

論文 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの諸性質

玉滝 浩司*1・吉田 浩一郎*2・石関 嘉一*3・平田 隆祥*4

要旨: 開発した超高強度繊維補強コンクリートは、常温でも早期に高強度が得られる特徴を有している。本検討では、開発品の諸物性を把握することを目的にフレッシュ性状と標準養生とした場合の硬化物性および耐久性を評価した。その結果、開発品は優れた流動性と硬化物性および耐久性を有しており、熱養生を基本とする一般的な超高強度繊維補強コンクリートと同等の性能を有していることを明らかにした。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 常温養生, 鋼繊維, 現場施工, 硬化物性, 耐久性

1. はじめに

近年、優れた強度発現性とじん性および高耐久性を併せ持つ超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : 以下 UFC と称す) が開発されている¹⁾。この UFC は、特長を生かして構造部材に適用することにより、部材の薄肉化、使用材料の削減および長期耐久性向上によるライフサイクルコストの低減等多くの合理化が図れる次世代の建設材料として期待されている。

一方、一般の UFC は高温で熱養生することが標準とされているため²⁾、部材の製造に必要な高温養生や、製造品の運搬および設置に関わる施工コストが高むこと、現場条件に即した施工が難しいこと等が UFC 適用の障壁となる場合がある。このことから、最近では、熱養生が不要な UFC のニーズが高まり、常温環境でも早期に所定の性能が得られる UFC が開発されている³⁾。この開発品 (以下、UFC-SC と略記) は、現場施工が可能であり、その特性から補修・補強用途への適用が期待されている。構造物への適用にあたっては、その物性データが必要となるが、UFC-SC の諸物性は未だ明らかにされていない。このため、UFC-SC の設計・照査に活用できるデータの充実を目的として、各種硬化物性および耐久性を評価した。

熱養生を行わなくても常温で早期に強度発現するよう、C₃A 量が極めて少なく、C₃S 量が多いセメントをベースに配合されている。また、細骨材には高強度コンクリートに適した粒径 5mm 以下の細骨材を使用した。なお、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用し、引張抵抗性を付与するため、直径 0.16mm、長さ 13mm の鋼繊維 (写真-2) を 2.0vol% 添加した。

表-1 UFC-SC の構成材料

材料	種類・性質等
水	上水道水
プレミックス材	密度 2.96g/cm ³
細骨材	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 2.5%,
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤
補強用鋼繊維	密度 7.85 g/cm ³ , 直径 0.16mm 長さ 13mm, 引張強度 2000N/mm ² 以上

表-2 UFC-SC の標準配合

単位量 (kg/m ³)				補強用 鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材	高性能 減水剤	
230*1	1830	330	32	157

※1 高性能減水剤中の水分も含む

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に UFC-SC の構成材料を示す。結合材には、品質の安定化および現場作業の軽減を図るために、ポルトランドセメント、ボゾラン材、無機粉体をあらかじめ混合したプレミックス材 (写真-1) を使用した。プレミックス材は、低水結合材比領域で流動性に優れ、高温の



写真-1 プレミックス材 写真-2 補強用鋼繊維

*1 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 工修 (正会員)

*2 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 主席研究員 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 工博 (正会員)

*4 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 工博 (正会員)

2.2 配合

表-2にUFC-SCの標準配合を示す。本実験では、水結合材比が極めて小さいUFC-SCであっても一般のコンクリートと同様に、細骨材の表面水を練混ぜ水に反映することで流動性の安定したモルタルが得られるかを検証するため、細骨材は予め表面水を含んだものを5ロット分使用した。なお、特に意図的な細骨材の表面水率の調整は行っておらず、表面水率を練混ぜ直前に測定して練混ぜ水に反映した。

2.3 練混ぜ方法

UFC-SCの練混ぜには、主に水平二軸型強制練りミキサ(容量:55L)を使用し、1回の練混ぜ量は50Lとした。

プレミックス材と細骨材をミキサ内に投入後、30秒間練り混ぜ、高性能減水剤および水を投入して7分間練り混ぜた。その後、搔落としを行い、さらに3分間練り混ぜた。練り上がったモルタルに鋼繊維を添加し、さらに2分間練り混ぜて排出した。なお、練混ぜは環境温度10~30℃の室内または屋外で実施した。

