

現場での製造施工に対応した 180MPa 級超低収縮高強度繊維補強コンクリート

180MPa Class Ultra-low Shrinkage and High-strength Fiber Reinforced Concrete Corresponding to On-site Construction

建設基盤技術部 恩田 陽介 YOSUKE ONDA
建設基盤技術部 佐々木 亘 WATARU SASAKI
建設基盤技術部 葦 哲義 AKIYOSHI DAI
建設基盤技術部 松田 拓 TAKU MATSUDA

一般に超高強度コンクリートは富配合であり水和熱や自己収縮が非常に大きいため、継手部のような拘束の大きい部位に使用された場合はひび割れ発生リスクの増大が懸念される。これに対し筆者らは、フェロニッケルスラグ細骨材（FNS）等の副産物を使用し、超高強度でありながら収縮を著しく低減できる短繊維補強コンクリートの検討を進めている。本稿では、現場施工での品質変動を抑制する目的で、気乾状態の FNS を用いた超低収縮高強度繊維補強コンクリートの検討を行った。その結果、気乾状態の FNS を用いても、単位水量等の配合条件を適切に設定すれば、流動性を確保した超低収縮高強度繊維補強コンクリートが得られると分かった。

キーワード：繊維補強コンクリート、高強度コンクリート、超低収縮、フェロニッケルスラグ細骨材

Ultra-high-strength concrete is generally characterized by extremely large heat of hydration and autogenous shrinkage due to having a large amount of cement and a small water-binder ratio. The authors are studying the use of industrial by-products such as ferro-nickel slag sand (FNS) to obtain concrete with ultra-high-strength and low heat of hydration and shrinkage. In this paper, ultra-low shrinkage and high-strength fiber reinforced concrete using FNS with drying conditions was investigated to suppress quality fluctuation during on-site construction. As a result, it was found that ultra-low shrinkage and high-strength fiber reinforced concrete with ensured high fluidity can be obtained by setting appropriate mixed proportion even if FNS with drying conditions is used.

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

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の生産性向上策の 1 つとしてプレキャスト部材（以下、PCa 部材）の利用が広がっている。PCa 部材を用いることで現地での部材製作に関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の鉄筋の配置が煩雑であり、生産性における課題となっている。そのため、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¹⁾。

そのような背景のもと、継手部分に用いるコンクリー

トの圧縮強度および引張軟化特性を高め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となることが明らかとなってきた^{2),3)}。しかし圧縮強度を高めたコンクリートは一般的に単位セメント量が多く水結合材比が小さいため、継手や間詰め部などに打ち込んだ場合、温度ひずみや自己収縮ひずみが拘束されることによるひび割れ発生リスクが高まることが懸念される⁴⁾。そこで筆者らは、副産物を大量に使用することで、超高強度コンクリートの発熱や自己収縮によるひび割れリスクを軽減した超低収縮高強度繊維補強コンクリートを開発した⁵⁾。これらの技術を組み合わせることにより、生産性と耐久性に優れかつ副産物の利用に寄与する継手構造が可能となる。本稿では、開発した超低収縮高強度繊維補強コンクリ

表-1 使用材料

材料	物性など（試験値は一例）	記号	
水	上水道水（千葉県流山市）	W	
粉体 または 結合材	セメント	中庸熟ポルトランドセメント，比表面積 3,340 cm ² /g，密度 3.21 g/cm ³	M
	フライアッシュ	JIS I 種相当品，SiO ₂ 68.4%，Ig.loss 2.0%，比表面積 5,890 cm ² /g，密度 2.44 g/cm ³	FA
	シリカフェーム	SiO ₂ 95.0%，BET 比表面積 22.3 m ² /g，密度 2.26 g/cm ³	SF
	膨張材	石灰系，比表面積 5,190 cm ² /g，密度 3.17 g/cm ³	EX
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	
粗骨材	鹿沼産硬質砂岩碎石 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，密度 7.85 g/cm ³	Fb	
化学混和 剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系化合物	SP
	消泡剤	エステル系	DF

