

ジオポリマーモルタルの適切な初期養生条件と CO₂ 排出量の評価

内村 陽介
Yosuke Uchimura

概 要

ジオポリマーは、一般のセメントに比べて製造時の CO₂ 排出量が少なく、各種副産物を有効利用でき環境に配慮された材料である。本研究は、ジオポリマーの適切な初期養生条件を考案し CO₂ 排出量の評価を行うことを目的とする。ジオポリマーは給熱養生により活性フィラーとアルカリ溶液の反応が促進して早期の強度発現が促される。養生温度が高く、最高温度保持時間が長いほど、養生直後の強度が増進する。本研究では、温湿度を可変させた各種環境条件下で初期養生（成型後 6 時間）を行い強度発現に十分な初期養生の条件を考案した。またジオポリマーモルタルの CO₂ 排出量を算出し、セメントモルタルと比較したときの削減率を求めることで CO₂ 排出量削減の効果が明確になると考える。本研究では原単位の引用元を土木学会の成果報告書に絞り、CO₂ 排出量の計算を行うことで、引用元と計算結果に整合性のとれた CO₂ 排出量が確認できた。

Requirement of Appropriate Initial Curing Method for Geopolymer Mortar and Evaluation of CO₂ Emissions

Abstract

Geopolymers are an environmentally friendly material that emits less CO₂ during production than regular cement and effectively uses various by-products. This study aims to devise an appropriate initial curing method for geopolymers and evaluate CO₂ emissions. When geopolymers are cured with heat, the reaction between the active filler and the alkaline solution is accelerated, promoting early strength development. The higher the curing temperature and the longer the maximum temperature retention time, the greater the strength immediately after curing. In this study, initial curing (6 hours after molding) was performed under various environmental conditions with varying temperatures and humidity, and the conditions for initial curing sufficient for strength development were devised. We also believe that the effects of reducing CO₂ emissions will become clear by calculating the CO₂ emissions of geopolymer mortar and determining the reduction rate compared to cement mortar. In this study, by limiting the source of the unit citation to the results report of the Japan Society of Civil Engineers and calculating the CO₂ emissions, we could confirm that the source of the citation and the calculation results were consistent with the CO₂ emissions.

キーワード：ジオポリマー，モルタル，初期養生，フライアッシュ，
高炉スラグ微粉末，CO₂ 排出量

1. はじめに

ジオポリマーは、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、水ガラスと苛性ソーダと水を混ぜたアルカリ溶液を反応させることによって形成される非晶質の縮重合体の総称である。一般のセメントに比べて製造時のCO₂排出量が少なく、各種副産物を有効利用でき環境に配慮された材料である¹⁾。将来、建築材料として活用されるべき材料と考える。

ジオポリマーは、給熱養生により活性フィラーとアルカリ溶液の反応が促進して早期の強度発現が促される。本報では早期の強度発現が十分な環境下を探るために、各種環境条件下で初期養生（成型後6時間）の違いによる曲げ・圧縮強度を確認しその結果を報告する。

またジオポリマーのCO₂排出量を土木学会の成果報告書²⁾に記載される原単位を用いて算出し、セメントから置き換えたときの削減率を求め、CO₂排出量削減の効果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料を写真1と表1に示す。フライアッシュ及び高炉スラグ微粉末の混合系を活性フィラーとする。フライアッシュはJIS A6201³⁾に定めるII種を使用する。高炉スラグ微粉末はJIS A6206⁴⁾に定める4000級とし、製作上・性能上せっこう添加なしが望ましいが今回は材料手配の都合でせっこう添加ありの材料を使用する。

アルカリ溶液は水ガラスとNaOH溶液と水を混ぜたものとする。水ガラスは日本無機薬品協会規格⁵⁾に定める2号を使用する。



写真1 使用した材料（抜粋）

表1 使用材料

項目	材料	備考
活性フィラー	フライアッシュ (FA)	JISII種 密度：2.24g/cm ³ 比表面積：3,710 cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 (BFS)	JIS A 6206 4000 級 密度：2.89 g/cm ³ 比表面積：4,710 cm ² /g せっこう添加：有
アルカリ溶液	水ガラス (WG)	2号 密度：1.53 g/cm ³
	苛性ソーダ (NaOH)	NaOH：48% 水溶液
	水 (H ₂ O)	上水道水
骨材	細骨材 (S)	珪砂5号

2.2 調合

ジオポリマーモルタルの調合を表2に示す。調合は土木学会の成果報告書²⁾を参考に作成し、検査成績書よりNa、Si、H₂Oの含有量を求めアルカリ成分/水のモル比(A/W)、ケイ素成分/アルカリ成分のモル比(Si/A)、単位水量を算出した。

