

UFC床版における補修材料の有効性に関する検討

齋藤佑太¹・宇野津哲哉²・松井章能²

¹ (一財)阪神高速先進技術研究所 調査研究部

² 神戸建設部 湾岸西伸第二建設事業所

要約

UFC床版は、活荷重作用の使用状況ではひび割れの発生を許容しない設計となっているが、設計上想定しない外力等によりひび割れが確認できた場合、ひび割れ幅とひび割れの進行性により損傷度合いを分類し、床版取換え、ひび割れ注入工法、ひび割れ含浸樹脂接着工法による対応を検討している。また、UFC床版は、製作や施工に時間を要するため、取替えを実施するまでの暫定的な対策として、補強シートによる補強工法を実施するものとしている。本検討では、ひび割れ注入工法、ひび割れ含浸樹脂接着工法、炭素繊維シート補強工法について、UFC床版に対し施工した場合の効果を確認するため試験を行った。

キーワード:UFC床版, ひび割れ注入工法, 含浸樹脂接着工法, 炭素繊維シート補強工法

1. はじめに

都市高速の道路橋では、基礎の規模や工期の制約により軽量の鋼床版が多く適用されているが、近年では溶接部における疲労き裂が顕在化している。また、建設時期の古いRC床版などでは、大型通行車両の増加によりひび割れ等の損傷が生じている。そこで、鋼床版の代替および既設床版の取替え工事への適用を目的に、耐久性の高いコンクリート系の道路橋床版として、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete, 略称UFC)^{1),2)}を用いた道路橋床版 (以下、UFC床版という) が開発された^{3)~5)}。

阪神高速道路では、2018年に15号堺線の玉出入路における床版取替えに、2019年に1号環状線の信濃橋入路における新設工事に、2020年には12号守口線(守S20)において上下線での床版取換え工事にUFC床版を採用している(写真-1)。

UFC床版は、活荷重作用の使用状況ではひび割れの発生を許容しない設計となっているが、設計上想定しない外力等によりひび割れ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。

しかし、UFC床版は実構造物での適用事例が少なく、損傷の発生事例も極めて少ないことから、補修および補強方法について確立されていないのが現状であり、これらの維持管理手法について検討を実施することは、将来にわたる使用のための管

理・更新手法の実現という点で、阪神高速グループビジョンの「最高の安全と安心を提供する阪神高速」に資するものである。



写真-1 信濃橋入路(ワッフル型UFC床版)

2. 試験の目的

阪神高速道路において作成を実施している「UFC床版の設計・製作・施工・維持管理の手引き(案)」⁶⁾の改定案においては、点検時にUFC床版のひび割れが確認できた場合、図-1に示すフローに従いひび割れ幅とひび割れの進行性により損傷度合いを分類し、床版取換え、ひび割れ注入工法、ひび割れ含浸樹脂接着工法による対応をすることとしている。

UFC床版に0.1mm以上のひび割れが存在する場合、塩化物イオンがひび割れに沿って侵入することが

過去の検証により確認されている。特に設置場所が海上部の場合は塩害環境にあたることから、ひび割れからの塩化物イオンの侵入抑制を目的とした補修を実施することとしている。

補修工法はひび割れ幅によって分類し、進行性のないひび割れについて、ひび割れ幅が0.2mm以上の補修はひび割れ注入工法、ひび割れ幅が0.1mm以上0.2mm未満の場合は、施工の容易さ、ひび割れへの浸透性を考慮し、ひび割れ含浸樹脂接着工法による補修を行うとしている。さらに、0.5mmより大きい残留ひび割れ幅が発見された場合、もしくは進行性のあるひび割れが発見された場合、性能照査を行い床版の取替えを判断することとしている。

しかし、UFC床版の取替えには製作や施工に時間を要するため、取替えを実施するまでの暫定的な対策として、炭素繊維シートによる応急的な補強を実施することとしている。

本検討は、設計上想定しない外力等により、UFC床版にひび割れが発生した場合の対応として実施するひび割れ注入工法、ひび割れ含浸樹脂接着工法、炭素繊維シート補強工法について、UFC床版へのひび割れ補修における施工品質の確保を試験により確認した新規性のある検討である。

