

論文

UHPFRC と部分防水層を併用したプレキャスト PC 床版に関する実験的検討

十川貴行*, 一宮利通*, 永島史晟*, 高松寛子*, 柳井修司**, 新井崇裕***

*修(工), 鹿島建設(株), 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

**博(工), 鹿島建設(株), 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

***博(工), 鹿島建設(株), 土木管理本部 (〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8)

プレキャスト PC 床版を用いた床版取替工事における防水層の施工の省力化を目的として, 床版の上層を緻密性の高い UHPFRC とすることで, 防水層を同床版の接合部のみに限定した構造を考案した. 本研究では, まず, 接合部における防水層と UHPFRC からなる床版上層部の一体性について, 引張接着試験およびせん断接着試験で検証した. 次に, 接合部を含む本床版を模擬した試験体に対して輪荷重走行試験を実施し, 100 年相当以上の載荷に対して, UHPFRC と床版, および接合部における防水層が一体となって挙動し, 十分な疲労耐久性と防水性が期待できることを確認した.

キーワード: 部分防水層, UHPFRC, プレキャスト PC 床版, 輪荷重走行試験

1. はじめに

現在, 国内の道路橋床版の取替工事においては, 高耐久化と施工中の工事規制を最小限化するために, 事前に工場で製作されたプレキャスト PC 床版が多く採用されている. 道路橋床版は, 舗装からの水や凍結防止剤が侵入することによる劣化を防止するために, 床版上面へ防水層の設置が定められている¹⁾. 防水層は, 床版設置後, 舗装を行う前に施工されるが, 天候条件に作業の可否が影響されるため, 工程遅延の要因となることがある. 加えて, 従来の防水層は経年による劣化が生じるため, 一定期間での取替が必要である点も維持管理における課題とされている. そのため, 同工事における防水層の施工数量の縮減は, 工程の確保, 短縮および維持管理性に対して有効である.

塩畑ら²⁾は, 超高性能繊維補強セメント系複合材料 (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下 UHPFRC) の遮水性能に着目し, プレキャスト PC 床版の上層を UHPFRC とし, 床版同士の接合部の間詰め材も UHPFRC とすることで, 現場での防水層施工を省略した構造を開発している.

しかしながら, 床版の接合部の間詰め材として UHPFRC を現場で打ち込むためには特殊な製造設備や施工技術が必要である. また, 一般的に UHPFRC は自己収縮が大きいことから, 接合部の鉛直打継ぎ目に目開きが生じて防水性に影響することが懸念される. このことから図-1 に示すように, 上層を UHPFRC としたプレキャスト PC 床版を, 通常の施工が可能なコンクリートか

らなる間詰め材で接合したうえで, 接合部の鉛直打継ぎ目を跨ぐ形で部分的な防水層を設置する床版構造を考案した. 本構造では, UHPFRC によって大部分の防水層を省略できるとともに, 目開きが懸念される接合部の防水性を部分的な防水層で確保できることが特徴である.

本稿では, UHPFRC と防水層の界面の接着性を引張接着試験とせん断接着試験で検証した結果, ならびに提案構造を模した実物大の床版試験体に対して輪荷重走行試験を実施した結果を示す.

2. UHPFRC と防水層の界面の接着性の検証

2.1 概要

本構造では, 間詰め部において部分的に防水層を設けるため, 床版上層の UHPFRC と防水層との接着性を確認する必要がある. そこで, UHPFRC に接着された防水層を模擬した試験体に対する引張接着試験およびせん断接

