

# 論文 フライアッシュおよび電気炉酸化スラグを使用したジオポリマーモルタルにおける高濃度塩酸溶液に対する抵抗性

五十嵐 祐太\*1・Sanjay PAREEK\*2

**要旨:** 本研究は、フライアッシュおよび電気炉酸化スラグを多量使用した、ジオポリマーモルタルにおける高濃度塩酸溶液に対する劣化抵抗性を検討したものである。セメントモルタルと比較して、ジオポリマーモルタルは優れた劣化抵抗性を有し、細骨材として電気炉酸化スラグを使用したジオポリマーモルタルは、珪砂使用ジオポリマーモルタルと比較して、高濃度塩酸溶液に対する劣化抵抗性が若干劣る。さらに、ジオポリマーモルタルにおけるそれは、細孔空隙径および細孔空隙量に関わらず、マトリックス中の Ca 成分に大きく依存することが分かった。

**キーワード:** ジオポリマー, フライアッシュ, 電気炉酸化スラグ, 塩酸溶液, 化学的腐食

## 1. はじめに

コンクリート構造物の主な劣化原因は、中性化、塩害、凍害およびアルカリ骨材反応など様々であるが<sup>1)</sup>、近年では、温泉施設、硫酸塩土壌および下水道関連施設の化学的腐食環境におけるコンクリート構造物の浸食や鉄筋の腐食といった劣化現象が、国内外において数多く報告されている<sup>2)</sup>。さらに、欧米諸国や中国といった先進国における環境汚染によって発生した酸性雨の影響により、歴史的建造物やコンクリート構造物に被害が及んでいる<sup>3)</sup>。

一般的にコンクリートは、その構成材料の化学的性質や多孔質なマトリックスが影響して、酸に対する抵抗性は低いとされ、現在では、耐硫酸塩ポルトランドセメントを用いた耐酸性コンクリート<sup>4)</sup>、ポリマー混和材を用いたポリマーセメントコンクリート<sup>5)</sup>およびジオポリマー硬化体が、腐食性物質に対する抵抗性を向上させたコンクリートとして開発されている<sup>6)</sup>。なかでも、ジオポリマー硬化体は、一般的なセメントコンクリートと比較して、優れた耐酸性を有する<sup>7)</sup>。さらに、セメント未使用、且つ天然骨材を一切使用せず、未利用資源であるフライアッシュや鉄鋼スラグの有効利用が可能であるため、近年では耐酸性を有する低炭素型新材料として、研究開発が推進されている<sup>8)</sup>。

しかしながら、ジオポリマー硬化体に関する既往の研究では、従来のセメントコンクリートにおける浸漬試験にならった、硫酸を試験溶液として使用した研究報告が多く、塩酸溶液浸漬下におけるジオポリマー硬化体の抵抗性については、研究事例が少なく、明確にされていない。従って、本研究では、フライアッシュおよび電気炉酸化スラグ細骨材を多量使用したジオポリマー硬化体の塩酸浸漬時における劣化機構および劣化抵抗性の明確化を目的とする検討を行った。また、本研究では劣化促進のために高濃度塩酸溶液を使用した。

試験方法は、35%塩酸溶液を用いて浸漬試験を28日(以下、28d)間行い、各測定日における試験体の質量変化率の測定、浸食深さの測定、外観観察、圧縮強度試験、細孔空隙構造の測定、微細構造の観察およびX線分析を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1には、ジオポリマーモルタル試験体に使用した、フライアッシュII種・能代産(密度: 2.26 g/cm<sup>3</sup>)および細骨材として使用した珪砂5号(密度: 2.61g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.28%, 粒形: 0.5mm)、電気炉酸化スラグ細骨材(密度: 3.1-4.0 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 2.0%以下, 粒形: 0.3-5mm)の化学組成表を示す。また、練混ぜ水として濃度調整したアルカリ溶液[水酸化ナトリウム水溶液(NaOH, 9.5M)および水ガラス(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)]を使用した。表-2には、比較用セメントモルタル試験体に使用した、普通ポルトランドセメント(密度: 3.16 g/cm<sup>3</sup>)の化学組成表を示す。

