

論文

UHPFRC のせん断試験結果を用いた補修 RC 床版の 押抜きせん断耐荷力の評価法

三田村浩*, 今野久志**, 古市 亨***, 東山浩士****, 松井繁之*****

*博(工), (一財)災害科学研究所 (〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋 4 丁目 5-13)

**博(工), (株)サンブリッジ (〒001-0025 北海道札幌市北区北 25 条 4 丁目 1-26)

***博(工), (株)古市 (〒565-0832 大阪府吹田市五月が丘南 30-10)

****博(工), 近畿大学教授 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

*****工博, 大阪大学名誉教授 (〒565-0824 大阪府吹田市山田西 4-2-40-1006)

過年度に 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提案を行った。この評価では、コンクリートに対するせん断強度式を引用して UHPFRC のせん断強度を求めている。UHPFRC の材料特性はコンクリートとは異なることから、UHPFRC の二面せん断試験を行いその評価をもとに押抜きせん断耐荷力を再評価した結果について報告する。

キーワード: UHPFRC, 二面せん断試験, 押抜きせん断耐荷力

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リング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¹⁾。このような背景から橋梁の RC 床版に対して、UHPFRC (超緻密高強度繊維補強コンクリート, 登録名: J-ティフコム) を用いた補修が実施されている(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 を現場練りにより打込みするもので、極めて高い劣化因子の侵入遮断性能による床版の防水性能向上、輪荷重走行試験により高耐久性の保有、実橋載荷試験による耐荷力向上などが図れることが報告されている^{2),3),4)}。

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、筆者らは、過年度に 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提案を行った⁵⁾。この評価式では、コンクリートに対するせん断強度式を引用して UHPFRC の

せん断強度を求めている。UHPFRC の材料特性はコンクリートとは異なることから、UHPFRC の二面せん断試験を行い、その評価をもとに押抜きせん断耐荷力を再評価した結果について報告するものである。



写真-1 RC 床版の押抜きせん断破壊事例



写真-2 UHPFRC による床版補修事例

2. 二面せん断試験

2.1 せん断試験の方法

せん断強度を算出するために、二面せん断試験を実施した。なお、普通コンクリート用のせん断試験法では、写真-3に示すような試験装置を用いるが、他の繊維補強コンクリートと同様に、ひび割れ抑制、引張強度向上のために混入している鋼繊維の影響で、せん断破壊面に架橋した繊維と試験装置との摩擦や拘束が生じ、せん断強度に影響を及ぼす。さらに、本材料のせん断強度が大きいため、使用した万能試験機の最大荷重を超えることが予想されたため、文献⁹⁾に示す新たなせん断試験手法を用いた。この新たな試験法の特徴と改良点を以下に示す。また、改良したせん断試験状況を写真-4に、試験装置のイメージを図-1に示す。

- (1) 載荷位置近傍に切欠き（幅 2.5mm、深さ 20mm）を入れせん断ひび割れを固定した。
- (2) 荷重が増加する際、水平方向の摩擦力による影響で



写真-3 従来のせん断試験装置による試験状況



写真-4 改良したせん断試験装置による試験状況

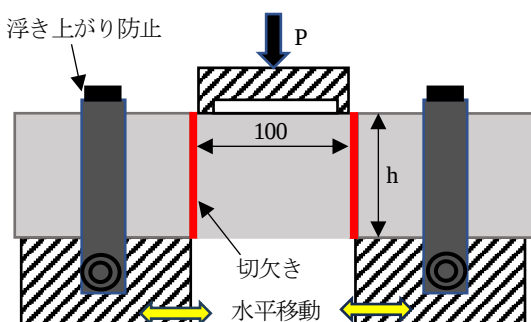


図-1 改良したせん断試験装置のイメージ

せん断強度が大きくなることが予想されるため、左右の治具を水平移動できるよう改良した。

- (3) 浮き上がり防止のための治具を追加した。

なお、鉛直変位は、写真-4に示すように、変位計をベースプレートに設置し、上部の試験治具下面に取付けたアルミ板に変位計を接触させて計測した。

2.2 試験体の形状

普通コンクリートの試験体の寸法は幅 100 mm、厚さ 100 mm、長さ 400mm が基本であるが、現場での施工厚さに合せ、UHPFRC の厚さは 20mm (Case A)、40mm (Case B)、60mm (Case C) の 3 種類とし、バラツキを考え、試験体は各 10 体作製した。写真-5 に Case B の試験体を示す。

