

# 論文 床版上面増厚へ適用する超速硬型の超高性能繊維補強セメント系複合材料の一体性に関する検討

青木 峻二\*1・富井 孝喜\*2・佐々木 一成\*3・相本 正幸\*4

**要旨：**床版上面増厚に用いる材料は、浮きやはく離による再劣化を防ぐことが重要となるため、既設床版や防水層・舗装、さらに、施工目地部の一体性が重要である。そこで、超速硬型の UHPFRC に関して、既設コンクリートとの水平打継目処理方法、施工目地となる UHPFRC 同士の鉛直打継目の形状と処理方法、防水層・舗装との水平打継目について検討を行った。その結果、水平打継目は目荒しを行い湿潤状態または接着剤の使用、UHPFRC 同士の鉛直打継目は鋸歯形状で目荒しを行い湿潤状態とすること、防水層・舗装との水平打継目は接着剤の使用で、必要な一体性を得られた。

**キーワード：**床版上面増厚, UHPFRC, 超速硬, 打継目処理, 接着強度

## 1. はじめに

道路橋梁床版の経年劣化が進む中、床版取替えによる大規模更新工事や床版上面増厚工法による大規模修繕工事が盛んに行われている。床版上面増厚工法では従来、ひび割れ抑制効果、曲げ・引張強度の増加、靱性改善効果などが期待できる超速硬型の鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC）が使用されているが、鋼材腐食や疲労による浮きやはく離、土砂化が問題となってきた。近年、SFRC の代替材料として、高強度かつ緻密性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 Composite：以下、UHPFRC）を床版上面増厚に用いることで既設床版との一体性を確保する検討が行われている<sup>1)</sup>。UHPFRC は、超高強度の材料であり、ひび割れに対する抵抗性が大きく、ひび割れが発生してもひび割れ幅が大きくなりづらい特性があることから、従来の SFRC に比較して、ひび割れの進展による耐力低下や表層の土砂化などの劣化が生じにくい材料である。また、UHPFRC は、透水係数の小さい緻密な材料であるため塩化物イオンや水などの浸透が表層に限定されることから、防水層の省略、防水層のグレード変更、および防水性の高いグースアスファルトとの併用など、防水工の省略、簡素化が期待できる。従来の規制時間内での作業工程を減らし、工事による規制時間短縮の可能性がある。一方で、SFRC は交通規制期間を短くするために超速硬性を有しているため、その代替材料にも超速硬性が必要とされるが、超速硬型の UHPFRC に関する既設床版、防水層・舗装との一体性に関しては検討が行われていない。

本論文では、常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリ

表-1 UHPFRC の基本配合

W/P (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					添加量(kg/m <sup>3</sup> )	
	W	P	S	SP*	HA**	SF	CR
16	210	1327	837	8~30	140	157	4~10

\*：練混ぜ水に含む \*\*：P に含む

表-2 UHPFRC の使用材料

種類	記号	備考
練混ぜ水	W	上水道水
プレミックス材	P	高強度用プレミックス結合材
細骨材	S	珪砂
混和剤	SP	高性能減水剤
急硬材	HA	粉体系
補強用鋼繊維	SF	φ0.16×13mm
遅延剤	CR	粉体系

ート<sup>2)</sup>（以下、UFC）をベースにして開発した超速硬型の UHPFRC の適用に際して、SFRC と同様の施工方法とした場合に必要とされる以下のケースを対象として、一体性を確保するための打継目処理方法などについて、接着性能試験や上面増厚梁の曲げ試験を実施して、検討を行った結果を報告する。

- ・水平打継目：コンクリート-UHPFRC
- ・水平打継目：コンクリート-UHPFRC（材齢3時間）
- ・鉛直打継目（施工目地）：UHPFRC 同士
- ・水平打継目：UHPFRC-舗装・防水層  
それぞれの打継目位置を図-1 に示す。

## 2. 実験の概要

### 2.1 基本配合および使用材料

UHPFRC の基本配合を表-1 に、使用材料を表-2 に

\*1 (株)大林組 生産技術本部リニューアル技術部 副課長 修(工)(正会員)

\*2 (株)大林組 生産技術本部リニューアル技術部 部長(正会員)

\*3 (株)大林組 技術研究所構造技術研究部 主任研究員 修(工)(正会員)

