

## UFC 部材の損傷に対する補修，補強に関する実験的研究

齋藤 佑太<sup>\*1</sup>, 森 重和<sup>\*2</sup>, 小坂 崇<sup>\*3</sup>, 松井 章能<sup>\*4</sup>, 渡邊 有寿<sup>\*5</sup>

## Experimental Study on Repair and Reinforcement of Damaged UFC Members

Yuta SAITO<sup>\*1</sup>, Shigekazu MORI<sup>\*2</sup>, Takashi KOSAKA<sup>\*3</sup>, Akiyoshi MATSUI<sup>\*4</sup> and Yuji WATANABE<sup>\*5</sup>

**要旨：** 超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFC）を用いた構造部材は，常時の作用に対してひび割れを許容しない設計としている．一方，維持管理においては，設計基準に設定していない作用により損傷が生じる場合に，鋼繊維の腐食等により部材の構造性能が低下することも想定される．本研究では，UFC 部材の損傷に対する補修工法の施工品質および補修後の性能検証を目的に，ひび割れおよび断面欠損を対象として，各種補修工法を施工することで施工の確実性を確認すると同時に，補修材料のひび割れへの浸透性，付着性，および補修後の強度を各種試験によって検証した．

**キーワード：** 超高強度繊維補強コンクリート，UFC，損傷，補修，補強

## 1. はじめに

近年，超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFC）が橋梁や床版に適用されており，阪神高速道路においても，床版取替え工事や新設工事で UFC 床版の採用を始めている<sup>1)</sup>．これらの構造物は，土木学会の超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）<sup>2)</sup>（以下，UFC 指針）に準拠しているが，使用性能の照査においては，UFC 部材の引張応力がひび割れ発生強度を越えないように設計することとしている．

一方，供用後の実構造物においては，積載物の落下や車両の衝突など，基準に設定していない作用により UFC 部材が損傷する可能性がある．実際には，UFC 部材はひび割れ後も鋼繊維がひび割れ間を架橋することで荷重に抵抗するため，基準に設定していない作用に対しても靱性が期待できる．

耐久性については，UFC は塩化物イオン等の浸透に対して極めて高い抵抗性を有しており，鋼繊維腐食による構造物の性能は失われないとされている．一方，UFC にひび割れが生じた場合は，ひび割れに沿って塩化物イオンが浸透することや，ひび割れ幅と腐食条件により静的曲げ強度や疲労耐久性が低下することが報告されている<sup>3)</sup>．また，UFC 部材の表面に欠損が生じた場合，欠損部周辺のマイクロクラック等から劣化因子が浸入することが想定される．

さらに，舗装補修時に UFC 床版を切削した場合，内部に含まれる鋼繊維の毛羽立ちが発生し，舗装の防水層に悪影響を与えることが考えられる．

以上のことから，UFC 部材にひび割れや断面欠損等の損傷が発生した場合には，損傷状況に応じた補修および補強が必要となると考えられる．しかし，UFC 部材を実構造物で維持管理している事例が少なく，損傷および補修，補強の事例も極めて少ない．よって，本研究では，設計基準に設定していない作用により想定される損傷の内，ひび割れの補修，および断面欠損の補修に対する補修材料の性能検証および施工の確実性の確保について，各種実験を行い検討した．

## 2. 試験供試体

## 2.1 ひび割れおよび断面欠損に対する試験

UFC 部材のひび割れ，および断面欠損の補修に関する性能検証や，施工品質の確認を目的として実施した試験を表-1 に示す．

表-1 ひび割れおよび断面欠損に対する試験

損傷	損傷程度	対象工法	試験内容
ひび割れ	0.1mm程度	ひび割れ含浸樹脂接着工法	浸透性観察
	0.3mm程度	ひび割れ注入工法	曲げ強度試験 浸透性観察
	0.5mm程度	炭素繊維シート補強工法	曲げ強度試験 付着強度試験
断面欠損	過切削想定	断面修復工法	曲げ強度試験 付着強度試験

\*1 (一財) 阪神高速先進技術研究所 調査研究部 研究員

\*2 (一財) 阪神高速先進技術研究所 調査研究部 上席研究員

\*3 阪神高速道路(株) 建設事業本部 神戸建設部 技術統括課エキスパート

\*4 神戸市 都市局 都市計画課 係長(検討時 阪神高速道路(株) 建設事業本部 神戸建設部)

\*5 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員

## 2.2 試験供試体に用いた UFC

試験にはエトリンナイト生成系 UFC<sup>4)</sup> (以下, Aft 系 UFC) を用いた. 供試体は所定のコンシステンシーおよび強度が得られる配合で作製した (表-2)

## 2.3 ひび割れを模擬した試験供試体

ひび割れを模擬した試験供試体は, UFC 供試体 (100×100×400mm) に対し, 3 等分点荷重によって支間中央付近の残留ひび割れ幅が 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm 程度となるように, 目視で確認しながらひび割れを導入した (図-1).

