

# ジオポリマーの特性と施工事例

## Properties and construction case of geopolymers

原田 耕司\*

Koji Harada

### 要 約

ジオポリマーは、セメントを全く使用しない新材料である。ジオポリマーの材料としては、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末および水ガラス等が使用されることが多い。近年、環境問題（CO<sub>2</sub>削減）等の観点から、ジオポリマーの建設材料への適用が注目され始めている。本論では、ジオポリマーのCO<sub>2</sub>排出量の削減効果、強度特性、乾燥収縮、耐酸性能およびアルカリ骨材反応等の特性と、ジオポリマーの施工事例について述べたものである。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. ジオポリマーの固化メカニズム
- § 3. ジオポリマーの CO<sub>2</sub> 排出量削減効果
- § 4. ジオポリマーの特性
- § 5. 施工事例
- § 6. まとめ

### § 1. はじめに

1988年にフランスのDavidovitsにより提唱されたジオポリマーは、アルカリシリカ溶液とアルミナシリカ粉末（以下、活性フィラーと呼ぶ）との反応によって形成される非晶質の縮重合体（ポリマー）の総称である。

建設分野では、アルカリシリカ溶液として珪酸ナトリウム水溶液（以下、水ガラスと呼ぶ）や水酸化ナトリウム（以下、苛性ソーダと呼ぶ）、活性フィラーとしてフライアッシュや高炉スラグ微粉末などを使用することが多いが、フライアッシュや高炉スラグ微粉末以外にも、都市ゴミ焼却灰溶融スラグ微粉末、下水汚泥溶融スラグ微粉末、もみ殻灰なども使用できるなどの報告もある<sup>1)</sup>。

ジオポリマーはセメントを使用しないため、フレッシュコンクリートの特性がセメントコンクリートと異なることが考えられる。また、ジオポリマーの構成元素は、カルシウムの代わりにナトリウムやカリウムを多く含むため、固化体の特性もセメントコンクリートと大きく異なることが考えられる。公益社団法人日本コンクリート工学会では、ジオポリマーのセメントと異なる特性に注目し、ジオポリマーの建設分野への普及を図ることを目的に、「建設分野へのジオポリマー技術の適用委員会」を2015年度から立ち上げ活動している。当社では、ま

だジオポリマーが注目されていない2010年から、建設材料としてのジオポリマーの研究・開発を開始し、これまでに多くの研究成果を報告している<sup>例えば2), 3), 4), 5)</sup>。また、その研究成果をもとに、ジオポリマー製のブロック（製品名：ジオポリー）を製造し、施工実績も有している。

本論では、ジオポリマーのCO<sub>2</sub>排出量削減効果およびその特性に関する研究・開発の成果と、施工事例について述べる。

### § 2. ジオポリマーの固化メカニズム

ジオポリマーの材料である水ガラス中の珪酸は、モノマー（単量体）に近い状態で存在する。金属イオンが水ガラス中に存在する場合、図-1に示すように、その金属イオンを取り込んでポリマー化すると考えられている。

セメントは、水和作用により加えた水が結晶水として吸収されるため、粉状のセメントが凝集して固まる。その際、図-2(a)に示すように、強度への寄与が少ないと思われるポルトランドイトやエトリンガイトのような比較的大型の水和結晶の存在を無視すると、エーライトやビーライトの粒子表面に生成する多数の突起をもつイガクリ状のC-S-Hが絡み合い集合体となる。一方、ジオポリマーは活性フィラーから溶出した金属イオンが水ガラスと接すると、珪酸錯体を架橋してポリマー化し、図-2(b)のように活性フィラーの粒子を無機質の不