\*4 大林道路(株) 技術部 部長

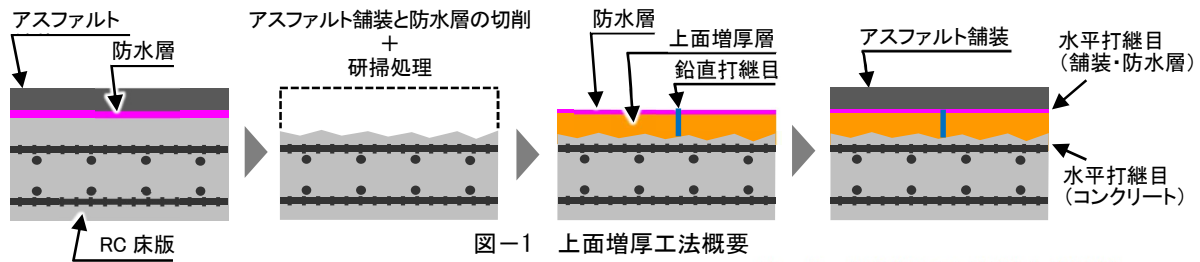


図-1 上面増厚工法概要

表-3 UHPFRCの目標値と実測値

示す。「UFC 設計・施工指針 (案)」<sup>3)</sup> に準拠した材料をベースとし、早期の強度発現性を実現するために急硬材を使用した。また、可使時間と流動性を調整するために、遅延剤と高性能減水剤を使用した<sup>4)</sup>。コンクリートは、設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>を用いた。

### 2.2 超速硬型 UHPFRC の概要

UHPFRC の目標値と実測値を表-3 に示す。モルタルフローは、5~10%程度の勾配においても仕上げが可能となるよう管理基準を 150~280mm と設定した。また、従来の SFRC と同等の超速硬性を確保するために、材齢 3 時間での圧縮強度は 24N/mm<sup>2</sup>以上、接着強度は 1.0N/mm<sup>2</sup>以上を目標値とした。材齢 28 日における圧縮強度は 120N/mm<sup>2</sup>以上、ひび割れ発生強度は、6.0N/mm<sup>2</sup>以上を目標値とした。

SFRC による床版上面増厚工法は、既設床版上面を 10mm 程度切削・研掃して、その上に SFRC を 50mm 以上増厚する工法である。UHPFRC による床版上面増厚工法では、同様の施工方法ではあるが、超高強度材料という特性と粗骨材を混入しないことから、厚さ 30mm 程度と SFRC より薄層での補強が可能となり、長期耐久性にも優れている<sup>5)</sup> (図-1)。

### 2.3 試験項目一覧

水平打継目と鉛直打継目を対象として引張接着性能とせん断接着性能を検討するために実施した試験項目の一覧を表-4 に示す。水平打継目では、現場での施工を考

項目		UHPFRC (材齢)	
		目標値	実測値
モルタルフロー (mm)	JIS R 5201 (静置)	150~280	185
空気量 (%)	JIS A 1128	4.0 以下	3.0
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1108	24.0(3 時間)	34.8(3 時間)
		120(28 日)	150(28 日)
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1149	—	44.3
接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1171	1.0(3 時間)	1.5(3 時間)
		1.5(28 日)	2.7(28 日)
ひび割れ発生強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1113	6.0(28 日)	9.25(28 日)

慮して、3 時間後の引張接着性能についても検討した。打継目処理方法は、ショットブラスト (以下, SB) (150kg/m<sup>2</sup>)、またはウォータージェット (以下, WJ) で目荒しをした後、湿潤状態か接着剤塗布を基本とした。湿潤状態は、既往の文献<sup>1)</sup>を参考として、凹部への多少の水の残留は可とした。

