

論文 UHPFRC を用いた道路橋床版の打替え・補強工法における床版界面の付着特性と振動エネルギーに関する実験的検討

光山 恵生*1・渡邊 有寿*2・牧田 通*3・向 俊成*4

要旨：本研究は、老朽化した道路橋の耐久性や耐荷性能を向上させることを目的として、優れた物質移動抵抗性と高い力学性能を有する超高性能繊維補強セメント系複合材料（UHPFRC）を用いて既設床版を補強する工法を検討した。実大規模の実験の結果、施工時の締固めエネルギーが大きいほど、UHPFRC の硬化体はより緻密になる傾向が認められた。補強対象が RC 床版の場合は、既設床版上面のウォータージェットによる打継処理のみで UHPFRC との付着強度が安定して得られた一方で、鋼床版の場合は十分な付着強度を得るためにショットブラストによる研掃と界面に接着剤を塗布することが望ましいことを明らかにした。

キーワード：UHPFRC, 上面増厚, 床版打替え, 振動エネルギー, 付着, 空隙率

1. はじめに

我が国の高速道路橋は、総延長の約 4 割が供用から 30 年以上経過しており、年々増加する交通量と車両の大型化および冬期の凍結防止剤等に代表される厳しい使用環境によって、著しい変状が顕在化している。このような状況において、有効な補強工法の一つとして上面増厚工法があり、増厚材料として鋼繊維補強コンクリート(Steel Fiber Reinforced Concrete: 以下, SFRC) が一般的に使用されてきた。これは、既設床版の上面に新たに SFRC を打込み・一体化し、増厚することでコンクリート床版の曲げ耐力と押抜きせん断耐力の向上や、鋼床版の疲労耐力を向上させる工法¹⁾であるが、増厚に伴い床版の死荷重が増加するため、場合によっては下部工の補強も併せて必要になるという課題があった。そこで著者らは、比較的薄い増厚で下部工への影響を軽減し、床版の耐久性や耐荷性能を向上させることを目的として、優れた物質移動抵抗性と高い力学性能を有する超高性能繊維補強セメント系複合材料(Ultra-High Performance Fiber Reinforced cement-based Composites: 以下, UHPFRC) および同材料を用いた工法(図-1)の実現に向けた研究開発を進めている²⁾。

UHPFRC は、圧縮強度が 150MPa 以上、ひび割れ発生強度が 4MPa 以上、引張強度が 5MPa 以上であり、普通コンクリートと比較して透気係数は約 1/1,000、塩化物イオン拡散係数は約 1/100 という優れた強度特性と物質移動抵抗性を有するセメント系材料である。この UHPFRC は、スイスで 2004 年に初めて現場打ち工法にて橋梁床版の補修に使用されて以降、総延長約 2km の大規模なものも含め 50 橋以上に適用され³⁾、近年はドイツやアメリカ

カなどでも適用が広がっている。なお、前述の材料特性を有する材料として、日本では UFC という呼称で指針⁴⁾が整備されているが、同指針は蒸気養生が必要なプレキャスト部材が主な対象で、供用時にひび割れを許容しない等の規格があるため、本報では世界的にみて広義の呼称である UHPFRC を用いることとする。

これまでの研究において、100L/バッチ程度の試験練り用ミキサ(強制二軸式およびパン型)でUHPFRCを製造した場合、屋外で打込み、外気で養生された供試体および部材の強度特性や耐久性は、蒸気養生されたUFCと同程度の性能が得られることが確認されている²⁾。一方で、実工事を想定した場合、大型ミキサによって製造され、現場の施工機械によって敷均し、締め固められたUHPFRCの強度特性や耐久性が室内レベルと同等の性能が得られるか不明である。そこで本研究では、実橋のRC床版や鋼床版を模擬したヤードを用意し検討を行った。結果の一部は既報⁵⁾にて報告しており、本論文ではUHPFRCのフレッシュ性状および施工機械による締固めが、充填性や既設床版との付着特性および硬化後のUHPFRCの空隙率へ及ぼす影響や長期強度(材齢91日お

