

論文 フェロニッケルスラグを骨材として用いたコンクリートの性質

依田彰彦*1・横室 隆*2

要旨：フェロニッケルスラグは、ニッケル鉱石からフェロニッケルを製錬採取する際に副産されるもので、我が国における発生量は年間 200 万トン程度といわれている。コンクリート用フェロニッケルスラグ細骨材の JIS 規格は、1992 年に制定され、1997 年に一部改定された。本実験研究はスラグ骨材を用いたコンクリートの基本的な性質を主に究明したものである。細骨材には JIS に定められている電気炉風砕砂 (FNS5-0.3 A) に川砂を混合したもの、及び川砂単独品を使用し、粗骨材には粒度調整した電気炉徐冷品を用いた。その結果、フェロニッケルスラグはコンクリート用骨材として使用できることが確認された。
キーワード：フェロニッケルスラグ、骨材、コンクリートの性質、天然資源の枯渇化解消。

1. はじめに

本実験研究はコンクリート用天然骨材の枯渇化の解消を、少しでも解決することを目的として、JIS A 5011-2 : 1997 に適合する FNS5-0.3 A の電気炉風砕砂(写真

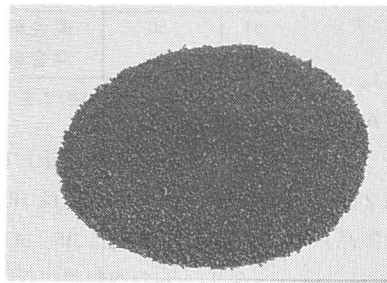


写真1 電気炉風砕砂 5-0.3 A

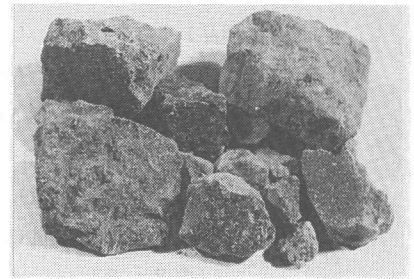


写真2 電気炉徐冷粗骨材

表2 使用骨材の品質

骨材	種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	ふるいを通るものの質量百分率 (%)										粗粒率または最大寸法 (mm)
						ふるい目 (mm)										
						25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材	川砂	2.61	1.7	1.65	62.6	—	—	—	—	100	91	70	41	17	5	2.76
	電気炉風砕砂	2.75	1.0	1.75	64.8	—	—	—	—	100	86	70	33	15	5	2.91
	混合砂 ^{*3}	2.69	1.3	1.71	63.9	—	—	—	—	100	88	70	36	15	6	2.85
	JASS 5 規定	2.5 以上	3.5 以下	—	—	—	—	—	100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15	—
粗骨材	川砂利	2.56	2.3	1.69	65.1	100	80	59	27	9	—	—	—	—	—	25
	電気炉徐冷粗骨材	2.84	1.9	1.63	57.3	96	62	39	2	0	—	—	—	—	—	25
	JASS 5 規定	2.5 以上	3.0 以下	—	—	90~100	—	30~70	—	0~10	0~5	—	—	—	—	—

[注] *3 電気炉風砕砂 FNS5-0.3 A が 60%、川砂が 40% (質量)。

*1 足利工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*2 足利工業大学助教授 工学部建築学科 (正会員)

1及び表2～3)に鬼怒川砂を混合したものを細骨材とした場合の他に川砂単独と、熔融状態のフェロニッケルスラグを大気中で徐冷し、最大寸法25mmに粒度調整したもの(写真2及び表2～3)を粗骨材として用いたコンクリートの基本的な性質に加えてフェロニッケルスラグの特長と考えられる耐熱性についても究明した。

なお、比較のために鬼怒川産骨材を用いたコンクリートについても実施し、検討に供した。

2. 使用材料

本実験研究に用いた材料は下記(1)～(5)に示すもので、これらはJASS 5の品質規定値をすべて満足している。

- (1) セメント：普通ポルトランドセメント(M社製品)(表1)。
- (2) 細骨材：川砂(鬼怒川産)(表2)。
電気炉風砕砂 FNS 5-0.3 A (T社製品)(表2～3)。
- (3) 粗骨材：川砂利(鬼怒川産)(表2)。
電気炉徐冷粗骨材(T社製品)(表2～3)。
- (4) 練混ぜ水：飲料水((社)栃木県薬剤師検査センターの判定)
- (5) 化学混和剤：主成分がリグニンスルホン酸化合物及びポリオール複合体のAE減水剤標準形(Pz社製品)。

