

論文

UHPFRC で上面を打ち替えた RC 床版の耐疲労性の評価

橋本理*, 越川喜孝**

*大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

**大成ロテック株式会社 技術研究所 (〒365-0027 埼玉県鴻巣市上谷 1456)

道路橋 RC 床版の劣化は、交通荷重の繰返し作用とコンクリートのひび割れ内部に浸入した水の相互作用によって促進されると考えられている。筆者らは、RC 床版の上面を高強度で緻密な超高性能繊維補強セメント系複合材料 (UHPFRC) で打ち替える高耐久補修工法の耐疲労性検証を目的として輪荷重走行試験を行った。その結果、輪荷重走行下においても UHPFRC の防水性が保持されることや床版のたわみを大幅に低減できることを確認した。

キーワード: UHPFRC, 道路橋 RC 床版, 上面打替え, 輪荷重走行試験

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート製の道路橋床版 (以下、RC 床版) では、写真-1 に示すような床版上面における劣化や、それに伴う内部鉄筋の腐食、遊離石灰の漏出等の進行が確認されており、床版としての耐荷力低下が大きな社会問題となっている。RC 床版の劣化は交通荷重の繰返し作用とコンクリートのひび割れ内部に浸透した水の相互作用によって促進されるものと考えられている。すなわち、コンクリートのひび割れ内部に水が浸入することで、ひび割れの進展やひび割れ内部のすり磨き作用による損傷、内部鉄筋の腐食、凍害等による劣化が促進され、RC 床版の耐荷力が急速に低下する。したがって、RC 床版に発生する劣化の進行を防止するためにはコンクリートのひび割れ内部に浸入する水の制御が最大の課題とされている。

筆者らは、一般のコンクリートに比べて高強度で緻密な超高性能繊維補強セメント系複合材料 (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cement-based Composites: 以下、UHPFRC) を用いた上面補修工法の開発を行ってきた²⁾。UHPFRC を用いて床版上面を全面補修することで、既設コンクリートに生じたひび割れ内部への水・塩分の浸入やひび割れ内部のすり磨き作用に対する抵抗性が格段に向上すると考えられるため、交通荷重に対する長期耐久性の向上も期待される。

本稿では、上面を UHPFRC で打ち替えた RC 床版の輪荷重走行試験を行い、輪荷重走行下における UHPFRC の防水性や UHPFRC による床版の補強効果について検討した結果を報告する。



写真-1 RC床版上面劣化状況の一例

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
54.5	48.9	176	323	864	925	3.23

2. 実験概要

2.1 実験条件および配合

本実験では、床版上面に劣化が進行している供用中の既設 RC 床版を想定し、昭和 47 年制定の道路橋示方書³²⁾ (以下、S47 道示) に準じて設計・製作した RC 床版の上面を UHPFRC にて打ち替えた複合床版を用いた。表-1 にコンクリートの配合を示す。使用したコンクリートは設計基準強度 24N/mm² のレディーミクストコンクリートである。表-2、表-3 に UHPFRC の構成材料および配合を示す。UHPFRC のフレッシュ性状はフロー値 (JIS R 5201, 15 回落下) によって管理しており、勾配 5% の仕上げを可能とする管理値として 160±20mm を採用し

表-2 UHPFRC の構成材料

使用材料	記号	概要
結合材	B	ポルトランドセメント, ポゾラン材等から構成される市販のプレミックス品
骨材	S	粒径2.5mm以下に調整された市販のプレミックス品
鋼繊維	F	長さ:15mm, 直径:0.2mm, アスペクト比:75 引張強度:2,000N/mm ² 以上
高性能減水剤	SP	専用減水剤
空気量調整剤	AC	ポリアルキレングリコール誘導体