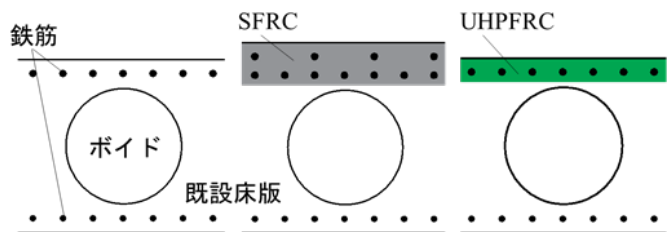


図-1 UHPFRC による打替え工法の模式図
(RC 中空床版橋の場合)

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 (正会員)
 *2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修 (正会員)
 *3 中日本高速道路(株) 名古屋支社 構造技術課 専門副主幹(橋梁担当) Dr. ès sc. (正会員)
 *4 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 工修 (正会員)

よび257日) について報告する。

2. 実大施工実験

2.1 概要

表-1に検討ケースおよび着目点を、図-2に平面視での実験ヤードの模式図を示す。床版種類は、RC床版と鋼床版の2種とした。充填時の障害物として、RC床版は鉄筋を、鋼床版はスタッドおよび添接板を設けている。既設床版とUHPFRCの一体性(付着)を高めるために、RC床版はウォータージェットによる洗い出しを、鋼床版はショットブラストによる研掃を全面にわたり実施した。また、両床版とも一部区間(図-2中青色ハッチング部)にエポキシ系接着剤を塗布し、接着剤の有無が付着特性

に及ぼす影響について検討した。横断勾配に対する施工性を確認することを目的として、横断勾配をRC床版で2.0%および9.0%の2水準、鋼床版は5.0%の1水準とした。

図-3に実験状況を示す。施工実験ヤードには容量3.0m³の強制二軸式ミキサを用意し、時間あたり3.0m³(1.5m³/バッチ/30分)の能力でUHPFRCを製造し、2車線規制を想定して打込みレーン(幅員5m)の隣のレーンからホイールローダーにて供給した。敷均し機械には、SFRCによる上面増厚工法に用いられてきたフィニッシャを採用し、敷均し〜締固め〜表面仕上げまでをエリア0からエリア7にむかって一方向に施工した。なお、フィニッシャの走行速度は0.5m/分で一定とした。

表-1 検討ケースおよび着目点

エリア	施工条件						配合	主な着目点	結果						
	想定	充填時障害物	施工厚(mm)	勾配(%)	パイプレータ設定回転数(rpm)	接着剤区間			繊維量(vol.%)	既報 ⁵⁾	本報				
0	RC床版 打替え	鉄筋	100	2	2000,3000	あり	3.0	・パイプレータ回転数の調整	△	○					
1					2000				・締固めエネルギー,施工性,締固め性	△	○				
2					3000					・鉄筋背面への充填性	—	○			
3											なし	3.0	・フロー低下の想定(予備区間)	—	—
4														150	△
5	100	9	△	○											
6	鋼床版 増厚	スタッド 添接板	40	5	2000	あり	3.0	・スタッド,添接板まわりの充填	—		○				
7			75			あり			2.0	・接着剤塗布厚(施工性)	—			○	
							3.0	・鋼床版の共振・振動,エネルギー	△	○					

△:一部報告(強度および収縮の材料特性が主),○:データ整理・考察(完了)