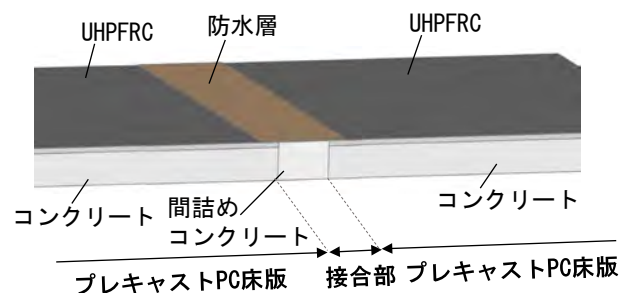


図-1 床版上層の UHPFRC と部分防水層を併用したプレキャスト PC 床版の概要

表-1 UHPFRC の配合

水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)						鋼繊維※ (kg/m ³)
	水	結合材	細骨材	収縮 低減剤	高性能 減水剤	消泡剤	
15.2	195	1287	913	25.8	32.2	6.4	236 (Vol 3%)

※繊維長 15mm, 径 0.2mm

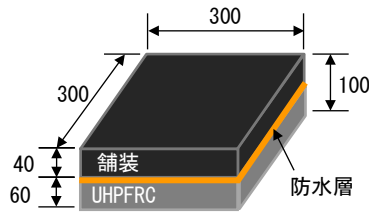


図-2 試験体の概要 (単位 mm)

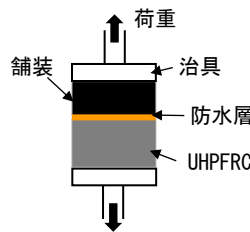


図-3 引張接着試験の概要

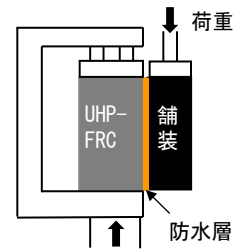


図-4 セン断接着試験の概要

表-2 試験条件

No.	ホイール トラッキング試験	温度	試験
1	-	23°C	引張接着試験 せん断接着試験
2	負荷後	-10°C	
3	負荷後	23°C	
4	負荷後	50°C	

表-3 引張接着試験の結果

No.	引張接着強度※ (N/mm ²)	規格値 (N/mm ²)	破壊面
1	1.53	0.60	防水層の破壊
2	2.25	1.20	防水層の破壊
3	1.38	0.60	防水層の破壊
4	0.25	0.07	舗装の破壊

※試験体3体の平均値

表-4 セン断接着試験の結果

No.	せん断接着強度※ (N/mm ²)	規格値 (N/mm ²)	破壊面
1	0.39	0.15	防水層の破壊
2	2.02	0.80	防水層の破壊
3	0.46	0.15	防水層の破壊
4	0.07	0.01	防水層の破壊

※試験体3体の平均値

着試験を行った。

(1) 試験体の概要

図-2 に試験体の概要を示す。試験体は道路橋床版防水便覧³⁾に準拠しており、厚さ 60mm の UHPFRC と厚さ 40mm のアスファルト舗装の間に防水層を設けたものである。表-1 に本試験体で使用した UHPFRC の配合を示す。UHPFRC は、エトリンサイト生成系 UHPFRC であり、膨張性を有する混和材を含有する結合材に加えて、収縮低減剤を添加したもの⁴⁾を用いた。試験時の UHPFRC の圧縮強度は 191N/mm²であった。アスファルト舗装には、最大粒径 13mm の橋梁レベリング層用混合物 (改質 II 型) を用いた。防水層は、NEXCO 各社で定められているグレード II⁵⁾の基準を満たしたアスファルト系シート材によるものを用い、UHPFRC をグラインダーで研掃したうえで UHPFRC の材齢 127 日後に設置した。なお、防水層は、部分的に防水層を施工する際の施工性を考慮して、シート材によるものを選定した。

(2) 試験概要

道路橋床版防水便覧³⁾を参考に、引張接着試験とせん断接着試験を実施した。引張接着試験では、図-3 に示すように試験体から φ100mm のコアを取得し、コアの上下面に治具を接着してコアに引張力を作用させ、破壊に至るまで載荷した。同試験で得られた最大荷重から式(1)で引張接着強度 F_b を算出した。

