

電気炉酸化スラグの鉱物組成と骨材のアルカリシリカ反応性

金沢大学大学院 ○野口陽輔 金沢大学工学部 本田貴子
金沢大学工学部 山戸博晃 金沢大学工学部 鳥居和之

1. はじめに

製鋼過程の副産物である電気炉酸化スラグは、電気炉還元スラグと異なり、膨張・崩壊性の原因となる f-CaO や f-MgO を含有しておらず、硬質・緻密なスラグの性質を活用した用途として、コンクリート用骨材への利用が期待されている¹⁾。電気炉酸化スラグは、結晶相を多く含み、シリカ鉱物やガラス相がほとんど含まれていないことから、アルカリシリカ反応が発生する可能性は少ないとされている。現在、電気炉酸化スラグは JIS 化を検討中であり、土木学会の施工指針（案）が作成されているが、電気炉酸化スラグの化学成分・鉱物組成とコンクリートの長期安定性との関係には不明な点も残されている。

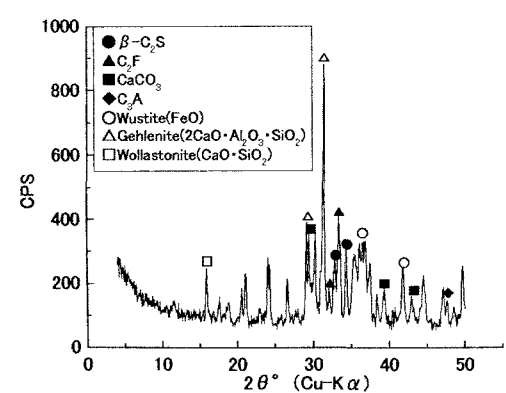
本研究は、土木学会の施工指針（案）の作成作業の一連の研究として、わが国で産出する代表的な電気炉酸化スラグ 4 種の化学成分及び鉱物組成の特徴を調べるとともに、電気炉酸化スラグ骨材のアルカリシリカ反応性を化学法(JIS A 1145)及びモルタルバー法（JIS A 1146, ASTM C 1260, デンマーク法）により検討したものである。

2. 電気炉酸化スラグの化学成分と鉱物組成

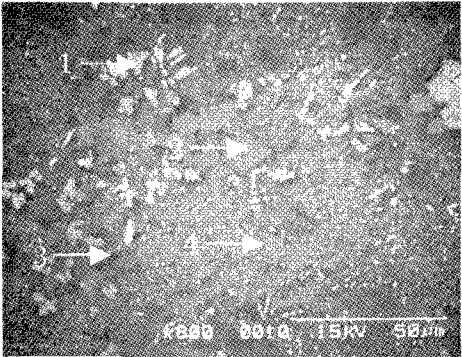
本研究に使用した電気炉酸化スラグの化学成分を表－1 に示す。電気炉酸化スラグは徐冷滓を破碎処理したものであり、コンクリート骨材用に粒度が調整されている。産出場所により電気炉酸化スラグの化学成分には相違が見られるが、いずれのスラグも f-CaO 及び f-MgO はほとんど含まれていない。電気炉酸化スラグ B の X 線回折図を図－1 に示す。電気炉酸化スラグは、結晶鉱物相として β -C₂S 相、C₂F 相、ブスタイト相及びゲーレンナイト相を含有しており、それらの鉱物相の構成比率はスラグの種類により相違した。また、化学成分分析と同様に、X 線回折分析でも f-CaO 相及び f-MgO 相は同定されず、非晶質相も存在しなかった。電気炉酸化スラグ骨材の鉱物組成を調べるために、スラグ粒子（1.2~2.5mm）をエポキシ樹脂に埋め込み作製した試料の鏡面研磨面を SEM-EDX により分析した。電気炉酸化スラグ A の反射電子像を写真－1 に示す。EDX による点分析の結果より、シリカ、アルミナを含むマトリックス中にブスタイト相（明灰色）、 β -C₂S 相（暗灰色、球形）が存在していた。また、電気炉酸化スラグにはクロムを含有する相や金属鉄相も確認された。

表－1 電気炉酸化スラグの化学成分(%)

記号	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	f-CaO	f-MgO	m-Fe
スラグ A	36.13	19.60	9.58	17.55	7.23	6.20	2.78	0.35	0.1200	0.0028	0.06
スラグ B	23.07	22.31	14.53	21.64	7.18	6.55	3.49	0.20	0.0460	0.0024	1.35
スラグ C	22.57	22.69	21.72	15.64	6.58	7.19	2.52	0.08	0.0270	ND	0.99
スラグ D	23.15	21.67	5.25	34.09	4.68	7.14	2.84	0.57	0.0600	0.0035	0.14



図－1 電気炉酸化スラグの X 線回折図 (スラグ B)



