

論文 UHPFRC で補修した RC 床版の押抜きせん断耐荷力の評価法

三田村 浩*1・今野 久志*2・松本 高志*3・松井 繁之*4

要旨：道路橋の RC 床版は、車両の繰り返し走行によってひび割れ損傷を生じ、損傷が進むと押抜きせん断破壊に至る。この現象に対して過去より種々の補修工法が行われてきているが、その多くは補修後早期に再劣化が生じている。近年、RC 床版の補修の一手法として防水性と耐久性が著しく高い UHPFRC の一材料である超緻密高強度繊維補強コンクリート「J-THIFCOM」を用いた補修工法が行われている。本研究では、RC 床版に UHPFRC を薄層で補修した床版の押抜きせん断試験を実施し、耐荷力の向上特性とその評価式について検討した。

キーワード：UHPFRC, RC 床版, 押抜きせん断試験, 耐荷力評価式

1. はじめに

道路橋の RC 床版は、大型車両に起因する輪荷重の繰り返し走行によってひび割れ損傷が生じ、損傷が進むとコンクリートの押抜きせん断破壊に至る（写真-1）。また、床版上面から床版内部に水分が浸透すると劣化は著しく加速され、特に積雪寒冷地ではスケールや土砂化に進展することにより、有効床版厚が減少して疲労耐久性が大きく低下することが判ってきた。現在では架橋後 50 年以上となる橋梁の床版劣化度が急に増大する傾向を示しており、補修材料、補修工法に対して抜本的な対策を講じる必要が求められている。

このような背景から橋梁 RC 床版に対して、超緻密高強度繊維補強コンクリート（以降、UHPFRC）を用いた補修が試行されている（写真-2）。この工法は、床版上面の劣化部を除去し、薄層で床版上面全体に UHPFRC を現場打込みするもので、極めて高い劣化因子の侵入を遮断する特徴により床版の防水性能向上が図れること、輪荷重走行試験により高耐久性を有すること、実橋載荷試験により耐荷力向上が図れることなどが報告されている^{2),3),4)}。

RC 床版の破壊形態は、コンクリートの押抜きせん断破壊が支配的であり、今後、劣化損傷した床版の数がさらに急増することが考えられるため、上記補修工法の耐荷力と疲労の耐荷性の向上について評価法を定めることは重要な課題と言える。

平成 29 年の道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編 11.5 節の規定（以降、H29 道示の規定）を満足することで、RC 床版は自動車の繰り返し通行に伴う荷重に対して、設計耐久期間 100 年に相当する所要の耐久性能を満たすものとみなしてよいとされている。そこで、本研究では、



写真-1 RC 床版の押抜きせん断破壊



写真-2 UHPFRC による床版補修

H29 道示の規定を満たす RC 床版をモデル化した供試体を基準として、古い設計基準で建設された RC 床版をモデル化した供試体の上面に UHPFRC で薄層補修した床版について、RC 床版の耐荷力向上に関する基礎資料を得ることを目的に押抜きせん断試験を実施し、道路橋 RC 床版の耐荷力に与える影響に関して実験的に検討を行った。その結果に基づく耐荷力向上と床版上面の押抜きせん断耐荷力の評価式について報告するものである。

*1 (株) サンプリッジ 執行役員 博(工) (正会員)

*2 (株) サンプリッジ 工事部部长 博(工) (正会員)

*3 北海道大学大学院工学研究院 教授 Ph.D. (正会員)