$$F_b = T_b / A_b \quad (1)$$

ここで、 F_b : 引張接着強度 (N/mm²)、 T_b : 最大荷重 (N)、 A_b : 接着面積 (mm²)、である。

せん断接着試験では、100×100mm の試験片を切り出し、図-4 に示すように UHPFRC 側を固定した状態で防

水層にせん断力を作用させ、破壊に至るまで載荷した。同試験で得られた最大荷重から式(2)でせん断引張強度 F_s を算出した。

$$F_s = P_s / A_s \quad (2)$$

ここで、 F_s : せん断接着強度 (N/mm²)、 P_s : 最大荷重 (N)、 A_s : 接着面積 (mm²)、である。

各試験は、表-2 に示すように無負荷での 23°C 環境に加え、ホイールトラッキング試験で負荷を与えた後における -10、23、50°C 環境としたケースについても実施した。なお、ホイールトラッキング試験³⁾とは、試験体上面に 686±10N の輪荷重を 42±1 回/分の速さで 120 分間往復させて負荷を与える試験である。

2.2 試験結果

引張接着試験とせん断接着試験の結果を表-3、4 にそれぞれ示す。同表には、23°C、-10°C は道路橋床版防水便覧³⁾より、50°C は舗装施工管理要領⁵⁾より引用した規格値も併記している。全ての検討ケースにおいて、引張接着強度およびせん断接着強度は、規格値を満足した。また、ホイールトラッキング試験後の 50°C 環境の引張接着試験では舗装の破壊であったが、それ以外では防水層自

