

論文 超高性能繊維補強セメント系複合材料により上面増厚された床版の押抜きせん断に関する実験的検討

佐々木 一成^{*1}・青木 峻二^{*2}・富井 孝喜^{*3}・大場 誠道^{*4}

要旨：鋼橋の RC 床版の劣化に対する補修・補強工法として超高性能繊維補強セメント系複合材料(UHPFRC)を用いた上面増厚工法が開発されている。本稿では上面増厚による押抜きせん断補強効果や疲労耐久性向上効果に着目し、その性能を確認するため、各種材料により増厚された梁の静的せん断実験、UHPFRC により増厚された床版の輪荷重走行試験を行った。その結果、上面増厚された床版はせん断耐力が増加するが増厚層の材料強度や厚さには依存しない可能性があること、UHPFRC により上面増厚した床版は鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚と比較して界面剥離や上面ひび割れ、漏水に対する抵抗性が高いことが確認された。

キーワード：上面増厚, UHPFRC, 押抜きせん断, 輪荷重走行試験

1. はじめに

鋼橋の RC 床版の劣化に対する補修・補強方法のひとつとして、鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete : 以下, SFRC) による上面増厚工法が採用されている。SFRC は粗骨材を含んでおり、混入している鋼繊維の長さが 30mm 程度であることから 50～60mm 程度で増厚されている。そのため、床版重量増による桁の補強や路面の擦り付けが必要になるなどの課題もある。また、施工目地からの水の侵入や SFRC 層の剥離などの再劣化が散見されており、更新が必要となっている。そこで、近年、SFRC と比べて高強度・高靱性かつ緻密で物質移動抵抗性に優れた超高性能繊維補強セメント系複合材料(Ultra High Performance Fiber Reinforced Cement composite : 以下, UHPFRC)により床版厚さを大きく増加させることなく補強する工法が開発されている。UHPFRC は一般的に粗骨材を含まず、混入している鋼繊維の長さは 15mm 程度以下であるため、30mm 程度の厚さであっても増厚施工が可能である。また、緻密な材料であるとともに繊維の架橋によりひび割れ幅の拡大を抑制することができることから、床版コンクリートへの水や塩化物の侵入を抑制し、コンクリートの土砂化防止などが期待されている。付着性能も高いことから SFRC で課題となっている界面剥離に対しても優位であると考えられる。

本検討では鋼橋の RC 床版を対象とし、UHPFRC を用いて上面増厚した床版の押抜きせん断補強効果を検証するため、増厚した梁の静的せん断載荷実験を実施した。また、同様に増厚した床版の輪荷重走行試験を実施し、疲労性能を確認した。

2. 本検討対象の UHPFRC を使用した上面増厚構造

本検討の対象とした上面増厚工法の概要を図-1 に示す。本工法は劣化した既設 RC 床版上面を切削した後ショットブラストにより研掃し、コンクリート面を湿潤状態に保ったうえで、UHPFRC を 30mm 程度の厚さで打ち継ぐことにより補強することを想定している。本工法に使用する UHPFRC の配合を表-1 に示す。ポルトランドセメント、ポゾラン材、無機粉体からなるプレミックス材、粒径 5mm 以下の骨材、急硬材、膨張材、特殊高性能減水剤、水および鋼繊維から構成され、注水から 3 時間で 24N/mm² を発現する超速硬型の UHPFRC である¹⁾。材齢 28 日で圧縮強度 130N/mm² を満足する。鋼繊維は直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2700N/mm² で 2vol.% 混入している。

施工目地は超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)をコンクリートに打ち重ねたプレキャスト床版²⁾で用いられている UFC 同士の打継方法を参考に、鋸歯形状とすることを想定している。UHPFRC の打継面は脱型時に高圧水で水洗いして細骨材および鋼繊維が見える状態とし、接着剤などを用いず湿潤状態として打ち継ぐ。

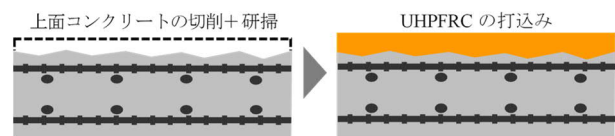


図-1 UHPFRC による床版の上面増厚

表-1 本研究に使用した UHPFRC の配合

単位量 (kg/m ³)							添加量(kg/m ³)
水	プレミックス材	細骨材	急硬材	膨張材	高性能減水剤	遅延剤	鋼繊維
210	1327	837	140	20	8～30	4～10	157