*4 大阪大学名誉教授, 大阪工業大学客員教授 工博

2. 供試体および実験方法

2.1 供試体

供試体は、H29 道示の規定に準拠してモデル化した床版厚 200mm の供試体-1 と昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準拠してモデル化した床版厚 160mm の供試体-2 を作製した。この供試体-2 と同様の諸元でコンクリート硬化後に表面を WJ 研掃して水で飽和した状態で UHPFRC を打設した供試体を 3 体作製した。供試体はそれぞれ供試体-3、供試体-4、供試体-5 とした。供試体-3 は、既設床版上面の土砂化等による床版厚減少に対する補修を模擬して、供試体-2 の床版上面を 20mm 減じて作製後、UHPFRC で 20mm 補修したものである。一方、供試体-4 は供試体-2 の上面に UHPFRC を 20mm 増厚、供試体-5 は 40mm 増厚した供試体とした。供試体の配筋図を図-1 に、断面図を図-2 に示す。表-1 に供試体諸元、表-2 に供試体の材料試験結果、表-3、4 に配合を示す。圧縮強度は材齢 28 日、鉄筋は異形鉄筋 SD345 を用いた。表-5 には UHPFRC の物性値を示すが、劣化因子侵入の遮断性能が高く、高強度で流動性および材料分離抵抗性に優れる材料である。また、高気密・高強度な性能を保有しつつ、現場での連続打込みが可能な材料である。

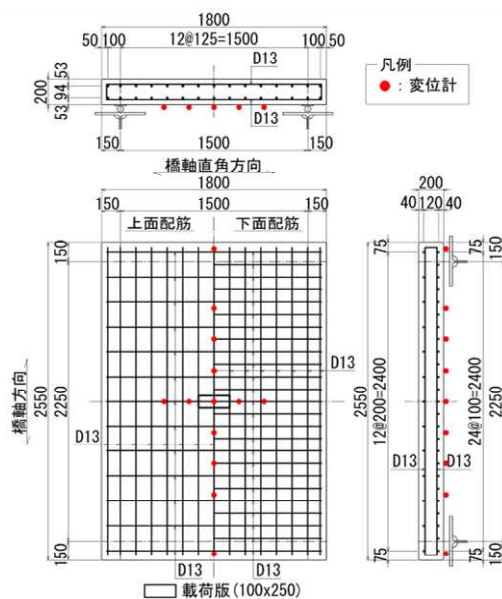


図-1 供試体配筋図 (供試体-1)

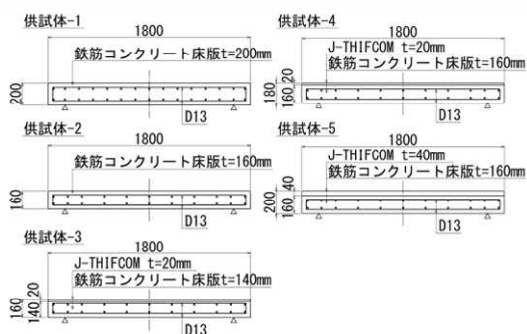


図-2 供試体断面図 (橋軸方向断面)

表-1 供試体諸元

供試体	供試体部材厚			適用示方書	配筋	
	床版厚	UHPFRC補修厚	計			
供試体-1	200mm	-	200mm	平成29年	主鉄筋 配力筋	上側 D13 ctc 200 下側 D13 ctc 100 上下 D13 ctc 125
供試体-2	160mm	-	160mm	昭和39年		主鉄筋 配力筋
供試体-3	140mm	20mm	160mm			
供試体-4	160mm	20mm	180mm			
供試体-5	160mm	40mm	200mm			

表-2 コンクリート、UHPFRC の材料試験結果

		供試体-1	供試体-2	供試体-3	供試体-4	供試体-5
部材厚 (mm)	UHPFRC	0	0	20	20	40
	コンクリート	200	160	140	160	180
	合計厚	200	160	160	180	220
圧縮強度 (N/mm ²)	UHPFRC	-	-	165	165	165
	コンクリート	28.2	23.0	23.0	23.0	23.0
静弾性係数 (kN/mm ²)	UHPFRC	-	-	39.7	39.7	39.7
	コンクリート	21.8	18.8	18.8	18.8	18.8
ヤング係数比(UHPFRC/Con)		-	-	2.1	2.1	2.1

