論文 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮抑制効果に関する実 験的研究

原品 武*1·今本 啓一*2·清原 千鶴*3·真野 孝次*4

要旨: 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮低減効果を明らかにすることを目的として, 強度特性, 自由収縮, 乾燥収縮ひび割れ実験を行い, 非鉄スラグ細骨材の使用がこれらの特性に及ぼす影響について検 討を行った。その結果, 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートは, 天然骨材を用いたものより, 収縮抑制効 果が高いことが明らかとなった。また, 非鉄スラグ細骨材の収縮抑制効果の要因として比表面積が小さいこ とおよび非鉄スラグ骨材の界面に形成される反応層体積と関係があることを示唆した。 キーワード: 非鉄スラグ細骨材, 乾燥収縮, 比表面積, SEM 写真

1. はじめに

良質なコンクリート用骨材の枯渇化が懸念されており,環 境保全の観点からも産業副産物を代替骨材として利用する ことが期待されている。非鉄金属を製錬する際に副生する非 鉄金属スラグ(以下,非鉄スラグ)はフェロニッケルスラグ(以 下, FNS),銅スラグ(以下, CUS)が産出されており,銅やニ ッケルの国際的な需要増加等を背景に産出量は増加傾向 にある。

非鉄スラグのコンクリート用骨材として, FNS (JISA5011-2) および CUS (JISA5011-3)が 1997 年に規格され, FNS およ び CUS は日本建築学会から設計施工指針^{1,2)}が制定されて いるが積極的に有効利用されていないのが現状である。一 方, 既往の研究では普通骨材の一部を FNS および CUS に 置換することで収縮低減効果が得られており³⁾, 非鉄スラグ 骨材をコンクリートの収縮低減材料として有効利用できる可 能性も考えられる.

そこで、本研究では非鉄スラグ細骨材の収縮抑制効果の 特性を把握するために、FNS および CUS を用いてモルタル 試験体およびコンクリート試験体を作製し、収縮低減効果に ついて検討を行った。

2. 非鉄スラグ骨材の特性

2.1 細骨材の特性

試料とした細骨材の物性を表-1に示す。非鉄スラグ細骨 材は FNS および CUS ともに製造工場の異なる 2 種類を使 用し、比較のために陸砂および砕砂を使用している。表中に は、収縮に影響を及ぼす物性値として、吸水率および比表 面積を示している。

骨材の比表面積測定においては、広範囲の相対圧力(5 ~99%)にわたって等温吸着曲線が得られる自動試験機 (Hydrosorb)を用いた。水分の移動を伴う乾燥収縮現象を取

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員) *2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員) *3 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託補手 博士(工学) (正会員) *4 (一財)建材試験センター (正会員)

表-1 使用した骨材の物性

骨材の種類	記号	最大粒径	表乾密度	吸水率	比表面積
		(mm)	(g/cm ³)	(%)	(m^2/g)
陸砂	PS	5.0	2.59	2.07	5.50
砕砂	CS	5.0	2.62	0.98	0.50
フェロニッケル	FNS(OS)	1.2	3.06	0.51	0.11
スラグ細骨材	FNS(HS)	5.0	3.02	2.05	0.20
銅スラグ細骨	CUS(MS)	2.5	3.49	0.30	0.01
材	CUS(SS)	2.5	3.50	0.68	0.15
砕石	CG	25.0	2.64	0.66	



図-1 骨材の粒度分布曲線



写真-1 骨材の形状

り扱うため,水蒸気を吸着質とした。比表面積は,試料を微 粉末にして105℃で乾燥した後,BET1点法により,相対圧力 が30%における吸着量から算定した。

使用した骨材の粒度分布を図-1 に示す。また, 1.2mm

ふるいに残った非鉄スラグ骨材の形状を写真-1 に示す。 これらによると, FNS は, MgO を 30%~35%含み普通骨 材に比べて密度が大きく, 球形に近い形状をしている。FNS (OS)は, 他の非鉄スラグ骨材よりも粒度が細かい。一方, CUS は, FeO を 43%~49%含み密度が大きく, 粒子形状は 角張っている。

表-1 に示すように吸水率については FNS(HS)を除いて CS より FNS および CUS の方が低い傾向が見られた。これ は、FNS および CUS 成分の中に S_iO₂のガラス質が多く含ま れており、また、マグネシウムや鉄分を含有しているので水 が骨材に吸収されにくいためと考えられる。比表面積は砕砂 と比較して FNS および CUS が小さく、製造工場が異なるとそ の値も異なっている。

