

# 論文 各種リサイクル材を用いたジオポリマーモルタルの強度とそれらを充填したアスファルト舗装表面の遮熱効果

石黒 寛<sup>\*1</sup>・山中 正善<sup>\*2</sup>

**要旨：**夏季のアスファルト舗装路面の高温は、都市部におけるヒートアイランド現象の一因とも言われている。このため、遮熱性舗装などの環境に配慮した舗装技術が求められている。本研究では、各種リサイクル材を用いたジオポリマーモルタルを利用し、夏季の路面温度上昇に対する抑制効果に着目して各種の実験を行った。室内においてアスファルト供試体のランプ照射試験を行った結果から、ジオポリマーモルタルを開粒度アスファルト表面の空隙に充填した場合、充填しないアスファルト供試体に比べて温度上昇量は大きく低下することを確認した。また、リサイクル材の種類によって遮熱効果も異なることがわかった。

**キーワード：**リサイクル材、ジオポリマー、アスファルト舗装、表面温度、ランプ照射試験

## 1. はじめに

アスファルト舗装は、その色や材質から昼間の太陽光線を多く吸収し、夏季においては 60℃以上の高温となることもあり、舗装の耐久性低下の一因となっている。また、夜間には舗装内部に蓄積された熱が大気中に放出されるため、都市部におけるヒートアイランド現象の一因とも言われている。このため、夏季におけるアスファルト舗装の路面温度を低減し、道路環境を改善する舗装技術が求められている。

近年、舗装分野において、遮熱性舗装や保水性舗装など、環境に配慮した舗装技術が開発され、都市部の道路に適用されている<sup>1),2)</sup>。このうち、遮熱性舗装は、近赤外線を高反射する塗料をアスファルト舗装表面に塗布するのが一般的である。一方、著者らは、このような遮熱塗料を使用する方法ではなく、カキ養殖の副産物であるカキ殻およびその他のリサイクル材を有効活用し、細骨材の代替として用いたセメントモルタルを開粒度アスファルト舗装表面の空隙に充填し、遮熱性を付与する方法とその効果について報告した<sup>3),4)</sup>。

一般的に、セメントコンクリートは色が白く、日射反射率が大きいので、コンクリート舗装はアスファルト舗装に比べてヒートアイランド現象の緩和に有効であることが報告されている<sup>5)</sup>。また、上記の理由から、セメントモルタルとアスファルト舗装を組み合わせることにより遮熱性を付与することができる。セメントモルタルの色を明るくし、高反射率を得る方法の一つとして、製鉄の産業副産物である高炉スラグ微粉末をセメント置換材として用いることも有効である<sup>6)</sup>。

現在、産業副産物の有効活用は、資源の有効利用や環境負荷低減の観点から非常に重要なテーマであり、コンクリ

ート分野においても多くの研究が行われている。ジオポリマーは、セメントを使用しない結合材であるため、CO<sub>2</sub>排出抑制の観点から、最近、注目されている材料である。コンクリート分野においても、CO<sub>2</sub>排出抑制や耐酸性の向上などの観点から、セメント代替材としてジオポリマーを結合材として用いた研究が報告されている<sup>7),8)</sup>。

本研究は、各種リサイクル材（瓦、陶磁器、廃ガラス、貝殻などの破碎材）を用いてジオポリマーモルタルを作製し、これを開粒度アスファルト表面の空隙に充填し、夏季の路面温度上昇に対する抑制効果を調べることを目的としている。このため、まず、ジオポリマーモルタルの圧縮強度、明度・色彩、急結開始時間などに関する実験を行った。つぎに、ジオポリマーモルタルを充填したアスファルト供試体を作製し、室内においてランプ照射試験を行い、表面温度の低減効果を調べた。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料