表-3 コンクリートの配合

供試体	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)
供試体-1	25	8	58	4	47
供試体-2~5	25	8	54	4	46

供試体	単位量 (kg/m ³)				
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
供試体-1	163	281	847	965	1.717
供試体-2~5	162	302	819	981	1.854

表-4 UHPFRC の配合

単位量 (kg/m ³)	補強用繊維 5vol.%(kg/m ³)	混和材 (剤)(kg/m ³)	混和液粉体比(%)
標準配合粉体(P)	鋼製メゾ繊維 2.5vol.%	鋼製マイクロ繊維 2.5vol.%	その他の混和材(剤)
1850	290	196	200

鋼製メゾ繊維: 直径0.2mm, 長さ15mm
鋼製マイクロ繊維: 直径0.2mm以下, 長さ15mm以下

表-5 UHPFRC の物性値

項目	特性値	備考
圧縮強度	130 N/mm ²	JIS A 1108(材齢28日)
引張強度	9 N/mm ²	一軸引張試験(材齢28日)
曲げ強度	35 N/mm ²	JIS A 1171(材齢28日)
ひび割れ発生強度	6 N/mm ²	JIS A 1113(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	JIS A 1171(材齢28日)
長さ変化率 (収縮低減剤使用)	111×10 ⁻⁶	JIS A 6202(材齢32週)
塩化物イオン浸透深さ	0mm	JIS A 1171(材齢28日)
中性化深さ	0mm	JIS A 1171(材齢28日)
透気係数	0.001×10 ⁻¹⁶ m ² 以下	透気係数試験(トレント法)

2.2 実験方法

静載荷試験機を用いた実験状況を写真-3に示す。供試体は支持桁上に丸鋼を介して2辺単純支持とし、橋軸方向の端部はH鋼175×175の横梁により2辺弾性支持とした。荷重は道路橋示方書I共通編8.2活荷重の項に示される載荷面寸法の1/2とし、供試体中央に配置した橋軸方向100mm×橋軸直角方向250mmの載荷板を介して載荷した。予備載荷として、100kNを3回載荷して床版下面にひび割れを生じさせることで、全断面有効から引張領域を無効とするRC床版を再現した。

予備載荷後の実験荷重はB活荷重の軸重相当の156kN(軸重100kN×衝撃1.3×道路橋示方書に示す大型車混入率1.2)を初期値として、以後は、156kNの2倍(312kN)→3倍(468kN)→床版が破壊するまで単調増加の荷重を順次載荷した。なお荷重段階ごとに、除荷一再載荷を行い、床版下面のたわみ、ひび割れ状況、鉄筋ひずみを測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れおよび破壊性状

図-3は、荷重段階ごとの床版下面ひび割れ図を示す。100kN-3回載荷後を黒、156kN-1回載荷後を青、その後の2倍、3倍の荷重載荷後を緑、破壊時を赤で示した。実験荷重載荷前に、予備載荷100kNを3回載荷することで、床版下面に、式(1)に示す劣化度0.3~0.4程度に相当するひび割れを再現した⁵⁾。

$$D_c = \frac{C_d}{10.0} \quad (1)$$

ここに、

D_c : ひび割れ密度による劣化度

C_d : ひび割れ密度の実測値 (3.6m)

最終破壊時には、図-3に示すように、床版が押し抜かれる破壊形態となった。この破壊時の静的載荷荷重を耐荷力と定義する。なお破壊形態は、図中の赤線ハッチで示す部分が押抜きせん断破壊の状態を呈した。

3.2 押抜きせん断耐荷力の試験結果(荷重と変位)

図-4は、実験終了後の全供試体における床版支間中央に対する主鉄筋の荷重-変位関係を示す。図-5、6は、各載荷毎の最大値をプロットしたものを供試体別に示す。図-5は、供試体-2と補修を施した供試体-3、図-6は、供試体-1と補修を施した3体の荷重-変位関係を示す。これらの試験結果の最大荷重比とエネルギー吸収量を示す荷重-変位面積比の一覧を表-6に示す。

