

超低収縮高強度繊維補強コンクリートの基礎的性質

Fundamental Properties of Ultra-low Shrinkage and High-strength Fiber Reinforced Concrete

建設基盤技術部 佐々木 亘 WATARU SASAKI

建設基盤技術部 恩田 陽介 YOUSUKE ONDA

建設基盤技術部 松田 拓 TAKU MATSUDA

短繊維補強コンクリートは、短繊維をマトリクス中に分散させるために一定のペースト量を確保する必要がある。これは、流動性と材料分離抵抗性の確保のために単位水量が大きくなる傾向にあることを意味し、収縮をはじめとする体積変化に対しては決して有利な条件ではない。そこで本稿では、超高強度コンクリートで実績のある複数の混和材からなる結合材とフェロニッケルスラグ細骨材による収縮低減効果に着目し、短繊維補強コンクリートにおける効果の確認を行った。その結果、従来の高強度繊維補強コンクリートに比べて、流動性や力学特性は同程度または向上させながら、大幅に単位水量と自己収縮を低減できることを確認した。

キーワード：短繊維、高強度、自己収縮、混和材、フェロニッケルスラグ細骨材

Fiber reinforced concrete needs to have a certain amount of paste to disperse the short fibers in the matrix. This means that the unit water content tends to be larger than that of plain concrete to ensure fluidity and segregation resistance, which is never a favorable condition for volume changes such as shrinkage. In this paper, the shrinkage reduction effect by using ferronickel slag sand and binder which is a combination of several supplementary cementitious materials that have been used in ultra-high strength concrete, was verified. As a result, it was confirmed that the unit water content and autogenous shrinkage could be significantly reduced while the flowability and mechanical properties were similar or improved compared to the conventional high-strength fiber reinforced concrete.

Key Words: Sort fiber, High strength, Autogenous shrinkage, Supplementary cementitious materials, Ferronickel slag sand

1. はじめに

繊維補強セメント複合体（以下、FRCC と称す）の大きな特徴は、セメント複合体の弱点であるひび割れ発生後の力学特性を大きく改善することにある。短繊維をコンクリートやモルタルといったセメント複合体に均一に分散させることで、ひび割れ幅の抑制、じん性や耐衝撃性の向上、引張強度、曲げ強度やせん断強度の改善などを図ることができる。FRCC については、古くは 20 世紀初頭から検討が行われてきた。我が国では 1970 年代あたりから構造利用を目的とした研究が精力的に行われ、土木学会をはじめとする様々な機関で鋼繊維補強コンクリートの設計施工に関する指針類¹⁾が整備された。近年では、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）や複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下、SHCC）といった高性能な FRCC が開発され、それぞれ

に特化した設計施工指針^{2), 3)}が取り纏められるとともに、実構造物への適用も進められている⁴⁾。

コンクリート等のセメント複合体の配合設計に当たって、単位水量（同一の水粉体容積比においては単位ペースト容積と同義）は可能な限り低減するのが望ましいことは言うまでもない。しかし、FRCC においては、マトリクス中に実積率⁵⁾の小さな固体である短繊維を分散させる必要があることから、流動性と材料分離抵抗性を確保するためには、一般のコンクリートやモルタルに比べて大きい単位ペースト容積が必要となる傾向にある。一方で、フェロニッケルスラグ細骨材（FNS）等の収縮低減効果を有する細骨材ならびに複数の産業副産物を組み合わせた結合材を用いることで、流動性は確保したまま単位水量を大きく低減することができ、かつ収縮が極めて小さい高強度コンクリートが得られることがわかってきた⁶⁾。そこで本稿では、FNS と複数の産業副産物から

