

論文 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

今野 久志*1・三田村 浩*2・植田 健介*3・松本 高志*4

要旨:本研究では, RC 床版上面を 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) で補修した場合の曲げ耐力や押抜きせん断耐力の向上効果に関する基礎資料を得ることを目的に, 各種設計基準に準拠したモデル供試体を用いて静的載荷試験を実施した。その結果, 補修床版供試体は J-THIFCOM との合成効果により剛性が向上し, 設計荷重載荷時において鉄筋ひずみの低減効果を確認できた。さらに押抜きせん断耐力に関しても, H29 道示の規定を満たす RC 床版相当の耐荷性能を付与できる可能性を示した。
キーワード: 超緻密高強度繊維補強コンクリート, 疲労損傷, RC 床版, 押抜きせん断試験

1. はじめに

近年, 構造物の高経年化や交通量の増大, さらには走行車両の大型化に伴い, 道路橋の RC 床版における疲労損傷が顕在化してきている。RC 床版では, 床版上面からの水分の浸透により劣化が著しく加速されることが明らかになっており, 積雪地域では床版上面のコンクリートが凍結防止剤の散布によりスケーリングや土砂化を起すことが判ってきた¹⁾。今後も経年による RC 床版の疲労損傷の発生増加が予想されることから, 合理的かつ高耐久性を有する対策工法の開発が急務となっている。

このような背景から, 筆者らは, 床版の外的劣化因子である水や塩化物イオン等の遮断性能と高強度で流動性・材料分離抵抗性に優れた現場打設が可能な超緻密高強度繊維補強コンクリート (J-THIFCOM), 以降, 本材料) を床版上面に薄層で打設する工法を提案し, 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が図れることを報告している^{2),3),4)}。本工法をさらに広く現場適用していくためには, 補修厚さが異なる場合の耐荷力向上効果の定量的な評価手法や押抜きせん断耐力の算定手法を確立する必要があるものと考えられる。

一方, 平成 29 年版の道路橋示方書では, 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疲労に対して, 設計耐久期間 100 年に相当する所要の耐久性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, H29 道示の規定を満たす RC 床版をモデル化した供試体や, 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およびその上面の一部を本材料で置き

表-1 本材料の材料特性⁵⁾

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 以上	JIS A 1171 (材齢28日)
長さ変化率 (収縮低減剤使用時)	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	0.001×10 ⁻¹⁶ m ² 以下	透気係数試験 (トレント法)

換え, あるいは増厚した補修供試体について, 曲げ耐力や RC 床版の最終的な破壊形態である押抜きせん断耐力の向上効果に関する基礎資料を得ることを目的に静的載荷試験を実施したので, その結果について報告するものである。

2. 超緻密高強度繊維補強コンクリート

本材料の材料特性を表-1に示す。本材料の圧縮強度は, 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。塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さは, JIS A1171 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 0.001×10⁻¹⁶m² 以下であり, 床版劣化因子の遮断性能に優れることから床版防水工を不要とする性能を有している。さらに, 本材料は現場打設が可能であり打設後 1.5~2.0 時間で 24N/mm² 以上の圧縮強度を発現することから, 供用中の構造物の補修・補強においても, 早期に交通開放を可能とするなどの特徴を有するものである。

*1 (株) サンプリッジ 工事部部长 博 (工) (正会員)
*2 (株) サンプリッジ 執行役員 博 (工) (正会員)
*3 (株) サンプリッジ 執行役員
*4 北海道大学大学院 工学研究院教授 Ph.D. (正会員)

3. 試験概要

3.1 供試体

試験に使用した RC 床版供試体は、H29 道示の規定に準拠してモデル化した厚さ 200mm の供試体-1、昭和 39 年鋼道路橋示方書（以降、S39 鋼道示）に準拠してモデル化した厚さ 160mm の供試体-2、さらに供試体-2 を基準供試体とし、供試体-2 の上面 20mm を本材料に置き換えた供試体-3、供試体-2 の上面に本材料を 20mm および 40mm 増厚した供試体-4 および供試体-5 の全 5 種類である。いずれの供試体も平面寸法は橋軸方向が 2,550mm、橋軸直角方向が 1,800mm である。一例として図-1 に供試体-2 の形状寸法および配筋状況を、図-2 に全供試体の橋軸方向断面図を、表-2 に供試体諸元を示す。また、表-3 には供試体上面の補修に使用した本材料の配合を示す。供試体コンクリートの設計基準強度は、適用した設計基準に対応させて、供試体-1 が $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 、供試体-2～-5 が $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$ としたが、試験時の圧縮強度は前者

