

超速硬型の超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) の開発と橋梁床版上面増厚への適用

藤野由隆・伊藤隆紘・玉滝浩司・高原幸之助

富井孝喜・青木峻二・石関嘉一・川西貴士・福井真男・本間 順

当社と株式会社大林組および大林道路株式会社は、道路橋などの既設床版の耐久性向上を目的に、床版上面増厚工法に適用される補修材として、高強度かつ高耐久性を有する超速硬型の超高性能繊維補強コンクリート (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete : UHPFRC) を共同開発した。開発したUHPFRCは、急硬材を添加したことで早期強度発現性に優れ、早期に交通開放が可能となる。このUHPFRCについて、実高架橋の床版上面増厚工法への適用性を評価した結果、フレッシュ性状および圧縮強度ともに安定しており、施工性も良好であることが確認できた。

キーワード：床版上面増厚工法、超速硬型、UHPFRC、補修材、品質管理手法

1 緒言

高度経済成長期に急速に整備された鉄道や道路などのインフラは、長期供用や気象変動の激しい環境での使用により著しい劣化や変状が進行している。その中で道路橋では、インフラの機能維持のため床版取替工事による大規模更新や床版上面増厚工法による大規模修繕が行われている。床版上面増厚工法では、超速硬型の鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete : 以下、SFRC) などが使用されるが、既設床版との一体化不足による浮き・剥離、土砂化などの再劣化が報告されている。また、道路橋床版は床版の疲労、凍結融解作用、凍結防止剤散布による塩害等に起因する床版上面の浮き・剥離、土砂化、塩化物イオンの侵入による鋼材腐食などによっても劣化が進行し、耐久性が低下することが懸念されている。そこで、道路橋床版の耐久性向上を目的に、床版上面増厚工法に使用可能な材料として、高強度かつ高耐久性を有する超速硬型の超高性能繊維補強コンクリート (以下、UHPFRC) を開発した。本報では、UHPFRCの材料開発における配合選定やその品質、施工時の品質管理手法等を示すとともに、実際の橋梁へ適用した事例について報告する。

2 UHPFRCの特徴

図1に短繊維を混入したセメント系材料 (Fiber Reinforced Cement Composites : FRCC) の分類を示す。UHPFRCは、FRCCの中でも強度の高い材料であり、ひび割れに対する抵抗性が大きく、ひび割れが発生した場合でもひび割れ幅が大きくなる特徴がある。緻密な材料であり、塩化物イオンや水などの浸透が表層に限定されるため、ひび割れ進展による耐力低下や表層の土砂化、鋼材腐食の抑制・防止に期待できる優れた材料である。今回開発された材料は、これまで国内では明確に分類されていなかったが、2024年9月に土木学会から「高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針(案)」⁽¹⁾が発刊され、高

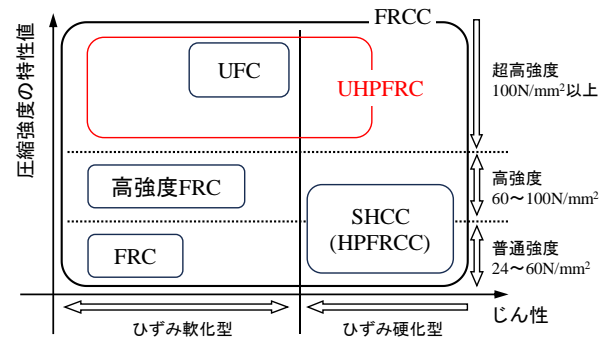


図1 FRCCの分類⁽²⁾を参考に作成

強度繊維補強セメント系複合材料(Very high strength Fiber reinforced Cement composites : VFC)として、同指針に基づいて設計・施工できるようになった。