表-1 使用材料

材料		物性など	記号	
水		上水道水 (千葉県流山市)	W	
結合材 (粉体)	セメント	中庸熟ポルトランドセメント, 比表面積 3,250 cm ² /g, 密度 3.21 g/cm ³	M	B (P)
	フライアッシュ	JISI 種相当品, SiO ₂ 68.9%, Ig.loss 2.0%, 比表面積 5,590 cm ² /g, 密度 2.39 g/cm ³	FA	
	シリカフェーム	エジプト産, SiO ₂ 93.6%, BET 比表面積 22.3 m ² /g, 密度 2.26 g/cm ³	SF	
細骨材		フェロニッケルスラグ細骨材, 吸水率 2.70%, 表乾密度 2.90 g/cm ³	FNS	S
		鹿沼産硬質砂岩砕砂, 吸水率 1.45%, 表乾密度 2.62 g/cm ³	CS	
粗骨材		鹿沼産硬質砂岩砕石 1305, 表乾密度 2.63 g/cm ³	G	
短繊維		鋼繊維, φ 0.2×15 mm, 引張強度 2000 N/mm ² 以上, 表乾密度 7.85 g/cm ³	Fb	
化学 混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	SP	
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体	DF	

表-2 コンクリートの配合条件

記号	水粉体 容積比 w/p [%]	水 結合材 比 W/B [%]	単位 水量 W [kg/m ³]	モルタル 細骨材 容積比 s/mor [%]	単位 粗骨材 絶対容積 Vg [L/m ³]	短繊維 混入率 Vf [%]	空気量 [%]	粉体の構成比率 (容積比)		
								M	FA	SF
CS-MS175	42.5	13.8	175	22.8	200	1.0	3.0	86	-	14
CS-MS155		13.8	155	31.6				86	-	14
CS-MFS155		15.0	155	31.6				55	30	15
FNS-MFS175		15.1	175	22.8				55	30	15
FNS-MFS155		15.0	155	31.6				55	30	15
FNS-MFS135		15.1	135	40.4				55	30	15



写真-1 鋼繊維

なる結合材が高強度繊維補強コンクリートの単位水量や自己収縮に与える影響について報告する。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

使用材料を表-1 に示す。結合材として中庸熟ポルトランドセメント (M), フライアッシュ (JISI 種相当品, 記号 FA) およびシリカフェーム (SF) を使用した。FNS は吸水率が比較的大きいものであり, 一般的な硬質砂岩砕砂 (CS) と比較を行った。鋼繊維は UFC で多用される細径の繊維を使用した。外観を写真-1 に示す。

コンクリートの配合条件を表-2 に示す。一般的な超高強度コンクリートを想定した, 細骨材 CS および M と SF からなる結合材 (質量比 9:1) を用いた配合 (記号: CS-MS), ならびに, 細骨材 FNS および M, FA と SF からなる結合材 (容積比 55:30:15) を用いた配合 (記号: FNS-MFS) を基本とし, 単位水量を 175 kg/m³ から 20 kg/m³ ずつ減じて後述の測定項目へ与える影響を調べた。また, 1 水準のみであるが, 細骨材 CS および M, FA と SF からなる結合材を用いた配合 (記号: CS-MFS) でも確認を行った。水粉体容積比, 空気量, 単位粗骨材絶対容積および短繊維混入率は全ての配合で一定とした。すなわち, 本実験における単位水量の変化は一定容積のモルタル中の細骨材容積比 (s/mor) の変化を意味する。

