

ジオポリマーモルタルの硬化中および硬化後の長さ変化に関する研究

九州大学大学院 学生会員 ○川崎 隆聖
九州大学大学院 正会員 佐川 康貴

1. はじめに

ジオポリマー（GP）は、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの活性フィラーとアルカリシリカ溶液との縮重合反応による固化体である。セメントを使用しないことから、コンクリートのCO₂排出量削減方法の一つとして近年注目されている。本研究では、GPの練混ぜ直後から加熱養生終了まで（硬化中）の長さ変化、および、脱型後に乾燥状態および封かん状態に置いた状態（硬化後）の長さ変化を測定し、GPの収縮特性について考察した。

2. 試験概要

2.1 使用材料・配合およびGPモルタル作製方法

作製したGPモルタルの配合を表-1に示す。上原らの研究¹⁾を参考に、アルカリシリカ溶液中に含まれるナトリウム（Na）と水（H₂O）のモル比をA/W、ケイ素（Si）とNaのモル比をSi/Aと定義し、表-1に併記した。アルカリシリカ溶液には水ガラス1号（SS）（SiO₂=37.19%、Na₂O=17.57%）と、粒状特級試薬を蒸留水に溶かして調整した3.6mol/LのNaOH水溶液（SH）を使用し、SSとSHの質量比は1.0で固定した。溶液中のH₂O量は、212kg/m³である。活性フィラーには、フライアッシュII種（FA）（密度2.26g/cm³、比表面積4310cm²/g、強熱減量2.88%）と、高炉スラグ微粉末4000（GGBFS）（密度2.91g/cm³、比表面積4160cm²/g、石こうなし）を使用した。細骨材は、JIS R 5201の標準砂（S）を使用した。活性フィラー（P=FA+GGBFS）と溶液（L=SS+SH）の容積比L/Pを1.00に固定し、粉体に対するGGBFSの質量置換率は0%、10%、20%とした。供試体名は、「GGBFS置換率(%)」とした。練混ぜは、容量2Lのホバート型ミキサを使用し、既往の研究²⁾の手順に沿って練り混ぜた。練混ぜ終了後、40×40×160mm用の鋼製型枠に入れ、打設後3時間20℃環境下に静置した後、プログラム式恒温装置を用いて、昇降温度13.3℃/h、保持時間12hの条件で加熱養生を行った。

表-1 GPモルタルの配合および強度試験結果

供試体名	単位量(kg/m ³)				A/W	Si/A	W (kg/m ³)	曲げ強度(N/mm ²)		圧縮強度(N/mm ²)		
	L		P					S	材齢 2日	材齢 28日	材齢 2日	材齢 28日
	SS	SH	FA	GGBFS								
GGBFS 0	167	167	547	0	1350	0.125	0.701	212	2.0	5.4	8.6	14.8
GGBFS 10			504	56					4.6	5.8	28.0	32.7
GGBFS 20			459	115					4.7	5.7	31.2	41.3

2.2 長さ変化試験

GPモルタルの長さ変化特性を把握するため、加熱開始から加熱養生終了までの長さ変化を、あらかじめモルタル内に埋設した埋込型ひずみゲージにより、また、脱型後の乾燥状態（20℃、60%R.H.）および封かん状態（20℃）における長さ変化を、供試体端面に設置したゲージプラグを用いてダイヤルゲージ法により測定した。なお、加熱養生時における型枠による変形の拘束を緩和するため、型枠面にはプラスチックフィルムおよび緩衝材を設置した。加熱養生終了後に脱型を行い、直後にダイヤルゲージを用いて長さ変化の初期値と供試体の質量を測定した。この時点を経硬化後の長さ変化測定における試験期間0日とした。水分の逸散を防ぐため、脱型後に保水養生テープを用いて封かん養生を行った供試体も作製した。試験期間7日目までは1日毎、その後35日目までは7日毎、以降91日目までは14日毎に長さおよび質量を測定した。また、材齢2、28日目に曲げ強度および圧縮強度を測定した。

キーワード ジオポリマー、加熱養生、乾燥収縮、モルタル
連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 九州大学大学院工学部 土木工学専攻 TEL:092-802-3387

3. 試験結果および考察

3.1 強度試験

強度試験結果を表-1に併記する。GGBFS 置換率が大きいほど、また、材齢の経過に伴って強度が高くなった。GGBFS により構造が緻密化したと考えられる。材齢 2 日強度に対する材齢 28 日強度の割合は、GGBFS 置換率が高くなるにつれて小さくなった。GGBFS 置換率が高くなることで、材齢初期の段階から高い強度を示していることが確認できる。

3.2 埋込型ひずみゲージによる測定

図-1 に打設開始から加熱養生終了までの、埋込型ひずみゲージによる、ひずみの測定結果を示す。加熱養生時の昇温に合わせて膨張ひずみが生じているが、その最大値は GGBFS 置換率によって異なり、GGBFS 置換率が大きいほど、膨張が小さくなった。また、加熱温度がピーク値を迎える経過時間 6h 付近で膨張が最大値を示し、その後収縮に転じた。