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 修(工)(正会員)

*2 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 リニューアル技術部 技術第一課 副課長 修(工)(正会員)

*3 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 リニューアル技術部 部長 (正会員)

*4 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 統括部長 修(工)

3. 上面増厚梁のせん断実験

3.1 概要

上面増厚による床版のせん断補強効果を確認するため、SFRC および UHPFRC により上面増厚したせん断破壊型の梁の載荷実験を行った。

3.2 実験方法

(1) 試験体

試験体の概要を図-2 に示す。試験体の寸法は長さ 2.5m、幅 0.5m であり、コンクリート層の厚さは 0.21m である。コンクリート上面を増厚していない梁およびコンクリート上面に材料や厚さがそれぞれ異なる増厚層を設けた梁の計 5 体を作製した。試験体の諸元を表-2 に示す。試験体 No.1 は、増厚していない RC 梁であり、試験体 No.2~5 は硬化したコンクリート上面を切削せずにショットブラストによる研掃のみ実施し、水を噴霧して湿潤状態を保ったうえで、増厚材料を所定の厚さで打ち継いだ梁である。軸方向引張鉄筋には試験体の曲げ降伏が先行しないよう高強度のねじ節 PC 鋼棒を使用した。コンクリートは設計基準強度 24N/mm^2 の普通コンクリートとした。SFRC は床版上面増厚工法に使用されている超速硬化性の材料とし、直径 0.62mm、長さ 30mm で両端にフックが付いた鋼繊維を 1.27vol.%(100kg/m³) 混入している。UHPFRC は 2 章に示した材料である。使用した材料の実験時の諸元を表-3 に示す。

(2) 載荷方法

載荷条件を図-2 に示す。載荷スパンは輪荷重の幅にあわせて 500mm とし、支点間はせん断破壊が先行するよう 2000mm とした。単調載荷とし、荷重が大きく低下した時点で載荷を終了した。

(3) 計測

試験機に取り付けたロードセルにより荷重を計測し、載荷荷重の 1/2 を作用せん断力とした。たわみは変位計により試験体中央で計測した。

3.3 実験結果

(1) 概要

実験における作用せん断力-たわみ関係を図-3 に示す。なお、図中にはコンクリート部分にせん断ひび割れが発生して荷重が低下したせん断力および最大せん断力の値を示している。また、試験体の試験終了後のひび割れ状況として試験体 No.1~3 を写真-1~3 に示す。増厚していない試験体 No.1 は一方のせん断スパン内のコンクリートのせん断破壊により荷重低下し、載荷を終了した。増厚した試験体 No.2~5 はいずれも写真-3 に示すようにコンクリート部に斜めひび割れが発生し、打ち継ぎ界面に沿ってひび割れが進展して荷重低下した(写真-3 の[1]~[2])。コンクリート部に発生した斜めひび割れは増厚層を貫通しないで、低下した荷重は再び上昇し、

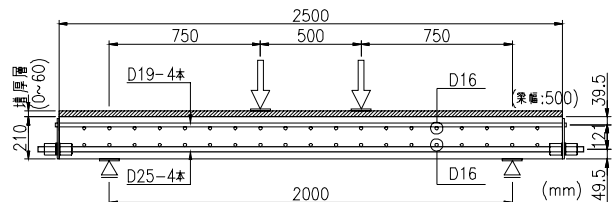


図-2 上面増厚した梁のせん断試験体

表-2 実験ケースおよび実験結果

No.	床版	増厚層		下層	せん断耐力		
	全厚 (mm)	材料	厚さ (mm)	厚さ (mm)	下層 破壊時 ^{※1} V_{exp} (kN)	計算値 ^{※2} V_{cal} (kN)	比 V_{exp} / V_{cal}
1	210	—	0	210	105	99	1.06
2	270	SFRC	60	〃	156	119	1.31
3	230	UHPFRC	20	〃	138	107	1.22
4	240	〃	30	〃	139	111	1.18
5	250	〃	40	〃	145	115	1.20

