

論文 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の検討

弓場 上 有沙^{*1}・高橋 篤史^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：著者らは、ポーラスコンクリートに変わる新しい保水性建材の開発として、活性アルミナ粉末混入モルタルの温度上昇抑制効果および強度特性について研究してきた。本研究では、このモルタルを用いた建屋を作製し実証実験を行った。次に耐久性試験として長さ変化試験、簡易急速凍結融解試験を行った。その結果、これまでの供試体レベルと同等以上の温度上昇抑制効果があり、通常のモルタルの約 2 倍の乾燥収縮量と通常の AE コンクリートと同程度の耐凍害性を有することが確認された。W/C が 100%以上のモルタルに活性アルミナ粉末を混入することで、連続的な細孔構造を有するポーラスモルタルが実現したと考えられる。

キーワード：保水性建材, モルタル, 活性アルミナ, 温度上昇抑制, 実証実験, ポーラスコンクリート

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ことが大部分を占めている。したがって、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。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),2)}。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。

筆者らは、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、W/C を大きくすることでポーラス化を図り、温度上昇抑制効果をハロゲンライトによる模擬日射照射試験で検討した。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させることができた。これにより活性アルミナ粉末を混入したモルタルは高橋らの研究で用いた活性アルミナ粉末ボールを混入したモルタルと同等以上の温度上昇抑制効

果があることを確認した^{3),4)}。

しかし、これまで温度上昇抑制効果の検証実験における供試体の形状は平板型のみであった。本研究では、新たに活性アルミナ粉末混入モルタルを実際の構造物に使用した場合を想定し、活性アルミナ粉末混入モルタルを用いた建屋の実証実験による温度上昇抑制効果の検証を行うことにした。

また、これまでの研究により活性アルミナ粉末混入モルタルの材齢 28 日における曲げ強度が JASS 7 M 101 インターロッキングブロックの品質規格における歩行者系道路の曲げ強度規定 3.0N/mm² を満足することが明らかになった⁴⁾。図-1 に曲げ強度試験結果を示す。図の横軸はモルタルの配合を意味し、記号は W が水セメント比を、A が活性アルミナ粉末の混入率を表す(以降、同じとする)。W/C の増加に伴い強度が低下することが明らかとなった。また、材齢と共に強度が増進していることから、活性アルミナ粉末が強度の増進を妨げないことが分かった。しかし、この他の力学特性については明ら

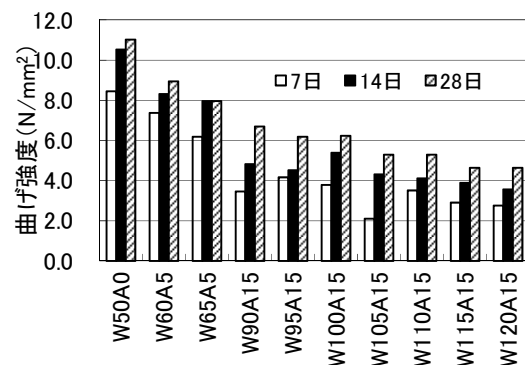


図-1 曲げ強度試験結果

*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 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程 (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教授 工博 (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エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)

かになっていない。そこで本研究では、いくつかの観点から試験を行うことにした。活性アルミナ粉末混入モルタル作製に伴う高 W/C 化により懸念される乾燥収縮について、長さ変化試験を行った。また、活性アルミナ粉末の混入によりモルタルの W/C を大きくすることが可能となり、モルタル内部がポーラス化していることから細孔がモルタル内に存在すると考えられる。この細孔が与える耐凍害性を調べるために、簡易急速凍結融解試験を実施した。

2. 実証実験概要

2.1 水酸化アルミニウムの焼成方法

今回の試験では、マッフル炉を用いて水酸化アルミニウムを 600℃で焼成し、γ アルミナ（活性アルミナ粉末）を得た。本研究で使用した活性アルミナ粉末は、一般的に活性化されているか判定するために行う X 線解析により、γ アルミナが焼成できていることを確認した。

2.2 活性アルミナ粉末モルタルの作製

練混ぜ方法は JIS R 5201:1997 に準じた。

- 1) 規定量の水、セメント、活性アルミナ粉末を練混ぜ機に順に投入する。
 - 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，モルタルを作製した。

