

論文 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料 (UHP-SHCC) を用いた コンクリート床版増厚工法に関する実験的検討

青山 達彦*1・国枝 稔*2・柳井 修司*3・鎌田 修*4

要旨: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料 (以下, UHP-SHCC) は, 合成短繊維をセメント系モルタルマトリクスに混入した繊維補強モルタルの一種であり, 高強度, 高靱性で, 非常に緻密な材料である。コンクリート床版の予防保全に着目すると, UHP-SHCC は物質移動抵抗性が高いことから, 床版の表層のみに敷設 (増厚) することで, 防護機能を発揮し, 早期劣化や損傷の抑止策となることが期待できる。本論文では, UHP-SHCC を用いた耐久性の高いコンクリート床版増厚工法の確立を目的とし, UHP-SHCC の防水性能, 基層コンクリートと UHP-SHCC および UHP-SHCC とアスファルト舗装との付着性能について検討を行った内容について述べる。

キーワード: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料, 床版増厚工法, 付着, 疲労, 接着剤, 予防保全

1. はじめに

近年, 道路構造物などにおいて早期劣化や損傷が生じており, 合理的な補修・補強工法の確立が急務となっている。また, それらは, 供用中の維持・管理, 将来的な補修方法も含めて, 求められる要求性能と設計耐用期間に応じて LCC も考慮して構築されることが必要となってきた。

道路橋のコンクリート床版 (以下, RC 床版) においては, 継続的な交通荷重によって疲労破壊が進行していく。その際, 舗装路面に降った雨水がコンクリート床版まで浸透し, コンクリート床版と舗装面の摩耗を促進させることにより, 疲労寿命を著しく短くさせることが確認されている¹⁾。さらに, 凍結防止剤や飛来塩分などによる塩害, 中性化等も加わった複合劣化が生じた場合, より早期に損傷が進行する²⁾。現状では, 舗装と RC 床版の間に塗膜系あるいはシート系の防水層を設置して, 延命を講じているが, これらの防水層は早期に劣化する事例も報告されている³⁾。

本論文では, 合成短繊維をモルタルに混入した超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料 (UHP-SHCC)⁴⁾ を RC 床版とアスファルト舗装の間に設置することで, 防水性, 遮塩性および RC 床版の耐荷性能を向上させることのできる, 舗装と床版が一体となった高耐久性床版構造の検討を行った。具体的には, UHP-SHCC の防水性能, 基層コンクリートと UHP-SHCC, UHP-SHCC とアスファルト舗装の付着性能を室内試験で検討した。さらに, 室内検討結果より推奨されると判断された付着方法について, 実施工レベルで性能確認を行った。

表-1 各種繊維補強材料の強度特性 (例)

	材齢	UFC	UHP-SHCC	HPFRCC
		蒸気養生後	28日	28日
圧縮強度	N/mm ²	189.5	89.0	33.5
ヤング係数	kN/mm ²	44.3	25.2	16.3
引張強度	N/mm ²	15.3	7.9	4.8
曲げ強度	N/mm ²	37.4	21.0	12.2

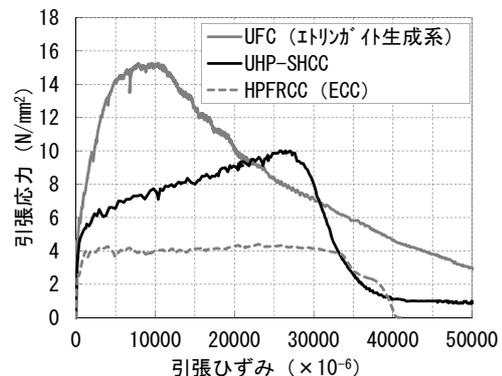


図-1 各種セメント系繊維補強材料の変形性能 (例)