練り混ぜは、以下の手順で行う。

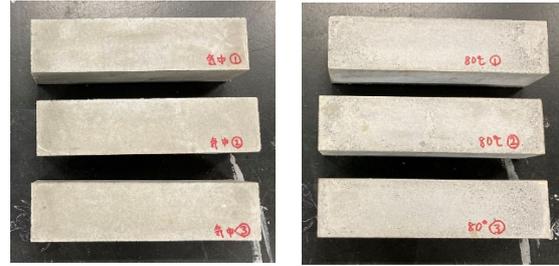
- ①モルタルミキサー5Lに細骨材を少量投入しフライアッシュと高炉スラグ微粉末を入れたあとに残りの細骨材で蓋をするように投入する。
- ②低速で2分半攪拌したあと高速で30秒攪拌する。
- ③ミキサー内の粉体が十分に混ざったことを確認してから混ぜ合わせたアルカリ溶液を投入する。
- ④低速で2分攪拌したあと高速で1分攪拌する。攪拌後の状況を写真2に示す。
- ⑤十分に混ざったことを確認し、強度試験用のモルタル用三連型枠に流し込みテーブルバイブレータで振動を与えて成型する。

表2 ジオポリマーモルタルの調合

FA	BFS	WG	NaOH	H ₂ O	S	A/W	Si/A	単位水量
kg/m ³						モル比		kg/m ³
434	140	155	52	141	1,297	0.095	0.599	248



写真2 練り混ぜ直後の状況



(左：条件1 右：条件7)

写真3 養生後の試験体状況

2.3 初期養生時の環境条件

初期養生時の環境条件を表3に示す。

ジオポリマーは給熱養生することで反応が促進されるため、環境条件は乾燥器や恒温恒湿器で熱を与えながら養生することとした。

温度は20℃、30℃、40℃、60℃、80℃とした。湿度は、恒温恒湿器での養生は制御し、乾燥器での養生は測定で確認した。条件6、7は試験の都合上、湿度を確認できなかったが乾燥器による加熱で水分が飛んでしまうため低湿度の環境であると推測される。

初期養生時間は、実際に工場で作成することを想定して定める。工場での製造工程は朝に練り混ぜて成型シタ方には初期養生を終えていることが望ましいため、初期養生を6時間とした。試験体は密閉せずに初期養生を行った。初期養生後は23℃50%RH(温度23度 相対湿度50%)の環境下で4週まで存置する。4週後の試験体を写真3に示す。

表3 各種環境条件

条件	環境条件	備考
1	20℃50%RH	初期養生時の処方なし (室内静置)
2	30℃25%RH	30℃乾燥器で初期養生
3	30℃85%RH	恒温恒湿器で初期養生
4	40℃15%RH	40℃乾燥器で初期養生
5	40℃85%RH	恒温恒湿器で初期養生
6	60℃ (湿度制御なし)	60℃乾燥器で初期養生
7	80℃ (湿度制御なし)	80℃乾燥器で初期養生
8	80℃85%RH	恒温恒湿器で初期養生



(左：曲げ強さ 右：圧縮強さ)

写真4 強度試験の状況

2.4 強度試験

JIS A 1171⁹⁾に準じて曲げ強さの試験と圧縮強さの試験を行う。試験の状況を写真4に示す。

曲げ強さ試験は3体行い、圧縮強さ試験は曲げ強さ試験後の3本の試験体の両折片について行う。

試験の載荷速度は、曲げ強さ試験 50±10N/秒、圧縮強さ試験 800±50N/秒とする。

曲げ強さ $b(N/mm^2)$ は、最大荷重 $w(N)$ の平均値から式(1)によって算出する。

$$b = w \times 0.00234 \quad (1)$$

圧縮強さ $\sigma_c(N/mm^2)$ は、最大荷重 $P(N)$ の平均値から式(2)によって算出する。

$$\sigma_c = P / 1,600 \quad (2)$$

2.5 CO₂排出量の算出

土木学会の成果報告書¹⁾に記載されている原単位を用いてCO₂排出量の算出を行う。原単位の引用元は様々あるが今回は土木学会の成果報告書¹⁾に絞って評価する。

セメントモルタルの調合⁷⁾を表4とし、ジオポリマーモルタルとセメントモルタルのCO₂排出量を算出し比較して削減率を算出する。

表4 セメントモルタルの調合 (kg/m³)