2.4 実験水準

表-3に実験項目一覧を示す。本実験では、UFC-SCの物性および各試験値のばらつきを把握するため種々の実験を行った。実験毎にn数が異なるのは、試験項目毎に実験頻度が異なるためである。例えば、硬化物性を最も簡便に評価できる圧縮強度試験はn数が多くなっている。

2.5 供試体の作製

(1) 圧縮強度試験用供試体

供試体はφ50×100mmの円柱とした。エントラップトエアを巻き込まないように、一層で流し込んだ後、エントラップトエアを抜くことを目的に鋼繊維が沈まない程度にタッピングして成型した。なお、脱型まで水分の蒸発を防ぐため、表面をビニールシートで覆った。

(2) 曲げ強度試験用供試体

供試体は100×100×400mmの角柱とした。成型は合流部ができないように型枠の端部から一層で上面まで連続的に流し込んだ。なお、脱型まで水分の蒸発を防ぐため、表面をビニールシートで覆った。

2.6 試験項目および試験方法

(1) フロー試験

フロー試験はJIS R 5201-1997「セメントの物理試験方法」を参考に落下なしのフロー値を測定し、目標値を260±30mmとした。

(2) 圧縮強度試験、曲げ強度試験および割裂引張試験

圧縮強度試験はJIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」を参考にして行った。なお、ヤング係数は、JIS A 1149:2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて測定した。

曲げ強度および曲げひび割れ発生強度は、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)」²⁾(以下、UFC指針と略記)3.5.3記載「曲げ強度試験方法」に準じて測定した。曲げひび割れ発生強度は、供試体の引張縁に等曲げ区間全域を通るよう支間方向と平行に測長120mmのひずみゲージを貼り付け、試験載荷時に荷重とひずみを連続的に計測することによって、計測値が不連続となった点から、曲げひび割れ発生時を特定した。この時の応力を曲げひび割れ発生強度とした。図-1に曲げ強度試験によるひび割れ発生強度を示す。

表-3 実験項目一覧

実験項目	目的	要因
フロー値(n=73) 圧縮強度(n=149) 曲げ強度(n=107) ヤング係数(n=40) 曲げひび割れ発生強度(n=51)	物性およびばらつき把握	細骨材の表面水率およびロット
割裂ひび割れ発生強度 引張軟化 熱膨張係数 乾燥収縮 自己収縮、中性化 凍結融解抵抗性 耐薬品性	物性把握	—

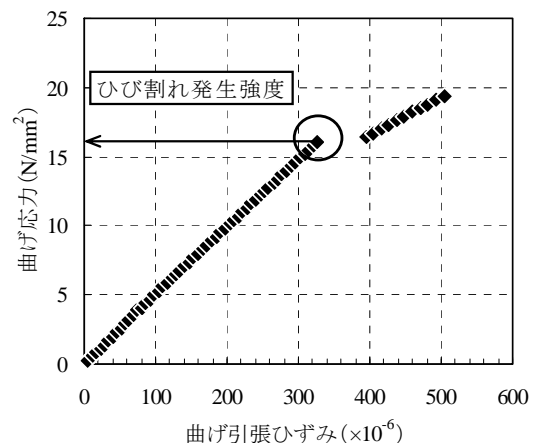


図-1 曲げ強度試験によるひび割れ発生強度



写真-3 ひずみ計の設置状況

また、引張軟化曲線は、JCI-S-002-2003「切欠きはりを
用いた繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方
法」に準じて推定した。

割裂ひび割れ発生強度は UFC 指針 3.5.2 記載「割裂引
張強度試験」を参考にして測定した。供試体の端面中心
に、荷重方向と垂直になるようにひずみゲージを貼り付
け、試験载荷時に荷重とひずみを連続的に計測すること
によって、計測値が不連続となった点から、割裂ひび割
れ発生時を特定した。

