

FNS とフライアッシュを用いた 超低収縮超高強度繊維補強コンクリート

Ultra-low Shrinkage and Ultra-high Strength Fiber Reinforced Concrete containing Ferro-nickel Slag Sand and Fly-ash

R&D センター 佐々木 亘 WATARU SASAKI
 土木設計部 恩田 陽介 YOUSUKE ONDA
 R&D センター 基 哲義 AKIYOSHI DAI
 R&D センター 松田 拓 TAKU MATSUDA

本稿はフェロニッケルスラグ細骨材（FNS）とフライアッシュを用いた超低収縮超高強度繊維補強コンクリートの特性を種々の実験データとともに報告するものである。このコンクリートは、従来の超高強度コンクリートで一般的な材料を用いた配合と比べて、流動性は大きく向上し、単位水量と自己収縮を大幅に低減しながら高い力学特性を実現できる。また、FNS を気乾状態で使用しても単位水量を適切に設定することで各種特性の低下は生じないこともわかった。

キーワード：短繊維補強コンクリート，超低収縮，超高強度，フェロニッケルスラグ細骨材，フライアッシュ

This paper reports the characteristics of ultra-low shrinkage and ultra-high strength fiber reinforced concrete containing ferro-nickel slag sand (FNS) and fly-ash, along with various experimental data. Comparing conventional ultra-high strength concrete using conventional materials, the flowability has been significantly improved as well as high mechanical properties while significant reduction of unit water content and autogenous shrinkage. It has also found that even if using air-dried FNS, various characteristics can be obtained without deterioration by adjusting unit water content appropriately.

Key Words: Fiber reinforced concrete, Ultra-low shrinkage, Ultra-high strength, Ferro-nickel slag sand, Fly-ash

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の生産性向上策の一つとしてプレキャスト部材（以下、PCa 部材）の活用が広がっている。PCa 部材を利用することで現地での部材製作にかかわる作業量を削減することが可能であるが、一方で、部材同士の接合部のような PCa 部材特有の構造およびその構築のための現地作業が生じる。例えば、道路橋での PCa 床版の継手にはループ継手が標準的に用いられているが、ループ継手ではループ鉄筋と直角方向に配置する鉄筋の配置作業が煩雑であり、生産性向上の観点から改善の余地がある。また、ループ鉄筋の曲げ半径の規定から床版厚の設定に制限が生じる場合がある。これらの課題を解決するため、ループ継手に代わる種々の合理化継手構造が提案されている²⁾。

このような背景のもと、短繊維補強コンクリートを併用した継手の検討を行ない、継手部に圧縮強度および引

張軟化特性を高めたコンクリートを用いることで、重ね継手長の短縮および直角方向鉄筋の省略が可能になることが明らかとなってきた³⁾。しかし、圧縮強度を高めたコンクリートは一般に単位結合材量が大きく水結合材比が小さいため、継手部のような拘束の多い部位に打ち込んだ場合、温度ひずみや収縮ひずみが拘束されることによるひび割れ発生の可能性が高まることが懸念される⁴⁾。

一方で筆者らは、結合材に産業副産物を多く使用し、さらに細骨材にも副産物由来で比較的吸水率の大きい骨材を用いることで、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可能であり、かつ収縮が極めて小さい超高強度コンクリートが得られることを見出した⁵⁾。さらに、このコンクリートをベースとした超低収縮超高強度繊維補強コンクリートを開発し、これを用いた PCa 床版向けの継手構造⁶⁾を開発した。本稿ではこの継手構造に用いる超低収縮超高強度コンクリートの特性について、既報^{7),8)}のデータに新たなデータを加えて報告する。

表-1 使用材料

材料		物性など (数値は試験値の一例)	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	JIS I 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	
	シリカフューム	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%, 絶乾密度 2.83 g/cm ³ , 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, φ0.2×15 mm, 引張強度 2000N/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	SP1	SP
		ポリカルボン酸系化合物	SP2	
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体	DF1	DF
		エステル系	DF2	

