

# ジオポリマー土質材料の圧縮強さ特性に関する基礎的研究

寺井 雅和<sup>†1</sup>

## Study on Compressive Strength Characteristics for Geopolymer Soil materials

Masakazu TERAI <sup>†1</sup>

### Abstract

In this study, some paste specimens and mortar specimens were made of geopolymers using fly ash and blast furnace slag fine powder as active fillers, and experimental studies were conducted on the effects of compressive strength and initial heat curing. Some results obtained in this study are as follows. 1) The compressive strength of geopolymer is greatly affected by the concentration of the alkaline solution, and it is necessary to increase the concentration in order to increase the strength early. 2) It was found that the strength of geopolymer continued to increase with age, although the rise in strength of the initial age was smaller than that of cement. This contrasts with the fact that cement develops strength up to 70-80% of the design strength at the initial age. 3) Under these experimental conditions, there was no difference in the initial strength even when heated during the initial curing, and the initial heating was not desirable for long-term ages.

**Key words:** Geopolymer, Fly Ash, Blast Furnace Slag Fine Powder, Soil, Strength, Curing Method

### 1. はじめに

近年、巨大な台風が数多く発生し、各地に大きな被害をもたらしている。また、ゲリラ豪雨など短い期間に大量の雨量をもたらした結果、土石流が発生したり、河川が氾濫して床上浸水が生じたりする被害が増えてきたように感じられる。このような異常気象の原因は、地球温暖化によるもので、この原因はCO<sub>2</sub>濃度の増加であることは気候変動の科学が証明している事実である。

コンクリートで使用されるセメントは、その製造工程において大量のCO<sub>2</sub>を排出することが知られている。日本国内のセメント需要は頭打ちとなっているが、近年の新興国におけるセメント生産量・使用量の増加状況を見ると、セメント製造時のCO<sub>2</sub>を抑制するか、セメントそのものの使用を削減できないのであれば、これに代わる代替材料の開発が必要となってきている。そこで、最近、セメントの代替材料としてジオポリマーが期待されている。同じ構造物を建設した場合、セメント比較すると約80%のCO<sub>2</sub>排出量を削減できるとの報告があり、この数値が確かなものであれば、今後有効な建設材料になり得る可能性を有している。

環境問題同様、資源問題も世界規模で注目されている。自然界では分解されないペットボトルが海洋ゴミとして

漂流し、離島の海岸を埋め尽くしているというニュースが最近頻繁に聞かれるようになった。廃棄物の対策は、単に廃棄物を焼却して埋め立てるということではなく、排出抑制（リデュース）、再利用（リユース）、再生利用（リサイクル）によって、廃棄物の減量化を促進し、その上でなお処理しなければならない廃棄物について、安全かつ適正に処理するという循環型へ転換していくことが重要であることが、環境省HPで謳われている<sup>1)</sup>。資源の再利用という観点からも、ジオポリマーは注目されている。ジオポリマーの原料となる活性フィラーは、ケイ酸アルミニウムが主成分となるが、これを含むものとして、フライアッシュ、高炉スラグ、下水汚泥などの産業副産物があり、ジオポリマーは資源循環に貢献する材料であると考えられる。

本研究は、環境負荷低減、産業副産物の有効活用の観点から、土を骨材としたジオポリマー材料の開発を目的としている。これまでのジオポリマー研究はポルトランドセメントの代替材料としてコンクリートを対象としたものがほとんどであるが、コンクリートを製造する良質な骨材が減少しているため、砂や砂利に代わり土を原料にした材料開発が期待され、その中でも近年、版築構造が注目を集めている。土をジオポリマーで固化させる研

<sup>†1</sup> 近畿大学工学部建築学科

Department of Architecture,  
Faculty of Engineering, Kindai University

究<sup>2)</sup>は幾つかあるが、基礎的な物性を含めその諸性状は未だ明らかになっていない。本稿では、ジオポリマーを使用したペーストおよびモルタル（細骨材には土を用いた硬化体）を作製し、その圧縮強度や破壊性状について実験的検討を行う。

