

学位論文

リスク評価に基づく道路施設修繕計画立案方法

生産開発システム工学専攻

杉浦 聡志

2015年3月

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	アセットマネジメントの概要	1
1.1.2	アセットマネジメントの普及と学術研究の動向	2
1.1.3	笹子トンネル事故	4
1.1.4	道路新規建設計画時における費用便益分析の概要と維持管理における便益評価の必要性	5
1.1.5	道路施設における資産価値の評価	9
1.1.6	不確実に生起する損失を評価する手法	11
1.2	研究の目的	12
1.3	論文の構成	15
第2章	道路施設修繕計画における現状，課題整理と本研究の位置づけ	17
2.1	諸言	17
2.2	我が国における道路施設維持管理の政策，実務と既往研究の動向	17
2.3	インフラマネジメントの全体構造	18
2.4	LCC型マネジメントを構成する要素技術	19
2.4.1	LCC型マネジメントにおける基本的な修繕計画立案フロー	19
2.4.2	管理目標水準の設定の既往研究	20
2.4.3	LCC分析	21
2.4.4	劣化予測モデル	22
2.4.5	対策箇所・工法選定アルゴリズム	22
2.5	利用者費用を考慮する試み	23
2.6	本研究の位置づけ	24
第3章	リスク評価に基づいた道路施設の総合維持管理手法の開発	27
3.1	諸言	27
3.2	道路施設におけるリスクの定義	27
3.2.1	対象とする施設の設定	27
3.2.2	ハザードの特定	28
3.2.3	リスクの推定	29
3.3	社会的影響度	33
3.3.1	道路事故	33
3.3.2	救命救急アクセス経路	34
3.3.3	観光・産業	36

3.3.4	孤立集落.....	37
3.3.5	通行規制区間.....	37
3.3.6	情報提供.....	38
3.3.7	事後対策工事.....	38
3.3.8	事後対策工事による渋滞・迂回.....	42
3.4	破損確率.....	43
3.4.1	舗装.....	43
3.4.2	橋梁.....	43
3.4.3	危険斜面.....	44
3.5	影響確率.....	52
3.6	リスク評価に基づく対策箇所の選定方法.....	54
3.6.1	費用対効果.....	54
3.6.2	便益.....	54
3.6.3	費用.....	55
3.6.4	区間リスク評価.....	55
3.6.5	対策箇所選定.....	55
3.7	リスク評価に基づく対策箇所選定の試算.....	56
3.7.1	試算条件.....	56
3.7.2	リスクに基づく対策箇所選定の試算.....	57
3.8	結語.....	58
第4章	リスク評価に基づく道路施設の修繕箇所選定の実務導入に向けた検討.....	60
4.1	諸言.....	60
4.2	道路区間の重要性に基づく管理手法の検討.....	60
4.2.1	重点路線の設定.....	60
4.2.2	路線区分ごとの管理方針.....	61
4.3	修繕箇所決定手順.....	63
4.3.1	限界管理水準.....	63
4.3.2	現地職員による現地確認.....	63
4.3.3	予算運用の設定.....	63
4.3.4	橋梁修繕の同期化.....	64
4.3.5	修繕箇所決定手順.....	64
4.4	実運用における課題の抽出.....	65
4.4.1	抽出箇所の比較分析.....	65
4.4.2	土木事務所担当者へのヒアリング.....	69
4.4.3	改善方法の検討.....	71
4.5	結語.....	84

第5章	道路施設の破損リスクに基づく最適補修戦略決定モデルの構築	86
5.1	諸言	86
5.2	公平性を巡る議論の整理	87
5.2.1	衡平論の難点	87
5.2.2	不衡平を測る2つのアプローチ	87
5.3	衡平性の定量的評価の道路施設維持管理への適用	89
5.4	公平性指標の適用	90
5.4.1	衡平の捉え方	90
5.4.2	衡平の対象	90
5.4.3	衡平の尺度	90
5.4.4	評価の単位期間	90
5.4.5	評価の時点	91
5.4.6	評価尺度の単位	91
5.5	最適維持管理計画策定モデル	92
5.5.1	利用者の経路, 経路交通量算出方法	92
5.5.2	公平性評価	92
5.5.3	効率性指標	93
5.5.4	補修箇所選定モデルの定式化	94
5.5.5	最適補修戦略の解法	94
5.6	最適補修戦略決定モデルの挙動確認	95
5.6.1	試算条件	95
5.6.2	リスク評価	96
5.6.3	試算結果	96
5.7	結語	100
第6章	結論	102
6.1	本研究の成果	102
6.2	今後の課題	103
6.2.1	リスク評価の精度向上	103
6.2.2	長期にわたる修繕計画の立案	104
6.2.3	衡平性・効率性を考慮した最適補修戦略の実道路ネットワークへの適用	104
謝辞		105

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 アセットマネジメントの概要

わが国では 1950 年代からの高度経済成長とともに社会資本が急速に整備され、現在までに相当量のストックが蓄積されている。今後は、蓄積されたストックの高齢化への対応が必要になっている。一方で、近年のひっ迫した財政事情により、社会資本整備、維持管理に充当される予算は縮小してきた。そこで、2000 年代前半から老朽化した橋梁をはじめとして維持管理の必要性が指摘され、社会資本を効率的に維持管理するためのツールとしてアセットマネジメントが検討されてきた。アセットマネジメントは従来、預金、株式、債券などの金融資産をリスク、収益性などを考慮して運用することで資産価値を最大化するための活動を指していた。社会資本にこの考え方を適用し、国民から信託された税金とストックされた社会資本を資産として、長期的視点にたって運用、管理を通して公共サービスにより国民に還元しようとする活動を社会資本のアセットマネジメントという¹⁾。アセットマネジメントの構築には段階的アプローチが必要であると指摘されている¹⁾。具体的には、**図 1-1** に示すように LCC 型(Life Cycle Cost)マネジメント→PPBS(Planning Programming Budgeting System)型マネジメント→NPM(New Public Management)型マネジメントの段階がある。これは、資産管理からはじまり、資産運用へと進化するものである。

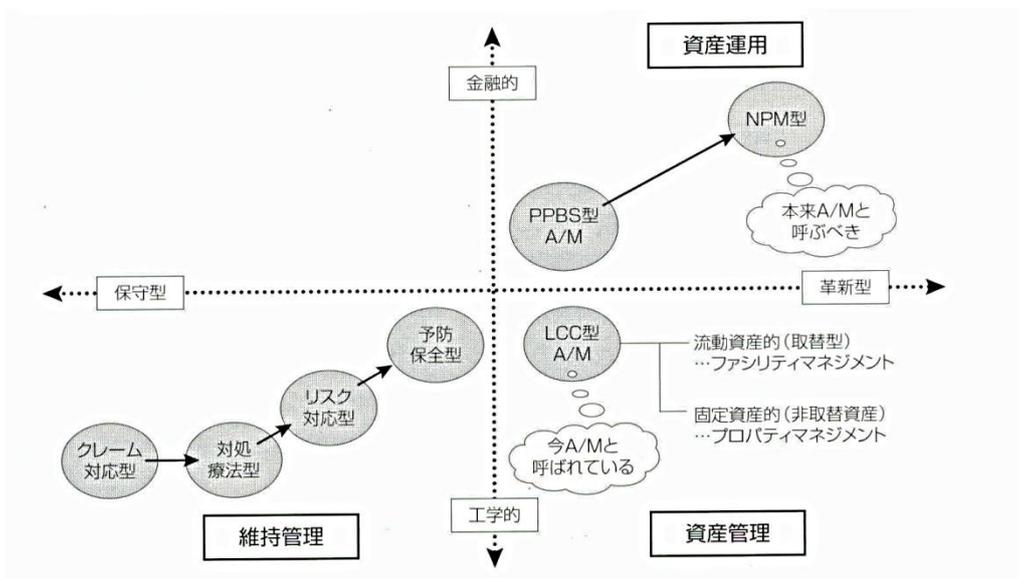


図 1-1 アセットマネジメントの段階的アプローチ¹⁾

LCC型はメンテナンス工学の延長であり、性能目標を満たしながら各年度の予算とLCC最小化のバランスを図る。しかし、劣化予測や補修費を管理することに主眼が置かれているためコスト面のみに着目している。したがって、資産としての価値については着目していないため、投資の妥当性の検証や、資産価値を積極的に高めるような計画の検討にまで活用することはできない。PPBS型は異種の構造物で構成される機能的な構造物群として捉えて資産管理を図る。たとえば道路は橋梁、トンネル、舗装等が一体となって機能することで1つの資産とみなすことができる。LCC型との違いは、道路であれば路線など機能面で評価することで、個別の施設のLCC最小化を図るのではなく、施設全体で性能を維持するように投資効率向上を図ることである。このためには、複数種類の構造物の投資優先順位を統一指標で評価する必要がある。NPM型は資産価値の最大化を目指すための金融資産の運用と同様に、資産価値最大化を目的とした社会資本の運用のことを指す。しかし、社会資本の資産価値という概念に明確な定義はない。たとえば、社会資本の大部分は使用料金などの明確な形での収益はない。利用者の便益などを計測することも考えられているが、金銭換算しがたい効果も多く存在すると考えられる。したがって、現状では実現が容易ではないが、投資と資産価値の関係を把握することで投資の妥当性の検証や合理化を図る理想的なシステムのことをNPM型マネジメントという。LCC型、PPBS型、NPM型の違いは図1-2のように整理されている¹⁾。

	LCC型	PPBS型	NPM型
対象	同種の構造物群	機能としての構造物群 (異種の構造物群)	全体(ネットワーク)
評価	供用性能 (例:健全度)	施策目標指標	資産価値 (金額他)
特徴(主目的)	コスト削減	施策間の予算配分	投資の効率化・合理化 (アカウントビリティ)
システム構築	施策に関係なく ほぼ共通	施策に合わせて カスタマイズ	施策に合わせて カスタマイズ

以降の章で主に扱う
マネジメントシステム

図 1-2 LCC型、PPBS型、NPM型の違い¹⁾

1.1.2 アセットマネジメントの普及と学術研究の動向

LCC型マネジメントは、図1-3に示すように社会資本のうちストック額が大きい道路において検討が先行している。粗資本ストック、純資本ストックの意味については1.1.5で述べる。道路は現在の我が国において市民の生活、経済活動を支える大きな役割を果たしていることはいうまでもない。したがって、アセットマネジメントによりこれらの維持管理が適切に運営されることが円滑な市民の生活、経済活動に資することは明らかであろう。

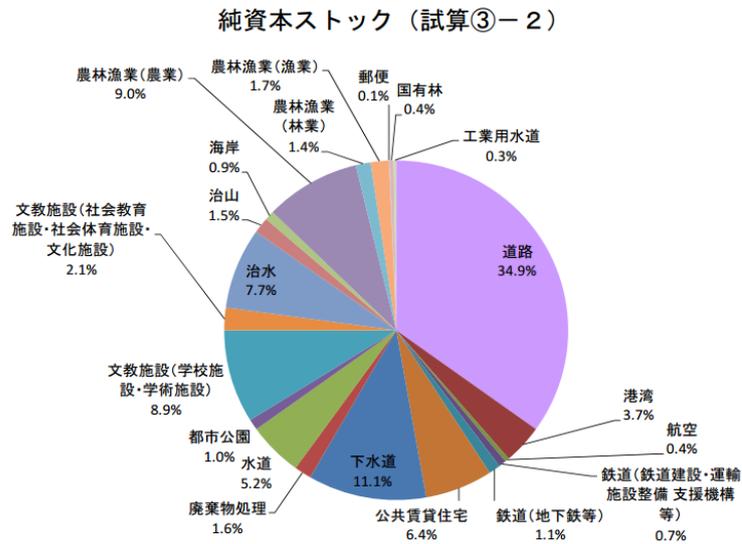
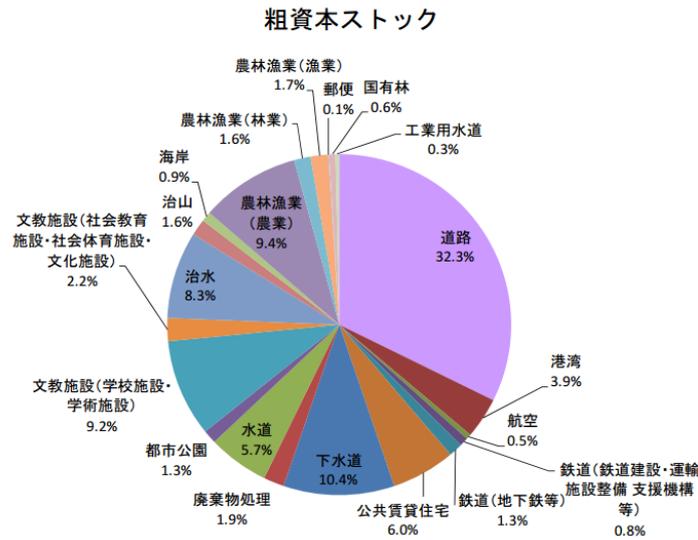
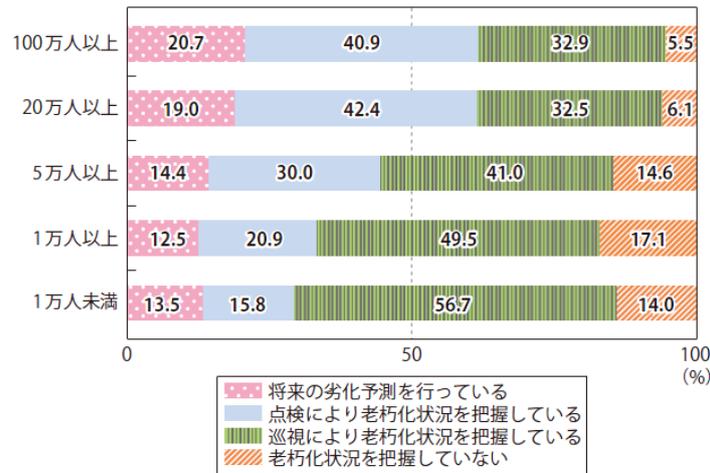


図 1-3 粗資本ストック及び純資本ストックの部門別内訳⁷⁾

道路は橋梁やトンネル，舗装など多種多様な施設で構成されるため，それぞれについてLCC 最小化を図るための技術が蓄積されている．LCC 型マネジメントの検討のためには道路施設の点検・評価，データの蓄積，修繕計画の立案，修繕工事の実施などの多岐にわたる要素技術が必要となる．そのため，ハード，ソフトの両面で多くの研究，実務の事例が蓄積されてきた．その結果として，図 1-4 に示すように管理者の規模によって多寡はあるものの，多くの管理者が点検を実施し，劣化予測を踏まえた修繕の計画が立案されるなどアセットマネジメントの枠組みが普及しつつある．



(注) 調査対象の地方公共団体が多いインフラ5分野（道路・河川・下水道・公営住宅・公園）について、各分野でそれぞれの種類の取組みを行う地方公共団体の割合を平均したもの。
資料) 国土交通省 地方公共団体に対するアンケート調査結果（2012.12月）より作成

図 1-4 地方自治体における老朽化の把握状況²⁾

学術研究においても、LCC 型マネジメントを実現するための要素技術が多く蓄積されてきた。特に社会資本の劣化・損傷など、日常的な維持管理の効率化や LCC 最小化を目的としたアセットマネジメント技術についてはアセットメトリクスとして学術的体系化が図られつつある³⁾。

以上のことから、社会資本のうちでもストック額が大きく、アセットマネジメントの研究が先行している道路を本研究の対象とする。

1.1.3 笹子トンネル事故

2012年12月2日、中央自動車道上り線笹子トンネル内において天井板が落下する事故が発生した。9名死亡、負傷者2名というインフラ破損による第3者被害が過去最大の事故となった。事故後、2月7日に上り線の供用再開、2月8日に上下2車線ずつの供用が再開された。この間、道路利用者は中央自動車道が利用できず、一般道を迂回することとなった。年末年始の道路交通需要が大きい時期も含まれたため、このときの迂回によって生じた時間損失などの利用者損失は600億円以上と推計されている⁴⁾。

笹子トンネル事故のように道路施設が適切に維持管理されていなければ、利用者の人命にかかわるうえ、道路ネットワークの寸断により事故後にも利用者へ大きな損失を与える。また、道路管理者においても行政的、社会的な責任を負うこととなる。事故の復旧費用は事後対応の工事費用を踏まえれば維持管理に投ずるべきであった費用よりも大きいことが推察される。

このように維持管理が適切に行われなければ、利用者の人命、時間損失の増大、走行費

用の増大，管理者における復旧費用を含む管理費用増大など多岐にわたる影響が生じる。したがって，LCC 型マネジメントにより適切に点検，修繕のサイクルを最小の費用で運用するシステムが構築される必要性はもとより，厳しい予算制約下においては，第 3 者被害や交通利用者への影響を考慮した選択と集中の投資が必要になると考えられる。

1.1.4 道路新規建設計画時における費用便益分析の概要と維持管理における便益評価の必要性

(1) 道路事業における便益評価

道路建設における新規事業採択時には事業の妥当性を評価するために費用便益分析を行う。費用便益分析では道路整備の有無による社会的な便益の差分(社会的余剰)と道路整備に係る費用の差分を比較することで事業の効果，効率性を計測する。「道路投資の評価に関する指針」⁵⁾では道路事業実施における妥当性分析の過程が図 1-5 のように提示されている。

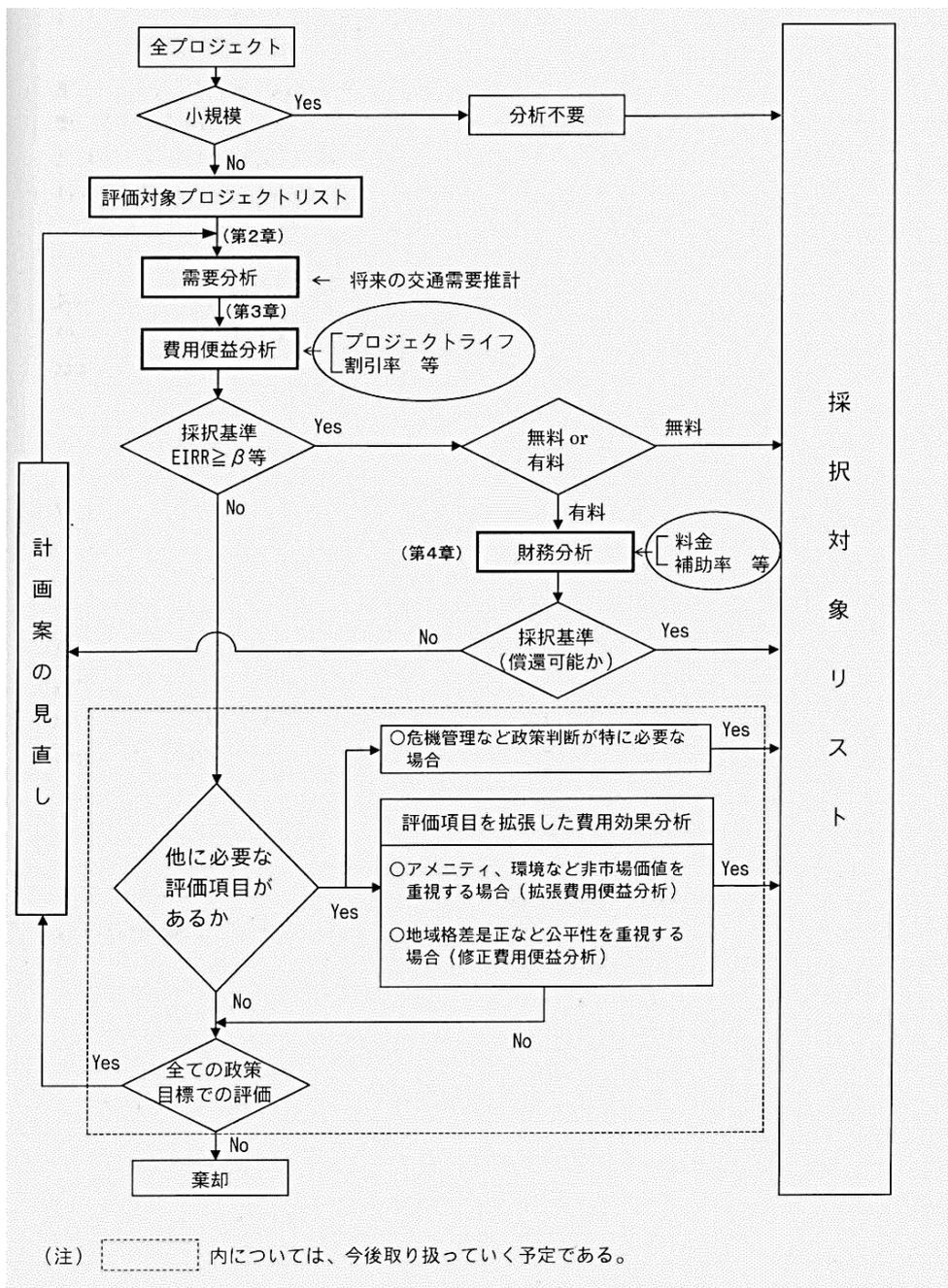


図 1-5 道路事業実施の妥当性分析の過程⁵⁾

ここでは、費用便益分析において採択基準を満足するかどうかを分析し、満足しない場合には拡張費用便益分析、修正費用便益分析、あるいは危機管理上必要となる条件がないかどうかを総合的に判断したうえで事業の是非を決定する。このフローにおける「費用便益分析」は、**図 1-6** に示す手順で実施される。ここでは一般化交通費用における消費者余剰である利用者便益と交通事故減少便益、環境改善便益の 3 指標を便益の計測対象としている。平成 20 年度に国土交通省道路局が公表した費用便益分析マニュアル⁶⁾では便益の算定項目を、マニュアル策定時点で十分な精度で計測が可能でかつ金銭表現が可能である走行時間短縮便益、走行経費減少便益、交通事故減少便益の 3 つとしている。

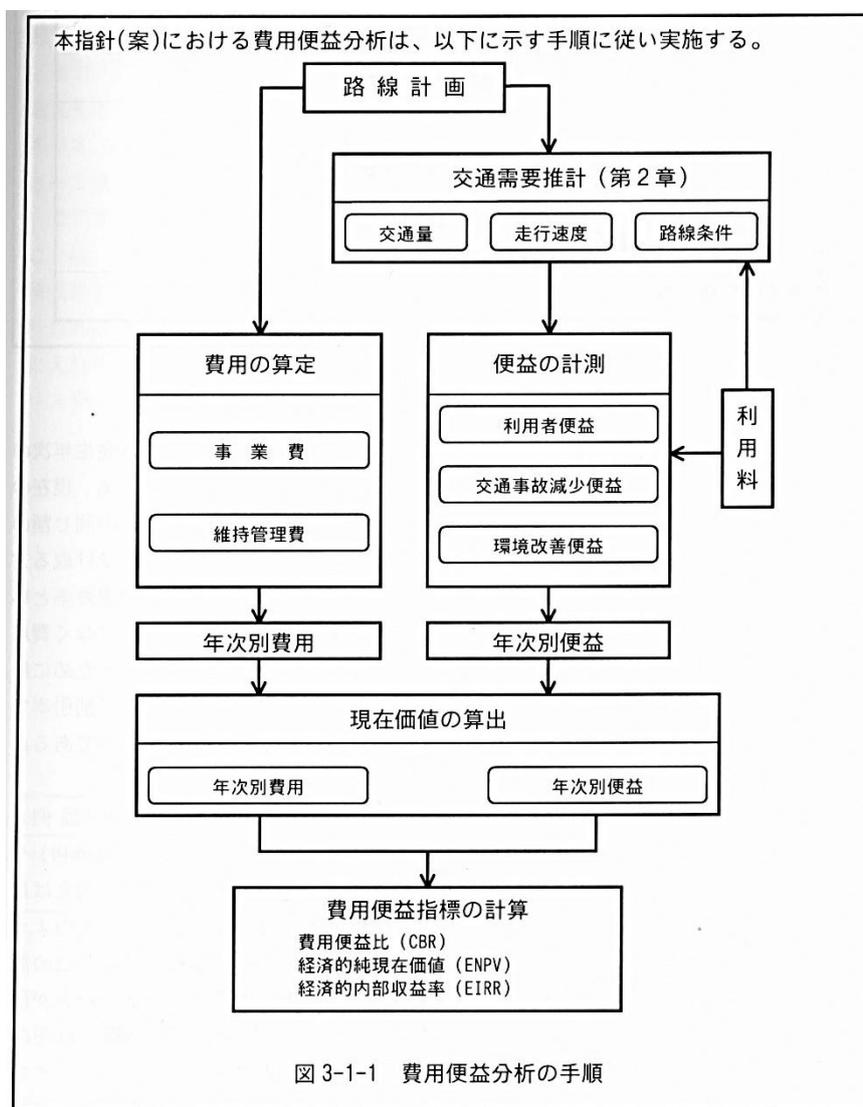


図 1-6 費用便益分析の手順⁵⁾

このほかに交通量に依存しない非市場的価値として位置づけられ、精度よく計測するこ

とが困難な効果項目が存在する。これらの効果項目を計測するために「道路投資の評価に関する指針(案)⁵⁾」では代替法、トラベルコスト法、ヘドニック法、CVMなどの貨幣換算手法を用いる方法を提案している。以上のように、道路新規建設時には道路需要の予測に基づく便益の計測、非市場便益の計測の方法が提案されており、実務においてもこの方法が採用されて定着している。

(2) 維持管理における便益評価の必要性に関する考察

費用便益分析で検討された便益と維持管理の意味について考察する。費用便益分析で定義された便益は道路が建設され、プロジェクトライフの終了時点まで設定した交通容量等の機能が保持されていることを前提としている。すなわち、供用中に破損等により道路機能が失われる事象が生じれば、建設時に想定した便益の一部が発現しないこととなる。この前提に整合を図るため費用便益分析においては費用の算定に維持管理費を計上している。したがって、費用便益分析では「建設時に想定した維持管理費が必ず充当されることで、道路の機能低下が生じないように管理される条件下においては、計測した便益が発現する。」ことを仮定している。たとえば、維持管理のための投資について、withとwithoutを考えてみよう。維持管理のための費用が全く投資されなかった(without)場合、永久的に劣化しない構造物を除いていずれかの時期に構造物が破損し、道路の機能が低下、あるいは消失し、以降の便益は発現しない。一方で投資が適切にされる(with)場合、便益はプロジェクトライフにおいて発現し続ける。このように費用便益分析で計測された便益を保持するための維持管理費用の設定と、それに応じた予算が充当されるかどうかは重要であるが、現在のところこれらの整合を検証している事例は見当たらない。新規建設と維持管理が切り離されて計画立案される実務での実情を踏まえれば、新規建設で設定した維持管理費用の妥当性を問われることはないと考えられる。したがって、維持管理費用の投資是非はアセットマネジメントの中で議論される必要がある。

(3) 道路建設における公平性の考慮

道路投資の評価に関する指針(案)では利用者が少なく新規建設事業で便益額が小さくなりやすい地方部と都市部の格差是正を図るための「修正費用便益分析」も提案している。修正費用便益分析では費用便益分析で算出された便益額に地域修正係数を乗じることで便益を修正する。修正費用便益分析は公平性を考慮するために提案されたものであるが、この導入の是非については多くの議論があり、実務においても定着しているとは言い難い。しかしながら、費用便益分析で計測された便益は個人(あるいは地域)の社会的重要度が所得の限界効用の逆数として取り扱われているため、主に限界効用が高い低所得者に便益を与える事業は不利になる。一般的に地方部よりも高所得世帯が多い大都市の事業を優先採択すれば地域間格差が大きくなるという問題を抱えている。したがって、道路投資に公平性を考慮する必要性は大きいと考える。これは維持管理においても同様であると考えられる。

1.1.5 道路施設における資産価値の評価

わが国で社会資本の資産価値を算出した事例としては内閣府「日本の社会資本」⁷⁾がある。「日本の社会資本」では資産価値評価を粗資本ストック，純資本ストック，生産的資本ストックの3区分で試算している。それぞれ以下のように定義されている。

●粗資本ストック (Gross capital stock)

現存する固定資産について、評価時点で新品として調達する価格で評価した価値。

●純資本ストック (Net capital stock)

粗資本ストックから供用年数の経過（経齢）に応じた減価（物理的減耗、陳腐化等による価値の減少 ※1）を控除した残存価値。市場のある民間資本であれば、市場価値に相当する。

●生産的資本ストック (Productive capital stock)

粗資本ストックから供用年数の経過（経齢）による効率性の低下（※2）を控除した資産の残存能力量。ストックが提供するサービスを生み出す能力の量を表す。

※1 減価

本推計では、OECDマニュアル(2009)に基づき、経齢に伴う物理的減耗及び予期される陳腐化による価格の低下、と定義する。予期せぬ陳腐化は含まない。

※2 効率性の低下

社会資本はその経齢に伴って、物理的な劣化その他の劣化が発生するものと考えられ、そうした劣化によって当該社会資本が提供するサービス・性能が低下することを、効率性の低下と表現している。経齢に伴う効率性の低下については、現時点で確立された定義は存在しない。定義および損失の適切な評価については今後の研究が待たれる。（詳細は後述）

図 1-7 ストックの理論的フレームワーク 3 区分⁷⁾

このうち、粗資本ストック，純資本ストックによる評価は評価時点での調達価格に基づいている。すなわち、社会資本の投資によって生じるサービス量を不問として、再度調達するときの調達の価格による評価を採用している。施設の調達価格を資産価値とみなした場合には、投資量を増やせば資産価値を向上させることになる。これは、道路施策のための投資とそれによって生じるサービス量を比較することで投資効率性を議論している現状を鑑みれば、適切であるとは考えにくい。そこで、「日本の社会資本」では諸外国の社会資本の資産価値評価方法を参考にして生産的資本ストック評価を2012年度から追加しており、「能力」の計測法を提案している。しかしながら、図 1-7 に示すように、効率性の低下を表現する方法は確立されていないと述べられている。国土技術政策総合研究所が2006年に報告した「住宅・社会資本の管理運営技術の開発」⁸⁾ではインフラ会計を用いた社会資本マネジメント手法を検討する中で、社会資本の資産価値を費用便益分析で用いられる純現在

価値(B-C)で定義する方法を提案している。また、事業開始後に費用便益分析を行う事業再評価や事後評価を活用し、純現在価値とそれまでに投資した維持管理費用を用いて資産価値を改定することも提案している。これらは社会資本の能力を便益で評価することで、維持管理や更新により社会資本を継続的に提供し続ける根拠として活用することを目的として提案されている。

本研究の対象である道路が供用されることで得られる便益を資産価値としたとき、資産価値を向上させる施策は無数に存在する。例えば、MM(Mobility Management)や情報提供による道路混雑の解消に向けた施策は道路ネットワークを効率的に利用することで資産価値を向上させる。また、道路空間の民間開放による有効活用なども、現在計測されている道路の通行機能に基づく便益ではないが、社会資本が供する便益を増大させるだろう。これらの施策を総合的に取り扱い、投資の合理性を踏まえた意思決定ができればNPMマネジメントが実現できると考える。しかし、これらの実現には膨大な知見の蓄積が必要である。無数に考えられる資産価値を向上させる施策の中でも、修繕の投資は重要であると考え。1.1.3 で述べたように、道路施設が破損すれば膨大な損失が生じる。この損失の大きさは他の施策がされなかったときの便益減少分と比較しても十分大きいものであると想像できる。したがって、NPM型マネジメントの実現に向けた取り掛かりとして、本研究では道路施設の修繕投資を対象を限定する。その他の施策を含めたNPM型マネジメントの実現に向けては個別の施策に関する知見の蓄積を待って検討することとしたい。

道路資産の価値を便益評価する方法について考える。道路新規建設での便益評価は、1.1.4 で述べたように常時便益が発現することを捉えて評価する技術で構成されている。費用便益分析における便益計測方法でアセットマネジメントの投資合理性を議論するとき以下2点の課題がある。

① 便益評価の構成要素

便益評価は一般的に利用者の時間短縮、走行費用縮減、交通安全性向上の3つで構成されている。これらは、新設時を想定している。したがって、劣化したときに生じる負の効果については想定していない。例えば、道路であれば劣化すれば走行快適性が低下する、ポットホールが生起すれば大型車通行時に振動が生じるなどが考えられる。そのため、アセットマネジメントの投資においては、劣化による負の効果も投資によって改善されれば便益と捉えることができるだろう。また、3つの便益要素は道路新設によって生じる便益のうち、比較的便益が大きいと予想され、計測方法が確立されているものである⁵⁾。したがって、3要素以外にも定量的に計測でき、投資の優先度など意思決定に影響するものがあれば追加を検討する必要がある。

② 破損の不確実性

アセットマネジメントのための投資が適切にされない場合に不確実に生起する破損によって便益が消失する、すなわち資産価値が0となることも考えられる。したがって、耐用年数を与えて確定的な減価償却を用いた資産価値評価で投資の合理性

を判断すれば、安定的な道路施設の供用が困難となる。したがって、維持管理においては、構造物が破損したときの損失，すなわち負の便益を評価し，これを最小化するような方策が適切であろう。したがって，不確実に生起する構造物の破損を踏まえた評価技術が必要となる。

道路施設の資産価値向上のための修繕投資において便益を採用するときにはこれらの課題を解決する必要がある。

1.1.6 不確実に生起する損失を評価する手法

(1) 治水事業における便益評価

治水事業の対象となる洪水被害は主に大量の降雨という気象条件によって生起する不確実な事象である。治水事業の妥当性検討に定着している治水経済調査マニュアルでは堤防やダムの整備によって軽減される人命，資産への直接被害と稼働被害等による間接被害の期待被害額を便益として評価している。これは年平均被害軽減期待額を被害の軽減額とその被害が予想される降雨の生起確率の積で算定するものである。このアプローチはリスクマネジメントと呼ばれ体系化された技術の援用である。

(2) リスクマネジメント

リスクという言葉は分野，対象によってさまざまに使われ方をされており，統一的な定義がされていない⁹⁾。ただし，さまざまに定義されたリスクによって生じる悪影響をできる限り少ない投資で抑える活動である「リスクマネジメント」は図 1-8 に示すような基本的手順が定着している。土木分野における自然災害のリスクアセスメントにおいては伝統的に「リスク」＝「被害の大きさ」×「被害の発生確率」と定義してきた。すなわち，特定したハザードによる期待被害額を評価の対象としている。これは，小規模な危険事象が独立に多数生起するようなリスクを前提に開発されている。近年頻発する巨大災害ではこの評価方法では適用に限界があると指摘されている⁹⁾。巨大災害では甚大な被害が同時に生起するため，期待被害額ではなく災害リスクの分布を考慮した計測が求められる。治水事業においては，豪雨災害による洪水は河川流域ごとで被害の範囲が概ね独立に限定できること，降雨確率が気象データの蓄積により比較的予想でき，極めて希少なものではないことから期待被害額によるアプローチが採用されていると考えられる。

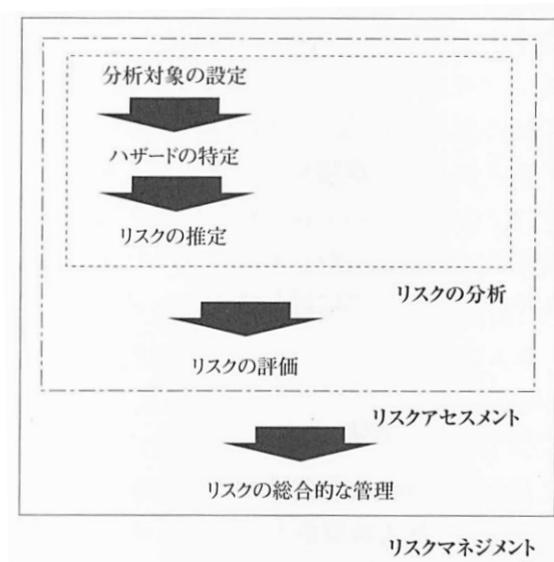
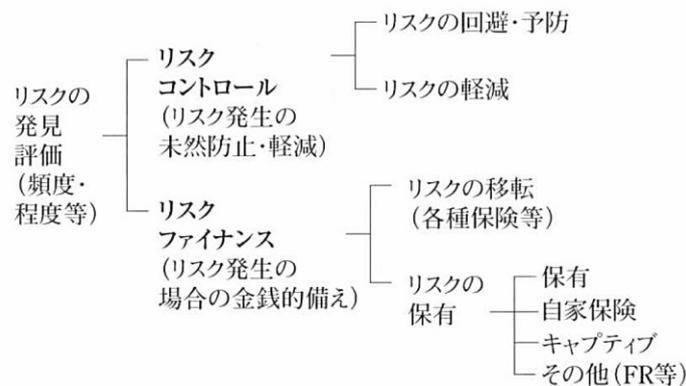


