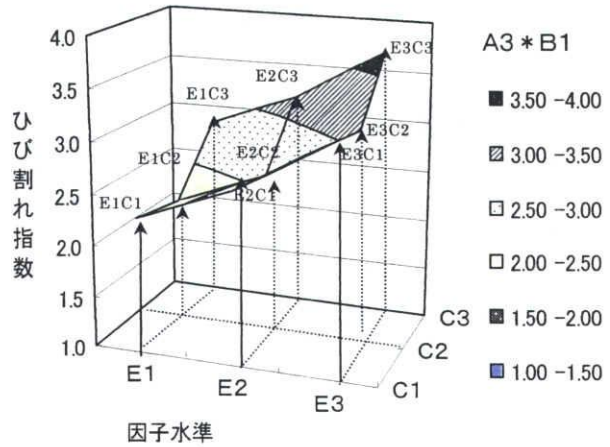


図 8.52 水準等高線グラフ

④ : $A2 * B1 * F3$ の場合

指数の満足できる組合せは限定される。

$E2 * C3$ と $E3 * C1$ を結ぶ線が 2.5 以上となる。打設間隔が $C1$ の場合 $E3$ 打設間隔が $C2$ の場合 $E3$ 打設間隔が $C3$ の場合 $E1 \sim E2$ の熱伝達率により検討ができる。 $E2$ 以上なら問題はない。この関係を図 8.56 水準等高線グラフにより表す。

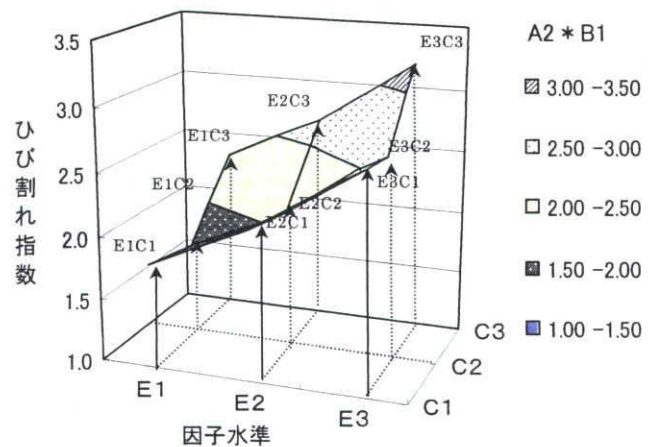


図 8.53 水準等高線グラフ

⑤：A1*B3*F3 の場合

上記とほぼ同じ水準であるが C 水準に関せず E1 水準では目標値は確保できない。打設間隔が C1 の場合は該当する E 水準はない。打設間隔が C2 の場合 E3 打設間隔が C3 の場合 E2～E3 の熱伝達率により検討ができる。A2*B1*F3 の場合より養生条件は、限定される。この関係を図 8.57 水準等高線グラフにより表す。

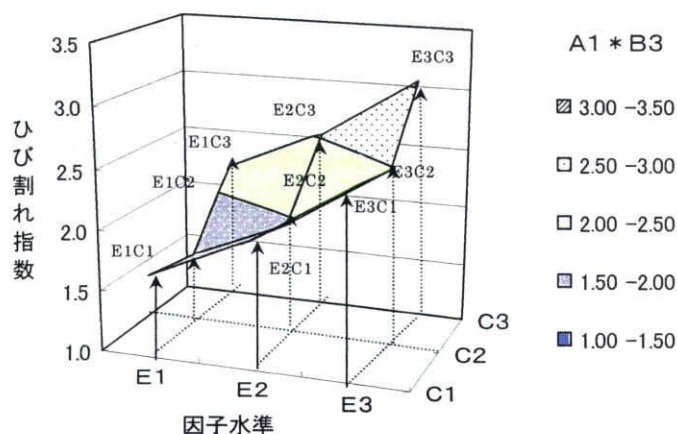


図 8.54 水準等高線グラフ

⑥：A3*B2*F3 の場合

目標値を確保できる組合せが少ない。E1, E2 水準および C1, C2 水準では、満足できず (E2*C3 が 2.5 境界) C3*E2, E3 により確保できる。この場合は打設間隔が固定された条件での養生選択となる。この関係を図 8.58 水準等高線グラフにより表す。

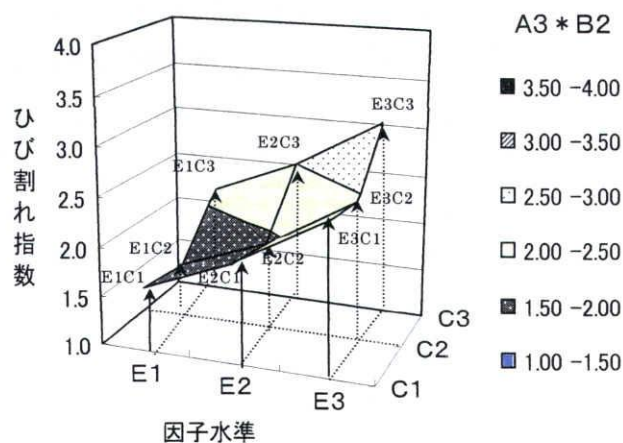


図 8.55 水準等高線グラフ

(2)分散分析の結果多くの主効果と交互作用が有意と判断された場合の対応手順と本例の結果を以下にまとめる。

- ㉑：施工法として最適，回避組合せ条件となる特性値を有意とされる主効果，交互作用の行*列組合せデータの信頼区間より期待値を決定
- ㉒：交互作用との組合せによる工程平均を求めて散布図を作成
(寄与率の高い要因の水準を主体に他要因の水準を組み合わせる)
- ㉓：期待値以下(以上)となる因子，水準条件(行*列組合せ)を散布図により判断
(施工法選択を最適，回避条件とするか目的により決定，例えば図 8.49, 表 8.81)
- ㉔：㉓で選択した施工法選択条件による工程平均を条件に要因水準の組合せからせ工法を選択する。
- ㉕：総合判断を行う。併せて特性値の等高線図による推移状況から因子水準の再

設定(施工条件や経済性と要求性能との比較検討)を行う。

このフローで当事例を考察する。

④：本例は，確認のため多くの交互作用との組合せを試行した．その結果は，交互作用で示される行×列特性値の高低が反映される．本例の特性値は， $A_3 \times B_2 < A_1 \times B_3 < A_2 \times B_1 < A_3 \times B_1 < A_3 \times B_3 < A_2 \times B_2$ であり，順次行列を固定して主効果の組合せによる工程平均を求めた．主効果の組合せは，分散分析による寄与率の高い因子水準をベースに配列する．F 因子の水準で散布状況が示される．

⑤：④で求めた特性値の工程平均を分散図にして所要特性値に対応できる(できない)組合せを選択する．この段階で特性値を変動させる主因子が明らかになる．本例では，打設面養生水準である．

⑥④：最適条件，回避条件で検討するかは，散布図により検討数の少ない方を選択する．本例では，リフト水準 3 で所要特性値が確保できる．主効果で寄与率の高い因子の水準で因子と水準を再度構成して一覧表にする．リフト水準 3 の場合による他の 2 因子水準組合せによる特性値一覧表を作成する．

⑥：試行のため 6 例を行った．

i・ $A_2 \times B_2$ 以外は， $A_i \times B_j \times F_3$ でしか所要値が確保できない． $A_2 \times B_2$ の条件でも $C_3 \times E_3$ の組合せに限定して F_1, F_2 の選択が可能である．要素 3 は，内部，外部拘束に注目して解析した．上部リフトが打設される前の状況下では，リフト厚が厚いほど優位 (H/L 効果による外部拘束およびその反力による内部拘束) であるといえる．また打設面養生が E_1 水準(散水)以上を考える必要があることも示している．

ii・ $A_i \times B_j \times F_3$ の 5 組合せの結果を表 8. 84 に示す．

表 8. 84 交互作用組合せと因子水準リスク表

主効果組合せ 交互作用組合	C ・ E 水 準								
	E 1			E 2			E 3		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
A 3 * B 3			○	○	○	○	○	○	○
A 3 * B 1			○	○	○	○	○	○	○
A 2 * B 1						○	○	○	○
A 1 * B 3						○		○	○
A 3 * B 2						○			○

散布図による下降点での共通する主効果水準 E_1 による影響がかなり鮮明にわかる．本例の解析結果より，今回設定した条件下での暑中コンクリート要素 3 のひび割れ指数の確保には，打設面養生方法として散水<湛水<断熱養生の順で厳しい施工管理が必要となる．また外部拘束上リフト厚が厚いほど，また打設間隔

は 10～21 日で計画することが有利となる。

8. 6. 4 まとめ

(1) 本研究の提案

「土木施工法の工学的評価と合理的選択」として提案する。

本研究では、寒中、暑中コンクリートの 2 ケース，要因を 6 要因，3 水準の組合せ，上部リフト打設前，後，解析 4 要素と網羅的条件を設定した。従い解析，分析も複雑化した。しかし現実の施工では，施工環境，施工条件等が決まり，因子と水準数は，2～3 程度に限定でき簡易となる。

型枠材質，打設温度，打設間隔，セメント種別，打設面養生，リフト厚を不確定因子としての水準設定をしたが，施工計画段階での因子と施工段階での因子を区分すれば，実施工での因子水準数は減少する。セメント種別，リフト厚を固定して 4 因子を 2 水準の解析は， L_{16} (2^{15})，2 因子 3 水準なら L_9 (3^4) 等の組合せで可能となる。

(2) 本研究による提案の特徴

施工法の選択要素と水準の組合せによる特性値のマトリックス化による簡易的判断も可能となる。その特徴として以下の項目がある。

①従来の施工選択に対応する工学的評価は，単一条件での適否が一般的であるのに対して本提案は，工程平均による特性値の範囲が施工条件の選択により可能となる。特性値の幅と施工法選択がリンクされることに大きな意味を持つ。施工構造物の要求性能に対応する特性値の選択が可能になることは，施工におけるリスク管理であり，工学的評価を背景とした経済的施工選択となる。

②諸条件の組合せは，「実施工」への工学評価のリアルタイムなフィードバックとなる。施工段階での工事データが工学的数値で認識され，施工後の品質担保が定量的に評価できる。

本提案の最大目的は，施工によるコンクリート構造物の耐久性確保であり，施工原因による早期劣化の削減である。そのためには施工法が，経験的，定性的な判断ではなく客観的，工学的評価によることの認識化である。時代のパラダイムにおける耐久的なコンクリート構造物による長寿命化は，大きくは地球環境保全，循環社会の実現と将来の国勢である少子高齢化の経済状況，熟練技術者不足等の課題に不可欠な課題である。良質の社会資本の蓄積と継続的発展による後生への継承は，最前線でその実践にあたる土木技術者の責務であると考える。

