

フライアッシュ系ジオポリマーの部分吸水に伴う表層劣化と試験環境や配合の関係

大分高専 正会員 ○一宮 一夫, 大分高専専攻科 非会員 山下 祐弥
西松建設(株) 正会員 原田 耕司, 山口大学名誉教授 非会員 池田 攻

1. はじめに

ジオポリマー (以下, GP とする) はフライアッシュ (以下, FA とする) などのアルミナシリカ粉末と水ガラスなどのアルカリシリカ溶液の縮重合反応による固化体である. ポルトランドセメント (以下, OPC とする) を使用しないことから製造時の CO₂ 排出量を抑制できることに加えて, 酸性や高温に対する抵抗性に優れることから, OPC の弱点を補完できる建設材料として近年注目されている.

一方, GP を歩車道境界ブロックに適用したところ, 設置1年以内で図1のような表層部に白華ならびにスケーリングなどの変状が認められた. OPC コンクリートの白華や塩類風化に類似した症状であるが, 発生条件や劣化速度は OPC コンクリートとは異なる点もあり, 発生メカニズムの解明や対策が求められている. このような背景のもと, 本研究では FA を基本とし, 強度増進のために高炉スラグ微粉末 (以下, BS とする) を併用した GP モルタル製供試体に対して部分吸水試験を行い, 試験環境 (気温, 湿度) や配合 (BS 置換率, アルカリ溶液の濃度) と表層劣化の関係を調べた.



図1 GP ブロックの表層劣化の例

表1 使用材料

項目	記号	材料
活性 ファイバー	FA	フライアッシュ1種, 密度 2.36g/cm ³ 比表面積 5327cm ² /g
	BS	高炉スラグ微粉末, 密度 2.92 g/cm ³ , 比表面積 4009cm ² /g
アルカリ 溶液	GPW	水ガラス, 苛性ソーダ, 水の混合物, 密度 1.27g/cm ³ , S/N モル比 (ただし, S は SiO ₂ , N は Na ₂ O) 0.68, 濃度 (溶液 A) 36.68wt.%, (溶液 B) 57.47wt. %
細骨材	S	混合珪砂, 密度 2.64 g/cm ³

表1に使用材料, 表2にモルタルの配合を示す. アルミナシリカ粉末は FA を基本とし, 硬化促進のために BS を内割り置換 (置換率は 0, 10, 20, 30% で, 以下, それぞれを F100B0, F90B10, F80B20, F70B30 とする) した. アルカリ溶液には水ガラス, 苛性ソーダ, 水の混合物を使用し, 濃度を 2 水準に調整して用いた. 細骨材には珪砂を JIS 標準砂を参考に粒度調整して使用した.

GP は反応促進のために加熱を行う必要があり, 一般には蒸気養生が施される. 本研究では, プログラム式恒温恒湿装置を用い, 最高温度 60℃, 湿度 90%RH の給熱養生 (室温→60℃: 3 時間, 60℃: 3 時間, 60℃→20℃: 3 時間) をし, その後は室温 (20℃, 60%RH) で所定の材齢まで貯蔵した.

図2に部分浸漬試験の様子を示す. 供試体は長手方向に縦置きにし, 下端部 1cm を水浸させた. 定期的に外観の写真撮影と供試体質量を測定した. 試験は, (1)恒温室 (温度 20℃, 湿度 60% RH), (2)冷蔵庫 (温度 2℃, 湿度 0%RH), (3)恒温恒湿装置 (温度 5℃~20℃の繰り返し 4 時間を 1 サイクル, 湿度 85%) の 3 条件で行った. 試験期間は冷蔵庫と恒温室が 56 日間, 恒温恒湿装置が 120 サイクル (24 日間) とした.

表2 GP モルタルの配合 (kg/m³)

記号	BS 置換率 (%)	GPW	FA	BS	S
F100B0	0	295.0	640.3	0.0	1311.2
F90B10	10	295.0	576.4	79.2	1311.2
F80B20	20	295.0	512.3	158.4	1311.2
F70B30	30	295.0	448.2	237.7	1311.2

3. 実験結果

3.1 試験環境の影響

図3に試験環境別の供試体外観を示す. まず, (a)恒温室と(b)冷蔵庫を比較すると, 両者の変状はほぼ同位置であることから, 変状メカニズムは同じと判断できる. 恒温室での角柱と円柱を比較すると円柱において大量の白色の析出物が発生するのに対して角柱での析出物は僅少である. この

