

論文

道路橋 RC 床版上面補修に用いる UHPFRC の防水性能評価に関する実験的検討

今野久志*, 三田村浩**, 桐川潔***

*博(工), (株)サンブリッジ工事部部長 (〒001-0025 札幌市北区北25条西4丁目1-26)

**博(工), (株)サンブリッジ技術本部長 (〒001-0025 札幌市北区北25条西4丁目1-26)

***修(工), ピーエス・コンストラクション(株)GL (〒105-7365 東京都港区東新橋一丁目9番1号)

UHPFRC の優れた遮水性能に着目し, プレキャスト PC 床版上面にあらかじめ防水層として UHPFRC を工場製作時に一体化する工法の実現可能性を検討するために, 橋梁の設計供用期間と同じ 100 年の設計耐用期間において防水性能や床版コンクリートとの一体性を確保できるかどうかを実験的に検証した. その結果, 本検討に使用した UHPFRC は想定した載荷条件下において十分な防水性能や付着性能を有していることが確認できた.

キーワード: 防水性能, 定点疲労試験, 凍結融解試験, 透水試験

1. はじめに

近年, 構造物の高経年化および予想を上回る交通量の増大, さらには走行車両の大型化に伴い既設 RC 床版において床版上面の水平ひび割れの発生や土砂化等の劣化損傷が顕在化してきている. これら劣化損傷の要因として水, 塩化物イオンなどの劣化因子が床版内部に侵入することがあげられる. 筆者らは RC 床版に対するこれらの外的劣化因子の遮断性能や高強度で流動性および材料分離抵抗性に優れる UHPFRC を用い, 既設 RC 床版上面の劣化部位を取り除いたのち現場打設により薄層で補修する対策工法を提案し, 輪荷重走行試験により疲労耐久性の向上効果や現場適用した RC 床版に対する実橋載荷試験により耐荷力向上効果が図れること^{1), 2), 3)}, さらには UHPFRC で上面補修や増厚をした RC 版の押抜きせん断試験を実施し, 押抜きせん断耐力の向上効果や押抜きせん断耐力の評価法について報告している^{4), 5)}.

一方, 橋梁の大規模な更新工事では, 既設橋の劣化した RC 床版をこれまでより耐久性の高い床版に取り換えることが行われており, プレキャスト PC 床版が多く採用されてきている. これまで RC 床版上面に補修材料として UHPFRC を適用した場合には, その優れた床版劣化因子の遮断性能より UHPFRC 上面には防水工を施工せず, UHPFRC そのものを防水層として適用してきた. 今後のプレキャスト床版の現場適用を考えると, 既設 RC 床版の補修材料として用いてきた UHPFRC を新設の部材上面に適用した場合, 現場作業の省力化や工期短縮に有効であるものと考えられる.

そこで筆者らは, 道路橋既設 RC 床版の上面補修に用いてきた UHPFRC をプレキャスト PC 床版上面の一部として工場製作時に一体施工した場合に, 防水層として適用可能かどうかについて照査項目を設定し実験的検討を

行い, 防水層としての性能評価を実施したのでその結果について報告する.

2. 防水層として使用した UHPFRC について

本検討においてプレキャスト PC 床版上に防水層として使用する材料は, UHPFRC の一つである超緻密高強度繊維補強コンクリート (J-THIFCOM, 以後単に UHPFRC と記す) である. UHPFRC の材料特性を表-1 に示す. 圧縮強度の特性値は 130N/mm² であり, 材齢 1 日で 100N/mm² 以上の高強度を発現するとともにひび割れ抵抗性が極めて高い. また, 高い流動性を有し, 反面, フレッシュ材料を手で持ち運びできる性状もあり, 高い粘性と材料分離抵抗性を保有している. コンクリートとの付着引張試験では, コンクリートの母材破壊を呈し, 界面付着強度は 2.7N/mm² 以上を有する. 塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さは, JIS A 1171 試験においていずれも材齢 28 日において 0mm, 透気係数試験 (トレント法) による透気係数は 10⁻¹⁹m² 以下であり, 床版劣化因子の遮断性能に優れることから, 本材料を床版上面に補修

