

博士論文

超高性能繊維補強セメント系複合材料の  
品質および耐久性確保に向けた研究

宇都宮大学 大学院 工学研究科

博士後期課程

システム創成工学専攻

2022年3月

渡邊 有寿



# 博士論文

## 超高性能繊維補強セメント系複合材料の 品質および耐久性確保に向けた研究

宇都宮大学 大学院 工学研究科

博士後期課程

システム創成工学専攻

渡邊 有寿

主査	藤原 浩己	教授
副査	池田 裕一	教授
	藤倉 修一	准教授
副指導	杉山 央	教授
	丸岡 正知	准教授





# 目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 本研究の目的.....	4
1.3 本論文の構成.....	5
参考文献.....	7
第2章 UHPFRC の強度発現性に及ぼす養生の影響.....	9
2.1 はじめに.....	9
2.2 実験概要.....	9
2.2.1 UHPFRC について.....	9
2.2.2 実験条件および水準.....	10
2.3 実験結果および各種特性.....	11
2.3.1 フレッシュ特性.....	11
2.3.2 凝結特性.....	11
2.3.3 自己発熱特性.....	12
2.3.4 硬化特性.....	13
2.3.4.1 圧縮強度の発現.....	13
2.3.4.2 ひび割れ発生強度と曲げ強度の発現.....	13
2.4 強度発現特性の定式化.....	14
2.4.1 目的および概要.....	14
2.4.2 圧縮強度との関係.....	14
2.4.2.1 ひび割れ発生強度.....	14
2.4.2.2 静弾性係数.....	15
2.4.3 圧縮強度の推定.....	16
2.4.3.1 積算温度法による整理.....	16
2.4.3.2 領域分けによる評価.....	18
2.5 圧縮強度発現の推定精度向上.....	19
2.5.1 推定方法について.....	19
2.5.2 積算温度法における基準温度の提案.....	20
第2章のまとめ.....	23
参考文献.....	24

<b>第3章 UHPFRC の耐久性に及ぼす養生の影響</b> .....	25
3.1 はじめに.....	25
3.2 UHPFRC の細孔構造と物質移動抵抗性.....	25
3.2.1 使用材料および配合.....	25
3.2.2 細孔構造の推移.....	26
3.2.3 物質移動抵抗性.....	27
3.3 高温履歴が及ぼす影響.....	28
3.3.1 マスブロック試験体での検証その1 (部材厚 50cm) .....	28
3.3.1.1 水和熱の測定.....	29
3.3.1.2 硬化体の分析.....	31
3.3.2 マスブロック試験体での検証その2 (部材厚 1m) .....	32
3.3.2.1 水和熱の測定.....	33
3.3.2.2 硬化体の分析.....	34
3.3.3 遅れエトリンサイト生成の可能性について.....	35
3.4 細孔構造の長期的な追跡.....	38
第3章のまとめ.....	39
参考文献.....	40
<b>第4章 場所打ちに向けた各種検討と施工</b> .....	41
4.1 はじめに.....	41
4.2 場所打ち施工の適用－小滝川橋－.....	41
4.2.1 工事概要.....	41
4.2.2 使用材料および配合.....	44
4.3 場所打ち工法に向けた検討.....	45
4.3.1 流動距離と材料分離抵抗性.....	45
4.3.2 打重ね部の一体性確保に関する検討.....	48
4.3.2.1 水平および鉛直打重ねを想定した実験.....	49
4.3.2.2 実験結果.....	51
4.3.2.3 実施工での打込み.....	55
4.3.3 養生および温度ひび割れ対策.....	56
4.3.3.1 養生方法の検討.....	56
4.3.3.2 マスコンクリートとしての対策.....	58
4.4 完成.....	60
第4章のまとめ.....	61
参考文献.....	62

<b>第5章 マトリクスに生じるひび割れの発生機構</b> .....	63
5.1 はじめに.....	63
5.2 既存の JIS 試験における基礎的検討.....	64
5.2.1 既往の拘束試験.....	64
5.2.2 JIS 試験による拘束度の検討.....	65
5.2.2.1 検討水準および配合 .....	66
5.2.2.2 試験結果 .....	67
5.3 TSTM 試験による詳細検討 .....	69
5.3.1 TSTM 試験について.....	69
5.3.2 検討水準および配合.....	70
5.3.3 試験結果.....	71
5.3.3.1 収縮ひずみ.....	71
5.3.3.2 発生応力とひび割れ発生強度 .....	72
第5章のまとめ .....	75
参考文献 .....	76
<b>第6章 マトリクス内における繊維の健全性とその影響</b> .....	77
6.1 はじめに.....	77
6.2 鋼繊維を用いた UHPFRC .....	77
6.2.1 長期評価用供試体の作製 .....	77
6.2.2 暴露条件および試験ケース.....	79
6.2.3 試験結果.....	83
6.2.3.1 静的強度試験結果.....	83
6.2.3.2 塩化物イオン浸透状況と鋼繊維の状態.....	85
6.2.3.3 曲げ疲労試験結果.....	87
6.3 合成繊維を用いた UHPFRC .....	91
6.3.1 マトリクス中の合成繊維に想定される劣化 .....	91
6.3.2 使用材料および配合.....	92
6.3.3 試験概要.....	93
6.3.3.1 繊維単体の耐久性.....	93
6.3.3.2 温度依存性の確認.....	94
6.3.3.3 暴露条件および試験ケース .....	95
6.3.4 試験結果.....	96
6.3.4.1 繊維単体の耐久性（ポリプロピレン繊維） .....	96
6.3.4.2 温度依存性の確認.....	98
6.3.4.3 熱疲労に対する耐久性 .....	100
6.3.4.4 曲げ疲労に関する既往の研究 .....	104
第6章のまとめ .....	105
参考文献 .....	107

<b>第7章 UHPFRC に対する補修や維持管理に向けた検討</b> .....	108
7.1 はじめに.....	108
7.2 UHPFRC のひび割れ補修.....	108
7.2.1 力学特性の回復性評価.....	108
7.2.1.1 試験概要.....	108
7.2.1.2 補修後の曲げ強度試験結果.....	110
7.2.2 遮塩性の評価.....	111
7.2.2.1 試験概要.....	111
7.2.2.2 浸透性防水材の浸透深さと遮塩性.....	113
7.3.1 力学特性の回復性評価.....	114
7.3.1.1 試験概要.....	114
7.3.1.2 静的強度試験および簡易疲労試験による評価.....	117
7.3.1.3 曲げ疲労特性.....	121
7.3.2 遮塩性の評価.....	124
第7章のまとめ .....	125
参考文献 .....	127
<b>第8章 総括</b> .....	128
8.1 本研究のまとめ.....	128
8.2 今後の課題.....	131
参考文献 .....	134

## 謝辞

## 付録

発表論文一覧

# 第 1 章

## 序論



## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

社会資本ストックの老朽化が社会問題となっている昨今、各種インフラ構造物の大規模更新・大規模修繕をはじめとした事業では、財政の制約がある中で将来の維持管理・更新費の増大を抑える予防保全の観点での取組みも進んでいる。このような背景の中、超高性能繊維補強セメント系複合材料（Ultra-High Performance Fiber Reinforced cement-based Composite：以下、UHPFRC）を活用し、従来の技術による新設・更新および補修・補強工法よりも耐荷重や耐疲労といった構造物の性能を積極的または合理的に向上させつつ、より長期的に補強効果と耐久性を持続させることを志向する検討が増えてきている。

UHPFRCは、「圧縮強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の超高強度で、多量に混入した短繊維によって設計に引張強度を組み込めるほどの靱性を有し、さらには非常に緻密なマトリクスで耐久性に優れるセメント系材料」というのが一般的な理解であると思われる（図1-1、図1-2）<sup>1) 2)</sup>。規準化が進んでいる欧州（特にスイス）<sup>3)</sup>では、用途ごとに力学特性のランク分けがされ、工場でのプレキャスト部材、現場打ちによる補修・補強など様々に活用されている。

UHPFRCという呼称については、2000年にフランスにて使用されたのが始まりとされており<sup>4)</sup>、ドイツやアメリカではUHPCとも称されている。

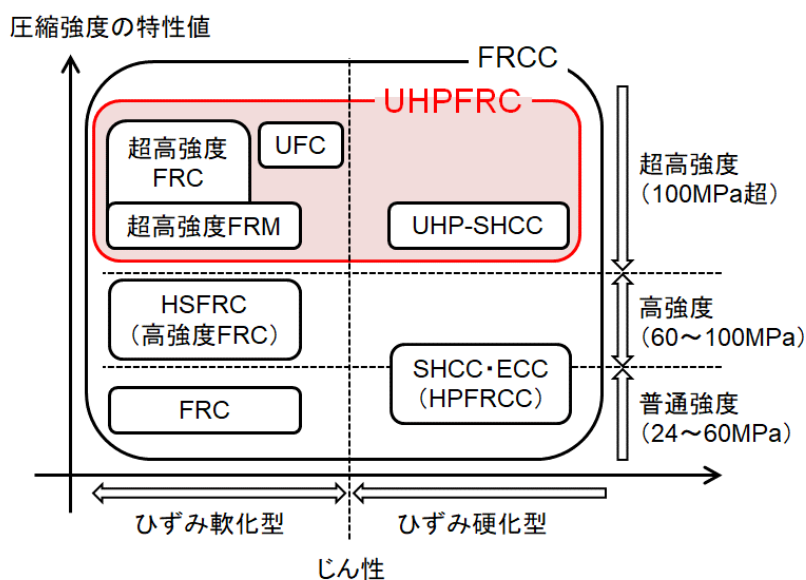


図 1-1 FRCC(Fiber Reinforced Cement Composite)の分類  
（土木学会 346 委員会(第 2 期)報告書<sup>1)</sup>を参考)

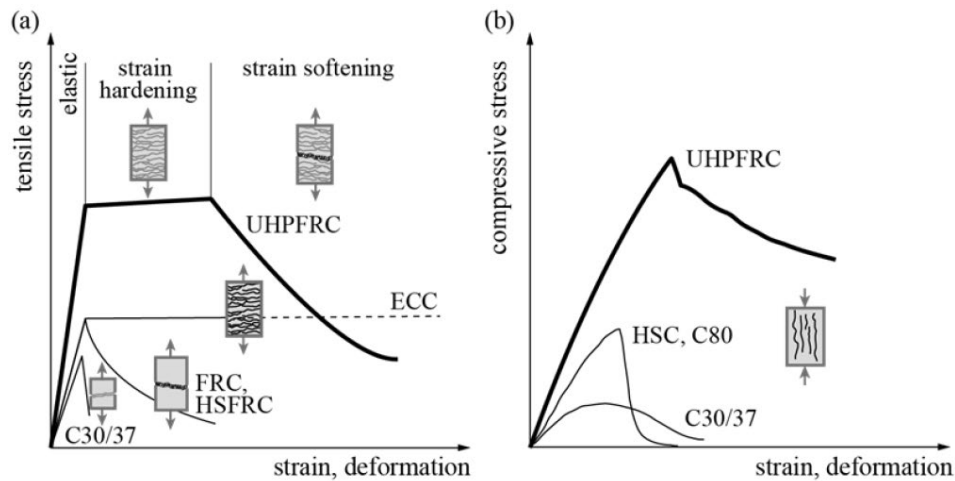


図 1-2 UHPFRC の力学特性(引張・圧縮)<sup>2)</sup>

我が国に目を向けると、UFC すなわち土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」<sup>5)</sup>にて定義されている材料は広義で解釈すれば UHPFRC の一種とされている。同指針(以下、UFC 指針)では主にプレキャスト部材向けに設計や養生方法が取り纏められており、2002 年に酒田みらい橋<sup>6)</sup>の建設に反応性粉体系(Reactive Powder Concrete, RPC 系)の UFC が国内で初めて使われてから、エトリンサイト生成系(AFt 系)の UFC も 2005 年に加わり<sup>7)</sup>、羽田空港 D 滑走路<sup>8)</sup>(写真 1-1)への適用など世界に先駆けて大量に UHPFRC を利用する礎となった。さらに近年では、UFC と同等あるいはそれより低い強度レベルの力学特性を有する様々な UHPFRC が盛んに開発されている。このように、超高強度コンクリートが今日の土木構造物へ適用が広まったことに同指針の功績は多大なものであったと考える。



写真 1-1 羽田空港 D 滑走路への UFC 床板の適用  
(筆者は床板製作工場にて管理者として赴任)



UHPFRC はマトリクスが極めて緻密であるため、マトリクスに覆われた鋼繊維や補強鋼材の腐食も防ぐことができる。したがって、構造物の中でも厳しい力学的作用や過酷環境に曝される部位・部材に使用することは、これらの材料特性を最大限に活用できる効果的な方法といえる(図1-3)<sup>7)</sup>。UFC 指針の整備により、材料の大きな特徴の一つである繊維補強による引張特性が定量的に設計で示されるようになった。加えて、塩害環境における長年の耐久性データの蓄積<sup>9) 10)</sup>により信頼性が高められていることもその後の適用事例や研究・応用技術に寄与してきた一因と考えられる。

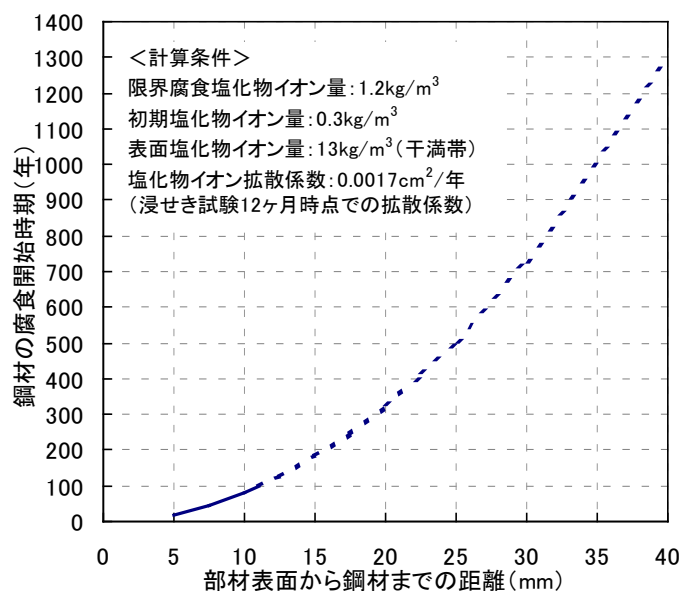


図1-3 エトリングイト生成系 UFC での鋼材腐食に関する照査例<sup>7)</sup>

また、UFC 指針では、鋼繊維を多量に混入することで優れた引張強度を達成させている一方で、セメント量が非常に多いため養生中に大きな自己収縮ひずみが生じることから、拘束体となる鉄筋などの補強材はひび割れ発生のリスクとなることから配置しないことを標準としている。さらには使用限界状態としてひび割れの発生を許容しないことを条件としている。ゆえにマトリクス内の鋼繊維の存在が担保されることで、中性化や塩害などに対して長期間にわたり耐久性能を保持できる(照査をしなくてよい)ということが同指針のコンセプトである。これらは長期的な耐久性データが十分でないで新技術を適用させるために当時必要な措置であったと推察される。

## 1.2 本研究の目的

前述のように UFC は引張特性やひび割れの分散性に優れているものの、設計ではひび割れ発生後の特性を使いきれおらず、設計・施工方法が限定されてしまうことも事実である。一方で、UHPFRC はマトリクスが極めて緻密であるため、マトリクスに覆われた鋼繊維や補強鋼材の腐食も防ぐことができ、構造物の中でも厳しい力学的作用や過酷環境に曝される部位・部材に使用することは、これらの材料特性を最大限に活用できる可能性を有している。海外では、UHPFRC をコンクリート構造物の補修・補強に利用される場合も増えてきており、特にスイスでの補修・補強への適用事例は大小併せて約 200 例に上り、使用量も日本の UFC に迫るほどになっている<sup>11)</sup>。昨今、国内でも UHPFRC を用いた様々な補修・補強技術が開発・検討され、実績も広がっている<sup>12) ~17)</sup>。

このように、世界的にみても UHPFRC は補修・補強の分野で益々適用が広がっていくことや、現場打ち施工や鉄筋コンクリートとしての設計も想定していることを鑑みると、特に耐久性に関する課題の理解とその解決に向けた取組み、事例共有の場を広げていくことが必要となる。しかしながら、実験データや実績が少ないこともあり、優れた性能を十分に活かした設計法の確立は必ずしも進んでいない。

本研究は、このような背景のもと、UHPFRC が現場打ちを含む一般的なコンクリートと同じような施工がなされた場合の特徴や留意点を明らかにするとともに、ひび割れの発生を想定した場合の耐久性の確保・照査など、さらには今後の設計・施工法や維持管理手法の確立に資する知見を得ることを目的に、幅広く実験的検討を行った。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1-4 に示す。本論文では全 8 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

- ・ **第1章**では、本研究の背景および目的について述べた。
- ・ **第2章**では、UHPFRC が様々な温度環境で養生されることを鑑み、若材齢からの強度発現特性を明らかにするとともに、積算温度によって強度を推定する際の精度を上げるための新たな補正方法を提案した。
- ・ **第3章**では、UHPFRC の硬化体の細孔構造と耐久性に着目し、マスコンクリートなどによる高温履歴がこれらに与える影響について調査・分析を行った。また、5～10 年といった長期的なスパンでその推移を追跡調査した。
- ・ **第4章**では、UHPFRC を現場打ち施工で橋梁を建設するプロジェクトに向けて、想定される水平流動での流動距離の限界や、水平・鉛直打重ねの影響把握などを行った。また、第 2 章で提案した強度推定手法、第 3 章で取得した発熱特性を反映した温度ひび割れ対策など、プレキャスト部材の製作とは異なる観点での留意点も考慮しながら各種検討を行った。
- ・ **第5章**では、既設構造物や鉄筋などによって拘束を受けた UHPFRC のひび割れ抵抗性を評価するために、既存の JIS 規格試験および拘束度を任意に変化させることができる TSTM 試験によって各種養生条件における UHPFRC のひび割れ発生機構の検証と、ひび割れに対する余裕度を評価した。
- ・ **第6章**では、ひび割れが残留した UHPFRC の耐久性や力学的挙動への影響を明らかにすることを目的に、各種環境条件におけるマトリクス内の鋼繊維や合成繊維の健全性（劣化や変質）に着目した実験的検討を行った。
- ・ **第7章**では、今後の UHPFRC を用いた構造物の維持管理計画に資するデータ取得や試験方法の提案を目的に、ひび割れや断面欠損を模擬した供試体に対して補修を施した際の物質浸透抵抗性や力学特性の回復有無や程度を確認した。
- ・ **第8章**では、本論文のまとめおよび今後の課題について提示した。

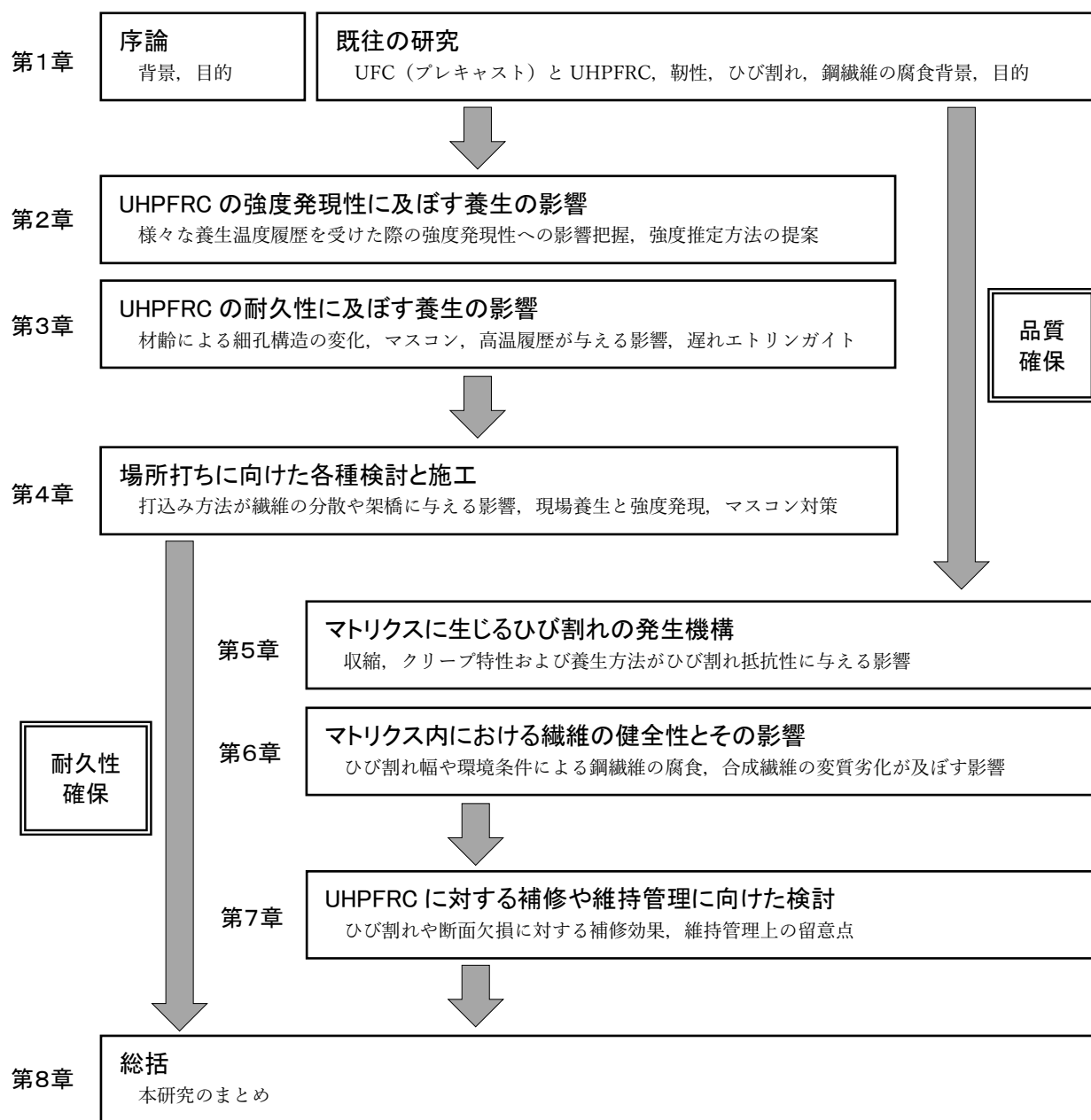


図 1-4 本論文の構成

## 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（第2期）委員会報告書，コンクリートライブラリー119，2018
- 2) Talayeh.N：Structural Response of R-UHPFRC-RC Composite Members Subjected to Combined Bending and Shear，Doctoral thesis No.5246，École Polytechnique Federale de Lausanne，2012
- 3) MCS EPFL：Recommendation：Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based composites(UHPFRC)，SIA 2052，2016
- 4) Rossi P.：Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes（UHPFRC）：An overview，Proceedings of Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes（FRC）BEFIB'2000，Lyon, France, pp.87-100，2000
- 5) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，2004
- 6) 武者浩透，大竹明朗，関文夫：無機系複合材料（RPC）を用いた酒田みらい橋の設計と施工，橋梁と基礎，pp.2-11，2002.11
- 7) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.3，2006（2011，2016年に更新）
- 8) 渡邊有寿，南浩郎，大野俊夫，三浦一浩：UFC床版製作におけるAFt系UFCの製造・品質管理，プレストレストコンクリート工学会第19回シンポジウム論文集，pp.289-292，2010
- 9) 河野克哉，川口哲生，武者浩透，小林忠司：プレストレストコンクリート橋に日本で初めて適用された超高強度繊維補強コンクリートの供用10年間の耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.262-267，2014
- 10) 渡邊有寿，柳井修司，宮口克一，藤原浩巳：超高強度繊維補強コンクリートの海洋環境暴露後の疲労特性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.217-222，2017
- 11) スイス連邦工科大学ローザンヌ校HP：UHPFRC Map Switzerland，  
<https://www.epfl.ch/labs/mcs/mcs-laboratory-for-maintenance-and-safety-of-structures/uhpfr-map-switzerland/>
- 12) 港湾空港技術研究所：UHP-SHCCの巻立てによる栈橋の鋼管杭頭部の構造性能評価，港湾空港技術研究所資料No.1295，2014
- 13) 平田隆祥，石関嘉一，武田篤史，小澤武史：常温硬化型UFCの現場打設による護岸構造物のリニューアル，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.1249-1254，2014
- 14) 角間恒，岡田慎哉，西弘明，松井繁之：超高性能繊維補強コンクリートで断面修復したRC部材の曲げ耐荷性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1219-1224，2015
- 15) 柳井修司，渡邊有寿，牧田通，北川寛和：超高強度繊維補強コンクリートの道路床版打替え工法への適用に関する研究，プレストレストコンクリート工学会第26回シンポジウム論文集，pp.469-474，2017

- 16) Brühwiler, E. : “Structural UHPFRC” ; Welcome to the post-concrete era!, Proceedings of the First International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Des Moines, Iowa, July 18-20, 2016
- 17) 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

## 第2章

UHPFRC の強度発現性に及ぼす

養生の影響





## 第2章 UHPFRC の強度発現性に及ぼす養生の影響

### 2.1 はじめに

超高性能繊維補強セメント系複合材料（以下、UHPFRC）が現場にて打設される場合、施工の過程で必要な強度に対して打設時期や養生設備等の現場条件から様々な温度にて養生されることが想定される。この場合、養生方法が強度発現に及ぼす影響について把握し、その強度発現性を推定することは施工管理をする上で重要である。また、水和反応が活発な若材齢を含めた引張強度や静弾性係数の発現特性を明らかにすることは、ひび割れ発生リスクを検証・照査する上でも重要である。

本章では、打設時期や養生設備等の現場条件を考慮して、練上り温度、養生温度および養生時間をパラメータとした実験を行い、練上り直後から材齢を追って強度試験を実施した。また、強度発現性を積算温度で定式化することを試みた。

### 2.2 実験概要

#### 2.2.1 UHPFRC について

本章で検討した UHPFRC の配合を表 2-1 に示す。マトリクスは、ポルトランドセメントとポゾラン材およびエトリンガイト生成系混和材で構成された結合材、2.5mm 以下に粒度調整された細骨材（砕砂）からなる。これに、長さが 15mm および 22mm の補強用鋼繊維（引張強度 2,000N/mm<sup>2</sup> 以上で直径が 0.2mm）が混入されている。混和剤は、低水セメント比のコンクリートに適したポリカルボン酸系高性能減水剤を使用している。

本章では、以降 AFt 系 UHPFRC と称する。

表 2-1 AFt 系 UHPFRC の配合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					補強用* <sup>5</sup> 鋼繊維 (kg)
		水* <sup>1</sup>	結合材* <sup>2</sup>	骨材* <sup>3</sup>	高性能* <sup>4</sup> 減水剤	消泡剤	
15.2	2.0	195	1,287	905	32.2	6.4	137.4 (1.75vol%)

\*1：高性能減水剤の水分を含む

\*2：プレミックス粉体，密度 2.98g/cm<sup>3</sup>

\*3：砕砂，表乾密度 2.66g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.18%

\*4：ポリカルボン酸系

\*5：φ0.2mm，引張強度 2,000N/mm<sup>2</sup> 以上，L=15mm，22mm，密度 7.85g/cm<sup>3</sup>

2.2.2 実験条件および水準

(1) 温度

本実験では、現場で想定される条件として、気候に左右される温度条件および施工条件（設備、期間）を考慮し、表 2-2 に示す水準、パターンで実験を行った。養生は打設後からの一次養生（気中封かん 24 時間）とその後に実施する二次養生（水中封かん N 日）を連続的に行った。なお、プレキャスト部材を想定した Case0（蒸気養生）を除き、外部からの水分供給が無いよう封かん養生とした。

表 2-2 検討水準

Case	目標練上り温度		一次養生		二次養生		試験材齢（注水から）*4															
	環境温度	温度	温度	時間	温度	時間	15h	18h	21h	1日	2日	3日	4日	6日	7日	8日	11日	28日	56日	91日		
0	20°C	20°C	20°C	1日	85°C	24h*1	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	△	-	-		
1	15°C	10°C	-（蒸気養生せず）				○	○	○	○	○	○	-	-	○	-	-	-	-	-		
2	20°C	20°C	-				○	○	○	○	○	○	-	-	○	-	-	○	-	-		
3	30°C	30°C	-				○	○	○	○	○	○	-	-	○	-	-	○	-	-		
4	20°C	20°C	20°C	1日	40°C*2	1日	-	-	-	-	●	-	-	-	△	-	-	△	-	-		
						2日	-	-	-	-	-	●	-	-	△	-	-	△	-	-	-	
						3日	-	-	-	-	-	-	●	-	△	-	-	△	-	-	-	
						5日	-	-	-	-	-	-	-	●	△	-	-	△	-	-	-	
						7日	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	△	-	-	
						10日	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	△	-	-
5	20°C	20°C	20°C	1日	60°C*3	1日	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-	△	-	△	
						2日	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-	△	-	△
						3日	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	△	-	△
						5日	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	△	-	△
						7日	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	△	-	△

\*1：蒸気養生（昇温15°C/h，最高温度85°C，最高温度保持24h，降温2°C/h）

\*2, 3：40°C, 60°Cの水槽から試験材齢時に回収（徐冷はしない）

\*4：●印まで二次養生温度で養生し強度試験。●印の材齢以後、環境温度20°Cで養生し△印の所定材齢で強度試験

○印は温度一定で養生し強度試験

(2) 試験項目

試験項目を表 2-3 に示す。練上り時のフレッシュ性状を確認するとともに、圧縮強度試験、曲げ強度試験、割裂引張強度試験用の供試体を採取した。

表 2-3 試験項目

試験項目	試験方法	
フレッシュ性状 (練上り直後)	フロー	JIS R 5201（落下なし）
	空気量	JIS A 1128
	練上り温度	JIS B 7411（温度計による）
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108 寸法 φ100×h 200mm
	静弾性係数	JIS A 1149
	曲げ強度	JIS A 1106 寸法 □100×400mm
	割裂引張強度	JIS A 1113 寸法 φ100×h150mm

2.3 実験結果および各種特性

2.3.1 フレッシュ特性

フレッシュ性状の測定結果を表 2-4 に示す。高性能減水剤の添加率を一定とした今回の実験では、練上り温度が高い場合にはフローが小さくなる結果となった。

表 2-4 フレッシュ試験結果

Case	目標練上り温度 (環境温度)		練上り温度 (°C)	フロー (mm)	空気量 (%)
0	20°C	環境温度：20°C	23.1	304×291 (298)	3.4
1	15°C	環境温度：10°C	15.7	306×305 (306)	2.9
2	20°C	環境温度：20°C	23.1	304×291 (298)	3.4
3	30°C	環境温度：30°C	30.1	267×260 (264)	3.7
4	20°C	環境温度：20°C	23.1	304×291 (298)	3.4
5	20°C	環境温度：20°C	27.2	269×264 (267)	3.9

\*試験値は補強用鋼繊維を混入した後のもの

\* ( ) 内はフローの平均値

2.3.2 凝結特性

Case1~3 における AFt 系 UHPFRC の凝結時間を表 2-5 に示す。総じて練上り温度や環境温度が高い方が凝結時間は早まる傾向となる。環境温度 20°C との差で比較すると、30°C については始発・終結の両者は 1 時間に満たない差である。一方、10°C については、始発から終結までの時間が 1.5 時間ほどに広がっている。

表 2-5 AFt 系 UHPFRC の凝結特性

Case	練上り 温度	環境 温度	凝結時間					
			始発	差	終結	時間差 (始-終)		
1	15.7	10°C	7.2h	> 1.6h	11.5h	> 3.1h	4.3h	> 1.5h
2	23.1	20°C	5.6h		8.4h		2.8h	
3	30.1	30°C	4.7h	> 0.9h	7.8h	> 0.6h	3.1h	> 0.3h

## 2.3.3 自己発熱特性

Case 1～4において、供試体に熱電対を設置し、中心温度を注水から計測した。計測結果を図 2-1 に示すが、寸法が  $\phi 100 \times h200\text{mm}$  の小型であっても、AFt系 UHPFRC は自己の水和発熱により温度上昇が生じていることが分かる。水和発熱のピークは注水から 15～17 時間後（約 0.6～0.7 日後）であり、練上り温度や環境温度（一次養生温度）が高いほど、発熱のピーク時間は早くなる傾向が見られ、前述の凝結時間との相関性も認められる。

また、練上り温度や一次養生温度が高いほど発熱量が大きく、一次養生温度が  $20^\circ\text{C}$  の場合は練上り温度から  $9^\circ\text{C}$  上昇し、 $30^\circ\text{C}$  の場合は  $21^\circ\text{C}$  上昇した。これらのことから、AFt系 UHPFRC は自己の水和発熱温度が高く、その発熱速度および上昇量は練上り温度、養生温度に大きく依存することが明らかとなった。

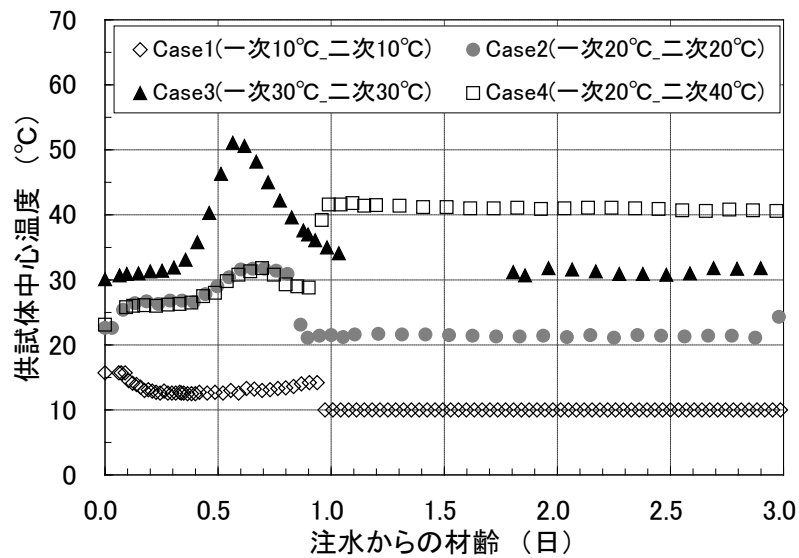


図 2-1 供試体 ( $\phi 100 \times 200$ ) の中心温度

2.3.4 硬化特性

2.3.4.1 圧縮強度の発現

各環境温度における材齢と圧縮強度の関係を図 2-2 に示す。常温域である Case 2, 3 (20, 30°C養生) においては練上りから約 20 時間で約 80~100N/mm<sup>2</sup> まで急激に強度増進し, 100N/mm<sup>2</sup> 以降は緩やかに強度が伸びていく傾向が見られた。また, 圧縮強度 150N/mm<sup>2</sup> に達する材齢で比較すると, 20°Cおよび 30°C養生では 28 日 (672h), 40°C養生で 3 日 (72h), 60°C養生で 2 日 (48h) であった。養生温度が高いほど強度発現が早いのは一般的なコンクリートと同様の傾向であるが, 10°Cの差ではあるが 30°C養生と 40°C養生には 150N/mm<sup>2</sup> 到達に要する時間に大きな差がある。低水セメント比すなわち単位結合材量が多いとセメント粒子間の距離が小さく若材齢時から水和反応が活発だが, 水和反応の温度依存性が高いことが既往の研究<sup>1)</sup>で報告されているが, UHPFRC にも同様のことが関係しているものと推察される。

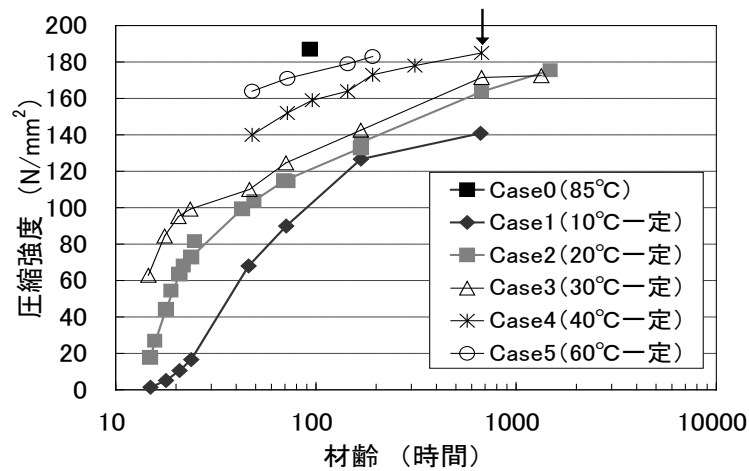


図 2-2 圧縮強度の発現(↓部:材齢 28 日)

2.3.4.2 ひび割れ発生強度と曲げ強度の発現

Case 2 (20°C養生)における材齢 7 日までの割裂ひび割れ発生強度および曲げ強度を図 2-3 に示す。割裂ひび割れ発生強度は材齢 1 日までに 4.0N/mm<sup>2</sup> まで達し, 材齢 7 日で 6.4N/mm<sup>2</sup> に達した。

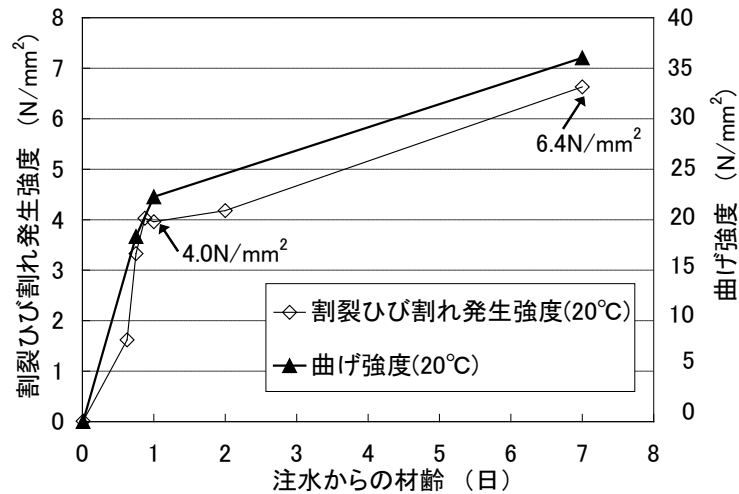


図 2-3 割裂ひび割れ発生強度および曲げ強度の発現(材齢 7 日まで)

## 2.4 強度発現特性の定式化

### 2.4.1 目的および概要

AFt 系 UHPFRC の強度発現特性は、練上り温度、養生温度および養生時間に影響を受けることが前節からも明らかとなったが、例えばプレストレス導入、架設および線閉開放時など施工時に必要な強度を精度良く推定することは施工計画・管理をする上で重要である。また、UHPFRC は一般に単位結合材量が非常に多い材料であるため、部材寸法によっては温度ひび割れが懸念される場合があり、温度応力解析を精度よく行うためにも強度発現特性を定式化しておく必要がある。

本検討では AFt 系 UHPFRC の強度推定式の提案を目的とし、積算温度を指標として圧縮強度の発現を推定することを試み、その適用性を検討した。

### 2.4.2 圧縮強度との関係

#### 2.4.2.1 ひび割れ発生強度

Case 2 (20°C一定) における (割裂) ひび割れ発生強度と圧縮強度の関係を図 2-4 に示す。今回の実験における AFt 系 UHPFRC のひび割れ発生強度は圧縮強度が 100N/mm<sup>2</sup> までは土木学会コンクリート標準示方書式<sup>2)</sup>に近いが、100N/mm<sup>2</sup> を超えると示方書式を大きく上回り、圧縮強度とひび割れ発生強度には次式(1)に示すような線形関係が見られた。

本実験式は、圧縮強度の特性値が 180N/mm<sup>2</sup>、ひび割れ発生強度の特性値が 8.0Nmm<sup>2</sup> である超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を鑑みても妥当な推定精度を有していると判断された。

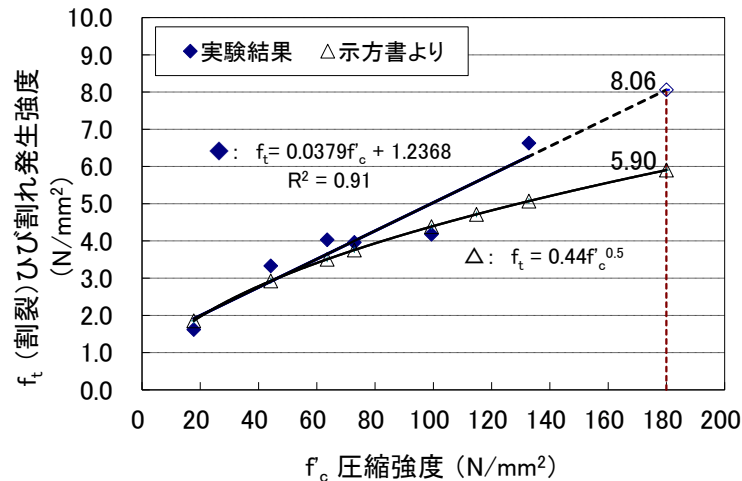


図 2-4 圧縮強度と(割裂)ひび割れ発生強度の関係

$$f_{cr} = 0.0379f'_c + 1.2368 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $f_{cr}$  : ひび割れ発生強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f'_c$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

2.4.2.2 静弾性係数

Case 2 (20°C一定) における圧縮強度と静弾性係数の関係を図 2-5 に示す。実験結果に対して、同一のマトリクスであるエトリングait生成系の超高強度繊維補強コンクリート (AFt系 UFC) の関係式<sup>3)</sup>を重ねると、同式で若材齢時の静弾性係数も圧縮強度を指標として推定可能であることが分かった。

$$E_c = 1.77f_c^{0.64} \tag{2}$$

ここで、 $E_c$  : 静弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

$f_c$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

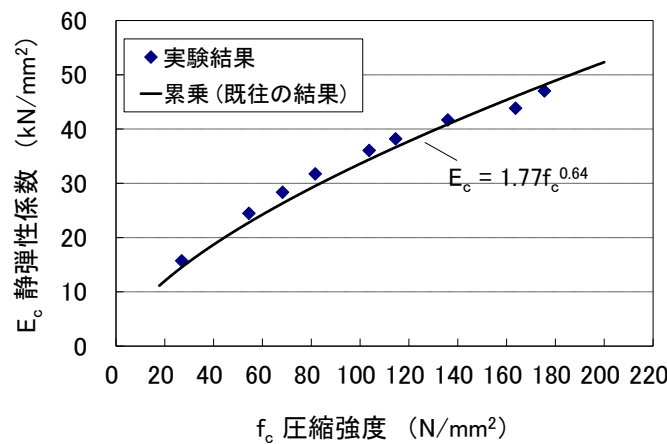


図 2-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

なお、材料ロット (年次) が異なる際にも同様に圧縮強度と静弾性係数の関係を把握したが、前述と同じ関係性を保持していることを確認した (図 2-6)。

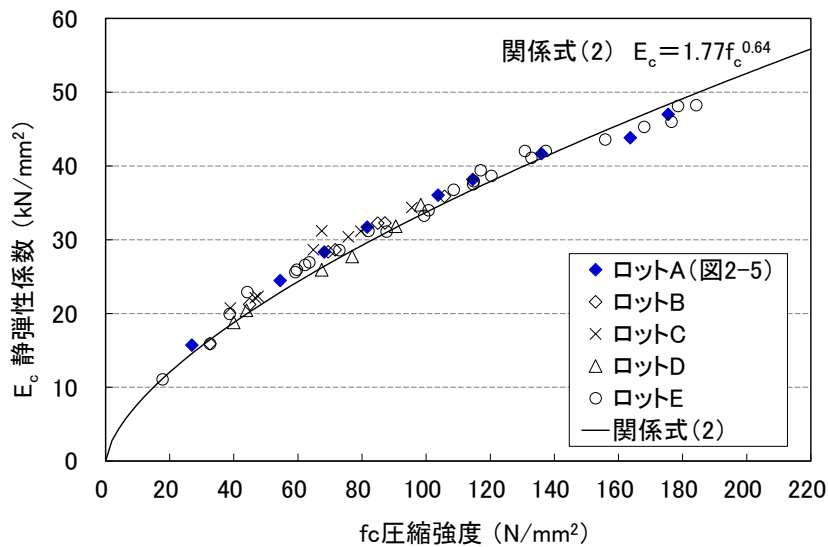


図 2-6 圧縮強度と静弾性係数の関係 (ロットによる影響確認)

## 2.4.3 圧縮強度の推定

## 2.4.3.1 積算温度法による整理

既往の研究<sup>3)</sup>では、同一のマトリクスである AFt 系 UFC の圧縮強度は、120N/mm<sup>2</sup>以下の範囲では、高性能減水剤の添加率ごとではあるが、一般的なコンクリートの強度推定と同様に式(3)のような-10°Cを基準温度とする積算温度法(マチュリティ則)で推定できるとされている。本推定式は、プレキャスト部材を製作する際のプレストレス導入時の圧縮強度(30~100N/mm<sup>2</sup>)を予測することを主目的としており、圧縮強度が限られた範囲でのものである。

$$M = \int_0^t (T + 10) dt \quad \text{式(3)}$$

ここで、M：積算温度 (°C・h)

