

報告 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの水流摩耗防止部材への適用

石関 嘉一*1・相良 光利*2・玉滝 浩司*3・西平 宣嗣*4

要旨 河川内に構造物が設けられる場合、水流や砂利・岩石などの衝撃により水路コンクリート表面が摩耗する。そこで、摩耗防止部材として、長期耐久性に優れた超高強度かつ高じん性な超高強度繊維補強コンクリートの適用を検討した。実施工の問題点を抽出する目的で、実規模の模擬施工を実施し、製造、打込み、表面仕上げ、養生条件等の基本データを取得した。その結果、常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートは耐摩耗部材に適していることを確認した。

キーワード：UFC、常温硬化、摩耗、スチールロッド、目地、仕上げ、現場打設

1. はじめに

一般的に河川を渡る橋梁(写真-1)や小型ダムなど、河川内に構造物が設けられる場合、水流や砂利・岩石などの衝撃により水路コンクリートの表面が摩耗する。現行は、こうした状況を防ぐため、レジンコンクリートや高強度プレキャスト板などの摩耗防止部材を水路コンクリートの表面に適用しているが、これらの部材は摩耗に対する耐久性や施工性の面で改善が必要と考える。そこで、長期耐久性に優れた超高強度かつ高じん性な超高強度繊維補強コンクリート(Ultra high strength Fiber reinforced Concrete: 以下 UFC と表記)の適用が期待されている¹⁾。

UFC は、超高強度モルタルと高強度鋼繊維で構成されており、 150N/mm^2 以上の圧縮強度と 5N/mm^2 以上の引張強度を持つ材料と定義されている。2004年には、土木学会より超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)²⁾(以下「指針」と表記)が発行されており、今後、これらの材料を使用した構造物は増加すると予想される。しかし、既存のUFCは、UFC指針に示される 90°C -48時間の蒸気養生が標準となっているため、蒸気養生設備が整った工場における生産が基本と考えられる。そのため施工場所近郊に製造工場がない場合、運搬等の問題により施工に大きな制限が生じると考える。これらの要因から羽田空港D滑走路建設以降の使用量が減少している³⁾。そこで、設計や施工に影響が少なく、型枠に直接打込むことが可能な常温で硬化するUFC材料として常温硬化型UFCを開発した。なお、ここで示す「常温」とは土木学会技術推進ライブラリー技術評価報告書⁴⁾に示す養生条件である。

常温硬化型UFCは常温で高強度を発現するプレミッ



写真-1 河川を渡る橋梁

クス粉体を使用するため、給熱養生が不要となり現場打込みが可能となった。また、レディーミクストコンクリートと同様に、市中のレディーミクストコンクリート工場で製造できるため、既存のUFCと比較して施工性が飛躍的に向上した。

本報告は、常温硬化型UFCの概要を記載するとともに、水流摩耗低減部材の施工を行う際の留意点を抽出する目的で、実構造物と同様な形状の模擬部材を構築し、製造方法、打込み方法、表面仕上げ方法、養生条件等の基本データを取得した。これらのデータを参考にして、実構造物に水流摩耗部材として常温硬化型UFCを適用し、その場合の硬化物性および施工性等について記載する。

2. 常温硬化型UFCの概要と品質・性能

2.1 構成材料と配合

常温硬化型UFCのモルタル部分は、ポルトランドセメント、ポゾラン材および無機粉体を混合したプレミック

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工) (正会員)

*2 (株)大林組東京本店 京王多摩川耐震JV工事事務所 修士(工)

*3 宇部興産(株) 技術開発研究所 研究員 修士(工) (正会員)

*4 京王電鉄(株) 鉄道事業本部 工務部 土木課 課長補佐

ス粉体、水、細骨材、および高性能減水剤で構成されている⁴⁾。また、空気量は消泡剤を用いて、3.5%以下に調整した⁴⁾。このモルタルは給熱養生等の特殊な養生を行わなくても常温で十分な強度特性を発現できるものである。配合を表-1に示す。