2.3 使用材料

表－1 に実証実験で使用した材料の物理的性質を示す。ただし，壁材の表層にはセメントは高炉セメント，細骨

材はフラタリーサンド，基層にはサイジングボードを用いた。天井部分には，表層は白色セメント，石灰粗目砕砂，基層は普通ポルトランドセメント，普通砕砂，6 号砕石を用いた。路盤材には表層は高炉セメント，石灰粗目砕砂，基層は普通ポルトランドセメント，普通砕砂，7 号砕石を用いた。

2.4 配合

表－2 に建屋屋根の配合，表－3 に建屋壁の配合，表－4 に路盤材の配合を示す。

2.5 実験方法

建屋は基層と表層の二層構造となっている。壁材は厚さ 12mm のサイジングボードによりあらかじめ作製した基層の上から，表面に厚さが 5mm になるよう表層として活性アルミナ粉末混入モルタルで覆った。屋根材は厚さ 55mm のコンクリート基礎の表面を，厚さ 5mm の活性アルミナ粉末モルタルで覆った。比較のため基層のみの普通建屋を併せて作製した。ただし，屋根材は厚さ 60mm のコンクリートで作製した。また，路盤材につい

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/cm³)
	白色セメント(密度 3.05g/cm³)
	高炉セメント B 種(密度 3.04g/cm³)
細骨材	石灰粗目砕砂 (粒径 2.5～0.6 mm，表乾密度 2.65g/cm³)
	普通砕砂(表乾密度 2.65g/cm³)
	フラタリーサンド (粒径 0.6～0.15mm，表乾密度 2.6g/cm³)
粗骨材	6 号砕石 (粒径 13～5mm，表乾密度 2.62g/cm³)
	7 号砕石 (粒径 5～2.5mm，表乾密度 2.62g/cm³)
水酸化アルミニウム	H ₂ O 0.02%，L.O.I 34.4%，SiO ₂ 0.00%，Fe ₂ O ₃ 0.01%，Na ₂ O 0.15%，Al(OH) ₃ 99.8% 密度 0.82g/cm³，+150μm 0%，+45μm 63.4%
AE 減水剤	リゲニンスルホン酸系化合物およびポリオール複合体

表－2 活性アルミナ粉末混入モルタル建屋屋根材配合

空気量	単位量 (kg/m³)				
(%)	水	高炉セメント B 種	活性アルミナ	フラタリーサンド	AE 減水剤
4	363	363	182	666	C×1%

表－3 活性アルミナ粉末混入モルタル建屋壁材配合

	空気量 (%)	単位量 (kg/m³)						
		水	白色セメント	普通セメント	活性アルミナ	石灰荒目砕砂	普通砕砂	6 号砕石
表層	4	365	365	0	183	669	0	0
基層		99	0	248	0	0	500	1554
								C×1%
								0

表－4 活性アルミナ粉末混入モルタル路盤材配合

	空気量 (%)	単位量 (kg/m³)						
		水	高炉 B 種セメント	普通セメント	活性アルミナ	石灰荒目砕砂	普通砕砂	7 号砕石
表層	4	365	365	0	182	669	0	0
基層		119	0	339	0	0	932	424
								C×1%
								0

ては、市販品の平板(300×300×60mm)を比較対象とした。

愛媛県西条市にて 2011 年 9 月 15 日 7 時 55 分から 24 時間、実験開始前日に予め両方の建屋に水を吹き付け十分に含水させた状態で、熱電対によって活性アルミナ粉末混入モルタルを用いた建屋および普通コンクリートを用いた建屋の屋根、壁、路面、外気温および建屋内部の温度計測を行った。実証実験風景を写真-1、建屋寸法を図-2 に示す。温度は熱電対温度計をモルタルに取り付け、データロガーにより計測した。

3. 実証実験結果および考察

図-3～6 に建屋の温度変化の結果を示す。屋根、壁、路盤のうち最も温度上昇抑制効果が見られたのは、屋根部材であった。屋根部材で比較した場合、普通コンクリートが 47.0℃の時、活性アルミナ粉末混入モルタルは 34.0℃であり、その差は 13.0℃であった。これは、屋根が日中常に太陽光を受けるため、モルタル内部に保持していた水の蒸発が活発となったことが原因であるといえる。

