

# ポルトランドセメントを使用しない 高強度コンクリートの屋外暴露試験結果

Outdoor Exposure Test Results of High-strength Concrete without Portland Cement

R&Dセンター 峰 竜一郎 RYUICHIRO MINE  
 R&Dセンター 小宮 克仁 KATSUHITO KOMIYA  
 R&Dセンター 松田 拓 TAKU MATSUDA

2種類の細骨材（フェロニッケルスラグと硬質砂岩）を使用し、その体積混合比率を変化させたポルトランドセメントを使用しない高強度コンクリートを作製し、フレッシュ性状、力学特性、ひずみ測定を行った。試験体は材齢7日で脱枠し、その後2年間の屋外暴露養生とした。実験の結果、フェロニッケルスラグ細骨材混合率を増加させると、①流動性が高まり、②圧縮強度と静弾性係数が高まり、③収縮ひずみが低減された。フェロニッケルスラグ細骨材を使用しない条件の収縮ひずみは、一般的な高強度コンクリートと同様であった。

**キーワード：**ポルトランドセメント不使用、低環境負荷、高強度コンクリート、FNS混合率、屋外暴露

High-strength concrete without Portland cement was prepared by varying the mix volume ratio of two types of fine aggregate (ferronickel slag sand (FNS) and hard sandstone), and their fresh properties, mechanical properties, and strain properties were verified. The specimens were demolded at 7 days of age and then exposed outdoors for 2 years. It was revealed that as FNS mixing ratio increased, (1) flowability increased, (2) higher compressive strength and static modulus could be obtained, and (3) shrinkage decreased. Shrinkage under conditions with hard sandstone was similar to that of ordinary high-strength concrete.

**Key Words:** Non-Portland cement, Low environmental impact, High strength concrete, FNS mixing ratio, Outdoor exposure

## 1. はじめに

近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みが盛んに行われており、二酸化炭素削減の重要性が認識されている。コンクリートの構成材料の一つであるポルトランドセメント（以下、単にセメントと呼ぶ）はその製造時における二酸化炭素排出量が他の構成材料に比べ多いことが知られており、環境配慮の観点から、セメントを他産業の副産物で置換した環境配慮型コンクリートが注目されている。著者らは、セメントを使用しない条件で製造可能な超低収縮・高強度コンクリート（以下、STCと称す）を開発し、プレキャスト部材としての実用化を検討した結果を報告してきた<sup>1),2)</sup>。本コンクリートは、吸水率の比較的高いフェロニッケルスラグ細骨材（以下、FNSと略記）を使用することで、自己収縮ひずみを著しく低減している。細骨材をFNSとした調合

条件で製造したSTCで寸法が高さ2.0m×幅4.0m×厚さ0.075mの大型パネルを製作し、屋外に約5年間暴露しているが、現在もひび割れなどは見られず、高い美観性を維持している<sup>3)</sup>（写真-1）。これに加え、2つの適用事例がある。一つは、STCのモルタルで寸法が高さ1.8m×幅1.5m×厚さ0.04mの薄型パネルを5枚製造し、設備機器の目隠しパネルとして適用している<sup>4)</sup>（写真-2）。

もう一つは、黒色顔料を混入した調合条件で幅10m目地なしのコンクリート製フラットバーを作製し、大学施設のホール内の大ステージ立ち上がり部分に適用している<sup>5)</sup>（写真-3）。本報では、細骨材にFNSではなく一般的な細砂を使用した場合の性状を確認するべく、2種類の細骨材（FNS、天然骨材（硬質砂岩碎砂））を使用し、それらの混合比率（体積割合）を変化させた条件のSTCを製造し、各試験体を2年間屋外に暴露した結果を報告する。



1) 屋外暴露直後 (2019年)



2) 屋外暴露 5年経過 (2024年)