2. UHP-SHCC

2.1 UHP-SHCC の性能

UHP-SHCC は, 圧縮強度 80~100N/mm²程度, 引張強度 8N/mm²程度, 曲げ強度 20N/mm²程度であり, 表-1 に示すように強度特性として超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC) および複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (以下, HPFRCC) の中間に位置する材料である。また, 図-1 に示すように, HPFRCC と同様にひび割れが生じた後も, ひずみ硬化型の変形性能を有する, 高強度, 高靱性な材料である。

一方, 床版増厚工法において, 基層コンクリートと増

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ研究員 修 (工) (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 博 (工) (正会員)

*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ上席研究員 修 (工) (正会員)

*4 鹿島道路 (株) 技術研究所 第三研究室室長 博 (工) (正会員)

厚材料との剛性の差異は、界面に大きなせん断力を作させ、剥離を生じさせる原因となるため、増厚材の剛性は普通コンクリートと同等であることが望ましい。また、UHP-SHCCのヤング係数は25kN/mm²程度と普通コンクリートに近い値で、かつ物質透過抵抗性にも優れていることから⁴⁾、基層コンクリート表面に薄層で設置することができるため、床版増厚に適した材料であるといえる。

2.2 使用材料・配合

本論文で用いた UHP-SHCC の配合を表-2 に示す。使用材料は、水、低熱ポルトランドセメント、石灰石微粉末、シリカフューム、膨張材、細骨材を含むプレミックス材料、高性能減水剤および高強度ポリエチレン繊維であり、細骨材を除いた水粉体比は 22.3% である。また、本論文において、基層コンクリートの配合は 40-8-20H (表-3) であり、養生方法は、UHP-SHCC、基層コンクリートともに 20℃ 環境で湿布養生とした。

3. 実験概要 (室内検討)

3.1 UHP-SHCC の防水性

UHP-SHCC を防水層として考慮できるかを検討するために、舗装調査・試験法便覧 (以下、試験法便覧)⁵⁾ に示される防水性試験 II を実施した。供試体は、厚さ 50mm の基層コンクリートに、厚さ 50mm の UHP-SHCC で増厚した平板から採取した φ100mm のコア供試体を用いた。試験概要を図-2 に示す。試験後、供試体を割裂した断面にブラックライトを照射し、検査液の浸透の有無および浸透深さを確認した。

3.2 基層コンクリートと UHP-SHCC の付着性

既往の研究より基層コンクリートと UHP-SHCC には高い付着性があることが報告されている⁴⁾。ただし、その付着性は静的条件下において確認されたものであり、日射、雨水および疲労など、実際の道路床版の供用環境を模擬・想定した動的条件下においても確認の必要がある。本検討では、道路床版として必要な付着性を確保するために、付着オーバレイ工法や増厚工法として開発されたエポキシ樹脂接着剤を塗布する方法⁶⁾を試みた。

用いた接着剤は、ASTM D 5896 に準拠して行ったドライングレコールド試験より、硬化時間の異なる 2 種類のエポキシ樹脂とした (図-3)。本論文では、硬化するまでの時間が長い方を「接着剤 A」、硬化するまでの時間が短い方を「接着剤 B」と記す。接着剤塗布量は 1.4kg/m² とし、基層コンクリートはショットブラスト (以下、SB) およびウォータースト (以下、WB) によって表面処理を施した。本検討では、付着性の評価試験として、試験法便覧に示す、直接引張試験、一面せん断試験および水浸引張疲労試験を実施した。実験要因と、その試験項目を表-4 に示す。なお、各試験の目標値は、NEXCO

表-2 UHP-SHCC の配合

W/P* (%)	単体量 (kg/m ³)							PEF (kg)	
	W	プレミックス材料					SP		DA
		C	LP	SF	EX	S			
水粉体比	水	低熱ポルトランドセメント	石灰石微粉末	シリカフューム	膨張材	細骨材	高性能減水剤	消泡剤	ポリエチレン繊維
22.3	347	1017	264	233	40	156	23.3	0.2	14.6 (1.5Vol%)
							※P=C+LP+SF+EX		

