

超高強度ひずみ硬化型セメント系材料を用いた補強による
栈橋構造物の長寿命化

Lifetime extension of pier by strengthening using Ultra High Performance-Strain
Hardening Cementitious Composite

2017年3月

岐阜大学大学院
工学研究科博士後期課程
生産開発システム工学専攻

田中 亮一

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	4
1.3 論文の構成.....	7
参考文献.....	9
第2章 既往の研究.....	10
2.1 UHP-SHCCに関する既往の研究.....	10
2.1.1 UHP-SHCCの概要.....	10
2.1.2 UHP-SHCCの物質移動に対する抵抗性.....	12
2.1.3 UHP-SHCCの自己治癒性.....	14
2.1.4 UHP-SHCCの耐海水性.....	15
2.1.5 UHP-SHCCの耐衝撃性.....	17
2.1.6 UHP-SHCCを用いた補修・補強に関する研究事例.....	18
2.2 UHP-SHCCの適用例.....	20
2.2.1 壁高欄の表面保護工.....	20
2.2.2 道路橋床版上面の予防保全対策.....	20
参考文献.....	22
第3章 UHP-SHCCの被覆防食性能.....	24
3.1 はじめに.....	24
3.2 実験概要.....	25
3.2.1 検討ケースと供試体概要.....	25
3.2.2 暴露環境と試験項目.....	27
3.3 実験結果.....	29
3.3.1 自然電位と分極抵抗.....	29
3.3.2 ひび割れなし供試体の解体調査.....	30
3.3.3 ひび割れあり供試体の解体調査.....	30
3.3.4 EPMA法による塩化物イオンの面分析.....	32
3.4 まとめ.....	33
参考文献.....	34
第4章 UHP-SHCCの収縮特性.....	35
4.1 はじめに.....	35
4.2 実験概要.....	36
4.2.1 UHP-SHCCの配合.....	36
4.2.2 検討ケースと試験項目.....	37

4. 3	実験結果	39
4. 4	まとめ	45
	参考文献	46
第5章	UHP-SHCCを用いた巻立て補強構造	47
5. 1	はじめに	47
5. 2	UHP-SHCCと鋼管杭の一体化および杭頭構造に関する基礎的検討	47
5. 2. 1	検討ケースと供試体概要	47
5. 2. 2	使用材料および力学的性質	50
5. 2. 3	実験結果	51
5. 2. 4	まとめ	56
5. 3	UHP-SHCCのひび割れ分散性を発揮させる鋼材との一体化方法に関する検討	57
5. 3. 1	検討ケースと供試体概要	57
5. 3. 2	使用材料および力学的性質	60
5. 3. 3	実験結果	61
5. 3. 4	まとめ	66
	参考文献	66
第6章	UHP-SHCCの上部工への定着方法	67
6. 1	はじめに	67
6. 2	実験概要	68
6. 3	UHP-SHCCの配合	70
6. 4	実験結果	71
6. 4. 1	最大引張荷重	71
6. 4. 2	コーン状破壊形状	72
6. 4. 3	引張荷重と実測水平投影面積の関係	73
6. 4. 4	建築学会式との比較	74
6. 5	引抜き耐力算定手法の検討	75
6. 6	まとめ	78
	参考文献	78
第7章	UHP-SHCC巻立てによる補強効果の検証	79
7. 1	はじめに	79
7. 2	大型供試体を用いた曲げ載荷試験	79
7. 2. 1	実験概要	79
7. 2. 2	実験結果	82
7. 3	曲げ耐力の推定方法の検証	86
7. 3. 1	計算条件	86
7. 3. 2	実験結果と計算値の比較	86

7. 4	まとめ	88
	参考文献	88
第8章	施工検討	89
8. 1	UHP-SHCC の水中流動による品質変化の確認	89
8. 1. 1	はじめに	89
8. 1. 2	実験概要	89
8. 1. 3	実験結果	91
8. 1. 4	まとめ	96
8. 2	注入実験による充填性確認	97
8. 2. 1	はじめに	97
8. 2. 2	実験概要	97
8. 2. 3	実験結果	98
8. 2. 4	まとめ	99
8. 3	UHP-SHCC の圧送性	100
8. 3. 1	実験概要	100
8. 3. 2	実験結果	101
8. 3. 3	まとめ	103
8. 4	実架橋における試験施工	104
8. 4. 1	試験施工の概要	104
8. 4. 2	施工手順	105
8. 4. 3	まとめ	106
	参考文献	107
第9章	UHP-SHCC を用いた巻立て補強方法の提案	108
9. 1	巻立て補強の仕様	108
9. 2	耐用年数	109
9. 3	UHP-SHCC の材料特性値	110
9. 4	巻立て断面の設計法	112
9. 5	適用条件の整理	113
9. 6	ライフサイクルコストの試算例	116
9. 6. 1	はじめに	116
9. 6. 2	検討条件	116
9. 6. 3	試算結果	118
9. 6. 4	追加検討	118
	参考文献	120
第10章	結論	121
	謝辞	125

第1章 序論

1.1 研究の背景

港湾施設は、我が国の国際競争力維持または強化を担う重要な施設であるとともに、地震や台風襲来等にもなう津波や高潮からの被害を食い止める防災施設である。近年、世界中で大地震や大型台風等が頻発しているが、港湾施設が大規模な損壊を被った場合、地域の社会活動や物流、避難拠点としての役割を果たせなくなる可能性があり、経済活動の停止や制限といった社会的損失に対する危機感が高まっている。加えて、我が国の港湾施設の多くは1960年～1970年代の高度経済成長期に建設されており、図-1.1に示す公共岸壁の例 [1] のように、今後の老朽化施設の増大が懸念されている。

港湾施設には、防波堤や護岸などの外郭施設、重力式係船岸や棧橋などの係留施設、臨港地域の道路や橋梁などの臨港交通施設、航路や泊地などの水域施設などがある [2]。このうち船舶が着岸するための係留施設のひとつである棧橋は、図-1.2に示すとおり、海底地盤に打ち込まれた主に鋼管杭と鉄筋コンクリート製の上部工で構成され、その他の係留施設（重力式係船岸等）に比べて軽量であることから、軟弱地盤条件下や大水深条件下でも建設することが可能な構造物である。

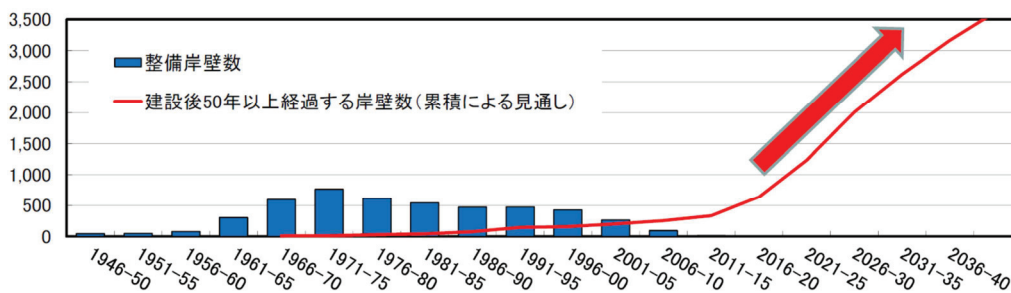


図-1.1 各年度に整備した係留施設数と供用後50年を経過する公共岸壁の推移 [1]

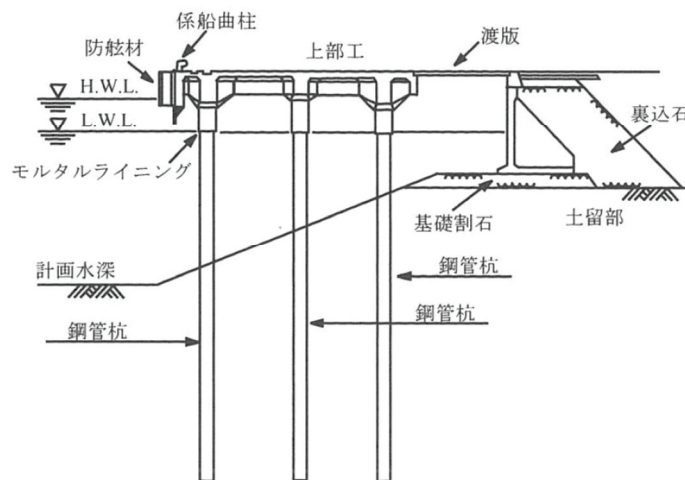


図-1.2 棧橋の例（直杭式横棧橋） [2]

図-1.3は、栈橋が位置する海上大気中、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部の5つの環境において、鋼管杭が無防食の場合の腐食速度を板厚減少プロフィールとして模式的に示したものである [3]。栈橋は過酷な自然環境下に曝されるため、海水作用による材料劣化や漂流物の衝突などによって損傷を受けやすいが、特に鋼管杭は鋼材腐食に対して厳しい条件下にあり、腐食速度は飛沫帯が最も大きく、次いでさく望平均干潮面（L.W.L.）直下の海中部で大きくなる。このような厳しい腐食環境下にある鋼管杭には、一般に、L.W.L.-1.0mより上方の部分に有機系被覆、ペトロラタム被覆、金属被覆もしくは無機系被覆等の被覆防食工が施され（海中部および海底土中部は、流電陽極方式による電気防食が適用されることが多い）、塩化物イオン等の腐食影響因子の侵入を物理的に遮断する。

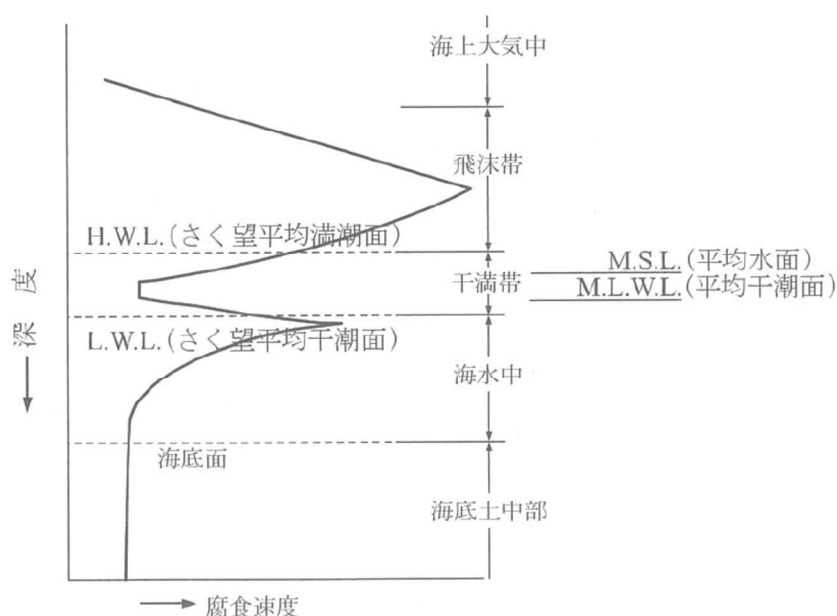
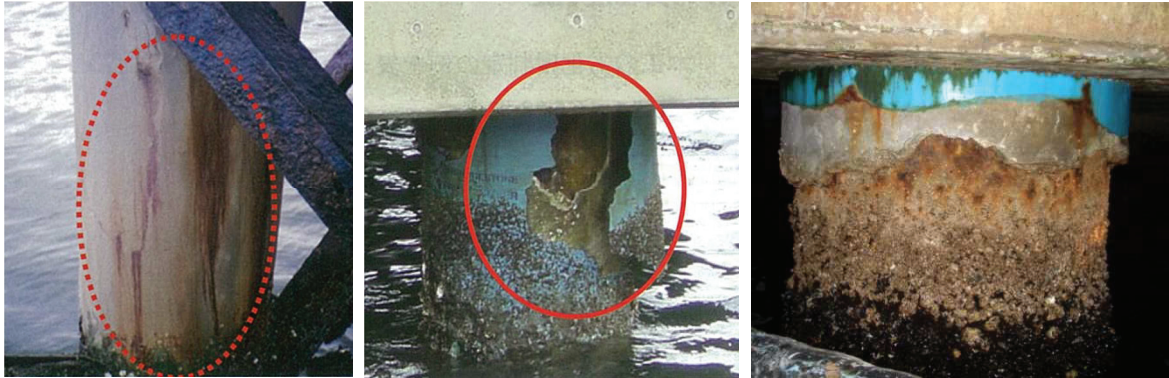


図-1.3 鋼管杭の板厚減少プロフィール [3]

しかし、写真-1.1に示すとおり被覆防食工は損傷しやすく、栈橋鋼管杭が当初想定よりも短期間で防食性能を失うケースは少なくない。損傷した被覆防食工を補修する方法としては、現地施工が可能な水中硬化形被覆、ペトロラタム被覆および無機系被覆等があるが、補修を行っても、写真-1.1に示すような損傷のリスクは改善されない。また、これらの方法は、鋼管杭と上部工の接合部が被覆防食材の上端となるため、一般的には水中硬化形エポキシ樹脂等によるコーキングが施される。しかし、コーキング材は長期的には劣化し、また、割れや剥離等の損傷が生じる可能性もあるため、鋼管杭と上部工の接合部は鋼材腐食の弱点となりやすい。写真-1.2は、鋼管杭に塗装が施されていたものの、接合部付近において局所的に腐食が進行していた事例である（写真は塗装除去および上部工の一部をはつり取った後の状態）。なお、接合部付近の鋼管杭の腐食が顕著に進行した場合は、写真-1.3に示すような鋼管杭の圧縮変形が生じて上部工自体が沈下してしまう危険性がある。



左図：有機系被覆の損傷状況（被覆材表面からのさび汁）
 中図：ペトロラタム被覆の損傷状況（漂流物の衝突による保護カバーの割れ）
 右図：モルタル被覆の損傷状況（カバー材およびモルタル層の脱落）

写真-1.1 栈橋鋼管杭の被覆防食工の損傷状況 [4]



写真-1.2 鋼管杭と上部工の接合部において腐食が進行している事例



写真-1.3 鋼管杭の圧縮変形により上部工が沈下した事例 [5]

加えて、杭頭部（鋼管杭と上部工の接合部付近）は外力作用による曲げモーメントが最も大きくなる箇所であり、栈橋に船舶の衝突や地震等の突発的で大きな外力が作用した場合は、杭頭部が損壊する可能性がある。また、杭頭部の損壊は被覆防食工の著しい損傷に繋がると考えられ、この部位に鋼管杭の腐食が集中すると、栈橋構造としての安全性の低下が引き起こされる。予防保全的な杭頭部補強、もしくは低下した保有耐力を回復・向上させるための既存の補強技術としては、鉄筋コンクリート巻立て、鋼板巻立ておよび水中格点工法がある。このうち、鋼板巻立てと水中格点工法は、防食性能を回復させる技術ではないため、被覆防食工との併用が必要である。一方、鉄筋コンクリート巻立ては、鋼管杭に対する防食も同時に期待できるが、局所的なひび割れの発生によっては防食性能が低下する可能性がある。また、鋼管杭と上部工の接合部が巻き立てる鉄筋コンクリートの上端となるため、接合部からの塩化物イオンの侵入が懸念される。さらに、鉄筋コンクリートの巻立て厚は、防食性能を確保するために大きくする必要があり、それにとまって自重や断面剛性が増加するため、栈橋全体の変形挙動に影響を及ぼす可能性がある。

以上のことから、栈橋鋼管杭の腐食を長期的に防止し、合わせて災害に強い施設へ改良することができれば、栈橋の使用性および安全性を確保する上では非常に効果的である。少子高齢化にともなう財源縮小が見込まれる今後は、既存ストックを継続的に利用するための長寿命化技術の開発が必須と考えられる。

1. 2 研究の目的

本研究では、既存栈橋の長寿命化を実現させることを目的に、高強度、高靱性、高耐久性の優れた性質を併せ持つ超高強度ひずみ硬化型セメント系材料（以下、UHP-SHCC）を用いた補修・補強技術を開発した。

ここで、図-1.4 に示すとおり、UHP-SHCC は既存の繊維補強コンクリート（FRC）の高性能化を目指して開発された材料であり、高強度材料と高靱性材料の中間的な特性を持つ [6]。UHP-SHCC の材料的特徴を表-1.1 にまとめる。UHP-SHCC は低水結合材比であることから圧縮強度は 100N/mm^2 程度と高強度化を実現しており、また、繊維の混入によって高靱性化も達成している。UHP-SHCC の特徴的な性質はひずみ硬化性であり、図-1.5 に示すとおり引張応力下でひび割れが発生した後も引張応力が増加する擬似ひずみ硬化特性を有する。加えて、引張応力下で発生するひび割れの幅は 0.2mm 以下と小さく、ひび割れは分散して多数発生する特徴がある。また、緻密な材料であるため遮塩性に優れており、栈橋鋼管杭が位置する海洋環境下で使用しても長期的な被覆防食性能が期待できる。さらに、現場製造が可能であることから、既存栈橋の鋼管杭に対する補修・補強材料として有効と考えられた。

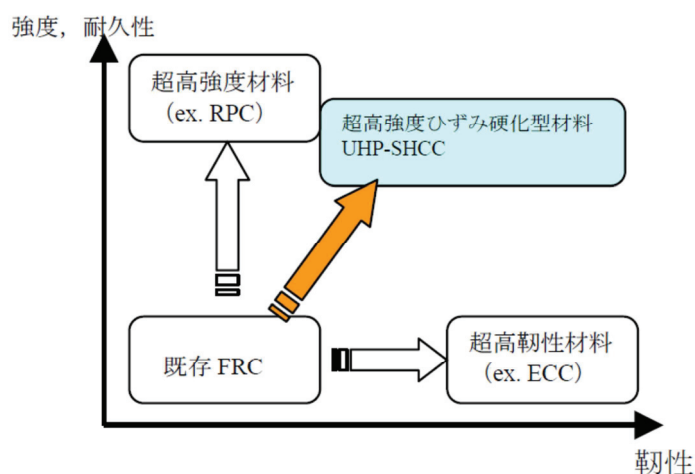


図-1.4 UHP-SHCC の開発コンセプト [6]

表-1.1 UHP-SHCC の材料的特徴

項目	特徴	効果
配合	水結合材比 0.20 程度 シリカフェームを混和	高強度化, 秘密化
	高強度ポリエチレン繊維の使用 (繊維混入量は単位体積あたり 1.5%程度が標準, 要求性能に応じて変更可能)	高靱性化 (ひずみ硬化性, ひび割れ分散性, ひび割れ幅抑制)
	高性能減水剤と消泡剤を添加	流動性の確保と繊維混入によるエントラップトエアの増加抑制
力学特性	圧縮強度 100N/mm^2 程度 引張強度 $6\sim 8\text{N/mm}^2$ 引張強度時ひずみ 2.0%程度	—
耐久性	塩化物イオンの見掛けの拡散係数 $0.067\text{cm}^2/\text{年}$ [7]	—
施工性	現場製造が可能	—

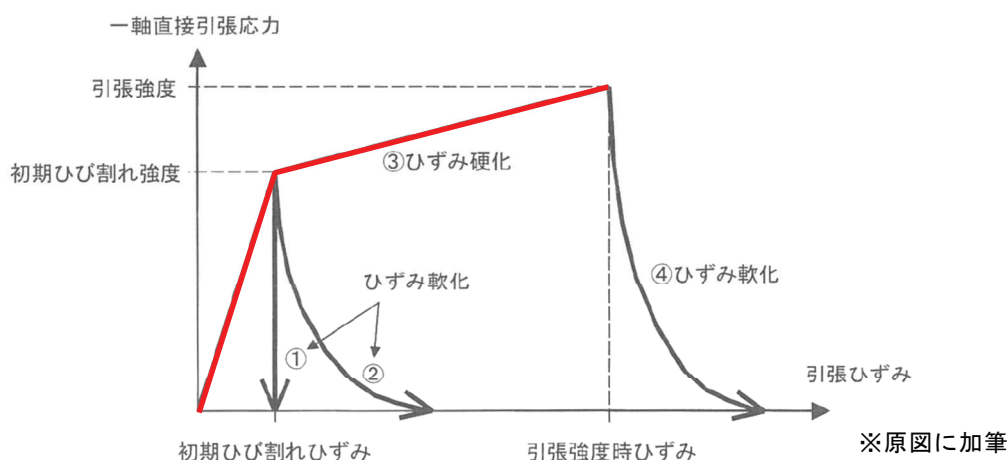


図-1.5 引張応力下におけるひずみ硬化性の概念図 [8]

そこで、本研究では以下の3つの点をポイントとし、UHP-SHCCの優れた材料特性を活かした栈橋鋼管杭に対する新しい補修・補強技術を開発することを目的とした。特に、鋼管杭と上部工の接合部に着目する点において、既存技術とは大きく異なっている。

- ① UHP-SHCCによって栈橋鋼管杭の長期的な被覆防食性能を確保すること
- ② UHP-SHCCの優れた性質を活かして断面設計手法を確立すること
- ③ 鋼管杭と上部工の接合部に着目した防食および補強方法を提案すること

図-1.6に、本研究の成果として得られたUHP-SHCCを用いた栈橋鋼管杭の補修・補強技術の概念図を示す。耐久性上および構造上の弱点となりやすい鋼管杭と上部工の接合部においては、UHP-SHCCを鋼管杭表面部から上部工まで連続して巻き立てる断面構造とした。これにより、鋼管杭と上部工の接合部における防食および補強を同時に達成する。なお、栈橋に突発的な外力が作用して杭頭部に大きな曲げモーメントが生じた場合、接合部付近のUHP-SHCCにはひび割れが発生するが、UHP-SHCCの有するひび割れ分散性により発生するひび割れは微細かつ複数であるため、長期的な耐久性を確保することは可能と考えられる。

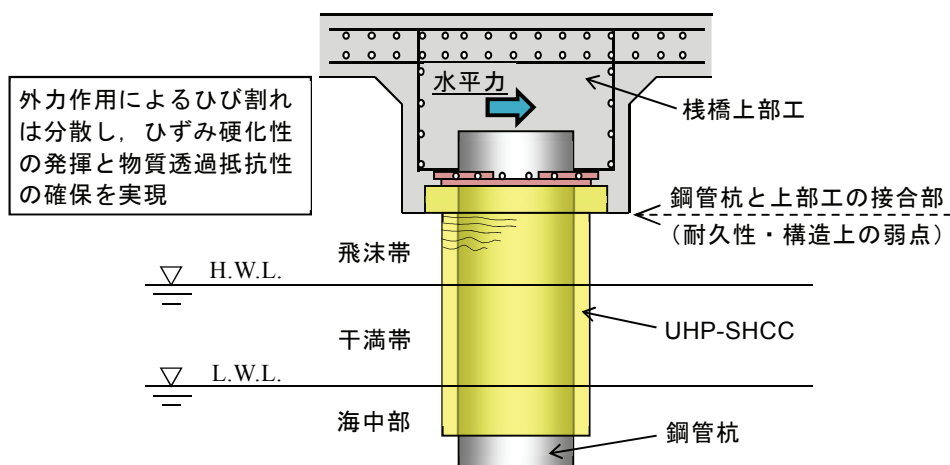


図-1.6 UHP-SHCCを用いた栈橋鋼管杭の補修・補強技術の概念図

1. 3 論文の構成

本論文の構成を図-1.7に示す。本論文は、10章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、既存技術の課題を示し、本研究の検討方針を明確化した。また、本論文の構成を示した。

第2章では、UHP-SHCCの材料特性と補修・補強に関する研究事例、また、実構造物への適用例を整理した。

第3章では、実海洋環境下の飛沫帯で約3年間の暴露試験を実施した結果を示し、UHP-SHCCの塩化物イオンの見掛けの拡散係数は $0.012\text{cm}^2/\text{年}$ と非常に小さく、鋼材に対して優れた被覆防食性能を有することを報告した。また、ひび割れを有するUHP-SHCCで鋼板を被覆した供試体による結果も示し、塩化物イオンはひび割れに沿って侵入して鋼板表面まで到達するものの、鋼材腐食は進行していないことを報告した。

第4章では、UHP-SHCCの収縮抑制策を検討する目的で実施した自己収縮試験および乾燥収縮試験の結果を示し、収縮低減剤の使用によって自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみが低減され、添加量が多いほどその効果が増大することを報告した。

第5章では、小型供試体を用いたUHP-SHCCと鋼管の一体化方法および杭頭構造に関する基礎的な検討結果を示した。載荷試験の結果から、一体化には鋼管杭の軸方向に設置する鉄筋の最低限の仕様があり、また、杭頭構造はUHP-SHCCを鋼管杭表面から上部工まで連続させる方法が有効であることを示した。

第6章では、頭付きアンカーボルトを用いたUHP-SHCC巻立てと上部工の定着方法を示し、UHP-SHCCに埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力の算定手法を提案した。

第7章では、大型供試体を用いた曲げ載荷試験によってUHP-SHCC巻立てによる補強効果を確認した結果を示した。その結果、UHP-SHCC巻立てによって曲げ耐力は大幅に向上すること、また、UHP-SHCCの引張強度特性を考慮したファイバーモデルにより、鋼管降伏時の曲げ耐力を算定できることを示した。

第8章では、型枠内への充填性および水中流動による品質変化、モルタルポンプによる圧送性、および実橋鋼管杭への試験施工の結果を示し、本技術の施工性について報告した。

第9章では、第3章から第8章までの成果を受けて、本技術の仕様、耐用年数、UHP-SHCCの材料特性値、巻立て断面の設計法、および適用条件を整理した。また、ライフサイクルコストの試算例も示した。

第10章では、本研究の成果をまとめるとともに、現時点での課題と本技術を活かした新たな利用法等に関する今後の展望について述べた。

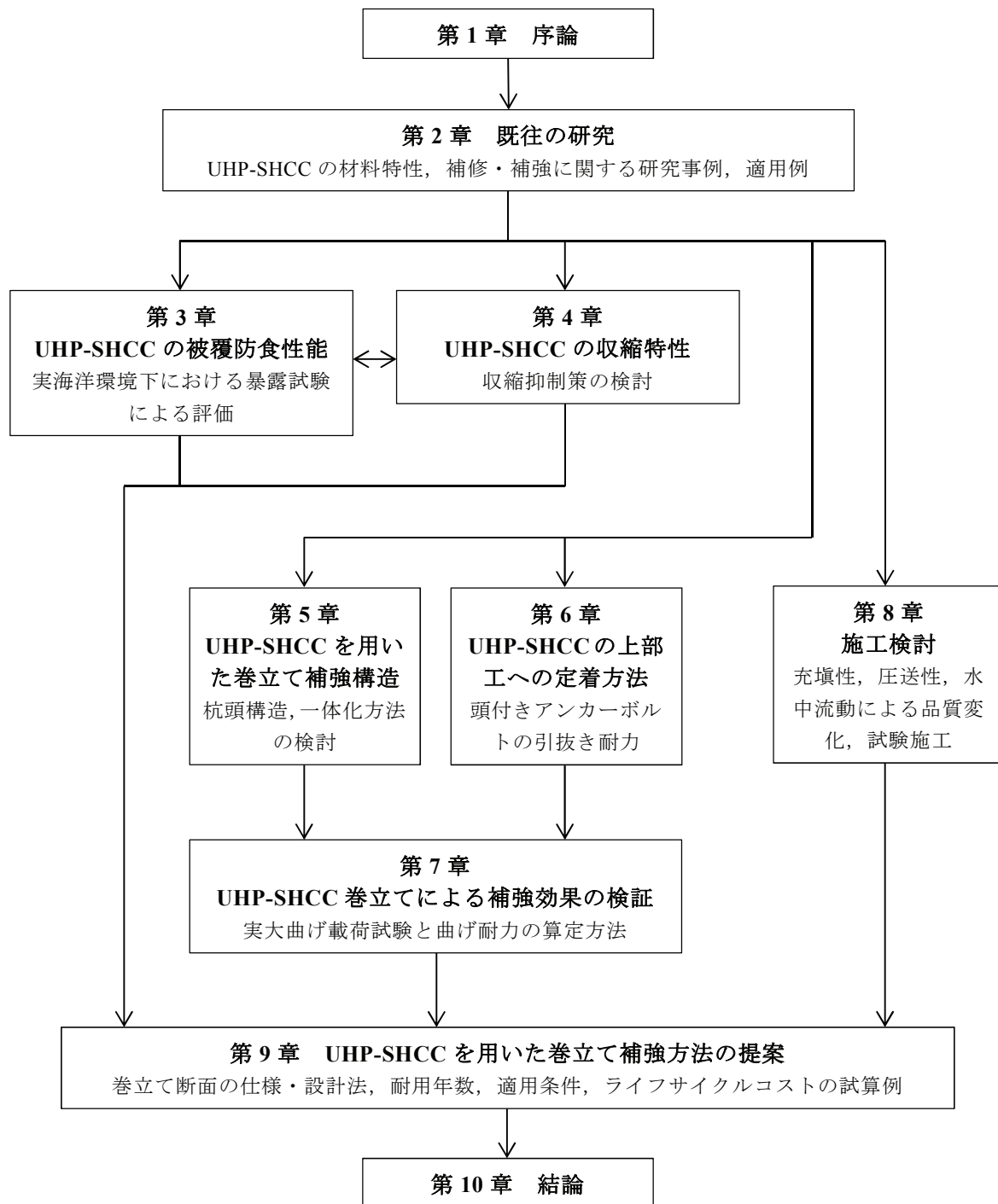


図-1.7 論文の構成

参考文献

- [1] 国土交通省：港湾施設の維持管理の現状と課題，平成 26 年度港湾施設の維持管理に関する技術講習会資料（資料 1），港湾局技術企画課，平成 27 年 2 月 4 日
- [2] 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻），平成 19 年 7 月
- [3] 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009 年版），沿岸技術ライブラリー，No.35，pp.13，平成 21 年 11 月
- [4] 防食・補修工法研究会：港湾鋼構造物 新しい防食工法・補修工法・維持管理 実務ハンドブック 維持管理編，2013 年度版
- [5] 日経 BP 社：日経コンストラクション，No.633，pp.18，2016 年 2 月 8 日号
- [6] 国枝稔，Ahmed Kamal，中村光，Eugen Brühwiler：超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発，日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.315-320，2007
- [7] 志水康祐，国枝稔，中村光，玉越隆史：超高強度ひずみ硬化型モルタルの物質移動抵抗性の評価，日本材料学会，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 9 巻，pp.253-260，2009.10
- [8] 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，pp.2，平成 19 年 3 月

第2章 既往の研究

2.1 UHP-SHCCに関する既往の研究

2.1.1 UHP-SHCCの概要

繊維補強セメント複合材料（FRCC: Fiber Reinforced Cementitious Composites）[1]は、近年、各種指針等が発刊されたのをきっかけに構造利用のための検討が進められている。UHP-SHCC（Ultra High Performance- Strain Hardening Cementitious Composites の略）は、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites もしくは SHCC: Strain Hardening Cementitious Composites）[2]の一種であり、高強度材料と高靱性材料の特性を合わせ持つ材料として開発された[3]。なお、FRCCの範囲におけるUHP-SHCCの位置付けは、図-2.1に示すとおりである。

UHP-SHCCを構成する材料を表-2.1に、配合例を表-2.2に示す。UHP-SHCCは、水結合材比が0.20程度と低水結合材比で、かつシリカフュームの混和によってマトリックスを緻密化させて、圧縮強度で 100N/mm^2 程度の高強度化を実現している。また、高強度ポリエチレン短繊維（密度 0.97g/cm^3 、直径 0.012mm 、長さ 6mm 程度、弾性係数 88GPa 、引張破断強度 $2,700\text{MPa}$ ）の混入によって、ひび割れ分散性と引張ひずみ硬化性を付与させている。写真-2.1にひび割れ分散性状を、図-2.2に一軸引張応力下における擬似ひずみ硬化特性（引張応力-ひずみ曲線）を例示する。

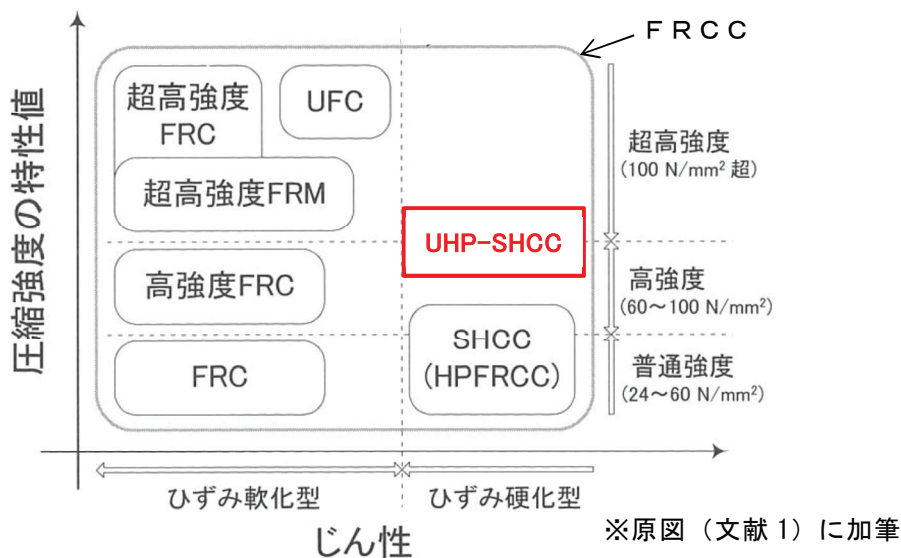


図-2.1 FRCCの範囲におけるUHP-SHCCの位置付け

表-2.1 UHP-SHCC の構成材料 [3~6]

記号	材料	種類および物性等
W	水	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)
C	結合材 (B)	普通ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm ³) (文献 3)
		低熱ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm ³) (文献 4~6)
SF		シリカフューム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 120,000cm ² /g) (文献 3)
LP		シリカフューム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 217,000cm ² /g) (文献 4~6)
EX		石灰石微粉末 (密度 2.70g/cm ³ , 比表面積 5,000cm ² /g)
S	骨材	膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.10g/cm ³)
PE	繊維	7号珪砂 (密度 2.68g/cm ³)
SP	混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.06g/cm ³)

表-2.2 UHP-SHCC の配合例 [3~7]

W/B	SF/B	LP/ C+LP(%)	EX (kg/m ³)	S/B	繊維混入率 (単位体積%)	繊維長 (mm)	SP (B×%)	文献
0.22	0.20	—	—	0.05	2.5	3mm(0.5vol.%) 6mm(2.0vol.%)	3.0	[3]
0.22	0.15	—	20	0.10	1.0, 1.25, 1.5	6mm	0.3	[4]
0.22	0.15	—	—	0.10	1.5	6mm	1.0	[5]
0.22	0.15	0, 20, 40, 60	—	0.10	1.5	6mm	1.0	[6]
0.18	0.17	—	—	0.08	0.5, 1.0, 1.5	6mm	1.7	[7]

B=C+SF+LP+EX (※ここでは、石灰石微粉末 (LP) も結合材の一部とした)



写真-2.1 ひび割れ分散性状 [3]

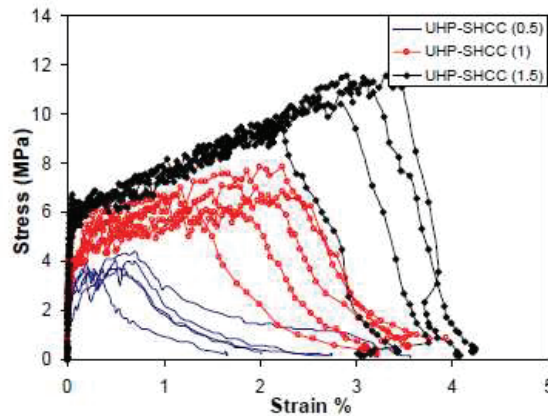


図-2.2 一軸引張応力下における擬似ひずみ硬化特性 [7]

2. 1. 2 UHP-SHCC の物質移動に対する抵抗性

UHP-SHCC は非常に緻密な材料であるため、物質移動に対する抵抗性に優れていることが確認されている。図-2.3 はトレント法 [8] によって表層透気性を確認した結果である [3]。なお、図中の記号 N-SHCC は水結合材比 45% で、ポリビニルアルコール繊維 (長さ 12mm, 直径 0.04mm, 密度 1.30g/cm^3) を体積比で 2.0% 混入した繊維補強セメント系材料である。図より明らかであるが、UHP-SHCC の透気係数は極めて小さく、表層部の緻密性が高いことが示されている。

写真-2.2 は走査型電子顕微鏡 (SEM, 倍率 50 倍および 750 倍) により UHP-SHCC の内部構造を観察した状況である [4]。普通コンクリート (水セメント比 56%) では、径 $100\sim 500\mu\text{m}$ 程度の空隙 (連行空気による気泡) や径 $1\sim 10\mu\text{m}$ 程度の毛細管空隙が多く観察されているが、UHP-SHCC では気泡や毛細管空隙の量が少ないことが確認されている。これは、UHP-SHCC が非常に緻密な内部構造を有していることを示している。

表-2.3 は電気泳動試験 (JSCE-G571 に準拠, ただし UHP-SHCC の試験時のみ印加電圧 30V) によって得られた UHP-SHCC の実行拡散係数である [4]。繊維混入率によらず UHP-SHCC の実行拡散係数は $0.04\sim 0.05\text{cm}^2/\text{年}$ 程度であり、普通コンクリート (水セメント比 57%) の $1/50$ 程度となっている。また、供試体を材齢 28 日 (材齢 28 日までは水中養生) から 10% 塩化ナトリウム水溶液に 28 日間浸漬し、その後 EPMA 分析によって塩化物イオンの濃度分布を測定した結果を図-2.4 に示す [4]。UHP-SHCC における塩化物イオンの侵入深さは 2.2mm, 普通コンクリートにおける侵入深さは 15.7mm で、UHP-SHCC の見掛けの拡散係数は $0.067\text{cm}^2/\text{年}$ と普通コンクリート (見掛けの拡散係数 $4.0\text{cm}^2/\text{年}$) の $1/60$ 程度となっている。このことから、UHP-SHCC は塩化物イオンの侵入に対する抵抗性が非常に高いと言える。

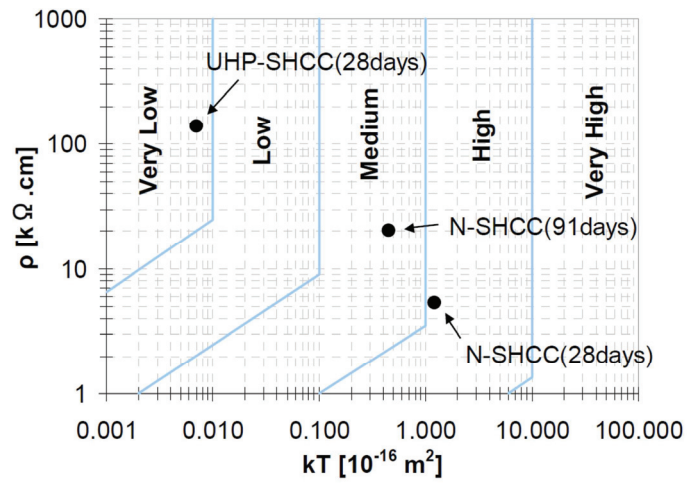
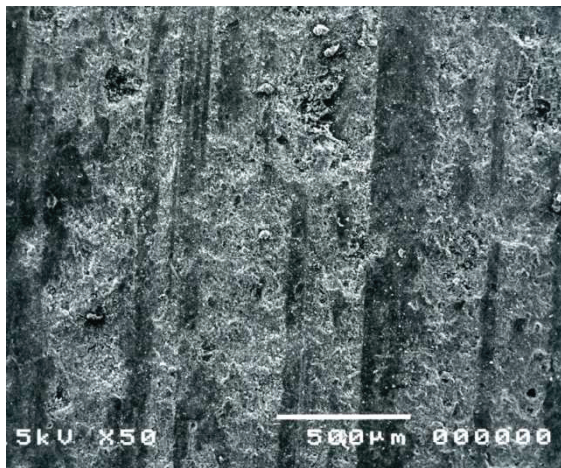
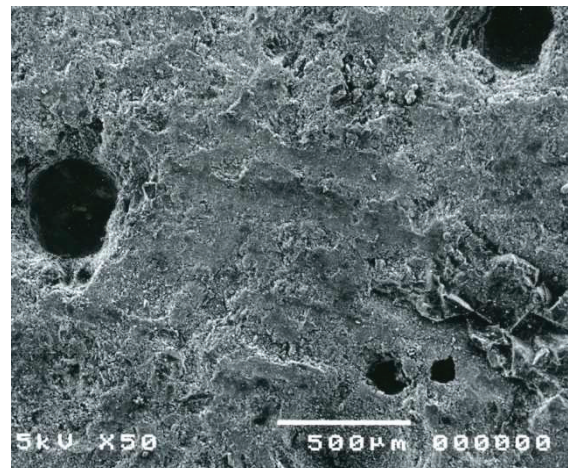


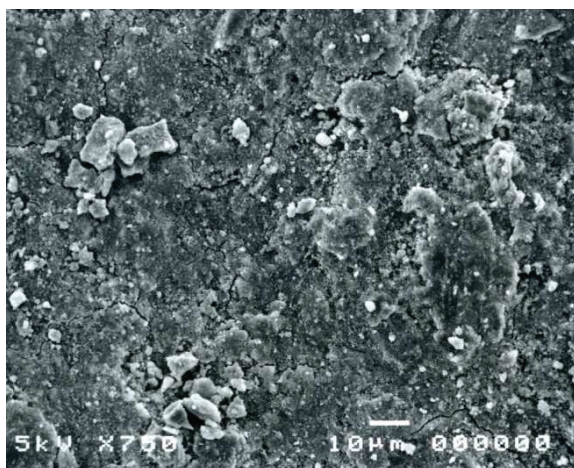
図-2.3 透気試験の結果 [3]



(a) UHP-SHCC (倍率 50 倍)



(b) 普通コンクリート (倍率 50 倍)



(c) UHP-SHCC (倍率 750 倍)



(d) 普通コンクリート (倍率 750 倍)

写真-2.2 SEMによる内部構造の観察状況 [4]

表-2.3 電気泳動試験による実効拡散係数 [4]

	UHP-SHCC			普通 コンクリート
	Vf=1.50(%)	Vf=1.25(%)	Vf=1.00(%)	
実効拡散係数 (cm^2/year)	0.050	0.041	0.052	2.4

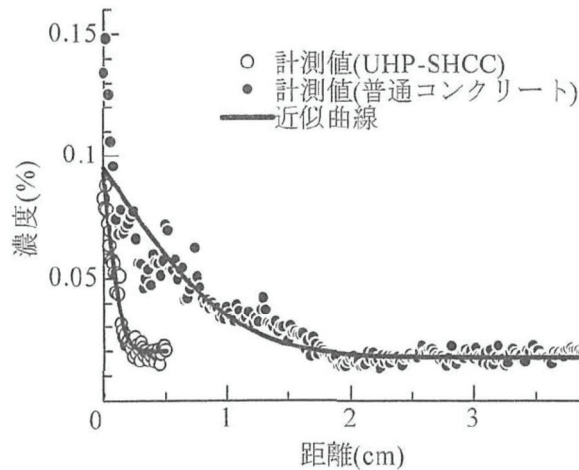


図-2.4 EPMA 分析による塩化物イオン濃度分布 [4]

2. 1. 3 UHP-SHCC の自己治癒性

UHP-SHCC は、一般的なコンクリートに比べて約 4 倍程度のセメント量が必要であり、時間が経過した後もセメントの約 50%が未水和セメントとして内部に残っていることが確認されている [6]。また、硬化体内部の未水和セメントは、再水和およびシリカフェームのポズラン反応により、ひび割れが生じた場合でも水分が供給される環境下においては、自己治癒性能が発現することが確認されている [5]。写真-2.3 は、ひび割れ導入後に水中養生による再養生を 20 日間実施したときのひび割れ閉塞状況をマイクロSCOPEによって観察したものである。水中養生による再養生によりひび割れ部には新しく生成物が生じ、ひび割れが閉塞している状況が見られる。図-2.5 は、ひび割れ導入（両引き引張による残留ひずみ 0.1%程度（平均ひび割れ幅で 10 μm 程度））前後に透気係数（トレント法 [8]）および単位時間透水量（JSCE-K571, 注水 20 時間後の水頭差から算出）を測定した結果である。水分の供給がない気中養生では、透気性および透水性は若干の回復もしくはほとんど回復していないが、水分が供給される条件においては自己治癒性能が発揮されることが示されている。

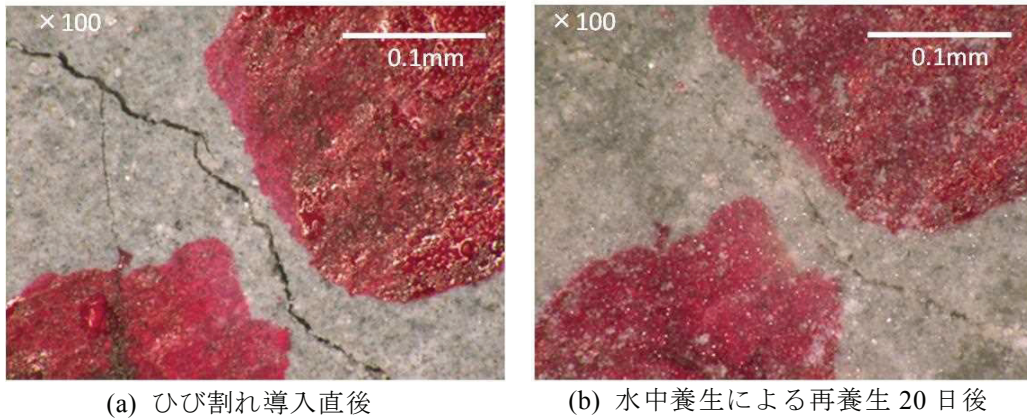


写真-2.3 水中養生による再養生後のひび割れ閉塞状況 [5]