※1 コンクリート部に斜めひび割れが発生し荷重低下した時のせん断力

※2 全断面をコンクリートとしてせん断耐力式³⁾により計算した値

表-3 使用材料の諸元

	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂ひび割れ発生強度 (N/mm^2)	引張強度 [*] (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)
コンクリート	28.7	2.55	-	23.6
SFRC	65.5	4.71	2.27	36.7
UHPFRC	148	6.75	12.4	45.9

※ 引張強度は JCI-S-002 切欠きはりを有した繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法によって推定した引張軟化曲線より算出した。

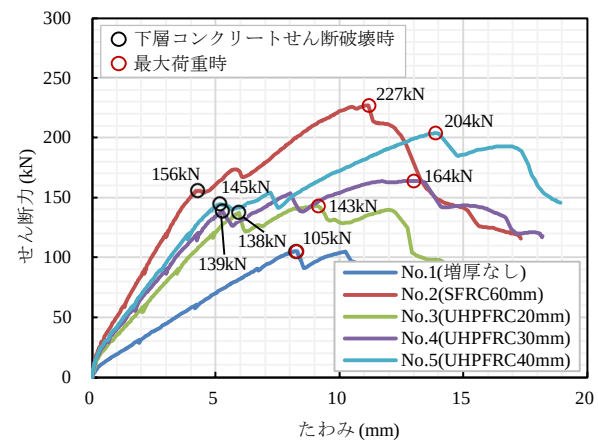


図-3 作用せん断力-たわみ関係

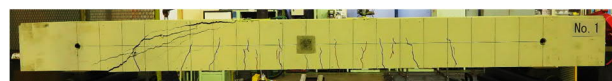
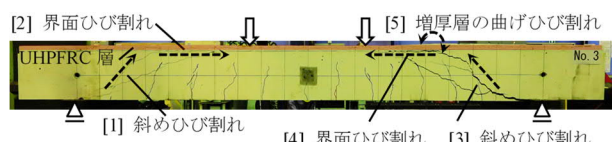


写真-1 増厚なし試験体 (No.1)



写真-2 SFRC 増厚試験体 (No.2)



※ 写真中の番号は事象が発生した順番を示す。

写真-3 UHPFRC 増厚試験体 (No.3)

載荷点を挟んで反対側のせん断スパンのコンクリートもせん断破壊した(写真-3の[3])。下層コンクリートのせん断破壊後、増厚層が曲げによりせん断ひび割れの拡大に抵抗し、最終的に増厚層の曲げひび割れが拡大して荷重低下した(写真-3の[5])。増厚層にせん断ひび割れは見られなかった。

(2) 最大荷重

増厚層の厚さが大きいほど最大荷重は大きくなった。いずれも下層コンクリートのせん断破壊後、増厚層が曲げ抵抗しているため、増厚層の厚さが影響したものと考えられる。

(3) 下層コンクリートせん断破壊時荷重

増厚層の厚さが大きいほど下層コンクリート部のせん断破壊時の荷重は大きくなった。下層コンクリートがはじめにせん断破壊した時点で、増厚層はせん断破壊していない。そこで、全断面をコンクリートとしてせん断耐力式³⁾により計算されるせん断耐力を算出し比較した。計算結果を表-2に示す。今回のケースでは増厚していない試験体 No.1 のせん断耐力の実験値と計算値はほぼ同等であった。一方、増厚した試験体では、下層コンクリートがせん断破壊したときのせん断力は計算値よりも高く、増厚により下層コンクリートのせん断耐力が2割程度向上しているといえる。しかし、増厚層の材料や厚さによる大きな差は見られず、下層コンクリート上面が増厚層によって拘束されることによる効果と考えられる。

以上より、せん断破壊型とした上面増厚コンクリート梁は下層コンクリートのせん断破壊が先行することがわかった。上面増厚により下層コンクリートのせん断耐力は増加するものの、増厚層の材料強度や厚さは下層コンクリートのせん断補強に直接寄与していないと考えられ、補強効果の定量的な評価にはさらなる検討が必要である。

4. 上面増厚床版の輪荷重走行試験

4.1 概要

UHPFRC を用いて上面増厚された床版の輪荷重に対する疲労性能を確認するため、輪荷重走行試験を実施した。増厚する前の床版は劣化した床版を模擬するため、あらかじめ輪荷重走行により疲労負荷を与えた床版を用いた。