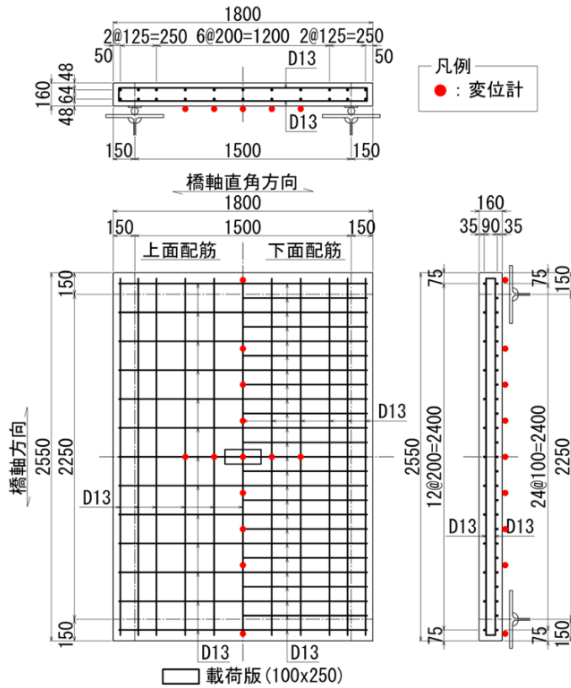


図-1 供試体-2 の形状寸法・配筋状況

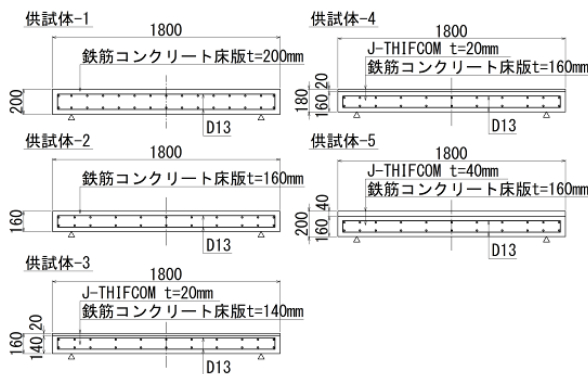


図-2 供試体断面図（橋軸方向）

表-2 供試体諸元

供試体	供試体部材厚 (mm)			適用示方書	配筋 (上段：上側，下段：下側)	
	床版厚	補修厚	計		主鉄筋	配力筋
供試体-1	200	—	200	H29	D13 ctc 200 D13 ctc 100	D13 ctc 125 D13 ctc 125
供試体-2	160	—	160	S39	D13 ctc 200 D13 ctc 100	D13 ctc 200 D13 ctc 200
供試体-3	140	20	160			
供試体-4	160	20	180			
供試体-5	160	40	200			

表-3 本材料の配合

専用ミックスセメント (P) (kg/m ³)	専用混和液 (We) (kg/m ³)	補強用鋼繊維 (2.5vol.%+2.5vol.%)		混和材 (剤) (kg/m ³)	混和液粉体比 (We/P) (%)
		メゾ繊維 (kg/m ³)	マイクロ繊維 (kg/m ³)		
1,850	290	196	196	200	16



写真-1 供試体の WJ による表面研掃状況

が 28.2N/mm^2 、後者が 23.0N/mm^2 、静弾性係数はそれぞれ 21.8kN/mm^2 および 18.8kN/mm^2 であった。また、本材料の圧縮強度および静弾性係数はそれぞれ 165N/mm^2 および 39.7kN/mm^2 である。また、本研究では同一条件で製作した供試体間での単純比較を目的としていることから、鉄筋は全ての供試体において後述する荷重の載荷面積に対応させて主鉄筋、配力筋ともに通常使用されるものより細径の D13 の異形鉄筋 SD345 を使用しており、ミルシートによる降伏強度は $f_y=384\text{N/mm}^2$ であった。

供試体の製作方法については、先ず床版コンクリートを製作し、10 日間経過後にコンクリート表面の脆弱部であるレイタンス除去を目的として、写真-1 に示すようなスピンジェット式のウォータージェット（圧力 240MPa）でコンクリート表面を研掃し、その上部に所定の厚さで本材料を打ち重ねている。試験は、本材料打設後 6 週目以降に実施している。

