

論文 活性アルミナ粉末を混入したポーラスモルタルおよびポーラスペーストの温度上昇抑制機構

原 勝哉^{*1}・橋本 親典^{*2}・渡辺 健^{*3}・石丸 啓輔^{*4}

要旨: 既往の研究においてポーラスコンクリートに変わる新たな保水性建材の開発として、活性アルミナ粉末を混入することで本来成形が困難な高 W/C のポーラスモルタルの作製を可能とし、内部の連続空隙への保水による温度上昇抑制効果が大きい材料を開発した。本研究では、活性アルミナ粉末を用いて新たにポーラスペーストを作製し、ポーラスモルタルとポーラスペーストの温度上昇抑制効果について、内部構造の観察、保水性試験、吸水性試験および模擬日射照射試験等により検討した。その結果、高 W/C 高活性アルミナ粉末混入率のポーラスペーストは、ポーラスモルタルより長期の温度上昇抑制を期待できることがわかった。

キーワード: 保水性建材, 活性アルミナ粉末, 温度上昇抑制, ヒートアイランド現象

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は、緑地の減少、人工排熱の増加、建築物の高層化、密集化による風通りの悪化など、様々な要因が重なって起きている。日中最も寄与している要因として、緑地の減少や人工被覆面の増加による、蒸発散作用の冷却効果が弱くなるものが大部分を占めていると考えられる。従って、ヒートアイランド現象の対策として緑地に代わる保水性建材の開発が急務である。例えば、保水性建材の一種のポーラスコンクリートは、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。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。

既往の研究^{1,2)}において、通常の骨材と比較して保水能力が高い活性アルミナボール（本来、主に吸着剤、乾燥剤に利用）の原料である活性アルミナの粉末を 40×40×160mm モルタル内に混入し、温度上昇抑制効果をハログゲンライトによる模擬日射照射試験で検討した。これまではモルタル内部の空隙を通じて進入してきた水分を活性アルミナ粉末が多量かつ長期的に吸水・保水することでモルタルの温度上昇が抑制されると考えてきた。しかし、弓場上らの研究³⁾における簡易急速凍結融解試験結果において、活性アルミナ粉末混入モルタルが凍結融解抵抗性を持つことが明らかとなった。活性アルミナ粉末混入モルタルは、通常では材料分離により施工困難な高 W/C モルタルである。活性アルミナ粉末が吸水することで施工時の水の分離を防ぎ、内部に微細な連続空隙が発生し、この空隙が水圧の緩和に対して有効に働いた

ためと考えられる。W/C を大きくすることで、モルタルをポーラス化させ、モルタル内に多くの水分を供給させることができ、活性アルミナ粉末の混入率を上げることで吸水量の増加、水分の長期間保持能力を寄与することができた。

本研究では、既往の研究^{1,2,3)}を元に、新たな保水性建材として活性アルミナ粉末混入ペーストを作製した。SEM による内部微細構造の観察、保水性試験、吸水性試験および模擬日射照射試験により活性アルミナ粉末混入ペーストの温度上昇抑制効果の定量的評価を行った。また比較検討用に活性アルミナ粉末混入モルタルを作製し、活性アルミナ粉末混入ペーストとの温度上昇抑制の違いを考察した。

なお、本論文では、活性アルミナ粉末混入モルタルをポーラスモルタル、活性アルミナ粉末混入ペーストをポーラスペーストと称す。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に本研究で使用した材料の物理的性質を示す。

2.2 ポーラスモルタルの作製

練混ぜ方法は JIS R 5201:1997 に準じる。

- 1) 規定量の水、セメント、活性アルミナ粉末を順に投入する。
- 2) 低速30秒後規定量の石灰細砂を30秒間で投入する。
- 3) 高速回転30秒後90秒休止、最初の15秒でさじを用いモルタルをかき落とす。
- 4) 高速回転60秒後さじで10回かき混ぜる。

上記の手順で行い、モルタル供試体成形用三連型枠を

*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 (学生会員)

*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)

用いて40×40×160mmの角柱モルタルを作製し、材齢28日まで20℃で水中養生を行った。

2.3 ポーラスペーストの作製

練混ぜ方法はJIS R 5201を参考に行った。

- 1) 規定量の水、セメント、活性アルミナ粉末を順次投入する。
- 2) 低速回転で30秒練混ぜる。
- 3) 90秒休止、この間さじを用いてペーストをかき落とす。
- 4) 高速回転で30秒練混ぜる。