表-4 材料試験結果

種別	コンクリート		UHPFRC	
	28日	48日*	28日	48日*
材齢	28日	48日*	28日	48日*
養生方法	標準養生	現場養生	20℃封緘	現場養生
圧縮強度 (N/mm ²)	26.8	27.4	169	188
ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	-	-	8.63	7.97
ヤング係数 (kN/mm ²)	25.3	26.3	53.9	55.3

※輪荷重走行試験開始材齢

表-5 RC 床版の配筋仕様

	主鉄筋	配力鉄筋
上側	D16@100mm (SD295A)	D16@250mm (SD295A)
下側	D16@100mm (SD295A)	D16@125mm (SD295A)



写真-2 UHPFRC の締固め状況

た2). コンクリートおよび UHPFRC の材料試験結果を表-4 に示す。

2.2 供試体概要

図-1 に供試体形状と寸法を示す。上面を UHPFRC で打ち替える前段階における RC 床版の寸法は幅 2.8m, 長さ 4.5m で, 床版厚さは実際に S47 道示に準拠して供用された床版⁴⁾を参考に 210mm とした。表-5 に RC 床版の配筋仕様を示す。鉄筋配置は主鉄筋を外側に配置しており, かぶり厚は 30mm とした。

UHPFRC による上面打替え範囲は幅 2.2m, 長さ 4.5m, 厚さ 50mm とした。RC 床版上面を深さ 50mm までウォータージェットにて除去した後, 打継面を湿潤状態として UHPFRC を打込んだ。UHPFRC の締固め状況を写真-2 に示す。UHPFRC の施工目地部には鋼繊維が架橋しておらず耐久性上の弱点となることが想定されたため,

表-3 UHPFRC の配合

	単位量 (kg/m ³)				
	W		B	S	F
	SP	AC			
170	10	1	1,086	1,135	157 (2vol.%)

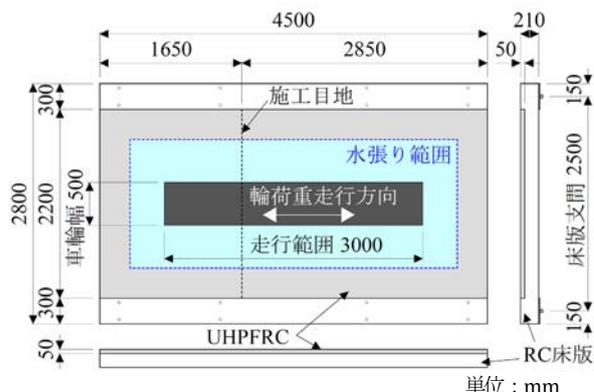


図-1 供試体形状と寸法

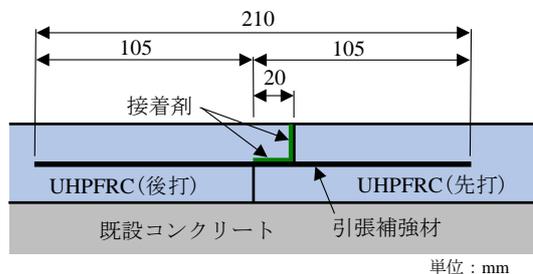


図-2 UHPFRC 施工目地の処理

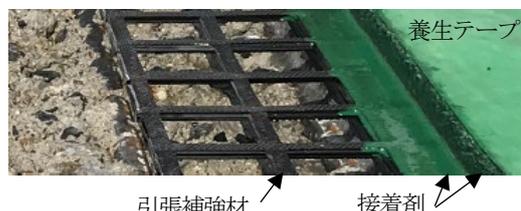


写真-3 UHPFRC 施工目地の処理状況

表-6 接着剤の仕様

硬化物比重	圧縮降伏強さ (N/mm ²)	圧縮弾性率 (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	引張せん断強さ (N/mm ²)
1.53	83.6	3,277	53.7	22.5

表-7 引張補強材の仕様

筋断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)	格子間隔 (mm)	単位重量 (g/m ²)
26.4	1,400	100,000	50×50	1,510