コンクリートは公称容量 60 リットルの強制二軸ミキサを用いて, 空練り→モルタル練り→コンクリート練り→FRCC 練りの順となるよう材料を投入し練り混ぜた。

(2) 測定項目

フレッシュ性状の確認として, 練り上がり後直ちにスランプローおよび空気量の測定を行った。硬化特性の確認として, 自己収縮ひずみ, 圧縮強度, 静弾性係数, ひび割れ発生強度および引張軟化特性の測定を行った。各供試体の採取は, フレッシュ性状の確認に続いて行った。供試体の寸法は, 自己収縮ひずみおよび引張軟化特性の測定では 100×100×400 mm であり, 圧縮強度, 静弾性係数およびひび割れ発生強度の各試験では φ100×200 mm である。供試体の養生は 20℃封緘養生とし, 圧縮強度および静弾性係数試験は材齢 3, 14, 28, 91 日, その他の強度試験は材齢 28 日で行った。自己収縮ひずみは「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁷⁾を参考に, 100×100×400 mm 角柱供試体の中央に埋め込み型ひずみ計を設置し, 20℃封緘状態における打込み直後からのひずみを測定した。ひび割れ発生強度は UFC 指針²⁾を参考に, 割裂引張強度試験において供試体端面のひずみを測定し, ひずみ変化が不連続になった応力をひび割れ発生強度とした。引張軟化特性は, JCI-S-002-2003 および JCI-S-001-2003 付属書に準じて, 切欠きのあるはりの曲げ試験結果を逆解析することによって求めた。

3. 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表-3 に化学混和剤の使用量およびフレッシュ試験の結果, 図-1 に単位水量とスランプローの関係を示す。

表-3 フレッシュ試験結果

記号	化学混和剤の使用量		スランブフロー [mm]	500 mm フロー到達時間 [s]	空気量 [%]	コンクリート温度 [°C]
	SP [B×%]	DF [B×%]				
CS-MS175	3.0	0.03	570	69.5	3.3	26.4
CS-MS155	3.5		425	-	2.5	27.8
CS-MFS155	2.8		680	19.2	2.7	24.8
FNS-MFS175	2.5		820	5.5	4.8	24.2
FNS-MFS155			765	10.9	3.9	24.6
FNS-MFS135			680	23.7	4.5	25.1

一般的な超高強度コンクリートの材料・配合をマトリクスとした CS-MS シリーズでは、単位水量が 175 kg/m³ では、SP 量が比較的多い B×3.0%の条件でもスランブフローは 570 mm であった。単位水量を 155 kg/m³ に減じると、SP を 3.5%まで増加させてもスランブフローは大きく低下し、それ以上単位水量を減じることが難しいと考えられた。これに対して結合材にフライアッシュを用いた CS-MFS155 では SP 量を減じても流動性が大きく改善した。一方、FNS-MFS シリーズではさらに流動性が改善し、CS-MS と比べて SP を大きく減じた条件であっても高い流動性が得られた。単位水量の低減に伴うスランブフローの減少の程度も小さく、単位水量を 135 kg/m³ まで減じても CS-MS175 より高い流動性が得られた。CS-MFS の結果も考慮すると、フライアッシュによるベアリング効果ならびにセメント量の低減によってペーストの流動性が向上し、さらに FNS によってモルタルの流動性が向上したと考えられる。

(2) 自己収縮ひずみ

図-2 に自己収縮ひずみの測定結果を示す。全般的な挙動としては、材齢 1 日以降の自己収縮ひずみに与える実験要因の影響は小さく、主たる差異は材齢 1 日程度で生じている。CS-MS シリーズでは、材齢 28 日で 800×10⁻⁶ 程度の自己収縮ひずみを生じており、単位水量の変化による自己収縮ひずみの変化は極めて小さい。結合材のみを変化させた CS-MFS155 では材齢 28 日の自己収縮ひずみが 600×10⁻⁶ 程度となり、FA の使用により自己収縮の低下が生じている。一方、FNS-MFS シリーズでは、単位水量 175 kg/m³ の条件で材齢 28 日の自己収縮ひずみが 400×10⁻⁶ と CS-MS シリーズの約 1/2、単位水量 155 kg/m³ では 300×10⁻⁶ 程度であり、FNS の使用により FA の効果を上回る収縮低減効果が得られている。単位水量 135 kg/m³ では 200×10⁻⁶ 程度まで小さくなり、CS では確認されなかった、単位水量の低減に伴う自己収縮ひずみの減少も生じている。これらのことから、FNS によって自己収縮が大きく低減されていると推察され、短繊維を