3.3 長さ変化試験

まず、図-2 に乾燥状態 (20℃, 60%R.H.) での長さ変化率を、また、図-3 に質量変化率を示す。長さ変化率は、GGBFS 10 が最も小さくなり、GGBFS 0 と GGBFS 20 では試験期間 91 日において、大きな違いは確認できなかった。また、GGBFS 置換率が大きくなるにつれて、質量変化率は小さくなった。これは内部の空隙が GGBFS により小さくなり、それに伴い水分の逸散量が小さくなったためであると考えられる。

次に、封かん状態 (20℃) での長さ変化率を図-4 に示す。封かん状態での長さ変化は、乾燥以外の要因による収縮（ここでは、反応収縮という）である。GGBFS 10 と GGBFS 20 では、反応収縮はほとんど認められなかった。しかし、FA のみを用いた GGBFS 0 では約 50×10^{-6} 程度の反応収縮があった。本実験の条件下における反応収縮と、図-2 に示した結果（全ひずみ）とを比べると、全ひずみに対する反応収縮はわずかであり、収縮の大部が乾燥収縮であると分かった。

図-5 に質量変化率と長さ変化率の関係を示す。GGBFS 置換率の違いによって勾配が異なる。モルタル内部の空隙特性の差が原因の一つであると推察されるが、さらなる検討が必要である。

4. まとめ

GGBFS 置換率の増加および材齢の経過に伴い強度は増進し、GGBFS 置換率が高くなることで材齢初期から高い強度を示した。加熱養生時の昇温に伴う膨張は、GGBFS 置換率が高い方が小さくなった。また、加熱養生中に膨張から収縮に転じた。GGBFS 置換率が高いほど質量変化率は小さくなるが、長さ変化率は異なる傾向を示した。FA のみを用いた場合にわずかな反応収縮が認められたが、収縮の大部は乾燥収縮であった。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP19K04558 の助成を受けたものである。関係者各位に謝意を表す。

参考文献：

- 1) 上原元樹, 南浩輔, 平田紘子, 山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質, コンクリート工学年次論文集, Vol37, No.1, pp.1987-1992, 2015
- 2) 楠野寿都, 香島和輝, 佐川康貴, 尾上幸造：ジオポリマーモルタルの製造方法とフライアッシュの品質の違いが乾燥収縮に及ぼす影響, 令和2年度土木学会西部支部研究発表会, V-10, 2021

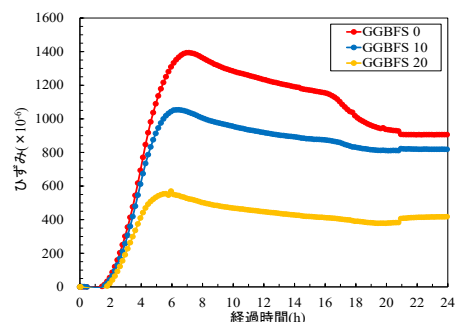


図-1 埋込型ゲージによる測定

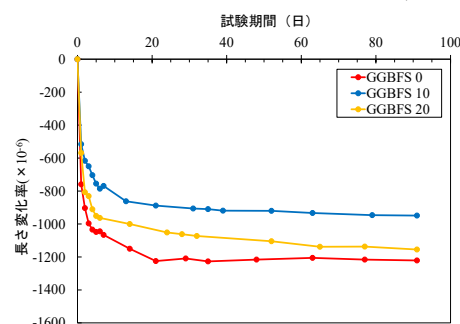


図-2 長さ変化率 (20℃, 60%R.H.)

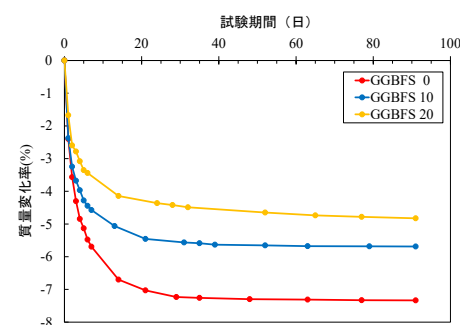


図-3 質量変化率 (20℃, 60%R.H.)

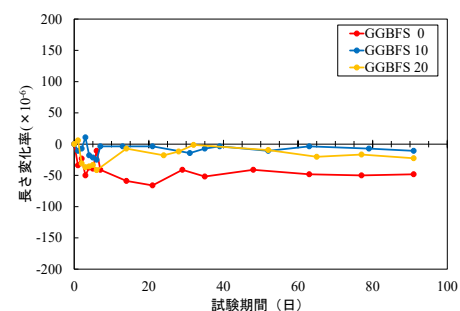


図-4 反応収縮 (20℃)

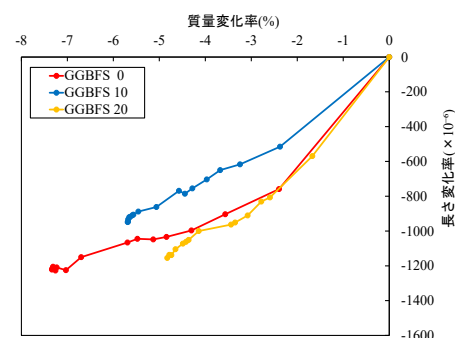


図-5 質量変化率と長さ変化率の関係