使用材料とその物性を表-1に示す。粉体として高炉スラグ微粉末 4000 を使用した。また、アルカリシリカ溶液として、珪酸ソーダ 1 号を水道水で 2 倍に希釈したものを使用した。細骨材として、かき殻（粒径 2mm 以下）、廃瓦（粒径 3mm 以下）、陶磁器屑（粒径 0.15~3mm）、廃ガラス（粒径 2.5mm 以下）、ホタテ殻（粒径 2mm 以下）、等のリサイクル材を使用した。これらのうちホタテ殻は青森県で生産されたもの、それ以外の材料は三重県で生産されたものを入手した。その他、沖縄県産のサンゴ砂（粒径 2.5mm 以下）、三重県産の川砂（粒径 2.5mm 以下）を比較用の細骨材として使用した。ここで、細骨材の密度および吸水率は、JIS A 1109 により求めた。

\*1 三重大学 生物資源学研究科教授 農博（正会員）

\*2 朝日土木(株) 代表取締役専務

## 2.2 モルタルの配合および練り混ぜ

1 回の練り混ぜに使用したモルタルの配合を表-2 に示す。既報<sup>3),4)</sup>において、かき殻とセメントの質量比を 2:1、水セメント比が 1.1 のかき殻セメントモルタルを作製し、充填モルタルとして利用した。本研究では、かき殻と高炉スラグ微粉末の質量比を 2:1 とし、アルカリシリカ溶液と高炉スラグ微粉末の質量比を 1.37:1 とし、かき殻セメントモルタルと同程度の軟らかさのかき殻ジオポリマーモルタルを作製した。その他の細骨材の配合では、アルカリシリカ溶液と高炉スラグ微粉末の質量比を 1.37:1 とし、また、細骨材と高炉スラグ微粉末の質量比を 2:1~4:1 とし、充填モルタルとして利用できる軟らかさを目標とした。

ジオポリマーモルタルの練り混ぜにはモルタルミキサーを使用し、まず、高炉スラグ微粉末とアルカリシリカ溶液を混合し、つぎに、細骨材を投入して 1 分間練り混ぜた。なお、供試体作製に使用した細骨材の含水率は、かき殻 3.6%、廃瓦 9.0%、陶磁器屑 1.6%、廃ガラス 0.0%、ホタテ殻 0.5%、サンゴ砂 0.4%、川砂 1.4%であった。また、モルタルを供試体作成用型枠に詰めた時の密度（単位容積質量）も測定した。

## 2.3 供試体の作製方法

ランプ照射試験に用いるアスファルト供試体および圧縮強度試験に用いる円柱供試体を作製した。

細骨材の異なるジオポリマーモルタルを充填したアスファルト供試体をそれぞれ 1 個作製した。その概要を図-1 に示す。開粒度アスファルト供試体（最大骨材粒径 20mm、寸法 30×30cm、厚さ 5cm）の表面から、振動機を用いてジオポリマーモルタルを上部の空隙に充填した。このため、アスファルト供試体表面部の空隙が充填され、下部の空隙は未充填となっている。モルタル充填後に供試体をビニールシートで覆い、材齢 7 日において研磨機を用いて表面を研磨し、その後、室内に放置して乾燥させた。写真-1 は、表面を研磨したアスファルト供試体を示しており、かき殻を細骨材として用いた場合のものである。

圧縮強度試験には、φ5×10 cm の円柱供試体を使用し、各配合の材齢 7 日および 28 日試験用としてそれぞれ 3 個の供試体を作製した。供試体は、乾燥しないように 20℃の室内で保存し、材齢 7 日で脱型した後、供試体端面を研磨機で平坦に仕上げた。また、材齢 28 日試験用の供試体は、プラスチックフィルムとシートで覆い、試験材齢まで 20℃の室内で封緘養生した。

