

論文 UFC プレキャスト部材の接合部に用いるウェットジョイント材に適した早強・常温硬化型 UFC の諸物性

橋本 理^{*1}・坂本 淳^{*2}

要旨：UFC プレキャスト部材の接合方法として、部材間に超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）を充填する方法（ウェットジョイント）が広く用いられている。この方法において、速やかにプレストレスを導入し各部材を一体化するためには、充填した UFC の強度を早期に発現させる必要がある。従来はヒーター等を用いた給熱養生を行っていたが、現場での作業負担が増大する課題が生じていた。本研究では、大規模な給熱養生を施さなくても早期に強度を発現可能な UFC を開発し、諸物性を確認した。その結果、一般的な UFC に比べて早期に強度発現が得られること、十分な長期耐久性を有していることを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、ウェットジョイント、強度発現性、耐久性

1. はじめに

UFC を用いて構造物を構築する場合、あらかじめ工場で分割して製作したプレキャスト部材を現地に運搬し、プレストレスを与えて一体化する工法（プレキャストセグメント工法）が広く用いられている。部材間の接合方法としては、各部材を直接接合させる方法（ドライジョイント）と部材間に UFC を充填する方法（ウェットジョイント）¹⁾が挙げられる。前者ではプレキャスト部材間の密着を図る必要があるが、プレキャスト部材の養生中における自己収縮が大きいため、プレストレス導入時に荷重の不均等に伴う応力集中が懸念される。先に製作したプレキャスト部材の接合面を型枠として利用するマッチキャスト方式で製作する方法も提案されているが²⁾³⁾、通常の製作に比べて作業手間がかかるとともに長い製作期間が必要になる。一方、後者において早期にプレストレスを与えて一体化するためには、それまでに接合部に充填した UFC の圧縮強度が所定の値に達している必要がある。従来は、初期の圧縮強度を増進させるため、ヒーター等を用いた給熱養生を行っていたが、現場での作業が煩雑になるとともに作業期間が長期化するなどの課題が生じていた。

本研究では、大規模な給熱養生を施さなくても早期に強度を発現し、かつ十分な長期耐久性を有するウェットジョイント用の UFC（以下、UFC-WJ）を開発し、その諸物性を確認した。強度の目標値は、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針⁴⁾（以下、UFC 指針）において適用の範囲とされている値（圧縮強度：150N/mm²、ひび割れ発生強度：4N/mm²、引張強度：5N/mm²）とし、各種耐久性試験の結果は UFC 指針に示されている標準配合粉体を用いた UFC（以下、UFC 指針材料）の試験結果と比較し考察を加えた。さらに、材齢 24 時間でプレストレスを導入するケースを想定したクリープ試験を実施し、若材齢時から圧縮力を受ける場合のクリープ特性を把握した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を示す。UFC-WJ は、セメント、プレミックス混和材、珪砂、水道水、高性能減水剤、消泡剤および鋼繊維で構成されるセメント系材料である。

表-2 に UFC-WJ の配合を示す。シリカフューム等の混和材の種類や配合割合は事前の試験練りで決定し、水

表-1 UFC-WJ の使用材料

種別	材料	物性または成分
粉体	セメント	早強ポルトランドセメント、密度3.14g/cm ³
	混和材	プレミックス混和材、密度2.77g/cm ³
骨材	珪砂	粒径2.5mm以下、絶乾密度2.60g/cm ³ 、吸水率0.51%
短繊維	鋼繊維	長さ13mm、直径0.16mm、引張強度2700N/mm ² 以上
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

*1 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任研究員 工修（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 室長 工博（正会員）

表-2 UFC-WJ の配合

フロー 値 (mm)	空気量 (%)	水粉体 比 (%)	骨材 容積率 (vol.%)	単位量(kg/m ³)				高性能 減水剤 (kg/m ³)	消泡剤 (kg/m ³)	鋼繊維 (kg)
				水※1)	セメント	混和材	珪砂※2)			
250	5以下	14.2	25.0	216	813	712	650	30	1	118

