

論文 温度上昇抑制効果能力をコンクリートに付与するモルタルの開発

高橋 篤史*1・橋本 親典*2・渡辺 健*3・石丸 啓輔*4

要旨: コンクリート、ポーラスコンクリート、保水能力が高い骨材を混ぜたモルタルをコンクリートに打ち込んだ平板（以後特殊平板と略す）を屋外暴露と室内でハロゲンライトを照射して温度と試験体重量を同時測定する実験を行い、検討を行った。その結果、コンクリート、ポーラスコンクリートと比べて特殊平板は、温度上昇が一番低く保水能力も優れていることがわかった。温度上昇抑制効果を有するコンクリートを作製するためにはコンクリート内に含水する水分量だけでなく、水分を蓄積し続けること、蒸発することにより発生する気化熱の吸熱効果を効率よくコンクリートに与える必要があることがわかった。

キーワード: ヒートアイランド現象, 気化熱, ポーラスコンクリート, 吸水, 活性アルミナ

1. はじめに

近年問題となっている、ヒートアイランド現象対策としてポーラスコンクリートを使用する方法が有効な手段となっている。ポーラスコンクリートは保水性建材の一種であり、その空隙部に蓄えた雨水などの蒸発による温度上昇抑制効果が期待できる。また、ポーラスコンクリート舗装に関する基本的な熱特性の研究²⁾や、現状の技術として保水性建材としてのポーラスコンクリートの機能をより高める方法として空隙中に吸水性樹脂を注入したポーラスコンクリートが提案開発されている¹⁾。またポーラスコンクリートに植物を植え付けることによりコンクリートに緑化を施して温暖化対策を行う技術が提案されている物もある。筆者は、通常の骨材と比較して保水能力が高い骨材を混入させたモルタルをコンクリート表面に打ち込むことにより現在使用しているポーラスコンクリートと同等以上の性能を寄与させる技術を開発した。

本研究では、保水能力が高い骨材として活性アルミナを選択し、コンクリート表面上にモルタルとして打ち込むことで温度上昇抑制効果を与え、コンクリート平板、ポーラスコンクリート平板との温度比較を行うために屋外暴露試験と模擬日射照射試験を行った。また模擬日射照射試験で各平板の水分割合と温度上昇の関係について考察した。

2. 実験概要

2.1 屋外暴露試験

屋外暴露試験では、愛媛県西条市の野外において日の出から日の入りまで日光を受光する場所に設置し、24時間の温度測定を行った。

(1) 測定期間

屋外暴露試験は平成 21 年 10 月 23 日の 7 時 55 分から 24 日の 7 時 55 分の 24 時間測定した。日中最大気温は 21.7℃であった。

(2) 試験装置

装置は図-1 に示す構造とする。台の高さは地上より 30mm としている。

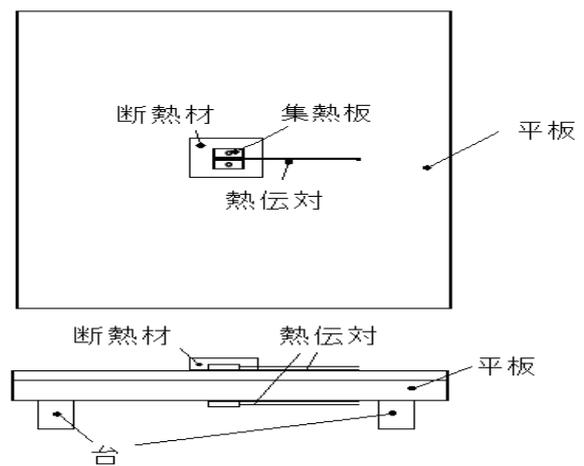


図-1 屋外暴露試験装置



図-2 屋外暴露試験の熱電対固定風景

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 2 年 (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博 (工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター技術専門職員 (正会員)

表-1 各コンクリートの使用材料

| 材料 | 種類 |
|------|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント (密度:3.15g/cm ³) |
| | 白色ポルトランドセメント (密度:3.06g/cm ³) |
| 骨材 | 7号砕石 粒径2.5~5mm, 表乾密度2.56g/cm ³ |
| | 細砂 粒径 1.2~0.6mm, 表乾密度 2.65g/cm ³ |
| | 石灰砕砂 粒径 2.5~0.6mm, 表乾密度 2.63g/cm ³ |
| | 活性 アルミナ 粒径 4 mm, 表乾密度 0.82g/cm ³ 細孔容積 0.43g/ml 比表面積 140m ² /g |

