

## ジオポリマーモルタルの三軸圧縮特性に関する研究

防衛大学校 学生会員 ○佐伯 祐真 防衛大学校 学生会員 谷田 美月  
 防衛大学校 幸 敬二 防衛大学校 正会員 藤掛 一典  
 日鉄高炉セメント(株) 桑原 直也 日鉄高炉セメント(株) 笹谷 達也  
 富士化学(株) 黒岩 大地

## 1. はじめに

我が国では、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことが表明されており、温室効果ガス排出量の多いセメントに代わる代替材料の開発が必須である。そのため、石炭火力発電所や製鋼所の副産物であるフライアッシュや高炉スラグにアルカリ溶液を混入したジオポリマー（以下GP）が注目されている。また、コンクリート構造ではコンクリートが多軸圧縮応力状態に置かれる場合が多く存在する。そのため、セメントコンクリートの代替材料としてGPの普及を促進するためには、三軸圧縮応力下での力学的特性を調べる必要があると考えた。

## 2. 使用材料

## (1) GPモルタルの製作に用いる粉体

アルミナシリカ粉体としてフライアッシュ（以下FA）（密度が $2.29\text{g/cm}^3$ で比表面積が $4,340\text{cm}^2/\text{g}$ ）及び高炉スラグ微粉末（以下GGBFS）（密度が $2.91\text{g/cm}^3$ で比表面積が $4,070\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。これらの他にカルシウム化合物として、水酸化カルシウム（以下CH）および炭酸カルシウム（以下CC）を使用した。CHおよびCCの密度は、それぞれ $2.21\text{g/cm}^3$ 及び $2.71\text{g/cm}^3$ である。粉体材料の化学成分を表-1に示す。

## (2) アルカリ溶液

12モル濃度のNaOH水溶液と $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ のモル比が2.10のケイ酸ナトリウム溶液を使用した。NaOH水溶液とケイ酸ナトリウム溶液は1:2.5の質量比で混合した。

## (3) 細骨材

細骨材として砂および5号珪砂を使用した。砂の密度、吸水率、粗粒率は、それぞれ $2.50\text{g/cm}^3$ 、0.44%、2.66であり、5号珪砂の表乾密度および絶乾密度はそれぞれ2.61、 $2.60\text{g/cm}^3$ である。表-2に5号珪砂の化学成分を示す。

表-1 各粉体材料の化学成分

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)
FA	65.0	23.2	2.7	0.7	0.4	0.5	1.1	0.2
GGBFS	34.9	14.1	0.3	43.5	5.8	0.3	0.3	-
CH	0.3	0.2	0.1	73.1	0.8	-	-	-
CC	0.5	0.1	0.04	54.2	2.2	-	-	-

表-2 5号珪砂の化学成分

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
割合 (%)	95.08	2.85	0.10	0.52	0.75	0.54	0.04

表-3 各種GPの配合

供試体名	FA (g)	GGBFS (g)	CH (g)	CC (g)	NaOH (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	砂 (g)	珪砂 (g)
FA100/GGBFS0	1800	0	-	-	308.6	771.4	4500	-
FA90/GGBFS10	1620	180	-	-	308.6	771.4	4500	-
FA80/GGBFS20	1440	360	-	-	308.6	771.4	4500	-
FA60/GGBFS40	1080	720	-	-	308.6	771.4	4500	-
FA0/GGBFS100	-	1800	-	-	308.6	771.4	4500	-
FA90/CH10	1620	-	180	-	308.6	771.4	4500	-
GGBFS80/CC20	-	1520	-	380	308.6	771.4	4500	-
GGBFS100	-	2800	-	-	400.0	1000	-	3360

## 3. 各種GPの配合

表-3に各種GPの配合を示す。FA100/GGBFS0, FA90/GGBFS10, FA80/GGBFS20, FA60/GGBFS40, FA0/GGBFS100, FA90/CH10, GGBFS80/CC20においては、アルカリ溶液と粉体材料の比率（アルカリ溶液/粉体比）および砂と粉体材料の比率（砂/粉体比）は、0.6及び2.5とした。GGBFS100においては、アルカリ溶液/粉体比および砂/粉体比は0.5及び1.2とした。

## 4. 三軸圧縮試験

三軸圧縮載荷装置によって各GPの三軸圧縮試験を行った。載荷試験では、所定の設定側圧（ $\sigma_{cp}$ ）まで静水圧載荷（ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ）し、所定の側圧に達した後は側圧（ $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{cp}$ ）を一定に保持した状態で、最大圧縮強度に達するまで軸方向に圧縮応力を作用させた。本実験では、設定側圧を0, 2.94, 5.88, 8.83 MPaとした。

キーワード ジオポリマー、フライアッシュ、高炉スラグ、三軸圧縮、Leonモデル

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 防衛大学校 Tel:046-841-3810 E-mail:em60052@nda.ac.jp

5. 実験結果

(1) 側圧が応力-ひずみ関係に及ぼす影響

図-1 および図-2 に本実験で得られた三軸圧縮応力下の応力 - ひずみ関係の一例を示す。これらの図から、いずれの GP についても側圧が大きくなると最大圧縮強度とその時のひずみは大きくなる事が分かった。

