

## 論文 超高強度繊維補強コンクリートの品質安定性に関する検討

大野 俊夫<sup>\*1</sup>・坂井 吾郎<sup>\*2</sup>・保利 彰宏<sup>\*3</sup>・樋口 正典<sup>\*4</sup>

**要旨:** エトリンガイト生成系混和材を添加することにより高強度化を図った超高強度繊維補強コンクリートについて、表面水を有する細骨材の使用がフレッシュ性状や圧縮強度などの品質安定性に及ぼす影響を把握するため、実機プラントによる練混ぜ実験を実施した。また、鋼繊維の均一性や表面水率の設定違いの影響に関する実験を実施した。その結果、細骨材の表面水率の範囲や測定頻度を適切に設定することによって、細骨材を絶乾状態としなくても安定した品質を有する超高強度繊維補強コンクリートを達成でき、土木学会の設計・施工指針(案)の性能を満足できることが明らかになった。

**キーワード:** 超高強度繊維補強コンクリート, 品質, 安定性, 表面水率, 鋼繊維混入率

## 1. はじめに

近年, 欧州において圧縮強度が  $200\text{N/mm}^2$  に達するモルタルに高い引張強度を有する短繊維を混入した超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC と称す) が開発され, 実際の構造物に適用され始めている。我が国にもこの種の UFC が導入され, 2004 年 9 月に土木学会より「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」<sup>1)</sup> (以下, UFC 指針(案)と称す) が発刊されたこととあいまって適用事例が増えつつある<sup>2)</sup>。

筆者らはエトリンガイト生成系混和材を添加することにより高強度化を図った UFC (以下, 本 UFC と称す) の実用化に関する検討を行ってきている。UFC のフレッシュ性状や強度特性などを安定化させる上では細骨材を絶乾状態で使用することが有効であるが, 絶乾状態とするための設備や工程などが必要となることから, 細骨材を湿潤状態や気乾状態で使用することが課題となっている。

本報は, 表面水を有する細骨材を用いて実機プラントにおいて本 UFC を練り混ぜ, 流動性, 圧縮強度などの品質安定性に及ぼす影響につい

て検討した実験, 鋼繊維の均一性などに関する実験の結果について報告するものである。

## 2. 実験概要

本 UFC に使用した材料, 配合は全実験において同一とした。結合材はエトリンガイト系混和材が添加されたプレミックスセメントとし, 細骨材は高強度コンクリートに適する砕砂 (粒径  $2.5\text{mm}$  以下, 表乾密度  $2.66\text{g/cm}^3$ , 吸水率  $1.18\%$ ), 混和剤はポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。プレミックスセメントの化学組成を表-1 に示す。また, 鋼繊維は直径  $0.2\text{mm}$  で引張強度  $2 \times 10^3\text{N/mm}^2$  以上のものを使用した。

本 UFC の配合を表-2 に示す。本 UFC の水結合材比は  $15.2\%$  であり, 打設時の目標フロー値を  $250 \pm 20\text{mm}$  に設定している。

実機プラントはコンクリート製品工場として稼動中のプラントであり (写真-1 参照), 本 UFC を練混ぜ容量  $1.0\text{m}^3$  の水平 2 軸型のミキサにより 1 バッチ当り  $0.8\text{m}^3$  で練混ぜを行った。練混ぜは鋼繊維投入前の一次練りを 7 分, 投入後の二次練りを 5 分行った。フレッシュコンクリートに

\*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員 (正会員)

\*3 電気化学工業 (株) 特殊混和材事業部特混技術課 博士(工学) (正会員)

\*4 三井住友建設 (株) 技術研究所 土木研究開発部 グループ長 (正会員)



写真-1 実機プラントの外観

関する試験は練混ぜ直後に実施した。

圧縮強度試験用供試体は成形後、20℃で24時間の一次養生（初期養生）を行った後に脱型して二次養生した（最高温度85℃の蒸気養生、20時間保持）。

## 2.1 実機プラントにおける練混ぜ実験

### (1) 試験条件

実機プラントにおける本UFCの練混ぜは1日当たり1～11ケース行い、全97ケース実施した（全17稼動日）。実験実施期間は6月～11月であり、この間、細骨材のロット（採取日）変更を6回行っている。