壁部材では普通コンクリートの最大 39.6℃に対し、活性アルミナ粉末混入モルタルは 37.4℃、このとき外気温は 32.7℃であった。普通コンクリートと活性アルミナ粉末混入モルタルの表面温度差は 2.2℃であった。これは、高い単位水量によって出来た活性アルミナ粉末混入モル

タル内部の細孔が連続しているためと考えられる。すなわち、壁が垂直のため水が連続的な細孔を通じて下方へ移動し、計測位置における蒸散作用が減少し、表面温度低下量が小さくなったと考えられる。

また路盤においては、普通コンクリートが 42.0℃の時、活性アルミナ粉末混入モルタルは 38.3℃であり、その差は 3.7℃であった。屋根に比べて温度差が小さくなったのは、地熱による活性アルミナ粉末混入モルタルの温度上昇と普通モルタルの地面への放熱が同時に行われていたためと考えられる。

建屋内部の最大温度は、普通コンクリートを使用した場合 45.7℃、活性アルミナ粉末混入モルタルを使用した場合には 40.8℃で、その差は 4.9℃であった。室内は窓がなく外気に比べて高温になったものの、普通コンクリートと比べて温度上昇を抑制することが明らかになった。

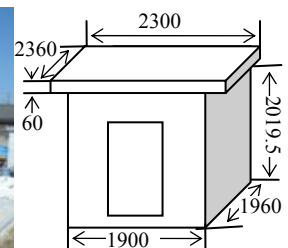


写真-1 実証実験風景 図-2 建屋寸法 (mm)
(活性アルミナ粉末モルタル)