本実験では図-1 に示す位置に UHPFRC の施工目地を設け, 図-2, 写真-3 に示す目地処理を施した。接着剤塗布面には UHPFRC (先打) 打込み時において表面に凹凸を有する特殊な織布を張付けた布張り型枠を用いており, 接着剤や UHPFRC (後打) との付着性状の向上が図られている。また, 引張補強材として FRP 格子筋を設置した。接着剤および引張補強材の仕様を表-6, 表-7 に示す。

表-8 予備載荷の載荷ステップ

STEP	載荷荷重 (kN)	載荷回数 (回)	累計回数 (回)
1	157	1,000	1,000
2	177	1,000	2,000
3	196	5,000	7,000

表-9 本載荷の載荷ステップ

STEP	載荷荷重 (kN)	載荷回数 (回)	累計回数 (回)
1	157	40,000	40,000
2	177	40,000	80,000
3	196	40,000	120,000
4	216	40,000	160,000
5	235	40,000	200,000
6	250	100,000	300,000
7	275	40,000	340,000
8	314	破壊まで	

2.3 輪荷重走行試験の概要

輪荷重走行試験は、供試体上面に載荷版を一行に並び、その上に鉄輪を走行させることにより載荷を行った。鉄輪の走行範囲は図-1 に示すとおりである。供試体の支持条件は、長辺方向の2辺を単純支持とし鉛直方向の変位のみ拘束した。また、短辺方向の2辺は端桁による弾性支持とし変位を拘束することで短辺からの曲げ破壊を防止した。試験中の計測項目は、輪荷重走行試験の各段階で実施する静的載荷時の床版たわみおよびひび割れ分布である。

はじめに、供用中の既設 RC 床版に生じている劣化を再現する目的で、上面を UHPFRC で打ち替える前段階の RC 床版を試験機に設置し、床版下面に二方向ひび割れ（間隔が 50cm 以下）が生じるまで輪荷重を載荷した（以下、予備載荷）。これは、保全点検要領⁵⁾において劣化度 B・C と判定され、劣化が大き、あるいは大きくなりつつあると判定される劣化程度に該当する。予備載荷の載荷ステップを表-8 に示す。

予備載荷後の供試体を試験機から降ろし、上面を図-1 に示すとおり UHPFRC で打ち替えた後、再度試験機に設置し輪荷重走行試験を行った（以下、本載荷）。本載荷では、輪荷重走行下における UHPFRC の防水性を検証する目的で、本載荷開始時より供試体上面に水を張った条件で載荷した（図-1）。載荷は階段状荷重漸増載荷による方法とし、157kN から開始後、走行回数 4 万回毎に荷重を 19.6kN ずつ増加させた。ただし、載荷荷重が 250kN に達した段階では、耐用年数 100 年相当の走行回数（乾燥条件）として提案されている 10 万回⁶⁾を採用しており、その後は表-9 に示す載荷方法とした。輪荷重走行試験の状況を写真-4 に示す。

2.4 輪荷重走行試験後における供試体の各種検証

本載荷後、供試体を切断し、輪荷重走行試験による供



写真-4 輪荷重走行試験状況（本載荷）

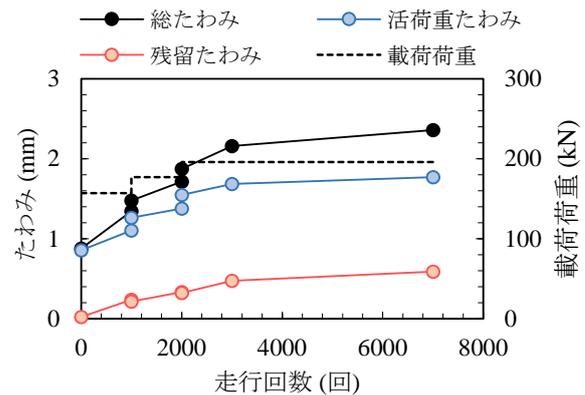
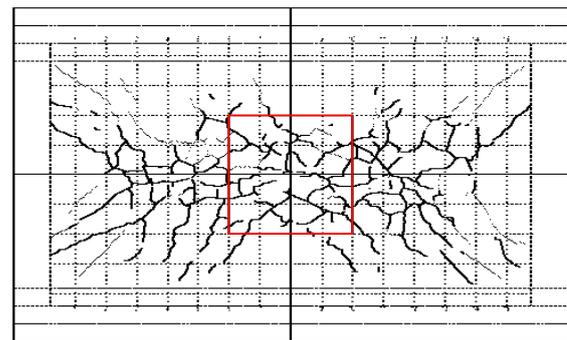