表-2 コンクリートの配合条件

記号	水粉体 容積比 w/p [%]	細骨材	短繊維 混入率 Vf [%]	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]	空気量 [%]	粉体の構成比率 (容積比)			水結合材 比 W/B [%]
								M	FA	SF	
CS-MS175-Vf2.0	42.5	CS	2.0	175	21.7	200	3.0	86	-	14	13.8
CS-MS175			1.0	175	22.8						
CS-MS155			1.55	155	31.6						
CS-MFS155			1.0	155	31.6						
FNS-MFS175-Vf2.0		FNS	2.0	175	21.7			55	30	15	15.1
FNS-MFS155-Vf2.0			1.55	155	30.7						15.1
FNS-MFS155-Vf1.5			1.5	155	31.1						15.0
FNS-MFS175			1.75	175	22.8						15.1
FNS-MFS155			1.0	155	31.6						15.0
FNS-MFS135			1.35	135	40.4						15.1
FNS-MFS135-Vf0.5			0.5	135	40.8						15.1
FNS-MFS100-Vf0.5			1.0	100	53.1						15.1
FNS(D)-MFS150		FNS (気乾)	1.0	150	33.8			15.1			
FNS(D)-MFS135			1.35	135	40.8			15.1			

2. 試験方法の概要

(1) 使用材料およびコンクリートの条件

使用材料を表-1に示す。結合材は中庸熟ポルトランドセメント (記号 M), フライアッシュ (JIS I 種相当品, 記号 FA) およびシリカフューム (記号 SF) である。FNS は吸水率が比較的大きいものであり, 一般の骨材と同様な表乾状態, あるいは気乾状態で使用する。実験で用いた気乾状態の FNS の含水率は 0.1%以下であり, 配合計算では絶乾密度を用いた。気乾状態での使用について検討したのは, FNS を絶乾状態とみなせる状態でも性能上大きな問題が生じないのであれば, 吸水率の高い FNS の含水状態がばらつくことによるコンクリートの品質変動のリスクを比較的容易に低減できると期待したためである。硬質砂岩砕砂は二次製品工場で使用されている一般的なものであり, 比較として使用した。粗骨材は, 比較用に用いた砕砂と同様に二次製品工場で使用されている一般的なものである。最大寸法は 13 mm とした。鋼繊維には UFC で用いられる細径の鋼繊維を使用した。化学混和剤には水結合材比の小さい超高強度コン

リートで使用されている高性能減水剤と消泡剤を用いた。記号における枝番の違いはメーカーの違いであり, SP2 および DF2 は一部のシリーズでのみ使用した。

コンクリートの配合条件を表-2に示す。水粉体容積比, 単位粗骨材絶対容積および空気量は一定とし, 短繊維混入率および単位水量を変化させ, それらの影響を確認した。細骨材は表乾状態の FNS を基本とし, 結合材は M, FA および SF を容積比 55:30:15 で用いた。一部の条件では気乾状態の FNS を用いてその影響を確認した。細骨材 CS を用いたシリーズは比較として設定したものであり, 一般的な超高強度コンクリートを想定して結合材に M と SF (質量比 9:1) を用いた。配合 CS-MFS155 は FNS を用いた条件と同様の結合材としたものであり, 細骨材の影響を確認する目的で設定した。

コンクリートの練混ぜには公称容量 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→繊維コン練りの順で材料を投入した。

(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

ランプフ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 $100 \times 100 \times 400$ 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 $\phi 100 \times 200$ mm である。供試体の養生は 20°C 封緘養生とした。圧縮強度および静弾性係数試験は材齢 28 日を基本とし、91 日までの範囲で材齢との関係を調べた。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」⁹⁾を参考に、 $100 \times 100 \times 400$ mm 角柱供試体の中央に埋め込み型ひずみ計を設置し、 20°C 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⁴⁾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. 結果および考察

