

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420468

研究課題名(和文) 廃棄碍子モルタルの塩分浸透抑制メカニズムの解明と強度特性の把握

研究課題名(英文) Characteristics of Chloride ingress resistance and mechanical properties of ceramic waste aggregate mortar

研究代表者

東山 浩士 (HIGASHIYAMA, Hiroshi)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：60319754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：電力や鉄道関連における絶縁材料であり、埋め立て廃棄されている碍子(がいし)の建設材料への有効利用と環境対応型碍子モルタルの開発を目的に、環境対応型碍子モルタルの強度特性と塩分浸透抵抗性に関する研究を実施した。まず、環境対応型碍子モルタルの圧縮強度と各種強度との関係を把握した。次に、濃度5%のNaCl溶液に48週および96週間浸漬した環境対応型碍子モルタルへの塩分浸透と細孔径分布を分析し、見かけの塩化物イオン拡散係数を導出するとともに、この拡散係数と累積細孔量には相関を有することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Ceramic porcelain insulators discarded from electric power companies and railway companies are one of the materials possibly recyclable as aggregates in construction materials. In this study, the utilization of the ceramic waste aggregate (CWA) for mortar and the development of the CWA mortar as an eco-efficient construction material using ground granulated blast-furnace slag (GGBS) are aimed. The mechanical test, the chloride immersion test, and the pore size distribution test were performed on the CWA mortars partially replaced with GGBS. The various strength relations were represented. Moreover, it was revealed that the apparent chloride diffusion coefficient was well related to the cumulative pore volume less than 0.1 micro-m of pore diameter.

研究分野：複合構造・材料

キーワード：環境対応型碍子モルタル 高炉スラグ微粉末 強度特性 塩分浸透抑制効果 塩化物イオン拡散係数
細孔径分布

1. 研究開始当初の背景

電力や鉄道関連の絶縁材料として用いられている碍子(図-1)は、約30年毎に取り換えられるとともに、落雷による破損や汚れ、製造過程で廃棄される欠陥品など、それらは産業廃棄物として多くが埋め立て処分されている。このような状況において、社会的な要請に応えることを目的に、本申請者が所属する研究機関では、企業との共同研究による回収された廃棄碍子の100%リサイクルを目指し、破碎・研磨処理方法や処理後の有効利用に関して検討を進めてきた。産業廃棄物問題に関しては、世界的に見ても同様な問題が取り上げられており、わが国としても喫緊に取り組むべき課題のひとつといえる。

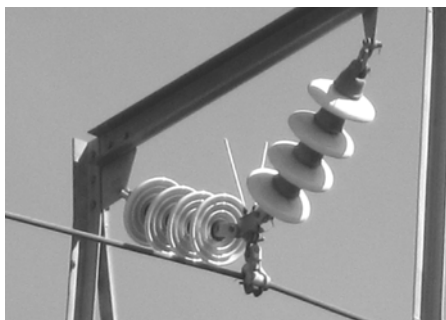


図-1 絶縁材料の碍子

そこで、破碎・研磨処理された碍子片の有効利用を検討するにあたり、建設材料であるコンクリートやモルタル用の骨材として検討を始めた。本申請者はモルタルの細骨材として有効利用する研究に取り組み、川砂を使用したモルタル(川砂モルタル)との比較検討から、碍子を使用したモルタル(碍子モルタル)の特性として、以下の基礎的知見^{①~③}を得た。

- (1) 圧縮強度の低下は見られない。
- (2) 塩分浸透を抑制できる。水セメント比50%では塩化物イオンの有効拡散係数が約60%に低下する。

しかし、実用化に向けては課題が散在しており、碍子モルタルの塩分浸透抑制メカニズム、各種強度特性、塩分浸透抑制のさらなる向上による環境対応型碍子モルタルの開発に取り組むべく本研究課題の申請に至った。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、以下の通りである。

