

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

鹿島建設(株)	正会員	工修	○柳井	修司
鹿島建設(株)	正会員	工修	渡邊	有寿
中日本高速道路(株)	正会員	Dr. ès sc.	牧田	通
中日本高速道路(株)			北川	寛和

Abstract : In order to upgrade expressway bridge decks, research to develop a method to increase the thickness of bridge decks and replace top surface of bridge decks by using Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete (UFC) has been started. In the present paper, outline of the research is explained and results of small-scale construction experiments are detailed. Low shrinkage UFC showed good workability and consistency when it is cast on top of concrete substrates. It was understood that plastic shrinkage cracking of UFC can be prevented by conducting wet curing immediately after casting. Delamination of UFC from concrete substrates was not observed and interfacial bond between UFC and concrete was robust.

Key words : Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete , Bridge Deck, Upgrading

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート「UFC (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete)」は、優れた強度特性（圧縮強度150MPa以上，引張強度5MPa以上，ひずみ硬化特性），高い物質浸透抵抗性（普通コンクリートと比較して，透気係数が約1/1,000，塩化物イオン拡散係数が約1/100）を有するセメント系材料である¹⁾。UFCは，プレキャスト部材として利用される事例が多いが，海外では，コンクリート構造物の補修・補強に場所打ち施工で利用される場合も増えてきており，これまでに50以上の橋梁や建物に適用がなされている²⁾。一方，国内の高速道路の大規模更新・大規模修繕事業においては，鉄筋コンクリート床版（以後，RC床版）の撤去・取替えが基本方針となっているが，耐荷性や耐疲労性の向上を目的とした「上面増厚」や外来塩分により劣化したRC床版の耐久性の回復・向上を目的とした「上面打替え」も視野に入れた事業計画となっている。筆者らは，後者（RC床版の増厚や打替え）において，UFCの優れた性能を活用し，既設床版の機能を向上するための研究開発を進めている。本稿では，その進捗を概説するとともに，研究開発の一環として実施した小規模施工実験の結果について報告する。

2. 既設床版の機能向上の概念

RC床版の上面打替え工法における機能向上の概念を図-1に示す。従来工法として考えられる手法としては，劣化した床版上面のコンクリートをウォータージェットで除去し，鉄筋を残した状態で鋼繊維補強コンクリート（SFRC）を打ち込むことになる。その場合，鉄筋背面へのコンクリートの廻込み不良やそれに伴う既設コンクリートとの一体性の低下が懸念される。また，劣化因子の浸透に対する抵抗性を高めるためには防水層の施工が必要となる。さらには，構造設計上，鉄筋の追加配置や増厚が必要となる場合も想定され，その場合には，下部工の補強も余儀なくされる。打替え用の材料として，強度特性，物質浸透抵抗性に優れたUFCを薄層で活用することで，構造的，耐久性，維持管理性に優れた道路床版にアップグレードできるものと考えている。

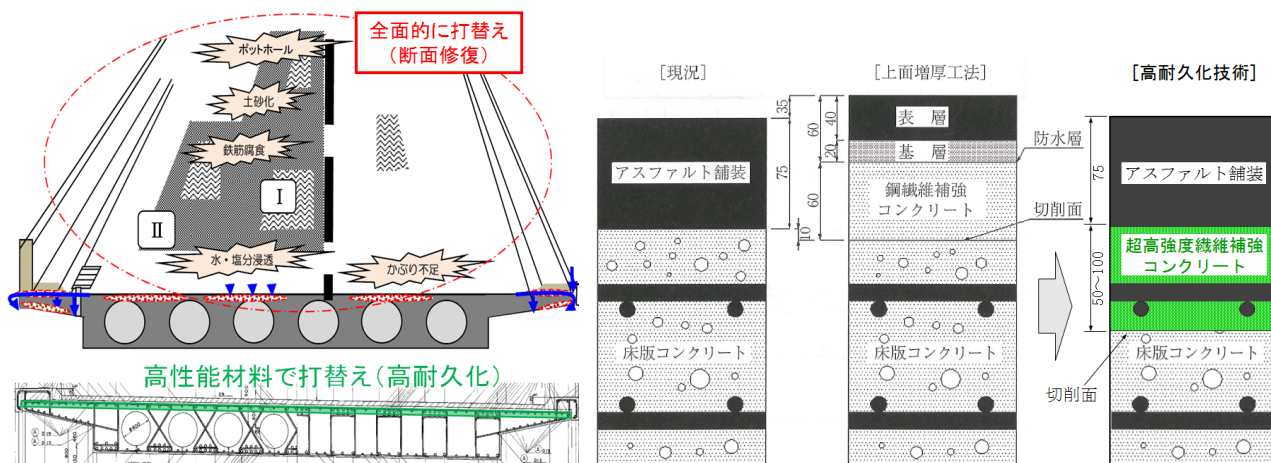


図-1 機能向上の概念 (RC床版の打替え・増厚)

