

報告 中空床版橋の補修に対する超高性能繊維補強コンクリートの適用性検討

岩立 次郎*1・竹沢 正文*2・三田村 健二*3・坂田 圭信*4

要旨：中空床版橋では、円筒型枠に起因する床版の変状が確認されておりその合理的な補修・補強が望まれている。本稿では、床版上面を補修・補強する方法として、床版の上面を切削し、増厚を行う工法を採用する際の材料として、超高性能繊維補強コンクリートを適用した場合について、その効果を確認するとともに、実橋において試験的に施工を行い、施工性についても確認を行った結果を報告する。

キーワード：中空床版橋, 上面増厚工法, 超高性能繊維補強コンクリート, UHPFRC, SFRC

1. はじめに

中空床版橋は、施工時コンクリート打設において円筒型枠の浮き上がりや変形によって、型枠上部の床版厚が小さくなっていることがあり、それに起因する変状が確認されている。図-1では、左側から円筒型枠上の床版厚が小さくなった状態で交通荷重の繰り返しや舗装打ち替え時の切削等により床版が劣化した状態を示しており、

真ん中の円筒型枠では、劣化した床版から路面水が浸入、水に含まれる塩化物イオンの影響により鉄筋が腐食し更に床版が劣化、円筒型枠中に水が滞水、右側では桁下面にも劣化が広がる、という変状の経緯を示している。

本稿では、円筒型枠上部の床版厚が小さく、床版の抜け落ち、舗装の陥没の変状が確認されている橋梁において、床版の上面を補修するにあたって、施工方法と使用する材料について検討を行い、超高性能繊維補強コンクリート（以下、UHPFRC）を補修材料として採用するための検討経緯と、実橋においてUHPFRCを試験的に施工した結果を報告する。

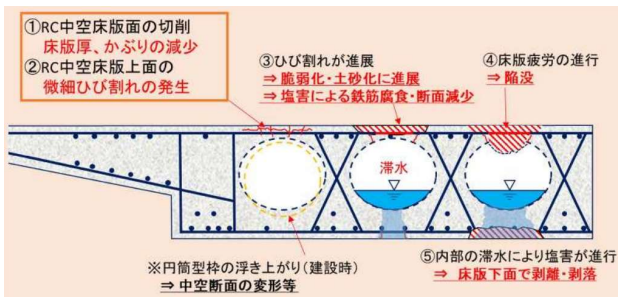


図-1 中空床版橋の変状¹⁾

2. 計画・設計

2.1 構造

検討の対象とする橋梁の一般図を図-2に示す。RC中

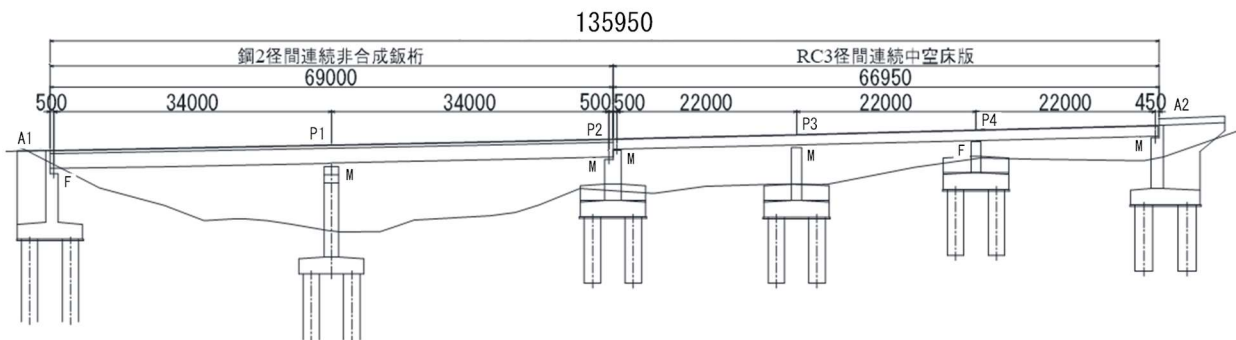


図-2 橋梁一般図

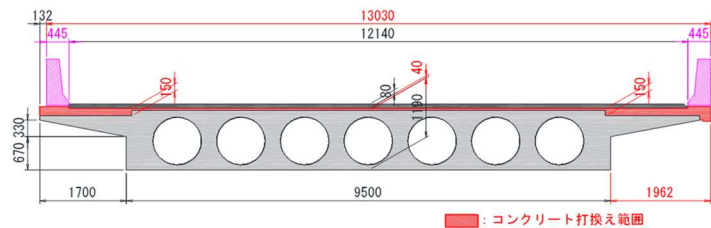


図-3 補修断面図 (UHPFRCの場合)