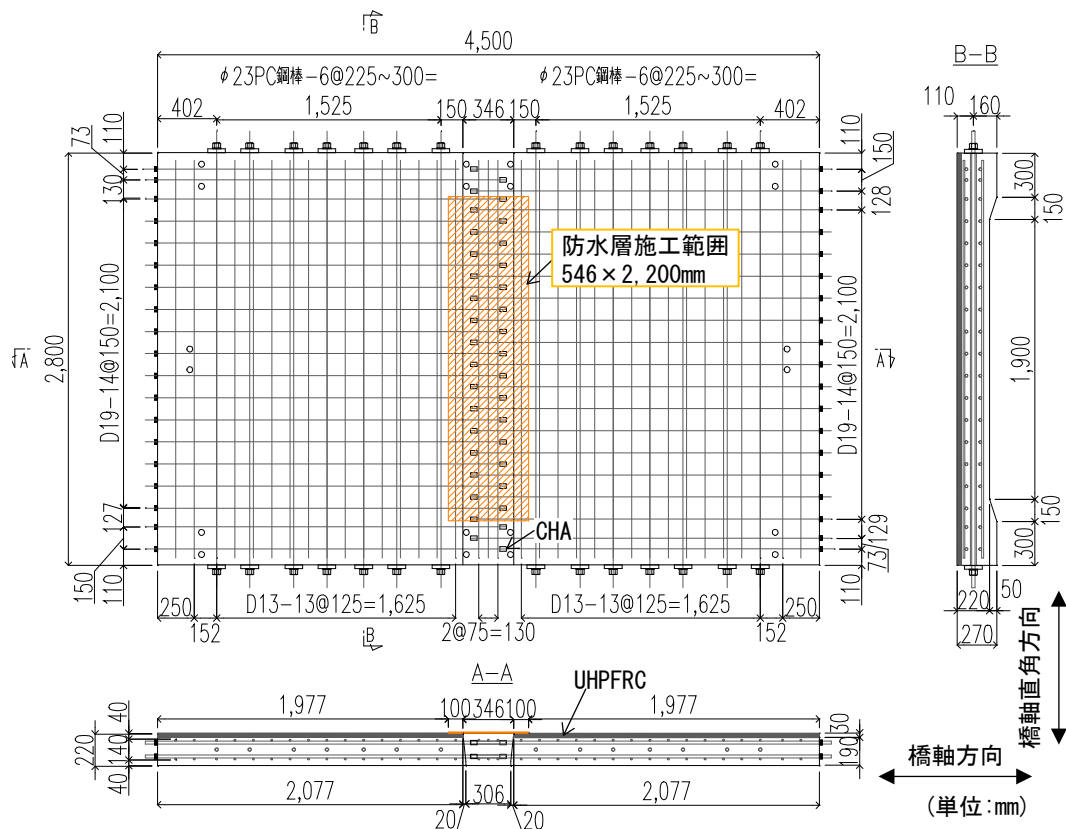


図-5 試験体の概要

体の破壊であり、いずれも防水層と UHPFRC の界面での剥離に伴う破壊は発生しなかった。なお、ホイールトラッキング試験後の 50℃環境の引張接着試験で舗装での破壊になった要因については、高温化で舗装の強度が低下したためであると考えている。以上の結果より、選定した防水層はいずれの条件、温度環境においても UHPFRC と十分な接着性を有していることを確認した。

3. 輪荷重走行試験

3.1 試験概要

接合部を含む考案した床版を模擬した実物大の試験体に対して輪荷重走行試験を実施し、同構造の疲労耐久性および防水性を検証した。

(1) 試験体の概要

図-5 に試験体の概要を示す。試験体は NEXCO 試験方法⁹⁾に準じて製作した厚さ 220mm の 2 枚の PC 床版を橋軸方向に接合した構造であり、接合後の寸法は橋軸方向 4,500mm、橋軸直角方向 2,800mm である。PC 床版には、橋軸方向に SD345 D19 エポキシ鉄筋を 150mm 間隔、橋軸直角方向に SD345 D13 エポキシ鉄筋を 125mm 間隔で配筋した。また、下層コンクリートを打ち込んだ後に、コテ均しを行い、打込み後 3 時間で上層 30mm へ UHPFRC を打ち重ねた。なお、同打重ね時間は、事前の要素実験の結果から UHPFRC が下層コンクリートに沈み込まず、両者の付着強度が確保できる時間として設定

した。UHPFRC を打ち込んだ後、20℃の環境下で 24 時間の湿潤養生を行った。材齢 6 日目において、各床版の橋軸直角方向に $\phi 23$ PC 鋼棒 (B 種 1 号) を 7 本配置し、1 本あたり 312kN の緊張力を付与することでプレストレスを導入した。UHPFRC は表-1 の配合のものをを用い、試験時の圧縮強度は 173N/mm²であった。また、下層コンクリートは呼び強度 50N/mm² で水セメント比 35% の配合のものをを用い、試験時の圧縮強度は同じ環境条件で養生したテストピースの結果から 88N/mm²であった。

PC 床版は、セラミック製の機械式定着体を用いた継手⁷⁾と間詰めコンクリートによって接合した。接合部の鉛直打継ぎ目には、事前に型枠に設けた打継用のシートによって凹凸を設けた。間詰めコンクリートは収縮補償用膨張コンクリートで、呼び強度 50N/mm²、水結合材比 35% の配合のものをを用いた。間詰めコンクリートの試験時の圧縮強度は、同じ環境条件で養生したテストピースの結果から 80N/mm²であった。間詰めコンクリートの硬化後に、接合部の鉛直打継ぎ目を跨ぐ形で、試験体上面の 546 × 2,200mm の範囲をグラインダーで研掃したうえで、2 章の検討で選定したシート系防水層を設置した。

(2) 载荷概要と計測概要

载荷概要と計測概要を図-6 に示す。実験では、試験体を橋軸直角方向に支間 2,500mm で単純支持し、橋軸方向に端横桁を用いて弾性支持した状態で、試験体中央の幅 500mm、長さ 3,000mm の範囲にベニヤ板を置き、その上に幅 500mm、長さ 200mm の鋼製ブロックを並べて