図 1-8 リスクマネジメントの手順⁹⁾

リスクマネジメントの手段は図 1-9 のように整理されている。たとえば治水事業では堤防などの施設により大きい流量への破堤を防止することで洪水というハザードの生起確率を減じ、仮に破堤した場合にも浸水量を軽減させることで被害額を低減させるための投資になる。したがって、図 1-9 中のリスクの回避・予防とリスクの軽減の両者を図るものである。



出典：山口 (1998)。

図 1-9 リスクマネジメントの手段⁹⁾

1.2 研究の目的

LCC 型マネジメントは基礎的な技術蓄積が一巡し、今後はこれらの検討の基礎となる点検結果などのデータ蓄積により逐次更新されていくことが予想される。LCC 型マネジメント

トの検討がひと段落した現在、社会資本のアセットマネジメントは PPBS 型マネジメント、NPM 型マネジメントへの進化が必要であると考えられる。NPM 型マネジメントでは資産価値の最大化が求められる。資産価値の最大化の手段は広義には無数に考えられる。無数に存在する手段を実現するための技術を蓄積し、統合する技術が開発されたとき NPM 型マネジメントが実現できるだろう。しかし、NPM 型マネジメント実現には長い期間を要することは容易に想像できる。まずは LCC 型マネジメントに資産価値最大化の方向性を加えることが妥当であろう。特に道路修繕工事は社会資本の維持管理における投資の中でも金額が大きく、修繕箇所選定に資産価値最大化のためのエッセンスを加えることができれば、NPM 型マネジメントの実現に向けた有用な技術となる。そこで、本研究では劣化により修繕が必要となる橋梁や舗装などの道路施設の修繕計画立案を研究の対象とする。

道路施設修繕計画立案で「資産価値最大化を図る」とは、道路の機能低下を予防することで、最大のサービスレベルを維持する計画のことであると考えられる。道路施設の修繕による道路のサービスレベル維持はすなわち、施設の劣化、破損によって生じる利用者への影響を最小にすることである。利用者への影響とは、破損による道路の容量低下、あるいは途絶することで生じる損失のことを指す。したがって、破損等の予防を図るための修繕優先順位は、容量低下や途絶によって利用者損失の大きさを考慮して決定することで、予算制約下における資産価値の最大化が図られる。

道路施設の破損による社会的損失は劣化による破損を対象とするため、不確実な事象を評価する必要がある。劣化による破損が同時に生起することは稀有であり、無視しても差し支えないと考える。したがって、維持修繕による効果を被害の大きさと被害の発生確率の積で定義するリスクの軽減分で評価することが妥当である。この投資は健全度を向上させ、破損確率を 0、あるいは減じるためのものであることから、リスクコントロールのうち、リスクの回避・予防に位置づけられる。

一方で、効率的な修繕計画の立案は必要であるが、顧客である利用者は多数いることを踏まえれば、投資の意思決定には衡平性を考慮する必要があると考えられる。一般的に金融資産のアセットマネジメントにおける顧客は 1 個人、あるいは 1 つの組織である。しかしながら、道路は顧客である利用者が多数いるため、金融資産のマネジメントで議論されている資産価値向上の手法では扱わないアプローチを加えて衡平性を考慮する必要がある。

以上より、本研究で取り扱う課題を以下の 4 点とする。

- ① 道路ネットワークは多種に及ぶ施設群の物理的な連結で構成されるものである。したがって、道路ネットワークのサービスレベル最大化を図るためには、施設群に個別の LCC 型で議論されている修繕計画立案では不十分であり、すべての施設を同じ指標で一元的に評価し、修繕する対象を選定する必要がある。これが達成されれば PPBS 型のマネジメントとして位置づけられる。
- ② 道路機能を低下させる要因は多くある。劣化による破損以外にも、例えば冬季の降雪による路面積雪や、走行中の落下物などが考えられる。しかし、これらは除雪や

道路巡回など日常的な維持管理業務で対応する必要がある。一方で地震災害による落橋や盛土の崩落など大規模で低頻度の損傷は耐震対策など大規模な事業により対応する必要がある。これらの損失は生起する条件，対処の方法が異なり，同じ枠組みで評価することは適切でない。そこで，議論の焦点を道路施設修繕に限定する。道路施設は健全に機能しているときには損失は生じないと仮定する。したがって，通常時においては機能の損失が生じず，不確実に生起する破損により生じる損失をリスクとして評価する。道路施設の修繕によってリスクの最小化を図るような修繕計画立案方法を開発する必要がある。

- ③ LCC 型マネジメントは実務において既に導入され，定着している自治体も多くみられる。しかし，本研究で提案する NPM 型に向けた修繕計画の立案方法は，新たな試みであることから，実務での適用に耐えうるか不明である。そこで，本研究の知見が実務での適用に対応できるような方策を検討する必要がある。
- ④ 道路施設の維持管理においては，一部の利用者が他の利用者よりも多くの損失を生じるような投資を避け，できる限り衡平性に配慮する必要がある。したがって，修繕計画には衡平性を考慮するような枠組みを加える必要がある。

②で示したリスク評価を用いることですべての施設の修繕必要性は貨幣換算されるため，単位を(円/任意の期間)に一元化できる。したがって，リスク分析を用いれば①に示した課題にも対応できる。以上より本研究では，まず，道路施設の破損によるリスクを定義して，道路施設修繕の優先順位を決定する方法を構築する。つぎに，③に示すように構築した枠組みが机上の議論に帰することを避けるため，実務において適用されるために必要となる条件等について検討し，実務に導入して PDCA が一巡する 1 年後に，現地技術者へのヒアリング等から課題を抽出し，改善のためにリスク評価方法を修正する。最後に，④に示した課題に対応するため，利用者が暴露するリスクの衡平を確保するような修繕計画立案方法についても構築を試みる。以上の研究により道路施設の管理を NPM 型に進化させる一助となることを期待している。

1.3 論文の構成

本論文は6章構成とする。

第2章では道路施設修繕計画に関する既往研究や現在に至る国の動向を整理する。道路施設維持管理計画の立案方法においては既に多くの研究蓄積がある。これらを整理し、本研究の立場を明らかにする。

第3章では道路施設のリスク評価に基づく総合維持管理手法の枠組みを構築する。具体的には、道路施設が損傷する確率と損傷したときに生じる社会的費用の積をリスクと定義して、リスク項目8種類の算出法を示す。リスク評価の値を用いて修繕優先順位を決定する方法についてもここで述べる。また、構築した枠組みで実道路を用いた試算を行い、モデルの挙動を確認する。

第4章では第3章で構築したリスク評価に基づく補修戦略立案方法を岐阜県において実務に導入するために必要となる条件設定等を検討する。また、実務導入から1年が経過したときに、現地担当技術者へのヒアリングを行い、リスク評価手法の課題を抽出する。抽出した課題をもとに改善策を提案し、リスク評価手法を修正する。

第5章では第3章で構築したリスク評価手法を用いて、修繕箇所選定の手法に衡平性の概念を加えた最適補修戦略決定モデルを構築する。ここでは、理論的な方法論に着目するため、第4章で示した実務レベルの議論と切り離している。構築した最適補修戦略決定モデルを仮想道路ネットワークでモデルの挙動を確認する。なお、本論文中で取り扱う「衡平性」、「衡平」という言葉については、第5章で語彙を定義するが、他の箇所でも既往研究の引用等を使用するときには原著のまま使用する。

最後に第6章では本論文の内容と成果、今後の課題を整理することで結論とする。

なお、本研究の第3章、第4章はLCC型マネジメントからの進化を目指す岐阜県と共同で検討をすすめたものである。岐阜県では成果を取りまとめて「社会資本メンテナンスプラン」として維持管理施策を運用している。

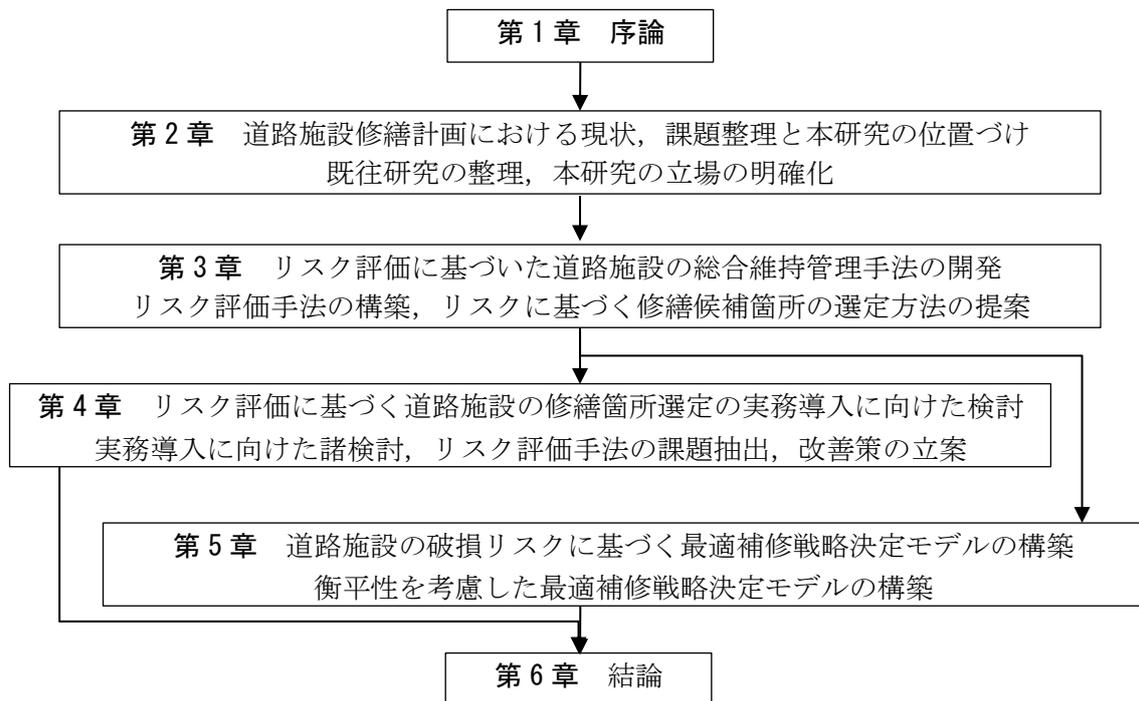


図 1-10 本研究の構成

参考文献

- 1) (社)土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，技報堂出版(株)，2005
- 2) 国土交通省：平成 25 年度国土交通白書
- 3) 実践的アセットマネジメントと第 2 世代研究への展望：貝戸清之，青木一也，小林潔司，土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.67-82，2010.3
- 4) 日本経済新聞 HP 2013 年 12 月 3 日「経済損失 600 億円超 笹子トンネル事故通行止め，山梨大推計」，
<http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG2605P_W3A320C1CR8000/>
(2014/12/03 アクセス)
- 5) 道路投資の評価に関する指針検討委員会編：道路投資の評価に関する指針(案)，(財)日本総合研究所，(1998).
- 6) 国土交通省道路局，費用便益分析マニュアル，2008.
- 7) 内閣府：日本の社会資本 2012
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国総研プロジェクト研究報告第 4 号 住宅・社会資本の管理運営技術の開発 第 3 章，2006.
- 9) 小林潔司：「多々納裕一・高木朗義(編著)防災の経済分析」勁草書房，第 1 章，pp.3-21，2005.

第2章 道路施設修繕計画における現状，課題整理と本研究の位置づけ

2.1 諸言

道路施設における LCC 型マネジメントのための要素技術はストック額の大きい橋梁，舗装を中心に多く蓄積されてきた。蓄積された技術は実務にも多数適用されている。また，笹子トンネル天井板崩落事故を契機とした国の施策で，これまで LCC 型マネジメントが適用されていなかった自治体においても今後適用するよう指導が進められている。このような背景のもと本研究では，LCC 型で検討されてきた道路施設の管理を，NPM 型マネジメントへと進化させる一つの要素技術の開発を試みる。そこで本章では以下を整理することで，本研究の位置づけを明確にする。①我が国における道路施設維持管理の実務における動向を俯瞰する。②LCC 型マネジメントの基本的な検討フローとそれを構成する要素技術に関する既往研究を整理する。

なお，本論文における語彙の統一のために以下を設定する。「道路の維持管理」にはインフラストラクチャ(以下，インフラという)の戦略的な修繕計画立案のほかにも，除雪，街路樹剪定，道路パトロールなど多くの項目が含まれる。そこで，インフラのアセットマネジメントのことを「インフラマネジメント」，このうち，道路施設に限定したものを「道路施設マネジメント」という。「アセットマネジメント」は，点検の実施やその計画，修繕計画の立案から修繕工事の実施に至るまで，施設を効率的にマネジメントするための要素全体の体系を指す。このうち，特に道路施設の修繕時期や修繕工法の最適化を目的として立案される修繕計画を「道路施設修繕計画」という。

2.2 我が国における道路施設維持管理の政策，実務と既往研究の動向

我が国では 2000 年代前半から，高度成長期に大量に建設された道路施設の高齢化を受けてそれらにおける効率的な維持管理の必要性について注目が集められた。平成 15 年 3 月に「道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会」から「道路構造物の今後の管理・更新等のあり方 提言」¹⁾が公表され「アセットマネジメント導入による総合的なマネジメントシステムの構築」をはじめとする管理・更新のあり方について提言が示されている。土木計画の分野では土木学会論文集 No.744 にインフラのアセットマネジメントの特集論文が掲載された。ここでは小林，上田がインフラのアセットマネジメント研究の課題と展望を示し²⁾，このほかにアセットマネジメント戦略を検討するための分析モデル³⁾，インフラの劣化予測⁴⁾に関する検討がされている。

実務においてもこの頃から国や多くの都道府県でストック量の大きい道路施設である橋梁や舗装を対象としたインフラマネジメントの導入が検討され始めた^{たとえば⁵⁾6)}。しかし，ひっ迫する財政状況や維持管理に関する必要性が十分に認知されていなかったことなどによ

り、実務導入が遅れていた自治体も散見された。しかし、平成 24 年 12 月 2 日の中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故の発生を契機にインフラマネジメントに関する政策が国の主導により急速に進められている。

国土交通省は平成 25 年度を「社会資本メンテナンス元年」として、平成 25 年 3 月に 3 か年の工程表として「社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置」⁷⁾をとりまとめ、これに基づく取組みを進めている。政府としても平成 25 年 10 月に「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」を設置し、11 月には戦略的なインフラの維持管理・更新等の方向性を示す基本的な計画として「インフラ長寿命化基本計画」⁸⁾をとりまとめている。このように我が国におけるインフラマネジメントは膨大なストックを戦略的に維持管理・更新する方針が打ち出され、実行段階にあるといえる。

国直轄道路においては国土交通省が定めた「国が管理する一般国道および高速自動車国道の維持管理基準(案)」⁹⁾に従い各地方整備局が「道路維持管理計画(案)」を策定し、これに基づいて橋梁、トンネル、のり面、舗装などの道路施設について、点検、長寿命化修繕計画の作成、修繕工事を主眼においた PDCA サイクルによる事業を進めている。都道府県、指定市は各自治体の事情に応じて検討した維持管理方針等によりインフラマネジメントを実践している。

一方で、市町村のマネジメントの取り組みは一般的に遅れており、取り組みの一步目として平成 25 年 2 月に国土交通省から公表された「総点検実施要領(案)」¹⁰⁾により劣化した道路ストックによる第 3 者被害を防止するための点検が実施されているところである。総点検の実施後は戦略的なマネジメントに向けた取り組みが進められる予定である。

以上のように、我が国におけるインフラマネジメントの実務は行政の規模によって進捗に差があるものの、具体的な維持管理の戦略策定が進められ、修繕事業の実施までの道筋が立てられた段階にある。

学術研究ではインフラマネジメントのソフト面において、上記の 2003 年以降、劣化予測モデルや、LCC 型マネジメントの検討などを中心として多く蓄積されてきた。その概要について次節以降に述べる。

2.3 インフラマネジメントの全体構造

インフラマネジメントは、既存施設の維持管理費用の削減、あるいは長寿命を図るための措置を講ずるだけで目標が達成されるような単純なものではないと指摘されている¹¹⁾。意思決定の時間視野の違いにより、図 2-1 に示すように 3 つの階層に分類され、それぞれに PDCA(PDS)サイクルが定義できるとされている。

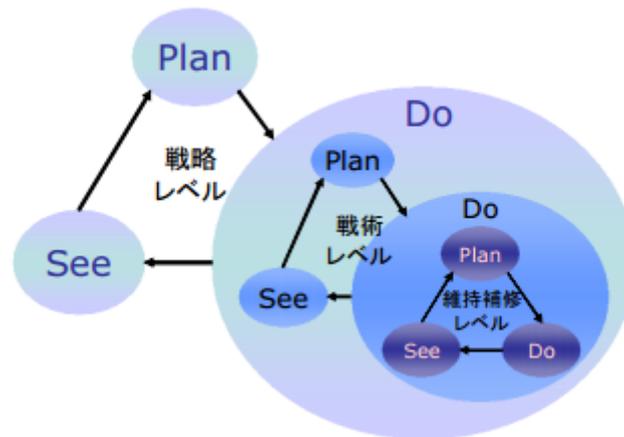


図 2-1 階層的マネジメントフロー(貝戸ら(2010)¹¹⁾)

戦略レベルは、長期的な視点に基づいた管理目標水準の設定と LCC 分析を用いた修繕シナリオ決定、そのために必要となる予算の把握からなる。戦術レベルは、短期的な視点に基づいて戦略レベルで決定された基本方針と充当された予算に基づいて、現地の事情等を踏まえて修繕の優先順位を考慮して予算執行、修繕事業の合理化を図る。維持管理レベルは、パトロールや要望受付など日々の維持管理業務の合理化を図る。この階層的マネジメントは各レベルで PDCA によるスパイラルアップを図るとともに、情報の蓄積により相互にフィードバックすることが求められる。

LCC 型マネジメントに関する研究は戦略レベルでの蓄積が多くされている。以下では戦略レベルにおける知見の蓄積をレビューする。

2.4 LCC 型マネジメントを構成する要素技術

2.4.1 LCC 型マネジメントにおける基本的な修繕計画立案フロー

LCC 型マネジメントのうち、戦略レベルのサイクルは、図 2-2 に示すような流れで構成される。修繕計画の立案においては予算を平準化するために、予算制約の範囲内で修繕優先度が高いものから修繕工事する対象を選定する。修繕優先度は LCC 分析で、その期に修繕せず、先送りすることで増大する LCC の増分が大きい順に与える場合、あるいは健全度の低い順に与える場合がある。ここで図中に示されている「交通状況、沿道状況等」は定量的に計測されているものは後述する事例があるが多くない。一般的には管理者の定性的な判断で修繕計画に反映している。

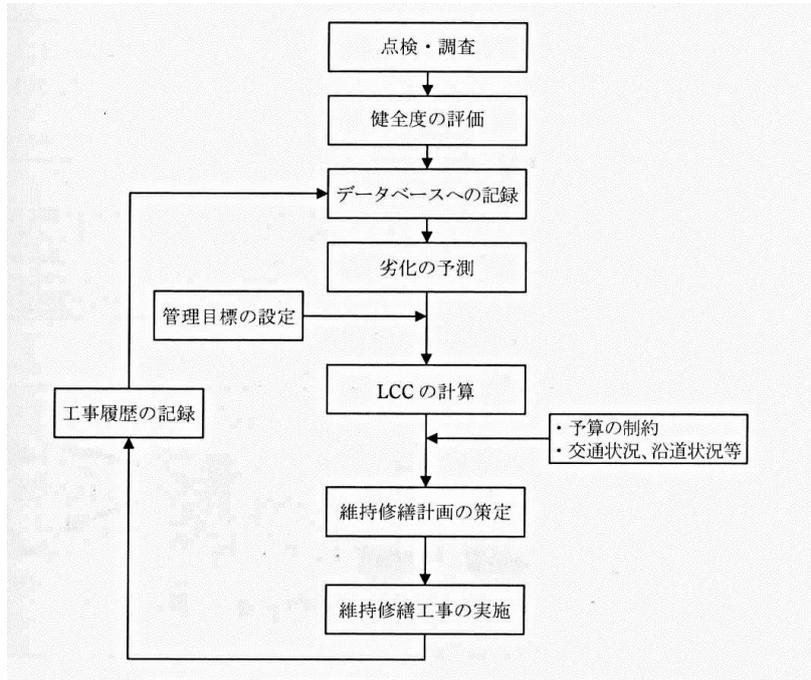


図 2-2 アセットマネジメントのフロー¹⁴⁾

2.4.2 管理目標水準の設定の既往研究

管理目標水準の設定については、坂井ら¹²⁾がロジックモデルに基づいて経営目標として設定したアウトカム指標の水準を達成するために必要となるインプット、すなわち道路巡回であれば巡回頻度などの投資量を決定する手法を提案している。ロジックモデルは図 2-3 に示すように、最終アウトカムを成果の達成度合いの判断指標として設け、それを達成するための道筋、手順を明らかにするために数段階に分けたアウトカムとアウトプットで表現し、アウトプット、インプットとの関係を表現する。坂井ら¹²⁾では安全安心、快適、経営管理の 3 つの最終アウトカムを設けて、路面の落下物や照明、通信機器の点検などを含む日常点検業務と、舗装補修などインフラマネジメントへの投資量をインプットとしたロジックモデルを構築している。

要素	内容
インプット (資源, 活動)	予算, 人員等, 施策を実施するために投入される資源および活動
アウトプット (結果)	職員の活動が行われたことによって生み出される結果
中間アウトカム (成果)	活動, 結果がなされたことによって生じる, 比較的短時間で顕在化する(であろう)成果
最終アウトカム (経営目標)	その施策が目指している最終的な成果. 一般に, 達成されるまでに長い期間を要し, 施策の枠を越えた外的要因に影響されることもある



図 2-3 ロジックモデルの要素(坂井(2007)¹³⁾)

2.4.3 LCC 分析

LCC は図 2-4 に示すように本来インフラの整備計画の開始から供用が終了し, 廃棄されるまでの費用のことを指す。

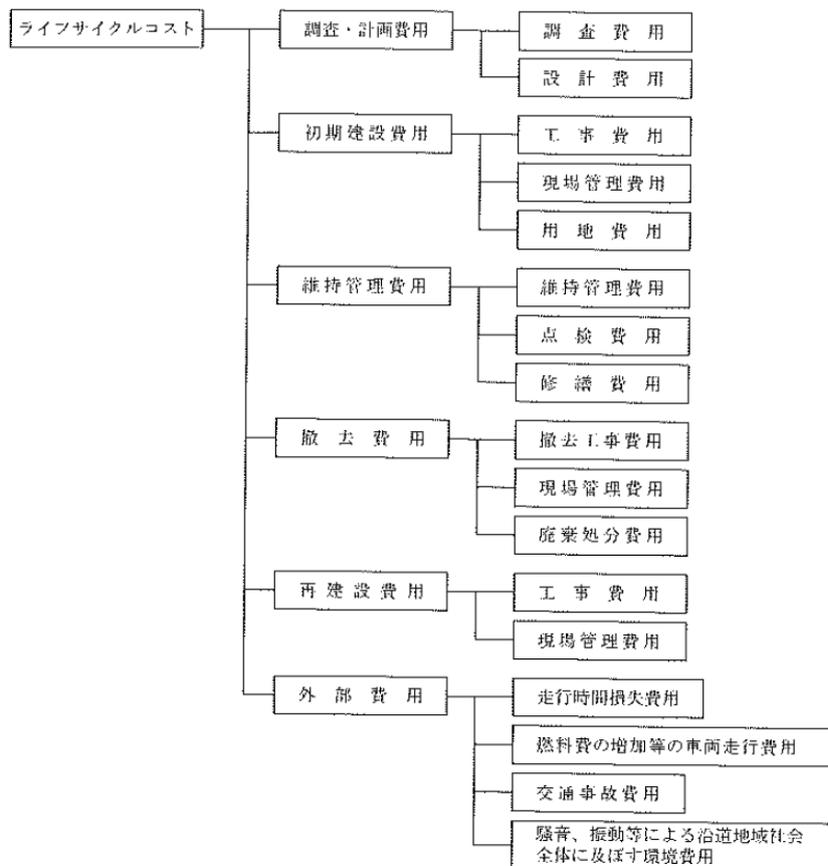


図 2-4 LCC の項目 (財団法人道路保全技術センター(2008)¹⁴⁾)

しかしながら、維持管理業務においては供用されたインフラの管理に着目するため、取り扱われる図中の「維持管理費用」を中心に、特に修繕費用の最小化について多く議論されている。ただし、更新の時期を検討する場合には図中の「撤去費用」、「再建費用」が考慮されることもある。また、「外部費用」として「走行時間損失」などを含む利用者費用を考慮した事例もある。利用者費用に関する研究は2.5で述べる。

2.4.4 劣化予測モデル

劣化予測モデルは、離散量で表現される各インフラの健全度を指標として、定点観測によって蓄積されたデータに基づいて、経年による劣化進行について不確実性を確率事象ととらえてマルコフ推移確率モデルを用いて予測する手法の研究が多くなされている。また、対象となる施設ごとに健全度の定義、損傷の経過が異なるためそれぞれに適した劣化予測モデルが構築されている。たとえば橋梁では津田ら¹⁵⁾などがあり、舗装では小林ら¹⁶⁾などがある。この他にも浄水場のコンクリート版の中性化では田中ら¹⁷⁾など、多岐にわたる劣化予測モデルが構築されている。

2.4.5 対策箇所・工法選定アルゴリズム

LCCを最小とするためには、対象施設を廃棄するまでの長期間において適切な修繕時期、工法を設定する必要がある。修繕時期は、廃棄するまでの期間における各年で修繕の是非を意思決定する必要がある。修繕工法は修繕が実施されるときに、健全度をどの程度回復させるかによって複数の工法が考えられる。この2者を組み合わせると膨大な意思決定の量となる。そこで、膨大な組み合わせの中から最適となる修繕時期と工法を決定する方法として、平均費用法¹⁸⁾と現在割引価値法¹⁹⁾が提案されている。青木ら²⁰⁾はそれぞれについて複数橋梁を対象としたシミュレーションを実施し、両者が橋梁群の劣化・補修過程に及ぼす影響を分析した。その結果、平均費用法がライフサイクルコストの評価手法として優れていることを示した。平均費用法は施設を半永久構造物と仮定し、半永久的に劣化、修繕するサイクルにおいて最も1年あたり費用が小さくなる修繕サイクルを決定する方法である。この方法では、図2-2中のLCCの算出と維持修繕計画の策定を同時に決定する。平均費用法で計測の対象となっているのは修繕費用のみとなっている。同じ期に修繕するのが最適となる対象が複数あり、予算制約下において優先順位を決定する必要がある場合は、健全度が小さい順に修繕する。

平均費用法による方法は、中長期にわたる修繕計画を立案するための技術として有用である。中長期においてある評価指標の最小化を図るためのアプローチであることを鑑みれば、評価指標の変更や、優先順位の決定方法を変えても応用できると考える。そこで、本研究では劣化予測を踏まえた中長期にわたる計画立案方法は取り扱わない。しかし、平均

費用法で採用している健全度が小さいものから選択する優先順位の決定方法には、利用者への影響等を議論する余地があると考える。

修繕工事は一般的に一つの劣化した施設、たとえば橋梁であれば一部材を修繕するとき、同一橋梁内で劣化が進行している部材を同時に修繕する。これは、橋梁部材の修繕に必要な足場の架設費用を削減することや発注ロットを大きくすることで総費用の削減を図るためである。したがって、修繕の意思決定には修繕の同期化を考慮することで費用の削減を図る必要がある。織田澤ら²¹⁾は複数の要素で構成される施設の補修をライフサイクルコストが最小となるような最適同期化政策を求める方法論を示した。ここでは高速道路上の消化施設を対象としてケーススタディを行ったが、この手法は舗装の修繕や橋梁にも応用できる。このように複数施設の修繕同期化を図る手法も開発されている。

2.5 利用者費用を考慮する試み

図 2-4 に示した LCC の項目は多くが管理者の費用であるが、「外部費用」は供用中における利用者の費用である。「走行時間損失」と「燃料費の増加等の車両走行費用」は供用中の道路施設が損傷等により供用中止、あるいは交通容量が低下することで、利用者に問題なく供用されているときとは異なる迂回や混雑による損失を与えることを指している。このように道路の供用に異常が起きた場合の外部費用を利用者費用(ユーザーコスト)として定義し、インフラマネジメントに考慮した事例がある。たとえば杉本・首藤²⁰⁾はある1つの橋梁が通行止めとなったときに迂回する経路を設定し、迂回路の旅行時間と通常時の旅行時間の差分に時間価値と通行止め期間を乗ずることでユーザーコストを算出し、橋梁マネジメントシステム(BMS)を利用した LCC 分析への導入を試みている。

石田・岳本ら²¹⁾は舗装の乗り心地に着目し、実際の道路、ドライビングシミュレータによる走行実験を実施して、実験後に CVM によって被験者の修繕に対する支払意思額を求めている。これにより乗り心地の悪化に対するユーザーコストの定量化を試みた。

鈴木・杉浦ら²²⁾はコンジョイント分析を用いて、ひび割れ率、わだち掘れ量のそれぞれについて利用者の修繕に対する支払意思額の推定を試みている。また、それぞれの支払意思額を安全性、快適性のユーザーコストと定義し、km・台あたりの単価としてユーザーコストを考慮した LCC を分析し、利用者が多い場合には LCC 最小となる管理水準が異なることを示した。

これらの研究はいずれも維持管理における確定的に生じる利用者の影響を費用換算し、LCC 分析へ反映させるものであるが、修繕時のネットワークへの影響や、劣化による利用者への心理的負担を捉えるものであり、不確実に生起する破損の影響を評価したものではない。道路管理者は主要な構造物においては破損が生じる前に破損を防止するべく対応する。上記の研究は管理者が構造物の破損を未然に防ぐことを前提にして、供用中の破損による利用者費用については評価の対象外としている。

2.6 本研究の位置づけ

LCC 型マネジメントに関する研究では、劣化の不確実性を捉えた劣化予測手法や、管理目標の設定方法、中長期にわたる最適化手法、修繕の同期化によって合理化を図る個別技術が蓄積されており、既に実務での適用が可能な段階にあるといえる。しかし、修繕計画の立案においては、予算制約下における個別施設の優先順位決定に「健全度の低さ」や「先送りにすることによる LCC の増分」などの管理者の費用だけを指標として意思決定している。ここに利用者の影響を議論したものは散見されるものの、いずれもこれらは確定的に計測できる事象を捉えたものであり、不確実に生起する道路の破損に着目したものは見当たらない。笹子トンネル事故での中央自動車道の通行止めからわかるように、維持管理上、影響が大きいと考えられるのは道路施設が破損したときの影響であることから、不確実に生起する道路の破損を捉えることは、安全で安心な社会資本を資産として運用する視点にたてば重要である。そこで、本研究では道路施設の破損をハザードとするリスク評価を用いて複数種類の道路施設における修繕必要性を一元的に計測する手法を構築する。ただし、リスク評価に基づいて決定する予算制約下の修繕箇所は、単年度ごとの選定方法を議論する。これは、上記のように中長期で最適化する技術は既に蓄積があり、評価指標をリスクに差し替えれば応用が可能であるため、本研究で取り扱う必要性は小さいと考える。したがって、本研究での議論は「予算制約下におけるリスク評価に基づく単年度の道路施設修繕計画立案方法」に限定する。

参考文献

- 1) 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方，道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会，2003
- 2) 小林潔司，上田孝行：インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.15-27，2003.10
- 3) 貝戸清之，阿部允，藤野陽三：実測データに基づく構造物の劣化予測，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.29-38，2003.10
- 4) 慈道充，小林潔司：不確実性下における最適点検・修繕ルール，土木学会論文集，No.744，IV-61，pp.39-50，2003.10
- 5) 青森県橋梁アセットマネジメント基本計画，青森県県土整備部道路課，2004
- 6) 土木施設長寿命化計画舗装ガイドライン，静岡県土木部道路総室道路保全室舗装係，2006
- 7) 社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置，国土交通省，2013.3
- 8) インフラ長寿命化基本計画，インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議，2013.11
- 9) 国が管理する一般国道及び高速自動車国道の維持管理基準(案)，国土交通省，2013.4
- 10) 総点検実施要領(案)，国土交通省，2013.2
- 11) 実践的アセットマネジメントと第 2 世代研究への展望：貝戸清之，青木一也，小林潔司，土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.67-82，2010.3
- 12) 坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.14，pp.125-134，2007.
- 13) 坂井康人，西林素彦，荒川貴之，小島大祐，小林潔司：高速道路の効果的な維持管理を目的としたロジックモデル（HELM）の検討，第 62 回土木学会年次学術講演会，2007
- 14) 財団法人道路保全技術センター：道路アセットマネジメントハンドブック，鹿島出版社，2008.
- 15) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.69-82，2005.10.
- 16) 小林潔司，貝戸清之，江口利幸，大井明，起塚亮輔：舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル，土木学会論文集 D3，Vol.67，No.4，pp.422-440，2011.10
- 17) 田中尚，藤森裕二，貝戸清之，小林潔司，安野貴人：加速劣化ハザードモデル：コンクリート中性化予測への適用，土木学会論文集 D，Vol.66，No.3，pp.329-341，2010.7
- 18) 貝戸清之，保田敬一，小林潔司，大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.83-96，2005.10.
- 19) Howard, R. A.: Dynamic Programming and Markovian Processes, 関根智明他訳：ダ

イナミックプログラミングとマルコフ過程, 培風館, 1971.

- 20) 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: ライフサイクル費用評価が複数橋梁の劣化・補修過程に及ぼす影響, 土木計画学研究・論文集, No.23 , no.1, pp.39-50, 2006.9.
- 21) 織田澤利守, 山本浩司, 青木一也, 小林潔司: 道路付帯施設の最適補修同期化政策, 土木学会論文集F, Vol.64, No.2, pp.200-217, 2008.6.
- 22) 杉本博之, 首藤諭, 後藤晃, 渡辺忠朋, 田村享: 北海道の橋梁のユーザーコストの定量化の試みとその利用について, 土木学会論文集, No. 682/1-56, pp.347-357, 2001.7
- 23) 石田樹, 岳本秀人, 川村彰, 白川龍生: ドライビングシミュレータによる舗装路面の乗り心地と安心感評価, 北海道開発土木研究所月報, No.630, 2005.11
- 24) 鈴木俊之, 杉浦聡志, 高木朗義: 道路舗装アセットマネジメントのための表明選好法を用いた安全性・快適性ユーザーコストの試算と考察, 土木計画学研究・論文集, Vol.25, pp.121-127, 2008.

