

フライアッシュを混和したモルタルの中酸化抵抗性に及ぼす石灰系膨張材の影響

東北大学 学生会員 ○小川 遼太郎 正会員 皆川 浩 宮本 慎太郎 久田 真
(株)奥村組 正会員 齋藤 隆弘

1. 研究の背景と目的

フライアッシュ (以下, FA) のポズラン反応は, 細孔構造を緻密化するとされているが, セメントの水和反応により生じた水酸化カルシウム (以下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) を消費するため, 細孔溶液の pH 保持性が低下して硬化体の中酸化抵抗性を低下させる可能性がある. 一方, 石灰系膨張材 (以下, EX) は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を生成し硬化体の収縮量を補償するが, 空隙構造を粗大化させる懸念がある. 両者を併用することで, FA のポズラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の減少を EX が補償し, 中酸化抵抗性の低下等の各材料使用時の懸念を解消できる可能性がある. また, 膨張材を混和したセメント硬化体では, 拘束の有無が中酸化の進行に影響する可能性がある¹⁾.

以上より, 本研究は, FA を混和したモルタルの中酸化抵抗性に及ぼす EX の影響を, 空隙率, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および拘束条件に着目して明らかにすることを目的とした.

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

本研究で使用した材料およびモルタル供試体の配合を表-1 および表-2 に示す. 表-2 で示すように, $W/B = 50\%$ であり, FA と EX の単位量を実験パラメータとした. FA は結合材全体の質量に対して内割り度で 0, 15, 25%と変化させた. また, EX の使用量は, その標準量が 20 kg/m^3 であることを考慮して, 単位水量 170 kg/m^3 かつ $W/C = 50\%$ のコンクリートに 0, 15, 30 kg/m^3 をセメントに置換して混和することを想定して変化させた. なお, 配合 PL は, $S/C = 2.8$ であり, 空気量は 1.5% だった. また, セメントペースト供試体の配合は, モルタルの配合から細骨材を除いたものとした.

2.2 供試体の作製

JIS R 5201 に準拠して練り混ぜたモルタルおよびセメントペーストを内寸法 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ の三連鋼製型枠に打ち込んだ. 供試体は, JIS A 6202 に準じた方法で両端を拘束した供試体 (以下, 有拘束供試体) と, 拘束器具の無い供試体 (以下, 無拘束供試体) の 2 種類である. 両者ともに打込み後 24 ± 2 時間後に脱型し, 材齢 7 日まで $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 環境下で湿潤養生し, $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $(58 \pm 1)\% \text{rh}$ で 35 日間乾燥させた後, $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $(58 \pm 1)\% \text{rh}$, CO_2 濃度 $(5 \pm 0.2)\%$ で 21 日間促進中酸化を実施した.

2.3 測定項目と測定方法

(1) 長さ変化率

材齢 1~63 日において, JIS A 1129 に準拠してマイク

表-1 使用材料

記号	材料名	密度 (g/cm^3)
C	研究用普通ボルトランドセメント	3.16
FA	加熱改質フライアッシュ	2.26
EX	石灰系膨張材	3.16
S	砕砂 (細骨材)	2.87 (表乾)
Ad	空気量調整剤	0.98~1.02

表-2 モルタルの配合 (空気量を除く)

水準	W/B (%)	単位量 (kg/m^3)						
		W	B	C	FA	EX	S	Ad
PL		279	558	558	0	0		
FA15EX00	50	273	546	464	82	0	1562	0.056
FA15EX15		273	546	440	82	24		
FA15EX30		273	545	415	82	48		
FA25EX00		269	537	403	134	0		
FA25EX15		269	537	379	134	24		
FA25EX30		269	537	356	134	47		

ロメータおよび JIS A 6202 に準拠して測長器により各モルタル供試体の長さ変化率を測定した.

(2) 中酸化深さ

材齢 63 日において, 各モルタル供試体の長辺の中心部分を湿式カッターで切断した面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して, 供試体側面からの中酸化深さを測定した.