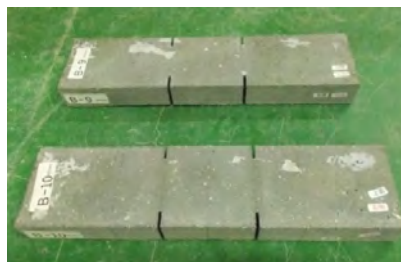


写真-5 試験体の状況 (Case B)

2.3 載荷試験手法

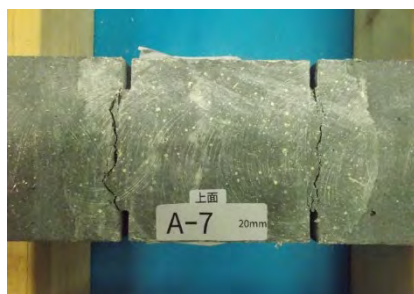
予備試験の結果、試験体 Case A、Case B、Case C の 3 種類ごとに、破壊時、破壊後の挙動が少し異なっていたため、載荷試験は最大荷重から、荷重が 20% 程度低減したときに終了し、載荷速度は 0.5mm/min とした。

2.4 載荷試験結果

二面せん断試験の最大荷重に対して、切欠きを考慮した断面積で除して求めたせん断強度の一覧を表-1 に示す。なお、試験体寸法はバラツキがあるため、事前にノギス等で寸法を実測し、試験体毎に、せん断強度を算出している。試験体 Case A、Case B、Case C のせん断強度の平均値は、それぞれ 32.1MPa、36.8MPa、42.0MPa と UHPFRC が厚くなるに伴い大きくなる傾向を示した。試験体 A の破壊状況を写真-6 に示すが、他の試験体も同様であった。

表-1 せん断強度試験結果

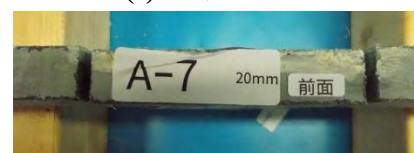
試験体のせん断強度 (MPa)					
CaseA(t=20mm)		CaseB(t=40mm)		CaseC(t=60mm)	
A-1	27.8	B-1	34.5	C-1	32.8
A-2	35.7	B-2	40.0	C-2	41.1
A-3	23.6	B-3	28.6	C-3	46.3
A-4	29.0	B-4	30.8	C-4	43.4
A-5	33.2	B-5	38.2	C-5	44.0
A-6	33.3	B-6	40.4	C-6	44.4
A-7	38.1	B-7	38.5	C-7	45.9
A-8	35.7	B-8	37.0	C-8	46.9
A-9	38.6	B-9	43.7	C-9	42.8
A-10	26.3	B-10	36.1	C-10	32.4
平均	32.1	平均	36.8	平均	42.0



(a) 試験片上面



(b) 試験片下面



(c) 試験片前面

写真-6 セン断試験による試験体の破壊状況
(試験体 CaseA)

2.5 試験結果の分析

(1) セン断強度

試験体 CaseA (10 体) のせん断強度と各試験体の平均値に対する差を表-2 に示す。せん断試験の結果、強度は 23.6MPa から 38.6MPa の範囲に有り、その平均値は 32.1MPa であった。また、平均との差の広がり大きい。

標準偏差と正規分布曲線の分析結果を図-2 に示す。縦軸は確率密度、横軸はせん断強度を示すが、正規分布内に一様に分布する状況にある。これらの傾向は試験体 Case B, Case C も概ね同様であった。