※1) 高性能減水剤、消泡剤を含む ※2) 絶乾状態の配合量を示す

表-3 実験ケース

Case	養生条件		試験項目	供試体 数量	試験概要
	脱型(24h) まで	24h以降			
1	室温20℃封緘	室温20℃ 相対湿度60%	圧縮強度	3	材齢28日で試験実施
			ひび割れ 発生強度	3	
			曲げ強度	3	
			曲げ強度 (切欠き有)	3	
			熱膨張係数	2	
			自己収縮	3	凝結開始 から材齢800日まで測定
			中性化	3	材齢28日で試験を開始し、促進期間113週まで実施
			塩化物イオン の拡散係数	2	材齢28日で試験を開始し、浸せき期間2.5年まで実施
			凍結融解	3	材齢28日で試験を開始し、1470サイクルまで実施
			化学的侵食	3	材齢28日で試験を開始し、浸せき期間182日まで実施
2	室温25℃封緘	室温20℃ 相対湿度60%	圧縮強度	各3	下記材齢時に試験を実施 (8, 12, 16, 20時間および1, 2, 4, 7, 28日)
			静弾性係数	各3	
			クリープ	3	材齢24時間で試験を開始し、載荷期間1000日まで実施

粉体比および骨材容積率は、フレッシュ性状や強度、凝結特性から判断して設定した。補強繊維の混入容積率は1.5vol.%とし、練り上ったマトリクスに外割に添加した。

2.2 練混ぜ、養生方法

練混ぜには、水平二軸ミキサー（公称容量 100L）を用い、1回の練混ぜ量は 60L とした。雰囲気温度を 20℃に調整した室内で、最初に粉体と絶乾状態の珪砂をミキサーに投入して 5 分間空練りした後、水と混和剤を投入して 16 分間、その後繊維を投入して 3 分間練混ぜた。

練上がり直後には、フレッシュ性状の確認としてフロー（JIS R 5201,落下なし）、空気量（JIS A 1116）および温度（JIS A 1156）を測定した。後述の各種試験用供試体は、一次養生として 24 時間の封緘養生を行った後に脱型し、その後は室温 20℃、相対湿度 60%の室内にて気中養生を行った。

2.3 実験ケース

表-3 に実験ケースを示す。Case1 では養生温度を脱型前後で 20℃一定としているのに対し、Case2 では脱型までの養生温度を 25℃とした。これは、クリープ試験を開始する材齢 24 時間において、圧縮強度が試験時載荷応

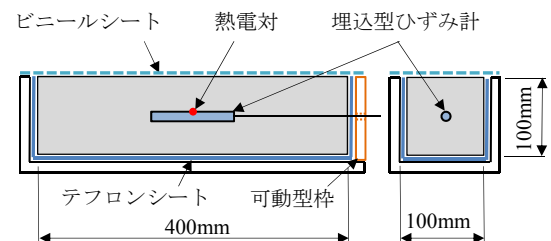


図-1 自己収縮の測定方法（材齢 24 時間以前）

力の 3 倍程度となるよう調整したためである。

2.4 試験項目および試験方法

(1) 圧縮強度、静弾性係数

圧縮強度（以下、 f'_c ）および静弾性係数（以下、 E_c ）は、それぞれ JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて測定した。供試体は $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体とし、試験直前に両端面の研磨処理を施した。

(2) ひび割れ発生強度

ひび割れ発生強度（以下、 f_{cr} ）は JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じて測定した。供試

体は $\phi 100 \times 110$ mmの円柱供試体とし、試験直前に打込み面のみ研磨を行った。 f_{cr} は、両端面に貼り付けたひずみゲージの測定値から評価した。

(3) 曲げ強度

曲げ強度（以下、 f_b ）および曲げひび割れ強度（以下、 f_{bcr} ）は、JSCE-G552「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法（案）」に準じて行った試験の結果から求めた。供試体には、 $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱供試体を用いた。

(4) 引張強度

引張強度（以下、 f_t ）は、JCI-S-001「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」に準じて行った試験の結果から得られた荷重－変位関係を逆解析することにより引張軟化曲線を推定し求めた。供試体には、 $100 \times 100 \times 400$ mmで供試体下面の中央に深さ30 mmの切欠きを入れた角柱供試体を用いた。