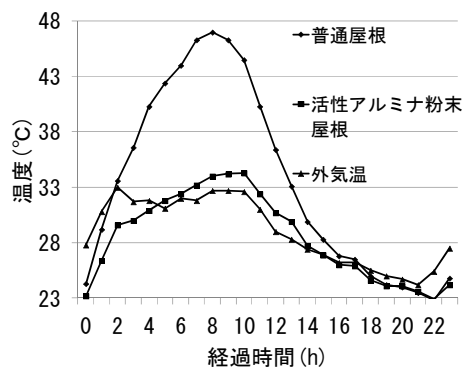


図-3 屋根材の温度変化

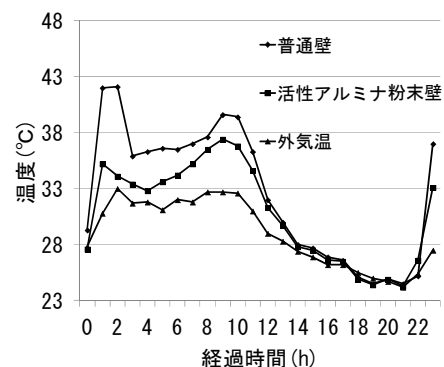


図-4 壁材の温度変化

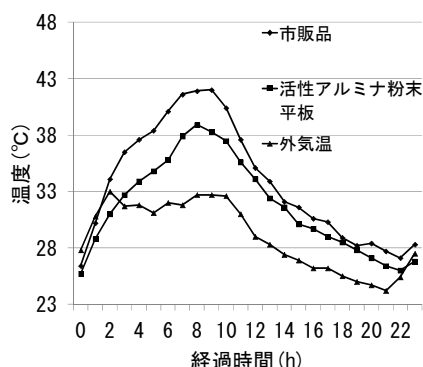


図-5 路盤材の温度変化

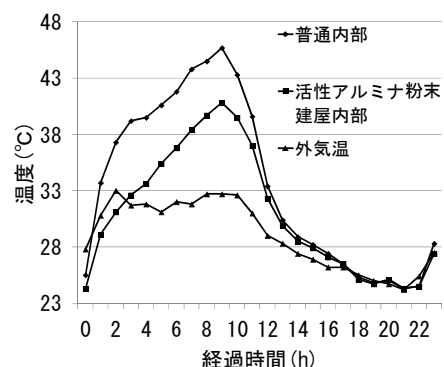


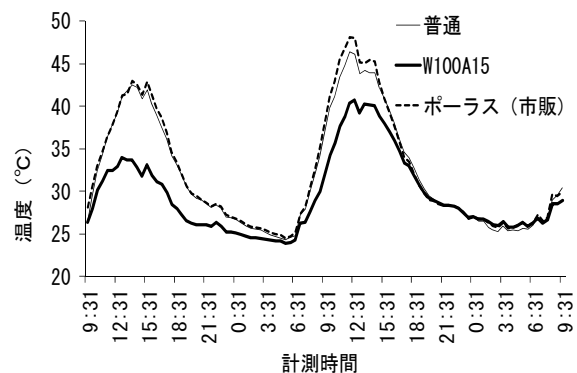
図-6 建屋内部の温度変化

表－5 耐久性試験に用いたモルタルの配合

	W/C (%)	活性アルミ ナ粉末	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤
				水	セメント	活性アルミナ	細骨材	
W50A0	50	0	4	246	493	0	1478	0
W60A0	60	0		281	469	0	1406	
W60A5		5		246	410	99	1229	
W65A5	65	5		260	401	98	1202	C × 1.5%
W90A10	90	10		287	319	174	956	
W90A15		15		254	282	244	846	
W95A10	95	10		297	313	172	938	
W95A15		15		263	277	242	831	
W100A10	100	10		307	307	171	921	
W100A15		15		272	272	240	817	
W105A15	105	15		281	268	239	803	
W110A15	110	15		290	263	237	790	
W115A15	115	15		298	259	235	777	
W120A15	120	15		293	255	234	764	

今回初めて立体構造の建屋を計測対象としたことで、室温の計測が可能となった。今後、活性アルミナ粉末混入モルタルが建物内部へ与える影響についても検討する必要がある。

予備実験として図－7 に 2011 年 8 月 29 日に徳島大学屋上にて実施した、平板形状の屋外暴露試験結果を示す。活性アルミナ粉末混モルタルは最大で約 9.4℃、普通モルタルより表面温度を抑制している。建屋では平面形状以上の結果があった。これより、活性アルミナ粉末混入モルタルの実構造物への適用の可能性が示された。



図－7 平板の温度変化
(徳島大学屋上での計測)

4. 耐久性試験概要

4.1 水酸化アルミニウムの焼成方法

2.1 と同様に行った。

4.2 活性アルミナ粉末混入モルタルの作製方法

2.2 と同様の方法で行い、モルタル供試体成形用三連型枠を用いて 40×40×160mm の角柱モルタルおよびφ 100×200mm の円柱供試体を作製する。角柱モルタルは所定の試験材齢まで 20℃で水中養生した。ただし、W/C100%の試験体に関しては水中養生不可であったため温度 20℃湿度 100%の気中養生を行った。

4.3 長さ変化試験

4.3.1 使用材料及び配合

長さ変化試験で使用した材料は、表－1 に示したものと同じである。ここで、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は石灰粗目砕砂である。モルタルの配合を表－5 に示す。

4.3.2 試験方法

長さ変化試験は、JIS A 1129-2「モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法：コンタクトゲージ法」に準じて行った。脱型後 2 週間水中養生したものを乾燥期間 0 日とし、計測を開始した。

角柱供試体(40×40×160mm)を 4.2 に従い 3 本ずつ作製し、表面と裏面に、供試体左右端から 30mm の位置に

100mm の間隔でコンタクトチップを 2 枚貼り付け、測定のための標点とし、1 供試体につき表面、裏面の 2 箇所 の 2 点間の長さ変化を測定した。最小目盛 1000 分の 1mm まで読み取り、各面について測る方向を変えて同じ 2 点間を計測し、2 箇所 2 方向の平均を求めることで、精度向上を図った。各配合の計測値は、3 本の平均値とした。

供試体は室温 20℃、相対湿度 60% の環境下で保管し 182 日まで測定した。前回測定した収縮ひずみの差が全体の収縮ひずみの 5% 以下になった時、収縮は収束したものとみなす。

4.4 簡易急速凍結融解試験

4.4.1 使用材料及び配合

簡易急速凍結融解試験で使用した材料は、長さ変化試験と同じである。

配合は長さ変化試験で用いたうちの、各活性アルミナ粉末混入量の代表的な W50A0、W65A5、W90A10、W100A15 と同じもので、供試体の形状はφ 100×200mm の円柱とした。作製方法および養生方法は、長さ変化試験と同じである。