## 2.4 フロー値の測定

練り混ぜ直後にジオポリマーモルタルをフローコーンに詰め、コーンを引き上げた時の拡がりフロー値として測定した。

表-1 使用材料

|           |                                                          |          |                         |         |
|-----------|----------------------------------------------------------|----------|-------------------------|---------|
| 高炉スラグ微粉末  | 比表面積 4300 cm <sup>2</sup> /g<br>密度 2.88g/cm <sup>3</sup> |          |                         |         |
| アルカリシリカ溶液 | 珪酸ソーダ 1 号を水道水で 2 倍に希釈したもの、密度 1.29 g/cm <sup>3</sup>      |          |                         |         |
| 細骨材       | 種類                                                       | 粒径       | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率 (%) |
|           | かき殻                                                      | 2mm 以下   | 2.29                    | 1.7     |
|           | 廃瓦                                                       | 3mm 以下   | 2.52                    | 1.7     |
|           | 陶磁器屑                                                     | 0.15~3mm | 2.33                    | 4.2     |
|           | 廃ガラス                                                     | 2.5mm 以下 | 2.49                    | 0.6     |
|           | ホタテ殻                                                     | 2mm 以下   | 2.64                    | 0.9     |
|           | サンゴ砂                                                     | 2.5mm 以下 | 2.43                    | 6.0     |
|           | 川砂                                                       | 2.5mm 以下 | 2.60                    | 1.6     |

表-2 モルタルの配合（1 リットルの練り混ぜ量）

| 配合 No. | 細骨材の種類 | 高炉スラグ微粉末 (g) | アルカリシリカ溶液 (g) | 細骨材 (g) |
|--------|--------|--------------|---------------|---------|
| 1      | かき殻    | 382          | 524           | 764     |
| 2      | 廃瓦     | 332          | 455           | 1194    |
| 3      | 陶磁器屑   | 305          | 418           | 1218    |
| 4      | 廃ガラス   | 306          | 420           | 1224    |
| 5      | ホタテ殻   | 473          | 649           | 946     |
| 6      | サンゴ砂   | 372          | 511           | 1117    |
| 7      | 川砂     | 339          | 465           | 1355    |

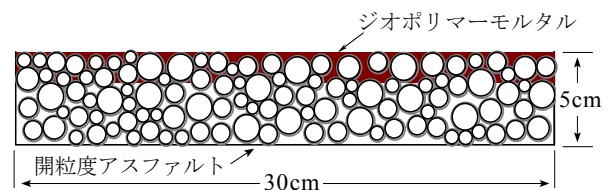


図-1 アスファルト供試体の概要

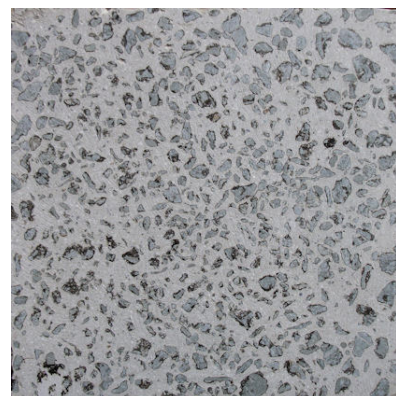


写真-1 表面を研磨したアスファルト供試体  
（かき殻を細骨材としたジオポリマーモルタルを充填した供試体の表面、寸法 30×30cm）

## 2.5 急結開始時間の測定

作製したモルタルは、練り混ぜ後の比較的早い時間で急激に流動性を失った。その急結開始時間を把握するため、モルタル表面から直径 3mm の鋼棒を一定速度で 10mm 貫入させ、そのときの貫入抵抗を写真－2 に示す力量計で測定した。高炉スラグ微粉末とアルカリシリカ溶液を混合したときを開始時間とし、貫入抵抗が発生し始めるときの時間を急結開始時間として求めた。モルタルの練上がり時の温度が約 18℃ で試験を行った。



