

フライアッシュジオポリマー硬化体の塩化物イオン浸透性

(公財)鉄道総合技術研究所

正会員 ○上原 元樹

(公財)鉄道総合技術研究所

正会員 佐藤 隆恒

早稲田大学創造理工学部

平田 綾子

早稲田大学創造理工学部

山崎 淳司

1. 目的

ジオポリマー(GP)硬化体とはフライアッシュ(FA)などの非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液との反応によりゼオライト類似のナノ細孔を有する非晶質ポリマー構造が生じて硬化したものである。その製造時に多くの CO_2 を発生する普通ポルトランドセメント(NPC)を使用しないため、 CO_2 低減効果に優れ、かつ FA 等の産業副産物を有効利用できる点で注目されている⁽¹⁾。また、本硬化体は、その化学的耐久性の高さや陽イオン交換能を有する⁽²⁾点で、セメント硬化体とは異なる特徴を有する。そこで筆者らは、本硬化体によるまくらぎや⁽³⁾、そのイオン交換能を利用したアルカリシリカ反応抑制材料⁽⁴⁾など、新たな用途開発を行っている。

ここで、Ca 成分を含まない FA-GP 硬化体は、湧水等によりエトリンガイト等の劣化生成物を生じることがなく、フリーデル氏塩等の Cl^- イオンを固定する物質も生成しないことなど NPC 硬化体とは、その塩化物イオンの浸透特性が大きく異なること、浸透抑制には高炉スラグ(BS)添加による FA の置換が効果的であることなどが指摘されている⁽⁵⁾。しかし、その置換率、硬化体の圧縮強度などと、 Cl^- イオンの浸透性との関係はよくわかっていない。そこで、本研究では BS 置換率の異なる GP 硬化体の塩水浸漬による Cl^- イオンの拡散試験を行い、BS 置換による塩化物イオン浸透抑制効果を検討した。

2. 試験方法

(1)試料作製-1

GP 硬化体における Cl^- イオンの遮蔽性を確認するために、ケイ酸 Na 溶液あるいはケイ酸 K 溶液を使用して、参考文献(1)に示された圧縮強度 80MPa の配合(BS 置換率 0% および 10%, 粉体:骨材=1:2.25, 養生温度・時間, $80^\circ\text{C} \cdot 8\text{h}$)で GP モルタルを作製した(以下、Na 成分および K 成分で作製した GP をそれぞれ Na-GP、K-GP と呼ぶことにする)。

(2)試料作製-2

ケイ酸 Na 溶液を用いて、BS 置換率 0%, 5%, 10%, 20% の Na-GP モルタルをアルカリ/水(モル)0.10 あるいは 0.15 の配合(粉体:骨材=1:2, 養生温度・時間, $80^\circ\text{C} \cdot 8\text{h}$)で作製した。なお、NPC モルタルの配合は、試料作製-1、-2 とも粉体:骨材比などは GP モルタルと同様とし、作製-1 では W/C=40%、作製-2 では W/C=50%とした。

(3)分析

作製したモルタルは 10%NaCl 溶液に浸漬し、浸漬面から深さ 10mm 毎に 50mm まで切断して浸透・溶脱した各成分を測定した。浸漬試験は、JSCE-G572-2003(浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案))に準じて行った。全 Cl^- イオンは JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて、可溶性 Cl^- イオンは JIS A 1154 附属書 2(参考)「硬化コンクリート中に含まれ