図-3 たわみと走行回数の関係（予備載荷）



赤枠はひび割れ密度算出範囲 (1m×1m)

図-4 予備載荷後のひび割れ発生状況（下面）

試体の破壊状況の確認を行った。また、供試体からコア試験体采取し、UHPFRC とコンクリートの付着強度および UHPFRC の防水性について検証した。

3. 実験結果および考察

3.1 予備載荷による供試体の劣化状況

図-3 に供試体中央におけるたわみと走行回数の関係を示す。載荷荷重の増加とともに活荷重たわみと残留たわみがいずれも増大していることが分かる。図-4 に予備載荷後における供試体下面のひび割れ発生状況を示す。供試体下面のひび割れは亀甲状に進行しており、その間隔は 500mm 以下であった。また、図中赤枠で示す範囲（供試体中央、1m×1m）で算出されたひび割れ密度は 8.8m² であり、一般に使用限界状態⁷⁾とされている

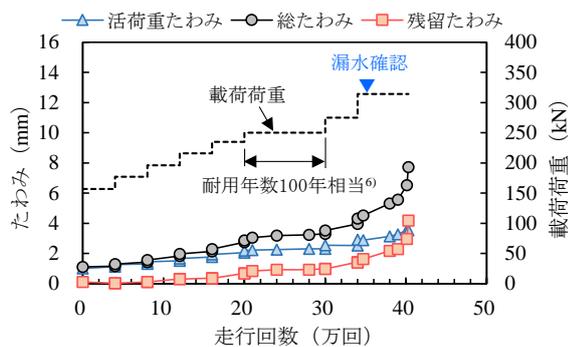


図-5 たわみと走行回数の関係

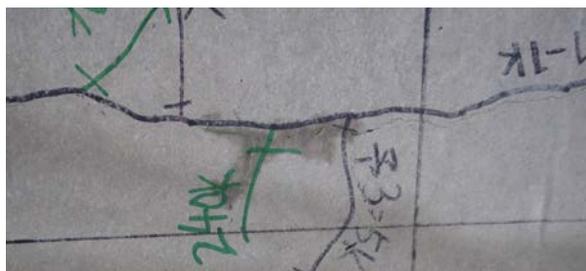


写真-5 供試体下面の漏水発生状況

10m/m²にかなり近い値となった。ひび割れ密度は算出範囲の設定や対象とするひび割れ幅の考え方によって個人差が入りやすいとされているが⁷⁾、これらのことを考慮しても供試体には十分な劣化が生じていると判断した。

