

電気炉酸化スラグ細骨材を使用した高強度コンクリートの 材料性能検討

加藤 優志^{*1}・山本 佳城^{*1}・黒岩 秀介^{*1}

Keywords : high strength concrete, electric arc furnace oxidizing slag fine aggregate, L-type flow, mechanical properties, fire resistance, segregation resistance

高強度コンクリート, 電気炉酸化スラグ細骨材, L フロー, 力学物性, 耐火性, 材料分離抵抗性

1. はじめに

近年, 都市部において超高層建築物が増加している。超高層建築物のような高さと幅の比が大きい建築物では, 地震荷重による曲げ変形抑制のために下層階柱の軸剛性向上が望まれる。柱の軸剛性を向上する一つの方法として下層階柱に使用される高強度コンクリートのヤング係数を大きくすることが考えられ, 本検討では, 電気炉酸化スラグ細骨材の使用を検討した。同骨材は, 主に護岸コンクリートブロック¹⁾や放射線遮へいコンクリート²⁾にされており, 2003 年にはコンクリート用骨材として JIS A 5011-4 に規格化されている。使用によってコンクリート(実強度 30~80 N/mm²)の圧縮強度やヤング係数等の力学性能が向上することが報告されている¹⁻³⁾。また, 同骨材は鉄スクラップを原料とした製鋼過程で生じる副産物である。2023 年度の電気炉系スラグの生産量は約 2,700 千 t⁴⁾であり, 国内では近年, 脱炭素化に向けた取り組みとして製造の一部を高炉から電炉へ置き換える動きが進められ^{例えば 5)}, 将来的には電気炉系スラグの有効利用の要求が高まると想定される。一方で, 設計基準強度 80 N/mm²以上の高強度コンクリートに電気炉酸化スラグ細骨材を使用した検討はほとんどなく, 適用に向けては基礎的な材料物性を取得し, その影響を確認する必要がある。

本検討では, まず, 国内製造されている 2 種類の電気炉酸化スラグ細骨材を使用して高強度コンクリートの流動性, 力学物性, 耐火性(高温加熱後の強度)へ

の影響を検討し, 使用する電気炉酸化スラグ細骨材の種類を選定した。さらに, 選定した細骨材を用いて材料分離抵抗性を検討した。本報ではこれらの検討の一部を報告する。なお, 本報の詳細については既報⁶⁻⁸⁾にて報告している。

2. 流動性, 力学物性, 耐火性に関する検討

2.1 実験概要

2.1.1 使用材料および調合

使用材料の一覧を表-1 に示す。結合材には, 普通ポルトランドセメントにスラグセメント系混和材 (JASS 5 M-701) とシリカフュームを質量比 7:2:1 で混合した高強度用結合材 (B) を使用した。細骨材には, 一般に使用されている碎砂と山砂を質量比 1:1 とした混合砂 (NS) と, 前述した 2 種類の電気炉酸化スラグ細骨材 (ES, ESW) を使用した。ES と ESW の外観を写真-1 に示す。ES は溶融状態のスラグを冷却した後に, 破碎・分級の工程を経て製造される(徐冷)。ESW は溶融状態のスラグを高圧圧送された空気で吹き飛ばし, ミストで急冷・分級して製造される(急冷)。ESW の粒形は球状に近く, コンクリートの単位水量低減⁹⁾や粘性低減¹⁰⁾を目的に使用されている。本検討では, 高強度コンクリートのヤング係数向上に加え, 粘性低減によるポンプ圧送時の圧力損失低減を期待して ESW を使用した。粗骨材には比較的ヤング係数の高い岩種である石灰岩の碎石 2005 (LG) を使用した。細骨材の物

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 RC研究室

性の特徴として、ES と ESW の密度は NS の約 1.4 倍である。それぞれの細骨材の粒度曲線の比較を図-1 に示す。ESW は NS, ES よりも 1.2 mm 未満が少なく粗粒率が大きい。また、ES の粒度曲線は NS に近く、粗粒率はほぼ同じであった。化学混和剤は全ての調合において同じ種類の高性能減水剤 (AW), 空気量調整剤 (AD) を使用した。また、一部の調合では火災時の爆裂防止用にポリプロピレン短纖維 (PP) を使用した。

コンクリートの調合表を表-2 に示す。本検討では、水結合材比と細骨材種類を水準とし、調合を作製した。水結合材比 (W/B) は設計基準強度 80 N/mm² 以上を想定し、30, 20, 15 % の 3 水準とした。ES または ESW の混合率は、コンクリートのヤング係数を最大限高めるために 100 % とした。単位水量 (W) および単位粗骨材絶対容積 (Vg) は、それぞれ 150 kg/m³, 0.310 m³/m³ で一定とした。また、後述する高温加熱後の強度試験を行う W/B15 % の供試体では、PP を 2.2 kg/m³ 外割で添加した。