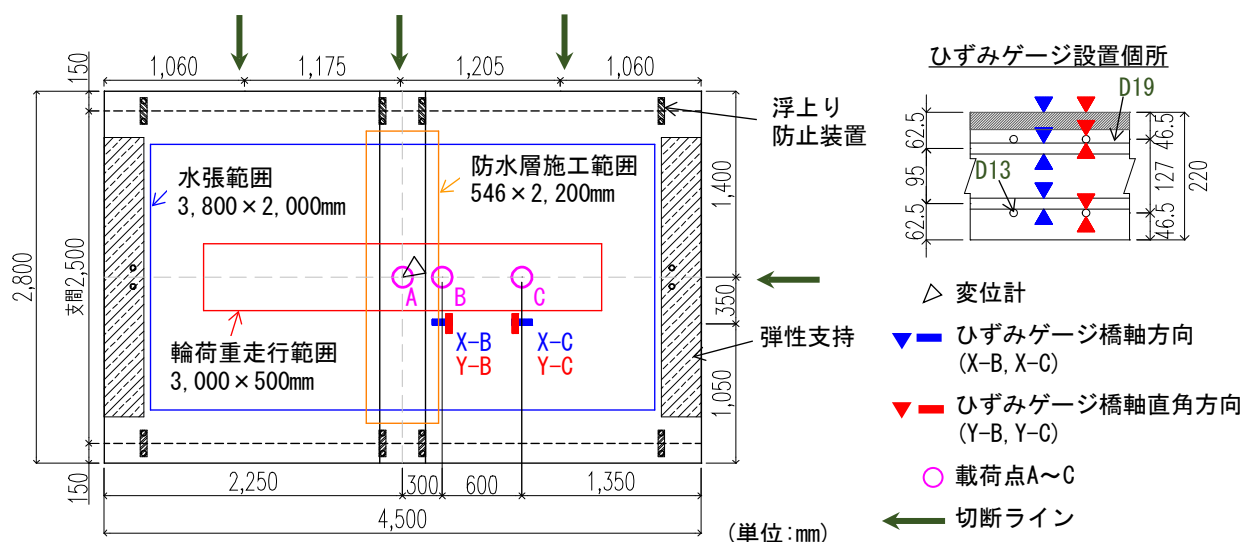


図-6 载荷概要と計測概要

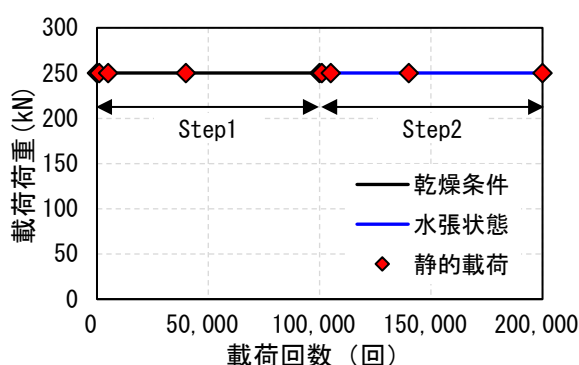


図-7 载荷ステップ



写真-1 輪荷重走行試験の様子（水張状態）

設置し、鋼製ブロック上で鉄輪を往復させることで輪荷重を繰り返して作用させた。载荷荷重ステップと载荷回数を図-7に示す。载荷は、耐用年数100年⁸⁾とされる乾燥状態での250kN×10万回の载荷を実施し（Step1）、その後、図-6に示す範囲に水を5mm程度滞水させた水張状態で、250kN×10万回の载荷（Step2）を実施した。水張状態では、漏水を観察しやすいように赤色に着色した水を用いた。写真-1に輪荷重走行試験時の様子を示す。また、一連の試験が終了した後に、図-6に示す位置で試験体の切断を行い断面の観察を行った。

なお、载荷開始前、および乾燥状態と水張状態のそれぞれで载荷回数が1千回、5千回、4万回、10万回となった時点で、図-6に示すA、B、C地点を载荷点とする静的载荷も実施した。静的载荷時には試験体のたわみを変位計で、UHPFRCと圧縮鉄筋、引張鉄筋の橋軸方向ならびに橋軸直角方向のひずみを、ひずみゲージで計測した。

(3) 引張接着試験

载荷終了後に、図-8に示す位置で引張接着試験³⁾を実施した。引張接着試験は、上面にUHPFRCを施したPC床版と防水層との界面（図中赤丸）、および接合部の間詰めコンクリートと防水層との界面（図中青丸）で実施した。同試験では、60mmの深さでφ75mmの切込みを入