第8章参考文献

- 1) コンクリート研究室：コンクリート構造物の長寿命化に関する取り組み，土木技術資料 43-2，2001，pp. 16
- 2) 魚本健人：コンクリート構造物の建設と劣化対策．S. Q. C 構造物開発・普及協会平成 12 年度特別講演，平成 12 年 11 月 13 日
- 3) 岡村甫，前川宏一、小澤一雅：平成 11 年度土木学会コンクリート標準示方書「施工編」～耐久性照査型～の概要，コンクリート工学 Vol. 38, No. 4, pp10～15, 2000. 4
- 4) 大臣官房技術調査課建設コスト管理企画室長「レディミックスコンクリートの品質確保について」について，同運用について平成 13 年 5 月 16 日
- 5) 末松静也，清原千鶴，大谷俊浩，白川敏夫，上田賢司：コンクリート技術の展望，大分大学工学部研究報告 43 号，平成 13 年 3 月，pp. 1～14
- 6) 岡田清，明石外世樹，小柳洽共編：新編土木材料学・国民科学社．1994
- 7) 田澤栄一：コンクリートの欠陥とその対策，コンクリート工学 Vol. 37, No. 10, pp. 3～10, 1999. 10,
- 8) 森本博昭：マスコンクリートの温度ひび割れ危険度評価ならびに温度応力のリラクセーション解析にかんする基礎的研究，京都大学博士論文，平成元年 10 月
- 9) 芦野正博：ONR 工法の紹介，ORIKEN 技法第 11 号，pp. 80～85
- 10) 長瀧重義，久田真：土木コンクリートの技術の変遷と将来展望，コンクリート工学 Vol. 37, No. 1, pp. 4～12, 1999. 1
- 11) 永瀧重義監修：コンクリートの高性能化，pp. 106～111・技報堂，1997. 11
- 12) 梶田佳寛：構造物の高性能化を目指す 21 世紀のコンクリート技術－建築の立場から，コンクリート工学 Vol. 39, No. 1, pp. 11～16, 2001. 1
- 13) (社) 日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書：マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括，pp. 1～16, 1985, 11
- 14) 平賀友晃，倉林清：コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度メカニズムに関するコロキウム論文集，(社) 日本コンクリート工学協会，pp 1～6, 1982. 9
- 15) 浅野幸男：コンクリート技術の動向と耐久性について，平成 9 年 5 月 (社) 中部建設業協会講習会テキスト，pp. 1～29
- 16) 日経コンストラクション 2001. 6. 22：コンクリート補修実践講座第 1 回「知っておきたい 50 のキーワード」，pp. 88～91
- 17) 十河茂幸：マスコンクリート，コンクリート工学 Vol. 37, No. 6, pp. 41～45, 1999. 6

- 18) 山本泰彦, 中根淳: コンクリートの品質の展開「耐久性」「施工性」, セメント・コンクリート No500, pp. 111~118, 1988. 10
- 19) 鮎田耕一: コンクリート構造物の耐久性向上の問題点とその対策—凍害(1), コンクリート工学 Vol. 32, No. 10, pp. 131~136, 1994. 10
- 20) 鎌田英治: 硬化コンクリート中の水分凍結, コンクリート工学 Vol. 32, No. 9, pp. 15~17, 1994
- 21) 松藤泰典, 小山智幸: 暑中コンクリートの特性と対策, コンクリート工学 Vol. 39, No. 3, pp. 21~28, 2001. 3
- 22) 加藤十良, 岡山孝: 寒中コンクリート養生技術, 大日本土木技術年報平成 8 年度, pp. 153~162
- 23) 大日本土木株式会社・マスコンクリートの寒中施工技術の手引き書 1996. 4
- 24) 片平博: コンクリートダム of 堤体内温度分布とその経年変化, 土木技術資料 43-2(2001), pp. 10~11
- 25) 土木学会: コンクリート標準示方書, 平成 11 年度版・施工編
- 26) 矢野恒太郎記念会編: 日本国勢図絵 2001・国勢社, pp. 34~39
- 27) 建設省河川局監修, 佐々木才郎編集: 多目的ダムの建設第 5 巻施工編, 昭和 55 年
- 28) 堀和夫編: 土木施工法講座第 10 巻・ダム施工法, 山海堂・昭和 53 年 9 月
- 29) 糸林芳彦編: 土木学会編・新体系土木工学 76・ダムの施工, 技報堂・昭和 55 年 12 月
- 30) 編者森口繁一: 新編・数値表, 日科技連出版, 1990
- 31) 宇部三菱セメント株式会社「技術資料」
- 32) 土木学会: 最近のマスコンクリート技術, pp. 4~7, 平成 8 年 11 月
- 33) 平賀友晃, 倉林清: コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集・コンクリート工学協会, pp. 1~5, 昭和 57 年 9 月
- 34) 土木学会: 平成 11 年度制定・コンクリート標準示方書「設計編」「施工編」
- 35) (社) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書日本マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括, pp. 1~16, 1985, 11
- 36) 飛島建設, 大日本土木: 蓮ダム工事誌・平成元年 3 月
- 37) 水資源開発公団一庫ダム建設事務所: 一庫ダム工事誌・昭和 59 年 3 月
- 38) 間, 大日本土木: 大島ダム工事誌, p. 6~46, 6-309, 平成 12 年 3 月
- 39) 岐阜県: 岩村ダム工事誌, 第 2 章 p. 2-54~2-57, 第 6 章 p. 6-12~6-24, 平成 11 年 3 月

- 40) 奥村組，大日本土木：三春ダム工事誌 p37，85～90，平成 8 年 3 月
- 41) 田口玄一：新版実験計画法上下巻・丸善株式会社 1972，11
- 42) 谷津進：実験の計画と解析，基礎編・財団法人日本規格協会，2001，11
- 43) 中村義作：よくわかる実験計画法・近代科学社，1997，5
- 44) 安藤貞一，田坂誠男：実験計画法入門，pp. 1～37 日科技連出版社，2001，2
- 45) 大村平：実験計画法と分散分析のはなし，pp. 122～212，日科技連出版社，2002
- 46) 朝尾正，安藤貞一，楠正，中村恒夫：新実験計画法 p 105，日科技連出版社
- 47) 数値表・日科技連出版，pp. 30～36，1990
- 48) 大浜文彦：朝倉土木工学講座・第 7 巻土木材料学，pp. 36～45，朝倉書店，1970
- 49) 松下博通，大和竹史，大津政康，山崎竹博，上尾嗣一，大友 建：マッシブな橋脚躯体に発生する温度ひび割れの計測および解析によるひび割れ現象の評価，北九州空港連絡橋設計・施工委員会コンクリート部会報告，2001. 9
- 50) NGUYEN CAO QUY，本田正治，新美孝之介，森本博昭：ダム施工時の温度ひび割れ要因の解析について，
- 51) 新美孝之介，大倉浩二，本田正治，森本博昭：ダム施工の工学的評価について，コンクリート工学年次講演論文集，Vol. 25，2003（投稿中）
- 52) 志水茂明：ダム施工の実際，ダムコンクリートの温度規制 pp. 315～323，（社）全日本建設技術協会・昭和 60 年

第9章 現場計測による温度ひび割れ対策工の評価^{1, 2, 3)}

9. 1 はじめに

前章では、工学的評価に基づく定量的指標により施工法を合理的に選択する手法として実験計画法を適用した。適用例として、施工環境の厳しい寒中コンクリート、暑中コンクリートの施工条件組合せによる数値解析実験を行った。その結果(特性値=ひび割れ指数、コンクリート温度等)を統計的に解析(分散分析)した。解析結果によって得られた有意な効果因子の組合せにより算定される特性値の工程平均を指標にして、合理的な施工法を選択手法を提案した。提案の目的は、実施工への反映による良質なコンクリート構造物の構築をすることにある。その実現を図るため実施工中のTダムへ解析結果を展開し、その検証として計測工を実施した。ダムコンクリートの施工では、初期欠陥の主要な原因となる温度応力・ひび割れを制御するために種々の対策工が実施される。低発熱セメントの使用、各種クーリング工法、保温養生などは、代表的な温度ひび割れ対策工として広く採用されてきた。しかし、これらの温度ひび割れ対策工の実施にあたっては、従来から経験による部分が多く、理論的解析により事前に各種対策工の効果を評価した上で、その施工法を選定、評価した例は少ない。特にTダムで適用される中庸熱フライアッシュセメントは、水和発熱が低く特に夏期施工における温度ひび割れ対策として有効である。ただし、強度発現が緩やかであるので、冬期施工においては凍害に対する養生方法の検討が必要である⁴⁾。冬期施工における凍害防止のために種々の保温養生が実施される。従来から、ジェットファンヒーターなどによる給熱養生が一般的であるが、ブロック全体に熱を行き渡らせることが困難で、養生不足の箇所が生じる場合が少なくないため、最近では断熱性の高い型枠による保温養生が注目されている。冬期における保温型枠採用は、温度ひび割れ制御に加えて、コンクリート強度発現の促進という面においても効果が期待できる。以上のことを踏まえ当節では、寒中コンクリート解析・評価手法の検証として、実施工現場での温度、ひずみ、応力の実測を行い、温度ひび割れ対策工による結果の理論的検証・評価、した結果について報告する。

9. 2 ダム施工概要

現在拡張レヤー工法により施工中のTダムは洪水調節、上下水道水源、河川環

境の保全等を目的とした多目的重力式コンクリートダム（写真 9.1，図 9.2）である。T ダムは，冬期間の積雪が少ないことから通年のコンクリート打設により施工されている。しかし冬期間の外気温は低く，寒中コンクリート対策が不可欠となる。10 年間でもっとも厳しい気象データは，日平均気温 -2°C （最高 3.9°C ，最低 -7.9°C ：1999 年 2 月記録）である。（表 8.6，図 8.8 参照）

解析と実証をリンクするため実験計画法による解析組合せ因子，水準は，T ダムのコンクリート配合，セメント種別，リフト厚，打設間隔，打設温度等を含めた範囲に設定した。また解析モデルは，T ダムの形状，リフト，ブロックを適用し，環境条件は，T ダム建設場所の気象データを適用した。