3.2 供試体たわみと漏水の発生状況

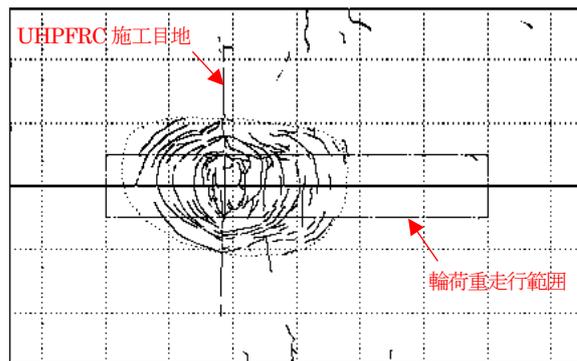
図-5 に本載荷時におけるたわみと走行回数の関係を示す。たわみは、本載荷の各段階で輪荷重走行を停止し、その時点の載荷荷重まで静的載荷を行った際に供試体中央に生じたたわみを示している。供試体下面からの漏水は、載荷荷重 314kN で 7000 回走行した時点にて確認されており（写真-5）、耐用年数 100 年相当走行回数⁹⁾の完了時点での漏水やたわみの急増は生じなかった。このことから、同時点において UHPFRC とコンクリート間への浸水はなく、両者の一体性は保持されていたものと推察される。漏水確認後には残留たわみの進展が加速し、載荷荷重 314kN で 6.3 万回走行した時点においてたわみが急増したため載荷を停止した。

UHPFRC にて上面打替えを行うことによる補強効果を確認するため、予備載荷終了時および本載荷開始時における荷重 157kN 静的載荷時の活荷重たわみを比較した。その結果、前者が 1.50mm、後者が 1.01mm であり、本工法適用による供試体の剛性向上効果が確認された。

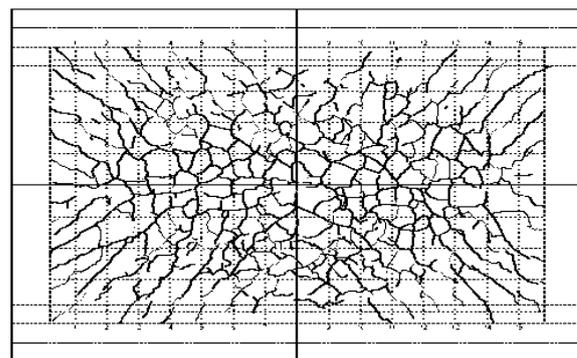
3.3 ひび割れの発生状況

本載荷終了時（走行回数 40.3 万回）における供試体のひび割れ発生状況を図-6 に示す。供試体上面のひび割れが UHPFRC 施工目地中央付近を中心として環状に広がっている一方、供試体下面では UHPFRC 施工目地に関係なく全体的にひび割れが生じていることが分かる。このことから UHPFRC 施工目地の有無は既設 RC 床版のひ

び割れ発生分布に影響を及ぼさないと判断されるが、輪



a) 供試体上面



b) 供試体下面

図-6 本載荷終了時のひび割れ発生状況

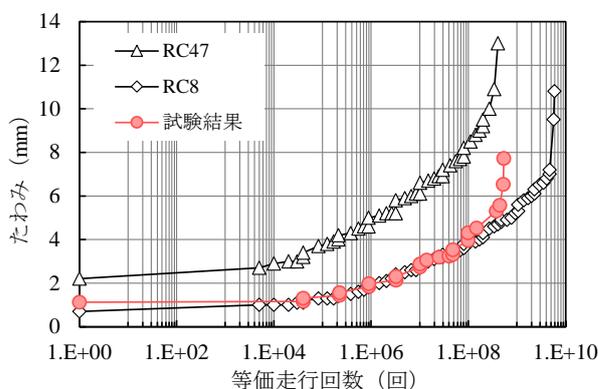


図-7 たわみと等価走行回数の関係

荷重走行時における供試体下面からの漏水は UHPFRC 施工目地直下付近で最も多く観察された。したがって、供試体上面からの浸水は UHPFRC 施工目地およびその近傍に生じた UHPFRC の貫通ひび割れを通じて進行したと推察される。

3.4 既往の試験結果との比較

図-7 に本載荷時におけるたわみと等価走行回数の関係を示す。たわみは、各荷重段階で静的載荷を与えた際の供試体中央における総たわみであり、既往の試験結果として昭和 47 年および平成 8 年制定の道路橋示方書に準拠した RC 床版の輪荷重走行試験結果⁸⁾（以下、RC47 および RC8）も比較のために併記した。図-7 を参照す