点 1：ブスタイト相
点 2：クロム含有相
点 3： β -C₂S 相
点 4：シリカ含有相

写真－1 反射電子像（スラグ A）

3. 電気炉酸化スラグ骨材のアルカリシリカ反応性

電気炉酸化スラグ骨材のアルカリシリカ反応性の判定結果を表-2に示す。いずれのスラグも、アルカリ濃度の減少量及び溶解シリカ量ともに小さく、「無害」と判定された。また、モルタルバー法（JIS A 1146、温度 40℃、湿度 100%の湿気槽養生）の結果を図-2に示す。モルタルバーの材齢 6 ヶ月の膨張量は 0.05%程度であり、同様に「無害」と判定された。電気炉酸化スラグのシリカ含有量は 20%程度と小さく、シリカ分が β -C₂S相の形態で含有されているので、アルカリシリカ反応性はないものと判断された。同様な結果は、デンマーク法（温度 50℃の飽和 NaCl 溶液浸漬養生）でも確認された。

モルタルバー法（ASTM C 1260、温度 80℃の 1 N・NaOH 溶液浸漬養生）の結果を図-3に示す。ASTM C 1260 では、浸漬材齢 14 日の時点でモルタルの膨張量が 0.1%未満であるならばアルカリシリカ反応性に対して「無害」、0.1~0.2%であるならば「無害と有害の両者が存在」、0.2%以上であるならば「有害」と判定する。材齢 14 日の時点でのモルタルバーの膨張量は 0.02%程度であり、「無害」と判定された。しかし、電気炉酸化スラグ B は材齢 14 日にてポップアウトが発生し、その後試験体は中央部で破断した。破断部分の SEM・EDX による観察結果及び剥離箇所の X 線回折分析結果を写真-2 及び図-4 に示す。剥離箇所には大きく発達した六角板状の結晶が多数存在しており、EDX による分析の結果、水酸化カルシウムの結晶と判明した。また、X 線回折分析でも水酸化カルシウム及び炭酸カルシウム(Calcite)が同定された。これらの結果より、温度 80℃の 1 N・NaOH 溶液浸漬養生の条件下では、硬化体中で骨材内部の β -C₂S 相の水和反応が活発に進行したものと推測された。すなわち、骨材粒子表面に水酸化カルシウムの結晶がカードハウス状に生成し、硬化体組織を押し広げた結果、局部的な膨張破壊が生じたものと考えられた。 β -C₂S 相以外の鉱物相は養生条件にかかわらず安定であると判断された。

4. まとめ

電気炉酸化スラグのシリカ量は比較的少なく、カルシウムシリケート相の形態で存在しているので、骨材のアルカリシリカ反応が生じる可能性はほとんどないことが判明した。しかし、電気炉酸化スラグの β -C₂S 相には水和反応性が高いものもあり、硬化体中で水和反応が継続した場合にはコンクリートの膨張劣化の可能性があるので、注意が必要である。

【参考文献】

- 1) 鉄鋼スラグ協会 [電気炉スラグ特別委員会]、電気炉酸化スラグ利用研究委員会報告書、2001

表-2 電気炉酸化スラグの化学法の結果

	スラグ A	スラグ B	スラグ C	スラグ D
アルカリ濃度 減少量 Rc (mmol/l)	23	72	34	24
溶解シリカ量 Sc (mmol/l)	0.3	13.2	7.2	15.3
判定	無害	無害	無害	無害

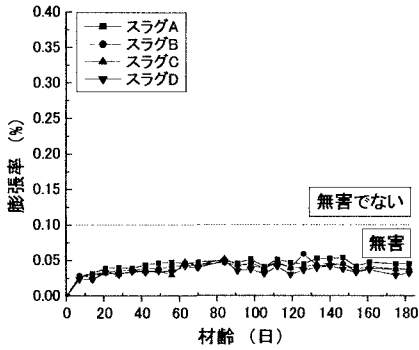


図-2 モルタルバー法（JIS A 1146）の結果

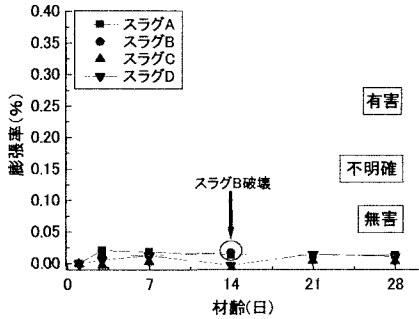


図-3 ASTM C 1260 の結果



写真-2 モルタルバー破断面の SEM 像 (スラグ B)

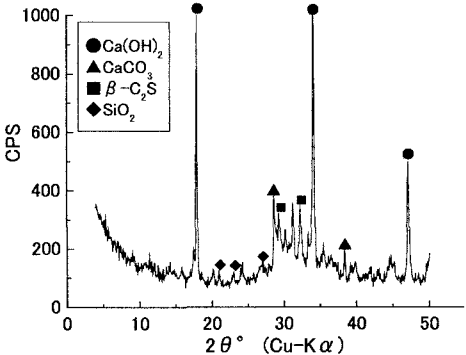


図-4 モルタルバーの X 線回折図 (スラグ B)