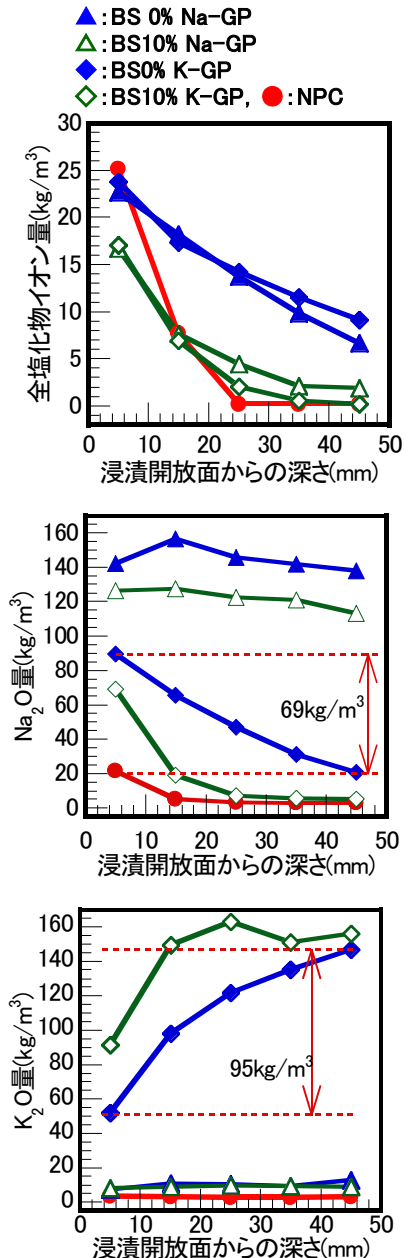


図 1 各試料の浸漬面からの深さと全 Cl^- イオン、 Na_2O 量、 K_2O 量 (8 ヶ月経過時 80MPa 試料)

キーワード：ジオポリマー，フライアッシュ，塩化物イオン，高炉スラグ，環境負荷低減

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7338

る温水抽出塩化物イオンの分析方法」に準じて算出した。また、浸漬後の供試体は、粉末 X 線回折試験により、その生成相の同定を行い、試験前供試体の細孔分布に関しては窒素ガス吸着法により測定した。

3. 結果と考察

図1は試料作製-1で作製した各モルタルの浸漬試験8ヶ月経過時における浸漬開放面から深さ方向に各成分量を測定した結果である。一般的な NPC モルタルは最表面で Cl^- イオンが多いが、深い領域にはほとんど Cl^- イオンは浸透していない。一方、BS 0%の GP モルタルは、最深部まで Cl^- イオンが浸透したが、BS で 10%置換した GP モルタルは、明らかに Cl^- イオン浸透深さが小さかった。また、K-GP 系試料(図中◆、◇)において、Na 浸透領域における、Na 増加量 69kg/m^3 と K 減少量 95kg/m^3 をモル換算すると、 K_2O が 1008 モル、 Na_2O が 1113 モルとほぼ同量であることから、いわゆるイオン交換反応により、GP の K 成分が Na 成分と等量交換しているものと推察される。

図2は試料作製-2で作製した GP モルタルの浸漬2ヶ月経過時の浸漬データから求めた見かけの拡散係数を各強度に対してプロットしたものである。BS 0%GP モルタルは、高強度でも Cl^- イオンの拡散が速いが、BS 置換により同一強度でも Cl^- イオンの拡散が大きく抑制されること、特に 20%置換試料ではより強度の大きい NPC モルタルよりも拡散が抑制されることが確かめられた。

図3は、BS20%置換 GP モルタルと NPC モルタルの2ヶ月経過時の可溶性 Cl^- イオンと全 Cl^- イオンの量およびその割合を示している。なお、図3に無記載である BS 置換率が 10%までは、可溶性 Cl^- イオンと全 Cl^- イオンの値にほぼ差が無く、 Cl^- イオンを固定する物質は生じていない。一方、BS20%置換モルタルでは、NPC モルタルと同様に、若干可溶性 Cl^- イオンが少なく、 Cl^- イオンを固定化する物質相の存在が示唆される。

図4は浸漬試料の X 線回折図である。NP セメントモルタルでは Cl^- イオンの浸透に伴い、フリーデル氏塩が生じ、ここで Cl^- イオンが固定されていることがわかる。一方、BS20%置換試料でも、特に Cl^- イオンを固定するような結晶質物質は生じていない。したがって、Ca を含む BS の置換によって生じるケイ酸 Ca 水和物(C-S-H)非晶質相により Cl^- イオンが固定されている可能性が考えられるが、詳細はさらに検討が必要である。