表-1 UHPFRC の材料特性

項目	特性値	備考
圧縮強度 (設計)	130 N/mm ²	JIS A 1108 (材齢28日)
引張強度 (設計)	9 N/mm ²	一軸引張試験 (材齢28日)
ひび割れ発生強度	6 N/mm ²	JIS A 1113 (材齢28日)
曲げ強度	35 N/mm ²	JIS A 1171 (材齢28日)
ヤング係数	4.0×10 ⁴ N/mm ²	JIS A 1149 (材齢28日)
付着強度	2.7 N/mm ² 以上	JIS A 1171 (材齢28日)
長さ変化率 (収縮低減考慮)	111×10 ⁻⁶	JIS A 6202 (材齢32週)
塩化物イオン浸透深さ	0 mm	JIS A 1171 (材齢28日)
中性化深さ	0 mm	JIS A 1171 (材齢28日)
透気係数	1.0×10 ⁻¹⁹ m ² 以下	透気係数試験 (トレント法)

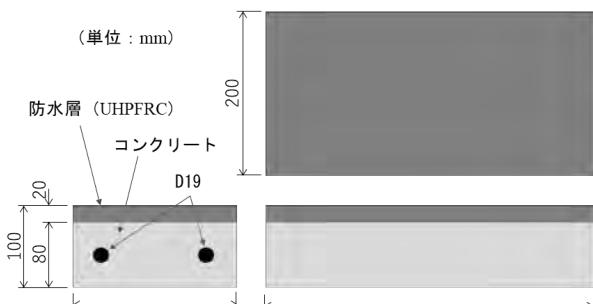


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

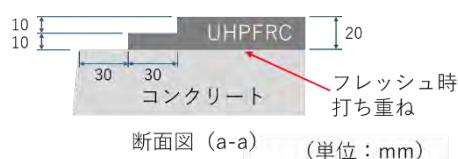
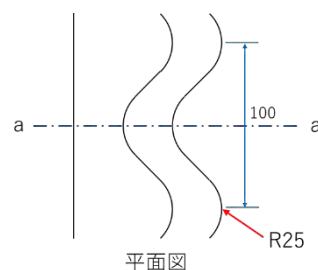


図-2 接合部の形状寸法



写真-1 WJ 研掃後の接合部の状況

材料として適用した場合には床版防水工を不要とするものである。

3. 試験体

試験体の形状寸法および配筋状況を図-1 に示す。試験体は幅 200mm, 長さ 400mm, 厚さ 100mm (上部 20mm が UHPFRC) であり, D19 の異形鉄筋が 2 本配置されている。また, 本試験体はプレキャスト PC 床版の部分模型としていることから, 工場製品と同様にコンクリート上面に 20mm 厚の UHPFRC を単に打ち重ねた複合部試験体と現場施工時に打ち継ぎ部となる 2 次施工部分を試験体の一部に取り入れた接合部試験体からなる。接合部

表-2 試験体一覧および性能照査試験項目

試験体	種別	定点疲労試験	凍結融解試験	引張強度試験	透水試験
S-1~3	複合部	○	○	—	○
S-4~6		—	—	○	—
S-7~9		○	—	○	—
S-10~12		—	—	—	○
J-1, 3, 7	接合部	○	○	—	○
J-4~6		—	—	○	—
J-2, 8, 9		○	—	○	—
J-10~12		—	—	—	○

○: 実施, —: 未実施

表-3 UHPFRC の配合

専用ミックス セメント (P) (kg/m ³)	専用混和液 (We) (kg/m ³)	補強用鋼纖維 (2.5vol%+2.5vol%)		混和材 (剤) (kg/m ³)	混和液 粉体比 (We/P) (%)
		メゾ纖維 (kg/m ³)	マイクロ纖維 (kg/m ³)		
1,850	290	196	196	200	16