(3) 空隙率

材齢 63 日において, 各モルタル供試体から湿式カッターで約 20 mm 厚さの試料を切り出し, その試料を浸水させた状態で 24 時間減圧環境下に置くことで, 飽水状態試料とした. この試料の表乾質量 (W_1), 水中質量 (W_2) を測定した. また, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ の乾燥炉で質量が恒量になるまで乾燥させた後の質量を絶乾質量 (W_3) として測定し, 以下の式から空隙率を算出した. なお, 本研究では, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ の乾燥によって散逸した水分の体積を硬化体中の空隙と定義した.

$$\varepsilon = \frac{(W_1 - W_3)/\rho_w}{(W_1 - W_2)/\rho_w} \times 100 \quad (1)$$

ここで, ε : 空隙率(%), ρ_w : 水の密度 (g/cm^3) である.

(4) セメントペーストの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量

示差熱-熱重量同時測定装置 (TG-DTA) を用いて, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を測定した. 測定試料は, 材齢 42 日のセメントペースト供試体から湿式カッターを用いて試料を切り出し, 減圧水和停止処理を施した後, $11\% \text{rh}$ で 7 日間乾燥させた. その後, 測定直前に粉碎し, 粒径 $150 \mu\text{m}$ 以下に調整した. なお, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は TG 曲線における $430 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 間の質量減少分¹⁾ から求めた.

キーワード フライアッシュ 石灰系膨張材 拘束 中酸化抵抗性 長さ変化

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院土木工学専攻 TEL 022-795-7427

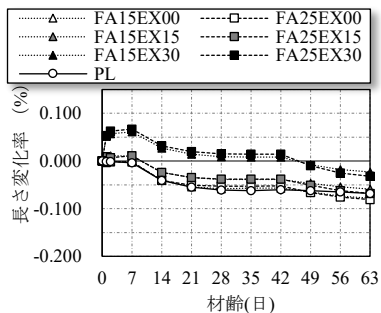


図-1 有拘束供試体の長さ変化率

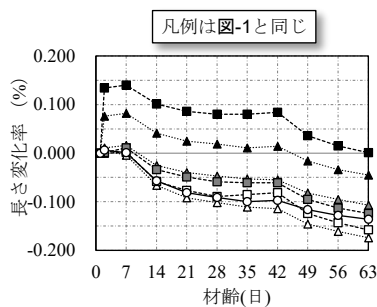


図-2 無拘束供試体の長さ変化率

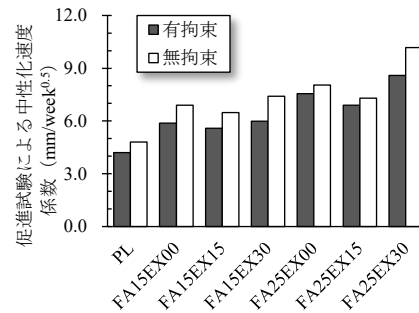


図-3 促進試験による中性化速度係数

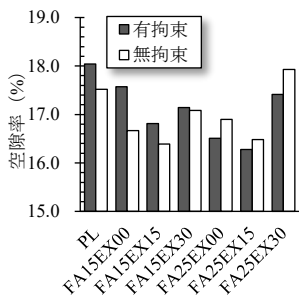


図-4 空隙率

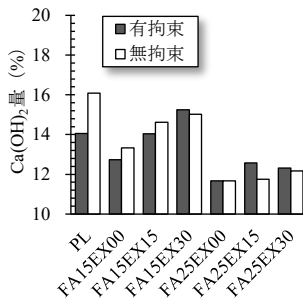
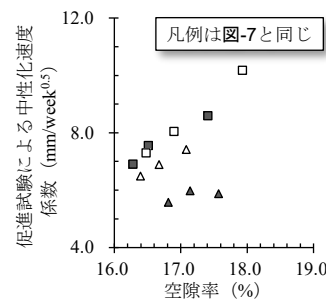
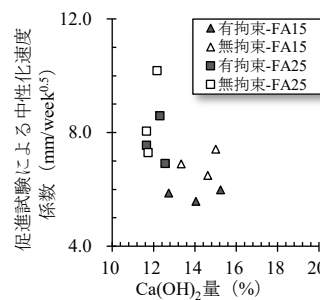
図-5 セメントペーストのCa(OH)₂量