表-2 屋外曝露用コンクリート平板

| スランブ (cm) | 骨材の 最大寸法 (mm) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|--------------|---------------------|------------|--------------------------|------------|-----|----------|
| | | | 水 | 普通 セメント | 細砂 | 7号 砕石 |
| 0 | 10 | 4 | 99 | 248 | 500 | 1554 |

(3) 配合条件

表-1 に各種試験片の使用材料を表-2~4 に各種コンクリートの配合条件を示す。

(4) コンクリート平板の作製

表-2 に示す材料と水を混練し、製造したコンクリートを 300×300×30 mm のサイズの型枠に高さ 30 mm まで流し込み突き棒で締め固めた。

(5) 特殊平板の作成

はじめに表-3 にある表層の材料と水を混練したセメントペーストを製造する。表層に使用する骨材のうち、活性アルミナは水の吸水量が大きいので、前もって表乾状態にしておいた。作製したセメントペーストを 300×300×30 mm のサイズの型枠に高さ 10 mm の位置まで流し込み突き棒で締め固めた。次に表-3 にある基層の材料を (4) と同じ方法で混練しコンクリートを製造する。

表-3 屋外曝露用特殊平板

| | スランブ (cm) | 骨材の 最大寸法 (mm) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|----|--------------|---------------------|------------|--------------------------|------------|------------|-----|------|------|------------|
| | | | | 水 | 普通 セメント | 白色 セメント | 細砂 | 石灰砕砂 | 7号砕石 | 活性 アルミナ |
| 表層 | 0 | 10 | 4 | 133 | - | 333 | - | 539 | - | 420 |
| 基層 | 0 | 10 | 4 | 99 | 248 | - | 500 | - | 1554 | - |

表-4 屋外曝露用ポーラスコンクリート

| | スランブ (cm) | 骨材の 最大寸法 (mm) | 連続 空隙率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|----|--------------|---------------------|------------------|--------------------------|------------|------------|------|------|
| | | | | 水 | 普通 セメント | 白色 セメント | 7号砕石 | 砕石 |
| 表層 | 0 | 10 | 20 | 99 | - | 360 | 1680 | - |
| 基層 | 0 | 10 | 20 | 99 | 360 | - | - | 1590 |

コンクリートを残りの高さ 20 mm の部分に流し込み突き棒で締め固めた。

(6) ポーラスコンクリート平板

ポーラスコンクリート平板は化粧ブロック構造の平板を使用している。配合条件は表-4 に示す。

(7) 熱電対の取り付け方法

コンクリート平板および特殊平板は作製時に直径 3mm の雄ネジを埋め込み熱電対の先に固定している集熱板に直径 4mm の穴を開け、ネジによって熱電対を固定した。ポーラスコンクリート平板は、熱電対を平板に固定できる Uクリップで挟み固定した。図-2 に熱電対固定風景を示す。

(8) 実験方法

300×300×30 mm の各種平板の上下に熱電対を取り付け、平板の上面には、直射日光の影響を熱電対が受けないう断熱材を置き、日光の当たる面と当たらない面を比較測定した。24 時間の温度変化を一時間おきにデータロガーで測定した。すべての試験体を同時期同一条件で測定した。