写真－2 モルタルの急結開始時間の測定に用いた装置の外観

## 2.6 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108) に準じ、材齢 7 日および 28 日の強度を測定した。

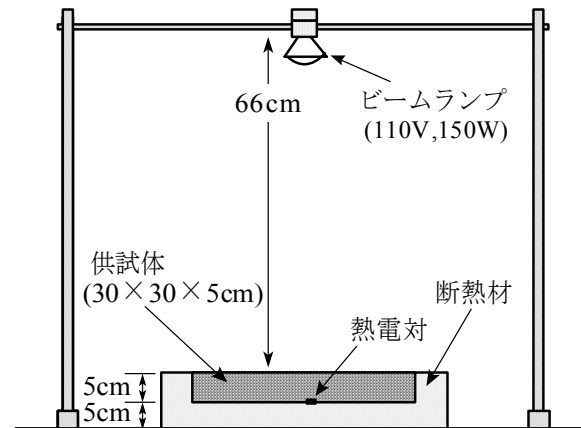
## 2.7 ランプ照射試験

ランプ照射試験は材齢 28 日経過後に実施した。その概要を図－2 に示す。室温は 29℃、照射時間 3 時間、計測時間を照射開始から約 15 時間とした。使用ランプはビームランプ散光型 (110V150W)、供試体表面からランプまでの距離は 66cm、密粒度アスファルトの表面温度が、照射時間 3 時間で 60℃ を超える程度の高さとした。なお、全天日射計で測定したランプ直下の供試体表面における照射量は、355W/m<sup>2</sup> であった。供試体は厚さ 5cm の断熱材 (発泡スチロール) で底面と側面を覆って断熱処理を施し、供試体中央の表面温度を非接触温度センサにより、また、底面の温度を断熱材に埋め込んだ熱電対により、20 秒間隔で計測した。

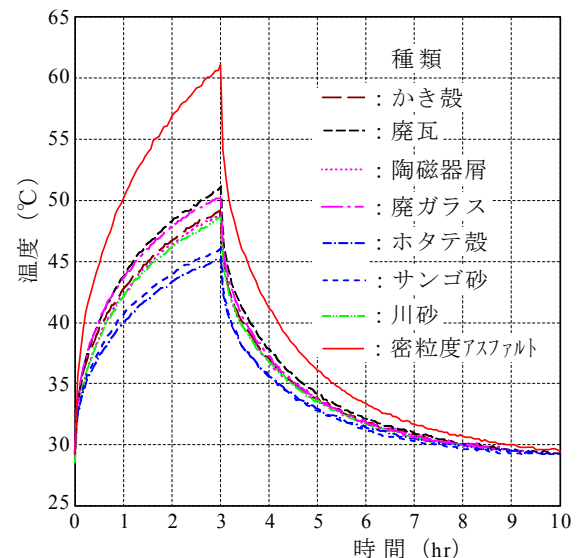
なお、本実験では、一般の舗装に多く用いられている密粒度アスファルトを比較用の供試体とした。

## 2.8 明度と色彩の測定

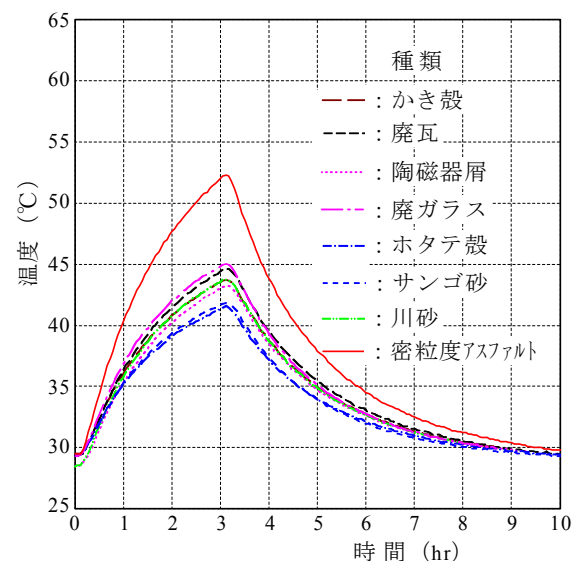
色彩色差計<sup>9)</sup>を用いてアスファルト供試体表面における 25 点の平均の明度と色彩を測定した。測定結果は、L\*a\*b\*表色系のパラメータを用いて評価した。



図－2 ランプ照射試験の概要



図－3 アスファルト供試体表面の温度経時変化



図－4 アスファルト供試体底面の温度経時変化

また、モルタル供試体（円柱供試体を輪切りした断面）の明度と色彩も測定した。なお、アスファルト供試体ならびにモルタル供試体ともに、材齢 28 日まで室内に放置し、乾燥した状態で測定した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 アスファルト供試体の温度挙動

