

論文 環境温度の違いが超速硬型の超高性能繊維補強セメント系複合材料の配合に及ぼす影響

太田 健司*1・川西 貴士*2・兼丸 隆裕*3・藤野 由隆*4

要旨: 高速道路のリニューアル工事などでは、長期耐久性の向上やライフサイクルコストの低減、工期短縮の観点から、高強度かつ高耐久材料である超高性能繊維補強セメント系複合材料 (UHPFRC) の開発、工事への適用が進められている。早期の交通開放を目的として短時間で硬化する超速硬型の UHPFRC に着目し、環境温度の違いによる遅延剤や混和剤の添加率などの変化がフレッシュ性状や支持強度、圧縮強度へ及ぼす影響について検討した。その結果、環境温度 10°C~30°Cにおいて、遅延剤や混和剤の添加率を適切に設定することで、所定のフレッシュ性状や支持強度、圧縮強度が得られることを確認した。

キーワード: 超高性能繊維補強セメント系複合材料, 超速硬, 支持強度, 環境温度, 遅延剤, 混和剤

1. はじめに

我が国の高度経済成長期に建設された社会インフラにおいて、老朽化の進行が社会問題となっている。高速道路の橋梁においては、凍結防止剤の散布に伴う塩害の進行や交通量の大幅な増加に伴う疲労などの影響を受け、床版に著しい損傷が生じている。このような背景から、各地において、橋梁床版の取替工事をはじめとする高速道路のリニューアル工事が進められている。

高速道路のリニューアル工事において、長期耐久性の向上やライフサイクルコスト低減、工期短縮の観点から、高強度かつ高耐久材料である超高性能繊維補強セメント系複合材料 (以下、UHPFRC とする) の開発が進められ、積極的に工事への適用も進められている。

特に、交通量の多い都市部の道路橋床版取替工事においては、最小限の交通規制ならびに早期の交通規制の開放が求められている。そのため、日中や休日など比較的交通量が多い時間帯においては、最小限の車線規制にとどめ、比較的交通量の少ない平日夜間のみ車線規制を拡幅する工法が採用されている¹⁾。この工法では、夜間規制の時間帯(夕方に規制を開始し、翌早朝に規制を解除)のみで既設床版の撤去から新設 PCa 床版の設置、アスファルト舗装までを行い、交通開放しなければならない場合がある。このような早期の交通規制の開放が求められる工法において、PCa 床版と橋桁を一体化させるためのジベル孔や吊り金具取付部の穴埋め材として、短時間で硬化し、かつ早期に強度発現するセメント系材料の開発が求められた。加えて、橋梁床版の長期耐久性確保の観点から、穴埋め材においても、高強度、高耐久およびひび割れ抵抗性の高い材料が必要とされた。

そこで、ひび割れ抵抗性や耐久性が高く、短時間で硬化する超速硬型の UHPFRC¹⁾に着目した。この超速硬型の UHPFRC を工事に適用する場合、短時間で硬化するため長時間の運搬が困難なことから工事現場内で製造し、打ち込む必要がある。加えて、外気温などの環境温度が流動性や硬化時間に影響を及ぼすことが懸念された。そこで、環境温度の違いが、超速硬型の UHPFRC の配合 (遅延剤および混和剤の添加率)、フレッシュ性状、支持強度および圧縮強度に及ぼす影響について検討した。

2. 超速硬型の UHPFRC の硬化物性

道路橋床版のリニューアル工事における上面増厚工法への適用を目的に、鋼繊維補強コンクリートの代替として急硬材の使用による超速硬型の UHPFRC が開発されている²⁾。以下に、当社開発の超速硬型の UHPFRC の特徴的な物性について示す。

2.1 各種強度特性

超速硬型の UHPFRC の圧縮強度、曲げひび割れ発生強度および曲げ強度の結果を表-1 に示す²⁾。

材齢 3 時間における圧縮強度は、高速道路の構造物施

表-1 各種強度試験の結果

項目	試験体寸法(mm)	試験規格	試験材齢	
			3 時間	28 日
圧縮強度(N/mm ²)	φ 50×100	JIS A 1108	34.8	150
曲げ強度(N/mm ²)	□100×100×400	JIS A 1106	11.5	35.7
曲げひび割れ発生強度(N/mm ²)	□100×100×400	JIS A 1171	6.0	19.7