ジオポリマーモルタル試験体は、表-3に示す配合(質量比)で、活性フィラー(フライアッシュ、珪砂または電気炉酸化スラグ細骨材)およびアルカリ溶液[水酸化ナトリウム水溶液(NaOH, 9.5M)および水ガラス(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)]を作製し、練混ぜを行った。練混ぜ後、寸法φ50×100mmに成形し、2時間(以下、2h)乾燥(80°C)養生、2h蒸気(100°C)養生、20h乾燥[20°C, 60%(RH)]養生して、2種類(細骨材として珪砂または電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタル)の試験体を作製した。セメントモルタル試験体は、セメント:細骨材=1:3(質量比)、水セメント比50%としたモルタルを練混ぜ、寸法φ50×100mmに成形した後、2d湿空[20°C, 80%(RH)]、5d水中(20°C)、21d乾燥[20°C, 60%(RH)]養生して、試験体を作製した。

浸漬試験には、全ての試験体の材齢が28dになるまで、乾燥室[20°C, 60%(RH)]にて静置させたものを使用した。

\*1 日本大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (正会員)

\*2 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学)(正会員)

表 - 1 ジオポリマーモルタル使用材料化学組成表

|   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | Density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | ig.loss<br>(%) | Surface Area<br>(cm <sup>2</sup> /g) |
|---|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|---------------------------------|----------------|--------------------------------------|
|   | (%)              |                                |                                |      |                                 |                |                                      |
| Fly Ash<br>(JIS Type II)                  | 64.5             | 23.9                           | 4.8                            | 5.3  | 2.3                             | 2.1            | 3880                                 |
| Silica Sand<br>(No.5)                     | 95.5             | 3.1                            | 0.1                            | 0.4  | 2.6                             | 0.1            | -                                    |
| Electric Arc<br>Furnace Slag<br>(0.3-5mm) | 11.9             | -                              | 37.0                           | 12.7 | 3.1-4.0                         | -              | -                                    |

表 - 2 普通ポルトランドセメント化学組成表

| C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF | Density              | ig.loss | Surface Area         |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|---------|----------------------|
| (%)              |                  |                  |                   | (g/cm <sup>3</sup> ) | (%)     | (cm <sup>2</sup> /g) |
| 56.0             | 18.0             | 9.0              | 9.0               | 3.16                 | 2.26    | 3340                 |

表 - 3 ジオポリマーモルタル配合表 (質量比)

|            | Fly Ash | Sand or<br>Slag | NaOH<br>(9.5M) | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> |
|------------|---------|-----------------|----------------|----------------------------------|
| By Wt. (%) | 38      | 44              | 8              | 10                               |

## 2.2 浸漬試験条件

浸漬試験は、JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法」<sup>9)</sup>に準拠して行い、温度 20±2℃の試験環境下で 28d 間実施し、試験溶液には、35%の塩酸溶液(質量パーセント濃度)を用いた。

## 2.3 測定項目

### (1) 質量変化率

7d, 14d, 21d および 28d, 35%塩酸溶液に浸漬した後、7d 毎に試験体を取り出し、水で洗浄後、布ウェスをを用いて余剰水分をふき取った際の質量を測定した。

### (2) 浸食深さ

28d 間、35%塩酸溶液に浸漬した後、試験体を打込み面と平行に切断し、モルタルが劣化していない部分の距離を図 - 1 に示す 4 方向について測定した後、式(1)によって浸食深さを求めた。

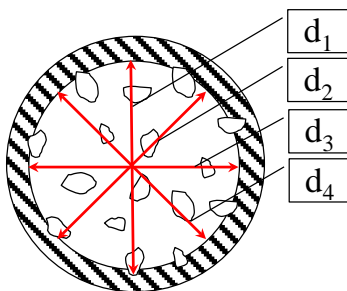


図 - 1 浸食深さ測定箇所

$$\text{浸食深さ (mm)} = \{D - [(d_1 + d_2 + d_3 + d_4) / 4]\} / 2 \quad (1)$$

ここに、 $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$  ; 試験溶液に浸漬した試験体断面の浸食されていない部分の直径 (mm)

D ; 試験溶液に浸漬前の試験体断面の直径 (mm)

## (3) 外観観察

28d 間、35%塩酸溶液に浸漬した後、試験体の色調、破損状況などを目視で観察し、写真撮影を行った。

## (4) 圧縮強度試験

28d 間 35%塩酸に浸漬した試験体について JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に従って、圧縮強度試験を行い、浸漬前後における試験体の圧縮強度比を算出した。