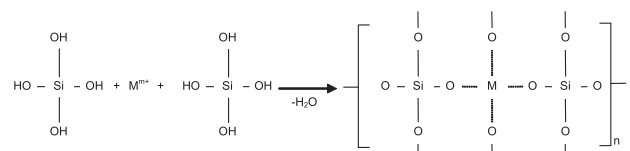


図-1 ジオポリマーの固化概念図

\* 技術研究所土木技術グループ

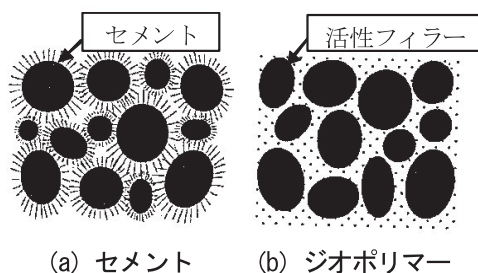


図-2 固化形態イメージ

定形ゲルで固めた構造になるものと考えられている。

### §3. ジオポリマーのCO<sub>2</sub>排出量削減効果

ジオポリマーのCO<sub>2</sub>排出量削減効果を検証するために、試算を行った。表-1には試算に用いたジオポリマーコンクリート（以下、GPコンクリートと呼ぶ）およびセメントコンクリート（以下、OPコンクリートと呼ぶ）に使用する材料のCO<sub>2</sub>排出量を示す。なお、表中のGP溶液とは、水ガラス、苛性ソーダおよび水を混合して比重1.27に調整した特殊溶液である。ジオポリマーでは、水の代わりにこのGP溶液を使用する。

表-1に示すように、使用材料でCO<sub>2</sub>排出量が最も大きな値を示しているのは、普通ポルトランドセメントである。これは、普通ポルトランドセメントは、その製造時に多くの熱源を必要とすることや、原料である石灰石を焼成する過程でCO<sub>2</sub>を排出するためである。GPコンクリートは、普通ポルトランドセメントを全く使用しないためCO<sub>2</sub>排出量の削減が期待できる。

試算では、圧縮強度30 N/mm<sup>2</sup>レベルのGPコンクリートとOPコンクリートを比較した。表-2には、試算に用いたOPコンクリートの配合を、表-3は試算に用いたGPコンクリートの配合を示す。OPコンクリートについては、蒸気養生を行っている2次製品メーカーの実配合を使用し、GPコンクリートに関してはこれまでの研究から得られた配合を参考にしている。なお、GPコンクリートおよびOPコンクリートの養生は蒸気養生として、蒸気養生によるCO<sub>2</sub>排出量をいずれも12kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>とした。

図-3に試算結果を示す。OPコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量が340 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>であるのに対して、GPコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量は104 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>となっており、今回の試算条件では、約70%ものCO<sub>2</sub>排出量削減効果がGPコンクリートにあることが明らかになった。

なお、今回は、圧縮強度30 N/mm<sup>2</sup>の試算結果のみを示しているが、これまでの研究で、圧縮強度が高くなるほど、GPコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量の削減効果が大きくなることを確認している。

表-1 使用材料のCO<sub>2</sub>排出量

| 材料           | 記号  | CO <sub>2</sub> 排出量 |
|--------------|-----|---------------------|
| 普通ポルトランドセメント | C   | 766.6               |
| フライアッシュ      | FA  | 19.6                |
| 高炉スラグ微粉末     | BS  | 26.5                |
| 天然細骨材        | S   | 3.7                 |
| 天然粗骨材        | G   | 2.9                 |
| GP 溶液        | GPW | 323.6               |
| 水            | W   | 0.0                 |

表-2 試算に用いたOPコンクリートの配合

| 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |
|------------------------------|--------------------------|-----|-----|------|
|                              | W                        | C   | S   | G    |
| 30                           | 165                      | 420 | 700 | 1090 |

表-3 試算に用いたGPコンクリートの配合

| 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |     |
|------------------------------|--------------------------|-----|----|-----|-----|
|                              | GPW                      | FA  | BS | S   | G   |
| 30                           | 262                      | 444 | 78 | 665 | 813 |