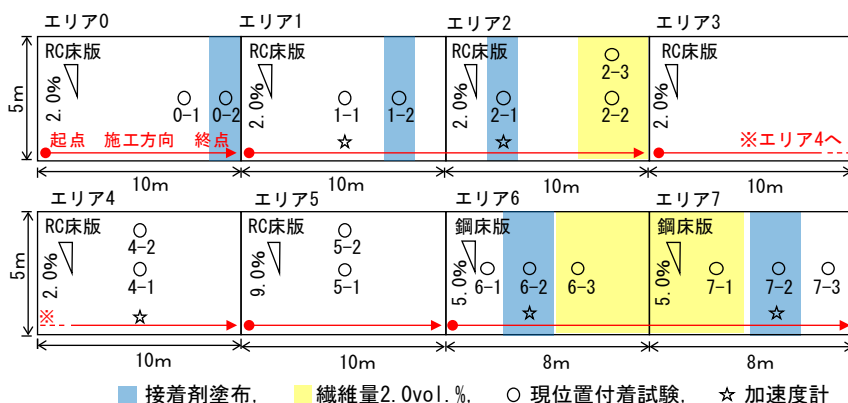


図-2 実物大実験 模式図



図-3 実物大実験 施工状況

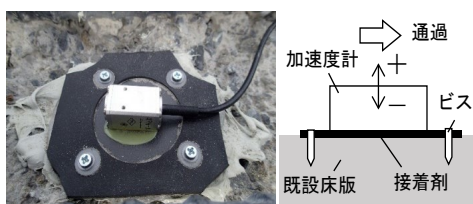


図-4 加速度計設置状況

表-2 UHPFRCの配合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					だれ ³⁾ 止め材	鋼繊維 ⁴⁾
		水 ¹⁾	結合材 ²⁾	骨材	収縮低減剤	高性能減水剤		
15.2	2.0	195	1,287	905	12.9	32.2	調整	3.0vol.%, 2.0vol.%

*1: 高性能減水剤中の水分を含む

*2: エトリンサイト生成系プレミックス結合材(収縮低減型)

*3: 無機系鉱物由来の粉末

*4: 繊維長15mm, 径0.2mm, 引張強度2,000MPa以上

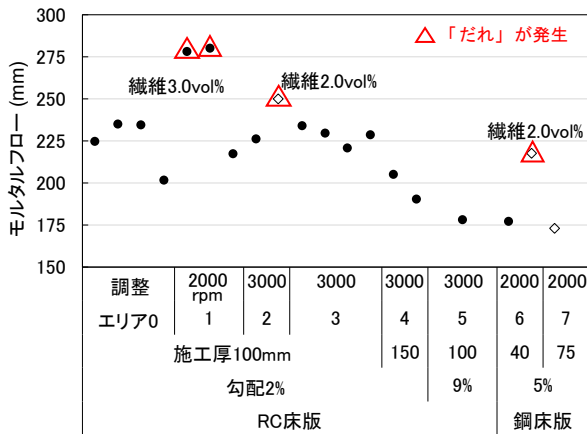


図-5 モルタルフロー（現場でのコントロール結果）

SFRCによる上面増厚工法の場合、既設床版との一体化のためには既設床版の地下処理と新コンクリートの締固めの良否が影響することが確認されている²⁾。そこで、今回の実験では締固めエネルギーがUHPFRCと既設床版の一体化に及ぼす影響を評価することを目的として、図-2の「☆」で示す位置で、既設床版上面に圧電式の加速度計を設置し（図-4）、エリア毎にフィニッシャに備え付けのバイブレータの振動数を変化させ、得られた加速度を振動エネルギーに変換し評価した。

UHPFRCの養生は、表面仕上げ直後からポリプロピレン製のシートを敷設し、打込み2日後に撤去した。これは、事前の試験にて材齢2日で圧縮強度が90MPaまで達することを確認しており、交通量の多い道路の早期解放を想定したものである。

表-2に施工実験に用いたUHPFRCの配合を示す。国内で場所打ちによる橋梁の建設に使用された実績のあるエトリンナイト生成系UFCを基本に、鋼繊維の混入率を2.0および3.0vol.%の2水準とした。