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任 修士 (工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 (株)大林組 東京本店 東名多摩川橋 JV 工事事務所 所長

*4 UBE 三菱セメント (株) 研究所 コンクリート研究室 生コン・特殊コングループ (正会員)

工管理要領（以下、施工管理要領とする）³⁾で定められている圧縮強度の管理基準値 24N/mm^2 を上回る 34.8N/mm^2 を示している。また、材齢28日時点における圧縮強度は 150N/mm^2 を示している。

材齢28日における曲げ強度および曲げひび割れ発生強度は、それぞれ 35.7N/mm^2 および 19.7N/mm^2 を有しており、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（以下、UFC指針とする）⁴⁾に示される値と同等以上の強度が得られている。

2.2 収縮特性

長さ変化率ならびに質量変化率を図-1に示す²⁾。試験は、NEXCO試験法439に準拠した。長さ変化率については、打込み後から若干、収縮側の挙動を示すものの、その後、膨張側の挙動を示し、材齢28日時点では約0.02%の膨張率を示している。施工管理要領では、床版上面に使用する際の断面修復の寸法安定性が0.025%以下と定められており、基準値を満足する結果が得られている。質量変化率については、材齢28日時点で0.6%程度の質量減少で収束した。以上より、UHPFRCは収縮量が少なく、穴埋め材として適していると考えられる。

3. 環境温度がUHPFRCの性状に及ぼす影響

3.1 実験概要

3.1.1 使用材料・配合・練混ぜ方法

使用材料を表-2に、UHPFRCの配合を表-3に示す。

高速道路の早期開放を目的として、既存のUHPFRC²⁾を参考とし、練上がり直後の流動性は、モルタルフロー200mmを目安として、配合を検討した。

UHPFRCを工事現場へ適用するためには、外部環境（特に外気温）の違いが、練上がり時のフレッシュ性状、

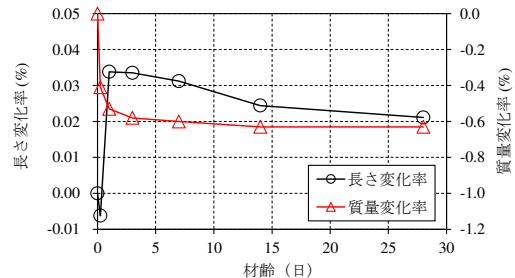


図-1 長さ変化率および質量変化率

表-2 使用材料

種別	記号	物性
水	W	上水道水
プレミックス粉体	P	専用プレミックス粉体
細骨材	S	珪砂, 表乾密度 2.64g/cm^3
混和剤	SP	高性能減水剤
鋼繊維	SF	$\phi 0.16 \times 13\text{mm}$
急硬材	HA	粉体系, 密度 2.93g/cm^3
遅延剤	CR	粉体系

表-3 超速硬型のUHPFRCの配合表

記号	環境温度 (°C)	水粉体比 W/(P+HA) (%)	遅延剤 添加率 (%)**	混和剤 添加率 (%)**	単位量(kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)	添加量 (kg/m ³)								
					W	P	S	HA		SF	CR							
L-1	10	15.8	0.20	0.70	210	1187	837	140	9.3	157	2.7							
L-2				0.80														
L-3				0.95														
L-4				0.25								0.95						
L-5				0.30								0.95						
M-1	20		15.8	0.25							1.20	210	1187	837	140	15.9	157	3.3
M-2											0.95							
M-3											1.10							
M-4											1.25							
M-5											0.30							
H-1	30	15.8		0.30	1.20	210	1187	837	140	15.9	157							4.0
H-2					1.05													
H-3					1.25													
H-4					1.45													
H-5					0.35													

