

論文 シドアルジョ泥火山噴出泥 LUSI を用いたジオポリマーの強度および体積変化

森 陽香*1・藤山 知加子*2・大倉 風芽*3・J. J. Ekaputri*4

要旨: 乾燥させたシドアルジョ泥火山噴出泥 (以下, LUSI) を資源として活用するため, フライアッシュベースのジオポリマーペースト (以下, GP) に混和材として LUSI を使用した供試体 (LUSI-GP) を作製し, 異なる給熱養生温度を複数設定して圧縮強度と体積変化を測定した。その結果, LUSI-GP は補修材に適したフレッシュ性状を持ち, 給熱養生を 60°C で 48 時間程度行くと 7 日圧縮強度が 22N/mm² 以上得られることがわかった。また, フライアッシュのみの GP と LUSI の代わりにカオリンを用いた GP 供試体を作製して LUSI-GP と比較し, LUSI の反応性や吸水性が強度発現と体積変化をもたらすメカニズムを推定した。

キーワード: ジオポリマー, フライアッシュ, メタケイ酸ナトリウム 9 水和物, LUSI, 火山泥, 体積変化

1. はじめに

2006 年 5 月インドネシア・東ジャワ州のシドアルジョ地方で発生した噴出泥 (以下, LUSI) は, 2011 年 6 月の時点で約 6.5km² の範囲を覆い, 3 万人以上の近隣住民の生活に影響を及ぼしたり。LUSI は 2024 年現在も噴出が続いており, 噴出する LUSI の総量は 0.14km³ におよぶ²⁾ という試算もある。市街地へのさらなる流入を避けるため現在では噴出口を取り囲む堤防が構築されているが, 堤防内に蓄積する LUSI の定期的な排出が必要である³⁾。また, 排出する LUSI を資源として活用することが期待されている。

LUSI は焼成により非晶質化しポゾラン反応性を持つこと, フライアッシュ (以下, FA) 等の活性フィラーと化学組成が類似していることから, 焼成 LUSI のジオポリマーバインダーへの応用も行われてきた⁴⁾。しかし, 大量の LUSI を焼成して利用するには莫大なプラント建設費用や膨大なエネルギーが必要となる点が課題であった。

そこで筆者らは, 自然乾燥させた LUSI (以下, 乾燥 LUSI) を一般的なセメントコンクリート用混和材として活用することを試みた。しかし, 乾燥 LUSI の特性である高い吸水性によって, 施工可能なワーカビリティを得るためには想定よりも大量の水が必要となり, 材齢 28 日での圧縮強度は 5.0N/mm² 程度しか得られなかった。一方で, 焼成を行わない乾燥 LUSI を FA ベースのジオポリマーで混和材として適用する研究も実施している⁵⁾。ただし, ジオポリマーにおいてもワーカビリティを確保するために多くの追加水を必要とするほか, 乾燥 LUSI の反応性は焼成した LUSI に大きく劣り, 乾燥 LUSI を使用した配合の圧縮強度は乾燥 LUSI を使用しない配合と比べて低い傾向がある。

次に, 乾燥 LUSI 使用によるフレッシュ性状に関する課題

を解決するため, FA に混和材として乾燥 LUSI を加え, アルカリ刺激剤として常温で粉末状のメタケイ酸ナトリウム 9 水和物 (以下, SM) と乾式混合し, その後加熱して反応させるドライミックス法を用いたジオポリマーペースト (以下, GP) が提案された⁷⁾。この方法で FA の質量の 50% を粒径 150μm 以下の乾燥 LUSI で置換した GP 供試体の圧縮強度は 31.8N/mm² であった。さらに, GP のフレッシュ性状改善を目指し, SM を練り混ぜ直前に溶解させる加熱溶解後混合法も提案された⁸⁾。