T ダムにおけるコンクリート打設工法である拡張レーヤ工法は，ブロック工法，レーヤ工法の従来工法に対して，コンクリートダムを経済的に短期間で建設する目的で開発された工法で一般的に合理化工法と称される。施工方法の特徴として，①打設リフトの薄さ，②大きな打ち上がり速度，③打設の連続性，④パイプクーリングの省略が上げられる。⁵⁾ 拡張レーヤ工法は経済性に加えて，コンクリート施工，特に温度応力制御の面において有利な工法であるが，コンクリートの温度，応力および強度発現におよぼす種々の施工条件の影響を，理論的解析に基づき総合的に検討して策定した施工法によりはじめて実現可能となるものである。

9. 3 計測工

(1) 計測工の概要

計測は，堤体の岩着部付近の施工について行なった。岩着部付近のリフトスケジュールを図 9.1，施工状況を写真 9.1 に示す。標準打設ブロックの大きさは，厚さ 75cm，幅（ダム軸方向）15m，長さ（上下流方向平均）20m 程度となる。ただし，躯体形状と工程の都合上，一部のブロックでは幅が異なる。コンクリートの配合については，耐久性を必要とする外部コンクリートを A 配合，一方，重量を必要とする内部コンクリートは B 配合とし，それぞれの配合は，表 8.7 に示す。

セメントは中庸熱フライアッシュセメント（混合率：内割 30%）。解析結果を基に打ち込み温度は，冬期は 10°C 以上，夏期は 25°C 以下となるよう材料のプレヒーティングおよびプレクーリングを実施している。養生方法もブロック上面は断熱養生マット（冬期）および湛水養生（夏期），上下流表面は冬期型枠養生とし発泡ウレタン吹き付け（ $t=10\text{mm}$ ）メタルフォームを採用した。養生期間は，上面は上部リフトが打設されるまで，また上下流面は 8 日間（型枠移動日数）が標準として施工されている。

(2) 現場計測概要

図 9.1 において、ハッチングを施した岩着部付近の 3 ブロックに対して温度、ひずみ、温度応力、ならびに無応力計（表 9.1 参照）による熱膨張係数の計測を行なった。ひずみと応力は、上下流方向について計測した。計測位置の堤体リフトを図 9.2 に示す。計測器の詳細設置位置を図 9.2, 9.3, 写真 9.2 に示す。

表 9.1 計測器の諸元

名称	型式	測定, 定格容量	非直線性
ひずみ計	BS-25ST	$\pm 500 \times 10^{-6}$	$\pm 1.5\%R0$ 以内
有効応力計	GK-1-505	0.9mv/v 以上	—

5・Block	6・Block	7・Block	8・Block	9・Block
09/29	10/03	10/01	06/18	06/14
09/20	09/27	09/25	06/12	06/07
09/15	09/13	09/17	06/05	05/29
09/11	09/06	09/10	05/25	05/23
09/04	09/01	09/04	05/19	05/19
08/30	08/28	★08/30	05/11	
08/24	08/24	◎08/27	04/30	
	08/10	★08/22	04/25	
	08/06	08/08	04/21	

★Stress-free and effective stress meater .Strainmeter ◎Thermometer

図 9.1 堤体リフト

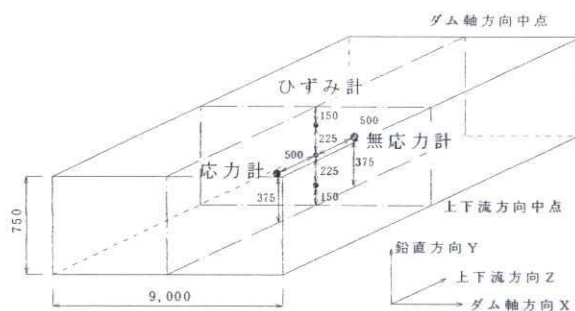


図 9.3 計測器設置詳細

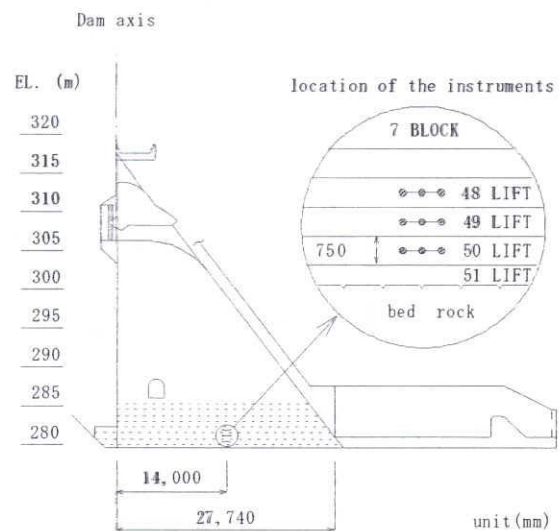


図 9.2 堤体断面・計測器設置位置

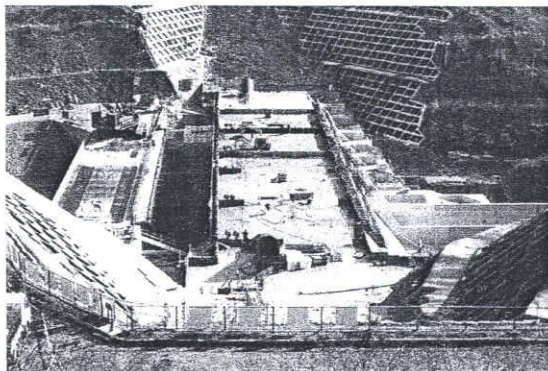


写真 9.1 堤体状況

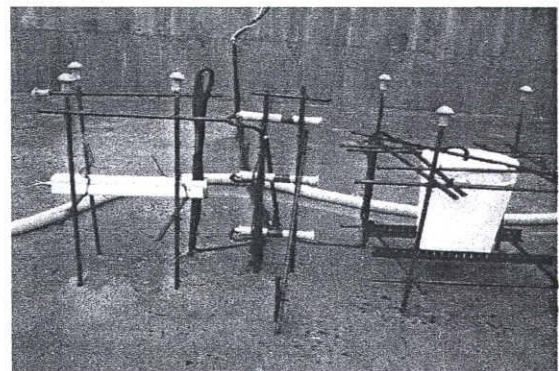


写真 9.2 計測器設置

9. 4 事前解析による施工選択

(1)はじめに

実験計画法の手順による寒中コンクリート対応した6因子，3水準の組合せによる解析(8章)結果は，ひび割れ指数，コンクリート温度について行った．解析により有意となった因子を表9.2、9.3に示す．

表 9.2 ひび割れ指数による有意因子

区分	ケース	上部リフト打設前						上部リフト打設後					
	因子	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
寒中	要素 1	—	—	—	—	○	◎	/	/	/	/	/	/
	要素 2	—	—	◎	—	◎	◎	—	—	—	—	—	◎
	要素 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	○
	要素 4	/	/	/	/	/	/	—	—	—	○	—	○

表 9.3 最高温度に対する有意因子

因子	A	B	C	D	E	F	交互作用
表面温度	◎	◎				◎	◎A*F
内部 15cm 温度	◎	◎			○	◎	○A*F

◎は 99%、○は 95%の信頼率で有意とされる因子

上部リフト打設前では、打設間隔水準に関係なく要素 1、2(図 8.20) のひび割れ指数は、リフト厚と打設面養生により影響される．打設後は、リフト厚とセメント種別による影響が有意とされた．

凍害に対応する表面，内部 15cm でのコンクリート温度は、型枠種別，打設温度，リフト厚と型枠*リフト厚の交互作用が共通する有意要因となる．内部 15cm では、打設面養生が有意因子となっている．Tダムの設計条件，環境条件の決定事項を考慮すると型枠種別，打設温度，打設面養生が施工法の選択範囲となる．

(2)ひび割れ指数による選択

1)要素 1 (上部リフト打設前)

工程平均値を表 9.4 に示す．有効反復回数と信頼区間を表 9.5 に示す．

表 9.4 工程平均

要素, 水準	F1	F2	F3
E1	6.16	4.20	0.81
E2	6.79	4.82	1.43
E3	7.32	5.35	1.96

表 9.5 有効反復回数と信頼区間

有効反復回数	95%信頼区間	99%信頼区間
5.4	±0.650	±0.887

この結果に 95%の信頼区間を考慮し，ひび割れ指数を 2 以上確保するためには， $2+0.650=2.65$ 以下の組合せを検討すればよい．リフト厚水準 1 の場合，特に問題

はない。この表を指数の等高線により表示するとリフト厚と打設面養生の関連が明らかになる。(図 9.4 参照)

E 水準の向上による効果はリフト厚が厚くなる程大きいことがグラフからわかる。また F3 と F2 の間でも養生を E2,3 の組合せによって施工すれば可能となることがわかる。要素 1 では、リフト厚が内部拘束要因およびその反力としての外部拘束の両面効果を有していると考ええる。

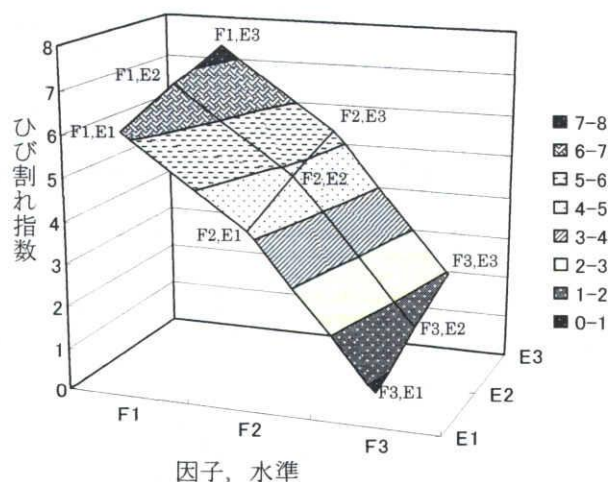


図 9.4 水準等高線グラフ

2)要素 2(上部リフト打設前)

C, E, F の 3 因子による主効果が有意とされ工程平均値及びその散布図を図にして示す。要素 1 と同様に 95%信頼率での目標値は、 $2+3.538 \div 6.0$ とする。

表 9.6 有効反復回数と信頼区間

有効反復回数	95%信頼範囲	99%信頼範囲
3.857	± 3.538	± 4.826

工程平均の組合せは分散分析の寄与率の高い因子をベースにする。この場合打設間隔(35.5%)>リフト厚(30.4%)>打設面養生(16.4%)である。その結果散布図は、高い寄与率因子水準による区分ができ、目標値に達しない施工組合せも明らかになる。(図 9.5 散布図に示す)また全体から特性値が下降する組合せも明らかになる。下降列は、4, 12, 22 でありその因子水準組合せから各打設水準での打設面養生水準 1 が共通することがわかる。打設面養生水準の影響がリフト厚との関連で大きく影響していること推察でき、施工法の選択に展開する必要を示している。また、打設間隔により特性値のバラツキが変化する状況が把握できる。