上記の手順で行い、形状はモルタルと同じ40×40×160mmを用いて、角柱ペーストを作製した。打設後2日で脱型し、材齢28日まで温度20℃、湿度100%RHの空間で湿潤養生を行った。

2.4 配合

表-2にポーラスモルタルの、表-3にポーラスペーストの1回の練混ぜに必要な材料の重量を示す。1バッチに必要な重量をモルタル供試体成形用三連型枠の容積より算出し、施工後余った分は廃棄した。各配合3本ずつ供試体を作製した。配合名のWに続く数字は水セメント比を、Aに続く数字は活性アルミナ粉末混入率を表す。モルタル、ペーストともに既往の研究^{1,2,3)}を参考に配合設計を行った。また比較検討用に標準的な配合としてW50A0を用意した。ポーラスモルタルは作製時にAE減水剤を使用した。これらの配合を用いて以下に示す試

表-1 使用材料の物理的性質

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3380cm ² /g)
細骨材	石灰細目細砂 (粒径 2.5~0.6 mm, 密度 2.65g/cm ³)
活性アルミナ粉末	水酸化アルミニウム(密度 0.82g/cm ³) を 600℃で焼成
AE 減水剤	リグニンスルホン酸系化合物および ポリオール複合体

験を行った。

2.5 細孔構造の確認

細孔径分布の測定は水銀圧入法により行った。また内部の微構造をSEMにより観察した。

2.6 保水性試験

湿潤質量は、15~25℃の清水中で24時間吸水させた後、供試体を取り出し密閉式のプラスチック容器に入れ15~30℃の室内で30分間水を切り、絞ったウエスで見える水膜を拭った後、直ちに計測した質量とする。絶乾質量は24時間105±5℃環境で保管し、その後常温の室内にて供試体が室温に戻った時の質量とする。保水量は以下の式(1)から求めた。

$$W = \frac{m_w - m_d}{V} \quad (1)$$

表-2 ポーラスモルタルの配合

配合名	W/C (%)	活性アルミナ粉末混入率 (%)	1バッチの練混ぜに必要な各材料の質量 (g)				
			水	セメント	活性アルミナ粉末	細骨材	AE 減水剤
W50A0	50	0	246	493	0	1478	0
W60A0	60	0	281	469	0	1406	
W60A5		5	246	410	99	1229	C×1.5%
W90A0	90	0	368	409	0	1225	0
W90A10		10	287	319	174	956	
W100A10	100	10	307	307	171	921	C×1.5%
W100A15		15	272	272	240	817	

表-3 ポーラスペーストの配合

配合名	W/C (%)	活性アルミナ粉末混入率 (%)	1バッチの練混ぜに必要な練混ぜ量 (g)		
			水	セメント	活性アルミナ粉末
W50A0	50	0	588	1176	0
W60A0	60	0	628	1047	0
W60A5		5	565	942	79
W90A0	90	0	710	789	0
W90A10		10	586	651	137
W100A10	100	10	605	605	134
W100A15		15	549	549	194