## (5) 細孔空隙構造

浸漬前の試験体の中心部分について、粒形 5mm 程度の試料を採取し、水銀圧入式ポロシメータを用いて、細孔径分布および総細孔量を測定した。

## (6) 微細構造の観察および X 線分析

浸漬前の試験体および 35%塩酸溶液に 28d 間浸漬後の試験体について、電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて微細構造の観察および X 線分析を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 質量変化率

図 - 2 には、35%塩酸溶液に浸漬した珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルの経時変化ごとの質量変化率を示す。珪砂使用ジオポリマーモルタルは、浸漬開始から浸漬期間 28d までにおいて、ほとんど質量変化が見受けられない。また、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルに関しては、浸漬 7d までに質量が約 20%減少し、その後 28d において約 25%の減少に留まっている。一方、セメントモルタルについては、浸漬 7d までに質量の約 45%が減少し、浸漬 14d において、質量の約 50%が減少した。さらに、浸漬 28d では、質量の約 55%が減少した。

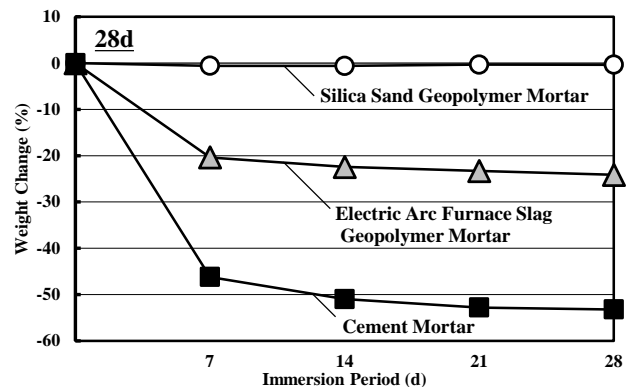


図 - 2 35%塩酸浸漬した試験体の質量変化率

### 3.2 浸食深さ

図 - 3には、35%塩酸溶液に浸漬した珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルの28d浸漬後における浸食深さを示す。浸食深さは、変色している部分までを測定し、珪砂使用ジオポリマーモルタルが7mm程度、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルが8mm程度、セメントモルタルが13mm程度であった。セメントモルタルの浸食深さは、珪砂使用ジオポリマーモルタルに対して約1.8倍、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルに対して約1.7倍であり、セメントモルタルは2種類のジオポリマーモルタルと比較して、浸食の速度が早い傾向にある。また、珪砂使用ジオポリマーモルタルおよび電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルを比較すると、前者の方が若干、浸食に対しての抵抗性が優れていることが確認できた。

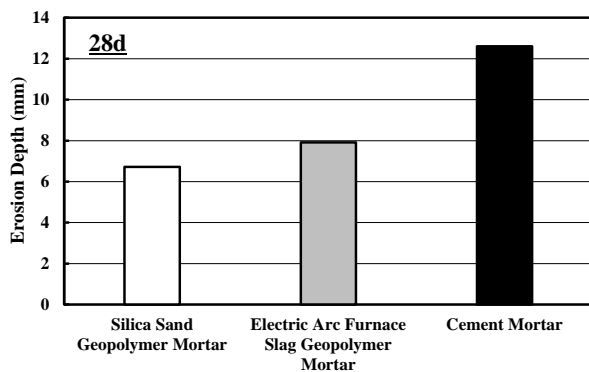


図 - 3 28日間35%塩酸浸漬した試験体の浸食深さ

### 3.3 外観観察

写真 - 1には、35%塩酸溶液に浸漬した珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルの28d浸漬後における外観および中央の断面をそれぞれ示す。それぞれの浸漬前後における外観および中央における断面の写真を比較して、珪砂使用ジオポリマーモルタルは、試験体表面の色調が緑褐色に変化し、変色した劣化部分が残存している。また、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルについては、色調が緑褐色に変化し、劣化により表面の骨材が露出し、表層部分が欠損していることが分かる。一方、セメントモルタルは、浸漬前の試験体と比較して、色調が黄褐色に変化し、断面には劣化したマトリックス層が確認でき、断面寸法が著しく縮小していることが確認できる。

よって、質量変化率、浸食深さおよび外観観察の結果から、珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルの35%塩酸溶液浸漬時における劣化現象は、表 - 1 および表 - 2