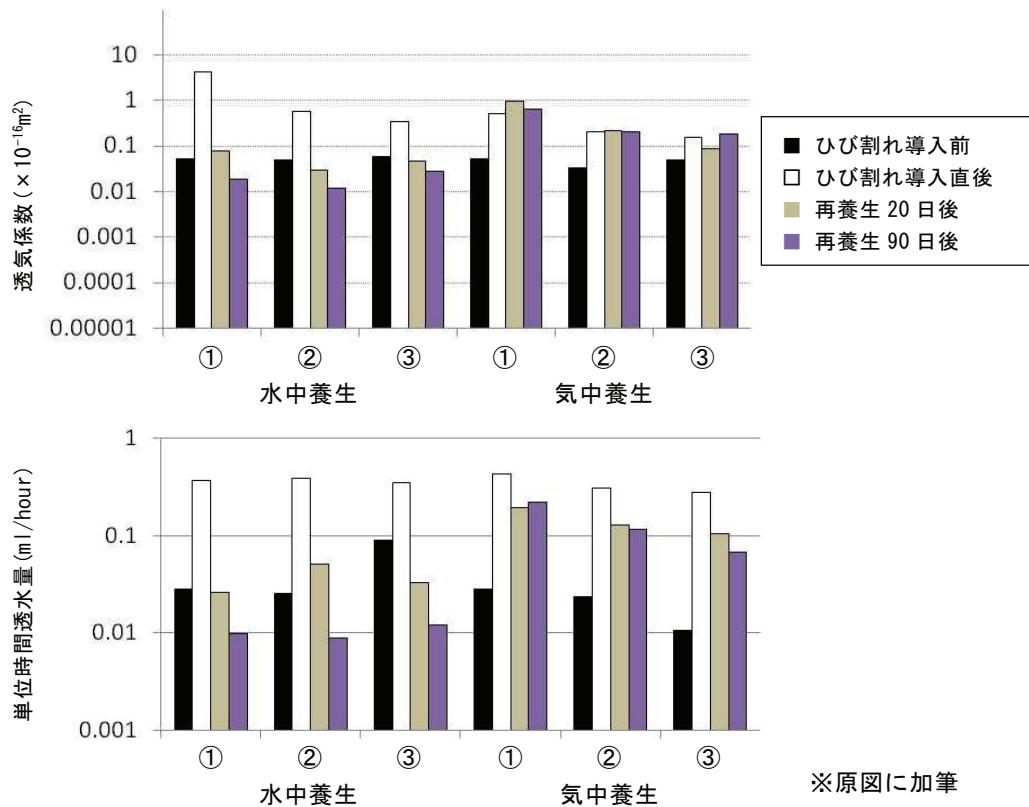


図-2.5 ひび割れ導入前後の透気係数および単位時間透水量 [5]

2. 1. 4 UHP-SHCC の耐海水性

図-2.6 は、飛沫帯環境下に 1 年間暴露した供試体を用いてビッカース硬さ測定を行った結果である [9]。比較用の水中不分離性モルタル（水セメント比 52%）とともに、深さ方向のビッカース硬さの低下は見られない。写真-2.4 は、EPMA 分析 (SO₃, MgO の質量濃度分布を測定) を行った結果である [9]。表面からの MgO の侵入は見られないが、水中不分離性モルタルは表面から 2mm 程度の SO₃ の侵入が確認されている。このことから、海洋環境下における劣化

因子の侵入に対して、UHP-SHCC は高い物質透過抵抗性を有していることが示されている。

図-2.7 は ASTM C 418 に準拠した摩耗試験の結果である [9]。UHP-SHCC は水中不分離性モルタルに比べて約 1.3 倍の耐摩耗性を有しており、海洋環境下における波浪や飛沫等に対する被覆防食性能に優れることが示されている。

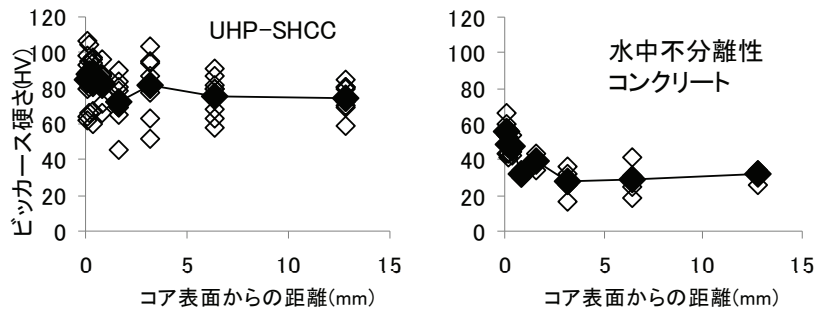


図-2.6 飛沫帯暴露後のビッカース硬さ測定の結果 [9]

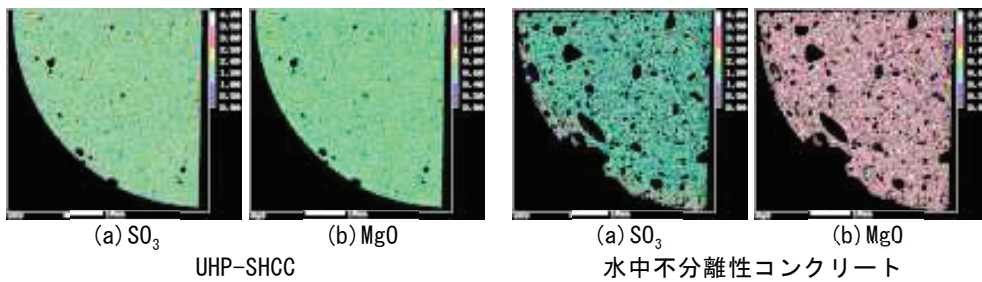
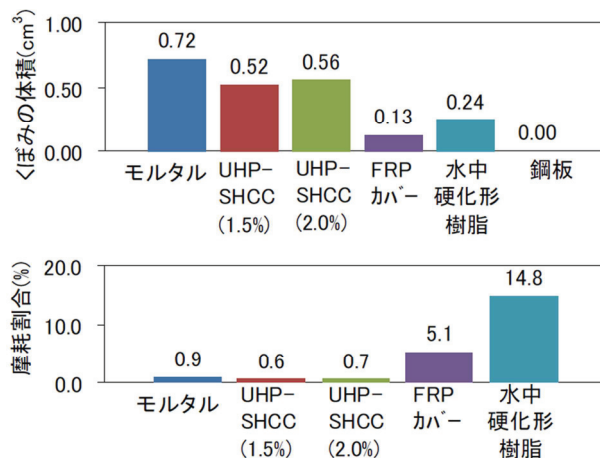


写真-2.4 飛沫帯暴露後の EPMA 分析の結果 [9]



※上段は、摩耗試験によって生じたくぼみの体積を測定した結果

※下段は、一般的な被覆防食工を想定してモルタル被覆厚さ 100mm, FRP カバー厚さ 3mm, 水中硬化形樹脂厚さ 2mm とし、被覆厚さに対する摩耗割合として算出した結果

図-2.7 摩耗試験の結果 [9]

2. 1. 5 UHP-SHCC の耐衝撃性

UHP-SHCC が衝撃荷重を受けたときの破壊性状、およびそれに及ぼす載荷速度と繊維混入率の影響に関して、実験的に検討した結果が報告されている [10]。衝撃力は質量 400kg の重錘を自由落下させて与えており、漁港・魚場の施設の設計の手引き [11] に基づいて、船舶が衝突するときの運動エネルギーから載荷速度を設定し、所定の載荷速度を得るための重錘落下高さを決めている。

図-2.8 に衝撃載荷を行ったときの重錘反力（重錘に作用する反力、重錘に組み込まれたひずみゲージ式ロードセルにて計測）の時刻歴応答を示す。UHP-SHCC の重錘反力は、被覆防食材として従来から用いられている水中不分離性モルタルに比べて、顕著に大きいことが確認されている。また、水中不分離性モルタルは衝撃載荷によって大破したことから、UHP-SHCC は衝撃載荷によるひび割れの発生および局所的な変形の進展に対する抵抗性が高いことが示されている。図-2.9 は、衝撃載荷後に試験体表面（載荷面）のひび割れ（幅 0.03mm 程度以上）を目視確認した結果であり、繊維混入率が増すほどひび割れの発生量が少ない状況が見て取れる。写真-2.5 は、試験体が破壊するまで繰り返し衝撃載荷を与えた後のひび割れ発生状況である。載荷速度によって破壊形態は異なり、載荷速度が小さい場合は押し抜きせん断、載荷速度が大きい場合は局所的な変形が卓越して破壊に至ると報告されている。

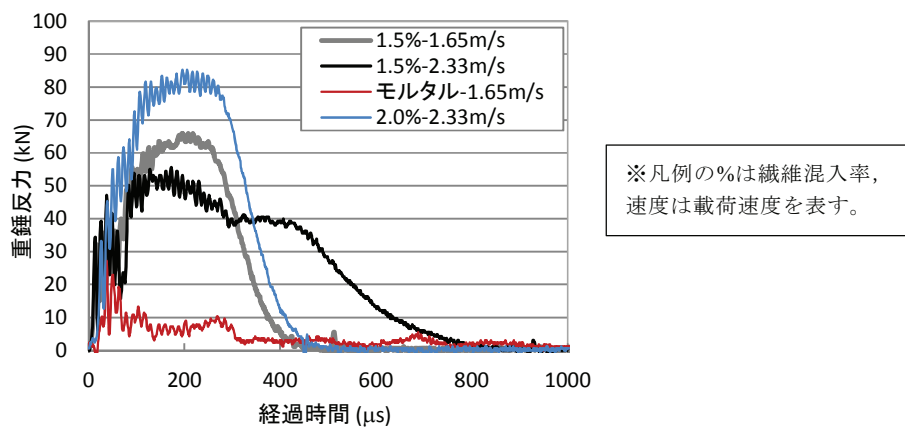


図-2.8 重錘反力の時刻歴応答 [10]

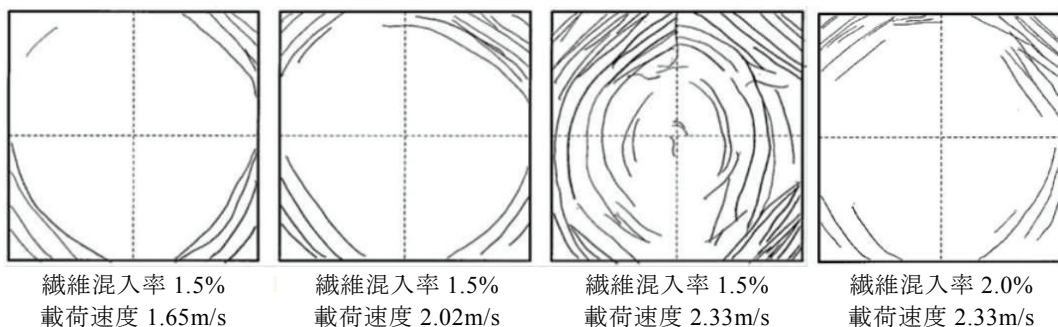


図-2.9 載荷面のひび割れ発生状況 [10]

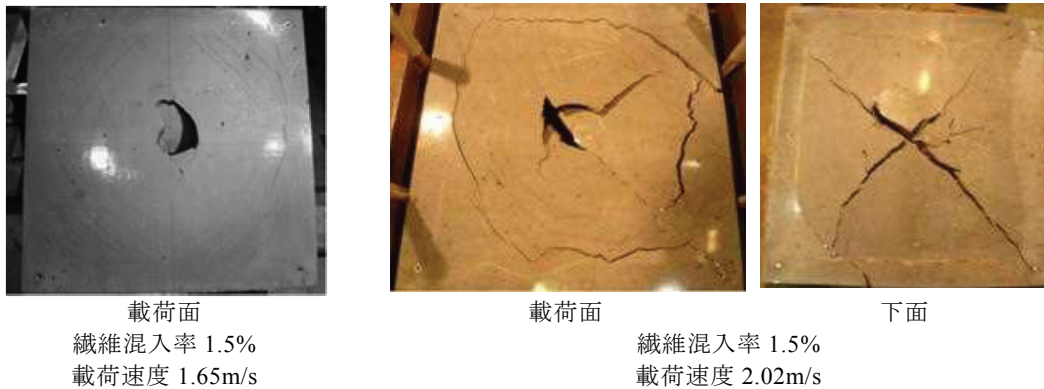


写真-2.5 繰返し衝撃載荷後のひび割れ発生状況 [10]

2. 1. 6 UHP-SHCC を用いた補修・補強に関する研究事例

UHP-SHCC は、高強度、高靱性、高い物質移動抵抗性を有する材料であるため、コンクリート構造物の補修・補強材料としての利用が期待されている。UHP-SHCC を用いた補修・補強に関する研究事例としては、曲げによって損傷した RC 柱に対する補修効果を確認した事例「12」、RC 梁に対する曲げ補強効果を確認した事例 [13]、表面被覆した RC 梁の鉄筋腐食に対する補強効果について検討した事例 [14,15]、コンクリート床板の上面増厚工法について検討した事例 [16]、吹付け工法に関する検討事例 [17] などがある。

ここでは、本研究の鋼管杭巻立てと近い、RC 柱を補修したときの効果を確認した研究事例について紹介する。梅田ら [12] は、地震などにより損傷を受けた RC 柱の早期復旧工法を開発することを目的とした研究を行っており、正負交番載荷試験によって補修効果を確認している。図-2.10 は供試体の概略図と載荷方法である。供試体には載荷により、かぶりコンクリートが剥落して軸方向鉄筋が座屈する程度までの損傷を一度与え（写真-2.6 参照）、吹付けによる補修後に再び載荷を実施した。図-2.11 に示すとおり、最大荷重や変形性能は損傷前（図中では初期載荷と表記）と同程度以上まで回復できることが確認されている。また、比較用のポリマーセメントモルタル補修供試体による結果と比べても、UHP-SHCC の優位性は明らかである。

以上より、UHP-SHCC による巻立て補強は曲げ耐力の回復・向上に大きく貢献できると考えられ、巻立て材としての UHP-SHCC の有効性が裏付けされている。

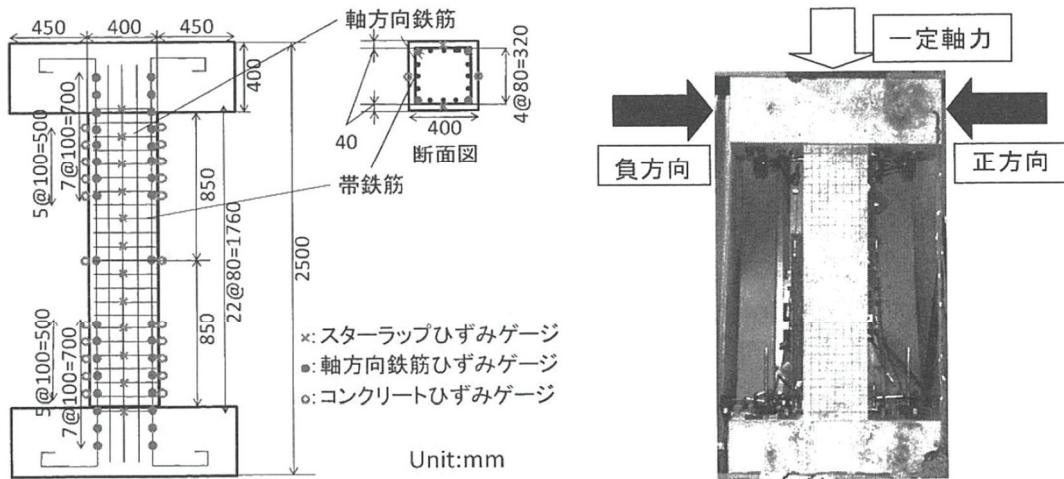


図-2.10 供試体の概略図と載荷方法 [12]

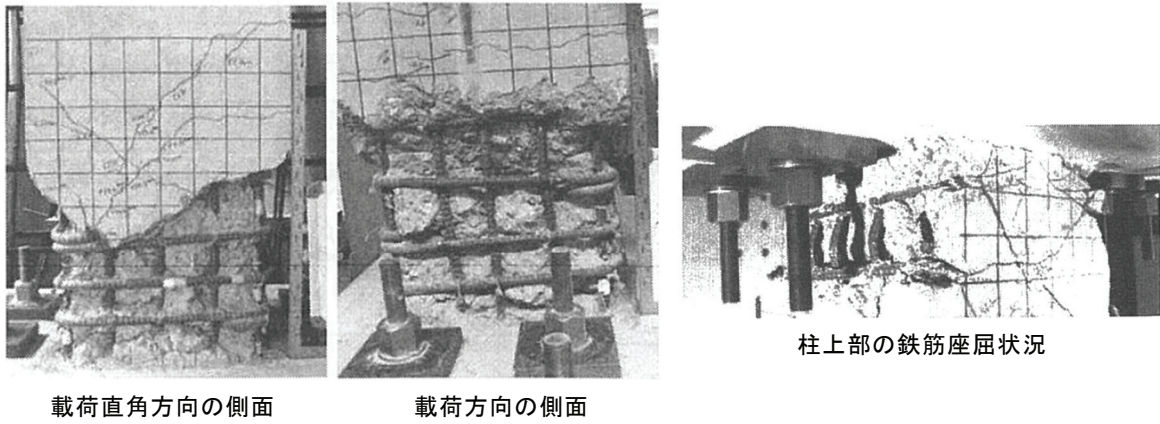


写真-2.6 補修前の損傷状況 [12]

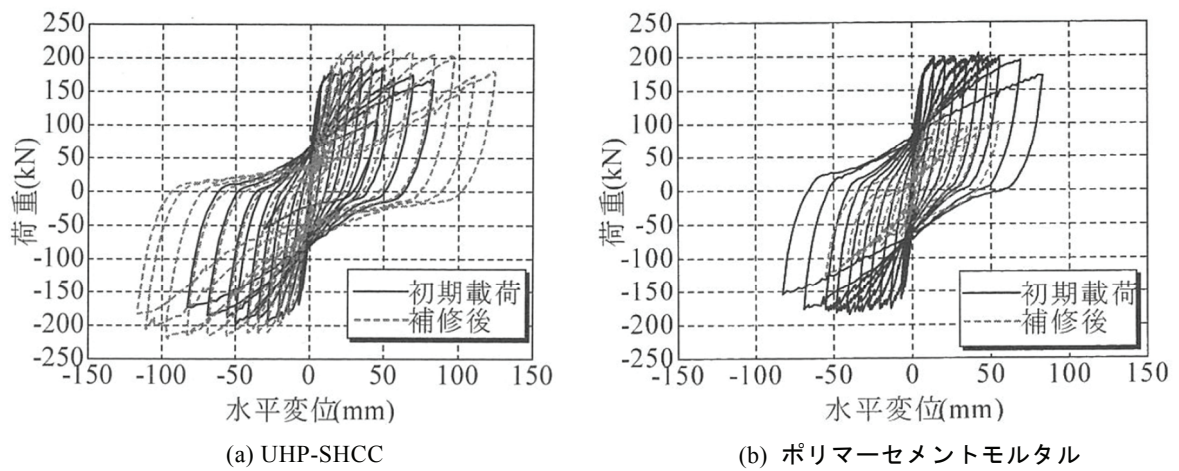


図-2.11 荷重-変位関係 [12]

2. 2 UHP-SHCC の適用例

2. 2. 1 壁高欄の表面保護工

写真-2.7 は、中性化により鉄筋腐食した壁高欄の補修に UHP-SHCC が適用された事例である [18]。UHP-SHCC は現場にて製造し、一般的な吹付け機械を用いて施工され、左官コテによって仕上げが施されている。UHP-SHCC は既設コンクリートとの付着性が高いためプライマーの塗布が不要である一方、コテ仕上げによって平滑な表面とするのに手間を要することが報告されている。



補修前の壁高欄の劣化状況



UHP-SHCC の吹付け施工状況



コテ仕上げ施工状況



完成状況

写真-2.7 壁高欄に対する表面保護工の施工例 [18]

2. 2. 2 道路橋床版上面の予防保全対策

写真-2.8 は、道路橋床版の早期劣化や損傷に対する予防保全対策として、床版上面に UHP-SHCC を適用した事例である [19]。UHP-SHCC は、床版コンクリートならびに内部鋼材の健全性を長期間維持させる目的で床版上面に厚さ 20mm で施工されている。UHP-SHCC の敷均しは、小規模な舗装コンクリートの敷き均しに利用されるコンクリートフィニッシャと、吹付け工法によって行われ、手間や仕上がりの観点からは両者に有意な差は見られず、いずれも良好な施工性であったことが報告されている。



現場製造状況（パン型強制練りミキサ）



コンクリートフィニッシャーによる施工状況



仕上げ状況



吹付け施工状況

写真-2.8 道路橋床版上面に適用した事例 [19]

参考文献

- [1] 土木学会：繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書，コンクリート技術シリーズ 106，pp.I-2，平成 27 年 8 月
- [2] 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，平成 19 年 3 月
- [3] 国枝稔，Ahmed Kamal，中村光，Eugen Brühwiler：超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発，日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.315-320，2007
- [4] 志水康祐，国枝稔，中村光，玉越隆史：超高強度ひずみ硬化型モルタルの物質移動抵抗性の評価，日本材料学会，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 9 巻，pp.253-260，2009.10
- [5] 森本拓也，国枝稔，上田尚史，中村光：超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料の自己治癒特性，日本材料学会，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 9 巻，pp.245-252，2009.10
- [6] 梅田靖司，国枝稔，上田尚史，中村光：石灰石微粉末を添加した超高強度ひずみ硬化型モルタルの材料特性の評価，日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.263-268，2011
- [7] A. Kamal, M. Kunieda, N. Ueda and H. Nakamura: Assessment of crack elongation performance in RC beams repaired by UHP-SHCC, Proceedings of 9th International Summer Symposium, JSCE, Yokohama, University, Japan, pp.5-8, September 2007
- [8] Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, 25, pp.358-365, 1992
- [9] 松本拓也，岩崎英治，加藤絵万，川端雄一郎，岩波光保：海洋環境における超高性能ひずみ硬化型セメント系材料の長期耐久性の検討，土木学会，第 68 回年次学術講演会講演概要集，5-008，pp.15-16，平成 25 年 9 月
- [10] 加藤絵万，川端雄一郎，西田孝弘，岩波光保：超高強度ひずみ硬化型モルタルの耐衝撃性に関する基礎的検討，生産研究，第 64 巻，4 号，pp.591-595，2012
- [11] 全国漁港魚場協会：漁港・魚場の施設の設計の手引 2003 年版，pp.145-151
- [12] 梅田靖司，国枝稔，中村光，玉越隆史，森井直治：超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料で補修された RC 柱の補修効果，日本材料学会，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 10 巻，pp.349-356，2010.10
- [13] A. Kamal, M. Kunieda, N. Ueda and H. Nakamura: Assessment of strengthening effect on RC beams with UHP-SHCC, コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1483-1488，2008
- [14] 森本拓也，国枝稔，河村圭亮，中村光：超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料で表面被覆した RC はりの鉄筋腐食に対する補強効果，日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.373-378，2009

- [15] 国枝稔, 志水康祐, 江口輝行, 上田尚史, 中村光 : 超高強度ひずみ硬化型モルタルの基礎物性と補修材料としての利用法, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.508-521, 2011
- [16] 江口輝行, 国枝稔, 中村光, 玉越隆史 : 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料を用いた上面増厚工法の施工試験, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 10 巻, pp.37-42, 2010.10
- [17] 国枝稔, 上田尚史, 中村光, 玉越隆史 : 超高強度ひずみ硬化型モルタルの吹付け工法の開発, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.349-354, 2009.10
- [18] 田中一能, 松本康弘, 高橋衛 : 超高強度ひずみ硬化型モルタル (UHP-SHCC) を用いた表面保護工の施工, 土木技術資料, No.55(5), pp.38-41, 2013.5
- [19] 国枝稔, 柳井修司, 渡邊有寿, 青山達彦, 鎌田修, 林信也 : 岐阜大学「大学西橋」の施工ー超高強度ひずみ硬化型モルタル (UHP-SHCC) を用いた高耐久床版の施工ー, セメント・コンクリート, No.816, pp.19-25, 2015.2

第3章 UHP-SHCCの被覆防食性能

3.1 はじめに

UHP-SHCCは、塩化物イオンの侵入に対する抵抗性が非常に高く、10%塩化ナトリウム水溶液に28日間浸漬したときの見掛けの拡散係数は $0.067\text{cm}^2/\text{年}$ であることが確認されている[1]。しかし、本技術は、図-3.1に示すとおりUHP-SHCCを栈橋鋼管杭に巻き立てて用いるため、実海洋環境下における塩化物イオンの侵入に対する抵抗性や、鋼材に対する被覆防食性能を確認する必要がある。そこで、UHP-SHCCを被覆した鋼板供試体を用いた暴露試験を実施し、UHP-SHCCの被覆防食性能について確認を行った。

ここで、UHP-SHCCを巻き立てた鋼管杭に対して、地震力等の突発的な外力作用により大きな曲げが生じた場合、UHP-SHCCの表面にはひび割れが発生する可能性がある(図-3.1参照)。このとき、UHP-SHCCの有するひずみ硬化性およびひび割れ分散性が発揮されるため、発生するひび割れの幅は 0.2mm 以下に抑えられる。また、水分が供給される環境下においては、UHP-SHCCが有する自己治癒性能によってひび割れ(幅 $10\mu\text{m}$ 程度)が発生する前と同程度の物質移動抵抗性まで回復することが確認されている[2]。しかし、一般的にはひび割れの発生は耐久性の低下に繋がるため、「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)」[3]においては、使用時において生じる引張ひずみおよびひび割れ幅の影響を考慮して塩化物イオンの拡散係数を設定することとしている。UHP-SHCCの優位性を活用し、本補強技術により栈橋の長寿命化に寄与するためには、ひび割れ部における被覆防食性能を確認しておくことは重要と考えられるため、UHP-SHCCで被覆した鋼板供試体に曲げ载荷を導入してUHP-SHCCの表面にひび割れを発生させた状態の供試体による暴露試験も実施した。

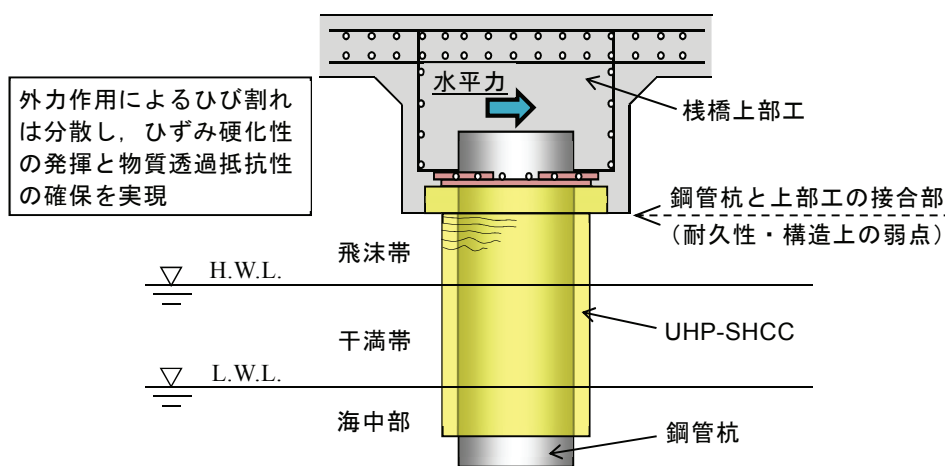


図-3.1 UHP-SHCCを用いた栈橋鋼管杭の補修・補強技術の概念図

3. 2 実験概要

3. 2. 1 検討ケースと供試体概要

表-3.1 に検討ケースを，図-3.2 に供試体の概要を示す。UHP-SHCC の被覆厚は 30mm および 50mm の 2 水準とし，図-3.3 に示す载荷方法によって，最大曲げ引張ひずみ（純曲げ区間 100mm に対する平均ひずみ）で 0%（ひび割れなし），0.5%および 1.5%の 3 水準のひび割れを導入した。供試体に与えた最大曲げ引張ひずみと除荷後の残留ひずみを併記して表-3.1 に示す。また，曲げ载荷の载荷履歴を図-3.4 に示す。

鋼板の UHP-SHCC の被覆側は，サンドブラスト処理によって鋼板表面の黒皮を除去し，UHP-SHCC との定着用鉄筋 (D13) を 2 本設置した。供試体の製作は 20℃の恒温室内で実施し，約 1 カ月間養生した後ひび割れを導入して，その後ひび割れ面以外（鋼板部も含む）をエポキシ樹脂で被覆して暴露供試体とした。なお，供試体は各ケース 1 体とした。供試体に用いた UHP-SHCC の配合を表-3.2 に，UHP-SHCC の構成材料を表-3.3 に示す。UHP-SHCC の品質は，モルタルフロー153mm，空気量 4.2%，材齢 28 日（標準水中養生）における圧縮強度 112N/mm²，静弾性係数 27.2kN/mm²であった。

表-3.1 検討ケースと供試体に与えた最大曲げ引張ひずみ

検討ケース		供試体に導入した最大ひずみ(%) (除荷後の残留ひずみ)	
UHP-SHCC の被覆厚(mm)	最大曲げ引張ひずみの目標(%)	1 年暴露供試体	3 年暴露供試体
30	0	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
	0.5	0.57 (0.23)	0.51 (0.17)
	1.5	1.51 (0.44)	1.51 (0.42)
50	0	0.00 (0.00)	—
	0.5	0.50 (0.21)	—
	1.5	1.51 (0.51)	—

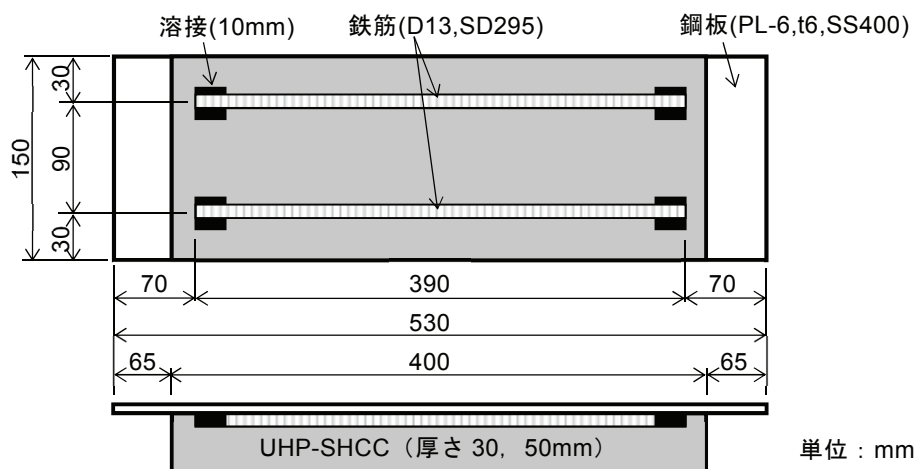


図-3.2 供試体概要

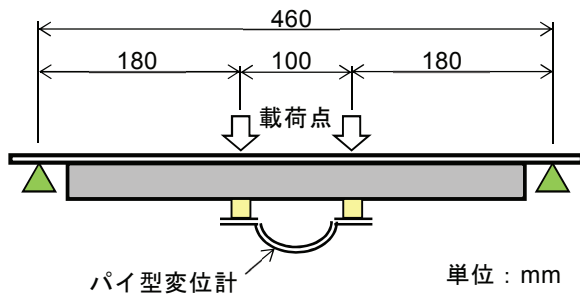


図-3.3 曲げ荷荷によるひび割れ導入方法

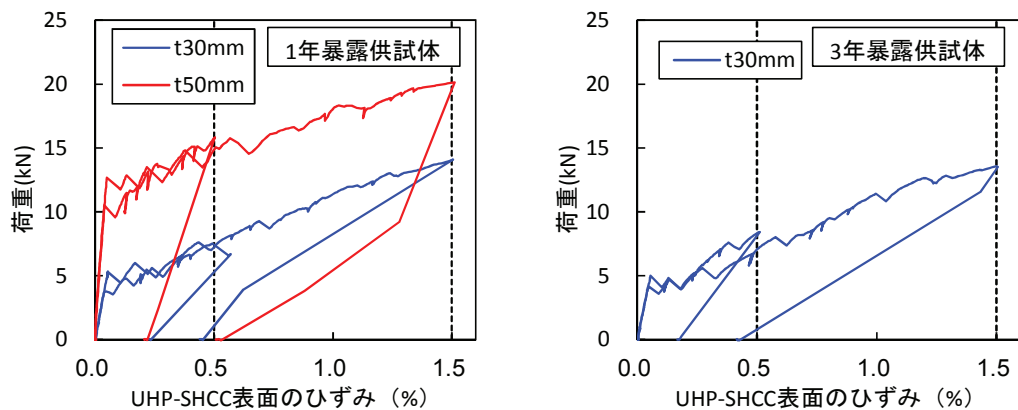


図-3.4 曲げ荷荷によるひずみ導入結果

表-3.2 UHP-SHCC の配合

W/B	SF/B	EX/B	S/B	繊維混入率 (単位体積%)	SP (B×%)	D (B×%)
0.22	0.15	0.025	0.10	1.5	2.0	0.0044

$$B=C+SF+EX$$

表-3.3 UHP-SHCC の構成材料

記号	材料	種類および物性等
W	水	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)
C	結合材 (B)	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
SF		シリカフューム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 200,000cm ² /g)
EX		膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.10g/cm ³)
S	骨材	珪砂 (密度 2.68g/cm ³)
PE	繊維	高強度ポリエチレン短繊維 (密度 0.97g/cm ³ , 直径 0.012mm, 長さ 6mm, 弾性係数 88GPa, 引張破断強度 2,700MPa)
SP	混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.10g/cm ³)
D		消泡剤 (ポリエーテル系, 密度 1.00g/cm ³)

3. 2. 2 暴露環境と試験項目

供試体は、横須賀市に立地する栈橋下の飛沫帯に、写真-3.1 に示すとおり暴露面（ひび割れ導入面）を下向きに設置し、約1年間および3年間暴露した。

所定の暴露期間終了後は、暴露面中央部で交流インピーダンス法（測定周波数 10Hz, 20mHz）により分極抵抗および自然電位を測定した。分極抵抗測定に用いた装置を図-3.5 に、得られた分極抵抗の判定基準を表-3.4 に示す。分極抵抗測定後は、図-3.6 に示すとおり UHP-SHCC を鋼板から剥がし取り、カッター切断面において 0.1N 硝酸銀溶液の噴霧による塩化物イオンの浸透状況、および鋼板表面の腐食状況を確認した。また、暴露3年後においてはカッター切断面において EPMA 分析（Cl 濃度分布測定）も実施した。



写真-3.1 暴露状況（栈橋下の飛沫帯，暴露面を下向きに設置）

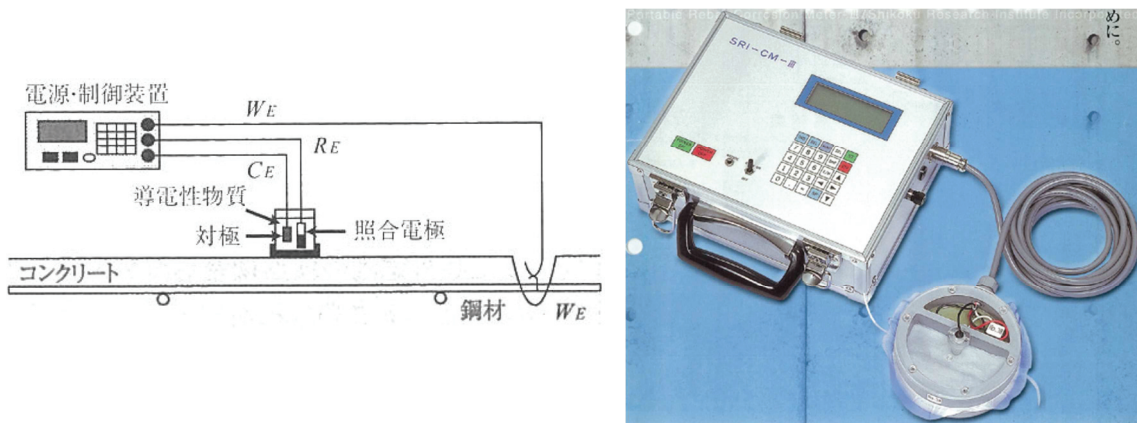


図-3.5 分極抵抗測定概要と装置 [4]

表-3.4 CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）による腐食速度の判定基準 [4]

腐食速度測定値 (腐食電流密度) I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度の判定	分極抵抗測定値* R_{ct} ($\text{k}\Omega\text{cm}^2$)	侵食速度* PDY (mm/年)
0.1~0.2 より小	不動態体状態 (腐食なし)	130~260 より大	0.0011~0.0023 より小
0.2~0.5	低~中程度の腐食速度	52~130	0.0023~0.0058
0.5~1	中~高程度の腐食速度	26~52	0.0058~0.0116
1 より大	激しい, 高い腐食速度	26 未満	0.0116 より大

*分極抵抗測定値および侵食速度は、 $I_{corr} = K \cdot 1/R_p$ ($K=0.026$ (V)), $1\mu\text{A}/\text{cm}^2 \rightarrow 0.0116\text{mm}/\text{年}$ により求めた値である (CEBが規定しているのは、腐食電流密度 I_{corr} と腐食速度の判定の関係のみ)。

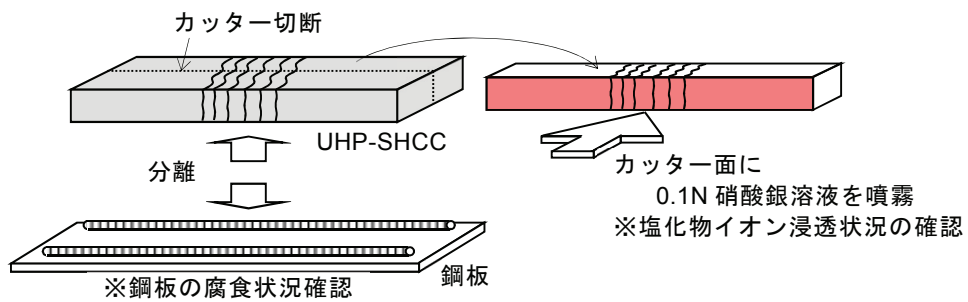


図-3.6 塩化物イオン浸透状況と鋼板腐食状況の確認方法

3. 3 実験結果

3. 3. 1 自然電位と分極抵抗

自然電位の測定結果を図-3.7に示す。この結果では、UHP-SHCCの被覆厚や最大曲げ引張ひずみの大きさが自然電位に及ぼす影響は明確ではなかった。また、測定値はおおよそ-350~-600mV vs CSEの範囲にあり、ASTM C876による判定基準 [5] では90%以上の確率で腐食ありと判定される範囲であった。

分極抵抗の測定結果を図-3.8に示す。暴露期間にかかわらず測定結果はほぼ同じ値となっており、腐食が進行している様子は見られなかった。また、CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）の判定基準によると、すべての値で不動態状態（腐食なし）と判定される範囲であった。

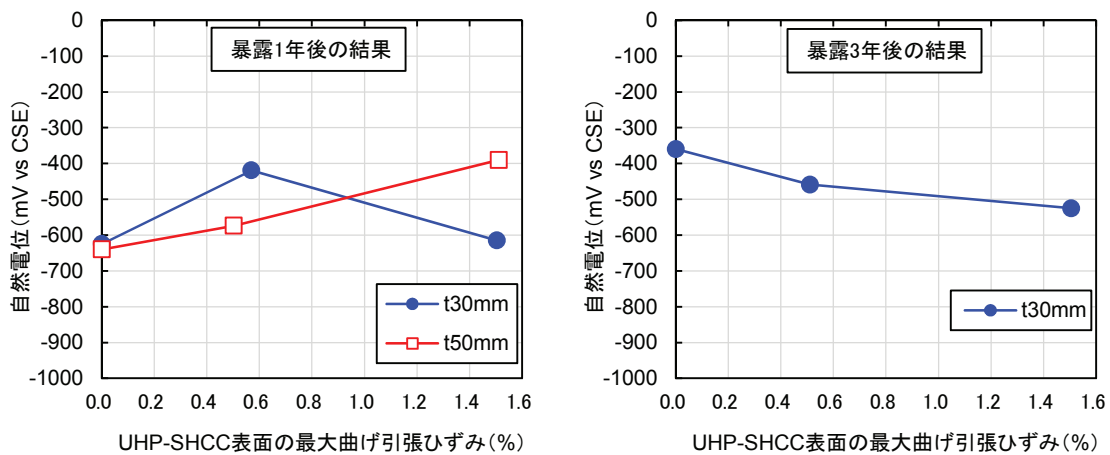


図-3.7 自然電位

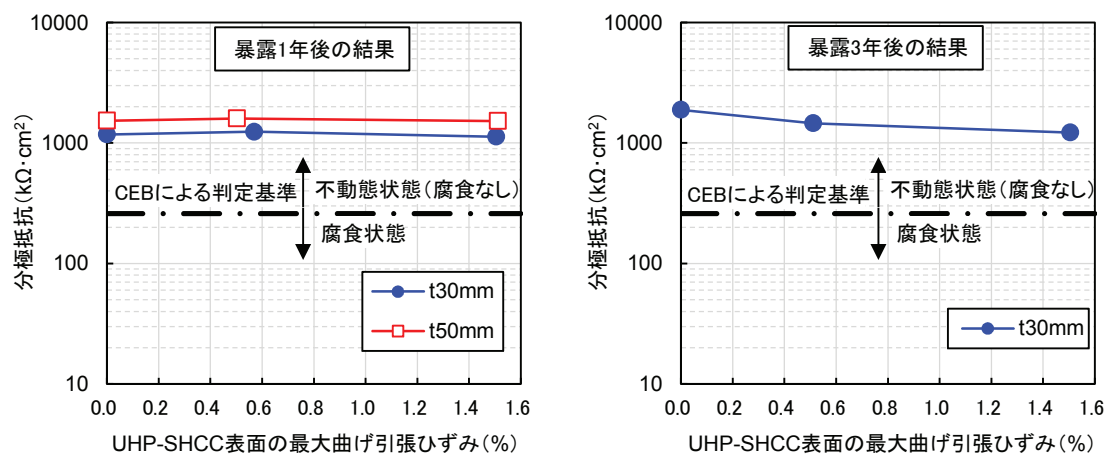
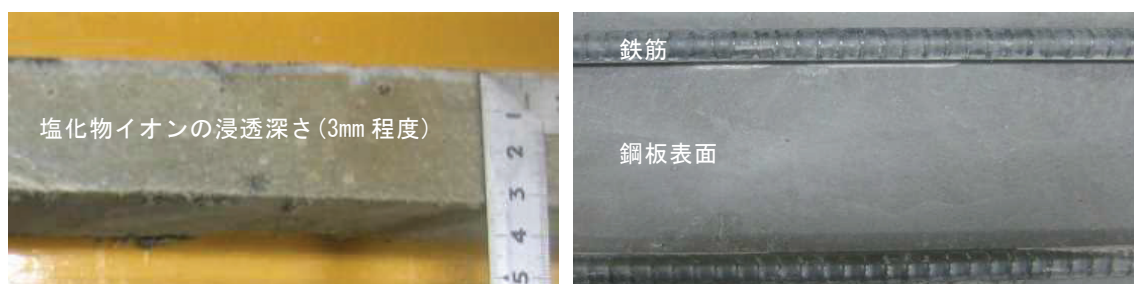


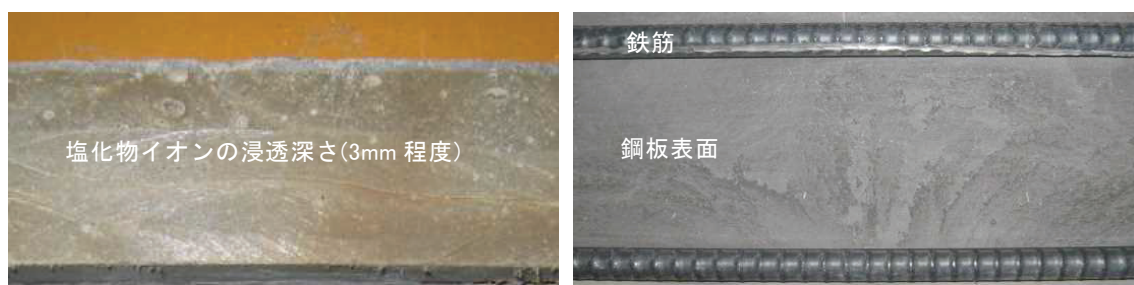
図-3.8 分極抵抗

3. 3. 2 ひび割れなし供試体の解体調査

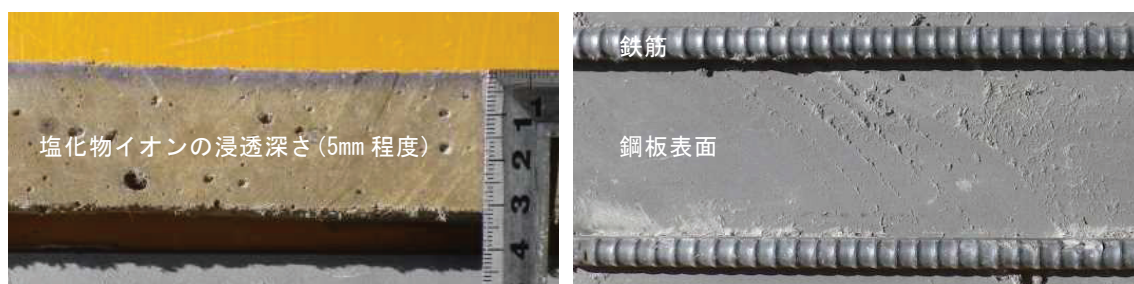
写真-3.2に、ひび割れなし供試体の塩化物イオンの浸透状況と鋼材表面の状況を示す。暴露1年後においては塩化物イオンの浸透は3mm程度、暴露3年後では5mm程度浸透していた。また、鋼材表面は全く腐食していないことが確認された。この結果から、UHP-SHCCは鋼材腐食に対して優れた被覆防食性能を有することがわかった。



