

フェロニッケルスラグを細骨材に利用した コンクリートの諸特性について

上田橋 克^{1*} 竹下 孝徳² 浦野 登志雄³

Properties of Concrete Using Ferronickel Slag as Fine Aggregate

Suguru Kandabashi^{1*}, Takanori Takeshita², Toshio Urano³

In this study, various material tests were carried out in accordance with the Japanese Industrial Standards to confirm that ferronickel slag is effective as a fine aggregate for concrete. Aggregate tests showed that ferronickel slag met the standards for fine aggregate for concrete. Alkali-silica reactivity tests determined that ferronickel slag was not "harmless," but showed that FNS could be used by using blast-furnace slag Type B. Compressive strength tests showed a tendency for strength to increase when part of the sea sand was replaced with ferronickel slag, and no decrease in strength was observed in any of the mix proportions. The static elastic modulus tended to increase as the replacement rate of ferronickel slag increased. In terms of drying shrinkage strain, it was shown that the drying shrinkage strain was reduced more than that of sea sand.

キーワード：フェロニッケルスラグ、細骨材、アルカリ骨材反応、ブリーディング、力学的性質、乾燥収縮

Keywords：Ferronickel Slag, Fine Aggregate, Alkali-aggregate Reaction, Breeding, Mechanical Properties, Drying Shrinkage

1. はじめに

近年、建設分野においても持続可能性の向上と資源循環型社会の実現が強く求められており、産業副産物の有効利用に関する研究が盛んに行われている。特に、鉄鋼や非鉄金属の製造過程で発生するスラグ（副産物）をコンクリート用骨材として利用する試みは、天然資源の消費抑制および産業廃棄物の削減の観点から注目されている。

フェロニッケルスラグ（以下、FNS と称す）は、フェロニッケル合金の製造過程で副次的に生じるガラス質のスラグであり、高い硬度と安定した化学的性質を有することから、骨材としての利用可能性が指摘されている。現在の利用状況として、FNS は主にセメント原料や道路の路盤材として活用されているケースが多く、コンクリート用骨材としての利用拡大には技術的な課題が残っている。具体的には、FNS を細骨材として用いた場合、天然砂と比較して吸水率や粒形の違いが施工性や強度発現に影響を与える可能

性が指摘されている。また、スラグ由来のアルカリ活性や長期的な耐久性に関する不安もあり、安全かつ安定した利用を確立するための検証が必要とされている。

本研究では、FNS を細骨材として 15% から 60% 代替したコンクリートを作製し、アルカリ骨材反応、ブリーディング、圧縮強度および乾燥収縮などに与える影響を実験的に検討することで、FNS のコンクリート細骨材としての有効利用に向けた基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 試験項目

本研究で実施した試験項目を以下に示す。

- ① 細骨材の密度・吸水率試験
- ② 細骨材のふるい分け試験
- ③ 海砂・FNS の混合割合を変えた細骨材のアルカリシリカ骨材反応性試験（モルタルバー法）
- ④ 海砂・FNS の混合割合を変えたコンクリートのブリーディング試験
- ⑤ フレッシュコンクリートの性状
- ⑥ コンクリートの圧縮強度試験
- ⑦ コンクリートの静弾性係数試験
- ⑧ コンクリートの曲げ強度試験
- ⑨ コンクリートの長さ変化試験

3. 試験配合

表 1 に使用材料、表 2 に試験配合を示す。W/C=50%、スランプ 18 cm の配合については、強度試験の他に長さ変化試験を実施した。

1 技術教育支援センター
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Center for Technical and Educational Support,
2627 Hirayama-Shinmachi, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

2 (株)吹上工業 試験室
〒899-5204 鹿児島県姶良市加治木町日木山 82-1
Laboratory Concrete, Fukiage Industry Co., Ltd.,
82-1 Hikiyama, Kajiki-cho, Aira-shi, Kagoshima, Japan 899-5204

3 久留米工業大学 工学部 建築・設備工学科
〒830-0052 福岡県久留米市上津町 2228-66
Kurume Institute of Technology, Faculty of Engineering,
Department of Architecture and Building Services Engineering,
2228-66 Kamitsu-cho, Kurume-shi, Fukuoka, Japan 830-0052

* Corresponding author:
E-mail address: s-kandabashi@kumamoto-nct.ac.jp (S. Kandabashi)

4. 骨材試験

本研究では、フェロニッケルスラグのコンクリート細骨材としての適用性を調べる目的で骨材試験を実施した。骨材試験は、密度および吸水率試験、ふるい分け試験を実施した。

密度および吸水率試験は、以下の目的で実施する。

- ① 骨材の強度や耐久性、風化の程度を判定する目安を得る。
- ② コンクリートの配合計算に必要なとなる細骨材の表面乾燥飽水状態（表乾状態）での密度を求める。

表1 使用材料

種類	略記号	品名	産地	密度 (g/cm ³)
水	W	上水道水	－	1.00
セメント	C	高炉セメント B 種	－	3.02
細骨材	FNS	フェロニッケルスラグ	宮崎県日向精錬所	2.98
	S	海砂	鹿児島県屋久島産	2.52
粗骨材	G	碎石	鹿児島県曽於産	2.63
混和剤	SP	AE 減水剤	－	1.07
	AE	AE 助剤	－	1.05
	DF	消泡剤	－	1.00