ランプ照射試験におけるアスファルト供試体表面の温度経時変化を図-3に示す。この結果から、ランプ照射中は供試体表面の温度は急激に上昇し、照射終了後は放熱に伴って徐々に室温まで低下する挙動がうかがえる。密粒度アスファルト供試体はその表面色が黒く、熱を吸収しやすいことから、最高表面温度は 61.1℃に達し、他の供試体に比べて 10℃以上大きくなっている。これに対して、モルタルを充填した供試体は、アスファルトに比べて最高温度は低くなり、温度低下も早い傾向がうかがえる。また、供試体底面の温度経時変化は、図-4のようになり、底面では、表面に比べて若干遅れて最高温度に達し、その後は比較的緩やかな温度低下を示す。底面における最高温度は、表面と同様に密粒度アスファルトで高く、モルタルを充填した場合に抑制されている。これらのことから、モルタルを開粒度アスファルト表面の空隙に充填することにより、供試体の温度上昇と熱の蓄積が抑制されており、その有効性が認められる。したがって、この舗装工法は、夏季の舗装表面の温度上昇と熱の蓄積を抑制できると考えられ、ヒートアイランド現象の緩和に役立つと思われる。

図-5は、アスファルト供試体における温度上昇量の比較を示す。供試体における温度上昇量は、測定した最高温度と試験開始時の温度の差を表している。なお、表面の最高温度はランプ照射終了時点、底面では表面に比べて若干遅れた時点が最高温度となっている。これらの結果から、密粒度アスファルトにおける表面の温度上昇量は、31.8℃と最も高くなり、最も低いホタテ殻の温度

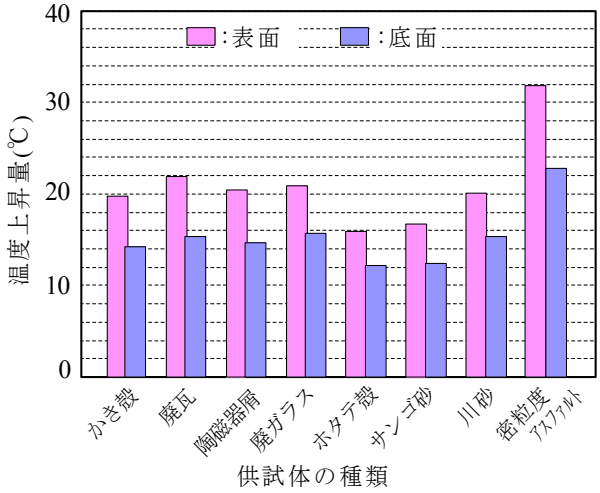


図-5 アスファルト供試体における温度上昇量の比較

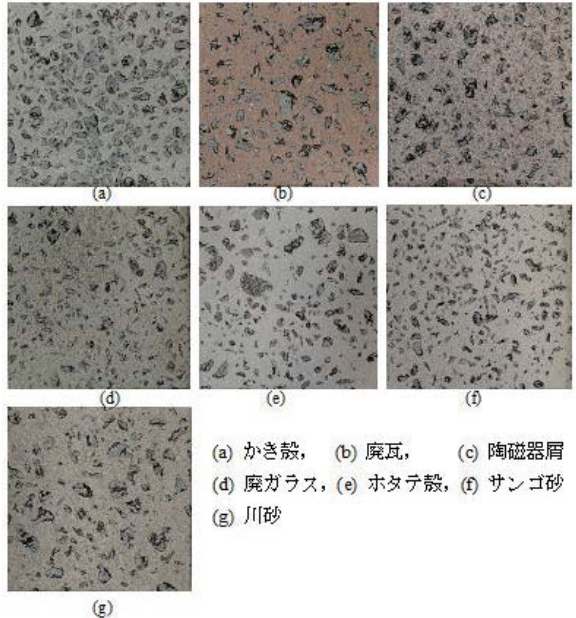


写真-3 アスファルト供試体における表面の色と模様 (15×15 cm 範囲を表す)