3 材料開発

3.1 実験概要

(1) 試験項目および目標性能

表1に試験項目および目標性能を示す。モルタルフローの目標値は、最低限の施工性確保と、施工部の勾配に合せた調整ができるように150~280mmと幅を設けた。また、早期交通開放を実現するため、材齢3時間の圧縮強度は24N/mm²以上を目標とした。その他、現行の基準値や道路橋床版の耐力向上を実現させることを目的に、材齢28日の圧縮強度、ひび割れ発生強度、引張強度、接着強度および収縮の目標値を定めた。なお、圧縮強度は、温度依存性を確認するため、環境温度5~40°C(5°C毎)について実施した。

(2) 使用材料

表2に使用材料を示す。材料は「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁽³⁾」に準拠した材料をベースとし、早期の強度発現性を実現させるために急硬材を使用した。また、施工時の可使用時間と流動性(モルタルフロー)を調整するために、遅延剤と高性能減水剤を使用した。

(3) 配合

表3に開発したUHPFRCの検討配合を、図2にW/Pと材齢3時間強度の関係を、図3に急硬材添加量と材齢3時間強度の関係をそれぞれ示す。配合を検討するにあたり、W/Pおよび急硬材添加量を変えて、最初に材齢3時間の圧縮強度を確認した。その結果、W/Pおよび急硬材添加量と材齢3時間強度はそれぞれ直線関

係であった。これらの結果より、W/P=15.8%、急硬材添加量=140kg/m³の条件で目標強度を満足することがわかったため、この条件で配合を設定した(表4)。

表2 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
補強用鋼繊維	SF	φ0.16mm×13mm
急硬材	HA	粉体系
遅延剤	CR	粉体系

表3 UHPFRCの検討配合

W/P (%)	単位量(kg/m ³)					添加量(kg/m ³)	
	W	P	S	SP ^{※1}	HA ^{※2}	SF	CR
14.1	210	1467	693	12.6	120	157	4.0
15.8		1327	837	8.6	120		3.6
				8.6	140		
				9.9	160		
17.5		1201	951	7.2	120		3.2
20.1		1046	1090	5.8	120		3.1
22.7	926	1198	4.8	120	2.8		

※1：Wに含む ※2：Pに含む

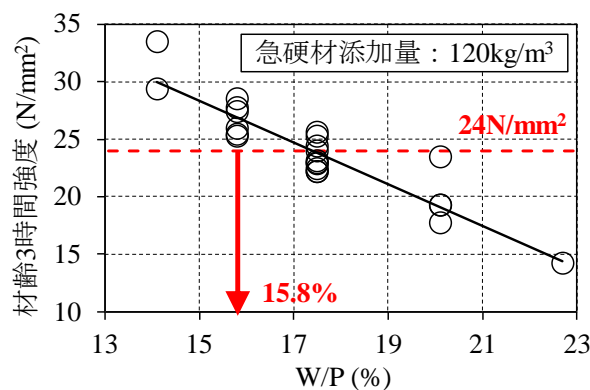


図2 W/Pと材齢3時間強度の関係

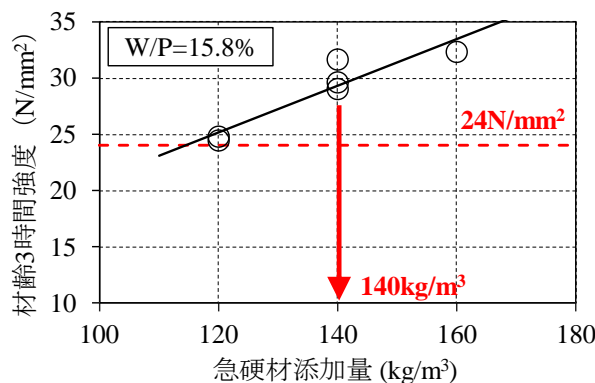


図3 急硬材添加量と材齢3時間強度の関係

表1 試験項目および目標性能

試験項目	目標値
モルタルフロー(mm)	JIS R 5201(静置) 150~280
空気量(%)	JIS A 1148 4.0以下
圧縮強度(N/mm ²)	材齢3時間(封緘) 24以上
	材齢28日(標水) 130以上
ひび割れ発生強度 ^{※1} (N/mm ²)	JIS A 1113 割裂引張強度 6.0
	JIS A 1113 割裂引張強度 9.0
引張強度 ^{※1} (N/mm ²)	JIS A 1113 割裂引張強度 9.0
接着強度 ^{※1} (N/mm ²)	JIS A 1171 1.5
収縮(%)	試験法439 0.025以下
促進中性化深さ(mm)	JIS A 1171 —
塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm ² /年)	JSCE-G574 —