表-2 セン断強度と各試験体の平均値に対する差異

試験体 タイプ	せん断強度 (MPa)	平均 との差
A-1	27.8	-13.4%
A-2	35.7	11.2%
A-3	23.6	-26.6%
A-4	29.0	-9.7%
A-5	33.2	3.3%
A-6	33.3	3.7%
A-7	38.1	18.6%
A-8	35.7	11.0%
A-9	38.6	20.0%
A-10	26.3	-18.0%
平均	32.1	

試験体 タイプ	せん断強度 (MPa)	確率密度
A-1	27.8	0.0554
A-2	35.7	0.0621
A-3	23.6	0.0177
A-4	29.0	0.0665
A-5	33.2	0.0796
A-6	33.3	0.0792
A-7	38.1	0.0387
A-8	35.7	0.0629
A-9	38.6	0.0345
A-10	26.3	0.0405
平均	32.1	
標準偏差		4.9

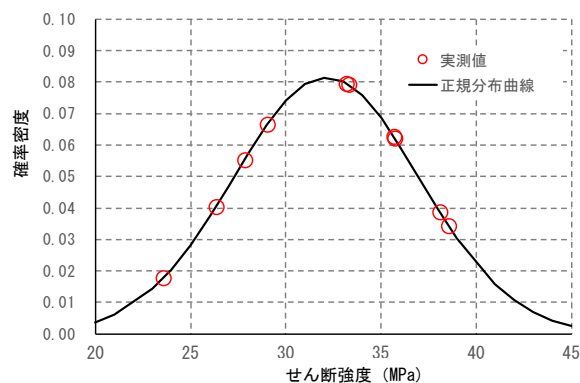
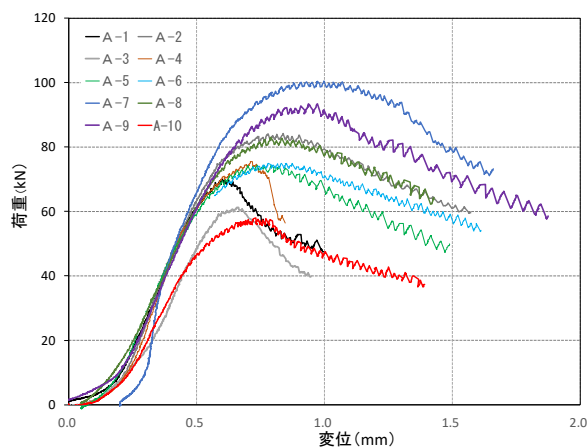


図-2 標準偏差と正規分布曲線の分析結果

(2) 荷重-変位曲線

厚さ 20mm の試験体 10 体の荷重-変位曲線を図-3 に示す。荷重が小さな場合には、初期の試験体設置状況、試験体治具のなじみ等の影響が考えられるため、主に試験体ごとの傾きを比較した。下段の表は最大荷重、せん断強度を示している。荷重が 40kN~60kN の傾きは概ね一致している。せん断強度が小さい A-3、およびせん断強度が大きい A-7 の傾きは他とは若干異なる結果となっていた。せん断強度が平均値との差が大きい試験体については荷重-変位曲線も異なる傾向となり、これらは Case B, Case C にもみられた。



試験体	単位	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10	平均
最大荷重	kN	69.9	84.2	61.3	75.5	74.4	75.0	100.4	83.1	83.1	58.1	76.5
せん断強度	Mpa	27.8	35.7	23.6	29.0	33.2	33.3	38.1	35.7	38.6	26.3	32.1
平均との差		-	-13.4%	11.2%	-26.6%	-9.7%	3.3%	3.7%	18.6%	11.0%	20.0%	-18.0%

図-3 試験体 Case A (厚さ 20mm) の荷重-変位曲線

(3) 試験結果の分析のまとめ

試験後の試験体の破壊状況を観察したが、全ての試験体 Case A, B, C において、破壊状況に明確な傾向は見られなかった。一般に、普通コンクリートにおいては、部材が厚くなるとせん断強度は小さくなる傾向にあるが、本試験では、逆の傾向が見られる (図-4)。これらの要因として、型枠に流し込む位置や流し方などによる鋼繊維の配向の影響が考えられる。また、試験体が薄い場合は、鋼繊維は平面配置となり、厚くなるに伴い、鋼繊維が斜め方向に傾くことで強度が上昇したものと推察した。