表2 試験配合

W/C (%)	FNS 置換率 (%)	SL (cm)	s / a (%)	単位容積質量(kg/m ³)							
				W	C	FNS	S	G	SP (%)	AE (%)	DF (%)
40	0	12	41.6	185	463	0	647	947	0.8	0.400	－
	15		42.3	181	453	118	566	947	0.8	0.400	
	30		42.8	178	445	241	476	947	0.8	0.350	
	45		43.3	175	438	369	381	947	0.8	0.300	
	60		43.8	172	430	502	297	947	0.8	0.250	
50	0	12	44.9	178	356	0	746	954	0.8	0.250	－
	15		45.8	172	344	137	656	954	0.8	0.400	
	30		46.2	169	338	278	549	954	0.8	0.300	
	45		46.6	166	332	424	438	954	0.8	0.250	
	60		46.9	163	326	574	324	954	0.8	0.200	
60	0	12	46.0	182	303	0	781	954	0.8	0.350	－
	15		46.3	180	300	140	670	954	0.8	0.250	
	30		46.6	177	295	284	560	954	0.8	0.200	
	45		47.1	173	288	434	449	954	0.8	0.150	
	60		47.4	171	285	584	330	954	0.8	0.075	
50	0	8	43.2	171	342	0	731	1002	0.8	0.250	－
	15		44.1	165	330	134	643	1002	0.8	0.300	
	30		44.5	162	324	273	538	1002	0.8	0.300	
	45		44.9	159	318	416	430	1002	0.8	0.300	
	60		45.3	156	312	563	318	1002	0.8	0.250	
50	0	18	46.2	182	364	0	759	923	0.6	－	0.050
	15		47.0	176	352	139	667	923	0.6		0.050
	30		47.3	174	348	281	555	923	0.6		0.050
	45		47.8	170	340	431	445	923	0.6		0.075
	60		50.0	174	348	595	335	923	0.7		0.100

- ふるい分け試験は、以下の目的で実施する。
- ① 骨材の粒度、粗粒率、骨材の最大寸法を求める。
 - ② コンクリート用骨材としての適否を判断する資料を得る。
 - ③ 骨材の品質管理に必要となる。

4.1 細骨材の密度および吸水率試験

FNSの密度がコンクリート細骨材としての品質を満たしているかについて確認するために、「JIS A 1109 細骨材の密度および吸水率試験方法」に準じて骨材試験を行った。図1に試験方法の手順を示す。

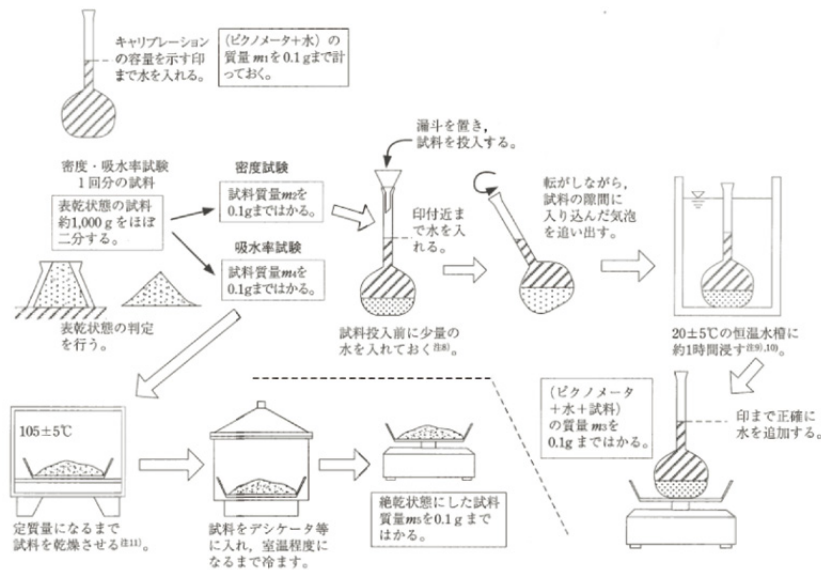


図1 密度試験・吸水率試験の手順⁽¹⁾

表3 FNSの比重・吸水率試験結果

試験項目		1回目	2回目
密度・吸水率	①水を満たしたフラスコの質量	(g) 1159.5	1160.1
	②密度試験用の試料の質量	(g) 500.0	500.0
	③(フラスコ+水+試料)の質量	(g) 1491.9	1492.6
	④試験温度による水の密度	(g/cm ³) 0.9982	
	⑤表乾密度②÷(①+②-③)×④	(g/cm ³) 2.98	2.98
	⑥平均値 [差≦0.01]	(g/cm ³) 2.98	
	⑦吸水率試験用試料の質量	(g) 500.0	500.0
	⑧乾燥後の試料の質量	(g) 497.6	497.7
	⑨吸水率 (⑦-⑧)÷⑧×100	(%) 0.48	0.46
	⑩平均値 [差≦0.05]	(%) 0.47	
	⑪絶乾密度 ⑤×(⑧÷⑦)	(g/cm ³) 2.97	2.97
	⑫平均値 [差≦0.01]	(g/cm ³) 2.97	
単重	容器中の試料の質量	(g) 3599.6	3608.7
	容器の容積 (1951.4)	(mℓ) 1958.6	1958.6
	単位容積質量	(kg/ℓ) 1.84	1.84
	平均値 [差≦0.01]	(kg/ℓ) 1.84	
微粒分量	①微粒分用の試料の質量	(g) 524.2	522.9
	②洗った後の乾燥質量	(g) 513.8	511.9
	微粒分量 (①-②)÷①×100	(%) 2.0	2.1
	平均値 [差≦0.5]	(%) 2.1	
備考	試験に用いた水の温度 水道水で 20.0℃=0.9982 (g/cm ³)		
塩分	Cl ⁻ (%)	0.0004	