2.2 模擬日射照射試験

模擬日射照射試験では、試験体を室内でハロゲンライトを照射して温度測定及び試験体の含水水分重量の変化の測定を行った。

(1) 照射試験装置

装置は図-3 に示す構造とする。また試験装置の周りには湿度と温度と風の影響を少なくするために発泡ポリスチレンフォームで壁および天井を作成し密閉した。

(2) 配合条件

表-5~6 に各種試験片の配合条件を示す。

(3) コンクリート平板

コンクリート平板は屋外曝露試験時に作製した平板とは異なり、表-5 に示す配合の平板を使用した。

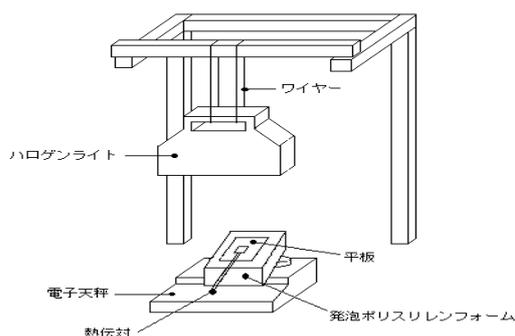


図-3 模擬日射照射試験装置

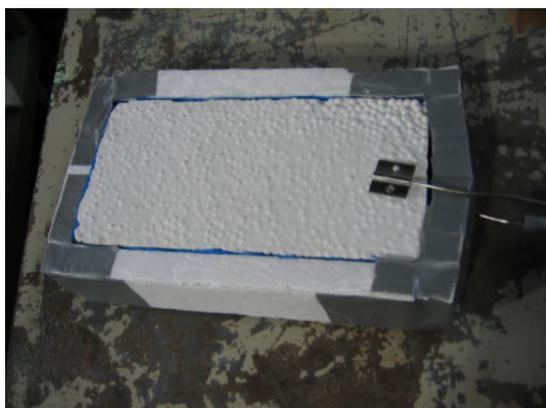


図-4 模擬日射照射試験の熱伝対固定風景

表-5 模擬日射照射試験用コンクリート平板

| スランブ (cm) | 骨材の 最大寸法 (mm) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|--------------|---------------------|------------|--------------------------|------------|-----|----------|
| | | | 水 | 普通 セメント | 細砂 | 7号 砕石 |
| 0 | 10 | 4 | 99 | 410 | 343 | 1471 |

表-6 模擬日射照射試験用特殊平板

| スランブ (cm) | 骨材の 最大寸法 (mm) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|--------------|---------------------|------------|--------------------------|------------|----------|------------|
| | | | 水 | 白色 セメント | 石灰 砕石 | 活性 アルミナ |
| 0 | 10 | 4 | 133 | 333 | 539 | 420 |

(4) 特殊平板の作製

模擬日射照射試験で使用する特殊平板は遮熱効果が現れる表層部に含水した水分量と測定時の蒸発量の変化を解りやすくするため2層構造では無く表層のみで作製した。表-6にある表層の材料と水を混練しペースト状にして型に流し込み、突き棒で締め固めた。屋外暴露試験時の時と同様、活性アルミナは水の吸水量が大きいので前もって表乾状態にしておいた。

(5) ポーラスコンクリートの作製

ポーラスコンクリートは屋外暴露試験時と同じ配合の平板を使用した。

(6) 熱電対の取り付け方法

屋外暴露試験と同様の方法で熱電対を取り付けた。図-4に熱電対固定風景を示す。

(7) 実験方法

コンクリート平板を 105±5℃で定質量となるまで乾燥し室温まで冷やし、絶乾質量を測定した。その後に室温の水中に 24 時間コンクリート平板を浸した後、平板に付着した水を拭き取り重量を測定する。以後、この状態を表乾状態と略す。表乾質量から絶乾質量を引いた値をその平板に含水している水分量とする。その後、平板の上下に熱電対を取り付け、試験片の上面以外からの水分および熱の移動を防ぐため側面および底面に防水シート、発泡スチロールの順番で覆い、上面には熱伝対がハロゲンライトの赤外線照射の影響を受けないよう熱伝対の上に断熱材を付けた。ハロゲンライトから試験片の距離を 200 mm とし、温度変化と含水水分量変化を同時に測定する。開始から 8 時間はハロゲンライトで照射し、その後の 16 時間はハロゲンライト照射を停止する。これは測定時期の屋外の日照条件から日中を 8 時間、夜間を 16 時間と設定した。測定開始から 30 分おきにデータロガーで温度測定、電子天秤で水分量を 24 時間測定した。

3. 実験結果とその考察

3.1 屋外曝露試験

屋外でコンクリート平板、ポーラスコンクリート平板、特殊平板の温度変化を測定した。図-5～図-7に各平板の温度変化を、図-8に全体の温度変化の比較を示す。コンクリート平板とポーラスコンクリート平板の最大温度が 35.1℃と 34.5℃のほぼ同じ数値になり特殊平板の最大温度が 26.3℃と温度上昇が一番低かった。日没後の各平板の温度変化はどれもほぼ同じ数値となった。