鋼繊維には一般建設用鋼繊維とは異なる高強度鋼繊維を使用した。使用した鋼繊維を写真-2に示す。高強度鋼繊維は、延伸製法により製造された自動車タイヤに使用するスチールコードである。表面は真ちゅうでメッキされている。一般の建設用鋼繊維の引張強度1,000N/mm²に対して、引張強度は2,000N/mm²以上で、形状はすべて直線である。なお、鋼繊維の添加は外割とし、繊維径および繊維長は0.16mmおよび13mmである。



写真-2 高強度鋼繊維 写真-3 モルタルフロー

表-1 配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス	細骨材	高性能減水剤	
230 ^{※1}	1830	330	32	157

※1 水の単位量は高性能減水剤の水分も含む

表-2 フレッシュ試験項目および判定基準

試験項目	判定基準
モルタルフロー(mm)	260mm±30mm
JIS R 5201 (落下なし)	
空気量(%)	3.5%以下
JIS A 1128	

2.2 フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ性状は、モルタルフロー値260±30mmであり、間隙が30mm以下の偏狭部においても閉塞することなく充填が可能である³⁾。なお、モルタルの品質試験項目および判定基準を表-2、モルタルフローを写真-3に示す。

2.3 強度特性

常温硬化型 UFC は超高強度、高じん性であり、標準養生材齢 28 日の圧縮強度は 180N/mm² 以上、引張強度は 8.8N/mm² 以上の材料強度を有している⁴⁾。

2.4 凍結融解抵抗性

図-1に凍結融解試験 (JIS A1148 に準拠) における 2 試験体の相対動弾性係数を示す。

凍結融解試験 4500 サイクル終了時における相対動弾性係数は、2 試験体とも 100%以上であった。この原因として、試験開始以降も強度増進があったと考えられる。この結果より、常温硬化型 UFC は高い凍結融解抵抗性を有していると言える。

2.5 耐摩耗性

常温硬化型 UFC のスチールロッド式摩耗試験装置を用いた摩耗試験結果⁵⁾および同等の試験方法で実施した既往の研究⁶⁾に基づく普通コンクリート (圧縮強度 18N/mm², 21N/mm²) と高強度コンクリート (圧縮強度 88N/mm²) の摩耗試験結果を図-2に示す。普通コンクリートの摩耗時間 10 時間後の摩耗量は圧縮強度 18N/mm²および圧縮強度 21N/mm²において 1.71cm³/cm²および 1.62cm³/cm²であり、常温硬化型 UFC の摩耗時間 10 時間後の摩耗量は 0.28cm³/cm²であった。常温硬化型 UFC と普通コンクリートの摩耗量を比較すると、常温硬化型 UFC は普通コンクリートの摩耗量に対して 15%程度であり、著しく摩耗量が少ないことが確認できた。また、高強度コンクリートに対して常温硬化型 UFC の摩耗量は 37%程度であり、高強度コンクリートと比較しても