3. 実験計画

実験に供した骨材の組合せとコンクリートのW/C及び調合Noを表4に示す。

3.1 目標としたコンクリートの調合

- (1) 水セメント比：50, 60%
- (2) スランプ：18～20cm
- (3) 空気量：4.0 ± 0.5%

3.2 実験の項目と方法

- (1) スランプ：JIS A 1101(コンクリー

表1 使用セメントの主な品質

ig.loss (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Cl ⁻ (%)	
1.8	1.7	2.0	0.005	
密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	圧縮強度 (N/mm ²)		
		3日	7日	28日
3.16	3230	15.1	24.8	41.9

表3 フェロニッケルの化学分析*4結果(%)

種類	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Ni	MgO	CaO	S
電気炉風砕砂	51.6	2.2	7.1	0.1	35.3	1.6	0.05
電気炉徐冷粗骨材	53.8	2.2	3.7	0.1	37.6	1.3	0.05

[注] *4 分析方法は原子吸光法によった。

表4 骨材の組合せとコンクリートの調合No

No	W/C (%)	細骨材	粗骨材
11	50	川砂	川砂利
12	60	川砂	川砂利
41	50	川砂	電気炉徐冷粗骨材
42	60	川砂	電気炉徐冷粗骨材
51	50	混合砂*5	電気炉徐冷粗骨材
52	60	混合砂*5	電気炉徐冷粗骨材

[注] *5 表2の脚注*3を参照されたい。

トのスランプ試験方法)によった。フレッシュコンクリートの温度は18～22℃である。

(2) 空気量：JIS A 1128(フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法)によった。フレッシュコンクリートの温度は18～22℃である。

(3) ワークビリティ：スランプしたコンクリートの形状やこれをタッピングしたときのくずれ方などを目視によって判断した。

(4) プリーディング量：JIS A 1123(コンクリートのプリーディング試験方法)によった。フレッシュコンクリートの温度は18～22℃である。

(5) 圧縮強度：直径10cmの供試体を用い、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)によった。養生は20℃水中とした。併せて温度180℃のオートクレーブに4時間入れ、ポップアウトの発生の有無も試験した。

(6) 静弾性係数：圧縮強度試験時にコンプレッションメーターを用いて縦の歪を測定し、最大圧縮荷重の1/3の点における割線静弾性係数を

算出した。

(7) 乾燥収縮率：長さは JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法) のコンパレーター方法、質量は 0.1 g まで測定できる天秤によってそれぞれ測定し、乾燥収縮率と気乾単位容積質量を算出した。なお、基長は材齢 1 週とした。供試体は 10 × 10 × 40cm の角柱状で初期養生実施後は 20 °C・60 % 室に保存した。

(8) 凍結融解作用に対する抵抗性：ASTM C 666 (Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing) によって 300 回まで、くり返したときの相対動弾性係数を算出した。供試体は 10 × 10 × 40cm の角柱状である。

(9) 中性化深さ：温度 20 °C・湿度 60 %・CO₂ 濃度 0.15 % 室に放置していた供試体を材齢 130 週において折り、その折った面を清掃した後、1 % のフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して紫赤色にならなかった部分を中性化したものと判断し、mm 単位のスケールを用いて平均中性化深さを求めた。供試体は 10 × 10 × 40cm の角柱状である。

(10) 耐熱性：直径 10cm の供試体を用い、初期養生 (20 °C 水中) は材齢 1 週まで行い、材齢 4 週まで温度 20 °C・湿度 80 % の室に放置した。その後 100 °C、200 °C、300 °C の電気乾燥炉中へ材齢 4 週から 26 週間さらした。なお、昇降温勾配は 0.5 °C/hr と緩やかにした。耐熱性は同一期間 (26 週間) 20 ± 2 °C 水中養生した場合の圧縮強度及び静弾性係数を 100 とした場合の圧縮強度比及び静弾性係数比で示した。