2.2 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ試験結果としてモルタルフロー（JIS R 5201）の測定結果を図-5に示す。実規模での製造においても室内レベルでの検討時と同様に、勾配に応じて高性能減水剤量を固定し、だれ止め材の量を調整することでフレッシュ性状をコントロールした。施工の状況を観察した結果、RC床版の2.0%勾配ではモルタルフローが250mm以上でだれが発生し、225mm程度まで小さくすると良好であった。RC床版の9.0%勾配ではフロー180mmで打込みを行ったところ、だれが発生しなかった。表面が平滑な鋼床版では、フロー225mm程度でだれが生じ、180mm程度まで小さくする必要があった。だれが生じていない区間の出来形計測の結果、設計の横断勾配に対し±0.1%以内で仕上がったことを確認した。

図-6は、エリア4のUHPFRC硬化後の切断面を示し

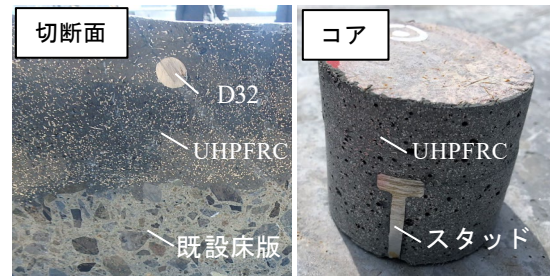


図-6 UHPFRC充填状況（左：RC床版、右：鋼床版）

表-3 各材齢での強度試験結果

項目	結果			
	7日	28日	91日	257日
圧縮強度 JIS A 1108 (MPa)	134 最大 137 最小 131	172 最大 177 最小 160	187 最大 196 最小 166	189 最大 198 最小 181
弾性係数 (GPa)	42	46	46	46
ひび割れ発生強度 JIS A 1113 (MPa)	7.5 最大 9.1 最小 5.8	8.2 最大 9.9 最小 6.4	9.4 最大 10.2 最小 8.5	11.3 最大 11.8 最小 10.7
引張強度 ⁶⁾ (MPa)	—	—	—	12.8

たものだが、鉄筋周りにも密実に充填されており旧コンクリートと一体化している状況が見てとれる。今回の実験では、勾配に応じてだれ止め材を添加し、チクソトロピー性を付与した配合である一方で、ある程度の自己充填性も保有させた。フィニッシャによる振動締固めによって施工時のエントラップドエアを鉄筋や旧コンクリート界面から追い出すことができたものと考えられる。

(2) 強度試験結果

本実験と同じ外気温（5～24℃）および封緘なしで養生した供試体の強度試験結果を表-3に示す。材齢28日時点で、冒頭で示したUHPFRCの圧縮強度とひび割れ発生強度を満足した。引張強度は、直接引張試験⁶⁾によって材齢257日に確認した。今回のように打込み後2日間のシート養生（封緘養生）のみでも、その後の強度発現は良好であることを確認した。

(3) 界面付近の締固めエネルギーの算出

締固めエネルギーは、村田ら⁷⁾の研究を参考に式(1)を用いて算出した。

$$E_{total} = \frac{\rho}{4} \alpha^2 \frac{t}{(2\pi n)^2} \quad (erg \cdot s/cm^3) \quad (1)$$

ここで、 ρ ：コンクリートの密度(kg/L) (g/cm^3)

α ：加速度(m/s^2) (cm/s^2)

n ：振動数(Hz)

t ：振動時間(s) ※算出時は下線の単位に換算

図-7に、測定例としてエリア1で得られた±200秒間（加速度計から約±1.7mの範囲）で測定された加速度の波形を示す。今回の実験では、あらかじめ模擬床版へ

設置された加速度計にフィニッシャが「ア.徐々に近づく,」「イ.直上を通過する,」「ウ.徐々に遠ざかる」という過程を経るため、それに応じて加速度 α も増減している。