ると、本実験は供試体上面に水張りをした条件で行った

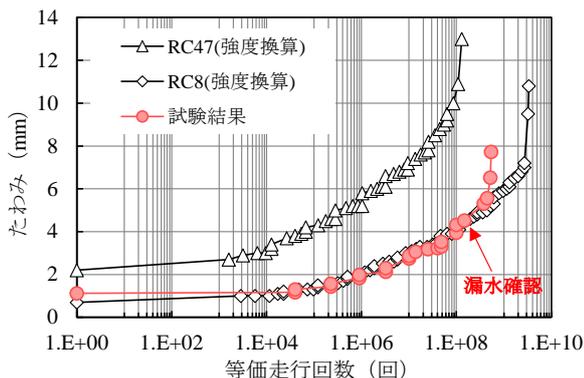


図-8 たわみと走行回数の関係 (強度換算後)

にも関わらず、乾燥条件で実施された RC47 と破壊時の等価走行回数に大差がないことが分かる。このことは、輪荷重走行下においても UHPFRC の防水効果が保持されることを示唆しているが、UHPFRC が供試体に及ぼす補強効果については、供試体に使用されたコンクリートの圧縮強度も考慮に入れて検討する必要がある。コンクリートの圧縮強度は本実験で 27.4N/mm^2 であったのに対し、RC47 および RC8 はそれぞれ 36.3N/mm^2 、 33.1N/mm^2 である。

図-8 は、以下に示す既往の疲労強度式⁷⁾を用いて、RC47 と RC8 の等価走行回数を本実験のコンクリート圧縮強度に合わせて換算して整理し直したものである。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (1)$$

ここに、

P : 輪荷重 (kN)

P_{sx} : 梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力 (kN)

本実験では図-8 に示す位置 (等価走行回数 1.48×10^8 回付近) において供試体下面に漏水が確認されたが、それ以前の供試体中央たわみは RC8 と同程度となっており、UHPFRC 上面打替え前の供試体が RC47 相当であることを考慮するとたわみが大幅に抑制されていることが分かる。これは、輪荷重走行下において静弾性係数の大きい UHPFRC とコンクリートの一体性が保たれることにより供試体断面の中立軸が上面側に移動したためと推察される。漏水発生後は、走行回数の増大とともに UHPFRC とコンクリート間への浸水量が増加し、徐々に両者間の界面に剥離が生じてたわみが急増したと考えられる。

図-9 に既往の輪荷重走行試験結果から得られた乾燥条件および水張条件における RC 床版の S-N 曲線⁷⁾を示す。図中には、本実験結果および既往の試験結果⁸⁾も併記した。同図を参照すると、本実験結果は乾燥条件の S-N 曲線や既往の試験結果 (RC47) に比べて上方にプロットされており、上面を UHPFRC で打ち替えることによる防水・補強効果が実証されたと判断される。