第3章 リスク評価に基づいた道路施設の総合維持管理手法の開発

3.1 諸言

本章では、舗装、橋梁、危険斜面を対象としてそれらを一元的に評価し、道路ネットワークの安全性を確保する総合維持管理手法を開発する。具体的には、道路施設が破損するときの管理者、利用者の期待費用をリスクとして定義して、複数工種における対策必要性を一元的に定量評価する手法を構築する。そのうえで、施設ごとに評価されたリスクを用いて、道路ネットワーク上のリンクに存在する施設のリスクを合計した値(以下、区間リスクという)が大きいリンクのリスクが効率的に低減できるような施設を抽出する手法を提案する。そして、構築した手法で岐阜県内の4路線を対象にリスク評価に基づく対策箇所選定を試算し、挙動を確認する。手法の挙動確認は岐阜県の道路ネットワークを対象として、緒元や健全度は岐阜県が管理している施設のデータを使用する。

3.2 道路施設におけるリスクの定義

3.2.1 対象とする施設の設定

本研究では、岐阜県が管理している道路施設のうち、点検により劣化状態のデータが蓄積されており、破損することで利用者への影響が大きいものを対象としてリスク評価の枠組みを構築する。岐阜県では既に舗装、橋梁についてはLCC型を目指したアセットマネジメントが導入されている。舗装においては平成17年度、18年度に管理道路役4,200kmのうち、改良済の幹線道路である約1,700kmを路面性状測定車によってひび割れ率、わだち掘れ量を測定している。橋梁については15m以上の長大橋役1,600橋を平成16年度より5年に1度の間隔で定期的に点検している。以上より、舗装、橋梁はリスク評価の対象とする。

山間地を多く有する岐阜県では、斜面からの落石による事故が多く生じている。そのため、平成8年から防災点検とよばれる危険斜面の点検を実施している。ここでは、落石の危険性をカルテに取りまとめて、特に危険な箇所を対象として対策計画を立案し、事業を推進している。落石が生じれば道路利用者へ直接接触する事故の発生のほか、落石の除去工事が完了するまでの期間は片側交互通行、通行禁止にするなど、利用者への影響がある。このことから、危険斜面もリスク評価の対象とする。

岐阜県におけるトンネルは管理延長が約97kmと長く、破損すれば利用者への影響が大きいと考えられるが、トンネルの点検は平成23年4月現在で完了していないため、リスク評価ができない。

他の道路施設は道路付帯施設、盛土など、点検が進められているが、劣化状態等のデータが整理されているものはないため、リスク評価には加えない。

以上より舗装、橋梁、危険斜面をリスク評価の対象とする。

3.2.2 ハザードの特定

リスク評価の対象とするハザードは、道路施設の劣化が進行し破損することによって利用者への影響が生じ、管理者が事後対策的に対応する必要がある事象を抽出する必要がある。また、ハザードの発生確率がデータの蓄積により計測可能であることも必要となる。ここでは、第1章に述べたように、地震などの稀有で甚大な被害を生じさせるような事象と、除雪、落下物の除去など、日常的に巡回することで対処すべき高頻度で被害が小さい事象は対象外とする。すなわち、道路施設の劣化により道路ネットワーク機能が低下、あるいは停止するような破損を抽出する。

舗装は、時間の経過による材料劣化、自動車の通行による繰り返し荷重、舗装下面の変動による表層への損傷などによりアスファルトにひび割れ、わだちが生じ、最終的にはひび割れが連なることでポットホールが生じる。ひび割れが生じている段階では道路利用者は大きな影響を受けることは考えにくい。わだち量が大きい箇所については、雨天時に沿道歩行者への水はね等の影響が考えられるが、自動車への影響は小さく、損失は限定的であると考えられる。ポットホールが生じた段階では走行する自動車はタイヤ、バンパーに損傷が考えられることや、自動車への損傷を避けるために減速することが考えられる。また、ポットホールが生じるまで劣化していると、路盤材が劣化していることが考えられる。そのため、修繕工事は打ち替えなどの大規模な工法が必要になることが予想される。以上より、舗装の破損とは、ポットホールの発生を指すこととする。

橋梁は、多くの部材で構成される施設である。また、部材の主たる材料はコンクリートと鋼材があり、劣化の要因は使用される材料によって異なる。また、各部材は多くの資材で構成される構造であることから、破損の状態を一律に定義することは困難である。そこで、岐阜県では表3-1に示すような判定基準を設けており、点検診断する技術者が資材の損傷具合等を確認し、総合的に各部材の健全度を評価している。

表 3-1 健全度の判定基準¹⁾

健全度	状態
5	健全
4	経過観察：ほぼ健全
3	補修開始：劣化損傷（中）
2	直ちに補修実施：劣化損傷（大）
1	機能停止の恐れ

岐阜県橋梁点検マニュアル¹⁾では健全度評価のうち、健全度1となった部材を持つ橋梁は早期の対応が求められ、必要に応じて通行禁止にするなどの措置が取られる。これによって道路利用者への損失が生じることも考えられ、資材の少なくとも一部は損傷している状態であるため、管理者の修繕工事も大規模になる。したがって、橋梁を構成する各部材の破損は健全度1と判断される状態を指す。落橋などの目に見える事故ではなく、「通行が禁止されるような状態」を破損と定義していることに留意する。これは、以下の理由による。橋梁は一部の資材が損傷していても他の資材で構造を保つよう配慮されているため、長い期間損傷した状態が放置されなければ、落橋することは考えにくい。定期的に点検されているため、放置されることが考えにくく、落橋した事例が少ない。すなわち、落橋するハザードは生じないと考えられる。

危険斜面は落石、地盤崩壊、盛土、雪崩など道路ネットワークへ影響するハザードがいくつか考えられる。このうち、地盤崩壊や雪崩などは生起が気象条件に起因し、大規模で稀有な事象であるといえ、生起確率を求めることも困難である。盛土は地震時における破損等の事例はみられるものの、時間の経過や劣化により破損した事例は見当たらない。そこで、落石の実績と点検時の情報が蓄積されている、斜面からの一定規模以上の石の落下を指すこととする。小さな落石は頻発しており、道路交通にも影響がほとんどないと考えられるため、「一定規模以上」とは、道路交通に影響が生じるほど大きな落石を指す。

3.2.3 リスクの推定

道路施設におけるリスクは、供用中の道路施設に前項で定義したリスクのハザードにより発生する社会的費用の大きさ（以下、社会的影響度という）に、機能不全となった状態において社会的費用が発生する確率（以下、発生確率）を乗じたものと定義する。また、発生確率は、道路施設が機能不全を起こす確率（以下、破損確率）に機能不全が起こった場合に社会的費用が発生する条件付き確率（以下、影響確率）を乗じたものであると定義する。これはリスクを期待被害額として定義するものであり、損害額の平均値をとるものである。しかしながら、点検結果の精度や、点検からの時間経過によって損傷する確率は不確実な事象である。また、社会的影響度も道路利用者数など算出に用いた変数が不確実に変動すると想定される。これらの不確実な事象が確率分布にしたがっている場合、各道路施設におけるリスク値の分布形状に差が生じることが想定される。しかしながら、健全度による破損の確率分布を求めた既往の文献は見当たらない。この原因は、道路施設が破損した事例は多くないため、健全度と破損の関係を確率分布で表現できるだけのデータがないためである。そこで、ここでは平均値で取り扱うものとする。

リスク事象は、新規建設の便益評価⁶⁾を参考にする。1つは施策による走行時間、走行費用の差分である。この評価を現状のネットワークにおいて道路施設に破損が生じた時を想定すると、道路ネットワークからある道路施設が存在するリンクが不通となったとき、あ

るいは容量が低下したときの負の便益をリスクとして捉えることができるだろう。2つは交通事故の軽減である。しかし特定したハザードを鑑みれば道路施設が劣化、破損したときに交通事故が増大することはないと考えられる。そのため、たとえば舗装にポットホールが生じたときに走行車両のタイヤがパンクするなど、施設が破損したことで生じる「道路事故」が生じる。この負の便益をリスク評価することは理解が得られるだろう。この他にも地域の事情によっては上記の2つのリスクと比べて相対的に大きくなるリスク事象も考えられる。例えば人口減少の問題や豪雪、山間地域を抱える秋田県では新規建設の費用便益分析において3つの便益項目では十分な道路建設効果が説明できないことが多くあるため、表3-2に示す拡張便益を必要に応じて採用している³⁾。

表 3-2 秋田県の費用便益分析における拡張便益³⁾

拡張便益		基本的考え方	適用	算出式の考え方
①	休日交通便益	●既存3便益では算出していない、休日交通量による走行時間短縮、走行経費減少便益を加算	●平日休日交通量比が1.0より大きい路線、およびそのバイパス等の道路事業を対象	$B1 = 1 \text{ 台当たりの(走行時間短縮便益} + \text{走行経費減少便益)} \times \text{平日交通量} \times \{(\text{休日交通量} / \text{平日交通量}) - 1\} \times \text{年間休日数}$
②	冬期速度低下解消便益	●道路整備後に、冬期の走行速度低下の割合が小さくなることを貨幣換算	●道路整備により冬期の速度向上が見込める道路事業を対象	$B2 = \text{冬期の走行速度向上に伴う(「走行時間短縮便益」} + \text{「走行経費節減便益」)} \times \text{交通量} \times \text{冬期日数}$
③	定時性向上便益	●道路整備により、所要時間のばらつきが減少し、定時性確保のための余裕時間も短縮されることを貨幣換算	●時間短縮効果がある道路事業を対象	$B3 = (\text{標準偏差の変化} \times \text{交通量}) \times \text{時間価値原単位} \times \text{時間信頼性の価値} \times 365$
④	環境改善便益	●走行環境改善によるCO ₂ 、NO _x 、SPM 排出量削減を貨幣換算	●速度向上による環境改善が期待され、走行時間短縮便益が発生する道路事業を対象	$B4 = (\text{整備前の排出量の貨幣評価値} - \text{整備後の排出量の貨幣評価値})$
⑤	観光客増加便益	●所要時間短縮に伴う観光客増加による消費増加を地域経済への波及効果として貨幣換算	●県外観光客のアクセス時間短縮に寄与する道路事業を対象	$B5 = (\text{日帰り利用者の増加分} \times \text{日帰り利用者支払額}) + (\text{宿泊利用者の増加分} \times \text{宿泊利用者支払額})$
⑥	地域医療向上便益	●道路整備により、地域住民の医療に対する安全・安心感を向上させる効果を貨幣換算	●2次医療施設(救急病院)アクセスが改善する道路事業を対象	$B6 = 2 \text{ 次医療施設へのアクセスが改善する地域の世帯数} \times \text{地域医療向上に対する支払い意思額(CVM)}$
⑦	救急救命率向上便益	●救急搬送時間短縮による救命率の向上を貨幣換算。	●当該2次医療圏にある2次医療施設以上の施設までの1分以上の搬送時間短縮に寄与する道路事業を対象	$B7 = (1 \text{ 分あたりの救命向上率} \times \text{短縮時間}) \times (\text{人口当たり死亡} \cdot \text{重傷搬送患者割合} \times \text{対象地区人口}) \times \text{死亡による人的損失額}$
⑧	迂回解消便益	●道路整備により、降雨・降雪時の通行規制による迂回時間の解消を貨幣換算	●現道が冬期通行規制区間および雨量規制区間の指定区間を含む道路事業を対象	$B8 = \text{通行規制(迂回)による時間損失} \times \text{年間通行規制日数} \times \text{当該道路の交通量} \times \text{時間価値原単位}$
⑨	防災便益(山間部)	●災害が起こり得る路線の事業を実施することにより、不要となる災害被害および復旧事業費を貨幣換算	●現道において道路の防災対策の必要性がある箇所を含んだ道路事業を対象	$B9 = \text{事業により回避できる災害による被害、復旧事業費} = \text{災害発生} \text{の危険がある箇所の対策費(複数箇所ある場合はその合計)}$
⑩	防災便益(都市部)	●道路整備による、家屋延焼防止効果として、沿道家屋の不燃化に要する費用を貨幣換算	●都市計画用途地域内における幅員12m未満の道路を12m以上に拡幅および新設する道路事業を対象	$B10 = \text{防災機能が向上する沿道延長} \times \text{影響幅} \times \text{不燃化に要する費用}$
⑪	孤立解消便益	●道路整備により、交通途絶による孤立時の経済的被害額を貨幣換算	●道路整備により、孤立危険性から免れる地域の道路事業を対象	$B11 = \text{交通が途絶する危険性がある地域の人口} \times \text{孤立が想定される日数} \times 1 \text{ 人あたり日生産額}$
⑫	排雪便益	●拡幅事業により堆雪が可能になることから、不要となる運搬排雪費を貨幣換算	●排雪実績のある現道拡幅事業を対象	$B12 = \text{現道拡幅(堆雪帯)延長} \times \text{単位あたり運搬排雪費用}$
⑬	沿道機能向上便益	●道路整備が街づくりに寄与することによる土地評価(地価)上昇分を貨幣換算	●都市計画用途地域内にある道路事業を対象	$B13 = \text{事業区間路線価} \times (\text{道路整備による路線価上昇率} - 1) \times \text{沿道延長} \times \text{影響幅}$
⑭	移動快適性向上便益	●道路、都市空間整備における歩行者、自転車利用者の通行快適性向上や景観向上を貨幣換算	●広幅員歩道(3.0m以上)整備や景観向上、歩行および自転車の所要時間短縮に資する道路事業を対象	$B14 = \text{利用者数} \times (\text{移動快適性便益} + \text{都市景観向上便益} + \text{移動時間短縮便益}) \times 365$
⑮	走行快適性向上便益	●道路整備により、ストレスが少なく快適に走行可能となる効果を貨幣換算	●道路種別が第1種および第3種道路(第3種第5級は除く)で整備される道路事業を対象	$B15 = \text{交通量} \times \text{走行快適性に対する支払意思額(CVM)}$

このことから、適用地域によっては3つの便益項目では十分に道路施設の重要性を評価することができない場合もあると考える。道路のもつ便益は3つの便益項目だけで全て計測できるものではなく、無数にある。したがって、ダブルカウントに注意して、社会的影響度の計測方法がある程度確立されており、計測するためのデータが蓄積されている項目

についてはリスク事象として評価することとする。本章では表 3-3 に示す道路維持政策のアカウントビリティの向上が期待でき、現在計測が可能で、修繕の意思決定に影響を与えると考えられる 8 種類の事象をリスク事象として定義する。現時点で考えられる投資の意思決定に影響するほど大きな便益をもつリスク事象は抽出できたと考えているが、実運用上追加が適切であると判断される事象については適宜追加する必要がある。

ここで、詳細は後述するが、⑤の通行規制区間については他の社会的費用と異なる損傷確率で算出する。以上より、本研究で定義するリスクは(3.1)式で、発生確率は(3.2)式で定式化できる。

$$R_i = \sum D_{ij} \times P_{ij} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} P_{ij} &= pb_i \times ps_j \quad \forall j \neq 5 \\ P_{i5} &= pd_i \times ps_5 \quad \forall j = 5 \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 R_i : 道路施設 i のリスク(円/年), D_{ij} : 道路施設 i のリスク事象 j に関する社会的影響度(円), P_{ij} : 道路施設 i の社会的費用 j に関する発生確率(/年), pb_i : 道路施設 i の破損確率(/年), ps_j : 社会的費用 j の影響確率, ps_5 : 道路施設 i の年間平均通行規制発生回数(/年).

表 3-3 リスク事象とその計測方法, 対象となる道路施設

	損失	計測方法	舗装	橋梁	斜面
道路事故	車両・人の損傷	管理瑕疵案件の平均被害額	○	○	○
救命救急アクセス経路	救命輸送の遅延による救命率低下	救命率減少による人命価値の被害	○	○	○
観光・産業	リンク容量低下による渋滞・迂回損失	リンク容量低下による一般化費用の増分	○	○	○
孤立集落	道路寸断による孤立に対する不安感	コンジョイント分析で計測された不安感			○
通行規制区間	リンク寸断による渋滞・迂回損失	リンク容量低下による一般化費用の増分			○
情報提供	通報に係る利用者の時間損失	通報等に要する30分の時間損失	○	○	○
事後対策工事	事後対策工事での修繕費用の増大	設定した事後的な修繕費用	○	○	○
事後対策工事による渋滞・迂回	事後対策工事での工期増大による渋滞・迂回損失	リンク容量低下による一般化費用の増分	○	○	○

定義したリスク事象のうち2種類は道路施設種類によって生起しないものがある。孤立集落リスクは舗装が破損しても、十分通行が可能であると想定されるため生じない。橋梁は、破損しても落橋を想定しないため、孤立集落の発生には関係しない。したがって、斜面の破損にのみ生起する事象である。通行規制区間は、危険斜面が存在する区間に降雨があったときに通行規制が実施される事象を捉えたものであるため、舗装、橋梁は無関係である。

3.3 社会的影響度

3.3.1 道路事故

道路事故の社会的影響度は道路施設の破損による道路事故で発生した損失とする。本研

究では、岐阜県において直近 3 年間で、道路施設の破損によって発生した道路事故の損害額の合計を発生した事故件数で除して算出する。この損害額は管理瑕疵案件で生じたすべての損失を計上しているため、人的被害も本来含まれる。しかしながら、計算対象とした H19 年度～H21 年度の 3 年間では人的被害は生じていない。H19 年度～H21 年度における実績の平均値より舗装、危険斜面の社会的影響度をそれぞれ 64,050、161,439(円/回)で設定した。橋梁については損傷による道路事故の実績がない。そのため、橋梁の損傷はジョイント等の破損により段差が生じて、舗装による事故と同じように走行車両のバンパー等の損傷を想定し、舗装と同額の 64,050(円/回)とする。

表 3-4 道路事故平均損害額の算出根拠

	道路事故の損害額 (平成 19～21 年度合計)	破損の発生件数 (平成 19～21 年度合計)	平均損害額(円/回)
舗装事故	1,921,487 円	30	64,050
落石事故	2,905,909 円	18	161,439

3.3.2 救命救急アクセス経路

救命救急アクセス経路の社会的影響度は、道路施設の破損によってその道路を利用する救命救急車両が遅延することにより、搬送される患者の救命率が低減する損失とする。救命救急アクセス経路に関する社会的影響度は(3.3)式に示す橋本ら¹⁾の救急医療損失評価モデルで算出する。救急医療損失評価モデルは、発症から短い時間で重篤な状態となる 7 種類の疾病について長崎県の搬送時間と救命の可否の 42,838 件の実績データを用いて、発症からの時間経過と救命率の関係を回帰分析により求めている。

$$D_{i2} = \sum_m \sum_n [N_m \times P_{Ei} \times (P_{Lm,n}^0 - P_{Lm,n}^d) \times \frac{T}{365} \times I] \quad m = 1, \dots, 7 \quad (3.3)$$

ここで、 D_{i2} : 施設 i の救命救急アクセス経路に関する社会的影響度(円)、 N_m : ゾーン m の人口(人)、 P_{Em} : ゾーン m の疾患発生確率(/年)、 $P_{Lm,n}^0$: ゾーン m における疾患 n の平常時の救命率、 $P_{Lm,n}^d$: ゾーン m における疾患 n の道路施設破損時の救命率、 T : 復旧日数(日)、 I : 1 人当たり生命の価値(円/人)。

橋本らの算出した救急医療損失評価モデルは救命率を $P_{Li,j}$ とし、収容所要時間を x とすると、救命率は以下の式で特定されている。

脳出血:
$$P_{L1,j}^{o,d} = 0.8708e^{-0.0165x} \quad (3.4)$$

$$\text{くも膜下出血:} \quad P_{L2,j}^{o,d} = 0.9052e^{-0.0476x} \quad (3.5)$$

$$\text{急性心筋梗塞:} \quad P_{L3,j}^{o,d} = 0.8998x^{-0.0604} \quad (3.6)$$

$$\text{急性心不全:} \quad P_{L4,j}^{o,d} = -0.0333\ln(x) + 0.8588 \quad (3.7)$$

$$\text{肺炎:} \quad P_{L5,j}^{o,d} = 0.9057e^{-0.0101x} \quad (3.8)$$

$$\text{CPA:} \quad P_{L6,j}^{o,d} = -0.0473\ln(x) + 0.1408 \quad (3.9)$$

$$\text{脳梗塞} \quad P_{L7,j}^{o,d} = 0.8861x^{0.0155} \quad (3.10)$$

(3.3)式の疾患発生確率について橋本らは長崎県の疾患別の搬送人数を人口で除することで算出しているが、小坂ら⁴⁾は同じ手順で岐阜県飛騨圏域のデータに基づいて表 3-5 のように算出している。疾患発生確率は地域ごとにばらつきがあるため、地域間の平均値をとれば広域における平均的な発症率になると仮定して、採用する。

表 3-5 疾患発生確率¹⁾

i	疾患名	飛騨市	高山市	下呂市	平均
1	脳出血	0.000619	0.001045	0.000544	0.000736
2	くも膜下出血	0.000473	0.001235	0.00019	0.000633
3	心筋梗塞	0.000619	0.001425	0.000816	0.000954
4	心不全	0.000546	0.00114	0.000598	0.000762
5	肺炎	0.000983	0	0.000979	0.000654
6	CPA	0.000728	0.004086	0.00049	0.001768
7	脳梗塞	0.001457	0.003326	0.001115	0.001966

1人当たりの生命の価値は内閣府政策総括官⁶⁾の226,000,000(円/人)を採用する。

3.3.3 観光・産業

観光・産業に関する社会的影響度は、道路施設が破損することにより道路交通に与える影響を貨幣評価したものとす。これは、破損が発生し、道路管理者が対策工事を開始するまでの期間の費用を捉えたものである。舗装は破損すると車両走行性が低下し、区間の交通容量が減少するが、通行は可能であると考えられ、(3.11)式で算出する。橋梁は管理者が対応を開始するまでの期間は通行されることが考えられるため、舗装と同様に(3.11)式で算出する。

危険斜面は破損すると通行ができない状況になると考えられるため、(3.12)式で算出する。(3.11)式については、利用者が行動変更を行うほどの大きなインパクトは発生しないと仮定し、幅員減少によって生じる容量低下によって遅延が生じるものと仮定した。一方で、通行止めが発生する場合には迂回交通が発生するため、その影響も加味した上での評価を試みている。

$$D_{i3} = t_i \times q_i \times \alpha \times T_i \quad \forall K_i = 1, 2 \quad (3.11)$$

$$D_{i3} = (td_i \times qd_i \times \alpha + l_i \times qd_i \times \beta) \times T_i \quad \forall K_i = 3 \quad (3.12)$$

ここで、 D_{i3} ：施設*i*の観光・産業に関する社会的影響度(円)、 t_i ：対象施設*i*の幅員減少に伴う遅延時間(分)、 q_i ：対象施設の交通量(台/日)、 α ：時間価値原単位(円/分)⁶⁾、 T_i ：対策工事に取り掛かるまでの日数(日)、 td_i ：リンク*i*の通行止めによる迂回で発生する遅延時間(分)、 qd_i ：リンク*i*の通行止めにより迂回する交通量(台/日)、 l_i ：迂回距離(km)、 β ：走行費用原単位(円/km)⁶⁾、 K_i ：施設*i*の道路施設の種類を示す変数(1=舗装、2=橋梁、3=危険斜面)。

3.3.4 孤立集落

孤立集落に関する社会的影響度は孤立集落が発生し、人の移動や物資の流通が困難となり、住民生活が困難または不可能となることに対する住民の不安感である。そのため、破損しても通行が可能な舗装においては、この社会的費用は発生しないこととする。橋梁においても、破損が発生しても孤立集落となる路線を通行止めにするのは考えにくく、仮橋等により迂回路を確保することが想定されるため、この社会的費用は発生しないこととする。孤立集落住民の不安感を算出した先行研究として、小坂ら⁴⁾は、表 3-6 に示すように CVM によるインターネットアンケート調査により孤立集落のサービス途絶回避に対する支払意思額 (WTP) を推定している。本研究では、小坂らの推定結果に基づいて、危険斜面からの落石によって発生する項目は医療、介護、郵便であるとし、WTP を 8,550(円/月) で設定し、(3.13)式で算出する。式中で 12 を乗ずるのは WTP が月あたりで推定されていることから、1年間あたりの社会的影響度を算出するためである。

$$D_{i4} = WTP \times b_i \times 12 \quad \forall K_i = 3 \quad (3.13)$$

ここで、 D_{i4} : 施設 i の孤立集落に関する社会的影響度(円)、 WTP : 支払意思額(円/世帯)、 b_i : 世帯数(世帯)。

表 3-6 孤立集落の WTP(出典：参考文献 2)

項目	WTP	項目	WTP
水道	3,242	医療	2,111
電気	2,904	介護	2,928
ガス	2,682	郵便・宅配便	3,511
情報通信手段	2,986	合計	20,364

3.3.5 通行規制区間

通行規制区間に関する社会的影響度は、多降雨時の通行規制に伴って発生する迂回による影響を貨幣評価したものである。これは、危険斜面に対策がされていないために発生する社会的費用であることから、舗装と橋梁では計上しない。

通行規制区間に関する社会的費用は斜面の破損にかかわらず多降雨時には必ず発生する。そのため、危険斜面の破損確率を乗ずるのではなく、通行規制が必要となる雨量の年間平均発生回数を乗ずる。これにより、発生頻度は多降雨の年間平均発生回数とした。以上より、通行規制区間に関する社会的影響度は(3.14)式で算出する。

$$D_{i5} = td_i \times qd_i \times \alpha + l_i \times qd_i \times \beta \quad (3.14)$$

ここで、 D_{i5} ：施設 i の通行規制区間に関する社会的影響度(円).

3.3.6 情報提供

苦情に関する社会的影響度は、各施設の問題（ポットホール、段差、落石等）を道路利用者が発見した場合に、発見から通報終了までに要する時間を貨幣評価したものである。道路利用者が苦情のために要する時間を 30 分で設定し、(3.15)式で算出する。

$$D_{i6} = tc \times \alpha \quad (3.15)$$

ここで、 D_{i6} ：施設 i の苦情に関する社会的影響度(円)， tc ：道路利用者が苦情のために要する時間(分)=30.

3.3.7 事後対策工事

事後対策工事に関する社会的影響度は、事後対策工事が必要となった場合に発生する費用である。舗装、橋梁の工事単価は岐阜県で先行導入されている事業者 LCC 最小化アセットマネジメントで設定されている値を用いる。舗装の工事単価を表 3-7 に示す。事後対策では打ち換え工法が必要になると設定した。

表 3-7 舗装打ち換え単価

補修工法	L交通	A交通	B交通	C交通	D交通
切削OL+ 部分打ち換え	3330	3330	3570	3910	4180

橋梁の工事単価は各部位の健全度に応じて表 3-8 に示すように対策工法が設定され、工事単価が表 3-9 のように設定されている。橋梁の事後対応における工事単価は健全度が最低である 1 のときの値を用いる。

表 3-8 橋梁部材の補修工法設定一覧表

		健全度3	健全度2	健全度1
床版(鋼桁RC床版)	対策1	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面
	対策2		鋼板接着工(橋面積30%)	
	対策3			床版取替え
床版(PC桁)	対策4	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面
	対策5		鋼板接着(部分打替え含む)間詰め面積30%	鋼板接着(部分打替え含む)間詰め面積100%
鋼橋塗装	対策6	塗装塗替え(Ra-Ⅲ)		
	対策7		塗装塗替え(Rc-Ⅰ)	塗装塗替え(Rc-Ⅰ)
	対策8			あて板補強工(鋼重の35%)
PC上部工	対策9	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面
	対策10		ひび割れ注入工(主桁延長の30%)	ひび割れ注入工(主桁延長の50%)
	対策11		グラウト注入工(主桁延長の30%)	グラウト注入工(主桁延長の50%)
	対策12			アウトケーブル補強工
RC上部工	対策13	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面	舗装打ち替え+橋防水工面
	対策14		断面修復工(下フランジ面積の5%)	断面修復工(下フランジ面積の10%)
	対策15			鋼板接着工(下フランジ幅全て)下フラ幅0.5m
下部工	対策16	表面保護工(浸透性吸水防止材)	表面保護工(浸透性吸水防止材)	表面保護工(浸透性吸水防止材)
	対策17		断面修復工(縦壁面積の30%)	断面修復工(縦壁面積の50%)
支承(モルタル、アンカー、沈下等)	対策18	モルタル補修工	モルタル補修工	
	対策19		支承防錆工	
	対策20			支承取替え(大・中・小)
支承(脱落)	対策21			支承取替え(大・中・小)
伸縮装置	対策22			取替工

表 3-9 橋梁の対策単価

部位	対策工		単位	単価
床版 (鋼桁RC床版)	対策1	橋面防水工(舗装打替え含む)	円/㎡	15,000
	対策2	鋼板接着工	円/㎡	120,000
	対策3	床版取替え工	円/㎡	250,000
床版 (PC間詰め)	対策4	橋面防水工(舗装打替え含む)	円/㎡	15,000
	対策5	鋼板接着工(断面修復含む)	円/㎡	140,000
鋼桁塗装	対策6	塗装塗替え(Ra-Ⅲ)	円/㎡	5,000
	対策7	塗装塗替え(Rc-Ⅰ)	円/㎡	13,000
	対策8	あて板補強工	円/t	1,200,000
PC上部工	対策9	橋面防水工(舗装打替え含む)	円/㎡	15,000
	対策10	ひび割れ注入工	円/m	9,000
	対策11	グラウト注入工	円/m	130,000
	対策12	アウトケーブル補強工	円/m	110,000
RC上部工	対策13	橋面防水工(舗装打替え含む)	円/㎡	15,000
	対策14	断面修復工	円/㎡	300,000
	対策15	鋼板接着工	円/㎡	120,000
下部工	対策16	表面保護工	円/㎡	10,000
	対策17	断面修復工	円/㎡	130,000
支承 (モルタル, アンカ ー, 沈下等の異常) (脱落)	対策18	モルタル補修工	円/個	50,000
	対策19	支承防錆工	円/個	130,000
	対策20	取替え工(大支承)	円/個	5,000,000
		取替え工(中支承)	円/個	3,000,000
対策21	取替え工(小支承)	円/個	1,000,000	
伸縮装置	対策22	取替え工	円/m	400,000
その他	仮橋費		円/m	260,000
	ベント費		円/個	170,000
	規制費		円/m	9,000

危険斜面の工事単価は「土木コスト情報，2010.10，建設物価調査会」の落石防護柵工設置工の金額を用いて，以下のように設定する。

(1) 落石防護柵がすでに設置されている場合

落石により，落石防護柵が破損し，防護柵基礎とブロック積み擁壁も損傷する．そのため，既設落石防護柵，防護柵基礎，ブロック積み擁壁の撤去費用，新設の落石防護柵，防護柵基礎，ブロック積み擁壁費用を計上する．ブロック積み擁壁はH=5.0mを想定し，2.5mが破損すると仮定した．

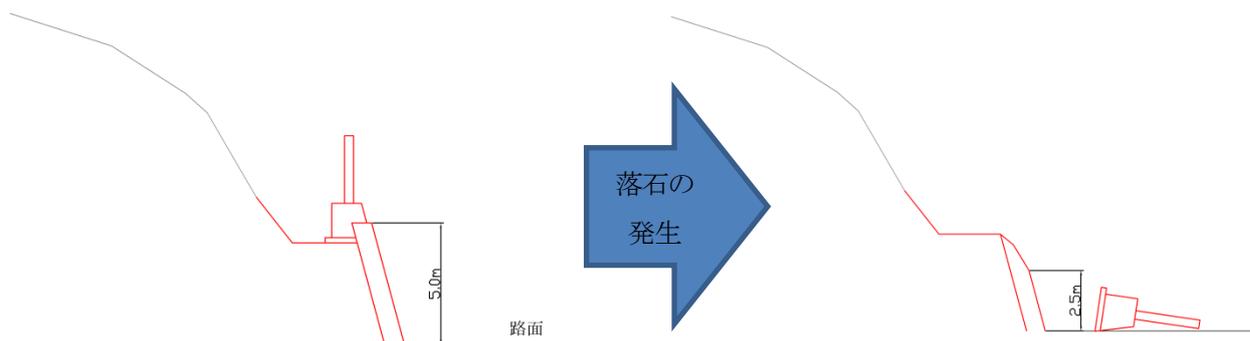


図 3-1 落石防護柵が設置されている場合における落石発生時のイメージ

(2) 落石防護柵が設置されていない場合

落石により路面への落石再発を防止するために防護柵を設置する．このときに，落石防護柵，防護柵基礎，3mのブロック積み擁壁を設置する費用を計上する．

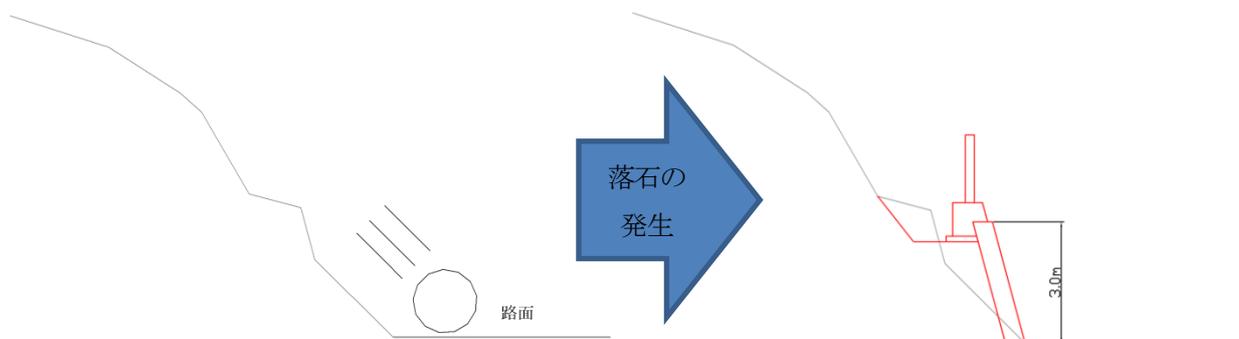


図 3-2 落石防護柵が設置されていない場合における落石発生時のイメージ

ここで，岐阜県が管理する全危険斜面において，上記の2事象が半分ずつ発生すると想定し，2つの平均の金額を事後対策費用とする．この結果，事後対策費用は事前対策費用の1mあたり2.51倍となり，この値を事後対策費用の単価として設定する．

表 3-10 斜面の対策単価

落石対策費用	直接工事費用	諸経費	計
端末支柱(2本)	316,000	158,000	474,000
中間支柱(3m当たり)	39,000	19,500	58,500
ロープ、金網(3m当たり)	29,400	14,700	44,100

以上の設定で、事後対策工事は(3.16)式で算出する。

$$D_{i7} = \gamma_i \times v_i \quad (3.16)$$

ここで、 D_{i7} ：施設 i の事後対策工事に関する社会的影響度(円)、 γ_i ：工種ごとに設定した対策単価(円/単位数量)、 v_i ：対策数量。

3.3.8 事後対策工事による渋滞・迂回

事後対策工事による渋滞・迂回に関する社会的影響度は施設ごとに設定した問題が発生した場合に、その対策工事や応急復旧工事のときに発生する渋滞や、通行止めとしたときの迂回による物的・時間的損失を貨幣評価したものである。「③観光・産業」が、落石が発生して対策工事に取り掛かるまでの期間に発生するのに対して、この社会的影響度については対策工事を実施する期間に発生する。そのため、この社会的影響度は(3.11)式、(3.12)式と同等の(3.17)式、(3.18)式で算出するが、対策工事期間を乗ずる点が異なる。

$$D_{i8} = t_i \times q_i \times \alpha \times Tr_i \quad (3.17)$$

$$D_{i8} = (td_i \times qd_i \times \alpha + l_i \times qd_i \times \beta) \times Tr_i \quad (3.18)$$

ここで、 D_{i8} ：施設 i の事後対策工事による渋滞・迂回に関する社会的影響度(円)、 Tr_i ：対策工事期間(日)。

3.4 破損確率

3.4.1 舗装

舗装が破損する頻度は舗装 100m の中でポットホールが発生する期待発生箇所数と定義する。期待発生箇所数は、ポットホールの発生数が MCI の値に従うと仮定して、MCI 調査データとポットホールの発生情報を用いて MCI 値ごとのポットホールの年間期待発生箇所数を表 3-11 のように設定した。ただし、この設定は統計学的に確立された分析手法に基づいたものではなく、分析精度の検定もできていない。ポットホールの発生確率は、舗装の点検データと点検された同時期におけるポットホールの発生数のデータを位置でマッチングさせたデータを蓄積し、ポットホールが発生するときの舗装状態との関係を分析することで求められる。今後のデータ蓄積と確率推定技術の開発により破損確率が推定されることを期待する。ここでは手法論の構築を主眼としているため、暫定的に破損確率を設定することとした。