本研究では, 乾燥 LUSI を混和材として FA に置換し加熱溶解後混合法を適用した LUSI-GP の粘性が高く, 垂直な板にも貼りつく性状を持つことに着目した。LUSI-GP の補修材としての利用可能性を検討するため, こて塗覆工工法で要求される性能であるチキソトロピー性, ならびに養生温度が強度発現や体積変化に及ぼす影響について検討を行ったので, 結果を報告する。

2. チキソトロピー性および圧縮試験の概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

活性フィラーは FAII 種を使用した。混和材として, 自然乾燥後スピードミルで粉砕し, 実験条件を揃えるため 1.18mm ふるいを通過した乾燥 LUSI (表乾密度: 2.37g/cm³) と, 非焼成の朝鮮カオリン (以下, KA) を LUSI と同条件で粉砕・ふるい分けしたもの (表乾密度: 2.56g/cm³) を用いた。表-1 と表-2 に使用材料と化学組成を示す。本実験では LUSI の高吸水性に由来する高粘性に着目したため, LUSI と化学組成および粒子の形状が類似し, 高吸水性で LUSI と同様に焼成すると反応性を持つことが知られている KA

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府都市地域社会専攻 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院教授 工博 (正会員)

*3 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府都市地域社会専攻

*4 Institut Teknologi Sepuluh Nopember Department of Civil Engineering 准教授 工博

を使用した。LUSI, KA を 500 倍で撮影した SEM 画像をそれぞれ図-1 に示す。LUSI, KA はともに粒子がフレーク状であることが確認できた。

図-2 に LUSI と KA の粉末 X 線回折図を示す。試料は乳鉢でエタノールを用いて湿式粉碎したのち、粉末 X 線回折集積法（管球 Cu, 管電圧 40kV, 電流 45mA）により測定した。石英以外のピークは未同定であるが、LUSI は大部分のピークが鋭く多くの結晶質を含み、KA は LUSI と比べて幅の広いピークが多く非晶質部分を含むことが示唆された。

アルカリ刺激剤は SM に追加水を加えて $80 \pm 1^\circ\text{C}$ で溶解させ、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ の質量比（以下、A/W）が 0.22 になるように調整した溶液を用いた。

(2) 実施配合

表-3 に各種 GP 供試体の配合条件および試験結果を示す。本研究では全ての配合においてアルカリ溶液の A/W を 0.22 に固定した。アルカリ溶液の密度は標準密度計を用いて測定し、 80°C において $1.40\text{g}/\text{cm}^3$ とした。なお、表中の Si/A の算出では LUSI や KA から Si は溶解しないものとし、アルカリは NaOH に換算した値を用いた。配合時に空気量は見込んでいない。

Case1 として混和材を含まない FA-GP, Case2 として Case1 中の FA を質量比で 23%, 33%, 41% 乾燥 LUSI に置換した配合（以下、Binder/FA で 0.3, 0.5, 0.7 と表す）, Case3 として Case2 と同じく Case1 中の FA を質量で 23%, 33%, 41% 乾燥 KA に置換した配合で練混ぜを行った。Case3 の配合設計では Case2 の LUSI を質量で同量 KA に置換し、その後全ての材料を均等な割合で除し、示方配合とした。

2.2 チキソトロピー性の簡易試験概要

(1) 練混ぜ手順

混和材の有無に応じて Case1 および Case2, 3 にパターン分けし、以下の手順で練り混ぜた。練混ぜにはホバート型モルタルミキサーを用いた。

Case1（混和材無し）：練り鉢内に FA と溶解させた SM 溶液を投入し、60 秒間練混ぜ。

Case2, Case3（混和有り）：練り鉢内に FA と LUSI または KA を投入し 180 秒間空練りした後、溶解させた SM 溶液を投入し 60 秒間練混ぜ。