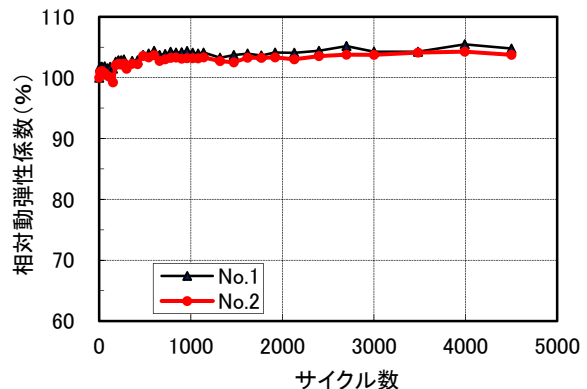


図-1 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数

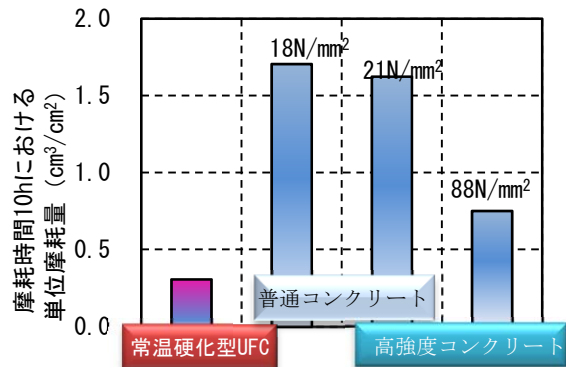


図-2 摩耗試験結果

摩耗量が少ないことが確認できた。よって、これらの性能は従来の高強度コンクリート等の摩耗部材と比較して摩耗抵抗性が向上していることが実証された。

3. 試験施工

3.1 試験施工の概要

常温硬化型 UFC の実施工における問題点を抽出する目的で、実構造物と同様な形状の模擬部材を構築し、製造方法、打込み方法、表面仕上げ方法、養生条件等の基本データを取得した。

3.2 製造方法

通常、常温硬化型 UFC の製造は、市中のレディーミクストコンクリート工場で製造する。しかし、摩耗防止材を施工する場合、1日当たりの打込み計画数量が0.5～3.0m³程度と少ないため、レディーミクストコンクリート工場を使用すると、1バッチ当たりの練混ぜ量が2.0m³程度と多く、大量のロスが発生する。そこで、少量の練混ぜを実施する場合、UFC の製造には最大練混ぜ量0.6m³の強制練り車載式ミキサ（写真-4）を用いると、ロスが低減できるため、最適な練混ぜ方法であると考えた。

車載式ミキサの練混ぜ速度はミキサの最大出力の「高速」とミキサの負荷を考慮して最大出力の80%の「低速」とした。「低速」、「高速」の2段階の練混ぜ時間と製造量を把握する目的で、1バッチ当たりの練混ぜ量を0.5m³とし、ミキサの回転速度を変化させ練混ぜ試験を行った。なお、「高速」は通常レディーミクストコンクリート工場に常設してあるミキサと同等の回転数である。

練混ぜ試験の結果を図-3に示す。その結果、ミキサの回転を「低速」にした場合、ミキサ負荷値がピークになるまでの時間が23分程度かかり、全体の練混ぜ時間は約30分であった。また、ミキサの回転を「高速」にした場合は、ミキサ負荷のピーク値は増加したものの、ピーク値までの練混ぜ時間が7分程度と短縮した。そのため、全体の練混ぜ時間は13分程度となり、著しく練混ぜ効率が改善された。なお、プレミックスと細骨材を投入し、スラリー化後に鋼繊維を投入する車載式ミキサによるUFCの製造時間は約25分であった。よって、打込み後の仕上げ時間を考慮した車載ミキサによる1日当たりの最大供給量は5m³程度と考えられ、3.5m³/日の打込み計画は妥当と判断した。

3.3 ひび割れ対策

実際の水流摩耗低減部材の面積は約80m²であり、厚さは40mmと薄く、打込み面下部の既設躯体に拘束されるため、ひび割れの発生が予想された。そのため、ひび割れ抑制を目的に予め目地を設けることとし、予備試験で模擬部材（図-4）を構築して目視によるひび割れの発生確認試験を実施した。その結果、耐久性に影響を及ぼすひび割れは生じなかった。

3.4 打込み方法および表面仕上げ方法

製造量を0.5m³/バッチとし、打込みには0.5m³のホッ

パーを用いた。流動性が非常に高いため、ホッパーの開閉を調整して打ち込んだ。打込み直後は木ごてを用いて、平滑に均しを行い、乾燥防止のためにブルーシー等で簡易な養生を行った。