表 3-11 ポットホール年間期待発生箇所数

MCI	年間期待発生箇所数
6	0.0042
5	0.0720
4	0.7076
3	4.2370
2	15.2279
1	32.8074
0	42.3704

3.4.2 橋梁

橋梁においては、計画的に維持管理されており、落橋などの大規模な損傷の実績が少ない。そのため、破損確率を推計によって算出することが困難である。ここでは手法論の構築を主眼としているため、暫定的に破損確率を設定することとした。岐阜県の橋梁点検マニュアルでは、健全度=1を「機能停止の恐れ」と定義している。このことから橋梁の点検結果で健全度=1と判定される状態を機能不全の状態であると仮定する。すなわち、健全度=1の部材は、破損確率が100%となる。また、健全度2や3の状態の部材については、部材の重要性などを考慮し、現在の健全度=3または2の部材が、補修を実施せず放置したことにより1年後に健全度=1となる確率を想定して表 3-12 に示すように設定した。

橋梁の破損確率は、橋梁の破損実績データと、破損した時期の劣化状態を示すデータを蓄積し、統計的な分析によって劣化状態と破損の関係を分析することで求められる。ここで設定した破損確率は、科学的な根拠を持たない設定値であるため、今後の研究で推定されることを期待する。

表 3-12 橋梁部位の破損確率と評価項目対応一覧

工 種	健全度	確率 (%)	社会的影響の評価項目					
			①	②	③	⑥	⑦	⑧
床 版 (鋼桁に支持されたRC床版)	1	100						
	2	50	○	○	○	○	○	○
	3	10						
床 版 (PC橋の床版、間詰め含む)	1	100						
	2	50	○	○	○	○	○	○
	3	10						
鋼桁(塗装)	1	100						
	2	50	-	-	-	-	○	○
	3	10						
PC上部工	1	100						
	2	50	-	-	-	-	○	○
	3	10						
RC上部工	1	100						
	2	50	-	-	-	-	○	○
	3	10						
下部工	1	100						
	2	50	-	-	-	-	○	○
	3	10						
支 承	1	100						
	2	50	○	○	○	○	○	○
	3	10						
伸縮装置	1	100						
	2	-	○	○	○	○	○	○
	3	-						

3.4.3 危険斜面

危険斜面の損傷確率は、落石の発生要因(岩石、地形など)が箇所ごとに異なり、力学的な理由付けが困難であることから、落石確率を算出した事例が見当たらない。そのため、岐阜県における落石の実績と平成8年に岐阜県が実施した防災点検結果(以下、H8 防災点検という)に基づいて統計的分析を行った本城ら⁷⁾の解析手順で危険斜面の損傷確率(落石発生確率)を算出する。H8年時点で点検され、すべての点検項目において点検結果が残っているすべての斜面(4,907箇所)について、破損確率を算出する。危険斜面のうち、H8 防災点検で対象となった落石崩壊斜面 3,738 か所と、岩石崩壊斜面 1,169 か所を対象とし、それぞれについて以下の手順で分析する。

(1) 相対危険度の算出

安定度調査票に基づいて重回帰分析により各危険斜面の相対危険度を算出する。相対危険度は岐阜県の土木事務所別に自然斜面は 86、のり面は 85、岩石崩壊は 58 の H8 防災点検における調査項目を説明変数として、H8 防災点検で各斜面に専門家によって与えられた総合評価(「要対策」、「カルテ対応」、「対策不要」)を斜面数に応じて配分した値(「代表累積頻度率」)を被説明変数として、ロジスティック回帰分析で推計する。説明変数はすべて該当する、しない(1or0)に区分されるダミー変数で定義される。モデルの選択、すなわち説明変数の選択は AIC(赤池情報量)に基づいて選択する説明変数を減じるステップ法を用いる。

(2) 絶対危険度の算出

土木事務所別の落石発生実績から算出される変換係数と相対危険度を掛け合わせることで、1年間あたりの落石発生確率を算出する。落石発生実績は2003年4月から2011年10月の8.5年間のデータを用いて、各土木事務所においてH8防災点検での総合評価、「対策不要」、「カルテ対応」、「要対策」の判定結果(階級*i*)ごとに集計し、(3.19)式で算出する。破損確率は、1年あたりに落石が生じる値になるよう整理する。

$$K_i = \frac{\sum_j^{N_i} p_{sij}}{N_i} \times \frac{N_i}{N_{iF}} \quad (3.19)$$

ここで、 N_{iF} ：階級*i*の斜面数、 N_i ：階級*i*の事故斜面数、 p_{sij} ：階級*i*の第*j*斜面の相対危険度、 $\sum_j^{N_i} p_{sij} / N_i$ ：階級*i*の相対危険度平均値。

(3) 絶対危険度の算出結果

以上の方法で各斜面の絶対危険度、すなわち斜面の破損確率を算出した。すべての斜面の落石確率を掲載するのは紙面をいたずらに消費するため、ここでは土木事務所別に破損確率のヒストグラムを掲載する。また、算出結果概要の理解を図るため、算出結果一覧表を表3-13に示す。

表 3-13 算出結果一覧表

	斜面数	落石事故数	平均破損確率	標準偏差
岐阜	499	36	1.78%	0.00866
大垣	128	1	0.30%	0.00258
揖斐	95	40	9.30%	0.02648
美濃	401	6	0.65%	0.00182
郡上	542	19	1.03%	0.00383
可茂	405	27	1.50%	0.00817
多治見	220	2	0.42%	0.00460
恵那	369	24	2.37%	0.00954
下呂	919	8	0.42%	0.00155
高山	1431	29	0.87%	0.00916
古川	648	16	1.04%	0.00268

算出された破損確率を各土木事務所における平均すると、多くの事務所が0%から3%の間の値をとる。しかしながら、揖斐土木事務所は9.3%と相対的に大きい。これは、斜面数が95と少ないにもかかわらず8.5年間に40件と多くの落石が生じており、他の土木事務所と比べて大きいことが原因である。また、揖斐土木事務所は標準偏差も大きい。図3-5に示すように10%を超える斜面も複数ある。地域によって山地の勾配や地盤条件、道路の位置条件が異なることが土木事務所間に差が生じる理由であると考えられる。

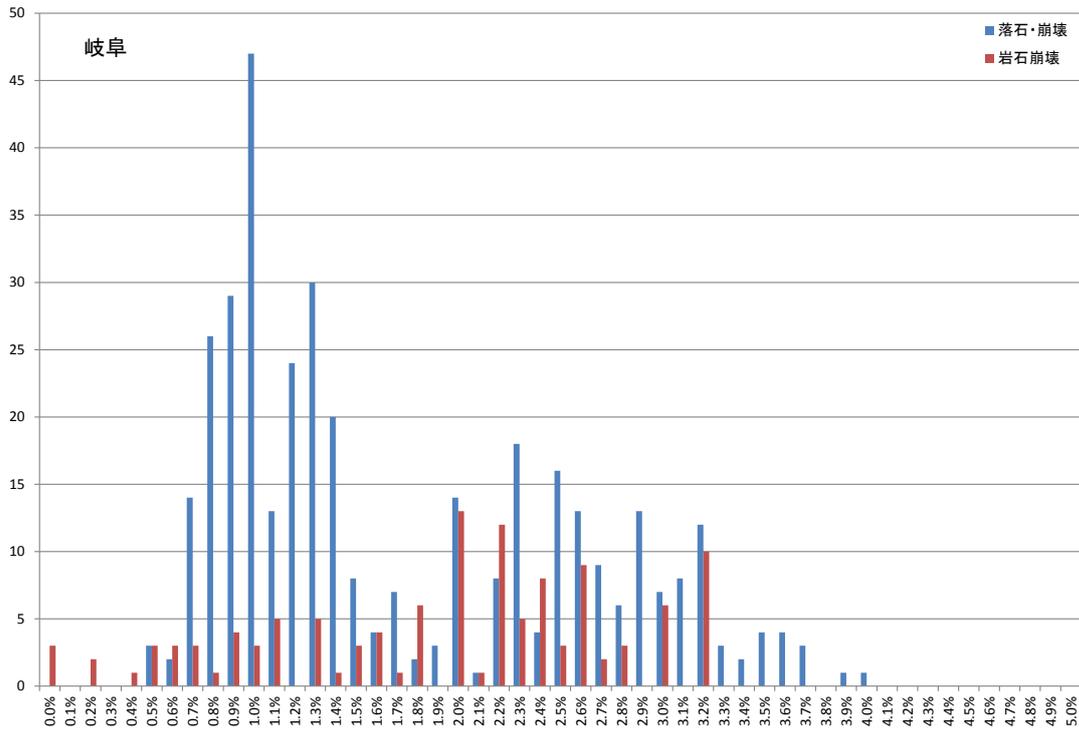


図 3-3 岐阜土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

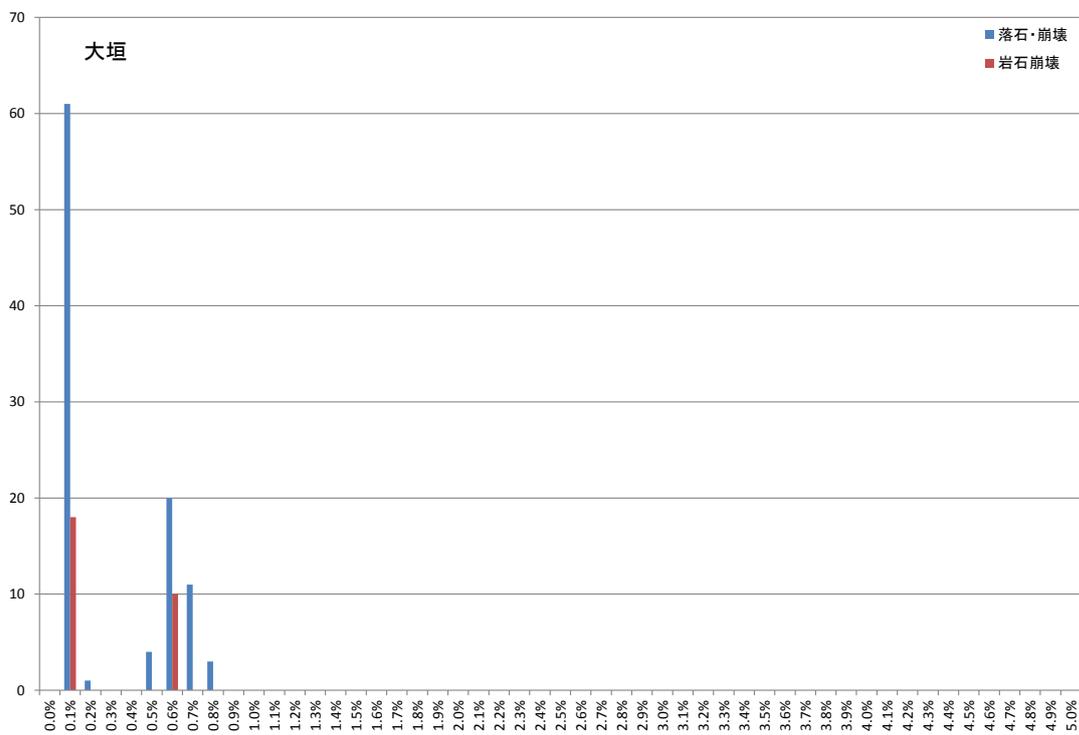


図 3-4 大垣土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

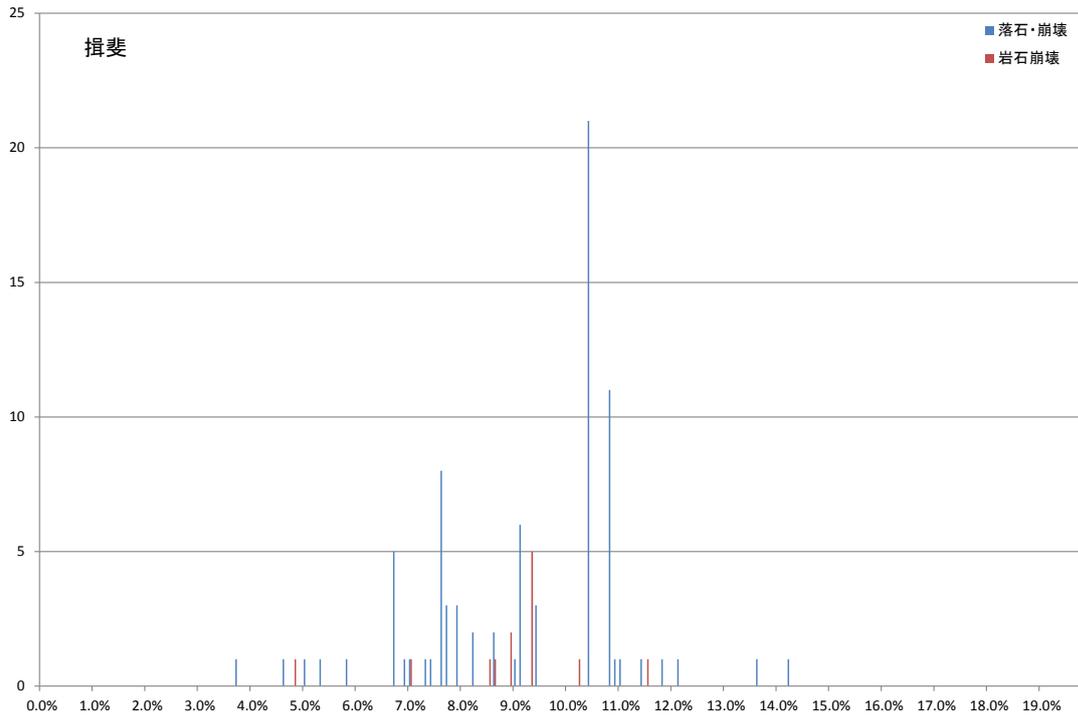


図 3-5 損斐土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

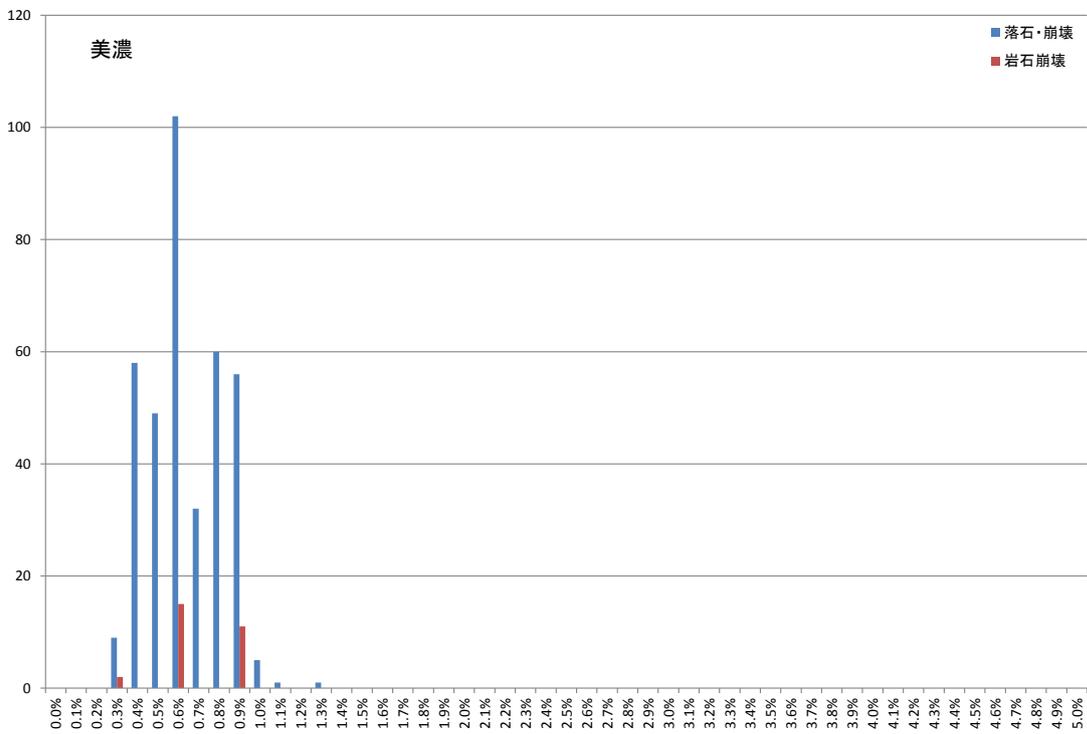


図 3-6 美濃土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

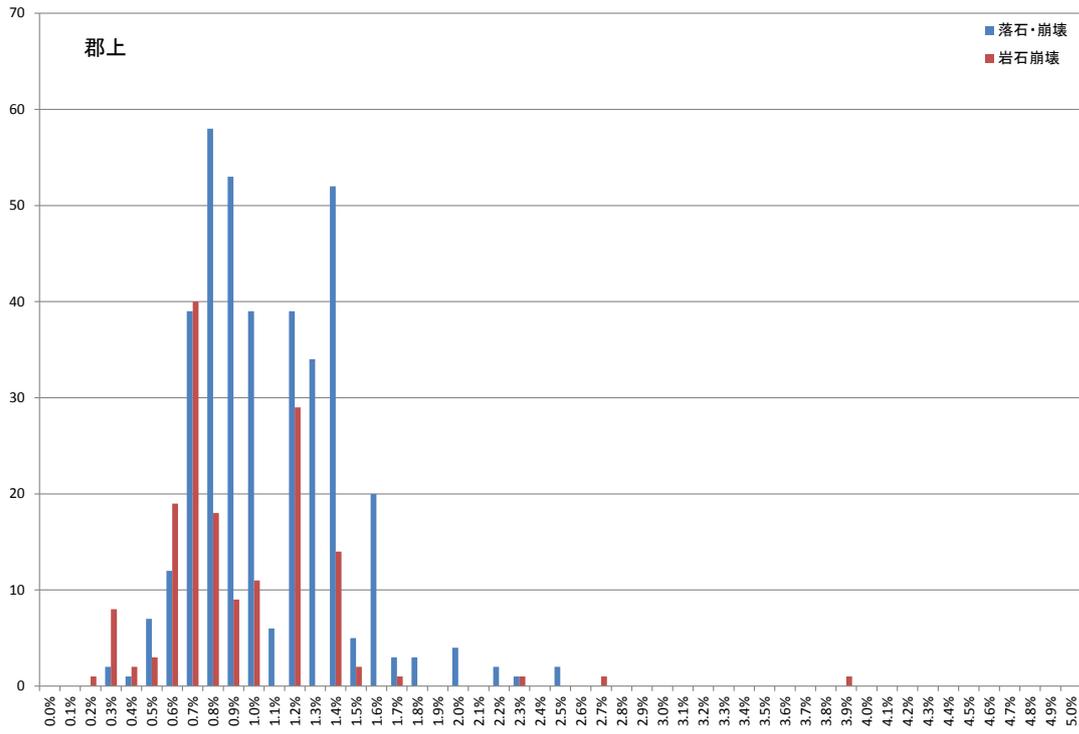


図 3-7 郡上土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

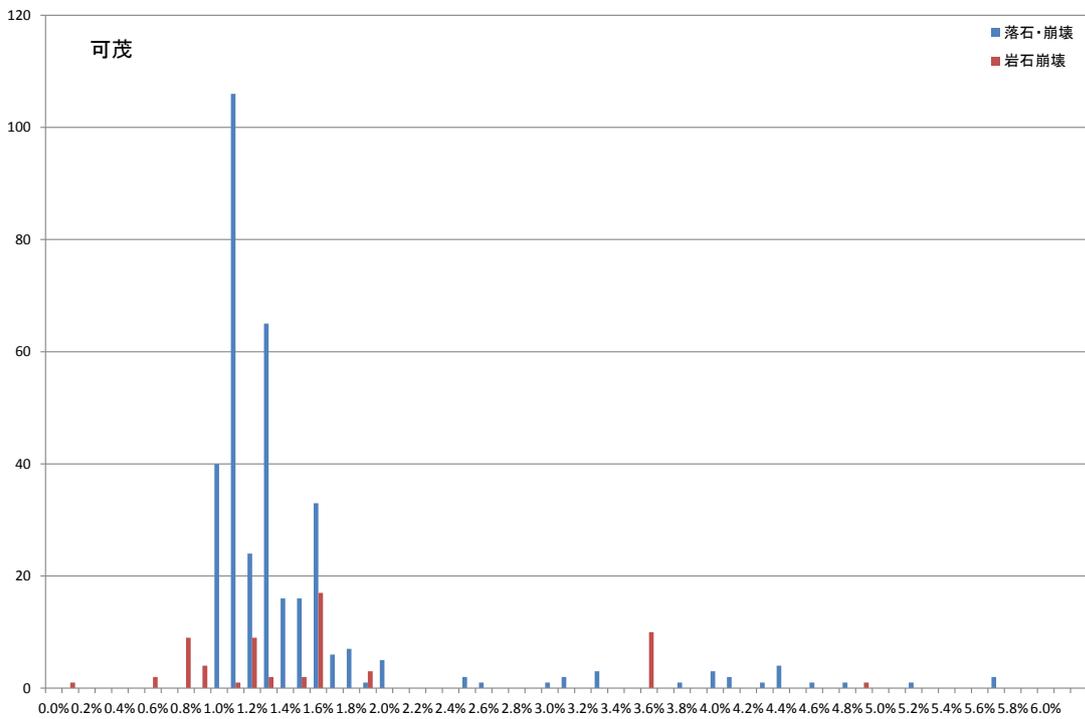


図 3-8 可茂土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

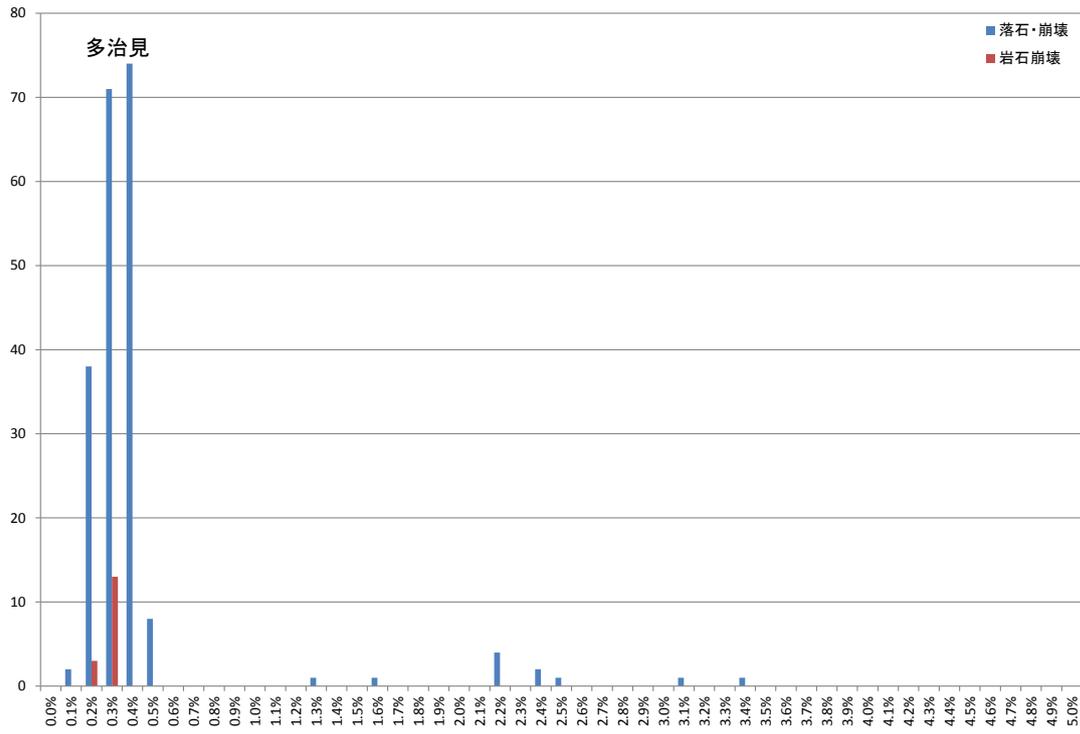


図 3-9 多治見土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

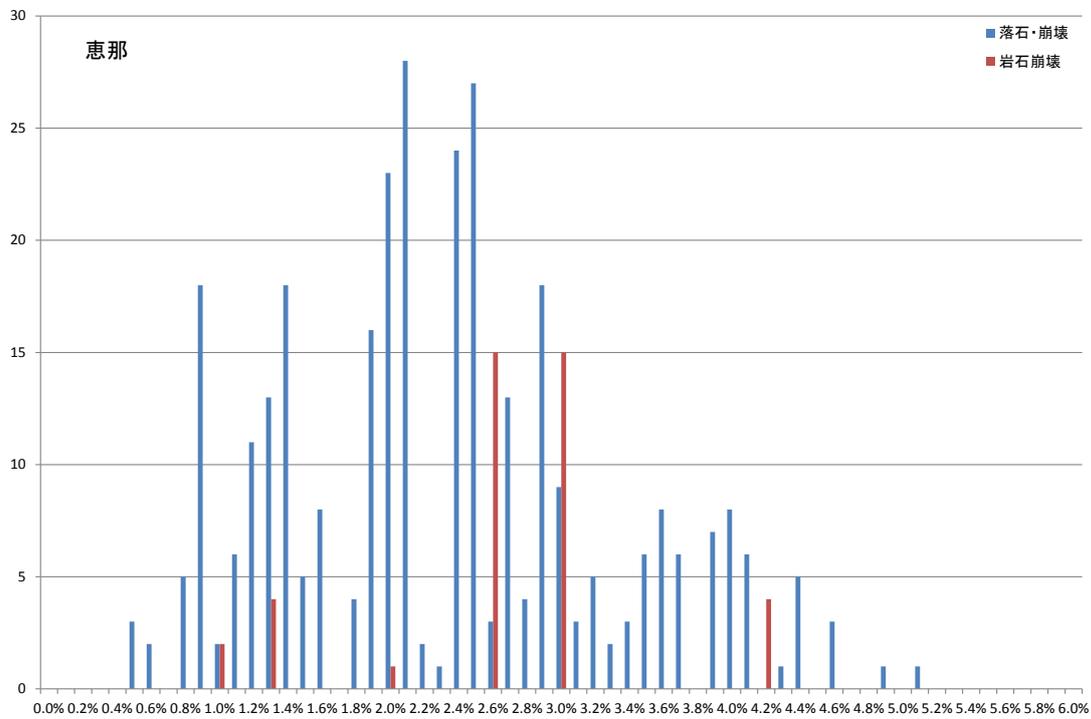


図 3-10 恵那土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

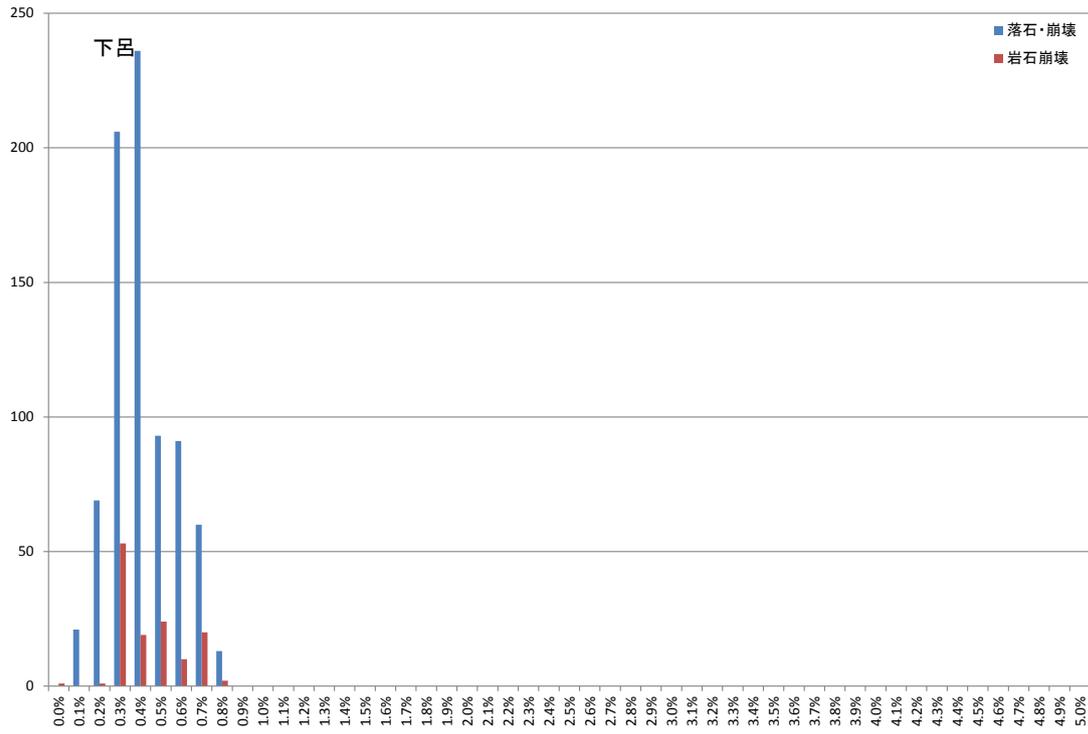


図 3-11 下呂土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

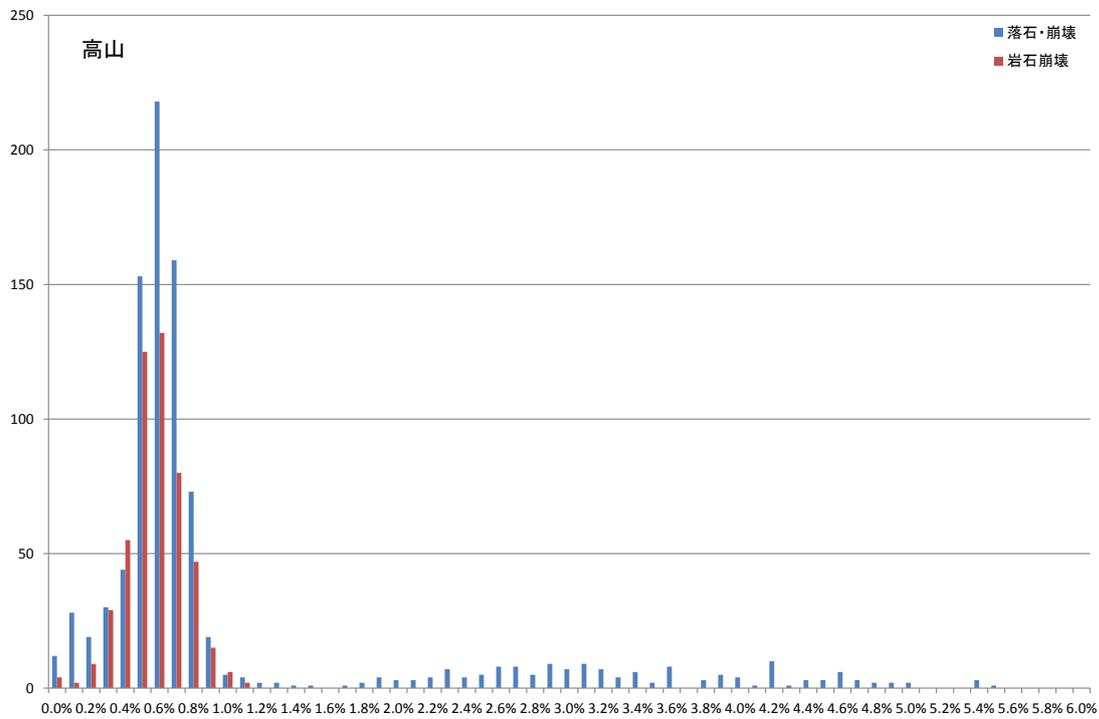


図 3-12 高山土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

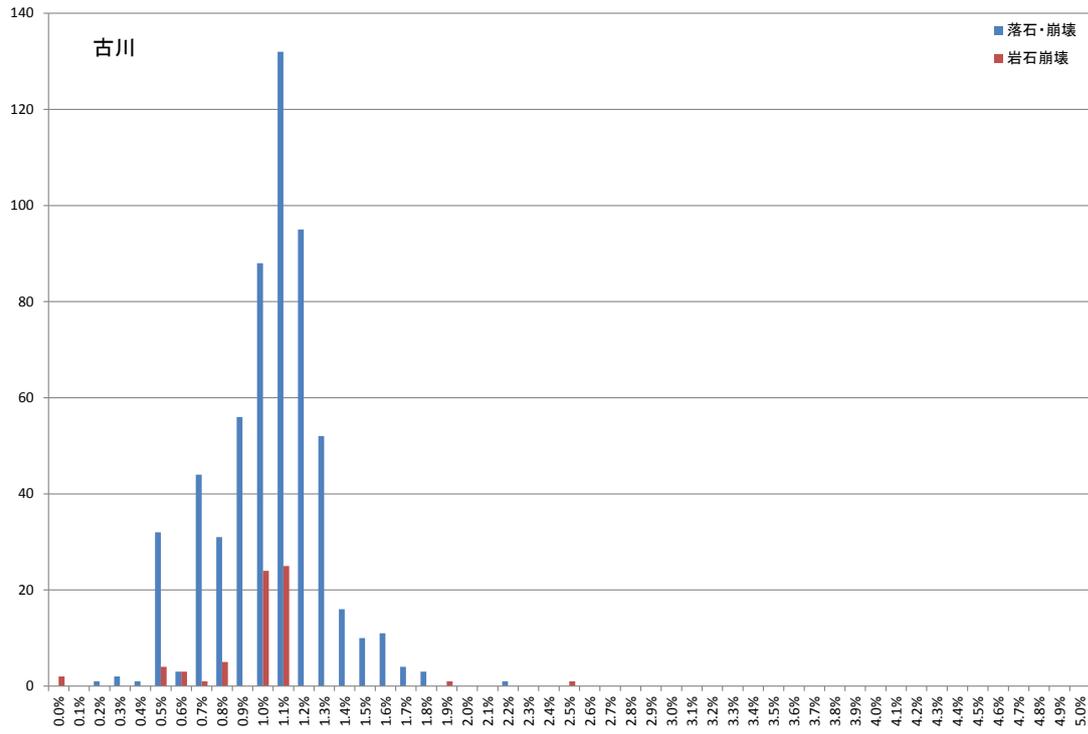


図 3-13 古川土木事務所内危険斜面における絶対危険度のヒストグラム

3.5 影響確率

影響確率は、工種によって破損と定義する状況が異なることからそれぞれ設定する必要がある。対象施設の影響確率を表 3-14 に整理する。

舗装の影響確率は、ポットホールにより社会的費用が発生する条件付き確率と定義する。ポットホールが発生した場合には、①道路事故、④孤立集落、⑤通行規制区間を除いて、必ず社会的費用が発生すると設定する。ポットホールが発生したときの道路事故の発生する確率は、県管理道路における過去 3 年間のポットホールによる道路事故件数を道路パトロールで発見されたポットホール発生数で除することにより算定し、0.074%とする。

表 3-14 社会的費用の項目と道路施設の影響確率

社会的損失の項目	影響確率		
	舗装	橋梁	危険斜面
① 道路事故	0.074%	100%	100%
② 救命救急アクセス経路	100%	100%	100%
③ 観光・産業	100%	100%	100%
④ 孤立集落	-	-	100%
⑤ 通行規制区間 (日/箇所/年)	-	-	1.24
⑥ 苦情	100%	100%	100%
⑦ 事後対策工事	100%	100%	100%
⑧ 事後対策工事による 渋滞・迂回	100%	100%	100%

橋梁の影響確率は、部材に損傷が発生した場合に、④孤立集落と⑤通行規制区間を除く社会的費用が必ず発生すると設定する。よって、損傷が問題を起こす確率は、表 3-14 に示すとおりである。ただし、橋梁については、破損した部位によっては社会的費用が発生しない。例えば、鋼桁（塗装）で破損が発生しても、その橋梁を通過する利用者には社会的費用は発生しないといえる。そのため、部位ごとに破損によって社会的費用が発生の有無を設定した。