4.2 実験方法

(1) 試験体

試験体の概要を図-4に示す。試験体の平面寸法は長さ 4.5m、幅 2.8m である。SFRC により補強された床版と比較するため、SFRC の増厚床版を対象に実施された既往の研究⁴⁾を参考に鉄筋配置やコンクリート強度を設定した。コンクリート部は設計基準強度 24N/mm² の普通コンクリートとした。

厚さ 220mm の RC 床版に輪荷重 250kN 走行回数 10 万回の予備載荷を実施した。予備載荷後の床版下面のひび割れ密度は 14.7m/m² であった。その後、床版上面を厚さ 10mm で切削し、ショットブラストにより研掃した。研掃後、コンクリート表面は水を噴霧することにより湿潤状態を保ちながら UHPFRC を 25mm の厚さで増厚した。実施工で管理可能な増厚最小厚さは 30mm と想定しているが、安全側に増厚層を 5mm 薄くして検証することとした。増厚後の床版の厚さは 235mm となる。

UHPFRC 増厚層には、既往の研究⁴⁾を参考に幅 500mm の軌道から 100mm 離れた位置に軌道平行方向の施工目地を設けた。UHPFRC は軌道側を先に施工し、翌日に残りの部分を施工して打ち継いだ。施工目地は三角形の高さ 50mm、間隔 50mm の鋸歯形状とし、先打ちした UHPFRC の打継面は打込み後 2 時間で脱型し、高圧水で細骨材および鋼繊維が表面に出る状態とした。

UHPFRC の表面は金ゴテを用いて平滑に仕上げ、水分の逸散を防ぐため、シートにて養生した。試験開始時における材料の諸元を表-4に示す。

(2) 載荷方法

増厚前の予備載荷および増厚後の本載荷は同一の試験機、支持条件とした。使用した輪荷重走行試験機はクランク式であり、幅 500mm の鉄輪を試験体の中心から前後 1.5m(全長 3.0m)の区間、往復させた。試験体長辺は支間 2.5m で単純支持し、短辺は H 形鋼材(H300×300)の弾性梁により支持している(図-4)。軌道には大型車後輪の接地面積と同一の 200×500mm の載荷ブロックを配置し、上面に鋼板を敷いた。載荷荷重と走行回数の関

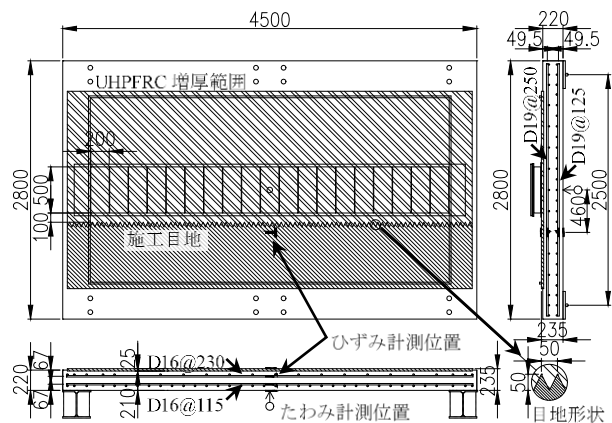


図-4 輪荷重走行試験体 (増厚後)

表-4 使用材料の諸元 (コンクリート, UHPFRC)

	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
(予)コンクリート	31.1	2.89	-	26.6
(本)コンクリート	34.7	2.69	-	26.9
UHPFRC(先)	160	9.37	10.9	47.2
UHPFRC(後)	165	9.08	10.6	46.3

※ (予):予備載荷時, (本):本載荷時, (先):先打ち, (後):後打ちを示す。

係を図-5 に示す。本試験では高速道路において PC 床版の供用期間 100 年に相当する負荷として提案されている $250\text{kN} \times 10$ 万回⁵⁾をひとつの目安とし、予備載荷および本載荷の載荷ステップを設定した。予備載荷では乾燥状態で $250\text{kN} \times 10$ 万回を載荷した。本載荷では乾燥状態で $250\text{kN} \times 10$ 万回を載荷した後、表面を水性ペンキで着色した水を張った状態でさらに $250\text{kN} \times 10$ 万回の載荷を実施した。その後、載荷荷重を 300kN とし、床版から漏水が観察された時点で水張を終了し、たわみが試験できない大きさになるまで載荷荷重 300kN で走行を続けた。