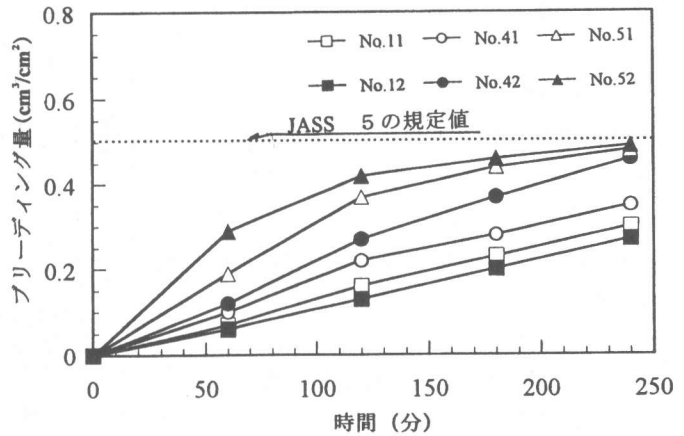


図1 ブリーディング量

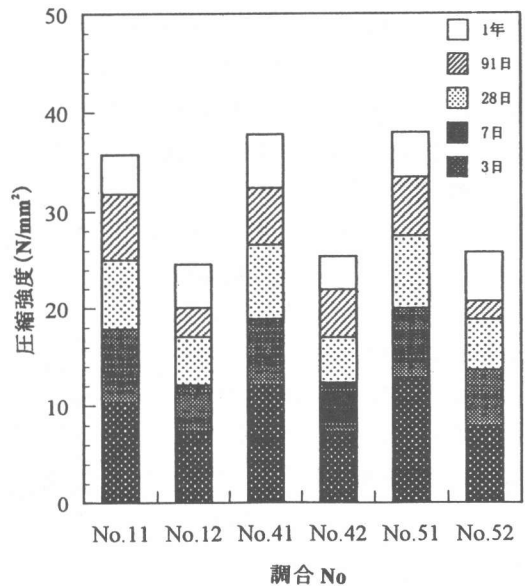


図2 圧縮強度

3.3 コンクリートの練り混ぜ、その他の試験条件

a. コンクリートは JIS A 1138 (試験室におけるコンクリートの作り方) によって 1992 年 5 月 13 日 (水) に練り混ぜた。ミキサは容量 0.1m³ の強制攪拌ミキサを用い、骨材は表乾状態とした。

b. 供試体は JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) に準じて作った。

4. 実験結果と検討

実験結果を表5～6及び図1～4に示して検討する。

(1) ワーカビリティ

打ち込んだ6種類のコンクリートには、すべて一定量の化学混和剤を用いた。その結果、所要のスランブ・空気量が得られ、ワーカビリティは、いずれも良好であった(表5)。

(2) 最終ブリーディング量

いずれのコンクリートも $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下で、JASS 5の品質目標値¹⁾を満足する(図1)。

(3) 圧縮強度

20℃水中養生した円柱供試体(10Φ×20cm)の圧縮強度は図2に示した通りで、同一のW/Cで比較すると川砂・川砂利コンクリートに比べて混合砂・電気炉徐冷粗骨材コンクリート(NO.51, 52)の圧縮強度が最も大きく、次いで川砂・電気炉徐冷粗骨材コンクリート(NO.41, 42)の順であり、フェロニッケルスラグを骨材として用いたコンクリートの圧縮強度は川砂・川砂利コンクリートより若干上廻る結果を得た。また、併せて材齢ごとに、供試体をオートクレーブへ入れてポップアウトの発生の有無を観察したが²⁾、いずれのコンクリートも発生は認められなかった。

(4) 静弾性係数

20℃水中養生した静弾性係数と圧縮強度との関係を図3に示す通り日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説図5.2で提唱している式³⁾を全て満足している。

(5) 乾燥収縮率

乾燥収縮率は図4に示した通りでJASS 5において目標としている乾燥期間26週間で 8×10^{-4} 以下¹⁾を満足している。また、材齢130

表5 実際に得られたコンクリートの調合

*6 No	W/C (%)	スランブ (cm)	s/a (%)	空気量 (%)	単水量 (kg/m ³)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	ワーカビリティ
11	50	19.0	37.3	3.9	156	0.67	良
12	60	18.0	42.2	4.2	163	0.62	良
41	50	19.0	40.2	4.4	158	0.67	良
42	60	19.5	44.9	3.9	165	0.62	良
51	50	20.0	38.5	4.2	158	0.67	良
52	60	20.0	43.3	4.2	165	0.62	良