T：部材温度 (°C)

t：温度 T (°C) である期間 (h)

全ケースにおける圧縮強度と-10°Cを基準温度とする積算温度の関係を図2-7に示す。図のように、圧縮強度と積算温度の関係を1つの式で近似すると、ある程度の相関が見られるが、各養生条件における圧縮強度を1つの関係式によって高い精度で推定できるまでには至っておらず、圧縮強度を精度良く推定するためには、いくつかの条件設定が必要であると判断した。

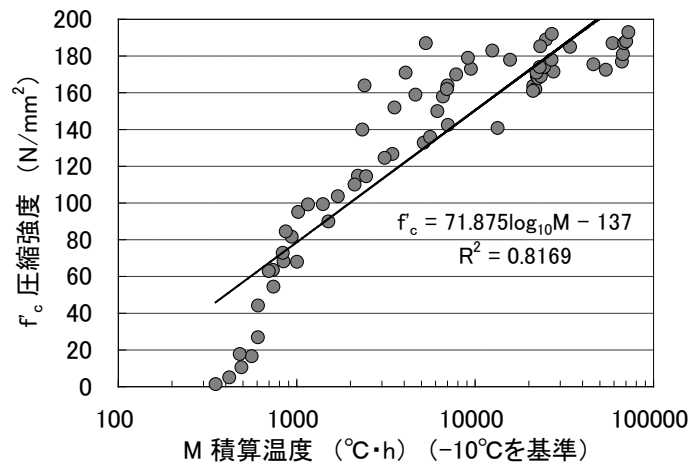


図 2-7 圧縮強度と積算温度(-10°C基準)の関係



次に、前述の圧縮強度と積算温度との関係を養生温度ごとに凡例分けし（図 2-8）、20°Cの養生条件の結果を基本パターンとして考察する。

養生温度が 10°C の場合、基本パターンに比べて同じ積算温度でも圧縮強度が小さくなっており、強度発現が遅いことがわかる。また、養生温度 30°C の場合、圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup> に到達する積算温度が基本パターンよりもわずかに早いことが分かる。また、養生温度 40°C、養生温度 60°C、養生温度 85°C（蒸気養生）の場合はいずれも基本パターンよりも強度発現が早く、30°C よりも 40°C、40°C よりも 60°C、60°C よりも 85°C と同じ圧縮強度を得るのに必要な積算温度が小さくなっている。

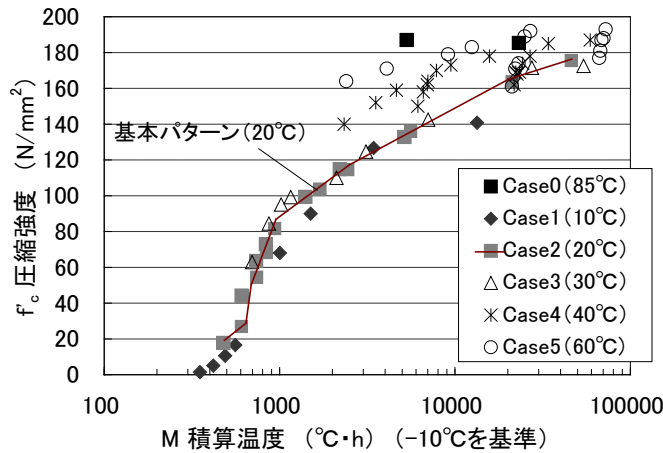


図 2-8 圧縮強度と積算温度の関係(養生温度ごとに凡例分け)

次に、Case 4 に着目し、40°C の時間を变化させた場合の積算温度と圧縮強度の関係を図 2-9 に示す。ここで、Case 4 は所定の二次養生時間（養生温度 40°C）を終了した後は 20°C で養生し、所定の材齢で強度試験を行っている。図より、同じ材齢（ $f_7$  や  $f_{28}$ ）でも 40°C 養生の時間が長いほど圧縮強度が大きい結果となった。また、40°C 養生が終了し、20°C 養生に切り替えた後（表 2-2 の△印）の強度増進（図中直線の勾配）は、40°C 養生時間が短い方が大きい結果となった。これは、材齢初期に与えられる積算温度が小さいほど水和反応が進行しておらず、その後の強度増進に繋がったものと推察される。

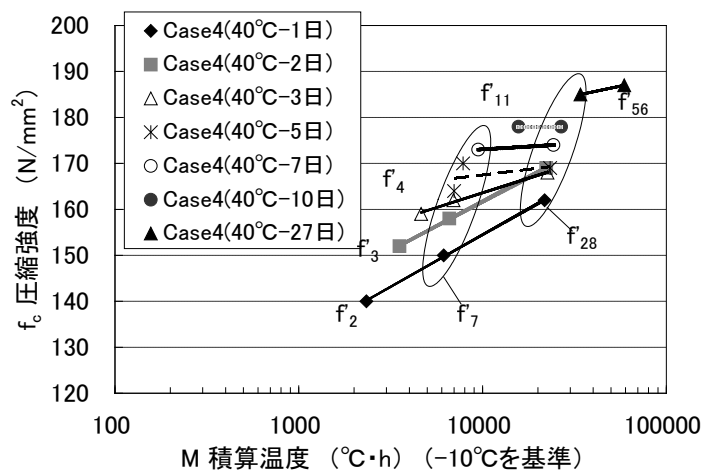


図 2-9 圧縮強度と積算温度の関係(Case 4)

2.4.3.2 領域分けによる評価

以上より、UHPFRC のもつ温度依存性が圧縮強度と積算温度の関係を 1 つの式で評価することを困難にしている要因と考え、いくつかの領域に分けて評価してみることにした。

ここで、図 2-10 は、Case 2 (20°C一定) と同条件で AFt 系 UHPFRC の自己収縮を計測した結果である。まず、凝結始発から収縮が急激に進むが、終結を過ぎた注水から約 0.5 日あたりに 1 つ目の変曲点を迎え、この段階で圧縮強度は 30 N/mm<sup>2</sup> に達した。次に材齢 2 日に 100 N/mm<sup>2</sup> を迎えるあたりに 2 つ目の変曲点を迎えている。

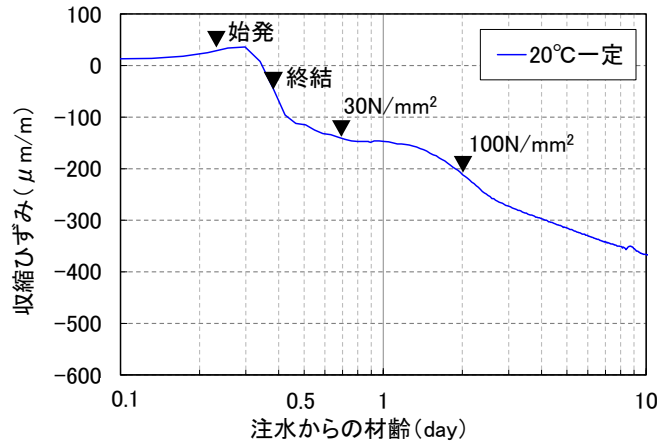


図 2-10 AFt 系 UHPFRC の自己収縮ひずみ(20°C一定)

本研究では、この 2 つの変曲点を水和反応の速度が移り変わる部分であると判断し、セメントが水に接してから 30N/mm<sup>2</sup> に到達するまでの範囲を「水和初期」、30N/mm<sup>2</sup> から 100N/mm<sup>2</sup> までの強度増進が著しい範囲を「加速期」、100N/mm<sup>2</sup> 以降の緩やかに強度増進している範囲を「漸増期」と称し、これら 3 つの領域について近似式を作成した。

領域分けした場合の圧縮強度と積算温度の関係を図 2-11 に示す。当然の結果だが、図 2-7 に比べて推定精度が向上したが、各領域の近似式の相関がまだ低いこと、3 つの近似式が相互に連続していないといった課題が残った。

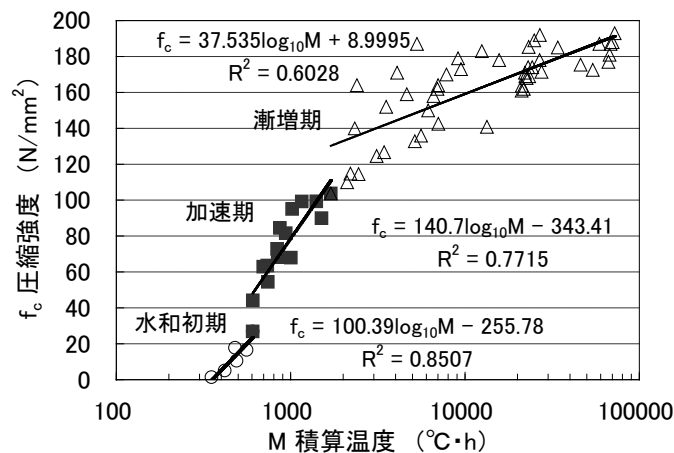


図 2-11 圧縮強度と積算温度の関係(領域別)

## 2.5 圧縮強度発現の推定精度向上

### 2.5.1 推定方法について

コンクリートの圧縮強度の推定方法のひとつに、先に示した積算温度法（マチュリティ則）のほかに、式（4）のようにアレニウス則に基づいた方法も提案されている。アレニウス則は様々な温度履歴を受けた材齢を、基準温度の材齢（等価材齢）に換算するものである。近年ではセメントの水和反応速度がアレニウス則に従うとし、超高強度コンクリートの収縮特性や C<sub>3</sub>S 系セメントとポゾラン質微粉末を用いた超高強度繊維補強コンクリート（UFC）の強度発現性を予測した報告<sup>4)5)</sup>もある。

$$t_e = \int_0^t \exp \left[ \frac{U_h}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] dt \quad \text{式(4)}$$

ここで、 $t_e$ ：等価材齢（日）

$U_h$ ：見かけの活性化エネルギー（kJ/mol）

$R$ ：気体定数（8.31J/mol/K）

$T_0$ ：基準温度（293K）

$T$ ：部材温度（K）

本研究では、現場にて様々な養生温度にて UHPFRC を施工する際の利便性や簡便性を鑑み、温度と時間で簡便に表すことができる積算温度法を引き続き採用して、これによる推定精度の向上を試みる方針とした。

## 2.5.2 積算温度法における基準温度の提案

AFt 系 UHPFRC はこれまで示したように、初期に受ける養生温度が高いほど同一の積算温度でも高強度に達する。従来積算温度のように、基準温度を「 $-10^{\circ}\text{C}$ 」一定で評価すると、養生温度が異なる場合には同じ積算温度でも圧縮強度に大きな差が生じてしまう。一般に基準温度「 $-10^{\circ}\text{C}$ 」は、 $-10^{\circ}\text{C}$ 以下では水和反応が生じないことに基づくものであるが、AFt 系 UHPFRC の圧縮強度をあくまで積算温度を指標として推定することを目標に、式(5)に示す方法で簡易的に積算温度を修正することとした。

$$M' = \int_0^t (T - B) dt \quad \text{式(5)}$$

$$B = -10 \times 2^{a-1}$$

ここで、 $M'$ ：修正積算温度 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ )

$T$ ：部材温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$B$ ：部材温度の補正值 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$a$ ：係数 ( $a = \text{部材温度} \times 0.1$ )

$t$ ：温度  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) である期間 ( $\text{h}$ )

表 2-6 基準温度の補正

部材温度*1	係数*2 a	基準温度の補正值 B
10 $^{\circ}\text{C}$	1.0	-10 $^{\circ}\text{C}$
20 $^{\circ}\text{C}$	2.0	-20 $^{\circ}\text{C}$
30 $^{\circ}\text{C}$	3.0	-40 $^{\circ}\text{C}$
40 $^{\circ}\text{C}$	4.0	-80 $^{\circ}\text{C}$
50 $^{\circ}\text{C}$	5.0	-160 $^{\circ}\text{C}$
60 $^{\circ}\text{C}$	6.0	-320 $^{\circ}\text{C}$
85 $^{\circ}\text{C}$	8.5	-1810 $^{\circ}\text{C}$

\*1：コンクリートが実際に受けた温度

\*2：部材温度の間の係数は直線補間

なお、補正值を設定するにあたっては、例えば、鉄筋近傍のモルタルの内部温度と腐食速度比においても温度が  $10^{\circ}\text{C}$  変化すると速度比は平均 1.9 となる<sup>6)</sup>ことも報告されていることなど、アレニウス則の中でも材料の寿命予測に一般的に使われている、いわゆる「 $10^{\circ}\text{C}$ -2 倍則」を参考とした。

本手法で算定した修正積算温度と圧縮強度の関係を図2-12に示す。なお、基準温度の補正值Bは、AFt系UHPFRCが受けた温度履歴（部材温度）から算定しているが、Case 0, Case 4およびCase 5のように養生温度が途中で変わる場合も考慮している。図より、修正積算温度を用いた場合には「水和初期」、「加速期」および「漸増期」の各領域において、従来の基準温度（-10°C一定）を用いた場合（図2-11）よりも相関係数が高くなっていることがわかる。

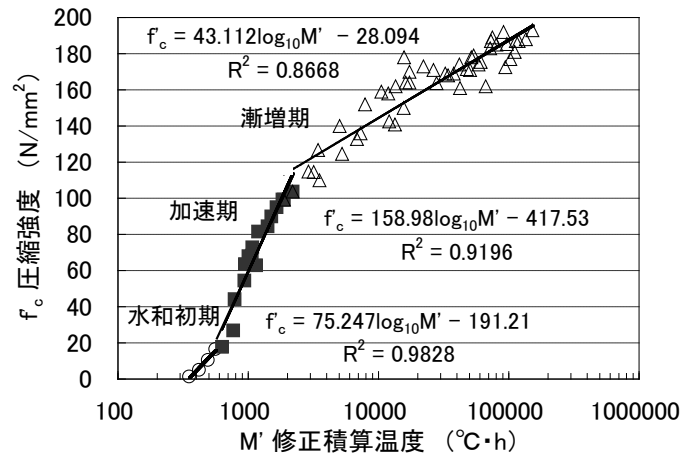


図2-12 修正積算温度と圧縮強度の関係(領域別)

以上より、部材の温度をもとに基準温度を補正する修正積算温度を指標として用いることで、養生温度を変化させた場合でもAFt系UHPFRCの強度を簡便かつ精度よく推定することが可能であると判断された。

本検討で得られた修正積算温度と圧縮強度の関係を以下に示す。

- ・  $M' \leq 505$  の場合（水和初期）

$$f_c' = 75.247 \times \log_{10} M' - 191.21$$

- ・  $505 < M' \leq 2296$  の場合（加速期）

$$f_c' = 158.98 \times \log_{10} M' - 417.53$$

- ・  $2296 < M'$  の場合（漸増期）

$$f_c' = 43.112 \times \log_{10} M' - 28.094$$

式(6)

得られた推定式から算出した圧縮強度の推定値と実測値の関係を図 2-13 に示す。図より、本検討で提案した修正積算温度を用いることにより、大きな誤差を生じることなく実際の圧縮強度を推定できることがわかる。

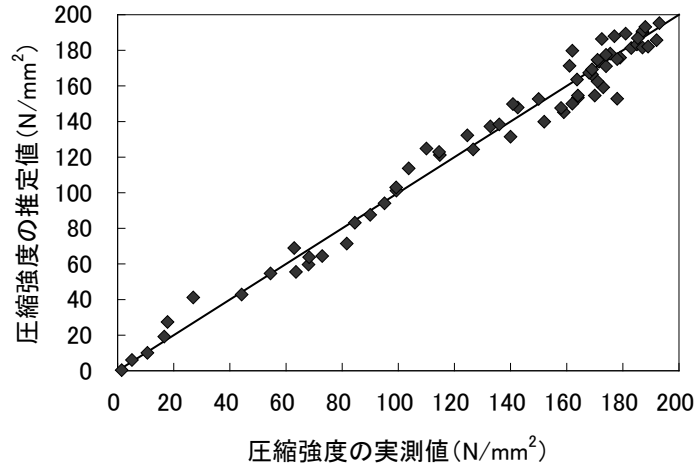


図 2-13 圧縮強度の実測値と推定値

## 第2章のまとめ

本章では、打設時期や養生設備等の現場条件を考慮して、練上り温度、養生温度および養生時間をパラメータとした実験を行い、練上り直後から材齢を追って強度試験を実施した。また、強度発現性を積算温度で定式化することを試みた。

- ・ エトリンナイト生成系 UHPFRC は、自己の水和熱が大きく、その発熱温度および温度上昇量は練上り温度、養生温度に大きく依存する。
- ・ 圧縮強度は従来の積算温度法（ $-10^{\circ}\text{C}$ 基準）である程度までは推定できるが、若材齢時の強度を推定するには精度に課題がある。
- ・ 現場にて UHPFRC を施工する際の利便性や簡便性を鑑み、積算温度法に対して深掘り・改善を試み、部材温度をもとに基準温度を補正する修正積算温度を用いることで、強度発現を比較的精度よく推定することが可能となった。
- ・ UHPFRC の凝結時間や収縮計測による変曲点を判断材料に、圧縮強度が  $30\text{N}/\text{mm}^2$  に到達するまでの範囲を「水和初期」、 $30\text{N}/\text{mm}^2$  から  $100\text{N}/\text{mm}^2$  までの強度増進が著しい範囲を「加速期」、 $100\text{N}/\text{mm}^2$  以降の緩やかに強度増進している範囲を「漸増期」と定義し、これら3つの領域について近似式を作成して強度推定の精度を向上させた。
- ・ ひび割れ発生強度および静弾性係数は圧縮強度と高い相関関係がある。そのため、これらは圧縮強度を指標として若材齢から推定可能である。

参考文献

- 1) 丸山一平, 野口貴文, 松下哲郎: ポルトランドセメントの水和反応モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第593号, pp.1-8, 2005.7
- 2) コンクリート標準示方書[施工編]-2002年制定-, 土木学会, 2002.1
- 3) 柳井修司, 松原功明, 相澤一裕, 芦田公伸: 超高強度繊維補強コンクリートの強度特性に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1259-1264, 2006.6
- 4) 寺本篤史, 丸山一平, 三谷裕二, 谷村 充: 低水結合材比シリカフェュームセメントペーストの自己収縮性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.601-606, 2009
- 5) 桐山宏和, 丸屋英二, 大西利勝, 平田隆祥: 等価材齢を用いた超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.238-248, 2012
- 6) 三田村恒彦, 宮里心一: 気温変化を考慮したコンクリート中鉄筋の腐食速度推定手法の提案, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.58, No.8, pp.666-671, Aug.2009



## 第3章

UHPFRC の耐久性に及ぼす

養生の影響



## 第3章 UHPFRCの耐久性に及ぼす養生の影響

### 3.1 はじめに

第2章では、AFt系UHPFRCの強度発現特性を練上り直後から材齢を追って把握し、特に圧縮強度の推定を試みたが、硬化体の細孔構造に着目し、その推移を長期的な観点で把握することは耐久性を評価する上でも重要である。

UHPFRCは、その優れた力学特性と耐久性から部材厚や打込み厚を小さくできるという利点がある。一方で、一般的に単位結合材量が多いため、例えばPC構造物のケーブル定着部のような比較的断面寸法が大きい部材では、内部温度が著しく高くなることも想定される。また、プレキャスト工場で蒸気養生を行う場合でも、部材寸法と給熱のタイミングによっては、マトリクス自身の水和熱と相まって設定した養生温度以上に高温となることも想定される。

以上のように水和初期に高温履歴を受けたUHPFRCは硬化性状に悪影響を及ぼすことも懸念されることから、本章では、マスブロック試験体に対して各種養生履歴を与え、コア部材の圧縮強度、細孔構造および鉱物組成を確認した。さらには、5～11年といったスパンでその推移を追跡調査した。

### 3.2 UHPFRCの細孔構造と物質移動抵抗性

#### 3.2.1 使用材料および配合

本章で検討したUHPFRCは、2章と同様にエトリンガイト生成系のマトリクスから形成され、結合材量は $1287\text{kg/m}^3$ と非常に多い(表3-1)。結合材の化学成分は表3-2に示すとおりであり、シリカフュームほかポゾラン材が含まれている。

表 3-1 AFt系UHPFRCの配合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )					補強用 <sup>*5</sup> 鋼繊維 (kg)
		水 <sup>*1</sup>	結合材 <sup>*2</sup>	骨材 <sup>*3</sup>	高性能 <sup>*4</sup> 減水剤	消泡剤	
15.2	2.0	195	1,287	905	32.2	6.4	137.4 (1.75vol%)

\*1：高性能減水剤の水分を含む

\*2：プレミックス粉体、密度 $2.98\text{g/cm}^3$

\*3：砕砂、表乾密度 $2.66\text{g/cm}^3$ 、吸水率1.18%

\*4：ポリカルボン酸系

\*5： $\phi 0.2\text{mm}$ 、引張強度 $2,000\text{N/mm}^2$ 以上、 $L=15\text{mm}$ 、 $22\text{mm}$ 、密度 $7.85\text{g/cm}^3$

表 3-2 結合材の化学成分(AFt系UHPFRC)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
33.4	6.4	2.8	51.1	2.4	0.7

mass%

3.2.2 細孔構造の推移

まず、AFt系UHPFRCの細孔構造（空隙率）が時系列的にどのように変化していくかを把握、理解するために、水銀圧入式ポロシチメータにて測定した。ここで、試験に用いたサンプルは、第2章の20°C一定の養生条件（Case2）で採取した圧縮供試体から採取したものである。写真3-1に示すように、各材齢で実施した圧縮強度試験体の破片を2.5~5.0mmの粒子に破碎し、速やかにアセトンに浸漬させ水和がそれ以上進行しないよう処置を施した。なお、試料の寸法（骨材の影響）によって空隙量に差異が生じることを防ぐため、本研究では前述の破碎寸法に統一している。



写真 3-1 試験片のアセトン浸漬状況

細孔構造の測定結果を図3-1に示す。図より、AFt系UHPFRCの空隙率は材齢が進むにつれて（水和が進むにつれて）小さくなる傾向が見られ、特に10-100nmの細孔割合が減少し、3-6nmの細孔割合が増えて緻密になっていくことが分かる。また、最終強度である圧縮強度190N/mm<sup>2</sup>に達した段階の空隙率は4vol.%程度となった。

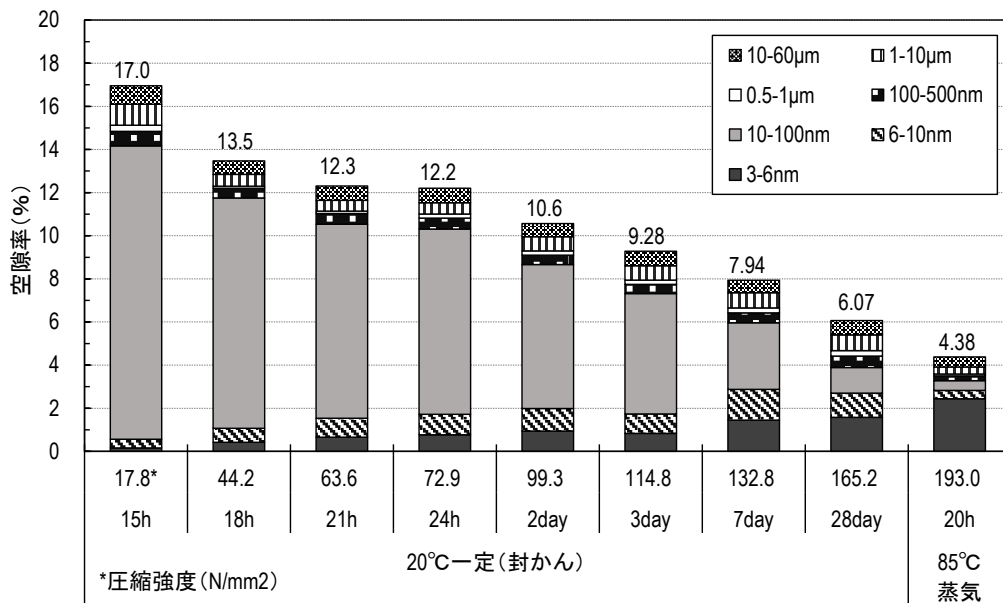


図 3-1 材齢による細孔構造の推移(2章 Case2:20°C養生)

## 3.2.3 物質移動抵抗性

圧縮強度が180N/mm<sup>2</sup>以上で、空隙率が4vol.%程度であるAFt系UHPFRC(W/B=15.2%)の耐久性の一例<sup>1)</sup>を表3-3に示す。表より、AFt系UHPFRCはW/C=30%の高強度コンクリートに比べても物質移動抵抗性が極めて高いことが分かる。

表3-3 AFt系UHPFRCの物質移動抵抗性の一例<sup>1)</sup>

項目	試験方法	結果	比較(参考)
塩化物イオン 浸透抵抗性	10%NaCl溶液浸せき (塩化物イオン濃度6%)	拡散係数 浸せき2ヶ月:0.0075cm <sup>2</sup> /年 浸せき6ヶ月:0.0032cm <sup>2</sup> /年 浸せき12ヶ月:0.0017cm <sup>2</sup> /年 浸せき30ヶ月:0.0018cm <sup>2</sup> /年	拡散係数 0.14cm <sup>2</sup> /年 (W/C=30%)
	JSCE-G571-2003 電気泳動法(6ヶ月間)	浸透深さ:6mm	22mm (W/C=30%)
透気係数	RILEM TC116-PCD	4.5×10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup>	1.0×10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> (W/C=30%)
凍結融解抵抗性	JIS A 1148 (A法)	4,500サイクルで 質量・相対動弾性係数低下なし	—
アルカリ骨材反応 抵抗性	JCI-AAR-3-1987 コンクリート法 (R <sub>2</sub> O=12.8kg/m <sup>3</sup> )	12ヶ月後の膨張率55×10 <sup>-6</sup> (≦1000×10 <sup>-6</sup> )	—
空隙量	水銀圧入式ポロシチメータ	4vol.%程度	10vol.%程度

### 3.3 高温履歴が及ぼす影響

#### 3.3.1 マスブロック試験体での検証その1(部材厚 50cm)

本検討では、PC 構造物のケーブル定着部など断面が大きい部材を想定して、図 3-2 に示す 1.0×1.0×厚さ 0.5m のマスブロック試験体を用意した。マスブロックに AFt 系 UHPFRC を打ち込んだ後は直ちに防災シートで囲い、3つのパターンで温度履歴を与えた。

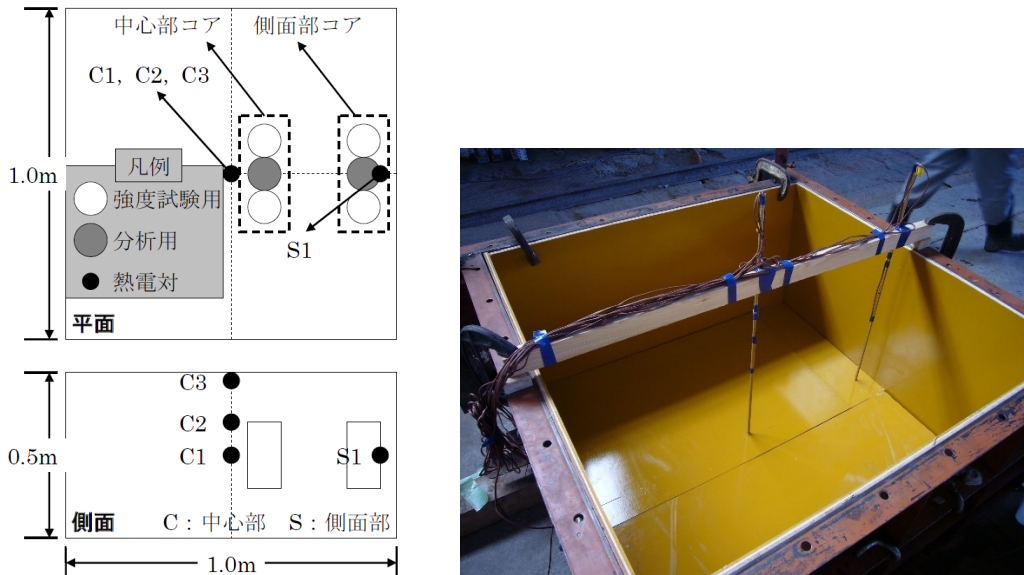


図 3-2 マスブロック試験体(1.0×1.0×厚さ0.5m)

ケース 1 は、温度履歴を与えずに、打込み完了からシート内での常温養生をしたもので、主に AFt 系 UHPFRC の発熱量ほか熱特性を把握することを目的としたものである。

ケース 2 およびケース 3 は、プレキャスト部材を工場で蒸気養生することを想定したものであり、図 3-3 に示すような 85°C の温度履歴を与えた。

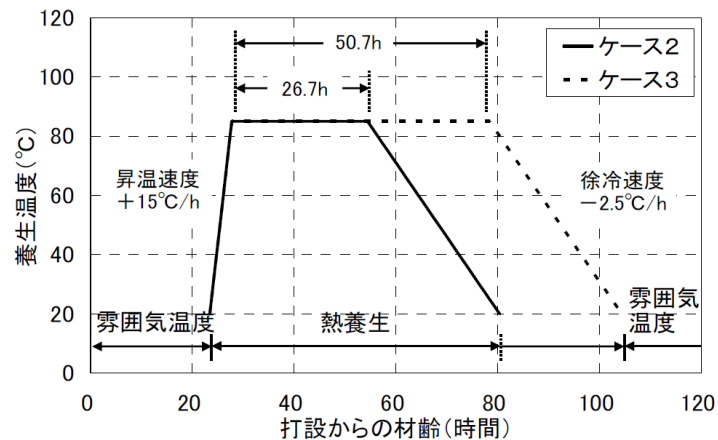


図 3-3 蒸気養生を想定した温度履歴  
(ケース 2:85°C-27h, ケース 3:85°C-51h)

3.3.1.1 水和熱の測定

(1) 常温養生

ケース1で計測された温度履歴を図3-4に示す。AFt系UHPFRCの水和熱の上昇は打込み完了から約10時間後に始まっているが、これは第2章で計測した凝結の終結時間とほぼ整合する結果であった。また、打込み完了から約24時間後に中心部の温度がピークを迎えた。

ここで、中心部の最高温度は81.1°Cであったが、3次元有限要素法による温度解析による逆解析(解析ソフト: ASTEA-MACS)では断熱温度上昇量は96.0°Cであると同定された。

図3-4には温度履歴を逆解析した結果も併記する。また、表3-4には解析に用いたAFt系UHPFRCの熱特性値を、断熱温度上昇式を式(1)に示す。

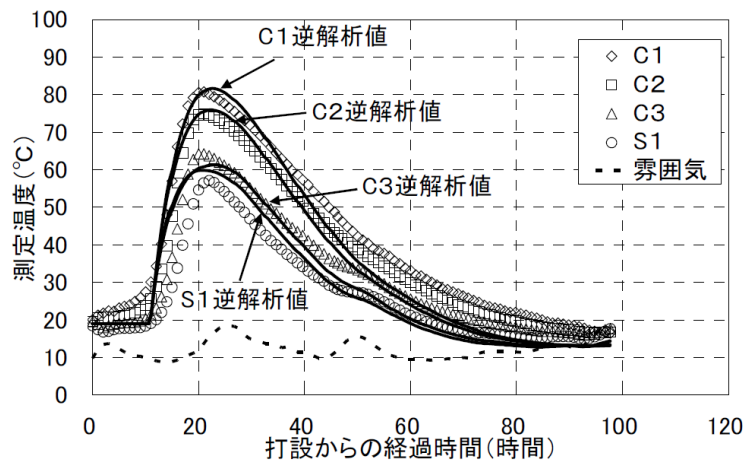


図3-4 ケース1の温度履歴(蒸気養生なし)

表3-4 AFt系UHPFRCの熱特性値(解析入力値)

項目	入力値
熱伝導率 (W/m°C)	1.77
比熱 (kJ/kg°C)	1.01
打込み温度 (°C)	19.0
熱伝達率 (W/m²°C)	合板型枠 8.0 打込み面 12.0

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-3.3(t - t_0)^{1.0}\}] \tag{1}$$

ここで、 $Q(t)$  : 温度 (°C)

$Q_{\infty}$  : 断熱温度上昇量 (°C) = 96.0

$t_0$  : 遅れ時間 (h) = 0.45

※凝結の始発時間に相当 (打込み完了から約10時間)

(2) 蒸気養生

ケース2およびケース3で計測された温度履歴を図3-5および図3-6に示す。蒸気養生を開始するタイミングは打込み完了から23時間後としたが、いずれのケースも自身の水和熱でピーク温度を迎えてからの蒸気養生となった。

両ケースとも蒸気養生の開始後に再び温度が上昇し、マスブロック上方のC2においては設定した蒸気養生温度(85°C)よりも高い92.5°Cに達した。

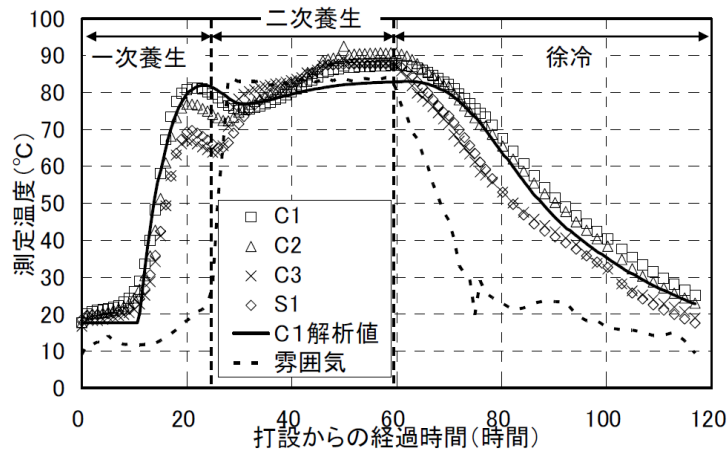


図3-5 ケース2の温度履歴(蒸気養生85°C-27h)

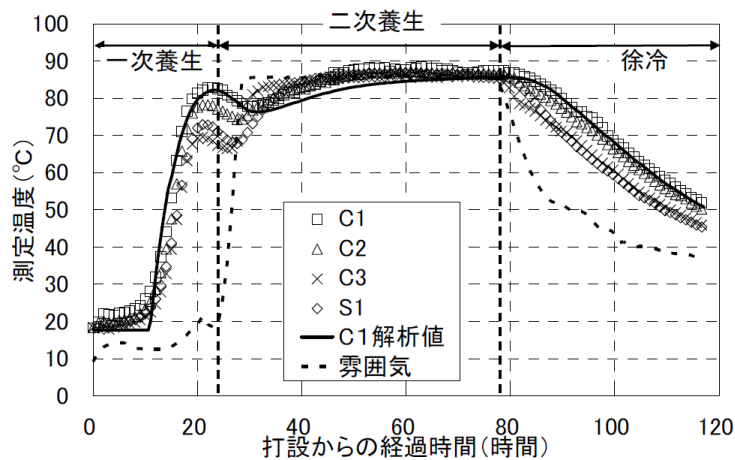


図3-6 ケース3の温度履歴(蒸気養生85°C-51h)

Aft系UHPFRCが断熱温度上昇量96°Cというポテンシャルを有していることを鑑みると、仮に1回目の温度ピークが確認される前に昇温を開始すると、1回目のピーク温度がさらに上昇することが懸念される。

そのため、部材厚50cm以上の断面の大きい部材を蒸気養生する場合には、養生時の発熱をできるだけ小さく抑えるために少なくとも1回目のピークが確認されてから昇温することが望ましい。



3.3.1.2 硬化体の分析

(1) 圧縮強度

ケース2およびケース3におけるコア供試体とテストピースの圧縮強度試験結果を図3-7に示す。コア供試体は材齢5日で採取し、直ちに圧縮強度試験に供した。両ケースの同一採取位置での強度は同等であった。また、蒸気養生時間がより長いケース3では、ケース2と比較して圧縮強度の増進は見られず、頭打ちになっている。

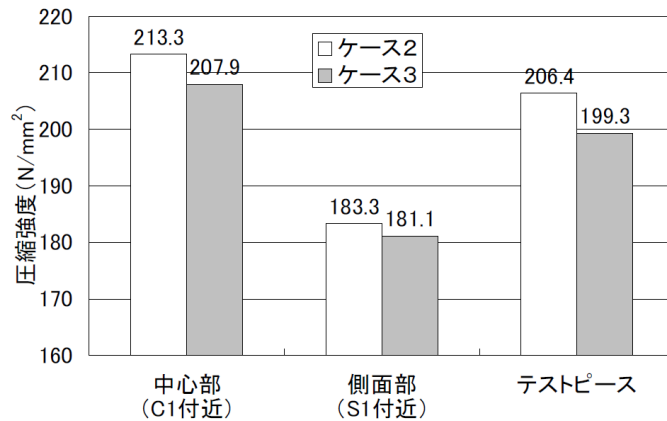


図 3-7 コア供試体およびテストピースの圧縮強度  
(ケース2: 85°C-27h, ケース3: 85°C-51h)

(2) 細孔構造

蒸気養生を行ったケース2およびケース3の細孔構造の測定結果を図3-8に示す。養生時間は異なるが、細孔径の割合はほぼ同等であり、図3-1のテストピースを養生した細孔構造と同様に良好な硬化体が形成されていると判断できる。

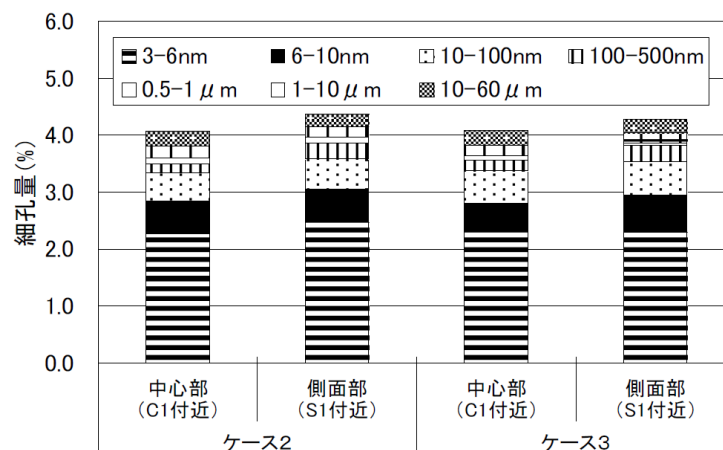


図 3-8 コア供試体の細孔構造測定結果

3.3.2 マスブロック試験体での検証その2(部材厚 1m)

本検討では、より断面の大きい部材を想定して、図 3-9 に示す 1.0×1.0×厚さ 1.0m のマスブロック試験体を用意した。写真 3-2 に示すようにマスブロックは、厚さ 50cm の断熱材(発泡スチロール)で覆った。打込み時の AFt 系 UHPFRC の温度は 32.8℃であった。

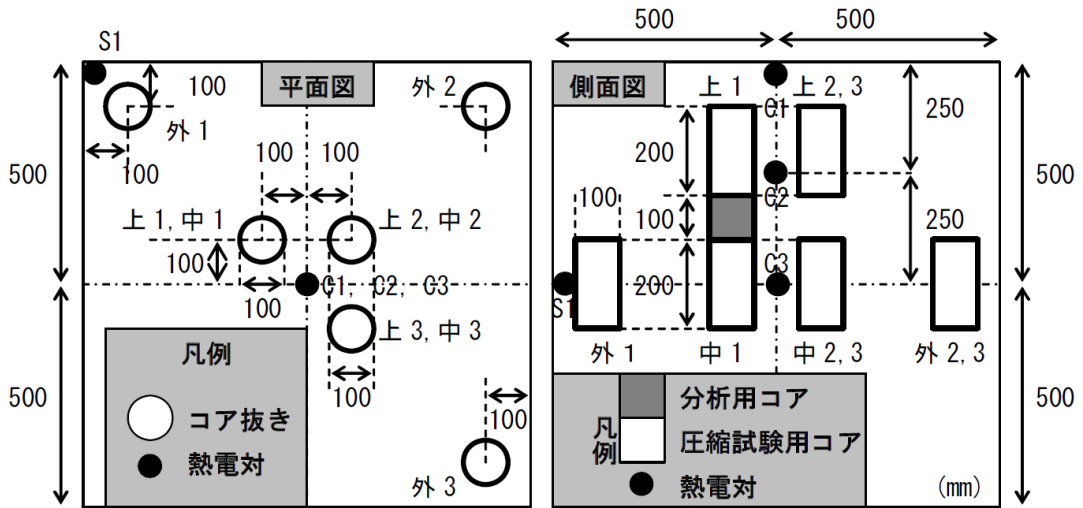


図 3-9 マスブロック試験体(1.0×1.0×厚さ 1.0m)



写真 3-2 マスブロック試験体の製作状況

3.3.2.1 水和熱の測定

打込みからの温度履歴を図3-10に示す。図に示すとおり、中心部(C3)の最高温度は123.3°Cに達した。打込み温度が32.8°Cであったことを考慮すると、温度上昇量は90.5°Cであった。

しかしながら、ピーク温度到達後の温度低下が早かったため打込みから31日後に断熱材を解体したところ、写真3-3に示すようにマスブロックの発熱によって上方の断熱材が溶けていた。

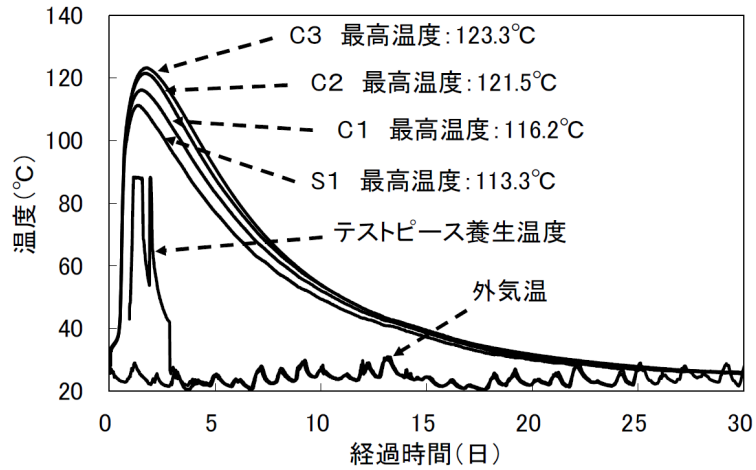


図3-10 温度履歴(マスブロックおよびテストピース)



写真3-3 マスブロック解体時の断熱材の状態

なお、マスブロックとは別に圧縮強度試験用のテストピースを蒸気養生したが、設備の故障により当初計画よりも短い時間となった(当初:85°C-24時間 → 実際:85°C-10時間)。

3.3.2.2 硬化体の分析

(1) 圧縮強度

最高温度とコア供試体の圧縮強度の関係を図3-11に示す。ここで、マスブロックの上方、中心、外側のそれぞれの最高温度は、「上：C2」, 「中：C3」, 「外：S1」を代表として採用した。

図に示すとおり、上・中心・外でばらつきはあるものの、おおむね最高温度が高いほど圧縮強度が大きい結果となった。また、いずれもコア強度は200N/mm<sup>2</sup>を超え、蒸気養生を行ったテストピースの強度187N/mm<sup>2</sup>よりも大きい結果となった。

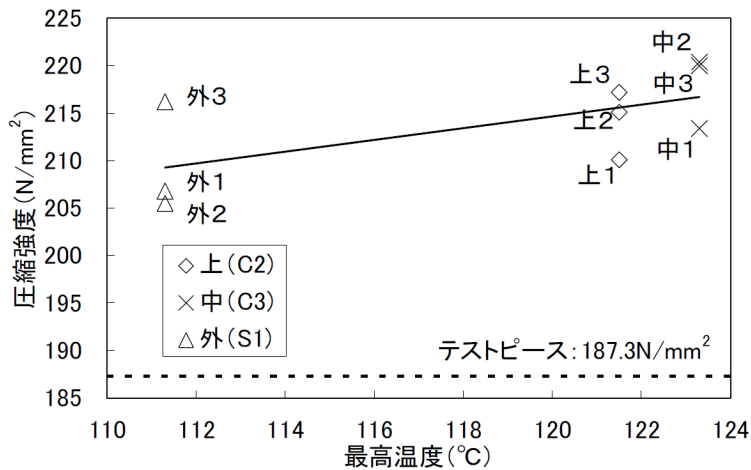


図3-11 最高温度履歴と圧縮強度(コア供試体)

(2) 細孔構造

コア供試体およびテストピースの細孔構造の測定結果を図3-12に示す。若干ではあるがコア供試体の方が全細孔量が少なく、また10nm以下の小さな空隙が多く占める結果となった。以上より、硬化体はテストピースよりもコア供試体の方がより緻密となっていると判断された。