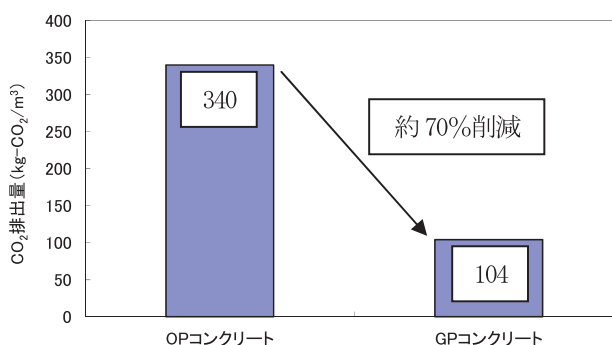


図-3 試算の結果

### §4. ジオポリマーの特性

ジオポリマーの強度特性および耐久特性を検討するため、モルタルを用いた実験を行った。具体的には、ジオポリマーモルタル（以下、GPモルタルと呼ぶ）と同圧縮強度レベル（約30 N/mm<sup>2</sup>）のセメントモルタル（以下、OPモルタルと呼ぶ）との比較を行い、GPモルタルの強度および耐久性に関して検討を行った。

なお、耐久性試験としては、乾燥収縮試験、アルカリ骨材反応試験および酸に対する抵抗性を検討するための硫酸浸漬試験を行った。

#### 4-1 実験概要

##### (1) 使用材料

GPモルタルとOPモルタルの使用材料を表-4に示

表－４ 使用材料

| 分類         | 項目         | 材料                                                                                                                                                                                                                             |
|------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GP<br>モルタル | GP<br>溶液   | 水ガラス、苛性ソーダおよび水の混合溶液（密度：1.27g/cm <sup>3</sup> ）                                                                                                                                                                                 |
|            | 活性<br>フィラー | (a) フライアッシュ 1 種（密度：2.36 g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：5,327cm <sup>2</sup> /g）<br>(b) フライアッシュ 2 種（密度：2.30 g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3,534cm <sup>2</sup> /g）<br>(c) 高炉スラグ微粉末（密度：2.92 g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：4,009 cm <sup>2</sup> /g） |
|            | 細骨材        | 標準砂（密度：2.64 g/cm <sup>3</sup> ）<br>輝石安山岩                                                                                                                                                                                       |
| OP<br>モルタル | セメント       | 普通ポルトランドセメント<br>（密度：3.15 g/cm <sup>3</sup> ）                                                                                                                                                                                   |
|            | 水          | 水道水（密度：1.00 g/cm <sup>3</sup> ）                                                                                                                                                                                                |
|            | 細骨材        | 標準砂（密度：2.64 g/cm <sup>3</sup> ）<br>輝石安山岩                                                                                                                                                                                       |

す。GP モルタルのアルカリシリカ溶液としては、水ガラス、苛性ソーダおよび水を混合し比重を 1.27 g/cm<sup>3</sup> に調整した特殊溶液を用いた。活性フィラーとしては、表－５に示すフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いた。フライアッシュに関しては、その品質が GP モルタルの強度および耐久性に与える影響について検討するため、フライアッシュ 1 種とフライアッシュ 2 種の 2 種類を用いた。

また、アルカリ骨材反応試験では、標準砂とアルカリシリカ反応性鉱物を含む輝石安山岩の砕砂を 50：50 で混合した細骨材を用い、アルカリ骨材反応が発生しやすくした。

## (2) 配合

ジオポリマーは、一般に蒸気養生（加熱）が必要なため、現場打設よりは 2 次製品への適用が考えられる。そこで今回の実験の圧縮強度は、2 次製品で適用されることが多い 30 N/mm<sup>2</sup> に設定した。実験に使用した圧縮強度 30 N/mm<sup>2</sup> を目指した配合を表－６に示す。

今回の実験では、表－７に示す同圧縮強度レベルの OP モルタルとの比較を行うため、GP モルタルと OP モルタルの細骨材の容積が一定の配合とした。また、GP モルタルの高炉スラグ微粉末は、フライアッシュの容積に対して 10%内割り置換した。

