

製鋼スラグを細骨材に用いた低炭素型モルタルの基礎物性に関する研究

リハビリテーション工学分野
大倉一慶

低炭素型コンクリート 製鋼スラグ 細骨材
アルカリ刺激 圧縮強度 中性化

1. はじめに

近年、地球規模での気候変動対策が急務となる中、建設分野においてもカーボンニュートラルの実現が求められている。特にセメント産業は国内CO₂排出量の約3.7%を占め、その6割が原料の脱炭素反応に由来するため、生産量自体の削減が不可欠である。

これに対し、セメントを産業副産物に置換した低炭素型コンクリートが開発されているが、セメント量を極限まで減らすと、潜在水硬性やポズラン反応に必要となるアルカリが不足し、強度発現性や中性化抵抗性が低下するという課題がある²⁾。

一方で、製鋼スラグは高いアルカリ供給能を持つものの、膨張性の懸念からコンクリート骨材としての利用は進んでいない³⁾。そこで本研究では、このアルカリ供給能を低炭素型コンクリートのアルカリ不足を補う資源として活用することに着目した。製鋼スラグを細骨材として適用し、化学薬品に依存しない強度増進と耐久性向上に向け、力学特性、耐久性、熱的特性の検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料と調合

本実験の調合を表1に示す。結合材には、普通ポルトランドセメント (C)、高炉スラグ微粉末 (GGBS)、フライアッシュ (FA)、シリカフューム (SF) を用いた。それぞれの質量比は5、60、30、5%で固定した。細骨材には砕砂と陸砂の混合砂 (S) と製鋼スラグ細骨材 (SS) を用い、製鋼スラグの置換率を質量比で0、50、60、70、80、90、100%と変化させた計7種 (SS-0~SS-100) とした。

2.2 試験体作製方法

モルタルの練り混ぜは、フロー値が目標範囲 (160±5

表1 調合表 (結合材を100としたときの質量比)

	B				S	SS	W	SP
	C	GGBS	FA	SF				
SS-0	5	60	30	5	160	0	25	0.3
SS-50					80	80		
SS-60					64	96		
SS-70					48	112		
SS-80					32	128		
SS-90					16	144		
SS-100					0	160		

mm) に収まるよう高性能AE減水剤 (SP) の添加量を調整した。試験体は各試験の型枠に打設し、脱型後は各試験の所定材齢まで水中養生または気中養生を行った。

2.3 各種試験方法

2.3.1 フレッシュ試験

練り上がり直後にJISR 5201を参考にモルタルフローを測定した。また、JISA 1128を参考に空気量の測定を行った。

2.3.2 圧縮試験、引張割裂試験

圧縮強度は材齢7、14、28日においてJISA 1108を参考に実施した。引張割裂強度は材齢14、28日においてJIS A 1113を参考に実施した。

2.3.3 中性化試験

中性化試験はJISA 1152を参考に行った。材齢14、28日の試験体を割裂し、フェノールフタレイン溶液を噴霧して未呈色部分の深さを測定した。本研究では完全中性化深さ (d) に加え、呈色境界深さ (D) も測定することで、中性化が進んでいる途中である中間領域 (D-d) についても評価した。

2.3.4 乾燥収縮試験

打設時に埋込型ひずみゲージを設置した。脱型後、恒温恒湿室 (室温: 約21°C、相対湿度: 約50%) に静置し、そのひずみを測定した。

2.3.5 熱伝導率試験

熱伝導率試験はJISA 1412-2を参考に行った。高温パネルと低温パネルで平板試験体を挟み込み、その熱流を測定することで熱伝導率を算出した。

表2 フレッシュ試験結果

	空気量 [%]	初期フロー [mm]	総添加 SP	最終フロー [mm]
SS-0	1.7	160.0	0.30	160.0
SS-50	1.8	121.7	0.40	160.7
SS-60	1.5	155.2	0.35	164.9
SS-70	2.3	142.5	0.35	162.2
SS-80	2.7	157.3	0.35	161.7
SS-90	2.2	149.1	0.35	172.9
SS-100	3.0	124.1	0.40	156.6