<暴露1年後，UHP-SHCC被覆厚30mm>



<暴露1年後，UHP-SHCC被覆厚50mm>



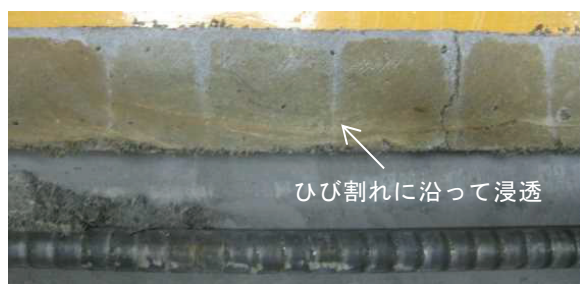
<暴露3年後，UHP-SHCC被覆厚30mm>

写真-3.2 ひび割れなし供試体の暴露後の解体調査結果

3. 3. 3 ひび割れあり供試体の解体調査

写真-3.3～3.4に、曲げ引張ひずみを導入した供試体における塩化物イオンの浸透状況と鋼材表面の腐食状況を示す。塩化物イオンはひび割れに沿って浸透しており、ひび割れが大きい箇所では鋼板表面まで塩化物イオンが到達している状況も確認された。また、鋼板表面にはひび割れの痕跡のような縞模様が確認でき、その位置の鉄筋には軽微な腐食が観察された。このことから塩化物イオンは鉄筋位置まで到達していたと考えられる。鋼板表面部においては、すべてのケースで腐食は確認されなかった。暴露1年後と暴露3年後を比べると、ひび割れ部

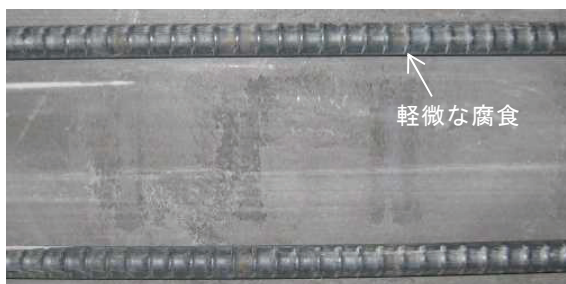
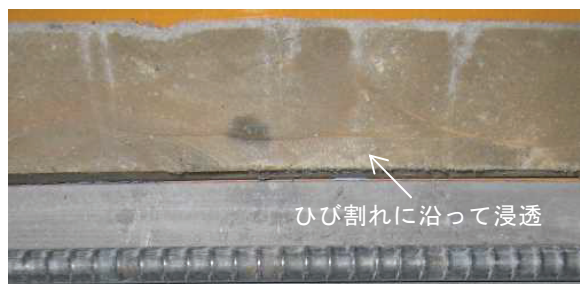
における塩化物イオンの浸透状況および鉄筋の軽微な腐食の進展は見られなかった。以上より、UHP-SHCC は非常に緻密な材料であることから、塩化物イオンが浸透しても鋼材腐食に必要な酸素と水の供給が抑制されるため、鋼材腐食の進行が非常に遅いと推察される。また、UHP-SHCC の被覆厚さ 30mm で 0.4%の曲げ引張ひずみ（残留ひずみ）を有しても、暴露 3 年の範囲では被覆防食性能を保持していたことが確認された。



<暴露 1 年後, UHP-SHCC 被覆厚 30mm, 最大曲げ引張ひずみ 0.57%>



<暴露 1 年後, UHP-SHCC 被覆厚 30mm, 最大曲げ引張ひずみ 1.51%>

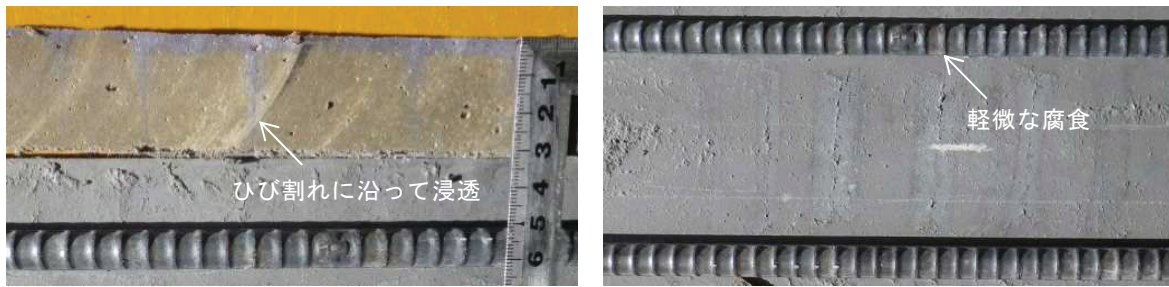


<暴露 1 年後, UHP-SHCC 被覆厚 50mm, 最大曲げ引張ひずみ 0.50%>

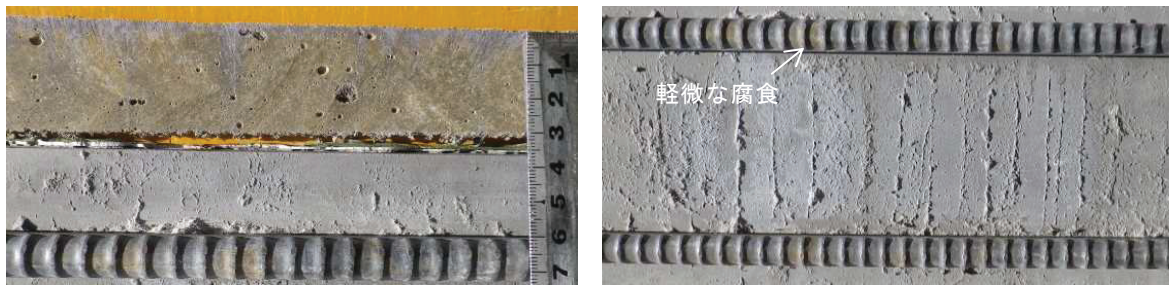


<暴露 1 年後, UHP-SHCC 被覆厚 50mm, 最大曲げ引張ひずみ 1.51%>

写真-3.3 ひび割れあり供試体の暴露 1 年後の解体調査結果



<暴露3年後，UHP-SHCC 被覆厚 30mm，最大曲げ引張ひずみ 0.51%>



<暴露3年後，UHP-SHCC 被覆厚 30mm，最大曲げ引張ひずみ 1.51%>

写真-3.4 ひび割れあり供試体の暴露3年後の解体調査結果

3. 3. 4 EPMA 法による塩化物イオンの面分析

写真-3.4 に示す暴露3年後の最大曲げ引張ひずみ 1.5%を与えた供試体を用いて、EPMA 法により塩化物イオンの面分析を行った結果を写真-3.5 に示す。ひび割れに沿って塩化物イオンの濃度が高い状況が確認でき、前述の解体調査で確認した塩化物イオンの浸透状況と合致していることが確認された。

続いて、写真-3.5 のひび割れの無い箇所 (①)、曲げによって発生した平均的なひび割れ箇所 (②) および比較的大きなひび割れを含む箇所 (③) における深さ方向の幅 5mm で平均化した塩化物イオンの濃度分布を図-3.9 に示す。また、フィックの第二法則に基づいた拡散方程式の解を用いて回帰分析を行い、塩化物イオンの見掛け拡散係数 (D) を算出した結果を図-3.9 に併記した。実海洋環境下で3年間暴露した UHP-SHCC の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は $0.012\text{cm}^2/\text{年}$ と非常に小さいことが確認された。また、ひび割れを含む箇所 (②, ③) における見掛けの拡散係数も一般的なコンクリート (普通ポルトランドセメント, $W/C=50\%$) に比べて約 $1/20$ 以下と小さかった。このことから、本実験で導入したひび割れの範囲では、UHP-SHCC における塩化物イオンの浸透抵抗性は高いと考えられる。

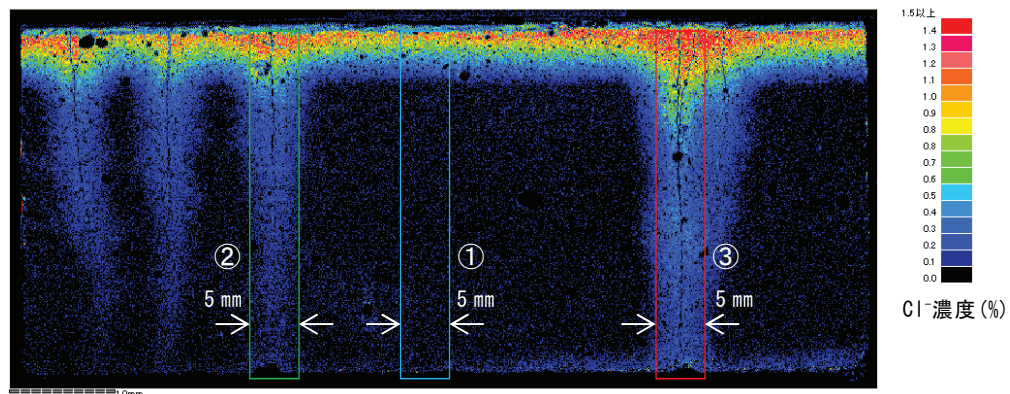


写真-3.5 EPMA 法による塩化物イオンの面分析結果

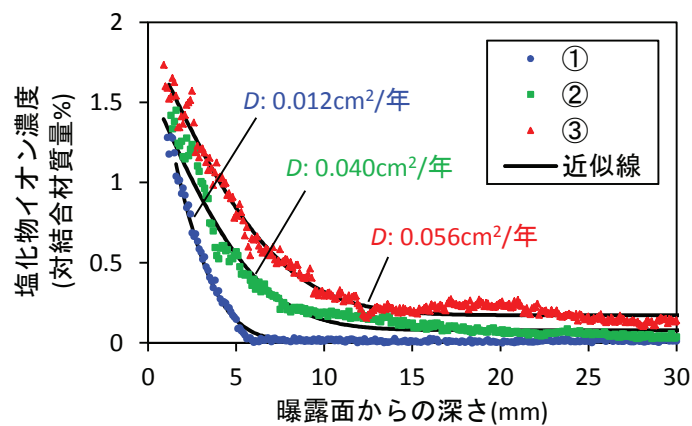


図-3.9 深さ方向の塩化物イオンの濃度分布

3. 4 まとめ

本検討では、UHP-SHCC を被覆した鋼板供試体を用いた暴露試験を実施し、UHP-SHCC の被覆防食性能について確認した。また、UHP-SHCC の表面にひび割れを発生させた供試体を用いた暴露試験も実施した。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 実海洋環境下の飛沫帯に3年間暴露したUHP-SHCCの塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、 $0.012\text{cm}^2/\text{年}$ と非常に小さいことが確認された。
- 2) ひび割れを導入した供試体を用いて、暴露3年後に塩化物イオンの浸透状況および鋼材の腐食状況を確認した結果、ひび割れを通して塩化物イオンは浸透するものの、最大曲げ引張ひずみで1.5%（残留ひずみで0.4%程度）を与えたかぶり30mmの鋼板表面には腐食が生じていないことが確認された。
- 3) 一方、かぶり17mmの鉄筋表面には軽微な腐食が確認された。しかし、暴露1年後から暴露3年後にかけて腐食の進行は見られないことから、ひび割れが発生した状態であっても腐食速度は極めて小さいと推察される。

- 4) 本実験の範囲において、ひび割れ部における塩化物イオンの見掛けの拡散係数は $0.040 \sim 0.056 \text{cm}^2/\text{年}$ であった。
- 5) 得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数を用いて塩害照査 [6] (ここでは、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 と仮定) を行うと、かぶり 34mm (鋼管杭への UHP-SHCC 巻立て厚さ 50mm , 定着鉄筋 D16 とした場合) における耐用年数は 96 年と算定され、UHP-SHCC の被覆防食性能は非常に高いことが確認された。
- 6) 一方、ひび割れ部の拡散係数 $0.056 \text{cm}^2/\text{年}$ を用いて計算した場合は、耐用年数は 21 年と算定される。そのため、ひび割れを発生させないようにすることが長寿命化に大きく寄与することが確認された。
- 7) 今後の課題としては、長期暴露によるデータの蓄積とともに、UHP-SHCC に埋設された鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度を評価する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 志水康祐, 国枝稔, 中村光, 玉越隆史: 超高強度ひずみ硬化型モルタルの物質移動抵抗性の評価, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.253-260, 2009.10
- [2] 森本拓也, 国枝稔, 上田尚史, 中村光: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料の自己治癒特性, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.245-252, 2009.10
- [3] 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー127, 平成 19 年 3 月
- [4] 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'16 [基礎編], pp.194-198, 2016
- [5] ASTM C876: Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete
- [6] 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.148-156

第4章 UHP-SHCCの収縮特性

4.1 はじめに

UHP-SHCCは水結合材比が小さく、かつ粉体量が多いセメント系材料であるため、自己収縮ひずみは非常に大きくなる。超高強度コンクリート（モルタルも含む）の自己収縮の低減対策としては、膨張材や収縮低減剤の添加が有効であることが報告されているが[1,2]、UHP-SHCCのようなひずみ硬化型セメント系材料で検討された事例は少ない。

ここで、本補強技術は、UHP-SHCCを鋼管杭に巻き立てることで防食と補強を同時に期待している。そのため、UHP-SHCCの収縮は鋼管杭に拘束される形となるため、UHP-SHCCの収縮に伴いひび割れが生じる可能性は高いと考えられる。写真-4.1は、実際の栈橋鋼管杭にUHP-SHCCを巻き立てたあとに観察された表面ひび割れである。材齢3日に型枠を取り外した際にはひび割れは確認されなかったが、時間の経過に伴いひび割れが確認されるようになった。ひび割れ幅は0.05mm以下と小さいため被覆防食性能は保持されると考えられるが、外観上の見栄えは好ましくはない。

また、本補強技術の実施工においては、UHP-SHCCを型枠内へ確実に充填させることが重要であり、UHP-SHCCの流動性を確保するためには、低熱ポルトランドセメントと石灰石微粉末を使用することが有効であることを確認している。そこで、本章では低熱ポルトランドセメントと石灰石微粉末を使用した配合をベースにUHP-SHCCの収縮低減策を検討する目的で、膨張材と収縮低減剤を使用した配合の自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみを測定し、収縮低減効果を確認した。また、リング型拘束収縮試験により型枠取り外し後のひび割れの発生状況を観察し、ひび割れ本数と収縮ひずみの関係を整理した。



写真-4.1 実栈橋鋼管杭にUHP-SHCCを巻き立てた後に観察された表面ひび割れ発生状況

4. 2 実験概要

ここでは、3つのシリーズで実験を行った。シリーズ1では、膨張材、収縮低減剤、収縮低減型高性能減水剤を使用した配合を用いて自己収縮試験および長さ変化試験（以下、乾燥収縮試験）を実施し、収縮低減効果を確認した。シリーズ2では、シリーズ1の結果を受けて、収縮低減剤の添加率を変化させた配合を用いて自己収縮試験および乾燥収縮試験を実施し、収縮低減効果を確認した。また、乾燥収縮試験においては供試体の乾燥開始材齢を変化させたときの違いを確認した。シリーズ3では、シリーズ2と同様の配合を用いてリング型拘束収縮試験を実施し、発生したひび割れの本数と収縮ひずみの関係を整理した。以下に3つのシリーズの詳細な実験概要を示す。

4. 2. 1 UHP-SHCCの配合

表-4.1にUHP-SHCCの配合を、表-4.2に使用材料を示す。すべての配合において、粉体材料の構成は低熱ポルトランドセメント、シリカフューム、石灰石微粉末および膨張材とした。水結合材比は0.22（ここでは、石灰石微粉末も結合材の一部とした）、砂結合材比は0.10とし、シリカフュームは結合材の質量に対して置換率15%、石灰石微粉末は置換率17%とした。また、繊維混入率は単位体積あたり1.5%とした。

配合の検討ケースは、膨張材の添加率を結合材の質量に対して2.7%（40kg/m³相当）としたBase、膨張材の添加率を3.4%に増加したEX、収縮低減剤を結合材の質量に対して0.7%添加したSRA0.7、Base配合の高性能減水剤を収縮低減型に変更したSSP、収縮低減型高性能減水剤を使用し、かつ収縮低減剤の添加率を0.7%、2.0%、4.0%としたSRA0.7SSP、SRA2.0SSP、SRA4.0SSPとした。なお、高性能減水剤の添加率は結合材量に対して3.0%一定とし、また、製造時の繊維混入によるエントラップトエアを低減させるため、消泡剤を結合材量に対して0.03%添加した。

表-4.1 UHP-SHCCの配合

記号	W/B	SF/B	LP/B	EX/B	S/B	F.vol (%)	SP 種類	SP (B×%)	D (B×%)	SRA (B×%)
Base	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	SP1	3.0	0.03	—
EX	0.22	0.15	0.17	0.034	0.10	1.5	SP1	3.0	0.03	—
SRA0.7	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	SP1	3.0	0.03	0.7
SSP	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	SP2	3.0	0.03	—
SRA0.7SSP	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	SP2	3.0	0.03	0.7
SRA2.0SSP	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	SP2	3.0	0.03	2.0
SRA4.0SSP	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	SP2	3.0	0.03	4.0

B=C+SF+LP+EX（ここでは、石灰石微粉末も結合材の一部とした）、F.vol：繊維混入率

表-4.2 UHP-SHCC の使用材料

記号	材料	種類および物性等
W	水	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)
C	結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント (密度 3.24g/cm ³)
SF		シリカフューム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 200,000cm ² /g)
LP		石灰石微粉末 (密度 2.70g/cm ³)
EX		膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.10g/cm ³)
S	骨材	7号珪砂 (密度 2.68g/cm ³)
PE	繊維	高強度ポリエチレン繊維 (密度 0.97g/cm ³ , 直径 0.012mm, 長さ 6mm, 弾性係数 88GPa, 引張破断強度 2,700MPa)
SP	混和剤	SP1: 高性能減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.10g/cm ³)
		SP2: 収縮低減型高性能減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.05g/cm ³)
D		消泡剤 (ポリエーテル系, 密度 1.00g/cm ³)
SRA		収縮低減剤 (有機系界面活性剤が主成分, 密度 1.065g/cm ³)

表-4.3 UHP-SHCC の圧縮強度および静弾性係数

記号	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)
Base	100.0	27.7
EX	99.4	26.7
SRA0.7	96.4	27.5
SSP	96.5	27.0
SRA0.7SSP	95.3	26.5
SRA2.0SSP	89.7	27.5
SRA4.0SSP	73.4	27.4

表-4.3 に材齢 28 日 (標準水中養生, 20°C) における各配合の圧縮強度および静弾性係数を示す。SRA2.0SSP および SRA4.0SSP の圧縮強度が他に比べて小さく, 収縮低減剤の添加率が大きいほど強度は小さくなる傾向が確認された。これは, 収縮低減剤がセメントと水の水和反応を遅延させているためと考えられるが [3], 本研究においては強度の影響は考慮せずに検討を進めた。

4. 2. 2 検討ケースと試験項目

1) シリーズ 1

シリーズ 1 の検討ケースを表-4.4 に示す。自己収縮試験は「(仮) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」[4] に準拠し, 20±1°Cの恒温室にて低弾性型 (見かけの弾性係数 40N/mm²) の測温機能付き埋込み型ひずみ計を 100×100×400mm の角柱供試体に埋設してひずみ計測を実施した。なお, 計測された実ひずみから温度ひずみ (ここでは, UHP-SHCC の線膨張係数を 10×10⁻⁶/°Cとした) を差し引いた値を自己収縮ひずみとした。供試体は 1 ケースあたり 1 体とし, 試験中は供試体からの水分逸散がないように完全密封した。乾燥収縮試験は JIS A 1129-2 (コンタクトゲージ法) に準拠し, 材齢 7 日まで標準水中養生したあとに基長測定を行った。

供試体の寸法は 100×100×400mm，1 ケース 3 体とし，20±1℃，湿度 60±5%の恒温恒湿室にて定期的に長さ変化率（以下，乾燥収縮ひずみ）を測定した。

表-4.4 シリーズ1の検討ケースおよび試験項目

検討ケース	試験項目	
	自己収縮	乾燥収縮
Base	○	○（乾燥開始材齢：7日）
EX	○	○（乾燥開始材齢：7日）
SRA0.7	○	○（乾燥開始材齢：7日）
SSP	○	○（乾燥開始材齢：7日）
SRA0.7SSP	○	○（乾燥開始材齢：7日）

2) シリーズ2

シリーズ2の検討ケースを表-4.5に示す。自己収縮試験および乾燥収縮試験はシリーズ1と同様の方法で行った。ただし，乾燥収縮試験における基長測定は材齢2日とし，乾燥開始材齢が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を確認するため，SSPのみ乾燥開始材齢を1日，2日，7日（7日までは標準水中養生）の3水準で行った。

表-4.5 シリーズ2の検討ケースおよび試験項目

検討ケース	試験項目	
	自己収縮	乾燥収縮
SSP	○	○（乾燥開始材齢：1日，2日，7日）
SRA2.0SSP	○	○（乾燥開始材齢：2日）
SRA4.0SSP	○	○（乾燥開始材齢：2日）

3) シリーズ3

シリーズ3の検討ケースを表-4.6に示す。本シリーズでは，UHP-SHCCを鋼管の外周に巻き立てることで比較的容易に様な拘束を与えられるリング型拘束収縮試験 [5] を実施した。供試体の概要を図-4.1に示す。鋼管（STK400）は，外径 812.8mm，板厚 12.7mm，高さ 150mm とし，鋼管の外周に UHP-SHCC を 50mm 厚および 70mm 厚の 2 水準で巻き立て供試体とした。側面の型枠は材齢 2 日に取り外し，UHP-SHCC 表面のひび割れの発生状況を観察した。なお，UHP-SHCC を打ち込んだ直後から天端面はビニルシートを用いて封緘養生し，側面の型枠を取り外した後も天端面および底面（型枠存置）からの乾燥を防止した。また，鋼管内面の高さ中央にひずみゲージを 4 カ所貼り付け，打込み直後からの円周方向のひずみを計測した。なお，供試体は 20±2℃の恒温室（湿度 55～75%）にて製作および静置した。

表-4.6 シリーズ3の検討ケース

検討ケース	乾燥開始材齢	巻立て厚
SSP	2日	50mm, 70mm
SRA2.0SSP	2日	50mm
SRA4.0SSP	2日	50mm

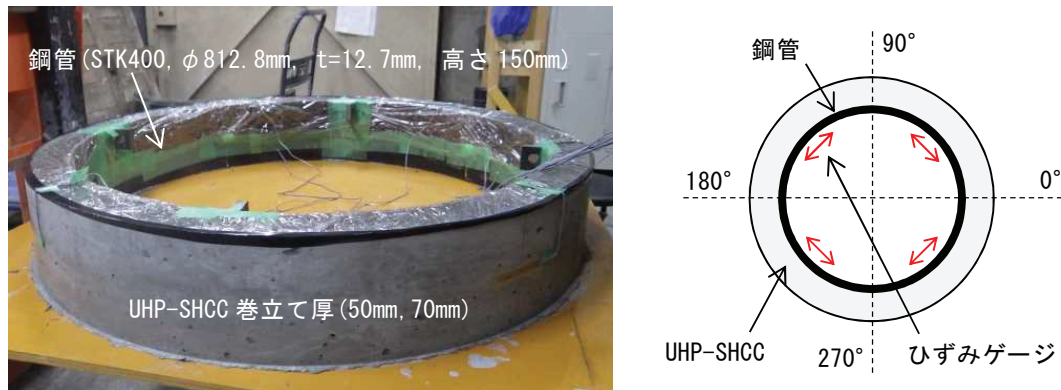


図-4.1 シリーズ3の供試体概要

4.3 実験結果

1) シリーズ1

図-4.2に、材齢2日、7日、28日および91日時点のBaseの自己収縮ひずみに対する各配合の低減量を示す。なお、図中には、SRA0.7とSSPの結果を足し合わせた計算値(SRA0.7+SSP)も併記した。膨張材の増量、収縮低減剤の使用および収縮低減型高性能減水剤の使用により、自己収縮ひずみは低減された。また、膨張材の増量では材齢による違いは小さいが、収縮低減剤(収縮低減型高性能減水剤を含む)の効果は材齢の経過に伴って増加することが確認された。このことから、収縮低減剤(収縮低減型高性能減水剤を含む)の使用により自己収縮ひずみを大幅に低減できると考えられる。SRA0.7SSPとSRA0.7+SSP(計算値)を比較すると、材齢が経過するにしたがって低減量に差が見られた。これは、収縮低減剤と収縮抑制型高性能減水剤のそれぞれの低減量を足し合わせるほどの効果は期待できないことを示していると考えられる。なお、EXのひずみ低減量が他に比べて小さかったのは、Baseに既に2.7wt.%の膨張材が添加されていたためであり、0.7wt.%(合計3.4wt.%添加)の増分では自己収縮ひずみの抑制効果に与える影響は小さかったと考えられる。

図-4.3に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。材齢190日におけるBaseの乾燥収縮ひずみは約1530 μ 、EXは約1510 μ 、SRA0.7は約1340 μ 、SSPは約1160 μ 、SRA0.7SSPは約1180 μ であった。Baseに対してEXの乾燥収縮ひずみの抑制効果が小さかったのは、膨張材による膨張効果は材齢7日程度で収束するためであり、本実験では材齢7日からひずみ測定を行ったためと考えられる。一方、収縮低減剤および収縮低減型高性能減水剤の使用により、乾燥収縮ひずみは抑制されることが確認された。

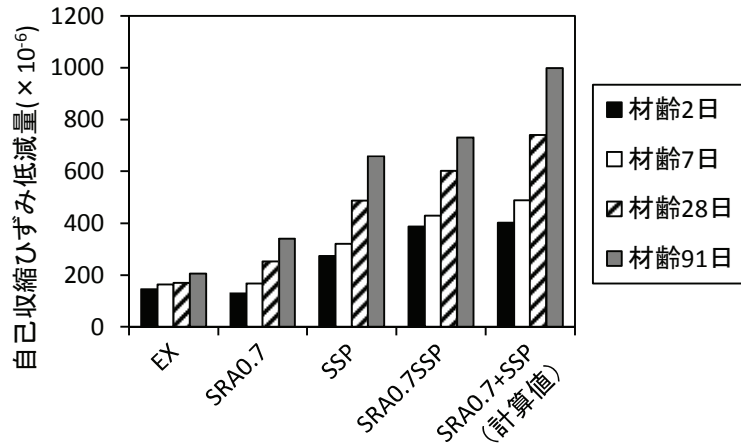


図-4.2 自己収縮ひずみの低減量 (シリーズ 1)

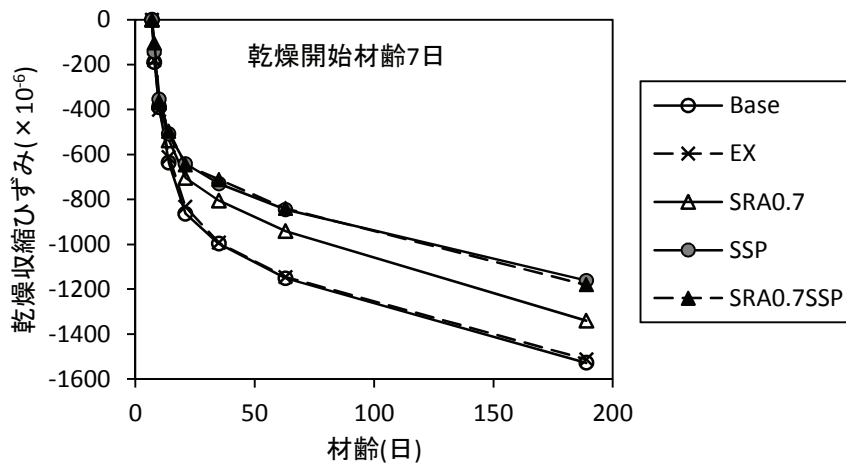


図-4.3 乾燥収縮ひずみ経時変化 (シリーズ 1)

2) シリーズ 2

図-4.4 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。なお、自己収縮ひずみおよび経過日数の起点は、計測値が急激な変化を示した時点とした。この時点は、凝結の始発時刻とほぼ同じであったことを確認している。SRA2.0SSP および SRA4.0SSP の 15 日～20 日経過後において、自己収縮ひずみが膨張挙動に転じ、40 日経過後以降に再び収縮挙動を示すことが確認された。この挙動に収縮低減剤が関わっていると推察されるが、現時点では要因不明である。91 日経過後の SSP の自己収縮ひずみは約 700μ 、SRA2.0SSP は約 330μ 、SRA4.0SSP は約 150μ であった。このことから、収縮低減剤の添加率が大きいほど、自己収縮ひずみを抑制できると考えられる。

図-4.5 に材齢初期の自己収縮ひずみおよび供試体内の温度変化を示す。なお、この図では打込みが完了した時点を経過日数の起点とした。収縮低減剤を添加することで初期に膨張ひずみを示し、収縮低減剤の添加率が大きいほど膨張ひずみが最大となる時点は遅くなった。また、収縮低減剤の添加率が大きいほど最高温度に到達するまでの時間は遅く、最高温度は小さくな

ることが確認された。このことから、収縮低減剤の使用は凝結を遅延させ、また、水和発熱の抑制に寄与する可能性があると考えられる。

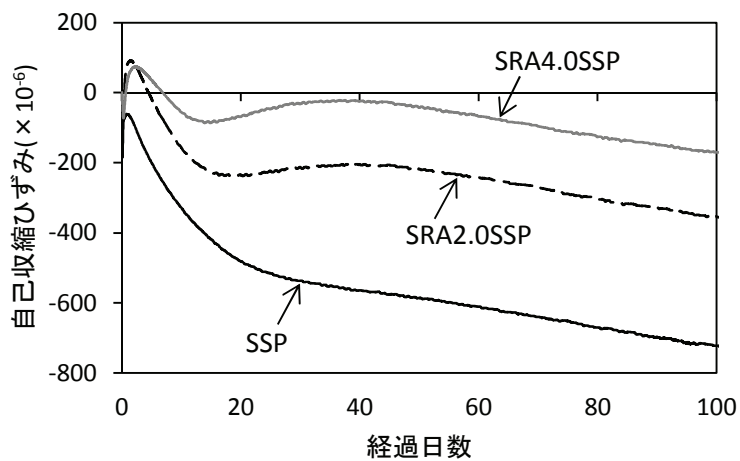


図-4.4 自己収縮ひずみの経時変化（シリーズ2）

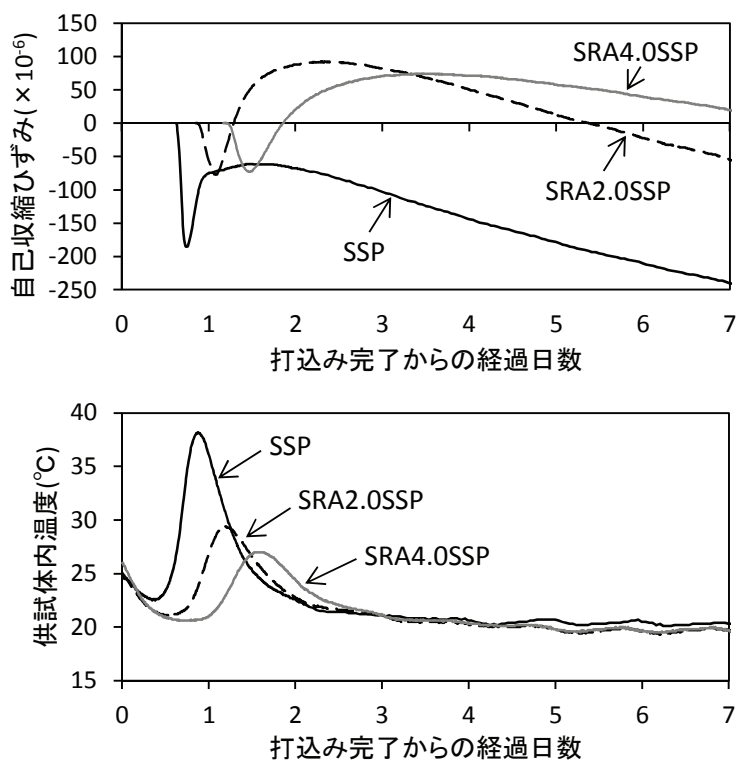


図-4.5 材齢初期の自己収縮ひずみと供試体内温度の経時変化（シリーズ2）

図-4.6に、乾燥開始（基長測定）材齢2日のケースにおける乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。収縮低減剤の添加率が大きいほど乾燥収縮ひずみが小さくなっていることが確認でき、材齢96日におけるひずみ低減量は、SSPに対してSRA2.0SSPで約200 μ 、SRA4.0SSPで約470 μ であった。また、SRA4.0SSPは材齢2日から材齢5日にかけてほとんど収縮しておらず、図-4.5の自己収縮ひずみの計測結果より、SRA4.0SSPは材齢2日以降の膨張量が大きく、かつ膨張挙動が長く継続されるため、型枠を取り外した後でも乾燥による収縮が急激には進行しなかったと考えられる。

図-4.7に、SSPによる乾燥開始材齢を変えたときの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥開始材齢が早いほど長期における乾燥収縮ひずみは小さくなっており、乾燥開始（型枠取り外し）材齢の違いが乾燥収縮ひずみに影響を及ぼす可能性が示唆された。特に乾燥開始材齢1日で乾燥収縮ひずみが最も小さくなったのは、図-5に示すとおり、SSPは材齢1日の時点では発熱段階にあり、その後の膨張挙動が乾燥収縮ひずみを小さくした要因のひとつと推察する。

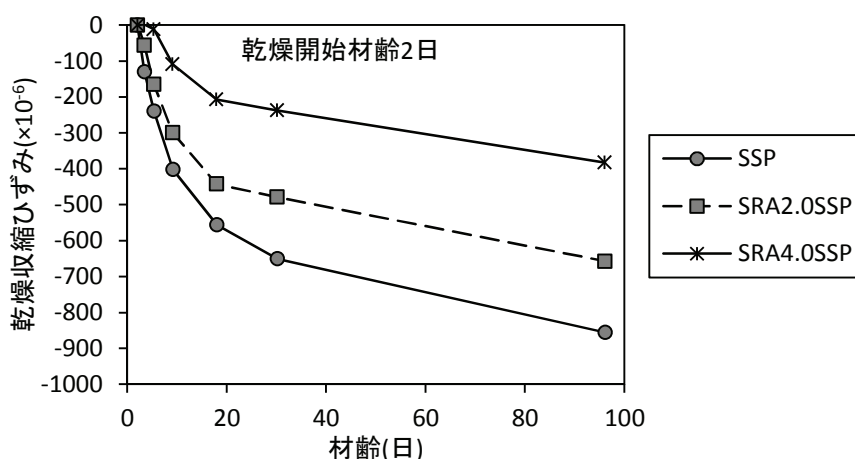


図-4.6 乾燥収縮ひずみの経時変化（シリーズ2：乾燥開始材齢2日）

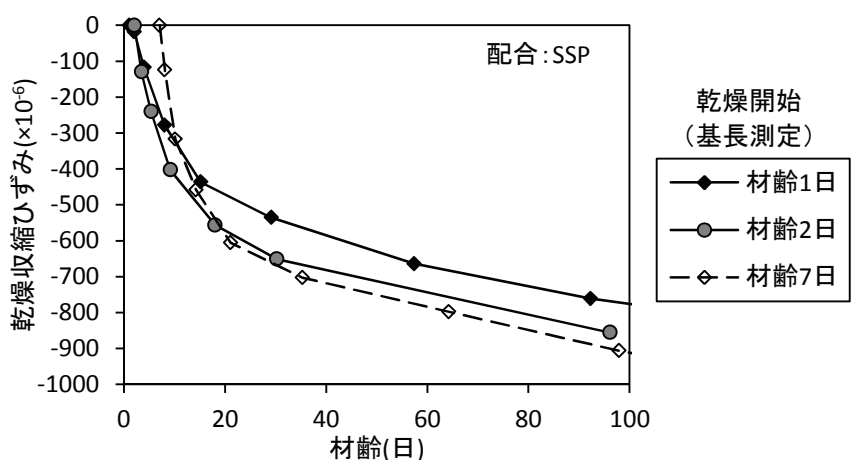


図-4.7 乾燥収縮ひずみの経時変化（シリーズ2：乾燥開始材齢の違いを比較）

3) シリーズ 3

図-4.8 にひび割れ展開図を、図-4.9 にひび割れ本数の経時変化を示す。なお、図中の SSP-t50 は SSP 配合で巻立て厚 50mm のケース、SSP-t70 は巻立て厚 70mm のケースである。ひび割れ展開図より、ひび割れは周方向に分散して発生していることが確認された。なお、発生したひび割れの幅はすべて 0.05mm 以下であった。また、収縮低減剤の添加率が大きいほどひび割れ本数は抑制され、巻立て厚が大きい方がひび割れ本数は低減することが確認された。

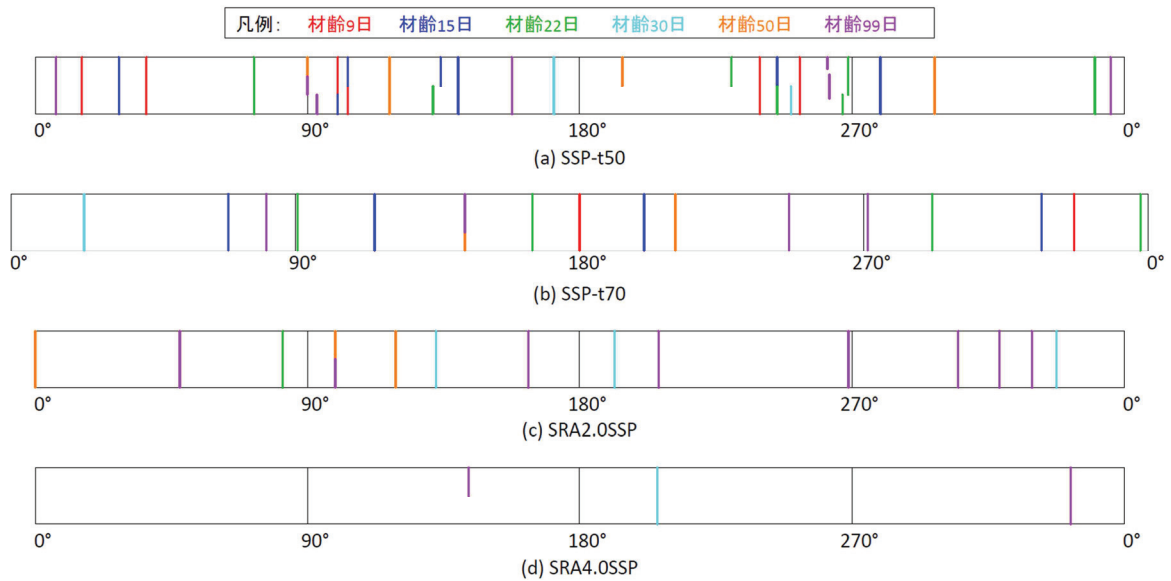


図-4.8 ひび割れ展開図 (シリーズ 3)

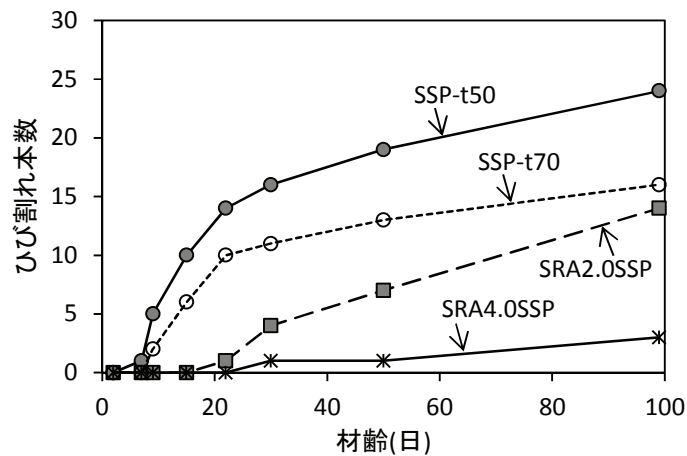


図-4.9 ひび割れ本数の経時変化 (シリーズ 3)

ここで、本実験で用いた配合の自己収縮ひずみ（図-4.4 参照）と乾燥収縮ひずみ（図-4.6 参照）を足し合わせた値を収縮ひずみと称し、ひび割れ本数との関係で整理したものを図-4.10 に示す。収縮ひずみが大きくなるほどひび割れ本数は増加する傾向となっており、収縮ひずみが 400～600 μ 程度を超えるとひび割れ本数と収縮ひずみはおおよそ線形関係となった。また、SSP-t50 と SSP-t70 を比較すると、同じ収縮ひずみでも巻立て厚が大きい方がひび割れ本数は抑制された。以上より、UHP-SHCC を鋼管の外周に巻き立てるような拘束条件下においては、収縮ひずみを 400～600 μ 程度以下に抑えることでひび割れの発生を抑制できると考えられる。

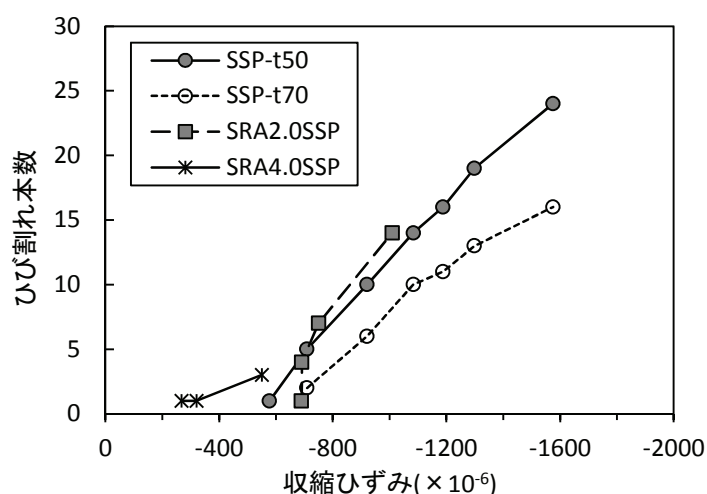


図-4.10 ひび割れ本数と収縮ひずみの関係

次に、計測された鋼管のひずみから以下の式(1)を用いて UHP-SHCC 表面の円周方向の応力を算出し、図-4.11 に応力の経時変化として示す。なお、計算で用いた鋼管のひずみは、4 カ所で計測された値の平均値とした。

$$\sigma(r) = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot t \cdot r_1 \frac{(r_2/r)^2 + 1}{r_2^2 - r_1^2} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma(r)$ ：供試体中心点からの距離 r の位置における円周方向の応力(MPa)、 r ：供試体中心点からの距離(mm)、 ε_s ：鋼管内面の円周方向ひずみ、 E_s ：鋼管の弾性係数(MPa)、 t ：鋼管の厚さ(mm)、 r_1 ：供試体中心点から UHP-SHCC 内面までの距離(mm)、 r_2 ：供試体中心点から UHP-SHCC 外面までの距離(mm)とした。

UHP-SHCC 表面の応力は、収縮低減剤の添加率が大きいほど小さくなっており、ひび割れ発生の傾向を裏付けるものとなった。また、巻立て厚が大きい SSP-t70 は、材齢に伴う応力の増加が SSP-t50 に比べて小さいことが確認された。なお、計測データからひび割れ発生時期（ひずみが急激に変化する点）を特定することが難しかった。これは、設置したひずみゲージの数が円周長に対して少なかったこと、また、UHP-SHCC のひずみ硬化性および繊維の架橋効果により発生するひび割れは微細であり、かつひび割れ発生後の円周方向のひずみ分布が均一では