## 2.4 欠損を模擬した試験供試体

### (1) 付着強度試験用供試体

欠損を模擬した試験供試体は, 欠損表面の状態の差による影響を確認するため, 平滑面 (300×300×50mm) と凹凸面 (500×1100×50mm) の 2 種類を製作した. 平滑面の表面処理はディスクグラインダーで実施し, 凹凸面は小型切削機を用いて表面を 5~10mm 程度切削した (図-2). また, 切削後に露出した鋼繊維は除去せず補修することとした.

### (2) 防水性試験用供試体

欠損を模擬し断面補修の防水性能を検証する供試体は, 型枠 (300×300×50mm) の中央に当て板 (60×60×50mm) を設置し, 断面修復材料を充填する開口部を設けた. なお, 設置した当て板には, 遅延剤含浸シートを貼付け, UFC を打込んだ翌日に金ブラシにより目粗しすることで, 床版の切削面や欠損部の状態を再現した (図-3).

## 3. 補修工法の施工および性能確認方法

### 3.1 樹脂の浸透状況の確認方法

2.3 節で作製した UFC 供試体のひび割れを含浸樹脂接着によって補修し, 樹脂の含浸状況を確認した.

#### (1) ひび割れ含浸樹脂接着の施工

ひび割れ含浸樹脂接着は, 0.1mm 程度のひび割れに含浸可能で, 施工が容易 (ローラー, 刷毛等で施工が可能) な樹脂のうち, 市販されている 5 種類の材料を選定した (表-3). 樹脂の塗布は, 実際の現場を想定し, 刷毛を用いた上向き施工とした. また, 硬化後の浸透状況を確認するため, 樹脂にはあらかじめ蛍光塗料を添加した. 塗布後は樹脂が硬化するまで塗布面が下向きになるよう静置し, 作業時の室温は約 20℃に設定した.

#### (2) ひび割れ含浸樹脂接着の施工

樹脂の浸透状況は, 試験体を長手方向に切断後, 断面に可視光および紫外光 (ブラックライト) を照射し, ノギスを用いて浸透深さを確認した.

### 3.2 ひび割れ注入工法

2.3 節で作製した UFC 供試体のひび割れ (幅 0.3mm)

を, ひび割れ注入工法によって補修し, 曲げ強度および注入材料の浸透状況を確認した.

表-2 試験供試体に用いた Aft 系 UFC の配合<sup>4)</sup>

W/B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					鋼繊維 (kg)
		水	結合材	細骨材	高性能減水剤	消泡剤	
15	2	195	1287	905	25.7	6.4	137.4

鋼繊維は UFC の体積の 1.75% であるため,  
 $1\text{m}^3 \times 0.0175 \times 7850\text{kg/m}^3 = 137.4\text{kg}$



図-1 3 等分点荷重によるひび割れ導入状況

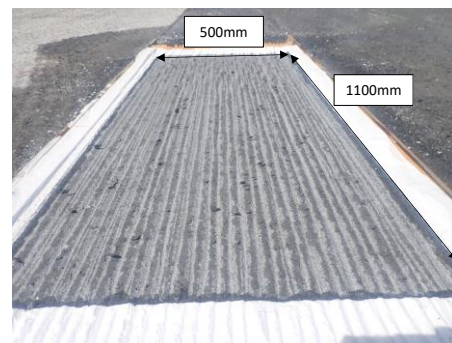


図-2 供試体切削後の凹凸面状況

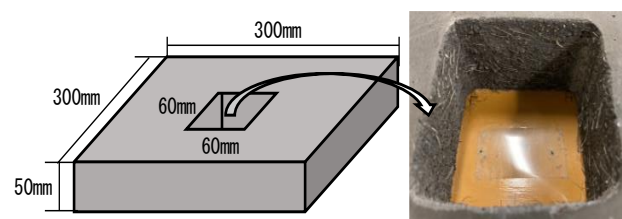


図-3 防水性試験供試体の概要と開口部の状態

表-3 ひび割れ含浸樹脂接着に用いた樹脂

No.	樹脂の種類	規定塗布量 (g/m <sup>2</sup> )
①	アクリル系 (低粘度型)	200
②	エポキシ系 (低粘度型)	225
③	エポキシ系 (超低粘度型)	200
④	アクリルシリコン系 (無溶剤型)	250
⑤	エポキシ系樹 (溶剤型)	100