### 3. 水平打継目：コンクリート-UHPFRC

#### 3.1 引張接着性能

引張接着性能は、表面を WJ 処理した後に、湿潤状態としたコンクリート平板 450×450×100mm に UHPFRC を

表-4 試験項目一覧

種類	水平打継目			鉛直打継目 (施工目地)	
	下層：コンクリート, 上層：UHPFRC			UHPFRC 同士	
検討材料	下層：コンクリート, 上層：UHPFRC			UHPFRC 同士	
検討性能	引張接着性能	せん断接着性能	引張接着性能	引張接着性能	せん断接着性能
試験材齢	28 日	36 日	3 時間	28 日	28 日
試験方法	一軸引張試験	簡易一面せん断試験	建研式引張試験	一軸引張試験	簡易一面せん断試験
試験規格	試験法 439 <sup>6)</sup>	土研資料 <sup>7)</sup>	試験法 434 <sup>6)</sup>	試験法 439 <sup>6)</sup>	土研資料 <sup>7)</sup>
試験体寸法 (mm)	形状	450×450	900×900	①4000×6000 ②11750×5900	450×450 φ200
	下層	100	100	①100, ②既設床版	100
	上層	100	100	30	100
	供試体	φ100×200	φ200×200	φ100	φ100×200
打継目処理方法	目荒し	・WJ* ・湿潤	・SB** ・乾燥, ・湿潤 ・プライマー ・プライマー+接着剤	・SB** ・湿潤 ・吸水調整剤 ・接着剤	・WJ* ・湿潤

\* WJ：ウォータージェット, \*\*SB：ショットブラスト

100mm 打込み後に、室温で封緘養生を行い、その平板からφ100×200mmの試験体を5体コア抜きし、NEXCO試験方法439<sup>6)</sup>に準拠した一軸引張試験により確認した(写真-1)。

一軸引張試験の結果、引張接着強度の5体の平均値は3.2N/mm<sup>2</sup>(破断面:下地材)となり、目標値1.5N/mm<sup>2</sup>以上を確認した。

### 3.2 せん断接着性能

せん断接着性能は、表面をSBにて処理した後に湿潤状態としたコンクリート平板900×900×100mmにUHPFRCを100mm打込み後に、室温で封緘養生を行い、その平板からφ200×200mmの試験体をコア抜きし、図-2に示す簡易一面せん断試験<sup>7)</sup>で確認した。せん断試験における傾斜角αは25、30および35度とし、各傾斜角につき試験体3本を製作した。

試験は、乾燥状態、湿潤状態、プライマー、プライマー+接着剤の4ケースで行った。接着剤は、エポキシ系接着剤(標準量1.4kg/m<sup>2</sup>)を使用した。プライマーは、接着剤に加えて使用されるマイクロクラック補修用の浸透性エポキシ樹脂を使用した。それぞれの規格値を表-5に示す。

試験結果を表-6に示す。水平打継目が乾燥状態では、試験体のうち3体がコア抜き時にはく離してしまったことや純せん断強度が0.54N/mm<sup>2</sup>と低いことから、一体性を確保することが難しいと考える。UHPFRCにおいても、一般的なセメント系材料と同様に乾燥状態で打継ぎを行う場合には、ドライアウトの影響で接着強度が低下していることが考えられる。それに対して、水平打継目を湿潤状態、プライマー、プライマー+接着剤とした場合では、純せん断強度が3.0N/mm<sup>2</sup>以上と床版に作用する水平せん断応力に対して十分な強度を有しているといえる。

### 3.3 引張接着性能(材齢3時間)

コンクリートとUHPFRCの材齢3時間での引張接着性能を2回の試験施工で確認した。試験施工は、1回目が下層コンクリート上に長さ4000×幅6000×厚さ100mmの範囲に、2回目が既設コンクリートを下層コンクリートとして、その上に長さ117500×幅5900mmの範囲に、UHPFRCを厚さ30mm打設した。

下層コンクリート面は、SBにより研掃処理した。試験施工1回目では湿潤状態とアクリル系プライマー(以下、吸水調整剤)の2種類で比較を行った。試験施工2回目は、構造物施工管理要領<sup>8)</sup>の床版上面増厚工に準拠し、施工端部から500mmの範囲に接着剤を額縁状に塗布した。施工端部以外を湿潤状態とすると接着剤塗布範囲にも水が入り接着不良を起こす可能性が考えられたため、事前に接着剤塗布範囲以外に吸水調整剤を塗布し、乾燥後に接着剤を塗布した。UHPFRCの打込みは専用のスク