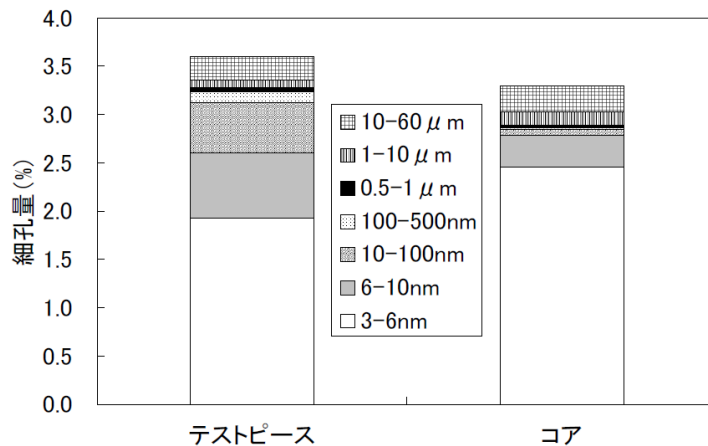


図3-12 コア供試体の細孔構造測定結果



### 3.3.3 遅れエトリンガイト生成の可能性について

一般に、エトリンガイトは高温履歴を受けると、硫酸イオンを放出してエトリンガイトが分解しモノサルフェートに変化するものがあるとされている<sup>3)</sup>。この硬化体に長期的に亘って水や硫酸イオンが供給されると、再びエトリンガイトが生成、膨張するいわゆる DEF(Delayed Ettringite Formation) によって構造物を劣化させることが懸念されている。また、セメント硬化体が 70°C 以上の高温履歴を受けると DEF が生じやすいと一般的には言われている。

これまでのマスブロックによる検証により、マトリクス自身の水和熱を起因として約 90~120°C の高温履歴を受けることが明らかとなった。そこで、ここではマスブロックから採取したコア供試体について X 線回折分析を行い、AFt 系 UHPFRC の DEF の可能性について検証・考察を行った。

#### (1) マスブロック試験体における分析

検証その 1 (部材厚 50cm) において、最高温度履歴が 92.5°C であったコア供試体およびテストピースの X 線回折分析結果を図 3-13 に示す。図に示すとおり、いずれの試料からもエトリンガイト (回折角度: 9.0°) が検出され、無水石膏 (回折角度: 25.4°) は検出されなかった。

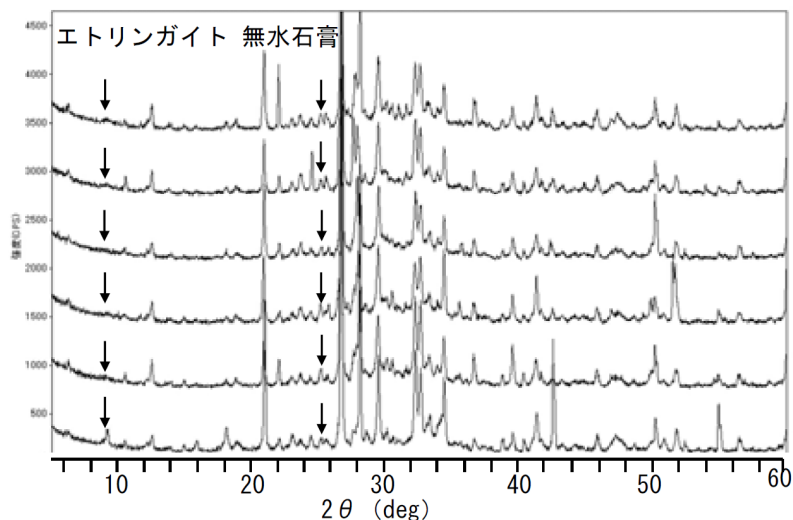


図 3-13 X 線回折結果 (50cm マスブロック: 最高温度履歴 92.5°C)

次に、最高温度履歴が 123.3°C であった検証その 2 (部材厚 1m) におけるコア供試体およびテストピースの X 線回折結果を図 3-14 に示す。図に示すとおり、テストピースからはエトリンガイト (回折角度: 9.0°) が検出され、無水石膏 (回折角度: 25.4°) は検出されなかった。

しかしながら、コア供試体についてはエトリンガイトが検出されない一方で無水石膏が検出された。これは、水和過程で一度生成したエトリンガイトが分解し、モノサルフェートと無水石膏に変化した形跡と考えられた。

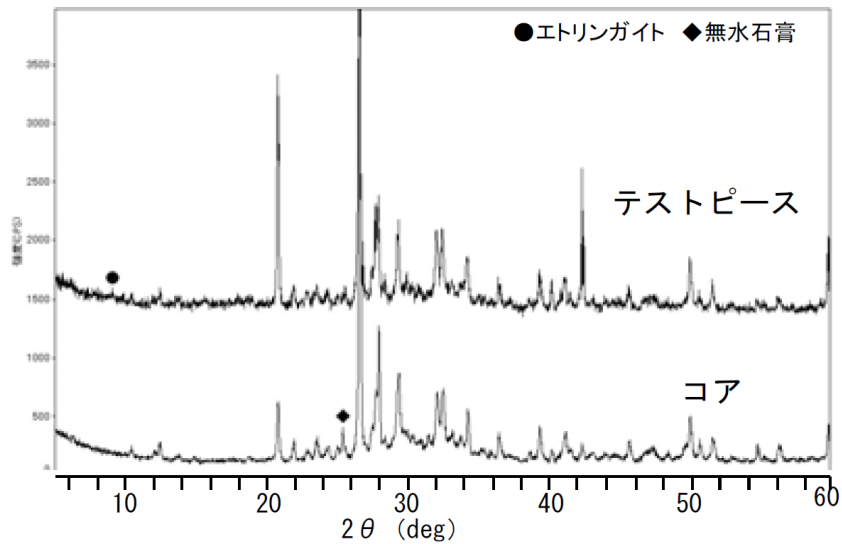


図 3-14 X線回折結果(1m マスブロック:最高温度履歴 123.3°C)

(2) 長期高温暴露した供試体における追加分析

ここでは、85°Cの蒸気養生を行ったテストピース（曲げ供試体）を 105°Cの乾燥炉に 5 年間設置したものについて DEF に関する分析を加えた（主目的は後述する第 6 章）。



写真 3-4 乾燥炉での暴露状況 (105°C-5 年間)

X線回折結果を図 3-15 に示す。結果には、乾燥炉に入れずに 20°C環境で保管したものも併記する。図に示すとおり、乾燥炉に入れなかった供試体からはエトリンガイト（回折角度：9.0°）が検出されたが、無水石膏（回折角度：25.4°）は検出されていない。

しかしながら、乾燥炉にて 105°Cの高温履歴を 5 年間受け続けたテストピースは、エトリンガイトが検出されない一方で無水石膏が検出される結果となった。

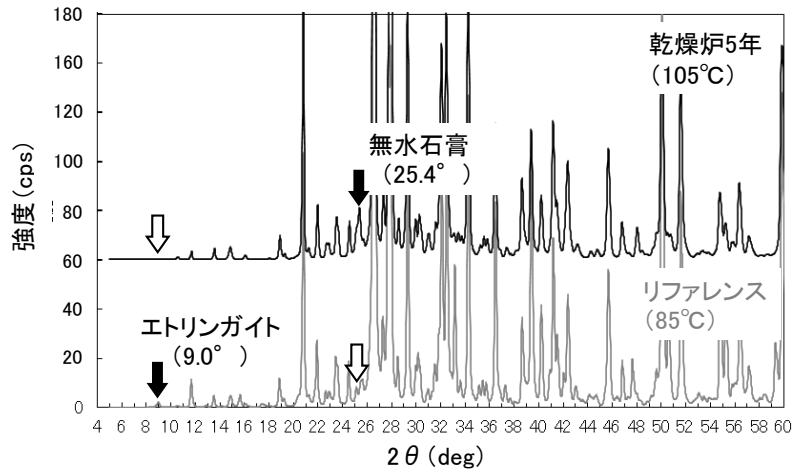


図 3-15 X線回折結果(105°C高温暴露供試体)

ここで、DEFは、図 3-16 に示すように「過剰な硫酸塩の存在」、「十分な水の供給」、「高温履歴」の3条件が重なった場合に生起されると知られている。マスブロックから採取したコアの細孔構造の結果のうち、例えば 120°C超の高温履歴を受けた AFt 系 UHPFRC の硬化体は緻密であった(図 3-12)ことから、将来的には外部からの水の浸透および内部での移動がほとんど生じず、DEFが生じる可能性は低いと思われる。

しかしながら、1m以上の断面の大きい部材を製作する際は、水和熱による温度上昇が大きくなり過ぎないように、クーリングなどによって温度上昇量を抑制するといった一般的なマスコンクリート施工と同様の配慮が必要であると考えられる。

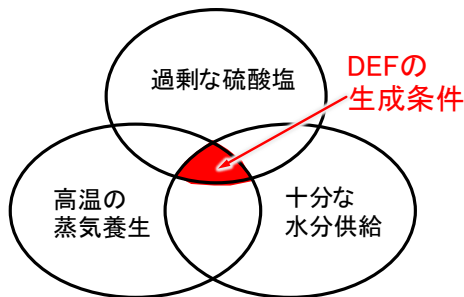


図 3-16 遅れエトリンガイト(DEF)の生成条件

3.4 細孔構造の長期的な追跡

ここでは、AFt系UHPFRCの空隙構造を最長11年まで長期的に追跡し、その推移を把握した。分析を行ったサンプルの内訳を表3-5に示す。また、水銀圧入式ポロシメータによる空隙率の測定結果を図3-17に示す。

プロジェクトごとのサンプル採取であるため材料ロットは異なるが(配合は同一)、打込み初期の養生温度(高温履歴の有無)や暴露環境(水分供給有無)によらず長期的に空隙量は減少し緻密化していく傾向が確認された。

AFt系UHPFRCは水結合材比が15%程度と極めて小さく、未水和セメントも多く存在しているため、水和が長期的に進むが、硬化体が緻密であるため外部からの水の供給の影響は小さく、硬化体に存在する自由水を主とした水和反応であるため、その進行・増進はゆっくりであると推察された。

表 3-5 分析対象(内訳)

No.	製造方法	養生	暴露環境	材齢	備考
①	試験練り ミキサ	常温 (封緘, 20°C)	室内 (20°C封緘)	28,56,91,184日	
②	実機ミキサ	常温 (温風 30°C)	室内 (20°C封緘)	5年	4章に関連 (小滝川橋)
③	実機ミキサ	蒸気養生 (85°C-24時間)	屋外 (飛沫帯)	2, 11年	5章に関連 (羽田 UFC 床版)

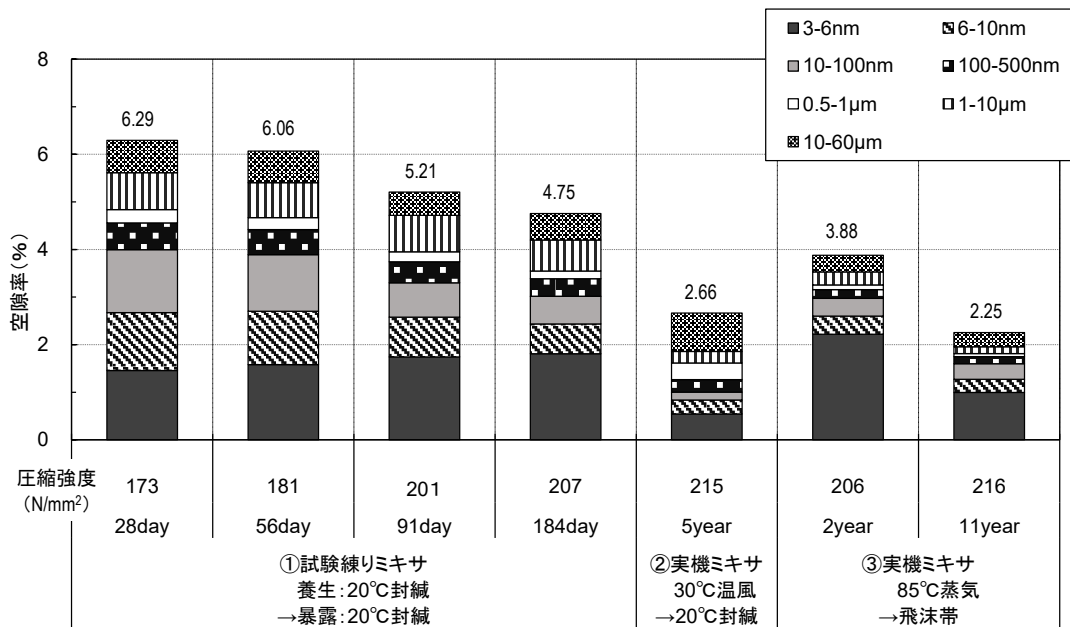


図 3-17 細孔構造の長期的な推移



### 第3章のまとめ

水和初期に高温履歴を受けた UHPFRC は硬化性状に悪影響を及ぼすことも懸念されることから、本章では、マスブロックを製作し各種養生履歴を与え、コア部材の圧縮強度、細孔構造および鉱物組成を確認した。さらには、5～11年といったスパンでその推移を追跡調査した。

- ・ エトリンガイト生成系 UHPFRC は、単位結合材量が非常に多いため水和熱が大きく、マスブロック試験および解析により断熱温度上昇は 96°C であると算定された。
- ・ 最高温度の一次ピークは打込みから 24 時間程度に迎えるが、マスコンクリートとしての施工や部材製作を行う場合は、これより前に給熱養生を行うと、さらに最高温度が上昇する恐れがある。
- ・ 高温履歴を受けたマスコン部材の硬化体は緻密であることを確認した。また、養生温度が高いほど圧縮強度が高い結果であった。
- ・ 90°C 以下の温度履歴ではエトリンガイトの分解は認められなかったが、100°C 以上の高温履歴を受けた際には分解の形跡と思われる無水石膏が検出された。  
UHPFRC は緻密な硬化体組織であるために、マトリクス内部への水分や硫酸塩の侵入を阻止するため、遅れエトリンガイト生成 (DEF) の可能性は小さいと考える。しかし、DEF による膨張現象の確認を目的とした検証によってこれを否定することには至っておらず、現時点では本研究の状況証拠から最高温度は 90°C 以下に抑えておくことが望ましい。
- ・ 最長 11 年の細孔構造の長期的な追跡では、高温履歴の有無 (最高温度 85°C)、暴露環境 (水分供給有無) によらず長期的な強度の増進、空隙量の減少 (緻密化) を確認した。

参考文献

- 1) 渡邊芳春, 芦田公伸, 相澤一裕, 柳井修司: 200N/mm<sup>2</sup>級超高強度繊維補強コンクリートの耐久性と微細組織, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1271-1276, 2006
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004
- 3) 平尾 宙: 硫酸塩劣化事例-エトリンガイトの遅延生成(DEF)に関する研究, コンクリート工学, 文献調査, Vol.44, No.7, pp.44-51, 2006.7

## 第4章

場所打ちに向けた

各種検討と施工



## 第4章 場所打ちに向けた各種検討と施工

### 4.1 はじめに

これまで、UHPFRC は、土木学会指針で UFC として定義されている範囲において、優れた力学特性や耐久性を発揮・担保させるために、給熱養生設備を有する工場でのプレキャスト部材を中心に展開されてきた。しかし、施工規模や施工条件によっては場所打ちで構築する方が合理的となる場合もある。このような背景の中、実橋梁の建設において、(2013 年当時) 国内で初めて構造物全体を AFt 系 UHPFRC (UFC) の場所打ち施工で構築することとなった。

本章では、現場打ちで想定される水平流動での流動距離の限界や、水平・鉛直打重ねの影響把握、第2章で提案した強度推定手法、第3章で取得した発熱特性を反映した温度ひび割れ対策など、プレキャスト部材の製作とは異なる観点での留意点も考慮しながら各種検討を行った。

### 4.2 場所打ち施工の適用—小滝川橋—

#### 4.2.1 工事概要

新潟県糸魚川市に位置する本橋梁は、民間発電設備のリニューアルに伴い、建設後約 100 年経過した吊橋を新たに桁橋で架け替えるものである。新設する橋梁は、橋長 39.0m、桁長 38.8m、全幅員 5.2m の単純 PC ポストテンション方式 T 桁橋 (躯体数量約 90m<sup>3</sup>) となっている。凍結防止剤散布による塩害ならびに凍害を受ける地域に建設されることを踏まえ、今後 100 年間のライフサイクルコストの削減を目的に AFt 系 UHPFRC が採用された。橋梁の概要を表 4-1、構造一般図を図 4-1 に示す。

本橋の架設地点へのアクセスは、幅員の狭い道路を通行する必要があるため、大型のプレキャスト部材を運搬することが困難であったこと、部材を細かく分割することによって継目が増えることが、施工ならびに耐久性上の課題となった。そこで、橋梁全体を場所打ちで構築することとした。

表 4-1 橋梁の概要

工 事 名	小滝川発電所 2 号機リニューアル橋架替え工事
工 事 場 所	新潟県糸魚川市
橋 種	プレストレストコンクリート道路橋
構 造 形 式	上部工：単純 PC ポストテンション方式 T 桁橋 下部工：逆 T 式橋台 2 基
荷 重	A 活荷重, 雪荷重
寸 法	橋長：39.0m 幅員：5.2m (全幅員), 4.0m (有効幅員)

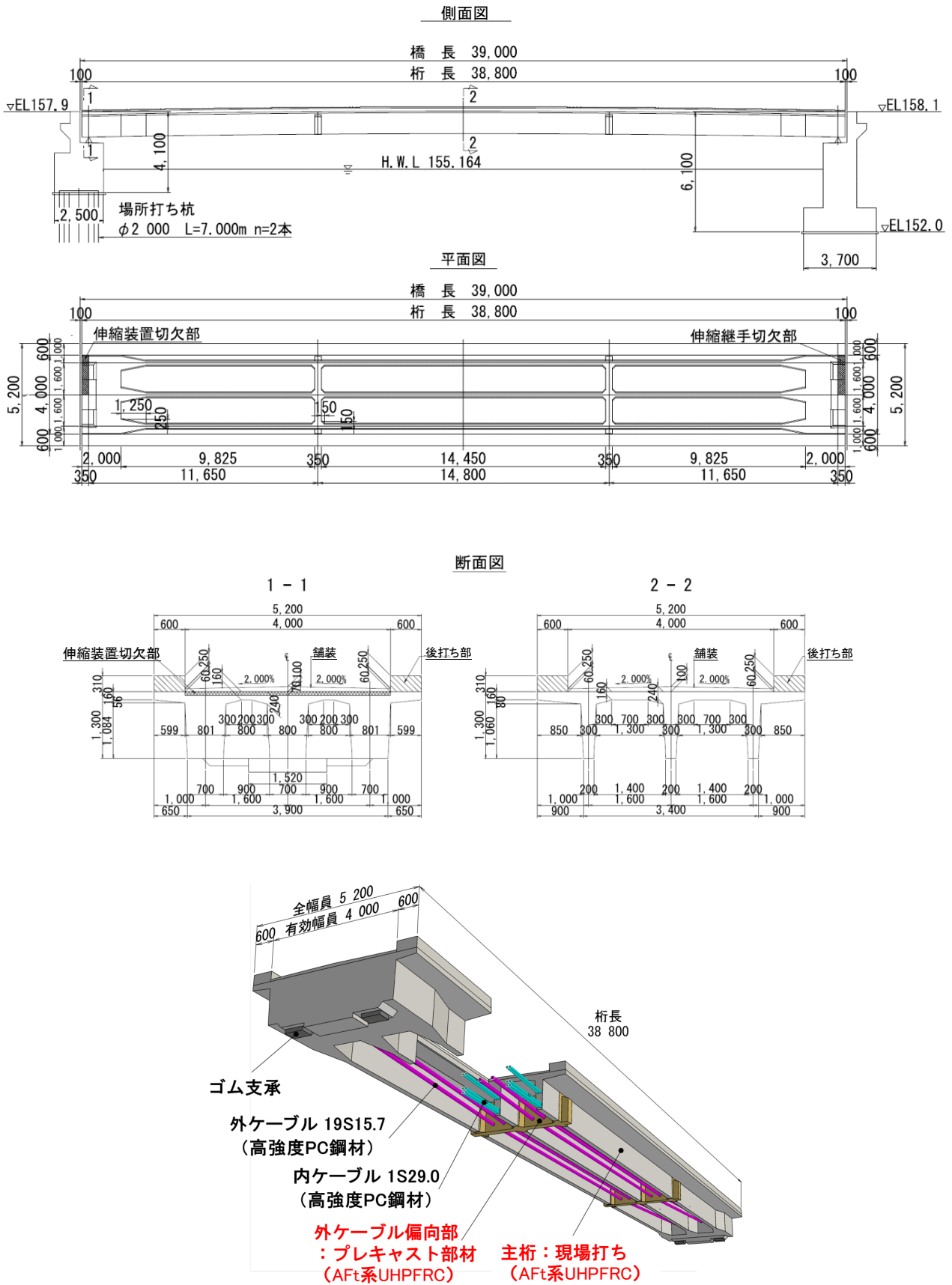


図 4-1 構造一般図

本橋では、UHPFRCの場所打ち施工による構築を基本とするが、中間横桁にはプレキャスト部材を採用している<sup>3)</sup>。これは、主桁へのプレストレス導入で主桁下縁の橋軸方向に生じる大きな圧縮応力により、中間横桁に局所的な引張応力が生じるためである。

部分的にプレキャスト化することで、中間横桁を打込み境界（妻型枠）とすることができ、全長約39mの部材を3回（3日）に分割して施工することが可能となり、コンクリートの供給能力、打込み能力、流動距離の抑制および鉛直打重ねの解消など、施工や品質確保の上でもメリットになった（写真4-1および図4-2）。

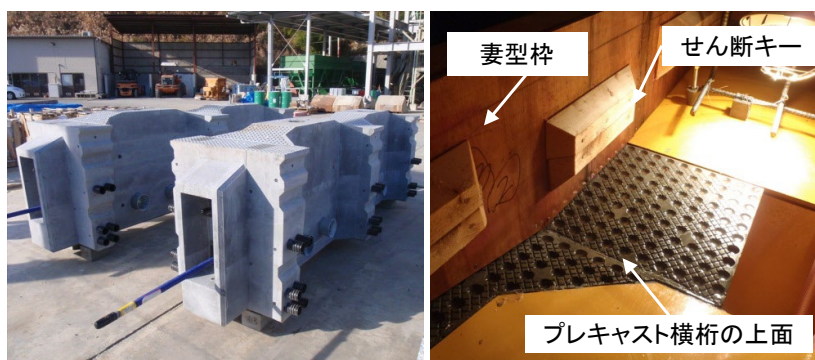


写真 4-1 プレキャスト化した中間横桁

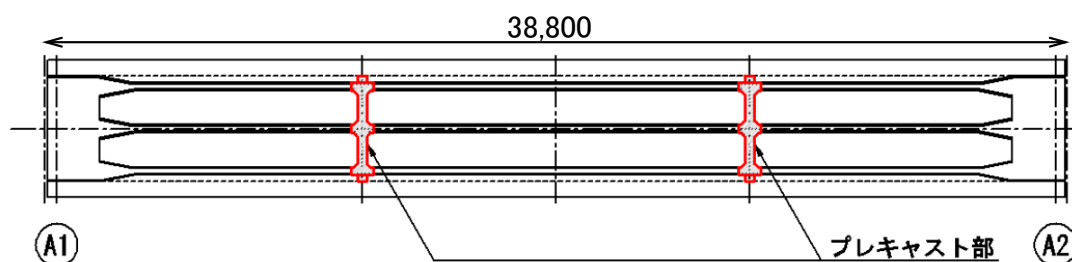


図 4-2 プレキャスト横桁による施工範囲の分割

## 4.2.2 使用材料および配合

本章で検討した UHPFRC は、2 章および 3 章と同様にエトリンナイト生成系のマトリクスから形成されるが、場所打ち施工におけるひび割れ抑制を目的に、収縮低減タイプ（表 4-2）を採用した。

AFt 系 UHPFRC の収縮ひずみの計測結果例（自己収縮+乾燥収縮）を図 4-3 に示す。UHPFRC は単位結合材量が多いため、収縮量の大部分が自己収縮となる。標準型の収縮ひずみが  $800 \mu\text{m/m}$  程度であるのに対し、収縮低減タイプは半分の  $400 \mu\text{m/m}$  程度に低減されている<sup>1)</sup>。

表 4-2 AFt 系 UHPFRC の配合(収縮低減タイプ)

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						補強用* 鋼繊維 (kg)
		水* <sup>1</sup>	結合材* <sup>2</sup>	骨材* <sup>3</sup>	高性能* <sup>4</sup> 減水剤	収縮* <sup>5</sup> 低減剤	消泡剤	
15.2	2.0	195	1,287	905	32.2	12.9	6.4	137.4 (1.75vol%)

\*1：高性能減水剤の水分を含む

\*2：プレミックス粉体（収縮低減タイプ）、密度  $2.98\text{g/cm}^3$

\*3：砕砂、表乾密度  $2.66\text{g/cm}^3$ 、吸水率 1.18%

\*4：ポリカルボン酸系

\*5：低分子量エチレンオキサイドおよびプロピレンオキサイド共重合体

\*6： $\phi 0.2\text{mm}$ 、引張強度  $2,000\text{N/mm}^2$  以上、 $L=15\text{mm}$ 、 $22\text{mm}$ 、密度  $7.85\text{g/cm}^3$

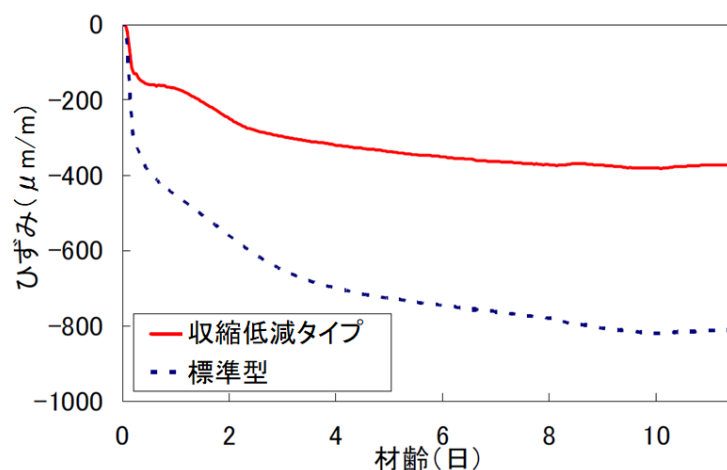


図 4-3 AFt 系 UHPFRC の収縮ひずみの測定例



### 4.3 場所打ち工法に向けた検討

#### 4.3.1 流動距離と材料分離抵抗性

UHPFRC で部材を構築する際、設備が整ったプレキャスト製品工場ではバケットを任意に移動させて型枠内に均一に打ち込むことが比較的容易であるのに対し、屋外の現場施工では様々な条件で打込み位置が制約されることが想定される。実際に、本橋梁の施工でもクレーンの作業半径に加えて雪中期（湯水期）の施工であるために養生屋根の一部分の開口からの打込みといった制約が生じた（図4-4 および写真4-2）。

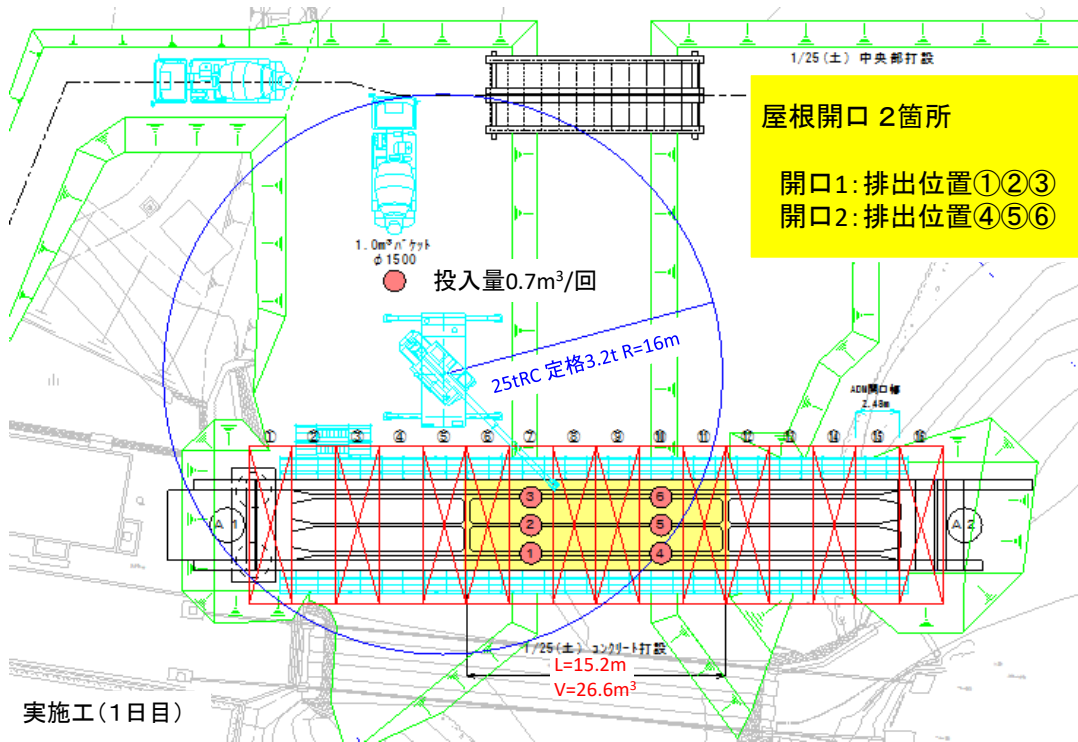


図 4-4 打込み計画図(1日目の場合)



写真 4-2 主桁の打込み状況

そこで、本検討では、1日に打ち込む主桁の規模と同じ全長10mの模擬部材に対してバケットで打ち込み、AFt系UHPFRCのレベリング性や鋼繊維が材料分離しない流動距離の限界を把握した。写真4-3に模擬実験の概要を示す。型枠内には、実構造物と同様に鋼材やセパレータなど流動の障害となるものを配置した。また、0, 2, 4, 5, 6, 8, 10m地点には流動先端から試料を採取する横窓を設け、採取後は繊維の洗い試験によって繊維の混入割合を測定した。

打ち込みは端部の1か所からとし、バケットによる供給量は0.4m<sup>3</sup>/回で計5回(2.0m<sup>3</sup>)である。なお、2.0m<sup>3</sup>という打ち込み量は、市中コンクリート工場からのアジテータ1車あたりの供給量から決定した。

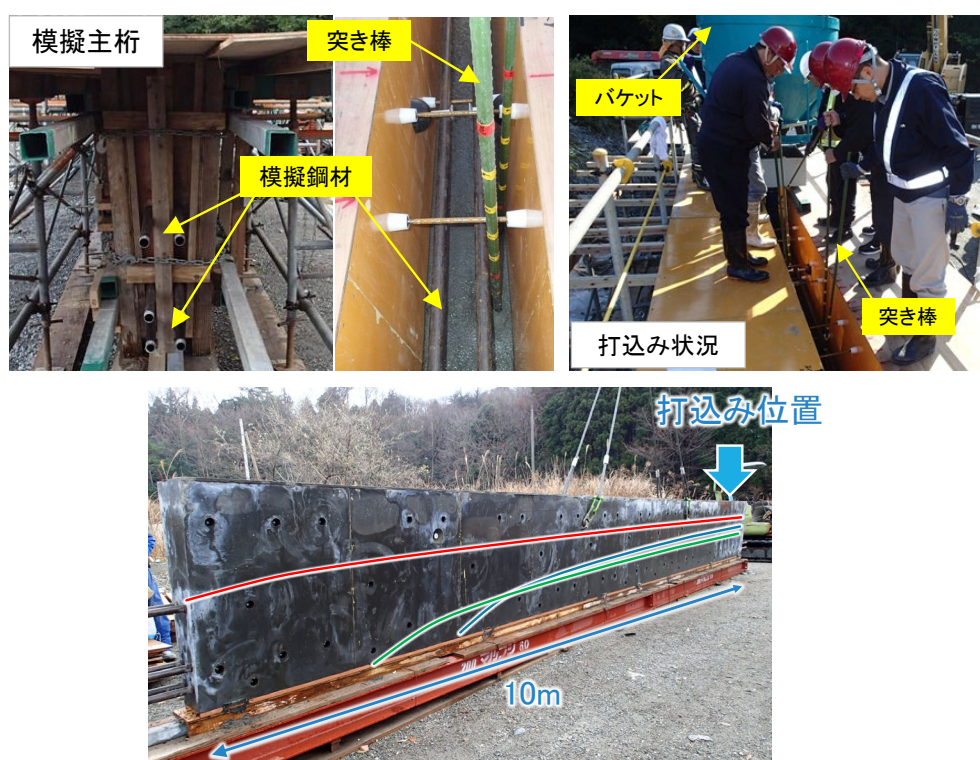


写真 4-3 模擬実験の状況(全長 10m)

図4-5に実験時の流動勾配を示す。図より、1回目に打ち込んだ時点で流動先端は7.6m地点まで到達し、4回打ち込んだ時点で10m地点まで到達した。UHPFRCの優れたレベリング性を確認するとともに、実施工での打ち上がり高さ管理の観点では打ち込み間隔は10mで十分であると判断した。

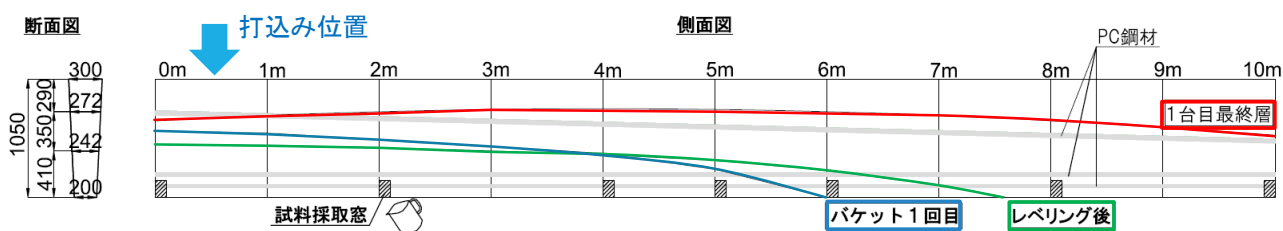


図 4-5 AFt系UHPFRCの流動勾配(全長10m)

また、洗い試験による鋼繊維の混入割合の測定結果を図4-6に示す。流動距離0m地点の繊維量を基準として評価した場合、その差異は±5%程度であり、流動距離10m地点まで材料分離せずに均等に分散されていることが確認された。

以上より、本橋での施工においては流動距離が10mまでの打込み条件で計画をすれば、AFt系UHPFRCの繊維量すなわち繊維の架橋効果に期待する曲げ強度や引張強度は最低限確保されると判断した。

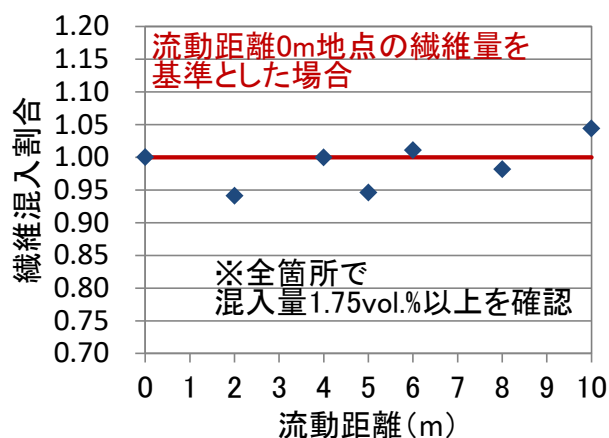


図4-6 繊維の洗い試験結果(流動距離10mまでの均一性)

なお、実施工では、前述の打込み計画図(図4-4)のようにバケット排出間隔は安全を見て10m以下となるよう屋根開口を1スパンに当たり2箇所設けたが、降雪が激しい時間帯・打設日は開口を減らして対応したため、本実験の結果が判断の裏付けとなった。

### 4.3.2 打重ね部の一体性確保に関する検討

現場での施工を想定した場合、部材の形状・大きさ（面積）あるいは打込み方法によって、広範囲に水平打重ね部が生じることが想定される。また、水平打重ね部を作らないように配慮した場合、仕切り板や櫛状の枠で面積の拡大を抑え、鉛直打重ねを行いながら打ち込むことも想定される。例えば、土木学会指針（UFC 指針）<sup>2)</sup>では、合流部や打重ね部は構造上の弱点となるため、極力これを避けることが原則とされており、やむを得ず設ける場合には突き棒などによるかき乱しによって繊維の配向を分散させることが重要としている（図4-7および図4-8）。

ここでは、水平および鉛直打重ねが UHPFRC の強度特性に及ぼす影響を把握するとともに、一体性確保に向けて供試体レベルでの基礎的な検討を行った。

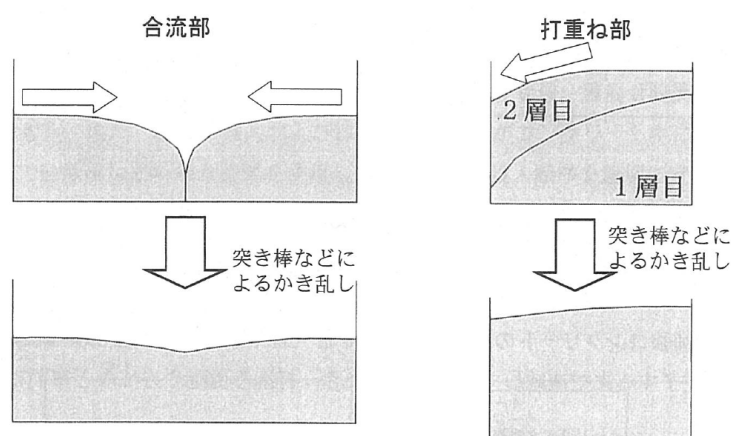


図4-7 合流部および打重ね部の処理例(土木学会 UFC 指針より)<sup>2)</sup>

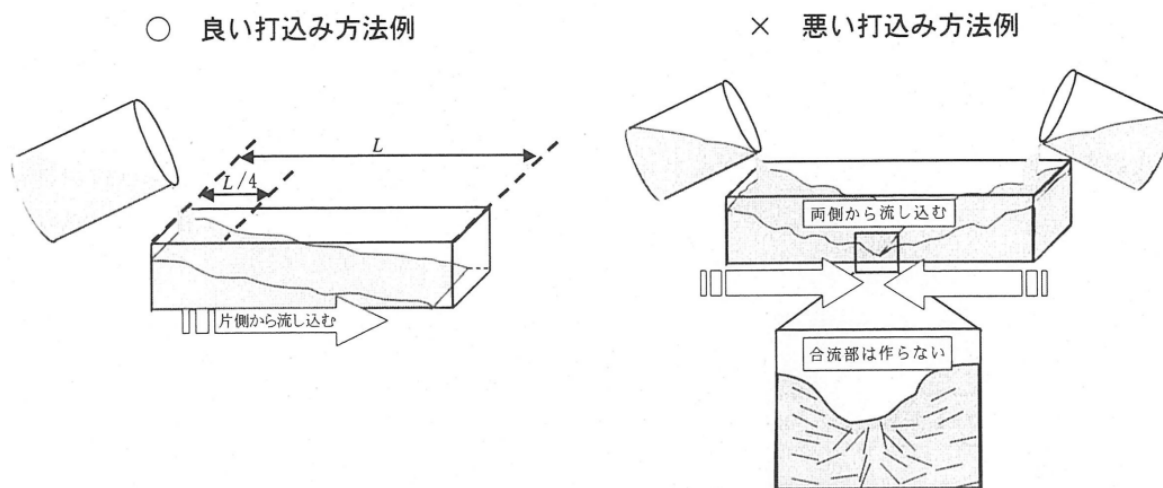


図4-8 曲げ供試体の打込み方法(土木学会 UFC 指針より)<sup>2)</sup>



## 4.3.2.1 水平および鉛直打重ねを想定した実験

## (1) 水平打重ね

水平打重ねの検討では、割裂引張強度試験にて評価を行うこととした。供試体は、図 4-9 に示すように打重ね部が割裂面となるように、横打ちが可能な鋼製円柱型枠（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を用いて作製した。まず、型枠半分まで 1 層目を打ち込み、所定の打重ね時間間隔が経過した後に 2 層目を打ち重ねる方法とした。なお、打重ね部は、突き棒を用いて 1 回/10 $\text{cm}^2$  の頻度で計 20 回、前層に届くように突いてかき乱した。

実験要因と水準は、表 4-3 に示すように打重ね面における乾燥防止処置の方法（シートの密着／水の噴霧）と、打重ね時間間隔（1.5 時間／2.5 時間）とした。試験本数は各ケース  $N=2$  で実施した。

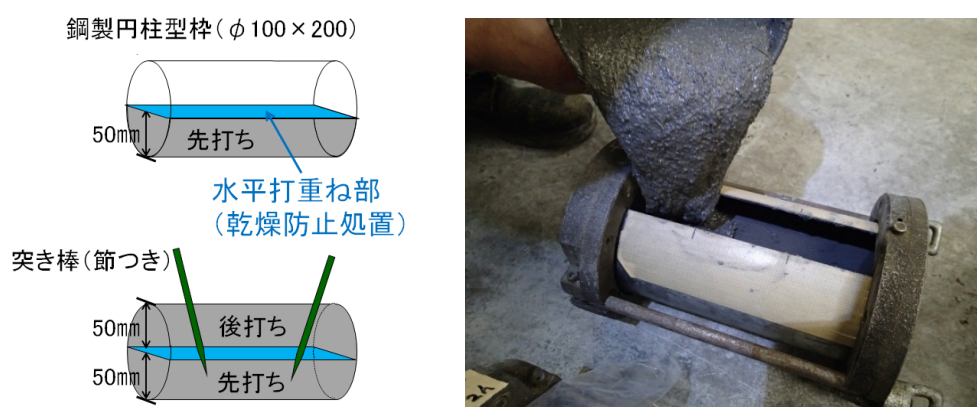


図 4-9 水平打重ね供試体の製作

表 4-3 実験要因と水準(水平打重ね)

水平打重ねの有無	かき乱し <sup>*1</sup>	乾燥防止処置方法	打重ね時間間隔
なし	—	—	—
あり	あり	シート密着 <sup>*2</sup>	1.5 時間
		水の噴霧 <sup>*3</sup>	2.5 時間

\*1：突き棒で打重ね面を鉛直に下層まで、10 $\text{cm}^2$ /回の頻度で計 20 回

\*2：ポリプロピレン製シート

\*3：表面が乾燥しない程度 (0.05 $\text{g}/\text{cm}^2$ )

(2) 鉛直打重ね

鉛直打重ねでの検討では、曲げ強度試験にて評価を行うこととした。供試体は、図4-10に示すように支間中央に仕切り板を設置した鋼製角柱型枠（100×100×400 mm）を用いて作製した。まず、型枠の片側に打ち込み、2.5時間後に反対側を打ち込んだ後に仕切り板を引き抜いた。

実験要因と水準は、表4-4に示すように打重ね部のかき乱しの有無とした。かき乱しは、突き棒を用いて±45°の斜め方向に、1回/10cm<sup>2</sup>の頻度で、計10回突くことで行った。試験本数は各ケースN=2で実施した。

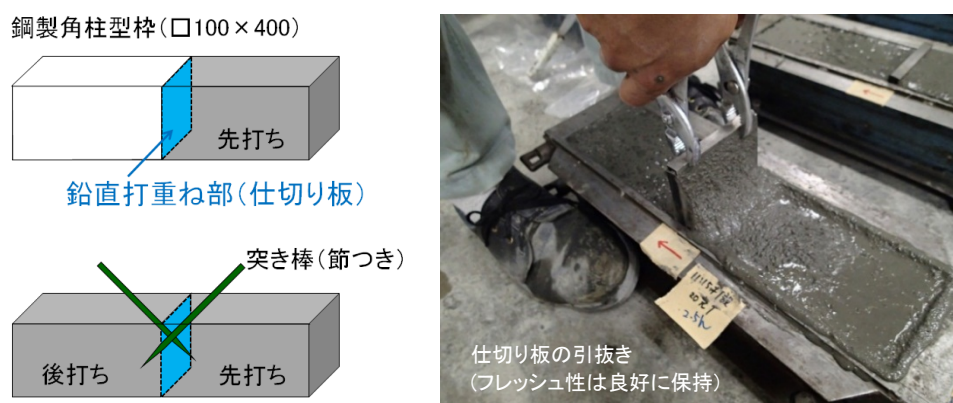


図4-10 鉛直打重ね供試体の製作

表4-4 実験要因と水準(鉛直打重ね)

鉛直打重ねの有無	かき乱し*1	打重ね時間間隔
なし	—	—
あり	あり	2.5 時間
	なし	

\*1：突き棒で打重ね面を斜め45°の方向に10cm<sup>2</sup>/回の頻度で計10回

## 4.3.2.2 実験結果

まず、本実験では、本橋における現場の冬期施工で実現可能な養生方法を想定して、打込みから2日間は15°C、以降は30°Cを10日間とした。この時のAFt系UHPFRCの圧縮強度は161N/mm<sup>2</sup>であった。