表-2 配合条件

記号	水粉体 容積比 w/p [%]	単位水量 W [kg/m ³]	細骨材の 状態	単位粗骨 材 絶対容積 Vg [L/m ³]	短繊維 混入率 Vf [%]	空気量 [%]	膨張材の 使用
ME40.0-150	40.0	150	気乾	200	1.00	3.0	○
ME42.5-150	42.5	150					
ME42.5-135		135					
M42.5-150		150					
M42.5-135		135					
M42.5-175W	42.5	175	表乾	200	1.00	3.0	-
M42.5-155W		155					
M42.5-135W		135					

ート⁵⁾について、現場での製造・施工への適用性を高めることを目的に、材料や配合条件の検討を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

表-1に使用材料，表-2に検討を行った配合条件を示す。既報⁵⁾で性状を確認した配合（記号の末尾に W）を基本とし，膨張材使用の有無，単位水量および細骨材の水分状態を実験要因とした。結合材として中庸熟ポルトランドセメント，フライアッシュおよびシリカフェームを使用し，容積比で 55:30:15 となるよう混合した。膨張材を使用する場合には，中庸熟ポルトランドセメントの 20 kg/m³を膨張材で置換した。低水結合材比であることを考慮し，膨張材には比較的比表面積の大きいものを使用した。水粉体容積比は 42.5%を基本とし，一部 40.0%も検討した。短繊維には超高強度繊維補強コンクリート⁴⁾に用いられている細径の鋼繊維を使用した。

このコンクリートは比較的多種の混和材とフェロニッケルスラグ細骨材を使用するため，一般的なコンクリート工場での製造は設備面から容易ではないことが想定される。その対応の一例として，計量済みの各材料をプレパックして現地で練り混ぜる方法が考えられる。使用した

フェロニッケルスラグ細骨材は比較的吸水率が大きいいため，コンクリート製造における通常の骨材状態である表乾状態とすると細骨材中に多量の水分を見込むこととなり，表面水率のばらつきが管理上の課題となることが考えられる。そこで，本検討ではフェロニッケルスラグ細骨材を表面水を持たない乾燥状態（以下，気乾 FNS）で使用することとし，通常を表乾状態で使用した場合⁵⁾（以下，表乾 FNS）との差異について検討を行った。使用した気乾 FNS の含水率の実測値は 0.1%以下であり，配合計算上では絶乾状態として扱った。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→短繊維補強コンクリート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

a) フレッシュ性状

フレッシュ性状の確認として，練上がり後直ちにスランプフロー試験（JIS A 1150），空気量試験（JIS A 1128）を行った。

b) 自己収縮

硬化性状の確認として，自己ひずみの測定を行なった。測定方法は「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁶⁾を参考に，100×100×400mm の角柱の中心に埋め込み型

表-3 フレッシュ性状

記号	化学混和剤の使用量		スランブ フロー [mm]	フロー 500mm 到達時間 [s]	空気量 [%]
	SP [B×%]	DF [B×%]			
ME40.0-150	2.7	0.015	620	32.3	3.0
ME42.5-150	2.5	0.015	675	20.9	2.6
ME42.5-135	2.5	0.050	580	61.0	3.2
M42.5-150	2.5	0.015	735	16.3	1.7
M42.5-135	2.7	0.015	600	44.0	2.6
M42.5-175W	2.5	0.030	820	5.5	4.8
M42.5-155W	2.5	0.030	765	10.9	3.9
M42.5-135W	2.5	0.030	680	23.7	4.5