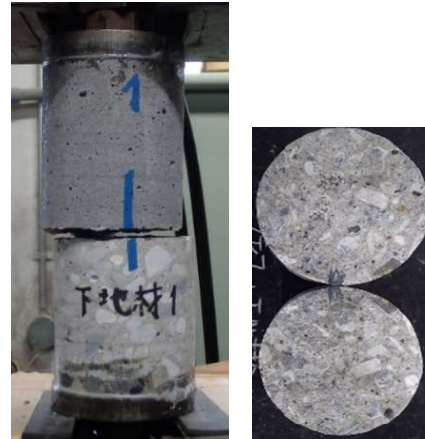


写真-1 一軸引張試験状況および破断面

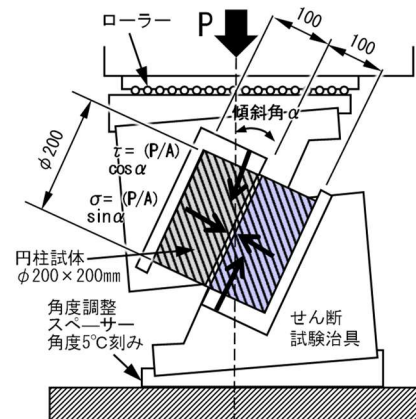


図-2 簡易一面せん断試験装置の概要

表-5 プライマーと接着剤の規格値

試験項目 (試験方法)	規格値	
	プライマー	接着剤
比重(硬化物) JIS K 7112	1.10±0.10	1.40±0.20
曲げ強さ JIS K 7203	35N/mm <sup>2</sup> 以上	35N/mm <sup>2</sup> 以上
圧縮降伏強さ JIS K 7208	50N/mm <sup>2</sup> 以上	50N/mm <sup>2</sup> 以上
圧縮弾性率 JIS K 7208	1.0×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上	1.0×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上
引張せん断接着強さ JIS K 6850	10N/mm <sup>2</sup> 以上	10N/mm <sup>2</sup> 以上
引張接着強さ JIS A 6909	1.6N/mm <sup>2</sup> 以上	1.6N/mm <sup>2</sup> 以上

表-6 簡易一面せん断試験結果(平均値)

打継目	純せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断面
湿潤	3.16	界面
乾燥	0.54	界面
プライマー	3.69	下面コンクリート
プライマー+ 接着剤	3.40	界面

リード（写真-2）で行い、打込み後 2 時間半～3 時間の間にコアカットを実施した。試験方法は、NEXCO 試験法 434<sup>6)</sup>に準じて、建研式引張試験（直径 φ100mm）とした（写真-3）。

試験結果を表-7 に示す。湿潤状態、吸水調整剤、接着剤で有意な差は確認されず、目標値 1.0N/mm<sup>2</sup> 以上を確認した。破断面は、上層破壊、または上層表層はく離であった。このことから、打継目処理は、全面的湿潤状態、または施工端部 500mm の接着剤と施工中央部（端部以外）の吸水調整剤の組合せで全範囲において必要な接着力が得られると考える。UHPFRC の 3 時間後の圧縮強度（現場封緘養生）は、30N/mm<sup>2</sup> 程度であった。

#### 4. 鉛直打継目（施工目地）：UHPFRC 同士

##### 4.1 引張・せん断接着性能

UHPFRC 同士の一体性を確保できる鉛直打継目形状を検討するため、一軸引張試験と簡易一面せん断試験を 3.1 節および 3.2 節と同じ方法で実施した。ただし、簡易一面せん断試験の試験体は UHPFRC で φ200×100mm を打込み後に、UHPFRC を 100mm 打込む方法とした。また、打継目はどちらも WJ 処理後に湿潤状態とした。

一軸引張試験の結果、接着強度は 4.3N/mm<sup>2</sup> であった。簡易一面せん断試験の結果、純せん断強度は 4.88N/mm<sup>2</sup> であった。破断面は、どちらの試験でも界面であった。この結果より、打継目を直線形状とした場合には、母材と同等のひび割れ発生強度（6.0N/mm<sup>2</sup> 以上）を得られない。それに対して、常温硬化型 UFC の接合部<sup>9)</sup>を参考にして、鋸歯形状とした場合、引張抵抗とせん断抵抗が作用するため UHPFRC のひび割れ発生強度と同等以上の性能を得られる可能性が示された（図-3）。

