

フライアッシュの ASR 抑制効果における C-S-H の Ca/Si 比の検討

北電総合設計(株) 正会員 ○齋藤 敏樹
 北海道電力(株) 正会員 山城 洋一
 北電興業(株) 正会員 坂本 久宣
 マイジオ 八幡 正弘
 北海道大学大学院 正会員 杉山 隆文, 胡桃澤 清文

1. はじめに

近年、コンクリート用の良質な骨材は減少傾向にあり、アルカリシリカ反応(以下、ASR という)に対し「無害」判定の骨材入手は困難な状況である。「無害ではない」判定の骨材を使用する際の対策の一つに「フライアッシュの使用」があり、フライアッシュの ASR 抑制効果について検討を行った。本報告では、ASR 抑制効果の指標の一つとされる C-S-H の Ca/Si 比について検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料および実験ケース

本実験で使用した材料を表-1に、実験ケースを表-2に示す。粗骨材はASR反応性が無害である石灰岩砕石GおよびASR反応性が無害でない安山岩砕石Hの計2種類とし、ペシマム量の混合率(H:G=30:70)¹⁾で使用した。細骨材はASR反応性が無害の石灰岩砕砂を使用した。フライアッシュ置換率は、0、15、22および30%の4水準とした。

2.2 実験項目および方法

(1) コンクリートの練混ぜ: JIS A 1138 に準拠し、二軸強制練りミキサ(容量 60L)を使用し、排出後直ちにスランブ(JIS A 1101)および空気量(JIS A 1128)を測定した。水酸化ナトリウムは練混ぜ水に溶解して使用した。

(2) ASR試験(コンクリートバー法): JCI-S-010-2017に準拠し、長さ変化の測定を行った。供試体寸法は、幅100mm、高さ100mm、長さ400mmの角柱体とし、打込み後24時間で脱型を行い基長を測定後、材齢4、8、13、17、21、26、39、52および104週で測定を行った。

(3) SEM-EDS測定: 材齢104週の測定後、供試体から縦40mm、横20mm程度の薄片を作製した。その後白金、パラジウム蒸着を行い、SEMに付属するEDSを用いて、カルシウムシリケート水和物(C-S-H)およびアルカリシリカゲルのCaO/SiO₂(Ca/Si)比およびAl₂O₃/SiO₂(Al/Si)比を測定した。測定は、加速電圧15keV、ワーキングディスタンス約15mm、倍率500倍にて行った。

3. 実験結果

3.1 ASR 試験(コンクリートバー法)

ASR 試験(コンクリートバー法)結果を図-1~2に示す。実験ケースNは材齢4週から膨張し104週では0.33%の膨張率となり JCI-AAR-3 修正案判定の0.04%以上となった。他方、普通ポルトランドセメントをフライアッシュ

表-1 使用材料

種類	諸元
セメント	N 普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3.310cm ² /g, R ₂ O:0.48%
フライアッシュ	FA JIS II種灰 密度:2.29g/cm ³ , 比表面積:4.010cm ² /g, SiO ₂ :65.2%, 活性度指数:95%(材齢28日), 95%(材齢91日), フロー値比:106%, ガラス化率:82.6%
細骨材	S 石灰岩砕砂, ASR化学法:無害 表乾密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:1.54%, F.M:2.94
粗骨材	G 石灰岩砕石2005, ASR化学法:無害 表乾密度:2.69g/cm ³ , 吸水率:0.40%, F.M:6.64
	H 安山岩砕石2005, ASR化学法:無害でない 表乾密度:2.66g/cm ³ , 吸水率:1.85%, F.M:6.65
混和剤	AE減水剤 主成分:変性リグニンスルホン酸化合物
	AE剤 主成分:アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
練混ぜ水	上水道水
水酸化ナトリウム	JIS K 8576に規定される試薬

表-2 実験ケース

実験ケース	スランブ (cm)	空気量 (%)	フライアッシュ置換率 (%)	単位結合材量		アルカリ総量 ^{※1} (Na ₂ O _{eq}) (kg/m ³)
				C (kg/m ³)	F (kg/m ³)	
N	18±1.5	4.5±1.0	0	400	0	5.5
F15			15	340	60	
F22			22	312	88	
F30			30	280	120	

※1: アルカリ総量の5.5kg/m³とはセメントのアルカリ量に水酸化ナトリウムを追加して総量を5.5kg/m³にするケースである。フライアッシュのアルカリは考慮しない。

シュに置換することで膨張率は小さくなり、置換率 15%では材齢 104 週の膨張率は 0.05%となったが、置換率 22%以上では 0.02%未満となり、フライアッシュによる ASR 抑制効果が認められる。

3.2 SEM-EDS 測定

反射電子像の例を写真-1に、EDSスペクトルの例を図-3に、フライアッシュ置換率とC-S-HのCa/Si比およびAl/Si比の関係を図-4に、フライアッシュ置換率とASRゲルのCa/Si比およびAl/Si比の関係を図-5に示す。図-4~5より、フライアッシュ置換率が大きいほど、C-S-HのCa/Si比およびASRゲルのAl/Si比は、フライアッシュ置換することで大きくなるのが分かる。これは、フライアッシュから溶解したAlイオンが取り込まれたものと考えられる。