写真-1 大型パネルの屋外暴露の様子



写真-2 薄型パネル



写真-3 幅 10m のフラットバー

表-1 使用材料

記号	種類	物性等							
W	水	密度 : 1.00g/cm <sup>3</sup>							
BFA	高炉スラグ微粉末 (石膏入り)	密度 : 2.89g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 4400cm <sup>2</sup> /g							
SF	結合材 シリカフューム	密度 : 2.26g/cm <sup>3</sup> , BET比表面積 : 200000cm <sup>2</sup> /g							
FA	フライアッシュ	密度 : 2.40g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 5540cm <sup>2</sup> /g							
EX	膨張材	密度 : 3.17g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 4970cm <sup>2</sup> /g							
FNS	細骨材 フェロニッケルスラグ	表乾密度 : 2.98g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 : 2.65%							
HS	硬質砂岩	表乾密度 : 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 : 1.10%							
G	粗骨材 硬質砂岩	表乾密度 : 2.63g/cm <sup>3</sup> , 実積率59.0%							
SP	化学 高性能減水剤 I 種	ポリカルボン酸系							
AF	混和剤 消泡剤	アルキルエーテル系							

表-2 調合条件

NO.	記号	FNS 混合率 (%)	W/B [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]							
				W	B	BFA	FA	SF	EX	S	FNS
1	FNS100	100	16.0	90	563	299	163	81	20	1067	1067
2	FNS75	75	16.0	90	563	299	163	81	20	1034	800
3	FNS50	50	16.0	90	563	299	163	81	20	1002	533
4	FNS25	25	16.0	90	563	299	163	81	20	970	267
5	FNS0	0	16.0	90	563	299	163	81	20	938	0

## 2. 使用材料とコンクリートの調合条件

使用材料を表-1 に示す。結合材は、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフューム、膨張材とした。細骨材は FNS に加え、一般的な細砂として硬質砂岩碎砂の 2 種類を使用した。硬質砂岩碎砂は表乾密度  $2.62\text{g/cm}^3$ 、吸水率 1.10% であり、FNS と比べ密度、吸水率が小さいものとした。粗骨材は硬質砂岩碎石を使用し

た。高性能減水剤はポリカルボン酸系が主成分のものを、消泡剤はアルキルエーテル系が主成分のものを使用した。コンクリートの調合条件を表-2 に示す。水結合材比 (W/B) を 16.0%，単位水量 (W) を  $90\text{kg/m}^3$  とした。2 種類の細骨材それぞれの単位量は、表中に示す FNS 混合率で変化させた。なお、目標空気量は 4.5% とした。

## 3. 試験概要

コンクリートは強制 2 軸ミキサを使用して練り混ぜた。練混ぜ量は各バッチ  $80\text{L}$  とした。練混ぜ手順は、粉体と細骨材を投入し、20 秒空練りした。その後、粗骨材、水、化学混和剤を投入し、240 秒練り混ぜた。搔き落とし後に 120 秒練り混ぜて排出した。排出後、ただちにフレッシュ試験を実施し、供試体を作製した。養生条件は、供試体作製後、材齢 7 日まで  $20^\circ\text{C}$  封かんとし、脱枠した後、屋外暴露した (写真-4)。硬化後の試験項目は、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、収縮ひずみとした。試験材齢は 7, 28, 91, 729 日とした。なお、静弾性係数の測定は材齢 729 日のみ実施した。ひずみは埋込み型のひずみ計を用いて測定した。コンクリートの線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  と仮定し、見かけの温度ひずみを除去し、コンクリートの自己収縮ひずみとした。



写真-4 屋外暴露の様子

表-3 フレッシュ試験結果

NO.	記号	SP 添加率 (B×%) 0.001%	AF 添加率 (B×%) 0.001%	スランプフロー [cm]			停止 時間 [Sec]	50cm 到達 時間 [Sec]	空気 量 [%]	単位 容積 質量 [kg/m <sup>3</sup> ]	CT [°C]	AT [°C]	
				1	×	2							
1	FNS100	1.70	2	73.0	×	72.5	72.8	180	10.2	4.4	2478	22.3	20.9
2	FNS75	1.60	2	70.1	×	67.3	68.7	180	15.0	3.9	2468	22.8	20.7
3	FNS50	1.60	2	68.5	×	65.0	66.8	180	15.4	4.5	2415	22.8	21.0
4	FNS25	1.60	2	60.6	×	59.0	59.8	180	28.0	4.0	2398	22.8	19.8
5	FNS0	1.60	2	46.5	×	46.5	46.5	116	-	3.6	2380	23.3	21.3

