

研究成果報告書

研 究 題 目		フライアッシュを用いたひび割れ補修材の開発に関する研究	実 施 年 度
			21-22 年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学大学院先進理工系科学研究科	
	氏 名	寺本 篤史	印

1. 研究の目的・背景

発電の過程で発生する産業廃棄物の再資源化を更に推し進めるために、本研究ではフライアッシュ（FA）の利点を活かした新たなひび割れ補修材の開発を目的とする。

コンクリート構造物には日射や気温等の周辺環境の変化により温度変形が生じており、ひび割れ補修材と周辺のコンクリートの体積変化特性が異なる場合、補修部周辺に拘束応力が集中し再劣化が生じる。補修部の再劣化を防止するためには補修材の体積変化特性を積極的に制御する必要がある。

近年、セメント硬化体の主要水和物であるカルシウムシリケート水和物（C-S-H）に含まれる水分子が温度変化時に瞬時に移動すること、それにより C-S-H のヤング率等の物性値が変化することが明らかになった。C-S-H 内の水分子の移動は、C-S-H の密度、Ca/Si 比、鎖長、層間距離により影響を受けると考えられるため、本研究では、ケイ酸化合物を主たる構成要素とする FA を活用し、C-S-H の Ca/Si 比、細孔構造を制御することで、温度変化時に生じる水の移動量を抑制し、水分子と固相の相互作用力に起因する熱膨張駆動力の低下を図る。これらの知見は、高耐久ひび割れ補修材の開発だけでなく、FA を活用したコンクリート躯体のひび割れ制御等にも応用可能な学術的な根拠となる。

本研究では細孔構造モデル（Feldman & Sereda モデル）を前提に温度変化によりセメント硬化体の細孔間を移動する水分子と、隣接する固相間との相互作用力の変化を利用した新たな体積変化の制御方法を提案することを最終目的に、以下の（i）～（iv）の小目的に取り組む。

（i）異なる組成を有する C-S-H 細孔中の温度変化時における水分移動評価
（ii）細孔構造間の水分移動時に生じる内部相対湿度変化の評価
（iii）i，ii とマクロな体積変化との関係の検証
（iv）FA を活用したひび割れ補修材として使用した場合の耐久性の検証

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

（i）異なる組成を有する C-S-H 細孔中の温度変化時における水分移動評価 に関して，異なる C/S を有するセメント硬化体を作製するため，水結合材比を 50%に固定し，研究用普通ポルトランドセメントに対して FA を内割で 0, 15, 30, 45%置換した試験体を作製した。作製した試験体の C-S-H の密度，Ca/Si 比を評価するために XRD/リートベルト解析による組成分析を行った。（図 1）

温度変化時に C-S-H 中で生じる水分移動は ^1H NMR により計測を行ったが，試験体に混和した FA 由来元素 (Al_2O_3 と推測される) の影響で NMR の解析が適切にできないことが判明した。そのため温度変化による C-S-H 中の水の移動は （ii）細孔構造間の水分移動時に生じる内部相対湿度変化の評価で行うこととした。図 2 がその結果であり，FA 置換率が増加すると，高湿度域での相対湿度変化量が大きくなる傾向がみられた。

以上の水分移動性状の相違が，温度変化によって生じる （iii）マクロな体積変化に与える影響を検証した。図 3 の結果より，既往研究と同様に相対湿度 70%程度まで線膨張係数が増大しているが，FA を置換した試験体については，非置換の試験体よりも変化量が大きく，ピーク位置が高湿度側に移動する傾向がみられた。この実験結果と，Kelvin・Laplace 式を用いて相対湿度の変化量から推定される線膨張係数の計算値を比較したところ，両者は良い一致を示し，Kelvin・Laplace 式の妥当性が示された。FA 混和が高湿度域で線膨張係数を増大させる原因としては，平均 Ca/Si 比の低下により比表面積が増大し，親水性の高い固相が形成されたことが挙げられる。また FA 混合したセメント硬化体を 120°C で高温高圧養生を行ったところ，図 4 左のように 1.1nm Al-tobermorite の生成が確認され，線膨張係数が 3 割程度低下する結果が得られた（図 4 右）。以上の結果は FA 混合と適切な養生により低膨張性材料が生成可能であることを示唆する。

（iv）フライアッシュを活用したひび割れ補修材として使用した場合の耐久性の検証のため，模擬ひび割れを作成した試験体に FA を混和したセメント系補修材と無混和の補修材を注入し，温度環境とひび割れ挙動を同時に再現可能な装置によって，ひび割れ補修材としての耐久性を評価した。その結果，いずれの補修材も同程度のサイクル回数でひび割れ部の再劣化が発生し，FA 混合の効果は認められなかった。本結果は，FA 混合後の養生が困難であること，および FA の混合によって接着強度が低下していることが原因として考えられる。