3.5 輪荷重走行試験後における供試体の状態

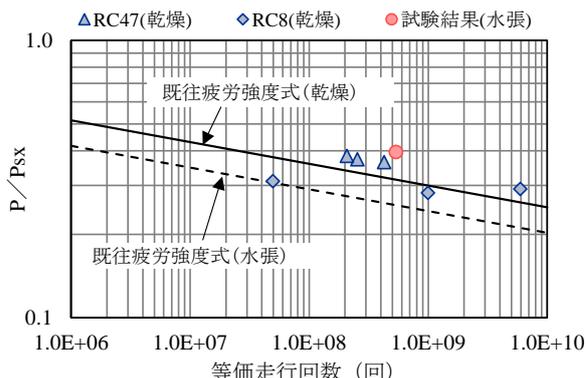


図-9 RC 床版の S-N 曲線

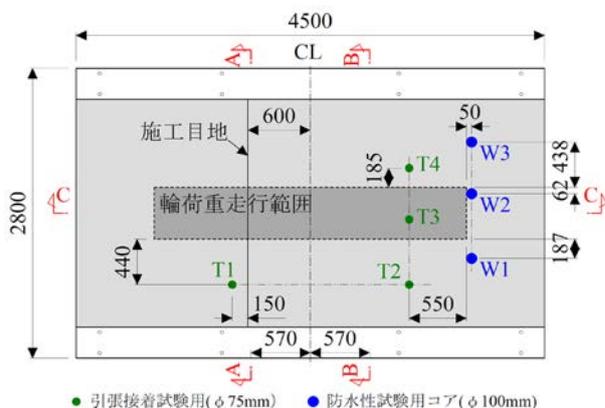


図-10 切断とコア供試体の採取位置

輪荷重走行試験後における供試体の状態を確認する目的で、図-10 に示す A-A・B-B・C-C の 3 断面で供試体を切断するとともに、T1~T4 (引張接着試験用) と W1~W3 (防水性試験用) の 7 箇所コア採取を行った。直径はそれぞれ 75mm、100mm である。

写真-6 に供試体の切断面を示す。供試体のひび割れは UHPFRC 施工目地近傍 (A-A 断面) で多く生じており、輪荷重両端部付近では UHPFRC のひび割れも確認された。一方、供試体中央を挟んで A-A 断面と対称位置の B-B 断面では、UHPFRC とコンクリート間に剥離が生じているもののコンクリート部のひび割れは A-A 断面に比べて非常に軽微であった。また、長手方向の C-C 断面を参照すると、A-A 断面との交差部付近で UHPFRC とコンクリートの剥離が顕著で UHPFRC のひび割れも確認される。これらのことと図-6 に示した供試体上面のひび割れ分布を併せて考慮すると、供試体の破壊は UHPFRC 施工目地付近を中心とする押抜きせん断破壊であったと判断される。すなわち、輪荷重走行の影響により UHPFRC 施工目地部より浸水が始まり、徐々に UHPFRC とコンクリートの界面やコンクリート内部の劣化が進行し破壊に至ったと推察される。

図-11 にコアの引張接着試験の状況と結果を示す。引張接着試験は、NEXCO 試験方法⁹⁾ (試験法 434) に準じて行っており、図中の目標値は、床版上面増厚工における付着強度の基準値¹⁰⁾である。試験の結果、全ての供試