4.4.2 試験装置

写真－2 は実験で用いた簡易急速凍結融解試験装置で

ある。簡易急速凍結融解試験装置は、液化窒素容器をクライオトロールポンプとつなぎ、電源を入れると1分間に420ミリリットルの液化窒素が吹きつけられる仕組みになっている。

4.4.3 試験方法

液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験を、既往の研究⁵⁾から以下の手順で行った。なお簡易急速凍結融解試験の1サイクルがJIS A 1148(A法)の30サイクルに相当すると見なす。

まず液化窒素用のバケツに、φ100×200mmの円柱供試体を静かに投入し、液化窒素を数秒間吹き付ける。蓋をして30秒間底面を凍結させる。浸漬時間後、バケツから取り出し、お湯(約40℃)に浸漬し、5分間融解させる。融解後、水分を拭き取り、凍結した底面から約15mmの位置に、超音波センサーをあて、距離100mm間の超音波伝播時間を計測する。この作業を1サイクルとし、相対動弾性係数が60%以下になるか、サイクル数が10回に達した時点を試験終了とした。動弾性係数は、各試験で測定した超音波伝播時間から求めた超音波伝搬速度を用いて緒方らが提案する以下の式から求めた⁶⁾。式(1)は、コンクリート供試体を対象とした式であるが、本研究ではこれをモルタル供試体に適用した。

$$Ed = 4.038VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad (1)$$

ここに、

Ed：動弾性係数(GPa)，VL：超音波伝播速度(km/s)

また、凍結融解試験を評価する相対動弾性係数は、上記式(1)の動弾性係数の値を使用して、式(2)から求めた。

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = Ed_n / Ed_0 \times 100 \quad (2)$$

ここに、

Ed_n：サイクル数nの超音波伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)，Ed₀：凍結融解試験の開始前に測定した超音波伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)

5. 耐久性試験結果および考察

5.1 長さ変化試験

図-8に長さ変化試験の結果の一例を示す。図-9は配合ごとの材齢182日における長さ変化率を表している。W50A0とW60A0を比較すると、長さ変化率がW60A0の方が約200μ大きくなっている。これは、単位水量の増加が原因といえる。また、同じW/CにおいてW60A0とW60A5を比較すると約300μ大きくなっている。これは、活性アルミナ粉末を5%混入したことで、モルタル内部に存在していた練り混ぜ水が吸収され、ポーラ化がより進んだためと考えられる。さらにW/C90%以上では、W110A15を除いて活性アルミナ粉末混入率に関わらず、長さ変化率は約2000μであり、違いは見られ