ない可能性があることに要因があると推察される。しかし、応力の推移は捉えやすく、検討ケースの違いを相対的に評価することには有効と考えられる。

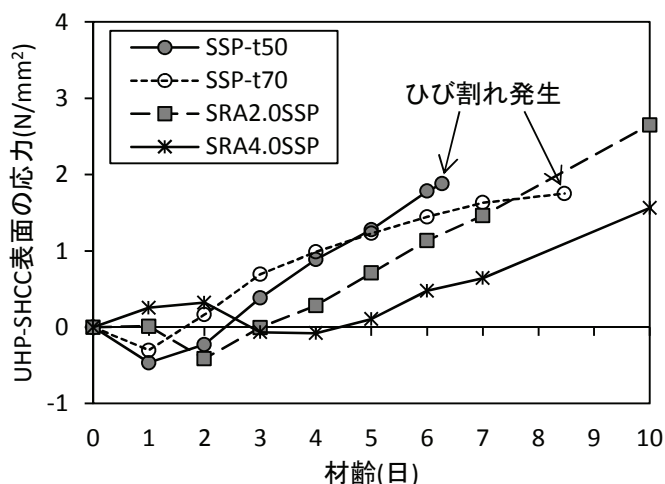


図-4.11 UHP-SHCC 表面の応力の経時変化

4. 4 まとめ

本検討では、低熱ポルトランドセメントと石灰石微粉末を使用した UHP-SHCC の配合をベースに、膨張材と収縮低減剤を添加したときの収縮特性を確認し、UHP-SHCC の収縮低減策について検討を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 収縮低減剤（収縮低減型高性能減水剤を含む）の使用により、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみは低減できることが確認された。
- 2) 収縮低減剤の添加率が大きいほど、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみは大幅に低減できることが確認された。
- 3) 膨張材の増量によって自己収縮ひずみは低減されるが、その効果は収縮低減剤を使用した場合より小さかった。これは、ベース配合に既に膨張材が混和（結合材量に対して 2.7wt.%）されていたためであり、増量分（+0.7wt.%）ではひずみ抑制効果に与える影響は小さかったと考えられる。
- 4) 乾燥開始材齢が乾燥収縮ひずみに影響を及ぼす可能性を示し、本実験の範囲では、乾燥開始材齢が早いほど乾燥収縮ひずみが抑制された。これは、本実験で用いた UHP-SHCC の配合は材齢 1 日の時点では発熱段階にあり、その後の膨張挙動が乾燥収縮ひずみを小さくした要因のひとつと推察する。
- 5) リング型拘束収縮試験により発生したひび割れの本数は、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの合計値と相関があり、拘束条件下においては収縮ひずみの合計値を 400～600 μ 程度以下に抑えることで、ひび割れの発生を抑制できると考えられる。

参考文献

- [1] 上原伸郎, 鈴木康範, 河上浩司, 西本好克: 超高強度コンクリートの自己収縮低減, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1099-1104, 2005
- [2] 川口哲生, 河野克哉, Eduardo Daniel: 常温で硬化させた RPC 系超高強度繊維補強コンクリートの諸特性に関する研究, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.274-279, 2014
- [3] 池尾陽作, 三井健郎, 井上和政, 木之下光男, 三浦豊司, 稲垣順司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼすセメントと収縮低減剤の影響 (その 1 コンクリートの乾燥収縮率と強度特性), 日本建築学会, 学術講演梗概集, 構造系, No.A-1, pp.543-544, 2002
- [4] 日本コンクリート工学協会: (仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法, 超流動コンクリート研究委員会報告集(Ⅱ), pp.209-210, 1994
- [5] 日本コンクリート工学協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, 2002.9

第5章 UHP-SHCC を用いた巻立て補強構造

5. 1 はじめに

UHP-SHCC を用いて栈橋鋼管杭を補強するにあたり、巻立て材と鋼管杭は一体化する必要がある。ここで、ひずみ硬化型セメント系複合材料 (SHCC) と鋼材の一体性を評価した既往の研究について、鋼管表面 (外径 101.6mm) にスパイラル状のリブ (間隔 40mm, リブ高さ 3mm) を設けることで、被覆した SHCC のひび割れ分散性は向上することが確認されている [1]。また、鋼管表面 (外径 216mm) にスパイラル鉄筋 (間隔 50mm) と軸方向鉄筋を配置することで、SHCC 表面のひび割れ幅は抑制することが確認されている [2]。しかし、実工事における施工性を考慮した場合、鋼管杭の周方向に多数の鉄筋を設置・溶接するのは難しいため、ここでは比較的簡易に定着できる方法を検討することとした。また、栈橋に突発的な外力が作用して鋼管杭と上部工の接合部に大きな曲げモーメントが生じることを想定すると、耐久性上の観点から接合部は開口しないことが望ましい。そこで、本章では小型供試体を用いて UHP-SHCC と鋼管の一体化方法および杭頭構造 (ここでは、鋼管杭と上部工の接合部付近の構造を称す) に関する基礎的な検討を行った。

5. 2 UHP-SHCC と鋼管杭の一体化および杭頭構造に関する基礎的検討

本検討では、UHP-SHCC の繊維混入率、巻立て厚、鋼管表面の軸方向に設置した鉄筋 (以下、定着鉄筋) の有無および杭頭構造をパラメータとした小型供試体を用いて、2 つのシリーズで曲げ載荷試験を行った。なお、定着鉄筋は UHP-SHCC と鋼管の一体化およびひび割れ分散性の向上を期待して配置したものである。シリーズ 1 は、UHP-SHCC を用いた巻立て補強の基本情報を収集する目的で実施した。シリーズ 2 は、杭頭構造に関して検討した。

5. 2. 1 検討ケースと供試体概要

1) シリーズ 1

図-5.1 および図-5.2 に供試体の概要および巻立て断面形状を、表-5.1 に検討ケースを示す。シリーズ 1 の検討ケースは、UHP-SHCC の繊維混入率、巻立て厚、定着鉄筋の有無をパラメータとし、図-5.1 に示す載荷系で曲げ載荷試験を実施した。試験時の計測項目は、荷重、スパン中央の変位、純曲げ区間の鋼管および UHP-SHCC 表面のひずみとした。なお、供試体の製作は鋼管を立てた状態で UHP-SHCC を下方から上方に打ち上げて行った。また、鋼管の内側には中詰めコンクリートを施工し、支承部コンクリートは UHP-SHCC が硬化した後に製作した。

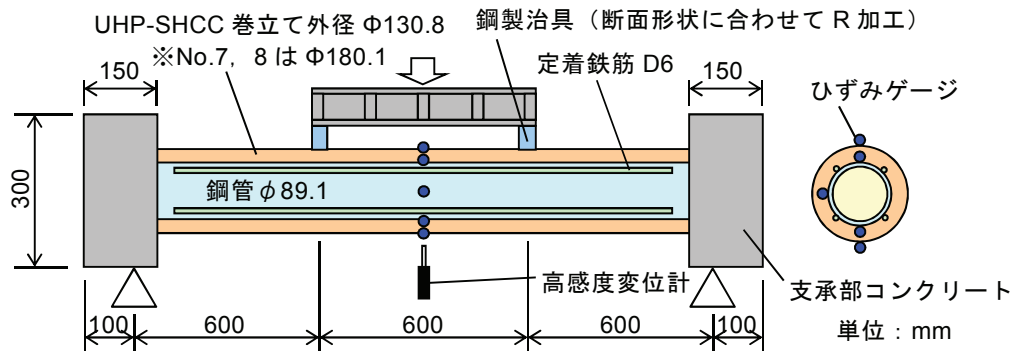


図-5.1 シリーズ1の供試体および荷重試験概要

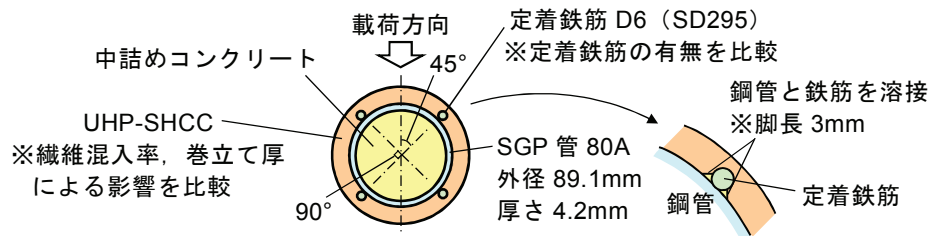


図-5.2 巻立て断面形状（シリーズ1, 2 共通）

表-5.1 シリーズ1の検討ケース

No.	UHP-SHCC		定着鉄筋の有無
	繊維混入率	巻立て厚	
1	—	—	なし
2			あり
3	1.5%	21mm	なし
4	2.0%		あり
5	1.5%		
6	2.0%		
7	1.5%	45mm	あり
8	2.0%		

2) シリーズ2

図-5.3 および図-5.4 に供試体の概要および杭頭構造を、表-5.2 に検討ケースを示す。シリーズ2のUHP-SHCCの巻立て厚は21mmとし、検討ケースは繊維混入率、杭頭構造をパラメータとして、図-5.3に示す荷重系で曲げ荷重試験を実施した。杭頭構造は図-5.4に示すとおり、鋼管と上部工の接合部においてUHP-SHCCのひび割れ分散性とひずみ硬化性を期待したType-AおよびType-B構造と、既存のモルタル被覆やRC巻立てと同様に巻立て材と接合部が接するだけのType-C構造とした。なお、Type-A構造はUHP-SHCC巻立て部と上部工を同時に構築するイメージで、Type-B構造は既設鋼管杭の杭頭部補強を行うために既設上部工の一部を

はつり取って、鋼管杭表面から上部工までを連続的に巻き立てるイメージの構造とした。また、Type-A および Type-B 構造では、接合部を貫通するように配置する定着鉄筋の有無についても検討した。载荷試験時の計測項目は、荷重、载荷点の変位、接合部の鋼管および UHP-SHCC 表面のひずみとした。また、供試体の製作はシリーズ 1 と同様の方法で行った。

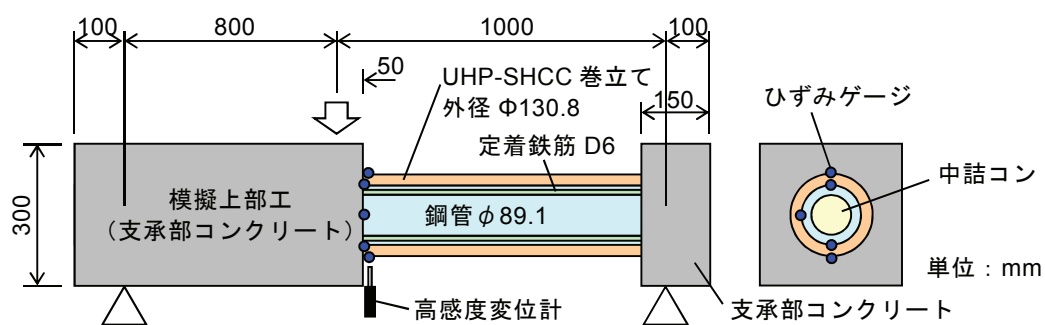


図-5.3 シリーズ 2 の供試体および载荷試験概要

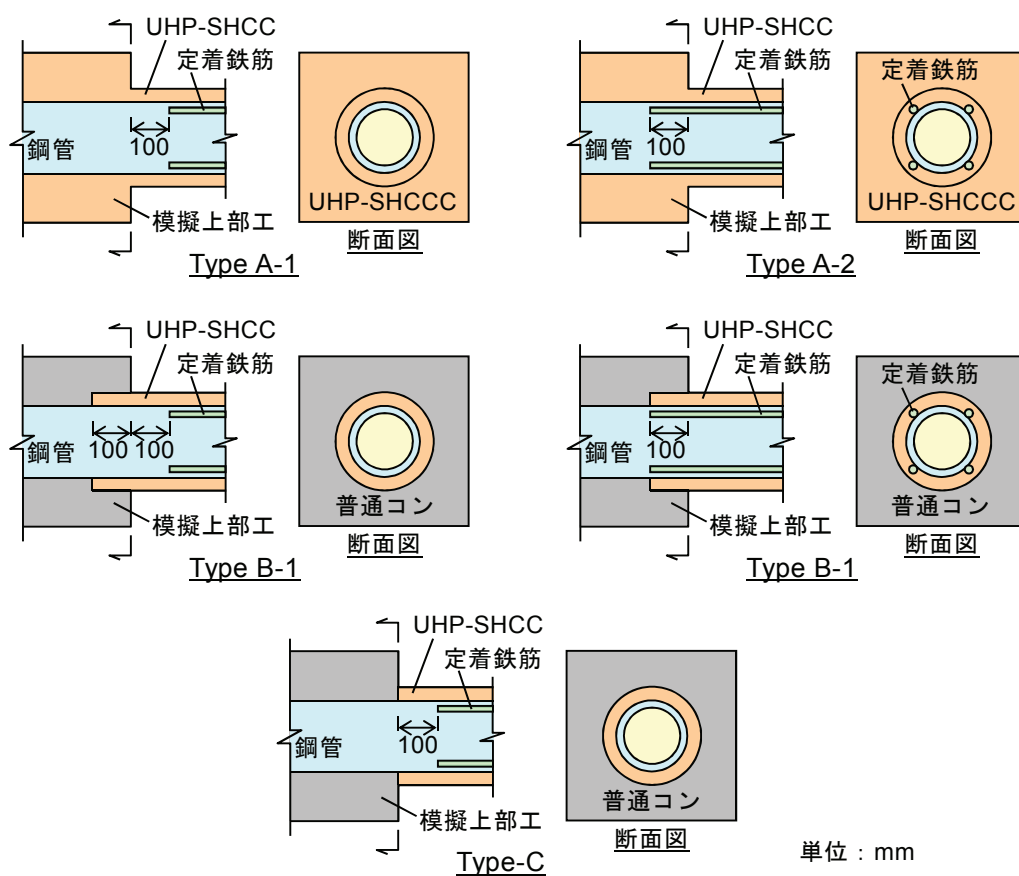


図-5.4 シリーズ 2 供試体の杭頭構造

表-5.2 シリーズ2の検討ケース

No.	繊維混入率	杭頭構造	備考
9	1.5%	Type A-1	UHP-SHCC 巻立てと上部工を同時施工
10	2.0%		
11	1.5%	Type A-2	
12	2.0%		
13	1.5%	Type B-1	UHP-SHCC 巻立てを鋼管杭表面から上部工まで連続的に施工
14	2.0%		
15	1.5%	Type B-2	
16	1.5%	Type-C	巻立て材と上部工が接合部で接する構造

5. 2. 2 使用材料および力学的性質

本実験で用いた UHP-SHCC の配合を表-5.3 に、UHP-SHCC の構成材料を表-5.4 に示す。また、供試体を構成する各材料の仕様と力学的性質を表-5.5 に示す。ここで、既往の知見 [4] では UHP-SHCC の引張強度時ひずみは 1.5%以上であると示されているが、載荷試験時に実施したダンベル試験体を用いた一軸引張試験ではその値を大きく下回った。これは、一軸引張試験終了後のダンベル試験体の破断面に確認された比較的大きな気泡に起因したものと考えられ、試験体製作時の施工不良が要因ではないかと推察される。

表-5.3 UHP-SHCC の配合

W/B	SF/B	EX (kg/m ³)	S/B	繊維混入率 (単位体積%)	SP (B×%)	D (B×%)
0.22	0.15	40	0.10	1.5	2.0	0.0044
0.22	0.15	40	0.10	2.0	2.0	0.0044

$$B=C+SF+EX$$

表-5.4 UHP-SHCC の構成材料

記号	材料	種類および物性等
W	水	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)
C	結合材 (B)	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
SF		シリカフューム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 200,000cm ² /g)
EX		膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.10g/cm ³)
S	骨材	珪砂 (密度 2.68g/cm ³)
PE	繊維	高強度ポリエチレン短繊維 (密度 0.97g/cm ³ , 直径 0.012mm, 長さ 6mm, 弾性係数 88GPa, 引張破断強度 2,700MPa)
SP	混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.10g/cm ³)
D		消泡剤 (ポリエーテル系, 密度 1.00g/cm ³)

表-5.5 各材料の仕様と力学的性質

材料および仕様		力学的性質	
鋼管 (SGP 管 80A)		試験成績表	引張強さ 451N/mm ²
			破断伸び 36%
定着鉄筋 (SD295A D6)			降伏点 336N/mm ²
			引張強さ 517N/mm ²
		破断伸び 30%	
UHP-SHCC	繊維混入率 1.5%	載荷試験時における試験結果	圧縮強度 121.4N/mm ²
			静弾性係数 27.5kN/mm ²
	引張強度 6.5N/mm ² ※		
	引張強度時ひずみ 0.26%※		
	繊維混入率 2.0%		圧縮強度 119.8N/mm ²
			静弾性係数 27.6kN/mm ²
中詰めコンクリート			引張強度 8.1N/mm ² ※
			引張強度時ひずみ 0.11%※
模擬上部工および支承部コンクリート			圧縮強度 38.6N/mm ²
			静弾性係数 34.2kN/mm ²
			圧縮強度 67.2N/mm ²
			静弾性係数 40.3kN/mm ²

※UHP-SHCC の引張強度および引張強度時ひずみは、「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針 (案)」[3] におけるダンベル試験体を用いて測定

5. 2. 3 実験結果

1) シリーズ 1

シリーズ 1 では、UHP-SHCC の繊維混入率 (以下、図中では PE と表記)、巻立て厚、定着鉄筋の有無に着目し、純曲げ区間における巻立て断面の曲げ耐力の向上効果について考察した。

図-5.5 に荷重とスパン中央の変位の関係を示す。なお、巻立てのない No.1 および No.2 は、鋼管のひずみが 10,000 μ を大きく超えても荷重増加が見られなかったため載荷を終了した。一方、UHP-SHCC を巻き立てた No.3~8 の終局は、全てのケースで UHP-SHCC 上縁部の圧壊によるものであった。試験結果より、UHP-SHCC を巻き立てたケース (No.3~8) の荷重は、巻立てのないケース (No.1 および No.2) に比べて増加していることが確認された。このことから、UHP-SHCC 巻立てにより曲げ耐力が向上できると考えられる。

巻立て厚 21mm のケースについて、定着鉄筋を配置しない No.3 および No.4 の終局時荷重はそれぞれ 62kN および 66kN で、終局時変位は 60mm および 70mm であり、繊維混入率の違いによって終局時変位が若干異なった。一方、定着鉄筋を配置した No.5 および No.6 の終局時荷重はそれぞれ 72kN および 70kN で、終局時変位は 58mm および 57mm であり、繊維混入率の違いによる差はほとんどなかった。本検討において、定着鉄筋を配置しないケースの終局時変位が定着鉄筋を配置したケースより大きかったのは、鋼管と UHP-SHCC 間の付着は小さく、曲げに対して界面で滑りが生じ、UHP-SHCC の上縁部が圧縮破壊ひずみに達するまでに大きな変形が必要になったことが要因と考えられる。写真-5.1 は、定着鉄筋なしの No.3 と定着鉄筋あり

の No.5 における曲げモーメント一定区間に生じたひび割れであるが、定着鉄筋ありのほうがひび割れは分散して発生している状況が確認された。このことから、実際の栈橋鋼管杭への適用を考えた場合、塩化物イオン等の劣化因子の侵入を抑えるためには UHP-SHCC のひび割れ分散性を発揮させるのが有効であるため、定着鉄筋は配置したほうが良いと考えられる。

巻立て厚 45mm のケースについて、No.7 および No.8 の終局時荷重はそれぞれ 117kN および 123kN であり、巻立て厚 21mm のケースに比べて終局時荷重は増加した。また、巻立て厚が大きい方が繊維混入率の違いが荷重に与える影響があると考えられる。なお、No.7 および No.8 の終局時変位は 56mm および 57mm とほぼ同じであり、繊維混入率による影響は巻立て厚 21mm の傾向とほぼ同様であった。

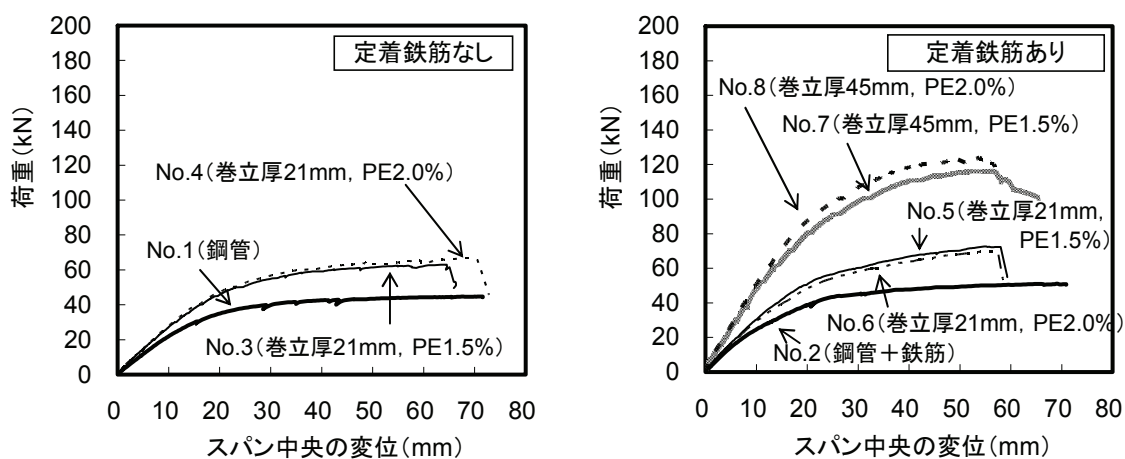


図-5.5 シリーズ 1 の荷重と変位の関係

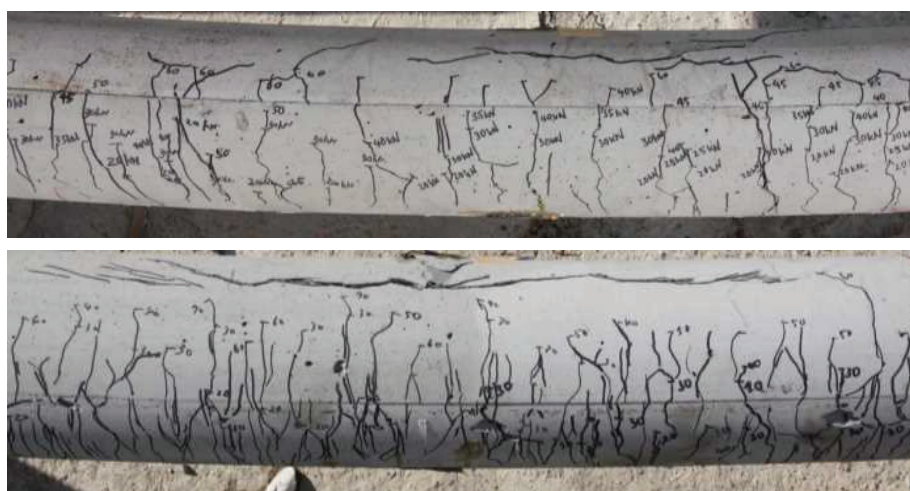


写真-5.1 曲げモーメント一定区間に生じたひび割れ
(上段：定着鉄筋なしの No. 3, 下段：定着鉄筋ありの No. 5)

図-5.6 にスパン中央断面における曲げモーメントと鋼管の曲率の関係を示す。なお、鋼管の曲率は、鋼管の上縁と下縁におけるひずみの差を鋼管の外径 89.1mm で除して算出したものである。また、No.8 は終局に達する前にひずみゲージが破損したため、図中では測定できた範囲までを示している。なお、No.7 は载荷試験直後からひずみゲージの計測値に異常が認められたため除外した。

巻立て厚 21mm のケースについて、定着鉄筋なしの No.3 の終局曲げモーメントおよび終局時曲率は $19\text{kN}\cdot\text{m}$ および 0.18m^{-1} であり、No.4 は $20\text{kN}\cdot\text{m}$ および 0.28m^{-1} であった。一方、定着鉄筋ありの No.5 のそれらは $22\text{kN}\cdot\text{m}$ および 0.22m^{-1} であり、No.6 は $21\text{kN}\cdot\text{m}$ および 0.22m^{-1} であった。このことから、定着鉄筋を配置しない場合は、UHP-SHCC の繊維混入率を増加するほど終局時曲率が増加することがわかった。また、繊維混入率 1.5% の No.3 と No.5 を比較した場合、定着鉄筋ありの No.5 の終局曲げモーメントおよび終局時曲率は定着鉄筋なしの No.3 より若干大きいことが確認された。さらに、巻立て厚 45mm の No.8 の終局曲げモーメントは、巻立て厚 21mm の No.6 に比べて大きく増加した。

本実験において、鋼管の曲率が 0.1m^{-1} に達した時点で鋼管縁部のひずみは $2,000\mu$ を超えており、鋼管は降伏していたと考えられる。しかし、鋼管が降伏した後も UHP-SHCC はすぐには圧壊せず、曲げモーメントが増加することが確認された。このことから、鋼管降伏後も UHP-SHCC はひずみ硬化性を保持していたと考えられる。

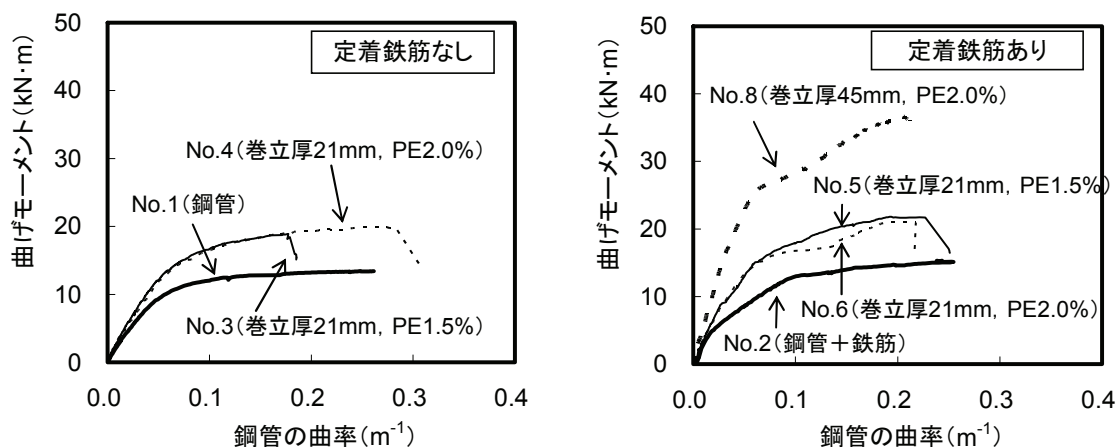


図-5.6 シリーズ1のスパン中央断面における曲げモーメントと鋼管の曲率の関係

2) シリーズ2

シリーズ2では、杭頭構造の違いが曲げ耐力の向上効果に及ぼす影響について考察した。

図-5.7に、Type-AおよびType-B構造における荷重と変位の関係を示す。Type-AおよびType-B構造ともに、鋼管と上部工の接合部を貫通するように定着鉄筋を配置したほうが、荷重は増加することが確認された。

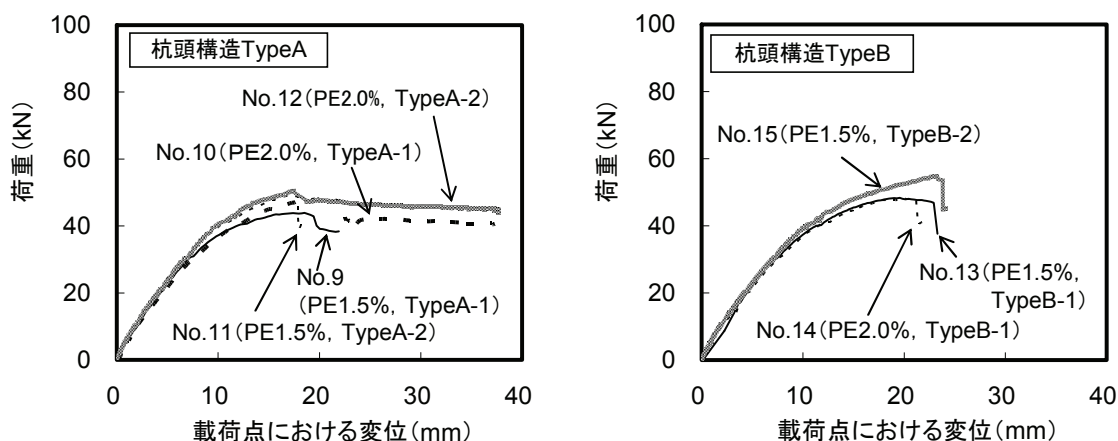


図-5.7 シリーズ2の荷重と変位の関係 (Type-A および Type-B 構造)

図-5.8 に、杭頭構造の違いに着目して繊維混入率 1.5%における荷重と変位の関係、および曲げモーメントと鋼管の曲率の関係を比較した結果を示す。この比較から、Type-A および Type-B 構造のほうが Type-C 構造よりも大幅に曲げ耐力が向上することが確認された。図-5.9 は、Type-C 構造の No.16 がほぼ終局状態に達した曲げモーメント (15kN・m 時) を基準に、その他のケースも含めて接合部断面のひずみ分布を示したものである。このひずみ分布から、No.16 (Type-C 構造) の鋼管下縁ひずみが大幅に大きくなっているにもかかわらず、その他のケースでは UHP-SHCC 巻立て上縁部を含む鋼管内のひずみ分布は直線関係を保持している (UHP-SHCC 巻立て下縁部は、UHP-SHCC 表面にひび割れが発生しているため直線関係となっていない) ことが確認された。これは、Type-A および Type-B 構造は曲げに対する余力が十分に残されていたためと考えられる。

写真-5.2 に、試験終了後の接合部付近におけるひび割れ発生状況を示す。Type-A および Type-B 構造は複数の微細ひび割れが発生しているのに対し、Type-C 構造は接合部が大きく開口している状況が確認された。本実験は、実栈橋において地震力等の作用によって杭頭部に曲げモーメントが生じた場合を想定しており、Type-C 構造のように接合部が開口してしまうと開口は残留する可能性もあり、鋼材腐食の観点から好ましくない。そのため、栈橋鋼管杭の長寿命化に寄与するためには Type-A または Type-B 構造のほうが有効と考えられる。

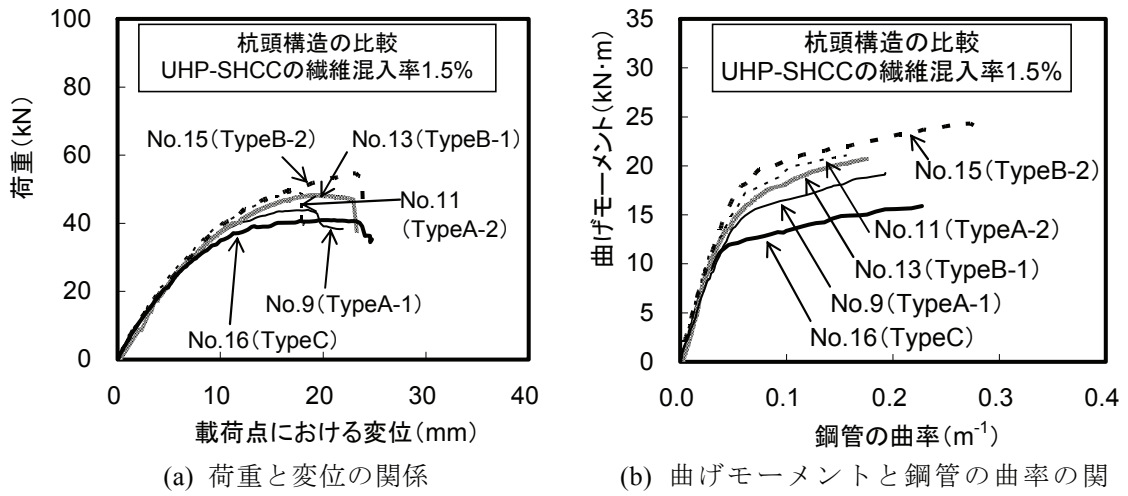


図-5.8 杭頭構造の違いによる比較

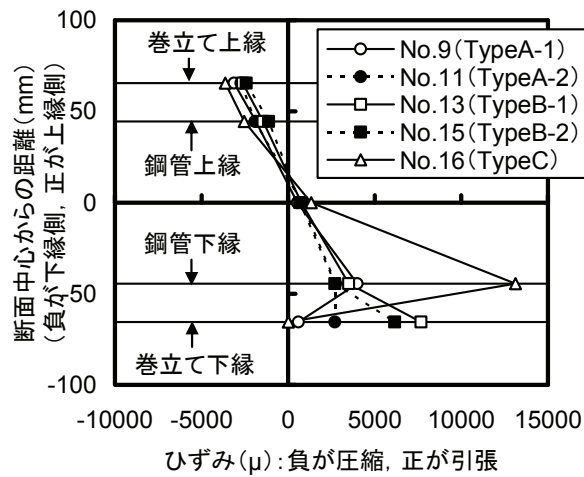
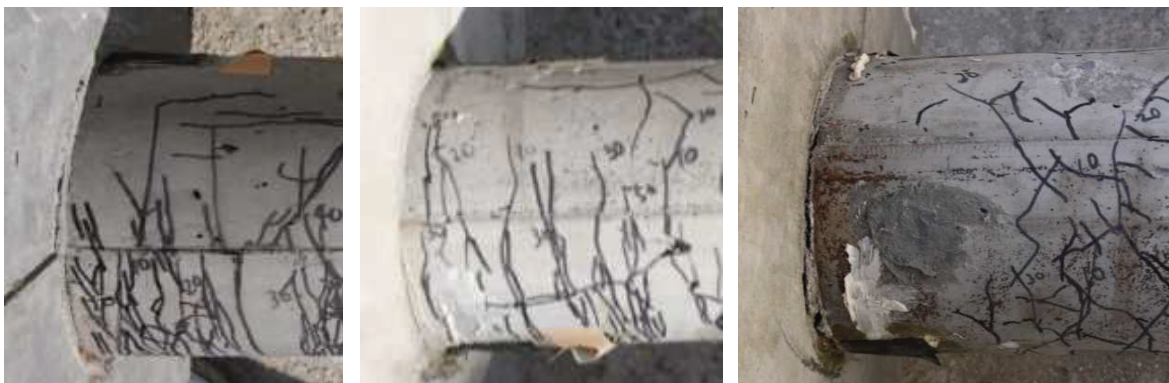


図-5.9 ひずみ分布 (曲げモーメント 15kN・m 時点)



(a) No.9 供試体(Type-A) (b) No.13 供試体(Type-B) (c) No.16 供試体(Type-C)

写真-5.2 シリーズ2の試験終了後における接合部付近のひび割れ発生状況

5. 2. 4 まとめ

本検討では、UHP-SHCC 巻立てによって補強効果が得られる杭頭構造について、小型供試体を用いた載荷試験により確認した。以下に本検討で得られた知見を示す。

- 1) 鋼管に UHP-SHCC を巻き立てることで曲げ耐力は向上することが確認できた。また、巻立て厚が大きくなるほど曲げ耐力はさらに向上することが確認された。ただし、UHP-SHCC の繊維混入率の増加が曲げ耐力の向上効果に及ぼす影響は、巻立て厚によって異なる可能性があることが示された。
- 2) 最大曲げモーメントが作用する断面に UHP-SHCC と鋼管の一体化を強化する鉄筋(定着鉄筋)を配置したほうが、UHP-SHCC のひび割れ分散性が発揮されるため、UHP-SHCC 巻立てによる防食効果を期待するためには定着鉄筋の配置が有効と考えられる。
- 3) UHP-SHCC を巻き立てた鋼管が降伏ひずみに達した後も巻立て材はすぐには破壊せず、UHP-SHCC のひずみ硬化性が発揮されて曲げ耐力の向上に寄与することが確認された。
- 4) UHP-SHCC を用いた巻立て補強構造は、UHP-SHCC を鋼管杭表面から上部工まで連続させた構造が有効であり、これにより曲げ耐力の向上および接合部における防食が期待できると考えられる。

5. 3 UHP-SHCC のひび割れ分散性を発揮させる鋼材との一体化方法に関する検討

本検討では、UHP-SHCC と鋼板を一体化するために設置する軸方向鉄筋の径や配置間隔、UHP-SHCC の被覆厚さおよび端部鋼材の有無をパラメータとした供試体を用いて、2つのシリーズで載荷試験を行った。なお、端部鋼材とは、曲げ載荷による供試体の変形が大きくなった際に、UHP-SHCC 被覆の端部が鋼板から剥離するのを抑えるために設置した鋼材である（後述の図-5.10 参照）。シリーズ1は、UHP-SHCC と鋼板の一体化構造についてひび割れ分散性を評価することで検証した。シリーズ2は、シリーズ1で最適と判断された一体化方法に対して正負交番繰返し載荷を行い、一体化構造に関して考察した。

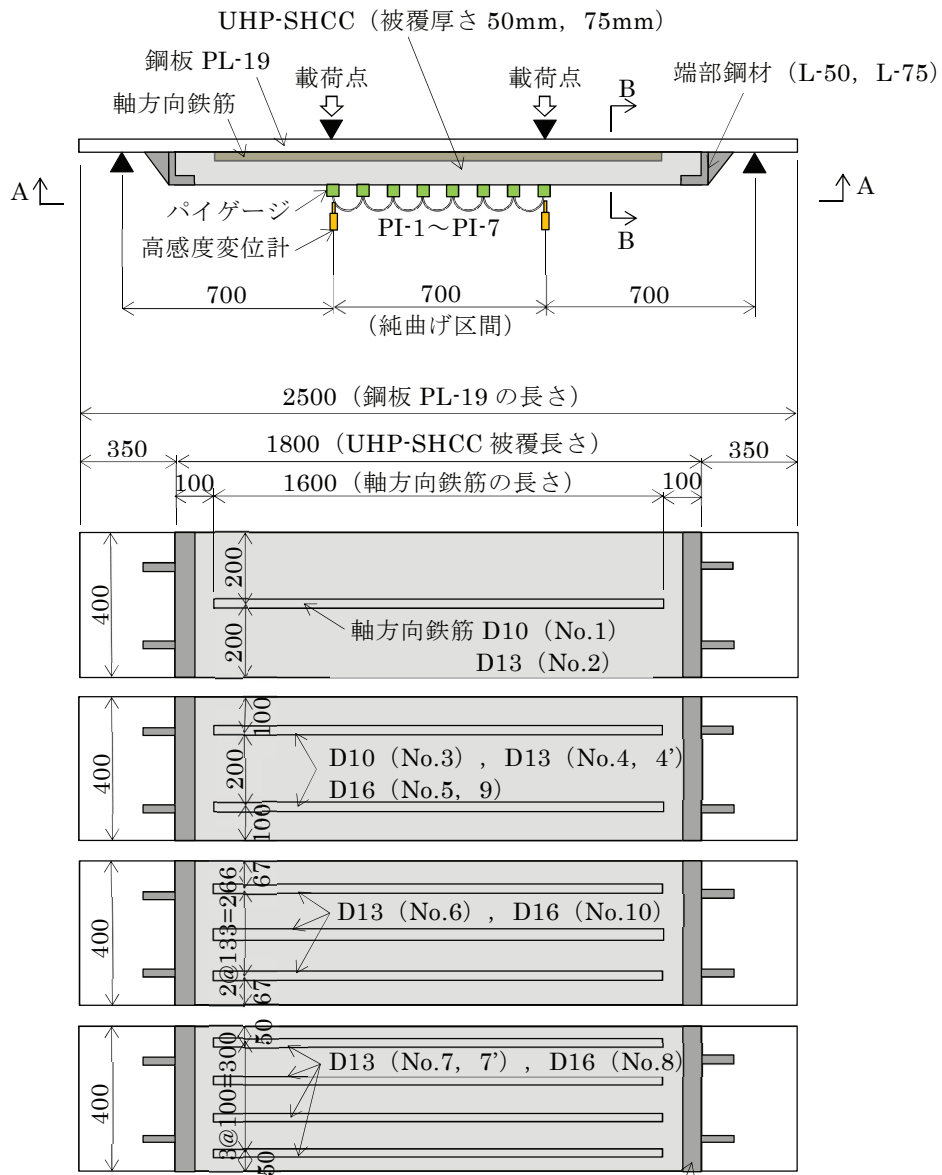
5. 3. 1 検討ケースと供試体概要

1) シリーズ1

検討ケースを表-5.6に、供試体の概要を図-5.10に示す。シリーズ1の検討ケースは、軸方向鉄筋の径と配置間隔、UHP-SHCC の被覆厚さおよび端部鋼材の有無をパラメータとし、図-5.10に示す載荷系で曲げ載荷試験を実施した。なお、表中の鉄筋比とは、UHP-SHCC の被覆断面積に対する軸方向鉄筋の断面積の比である。また、No.4'および No.7'は、端部鋼材の有無による違いを確認するための比較用とした。供試体は図-5.10に示すとおり、厚さ19mm、幅400mmの鋼板の片面に軸方向鉄筋（鉄筋全長に対し鉄筋の両側をフレア溶接）および端部鋼材を設置した後、UHP-SHCC を被覆して製作した。計測項目は、荷重、載荷点直下の変位および純曲げ区間のUHP-SHCC 表面に設置した7つのパイゲージ（標点間距離100mm）の変位量（以下、O.D.と称す）とし、変位が70mm（No.1は50mm、No.2は60mm）に達するまで載荷を行った。

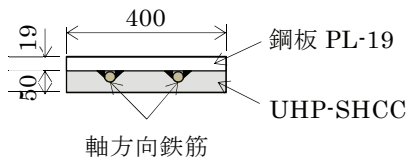
表-5.6 シリーズ1の検討ケース

No.	鉄筋径	配置間隔 (mm)	鉄筋比 p (%)	端部鋼材の有無 (鋼材の仕様)	UHP-SHCC 被覆厚(mm)
1	D10	400	0.36	あり (L-50×50×6)	50
2	D13	400	0.63		
3	D10	200	0.72		
4	D13	200	1.26		
4'	D13	200	1.26	なし	
5	D16	200	1.99	あり (L-50×50×6)	
6	D13	133	1.89		
7	D13	100	2.52		
7'	D13	100	2.52	なし	
8	D16	100	3.98	あり (L-50×50×6)	
9	D16	200	1.33	あり (L-75×75×6)	75
10	D16	133	1.99		



A-A 断面

端部鋼材 (L-50, L-75)



B-B 断面

※単位:mm



※写真は端部鋼材 (No.4', 7'はなし)

図-5.10 シリーズ1の供試体概要

2) シリーズ 2

供試体の概要を図-5.11に示す。シリーズ1の結果を受けて、シリーズ2の供試体は厚さ19mm、幅400mmの鋼板の両面に軸方向鉄筋D13を200mm間隔で配置（純曲げ区間は溶接せずに荷重点と支承間の鉄筋の両側をフレア溶接）し、鋼板の両面に厚さ50mmのUHP-SHCCを被覆して製作した。荷重試験では、図-5.11に示す荷重系で図-5.12に示すサイクルにて漸増的な正負交番荷重を与え、純曲げ区間の両面に各5箇所設置したパイゲージ（標点間距離100mm）にてO.D.を、鋼板の両面中央部に設置したひずみゲージにて鋼板表面のひずみを計測した。なお、具体的な荷重手順は、A面を下面にした状態でスパン中央変位10mmまで荷重して一旦除荷し、B面が下面になるように供試体を反転させた後、再びスパン中央変位10mmまで荷重して1サイクル目とした。2サイクル目は1サイクル目と同様の手順で、スパン中央変位30mmまで荷重した。なお、3サイクル目で変位40mmとなった時点で荷重低下が確認された。これは実験結果で後述するが、供試体端部のUHP-SHCCにひび割れや鋼板との剥離が生じたためである。

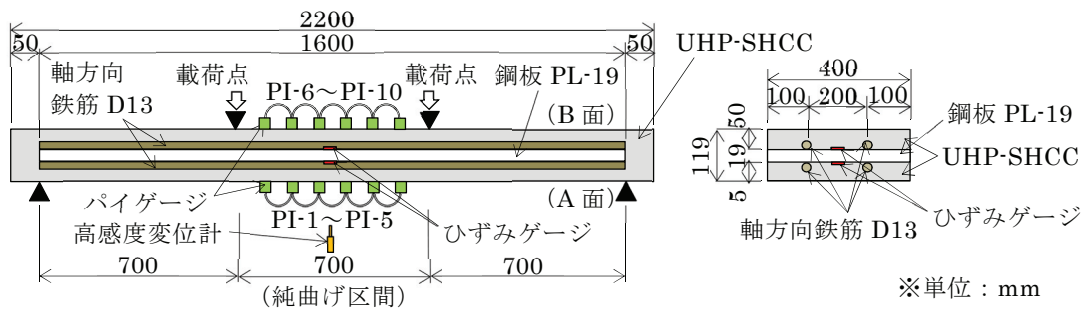


図-5.11 シリーズ 2 の供試体概要

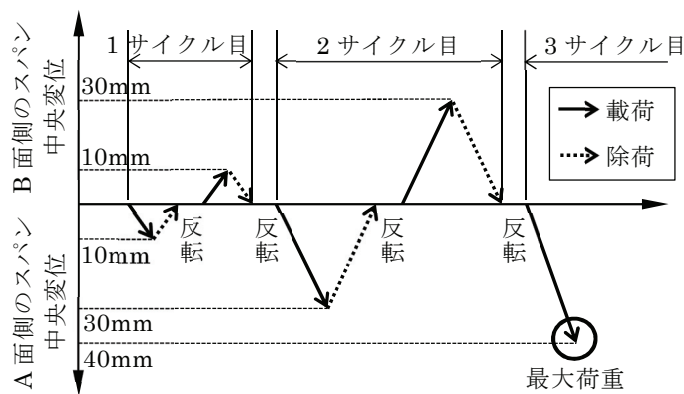


図-5.12 シリーズ 2 の正負交番荷重の手順

5. 3. 2 使用材料および力学的性質

本実験で使用した UHP-SHCC の配合を表-5.7 に、UHP-SHCC の構成材料を表-5.8 に示す。また、各材料の力学的性質を表-5.9 に示す。なお、引張強度および引張終局ひずみは、「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）」[3] に準拠したダンベル試験体による一軸引張試験の測定結果である。