細骨材の表面水率は実機プラントの計量ホッパに落ちる際に1バッチごとにサンプリングを行い、JIS A 1111「細骨材の表面水率試験方法」によって測定した。実験時の細骨材の表面水率に応じて表-2に示す示方配合を補正して練混ぜを実施した。

### (2) 試験項目

表-3に品質安定性を評価するために実施した試験項目を示す。なお、フロー試験は落下なしで自重により広がった試料の直径を測定している。

## 2.2 表面水率の設定違いに関する実験

### (1) 試験条件

細骨材の表面水率の設定違いが本UFCのモルタルフローと圧縮強度に及ぼす影響を把握するため、室内実験において故意に表面水率を±0.5%（見かけの単位水量で±4.5kg/m<sup>3</sup>）変動させ、

表-1 プレミックスセメントの化学成分（mass%）

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
33.4	6.4	2.8	51.1	2.4	0.7

表-2 本UFCの示方配合

単位量（kg/m <sup>3</sup> ）				鋼繊維
水	プレミックス結合材	細骨材	高性能減水剤	
195*	1,287	905	32.2	137.4kg (1.75vol.%)

\*高性能減水剤中の水分22.5kgを含む

表-3 試験項目（実機プラント実験）

試験項目	摘要
フレッシュ	フロー JIS R 5201に準拠（落下なし）
	空気量 JIS A 1128に準拠（空気室圧力法、約7L）
	モルタル温度 デジタル温度計による
硬化	圧縮強度 供試体の作製：UFC指針（案）による 圧縮強度：JIS A 1128に準拠 （供試体寸法：φ100×h200mm、供試体数：3本、試験材齢：2次養生後）

表-4 表面水率の設定誤差実験の配合

表面水率の設定	水結合材比（%）	単位量（kg/m <sup>3</sup> ）				鋼繊維
		水*	プレミックス結合材	細骨材	高性能減水剤	
+0.5%	14.84	191	1,287	909.5	32.2	137.4kg (1.75vol.%)
基準（±0%）	15.19	195.5		905		
-0.5%	15.54	200		900.5		

\*高性能減水剤中の水分22.5kgを含む

示方配合の単位水量よりも水量が増減している配合について練混ぜを行った。

中心配合（基準）の細骨材は表乾状態とした表-2の示方配合であり、他の配合は細骨材の表面水率の設定を間違っって補正したことを想定し、表-4に示すように示方配合の水量を4.5kg増減した。この水量の増減により水結合材比は0.35%増減している。

### (2) 試験項目

品質変動の程度を評価するために実施した試験項目はモルタルフローと圧縮強度であり、試験方法は表-3のとおりである。

## 2.3 鋼繊維の均一性に関する実験

### (1) 試験条件

練混ぜおよび運搬後の本 UFC 中の鋼繊維の均一性を評価するため、実機ミキサから排出した試料及びアジテータトラックに一度投入して採取した試料について、全試料の 1/3、2/3、3/3 部分よりサンプリングを行い、鋼繊維の混入率を測定した。

なお、アジテータトラックによる実験は、 $4.8\text{m}^3$  搭載した実験（実験 A、B： $0.8\text{m}^3 \times 6$  バッチ）と  $2.4\text{m}^3$  搭載した実験（実験 C： $0.8\text{m}^3 \times 3$  バッチ）の 3 ケースについて行った。

### (2) 試験項目

鋼繊維の混入率の測定は JSCE-F554「鋼繊維補

強コンクリートの鋼繊維混入率試験方法」の洗い分析試験方法に準拠し、空気量試験の容器を用いて行った。なお、同時にモルタルフローと空気量を表-3 に示す方法により測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 実機プラントにおける練混ぜ実験