※1 材齢28日で試験を実施。

表4 UHPFRCの配合

W/P (%)	単位量(kg/m ³)					添加量(kg/m ³)	
	W	P	S	SP※1	HA※2	SF	CR
15.8	210	1327	837	調整	140	157	調整

※1：Wに含む ※2：Pに含む

3.2 実験結果

(1) 各環境温度における圧縮強度

圧縮強度は、環境温度5～40°C(5°C毎)ごとに、高性能減水剤および遅延剤添加率の異なる9水準について測定した。図4に材齢3時間の圧縮強度の測定結果を、図5に材齢28日の圧縮強度の測定結果を示す。材齢3時間の圧縮強度は、環境温度5°Cおよび40°Cの強度がやや低いものの、全環境温度の標準偏差は2.4N/mm²、平均強度は30.9N/mm²でいずれの環境温度についても目標強度を満足した。材齢28日の圧縮強度は、環境温度が高くなるほど小さくなる傾向を示したものの、環境温度40°Cの場合でも平均値は154N/mm²と高い数値を示した。また、全環境温度における標準偏差は9.1N/mm²、平均強度は163N/mm²で材齢28日における目標強度を十分に満足した。

(2) その他の強度特性

材齢28日での割裂引張試験によるひび割れ発生強度および引張強度は、それぞれ9.25N/mm²および14.0N/mm²であり、目標強度を満足した。また、材齢28日での接着強度は、2.7N/mm²以上と高い値を示した。床版上面増厚工法では床版の耐荷性能を回復・向上させるため、高い引張特性や既設部との一体性が重要となる。本試験結果より、十分な一体性を確保でき、耐久性の向上が図れることが確認された。

(3) 膨張・収縮特性

図6に「NEXCO試験法439(床版上面における断面修復用補修材の試験方法 寸法変化率試験)」における長さ変化率および質量変化率の測定結果を示す。長さ変化率は材齢28日で0.021%と膨張挙動を示した。床版上面における断面修復の寸法安定性は0.025%以下と定められており、その基準値を満足した。

(4) 耐久性

耐久性を確認するため促進中性化深さおよび塩化物イオンの拡散係数を測定した。CO₂濃度5%環境、促進期間26週における促進中性化深さは0mmであり、中性化は認められなかった(写真1)。また、10%NaCl溶液に39週間浸せさせた場合の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は0.032cm²/年であり一般的なコンクリート(0.14～0.9cm²/年)と比較して小さい値を示した。