## (1) 水平打重ね

割裂引張試験におけるひび割れ発生強度を図4-11に、破壊時のピーク強度（参考）を図4-12に示す。図に示すとおり、打重ね面にシートを密着させて乾燥防止処置を行った場合には、打重ね時間間隔によらず、ひび割れ発生強度および破壊時強度はリファレンス（打重ねなし）と同等であり、強度低下は確認されなかった。一方、打重ね面に水を噴霧して処置を行った場合には、打重ね時間間隔が1.5時間では強度低下は見られないものの、2.5時間においてはひび割れ発生強度および破壊時強度ともわずかながら低下していることが確認された。

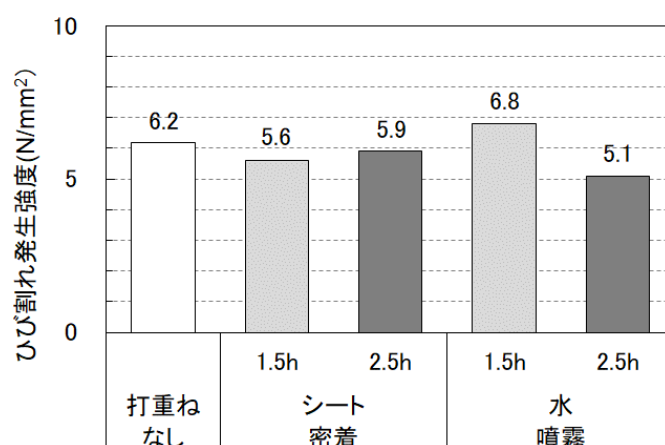


図4-11 割裂ひび割れ発生強度(水平打重ね)

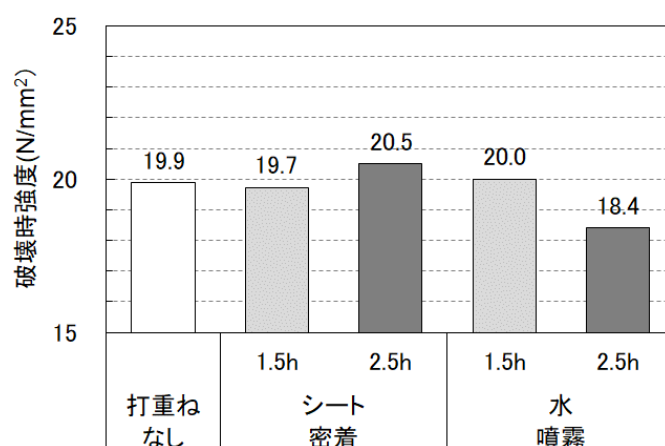


図4-12 割裂破壊時強度(水平打重ね)

1層目の打込みから2.5時間における打重ね面の状態を写真4-4に示す。定性的ではあるが、シート養生を行ったものは表面が確実に湿潤状態に保たれているのに対し、水の噴霧を行ったものは表層がこぼり、乾燥している状態であった。UHPFRCは単位粉体量が多く、基本的にはブリーディングが生じないため、打込み後の表面は乾燥によって象皮のような膜を生じやすい。これが、層間の付着や突固め（かき乱し）の効果に影響を与えたものと考えられる。特に、水を噴霧する方法を採用する場合には、一時的な噴霧ではなくある程度断続的に噴霧して湿潤状態を保持することが重要であると判断された。

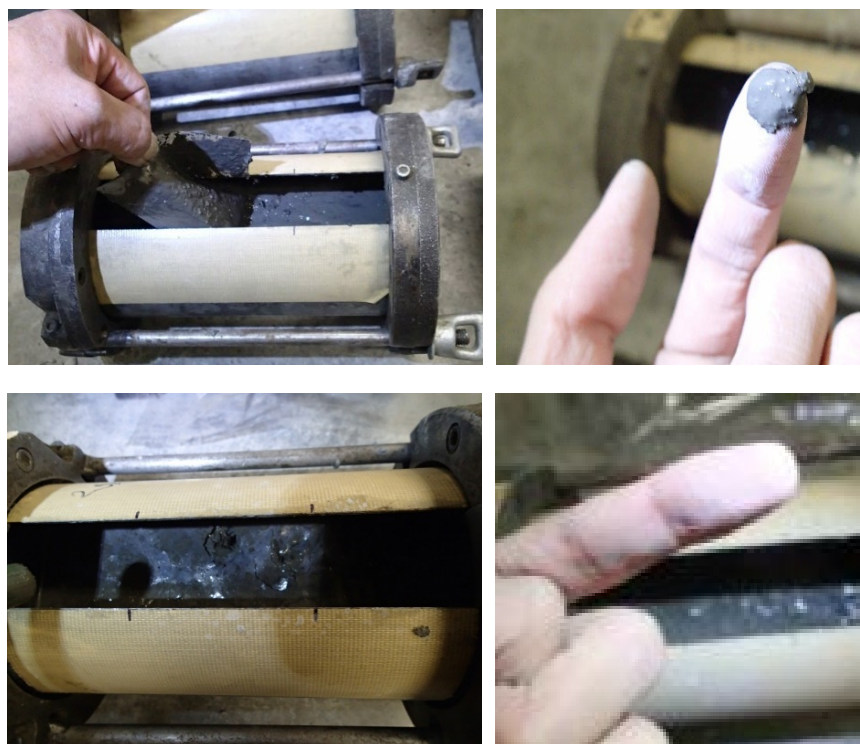


写真 4-4 2.5 時間後の打重ね面の乾湿状態(上:シート, 下:噴霧)

水平打重ねについては、図4-13に示すように打重ね直後は層間に繊維が架橋していない状態に対して突固めにより層間のモルタルが一体化し、繊維も割裂方向に有意に配向したことがひび割れ発生強度、破壊時強度それぞれの回復に寄与した要因と考えられる。

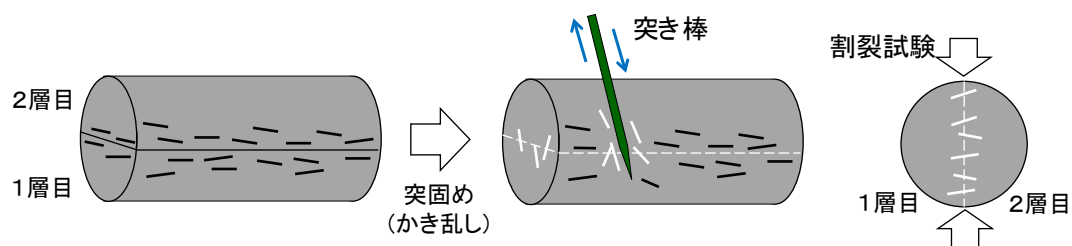


図 4-13 水平打重ねによる突固めの効果イメージ



## (2) 鉛直打重ね

曲げ強度試験における曲げひび割れ発生強度を図4-14に、曲げ強度（破壊時のピーク強度）を図4-15に、応力-たわみ関係を図4-16および図4-17に示す。まず、曲げひび割れ発生強度については、リファレンス（打重ねなし）の $10\text{N/mm}^2$ に対し、打重ね部を設けた供試体においても、かき乱しの有無によらずほぼ同等の $9\text{N/mm}^2$ 程度となった。これは、打重ねをする際に仕切り板を引き抜いた状態では界面の湿潤が保たれていたため、前述の水平打重ねの結果から、モルタルマトリクスの付着はかき乱しよりも乾燥の有無の影響を受けるということを示唆している。

一方、曲げ強度はリファレンスの $22.3\text{N/mm}^2$ に対し、かき乱しを行わない場合は $9\text{N/mm}^2$ 程度の低下、かき乱しを行ったとしても場合は $3\text{N/mm}^2$ 程度の低下が生じることが確認された。

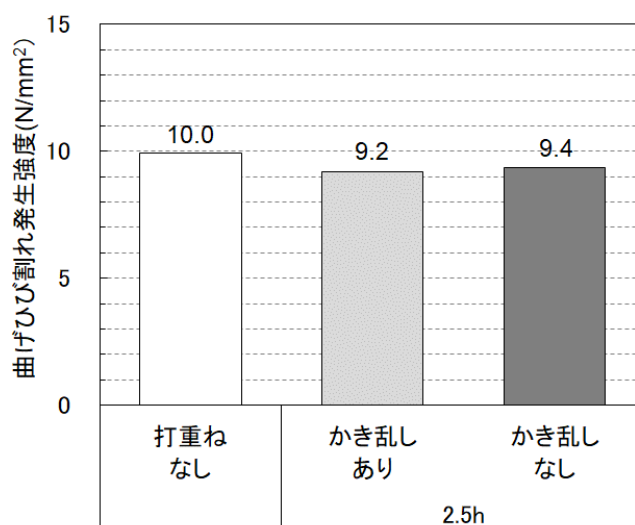


図4-14 曲げひび割れ発生強度(鉛直打重ね)

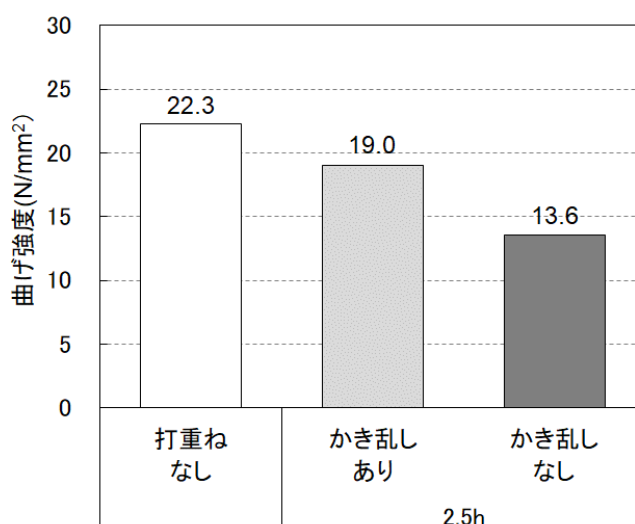


図4-15 曲げ強度(鉛直打重ね)

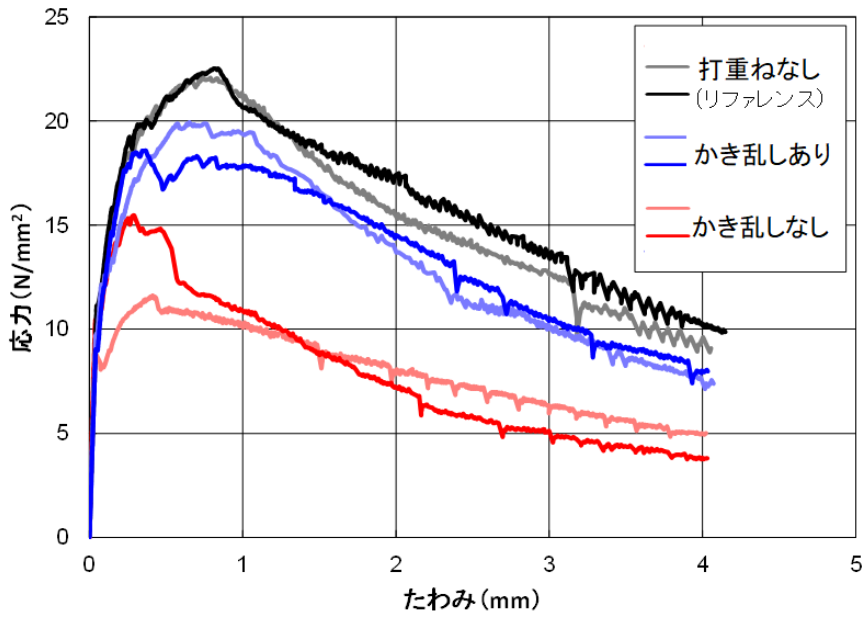
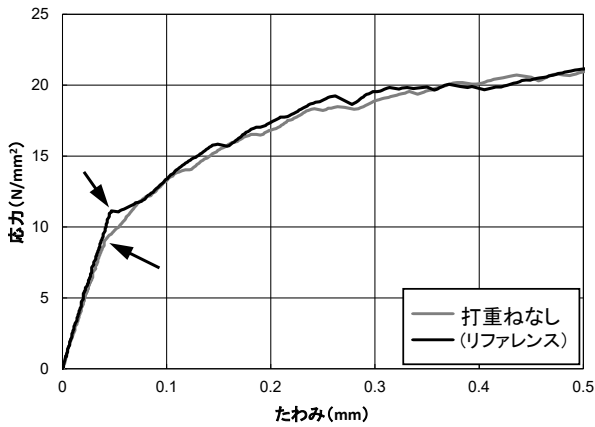


図 4-16 曲げ強度試験の応力-たわみ関係 (鉛直打重ね)



拡大  
 曲げひび割れ発生の確認  
 (矢印部)

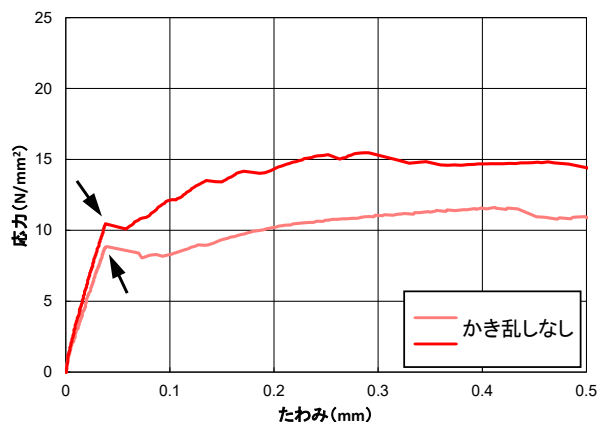
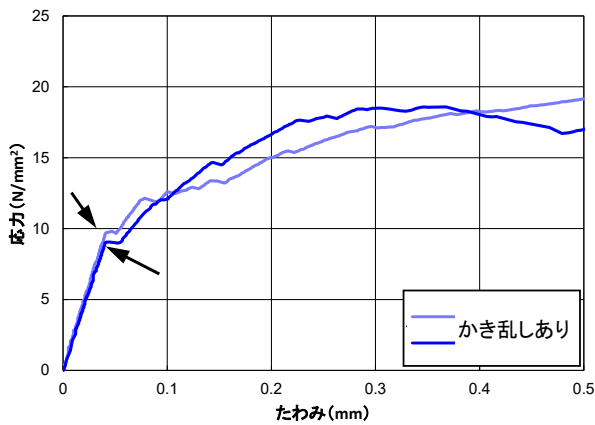


図 4-17 曲げ強度試験の応力-たわみ関係 (拡大)

これは、図 4-18 に示すように、今回の突固め（かき乱し）方法では、ひび割れ発生後の繊維の架橋効果が十分に発揮されなかったことが要因であると考えられる。UHPFRC に鉛直打重ね部を設ける際は、確実に繊維が架橋するようにかき乱しの方法（頻度、方向等）を十分に配慮するか、低下の程度を配向係数（安全率）として見込む必要があることが改めて確認された。

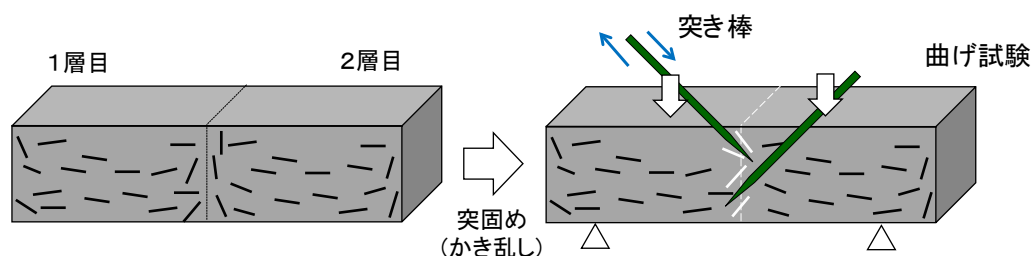


図 4-18 鉛直打重ねによる突固めの効果イメージ

#### 4.3.2.3 実施工での打込み

実施工での UHPFRC の打込み状況を写真 4-5 に示す。本橋では、構造設計の観点でプレキャスト化した中間横桁を打込み境界すなわち妻型枠としたため（写真 4-1、図 4-2）、事前の検討によって課題が把握されていた鉛直打重ねは解消されている。

長時間の打込みにおける水平打重ねについては、ブリーディングのない UHPFRC 特有の表面の乾燥防止と一体化（鋼繊維の架橋）を考慮し、打込み空間の保湿（継続的な噴霧）と突き棒によるかき乱しを施した。実施工では最大 1.5 時間程度の打重ね時間間隔が生じたが、水平打重ね線や表面気泡のない、きれいな仕上がりとなっている。

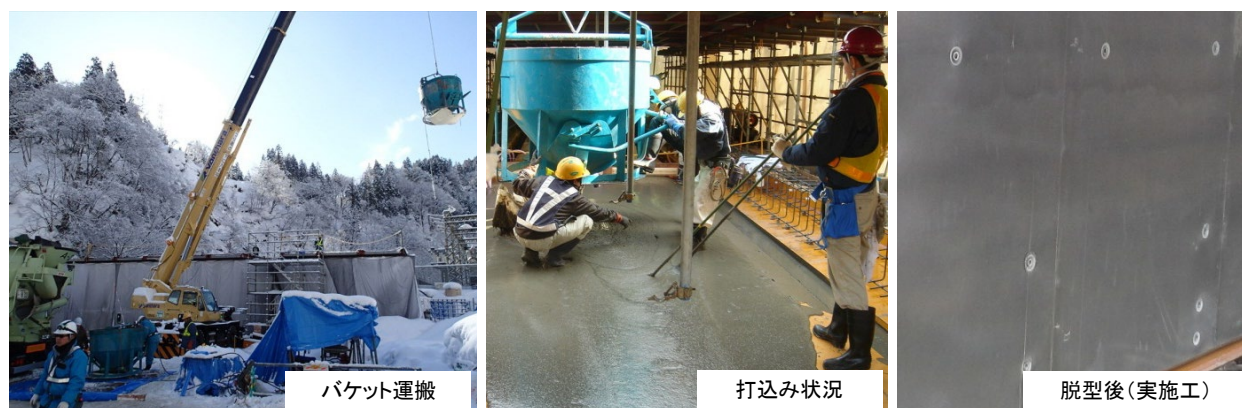


写真 4-5 UHPFRC の打込み状況および脱型状況

### 4.3.3 養生および温度ひび割れ対策

#### 4.3.3.1 養生方法の検討

第3章において、AFt系 UHPFRC の強度発現を積算温度で推定する際に部材温度をもとに「基準温度」を補正する簡易手法を提案した。まず、同手法を用いて、表 4-5 に示すように本橋梁における設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup>に達するために必要な積算温度は 13,340°C・h と算定し、養生温度や養生日数を施工計画に反映させることとした。

表 4-5 積算温度の目標値と養生条件

部材温度*1 T (°C)	係数*2 a	基準温度の 補正值*3 B (°C)	積算温度の 目標値*4 M (°C・h)	養生時間	
				(h)	(day)
10	1.0	-10	13,340	667	28
20	2.0	-20		334	14
30	3.0	-40		191	8
40	4.0	-80		111	5

\*1：コンクリートが実際に受けた温度（養生温度）

\*2： $a = T \times 0.1$

\*3： $B = -10 \times 2^{a-1}$

\*4：圧縮強度 150N/mm<sup>2</sup>を目標とした場合 ( $f_c = 43.112 \times \log_{10} M - 28.094$ )

図 4-19 は本橋の寒中施工に先立ち、改めて強度発現性を確認したものである。本検討では3章での検討よりも低温域（5°C、10°C）のデータを加えた。まず、本橋に用いる AFt 系 UHPFRC のマトリクスは収縮低減タイプを採用したが、20°C以上の領域では、本研究で提案した推定式を用いることの妥当性が再確認された。

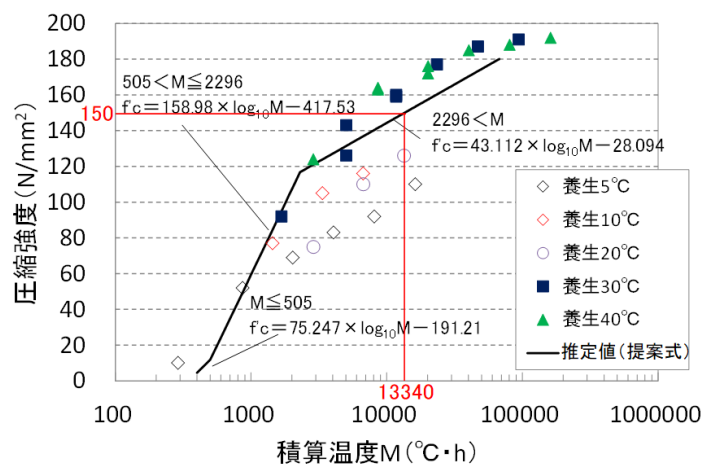


図 4-19 積算温度と圧縮強度の関係(収縮低減タイプ)

一方で、養生温度が20℃以下になると強度発現が推定ラインよりも遅くなることが明らかとなった。シリカフェームやポゾランの活性による初期強度の立上りおよび長期的な増進には、誘因(トリガー)となる温度が必要<sup>4)</sup>という報告もあり、AF t系UHPFRCにも同様の影響があるものと推察した。以上より、本橋の養生では、結合材の反応を活性させて初期強度の立ち上がりおよび以降の強度発現を確実にするため、打込みから初期の養生温度が30℃を下回らないことを基本に、積雪山間部で実現可能な保温と給熱養生を実施することとした。

具体的にはユニット式養生パネルと二重の防災シートで施工エリア全体を覆い、打込み後の雰囲気温度の目標を30℃として熱交換式温風機(熱出力68,700kcal/hr×6台、28,600kcal/hr×2台)を使用した(写真4-6)。



写真4-6 給熱養生状況

また、強度管理については、自己発熱が小さい張出先端(薄肉部)を管理対象とし、張出先端に埋め込んだ熱電対によって計測された温度と同じ温度で圧縮試験供試体を養生した(写真4-7、温度追従養生層)。また、比較用に温風の当たらない橋面に供試体を設置した(保温なし)。



写真4-7 管理用圧縮供試体の養生状況(温度追従養生層)



## 4.3.3.2 マスコンクリートとしての対策

単位結合材量の多い UHPFRC 特有の最高温度の上昇による様々な影響を考慮した施工計画が必要となる。本橋においても、端部横桁は約  $2.0 \times 4.0 \times 1.5\text{m}$  のマスコンクリートであるため、以下の2点について対策をする必要があった。

- (1) 内外温度差による温度ひび割れ
- (2) 最高温度上昇による遅れエトリングイト生成 (DEF) の可能性

まず、実施工に先立ち、端部横桁を対象とした温度応力解析を実施した。解析には、2章および3章で得られた強度発現特性や断熱温度上昇特性を反映し、さらには前述の検討で設定した養生温度 ( $30^{\circ}\text{C}$ ) を条件に盛り込んだ。

解析結果を図 4-20 に示す。図より端部横桁の中心部の最高温度が  $110^{\circ}\text{C}$  まで上昇することが確認された。(1) 温度ひび割れに関しては、応力計算結果より内外温度差による温度ひび割れが生じる可能性が示された。そこで、河川水 (水温  $5^{\circ}\text{C}$ ) を利用したパイプクーリングを実施し、中心部の温度上昇を抑制した (写真 4-8 および図 4-20)。その結果、実工事においても事前の予測よりも  $20 \sim 25^{\circ}\text{C}$  程度最高温度を抑制することができた。これにより、(2) 遅れエトリングイト生成についても、第3章で得られた「最高温度  $90^{\circ}\text{C}$  以下が望ましい」を達成することが可能となった。

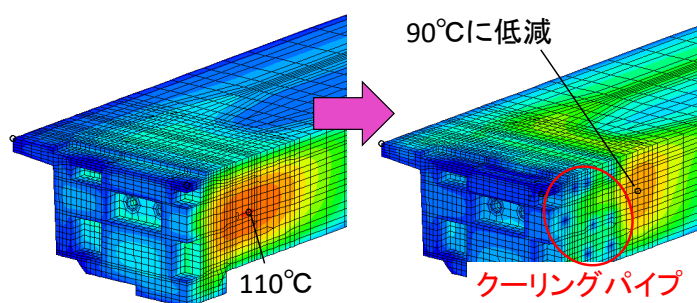


図 4-20 端部横桁のパイプクーリング (事前解析)

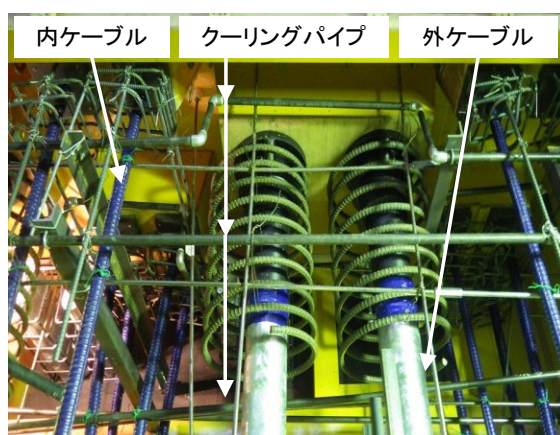


写真 4-8 河川水によるパイプクーリング (端部横桁)

実施工による温度計測結果を図4-21に示す。図より、端部横桁の最高温度（ポイント①）はパイプクーリングによって82°Cに抑えられるとともに、最も温度の低い張出先端（ポイント②）についても前述の給熱養生によってトリガーとなる30°Cの温度履歴を与えることができた。

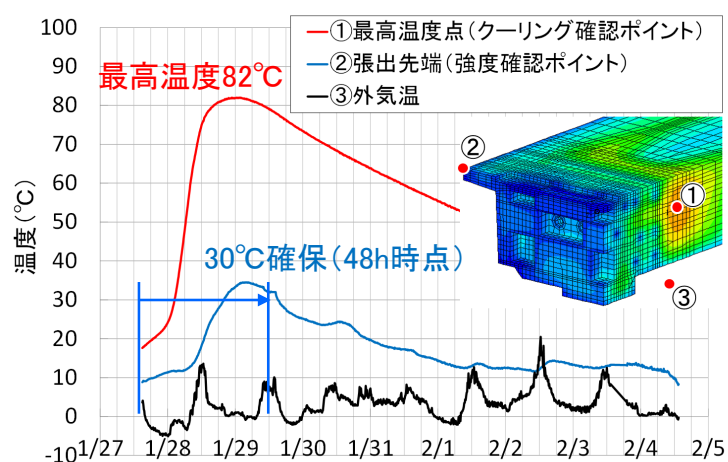


図 4-21 温度計測結果

また、圧縮強度の管理結果について図4-22に示す。図より、張出先端と同じ部材温度で養生したもののについては、第2章で提案した積算温度による推定結果とほぼ一致した。一方で、橋面で養生されていないもの（10°C以下）については、前述の図4-19と同様に圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup>以下の領域での推定精度が下がる結果となった。

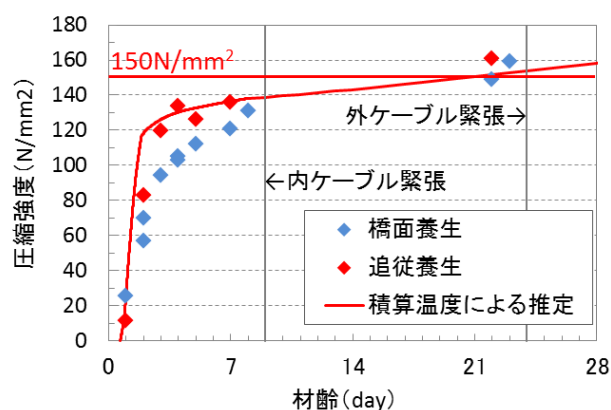


図 4-22 圧縮強度の管理結果

なお、内ケーブルや外ケーブルの緊張のタイミングについては、両者の予測結果を考慮して定め、工程管理に寄与した。

#### 4.4 完成

本橋の完成写真を写真 4-9 に示す。本橋は、UHPFRC (UFC) を国内で初めて (2013 年当時) 場所打ち施工したものである。



写真 4-9 完成写真(全景)



#### 第4章のまとめ

国内で初めて構造物全体を AFt 系 UHPFRC の場所打ち施工で構築することとなり、実施工に先立ち、現場打ちで想定される水平流動での流動距離の限界や、水平・鉛直打重ねの影響把握、第2章で提案した強度推定手法、第3章で取得した発熱特性を反映した温度ひび割れ対策など、プレキャスト部材の製作とは異なる観点での留意点も考慮しながら各種検討を行った。

- ・単純 PC ポストテンション方式 T 桁橋を UHPFRC の現場打ち施工で構築するにあたり、主桁を模擬した打込み実験を実施し、UHPFRC の流動距離と鋼繊維の分散や材料分離抵抗性は 10m まで良好であることを確認した。
- ・UHPFRC の水平・鉛直打重ねを想定した要素試験を実施し、水平打重ねは湿潤状態を 2.5 時間まで確保できれば、突き棒によるかき乱しにて割裂ひび割れ発生強度や引張強度の低下を抑制できる。
- ・鉛直打重ねは繊維の架橋に大きな影響を及ぼし、突き棒によるかき乱しでは、曲げ強度をリファレンスまで回復させることは困難であった。
- ・マスコンである端部横桁は無対策では 110°C まで温度上昇する懸念があったが、実施工ではパイプクリーニングにより 90°C 以下まで低減できた。また、第2、第3章の成果を活用し、温度応力解析により精度よい推定・検証が可能であった。
- ・現場養生のテストピース強度についても、2章で提案した積算温度法によって精度のよい推定・管理が可能であった。ただし、10°C 以下の低温域では、圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup> 以下の領域での精度が下がるという課題もあった。

参考文献

- 1) 一宮利通, 福下敏至, 矢野一正, 中坊 傳: 収縮低減型超高強度繊維補強コンクリートを用いたP  
C水路橋の施工, プレストレストコンクリート技術協会 第 19 回シンポジウム論文集, pp.1-4,  
2010.10
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113,  
2004
- 3) 伊藤康輔, 別府 教, 森田 遼, 一宮利通: 場所打ちによる超高強度繊維補強コンクリート製道路橋  
の設計, プレストレストコンクリート工学会 第 23 回シンポジウム論文集, pp.527-530, 2014.10
- 4) 石中正人, 中山英明, 鳴瀬浩康; シリカフェーム混合セメントにおける加熱養生時の強度発現性に  
及ぼす最高温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, (2008.6), pp.91-96.

## 第5章

マトリクスに生じる

ひび割れの発生機構



## 第5章 マトリクスに生じるひび割れの発生機構

### 5.1 はじめに

ここでは、はじめに UHPFRC のひび割れについてその発生タイミングから以下のように整理する。まず、十分に硬化したマトリクスであれば、仮に外力によってひび割れが生じたとしても繊維の架橋効果によってひび割れは分散し、幅も抑制されるため速やかに耐久性に影響を与えることはないと考えられる。一方で、硬化過程すなわち繊維架橋効果が発揮できない施工段階でのひび割れは幅・深さともに大きくなることが予想されるため特段の留意が必要である。

UHPFRC の優れた力学特性と高い物質移動抵抗性を活用してコンクリート構造物の補修・補強に用いることが期待されている。その場合、UHPFRC は躯体の中で厳しい力学的作用や環境条件に曝される部位に断面修復や増厚として部分的に適用することが想定される。例えば、既設コンクリート構造物へ薄層で打ち込まれた場合、UHPFRC の収縮が既設部材により拘束され、**図 5-1** のように自由端での剥離や増厚材の全断面にわたって引張応力が発生する可能性がある<sup>1)</sup>。前者については、既設コンクリート界面の処理や接着剤といった対処法で解決が可能である。一方、後者の施工時の引張応力に対するひび割れについては幅・深さともに耐久性に影響を与えるものとなる可能性があるため、発生リスクに対して UHPFRC の収縮量や既設コンクリートの拘束度による影響などを把握・理解したうえで対策を施さなければならない。

本章では、拘束を受けた UHPFRC のひび割れ抵抗性を評価するために、まず既存の JIS 規格を基本とした試験にて基礎データを取得するとともに、本試験の拘束度の算出など試験の適用性を検討した。次に、拘束度を変化させることができる TSTM 試験によって完全拘束状態を模擬し、各種養生条件における UHPFRC のひび割れ発生に対する余裕度を評価した。

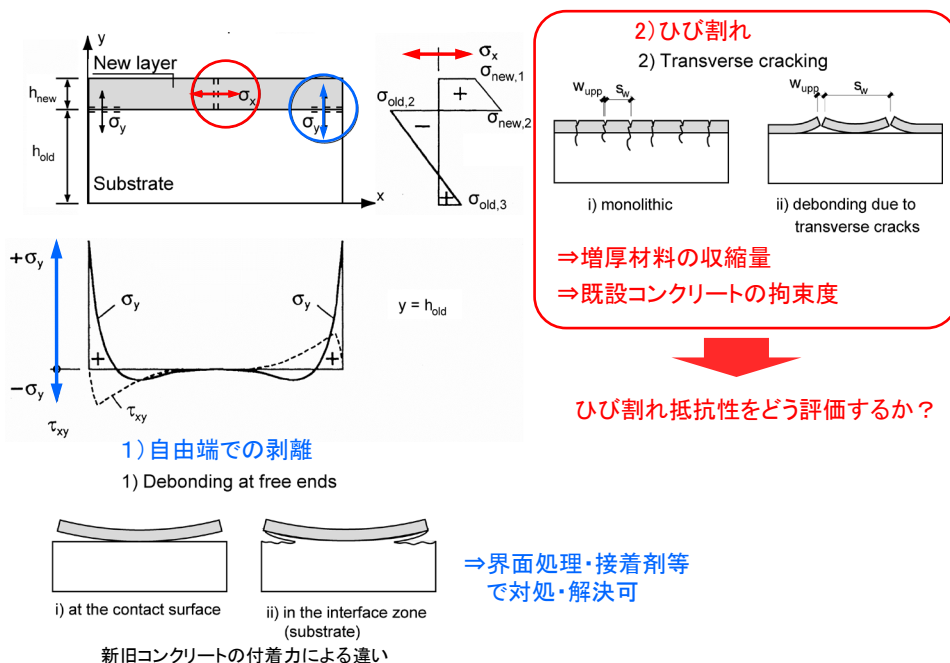


図 5-1 増厚材の収縮による残留応力の状態(既往の文献<sup>1)</sup>に加筆)

5.2 既存の JIS 試験における基礎的検討

5.2.1 既往の拘束試験

現場で比較的薄層に打ち込まれたコンクリートの拘束によるひび割れ抵抗性を評価する方法はこれまでもいくつか提案されており、例えば鋼床版の上面増厚補強に鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を適用することを想定したものとしては、図 5-2 に示すような方法が提案されている<sup>2)</sup>。本試験は、鋼材の上にスタッドジベルを設置し、コンクリートの収縮を拘束するものであり、拘束度は 50~60 程度であると報告されている (図 5-3)。

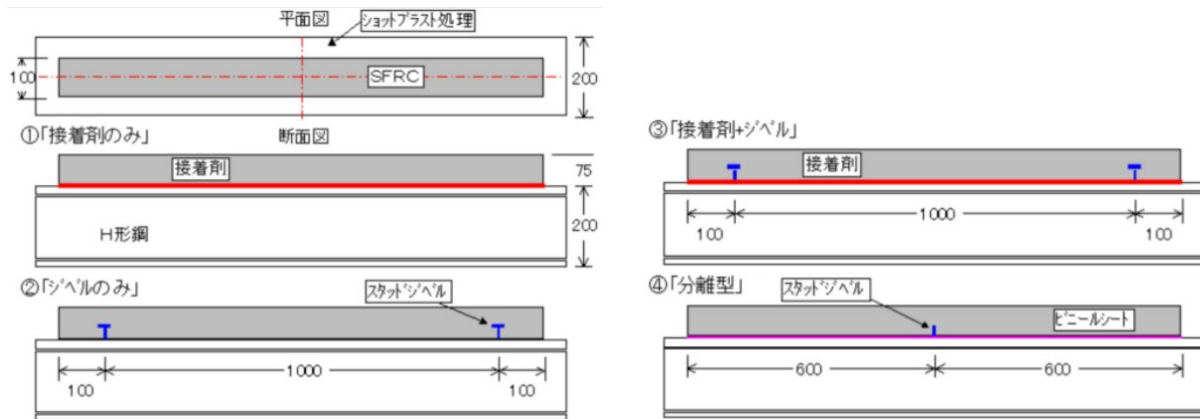


図 5-2 鋼床版上に用いる SFRC 舗装の乾燥収縮拘束率試験<sup>2)</sup>

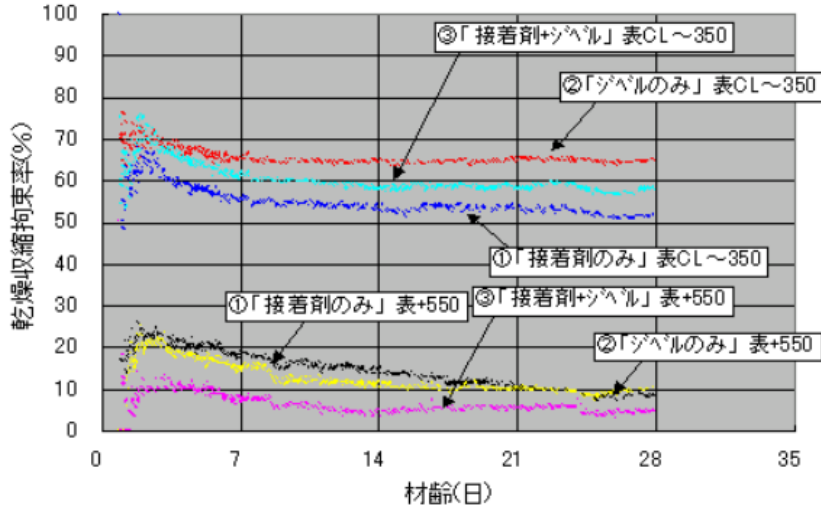
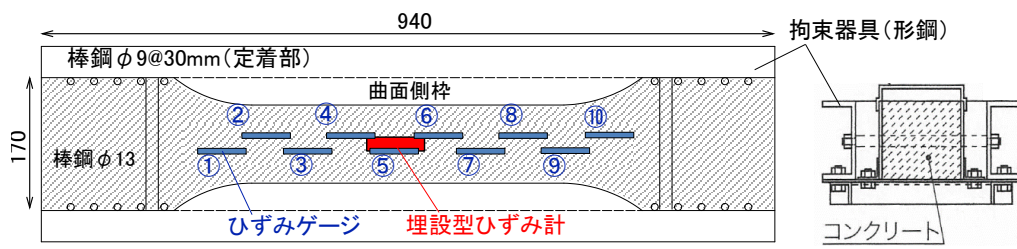


図 5-3 拘束度の算出結果例<sup>2)</sup>

5.2.2 JIS 試験による拘束度の検討

本研究では、収縮に対するひび割れ抵抗性を評価する手法として、JIS A 1151「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」(以下、現行 JIS 法)の型枠を用いた。型枠は図 5-4 に示すように、ダンベル状の型枠の両端に収縮を拘束する形鋼や棒鋼が設置されている。

現行 JIS 法では、コンクリート打込み後は温度 20°C で 7 日間湿潤状態を保った後に曲面部の側枠を取り外し、温度 20°C、相対湿度 60% で乾燥を開始としているが、実施工においては薄層で平面状に打ち込まれる UHPFRC の乾燥面は上面のみであることを鑑み、本研究では UHPFRC の収縮が収束するまでは側枠を取り外さないことを基本とした。また、型枠の中心部には測温機能付きの埋設型ひずみ計を、打込み翌日の硬化した打込み面にはひずみゲージを設置して、経時的な長さ変化を測定した。試験状況を写真 5-1 に示す。



< 現行 JIS 法 >

- ・材齢 28 日強度で 45MPa 以下
- ・材齢 7 日で曲面側枠を脱型
- ・乾燥開始時から目視観察

※ひずみゲージ(側面 2 点)  
もしくはコンタクトゲージ(上面 1 点)で計測

< 本研究 >

- ①脱型せず(乾燥は上面のみ)
- ②打込み翌日にひずみゲージ(上面に 10 点貼付)
- ③埋設型ひずみ計により打込み直後から計測

図 5-4 JIS A 1151 拘束試験体(現行 JIS 法と本研究での計測案)

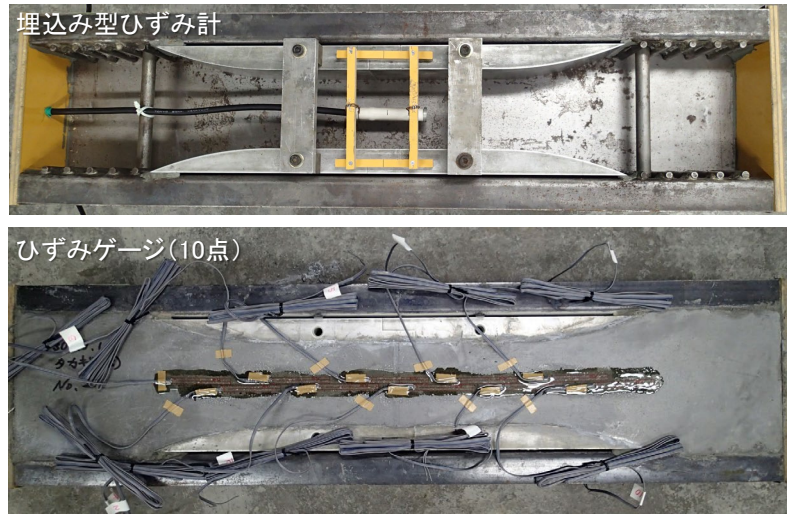


写真 5-1 試験状況

5.2.2.1 検討水準および配合

検討ケースを表 5-1 に、試験に供したコンクリート配合を表 5-2 に示す。本研究では、鋼橋 RC 床版の上面増厚工法に従来から用いられている鋼繊維補強コンクリート (SFRC)<sup>3)</sup> を比較対象とし、膨張材の効果も併せて確認した (No.1, 2)。UHPFRC は、土木学会 UFC 指針に準拠したマトリクスと鋼繊維量からなるエトリンガイト生成系 UHPFRC (No.3) と、鉄筋部までの打替えといった拘束がより厳しい条件への用途を想定して膨張材および収縮低減剤の添加に加え、鋼繊維を増量した配合 (No.4) とした。

なお、No.4 に用いたワラストナイトは針状の鉱物であり、マトリクスのひび割れ発生強度の改善を期待して混入したものである。

表 5-1 検討ケース

No.	材料	配合条件				計測方法	
		膨張材 EX	収縮低減剤 SRA	ワラストナイト WR	繊維量 (kg/m <sup>3</sup> )	埋設型 ひずみ計	ひずみ ゲージ
1	SFRC	—	—	—	100.0	○	○
2		○	—	—		○	—
3	AfT 系	—	—	—	137.5	○	○
4	UHPFRC	○	○	○	235.5	○	—

表 5-2 検討配合

No.	材料	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									鋼繊維 SF*** (kg/m <sup>3</sup> )
		水 W	結合材 B*	膨張材 EX**	ワラスト ナイト	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤	高性能 減水剤	収縮 低減剤 SRA	
1	SFRC	175	365	—	—	963	762	2.6	—	—	100.0
2		175	345	20	—	963	762	3.3	—	—	100.0
3	AfT 系	195	1287	—	—	912	—	—	34.8	—	137.4
4	UHPFRC	195	1257	30	65	879	—	—	37.3	12.9	235.5

\*結合材：SFRC は早強ポルトランドセメント/UHPFRC は専用品

\*\*膨張材：SFRC は石灰系/UHPFRC はエトリンガイト・石灰複合系

\*\*\*鋼繊維：SFRC は繊維長 30mm (両端フック型) /UHPFRC は繊維長 15mm (ストレート)



5.2.2.2 試験結果

埋設型ひずみ計による材齢 210 日（7 か月）までの計測結果を図 5-5 に示す。SFRC は No.1, 2 とともに収縮が収束しておらず、膨張材を混和していない No.1 については材齢 200 日頃にひび割れが発生した（写真 5-2）。これに対し UHPFRC は、No.3 は材齢 90 日頃にひび割れ発生と考えられるひずみの変化が計測された。この時点で目測やアセトン塗布による確認を行ったが、表面にはひび割れが認められなかったため、マトリクス内部に微細なひび割れが発生していると推察した。また、No.4 は収縮ひずみが材齢 20 日程度で収束しており、膨張材や収縮低減剤の効果が認められた。

ただし、No.4 については収縮が収束した時点で曲面側枠を取り外したことで直後から収縮ひずみが大きくなってしまった。側枠の取外しは乾燥収縮を促進させることが目的であったが、その後のひずみに長期的な変化が見られないことから、側枠を外すことは拘束効果を下げる結果となり、コンクリートのひび割れ抵抗性を比較・評価する際には、側枠を外さない方がより安全側で評価できるものと考えられる。