- (1) 碍子モルタルの塩分浸透抑制メカニズムの解明

碍子モルタルの塩分浸透抑制メカニズムの解明では、まず、モルタル中における碍子骨材の電気的な塩分浸透抑制効果を検討しておく必要がある。そこで、モルタル中の碍子骨材表面の電気的特性としてゼータ電位に着目した。もし、碍子骨材の表面電位が川砂と異なるのであれば、それが塩分浸透抑制メカニズムのひとつと考えられると仮定したからである。

- (2) 環境対応型碍子モルタルの各種材料強度の把握

塩分浸透抑制効果をさらに向上させるために、セメントの一部を高炉スラグ微粉末(GGBS)で置換した環境対応型碍子モルタルの各種材料強度(圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数)を調べ、高炉スラグ微粉末置換による影響を把握する。

- (3) 環境対応型碍子モルタルの塩分浸透抵抗性評価

セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した環境対応型碍子モルタルの塩分浸透試験および電子線マイクロアナライザ分析(EPMA)結果から、見かけの塩化物イオン拡散係数を導出するとともに、細孔径分布を測定して、両者の関係を調べる。

3. 研究の方法

- (1) 碍子モルタルの塩分浸透抑制メカニズムの解明

モルタル中の碍子骨材と川砂の表面電位(ゼータ電位)を測定するために、水酸化ナトリウム水溶液と水酸化カリウム水溶液を混合し、セメントペースト中の細孔溶液を模擬した高アルカリ(pH12.9)水溶液を作製し、その水溶液中に粉碎した碍子骨材と川砂を浮遊させ、さらに濃度5%の塩化ナトリウム水溶液を測定試料の体積に対して0%、1%および3%添加したときのゼータ電位を電気泳動法により各2回測定した。

- (2) 環境対応型碍子モルタルの各種材料強度の把握

環境対応型碍子モルタルの各種材料強度(圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数)を把握するために、水粉体比(W/B)0.4、0.5、0.6、高炉スラグ微粉末置換率0%、20%、40%の碍子モルタルを作製した。使用したセメント、碍子骨材、高炉スラグ微粉末の化学組成と基本物性を表-1に示す。また、配合は表-2に示すとおり、すべて体積比に基づいて決定した。各種材料試験は、円柱供試体(φ50×100mm)を各3体作製し、材令7日、28日、91日まで水中養生(20±2°C)した後に実施した。

- (3) 環境対応型碍子モルタルの塩分浸透抵抗性評価

塩分浸透抵抗性試験に用いた供試体は表-2に示した配合と同様である。円柱供試体(φ100×200mm)を各1体作製し、7日間水中養生(20±2°C)した後に、骨材分離の影響を排除するため、打設面から50mmを切断し、切断面を残してすべての面をエポキシ樹脂によりコーティングを行った。その後、濃度5%の塩化ナトリウム水溶液中に48週および96週間浸漬した。各浸漬期間が終了した時点で、供試体を切断し、電子線マイクロアナライザ分析(EPMA)のため、中央部分から

表-1 使用材料の化学組成と基本物性

化学組成と基本物性	セメント	GGBS	CWA
化学組成 (質量%)			
SiO ₂	20.68	33.80	70.90
Al ₂ O ₃	5.28	15.00	21.10
Fe ₂ O ₃	2.91	0.27	0.81
CaO	64.25	43.10	0.76
MgO	1.40	5.63	0.24
SO ₃	2.10	-	-
Na ₂ O	0.28	0.28	1.47
K ₂ O	0.40	0.31	3.57
TiO ₂	0.28	0.52	0.33
P ₂ O ₅	0.25	-	-
MnO	0.09	0.20	-
SrO	0.06	-	-
S	-	0.77	-
Cl	0.015	0.004	-
強熱減量	1.80	0.05	-
比重	3.15	2.91	2.40
比表面積 (cm ² /g)	3360	6230	-

表-2 配合表

配合名	W/B (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	CWA (kg/m ³)	GGBS (kg/m ³)
CWA40-0	40.0	303	758	1095	0
CWA40-20	40.6	303	607	1095	140
CWA40-40	41.2	303	455	1095	280
CWA50-0	50.0	303	606	1211	0
CWA50-20	50.8	303	485	1211	112
CWA50-40	51.5	303	364	1211	224
CWA60-0	60.0	303	505	1288	0
CWA60-20	60.8	303	404	1288	94
CWA60-40	61.8	303	303	1288	187