図5は GP 硬化体の N_2 ガス吸着による細孔径分布を測定した事例である。BS で置換した試料は、細孔容積の低減が認められたことから細孔構造と Cl^- 浸透量に関係があるものと推察されることから、今後その定量的な関係を検討していく予定である。

参考文献

- (1)上原「ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発」, 鉄道総研報告第 22 巻 4 号, pp41-46, 2008 年
- (2) Motoki Uehara *et al.*, "Ion-exchange properties of hardened geopolymer paste prepared from fly ash", Clay Science, Vol.14, No.3, pp127-134, 2009.
- (3)東原他, 繊維補強ジオポリマー短まくらぎの製作, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012
- (4) Motoki Uehara *et al.* "Inhibition of alkali-silica reaction by H^+ -type geopolymer from fly ash", The 2nd Asian Clay Conference, 2012
- (5)上原他, 高炉スラグの添加が石炭灰ジオポリマー硬化体の塩化物イオン浸透性に与える影響, 無機マテリアル学会第 125 回学術講演会, 2012

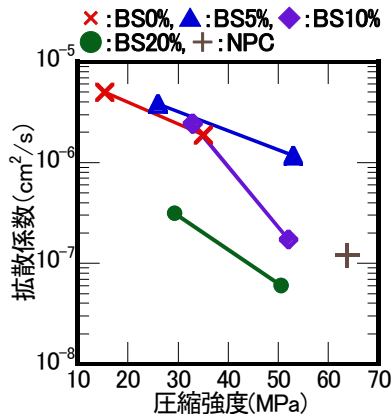


図2 Na-GP モルタルにおける全 Cl^- イオンの拡散係数と圧縮強度

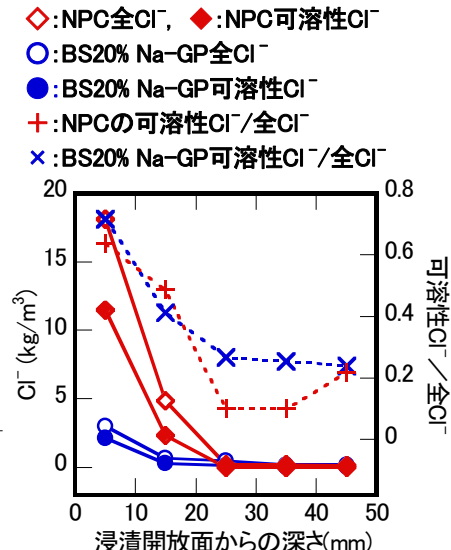


図3 全 Cl^- イオン、可溶性 Cl^- イオンおよびそれらの割合

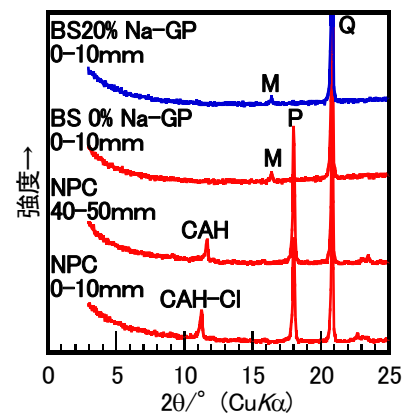


図4 各試料の浸漬後の粉末 X 線回折図

M: ムライト, Q: 石英,
P: 水酸化 Ca,
CAH-Cl: フリーデル氏塩,
CAH: アルミン酸 Ca 水和物

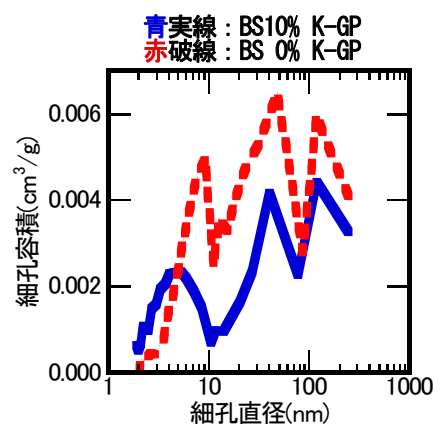


図5 K-GP モルタルの細孔分布