(1) フレッシュ性状

図-1 に単位水量とスランプフローの関係を示す。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/m^3 では、SP 量が比較的多い $B \times 3.0\%$ の条件でもスランプフローは 570 mm であった。単位水量を 155 kg/m^3 に減じると、SP を 3.5% まで増加させてもスランプフローは大きく低下し、それ以上単位水量を減じることは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。これは、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たことによるものと考えられる。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プフローの減少の程度も小さく、単位水量を 135 kg/m^3 まで減じても CS-MS175 より高い流動性が得られた。一般にフェロニッケルスラグ骨材を用いるとブリーディング量が増加することや同一のスランプを得るための単位水量が少なくなることが知られている¹⁰⁾。骨材が拘束する水が一般の骨材に比べて少ないことが推察されるが、本稿のような極めて水結合材比の小さいコンクリートでは、このことが、流動性の向

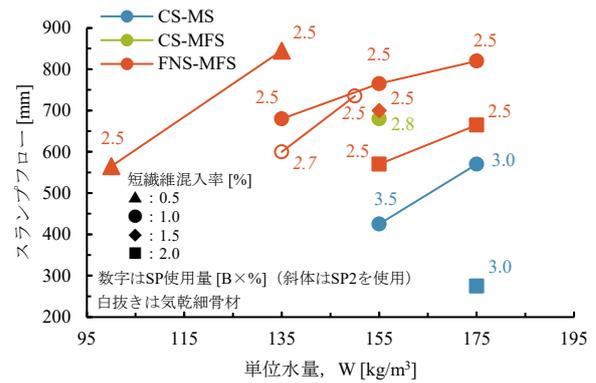


図-1 単位水量および短繊維混入率とスランプフローの関係

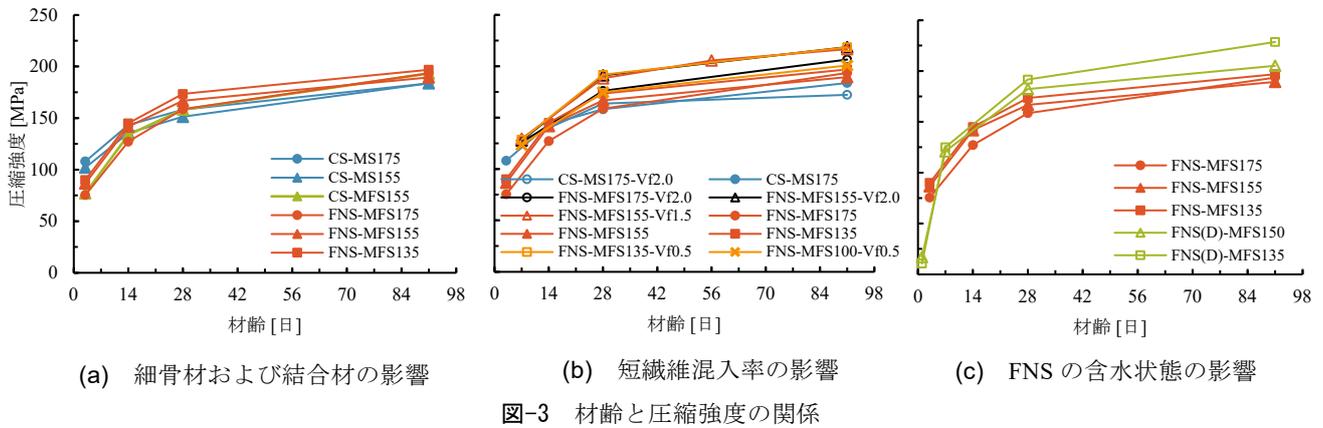
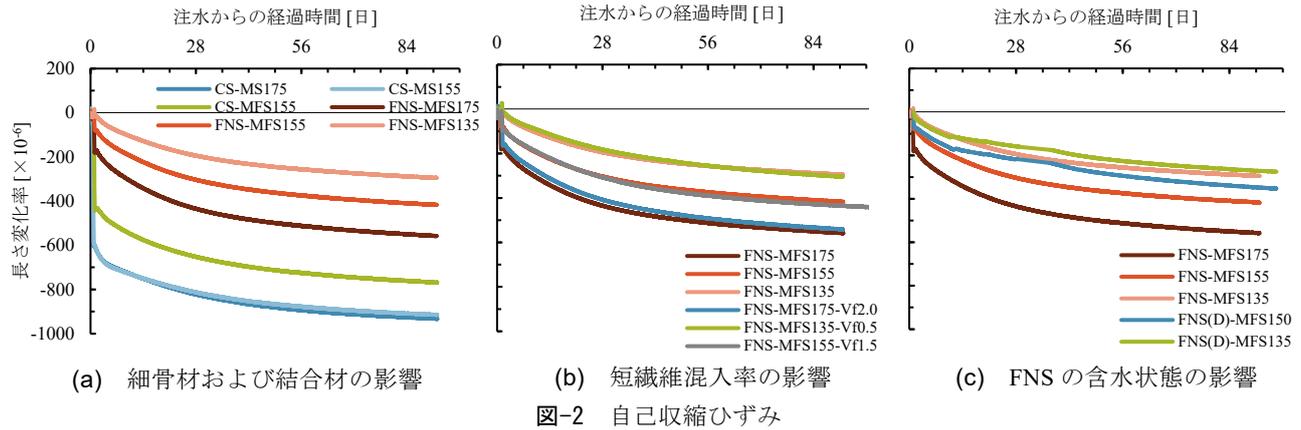
上につながったものと考えられる。