(3) 計測

床版の鉛直変位、鉄筋ひずみ、UHPFRC 表面ひずみを図-4 に示す位置で計測した。計測時は輪荷重を床版中央で停止させ、静的に計測した。計測した時期は図-5 のとおりで、試験体に発生したひび割れをあわせて観察した。走行回数 10 万回ごとの静的載荷では $0 \sim 250\text{kN}$ まで 50kN おきに計測した。

4.3 実験結果

(1) 概要

実験結果を図-6～8 に、実験終了後の床版上面および断面のひび割れの状況を図-9 および写真-4～6 に示す。総たわみは各ステップにおける荷重載荷時の値、残留たわみは荷重を載荷していない時の値、活荷重たわみは総たわみから残留たわみを減じた値で各載荷荷重における弾性変化分を示している。本載荷開始時の残留たわみは予備載荷終了時の残留たわみとしている。換算走行回数は式(1)により求めた。基準輪荷重を 250kN とし S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値は松井⁶⁾が提案する 12.7 を用いた。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m \times N_i \quad (1)$$

ここに、 N_{eq} ：基本輪荷重による荷重載荷回数

P_i ：輪荷重

P_0 ：基本輪荷重($= 250\text{kN}$)

m ：S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値($= 12.7$)

N_i ：輪荷重 P_i における載荷回数

最終的に下層コンクリートが押抜きせん断破壊することにより UHPFRC 層にひび割れが発生して漏水し、たわみが急増し、実験を終了している。

(2) たわみの経時変化

図-6 より、増厚後、活荷重たわみは小さくなり、増加量も小さくなった。増厚直後の残留たわみの増加は、支点と試験体のなじみなどの影響が考えられる。水張をした 20 万回以降においても増加量に大きな変化は見られなかった。換算走行回数 54 万回の漏水発生時点で押抜きせん断によるひび割れが発生し、たわみは急増した。図-7 より、増厚により剛性が回復し、その後の載荷でも補強前に比べて剛性の低下が抑制できていることが確認できる。