なお、いずれの供試体も成型後 24 時間で脱型し、材
齢 28 日まで標準養生した（試験材齢 28 日）。

(3) 熱膨張係数試験

熱膨張係数は、日本コンクリート工学協会「マスコン
クリートのひび割れ制御指針 2008」記載の方法⁴⁾で測定
した。測定範囲は 20～85℃とし、6 サイクル測定した。
昇降温速度は 1℃/h とし、5℃上昇（降下）する毎に 5 時
間保持した。なお、測定には自己収縮ひずみ測定終了後
の 100×100×400mm の角柱を用いた。自己収縮ひずみが
収束した供試体を用いているため、熱膨張係数試験中
には自己収縮が生じないものと仮定して試験を実施した。

(4) 乾燥・自己収縮試験

乾燥収縮は、JIS A 1129-2 : 2001「モルタル及びコンク
リートの長さ変化試験方法－第 2 部：コンタクトゲージ
方法」に準じて測定した（写真－3 参照）。なお、測定
は標準養生 7 日後を基準とし、材齢 182 日まで測定した。

自己収縮は、埋込み型ひずみ計を用いて、封緘状態
のひずみを材齢 182 日まで測定した。また、同一試料で凝
結時間を測定し、凝結開始からのひずみを自己収縮ひ
ずみとした。

(5) 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153 : 2003「コンクリートの
促進中性化試験方法」に準拠して行い、中性化深さは、
JIS A 1152 : 2002「コンクリートの中性化深さの測定方法」
に準拠して測定した。なお、供試体は 40×40×160mm
の角柱とした。

(6) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148 : 2001「コンクリートの凍
結融解試験方法（A 法）」に準じて行った。なお、測定は
2000 サイクルまで実施した。

(7) 耐薬品試験

耐薬品試験は、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）」⁵⁾を参考に行った。浸せ
き溶液は、5%硫酸溶液、2%塩酸溶液、10%硫酸マグネ
シウム溶液および 10%硫酸ナトリウム溶液とした。試験
溶液は、試験開始後 1 ヶ月間は毎週全量交換し、その後
は 1 ヶ月毎に全量交換することとした。なお、供試体は
φ50×100mm とした。

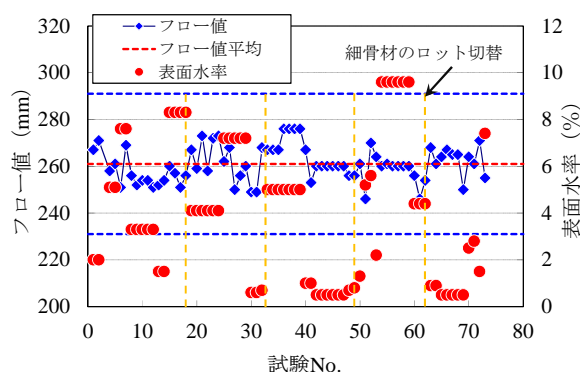
3. 実験結果および考察

3.1 フロー値

細骨材の表面水率が異なる場合のフロー試験結果を
図－2 に示す。フロー値の平均は 261mm であり、い
ずれも目標値（260±30mm）を満足した。このことから、
細骨材の表面水率の変動が 0～10% の範囲であれば、一
般のコンクリートと同様に表面水を練混ぜ水から差し
引くことによって流動性の安定した UFC-SC を製造でき
ることがわかった。なお、練上がり温度は 13.0～31.0℃
の範囲であった。また、写真－4 に示すフロー試験後の
状況によれば、流動した試料の先端まで鋼繊維が分散
しており、材料分離やファイバールは認められなかつ
た。

3.2 圧縮強度

圧縮強度試験結果の度数分布（n=149）を図－3 に示す。
圧縮強度の平均値は、196.3N/mm²、標準偏差は 8.2N/mm²
であった。正規分布を仮定し、危険率 5% となる値は
182.8N/mm² となることから、圧縮強度の特性値は、さら
に安全を見込んで 180N/mm² を用いることが可能と考え
られた。なお、圧縮強度のばらつきは、一般的な UFC
の標準偏差²⁾（7.7N/mm²）とほぼ同等であった。