図-6 中性化速度係数と空隙率の関係

図-7 中性化速度係数とCa(OH)₂量の関係

3. 実験結果と考察

3.1 長さ変化率

図-1 および図-2 に、各水準における長さ変化率を示す。図-1 および図-2 より、EX の使用量の増加に伴い材齢初期に長さ変化率が膨張側に増加する傾向が得られた。その膨張は無拘束の供試体と比較して有拘束供試体の方が小さく、この傾向は特に EX30 で顕著だった。また、供試体が収縮側に転じた後の長さ変化率は有拘束供試体の方が小さくなった。このように、FA を混和した供試体の EX による膨張、乾燥収縮等の寸法変化は、拘束によって抑制されることが確認できた。

3.2 中性化速度係数

図-3 に促進試験による中性化速度係数を示す。図-3 より、同じ EX の使用量および同じ拘束条件で比較すると、FA の置換率が高い水準ほど中性化速度係数は増加した。また、FA15 および FA25 のどちらの置換率においても、拘束条件に関わらず、EX30 では EX00 と比較して中性化速度係数が増加した。一方、EX15 では EX00 と比較して中性化速度係数が低下しており、中性化抵抗性を改善する EX の適正量が存在すると考えられる。

ここで、図-4 に示す空隙率の結果を同じ FA の置換率で比較すると、EX15 が EX00 や EX30 と比較して空隙率が低下することが確認できた。この結果と中性化速度が空隙中を透過する気体の CO₂ 量に依存することを踏まえると、EX15 のケースで中性化速度係数が EX00 や EX30 と比較して低くなったのは、本研究で定義した空隙の量が比較的少なく、CO₂ の透過性を低下させたことが要因になっていると推察した。

一方、図-5 のセメントペースト中の Ca(OH)₂ 量の結果を同じ FA の置換率で比較すると、Ca(OH)₂ 量は EX の置換量に比例して増加していることが確認できる。

ここで、図-6 および図-7 に FA を使用したモルタルの促進試験による中性化速度係数と空隙率および Ca(OH)₂ 量の関係をそれぞれ示す。図-6 より、同じ FA の置換率および同じ拘束条件に着目すると、中性化速度係数と空隙率には正の相関があることが確認できた。一方、図-7 より、同じ FA の置換率および同じ拘束条件において中性化速度係数と Ca(OH)₂ 量には明確な相関は確認できなかった。これらの理由から、EX30 が EX00 や EX15 と比較して中性化速度係数が増加したのは、Ca(OH)₂ 量の増加による中性化の進行抑制効果よりも、EX の膨張作用による空隙率の増加が中性化の進行に強く影響したためと推察した。

拘束の有無の影響について着目すると、図-3 より、無拘束供試体に比べて有拘束供試体の中性化速度係数はいずれの水準においても低下する傾向が得られた。ここで図-4 を見ると、FA25 のケースにおいては有拘束供試体の方が無拘束供試体よりも空隙率が低くなったが、FA15 においては有拘束・無拘束の空隙率の関係は FA25 とは逆になった。このことから、本研究の検討範囲では EX を使用した FA モルタルの中性化抵抗性に及ぼす拘束の有無の影響を空隙率だけでは十分に説明できず、この点に関しては今後の課題となった。

4. 結論

石灰系膨張材 (EX) を使用する場合、フライアッシュ (FA) を混和したモルタルの中性化抵抗性を改善する適正量が存在する。その要因としては、EX の使用による Ca(OH)₂ 量の増加よりも空隙率の方がより支配的であるためと推察した。

参考文献

- 1) 山本賢司, 金尚奎, 坂井悦郎: 膨張材を混和したセメント硬化体の炭酸化における拘束状態の有無の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 169-174, 2001.