次に振動エネルギー算出に必要な振動数 n については、フィニッシャ側の起震源（バイブレータ）の振動数の設定（rpm）が、どのように界面に伝わっているかを考える必要がある。得られた加速度波形に周波数解析を加え、周波数と振幅を求めた結果を図-8 に示す。エリア 1 では、起震源の設定振動数が 2000rpm(33.3Hz)である一方で、UHPFRC 中の振動数は 135Hz (33.3Hz の約 4 倍) および 169Hz (33.3Hz の約 5 倍) が卓越しており加速度スペクトルも大きい。そこで、図-7 中の赤枠に示す「ア」および「イ」時点における計測時間 10 秒間（90~100 秒および 190~200 秒）の加速度波形をそれぞれ周波数解析すると、図-9 のようになる。グラフから、加速度計と締固め機械の位置が離れている場合（ア）は低振動数の波が卓越して UHPFRC に伝わっており、逆に加速度計と締固め機械の位置が近い場合（イ）は高振動数の波が最も卓越して UHPFRC に伝わっていることが読み取れる。これは、低振動数の波に比べ高振動数の波の方が UHPFRC に大きな加速度を与えている一方で、高振動の波は減衰が大きいことから、離れた場所には届きづらいためと考えられる。

以上のように、今回の実験ではフィニッシャが徐々に

移動しているため、バイブレータの設定振動数を一定としても、UHPFRC へ卓越して伝わる振動数が距離に応じて変化しており、振動数を一定値として式(1)に代入した場合、誤差が大きくなってしまいう懸念があった。そこで、得られた加速度波形において、各周波数に対応する加速度スペクトルを高速フーリエ変換（FFT）によって（1÷計測時間）Hz 刻みで算出し、算出した振動数と加速度スペクトルそれぞれを式(1)に代入し、足し合わせることでエリア全体での振動エネルギーの総和とした。なお、20Hz 以下の波形は振幅が小さく、振動エネルギーの総和に与える影響度も小さいため、今回の計算では除外した。

表-5 に、上述の計算方法によって算出された各エリアにおける新旧コンクリート界面の振動エネルギーの総和を示す。エリア 1 と 2 を比較すると、同じ UHPFRC 施工厚であれば、バイブレータの振動数が大きいエリア 2 の方が、振動エネルギーの総和も約 2.6 倍と大きくなっていることがわかる。エリア 2 と 4 の結果を比較すると、UHPFRC 施工厚が大きいほうが振動エネルギーの総和が若干大きくなる結果（約 1.3 倍）となったが、これは UHPFRC のフローの違いや測定誤差によるものと考えられ、今回の実験のように施工厚 100~150 mm の範囲では、施工厚の違いによる締固めエネルギーの伝わり方の差は小さいと判断した。