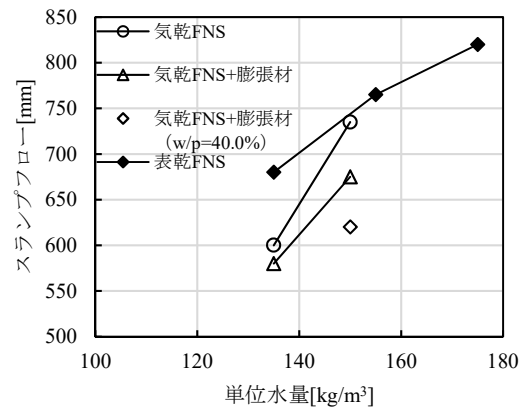


図-1 単位水量とスランブフローの関係

ひずみ計を設置し、20℃封緘状態での打込み直後からの長さ変化を測定した。

c) 力学特性

力学特性の確認として、圧縮強度試験 (JISA 1108)、静弾性係数試験 (JISA 1149)、割裂引張強度試験 (JISA 1113) を行った。割裂引張強度試験では、UFC 指針⁹⁾を参考に、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点をひび割れ発生強度とした。また、繊維補強コンクリートとしての性能確認として、JCI-S-001とJCI-S-002およびそれらの附属書に準拠した方法で引張軟化特性の推定を行った。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供試体の寸法をφ100×200mmとし、データはn=3の平均値で示す。引張軟化特性の推定では供試体の寸法を100×100×400mmとし、データはn=4の平均値とした。各供試体の養生方法は温度20℃での封緘養生を基本とし、材齢28日で各試験を実施した。また、圧縮強度および静弾性係数試験では、両者の関係を把握するため、材齢1~91日の複数材齢で試験を行い、データを取得した。さらに、脱型後に最高温度90℃、保持時間48時間の蒸気養生を行った条件でも試験を行った。

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を示す。図-1には単位水量とスランブフローの関係をプロットした。

図-1に白抜きの丸で示している気乾FNSを用いた場合の単位水量とスランブフローの関係は、単位水量が150 kg/m³では既報⁹⁾で示した表乾FNSの場合(図-1、黒塗りし形)と概ね同様の傾向にあるが、単位水量を135 kg/m³まで減じるとSPの使用量を増加させてもスランブフローの低下が大きくなった。また、図-1に白抜き三角形で

示すように膨張材を使用するとスランブフローは大きく低下し、さらにw/pを減じる(図-1、白抜きし形)とスランブフローはより低下した。本実験で使用した膨張材は比表面積が大きく反応性の高いものであり、置換した早強ポルトランドセメントよりも多くの水を拘束するものであることが考えられる。

表乾FNSに対して気乾FNSのスランブフローが小さくなる原因としては、気乾FNSのほうが水やペーストを拘束しやすいことや、接水後に吸水することで細骨材周辺にあるペーストの水結合材比が低下している可能性が考えられる。後述の力学特性の検討結果は、気乾FNSが接水後に吸水している可能性を示唆するものであり、スランブフローおよび力学特性の双方の結果を勘案すると、接水後の比較的早い段階で吸水を生じている可能性が考えられる。ただし、図-1から分かるように単位水量が150 kg/m³程度では、FNSの表乾と気乾の差異がスランブフローに与える影響は小さい。本実験において単位水量の低減はモルタル細骨材容積比の増加を意味する。単位水量が150 kg/m³となるモルタル細骨材容積比ではスランブフローに与える細骨材の影響は小さく、これより大きなモルタル細骨材容積比の領域で細骨材の影響が確認された。

(2) 自己収縮

図-2に自己収縮ひずみの測定結果を示す。既報⁹⁾で示した通り、表乾FNSを使用した場合には単位水量の低減に伴い自己収縮ひずみも減少する。単位水量を135 kg/m³まで低減すると、後述のように170~200 MPa級の高い圧縮強度を発現するコンクリートでありながら、自己収縮ひずみはPC上部工で多く使われる水セメント比40%程度のコンクリートと同程度⁷⁾まで低減できる。