表4 海砂の比重・吸水率試験結果

試験項目		1回目	2回目
密度・吸水率	①水を満たしたフラスコの質量	(g) 1159.6	1160.1
	②密度試験用の試料の質量	(g) 500.0	500.0
	③(フラスコ+水+試料)の質量	(g) 1461.5	1461.9
	④試験温度による水の密度	(g/cm ³) 0.9982	
	⑤表乾密度②÷(①+②-③)×④	(g/cm ³) 2.52	2.52
	⑥平均値 [差≦0.01]	(g/cm ³) 2.52	
	⑦吸水率試験用試料の質量	(g) 500.0	500.0
	⑧乾燥後の試料の質量	(g) 486.0	485.8
	⑨吸水率 (⑦-⑧)÷⑧×100	(%) 2.88	2.92
	⑩平均値 [差≦0.05]	(%) 2.90	
	⑪絶乾密度 ⑤×(⑧÷⑦)	(g/cm ³) 2.45	2.45
	⑫平均値 [差≦0.01]	(g/cm ³) 2.45	
単重	容器中の試料の質量	(g) 3004.9	3007.9
	容器の容積 (1951.4)	(mℓ) 1958.6	1958.6
	単位容積質量	(kg/ℓ) 1.53	1.54
	平均値 [差≦0.01]	(kg/ℓ) 1.54	
微粒分量	①微粒分用の試料の質量	(g) 523.9	523.0
	②洗った後の乾燥質量	(g) 502.8	501.5
	微粒分量 (①-②)÷①×100	(%) 4.0	4.1
	平均値 [差≦0.5]	(%) 4.1	
備考	試験に用いた水の温度 水道水で 20.0℃=0.9982 (g/cm ³)		
塩分	Cl ⁻ (%)	0.0020	

表3 および表4 に本試験で使用する FNS と海砂の密度 および吸水率試験結果をそれぞれ示す。表3 と表4 の試験結果を比較すると、海砂に比べて FNS の密度は大きく、吸水率は小さいことが明らかとなった。JIS A 5011-2 によると、FNS の絶乾密度の規格値は 2.7 g/cm^3 以上、吸水率の規格値は 3.0%以下であり、本試験結果から規格値を満足することを確認した。

4.2 細骨材のふるい分け試験

FNS の粒度分布がコンクリート細骨材として品質を満たしているか確認するために、「JIS A 1102 骨材のふるい分け試験方法」に準じて骨材試験を行った。図2 に試験方法の手順を示す。ふるい分け試験は各2 回行い平均値で評価した。

表5 および表6 に FNS と海砂のふるい分け試験結果を示す。粗粒率は海砂 2.35 に対して、FNS は 3.05 と大きな

値を示しており、粒径がやや粗いことを表している。ここで、粗粒率とは粒度を表す指標であり、この値が大きいほど粒径の大きな骨材が多いことを示し、小さいほど細かな粒子の割合が多いことを示している。

図3 および図4 に FNS と海砂の粒度分布を示す。上限粒度・下限粒度とは、JIS で規定された標準粒度曲線のことであり、この曲線の範囲内にあればコンクリート用細骨材として適している。図より、海砂は標準粒度曲線内にあるが、FNS は下限粒度を一部下回っていることから、FNS を単体で使用することは困難であるといえる。本研究では、海砂に対して FNS を 15%、30%、45%、60%置換した混合砂の粒度分布を計算により求めた。

図5～図8 に置換率 15%から 60%までの粒度分布をそれぞれ示す。図より、FNS と海砂を混合することで標準粒度曲線の範囲内に納まることが示された。

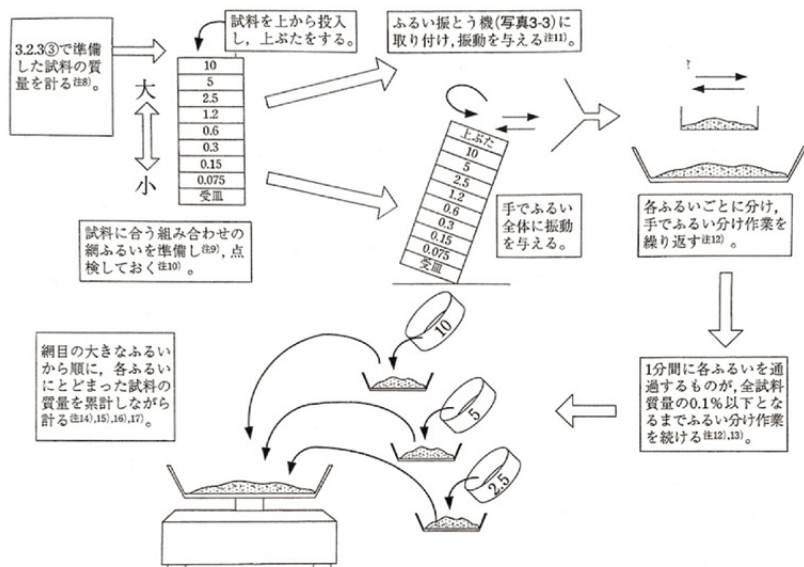


図2 ふるい分け試験の手順⁽¹⁾

表5 ふるい分け試験結果 (FNS)

ふるいの呼び 寸法(mm)	残留量		通過量 (%)
	(g)	(%)	
5.0	1.2	0	100
2.5	20.0	3	97
1.2	199.8	35	65
0.6	447.1	78	22
0.3	527.4	92	8
0.15	552.4	97	3
試料質量	572.9		
受け皿	571.9		±1%未満
粗粒率(FM)	3.05		

表6 ふるい分け試験結果 (海砂)

ふるいの呼び 寸法(mm)	残留量		通過量 (%)
	(g)	(%)	
5.0	11.3	2	98
2.5	45.1	8	92
1.2	101.1	19	81
0.6	220.2	41	59
0.3	390.6	73	27
0.15	494.1	92	8
試料質量	539.9		
受け皿	538.1		±1%未満
粗粒率(FM)	2.35		

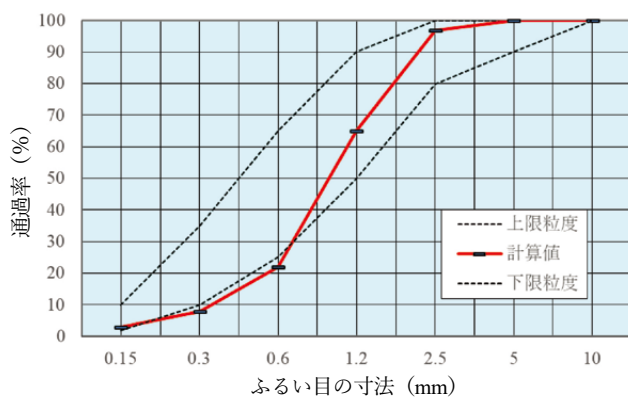


図3 粒度分布 (FNS)