(5) 自己収縮

中心に埋込み型ひずみ計および熱電対を設置した $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱供試体を用い、凝結開始から自己収縮を測定した。ひずみ計の設置状況を図－1に示す。UFC 打込み後は水分の逸散を防ぐため表面にビニールシートを被せて養生し、脱型後はビニール封緘した状態で測定を継続した。凝結開始時間には別途実施した凝結試験で得られた始発（=6 時間 40 分）を用いた。熱電対で測定されたコンクリート内部温度から算出した温度ひずみを、ひずみ計で測定した実ひずみから減ずることによって温度の影響を除去した。

(6) クリープ

クリープ試験はJIS A 1157「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準じ、雰囲気温度20℃、相対湿度60%に調整された室内にて実施した。供試体には $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を用い、载荷中の条件は気中状態とした。载荷応力は既往のプレストレス力導入実績を参考に30 N/mm²に設定し、材齢24時間の時点で圧縮強度が载荷応力の3倍程度以上発現していることを確認した後、

速やかにクリープ試験を開始した。载荷持続期間中にはクリープひずみの進行に伴って载荷応力が減少しないよう随時調整を行った。クリープひずみは、測定された全ひずみから载荷時弾性ひずみおよび無载荷ひずみを減ずることにより算出した。

(7) 熱膨張係数

中心に埋込み型ひずみ計を設置し、ビニール封緘養生した $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を用い、材齢28日の時点で、温度範囲20～60℃における熱膨張係数の測定を行った。昇降温度速度は1℃/hとし、20℃および60℃に到達する毎に12時間保持した。

(8) 中性化に対する抵抗性

中性化に対する抵抗性の確認は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて行い、促進期間はUFC 指針と同様、113 週までとした。

(9) 塩化物イオンの拡散係数

塩化物イオンの拡散係数は、JSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」を参考に、 $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱供試体を用いて試験を行った。塩化物イオン分布の測定方法は、JSCE-G 574「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析法（案）」に準じて実施した。面分析の測定範囲を図－2に示す。

(10) 凍結融解抵抗性

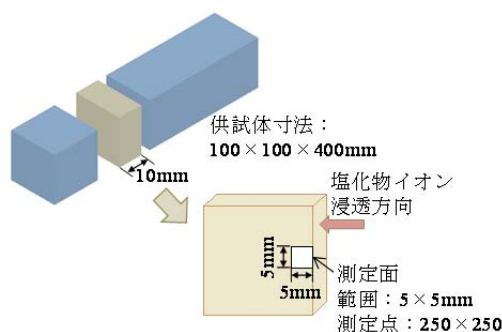
凍結融解試験はJIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法（A 法）」に準じ、1470 サイクルまで行った。

(11) 化学的侵食に対する抵抗性

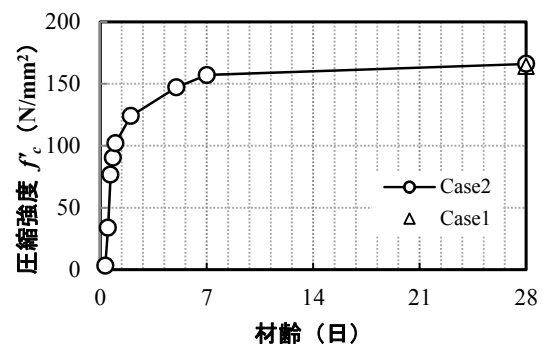
化学的侵食に対する抵抗性の確認試験は、JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法（案）」に準じ、上水道水、硫酸ナトリウムおよび硫酸マグネシウムを対象に耐薬品性試験を行った。供試体には、 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状