### (1) ひび割れ注入の施工

ここでは、進行性のないひび割れを想定していることから、阪神高速のエポキシ樹脂品質管理基準<sup>5)</sup>を満たす注入材料の中から、温度変化やたわみ等に追従可能なエポキシ系樹脂注入材料を選定した。

ひび割れへの注入は、シール材の塗布および注入入口を設置後、自動式低圧注入工法(図-4)により実施した。作業時の室温は約20℃に設定した。

### (2) 曲げ強度の確認方法

シール材や表面に垂れた樹脂を除去した後、3等分点載荷による曲げ強度試験により曲げ強度および曲げ剛性への影響を確認した。試験は、ひび割れなし、およびひび割れ注入後について各3体実施した。

### (3) 注入材の浸透状況の確認方法

曲げ強度試験後の供試体を長手方向に切断後、切断面に可視光および紫外光を照射し、ノギスを用いて浸透深さを確認した。

## 3.3 炭素繊維シート補強工法

2.3節で作製したUFC供試体のひび割れを、炭素繊維シート補強工法によって補修し、UFC部材との付着強度、補修後の曲げ強度を確認した。

### (1) 炭素繊維シート補強の施工

炭素繊維シートは、高弾性炭素繊維シート(1方向、目付量450g/m<sup>2</sup>、引張強度1,900N/mm<sup>2</sup>)を使用した。シートの貼付けは、下地処理(研磨)→プライマー塗布→シート貼付けの順に実施し、繊維方向と供試体長手方向が平行になるよう貼り付けた。

### (2) 付着強度の確認方法

付着強度試験は、施工性確認も兼ね、下地処理およびプライマー塗布を省略したケースも実施した(表-4)。試験用治具をシート表面に接着し、50mm間隔で格子状に3mm程度の深さで切り込みを入れ、建研式引張試験器を用いて実施した(4回/1供試体)。

### (3) 曲げ強度の確認方法

シート接着面(100mm×400mm)が引張縁となるように設置し、3等分点載荷による曲げ強度試験を実施した(3体/条件)。なお、支点部分には不陸調整および支圧応力緩和のため、シート表面(支点部分含む)に幅50mm、厚さ15mmの鋼板を接着した(図-5)。

## 3.4 断面修復工法

UFC部材の欠損を、断面修復工法によって補修し、断面修復材料の付着強度、防水性を確認した。

断面修復材料は、UFCに近い強度特性を有すること、材料調達・施工の容易性、およびUFC部材への使用実績を踏まえ、表-5に示す5材料を使用した。

また、各材料の下地処理として、メーカーが推奨する接着剤(プライマー)を使用した。

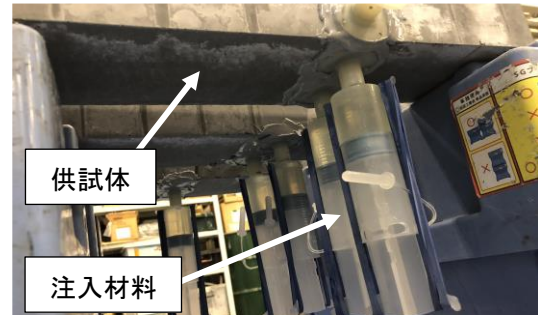


図-4 ひび割れ注入状況

表-4 炭素繊維シート補強工法の試験ケース

条件	ひび割れ幅	下地処理	プライマー塗布	シート貼付け	用途(供試体数)
1	なし	なし	なし	なし	曲げ試験 (3体/条件)
2	なし	あり	あり	あり	
3	0.3mm	あり	あり	あり	
4	0.5mm	あり	あり	あり	
5	0.5mm	なし	なし	なし	
6	0.5mm	あり	なし	あり	
7	なし	あり	あり	あり	付着試験 (1体/条件)
8	なし	あり	なし	あり	
9	なし	なし	なし	あり	