表-3 基層コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	SP
水セメント比	細骨材率	水	早強ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤
47.0	46.5	170	362	813	939	2.2
※材齢7日：圧縮強度51.5N/mm ²						

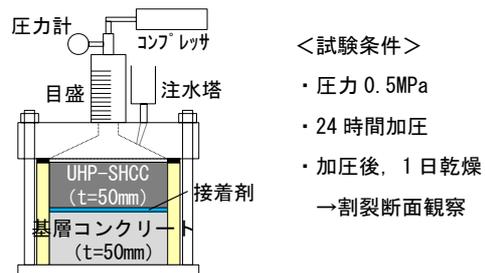


図-2 防水性試験 II 概要

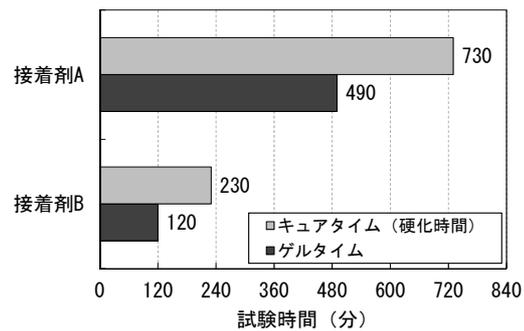


図-3 接着剤の硬化時間

表-4 実験要因と試験項目 (コンクリート-UHP)

実験要因	試験項目				
		直接引張試験		一面せん断試験	水浸引張疲労試験
		温水負荷前	温水負荷後		
下地処理方法	SB	A	○	○	○
	B	○	○	○	-
接着剤	WB	A	○	○	-
	B	○	○	○	-

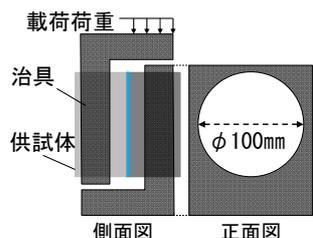
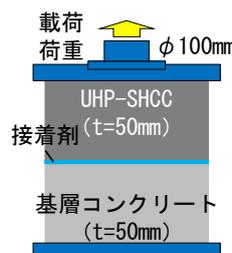


図-4 直接引張試験概要 図-5 一面せん断試験概要

構造物施工管理要領 (以下、NEXCO 要領)⁷⁾ に示されるものとした。

(1) 直接引張試験（温水負荷前後）

図-4に試験概要を示す。試験は、常温時に加え、供試体を50℃の温水に10日間浸漬させて温水負荷を与えた後においても行った。載荷速度は、NEXCO要領をもとに、毎秒0.06±0.04N/mm²の範囲で応力を制御しながら載荷した。

(2) 一面せん断試験

図-5に試験概要を示す。載荷速度は、試験法便覧をもとに、毎分1mmの変位制御とした。

(3) 水浸引張疲労試験

あらかじめ50℃の温水に10日間浸漬させて温水負荷を与えたコア供試体を、直接引張試験と同様に試験機に設置し、水浸状態となるように供試体外部をプラスチック製フィルムで囲った。その後、全振幅0.6N/mm²（下限0.1N/mm²，上限0.7N/mm²），振動数10Hzで480万回引張荷重を与えた後、直接引張試験に供した。

3.3 UHP-SHCCとアスファルト舗装の付着性検討

本検討では、UHP-SHCCとアスファルト舗装界面の付着を確実に確保できる付着材料の選定を試みた。使用する付着材料は、通常のアスファルト乳剤（以下、PK-4）、ゴム入りアスファルト乳剤（以下、PKR-T）、タイヤ付着抑制型乳剤（以下、PKM-T）といったアスファルト乳剤系と、より付着性を高めるために、良好な付着性能が確認されている歴青系塗膜防水材⁸⁾の4種とした。