図－2 面分析の測定範囲



図－3 圧縮強度試験結果

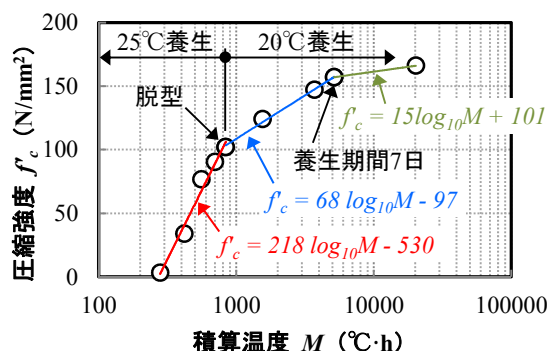


図-4 圧縮強度と積算温度の関係 (Case2)

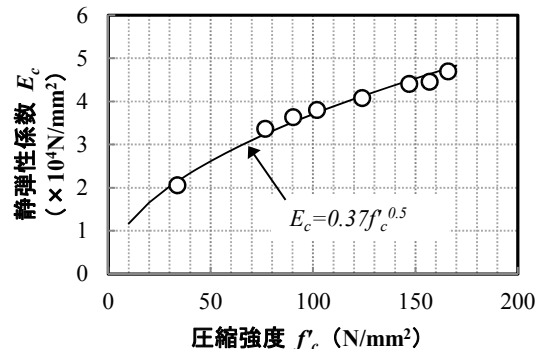


図-5 静弾性係数と圧縮強度の関係 (Case2)

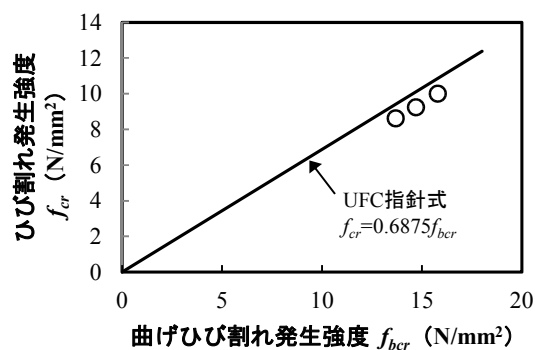


図-6 ひび割れ発生強度と曲げひび割れ発生強度の関係 (Case1)

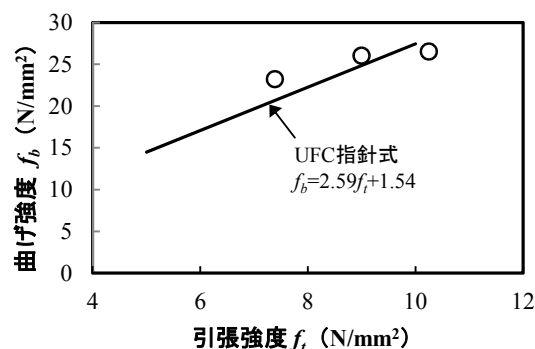


図-7 曲げ強度と引張強度の関係 (Case1)

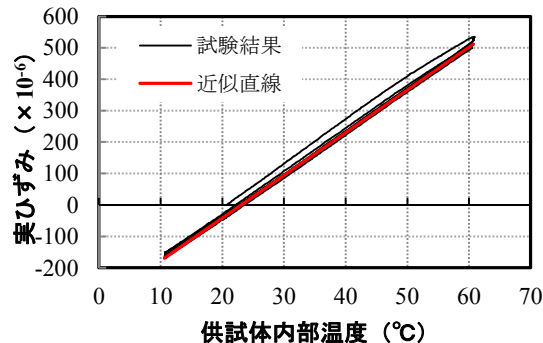


図-8 熱膨張係数測定結果 (Case1)

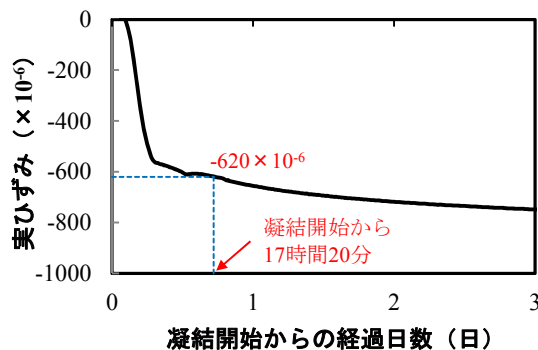


図-9 自己収縮測定結果
(凝結開始から3日まで)