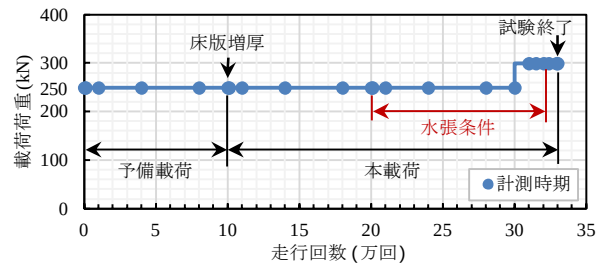


図-5 載荷ステップおよび計測時期

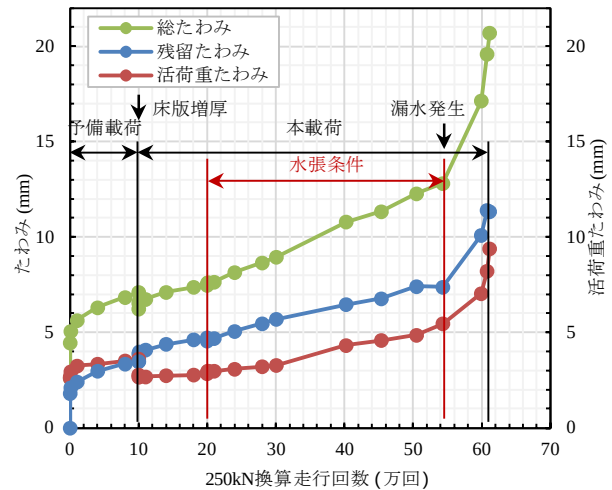


図-6 たわみ-換算走行回数関係

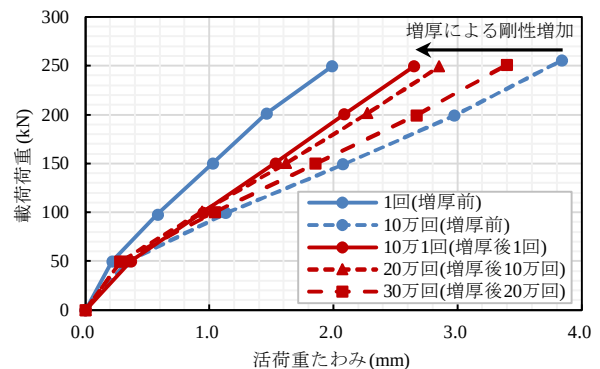
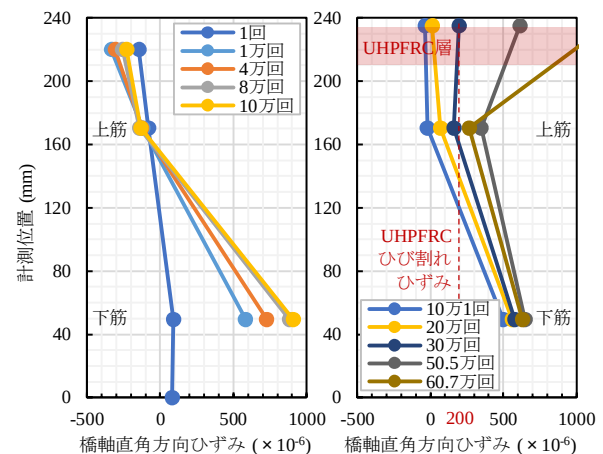


図-7 載荷荷重-活荷重たわみ関係



(a) 増厚前

(b) 増厚後

図-8 断面ひずみ分布

(3) 床版断面のひずみ分布

図-8 より、予備载荷終了時点で床版中央付近では平面保持が保たれていないと考えられる。後述するように上筋に沿ったひび割れが観察されており、この時点で進展していた可能性が考えられる。上筋付近までコンクリートを切削していないため増厚後も平面は保持されておらず、表面の UHPFRC には引張ひずみが発生している。走行回数 30 万回(増厚後 20 万回)载荷後に UHPFRC のひずみはひび割れ発生ひずみである 200×10^{-6} 程度となっている。少なくとも増厚後 250kN × 20 万回までは UHPFRC 表面にひび割れは発生していなかったと考えられる。

(4) ひび割れ状況

試験終了後の試験体切断面を観察すると、押抜きせん断による斜めひび割れが観察された。床版中央では斜めひび割れが UHPFRC 層を貫通していた。UHPFRC 界面に水張水による赤い着色やコンクリートが擦り磨かれたときに発生する泥濁物は見られず、UHPFRC にひび割れが発生した時点でコンクリート部分にはせん断ひび割れが入っており、ひび割れを伝って下面まで漏水が発生したものと考えられる。UHPFRC のひび割れ貫通位置が施工目地付近であるが、鋸歯形状に沿った目開きではなく、押抜きせん断ひび割れの到達したことにより、ひび割れたものと考えられる。

押し抜きせん断破壊した範囲において UHPFRC 層とコンクリートの界面剥離が見られた。押し抜きせん断破壊した範囲の外側では健全な状態で付着していた。また、押し抜きせん断破壊した範囲内では上筋に沿った水平ひび割れも観察された。

(5) 押抜きせん断耐力の評価

増厚された床版の押抜きせん断耐力を評価するため、松井⁶⁾が提案する RC 床版の押抜きせん断耐力算定式(式(2))により増厚前の厚さ 220mm の床版のせん断耐力を計算した。

$$P_{sx} = 2B(f_v x_m + f_t C_m) \quad (2)$$

ここに、

P_{sx} : 梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力

$B = b + 2d_d$

b : 載荷板の橋軸方向の辺長(= 200mm)

d_d : 配力鉄筋の有効高さ(= 153mm)

f_v : コンクリートのせん断強度(= $0.656f'_c{}^{0.606}$)

f_t : コンクリートの引張強度(= $0.269f'_c{}^{0.667}$)

f'_c : コンクリートの圧縮強度(= 31.1N/mm²)

x_m : 主鉄筋断面の中立軸深さ(= 75.3mm)

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ(= 40mm)