セメント	S	H ₂ O
512	1,535	256

3. 結果及び考察

3.1 強度試験の結果

曲げ強さの試験結果を図1に示す。

図1より、20°C50%RH、60°C（湿度制御なし）、80°C（湿度制御なし）の環境下において他と比べて曲げ強さが低い結果であった。

20°C50%RHの環境下については、他の条件と比べると初期の硬化が不十分で強度が発現していないことが原因であると考えられる。

60°C（湿度制御なし）、80°C（湿度制御なし）の環境下については、乾燥時に生じたひび割れが影響したため（写真5参照）曲げ強さが低い値となったと考える。一方で、80°C85%RHの結果はひび割れが生じず強度が出ていたことから高温であっても湿度を高くして水分を与えることでひび割れを防ぐことができると考える。

20°C50%RH、60°C（湿度制御なし）、80°C（湿度制御なし）を除くすべての結果については、曲げ強さが3N/mm²以上の結果であった。JISA5308「レディーミクストコンクリート」⁸⁾の舗装コンクリートでは曲げ強度4.5N/mm²が規定されており、その基準は下回る結果であった。仮にジオポリマーを舗装コンクリートに適用することを考えると強度向上の施策が必要である。

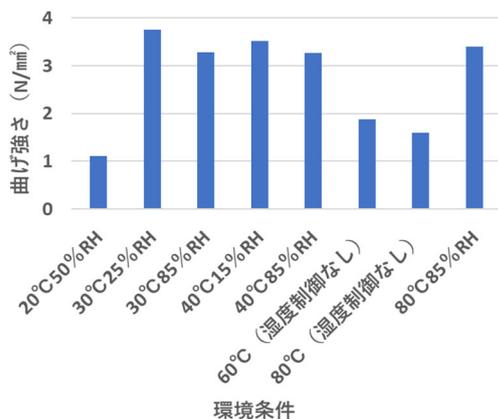


図1 曲げ強さの結果 (4週)

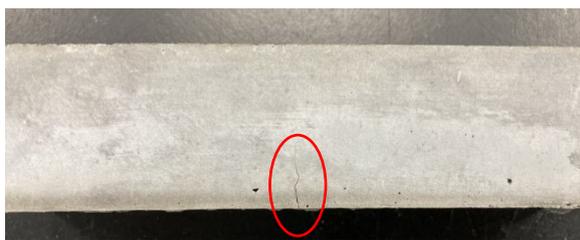


写真5 ひび割れの状況

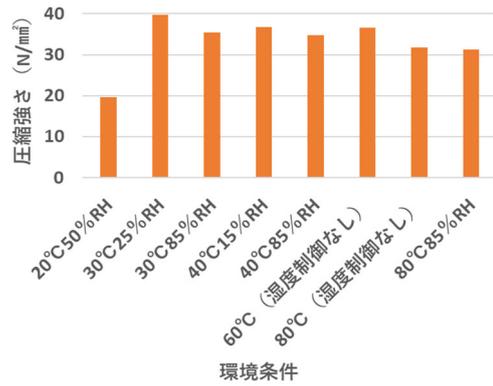


図2 圧縮強さの結果 (4週)

表5 コンクリートブロック規格

規格	圧縮強さ	主な用途
A種	8 N/mm ²	園芸用
B種	12 N/mm ²	屋内用ブロック
C種	16 N/mm ²	外構のブロック塀
D種	20 N/mm ²	構造用、ブロック建築用

圧縮強さの試験結果を図2に示す。

図2より、20°C50%RHの環境下において他と比べて圧縮強さが低い結果であった。

20°C50%RHでの養生は、曲げ強さの結果と同様に初期の硬化が不十分で強度が発現していない結果であった。

20°C50%RHを除くすべての結果については、圧縮強さが30N/mm²以上の結果であった。

JISA5406「建築用コンクリートブロック」⁹⁾より（表5参照）、20°C50%RHの環境下の結果はA種、B種、C種の基準を満たした。20°C50%RHを除くすべての環境下の結果はA種、B種、C種、D種の基準を十分に満たした。JISA5406には圧縮強さの他に質量吸水率や防水性といった性能も求められているため、商品化に向けては検討する必要がある。

図1、図2より、曲げ強さ及び圧縮強さの強度発現が良好な環境下として、30°C以上が望ましいと考える。また60°C以上のような高温下においては湿度を高く保つ必要がある。

3.2 CO₂排出量の算出結果

ジオポリマーモルタルのCO₂排出量の算出結果を表6に示す。

表6より、強度試験の調合における1m³あたりの使用量からCO₂排出量を算出したところ1m³あたり236.1kg-CO₂であった。

表 6 ジオポリマーモルタルの CO₂排出量

材料	使用量 (kg/m ³)	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)
FA	434	44.4	19.3
BFS	140	59.9	8.4
WG	155	1,250.0	193.8
NaOH	52	227.0	11.8
H ₂ O	141	1.0	0.1
S	1,297	2.1	2.7
合計	—	—	236.1