(1) 平板の表面と裏面

コンクリート平板、特殊平板に比べポーラスコンクリート平板は表と裏とでは温度上昇にずれが出ていた。ポーラスコンクリート平板は他のコンクリートに比べて内部に大きい空隙があるため伝熱効率が低下しているためと考えられる。

(2) 温度の逆転現象

コンクリート平板、特殊平板、ポーラスコンクリート平板とも、日没後の平板の表面と裏面との温度差が若干であるが逆転する現象が見られた。

(3) 温度上昇比較による考察

今回コンクリート平板とポーラスコンクリートの温

度変化が同じになった原因として、**図-1** の試験体を支えている台がある程度の高さがあるため、ポーラスコンクリート平板の空隙部に蓄えられた水が下面から抜け落ち内部に水が残らなかった。水が無くなったため気化熱による吸熱効果ができなくなっている。一方、特殊平板はコンクリートの表層に打ち込んでいるモルタルの骨材である活性アルミナの保水性能が高く水分を蓄え続けているという性質上、平板から水分が抜け落ちることもなく十分な量の水分を保持している。気化熱による吸熱効果で平板を冷却するため、平板の温度上昇を抑制したと推測する。

3.2 模擬日射照射試験

図-9～**図-11** に各平板の温度変化および含水量の変化を示す。模擬日射照射試験に使用した特殊平板は屋外曝露試験で使用した特殊平板の表層部分のみで測定を行なった。

(1) 各平板の水分割合

水分割合 A (%) を式 (1) に示す。ここで平板の表乾質量を α 、絶乾質量を β 、平板の模擬日射照射試験中に蒸発した水分の変化量を γ とする。

$$A = \frac{\gamma}{\alpha - \beta} \times 100 \quad (1)$$

図-9～**図-11** より実験終了時にはコンクリート平板 51%、ポーラスコンクリート平板 67%、特殊平板 73% の水分割合になった。水分割合が高い数値であるほどその平板は吸水した水を逃がさないことになり、水分割合の数値が低いものほど多くの水分が蒸発している。

(2) 各平板の含水割合

各平板の絶乾質量と含水量から含水割合 B (%) を出すと以下の式 (2) のようになる。

$$B = \frac{\alpha - \beta}{\beta} \times 100 \quad (2)$$

コンクリート平板 4%、ポーラスコンクリート平板 3%、特殊平板 23% となり特殊平板の含水割合が一番高くなっている。これは、特殊平板に使用している骨材の活性アルミナに起因している。活性アルミナの細孔容積は 0.43g/ml 比表面積は 140 m²/g となり非常に高く保水性が優れていることが要因で含水割合を高くしている。