3.2 試験方法

試験は、油圧ジャッキを用いた静的載荷により実施している。写真-2 に試験状況を示す。供試体は橋軸直角方向の 2 辺については丸鋼を用いた単純支持とし、橋軸方向の両端部については横梁により弾性支持としている。また、供試体上面に対しても丸鋼を配置して床版の浮き上がりを防止している。橋軸方向および橋軸直角方向のスパン長は 2,450mm および 1,500mm である。

荷重の載荷面積については供試体設置用架台の制約か

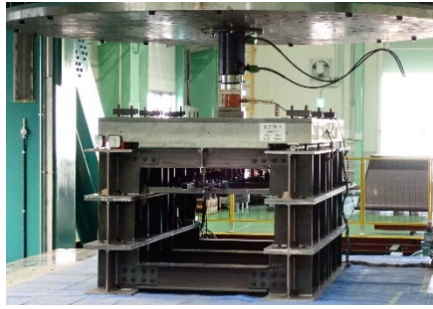


写真-2 静的載荷試験状況

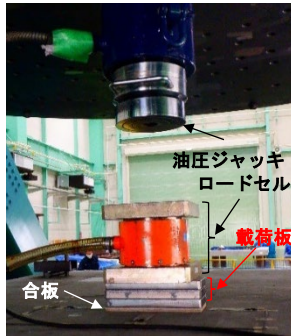


写真-3 載荷治具の設置状況

ら供試体の橋軸直角方向スパン長が実橋よりも小さいことを考慮し、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、橋軸方向に 100mm、橋軸直角方向に 250mm とした。写真-3 に供試体中央部載荷位置における載荷治具の設置状況を示す。供試体上面には載荷板端部の応力集中を緩和するために厚さ 10mm 程度の合板を、さらにその上部には厚さ 22mm の載荷用鋼板を 3 枚重ね、この上部にロードセルを設置して油圧ジャッキにより載荷を行っている。

荷重は、初期載荷として 0~100kN を 3 回繰り返し載荷した後、設計荷重として B 活荷重の輪重相当の 156kN (輪重 100kN×衝撃係数 1.3×安全率 1.2)、設計荷重の 2 倍の 312kN、設計荷重の 3 倍の 468kN を各 1 回載荷一除荷を繰り返した後、床版が破壊に至るまで載荷を行った。計測項目は、載荷荷重、床版下面のたわみ、鉄筋ひずみである。また、各載荷荷重除荷時には床版下面のひび割れ状況を記録するとともに、試験終了後には供試体を切断し、内部のひび割れを撮影している。

4. 試験結果

4.1 荷重—変位関係

図-3 には、全供試体の載荷荷重と床版下面中央変位の関係を、表-4 には試験結果一覧を示している。なお、いずれの供試体も最終破壊形態は押抜きせん断破壊であった。図中、破線の計算値は、供試体-1 および供試体-2 の材料物性値を用いて土木学会の補修・補強指針⁶⁾ に示される松井式を用いて算定した押抜きせん断耐力の計算

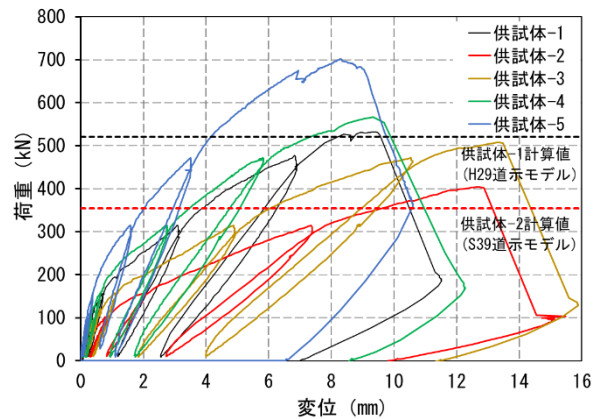


図-3 荷重—変位関係 (床版下面中央)

表-4 試験結果一覧

供試体	供試体部材厚 (mm)			最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	最大荷重比	
	床版厚	補修厚	計				
供試体-1	200	—	200	532.2	9.4	1.00	1.32
供試体-2	160	—	160	404.4	12.7	0.76	1.00
供試体-3	140	20	160	507.2	13.4	0.95	1.25
供試体-4	160	20	180	566.0	9.3	1.06	1.40
供試体-5	160	40	200	701.4	8.3	1.32	1.73
供試体-1 (計算値)	H29道示準拠モデル			521.1	—	0.98	—
供試体-2 (計算値)	S39鋼道示準拠モデル			355.0	—	—	0.88