3. 研究開発の概要と進捗

研究開発は、(1)既存UFCの適用性評価、(2)UFCの仕様、材料・配合に関する検討、(3)施工方法・施工機械に関する検討に大別して進めている。

3.1 既存UFCの適用性評価 (小規模施工実験)

既存UFCは、単位結合材量が多く、自己収縮量が多い。そのため、既設RC床版の上面に薄層に広がりを持って打ち込んだ場合、鉄筋やはつり面の凹凸に収縮が拘束されてひび割れが生じたり、反り上がりや界面剥離が生じたりすることが懸念される。そこで、まずは、既存UFCを用いた小規模施工実験を行い、解決すべき課題を抽出した。実験では、供用中のRC床版の諸元に倣った模擬床版を製作し、UFCの施工性を確認するとともに、硬化過程における変形挙動やひび割れの発生状況を観察した。詳細は、後述する。



写真-1 海外での施工事例

3.2 UFCの仕様、材料・配合に関する検討

UFC が場所打ちにより床版上面に薄い層 (50~100mm) として施工された場合、UFC の収縮が既設床版により拘束されほぼ一軸状態の引張応力が発生することとなる。また、橋梁では床版の張出し部や中間支点上近傍においても、作用する荷重により、同様の一軸状態の引張応力が発生することとなる。床版の補修・補強の材料として UFC を適用するためには、引張特性を直接引張試験により正確に把握する必要がある。これまでの UFC の直接引張試験は、厚さ 10mm 程度の平板供試体で実施され、繊維が荷重の作用方向と同じ向きに配向されやすい状態で行われてきた。本研究開発では、増厚や打替えの層厚を考慮し、繊維が3次的に配向する寸法を有する供試体で、新たな一軸引張試験装置により、UFC の一軸引張挙動を評価しているところである。その結果については、別の機会に報告したい。

一方、UFCの施工に際しては、製造から運搬、打込みまでの作業性はもとより、仕上げ性が重要となる。高速道路では、地形条件に沿った縦断勾配に加えて、カーブや排水を考慮した横断勾配があり、これらを精度良く仕上げるためには、既設床版の鉄筋背面への充填性を確保しつつ、「だれ」を生じさせないための性状が必要となる。現在、UFCにだれ防止性を付与する検討を進めており、5%程度の勾配であれば対応できるようになっている。

3.3 施工方法・施工機械に関する検討

高速道路床版の上面打替えにUFCが大規模に適用された例を写真-1に示す。総延長2.1kmの打替えにおいて、現場近傍に設けた専用バッチャープラントでUFCを40m³/日で製造し、専用の機械で打込み・敷均しがなされた。

国内工事においては、通行止めによる道路閉鎖、供用しながらの車線規制など施工時の制約に応じた施工方法を選定する必要がある。そのため、現存する施工機械の適否や新たな機械の開発の要否を見極めるため、比較的規模の大きい施工実験を行う計画である。

4. 小規模施工実験

4.1 模擬床版

施工実験で用いた模擬床版を図-2に示す。中空RC床版の上縁80mmをUFCで打ち替えることを想定して、4,000×2,000×厚さ280mmのRC床版を製作した。配筋は実際に供用されている床版を再現した。打継面はウォータージェットでの研り面を模擬すべく、既設コンクリートの打込み後に凝結遅延剤を散布して洗出し処理した。模擬床版は、全部で3体製作し、UFCの配合、接着剤の塗布、初期養生方法を変化させた。実施ケースを表-1に示す。

4.2 UFCの配合

実験に供したUFCの配合を表-2に示す。UFCは、国内で場所打ちによる橋梁建設³⁾に使用された実績のある収縮低減型のもの(配合A)と、さらなる収縮抑制を試行して膨張材を10kg/m³混和したもの(配合B)の2種類とした。