表-3 アスファルトおよびモルタル供試体における表面の明度と色彩

| 細骨材の種類 | アスファルト供試体 |      |      | モルタル供試体 |      |      |
|--------|-----------|------|------|---------|------|------|
|        | 明度        | 色彩   |      | 明度      | 色彩   |      |
|        | L*        | a*   | b*   | L*      | a*   | b*   |
| かき殻    | 73.7      | 0.2  | 4.3  | 76.4    | -0.5 | 4.7  |
| 廃瓦     | 62.8      | 6.8  | 10.0 | 60.8    | 8.4  | 10.5 |
| 陶磁器屑   | 71.6      | 3.2  | 6.5  | 74.0    | 1.4  | 4.2  |
| 廃ガラス   | 67.8      | -0.2 | 6.6  | 71.2    | -1.9 | 4.7  |
| ホタテ殻   | 79.0      | -0.4 | 2.1  | 80.9    | -0.5 | 0.7  |
| サンゴ砂   | 77.1      | 1.4  | 7.1  | 77.7    | -0.7 | 5.3  |
| 川砂     | 69.6      | 1.2  | 8.0  | 69.9    | -0.5 | 6.1  |

上昇量は、15.9℃となった。ホタテ殻を充填した場合には、密粒度アスファルトに比べて約16℃の温度低減効果が認められた。サンゴ砂を使用した場合においても比較的大きい低減効果を示している。また、かき殻の場合の温度上昇量は19.8℃となり、密粒度アスファルトに比べて12℃の温度低減効果があった。温度低減効果の大きい順番は、ホタテ殻、サンゴ砂、かき殻、川砂、陶磁器屑、廃ガラス、廃瓦の順番となった。川砂を用いたモルタルの効果は比較的大きく、陶磁器屑、廃ガラスおよび廃瓦などのリサイクル材に比べて、同程度あるいは大きい効果を有している。また、いずれの骨材を利用した場合においても、密粒度アスファルトに比べて10℃以上の温度低減効果があった。

供試体底面における温度上昇量は、表面に比べて低いものの、その大小関係は、表面の場合と同様であった。

### 3.2 供試体の明度と色彩

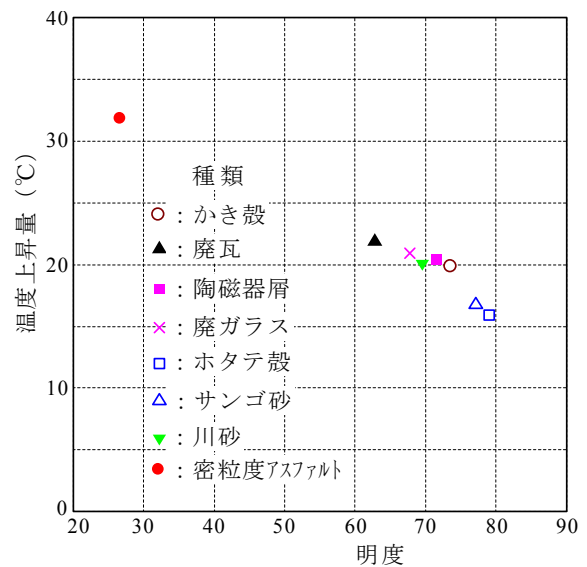
アスファルト供試体における表面の色と模様を写真－3に示す。充填モルタル硬化後に表面を研磨しているため、骨材とモルタルによる色と模様が現れている。

供試体の明度と色彩を表－3に示す。明度および色彩は $L^*a^*b^*$ 表色系の結果を表し、 $L^*$ は明度（明るさ）、 $a^*$ と $b^*$ により色相（色合い）と彩度（鮮やかさの度合い）を表す。ここで、 $L^*$ は0から100までの値をとり、0が黒、100が白となる。 $a^*$ と $b^*$ は、 $a^*$ が+のとき赤色側、-のとき緑色側に近くなり、一方、 $b^*$ が+のとき黄色側、-のとき青色側に近くなる。また、数値の絶対値が大きいほど色鮮やかになり、小さいほどくすんだ色となる。