値であり、それぞれ 521.1kN、355.0kN である。この計算値と試験結果を比較すると、試験結果の押抜きせん断耐力は、供試体-1 が 532.2kN (計算値の 1.02 倍)、供試体-2 が 404.4kN (計算値の 1.14 倍) であり、いずれの供試体も計算値に対して若干大きめの値を示しており、松井式を用いることによって押抜きせん断耐力を安全側に評価可能であるといえる。また、全供試体の荷重—変位関係についてみると、部材厚が厚くなる方が、また同じ部材厚であれば本材料で上面補修した方が荷重—変位関係の 1 次剛性および 2 次剛性の勾配が大きく、最大荷重も増加していることから床版剛性が向上していることがわかる。

次に、部材厚が 160mm と同一である S39 鋼道示準拠モデルの供試体-2 と床版上面 20mm を本材料で置き換えた供試体-3 を比較すると、最大荷重時変位は約 13mm と両者同程度であるものの、押抜きせん断耐力は前者が 404.4kN に対して、後者は 507.2kN (1.25 倍) となっている。供試体-3 の押抜きせん断耐力は、部材厚 200mm の H29 道示準拠モデルである供試体-1 の押抜きせん断耐力 532.2kN に類似 (0.95 倍) した値となっている。また、供試体-2 の上面に本材料を 20mm および 40mm 増厚した供試体-4 および供試体-5 では、最大荷重時変位は供試体-1 と同程度の 9mm 前後の値であるものの、押抜きせん断耐力は、部材厚が 180mm の供試体-4 が供試体-1 のそれを