式(2)より、増厚前の床版の押抜きせん断耐力 $P_{sx}=489\text{kN}$ と計算される。

載荷荷重 $P=250\text{kN}$ として載荷荷重せん断強度比と換

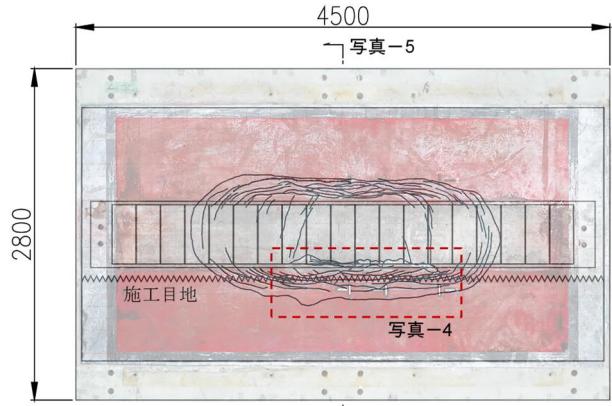


図-9 床版上面 UHPFRC のひび割れ



写真-4 施工目地部のひび割れ状況

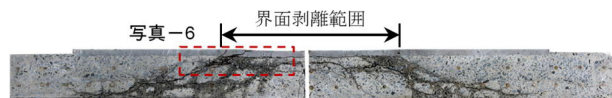


写真-5 床版断面のひび割れ状況

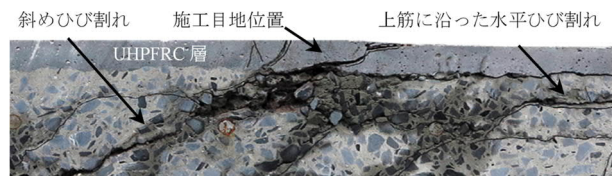


写真-6 床版断面のひび割れ状況(拡大)

算走行回数の関係を図-10 に示す。コンクリート部分に水の侵入がない乾燥状態を前提とした場合、松井⁶⁾が提案する RC 床版の S-N 曲線(式(3))と実験値はほぼ同等であり、増厚による押抜きせん断に対する補強効果は認められなかった。ただし、水張状態が考慮された式(4)では破壊までの走行回数が乾燥状態と比較して約 1/15 に低下すると計算される。

・乾燥状態において提案されている S-N 曲線

$$\log(P / P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (3)$$

・水張状態において提案されている S-N 曲線

$$\log(P / P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.23 \quad (4)$$

そこで水張を開始した換算走行回数 20 万回から漏水が発生し水張を終了した 44.3 万回までの 24.3 万回分の走行回数を 15 倍して換算すると、押し抜きせん断破壊するまでの走行回数は約 400 万回となる。水の影響を考慮すれば RC 床版と比べて破壊までの走行回数は大幅に改善することになり、UHPFRC の防水性能が大きく寄与しているといえる。

(6) SFRC による増厚床版との比較

SFRC の増厚床版を対象に実施された既往の研究⁴⁾の結果を基本荷重 250kN に換算し、各イベントが発生したタイミングを今回の実験結果とともに図-11 に示す。増厚補強後の開始時点を行走回数 0 としている。既往の研究⁴⁾では押抜きせん断破壊に至るまで荷重されていないため、界面剥離、漏水や上面ひび割れの発生のみを比較している。SFRC(A, B, E)は既往の研究⁴⁾で実施された SFRC 増厚による結果である。増厚前の床版の損傷度合いがパラメータとなっており、図-11 の注記に増厚前の床版下面のひび割れ密度を示す。UHPFRC は今回実施した実験で計測または観察された結果である。界面剥離、活荷重たわみ、漏水の発生、上面ひび割れの発生いずれにおいても UHPFRC の方が優れていることが確認された。既往の研究⁴⁾では施工目地から剥離が進展しているが、今回の鋸歯形状で打ち継いだ UHPFRC では 250kN × 20 万回の荷重でも界面剥離や漏水は生じておらず、鋸歯形状の施工目地が有効であったと考えられる。

5. おわりに

UHPFRC により上面増厚した床版の押抜きせん断抵抗性および疲労耐久性を検討するため、上面増厚した梁の静的せん断実験と、上面増厚した床版の輪荷重走行試験を実施した。その結果、以下のことを確認した。