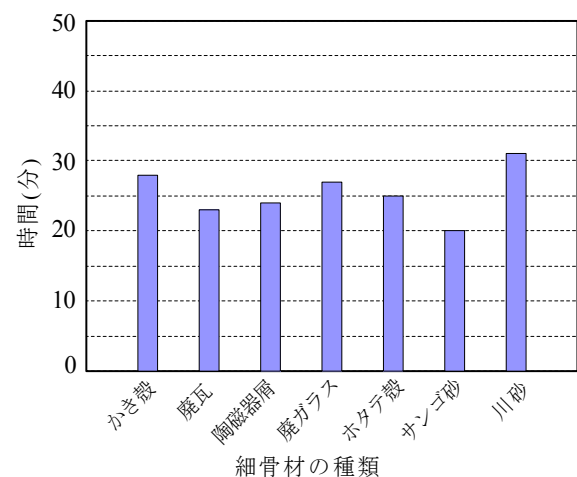
廃瓦を用いた場合には、 $a^*$ 、 $b^*$ がともに+の値が増加し、赤色、黄色側に増加していることを示している。これは、廃瓦自体の色彩の影響と考えられる<sup>10)</sup>。また、陶磁器屑も陶器廃材が含まれているため、同様の傾向が認められる。

供試体表面の明度 $L^*$ は、その値が大きいほど表面の日射反射率も大きくなることから、その遮熱効果に大きく影響する。モルタルを充填したアスファルト供試体において、明度の最も大きいものは、ホタテ殻の場合で79.0であった。これは、明度の大きなホタテ殻モルタルを表面に充填したことによる。また、最も明度の小さいものは、廃瓦の62.8であった。なお、ランプ照射試験に用いた密粒度アスファルト供試体における表面の明度は26.8であり、最も暗い供試体となっている。

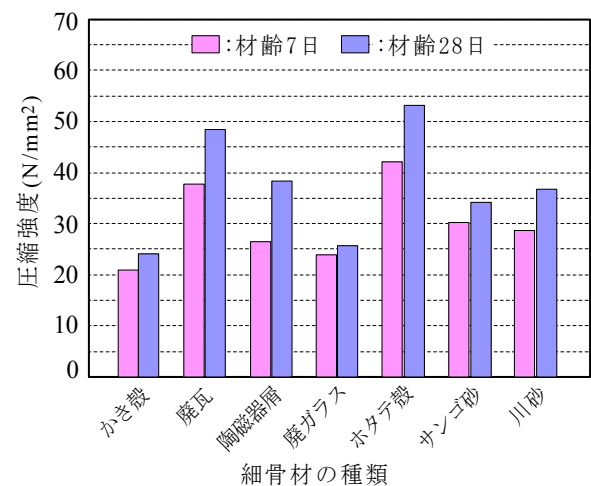
図－6は、アスファルト供試体表面における温度上昇量と明度の関係を示したものである。アスファルト供試体における明度の大きい順番は、ホタテ殻、サンゴ砂、かき殻、陶磁器屑、川砂、廃ガラス、廃瓦の順番となっている。これは、ランプ照射試験における温度上昇量の小さい順番とほぼ一致している。したがって、モルタル



図－6 アスファルト供試体表面における温度上昇量と明度の関係



図－7 各種骨材を用いたモルタルの急結開始時間



図－8 各種骨材を用いたモルタルの圧縮強度

充填による遮熱効果の増加は、表面の明度の増加によるものと考えられる。

### 3.3 モルタルのフロー値および急結開始時間

モルタルのフロー値 (mm) は、かき殻、廃瓦、陶磁器屑、廃ガラス、ホタテ殻、サンゴ砂、および川砂を用いた場合において、それぞれ、210、245、115、102、315、125 および 255 であった。なお、試験では落下打撃は与えていない。各モルタルのフロー値は、100 程度から 300 以上までとなり、軟らかさの程度は異なっている。