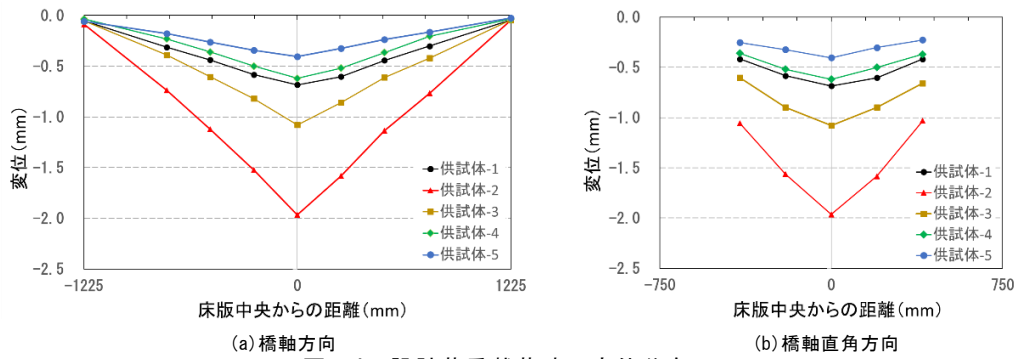


図-4 設計荷重載荷時の変位分布

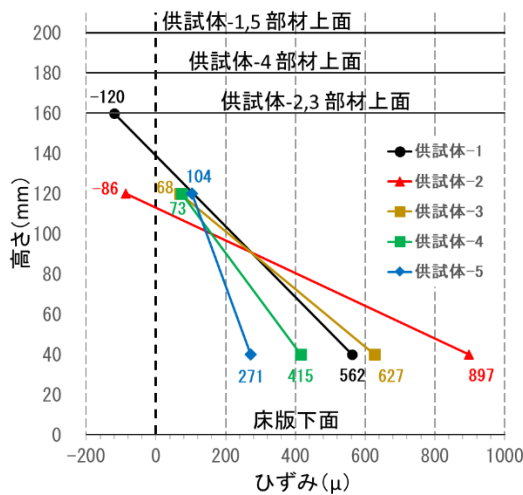


図-5 設計荷重載荷時の主鉄筋ひずみ

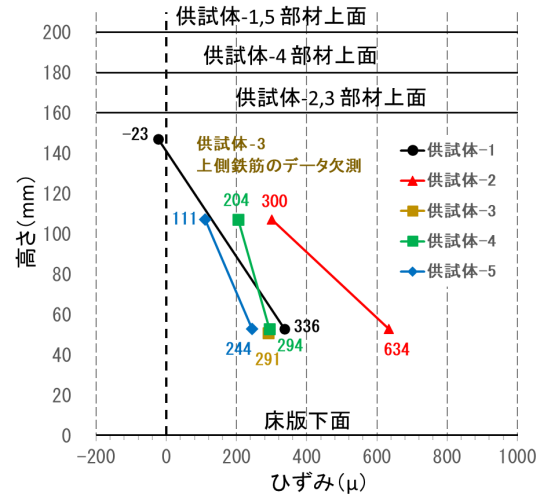


図-6 設計荷重載荷時の配力筋ひずみ

上回る 566.0kN (供試体-1 の 1.06 倍), 供試体-5 では 701.4kN (同 1.32 倍) となっており, 本材料で上面補修することによる押抜きせん断耐力の向上効果が確認できる。

図-4 には, 設計荷重 (P=156kN) 載荷時の橋軸方向および橋軸直角方向の供試体中央断面における変位分布を示している。(a) 図の橋軸方向を見ると, いずれの供試体も床版中央を最大値とする三角形の変位分布を示している。(b) 図の橋軸直角方向では, 床版の剛性が最も小さい供試体-2 では, 床版中央を最大値とする三角形に近い変位分布となっているものの, そのほかの供試体については床版の剛性に対応して中央の変位が小さくなり, 放物線状の滑らかな変位分布性状を示している。設計荷重載荷時以降の各載荷荷重段階においても橋軸および橋軸直角方向ともにほぼ同様の変位分布性状を示していた。

4.2 荷重—鉄筋ひずみ関係

図-5 および図-6 には, 設計荷重載荷時の供試体中央の主鉄筋および配力筋の上縁・下縁鉄筋ひずみを, 表-5 には供試体-1 あるいは供試体-2 の引張鉄筋ひずみを 1.0 とした場合の主鉄筋および配力筋のひずみ比を示している。図のひずみ値より, 主鉄筋および配力筋はいずれの供試体も設計荷重載荷時には弾性範囲内にあることがわかる。

表-5 設計荷重載荷時の下縁鉄筋ひずみ一覧

供試体	供試体部材厚 (mm)		計	設計荷重載荷時 下縁鉄筋ひずみ (μ)		設計荷重載荷時 下縁鉄筋ひずみ比			
	床版厚	補修厚		主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋
供試体-1	200	—	200	562	336	1.00	0.63	1.00	0.53
供試体-2	160	—	160	897	634	1.60	1.00	1.89	1.00
供試体-3	140	20	160	627	291	1.12	0.70	0.87	0.46
供試体-4	160	20	180	415	294	0.74	0.46	0.88	0.46
供試体-5	160	40	200	271	244	0.48	0.30	0.73	0.38

図-5 の主鉄筋ひずみ分布より, 同一の部材厚である供試体-1 と供試体-5 (部材厚 200mm) および供試体-2 と供試体-3 (部材厚 160mm) を比較すると, いずれも床版上面を本材料とした供試体において下縁鉄筋ひずみの低減効果が確認できる。表-5 より, 部材厚 160mm では, 供試体-2 が 897μ に対して供試体-3 が 627μ (供試体-2 の 0.7 倍) となり 30%の低減, 部材厚が 200mm である供試体-1 と供試体-5 では, 前者が 562μ に対して後者が 271μ (供試体-1 の 0.48 倍) となり 52%と大きな低減効果を示している。