写真-4 製造に使用した車載式ミキサ

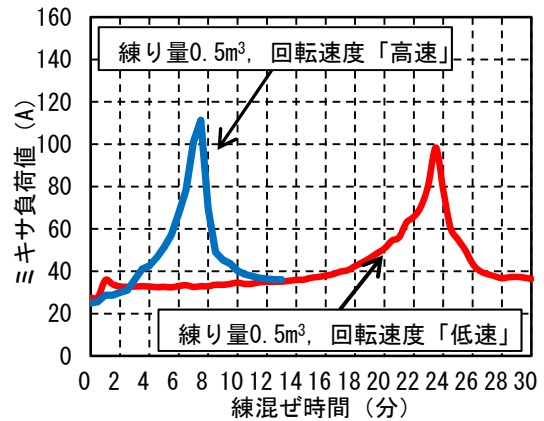


図-3 練混ぜ時間とミキサ負荷値との関係

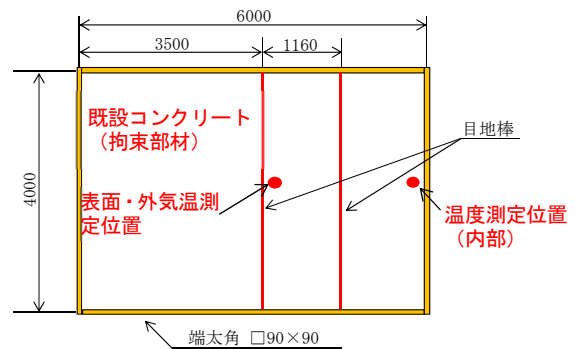


図-4 試験施工で構築した部材の平面図（単位 mm）

表-3 仕上げ剤の評価結果

成分	評価項目		判定*
	色むら	ひび割れ	
パラフィン系1	無	無	○
パラフィン系2	有多	無	×
低級アルコール系1	有多	無	×
低級アルコール系2	有多	無	×
合成ゴム系	有少	無	△
アクリル系	有少	無	△

※：○；色むらひび割れ無。△；色むら多少有。×；色むら多い。

数時間養生した後、簡易な養生を撤去し、仕上げ剤を用いて、表面仕上げを実施した。仕上げ剤は表-3 に示す6種類を検討した。評価項目として、定性的であるが色むらと微細ひび割れの発生の有無とした。パラフィン系1は表面に色むら、微細なひび割れ共発生が無く、良好な結果となった。それに対して、パラフィン系2、低級アルコール系1および2は微細なひび割れが発生しないものの、著しい色むらが発生し美観を損ねる結果となった。また、合成ゴム系およびアクリル系は若干の色むらが発生した。これらの検討結果から、打込み面の色むらが無く、微細なひび割れが発生しない、パラフィン系1の仕上げ剤を選択することとした。なお、成分が同一のパラフィン系の仕上げ剤で結果が異なったのは、含有される少量成分の違いが影響したものと推察される。

3.5 養生条件および期間

通常、コンクリートの硬化物性は初期材齢において外気の影響を受けやすいため、必要に応じて温度制御を実施する⁷⁾。常温硬化型UFCも同様に外気の影響を受けるため、低温環境下では、所定の強度発現が遅延することが確認されている⁴⁾。よって、昼夜の気温差が大きい時期の施工が予想されていたため、予備試験を行い、養生温度条件の違いによる強度発現性を確認した。

気象庁の統計データから、予備試験期間中の外気温は表-4に示すように、期間平均10℃を下回り、昼夜の温度差が10℃以上であると予想された。そのため、保温養生を実施し、打込み面を保温することとした。

予備試験期間中に測定した各所の温度を表-5に示す。外気温は10℃前後で予想通りであったが、保温養生を行ったため、部材および供試体の平均温度は20~30℃に保持することができた。予備試験における、現場封かん養生供試体の材齢1、3および7日の圧縮強度を図-5に示す。圧縮強度は、材齢1日で30N/mm²程度であったが、材齢3日では124N/mm²程度に達し、材齢7日では170N/mm²程度と設計図書に記載されている設計基準強度(150N/mm²)を満足した。