図-5、表-6より、同じ床版厚160mmの供試体-2と-3を比較すると、供試体-3は供試体-2の床版上面20mmをUHPCで置き換えた供試体であり、最大荷重比で1.25、荷重-変位面積比は1.39で耐荷力時変位が多少増加傾向を示したが、変形性能を保持したまま耐荷力とエネルギー吸収量が向上する結果となった。



写真-3 静載荷試験の実験装置

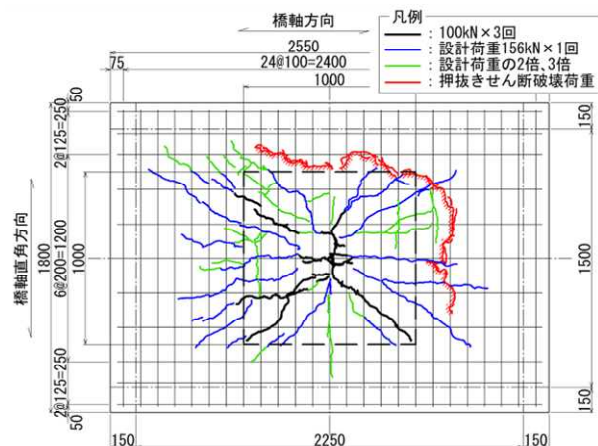


図-3 床版下面ひび割れ図(供試体-2)

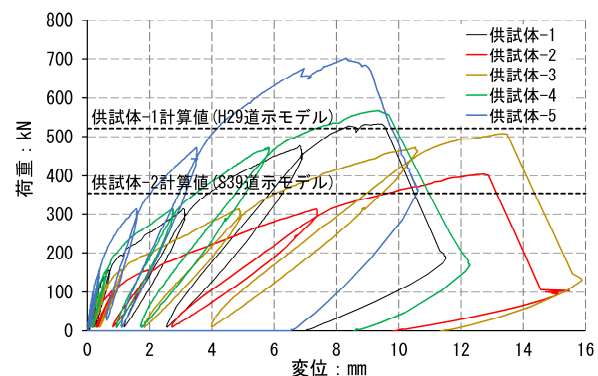


図-4 荷重-変位関係(主鉄筋支間中央)

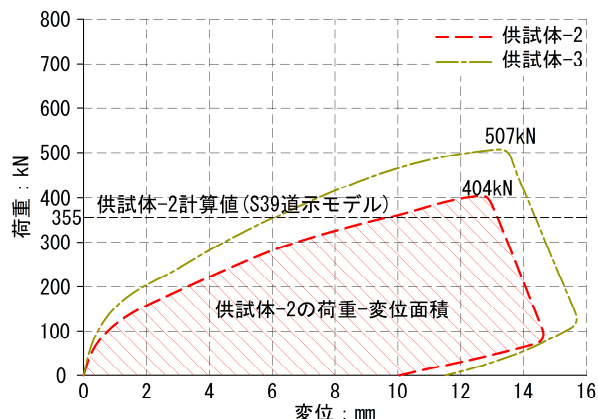


図-5 荷重-変位関係(主鉄筋支間中央)

これは、UHPFRC の高い剛性と既存コンクリートとの接着性能により、供試体-3 の全体剛性が向上したことにもと考えられる。

表-6 には、押抜きせん断試験の各供試体の最大荷重の比と、図-5 に示す荷重-変位面積の比として、供試体-1 を基準とした場合と供試体-2 を基準とした場合をそれぞれ 1.0 として示した。図-6、表-6 より、H29 道示対応モデルの供試体-1 の最大荷重 532kN に対し、供試体-3 の最大荷重は 507kN と実に 95% に近づく押抜きせん断耐荷力を示した。供試体-4 は、供試体-2 に対して、最大荷重比で 1.40、荷重-変位面積比は 1.21 を示し、耐荷力時変位は減少傾向を示した。供試体-1 との対比でも、最大荷重比で 1.06、荷重-変位面積比は 1.17 と床版厚が 180mm と薄くても、UHPFRC の効果により H29 道示対応モデル以上の耐荷力とエネルギー吸収量を示した。供試体-5 は供試体-1 と全厚は同じ供試体であり、極めて大きな押抜きせん断耐荷力とエネルギー吸収量を示した。