表-4 材料物性値一覧

物性値	圧縮強度 (平均)		ヤング係数 (平均)	
	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
材料／材齢	σ_{28}	σ_{223}	σ_{28}	σ_{223}
コンクリート	60.2	57.8	34.1	37.3
UHPFRC (1次施工)	123.1	158.0	33.5	39.2
UHPFRC (2次施工)	132.1	175.5	34.5	41.0

の形状寸法を図-2 に示す。接合部は鋼纖維が端部まで均一に充填されるように波型形状としており、鉛直の打ち継ぎ箇所が UHPFRC20mm 厚の一か所に集中しないように 10mm 厚ごとの段差を設けた 2 重波型接合構造とした。コンクリートと UHPFRC の打ち重ね時間については、事前検討において打ち重ねのタイミングをコンクリートのフレッシュ時、始発～終結の間、終結以後の 3 種類の方法で製作した小型梁の曲げ試験を実施し、曲げ破壊時においてコンクリートと UHPFRC の一体性が最も良好であったフレッシュ時打ち重ねとした。また、打ち重ね後の養生については通常のプレキャスト PC 床版製造と同様の温度一時間勾配において蒸気養生を実施している。複合部試験体は 1 回の打設で製作し、接合部試験体は工場製作部分としてコンクリートは全面、UHPFRC はゴム製の 2 重波型型枠を用いて 1/2 だけ打設を行い、蒸気養生を実施した後、後日 UHPFRC の接合部をウォータージェットで研掃した後に (写真-1) 現場打設部として UHPFRC を打ち重ねている。試験体一覧および後述する性能照査試験項目を表-2 に示す。表-3 には UHPFRC の配合を示す。なお、コンクリートの配合はプレキャスト PC 床版製造時と同一であり、設計基準強度 f_{ck} は $50N/mm^2$ である。表-4 にはコンクリートおよび UHPFRC の材齢 28 日およびすべての性能試験が終了した後の材齢 223 日における圧縮強度および静弾性係数を示す。

表-5 材齢 28 日における材料物性値

		コンクリート	UHPFRC
f_{ck} (N/mm ²)	50.0	130.0	
E_c (N/mm ²)	33,000	40,000	
d_{max} (mm)	20.0	20.0	
f_{ik} (N/mm ²)	3.122	5.902	
G_F (N/m)	100.000	137.507	
I_{ch} (m)	0.339	0.158	

表-6 曲げひび割れ応力度の制限値

材料	部材厚 h (m)	k_{ob}	k_{lb}		$f_{bck} = k_{ob} \cdot k_{lb} \cdot f_{ik}$ (N/mm ²)
			計算値	≥0.4補正	
コンクリート	0.200	1.285	0.822	0.822	1.057
	0.220	1.265	0.803	0.803	1.016
UHPFRC	0.220	1.140	0.803	0.803	0.916

4. 性能照査試験

4.1 照査項目

UHPFRC の防水性能については、防水層がプレキャスト PC 床版の一部であることから、設計耐用期間は橋梁の設計供用期間⁹⁾と同じと考え 100 年を求めるとした。性能照査は、UHPFRC の最外縁に後述する引張応力度を供用期間 100 年に対応する回数で繰り返し作用させた後に UHPFRC とコンクリートとの一体性が確保されているかを建研式引張強度試験により、また防水性能については上記と同様に 100 年に対応する疲労試験とさらには凍結融解を受けた状況下において透水試験を実施し、透水係数が設定した基準値を満足するかによって検証したものである。以下の各節に試験内容とその結果を示す。なお、実際の現場施工を考えると、最終的には UHPFRC の上部にアスファルト舗装が施工される。アスファルト舗装と UHPFRC の一体性に関しては、舗装施工管理要領（東・中・西日本高速道路株式会社、令和 2 年 7 月）の床版防水層の性能照査試験方法（グレード II、寒冷な地域）に準じた試験を実施し、全ての項目について試験結果は判定基準を満たすことを確認済みである⁷⁾。