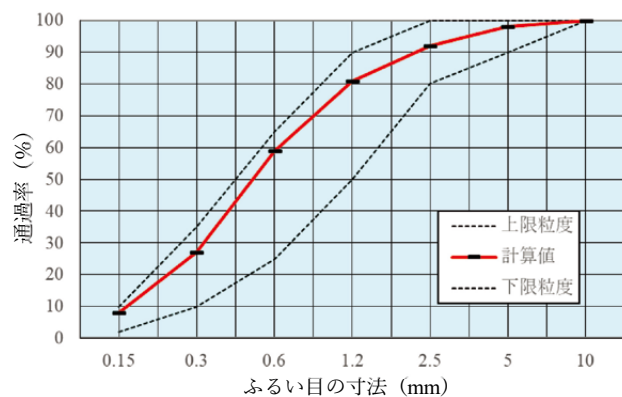


図4 粒度分布 (海砂)

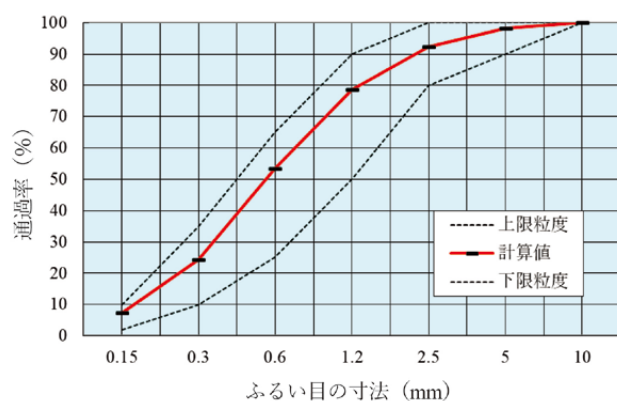


図5 粒度分布 (置換率 15%)

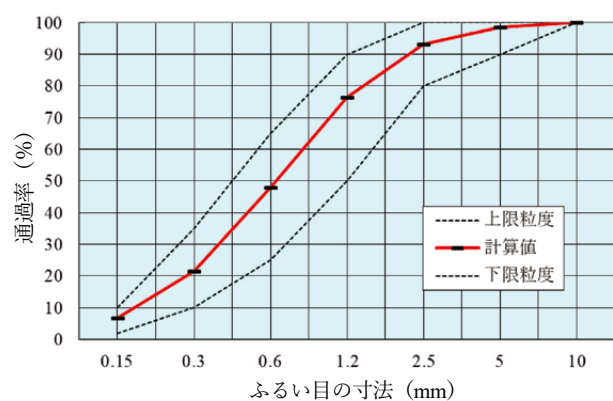


図6 粒度分布 (置換率 30%)

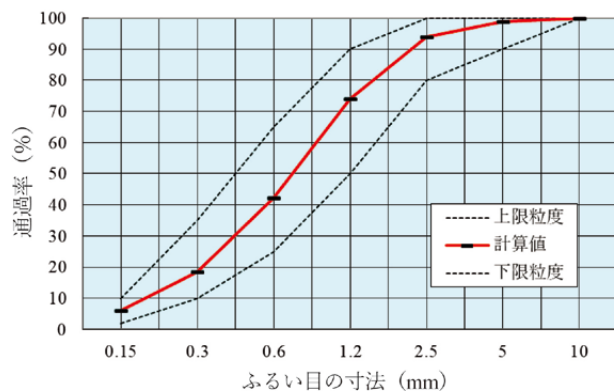


図7 粒度分布 (置換率 45%)

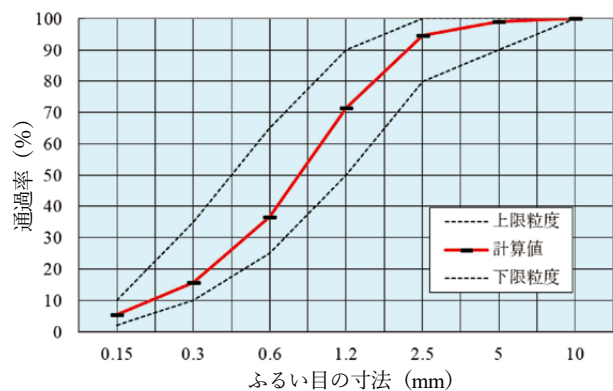


図8 粒度分布 (置換率 60%)

4.3 アルカリ骨材反応試験

本試験ではアルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張の有無を調べることを目的に、JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」に準じて試験を実施した。本試験方法の概要は以下のとおりである。

- ① 粒度調整を行った試料を用いて、水セメント比が 50% で、セメントのアルカリ量を水酸化ナトリウムの添加により 1.2%に調整した。

モルタルを用いて 40×40×100 mm のモルタルバーを作製する。

- ② モルタルバーを温度 40±2 °C、相対湿度 95%以上の条件下に 6 か月間保存した時の膨張量が 0.1%以上の骨材を「無害でない」とし、それ以外を「無害」と判定する。

図9にアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化過程を示す。アルカリ骨材反応とは、コンクリートの細孔溶液

中のアルカリ成分 (Na^+ や K^+) と、骨材中のアルカリ反応性鉱物との間の化学反応のことである。この反応生成物(アルカリシリカゲル)の吸水膨張に起因してコンクリートにひび割れが発生する。

本試験では、海砂に対して FNS 置換率 0%、15%、30%、45%、60%、100% の 6 水準および FNS 置換率 100% に高炉セメント B 種を使用したモルタルバーを作製した。

図 10 に試験結果を示す。FNS 置換率 15% から 100% まで、すべての供試体で膨張率 0.1% を超過することが示された。また、FNS 置換率 100% の試験結果を見ると、膨張率が 0.318% と最も大きな値を示した。