図－2 フロー試験結果



写真－4 フロー試験後の状況

3.3 曲げ強度

曲げ強度の度数分布 (n=107) を図-4に示す。曲げ強度の平均値は 32.6N/mm²、標準偏差は 4.6N/mm²であった。正規分布を仮定し、危険率 5%となる値は 25.1N/mm²となる。図-5に示す引張軟化曲線から求められる引張強度と曲げ強度の関係から、引張強度は 9.1N/mm²と算出できる。よって、引張強度の特性値はさらに安全を見込んで 8.8N/mm²を用いることが可能と考えられた。

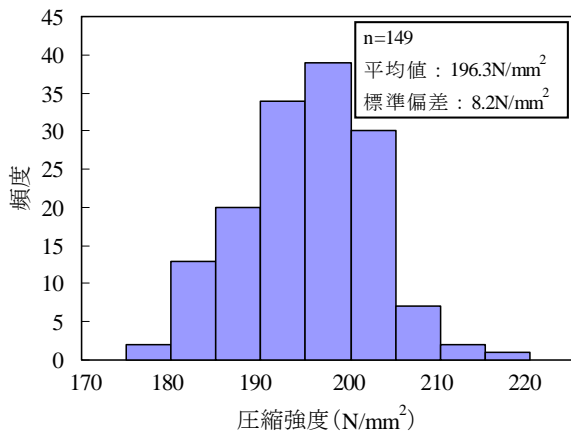


図-3 圧縮強度試験結果

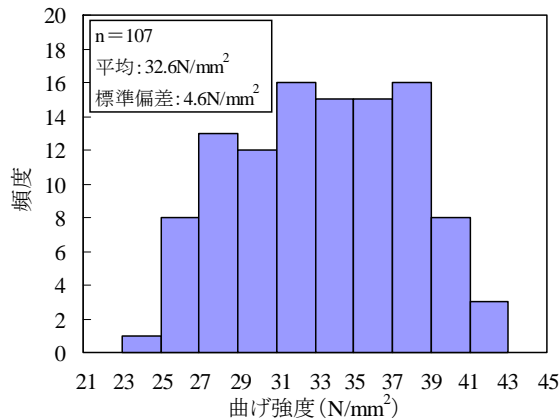


図-4 曲げ強度試験結果

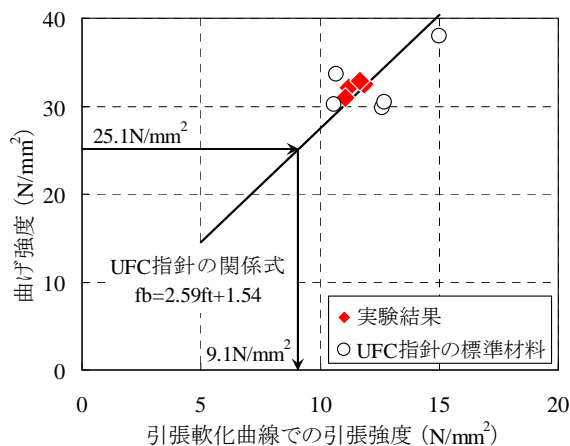


図-5 曲げ強度と引張強度との関係

3.4 ひび割れ発生強度

曲げ強度試験から求めた曲げひび割れ発生強度の度数分布 (n=40) を図-6に示す。曲げひび割れ発生強度の平均値は 15.7N/mm²、標準偏差は 1.3N/mm²であった。正規分布を仮定し、危険率 5%となる曲げひび割れ発生強度は 13.6N/mm²となる。図-7に示す曲げひび割れ発生強度と割裂ひび割れ発生強度の関係から、割裂ひび割れ発生強度は 9.4N/mm²と算出できる。よって、ひび割れ発生強度の特性値は、さらに安全を見込んで 8.0N/mm²を用いることが可能と考えられた。

3.5 ヤング係数

ヤング係数の度数分布 (n=51) を図-8に示す。ヤング係数の平均値は 4.6×10^4 N/mm²であり、一般的な UFC のヤング係数²⁾ (5.0×10^4 N/mm²) よりも若干小さい値となった。