3. モルタル実験

3.1 実験計画

本実験の調合を表-2 に示す。ここでは普通ポルトランド セメント(以下 OPC)を使用したシリーズ A, 高炉セメント B 種 (以下 BB)を使用したシリーズ B において非鉄スラグ骨材を 用いたモルタル試験体の収縮特性について検討を行った。 調合は, 水結合材比を50%とし, シリーズ A では, OPC:砕砂 =1:3(質量比), シリーズ B では BB:陸砂=1:2(質量比)とし た。非鉄スラグ細骨材の混合率については, シリーズ A では 100%とし, シリーズ B では 30,50 および 100%とした。また, BB を使用したシリーズ B においては, 既往の研究 ³⁾で夏期 を想定した環境温度 30℃において収縮ひび割れ特性が劣 ることが指摘されているこのことから, 環境条件を温度 30℃, 相対湿度 60%とした。

実験項目を表-3 に示す。試験体は ¢50×100mm の円 柱試験体を用い,収縮ひずみは埋め込みゲージにて測定し た。養生方法は,全て恒温室内(温度 20℃および 30℃)に て封緘養生を行い,材齢7日で脱型し,恒温恒湿室(温度 20℃および 30℃,相対湿度 60%)で気中養生とした。

3.2 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-4 に示す。フロー値は, CS および PS と比べて FNS(OS)以外,同程度かわずかに大 きくなった。FNS(OS)は,流動性が全く得られなかったため水



結合材比を55%とし,高性能AE減水剤をC×2%添加した。 図-1に示すようにFNS(OS)は,骨材径が小さいことが影響 していると考えられる。空気量は,CSおよびPSに比べ大きく なり,FNSおよびCUSは,空気を巻き込みやすいことがわか った。

3.3 強度特性

圧縮強度試験結果を図-2 および3に示す。シリーズA における FNS(OS)については、水結合材比を55%で作製し

-2 調合表 表 混合比 シリーズ 結合材:B 細骨材:S 7k:W 種類 比率 05 OPC 3 Α B 0.5 BB 2 OPC: 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³) BB: 高炉セメントB 種(密度 3.02g/cm³)

表-3 実験項目

実験項目	試験体寸法 (mm)	試験体数 (本)	測定開始 材齢 (日)	養生条件
フレッシュ性状	—	—	-	—
圧縮強度 (ヤング係数)	<i>ф</i> 50 × 100	3	28	7 日まで封緘 その後気中
乾燥収縮ひずみ	<i>φ</i> 50 × 100	2	7	7日まで封緘 その後気中

表-4 フレッシュ性状結果						
シリーズ	記号	セメント の種類	非鉄スラグ 細骨材 混合率 (%)	フロー値 (mm)	空気量 (%)	練り上がり 温度 (℃)
A	CS		0	149	2.5	19.5
	FNS(OS)		100	106	6.1	17.5
	FNS(HS)	OPC	100	166	3.0	20.1
	CUS(MS)		100	143	6.5	20.5
	CUS(SS)		100	172	5.9	20.2
	PS(OPC)	OPC	0	241	0.8	29.8
	PS(BB)	BB	0	214	2.0	28.6
	FNS(OS)	BB	30	186	2.7	29.9
			50	189	2.0	28.3
			100	166	2.4	27.9
	FNS(HS)	BB	30	223	2.3	28.4
Р			50	221	4.3	28.6
В			100	217	3.9	27.1
	CUS(MS)		30	213	1.6	28.6
		BB	50	235	4.1	28
			100	220	2.4	28.1
	CUS(SS)	BB	30	233	1.6	28.2
			50	239	2.4	28.2
			100	224	3.7	27.6



図-2 強度試験結果(シリーズA)





図-3 強度試験結果(シリーズB)



図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化(シリーズ A)

1000 乾燥収縮ひずみ (×10-⁶) 800 600 400 200 **30**% **50**% **100%** 0 PS FNS CUS CUS FNS OPC BB (0S) (HS) (MS) (SS)

図-5 乾燥期間 100 日の乾燥収縮ひずみ(シリーズ B)

表-5 コンクリートの調合 セメント W/B 細骨材の種類 混合率 単位量 (kg/m³) s/a シリーズ 記号 (%) 種類 S_1 (%) (%) W С S_1 S₂ CG S₂ 46.6 180 360 811 0 928 CS 0 FNS(OS)30% FNS(OS) 46.0 187 374 535 268 944 FNS(HS)30% FNS(HS) 47.8 180 360 568 281 928 С 50 OPC CS 30 CUS(MS)309 CUS(MS) 49.3 177 354 575 281 928 CUS(SS)30% CUS(SS) 49.7 175 350 582 281 928 FNS(HS)509 FNS(HS) 48.5 180 360 405 468 928 50 46. 7 174 348 806 0 936 PS 0 47.3170 340 411 486 936 -NS(OS)30% FNS(OS) 30 D FNS(HS)50% 50 BB PS FNS(HS) 50 45. 2 179 358 538 269 952 47.3170 340 576 333 936 CUS(MS)30% CUS(MS) 30 47.816633<u>2588341936</u> CUS(SS)30% CUS(SS)