T ダムの場合 C1, F1 水準による施工を計画している。打設面養生 E を水準 2 以上で施工しなければならない。またこの散布図から、工程調整による打設間隔 C3 水準となった場合、リフト厚 F1 施工では、打設面養生 E は 3 水準でなければ目標値は確保できないことが事前に把握できる。工程変化に対応する施工法組合せのリスク管理が可能となる。T ダム施工 F1*C1 の施工組合せをひび割れ指数の等高線グラフを図 9.6 に示す。グラフより F1*E1 水準～E2 水準、E1*F1～F2 に移行する段階で期待値が確保できることが示される。

Tダム施工において、上部リフト打継前段階において有意とされた要因の工程平均からひび割れ指数を95%の信頼率で確保できない施工組合せは、打設面養生E水準を2以上(湛水)の施工法が必要となる。打設間隔、リフト厚と密接な関連があり工程、施工の変更には十分な検討が必要である。

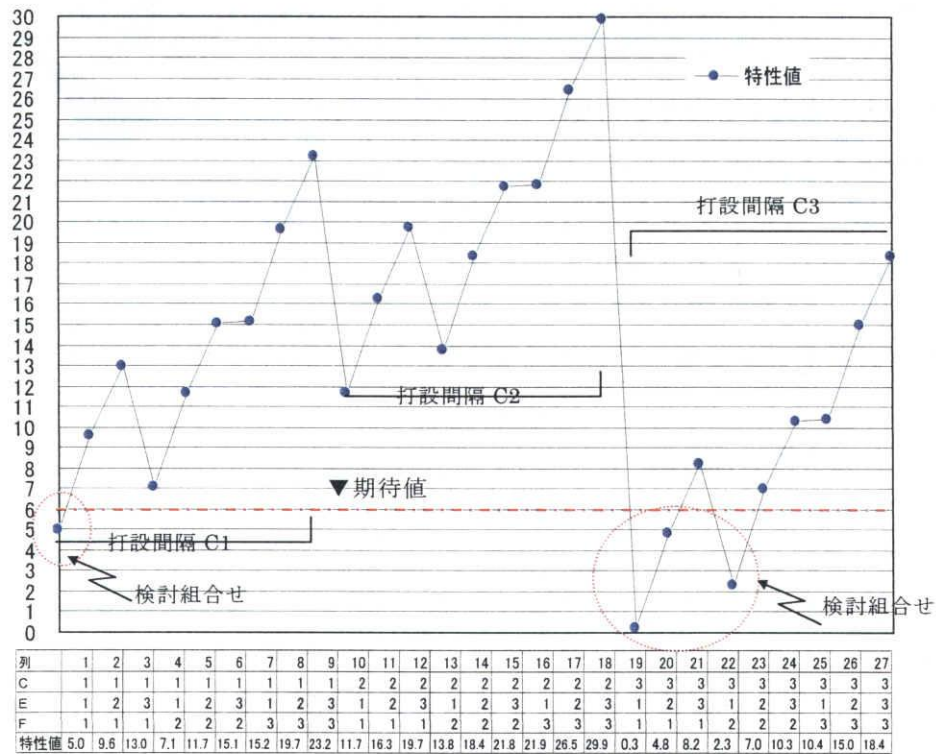


図 9.5 散布図

表 9.7 特性値の下限パタン組合せ

列・水準 因子	4	13	22
C	1	2	3
E	1	1	1
F	2	1	2

表 9.8 因子固定の工程平均

打設間隔水準1			
	F1	F2	F3
E1	5.02	7.10	15.16
E2	9.59	11.66	19.73
E3	13.01	15.08	23.15

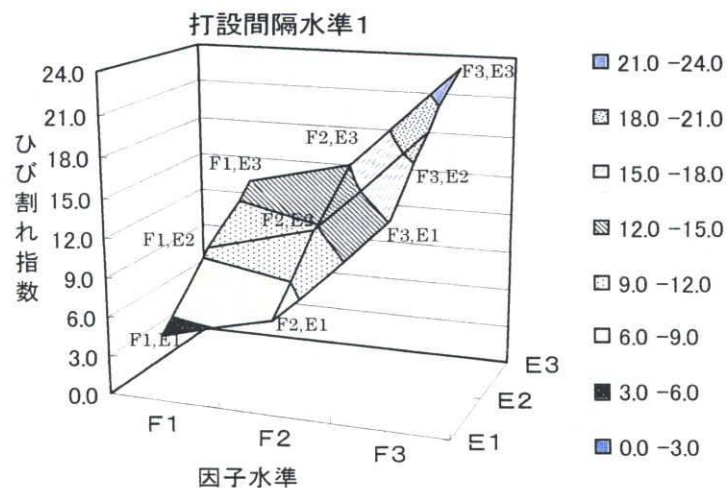


図 9.6 水準等高線グラフ

3)要素3 (上部リフト打設後に有意とされた因子)

有意要因D, Fによる工程平均の推定と信頼区間を表 9.9, 9.10 に示す. 工程平均を水準等高線グラフとして図 9.7 に示す.

表 9.9 有効反復回数と信頼区間

有効反復回数	95%信頼区間	99%信頼区間
5.4	± 2.474	± 3.469

表 9.10 工程平均

	F1	F2	F3
D1	4.69	4.39	7.55
D2	1.48	1.18	4.34
D3	0.93	0.63	3.78

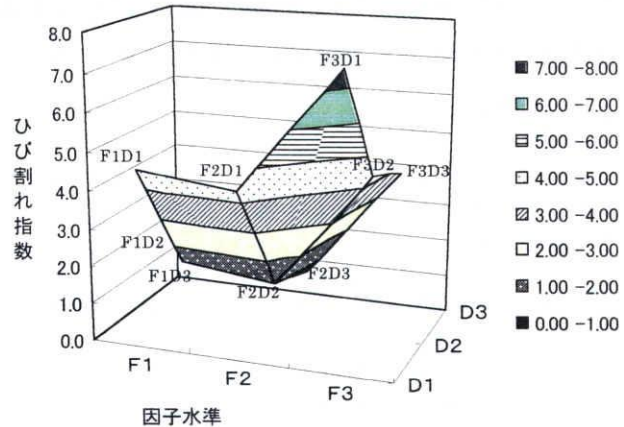


図 9.7 水準等高線グラフ

95%信頼区間(+2.47)を考慮するとF1*D1, F2*D1, F3*D2, D1の組合せ以外はひび割れ指数2以上を確保できない. D1(フライアッシュ中庸熱セメント)はリフト厚に関係せず満足できる.

セメント種別の熱特性による内部拘束がひび割れ指数に影響している.

4)要素4 (上部リフト打設後に有意とされた因子)

有意要因のセメント種別とリフト厚の水準効果推定表有意要因の効果推定より工程平均の推定を表 9.11, 9.12 に示す. 工程平均を因子と水準による等高線グラフにして図 9.8 に示す.

表 9.11 有効反復回数と信頼区間

有効反復回数	95%信頼区間	99%信頼区間
5.4	± 0.943	± 1.321

表 9.12 工程平均

	F1	F2	F3
D1	4.31	3.21	4.52
D2	3.75	2.65	3.96
D3	2.87	1.77	3.09

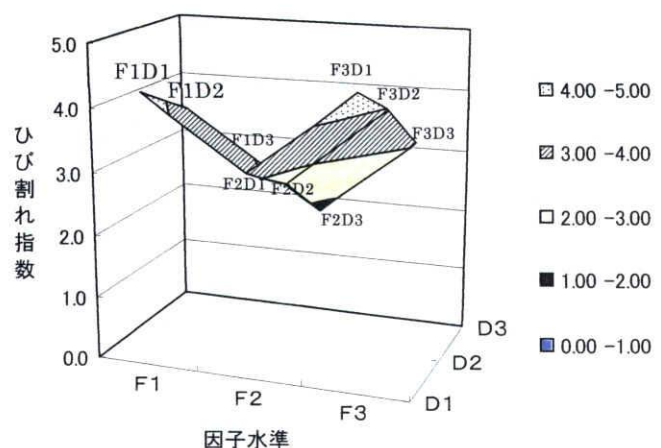


図 9.8 水準等高線グラフ

95%信頼率によるひび割れ指数2以上($2+0.943 \div 3.0$)を確保できる組合せは, F1 * D1, D2 とF2 * D1 およびF3 * D1~3 となる. Tダムでは, F1 の場合セメ

ント種別は、D1となる。

以上4要素のリフト打設前後でのひび割れ指数に有意とされる因子による信頼率95%の工程平均を求めた。Tダム施工条件下の寒中コンクリートのひび割れ指数を2以上確保するため施工選択として打設面養生は湛水養生以上が必要となる。またリフト厚、打設間隔の関連よりセメント種別は、フライアッシュ中熱セメントが特定された。

(3)コンクリート温度に関する選択

寒中コンクリート施工の留意点は凍害である。そのため要素1の表面温度と表面内部15cmの温度に関してもFEM解析で求めた最高温度について、ひび割れ指数と同様に工程平均を求め有意因子の効果について考察する。

解析値の分散分析結果による有意因子と寄与率の対比を表9.13図9.10に示す。

表 9.13 寄与率と有意効果

因子 位置	A	B	E	F	交互作用
表面	◎56.4	◎11.7		◎20.9	◎A*F4.7
-15cm	◎39.2	◎16.4	○2.3	◎32.9	○A*F3.2

表中◎99%，○95%信頼率で有意効果・寄与率%

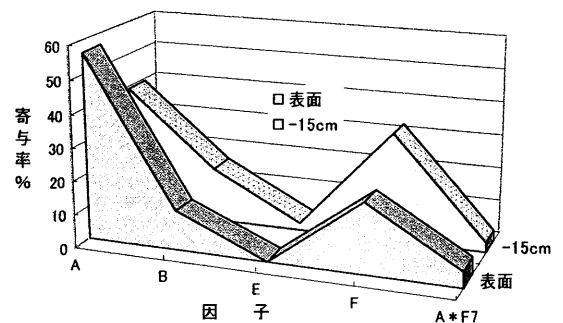


図 9.9 温度に対する寄与率推移

表面およびその近傍のコンクリート温度への影響は、外気境界である型枠>リフト厚>打設温度の順序となっている。図9.9で見られるように表面部は型枠境界が大きく影響する。表面より15cm内部の温度は、表面境界と同程度リフト厚の影響を受け、リフト厚の寄与率は、表面の1.6倍、打設温度も1.4倍と大きくなる。凍害に関しては、コンクリート表面の温度を問題として、その境界条件を施工の留意点とすれば対処できる。