(3) 平板の裏面と表面

模擬日射照射試験では、裏面は防水シートと発泡ポリスチレンフォームで覆われているため熱の逃げ場がなく裏面の方がハロゲンライトを切ったからは温度が高くなっている。

(4) ハロゲンライト照射切断時

今回測定した 3 種類の平板すべてハロゲンライト照射停止時から 30 分ほどは水分割合が数%回復している。

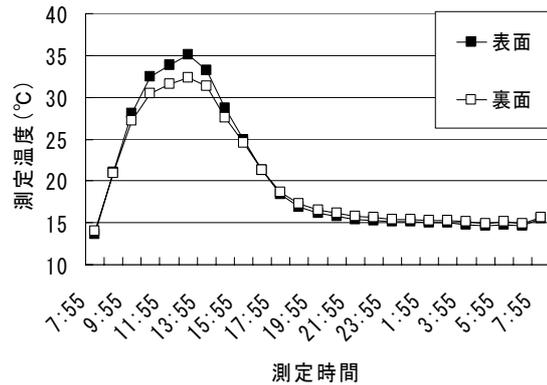


図-5 コンクリート平板の温度変化

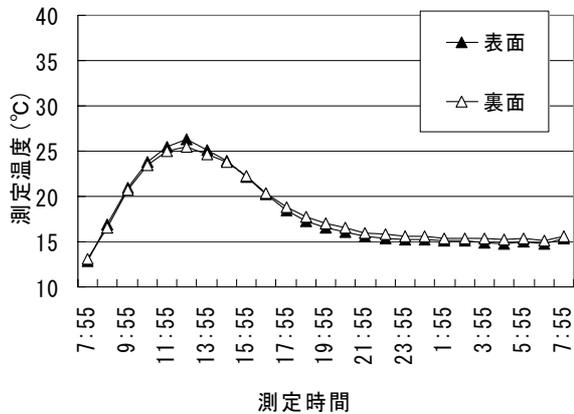


図-6 特殊平板の温度変化

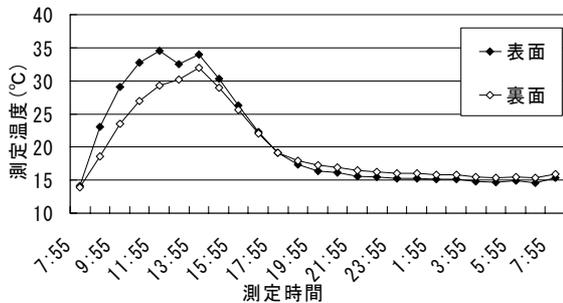


図-7 ポーラスコンクリート平板の温度変化

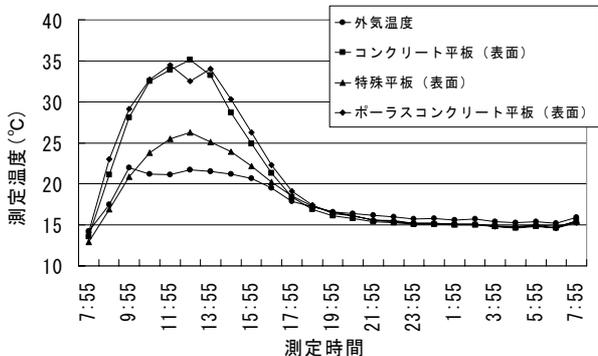


図-8 各平板の温度変化の比較

これは、ハロゲンライトから照射された熱が急速に失われたことによって起きた現象で蒸発中の蒸気が水に戻ったためと考えられる。

(5) 温度上昇比較による考察

今回の測定結果で各平板の最大温度は、コンクリート平板が 63.1℃、特殊平板が 56.4℃、ポーラスコンクリート平板が 73.7℃となった。コンクリート平板よりポーラスコンクリート平板の最大温度が高くなっている。各平板の表乾質量から絶乾質量を引いた値はコンクリート平板が 87.16 g、特殊平板が 171.67 g、ポーラスコンクリート平板が 82.82 g、また各平板の蒸発量は 43.12 g、46.63 g、27.14 g となる。コンクリート平板とポーラスコンクリート平板の含水量はほぼ同量になるが、蒸発量を比較するとポーラスコンクリート平板の蒸発量は 15.98 g 低い。ポーラスコンクリート平板の蒸発量がコンクリート平板より少ないことより気化熱の温度吸収がコンクリート平板よりも低いことがわかる。また、各平板の蒸発量を比較しても、蒸発量が多い物の温度上昇の抑制効果が高くなっていることがわかる。

(6) 土の温度測定

コンクリートに比べ土は温度が上昇しないとあるが実際に各平板に行った測定試験と同条件で測定した。蒸発を発生しやすくするため、土は砂土と仮定し、屋外曝露試験で使用したコンクリート平板の細砂を使用した。細砂を 100～110℃で定質量となるまで乾燥し室温まで冷やし、絶乾質量を測定した。次に室温の水に 24 時間細骨材を浸した後、細骨材を表乾状態にして表乾質量を測定する。その後 175×125×55 mm サイズの耐熱容器に入れ高さ 30mm の位置に熱伝対を埋め込んだ状態から土を突き固め、他の平板と同様の条件で温度測定を行った。結果、土は、水分割合の低下が激しく測定終了時には水分割合が 1%以下であった。このことから土は特殊平板と同じく気化による吸熱効果が大いだが嵩密度が小さいため蒸発量が増え保水能力が低いことがわかる。