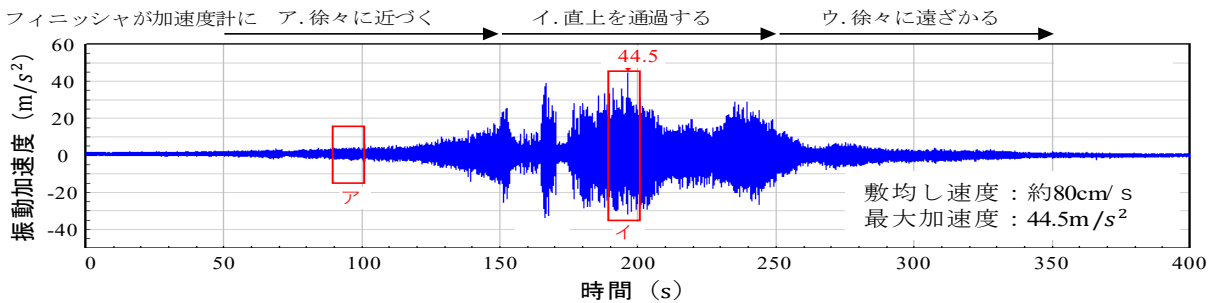


図-7 エリア 1 の加速度波形（400 秒）

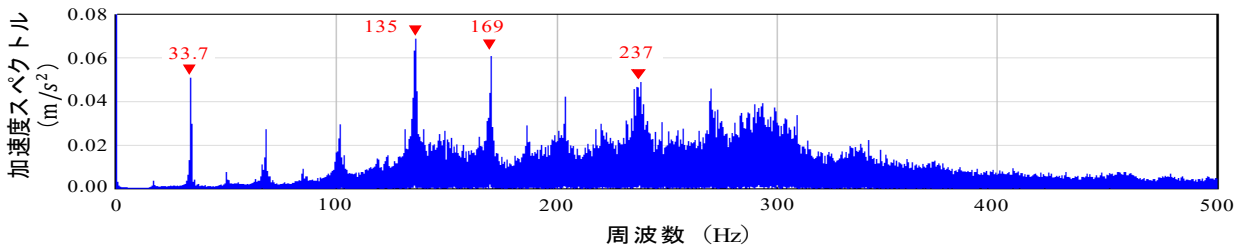


図-8 エリア 1 全体の周波数解析結果

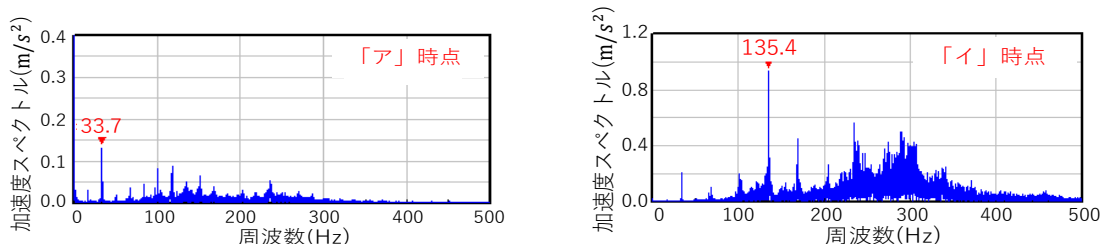


図-9 各時点の周波数解析結果（10 秒間）

表-5 各種試験条件と結果の一覧

エリア	条件						結果																	
	床版	勾配 (%)	繊維 (vol%)	UHPFRC 施工厚 (mm)	接着剤 (kg/m ²)	パイププレート 設定振動数 (rpm)	振動 E の 総和 (erg・s/cm ³)	付着強度(MPa)					モルタル フロー (mm)	空隙率(vol.%)										
								No.	①	②	③	平均		表面	界面									
0	RC 床版	2.0	3.0	100	—	2000~3000	—	0-1	2.69	2.91	2.32	2.64	—	—	—									
								0-2	3.06	2.94	3.17	3.06												
1								2000	33.4	1-1	2.85	2.59				2.40	2.61	279	5.87	3.26				
										1-2	4.41	3.01				3.13	3.52							
2								2.0	87.3	3000	—	—				—	2-1	2.66	2.91	2.63	2.73	227	4.21	1.91
																	2-2	2.92	3.04	2.52	2.83			
			2-3	2.82	3.36	3.08	3.09																	
4			3.0	150	—	—	—	—	4-1	-	-	2.74	2.74	191	6.22	4.50								
									4-2	3.06	2.90	3.03	2.99											
5			9.0	100	87.3 とみなす*1	—	—	—	5-1	2.53	2.85	2.64	2.67	179	5.28	3.96								
	5-2	-							2.92	2.90	2.91													
6	鋼床版	5.0	3.0	40	—	2000	251.7	6-1	0.33	1.95	1.97	1.42	178	—	3.18									
								6-2	4.80	4.91	5.12	4.95												
								6-3	2.72	3.28	1.31	2.44												
7			3.0	75	—	—	—	323.7	7-1	4.21	3.23	3.40	3.61	173	—	2.46								
									7-2	2.85	3.72	2.80	3.12											
									7-3	1.50	0.22	1.19	0.97											

□: 旧コンクリート部材(母材)破壊, ■: 界面破壊, ■: 治具部破壊(記録なし)