3. 試験の概要

(1) ひび割れ注入工法

ひび割れ注入工法を実施した際の注入状況、補修後の曲げ強度および曲げ剛性への影響について、3等分点荷重による曲げ強度試験を実施し、ひび割れのない供試体との比較を行った。

a) 供試体の製作

試験に用いるUFC供試体は、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⁷⁾を参考に、所定のコンシステンシーおよび強度が得られる配合で製作した(表-1)。製作したUFCのフレッシュ性状および圧縮強度を表-2に示す。UFC供試体は、100×100×400mmの曲げ強度試験用鋼製型枠に片流しにより打ち込み、20℃の環境に20時間静置後に脱型し、85℃で24時間の蒸気養生を行った。

b) ひび割れの導入

製作したUFC供試体に対し、3等分点荷重による曲げ強度試験(写真-2)により、除荷後の残留ひび割れ幅が0.3mm程度となるようひび割れを導入した。

c) ひび割れ注入の実施

本検討では進行性のないひび割れに対してひび割れ注入の適用を想定していることから、阪神高速道路の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」に適合する1種適合注入材料の中から、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口の設置後、自動式低圧注入工法(写真-3)によるひび割れ注入を実施した。なお、注入作業は上向

きに行い、作業時の室温は20℃であった。

d) 曲げ強度試験(3等分点荷重)

シール材や表面に垂れた樹脂を除去した後、3等分点荷重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。

e) 注入材浸透状況の確認

曲げ強度試験後、供試体を切断し切断面に可視光および紫外光(ブラックライト)を照射することで注入材の浸透状況を確認した。

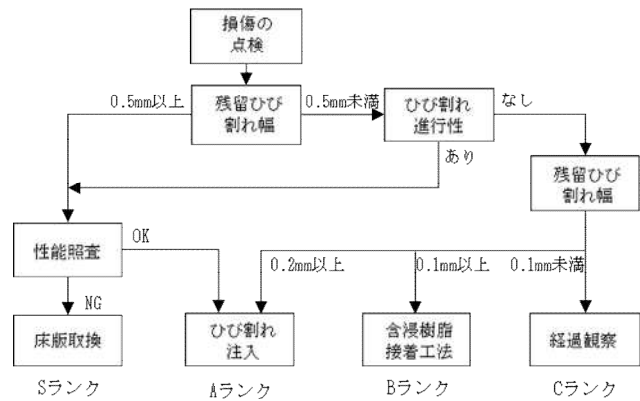


図-1 ひび割れの対策フロー

表-1 UFC(サクセム)の配合

W/B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					鋼繊維 (kg)
		水	結合材	細骨材	高性能減水剤	消泡剤	
15	2.0	195	1287	905	25.7	6.4	137.4 1.75vol%

表-2 UFC(サクセム)のフレッシュ性状および圧縮強度

練上り温度	モルタルフロー	空気量	圧縮強度 (蒸気養生後)
23.8℃	285×285mm	3.5%	191N/mm ²



写真-2 3等分点荷重によるひび割れ導入状況



写真-3 自動式低圧注入工法

(2) ひび割れ含浸樹脂接着工法

ひび割れ含浸樹脂接着工法を実施した際の含浸材の浸透状況を確認する。なお、曲げ強度試験機にて幅0.1mmのひび割れを深さ方向にコントロールすることが困難であるため、スペーサーを用いて均一の深さの模擬ひび割れ供試体を製作した。

a) 供試体の製作

試験に用いるUFC供試体は、(1)と同一材料、同一条件で製作を行った。

b) ひび割れの導入

UFC供試体をカッターで3分割に切断し、鋼板および長ネジ、スペーサーを用いて所定のひび割れ幅となるように長ネジの締付けを調整して模擬ひび割れ供試体を組立てた(図-2)。この際、ひび割れ幅が深さ方向に一定となるようにスペーサーを断面内に線状に設置し、計5つの浸透材の評価を同一条件で行うことが出来るようにした。また、スペーサーを2種類とすることで、模擬ひび割れ幅0.1mmおよび0.2mmに対して含浸材の浸透状況を確認することとした。

c) ひび割れ含浸樹脂接着の実施

ひび割れ含浸樹脂接着材料は、汎用性があり0.1mm程度のひび割れに含浸可能であること、施工が容易(ローラー、刷毛等で施工が可能)であることを考慮し、表-3に示す5種類の材料を選定した。