一方、気乾FNSを使用した場合の自己収縮ひずみは、単位水量150 kg/m³のM42.5-150では表乾FNSを用いた単位水量155 kg/m³のM42.5-155Wより若干小さい程度と

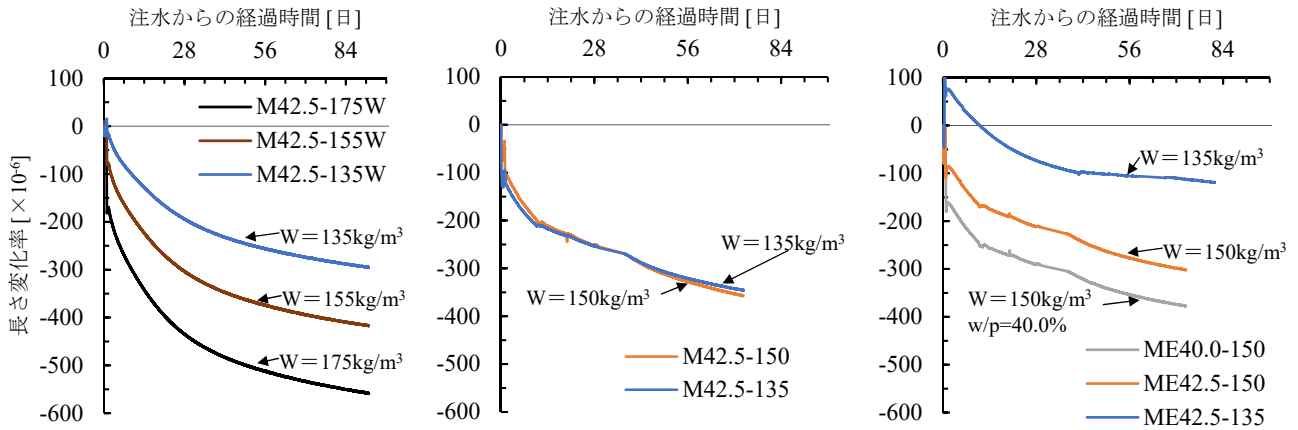


図-2 自己収縮 (左：表乾 FNS，中：気乾 FNS・膨張材なし，右：気乾 FNS・膨張材あり)

なった。単位水量を 135 kg/m^3 に低減した M42.5-135 では、単位水量 150 kg/m^3 とした M42.5-150 と同程度の自己収縮ひずみとなり、表乾 FNS で見られた単位水量の低減による自己収縮ひずみの低減は確認できなかった。しかし、M42.5-150 の自己収縮ひずみは、後述の圧縮強度に鑑みると相当に小さい値であり、気乾 FNS を使用しても高い収縮低減効果が得られることが分かった。

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る⁸⁾。しかし本実験で検討している気乾 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。仮に自己収縮の発生以前に気乾 FNS が十分に吸水しているとすると、内部養生効果は十分に発揮されることが期待できるが、その一方で気乾 FNS の吸水によりペーストの水結合材比は小さくなりペースト自体の自己収縮は大きくなると考えられる。したがって、気乾 FNS を用いた場合には、ペーストの硬化過程と FNS の吸水挙動が表乾 FNS を用いた場合と異なっていることから、単位水量と自己収縮ひずみの関係に変化をもたらしたものと推察される。

膨張材を使用した場合の長さ変化率の挙動は、単位水量 150 kg/m^3 では膨張材を使用しないものと比べて 50×10^{-6} 程度膨張側であり概ね同程度といえるものであったのに対し、単位水量 135 kg/m^3 では膨張材を使用しないものと比べて 250×10^{-6} 程度膨張側で推移した。単位水量 150 kg/m^3 で膨張材を使用し水粉体容積比を 40.0%とした配合では水粉体容積比 42.5%と比べて 70×10^{-6} 程度収縮側となっており、水粉体容積比が小さいことで自己収縮が大きくなったことによるものと考えられる。これらのことから、単位水量によって膨張材を使用した場合の長さ変化率の変化に差異が生じたのは、膨張材の単位量は一定でありながら、主に体積変化を生じていると考えら