以上の結果から、実施工においても、保温養生を実施することとし、設計基準強度を保証する材齢は7日と設定した。

3.6 実施工の反映

試験施工の結果から、表-6に示す項目の留意点を抽出し、試験施工で最良と思われる、製造・施工条件を実施工に反映した。

4. 実施工

4.1 施工箇所

施工箇所は、橋梁基礎コンクリートの天端(写真-5)である。常時、水流や砂利、岩石の衝突により摩耗作用

表-4 予備試験期間中に予想された外気温^{*}

部位	予測温度(℃)		
	期間平均	期間最大	期間最小
外気温	8.1	13.4	3.1

※ 気象庁統計データより(3月中旬)

表-5 予備試験期間中の温度測定結果

測定部位	温度測定値(℃)		
	期間平均	期間最大	期間最小
外気温	12.0	23.4	2.3
部材表面	28.6	37.8	5.0
部材内部	25.3	34.3	12.3
供試体	24.7	33.5	10.6

※ 測定期間は打込み後7日間。

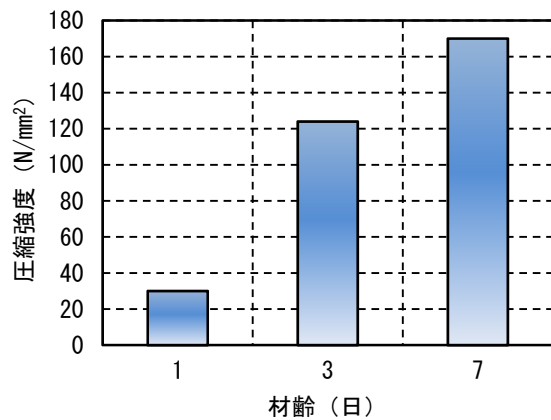


図-5 材齢と圧縮強度との関係(φ50×100mm)

表-6 試験施工結果の留意点および実施工への反映

項目	試験施工	実施工へ反映
製造方法	車載式ミキサ使用 ミキサ回転速度：高速 製造量：0.5m ³ /バッチ	車載式ミキサ使用 ミキサ回転速度：高速 製造量：0.5m ³ /バッチ
ひび割れ対策	打込み区画： 最大4000×3500mm	打込み区画： 3500×3500mm以下
打込み 表面仕上げ	ホッパー：0.5m ³ 仕上げ剤：6種類評価	ホッパー：0.5m ³ 仕上げ剤：パラフィン系1
養生条件 養生期間	養生条件：保温養生 養生期間：7日	養生条件：保温養生 養生期間：7日



写真-5 橋梁基礎コンクリート天端(施工箇所)

を受ける部分であり、コンクリートの摩耗による早期劣化が予想される。そこで、橋梁基礎コンクリート天端の表面保護材料として、常温硬化型 UFC を用いて、摩耗による橋梁基礎躯体の早期劣化の防止を実施した。

まず、橋梁基礎となる普通コンクリートを打ち込み、翌日に打込み面の薄層除去（目粗し）を行った。なお、既設コンクリートの薄層除去を行うことによって、後から打ち込む常温硬化型 UFC との付着強度は十分確保できることを確認している⁴⁾。

4.2 製造

常温硬化型 UFC の製造結果を表-7 に示す。製造は2日間に分けて行い、合計約7m³製造した。モルタルフローおよび空気量は、3バッチ/日でデータを収集したが、いずれも目標の範囲内で安定していた。このことから、使用した車載式ミキサは常温硬化型 UFC の製造に適していると言える。

4.3 施工

常温硬化型 UFC の打込みは2か所の同一形状の躯体に実施した。打込みの区割りを図-6 に示す。ひび割れ対策として、一方向に収縮が卓越しないように形状を概ね正方形とし、区画割りを実施した。その結果、一区画の寸法は試験施工よりも小さくなった。

