

水酸化ナトリウム溶液のモル濃度がジオポリマーペーストの耐熱性に及ぼす影響

広島大学	学生会員	○畔柳卓武
広島大学		Saludung Apriany
広島大学	正会員	小川由布子
広島大学	フェロー会員	河合研至

1. はじめに

ジオポリマーは、火力発電所からの副産物であるフライアッシュ (FA) や製鉄所の高炉から排出される高炉スラグ微粉末 (GGBS) などの活性フィラーと、Na系もしくはK系のアルカリシリカ溶液を用いた硬化体である。すなわち、ジオポリマーはセメントを使用しないため、CO₂排出量削減に大きく寄与できる材料として注目されている。ジオポリマーの強度は、GGBSの混入量が多くなるほど、増大すると報告されている¹⁾。また、Budhら²⁾は、アルカリシリカ溶液のモル濃度が高くなるほど、圧縮強度が向上することを示しているが不明な点が多く、統一的な配合設計手法は確立されていない。

一方、ジオポリマーはセメント系材料と比較して耐熱性に優れた材料であると言われている。例えば、橋本ら³⁾は、1200℃までの加熱後の圧縮強度は、セメントペーストと比較してジオポリマーペーストの方が高くなることを示している。しかし、GGBSを用いたジオポリマーを高温に曝した場合、GGBSの混和により生成量が増加したカルシウムシリケート水和物が分解され著しく強度低下を引き起こすとも報告されている⁴⁾。このように配合要因によっては耐熱性能が大きく低下する可能性があるものの、アルカリシリカ溶液のモル濃度がジオポリマーの耐熱性に及ぼす影響に関する検討は少ない。そこで、本研究では、ジオポリマーの耐熱性に対する水酸化ナトリウム溶液のモル濃度の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 使用材料と供試体作製方法

使用材料には、活性フィラーとして、FA (粉末度: 3550 cm²/g, 密度: 2.24 g/cm³) を 55%, GGBS (粉末度: 4170 cm²/g, 密度: 2.91 g/cm³) を 45% 混合して用いた。アルカリシリカ溶液には、10M, 12M, 14M の NaOH 溶液と Na₂SiO₃ 溶液を使用した。型枠には直径 50mm 高さ 100mm のプラスチックモールドを用い、打設後上面をビニールテープを用いて封緘し、温度 70℃ で 24 時間養生した。その後、温度 20℃ の恒温室に移動し、材齢 48 時間で脱枠した。脱型した供試体は、材齢 3, 7, 28 日まで温度 20℃, 相対湿度 60% の恒温恒湿環境に静置した。材齢 28 日に高温暴露を行なった。電気炉を用い、室温から 20℃/分で昇温し、炉内が目標温度の 500℃ もしくは 950℃ に達した後 1 時間保持し、その後室温まで自然冷却した。

2. 2 試験項目と試験方法

(1) 高温暴露による質量減少

示差熱重量分析を用いて、温度上昇に伴うジオポリマーペーストの質量減少を測定した。示差熱重量分析には、材齢 28 日の高温暴露前の供試体を用い、室温から 1000℃ まで 20℃/分の加熱速度で実施した。試料は、ボールミル粉砕機を用いて粉末状に粉砕した後、150μm のふるいを通る粉末試料を使用した。

(2) 粉末 X 線回折 (XRD) による分析

高温暴露前後の試料の組成の変化を調べるため、XRD 定性分析を行った。測定範囲は、5° ~ 65° (2θ) の範囲とし、試料は、(1)と同様に、ボールミル粉砕機を用いて粉末状に粉砕した後、150μm のふるいを通る粉末試料を使用した。

キーワード ジオポリマーペースト, 水酸化ナトリウム溶液濃度, 耐熱性

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 A-2-522 構造材料工学研究室 TEL 082-424-7786

(3)圧縮強度試験

ジオポリマーの耐熱性を検討するために、高温曝露前後において圧縮強度試験を行った。載荷速度は0.2mm/分とした。圧縮強度試験の測定材齢は3, 7, 28 日ならびに高温曝露後とし、3 本の供試体の圧縮強度の平均値を各条件における圧縮強度とした。

3. 実験結果および考察

図-1 に示差熱分析の結果を示す。溶液のモル濃度にかかわらず、すべての条件において室温から 200℃にかけて急激に質量が減少している。これは、ジオポリマーペースト中の間隙水の蒸発によると考えられる。また、200℃から 1000℃までゆるやかに質量が減少しているのは、化学的に結合した水の脱水が進んだことが原因として考えられる。また、モル濃度による減少量への影響は僅少であった。

図-2 に 12M の配合の XRD 分析結果を示す。高温曝露前後において、連続的で幅の広いピークが得られており、ジオポリマーの非晶質特性を示していると考えられる。500℃の高温に曝露されると、試料の C-S-H はほとんど分解されたが、他のピークは残っており、新しいピークは形成されなかった。一方、950℃に曝露した場合、Akermanite や Wollastonite などの二次鉱物相への再結晶が促進された。なお、10M, 14M の分析結果においても同様の結果であり、高温によるジオポリマーペーストの変質に対する水酸化ナトリウム溶液のモル濃度の影響は僅少であった。