4.2 定点疲労試験

(1) 載荷条件の設定

通常のプレキャスト PC 床版の設計（方法 B）で用いられている設計荷重時の許容曲げ引張応力度を基に、定点疲労試験における載荷荷重を決定する。床版厚を 220mm とした時の方法 B による許容曲げ引張応力度を算出する。なお、通常使用されている算出式は複合床版に対応していないことから、コンクリートと UHPFRC それぞれの設計基準強度とヤング係数（表-5）を用いて 2007 年度制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕5.2 節 式 (5.2.4) よりコンクリートの曲げひび割れ応力度の制限値を算出した（表-6）。

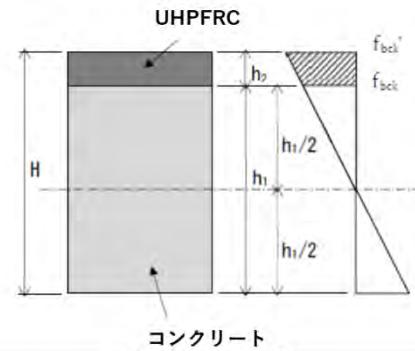


図-3 UHPFRC 頂部での応力度の算出



写真-2 定点疲労試験の載荷状況

次に、図-3 に示すようにコンクリート部の頂部での曲げひび割れ応力度の制限値 (f_{bck}) より、UHPFRC 頂部での応力度を比例換算すると、以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} f_{bck}' &= f_{bck} / (h_1/2) \cdot (h_1/2 + h_2) \\ &= 3.30 / (200/2) \cdot (200/2 + 20) \\ &= 3.96 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

上記より、定点疲労試験において UHPFRC の最外縁に作用させる引張応力度を 4.0 N/mm^2 と設定した。なお、繰り返し回数に関しては、鋼材の疲労限の考え方を参考に、200 万回の繰り返し載荷でひび割れ等の損傷が発生しなければ、何回負荷を繰り返しても疲労破壊に至らないものと考え、200 万回定点疲労試験を 100 年対応の載荷条件とした。

(2) 試験方法と結果

載荷試験の状況を写真-2 に示す。試験体は引張側を UHPFRC としてスパン長 300mm で支点治具上に設置し、載荷点間隔 100mm で 2 辺載荷した。各支点部の試験体表面には試験体を研磨した後、短冊状の鋼板を接着している。UHPFRC の最外縁に前項（1）で設定した 4 N/mm^2 の引張応力度を作用させるための載荷荷重は、コンクリートと UHPFRC の層厚を精度良く計測し材料強度を基に断面計算により決定した。また、200 万回載荷する際の除荷荷重は 0.5 kN に統一して試験を実施した。