*1 中日本高速道路(株) 名古屋支社 保全・サービス事業部 (正会員)

*2 中日本高速道路(株) 名古屋支社 飯田保全サービスセンター

*3 (株)大林組 東京本社 土木本部 生産技術本部 橋梁技術部 技術第三課

*4 (株)大林組・JFEエンジニアリング(株) 特定建設工事共同企業体(中央道中津川JV)

空床版橋はP2～A2の3径間部分であり、横断勾配は4%、縦断勾配は1.3%である。張出床版部は変状および塩化物イオン濃度が大きい箇所があったことから、壁高欄の取り換えを含めた厚層の補修としている。張出床版部を除く中空床版部を標準部とし、その部分については塩化物イオンの浸入深さが大きくないため、上面を10mm切削し、上面にコンクリート系材料を敷設する上面増厚工法を採用することとした(図-3)。

2.2 材料の選定

(1) FEM 解析による確認

上面増厚の材料として鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)とUHPFRCを候補として両者の特性について整

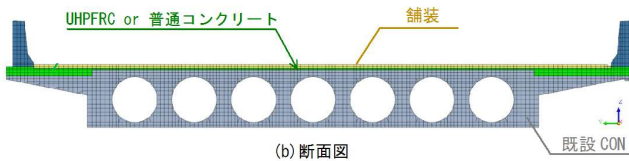


図-4 FEM 解析モデル

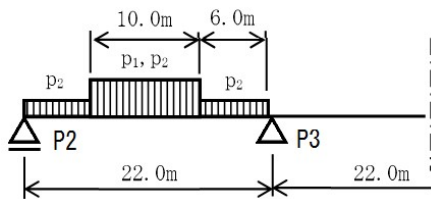


図-5 荷重状況 (L 荷重)

理した。耐荷性能については、3次元の線形FEM解析で応力度を確認し評価を行った。図-4にFEM解析モデル、図-5に荷重ケースを、表-1に解析に用いた材料の特性値を示す。解析のモデルは、対比を単純化するため、桁高を1200mmとし上面を10mm切削して40mmの増厚を行う断面とし、上面増厚の材料のみを変更した。増厚部と既設コンクリート間の境界条件は節点を共有している。SFRCの強度は設計上は普通コンクリートと同じであるため、検討においては既設コンクリートと同じ特性値とした。

図-6にL荷重を側径間の支間中央部および中間支点部の応力度が厳しくなるように荷重したケース(図-5)のFEM解析の橋軸方向の応力度コンターを示す。床版上面の中間支点上の引張応力度は、材料のヤング係数が普通コンクリートに対しUHPFRCが1.76倍であることから、普通コンクリート5.28N/mm²に対しUHPFRC 8.63N/mm²と1.63倍となっている。既設床版の界面およ

項目	既設・普通コンクリート (SFRC)	UHPFRC
密度	2.45	2.50
ヤング係数(N/mm ²)	2.5×10 ⁴	4.4×10 ⁴
ポアソン比	0.167	0.230
圧縮強度(N/mm ²)	24	110
引張強度(N/mm ²)	1.9	9.0