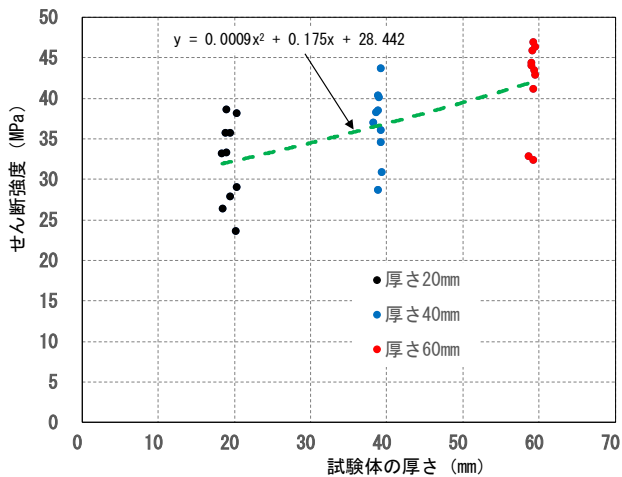


図-4 試験体の厚さとせん断強度の相関

2.6 UHPFRC のせん断強度の特性値

せん断試験結果から、厚さが違うと繊維の配向状態も異なり、せん断強度に差異が生じていると推察されるため、それぞれの厚さに対するせん断強度の特性値を設定した。せん断強度の分布を図-5に示す。

正規分布を仮定し不良率5%以下となる値を特性値として、厚さ20mm, 40mm, 60mmに対してそれぞれ24MPa, 29MPa, 33MPaと設定した。

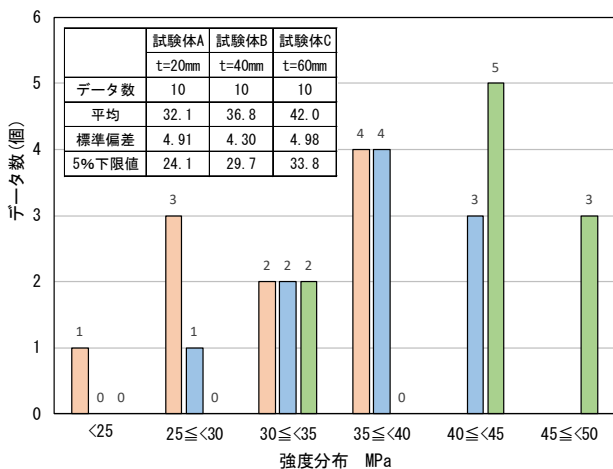


図-5 せん断強度の分布

3. 押抜きせん断耐荷力の再評価

3.1 押抜きせん断耐荷力の評価式

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⁷⁾に示される式を基本としているが、この評価式は単一材料に対するものであり、高強度材料のUHPFRCを床版上面に補修する場合、合成断面としての改良が必要となる。その模式図を図-6に示す。そこで、筆者らは過年度、高強度材料の物性値を考慮した補正を行うことで、合成断面としての押抜きせん断耐荷力を評価する(1)式を提案⁵⁾した。