表-5.7 UHP-SHCC の配合

W/B	SF/B	LP/B	EX/B	S/B	繊維混入率 (単位体積%)	SP (B×%)	D (B×%)
0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	3.0	0.03

B=C+SF+LP+EX (ここでは、石灰石微粉末 (LP) も結合材の一部とした)

表-5.8 UHP-SHCC の構成材料

記号	材料	種類および物性等
W	水	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)
C	結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント (密度 3.24g/cm ³)
SF		シリカフューム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 200,000cm ² /g)
LP		石灰石微粉末 (密度 2.70g/cm ³)
EX		膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.10g/cm ³)
S	骨材	珪砂 (密度 2.68g/cm ³)
PE	繊維	高強度ポリエチレン短繊維 (密度 0.97g/cm ³ , 直径 0.012mm, 長さ 6mm, 弾性係数 88GPa, 引張破断強度 2,700MPa)
SP	混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.10g/cm ³)
D		消泡剤 (ポリエーテル系, 密度 1.00g/cm ³)

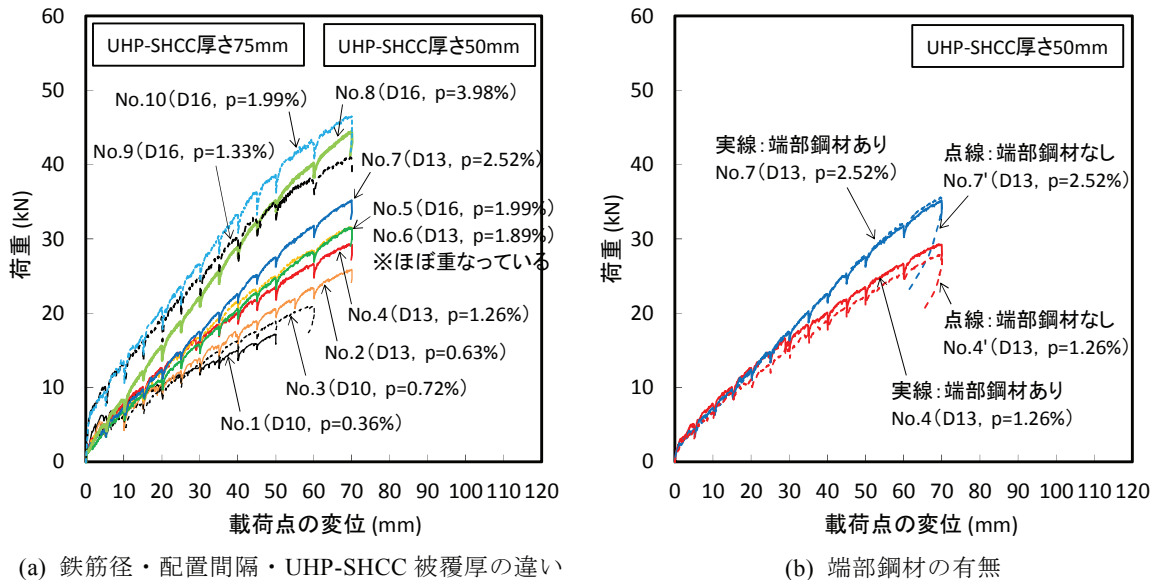
表-5.9 各材料の力学的性質

材料		力学的性質			
鋼板	試験成績表	規格 (JIS G 3101)	SS400		
		鋼板厚さ (mm)	19		
		降伏点 (N/mm ²)	332		
		引張強さ (N/mm ²)	454		
		破断伸び (%)	30		
軸方向鉄筋	試験成績表	公称鉄筋径 (mm)	10	13	16
		規格 (JIS G 3112)	SD295	SD345	
		降伏点 (N/mm ²)	336	385	410
		引張強さ (N/mm ²)	484	558	587
		破断伸び (%)	23	26	22
UHP-SHCC	載荷時	圧縮強度 (N/mm ²)	100		
		静弾性係数 (kN/mm ²)	25.1		
		引張強度 (N/mm ²)	5.21		
		引張終局ひずみ (%)	1.01		

5. 3. 3 実験結果

1) シリーズ 1

図-5.13 に荷重と変位の関係を示す。図-5.13(a)より、鉄筋比が大きく、UHP-SHCC 被覆厚が大きいほど、同じ変位に対する荷重は大きくなった。しかし、No.2 と No.3 を見ると、No.3 は No.2 よりも鉄筋比が大きいにもかかわらず荷重は小さくなった。また、No.5 と No.6 を見ると、鉄筋比は No.5 のほうが大きいですが、両者の荷重-変位曲線はほぼ一致していた。一方、図-5.13(b)に示すように、軸方向鉄筋の径や配置間隔が同じでも、鉄筋比 1.26%の No.4 と 4' では、端部鋼材を設置した No.4 のほうが端部鋼材のない No.4' よりも荷重は大きくなった。しかし、鉄筋比 2.52%の No.7 と 7' では端部鋼材の有無による違いは見られなかった。以上より、UHP-SHCC のひずみ硬化性の発現程度は、軸方向鉄筋の径や配置間隔に影響され、鉄筋比が小さい場合は被覆端部の鋼材の有無にも影響されると考えられる。



(a) 鉄筋径・配置間隔・UHP-SHCC 被覆厚の違い

(b) 端部鋼材の有無

図-5.13 シリーズ 1 の荷重と変位の関係

図-5.14 に UHP-SHCC 表面に配置した各パイゲージの O.D.の推移を示す。「端部鋼材あり」かつ「被覆厚さ 50mm」の条件の結果を見ると、軸方向鉄筋 D10 の No.1, No.3 では局所的 (No.1 では PI-2 と PI-3, No.3 では PI-4) に O.D.が大きくなり、ひび割れの局所化が顕著であった。また、軸方向鉄筋 D13 で鉄筋比の小さい No.2 では、PI-6 の両側に位置する PI-5 および PI-7 の O.D.の増加がほとんど見られなかった。一方、鉄筋比 1.26%以上の No.4~No.8 では、各パイゲージの O.D.に若干のばらつきは見られるものの、O.D.は変位の増加にともないほぼ均等に増加している様子が確認された。このことから、「端部鋼材あり」かつ「被覆厚さ 50mm」の条件では、軸方向鉄筋に D13 以上を使用し、かつ鉄筋比で約 1.3%以上の軸方向鉄筋を配置することで、UHP-SHCC のひび割れ分散性を十分に発揮させることができると考えられる。

次に、「被覆厚さ 75mm」の結果を比べると，No.9（鉄筋比 1.33%）では PI-4 区間において O.D.の増加が大きくなり，No.10（鉄筋比 1.99%）ではほぼ均等に O.D.が増加している様子が確認された。本検討ではケース数が少ないため定かにはできないが，被覆厚さが大きい場合，D16の軸方向鉄筋の配置間隔を 200mm より密にするのがよいと考えられる。

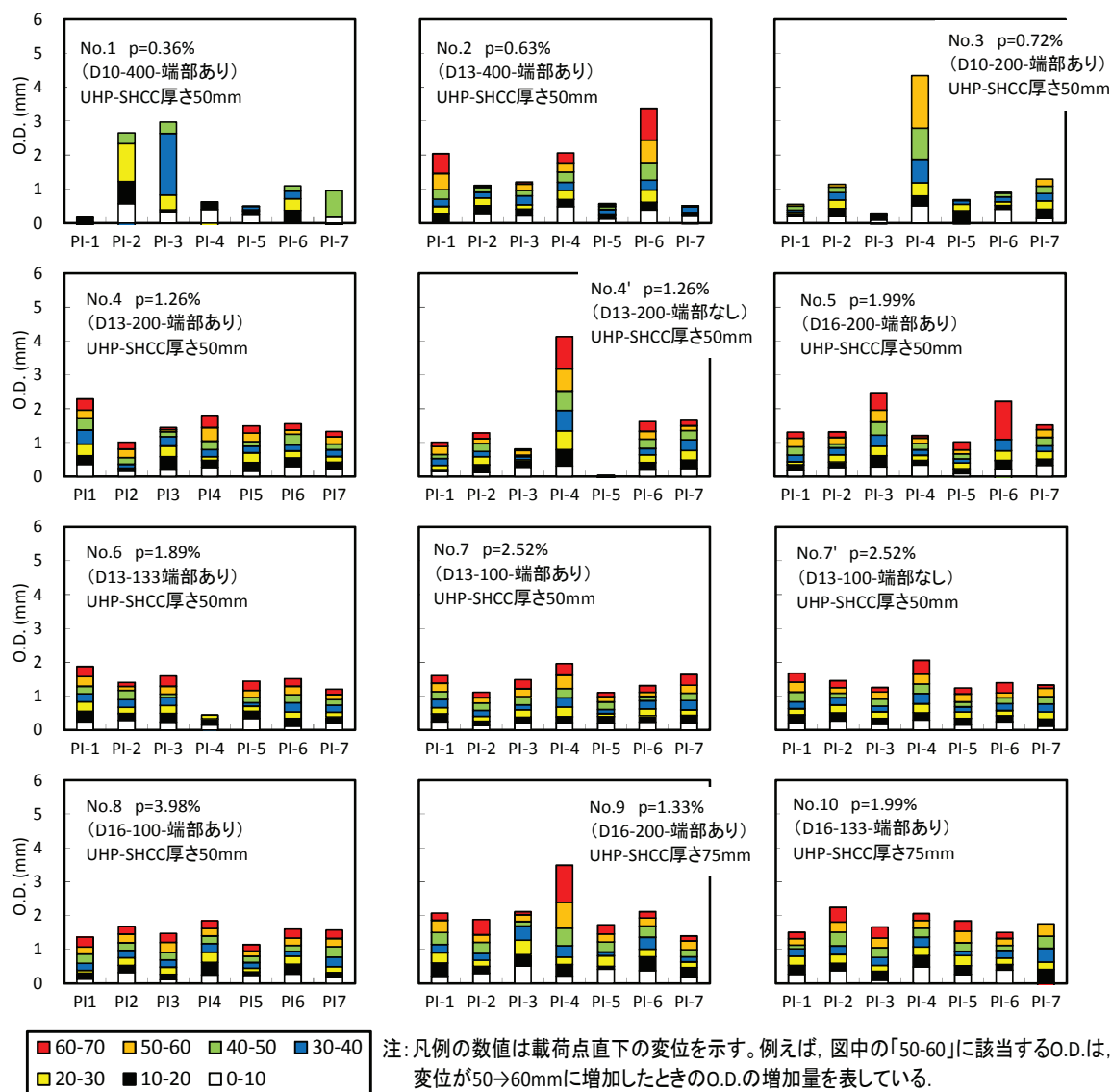


図-5.14 シリーズ1のUHP-SHCC表面に配置した各パイゲージのO.D.の推移

続いて、「端部鋼材の有無」を比較すると、端部鋼材を設けた No.4（鉄筋比 1.27%）の O.D. はほぼ均等に増加していたが、端部鋼材のない No.4' では PI-4 の区間で O.D. が著しく増加した。一方、鉄筋比 2.52% の No.7 と No.7' は、両者とも各パイゲージの O.D. は均等に増加しており、端部鋼材の有無による違いは見られなかった。これは、鉄筋比が 2.52% と大きい場合は、UHP-SHCC と軸方向鉄筋の付着面積が大きくなるため、端部鋼材がない状態でも曲げによる UHP-SHCC 端部の剥離は防止できると考えられる。

以上より、部材の曲げ変形による被覆端部の剥離が懸念される場合は、①D16 以上の鉄筋を 200mm 間隔で配置する、②D13 を配置間隔 200mm 以下にする、③D13 を配置間隔 200mm として被覆端部の剥離防止用の補助的な鋼材（端部鋼材など）を配置するなどの考慮が必要と考えられる。

2) シリーズ 2

図-5.15 に荷重と鋼板表面のひずみの関係を示す。これによると、A 面を下面にした状態における 3 サイクル目のスパン中央変位が 40mm となった時点で最大荷重 81kN に達し、それ以降は変位を増加させても荷重は低下した。これは、写真-5.3 に示すように、供試体端部の UHP-SHCC にひび割れが発生し、さらに鋼板と UHP-SHCC の界面が剥離したことによる。なお、最大荷重に達する前の A 面の荷重と鋼板表面ひずみの関係（実線）と B 面（点線）を比較すると、両者はほぼ一致しており（例えば、鋼板表面ひずみ 400 μ 時の荷重は、表示の関係から正負は異なるが、両者とも約 40kN）、正負交番载荷を受けた場合でも、A 面側と B 面側の UHP-SHCC ではほぼ同等のひずみ硬化性が発揮されていたと考えられる。

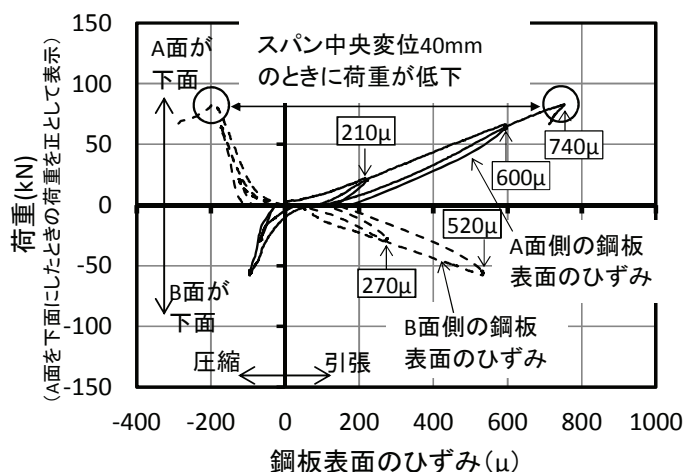
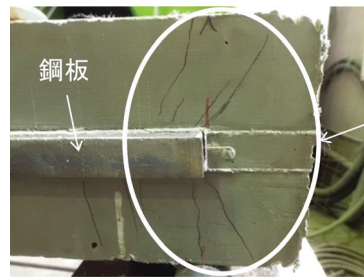
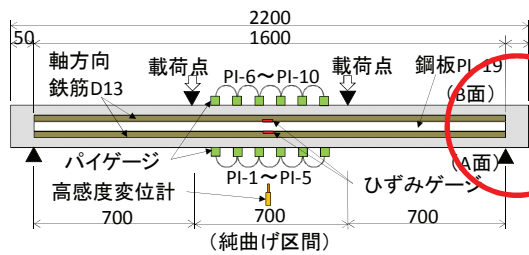


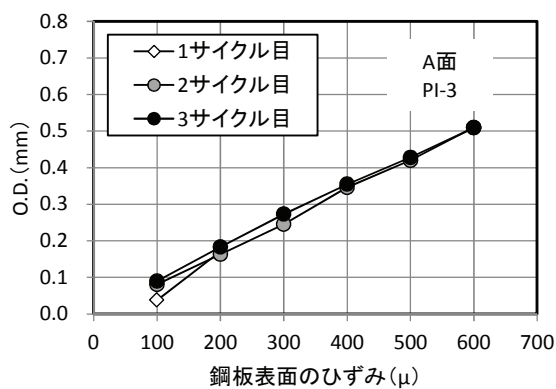
図-5.15 シリーズ 2 の荷重と鋼板表面ひずみの関係



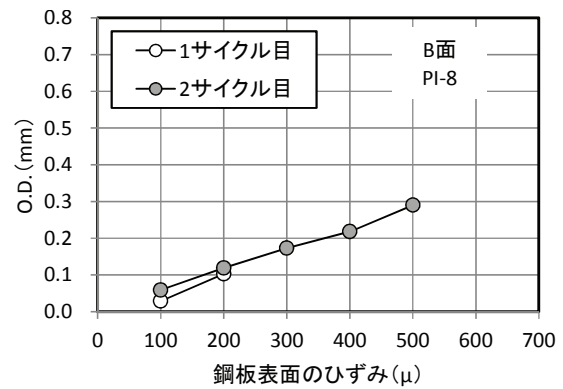
- ・UHP-SHCCに発生したひび割れ
- ・鋼板端部でのUHP-SHCCの剥離

写真-5.3 供試体端部における UHP-SHCC のひび割れ発生と鋼板との剥離状況

図-5.16 にスパン中央に配置したパイゲージにおけるサイクルごとの O.D. とその時点での鋼板表面ひずみの関係を整理した結果を示す。なお、図-5.16(a) は A 面を下面にして荷重した状態での A 面側の O.D. と鋼板表面ひずみの関係を示し、図-5.16(b) は B 面を下にした状態での結果を示している。これによると、鋼板表面ひずみの増加に伴って O.D. は直線的に増加している。つまり、今回の実験の範囲では、鋼板表面ひずみが 600μ 程度であれば、純曲げ区間の断面内では鋼板と UHP-SHCC は一体的に挙動していたと考えられる。また、各サイクルの O.D. と鋼板表面ひずみの関係は A 面および B 面とも同一直線上にプロットされており、繰返し荷重が作用する場合でも、引張側の O.D. と鋼板表面ひずみの関係は線形関係を保持することが確認された。なお、他のパイゲージでも同様の傾向が確認された。



(a) A 面 (PI-3)



(b) B 面 (PI-8)

図-5.16 引張を受ける UHP-SHCC 表面の O.D. と鋼板表面ひずみの関係

図-5.17(a)に A 面を下面にして載荷したときの A 面側の各パイゲージの O.D.の推移を、図-5.17(b)に B 面を下面にして載荷したときの B 面側の各パイゲージの O.D.の推移を示す。図-5.17(a)によると、各パイゲージの O.D.の値に若干の差は見られるものの、鋼板表面ひずみの増加に対応してすべてのパイゲージで O.D.は増加しており、鋼板の引張ひずみが 500~600 μ まではいずれかのパイゲージに O.D.の増加が集中する様子も見られなかった。また、図-5.17(b)を見ると、B 面側の O.D.はすべてのパイゲージでほぼ均等に増加していた。このことから、純曲げ区間における鋼板と軸方向鉄筋の溶接を行わない条件で数回の正負交番荷重を与えた場合でも、UHP-SHCC 表面には良好なひび割れ分散性が発揮されることがわかった。また、図-5.17より、鋼板表面ひずみが 500~600 μ に達した時点の UHP-SHCC 表面の O.D.は、平均的に 0.4mm 程度 (4,000 μ のひずみに相当) と読み取れる。ここで、図-5.18 に示すように、径 800mm 相当の鋼管杭に対し厚さ 50mm の UHP-SHCC を巻き立てたとして、軸力が作用せずに曲げのみが作用して UHP-SHCC の引張縁に 4,000 μ のひずみが発生したと仮定すると、鋼管杭表面のひずみは 3,500 μ 程度と試算される。つまり、シリーズ 2 で設定した軸方向鉄筋の配置仕様 (D13 を 200mm 間隔) で鋼管杭の引張縁が降伏ひずみ (約 2,000 μ) に達しても、UHP-SHCC は十分なひび割れ分散性を発揮できる可能性が示唆された。

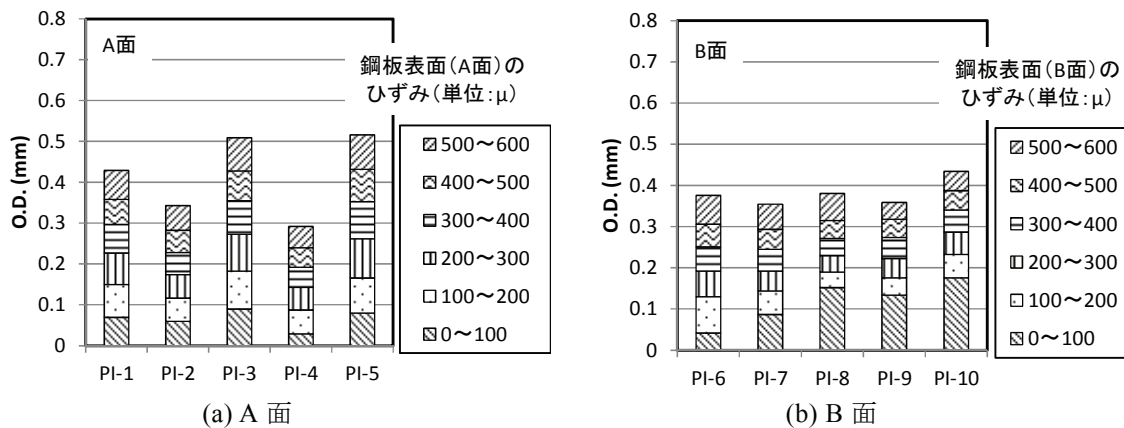


図-5.17 シリーズ 2 の UHP-SHCC 表面に配置した各パイゲージの O.D. の推移

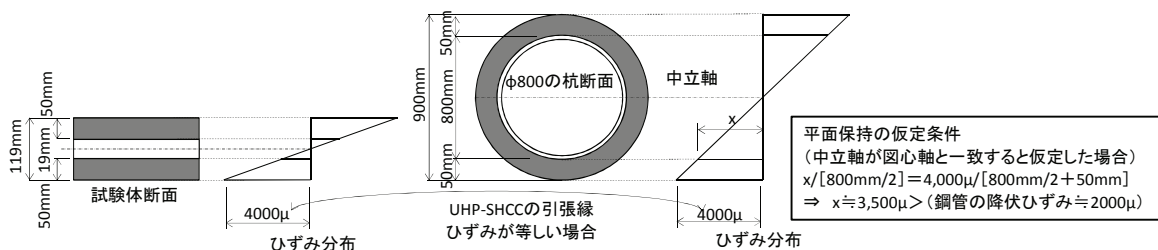


図-5.18 4000 μ のひずみが径 800mm 相当の杭表面に作用した場合の鋼管表面ひずみの試算

5. 3. 4 まとめ

本検討では、UHP-SHCC 巻立てと鋼管杭の一体化方法を確立することを目的に、ひび割れ分散性を発揮させる軸方向鉄筋の仕様について载荷試験により確認した。以下に本検討で得られた知見を示す。

- 1) UHP-SHCC 被覆端部に剥離が生じない場合には、D13 以上の径の軸方向鉄筋を 200mm 間隔で配置することで良好なひび割れ分散性が発揮されることが確認された。
- 2) 曲げにより UHP-SHCC 被覆端部の剥離が懸念される場合には、①D16 以上の鉄筋を 200mm 間隔で配置、②D13 を 200mm 以下の間隔で配置、③D13 を 200mm 間隔で配置して被覆端部に剥離防止用の補助的な鋼材を配置のいずれかの考慮が必要と考えられる。
- 3) 純曲げ区間における鋼板と軸方向鉄筋の溶接を省略し、正負交番载荷を作用させた場合でも、D13 の径の軸方向鉄筋を 200mm 間隔で配置することで、十分なひび割れ分散性が発揮されることが確認された。

参考文献

- [1] 森川秀人, 国枝稔, 藤本安宏, 六郷恵哲: ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料で鋼材を被覆した部材の力学挙動, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.263-268, 2003
- [2] 山下賢司, 藤本安宏, 林承燦, 六郷恵哲: 複数微細ひび割れ型コンクリートにより被覆した鋼管の曲げ破壊性状とひび割れ性状, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.301-306, 2005
- [3] 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー127, pp.試験-5-試験-8, 平成19年3月
- [4] A. Kamal, M. Kunieda, N. Ueda and H. Nakamura: Assessment of crack elongation performance in RC beams repaired by UHP-SHCC, Proceedings of 9th International Summer Symposium, JSCE, Yokohama, University, Japan, pp.5-8, September 2007

第6章 UHP-SHCC の上部工への定着方法

6.1 はじめに

前章の検討結果より、UHP-SHCC を用いた栈橋鋼管杭の補強構造は、UHP-SHCC を鋼管杭表面から上部工まで連続させた構造とするのが有効であることが確認された。この場合、UHP-SHCC は上部工に根入れする形となるため、アンカー効果が期待できる。しかし、地震力等の外力作用によって杭頭部に大きな曲げモーメントが発生する場合を想定すると、UHP-SHCC 巻立てを上部工へ機械的に定着させたほうが有効と考えられる。

そこで、図-6.1 に示すとおり、頭付きアンカーボルトを用いて上部工へ定着する方法を検討した。なお、この場合の上部工側の定着は、アンカーボルトの定着長によって設計可能である。一方、UHP-SHCC 側の定着は、図-6.1 (b) で示すとおり頭付きアンカーボルトのコーン状破壊によって定まる引抜き力を用いて照査することとなる。ここで、高靱性セメント系複合材料に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力は、高い靱性能によって引抜き耐力が向上することが明らかにされている [1,2]。しかし、UHP-SHCC のような高強度材料を用いた知見はほとんどない。そこで、UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き試験を実施し、引抜き耐力および破壊形状を確認した。加えて、得られた実験結果と日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説 (2010)」にある頭付きアンカーボルトの許容引張り算定式 (以下、建築学会式) [3] を比較し、許容引抜き耐力の算定手法について検討した。

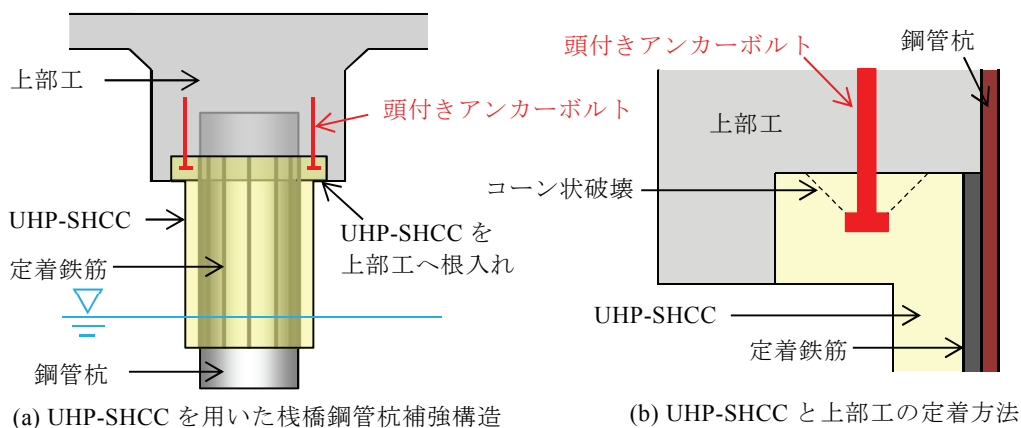


図-6.1 頭付きアンカーボルトを用いた UHP-SHCC の上部工への定着方法

6. 2 実験概要

本実験では、3つのシリーズに分けて実験を行った。シリーズ1では、アンカーの埋込み長が小さい範囲（10～30mm）の試験体を用いて検討を行った。シリーズ2では、埋込み長30～50mmの範囲で検討を行った。シリーズ3では、へりあきの影響について確認した。以下では3つのシリーズの実験概要を示す。

1) シリーズ1

シリーズ1の試験体概要を図-6.2に示す。試験体の母材（UHP-SHCC）寸法は200×200×100mmで、試験体中央部に頭付きアンカーボルトが埋め込まれた構造とした。アンカーの仕様はM22ボルトに直径38mmの定着板（厚み9mm）を固定したものとし、埋込み長（UHP-SHCC表面から定着板までの距離）を10mm、20mm、30mmとして試験ケースとした。引抜き試験は図-6.3に示すとおり、50t型万能試験機を用いて、アンカーボルトにカプラを介してPC鋼棒を接続し、PC鋼棒を下向きに引っ張ることで行った。反力台には、アンカー引抜きによるコーン状破壊面に影響を及ぼさないように、直径200mmの円形で切り抜いた鋼板を用いた。なお、試験中の計測項目は引張荷重のみとした。なお、試験体は各ケース3体とし、アンカーを底型枠に取り付けた状態でUHP-SHCCを打ち込んで製作した。

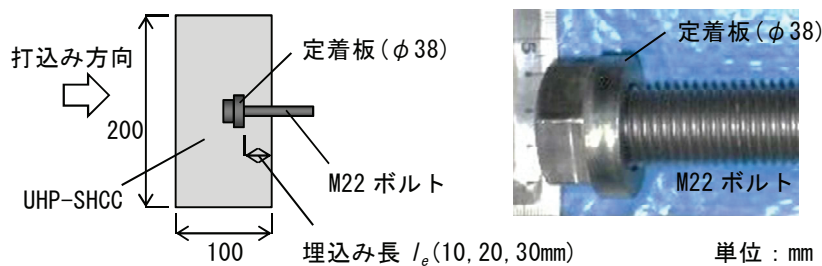


図-6.2 シリーズ1の試験体概要と頭付きアンカーボルト

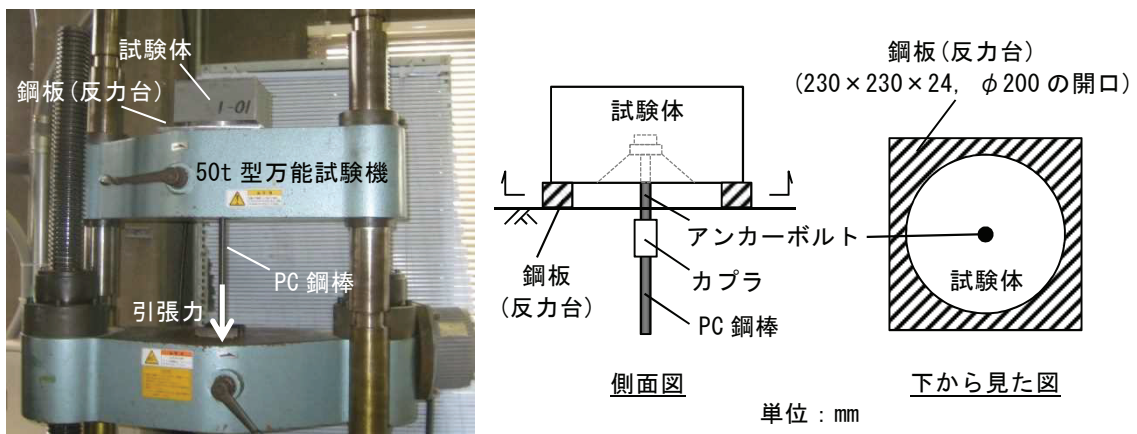


図-6.3 シリーズ1の引抜き試験概要

2) シリーズ 2 およびシリーズ 3

シリーズ 2 および 3 の試験体概要を図-6.4 に、シリーズ 1 も含めた実験ケース（頭付きアンカーボルトの仕様）を表-6.1 に示す。シリーズ 2 および 3 で用いたアンカーは、シリーズ 1 と同構造の M22 ボルトに定着板（直径 44mm，厚み 12mm）を固定したものとφ22mm スタッドボルト（頭部径 35mm，頭部厚 10mm）の 2 種類とし、埋込み長を変えて実験ケースとした。なお、2 種類のアンカーで頭部径を変えることで、その違いが及ぼす影響も確認した。試験体の母材寸法はアンカーの埋込み長に応じて大きさを変え、シリーズ 2 のアンカーは試験体中央部に、シリーズ 3 のアンカーは母材端部近くに埋設した。ここで、高靱性セメント系複合材料に埋設されたアンカーは、埋込み長が小さいほどコーン状破壊面が 45 度（建築学会式におけるコーン状破壊面）より緩い角度で破壊するという知見 [2] がある。そこで、シリーズ 3 は 45 度のコーン状破壊面を仮定して母材寸法を設定し、これによるへりあきの影響について確認するシリーズとした。試験体は各ケース 1 体とし、アンカーを側面の型枠に取り付けた状態で UHP-SHCC を打ち込んで製作した。引抜き試験は、図-6.5 に示すとおりセンターホールジャッキを用いて行った。なお、試験中の計測項目は、引張荷重とアンカーの鉛直変位（2 箇所）とし、鉛直変位は図-6.5 に示す位置でアンカーの鉛直変位を計測した。なお、シリーズ 1 とシリーズ 2 で打込み方向は異なるが、UHP-SHCC はブリーディングが発生しないため、打込み方向が実験結果に及ぼす影響はないと考えられる。

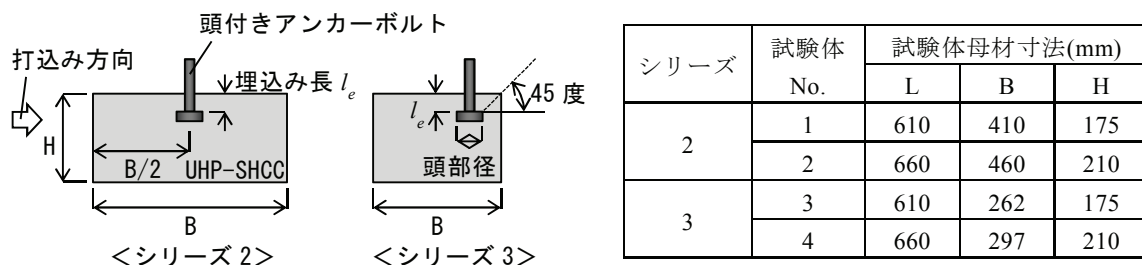


図-6.4 シリーズ 2 および 3 の試験体概要

表-6.1 実験ケース（頭付きアンカーボルトの仕様）

ケース	頭付きアンカーボルト仕様			試験体 No.
	種類	埋込み長	頭部径	
1-1	M22 ボルト+定着板	10mm	38mm	—
1-2		20mm		—
1-3		30mm		—
2-1	M22 ボルト+定着板	30mm	44mm	1
2-2		50mm		2
2-3	φ 22mm スタッドボルト	40mm	35mm	1
2-4		50mm		2
3-1	φ 22mm スタッドボルト	40mm	35mm	3
3-2		50mm		4

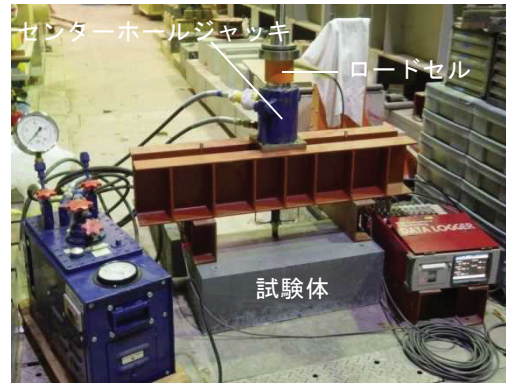
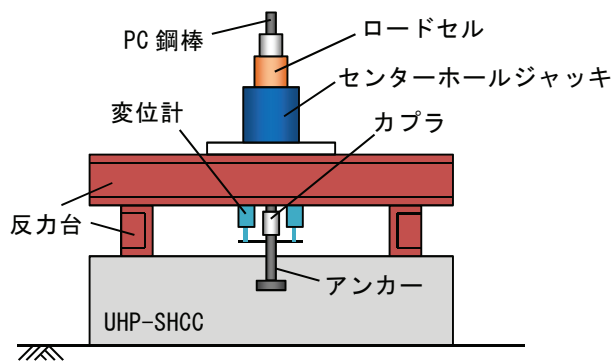


図-6.5 シリーズ2および3の引抜き試験概要

6.3 UHP-SHCCの配合

UHP-SHCCの配合を表-6.2に、UHP-SHCCの構成材料を表-6.3に示す。引抜き試験体と同条件で製作・養生したUHP-SHCCのテストピースを用いて、引抜き試験と同時に各種力学的試験を行った結果を表-6.4に示す。なお、シリーズ1の引抜き試験は材齢49日、シリーズ2は材齢32日、シリーズ3は材齢123日で行っている。シリーズ1とシリーズ2および3で石灰石微粉末の混和の有無による配合の違いはあるが、強度への影響はほとんどなかった。

表-6.2 UHP-SHCCの配合

シリーズ	セメント種類	W/B	SF/B	LP/B	EX/B	S/B	繊維混入率 (単位体積%)	SP (B×%)	D (B×%)
1	L	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	3.0	0.03
2, 3	L	0.22	0.15	—	0.025	0.10	1.5	3.0	0.03

B=C+SF+LP+EX (ここでは、石灰石微粉末(LP)も結合材の一部とした)

表-6.3 UHP-SHCCの構成材料

記号	材料	種類および物性等
W	水	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)
C	結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント (密度 3.24g/cm ³)
SF		シリカフェーム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 200,000cm ² /g)
LP		石灰石微粉末 (密度 2.70g/cm ³)
EX		膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.10g/cm ³)
S	骨材	7号珪砂 (密度 2.68g/cm ³)
PE	繊維	高強度ポリエチレン短繊維 (密度 0.97g/cm ³ , 直径 0.012mm, 長さ 6mm, 弾性係数 88GPa, 引張破断強度 2,700MPa)
SP	混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.10g/cm ³)
D		消泡剤 (ポリエーテル系, 密度 1.00g/cm ³)

表-6.4 UHP-SHCC の力学的性質

項目	シリーズ			標準水中養生 ($\sigma 28$)	
	1	2	3	シリーズ 1	シリーズ 2,3
圧縮強度(N/mm ²)	107	115	143	94.9	106
静弾性係数(kN/mm ²)	24.7	29.6	26.8	—	—
引張強度(N/mm ²)※	6.40	6.14	—	—	—

※ダンベル型供試体を用いた一軸直接引張試験による [4]

6. 4 実験結果

6. 4. 1 最大引張荷重

引抜き試験によって得られた最大引張荷重を図-6.6に示す。なお、すべての試験ケースにおいてコーン状破壊により母材破壊したのを確認している。試験結果より、すべてのシリーズにおいてアンカーの埋込み長が深いほど最大引張荷重は大きくなるのがわかる。また、シリーズ2の結果を比較すると、スタッドに比べてボルトのケースのほうが最大荷重は大きい傾向を示した。これは、頭部径の大きさがコーン状破壊面の大きさに影響を及ぼし、結果的に引張荷重が大きくなったためと考えられる。一方、シリーズ3の結果は、同アンカー仕様のシリーズ2（スタッド仕様ケース）の結果に比べて小さかった。これは、アンカーから母材端部までの距離（へりあき）が一部で短かったことにより、コーン状破壊面の大きさに影響を及ぼし、引張荷重が小さくなったためと考えられる。

シリーズ2および3における引張荷重とアンカーの鉛直変位の関係を図-6.7に示す。なお、試験ケース2-2および2-4のアンカーは、引張荷重115kN程度で降伏点を超えたが、アンカーが破断する前にコーン状破壊したのを確認している。試験結果より、初期は荷重の増加が大きく、その後荷重の増加が小さくなっても変位は大幅に増加しているのがわかる。既往の文献[2]では、ひび割れ発生後も荷重および変位が増加することが確認されており、本研究においてもUHP-SHCCの有する高い靱性能により同様の挙動を示したものと考えられる。

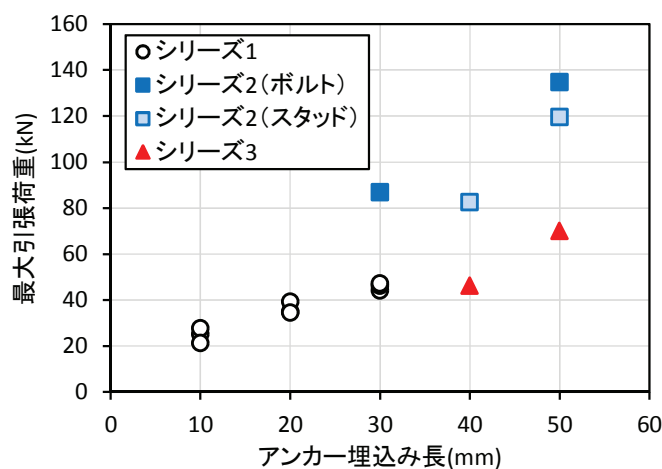


図-6.6 最大引張荷重とアンカー埋込み長の関係

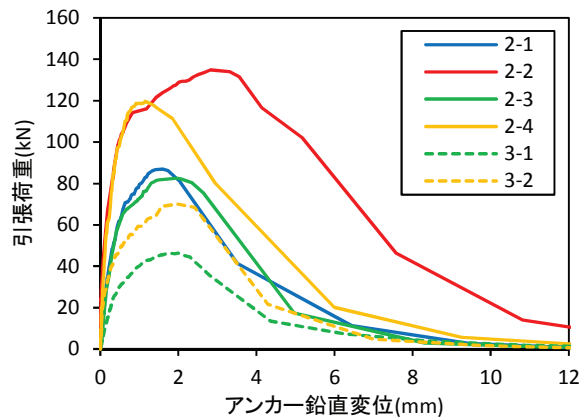


図-6.7 引張荷重とアンカー鉛直変位の関係

6. 4. 2 コーン状破壊形状

写真-6.1 にシリーズ 2 および 3 のコーン状破壊によって引き抜けた母材表面を示す。なお、図中には引き抜けた境界（破壊ライン）と建築学会式による有効水平投影面積を合わせて示した。これによれば、破壊ラインで形成される引抜き面積は建築学会式による有効水平投影面積に比べて大きく、シリーズ 2 においては 2.7～4.4 倍であった。ひび割れの発生状況は、アンカーを中心に放射状および円周方向に生じているひび割れが多数確認された。アンカー引抜きによる最終的な破壊は、破壊面全体が引き抜けるとともに、放射状もしくは円周方向のひび割れが局所的な拡大を伴いながら荷重が低下して生じた。

図-6.8 にシリーズ 2 の破壊断面を示す。なお、破壊断面は写真-6.1 に示す A～D の 4 断面で実測したものである。これによれば、実測した破壊断面は建築学会式で定義されている 45 度のコーン状破壊面に比べて角度が浅く、特にアンカー頭部に近いところでは 45 度に近い角度で破壊面が形成され、表面に近づくほど角度が浅くなっている状況が確認された。母材が普通コンクリートで検討されている既往の文献 [5] においても、破壊角度が 45 度より浅くなっている傾向は示されているが、本検討における破壊面は初めアンカー頭部付近から生じ、引張荷重の増加とともに拡大していくものの、UHP-SHCC に混入した繊維が破壊の進行に抵抗することで、アンカーより遠い領域ほど（母材表面に近づくほど）破壊面の角度が浅くなったものと推察される。また、埋込み長が同じケース 2-2 と 2-4 を比べると、ケース 2-2 のほうが破壊面の角度が浅くなっているように見える。これは、頭部径の寸法の違いが影響を及ぼしているものと考えられ、頭部径が小さいほうがアンカーに引張力が作用した際の軸方向力の影響が大きくなり、アンカー頭部に近い位置では破壊面の角度が若干大きくなったものと推察される。

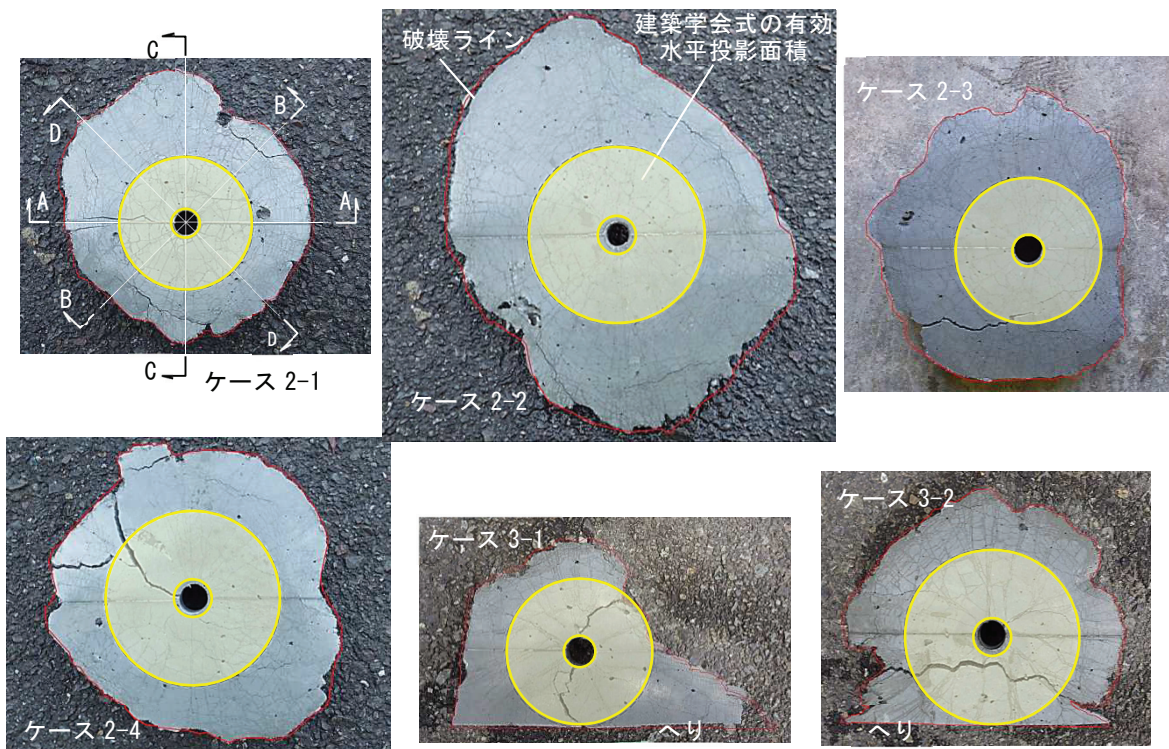


写真-6.1 コーン状破壊面

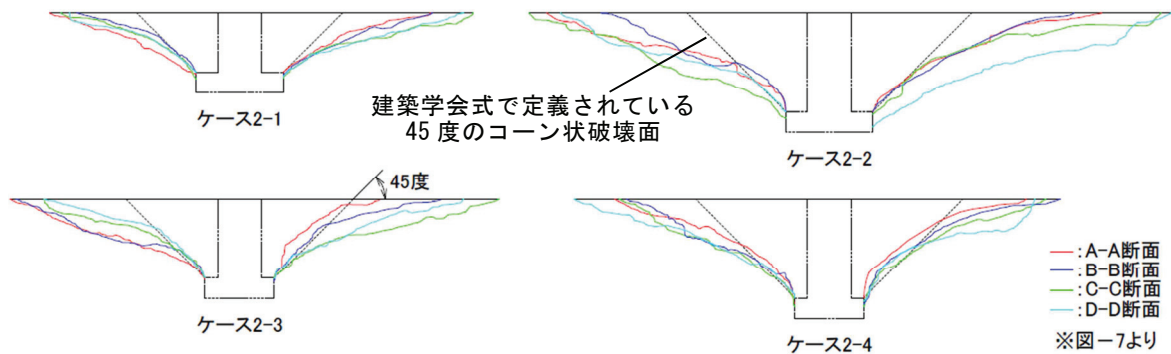


図-6.8 シリーズ2のコーン状破壊断面

6. 4. 3 引張荷重と実測水平投影面積の関係

引抜き試験によって得られた最大引張荷重とコーン状破壊した表面積からアンカーの支圧面積分を差し引いて算出した水平投影面積（以下、実測水平投影面積）の関係を図-6.9 に示す。この結果より、シリーズ3も含めておおよそ線形関係になっていることがわかる。このことは、へりあきの影響も含めて引抜き耐力と水平投影面積との間には線形関係が成立し、水平投影面積を算定できれば許容引抜き耐力を推定できる可能性があることを示唆しているものと考えられる。