2.1.2 測定項目と実験手順

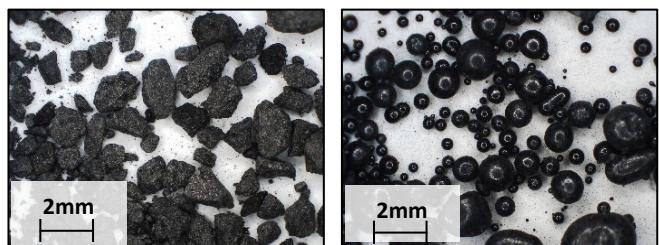
練混ぜは、水平二軸形強制練りミキサ (容量 55 L) を用い、モルタル先練りとした。PP を添加する調合では粗骨材と同時に PP を投入した。練混ぜ終了後、JIS A 1150 および JIS A 1128 に準拠してスランプフロー、空気量の測定を行った。スランプフロー、空気量が目標の範囲であり、材料分離が生じていないことを目視確認した後に、供試体を採取した。それぞれの調合に対する試験項目を表-2 に併せて示す。

流動性に関する検討として、L フロー初速度を測定した。L フロー初速度は、JSCE-F 514 (L 形フロー試験方法) に準拠して測定される L フローの変化をレーザー変位計によって測定し、L フローが 5 cm から 15 cm

表-1 使用材料

Table 1 Materials

記号	材料種類	物性等
B	高強度用結合材	密度 2.99 g/cm ³
NS	碎砂 (石灰岩) と山砂の混合砂	表乾密度 2.63 g/cm ³ 吸水率 1.15%, 微粒分量 1.4%
ES	5mm 電気炉酸化スラグ細骨材	表乾密度 3.84 g/cm ³ 吸水率 0.77%, 微粒分量 6.2%
ESW	5~0.3mm 電気炉酸化スラグ細骨材	表乾密度 3.59 g/cm ³ 吸水率 0.33%, 微粒分量 0.2%
LG	碎石 2005 (石灰岩)	表乾密度 2.68 g/cm ³ 吸水率 0.54%, 微粒分量 1.2%
PP	ポリプロピレン短纖維	密度 0.91 g/cm ³ , 長さ 10mm
AW	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系)	
AD	空気量調整剤	



(a) ES
(b) ESW
写真-1 電気炉酸化スラグ細骨材
Photo.1 Electric arc furnace oxidizing slag fine aggregate

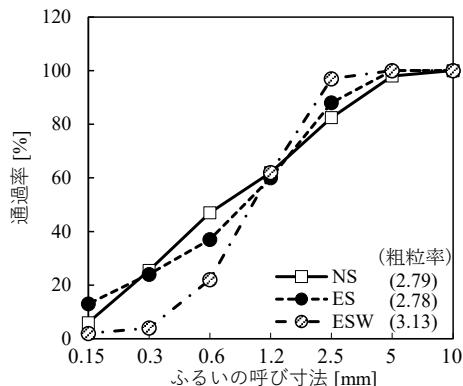


図-1 細骨材の粒度曲線

Fig.1 Particle size distribution of fine aggregate

表-2 調合表と試験項目
Table 2 Mix proportions and test items

調合 記号	調合表							試験項目*1						
	調合条件*2				単位量 [kg/m ³]			空気量 スランプ フロー [%]	L フロー 初速度	フレッシュコンクリート			硬化コンクリート	
	W/B [%]	Vg [m ³ /m ³]	空気量 [%]	スランプ フロー [cm]	W	B	細骨材			空気量 スランプ フロー	L フロー 初速度	圧縮 強度	ヤング 係数	高温加熱後 の強度
30N					930	—	—			○	○	○	○	—
30E	30				500	—	1355	—		○	○	○	○	—
30EW					—	—	1266			○	○	○	○	—
20N					710	—	—			○	○	○	○	—
20E	20	0.310	2.0	60.0	150	750	—	1034	—	○	○	○	○	—
20EW					—	—	966			○	○	○	○	—
15N					488	—	—			○	○	○	○	○*3
15E	15				1000	—	713	—		○	○	○	○	○*3
15EW					—	—	666			○	○	○	○	○*3

*1 ○: 実施, -: 未実施 *2 目標スランプフロー 60±10cm, 目標空気量 2.0±1.0%

*3 高温加熱後の圧縮強度試験を実施する調合のみ PP を 2.2kg/m³ 外割添加

までの平均速度として算出した。

力学物性に関する検討として、圧縮強度とヤング係数を測定した。供試体寸法は $\phi 100 \times 200$ mm とした。養生は 20 °C 水中養生とし、W/B15 % の調合ではポテンシャルの圧縮強度を確認する目的で 40 °C 水中養生も実施した¹¹⁾。試験材齢は全て 28 日とした。ヤング係数は JIS A 1149 に準拠して測定した。

耐火性に関する検討として、高温加熱後の強度を測定した。供試体寸法は $\phi 100 \times 200$ mm とし、封かん養生で材齢 91 日以降に測定した。最高温度は 200, 350, 450, 550 °C とし、昇温速度は 2 °C/min., 降温は自然冷却、最高温度保持時間は 3 時間とした。なお、事前の予備実験において、上記の条件で加熱した場合、供試体中心部と表面の温度は同程度となることを確認している。高温加熱後、供試体が室温と同程度になったことを確認してから、圧縮強度を測定した。