(2) チキソトロピー性の簡易試験法

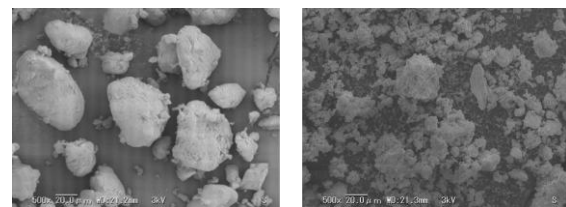
チキソトロピー性とは外部から振動が与えられた時には粘性が低く、外部からの振動が取り除かれたときに瞬時に粘性が高くなる性質であり、吹付け工法やこて塗式覆工工法で用いられるコンクリートに要求される性質である。従来はレオロジー定数を測定して評価するが、細見ら⁹⁾はスランブ試験のような簡便な方法で評価する方法を提案している。本研究で対象とする LUSI-GP は粘性が高いことが特徴であり、フロー試験を行う際にフローコーン

表-1 使用材料

材料	記号	種類および物理的性質
活性フィラー	FA	フライアッシュ II 種 (表乾密度: $2.32\text{g}/\text{cm}^3$, 強熱減量: 2.0%, 比表面積: $4140\text{cm}^2/\text{g}$)
混和材	LUSI	火山泥 (表乾密度: $2.37\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 9.13%, 液性限界: 85.83%)
	KA	陶芸用粘土 (密度: $2.56\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 13.06%, 液性限界: 61.07%)
アルカリ刺激剤	SM	メタケイ酸ナトリウム 9 水和物 (密度: $1.67\text{g}/\text{cm}^3$, 融点: 47°C)
水	W	水道水

表-2 各材料の化学組成

材料	化学組成(%)					
	Na_2O	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	SO_3
FA	-	41.9	17.7	7.2	12.8	0.7
LUSI	-	48.2	11.1	6.6	26.6	2.1
KA	-	59.1	34.9	1.1	3.3	-
SM	21.6	20.9	-	-	-	-



(a) LUSI (b) KA

図-1 混和材の SEM 画像 (500 倍)

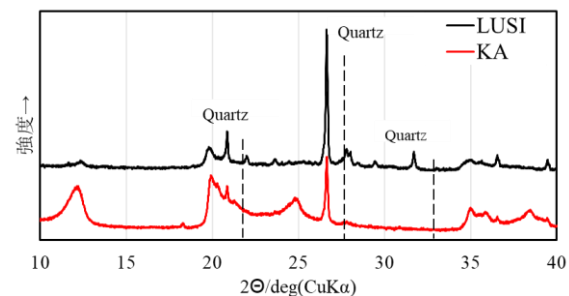


図-2 LUSI と KA の粉末 X 線回折図

に付着してしまうため、試験が実施できない。そこで本研究では、練混ぜ後に練り温度を測定した後、一定量の試料をはかり取り、以下の手順でチキソトロピー性の簡易評価試験⁹⁾を行った。

①練混ぜ直後の試料を 50g はかり取り球状にする。②表面が平滑になるよう高流動コンクリートを流し込んで作製したコンクリート板に向けて約 0.6m の高さから試料を鉛直に自由落下させ、落下直後に板を 10 秒かけて引き起こす。③試料の付着特性の観察ならびに付着したモルタルが滑り落ちるまでの時間を測定する。

表-3 GP の配合および結果一覧

Case	ID	質量比	mol 比	単位質量(kg/m ³)				付着時間 (分)	試験時の GP 温度(°C)	養生温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)
		Binder/FA	Si/A	FA	Binder	SM	W				
Case1 混和 材無	FA-0	0	0.41	1342	0	420	170	0	35.6	30	26.1
										40	31.2
										50	45.1
										60	34.4
										70	58.9
Case2 LUSI	LS-3	0.3	0.33	1037	311	420	170	10	44.3	30	17.2
										40	22.9
										50	29.1
										60	29.5
										70	44.6
	LS-5	0.5	0.29	901	450	420	170	10	35.4	30	12.4
										40	18.7
										50	24.3
										60	25.1
										70	34.2
	LS-7	0.7	0.26	796	557	420	170	10	39.1	30	8.9
										40	15.9
										50	15.6
										60	22.7
										70	27.2
Case3 KA	KA-3	0.3	0.33	1047	314	424	172	10	36.1	30	20.1
										40	21.5
										50	23.2
										60	30.1
										70	42.8
	KA-5	0.5	0.29	914	457	426	173	10	35.4	30	19.0
										40	15.7
										50	19.9
										60	27.3
										70	31.1
	KA-7	0.7	0.26	810	567	427	173	10	42.0	30	15.9
										40	16.5
										50	12.9
										60	20.9
										70	21.7
									80	22.9	