## 2. ジオポリマーとは<sup>3)</sup>

ジオポリマーは、活性フィラーと称されるケイ酸アルミニウムを含んだ産業副産物とアルカリ溶液との縮重合反応によってつくられる固化体のことであり、1970年代に開発された比較的新しい材料の一つである。開発当初は、原料となったカオリンのケイ酸塩鉱物からの縮合生成物が天然ゼオライトの結晶構造に近いので、地球上の岩石の成因に近いので“岩石の重合体＝ジオポリマー”と名付けられた。その後の研究から現在のジオポリマーに使用されている材料は多様であり、上記の結晶構造とは異なる物質も生成されている。そこで、近年ではジオポリマーは「セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とし他原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液の少なくとも1種類（アルカリ溶液）を用いて硬化させたもの」と定義されている。現在研究が進められているジオポリマーで扱われている、代表的な原料を表1にまとめる。

表1 ジオポリマーの原料

非晶質のケイ酸アルミニウム (活性フィラー)	アルカリ水溶液
フライアッシュ 高炉スラグ微粉末 メタカオリン シリカフェーム 下水汚泥（溶融スラグ微粉末） 火山灰、もみ殻灰	水ガラス（ケイ酸ソーダ） NaOH水溶液（苛性ソーダ） KOH水溶液 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 水溶液 K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 水溶液

## 3. 版築とは

コンクリートや鋼材が社会に登場する以前から、土は建材として世界中で使われてきた。土を固めて作った日干し煉瓦、焼成した煉瓦ブロック、セメントを混入して強度を高めたソイルセメントなどがある。日本でも、古くから土壁や三和土として親しまれてきた建材の一つであった。土を主原料として締め固めた固化物により構造体を構築する構法として『版築』がある。版築は五大陸全てで何百年もの間、伝統的壁構法として築造されてきた。ピラミッドや万里の長城などがその代表例である。版築は、湿った土を型枠の中に注ぎ込み、それぞれの層が厚さ10～15cmになるように、突き棒で突き固めて圧縮する。施工の手間が多めで非生産的である反面、人力で施工可能なこと、地産地消が可能であることから、建設に伴う二酸化炭素の排出量を抑制でき、環境負荷低減へ一定の効果が期待できると考えられている。土という入手しやすい安価な材料で建設するため、モノづくりの基本として近年見直されてきており、洗練された型枠シ

ステムや電動式・空気圧式による突固めの開発により、従来の組積造の有効な代替構法となり得ると言われている<sup>4)</sup>。

版築は、古典的な技法で古くから寺社仏閣などの壁として構築されており、古典的構法では固化材として石灰とにがりを使用しているが、職人の経験に基づいて施工されていることが多く、材料特性など不明な点が多い<sup>5),6)</sup>。現代構法への応用として、セメントを固化材にした版築研究はいくつか見られるが、事例は少ない<sup>7),8)</sup>。また、ソイルセメントは古くから数多く研究されており、地盤改良や路盤材などでの施工事例も多い<sup>9)</sup>。最近では、細骨材資源の枯渇から、土を細骨材としたコンクリートの開発研究も見られる<sup>10),11)</sup>。

表2 試験体要因・水準

要因	水準
使用粉体	高炉スラグ微粉末 フライアッシュ 普通ポルトランドセメント
細骨材（土）	有（モルタル）、無（ペースト）
養生	初期加熱養生、室内気中養生

表3 使用材料

種類	水準	記号	備考
使用粉体	高炉スラグ微粉末	BS	
	フライアッシュ	FA	
	普通ポルトランドセメント	OPC	
溶液	水ガラス3号	WG	
	水酸化ナトリウム水溶液	NH	5%濃度
細骨材	まさ土	S	

表4 調合表

使用粉体	単用量(g/L)						
	BS	FA	WG	NH	OPC	W	S
BSペースト	1424	-	740	-	-	-	-
BSモルタル	670	-	536	-	-	-	1072
FAペースト	-	1463	349	163	-	-	-
FAモルタル	-	760	259	121	-	-	1072
OPCペースト	-	-	-	-	1622	487	-
OPCモルタル	-	-	-	-	783	352	1072

## 4. 実験概要

ジオポリマーは、様々な物質から作製することができる。本研究では、そのジオポリマーを使用したペーストおよび、土を細骨材に使用したモルタルの供試体を作製し、圧縮強度および破壊性状について実験的検討を行う。なお、ジオポリマーは新しい研究分野であるため、コンクリートのような配合設計法は確立されていない。そこで、既往の研究<sup>12)</sup>の調合条件や調合表を参考に再現実験を行うことを試みた。また、フライアッシュを使用したジオポリマーは、養生期間中の温度や湿度の変化の影響を強く受けることが知られている<sup>13)</sup>。本研究では、養生（特に初期養生）温度の違いについても検討を行った。