4.3 接着剤

薄層で打ち込まれたUFCの収縮や反り上がり変形に対して、既設床版への接着剤塗布の有無が一体性に与える影響を確認するため、床版No.2は、NEXCO構造物施工管理要領(平成28年7月)に準じて額縁状に接着剤を塗布した(図-2)。使用した接着剤は、付着オーバーレイ工法や増厚工法用として開発されたエポキシ樹脂接着剤であり、UFCと同種材料との適合性が確認されている⁴⁾。

4.4 UFCの製造・打込み・仕上げ・養生

UFCの製造は、練混ぜ量0.2m³/バッチとし(パン型ミキサ、容量0.38m³、回転数60r.p.m.)、材料投入、鋼繊維の攪拌を含む練混ぜ、フレッシュ試験で30分の製造サイクル(0.4m³/h)とした。UFCの運搬・打込みにはバケットフォークを用い、突き棒による軽微な締固めの後、金ごて仕上げを行った。配合Aを打ち込んだ床版No.1およびNo.2については、各床版の中で不織布を敷いて散水したうえでビニールシート養生した箇所と、何も養生しない箇所の2区間を設けて初期養生方法の違いを観察した(写真-2)。配合Bを打ち込んだ床版No.3は、全面を湛水養生した。養生期間は、1日間とした。

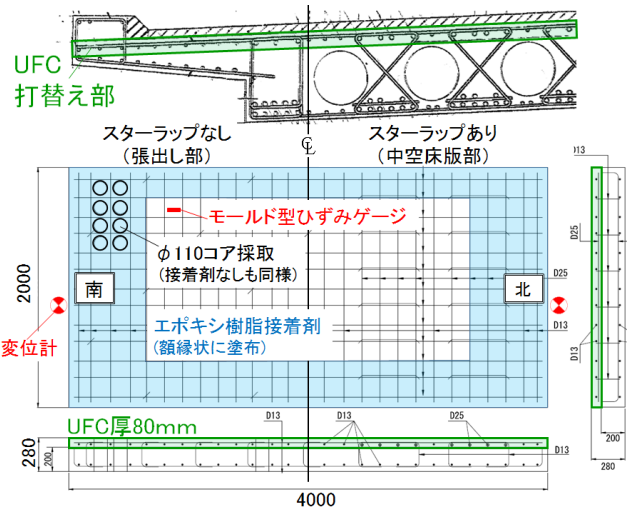


図-2 模擬床版 (中空床版を再現)

表-1 実施ケース (小規模施工実験)

床版 No.	配合	接着剤	湿潤養生
1	A 収縮低減型UFC (実績配合)	塗布せず	シート養生1日 なし
2		額縁状に塗布	シート養生1日 なし
3	B 配合A +膨張材10kg/m ³	塗布せず	湛水養生1日

表-2 実験に供した UFC の配合

配合	水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						鋼繊維 ^{*4} (kg)
			水 ^{*1}	結合材 ^{*2}	膨張材 ^{*3}	骨材	収縮低減剤	高性能減水剤	
A	15.2	2.0	195	1,287	—	905	12.9	32.2	137.4 (1.75vol.%)
B	15.2	2.0	195	1,287	10	895	12.9	32.2	137.4 (1.75vol.%)

*1: 高性能減水剤中の水分を含む
 *2: エトリンガイト生成系プレミックス結合材(収縮低減型)
 *3: エトリンガイト・石灰複合系低添加型膨張材
 *4: 繊維長15,22mmのブレンド、径0.2mm、引張強度2,000N/mm²以上



写真-2 初期養生の状況 (床版 No. 2)

4.5 測定・評価項目

測定および評価項目を表-3にまとめ示す。UFCのフレッシュおよび硬化後の性状の測定のほか、施工性、ひび割れの発生状況を観察した。また、打込み後の床版の挙動として、反り上がりや付着界面のずれ、長さの変化を、埋込み型ひずみ計によるUFCのひずみとともに測定した。さらに、既設コンクリートとUFCの一体性を評価するため、コア供試体を採取して引張試験を実施した。