表-1 解析および評価に用いた材料の特性値

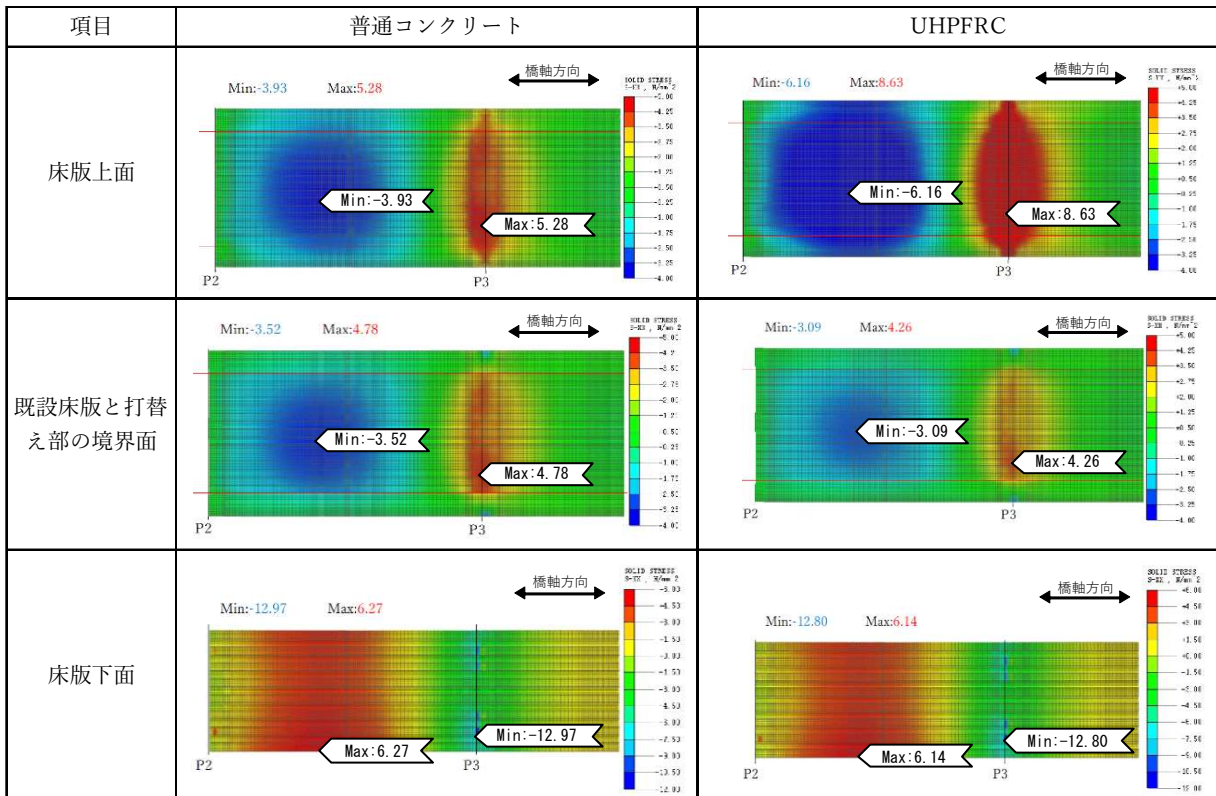


図-6 FEM 解析結果 (L 荷重 : 橋軸方向応力度分布)

び床版下面の応力度については、大きな差にはなっていない。

図-7に中間支点上断面の橋軸方向の応力度分布のイメージを示す。UHPFRCの場合、既設コンクリートとの界面において、ヤング係数の違いによる応力差からせん断力が発生し、はく離などの変状が想定されるが、その応力度は全体的に 0.2N/mm^2 程度と非常に小さい。中間支点部の壁高欄下部付近の界面に局部的に 1.4N/mm^2 程度のせん断応力度が確認されたが、今回使用する材料のコンクリートとのせん断接着性能試験で確認されている純せん断強度 3.0N/mm^2 以下である。また、この応力度はL荷重時のものであり、T荷重による応力振幅のレベルではこの値より小さいと考えられる。なお、普通コンクリートは解析上同じ材料としているため、界面には大きなせん断力は発生しない。

以上の解析結果から、耐荷性において普通コンクリート(SFRC)に対しUHPFRCの優位性は確認できなかった。耐久性の観点からは、UHPFRCは圧縮強度が大きいことから引張強度、付着強度も大きくなるため荷重によるひび割れや既設コンクリートとの界面はく離に対する抵抗、また、組成が緻密であることから遮塩性などは優