## (3) 練混ぜおよび締固め方法

練混ぜは、GP モルタルおよび OP モルタルともに、ホバート型ミキサ（容量：5ℓ）を用いた。GP モルタルでは、砂＋フライアッシュ＋高炉スラグ微粉末で空練りを 30 秒行い、GP 溶液を投入後 1 分間練混ぜ、一度ミキサを止め 15 秒で掻き落しを行い、最後に 2 分間練混ぜて排出した。練上がり後、型枠に打設して、テーブルバイブレータで分離が生じない程度に締固めを行った。なお、OP モルタルも、練混ぜおよび締固め方法は同様

表－５ 活性フィラーの化学成分

| 種類          | 化学成分（％）          |                                |                                |       |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
|             | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   |
| フライアッシュ 1 種 | 52.29            | 32.34                          | 7.37                           | 2.53  |
| フライアッシュ 2 種 | 53.18            | 27.45                          | 5.26                           | 6.59  |
| 高炉スラグ微粉末    | 31.11            | 16.84                          | 0.31                           | 41.44 |

表－６ GP モルタルの配合表（kg/m<sup>3</sup>）

| 記号  | 種類             | GP<br>溶液 | フライアッシュ | 高炉<br>スラグ | 細骨材     |
|-----|----------------|----------|---------|-----------|---------|
| GP1 | フライアッシュ<br>1 種 | 244.2    | 480.3   | 66.0      | 1,535.4 |
| GP2 | フライアッシュ<br>2 種 | 244.2    | 468.1   | 66.0      | 1,535.4 |

表－７ OP モルタルの配合表（kg/m<sup>3</sup>）

| 記号 | 水     | セメント  | 細骨材    |
|----|-------|-------|--------|
| OP | 255.9 | 511.8 | 1535.4 |

とした。また、使用材料は、20℃の室内で保管し、練混ぜも 20℃の室内で行った。

## (4) 養生方法

GP モルタルは、常温では強度発現が遅いため、一般に蒸気養生（加熱）を行う。今回の実験では、二次製品の養生方法と同じ養生条件を設定した。

具体的には打設後速やかに恒温恒湿装置に移し、3 時間かけて温度 60℃、湿度 90% まで上昇させ、その後 3 時間その条件で養生し、再び 3 時間かけて温度 20℃、湿度 60% まで下げ、材齢 1 日で脱型後、直ちに試験に

供した。OP モルタルに関しては、材齢 1 日で脱型後、所定材齢まで水中養生を行った。

## (5) 試験項目および方法

表－８には、試験項目および試験方法を示す。それぞれの試験方法の概略を以下に述べる。

- ①強さ試験：材齢 1 日、3 日、7 日、14 日および 28 日で実施した。
- ②乾燥収縮試験：GP モルタルでは材齢 1 日から、OP モルタルでは材齢 7 日から、温度 20℃、湿度 60% RH の試験環境でひずみ求めた。
- ③アルカリ骨材反応試験：表－８に示すように試験環境条件が今回の蒸気養生と同じ温度 60℃、湿度 90% に設定したため、OP モルタルは材齢 1 日で脱型後、直ちに試験に供した。
- ④硫酸浸漬試験：硫酸濃度 5% の溶液中に供試体を浸漬させ、供試体の質量と外径を測定した。試験開始材齢は、GP モルタルが 1 日で、OP モルタルは材齢 7 日とした。

表－8 試験項目および方法

| No. | 試験項目       | 試験方法                      | 試験開始材齢     |            | 試験環境 |        |
|-----|------------|---------------------------|------------|------------|------|--------|
|     |            |                           | GP<br>モルタル | OP<br>モルタル | 温度   | 湿度     |
| 1   | 強さ試験       | JIS R 5201 に準拠            | －          | －          | －    | －      |
| 2   | 乾燥収縮試験     | JIS A 1129-1 付属書 A（参考）に準拠 | 1 日        | 7 日        | 20℃  | 60% RH |
| 3   | アルカリ骨材反応試験 | JIS A 1129-3 に準拠して長さを測定   | 1 日        | 1 日        | 60℃  | 90% RH |
| 4   | 硫酸浸漬試験     | 硫酸濃度：5%，質量と外径を測定          | 1 日        | 7 日        | 20℃  | －      |