付着性の評価試験として、試験法便覧に示されている引張接着試験とせん断試験を実施した。また、温水内で動的な載荷を負荷させた場合の引張付着強度の低下の程度を、水浸ホイールトラッキング試験機を使用して確認した。実験要因と、その試験項目を表-5に示す。なお、各試験の目標値はNEXCO要領に示されるものとした。

(1) 引張接着試験

供試体の作製方法は、300×300mm，厚さ50mmのUHP-SHCC平板に付着材料を塗布し，その上に厚さ50mmでアスファルト混合物を舗装した。その平板供試体からφ100mmでコアを採取して供試体とした。引張接着試験方法は，前述の直接引張試験と同様であるが，供試体上面にアスファルト混合物，下面にUHP-SHCCとなるように治具を設置して試験を実施した。載荷速度は毎秒0.1N/mm²の応力制御とし，試験温度は23℃とした。

(2) せん断試験

せん断試験は上述の平板から100×100mmで切出して供試体とした。載荷速度は毎分1mmの変位制御とし，試験温度は23℃とした。

(3) 温水内動的輪荷重載荷後の引張接着試験

引張接着試験とせん断試験の場合と同様に300×300×厚さ50mm×2層の平板供試体を作製し，表-6に示す条件で，水浸ホイールトラッキング試験機（写真-1）を

表-5 実験要因と試験方法（UHP-舗装）

実験要因		試験項目			
		引張接着試験	せん断試験	温水内動的輪荷重載荷後の引張接着試験	
付着材	乳剤系	PK-4	○	○	-
		PKR-T	○	○	-
		PKM-T	○	○	-
	歴青系	防水材	○	○	○

表-6 温水内動的輪荷重載荷試験条件

項目	設定値
試験温度	40±0.5℃
輪荷重	686N
接地圧	0.63N/mm ²
走行速度・距離	42往復/分・280mm
走行時間	6時間
トラバース速度・幅	100mm/分・250mm
水浸時の水位	供試体上面より下10mm



写真-1 水浸ホイールトラッキング試験機

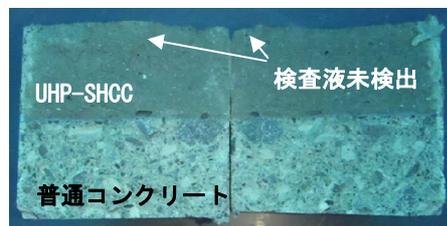


写真-2 防水性試験Ⅱ結果（コンクリート-UHP）

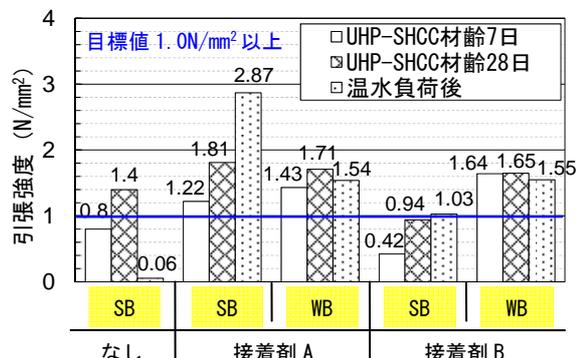


図-6 直接引張試験結果（コンクリート-UHP）

用いて，温水内で動的な輪荷重負荷を与えた。試験温度は，本検討では，界面の付着への影響を確認するために40℃とした。輪荷重載荷終了後，供試体からφ100mmのコアを採取し，23℃の温度条件下で引張接着試験を実施した。

4. 試験結果（室内試験）

4.1 UHP-SHCC の防水性

防水性試験Ⅱの結果、試験後の供試体割裂面にブラックライトを照射しても、写真-2 に示すように、UHP-SHCC への検査液の浸透は確認されなかった。したがって、UHP-SHCC の防水性能は極めて高く、防水層として優れた効果を発揮できることが示された。