※P+HA に対する割合

材齢 3 時間における圧縮強度および硬化時間に及ぼす影響を確認する必要がある。そこで、冬期、標準期、夏期を想定して、雰囲気温度ならびに材料温度を 10℃、20℃ および 30℃ とした環境で室内試験を実施した。なお、既往の研究⁵⁾を参考に、水粉体比を 15.8%，急硬材の混入量を 140kg/m³ とした。遅延剤および混和剤の添加率を調整することで、目標性能を満足する配合を設定した。

ここで、環境温度の違いが、モルタルフローや硬化時間に及ぼす影響を把握することを目的に、混和剤および遅延剤の添加率を変えた配合についても検討を行った。

UHPFRC の練混ぜは、ドラム容量 150L のパン型ミキサーを使用し、1 バッチ当たり 60L とし、練混ぜ方法を図-2 に示す。

3.1.2 目標品質および試験項目

目標品質、試験項目および試験方法を表-4 に示す。UHPFRC の練上がり直後の目標モルタルフローは、道路勾配によるダレの防止ならびに施工性を考慮して 200mm（管理下限値 150mm，管理上限値：280mm）とした。また、モルタルフローの経時変化も把握するため、練上がり直後、急硬材の投入から 10 分後および 20 分後のモルタルフローも測定した。

支持強度について、実際の施工条件やアスファルト舗装に必要な施工機械による転圧作業などを考慮し、施工機械の接地圧が 0.55N/mm² であったことから、安全側となるように硬化の目安を 1N/mm² 以上と定めた。測定は、工事現場で簡易に計測できることから、土壌の硬度計測

で一般的に使用される山中式土壌硬度計を用いた。得られた硬度指数から支持強度を換算した。練上がり直後の試料を用いて、容量 300mL のプラスチック製カップに

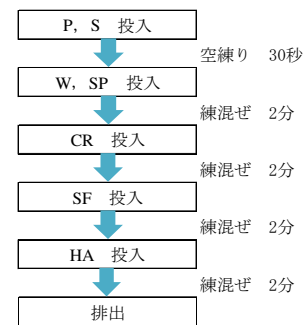


図-2 超速硬型の UHPFRC の練混ぜ方法

表-4 目標品質および試験項目一覧

項目	目標値	規格	備考
モルタルフロー	200mm	JIS R 5201	落下無し
空気量	4.0%以下	JIS A 1128	
練上がり温度	10℃以上	JIS A 1156	
支持強度	40 分で 1N/mm ²	JGS 1441 を 参考	山中式土壌硬度計による
圧縮強度	24N/mm ²	JIS A 1108 に準拠	材齢 3 時間
	130N/mm ² **		材齢 7, 28 日

※材齢 28 日の目標性能である。

表-5 フレッシュ性状

記号	環境温度 (°C)	遅延剤添加率 (%)	混和剤添加率 (%)	モルタルフロー(mm)			空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
				練上がり直後	10 分後	20 分後		
L-1	10	0.20	0.70	122	107	-	3.7	21.1
L-2			0.80	163	112	-	3.7	20.6
L-3			0.95	211	129	107	3.9	20.2
L-4		0.25	0.95	221	143	109	3.7	20.9
L-5		0.30	0.95	251	202	123	3.6	17.7
M-1	20	0.20	1.20	193	115	-	3.3	26.7
M-2		0.25	0.95	142	122	106	3.3	26.7
M-3			1.10	192	153	108	3.4	26.8
M-4			1.25	219	181	114	3.1	26.6
M-5		0.30	1.05	194	149	107	3.4	26.7
H-1	30	0.25	1.20	160	122	104	3.4	36.0
H-2		0.30	1.05	148	115	103	3.3	36.2
H-3			1.25	187	149	112	3.2	35.7
H-4			1.45	215	174	119	3.4	36.1
H-5		0.35	1.10	162	138	110	3.3	36.1

200mL 程度採取した。急硬材の投入から最大 60 分後まで 5 分または 10 分おきに硬度指数を計測した。得られた硬度指数から式(1)を用いて、支持強度 P を算出した。施工時のサイクルタイムを想定し、支持強度 1N/mm^2 が得られる硬化時間の目標を 40 分以内とした。

$$P = 100X / 0.7952(40 - X)^2 \quad (1)$$

ここで、 P ：支持強度(N/mm^2)