以上のように、荷重と変位の関係から、既設床版の上を UHPFRC で補修したモデルを模擬した供試体-4、5 は、H29 道示対応モデル以上の押抜きせん断耐荷力を有する結果を示した。同様に、エネルギー吸収量も上回る結果を示している。供試体-3 においては、H29 道示対応モデルに対して僅かながら（最大荷重比 95%）押抜きせん断耐荷力が不足していたことから、今後 UHPFRC の補修厚を増やした供試体の評価を検討したいと考える。

また、既設コンクリートとの引張接着試験状況を写真-4 に示す。試験結果では 3 回の平均で 2.70N/mm² を示し、3 箇所とも母材破壊を呈した。荷重載荷位置の近傍にも関わらず高い引張性能と接着性を示し、一体化による平面保持のもとで変形することを示唆した。

実験終了後、供試体切断による橋軸方向断面のひび割れ状況を写真-5 に示す。押抜きせん断破壊形態として、既往の知見のとおり、床版上面の載荷板端から 45 度よりも小さい角度でせん断破壊し、その後、ダウエル力により引張鉄筋に沿ったコンクリートの剥離へと進展している。床版上面の UHPFRC は鋼繊維のブリッジング効果によりやや複雑なひび割れを呈しているが無補修供試体と同様な破壊形態を示しているといえる。

4. 既往の評価法による検討

鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式は、土木学会の補修・補強指針⁶⁾に示される式(2) (松井式)を用いる。

$$P_o = f_v \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + f_t \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \} \quad (2)$$

$$f_v = 0.656f'_c{}^{0.606} \quad (3)$$

$$f_t = 0.269f'_c{}^{2/3} \quad (4)$$

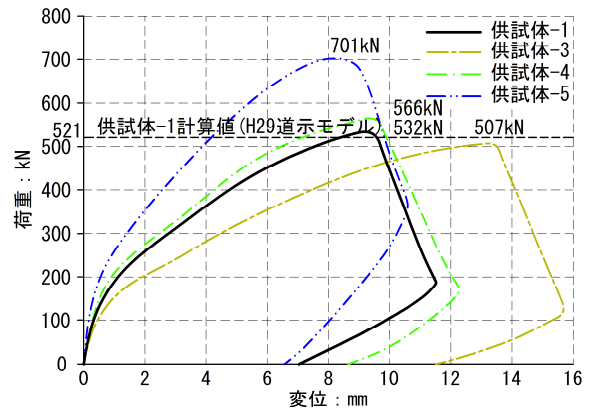


図-6 荷重-変位関係 (主鉄筋支間中央)

表-6 最大荷重比, 荷重-変位面積比

試験体	床版厚およびUHPFRC補修厚	最大荷重 (kN)	最大荷重比		荷重-変位面積比	
供試体-1	t200mm(H29道示モデル)	532.2	1.00	1.32	1.00	1.03
供試体-2	t160mm(S39道示モデル)	404.4	0.76	1.00	0.97	1.00
供試体-3	t140mm+UHPFRC20mm	507.2	0.95	1.25	1.35	1.39
供試体-4	t160mm+UHPFRC20mm	566.0	1.06	1.40	1.17	1.21
供試体-5	t160mm+UHPFRC40mm	701.4	1.32	1.73	1.22	1.26
供試体-1 (計算値)	H29道示モデル計算値	521.1	0.98	-	-	-
供試体-2 (計算値)	S39道示モデル計算値	354.5	-	0.88	-	-