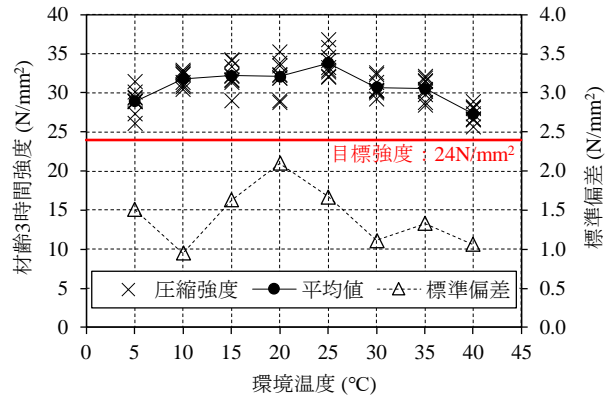


図4 材齢3時間の圧縮強度

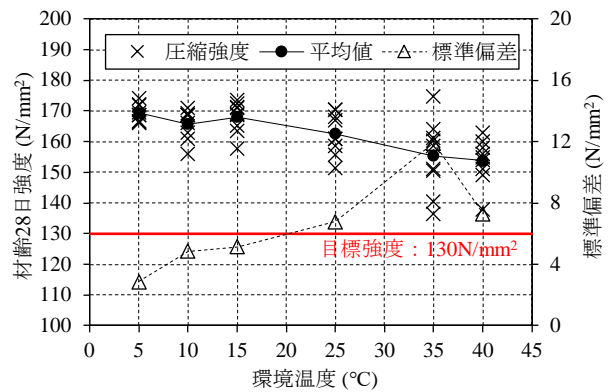


図5 材齢28日の圧縮強度

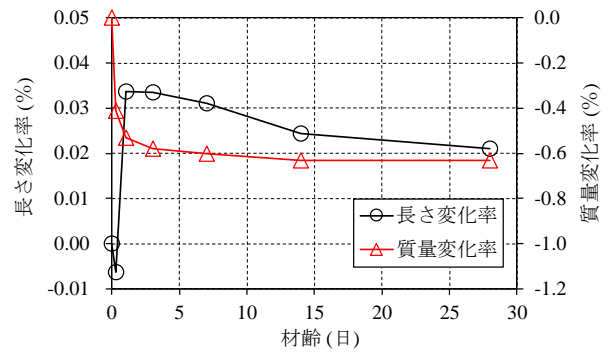


図6 長さ変化率および質量変化率

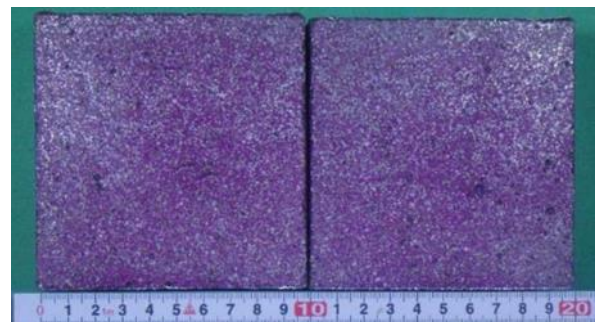


写真1 促進中性化の状況

4 品質管理手法

4.1 モルタルフローの温度依存性

(1) 実験概要

選定した配合において、施工時の品質管理手法を見出すため、環境温度が遅延剤添加率および高性能減水剤添加率に与える影響を調査した。運搬時間や施工時間を考慮して遅延剤添加率を3水準、施工性や道路勾配による変形を考慮して高性能減水剤添加率を各遅延剤添加率で3水準定めた計9水準について、環境温度5～40℃の範囲で5℃毎に試験を実施した。

(2) 環境温度20℃における測定結果

測定結果の一例として、図7に環境温度20℃における遅延剤添加率および高性能減水剤添加率を調整した場合のモルタルフローの経時変化を、写真2にはモルタルフロー試験時のモルタルの状態変化を示す。図7に示すように、遅延剤添加率を増やすことでフロー低下の開始時期を遅くできること、高性能減水剤添加率で初期フローを調整できることを確認した。なお、同等の初期フローを得るための高性能減水剤添加率は、遅延剤添加率の増加に伴い増加し、初期フローが大きいほど同一遅延剤添加率でも可使用時間がやや長くなった。

