

## セメントの添加によるジオポリマーの収縮特性変化

|        |      |             |
|--------|------|-------------|
| 東京工業大学 | 学生会員 | ○Lim Horhok |
| 東京工業大学 | 正会員  | 岩波 光保       |
| 東京工業大学 | 正会員  | 千々和 伸浩      |
| 東京工業大学 | 正会員  | 中山 一秀       |

## 1. はじめに

コンクリートはセメントと水との水和反応で硬化したものであり、セメントの製造により、大量の  $\text{CO}_2$  が発生し、環境問題の原因の 1 つになっている。一方、ジオポリマーはセメントコンクリートと違い、活性フィラーとアルカリ溶液との脱水縮重合反応で硬化したものであり、活性フィラーには産業廃棄物であるフライアッシュ等を活用し、環境に優しい材料となる。ところが、脱水縮重合反応によって、硬化体内部に水分が生成され、その水分が蒸発することで、硬化体が乾燥収縮を起こす。そこで、ジオポリマーの活性フィラーであるフライアッシュの一部をセメントに置き換えることによって、脱水縮重合によって生じた水分とセメントが水和反応をすることで、乾燥収縮を抑制できるのではないかと考えられる。本研究では、ジオポリマーにセメントを添加した際の硬化体の収縮特性変化を調べ、そのメカニズムを明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験概要

骨材を使用せず、水ガラス、 $\text{NaOH}$ 、水から成るアルカリ溶液 ( $\text{Si}_2\text{O}/\text{NaOH}$  モル比=0.707、 $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}$  モル比=0.102) とフライアッシュを用いたジオポリマーの配合で、フライアッシュの体積の 0%、5%、10% をセメントで置き換える供試体を作製した。ジオポリマーの脱水縮重合反応とセメントの水和反応の間に水の移動が生じると考えられるため、供試体を封緘状態で養生し、供試体の硬化過程での外部と水の出入りを封じた。高温環境下ではジオポリマーの硬化反応が大きく促進されると報告されており<sup>1)</sup>、はじめの 24 時間は室温 (20℃) あるいは高温 (40℃、60℃) で養生を行ってから、7 日あるいは 28 日まで 20℃ で供試体を養生した。

40x40x40 mm の角柱供試体でコンタクトゲージを用

いて収縮を測定した。合わせて、 $\phi 50 \times 100$  mm の円柱供試体を用いた圧縮試験を行った。また、水銀圧入式ポロシメータ (MIP) 試験を行い、硬化体の空隙分布を分析し、硬化コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす空隙の大きさや体積を求め、乾燥収縮との関係を考察した。そして、走査型電子顕微鏡 (SEM) を利用し、反応生成物の微細構造を観察した。脱水縮重合反応と水和反応の生成物を観察することで、その 2 つの反応の共存を考慮し、互いへの影響そして硬化体全体の強度や収縮といった特性への影響を調べた。

## 3. 結果と考察

## 3.1. ジオポリマーの硬化

図 1 は圧縮試験の結果を示す。0% 7 日はセメント置換率 0% (以下「OPC 0%」) で 7 日養生の供試体を表す。20℃ で 7 日養生を行った場合、セメントの添加によって供試体の圧縮強度の増加が見られたが、それ以外の養生条件では圧縮強度が低下した。これは、ジオポリマーのアルカリ溶液が持つ高アルカリ環境下でセメントの水和反応が急速に起きることと関係すると考えられている<sup>2)</sup>。セメントの水和が急速に進んで、水を消費するとき、ジオポリマーの原料であるフライアッシュ等の溶出に必要となる水が激減し、ジオポリマーの硬化反応も難しくなる。図 2 は SEM で観察した反応生成物の微細構造写真を示す。セメントが含まれることで、水和物が見られた反面、ジオポリマーの反応生成物と思われるもの

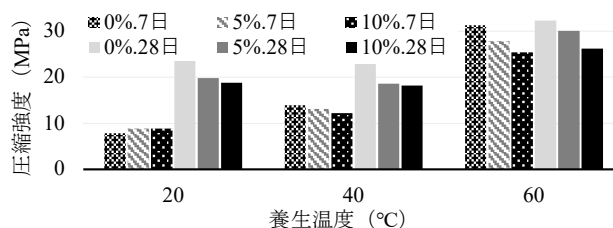


図 1 圧縮強度

キーワード ジオポリマー, セメント, 乾燥収縮, 脱水縮重合反応, 水和反応, 空隙分布  
 連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 緑が丘 1 号館 513 号室  
 TEL03-5734-3194

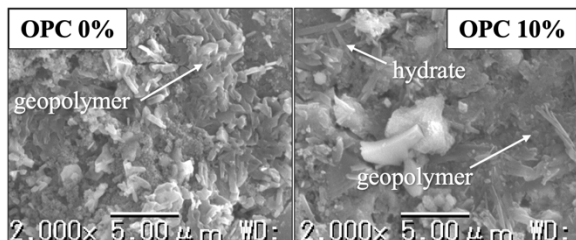


図2 生成物の微細構造 (20°C、28日養生)