図-1 に、全実機プラント練混ぜ実験における細骨材の表面水率とモルタルフロー、空気量、圧縮強度の推移を示す。

#### (1) 細骨材の表面水率の推移

練混ぜ実験を長期に亘って実施したことから、ロットの異なる細骨材がプラントに納入されており、細骨材の納入時の含水状態によって表面

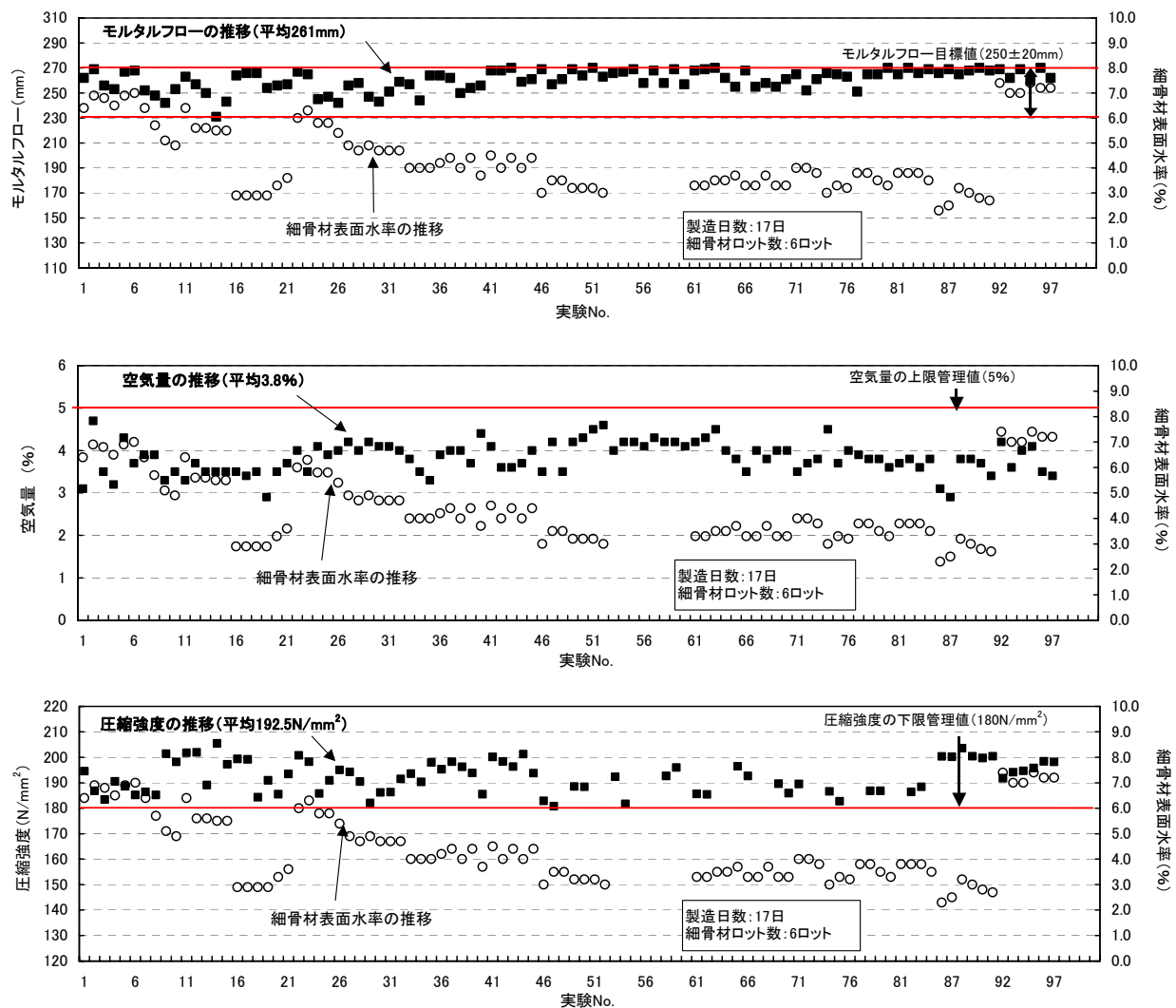


図-1 細骨材の表面水率とモルタルフロー、空気量、圧縮強度の関係

水率の測定値が異なっている。

練混ぜ直前の細骨材の表面水率の測定値は2.3～7.4%であった。

## (2) フレッシュ試験の結果

練混ぜ直後のモルタルフローの平均値は261mm（最大値 270mm，最小値 231mm），変動係数は3.2%であり，運搬時のフローロスを見込んでいるため，打設時の目標値（ $250 \pm 20$ mm）に比べて大き目のモルタルフロー値になっているが，ほぼ目標範囲内の安定したフロー値になっている。