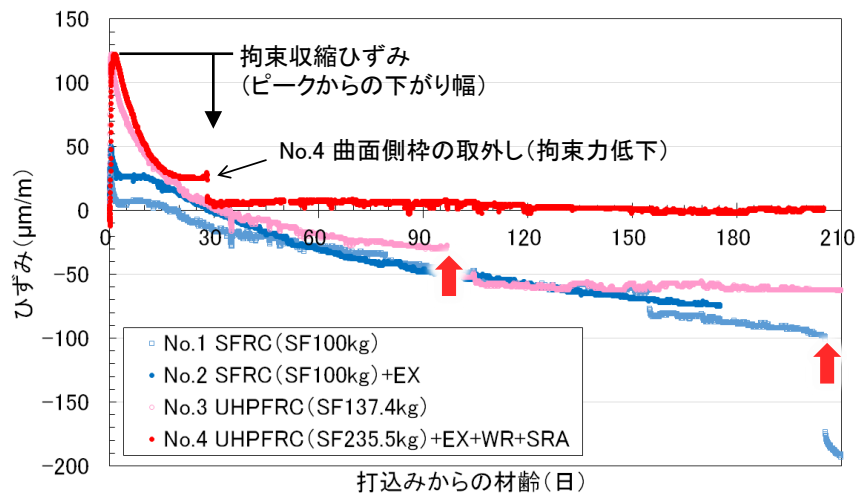


図 5-5 拘束収縮ひずみ(埋込み型ひずみ計)

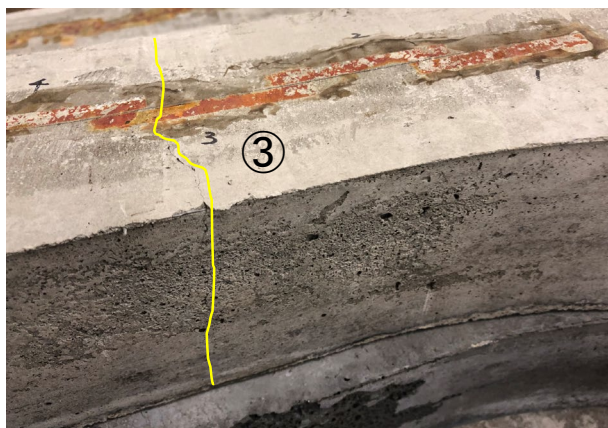


写真 5-2 ひび割れの発生状況(No.1 SFRC, ひずみゲージ③付近)

本研究で用いた現行 JIS 法の拘束試験体の拘束度を以下の式から算出する（ここで、完全拘束は拘束度 1.0）。材齢 180 日時点の計測結果で整理すると、表 5-3 のように SFRC や UHPFRC の収縮は 70～80%程度 の抑制すなわち拘束度 0.7～0.8 程度であることが明らかとなり、ひび割れ抵抗性を相対的かつ定量的に評価するのに有用であると判断された。なお、この試算で用いた自由収縮ひずみは過去の保有データであるため、より正確な拘束度を求めるには拘束試験と同じタイミングで自由収縮ひずみを取得する必要がある。

$$\text{拘束度} = 1 - (\text{拘束収縮ひずみ} / \text{自由収縮ひずみ}) \quad \text{式 (1)}$$

表 5-3 拘束度の算出(材齢 180 日時点)

No.	材料	材齢 180 日時点での整理		
		拘束収縮ひずみ* (μm/m)	自由収縮ひずみ (μm/m)	拘束度***
1	SFRC	122	600～800	0.80～0.85
2	SFRC+EX	125	400～600	0.69～0.79
3	UHPFRC	150	600～800	0.75～0.81
4	UHPFRC+EX+WR+SRA	100	400～600	0.75～0.83

\*拘束収縮ひずみはひずみのピーク（膨張側）からの下がり幅

\*\*自由収縮ひずみは過去のデータ

\*\*\*拘束度 = 1 - (拘束収縮ひずみ / 自由収縮ひずみ)      完全拘束 = 拘束度 1.0

次に、硬化した打込み面に設置したひずみゲージによる計測結果を図 5-6 に示す。図は代表として No.3 の例を示したものであるが、ひずみゲージの位置によって拘束収縮ひずみ量が異なり、試験体の中央付近（⑤）が最も小さく、拘束度も埋込み型ひずみ計よりも拘束度が高く算出される結果であった。結果は割愛するが、No.1 の計測結果も同様であり、ひずみゲージを設置していない No.2, 4 も同じ傾向になると思われる。以上より、より安全側の評価で、かつ打込み直後からひずみを計測できる埋込み型ひずみ計の方が乾燥収縮よりも自己収縮が卓越する UHPFRC には有用であると考えられる。

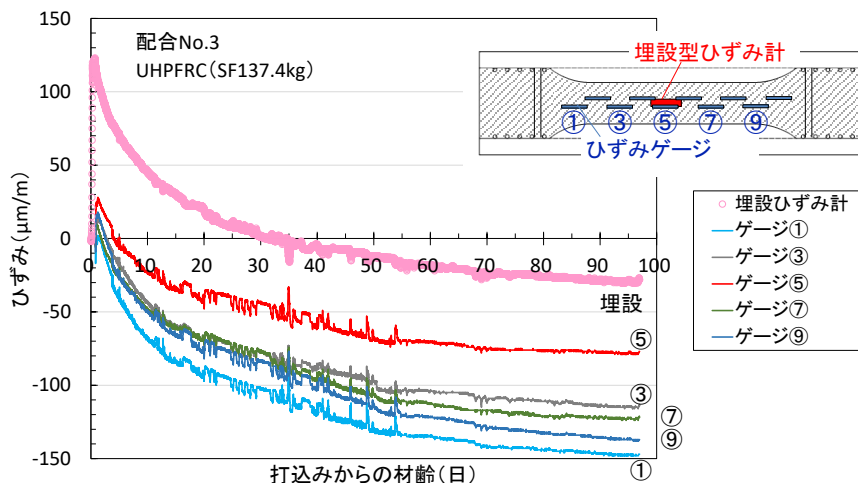


図 5-6 拘束収縮ひずみ(ひずみゲージ, No.3 SFRC を例に)

### 5.3 TSTM 試験による詳細検討

#### 5.3.1 TSTM 試験について

ここでは、若材齢時に拘束を受ける UHPFRC の挙動をより詳細に把握・検証するために、材料の温度条件と拘束条件を任意に変えることが可能な一軸拘束型の TSTM 試験装置 (Temperature-Stress Testing Machine) を用いて収縮拘束試験を実施した。TSTM 試験装置は図 5-7 に示すように一軸方向の膨張・収縮変形が自由な「無拘束供試体」と、ロードセルで一軸方向の変形を拘束できる「拘束供試体」から構成される。2 つの供試体を同一の温度条件下に置き、無拘束供試体に発生したひずみを基にして、設定した拘束度に相当するひずみの発生を拘束供試体に許容することで拘束条件下におけるセメント系材料の挙動をシミュレートする試験装置である<sup>3)</sup>。すなわち、前述の式 (1) に示す拘束度を 0.7 と設定した場合、一定時間に無拘束供試体に発生したひずみの 30% に相当するひずみの発生を許容するように拘束供試体の変形をアクチュエータで制御する、というものである。

型枠周囲には通水パイプが設置されており、温冷水によって設定された温度履歴通りに制御できるようになっている。また、両供試体ともに周囲をビニールシートで覆い、水分逸散と型枠との付着による拘束を防いでいる。各供試体のひずみは、供試体の両側面に設置された変位計により測定された変形量を基に算出し、変形の制御に用いる。供試体に加えられた力は型枠とアクチュエータの間に設置されたロードセルにより測定される。本研究では約 1 秒間隔で変形を制御した。

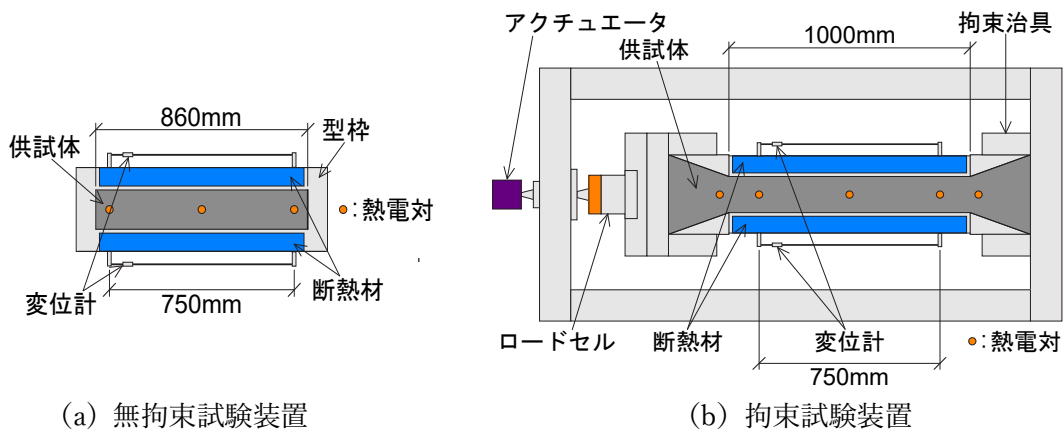


図 5-7 TSTM 試験装置



写真 5-3 TSTM 試験状況

### 5.3.2 検討水準および配合

まず、本研究では「拘束度を1.0（完全拘束）」と設定した。実際にはUHPFRCの収縮の拘束により発生する引張応力は部材の面内・面外変形や変位により緩和される<sup>4)</sup>ことになるが、例えばコンクリート床版の上面や橋脚の側面を研ってUHPFRCにより打ち替えたり増厚したりする場合、既設部材との界面近くのUHPFRCが最も厳しい拘束条件となることを想定した。

次に、本研究での検討水準を表5-4に、UHPFRCの配合を表5-5に示す。温度条件は2種類とし、1つは全試験期間にわたりパイプ内の通水温度を20°Cとしたもの（拘束試験1）、もう1つは材料の凝結始発まで通水温度を20°Cとした後は40°Cを8時間保ち、その後は20°Cまで下降させて試験終了まで保持したもの（拘束試験2）である。拘束試験2は電熱マット等により加温養生する状況を想定している。

拘束試験1では、さらに試験期間を短くしたもの（6日間、拘束試験1-i）と長くしたもの（15日間、拘束試験1-ii）の2ケースに分けた。拘束試験2はより長期的な挙動を把握するために、試験期間を37日間とした。なお、本研究では収縮の拘束により生じる挙動を検討することに主眼を置いたことから、試験開始は型枠への打込み直後からではなく、収縮の開始が想定された凝結の始発前後とした。具体的には、拘束試験1-iでは注水から5.8時間経過した時点、拘束試験1-iiと拘束試験2では注水からそれぞれ8.9時間と8.6時間経過した時点からとした。

表 5-4 TSTM 試験における温度条件

時間	拘束試験 1			拘束試験 2	
	温度	測定		温度	測定
		i	ii		
注水	20°C 一定	5.8h	—	20°C	—
凝結始発（約 8h）		↓	8.9h		8.6h
昇温（+2h）		↓	↓	+10°C/h	↓
保持（+8h）		↓	↓	40°C一定	↓
降温（+4h）		↓	↓	-5°C/h	↓
保持		↓	↓	20°C	↓
終了		6日	15日		37日

表 5-5 AFt 系 UHPFRC の配合

No.	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							鋼繊維 SF*** (kg/m <sup>3</sup> )
		水 W	結合材 B*	膨張材 EX**	ワラストナイト WR	細骨材 S	高性能減水剤 SP	収縮低減剤 SRA	
試験 1- i	15.2	195	1257	30	64	846	37.3	12.9	235.5
試験 1- ii 試験 2					—	905			

\*結合材：プレミックス（専用品）

\*\*膨張材：エトリンガイト・石灰複合系

\*\*\*鋼繊維：繊維長 15mm（ストレート）、φ0.2mm

### 5.3.3 試験結果

#### 5.3.3.1 収縮ひずみ

拘束試験1および拘束試験2における無拘束供試体のひずみの経時変化を図5-8に示す。まず、20°C一定とした拘束試験1については、試験1-i、1-iiともにほぼ同等のタイミングおよび速度で収縮が進み、注水から24時間で400~500 $\mu\text{m}/\text{m}$ に達した。これはAFt系UHPFRC（収縮低減タイプ）の全収縮量600~700 $\mu\text{m}/\text{m}$ のうち約65%が材齢1日未満の材齢初期に収縮していることを示している。また、収縮量に対してワラストナイトの有無は影響がないと判断した。

次に、40°C養生を行った拘束試験2については、注水から37日間の試験終了時点で約300 $\mu\text{m}/\text{m}$ に達した。これは、昇温時に生じた235 $\mu\text{m}/\text{m}$ の膨張により収縮補償された効果によるものだが、これを考慮しない収縮のみの場合でも約550 $\mu\text{m}/\text{m}$ であり、拘束試験1よりも収縮量が小さい結果となった。

無拘束供試体による本試験結果だけで判断すれば、UHPFRCに対して水和初期に加温養生を施すことでトータルの収縮量を抑制できるという結果であった。

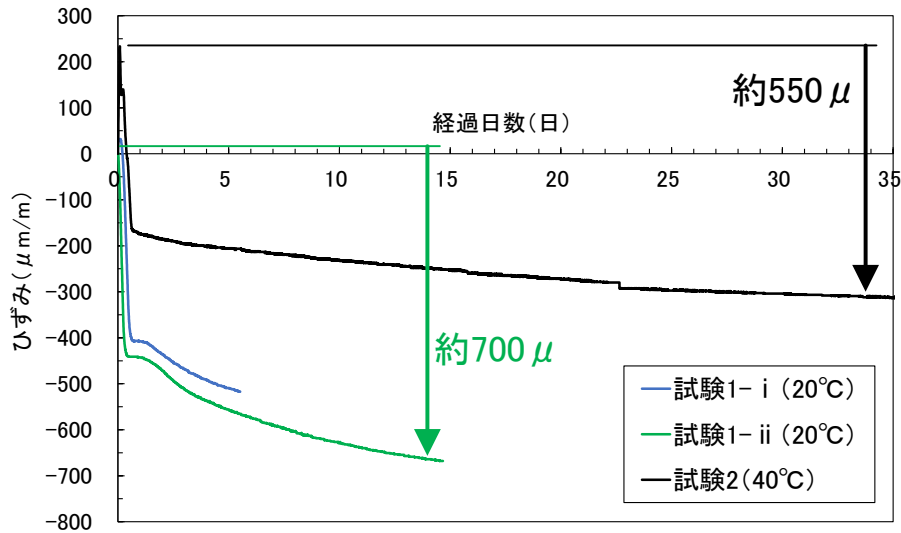


図5-8 無拘束供試体のひずみの経時変化



5.3.3.2 発生応力とひび割れ発生強度

次に、拘束供試体に発生した応力の経時変化を図 5-9 に示す。前述の無拘束供試体の収縮ひずみは拘束試験 2 の方が試験 1 よりも小さかったにもかかわらず、拘束供試体の発生応力は試験 2 の方が大きい結果となった。また、その応力も注水から 1 日までの材齢初期に発生している。

なお、本研究ではいずれの試験でも拘束度 1 の状態でひび割れは発生していない。

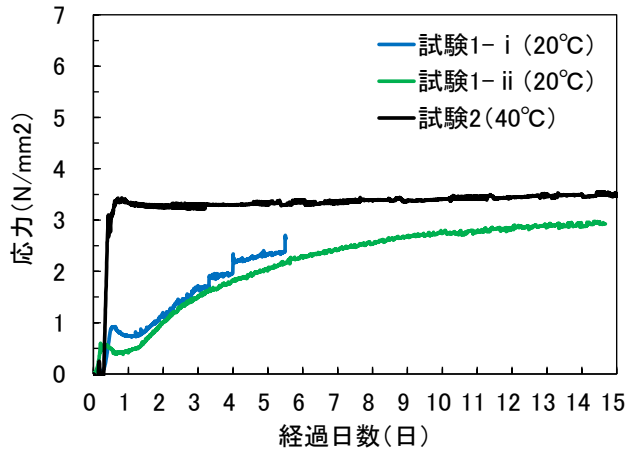


図 5-9 拘束供試体における応力の経時変化

この計測された拘束応力に対する余裕度を評価・判断するために、AFt系 UHPFRC のひび割れ発生強度の発現（推定曲線，後述）を重ねると図 5-10 のようになる。以上から、結果としては「ひび割れが発生していない」ものの、拘束試験 1 は発生応力に対して十分な余裕があるのに対し、試験 2 では特に材齢初期に余裕度が小さく、潜在的にはひび割れが発生しやすい状態であったと推察された。

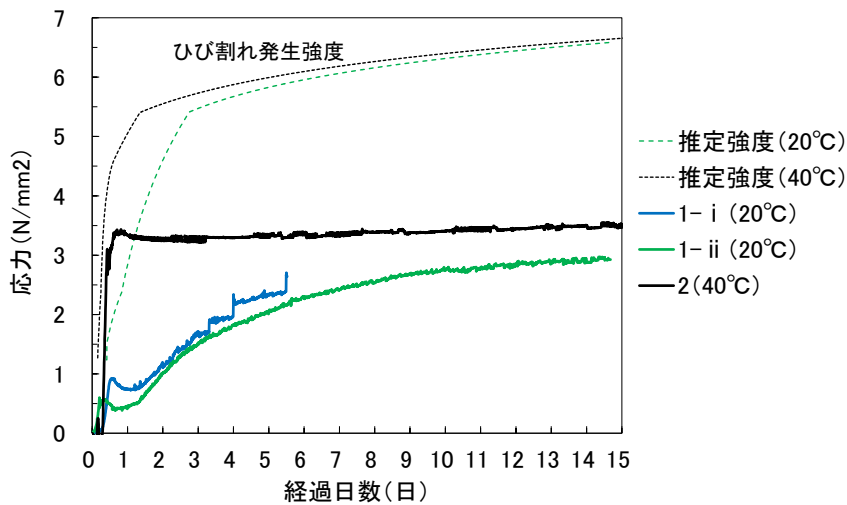


図 5-10 発生応力とひび割れ発生強度の関係

国枝ら<sup>4)</sup>は、無拘束供試体での自由収縮ひずみの大小は必ずしも拘束応力に影響を与えるのではなく、養生方法や弾性係数の発現の違い、クリープによる応力緩和特性が関係すると考察している（例えば、気中乾燥・封かんの比較では、乾燥させた方が応力が緩和される、など）。

本研究における拘束供試体の測定温度は以下の図 5-11 に示すとおりであり、拘束試験 1（20°C一定養生）は常時 20°Cで保たれているのに対して、拘束試験 2（40°C-8h 養生）は AFt 系 UHPFRC 自身の水和熱も相まって 55°Cまで温度上昇している。この時の弾性係数の発現（推定曲線、後述）は図 5-12 に示す通りであり、試験 2 は初期の加温養生によって弾性係数が早期に発現しており、これが発生応力の増大した一員であると考えられた。

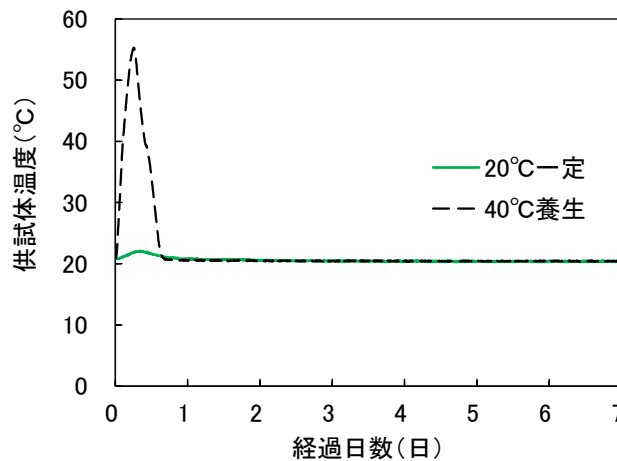


図 5-11 拘束供試体の温度

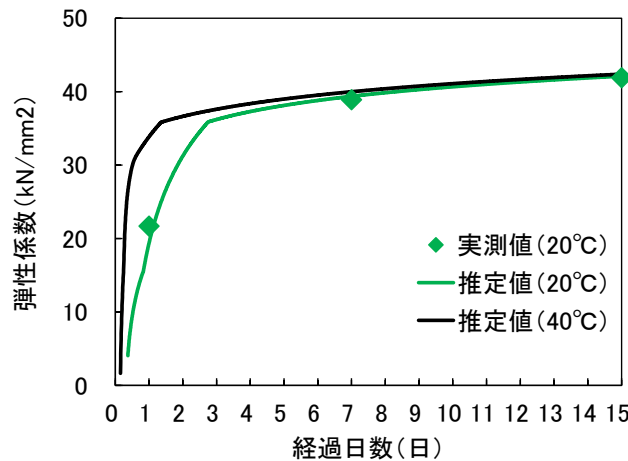


図 5-12 弾性係数の発現 (20°C養生は実測もプロット)

なお、前述のひび割れ発生強度や弾性係数の発現（推定曲線）の算出については、第2章の「積算温度による圧縮強度の推定」から、「圧縮強度と割裂ひび割れ発生強度の関係」および「圧縮強度と弾性係数の関係」を用いた（図5-13）。

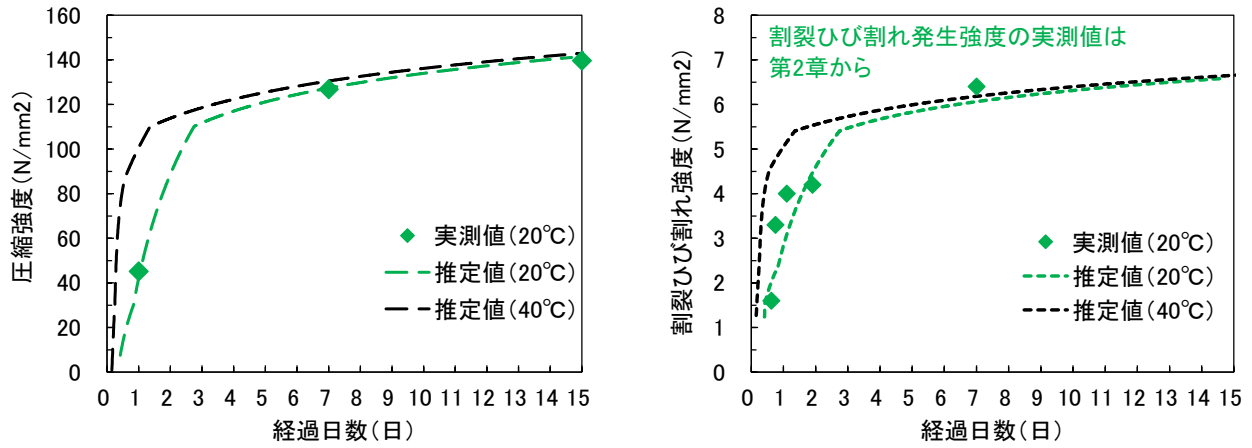


図 5-13 ひび割れ発生強度の推定曲線の算出

以下、第2章の算出式を再掲する。

ひび割れ発生強度と圧縮強度の関係

$$f_{cr} = 0.0379f'_c + 1.2368 \quad \text{第2章の式(1)}$$

圧縮強度と弾性係数の関係

$$E_c = 1.77f_c^{0.64} \quad \text{第2章の式(2)}$$

積算温度の補正式

$$M' = \int_0^t (T - B) dt \quad \text{第2章の式(5)}$$

$$B = -10 \times 2^{a-1}$$

積算温度と圧縮強度の関係

- ・  $M' \leq 505$  の場合（水和初期）

$$f'_c = 75.247 \times \log_{10} M' - 191.21$$

- ・  $505 < M' \leq 2296$  の場合（加速期）

$$f'_c = 158.98 \times \log_{10} M' - 417.53$$

第2章の式(6)

- ・  $2296 < M'$  の場合（漸増期）

$$f'_c = 43.112 \times \log_{10} M' - 28.094$$



## 第5章のまとめ

既設コンクリートの補修・補強として UHPFRC を薄層で打ち込んだ場合、UHPFRC の収縮は既設コンにより拘束され、UHPFRC の全厚にわたって引張応力が発生する恐れがある。この挙動を把握し、ひび割れの発生機構を理解・考察するために2つの拘束試験を実施した。

- ・既存の JIS 試験「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」を用いて、その適用性を検討した結果、打込み直後からひずみを計測できる埋設ひずみ計を用いることで拘束された状態でのひずみを計測できることが確認された。また、膨張材や収縮低減剤による効果も定量評価できる可能性がある。
- ・JIS 試験による拘束度はおよそ 0.7~0.8 であると判断された。ただし、試験をする場合には、側枠を取り外すと拘束効果を下げる恐れがある。
- ・TSTM 試験装置 (Temperature-Stress Testing Machine) によって拘束度 1.0 (完全拘束) での詳細試験を行った結果、20°C一定の状態では引張応力に対してひび割れ発生強度の余裕度が大きい。
- ・ただし、材齢初期 (凝結始発後) に給熱養生を行うと、UHPFRC の収縮量は小さくなるが、弾性係数の増大が速くなり、拘束応力が大きくなることでひび割れ発生リスクが高まることには留意が必要である。
- ・UHPFRC の自己収縮は注水から 24 時間でその大部分が発生するため、収縮に対する拘束応力、弾性係数の増大、抵抗するひび割れ発生強度、クリープによる応力緩和などのバランスに留意した養生が必要である。

参考文献

- 1) K.HABEL : Structural Behavior of Elements Combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes(UHPFRC) and Reinforced Concrete, EPFL 博士論文, 2004
- 2) 越川喜孝, 中丸 貢, 児玉孝喜, 村越 潤, 有馬敬育 : 鋼床版上に用いる鋼繊維補強コンクリート舗装の乾燥収縮拘束率に関する報告, 土木学会第 61 回年次学術講演会 (平成 18 年 9 月), pp.237-238
- 3) 溝渕利明, 石関浩輔, 閑田徹志, 新井淳一 : 高炉スラグ高含有セメントコンクリートのひび割れ抵抗性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.531-536, 2016.
- 4) 国枝 稔, 志水康祐, 丸山一平, 中村 光 : 疑似完全拘束試験による断面修復材の収縮ひび割れ抵抗性の評価, 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.7-12, 2010

## 第6章

マトリクス内における

繊維の健全性とその影響



## 第6章 マトリクス内における繊維の健全性とその影響

### 6.1 はじめに

高強度、高じん性、高耐久性といった優れた性能を有するのが UHPFRC の特長である。UHPFRC の補強繊維には鋼繊維が用いられることが多いが、マトリクスの硬化体組織が緻密であるため、塩化物イオンや水、酸素といった鋼材腐食物質から保護されていることも相性の良さである。しかし、UHPFRC にひび割れが生じると、ひび割れ部に露出（架橋）している繊維が腐食することによって力学性能の低下を引き起こすことが懸念されている。これまでも海洋環境で実暴後の曲げ試験や、水中での曲げ疲労試験など様々な検証がされているが、明らかに力学特性の低下が生じるという報告はなく、ひび割れが残留した UHPFRC の耐久性の実証や力学的挙動が明らかにされているとは言い難い。

また、合成繊維を用いた UHPFRC については、鋼繊維のような腐食の恐れはないものの、マトリクス中の高アルカリ環境による劣化（加水分解）、環境温度による材料特性の変化（温度依存性）などといった影響は明らかにしておく必要がある。

本研究では、「各種環境条件におけるマトリクス内の繊維の健全性」を確認し、それが UHPFRC の力学特性に与える影響を検証することを主眼に実験的検討を行った。

### 6.2 鋼繊維を用いた UHPFRC

#### 6.2.1 長期評価用供試体の作製

##### (1) 使用材料および配合

鋼繊維を用いた UHPFRC のマトリクスは、表 6-1 に示すとおりこれまで同様にエトリンナイト生成系の超高強度モルタルである。

表 6-1 AFt 系 UHPFRC の配合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					補強用 <sup>*5</sup> 鋼繊維 (kg)
		水 <sup>*1</sup>	結合材 <sup>*2</sup>	骨材 <sup>*3</sup>	高性能 <sup>*4</sup> 減水剤	消泡剤	
15.2	2.0	195	1,287	905	32.2	6.4	137.4 (1.75vol%)

\*1～5：詳細は 2 章を参照

##### (2) 供試体の採取

本研究に用いた供試体は、写真 6-1 に示すように羽田空港 D 滑走路の棧橋部に適用した UFC 製プレキャスト PC 床版の製作時<sup>1)</sup>に、併せて採取したものである。供試体の養生は、床版と同様に打込み後に養生シートを被せ、温度 20～30℃の環境で 12～16 時間後に脱型し、その後蒸気養生槽にて最高温度 85℃を 24 時間保持させている。



写真 6-1 供試体の作製状況(床板の製作工場にて)

曲げ供試体は、JSCE-G552「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法(案)」に準じ、切欠きのない3等分点曲げ試験を行った(支点間距離 300mm)。荷重状況を写真 6-2 に示す。ひび割れ幅をマイクロスコープで直接計測するとともに、等曲げ区間に設置した  $\pi$  型変位計の変位をひずみに換算して、除荷後に所定のひび割れ幅やひずみが残留するよう管理した。ひび割れ導入時の応力-たわみ曲線の一例を図 6-1 に示す。

本手法にて、①ひび割れなし(荷重なし)、②残留ひずみ  $200\mu$ (ひび割れ目視できず)、③残留ひび割れ 0.1mm 程度(実測 0.13~0.16mm)の3種を基本の分類とした。なお、0.1mm 以上のひび割れ幅を残留させるには、ピーク強度 ( $30.3\text{N/mm}^2$ ) の約9割の応力が必要であった。



写真 6-2 曲げ供試体へのひび割れ導入状況

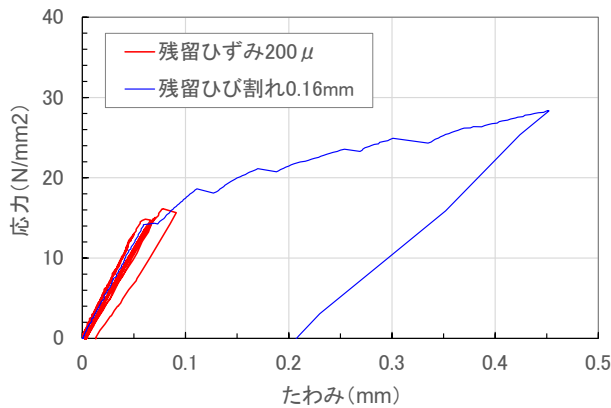


図 6-1 応力-たわみ曲線の例(曲げ荷重によるひび割れ導入時)

6.2.2 暴露条件および試験ケース

供試体は、国立研究開発法人港湾空港技術研究所（神奈川県横須賀市）内の長期暴露試験施設のうち「海水シャワー暴露試験場」に設置した。試験場の概要を図6-2に、暴露状況を写真-2に示す。飛沫帯を模した本試験場は、「自然海水散布 4hr+乾燥 8hr」を1サイクルとしており、人工海水でなく実際の海水を使用することで、Mg等の影響も加味できる。

ここで、当初計画では4年間の暴露期間を全て本試験場で海水散布する予定であったが、メンテナンスにより約1年4か月は海水散布が停止しており、この期間は同施設の「海上大気暴露試験場」と同等の環境とみなした。なお、供試体はひび割れ導入面（引張縁）が上面となるように設置した。

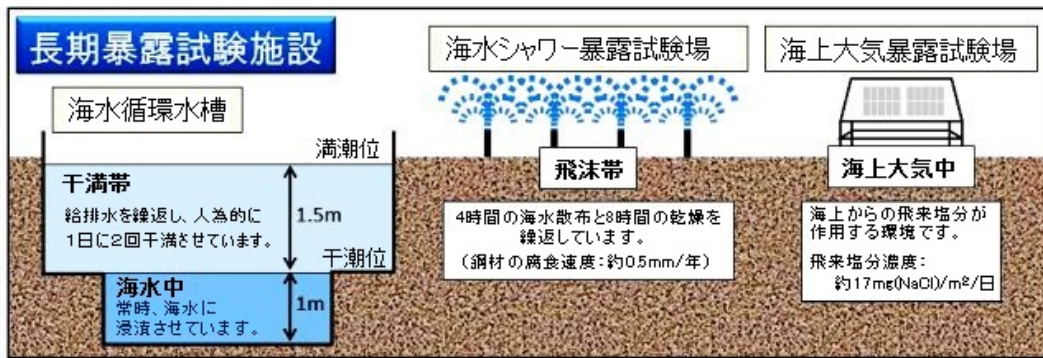


図6-2 暴露試験場の概要(港湾空港技術研究所 HP より)



写真6-3 暴露状況(引張縁, ひび割れ面が天端となるよう設置)



本研究では表 6-2 に示すとおり、2, 4, 5, 11 年間の暴露から供試体を回収したのち、静的強度試験として圧縮強度試験、曲げ強度試験を、疲労試験として気中環境での曲げ疲労試験を行った。

表 6-2 試験ケース

環境	経過	No.	ひび割れ 導入	静的強度試験		疲労試験	分析試験	
				圧縮	曲げ	曲げ	EPMA 反射電子像	細孔 構造
海洋 暴露	0年		なし	○3	○3	○3		
	2年		なし	○3				○1 3章
	4年	①	なし		○1	○2	○1	
		②	残留ひずみ 200 $\mu$		○1	○2	○1	
		③	残留ひび割れ 0.1mm		○1	○2	○1	
	5年		なし	○3				
	11年	①	なし	○3			○1 EPMAのみ	○1 3章
		②	残留ひずみ 200 $\mu$				○1 EPMAのみ	
		③	残留ひび割れ 0.1mm				○1 EPMAのみ	

\*：○印の数字はN数，細孔構造については第3章を参照



### (1) 静的強度試験

疲労試験に先立ち、回収した供試体の静的強度を把握するために圧縮強度試験 (JIS A 1108) および曲げ強度試験 (JSCE-G552) を実施した。試験は応力制御とし、圧縮強度試験の载荷速度は  $0.6\text{N/mm}^2/\text{sec}$ 、曲げ強度試験は  $0.06\text{N/mm}^2/\text{sec}$  とした。曲げ強度試験については、土木学会 UFC 指針に準じて、曲げひび割れ発生強度から割裂引張試験によるひび割れ発生強度も換算した。

### (2) 各種分析試験

暴露後の供試体から図 6-3 に示すようなひび割れを含む形で試料を切り出し、JSCE-G574-2005 に準じて電子マイクロアナライザ (EPMA) による面分析にて塩化物イオンの浸透状況を確認した。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) による反射電子像を観察し、鋼繊維の腐食状況を確認した。

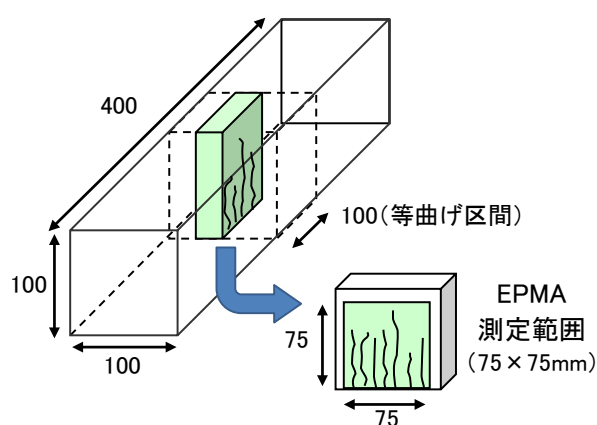


図 6-3 分析試料の切出し方法

(3) 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験は、写真 6-4 に示す 500kN サーボパルサを用いて図 6-4 に示すような荷重および計測方法で実施した（支点間距離 320mm）。試験は気中で行い、変位はレーザー変位計とアクチュエータのストローク変位計で計測した。また、①ひび割れなし、②残留ひずみ供試体については、等曲げ区間に  $\pi$  型変位計を設置し、③残留ひび割れ供試体については、最大のひび割れ幅を跨ぐように亀裂変位計を設置し、開口変位を計測した。

いずれの供試体においても、荷重応力は、回収した供試体のうち、①ひび割れなし供試体の静的曲げ強度  $f_m$  の 40%とし、下限応力  $\sigma_{min}$  は  $f_m$  の 5%とした。試験は 4Hz の荷重制御で最大 200 万回の繰返し荷重とした。

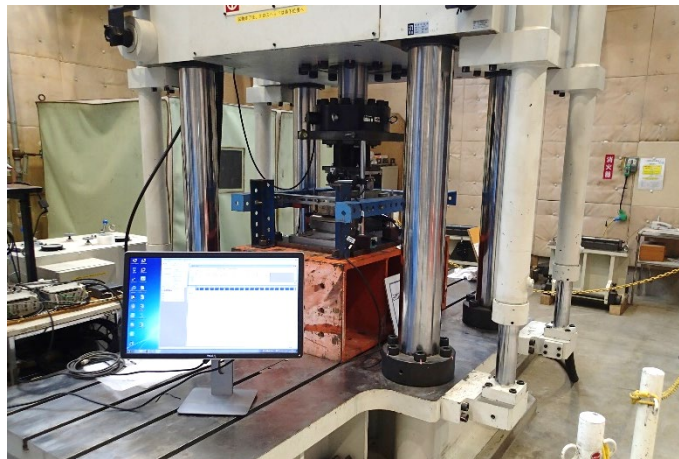


写真 6-4 疲労試験機(サーボパルサ)



レーザー変形・ $\pi$ 型変位計



亀裂変位計

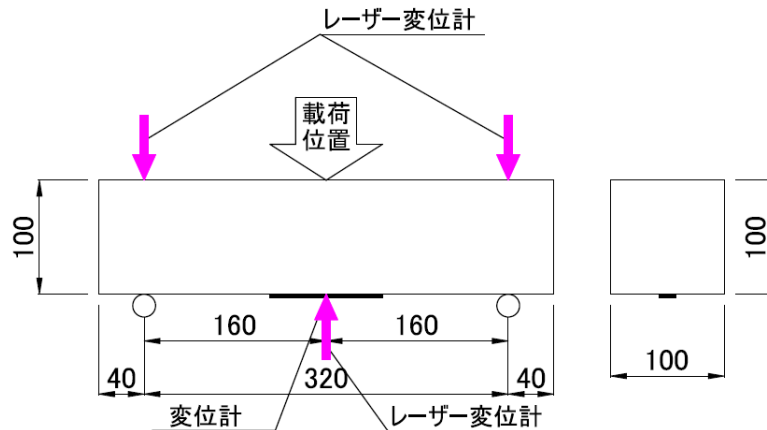


図 6-4 曲げ疲労試験における荷重および計測方法

## 6.2.3 試験結果

## 6.2.3.1 静的強度試験結果

## (1) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験は暴露から2, 5, 11年後に実施した。表6-3に示すように圧縮強度は、初期値(床板製作時): 196.1N/mm<sup>2</sup>, 2年後: 206.1N/mm<sup>2</sup>, 5年後: 230.6N/mm<sup>2</sup>, 11年後: 216.2N/mm<sup>2</sup>であり、大小のばらつきはあるが蒸気養生後も11年間にわたり強度が徐々に増加する傾向を示した。

細孔構造についても3章に示すように、マトリクスは緻密化している傾向となっている。

表6-3 静的強度試験結果

環境	経過	No.	ひび割れ	圧縮	曲げ強度試験			
					曲げ	曲げ ひび割れ	割裂* ひび割れ	割裂* 引張
海洋 暴露	0年		なし	196	30.3	13.8	9.5	10.2
	2年		なし	206				
	4年	①	なし		32.2	14.2	10.9	13.6
		②	残留ひずみ 200 $\mu$		29.9			10.9
		③	残留ひび割れ 0.1mm		32.1			11.8
	5年		なし	231				
	11年		なし	216				

\*: UFC 指針の換算式に則り算出

## (2) 曲げ強度試験結果

暴露4年後の静的曲げ強度の応力-たわみ曲線を図6-5に示す。①ひび割れがない供試体では、暴露前の初期値に対して暴露後はピーク強度が増加している。これは、前述の圧縮強度の増加に示すように、繊維周辺のマトリクスが緻密化されていることが理由と推察される。これに対し、②残留ひずみを $200\mu$ 与えた供試体では、ピーク強度は初期値に対して横ばいであるが、前述①が強度向上していることを鑑みると、本供試体はマイクロクラックによって強度が若干低下しているものと判断された。さらに、③残留ひび割れ幅 $0.1\text{mm}$ 程度の供試体では、初期値に対してピーク強度の増加が認められるとともに、ピーク以降の維持応力も高くなった。これは、残留ひび割れから侵入した塩化物イオンや酸素によって鋼繊維周囲に腐食生成物が発生し、マトリクスとの付着力や引抜き抵抗性が向上したためと推察された。なお、いずれのケースにおいても曲げ試験後の供試体はひび割れ面で架橋した鋼繊維が破断せず引き抜ける破壊モードであった。

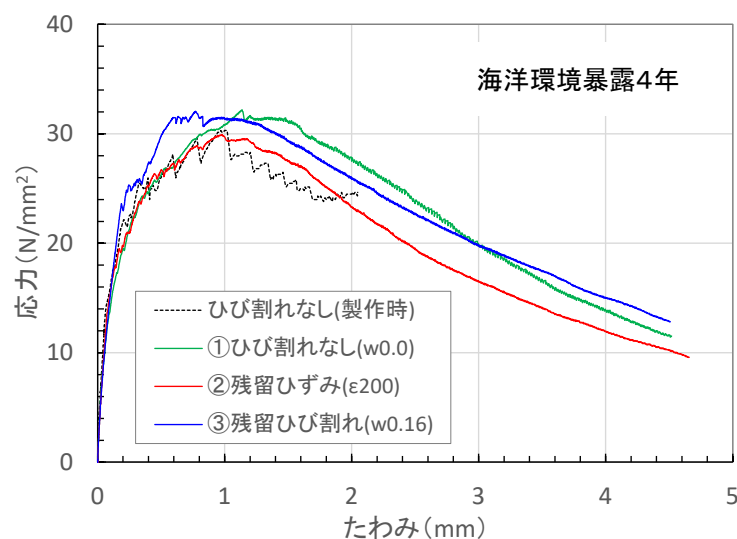


図6-5 静的載荷の応力-たわみ曲線(海洋環境暴露4年後)

## 6.2.3.2 塩化物イオン浸透状況と鋼繊維の状態

暴露4年, 11年次に切り出した試料のEPMAによる塩素マッピング画像を図6-6に示す。図より、①ひび割れがない供試体では、塩素は供試体表面から約2mmのごく表面に存在するのみである。これに対し、②残留ひずみを $200\mu$ 与えた供試体では、目視では観察できなかった微細ひび割れが切断面にて確認でき、この微細ひび割れを通じて塩化物イオンが内部に浸透していることも確認され、既往のRPC系UFCの知見<sup>2)3)</sup>と同様であった。なお、ひび割れの深さ方向に対して塩素の濃度分布がみられるが、ひび割れの直角方向であるマトリクス側に向かった浸透範囲は約2mmまでである。③残留ひび割れ0.1mm程度の供試体には大小複数のひび割れが見られ、塩化物イオンの浸透範囲は2mm程度であるが、ひび割れ幅が大きいことから②よりも強い濃度分布となった。