図-3 に、高温曝露前後の圧縮強度を示す。高温曝露の前後ともに、モル濃度が増加することで、圧縮強度が増進することが確認された。これは既往の研究²⁾で示されているとおり、高濃度の水酸化ナトリウムが、ジオポリマーの固化メカニズムにおける活性フィラーからの金属イオンの溶出反応を促進させたためと考えられる。500℃に曝されると、すべての供試体において、圧縮強度が約 50%低下した。これは、供試体の圧縮強度を増進していた C-S-H ゲルが分解されたためと考えられる。950℃まで加熱した供試体は、圧縮強度の約 80%を損失したが、この損失に対するモル濃度の影響は小さいことが明らかとなった。

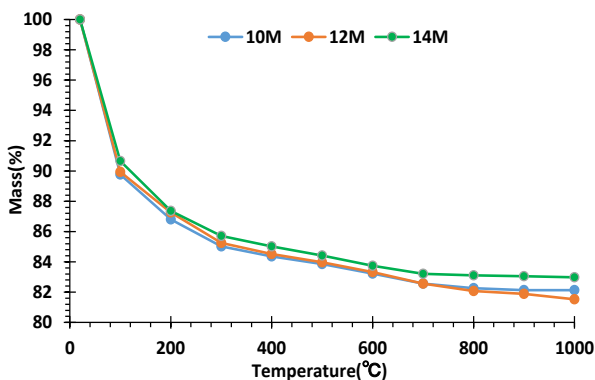


図-1 示差熱重量分析の結果

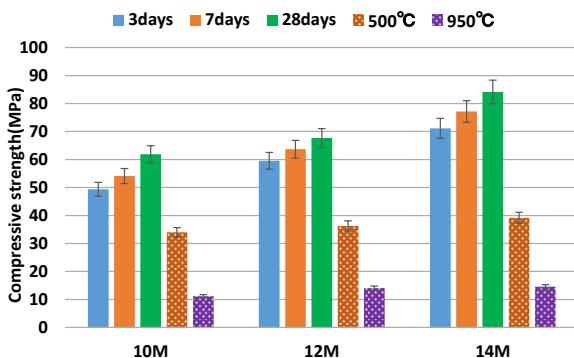


図-3 高温曝露前後の圧縮強度

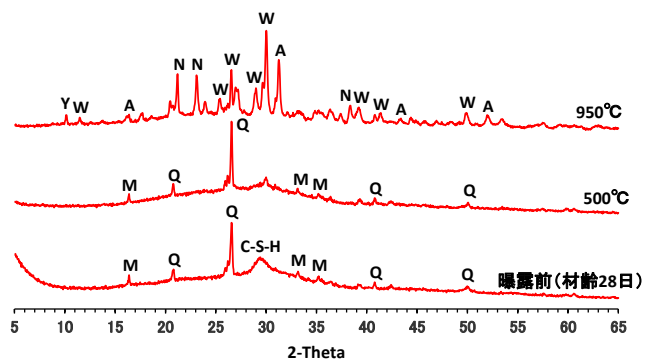


図-2 粉末 X 線回折解析の結果 (12M)

A : Akermanite($\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{Si}_2\text{O}_7]$),

C-S-H : Calcium silicate hydrate,

G : Grossular($\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$),

M : Mullite($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$),

N : Nepheline(NaAlSiO_4),

Q : Quartz(SiO_2),

W : Wollastonite(CaSiO_3),

Y : Yoshiokaite($\text{Ca}_{7.5}\text{Al}_{15}\text{SiO}_{32}$)

4. 結論

本研究では、FA55%と GGBS45%を活性フィラーとしたジオポリマーの耐熱性に対する水酸化ナトリウム溶液のモル濃度の影響について、10M から 14M の範囲で検討を行なった。この結果、ジオポリマーを 950℃までの高温に曝した場合の圧縮強度低下、鉱物組成変化、質量変化に対するアルカリシリカ溶液の濃度の影響は僅少であった。また、水酸化ナトリウム溶液の濃度にかかわらず、ジオポリマーが 500℃に曝されると、C-S-H ゲルが分解されることにより、圧縮強度が約 50%低下した。さらに、950℃に曝されると、質量減少がわずかに進み、圧縮強度は約 80%低下した。

今後は、本実験で対象とした活性フィラーの配合や養生条件以外での条件におけるモル濃度の影響を検討することが望まれる。

参考文献

- 1) Ganapati Naidu. P, A. S. S. N. Prasad, S. Adishesu, P. V. V. Satayanarayama. : A Study on Strength Properties of Geopolymer Concrete with Addition G.G.B.S, International Journal of Engineering Research and Development, Volume 2, Issue 4, pp19-28, 2012
- 2) C. D. Budh and N. R. Warhade. : Effect of Molarity on Compressive Strength of Geopolymer Mortar, International Journal of Civil Engineering Research, ISSN 2278-3652, Volume 5, Number 1, pp83-86, 2014.
- 3) 橋本忍, 鎌田隼人, 山崎裕司, 武田はやみ : ジオポリマーの耐火材料への適用, 耐火物, Vol.64, pp446-451, 2012.
- 4) S. A. Bernal, R. M. D. Gutierrez, F. Ruiz, H. Quinones and J. L. Provis.: High-temperature performance of mortars and concretes based on alkali-activated slag/metakaolin blends, Mater. Construcc, Vol62, No 308, pp471-488, 2012.