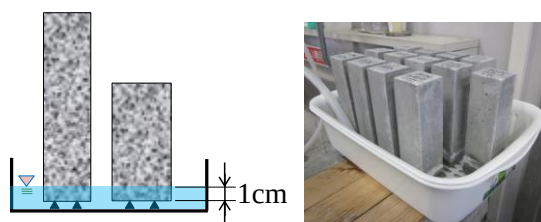


図2 部分吸水試験の様子

ことから白華の評価には円柱供試体の方が適すると考えられる。一方の冷蔵庫では角柱、円柱ともに析出物が確認できるが、恒温室の円柱供試体のような白色ではなく母材の灰色に近いことからスケーリングに近い現象と考えられ、恒温室の状態は試験材齢が進むと冷蔵庫での状況に近づくものと推察した。このことから、冷蔵庫に調蔵する方法は、表層劣化の促進評価法となることが期待できる。(c) 恒温恒湿装置では析出物はほとんどなく、スケーリングが主体である。短期間(試験材齢 24 日)にも係らず、表層部の状態は析出物を除去した冷蔵庫の場合とほぼ同じであることから、スケーリングの促進試験方法としての適用も期待できる。ただし、スケーリングの位置は他の 2 ケースよりも下方にあり、劣化メカニズムの詳細は他の場合と異なる可能性もある。

表層部の白色化は、OPC 硬化体における白華に類似している。図 1 に示した GP ブロック表面に発生した白色の析出物を XRD 分析したところ、炭酸ナトリウム(トロナ, Trona)であった。一方、スケーリングは、OPC 硬化体の塩類風化の主な劣化現象であり、既往において硫酸塩劣化に関する数多くの研究が報告されている¹⁾。上記の GP ブロックのスケーリング片に含まれる結晶は Calcite (CaCO_3) のみが認められ、OPC 硬化体の塩類風化を伴う結晶とは異なる。Calcite であれば、 $\text{CaO} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ のルートが想定される。CaO は水和すると Portlandite になり膨れるので亀裂発生可能性があるが、CaO の起源ならびにメカニズム解明は今後の課題である。

3.2 配合の影響 図 4 に溶液 A を使用した場合の BS 置換率ごとの供試体の外観、図 5 に同じく溶液 B を使用した場合の供試体の外観、図 6 に BS 置換率ごとの圧縮強度の溶液 A と B の比較を示す。

全体的に、BS 置換率を高くすることで表層劣化は抑制される傾向にある。紙面の都合から試験材齢に伴う質量変化は掲載していないが、F100B0 では試験開始 5 日までに吸水に伴い約 6%の質量増加があり、その後は一定で推移した。F90B10 も質量増加が確認されたが最大値は約 4%で、F80B20、F70B30 の質量増加はほとんどなかった。質量変化の結果ならびに図 6 の圧縮強度の比較から、BS を置換した配合では置換率を高くするほど表層劣化が抑制されるのは空隙の減少に起因していると判断できる。一方、アルカリ溶液の濃度を高くした溶液 B では溶液 A と比べて表層劣化が少ないことから、アルカリ濃度を調整することの有効性を確認した。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

(1) 恒温室 (20℃, 60%RH) よりも冷蔵庫 (2℃, 0%RH) で表層劣化は顕著であり、気温や湿度は低い方が劣化は促進される。(2) BS 置換は表層劣化の抑制効果があり、BS 置換率は高いほど有利である。(3) 溶液濃度を調整することでスケーリングが抑制される。

参考文献

- 1) 吉田夏樹, 松浪良夫, 永山勝, 坂井悦郎: 温度条件が硫酸ナトリウムによるモルタルの塩類風化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010

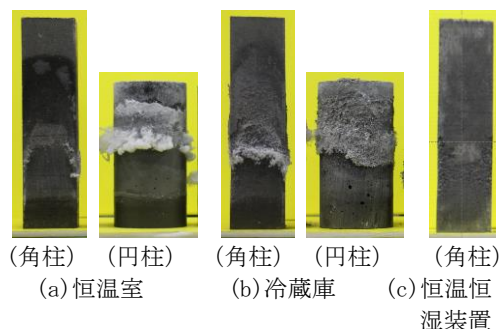


図 3 試験環境での比較 (F90B10)
(試験材齢は恒温室と冷蔵庫が 56 日, 恒温恒湿装置が 24 日 (120 サイクル), 溶液 A)



F100B0 F90B10 F80B20 F70B30

図 4 BS 置換率ごとの外観
(冷蔵庫, 試験材齢 56 日, 溶液 A)



F100B0 F90B10 F80B20 F70B30

図 5 BS 置換率ごとの外観
(冷蔵庫, 試験材齢 56 日, 溶液 B)

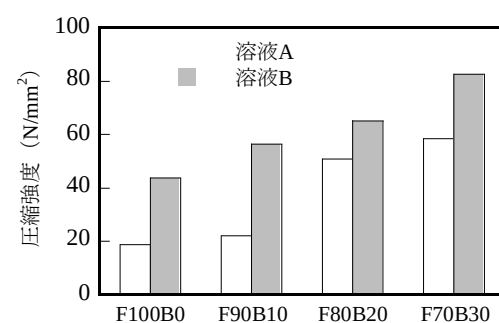


図 6 BS 置換率ごとの溶液濃度と圧縮強度の関係 (冷蔵庫, 試験材齢 56 日)