## 4－2 実験結果

### (1) 強さ試験結果

これまでの研究で、フライアッシュ中のカルシウムが多いほど、初期強度が大きくなる傾向を確認している。今回の試験でも図－4 に示すように、カルシウムの多いフライアッシュ 2 種を用いた GP2 モルタルの初期強度は、GP1 モルタルより大きくなる傾向を確認できる。

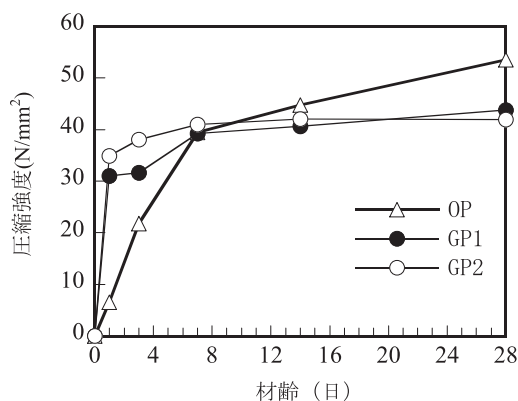
また、GP1 モルタルは材齢 28 日まで強度の増加が見られるが、GP2 モルタルは材齢 7 日以降の強度増加がほとんど見られない。これは比表面積の影響で、ジオポリマーの反応に必要な金属イオンの溶出が、フライアッシュ 1 種よりフライアッシュ 2 種の方が少なかったためだと考えられる。

図－5 には、曲げ強度試験の結果を示す。曲げ強度は、GP 1 モルタルおよび GP2 モルタルともに、材齢 3 日以降は OP モルタルより小さな値を示している。表－9 には、曲げ強度の圧縮強度に対する比を示す。OP モルタルでは 0.16～0.28 であるが、GP1 モルタルでは 0.15～0.16、GP2 モルタルでは 0.11～0.13 となり、GP モルタルの曲げ強度／圧縮強度比は、OP モルタルのそれに比べ小さくなっている。この原因の一つとしては、図－2 に示すようにジオポリマーの固化過程において、セメントのように粒子（活性フィラー）の表面に多数の突起が生成されず、粒子を無機質の不定形ゲルで固めた構造になっていることが影響しているためではないかと考えられる。

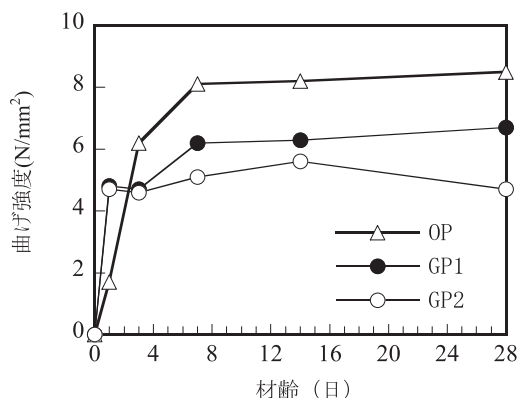
### (2) 乾燥収縮試験結果

GP モルタルの収縮ひずみは、図－6 に示すようにフライアッシュの種類によって異なる。フライアッシュ 1 種を用いた GP1 モルタルの収縮ひずみは、例えば材齢 30 日では OP モルタルの約 1/3 と非常に小さな値となっている。一方、フライアッシュ 2 種を用いた GP2 モルタルは、測定開始から一日で約 200  $\mu$  の収縮ひずみが発生し、その後は OP モルタルと同じ収縮傾向で推移しており、その初期の 200  $\mu$  分だけ OP モルタルよりひずみが大きくなっている。この原因は、縮重合反応による水の蒸発が関係しているのではないかと考えられる。