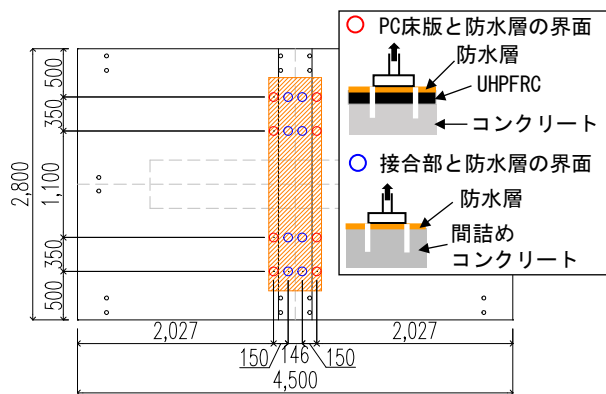


図-8 引張接着試験の実施位置

れ、上面に治具を接着して鉛直上向きに引張力を作用させ、式(1)から引張接着試験強度 F_b を算出した。

3.2 疲労耐久性の評価

図-9にStep1、2が終了した時点における試験体下面のひび割れ発生状況を示す。試験終了の段階でも橋軸直角方向のひび割れは生じているものの、橋軸方向のひび割れは少なく、床版の性能が低下する段階で見られる亀甲状のひび割れ⁸⁾は生じていないことが確認できる。なお、NEXCO試験方法⁹⁾では、水張状態における試験体下面への漏水の有無を疲労耐久性の照査項目としているが、

Step2の载荷終了時点でも、試験体下面への漏水は確認されなかった。

図-10に、輪荷重走行試験の途中で静的载荷を行った際の床版中央の活荷重たわみを示す。活荷重たわみは、床版中央（図-6中の载荷点A）での静的载荷時のたわみの最大値から、载荷終了後のたわみをそれぞれ差し引いた値である。各段階での静的载荷で計測されたたわみは、輪荷重の载荷回数に関わらず、いずれも1mm程度であった。

以上の結果より、本試験体は、100年に相当する以上の载荷に対して、十分な疲労耐久性を有しているものと評価できる。

3.3 防水性の評価

写真-2に輪荷重走行試験後の切断面の一例を示す。いずれの断面においても、試験体上面に滞水させた着色水が、接合部ならびにPC床版のコンクリートに浸透していなかった。このことから、輪荷重の繰返し载荷に対して、UHPFRCおよび接合部に施した防水層の防水性が期待できると考えられる。

3.4 UHPFRCと下層コンクリートの一体性の評価

図-11に、载荷点B、Cで静的载荷した際の図-6中におけるX-B、Y-B、およびX-C、Y-Cの断面高さ方向のひずみ分布を示す。なお、同図にプロットしたひずみは、载荷開始前、およびStep1の10万回時、Step2の10万回時に実施した、静的载荷による最大ひずみから除荷後の残留ひずみを差し引いた活荷重ひずみである。ひずみ分布は上からUHPFRC、圧縮鉄筋、引張鉄筋の結果を示している。なお、圧縮鉄筋と引張鉄筋のひずみは、上下に設置したひずみゲージの平均値を示している。

ひずみの大きさは、 $-100 \sim 100 \mu$ の範囲であり、走行前、Step1の10万回载荷後、Step2の10万回载荷後で大きく変化することはなかった。また、全ての結果において、ひずみは断面の高さ方向に対して概ね直線状に分布しており、平面保持が成立していることが分かる。加えて、写真-2に示す切断面の様子からもUHPFRCと下層コンクリートの界面における損傷は確認されなかった。以上より、繰返しの輪荷重に対して、UHPFRCと下層コンクリートの一体性が失われることなく、抵抗していることを確認した。