表面の有意因子組合せによる特性値を図9.10に分散図として示す。

表9.14に有効反復回数と信頼区間を示す。

表 9.14 有効反復回数と信頼区間

有効反復回数	95%信頼区間	99%信頼区間
2.455	±1.556	±2.143

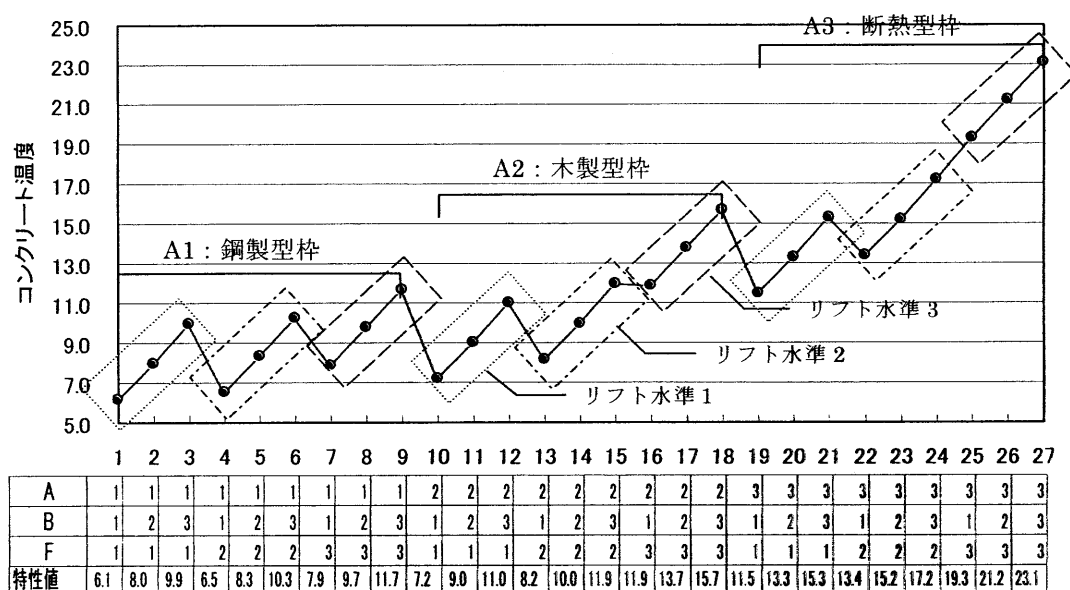


図 9.10 散布図

散布図から影響による違い(熱伝達率)が明らかに示されている。各材料の細部に注目すると、A1 ではリフト厚水準が変化しても、打設温度から0～1℃程度しか上昇しない。A2 では、リフト厚水準1,2ではA1と同じ程度しか上昇しない。3水準で5～6℃上昇している。A3 では、リフト水準1で5～6℃、水準2で6～8℃、水準3で13～14℃上昇している。表 9.15 は、A * B * F の工程平均である。

表 9.15 工程平均

A1	B1	B2	B3
F1	6.13	7.96	9.91
F2	6.50	8.33	10.27
F3	7.89	9.73	11.67

A2	B1	B2	B3
F1	7.20	9.03	10.97
F2	8.16	10.00	11.94
F3	11.90	13.73	15.67

A3	B1	B2	B3
F1	11.50	13.33	15.27
F2	15.23	17.17	19.33
F3	19.33	21.16	23.11

この表は、A水準による保温効果差、リフト厚による内部温度上昇効果を示している。特にA3の保温効果は他水準と大きく異なっている。

A3水準のB, F工程平均を等高線グラフにして図 9.11 に示す。コンクリート温度上昇への影響は、打設温度変動よりリフト厚水準が大きいことがわかる。同リフト水準とリフト厚水準による上昇温度を比較するとリフト水準が約 1.2～1.3 倍程度高くなっている。

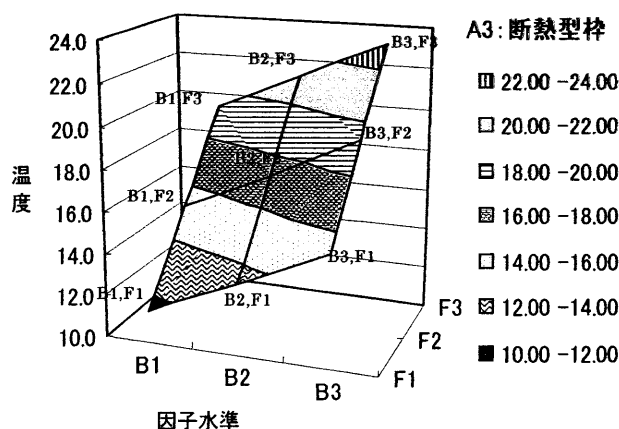


図 9.11 水準等高線グラフ

リフト厚水準は、工程と設備能力による経済比較で決められる場合が多い。またリフト厚は、型枠、打設間隔、グリーンカット等の多くの施工作業にも影響をおよぼす因子である。Tダムの場合、施工条件水準が1であり、A水準を3(断熱型枠)とすれば打設温度+5～6℃が期待できる。打設温度は、確実な凍害対策を行うため95%信頼率±1.556℃を加味し10℃以上として施工選択を行った。

(4)まとめ

以上ひび割れ指数、コンクリート温度両面の検討からTダムでの寒中コンクリート対策は、

1. 上下流面型枠は、断熱型枠とする
2. 打設面養生は、湛水養生以上とする(断熱材シートの適用)
3. セメントは、フライアッシュ中庸熱セメントが適している
4. 打設温度は10℃以上とする
5. 打設間隔、リフト厚を工程、設備能力等の理由で変更する場合6因子水準の組合せを再度検討する必要がある

9. 5 温度ひび割れ対策工の評価

(1)はじめに

温度ひび割れ対策工の効果を検証するため低発熱性セメント(中庸熱フライアッシュセメント)、および保温型枠(発泡ウレタン吹き付け(t=10mm)メタルフォーム)の温度ひび割れ制御効果を解析した。中庸熱フライアッシュセメントの効果検証については夏期施工を想定し、解析から得られるコンクリート温度、温度応力、および温度ひび割れ指数に着目して検討をした。一方、保温型枠については冬期施工を想定し、コンクリート温度、温度応力、および温度ひび割れ指数に加えて、コンクリート強度の発現についても検討した。

(2)解析条件

温度と応力の解析はFEMにより実施した。構造物解析モデルについては、図8.19に示すように上下流断面のダム岩着部付近7リフト分をモデル化した。コンクリート配合は表8.7とし、各々の打設位置は図9.1に示すとおりである。低発熱性セメント(中庸熱フライアッシュセメント)と保温型枠(発泡ウレタン吹き付け(t=10mm)メタルフォーム)の温度ひび割れ制御効果を解析的に検証するため表9.16, 9.17に示す解析条件で計6ケースの解析を実施した。解析に用いたセメントは中庸熱フライアッシュセメント(MFC)、中庸熱ポルトランドセメント(MPC)、

高炉セメントB種（BBC）の3種類である。温度解析で用いたコンクリートの熱的性質を表 9.18～9.20 にまとめて示す。コンクリートの圧縮強度実測値と材齢、および積算温度との関係をそれぞれ図 9.12, 9.13 に示す。各図中には最小二乗法による推定式をあわせて示す。なお、積算温度による圧縮強度推定は、積算温度 20000℃・hr の前後においてそれぞれ直線近似を行なった。

表 9.16 解析ケース(型枠・養生条件)

Curing combinations			
Season	Case	Form	Top surface
Summer	1	Wood	Ponding Curing mat
	2		
	3		
Winter	4	Metal	Spray
	5	Wood	Ponding Curing mat
	6	Urethane	Insulated mat

表 9.17 解析条件(セメント種別他)

	1	2	3	4	5	6
Placing temperature	Measurements			Preheating 11°C		
Cement	MPC	BBC	MFC	MFC		
Mix proportion	A is 50 or 49lift. B is 48lift.					
Placing interval	Refer to Fig-9.1					
Air temperature	Measurements			Minimum day temperature		

表 9.18 解析条件(熱特性)

Property	Specific heat	Thermal conductivity	Thermal carry-over factor	Density
Unit	Kcal/kg℃	Kcal/mr℃	Kcal/m ² hr℃	Kg/m ³
Concrete	0.3	31	12	2,400
Bedrock	0.49	1.23	—	1,800

表 9.20 解析条件(断熱温度上昇特性)

Classification			K (℃)	α
Season	Cement	Mix proportion		
Summer	BBC	A	38.46	0.592
		B	30.45	0.476
	MFC	A	29.46	0.588
		B	22.37	0.564
	MPC	A	36.43	0.816
		B	29.84	0.671
Winter	MFC	A	32.20	0.308
		B	24.50	0.296

表 9.19 解析条件(熱伝達率)

Thermal carry-over factor・Kcal/m ² hr℃					
Form			Curing		
Metal	Wood	Urethane	Spraying	Adiabatic Mat	Ponding
12	7	1.5	12	2.2	5

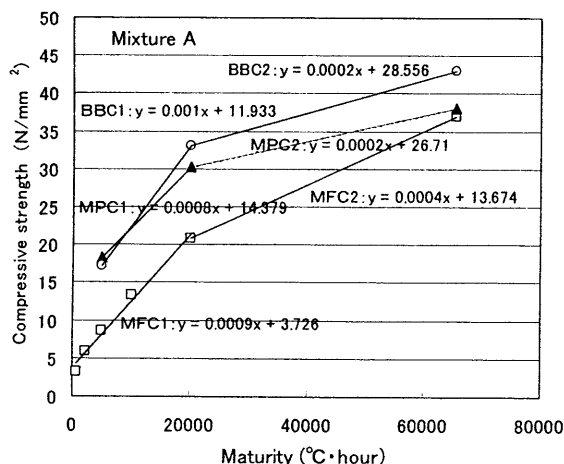


図 9.12 セメント種別の積算温度と圧縮強度 A 配合

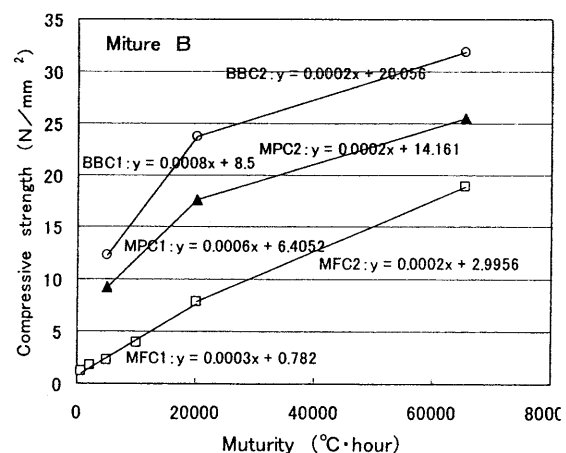


図 9.13 セメント種別の積算温度と圧縮強度 B 配合

ヤング係数は、土木学会式を用いて圧縮強度から推定した。応力解析ではクリープを考慮した。コンクリートのクリープ推定は重ね合わせ法を採用した。クリープ係数は土木学会式を用いて推定した⁴⁾。