ひび割れ含浸樹脂接着材料の塗布は、供試体の塗布面が下向きとなるように設置し、刷毛を用いた上向き施工により塗布を実施した(写真-4)。また、硬化後に含浸材の浸透状況を確認する際、含浸材の色によっては目視による確認が困難となるため、いずれの含浸材にもあらかじめ使用量(g)の0.5%の蛍光塗料を添加した。なお、本試験では、含浸材の塗布回数を設定するため、事前に予備試験を行い、模擬ひび割れ幅0.1mmの部分では6回、模擬ひび割れ幅0.2mmの部分では12回塗布をすることとした(表-4)。本試験における1回の塗布とは、模擬ひび割れ部分に対して、写真-5のように供試体の幅で片道の塗布のことをいう。塗布後は含浸材が硬化するまで塗布面が下向きになるよう静置した。塗布作業時の室温は約20℃であった。

d) 浸透状況の確認

含浸材のひび割れ浸透状況の観察は、組立てた模擬ひび割れ供試体を解体し、断面を可視光および紫外光(ブラックライト)を照射することで確認した(写真-5)。本試験では、浸透状況の他に、表-5に示す項目について含浸材の比較を行った。

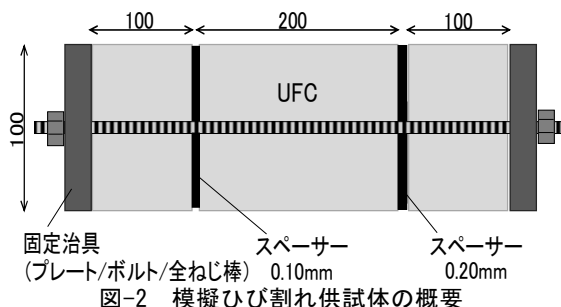


図-2 模擬ひび割れ供試体の概要

表-3 ひび割れ含浸樹脂接着材料の概要

NO.	樹脂の種類
1	アクリル系樹脂接着剤(低粘度型)
2	エポキシ系樹脂接着剤(低粘度型)
3	エポキシ系樹脂接着剤(超低粘度型)
4	アクリルシリコン系樹脂接着剤(無溶剤型)
5	エポキシ系樹脂接着剤(溶剤型)

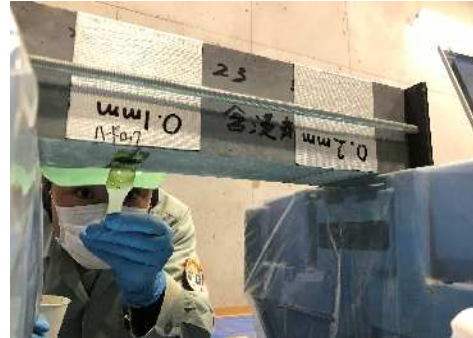


写真-4 含浸樹脂塗布状況

表-4 浸透状況確認予備試験結果

含浸材	材料③	
メーカ規定塗布量(g/m ²)	200	
ひび割れ幅(mm)	0.1	0.2
塗布回数(回)	3	4
塗布量(g/m ²)	385	415
最大浸透深さ	39	14

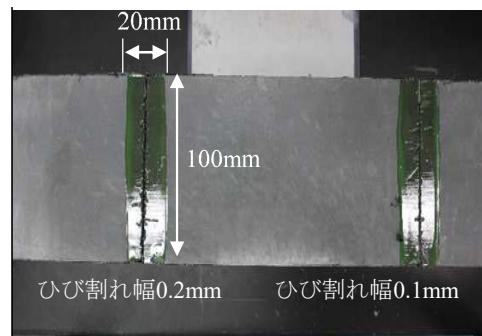


写真-5 含浸材塗布後供試体

表-5 測定項目

測定項目	測定方法
可使時間	ストップウォッチ
塗布量(g/m ²)およびメーカ規定塗布量との割合	重量測定
材料の垂れ量	重量測定
ひび割れ浸透深さ	供試体断面の観察

(3) 炭素繊維シート補強工法

ひび割れが発生したUFC床版に対し、下面を炭素繊維シートで補強した際のUFCとの一体性および、耐荷力や曲げ剛性への影響の確認を目的とし、建研式引張接着試験器による付着強度試験および3等分点載荷による曲げ強度試験を実施した。付着強度試験は、施工性確認のため下地処理およびプライマー塗布の有無を変更した3ケースで実施した。