4.2 基層コンクリートと UHP-SHCC の付着性

(1) 直接引張試験

各材齢、温水負荷後における直接引張試験の結果を図-6 に示す。全体的に材齢が長いほど引張強度も大きくなる傾向を示した。これは表-7 に示すように、材齢に伴う UHP-SHCC の強度増加が影響していると考えられる。

接着剤 A を用いた場合は、下地処理方法が SB、WB によらず目標値 1.0N/mm² 以上を満たした。

接着剤 B を用いた場合は、接着剤 A に比べて引張強度が小さい傾向を示すとともに、下地処理が SB の場合は、材齢 28 日においても、目標値を下回った。これは、UHP-SHCC は、低熱ポルトランドセメントや高性能減水剤を多量に用いており、硬化開始時間（凝結）が遅くなっていることから、UHP-SHCC が硬化する前に、硬化時間の短い接着剤 B が硬化してしまうため、樹脂が UHP-SHCC に浸透しなかったことが原因と考えられる。

次に、温水負荷後においては、接着剤を使用しない場合、引張強度が著しく低下した。このことから、日射や雨水の影響を受ける道路床版の使用環境下での引張強度を確保するためには、接着剤が必要であると判断された。強度が低下した原因については、UHP-SHCC の収縮や付着界面の形状（凹凸の程度）などが影響を与えていると考えられるが、詳細については現時点で解明できておらず、今後検討する必要がある。

(2) 一面せん断試験

一面せん断試験の結果を図-7 に示す。接着剤の有無および下地処理方法によって、せん断強度に大きな差はなかったが、SB で下地処理して接着剤 B を塗布した供試体は UHP-SHCC と接着剤の界面における破壊を生じた。その他の供試体は母材（UHP-SHCC または基層コンクリート）破壊が生じており、母材強度以上の付着強度を確保していることが確認できた。

(3) 水浸引張疲労試験

本試験は、直接引張試験およびせん断試験結果より接着剤 A を用いることとした。なお、下地処理については、現場における取水・排水などの制約条件により WB が使用できず、SB でなければ施工できない場合も想定し、本検討では、汎用性の高い SB を用いることとした。