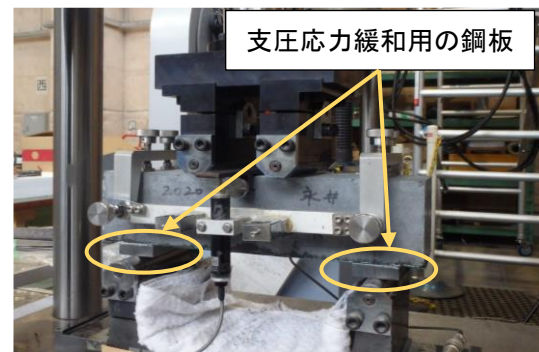


図-5 曲げ強度試験状況

表-5 断面修復材料

材料No.	材料種別	圧縮強度※(N/mm <sup>2</sup> )	接着剤
①	UHPFRC	135	高耐久エポキシ樹脂接着剤
②	超速硬ポリマーセメントモルタル	58	高耐久エポキシ樹脂接着剤
③	高強度・高弾性樹脂モルタル	124	専用プライマー
④	超速硬高強度無収縮モルタル	47	高耐久エポキシ樹脂接着剤
⑤	アクリル系樹脂モルタル	48	専用プライマー

※圧縮強度：φ50供試体による実験値(材齢6日=付着試験時)

### (1) 断面修復の施工

付着強度試験用供試体への打継ぎは、UFC表面に規定量の接着剤を塗布後、断面修復材料を打ち継いだ。UFC指針では鋼材の最小かぶりを20mmとしており、実施工を想定して打継ぎ厚さを20mmとした。



防水性試験用供試体への打継ぎは、開口部に接着剤を塗布後に材料を打設した。

なお、両試験は供試体への打継ぎ時期が異なったため、試験までの養生条件を統一させるために 20°C -7 日間の積算温度(基準温度 10°Cとして 210°C・day)となるように室温および日数を調整した。

(2) 付着強度の確認方法

付着強度の確認は、図-2 の過切削を模擬した試験供試体より φ100mm のコアを採取し、「NEXCO 試験方法 439：床版上面における断面修復材の試験方法<sup>6)</sup>」に準拠して実施した。

(3) 防水性の確認方法

防水性の確認は、「道路橋床版防水便覧：防水性試験 I<sup>7)</sup>」に準拠して実施した(図-6)。試験水はウラン水溶液を使用し、試験後の供試体を割裂し、断面に紫外光を照射することで浸透状況を確認した。

部材の剛性回復への寄与は小さいといえる。

(2) 注入材料の浸透状況

曲げ強度試験後の供試体を長手方向に切断し、紫外光により断面を観察した結果、いずれの供試体も目視により確認したひび割れ深さのほぼ全体(8割

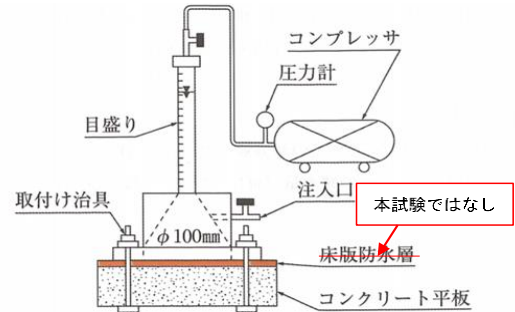


図-6 防水性試験 I の概要図<sup>7)</sup>

4. 試験結果および考察

4.1 ひび割れ含浸樹脂接着工法

試験結果を表-6 に示す。3.1 節 (2) の方法により浸透深さを確認した結果、供試体ごとにひび割れ幅やひび割れ深さが若干異なるが、各材料ともに 0.1mm 程度のひび割れ幅に対して一定の浸透状況を確認した。材料③の超低粘度型エポキシ樹脂接着剤は、ひび割れ深さに対し 9 割程度まで浸透することを確認した(図-7)。これは、他の材料と比較して粘度が低い(150mPa・s 程度)ことで、毛細管現象による浸透効果が高くなったと推測される。ただし、粘性が低く、液垂れによって塗布回数が増えたため、各材料メーカーが規定する塗布量を満たすための塗布回数は、他の材料よりも多い結果となった。