#### 4. 試験結果

##### (1) フレッシュ試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3 に示す。

化学混和剤添加率が同一の FNS0～75 を見ると、スランプフローは 46.5～68.7cm の範囲にあった。また、空気量は 3.6～4.5% の範囲にあり、細骨材の混合率による違いは見られなかった。50cm スランプフロー到達時間とスランプフローの関係を図-1 に示す。FNS 混合率を増加させると、スランプフローが大きかつ 50cm 到達時間が短くなり、流動性が高まった。この傾向は既報<sup>2)</sup>の結果と同様だった。

##### (2) 圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度

FNS 混合率と圧縮強度の関係を図-2 に示す。図中には各材齢におけるプロットを直線近似した結果を併記した。圧縮強度は FNS 混合率が増加すると高くなり、その傾向は材齢が経過すると大きくなった。FNS を使用したものの圧縮強度が高くなる傾向は、既報<sup>2)</sup>の結果と

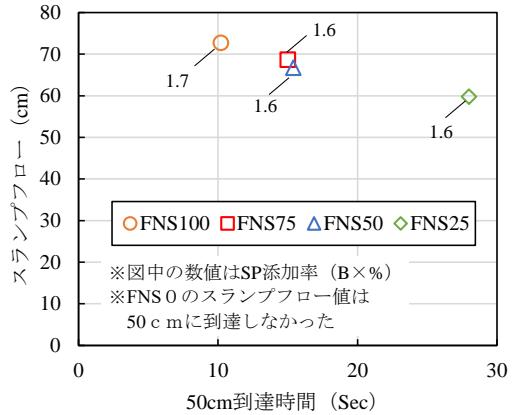


図-1 50cm スランプフロー到達時間とスランプフローの関係

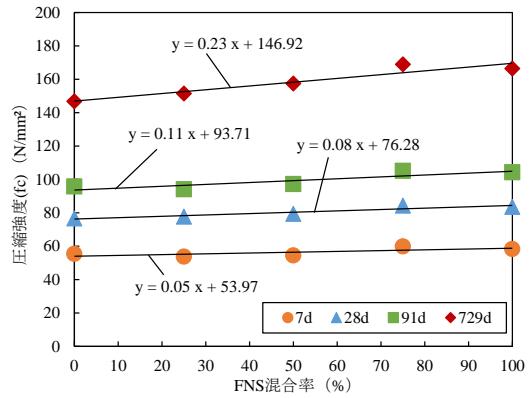


図-2 FNS混合率と圧縮強度の関係

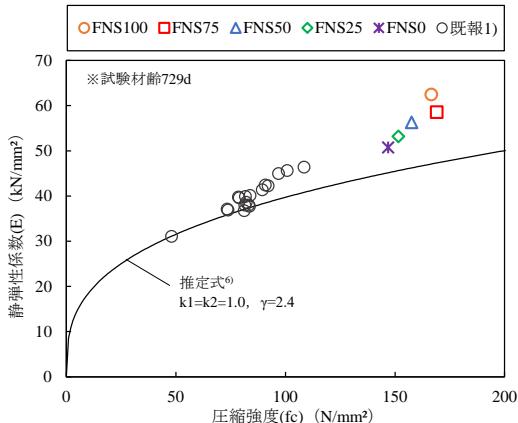


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

同様であった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3 に示す。既報<sup>1)</sup>の試験結果と JASS5 の推定式<sup>6)</sup>も併記した。本試験結果は推定式よりも上にプロットされた。また、FNS 混合率が増加すると、静弾性係数が高くなる傾向が見られた。

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-4 に示す。図中には一般的な高強度コンクリート(結合材: 普通ポルトランドセメント、水結合材比: 28.6%)の試験結果<sup>1)</sup>と

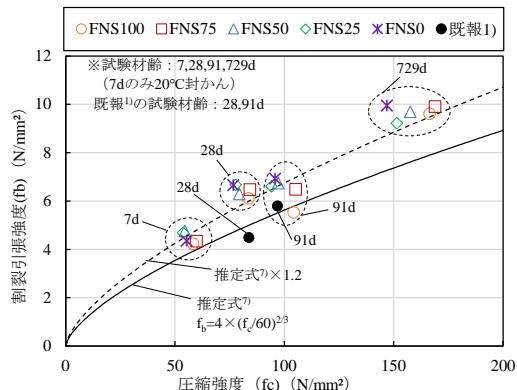


図-4 圧縮強度と割裂引張強度の関係

既報<sup>7)</sup>の推定式を併記した。材齢 91 日において、本試験結果は既報<sup>7)</sup>の推定式の 1.2 倍より上の範囲にプロットされ、混合率の違いによる影響は少なかった。