さらに、FNS-MFS シリーズでは短繊維混入率を増加させた場合の流動性の低下の度合いも、CS-MS シリーズに比べて小さく、より短繊維混入率を高められる可能性が高いことがわかる。逆に、短繊維混入率を減じた場合には、図に示したように単位水量を 100 kg/m^3 まで減じても一定の流動性を保持できている。単位水量を低減することで、後述するように自己収縮ひずみの低減や弾性係数の増大が可能になるため要求性能に応じた選択が可能になるほか、同一の水結合材比では単位結合材量の低減につながるため、水和熱の低減も期待できる。

FNS を気乾状態で用いたことの影響については、図-1 に白抜きで示したように、単位水量 150 kg/m^3 では表乾状態で用いた場合と概ね同様の性状が得られたが、単位水量を 135 kg/m^3 に減じると SP 使用量を増加させてもスランプフローの低下が大きくなった。単位水量の範囲によって、スランプフローに与える FNS の水分状態の影響が変化することが示唆される。少なくとも、単位水量を 150 kg/m^3 程度とすれば、スランプフローに与える FNS の含水状態の影響は小さいようである。

(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。図-2(a) に示したように、超高強度コンクリートとしては一般的な材料構成を想定した CS-MS シリーズでは、材齢 28 日の時点で 800×10^{-6} 程度の自己収縮ひずみを生じており、単位水量の影響はほとんど見られない。これに対して FNS-MFS シリーズでは自己収縮ひずみを大きく低減できている。また単位水量を減じるほど自己収縮ひずみも小さくなっていることがわかる。CS-MFS155 も CS-MS に比べて自己収縮ひずみが小さくなっているため FA の使用により自己収縮ひずみを低減できることがわかるが、CS-MFS155 と FNS-MFS155 の比較からは、FNS を用いることで FA を上回る自己収縮ひずみの低減効果が得ら



れており、併用することで自己収縮ひずみを著しく低減できている。FNS-MFS135の自己収縮ひずみは材齢28日時点で 200×10^{-6} 程度であり、これは、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の値¹¹⁾である。

図-2(b)に示したように短繊維混入率が自己収縮ひずみに与える影響は極めて小さく、FNS-MFSシリーズでは単位水量（あるいはモルタル細骨材容積比）が支配的であることがわかる。