C-S-HのCa/Si比と膨張率の関係を図-6に示す。一般にフライアッシュを使用することで、フライアッシュ中のシリカ質のガラスが反応し、Ca/Si比の低いC-S-Hが生成され、コンクリートの空隙水中のOH濃度が低減されることでASRを抑制することが知られており²⁾、本結果からも同様の結果が得られた。また本実験条件では、フライアッシュ置換率が22%以上でC-S-HのCa/Si比が1.6程度以下となり、ASRによる膨張を0.02%未満に抑制することが示された。

4. まとめ

普通ポルトランドセメントをフライアッシュで置換することで、生成されるC-S-HのCa/Si比が小さくなり、ASRによる膨張を抑制することが示された。本実験条件では、フライアッシュ置換率22%以上でC-S-HのCa/Si比が1.6程度以下となり、膨張率が0.02%未満(JCI-AAR-3 修正案判定 0.04%未満)になることが示された。

【参考文献】1)佐川康貴, 山田一夫, 鳥居慎也, 小川彰一: コンクリートブリズムを用いた 60°C加速養生によるアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014, 2)川端雄一郎, 松下博通: アルカリシリカ反応抑制の観点からのフライアッシュの品質評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.379-395, 2007.7

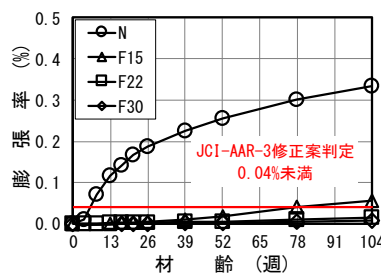


図-1 膨張率の経時変化

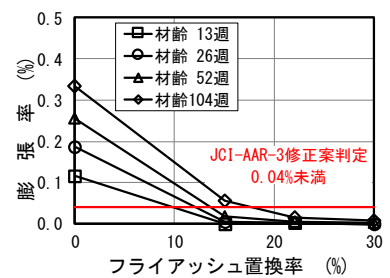


図-2 フライアッシュ置換率と膨張率の関係

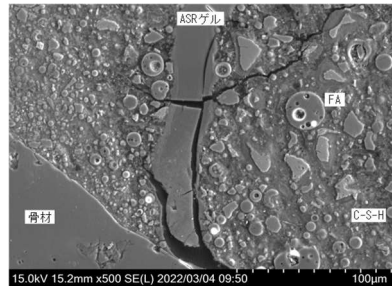


写真-1 反射電子像の例

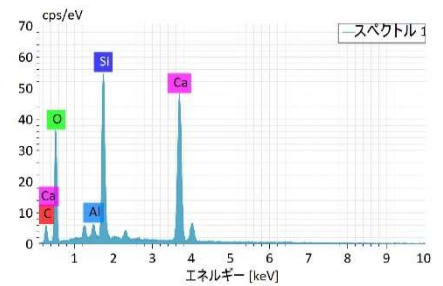


図-3 EDS スペクトルの例

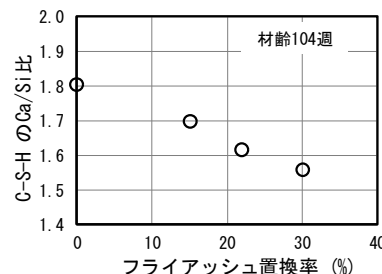
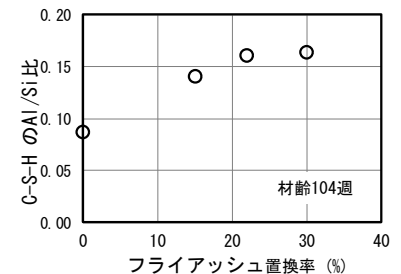


図-4 フライアッシュ置換率と



C-S-HのCa/Si比, Al/Si比の関係

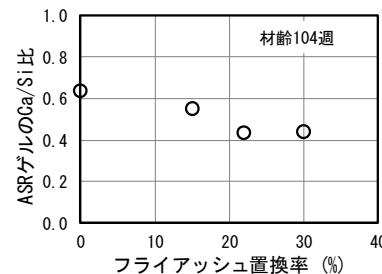
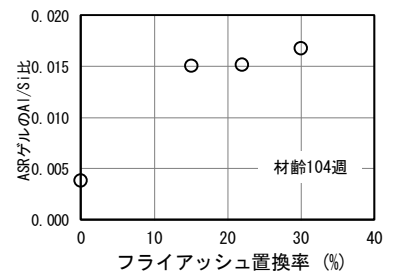


図-5 フライアッシュ置換率と



ASRゲルのCa/Si比, Al/Si比の関係

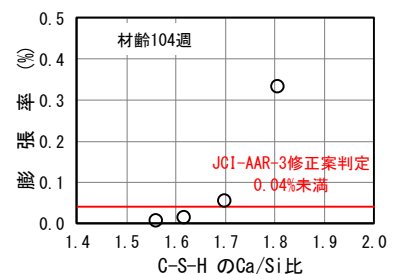


図-6 C-S-HのCa/Si比と膨張率の関係