表-3 測定・評価項目一覧

測定項目	測定方法	備考	
まだ固まらない UFC	練上がり温度	JIS B 7411	
	モルタルフロー	JIS R 5201	落下・打撃なし
	空気量	JIS A 1128	-
硬化した UFC	圧縮強度	JIS A 1108	-
	ひび割れ発生強度	UFC指針 ¹⁾ による	JSCE-G552の方法で求めた曲げひび割れ発生強度・曲げ強度から算出
	引張強度		無拘束自由ひずみ(自己収縮+乾燥収縮)翌日に脱型し、床版と同じ環境にて測定
	自由収縮ひずみ (□100×L400mm)	埋込み型ひずみ計による	コア供試体で測定
細孔量	水銀圧入法	-	
施工性	打込み性	目視観察	-
	充填性		-
	仕上げ性		-
ひび割れ	初期	近接目視観察	プラスチック収縮ひび割れに着目
	中・長期		自己収縮・乾燥収縮に伴うひび割れに着目
床版の挙動	床版の反り上がり	変位計による	図-5 参照
	界面のずれ		
	床版の長さ変化		
UFCの全ひずみ (床版上面)	埋込み型ひずみ計による	既設コンクリート・鉄筋に拘束された条件下での全ひずみ	
一体性	引張試験	JHS-434	①引張試験 ②温水負荷後の引張試験 ③温水負荷+水浸疲労後の引張試験

5. 小規模施工実験の結果

5.1 UFCの性状と施工性

UFCの施工状況を写真-3に示す。UFCのモルタルフローが225~275mmの範囲では、流動性に優れ、鉄筋背面の隅々にまで充填されることが確認され、運搬・打込みに際しても特段の課題は見受けられなかった。しかし、実験時の温度条件(外気温32℃、練上り温度39℃)や製造・供給速度(0.4m³/h)の制約から、打込みの待ち時間が生じ、時間経過に伴って流動性が低下する状況も生じた。その場合には、タンピングによる締固め(写真-3;右)を行うなど、労を要したのが実状である。勾配を有する床版の実施工では、だれ止め性を付与したUFCを打ち込むことになり、その場合の敷均し、締固め、タンピング、仕上げの手法や施工機械の選定が、今後の検討課題として抽出された。

5.2 養生方法とひび割れ

配合Bを用い、湛水養生した床版No.3には、打込みから1ヶ月経過した段階でも目視確認できるひび割れは発生しなかった。一方、配合Aを用いた床版No.1およびNo.2の上面には、図-3に示すようなひび割れが発生した。初期に不織布を敷いて散水を行い、シートを被せて初期養生した部分(上半分)には目視確認できるひび割れが発生しなかったのに対し、初期養生を行わなかった部分(下半分)には全面にわたってひび割れが発生した。ひび割れは、打込み完了後直ちに生じたプラスチック収縮ひび割れであり、打込みから1ヶ月間の観察においてもひび割れ幅・本数に変化は

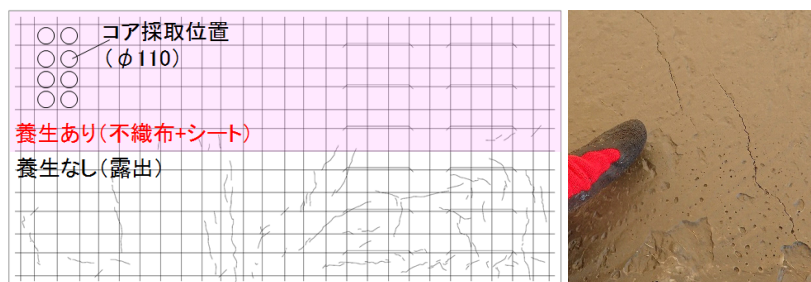


図-3 ひび割れ発生状況(床版No.2, 配合A) ※: No.1も同様



写真-3 施工状況(小規模施工実験)

みられなかった。なお、ひび割れの発生状況や挙動は、床版No. 1とNo. 2に有意な差は見られず、接着剤の塗布がひび割れの発生に及ぼす影響はほとんどないと判断された。

5.3 収縮とひび割れ

無拘束状態とした直方供試体(①)と模擬床版(②)で計測されたUFCの収縮ひずみの測定結果を図-4および表-4に示す。なお、模擬床版に設置したモールド型ひずみゲージの向きは、収縮が大きいと想定される長辺方向(南北方向)とした(図-2)。結果より、計測されたUFCの収縮ひずみには、配合による相違が認められ、膨張材を添加することで収縮が緩和されたことが分かる。ただし、直方供試体のひずみ差(約350 μ)に比べて、模擬床版のひずみ差(約250 μ)が小さくなる傾向を示した。また、直方供試体のひずみと模擬床版のひずみの差も配合Bの方が小さくなる傾向を示したことから、供試体レベルで評価される膨張材の効果が実施工レベルでは軽減されてしまう可能性があると考えられた。