#### 4.1. 実験の要因と水準

表2に試験体要因・水準を、表3に使用材料を、表4に調査表を示す。

使用粉体（活性フィラー）は、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用、比較のために普通ポルトランドセメントも使用した。細骨材は、5mm程度の網でふるった真砂土を使用する。実験パラメータとして、この他に養生条件の違いとして、初期養生時に60℃の乾燥炉に24時間入れたものを検討した。

アルカリ溶液は、水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液の二種類を使用し、高炉スラグ微粉末には水ガラスを、フライアッシュには水ガラスに加えて強度発現のための水酸化ナトリウム水溶液を内割で置換して用いた。前述の通り文献12を参考に材料を揃えたが、水ガラスは文献12では2号であるのに対し、本研究では3号を使用した。これらの違いは二酸化ケイ素濃度で、2号は34~36%、3号は28~30%がJIS規格(K1408)であり、本実験で使用した3号の方が濃度は小さい。また、水酸化ナトリウム水溶液は、一般的なジオポリマー作製では10mol/L濃度のものを使用するが、本研究では極めて薄い5%濃度のものを使用した。

#### 4.2. 供試体作製方法

本実験では、円柱供試体(φ50×100mm)を作製した。ペースト、モルタルの練混ぜには、小型のモルタルミキサーを使用した。紙製のモールドに2層に分け、各層をジグギングで空気を抜いて締め固めた。

#### 4.3. 養生方法

打設後、表面をコテ仕上げし、乾燥を防ぐために上面をビニールで密封した。材齢2日目に脱型し、室温20±2℃、湿度55±5%程度の室内で気中養生とした。なお、フライアッシュを使用した供試体については、同じものを2セット作製し、一方を打設直後に60℃の乾燥炉で24時間初期加熱養生を行った後、炉から出し室温程度に冷ました後に脱型し、その後他の供試体と同じ気中養生を行った。

表5 供試体の実験結果一覧（材齢28日目）

		単位体積質量 (g/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
A	高炉スラグ微粉末	ペースト	20.3
B		モルタル	19.6
C	フライアッシュ	ペースト	14.4
D		モルタル	16.9
E	セメント	ペースト	18.5
F		モルタル	19.3
G	フライアッシュ <加熱養生>	ペースト	14.2
H		モルタル	16.4

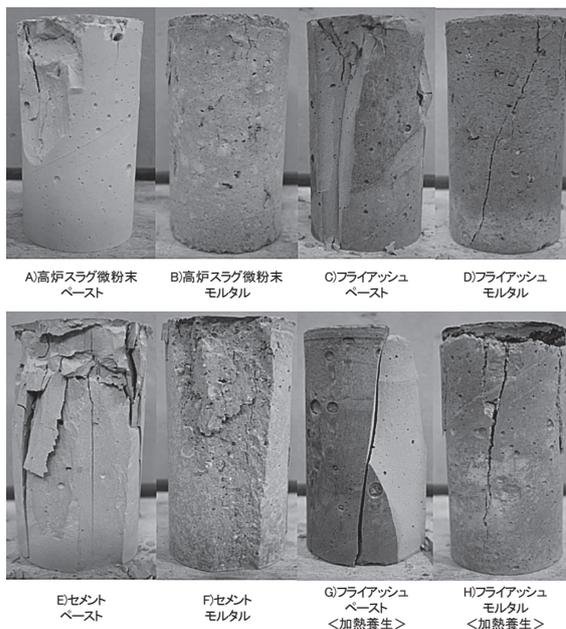


図1 供試体の破壊状況（材齢28日目）

表6 圧縮強度の材齢による推移（単位：N/mm<sup>2</sup>）

		材齢(日)		
		8	15	28
A	ペースト	2.7	6.1	16.4
	高炉スラグ微粉末			
B	モルタル	2.8	6.7	13.2
C	ペースト	1.0	2.0	10.3
	フライアッシュ			
D	モルタル	1.0	1.5	2.8
E	ペースト	23.8	29.1	37.7
	セメント			
F	モルタル	25.4	30.6	26.5
G	ペースト	0.9	2.7	4.2
	フライアッシュ <加熱養生>			
H	モルタル	0.9	1.3	1.2

#### 5. 実験結果および考察

##### 5.1. 単位体積質量

表5に、材齢28日目における単位体積質量と圧縮強度の結果一覧を示す。高炉スラグ微粉末のジオポリマーはセメント供試体と同程度の単位体積質量であることがわかる。フライアッシュのジオポリマーは、非常に軽い材料であることがわかる。