表 3-15 橋梁部材における社会的影響発生有無の設定一覧

	工 種	発生する問題	問題が発生した場合の対策	点検項目	社会的影響の評価項目					
					①	②	③	⑥	⑦	⑧
アセットの項目	床版 (鋼桁に支持されたRC床版)	陥没	床版打ち換え(全体) ※陥没発生	1方向のひび割れ、2方向のひび割れ、鉄筋露出、さび汁、など	○	○	○	○	○	○
	床版 (PC橋の床版、間詰め含む)		鋼板接着補強(全体) ※陥没発生	ひび割れ、間詰めコンクリートの変状、横締めの変状、など	○	○	○	○	○	○
	鋼桁(塗装)	耐力の低下	当て板補強(全体)	防食機能の劣化、主部材の腐食、など	-	-	-	-	○	○
	PC上部工		アウトケーブル補強(全体)	ひび割れ、鋼材が露出し腐食、セグメント目地の変状、たわみ等の変状、横締め定着部の変状(横桁)、など	-	-	-	-	○	○
	RC上部工		鋼板接着補強(全体)	ひび割れ、鋼材が露出し腐食、たわみ等の変状、など	-	-	-	-	○	○
下部工	断面修復工(全体)		ひび割れ、鉄筋露出、橋座部の変状、台座コンクリートの変状、など	-	-	-	-	○	○	
その他	支 承	段差	支承取替え ※段差発生	承座モルタルの損傷、沈下、移動、傾斜、変形、遊間異常、上承・ローラー等に脱落があるなど	○	○	○	○	○	○
	伸縮装置		伸縮装置取替え ※段差発生	遊間に異常がある、部材に劣化・損傷がある、段差がある	○	○	○	○	○	○

危険斜面の影響確率は、落石が発生した場合に、社会的費用が必ず発生すると設定する。ここで、孤立集落の発生による社会的費用はアンケート調査の対象者への回答条件として、「落石によって孤立するかもしれない」という不安感に対する WTP(Willingness To Pay)を求めたものである。したがって、孤立集落の原因となる危険斜面がある限り落石の影響確率によらず常に発生しているものである⁴⁾。そのため、孤立集落に関する社会的費用が発生する確率は 100%である。

通行規制区間では規制による社会的影響を、落石の発生に関係なく降雨量が基準値に達した場合に起こる交通への影響を捉えている。そのため通行規制区間のリスクは、降雨による年間平均通行止め日数を社会的影響度に乘じて求める。年間平均通行止め日数は実績値より以下のとおりに求める。

①全県下の雨量通行規制区間数は、102 箇所である。②H19～H21 の雨量通行止め延べ回数は、710 回である。③H19～21 の雨量通行止め延べ時間は、9,157.6 時間である。日数にする
と 381.57 日である。④年平均通行規制日数は、以下のとおりで求められる。

・平均規制回数 = 710 回 ÷ 3 年間 ÷ 102 箇所 = 2.32 回/箇所/年

・平均通行止め日数 = 381.57 日 ÷ 710 回 = 0.53 日/回

1 年間の 1 箇所当りの平均通行止め日数

= 2.32 回/箇所/年 × 0.53 日/回 = 1.24 日/箇所/年

3.6 リスク評価に基づく対策箇所の選定方法

3.6.1 費用対効果

道路施設の投資において事業の効率性を示す指標として、費用対効果(以下 B/C)を用いることが一般的である。また、リスクに基づいて投資の是非を検討する治水事業においてもリスク軽減分を B とする B/C で投資効率を判断している。以上より、投資効率性指標は B/C を用いる。

3.6.2 便益

道路施設の維持管理における便益 B は、対策実施により健全性が向上することで生じるリスクの減少分であると定義する。対策された構造物はそれぞれ、舗装の健全性指標である MCI は 8.66, 橋梁の健全度は 4 に回復すると設定する。これにより破損確率が 0 となる。危険斜面については対策により路面への落石は生起しないため破損確率が 0 になると設定する。以上から、(3.1)式、(3.2)式で示すとおり破損確率が 0 となるため、対策した構造物のリスクは 0 となる。

対策によってリスクが軽減する期間は対策をした 1 年間だけではなく、対策の効果は持続する。しかし、対策した構造物は長期で見れば再び劣化するため、対策によるリスク軽減の便益は一定の期間発現し、劣化が生じるときに消失するものである。そこで、ここでは劣化が進行することで破損確率が上昇し、再びリスクが 0 でなくなるまでの期間であるとする。便益を計算するための設定条件は次の 3 点とする。

- ① 対策しない場合(without)の道路施設は本来、時間の経過により劣化が進行し、健全度が低下することでリスクが増大するが、その影響はここでは無視して一定とする。
- ② 対策しない場合においては破損する可能性があり、破損した場合には事後対策が実施されるため、それ以降のリスクは発生しないことを考慮して、対策しない場合の影響確率は累積確率に従って減ずる。
- ③ 対策する場合において再びリスクが発生するまでの期間は舗装、橋梁、危険斜面それぞれについて、20 年、30 年、50 年とする。

以上を考慮すると対策事業による便益は(3.20)式で算出できる。経過年数は、初年度を 1 としている。

$$B_i = \Delta R_i = \sum_{j=1}^S D_{ij} \times \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{(1 - pb_i)^{t-1}}{(1+r)^{t-1}} \right\} \quad (3.20)$$

ここで、 ΔR_i : 対策によるリスク減少分(円/年), D_{ij} : 社会的影響度+対策工事時の渋滞・迂回費用(円/年), T : 対策の有効年数(年), t : 経過年数(年), r : 社会的割引率 (=4%)。

3.6.3 費用

経済性評価に用いる費用 C は現状の劣化状態における対策の費用と対策工事によって発生する渋滞・迂回による影響を足し合わせたものである。社会的影響度⑦, ⑧は損傷が発生した時点で対策を施すことによって生じる事後的な対策費用, 迂回費用を捉えている。一方で, 経済性評価に用いる費用は評価時点の劣化状態において予防保全的に対策を施すことによって生じる対策費用と迂回費用を捉えている。そのため, 費用 C には社会的影響度⑦, ⑧で用いた工事単価, 工事期間とは異なる値を設定する。以上より, 費用は(3.21)式, (3.22)式で算出する。なお, 道路舗装は片側通行での施工を想定して, 交通容量が低下すると設定し, (3.23)式で算出する。橋梁は施工時に通行できなくなるが, 仮橋等で迂回させることが想定され, 仮橋の交通容量になると設定し, (3.24)式で算出する。危険斜面は施工時に通行不可となると想定し, (3.24)式で UC_i を算出する。

$$C_i = MC_i + UC_i \quad (3.21)$$

$$MC_i = r_{iq} \times v_{iq} \quad (3.22)$$

$$UC_i = t_i \times q_i \times \alpha \times Tr_{iq} \quad \forall K_i = 1,2 \quad (3.23)$$

$$UC_i = (td_i \times qd_i \times \alpha + l_i \times qd_i \times \beta) \times Tr_{iq} \quad \forall K_i = 3 \quad (3.24)$$

ここで, MC_i : 現状の劣化状態での対策費用(円), UC_i : 現状の劣化状態での対策工事時に発生する渋滞・迂回費用(円), r_{iq} : 劣化状態 q における構造物 i の対策費用(円/単位数量), v_{iq} : 劣化状態 q における構造物 i の対策数量, Tr_{iq} : 劣化状態 q における構造物 i の対策工事期間(日)。

3.6.4 区間リスク評価

道路が都市間や地点間を連絡することにより効果を発揮することから, 保有リスクが大きい地点間に対策をすることにより, 県管理道路ネットワーク全体の保有リスクを効率的に下げることが, 道路ネットワークの安全性を確保することになる。そのため, 道路施設それぞれで算出したリスクを道路ネットワークにおける一定区間ごとに集計し, 区間が保有するリスクを求める。この評価単位となる区間は, リスクが交通量によって変化することから, 交通量が同値となる県道あるいは, 一般国道の交差点間で設定する。

3.6.5 対策箇所選定

リスク評価に基づく対策順序決定は次の手順による。

- ① 全区間の中で区間リスクが最も大きい区間を選定する。

- ② その区間の中で、B/Cの最も大きな道路施設を選定する。
- ③ 選定された道路施設のリスクを0とし、区間リスクを再計算する。
- ④ 対策選定された施設の対策費用の合計が予算額に達するまで①～③を繰り返す。

このときに、対策選定された道路施設のリスクは(3.1)式のとおり破損確率が0%となることで0となるため、対策選定された道路施設が所在する区間リスクは軽減される。なお、区間のリスクは、そのリンクに位置する道路施設のリスクの総和であるため、対策選定された道路施設を対策しても、他の対策されていない道路施設のリスクが残る。これにより、手順①において区間リスクが最大となる区間が、選定を進めるに従って入れ替わる。これにより、ネットワーク弱点部の確実なリスク低減が可能となる。このとき、ネットワークにおいてリスク大きい区間のリスクが拮抗して低減すると考えられる。そのため、ネットワークの供用において安全性が均等に確保できることから利用者間の格差を考慮した投資ができるといえる。また、複数工種の道路施設を一元的に経済効率性で比較して対策箇所を選定する目的も達成される。

3.7 リスク評価に基づく対策箇所選定の試算

3.7.1 試算条件

提案した対策箇所選定手法が確実にネットワークのリスクを低減できるか確認するため、岐阜県の道路の特徴を反映できる路線を選定し、リスクを試算する。試算対象には、都市部から山間部までを有する岐阜地域内から、県内の道路の特徴が反映できるよう、緊急輸送道路、雨量規制区間、孤立集落などを含む4つの路線を選定した。4路線の概要を表3-16に示す。本研究では対象とする3工種を岐阜県がこれまでに蓄積した点検データに基づいてリスク評価する。リスク評価は前述のように県道、あるいは一般国道の交差点間を単位区間とする。このことから、表3-16に示すように試算する4路線では76区間がリスク評価単位区間となる。なお、区間No.は区間数76とは無関係に付与されている。

評価結果から中期的な維持管理計画として5ヵ年分の対策実施箇所を選定する。試算においては、5年間における構造物の劣化は微小であり、維持管理計画への影響は小さいと判断し、考慮しないこととした。社会的影響度の算出に用いる交通量はH17年度に岐阜県で実施された交通量推計結果のリンク交通量を用いた。

表 3-16 試算対象の概要

路線 No.	路線	路線延長 (km)	橋梁数 (橋)	斜面数 (箇所)	交通量 (台/日)	区間情報			
						区間数	最小距離 (km)	最大距離 (km)	平均区間長 (km)
157	国道157号	70.5	19	141	~42,717	39	0.2	10.9	1.8
256	国道256号	23.5	16	2	~47,880	19	0.2	3.5	1.2
92	(主)岐阜県南大野線	11.3	10	0	~46,098	12	0.3	16.0	0.9
200	(一)神崎高富線	19.1	13	140	~1,052	6	0.3	6.2	3.2
計		124.4	58	283	-	76	-	-	1.6

3.7.2 リスクに基づく対策箇所選定の試算

4 路線において区間リスクを算出し、リスク評価結果に基づいて対策箇所を選定する。前章に示した対策箇所選定手順では対象となる 3 工種の予算を統合して投資すると述べた。しかしながら、本研究では道路施設の破損確率や社会的費用の影響確率に仮定値を設定していることから、評価精度に課題が残る。そのため、この試算においては予算を統合せずにそれぞれの工種に予算を設定して対策箇所を選定する。このとき、3.6.5 で示した区間リスクと B/C を判断指標として選定する手順を損なわないように以下に示す手順に修正する。

- ① 3 工種の対策費用がそれぞれの予算を超過していない状態では、統合した予算と同様に選定する。
- ② いずれかの道路施設が予算を超過する場合には、それ以降その工種は選定せず、残りの工種から選定する。

3 工種に設定する予算は岐阜県の H23 年度当初予算において舗装、橋梁補修、危険斜面对策に充当された金額の比率に、試算対象の総延長 124km に対する 5 か年分の投資実績額 5.0(億円)を乗じて表 3-17 のように設定した。

表 3-17 試算のための 3 工種における予算

	H23年度 当初予算(億円)	構造物間における 投資額の比率	試算に用いる予算 (億円/5か年)
舗装	20.5	54.09%	2.70
橋梁	10.9	28.76%	1.44
危険斜面	6.5	17.15%	0.86

以上の条件で評価時点のリスクと対策選定によって低減したリスクを各区間において集計し、対策前の保有リスクが大きい区間順に並べて図 3-14 に示す。この試算では区間リスクが大きく評価された区間から対策箇所が選定され、多くの区間リスクが拮抗して 5 千万(円/年)程度まで低減されていることがわかる。すなわち、ある一定の区間に対策が集中することなくネットワーク全体のリスクを低減できており、公平性を考慮した投資ができてい

ることがわかる。また、対策選定され、リスクが低減した工種をみると対策選定された構造物はいずれかの工種に偏っていないことがわかる。これにより、リスク評価に基づく対策箇所選定は特定の工種だけが補修されずに放置されるような偏りが無いといえる。しかし、No.1012は対策選定されずに残区間リスクが他の区間に比べて大きくなった。この区間の対策選定対象は対策費用が1億円を超える長大橋1橋であるため、設定した予算額では対策選定されなかった。これは試算対象の規模が小さく、試算条件として設定した予算が小さいため発生したと考えられ、本格的に全県へ導入した場合にはこの問題は発生しないと考えられる。以上より、本研究で提案する総合維持管理手法は道路ネットワーク全体のリスクを確実に低減させ、公平性を考慮した対策箇所選定ができるといえる。

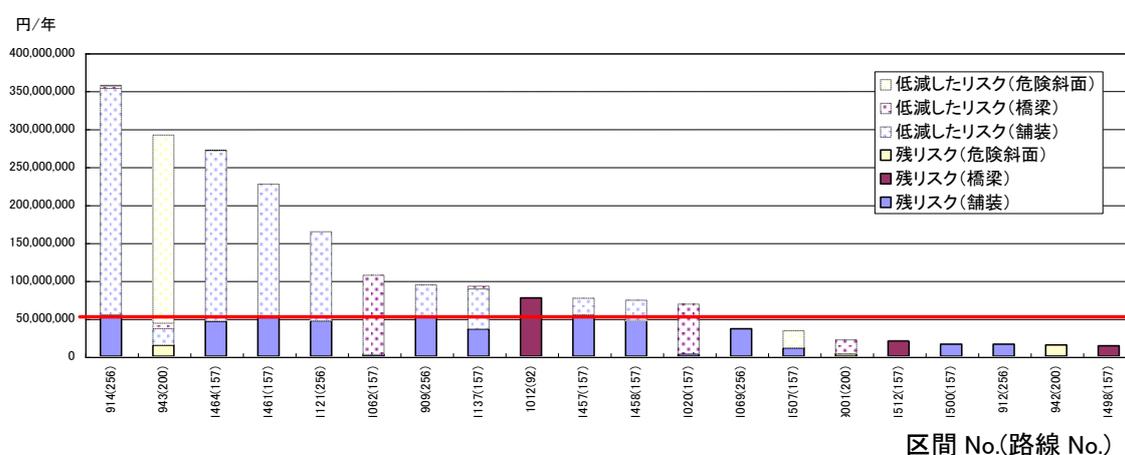


図 3-14 区間リスク低減状況

3.8 結語

本章では、複数工種の道路施設について、利用者費用と管理者費用をリスク評価することで、道路ネットワークに内在する区間リスクを定量的に評価し、確実に道路ネットワーク全体のリスクを低減させる維持管理手法を提案した。そして、岐阜県内の4路線においてリスク評価に基づく対策箇所選定を試算した。以下に本章で得られた知見を整理する。

①道路管理者、道路利用者、両者の維持管理におけるリスクを8種類定義し、それぞれの算出法を示した。②4路線のリスク評価試算ではどの工種においてもリスクが偏ることがなく、舗装、橋梁、危険斜面のそれぞれが対策の対象となることを示した。③対策箇所選定の試算では、ネットワークの弱点となる区間、すなわち区間リスクが大きい区間から、工種に関わらずリスクが軽減するように対策箇所が選定された。これにより、リスク評価に基づく対策箇所選定手法が道路ネットワーク全体のリスクを確実に減少させる対策箇所を抽出することを確認した。

本章で示した対策箇所選定手法に用いた舗装・橋梁の破損確率には、本来蓄積されたデータに基づいて分析された健全度と破損の関係を表現したモデルを用いることが必要だが、

そのデータの蓄積と分析方法に関する知見が不十分であるために、現段階ではパラメータとして設定値を与えている。この課題については本研究では取り扱わないが、今後研究がすすめられることを期待する。また、修繕箇所抽出には区間リスクを拮抗して減少させるような方法を採用したが、これは効率性の向上と利用者間の暴露リスクの格差減少を明示的に表現できるではものではない。修繕計画は公共投資の意思決定であるため、効率性、公平性を明示的に表現できる方法を採用することがアカウントビリティの向上に資する。そこで、この課題については第5章で議論する。

参考文献

- 1) 岐阜県橋梁点検マニュアル，岐阜県，2010.
- 2) 橋本孝来：救急患者収容所要時間と救命率の関係，日臨救医誌，5：285-92，2002.
- 3) 秋田県版 道路事業 費用便益分析マニュアル，秋田県 建設部，2012.
- 4) 道路途絶による社会経済損失を考慮した斜面災害リスクの評価モデル，小板宏彰，高木朗義，倉内文孝，北浦康嗣，土木計画学研究・講演集，Vol.41，CD-ROM，2010.
- 5) 交通事故の被害・損失の経済分析に関する調査研究，内閣府政策総括官，2007.
- 6) 費用便益分析マニュアル，国土交通省，2008.
- 7) 本城勇介，八嶋厚，町田裕樹，森口周二，浅野憲麻，社会基盤の総合的リスクマネジメント（その2）：飛騨圏域を対象とした道路斜面危険度評価，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集，6-404，2010.

第4章 リスク評価に基づく道路施設の修繕箇所選定の実務導入に向けた検討

4.1 諸言

第3章に示したリスク評価に基づく総合維持管理手法による修繕計画立案を実務に導入するためには、多くの課題がある。たとえば、舗装・橋梁の破損確率には、本来蓄積されたデータに基づいて分析された健全度と破損の関係を表現したモデルを用いることが必要だが、そのデータの蓄積と分析方法に関する知見が不十分であるために、現段階ではパラメータとして設定値を与えている。そのため、現状のリスク評価の精度は高くない。課題の解決のため今後の知見蓄積が期待される場所である。一方で実務へ早期に導入することは、優先度決定手順の透明性確保の効果が期待できる。また、同一施設種類内でのリスク評価は、破損確率の精度が高くなるとも、各施設の健全度、社会的影響の大きさを相対的に比較できると考えられる。

以上より、本章では岐阜県にリスク評価に基づく道路施設の総合維持管理手法を適用することを前提として、実務導入するために必要となる条件設定を検討する。また、設定した条件で1年間運用した後に実施したヒアリング調査で抽出した課題の整理、解決策の検討について述べる。

4.2 道路区間の重要性に基づく管理手法の検討

4.2.1 重点路線の設定

第3章に示したリスク評価に基づく修繕箇所選定では、どのような特性を持った区間でも同等に取扱い、リスク評価のみで修繕箇所が選定される。しかし、防災上、岐阜県の政策上において緊急輸送道路など、他の路線と比較して重要な路線も存在する。限られた予算でも重要な路線は確実に安定的に供用されることが求められる。そこで、緊急輸送道路と、県土1,700km骨格幹線ネットワーク道路は、「重点路線」として設定し、それ以外を「一般路線」とする。

県管理道路のうち、緊急輸送道路(1~3次)及び、骨格幹線ネットワーク道路の完成分の重複した延長を除く合計1,674kmを重点路線と定め、一般の路線と評価や管理の手法等を変えることにより、限られた予算でも重要な路線を確実に維持する。

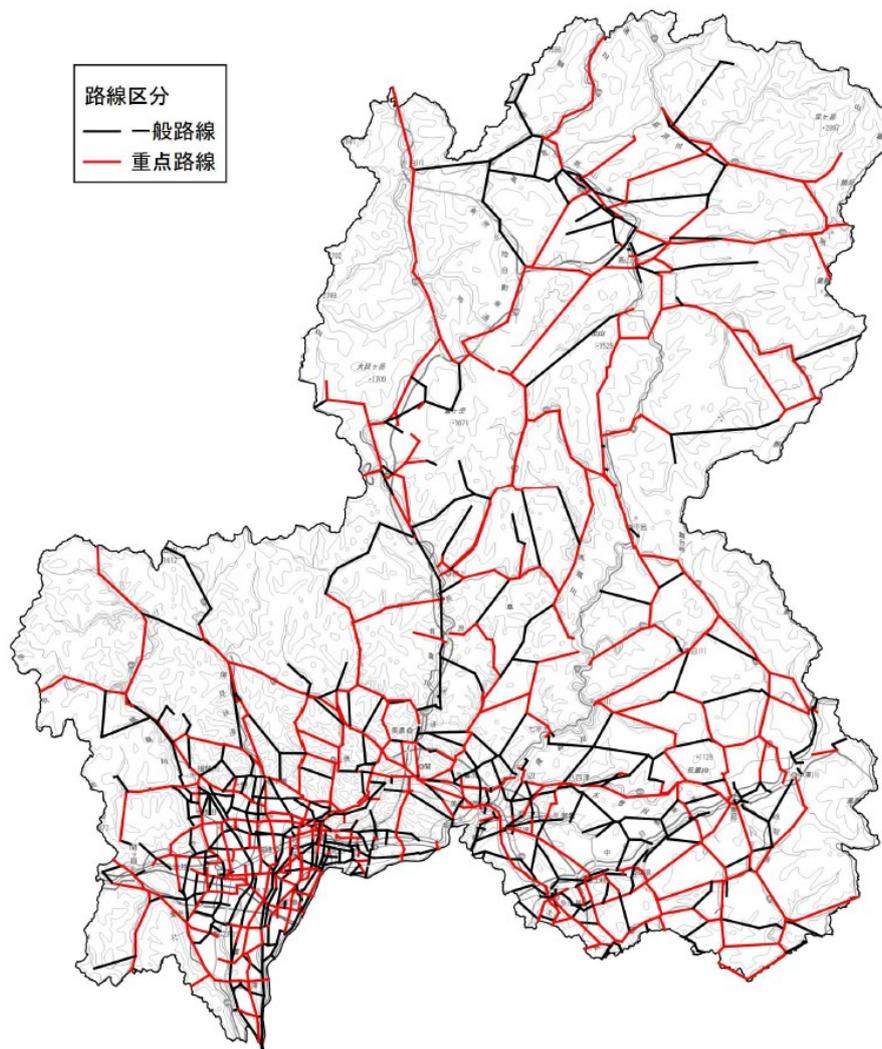


図 4-1 重点路線図

4.2.2 路線区分ごとの管理方針

「重点路線」に指定された路線はすべてリスク評価に基づく維持管理の対象とする。一方で「一般路線」のうち、リスクが小さい区間はリスク評価に基づいた維持管理の対象外とする。「一般路線」におけるリスクが小さい区間とは舗装や橋梁の劣化が進行しても、利用者数が少ない等の理由によりリスクが大きくなりにくい区間である。したがって、その区間に位置する施設は長期間修繕されないことが予想される。そのため、リスク評価の対象とせず、施設の健全度が小さい順に修繕順序を決定する。「区間リスクが小さい」の定義については、計画立案時に管理している施設の劣化状況や管理路線の利用状況等を踏まえて検討することとした。ここでは暫定的に「区間に存在するすべての舗装を MCI=2.0, 橋梁のすべての部材を健全度=2.0 として、リスクを計算し、区間で集計した値が 1(億円/年)に満

たない区間」と定義する。

また、「一般路線」のリスクが小さい区間のうち、15m以上の橋梁や危険斜面がない区間については、評価対象となる舗装、15m未満の橋梁に大きな損傷が発生しても、構造が簡易で復旧に要する費用が小さい場合が多いため、予防保全的に管理することで費用の増大が予想される。予防保全的な補修の対象外とする。この区間については対症療法的に管理し、日常のパトロールによる重点的な観察により損傷を早期に発見し、適切に対処することで利用者の安全を確保する。

上記の区分を設けて、リスク評価に基づく維持管理と、健全度評価に基づく維持管理に配分する予算をコントロールすることで、県管理道路をすべて健全に保つために十分な予算がない場合においてもリスク評価に基づく維持管理の対象に予算を充当することで「重点路線」のリスクが高くなる区間は集中的に修繕ができる。

表 4-1 管理方針表

		区間リスク	メンテナンスプラン				
			舗装	15m以上の橋梁	15m未満の橋梁	危険斜面	
重点路線	改良済		リスク評価に基づく維持管理			リスク評価に基づく維持管理	
	未改良						
一般路線	改良済	大	リスク評価に基づく維持管理				
		小	健全度評価に基づく維持管理				
	未改良	大	リスク評価に基づく維持管理				
		小	健全度評価に基づく維持管理				
		斜面および15m以上の橋梁がない区間	対症療法型維持管理	-	対症療法型維持管理		-

※改良済：交通量推計ネットワークで車線数が2車線以上の区間

未改良：交通量推計ネットワークで車線数が1車線の区間

4.3 修繕箇所決定手順

4.3.1 限界管理水準

「リスク評価に基づく維持管理」に設定された区間に存在し、劣化が進行してリスクが大きいある1施設（A）を考えよう。この区間に存在する他の施設は健全である場合、区間リスクは大きなリスクとなる施設を複数持つ他の区間と比較すると相対的に小さくなる。このとき、予算制約により（A）の存在する区間は、他の区間よりも優先度が小さいため修繕ができないことがある。しかしながら、（A）の健全度が著しく低い場合、修繕を遅らせることがリスクの発現につながり、大きな社会的損失を生じさせることが考えられる。そのため、区間リスクにかかわらず、施設の健全度が著しく低い場合には優先的にその施設のみを修繕するルールが必要となる。そこで、舗装はMCIが2.0未満、橋梁は各部材の健全度が2未満(以下、限界管理水準という)となった施設は第3章で示した区間リスクとB/Cによる修繕箇所の抽出よりも高い優先度を与える。

4.3.2 現地職員による現地確認

リスク評価に基づく維持管理、健全度評価に基づく維持管理のいずれも専門家によって診断された健全度と、その他の各種データによって修繕計画が立案される。データは点検年次から時間が経過している場合もあり、修繕の意思決定時には点検時と状態が異なることも考えられる。また、市民による情報提供や局所的な劣化により緊急的に対処すべき箇所も生じることが考えられる。そのため、修繕計画で立案された結果を踏まえたうえで、修繕は現地職員が現地確認して、最終的に修繕を意思決定する必要がある。

4.3.3 予算運用の設定

第3章に示したリスク評価に基づく総合維持管理計画では、舗装、橋梁、危険斜面の3種類の施設をすべてリスクで重要性を一元的に評価する。しかし、リスク評価の精度は3.8で述べたように、損傷確率の設定に課題が残されているため高くない。

一方で、現状の維持管理における予算は施設ごとに概ね横ばいとなるように毎年配分されている。したがって、リスク評価に基づいて修繕する施設を決定し、それに必要となる予算を充当してしまうと、例年配分されている予算と大きくかい離することが考えられる。現状の予算と大きなかい離が生じると、予算を執行するための人材や修繕事業を請け負う地域の業者における処理能力等に対して事業量が過不足を発生させる。

以上より、リスク評価による修繕箇所の選定には、工種ごとに配分された予算を与件として計画立案することが必要である。そこで、工種ごとに設定された予算を条件として、第3章に示した箇所抽出と矛盾しない方法として以下の方法を採用する。

- ① 3工種それぞれに1年ごとの予算を設定する。
- ② 区間リスク算出には、対象の施設すべてのリスクを算出する。
- ③ 区間リスク最大となった区間に存在する施設のうち、B/Cが最大となる施設を抽出する。
- ④ B/C最大となる施設の修繕費用が残予算より大きい場合は、以降その工種を選定しない。
- ⑤ 区間リスク最大の区間の中で④の条件により修繕できる箇所がない場合には、次に区間リスクが大きい区間から修繕箇所を選定する。

4.3.4 橋梁修繕の同期化

橋梁のある部材を修繕するとき、たとえば鋼橋における塗装を塗り替える場合には足場を架設する。このとき、実務においては足場架設費用の縮減のために、近い将来に修繕が必要となる健全度が小さい他の部材があれば同時に施工する。足場のほかにも高所作業車のリース費用など、同時に施工することで時期をずらして施工するよりも修繕費用を縮小できる場合がある。そこで、ある橋梁の部材が修繕候補箇所として抽出されたとき、その橋梁の他の部材で健全度が3以下となっている部材があれば同時に修繕する。

4.3.5 修繕箇所決定手順

以上までに示した条件を踏まえて、修繕箇所は以下の手順で決定する。

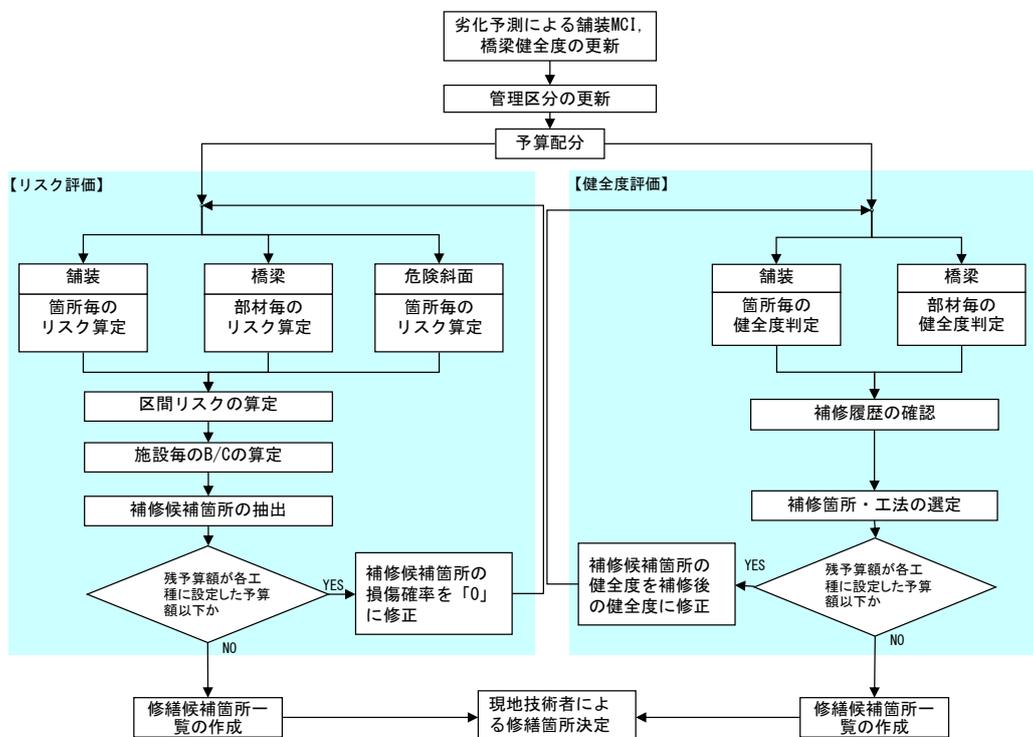


図 4-2 修繕箇所決定手順

4.4 実運用における課題の抽出

前節までにリスク評価に基づく維持管理手法(以下、岐阜県での施策名に準じてメンテナンスプラン、あるいはメンプラという)を実務に運用するための諸検討について示した。岐阜県はここまでに示した方法で2012年4月から運用を開始している。2013年度に運用を開始して1年が経過したため、修繕候補箇所として抽出した個所と、現地技術者が決定した修繕箇所、健全度順に抽出した箇所を比較し、その資料に基づいて現地出先事務所である県内の11土木事務所のうち、3土木事務所にヒアリング調査を実施することで運用における問題点等を抽出した。ヒアリング結果を踏まえて改善策を検討する。

4.4.1 抽出箇所の比較分析

(1) 使用データ

比較分析に使用するデータは、岐阜県が管理する舗装、15m以上の橋梁、危険斜面の平成25年度4月時点でのデータと県管理道路のネットワークデータを用いて、メンテナンスプラン、現地技術者が修繕したいと決定した箇所(以下、事務所判断の箇所という)、健全度順(以下、アセットという)のそれぞれの方法で、すべての構造物に優先度順位を試算した結果のうち、以下の条件で抽出したものである。

① 【メンプラ】上位100位

メンテナンスプランによる評価方法により選定されたH25年度の補修候補箇所一覧(全県)のうち、各施設の補修優先順位の上位100位までを抽出したものである。

② H25事務所判断の箇所

各土木事務所がH25年に補修を実施すると選定した各施設を抽出したものである。

③ 【アセット】上位100位

アセット(損傷度合いが著しい箇所から順に補修候補箇所として選定する評価方法)による評価方法により選定された補修候補箇所のうち、補修優先順位の上位100位までを抽出したものである。

表 4-2 各施設の補修候補箇所抽出条件

使用データ	舗装	橋梁	危険斜面
メンプラ	<ul style="list-style-type: none"> ・ MCI2未満の箇所(最低管理水準に該当する箇所)は除外 ・ H24までに補修した箇所は除外 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 健全度が2未満の部材(最低管理水準に該当する部材)は除外 ・ H24までに補修した部材は除外 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 区間IDごとに集計して、リスクを合計
H25事務所判断			<ul style="list-style-type: none"> ・ アセットによる補修箇所の選定は行わないため対象外
アセット			

(2) 舗装の比較分析

抽出された舗装の箇所におけるリスクを算出し、工種の総リスク平均値における項目別のリスク平均値の比率を図 4-3 に示す。

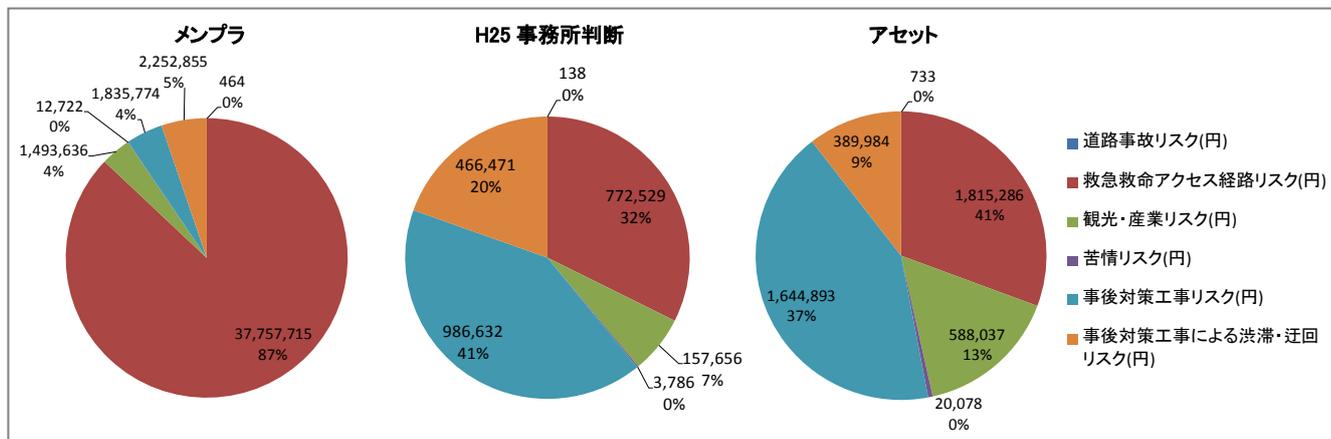


図 4-3 リスク項目別の比率

メンブラで抽出された箇所のリスクは「救命救急アクセス経路リスク」が 87%と大きい。一方で事務所判断、アセットの箇所はいずれも「救命救急アクセス経路リスク」の比率は 50%未満となり、事後対策工事リスクの比率が最も大きくなっている。この結果から、メンブラで優先度順位上位となる箇所は「救命救急アクセス経路リスク」の大きさによって決定されていると考えられる。これは、リスク評価における救命救急アクセス経路の設定に問題があることが分かった。に示すように、救命救急アクセス経路リスクが生じる区間は市役所と第 2 次緊急指定病院を結ぶ最短経路のみである。実際には、各地域に患者が生じるため、市役所と第 2 次緊急指定病院を結ぶ経路だけではなく、救急患者の搬送には多くの区間が利用される。そのため、「救命救急アクセス経路リスク」は該当する区間のみ過大に評価されている。