に示す、使用材料に含まれるカルシウム成分量の違いが引き起こすものと推察される。これより、珪砂および電気炉酸化スラグのそれは、後者の方が多く含まれているため、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルにおける劣化を促進させたものと考えられる。また、セメントモルタルに関しては、その大部分がカルシウム系化合物により形成されるため、セメントモルタル試験体がセメントを使用していない2種類のジオポリマーモルタルと比較して、劣化が著しく促進されたことが容易に理解できる。従って、35%塩酸溶液浸漬時における劣化現象は、マトリックス中のカルシウム成分が、塩酸溶液との反応によりそのマトリックスを劣化させ、劣化したマトリックスが溶脱して生じたものと推察される。

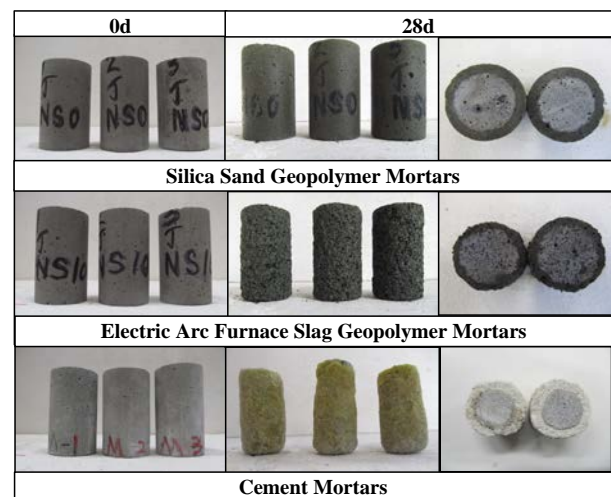


写真 - 1 35%塩酸浸漬前後における試験体の外観

### 3.4 圧縮強度試験

図 - 4には、28d間35%塩酸溶液浸漬前後における珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルの圧縮強度を示す。

珪砂使用ジオポリマーモルタルの浸漬前後における圧縮強度比は約98%であり、その圧縮強度は浸漬前と比較してほとんど低下していないことから、35%塩酸に対する劣化抵抗性は高いといえる。一方、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルに関しては、圧縮強度比は約24%であり、浸漬後における圧縮強度の低下が確認され、珪砂使用ジオポリマーモルタルと比較してその抵抗性は劣ることが分かった。また、セメントモルタルは塩酸浸漬による劣化が著しく、試験体が崩壊したため圧縮強度試験を行うことができなかった。

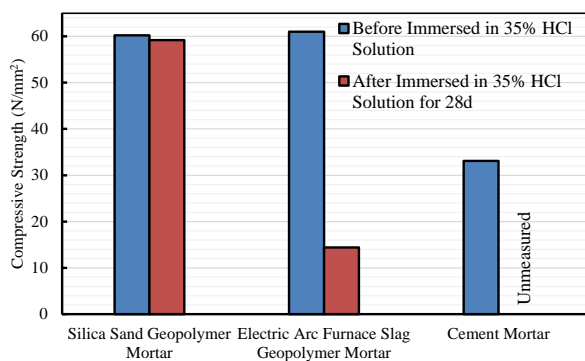


図 - 4 28 日間 35%塩酸浸漬前後における試験体の圧縮強度

### 3.5 細孔空隙構造

図 - 5 には、浸漬前の珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルにおける中心部の細孔径分布を示す。さらに、図 - 6 には、それぞれの試験体における総細孔空隙量を示す。