幅 25×長さ 60mm の試料を取り出した。さらに、水銀圧入法による細孔径分布を測定するために、供試体の中央部分から小片試料も同時に取り出した。

4. 研究成果

(1) 碍子モルタルの塩分浸透抑制メカニズムの解明^④

電気泳動法により測定した碍子骨材 (CWA) と川砂 (RS) のゼータ電位の結果を図-2 に示す。この結果から、塩化ナトリウム水溶液の添加により、ゼータ電位が僅かに変化するものの、骨材種類による差異は見られなかった。このことから、モルタル中における碍子骨材の電気的作用による塩化物イオンの浸透を抑制しているとは言えず、他の要因によるものであることが分かった。この点については引き続き検討する必要がある。

(2) 環境対応型碍子モルタルの各種材料強度の把握^⑤

28 日養生後の圧縮強度と水粉体比 (W/B) の関係を図-3 に示す。いずれの高炉スラグ微粉末置換率に対しても両者の関係は線形にあり、高炉スラグ微粉末置換による圧縮強

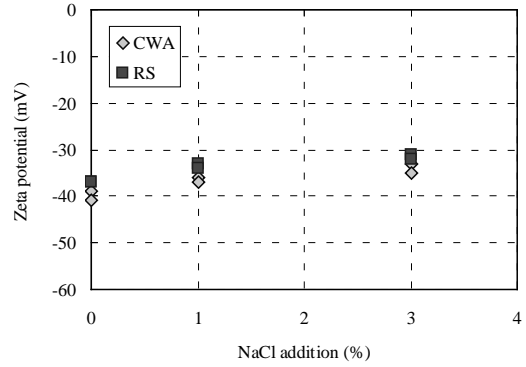


図-2 ゼータ電位測定結果

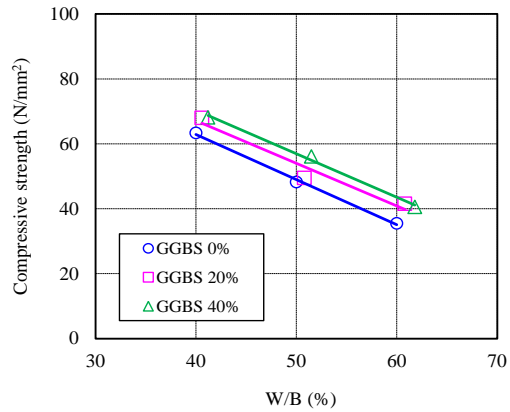


図-3 圧縮強度と水粉体比 (W/B) の関係

度の増大が観察された。次に、割裂引張強度と圧縮強度の関係を図-4 に示す。高炉スラグ微粉末置換による割裂引張強度の変化は見られないが、圧縮強度の高い領域において、高炉スラグ微粉末置換による割裂引張強度の増大が顕著であった。ヤング係数と圧縮強度の関係を図-5 に示す。高炉スラグ微粉末置換によるヤング係数の違いは見られなかった。