##### 4.2 上面増厚梁の曲げ試験による一体性検討

UHPFRC の鉛直打継目の形状を比較検討するために、図-4 に示す試験体を製作し、曲げ試験を実施した。試験体は、下層コンクリート幅 150mm×高さ 140mm×長さ 1000mm に、増厚として、UHPFRC を 30mm、または SFRC を 50mm 打込み、常温で封緘養生とした。水平打継目は、3.2 節の結果より、SB 処理し、湿潤状態とした。SFRC の配合を表-8 に、使用材料を表-9 に示す。



写真-2 UHPFRC 打込み状況



写真-3 建研式引張試験状況

表-7 引張接着強度試験結果（3 時間）

項目	打継目	接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
試験施工 1 回目	湿潤	1.21	28.7
	吸水調整剤	1.32	33.7
試験施工 2 回目	吸水調整剤	1.19	27.2
		1.22	
	接着剤	1.19	
		1.21	

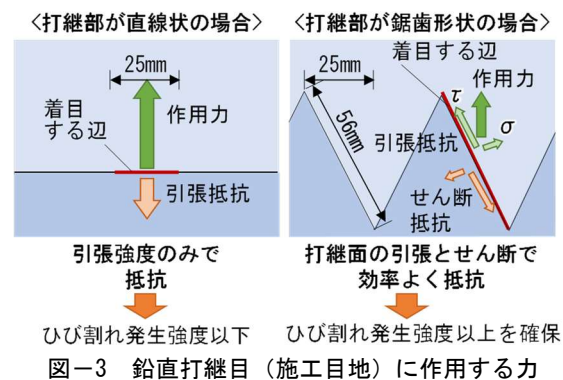


図-3 鉛直打継目（施工目地）に作用する力

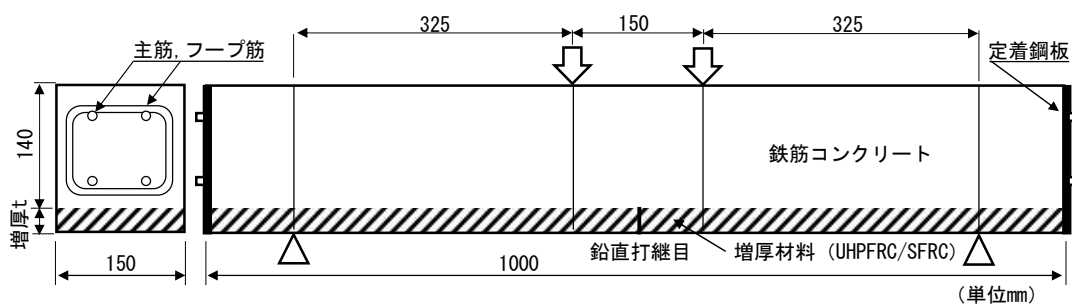


図-4 上面増厚梁の曲げ試験概要図

表-8 SFRCの配合

W/P (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					添加量(kg/m <sup>3</sup> )	
	W	C	EX	S	G	SF	Ad
41.8	174	396	20	864	814	100	7.5

表-9 SFRCの使用材料

種類	記号	備考
練混ぜ水	W	上水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント
細骨材	EX	粉体系
粗骨材	S	砕砂+細砂
補強用鋼繊維	G	砕石
膨張材	SF	φ0.6×30mm
混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤

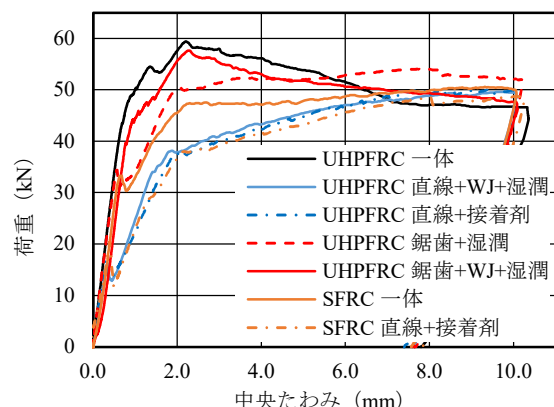


図-5 荷重-たわみの関係

UHPFRCの鉛直打継目は、直線形状と鋸歯形状で比較を行った。直線形状は、コンクリートの打継処理を想定したWJ処理+湿潤状態、SFRCでの施工時を想定した接着剤とし、鋸歯形状は目荒しを行わない湿潤状態、UFCの接合部<sup>9)</sup>と同等の打継目処理としてWJ処理+湿潤状態とした。比較として、SFRCで使用されている直線形状で接着剤を塗布するケースも製作した。鉛直打継目は、試験体中央とし、半分を先行して打込み、硬化後に残り半分を打込んだ。ただし、UHPFRCの鋸歯形状で湿潤状態とした試験体は、短時間の施工目地を想定して、先行打込み部が自立するまで硬化後に残り半分を打込んだ。