UFC-WJ の練混ぜは、1 バッチあたり 60L で計 8 バッチ行った。各バッチの練上がり直後にフレッシュ性状の確認を行った結果、フローは247～262mmの範囲であり、フローの状態や繊維の分散性も良好であった。また、繊維投入によるフローロス概ね10mm程度であり、空気量は繊維を投入することで0.5～1%増加する傾向が見られた。

3.2 圧縮強度

f'_c と材齢の関係を図-3に示す。Case2の結果を参照すると、材齢24時間で100N/mm²に達し材齢7日まで強度が増大した後、それ以降の伸びは緩やかになっていることが分かる。また、Case1とCase2で初期の養生温度は異なるものの、材齢28日の強度はほとんど変わらない結果となり、目標強度である150N/mm²を上回った。図-4にCase2における f'_c と-10℃を基準とした積算温度

の関係を示す。同図によると、圧縮強度が100N/mm²および150N/mm²付近となる時点に傾向が変化していることが分かる。この要因として、養生条件の他、水和反応の進行度による影響⁵⁾も考えられるが、プレストレス力導入時期（一般に $f'_c=100\text{N/mm}^2$ 以下）の推定には初期材齢時の関係を用いるため、積算温度からプレストレス導入時の f'_c を推定することは可能と判断される。ただし、養生温度によって関係式が異なる可能性があるため、施工条件に合わせた検討は適宜行う必要があると思われる。

3.3 静弾性係数

Case2における E_c と f'_c の関係を図-5に示す。 E_c は f'_c の増大に伴って大きくなり最終的にはUFC指針に示される標準的な値（ $=5.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ）近傍まで到達していることが分かる。また、 E_c と f'_c の間には相関関係が認

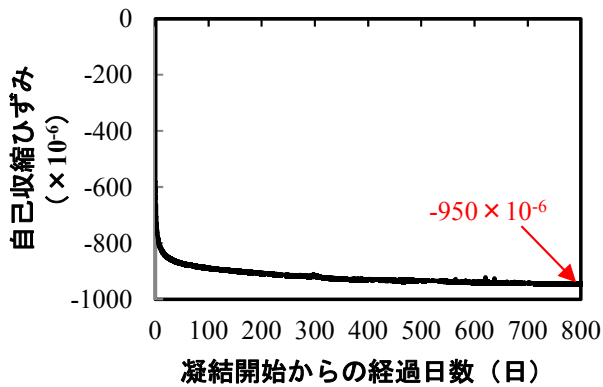


図-10 自己収縮測定結果
(凝結開始から 800 日まで)

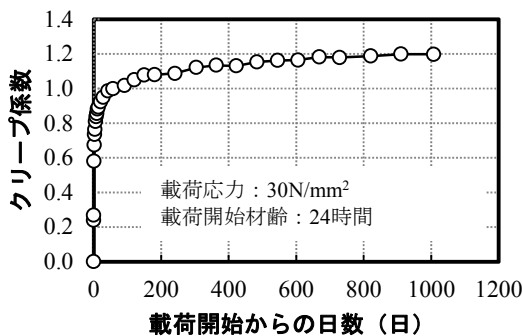


図-11 クリープ試験結果

められ、回帰分析の結果、式(1)の関係式を得た。

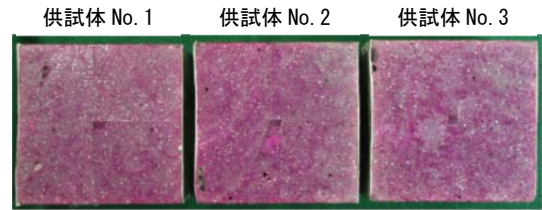
$$E_c = 0.37f_c^{0.5} \quad (\times 10^4 \text{N/mm}^2) \quad (1)$$