図-6 より, 配力筋の鉄筋ひずみについてみると, 主鉄筋と同様に部材厚が大きくなるほど, また部材厚が同じであれば床版上面を本材料とした場合が引張側の鉄筋ひ

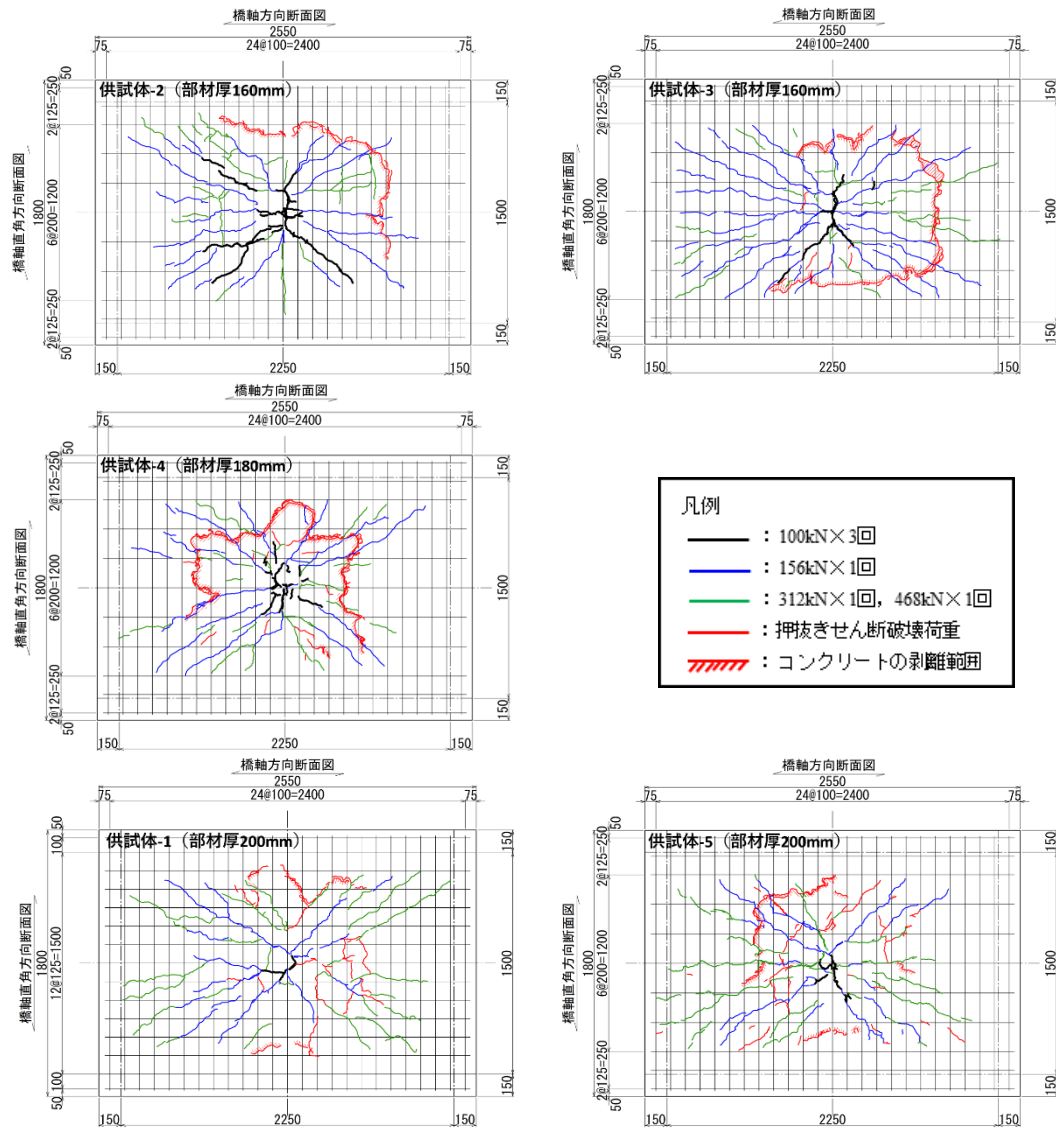


図-7 供試体下面のひび割れ状況

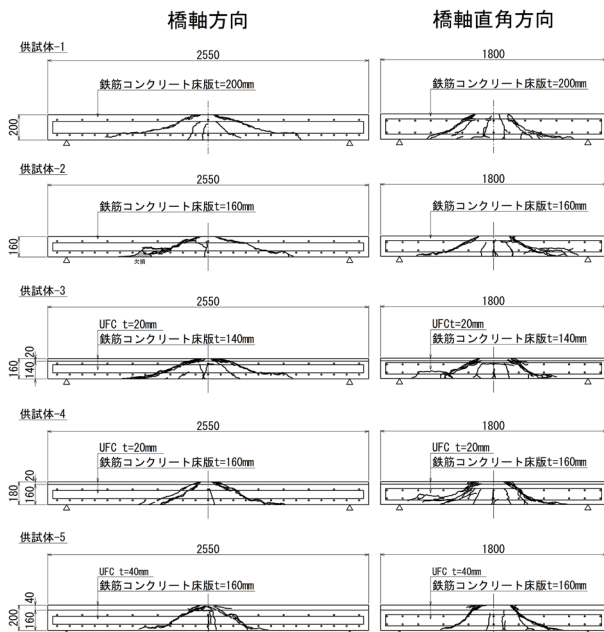


図-8 供試体切断面のひび割れ状況

ずみが低減していることがわかる。表-5より、部材厚が160mmの供試体-2と供試体-3を比較すると、前者が634 μ に対して後者が291 μ （供試体-2の0.46倍）となっており54%の低減効果を示している。