模擬床版に打ち込まれたUFCには、その収縮が周囲の鉄筋や下面のコンクリートに拘束されるため、計測された収縮ひずみに相当する引張応力(拘束応力)が発生していることになる。しかし、初期養生がなされていればひび割れは発生しておらず、UFCの引張強度が、発生した引張応力を上回っていたものと判断される。なお、初期の発生応力については、UFCの弾性係数の発現、ごく微細なひび割れの発生に伴う応力の解放や鋼繊維の応力負担、クリープによる緩和など、未解明な点も多い。今後、詳細な検討を行い、初期ひび割れを防止するための手法について研究を進めていく。

5.4 反り上がり・長さ変化

床版の変形は、図-2および図-5に示すように、反り上がりや長さ変化が最も生じると考えられる長辺方向の端部に変位計を設置して計測した。ここで、変位計の設置は脱型後であり、打込み後から2日間の水和初期段階での変形は計測できていない。計測結果の一例として、既設RC床版に対するUFCの相対変位量(鉛直方向, 床版No. 1, 配合A, 接着剤なし)を図-6に示す。床版端部のUFCの相対変位量は、マイナス方向(収縮)に卓越しており、反り上がりの兆候や懸念していた既設RC床版からのUFCの剥離は生じなかった。また、UFCの配合や接着剤による優位な差はなく、床版面内において収縮や相対変位の大小はあると推察されるものの、いずれのケースもUFCと既設RC床版が一体となって

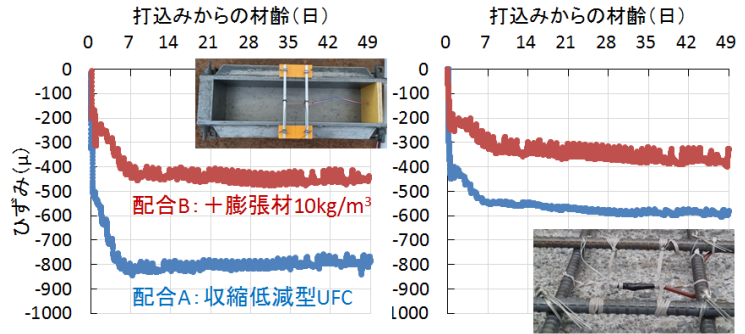


図-4 UFCの収縮ひずみ(供試体/模擬床版)

表-4 収縮ひずみ(材齢49日)

	床版No.1 (配合A)	床版No.3 (配合B)	配合による ひずみ差
直方供試体の自由ひずみ(①)	800	450	350
模擬床版の全ひずみ(②)	600	350	250
ひずみの減少量(①-②)	200	100	—

*1:直方供試体は6面乾燥状態 (いずれも打込み直後から計測)
*2:模擬床版の計測は長辺(南北)方向

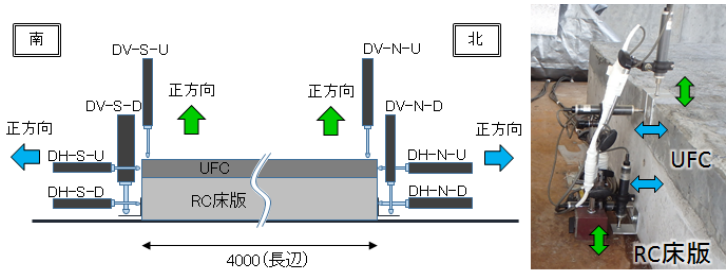


図-5 床版の変位計測

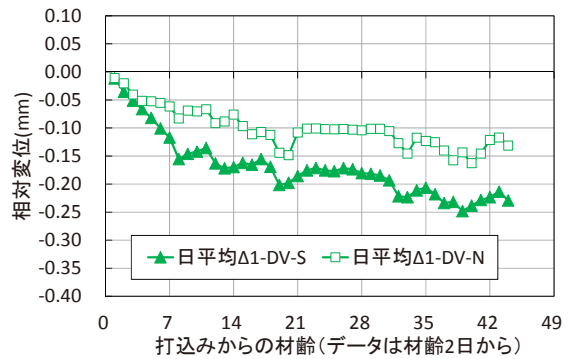


図-6 相対変位(鉛直方向, 床版 No. 1)