2.3 圧縮試験の概要

チキソトロピー性の簡易評価試験後、Φ50×100(mm)の円柱供試体を打設した。給熱養生は30,40,50,60,70,80°Cの6つの条件で行い、インドネシアでは常温養生で実現可能である30°Cでは168時間(7日間)、40°C以上では48時間給熱養生を行った。この際、湿度の調節は行わなかった。給熱養生開始から48時間経過時点で脱型し、20°C、60%RHの室内養生室で気中養生を実施した。材齢7日で一軸圧縮試験を行った。

2.4 試験結果

(1) チキソトロピー性

表-3に各配合のチキソトロピー性の簡易評価試験における付着時間および試験実施時のGP温度を示す。付着時間は10分を計測の上限とし、10分を超えても付着が確認されたものについては10分と記載している。

図-3にチキソトロピー性の簡易評価試験の様子を示す。Case1のFA-GPはボソボソした質感を呈し、全く付着せず板を垂直に立てた瞬間に落下し砕けた。対して、Case2およびCase3の試料はコンクリート板を垂直に引き上げた時にも半球形状を保持し、全ての配合で付着時間が10分以上を記録した。以上より、FAのみのGPはチキソトロピー性を有さず、LUSIやKAを置換したGPは高いチキソトロピー性を示し、補修材に適した性状を持つことが確認できた。

(2) 圧縮強度

各配合で得られた圧縮強度の平均値(n=3)と給熱養生温度の関係を図-4に示す。KA-7を除く全てのCaseで、給熱養生温度が70°Cのときに圧縮強度が最も高く、給熱養生温度80°Cでは70°Cに比べ強度が低下していた。給熱養生温度が30°Cのとき強度は20N/mm²以下ではあるが硬化す

ることが分かった。また、混和材種類ごとに比較すると、Case2, Case3 どちらも KA-7 を除きおおむね混和材の割合が高く活性フィラーが減少すると圧縮強度が低下する傾向がみられた。KA-7 のみ傾向が異なる点については、今後さらに検討する必要がある。

3. 体積変化

3.1 体積変化測定試験の概要

(1) 体積変化測定用供試体

GP の体積変化の測定は埋込型ひずみ計を用いて行い、「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」¹⁰⁾および「コンクリート構造物用断面修復材の試験方法(案)」¹¹⁾より、埋込型ひずみ計を用いた方法を参考とした。埋込型ひずみ計は標点距離 60mm のものを使用した。図-5 に埋込型ひずみ計を用いた供試体の打設状況を示す。型枠は JIS5201:2015 に適合するモルタル供試体成形用型を用いた。型枠による供試体の拘束を防ぐため、型枠底面に 160×200×1(mm) に切断したテフロンシートを敷き、両端部の内側に 40×40×3(mm) に切断したポリスチレンボードを配置した。供試体と型枠の接触を避けるため、型枠の底面・側面・端面に沿って厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを敷き詰めた。供試体中央部の温度を測定するため、熱電対を埋込型ひずみ計の中央に測定端子が来るように固定した。打設は 2 段階に分け、型枠高さのおおよそ半分まで打設したところで埋込型ひずみ計と熱電対を型枠長軸方向と平行になるように中央に埋め込んだ。その後残り半分を打設し、木槌で型枠を叩いて締め固めた。