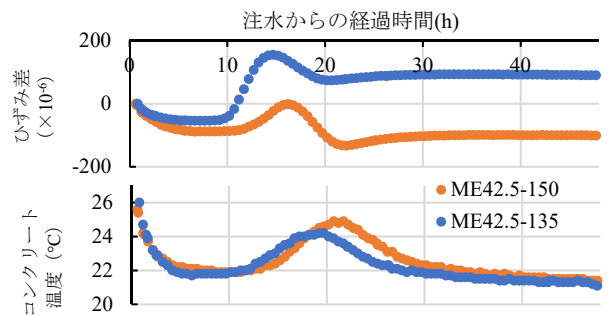


図-3 若材齢時のひずみ差と温度，膨張材あり

れるペーストの量が異なっていること、すなわち、ペースト量中の膨張材の割合が変化しているために、膨張材の影響に差異が生じたことが推察される。図-3 には、膨張材の影響に差異の生じた ME42.5-150 と ME42.5-135 について、若材齢時の埋め込み型ひずみ計のひずみ差とコンクリート温度を示している。どちらの配合も、注水後 10 時間を過ぎた付近より温度の上昇と膨張ひずみが生じており、膨張材の効果が確認できる。ME42.5-150 と ME42.5-135 を比較すると、ME42.5-135 では若材齢により大きく膨張していることがわかる。これについては、前述のペースト中の膨張材の割合が異なること等が影響として考えられる。

(3) 力学特性

a) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-4、 $w/p=42.5\%$ の条件における材齢 28 日の圧縮強度と単位水量の関係を図-5 に示す。骨材水分状態および膨張材の使用の有無にかかわらず、単位水量を減じる、すなわちモルタル細骨材容積比を増加させることで、圧縮強度がやや増加する傾向にあることがわかる。これは、材齢 91 日や蒸気養生後の圧縮強度も同様の傾向であった。骨材の含水状態に着目すると、気乾 FNS を用いた場合では表乾 FNS を用いた場合より若干で