空気量の平均値は3.8%（最大値 4.7%，最小値 2.9%），変動係数は9.6%であり，室内実験時の空気量の平均値2%に比べて大きめの値であったが，空気量の目標値である5%以下を満足する結果であった。

なお，試験期間中のモルタル温度は平均31.2℃（最高温度 37.6℃，最低温度 21.6℃）であった。

## (3) 圧縮強度試験結果

二次養生後の圧縮強度の平均値は  $192.5 \text{ N/mm}^2$ （最大値  $205.5 \text{ N/mm}^2$ ，最小値  $180.8 \text{ N/mm}^2$ ），変動係数は3.2%であり，圧縮強度の目標値  $180 \text{ N/mm}^2$  以上を満足する結果であった。圧縮強度の度数分布を正規分布と仮定し，危険率5%で特性値とすることのできる値を求めると  $182.3 \text{ N/mm}^2$  となり，UFC 指針(案)の圧縮強度の特性値  $150 \text{ N/mm}^2$  以上（標準配合粉体の場合： $180 \text{ N/mm}^2$ ）を上回る圧縮強度が得られていることが分かった。

## (4) 品質安定性

図-1 より，細骨材の表面水率が2.3～7.4%に変動した場合においてもモルタルフロー，空気量，圧縮強度の変動は比較的小さく，各管理目標の範囲内に推移していることが分かる。

したがって，細骨材を絶乾状態とせず，湿潤状態で使用した場合においても，今回品質安定性が確認された表面水率を8%以下として適切な頻度で細骨材の表面水率を測定し，示方配合の補正を行えば品質の安定したUFCを得ることができることが明らかになった。

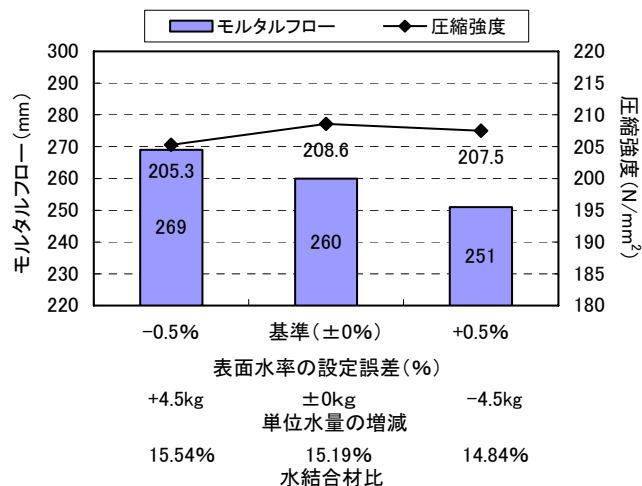


図-2 表面水の設定違いの影響

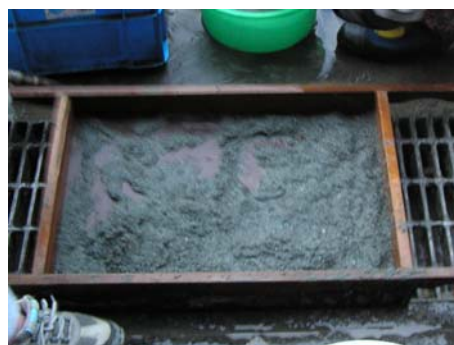


写真-2 鋼繊維の洗い試験状況

## 3.2 表面水率の設定違いに関する実験

細骨材の表面水率の真値が常に現場配合として補正される場合は（もしくは真値に近い場合），前述の実機プラントにおける実験で品質が安定していることが確認された。ここでは，細骨材の表面水率の変動が著しく表面水率の真値を反映することが難しい場合などを想定し，フレッシュ性状や圧縮強度を満足した範囲でどの程度までの表面水率の設定違いが許容できるかを確認するものである。

図-2 にモルタルフロー試験と圧縮強度試験の結果を示す。

### (1) フレッシュ試験結果

モルタルフロー値は細骨材の表面水率の設定値-0.5%，基準（±0%），+0.5%でそれぞれ269，260，251mmであり，水量の増加に伴ってフロー値が大きくなる傾向を示した。