製造した常温硬化型 UFC は、ホッパーで打ち込んだ。打込み状況を写真-6 に示す。

試験施工と同様に、打込み後は乾燥による軽微なひび割れを防止するためにブルーシート等で簡易な養生を実施した。養生を施した後、タンピングを実施し、打込み面に気泡が発生しないことを確認してから、表面仕上げを行った。なお、試験施工で最も仕上げ状況が良好であったパラフィン系1の仕上げ剤を使用して仕上げを実施した。仕上げ後は、打込み面に吸水性の高い養生マットを敷設して散水養生を実施した。その結果、打込み面の仕上げ状況は、ひび割れや色むらも認められず、良好であった。写真-7 に完了時の状況を示す。

4.4 養生および強度管理

打込み面の乾燥防止と給水のための散水養生を開始した後、試験施工と同様に保温養生を行った。なお、部材の強度管理は、部材と同一養生としたφ50×100mmの供試体で行った。各所の温度測定結果を表-8 に示す。熱電対を用いて、図-6 に示す実部材のA面、C面、H面、J面内部の4箇所温度を測定した。その結果、全ての測定箇所、ほぼ同等の温度履歴であり、保温養生が適当であったことが確認できる。また、いずれの測定個所の温度も供試体の温度と同等以上であった。よって、実部材の強度は供試体と同等以上と推察される。

材齢と圧縮強度の関係を図-7 に示す。圧縮強度は材

表-7 常温硬化型 UFC の製造結果

1日目製造					
バッチ No.	製造量 (m ³)	製造時間 (分)	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	0.50	25	263	2.5	21.5
2	0.50	25	—	—	—
3	0.50	25	—	—	—
4	0.50	20	266	2.8	27.5
5	0.50	25	—	—	—
6	0.50	20	—	—	—
7	0.50	20	268	1.7	28.0

2日目製造					
バッチ No.	製造量 (m ³)	製造時間 (分)	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	0.50	30	278	2.5	17.0
2	0.50	20	—	—	—
3	0.50	20	—	—	—
4	0.50	20	266	2.7	20.0
5	0.50	25	—	—	—
6	0.25	20	—	—	—
7	0.50	20	276	2.0	19.5

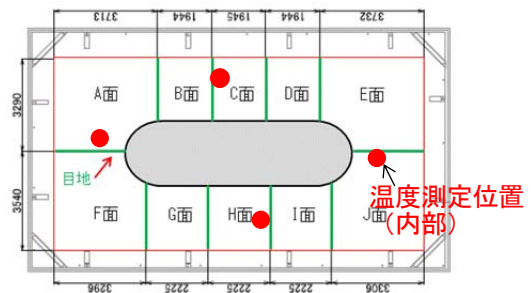


図-6 打込み区割り (単位:mm)



写真-6 打込み状況



写真-7 養生完了時の状況

表-8 温度測定結果*

橋脚名称	測定部位	温度測定値 (°C)		
		期間平均	期間最大	期間最小
橋脚①	外気温	11.6	21.7	6.2
	A面	21.0	43.4	9.9
	C面	21.4	43.4	9.6
	H面	22.9	32.6	11.5
	J面	24.4	40.6	10.6
	供試体	19.6	43.4	9.9
橋脚②	外気温	16.4	21.9	12.0
	A面	25.9	44.0	13.2
	C面	24.5	44.6	16.0
	H面	22.7	33.9	15.0
	J面	—	—	—
	供試体	22.4	34.7	8.4

* 測定は打込みから養生終了まで（材齢7日）

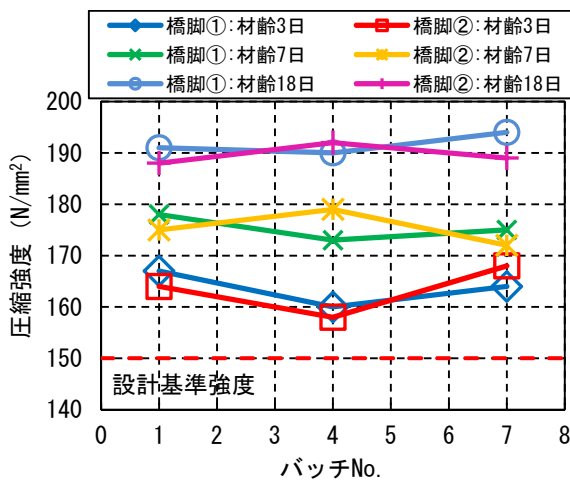


図-7 材齢と圧縮強度 (φ50×100mm)