図-1 吸水性試験装置図

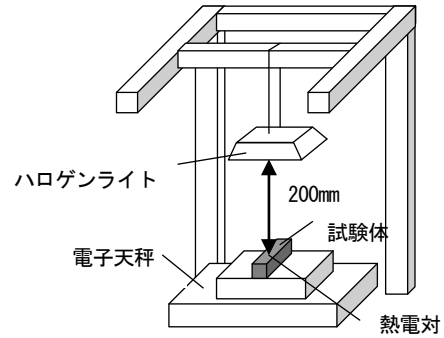


図-2 模擬日射照射試験

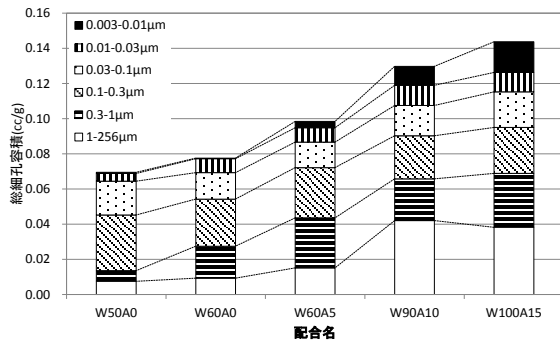


図-3 配合別総細孔量

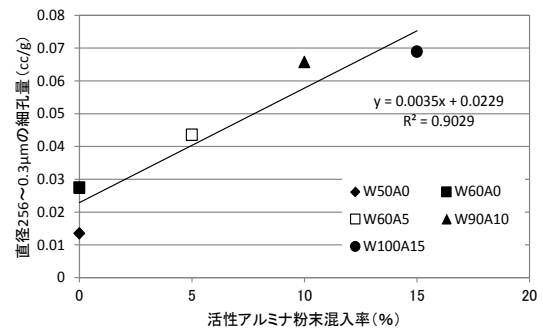


図-4 直径 256~0.3μm の細孔量と W/C および活性アルミナ粉末混入率の関係

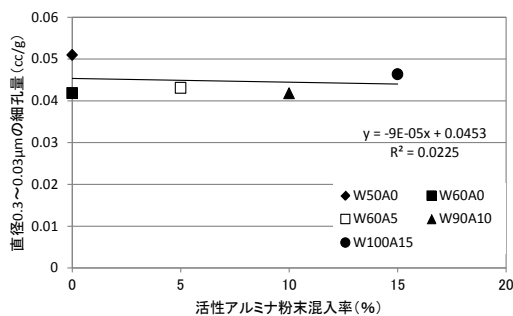


図-5 直径 0.3~0.03μm の細孔量と W/C および活性アルミナ粉末混入率の関係

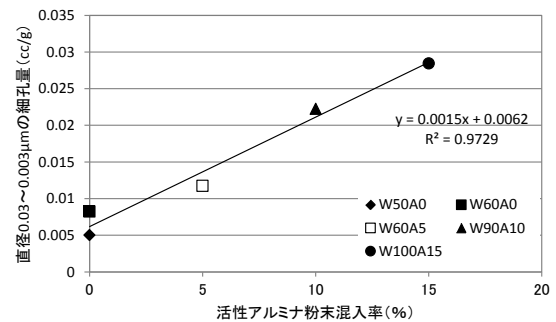


図-6 直径 0.03~0.003μm の細孔量と W/C および活性アルミナ粉末混入率の関係

W : 保水量(g/cm³), m_w : 湿潤質量(g), m_d : 絶乾質量(g),
V : 供試体体積 (cm³)

2.7 吸水性試験

供試体を温度 105±5℃の乾燥炉内において一定質量になるまで乾燥させこのときの質量を絶乾質量としその後、常温まで冷却する。冷却後、図-1 に示す装置に供試体を設置する。このとき設置時の水位は供試体底面から 5mm の高さとなるようにし、水は 15~25℃の清水とする。吸水試験開始後 5, 10, 30, 60, 90 分, 2, 4, 6, 12, 24 時間, 2, 3, 5 日経過毎に供試体を取り出し水が滴り落ちない程度まで水を切り、絞った濡れウエスで目に見える水膜を拭い質量を計測しこのときの質量を湿潤質量とする。吸水量は以下の式(2)から求めた。

$$W' = \frac{m_w' - m_d'}{V'} \quad (2)$$

W' : 吸水量(g/cm³), m_w' : 湿潤質量(g), m_d' : 絶乾質量(g),
V' : 供試体体積 (cm³)

2.8 模擬日射照射試験

試験装置の概略図を図-2 に示す。試験方法は既往の研究¹⁾を参考にした。供試体を 24 時間水中で十分吸水させた後、モルタルのハロゲンライト照射側に熱電対を取り付け、ハロゲンライトの赤外線照射の影響を受けないよう熱電対の上に断熱材を付けた。ハロゲンライト (500W) から供試体の距離を 200 mm としハロゲンライトの照射を開始し、温度変化と水分蒸発量を同時に測定した。一