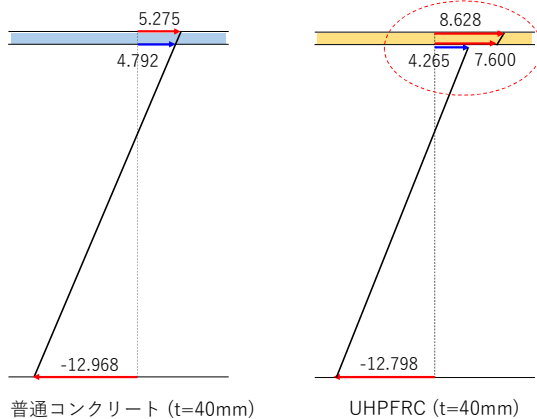


図-7 断面の応力分布イメージ

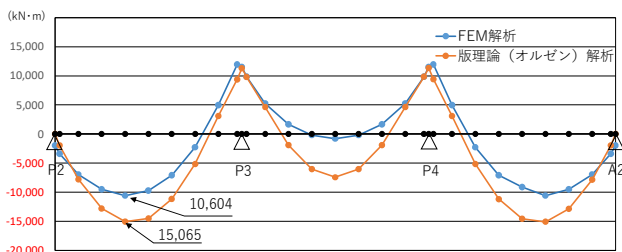


図-8 版理論解析とFEM解析の曲げモーメントの比較



図-9 幅員方向3分割の施工イメージ

位に評価できる可能性がある。なお、UHPFRCは一般に収縮量が大いいとされているため、膨張剤等による収縮量の制御が望まれる。なお、移動する荷重の繰り返しによる耐荷性への影響については一定の条件において確認されている²⁾。

(2) 床版防水工の施工

UHPFRCの緻密な材料であり、透水性が小さいため床版防水工を省略することも将来的には考えられるが、現時点においては床版防水工を省略した場合のUHPFRCの劣化に対する定量的な知見はないため本施工においては床版防水工としてBLG (Bridge Levelling Guss asphalt) を施工した。

(3) 版理論解析とFEM解析の比較

本検討の過程では、中空床版橋の設計で一般的に用いられる版理論(オルゼン)解析も行った。版理論解析で算出されるモーメントと、FEM解析の結果を比較すると、図-8に示されるように側径間支間中央部が最大となるようなケースで比較すると、FEM解析の方が約30%小さくなった。

3. 施工・品質

3.1 施工計画

UHPFRCを使用した上面増厚の施工に当たっての施工の条件は、張出床版部の施工も含め施工期間は3ヶ月、その期間は上下4車線の下り線側を対面通行とし、上り線の2車線を全断面で施工でき、橋梁の前後の本線はヤードとして使用可能で資材の搬入は供用する下り線から進入が可能というものであった。

UHPFRCの流動性があり自己充填性が高い、硬化までの時間が長い、といった一般的な特性は、橋面に勾配があり、比較的短時間で強度が望まれる上面増厚の材料としては改良が必要であった。今回使用した超速硬型のUHPFRC²⁾は、硬化時間と強度発現を制御することで、勾配のある橋梁の上面増厚の材料として適用可能なものである。施工に先立っては、モデル施工を行い施工性や各種性能を確認している。

施工範囲は橋長約65m、幅員約12m、橋面積約800m²、設計施工厚さ40mmであるため伸縮装置近傍は別施工として上面増厚部の設計施工量は約30m³である。フィニッシャーによる敷き均しの施工幅を4mとして幅員方向に3分割し、フィニッシャーによる作業工程がクリティカルになるよう施工量を決め、1日8hの作業時間で設計数量10m³を、3日間で施工することとした(図-9)。これはSFRCの施工スピードと同等である。

専用フィニッシャーの敷き均し速度は0.6m/minであり最大5.7m³/hの能力があるが、計画では1日の施工量も踏まえ3m³/hで計画した。3m³/hの施工サイクルを担



移動式ミキサ2台 (1.0m³練り)



車載式ミキサ2台 (0.5m³練り)