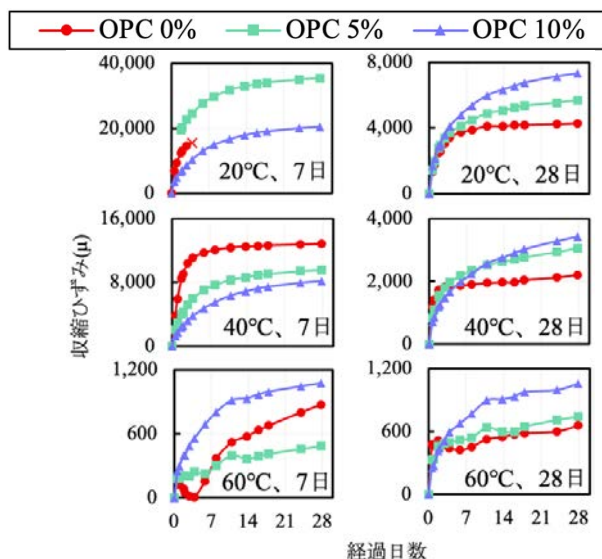


図3 各養生条件の収縮ひずみ

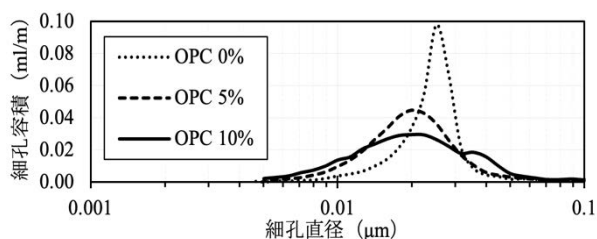


図4 空隙分布 (40°C、28日養生)

がより細くなり、ジオポリマーの硬化反応に影響を与えたと考えられる。20°Cで7日養生を行った場合、ジオポリマーの強度発現がまだ遅く、水和物が支配的であったため、圧縮強度が大きくなった。一方、養生温度が上がる、または養生期間が長くなると、ジオポリマーによる強度発現が支配的になり、大きく影響を受けると考えられる。

### 3.2. 収縮

図3から、セメントを添加することによって、「20°C、7日」と「40°C、7日」養生では収縮が小さくなり、それ以外の養生条件では収縮が大きくなり、2つの場合に分かれた。

圧縮強度が比較的に小さい「20°C、7日」と「40°C、7日」の養生条件のケースの供試体はセメントが増えるに伴い収縮が小さくなった。強度が小さい硬化体は反応

生成物の骨格自体が弱く、収縮しやすい。水分が多ければ多いほど、乾燥が激しく、収縮が大きい。ジオポリマーは理論上水を必要とせず、フライアッシュなどジオポリマーの原料に含まれるけい酸塩イオンやアルミン酸塩イオンの溶出にのみ水が必要で、消費されたりすることはない。脱水縮重合反応で生じた水とともに、練混ぜ時から使った水は硬化してもそのまま空隙を埋める。セメントが含まれない場合は、その水分が硬化体中に多く存在するため、その水分が蒸発することで収縮が大きくなる。一方、セメントを添加した場合、水和反応により水分が消費されることで、収縮が小さくなると考えられる。

圧縮強度が比較的大きい「60°C、7日」と「20/40/60°C、7日」の養生条件の供試体はセメント置換率が大きくにつれ、収縮が大きくなった。強度が大きいと、反応生成物の骨格が強固となり、水量より空隙構造の方が乾燥収縮を考えることにあって重要になってくると思われる。図4は収縮ひずみが大きくなった場合の1つの養生条件のMIP試験結果である。細孔径が比較的大きい空隙が多く含むOPC 0%の場合は収縮が早く収束するのに対して、細孔径が幅広く分布するセメントが含まれる硬化体は長期間に渡って徐々に収縮し、結果的に収縮が大きくなる。

### 4. 結論

硬化過程内の水分の過剰消費で、硬化体の強度、反応生成物の空隙構造や空隙内に含まれる水分が変わると考えられ、供試体の養生条件も合わせて、セメントの添加によるジオポリマーの乾燥収縮の抑制効果があったりなかったりした。今後、セメントの水和反応とジオポリマーの脱水縮重合反応の順番や速度を調整することが課題である。両反応を制御し、水分の消費が調整できれば、ジオポリマーの乾燥収縮を抑制することが期待できるのではないかと考えられる。

### 参考文献

- 1) Mo, B., He, Z., Cui, X., he, Y., Gong, S.: Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers, *Applied Clay Science*, Vol. 99, pp.144-148, 2014.
- 2) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 132, 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, p.8, 2022.