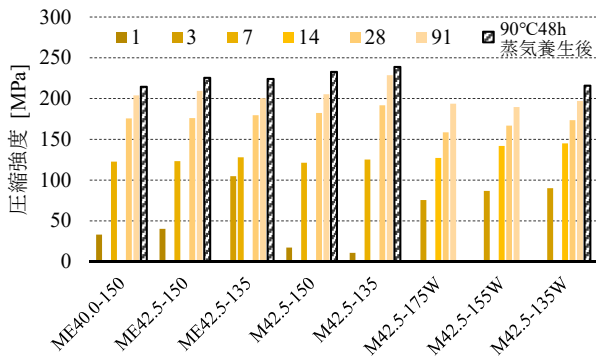


図-4 圧縮強度

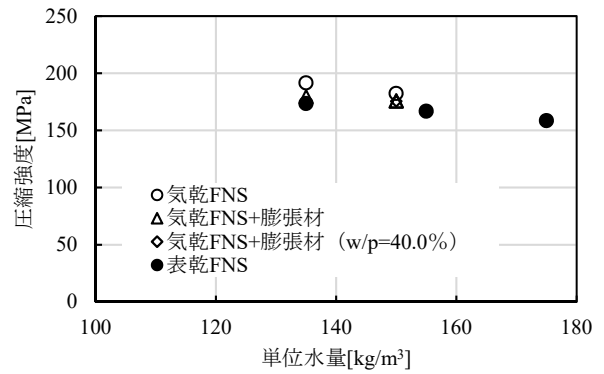


図-5 単位水量と圧縮強度の関係

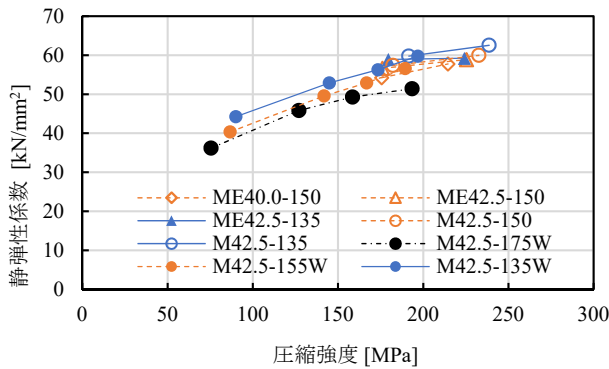


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

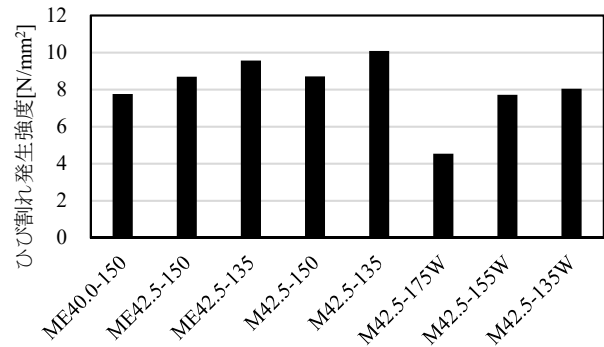


図-7 ひび割れ発生強度

あるが圧縮強度が高くなる傾向にあるようである。これは、接水後に細骨材が吸水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によるものと考えられる。

結合材に膨張材を用いた ME シリーズでは、材齢 1 日および 3 日の強度発現が膨張材を用いない M シリーズと比較して大きい傾向があるが、材齢 7 日以降ではおおむね同程度となった。

水粉体容積比を変化させた ME40.0-150 と ME42.5-150 を比較すると、いずれの材齢の圧縮強度にも大きな差は見られず、本実験の範囲では圧縮強度に与える水結合材比の影響は小さかった。

b) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6 に示す。表乾 FNS を用いた場合と同様に、気乾 FNS を用いた場合でも単位水量を低減（モルタル細骨材容積比を増大）させると圧縮強度および静弾性係数が大きくなった。同程度の単位水量であれば圧縮強度に対する静弾性係数の値はいずれの条件でも同程度であり、FNS の水分状態や膨張材の使用の有無が圧縮強度と静弾性係数の関係に与える影響は小さいことが分かった。

c) ひび割れ発生強度

図-7 にひび割れ発生強度の測定結果を示す。全体的に

は、図-4 に示した圧縮強度と同様の傾向にあることが分かる。単位水量以外の条件が同一であれば、単位水量を減じる、すなわちモルタル細骨材容積比が増加するとひび割れ発生強度も増加する傾向にあった。

図-8 には圧縮強度とひび割れ発生強度の関係を示した。本実験では 2 章(2)c)で示す通りひび割れ発生強度を測定しているが、図中には参考として野口ら⁹⁾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-7 および図-8 からわかるように、ひび割れ発生強度が極端に小さい M42.5-175W を除いて、圧縮強度の増加に伴って一定の割合でひび割れ発生強度も増加していることが分かる。すなわち、これらの結果からは、FNS の含水状態や膨張材の有無が、圧縮強度とひび割れ発生強度の関係に与える影響は小さいと考えられ、特に、気乾 FNS を用いた場合に表乾 FNS を用いた場合と比べて特性に変化が生じることはないと言える。一方、圧縮強度とひび割れ発生強度の関係からは、M42.5-175W のひび割れ発生強度が他の条件と比べて小さい値を示している。これについては、単位ペースト量やモルタル細骨材容積の範囲によって圧縮強度とひび割れ発生強度の関係に与える影響が異なる可能性が考えられるが、本実験の範囲ではデータが十分ではなく、今後のさらなる検討とデータの蓄積が必要であると考えられる。