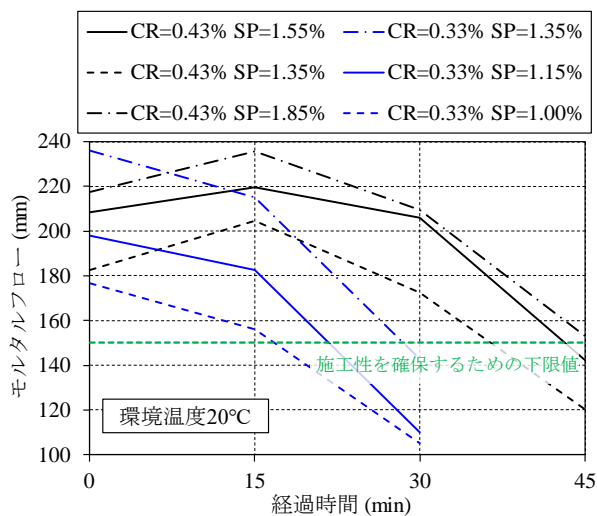


図7 モルタルフローの経時変化

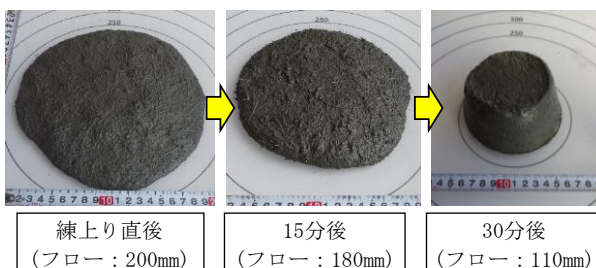


写真2 モルタルの状態変化

がやや長くなった。

(3) 環境温度の影響

図8および図9に環境温度と遅延剤所要添加率および高性能減水剤所要添加率の関係を示す。各環境温度におけるフレッシュ性状の測定値から、それぞれの添加率を換算した結果、所要の可使用時間を確保するための遅延剤添加率は、環境温度が低いほど小さく、高いほど大きくなった。急硬材は、水和反応によりエトリンガイトの生成を促進させて初期の硬化速度を速めている。そのため、環境温度が高いほどその効果が促進され、所要の可使用時間を得るための遅延剤の必要量が多くなったと考えられる。また、高性能減水剤添加率も環境温度が高くなるほど多く必要であった。この結果から、施工時の環境温度を測定し、所要の品質が得られるように環境温度に適した遅延剤添加率および高性能減水剤添加率を設定する必要があることがわかった。

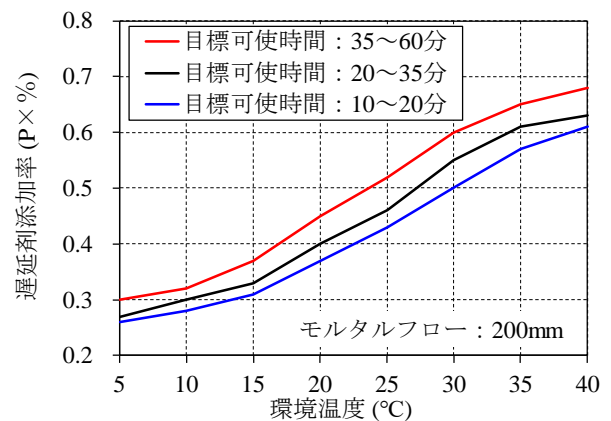


図8 環境温度と遅延剤所要添加率との関係

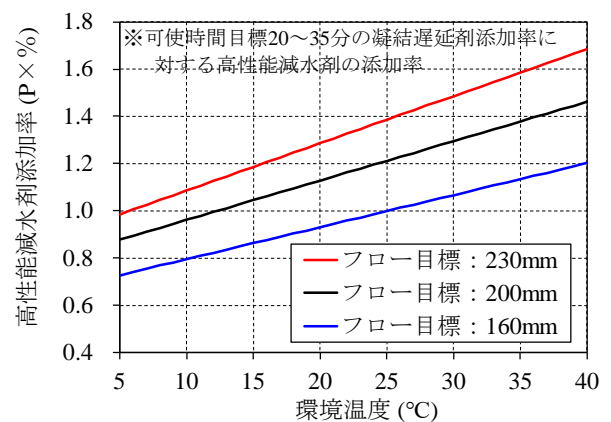


図9 環境温度と高性能減水剤所要添加率との関係

4.2 フレッシュ性状の調整方法

実際の施工現場における製造でモルタルフローの目標性能(150~280mm)を満足させるため、温度依存性の試験結果をもとに、環境温度5~40°Cの範囲で1°C毎に遅延剤添加率および高性能減水剤添加率をそれぞれ3段階に分けた計9段階の添加率早見表を作成した。表5に環境温度20°Cの場合の例を示す。この早見表を使用した以下の調整方法を策定した。