2.2 実験結果

2.2.1 スランプフロー、空気量、L フロー初速度

スランプフローと空気量の試験結果を表-3 に示す。

表-3 スランプフローと空気量

Table 3 Slump flow and air content

調合記号	AW 添加量 [B%]	スランプフロー [cm]	空気量 [%]
30N	0.90	60.0	1.3
30E	0.80	55.0	1.6
30EW	0.65	63.0	2.0
20N	0.90	65.0	1.3
20E	0.80	66.5	1.1
20EW	0.65	66.5	1.5
15N	1.40	64.5	2.2
15E	1.40	63.5	1.8
15EW	1.20	65.5	1.8
15N-PP*	2.00	61.5	2.1
15E-PP*	2.00	55.0	2.3
15EW-PP*	1.70	62.5	2.3

*PP 繊維を 2.2kg/m³ 外割添加

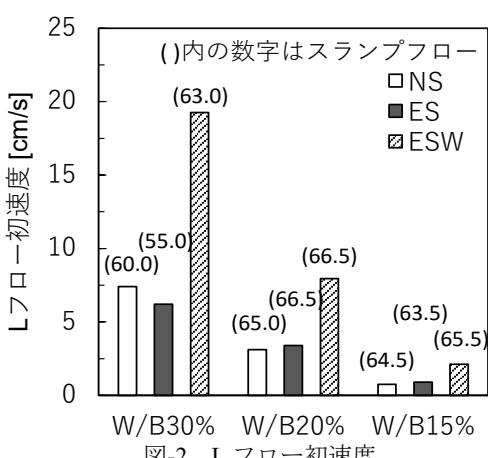


Fig.2 Initial velocity of L-type flow

スランプフロー、空気量は全ての調合で目標の範囲を満足した。ES を使用した調合の AW の添加量は NS と同程度であったが、ESW を使用した調合では少なくなる傾向が見られた。

L フロー初速度を図-2 に示す。同図には参考としてスランプフローの値を併記した。W/B が小さくなるほど結合材の量が増えることでコンクリートの粘性が増加し、L フロー初速度が遅くなる傾向が見られた。細骨材種類の影響について、NS と ES を使用した調合では L フロー初速度はほとんど変わらなかったが、ESW を使用した調合では速くなる傾向見られた。ESW の使用によって高強度コンクリートの粘性が低減され、ポンプ圧送時の圧力損失低減に有効であると推察された。

2.2.2 圧縮強度、ヤング係数

圧縮強度の試験結果を図-3 に示す。圧縮強度は W/B によらず、NS よりも ES を使用した調合の方が 10~20 % 程度大きくなった。圧縮強度が大きくなる要因としては、セメントペーストと細骨材の付着性の向上、細骨材自体の強度の影響等が考えられるが、詳細なメ

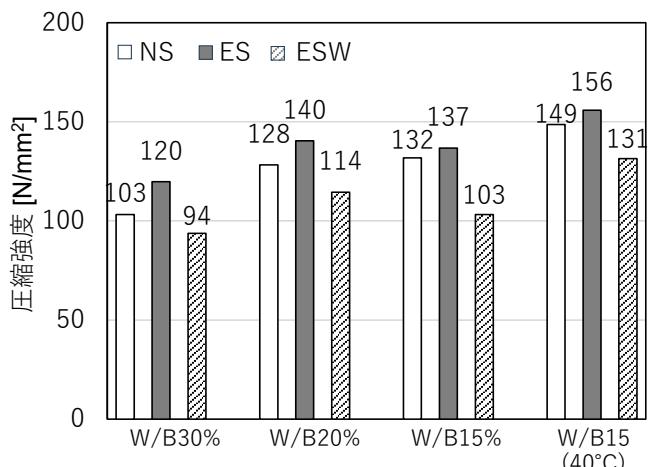


Fig.3 Compressive strength at 28-days

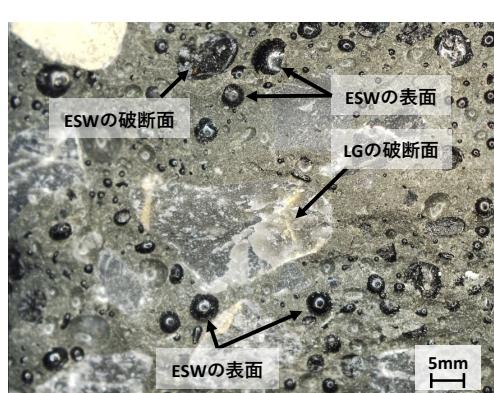


写真-2 圧縮試験後の 15EW (40°C) の破断面観察
Photo.2 Fracture surface of 15EW (40°C) after compressive test

カニズム解明については今後の課題とする。いずれにしても、ES の使用による圧縮強度の向上は、高強度コンクリート用の細骨材として ES が適していることを示唆している。ESW を使用した調合では NS を使用した調合よりも圧縮強度が小さくなる傾向が見られた。ここで、マイクロスコープを用いて ESW を使用した供試体 (15EW (40 °C)) の圧縮強度試験後の破断面を観察した (写真-2)。コンクリートの破断面には ESW の表面が確認でき、セメントペーストと ESW の境界面で破壊が生じていると推察された。このことから、ESW を使用した調合で圧縮強度が小さくなるのは、破碎の工程を経て製造される ES よりも ESW の形状が球状であるため、セメントペーストとの付着性が低下したことがあつた一つの要因と考えられた。