X ：硬度指数(m.m)

圧縮強度は、試験体寸法を $\phi 50 \times 100\text{mm}$ とし、材齢 3 時間および材齢 7 日および 28 日で試験を実施した。試験材齢 3 時間においては、製造時の環境温度と同一の温度環境で封緘養生を行った。試験材齢 7 日および 28 日においては、打込み 3 時間後に室温 20°C の試験室に静置し、翌日脱型を行い、所定材齢まで標準養生を行った。圧縮強度の目標値は、既往の研究⁵⁾と同様に、材齢 3 時間で 24N/mm^2 以上、材齢 28 日で 130N/mm^2 以上とした。

3.2 実験結果

3.2.1 フレッシュ性状

$10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ の環境で製造した UHPFRC のフレッシュ性状の確認結果を表-5 に示す。UHPFRC の練上がり直後のモルタルフローは、いずれの環境温度や遅延剤の添加率についても、混和剤の添加率を調整することにより管理値内のフロー値 ($150 \sim 280\text{mm}$) を得られることが確認された。流動性は、練上がり直後から低下し、10~20 分後には、ほとんどの配合でモルタルフローは 120mm 以下となった。

つぎに、環境温度毎に遅延剤の添加率を同一としたときの混和剤の添加率の影響を比較する。混和剤の添加率とモルタルフローの関係を図-3 に示す。環境温度毎に遅延剤の添加率は異なるものの、環境温度が低くなるにつれ、同一のモルタルフローを得るために必要な混和剤の添加率は減少する傾向を示した。また、環境温度の低下に伴い、モルタルフローと混和剤の添加率との関係式の傾きは大きくなる傾向を示した。環境温度ごとに混和剤の添加率とモルタルフローは線形関係を示しており、練上がり直後のモルタルフローは混和剤の添加率により調整可能であることがわかった。

3.2.2 支持強度

$10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ で製造した UHPFRC の支持強度と経過時間の関係を図-4~図-6 に示す。 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ の環境温度では、遅延剤の添加率を調整することで、目標性能で定めた 40 分で 1N/mm^2 以上の支持強度を確保できた。

遅延剤の添加率と支持強度 1N/mm^2 に到達する時間との関係を図-7 に示す。急硬材の投入から 40 分で支持強度 1N/mm^2 を得られる遅延剤の添加率は、環境温度 20°C および 30°C で 0.30% と同等であった。また、低温環境の 10°C 条件においては、遅延剤の添加率を 0.25% とするこ

とで目標性能を満足できることが確認された。

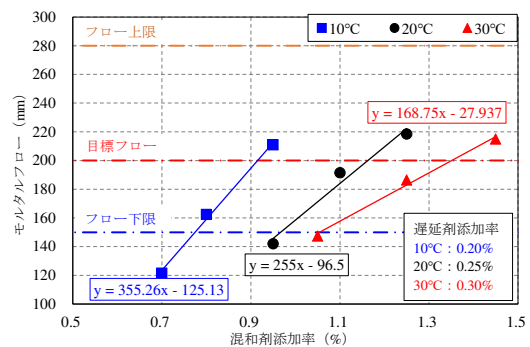


図-3 混和剤の添加率とモルタルフローの関係

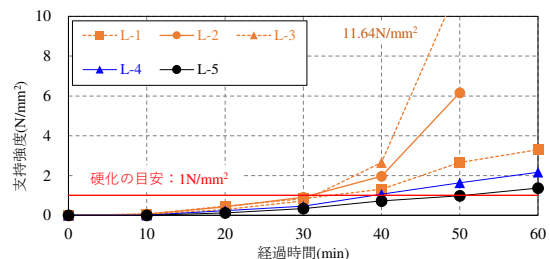


図-4 支持強度と経過時間の関係 (環境温度 10°C)