[注] *6 調合Noは表4を参照されたい。

表6 材齢130週における気乾単位容積質量と中性化深さ

*6 No	W/C (%)	気乾単位容積質量 (t/m ³)	平均中性化深さ (mm)	参考 (N/mm ²)	
				曲げ強度	圧縮強度
11	50	2.19	2.2	3.9	37.7
12	60	2.18	4.9	3.4	27.3
41	50	2.25	2.2	4.4	38.7
42	60	2.22	4.8	4.0	28.7
51	50	2.34	2.2	4.7	40.6
52	60	2.32	4.9	4.3	29.8

[注] *6 調合Noは表4を参照されたい。

表7 耐熱性 (26週間)

*6 No	W/C (%)	20℃水中養生		圧縮強度比*7			静弾性係数比*7		
		圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	100℃	200℃	300℃	100℃	200℃	300℃
11	50	32.9	27	86	67	53	64	50	29
12	60	22.5	25	83	63	53	59	45	31
41	50	34.9	28	90	76	62	64	51	34
42	60	22.8	25	87	71	61	60	46	31
51	50	35.2	29	93	76	65	65	52	37
52	60	24.8	26	96	78	67	60	46	34

[注] *6 調合Noは表4を参照されたい。

*7 20℃水中養生を100とした場合の比で表した。

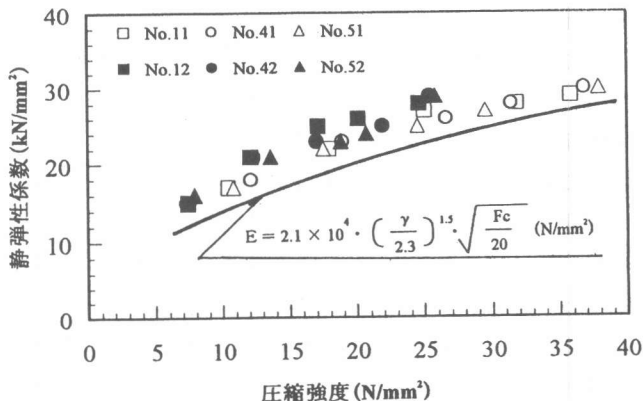


図3 圧縮強度と静弾性係数の関係

週の乾燥収縮率の傾向は次の通りである。混合砂・電気炉徐冷粗骨材コンクリート (No.51, 52) が最も小さく、次いで川砂・電気炉徐冷粗骨材コンクリート (No.41, 42) の順であり、比較用の川砂・川砂利コンクリート (No.11, 12) に比してフェロニッケルスラグを用いたコンクリートの乾燥収縮率は小さい。これはフェロニッケルスラグに含有されている MgO 及び FeO が多いためと考える (表 3)。

(6) 気乾単位容積質量

材齢 130 週の気乾単位容積質量は表 6 に示した通りフェロニッケルスラグ骨材の密度が河川系のものより若干大きいため 0.05 ~ 0.15t/m³ 程度重い⁴⁾⁵⁾。

(7) 凍結融解作用に対する抵抗性

実験結果を図 5 に示す通りいずれのコンクリートも JASS 5 において目標としている 300 サイクルで 70 % 以上⁶⁾を大きく上廻り満足している。

(8) 中性化深さ

材齢 130 週の中性化深さの結果を表 6 に示した通り W/C が大きいほど平均中性化深さは、当然のことだが大きい。また、コンクリートの種類による差は認められなかった。

(9) 耐熱性

26 週間 100℃, 200℃, 300℃の電気乾燥炉にさらした円柱供試体 (10Φ) の圧縮強度比と静弾性係数比を表 7 に示す。まず圧縮強度比を同一の W/C で見ると川砂・川砂利コンクリートに比して混合砂・電気炉徐冷粗骨材コンクリート (No.51, 52) と川砂・電気炉徐冷粗骨

