

高炉スラグを大量に使用した AAM コンクリートの反応機構および現場施工検証

東北大学大学院 正会員 ○皆川 浩

JFE スチール(株) 正会員 田恵太・松永久宏 日本大学 正会員 吉澤千秋

西松建設(株) 正会員 椎名貴快

1. はじめに

製造時に多量の CO₂を排出するポルトランドセメントを用いないアルカリ活性材料(Alkali Activated Material : AAM)は、コンクリート代替材料として注目されている。AAM は高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった副産物の活性フィラーとアルカリ金属溶液が反応して硬化し、通常のコンクリートに比べて CO₂ 排出量を 70 %以上削減できる。特に、高炉スラグ細骨材を用いた AAM は、その弱点とされてきた耐久性(乾燥収縮特性、凍結融解抵抗性)の改善に有効とされている¹⁾。しかし、AAM の反応機構については十分な知見がないのが現状である。また、可使時間が短いために現場適用には向かないとされてきた。そこで、高炉スラグを大量に使用した AAM の反応生成物の観察・考察のために透過型電子顕微鏡(Trans Electron Microscopy : TEM)および核磁気共鳴分析(Nuclear Magnetic Resonance : NMR)を用いた分析を実施した。また、現場施工を可能にする配合条件および製造方法を見出し、実機での施工性を検証した。

2. 分析実験 (AAM 反応機構)

(1) 概要

高炉スラグを使用した AAM の反応生成物を観察・考察するため、ペースト試料の TEM 観察および NMR 分析を実施した。配合は、高炉スラグ微粉末 500 g, 純水 100 g, 48 %NaOH 148 g, 凝結調整剤 8 g とした。混練後、内寸 40 mm×40 mm×160 mm の鋼製三連型枠に打ち込み、28 日封緘養生後にアセトンに 1 日浸漬した。

その後、TEM 用試料として 10 mm 角の小片に切り出し、樹脂埋め込み後に研磨し、アセトン洗浄後に研磨面に炭素蒸着をおこなった。そして、反射電子像でサンプリング位置にマーキングし、FIB 加工によりマーキング位置が分析面となるように断面加工して薄膜試料とした。その後、透過型電子顕微鏡(日本電子社製, JFM-ARM200F, 加速電圧 150 kV)を用いて、未反応スラグ付近にある反応生成物を観察した。NMR 分析用試料はアセトン浸漬後の試料を乾燥機で乾燥させ、振動ミルで 75 μm 以下に粉碎した後、真空デシケータ内に室温で保管した。分析は試料を装置に無処理で充填して²⁷Al-NMR 測定を実施した。

(2) 結果と考察

TEM 観察写真を図 1 に、TEM-EDS 面分析の結果を図 2 に、²⁷Al MAS-NMR スペクトルを図 3 に示す。図 1 および図 2 より、未反応スラグの外周に厚さ約 0.7 μm の緻密な反応層が確認された。また、図 2 より反応層およびその外周部には Na, Ca, Si, Al が存在していることや、図 3 より C-(A)-S-H のピークが観察されたことから、高炉スラグが C-(A)-S-H または N-(A)-S-H となって、硬化体の緻密化に寄与していると考えられた。このことから、細骨材として高炉スラグ細骨材を使用すると、その表面は高炉スラグ微粉末と同様の反応が期待できるので、ペースト部と一体化し、硬化体の緻密化に寄与するものと推察された。さらに、図 1 より、反応層の外周には板状物や針状物が観察された。点 A の位置で Selected-Area Diffraction (SAD)解析を行った結果、Hydrotoalcite (5Mg(OH)₂·2Al(OH)₃·MgCO₃·4H₂O)であると推定された。また、図 3 より Monosulfate のピークも観測された。これらの水和物は塩化物イオンを固定化することが報告されており²⁾、AAM 硬化体の遮塩性向上に寄与することが推察された。

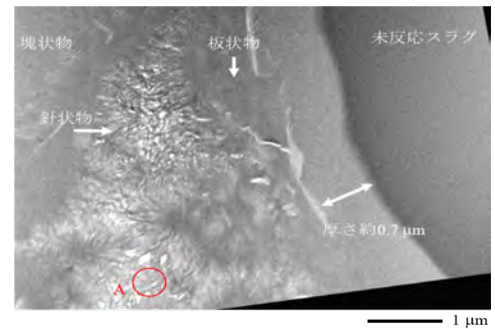


図 1 AAM ペーストの TEM 観察写真

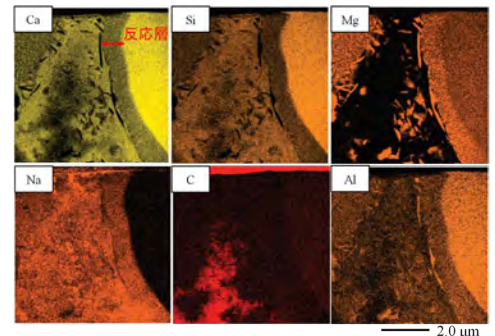
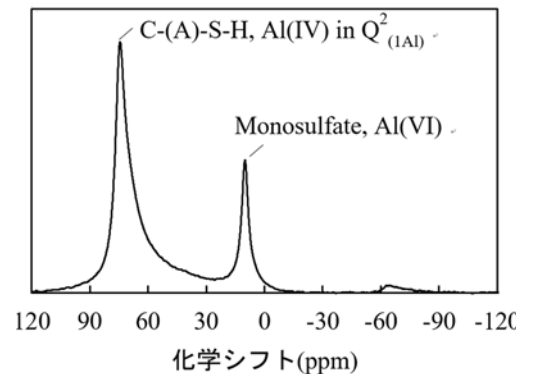