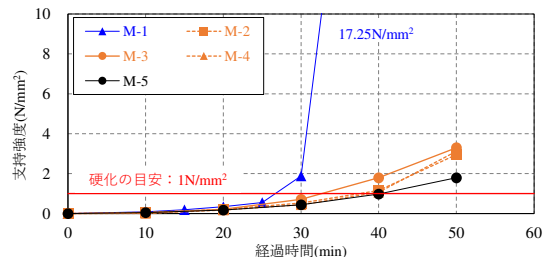


図-5 支持強度と経過時間の関係 (環境温度 20°C)

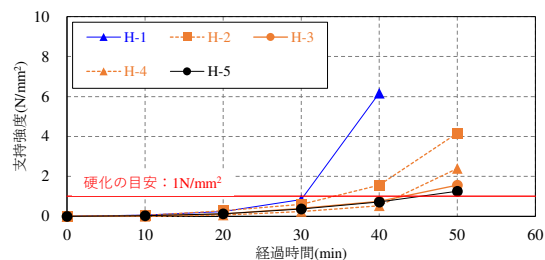


図-6 支持強度と経過時間の関係 (環境温度 30°C)

3.2.3 圧縮強度

$10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ で製造した UHPFRC の圧縮強度と材齢の関係を図-8~図-10 に示す。環境温度 20°C および 30°C で製造したすべての試験体で、材齢 3 時間および材齢 28 日の圧縮強度はそれぞれ目標値を満足する結果となった。

一方で、低温環境の 10°C 条件において、遅延剤の添加率が大きい配合(L-4 および L-5)において材齢 3 時間の圧縮強度が目標値を満足しなかった。これらの試験体は、

40分時点での支持強度においても $1\text{N}/\text{mm}^2$ を満足できていなかった。一方で、遅延剤の添加率の小さい配合(L-1～L-3)においては、支持強度ならびに材齢3時間の圧縮強度は目標値を満足する結果となった。したがって、 10°C までの低温環境では、遅延剤の添加率を適切に設定することで、材齢3時間における圧縮強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を確保できることがわかった。

4. 実環境への適用性の検証

4.1 環境温度毎の遅延剤および混和剤の添加率の設定

3章の結果から、UHPFRCは環境温度ごとに最適な遅延剤や混和剤の添加率は異なる。そのため、実施工を想定した場合、日々の外気温の変動に対して遅延剤および混和剤の添加率を適切に設定する必要がある。

支持強度および圧縮強度の結果から、各環境温度における遅延剤の添加率を、 10°C 環境では粉体の 0.20% 、 20°C 環境では粉体の 0.25% 、 30°C 環境では粉体の 0.30% と設定した。上記で定めた遅延剤の添加率から、 $10^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ の添加率を直線的に結び、それらの関係式から $10^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ の各環境温度における遅延剤の添加率を選定できるようにした。

つぎに、環境温度ごとの混和剤の添加率を設定した。図-3に示されるように、各環境温度でモルタルフローと混和剤の添加率の関係は異なる。環境温度が高くなるにつれて、所要のモルタルフローを得るための混和剤の添加率も大きくなっている。また、混和剤の添加率とモルタルフローの関係（関係式の傾き）も各環境温度で異なっており、環境温度が低いほど混和剤の添加率の変動に対するモルタルフローの増減幅は大きくなる。このことから、 10°C 、 20°C および 30°C の各環境温度における混和剤の添加率とモルタルフローとの関係式を用いて、 $10^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ 間の混和剤の添加率とモルタルフローの関係式を推定した。例として、 $20^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ において 5°C ごとに算出したモルタルフローと混和剤の添加率の関係を図-11に示す。各環境温度で算出した混和剤の添加率とモルタルフローとの関係式を用いて、目標モルタルフロー（本検討では 200mm とした）を入力することで、目標モルタルフローを得るための混和剤の添加率を設定した。各環境温度における遅延剤および混和剤の添加率を図-12に示す。

4.2 設定した配合の実環境での適用性の検証

図-12に示した環境温度と遅延剤の添加率および混和剤の添加率の関係を参照して、9月上旬から10月下旬（外気温 $12\sim 28^\circ\text{C}$ 環境）にかけて屋外の実環境下でUHPFRCを製造し、配合の妥当性を検証した。モルタルフローを図-13に、支持強度の例を図-14に、材齢28日における圧縮強度を図-15に示す。なお、遅延剤およ