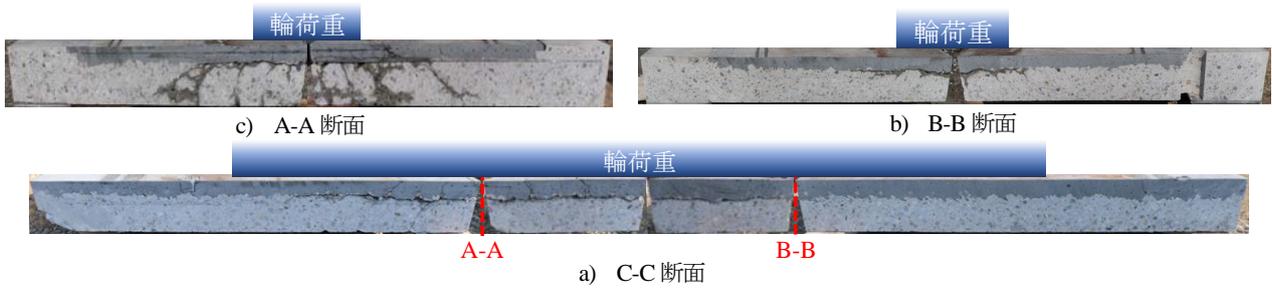


写真-6 試験後における供試体の切断面

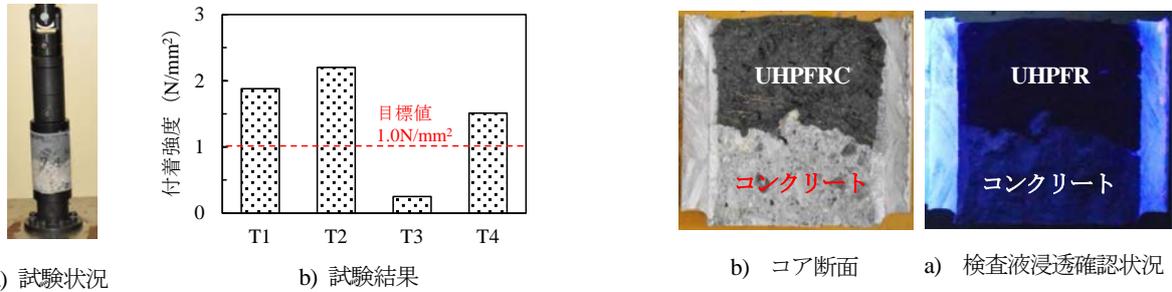


図-11 引張接着試験

写真-7 防水性試験Ⅱ結果

体において破断面はコンクリート部であり、輪荷重走行範囲直下の T3 のみ目標値 (1.0N/mm²) を下回る結果となった。これは、輪荷重作用下において UHPFRC とコンクリートの一体性が保持されているものの、T3 では荷重作用範囲直下であることから、コンクリート部に微細ひび割れ等の劣化が進展していたためと推察される。

輪荷重走行試験後における UHPFRC の防水性を検証する目的で、輪荷重走行範囲近傍から採取したコア (W1～W3) を対象に防水性試験Ⅱ¹¹⁾を行った。その結果、全てのコアで供試体内への検査液の浸透は確認されず、UHPFRC の防水性が保持されていることが分かった。結果の一例として W2 の断面確認状況を写真-7 に示す。

4. まとめ

UHPFRC で上面を打ち替えた RC 床版の耐疲労性評価を目的として、実大供試体による輪荷重走行試験を行った。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 水張り状況下での輪荷重走行試験では、耐用年数 100 年相当とされている乾燥状況下での走行回数を供試体下面からの漏水やたわみの急増を伴わずに完走し、本工法を適用した供試体の耐疲労性と輪荷重走行下における UHPFRC の防水効果を確認した。
- (2) 本実験で得られた供試体たわみは、RC8 を対象とした既往の試験結果と同程度であり、UHPFRC で上面を打ち替えることによるたわみ抑制効果を確認した。
- (3) 供試体のひび割れと切断面の状況から、供試体の破壊形態は押抜きせん断破壊と判断された。
- (4) 輪荷重走行試験後に行った付着強度試験および防水性試験Ⅱの結果、押抜きせん断破壊の影響が及んでいない範囲において、UHPFRC とコンクリートの一体性および UHPFRC の防水性が保持されていることを

確認した。

謝辞

実験を実施するにあたり、一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所の橋本雅行氏をはじめとする関係者の方々に多大なるご協力・ご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版，2016.9
- 2) 橋本理ほか：超高性能繊維補強セメント系複合材料を用いた既設 RC 床版上面増厚工法の開発，大成建設技術センター報，Vol.52，No.26，2019
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書，1972.3
- 4) 長谷俊彦ほか：ビニロン繊維補強コンクリートによる既設 RC 床版の上面打替え補強効果，構造工学論文集，Vol.63A，pp.1263-1272，2017
- 5) 東・中・西日本高速道路株式会社：保全点検要領 構造物編，2021.4
- 6) 長尾千瑛ほか：プレキャスト PC 床版継手の疲労耐久性照査試験，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.189-192
- 7) 松井繁之：道路橋床版，森北出版，2007.10
- 8) 中谷昌一ほか：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料第 28 号，2002.3
- 9) 東・中・西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法第 4 編 構造関係試験方法，2020.7
- 10) 東・中・西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，2020.7
- 11) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧，2007.3

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)