3.6 熱膨張係数

図-9に熱膨張係数の測定結果を示す。熱膨張係数は $10.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。1 サイクル目が他のサイクルと異なるのは、熱を与えたことによって未水和のセメントあ

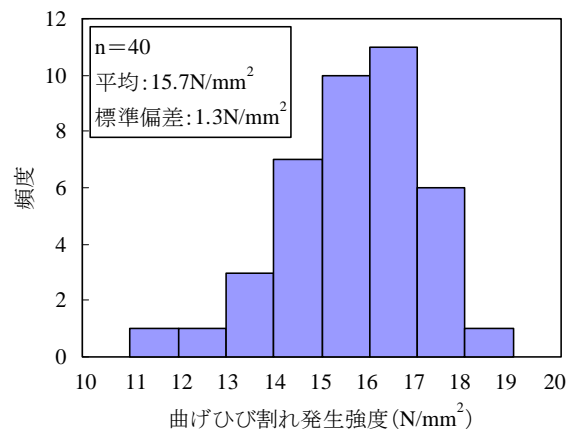


図-6 曲げひび割れ発生強度

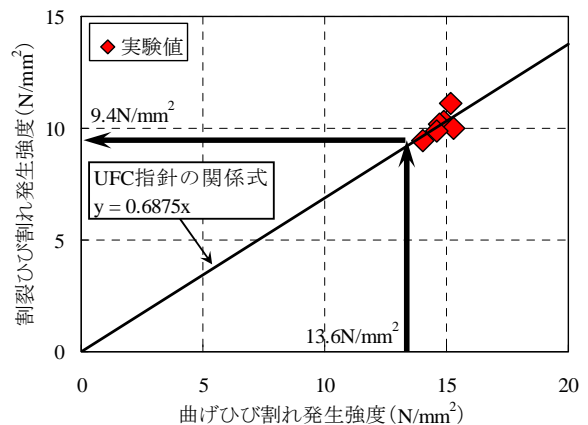


図-7 曲げひび割れ発生強度と割裂ひび割れ発生強度との関係

るいはポズラン材が反応し自己収縮が生じたためと推察される。

3.7 乾燥収縮

図-10 に乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。標準養生7日後を基準とし、20℃、湿度60%環境下で182日間測定した自己収縮ひずみを含む乾燥収縮ひずみは 400×10^{-6} であった。後述の自己収縮は 660×10^{-6} であり、乾燥収縮測定開始材齢が7日であることを考慮すると、本実験で測定された乾燥収縮のほとんどが自己収縮に含まれると考えられる。

3.8 自己収縮

図-11 に凝結始発からの材齢と自己収縮ひずみとの関係を示す。材齢182日における自己収縮ひずみは 660×10^{-6} であった。UFC-SC は結合材料が多く、粗骨材を含まないことから、通常のコンクリートと比較して自己収縮が大きくなったと考えられる。