ひび割れ発生強度に着目するため、荷重とたわみの関係の第一変化点に着目した。荷重とたわみの関係を図-5に、第一変化点(ひび割れ発生時)の荷重とたわみを表-10に示す。応力は、UHPFRCとSFRCで試験体の高さが異なる断面形状を考慮して、支点から載荷点までの距離からモーメントを算出して求めた。

試験の結果、直線形状の場合は、接着剤を使用した場合の試験後(写真-4(a))のように打継目でひび割れが入り、打継目状態によらず、SFRCの打継目(直線形状で接着剤を塗布)と同程度の第一変化点の応力しか得られないことが分かった。それに対して、UHPFRC同士の打継目は、鋸歯形状でWJ処理後に湿潤状態とした場合は、ひび割れが発生した箇所も鋸歯形状とは一致せず、打継目が一体となることが確認され(写真-4(b))、打継目を設けない一体の場合と第一変化点の応力が同等となり、ひび割れ発生強度が同程度になっていると考えられる。

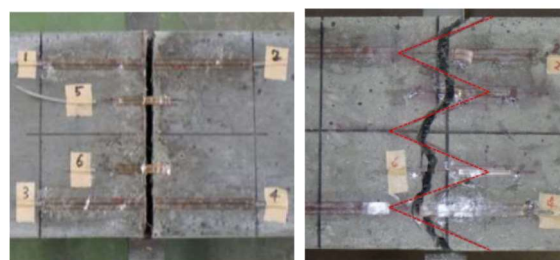
### 5. 水平打継目：UHPFRC—舗装・防水層

UHPFRCと舗装や防水層との一体性について表-11の組合せで検討を行った。橋梁レベリング層用混合物(以下、FB13)および防水層として使用されている橋梁レベリング層用グースアスファルト<sup>10)</sup>(以下、BLG: Bridge Levelling Guss asphalt)との一体性を確認した試験体は、UHPFRCで製作した平板300×300×60mmに接着層とし

表-10 上面増厚梁曲げ試験結果(第一変化点)

増厚材料	打継目形状	打継目状態	荷重(kN)	たわみ(mm)	応力(N/mm <sup>2</sup> )
UHPFRC	一体	—	40.8	0.628	9.2
	直線	WJ*処理+湿潤	17.7	0.340	4.0
		接着剤	17.0	0.295	3.8
	鋸歯	湿潤	34.4	0.558	7.7
WJ*処理+湿潤		39.8	0.809	9.0	
SFRC	一体	—	33.4	0.689	6.0
	直線	接着剤	19.9	0.388	3.6

\*WJ: ウォータージェット



(a)直線-接着剤 (b)鋸歯-WJ処理+湿潤

写真-4 上面増厚梁試験後(UHPFRC下面)

で一般的にコンクリート床版に塗布されるアスファルト乳剤を塗布し、上層を厚さ40mmで打込んだ。防水層との一体性を確認した試験体は、UHPFRCで製作した平板300×300×60mmにエポキシ系の接着層を塗布し、防水層を施工した。試験は、舗設負荷IIに準拠して行い、温度変化は-10°C、23°C、50°Cで実施した(図-6)。防水層で使用した材料は、構造物施工管理要領<sup>8)</sup>に記載されているグレードI(GI)とグレードII(GII)として、アスファルト加熱型の塗膜系床版防水工法(GI, GII-1)とウレタン・

ウレア樹脂を用いた防水工法（GII-2）を使用した。

試験結果を表-12, 13 に示す。すべてのケースにおいて、構造物施工管理要領<sup>8)</sup> で求められるアスファルト舗装とコンクリートに求める一体性の要求水準を満足することを確認した。