写真-4 引張接着試験状況

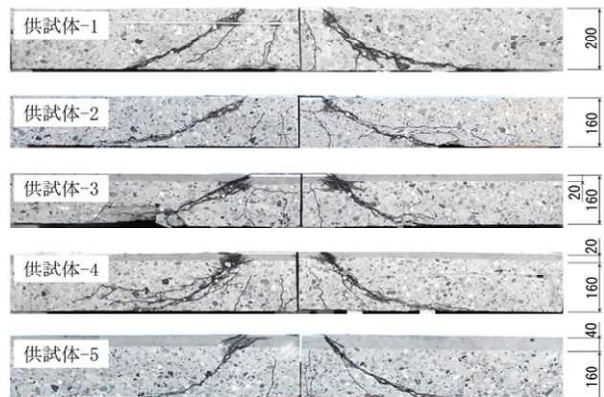


写真-5 ひび割れ断面状況 (橋軸直角方向)

ここに、

- P_0 : 押抜きせん断耐荷力 (N)
- a, b : 載荷板の主鉄筋, 配力鉄筋方向の辺長 (mm)
- x_m, x_d : 主鉄筋, 配力鉄筋に直交する断面の引張側
コンクリートを無視した時の中立軸深さ (mm)
- d_m, d_d : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ (mm)
- C_m, C_d : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋のかぶり深さ (mm)
- f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
- f'_{vc} : コンクリートのせん断強度 (N/mm²)
- f'_t : コンクリートの引張強度 (N/mm²)

式(2)を用い、単一材料で構成される供試体-1 と供試体-2 の押抜きせん断耐荷力を算出すると、実験結果に近似し妥当であると評価できる。しかしながら、この評価式は単一材料による研究から提案されているため、UHPFRC などの高強度材料を床版上面に補修する場合、合成断面としての評価が必要となる。

そこで、式(2)に高強度材料の物性値を考慮した補正を行うことで、「合成断面の押抜きせん断耐荷力の評価」が可能であるか以下に算出を試みた。

式(2)によると、RC 床版における押抜きせん断耐荷力は、第1項のコンクリートのせん断強度が負担するせん断耐荷力と第2項のコンクリートの引張強度が負担するせん断耐荷力に分けられる。今回の様に床版上面の一部に UHPFRC のような高強度材料を用いる場合のせん断耐荷力評価として、中立軸より高強度材料が薄いケースでは、第1項を高強度材料と既設コンクリートが複合したせん断耐荷力として考える。ここでの圧縮領域は、高強度材料の静弾性係数比を考慮した合成断面計算を行い求めた中立軸深さを示す。一方、高強度材料の補修厚が厚いケースでは、中立軸以深の高強度材料は考慮しないで耐荷力を算出する。押抜きせん断耐荷力の模式図を図-7に示す。

第1項の圧縮領域のせん断強度が負担するせん断耐荷力を既設コンクリートと高強度材料の厚さとして分解した式を示す。

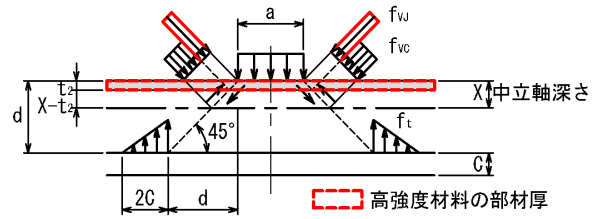
$$P_{sc} = f_{vc} \{ 2(a + 2x_m)x_d \cdot ((x_d - t_2) / x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot ((x_m - t_2) / x_m) \} \quad (5)$$

$$P_{sJ} = f_{vJ} \{ 2(a + 2x_m)x_d \cdot (t_2 / x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot (t_2 / x_m) \} \quad (6)$$