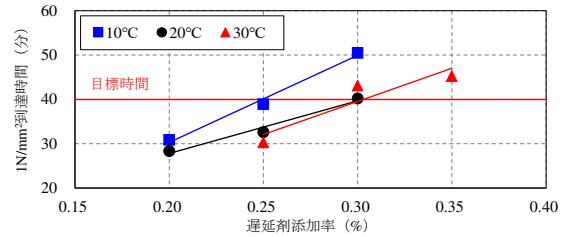


図-7 遅延剤の添加率と $1\text{N}/\text{mm}^2$ 到達時間との関係

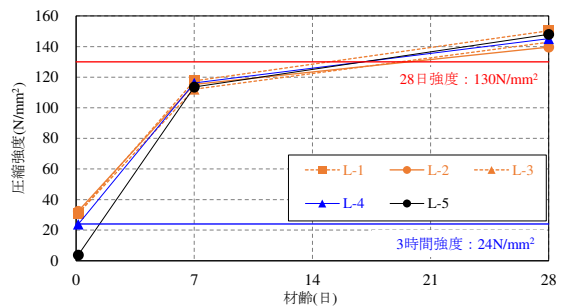


図-8 圧縮強度と材齢の関係（環境温度 10°C ）

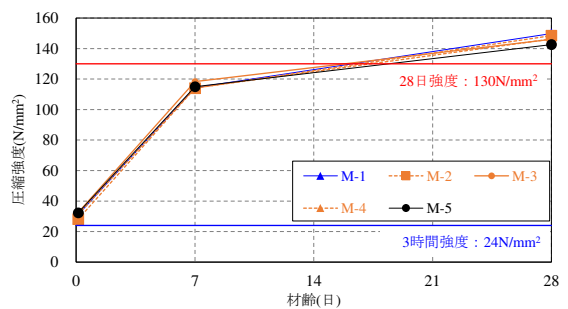


図-9 圧縮強度と材齢の関係（環境温度 20°C ）

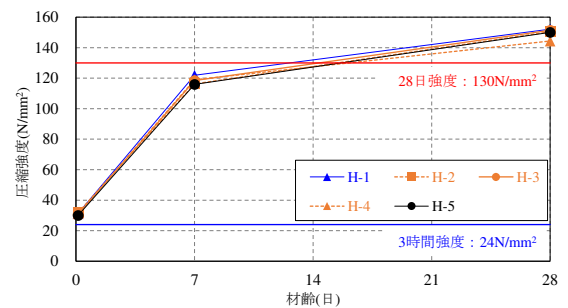


図-10 圧縮強度と材齢の関係（環境温度 30°C ）

び混和剤の添加率などの配合は、UHPFRC製造当日の予想気温をもとに、図-12を用いて配合の修正を行った。

図-13～図-15より、実環境下においてもモルタルフローや支持強度に関して所要の品質が得られた。また、所要の圧縮強度が確保できることも確認した。9月～10月の限られた温度環境のみの結果ではあるが、図-12で示した環境温度ごとの遅延剤および混和剤の添加率の選定はおおむね妥当であったと考えられる。