分析した供試体は異なるものであるが、4年次から11年次で塩化物イオンの浸透が進行している傾向よりも、供試体による個体差であると本研究では判断した。

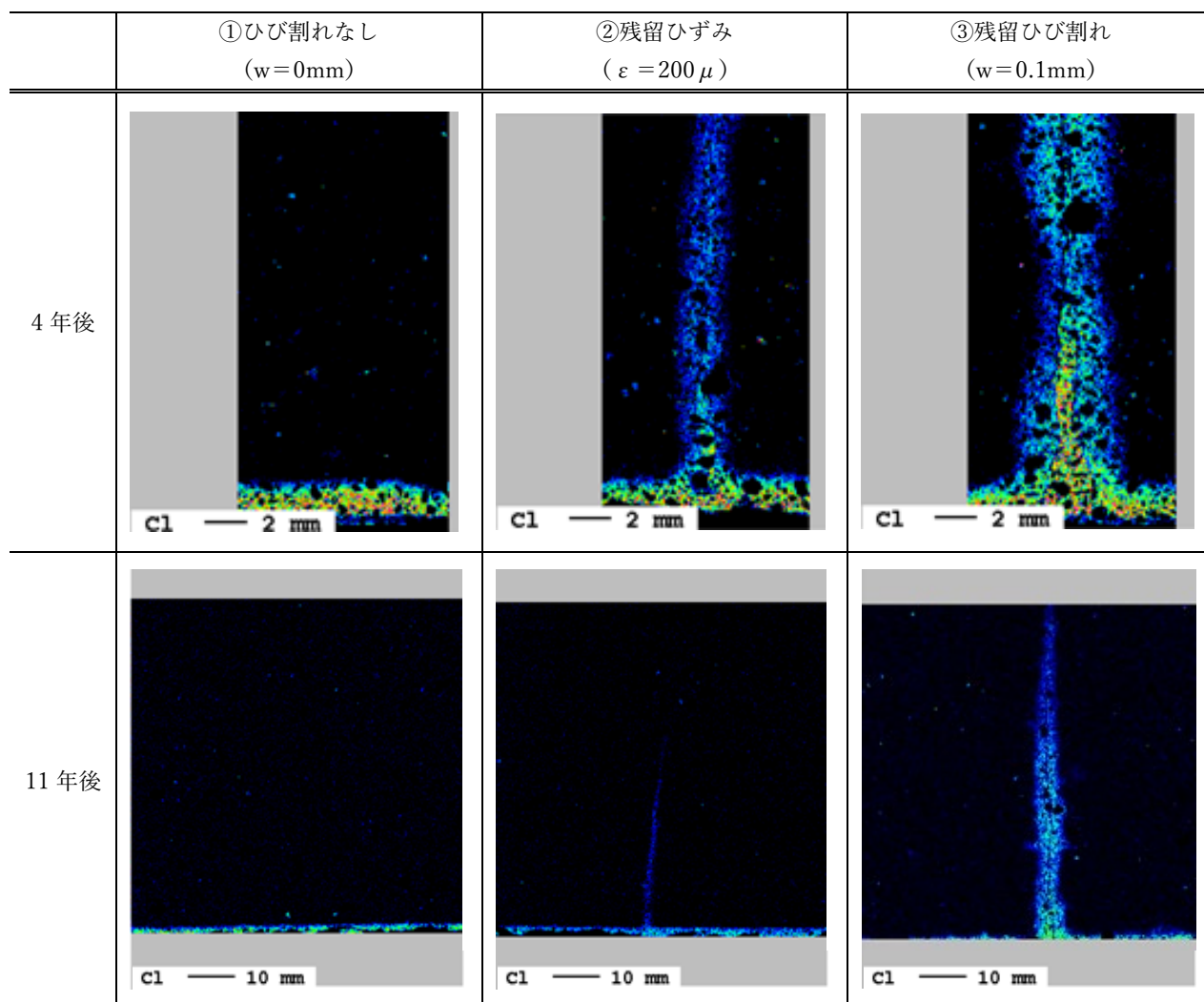


図6-6 ひび割れから侵入した塩化物イオンの濃度分布  
(海洋環境暴露4年, 11年)



次に、塩化物イオンが浸透した箇所の鋼繊維を SEM によって元素分布を確認した。ここでは、4 年次の暴露試験体での反射電子像の例を図 6-7 に示す。図より、①ひび割れがない供試体では、元素は Fe のみが検出、O は検出されなかったため、鋼繊維は腐食していないと判断した。これに対し、②残留ひずみ  $200\mu$  を与えた供試体では、鋼繊維のごく表面（写真の灰色部分）には Fe に加え O が検出されたため、酸化鉄  $Fe_2O_3$  や水酸化鉄  $Fe(OH)_3$  等の腐食生成物の存在が示唆され、図に示すマイクロクラックから塩化物イオンや酸素がわずかに供給されたものと推察された。③残留ひび割れ  $0.1mm$  程度の供試体についても、ひび割れが鋼繊維表面に達している箇所は腐食しており、腐食生成物が鋼繊維ごく近傍のひび割れを埋めるように生成していることが確認された。なお、いずれのケースにおいてもひび割れが鋼繊維に達していない部分は腐食していない。

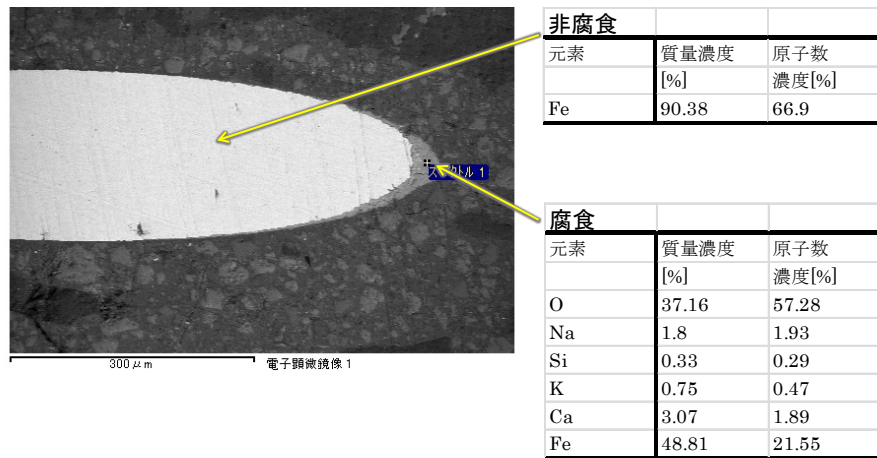
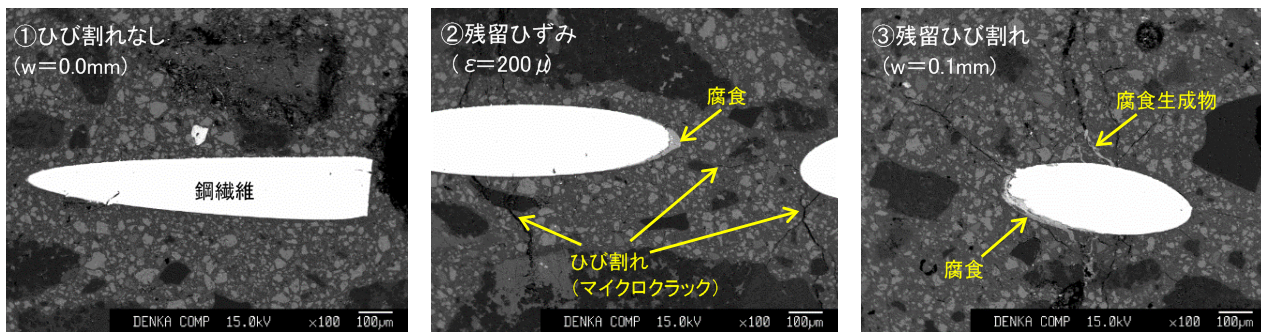


図 6-7 鋼繊維周辺の元素分析(反射電子像、暴露 4 年次)

## 6.2.3.3 曲げ疲労試験結果

## (1) S-N 曲線

①ひび割れがない供試体の静的曲げ強度の40%を載荷応力とした気中曲げ疲労試験を行った。各ケースの結果をこれまでに得られている蒸気養生を施した AFt 系 UFC の S-N 曲線とともにプロットした(図 6-8)。疲労試験結果より、①ひび割れがない供試体は 200 万回に達しても破壊せずに、土木学会 UFC 指針式<sup>4)</sup> およびこれまでの知見<sup>5)</sup> に対して同等の耐疲労特性を保持していることが確認された。これに対し、②残留ひずみ 200 $\mu$  および③残留ひび割れ 0.1mm 程度の供試体では、UFC 指針の S-N 曲線よりも早期に破壊する結果となった。

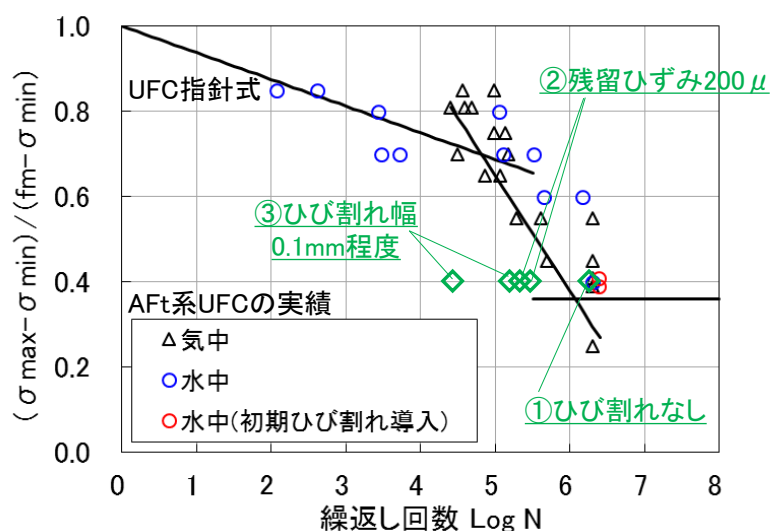


図 6-8 曲げ疲労試験結果(S-N 曲線)

ここで、蒸気養生を施した AFt 系 UFC は気中での曲げ疲労試験<sup>5)</sup>に加え、水中曲げ疲労試験を実施している。さらには、0.1mm 以下の微細ひび割れの導入後に水中での曲げ疲労試験に供しており(S-N 曲線図中、赤○印)、200 万回まで破壊しないことを確認している。これらの試験は、塩分や酸素といった劣化因子が侵入していない条件であり、本研究の疲労試験で得られた結果には、海洋環境かつ気中での長期暴露がひび割れを架橋する鋼繊維に対し、「腐食」が影響していると考えられる。

(2) 繰返し回数による変化

ある繰返し回数  $N$  における，供試体の中央のたわみ値と載荷荷重の関係を図 6-9 に示す。図中の凡例は「ある回数数／破壊時の回数」を示している。図より，①ひび割れがない供試体では 200 万回まで剛性勾配は変わらず，既往の研究<sup>6)</sup>と同様の傾向である。これに対し，②残留ひずみ  $200\mu$  および③残留ひび割れを有する供試体では， $N$  数の増加もしくは破壊に近づくにつれて 1 サイクル当りのたわみ量が増加している。これは，マイクロクラック，ひび割れの進展および繊維の引抜けに起因し，徐々に剛性が低下したものと考えられる。

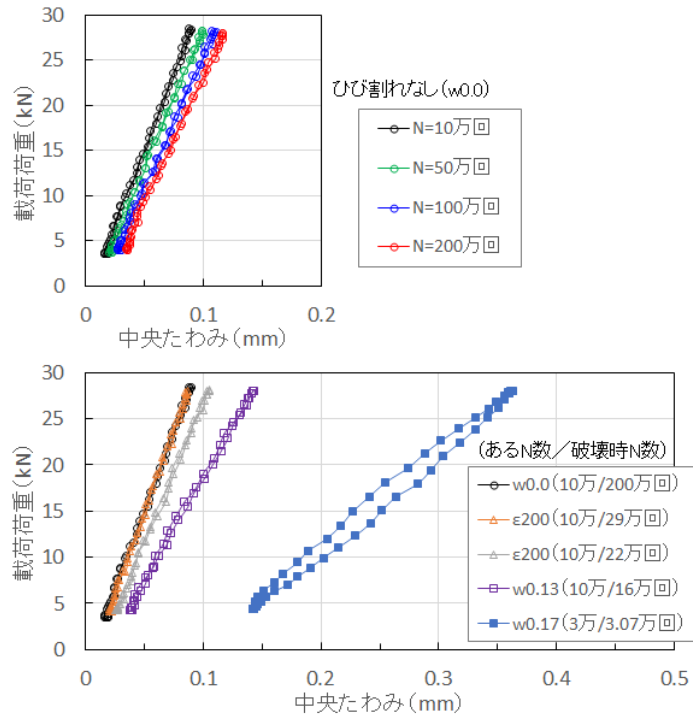


図 6-9 繰返し載荷によるたわみの変化

次に，破壊までのひび割れ幅の進展と繰返し回数の関係を図 6-10 に示す。ひび割れ幅は初期に導入したひび割れ幅も加味した値としており，破壊時の繰返し回数はそれぞれ異なるものの，いずれのケースもひび割れ幅が  $0.3\sim 0.4\text{mm}$  程度に変曲点があり，ひび割れ幅  $0.4\text{mm}$  を超えると急激にひび割れ幅が増大し破壊に至っている。これは，同変曲点までは鋼繊維が徐々に引き抜けるモードであるが，最終的に破断に至るモードであったと推察される。

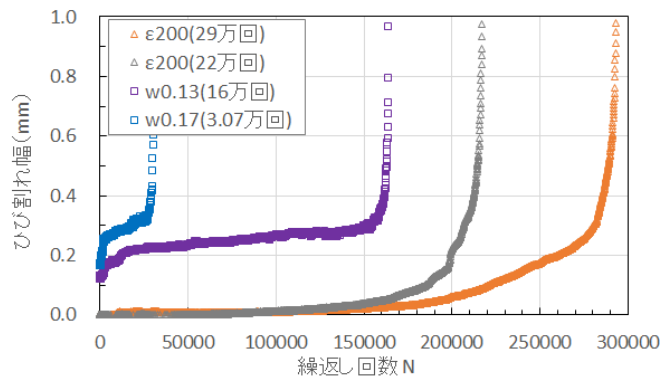


図 6-10 繰返し載荷によるひび割れ幅の進展



(3) 破壊面の鋼繊維

200万回未満で破壊したケース②、③の破壊面を写真6-5に、静的曲げ試験での破壊面を写真6-6に示す。静的曲げ試験では引張縁まで鋼繊維の存在を確認し、繊維の破断ではなく引抜きモードでの破壊であることを確認したが、疲労試験後の破壊面は供試体表面（引張縁）から深さ約30mmまでの範囲で鋼繊維がなくモルタル断面が滑らかで、暗い赤褐色に呈色している箇所が見られた。



写真 6-5 曲げ疲労試験後の破壊面（繊維消失, 暗い赤褐色）



写真 6-6 静的曲げ試験後の破壊面（繊維残存）

ここで、海外の UHPFRC の一軸引張疲労試験では、鋼繊維の摩耗と研削および腐食（トライボロジション）によって、明るい赤褐色の摩耗粉を伴う表面破壊が生じることが報告されている（図 6-11）<sup>7)</sup>。そこで、曲げ疲労試験中に破壊面から落下した破片や粉末をアセトンに浸漬して保管し、X 線回折（XRD）および蛍光 X 線（XRF）にて分析を行った。XRD では試料が微量のため酸化鉄は明瞭に検出できなかったが、XRF による元素分析では鋼繊維由来の鉄分が全試料の質量に対し 0.8%程度検出された。この検出量は配合に対する鋼繊維の質量割合（137.4kg/2481kg/m<sup>3</sup>=約 5.5%）に対して少ないが、試料には鋼繊維が残存・架橋している部分から剥落したマトリクスも含まれていることなどが要因であると考えられる。

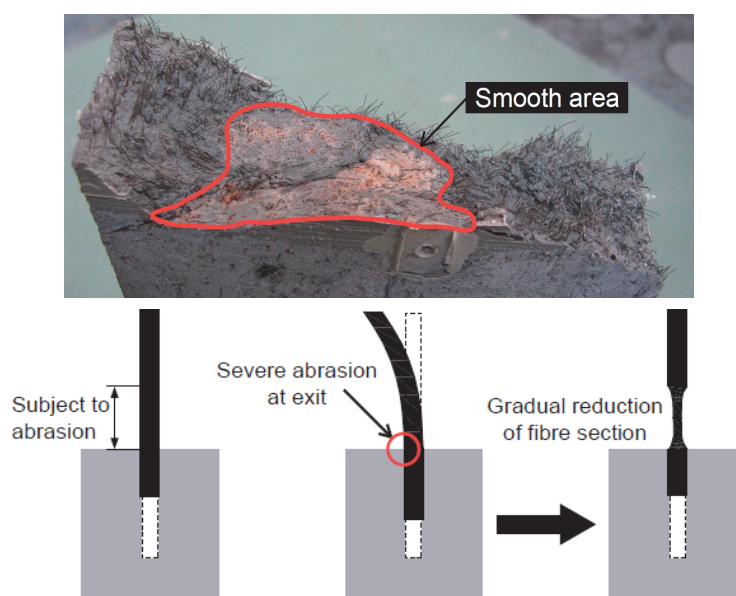


図 6-11 UHPFRC の一軸引張疲労試験での破壊挙動<sup>7)</sup>

本研究で確認された現象も、既往の報告と類似しており、図 6-11 に示すメカニズムのように、疲労サイクル条件下では、鋼繊維とマトリクス両方の摩耗が生じながら、架橋する鋼繊維の体積が徐々に減少し破断に至ったものと推察される。しかしながら、赤褐色に呈色した現象については、既往の報告では疲労試験中の短期間で生じているのに対し（明色：劣化環境にない中での酸化腐食）、本研究（暗色）では塩化物イオン、水ならび酸素が供給される暴露による鋼繊維の表層の腐食で、疲労試験前にひび割れ断面のモルタルに呈色、沈着していた可能性がある。

以上より、本研究や既往の研究<sup>2) 3)</sup>の静的曲げ強度試験から、仮に供用期間中に想定外のひび割れが生じて、ただちに破壊に至ることはないと思われる。また、0.1mm 以下のひび割れを有していても、腐食環境でなければ応力比 0.4 における曲げ疲労強度は良好である。しかしながら、疲労を受ける UHPFRC 製部材がひび割れ発生後も腐食環境下に置かれる場合には、鋼繊維の腐食を防止するためにひび割れ面からの塩化物イオン、水ならびに酸素の侵入を遮断する処置<sup>8)</sup>を施すとともに、疲労強度について検証をすることが重要であると考えられる。

### 6.3 合成繊維を用いた UHPFRC

#### 6.3.1 マトリクス中の合成繊維に想定される劣化

本研究で対象とした合成繊維は、代表として①ポリプロピレン繊維と②アラミド繊維の2種とした。はじめに、選定した合成繊維2種について、想定される変状や劣化および耐久性に関する既往の知見を以下に記す。

##### (1)ポリプロピレン繊維

ポリプロピレン繊維は一般的に耐薬品性（耐アルカリ性）に優れるため、普通コンクリートの剥落防止、ひび割れ幅の抑制および火災による爆裂防止などを目的に広く用いられている。ポリプロピレン繊維は、繊維単体では紫外線や酸（化）による劣化が考えられるが、コンクリートの内部に混入されている状態では長期的な健全性が確認されている<sup>9)</sup>。

##### (2)アラミド繊維

アラミド繊維は、いわゆるスーパー繊維と呼ばれ、UHPFRCに一般的に用いられる鋼繊維の引張強度（2000N/mm<sup>2</sup>程度）や高弾性率、耐熱性や耐薬品性にも優れた合成繊維であり、高～超高強度コンクリートへの混入事例が多い。アラミド繊維は、吸水や常温環境でのアルカリ溶液に対する抵抗性は高いが、高温環境下のアルカリ溶液では強度が低下するとされている<sup>10)</sup>。これに対して、保倉らはアラミド繊維を混入したコンクリートを常温よりも高い40～80℃の水中・気中に3年間暴露した場合、20℃水中での暴露に換算すると、100年経過した後でも90%以上の力学特性を保持する推定結果を得ている<sup>11)</sup>。

以上に示した知見は、普通コンクリートの強度レベル、かつ繊維混入率も1vol%程度での検討であることから、本研究では圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>超のマトリクスに、より多量に繊維を混入させたUHPFRCを対象に長期性能を把握・評価することを試みた。

## 6.3.2 使用材料および配合

合成繊維を用いた UHPFRC の配合を表 6-4 に示す。マトリクスは、シリカフェームがプレミックされた市販の結合材と山砂などで構成される。また、水結合材比が 14.9%であり、90°C-48 時間の蒸気養生を行った後の圧縮強度が 120~150N/mm<sup>2</sup> の超高強度モルタルである。本研究で使用した合成繊維 (①ポリプロピレン繊維, ②アラミド繊維) を写真 6-7 に示す。

なお、アラミド繊維は市販品であるが、ポリプロピレン繊維は UHPFRC 用に開発したものである。

表 6-4 UHPFRC の配合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					繊維*5 (kg) ①ポリプロピレン ②アラミド
		水*1	結合材*2	骨材*3	高性能*4 減水剤	消泡剤	
14.9	3.0	195	1,309	914	28.8	0.65	①31.9 (3.5vol.%) ②27.8 (2.0vol.%)

\*1: 高性能減水剤の水分を含む

\*2: シリカフェームセメント, 密度 3.08g/cm<sup>3</sup>

\*3: 山砂, 表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>

\*4: ポリカルボン酸系

\*5: ①ポリプロピレン繊維 φ0.4mm, L=20mm, 密度 0.91g/cm<sup>3</sup>

②アラミド繊維 (収束タイプ) φ0.4mm, L=30mm, 密度 1.39g/cm<sup>3</sup>



ポリプロピレン繊維  
※UHPFRC 用に開発



アラミド繊維 (収束タイプ)  
※市販品

写真 6-7 合成繊維



## 6.3.3 試験概要

## 6.3.3.1 繊維単体の耐久性

本研究で使用するポリプロピレン繊維については UHPFRC 用に開発したものであったため、各種試験に先立ち、表 6-5 および写真 6-8 に示すように耐アルカリ試験、耐候性試験（紫外線照射）および高温による酸化促進試験を行った。

表 6-5 促進劣化試験(ポリプロピレン繊維単体)

試験	環境条件	引張試験
耐アルカリ	※NEXCO 構造物施工管理要領 「はく落防止性能」 参照 カット前の長繊維を 1 辺 30cm の SUS304 金属枠に一定張力（5kg の分銅）で巻きつけ、20°C、pH12.5 アルカリ溶液に 7 日間浸漬	JIS L 1013 化学繊維フィラメント糸試験方法 機器：テンシロン チャック間距離：250mm 引張速度：300mm/分 本数：N=10 本（浸漬後）
耐候性 （紫外線）	機器：アイスーパーUV テスター SUV-W151 条件：100mV/cm <sup>2</sup> 期間：60 時間（20 時間ごとに強度試験）	同上 本数：N=10 本 （20, 40, 60 時間）
酸化	条件：135°Cの乾燥炉に長繊維を暴露（試験時温度 20°C） 期間：220 日	同上 本数：N=3 本（各材齢）



5kg 分銅での張力付与



アルカリ溶液浸漬状況

写真 6-8 耐アルカリ試験

### 6.3.3.2 温度依存性の確認

合成繊維を用いた繊維補強モルタルの耐久性を検討した既往の研究において、岩井ら<sup>12)</sup>はPVA 繊維 (VF)、鋼繊維 (SF)、アラミド繊維 (AF)、ポリプロピレン繊維 (PP) の4種を混入した繊維補強モルタルを 100°C に高温暴露し、その知見として「ガラス転移温度の低い PVA 繊維以外は高温による影響を受けない」と報告している (図 6-12)。一方で、曲げ試験時は供試体の温度を 20°C に冷却しているというものであった。

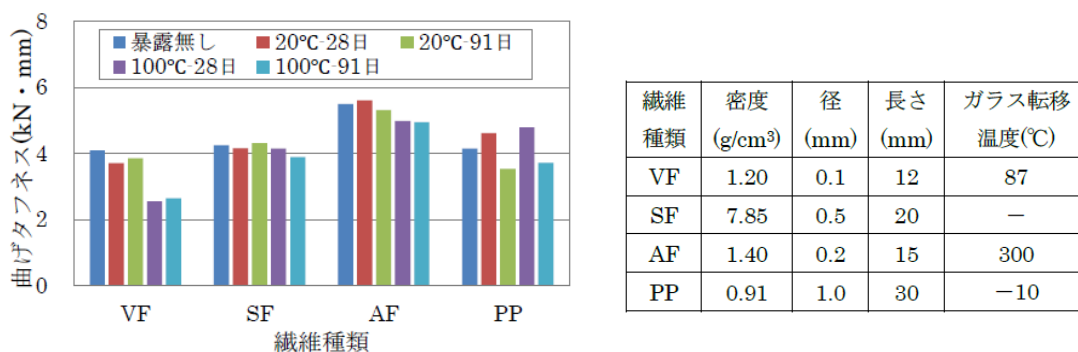
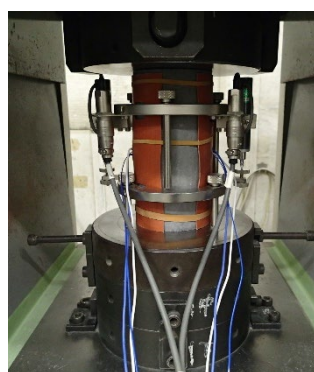


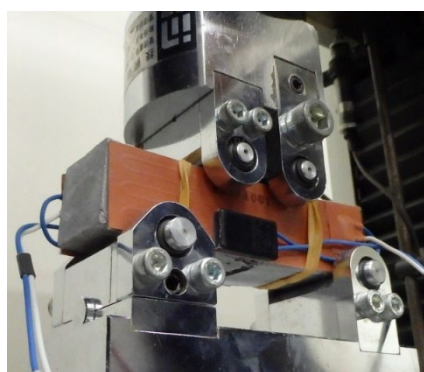
図 6-12 高温履歴を与えた繊維補強モルタルの曲げ試験結果(既往の研究)<sup>12)</sup>

UHPFRC はその優れた力学特性からプレキャスト、場所打ちによる部材製作、補修・補強では薄肉での適用ながらも、例えば温水シクナー (沈殿槽)、直射日光で温度が上がるパネル部材など温度の面で過酷な環境で共用されることも想定される。

そこで、本研究では温度履歴が保持された状態での力学特性を把握するために、写真 6-9 に示す電熱線内蔵のシートヒーターを製作し、供試体に温度履歴を与えながら強度試験が行えるようにした。



圧縮強度試験



曲げ強度試験



シートヒーター

(インバータで温度は任意に調整可)

写真 6-9 シートヒーターによる温度保持状況

## 6.3.3.3 暴露条件および試験ケース

暴露試験用の供試体は、圧縮強度試験用に  $\phi 50 \times 100$ mm 供試体を、曲げ強度試験用に  $40 \times 40 \times 160$ mm 供試体を採取した。本研究では、写真 6-10 に示す  $105^\circ\text{C}$ の乾燥炉に長期間設置し、表 6-6 に示す期間と温度で強度試験を実施した。

写真 6-10 乾燥炉での暴露状況( $105^\circ\text{C}$ )

表 6-6 暴露条件および試験ケース(UHPFRC)

暴露期間	暴露温度 ( $^\circ\text{C}$ )	試験時温度 ( $^\circ\text{C}$ )	
		ポリプロピレン	アラミド
0日 (イニシャル)	105	20	20
1週間		—	20
1ヶ月		20, 70*	20, 70*
3ヶ月		20	—
1年		20	—
2.2年		20	—
5.6年		20	20
5.9年		20	—

\*: シートヒーターによる加温

## 6.3.4 試験結果

## 6.3.4.1 繊維単体の耐久性(ポリプロピレン繊維)

## (1)耐アルカリ性

アルカリ溶液浸漬後のポリプロピレン繊維の引張試験結果を表 6-7 に示す。また、参考として NEXCO 構造物施工管理要領<sup>13)</sup>での基準値も併記する。結果より、本研究で用いたポリプロピレン繊維の耐アルカリ性は繊維補強コンクリートとして用いるに足る性能を有していることがわかる。

表 6-7 ポリプロピレン繊維の耐アルカリ性

		試験結果	
		浸漬前	浸漬 7 日後
破断荷重 (N)	①	66.9	66.5
破断面積 (mm <sup>2</sup> )	②	0.11	0.11
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	①÷②	608	605
伸び率 (%)		7.6	7.4
アルカリ浸漬前に対する引張強度保持率 (%) (NEXCO 基準値：浸漬前の 90%以上)		—	99.5
アルカリ浸漬前に対する伸び保持率 (%)		—	97.0

## (2)耐候性

紫外線照射後の引張試験結果を表 6-8 に示す。結果より、一般的な知見のとおり繊維単体が紫外線を受ければ劣化が生じるというポリプロピレンの特性が本研究で用いた繊維においても確認された。コンクリート用のポリプロピレン繊維は様々な製品があり、耐候性を高めたものもあるが、劣化速度に差異はあるものの特性・傾向としては不変であると思われる。

一方で、例えば NEXCO 構造物施工管理要領<sup>13)</sup>では、コンクリート中に混入される場合は直接紫外線が照射されないため、耐候性の照査は不要としており、UHPFRC についても同様に扱ってよいと考える。UHPFRC にひび割れが生じた場合、供用中に生じるひび割れ幅は想定外の外力、損傷が生じなければ 0.2mm 以下の微細なものであると想定される。この場合、ひび割れ部に架橋するポリプロピレン繊維に紫外線が与える影響は限定的であると推察されるが、必要に応じて実際の供用環境を想定した促進試験を行うことが望ましい。

表 6-8 ポリプロピレン繊維の耐候性

UV 照射時間 (時間)	0	20	40	60
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	615	427	379	318
引張強度保持率 (%)	100	69	62	52



## (3) 耐酸化性

135°Cの高温暴露による酸化促進試験後の引張強度の結果を図6-13に示す。本研究で用いたポリプロピレン繊維（酸化防止対策あり）は、暴露日数210日で引張強度保持率が70%まで低下しているが、これをアレニウス則によって30°C環境での年数に換算すると、図6-14に示すとおり繊維単体でも100年以上の耐用年数を有していることがわかる。

なお、酸化防止対策を施さないポリプロピレン繊維については、早期に強度が低下した。

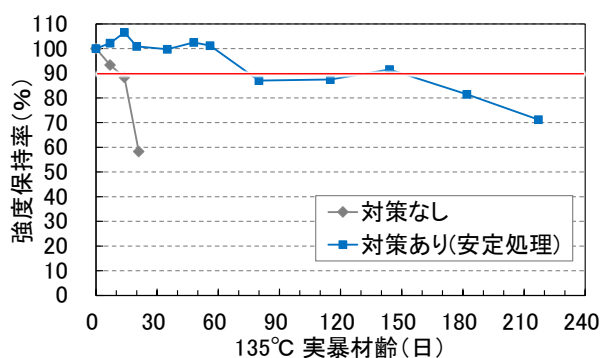


図6-13 酸化促進試験結果(実材齢)

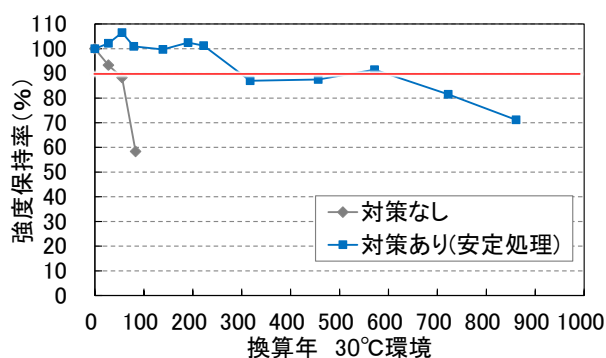


図6-14 酸化促進試験結果

(アレニウス則による年換算, 30°C環境での共用として)

なお、アレニウス則による換算において、ポリプロピレン繊維に対し別途異なる温度での暴露試験を事前に行い、10°Cで2.2倍の劣化速度差があることを確認している。

6.3.4.2 温度依存性の確認

ここでは、ポリプロピレン繊維とアラミド繊維を用いた UHPFRC について 105°C の乾燥炉に 1 か月間設置した後の曲げ試験結果について示す。図 6-15 より、まず 20°C 環境においては 1 ヶ月程度の高温暴露では強度や曲げタフネスの低下は認められなかった。一方で、シートヒーターで供試体温度を 70°C に保持した試験では、ポリプロピレン繊維を用いた UHPFRC は強度・タフネスともに低くなり、アラミド繊維については変化が認められなかった。

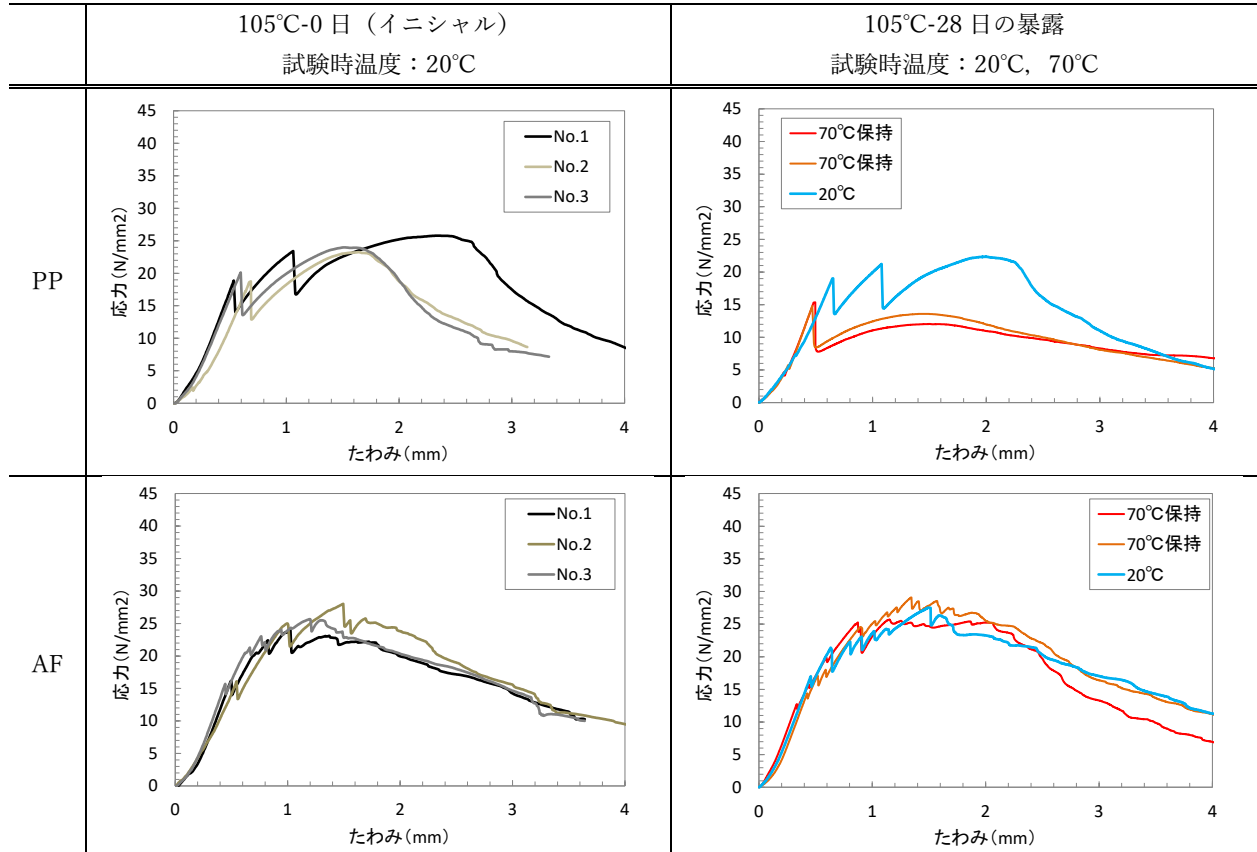


図 6-15 温度依存性の確認(曲げ強度試験)

ポリプロピレン繊維を用いた UHPFRC が 70°C に保持された状態で強度・タフネスが低下した要因については、ポリプロピレン自体の温度依存性が考えられ、素線についても同様に温度を保持した状態で引張試験を行った。図 6-16 に示すように、70°C 保持された状態での引張伸びは 40~50% 増加し、引張強度は 10~15% 低下することが確認され、この温度依存性が UHPFRC の力学特性に影響を与えたと考えられる。

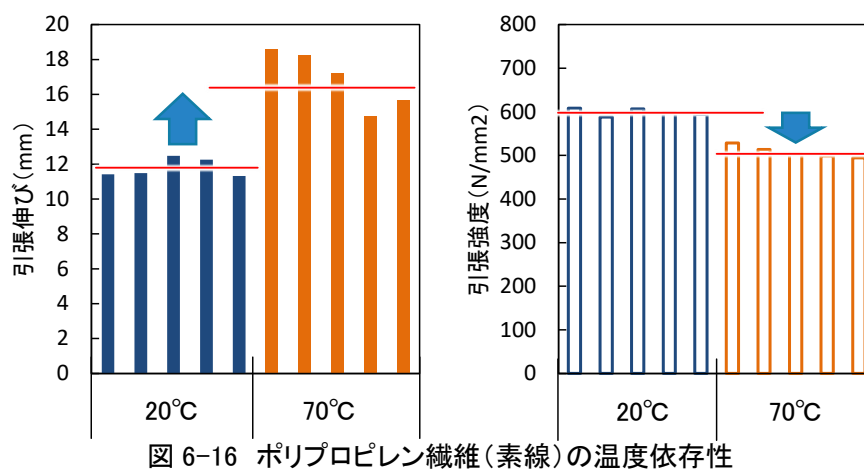


図 6-16 ポリプロピレン繊維(素線)の温度依存性

## 6.3.4.3 熱疲労に対する耐久性

## (1) 圧縮強度への影響

105°Cの高温暴露において、それぞれの期間で圧縮強度試験を行った。図6-17に示すように、圧縮強度は暴露期間が長くなるにつれて増進しており、過酷な乾燥条件においてもセメントの水和が進行していることが確認された。UHPFRCはその緻密性から乾燥環境でも細孔中の水分は消失せず、未水和セメントが長期的に反応したと推察される。なお、試験時の温度は20°Cとした。

なお、暴露から5年以上経過した供試体の断面にフェノールフタレインを噴霧すると、写真6-11に示すように呈色していることから、硬化体内部のアルカリも保持されていることも確認された。乾燥環境であったことから中性化が進行しにくかったと考えられるが、マトリクス内の繊維に対しては長期的にアルカリが保持されている厳しい条件である。

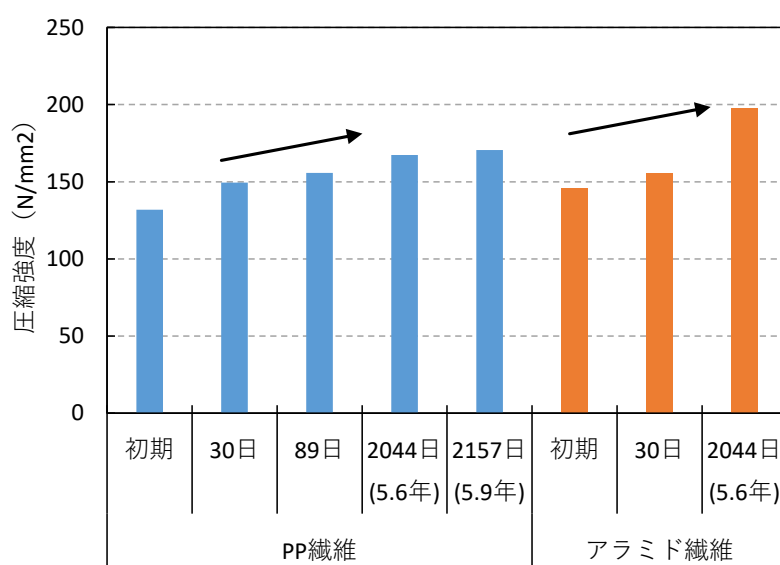


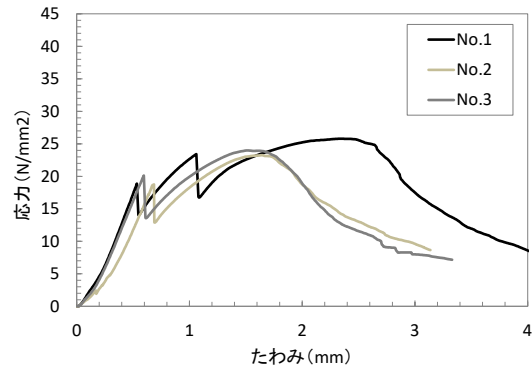
図 6-17 圧縮強度試験結果 (試験時温度は 20°C)



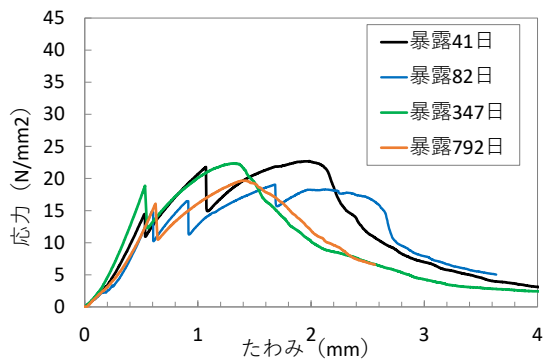
写真 6-11 硬化体のアルカリ保持確認 (フェノールフタレイン噴霧)

(2) 曲げ強度への影響

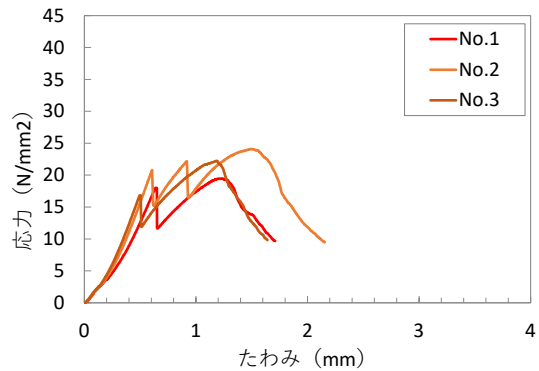
ポリプロピレン繊維を用いた UHPFRC の曲げ強度試験結果を図 6-18 に示す。図より、高温暴露によってひび割れ発生強度（グラフの一次ピーク）や曲げ強度（二次ピーク）に対する明確な低下は認められなかった。一方で二次ピークはたわみが小さい方向にシフトしており、タフネスが低下する傾向であった。



105°C-0日（イニシャル）



105°C-41日~792日（2.2年）



105°C-2157日（5.9年）

図 6-18 高温暴露による曲げ強度・タフネスへの影響（ポリプロピレン繊維）

ここで、ポリプロピレン繊維（素線）の酸化劣化に着目し、前項の試験からアレニウス則で 100°C 環境での耐用年数に換算すると図 6-19 に示すように今回の暴露期間 5.9 年では引張強度保持率は 80% まで低下していると予測された。本実験においてもマトリクス内の繊維自体の劣化による傾向が曲げ強度試験に表れていると考えられるものの、マトリクス内がアルカリに保持されていることから、酸化の影響がそのままに出ているものではないと考えられる。

これについては、繊維だけでなく長期的な高温暴露によるマトリクスへの影響（例えばマイクロクラックなど）についても分析する必要がある。

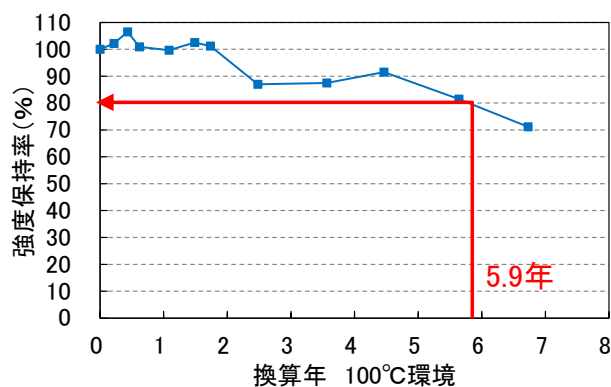


図 6-19 ポリプロピレン繊維の強度予測（アレニウス則による 100°C換算）

次に、アラミド繊維を用いた UHPFRC の曲げ強度試験結果を図 6-20 に示す。図より、本実験においてはアラミド繊維については曲げ強度やタフネスに対して 5 年超の長期間による高温暴露による明確な影響は認められなかった。

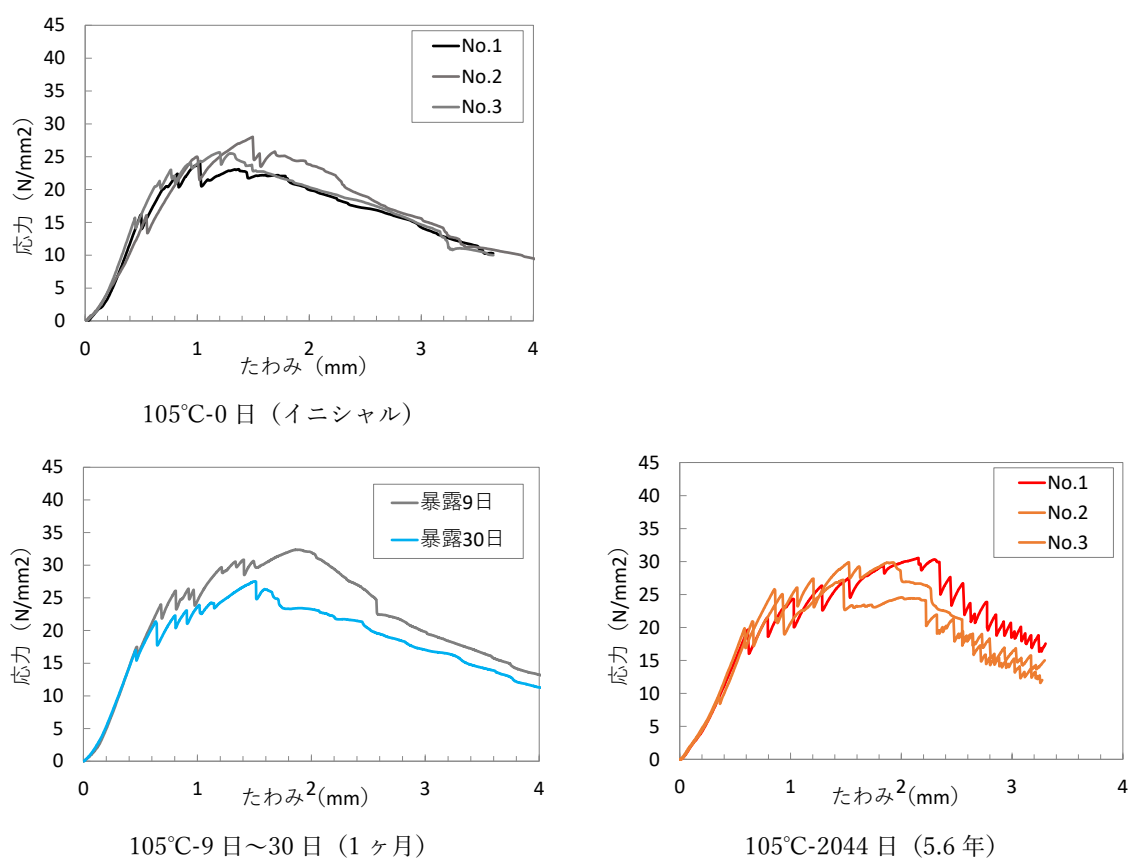


図 6-20 高温暴露による曲げ強度・タフネスへの影響(アラミド繊維)