試験終了後には試験体を載荷装置から取り外し、アセットンを用いて表面の状況を丁寧に観察したが、すべての試験体においてひび割れの発生は見られなかった。



写真-3 動弾性試験の測定状況

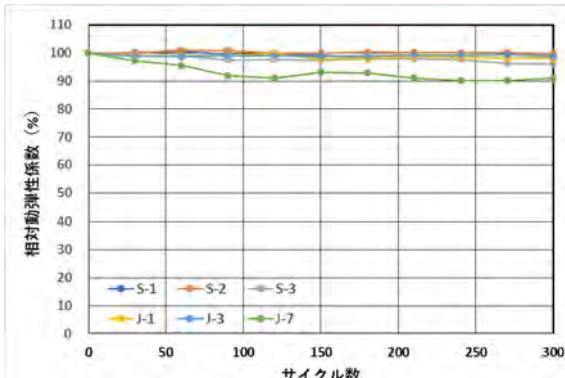


図-4 相対動弾性係数とサイクル数の関係

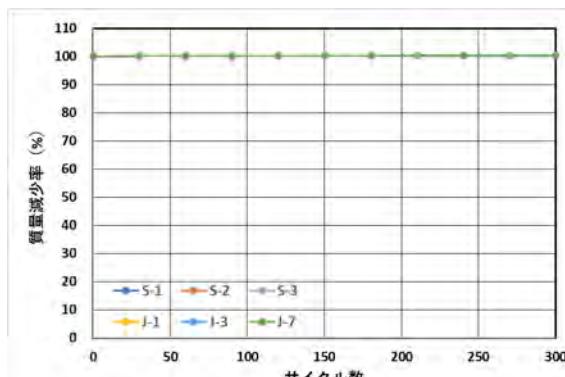


図-5 質量減少率とサイクル数の関係

4.3 凍結融解試験

(1) 試験方法

プレキャスト PC 複合床版の積雪寒冷地での適用も視野に入れ、環境負荷として凍結融解試験を JIS A 1148 により実施した。凍結融解試験を実施した試験体は、幅 200mm の試験体の左右両端を 50mm ずつ切断し、凍結融解試験の試験体形状□100mm×400 mm に成型した。UHPFRC 上面以外の 5 面についてはアルミテープで養生を確実に行い、水との接触がないようにしている。写真-3 には動弾性試験の測定状況を示す。

(2) 試験結果

試験は、複合部および接合部の定点疲労試験後に対して各 3 体実施した。図-4 および図-5 には、300 サイクルまでの質量減少率および動弾性係数の変化を示している。J-7 試験体のみ 100 サイクル程度で動弾性係数が 10%程度低下しているがそれ以降変動が無いことや質量



写真-4 引張強度試験状況 (J-2)

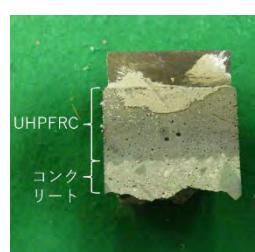


写真-5 断面状況 (J-2)

表-7 建研式引張強度試験結果

試験体	種別	負荷条件	引張強度 (N/mm ²)	破壊形態
S-4	複合部	無負荷	3.94	母材破壊
S-5			3.24	母材破壊
S-6			2.98	母材破壊
S-7	接合部	定点疲労	4.43	母材破壊
S-8			3.86	母材破壊
S-9	接合部	無負荷	4.50	母材破壊
J-4			4.43	母材破壊
J-5			4.01	母材破壊
J-6		定点疲労	2.71	母材破壊
J-2			4.09	母材破壊
J-8	接合部	無負荷	3.86	母材破壊
J-9			4.30	母材破壊

減少率が 0 サイクルから全く変動が無いことから凍結融解抵抗性について特に問題はないものと判断した。そのほかの試験体に関しては動弾性係数および質量減少率に大きな変化はなかった。

4.4 引張強度試験

(1) 照査基準および試験方法

100 年対応のコンクリートと UHPFRC の一体性の照査については、定点疲労試験後の試験体で建研式引張強度試験を行い、界面の破壊形態が母材破壊であることを確認するとともに、参考値として引張強度が「構造物施工管理要領」(平成 29 年 7 月) における断面修復の性能照査試験の基準値 (1.5N/mm² 以上) を満足するかどうかを確認した。試験は無負荷試験体に対しても行っている。建研式引張強度試験の状況を写真-4 に、試験後の断面状況の一例を写真-5 に示す。試験体に対する引張強度試験の実施箇所は、無負荷に対しては、試験体中央付近の任意箇所で、定点疲労試験実施の試験体に対してはスパン中央の等曲げ区間内で実施している。