今回の試験では、GP モルタルと OP モルタルの養生条件は異なっているが、本試験結果を見る限り、蒸気養生を行った GP モルタルの乾燥収縮ひずみは、十分実用レベルであると考えられる。



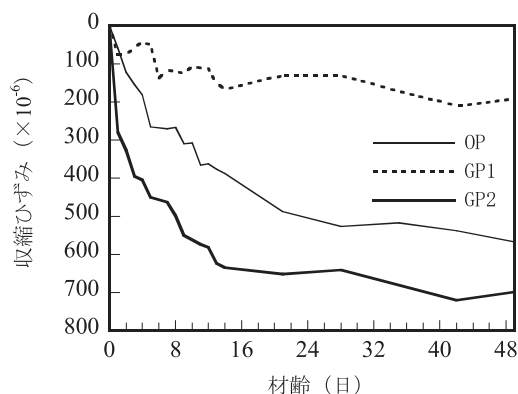
図－4 圧縮強度と材齢の関係



図－5 曲げ強度と材齢の関係

表－9 曲げ強度／圧縮強度比

| 種類  | 材齢   |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|
|     | 1 日  | 3 日  | 7 日  | 14 日 | 28 日 |
| OP  | 0.19 | 0.28 | 0.20 | 0.18 | 0.16 |
| GP1 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.15 | 0.15 |
| GP2 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.11 |



図－6 収縮ひずみの経時変化



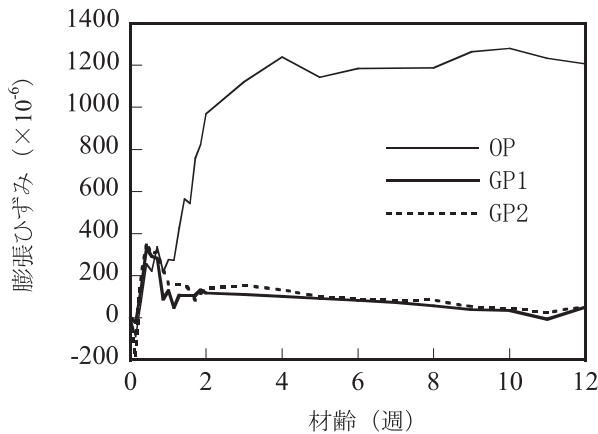


図-7 反応性骨材を使用した供試体の膨張ひずみの経時変化

## (3) アルカリ骨材反応

図-7 にアルカリ骨材反応試験の膨張ひずみの経時変化を示す。OP モルタルは、材齢 7 日から急激にひずみが増加し、材齢 14 日で写真-1 に示すようなアルカリ骨材反応による亀甲状のひびわれが発生した。一方、GP1 モルタルおよび GP2 モルタルは、OP モルタルのような急激なひずみの増加は発生しておらず、また写真-1 に示すように、供試体表面にひび割れも発生していない。以上より、GP モルタルでは、アルカリ骨材反応が発生していないことが分かる。

GP モルタルにアルカリ骨材反応が発生しない理由の一つは、GP モルタルの材料である水ガラスの主成分がシリカであることが影響しているものと考えられる。すなわち、ジオポリマーでは、アルカリ環境下で骨材から溶出するシリカが、ジオポリマーの材料である水ガラスの成分と同じであるため、材料として固化反応に関与し、セメントコンクリートのように膨張性の生成物が生じないのではないかと考えられる。

## (4) 硫酸浸漬試験

図-8 には 5% 硫酸溶液に浸漬した供試体の質量減少率の経時変化を示す。OP モルタルは浸漬 8 週で約 60% 質量が減少しているのに対して、GP1 モルタルおよび GP2 モルタルは浸漬 8 週で数%程度しか質量が減少していない。また、図-9 に示す断面欠損率（(硫酸浸漬前の断面積 - 浸漬後の断面積) / 浸漬前の断面積 × 100）の経時変化も、OP モルタルは浸漬材齢 8 週で約 50% 欠損しているのに対して、GP1 モルタルおよび GP2 モルタルはほとんど欠損していない。