3.5 防水層の接着性の評価

表-5に輪荷重走行試験終了後の引張接着試験の結果を示す。外気が流入する屋内で実施しており、気温は $16 \sim 18^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。PC床版と防水層との界面、ならびに接合部と防水層との界面の引張接着強度の平均値はどちらも $1.33\text{N}/\text{mm}^2$ であった。温度条件が異なるが、全ての箇所の引張接着強度は、道路橋床版防水便覧³⁾に定められている 23°C 環境における規格値 $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ 以上で

黒線：Step1で発生したひび割れ
青線：Step2で発生したひび割れ

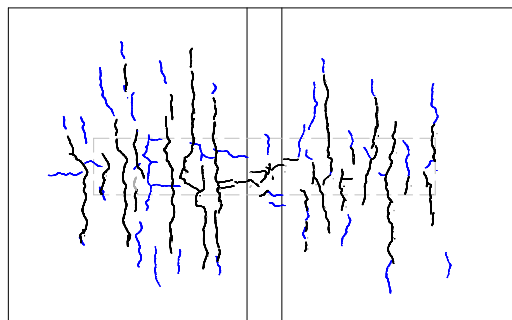


図-9 試験体下面のひび割れ発生状況

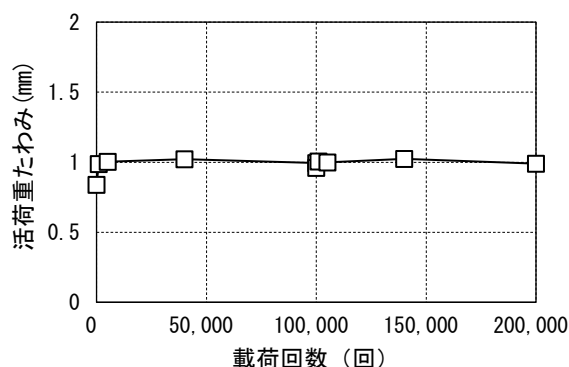


図-10 活荷重たわみの変化

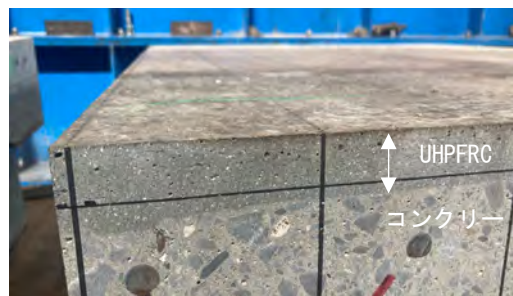


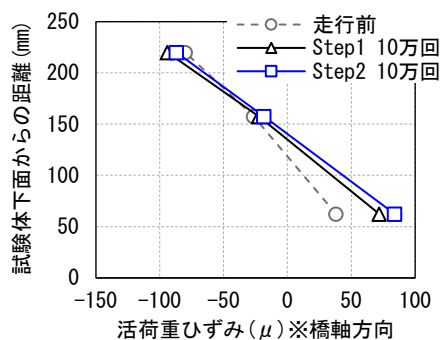
写真-2 切断面の様子

あり、いずれも破壊面は防水層であった。以上の結果から、輪荷重走行試験後においても、防水層の接着性が確保されていると評価できる。

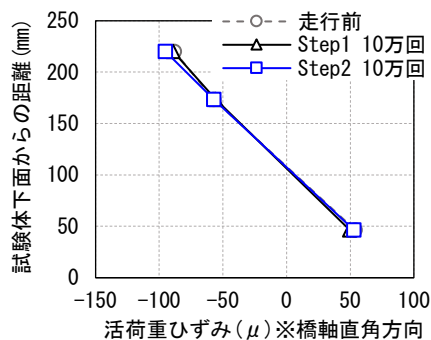
4. まとめ

UHPFRCによる上層部を有するプレキャストPC床版と、同床版の接合部における部分的な防水層を併用した床版構造を対象として、疲労耐久性および防水性能の検証を行った。以下に本検討で得られた知見を示す。