図-2(c)はFNSの含水状態の影響を示したものである。FNS(D)-MFS150はFNS-MFS155、FNS(D)-MFS135はFNS-MFS135と比べて、それぞれ若干ではあるが自己収縮ひずみは小さい値で推移している。FNS(D)-MFS150とFNS-MFS155の自己収縮ひずみの差異のほうがやや大きく、これは単位水量を 5 kg/m^3 小さくしたことの影響と推察される。FNSによる収縮低減効果は、主に、FNSの高い剛性がペーストの収縮を拘束することと、比較的高い吸水率で保持した水分による内部養生効果によってもたらされていると考えられている⁹⁾。しかし本実験で検討している気乾状態のFNSは練混ぜ時の接水以前にはほとんど水分を保持していない。そのため、仮に自己収縮の発生以前に気乾状態のFNSが吸水しているとすると、そ

の程度にもよるが、内部養生効果が発揮されることが期待できる。その一方で、FNSの吸水により少なくともFNS周辺のペーストの水結合材比は小さくなり、ペーストの自己収縮は大きくなる可能性がある。これらのバランスで全体の自己収縮ひずみが生じることとなるが、本実験の条件では、収縮を抑制する傾向がみとれた。

(3) 強度特性

a) 圧縮強度

図-3に材齢と圧縮強度の関係を示す。結合材にFAを用いたMFSシリーズではMSシリーズと比べて材齢3日の圧縮強度が小さいが、材齢7~14日以降は同程度以上となることがわかる。また、FNSを用いた場合には単位水量を減じる、すなわち、モルタル細骨材容積比を大きくすると圧縮強度も増加する傾向がみられ、既報⁹⁾と同様の傾向が得られた。図-3(b)に示したように、短繊維混入率の影響は必ずしも明確ではなかった。高強度コンクリートの圧縮強度に与える鋼繊維の影響は小さいことが報告¹²⁾されており、本実験でも同様であったと考えられる。図-3(c)に示したように、FNSの含水率の影響については、気乾状態のFNSを用いた場合には圧縮強度が増加する傾向が見られた。これは、接水後に細骨材が吸水