ここで、一般的にアラミド繊維は高温環境における水やアルカリでの劣化(加水分解)が想定されているが、保倉らの既往の研究では<sup>11)</sup>、高温の水中で暴露された繊維補強モルタルにおいても強度保持がなされていると報告されている。本研究では乾燥条件のみの条件ではあったが、例えば製品としての形状が異なるがアラミド連続繊維による繊維強化ポリマー(FRP)では、マトリクス中のアルカリや水分のみでは、繊維の劣化は生じにくいとしている<sup>14)</sup>。したがって、UHPFRCが仮に水中で高温に曝されてもマトリクスの緻密さから新たに水分が供給されることはないため、劣化の進行は抑えられるものと推察される。

ただし、UHPFRCにひび割れが生じ、高温の水とアルカリに繊維が曝される環境での共用が想定される場合には、適切な評価を行うことが望ましい。

## 6.3.4.4 曲げ疲労に関する既往の研究

本研究では、合成繊維（ポリプロピレン，アラミド）を用いた UHPFRC の曲げ疲労試験を行うことはできなかったが，小川ら<sup>15)</sup>がポリプロピレン，アラミド繊維に加え，ポリビニルアルコール（ビニロン）繊維を用いた UFC の曲げ疲労試験を行っている。図 6-21 に示すように，合成繊維を用いた UHPFRC の場合は，静的強度試験時には繊維が引抜け型であったものでも，例えばアラミド繊維はひび割れ部の開閉を繰り返すことで繊維とマトリクスが何度も擦れ，収束するためにコーティングした樹脂が剥がれ，細径の素線にほぐれて破断しやすくなり，ポリプロピレン繊維よりも早期に疲労破壊するという報告がなされている。

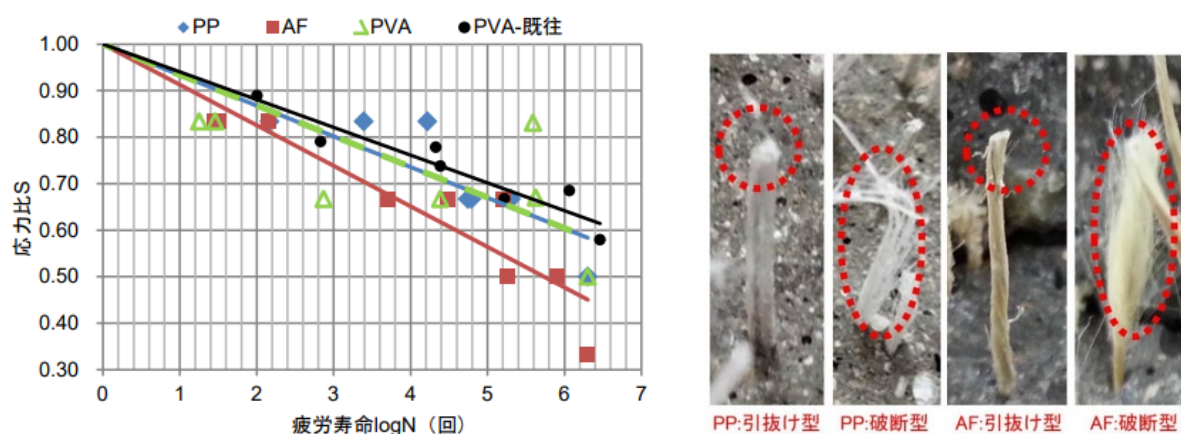


図 6-21 曲げ疲労試験結果(S-N 曲線)および破壊面の繊維状況<sup>15)</sup>  
(小川らの研究)

以上のように，合成繊維を用いた UHPFRC 部材への疲労特性を想定する場合には，鋼繊維とは異なる観点でその素材を選定することが肝要である。



## 第6章のまとめ

## (1) 鋼繊維を用いた UHPFRC での検証

初期ひび割れを含めた UHPFRC の力学性能について「塩害環境」と「疲労」に着目した試験を実施した。11年間の海洋暴露を行った供試体について、

- ・暴露前に UHPFRC は蒸気養生によって所定の強度まで発現させていたが、4年間の暴露にてさらに強度が増進することを確認した。また、0.1~0.2mm 程度のひび割れが残留しても、静的な曲げ強度試験では強度やタフネスなど基本的な力学特性の低下は認められなかった。圧縮強度については、暴露から11年後でも増進していることを確認した。
- ・塩化物イオンの浸透は表面から約 2mm のごく表面に留まっていた。また、ひび割れを有する場合でも、ひび割れ断面に留まりマトリクス内部の方向には拡散していない。この結果は、4年次、11年次の調査でも同様の結果であった。
- ・塩化物イオンがひび割れから鋼繊維に達しても腐食は繊維のごく表面であった。また、繊維周辺のマイクロクラックは腐食生成物によって埋められていることを確認した。
- ・ただし、残留ひび割れやひび割れを有した供試体の曲げ疲労試験では、ひび割れのない供試体よりも早期に破壊する恐れもある。また、曲げ疲労試験後の破壊断面には、摩耗に起因する鋼繊維の腐食破断が認められた。

以上より、供用中に UHPFRC にひび割れが生じることを想定し、さらに酸素や水が常時供給される環境において、ひび割れ幅 0.2mm 程度以下であれば速やかに部材としての構造耐力が速やかに低下することは考えにくい。しかし、疲労も加味される場合には留意や対処が必要である。

## (2) 合成繊維を用いた UHPFRC での検証

ポリプロピレン繊維とアラミド繊維を混入した UHPFRC に高温履歴を与えた際の影響を把握した。105°Cの乾燥炉（熱+酸素）による促進環境において、

- ・70°Cの高温を保持させた状態ではポリプロピレン繊維は曲げタフネスが低下する温度依存性を有し、これは高温時に素線の伸び率や引張強度の変化に由来するものであることが明らかとなった。なお、20°Cに戻すことで強度は回復する可逆性は、既往の報告と同じであった。
- ・アラミド繊維を用いた UHPFRC については温度依存性が認められなかった。
- ・105°Cの乾燥炉にて約5年間の高温履歴と乾燥に曝されても圧縮強度（水和）の増進が認められ、細孔中の水分は消失せず、未水和セメントが長期的に反応したと推察された。また、マトリクスのアルカリも保持されていた。
- ・ポリプロピレン繊維を用いた UHPFRC は5年間の高温暴露において若干のタフネス低下が認められたが、アレニウス則により常温換算すれば100年以上の耐久性を有していると判断された。
- ・アラミド繊維を用いた UHPFRC については、5年間の高温暴露では強度低下は認められなかった。

ポリプロピレン繊維の場合は「酸化」や「紫外線」による劣化が考えられ、本実験での素線への影響確認では、紫外線劣化による影響の方が顕著であった。ひび割れが生じる場合には考慮が必要であるが、供用中に UHPFRC に生じるひび割れ幅は微細であることを鑑みると、ひび割れ部に架橋するポリプロピレン繊維に紫外線が与える影響は限定的であると推察される。

アラミド繊維の場合は水とアルカリによる「加水分解」による劣化が想定されるが、既往の研究からも総合的に判断してマトリクス中のアルカリや水分のみでは、繊維の劣化は生じにくい。また、UHPFRC の緻密さにより、酸素や水の供給が遮断されるため、劣化速度は極めて小さいと判断された。ただし、UHPFRC にひび割れが生じ、高温の水（アルカリ）に曝される環境での共用が想定される場合には、適切な評価を行うことが望ましい。

## 参考文献

- 1) 渡邊有寿, 南 浩郎, 大野俊夫, 三浦一浩: UFC 床板製作における AFt 系 UFC の製造・品質管理, プレストレストコンクリート技術協会第 19 回シンポジウム論文集, pp.289-292, 2010
- 2) 河野克哉, 川口哲生, 橋本勝文, 横田 弘: 初期ひび割れを通じて海水作用を受ける超高強度繊維補強コンクリートの力学特性と組成変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp283-288, 2015
- 3) 後藤隼一郎, 横田 弘, 橋本勝文, 河野克哉: ひび割れた超高強度繊維補強コンクリートはりの海洋暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp281-286, 2015
- 4) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004
- 5) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書, 技術推進ライブラリー, No.3, 2006 (2011, 2016 年に更新)
- 6) 田中良弘, 横田 弘, 岩波光保, 前堀伸平: 超高強度繊維補強コンクリートの気中・水中曲げ疲労特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp1309-1314, 2005
- 7) Makita T., Brühwiler E.: Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), Materials and Structures, Vol. 47, Issue 3, pp. 475-491, 2014
- 8) 佐藤正巳, 片桐 誠: UFC に施したひび割れ補修の繊維腐食抵抗性に関する実験的検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.711-712, 2006
- 9) 堀口賢一, 丸屋 剛: ポリプロピレン繊維を混入したコンクリートの耐久性, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.535-536, 2008
- 10) 西村次男, 魚本健人, 加藤佳孝, 山口明伸: 高温環境下における各種繊維の引張強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.265-270, 1998
- 11) 保倉 篤, 宮里心一, 岡村脩平, 吉本大士, 倉方裕史: 異なる温度の水中と気中に暴露されたアラミド短繊維補強コンクリートの曲げ性能の経時変化, 土木学会論文集 E2, Vol.76, No.4, pp.374-385, 2020
- 12) 岩井雅紀, 宮里心一: 高温暴露が短繊維補強セメント系材料の力学的性質に及ぼす影響, 土木学会第 70 回年次学術講演会, pp.1261-1262, 2015
- 13) NEXCO 総研: NEXCO 構造物施工管理要領, 令和 2 年 7 月
- 14) プレストレストコンクリート工学会: 繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針, 令和 2 年 9 月
- 15) 小川真生, 志村 彩, 河野克哉, 岡本亨久: 有機繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリート部材の耐疲労メカニズム, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, 2015, 1099-1104, 2015



## 第7章

### UHPFRC に対する

### 補修や維持管理に向けた検討



## 第7章 UHPFRC に対する補修や維持管理に向けた検討

### 7.1 はじめに

第6章ではひび割れが生じた UHPFRC について、供用中に想定される様々な劣化環境が力学特性に与える影響を促進試験などによって確認した。促進試験と実暴との関連性や耐用年数の推定については明確にすることはさらなるデータ拡充が必要であるものの、発生したひび割れに対しては然るべき対処をできるだけ早い段階で行うことが望ましい。また、軽微な断面欠損であっても、UHPFRC の緻密性を生かして元々の設計かぶりを小さく見込んだ場合は、影響度合いが大きくなる可能性がある。

そこで本研究では、今後の UHPFRC を用いた構造物の維持管理計画に資するデータ取得や試験方法の提案を目的に、ひび割れや断面欠損を模擬した供試体に対して補修を施した際の物質浸透抵抗性や力学特性の回復の有無や程度を確認した。

なお、本研究では事前に様々な補修材料による検討を行ったが、これら材料の比較をすることが目的ではないため、本論文ではその過程は省略する。

### 7.2 UHPFRC のひび割れ補修

ひび割れの補修には、その幅やその変動に応じて「ひび割れ被覆」、「浸透性防水材の塗布」、「注入」および「充填」など様々な工法と材料がある(例えば<sup>1)</sup>)。本研究では、曲げ強度・タフネスといった力学特性の回復を確認する目的としては、ひび割れに対してより確実に補修を行った状態で試験を行うこととし、「ひび割れ注入工法」を選定した。

また、物質浸透抵抗性の確保という観点では、「浸透性防水材の塗布」を選定し、塩分浸透性試験を行った。

#### 7.2.1 力学特性の回復性評価

##### 7.2.1.1 試験概要

###### (1) 使用材料および配合

本研究に用いた UHPFRC は、表 7-1 に示すとおりこれまで同様にエトリンナイト生成系の UHPFRC であり、鋼繊維の混入率は 1.75vol.%とした。

表 7-1 Aft 系 UHPFRC の配合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					補強用 <sup>*5</sup> 鋼繊維 (kg)
		水 <sup>*1</sup>	結合材 <sup>*2</sup>	骨材 <sup>*3</sup>	高性能 <sup>*4</sup> 減水剤	消泡剤	
15.2	2.0	195	1,287	905	32.2	6.4	137.4 (1.75vol%)

\*1~5: 詳細は 2 章を参照

(2)ひび割れ供試体の作製

本研究では、UHPFRC に入るひび割れは想定外の荷重が生じなければ、ひび割れ分散効果によって 0.2mm 程度に収まるケースがほとんどであると想定し、評価対象とするひび割れ幅は 0.2mm とした。供試体は第 6 章と同様に 100×100×400mm の曲げ供試体とし、0.2mm のひび割れが残留するように切欠きのない 3 等分点曲げ载荷を行った。なお、供試体は、脱型後に 85°C-24 時間の蒸気養生を施している。

(3)ひび割れ注入補修

本研究で用いたひび割れ注入材は「低粘度形のエポキシ樹脂系接着剤」であり、仕様を表 7-2 に示す。

表 7-2 ひび割れ注入材の仕様(カタログ値)

	冬用での測定値例	試験方法
比重	1.18	JIS K 7112
圧縮降伏強さ (N/mm <sup>2</sup> )	88.0	JIS K 7181/JIS K 7208
圧縮弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	2.2×10 <sup>3</sup>	JIS K 7181/JIS K 7208
曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )	69.3	JIS K 7171/JIS K 7203
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	50.8	JIS K 7161/JIS K 7113
衝撃強さ (kJ/m <sup>2</sup> )	3.9	JIS K 7111-1
引張せん断接着強さ (N/mm <sup>2</sup> )	25.2	JIS K 6850

適合：

JIS A 6204 建築補修用及び建築補強用エポキシ樹脂

国交省 土木補修用エポキシ樹脂注入材 1 種

NEXCO 構造物施工管理要領 ひび割れ注入工法用エポキシ樹脂系ひび割れ注入材の品質規格 1 種

ひび割れ導入供試体へのひび割れ注入状況を写真 7-1 に示す。注入は自動式低圧注入工法によって上向きに行った。



写真 7-1 ひび割れ注入状況



## 7.2.1.2 補修後の曲げ強度試験結果

曲げ試験結果を図 7-1 に示す。曲げ強度（2 本平均）は、ひび割れのない供試体が  $30.9\text{N/mm}^2$  であったのに対し、 $0.2\text{mm}$  の残留ひび割れを注入工法で補修したものは  $30.8\text{N/mm}^2$  であり同等の曲げ強度であった。これは、ひび割れを導入した際に応力がピークに達する前に除荷していることから、注入材の強度回復効果ではなく、鋼繊維の架橋効果によるものと推察された。

载荷初期の部分に着目（図中拡大部）すると、ひび割れ注入供試体の载荷からの剛性が低くなっているが、この理由としては、ひび割れがある程度開口した状態をゼロ点としてスタートしているためである。また、注入材の弾性係数は UHPFRC の約  $1/20$  であるため、剛性の回復効果は小さいことを示唆している。

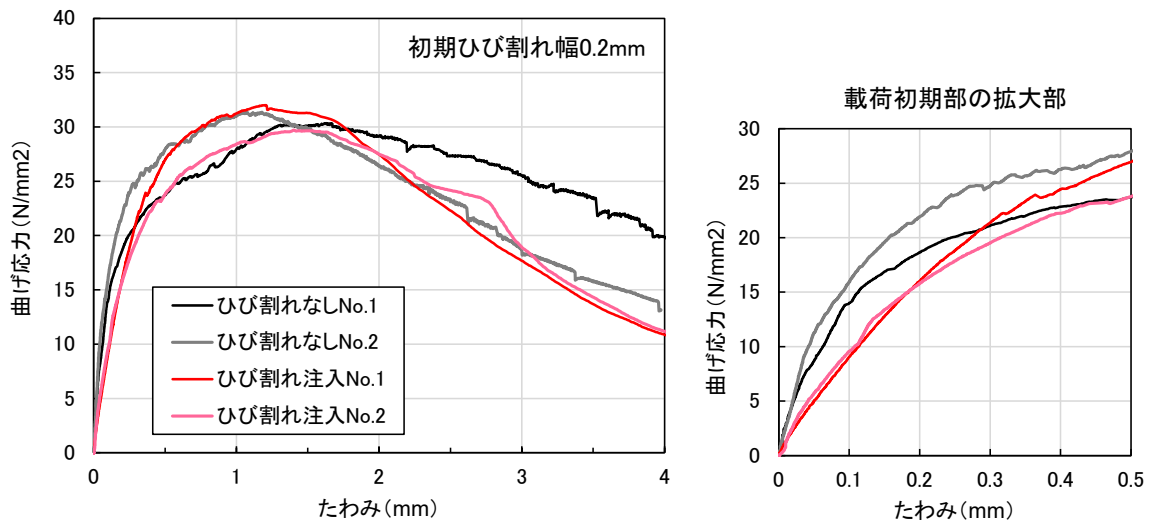


図 7-1 ひび割れ補修前後の応力-たわみ曲線(残留ひび割れ 0.2mm)

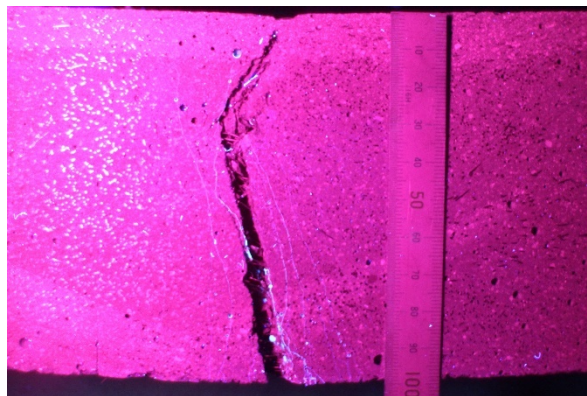


写真 7-2 注入材の浸透状況(曲げ試験後)

なお、曲げ载荷後の供試体の切断面に紫外線（ブラックライト）を照射し、圧入により良好にエポキシ樹脂が浸透していることを確認した（写真 7-2）。以上より、ひび割れ注入材は劣化因子の侵入防止が主目的で、力学特性の積極的な効果は見込めないとすることが妥当であると考えられる。

## 7.2.2 遮塩性の評価

### 7.2.2.1 試験概要

#### (1) 使用材料および配合

本研究に用いた UHPFRC は、表 7-3 に示すとおりエトリンガイト生成系の UHPFRC で、鋼繊維の混入率は 3.0vol.%としたものである。

表 7-3 AFt 系 UHPFRC の配合

水結合材比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							鋼繊維 SF*** (kg/m <sup>3</sup> )
	水 W	結合材 B*	膨張材 EX**	ワラストナイト WR	細骨材 S	高性能減水剤 SP	収縮低減剤 SRA	
15.2	195	1257	30	64	846	37.3	12.9	235.5

\*~\*\*\*：詳細は第5章を参照

#### (2) ひび割れ供試体の作製

本研究では、UHPFRC による高速道路床板の上面打換え・増厚工法の開発における施工実験<sup>2)</sup>(写真 7-3)にて打ち込まれた UHPFRC を活用した。実験では、0.1~0.15mm のひび割れが発生した部位や、0.2mm 以上の目開きが見られた施工目地を選定して、事前の室内試験<sup>3)</sup>で選定した4種の浸透性防水材(浸透プライマー)を塗布し、その後φ100mmのコア試料を目地やひび割れを跨ぐ部位から採取した(写真 7-3)。

なお、実施工では速やかに床版防水工や舗装工が行われるため、UHPFRC の打込み後に長期間乾燥に曝される状況は想定していないが、本研究では浸透プライマーの塗布を UHPFRC の打込みから約7か月後に実施したため、施工目地については施工直後には確認できなかった目開きが生じている。



写真 7-3 ひび割れ供試体の作製と浸透プライマーの塗布(模擬床板)

## (3) ひび割れ浸透性防水材

本研究で用いたひび割れ浸透性防水材（浸透プライマー）を表 7-4 に示す。

表 7-4 ひび割れ浸透性防水材(浸透プライマー)の一覧

No.	用途	主成分	浸透性 <sup>3)</sup>	遮塩性
P1	NEXCO GII 規格適合シート系防水層用	アクリル系	○	○
P2	NEXCO GII 規格適合塗膜系防水層用	エポキシ系	○	—
P3	首都高速規格適合複合防水工法用	アクリル系	○	○
P4	阪神高速規格適合複合防水工法用	エポキシ系	○	○
P5	床版防水性能を有する橋面舗装を用いた複合防水工法用	ビニルエステル系	○	○

P2 は浸透性試験にて UHPFRC との付着性が低かったため本検討では対象外  
塗布量はそれぞれの施工要領に準じたものとする  
促進条件：(60°C海水 3.5 日+送風乾燥 3.5 日) / サイクル ×15 サイクル

## (4) 促進試験

採取したコアは、浸透プライマーの塗布面以外をエポキシで被覆したのち温海水乾湿繰返しによる促進試験に供した。促進試験は、酸素、水および塩化物イオンの影響を考慮したものであり<sup>4)</sup>、「60°C 人工海水浸せき 3.5 日+20°C送風乾燥 3.5 日」を 1 サイクルとし、計 15 サイクル行った。

促進後は、塩化物イオンの浸透状況を EPMA 分析により確認した。なお、浸透プライマーには蛍光塗料を混和しており、分析に先立って切断面に紫外線（ブラックライト）を照射し、ひび割れ先端位置すなわち浸透プライマーの浸透深さを確認した。

7.2.2.2 浸透性防水材料の浸透深さと遮塩性

促進試験後の浸透プライマーの浸透深さおよび EMPA による分析結果を表 7-5 に示す。紫外線の照射による確認では、いずれのプライマーもひび割れ先端まで浸透していることが確認された。EPMA 分析では、ひび割れ部分にプライマー P1 および P3 を塗布した場合、塩化物イオンはひび割れの先端まで到達する結果であった。一方、P4 および P5 を塗布した場合、塩化物イオンは表面から 5mm 以下の範囲にとどまり、塩化物イオンの浸透が抑えられることを確認した。

施工目地に対しては、いずれのプライマーも塩化物イオンの浸透を抑制できず、鉄筋に達するものもあった。本研究では既に目開きが生じた部位を選定したが、コア採取時の外力もしくは促進試験による温度変化の繰返しによってさらに開いた可能性もある。UHPFRC の目地部が長期間乾燥に曝される状況は避けるとともに、床版防水を施すことが将来のリスク回避として重要であると考えられる。

表 7-5 促進試験後の塩分浸透状況(紫外線照射および EPMA 分析)

		P1	P3	P4	P5
ひび割れ部	紫外線照射				
	EPMA 分析 (Cl <sup>-</sup> )				
目地部	EPMA 分析 (Cl <sup>-</sup> )				

目地部はいずれも貫通

プライマーへの塩素の使用・混入はない（供試体を被覆したエポキシ樹脂からは、製造時に混入した塩素が検出）

また、この目開き部をひび割れ開口とみなせば、浸透プライマーのみで遮塩性を確保することは十分でない可能性があり、その場合は、前項で実施したひび割れ注入などによる確実な対処を行うことが肝要と考える。



### 7.3 UHPFRC の断面修復

本研究では、UHPFRC 部材に生じる欠損を、「表面気泡」レベルの軽微なものと、構造性能に影響を与えると想定される「断面欠損」レベルの2種に分け、補修箇所における断面補修材の剥離や部材としての強度低下の有無あるいはその度合いを曲げ強度試験や曲げ疲労試験にて評価した。

#### 7.3.1 力学特性の回復性評価

##### 7.3.1.1 試験概要

##### (1) 使用材料および配合

本研究に用いた UHPFRC は、表 7-6 に示すとおり、第 6 章で用いたポリプロピレン繊維を用いたものである。

表 7-6 UHPFRC の配合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					繊維* <sup>5</sup> (kg) ポリプロピレン (3.5vol.%)
		水* <sup>1</sup>	結合材* <sup>2</sup>	骨材* <sup>3</sup>	高性能* <sup>4</sup> 減水剤	消泡剤	
14.9	3.0	195	1,309	914	28.8	0.65	31.9

\*1～5：詳細は第 6 章を参照

##### (2) 断面補修材

本検討で使用した断面補修材の諸物性について表 7-7 に示す。断面補修材は、圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup> 程度の高強度を有する樹脂モルタルであり、従来から断面補修材として利用されている付着性に優れたエポキシ樹脂に、コンクリートと同様の弾性係数を得るために特殊骨材を混合したものであり、凍害および塩害の複合劣化に対する抑制効果も確認されているものである<sup>5)</sup>。

選定に際しては、UHPFRC の力学特性とできるだけ近いものとした。また、UHPFRC と断面修復材の一体性は、温度依存性も含めて写真 7-4 に示すように事前に付着試験で確認している。

表 7-7 断面補修材の物性(試験値)

試験項目 (規格)		UHPFRC	断面補修材
		水結合材比 14.9% ポリプロピレン繊維 90°C-24 時間 蒸気養生	高弾性・高強度 樹脂モルタル (エポキシ樹脂系) 材齢 1 日 (20°C)
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1108	129.4	125.8
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1149	40.9	20.5
曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1106	22.0	38.5
曲げひび割れ発生強度 (N/mm <sup>2</sup> )	(JSCW-G552)	11.5	38.5
UHPFRC と断面修復材の付着強度 (N/mm <sup>2</sup> ) *	直接引張試験	5.3 (20°C) 3.9 (40°C) 2.2 (60°C)	

\*：温度依存性も確認 (試験時温度 20, 40, 60°C)、断面修復材の厚さ 20mm



写真 7-4 UHPFRC と断面修復材の一体性確認(直接引張試験)

なお、UHPFRC と断面修復材には、樹脂材料特有の温度依存性はあるものの、最大 60°C 環境での付着強度は 2.2N/mm<sup>2</sup> であり、常温範囲内では良好な一体性を有している。

(3) 断面欠損を模擬した試験体

本研究では、写真 7-5 に示すようにあらかじめ欠損部を模擬した 100×100×400mm の曲げ供試体に、断面補修材を充填し、コテ仕上げにて成形した。

断面欠損率などの水準（試験ケース）は後述する。

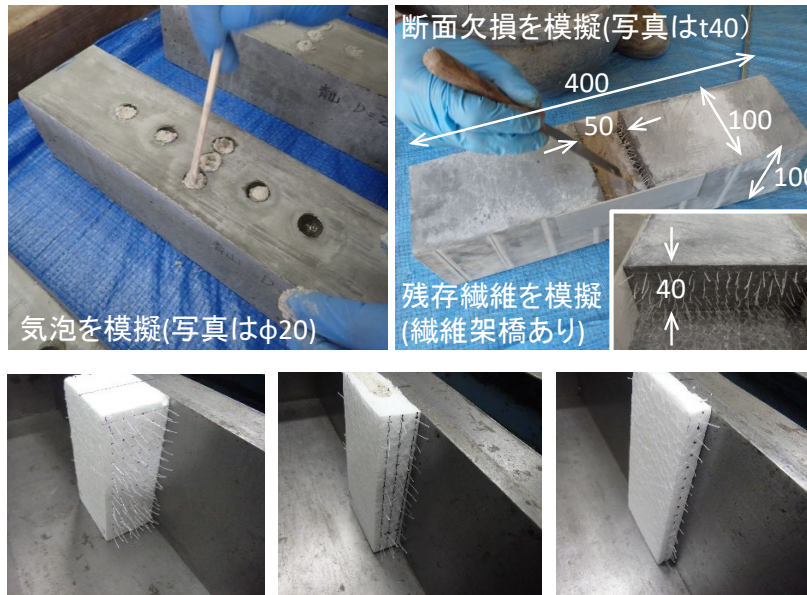


写真 7-5 断面欠損を模擬した供試体の作製

ここで、埋設型枠の母材に混入されている合成繊維を切断等を取り除かずに補修をした場合の効果を確認するため、欠損部に繊維をあらかじめ埋め込んだ供試体も製作した。埋め込んだ繊維の本数は、浅野による既往の研究<sup>6)</sup>を参考に、等方性配向(ランダム)に対して繊維が一方向(配向角 0°)で向いている本数を算出し、244 本/100cm<sup>2</sup>とした(図 7-2)。

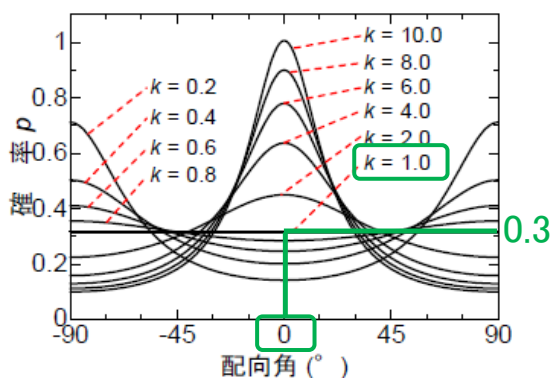


図 7-2 配向角とその確率(確率密度関数)から 0° の本数を算出

①本研究の UHPFRC の単位面積(100cm<sup>2</sup>)

あたりの繊維本数

→1,627 本/100cm<sup>2</sup>(等方性配向・ランダム配向の場合)

※等方性配向の場合の配向強度 k=1.0 に対して、

本研究では断面に対して垂直となる繊維のみを有効と仮定

②配向角 0° で繊維が向く確率 p=0.3

→1,627 本×0.3=488 本/100cm<sup>2</sup>

③破壊面の繊維が均等に引き抜けた場合を仮定

→488 本×1/2=244 本/100cm<sup>2</sup>

7.3.1.2 静的強度試験および簡易疲労試験による評価

(1) 静的強度試験

本研究では、断面補修材による強度回復効果を曲げ強度試験によって評価確認した。表 7-8 に示す試験ケースのとおり、断面補修部は曲げ強度試験における圧縮縁と引張縁に分けて実施した。

断面欠損率は、10%、20%、40%の3水準とした。

(2) 簡易疲労試験

UHPFRC の補修部が常時振動を受けることを想定し、長期的な振動環境下での一体性を評価するために、加振機（高周波振動モータ）を用いた簡易的な疲労試験を実施した。試験は写真 7-6 に示すように、補修部の引張縁に正負交番の振動が加わる方向に供試体をセットしたうえで（加速度計による実測で卓越方向は Z 方向）、補修部表面に卓越周波数 91.6Hz、加速度約 15Gal (0.15m/s<sup>2</sup>) の振動が生じていることをモニタリングしながら、累計 370 分、合計約 200 万回の振動を与えた。

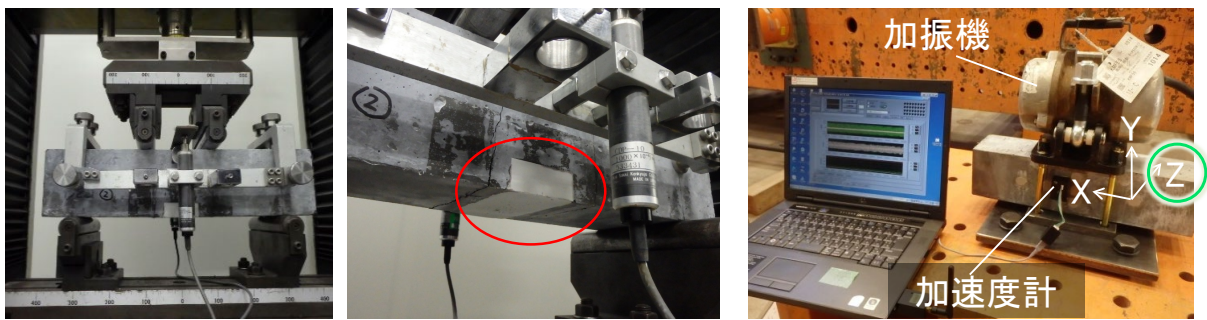


写真 7-6 静的曲げ強度試験および簡易疲労試験

表 7-8 試験ケース(静的曲げ強度試験および簡易疲労試験)

欠損レベル ・位置	欠損厚	欠損率	補修部の 繊維架橋	曲げ強度試験		
				静的	簡易疲労 (参考)	
気泡 補修	引張縁	t5.0mm(φ10)	無	○		
		t7.5mm(φ15)		○		
		t10mm(φ20)		○	○	
断面 補修	圧縮縁	t 10mm	無	○		
		t 20mm		○		
		t 40mm		○		
	引張縁	t 10mm		○		
		t 20mm		○		
		t 40mm		○		
	引張縁	t 10mm		有	○	
		t 20mm			○	
		t 40mm			○	○



(3) 試験結果

1) 静的曲げ強度試験

図7-3より、圧縮縁の補修においては断面欠損率が最大40%(全断面100mmに対して欠損厚40mm)生じて、本検討で用いた補修材では強度低下が生じなかった。これは、断面補修材の圧縮強度や弾性係数が母材に近いと考えられる。

引張縁の補修においては、表面気泡レベルの欠損であれば、強度低下は生じないものの、断面欠損レベルの場合には、断面欠損率が大きくなるにしたがって曲げ強度(ピーク強度)の低下が生じた。これは、断面補修材や補修界面には繊維が混入されていないために引張縁の繊維の架橋効果が期待できなかったことや、断面欠損部での断面変化部が破壊の起点となったことが考えられる。

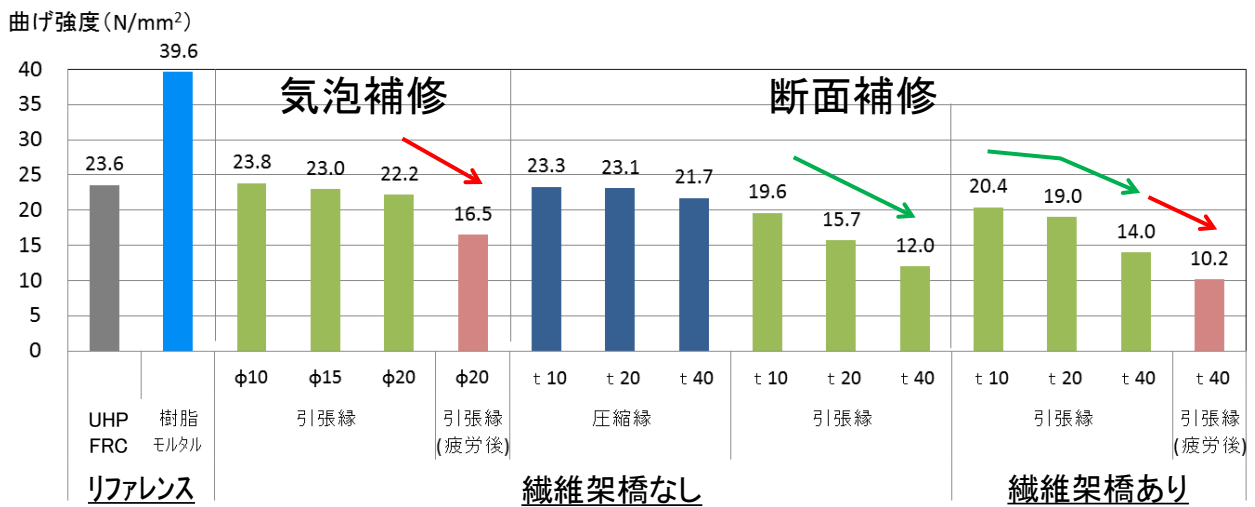


図7-3 強度試験結果一覧

これに対し、欠損箇所に残存する繊維を含めた補修をすることで、断面補修材と母材界面の付着力だけでなく、繊維の架橋効果が加わることで強度低下が緩和される傾向が確認された(図7-4 応力-たわみ曲線)。特に、断面欠損率20%については、曲げひび割れ発生強度(一次ピーク強度)は、補修界面に繊維が架橋されていないものはリファレンスよりも低下しているが、繊維を架橋したものについては同等レベルまで回復しており、断面補修材(エポキシ樹脂)とポリプロピレン繊維の付着が良好であったと推察される。また、写真7-7に示すように強度試験後の供試体の観察では、断面欠損率が大きくなるにつれて曲げひび割れの起点やひび割れの開口は補修界面となる傾向ではあるが、UHPFRC母材でひび割れが開口している供試体もある。

以上より、本研究で選定したエポキシ樹脂モルタルを用いた場合、断面欠損率20%までであれば強度回復が見込まれる可能性があり、総じてUHPFRCと一体となって挙動するものと判断された。

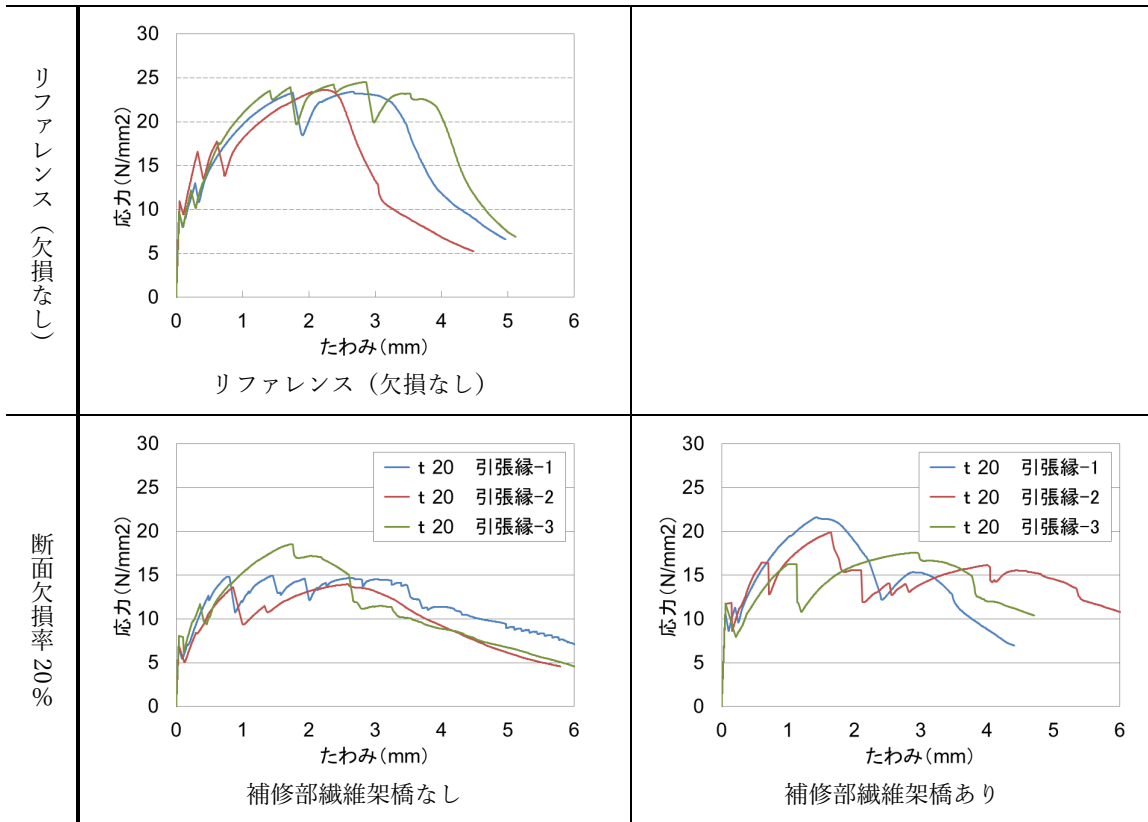


図 7-4 曲げ強度試験における応力-たわみ曲線

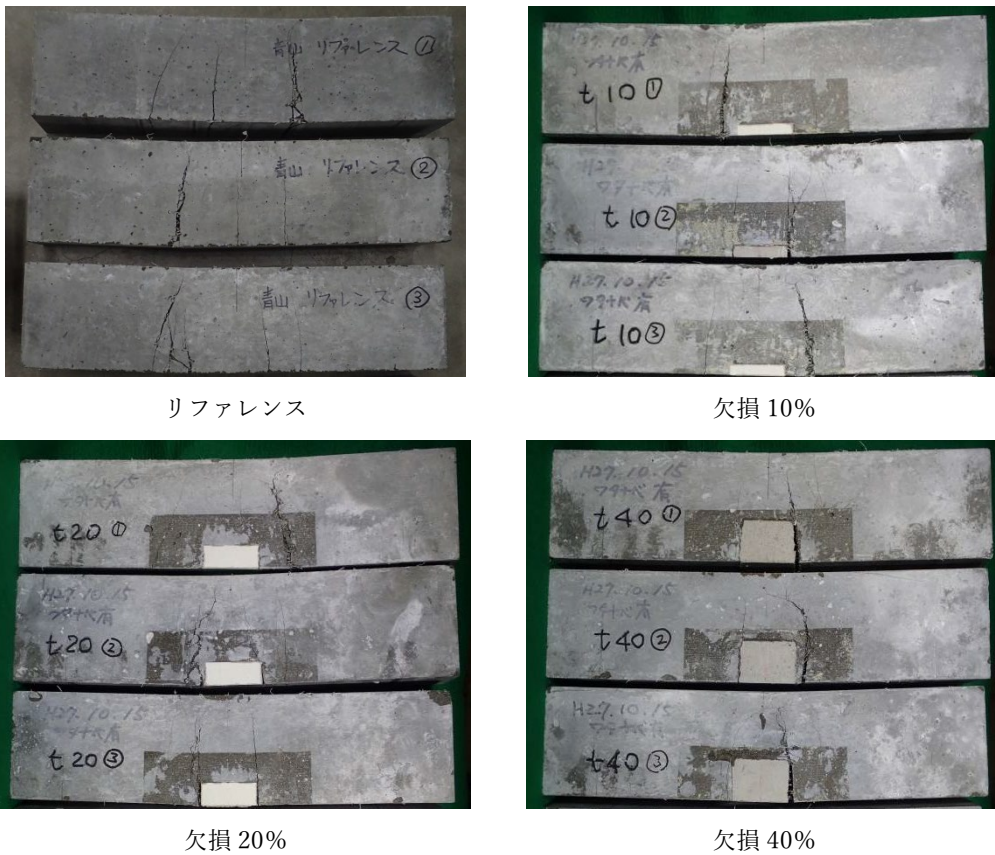


写真 7-7 曲げ強度試験後の供試体(断面欠損供試体, 繊維架橋あり)

## 2) 簡易疲労試験

加振機を当てがった簡易疲労試験については、前述の図 7-3 より加振 200 万回後の曲げ強度は、加振前に比べて約 25~30%程度低下する結果となった。また、図 7-5 には疲労試験前後の応力-たわみ曲線を示すが、特に断面欠損をした方の供試体は、加振後は曲げひび割れ発生強度が低下している。これは、補修界面での UHPFRC と断面修復材に付着切れやマイクロクラックが生じていることが推察された。併せて曲げ強度も低下していることから、界面に架橋している繊維との付着についても影響を及ぼしている可能性もある。このことから構造部材(特に引張縁)を補修するには注意が必要であると考えられる。

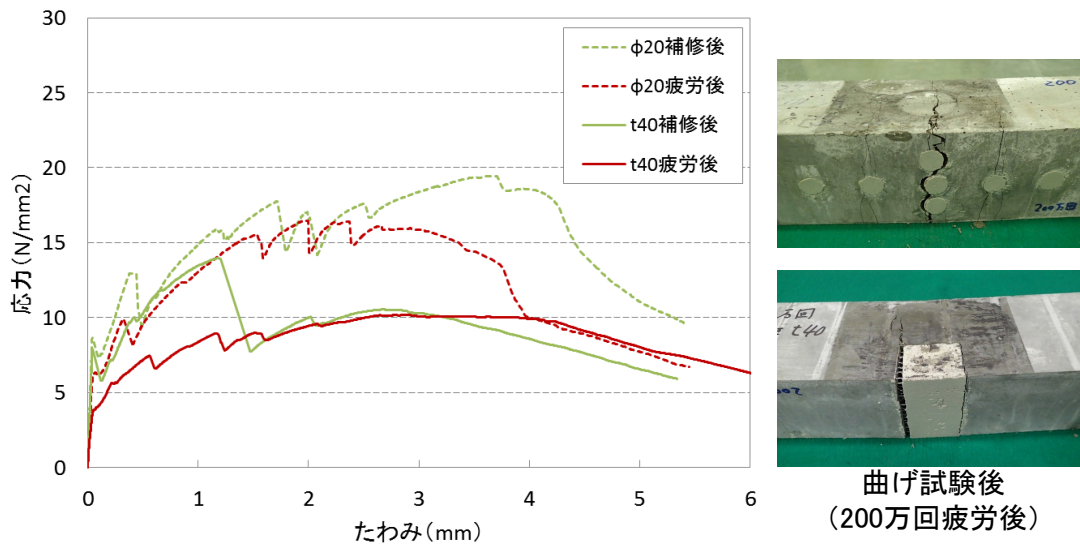


図 7-5 簡易疲労試験後の曲げ強度試験結果(応力-たわみ曲線)