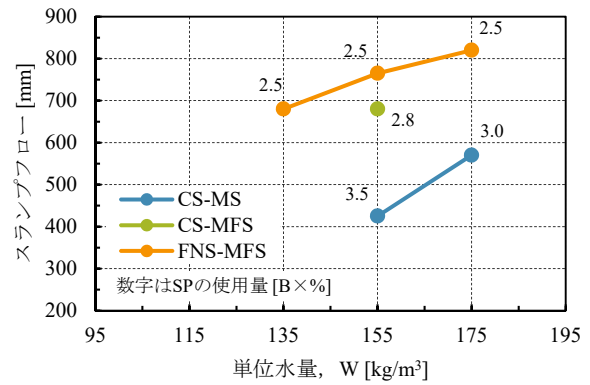


図-1 単位水量とスランブフローの関係

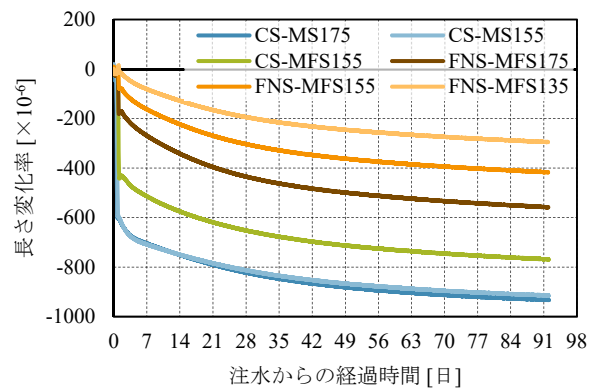


図-2 自己収縮ひずみ

用いた配合であってもプレーンコンクリートと同様の効果が期待できることがわかった。なお、材齢 28 日で 200×10⁻⁶ 程度の自己収縮ひずみは、PC 上部工で多用される水セメント比 40%程度のコンクリートと同程度⁸⁾である。

(3) 強度特性

図-3 に圧縮強度の測定結果を示す。結合材に FA を用いた結合材 MFS では MS と比べて材齢 3 日の圧縮強度が小さいが、材齢 14 日以降は同程度以上となることがわかる。特に FNS を用いた場合には FNS の単位量が増加するに伴って圧縮強度も高くなっており、既報⁹⁾と同様の効果が得られていることが分かる。図-4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。単位水量を低減(s/morを增大)させると圧縮強度に対する静弾性係数が大きくなるが、CS と比べて FNS を用いた場合にはその増加の程度が大きい。一方、CS シリーズの結果より、圧縮強度と静弾性係数の関係に与える結合材 (FA の使用) の影響は極めて小さいことがわかる。

図-5 にひび割れ発生強度の測定結果を示す。ひび割れ発生強度は、細骨材の種類によらず s/mor の増加にもなって増加する傾向がみられた。特に、CS-MS シリーズでは圧縮強度とは逆の傾向となっている。また、W