本稿では、(1)式のせん断強度に前述の二面せん断試験

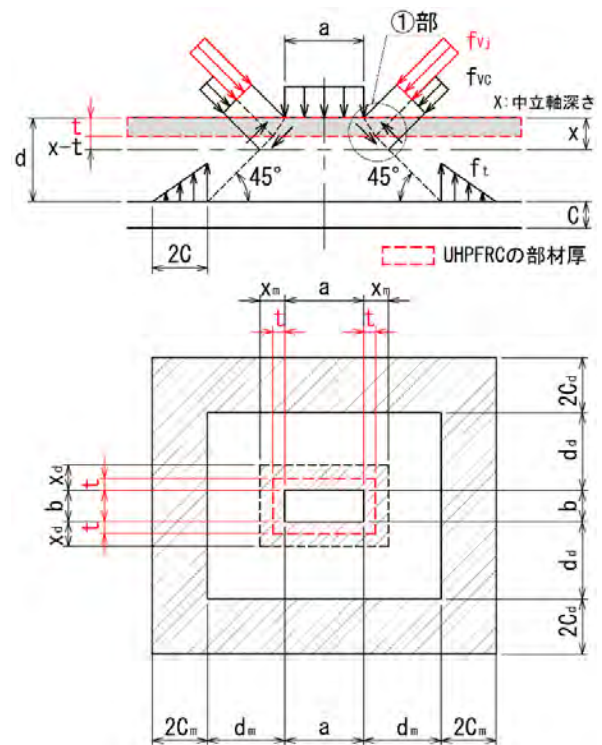


図-6 提案した押抜きせん断耐荷力の模式図

結果に基づくせん断強度を用いて押抜きせん断耐荷力を再評価した。

$$P_0 = f_{vc} \{ 2(a + 2x_m)x_d \cdot ((x_d - t) / x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot ((x_m - t) / x_m) \} + f_{vJ} \{ 2(a + 2x_m)x_d \cdot (t \cdot \cot \theta / x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot (t \cdot \cot \theta / x_m) \} + f_t \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \} \quad (1)$$

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)

t : UHPFRC の厚さ (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_{vc} : 既設コンクリートのせん断強度 (MPa)

f_{vJ} : UHPFRC のせん断強度 (MPa)

f_t : コンクリートの引張強度 (MPa)

θ : UHPFRC のせん断角度

3.2 UHPFRC のせん断角度

過年度に実施した押抜きせん断耐荷力の試験供試体を切断した断面観察状況と模式図を図-7に示す。UHPFRCのせん断角度は破壊部近辺の繊維の架橋によって複数のひび割れのなかで主方向ひび割れの計測より 57° を採用し、下層のコンクリートは標準値の 45° とした。

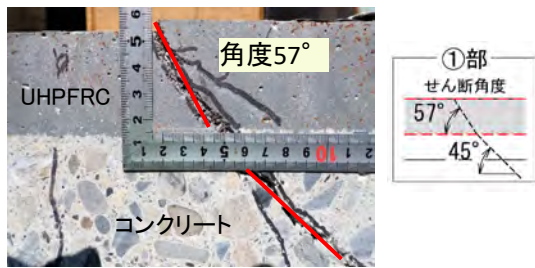


図-7 UHPFRC のせん断角度

3.3 押抜きせん断耐荷力の再評価

押抜きせん断耐荷力試験は、5種類の供試体について過年度に実施している(表-3)。供試体-1は、H29道示の規定に準拠してモデル化した床版厚200mmの供試体で、供試体-2は昭和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の供試体である。供試体-3, 4, 5の3体は、床版上面に異なるUHPFRCの条件で補修した供試体で、供試体-3は既設床版上面の土砂化を模擬して床版上面を20mm減じてUHPFRCにて20mm補修したものである。供試体-4は供試体-2の上面にUHPFRCを20mm増厚、供試体-5は40mm増厚した供試体である。

供試体-3, 4, 5について、UHPFRCの補修厚と同厚の二面せん断試験結果に基づき各試験体の厚さごとのせん断強度の平均値を用いて、(1)式による押抜きせん断耐荷力の再評価した計算値と実験値とを対比した。この結果を表-4、図-8に示す。図中、青色が再評価した計算値であり、黒色の実験値を+5%~+25%ほど上回る結果となった。この結果の要因は、UHPFRC供試体の製作時の打込み方法や敷き均しの違いが考えられる。まず、床版試験体は1800mm×2550mmの大きさで打込みしており鋼繊維の配向は一方向になりにくい。しかし、二面せん断試験に用いた試験体型枠は100mm×400mmの長方形であり、UHPFRCを流し込み後の材料は、長手方向に流動し繊維もほとんどが長手方向への配向となる。そのため、せん断面と直交する配向や配量となることから二面せん断試験ではせん断強度値が向上したものと類推される。このことを評価するためには、同じ床版から切り出した試験体で二面せん断試験を実施するなど、できるだけ同条件で試験を実施することが必要と考えられる。