水浸引張疲労試験後に直接引張試験に供した結果、引張強度は 2.74N/mm² 有しており、継続的な交通荷重によ

表-7 UHP-SHCC の各材齢の圧縮強度

材齢	1日	3日	7日	28日
UHP-SHCCの圧縮強度 (N/mm ²)	19.8	37.5	60.8	90.7

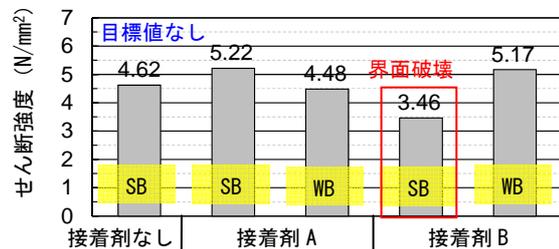


図-7 一面せん断試験結果（コンクリート-UHP）

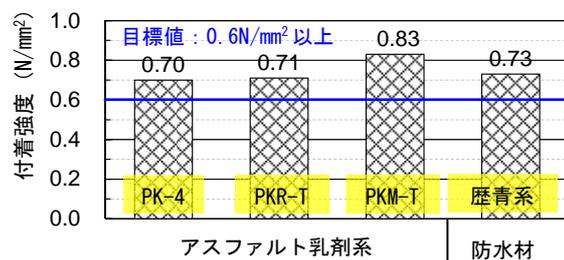


図-8 引張接着試験結果（UHP-舗装）

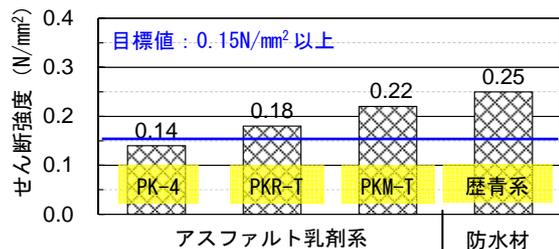


図-9 せん断試験結果（UHP-舗装）

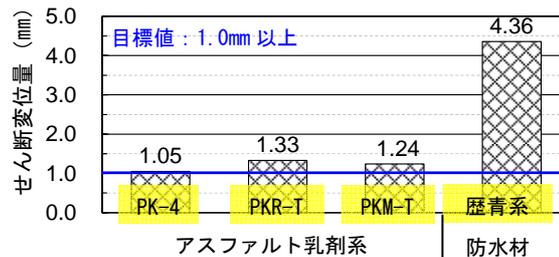


図-10 せん断試験での変位量（UHP-舗装）

る疲労荷重下においても、付着強度が確保できることが確認できた。

4.3 UHP-SHCC とアスファルト舗装の付着性検討

(1) 引張接着試験

引張接着試験結果を図-8 に示す。今回使用したすべての乳剤および防水材において、付着強度は目標値 0.6 N/mm² 以上を満たす結果が得られた。

(2) せん断試験

せん断試験結果を図-9 に示す。せん断強度は、乳剤である PK-4 においてのみ、目標値 0.15 N/mm² 以上を満たすできなかった。せん断試験時の変位量を図-10 に示す。

変位量はすべての付着材で目標値 1.0mm 以上を満足した。特に、歴青系塗膜防水材料の変位量は乳剤を大きく上回った。

(3) 温水内動的輪荷重載荷後の引張接着試験

本試験は、引張接着試験およびせん断試験の結果より、歴青系塗膜防水材料を付着材として使用した供試体についてのみ、水浸ホイールトラッキング試験機を用いて、載荷を行った。本試験の結果を図-11 示す。図より、輪荷重載荷後においても、目標値 0.6N/mm² 以上を満し、十分に付着強度が確保されていることが確認できた。

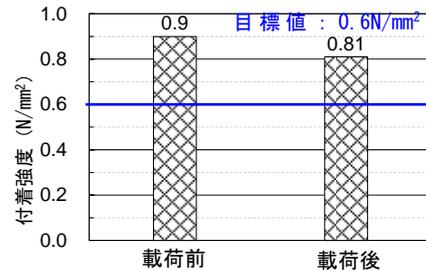


図-11 温水内動的輪荷重載荷後の引張接着試験 (UHP-舗装)

5. UHP-SHCC の施工性および付着性能 (試験施工)

5.1 試験施工概要

室内検討により、基層コンクリートと UHP-SHCC、UHP-SHCC とアスファルト舗装の推奨される付着方法が概ね選定できた。本検討では、実施工を想定した試験施工によって、UHP-SHCC の施工性能を確認するとともに、以下に示す項目に着目して、基層コンクリートと UHP-SHCC の付着性を評価した。

- ① 最適な基層コンクリートの下地処理方法
- ② 最適な接着剤 A の塗布量
- ③ UHP-SHCC の施工厚さ
- ④ 珪砂散布による付着強度の向上策

試験施工は、実構造物を模擬した、施工延長 17m、幅 4.3m の基層コンクリートを設置した箇所で行った。表-8 に試験施工区の一覧を示す。

①下地処理は、WB や SB と同等の凹凸度合いを狙った高圧洗浄機による洗い出し処理と、新たに床研削機による表面研削処理（以下、研削機処理）を実施した。洗い出し処理は、基層コンクリートの表面が硬化する前に粗骨材の表面が確認できるまで表面処理を施した。研削機処理は、基層コンクリートが硬化後、目で骨材が確認できる程度まで研削した。

②接着剤 A の塗布量は、室内検討で 1.4kg/m² が多めであると判断されたため、試験施工においては減らす方向とした。

凹凸の大きい洗い出し処理を行った工区 1~3 においては、塗布量を 1.0kg/m² とした。また、凹凸の小さい研削機処理を行った工区 4~9 のうち、工区 4 は 0.8kg/m² とし、工区 5~9 は、さらに半分の 0.4kg/m² とした。研削機処理に対して、洗い出し処理における接着剤塗布量が多い理由は、凹凸の度合いが大きい付着面に対して、接着剤の膜厚を十分に確保する必要があるからである。