- (1) 1バッチ目製造時は外気温を測定して可使時間および流動性が作業上安全側となるように遅延剤および高性能減水剤の範囲「上」の添加率を設定して練混ぜを行う。
- (2) 2バッチ目以降は1バッチ目のUHPFRCのモルタルフローおよび可使時間の測定結果より、早見表の添加率を参考にして、可使時間は遅延剤で、練上りのモルタルフローは高性能減水剤によって調整する。

表5 添加率早見表の例

環境温度 (°C)	予想練上り温度 (°C)	遅延剤添加率 ^{*1}			高性能減水剤添加率 ^{*2}		
		範囲	添加率 (%)	添加量 (kg)	範囲	添加率 (%)	添加量 (kg)
20	25	上	0.45	2.99	上	1.47	9.75
					中	1.27	8.43
					下	1.03	6.83
		中	0.40	2.65	上	1.29	8.56
					中	1.13	7.50
					下	0.93	6.17
		下	0.37	2.46	上	1.18	7.83
					中	1.05	6.97
					下	0.88	5.84

※1 可使時間の範囲は上：45分、中：30分、下：15分相当。

※2 フロー値の範囲は上：230mm、中：200mm、下：160mm相当。

5 実橋梁への適用

5.1 工事概要

(1) 適用する橋梁の現状

今回対象とした鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)は、昭和40年代に建設された後、平成12年にSFRCによって床版上面増厚されたものである。床版増厚による修繕が行われた後も交通荷重や雨水の浸透等により、床版上面増厚に起因する舗装路面のポットホールが頻発していた。また、経年劣化による床版下面の変状も顕在化して、コンクリート片の剥落なども発生していた。対象RC床版の打音検査の結果、上面増厚したSFRC床版と既設床版との界面に浮きなどの劣化が確認された。そこで、路肩を含む第1走行車線の3連1径間(3ブロック、計536.7m²)において、劣化部分の補修として試験的にUHPFRCが適用された。

(2) UHPFRCを適用した床版上面増厚工法の概要

図10にUHPFRCによる床版上面増厚工法の概要図を示す。SFRCによる床版上面増厚工法は、既設の床版上面を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。一方、UHPFRCによる床版上面増厚工法は、SFRCと同様に既設床版上面を切削・研掃する工法であるが、強度と長期耐久性にも優れているため、SFRCよりも薄層での補強が可能となり、補強前の床版と同等の高さとすることができる場合もある。また、防水層の省略や防水性の高いグースアスファルトを併用した場合には、防水工の省略・簡素化により、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の短縮を図ることができる可能性がある。

(3) 使用機械およびUHPFRCの製造方法

製造設備は、既存の現場施工用の超高強度繊維補強コンクリート用の一軸強制練りミキサを使用した。使用する材料は、1バッチ当りの製造量に合わせて0.5m³分の材料をフレコンパックに計量し、ユニック車のクレーンでミキサに投入した。