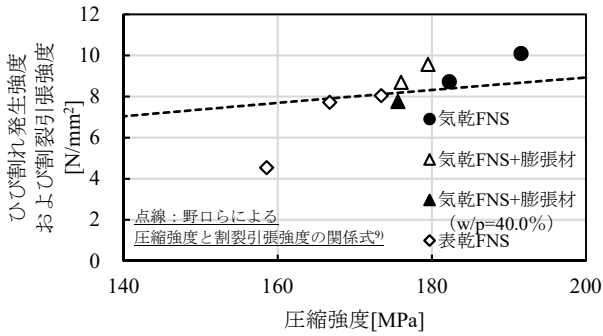


図-8 圧縮強度とひび割れ発生強度の関係

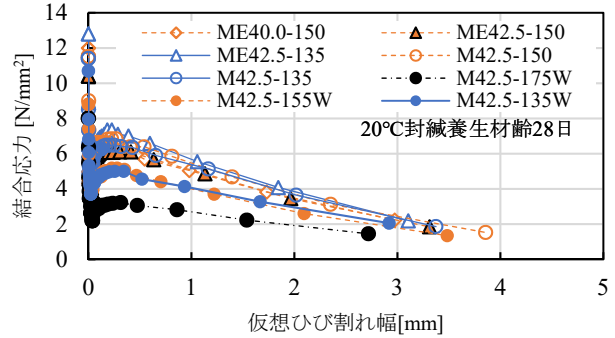


図-9 引張軟化特性

d) 引張軟化特性

材齢 28 日における引張軟化特性の推定結果を図-9 に示す。既報でも示した M42.5-175W を除いて、引張軟化特性に与える単位水量の影響は小さく、また、膨張材の影響も小さかった。しかし、細骨材の含水状態に着目すると、気乾 FNS を用いたシリーズでは、いずれも表乾 FNS を用いた末尾 W のシリーズに比べて高い結合応力を示した。3. (3) a) で述べたように、細骨材が吸水することにより周辺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ことが考えられる。

4. まとめ

既報⁵⁾にて検討した超低収縮高強度繊維補強コンクリートの現場施工への適用性を高めることを目的に、フェロニッケルスラグ細骨材の含水状態をはじめとした材料や配合の条件について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 単位水量が 150 kg/m³ 程度であればフェロニッケルスラグ細骨材を気乾状態としても流動性への影響は小さいが、膨張材の使用や、単位水量を 135 kg/m³ まで減じると流動性の低下が大きい。
- ② 気乾状態であってもフェロニッケルスラグ細骨材は高い自己収縮低減効果を有する。
- ③ 気乾状態であっても、超低収縮高強度繊維補強コンクリートはモルタル細骨材容積比を増加させることで圧縮強度はやや増加する傾向にあり、かつ、表乾状態に比べて圧縮強度は高くなる傾向にある。
- ④ フェロニッケルスラグ細骨材の含水状態や膨張材の有無が圧縮強度と静弾性係数の関係に与える影響は小さい。
- ⑤ 単位水量が 150 kg/m³ 程度以下の範囲では、ひび割れ発生強度と圧縮強度の関係に与えるフェロニッケルスラグ細骨材や膨張材の影響は小さい。

⑥ 引張軟化特性は、気乾状態のフェロニッケルスラグ細骨材を用いた場合、表乾状態で用いた場合と比較して高い結合応力を示した。

参考文献

- 1) 例えば、阿部浩幸, 原健悟, 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
- 2) 竹山忠臣, 佐々木亘, 篠崎裕生, 樋口正典, 内田裕市: 短繊維補強コンクリートを用いたループ継手の部材性能, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 17 巻, pp.413-418, 2017.10
- 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 (投稿中)
- 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) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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, pp.1117-1122, 2015
- 9) 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