(2) 三軸圧縮応力下での破壊基準

各種 GP モルタルに対して本実験で得られた最大圧縮強度( $\sigma_1$ )とその時の側圧( $\sigma_2 = \sigma_3$ )の関係を一例として図-3 に示す。この図から最大圧縮強度ならびに側圧を一軸圧縮強度で割って無次元化することで、容易に破壊基準を評価することができる。また、比較的単純な破壊基準である直線モデルや Leon モデルを用いて三軸圧縮荷重における破壊基準を定式化した。直線モデルや Leon モデルは以下の式で表される。

(a)直線モデル

$$\frac{\sigma_1}{f'_c} = 1 + k \frac{\sigma_3}{f'_c} \quad (1)$$

(b)Leon モデル

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f'_c}\right)^2 - \left(\frac{1 - h^2}{h}\right)\left(\frac{\sigma_3}{f'_c}\right) - 1 = 0 \quad (2)$$

直線モデルのパラメータ k については直線の傾きを示す。Leon モデルのパラメータ h については、一軸引張強度と一軸圧縮強度の比を示す。本実験結果で得られたパラメータ k および h の値は、100%FA で高温養生した GP と、それ以外の GP で分けて評価できる。パラメータ h について FA100/GGBFS0 は  $h=0.118$ 、それ以外の GP は  $h=0.079$  となる。パラメータ k は、FA100/GGBFS0 では  $k=4.11$  で、その他の場合、パラメータ k と  $f'_c$  の間に次の関係があることが分かった。

$$k = 4.31 + 0.023f'_c \quad (3)$$

図-3 に実験結果と各モデルの比較の一例を示す。

この図から各モデルは実験結果を概ね表現できている。

6. まとめ

- (1) いずれのジオポリマーにおいても、側圧が大きくなると最大圧縮強度とその時のひずみは大きくなる。
- (2) Leon モデルや直線モデルを用いて三軸圧縮荷重における破壊基準を定式化した。ただし、これらの破壊基準は 100%フライアッシュで高温養生した GP と、それ以外の GP では異なることが分かった。

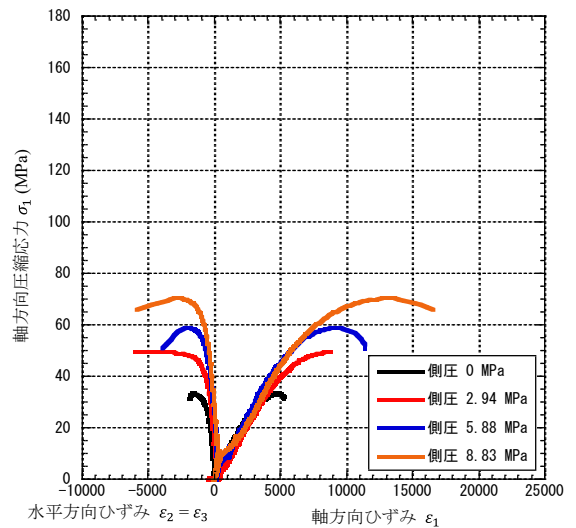


図-1 FA100 / GGBFS0 供試体の三軸圧縮下の応力 - ひずみ関係

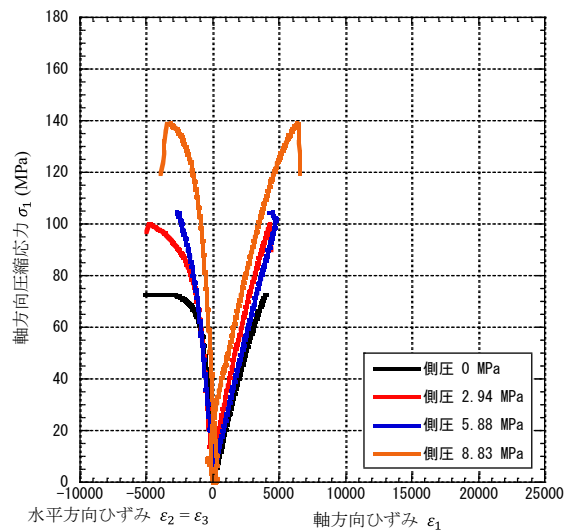


図-2 FA60 / GGBFS40 供試体の三軸圧縮下の応力 - ひずみ関係

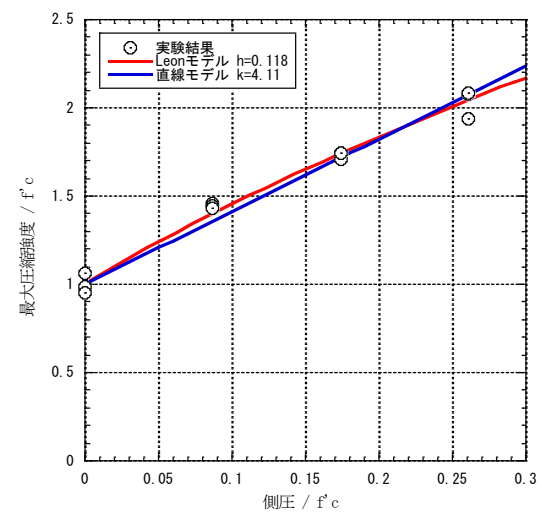


図-3 FA100 / GGBFS0 の最大圧縮強度と側圧の関係