フライアッシュと石灰系膨張材を併用したモルタルの物質移動抵抗性の評価

東北大学　学生会員　○小川　遼太朗
東北大学　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. はじめに

フライアッシュ（以下，FA）のポゾラン反応は，細孔構造を緻密化して空隙中の物質移動の抑制に寄与するとされているが，セメントの水和反応により生じた$Ca(OH)_2$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性化抵抗性を低下させる可能性がある．一方，収縮抑制対策として使用される石灰系膨張材（以下，EX）は$Ca(OH)_2$を生成することで硬化体の収縮量を補償するものの，空隙構造を粗大化させてしまう懸念がある．また，膨張材を混合したセメント硬化体の炭酸化において拘束状態の有無が炭酸化の進行に影響することが報告されている[1),2)]．

本研究では，FA と EX の併用が物質移動抵抗性に及ぼす影響を評価するために，両者の置換率を変化させたモルタルの中性化深さ，空隙率および$Ca(OH)_2$量を評価するとともに，長さ変化を測定した．

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で 0，15，25 %と変化させた．また，EX は単位水量 170 kg/m^3，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合することを想定して変化させた．なお，配合 PL の空気量は 1.5 %だった．

表-1　使用材料

記号	材料名	密度[g/cm^3]
C	研究用普通ポ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　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	50	279	558	558	0	0	1562	0.056
FA15EX00		273	545	464	82	0		
FA15EX15		273	545	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		

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を内寸法 4×4×16 cm の三連鋼製型枠に打ち込んだ．寸法 4×4×16 cm の角柱供試体は，JIS A 6202 に準じた方法で両端を拘束した供試体（以下，JIS 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±2 ℃環境下で湿潤養生し，20±2 ℃，RH(58±1) %で 35 日間乾燥させた後，20±2 ℃，RH(58±1) %，CO_2濃度(5±0.2) %で 21 日間促進中性化を実施した．

2.3 測定項目と測定方法

(1) 長さ変化

材齢 1～63 日において，JIS A 1129 に準拠してマイクロメータおよび JIS A 6202 に準拠して測長器により供試体の長さ変化を測定した．

(2) 中性化深さ

材齢 63 日において，供試体の長辺の中心部分を湿式カッタで切断し，切断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性化深さを測定した．

(3) 空隙率

材齢 63 日において，各供試体から湿式カッタで約 2 cm 厚さの試料を切り出し，その試料を浸水させた状態で真空ポンプを使用して 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 ℃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．

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

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 Ca(OH)$_2$量

示差熱-熱重量同時測定（TG-DTA）を用いて，$Ca(OH)_2$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を用いて試料を切り出し，減圧水和停止処理を施した後，R.H.11 %で 7 日間乾燥させた．その後，測定直前に粉砕し，粒径 150 μm 以下に調整した．なお，$Ca(OH)_2$量は TG 曲線における 430～500 ℃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　中性化抵抗性　長さ変化試験
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