3.9 中性化

写真-5 に促進中性化期間52週における供試体にフェノールフタレイン溶液を噴霧した状況を示す。割裂面は表層部に至るまではほぼ赤紫色で、中性化深さは0.01mm

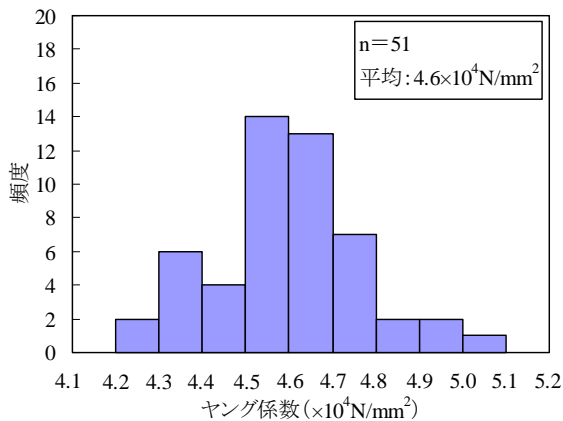


図-8 ヤング係数の試験結果

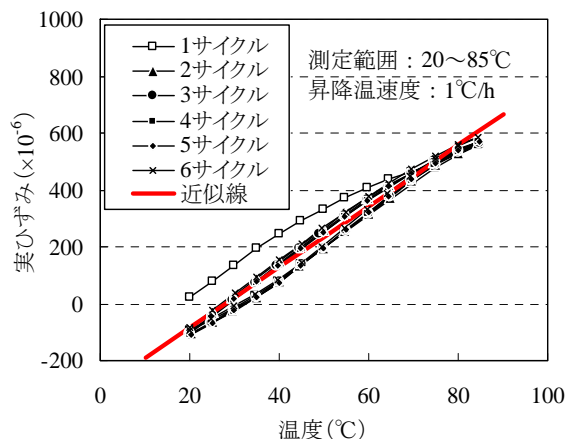


図-9 熱膨張係数の測定結果

以下であった。高強度で組織が緻密なため、中性化しなかったと推察される。

3.10 凍結融解抵抗性

図-12 にサイクル数と相対動弾性係数との関係を示す。凍結融解サイクル2000回においても相対動弾性係数の低下は認められなかった。また、供試体の質量減少も認められなかった。なお、供試体作製時の空気量は3.0%であった。

最低温度や湿潤程度(飽水程度)などの影響をもとに凍害危険度に応じた凍結融解回数との関係をまとめた結果によれば、465回以上の凍結融解抵抗性を有していれば、いずれの凍害危険度においても、期間100年での凍結融解の繰り返しによる性能の低下はないとしている⁹⁾。よって、UFC-SCを用いた構造物は、設計耐用年数100年以内に凍結融解作用によって所要性能が低下することはないと考えられる。

3.11 耐薬品性

図-13 に試験期間と質量減少率との関係を示す。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は高く、実環境下では硫酸塩の侵食によって、構造物の所要性能が低下する可能性は小さいと考えられる。一方、塩酸、硫酸に浸せきした場合、浸せき期間に

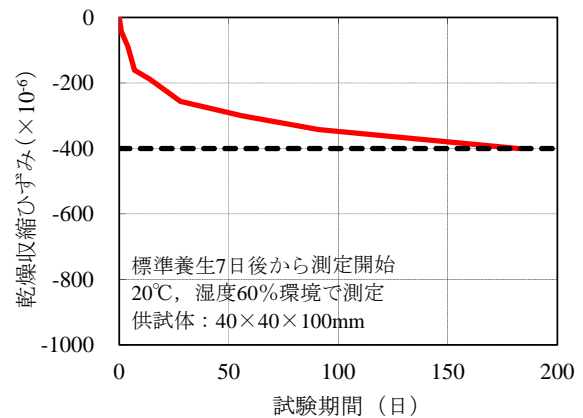


図-10 乾燥収縮ひずみの測定結果

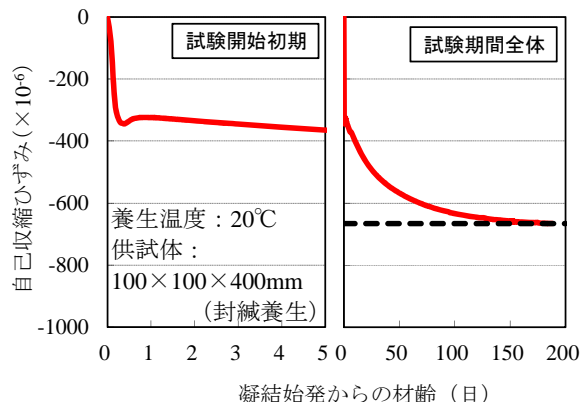


図-11 自己収縮ひずみの測定結果

伴って質量が低下しており、使用環境によっては劣化防止対策が必要と考えられる。

4. まとめ

常温で早期に高強度が得られる特徴を有する超高強度繊維補強コンクリートの各種物性について確認を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) UFC-SC に使用する細骨材の表面水率が 0~10% で変動した場合でも、一般的なコンクリートと同様に練混ぜ水量を補正することで、流動性を安定させることができる。
- (2) UFC-SC の圧縮強度、曲げ強度およびひび割れ発生強度の特性値は、UFC 指針に示される標準配合粉体を使用した UFC とほぼ同等である。
- (3) UFC-SC は自己収縮ひずみが大きいいため、打込み後の型枠脱型時期やプレストレスのロス等設計に留意する必要がある。
- (4) UFC-SC は中性化、凍結融解および硫酸塩に対する抵抗性は非常に高い。ただし、硫酸および塩酸による劣化が生じる環境に使用する場合は適切な対策が必要である。