図 11 および図 12 にひび割れの状況を示す。本試験では、明確に膨張性ひび割れが観察された。なお、今回の試験結果からベシマム値 (アルカリシリカ反応による膨張率が最大となるときの反応性骨材の割合) は確認できなかった。高炉セメント B 種を使用した場合についての試験結果は、13 週で 0.012%、26 週で 0.018% と極めて小さい値を示しており、高炉セメント B 種を使用することで FNS が使用可能であることが示された。

5. フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの性質を調べる試験として、コンクリートのコンシステンシーやワーカビリティを判定するスランプ試験 (図 13) や空気量試験 (図 14) などがある。

本研究では、フレッシュコンクリートの材料分離の有無を調べる目的で、ブリーディング試験を実施した。試験方法は、日本コンクリート工学会規準「小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法 (JCI-S-015-2018)」に準拠した。測定は各配合について 2 回実施した。

ブリーディングとは、コンクリート打設後、コンクリート表面に水が浮き上がる現象のことであり、時間の経過とともに進行する。過度なブリーディングが生じると、セメント・骨材の下降によるコンクリートの均一性の低下、水密性および鉄筋の付着力の低下が生じる。

図 15 にブリーディング率と FNS 置換率の関係を示す。図中には単位水量と FNS 置換率との関係を併記している。図より、FNS 置換率が増加するとブリーディング率が低下する傾向にあることが分かる。一般にガラス質で吸水率が小さいスラグ系骨材の場合はブリーディング率が大きくなると言われているが、FNS を使用した場合、同一スランプに必要な単位水量が減少することから、ブリーディングの増加が相殺されたものと考えられる。以上のことから、FNS 置換によるブリーディングの増加はそれほど大きくならないことが予想される。

6. 硬化コンクリートの性質

本研究では、硬化コンクリートの特性として、圧縮強度

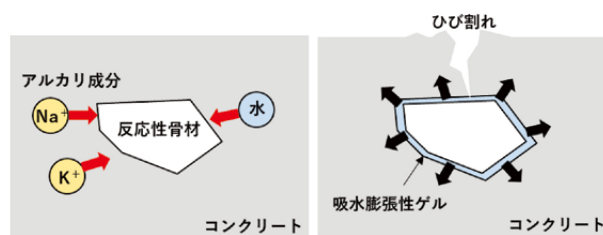


図9 アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化過程

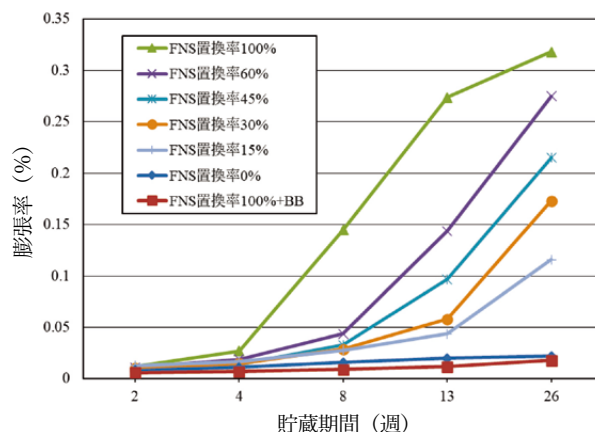


図10 アルカリ骨材反応性試験結果

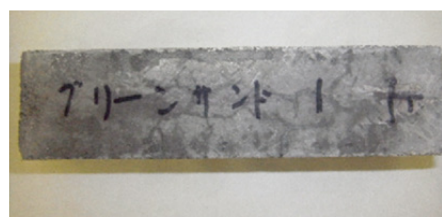


図11 ひび割れ状況 (13週)

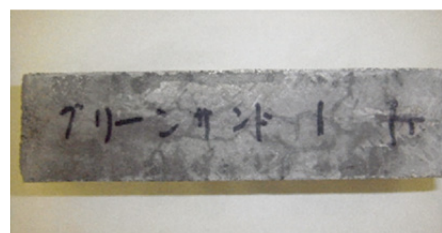


図12 ひび割れ状況 (26週)



図13 スランプ試験



図14 空気量試験

試験、静弾性係数試験、曲げ強度試験、長さ変化（乾燥収縮）試験を実施した。

6.1 圧縮強度試験・静弾性係数試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」、静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて実施した。

圧縮強度は、試験体に圧縮荷重を作用させ、最大荷重（破壊荷重）を試験体断面積で除すことによって求められる。また、静弾性係数は、圧縮応力度と圧縮ひずみ度の関係から、圧縮強度の 1/3 の点における応力度を、その点におけるひずみ度で除すことによって求めることができ、コンクリートの硬さの指標となる係数である。