3.4 ひび割れ発生強度と曲げひび割れ発生強度の関係

Case1 における材齢 28 日の f_{cr} と f_{bcr} の関係を UFC 指針に示される関係式と併せて図-6 に示す。同図を参照すると、材齢 28 日におけるひび割れ発生強度は目標強度の 4N/mm^2 を大きく上回っていることが分かる。また、図中に示すプロットは、 f_{cr} と f_{bcr} をそれぞれ昇順に並べて整理したものであるが ($n=3$)、UFC-WJ における f_{cr} と f_{bcr} の関係は UFC 指針に示される関係式とほぼ一致することが分かった。ただし、現段階では供試体数が十分ではないため、今後の検証が必要である。

3.5 引張強度

図-7 に f_b と f_t の関係を UFC 指針に示される関係式と併せて示す。図中に示すプロットは、 f_b と f_t をそれぞれ昇順に並べて整理したものである ($n=3$)。UFC-WJ における f_t と f_b の関係は、UFC 指針に示される関係式とほぼ一致する結果となり、引張強度も目標強度 5N/mm^2 以上となったが、現段階では供試体数が十分ではないため、今後の検証が必要である。また、 f_t のばらつきが大きいのは、UFC 指針材料に比べて補強繊維の混入容積率が小さいためと推察され、引張強度の特性値を把握するためには、今後のデータの蓄積が必要である。



※上写真において、供試体の上下面は曝露面、左右面はシール面を示す

写真-2 促進中性化試験結果 (113 週)

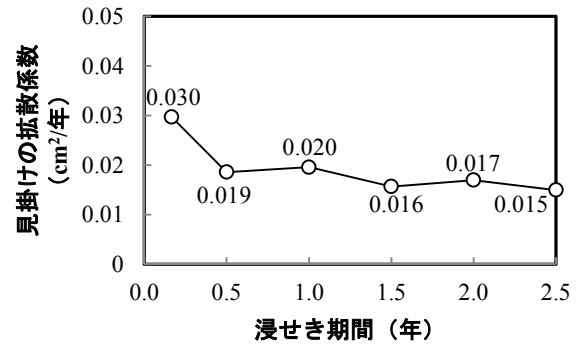


図-12 塩化物イオンの拡散係数の測定結果

3.6 熱膨張係数

図-8 に熱膨張係数の測定結果を示す。同図より、熱膨張係数の値として $13.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を得た。

3.7 自己収縮

初期 (凝結開始から 3 日まで) および長期の自己収縮測定結果をそれぞれ図-9、図-10 に示す。図-9 において、プレストレス力導入時期を凝結開始から 17 時間 20 分後 (注水から 24 時間後) と想定するとその時点における自己収縮は 620×10^{-6} となる。一方、図-10 を参照すると、最終的な自己収縮ひずみは 950×10^{-6} 程度で収束していることが分かる。したがって、概ね 330×10^{-6} 程度の自己収縮がプレストレス力導入以降に生じると想定されるが、プレストレスの作用方向において幅が狭い接合部に生じるひずみであることを考慮すれば、構造物全体に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

3.8 クリープ

図-11 にクリープ試験結果を示す。クリープ係数は載荷後 1000 日付近で 1.2 程度に収束した。UFC 指針に示される標準材料のクリープ係数 ($=0.4$) より大きい値となったが、これは載荷開始材齢が注水の 24 時間後と早かったこと、熱養生を実施していないことに起因しているものと推察される。しかしながら、自己収縮同様、プレストレスの作用方向において幅が狭い接合部に適用することを考慮すれば、構造物全体に及ぼす影響は小さいと思われる。