表 7 セメントモルタルの CO₂排出量

材料	使用量 (kg/m ³)	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)
セメント	512	786	402.4
S	1,535	2.1	3.2
H ₂ O	256	1.0	0.3
合計	—	—	405.9

使用量は細骨材やフライアッシュが大きいですが、CO₂排出原単位の影響で水ガラスが最も CO₂排出量が大きい結果であった。

セメントモルタルの CO₂排出量の算出結果を表 7 に示す。

表 7 より、表 4 における使用量にそれぞれの材料の CO₂排出原単位をかけて CO₂排出量を算出したところ 1 m³あたり 405.9 kg-CO₂であった。

CO₂排出原単位の影響で、セメントが CO₂排出量の割合を大きく占める結果であった。

ジオポリマーモルタルとセメントモルタルを比べて削減率を算出した結果を図 3 に示す。

図 3 より、セメントモルタル (405.9 kg-CO₂/m³) をジオポリマーモルタル (236.1 kg-CO₂/m³) に置き換えたときの削減率は 41.8%であった。削減率を大きくするためには、ジオポリマーモルタルの CO₂排出量を小さくする必要がある。ジオポリマーモルタルの CO₂排出量は水ガラスが占める割合が大きいいため、アルカリ溶液の材料について原単位の低いものを選ぶ、または水ガラスの製造方法を精査し原単位を見直すことで CO₂排出量はさらに小さくなる。

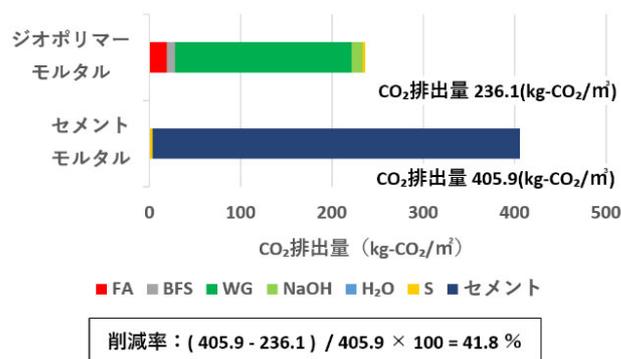


図 3 各 CO₂排出量と CO₂削減率

一方で、水ガラスは硬化に影響を与える材料であり、CO₂排出量だけみて安易に材料選定してしまうと求める性能を実現できないため、材料選定と性能確認を並行して調合作成していく必要がある。

4. まとめ

ジオポリマーモルタルの各種環境条件下における養生後の強度に関して、以下の知見を得た。

- ・20°C50%RH の環境下では、4 週の強度発現が他の水準と比べて不十分であった。
- ・60°C以上の高温で初期養生をした場合、湿度制御を行い、湿度を高く保つ必要がある。

また、ジオポリマーモルタルの CO₂排出量の評価を行い、以下の知見を得た。

- ・ジオポリマーモルタルの CO₂排出量をさらに抑えるにはアルカリ溶液の材料選定、調合割合を見直す、あるいは水ガラスの製造方法を精査し原単位を見直すことが重要である。

参考文献

- 1) 一宮一夫, 池田攻, 上原元樹, 他: 低炭素材料としてのジオポリマーの普及・活用, コンクリート工学年次論文集, Vol.59, No.9, pp.794-799, 2021.
- 2) 公益社団法人 土木学会: 土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究 小委員会 (361 委員会) 成果報告書, コンクリート技術シリーズ No.132, p.12, p.125, 2022.
- 3) 日本工業標準調査会: コンクリート用フライアッシュ, JIS A 6201, 2015.
- 4) 日本工業標準調査会: コンクリート用高炉スラグ微粉末, JIS A 6206, 2013.

- 5) 日本無機薬品協会珪酸ソーダ部会：けい酸ナトリウム（けい酸ソーダ），2022.
- 6) 日本工業標準調査会：ポリマーセメントモルタルの試験方法，JIS A 1171，2016.
- 7) 一宮一夫，津郷俊二，原田耕司，他：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.575-580，2011.
- 8) 日本工業標準調査会：レディーミクストコンクリート，JIS A 5308，2019.
- 9) 日本工業標準調査会：建築用コンクリートブロック，JIS A 5406，2017.

執筆者紹介

ひとこと

ジオポリマーが低炭素社会の実現に有効であることに着目し研究に励みました。これからは建築材料として使うことを目指して技術開発に臨みます。



内村 陽介
修士（工学）