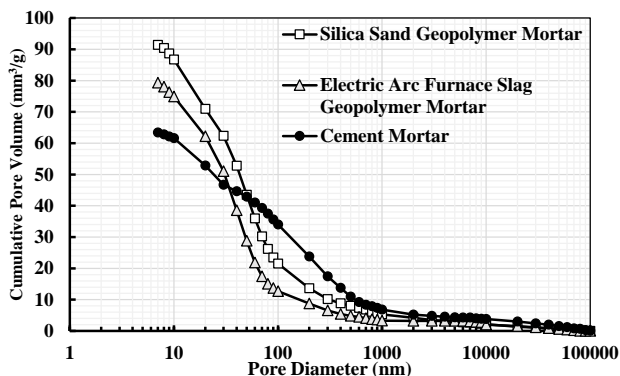


図 - 5 試験体の細孔径分布

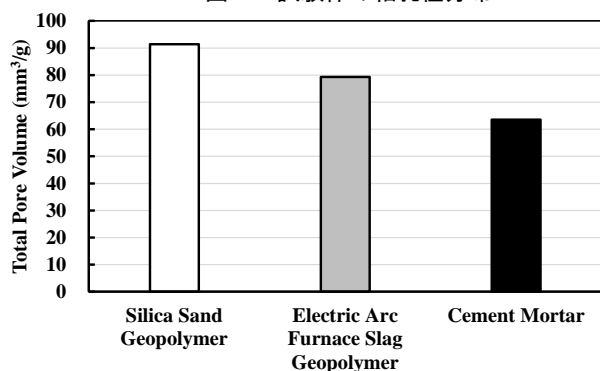


図 - 6 試験体の総細孔空隙量

珪砂使用ジオポリマーモルタルおよび電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルの細孔径分布は、細孔径 7~100nm の範囲で概ね多く分布する。一方、セメントモルタルの細孔径分布は、細孔径 7~200nm の範囲で概ね多く分布していることが分かる。また、総細孔空隙量に関しては、珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルの順に総細孔空隙量が多い。珪砂使用ジオポリマーモルタルは、いずれの試験体と比較してマトリックスが緻密で

ないにもかかわらず、塩酸に対して優れた劣化抵抗性を有することから、ジオポリマーモルタルの細孔空隙構造は塩酸浸漬における劣化に対して影響度は少ないと推察される。

### 3.5 微細構造の観察および X 線分析

本論文では、各試験体における微細構造の電子顕微鏡写真(1000 倍)を比較して検討を行う。

写真 - 2 に、浸漬前における珪砂使用ジオポリマーモルタルを示し、写真 - 3 に、35%塩酸溶液に 28d 浸漬後における、珪砂使用ジオポリマーモルタルを示す。写真 - 4 に、浸漬前における電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルを示し、写真 - 5 に、35%塩酸溶液に 28d 浸漬後における、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルを示す。また、図 - 7 に X 線分析装置を用いて点分析で測定した元素の分布量を示す。ここで測定した各元素は定性的なもので、その絶対値を議論することは困難であるが、各元素量の試料間の相対的な比較は可能であると考えた。



写真 - 2 35%塩酸浸漬前における珪砂使用ジオポリマーモルタルの微細構造写真 (×1000)

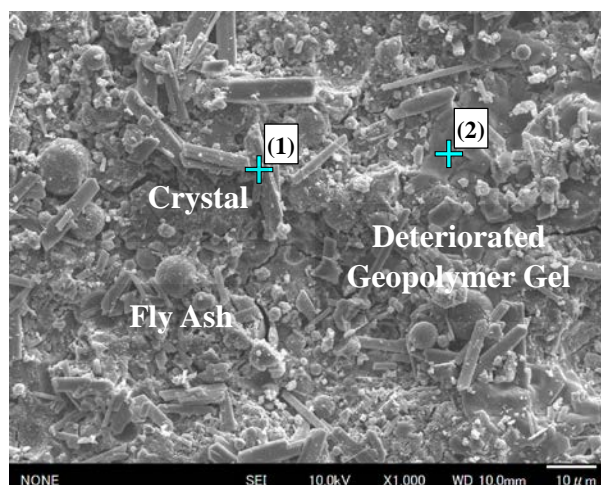


写真 - 3 35%塩酸浸漬後における珪砂使用ジオポリマーモルタルの微細構造写真 (×1000)





写真 - 4 35%塩酸浸漬前における電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルの微細構造写真 (×1000)

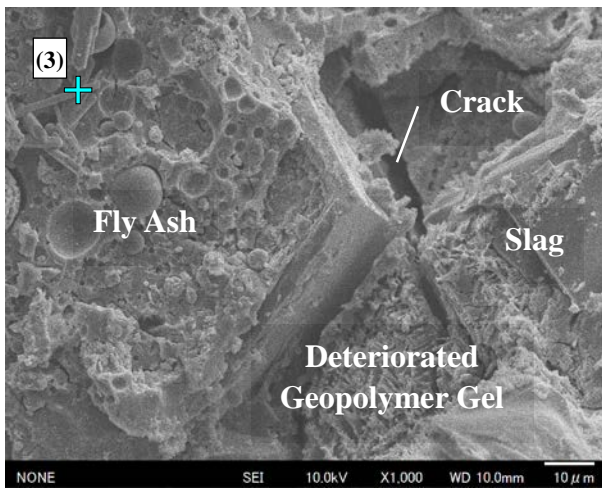


写真 - 5 35%塩酸浸漬後における電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルの微細構造写真 (×1000)