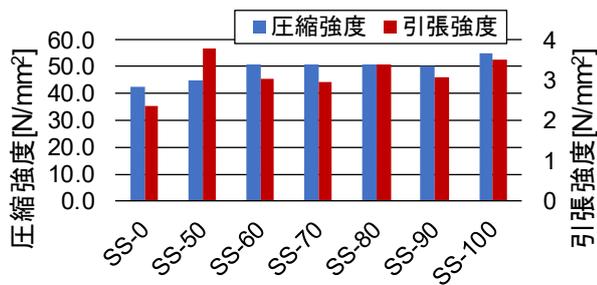


図1 圧縮強度・引張強度

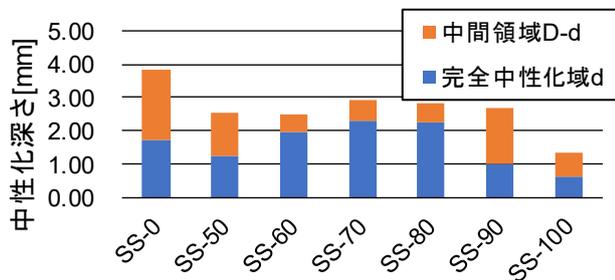


図2 中性化深さ

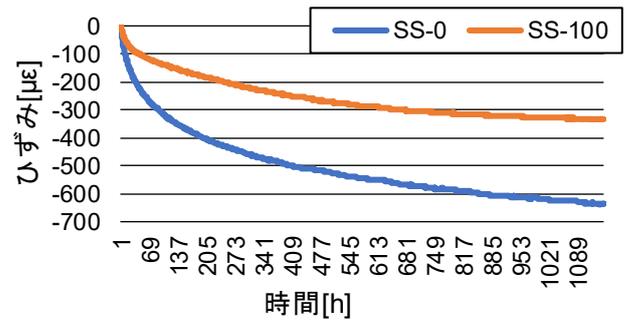


図3 乾燥収縮ひずみ

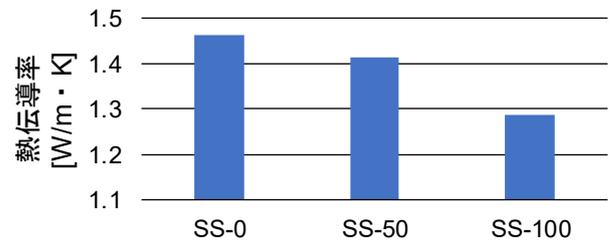


図4 熱伝導率

3. 実験の結果と考察

3.1 フレッシュ試験

フレッシュ試験の結果を表2に示す。製鋼スラグの置換率が増加するに伴い、所定のフロー値を得るためのSP添加量が増加し、空気量が微増する傾向が見られた。これは、製鋼スラグの粒子形状が天然砂と比較して角張っているため、粒子間の摩擦抵抗が増大し流動性が低下したことに起因すると考えられる。

3.2 圧縮試験、引張割裂試験

圧縮強度試験及び引張割裂試験の結果を図1に示す。

圧縮強度、引張強度ともに、製鋼スラグを用いた調査全てにおいて、SS-0よりも高い強度が得られた。特にSS-100の圧縮強度は、材齢28日で55.1N/mm²の最大強度を記録した。この結果から、製鋼スラグ細骨材から溶出するアルカリ成分が反応を促進させたことが示唆される。

引張強度は、置換率の増加に伴う明確な傾向は見られなかった。これは、割裂破壊がセメントペースト部や界面で生じ、骨材による影響が少ないためであると考えられる。

3.3 中性化試験

中性化深さの測定結果を図2に示す。SS-0での中性化深さが3.85mmであるのに対して、SS-100では1.36mmであり、中性化の抑制が確認された。これはスラグが長期にわたりアルカリを供給し、CO₂侵入によるpH低下を抑制したことが一因として考えられる。

3.4 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみの測定結果を図3に示す。製鋼スラグを用いた調合(SS-100)は、無置換(SS-0)よりも乾燥収縮ひずみが小さくなった。この結果から、製鋼スラグ

細骨材中のフリーライムの膨張が、乾燥収縮を緩和させた可能性が示唆された⁴⁾。

3.5 熱伝導率試験

図4に示すように、熱伝導率は、SS-0では1.46W/m・K、SS-50では1.41W/m・K、SS-100では1.29W/m・Kであった。この結果より、製鋼スラグの置換率が増加するにつれて熱伝導率が低下することが確認された。これは、製鋼スラグが多孔質であり、空気を多く含むためである可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究の結果、セメント使用量を5%に抑えた低炭素調合において、細骨材として製鋼スラグを用いることは、強度および中性化抵抗性の向上に有効であることが明らかになった。これは、製鋼スラグがコンクリート内部のアルカリ供給源として機能し、性能を向上させる可能性を示唆している。本技術は、産業副産物を活用した完全資源循環型の建設材料実現に貢献するものである。

[参考文献]

- 1) 細谷俊夫：セメント産業におけるCO₂排出削減の取組み、コンクリート工学, 48(9), 51-53, 2010
- 2) 鈴木南都, 小林紀行, 小林知大, 西脇智哉：CO₂排出量削減を実現するセメントコンクリートの開発と評価, コンクリート工学年次論文集, 45(1), 1054-1059, 2023
- 3) 鉄鋼スラグ協会：環境資材 鉄鋼スラグ, p.9, 2025
- 4) 大澤紀久, 五十嵐豪, 山田一夫, 西脇智哉：アルカリシリカ反応によるアルカリシリカゲルが膨張圧を発生する機構に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, 71, 272-279, 2017