次に、標準偏差と正規分布曲線の分析結果よりバラツキが大きいことを踏まえて、土木学会コンクリート標準示方書⁹⁾に示す「5章材料5.2材料物性の特性値」に記載する試験値が特性値を下回る確率が想定する不良率以下となる試験体の厚さごとの5%下限値を特性値として(1)式による押抜きせん断耐荷力の計算値と実験値とを対比した結果を図-8に赤色で示す。UHPFRCを用いた補修試験体-3, 4, 5の計算値は実験値に対して-10%~+6%の結果となった。尚、試験体が厚くなると計算値は実験値を上回る結果となるため、繊維配向等に注目した試験を実施していきたい。以上、押抜きせん断耐荷力の算定にはUHPFRCのせん断強度の評価が重要な要素の一つであ

ると類推される。

図-9には、図-8の押抜きせん断耐荷力の評価式の各項目の計算値に着目した図を示す。上面にUHPFRCで薄層で補修を施すことにより、図中赤線で示すとおり、UHPFRCの高いせん断強度により押抜きせん断耐荷力が大きく上昇することがわかる。これは、床版上面に超

表-3 押抜きせん断耐荷力試験の供試体(過年度実施)

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	上側 D13 ctc 200 下側 D13 ctc 100 上下 D13 ctc 200
供試体-3	140mm	20mm	160mm			
供試体-4	160mm	20mm	180mm			
供試体-5	160mm	40mm	200mm			

表-4 押抜きせん断耐荷力の実験値と計算値

供試体		供試体-1	供試体-2	供試体-3	供試体-4	供試体-5
床版厚	コンクリート厚	mm	200	160	140	160
	UHPFRC厚	mm	-	-	20	40
	合計	mm	200	160	160	180
UHPFRCせん断角度		度	-	-	57	57
UHPFRCせん断強度(厚さ毎平均値)		MPa	-	-	32	32
押抜きせん断耐荷力	第1項: せん断耐荷力(UHPFRC分担分)	kN	0	0	334	334
	第1項: せん断耐荷力(コンクリート分担分)	kN	250	171	45	68
	第2項: 引張耐荷力	kN	271	183	178	193
	合計	kN	521 (100%)	355 (68%)	557 (107%)	595 (114%)
	実験値	kN	532 (100%)	404 (76%)	507 (95%)	566 (106%)
耐力比率(計算値/実験値)			98%	88%	110%	105%
UHPFRCせん断強度(5%下限値)		MPa	-	-	24	24
押抜きせん断耐荷力	第1項: せん断耐荷力(UHPFRC分担分)	kN	0	0	251	251
	第1項: せん断耐荷力(コンクリート分担分)	kN	250	171	45	68
	第2項: 引張耐荷力	kN	271	183	178	193
	合計	kN	521 (100%)	355 (67%)	474 (89%)	512 (96%)
	実験値	kN	532 (100%)	404 (76%)	507 (95%)	566 (106%)
耐力比率(計算値/実験値)			98%	88%	93%	90%