なお、加振後にハンマーで補修箇所を打撃しても、補修材は剥離せず良好な一体性を有していることから、第三者影響を考えた剥落防止の観点では補修界面に繊維を架橋させることは有効であると考えられる。

7.3.1.3 曲げ疲労特性

(1) 曲げ疲労試験

本研究では、前述の簡易的な疲労試験にて断面欠損部への影響把握に引き続き、曲げ疲労試験によってその特性を確認した。静的な曲げ強度試験では、欠損面に残存した繊維を架橋させるように補修する場合、「欠損率 20%」が強度回復を見込める閾値と判断したため、ここでは「欠損率 20%、繊維架橋あり」にケースを絞り評価を行った。

試験は、第6章での暴露試験体での検討と同様に、500kN サーボパルサを用いて曲げ疲労試験を行ったが、温度依存性の影響も把握・理解するために同6章で用いたシートヒーターによって加温しながらの試験も行った（写真 7-8）。試験は3点曲げ載荷とし、速度 5Hz の sin 波で供試体が破壊もしくは 200 万回到達するまで試験を実施した。

荷重条件は表 7-9 に示すとおり、応力比を 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 の4水準とした。シートヒーターで試験中の供試体温度を加温するケースは 50, 70°C とし、応力比 0.4 のみで実施した。

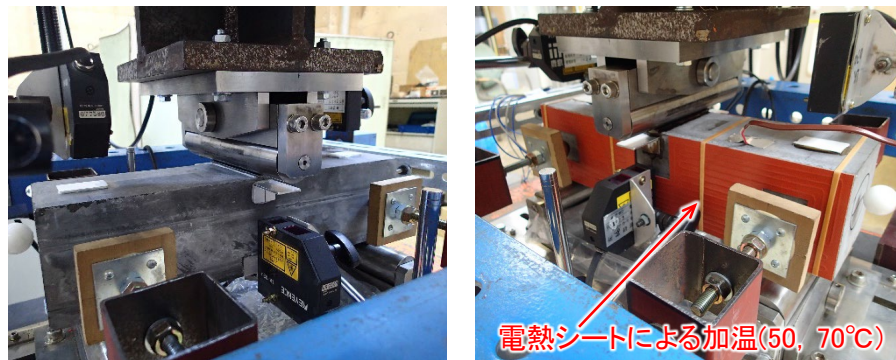


写真 7-8 曲げ疲労試験(試験時温度 20, 50, 70°C)

表 7-9 試験ケース(曲げ疲労試験)

欠損厚* (欠損率)	ケース		静的強度		曲げ疲労試験条件**			
			曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げひび割れ発生強度 (N/mm <sup>2</sup> )	上限応力 (N/mm <sup>2</sup> )	上限 載荷力 (kN)	下限 応力 (N/mm <sup>2</sup> )	下限 載荷力 (kN)
20mm (20%)	20°C	0.2	16.2	5.09	4.76	9.92	1.90	3.96
		0.4			6.48	13.50		
		0.6			9.72	20.25		
		0.8			12.96	27.00		
	50°C	0.4			6.48	13.50		
	70°C							

\*：補修部の繊維架橋あり

\*\*：載荷応力比 =  $(\sigma_{max} - \sigma_{min}) / (f_m - \sigma_{min})$



(2) 試験結果

1) 静的曲げ強度試験

断面補修後の曲げ強度は、表 7-9 に示すとおり UHPFRC 母材の  $22.0\text{N/mm}^2$  に対して  $16.2\text{N/mm}^2$  と 26% 強度が低下している状態であった。ただし、図 7-6 の応力-たわみ曲線に示すとおり、補修後の供試体は約  $5\text{N/mm}^2$  で曲げひび割れが発生したが、その後も荷重（応力）が上昇する傾向を示し、補修材と母材の接合界面に架橋された繊維が有効に機能したものと判断された（写真 7-9）。

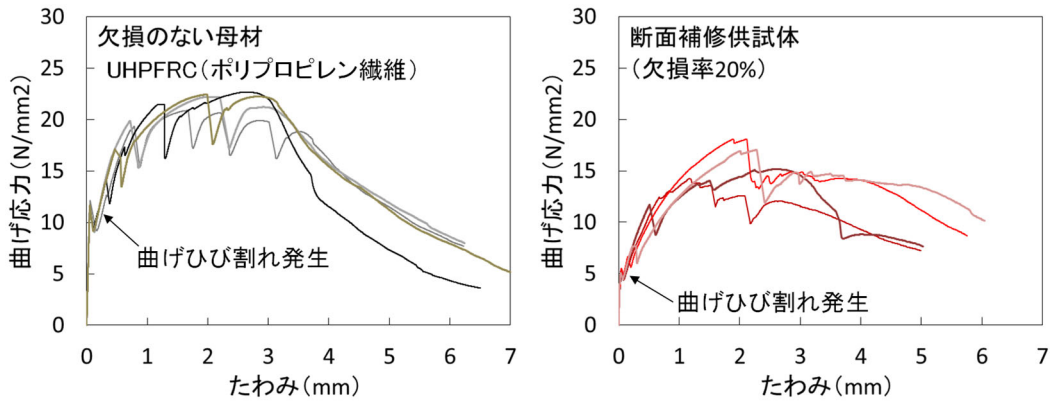


図 7-6 静的曲げ強度試験の応力-たわみ曲線



写真 7-9 断面補修界面の繊維架橋状況(静的曲げ試験後)

2) 曲げ疲労試験結果

本研究では、考察の一つとして第6章と同様に土木学会 UFC 指針<sup>7)</sup>に記載の S-N 曲線図上に結果をプロットすることとした。図 7-7 より、本研究で用いたポリプロピレン繊維を混入した UHPFRC に対して「欠損率 20%、繊維架橋あり」という条件でエポキシ樹脂モルタルによる補修を施した場合、UFC の疲労特性と同様の評価ができる可能性が示された。

ただし、供試体温度が 20°C、50°C に比べ 70°C では疲労強度が低下する傾向が確認された。これは、第6章での知見と同じように UHPFRC に用いているポリプロピレン繊維の温度依存性（軟化）による影響が表れているものと考えられる。

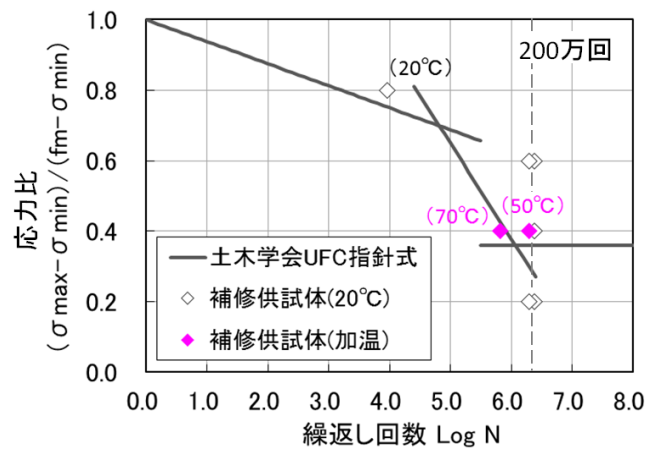


図 7-7 曲げ疲労試験結果 (S-N 曲線図)

### 7.3.2 遮塩性の評価

ここでは、エポキシ樹脂モルタルで断面補修した部分での物質浸透抵抗性を評価することを目的に、塩分促進試験を行った。本研究では、「断面欠損率 40%、繊維架橋なし」の 1 ケースを代表として促進試験に供した。促進試験は、本章のひび割れ補修試験体の評価と同様に、温海水乾湿繰返し試験とした。なお、評価面を除く 5 面はエポキシでコーティングした。

促進試験後は、EPMA 面分析によって塩化物イオンの浸透状況を確認した。

EPMA 分析の結果を図 7-8 に示す。図に示すように、本研究では UHPFRC とエポキシ樹脂モルタルの補修界面からの塩化物イオンの浸透は認められず、载荷荷重のない条件では界面の付着とそれに伴う遮塩性が良好に保たれていることが確認された。なお、エポキシ樹脂モルタルについては、合成時に混入していると思われる塩素イオンが全体的に検出されている。

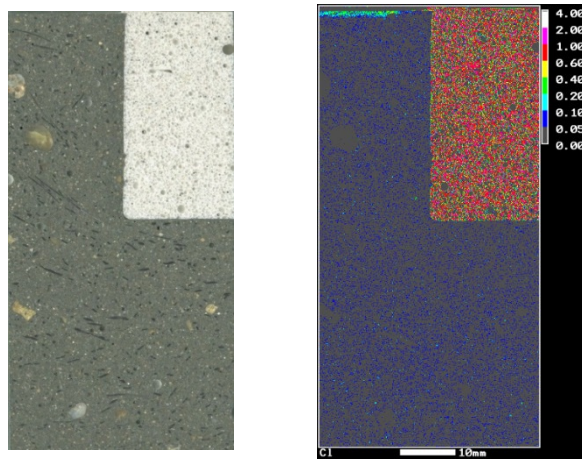


図 7-8 EPMA 分析結果  
(UHPFRC-エポキシ樹脂モルタル補修界面)

## 第7章のまとめ

本研究では、今後の UHPFRC を用いた構造物の維持管理計画に資するデータ取得や試験方法の提案を目的に、ひび割れや断面欠損を模擬した供試体に対して補修を施した際の物質浸透抵抗性や力学特性の回復の有無や程度を確認した。以下に得られた知見を示す。

### (1) ひび割れ補修に関する検討

0.2mm のひび割れを残留させた曲げ供試体に対し、ひび割れ注入工法による補修を行った。

- ・補修後の曲げ強度試験において、载荷初期の剛性回復は見込めないとともに、曲げ強度やタフネスなどひび割れ後の挙動には注入材は関与しない。ひび割れ注入材は劣化因子の侵入防止が主目的と考えるのが妥当であると考えられる。
- ・ひび割れ浸透性防水材（プライマー）によってひび割れ部を閉塞させ、塩化物イオンの浸透を抑制できることを確認した。ただし、ひび割れへの浸透性や遮塩性（ひび割れ閉塞性）については、材料による差異があるため、事前の確認が必要である。

### (2) 断面修復に関する検討

UHPFRC 部材に生じる欠損を、「表面気泡」レベルの軽微なものと、構造性能に影響を与えると想定される「断面欠損」レベルの2種に分け、欠損部にエポキシ樹脂モルタルによる補修を行った。

- ・圧縮縁の補修においては断面欠損率が最大 40%でも強度低下が生じなかった。これは、本研究で選定したエポキシ樹脂モルタルの圧縮強度や弾性係数が母材に近いためと考えられる。
- ・引張縁の補修においては、表面気泡レベルの欠損であれば、強度低下は生じないものの、断面欠損レベルの場合には、断面欠損率が大きくなるにしたがって曲げ強度の低下が生じた。またその破壊の起点は補修界面であった。
- ・欠損箇所に残存する繊維を含めた補修をすることで、断面補修材と母材界面の付着力だけでなく、繊維の架橋効果加わることで強度低下が緩和される傾向が確認された。本研究で選定したエポキシ樹脂モルタルを用いた場合、欠損率 20%までであれば強度回復が見込まれる可能性がある。
- ・加振機を当てがった簡易疲労試験（本研究で考案）後の曲げ強度試験では、加振前に比べて約 25～30%程度曲げ強度が低下する結果となった。補修界面での UHPFRC と断面修復材に付着切れやマイクロクラック、界面に架橋している繊維との付着について影響を及ぼしている可能性がある。



- ・サーボパルサを用いた曲げ疲労試験では、ポリプロピレン繊維を混入した UHPFRC に対して「欠損率 20%、繊維架橋あり」という条件でエポキシ樹脂モルタルによる補修を施した場合、土木学会 UFC 指針に示される疲労特性と同様の評価ができる可能性が示された。
- ・ただし、供試体温度が 20°C、50°C に比べ 70°C では疲労強度が低下する傾向が確認され、第 6 章での知見と同様にポリプロピレン繊維の温度依存性による影響が表れているもの考えられる。
- ・第三者影響を考えた剥落防止の観点では補修界面に繊維を架橋させることは有効である。
- ・塩分浸透促進試験による検証では、疲労ほか無荷の条件では UHPFRC とエポキシ樹脂モルタルの一体性は良好で、補修界面からの塩化物イオンの浸透は認められなかった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2013
- 2) 渡邊有寿，柳井修司，牧田 通，北川寛和：UHPFRC による道路床版打替え・補強工法に向けた実大施工実験，プレストレストコンクリート工学会，第 28 回シンポジウム論文集，pp.619-622，2019.11
- 3) 牧田 通，渡邊有寿，光山恵生，向 俊成，加藤健太：UHPFRC が敷設された橋梁床版の施工目地の閉塞に適したプライマーの検討，令和 2 年度土木学会全国大会大 75 回年次学術講演会，V-123，2020
- 4) 渡邊有寿，一宮利通，藤原浩已：繊維種類やマトリクスがひび割れを有する繊維補強モルタルの力学特性や塩分浸透特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.293-298，2019.
- 5) 内田真末，西出 靖，野嶋潤一郎，溝渕利明：樹脂モルタル補修材によるコンクリート構造物の耐久性向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，2015，pp.1633-1638.
- 6) 浅野浩平：高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性と架橋側に関する研究，筑波大学博士論文，2014
- 7) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー113，2004

## 第 8 章

### 総括



## 第8章 総括

### 8.1 本研究のまとめ

本論文では、超高性能繊維補強セメント系複合材料（Ultra-High Performance Fiber Reinforced cement-based Composite：UHPFRC）が現場打ちを含む一般的なコンクリートと同じような施工がなされた場合の特徴や留意点を明らかにするとともに、ひび割れの発生を想定した場合の耐久性の確保・照査など、さらには今後の設計・施工法や維持管理手法の確立に資する知見を得ることを目的に、幅広く実験的検討を行った。本研究で得られた知見および結論を章ごとに総括する。

#### 【第2章～第4章：品質確保に資する研究】

**第2章**では、エトリングایت生成系 UHPFRC が様々な温度環境で養生されることを鑑み、若材齢からの強度発現特性を把握し、圧縮強度は従来の積算温度法（ $-10^{\circ}\text{C}$ 基準）である程度までは推定できるが、若材齢時の強度を推定する場合には精度に課題があることを明らかにした。本研究では、部材温度をもとに基準温度を補正する修正積算温度を提案し、さらに「水和初期」、「加速期」、「漸増期」の3つの領域について近似式を分けることで、簡便かつ精度の高い強度発現の推定を可能とした。

**第3章**では、エトリングایت生成系 UHPFRC の硬化体の細孔構造と耐久性に着目し、高温履歴がこれらに与える影響について調査・分析を行った。UHPFRC は単位結合材量が非常に多いため水和熱が大きく、部材寸法や断熱状態によっては  $100^{\circ}\text{C}$ 以上の高温履歴を受けエトリングایتが分解し、遅れエトリングایتによる再膨張の懸念が発生する懸念があり、マスコンクリートとして施工する際にはエトリングایتの分解が生じなかった  $90^{\circ}\text{C}$ 以下に抑える配慮が必要であることを明らかにした。

また、5～10年の長期的なスパンで細孔構造の推移を追跡調査し、高温履歴の有無（最高温度  $85^{\circ}\text{C}$ ）、暴露環境（水分供給有無）によらず長期的な強度の増進、空隙量の減少（緻密化）を確認した。

**第4章**では、エトリングایت生成系 UHPFRC を現場打ち施工で橋梁を建設するプロジェクトに向けて、想定される水平流動での流動距離の限界や、水平・鉛直打重ねの影響把握などを行った。その結果、流動距離 10m までは鋼繊維の分散や材料分離に影響を及ぼすことはないことを確認した。

水平打重ねについては打重ね面の湿潤状態を確保できれば突き棒によるかき乱しにて一体性の低下を抑制できた。一方で、鉛直打重ねは繊維の架橋や配向に大きな影響を及ぼし、突き棒によるかき乱しでは元の曲げ強度まで回復させることは困難であることが明らかとなったため、実施工では鉛直打重ねを回避した施工を行った。

第2章および第3章の知見を活用することで、マスコンクリートである端部横桁の温度応力解析の精度を高めることができ、無対策では  $110^{\circ}\text{C}$ まで温度上昇する懸念があるところを実施工ではパイプクリーニングにより  $90^{\circ}\text{C}$ 以下まで低減することができた。また、3章で提案した積算温度による強度推定を施工管理にも用い、プレストレスの導入材齢の管理などに反映させた。

**【第5章～第7章:耐久性確保に資する研究】**

**第5章**では、既設構造物や鉄筋などによって拘束を受けた UHPFRC のひび割れ抵抗性を評価するために、既存の JIS 試験「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」と拘束度を任意に変化させることができる「TSTM (Temperature-Stress Testing Machine) 試験」によって各種養生条件における UHPFRC のひび割れ発生機構の検証と、ひび割れに対する余裕度を評価した。

JIS 試験法による評価では、ひずみ計を同試験機に加えることで型枠の拘束度は 0.7～0.8 程度であることを明らかにし、膨張材や収縮低減剤による効果も定量的に比較・評価できる可能性を見出した。また、TSTM 試験によって拘束度 1.0 (完全拘束) での詳細試験を行った結果、20℃一定の状態では引張応力に対してひび割れ発生強度の余裕度が大きいものの、材齢初期から給熱養生を行うと UHPFRC の収縮量は抑制できる一方で拘束応力が大きくなりその余裕度が小さくことを明らかにした。これは、給熱養生によって弾性係数が材齢初期に増大することが要因であり、拘束状態に応じて養生温度を管理することの重要性を実証した。

**第6章**では、ひび割れが残留した UHPFRC の耐久性や力学的挙動への影響を明らかにすることを目的に、各種環境条件におけるマトリクス内の繊維の健全性に着目した実験的検討を行った。

鋼繊維を用いた UHPFRC については、初期ひび割れを含めた UHPFRC の力学性能について「塩害環境」と「疲労」に着目した試験を実施した。0.1～0.2mm 程度のひび割れが残留した状態で4年間海洋暴露されても静的な力学特性は低下しておらず、塩化物イオンの浸透については11年後でも表面から約2mmのごく表面に留まり、ひび割れからマトリクス内部には拡散していないことを確認した。酸素や水が常時供給される環境においては、0.2mm程度のひび割れであれば部材としての構造耐力が速やかに低下することは考えにくい、残留ひずみやひび割れを有した状態で疲労を受ける際にはひび割れを架橋する鋼繊維の腐食破断が早まる恐れがあり留意が必要であることを明らかにした。

合成繊維を用いた UHPFRC については、ポリプロピレン繊維とアラミド繊維を対象に「熱」、「酸化」および「アルカリ」に着目した検討を行った。まず、ポリプロピレン繊維については、高温時の伸びや引張強度の変化といった温度依存性が UHPFRC の力学特性にも影響を与えることを明らかとするとともに、マトリクス内部の繊維の劣化(酸化)についてもその健全性は100年以上保たれることを明らかとした。アラミド繊維については、温度依存性は認められず、マトリクス内の繊維が高温かつアルカリに曝されても、想定した加水分解による劣化は認められなかった。以上より、UHPFRC は硬化体の緻密さにより、酸素や水の供給が遮断されるため、合成繊維の劣化速度は極めて小さいということを明らかにした。

**第7章**では、UHPFRC を用いた構造物の維持管理計画に資するデータ取得や試験方法の提案を目的に、ひび割れや断面欠損を模擬した供試体に対して補修を施した際の物質浸透抵抗性や力学特性の回復有無や程度を確認した。

ひび割れ部を注入や浸透防水材料によって補修した検討では、载荷初期の剛性回復は見込めず曲げ強度やタフネスなどひび割れ後の挙動にも関与しないものの、適切に材料を選定すれば塩化物イオンの浸透を抑制できることを実証した。

断面修復に関する検討では、圧縮強度や弾性係数が UHPFRC に近いエポキシ樹脂モルタルを補修材に選定し、欠損レベルをパラメータとして曲げ強度や曲げ疲労特性への影響を評価した。圧縮縁の

補修においては断面欠損率が最大 40%でも強度低下が生じず、引張縁の補修においても表面気泡レベルの欠損であれば強度低下は生じない。一方で、引張縁の断面欠損レベルが大きくなるにしたがって曲げ強度の低下が生じたが、欠損箇所に残存する繊維を含めた補修をすることで強度低下が緩和される知見を得た。ただし、断面補修部が疲労を受けるような環境では、補修界面での UHPFRC と断面修復材に付着切れやマイクロクラック、界面に架橋している繊維との付着について影響を及ぼす恐れがあることを明らかにした。

塩分浸透促進試験による検証では、疲労ほか無載荷の条件では UHPFRC とエポキシ樹脂モルタルの一体性は良好で、補修界面からの塩化物イオンの浸透は認められないことを確認した。

## 8.2 今後の課題

今後、UHPFRC が鉄筋コンクリートとしての設計・施工に向けた検討が進み、特に補修・補強の分野で適用が広がっていくことを鑑みた場合、耐久性や維持管理に関して以下のような課題の理解とその解決に向けた取組み、事例の共有が必要であると考えます。

### (1) UHPFRC の耐久設計

例えば UHPFRC による増厚補強によって既設の鉄筋コンクリート部材が UHPFRC で覆われた場合、その緻密性を活かした表面保護効果から鉄筋部分の腐食限界塩化物イオン濃度に達するまでの期間を長くすることが期待できる。すなわち UHPFRC を選択する場合は、力学特性の向上だけでなく時間的な性能低下曲線を緩やかにできる“アップグレード化”も期待した抜本的な対策を目的とすることが多くなると考えられる（図 8-1）。一方で、UHPFRC の配合によってひび割れ分散性や幅・深さは様々であり、さらには混入する繊維の劣化や変質など時間的な変化も関与してくる。

本研究では耐久性照査法の提案までは至ることができなかったが、上記を包括的に扱った耐久設計を確立するには、データの拡充がさらに必要である。

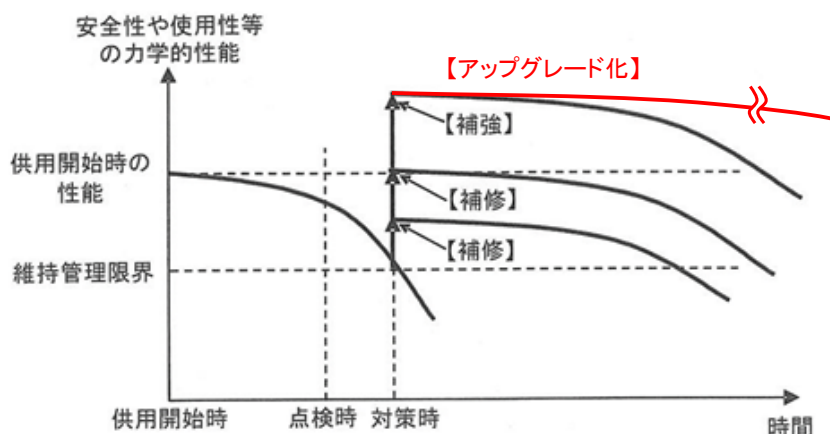


図 8-1 UHPFRC に期待する効果  
(コンクリート標準示方書[維持管理編]<sup>1)</sup>に加筆)

### (2) ひび割れ発生リスクの予測

本研究（第5章）では拘束条件が厳しいものでもひび割れが発生しないという良好な結果ではあったが、ひび割れ発生リスクを予測するという観点では課題が残った。例えばマスコンクリートのひび割れ制御指針<sup>2)</sup>に示される安全係数すなわちひび割れ指数（ひび割れ発生強度／引張応力）を用いてひび割れ発生リスクを確率として予測・照査できるのが理想ではある。

しかしながら、そのためには実際のひび割れ発生事例の収集とこれに対応する強度・応力など、普通コンクリートでなされてきた数多くのデータ収集が必要となる。さらには、普通コンクリートよりも特徴的な収縮特性やクリープによる応力緩和特性などについても UHPFRC の材料設計者はデータを集めていく必要がある。



### (3) 目地部および接手部の耐久性確保

既設コンクリートと UHPFRC，もしくは UHPFRC 同士の目地部および接手部は塩化物イオンなどコンクリートの劣化因子が浸入しやすく，耐久性上の弱部となることが懸念される。特に，床版などは輪荷重に伴う疲労が補修・補強後の供用中に作用することから，100 年耐用を目指すのであれば UHPFRC の優れた付着特性に加え，接着剤を用いることで長期的な一体性を確保することが望ましい。また，接着剤以外にも例えば目地界面の付着面積を大きくしたり，劣化因子の浸入経路を長くしたりするなどの形状の工夫，補強材の配置などによる目開き抑制対策（図 8-2）<sup>3)</sup>，または本研究 第 7 章で検討した浸透防水材（プライマー）による処置といった検討事例を蓄積していくことが必要である。

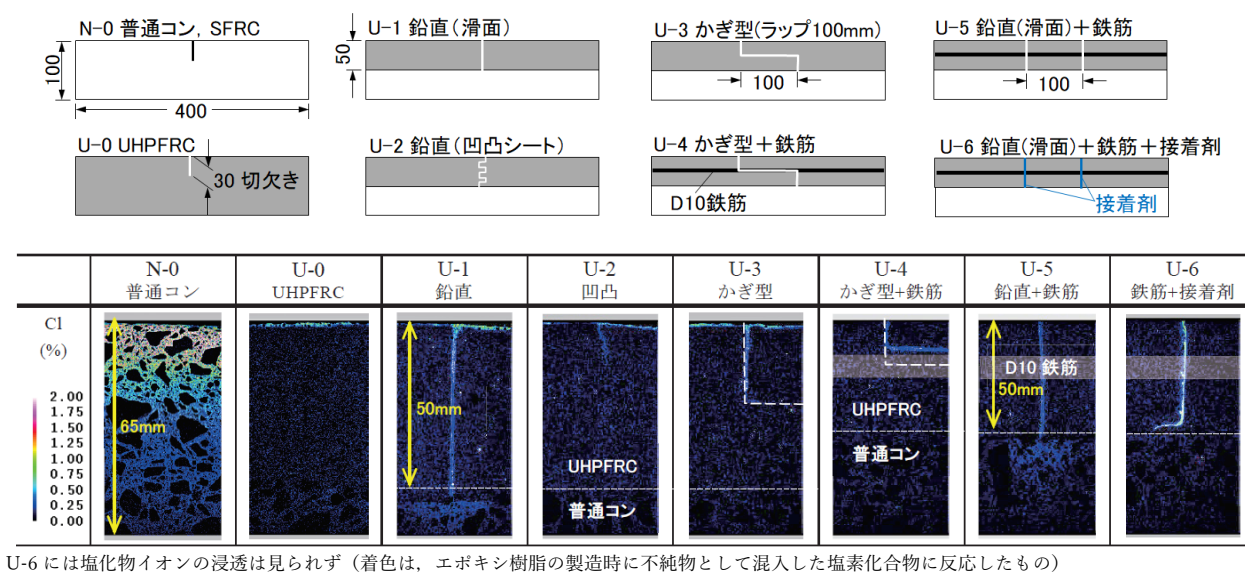


図 8-2 UHPFRC の目地部の耐久性検討例<sup>3)</sup>

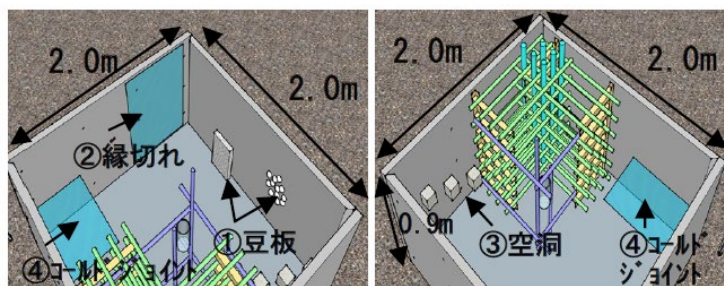
### (4) ライフサイクルコストの試算

インフラ更新時の投資が多少高くなってもトータルでのライフサイクルコスト（LCC）が最小となるような維持管理方法が有効であることは，概念的には理解されていても実際の補修・補強工事へ十分に導入されているとは言えないのが現状である。また，UHPFRCに限ったことではないが，特に UHPFRC を用いた工法は材料費・工費ともに割高になるというのが一般的な認識であると思われる。そのため，補修・補強後の耐久性の的確な照査，維持管理回数（年数）の正確な試算など，定量的に効果を示すためのデータ取得がここでも必要となる。

UHPFRC を用いることによって，図 8-1 のように構造物の寿命が大幅に延びることも想定されるため，LCC の試算では将来の「物価上昇」「社会的割引率」などといった条件の設定で評価が大きく変わる恐れがあることも認識しておく必要がある。

(5)維持管理および検査手法の確立

前述のLCC試算とも関連するが、UHPFRCが用いられた構造物を維持管理していく上では検査手法の確立が必要である。UHPFRCには補強用繊維が混入されているため、例えば鋼繊維を用いた場合にはUHPFRCに内包または囲まれたコンクリートや鉄筋の健全性を調査・点検する場合、従来の非破壊検査手法では検出が困難な場合も想定される<sup>4)</sup>。従来手法の適用性や課題の把握、さらには新たな検査手法の開発が必要となる。



対象	初期欠陥 模擬状況	電磁波レーダ探査機	超音波探査機	赤外線カメラ
かぶり	平面視 かぶり 140mm PCaパネル (t=60mm) 80mm D32	反射波形 レーダ画像 0 mm 50 100 150 鉄筋 137 カーブ フィッティング	平面視 0 100 200 300 400 水平方向 鉄筋らしき影は 見えるが不鮮明	(計測対象外)
豆板	正面視 半球状の 発砲スチロール ポーラス コンクリート	正面視 水平方向 鉛直方向 豆板を検知	平面視 0 100 200 水平方向 発泡スチロール 多重反射波 豆板を検知	正面視 ポーラス コンクリート 発泡スチロール (鮮明) 豆板が深く広範囲な場合は検知可
空洞	平面視 PCaパネル (t=60mm) 200mm 100mm 空洞 (□100mm発砲スチロール)	平面視 0 mm 水平方向 発泡スチロール 多重反射波 空洞を検知	平面視 0 mm 水平方向 発泡スチロール 多重反射波 空洞を検知	正面視 不鮮明 インサート パネルに接した空隙のみ検知
縁切れ	正面視 PETシート	平面視 0 mm 水平方向 PETシート PETシートを検知	平面視 0 mm 水平方向 PETシート 多重反射波 PETシートを検知	正面視 PETシート (不鮮明) 縁切れの検知は難しい

図 8-3 UHPFRC(埋設型枠)に囲われた鉄筋コンクリートの調査例<sup>4)</sup>

(6)解体方法の確立

UHPFRCを用いることによって、耐久性や構造耐力を従来の鉄筋コンクリートよりも大きくなる(する)場合、その高強度ゆえに解体が困難となり、解体時の騒音も問題となる。加えて、現在は繊維が混入された硬化コンクリートは再生材料として用いることができず産廃(埋立)扱いとなってしまいうことも課題である。

UHPFRCを用いたインフラ構造物を維持管理する将来の技術者に対して更新時に課題を残さぬよう、容易に解体できかつ環境への負荷をかけない新たな解体・分別技術の研究・開発が望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【維持管理編】，2018
- 2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2016
- 3) 渡邊有寿，向 俊成，牧田 通，服部雅史：UHPFRC を用いた橋梁床版の補修・補強工法における目地部の耐久性，プレストレストコンクリート工学会第 29 回シンポジウム論文集，pp.693-698，2020
- 4) 光山恵生，渡邊有寿，柳井修司，小山一夫，前山篤史：埋設型枠工法における内部コンクリートの初期欠陥の検知方法に関する実験的検討，土木学会第 75 回年次学術講演会，V-377，2020



# 付録

発表論文一覧



## 発表論文一覧

## 学・協会誌等論文

1. (題目) UFC床版製作におけるAFt系UFCの製造・品質管理  
(著者名) 渡邊有寿, 南 浩郎, 大野俊夫, 三浦一浩  
プレストレストコンクリート工学会第19回シンポジウム論文集,  
pp.289-292, 2010
2. (題目) 超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性状に関する実験的検討  
(著者名) 渡邊有寿, 柳井修司, 坂本 真, 大野俊夫  
コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.243-248, 2008
3. (題目) 養生中の温度履歴が超高強度繊維補強コンクリートの硬化性状におよぼす影響  
(著者名) 松原功明, 渡邊有寿, 柳井修司, 坂本 真, 大野俊夫  
コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.139-144, 2007
4. (題目) 場所打ちによる超高強度繊維補強コンクリート製道路橋の施工  
(著者名) 蓮野武志, 渡邊有寿, 柳井修司, 栖原健太郎  
プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集,  
pp.391-394, 2014
5. (題目) UHPFRCによる道路床版打替え・補強工法に向けた実大施工実験  
(著者名) 渡邊有寿, 柳井修司, 牧田 通, 北川博和  
プレストレストコンクリート工学会第28回シンポジウム論文集,  
pp.619-622, 2019
6. (題目) UHPFRCを用いた道路橋床版の打替え・補強工法における床版界面の  
付着特性と振動エネルギーに関する実験的検討  
(著者名) 光山恵生, 渡邊有寿, 牧田 通, 向 俊成  
コンクリート年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1426-1431, 2020
7. (題目) 超高強度繊維補強コンクリートの海洋環境暴露後の疲労特性に関する  
実験的検討  
(著者名) 渡邊有寿, 柳井修司, 宮口克一, 藤原浩巳  
コンクリート年次論文集, Vol.39, No.1, pp.217-222, 2017
8. (題目) 繊維種類やマトリクスがひび割れを有する繊維補強モルタルの  
力学特性や塩分浸透特性に及ぼす影響  
(著者名) 渡邊有寿, 一宮利通, 藤原浩巳  
コンクリート年次論文集, Vol.41, No.1, pp.293-298, 2019

9. (題目) 既設部材の補修・補強に用いる場所打ちUHPFRCの引張特性および拘束条件下における挙動に関する研究  
(著者名) 牧田 通, 渡邊有寿  
土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.77, No.3, pp.92-107, 2021
10. (題目) UHPFRCを用いた橋梁床版の補修・補強工法における目地部の耐久性  
(著者名) 渡邊有寿, 向 俊成, 牧田 通, 服部雅史  
プレストレストコンクリート工学会第29回シンポジウム論文集,  
pp.693-698, 2020

#### 国際会議発表論文

1. (題目) Experimental Study on the Applicability of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete to Large Scale Members  
(著者名) Yuji Watanabe, Shuji Yanai, Noriaki Matsubara, Toshio Ohno  
(会議名) 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, pp.715-720  
(開催場所, 発表時期) Tokyo, 2008
2. (題目) Development of cast-in-place method of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete  
(著者名) Yuji Watanabe, Toshimichi Ichinomiya, Shuji Yanai, Katsuaki Iriuchijima, Kentaro Suhara  
(会議名) Conmat'15, 5th International Conference on Construction Materials  
(開催場所, 発表時期) Vancouver, 2015
3. (題目) Experimental study on fatigue characteristics of UHPFRC to marine environment  
(著者名) Yuji Watanabe, Shuji Yanai, Hiromi Fujiwara  
(会議名) 42<sup>nd</sup> Conference on Our World in Concrete & Structures, pp.423-431  
(開催場所, 発表時期) Singapore, 2017
4. (題目) An Experimental Study on the Mechanical and Durability Properties of UHPFRC for cast-in-place method  
(著者名) Yuji Watanabe, Tohru Makita, Hiromi Fujiwara, Shuji Yanai  
(会議名) The 2nd International Interactive Symposium on Ultra High Performance Concrete  
(開催場所, 発表時期) Albany, New York, 2019



5. (題目) Full-Scale Construction Test for Improvement of RC Void Slab Bridges Using UHPFRC – Part 1: Experimental Test Plan  
(著者名) Tohru Makita, Yuji Watanabe, Shuji Yanai, Hirokazu Kitagawa  
(会議名) RILEM-fib International Symposium on FRC (BEFIB) in 2020  
(開催場所, 発表時期) RILEM Bookseries 30, pp.1003-1011, 2021  
※コロナにより開催中止 (書籍による論文取りまとめ)
6. (題目) Full-Scale Construction Test for Improvement of RC Void Slab Bridges Using UHPFRC – Part 2: Test Results  
(著者名) Yuji Watanabe, Shuji Yanai, Tohru Makita, Hirokazu Kitagawa  
(会議名) RILEM-fib International Symposium on FRC (BEFIB) in 2020  
(開催場所, 発表時期) RILEM Bookseries 30, pp.1012-1021, 2021  
※コロナにより開催中止 (書籍による論文取りまとめ)
7. (題目) Full-scale test for upgrading existing bridges using AFt-HPFRC  
(著者名) Yuji Watanabe, Shuji Yanai, Tohru Makita, Hirokazu Kitagawa  
(会議名) proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management(IABMAS 2020)  
(開催場所, 発表時期) Online, pp.2818-2826, 2021

#### 口頭発表論文

1. (題目) 羽田空港D滑走路UFC床版製作におけるAFt系UFCの製造・品質管理結果  
(著者名) 渡邊有寿, 葭葉雅弘, 野口孝俊, 南 浩郎, 柳井修司  
土木学会第65回年次学術講演会, 2010
2. (題目) エトリンサイト生成系超高強度繊維補強コンクリートの水和に伴う発熱と養生中に高温履歴を受けた硬化体の諸物性  
(著者名) 松原功明, 大野俊夫, 坂井吾郎, 柳井修司, 盛田行彦, 渡邊有寿, 芦田公伸, 相澤一裕, 山本賢司  
土木学会第62回年次学術講演会, 2007
3. (題目) 超高強度繊維補強コンクリートの打重ね部の一体性確保に関する基礎的実験  
(著者名) 青山達彦, 柳井修司, 渡邊有寿, 石橋靖亨, 栖原健太郎  
土木学会第69回年次学術講演会, 2014
4. (題目) 拘束を受けたUHPFRC のひび割れ抵抗性評価試験に関する基礎的検討  
(著者名) 渡邊有寿, 高木智子, 柳井修司, 牧田 通, 北川寛和  
土木学会第74回年次学術講演会, 2019

5. (題目) UHPFRCが敷設された橋梁床版の施工継目の閉塞に適した浸透プライマーの検討  
(著者名) 牧田 通, 渡邊有寿, 光山恵生, 向 俊成, 加藤健太  
土木学会第75回年次学術講演会, 2019
6. (題目) 橋梁床版上面に敷設するUHPFRCのひび割れおよび施工目地に用いるプライマーの遮塩性  
(著者名) 渡邊有寿 向 俊成, 牧田 通, 加藤健太  
土木学会第76回年次学術講演会, 2020
7. (題目) UFC床版における補修材料の有効性に関する検討  
(著者名) 齋藤裕太, 宇野津哲哉, 松井章能, 小坂 崇, 一宮利通, 渡邊有寿  
土木学会第76回年次学術講演会, 2021
8. (題目) 高強度繊維補強モルタル製埋設型枠の断面補修に関する基礎的検討  
(著者名) 渡邊有寿, 大井 篤, 本田智昭, 柿本啓太郎, 白木 浩, 小山一夫  
土木学会第71回年次学術講演会, 2016
9. (題目) 断面修復した高強度繊維補強モルタルの曲げ疲労特性に関する検討  
(著者名) 渡邊有寿, 高木智子, 一宮利通, 本田智昭, 白木 浩  
土木学会第72回年次学術講演会, 2017
10. (題目) 埋設型枠工法における内部コンクリートの非破壊検査に関する実験的検討  
(著者名) 光山恵生, 渡邊有寿, 柳井修司, 小山一夫, 白木 浩  
土木学会第74回年次学術講演会, 2019
11. (題目) 埋設型枠工法における内部コンクリートの初期欠陥の検知方法に関する実験的検討  
(著者名) 光山恵生, 渡邊有寿, 柳井修司, 小山一夫, 前山篤史  
土木学会第75回年次学術講演会, 2020

#### その他(著書, 解説等)

1. (題目) 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を場所打ちで施工したPC橋  
ー小滝川橋ー  
(著者名) 渡邊有寿, 柳井修司, 入内島克明, 栖原健太郎  
コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.629-634, 2015
2. (題目) 超高性能繊維補強セメント系複合材料(UHPFRC)を用いた各種補修・補強技術の最新動向  
(著者名) 渡邊有寿  
コンクリート工学, Vol.59, No.5, pp.446-451, 2021

## 謝辞

本論文は、筆者が鹿島建設株式会社において取り組んで参りました、超高性能補強セメント系複合材料（UHPFRC）および超高強度繊維補強コンクリート（UFC）に関する研究開発の成果を取りまとめたものです。この間、多くの方々から貴重なご指導やご協力を賜りました。

宇都宮大学大学院 藤原浩已教授には、後期課程への進学および本論文をまとめる機会を与えて頂くとともに、本研究の深度化ならびに論文をまとめるにあたり、心構えから懇切丁寧なご指導を賜りました。何より私のコンクリート工学の研究者・技術者としての道を歩めているのは、学生時代に藤原先生との出会いがあつてのことです。ここに心より御礼を申し上げます。

また、学位論文の審査員を務めて頂きました、宇都宮大学大学院 池田裕一教授、藤倉修一准教授、杉山 央教授、丸岡正知准教授には、的確なご指摘や貴重なご助言を賜りました。重ねて御礼申し上げます。

本研究は、デンカ株式会社様、三井住友建設株式会社様、住友電気工業株式会社様との超高強度繊維補強コンクリートに関する共同研究の成果、中日本高速道路株式会社様との超高性能繊維補強セメント系複合材料に関する共同研究の成果が基礎となっております。各社ご担当の皆様のご協力・ご尽力ならびにご助言無くして、また皆様との数多くの議論を重ねた日々無くして、本研究開発は成し得ませんでした。デンカ・故渡邊芳春様、故芦田公伸博士にはセメント化学に関する様々なご助言を頂きました。ご存命中に材料開発・展開にご尽力された本技術が、現在様々に活用・応用が広がっていること、ここにご報告するとともに御礼を申し上げます。五味秀明様、清水久行様、五十嵐数馬様、栖原健太郎博士、樋口隆行博士、入内島克明様、伊藤慎也様、岡元直征様、渡辺 晃様、富岡 茂様、庄司 慎様、本間一也様ほかデンカの皆様には超高強度繊維補強コンクリートの研究開発・実装に多大なご協力を賜りました。

中日本高速道路・上東 泰博士、牧田 通博士には、超高強度繊維補強セメント系複合材料を道路橋の補修・補強分野へ応用するという新たなチャレンジに関し、数多くの貴重なご助言を賜りました。

私が入社以来、15年にわたり途切れもなく本研究に没頭できたのは、このほかにも社外の様々なの方々より温かいご協力を賜ったからです。ここに心から感謝の意を表したいと思います。

また、東京工業大学 二羽淳一郎名誉教授、岐阜大学 内田裕市教授、国枝 稔教授ならびに神戸大学 三木朋広准教授には、UHPFRC・UFC技術に関する学協会委員会、研究会、評価委員会など様々な機会でご指導を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究は、筆者が2006年の鹿島建設入社以来、今日まで取り組んで参りました。土木管理本部 土木技術部 執行役員 部長・坂田 昇博士には、社会人そして研究者・技術者としての在り方について今日までご指導を賜りました。土木管理本部 土木技術管理部長・大野俊夫博士（現 日本海上工事株式会社）には、本研究に携わる機会を設けて頂き、温かく見守って頂きました。技術研究所の主席研究員・坂井吾郎博士、土木材料グループ長・渡邊賢三博士、北海道支店 執行役員 支店長・山本 徹様には、学位の取得に向けて終始背中を押して頂きました。そして、技術研究所 担当部長・柳井修司博士、

一宮利通様ならびに松原功明様には、入社以来、本研究ならびに本技術の実務について私に基礎からご指導・ご助言を賜りました。小林 聖様、青山達彦様、光山恵生様、高木智子様、向 俊成様、荒川 遥様をはじめ技術研究所ならびに有限会社藤木興業の皆様とは一緒に悩み・考えながら実務・研究の遂行に多くのご協力を頂きました。ここでは書ききれない全ての関係者の皆様にも心より御礼申し上げます。

この学位取得へのチャレンジを改めての機会に、今後一層精進して参ることを皆様にお誓い申し上げます。

最後に、不在がちであった家庭を明るく守り支えてくれる妻 一代、私の癒しである、しっかり者の長男 健太、いつも明るく陽気な次男 瑛太、そして現在の研究者・技術者としての道を応援してくれる福島の両親に心から感謝し、謝辞といたします。

2022年3月

渡邊 有寿