ここに、

- P_{sc} : 既設コンクリートが負担するせん断力 (kN)
- P_{sJ} : 高強度材料が負担するせん断力 (kN)
- f'_{vc} : 既設コンクリートのせん断強度 (N/mm²)
- f'_{vJ} : 高強度材料のせん断強度 (N/mm²) 式(3)引用

◆中立軸よりも高強度材料厚が薄い場合 ($t_2 < X$)



◆中立軸よりも高強度材料厚が厚い場合 ($t_2 > X$)

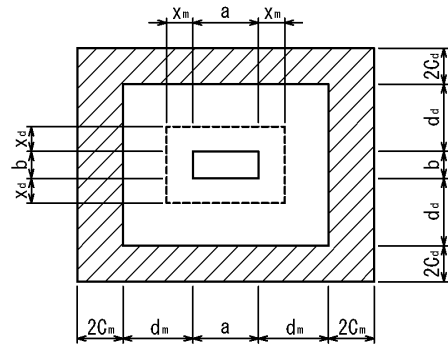
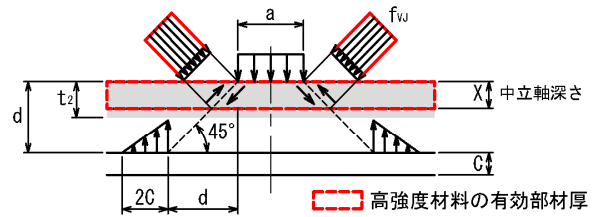


図-7 押抜きせん断耐荷力の模式図

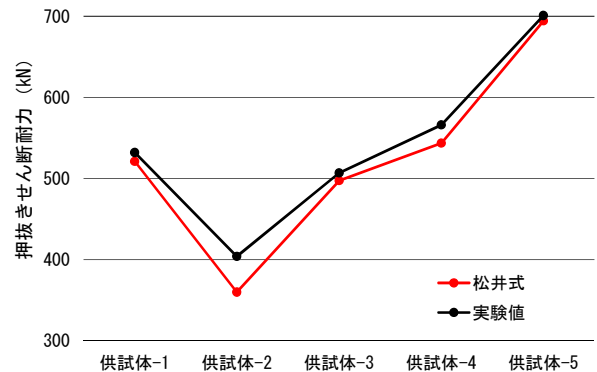


図-8 押抜きせん断耐荷力 実験値と計算値の比較

式(2)の第1項に式(5)、式(6)を適用して、「合成断面の押抜きせん断耐荷力の評価式」を式(7)に示す。

$$P_0 = f_{vc} \{ 2(a + 2x_m)x_d \cdot ((x_d - t_2) / x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot ((x_m - t_2) / x_m) \} + f_{vJ} \{ 2(a + 2x_m)x_d \cdot (t_2 / x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot (t_2 / x_m) \} + f_t \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \} \quad (7)$$

式(7)による計算結果と実験値とを対比した図および表をそれぞれ図-8、表-7に示す。UHPFRCを用いた供試体-3, 4, 5の計算値は、実験値と極めて近似した結果が得られた。ここで、供試体-5は、UHPFRC厚40mmに対し、中立軸深さは33mm程と浅く、これ以深のUHPFRCは考慮していない。

図-9に表-7の押抜きせん断耐荷力の計算値のみに着目した模式図を示す。上面にUHPFRCで薄層補修を施すことにより、図中赤線で示すとおり、第1項のせん断耐荷力が大きく上昇することがわかる。特に、供試体-3は供試体-2と同厚の160mm厚であるが、第1項のせん断耐荷力は1.84倍となる。同様に、供試体-4は2.02倍、供試体-5は2.82倍となる。これらは、床版上面に超高強度で既設コンクリートと接着して一体化挙動を有するUHPFRCを補修として用いることで、RC床版の破壊形態で支配的な押抜きせん断耐荷力の向上に大きく付与することを示している。

以上より、本研究の範囲内であるが、既設床版の上面をUHPFRCなどの高強度材料で補修したRC床版に対しても、松井式の一部を補正することで押抜きせん断耐荷力を評価できることを確認した。