##### 5.2. 破壊性状

図1に圧縮試験後の破壊した供試体の写真を示す。ペーストの3つ(A, C, E)を比較すると、セメントペーストは多数のひび割れが供試体全域に発生し、細かい破片に分割しながら崩れていることがわかる。高炉スラグ微粉末ペーストは荷重変形関係を計測していないが、非常に剛性は小さいと思われる、全体が縮みながら一部が剥離するような壊れ方をした。フライアッシュペーストは縦に大きなひび割れが発生し、その破壊片は、薄片状、

節理状に割れるように破壊した。

土を細骨材に入れたモルタル供試体は、ペースト供試体よりも細かいひび割れが複数発生し、破壊片も小さく砕けるように破壊した。

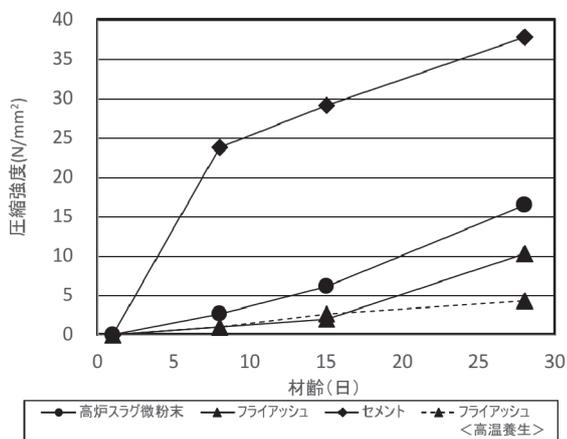


図2 ペーストの圧縮強度

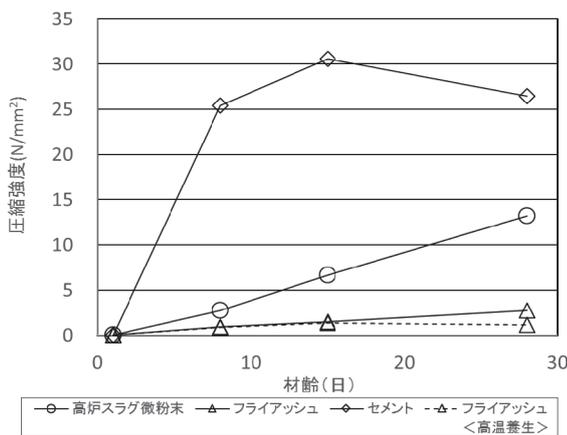


図3 モルタルの圧縮強度

### 5.3. 圧縮強度結果

表6に材齢8, 15, 28日目の圧縮強度の値, 図2にペーストの材齢を圧縮強度の関係を, 同じく図3にモルタルの関係をそれぞれ示す。

はじめに, ペースト供試体 (図2) を見る。セメント供試体は, 水セメント比45%で調合しているので, 圧縮強度40N/mm<sup>2</sup>程度だったのは設計通りと言える。ジオポリマー供試体の強度は10~15N/mm<sup>2</sup>となりセメントに比べ1/2以下である。もとの調合では, セメントと同程度の強度を狙って設計されていたが, 本実験で使用したアルカリ水溶液は, 水ガラスが3号, 水酸化ナトリウム水溶液が5%と, 十分な濃度ではなかったためと考えられる。しかし, セメントに比べ初期材齢の強度の立ち上がりが小さい割に, 材齢とともに強度は上がり続けることが分かる。セメントが8日間材齢で設計強度の7割程度まで強度発現があることと対照的である。ジオポリマーの縮重合反応は温度や湿度の変化に強く影響を受ける

ことが知られており, 本実験でも特に対策がなければ, 初期強度発現は期待できないことがわかった。初期強度発現が小さい場合, 型枠の脱型時期が遅れるので, 実施工においては作業効率が悪くなると考えられ, 今後改めて検討が必要である。

次に, モルタル供試体 (図3) であるが, 強度発現の推移はペースト供試体とほぼ同じである。しかし, ペーストに比べ圧縮強度は低めになっている。特に, フライアッシュの供試体は, 28日目でペースト10.3N/mm<sup>2</sup>に対してモルタル2.8N/mm<sup>2</sup>と極めて低くなっている。単位体積質量で比較しても, 高炉スラグ微粉末供試体と比べてかなり軽くなっており, フライアッシュを用いた場合に空気が抜けにくいなどの原因があったと考えられる。