(2) 引張強度試験結果

表-7 には、引張強度試験結果を示している。すべての試験体において母材破壊となっており、引張強度も断面修復における性能照査試験の基準値を上回った。

以上より、複合部と接合部共に 100 年相当の負荷を与えた後もコンクリートと UHPFRC は一体性を確保できるものと判断できる。



4.5 透水試験

(1) 透水係数基準値の設定

防水層の性能照査にあたり、供用期間中に床版に作用する水圧および作用時間を想定し、透水係数の基準値を設定した。参考文献8)より、作用する軸数は、2005年の東名高速道路日本平における軸重計データとし、床版上面が湿潤状態になっている日数は、気象データから全国の年間降雨日数の平均値(120日)に路面が乾燥に要する日数(翌日1日)を加算した累計時間により100年間で水がUHPFRCに10mm浸透する時の透水係数を算出した。これは、UHPFRC接合部が10mmの段差を有する二重波型構造であることから、全層厚20mmの1/2である10mmまでの水の浸透を許容する場合の透水係数を算出し100年対応の防水性能に対する基準値としたものである。なお、水が10mm浸透した場合においてもその下層にはさらに10mm厚の打ち継ぎのない連続した防水層があることから、十分な防水機能を有しているものと判断した。

以下に算出した透水係数と透水試験に用いる基準値を示す。

①透水係数の算出式

ダルシー則より、

$$q = k \cdot i \quad (1)$$

ここに、

q: 流速 (m/s) で次式による。

$$q = L/t$$

L: 防水層への浸透深さ (m)

t: 防水層に浸透するのに要した時間 (s)

k: 透水係数 (m/s)

i: 導水勾配で次式による。

$$i = h/L$$



h : 水頭差 (m)

$$\begin{aligned} \text{式(1)より, } k &= q/i \\ &= (L/t) / (h/L) \\ &= L^2 / (t \cdot h) \end{aligned} \quad (2)$$

②防水層に水が10mm浸透するときの透水係数

年間の軸数 (A_y) : 8226096台/年

100年間の軸数 (A_{100y}) : 822609600台/100年

車両の走行速度 (v) : 80km/h

T荷重が通過する時間 (t_1) : LT/v) : 0.009s

床版上面が湿潤状態と想定される日数 (W_d) : 240日

設計耐用期間中(100年当たり)の通過軸数の累計時間 (t (= $A_{100y} \cdot t_1 \cdot W_d$ / 365)) : 1353時間 / 100年

防水層に浸透するのに要した時間 t (s) : $t=1353$ 時間 $\times 3600=4870800$ (s)

水頭差 h (m) : $h=0.5\text{MPa} / 0.0098=51.0$ (m)

防水層への浸透深さ L (m) : $L=0.01$ (m)

式(2)より透水係数は、

$$\begin{aligned} \text{透水係数 } k \text{ (m/s)} &= k=0.01^2 / (4870800 \cdot 51.0) \\ &= 4.0 \times 10^{-13} \text{ (m/s)} \end{aligned}$$

上記の計算結果より、透水係数は $k=4.0 \times 10^{-13}$ (m/s)を基準値とする。

(2) 透水試験方法

透水試験については、無負荷試験体および疲労載荷試験+凍結融解試験実施後の試験体に対して実施した。試験体は、無負荷試験体については試験体中央より、また疲労載荷試験+凍結融解試験実施後の試験体については100×100×400mmの角柱試験体の中央部よりφ100×100mmの円柱試験体をコアリングにより製作した。写真-6にはコアリングした円柱供試体および透水試験用治具に設置した状況を示す。透水試験は写真-7に示す(株)丸東製作所社製のコンクリート透水透気試験装置を用い、日本コンクリート工学会「コンクリートの試験・分析マニュアル」(2005年5月), G-1透水試験(インプット法)および参考文献9)の第3章コンクリートの透水試験方法, 3.3インプット法を参考に試験を実施した。試験条件は、水圧1.0MPa、加圧時間は24時間とした。

加圧終了後、試験体を円柱軸方向に割裂し(写真-8)、水が浸透した場合には面積画像解析ソフトにて浸透面積を測定することとした。また、拡散係数の算出は、測定



写真-9 試験体割裂断面の一例 (J-1)