a) 供試体の製作

試験に用いるUFC供試体は、(1)と同一材料、同一条件で製作を行った。

b) ひび割れの導入

(1)と同様の方法により、除荷後の残留ひび割れ幅の最大値が0.3mmおよび0.5mmとなるようにひび割れを導入した。

c) 炭素繊維シート補強の実施

炭素繊維シートの選定は、阪神高速道路で使用実績のある高弾性炭素繊維シート(1方向、目付量450g/m²)を選定した。

シートの貼付けは、ディスクグラインダーによる下地処理、プライマー塗布(0.15kg/m²)、プライマーの硬化後(約22時間後)に下塗り(0.60kg/m²)、炭素繊維シート接着、脱泡(約1.5時間後)、上塗り(0.50kg/m²)の順で実施した。また、シートは繊維方向と供試体長手方向が平行になるよう貼付けた。

d) 付着強度試験

試験用治具を表面に接着し、コンクリートカッターで50mmの間隔で格子状に3mm程度の深さで切り込みを入れ、付着強度試験を実施した(写真-6)。

e) 曲げ強度試験

炭素繊維シートを接着した面が引張縁となるように設置し、3等分点载荷による曲げ強度試験を実施した。なお、支点部分には不陸調整および支圧応力緩和のため、幅50mm、厚さ15mmの鋼板を接着した(写真-7)。

4. 試験結果

(1) ひび割れ注入工法

a) 曲げ強度試験結果

曲げ強度試験の結果を図-4に示す。曲げ強度の平均値は、ひび割れのない供試体が30.9N/mm²、ひび割れ注入供試体が30.1N/mm²と同程度の値となった。ひび割れ注入供試体では、荷重がピークに達する際ひび割れが既に開いていたことから、曲げ強度が同程度となったのは、ひび割れを跨ぐ鋼繊維の架橋効果であると考えられる。ただし、ひび割れ注入後の曲げ強度試験では、ひび割れが別方向に進行したことや、微細なひび割れの目開きがなかったことから、選定した注入材にも一定のひび割れ結合効果があったと推測される(写真-8)。

また、ひび割れ注入供試体の载荷からの剛性が低い理由としては、ひび割れがある程度(0.3mm)まで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。すなわち、注入材のヤング係数が小さいことや、注入したひび割れ以外にもひび割れが発生していたと考えられ、剛性の回復効果は小さいものと考えられる。よって、ひび割れ注入工法による補修は腐食因子の侵入防止が主目的で、曲げ強度および曲げ剛性の回復について積極的に効果は見込まないものとする。

b) 注入材浸透状況

曲げ強度試験後の供試体を切断し、紫外線を照射しながら断面を観察したところ、平均85mmの深さまで注入材の浸透が確認できた(写真-9)。供試体の高さは100mmであり、上辺は圧縮縁となっていることから、ひび割れのほぼ全体に注入材が浸透したものと考えられる。



写真-6 付着強度試験

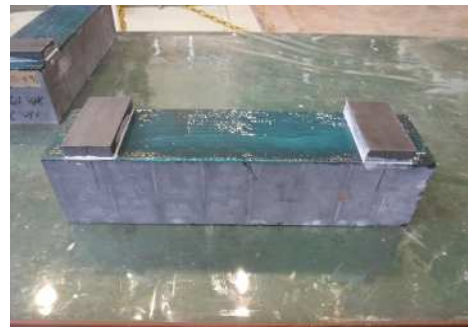


写真-7 曲げ供試体(不陸調整後, 上下反転中)

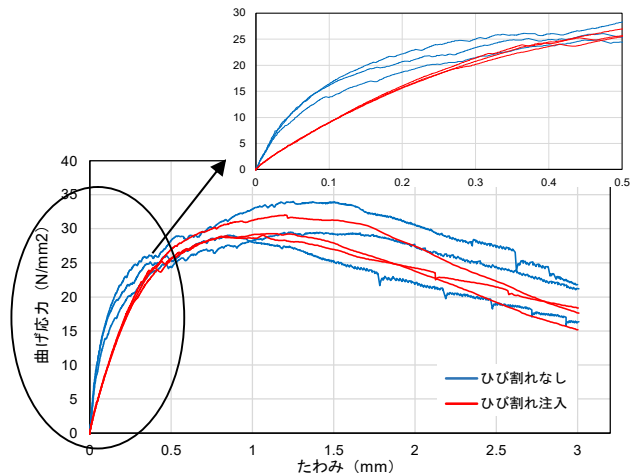


図-4 曲げ強度試験結果(ひび割れ注入工法)