(2) 養生条件

給熱養生温度は 30℃、60℃、80℃ の 3 種類とし、あらかじめ給熱養生温度まで熱したオープンに供試体を投入した。圧縮試験用円柱供試体と同様に湿度の調整は行わなかった。埋込型ひずみ計の計測は給熱養生開始と同時に開始し、給熱養生開始直後の 3 時間は 5 分毎、その後給熱養生終了まで 1 時間毎、給熱養生終了後 2 時間は 5 分毎、その後材齢 28 日目までは 3 時間毎に計測を行った。給熱養生中は型枠上にガラス板を設置することによって、また脱型後は全面をアルミテープで隙間なく覆い、さらにビニール袋で密閉することで、供試体からの水分の逸散を防止した。供試体数は各配合 2 体とし、ばらつきを考慮するため以降の図には各供試体で得られた計測データを掲載している。

3.2 測定結果

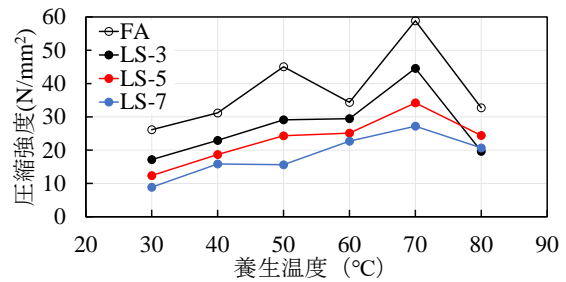
(1) 硬化に伴う体積変化の概要

給熱養生温度が 30℃、60℃、80℃ の場合について、FA-0、LS-7、KA-7 の体積変化の材齢 3 日までの経時変化を図-6 に、同様に材齢 28 日までの経時変化を図-7 に示す。

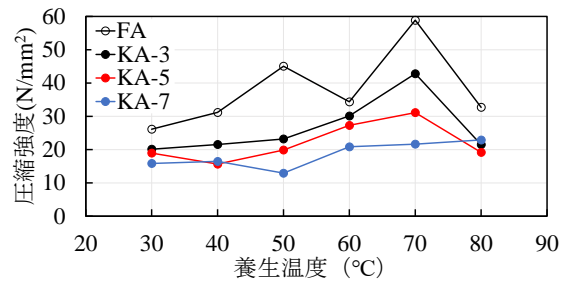
全ての配合および給熱養生条件において、給熱養生開始



(a) Case1 FA のみ (b) Case2 LUSI-GP
図-3 チキソトロピー性の簡易試験の様子



(a) Case1 および Case2



(b) Case1 および Case3

図-4 圧縮強度と給熱養生温度の関係



図-5 体積変化測定用供試体の打設状況

後 3 時間程度膨張し、その後 8 時間以内に急激な収縮を経て緩やかな収縮に移行した。養生温度が 30℃ のときは高温養生と挙動が異なり、膨張・収縮は起こるものの反応が遅かった。給熱養生開始直後の膨張は GP 中の水分の蒸発が起こる一方で、供試体の温度上昇による膨張や空気の熱膨張の影響が大きいためと考えられる。急激な収縮は、温められた空気・水分が抜けることおよび縮重合反応によるもの、その後の緩やかな収縮は主に形成された細孔からの水分逸散によるものと考えられる。

(2) 給熱養生温度の影響

材齢 3 日までの体積変化について給熱養生温度別に比較すると、給熱養生温度 60℃、80℃ の場合材齢 48 時間時点で KA-7 を除く全ての供試体において急激な膨張が見られた。これは給熱養生の際湿度を管理しなかったため、供試