(3)解析結果

1)低発熱セメントの温度ひび割れ対策効果

低発熱セメントの使用は、打設ブロックの温度上昇を抑え、特に既設ブロックによる外部拘束応力を低減する効果が期待できる。そこで、50 リフト計器埋設ブロック中心部について温度、応力および温度ひび割れ指数の検討を行なう。図 9.14 に、3 種類のセメントを用いた場合のブロック中心部の温度履歴を示す。

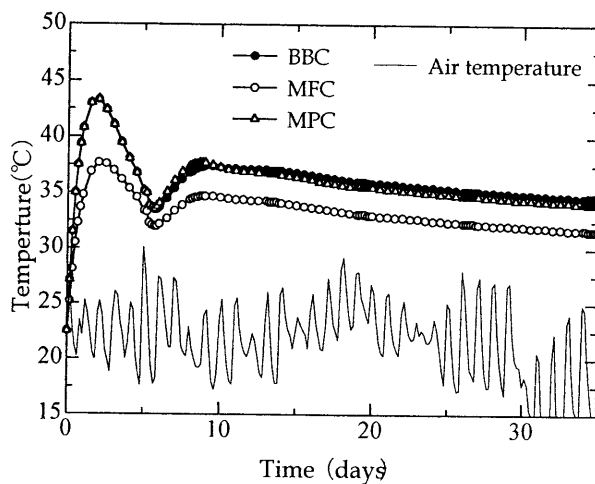


図 9.14 セメント種別温度履歴

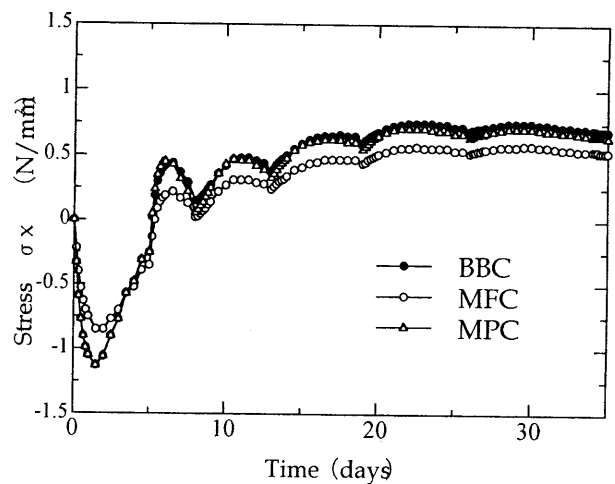


図 9.15 セメント種別応力履歴

図から、ブロック中心の温度計算値は、打設後2日前後で最大となり、上部リフトが打設されまで速やかに降下していく。上部リフトが打設されると、温度は再度4℃程度上昇しその後は緩やかに降下していく。中庸熱フライアッシュセメントを用いると中庸熱ポルトランドセメントあるいは高炉セメントB種に比べて4℃程度温度上昇を低減することができる。中庸熱ポルトランドセメントと高炉セメントB種の温度上昇は、ほぼ同程度である。図 9.15 に、中心部の温度応力を示す。中心部の応力計算値は、上部リフトが打設されるまでは温度上昇期に圧縮応力が最大となり、その後は温度降下とともに引張応力に転じるという、いわゆる外部拘束応力の発現特性を示す。しかし、上部リフトが打設されるとその影響で引張応力が急増する。上部リフトの温度が降下すると引張応力は一時的に減少するが、上部にさらにブロックが打設されると再度引張応力が増大する。上部リフトが打設されるたびにこのような挙動を繰り返しながら引張応力は漸増し、材齢20日(上部4リフト打設)以降はほぼ一定の値になる。中庸熱フライアッシュセ

メントを用いた場合の最大応力は約 0.6N/mm^2 で、中庸熱ポルトランドセメントあるいは高炉セメントB種に比べて約20%応力が低減している。図9.16に、温度ひび割れ指数を示す。温度ひび割れ指数は材齢にともない小さくなるが、材齢20日以降はほぼ一定となる。中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合の最小温度ひび割れ指数は3.5で、中庸熱ポルトランドセメントあるいは高炉セメントB種にくらべて指数0.8増の温度ひび割れ制御効果が認められる。

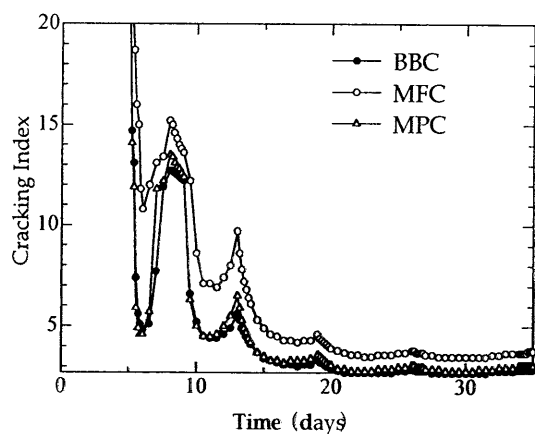


図 9.16 ひび割れ指数履歴

2) 保温型枠養生の温度ひび割れ対策効果

冬期施工における保温養生は、表面部の内部拘束応力を低減し表面ひび割れを防止する効果が期待できる。さらに表面部コンクリートの強度発現を促進して、凍害を防止することにも寄与する。ここではダム下流表面に着目して、保温型枠養生の効果を検討する。

図9.17、9.18にダム下流表面の温度および応力を示す。図9.16から、発泡ウレタン吹き付けメタルフォームを用いると、型枠脱型までは表面温度の降下が防止されることがわかる。一方、木製およびメタルフォームの場合は、打設直後から急激な温度降下が生じている。図9.17から、発泡ウレタン吹き付けメタルフォームの場合、表面温度の降下が緩和されるため、木製およびメタルフォームに比べて応力の発生が少なくなっている。

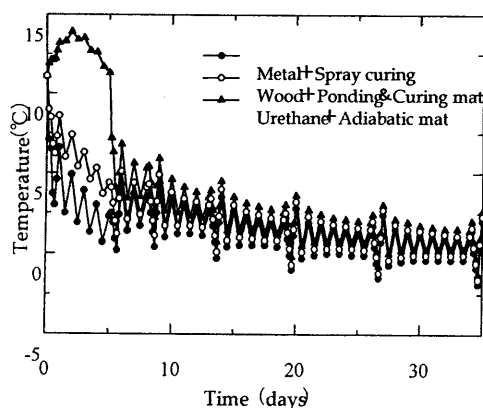


図 9.17 養生による表面温度履歴

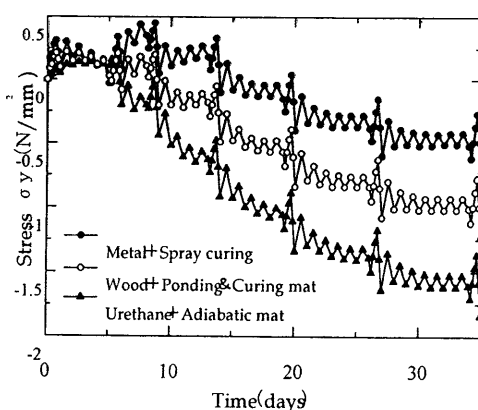


図 9.18 養生による温度応力履歴

図 9.19 に、表面部コンクリートの積算温度を示す。図から、表面部におけるコンクリートの積算温度の増加は、発泡ウレタン吹き付けメタルフォームを用いると他の型枠に比べて大きく、特に材齢初期にその増進が著しいことがわかる。このことは、寒中施工におけるコンクリート初期材齢時の凍害防止に有効である。

図 9.19 は、図 9.12, 9.13 に示した圧縮強度評価式を用いて圧縮強度と材齢との関係を求めたものである。図から、発泡ウレタン吹き付けメタルフォームを用いると、材齢 5 日前後で凍害に対して安全であると考えられている圧縮強度 5N/mm^2 に達することがわかる。これは凍害防止に加えて、保温養生期間の短縮にもつながり施工上においても有利である。これに対して、木製型枠では圧縮強度 5N/mm^2 に達する材齢が約 2 週間、メタルフォームでは材齢 1 ヶ月においても圧縮強度は 5N/mm^2 以下である。