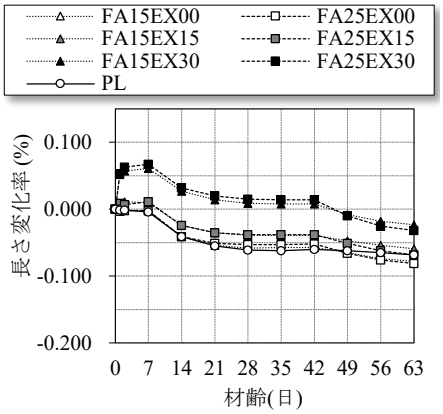

図-1　JIS 拘束供試体の長さ変化率

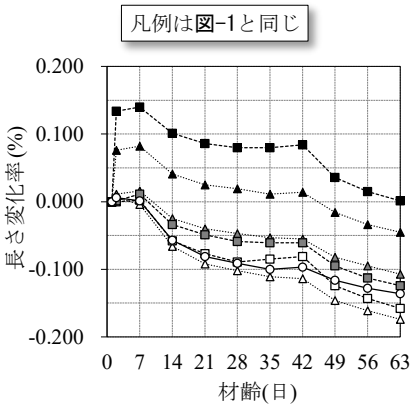

図-2　無拘束供試体の長さ変化率

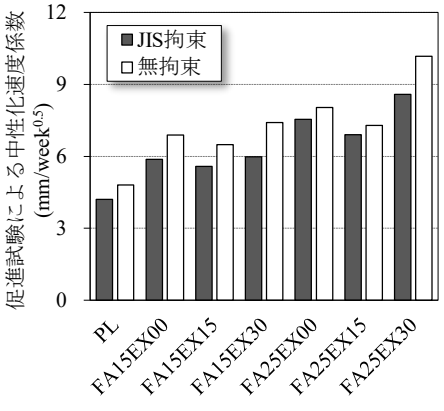

図-3　促進試験による中性化速度係数

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 の置換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，その膨張は無拘束の供試体と比較して JIS 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 JIS 拘束供試体の方が小さくなった．このように，拘束器具によって JIS 拘束供試体の寸法変化が膨張・収縮ともに抑制されることが確認された．

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 の置換量および同じ拘束条件で比較すると，FA の置換率の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 と比べ中性化速度係数が増加した．一方で，EX15 では EX00 と比べ中性化速度係数が低下した．

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小さくなっていることが確認できる．この結果と中性化速度が空隙中を透過する気体の CO_2 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主要因は，空隙構造が比較的密実で，CO_2 の透過性を低下させたためと考えられた．

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．$Ca(OH)_2$ 量の増加は中性化の進行を抑制するが，EX30 では $Ca(OH)_2$ 量の増加の効果よりも EX の膨張作用による空隙構造の粗大化が中性化の進行に強く影響したと考えられる．

拘束の有無の影響について着目すると，無拘束供試体に比べ JIS 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．また，特に EX30 ではこの傾向が顕著であった．これは図-1 および図-2 にも示しように，拘束器具によって EX による膨張作用が抑制されて空隙構造が粗大化しなかったためと考えられる．しかし，PL や FA15 のケースでは，空隙率は無拘束の方が小さくなっており，本研究の検討範囲では EX を使用したモルタルの中性化抵抗性に及ぼす拘束の有無の影響を十分に説明できず，この点に関しては今後の課題となった．

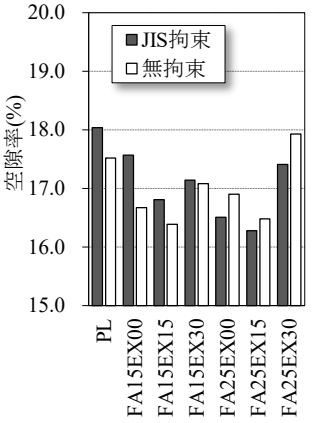

図-4　空隙率

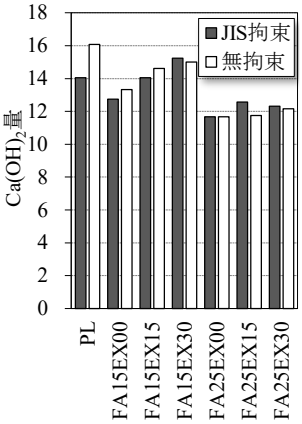

図-5　セメントペーストの $Ca(OH)_2$ 量

4.　結論

EX を使用する場合，その置換量を適正量とすることで，普通ポルトランドセメントを FA で置換して作製したモルタルの中性化抵抗性を改善することができる．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と考えられた．

参考文献

1）　山本ら：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.
2）　黒岩ら：膨張コンクリートの圧縮強度・耐凍害性・中性化抵抗性に及ぼす拘束の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42，No. 1，pp. 95-100，2020.