3.3 各平板の特徴

模擬日射照射試験で測定した各平板を温度上昇時の条件で比較検討した。

(1) 温度上昇の比較

コンクリート平板、特殊平板、ポーラスコンクリート平板の 3 つの平板をハロゲンライトで 8 時間照射した時の各平板の表面の温度上昇を図-9～図-11 に示す。ハロゲンライトを照射し始めの 1 時間以内は、特殊平板の温度上昇が一番高かった。その後、徐々に温度上昇の伸びが低下し、3 時間も経つと 3 つの平板の中で表面温度が一番低くなった。コンクリート平板とポーラスコンクリート平板はどちらもほぼ一定の間隔で表面温度が上

昇した。

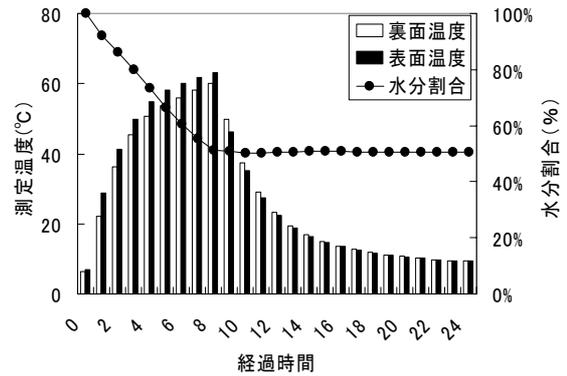


図-9 コンクリート平板の水分量と温度の関係

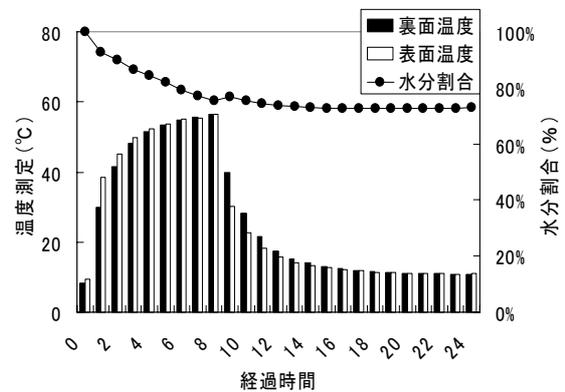


図-10 特殊平板の水分量と温度の関係

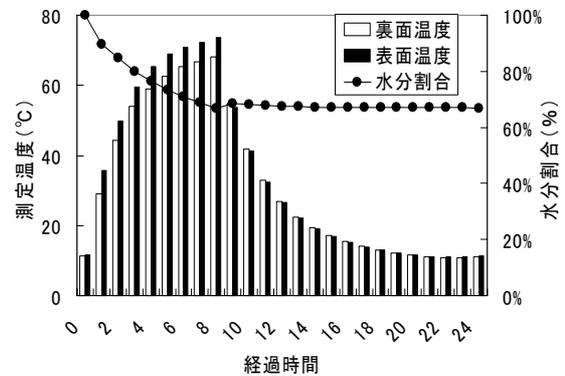


図-11 ポーラスコンクリート平板の水分量と温度の関係

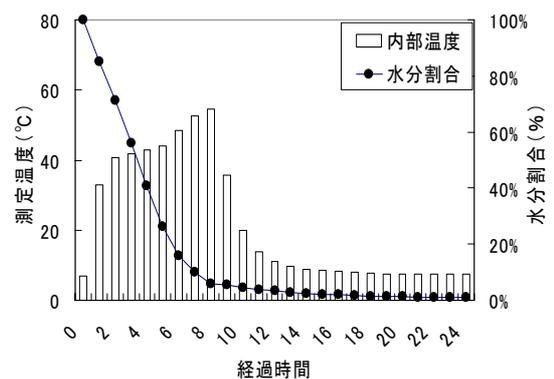


図-12 土の水分量と温度の関係

4 温度抑制メカニズムの考察

屋外曝露試験および模擬日射照射試験から平板の温度上昇の抑制に必要な条件として平板に含水している水分量とは別に違う条件も必要になることが解かってきた。図-5 と図-7 からコンクリート平板とポーラスコンクリートは屋外曝露試験ではほとんど測定に差がない。また模擬日射照射試験の結果、3.2の(5)に書いているように含水量は約4gの差しかない。しかし図-9 と図-11 を比較すると温度の最大上昇値が10℃の差が生じている。また測定終了時の水分割合も16%ほど差がある。これらの測定記録からコンクリート平板とポーラスコンクリート平板は含水量も材質もほぼ変わらないが、平板の最大温度や平板内部の水分蒸発量が変わってきていることから、温度上昇抑制に必要な条件が含水量以外に含水された水が効率よく蒸発されなければいけないことがわかる。土の模擬日射照射試験で温度上昇抑制効果がコンクリート平板と比べると非常に大きい。コンクリート平板と土の違いは嵩密度にあり、土はコンクリートに比べて嵩密度が低いいため水の通り道が沢山あり蒸発しやすくなっている。それにより気化熱の発生割合が多く吸熱効果が高くなっている。図-12の測定終了時の水分割合が1%以下になっているのはそのためと考えられる。図-10の特殊平板の最大温度上昇値は土の最大温度上昇値に近い。