表-8 透水試験結果

試験体	種別	負荷条件	試験結果
S-10	複合部	無負荷	水の浸透無し
S-11			水の浸透無し
S-12			水の浸透無し
S-1		定点疲労	水の浸透無し
S-2			水の浸透無し
S-3		凍結融解	水の浸透無し
J-10	接合部	無負荷	水の浸透無し
J-11			水の浸透無し
J-12			水の浸透無し
J-1		定点疲労	水の浸透無し
J-3			水の浸透無し
J-7		凍結融解	水の浸透無し

結果をもとに、式(3)により行うこととした。

$$\beta o^2 = \alpha \cdot (D_m^2 / (4t \cdot \xi^2)) \quad (3)$$

ここに、 βo^2 ：拡散係数 (mm^2/s)

D_m ：水の浸透深さ (mm)

t ：水圧を加えた時間 (s) ($t=86400$)

α ：水圧を加えた時間に関する係数 ($\alpha=130.5$)

ξ ：水圧の大きさに関する係数 ($\xi=1.018$)

(3) 透水試験結果

試験体を円柱軸方向に割裂した一例を写真-9に、透水試験結果を表-8に示す。複合部および接合部の各負荷条件に対して各3体の透水試験を実施したがすべての試験体において透水無しの結果となった。これにより、防水性能に関し100年対応での性能を満足しているものと判断できる。

8. まとめ

UHPFRCの優れた遮水性能に着目し、プレキャストPC床版上面にあらかじめ防水層として工場製作時に一体化する複合床版について、橋梁の設計供用期間と同じ100年の設計耐用期間におけるUHPFRCの防水性能や床版コンクリートとの一体性を実験的に検証した。実験ではUHPFRCの最外縁に作用する曲げ引張応力度を 4N/mm^2 と設定し、200万回の定点疲労試験を100年対応の載荷条件とした条件下において以下のことが明らかとなった。

- 1) UHPFRCの最外縁に 4N/mm^2 の曲げ引張応力度を200万回繰り返し作用させた結果はいずれの試験体においてもひび割れの発生は無かった。
- 2) 定点疲労試験を実施した後の建研式引張強度試験結果は、全ての試験体で母材破壊となり複合部・接合部共に100年相当の負荷を与えた後もコンクリートとUHPFRCは一体性を確保できるものと判断できる。
- 3) 定点疲労試験と凍結融解試験を実施した後の透水試験結果はいずれの試験体も透水無しとなり、100年対応の防水性能を有していると判断できる。

謝辞

本検討における各種性能照査試験は(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所で実施したものである。関係者には紙面をお借りして謝意を表します。

参考文献

- 1) 三田村浩：限りある橋梁を守るため、床版防水はどうあるべきか—高機能セメント系防水工法—、防水ジャーナル, pp.65~70, 2019.6
- 2) 三田村浩, 今井隆, 松井繁之：道路橋床版補修に適する超緻密高強度繊維補強材料の開発, 土木学会第70回年次学術講演会, pp.59~60, 2015.9
- 3) 赤尾駿太朗, 芹沢尚一, 平栗一哉, 東田典雅, 三田村浩：J-ティフコムを用いた床版上面補修による延命化対策 検証編, 土木学会第75回年次学術講演会, CS8-23, 2020.8
- 4) 今野久志, 三田村浩, 植田健介, 松本高志：超緻密高強度繊維補強コンクリートで上面補修したRC床版の押抜きせん断試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, pp.787~792, 2023
- 5) 三田村浩, 今野久志, 松本高志, 松井繁之：UHPFRCで補修したRC床版の押抜きせん断耐荷力の評価法, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, pp.793~798, 2023
- 6) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2017.11
- 7) (一財)災害科学研究所, J-ティフコム技術研究会：超緻密高強度繊維補強コンクリートの設計・施工マニュアル(案), 令和4年6月
- 8) 塩畑英俊, 平野勝彦, 川西貴士, 佐々木一成：防水層にUFCを用いた複合プレキャストPC床版の開発, コンクリート工学テクニカルレポート, Vol.59, No.7, 2021.7
- 9) 村田二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計, 技報堂出版, 2002

(2024年7月12日受付)