図 16～図 19 に圧縮強度と静弾性係数の試験結果を示す。図 16～図 19 より、すべての配合について FNS 置換率が

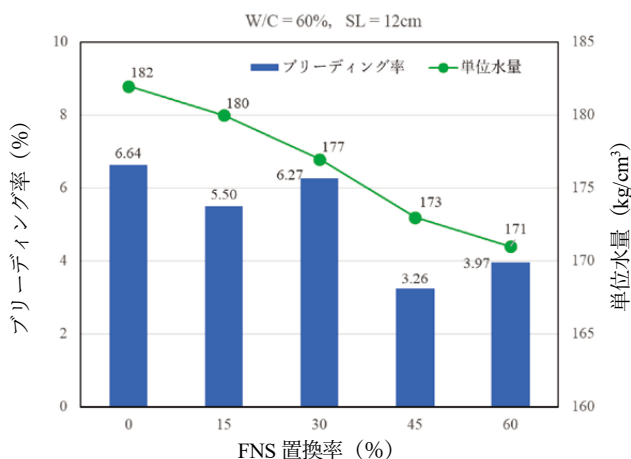


図 15 ブリーディング率と FNS 置換率の関係

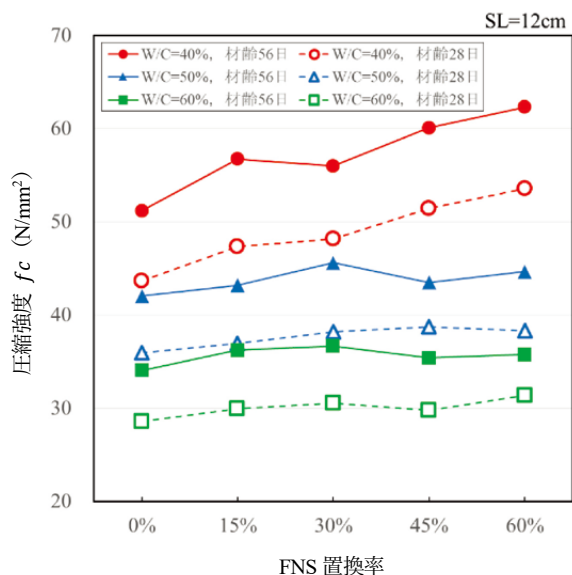


図 16 圧縮強度試験結果 (SL=12 cm)

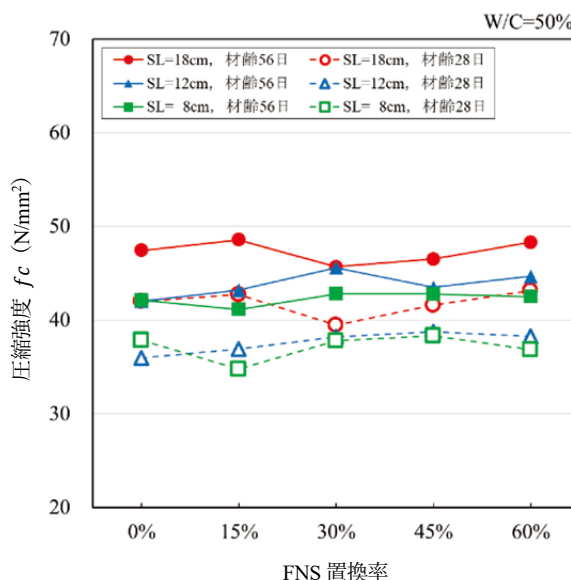


図 17 圧縮強度試験結果 (W/C=50%)

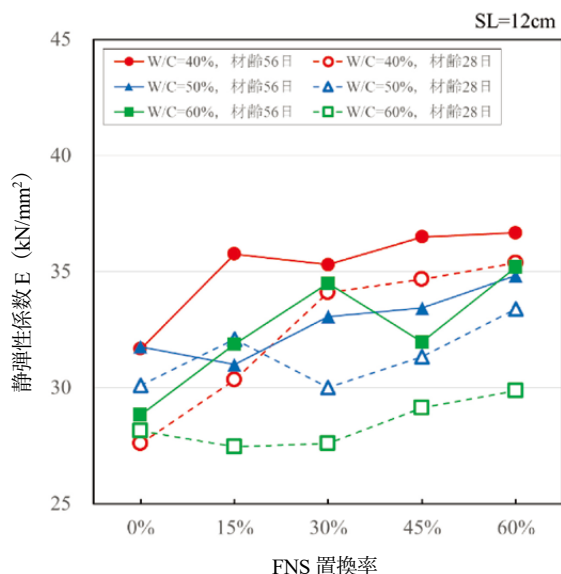


図 18 静弾性係数試験結果 (SL=12 cm)

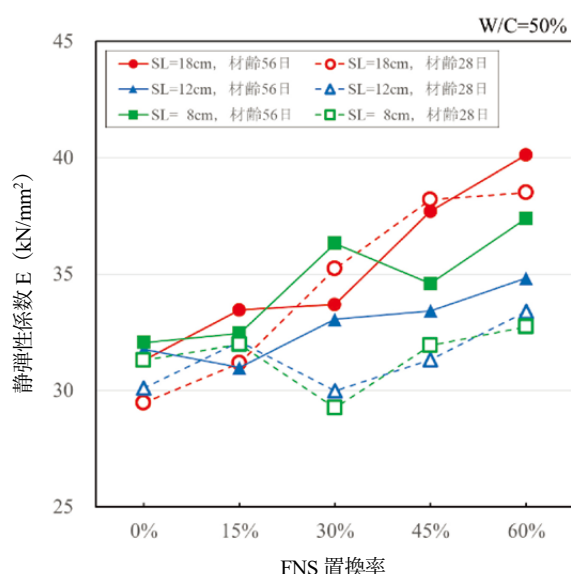


図 19 静弾性係数試験結果 (W/C=50%)

きくなると圧縮強度が増加する傾向にあることが明らかとなった。また、静弾性係数も同様に FNS 置換率が大きくなると増加する傾向が示された。この理由として、FNS は天然の海砂に比べて密度が大きく硬質であるため、静弾性係数も圧縮強度と同様に増加するものと考えられる。

図 20 に土木学会示方書⁽²⁾に示されている規準式によるコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中に示す ρ は、コンクリートの密度を表しており、今回の実験に供したコンクリートの密度は 2.30 g/cm^3 から 2.35 g/cm^3 の間であった。図中に今回の測定値をプロットしているが、圧縮強度と静弾性係数に高い相関が認められる。

図 21 に日本建築学会建築工事標準仕様書⁽³⁾に示されている規準式によるコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の

関係を示す。図中に示す γ はコンクリートの密度を表しており、同様に測定値をプロットした。図より、測定値は計算値をやや上回っているが、安全側の評価を示していることが分かる。また、これらの図を見ると FNS 置換率が高い配合では、圧縮強度に比較して静弾性係数が大きくなる傾向を示している。

図 22 に上記 2 式による実験値と計算値の比較を示す。図より、土木学会規準式は、実験値と計算値に妥当な一致を示していることが分かる。これに対して、日本建築学会規準式による計算値は、実験値を下回る傾向が示された。

6.2 曲げ強度試験

図 23 に曲げ強度試験結果を示す。今回の曲げ強度試験には、長さ変化試験に供した $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ の