それは特殊平板の骨材に使われている活性アルミナの細孔容積が0.43g/ml、比表面積は140m²/gとなっており、気化熱として吸熱効果が効果的に働くためである。各平板の気化熱による温度上昇抑制の効率を図-13に表した。一時間ごとの温度上昇値Tを同じ時間内で蒸発した水分量Hで割ることにより各平板の気化効率G(℃/g)を出した。

$$G = \frac{T}{H} \quad (3)$$

この気化効率の数値が大きいほど気化熱による吸熱効果が低いことになる。開始から徐々に気化効率は下が

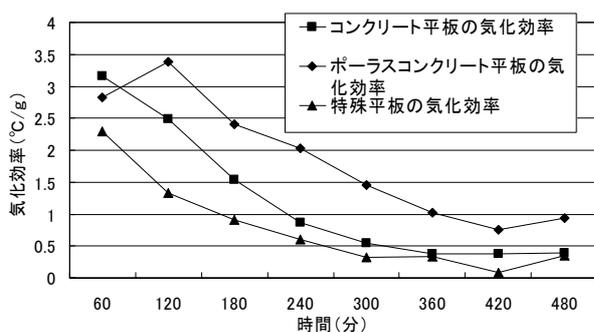


図-13 各平板の気化効率

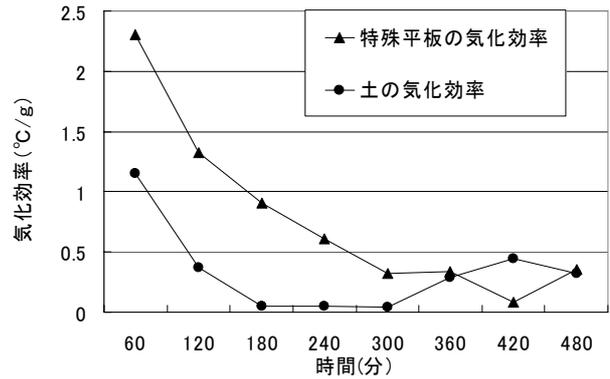


図-14 土と特殊平板の気化効率

っている。これはハロゲンライトが平板に与える熱量の上昇限界値に近づいているためと考える。模擬日射照射試験での温度測定で土と特殊平板とはほぼ同じ数値を示したが水分割合は特殊平板の方が高く土はほとんど残らなかった。図-14は土と特殊平板の温度上昇率の比較を表している。360分たったところに土の含水量が無くなったため気化効率が上がっているのがわかる。

以上のことから平板に温度上昇抑制効果を付与するためには平板に一定量の水分を含水させる、水分が蒸発するときにおける気化熱の吸熱効果を効率よく発生させるための細孔を一定量保持しておく必要がある。コンクリート平板やポーラスコンクリートにはこの点が欠如していたため温度上昇が高かったと考える。

5 まとめ

コンクリートに温度上昇抑制効果を与える場合次の三つの点が大切になってくる。一つ目はコンクリート内部に吸水される水の吸水量、二つ目は吸水した水をコンクリート内部に蓄積し下層等に流出しない能力、三つ目は内部に吸水した水が効率よく蒸発できることである。本実験では特殊平板が上記を一番満たしていたため最大温度上昇値が低くなった。

参考文献

- 1) 寺西浩司、吉永美香、永井伴英、諏訪達也：温度上昇抑制効果を有するポーラスコンクリートブロックの開発（その1.予備的な模擬日射照射試験）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1295、pp 589-590、2008.9
- 2) 三島直生、中川武志、畑中重光、北野博亮：屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、vol.30、No.2、pp337-342、2008.7