変形したことが示された。

5.5 UFCと既設コンクリートの一体性

模擬床版から採取したコア試料(図-3)を用いて、UFCと既設コンクリートの付着強度に関する試験を実施した。NEXCO試験法⁵⁾に準じた3種類の引張試験の結果を図-7に示す。破壊強度は、配合や収縮量、接着剤の有無によらず、全試料で1.0N/mm²を上回り、既設部の打継処理やUFCの施工が適切であれば、界面の付着は良好に得られることが確認された。一方で、接着剤の塗布については、付着の向上目的に反して異種材料の界面が2つ形成されること、その分だけ付着に関する不確実性が増すことも考えられ、今後さらなる検討が必要と考えている。

5.6 現場打ちされたUFCの細孔構造

模擬床版No.2から採取したコア試料のUFC(配合A)の細孔量の測定結果を図-8に示す。比較として、蒸気養生(85°C-24時間)した場合の結果も併記した。打込みから7ヶ月(屋外2ヶ月、室内5ヶ月)経過したUFCの空隙率(60μm以下)は、蒸気養生のものよりもやや大きく、養生中の温度や水分の供給状態が影響していると推察された。本実験に供したUFCは、UFC指針¹⁾に示される標準材料とは異なる材料構成であり、両者の細孔分布には相違がある。ただし、現場打ちされた本UFCの空隙率は、UFC指針の標準材料と同程度であり、十分な緻密さを有すると判断された。今後、現場養生したUFCの塩分浸透性や透気係数などの耐久性データを拡充していく予定である。

6. おわりに

高速道路床版の増厚や打替えに、UFCを適用するための研究開発の概要と一部の成果について記した。小規模施工実験では、低収縮性を付与した既存UFCにより、良好な施工性と既設床版との一体性が得られること、初期に湿潤養生を行うことでひび割れの発生を防止できること、反りや変形は微小であることなどが知見として得られ、工法としての実現性を確認することができた。現在、工法の確立に向けて、研究開発に鋭意取り組んでいるところであり、その成果は順次発表していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 渡邊, 柳井, 入内島, 栖原：超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を場所打ち施工したPC橋—小滝川橋—, コンクリート工学Vo.53, No.7, pp.629-634, 2015.
- 4) 国枝, 管, 熊部ら：超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料(UHP-SHCC)とコンクリート床版の付着特性に関する研究, 土木学会第68回年次学術講演会, pp.875-876, 2013.
- 5) 中日本高速道路(株)：NEXCO試験方法 第4編 構造関係試験方法 試験法434 増厚コンクリート用エポキシ接着剤の性能試験方法, 2017.

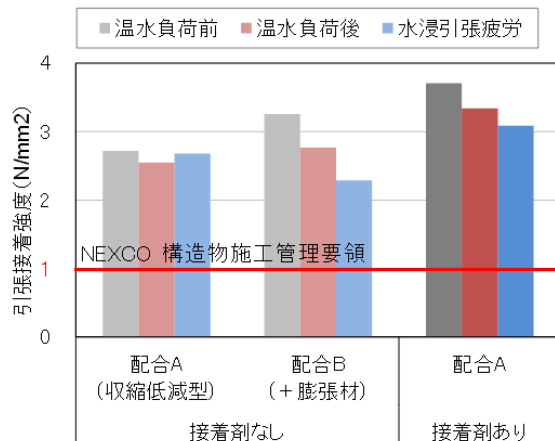


図-7 UFCと既設コンクリートの一体性

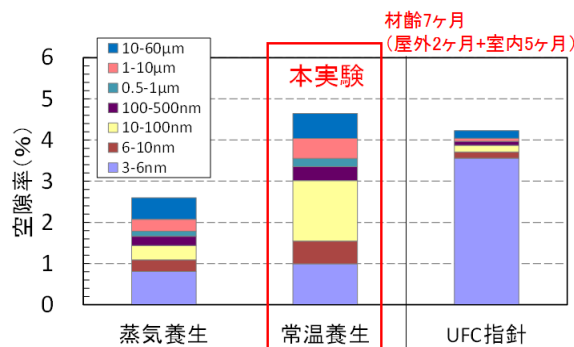


図-8 UFCの細孔径分布(コア供試体)