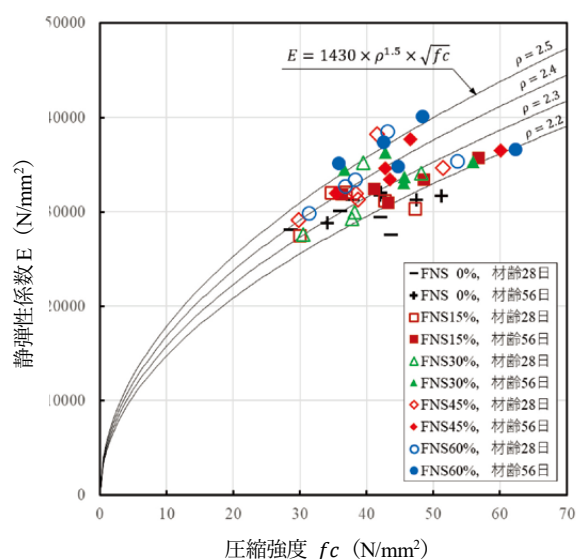


図 20 圧縮強度と静弾性係数の関係
(土木学会規準式)

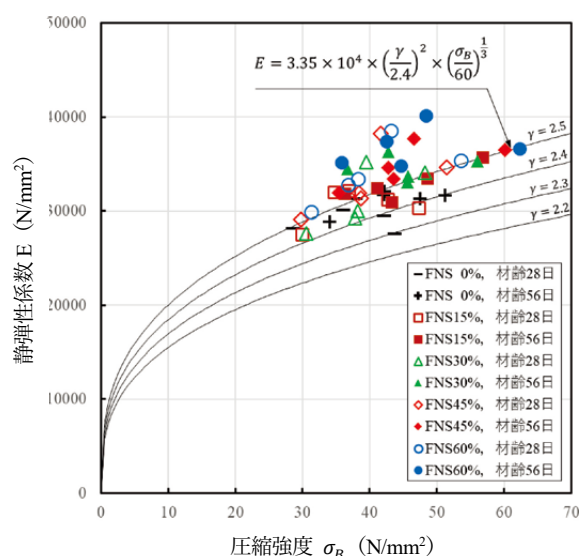


図 21 圧縮強度と静弾性係数の関係
(日本建築学会規準式)