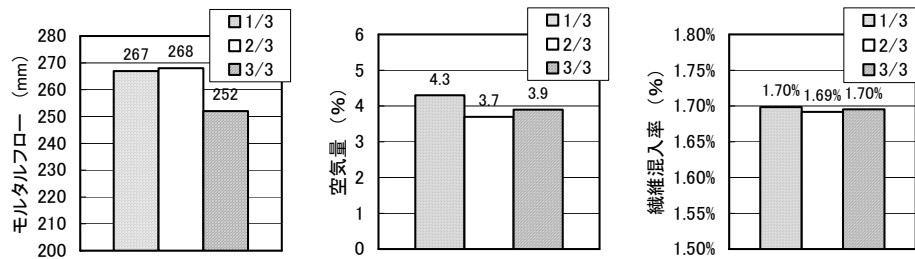
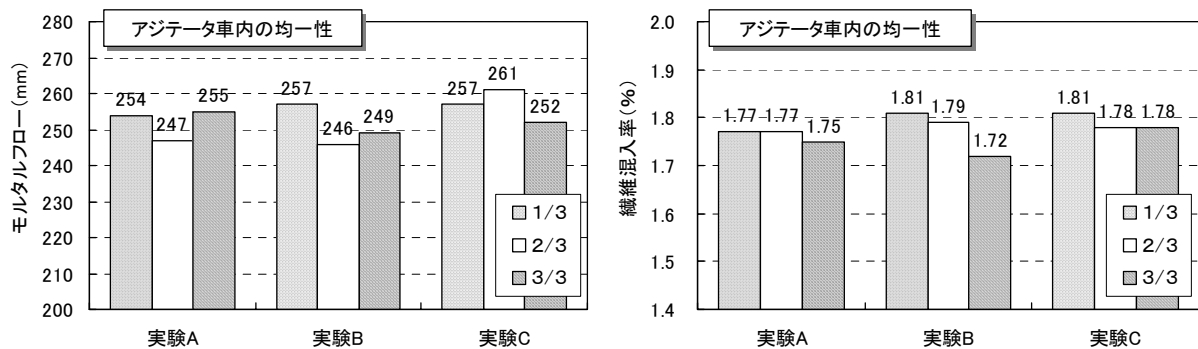


図-3 ミキサ排出後の試験結果



実験A, B: 積載量10tのアジテータ車に4.8m<sup>3</sup>の本UFCを積載  
実験C: 積載量10tのアジテータ車に2.4m<sup>3</sup>の本UFCを積載

図-4 アジテータトラックから排出した試料の試験結果

## (2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度は細骨材の表面水率の設定値－0.5%，基準（±0%），＋0.5%（水結合材比で15.54%，15.19%，14.84%）でそれぞれ205.3 N/mm<sup>2</sup>，208.6N/mm<sup>2</sup>，207.5 N/mm<sup>2</sup>であり，水結合材比 0.35%程度の変化では圧縮強度に及ぼす影響はほとんど認められない傾向にあった。

## (3) 表面水率設定の許容値

表面水率が±0.5%に変動することに伴ってモルタルフローや圧縮強度が変動するものの，いずれも目標範囲内であることから，表面水率の±0.5%変動は許容できる範囲と判断された。したがって，この範囲の細骨材表面水率の設定違いが本UFCの品質に大きく影響を及ぼすことはなく，±0.5%の範囲に細骨材の表面水率が入るようであれば表面水率の測定頻度を減少することも可能と考えられた。

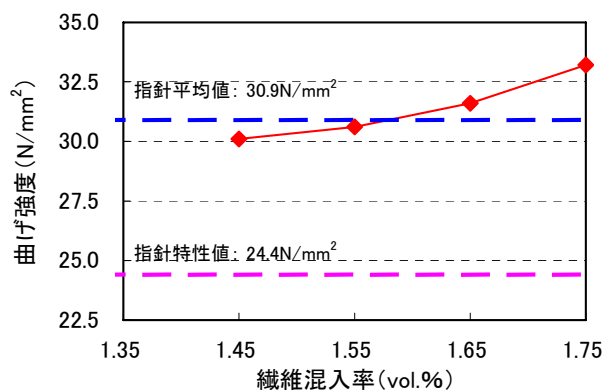


図-5 繊維混入率と曲げ強度の関係

## 3.3 鋼繊維の均一性に関する実験

### (1) ミキサ排出後の試験結果

図-3 に実機ミキサで練り混ぜた本UFCを排出する際の1/3，2/3，3/3の部分より試料を採取し，モルタルフロー，空気量，繊維混入率試験を行った結果を示す。

1/3，2/3，3/3部分のモルタルフローは252～268mm，空気量は3.7～4.3%，繊維混入率は1.69～1.70vol.%であり，各測定値の変動は小さい結