以上より、RC床版の上面を本材料で補修した場合には床版コンクリートとの合成効果により床版の剛性が向上し、鉄筋ひずみの低減効果を確認することができた。今後は、数値解析等を実施し本材料の補修厚さに対応した床版曲げ耐力の定量的な評価手法を提案していきたいと考えている。

4.3 ひび割れ状況

図-7には、各載荷重段階および押抜きせん断破壊荷重時の供試体下面のひび割れ状況を示している。いずれの供試体も100kN載荷時の試験体中央部近傍の主鉄筋に沿ったひび割れの発生後、載荷荷重の増加とともに配筋方向および放射状のひび割れが増加するとともに、最終的には図中の赤線ハッチで示す押抜きせん断



写真-4 載荷点近傍のひび割れ状況
(供試体-2: 橋軸直角方向断面)



写真-5 載荷点近傍のひび割れ状況
(供試体-3: 橋軸直角方向断面)

破壊による下面コンクリートの剥離が発生していることがわかる。供試体の部材厚が増加するほど、また同一の部材厚では表面を本材料で補修した供試体の方が、供試体の剛性が増加することから、より大きな荷重段階でひび割れの発生が増加していることがわかる。

図-8には、試験終了後の供試体切断面のひび割れ状況を示している。いずれの供試体も載荷位置の直下には下縁から上縁に向かう曲げひび割れが発生するとともに、供試体上面の載荷板端から斜め下方に向かって押抜きせん断ひび割れが発生し、ダウエル力による引張鉄筋に沿ったひび割れの進展も確認することができ、大略的にはいずれの供試体も同様のひび割れ性状を示している。ただし、供試体-5に関しては、橋軸方向および橋軸直角方向ともに下面の押抜きせん断領域が狭く、引張鉄筋に沿うひび割れ進展も小さい。これは、部材厚が200mmと厚く、さらに上部40mmを本材料で補修していることの影響が大きいと考えられるがそのメカニズムに関しては、本材料単体の押し抜きせん断試験や数値解析的な検討を進めながら明らかにしていきたい。

写真-4および写真-5には、部材厚が160mmと同一の供試体-2および供試体-3の載荷点近傍の押抜きせん断ひび割れ(橋軸直角方向断面)の拡大写真を示している。本材料による補修を実施していない供試体-2の場合には、載荷板端より斜め下方に向かう明瞭な押抜きせん断ひび割れが確認できるが、本材料による補修を実施した供試体-3では、本材料内の押抜きせん断ひび割れ箇所の周辺には鋼繊維のブリッジング効果によると思われる複数の微細ひび割れが確認できるとともに、押抜きせん断破壊面近傍にも斜めせん断ひび割れが確認できる。このことも押抜きせん断耐力が向上する一つの要因と推察されるが、その発生メカニズム等に関しては今後の検討課題である。

5. まとめ

本研究の範囲で明らかになった事項は以下の通りである。

- (1) RC床版の上面を本材料で補修した場合には、床版コンクリートとの合成効果により床版の剛性が向上し、設計荷重載荷時において鉄筋ひずみの低減効果を確

認することができた。

- (2) 荷重と変位の関係より、古い設計基準で建設されたRC床版上面を本材料で補修することによりH29道示の規定を満たすRC床版相当の耐荷性能を付与できる可能性を示した。
- (3) 本材料で補修した供試体の押抜きせん断破壊形態は、大略既往の知見と同様に載荷板端から45°よりも小さい角度でせん断破壊に至るが、鋼繊維のブリッジング効果の影響と思われる複雑なひび割れ性状も見受けられる。

今後は、数値解析等を実施し本材料の補修厚さに対応した床版曲げ耐力の定量的な評価手法や載荷点近傍の複雑なひび割れの発生メカニズムに関して検討を進めていきたいと考えている。

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—高機能セメント系防水工法—, 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) 今野久志, 三田村浩, 松本高志: 超緻密高強度繊維補強コンクリートで上面増厚した鋼床版の輪荷重走行試験及びFEMによる数値解析, 第12回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.189-194, 2022.10
- 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, pp.75-75, 2018.6