表-6 樹脂の浸透観察結果

材料No.	①	②	③	④	⑤
可使時間	15分	45分	3時間以上	45分	1時間以上
塗布回数	5回	3回	7回	4回	5回
ひび割れ幅	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.08mm	0.15mm
最大ひび割れ深さ	81mm	78mm	80mm	83mm	85mm
浸透深さ	10mm	19mm	73mm	7mm	12mm

4.2 ひび割れ注入工法

(1) 曲げ強度

ひび割れのない供試体、およびひび割れ注入後の曲げ強度試験結果を図-8 に示す。なお、たわみは変位計を用いて計測した。いずれのケースも最大曲げ応力は同程度の値であったのは、ひび割れを跨ぐ鋼繊維の架橋効果にひび割れ注入材料は影響していないことを意味している。また、ひび割れ注入後の曲げ強度試験では、事前に導入したひび割れとは別の箇所(ひび割れがなかった部位)にもひび割れが入ったことや、事前に導入したひび割れの再目開きがなかったことを確認した。ここで、ひび割れ注入供試体の载荷初期の剛性がひび割れなしと比べて小さかった。これは、ひび割れ注入材料のヤング係数が UFC より小さいことや、0.3mm 未満の注入対象としなかった微細なひび割れの影響と推測される。このことより、0.3mm 以上のひび割れのみ注入しても

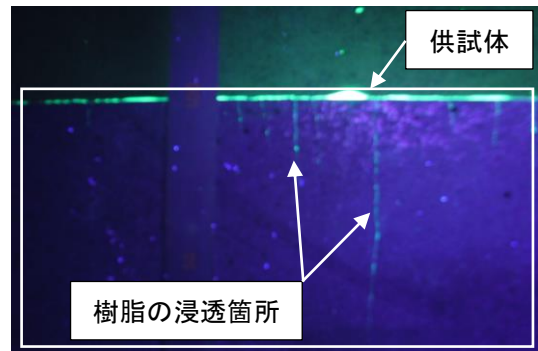


図-7 樹脂の浸透状況(材料③)

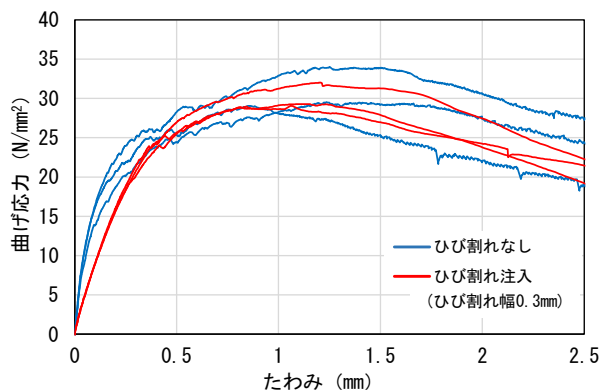


図-8 曲げ強度試験結果(ひび割れ注入工法)

～9割)まで注入材料の浸透が確認された(図-9)。ひび割れ注入による劣化因子の遮断効果は既往の研究でも報告されており<sup>8)</sup>、今回使用した注入材料にも同等の遮断効果が期待できる。

### 4.3 炭素繊維シート補強工法

#### (1) 付着強度

付着強度試験の結果を図-10に示す。表-4のいずれの条件も1.5 N/mm<sup>2</sup>以上であった。これは、NEXCOの「構造物施工管理要領」<sup>9)</sup>における基準値を満足する結果である。また、すべての供試体で治具接着部、もしくは上塗り部分で破壊し、シートがUFCから剥離することなく、下地処理やプライマー塗布を省略した場合でも十分な付着が確認できた。

一般的なコンクリートの場合、付着界面の弱部を除去、または改質するために、下地処理やプライマー塗布を施す場合が多いが、UFCの場合は表面が緻密でプライマーも浸透しないために、これらに左右されなかったものと考えられる。

#### (2) 曲げ強度

曲げ強度試験の結果を図-11に示す。補強を実施していない条件1、5と比較して、ひび割れの有無に関わらず、炭素繊維シートの接着により曲げ強度が増大することを確認した。また、炭素繊維シート補強を実施した供試体においては、剛性の回復傾向も確認された。Case6と比較して、Case3およびCase4の曲げ強度が大きい結果となったのは、使用したプライマーの効果が少なからず影響したものと推察される。また、炭素繊維シートが破断した際に大きく応力が低下し、以降は鋼繊維の架橋効果のみが見られた。シートの破断位置は導入したひび割れ位置と重なると想定されたが、必ずしも一致しなかった。これは、鋼繊維の架橋効果によりひび割れが分散して発生するためであると推測される。