③UHP-SHCC の施工厚さは、基本の 30mm から 20mm、15mm と変化させた。

④珪砂散布は、接着剤 A を塗布後に、4 号珪砂を 0.4kg/m² もしくは 0.7kg/m² 散布する工区を設けた。

表-8 試験施工区一覧

工区	下地処理	付着方法		UHP厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)
		接着剤A塗布量 (kg/m ²)	珪砂散布量 (kg/m ²)		
1	洗い出し	1.0	-	30	1.75
2			0.4		2.52
3			0.7		2.76
4	研削機処理	0.4	0.8	20	2.91
5			0.7		2.97
6			-	15	3.61
7			0.4		3.60
8			0.7		3.70
9			-	-	-



写真-3 試験施工実施状況

5.2 試験施工結果

(1) 施工性

UHP-SHCC は、現場内で、容量 380L、回転数 33rpm (50Hz) のパン型ミキサを使用して製造した。

供給および敷均し方法は、施工位置までスクイーズ式ポンプで圧送し、写真-3 に示すように、トラス型簡易コンクリートフィニッシャ（ホークアイスクリード）で敷き均し、最後に金ごてで表面仕上げを行った。

試験施工の結果、UHP-SHCC は、一般的なポンプおよび敷均し機械で施工可能であることが確認できた。また、施工厚さが最も薄い 15mm の工区においても引きずり等の不具合はなく、良好に施工できることが確認できた。

(2) 付着性能

直接引張試験結果を表-8 に付記するとともに、図-12 に工区 1~6 の結果を示す。直接引張試験は前述の方法（図-4）と同様に行った。

①下地処理については、洗い出し、研削機処理ともに引張強度の目標値 1.0N/mm² 以上を満足することができた。また、引張強度は洗い出し処理の方が研削機処理よりも小さくなった。これは、洗い出し処理は、WB や SB と異なり、凹凸の度合いが同等でも、表面の脆弱な部分

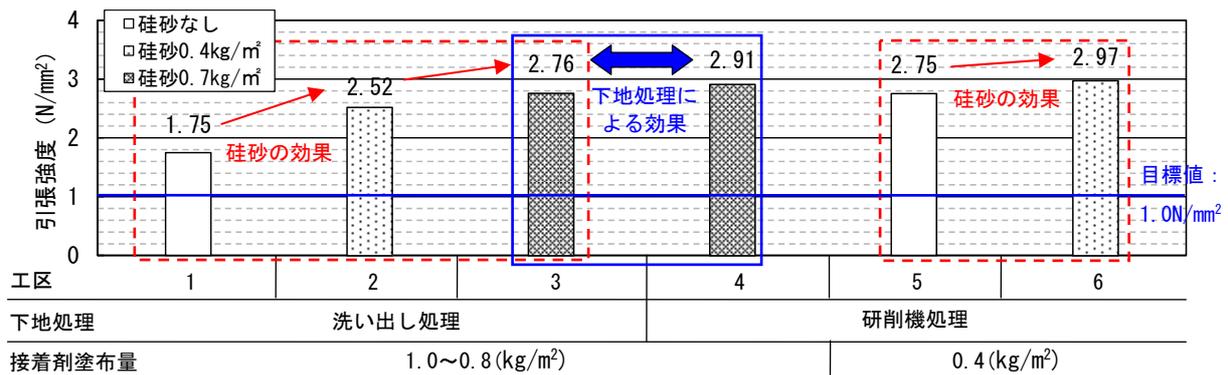


図-12 直接引張試験結果 (UHP-SHCC 施工厚さ 30 mm 工区)