3.9 中性化に対する抵抗性

促進期間 113 週において、供試体の切断面にフェノー

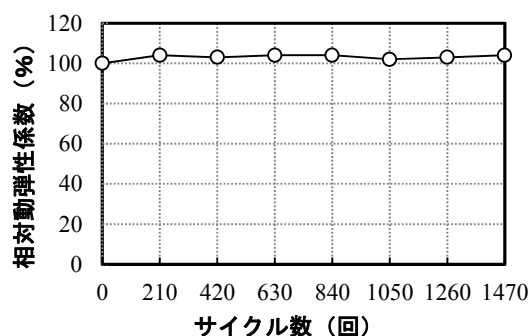


図-13 凍結融解試験結果

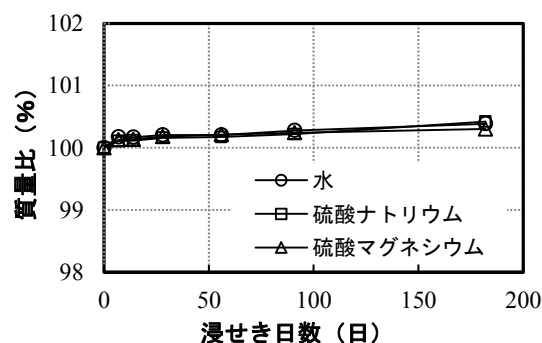


図-14 耐薬品性試験結果

ルフタレイン溶液を噴霧した状況を写真-2 に示す。切断面は表層部に至るまで赤紫色に呈色しており、曝露面において中性化領域は認められなかった。

3.10 塩化物イオンの拡散係数

図-12 に試験結果から得られた見掛けの拡散係数を示す。浸せき期間 2.5 年まで試験を実施したが、浸せき期間 1.5 年ではほぼ一定値 ($=0.015\text{cm}^2/\text{年}$) に収束する結果となった。これは、UFC 指針材料の値 ($=0.0019\text{cm}^2/\text{年}$) に比べて 1 オーダー程度大きい値である。したがって、部材設計の際には現位置の環境条件を考慮し、条件が厳しい場合にはかぶりを大きくする等の措置が必要になると考えられる。

3.11 凍結融解に対する抵抗性

図-13 に凍結融解試験の結果から得られた相対動弾性係数とサイクル数の関係を示す。同図より、凍結融解サイクル 1470 回においても相対動弾性係数の低下が生じていないことが分かった。なお、凍結融解試験の供試体を採用したバッチにおける練上がり直後の空気量は 3.5%であった。

3.12 化学的侵食に対する抵抗性

図-14 に化学的侵食に対する抵抗性に関する試験結果を示す。同図に示すとおり、硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウムといった硫酸塩に対する抵抗性が高く、実環境下において硫酸塩の侵食に起因した劣化が生じる可能性は小さいものと判断される。

4. まとめ

UFC プレキャスト部材の接合部に充填することを目的に開発した UFC-WJ を対象に、強度特性および耐久性等の確認を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) UFC-WJ の圧縮強度と -10°C を基準とした積算温度との間に相関性があることを確認した。ただし、圧縮強度が $0\sim 100\text{N/mm}^2$ 、 $100\sim 150\text{N/mm}^2$ の範囲で傾

向が変化した。

- (2) ひび割れ発生強度と曲げひび割れ発生強度の関係および曲げ強度と引張強度の関係は、UFC 指針材料の関係とほぼ一致した。
- (3) UFC-WJ の自己収縮ひずみおよびクリープ係数は、UFC 指針に示される標準材料に比べて大きくなった。ただし、プレストレスの作用方向において幅が狭い接合部に充填する材料であり、接合部幅が部材全長に占める割合が小さいことから構造物全体に及ぼす影響は小さいものと推察される。
- (4) UFC-WJ の中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および硫酸塩の侵入に対する抵抗性は高いことが分かった。
- (5) UFC-WJ の見掛けの拡散係数は、UFC 指針材料に比べて 1 オーダー大きいことが分かった。

参考文献

- 1) 武者浩透，渡辺典男，竹田康雄，松川文彦：東京国際空港 GSE 橋梁 桁間ジョイントの実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1477-1482，2008.7
- 2) 大島邦裕，田中浩二，稲原英彦：ダクト部材の接合方法および低桁高部材の製作方法の開発，大成建設技術センター報，第 41 号，2008.11
- 3) 田中良弘，小林 隆，石堂正之，熊谷 徹：UFC を適用した長大スパンモノレール軌道桁の構造検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1405-1410，2008.7
- 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)，コンクリートライブラリー113，2004.9
- 5) 桐山宏和，玉滝浩司，吉田浩一郎：常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性について，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，V-248，pp.495-496，2014.9