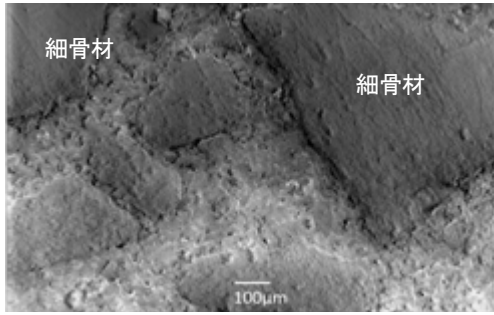


図-7 W50A0 (モルタル) の SEM 画像

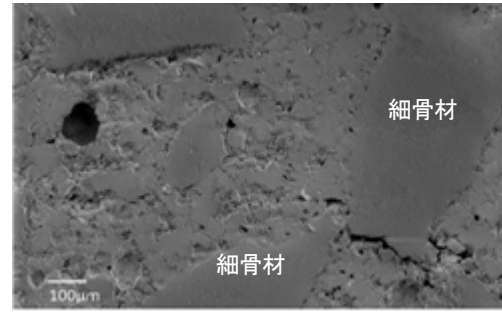


図-8 W100A15 (モルタル) の SEM 画像

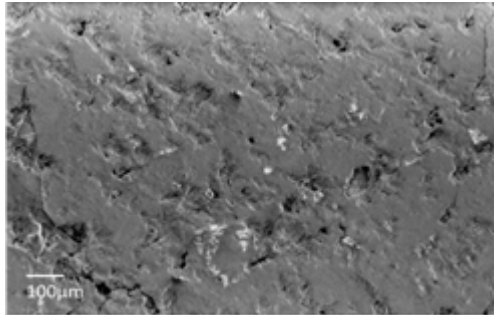


図-9 W50A0 (ペースト) の SEM 画像

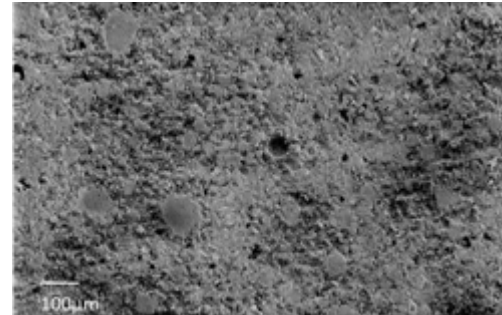


図-10 W100A15 (ペースト) の SEM 画像

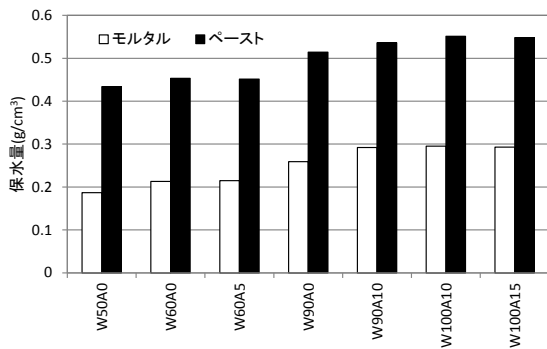


図-11 保水性試験結果

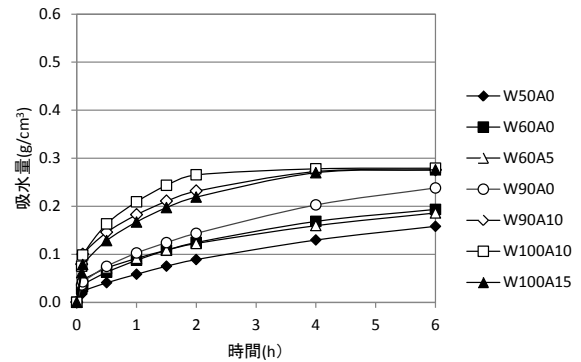


図-12 計測6時間までのモルタルの吸水性試験結果

定条件下での温度上昇抑制効果の検討を行うため、試験装置内を温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ に設定した。測定時間は日中の日光の連続照射時間を6時間と仮定しモルタル、ペーストともに6時間とした。測定開始から30分おきにデータロガーで温度変化を、電子天秤で水分蒸発量を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 細孔構造の確認結果

図-3 に、モルタルの総細孔量を示す。W/C および活性アルミナ粉末混入率の増加とともに、空隙の総量が増加していることが明らかとなった。W50A0 と W100A15 を比較すると総細孔量に約2倍の差が確認された。図-4、図-5 および図-6 に直径別の細孔量と W/C および活性アルミナ粉末混入率との関係を示す。直径 $0.03 \sim 0.003\mu\text{m}$ 、 $256 \sim 0.3\mu\text{m}$ の細孔において、W/C と活性アルミナ粉末混入率の増加に伴って細孔量が増加している。活性アルミナ