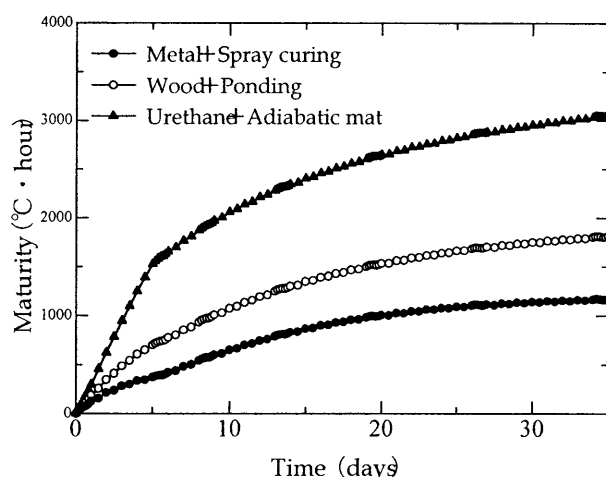


図 9.19 養生による積算温度履歴

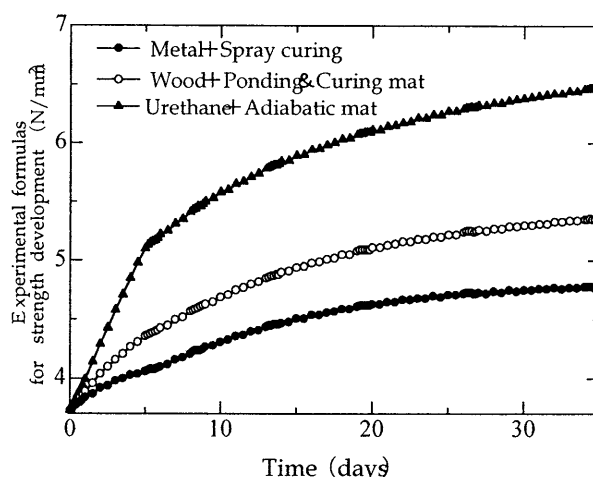


図 9.20 養生による圧縮強度履歴

9. 6 現場計測結果

(1) 図 9.21 に無応力計から得られたコンクリート温度とひずみとの関係を示す。

図から、コンクリートの熱膨張係数の実測値は、 $12\mu/\text{°C}$ (材齢初期) $\sim 8\mu/\text{°C}$ (材齢後期) 程度であった。図 9.21 に、50, 49 および 48 リフト計器埋設ブロック中心部の温度実測値と計算値 (中庸熱フライアッシュ) を示す。50, 49 リフトは外部 A 配合、一方、48 リフトは外部 B 配合である。図から、計算値は実測値に比べて最大 $3\sim 7\text{°C}$ 程度大きくなっており、上部リフトほど実測値と計算値との差異が大きくなる傾向にある。また、計算値が材齢 10 日以降漸減する傾向を示すのに対して実測値は漸増する傾向を示す。この一因として、計算でコンクリートの発熱特性を大きく評価した可能性がある。すなわち、計算では断熱温度上昇特性を用いたが、部材厚 (リフト厚) が 75cm と比較的薄い場合のコンクリートの発熱量、特に中

庸熱フライアッシュセメントのような混合系低発熱セメントの発熱特性の評価については資料の蓄積がまだ不十分であり、今後さらなる研究の充実が必要であると考えられる。

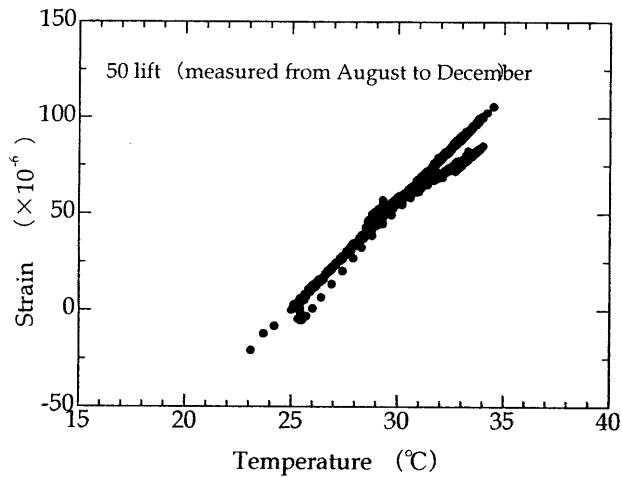


図 9.21 熱膨張係数実測値

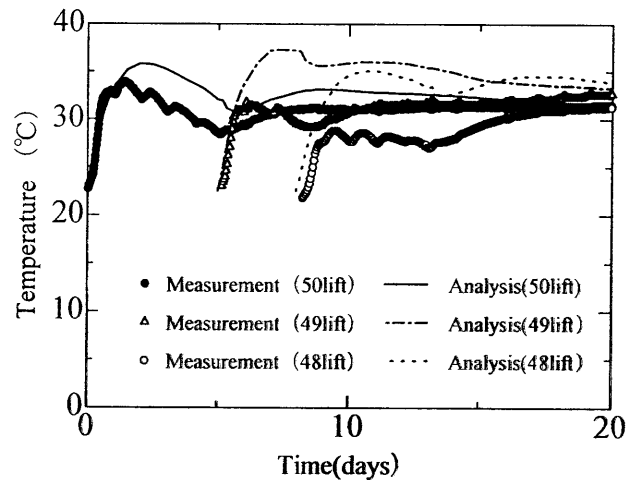


図 9.22 リフト別温度履歴実測と解析値

(2)図 9.22 に、有効応力計による 50 と 48 リフト中心の温度応力の実測値と計算値とを示す。なお、ここでの応力解析は、実務分野での解析を念頭においてクリープの取り扱い是有効弾性係数法を用いている。ヤング係数の補正係数は、土木学会コンクリート標準示方書の値を用いた。図から、特に材齢初期で計算値が実測値に比べかなり大きな値となっている。図 9.23 は、材齢 3 日までのヤング係数の補正係数を、示方書推奨値の 0.73 から 0.3 に低減した場合の解析結果である。図から計算値は実測値にかなり近似した値を示すようになる。このことから、貧配合コンクリートの若材齢時クリープおよびヤング係数の補正係数については、さらに資料の蓄積と検討の必要がある。ただし、示方書の値を用いた場合の応力計算値は、いずれも安全側の値を与えていることから、設計のための解析に用いるのであれば示方書推奨値は十分な合理性を持つと考えられる。

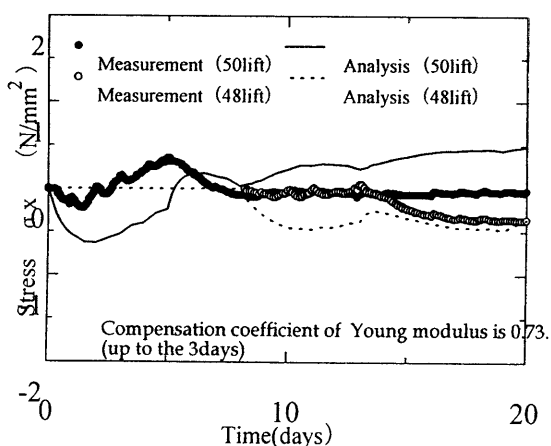


図 9.23 リフト別温度応力履歴(ヤング係数 0.73)

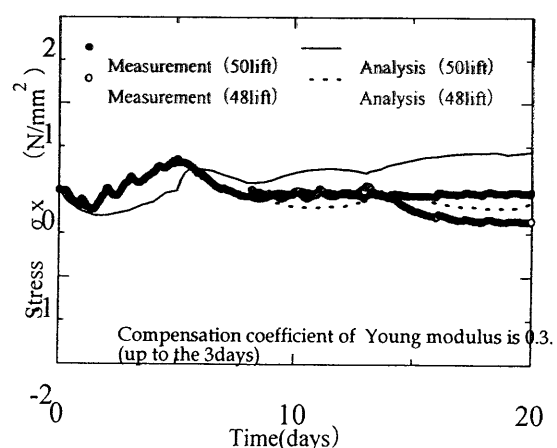


図 9.24 リフト別温度応力履歴(ヤング係数 0.3)

(3) 夏期における断熱型枠の温度計測

実際の施工では、冬期に使用した型枠を存置して転用することが考えられる。断熱型枠が夏期まで存置された場合、コンクリート内部温度の上昇に影響にして内部拘束によるひび割れ発生が懸念される。その検証のため図 9.25 に示す位置で 2 種類の型枠に対応する暑中コンクリートの内部温度を計測した。

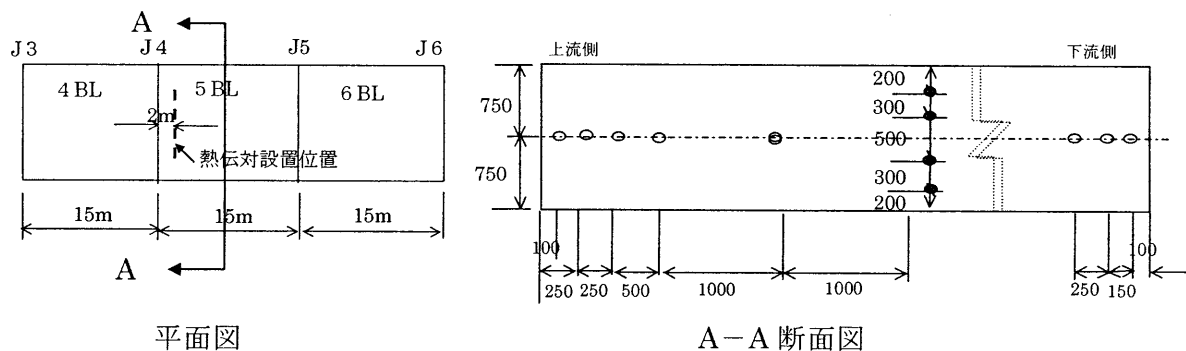


図 9.25 熱伝対配置平面図，断面図－5 BL－10lift

図 9.26 に測定結果を示す。図から鋼製型枠，断熱型枠の内側 10cm, 25cm のコンクリート温度比較は，共に 1°C 程度断熱型枠が低くなっている。10cm と 25cm の比較では表面－10cm がコンクリート打設後 20 時間程度から，－25cm では 32 時間後から温度差が生じている。打設後 5 日目には両者の差はなくなる。T ダムの場合，冷水混合により暑中コンクリートの打設温度は， 22.5°C を目標に打設されている。フライアッシュ中庸熱セメントを使用した T ダムの場合，コンクリート最高温度は打設温度 $+12\sim 15^{\circ}\text{C}$ 程度上昇する。観測外気温が 30°C 程度で境界における温度差が小さいことが熱伝達率の違いによる差を小さくしていると考えられる。この結果から，T ダムの場合，断熱型枠はコンクリート温度上昇に影響はなく通年施工に使用できると考える。