以上の材料強度試験結果から、環境対応型碍子モルタルは実用レベルにおいて問題のない強度が得られることが分かった。

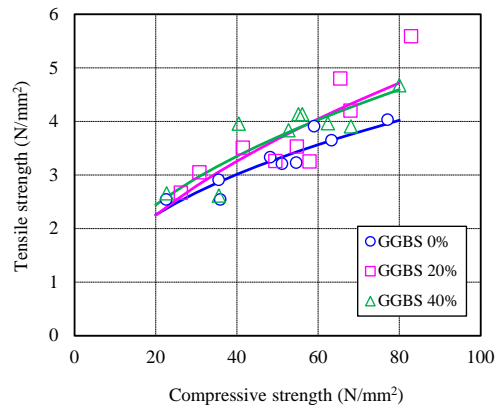


図-4 割裂引張強度と圧縮強度の関係

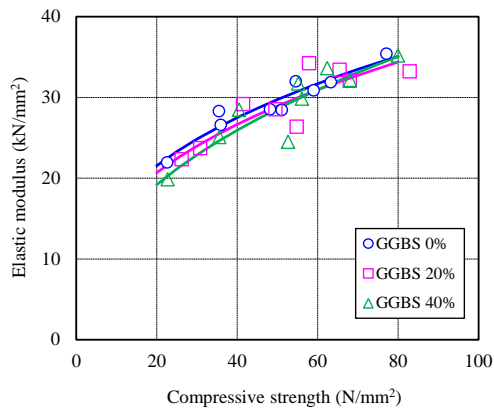


図-5 ヤング係数と圧縮強度の関係

(3) 環境対応型碍子モルタルの塩分浸透抵抗性評価^{⑤, ⑥}

EPMA による塩化物イオン濃度のマッピング結果の一例 (48 週浸漬の W/B=50%) を図-6 に示す. 高炉スラグ微粉末置換の増加により, 塩化物イオンの浸透が大きく抑制されていることが分かる. これは, 高炉スラグ微粉末の特徴であるセメントペースト部の緻密化とフリーデル氏塩の生成による塩化物イオンの固定化によるものと考えられる.

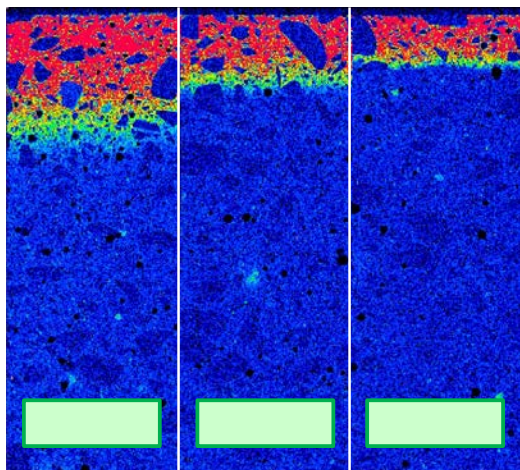


図-6 塩化物イオンのマッピング結果 (48 週浸漬の W/B= 50%)

次に, 塩化物イオン濃度の分布結果の一例 (96 週浸漬の W/B=40%) を図-7 に示す. 高炉スラグ微粉末置換による塩化物イオンの浸透深さが抑制されていることが分かる. 一方, 高炉スラグ微粉末置換によるセメントペースト部の緻密化とフリーデル氏塩の生成の影響で表面における塩化物イオン濃度が高くなっている. 各供試体の 48 週および 96 週における塩化物イオン濃度の分布結果と Fick の第 2 拡散方程式により, 見かけの塩化物イオン拡散係数を導出した結果の一例 (W/B=40%) を図-8 に示す. 一般的なコンクリートの場合と同様に, 常用対数で表した見かけの塩化物イオン拡散係数と高炉スラグ微粉末置換率との間には線形関係が見られ,

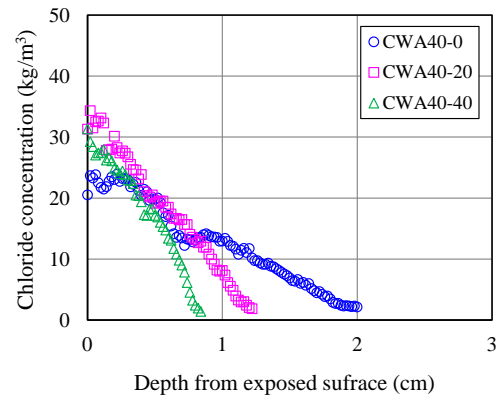


図-7 塩化物イオン濃度の分布結果 (96 週浸漬の W/B=40%)

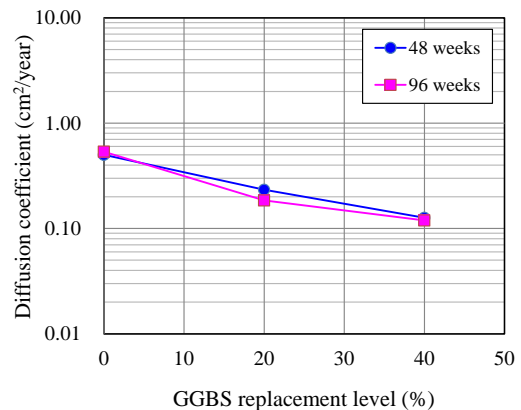


図-8 見かけの塩化物イオン拡散係数と高炉スラグ微粉末置換率の関係 (W/B=40%)