## 6. まとめ

超速硬型 UHPFRC の一体性に関する試験により、以下のことが明らかとなった。

- 1) コンクリートと UHPFRC の水平打継目は、ショットブラストまたはウォータージェットで目荒しを行い、湿潤状態、または接着剤・吸水調整剤の塗布で、いずれの場合も必要な接着性能が得られる。
- 2) コンクリートと UHPFRC の水平打継目は、乾燥状態とした場合には必要な接着性能が得られない。
- 3) UHPFRC 同士の鉛直打継目は、鋸歯形状としてウォータージェットで目荒しを行い、湿潤状態とすることで打継目を設けない場合と同等のひび割れ発生強度を得られる。
- 4) UHPFRC 同士の鉛直打継目は、直線形状として打継目処理をした場合には、鋸歯形状とした場合の半分程度のひび割れ発生強度となる。
- 5) 防水層・舗装との水平打継目は、接着層を塗布することで必要な引張接着性能を得られる。

これらより、超速硬型 UHPFRC は既設コンクリート床版、防水層・舗装と必要な一体性を確保できることが明らかになり、床版上面増厚工法に使用される SFRC に代替することで、効果的な補修が可能だと考える。

## 参考文献

- 1) 島崎利孝, 橋本理, 小栗直幸, 石田征男: 既設 RC 床版上面増厚工法への現場打ち UFC の適用性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, 2019
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価書, 2012
- 3) 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), 2004
- 4) 富井孝喜, 青木峻二, 玉滝浩司, 藤野由隆: 床版上面増厚工法用超速硬型超高性能繊維補強コンクリートの配合設定, 土木学会, 第 77 回年次学術講演会, V-233, 2022.9
- 5) 青木峻二, 富井孝喜, 伊藤智章, 伊藤隆紘: 床版上面増厚工法用超速硬型超高性能繊維補強コンクリートの物性および耐久性, 土木学会第 77 回年次学術講演会, V-234, 2022.9

表-11 UHPFRC と舗装・防水層試験一覧

舗装・防水層	引張接着強度	せん断接着強度
FB13	-10, 23, 50°C	-10, 23, 50°C
BLG	-10, 23, 50°C	-10, 23, 50°C
GI・GII	23°C	—

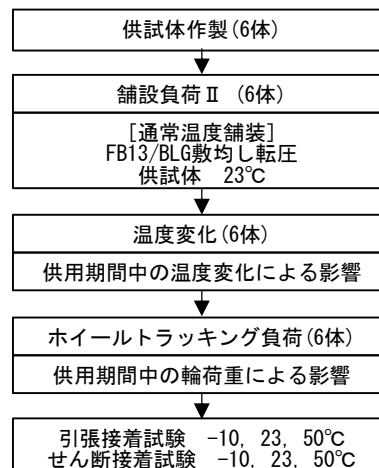


図-6 舗装との接着性検討の流れ

表-12 舗装との接着性試験結果

試験項目	試験結果 (N/mm <sup>2</sup> )		基準値	
	FB13	BLG		
引張接着強度	-10°C	1.71	2.77	1.20 以上
	23°C	1.33	1.93	0.60 以上
	50°C	0.26	0.57	0.07 以上
せん断接着強度	-10°C	1.35	1.52	0.80 以上
	23°C	0.67	0.46	0.15 以上
	50°C	0.08	0.11	0.01 以上

表-13 防水層との引張接着強度試験結果 (23°C)

試験結果 (N/mm <sup>2</sup> )	GI	GII-1	GII-2	基準値
		1.97	1.87	1.94

- 6) 東・中・西日本高速道路株式会社: NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法, 2020.7
- 7) 永山功, 渡辺和夫, 小林正登: コンクリートのせん断強度についての実験的考察 (その 1), 土木研究所資料, 第 2829 号, 1990.3
- 8) 東・中・西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領, 2020.7
- 9) 塩畑英俊, 平野勝彦, 川西貴士, 佐々木一成: 防水層に UFC を用いた複合プレキャスト PC 床版の開発, コンクリート工学, 59 巻 (2021), 7 号
- 10) 田中敏弘, 鎌田修, 丸山陽: 防水機能を有する橋面舗装の開発, 第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告書, 土木学会, 2016.11