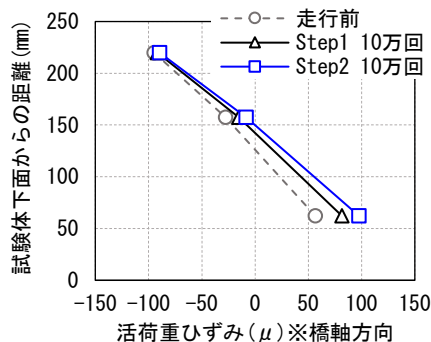
- (1) 本実験で適用した防水層はUHPFRCとの界面において、いずれの温度環境でも規格値以上の引張接着強度とせん断接着強度を有していることを確認した。
- (2) 乾燥、水張状態のそれぞれで100年に相当する以上の輪荷重走行試験を行った。その結果、試験終了時点でも試験体下面には亀甲状のひび割れは生じておら



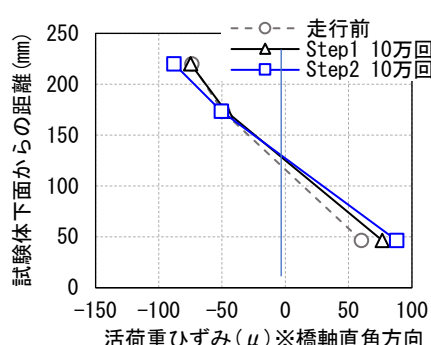
(a) X-B断面ひずみ分布 (載荷点B)



(b) Y-B断面ひずみ分布 (載荷点B)



(c) X-C断面ひずみ分布 (載荷点C)



(d) Y-C断面ひずみ分布 (載荷点C)

図-11 断面ひずみ分布

ず、たわみも安定していたことから十分な疲労耐久性を有していることが確認できた。

- (3) 輪荷重走行試験の終了時点においても、床版下面への漏水、ならびに接合部と PC 床版のコンクリートへの水の侵入が確認されてなかったことから、輪荷

表-5 輪荷重走行試験後の引張接着試験の結果

位置	引張接着強度※ (N/mm ²)	破壊位置
PC 床版と防水層の 界面	1.33 (1.10~1.48)	全て防水層の 破壊
接合部と防水層の 界面	1.33 (1.17~1.45)	全て防水層の 破壊

※8 か所の平均値. 括弧内は試験値の範囲 (最小~最大).

重の繰返し载荷に対して UHPFRC と防水層の防水性が期待できると考えられる。

- (4) 輪荷重走行試験時の途中で実施した静的载荷に対して、UHPFRC と下層コンクリートには平面保持が成立しており、両者の一体性が試験終了時まで確保されていることを確認した。
- (5) 輪荷重走行試験の終了後においても、接合部に部分的に施した防水層は規格値以上の引張接着強度を有しており、100 年以上に相当する载荷に対しても十分な接着性が保持できることを実証した。

なお、本検討で用いた防水層と同等以上の引張接着強度とせん断接着強度を有しているものであれば今回得られた知見を適用できると考えられる。また、今後試験体から取得したコアに対する透水試験を行うことで、UHPFRC と部分防水層の防水性について、定量的な詳細を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，丸善出版，2017.12.
- 2) 塩畑英俊，安川義行，本間淳史，大場誠道，佐々木一成：防水層に UFC を用いた複合プレキャスト PC 床版の実用化に向けた検証，橋梁と基礎 2021 年 10 月号，pp.31-46，2021.10.
- 3) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧，丸善出版，2007.3.
- 4) 一宮利通，福下敏至，矢野一正，中坊博：収縮低減型超高強度繊維補強コンクリートを用いた PC 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
- 5) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：舗装施工管理要領，2023.7.
- 6) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法 第 4 編，2019.7.
- 7) 高橋周斗，一宮利通，新井崇裕，古市耕輔：セラミック製定着体を用いた継手で接合された PC 床版の輪荷重走行試験，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.595~598，2020.10.
- 8) 後藤俊吾，長谷俊彦，本間淳史，平野勝彦：PC 床版の疲労耐久性評価方法の提案，構造工学論文集 Vol.66A，pp.762~773，2020.3.

(2024 年 7 月 12 日受付)