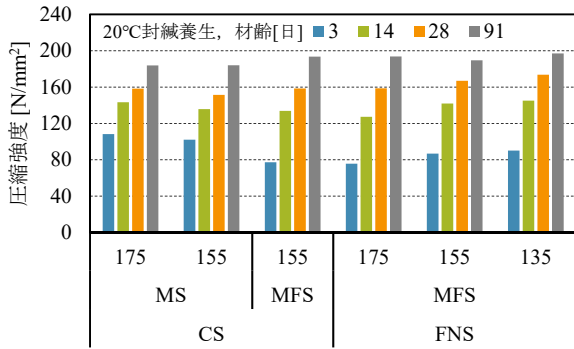


図-3 圧縮強度

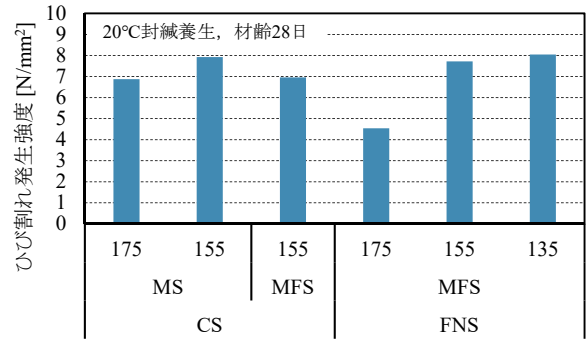


図-5 ひび割れ発生強度

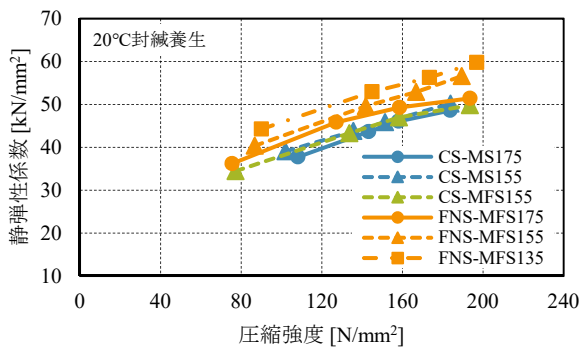


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

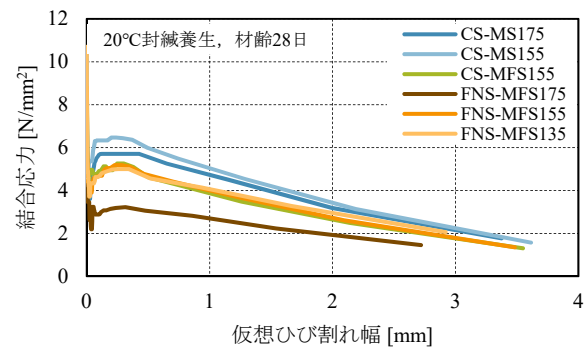


図-6 引張軟化特性

= 155 kg/m³の結果からは、ひび割れ発生強度はFAの使用では小さく、細骨材はCSに比べてFNSのほうが大きくなる傾向がみられた。図-6に引張軟化特性の算出結果を示す。FNS-MFS155および135、ならびにCS-MFS155の引張軟化特性はほぼ同程度であり骨材の影響は小さいと考えられる一方で、FAを使用していないCS-MSシリーズのほうが高い引張応力が得られた。結合材の収縮特性の違いが短繊維の付着に影響を与えている可能性が考えられるが、データの蓄積を含めた詳細な検討が必要である。また、FNS-MFS175については、ひび割れ発生強度および引張軟化特性における引張応力が共に他の配合に比べて小さい結果であった。自己収縮と同様にFNSにおいてはs/morの影響が大きくなっている可能性も考えられるが、これも同様にデータを蓄積して検討していく必要がある。

4. まとめ

超高強度コンクリートの単位水量と収縮を大きく低減できる材料の短繊維補強コンクリートへの適用性について確認を行った結果、短繊維補強コンクリートであっても、一般的な材料を用いた場合と比べて流動性を確保または向上しつつ、単位水量と自己収縮の著しい低減が可能であることが分かった。

参考文献

- 1) たとえば、土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），1983. 3
- 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），2004. 9
- 3) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計施工指針（案），2007. 3
- 4) 土木学会：繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書，2015. 8
- 5) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典，宮川豊章：短繊維のかさ容積による高強度繊維補強コンクリートの流動性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 73，No. 1，pp. 307-312，2015. 7
- 6) 松田拓，蓮尾孝一，野口貴文：細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，2015. 7
- 7) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（II），pp. 209-210，1994. 5
- 8) 谷口秀明，佐々木亘，樋口正典，村田宣幸：東北地方の骨材を用いたコンクリートの品質評価，第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 461-464，2011. 10