写真-2 には、硫酸浸漬前後の供試体の外観比較を示す。写真-2 に示すように、GP1 モルタルおよび GP2 モルタルは表面が若干劣化しているが、形状は保持してほぼ健全な状態であるのに対して、OP モルタルは劣化により浸漬前よりかなり小さくなっている。

以上より、GP モルタルの硫酸に対する抵抗性は、OP モルタルに比べて高いことが分かる。この理由としては、セメントが材料の OP モルタルは、成分のカルシウムが

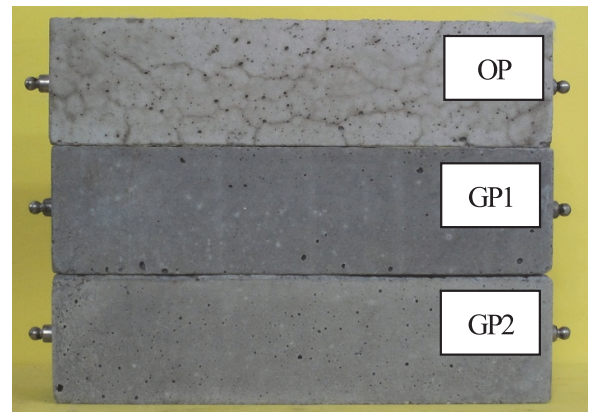
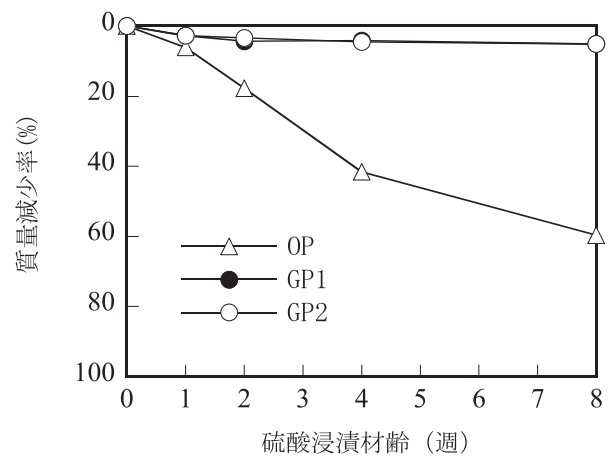
写真-1 表面ひび割れの発生状況の比較  
(上から OP, GP1, GP2)

図-8 質量減少率の経時変化

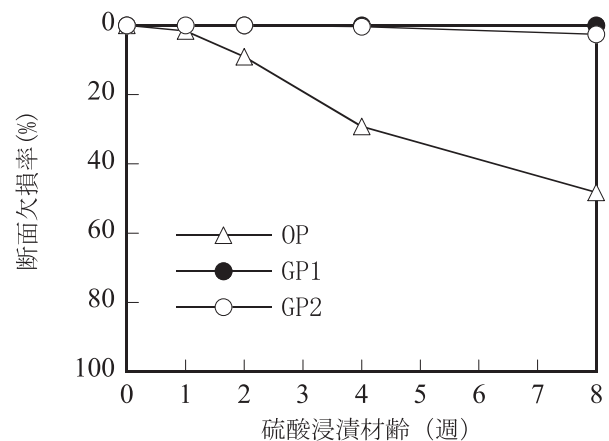


図-9 断面欠損率の経時変化

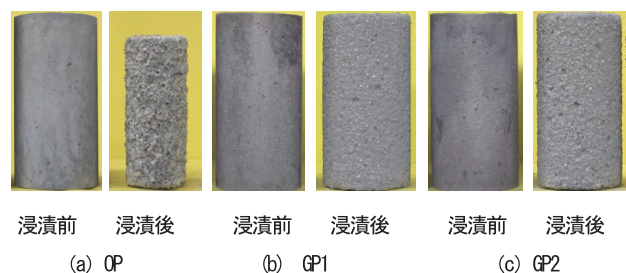


写真-2 浸漬前後の供試体の外観状況

硫酸により石こうに変化し劣化するが、セメントを材料としない GP モルタルは、主成分がカルシウムではなくカリウムやナトリウムのため、このような結果になったものと考えられる。