写真-2 簡易急速凍結融解試験装置

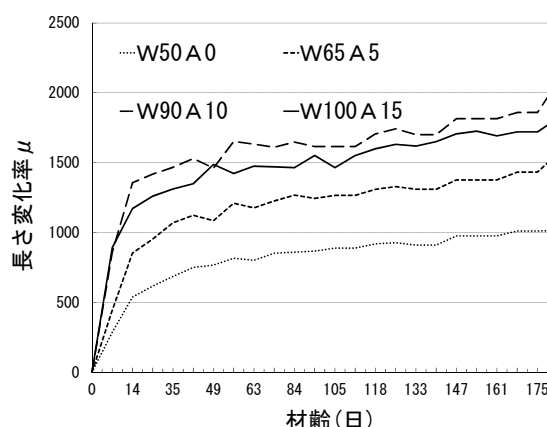


図-8 代表的な供試体の長さ変化率と材齢の関係

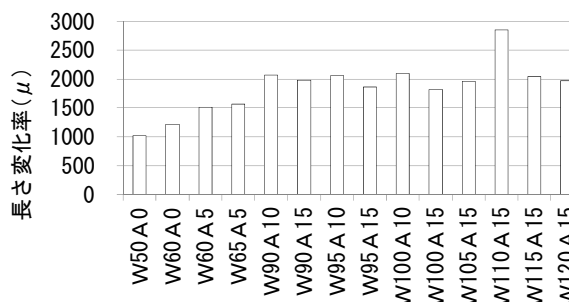


図-9 各配合の材齢182日における長さ変化率

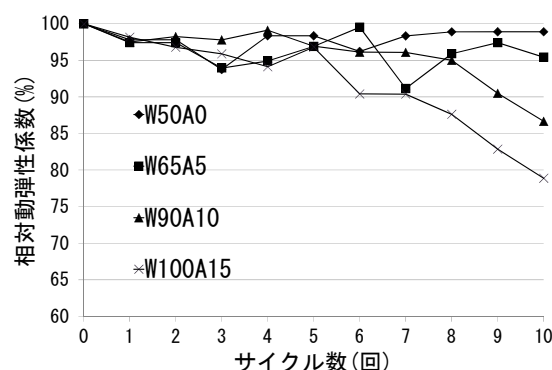


図-10 簡易急速凍結融解試験結果

なかった。

以上の結果より、活性アルミナ粉末を 10%以上混入したモルタルは、通常のモルタルの約 2 倍の長さ変化率を示すことが明らかとなった。

5.2 簡易急速凍結融解試験

図-10 に簡易急速凍結融解試験における結果を示す。10 サイクルの時点において、全ての配合が相対動弾性係数 60%以上を保つ結果となった。簡易急速凍結融解試験における 10 サイクルが JIS 法の 300 サイクルと相関性がある⁵⁾ことから、活性アルミナ粉末混入モルタルは AE 剤を使用していないに関わらず、JIS 法の凍結融解試験 300 サイクルで 60%以上の相対動弾性係数を有する AE コンクリートと、同等の耐凍害性を有するといえる。

6. 温度上昇抑制メカニズム

これまでの研究では、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ことが考えてきた。

本研究の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耐凍害性を持つことが明らかとなった。一般的にポーラスコンクリートが凍結融解試験に対して優れた結果を示すことが知られている⁷⁾。これは、空隙が水圧の緩和に対して有効に働くためである。簡単な実験として、モルタルバー供試体を鉛直に自立させ水の吸い上げ試験を実施したところ、W50A0 の吸い上げ量に対して W100A15 のそれは 2 倍以上であった。内部空隙を視覚的に確認することはできなく推測の域ではあるが、活性アルミナ粉末混入モルタルの内部にも連続的細孔が存在し、ポーラス化しているため、今回のような結果が得られたのではないかとと思われる。

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、このようなモルタルの作製を可能にした。

ポーラスコンクリートは、骨材の間の空隙に水を保水することで蒸発量を増加させ、表面の温度上昇を抑制する。W/C を大きくすることで得られた細孔がポーラスコンクリートの空隙と同様の役割を果たしたことで、同様のメカニズムにより細孔に吸水・保水をし、蒸発量を増加させたことで温度上昇抑制効果を発揮したと考えられる。ポーラスコンクリートと比較して活性アルミナ粉末混入モルタルの温度上昇抑制効果が長期的である⁴⁾のは、細孔が非常に小さく、蒸発が徐々に行われるためである。ただし、ポーラスコンクリート同様にモルタル内部に多数の細孔を持つため、強度は一般的なモルタルと比較して劣る傾向がある。

7. まとめ

本研究の結果について以下に報告する。

- (1) 実証実験により活性アルミナ粉末混入モルタルは、平板形状に限らず建屋に用いた場合にも温度上昇抑制効果示すことが確認できた。屋根、壁、路盤のうち最も効果が見られたのは、日中多くの太陽光を受けるため水の蒸発が活発となる屋根部材であった。
- (2) 長さ変化試験により、活性アルミナ粉末を 10%以上混入することで普通モルタルより約 2 倍の乾燥収縮を示すことが明らかになった。
- (3) 簡易急速凍結融解試験により、活性アルミナ粉末混入モルタルが、通常の AE コンクリートと同等の耐凍害性を有することを確認した。また、内部構造がポーラス化していることが明らかとなった。

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, pp. 589-590, 2008.9
- 2) 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 2.模擬日射照射試験および屋上曝露試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.591-592, 2008
- 3) 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, No.1, pp.1829-1834, 2010.1
- 4) 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, No.1, pp.1949-1954, 2011.1
- 5) 弓場上有沙, 高橋篤史, 橋本親典, 渡辺健: 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A 法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.941-946, 2011.1
- 6) 緒方英彦ほか: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002.1
- 7) 鳥居南康一, 小山実, 中山崇雄, 林賢: 即脱ポーラスコンクリート製品の凍結融解抵抗性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1187-1192, 2003.1