※1: エリア 2 と 5 は、施工厚およびパイププレート設定振動数が同じであるため、振動エネルギーも同等であるとみなした

床版の種類で比較すると、RC 床版区間と鋼床版区間では、床版自体の剛性および施工厚が異なるため、振動エネルギーの伝わり方も大きく異なっている。RC 床版に比べ鋼床版区間では、フィニッシャと加速度の測定場所が離れている場合でも振動が伝わりやすく、有効な振動時間が長くなったため、それに応じて振動エネルギーの総和も大きくなったものと考えられる。

(4) 原位置付着試験結果

原位置付着試験は、図-2 の「○」で示した位置で実施した。表-5 に試験結果を示し、破壊面の違いで色分けを行った。RC 床版区間では、試験条件によらずほとんどが既設床版の部分で破壊する結果(母材破壊)となり、少なくとも既設床版コンクリートの引張強度以上の付着強度を有していると考えられる。

鋼床版区間においては、試験条件によらず、すべてのケースで界面での破壊となった。接着剤のだれ・巻込みを抑制するために塗布量を 0.4kg/m² に減らしたケース(No.7-2)は、標準の塗布量 1.2kg/m² のケース(No.6-2)に比べて付着強度が若干低い値となったが、3MPa 以上と高い付着力を確保している。鋼床版区間で接着剤を使用しなかった場合は、測定値のばらつきが大きく、特にフィニッシャによる締固めが困難である施工の始点(No.6-1)と終点(No.7-3)では付着強度が小さく、ばらつきも大きい。

図-10 に締固めエネルギーの総和と付着強度の関係

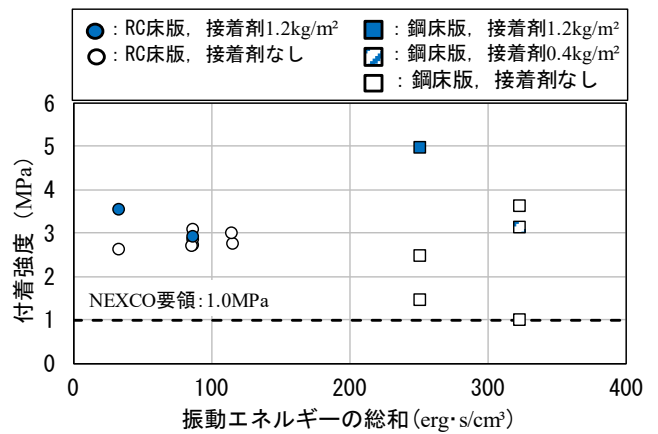


図-10 振動エネルギーの総和と付着強度の関係

を示す。参考として NEXCO 構造物施工管理要領⁸⁾の規格値 1.0MPa も示した。RC 床版においては、振動エネルギーの総和によらず付着強度は安定しており、付着に必要な締固めエネルギーが十分に伝わったものと考えられる。また、接着剤の有無による影響も見られず、良好に界面処理ができていると判断された。

鋼床版においては、振動エネルギーの総和の違いが及ぼす影響よりも、接着剤の有無および塗布量の違いの方が支配的であると推察される。以上より、鋼床版区間においては、締固め機構付きの専用フィニッシャを導入しつつ、接着剤の使用により一体性を確保することが必要

と考えられる。また、本試験の結果は RC 床版・鋼床版ともに、室内レベルでの検討⁹⁾と同程度の付着強度であり、適切な施工によって実大レベルでも同様の付着特性を有することを示している。

(5) 空隙率測定結果

表-5 に表層部および床版界面付近で得られた UHPFRC の水銀圧入法による空隙率の測定結果を示す。この時の空隙率は 3nm-60 μ m の細孔径を測定の対象としている⁴⁾。測定した試料は、床版から採取したコア供試体 (ϕ 100 \times 200mm) であり、材齢 91 日に採取後、材齢 270 日まで常温常湿 (20 $^{\circ}$ C, 60%) で養生を行ったものである。測定の結果、空隙率はおおむね 6%未満と緻密な硬化体となっており、蒸気養生または水中養生 (材齢 91 日) した UFC³⁾ と比べ同程度以下であった。特に、表面側よりも界面で得られた試料の方が空隙率は小さく、最小 1.91%, 最大でも 4.50%である。床版界面は、早期にシート養生を終了し長期間の乾燥の影響を受けた表面に比べ、より良好に水和が進んだものと考えられる。