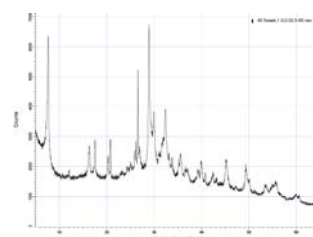


図 1 XRD チャート

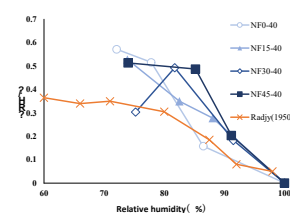


図 2 ΔRH の推移

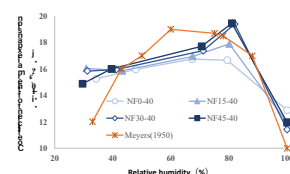


図 3 線膨張係数の推移

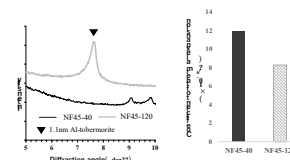


図 4 結晶化した FA

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

		計画		使用状況	
2021	消耗品費	埋込型ひずみ計 PMFL-50T × 60本	200,000	防水型メタルベースゲージ WFLM-30-11-3LJQTA×44枚	236,302
		ひずみゲージ PFL30-11 ×60枚	50,000	スチロール角型ケースNo.27	5,830
				アルミラミジップ（底開きタイプ）	7,524
	借料損料	データロガー TDS-150	150,000	共和電業製 光ファイバ測定器(4ポートタイプ) リース費用	350,344
	旅費	広島一名古屋 1名 1泊2日 3回	150,000		0
	その他	試験体運搬費	50,000		0
2022	消耗品費	光ファイバセンサ ×2点	50,000	ポリエステルゲージ PL-60-11-3LJCT-F	12,419
				標準型温湿度プローブ ロトロニックHC2A-S	20,401
	借料損料	共和電業製 光ファイバ測定器(4ポートタイプ) リース費用	350,000	共和電業製 光ファイバ測定器(4ポートタイプ) リース費用	367,180
合計			1,000,000		1,000,000

本実験で湿度依存性の試験に使用する試験体では、水に対して耐性の高い防水型メタルベースゲージと光ファイバセンサを用いることとし、光ファイバセンサは手持ちのものを使用し、防水型メタルベースゲージは必要数量を購入した。ひび割れ挙動の測定補助として使用したひずみゲージを購入した。もともと所有していた湿度測定用のプローブの1本が不調になったため湿度プローブを購入した。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では、フライアッシュを置換したセメント硬化体では、初期相対湿度での線膨張係数のピーク位置は高湿度側に移動すること、この傾向は Kelvin-Laplace 式によって再現可能であることから毛細管張力の影響が示唆された。しかし、空隙間の水の移動を直接的に測定するには至らなかったため、 ^1H NMR 等による検証が必要である。

また、フライアッシュを 45%置換した試験体で高温高圧養生を行った場合、結晶性水和物である 1.1nm Al-tobermorite の生成が確認され、この試験体では線膨張係数の大幅な低下が確認されたが、1.1nm Al-tobermorite の生成量を定量するには至っておらず、水和物そのものの影響であるのか、これに伴う細孔構造の変化が線膨張係数に影響しているかどうかは今後検証する必要がある。

一方、フライアッシュを混合したセメント系結合材を、模擬ひび割れを作成した試験体に注入し、注入前後の模擬ひび割れ試験体に温度変動を与えた際のひび割れ幅の挙動を観察した。その結果、フライアッシュの混合の有無によらず同程度のサイクル回数でひび割れ部の再劣化が発生した。このことからフライアッシュ混合による線膨張係数の変化は結合材の硬化直後には十分に発現していないことや、フライアッシュの混合によって接着強度が低下していることが原因として考えられたため、実用化に向けては硬化後の養生まで含めて検討する必要があると考えられた。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

<学会での発表>

戸田滉大，寺本篤史，大久保孝昭：フライアッシュによる内部構造の変化がセメント硬化体の線膨張係数に及ぼす影響，日本建築学会中国支部研究発表会，2022.3

<査読付き論文>

戸田滉大，寺本篤史，大久保孝昭：フライアッシュ混和による空隙構造の変化がセメント硬化体の線膨張係数に及ぼす影響，日本コンクリート工学会年次論文集，Vol.44, No.1, pp.286-291

蔵富千奈，戸田滉大，松崎雅俊，寺本篤史：フライアッシュ混和および結晶化による空隙構造の変化がセメント硬化体の線膨張係数に及ぼす影響，セメントコンクリート論文集，Vol.76, No.1, pp202-210