5. まとめ

本検討によって明らかになった事項を、以下に示す。

- (1) 荷重と変位の関係から、既設床版の上面をUHPFRCで補修したモデルを模擬した供試体-4, 5は、H29道示対応モデル以上の押抜きせん断耐荷力を有する結果を示した。供試体-3モデルにおいては、本式を用いると、UHPFRCの置き換え厚を30mmとすることでH29対応モデルと同等以上の計算値が出ており、これについては追加試験を実施する予定である。
- (2) UHPFRCで補修した供試体の押抜きせん断破壊形態は、鋼繊維のブリッジング効果によりやや複雑なひび割れを呈するが、既往の知見のとおり載荷板端から45度よりも小さい角度でせん断破壊する破壊形態を示した。
- (3) 合成断面UHPFRCの補修厚が厚い場合、中立軸以深のUHPFRCは考慮せずして耐荷力を算出することで試験結果と近似する結果を得た。
- (4) 既設床版の上面をUHPFRCで補修した床版に対しても松井式の一部を補正することで押抜きせん断耐荷力を評価することが可能であることを示した。
- (5) 対象としたUHPFRCは、既往の研究成果^{2),3),4)}による性能に加え、既設床版を模擬した供試体の上面に薄層補修を行うことで、H29道示対応相当の耐久性を確保できることを示した。

表-7 押抜きせん断耐荷力 実験値と計算値

供試体		供試体-1	供試体-2	供試体-3	供試体-4	供試体-5	
		既設床版厚 t=160mm					
床版厚	コンクリート厚	mm	200	160	140	160	160
	UHPFRC厚	mm	-	-	20	20	40
	合計	mm	200	160	160	180	200
載荷板サイズ(軸×直角)		mm	100×250	100×250	100×250	100×250	100×250
押抜きせん断耐荷力(松井式)	第1項-1: せん断耐荷力(コンクリート分担分)	kN	250	171	39	60	-
	第1項-2: せん断耐荷力(UHPFRC分担分)	kN	0	0	275	285	482
	第2項: 引張耐荷力	kN	271	183	183	198	212
	合計	kN	521 (100%)	355 (68%)	497 (95%)	544 (104%)	694 (133%)
実験値		kN	532 (100%)	404 (76%)	507 (95%)	566 (106%)	701 (132%)
比率(耐荷力/実験値)			98%	88%	98%	96%	99%

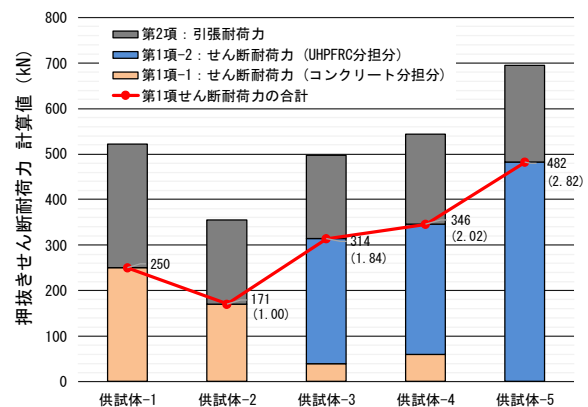


図-9 押抜きせん断耐荷力の計算値に着目した模式図

参考文献

- 1) 小野貴之, 三田村浩, 林川俊郎, 松井繁之: 積雪寒冷地におけるRC床版の疲労耐久性に関する研究, 第6回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.75-80, 2008.6
- 2) 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, pp65-70, 2019.6
- 3) 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, pp59-60, 2015.9
- 4) 赤尾駿太郎, 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
- 5) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, 第374号, I-6, pp.419-426, 1986.10
- 6) 土木学会: セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針, 150 コンクリートライブラリー, pp75-75, 2018.6
- 7) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版株式会社, pp.47-61, 2007.10