表一6 実験項目					
実験項目	圧縮強度 (ヤング係数)	乾燥収縮ひずみ			
試験体寸法 (mm)	ϕ 100 × 200	100 × 100 × 400			
試験体数 (本)	3	2			
測定開始 材齢 (日)	7, 28, 91	7			
養生条件	7日まで封約	減その後気中			

たため,既往の文献⁴⁾の水結合材比と圧縮強度の関係より, 圧縮強度を補正した。非鉄スラグ細骨材を用いた場合,空 気量が増大したが,セメント種類の違いによらず FNS および CUS を使用したモルタル試験体の圧縮強度およびヤング係 数ともに, CS を使用したものと同等以上の強度発現が得ら れている。また,シリーズ B より混合率が増加するに従い圧 縮強度も増加している。

3.4 収縮特性

シリーズ A における乾燥収縮ひずみの経時変化を図-4 に示す。乾燥収縮ひずみは、CSと比較してFNSおよびCUS を用いた方が小さくなる。CS に対する乾燥収縮ひずみの低 減率は乾燥材齢 140 日時点において FNS(OS)で 12%およ び CUS(SS)で 29%低減している。

シリーズ B における乾燥収縮ひずみの測定結果を図-5 示す。乾燥収縮ひずみは、PS(BB)と比較して FNS および CUSを混合した方が小さくなっており、また混合率が高くなる ほど乾燥収縮ひずみは小さくなっている。PS(BB)に対する 乾燥収縮ひずみの低減率は、乾燥材齢100日時点におい て FNS(OS)100%で 15%および CUS(SS)100%で 52%低減 している。

以上の実験結果より,いずれのシリーズにおいても非 鉄スラグ細骨材を使用した場合,収縮低減効果が得られるこ とが確認できた。

4. コンクリート実験

4.1 実験計画

モルタル実験と同様にコンクリート実験においても OPC と BB を用いた 2 つのシリーズにて実験を行った。本実験の調 合を表-5 に示す。ここでは OPC を使用したシリーズ C, BB を使用したシリーズ D において非鉄スラグ骨材を用いたコン クリート試験体の収縮特性について検討を行った。水結合材 比はモルタル実験と同様の 50%とし、スランプ 18±2.5cm,空 気量 4.5±1.5%となるように試し練りを行い、調合を決定した。 また, FNS および CUS の混合率は 0, 30 および 50%とした。

実験項目を表-6 に示す。フレッシュ性状について、スラ ンプ試験は JIS A 1101, 空気量試験は JIS A 1128 に準じて 測定した。圧縮強度試験には、 ϕ 100×200mm の円柱試験 体を用い、材齢 7, 28 および 91 日において測定を行った。

乾燥収縮ひずみ試験には,100×100×400mmの角柱試 験体を用い、コンクリート内部に埋設した埋め込みゲージに てひずみの測定を行った。また、材齢7日で脱型し、 100×400mmの試験体側面2面を乾燥面とし、その他の面 をアルミ箔テープによりシールをして恒温恒湿室(シリーズ C では温度20℃、相対湿度60%、シリーズDでは温度30℃、 相対湿度60%)で気中養生とした。

4.2 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状について表-7 に示す。いず れのコンクリートにおいてもスランプは18.0±2.0cm, 空気量は 4.5±1%の範囲内にほぼ収まり, ワーカビリティは良好であっ た。また, 非鉄スラグ細骨材の種類によって同一のスランプ を得るために単位水量が異なっており, FNS(OS)では, CS および PS に比べて単位水量が大きくなり, CUS は単位水量 を低減できる結果となった。