ヤング係数の試験結果を図-4 に示す。コンクリートのヤング係数は NS を使用した調合と比較して、ES の使用で最大約 20 %、ESW の使用で最大約 10 %大きくなつた。ES と ESW の骨材自体のヤング係数が NS よりも大きいことが要因と考えられた。また、W/B が大きいほど ES または ESW を使用した調合と NS を使用した調合のヤング係数の差は大きくなつた。本検討では、W と Vg を一定としており W/B が大きい調合ほど B の量が少なく、細骨材の量が多くなるためヤング係数の差が大きくなつたと考えられた。したがつて、コンクリートのヤング係数向上の観点で考えると、W/B が比較的大きい調合 (細骨材量が比較的多い調合) で ES または ESW を使用する方が有効と考えられた。

2.2.3 高温加熱後の強度

高温加熱後の強度を図-5、圧縮強度残存率を図-6 に示す。前述したように高温加熱後の強度試験を行う供試体では PP を添加しているため、凡例の末尾に-PP を記載して区別した。なお、試験時の供試体の材齢は 91 ~ 101 日であり、圧縮強度残存率は、20 °Cでの試験結果を基準にして、各加熱温度の試験結果との比で整理した。ESW の 200 °Cにおいて圧縮強度残存率がわずかに高い傾向が見られるが、ES または ESW を使用した調合の高温加熱後の圧縮強度残存率は NS を使用した調合とほとんど変わらず、高温加熱後の強度に与える影響は小さいと考えられた。

3. 材料分離抵抗性に関する検討

3.1 検討方針

2 章の結果から、ESW は高強度コンクリートの粘性低減に有効であるが、圧縮強度低下の可能性が示唆さ

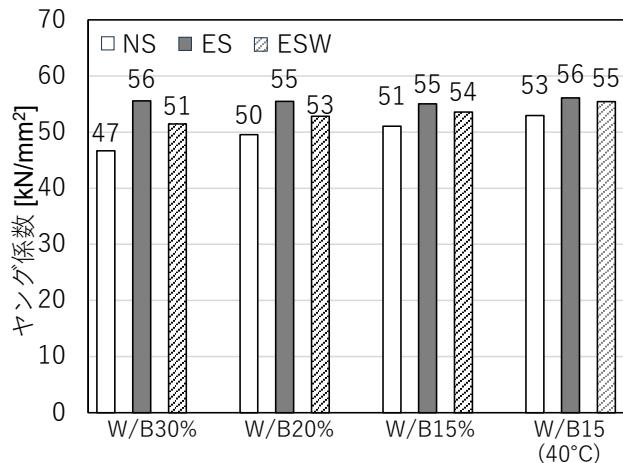


図-4 ヤング係数 (材齢 28 日)

Fig.4 Elastic modulus at 28-days

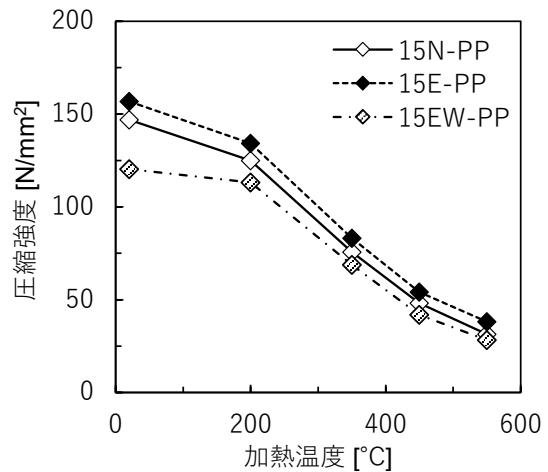


図-5 高温加熱後の強度

Fig.5 Compressive strength after heating

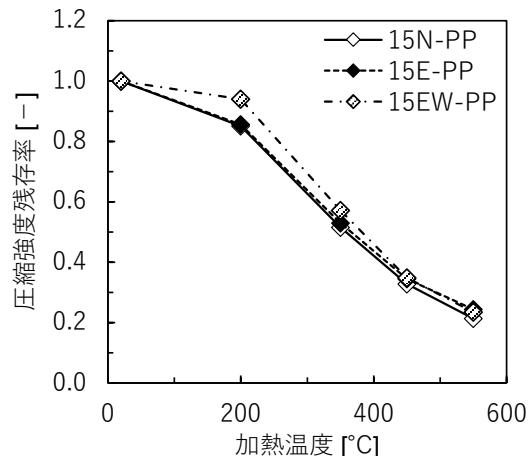


図-6 高温加熱後の圧縮強度残存率

Fig.6 Residual compressive strength after heating

れた。また、ES または ESW の使用によるヤング係数向上効果は ES の方が大きかった。そこで、本章の検討では電気炉酸化スラグ細骨材として ES を選定し、高強