図 2 AAM ペーストの TEM-EDS 面分析

図 3 AAM の²⁷Al MAS-NMR スペクトル

キーワード アルカリ活性材料, 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ細骨材, TEM, NMR, 乾式混合

連絡先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL022-795-7430

3. 実機製造および現場施工

現場施工向けに配合条件を工夫した AAM コンクリートの現場製造・施工性および出来形品質を検証した。

(1) 使用材料および配合

表 1 に使用材料，表 2 に配合を示す。粉体は高炉スラグ微粉末 4000(石膏添加 2.0%)，アルカリ溶液は，可使時間 4 時間以上を得られるように，NaOH・凝結調整剤・水を適量混合して用いた。細骨材は高炉スラグ細骨材，粗骨材は石灰砕石 2005 である。配合は，圧縮強度(28 日)30 N/mm²，スランブフロー500~600 mm，空気量 2.5% (non AE) を目標に，事前試験に基づき，アルカリ溶液と粉体の質量比(AW/P) 59.9%，細骨材率(s/a) 50.0%，粗骨材絶対容積(V_G) 0.314 m³/m³とした。

(2) 製造方法

現場での製造工程を簡略化するため，アルカリ溶液以外の材料(P, S, G)をあらかじめ専用コンテナバッグにバッチ単位で内包し，現場でミキサへ一括投入して製造した。アルカリ溶液も自動計量で投入し，計量の作業・設備を削減した(写真 1)。なお，専用コンテナバッグは二重内袋式で，表面水率を調整した骨材(S, G)と粉体(P)を別々の内袋に詰めているので，乾式混合物として 3~4 週間程度の長期保管が可能である。本施工では，定置式ドラム型ミキサ(定格容量 1.0 m³)を使用し，1 バッチ当たりの練混ぜ量 0.5 m³で，混練時間は全材料投入後 120 秒，製造能力は約 6~9 m³/h である。

(3) フレッシュ性状および強度特性

表 3 にフレッシュ性状(練直. 60 分後)および圧縮強度試験の結果を示す。スランブフローおよび空気量ともに 60 分後でも目標性能を満足した。なお，流動停止まで 60 秒超を要するため，打込み速度は普通コンクリートよりも小さい方が望ましいと考える。圧縮強度は給熱養生など行わず，20℃気中存置でも材齢 1 日で 10 N/mm² を越え，以降も順調に発現し，材齢 28 日で目標強度を超えた。

(4) 施工性，出来形

角ブロック(1.0 m×1.0 m×0.3 m)，柱基礎(柱：0.3 m×0.3 m×0.7 m，基礎：0.9 m×0.9 m×0.3 m)，土間(1.0 m×2.5 m×0.2 m)に打ち込んだ結果(写真 2, 3)，流動・充填性が良く，軽微な締固めで施工できた。翌日には脱型に十分な強度が得られ，表面の剥離もなく，所要の出来形を確保できた。色調は高炉スラグに含まれる硫化物の影響で脱型直後は青緑色を呈したが，4 週間で白色調になった。なお，AAM は普通コンクリートに比べて高粘性でブリーディングも少ないため，巻込み気泡が抜けにくく，パイプレータの締固め時間や表面仕上げのタイミングに配慮が必要である。

4. まとめ

本報では，高炉スラグを大量に用いた AAM 硬化体の反応物を観察し，かつ実機製造・現場施工による実用性を確認できた。今後さらに汎用化を進めたい。

参考文献

- 1) 田恵太, 松永久宏, 吉澤千秋, 皆川浩, “NaOH の配合量がアルカリ活性材料モルタルの特性に及ぼす影響”, 令和 4 年度土木学会全国大会, 第 77 回年次学術講演会, V-542, (2022).
- 2) Obada Kayali, M.S.H. Khan, M. Sharfuddin Ahmed, “The role of hydrotalcite in chloride binding and corrosion protection in concretes with ground granulated blast furnace slag”, Cement & Concrete Composites, 34, 936–945, (2012).

表 1 使用材料

種類	記号	材料名	密度(g/cm ³)
粉体	P	高炉スラグ微粉末 4000 (石膏添加)	2.89
アルカリ溶液	AW	NaOH, 凝結調整剤, 水	1.19
細骨材	S	高炉スラグ細骨材	2.74
粗骨材	G	石灰砕石 2005	2.74

表 2 AAM コンクリート配合表

AW/P (%)	s/a (%)	V _G (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)			
			AW	P	S	G
59.9	50.0	0.314	239.5	400	860	860



写真 1 製造状況

写真 2 流動・充填性

表 3 フレッシュ性状

測定	フレッシュ性状					圧縮強度(N/mm ²)		
	スランブフロー(mm)	流動停止時間(秒)	空気量(%)	AAM 温度(°C)	気温(°C)	1 日	7 日	28 日
	500~600	—	2.5±1.0	—	—	—	—	≥30
練直	530×520	64	2.4	20	18	11.0	26.2	35.0
60 分後(静置)	570×560	62	1.8	19	18	—	—	—

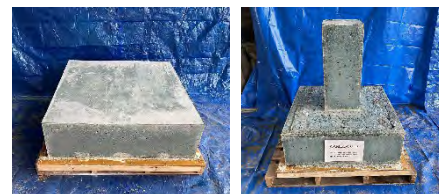


写真 3 製作した AAM 部材