- ・下層コンクリートが先行してせん断破壊を生じる。
- ・下層コンクリートのせん断ひび割れ進展に伴い、UHPFRC 層と下層コンクリートの界面にひび割れが生じる。
- ・下層コンクリートへのせん断補強効果に与える上面増厚層の材料強度や厚さの影響は小さい可能性がある。
- ・UHPFRC により上面増厚した床版は SFRC と比較して界面剥離や上面ひび割れ、漏水に対する抵抗性が高い。

以上より、UHPFRC による上面増厚工法は床版劣化の抑制に対して有効であることが確認された。一方で増厚層を厚くすることによる補強効果は大きいとはいえない。そして、床版の押抜きせん断に対する抵抗性は下層コンクリートのせん断強度に依存することから、下層コンクリートの健全度が重要となる。増厚層を厚くすることにより、下層コンクリートのせん断ひび割れ発生後の脆性的な押抜き破壊を防止する効果を高めることはできるが、下層コンクリートにせん断ひび割れが発生した状態で床版を使い続けることは安全とはいえない。今回の検討では UHPFRC の厚さ 30mm 程度の補強により脆性的な押抜きせん断破壊を防止し、コンクリートへの水の侵入を SFRC と比べて抑制できることが確認できた。SFRC に代えて UHPFRC により従来よりも薄く上面増厚することは有効であるといえる。

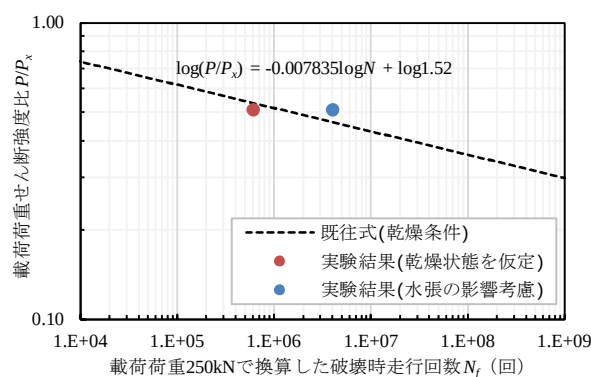
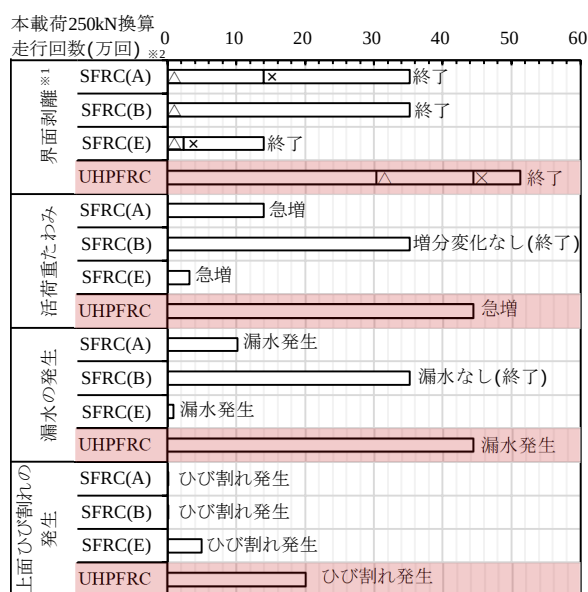


図-10 S-N 関係における実験結果



※1 △: 剥離の兆候が見られた時点, ×: 完全に剥離した時点を示す。
 ※2 各試験体は増厚前の床版下面ひび割れ密度が以下のとおりである。
 SFRC(A):11m/m², SFRC(B):12m/m², SFRC(E):11.9m/m²
 UHPFRC:14.7m/m²

図-11 輪荷重走行試験におけるイベント発生の比較

参考文献

- 1) 富井孝喜, 青木峻二, 玉滝浩司, 藤野由隆: 床版上面増厚工法用超速硬型超高性能繊維補強コンクリートの配合設定, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, V-234, 2022
- 2) 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, Vol.59, No.7, pp574-581, 2021.7
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017
- 4) 長谷俊彦, 和田圭仙, 緒方辰男: 上面増厚床版における施工目地部の劣化再現実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1345-1350, 2010
- 5) 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
- 6) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007