写真 - 2 より、球体状のものはフライアッシュを示す。フライアッシュの周辺にはジオポリマーゲルが生成され、マトリックスが形成されていることが確認できる。

写真 - 3 より、球体状のフライアッシュの周辺には、板状の生成物および劣化部分が確認できる。これより、塩酸溶液との反応によって健全なマトリックス部分が変化し、これらの生成物および劣化部分を形成したものと考えられる。

写真 - 4 より、フライアッシュおよび電気炉酸化スラグの周辺には、マトリックスが形成され、電気炉酸化スラグおよびマトリックスの界面部が強固に結合していることが確認できる。

写真 - 5 より、マトリックス中には板状の生成物および劣化部分が確認され、電気炉酸化スラグおよびマトリックスの界面に、ひび割れが生じていることが確認できる。このことより、塩酸溶液浸漬時における電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルの劣化現象は、板状の生成物および劣化部分の形成に伴い、電気炉酸化スラグお

よびマトリックスの界面からひび割れが発生し、マトリックス部分の溶脱を引き起こしたものと考えられる。

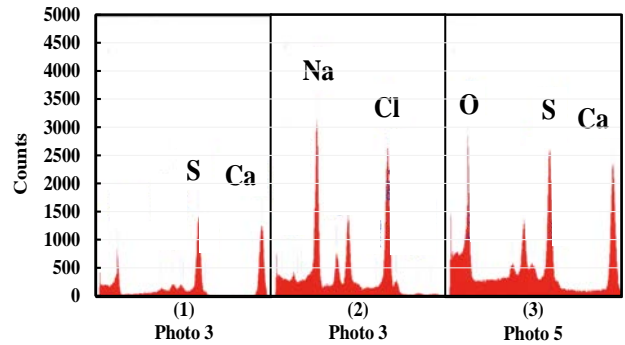


図 - 7 35%塩酸浸漬後におけるジオポリマーモルタルのX線分析結果

さらに、図 - 7 より、写真 - 3 および写真 - 5 に示される点分析を行った測定点(1), (2), (3)について、それぞれの生成物および劣化部分の元素成分を定性的に判断し、それらが劣化現象に及ぼす影響を考察する。

測定点(1)(板状の生成物)では、検出された元素ピークにおいて、S(硫黄)および Ca(カルシウム)が大きな値を示している。よって、写真 - 3 に示される板状の生成物は、硫黄成分を含んだカルシウム系化合物であることが推察される。

測定点(2)(劣化部分)では、検出された元素ピークが Na(ナトリウム)および Cl(塩素)の数値を大きく示しているため、塩酸と結合材に含まれる NaOH が反応して、NaCl を生成したものと考えられる。

測定点(3)(板状の生成物)では、検出された元素ピークが S(硫黄)および Ca(カルシウム)を大きく示している。これより、測定点(3)における板状の生成物は、測定点(1)で示した硫黄成分を含んだカルシウム系化合物に類似するものと推察することができる。また、それを測定点(1)の結果と比較するとスペクトルが相対的に大きいため、珪砂使用ジオポリマーモルタルおよび電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルを塩酸溶液に浸漬した場合には、後者の方が劣化要因であるカルシウム系化合物を生成しやすいと考えられる。

#### 4. 結論

本研究において、高濃度塩酸溶液に 28d 浸漬した場合、珪砂使用ジオポリマーモルタルおよび電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルは、セメントモルタルと比較して、塩酸に対して優れた劣化抵抗性を有することが確認された。また、珪砂使用ジオポリマーモルタルおよび電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルを比較した場合、後者の塩酸に対する劣化抵抗性は若干劣った。