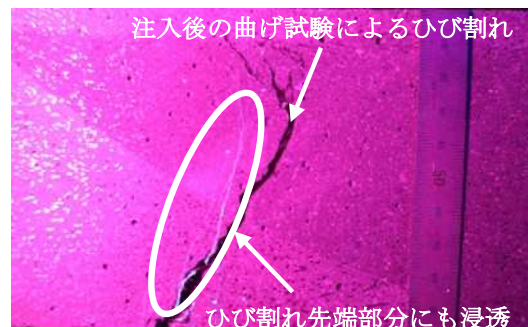


写真-8 注入材浸透状況

(2) ひび割れ含浸樹脂接着工法

本試験の結果を表-6に示す。材料③に関して、含浸材の最大浸透深さを予備試験の結果と比較すると、模擬ひび割れ幅0.1mmでは2倍の塗布回数に対して浸透深さは約1.7倍、0.2mmでは3倍の塗布回数に対して浸透深さは約2倍となり、塗布回数と浸透深さに相関関係が確認できた。

浸透深さの確認および可使時間の測定結果より、0.1mm程度のひび割れに対しては、超低粘度型エポキシ系樹脂接着剤により含浸させる方法が望ましいと考えられる。

(3) 炭素繊維シート補強工法

a) 付着強度試験

付着強度試験の結果を表-7に示す。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、炭素繊維シートがUFCから剥離することはなかった(写真-9)。いずれの試験ケースもNEXCO構造物施工管理要領記載の付着強度(1.5 N/mm²)以上の結果となったことから、UFC床版と炭素繊維シートの付着は、下地処理やプライマー塗布を省略した場合においても確保できるものと推測される。

b) 曲げ強度試験

曲げ強度試験の結果を図-5に示す。炭素繊維シートの接着により曲げ強度が増大し、50N/mm²以上の曲げ強度を示す供試体も見られた。また、炭素繊維シート補強を実施した供試体においては、曲げ応力当りのたわみ量がシート補強を実施していない供試体と比べ減少していることから、剛性の回復傾向も確認できた。

荷重開始から炭素繊維破断までは、荷重増加に伴いたわみが増加し、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みられた。曲げ強度試験を通して、炭素繊維シートの剥離等の発生は見られなかった。

また、炭素繊維シートの破断位置は予め導入したひび割れの位置とは必ずしも一致しなかった(写真-10)。

表-7 付着強度試験結果

下地処理	プライマー塗布	付着応力 (N/mm ²)	破壊部分
○	○	4.81	接着剤
○	—	5.16	接着剤 (一部上塗り)
—	—	4.00	接着剤

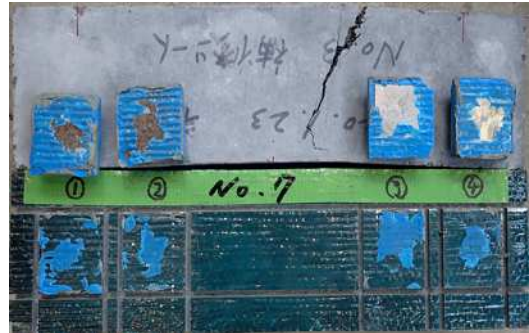


写真-9 付着強度試験の破壊状況

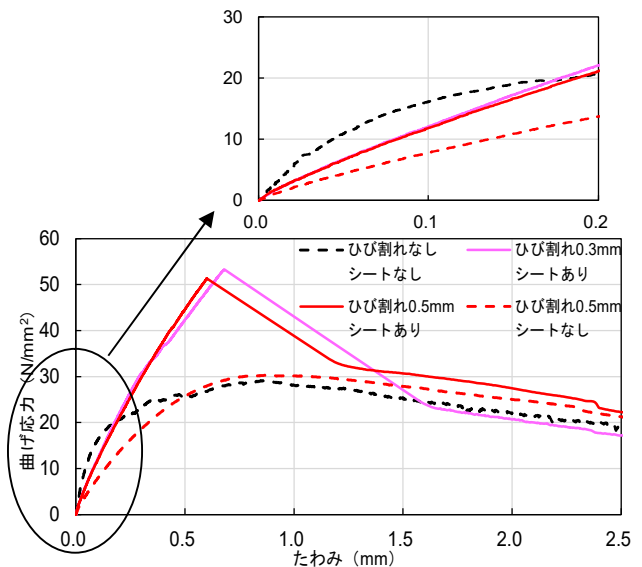


図-5 曲げ強度試験結果(炭素繊維シート補強工法)