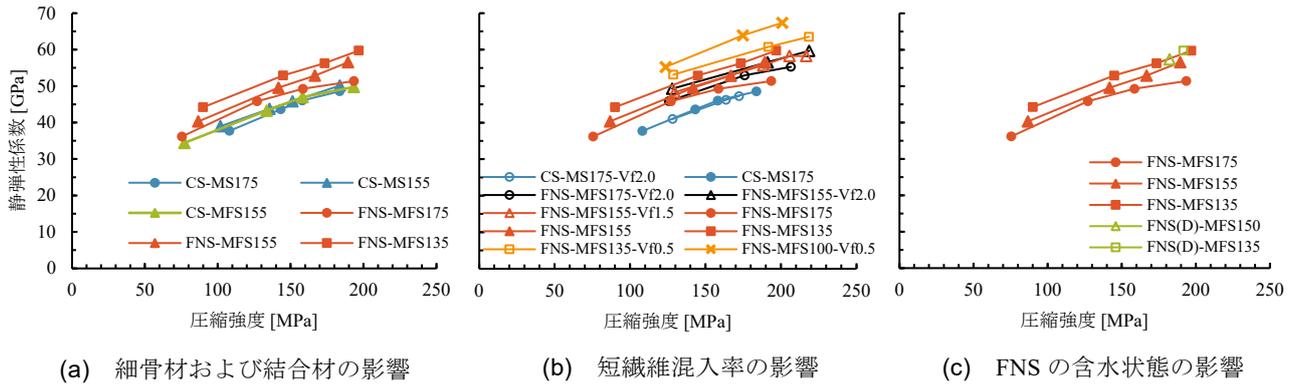


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

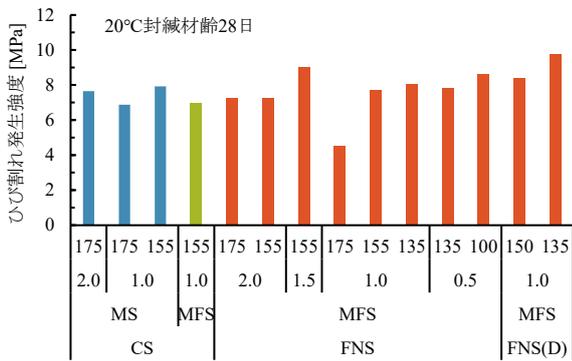


図-5 ひび割れ発生強度

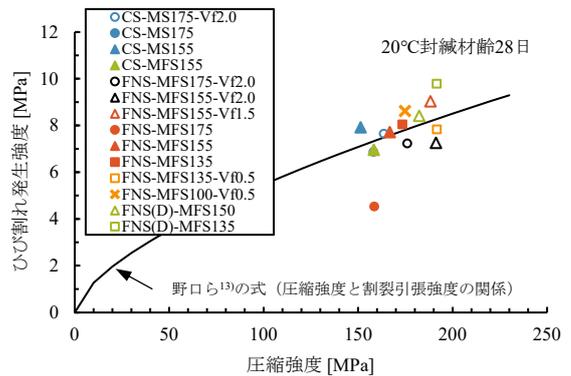


図-6 圧縮強度とひび割れ発生強度の関係

することにより周辺のペーストの水結合材比が低下しペースト自体の強度が増加したことや細骨材とペーストの界面の付着強度が増加したこと等が推察される。

b) 静弾性係数

図-4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。細骨材に CS を用いた場合には圧縮強度と静弾性係数の関係に与える単位水量（モルタル細骨材容積比）の影響は小さいが、FNS を用いた場合には単位水量を減じる、すなわちモルタル細骨材容積比を大きくすると圧縮強度に対する静弾性係数が明確に大きくなった。図-4(c) からわかるように、FNS の含水状態が圧縮強度と静弾性係数の関係に与える影響は小さかった。

c) ひび割れ発生強度

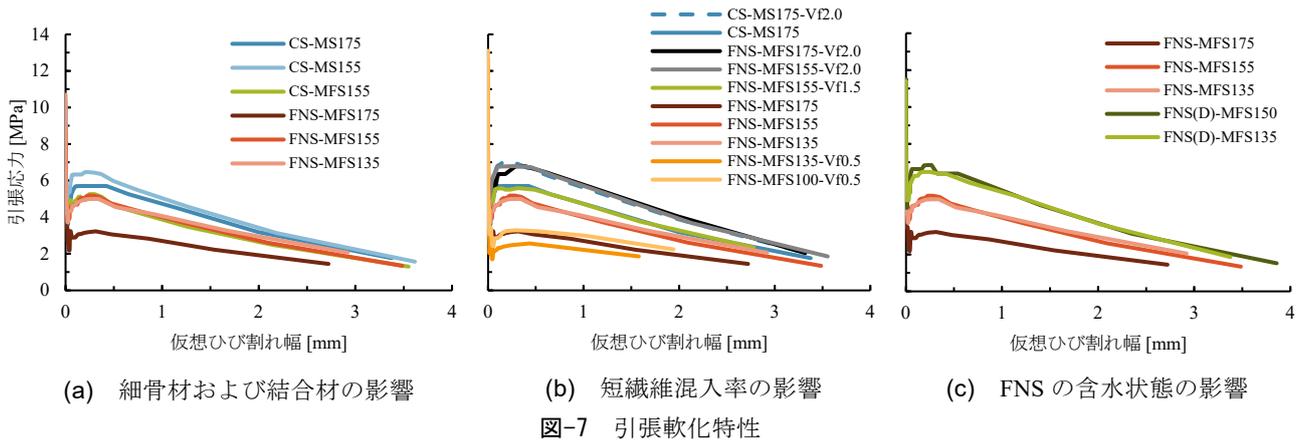
図-5 にひび割れ発生強度、図-6 に圧縮強度とひび割れ発生強度の関係を示す。図-6 には、参考として野口ら¹³⁾による圧縮強度と割裂引張強度の関係式により求まる曲線も併記した。図-5 からは、それぞれの条件において単位水量の減少（モルタル細骨材容積比の増加）に伴ってひび割れ発生強度は増加する傾向があるように見られるが、図-6 によると、FNS-MFS175 を除いて、概ね、報告されている圧縮強度と割裂引張強度の関係の範囲にあると考えられる。細骨材や単位水量、短繊維混入率が圧