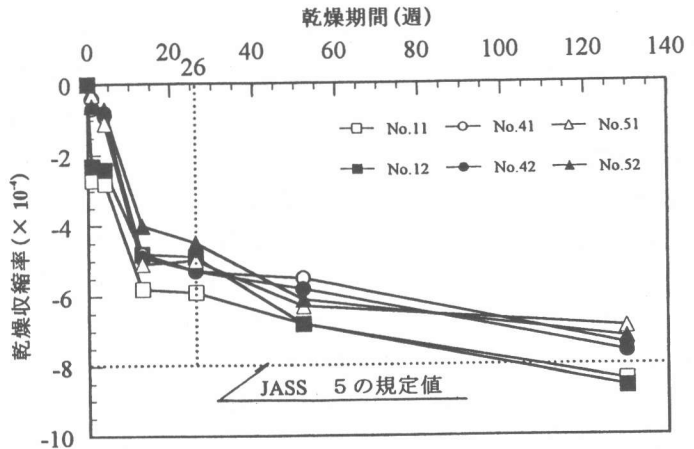


図 4 乾燥収縮率

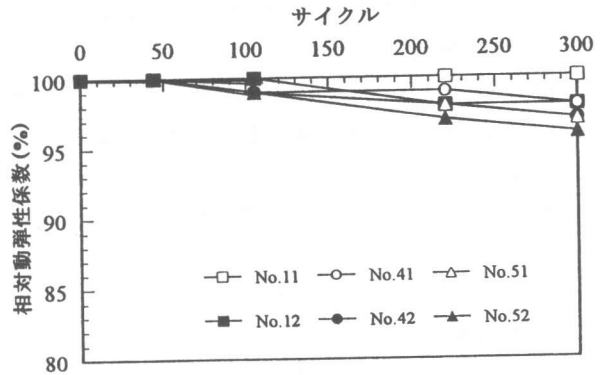


図 5 相対動弾性係数

材コンクリート (No.41, 42) の強度低下は小さい。また、温度別に見るとその低下率 (100℃から差し引いた値) は 100℃で 4 ~ 19%, 200℃で 23 ~ 29%, 300℃で 33 ~ 39% と高温になるほど低下は当然だが大きい。

次に、静弾性係数比を見ると、川砂・川砂利コンクリートに比して、フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの静弾性係数比の低下は同程度である。また、温度別に見るとその低下率は 100℃で 36 ~ 41%, 200℃で 48 ~ 55%, 300℃で 63 ~ 71% で、圧縮強度比と比較すると静弾性係数比のそれはかなり大きい。これは肉眼では確認できなかったが、高温のため

に微細なひび割れが供試体の内部に若干生じたためかと考える。

5. 結論

混合砂・電気炉徐冷粗骨材と川砂・電気炉徐冷粗骨材を組み合わせたコンクリートの性質について川砂・川砂利コンクリートと比較実験研究した結果、結論として次のことがいえよう。

- (1) フェロニッケルスラグを骨材としたコンクリートのワーカビリティは川砂・川砂利コンクリートと同じで、良好なものが得られる。
- (2) プリーディング量は JASS 5 の品質目標値を満足する。
- (3) 20℃水中養生した圧縮強度は比較した川砂・川砂利コンクリートより、いずれの材齢においても大きい。また、オートクレーブによるポップアウト現象は、いずれも認められない。
- (4) 静弾性係数は日本建築学会の提唱式を上廻る。
- (5) 乾燥収縮率は川砂・川砂利コンクリートより小さい上に、JASS 5 で目標としている値を満足する。これはフェロニッケルスラグが有する成分の影響によるものと考ええる。
- (6) 気乾単位容積質量は川砂・川砂利コンクリートより $0.05 \sim 0.15\text{t/m}^3$ 程度重い。
- (7) 300 回くり返した相対動弾性係数は、いずれも良好で、JASS 5 の品質目標値を大きく上廻る。
- (8) 材齢 130 週までの中性化深さは同程度である。

(9) 26 週間 100 ~ 300℃にさらした耐熱性は良好である。これはフェロニッケルスラグ骨材の熱膨張係数が小さいためと考える。

(10) 以上 (1) ~ (9) を総じるとフェロニッケルスラグはコンクリート用骨材として適している。気乾単位容積質量は若干重いですが、とくに乾燥収縮率及び耐熱性が有利であることが特長であると言えよう。

謝辞

本実験研究は、大太平洋金属㈱のご協力を得て実施したものである。ここに同社と実験にご協力頂いた多くの足利工大建築学科卒業生に対して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書，同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事解説表 2. 2, 1975, 1
- 2) 依田彰彦・横室 隆：フェロニッケルモルタルのポップアウトについて，日本建築学会大会学術講演梗概集，1991. 9
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 図 5. 2, 1988. 12
- 4) 横室 隆・依田彰彦：フェロニッケルスラグを細骨材として用いたコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集 Vol 15, No 1, 1993
- 5) 依田彰彦・横室 隆：フェロニッケルスラグ細骨材コンクリートの 10 年までの性質，第 20 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，1993. 11