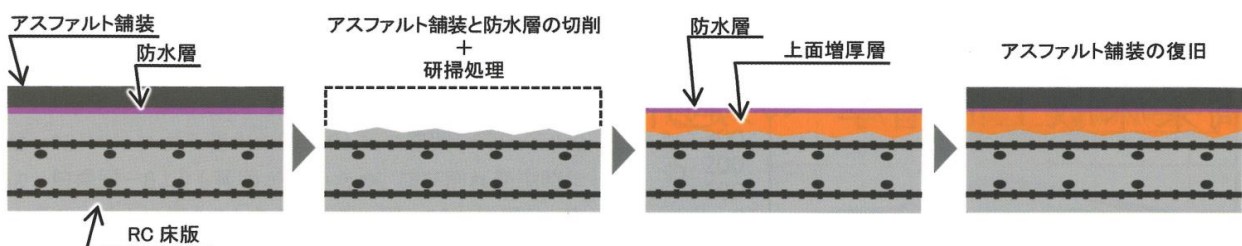


図10 UHPFRCによる床版上面増厚工法の概要⁽⁴⁾

(4) 施工方法

施工は、舗装切削・研掃、劣化部除去・断面修復、UHPFRCの施工の順で行った。舗装除去後に実施した打音検査で浮きや剥離等が認められた劣化部は、人力はつりですべて撤去した後、先行してUHPFRCにて断面修復した。

今回の施工箇所は横断勾配が5%あり、隣接車線の交通振動の影響を受けるため、増厚部の材料のダレが懸念された。UHPFRCは打込み厚さの違いにより表面部の変形性能が変化するため、締固めによって打込み厚さの均一化を図った。また、既設床版との一体性を図るため、既設床版とUHPFRCの界面には全面接着剤を塗布した。打込み方法は、事前の試験施工の結果をもとに打込み時のダレを考慮して勾配の高い方から低い方へ向けて打込む方法とした(写真3)。一車線規制の狭隘な場所であったため、手押し車で材料運搬を行い、電動振動ゴテと大型のエンジンスクリードを使用して人力で締固めを行った(写真4)。表面仕上げの養生材には、アスファルト舗装



写真3 打込み状況⁽⁵⁾



写真4 締固め状況 (大型エンジンスクリード)⁽⁴⁾

との接着性を阻害しない仕上げ助剤を選定し、打込み直後からアスファルト舗装までシート養生を行って表面乾燥を防止した。なお、超速硬性を有することから毎バッチミキサの洗浄が必要となるため、製造サイクルは40分/バッチとし、ブロックごとに施工目地を設けることとした。

5.2 施工結果

(1) フレッシュ性状および圧縮強度

施工現場で実施するUHPFRCの品質管理項目は、モルタルフロー、空気量、圧縮強度(3時間、28日)とした。図11にモルタルフローの測定結果を、図12に現場で採取した供試体の圧縮強度の測定結果を示す。練混ぜ直後のモルタルフローは220mm程度と安定していた。今回の施工では、施工環境に応じて高性能減水剤および遅延剤添加率を調整したが、外気温によらず練混ぜ完了から30分程度までは振動コテ等で締固め・仕上げができる状態を維持した。今回の施工方法では、練混ぜ完了から打込み・仕上げ完了までの所要時間は各ブロックとも10分程度であった。