図-10 プラントの配置

保するため、1.0m³ プラント2台、0.5m³ プラント2台、計4台のプラント構成とし、施工箇所から5分の運搬距離に配置した(図-10)。各プラントの標準サイクルは、1.0m³プラントは練り混ぜ50分、搬出10分、洗いが2回に1回30分。0.5m³プラントは練り混ぜ30分、搬出5分、洗いが毎回30分で計画した。図-11は半日6m³を施工するタイムスケジュールを示す。

3.2 施工

今回使用したUHPFRCの配合を表-2に示す。構成材料は「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)」に準拠した材料を改良し、超早強材料は粉体系の急硬材を使用している。目標性能を表-3に示す。圧縮強度の弱材齢での目標値は、材料としては3時間としているが、今回の施工では16時間で管理している。モルタルフローは、施工部の勾配に合わせて調整するため150~280mmと幅を設けている。モルタルフローの調整は、環境温度毎に高性能減水剤と遅延材の添加量を設定し、製造各段階での性状や現場打設状況に応じて、配合調整を行った。

図-12に施工の状況を示す。打設範囲の端部から1mの範囲には、NEXCO基準に従い、エポキシ系接着剤を塗布している。専用フィニッシャーの走行速度は0.6m/minを基本とし、材料の流動性に合わせて走行速度を調整、材料が勾配下流側に流れていかないよう注意しながら作業を行った。施工端部は締固めを確実に行うた

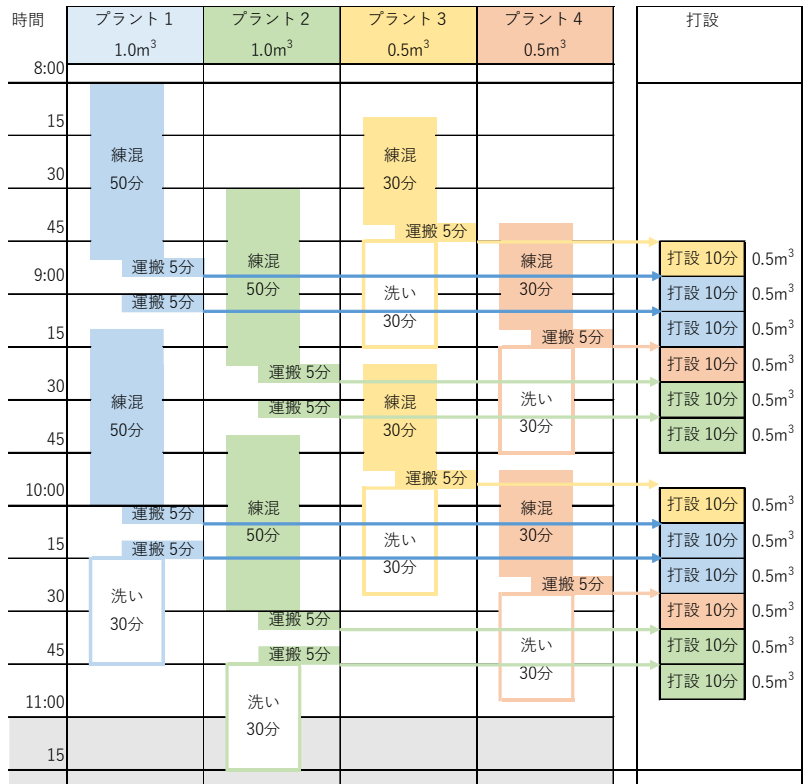


図-11 施工サイクル計画

め振動コテを使用した。実施工における施工サイクルは、1.0m³プラントからの打設に11~19分(平均14.6分)、0.5m³プラントからの打設に5~13分(平均7.7分)要しており、概ね計画通りの敷設が可能であった。

表-2 UHPFRCの配合

W/ (B+BF) (%)	単位量(kg/m³)					使用量	
	W	B	BF	SP	EX	ST (kg/m³)	SF (vol%)
9.7	210	2024	140	8~30	20	2~9	2.0