4.3 強度特性

強度試験結果を図-6 および図-7 に示す。モルタル実 験と同様に FNS および CUS を用いたコンクリート試験体の

えー/ コンククードのフレクフェ圧状						
シリーズ	記号	AE 減水剤 (C×%)	空気量 調整剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り上がい 温度 (℃)
	CS	1.0	4A	19.5	4.6	23.4
	FNS(OS)30%		5.5A	19.7	4.7	23.9
	FNS(HS)30%		4A	19.7	4.6	24.2
	CUS(MS)30%		4A	19.6	4.8	23.2
	CUS(SS)30%		3A	19.5	4.1	23.1
	FNS(HS)50%		2.5A	19.6	4.5	24.4
D	PS	1.0	3A	19	4	30.3
	FNS(OS)30%	0.9	2A	20	4.9	29.9
	FNS(HS)50%	1.0	2A	20.5	5	29.8
	CUS(MS)30%	1.0	2A	19	3.5	30
	CUS(SS)30%	1.0	2.5A	20	4.7	30.4

テーフ コンクリートのフレッシュ性状

60 圧縮強度 (N/mm²) 40 20 ■7日(封緘) ■28日(気中) ■91日(気中) 0 40 **ヤング係数(KN/mm**5) 30 20 10 ■7日(封緘)■28日(気中)■91日(気中) 0 FNS (HS) CS FNS (0S) FNS (HS) CUS (MS) CUS (SS) 30% 30% 30% 50% 30% 図-6 圧縮強度試験結果(シリーズC)

圧縮強度およびヤング係数ともに、セメント種類によらず、いずれの材齢においても普通骨材を使用したものと同等以上の値となっている。また、FNS および CUS の混合率が増加するに従い、圧縮強度およびヤング係数が増加している。

4.4 収縮特性

乾燥収縮ひずみの測定結果を図-8 および 9 に示す。シ リーズ C の乾燥収縮ひずみは、CS を使用したコンクリートに 比べ非鉄スラグ細骨材を混合使用したコンクリートの方が小 さくなっている。FNS(HS)50%では、CS と比べて乾燥期間 182 日で 10%程度低減している。また、FNS(HS)では、混合 率が増加するに従い収縮が低減している。

シリーズDの乾燥収縮ひずみにおいてもPSを使用したコンクリートに比べ非鉄スラグ細骨材を混合使用したコンクリー



図-9 乾燥収縮ひずみの経時変化(シリーズD)

トの方が小さくなっている。FNS(HS)50%では, PS と比べて 乾燥期間56日で40%の乾燥収縮ひずみが低減している。

これらのことから、コンクリート試験体においてもモルタル 試験体と同様に、OPC および BB を使用したコンクリートにお いても,非鉄スラグ細骨材を混合することで,収縮低減効果 が得られ,収縮低減材として期待できることが示唆された。

5. 収縮低減効果の検証

上記の実験結果より,非鉄スラグ細骨材を混合することに よって収縮低減効果が確認できた。ここでは,非鉄スラグ細 骨材における収縮低減効果の要因について検証する。

5.1 骨材の物性値との関係

収縮に影響を及ぼす物性値として、表-1に示す吸水率、 比表面積について検討を行った。表-1 の骨材の特性と図 -4 に示すシリーズ A の乾燥収縮ひずみ(乾燥期間 60 日) の関係を図-10 および 11 に示す。FNS および CUS の吸水 率と乾燥収縮ひずみの関係では,相関がみられなかった。 FNS および CUS の比表面積と乾燥収縮ひずみの関係では、







図-11 比表面積と乾燥収縮ひずみ(シリーズ A)



図-12 FNS(HS)の SEM 写真

相関がみられ,比表面積が増加するに伴い乾燥収縮ひず みが増加していることが確認できた。既往の研究 5において も,比表面積が小さいほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向 にあることが示されており、非鉄スラグ細骨材は、砕砂(CS)と 比較して,比表面積が小さいことが,収縮低減効果の要因の 1 つであると考えられる。

5.2 骨材界面の状況

モルタル実験で作製したシリーズ A の材齢 270 日の試験 体を用い, SEM 写真撮影にて骨材界面の状況を観察した。 SEM 写真および元素分析スペクトルの一例を図-12, 13 お よび 14 に示す。なお, 図-12 中のスペクトルの番号は測定 の順番を示している。FNS(HS)は, SiO2と MgO が主成分で ある。図-13 におけるスペクトル 5 において Mg 量が多く, FNS(HS)の Mg が溶出しセメントペースト層と反応しているこ とが推測される。この傾向は図-12 中のスペクトル 3 および 4 でも同様である。一方, 図-14 におけるスペクトル6 では, Mg 量がスペクトル 5 より少なく,反応が弱いことが推測され る。そこで,ここでは, Mg のスペクトル量が減少した点とスペ クトル量が高い点の中間点を反応層として概略的に算出し た。その結果, FNS(HS)の反応層は約2µmと推定した。他の 試料においても同様にスペクトル図を比較することで反応層 の厚さを求めた(図-15)。