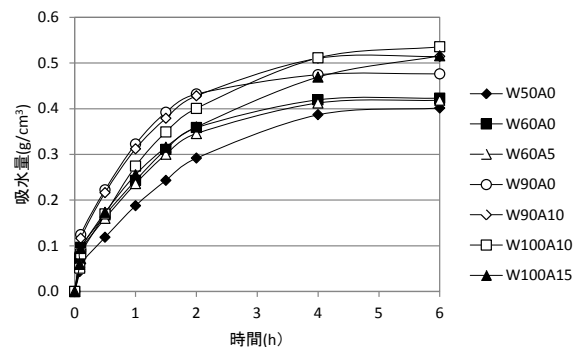


図-13 計測6時間までのペーストの吸水性試験結果

粉末混入率との相関係数を算出すると直径 $0.03 \sim 0.003\mu\text{m}$ との相関係数 $R^2=0.9729$ 、直径 $256 \sim 0.3\mu\text{m}$ との相関係数 $R^2=0.9029$ となり、ともに高い相関性が得られた。また、W60A0 の配合と W60A5 の同一 W/C の配合を比較すると、活性アルミナ粉末混入率が5%増加することで細孔量が増加していることが確認された。しかし、図-5 に示す直径 $0.3 \sim 0.03\mu\text{m}$ の細孔において、W/C と活