### 4.4 断面修復工法

#### (1) 付着強度

付着強度試験結果を図-12に示す。平滑面および凹凸面のいずれも1.5 N/mm<sup>2</sup>以上であったが、凹凸面における付着強度は、平滑面の70～80%程度であった。また、供試体の破壊位置に着目すると、平滑面の場合は、母材または補修材での破壊が多いのに対し、凹凸面は、母材と補修材の境界面付近に多いことが確認された。これは、凹凸面の方が見掛けの付着面積が大きく付着強度の増進が期待されるが、境界面の不陸により接着剤を均一に塗布することが困難になり、塗布量にばらつきが生じたためと推測される。接着剤の塗布厚さが大きくなるほど、付着強度は小さくなるため、局所的に塗布量が多くなった箇所が弱層になったと推測される。また、凹凸面

製作時の切削により、表面にマイクロクラックが生じ、弱部が形成されたことも要因として考えられる。

#### (2) 防水性

防水性試験結果を図-13に示す。防水便覧に記載の基準値(30分間の減水量0.2ml以下)と比較すると、材料③のみが満足する結果であった。また、断

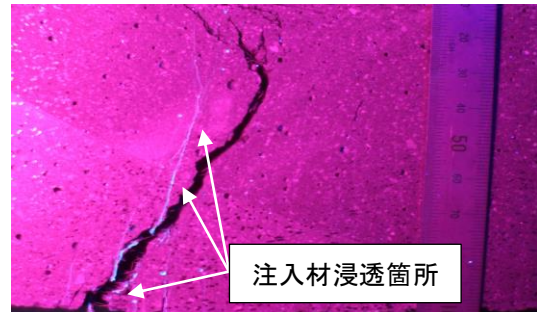


図-9 注入材料の浸透状況

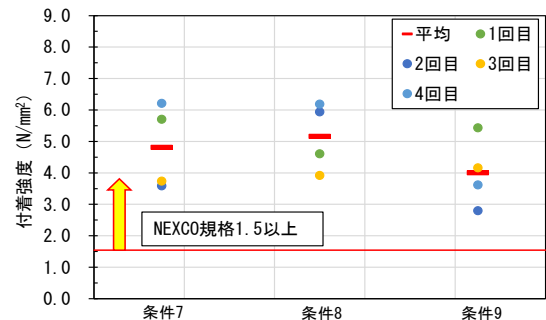


図-10 付着強度試験結果(炭素繊維シート補強)

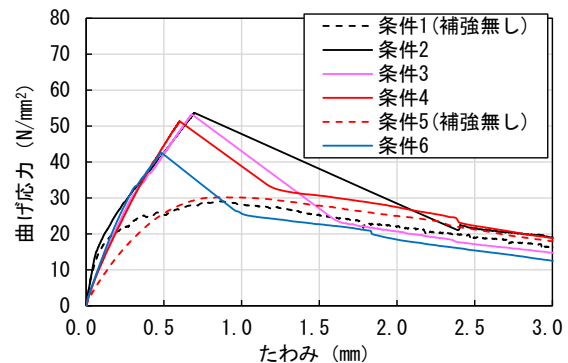


図-11 曲げ強度試験結果(炭素繊維シート補強)

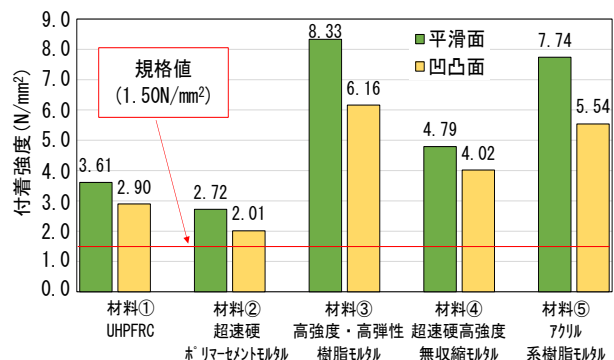


図-12 付着強度試験結果

面の浸透状況を確認すると、基準値外となった断面修復材料の内、材料②および材料④は母材（UFC）との境界面および断面修復材内部への浸透が確認された（図-14）。材料③および材料⑤は主成分が樹脂系で、セメントを用いない材料のため、材料内部への浸透がなかったものと推測される。また、材料①のUHPFRCはセメント系材料ではあるものの、表面が緻密であるため、材料内部への浸透がなかったと考えられる。さらに、境界面からの浸透が確認されたのは、硬化過程の収縮により、境界面に縁切りが生じたためと推測される。