## § 5. 施工事例

ジオポリマーの施工実績は、試験施工を含めて現在までに 4 件ある。ここでは、1 例としてジオポリマーの耐酸性を期待して施工された事例を紹介する。施工場所では、酸によるコンクリートの劣化が激しく、耐酸性に優れた材料が望まれていた。そこで、耐酸性に優れたジオポリマー製品が採用された。採用されたジオポリマー製品は、写真-3 に示す JIS A 5371 の境界ブロックであり、施工本数は 61 本（切り下げ 1 本を含む）である。施工後の状況を写真-4 に示す。

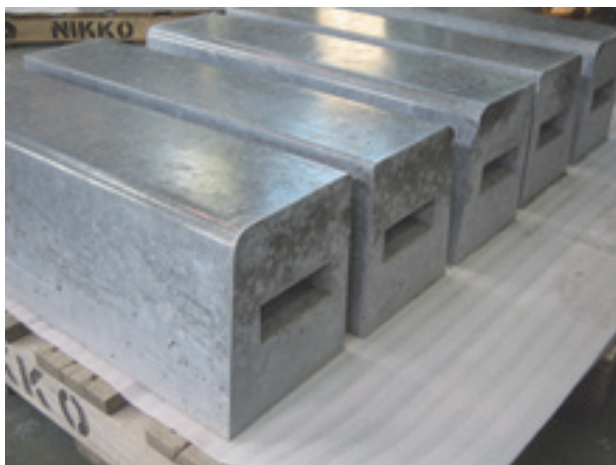


写真-3 ジオポリマー製のブロック  
(ジオポリマー)



写真-4 施工後の状況

## § 6. まとめ

以下にまとめを示す。

- ① CO<sub>2</sub> 排出量の試算を行い、ジオポリマーコンクリートはセメントコンクリートに比べ、CO<sub>2</sub> 排出量を約 70% 削減できることが明になった。
- ② フライアッシュ中のカルシウムが多いと、初期の圧縮強度が増加する傾向を確認した。
- ③ ジオポリマーモルタルの曲げ強度の圧縮強度に対する比は、セメントモルタルより小さくなることが分かった。これは、ジオポリマーの固化形態が影響しているためと推定される。
- ④ 今回の配合条件の範囲では、ジオポリマーの乾燥収縮ひずみは、十分実用可能な範囲であることを確認した。
- ⑤ ジオポリマーは、膨張ひずみの増加がなく、また、供試体表面にもひび割れが発生しないことから、アルカリ骨材反応が生じないことが分かった。
- ⑥ ジオポリマーはカルシウムが少ないため、酸に対する抵抗性が高いことを確認した。

ジオポリマーは、セメントとは異なる優れた特性を持つが、まだまだ多くの課題もある。今後は、それらの課題を解決して、ジオポリマーの特性を活かした、優れた社会資本の形成に貢献していきたいと考えている。

**謝辞：**ジオポリマーの開発では、大分工業高等専門学校教授一宮一夫氏、山口大学名誉教授池田攻氏および日本興業㈱津郷俊二氏には多大なご協力を頂きました。ここに記して深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Norio, Y. and Ko, I.: Preparation of geopolymetric materials from sewage sludge slag with special emphasis the matrix compositions, Journal of the Ceramic Society of Japan, 118[2], pp. 107-112, 2010.
- 2) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻: ジオポリマーモルタルの耐久性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. 1937-1942, 2011.
- 3) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻: ジオポリマーの諸特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp. 1894-1899, 2012.
- 4) 一宮一夫, 原田耕司, 津郷俊二, 池田攻: フライアッシュ 4 種を用いたジオポリマーモルタルの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1900-1905, 2012.
- 5) 一宮一夫, 原田耕司, 池田攻, 津郷俊二: フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp. 2230-2235, 2014.