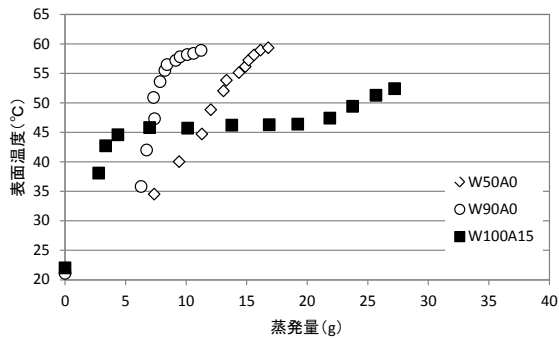


図-14 モルタルの蒸発量と表面温度の関係

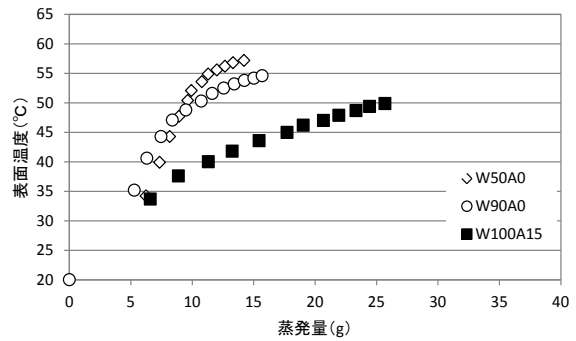


図-15 ペーストの蒸発量と表面温度の関係

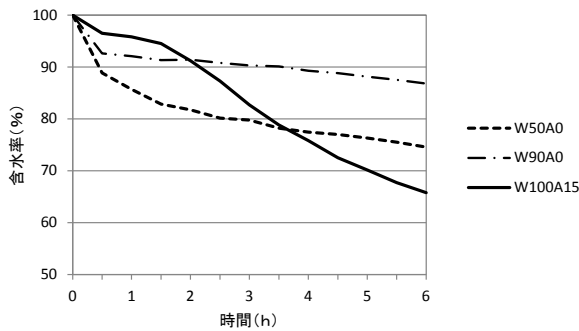


図-16 モルタルの含水率

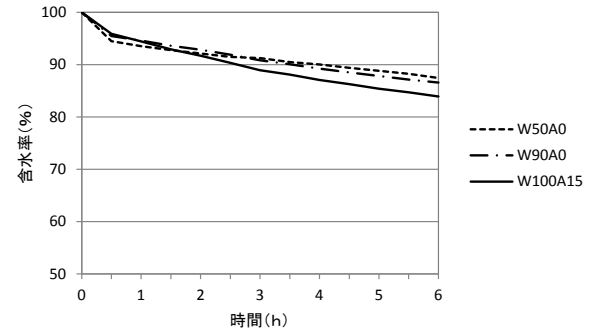


図-17 ペーストの含水率

性アルミナ粉末混入率との関係を見ると W/C が増加しても細孔量は増加せず、活性アルミナ粉末混入率との相関係数を算出すると $R^2=0.0225$ となりこの直径の細孔量は W/C と活性アルミナ粉末混入率の変化に依存しなかった。これらのことから、高 W/C 化、活性アルミナ粉末混入率の増加に伴い細孔量が増加すること、同一 W/C の配合でも活性アルミナ粉末混入率の増加により微細直径 (0.03~0.003 μm) の細孔が増加することがわかった。

図-7、図-8 にポーラスモルタルの W50A0、W100A15 の配合の SEM による内部観察画像を、図-9、図-10 にポーラスペーストの W50A0、W100A15 の配合の SEM による内部観察画像を示す。すべて同倍率である。モルタル、ペーストともに W50A0 と W100A15 の配合を比較すると、W100A15 の配合内部には W50A0 よりも多数の細孔を確認できる。ポーラスモルタルの内部とポーラスペーストの内部を比較すると、ポーラスペースト内部には細骨材がないため、空隙量がポーラスモルタルよりも多いことが確認できる。

ポーラスモルタル、ポーラスペーストともに水分を吸水・吸水するための細孔を確認することができた。この細孔が温度上昇抑制に寄与していると考えられる。

3.2 保水性試験結果

図-11 に保水性試験の結果を示す。W/C、活性アルミナ粉末混入率の増加に伴い保水量は増加した。図-3 に示すように W/C、活性アルミナ粉末混入率の増加とともに細孔量が増加する。細孔量の増加に従い保水量が増加し

ている。細孔中に水分を保水したためである。また、モルタルとペーストを比較すると、全ての配合でペーストの保水量は、モルタルの約 2 倍程度であった。ペーストは骨材が存在せず、空隙の総量がモルタルに比べ多いためであると考えられる。W90A10、W100A10、W100A15 では、W/C、活性アルミナ粉末混入率に差はあるが保水量にほとんど差がみられない。W90A10、W100A10 の配合では、W/C に対して活性アルミナ粉末の混入率が低いために材料分離が発生し、空隙量が増加したことが原因であると考えられる。

3.3 吸水性試験結果

図-12 にモルタルの吸水性試験の結果を、図-13 にペーストの吸水性試験の結果を示す。総吸水量はモルタル、ペーストともに保水性試験とほぼ同じ結果となった。モルタルとペーストの総吸水量に約 2 倍の差がみられるが、3.2 節で述べたように骨材がないために総空隙量に差があるためと考えられる。

モルタルに関しては、W50A0 の配合の吸水量が最も小さく、高 W/C、高活性アルミナ混入率の配合ほど吸水量が大きい。また、計測初期は W100A10 の吸水量が最大であるが、2 時間経過後は W100A15 の吸水量が W100A10 の吸水量に追いつき値が収束している。ペーストに関しては、モルタルと同様に高 W/C、高活性アルミナ粉末混入率の配合ほど吸水量が大きい。高 W/C、低活性アルミナ粉末混入率の配合 (W90A0) の吸水量は計測初期では大きい。しかし、計測開始から 2 時間を超えると活性ア

ルミナ粉末混入率が高い配合 (W100A10, W100A15) の吸水量が逆転する。活性アルミナ粉末混入率の高い供試体では空隙径が小さいものが多いために初期の吸水量が小さくなったと考えられる。しかし、保水・吸水するための空隙の総量は多いため計測後半になるにつれて吸水量が増加し、活性アルミナ粉末混入率が高い配合の吸水量は最終的には活性アルミナ粉末混入率が低い配合の吸水量を逆転したと考えられる。