図-7 は、モルタルの急結開始時間を示している。川砂の場合で 31 分、サンゴ砂の場合で 20 分であった。その他の骨材を用いたモルタルの急結開始時間は、20-30 分の間であった。一方、かき殻とセメントの質量比が 1 : 2、水セメント比が 1.1 のかき殻セメントモルタルの場合、急結開始時間は 160 分であった。今回の配合においては、モルタルの急結開始までの時間が比較的短いことがわかった。このため、今後の課題として、遅延剤等の使用の検討も必要と考えられる。

### 3.4 モルタルの圧縮強度

材齢 7 日および 28 日におけるモルタルの圧縮強度を図-8 に示す。各材齢において、細骨材としてホタテ殻を用いたモルタルが最も大きな圧縮強度となり、かき殻の場合が最も小さかった。また、廃瓦を用いた場合も比較的大きな強度が得られた。既往の研究<sup>4)</sup>において、かき殻とセメントの質量比が 1 : 2、水セメント比が 1.1 のかき殻セメントモルタルの場合、材齢 7 日の圧縮強度は 10.2N/mm<sup>2</sup> であった。これと比較すると、ジオポリマーモルタルの強度は、セメントモルタルよりもかなり大きいといえる。したがって、強度的にはかき殻ジオポリマーモルタルを遮熱舗装用の充填モルタルとして利用できると思われる。ただし、既往の文献<sup>8)</sup>において、乾燥に伴うモルタルの強度低下が指摘されている。本実験では、乾燥しにくい養生条件下で強度を求めているため、材齢経過に伴う強度低下などは認められなかったが、今後は、乾燥の影響についての検討も必要と思われる。

## 4. まとめ

本研究の結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) ジオポリマーモルタルを開粒度アスファルト表面の空隙に充填した場合、密粒度アスファルトに比べて 10℃以上の温度低減効果が得られた。
- 2) 舗装表面の遮熱効果を大きくするためには、明度の

大きなモルタルを充填し、舗装表面の明度を大きくすることが有効である。ここでは、ホタテ殻を用いたジオポリマーモルタルの効果が最も大きかった。

- 3) 各種リサイクル材を用いたジオポリマーモルタルを作製し、乾燥しにくい養生条件下で圧縮強度を求めた。この結果、低い圧縮強度のものや材齢経過に伴う強度低下などは認められなかった。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会 舗装委員会：環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック，丸善，2009.6
- 2) 路面温度上昇抑制舗装研究会：保水性舗装・遮熱性舗装，<http://www.coolhosouken.com/>，（参照 2015.6）
- 3) 石黒 覚，山中正善：カキ殻粉入りモルタルを活用した遮熱性舗装の研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，p.1367-1372，2010.6
- 4) 石黒 覚，山中正善：充填モルタルによるアスファルト舗装路面の温度制御，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1384-1389，2012.7
- 5) 君島健之，大石英夫，西岡真稔，森山正和：コンクリート舗装のヒートアイランド緩和効果，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.635-641，2006
- 6) 林 建佑：ヒートアイランド現象の緩和を目的としたコンクリートの材料技術に関する研究，コンクリート工学，Vol.52，No.3，pp.273-279，2014.3
- 7) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田 攻：活性ファイバーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2005-2010，2013.7
- 8) 畑中重光，前川明弘，三島直生：ポーラスコンクリート用結合材のためのジオポリマー硬化体の製造に関する基礎研究，三重大学社会連携研究センター研究報告，Vol.21，pp.67-71，2014.2
- 9) KONICA MINOLTA 計測機器：色彩色差計，<http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/color/index.html>，（参照 2015.6）
- 10) 井上真澄，岡本享久，平尾和洋，児島孝之：陶器廃材により着色したコンクリートの力学的特性と色彩評価，コンクリート工学，Vol.47，No.2，pp.14-20，2009.2