表-4 調合表とフレッシュ試験結果
Table 4 Mix proportions and fresh test results

バッチ No.	調合条件				調合表					AW 添加量 [B×%]	フレッシュ試験結果					
	W/B [%]	Vg [m ³ /m ³]	s/a [%]	細骨材 種類*1	単位量[kg/m ³]						スランプ フロー [cm]	500mm フロー 到達時間 [秒]	空気量 [%]			
					W	B	NS	ES	LG							
1	30	0.310	53.9	NS-a	956	500	837	0.875	53.6	9.0	1.7					
2								0.900	59.0	8.3	1.1					
3				NS-b				0.950	68.0	5.8	1.3					
4								1.025	69.0	6.6	1.4					
5								1.100	76.1	5.9	1.2					
6	25	0.310	51.5	NS-b	600	868	-	1.075	75.8	5.6	1.3					
7								0.950	62.3	11.8	1.4					
8				NS-a				1.000	69.0	9.4	1.4					
9								1.100	73.2	9.6	1.1					
10		0.310	53.9	ES-a	1393	837	150	0.900	63.0	10.6	1.3					
11								0.850	60.5	12.3	1.2					
12				ES-b				0.900	64.2	10.4	1.2					
13								1.615	675	0.900	55.5	15.9	1.7			
14	25	0.310	51.5	ES-b	1258	837	-	1.025	71.9	7.6	0.9					
15								0.950	70.5	8.4	0.9					
16				ES-b				0.850	62.1	9.7	1.6					
17								1.487	675	0.900	60.5	10.0	2.3			
18								1.029	999	0.800	54.6	18.9	1.4			
19		0.310	47.4	ES-a	1072	837	750	0.950	64.0	10.9	1.3					
20								0.900	55.9	18.6	1.4					
21				ES-b				1.075	75.5	9.6	1.2					
22								1.000	71.1	10.6	1.0					
23								1.296	675	1.075	75.8	11.9	1.3			

*1 添え字-a, -b はそれぞれ製造ロットが異なる

表乾密度[g/cm³] : NS-a = 2.63, NS-b = 2.63, ES-a = 3.84, ES-b = 3.82

度コンクリートの材料分離抵抗性を検討した。

一般に高強度、高流動コンクリートの材料分離抵抗性の評価は JIS A 1150 のスランプフロー試験方法において、中心部の粗骨材の偏在や、外周部のモルタルや水の偏在の有無を目視確認することで判断される¹²⁾。一方で、上記の材料分離が目視で確認されない場合であっても施工条件によっては材料分離が生じ、コンクリートの品質に差が生じることが指摘されている^{13), 14)}。また、材料分離抵抗性にはいくつかの評価方法がある¹⁵⁾が、対象のコンクリートの特徴に応じて適切な試験・評価方法を選定する必要がある。そこで、ES の特徴である密度が大きいことに着目して、本検討では、コンクリート中の骨材分布の高さ方向の偏りを評価する試験方法を採用し材料分離抵抗性を評価した。

3.2 実験概要

使用材料の種類は表-1 と同じとした。ただし、本検討で使用した細骨材は NS と ES の 2 種類とし、圧縮強度の低下が見られた ESW は使用していない。また、本実験では、PP の添加によりセメントペーストの見かけ

の粘性が増加し、分離抵抗性が過小評価されることが考えられたため、PP は使用していない。

コンクリートの調合は、W/B、細骨材種類、Vg、スランプフローを試験水準とした。W/B は 30, 25, 20 %, 細骨材種類は NS または ES, Vg は 0.250, 0.310, 0.370 m³/m³ とした。コンクリートの調合表を各バッチのフレッシュ試験結果と併せて表-4 にまとめる。各バッチのスランプフローは施工性を考慮して 55~75 cm を目標とし、AW の添加量で調整した。

コンクリートの練混ぜは、水平二軸形強制練りミキサ（容量 55L）を用い、モルタル先練りとした。練混ぜ後のコンクリートは、JIS A 1150 に準拠してスランプフロー、500 mm フロー到達時間、空気量（JIS A 1128）を測定した後に、材料分離抵抗性試験を行った。なお、本検討ではスランプフローは 0.1 cm 刻みで評価した。

本検討で用いた材料分離抵抗性試験装置の概要を図-7 に示す。試験容器は、内径 250 mm の塩化ビニル製の型枠を積層したもの（高さ 300 mm）を用いた。試験容器内に、コンクリートを 1 回で流し込み、振動台によ

り20秒間の振動(周波数30Hz)を与えた。なお、振動時間については、NSを使用したW/B30%の調合に対して事前の実験を行い、粒径5mm以上の骨材の沈降が明確に確認された振動時間として20秒と設定した。振動終了後、容量2Lの鋼製容器を用いて試験容器の上から50mm(上段)と下から50mm(下段)の試料を採取した。鋼製容器で採取した試料は、水洗いして骨材を取り出し、105℃で絶乾状態とした後に、公称目開き4.75mmおよび300μmのふるいでそれぞれ粒径5mm以上と粒径0.3~5mmの骨材に分級した。なお、各骨材の粒度曲線から考えると、コンクリート中のLGの約96%が粒径5mm以上の骨材であり、NSの約70%およびESの約75%が粒径0.3~5mmの骨材である。分級した各粒径の骨材の絶乾質量と、鋼製容器の容積から、コンクリート体積あたりの骨材量を算出した。また、比較用に材料分離抵抗性試験を行う前の練上り直後の試料に対しても、同様の作業を行い、それぞれの粒径の骨材量を算出した。さらに、上段と下段の骨材分布の差を評価するために、既往の文献¹⁶⁾を参考に、式(1)の材料分離指標を用いてコンクリート中の粗骨材の材料分離抵抗性の評価を行った。また、式(1)の形から、モルタルについて整理した式(2)を用いてモルタル中の細骨材の材料分離抵抗性の評価を行った。なお、SI₅およびSI_{0.3~5}は正の場合は骨材の沈降、負の場合は骨材の浮上が生じていることを示している。

$$SI_5 = \frac{(R_{b5} - R_{u5})}{2R_{r5}} \times 100 \quad (1)$$

$$SI_{0.3~5} = \frac{\frac{R_{b0.3~5}}{(1-R_{b5})} - \frac{R_{u0.3~5}}{(1-R_{u5})}}{2\frac{R_{r0.3~5}}{(1-R_{r5})}} \times 100 \quad (2)$$