表-3 UHPFRCの目標性能

目標性能		目標値
圧縮強度	材齢3時間	24.0 N/mm²
	材齢28日	120.0 N/mm²
ひび割れ発生強度 JIS A 1113	材齢28日	6.0 N/mm²
引張強度 JCI S 002 2003	材齢28日	9.0 N/mm²
接着強度 建研式引張試験	材齢3時間	1.0 N/mm²
モルタルフロー(mm)		150~280 mm
空気量(%)		4.0 %以下
収縮(μ)		250 μ以下



打込み



敷き均し



仕上げ

図-12 施工状況

表-4 品質管理試験結果

		圧縮強度		ひび割れ発生強度	引張強度
		材齢16h	材齢28d	材齢28d	材齢28d
一日目	①	35.3	150	8.11	
	②	35.1	150	7.00	
	③	32.7	143	7.00	
	平均	34.4	148	7.37	14.7
二日目	①	55.1	135	7.97	
	②	56.9	145	9.32	
	③	52.7	139	9.07	
	平均	54.9	140	8.79	11.6
三日目	①	34	152	6.77	
	②	36.7	150	6.16	
	③	35.3	146	7.59	
	平均	35.3	149	6.84	12.7

3.3 品質

表-4に圧縮強度、ひび割れ発生強度、引張強度を示す。全て目標性能を満足している。

4. 経済比較

中空床版の上面補修について、SFRCおよびUHPFRCで実施した場合の経済比較を行った。検討にあたっては、図-13のような補修断面を想定した。それぞれの補修材料の厚さは、SFRCについて最低厚さ50mmに対して+10mmの60mmとし、UHPFRCについても最低厚さ30mmに対して+10mmの40mmとした。SFRCについてはNEXCO積算基準で積み上げ、UHPFRCについては実態を踏まえて試算したものである(表-5)。

材料の違いによる差は、材料費と練り混ぜ等に係るプラント等の設備費の合計である。

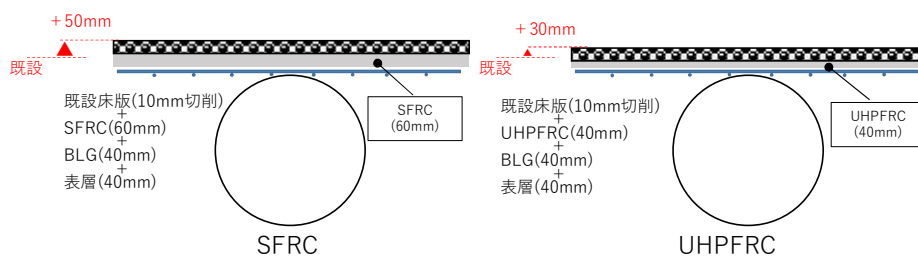


図-13 検討断面

表-5 経済比較の試算(直接工事費)

	SFRC (増厚60mm)			UHPFRC (増厚40mm)		
	数量	単価	金額	数量	単価	金額
切削工(WJ)	0.0 m3	1,000,000	0	0.0 m3	1,000,000	0
研削工	768.2 m2	1,500	1,152,300	768.2 m2	1,500	1,152,300
上面増厚(材料費)	48.4 m3	340,000	16,454,844	39.9 m3	860,000	34,353,904
上面増厚(施工費)	46.1 m3	30,000	1,382,760	30.7 m3	110,000	3,380,080
BLG	67.6 t	134,000	9,058,400	67.6 t	134,000	9,058,400
表層	768.2 m2	3,000	2,304,600	768.2 m2	3,000	2,304,600
合計			30,352,904			50,249,284
			1			1.66

※ 材料の違いだけ(赤字部)の比率は、37.7百万円/17.8百万円=2.12である。

※ 材料費の単価は、SFRCはモービル車による現着練り価格、SFRCについては現場プラントの設備費を含んでいる。

※ 材料費の数量においてSFRCは5%、UHPFRCは30%の割増しを行っている。

5. 課題

(1) 材料のロス率

本材料は粘性が大きく練り混ぜや運搬の際の材料ロスが大きいことや、材料が特殊であることから調達に時間を要するため、設計施工量に対し余裕をもった量の準備が必要といった特徴がある。今回の試験施工では設計数量に対する製造した量の比率、ロス率は30%と一般的なコンクリートの5~10%といった値に対して非常に大きなものとなっており、材料が高価であることや環境負荷を踏まえると改善が望まれる点である。