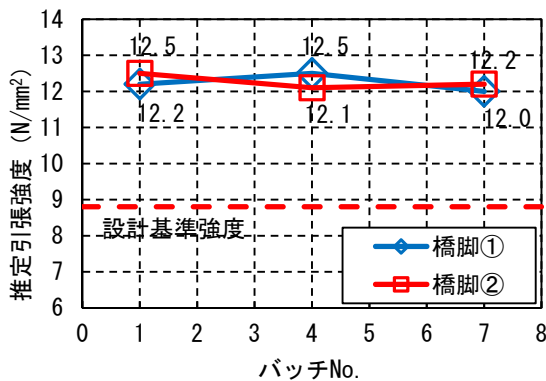


図-8 曲げ強度から推定した引張強度

齢3日で165N/mm²程度、材齢7日で175N/mm²程度となり、目標の設計基準強度を満足した。製造は7バッチ/日行い、強度管理用の供試体は1, 4, 7バッチのみ採取した。いずれも圧縮強度は190N/mm²程度であり、常温硬化型UFCの技術評価報告書⁴⁾に示す特性値の180N/mm²を満足する結果となった。なお、供試体間のばらつきは認められなかった。

式(1)を用いて⁴⁾曲げ強度から推定した引張強度の結果を図-8に示す。常温硬化型UFCの引張強度は12

N/mm²以上であり、いずれの供試体も特性値⁴⁾8.8N/mm²を満足した。UFCの引張強度は混入している鋼繊維の分散性が影響を及ぼすと考えられるので、今回の結果から、鋼繊維の分散は良好だったと考えられる。

以上の結果から、常温硬化型UFCは、適切な養生管理を行うことで、外気温が比較的低い環境下でも所要の性能が得られることを確認した。

$$f_b = 2.59f_t + 1.54 \quad (1)$$

f_b : 曲げ強度 (N/mm²)

f_t : 引張強度 (N/mm²)

5. まとめ

- (1) 常温硬化型UFCの摩耗量は、普通コンクリートの約15%、高強度コンクリートの約40%であり、著しく摩耗抵抗性が向上しているため、耐摩耗部材に適している。
- (2) 少量施工の場合は、車載式ミキサで安定供給が可能である。
- (3) 目地を適切に設置することで、ひび割れを抑制できる。
- (4) 表面仕上げ剤に原液タイプのパラフィン系を用いることで、色むらがなく軽微なひび割れも発生しない。
- (5) 常温硬化型UFCは、外気温が低い環境においても、適切な養生を選択することで、所定の強度特性が得られ、その結果、耐摩耗性能を早期に発揮する。

参考文献

- 1) 坂下雅司ほか: 超高強度繊維補強コンクリート製品の水路トンネル補修工事への適用, 「プレキャストコンクリート製品の課題と展望」に関するシンポジウム報告書・論文集, JCI-C74, pp.53-58, 2008.2
- 2) 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
- 3) 石関嘉一ほか: 「スリムクリート®」の港湾構造物リニューアル工事への適用, 大林組技術研究所報, No.75, 2011
- 4) 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」に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo.10, 2012.3
- 5) 石関嘉一ほか: 常温硬化型UFCを用いた耐摩耗部材の開発, コンクリート工学, Vol.51, No.11, pp.890-897, 2013, 11
- 6) 増田隆ほか: 高耐摩耗性コンクリート, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.100-104, 1994
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 施工編, p.124, 2012