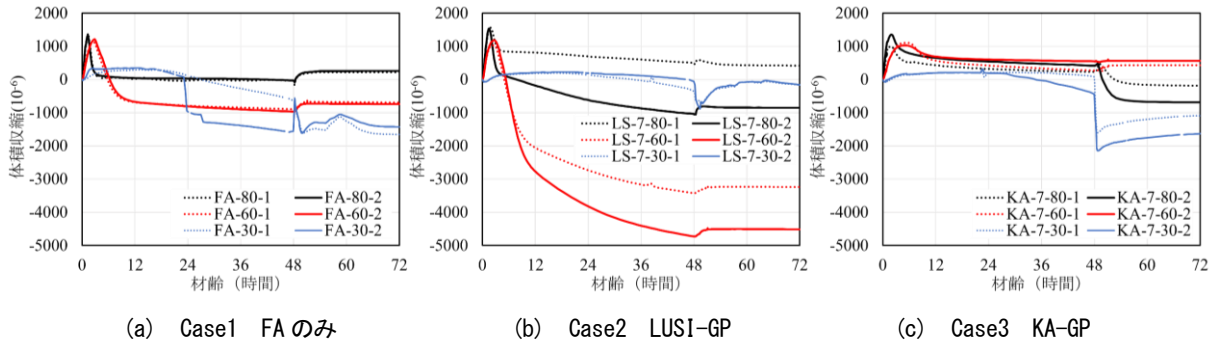


図-6 材齢3日までの体積変化の経時変化

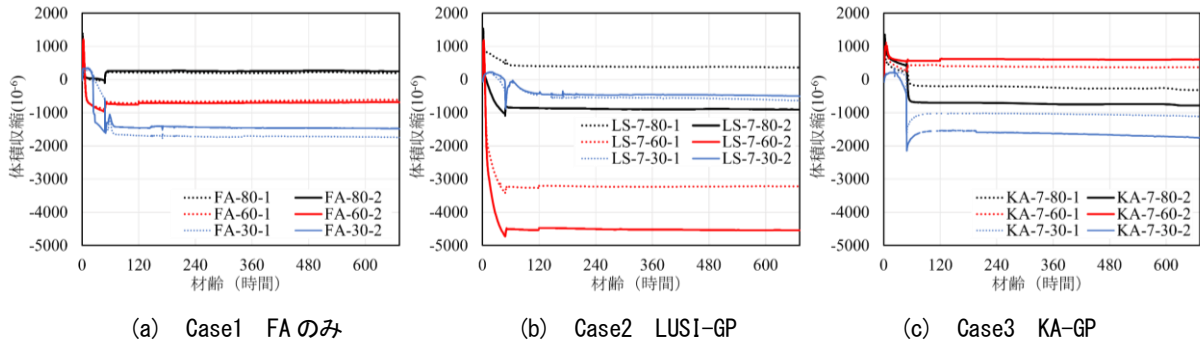


図-7 材齢28日までの体積変化の経時変化

体をオープンから取り出し脱型する際に大気中や型枠内の結露水分を吸収したためと考えられる。脱型時の膨張は永井らの実験結果¹²⁾でも確認されている。一方、給熱養生温度 30℃では収縮が見られたが、養生温度が低いと脱型時の型枠に吸着する水分が少なく、温度降下による収縮が顕著となったと考えられる。しかし KA-7-30 は 2 体とも大きく収縮しており、温度低下以外の要因も考えられるため追加で検討が必要である。いずれの配合・条件においても脱型後の膨張・収縮後はほとんど体積変化がなかった。

(3) 混和材種類の影響

材齢 3 日までの体積変化について、給熱開始から 6 時間経過時点の収縮を Case ごとに比較すると、Case1 は給熱養生温度が 80℃ではほぼ収縮せず、60℃では約 1000×10^{-6} 収縮した。一方、高吸水性の LUSI を用いた LUSI-GP は給熱養生温度 60℃および 80℃のとき収縮量が比較的大きく、60℃で約 5000×10^{-6} 、80℃で約 1000×10^{-6} 収縮している。この収縮は縮重合反応よりも脱水の影響が大きいと考えられる。KA-GP は収縮量が小さく、最終的に膨張で終了している。Ling らは FA ベースのジオポリマーペーストの細孔構造は活性フィラー、硬化条件などに依存し、細孔直径が大きいほど毛細管引張力が強まり細孔内の水が移動するため、ペーストの細孔構造が体積変化に影響を与える¹³⁾と報告している。KA は LUSI と同じく吸水性が高いが非晶質部分を含み、メタカオリンには劣るものの反応して硬化体を生成し、Case1 や Case2 と比べより小さな細孔を形成した可能性がある。また KA が反応し硬化体の生成量が多くなり、脱水による収縮が打ち消されていることも考えられる。今後は混和材種類による細孔構造の解明も含めて