以上、本論文では常温で早期に高強度が得られる超高強度繊維補強コンクリートの硬化物性および耐久性に関してとりまとめた。ただし、いずれも室内で標準養生した供試体のデータであることから、今後は現場レベルでの各種物性データならびにそのばらつきを含めた実際の構造物への適用を考慮したデータ収集を行う。

参考文献

- 1) 野口孝俊, 加藤浩司: 羽田空港再拡張事業における超高強度繊維補強コンクリートの活用, セメント・コンクリート, No.741, pp.34-38, 2008
- 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, 2005
- 3) 丸屋英二, 歳谷一雄, 高橋俊之, 平田隆祥: 超高強度繊維補強コンクリートの流動性および強度に及ぼすセメントの鉱物組成の影響, 土木学会第 66 回学術講演会講演概要集, pp.953-954, 2010.9
- 4) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008
- 5) 日本コンクリート工学協会: 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), コンクリート工学, Vol.23, No.3, March, pp.59-62, 1985

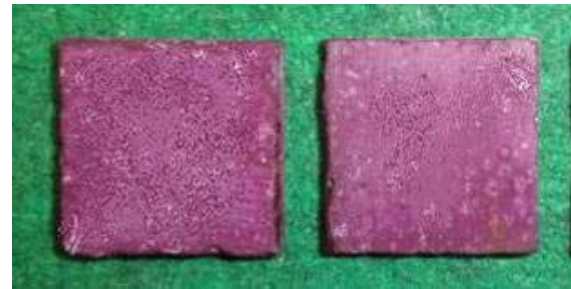


写真-5 フェノールフタレイン溶液噴霧後の状況 (促進期間: 52 週)

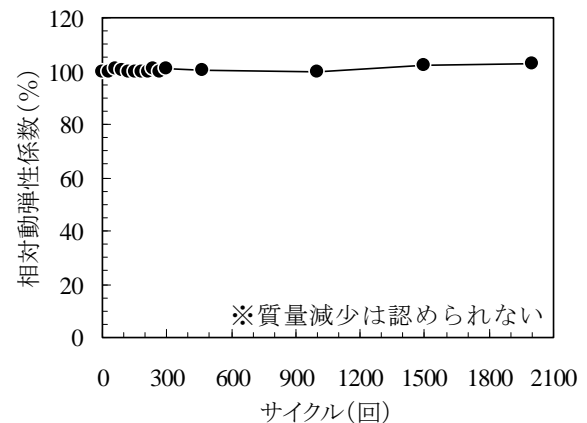


図-12 サイクル数と相対動弾性係数との関係

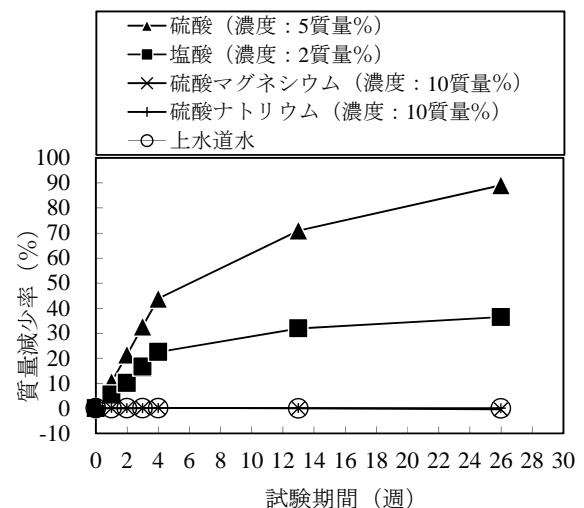


図-13 試験期間と質量減少率との関係

- 6) 土木学会: 自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー105, 2001