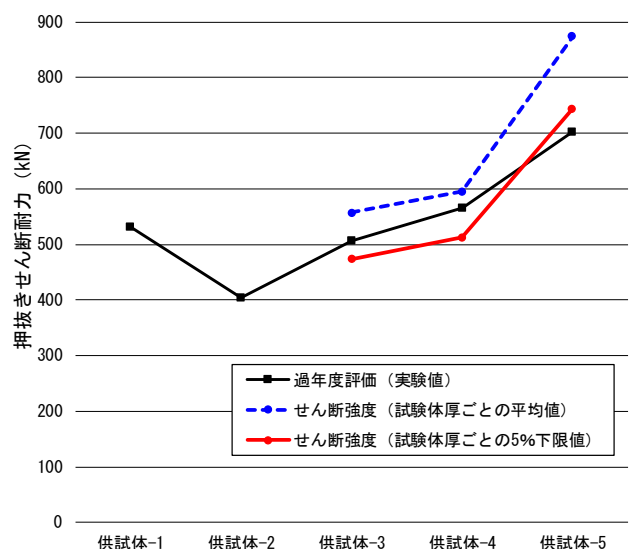


図-8 押抜きせん断耐荷力の実験値と計算値の比較

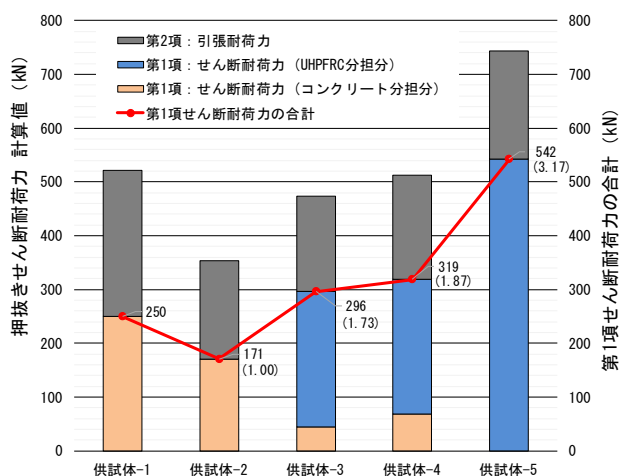


図-9 押抜きせん断耐力の計算値に着目した図

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力の向上に大きく寄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 で補修した RC 床版に対して、UHPFRC のせん断強度およびせん断角度を確認し、土木学会式⁹⁾の一部を補正することで押抜きせん断耐力を推定することが可能であることを示した。

5. 結論

本検討によって明らかになった事項を、以下に示す。

- (1) 二面せん断試験結果によるせん断強度は、バラツキが大きく、UHPFRC が厚くなるに伴いせん断強度が上昇する傾向となった。要因として、鋼繊維の配向の影響が考えられ、試験体が薄い場合は、鋼繊維は平面配置となり、厚くなるに伴い、鋼繊維が斜め方向に傾くことで強度が上昇したものと推察した。
- (2) UHPFRC の補修厚と同厚の二面せん断試験結果に基づくせん断強度の平均値を用いて、(1) 式による押抜きせん断耐力を再評価した。この結果、計算値は実験値を+5%～+25%ほど上回る結果となった。この要因は、試験体の製作時の打込みや敷き均しによる鋼繊維の配向や繊維量などが影響していると推察される。
- (3) 実験結果のバラツキと不良率を考慮する場合、二面せん断試験による試験体の厚さごとの 5% 下限値を特性値として (1) 式による押抜きせん断耐力を再評価した。この結果、計算値は、実験値に対して-10%

～+6%の結果となった。5% 下限値を用いることで実験値に近い結果となるが、試験体が厚くなると計算値は実験値を上回る結果となるため、今後は繊維配向に着目した試験を実施していきたい。

- (4) 床版上面に UHPFRC で薄層補修を施すことにより、UHPFRC の高いせん断強度により押抜きせん断耐力は大きく向上する結果となった。これは、床版上面に UHPFRC を補修として用いることで、RC 床版の破壊形態である押抜きせん断耐力の向上に大きく寄与することを示している。

今後は、UHPFRC のせん断強度を定量的に把握することを目的に、打込み方法や敷き均しによって、それに伴う繊維の配向等がどのようにせん断強度に影響を及ぼすかを実験検証し評価していく予定である。

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ー高機能セメント系防水工法ー、防水ジャーナル、pp.65-70, 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、pp.59-60, 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) 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力の評価法、コンクリート工学年次論文集 Vol.45, pp.793-798, 2023.7
- 6) Hiroshi Higashiyama, Nemkumar Banthia : Correlating Flexural and Shear Toughness of Lightweight Fiber-Reinforced Concrete, ACI Materials Journal/May-June, Vol.105, No.3, pp.251-257, 2008
- 7) 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, pp.75-75, 2018.6
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編, 2022 (2024 年 7 月 12 日受付)