が、確実に除去できなかったためと考えられる。

②接着剤の塗布量は、凹凸の大きい洗い出し処理には、接着剤の膜厚を確保するために、 1.0kg/m^2 程度がよいと判断された。また、凹凸の小さい研削機処理は、塗布量を 0.4kg/m^2 まで減らしても十分に付着強度を確保していることが確認できた。ただし、下地処理の凹凸の程度によって最適量を微調整する必要がある。

③UHP-SHCC 施工厚さは、いずれにおいても、十分な付着強度を確保できることが確認できた (図-13)。なお、施工厚さが薄いほど引張強度が大きくなる結果が得られたが、これは、供試体厚さが薄いほど偏心が小さくなったためと考えられる。

④付着強度向上のために、珪砂を 0.4kg/m^2 散布した場合、洗い出し工区で4割程度、研削機処理工区で1割程度の強度増加があり、珪砂を散布することは付着強度の向上に有効であることが確認できた。

6. まとめ

本研究での知見を以下に示す。

- 1) UHP-SHCC とコンクリートの付着性は優れているが、温水負荷直接引張試験の結果、疲労に対しては接着剤が必要である。
- 2) UHP-SHCC の硬化時間 (凝結) に合わせた硬化時間の長い接着剤 A の方が、付着性が優れる。
- 3) UHP-SHCC とアスファルト舗装の一体性 (特にせん断強度とせん断変位量) は、アスファルト乳剤よりも歴青系塗膜防水材料の方が優れる。
- 4) 基層コンクリートの下地処理は、洗い出しよりも脆弱部をより除去できる研削機処理の方が UHP-SHCC との付着性が優れる。
- 5) 接着剤の塗布量は、洗い出し処理では、 1.0kg/m^2 程度、研削機処理においては、 0.4kg/m^2 程度でよい。
- 6) 基層コンクリートの下地処理後、4号珪砂を散布することで、より確実に高い付着性が得られる。
- 7) UHP-SHCC の施工厚さは、15mm でも、良好に施工性でき、十分に付着性を有すると判断された。

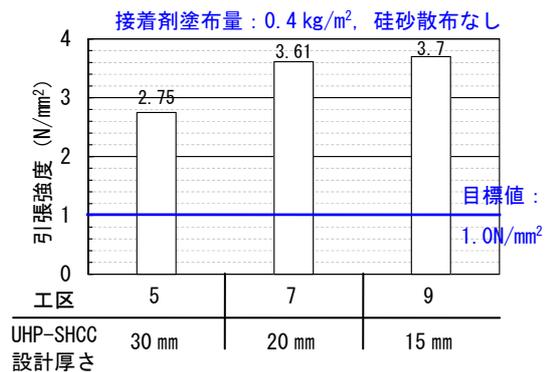


図-13 直接引張試験結果 (UHP-SHCC 施工厚さの影響)

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床板設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，2007。
- 2) 村越潤・田中良樹・長屋優子：凍結防止剤がコンクリート部材の耐久性に及ぼす影響に関する研究，平成19年度土木研究所成果報告書，No.27，2007。
- 3) 加藤亮・宮永憲一：橋梁コンクリート床版防水工の高度化に対応したレベリング層用混合物の検討，道路建設，No.739，pp.64-70，2013。
- 4) 国枝稔・志水康祐・江口輝行・上田尚史・中村光：超高強度ひずみ硬化型モルタルの基礎物性と補修材料としての利用法，土木学会論文集，Vol.67，No.4，pp.508-521，2011。
- 5) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕，2007。
- 6) 児玉孝喜・加形護・岡本達也・紀本一郎・柿崎勉・福手勤：エポキシ樹脂の機械塗布による付着オーバーレイ工法の実用化に関する研究，土木学会論文集，Vol.65，No.4，pp.501-515，2009。
- 7) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，2013。
- 8) 神下竜三・鎌田修・坂本康文：コンクリート上の薄層ポーラスアスファルト舗装構造に関する研究，第28回日本道路会議論文集，No.32108，2009。