図-11 に振動エネルギーと空隙率の関係を示す。振動なしで自己充填性を有するモルタルフロー230~270mm 程度³⁾を「大」とし、だれ止め性を考慮したフロー 180 \pm 25mm を「小」とした。エリア 1 と 2 の比較より、施工厚およびフローが同程度であれば振動エネルギーの大きい方が (図中、矢印①), 空隙率は小さくなる傾向を示した。同様に、エリア 2 と 5 の比較より、施工厚および振動エネルギーが同程度の場合は、フローの大きい方が (矢印②), エリア 4 と 5 の比較から、振動エネルギーおよびフローが同程度であれば施工厚の薄い方が (矢印③), 空隙率はそれぞれ小さくなる傾向を示した。ただし、振動エネルギーが水和を促すメカニズムについては、更なる分析と考察が必要である。

3. 結論

実物大の施工実験を行い、各種検討を行った結果、次のことが明らかとなった。

- ・UHPFRC は、実規模レベルでの製造においても安定したフレッシュ性状と強度が得られる。
- ・フィニッシャーによる施工時に得られた加速度波形を分析した結果、既設床版との界面において卓越する振動数は、起震源と加速度計測場所の距離によって異なり、近ければ近いほど高振動数の波の影響度が大きい。
- ・既設床版との一体化には十分な下地処理と機械による締固めが重要であり、鋼床版では接着剤を併用する必要がある。ただし、UHPFRC の配合や締固め方法が変更となる場合は、同様の試験によって締固めエネルギーと付着特性の関係を評価することが望ましい。

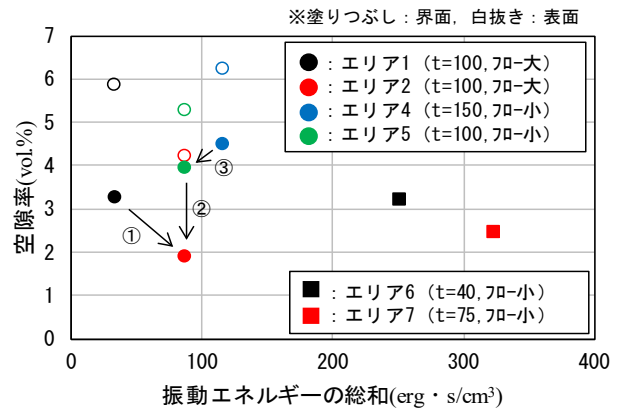


図-11 振動エネルギーの総和と空隙率の関係

- ・UHPFRC の空隙率には①振動エネルギー, ②モルタルフロー, ③施工厚が関係していると考えられ、振動エネルギーの大きい方が、フローの大きい方が、施工厚の薄い方が、空隙率は小さくなることが確認された。

参考文献

- 1) 財団法人高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル, 1995.11
- 2) 柳井ら：超高強度繊維補強コンクリートの道路床版打替え工法への適用に関する研究, プレストレストコンクリート工学会, 第 26 回シンポジウム論文集, p469~474, 2017.10
- 3) Brühwiler, E. : “Structural UHPFRC” ; Welcome to the post-concrete era!, Proceedings of the First International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Des Moines, Iowa, July 18-20, 2016
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案) コンクリートライブラリー113, 2004.9
- 5) 渡邊ら：UHPFRC による道路床版打替え・補強工法に向けた実大施工実験, プレストレストコンクリート工学会, 第 28 回シンポジウム論文集, p619~622, 2019.11
- 6) 牧田ら：直接引張試験による UHPFRC の引張特性に関する研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会, V-542, 2017.9
- 7) コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, 1989.4
- 8) 東・中・西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領, 2017.7
- 9) 渡邊ら：道路橋床版の打替え・補強工法における UFC 界面の付着特性に関する検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-139, 2018.8