縮強度とひび割れ発生強度の関係に与える影響は明確ではなかった。

FNS-MFS175 (Vf=1.0%) のひび割れ発生強度が他と比べて小さくなっているが、FNS-MFS175-Vf2.0 では同様の傾向とはなっていないことから、配合や材料の影響(FNS を用いて単位水量が大きい)によって生じたものではなく、実験作業上の何らかの要因で生じた可能性がある。

d) 引張軟化特性

図-7 に引張軟化特性の算出結果を示す。FNS-MFS175 を除いて引張軟化特性に与える単位水量の影響は小さい。図-7(a)からは 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ていることがわかる。結合材の違いによるペースト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、詳細についてはさらなるデータの蓄積と検討が必要である。図-7(b)からは、短繊維混入率が増加するにつれて、引張軟化特性における引張強度も上昇していることがわかる。Vf=2.0%の条件では、図-7(a)と異なり、CS-MS と FNS-MFS で引張軟化特性が同程度となっている。CS-MS175-Vf2.0 は図-1 に示したように流動性が極めて



小さく、短繊維の分散性が低下した可能性も考えられる。

図-7(c)に示した FNS の含水状態に着目すると、気乾状態の FNS を用いたシリーズでは表乾状態の FNS を用いたシリーズに比べて高い引張応力を示した。FNS の吸水により周囲のペーストの水結合材比の変化や細骨材とペーストの界面の付着強度の変化が生じ、結合応力が向上した可能性が考えられる。

4. まとめ

FNS とフライアッシュを用いた超低収縮超高強度繊維補強コンクリートの各種特性を確認した結果、一般的な材料を用いた場合と比べて流動性は大きく向上し、単位水量と自己収縮を大幅に低減しながら、高い力学特性を実現できるコンクリートであることがわかった。また、FNS を含水率 0.1%以下の気乾状態で使用しても、適切に単位水量を設定することで各種の特性が低下することはないこともわかった。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：更新用プレキャスト PC 床版技術指針，2016. 3
- 2) たとえば，阿部浩幸，原健梧，澤田浩昭，中村雅之：プレキャスト PC 床版の新しい RC 接合構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 3，pp. 493-498，2007. 7
- 3) 竹山忠臣，篠崎裕生，横井晶有，内田裕市：各種 FRCC を用いた鉄筋の重ね継手に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 43，No. 2，pp. 769-774，2021. 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），2004. 9
- 5) 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

- ト工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，pp. 1117-1122，2015. 7
- 6) 竹山忠臣，中村誠孝，松田拓，西村一博：超低収縮 FRCC を用いたプレキャスト床版継手構造の疲労耐久性，第 30 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. 481-484，2021. 10
- 7) 佐々木亘，恩田陽介，松田拓：単位水量と自己収縮を大幅に低減した高強度繊維補強コンクリート，第 29 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. 425-428，2020. 10
- 8) 恩田陽介，佐々木亘，葦哲義，松田拓：乾燥した FNS を用いた超低収縮高強度繊維補強コンクリートに関する検討，第 30 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. 351-356，2021. 10
- 9) 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
- 10) 土木学会：フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針，2016. 7
- 11) 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
- 12) たとえば，佐々木亘，芦塚憲一郎，出口宗浩，谷口秀明：高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 277-282，2013. 7
- 13) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，pp.11-16，1995. 6