ここで、SI₅：粒径5mm以上の骨材の材料分離指標[%]、SI_{0.3~5}：粒径0.3~5mmの骨材の材料分離指標[%]、R_{b5}、R_{u5}、R_{r5}：振動後の下段、上段、練上り直後それぞれの試料中の粒径5mm以上の骨材の絶対容積[m³/m³]、R_{b0.3~5}、R_{u0.3~5}、R_{r0.3~5}：振動後の下段、上段、練上り直後それぞれの試料中の粒径0.3~5mmの骨材の絶対容積[m³/m³]である。

3.3 実験結果

3.3.1 材料分離抵抗性試験における骨材分布の傾向

材料分離抵抗性試験は表-4の合計23バッチについて実施した。試験により得られた上段と下段の骨材量の例を図-8に示す。粒径5mm以上の骨材について、NSを使用した調合では上段よりも下段の方が多くなり、ESを使用した調合では上段よりも下段の方が少なくなつた。この傾向は、図-8に示した以外のバッチでも同

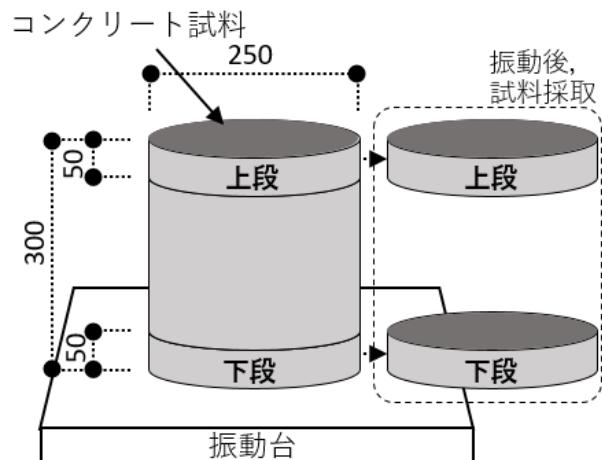


図-7 材料分離抵抗性試験の概要

Fig.7 Outline of segregation resistance test

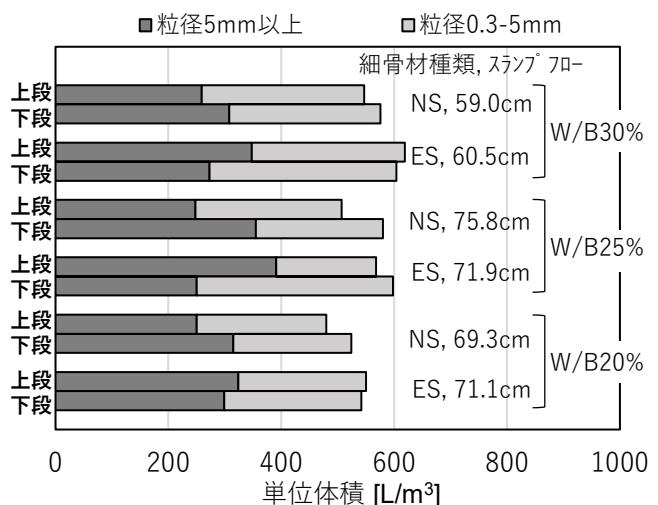


図-8 材料分離抵抗性試験結果の一例

Fig.8 An example of segregation resistance test results

様であった。本検討において、NSを使用したモルタルの密度は2.3~2.4g/cm³、ESを使用したモルタルの密度は2.8~3.0g/cm³であり、対して粒径5mm以上のLGの表乾密度は2.70g/cm³である。上記の傾向は、コンクリート中のモルタルとLGの密度の大小関係の違いによって生じたと考えられる。このことは、例えば既報¹⁵⁾で実施されている一輪車等に積載されたフレッシュコンクリート表面を目視確認する材料分離評価方法を採用する場合、NSを使用した調合とESを使用した調合では材料分離の傾向が異なるため、同様の判定基準で評価することが困難な可能性が考えられ、コンクリートの特徴を考慮した適切な試験、評価方法の選定が必要であることを示唆している。