(2) 施工サイクル

練り混ぜ時間や都度プラントの洗浄が必要なため時間当たり出荷量に制約がある。1日当たりの施工量を確保するためには、プラントを多数用意する必要がある。

本施工では、全体として90日間と比較的長期間の中での施工であったため工程上の課題とはならなかったが、数週間の集中工事方式で行う場合などは、プラントの配置が課題となる可能性がある。

(3) ひび割れに対する評価

UHPFRCは普通コンクリートに対し引張強度が大きい。一方、自己収縮は比較的大きいとされており、例えば本施工で使用した材料は乾燥収縮を含む収縮ひずみの目標値を 250×10^{-6} (普通コンクリートは $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ で 120×10^{-6} 、SFRCは 300×10^{-6} 程度)以下としている。

既設床版との境界面や施工継ぎ目でUHPFRCは拘束され、収縮によってUHPFRCに引張が作用するもしくは既設側に二次的な応力が作用することが懸念される。収縮の特性は膨張剤の使用により制御できるが、強度の発現、収縮量、ヤング係数は打設後、時間の経過により変化し、その変化の過程は温度等の施工条件や混和剤の種類や量により様々である。それらを把握したうえで設計・施工における条件や要求性能を設定することが必要であるが、現時点では整理できていない。

6. まとめ

(1) 構造上の観点

FEM解析でUHPFRCを使用した場合の応力度について確認したところ、構造上の課題は確認されなかったが、普通コンクリートとの比較では、耐荷性能についてはUHPFRCを使用することでの応力度の改善はわずかであり、メリットは確認できなかった。UHPFRCは圧縮強度、引張強度が大きいことで、薄層においてもせん断や局部的な引張応力に対する抵抗性が上がることなどの効果は見込まれるが、補修・補強においては施工時の条件や配慮が性能に与える影響が大きい傾向にあり、費用対効果を踏まえた定量的な評価は難しい。

耐久性能については、材料としての強度が大きいことで疲労や土砂化に対して抵抗性が上がり、また緻密性から塩化物イオンの浸入に対する抵抗性も上がると考えられる。今回使用した材料の性能については、参考文献2)および3)で示されている。

なお、床版防水工の省略については、水が介在した場合のUHPFRCの耐久性能が十分に確認されているとは言えないため慎重な判断が必要である。

(2) 施工上の観点

今回の施工においては、平面勾配の条件や施工時間に対する施工性や品質上の課題は確認されなかった。一方、SFRCがモービル車により打設できるのに比べ、同様の施工サイクルをUHPFRCで確保しようとするプラント設備の規模が大きくなり、コストやヤードの課題が生じる。また、今回使用した材料は粘性が大きいため、材料ロス率が大きくなるとともに、練り混ぜ時間が長くなる原因となっている。チクソ性を担保したうえでハンドリングの良い材料への改良が望まれる。

(3) 経済性

UHPFRCのコストについては、SFRCに対して材料費・施工費を含む m^2 当たり単価で約2倍程度と試算した。今後、施工上の工夫や材料の調達の合理化等によりコストが平準化していくことが望まれる。

(4) 今後の展望

中空床版橋の上面増厚工法においては、現時点では材料の要求性能が明確に整理されていないため、UHPFRCのコストを含めた優位性の整理が難しい状況にある。

今回の検討や試験施工によって、UHPFRCの適用に当たっての概ねの課題は確認できたことから、今後費用対効果を精査し、要求性能や適用範囲を整理していきたい。

参考文献

- 1) NEXCO 東, 中, 西日本: 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会 第7回委員会, 委員会資料, 2022.10.28
- 2) 佐々木一成, 青木峻二, 富井孝喜, 大場誠道: 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し抜きせん断に関する実験的検討, コンクリート工学会年次論文集, Vol.45, No.2, pp.265-270, 2023
- 3) 青木峻二, 富井孝喜, 佐々木一成, 相本正幸: 床版上面増厚へ適用する超速硬型繊維補強セメント系複合材料の一体性に関する検討, コンクリート工学会年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1570-1575, 2023