### 5.4. 養生方法の違い

ジオポリマーの強度発現を促進するには, 養生温度を高くする, アルカリ溶液の濃度を大きくする, 活性フィラーの混合割合を調整する, などが検討されている。本研究では, 養生温度の違いが初期強度発現に及ぼす影響を確認するために, フライアッシュペーストおよびモルタル供試体に対して, 加熱養生したものと加熱しないもので比較を行った。加熱の条件は4.3で示す通りである。

図2と図3の点線が加熱養生した供試体であるが, ペーストもモルタルも, 材齢15日目まではほとんど同じ強度発現を示しているが, 28日目は加熱養生をした供試体は強度発現が小さくなっている。理由はわからないが, 加熱をしても初期強度発現に違いは見られないこと, 長期材齢においては初期の加熱は望ましくないという結果が得られた。既往の研究<sup>13)</sup>では, 加熱をすると初期硬化が早まり, 長期強度も上がることが認められている。養生条件として, 加熱温度だけではなく, 水分環境も大きく影響していることが明らかとなっており, 養生条件の違いが硬化に及ぼす影響は今後明らかにしていく必要があると考えられる。

### 6. まとめ

本研究では, フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとして, ジオポリマーでペースト供試体およびモルタル供試体を作製し, 圧縮強度の発現および初期加熱養生の影響について実験的検討を行った。本実験で得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) ジオポリマーの硬化強度は, アルカリ溶液濃度の影響を多分に受け, 強度発現を早く大きくするためには, 濃度を大きくする必要がある。
- 2) ジオポリマーの強度発現は, セメントに比べ初期材齢の強度の立ち上がりが小さい割に, 材齢とともに強度は上がり続けることが分かった。セメントが初期材齢で設計強度の7割程度まで強度発現があることと対照的である。
- 3) 本実験条件の下では, 初期養生時に加熱をしても初期強度発現に違いは見られない, また長期材齢においては初期の加熱は望ましくないという結果が得られた。

参考文献

- 1) 環境省HP : [www.env.go.jp/recycle/kosei\\_press/](http://www.env.go.jp/recycle/kosei_press/) (参照 2019-11-24)
- 2) Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Heah Cheng Yong, and Liew Yun Ming: “*Clay Based Geopolymers: Processing & Characterization*”, LAP LAMBERT Academic Publishing (2012)
- 3) 日本コンクリート工学会: 「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書」, 日本コンクリート工学会 (2017)
- 4) ゲルノート・ミンケ著: 「土・建築・環境: エコ時代の再発見」, 西村書店 (2010)
- 5) 赤谷樹一郎, ほか3名: “荒木田土を用いた版築壁の強度性状に及ぼす調合および施工要因の影響に関する研究”, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第82巻, pp.41-44 (2012)
- 6) 荒木裕行, ほか2名: “伝統的な版築壁材料の一軸圧縮試験”, 生産研究, 62巻6号, pp.611-615 (2010)
- 7) 橋本佳大, ほか2名: “版築による土壁の築造方法に関する研究: その1: 最適含水比と固化材添加量”, 日本建築学会大会 (近畿) 学術講演梗概集B-1, 第2005巻, pp.729-730 (2005)
- 8) 藤井衛, ほか2名: “普通ポルトランドセメントを用いたソイルセメントの一軸圧縮強さについて”, 日本建築学会構造系論文報告集, 第441号, pp.9-16 (1992)
- 9) 川村政史, 笠井芳夫: “ソイルセメントコンクリート製造のための土の見掛けの表乾状態試験方法に関する実験研究”, コンクリート工学論文集, 第7巻1号, pp.103-111 (1996)
- 10) 相楽哲平, 出村克宣: “土舗装材料としてのまさ土の利用”, 日本建築学会大会 (近畿) 学術講演梗概集A-1, 第2005巻, pp.971-972 (2005)
- 11) 古河幸雄, ほか4名: “コンクリート用細骨材としてのまさ土の利用に関する基礎研究”, 土木学会論文集, No.750, pp.159-170 (2003)
- 12) 坪内徹朗, ほか3名: “ポーラスジオポリマーコンクリートの圧縮強度および乾燥収縮特性に関する実験的研究: その1: 実験概要および圧縮強度試験結果”, 材料施工, 第2016巻, pp.1501-1502 (2016)
- 13) 八名英佑, 近藤文義: “初期加熱および養生条件の違いがジオポリマー硬化体の圧縮強度に及ぼす影響”, 農業農村工学会論文集, 第87号1巻, pp. II\_39-II\_45 (2019)