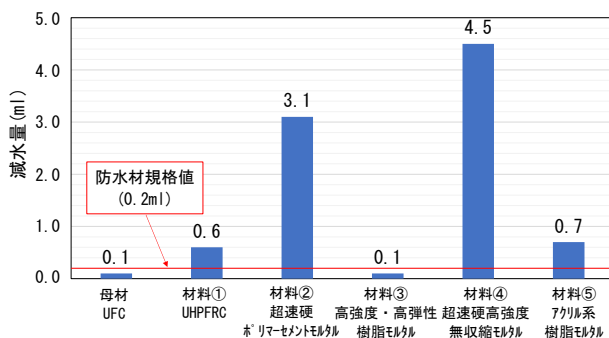


図-13 防水性試験結果

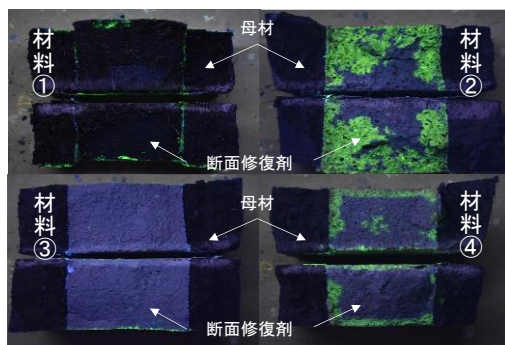


図-14 防水性試験結果

## 5. まとめ

本検討において得られた知見を以下に示す。

- (1) ひび割れ含浸樹脂接着工法について、5種類の樹脂を用いて、ひび割れ幅 0.1mm 程度の微細ひび割れに対する浸透性を確認した。超低粘度型エポキシ系樹脂が最も浸透性が高いことを確認した。また、各樹脂ともに一定の浸透性を確認した。
- (2) ひび割れ注入工法について、エポキシ系樹脂注入材によりひび割れ注入を実施した結果、ひび割れ幅 0.3mm 程度であれば断面全体へ注入材が浸透していることを確認した。曲げ強度は、ひび割れの無い試験体と同様となることを確認したが、曲げ剛性の回復効果は認められなかった。よって、0.3mm 以上のひび割れのみ注入しても部材の剛性回復への

寄与は小さいといえる。

- (3) 炭素繊維シート補強工法について、下地処理やプライマー塗布を省略した場合においても、UFC に対し良好な付着強度が得られることを確認した。また、曲げ強度や曲げ剛性が回復する傾向を確認した。
- (4) 断面修復工法について、選定した全ての材料で UFC との良好な付着性を確認できた。また、凹凸面に断面補修をした場合は、平滑面に比べ付着強度が 20~30%低下する傾向が認められた。よって、欠損部に断面補修を実施する場合は、研磨機等により表面の鋼繊維および凹凸を除去することが望ましいといえる。また、防水性試験により境界面での浸透状況を確認した結果、高強度・高弾性樹脂モルタルが最も浸透防止効果が高いことが認められた。

## 謝辞

本研究の実施や考察において、阪神高速先進技術研究所「UHPFRC 構造の先進的なメンテナンス検討会」において、委員長の神戸大学大学院三木朋広准教授、委員の京都大学大学院 山本貴士教授、北海道大学大学院 橋本勝文准教授にご指導を頂きました。ここに深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 小坂崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版の既設橋への適用に関する検討, 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, Vol.14, pp.195-200, 2014.
- 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), 2004.9
- 3) 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.
- 4) 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, 2006.11
- 5) 阪神高速道路株式会社: 土木工事共通仕様書関係基準 エポキシ樹脂品質管理基準, 2019.7
- 6) 東・中・西日本高速道路株式会社: NEXCO 試験方法 第4編 構造物関係試験方法, 2020.7
- 7) 日本道路協会: 道路橋床版防水便覧, 2007.3
- 8) 佐藤正己, 片桐誠: UFC に施したひび割れ補修の鋼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, V-357, 2006.9
- 9) 東・中・西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領, 2020.7