3.3.2 粒径 0.3~5mm の骨材の材料分離指標

スランプフローと粒径 0.3~5 mm の骨材の材料分離指標 $SI_{0.3-5}$ の関係を図-9 に示す。本検討で実施した全ての調合において、スランプフロー試験における中心部の粗骨材の偏在や、外周部のモルタルや水の偏在は確認されなかった。ただし、ES を使用した調合において、スランプフローを大きくしていくと空気量試験時の容器の底に ES が沈降している様子が観察された。そこで、図-9 では上記のように ES の沈降が目視で明確に確認された調合を区別して青のプロットで表記した。NS を使用した調合の $SI_{0.3-5}$ は、本検討のスランプフローの範囲においてほぼ 0 であり、0.3~5 mm の骨材の分離はほとんど生じなかった。一方で、ES を使用した調合ではスランプフローを大きくしていくと $SI_{0.3-5}$ が大きくなる傾向が見られた。特に ES の沈降が目視確認されたバッチ（青のプロット）は、 $SI_{0.3-5}$ が 5.0% を境にそれ以上で多く見られた。ES を使用した調合において $SI_{0.3-5}$ が 5.0% 以上となるのは、W/B30 % ではスランプフロー約 60 cm 以上、W/B25 % ではスランプフロー約 70 cm 以上、W/B20 % ではスランプフロー約 75 cm 以上となり、粒径 0.3~5 mm の骨材の材料分離抵抗性を確保するためには、スランプフローをある程度小さくするまたは W/B を小さくする等の対策が必要と考えられた。

3.3.3 粒径 5mm 以上の骨材の材料分離指標

スランプフローと粒径 5 mm 以上の骨材の材料分離指標 SI_5 の関係を図-10 に示す。NS を使用した調合では SI_5 は正の値、ES を使用した調合では負の値となっており、粒径 5 mm 以上の骨材の沈降、浮上がそれぞれ生じていることがわかる。NS を使用した調合では、スランプフローおよび W/B が大きいほど、 SI_5 が大きくなる傾向が見られ、コンクリート中のモルタルの粘性が小さくなっているためと考えられる。本検討では、骨材の分離は沈降または浮上に関わらず、骨材の偏りによりコンクリートの品質に変化が生じると考え、 SI_5 の絶対値で NS を使用した調合と ES を使用した調合の材料分離抵抗性を比較した。まず、ES を使用した調合のうち、 $SI_{0.3-5}$ が 5.0 % 以下のバッチに着目する。W/B30、20 % の調合の SI_5 の絶対値は同一スランプフローの NS を使用した調合と同程度かそれ以下になった。NS を使用したモルタルと LG の密度差は 0.4~0.3 g/cm³、ES を使用したモルタルと LG の密度差は 0.1~0.3 g/cm³ であり、ES を使用した調合の方が密度差は小さいため、 SI_5 の絶対値は同程度かそれ以下になったと推察された。

一方で、 $SI_{0.3-5}$ が 5.0 % より大きかったバッチでは、

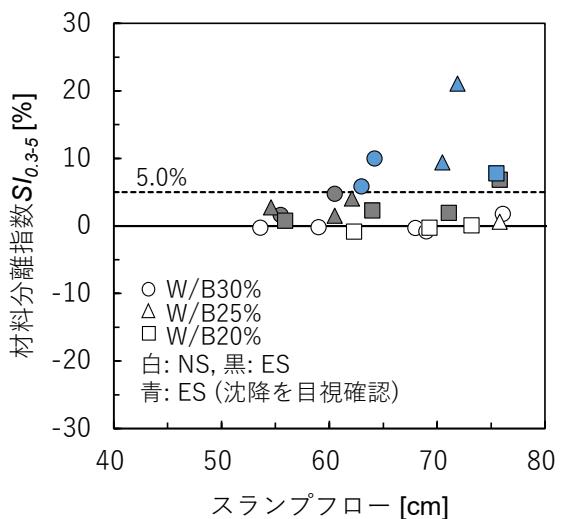


図-9 スランプフローと材料分離指標 $SI_{0.3-5}$ の関係

Fig.9 Relationship between slump flow and segregation index $SI_{0.3-5}$ (particle size of aggregate is 0.3-5mm)

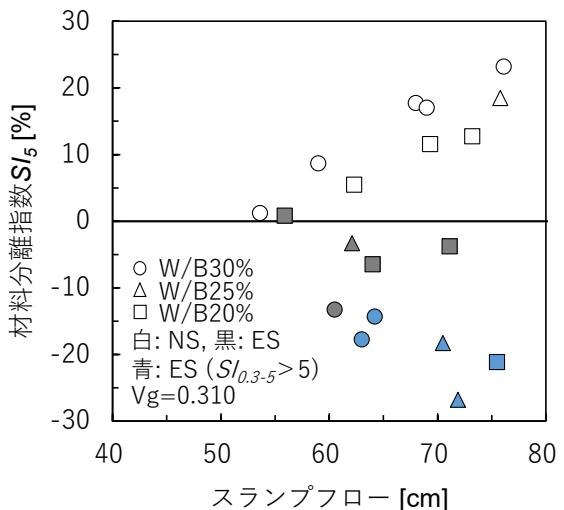


図-10 スランプフローと材料分離指標 SI_5 の関係

Fig.10 Relationship between slump flow and segregation index SI_5 (particle size of aggregate is 5mm or more)

特に W/B25、20 % で同一のスランプフローの NS を使用した調合よりも SI_5 の絶対値が大きくなる傾向が見られた。モルタル中の ES が一定以上沈降する条件では、試験容器下段のモルタルの密度が大きくなることで LG との密度差が大きくなり、粗骨材の浮上が生じやすくなることが要因として考えられる。このことから、ES を使用したコンクリートの材料分離抵抗性を確保するためには、モルタルと粗骨材間だけでなく、セメントペーストと細骨材間の材料分離抵抗性の確保も重要であると考えられた。