検討する必要がある。

3.3 硬化メカニズムと体積変化に関する考察

図-8 に以上の結果から推察される Case3 : KA-GP の反応イメージを示す。練混ぜ直後、給熱養生前(図-8a)は FA, KA, SM, 水(H₂O)および練混ぜ時に巻き込んだ空気が存在しており、SM 中の Na, Si が溶解している。給熱を開始すると(図-8b) GP および空気が熱膨張し、体積変化は膨張を示すとともに FA の Si, Al が溶出する。このとき KA から Si, Al が溶出している可能性がある。その後給熱から数時間経過すると(図-8c) 縮重合が始まり、脱気、水分蒸発等が進行し急激に収縮する。給熱開始から約 6 時間経過すると(図-8d) 縮重合が進行し、収縮が緩やかになる。LUSI-GP の場合はさらに混和材から水分蒸発が起こり、大幅な収縮が継続すると考えられる。

給熱養生温度が 80℃のとき、Case1 と Case2 では図-8c の段階の収縮量が 60℃に比べ小さく、圧縮強度も 80℃の方が小さい。これは、給熱養生温度が高いと水分蒸発が早期に進み、Na, Si, Al のイオン移動が制限され縮重合反応が十分に進行しないためである。混和材からの溶出可能性がある Case3 のみ給熱養生温度 60℃よりも 80℃の方がやや強度が高い。図-8c・d の段階の収縮は同程度であり、縮重合由来の収縮も同程度だったと考えられる。

また、給熱養生温度が 30℃のとき、Case1 は約 12 時間で収縮が始まり、LUSI あるいは KA を含む Case2・3 はいずれも約 24 時間で収縮が始まった。48 時間経過後の収縮量は Case2 より Case3 が大きいことから、30℃では Case1 は縮重合反応・脱水が進行し、Case3 もある程度進行したが、Case2 では縮重合反応が不十分で強度発現が遅く、縮