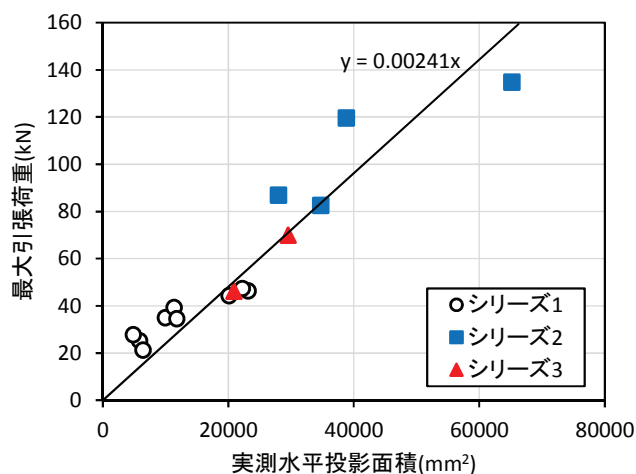


図-6.9 最大引張荷重と実測水平投影面積の関係

6. 4. 4 建築学会式との比較

引抜き試験で得られた最大引張荷重と建築学会式によって算定される許容引張力（ここでは低減係数を1とした）との関係を図-6.10に示す。ここで、建築学会式を以下に示す。なお、式中の母材設計基準強度には、表-6.4に示す圧縮強度を用いた。

$$p_{a2} = \varphi_2 \cdot {}_c\sigma_t \cdot A_c \quad (1)$$

ここに、 p_{a2} ：コーン状破壊により定まる許容引張力(N)

φ_2 ：低減係数（長期 1/3，短期 2/3）

${}_c\sigma_t$ ：コーン状破壊に対する母材の引張強度（ $= 0.31 \cdot \sqrt{F_c}$ ）(N/mm²)

F_c ：母材の設計基準強度(N/mm²)

A_c ：コーン状破壊面の有効水平投影面積（ $= \pi \cdot l_{ce}(l_{ce} + D)$ ）(mm²)

l_{ce} ：頭付きアンカーボルトの埋込み長(mm)

D ：頭付きアンカーボルトの頭部径(mm)

図-6.10より、シリーズ1および2はおおよそ線形関係になっており、実験値は建築学会式による算定値のおよそ2.74倍であった。シリーズ3は、へりあきの影響によって線形関係から外れたと考えられる。

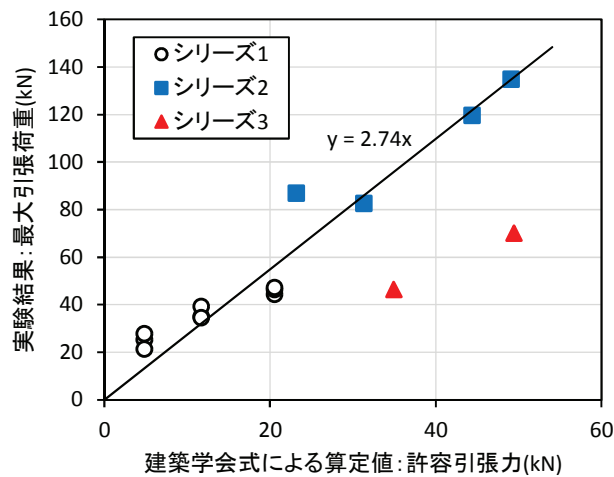


図-6.10 実験結果と建築学会式による算定値の比較

6. 5 引抜き耐力算定手法の検討

式(1)のとおり，引抜き耐力は母材の引張強度と水平投影面積の積として算定される。図-6.9より，UHP-SHCC に埋設されたアンカーの引抜き耐力は水平投影面積と線形関係にあることから，式(1)の考え方が成立するものと考えられるが，母材の引張強度を表す近似直線の傾きは 2.4N/mm^2 であるため，表-6.4 に示される引張強度に比べて大きく下回る。このことは，コーン状破壊する面積全体で引抜き耐力に寄与しているわけではないということを示唆している。

図-6.11 に引抜き試験による最大引張荷重を表-6.4 の引張強度で除して求めた値（以下，推定水平投影面積）と実測水平投影面積の関係を示す。なお，シリーズ3は一軸直接引張試験[4]を実施していないため，ここではシリーズ2の引張強度を用いた。図-6.11 より，推定水平投影面積（＝最大引張荷重／母材引張強度）は実測水平投影面積の約0.39倍となり，上述したとおり破壊した面積全体では引抜き耐力に寄与していないことが推察された。

ここで，図-6.11 の関係から図-6.12 に示すコーン状破壊面を仮定し，その仮定から得られる許容引抜き耐力の推定式を以下に示す。

$$p_{a2'} = \varphi_2 \cdot u\sigma_t \cdot A_{c'} \quad (2)$$

ここに， $p_{a2'}$ ：UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの許容引抜き耐力(N)

$u\sigma_t$ ：UHP-SHCC の引張強度(N/mm^2)

$A_{c'}$ ：仮定による有効水平投影面積（ $= \pi \cdot (l_{ce}/\tan 39^\circ) \{ (l_{ce}/\tan 39^\circ) + D \}$ ）(mm^2)

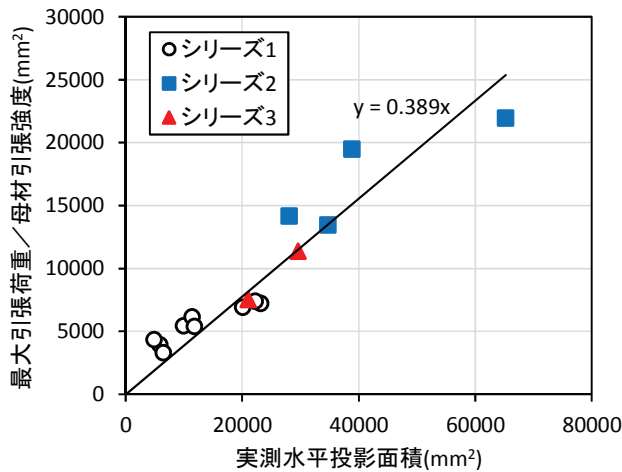


図-6.11 水平投影面積と実測水平投影面積

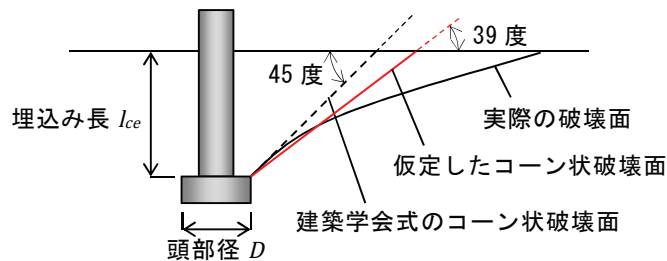


図-6.12 コーン状破壊面の仮定

写真-6.2 は、ケース 2-1 のコーン状破壊面に図-6.12 で仮定したコーン状破壊ラインを追記したものである。これによると、仮定したコーン状破壊ラインより外側に円周方向の微細ひび割れが多数発生していることがわかる。このひび割れは、アンカー引抜き時に表層剥離のような形となって曲げが作用した際に生じたものと考えられ、円周方向の微細ひび割れが多数発生している範囲は引抜き耐力には寄与していないと推察される。引抜き試験の際には、最大引張荷重時に母材表面には大きなひび割れ等の変状は確認されていないことから、破壊した面積全体が引抜き耐力に寄与していないと推察される。詳細な要因を検討するためには、最大引張荷重時のコーン状破壊面におけるひび割れの進展状況などを確認する必要がある。

次に、式(2)を用いて計算される許容引抜き耐力と実験により得られた最大引張荷重の関係を図-6.13 に示す。これによると、シリーズ 1 および 2 は実測値と推定値がおおよそ一致した。一方、シリーズ 3 は実験結果のほうが小さくなっている。へりあきを加味した推定手法を検討するためには、更なるデータの蓄積が必要であるが、本研究の範囲では低減係数を 1/2 とすることでへりあきの影響を加味でき、安全側の評価が可能と考えられる。

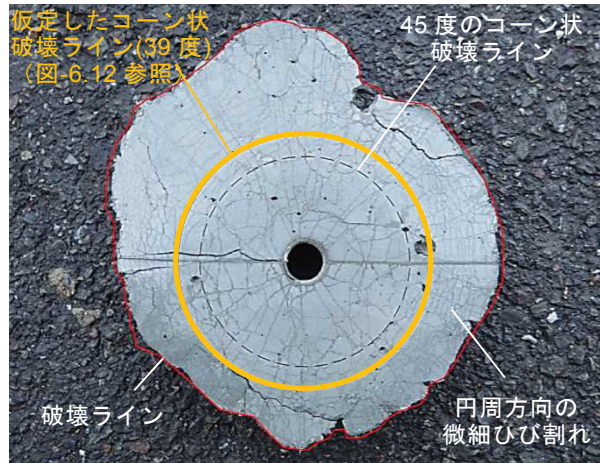


写真-6.2 仮定したコーン状破壊ラインの一例

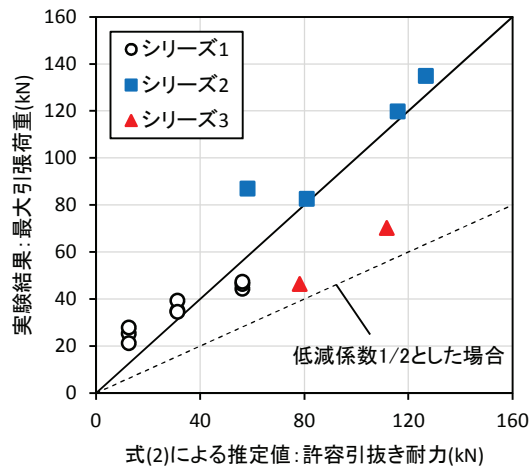


図-6.13 実験結果と式(2)による推定値の関係

6. 6 まとめ

本実験では、UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き試験を実施し、引抜き耐力とその算定手法について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力は、建築学会式によって算定される許容引張力に比べて、2.74 倍大きくなることが確認された。
- 2) UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜きによるコーン状破壊面の角度は、建築学会式で定義されている 45 度よりも浅く、破壊面積は大きくなることが確認された。
- 3) 頭付きアンカーボルトの頭部径が破壊面積の大きさに影響を及ぼしている可能性があることを示した。
- 4) へりあきの影響も含めて、コーン状破壊面の水平投影面積と引抜き耐力は線形関係を有していることが確認された。
- 5) 仮定したコーン状破壊面から引抜き耐力を推定する手法を提案した。
- 6) へりあきの影響が伴う際の引抜き耐力は、低減係数を用いることで推定できる可能性を示したが、精度向上のためにはデータの蓄積等の課題が残った。また、複数本の頭付きアンカーボルトが近接する場合の引抜き耐力についても今後の課題である。

参考文献

- [1] 稲熊唯史，柳沢啓悟，国枝稔，六郷恵哲，村田茂：高靱性セメント複合材料におけるアンカーボルトの引抜き性状，日本コンクリート工学協会，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.15-22，2003.12
- [2] 菊田貴恒，三橋博三，Choi Donguk，石川直哉：高靱性セメント系複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜け性状に関する研究，日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.327-332，2008
- [3] 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説 -2010 改定-，pp.236-237，2010
- [4] 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，pp.試験-5-試験-8，平成 19 年 3 月
- [5] 松崎育弘：コンクリート部材に定着したアンカーボルトの支持耐力，コンクリート工学，Vol.22，No.7，1984.7

第7章 UHP-SHCC 巻立てによる補強効果の検証

7.1 はじめに

小型供試体による UHP-SHCC と鋼管の一体化方法および杭頭構造に関する検討を受けて、本章では大型供試体を用いた載荷試験により曲げ耐力の向上効果を確認した結果を示す。また、載荷試験の結果を用いて曲げ耐力の推定方法について検証を行った。

7.2 大型供試体を用いた曲げ載荷試験

7.2.1 実験概要

検討ケースと供試体の概要を表-7.1 および図-7.1 に、使用材料の力学的性質を表-7.2 に示す。Case1 は巻立てなしの基準供試体とし、Case2～5 は定着鉄筋の条件を変えた UHP-SHCC 巻立て供試体とした。なお、Case5 供試体は、写真-7.1 に示すとおり、実施工を模擬して UHP-SHCC を注入により打ち上げて製作した。

写真-7.2 に載荷試験の状況を示す。載荷試験では、図-7.1 に示すとおり、実際の栈橋構造とは天地逆の状態です。供試体をセットし、鋼管上部に水平載荷を加えることで鋼管杭と上部工の接合部に曲げモーメントを発生させた。図-7.2 に載荷試験時の載荷ステップを示す。Case1 は正負交番水平載荷で行い、その他のケースは片側からの水平載荷で行った。また、Case1～4 は、Case1 での鋼管のひずみが 2000μ に達した時点の水平変位（約 16mm）を基準変位 δ_y として繰り返し載荷を実施し、Case5 は荷重制御で行った。なお、Case1～4 の載荷は供試体が破壊するまで行い、Case5 は試験機の関係で水平荷重 400kN までとした。載荷試験時の計測項目は、水平荷重、載荷点の水平変位、接合部断面の鋼管と UHP-SHCC 表面のひずみとした。なお、Case1～4 は、実際の上部工の重量を考慮して 300kN の軸力を導入した状態で載荷試験を実施した。ただし、補修工事における施工直後の巻立て材には上部工の重量は作用していないと考えられ、軸力を導入した本実験条件とは異なる。しかし、導入した軸力は全断面降伏軸力の約 10% と小さいため、試験結果に与える影響は小さいと判断した。

表-7.1 検討ケース

Case	UHP-SHCC 巻立て厚	定着鉄筋条件			備考
		規格	本数	鉄筋比(%)	
1	—	—	—	—	
2	56.5mm	D10	4本	0.31	
3		D13	8本	1.11	
4		D16		1.74	
5		D16	12本	2.61	実施工を模擬して UHP-SHCC を注入により打ち上げて供試体を製作

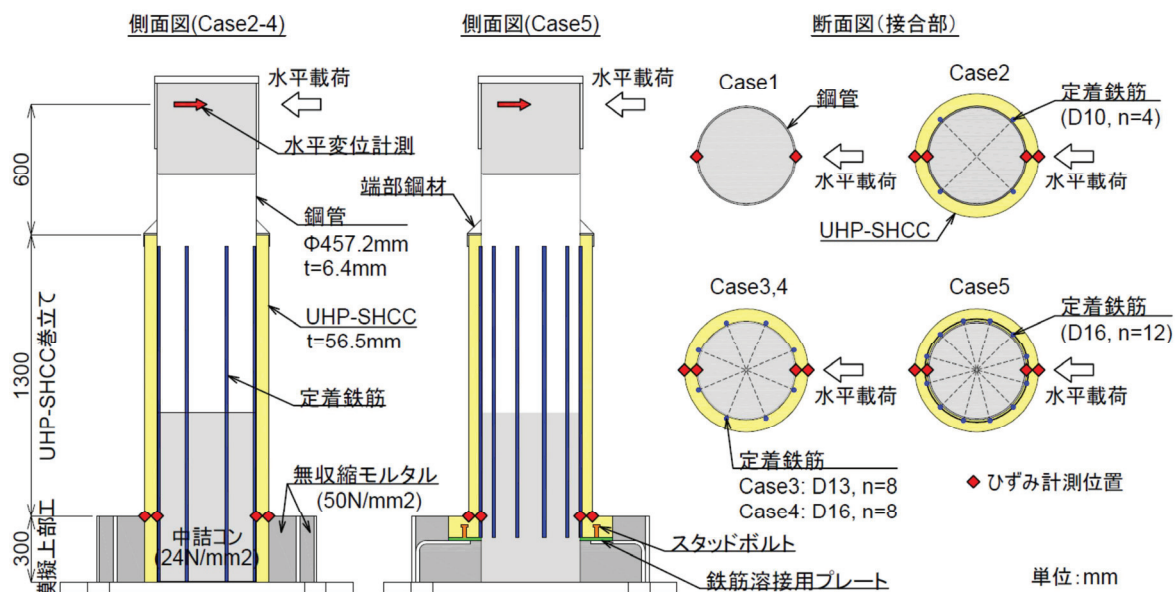


図-7.1 供試体概要

表-7.2 使用材料の力学的性質

材料	項目	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
鋼管 STK400	降伏点(N/mm ²)	365	353		336	
	引張強さ(N/mm ²)	470	465		451	
	破断伸び(%)	39	35		38	
定着鉄筋 SD295	降伏点(N/mm ²)	—	356	356	362	354
	引張強さ(N/mm ²)		552	501	509	477
	破断伸び(%)		25.6	30.4	25.0	24.0
UHP-SHCC	圧縮強度(N/mm ²)	—	100.0	91.1		100.0
	静弾性係数(kN/mm ²)		25.7	23.1		27.6
	引張降伏強度(N/mm ²)		4.00	4.00		3.80
	引張強度(N/mm ²)		5.70	7.58		6.73
	引張終局ひずみ(%)		0.58	1.81		1.81

* 鋼管・定着鉄筋は試験成績表，UHP-SHCC はテストピースを用いた試験結果

* UHP-SHCC の引張強度および引張強度時ひずみは，文献 [1] に基づいて測定



写真-7.1 供試体の製作状況 (Case5)

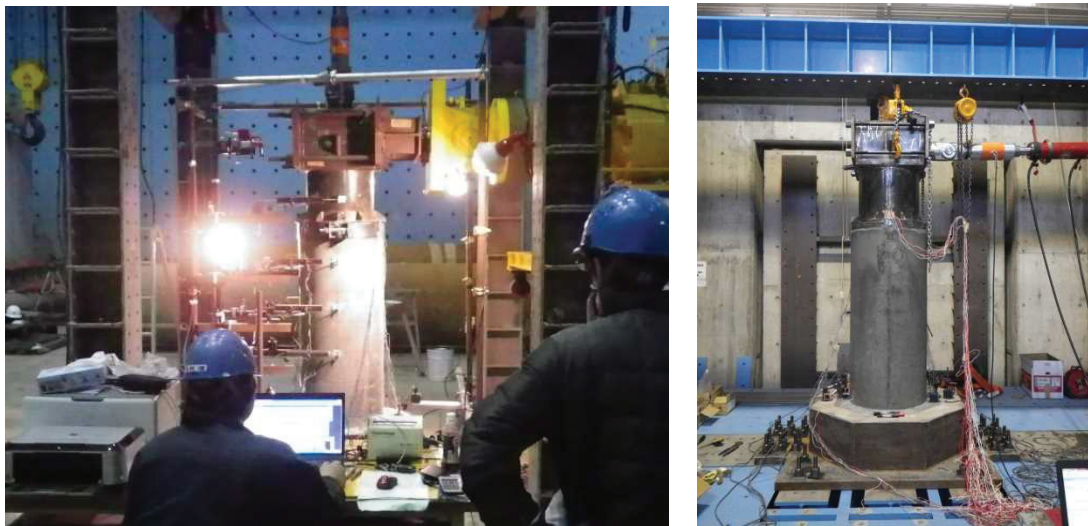


写真-7.2 荷重試験状況

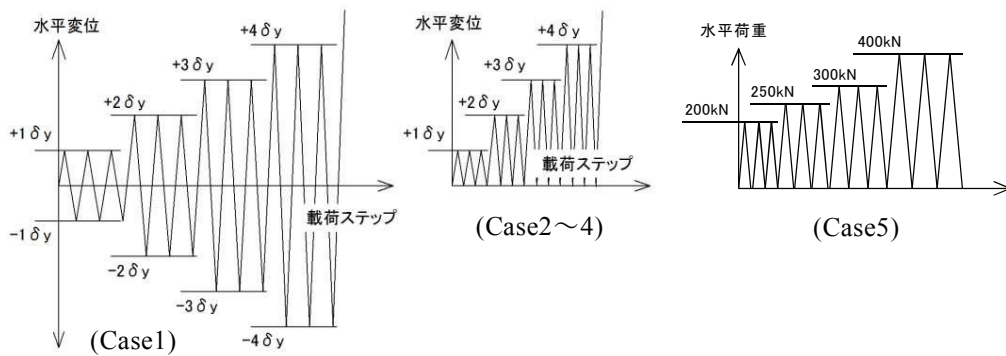


図-7.2 荷重試験時の荷重ステップ

7. 2. 2 実験結果

1) 荷重と変位の関係

図-7.3 に水平荷重と水平変位の関係を包絡線で示す。なお、Case1 は正側の結果のみを示す。基準変位 $+1\delta_y$ (約 16mm) で比較すると、UHP-SHCC を巻き立てたケースの荷重は顕著に大きくなっており、巻き立てによって曲げ耐力が向上したことが確認された。また、最大荷重も同様に、巻き立てなしの基準供試体 Case1 に比べて、Case2 は 1.61 倍、Case3 は 1.74 倍、Case4 は 1.85 倍と大幅に増加した。なお、最大荷重は Case2 < Case3 < Case4 となっており、定着鉄筋量の増加が荷重増加に寄与していると考えられる。また、同水平荷重時の水平変位を比べると、UHP-SHCC を巻き立てたケースの方が小さくなっており、UHP-SHCC 巻き立てにより曲げ変形は抑制されたと考えられる。なお、Case1 では、最大荷重後に接合部より約 100mm 上部の圧縮側で局部座屈が確認された。一方、Case2~4 では、最大荷重後に顕著な荷重低下が確認された。

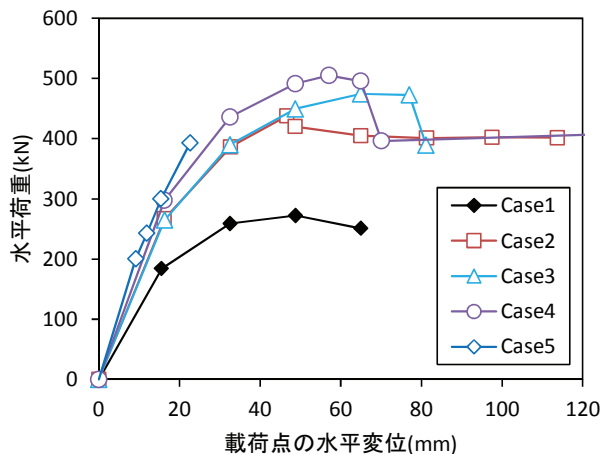


図-7.3 荷重－変位の包絡線

2) UHP-SHCC 表面のひび割れ

Case2~4 の UHP-SHCC 表面に発生したひび割れについて、経時的に確認したひび割れの展開図を図-7.4 に示す。なお、左列より荷重前に生じた初期ひび割れ、荷重開始から $+1\delta$ までに発生したひび割れ、 $+1\delta$ から最大荷重までに発生したひび割れ、一番右の列が最大荷重以降に発生したひび割れである。また、図中の 0° が引張側、 180° が圧縮側である。

荷重開始から鋼管が降伏ひずみに達する程度の $+1\delta$ までにおいては、すべてのケースで引張側の水平方向ひび割れがわずかに増える程度であった。その後の最大荷重に至るまでのひび割れ発生状況は、すべてのケースで引張側の水平方向ひび割れが増加した。特に Case4 の引張側の水平方向ひび割れが多く発生しており、定着鉄筋により荷重に伴うひび割れ分散性が発揮されたと考えられる。その後、すべてのケースで最大荷重に達する前に圧縮側の鉛直方向ひび割れが発生し、Case2 では引張側および圧縮側のひび割れが局所的に拡大して荷重が低下した。ひび割れが局所化したのは定着鉄筋量が少なく、UHP-SHCC と鋼管の一体性が欠けていたため

と考えられる。Case3 では、引張側の水平方向ひび割れの局所化が見られるとともに、圧縮側の鉛直方向ひび割れが進展して荷重が低下した。Case4 では最大荷重後に圧縮側の鉛直方向ひび割れが進展して荷重低下に至った。なお、供試体には載荷試験を実施した時点で初期ひび割れが発生していたが、鋼管が降伏ひずみに達するまでの間にひび割れはほとんど進展していないため、鋼管が降伏ひずみに達するまでの範囲においては初期ひび割れの影響は小さいと考えられる。一方、最大荷重時に進展した鉛直方向ひび割れは、初期ひび割れがきっかけとなっている箇所も確認された。

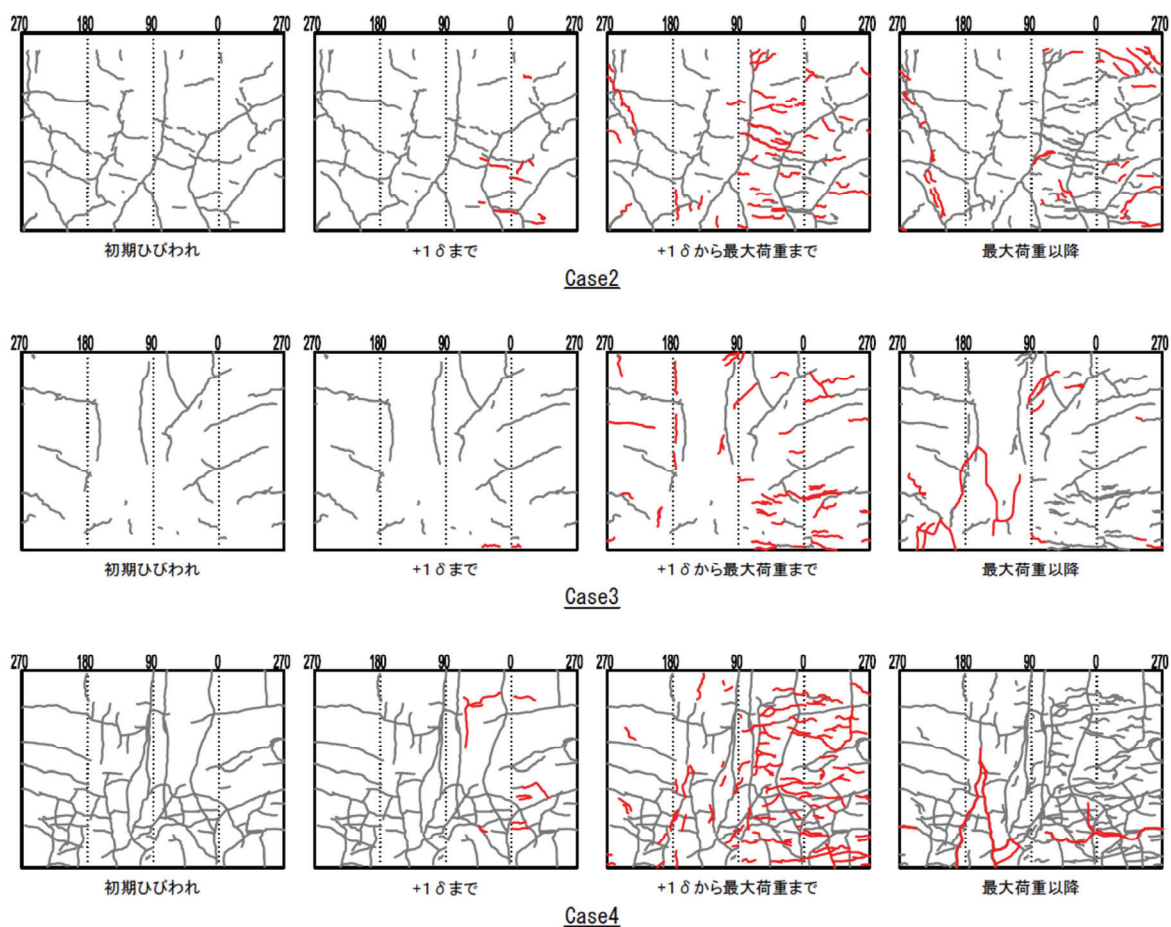


図-7.4 UHP-SHCC 表面の経時的なひび割れ展開図

3) 鋼管のひずみ

図-7.5 に接合部における圧縮側および引張側の鋼管ひずみの推移を示す。Case1 では圧縮側が先に降伏ひずみに達したのに対し、UHP-SHCC を巻き立てた Case2~4 では引張側が先に降伏ひずみに達した。これは、UHP-SHCC が圧縮力を大きく負担しているためと考えられる。また、同荷重時の鋼管ひずみは Case1 に比べて Case2~5 の方が小さくなっており、UHP-SHCC 巻き立てによる曲げ変形の抑制効果を裏付けている。

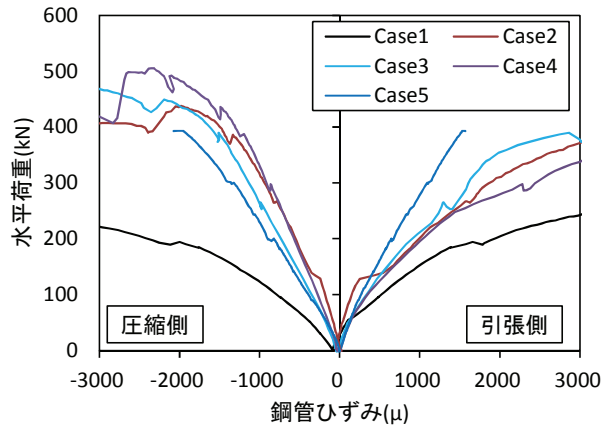


図-7.5 接合部における鋼管ひずみの推移

4) 接合部のひずみ分布

図-7.6 に水平変位が約 16mm に達した時点 (Case1 の鋼管ひずみが 2000 μ に到達した時点) の接合部におけるひずみ分布を示す。なお、断面中心から土約 0.23m におけるプロットが、鋼管の圧縮縁および引張縁のひずみである。UHP-SHCC を巻き立てることで中立軸は圧縮側にシフトしており、このことから UHP-SHCC による圧縮力の負担が大きいことが確認された。また、Case2 および 3 のひずみ分布は、鋼管の引張縁から UHP-SHCC の圧縮縁までほぼ直線分布となっているため、断面の平面保持が成立していると考えられる。なお、UHP-SHCC の引張縁のひずみがほとんど計測されなかったのは、ひずみゲージを設置した位置以外にひび割れが発生した影響と考えられる。

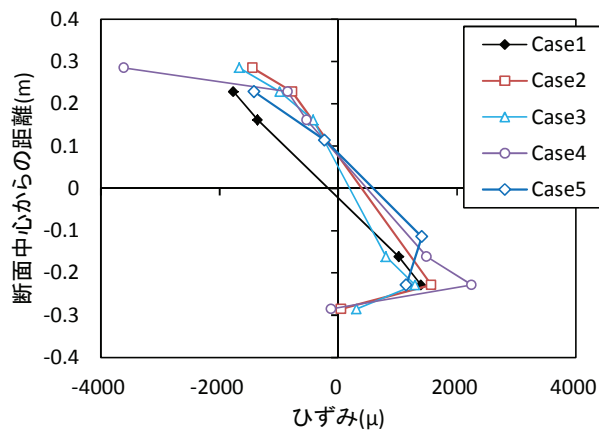


図-7.6 水平変位約 16mm 時点の接合部におけるひずみ分布

5) 接合部の曲げモーメントと鋼管の曲率の関係

図-7.7 に接合部断面における曲げモーメントと鋼管の曲率の関係を示す。Case1 に比べて Case2~5 の曲げモーメントは大幅に大きくなっており、UHP-SHCC 巻立てによる補強効果（曲げ耐力の向上）が確認された。

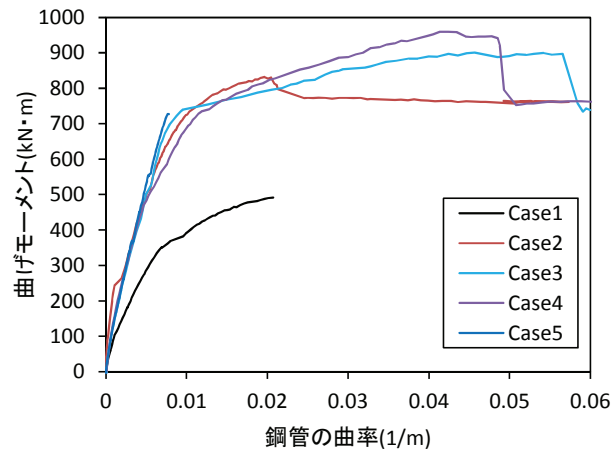


図-7.7 接合部断面における曲げモーメントと鋼管の曲率の関係

7. 3 曲げ耐力の推定方法の検証

7. 3. 1 計算条件

実大曲げ載荷試験で得られた結果をもとに曲げ耐力の推定方法を検証するため、ファイバーモデルを用いて鋼管降伏時の曲げモーメント（以下、降伏曲げモーメント）を計算し、実験結果との比較を行った。図-7.8 に計算において仮定した降伏曲げモーメント時のひずみ分布と応力分布を示す。なお、実験結果から、ひずみ分布は全断面で平面保持が成立しているとした。また、鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、UHP-SHCC の応力-ひずみ関係は試験結果をモデル化した。

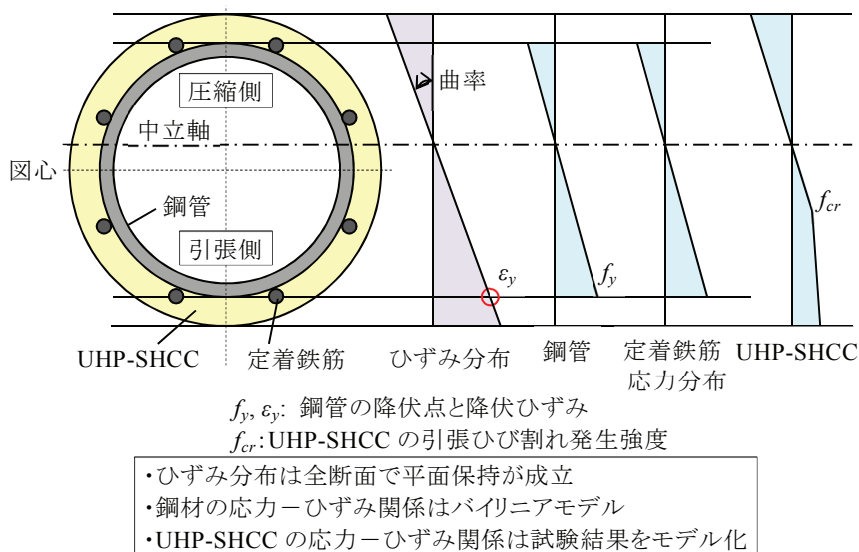


図-7.8 鋼管降伏時のひずみ・応力分布

7. 3. 2 実験結果と計算値の比較

降伏曲げモーメントの実験値と計算値の比較を表-7.3 に、載荷試験で得られた曲げモーメントと鋼管の曲率の関係に計算値を併記したものを図-7.9 に示す。図-7.9 より、計算値は実験結果をほぼ再現できていると判断でき、ファイバーモデルによって曲げ耐力を算定できると考えられる。また、表-7.3 の計算値より、UHP-SHCC の引張側の負担モーメントは降伏曲げ耐力に対して6~8%程度であることがわかった。鋼材の負担モーメントは定着鉄筋量の増加に伴い大きくなっており、定着鉄筋が降伏曲げ耐力に寄与することが確認された。

表-7.3 降伏曲げモーメントの実験値と計算値の比較

Case	計算値			降伏曲げ耐力(kN・m)	降伏曲げ耐力(kN・m)	実験値 / 計算値
	負担モーメント(kN・m)					
	鋼管 (+鉄筋)	UHP-SHCC 圧縮側	UHP-SHCC 引張側			
1	328	—	—	328	351	1.07
2	343	175	42	560	562	1.00
3	363	169	39	570	632	1.11
4	387	172	38	596	509	0.85
5	392	147	40	578	657	1.14

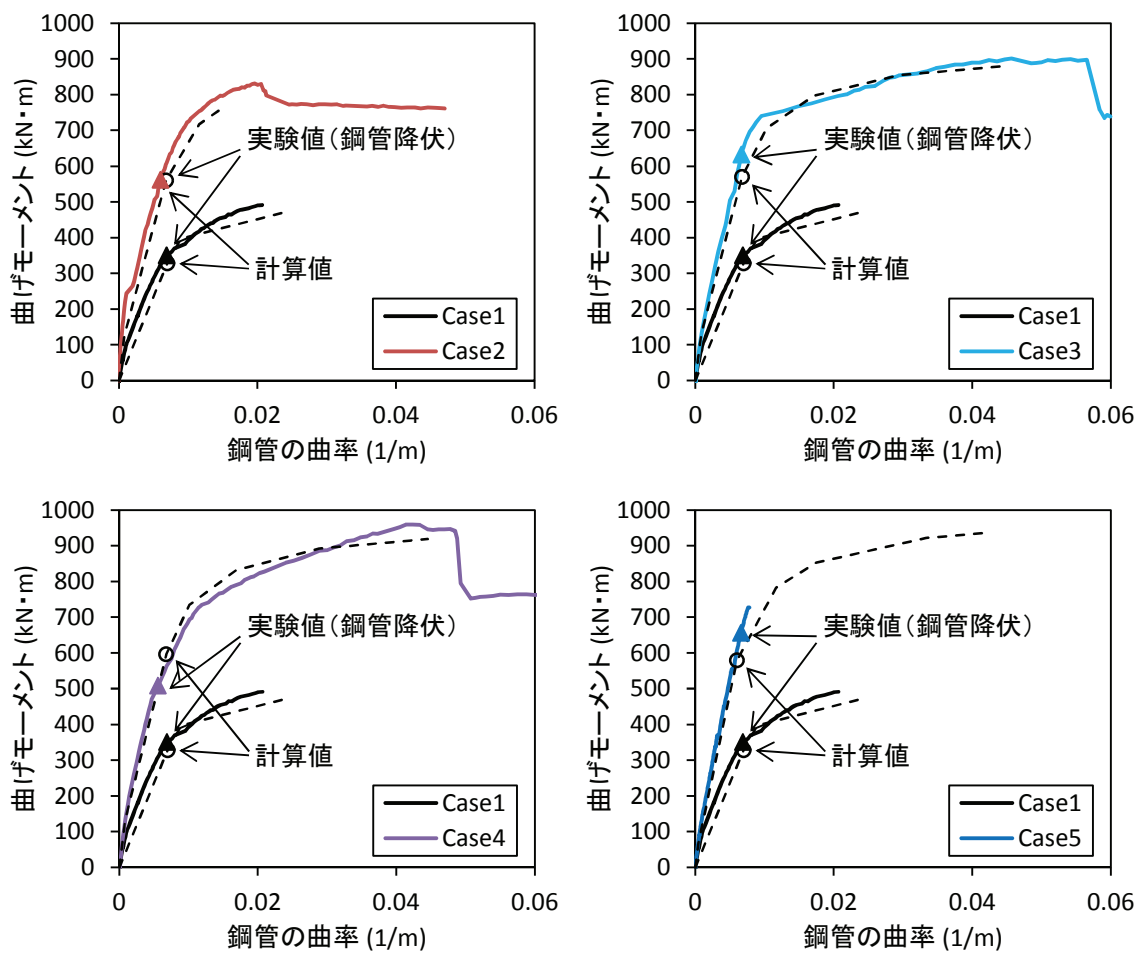


図-7.9 実験結果と計算値の比較

7. 4 まとめ

本章では，大型供試体を用いた載荷試験により曲げ耐力の向上効果を確認した。また，載荷試験の結果を用いて曲げ耐力の推定方法を検証した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 鋼管杭に UHP-SHCC を巻き立てることにより，曲げ耐力が大幅に向上することを確認した。
- 2) UHP-SHCC 巻立てによる圧縮力の負担が大きいため，鋼管に生じるひずみを抑制できることが確認された。
- 3) 鋼管表面に配置した定着鉄筋により，UHP-SHCC と鋼管の一体性が確保できることが確認された。
- 4) UHP-SHCC の引張強度特性を考慮したファイバーモデルによって，鋼管降伏時の曲げ耐力を算定できることを示した。

参考文献

- [1] 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，pp.試験-5-試験-8，平成 19 年 3 月

第8章 施工検討

8.1 UHP-SHCC の水中流動による品質変化の確認

8.1.1 はじめに

栈橋鋼管杭の被覆防食は L.W.L.-1.0m 以上に適用することが多く、信頼性も確認されている [1]。本補強技術を栈橋鋼管杭に適用する場合、図-8.1 に示すとおり UHP-SHCC は型枠下方から注入により型枠内に充填させるため、型枠内に残留する水の中を UHP-SHCC は通過することとなる。そこで、UHP-SHCC が水中で流動した際の品質変化を確認する目的で、模擬型枠を用いた実験を行った。

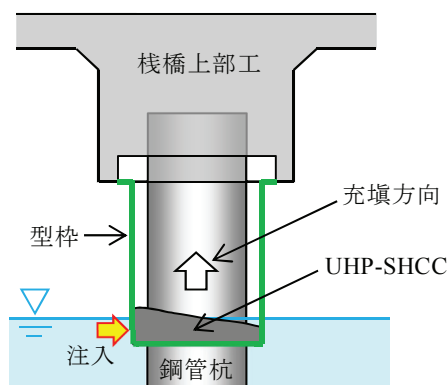


図-8.1 UHP-SHCC の注入施工のイメージ

8.1.2 実験概要

本実験では、図-8.2 に示す模擬型枠を用いて水中流動前後の UHP-SHCC の品質を確認した。模擬型枠の寸法は 1000×1000×30mm とし、型枠内における UHP-SHCC の流動状況を観察するため、型枠の一面をアクリル板とした。なお、型枠寸法は、直径 600mm の鋼管杭を厚さ 30mm の UHP-SHCC で巻き立てる場合を想定したものである。型枠内の水平方向の流動距離は 1000mm であり、型枠内を水で満たした状態で型枠の下方からモルタルポンプを用いて UHP-SHCC を注入した。また、注入は型枠上方の排出孔から UHP-SHCC が排出されるまで継続した。品質確認項目は、水中流動前後のモルタルフロー、空気量および力学的性質（圧縮強度、静弾性係数、ダンベル型供試体による一軸直接引張強度および引張強度時の終局ひずみ [2]）とした。また、注入によって押し出され、型枠上方より排出された水の水質（pH および懸濁物質質量）も確認した。なお、水中流動前の試料はパン型ミキサによる製造直後に採取し、水中流動後の試料は型枠上方の排出孔より出てきたものを採取した。

表-8.1 に検討ケースを示す。また、表-8.2 および表-8.3 に UHP-SHCC の配合と使用材料を、表-8.4 に比較用の水中不分離性モルタルの配合を示す。Case1～3 を UHP-SHCC、Case4 を水中不分離性モルタルのケースとした。なお、Case2 および 3 は、Case1 に比べて流動性を向上させて製造時のエントラップトエアの低減を図った配合である。

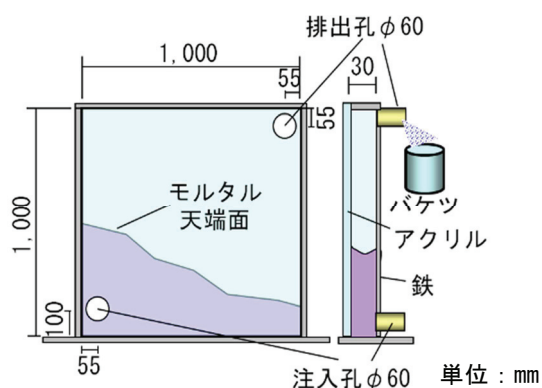


図-8.2 模擬型枠構造

表-8.1 検討ケース

Case	配合	備考
1	UHP-SHCC (繊維混入率 1.5%)	Case1 に比べて流動性向上, 製造時のエン トラップトエアの低減を図った配合
2		
3	UHP-SHCC (繊維混入率 2.0%)	
4	水中不分離性モルタル	

表-8.2 UHP-SHCC の配合

Case	セメント種類	W/B	SF/B	LP/B	EX/B	S/B	繊維混入率 (単位体積%)	SP (B×%)	D (B×%)
1	N	0.22	0.15	—	0.025	0.10	1.5	2.0	0.0044
2	L	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	1.5	3.0	0.03
3	L	0.22	0.15	0.17	0.027	0.10	2.0	3.0	0.03