得られた反応層の厚さを用いて試験体中の反応層体積 率を以下の手順で算出した。非鉄スラグ細骨材を球体とし, 反応層の厚さは混合率に依存しないと仮定し,一定値として SEM 観察により得られた値を用いた。また、細骨材の粒径に は平均粒径を用いた。式(1)よりコンクリート試験体中の非鉄 スラグ細骨材 1 個の反応層体積(Vz)を算出し, コンクリート 試験体中の非鉄スラグ細骨材の個数は非鉄スラグ細骨材容 積比(ans)を用いた式(2)より求め、非鉄スラグ細骨材 1 個の 反応層体積と非鉄スラグ細骨材の個数を用いて式(3)より反 応層体積率(Rz)を求めた。

$$V_z = 4/3\pi (r_1^3 - r^3)$$
(1)

- $N = V_1 \times a_{ns}/V$ (2)
- $R_z = (V_z \times N/V_1) \times 100$ (3)







図-14 FNS(HS)のスペクトル 6

ここに, r:非鉄スラグ細骨材骨材の平均粒径/2(mm) r₁:非鉄スラグ細骨材骨材の平均粒径/2+

反応層長さ(mm)

a_{ns}:非鉄スラグ細骨材体積比 V:非鉄スラグ細骨材1個の体積(mm³) V1:試験体体積(mm³)

シリーズ C における非鉄スラグ細骨材の反応層体積率と 圧縮強度(材齢91日)の関係を図-16に示す。反応層体積 率が増加するに伴いコンクリートの圧縮強度が高くなる傾向 にあり、反応層体積率と圧縮強度の関係は相関が高い。 FNS(HS)50%が、CS と比べて 1.2 倍強度が高くなった要因 の1つに反応層の厚さが考えられる.

シリーズ C における非鉄スラグ細骨材の反応層体積率と 乾燥収縮ひずみ(乾燥期間26週)の関係を図-17に示す。 図に示されるように反応層体積率が増加するに伴いコンクリ ートの乾燥収縮ひずみが低くなる傾向にあり,反応層体積率 と乾燥収縮ひずみの関係は,相関がみられる。反応層体積 率が大きなものは,収縮ひずみが小さくなり収縮抑制効果が 大きいことが確認できた。これらのことから,非鉄スラグ細骨 材においては細骨材の比表面積とともに,細骨材界面の反 応層の形成が,コンクリートの収縮低減に寄与していることが 推察される。今後,細骨材界面構造の詳細な特性およびコ ンクリートのその他の特性について検討を進める必要がある。

6. 結論

本論文では,非鉄スラグ細骨材を使用したコンクリートの 収縮低減効果について検討を行った。その結果,普通骨材 を使用したモルタルおよびコンクリート試験体と比較して,以 下の知見が得られた。

- 普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントを用いたモル タルおよびコンクリート試験体に非鉄スラグ細骨材を混合 した場合,乾燥収縮低減効果が確認できた。
- 2) 細骨材の比表面積が小さいほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向にあり、普通骨材に比べて非鉄スラグ細骨材の 比表面積が小さいことが、収縮低減効果の要因の1つであると考えられる。
- 3) SEM 写真により非鉄スラグ細骨材界面に反応層が形成されていることが確認できた。また、非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度が高く、また乾燥収縮ひずみが低くなるのは、非鉄スラグ細骨材を用いることによる反応層の形成と関係していると考えられる。

謝辞

本研究は建築研究振興協会非鉄スラグ委員会(主査:阿 部道彦 工学院大学教授)の活動の一環として行ったもので あり,関係各位に感謝の意を表します。



参考文献

- 日本建築学会:フェロニッケルスラグ細骨材を用いるコンクリートの設計施工指針・同解説,1998.2
- 日本建築学会:銅スラグ細骨材を用いるコンクリートの 設計施工指針(案)・同解説, 1998.3
- 3) 閑田徹志,百瀬晴基,依田和久,今本啓一:高炉セメントB種の収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす各種要因の影響およびその向上対策に関する実験検討,日本建築学会構造系論文集第695号,p9-18,2014.1
- 4) 杉山秋博,飯坂武男,吉田弥智:高温養生下におけるモルタルの強度と水セメント比の関係について, 土木学会第43回年次学術講演会,Vol.231,pp.510-511, 1988.10
- 5) 今本啓一,石井寿美江,荒井正直:各種骨材を用いた コンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響,日 本建築学会構造系論文集第606号, p9-14, 2006.8
- 6) 原品武,ほか:非鉄スラグ細骨材を使用したコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する実験的研究,第70回 セメント技術大会講演要旨,pp.162-163,2016