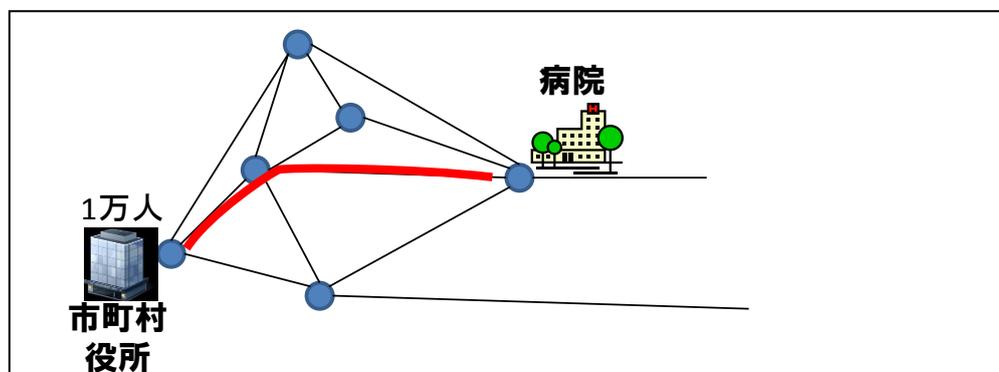


図 4-4 救命救急アクセス経路の経路設定

(3) 橋梁の比較分析

抽出された橋梁の箇所におけるリスクを算出し、工種の総リスク平均値における項目別のリスク平均値の比率を図 4-5 に示す。

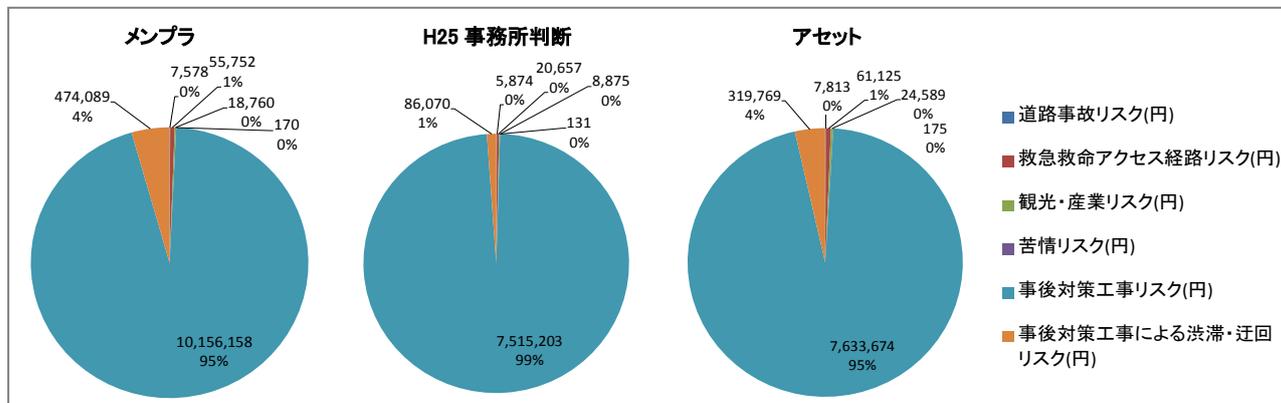


図 4-5 リスク項目別の比率

橋梁の抽出された箇所におけるリスクはいずれも「事後対策工事リスク」が 95%以上となっている。これは橋梁の事後対策工事における費用単価が大きいことが原因であると考えられる。橋梁の修繕工事金額が大きくなるのは工事規模を踏まえれば妥当である。また、リスク評価では通行止めだけでなく片側交互通行で通行させるため、渋滞、迂回の利用者費用が比較的小さくなるのも妥当と考えられる。

(4) 危険斜面の比較分析

抽出された危険斜面の箇所におけるリスクを算出し、工種の総リスク平均値における項目別のリスク平均値の比率を図 4-6 に示す。

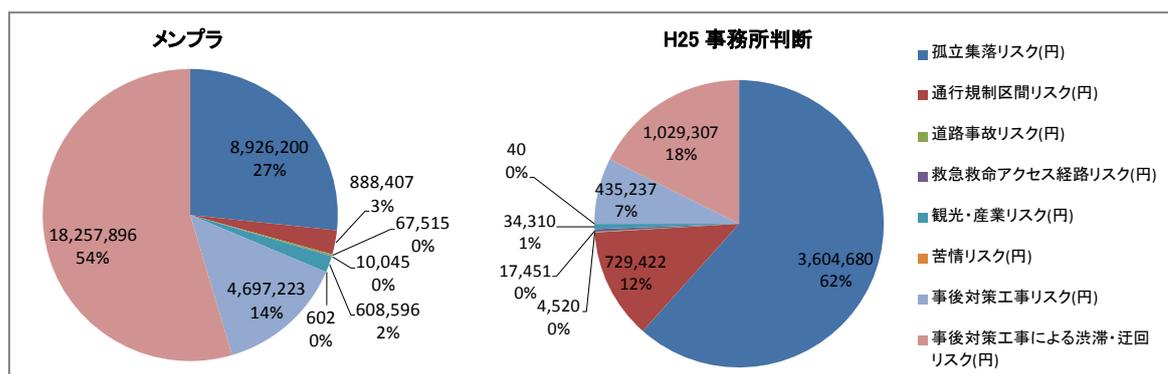


図 4-6 リスク項目別の比率

メンプラで抽出された箇所におけるリスク平均値の比率は「事後対策工事による渋滞・迂回リスク」が 54%と大きく、つぎに「孤立集落リスク」が 27%と大きい。一方で、事務所判断により抽出された箇所は「孤立集落リスク」が 62%と大きい。これは岐阜県が政策

として孤立集落につながる区間の危険斜面整備を進めているため、「孤立集落リスク」が生じている箇所を重点的に選定していることが原因であると考えられる。

メンブラで抽出された箇所が大きく評価された事故対策工事による渋滞・迂回リスクが大きくなる理由は図 4-7 に示すように、落石の発生による区間途絶時の迂回距離が 50km～60km と非常に長く設定されている区間が多くある。県管理道路が途絶した場合に長距離の迂回が必要となる時は、実際には県管理道路以外の市町村道等を利用して迂回することが考えられる。しかし、現在の迂回距離は県管理道路のみで迂回する条件で設定しているため、過大に評価されている。

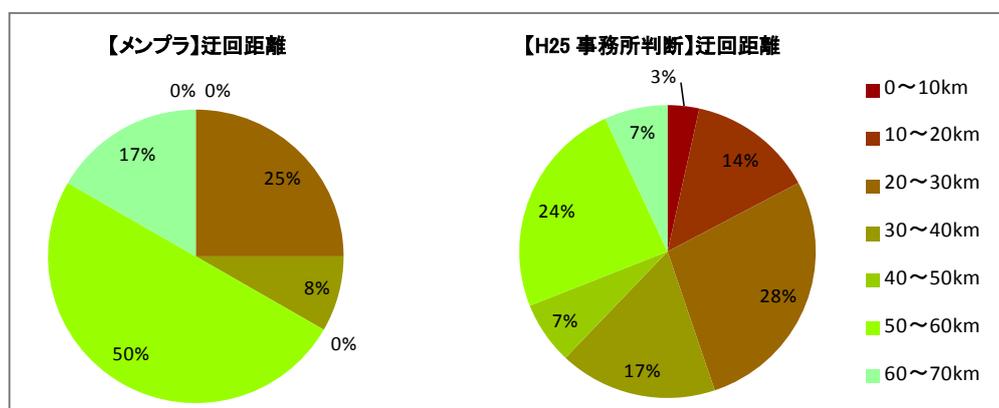


図 4-7 抽出された危険斜面の箇所に設定された迂回距離の比率

(5) 比較分析のまとめ

メンブラではこれまで明示的に定義されていなかった利用者、管理者両者のリスクを定義して補修候補箇所を選定するため、これまでの経験に基づいて修繕の意思決定をする事務所判断とメンブラの判断基準が異なることは、当然である。しかしながら、現地技術者は劣化状態、利用状況、苦情の有無などを総合的に考慮して修繕の意思決定をしており、これまで大きな事故等が生じていないことを踏まえれば妥当性があると考えられる。したがって、メンブラで抽出される補修候補箇所が現地判断と大きくかい離することは、リスク評価の計算方法等に問題があると考えられる。

比較分析の結果、メンブラで抽出された舗装の修繕候補箇所は「救急救命アクセス経路リスク」が非常に大きくなり、事務所判断の抽出箇所のリスク構成と大きくかい離した。「救急救命アクセス経路リスク」の経路設定方法に問題があるため、修正が必要である。

橋梁は事務所判断の抽出箇所とメンブラの抽出箇所のいずれも「事後対策工事リスク」が大きくなった。リスク評価では通行止めではなく片側交互通行で通行させるため、渋滞、迂回の利用者費用が比較的小さくなるのも妥当であるといえる。以上を踏まえれば橋梁リスク評価手法の修正は必要ないと考えられる。

危険斜面はメンブラで抽出された箇所は「事後対策工事による渋滞・迂回リスク」、事務

所判断は「孤立集落リスク」が大きくなった。リスク評価で採用している迂回距離は県管理道路のみで計測しているため、実際の迂回距離より過大に設定していることが考えられる。

4.4.2 土木事務所担当者へのヒアリング

メンテナンスプラン運用に関する課題を把握するために、岐阜県の現地機関である土木事務所にヒアリングした。ヒアリングの対象は11ある土木事務所のうち、山間部と都市部を代表する以下の3事務所とした。山間部では危険斜面を多く管理することから、危険斜面の修繕候補箇所選定に関する課題、都市部では舗装を多く管理することから、舗装に関する修繕候補箇所選定に関する課題抽出を期待した。

表 4-3 ヒアリング対象

	日時	対象	備考
高山土木事務所	2013年8月30日	道路維持課 3名	山間地が多い事務所
恵那土木事務所	2013年9月6日	道路維持課 3名	山間地が多い事務所
大垣土木事務所	2013年9月18日	道路維持課 2名	都市部が多い事務所

ヒアリングでは比較分析結果を提示し、事務所判断で選定された箇所の選定理由やメンテナンスプランでの選定箇所を選定しなかった理由等を質問した。ヒアリング項目は①メンテナンスプランと事務所選定箇所の違いが生じる理由について、②メンテナンスプランの補修候補箇所選定の要改善点についての2点である。表 4-4 にヒアリング結果を整理する。

表 4-4 ヒアリング結果一覧

	メンテナンスプランと事務所選定箇所 の違いが生じる理由について	メンテナンスプランの補修箇所選定方法 の要改善点について
高山土木事務所	<ul style="list-style-type: none"> 再生合材の使用によって劣化予測が当たらないためではないか. 道路パトロールで把握されるポットホールの発生率が高いところを優先して補修している. パッチングなどで事務所としては「補修した」と考えている箇所も、MCI データは小さいままであるため、データと現地の補修を希望する箇所は一致しない. 	<ul style="list-style-type: none"> 舗装において病院上の経路だからという理由で補修優先度を上げることはない. 迂回経路の設定値が長すぎる. 実務上、道路に異常が生じても膨大な延長となる迂回は生じさせないよう配慮する.
恵那土木事務所	<ul style="list-style-type: none"> MCI データを基準として補修候補箇所を選定し、現地確認の上で決定している. 路面状態に加えて住民からの苦情や要望等を考慮して補修箇所を選定している. 舗装の場合、優先順位に緊急輸送道路であるかを考慮しない. 危険斜面は通行規制区間、緊急輸送道路の指定、交通量等の指標をもとに補修箇所を選定する. 	<ul style="list-style-type: none"> 舗装では救命救急のアクセスを考慮する必要性が感じられない. 危険斜面の迂回経路は市町村道を迂回路として使用すれば、迂回距離が膨大になることを防げるのではないか. 各区間に対して迂回路を設定しているが、実際に通過する車両の目的地はその区間の終点ではない可能性が高いため、迂回路の設定自体が妥当でないのではないか. 舗装について、補修箇所を選定する指標として沿道状況(住宅地、山間地、あるいは騒音、振動を考慮するなど)が考えられる. これらを定量評価してリスクに加えられるか.
大垣土木事務所	<ul style="list-style-type: none"> 大型車交通量が多いため、沿道の振動や騒音の苦情を考慮している. 舗装の状態が良好でも段差が生じれば打ち直さなければならない. わだちによる水たまりに対する苦情も考慮している. 	<ul style="list-style-type: none"> 救急救命のアクセスを考慮して補修候補を決定したことはない. 舗装への振動、騒音、水たまりなどの苦情対策が優先度順位に関連できるとよい.

ヒアリング結果を整理すると、舗装の救急救命アクセス経路が大きく評価されることが、現地判断と整合しない大きな理由であることが明らかである。救命救急アクセス経路が大きく評価される原因は、図 4-4 に示したとおり、各基礎自治体の役所から病院への最短経路に、その市町村のすべての人口が搬送されることを仮定した設定となっていることにある。現実的には市町村の人口は広く分布しており、救急車両によって搬送される際には居住地、あるいはその他箇所から病院へ移動する。したがって、市役所から病院への最短経路のみにすべての人口が搬送されることを仮定した設定は修正する必要がある。また、舗装劣化による騒音、振動の沿道への影響はリスク評価に考慮するべきであるといえる。危険斜面の「事後対策工事時における渋滞・迂回リスク」で設定される迂回経路は市町村道を考慮して、延長が過大にならないような方策が必要である。

また、ヒアリングでは、現地技術者が健全度に基づいて修繕箇所を決定していることがわかった。すなわち、現地技術者はリスク評価の必要性が十分に認知していない。したがって、リスク評価精度の向上が必要であることのほかに、メンテナンスプランの認知を十分にすることなど、運用面の課題がある。しかし、運用面の課題は行政における講習会等により職員を教育することや運用を継続することが主な改善策となる。これは本研究の論旨と異なるためこの課題は取り扱わない。

4.4.3 改善方法の検討

(1) 救命救急アクセス経路リスク算出方法の修正

図 4-4 に示したように救命救急アクセス経路で設定された算出手法は、各基礎自治体の役所から病院をつないだ最短経路のみに救命救急アクセス経路リスクが生じると仮定している。現実的には在宅中、勤務、就学中、あるいは余暇の買い物先等多くの箇所から救急搬送が生じる可能性がある。しかしながらこの人口動態を捉えることは困難であるため、ここでは簡単のため、居住地から搬送されることとした。これにより、各基礎自治体から病院への経路以外にも多くの箇所から搬送されることとなり、結果としては搬送が想定される人口を分散させることとなる。

まず、道路ネットワーク上の各ノードに周辺の人口を集約する。これは、救急搬送の出発地をすべての住民の居住地とすると計算が煩雑となるため、その代替として一定規模のゾーンとして取り扱うためである。ゾーンの分割はノードを母点としたボロノイ分割を用いる。ボロノイ分割によって区分されたゾーンにおける第 2 次メッシュ人口を集計し、ゾーンの人口とする。

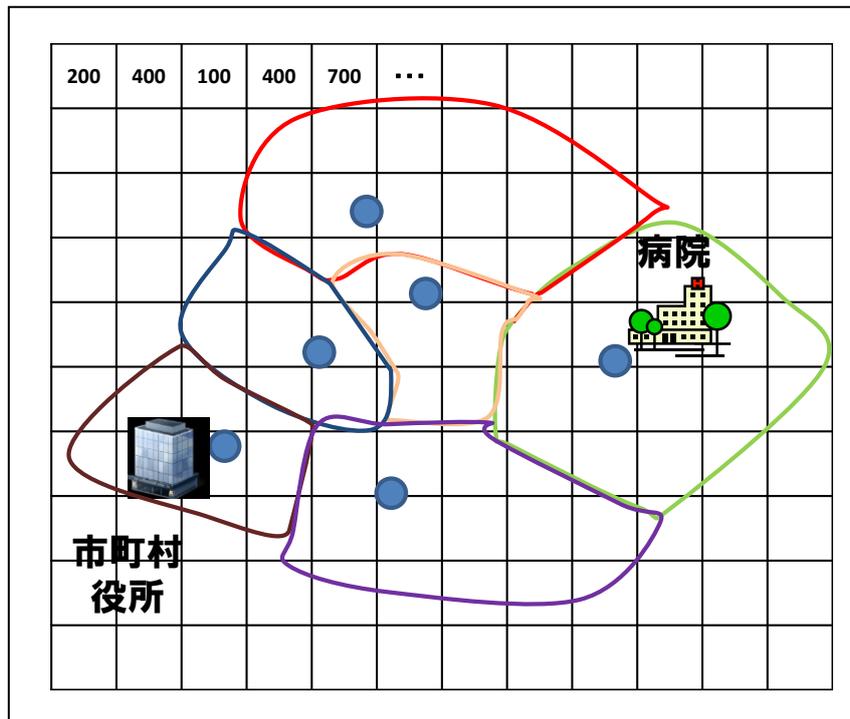


図 4-8 ボロノイ分割によるノードへの人口割り付けイメージ

ボロノイ分割には QGIS の空間分析ツールを利用する。メッシュ人口は国土数値情報サービスの最新データを利用する。

つぎに、各ノードから病院までの最短経路を探索する。探索された経路において経由する区間を記録する。すべてのノードから病院までの最短経路においてノードに集約した人口を割り付けることで、各リンクを通る可能性がある対象人口を算出する。最短経路探索アルゴリズムには高速でダイクストラ法を用いる。

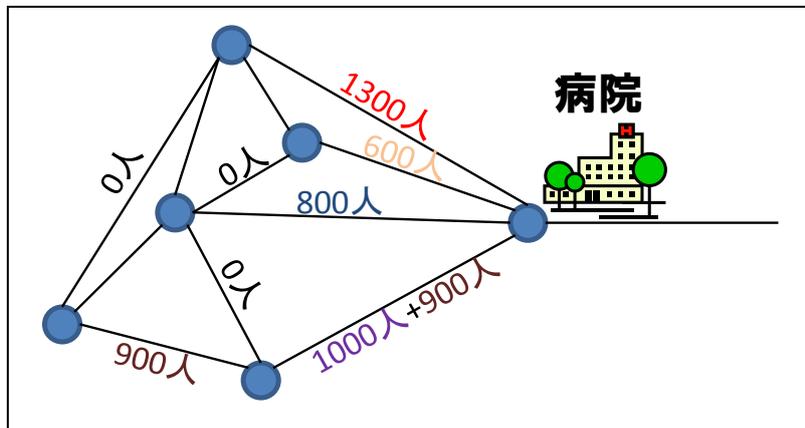
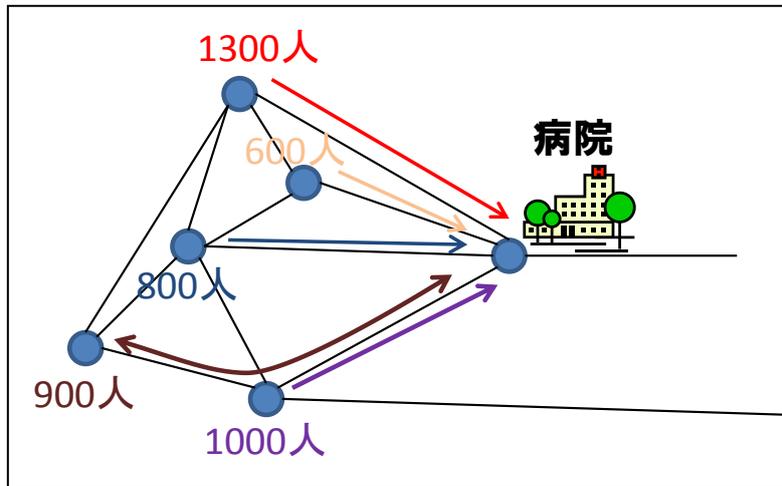


図 4-9 区間への対象人口割り付けのイメージ

救命救急アクセス経路リスクの算出方法を修正したことで区間に割り付けられた対象人口がどのように変化したかを図 4-10 から図 4-13 に示す。

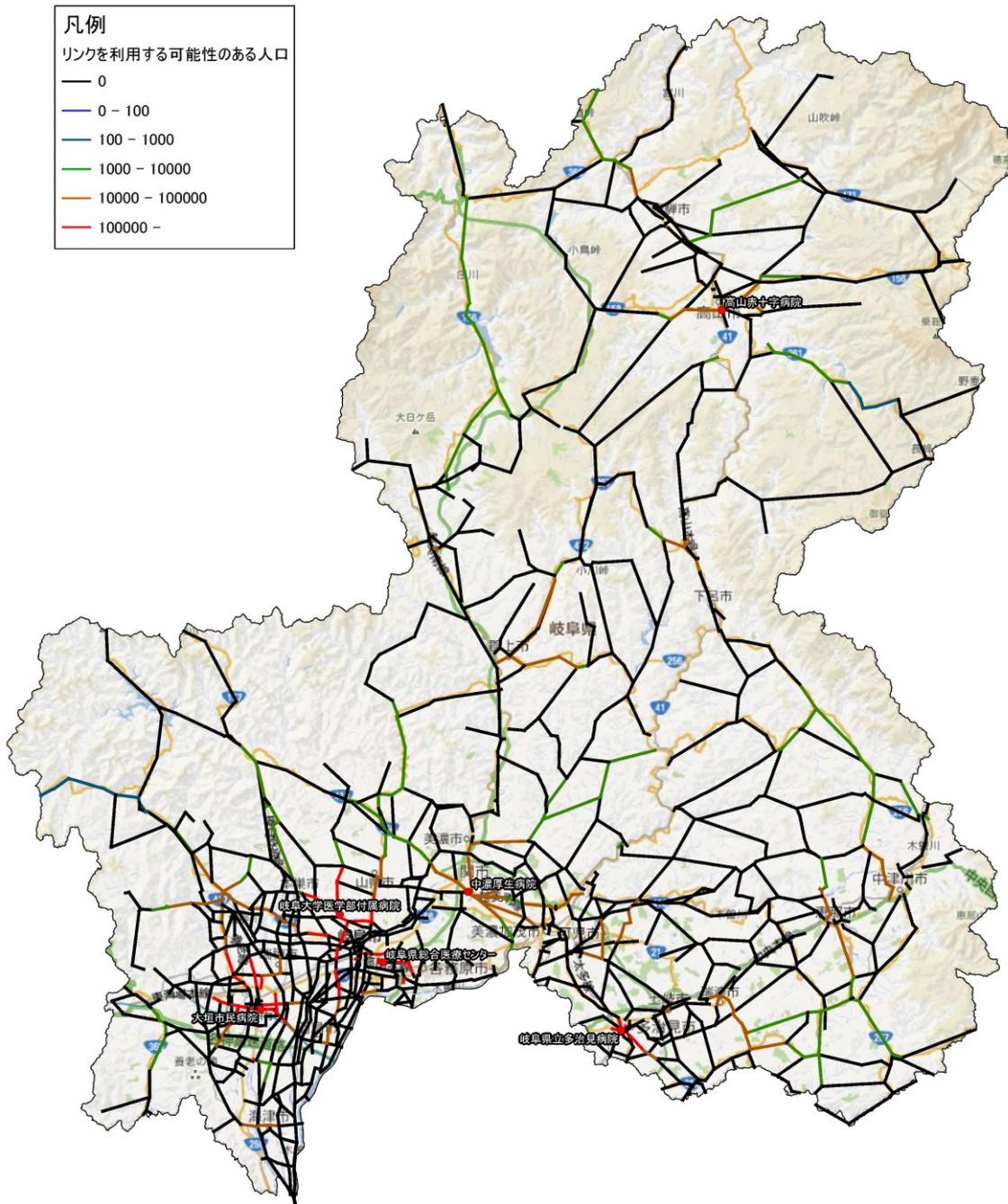


図 4-10 修正前の区間に割り付けられた対象人口図

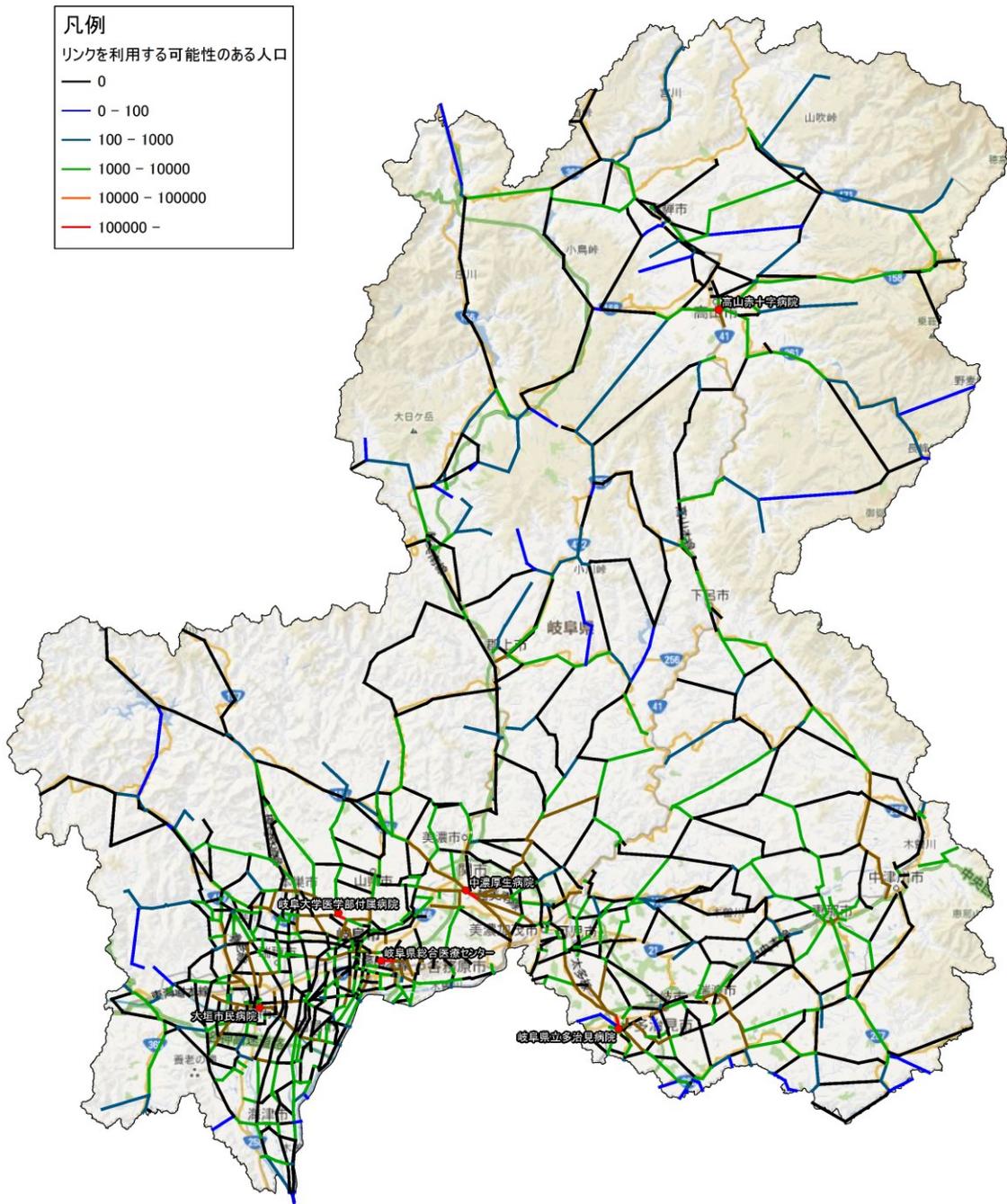


図 4-11 修正後の区間に割り付けられた対象人口図

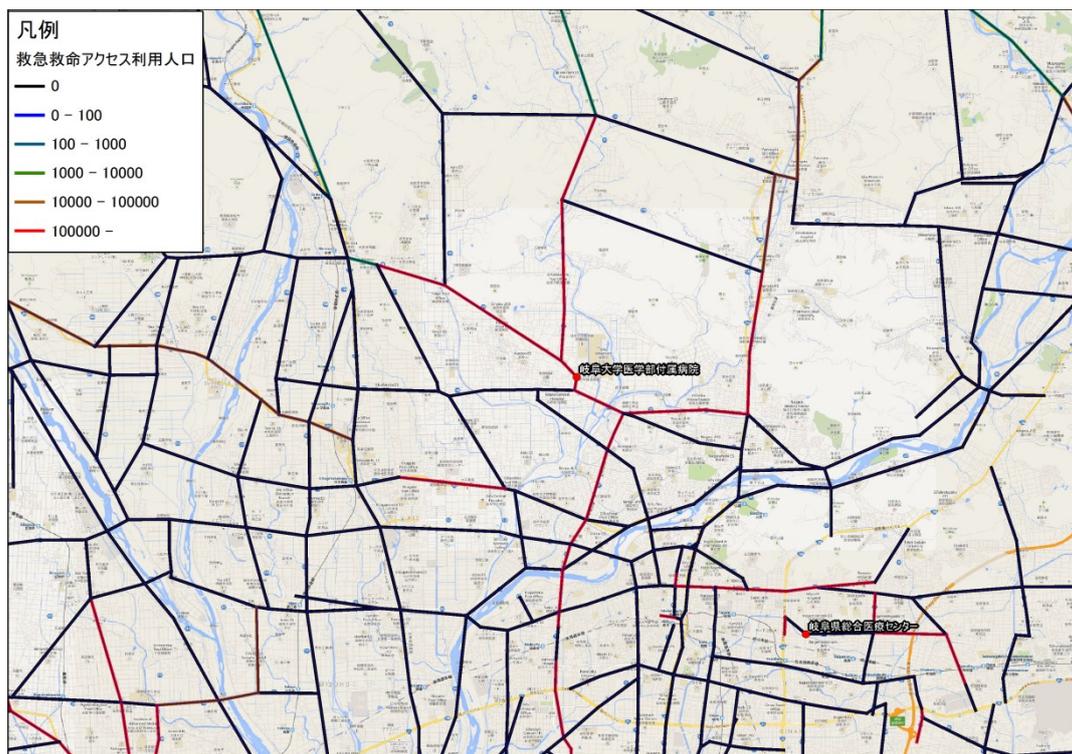


図 4-12 修正前の区間に割り付けられた対象人口図(岐阜市周辺拡大)

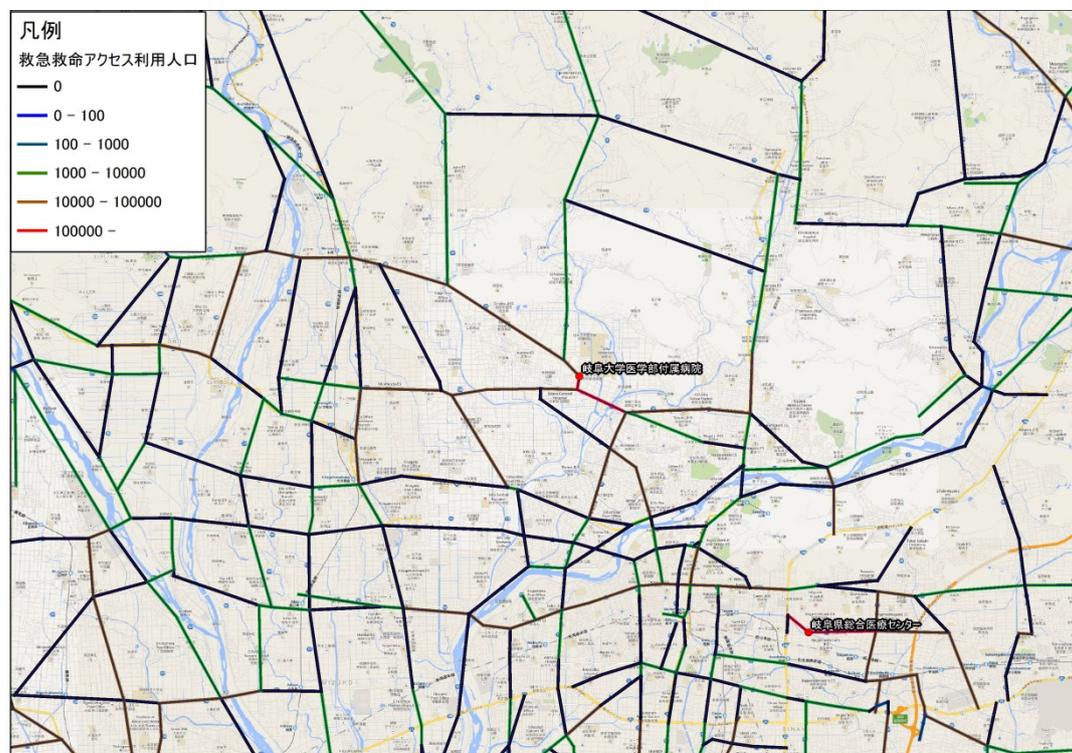


図 4-13 修正後の区間に割り付けられた対象人口図(岐阜市周辺拡大)

修正前の割り付け人口をみると、病院付近で対象人口が大きくなり、区間の割り付け人口が 100,000 人以上を示す赤色で表示されている。一方で、病院から離れた地域では数区間が着色され、その他の区間の対象人口が 0 となり、黒く表示されている。すなわち、利用されるリンクが限定されていることがわかる。修正後は多くのリンクに人口が割り付けられ、黒以外に着色されている。また、病院付近でも赤く着色された区間は少なく、多くの区間に人口がばらついていることがわかる。

修正した算出法を用いて、リスク評価を試算した。修正前と修正後で抽出される補修区間上位 100 位のリスク構成がどのように変化したかを以下に示す。旧手法では上位 100 位の箇所におけるリスクは 88%が救急救命アクセス経路であったのに対して、新手法では 5%と大幅に縮小された。これにより旧手法では補修箇所として抽出される箇所が救急救命アクセス経路に指定されている区間が多数だったのに対して、新手法ではその他の多くの箇所が抽出されていると考えられる。

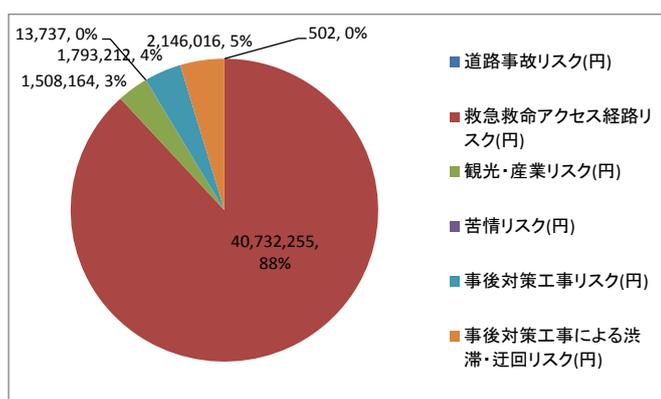


図 4-14 旧手法による補修箇所上位 100 位の平均リスク構成

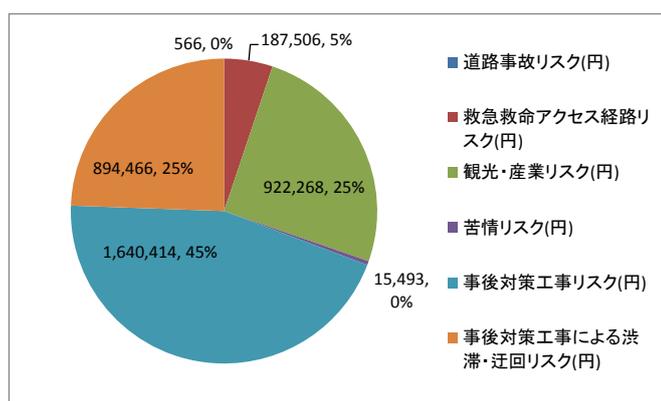
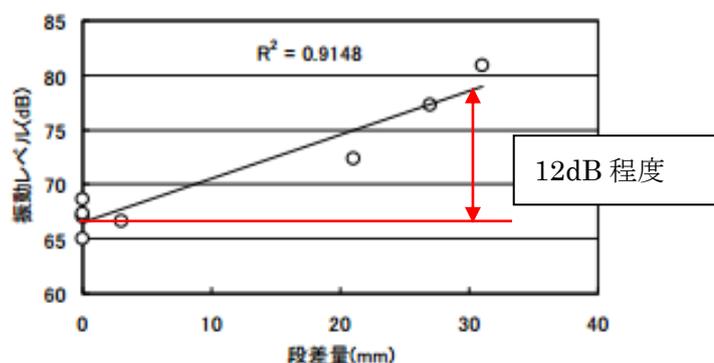


図 4-15 新手法による補修箇所上位 100 位の平均リスク構成

(2) 舗装を対象とした振動リスクの開発

舗装における修繕意思決定においては、沿道住民からの騒音・振動に関する苦情が判断要因となる。したがって、舗装の劣化に伴って増大すると考えられる騒音・振動を定量的に示し、その社会的影響を評価する「騒音・振動リスク」を定義する。しかしながら、騒音は舗装の劣化状態にかかわらず、走行する車両のタイヤと舗装の摩擦によって生じるため、劣化によって増大するとは考えにくい。そこで、振動を対象としたリスクの定義を試みる。

振動の発生と路面劣化の関係は「段差測定車による段差量と振動との関連把握」¹⁾で研究されており、以下の関係を示している。これによれば、路面の段差が大きくなるほど 20m 離れた平坦な位置の振動は大きくなること示しており、その値は図の直線のように推定される。



出典：段差測定車による段差量と振動との関連把握，都土木技術支援・人材育成センター年報，2013，pp.85-90

舗装の劣化進行によりポットホールができたとき、段差量が 30mm 生じると仮定すると、路面が平坦で劣化がない状態と比較して振動レベルは 12dB 程度大きくなる。

振動と社会的費用の関係は肥田野らが振動 1dB 増加するごとにどれだけ社会的費用が増加するかを示している。この研究では、該当する地点の地価によって振動による社会的費用の大きさが変化すると仮定している。これは地価が高くなるほど、人口密度や利便性は高くなるため、社会的費用が大きくなることが前提にされていると考えられる。この研究で示された振動 1dB あたりの社会的費用変化分は以下のとおりである。

$$dLP = LP \cdot (\exp(-4.425 \cdot 10^{-3}) - 1) \quad (4.1)$$

ここで、 dLP ：1dB あたりの地価変動量， LP ：振動 1dB 増加あたりの外部効果である。

表 4-5 振動 1dB 増加あたりの外部効果

ケース	50万円/m ²	75万円/m ²	100万円/m ²
外部効果 (円/m ²)	2,220	3,330	4,440

出典：都市内交通のもたらす騒音および振動の外部効果の貨幣計測，環境科学会誌，Vo.9, No.3, 1996, p.401-409

ただし，この値は過去から将来にわたって発生する被害の合計値であるため，これを年間の値として換算する必要がある．社会的費用単価の係数 0.00444 について，50 年間の影響期間と仮定し，社会的割引率は 4%を用いて 1 年あたりの費用に換算するために下式の x を求める．これは，社会的割引率で計算された 50 年分の被害額の合計が 0.00444 になるような 1 年分の被害額を計算するものである．

$$0.00444 = \sum_{t=1}^{50} \frac{x}{(1+r)^t} \quad (4.2)$$

算出すると，1 年あたり社会的費用単価は下式となる．

$$\text{【1dB 増加あたりの地価変動分(円/m}^2 \cdot \text{dB)】} = 0.000207 \times \text{【地価(円/m}^2 \text{)】}$$

公示地価，地価都道府県調査を基に各区間に地価の代表値を設定し，区間ごとに 1dB あたりの地価変動分を算出する．地価変動分は沿道住民に与える社会的費用と考えられるため，これを社会的影響度とする．

以上より，振動リスクは以下の式で算出する．ここで，影響面積はポットホール 1 つあたり舗装 10m の両側に 20m ずつであると仮定し， $10\text{m} \times 20\text{m} \times 2(\text{両側}) = 400 \text{ m}^2$ とする．ポットホール発生期待数が 1 より大きい場合には，ポットホールの期待発生数だけ影響面積が大きくなることとなる．

$$R_9 = 12 \times A_i \times 0.000207 \times L_i \times P_{i9} \quad (4.3)$$

ここで， A_i ：振動が影響を与える面積(=400 m²)， L_i ：区間 i の地価， P_{i9} ：ポットホールが発生したときにおける振動による影響の発生確率．

ポットホールが生じれば必ず振動が発生することが想定されるため，振動リスクの影響確率は 100%とする．

振動リスクの算出例として都市部の MCI=2, 3 の地点と, 山間地 MCI=2, 3 の地区で試算した結果, 都市部の地区では MCI=2 で 137(万円/年)となり, 図 4-16 に示すように全リスク中の比率は 11%, MCI=3 で 38(万円/年)となり, 全リスク中の比率は 5%となった. したがって都市部では, MCI が小さくなる(悪くなる)と振動リスクが優先順位決定に寄与することも考えられる. 一方で山間地では, MCI=2 で 100(万円/年), 全リスク中の比率は 4%, MCI=3 では 28(万円/年)となり全リスク中の比率は 1%となった. したがって山間地は MCI が大きくなっても振動リスクは優先順位決定に寄与しないと考えられる.