$B=C+SF+LP+EX$ (ここでは, 石灰石微粉末 (LP) も結合材の一部とする)

表-8.3 UHP-SHCC の使用材料

記号	材料	種類および物性等
W	水	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)
C	結合材 (B)	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
		低熱ポルトランドセメント (密度 3.24g/cm ³)
SF		シリカフューム (密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 200,000cm ² /g)
LP		石灰石微粉末 (密度 2.70g/cm ³)
EX		膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.10g/cm ³)
S	骨材	7号珪砂 (密度 2.68g/cm ³)
PE	繊維	高強度ポリエチレン繊維 (密度 0.97g/cm ³ , 直径 0.012mm, 長さ 6mm, 弾性係数 88GPa, 引張破断強度 2,700MPa)
SP	混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.10g/cm ³)
D		消泡剤 (ポリエーテル系, 密度 1.00g/cm ³)

表-8.4 水中不分離性モルタルの配合

Case	W/C	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	AN	Ad
4	0.516	340	659	1083	3.4	16.5

W：上水道水，C：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³），
S：山砂（密度 2.60g/cm³），AN：水中不分離性混和剤，Ad：流動化剤

8. 1. 3 実験結果

1) フレッシュ性状と硬化特性

表-8.5 および図-8.3 に水中流動前後に確認したフレッシュ性状を示す。同繊維混入率の Case1 と Case2 を比較すると、Case2 のモルタルフローは Case1 に比べて大きく、空気量は Case2 のほうが大幅に小さかった。これは、使用材料および配合の改善効果と考えられる。また、同配合の Case2 と Case3 を比べると、繊維混入率が大きい Case3 の方がモルタルフローは小さく、空気量はわずかに増加した。水中流動前後のモルタルフローは、すべてのケースでほとんど変化がなかったが、空気量はすべてのケースで低下した。水中流動前の空気量が最も大きい Case1 の低下量が大きかったのは、製造時の繊維混入によって巻き込まれたエントラップトエアの抜ける量が多かったためと推察される。ここで、後述の各種施工実験時に圧送前（製造直後に採取）、圧送後（モルタルポンプ筒先で採取）、水中流動後の試料を用いて空気量を測定した結果を図-8.4 に示す。これによると、モルタルポンプによる圧送によって空気量は低下し、さらに水中流動によっても空気量は低下することが確認された。なお、圧送による空気量の低下は水中不分離性モルタルでも同様と考えられる。

表-8.5 および図-8.5～6 に水中流動前後に確認した力学的性質を示す。Case1, Case2 および Case4 は水中流動後の圧縮強度が大きくなっており、これは水中を流動したことによる品質低下よりも空気量が減ったことが圧縮強度の増加に寄与したと考えられる。一方、Case3 の圧縮強度は水中流動前後でほとんど変化がないが、同配合の Case2 と同程度であるので、水中流動が強度変化に与える影響はほとんどないと考えられる。また、図-8.6 の引張強度と終局ひずみの関係からも、水中流動による影響はほとんどないことが確認された。

表-8.5 水中流動前後の品質確認結果

検討ケース		フロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	終局ひずみ (%)
Case1	水中流動前	126	6.0	108	27.2	6.61	1.61
	水中流動後	125	2.7	127	29.0	6.87	1.55
Case2	水中流動前	148	1.8	110	27.8	5.71	1.91
	水中流動後	149	0.8	113	30.3	5.30	1.92
Case3	水中流動前	135	2.6	107	28.4	—	—
	水中流動後	132	1.5	106	32.3	—	—
Case4	水中流動前	220	5.0	36.5	20.9	—	—
	水中流動後	217	3.6	41.9	21.0	—	—

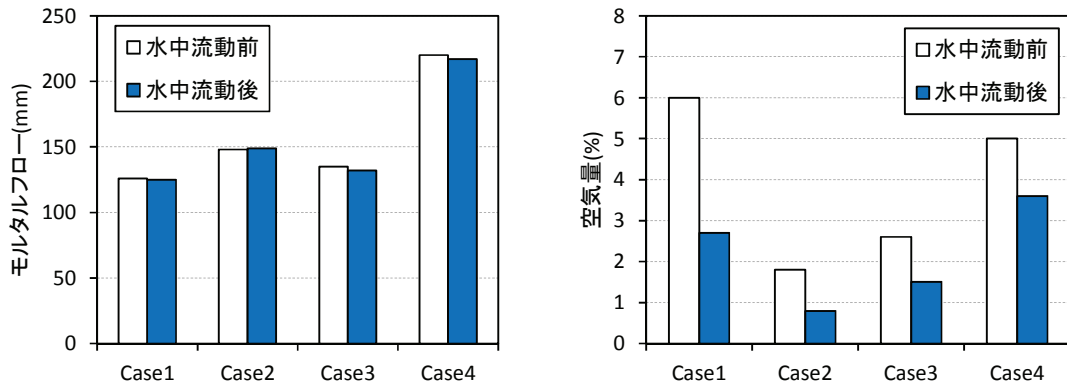


図-8.3 水中流動前後のフレッシュ性状 (左：モルタルフロー, 右：空気量)

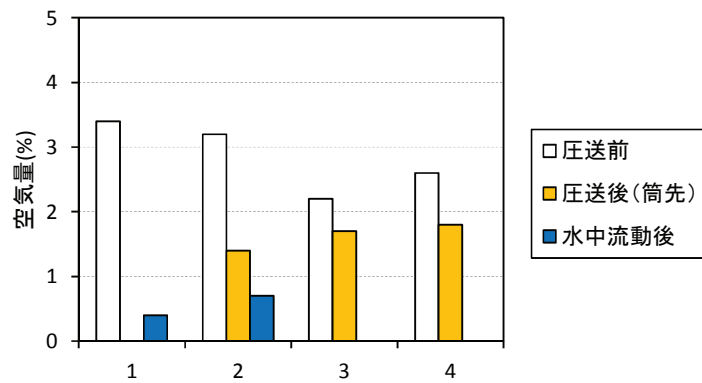


図-8.4 圧送および水中流動による空気量の変化の一例

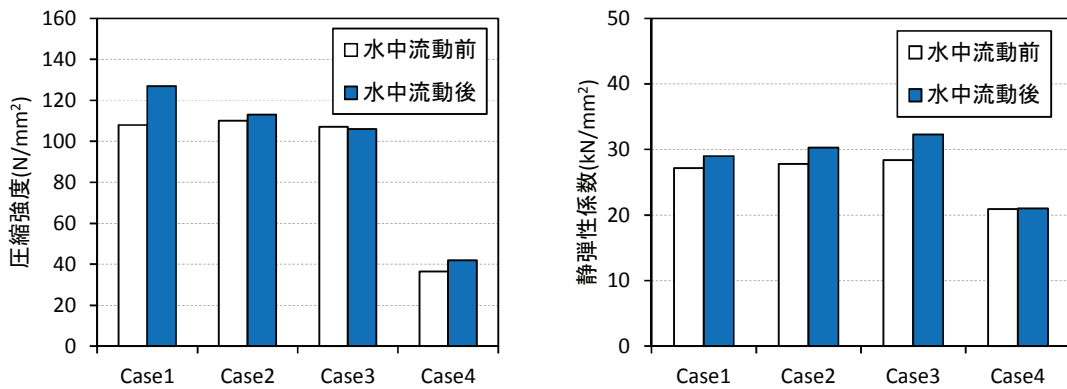


図-8.5 水中流動前後の硬化特性 (左：圧縮強度, 右：静弾性係数)

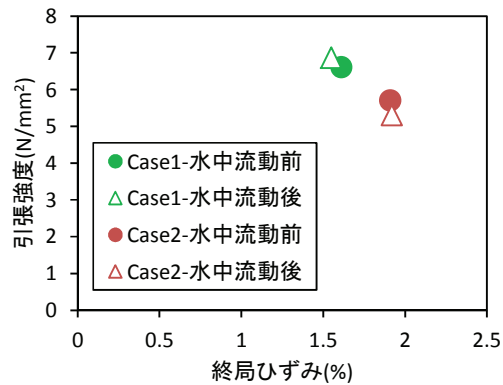


図-8.6 水中流動前後の引張強度と終局ひずみの関係

2) 水中流動状況

写真-8.1~4 に、各ケースの型枠内における流動状況と充填する際に発生した濁りの状況を示す。注入中の流動勾配は、Case1 が約 1/3.5，Case2 および Case3 が約 1/6，Case4 が約 1/20 であった。この勾配の違いは配合およびフローの大きさによるものと考えられる。濁りについては、Case1 において注入初期段階に大きな濁りの発生が確認された（写真-8.1 左）。この濁りが発生する直前の注入孔より大きな空気の塊が一気に出てきたのを確認しており、Case1 は水中流動前の空気量が他に比べて大きかったことが影響していると推察される。一方、Case2 と Case3 においては Case1 のような濁りの発生は確認されなかった。このことから、濁り抑制には製造時の繊維混入に伴うエントラップトエアの巻き込みを抑えることが有効と考えられる。なお、Case1 を含めてすべてのケースで水中流動前後の力学的性質に大きな違いはないことから、この程度の濁りの発生が品質変化に及ぼす影響は小さいと考えられる。比較用で実施した Case4 の濁りの状況は、水中不分離抵抗性を付与させたこともあり最も抑えられていた。



写真-8.1 Case1 の流動状況と濁り発生状況



写真-8.2 Case2 の流動状況と濁り発生状況



写真-8.3 Case3 の流動状況と濁り発生状況



写真-8.4 Case4 の流動状況と濁り発生状況

3) pH および懸濁物質量

注入によって型枠上方の排出孔より押し出された水を回収し、回収水の pH および 懸濁物質量を測定した結果を図-8.7 および図-8.8 に示す。なお、水の回収は 5 リットルずつ行い、pH の測定には水質チェッカーを用いた。また、懸濁物質量の測定は、「JSCE-D104 コンクリート用水中不分離性混和剤品質規格（案）附属書 2（規定）、水中不分離性コンクリートの水中分離度試験方法」[3] に準じて行った。

測定結果より、pH および懸濁物質量ともに水の排出量が増えるほど値の増加傾向が見られ、特に Case1 の値が他のケースに比べて大きかった。これは前述したとおり、注入初期に発生した濁りによる影響が大きいと考えられる。また、Case2 と Case3 の pH は、Case4 の水中不分離性モルタルと同程度であった。一方、Case2 と Case3 の懸濁物質量は、Case4 に比べて大きかった。ここで、各段階で回収された水をすべて合わせて測定した平均的な pH および懸濁物質量を図-8.9 に示す。これによれば、Case2 および Case3 の懸濁物質量は、Case4 に比べて値は大きいものの、水質汚濁防止法に基づく排水基準 200mg/l（日平均 150mg/l）以下を満足する範囲であった。

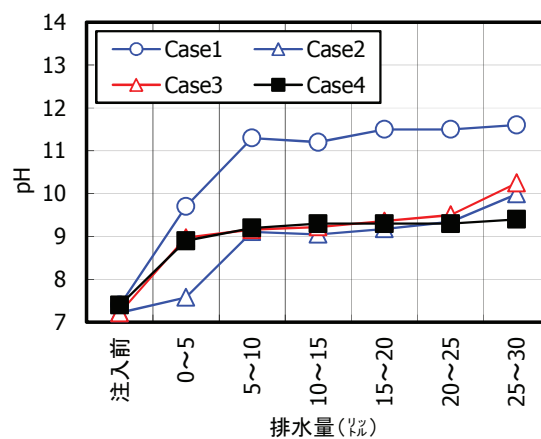


図-8.7 回収水の pH の推移

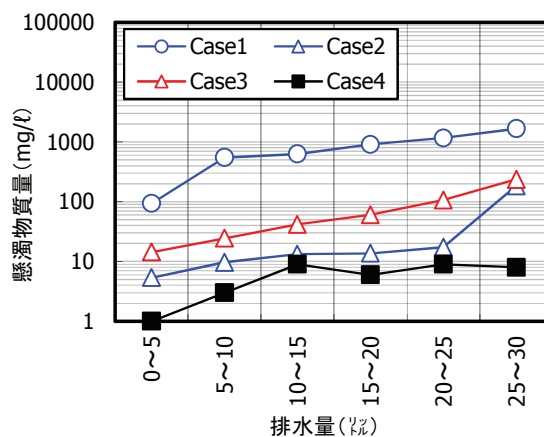


図-8.8 回収水の懸濁物質量の推移

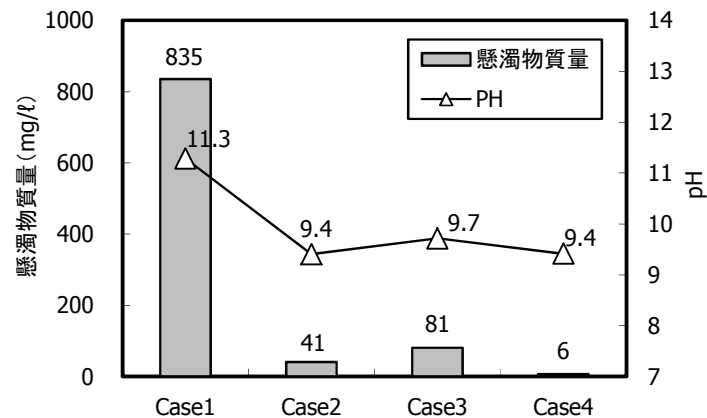


図-8.9 回収水の平均的な pH および懸濁物質量

8. 1. 4 まとめ

本実験では、UHP-SHCC を鋼管杭に巻き立てる場合を想定した模擬型枠を用いて、水中での流動状況および品質変化を確認した。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 水中流動前後における UHP-SHCC のモルタルフローはほぼ同程度であり、水中流動による影響は小さいことを確認した。また、流動性を改善させた配合を用いることで、型枠内でのセルフレベリング性に優れることが確認された。
- 2) モルタルポンプによる圧送および水中流動によって空気量は減少することが確認された。また、製造直後の空気量が大きいと、型枠内で大きな濁りが発生する可能性が高いと考えられる。
- 3) 本実験で用いた UHP-SHCC の配合では、水中流動が硬化特性に与える影響はほとんどないことが確認された。
- 4) UHP-SHCC の水中流動に伴って回収された水の pH は、水中不分離性モルタルと同程度で、懸濁物質量は若干大きかった。硬化特性の低下はなく、水質汚濁防止法に基づく排水基準も満足していることから、水中を通過させて型枠内を充填させる施工方法に問題はないと考えられる。
- 5) 栈橋鋼管杭に UHP-SHCC を巻き立てる実施工において、UHP-SHCC は鋼管の周囲を二手に分かれて流動するため、注入口と反対側で合流することとなる。この合流部は材料の流動先端部となるため、その他の巻立て部に比べて品質が低下する可能性がある。本実験では、この合流部を再現できていないため今後の課題である。なお、気中状態で注入により巻き立てた曲げ載荷用の実大供試体（第 7 章参照）においては、表面の変状は見られておらず、載荷試験の結果にも影響はなかったことを確認している。

8. 2 注入実験による充填性確認

8. 2. 1 はじめに

本補強技術は、UHP-SHCC を鋼管杭表面から上部工まで連続させた構造とするのが有効であり、これにより杭と上部工の接合部における防食と補強が同時に達成される。施工において、UHP-SHCC は上部工に根入れさせる形となるため、上部工部に UHP-SHCC を確実に充填させる必要がある。このとき、UHP-SHCC は型枠下方からの注入施工となるため、上部工部へは逆打ちとなる。そこで、実大規模の鋼管杭に上部工を模擬し、UHP-SHCC の充填性を確保するための施工方法を検討する目的で注入実験を行った。

8. 2. 2 実験概要

模擬上部工の概要を図-8.10 に示す。用いた鋼管杭は径 812.8mm、高さ 2300mm とし、このうち巻立て部の高さは 2000mm、上部工への根入れ長は 100mm とした。また、巻立て部の型枠の内径は 900mm (UHP-SHCC 巻立て厚 43.6mm) とし、模擬上部工は八角形の形状とした。なお、八角形の形状としたのは、実施工において上部工の一部をはつり取る際の施工方法を想定したためである。模擬上部工の天端面は写真-8.5 に示すとおり亚克力板とし、注入時に模擬上部工内への UHP-SHCC の充填状況を確認した。また、充填性を確保するための空気抜きや充填確認ホースを模擬上部工の八角形の角部に設置した。なお、実施工を想定して型枠内の下方は水で満たし、注入によって UHP-SHCC が水中を通過する状況を再現した。なお、本実験で用いた UHP-SHCC のモルタルフローは 150mm 程度であった。

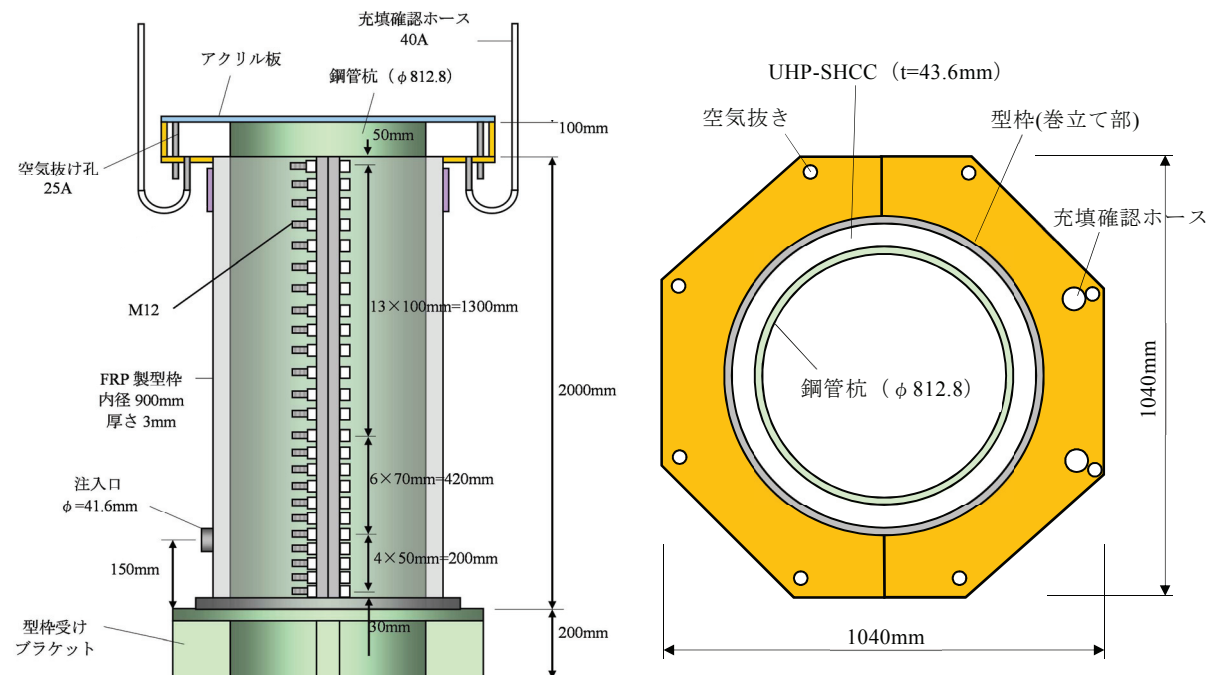




写真-8.5 模擬上部工の天端面

8. 2. 3 実験結果

写真-8.6は、UHP-SHCCが硬化した後に模擬上部工天端面の充填状況を確認した結果である。天端面に若干の気泡は見られるが、おおむね良好な充填状況であった。注入時の模擬上部工内におけるUHP-SHCCの流動および充填状況は、巻立て部を上昇してきたUHP-SHCCが徐々に模擬上部工の外側に向かって流動し、天端まで充填される様子が確認された。このとき、最終的に充填される箇所は模擬上部工の八角形の各角部となり、角部に設けた空気抜きによって良好な充填性が確保できたと考えられる。なお、注入口の上部に若干の充填不良が確認されたが、これは圧送終了時の注入口の閉塞が不十分だったためであり、UHP-SHCCが注入口より若干逆流する状況が確認された影響と考えられる。なお、この問題点は、注入口の構造を改造することで問題ないことを確認済みである。

写真-8.7に型枠脱型後の巻立て表面を示す。表面気泡もほとんどない仕上がりとなっており、注入施工によって充填性は確保できることが確認された。



写真-8.6 模擬上部工天端面の充填状況



写真-8.7 型枠脱型後の巻立て表面

8. 2. 4 まとめ

本実験では、実大規模の鋼管杭と模擬上部工を用いて、注入施工による UHP-SHCC の充填性を確認した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 注入施工によって逆打ちとなる上部工内まで充填できることを確認した。なお、充填性を確保するためには、空気抜きを適切な位置に設置することが重要と考えられる。
- 2) 充填性を確保する上で、注入口は強固な構造を有している必要があると考えられる。
- 3) 注入施工による巻立て部の仕上がりは、良好なことを確認した。

8. 3 UHP-SHCC の圧送性

8. 3. 1 実験概要

本補強技術において、UHP-SHCC は打込み箇所（栈橋鋼管杭位置）までの圧送が必要不可欠である。圧送はモルタルポンプにより行うが、UHP-SHCC は一般的なモルタルに比べて粘性が高く、また、繊維が混入されているため圧送抵抗は大きくなる。そこで、UHP-SHCC の圧送負荷を確認するための圧送実験を行った。

圧送実験の概要を図-8.11 および図-8.12 に示す。圧送実験は、圧送距離 10m および 40m の 2 水準（それぞれをケース 1 およびケース 2 とする）で実施し、また、圧送能力の異なるモルタルポンプを用いて行った。ケース 1 では、モルタルポンプの吐出口直後に圧力ゲージを設置し、圧送時の筒先の圧力をゼロとしたときの圧力差から管内圧力損失を算出した。一方、ケース 2 では、モルタルポンプの吐出口より 0m、20m および 30m 地点に圧力ゲージを設置し、20m～30m 区間の配管は直線で配置して、この区間の圧力差から管内圧力損失を算出した。また、UHP-SHCC を圧送するスピード（吐出量）を変化させ、そのときの管内圧力損失との関係を整理した。なお、本実験で用いた UHP-SHCC のモルタルフローは、ケース 1、ケース 2 ともに 150mm であった。

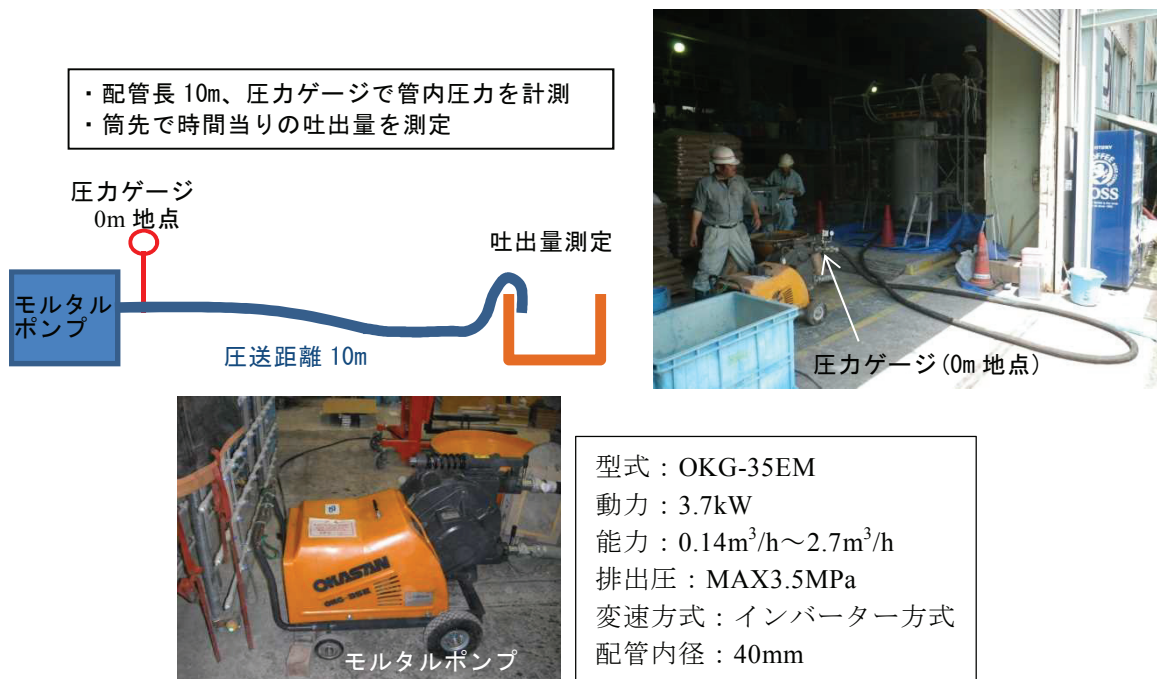


図-8.11 圧送実験概要（ケース 1）

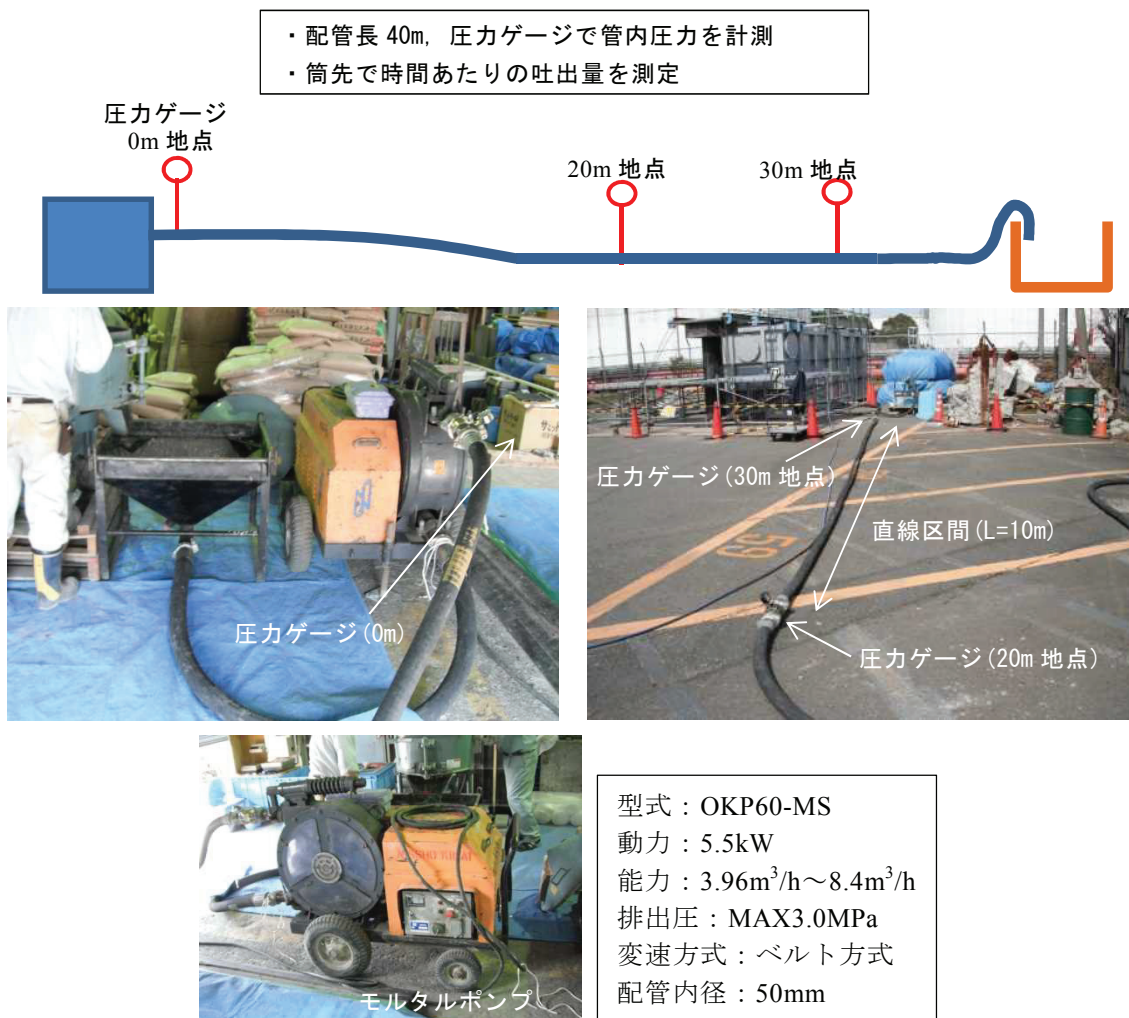


図-8.12 圧送実験概要（ケース 2）

8. 3. 2 実験結果

図-8.13 に管内圧力の計測結果を示す。ケース 1 では、吐出量が大きくなるほど 0m 地点の管内圧力は大きくなった。一方、ケース 2 では、吐出量に大きな差がなかったためケース 1 ほどの傾向は確認されなかったが、20m 地点の管内圧力を見ると、吐出量が大きいほど管内圧力が大きくなっていることが確認された。なお、本実験では配管の蛇行の影響はほとんど確認されなかった。図-8.14 に管内圧力損失と吐出量の関係を示す。吐出量が大きいほど圧力損失は大きくなり、また、配管内径が小さいほど圧力損失は大きくなることが確認された。以上より、この関係を用いることでモルタルポンプの圧送負荷を算定でき、ポンプ選定の一助になるものと考えられる。

ここで、本実験は前述の注入実験時に行ったものであり、写真-8.8(a)は圧送速度 0.2m³/h での巻立て部の表面状況を、写真-8.8(b)は圧送速度 1.0m³/h での結果である。圧送速度 1.0m³/h における縞模様は、UHP-SHCC が型枠内で流動する際に天端面が水で洗われ、ポンプの脈動に伴って発生したものではないかと推察される。このことから、圧送速度の違いが巻立て表面の

出来栄に影響を及ぼす可能性が示唆され、本実験の範囲では圧送速度が遅いほど出来栄が良くなる可能性が高いことが確認された。

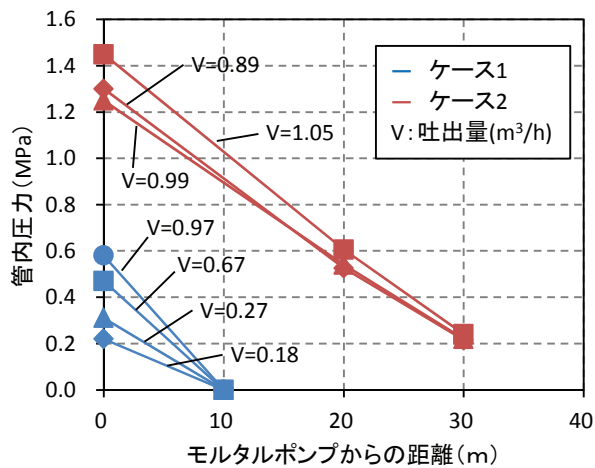


図-8.13 管内圧力計測結果

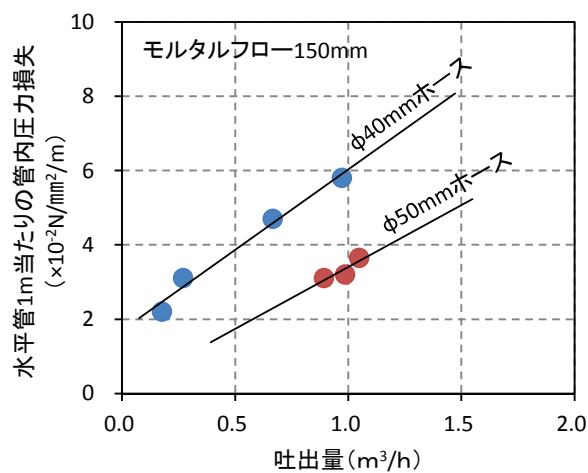


図-8.14 吐出量と管内圧力損失の関係



(a) 圧送速度 $0.2\text{m}^3/\text{h}$

(b) 圧送速度 $1.0\text{m}^3/\text{h}$

写真-8.8 圧送速度の違いによる巻立て部の表面状況

8. 3. 3 まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) UHP-SHCC の吐出量（圧送速度）が大きいほど圧力損失は大きくなり，また，配管内径が小さいほど圧力損失は大きくなることが確認された。
- 2) 圧送速度が巻立て表面の出来栄に影響を及ぼす可能性が示唆され，本実験の範囲では圧送速度が遅いほど出来栄が良くなる可能性が高いことが確認された。

8. 4 実栈橋における試験施工

8. 4. 1 試験施工の概要

ここまでの施工性の検討を受けて、本工法の施工手順を確立することを目的に試験施工を実施した。試験施工を実施した対象鋼管杭を写真-8.9に、施工対象の栈橋断面を図-8.15に示す。施工対象の鋼管杭には、M.W.L.付近にH鋼の補強材が設置されていたため、本試験施工ではそれより上方をUHP-SHCCにより巻き立てた。鋼管杭の径は609.7mmであり、巻立て高さは約2.0m、UHP-SHCCの上部工への根入れ深さは100mm(鉄筋溶接用プレートが存在していたため)とした。また、UHP-SHCCの巻立て厚は50mmとし、D16の定着鉄筋を10本設置した。



写真-8.9 試験施工対象鋼管杭（施工前）

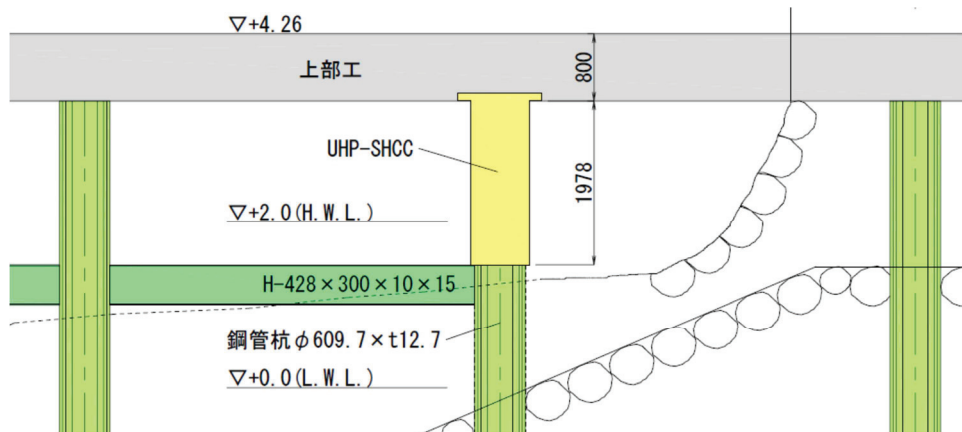


図-8.15 施工対象の栈橋断面図

8. 4. 2 施工手順

図-8.16 に施工手順を、写真-8.10～11 に試験施工における施工状況を示す。なお、補修足場の設置および既設表面被覆材の撤去は、既存の補修工事でも実施される工種である。本試験施工により、図-8.16 に示す施工手順で問題ないことが確認された。

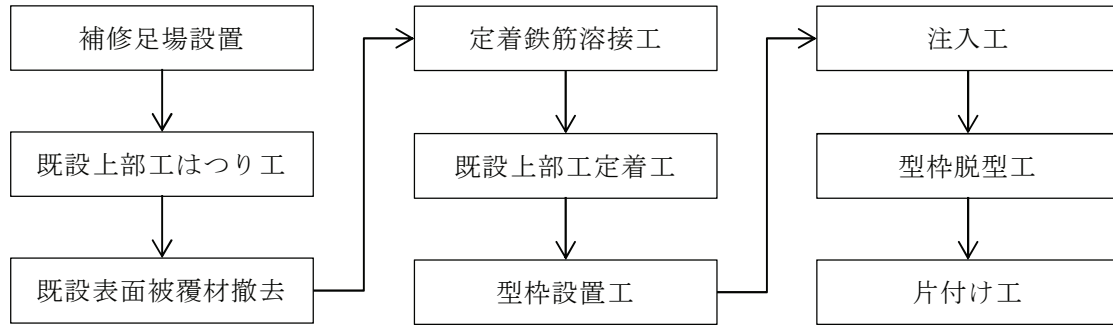


図-8.16 施工手順



(a) 既設上部工はつり工



(b) 既設表面被覆材撤去



(c) はつり後の杭頭部



(d) 定着鉄筋溶接工

写真-8.10 施工状況（既設上部工はつり工～定着鉄筋溶接工）



(e) 型枠設置工



(f) 型枠設置完了



(g) UHP-SHCC の製造



(h) 圧送状況

写真-8.11 施工状況（型枠設置～注入工（圧送状況））

8.4.3 まとめ

試験施工によって施工手順を確認し、本工法の施工手順を確立することができた。写真-8.12 は完成写真である。UHP-SHCC 表面の出来栄は良好で、充填性に問題がなかったことが確認された。なお、現時点で試験施工により UHP-SHCC 巻立てを適用してから3年が経過した。第4章で示したとおり、型枠取り外し後の時間経過に伴い表面ひび割れが確認されていることから、UHP-SHCC の収縮ひずみを抑制させることが今後の課題である。なお、発生したひび割れの幅は 0.05mm 以下と小さいため、UHP-SHCC による被覆防食性能は保持されていると考えられる。今後も長期的な経過観察を継続し、データの蓄積は図る予定である。



写真-8.12 完成写真

参考文献

- [1] 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版），沿岸技術ライブラリー，No.35，pp.52-53，平成21年11月
- [2] 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，pp.試験-5-試験-8，平成19年3月
- [3] 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準および関連規準，pp.48-50

第9章 UHP-SHCC を用いた巻立て補強方法の提案

9.1 巻立て補強の仕様

ここまでの検討結果を受けて、UHP-SHCC を用いた栈橋鋼管杭の補強方法を図-9.1 に示すとおり提案する。本補強技術は、UHP-SHCC を栈橋上部工に根入れさせるように巻き立てる構造とし、これにより鋼管杭と上部工の接合部における防食および補強を達成する。巻立て補強断面等の詳細仕様を以下にまとめる。

- ✓ UHP-SHCC の巻立て厚は 50mm 以上とし、適用する鋼管杭の残存耐力および期待する補強効果（曲げ耐力の回復，向上）に応じて巻立て厚を設定する。また，UHP-SHCC の優れた性質を活かすため，繊維混入率は 1.5% を標準とし，自己収縮および乾燥収縮の小さい配合を用いるのがよいと考えられる。
- ✓ UHP-SHCC 巻立てと鋼管杭の一体性を確保するためには，鋼管杭表面の軸方向に配置する定着鉄筋を鉄筋比（UHP-SHCC 巻立て断面積に対する鉄筋総断面積の比）で 1.3% 以上とする。これにより，UHP-SHCC のひび割れ分散性が発揮され，栈橋に突発的な外力が作用して杭頭部に大きな曲げモーメントが発生した場合でも，鋼材に対する被覆防食性能は確保できると考えられる。
- ✓ UHP-SHCC は上部工に根入れさせるため，巻立て部と上部工は一体化した構造となっている。さらに強固に定着するためには，頭付きアンカーボルトによって機械的に定着する方法が有効である。この場合の UHP-SHCC 側の頭付きアンカーボルトの設計は，コーン状破壊による引抜き耐力の算定式を用いて行い，ボルトの径，埋込み長を決定する。
- ✓ 本補強技術は，既存栈橋鋼管杭の性能を当初設計まで回復させることのできる工法であり，主たる作用がレベル 1 地震動，船舶の接岸および牽引並びに載荷重である変動状態に対して，鋼管杭に生じる応力度が降伏応力度を超えない範囲において適用可能である。

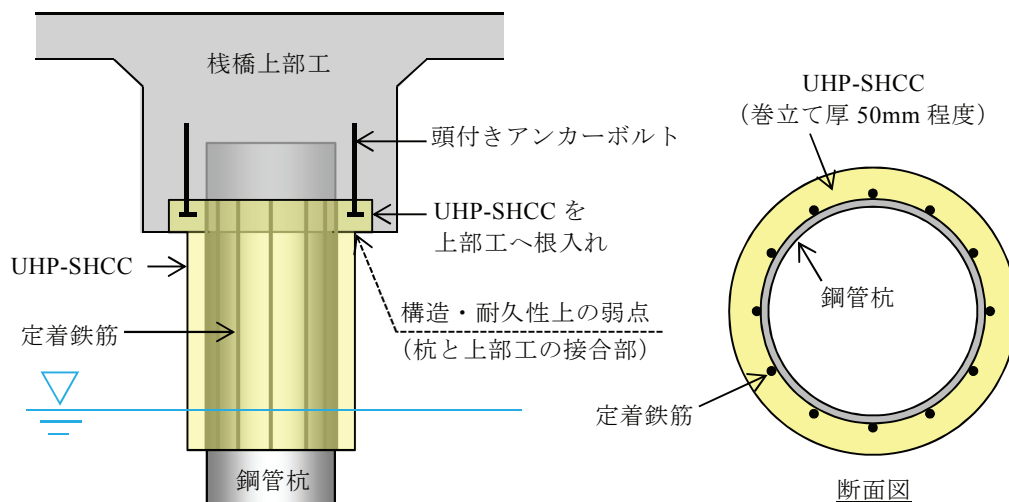


図-9.1 UHP-SHCC を用いた栈橋鋼管杭の補強方法

9. 2 耐用年数

本補強技術の適用位置は海洋環境下であるため、ここでは塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食により性能が低下するとして、耐用年数を検討した。なお、UHP-SHCC は耐摩耗性や耐衝撃性に優れていることが確認されているため [1,2]、海水作用や漂流物の衝突などによる材料劣化の可能性は小さいと考えられる。

第3章の検討より得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数を表-9.1 に示す。また、これら塩化物イオンの見掛けの拡散係数を用いて算定される耐用年数とかぶりの関係を図-9.2 に示す。なお、表面の塩化物イオン濃度 C_0 と初期塩化物イオン濃度 C_i は、図-3.8 におけるひび割れなしの近似線から計算される値とした。また、UHP-SHCC の水結合材比は 0.22 であるため、「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」[3] の塩害に対する照査における W/C の対象範囲 (0.30~0.55) からは外れているが、鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} は 1.2kg/m^3 (UHP-SHCC にはシリカフュームが混和されているため) に設定して試算した。図-9.2 より、かぶり 34mm (巻立て厚 50mm, 定着鉄筋 D16 の場合) でひび割れが存在しない場合の耐用年数は 96 年となり、UHP-SHCC の高い被覆防食性能が確認された。なお、本試算は、実海洋環境下の飛沫帯に 3 年間供試体を暴露した後に EPMA 分析によって得た値を用いて行ったものである。そのため、長期暴露によるデータの蓄積により、精度の高い塩害に対する照査が可能になるものと考えられる。

表-9.1 本研究で得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数

条件	拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)
ひび割れなし	0.012
ひび割れあり	0.040~0.056

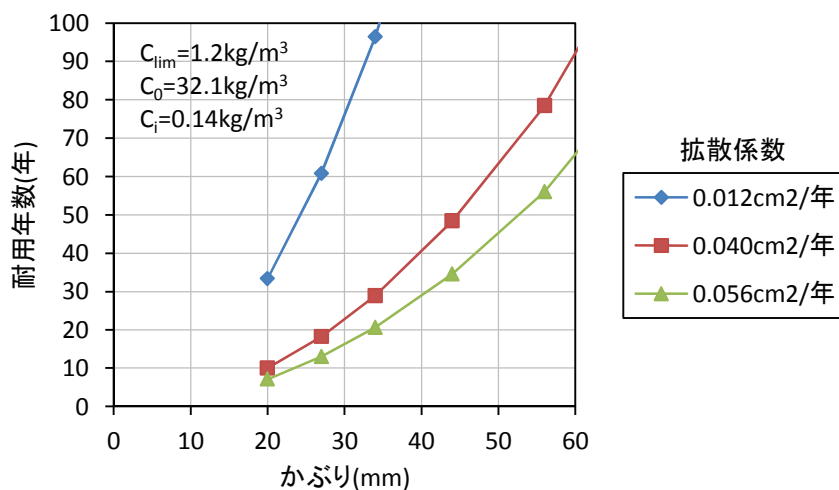


図-9.2 耐用年数とかぶりの関係

9. 3 UHP-SHCC の材料特性値

本補強技術は、UHP-SHCC の優れた性質を活用し、巻立て補強を適用する鋼管杭の残存耐力および期待する補強効果に応じて巻立て断面の仕様を設計することを目指した。そのため、設計にあたっては UHP-SHCC の強度特性値を設定する必要がある。図-9.3~5 は本研究を通して実施した強度試験の結果を統計的に整理したもので、算定された特性値を図中に併記した。なお、特性値の算定は、「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）」[4] を参考に行った。また、ここで得られた特性値を基にモデル化した応力-ひずみ曲線を図-9.6 に示す。なお、本補強技術の適用範囲は、鋼管杭に生じる応力度が降伏応力度を超えない範囲であるため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」[5] に従い材料特性値のばらつきを考慮するための安全係数 γ_c は 1.0 とした。また、圧縮応力-ひずみ曲線は、文献 [4] を参考に以下の計算式(1)を用いて曲線を再現した。一方、引張応力-ひずみ曲線は、ひずみ硬化特性を考慮したバイリニアモデルとした（式(2),(3)）。これは、第7章における曲げ耐力の推定方法の検証結果より、UHP-SHCC のひずみ硬化特性を考慮したモデルを用いて曲げ耐力を計算した値が実験結果とよく合っていたためである。