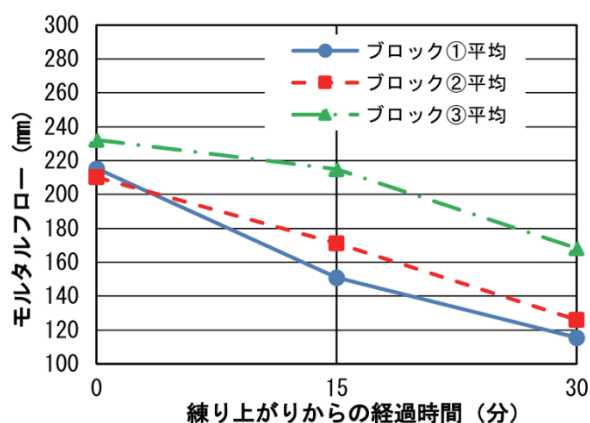


図11 モルタルフローの測定結果⁽⁴⁾

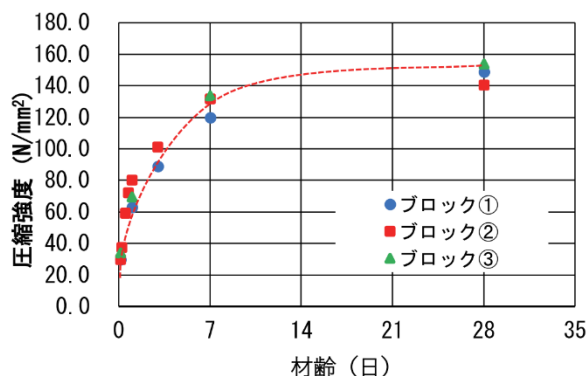


図12 圧縮強度の測定結果⁽⁴⁾

直射日光を受ける時間帯でフローの低下が若干早くなる傾向であったが、施工への影響もなく順調に施工が完了した。空気量はいずれも4%以下で目標値内であった。圧縮強度は、材齢3時間で24N/mm²以上、材齢1日で約80N/mm²の強度を発現し、材齢28日では約140N/mm²と実施工においても目標とする圧縮強度を満足していた。

(2) 出来形管理結果

施工完了後の出来形測定は、3Dレーザースキャナを併用して測定した。計画高さに対して±10mm以内に出来形管理ができていた。また、設計厚さ30mmに対して平均厚さ35.6mmとなり、今回の施工方法における施工精度は良好であった(写真5)。アスファルト舗装前に表面観察を行った結果、ひび割れは確認されず良好な状態であった。



写真5 施工完了全景⁽⁴⁾

6 結 言

床版上面増厚工法用の補修材として、超速硬型のUHPFRCを開発し、実高架橋での試験施工を実施した。その結果、環境温度毎に設定した早見表を活用した品質管理手法を適用することで、施工環境に応じてフレッシュ性状を管理できること、一車線規制の狭隘な場所での施工が可能であることがわかった。

UHPFRCによる床版上面増厚工法は、現在活発に材料や施工方法の開発、製造や施工の省力化に繋がる材料改良や、製造・運搬設備および敷設機械の開発が進められている。今後も需要増加が見込まれ、UHPFRCの普及拡大に向けて、研究を推進していく計画である。

参考文献

(1) 土木学会コンクリート委員会：「コンクリート

ライブラリー166 高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針(案)」、土木学会(2024)

- (2) 土木学会コンクリート委員会：「繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会(第2期)委員会報告：繊維補強コンクリートの構造設計とその課題」、p.I-7、土木学会(2018)
- (3) 土木学会コンクリート委員会：「コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」、pp.54-58、土木学会(2004)
- (4) 富井孝喜、青木峻二、富山裕司、玉滝浩司：「超速硬型の超高性能繊維補強セメント系複合材料の橋梁床版上面増厚への適用事例」、土木施工、7号、pp.135-138(2022)
- (5) 桑原秀明、樺木達也、富井孝喜、大場誠道、青木峻二、富山裕司、福井真男、玉滝浩司：「超高性能繊維補強材料(UHPFRC)を床版補修補強工事に適用」、土木建設技術発表会2021、pp.188-193(2021)

藤野由隆・ふじの ゆたか
 研究所 コンクリート研究室
 生コン・特殊コングループ 研究員

伊藤隆紘・いとう たかひろ
 研究所 コンクリート研究室
 生コン・特殊コングループ 研究員

玉滝浩司・たまたき こうじ
 研究所 コンクリート研究室
 生コン・特殊コングループ グループリーダー

高原幸之助・たかはら こうのすけ
 研究所 コンクリート研究室 室長

富井孝喜・とみい たかよし
 株式会社大林組 生産技術本部
 リニューアル技術部 部長

青木峻二・あおき しゅんじ
 株式会社大林組 生産技術本部
 リニューアル技術部 課長

石関嘉一・いしげき よしかず
株式会社大林組 技術本部 技術研究所
生産技術研究部 主席技師・チームリーダー

川西貴士・かわにし たかし
株式会社大林組 技術本部 技術研究所
生産技術研究部 上席研究員

福井真男・ふくい まさお
大林道路株式会社 本店技術部 担当部長

本間 順・ほんま じゅん
大林道路株式会社 本店技術部
生産技術二課 課長