表 4-6 都市部, 山間地におけるリスク算出の例

		都市部		山間地	
		MCI=2程度	MCI=3程度	MCI=2程度	MCI=3程度
基本情報	所在地	岐阜市宇佐東町	岐阜市宇佐東町	揖斐川町谷汲神原	揖斐川町谷汲神原
	区間ID	1042	1042	1574	1574
振動リスク算出条件	交通量	17,365	17,365	574	574
	MCI	2.00	3.00	2.00	3.00
	地価	90400	90400	6,600	6,600
	社会的費用単価	18.7	18.7	1.4	1.4
	影響面積(穴ぼこ一つあたり)	400	400	400	400
	穴ぼこ発生時の振動増加量(12dB)	12	12	12	12
	穴ぼこ発生確率	1523%	424%	1523%	422%
	振動リスク	1,367,801	380,573	99,862	27,698
リスク関連	道路事故リスク(円)	734	204	734	204
	救急救命アクセス経路リスク(円)	0	0	53,656	14,929
	観光・産業リスク(円)	2,657,702	739,483	58,564	16,295
	苦情リスク(円)	20,078	5,587	20,078	5,587
	事後対策工事リスク(円)	6,763,008	4,569,600	2,142,000	2,142,000
	事後対策工事による渋滞・迂回リスク(円)	1,745,283	1,745,283	57,687	57,687
	振動リスク	1,367,801	380,573	99,862	27,698
	リスク(円)	12,554,606	7,440,730	2,432,580	2,264,400
対策費(円)	6,763,008	3,968,000	1,860,000	1,860,000	

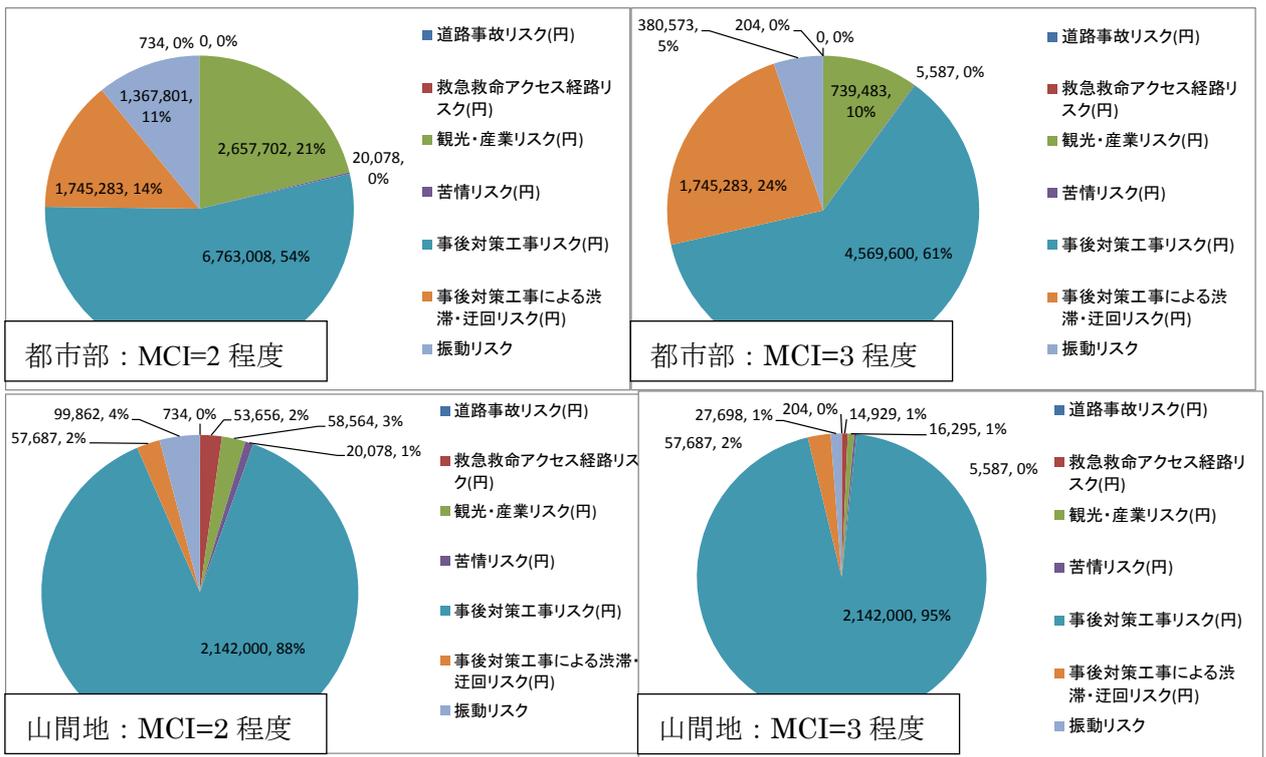


図 4-16 算出例におけるリスク構成

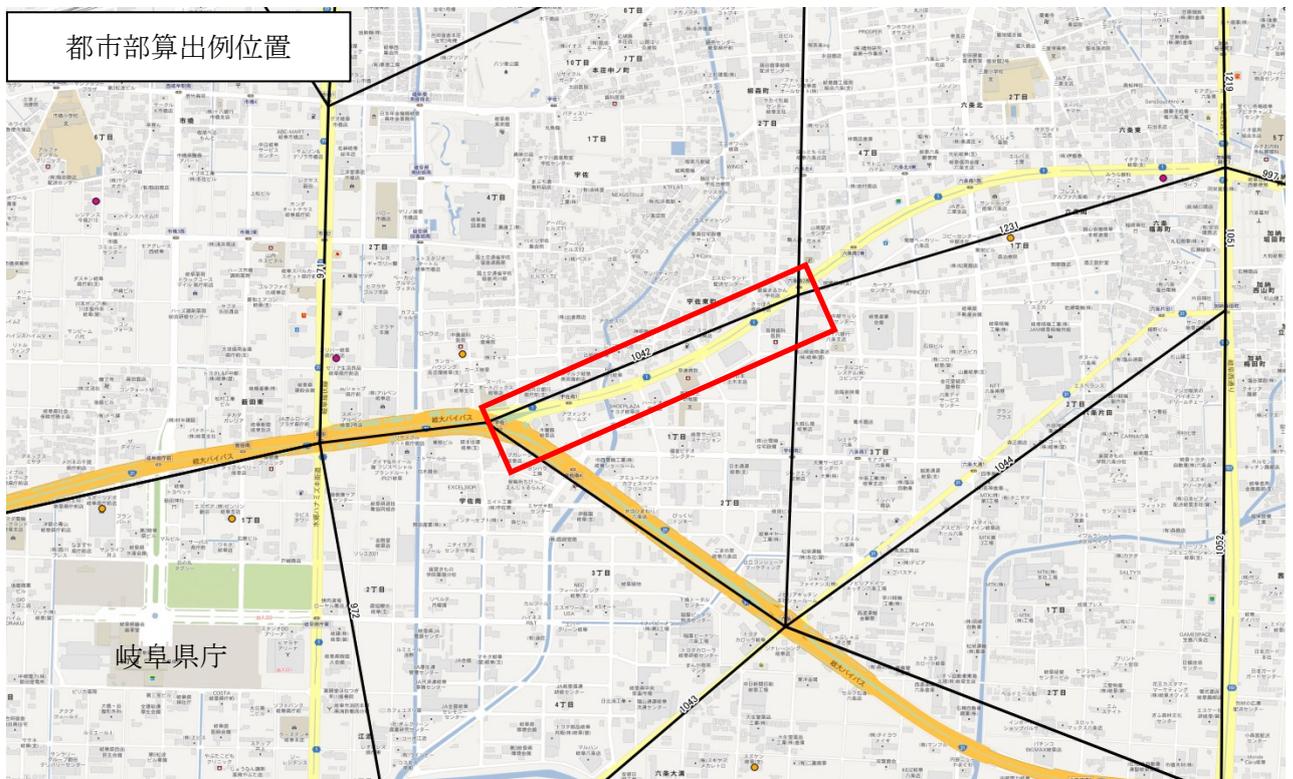


図 4-17 都市部の算出例位置図

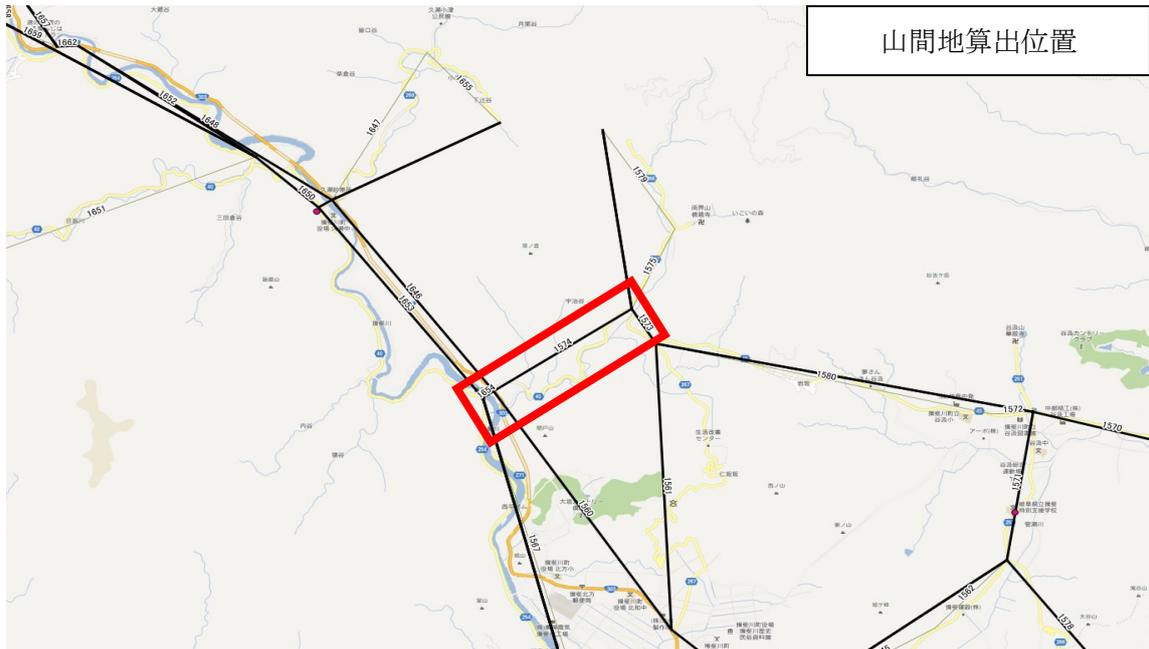


図 4-18 山間地の算出例位置図

(3) 迂回路の設定方法

迂回路の設定が県管理道路のみを利用する仮定を置いたため、冗長になっている課題について、修正するために考慮する利用者の経路選択方法は図 4-19 に示す2つが考えられる。

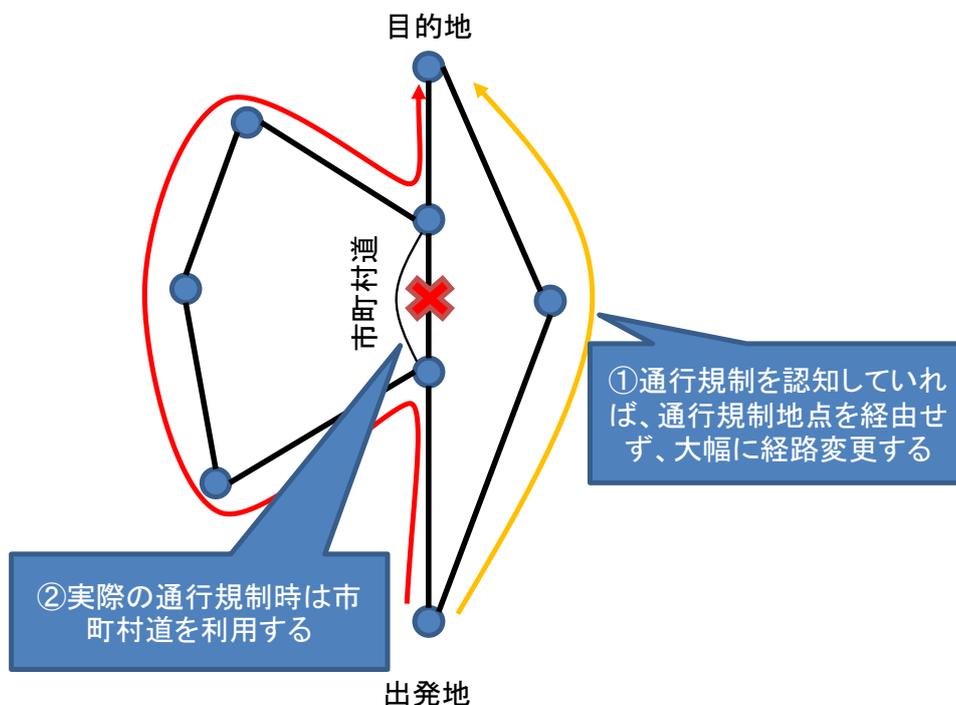


図 4-19 区間遮断時に考えられる利用者の経路選択方法

このうち①の大幅な経路変更は、以下の3点により考慮しない。A)落石の発生から撤去されるまでの時間は稀有に生じる大規模な落石を除き1日程度であると考えられること、B)短期間の通行規制間に利用者が認知し、経路変更することは考えにくいこと。以上より、②県管理道路に限定した迂回路より短縮可能な市町村道を利用した迂回路があれば、その迂回距離を採用する。市町村を含めた迂回路は、DRM等の広域的ですべての道路が網羅されている道路ネットワークデータを利用して、ダイクストラ法等を用いることで探索できる。

市町村道路を考慮することで図 4-20 に示すように県管理道路に限定した迂回路設定では山間地において冗長な迂回が必要であったのに対して、市町村道路を考慮することで旅行時間が適正な時間となる。ただし、市町村道路に異常が生じないことを前提としている。



図 4-20 市町村道を考慮した迂回経路の設定例

4.5 結語

本章では第 3 章に示したリスク評価に基づく総合維持管理手法による修繕計画立案を実務に導入するために必要となる条件を設定した。また、実務導入後 1 年が経過したため現地の担当者にヒアリングすることでリスク評価の課題を抽出し、改善策を検討した。

実務導入のために、以下の条件を設定した。①健全度が小さいにも関わらずリスク評価で抽出されない構造物を優先的に修繕する限界管理水準の設定、②リスク評価によって決定された修繕候補箇所は現地技術者が修繕の要否を確認後、修繕の意思決定をする運営ルールの設定、③事務所に配分される予算運用を考慮した修繕候補箇所選定ルールの設定、④橋梁における修繕候補箇所選定における同橋梁他部材の同期抽出ルールの設定。

1 年間の運用後にはリスク評価で抽出された箇所と事務所に選定した箇所のリスクを算出して比較分析した後、3 現地事務所の技術者ヒアリングを実施した。そこでは舗装における救命救急アクセス経路リスクの算出が過大になっていること、騒音・振動を考慮したり

スクが必要であること、迂回延長の設定が過大であることが課題として抽出された。

抽出された課題に対応するために、以下の 3 点の改善策を提案した。①救命救急アクセス経路リスク算出に用いる各リンクを救急搬送時に経由する対象人口の設定を修正した、②ポットホールによって生じる振動で低下する地価を社会的影響として定義した振動リスクを開発し、算出方法を示した、③県管理道路に限定すると冗長な迂回延長となる設定を修正するために、市町村道路を踏まえて迂回路を算出するよう修正した。

本章で述べたのは 1 年間の実務運用を終えた段階で抽出された課題に対応した内容である。したがって今後の運用においても課題が具現化されると考えられる。したがって、運用を継続する一方で定期的にリスク評価の算出方法など、この総合維持管理手法を改善する必要がある。

参考文献

- 1) 段差測定車による段差量と振動との関連把握，都土木技術支援・人材育成センター年報，2013，pp.85-90
- 2) 肥田野登，林山泰久，井上真志：都市内交通のもたらず騒音および振動の外部効果の貨幣計測，環境科学会誌，Vo.9, No.3, 1996， p.401-409

第5章 道路施設の破損リスクに基づく最適補修戦略決定モデルの構築

5.1 諸言

第3章で示したリスク評価に基づく総合維持管理手法の補修箇所選定方法は確実にリスクが高い区間の施設を補修選定するよう、区間リスクが最も高い区間を抽出し、その区間内において最もB/Cが大きい施設が選定される方法を採用した。しかし、施設をリスク評価することで、道路利用者が移動する間に暴露するリスクは利用者間の格差が明示される。施設の補修においては効率的に管理者、利用者の両者のリスクを低減させることが求められる。しかし、効率性の追求により一部の利用者が暴露するリスクが大きいにも関わらず、補修がされない状態があれば公平性の観点において課題となる。健全度のみで修繕優先度を評価する方法では、破損が生じないよう管理する水準を決定し、その通りに事業を実施することを前提とするため、利用者間格差を考慮する余地がない。

そこで本章では、リスクに基づいて施設の補修必要性が算出された上で、所与の予算制約の下で道路利用者が暴露するリスクの格差縮小と投資金額に対して低減させられるリスクの最大化を図る最適補修戦略決定モデルを構築する。

5.2 公平性を巡る議論の整理

5.2.1 衡平論の難点

小林¹⁾は公平性を巡る議論は極めて錯綜しており、一致した見解を見出すことは困難であると指摘している。この理由の1つとして公平性という言葉の多様性についてあげている。平等性 (equality), 衡平性 (equity), 無羨望 (envy-free), などがあり、これらの言葉は政治学, 経済学の学術分野でそれぞれ定義されているものの, 分野間で統一された定義は存在せず, 分野あるいは個人で混同されて用いられている, と述べられている。したがって「equity」に相当する衡平性で用語を統一する。

小林は衡平性の議論における第2の難点を, 「衡平性に関する議論の『不公平な性格』」と指摘している。衡平性の概念を「等しき者を等しく取り扱うこと」と単純でかつ抽象的に定義できるのは, ある何らかの同質性が尺度になり, この尺度上で「等しいか否か」を議論できるためである。したがって, ある尺度の上で公平性を求めることが他の尺度については不公平となることがある。第3の難点は衡平性の議論が単純な2分法では議論できない多元性を有している点を挙げている。たとえば機会の衡平性と結果の衡平性を比べたとき, 機会の衡平性を優先させる議論がある。しかし, これには多くの批判がある。たとえば機会の衡平が保たれときに, 結果の衡平を問わなければ, 結果として豊かなものが現れる。これは機会の衡平そのものが豊かなものの「言い逃れの方便」という批判の対象となる。また, 「機会の衡平」の定義が曖昧であるために, 何もかもが機会の衡平の対象となり, 結局は結果の衡平と同義となることもある。

以上のようにすべての公共投資において一元化された「不衡平」を定義して計測することは困難である。したがって, 目的に応じて社会的な合意が得られると推察される「衡平を測る尺度」を定義し, 援用するほかないと考える。

5.2.2 不衡平を測る2つのアプローチ

5.2.1に示したように衡平性の尺度は目的に応じて定義するが, 尺度を計測するアプローチは複数提案されている²⁾。具体的には, ある決められた尺度において個主体間の格差を計測するために, 社会厚生関数によるアプローチとローレンツ基準によるアプローチがある。

社会厚生関数によるアプローチとしては, 旧厚生経済学の立場から所得分布の社会厚生を順序付けるバーグソン・サミュエルソン社会厚生関数(以下BS社会厚生関数という)がある。社会状態全体の集合を X で定義したとき, ある社会状態を x で表現する。このときの社会厚生水準を表現する実数値関数(5.1)式に示す $W(x)$ で定義されたものがBS社会厚生関数である。

$$W(x) = W(u_1(x), u_2(x), \dots, u_n(x)) \quad (5.1)$$

これは何も制約のついていない最も一般的な形である。BS社会厚生関数に制約が付けら

れた以下の3つの社会厚生関数が知られている。①ピグー・ベンサム型社会厚生関数、②ベルヌーイ・ナッシュ型社会厚生関数、③ロールズ社会厚生関数、ピグー・ベンサム型社会厚生関数は個人効用の単純和で定義される。そのため、関数が示す値は個人間の効用格差に無関心である。ベルヌーイ・ナッシュ型社会厚生関数は個人効用の単純積である。ロールズ社会厚生関数は最も水準の低い個人の効用で定義される。社会厚生を最大化するためには、最も水準を低い個人の効用を最大化することが求められる。したがって、社会厚生最大を測ることで個人間の格差が減少することから、衡平性を示す1つの関数である。

ローレンツ基準によるアプローチは、個人効用の分布を用いて不衡平の尺度を示す。 i を経済主体の番号、 x_i を i の効用、 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ を効用分布としたとき、効用の小さいものから順に並べ替える。横軸に最大となる個人の効用を1とする各個人効用の比率、縦軸にその累積分布率をとり、効用分布 x をプロットしたとき、図 5-1 に示すような原点から $(x,y)=(1,1)$ まで至る曲線をローレンツ曲線という。このとき、原点と $(x,y)=(1,1)$ を結ぶ対角線を完全平等線といい、すべての個人効用が同値であることを示す。したがって、ローレンツ曲線は完全平等線に近づくほど衡平であると言える。

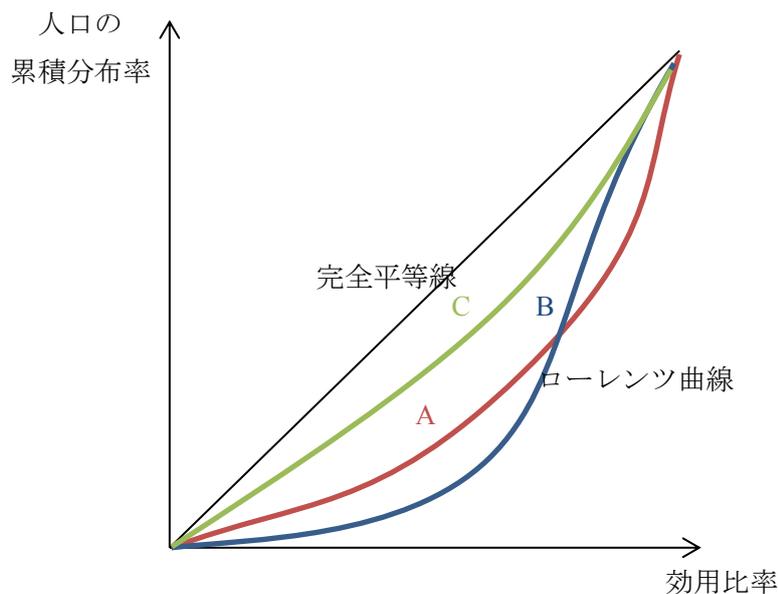


図 5-1 ローレンツ曲線

たとえば、図 5-1 において曲線 A と曲線 C を比較すると、曲線 C の方が衡平な社会状態であるといえる。しかしながら、曲線 A と B を比較すると、効用比率が小さいときは $A > B$ であるが、効用比率が大きいときは $A < B$ となる。すなわち、曲線 A は曲線 B の社会状態と比べると「効用が比較的小さい個人が多いが、効用が多い個人も多い」という状態を示す。したがって、いずれの社会状態がより衡平であるか特定できない。このようなときに、効用分布 x は所得不平等尺度による順序付けが可能である。

所得不平等尺度は、分散、変動係数、相対平均偏差、対数分散、タイル尺度、ジニ係数、ダルトン尺度、アトキンソン尺度、コルム尺度の9つが提案されている。曲線A,Bのようにローレンツ曲線が交錯する複数の効用分布において9つの所得不平等尺度で効用分布間の順序を比較すると、必ずしも整合しない。したがって、どの尺度を採用するかによって、衡平の状態が異なる。しかし、どのような条件においてどの尺度が適しているか等の議論は筆者が知る限りされていないため、目的に応じて尺度を設定する必要がある。

以上より、不衡平を測る方法としては、BS社会厚生関数のうち、ロールズ型の社会厚生関数とローレンツ曲線に基づく9つの所得不平等尺度がある。

5.3 衡平性の定量的評価の道路施設維持管理への適用

道路ネットワーク上に存在する施設によって生じる利用者リスクは、その施設が所在する道路区間を通過する全ての利用者が暴露する。道路利用者1人に着目すると、暴露するリスクは移動の起終点間の経路に存在する全ての施設の利用者リスクの総和となる。当然ながら、各利用者が移動に際して暴露する利用者リスクの総和は起終点やその間の経路によって異なるため、利用者間に格差が生じることになる。

ここで、各利用者は、暴露する利用者リスクの総和を管理者による情報公開により把握できる状態を考えてみよう。この前提にたてば、利用者は自身の曝露するリスクを知りつつも当該経路を選択していると思なすことができるため、利用者間における利用者リスクの格差の認知と経路の選択行動について、2つの状態が考えられる。ひとつは利用者が利用者リスクを認知し、回避することで経路選択行動が変化する場合。もうひとつは利用者が利用者リスクを認知しているものの、自らに生起すると考えず、所要時間のみで経路選択する場合である。

利用者が、利用者リスクを考慮して経路選択行動を行う場合には、時間価値と利用者リスクの和がリンクコストとなり、それが最小となる経路を選択することとなる。このとき、利用者にはリスクの高い経路を避けることができるため、利用者リスクを回避する機会の衡平¹³⁾が保たれているといえる。機会の衡平が保たれる条件下では社会的リスクを効率的に減じるような補修戦略を決定すればよい。

利用者が利用者リスクを考慮せず所要時間のみで経路選択する場合、暴露する利用者リスクが著しく大きい経路も選択される。効率性のみに基づいて補修戦略を決定するとすれば、もし著しく曝露する利用者リスクが大きい利用者がいたとしても、その利用者の利用経路上に社会的リスクを効率的に減じることができる施設がなければ、この利用者の利用者リスクを減ずる対策は実施されない。このような場合、より曝露する利用者リスクが小さい利用者のそれが改善することとなるため、結果的に曝露リスクの格差が相対的に増加することになる。管理者が利用者格差を認知していながら格差是正に配慮した投資をしないのは公共投資の衡平性の観点において課題となる。

利用者が曝露するリスクの発生確率を考慮すると、利用者は、利用者リスクを把握していても所要時間のみで選択されていると考えた方が現実に即していると考えられる。したがって利用者が所要時間のみで経路選択すると考えた場合において、社会的リスクの削減だけでなく、利用者間の公平性を高めることも目的とした補修戦略を決定する方法を構築する。

なお、前述の通り、公平性に対しては様々な定義が存在している。そのため、以下では補修戦略の決定における公平性の評価アプローチを整理し、本研究の立場を示すこととする。

5.4 公平性指標の適用

5.4.1 公平の捉え方

公平の捉え方は大分すると①結果、②機会の2つの軸があるとされている¹⁵⁾。②機会の公平とは、結果的に生じうる事象に対して、利用者が選択する機会が与えられているかどうかにより判定する。今回対象とする社会基盤構造物の災害発生リスクについては、利用者が補修の意思決定に関わることがないため、機会を担保することが困難である。一方で、結果の公平とは、なにがしかの対策によって、得られる帰結（結果）に公平性が保たれているか、を評価する。そのため、本研究では、①結果の公平を図ることとする。

5.4.2 公平の対象

公平の対象は①個人、②領域の2つの軸があるとされている¹⁵⁾。本研究では利用者間のリスク格差について問題提起しており、個人単位での計測が可能である。そのため、①個人間の公平を図る。ただし、ここで定義している個人とは、道路利用者のうち「交通量1台あたり」を想定しており、全市民における個人間の公平は対象としていない。本研究で定義した道路施設によるリスクは、道路利用者だけに生じる。そのため、個人を交通量1台と置き換えても差し支えないと考える。

5.4.3 公平の尺度

公平の尺度は①効用、②資源の2つが考えられる。本研究では公平性における尺度の要素である利用者リスクを負の効用として捉える。そのため、①効用を尺度とした公平を図る。

5.4.4 評価の単位期間

単位期間とは、公平性の尺度を計測する時期を指す。施設の補修においては、年度の補修計画との整合を考慮すると年度末までに実施した補修事業によって変化したリスクを計

測することとなる。評価の単位期間は①単年、②プロジェクトライフ、③任意の複数年の3つが考えられる。②または③では、それぞれの最終年に衡平性を計測する。この場合では、最終年までの経過においてはリスク格差が看過される可能性がある。そのため、本研究では①の毎年を単位期間として衡平を図る。

5.4.5 評価の時点

評価の時点は①現在と施策後の差をとる、②施策後の状態をとる、の2つが考えられる。①では、現在の状態において利用者間のリスク格差が大きい場合においても施策による変分だけが計測されることとなる。そのため、①の手法では、施策後に残存するリスクが許容できない大きさであっても看過されることが想定される。そのため、②施策後の状態における衡平を図る。

5.4.6 評価尺度の単位

評価の単位は、①利用者が移動中に被る利用者リスク、②利用者が移動中に被る単位距離あたりの利用者リスク、の2つが考えられる。旅行延長が長くなれば経路中に存在する施設数は多くなりやすいため、当然利用者リスクが大きくなることが想定される。②はこれに配慮して旅行延長が長い利用者の利用経路に補修が集中しないよう、合計リスクを単位距離あたりに除して評価するものである。この場合、長距離を旅行する利用者の暴露する合計リスクが許容できない場合でも、単位距離あたりにすると小さくなってしまい補修がされずに看過されることが想定される。そこで、旅行延長の長短に関わらず移動中に暴露する合計利用者リスクが衡平になるような補修戦略をとるため、①利用者が移動中に被る利用者リスクの衡平を図る。

以上より衡平性の評価アプローチは表 5-1 に示すように整理できる。

表 5-1 本研究で取り扱う衡平性の定義

	①	②	③
衡平の捉え方	垂直的(結果)	水平的(機会)	-
衡平の対象	個人(利用者1人)	領域(地域)	-
衡平の尺度	効用	資源(投資量)	-
評価の単位期間	単年	プロジェクトライフ	任意の複数年
評価の時点	現在と施策後の差	施策後の状態	-
評価尺度の単位	利用者が移動中に被る利用者リスク量	利用者が移動中に被る単位距離あたりの利用者リスク量	-

5.5 最適維持管理計画策定モデル

5.5.1 利用者の経路，経路交通量算出方法

道路利用者の移動起終点とその交通量は，交通需要予測で用いる OD 交通量で計測できる．OD 間の経路と経路交通量は交通量配分によって経路交通量を求めることで計測できる．経路交通量は，確定的利用者均衡配分でリンク交通量の更新時に経路とその交通量を記憶していく積み重ね法によって求める¹⁶⁾．ただし，この方法で得られる経路交通量は，パスフローが連続的に変化するため，一意に決められないことに注意が必要である．本研究では，補修戦略の決定方法に焦点を置くため，経路交通量の厳密な解法は省略し，簡易的に算出できるこの方法を採用する．なお，本研究では配分途中に見つかった経路交通量を用いることとし，経路交通量の推定方法については取り扱わないが，無限にある均衡フローのうちで最も尤もらしい経路交通量を得る手段として，エントロピー最大化を用いることも可能である⁷⁾．

5.5.2 公平性評価

利用者が OD 間を移動中に暴露するリスクを公平性尺度の要素とする．施設 i を通過するひとりの利用者が被る利用者リスクを u_i とする．ここで，経路 j に施設 i が存在するか否かを示す状態変数行列 \mathbf{y} を定義する．総数 N 個の施設があるとき，ある経路 j に存在する施設は $\mathbf{y}^j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj})'$ で表現できる． \mathbf{y} の要素は存在するかしないかを示す二値変数であり，1 であれば存在することを示す．補修意思決定前（状態 0）における経路 j の利用者が暴露する利用者リスク U_{j0} は以上より式(5.2)で表現できる．

$$U_{j0} = \sum_{i=1}^N y_{ij} u_i \quad (5.2)$$

施設の補修実施有無を示す状態ベクトル \mathbf{x} （以下補修戦略 \mathbf{x} ）を定義し， $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)'$ で施設 i の補修をするか否かを表現する． \mathbf{x} の要素は 1 であれば補修することを示す．施設は補修されると健全度が回復することで利用者リスクが 0 になると仮定する．補修によってリスクが解消した後の状態 d における経路 j の利用者リスク U_{jd} は式(5.3)で表現できる．

$$\begin{aligned} U_{jd} &= U_{j0} - \sum_{i=1}^N y_{ij} x_i u_i \\ &= \sum_{i=1}^N (1 - x_i) y_{ij} u_i \end{aligned} \quad (5.3)$$