圧縮応力-ひずみ曲線

$$\sigma'_c = 0.85 f'_{ck} / \gamma_c \times \varepsilon'_c / \varepsilon'_m \times (2 - \varepsilon'_c / \varepsilon'_m) \quad (0 \leq \varepsilon'_c \leq \varepsilon'_m = 0.005) \quad (1)$$

引張応力-ひずみ曲線

$$\sigma_c = E_c \times \varepsilon_c \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq f_{tyk} / E_c) \quad (2)$$

$$\sigma_c = E_c \times (f_{tyk} / E_c) + (f_{tm} - f_{tym}) / (\varepsilon_{tum} - f_{tym} / E_c) \times (\varepsilon_c - f_{tym} / E_c) \quad (f_{tyk} / E_c \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{tuk} = 0.008) \quad (3)$$

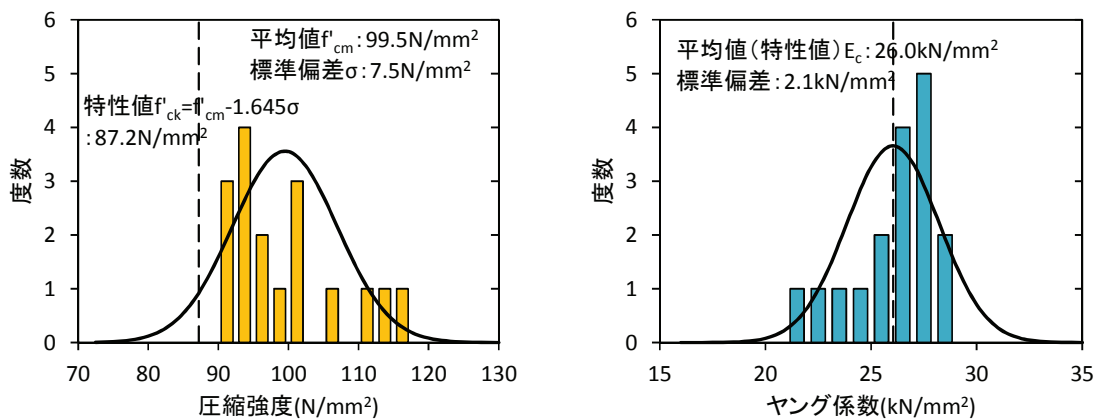


図-9.3 実験結果の統計的整理（左：圧縮強度，右：静弾性係数）

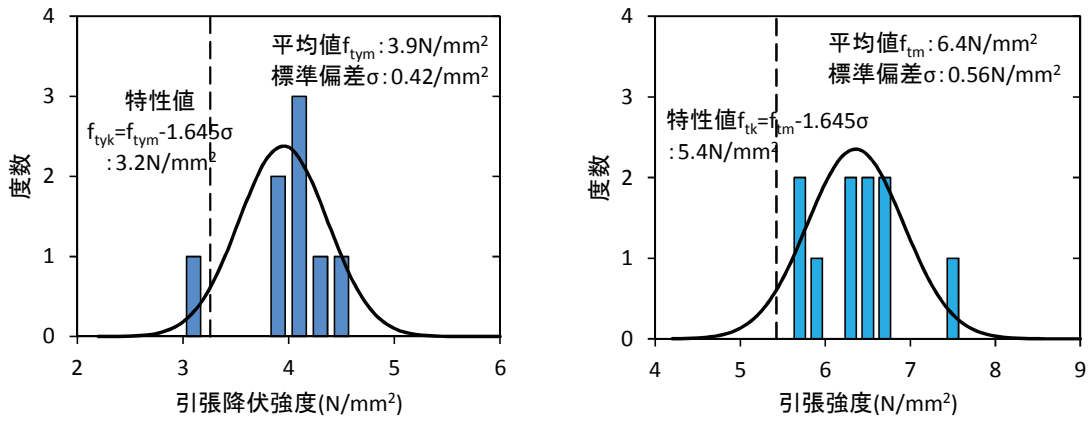


図-9.4 実験結果の統計的整理（左：引張降伏強度，右：引張強度）

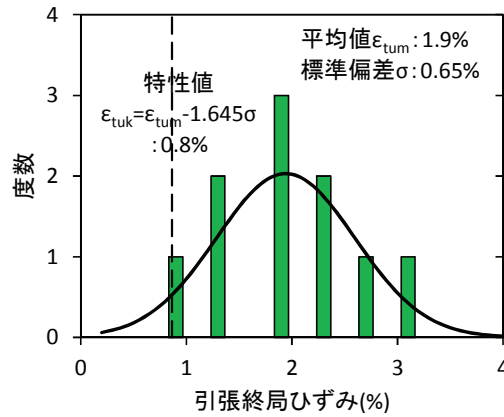


図-9.5 実験結果の統計的整理（引張終局ひずみ）

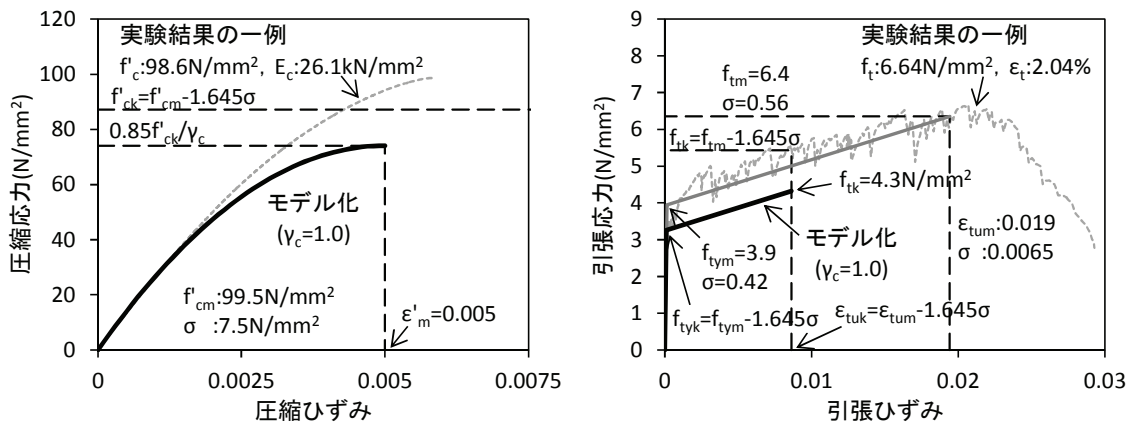


図-9.6 UHP-SHCC の応力-ひずみ曲線（左：圧縮特性，右：引張特性）

9. 4 巻立て断面の設計法

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」[5]によると、栈橋における主たる作用がレベル1地震動や船舶の接岸および牽引等の場合は、杭に発生する応力が降伏応力度を超えないことを照査する。一方、レベル2地震動の作用後も機能を損なわずに継続して使用できることが要求される耐震強化施設（特定（緊急物資輸送対応））の場合は、当該栈橋を構成する杭の中に二カ所以上で全塑性に達している杭が存在しないことを照査する。また、レベル2地震動等の作用による損傷等が軽微な修復により機能回復できることが要求される耐震強化施設（標準（緊急物資輸送対応））の場合は、当該栈橋を構成する杭の中に一カ所のみで全塑性に達している又は全塑性に達していない杭が存在することを照査する。第7章で検討した実大曲げ載荷試験の結果より、UHP-SHCC巻立てにより最大曲げモーメントは大幅に増加することが確認されており、この補強効果を考慮することで耐震強化施設としても適用できる可能性はある。しかし、載荷試験からポストピーク領域での顕著な荷重低下が確認されており、現段階では終局状態に近い範囲の設計法を構築するには至っていない。そこで、本技術では鋼管杭に生じる応力度が降伏応力度を超えない範囲を適用対象とした。巻立て断面の設計にあたっては、図-9.7に示すひずみ分布および応力分布よりファイバーモデルを用いて鋼管降伏時の曲げ耐力を算定し、巻立て断面の仕様を決定する。なお、鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、UHP-SHCCは図-9.6の応力-ひずみ関係を用いる。

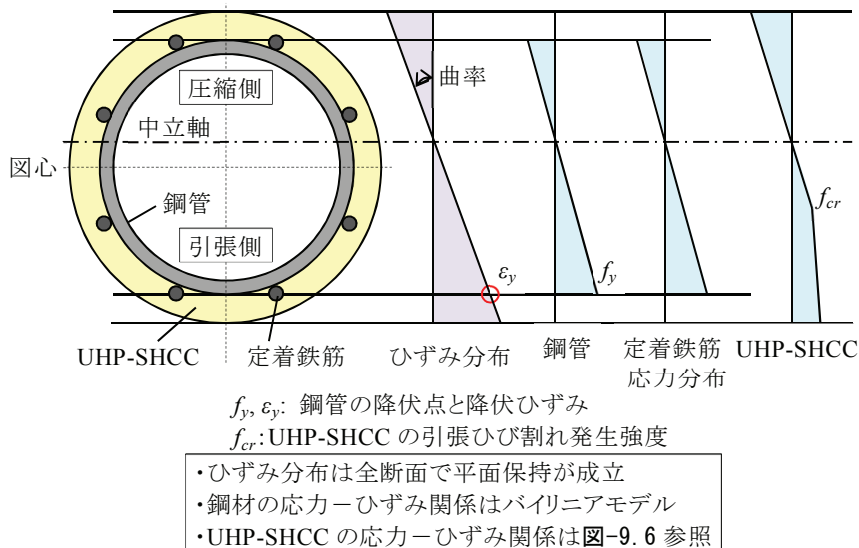


図-9.7 鋼管降伏時のひずみ・応力分布

9. 5 適用条件の整理

本技術は、既設栈橋の長寿命化に寄与する目的で開発した新しい補修・補強技術であり、特に鋼管杭と上部工の接合部に着目したことが既存技術とは大きく異なる点である。鉄筋コンクリート巻立て等の既存技術では、接合部における防食を確実に保証することは難しく、一方、UHP-SHCCによって接合部を完全に防食できる本技術は、これまでにない補修技術と考えられる。接合部断面を補強する場合、既存技術の鉄筋コンクリート巻立てでは上部工にアンカーを設置して定着する。しかし、一般的な栈橋の杭頭部においては鋼管杭の周囲に鉄筋溶接用プレートが設置されている場合が多く、上部工内の定着長を確保するためにはプレートを避けた位置にアンカーを設置する必要がある、それに伴って巻立て厚が大きくなる可能性がある。これは、自重や断面剛性の増加に繋がるため、栈橋全体の変形挙動に影響を及ぼす可能性がある。一方、本技術においては上部工との定着は頭付きアンカーボルトにより行う。鉄筋溶接用プレートが存在する場合のアンカーの設置位置は既存技術と同様となるが、UHP-SHCCに埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力は大きいため、埋込み長を短くすることが可能である。また、UHP-SHCCは高耐久性材料であるためアンカーのかぶりを小さくすることができる。このことから、本技術では巻立て厚を薄くすることが可能となり、既存技術にはない優位性と考えられる。

しかし、本技術は鋼管杭の残存耐力を考慮して巻立て断面を照査するため、鋼管杭の腐食が著しく進行して孔食が生じている場合などには適用が難しいと考えられる。そこで、鋼管杭が腐食して減肉した場合を想定し、鋼管杭の残存肉厚に対する適用範囲(適用限界)を整理した。なお、ここでは腐食によって低下した杭の力学性能を当初設計まで回復させる条件とした。

検討パラメータは、JIS A 5525「鋼管ぐい」を参考に設定した鋼管杭の仕様(表-9.2 参照)および残存肉厚とし、2水準のUHP-SHCC巻立て厚(50mmおよび75mm)での適用の可否として図化した。また、本補強技術は定着鉄筋を鋼管杭に溶接するため、「道路橋示方書・同解説」[6]を参考に溶接可能最小肉厚を6mmと仮定した。なお、定着鉄筋は巻立て厚50mmのときはD16鉄筋を200mm間隔で設置することとし、巻立て厚75mmのときはD19鉄筋を200mm間隔(巻立て厚50mmにおける定着鉄筋比と同程度)で設置する条件とした。

表-9.2 適用範囲の検討で用いた鋼管杭の仕様

鋼種	外径(mm)	厚さ(mm)
SKK400	600	9, 12, 14, 16
	800	9, 12, 14, 16
	1000	12, 14, 16, 19
	1200	14, 16, 19, 22
	1500	16, 19, 22, 25
	1800	19, 22, 25

図-9.8~9 に、当初設計まで力学性能を回復することができる条件を適用範囲として整理した結果を示す。結果より、UHP-SHCC の巻立て厚が大きいほど適用範囲は拡大することが確認された。また、鋼管杭の外径が大きいほど適用範囲は限られ、鋼管杭の腐食が著しい場合には当初設計まで耐力を回復させることが難しいと考えられる。

図-9.10 に代表的な鋼管杭の仕様に対して当初設計まで耐力を回復させることのできる UHP-SHCC の巻立て厚（50~75mm の範囲）と残存肉厚の関係を示す。本図から、対象となる既設鋼管杭の残存耐力（残存肉厚）によって、UHP-SHCC の巻立て厚を変更すれば設計が可能であると考えられる。

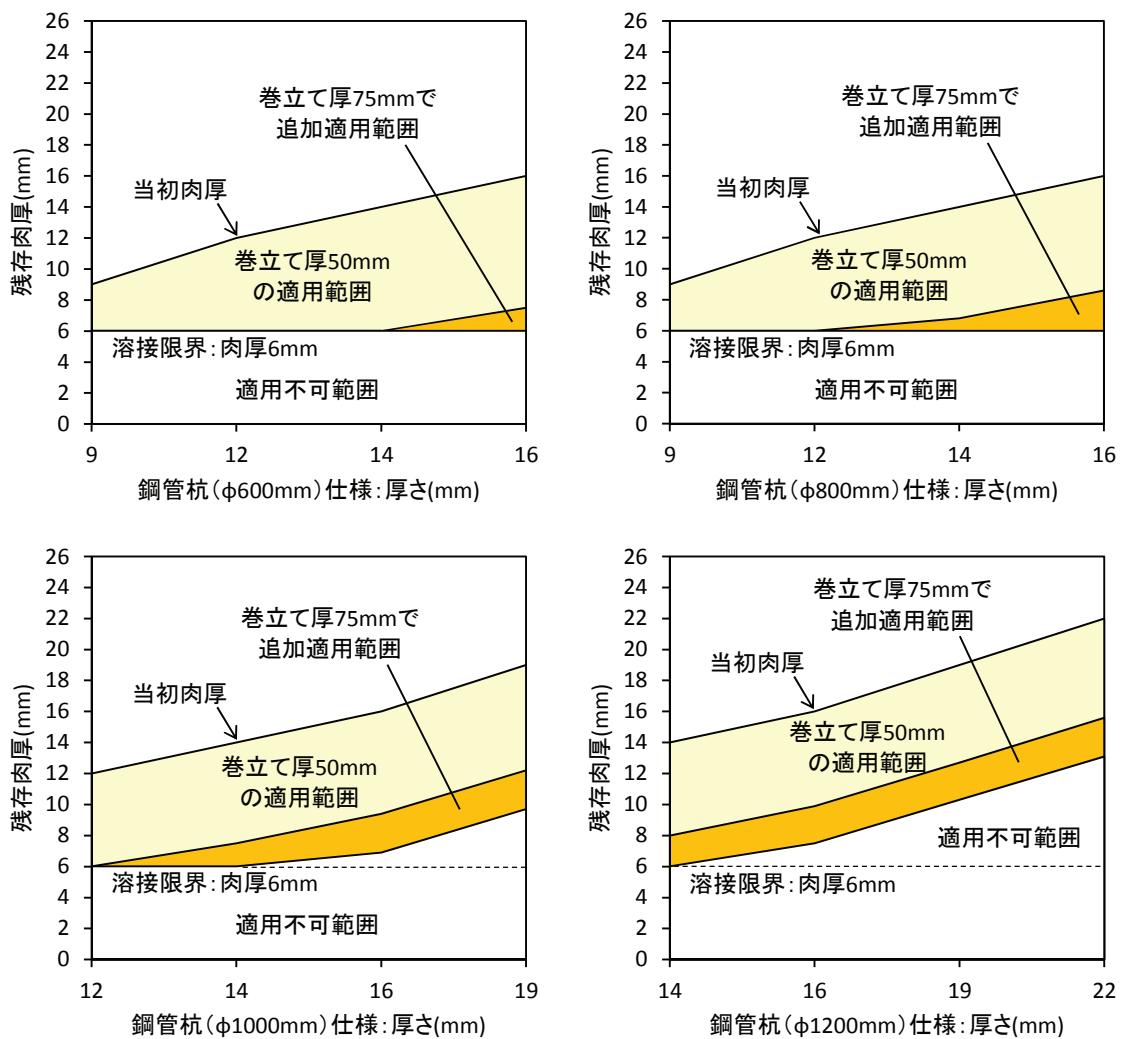


図-9.8 適用範囲の検討結果（杭径 600~1200mm）

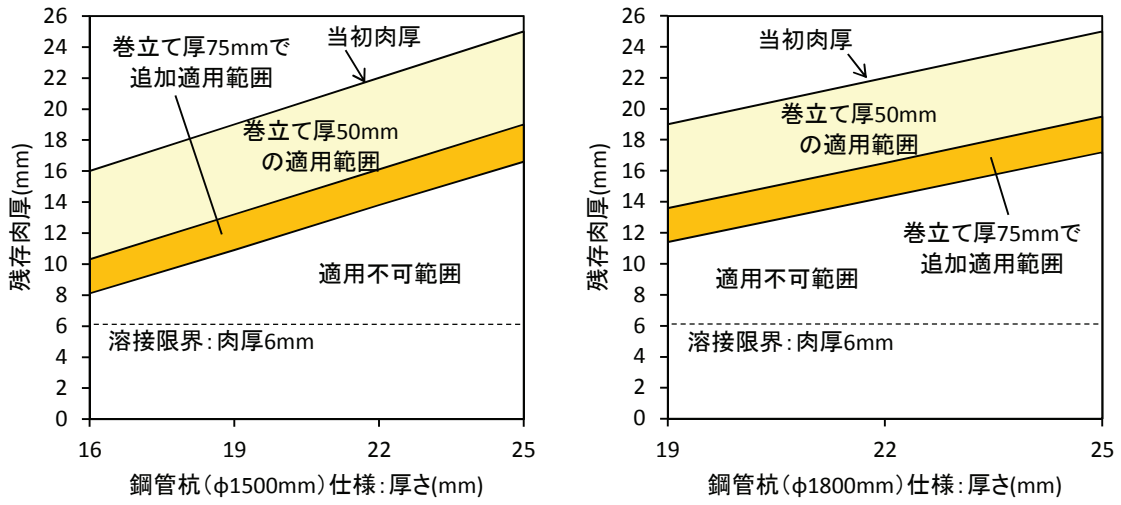


図-9.9 適用範囲の検討結果（杭径 1500～1800mm）

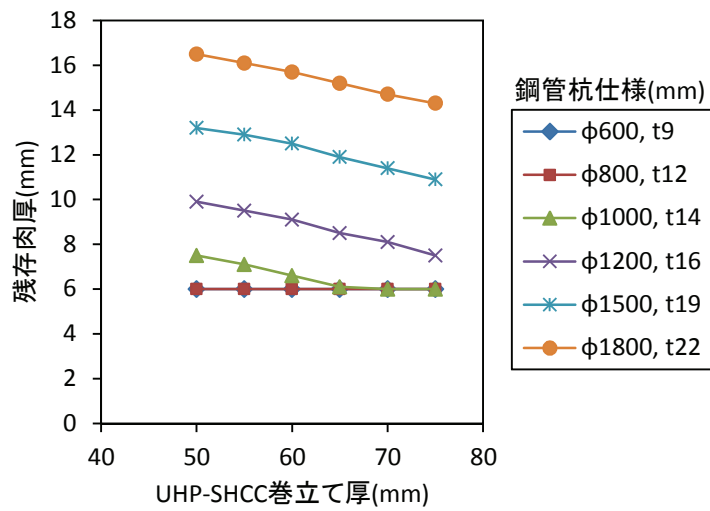


図-9.10 当初設計まで耐力回復が可能な UHP-SHCC 巻立て厚と残存肉厚の関係

9. 6 ライフサイクルコストの試算例

9. 6. 1 はじめに

栈橋を長期的に利用していくための維持管理計画を立案するためには、ライフサイクルコストを検討するのが有効である。ライフサイクルコストとは、構造物の計画、設計、建設、運用、維持管理、解体、撤去等の各段階での費用の総額であり [7]、本技術の適用検討においては維持管理における点検費用と対策費用の総和で検討することとなる。ここでは、同じ巻立て補強技術である鉄筋コンクリート巻立てとの比較を実施した。

9. 6. 2 検討条件

検討対象とした構造物の条件を表-9.3に示す。補修対象は、外径 800mm の鋼管杭 24 本とし、補修範囲は標高-1.0m~+2.0m (L=3.0m) とした。なお、-1.0m 以深は電気防食工法が適用され、適切な維持管理によって供用期間中の防食が確保されているものと仮定した（ライフサイクルコストの試算からは除外）。また、栈橋上部工についてもここでは試算から除外した。

UHP-SHCC 巻立ておよび鉄筋コンクリート巻立ての仕様を表-9.4に示す。UHP-SHCC は、巻立て厚 50mm と 75mm の 2 水準とし、定着鉄筋は D16×16 本/杭 (L=3.0m)、上部工との定着用頭付きアンカーボルトは M22×20 本/杭とした。一方、鉄筋コンクリートは、巻立て厚 200mm とし、主鉄筋は D22×20 本/杭 (L=2.8m)、帯鉄筋は D13×15 本/杭、スタッドボルトは M16×208 本/杭とした。なお、UHP-SHCC 巻立ては巻立て材を上部工に根入れさせるため、杭頭部の一部（深さ 0.1m ×1.1m²/杭）をはつり取る条件とした。

表-9.3 検討対象の構造物条件

項目	詳細
鋼管杭	外径 800mm, 補修対象 24 本 補修範囲：標高-1.0m~+2.0m (L=3.0m)
既存の防食工	有機系被覆（経年劣化により錆び汁あり）
置かれている環境	厳しい腐食環境

表-9.4 巻立て仕様

巻立て方法	仕様
UHP-SHCC 巻立て	巻立て厚：50mm と 75mm（繊維混入率 1.5%） 定着鉄筋：D16×16 本/杭 (L=3.0m/本) かぶり：34mm 上部工との定着用頭付きアンカーボルト：M22×20 本/杭 上部工はつり工：深さ 0.1m ×1.1m ² /杭
RC 巻立て	巻立て厚：200mm（水中不分離性コンクリート，W/C=50%，BB） 主鉄筋：D22×20 本/杭 (L=2.8m/本) 帯鉄筋：D13×15 本/杭 (L=3.2m/本) かぶり：76mm 杭との定着用スタッドボルト：M16×208 本/杭

UHP-SHCC 巻立ておよび鉄筋コンクリート巻立ての耐用年数について、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食の観点で計算した結果を表-9.5 に示す。なお、ここではひび割れは存在しない条件とし、UHP-SHCC は図-9.2 より、一方、鉄筋コンクリートは「港湾の施設の技術上の基準・同解説」[5] に基づいて計算した。計算結果から、耐用年数は UHP-SHCC 巻立てが 96 年（巻立て厚 50mm の場合）、鉄筋コンクリート巻立てが 23 年と算定された。ここで、文献 [8,9] では、鉄筋コンクリート巻立ての期待耐用年数は 30 年程度とされている。これは、これまでの実績に基づく設定値であり、錆び汁等の発生が確認される時点と推察される。上述の塩害に対する照査では、鋼材位置における塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生濃度に達した時点（潜伏期終了）を耐用年数としたことから、文献 [8,9] における期待耐用年数より小さくなったと考えられる。そこで以下では、鉄筋コンクリート巻立ての設計上の耐用年数は、塩害劣化の進展期も加味した 30 年とした。一方、UHP-SHCC は、第 3 章の検討結果から、進展期の進行は非常に遅いと推察される。そのため、塩害に対する照査で算定された耐用年数よりも期待耐用年数は大きく設定できると考えられるが、現段階では十分なデータが揃っていないので、ここでは塩害に対する照査で得られた値を設計上の耐用年数と仮定した。

表-9.6 に維持管理時の点検等の条件を示す。維持管理における点検の頻度は、「港湾の施設の点検診断ガイドライン」[10] を参考に設定した。なお、地震等の異常時直後に実施する臨時点検に係わる費用は予測不能なため除外し、社会的割引率は考慮しないこととした。また、鉄筋コンクリート巻立ては端部シール材が劣化しやすいため、文献 [11] を参考に 15 年に 1 回部分補修する条件とした。

表-9.5 LCC 試算上の耐用年数

巻立て材	UHP-SHCC		鉄筋コンクリート
配合条件	W/C=0.22, シリカフューム添加		W/C=0.50, BB
巻立て厚 (mm)	50	75	200
かぶり (mm)	34	56	76
鋼材腐食発生濃度 (kg/m ³)	1.2		2.0
見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	0.012		0.56
表面の塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	32.1		15.1
耐用年数 (年)	96	261	23
設計上の耐用年数 (年)	96	261	30

表-9.6 維持管理時の点検等の条件

巻立て材	UHP-SHCC	鉄筋コンクリート
維持管理	初回点検	竣工検査時に実施
	日常点検	定期的実施
	一般定期点検	5年に1回実施
	詳細定期点検	15年に1回実施
部分補修	—	15年に1回、端部シール材を補修

9. 6. 3 試算結果

ライフサイクルコスト (LCC) の試算結果を図-9.11 に示す。なお、LCC は鉄筋コンクリート巻立てによる補強費用を 1 とし、補強後の経過年数に応じて維持管理費用を積み上げた。また、ここでは巻立て補強の実施時期 (施設建設後の経過年数)、設計供用期間、補強後の期待供用年数は考慮せずに図示した。試算の結果、初期費用 (補強費用) は鉄筋コンクリート巻立てが最も小さいため、30 年経過までは鉄筋コンクリート巻立ての LCC が一番小さくなった。その後、鉄筋コンクリート巻立ては再補修するため LCC は逆転した。なお、UHP-SHCC 巻立てで比べると、補強後の経過年数 50 年の範囲においては再補修がないため、初期費用の差の分、巻立て厚 50mm の LCC が一番小さくなった。以上より、長期的な LCC は UHP-SHCC 巻立ての方が有利になると考えられる。

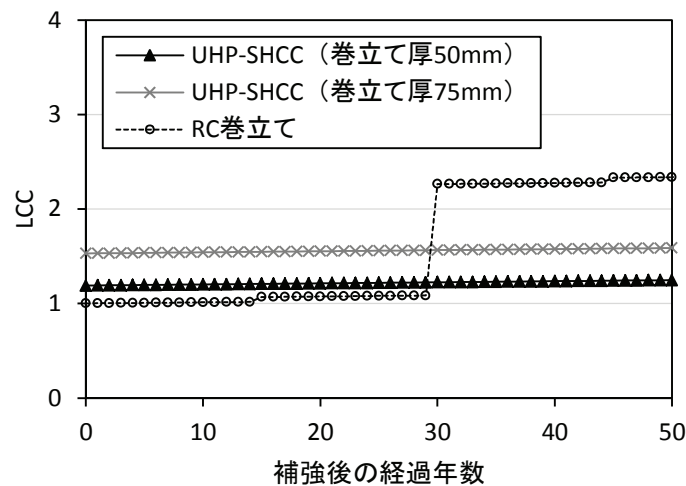


図-9.11 ライフサイクルコストの試算結果

9. 6. 4 追加検討

ここでは、補強直後 (経過 0 年) に栈橋に想定外の外力が作用し、杭頭部に大きな曲げモーメントが発生してひび割れが生じた場合における試算例を示す。ひび割れが存在する場合の設計上の耐用年数を表-9.7 に示す。UHP-SHCC の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は $0.056\text{cm}^2/\text{年}$ (純曲げ区間 100mm に対して曲げ引張残留ひずみで 0.5%程度生じていた場合における実験値) とし、一方、鉄筋コンクリート巻立てにおける鉄筋は降伏応力度まで達し、かつ生じたひび割れの幅は 0.2mm と仮定して、文献 [5] を参考に塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算定した。なお、ひび割れが存在する場合の鋼材腐食の進展期の進行は極めて速いと考えられるため、計算された耐用年数を設計上の耐用年数と設定した。また、再補修後はひび割れが存在しない条件とし、表-9.5 に示す設計上の耐用年数を用いて LCC を試算した。なお、維持管理時の点検等の条件は表-9.6 を用いた。

LCC の試算結果を図-9.12 に示す。LCC が最小となるのは、8 年経過までは鉄筋コンクリート

ト巻立て、経過年数 8～21 年では巻立て厚 50mm の UHP-SHCC 巻立て、経過年数 21～50 年では巻立て厚 75mm の UHP-SHCC 巻立てとなった。このことから、UHP-SHCC 巻立ては長期的な LCC が優位な補強技術と考えられる。また、UHP-SHCC 巻立ての巻立て厚を大きくすることでひび割れが生じるような場合でも再補修によるコスト増を避けられる可能性があることが示唆された。なお、本試算例はあくまでも LCC の傾向をとらえるのみであり、実績の蓄積が望まれる。

表-9.7 ひび割れ存在時の LCC 試算上の耐用年数

巻立て材	UHP-SHCC		鉄筋コンクリート
	W/C=0.22, シリカフューム添加		W/C=0.50, BB
巻立て厚 (mm)	50	75	200
かぶり (mm)	34	56	76
ひび割れ	表面で 0.5%の曲げ引張ひずみ		幅 0.2mm
鋼材腐食発生濃度 (kg/m ³)	1.2		2.0
見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	0.056		1.69
表面の塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	32.1		15.1
耐用年数 (年)	21	56	8
設計上の耐用年数 (年)	21	56	8

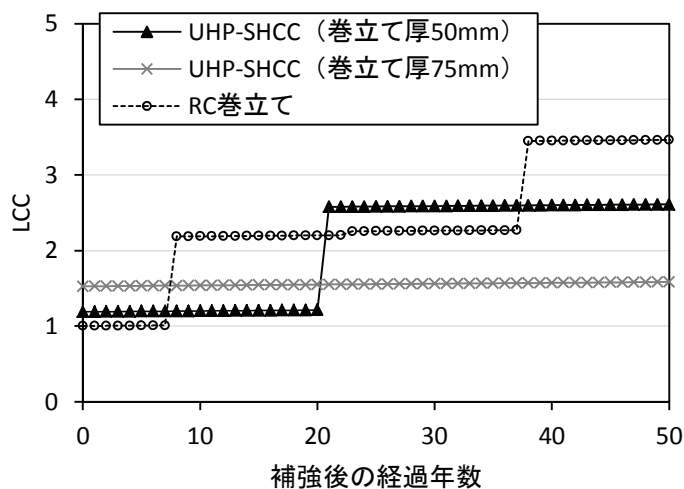


図-9.12 ライフサイクルコストの試算結果 (追加検討)

参考文献

- [1] 松本拓也, 岩崎英治, 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保: 海洋環境における超高性能ひずみ硬化型セメント系材料の長期耐久性の検討, 土木学会, 第 68 回年次学術講演会講演概要集, 5-008, pp.15-16, 平成 25 年 9 月
- [2] 加藤絵万, 川端雄一郎, 西田孝弘, 岩波光保: 超高強度ひずみ硬化型モルタルの耐衝撃性に関する基礎的検討, 生産研究, 第 64 巻, 4 号, pp.591-595, 2012
- [3] 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.148-156
- [4] 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー127, 平成 19 年 3 月
- [5] 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成 19 年 7 月
- [6] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 [I 共通編, II 鋼橋編], pp.220-221, 平成 24 年 3 月
- [7] 沿岸技術研究センター: 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 沿岸技術ライブラリー, No.26, pp.11-12, 平成 19 年 10 月
- [8] 沿岸技術研究センター: 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (2009 年版), 沿岸技術ライブラリー, No.35, 平成 21 年 11 月
- [9] 防食・補修工法研究会: 港湾鋼構造物 新しい防食工法・補修工法・維持管理 実務ハンドブック 設計・施工編, 2013 年度版
- [10] 国土交通省港湾局: 港湾の施設の点検診断ガイドライン [第 1 部 総論], 平成 26 年 7 月
- [11] 防食・補修工法研究会: 港湾鋼構造物 新しい防食工法・補修工法・維持管理 実務ハンドブック 維持管理編, 2013 年度版

第 10 章 結論

本論文では、厳しい腐食環境下に曝される栈橋の長寿命化を実現させることを目的に、高強度、高靱性、高耐久性の優れた性質を併せ持つ超高強度ひずみ硬化型セメント系材料（UHP-SHCC）を用いた栈橋鋼管杭の補強技術を開発した。本補強技術の構造は、UHP-SHCC を栈橋上部工に根入れさせるように鋼管杭に巻き立てることに特徴を有する。これにより、構造・耐久性上の弱点となりやすい鋼管杭と上部工の接合部において、防食性能および補強効果を確保する。以下に研究成果をまとめる。

UHP-SHCC の鋼材に対する被覆防食性能

第 3 章では、UHP-SHCC の鋼材に対する被覆防食性能を確認した。飛沫帯環境下に UHP-SHCC によって被覆された鋼板供試体を 3 年間暴露した結果、塩化物イオンの浸透深さは 5mm 程度と小さいことが確認された。また、暴露後の供試体を用いて EPMA 法による塩化物イオンの面分析を行った結果、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は $0.012\text{cm}^2/\text{年}$ であった。この値を用いて塩害照査（ここでは、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ と仮定）を行うと、かぶり 34mm（鋼管杭への UHP-SHCC 巻立て厚 50mm，定着鉄筋 D16 とした場合）での耐用年数は 96 年となり、優れた被覆防食性能が確認された。

また、より厳しい条件として、ひび割れを有する UHP-SHCC によって被覆された供試体を用いた暴露試験も実施した。その結果、塩化物イオンはひび割れを通して浸透するものの、かぶり 30mm の鋼材表面には腐食が生じていないことが確認された。また、かぶり 17mm の鉄筋表面には軽微な腐食が確認されたが、暴露 1 年後から 3 年後にかけて腐食の進行は見られなかったため、ひび割れが発生した状態であっても鋼材腐食の進行に対する抵抗性は高いと考えられる。また、比較的大きなひび割れ部（純曲げ区間 100mm での最大曲げ引張ひずみ 1.5%（残留ひずみ 0.4%程度））における塩化物イオンの見掛けの拡散係数は $0.056\text{cm}^2/\text{年}$ であった。この値を用いて塩害照査によって算定される耐用年数は 21 年となり、ひび割れを発生させないようにすることが長寿命化に大きく寄与することが確認された。

ここで、塩害照査にあたっては腐食発生限界塩化物イオン濃度が必要であるが、現段階では UHP-SHCC に埋設された鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度は得られていない。そのため、長期暴露によるデータの蓄積と検証実験により、精度の高い塩害に対する照査が可能になるものと考えられる。また、暴露実験によりひび割れが存在する条件下においても鉄筋腐食の進行が極めて遅いことを確認している。そのため、塩害劣化過程の進展期も含めた耐久性設計が可能となれば、構造物の長寿命化にさらに貢献できると考えられる。また、進展期も含めた耐久性設計手法が構築できれば、UHP-SHCC の優位性および材料特性を活かした新たな構造利用等への展開にも繋がると考えられる。

初期ひび割れに影響を与える UHP-SHCC の収縮特性

第 4 章では、鋼材に対する被覆防食性能にも関わる初期ひび割れに影響を与える UHP-SHCC

の収縮特性について、膨張材と収縮低減剤を添加したときの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみを確認することで、UHP-SHCCの収縮低減策について検討を行った。その結果、収縮低減剤の使用が効果的であり、その添加率が大きいほど自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみが抑制できることが確認された。また、リング型拘束収縮試験を実施し、型枠取り外し後のひび割れの発生状況を観察した結果、ひび割れの発生本数は自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの合計値と相関があることが確認された。このことから、UHP-SHCCの収縮ひずみを抑えることが、長期耐久性を保証する上で非常に重要であることを再認識した。

本検討では、収縮低減剤の適用が効果的であることが確認されたが、収縮低減剤の使用は場合によっては凍結融解抵抗性に劣ることが指摘されている。そのため、厳寒地域で本技術を適用する場合は、UHP-SHCCの凍結融解抵抗性を把握した上で適用を検討する必要がある。なお、本実験結果は一例にすぎないが、実際の現場条件におけるUHP-SHCCの収縮挙動データを蓄積することによって、長期耐久性の確保に貢献できると考えられる。

UHP-SHCCを用いた巻立ての補強構造

第5章では、UHP-SHCC巻立てと鋼管杭を一体化する構造、および杭頭構造（鋼管杭と上部工の接合部付近の構造）に関する基礎的な検討を行った。小型供試体を用いた載荷試験の結果、鋼管にUHP-SHCCを巻き立てることで曲げ耐力は向上し、巻立て厚が大きいほど曲げ耐力はさらに向上することが確認された。また、UHP-SHCC巻立てと鋼管杭の一体性を確保するためには鋼管杭表面の軸方向に鉄筋（定着鉄筋）を配置する方法が効果的で、UHP-SHCC巻立て断面積に対する鉄筋総断面積を1.3%以上とすれば、良好なひび割れ分散性が発揮されることが確認された。すなわち、UHP-SHCC巻立て厚を50mmとした場合は、D13鉄筋で200mm以下の間隔で配置し、D16鉄筋の場合は200mm間隔で配置すればよいこととなる。

杭頭構造は、UHP-SHCCを上部工へ根入れさせる形とするのがよく、さらに鋼管と上部工の接合部断面に鉄筋を配置することで、接合部付近におけるひび割れ分散性は向上することが確認された。これにより、耐久性上および構造上の弱点となりやすい接合部における塩化物イオンの侵入を抑制できると考えられる。

UHP-SHCCの上部工への定着方法

第6章では、UHP-SHCC巻立てを上部工へ機械的に定着させる方法を検討するため、UHP-SHCCに埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き試験を実施した。なお、本技術はUHP-SHCCを上部工に根入れさせることで接合部の防食・補強を期待しており、上部工からの応力伝達等を考慮すると根入れ部を上部工に確実に定着させることが重要である。引抜き試験の結果、UHP-SHCCに埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力は、日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説（2010）」にある頭付きアンカーボルトの許容引張力に比べて2.74倍大きくなることが確認された。また、引抜きによるコーン状破壊面の角度は、45度よりも浅く、破壊面積は大きくなることが確認された。さらに、コーン状破壊面を仮定することで、

UHP-SHCC に埋設された頭付きアンカーボルトの引抜き耐力を算定する手法を提案した。しかし、へりあきの影響や複数の頭付きアンカーボルトが近接している場合の算定手法の構築には、今後のデータの蓄積が必要である。

曲げに対する補強効果の検証

第7章では、小型供試体による検討結果を受けて、大型供試体を用いた載荷試験により曲げに対する補強効果を確認した。その結果、UHP-SHCC 巻立てによる曲げ耐力の向上効果を確認した。また、UHP-SHCC の引張強度特性を考慮したファイバーモデルを用いて、鋼管降伏時の曲げ耐力を算定できることを示した。

施工検討

第8章では、①UHP-SHCC が水中を流動した際の品質変化、②実施工を想定した注入実験による上部工部への充填性、③UHP-SHCC の圧送性を確認し、また、これまでの構造細目に関する検証実験や施工検討を受けて、実栈橋鋼管杭に対して試験施工を実施し、④本工法の施工手順を確認した。

①UHP-SHCC が水中を流動した際の品質変化について、水中を流動させても硬化特性の低下はないことを確認した。また、製造直後の空気量を抑えた配合を用いることで、型枠内での濁りの抑制に繋がると考えられる。②注入実験による充填性確認について、適切な位置に空気抜きを設置することで、逆打ちとなる上部工内まで充填できることを確認した。③UHP-SHCC の圧送性について、配管内径 40mm および 50mm における UHP-SHCC の管内圧力損失に関する一データが見出されたため、ポンプ選定の一助になるものと考えられる。また、圧送速度が巻立て表面の出来栄に影響を及ぼす可能性が示唆され、本研究では圧送速度が遅いほど出来栄が良くなる可能性が高いことが確認された。

④実栈橋における試験施工によって施工手順を確認し、本工法の施工手順を確立した。本補強技術において特徴的な施工は、UHP-SHCC を上部工に根入れさせるために既設上部工の一部をはつり取る作業、UHP-SHCC と鋼管杭の定着用鉄筋を既設鋼管杭に溶接する作業、また UHP-SHCC の製造と考えられる。なお、実栈橋の杭頭形状および構造、鋼管杭の径などの施工条件や環境条件により、型枠構造や注入方法などの施工方法に影響を及ぼす可能性はあるが、試験施工で検証した施工手順によって実構造物に対しても問題なく施工できるものと考えられる。

本補強方法の提案

第9章においては、すべての検討結果を受けて確立した UHP-SHCC を用いた栈橋鋼管杭の補強方法を提案し、設計に関わる巻立て補強断面等の詳細仕様、耐用年数、UHP-SHCC の材料特性値と鋼管降伏時の曲げ耐力の算定手法を示した。また、適用条件についても整理した。

以上より、本論文において UHP-SHCC を用いた栈橋鋼管杭の被覆・補強技術を提案し、耐久性および構造細目に関わる各種検証実験の結果から、曲げ耐力の向上効果等の本技術の優位性を示した。また、結論のなかで、耐久性設計や UHP-SHCC の収縮抑制策に関する課題を示した。今後、実栈橋鋼管杭に本技術が適用され、補強工法として成熟し、追跡調査による耐久性等に関するデータの蓄積と検証により、既存ストックの長寿命化に貢献できるものとする。

なお、現在供用中の栈橋鋼管杭を調査すると、劣化損傷が著しく、激しい孔食によって鋼管杭の残存肉厚がほとんどない事例も見受けられる。この場合、栈橋構造としての性能は大きく低下しており、栈橋上の使用法の変更や改修工事の検討がなされることとなる。しかしながら、年々老朽化施設は増える一方であり、適切な維持管理によって重要な社会基盤を保守し続けることは、特に地方自治体では難しくなっている現実もある。これは、専門的知識を有する技術者が不足しているという背景も考えられ、さらには今後の少子高齢化に伴って財源が縮小されることは確実であり、リニューアル分野への投資に関する見込みは不透明なのではないかと想像する。このような現状を踏まえると、維持管理に掛ける費用と負担を減らすことができれば、長期的な安定社会に繋がると考えられ、UHP-SHCC のような優れた性質を有する材料を活用することや新工法の開発を通じて、構造物の長寿命化に貢献していくことは可能と思われる。

本研究に係わる今後の展開としては、上述した要因により増える一方の激しく劣化した構造物に対して、低下した耐力の回復・向上が可能な技術の開発に本成果や考え方が利用され、発展していくことが望まれる。本研究の成果が、社会基盤整備や持続社会に少しでも貢献できれば幸いである。

謝 辞

本論文は、筆者が東亜建設工業株式会社技術研究開発センターにおいて実施した研究ならびに岐阜大学大学院工学研究科生産開発システム工学専攻博士後期課程在籍中に実施した研究の成果を取りまとめたものであります。

指導教員の岐阜大学工学部社会基盤工学科教授 國枝稔博士におかれましては、本研究の計画・遂行から取りまとめの細部に至るまで、懇切丁寧にご指導賜りました。また、国内外での発表の機会を与えていただきましたこと、さらには私が社会人という状況を鑑みて、特別ご配慮いただきましたこと、心より感謝とお礼を申し上げます。

また、本論文の取りまとめに際しましては、岐阜大学総合情報メディアセンター教授 内田裕市博士、岐阜大学工学部社会基盤工学科教授 小林孝一博士にご指導賜りました。ここに、心より感謝申し上げます。

岐阜大学大学院への入学の機会を与えていただきました東亜建設工業株式会社執行役員常務守分敦郎博士、また、同 技術研究開発センター前センター長 浅沼丈夫博士、同 現センター長 青野利夫博士には、日頃より叱咤激励をいただきました。深く感謝申し上げます。また、同 副センター長 羽瀧貴士博士、同 新材料・リニューアル技術グループリーダー 網野貴彦博士には、本研究の遂行ならびに取りまとめから、仕事の取り組み方、社会人としての姿勢に至るまで、上司として多くのご指導・ご助言をいただきました。心より感謝とお礼を申し上げます。

本研究の計画段階から取りまとめにおきましては、東京工業大学環境・社会理工学院教授 岩波光保博士、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所構造研究領域構造研究グループ長 加藤絵万博士、同 主任研究官 川端雄一郎博士をはじめとする多くの方々との意見交換をさせていただき、またご助言をいただきました。ここで、すべての皆様のお名前をあげることはできませんが、心よりお礼申し上げます。

さらには、本研究に関係する実験には、東亜建設工業株式会社技術研究開発センターに在籍する多くの方々、指導教員の國枝稔博士が名古屋大学に在籍されていたときの研究室の学生の皆さんの多大なご協力をいただきました。ここに、お礼申し上げます。

本研究の各段階におきましては、岐阜大学名誉教授 小柳洽博士、同 工学部特任教授 六郷恵哲博士をはじめ、同 コンクリート研究会のメンバーの方々には、打合せ会を通じて多くのご指導、ご意見を賜りました。ここに、深く感謝申し上げます。

本論文は、このように多くの方々のご指導、ご協力のもと取りまとめることができました。ひとえに皆様のお陰であることは勿論のこと、要所で貴重なご意見ならびに暖かい励ましのお言葉を賜りました。ここであらためて感謝とお礼を申し上げます。