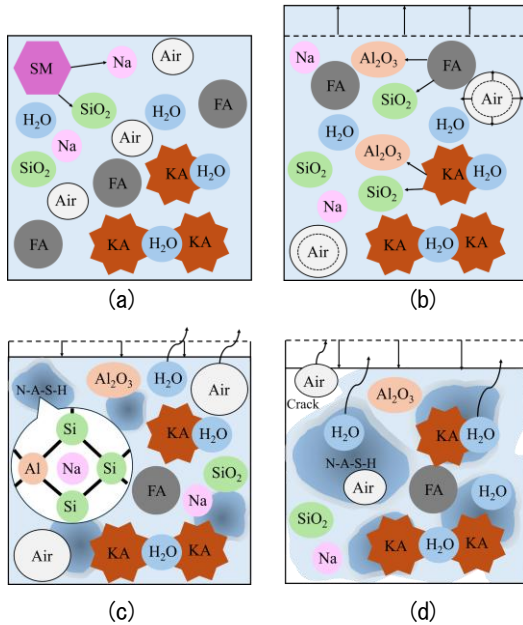


図-8 KA-GPの反応イメージ

重合反応に伴う脱水も少なかったと考えられる。

4. まとめ

乾燥させたシドアルジョ泥火山噴出泥 LUSI の活用のため、LUSI-GP の圧縮強度、体積変化を測定した。本研究から得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 加熱溶解後混合法で練り混ぜた LUSI ジオポリマーペーストは補修材に適したフレッシュ性状を持ち、給熱養生を 60℃で 48 時間行くと 22N/mm² 以上の 7 日圧縮強度が得られた。このとき材齢 28 日時点の体積変化は -1800×10^{-6} から -3800×10^{-6} であった。
- 2) 給熱養生温度を 30℃から 80℃の範囲で変更したところ、1 配合を除く全ての配合において、70℃にかけて圧縮強度が増加し、80℃では 70℃に比べ減少した。体積変化の測定結果とあわせて考えると、養生温度が高くなるとジオポリマーペースト中の水分の蒸発が早まり、縮重合反応に必要な Na 等が十分に行きわたらなかつたためと推測された。
- 3) 全ての配合および条件で給熱養生開始直後に供試体の温度上昇や空気の膨張による膨張が生じ、数時間で縮重合反応および脱気・脱水と考えられる収縮に転じた。その後給熱養生中は水分の蒸発による緩やかな収縮を続けた。
- 4) フライアッシュベースのジオポリマーにおいて混和材として LUSI を用いると、高吸水性により体積変化は大きくなる。KA (非焼成の朝鮮カオリン) は反応性を持つことから異なる細孔構造を生成し、独特の挙動を示した可能性がある。

以上より、今後養生条件の見直しや収縮軽減混和剤の活用によって体積変化を抑えることができれば、LUSI-GP を補修材として利用できる可能性があると考えられる。

謝辞

蛍光X線分析は横浜国立大学の機器分析評価センターの蛍光X線分析装置、SEM撮影は走査型電子顕微鏡、粉末X線回折の測定は多目的X線回折装置で行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) US Geological Survey: Preliminary Analytical Results for a Mud Sample Collected from the LUSI Mud Volcano, Sidoarjo, East Java, Indonesia, 2008, USGS
- 2) Davies, R. J., Mathias, S., Swarbrick, R. E., Tingay, M. J.: Probabilistic longevity estimate for the LUSI mud volcano, East Java, Journal of the Geological Society, London, Vol.168, pp. 517-523, 2011
- 3) Sungkono et al.: The VLF-EM imaging of potential collapse on the LUSI embankment, Journal of Applied Geophysics 109, pp.218-232, 2014
- 4) Antoni et al.: Effects of Calcination Temperature of LUSI Mud on the Compressive Strength of Geopolymer Mortar, Advanced Materials Research, Vol. 626, pp 224-228, 2013
- 5) Ekaputri, J. J., Triwulan: Geopolymer Concrete Using Fly Ash, Trass, Sidoarjo Mud Based Material, ITS JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, Vol.31 No.2, pp.57-63, Nov.2011
- 6) Syihabuddin, T., Ekaputri, J. J., Maulana, M. A., Soemitro, R. A. A., Petrus, H. T. B. M., Fujiyama, C.: One Part Method for Making Geopolymer Paste using Flocculated Sidoarjo Mud, Archives of Metallurgy and Materials, Vol.69, No.4, pp.1401-1406, 2024
- 7) Fujiyama, C., Kanai, D., Cui, Y., Ekaputri, J. J.: Dry Mix Geopolymer Processing for Utilization of Indonesian Volcanic Mud, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1090-1095, 2022
- 8) 大倉風芽, 森陽香, 藤山知加子, Januarti J.EKAPUTRI: 加熱溶解後混合法によるシドアルジョ火山泥 LUSI を用いたジオポリマーモルタルの製造, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, V-04, 2024
- 9) 細見和広, 田澤栄一, 川本秀夫, 河合研至: コンクリートのチキソトロピー性の簡易評価方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol 17, No.1, pp683-688, 1995
- 10) 社団法人 日本コンクリート工学協会: JCI 基準集, pp.455-458, 2004
- 11) 公益社団法人 土木学会: コンクリート標準示方書【基準編】土木学会基準および関連基準, pp.458-464, 2013
- 12) 永井伴英, 李柱国, 高垣内仁志, 岡田朋久: ジオポリマーコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2301-2302, 2016
- 13) Ling, Y., Wang, K., Fu, C.: Shrinkage behavior of fly ash based geopolymer pastes with and without shrinkage reducing admixture, Cement and Concrete Composites, Volume 98, pp.74-82, Apr. 2019