上記のとおり U_{j0} は各利用者が移動にあたり暴露する合計リスクである．ここで，すべての道路利用者は均等に道路利用に対して課税されていると考える．このとき，ある利用者の U_{j0} が他の利用者と比較して大きいとき，課税に対して不均衡な道路が供用されているといえる．したがって， U_{j0} が大きい経路に所在する施設を優先的に補修するような戦略をとることで不均衡の解消を図る．

衡平性の尺度としては、所得不平等尺度のうち、計算処理が比較的簡単な分散を衡平性指標に用いることとする。すなわち、衡平性指標は、 U_{jd} について全ODペアで集計した分散で定義する。一般的に U_{jd} が大きい経路に所在する施設を補修すれば、利用者リスクの利用者間における分散値は小さくなる。リスクが負の値とならないことを考慮すると、利用者間の分散値を小さくするような補修戦略 x を決定することで、 U_{jd} が大きい経路に所在する施設を優先的に補修でき、結果的に不平等の解消が図られるといえる。

経路の総数が M 、経路 j の交通量が h_j として、衡平性に関する目的関数 z_1 は式(5.4)で記述できる。

$$z_1 = V(U_{jd}) = (E(U_{jd}^2) - (E(U_{jd}))^2) \quad (5.4)$$

$$E(U_{jd}) = \frac{1}{\sum_j h_j} \sum_j h_j \sum_i (1-x_i) y_{ij} u_i \quad (5.5)$$

$$V(U_{jd}) = \frac{\sum_j h_j \sum_j (h_j \{ \sum_i (1-x_i) y_{ij} u_i \}^2) - (\sum_j \{ h_j \sum_i (1-x_i) y_{ij} u_i \})^2}{\sum_j h_j} \quad (5.6)$$

5.5.3 効率性指標

衡平性に関する目的関数は、利用者リスクを尺度の要素として定義した。一方で効率性を測るときには、利用者リスクだけではなく、管理者リスクを考慮する必要がある。ネットワーク上における利用者リスクと管理者リスクの総和を効率性指標と定義する。

施設 i がもつ管理者リスクを g_i とする。利用者リスクと同様に、施策後の状態 d における経路 j の管理者リスク G_{jd} は式(5.7)で表現できる。

$$G_{jd} = G_{j0} - \sum_{i=1}^N x_i g_i = \sum_{i=1}^N (1-x_i) g_i \quad (5.7)$$

ここで、 G_{j0} ：補修意思決定前の管理者リスクの総和。

利用者リスクと管理者リスクの総和を効率性に関する目的関数 z_2 として定義し、式(5.8)で記述できる。

$$z_2 = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N h_j (1-x_i) y_{ij} u_i + \sum_{i=1}^N (1-x_i) g_i \quad (5.8)$$

5.5.4 補修箇所選定モデルの定式化

補修箇所選定モデルでは，所与の年予算制約の下で衡平性指標と効率性指標の重み付き和を最小化する問題を解く．式(5.4)，式(5.8)より，衡平性指標，効率性指標は対策ベクトル x の線形結合となっていることから，この問題は二値整数線形計画問題として定式化できる．

z_2 の効率性指標は社会的リスクの総和であり，貨幣価値として評価される値である．一方で， z_1 の衡平性指標は利用者リスクの分散であるため，貨幣価値として評価できる指標ではない．そこで，衡平性に対する貨幣価値原単位を表現するパラメータとして α を導入する． α は任意の値で与えることができる．値は補修意思決定者が利用者の意見や供用状態を鑑みて設定する．以上から，最適化問題は以下のように定式化できる．

$$\min z = \alpha z_1 + z_2 \quad (5.9)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^N c_i x_i \leq budget \quad (5.10)$$

ここで， α ：衡平性の価値基準原単位パラメータ， c_i ：施設 i の補修費用， $budget$ ：年補修予算．

5.5.5 最適補修戦略の解法

本研究では定式化した問題を繰り返し解くことで，年度ごとの最適対策箇所を決定していく．年度が経過するたびに劣化予測により施設の健全度を更新し，補修意思決定前に利用者リスク，管理者リスクを算定する．この計算を設定したプロジェクトライフに至るまで繰り返す．

また，求解には Matlab を使い，最適化問題においては整数計画問題を解く高速アルゴリズムである Gurobi を Matlab から呼び出すことにした．

5.6 最適補修戦略決定モデルの挙動確認

構築した最適補修戦略決定モデルの挙動を確認するため仮想の道路ネットワークで試算する。試算対象は道路舗装とする。

5.6.1 試算条件

仮想ネットワークは25ノード、40リンクの格子状として、**図 5-2**に示すようにOD交通量(台/日)を設定した。交通容量は8800(台/日)、ゼロフロー時所要時間は2.0(分)とする。経路交通量はJICA STRADAのUser Equilibrium Assignmentで算出する。User Equilibrium Assignmentは、利用者均衡配分により交通量を推計するものであり、旅行時間をリンクコストとして算出する。これは前述のとおり、利用者はリスクを認知しているが自分に生起すると考えておらず、経路選択にリスクが考慮されない状態を前提としている。リンクは各1kmであり、100mを1区間として、400区間が補修戦略の対象となる。健全度は値が小さいほど劣化した状態を示す。健全度を乱数で与えた10ケースの結果でモデルの挙動を確認する。この試算では、モデル挙動確認を目的とするため、各ケースで目的関数を効率性の項のみにした場合と、均衡性の項のみにした場合、すなわち、重みパラメータを0としたとき(以下条件①)と無限大としたとき(以下条件②)、LCC型で多く採用される健全度が小さい順に抽出したとき(以下条件③)の3つの補修戦略について求める。

試算は1年間、予算1億円の最適補修戦略を求めて、劣化の影響は考慮しない。OD交通量は**図 5-2**に示すように設定した。舗装の破損確率、補修費用は健全度に応じて**表 5-2**、**表 5-23**に示すように設定した。

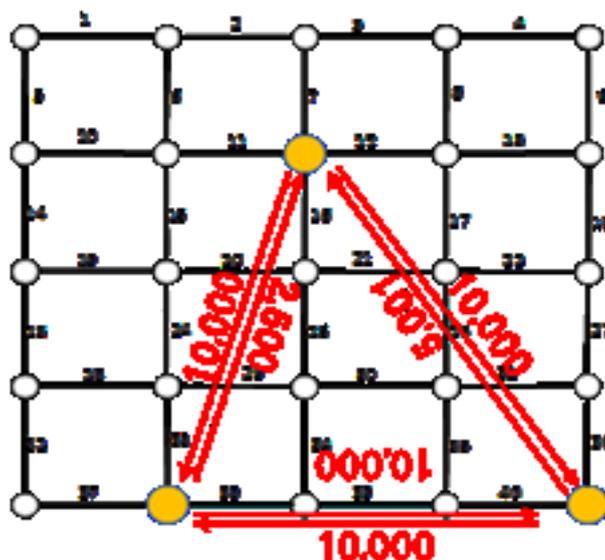


図 5-2 仮想ネットワーク

表 5-2 破損確率

健全度	年あたり破損確率
0	0.5
1	0.4
2	0.3
3	0.2
4	0.1
5	0.05
6	0.01

表 5-3 補修費用

健全度	補修費用 (円/㎡)
0	4,900
1	4,900
2	4,900
3	3,100
4	3,100
5	1,800
6	1,800

5.6.2 リスク評価

利用者リスクは舗装にポットホールが発生したときに生じる当該区間の旅行時間増加を対象とする。ポットホールが発生すると1日間交通容量が1,000（台/日）減少すると設定して、BPR関数で通常時と交通容量減少時の旅行時間を算出する。以上より舗装区間 i のリスクは式(5.11)、式(5.12)で算出する。

$$u_i = p_i(t_{i1} - t_{i0})k \quad (5.11)$$

$$t_{ia} = t_{ia0} \left\{ 1 + \phi \left(\frac{\sum_{j=1}^N h_j y_{ij}}{Q_{ia}} \right)^\phi \right\} \quad (5.12)$$

ここで、 p_i ：施設*i*が破損する発生確率、 k ：時間価値(40.01(円/台))、 t_{ia} ：区間*i*の所在するリンク利用者均衡走行時間（通常時*a*=0、損傷時*a*=1）、 t_{ia0} ：区間*i*の所在するリンクゼロフロー走行時間（通常時*a*=0、損傷時*a*=1）、 Q_{ia} ：区間*i*の所在するリンクの交通容量（通常時*a*=0、損傷時*a*=1）。

施設*i*に関する管理者リスクは、事後対策費用が生じるリスクを対象として、式(5.13)で算出する。

$$g_i = p_i c_{id} \quad (5.13)$$

ここで、 c_{id} ：施設*i*が破損したときの対症療法的補修費用。

また、対症療法的に補修したときの費用は表 5-2 破損確率 表 5-3 補修費用中の健全度0での補修費用4,900（円/㎡）とする。

5.6.3 試算結果

上記の条件で試算して得られた施策前の利用者リスク、条件①、条件②の累積頻度を10ケースで平均して図 5-3に示す。条件②はすべての経路における利用者リスクが23円以下となった。一方で条件①は18%の利用者が150円以上の利用者リスクに暴露し、条件③では51%の利用者が150円以上の利用者リスクに暴露されている。これより、条件②が最も利用者間の格差を小さくでき、条件①、条件③の順に利用者の格差が小さくなっていることが確認できた。なお、グラフ中の各条件で得られた結果の線より左上部の面積がネットワーク

クに残存する利用者リスクである。所得等の配分で一般的に効率と衡平を議論するときには、この面積で効率性と、頻度分布の形状で衡平性を比較する機会が多いが、このグラフでは面積、分布形状のいずれも条件①が優位な結果となる。これは利用者リスクの頻度分布であるため、管理者リスクは無関係であることによる。効率性のみを考慮した場合には管理者リスクも減少させるような最適解を選択するため、利用者リスクの減少量が大きくならないこともあるためである。

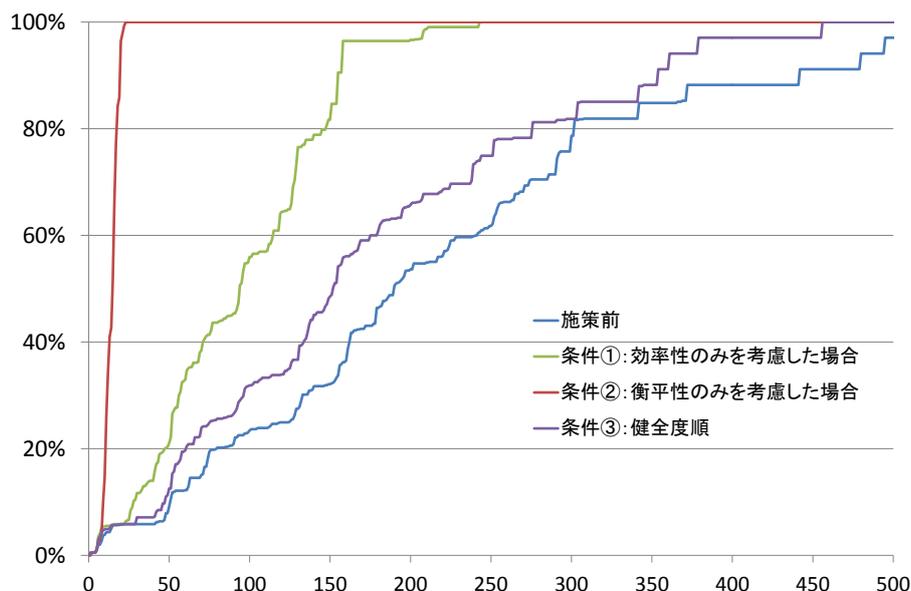


図 5-3 経路合計利用者リスク累積頻度

図 5-3 の暴露リスクが小さい値の範囲を拡大して図 5-4 に示す。暴露リスクが 5 から 9 円の範囲では、条件①、条件③の方が条件②よりも利用者頻度が大きい。この原因は以下 2 点によると考えられる。

- A) 条件②では利用者格差を縮小するために暴露リスクが大きい経路から選定しやすい。したがって、施策前の暴露リスクが小さい経路にある箇所は選定されにくい。
- B) 条件①、③では利用者格差に関心であるため、社会的リスクが大きい箇所から選定する。そのため、経路の暴露リスクが小さい箇所でも抽出される。

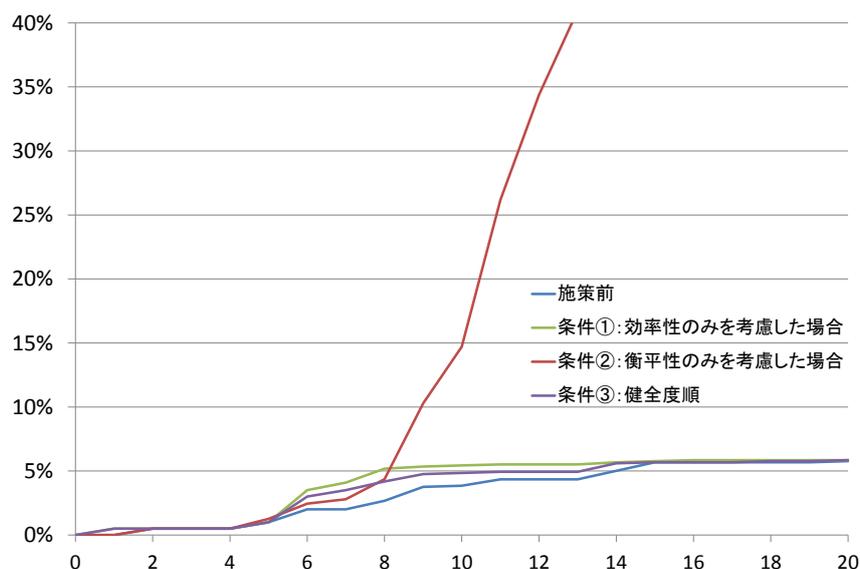


図 5-4 経路合計利用者リスク累積頻度（利用者リスクが小さい区間を拡大）

ネットワーク全体における施策前、施策後の利用者リスク、管理者リスク合計と、補修による減少率を整理して表 5-4 に示す。利用者リスクはどのケースにおいても条件②は利用者リスクを92%～95%以上低減できている。一方で条件①は29%～75%と低減率が高いケースと低いケースがある。これは、施策前の管理者リスクの値が利用者リスクの16～29倍となり支配的であるため、条件①では利用者リスクが補修戦略の決定への影響が小さいことが理由である。条件③は利用者リスクに無関心であるため、6%～30%と非常に小さい。

管理者リスクの試算10回における平均低減率をみると、条件①は23%、条件②は16%、条件③は24%と、条件③が最も大きく減少させていることがわかる。これは、条件③が利用者リスクに無関心で健全度が小さい箇所、すなわち管理者リスクが大きい箇所を選定しているためである。したがって、LCC型マネジメントにおいて採用されている健全度順で選定する方法は管理者リスクが最小になることが確認できる。

管理者リスクと利用者リスクの合計、すなわち社会的リスクの試算10回における平均低減率は条件①が24%、条件②では20%、条件③では23%となり、条件①が最も効率的にリスクを低減していることが確認できた。また、条件②は社会的リスクの低減量は条件③より小さくなることがわかった。条件②と条件③の平均リスク低減量は43,691と51,691であり、条件③の方が1.18倍社会的リスク低減量は大きい。

表 5-4 最適補修戦略試算結果一覧

単位は千円/年, ()内はリスク低減率

		case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10	平均
利用者リスク	施策前	10,064	10,247	8,066	10,981	9,151	11,680	11,614	6,822	13,053	10,794	10,247
	条件① 効率性のみ	3,979 (60%)	2,589 (75%)	3,826 (53%)	6,671 (39%)	5,065 (45%)	4,451 (62%)	4,939 (57%)	4,811 (29%)	4,315 (67%)	4,490 (58%)	4,513 (55%)
	条件② 公平性のみ	485 (95%)	627 (94%)	579 (93%)	859 (92%)	549 (94%)	905 (92%)	779 (93%)	790 (88%)	830 (94%)	757 (93%)	716 (93%)
	条件③ 健全度順	7,811 (22%)	8,961 (13%)	7,043 (13%)	9,223 (16%)	6,775 (26%)	8,232 (30%)	10,887 (6%)	5,488 (20%)	8,715 (33%)	9,782 (9%)	8,292 (19%)
	合計											
管理者リスク	施策前	231,594	218,765	212,214	213,655	201,375	225,454	205,011	197,534	207,138	207,103	211,984
	条件① 効率性のみ	183,231 (21%)	173,146 (21%)	163,851 (23%)	164,949 (23%)	152,669 (24%)	177,434 (21%)	160,078 (22%)	148,142 (25%)	159,118 (23%)	161,141 (22%)	164,376 (23%)
	条件② 公平性のみ	193,418 (16%)	184,911 (15%)	176,851 (17%)	178,772 (16%)	172,838 (14%)	189,302 (16%)	170,848 (17%)	164,880 (17%)	170,162 (18%)	176,268 (15%)	177,825 (16%)
	条件③ 健全度順	181,859 (21%)	169,030 (23%)	162,479 (23%)	163,920 (23%)	151,640 (25%)	175,719 (22%)	155,276 (24%)	147,799 (25%)	157,403 (24%)	157,368 (24%)	162,249 (24%)
	合計											
合計 (社会的リスク)	施策前	241,658	229,013	220,280	224,636	210,526	237,133	216,625	204,355	220,190	217,897	222,231
	条件① 効率性のみ	187,210 (23%)	175,735 (23%)	167,677 (24%)	171,619 (24%)	157,734 (25%)	181,885 (23%)	165,017 (24%)	152,953 (25%)	163,432 (26%)	165,631 (24%)	168,889 (24%)
	条件② 公平性のみ	193,903 (20%)	185,538 (19%)	177,429 (19%)	179,631 (20%)	173,387 (18%)	190,206 (20%)	171,627 (21%)	165,670 (19%)	170,992 (22%)	177,025 (19%)	178,541 (20%)
	条件③ 健全度順	189,669 (22%)	177,992 (22%)	169,522 (23%)	173,142 (23%)	158,415 (25%)	183,951 (22%)	166,163 (23%)	153,287 (25%)	166,118 (25%)	167,150 (23%)	170,541 (23%)
	合計											

この試算によって、条件①の効率性のみを考慮した場合には社会的リスクを最小化できることにくわえて、条件③の健全度順に抽出する場合と比べて利用者の暴露リスクの格差縮小も図られることがわかった。一方で、公平性のみを考慮する条件②では利用者間の格差は小さくできるが、社会的リスクの減少量が小さい。すなわち、投資効率が小さい。したがって、効率性と公平性の重みを決定するパラメータ α の適切な設定が重要である。このパラメータは、試算結果で示される利用者間の格差と効率性を鑑みて、利用者の合意が得られると推察される値を管理者が決定する必要がある。

条件①と条件②における補修戦略で決定された補修箇所を健全度、交通量でクロス集計した。例としてcase1の補修箇所について表 5-5、表 5-6に示す。表中の数字は補修箇所数である。条件①では健全度3未満の箇所が選定されている。条件②で選定された箇所は健全度6~7の箇所でも選定されており、交通量が7,000(台/日)未満の箇所は選定されていない。すなわち、条件②では健全度が低くても交通量が少ない箇所は補修されない。ここで、リスクの算出精度が十分であれば、健全度が低い箇所もリスクが大きい箇所は補修する必要が大きい。しかしながら実運用上は著しく健全度の低い箇所では設定値以上の破損確率、影響度が生じることも想定される。そのため管理限界を設定して、超過する箇所を優先的に補修するルールが本モデルのほかに必要である。

表 5-5 条件①の補修箇所 の健全度-交通量分布

	<1000	<2000	<3000	<4000	<5000	<6000	<7000	<8000	<9000	<10000	<11000	<12000	<13000	<14000	<15000	総計
0-1	0	0	0	4	2	4	3	1	4	2	1	2		3		26
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				1	1	2
2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0		1	1
3-4	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0
5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0			0
6-7	0	0	0	0	0	0	0		0		0	0		0	0	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
8-9	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
9-10	0	0	0	0	0		0		0	0	0		0	0	0	0
総計	0	0	0	4	2	4	3	1	4	2	1	2	0	4	2	29

表 5-6 条件②の補修箇所 の健全度-交通量分布

	<1000	<2000	<3000	<4000	<5000	<6000	<7000	<8000	<9000	<10000	<11000	<12000	<13000	<14000	<15000	総計
0-1	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2	1	2		3		12
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1				1	1	3
2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1			1		1	4
3-4	0	0	0	0	0	0	0		0	2	2	1	4	2	2	13
4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1					1
5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0			0
6-7	0	0	0	0	0	0	0		0		1	0		2	0	3
7-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
8-9	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
9-10	0	0	0	0	0		0		0	0	0		0	0	0	0
総計	0	0	0	0	0	0	0	1	4	6	5	3	5	8	4	36

5.7 結語

本章では、道路施設のリスクが評価されている条件において、効率性と衡平性を明示的に表現した最適補修戦略決定モデルを構築した。衡平性は議論が錯綜しており一義的な定義が困難であるため、本研究における「衡平な状態」を定義した。本研究における「衡平」とは、利用者が出発地から目的地までに経由する区間で暴露する道路施設の利用者リスク合計値の分散が小さいこと、と定義した。これに加えて、修繕により減少した施設のリスクの合計値を効率性の指標とした。衡平性と効率性の重みつき線形和を目的関数として、最小とする補修戦略を求めるモデルを構築した。

構築した最適補修戦略決定モデルについて、衡平性の項のみを目的関数とした場合、効率性の項のみを目的関数とした場合で仮想ネットワーク上において試算し、モデルの挙動を確認した。衡平性のみを考慮した最適戦略では、効率性のみを考慮した最適戦略、健全度が小さい箇所から修繕する戦略と比べて、利用者間の格差が小さくなった。しかしながら社会的リスクの低減量は小さく、投資効率が小さいこともわかった。したがって、効率性と衡平性の両者の重みを決定するパラメータ α を適切に設定する必要がある。

衡平性のみを考慮した場合では、健全度が著しく低い場合でも補修されないケースがある。そのため、管理限界を設定して優先的に補修するルールが本モデルのほかに必要となる。

今後は、実在する構造物、ネットワークを対象にモデルの適合性を検証し、目的関数の

衡平性重みパラメータを設定したときの補修戦略の挙動について確認する必要がある。また、第 4 章に示したような実務で採用するための制約条件を加えることで、実務への適用時における衡平性、効率性の与える影響を確認する必要がある。

参考文献

- 1) 小林潔司：地域間衡平性を巡る論点と課題，季刊運輸政策研究，Vol.3，No.3，pp.015-026，2000.
- 2) 依田高典：不確実性と意思決定の経済学，日本評論社，1997.

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本研究では、道路維持管理において破損したときの利用者、管理者の両者への影響をリスクとして定量評価し、修繕の優先順位を決定する枠組みについて提案した。具体的には以下のとおりである。

第3章では道路施設のリスク評価に基づく総合維持管理手法の枠組みを構築した。具体的には、道路施設が損傷する確率と損傷したときに生じる社会的費用の積をリスクと定義して、リスク項目8種類の算出法を示した。リスク評価の値を用いて、区間リスクの大きさと、各施設のB/Cから修繕優先順位を決定する方法について示した。構築したリスク評価に基づく総合維持管理手法で舗装、橋梁、危険斜面を対象施設とし、これらを有する4路線を対象とした試算によりモデルの挙動を確認した。その結果、4路線のリスク評価試算ではどの工種においてもリスクが偏ることがなく、舗装、橋梁、危険斜面のそれぞれが対策の対象となることを示した。また、対策箇所選定の試算では、ネットワークの弱点となる区間、すなわち区間リスクが大きい区間から、工種に関わらずリスクが軽減するように対策箇所が選定されることを確認した。

第4章ではリスク評価に基づく補修戦略を岐阜県において実務に導入するために必要となる条件設定等を検討した。具体的には以下の4点を設定した。①健全度が小さいにも関わらずリスク評価で抽出されない構造物を優先的に修繕する限界管理水準の設定、②リスク評価によって決定された修繕候補箇所は現地技術者が修繕の要否を確認後、修繕の意思決定をする運営ルールの設定、③事務所に配分される予算運用を考慮した修繕候補箇所選定ルールの設定、④橋梁における修繕候補箇所選定における同橋梁他部材の同期抽出ルールの設定。また、実務導入から1年が経過したときに、3つの現地事務所の担当技術者へのヒアリングを行い、リスク評価手法の課題を抽出した。そこでは舗装における救命救急アクセス経路リスクの算出が過大になっていること、騒音・振動を考慮したリスクが必要であること、迂回延長の設定が過大であることが課題として抽出された。抽出された課題に対応するために、以下の3点の改善策を提案した。①救命救急アクセス経路リスク算出に用いる各リンクを救急搬送時に経由する対象人口の設定を修正した、②ポットホールによって生じる振動で低下する地価を社会的影響として定義した振動リスクを開発し、算出方法を示した、③県管理道路に限定すると冗長な迂回延長となる設定を修正するために、市町村道路を踏まえて迂回路を算出するよう修正した。

第5章では第3章で構築したリスク評価手法を用いて、修繕箇所選定の手法に公平性の

概念を加えた最適補修戦略決定モデルを構築した。衡平性は議論が錯綜しており一義的な定義が困難であるため、本研究における「衡平な状態」を定義した。本研究における「衡平」とは、利用者が出発地から目的地までに経由する区間で暴露する道路施設の利用者リスク合計値の分散が小さいこと、と定義した。これに加えて、修繕により減少した施設のリスクの合計値を効率性の指標とした。衡平性と効率性の重みつき線形和を目的関数として、最小とする補修戦略を求めるモデルを構築した。

構築した最適補修戦略決定モデルについて、衡平性の項のみを目的関数とした場合、効率性の項のみを目的関数とした場合で仮想ネットワーク上において試算し、モデルの挙動を確認した。衡平性のみを考慮した最適戦略では、効率性のみを考慮した最適戦略、健全度が小さい箇所から修繕する戦略と比べて、利用者間の格差が小さくなった。しかし、衡平性のみを考慮すると社会的リスクの減少量が小さい。すなわち、投資効率が小さい。したがって、効率性と衡平性の重みを決定するパラメータ α の適切な設定が重要である。このパラメータは、試算結果で示される利用者間の格差と効率性を鑑みて、利用者の合意が得られると推察される値を管理者が決定する必要がある。

衡平性のみを考慮した場合では、健全度が著しく低い場合でも補修されないケースがあった。そのため、管理限界を設定して優先的に補修するルールが本モデルのほかに必要である。

6.2 今後の課題

6.2.1 リスク評価の精度向上

(1) 損傷確率

第3章で示したリスク評価手法では、橋梁と舗装の損傷確率に仮定値を設定した。仮定値は統計学的に分析され検定が可能な方法で設定したものではない。この理由は、橋梁においては、施設の健全性と破損の関係を十分に分析できるだけのデータが蓄積されていないためである。我が国においては管理者が破損する前に修繕するため、破損した実績は多くない。一方で舗装は、路面性状測定車による路面性状評価値が多く自治体で実施されている。舗装の破損、すなわちポットホールの発生に関する情報も蓄積されている。したがって、舗装の破損確率は今後の研究で算出モデルが開発されることを期待する。

本研究はリスク評価に基づく総合維持管理手法の構築を主眼としたため、この課題について議論しなかったが今後はこれらの分析により、リスク評価の精度向上を図る必要がある。

(2) リスクの確率分布

第3章で示したリスク評価手法では、損傷確率を施設の健全度ごとに定数で与え、各種リスクの社会的影響度を確定値で与えた。これは、それぞれの平均的な値を仮定しているため、マクロ的視点では維持管理の投資意思決定を議論できる精度があると考えている。

しかしながら、点検結果の精度や、点検からの時間経過によって損傷する確率は不確実な事象である。また、社会的影響度も道路利用者数など算出に用いた変数が不確実に変動すると想定される。これらの不確実な事象が確率分布にしたがっている場合、各道路施設におけるリスク値の分布形状に差が生じることが想定され、最適な修繕戦略は確定値での試算と異なる場合もある。したがって、リスク評価の精度向上のためには、確率分布を仮定した損傷確率、社会的影響度を検討する必要がある。

(3) PDCA サイクルによるリスク評価手法の継続的改善

第4章ではリスク評価に基づく総合維持管理手法を1年間導入した結果に基づいて、リスク評価手法を改善した。救命救急アクセス経路リスクの算出法修正や、振動リスクの追加など、現地技術者の経験に基づく修繕意思決定の思考を取り入れた。PDCA サイクルを一巡したことで、リスク評価の精度向上に一定の成果があったといえる。しかしながら、1年間での課題抽出で多くの課題が抽出されたことを踏まえれば、今後も課題が発現することが容易に想定できる。したがって、今後も適宜本研究で示した課題抽出方法等を活用することでリスク評価方法の継続的改善を図る必要がある。

6.2.2 長期にわたる修繕計画の立案

本研究で提案した修繕箇所選定方法はいずれも単年度の箇所選定を検討するものである。しかしながら、道路施設の資産価値は廃棄されるまでの残存価値で評価されることが適切である。すなわち、長期におけるネットワーク全体の保有リスク総量が最小化されることが資産価値最大化に寄与すると考えられる。したがって、劣化予測を用いた長期のリスク動向を考慮して最適な投資量、タイミングを決定する必要がある。この求解のためには、劣化予測の設定と劣化によるリスク変動を考慮した動的計画法を適用する方法が考えられる。

6.2.3 衡平性・効率性を考慮した最適補修戦略の実道路ネットワークへの適用

第5章に示した最適補修戦略決定モデルの挙動確認には、仮想のネットワークを採用した。今後は、実在する施設をリスク評価して、実道路ネットワークを対象にモデルの適合性を検証する必要がある。仮想ネットワークでの挙動確認では衡平性と効率性のいずれかのみを考慮したときの補修戦略について示した。最適補修戦略決定モデルは、衡平性に重みパラメータを乗ずることで、効率性と衡平性のバランスを設定できる。したがって、重みパラメータを設定したときの補修戦略の挙動について確認する必要がある。また、第4章で示したような実務へ導入するための制約条件を加えることで、実務での運用条件下において衡平性、効率性がどのように投資意思決定に影響するかを確認する必要がある。

謝辞

本研究は岐阜大学大学院工学研究科の社会人ドクターコースにおいて平成23年度から平成26年度までの4年間で取り組んだものです。この遂行にあたっては多くの方のご協力、ご鞭撻をいただきました。本研究を結ぶにあたって、ご厚誼いただいた皆様に感謝の意を表します。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 高木朗義教授には学部4年の平成18年度から8年間にわたってご指導いただきました。敬語の使い方も、勉学への態度もままならない私に、社会人の作法、土木計画のいろはから人生の効用最大化問題のモデル化まで、ときに厳しく、ときに優しく、常に熱くご教授いただいたことが、今日の私を成しています。コンサルタントへの就職や現在の雇用まで、人生の転機にはいつもご助言いただき、効用最大化戦略の意思決定を後押ししてくださったことに深く感謝いたします。これまでのご指導を胸に、人として、技術者として、使命を全うするよう邁進して参ります。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 倉内文孝教授には修士2年の平成20年度からご指導いただきました。また、本学位論文の主査をご多忙の中お受けいただきました。本研究を構成する評価手法の多くは交通計画の理論を応用したものであり、そのほとんどが倉内先生からご指導いただいたものです。また、倉内教授に昼夜を問わず、業務内外を問わずご指導いただいたことで、今日の私の行動原理の大半を占める「知的好奇心」と、その向き合い方が形成されたと感じています。これまでのご指導に深く感謝するとともに、今後ともご厚誼を賜りたく存じます。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 出村嘉史准教授にはご多忙の中、本学位論文の副査をお受けいただき、本研究の問題意識や課題提起に関して重要なご助言をいただきました。出村准教授の鬼気迫る研究に取り組む姿勢は、甘えがちになる私に襟を正す機会を多く与えてくださいました。また、ドクターコース入学後、多くの折で独特の言葉遊びによって研究室の活動を楽しいものにしていただきました。厚く御礼申し上げます。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 宮城敏彦フェローにはご多忙の中、本学位論文の副査をお受けいただき、本研究の評価手法やケーススタディの考察に関して重要なご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 本城勇介教授、新潟大学大竹雄准教授には、本研究で危険斜面の落石確率算出手法を参照させていただいた。また、本研究の成果の一部である全県管理斜面における落石確率算出においては、ご多忙の中で時間を割いて、ご助力いた

できました。ここに深甚の謝意を表します。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 森本博昭教授，沢田和秀教授，村上茂之准教授には岐阜県社会資本メンテナンスプラン検討委員会を通じて本研究のリスク評価手法，あるいは実務への適用方法について多くのご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

岐阜県下呂土木事務所所長 岩田靖氏，岐阜県郡上土木事務所 荻谷仁史氏をはじめとする平成 21 年度～平成 24 年度に岐阜県県土整備部道路維持課に在籍された岐阜県職員の諸氏には，岐阜県社会資本メンテナンスプラン策定業務を通じて大変お世話になりました。社会人，技術者として未熟な私に，行政としての立場から社会資本を運用するために必要なことを多く教えていただきました。ここで学んだ「実務に耐え得る」については心底に据えて今後の研究に取り組んでいきます。皆様へ感謝の意を表します。

大日コンサルタント株式会社 細江育男氏には在職中，社会人，技術者として未熟な私に「技術者とは」から社会資本の維持管理など専門領域，あるいは人生の歩み方までご指導いただきました。不勉強にも関わらず生意気な私を的確にマネジメントしていただき，ドクターコースへの進学，保全部，社会政策 G への異動などスキルアップするための環境を整えてくださいました。細江部長なくしては今日の私はあり得ません。これからは「岐阜を守る」ことを強く意識して技術者として人生を全うします。感謝の念はここに記しきれません。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 原田守啓准教授，大日コンサルタント株式会社 坂井田実氏，飯田潤士氏は私の大日コンサルタント在職中，社会人ドクターの先輩として，ドクターコースへの進学，在学中の業務遂行に関するアドバイスなど，多くの場面でご助言いただきました。社会，会社について議論したあれこれは，研究，業務を遂行する上で私の大きなモチベーションとなりました。3氏に深く感謝いたします。

大日コンサルタント株式会社の皆様には新卒入社して以降，岐阜県というフィールドで技術者として自立できるよう多くのご指導をいただいたうえ，ドクターコース進学に際しては大きな後押しをいただきました。進学後も本論文を完成させるに至るまで業務，研究活動に集中できるよう常にご支援いただきました。深く感謝いたします。今後の研究活動を通じて御恩に報いたいと思います。

岐阜大学工学部社会基盤工学科 地域システムデザイン研究グループ（旧地域システム計画研究室）に在籍した歴代の皆様には大変お世話になりました。後輩諸氏が研究に取り組み，成長する姿に励まされ，私も研究を進めることができました。ここに感謝の意を表

します。

コンサルタント技術者として業務を遂行しながら研究活動に取り組む中ではここに記しきれない多くの方のご支援をいただきました。本研究はそのご支援の上に成立していることをここに銘記いたします。ありがとうございました。

最後に、在学中に妻となった春菜は仕事と研究に励めるよう、陰日向となく支えてくれた。はらはらどきどきさせることには事欠かない夫であるにもかかわらず、いつも前向きになれるよう応援してくれてありがとう。在学中に生まれてきてくれた長男華月を懸命に育児する姿を見て、安心して研究に取り組むことができました。

華月は起きている間に帰宅すればいつでも笑顔で迎えてくれる。この笑顔を見るために早く帰ろうと努めたことが、スキルアップにつながっている。2人なくしては本研究も成立しなかった。感謝の気持ちは、これからの日々の生活での態度をもって表したい。

平成 27 年 1 月 5 日

杉浦 聡志