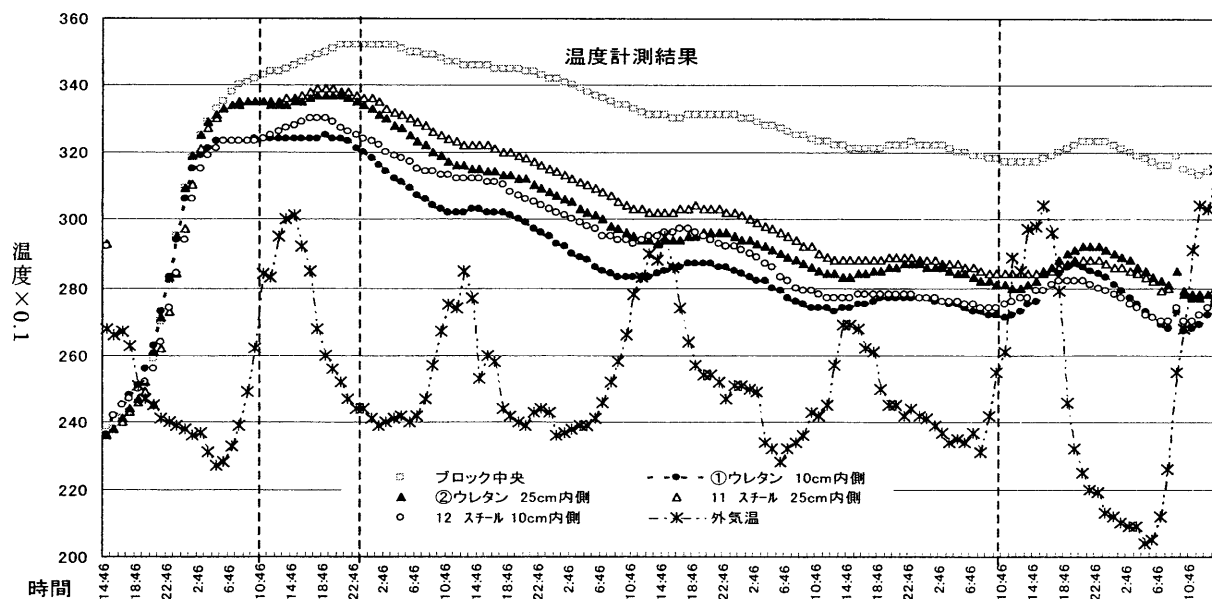


図 9.26 型枠種別によるコンクリート温度履歴

9. 7 まとめ

ダム施工の温度ひび割れ対策工について、本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 夏期施工で中庸熱フライアッシュセメントを用いると、中庸熱ポルトランドセメントあるいは高炉セメントB種にくらべて温度ひび割れ指数で 0.8 増の温度ひび割れ制御効果が認められる。
- (2) 発泡ウレタン吹き付けメタルフォームを用いると表面温度の降下が緩和されるため、木製およびメタルフォームに比べて表面部の応力の発生が小さくできる。さらに、材齢初期のコンクリート強度増進に大きく貢献し、寒中施工における初期材齢時の凍害防止に極めて有効である。また発砲ウレタン吹き付けメタルホームによる暑中コンクリートの内部温度への影響は認められない。
- (3) コンクリート温度と応力の計算値は、実測値に比べて大きな値となった。リフト厚が比較的薄い場合の貧配合コンクリート発熱量の評価については、今後検討の必要がある。さらに、若材齢時のクリープも検討が必要である。

以上施工法の工学的評価の導入により選択した温度ひび割れ対策工の実施およびその解析と計測による詳細な検証を行った。

寒中、暑中等の施工環境の厳しい状況を想定した本研究の提案は、コンクリート施工(若材齢期)において「凍害」「温度ひび割れ」等の発生防止に有効な手法であるといえる。また施工条件の経時変化にも随時対応が可能であった。

第9章参考文献

- 1) 新美孝之介, 山城稔, 森本博昭: 寒中コンクリート施工における養生効果の評価について, 土木学会第 56 回年次学術講演会(平成 13 年 10 月)pp. 694~695
- 2) K. Niimi, Q. Yong, and H. Morimoto: Thermal Crack Control for Dam Concrete, 5th International Symposium on Cement & Concrete, pp. 1097~1103, 2002
- 3) 新美孝之介, 大倉浩二, 岡山孝, 森本博昭: ダムコンクリートの温度ひび割れ対策工の評価に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 56, pp. 175~181, 2002
- 4) 土木学会: 平成 11 年度制定コンクリート標準示方書「施工編」
- 5) 例えば志水茂明: ダム施工の実際, コンクリートダムの合理化施工技術について, pp. 18~31

第10章 結論

本章では、各章で得られた結論をまとめる。

第2章では

- (1) 土木施工法を体系化することで建設産業の生産システムの特性を明らかにした。
- (2) 生産システムを構成する施工システムにおける基本作業システムの工学的位置付けと背景を明らかにした。
- (3) 施工システムの構成、分類より多くの構造物の要求性能、機能は「コンクリート工」に収束化されているとする根拠を体系的に明らかにした。

第3章では

- (1) 建設産業の変遷に社会的要因が大きく関わることを明らかにした。社会経済、生活環境、国勢からの要請が要因となり生産手段である施工法の変遷に大きく影響を与えることを明らかにした。
- (2) 社会的要請は、社会的価値観となり施工法の方方向性や評価に影響する。施工不良の要因に「社会的要請による省力、経済性からの分業化、専門化」現象があったことを明らかにした。施工法の持つ工学的目的が一般生産産業の作業目的と異なる点を明らかにし、本研究の必要性を導いた。
- (3) 施工法の評価項目に社会的価値観の動向の把握が必要であることを明らかにした。

第4章では

- (1) 建設産業の生産システムを構成する体系的要素により分類された施工法の変遷から検証しその発展経緯より将来の課題を抽出した。すなわち、環境、省力化が課題であり評価項目となる。特に機械化による効率作業の優先システムの問題点を指摘した。
- (2) 施工法の目的が機能目的判断に止まらず環境項目が要求性能として付加される傾向が明らかになった。また施工段階における危険性、緊急性といった本来機能とは関係のない建設産業の特異性を明らかにした。
- (3) 施工法的前提条件である「コンクリート」構成材料として骨材を取り上げ、品質管理と同様に生産管理の重要性を指摘した。
- (4) コンクリート工を構成する基本作業の変遷の検証から「基本作業の工学的位置付け」と「評価」の重要性を指摘して本研究の意義を明確にした。

第5章では

- (1) 施工事例の検証から施工法の問題が建設産業の生産システムの特異性にあることを明らかにした。
- (2) 建設産業の生産システムの特異性は一般の生産産業の目的である量的な効率性向上の目的と異なり、基本作業が工学的目的に位置付けられる。その特異性を定量化することが施工要因による早期劣化の抑制策であることを明らかにした。
- (3) 工学的に定量化するためには、作業（基本作業）のデータ化が必要となることを検証した。
- (4) 施工要因による不具合現象の多くが、コンクリートのひび割れを起因とする早期劣化であることを事例より検証した。
- (5) 施工の不具合は、施工環境（施工に対する社会的条件）が設計にフィードバックされていない現実にあることを指摘した。

第6章では

- (1) 価値観の変遷から「建設産業・建設技術」もその評価により大きな影響を受けることを検証した。価値観の変遷は、社会生活環境の影響を強く受けていることを明らかにして将来の価値観を展望した。価値観として「安全性、信頼性、快適性」が確保される将来の社会を構築するために建設産業・建設技術に求められるキーワードを「長寿命化」との結論を導いた。
- (2) 価値観が客観的から主観的に変化する中で景観設計に見られる土木構造物の目的を失う事象を検証した。形態設計と土木構造物の関係が工学的根拠に関連することを指摘した。

- (3) 価値観による評価が本質と異なる場合もある事例を検証し説明責任、情報公開、施工システムの確立など今後の建設産業に求められるソフト面研究の重要性を指摘した。

第7章では

- (1) 既存の施工法評価と施工法の定量評価する事例を検証した。その結果既存の検証は、建設事業の執行過程における全体評価、環境に関する評価、施工システム全体評価などの評価枠が本研究のものとは異なることを明らかにした。
- (2) 定量化に関しては、既存に事例では、設計段階での比較検討を主眼としたもので施工における段階的選択には容易な適用とはいえないことを指摘した。

第8章では

- (1) 第3章～第6章の検証による将来の社会資本の価値観「長寿命化」を実現するために施工法に求められる「早期劣化」抑制策に着目した提案をした。
- (2) 早期劣化の原因を「コンクリートひび割れ」に特定し、その因子と施工法を熟

特性に着目したデータにより工学的数量化を行った。

- (3) 熱特性を構成する 6 因子 3 水準による寒中、暑中コンクリートケースの解析を実験計画法を適用して行った。解析結果からひび割れ指数に有意となった因子水準の組み合わせによる工程平均で施工法の選択をする手法を提案した。この手法は、施工の最適組合せを容易に選択できることと特性値によるリスクを比較できる経済的選択も可能である。
- (4) 本研究の提案は、経験的、感性による施工選択を工学的評価による合理的に行い施工を起因とする「コンクリートひび割れ」抑制に有効な手法であることを示した。

第 9 章では

- (1) 第 8 章で提案した因子による組合せを実施工のダム工事事例により検証した。寒中コンクリートにおけるひび割れ対策の解析結果と計測値との比較により本研究の提案手法が有効であることを実証した。

謝 辞

本論文は、筆者が三十数年にわたり携わった「土木施工法」に関する考えを岐阜大学大学院博士後期課程の在籍中に取りまとめたものです。本研究を論文にまで高める機会を与えていただくとともに自身の貴重な時間を費やしご指導、激励いただきました岐阜大学森本博昭教授には深甚なる感謝を表します。

岐阜大学六郷恵哲教授、奈良敬教授、内田裕市助教授、鎌田敏郎助教授、國枝稔助手、小澤満津雄助手には、多くのご指導とご助言に心より感謝致しています。特に社会人への配慮から土曜日に定例研究会を開催していただき感謝以上のありがたい思いがあります。

また、岐阜大学小柳治名誉教授には、多くの機会に貴重なご指導とご助言をいただき深く感謝致しています。

本論文をまとめるに当たり多くの方々のご指導とご支援をいただきました。

コンクリート研究室の近藤照子氏には、ご支援をいただき感謝致します。岐阜大学で共に研究し本論文を支援していただきました、竹下千尋氏、金子倫三氏、NGUYEN CAO QUY 氏、本田正治氏、秦泳氏に深く感謝致しています。

博士後期課程の受験に際しご指導と激励をいただきました前田建設工業の米谷敏氏、奥村組の中山恵嗣氏には、深く感謝の意を表します。

在職中、本研究の機会を快諾していただきました大日本土木鬼頭徳就前社長に心からの感謝を表します。

揖斐川工業の三摩孝久氏には、公私にわたりご支援をいただき深く感謝致します。

筆者が在職した大日本土木の岡忠史氏には、入社以来のご指導とご支援をいただくと共に本研究の間常にご激励いただき深く感謝致します。山城稔氏には、多くの面でご支援をいただき深く感謝致します。大倉浩二氏、片岡昌裕氏、植野昌修氏には自身の時間を割いて、ご支援していただき深く感謝の意を表します。

最後に、入社以来大半が単身赴任であった私に、休日をも全く自由にさせてくれた妻に心から感謝の意を表します。また私を最後まで心配してくれた両親、祖母に感謝の念を捧げます。