3.4 模擬日射照射試験結果

図-14, 15 に、ハロゲンライト 6 時間連続照射におけるモルタルとペーストの表面温度と蒸発量の関係を示す。図中の 1 プロットの間隔は 30 分である。モルタル、ペーストともに 3.2, 3.3 節で高い保水・吸水性能を示した W100A15 の配合と比較検討用の W50A0 の配合、高 W/C かつ活性アルミナ粉末混入率 0% の W90A0 の配合を用いて温度上昇抑制効果の検討を行った。最大温度は計測開始 6 時間後であった。計測開始時点の温度と最大温度の差を温度上昇量とすると、W50A0 のモルタルの温度上昇量は 38.0°C、ペーストの温度上昇量は 37.3°C であった。W90A0 の配合の温度上昇量は、ペーストが 34.6°C、モルタルが 37.8°C であった。W100A15 の配合の温度上昇量は、ペーストが 30.0°C、モルタルが 30.4°C であった。何れの配合もペーストとモルタルの温度上昇量は同程度であった。また、高 W/C 化に伴う細孔量の増加により保水・吸水量が大きい W100A15 は水分蒸発量に伴う気化熱量が大きいいため、他の配合に比べ温度上昇が抑制された。しかし、高 W/C であり保水・吸水量が大きい W90A0 と W50A0 の温度上昇量が同程度であった。このことから保水・吸水量が多くとも活性アルミナ粉末を含まない高 W/C の配合では温度上昇抑制に繋がらないことがわかった。

図-16, 17 にモルタルとペーストの含水率の経時変化を示す。モルタル、ペーストともに活性アルミナ粉末が混入している W100A15 の配合は含水率が最も減少しており、他の配合に比べ効率よく蒸発が行われているといえる。モルタルに関して、W90A0 は W50A0 よりも照射から 6 時間の残存保水量が多く、ペーストに関しては、W90A0 と W50A0 の照射から 6 時間の残存保水量が多いことがわかる。保水量が多いと温度上昇抑制効果が持続するため優位に見えるが、効率よく蒸発できない場合は、内部に残った水分が温まるため温度が上昇する。よって活性アルミナ粉末を含まない配合では、蒸発できない水分保持量の多い高 W/C 配合の温度上昇が早くなると考えられる。保水の絶対量が多いほど温度上昇の抑制が可能となるが、それらを効率よく蒸発させることのできる細孔を持つことが、温度上昇抑制には重要であるといえる。3.1 節にあるように高 W/C かつ高活性アルミナ粉末

混入率の配合 (W100A15) は微細直径の細孔量が他の配合と比較して多い。直径の小さな細孔ほど毛管張力が大きく内部の水分を供試体表面まで運ぶため水分蒸発が促進される。温度上昇量が小さい W100A15 に関して、モルタルとペーストの含水率を比較すると 6 時間経過後の含水率はモルタルが約 65%、ペーストが約 85% ありペーストのほうが残存保水量が大きい。温度上昇を抑制する上で水分蒸発に伴う気化熱が重要になることからペーストはモルタルに比べ、給水の必要が少なく、より長期的な効果発揮を期待できる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) ポーラスモルタルにおいて水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った結果、W100A15 の総細孔量は W50A0 の総細孔量の約 2 倍であり、W/C、活性アルミナ粉末混入率の増加により、直径 0.03~0.003 μm 、256~0.3 μm の細孔の増加が確認された。温度上昇抑制の根拠となる細孔を確認することができた。
- 2) ポーラスモルタルおよびポーラスペーストに保水・吸水試験を実施した結果、W/C、活性アルミナ粉末混入率の増加に従い保水・吸水量は増加した。ポーラスペーストの保水・吸水量はポーラスモルタルの約 2 倍であり、高 W/C かつ高活性アルミナ粉末混入率の配合ほど吸水量は大きいことが明らかになった。
- 3) ポーラスモルタルおよびポーラスペーストに模擬日射照射試験を実施したところ、ともに温度上昇抑制量は同程度であるが、温度上昇量が小さい W100A15 に関して、模擬日射照射試験後のモルタルとペーストの含水率を比較するとペーストのほうが含水率が高く温度上昇の抑制に関してより長期的な効果を期待できる。

参考文献

- 1) 高橋篤史, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No1, pp.1829-1834, 2010
- 2) 坂本健, 高橋篤史, 橋本親典, 渡辺健: 活性アルミナ粉末混入モルタルの温度上昇抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No1, pp.1949-1954, 2011
- 3) 弓場上有沙, 高橋篤史, 橋本親典, 渡辺健: 活性アルミナ粉末混入モルタルの温度上昇抑制に対する実証実験と耐久性と実証実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1480-1485, 2012