以下に、各測定項目における結論を示す。

1. 質量変化率の測定では、35%塩酸溶液に 28d 浸漬した場合、セメントモルタルが約 55%減少するのに対して、珪砂使用ジオポリマーモルタルは 1%未満の減少、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルは、約 25%減少した。
2. 浸食深さの測定では、セメントモルタルの浸食深さが約 13mm に対して、珪砂使用ジオポリマーモルタルは約 7mm、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルは、約 8mm であり、2 種類のジオポリマーモルタルは塩酸浸漬時における浸食に対して、抵抗性を示した。
3. 外観観察では、浸漬前および浸漬 28d 後において、セメントモルタルは、変色およびマトリックスの劣化または欠損が多数見受けられ、塩酸に対しての劣化抵抗性は低いことを確認した。また、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルに関しては、前者と類似した劣化を示しているが、さほど顕著ではなかった。一方、珪砂使用ジオポリマーモルタルは、いずれの試験体と比較しても、変化は微量であり、塩酸に対して卓越した劣化抵抗性を示した。
4. 圧縮強度試験では、35%塩酸浸漬前後における圧縮強度比は、珪砂使用ジオポリマーモルタルが約 98%、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルが約 24%およびセメントモルタルは崩壊したため測定不可であった。これより、塩酸浸漬時において珪砂使用ジオポリマーモルタルの圧縮強度はほとんど低下しないことを確認した。また、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルにおけるそれは塩酸浸漬前と比較して劣ることを確認した。
5. 細孔空隙構造の測定では、セメントモルタルの場合、細孔径 7~200nm の範囲で概ね多く分布し、珪砂使用ジオポリマーモルタルおよび電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルの細孔径は、7~100nm の範囲で概ね多く分布していることを確認した。また、総細孔空隙量は珪砂使用ジオポリマーモルタル、電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルおよびセメントモルタルの順で多く、珪砂使用ジオポリマーモルタルはいずれの試験体と比較してマトリックスが緻密でないにもかかわらず、塩酸に対して優れた劣化抵抗性を有することから、ジオポリマーモルタルの細孔空隙構造は塩酸浸漬における劣化に対して影響度は少ないことを確認した。

6. 微細構造の観察および X 線分析では、35%塩酸溶液に 28d 浸漬した場合、珪砂使用ジオポリマーモルタルおよび電気炉酸化スラグ使用ジオポリマーモルタルの劣化現象は、マトリックス中に含まれる Ca が塩酸との反応により、Ca 系化合物の生成に伴って、マトリックスの劣化または溶脱を生じさせた。すなわち、ジオポリマーモルタルにおける塩酸に対する劣化はマトリックス中の Ca 含有量に大きく依存することを確認した。

#### 謝辞

本研究は、一般社団法人 日本鉱業振興会 平成 26 年度 試験研究助成の下で実施したものです。ここに記して謝意を示します。

#### 参考文献

- 1) 田澤栄一ほか、エース土木工学シリーズ エースコンクリート工学、株式会社 朝倉書店、2002。
- 2) 中本 至、技術展望 下水道施設におけるコンクリート構造物の化学的劣化、土木学会論文集、No.472, Vol.20, pp1-11, 1993.8。
- 3) 小林一輔、宇野祐一、森 弥広、酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.564, Vol.35, pp243-251, 1997.5。
- 4) 平田隆祥、正木栄一、小澤郁夫、久保田 賢、報告耐酸性セメント系材料の基礎的性質、コンクリート工学年次論文集、Vol.28, No.1, pp1055-1060, 2006。
- 5) 小柳 洽、Polymer in Concrete-新しい動向- 4. レジンコンクリート・ポリマー含浸コンクリートの利用、J.Soc.Mat.Sci., Japan, No.470, Vol.41, pp1709-1716, 1992.11。
- 6) J.Davidovits, GEOPOLYMERS Inorganic polymeric new materials, Journal of Thermal Analysis, Vol.37, pp.1633-1656, 1991。
- 7) X.J.Song, M.Marosszaky, M.Brungs and R.Munn, Durability of fly ash based Geopolymer concrete against sulphuric acid attack, 10DBC International Conference On Durability of Building Materials and Components, April.2005。
- 8) 魚本健人、信田佳延、山田一夫、世界で使用されているコンクリート材料と技術の現状-コンクリート材料ならびに関連規格の国際調査研究委員会報告から-、コンクリート工学年次論文集、Vol.49, No.2, pp54-62, 2011.2。
- 9) JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法」コンクリート工学、vol.23, No.3, pp.59-62, 1985