表-6 含浸樹脂接着剤の浸透状況確認結果

製品名(メーカー)	材料①		材料②		材料③		材料④		材料⑤	
	17分	27分	3時間以上	1時間以上	55分					
可使時間(実測)	17分	27分	3時間以上	1時間以上	55分					
メーカー標準塗布量	200g/m ²	50g/m (単位長さ当り)	200 g/m ²	250 g/m ²	100 g/m ²					
模擬ひび割れ幅(mm)	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
塗布量(g/m ²) (メーカーとの割合)	307.0 (154%)	477.5 (239%)	358.0 (-)**	524.0 (-)**	506.0 (253%)	537.0 (269%)	683.5 (273%)	866.0 (346%)	1000.5 (1001%)	1210.5 (1211%)
塗布量(g/m)	6.1	9.6	7.2 (14%)	10.5 (21%)	10.1	10.7	13.7	17.3	20.0	24.2
最大浸透深さ(mm)	36	24	43	27	66	28	17	16	39	26
ひび割れ浸透状況 (紫外線)										

5. まとめ

本検討では、UFC床版に想定外の外力等が作用することにより発生したひび割れに対し、ひび割れ注入工法、ひび割れ含浸樹脂接着工法、炭素繊維シート補強工法を施工した場合の施工品質の確保について試験を行い確認した。

本検討により各工法について得られた知見を以下に示す。

(1) ひび割れ注入工法

ひび割れ注入による注入状況および力学特性の回復効果について、エポキシ系樹脂注入材(1種)を用いて評価を実施した。

その結果、ひび割れ幅0.3mm程度であれば断面全体へ注入していることが確認できた。

以上のことから、エポキシ系樹脂注入材(1種)によるひび割れ注入工法について、UFC床版に発生したひび割れに対して施工品質が確保できることを確認した。

また、曲げ強度試験結果より、ひび割れ注入工法には曲げ強度および曲げ剛性の回復について積極的に効果は見込まないものとする。

(2) ひび割れ含浸樹脂接着工法

含浸樹脂接着による微細なひび割れへの浸透性確認について、5種類の材料を用いて評価を実施した。

その結果、ひび割れ幅0.1mm、0.2mmともにエポキシ系樹脂接着剤(超低粘度型)が最も浸透性が高い結果となった。また、各含浸材料ともに一定の浸透状況が確認できた。

以上のことから、エポキシ系樹脂接着剤(超低粘度型)によるひび割れ含浸樹脂接着工法について、UFC床版に発生した微細なひび割れに対して施工品質が確保できることを確認した。

(3) 炭素繊維シート補強工法

炭素繊維シートによるUFC床版の応急的な補強効果について、付着強度試験および曲げ強度試験により評価を実施した。

付着強度試験結果より、炭素繊維シートは下地処理やプライマーの塗布を省略した場合においても、UFCに対し良好な付着性能を有することが確認できた。

曲げ強度試験結果より、ひび割れが発生したUFC床版に炭素繊維シートを接着することで、耐荷力および剛性が回復する傾向を確認できた。また、曲げ強度試験による炭素繊維シートの剥離等は見られなかった。

以上のことから、炭素繊維シートによる応急的な補強について、ひび割れの発生により取換えが必要と判断されたUFC床版に対して施工品質が確保できることを確認した。



写真-10 炭素繊維シート破断状況

6. おわりに

阪神高速道路では、今後建設予定である新規路線や維持修繕工事にUFC床版の適用が検討されている。

前述のとおり、活荷重の使用状況下ではひび割れを許容しないUFC床版であるが、設計上想定しない外力等が作用することにより、ひび割れまたは断面欠損等の損傷が発生した際に、適切な点検、診断、補修・補強が実施できるよう維持管理シナリオおよび補修材料や施工方法のについて検討していくことが、阪神高速道路のさらなる安全性の向上において重要になると考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 小坂崇ら：超高強度繊維補強コンクリートを用いた軽量かつ耐久性の高い道路橋床版の開発，土木学会年次学術講演会，2013.9.
- 4) 齋藤公生ら：超高強度繊維補強コンクリートを用いた軽量かつ耐久性の高い道路橋床版の輪荷重載荷試験，土木学会年次学術講演会，2013.9.
- 5) 一宮利通ら：鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高いUFC道路橋床版の開発，プレストレストコンクリート，Vol.56，No.1，2014.1.
- 6) 阪神高速道路株式会社：UFC床版の設計・製作・施工・維持管理の手引き(案)
- 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