果であった。したがって、今回採用したミキサや練混ぜ容量、手順によって鋼繊維を均一に本 UFC 中に分散できていると考えられた。

#### (2) アジテータトラック排出後の試験結果

図-4 にアジテータトラックより排出する際の 1/3, 2/3, 3/3 の部分より試料を採取し、モルタルフロー、繊維混入率試験を行った結果を示す。

実験 A～C の 1/3, 2/3, 3/3 部分のモルタルフローは 246～261mm、繊維混入率は 1.72～1.81vol.%であり、実験間及び試料採取部位間の各測定値の変動は小さい結果であった。したがって、アジテータトラックに投入して運搬する方法を採用した場合でも、アジテータトラック内で鋼繊維の均一性が低下する可能性は少ないと考えられた。

鋼繊維の混入率が 1.75vol.%であるにもかかわらず、測定値が 1.75vol.%を上回っているが、これはアジテータトラックへの搭載量が少ない場合に顕著であることから、アジテータ車内面にマトリクスが鋼繊維に比べて多く付着していることが影響していると思われた。

#### (3) 鋼繊維の許容繊維混入率

図-5 に、別途実施した本 UFC のマトリクスに鋼繊維の添加率を変化させて作製した供試体の曲げ強度試験結果を示す(100×100×400mm, 3 等分点載荷)。同図より、鋼繊維の混入率とともに曲げ強度が大きくなり、UFC 指針(案)に示されている標準配合粉体を用いた供試体の曲げ強度の平均値 30.9N/mm<sup>2</sup>を鋼繊維混入率 1.65vol.%で超えることが分かる。

本 UFC においては曲げ強度の安全率を考慮して鋼繊維の混入率を 1.75vol.%としている。図-5 より鋼繊維混入率を 1.65vol.%とした場合においても所要の曲げ性能が確保できることから、許容繊維混入率を 1.75±0.1 vol.%として良いと思われた。ミキサやアジテータトラックからの排出試料の鋼繊維混入率は 1.69～1.81vol.%であったことから、鋼繊維混入率の許容範囲に十分入っていると考えられた。

#### 4. まとめ

エトリンガイト生成系混和材を添加することにより高強度化を図った超高強度繊維補強コンクリートについて、表面水を有する細骨材の使用が品質安定性に及ぼす影響を把握するため、実機プラントによる練混ぜ実験、鋼繊維の均一性や表面水率の設定違いの影響に関する実験を実施した。

これらの実験を通して得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 細骨材の表面水率が 8%以下で±0.5%の範囲に入るように管理し、適切な頻度で表面水を測定することによって、細骨材を絶乾状態としなくても安定した品質を有する UFC を達成でき、土木学会の設計・施工指針(案)の性能を満足できることが明らかになった。
- (2) また、本 UFC の圧縮強度の特性値として 180N/mm<sup>2</sup> とすることができることが分かった。
- (3) 細骨材の表面水率±0.5%の設定違いが、本 UFC の品質に大きく影響を及ぼすことはなく、この範囲に細骨材の表面水率が入る状態であれば表面水率の測定頻度を減少することも可能と考えられた。
- (4) ミキサやアジテータトラックから排出された本 UFC 試料内の鋼繊維混入率に大きな変動はなく、曲げ性能から許容される±0.1vol.%の範囲内に入っていることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 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第 113 号，2004.9
- 2) 例えば、萱嶋 誠，篠崎洋三，飯塚崇文，大和矢麻起：Fc200N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度繊維補強コンクリートを用いた連絡橋の設計・施工，コンクリート工学，Vol.43，No.7，pp.65-69，2005.7