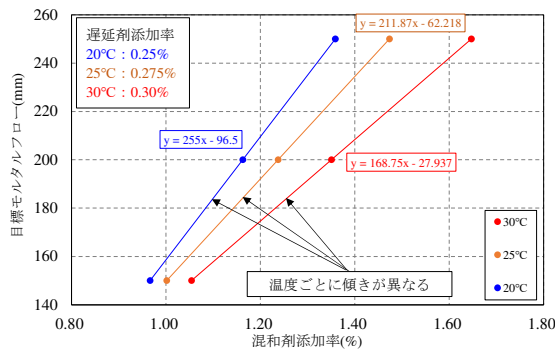


図-11 モルタルフローと混和剤の添加率の関係

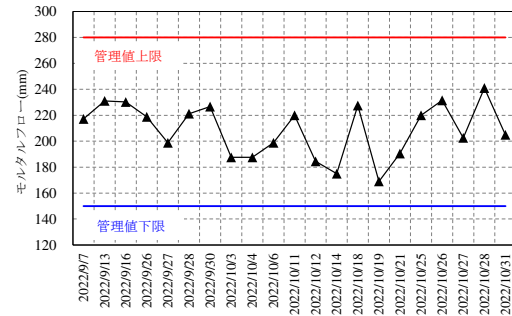


図-13 実環境下で製造した UHPFRC のモルタルフロー

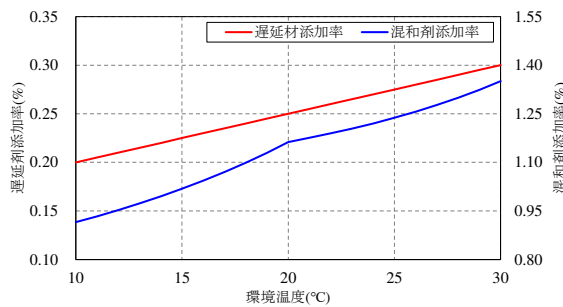


図-12 環境温度と遅延剤および混和剤の添加率の関係

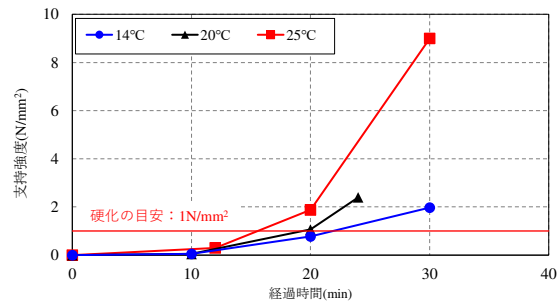


図-14 実環境下で製造した UHPFRC の支持強度の例

5. まとめ

高速道路のリニューアル工事などにおいて早期の交通規制の開放が求められる。そこで、短時間で硬化し、かつ早期に強度発現する超速硬型の UHPFRC の配合検討を行った。環境温度の違いが遅延剤や混和剤の添加率へ及ぼす影響を把握するために、モルタルフロー、支持強度および圧縮強度の確認を行い、配合選定を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 環境温度の上昇に伴い、所要のモルタルフローを得るための遅延剤および混和剤の添加量は増加する。また、環境温度ごとに混和剤の添加量とモルタルフローとの関係式（傾き）は異なる。
- 2) 環境温度 10～30℃の範囲においては、遅延剤および混和剤の添加量を調整することで、必要な支持強度や圧縮強度を確保することができる。
- 3) 環境温度ごとに設定した配合を用いることでモルタルフローや支持強度、圧縮強度の所要の品質を確保でき、配合の妥当性を環境温度 12～28℃の実環境下で検証できた。

真冬などの冷え込みが厳しく、環境温度 10℃を下回るような条件においては、UHPFRC の硬化や強度発現が遅れることが懸念される。そのため、混和剤や遅延剤の添加率の設定、給熱養生など今後も検討を進める必要があるため、今後の検討課題としたい。

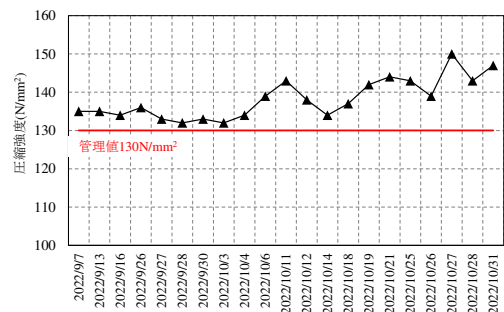


図-15 実環境下で製造した UHPFRC の圧縮強度

参考文献

- 1) 岩城孝之, 仲田宇史, 川西貴士, 村上隆弘, 酒井修平, 小野聖久: 夜間 1 車線規制下での床版取替え工法の技術開発と施工, 橋梁と基礎, pp.21-27, 2021.5
- 2) 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, 2022.9, V-234
- 3) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領, p.III-82, p.III-89, 2020.7
- 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), 2004.9
- 5) 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, 2022.9, V-233