4. まとめ

本検討では、2章にて、国内製造されている2種類の電気炉酸化スラグ細骨材(ES:徐冷, ESW:急冷)を使用して水結合材比30~15%の高強度コンクリートの流動性、力学物性、耐火性への影響を検討した。さらに、3章にて、ESを使用した高強度コンクリートの材料分離抵抗性を検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) ESWを使用した調合について、ヤング係数はNSを使用した調合と比較して最大約10%向上した。また、Lフロー初速度はNSを使用した調合よりも速くなり、粘性が低減された。一方で、圧縮強度はNSを使用した調合と比較して小さくなり、セメントペーストとESWの付着性の影響と考えられた。
- 2) ESを使用した調合について、圧縮強度とヤング係数は、NSを使用した調合と比較して最大約20%向上した。Lフロー初速度と加熱後の圧縮強度残存率は、NSを使用した調合とほとんど変わらなかった。
- 3) 本検討では、ESまたはESWを使用した調合の圧縮強度の結果と、ヤング係数向上効果の観点から高強度コンクリートに使用する細骨材としてESを選定した。
- 4) 材料分離抵抗性について、ESの密度はNSよりも大きいため、ESを使用した調合では粒径0.3~5mmの骨材の材料分離指数($SI_{0.3-5}$)が大きくなつた。材料分離抵抗性を確保するためには、スランプフローまたはW/Bを小さくする等の対策が必要と考えられた。また、 $SI_{0.3-5}$ が5.0%以下という条件下において、粒径5mm以上の骨材の材料分離指数(SI_5)の絶対値はNSを使用した調合と同程度かそれ以下となつた。これは、ESを使用した調合のモルタルの方が粗骨材との密度差が小さいためと考えられた。

本報では、室内実験での検討結果を報告した。今後は実施工に向けてスケールアップした実験を行い、施工性や構造体コンクリートとしての性能を確認していく。

参考文献

- 1) 森野奎二、渕上榮治、酒井誠：電気炉酸化スラグ骨材の特殊コンクリートへの実用化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.2, pp.37-42, 1998.
- 2) 岩永健、渕上榮治、松岡滋樹、島津寛、：電気炉酸化スラグのコンクリート骨材としての適用性、コンクリート工学、Vol.36, No.12, pp.11-17, 1998.
- 3) 五味信治、舛田佳寛、青沼隆嗣、保坂綱鎮：スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの調合とその性質に関する実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.30, No.2, pp.433-438, 2008.
- 4) 鐵鋼スラグ協会：鐵鋼スラグ統計年報、2024.
- 5) 日本製鉄株式会社：高炉プロセスから電炉プロセスへの転換投資を決定、<https://www.nipponsteel.com/news/2025/index.html>, 2025.5.30.
- 6) 加藤優志、今井和正、渡邊悟士：電気炉酸化スラグ骨材の使用が超高強度コンクリートの圧縮強度と静弾性係数に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.88, No.809, pp.1051-1059, 2023.
- 7) 加藤優志、渡邊悟士、山本佳城、西脇智哉：電気炉酸化スラグ細骨材を用いた高強度コンクリートの基礎物性、コンクリート工学年次論文集、2025.
- 8) 加藤優志、渡邊悟士、山本佳城、西脇智哉：電気炉酸化スラグ細骨材を使用した高強度コンクリートの材料分離抵抗性に関する一検討、日本建築学会構造系論文集、Vol.90, No.827, pp.1-7, 2025.
- 9) 古川雄太、篠原佳代子、大岡督尚：電気炉酸化スラグ細骨材の混合率がコンクリートの諸性状に及ぼす影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.42, No.1, pp.35-40, 2020.
- 10) 渡邊清信ほか9名：球状の電気炉酸化スラグ細骨材を用いた高流動コンクリートの流動性に関する基礎的検討、日本建築学会学術講演梗概集、材料施工、pp.47-48, 2022.
- 11) 寺内利恵子、早川光敬、陣内浩、渡邊悟士：高強度コンクリートの製造管理に用いる供試体の試験材齢と養生方法に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.73, No.633, pp.1899-1906, 2008.
- 12) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針・同解説、2013.
- 13) 西田朗、斎藤丈士、名和豊春、山崎庸行：構造体における高強度コンクリートの材料分離と各種性状、日本建築学会構造系論文集、Vol.72, No.613, pp.15-22, 2007.
- 14) 寺西浩司、河合逸希：低粉体系高流動コンクリートの材料分離抵抗性および間隙通過性、日本建築学会構造系論文集、Vol.88, No.811, pp.1318-1326, 2023.
- 15) 河野政典ほか8名：高流動性コンクリートの材料分離抵抗性評価に関する研究、日本建築学会技術報告集、Vol.26, No.64, pp.827-832, 2020.
- 16) 河井徹：高流動域まで流動化したコンクリートに対する粘稠剤の効果について、土木学会第43回年次学術講演会講演梗概集、pp.358-359, 1988.

謝辞

本検討実施にあたり、株式会社星野産商から電気炉酸化スラグ骨材をご提供いただきました。心より感謝申し上げます。