### (3) ひずみ

ひずみ測定結果を図-5 に示す。図中には図-4 と同じ既報<sup>1)</sup>の結果も併記している。打込み完了から 7 日時点のひずみ量は FNS100, 75, 50, 25, 0 でそれぞれ 248, 197, 30, -143,  $-447 \times 10^{-6}$  であり、FNS 混合率を増加させることで収縮ひずみが小さくなつた。FNS を混合したものは打込み完了から約 1 日で膨張側に挙動し、FNS 混合率が高いほど自己収縮は低減された。また FNS0 (結合材にセメントを使用せず、細骨材を天然骨材のみとした調合条件) を見ると、一般的な高強度コンクリートと同様な自己収縮ひずみが確認された。細骨材を天然骨材のみとした条件の収縮特性は、一般的な高強度コンクリートと同様と考えられ、収縮ひび割れ抑制の観点で見た場合、適用対象の構造物や部材の条件によっては、必ずしも現在使用している細骨材を FNS にすべて置き換える必要はないと考えられる。

## 5.まとめ

フェロニッケルスラグ細骨材 (FNS) と硬質砂岩碎砂の混合率を変化させたポルトランドセメントを使用しないコンクリートを 2 年間屋外暴露した結果、本実験の範囲内で以下のことがわかつた。

- (1) 圧縮強度は、FNS 混合率が増加すると高くなつた。また、屋外暴露した条件においても高い強度発現を示した。
- (2) 静弾性係数は、フェロニッケルスラグ細骨材混合率が増加すると大きくなつた。

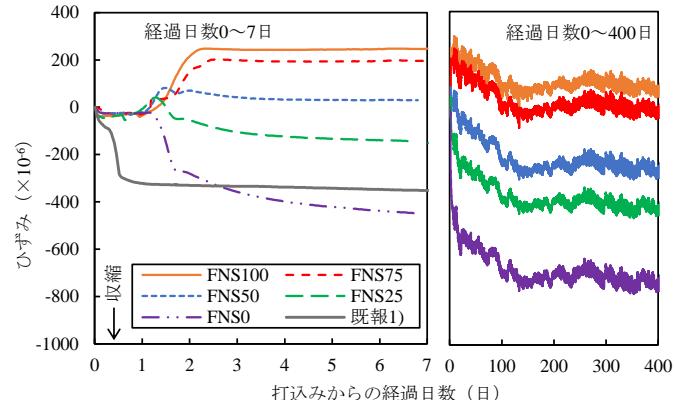


図-5 ひずみ測定結果

- (3) 割裂引張強度は、推定式<sup>7)</sup>の 1.2 倍よりも高くなる傾向が見られた。この傾向は使用する細骨材の種類や混合率の影響は少なかつた。
- (4) 自己収縮ひずみは、フェロニッケルスラグ細骨材混合率が高いほど低減された。また、天然骨材のみを使用した条件では、一般的な高強度コンクリートと同様の収縮ひずみとなつた。

## 参考文献

- 1) 峯竜一郎ほか：ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリートの実用化に向けた検討 その 1～6, 日本建築学会大会（北海道）学術講演梗概集, pp.659-672, 2022.9
- 2) 松田拓ほか：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, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1117-1122, 2015.7
- 3) 松田拓ほか：持続可能性に貢献する超低収縮・低炭素コンクリート, コンクリート工学, Vol.58, No.1, 2020.1
- 4) 三井住友建設ニュースリリース：「サスティンクリート®」をデザインパネルとして初適用—脱炭素社会へ貢献する高性能コンクリート— <https://www.smcon.co.jp/topics/2022/01131400/>, 2022.1.13
- 5) 新建築社：新建築, 第 98 卷 1 号, pp.189, 2023.1
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2022, pp.12, 2022.11
- 7) 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