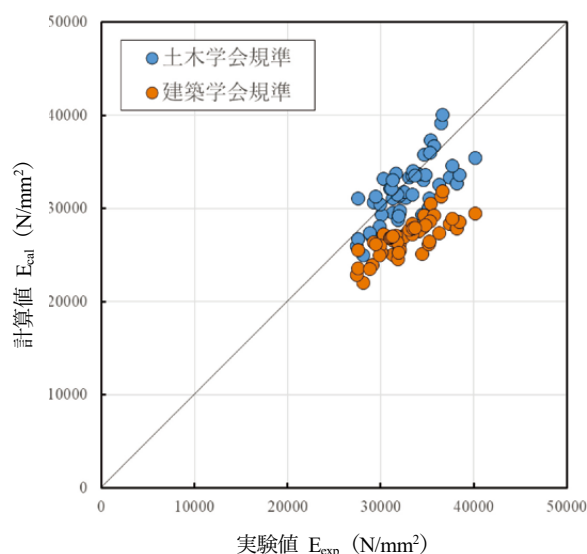


図 22 実験値と計算値の比較

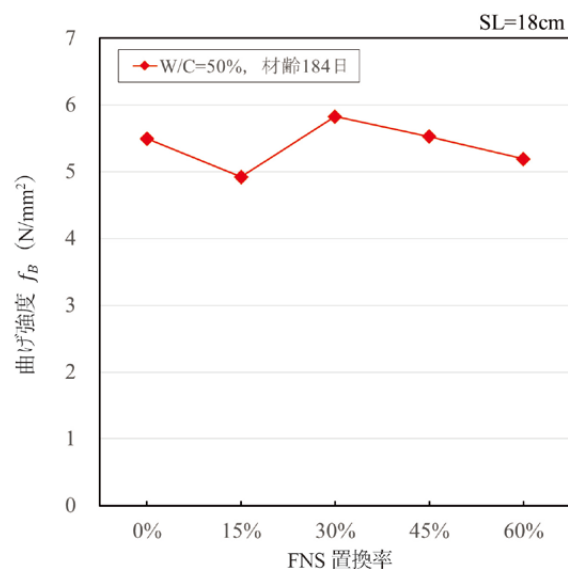


図 23 曲げ強度試験結果

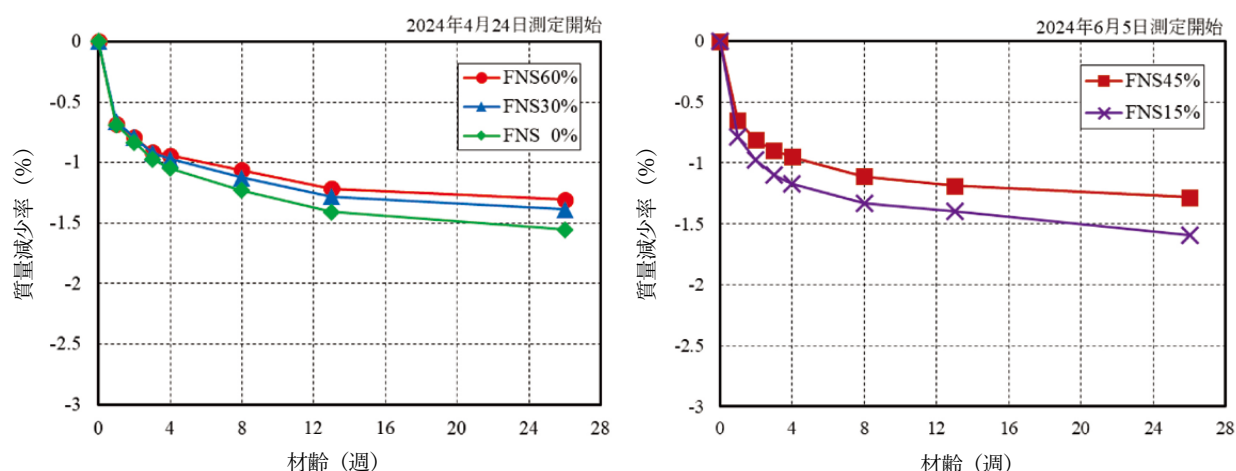


図 24 質量減少率と乾燥材齢の関係

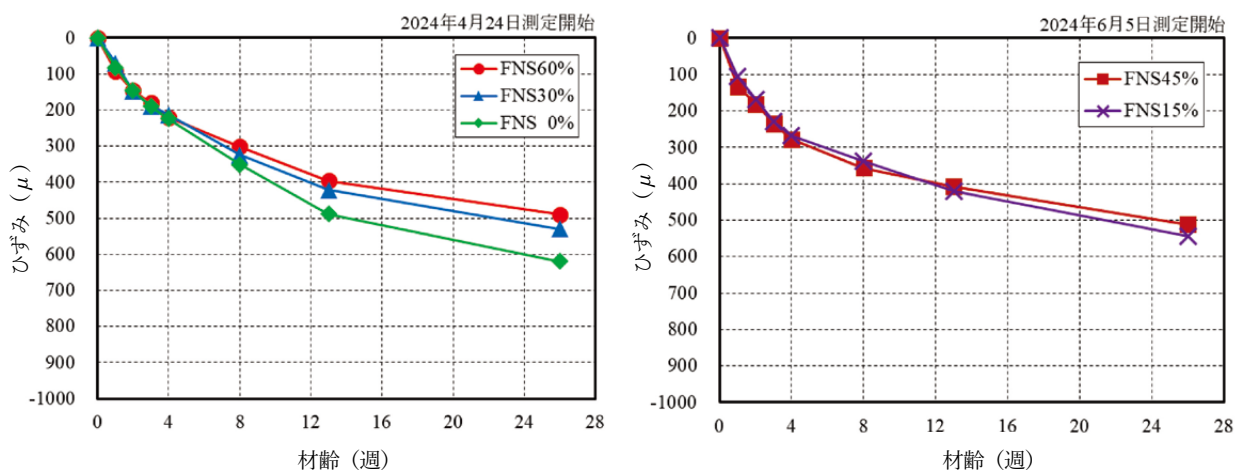


図 25 乾燥収縮ひずみの測定結果

角柱供試体を使用したため、材齢は 182 日超である。また、配合は水セメント比 50%、スランプ 18 cm、FNS 置換率 0%、15%、30%、45%、60% の 5 種類であり、各 3 本曲げ破壊試験を実施した。図より、FNS 置換率 30% の供試体が 5.83 N/mm^2 と最も高い値となった。一方、FNS 置換率 15% の供試体は、 4.92 N/mm^2 と最も低い値を示している。今回の実験結果から、スランプ 18 cm、水セメント比 50% の配合 1 種類のための結果ではあるが、FNS 置換による曲げ強度の増加は認められなかった。

6.3 長さ変化（乾燥収縮）試験

FNS を細骨材として使用するためには、コンクリートの乾燥収縮特性を調べる必要がある。乾燥収縮が大きいとひび割れのリスクが高まるため、本研究では JISA 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第 3 部：ダイヤルゲージ方法」に準じて乾燥収縮特性を調べた。

長さ変化試験には、断面幅 100 mm、断面高さ 100 mm、長さ 400 mm の角柱供試体を使用した。試験体の配合は、水セメント比 50%、スランプ 18 cm とした。この理由として、単位水量が最も大きいことから、乾燥収縮量も同様に

最も大きくなると予想されたからである。供試体は、圧縮強度試験体と同時に作製し、材齢 7 日まで標準養生を行った後、基長を測定し、温度 $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内で材齢 182 日までひずみを測定した。

図 24 に供試体の質量減少率と乾燥材齢の関係を示す。いずれの供試体についても、材齢が長くなるほど含有水分の逸散に伴う質量減少が認められる。配合別に比較して見ると、FNS 置換率が高いほど質量の減少量が小さくなっている。これは、FNS の吸水率が海砂に比べて小さいため、水分蒸発量が減少することに起因していると考えられる。

図 25 に乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。図より乾燥材齢が長くなるほど乾燥収縮ひずみが増加していることが分かる。配合別に比較してみると、FNS 置換率が高いほど乾燥収縮ひずみの値が小さくなっていることが分かる。これは FNS が海砂よりも吸水率が小さいため、FNS 自身の収縮率が小さくなることに起因していると考えられる。

以上のことから、FNS を細骨材に使用することで、海砂を用いる場合よりも乾燥収縮ひずみを減少させることがで

き、コンクリートの耐久性を向上させることができると考えられる。

7. まとめ

- 1) 骨材試験の結果、FNS はコンクリート細骨材としての基準を満たしていた。
- 2) アルカリ骨材反応試験の結果、FNS は「無害でない」と判定されたが、高炉セメント B 種を使用することで FNS が使用可能であることが示された。
- 3) 圧縮強度試験結果から、海砂の一部を FNS に置換すると強度が増加する傾向が示され、全ての配合で強度の低下は認められなかった。
- 4) 静弾性係数は、FNS の置換率が大きくなると増加傾向を示した。
- 5) 乾燥収縮ひずみ量は、FNS の置換率が大きくなると減少することが示された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)日向製錬所 総務部 業務課 古城みつる氏、赤城俊貴氏にはフェロニッケルスラグの試料提供をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

(令和 7 年 10 月 7 日受付)

(令和 7 年 10 月 27 日受理)

参考文献

-
- (1) 建設材料実験教育研究会編：「建設材料実験法」, pp.24-31, 鹿島出版会(2021).
 - (2) 土木学会編：「土木学会示方書（設計編）」, 土木学会(2012).
 - (3) 日本建築学会編：「鉄筋コンクリート工事標準仕様書（JASS 5）」, 日本建築学会(2022).