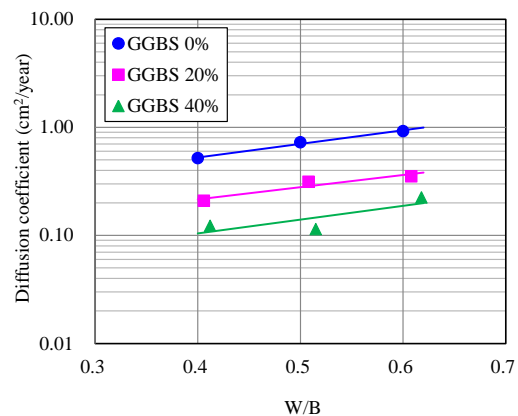


図-9 見かけの塩化物イオン拡散係数と水粉体比 (W/B) の関係

さらに, 48 週と 96 週の見かけの塩化物イオン拡散係数の比較から, 浸漬期間による違いは小さかった. また, 図-9 に示すように, 48 週と 96 週の見かけの塩化物イオン拡散係数の平均値と水粉体比 (W/B) との間においても線形関係が見られた.

次に, 96 週浸漬の各供試体中央部分から採取した小片を用いて測定した細孔径分布の一例 (96 週浸漬の W/B=40%) を図-10 に示す. この結果から, 高炉スラグ微粉末置換の増加

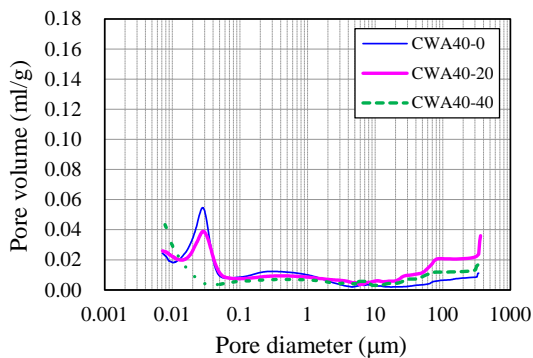


図-10 細孔径分布 (96週浸漬のW/B=40%)

により、細孔径がより小さい領域における細孔量の増加が見受けられる。また、細孔径0.1 μm以下の領域において、分布特性に顕著な差異が生じている。

そこで、細孔径0.007~0.1 μmの領域における累積細孔量を算出し、48週と96週の見かけの塩化物イオン拡散係数との関係を調べた結果、図-11に示すように、ややばらつきを有するものの、両者は線形に表現できそうである。上述したように、高炉スラグ微粉末の添加は、セメントペースト部の緻密化とフリーデル氏塩の生成による塩化物イオンの固定化の効果があることから、さらに長期的な観察が必要であることを記しておく。

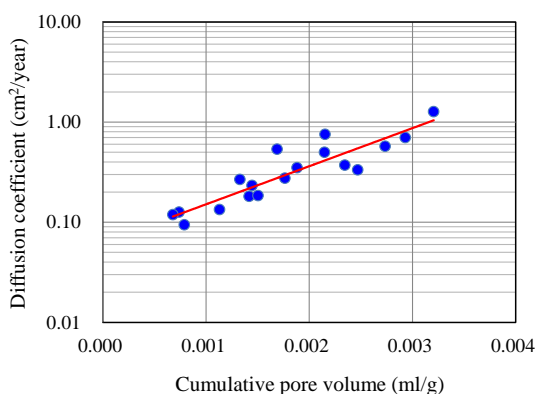


図-11 見かけの塩化物イオン拡散係数と累積細孔量の関係

以上の研究成果から、環境対応型碍子モルタルの塩害環境下における適用に際しての基礎資料を得ることができたと考える。よって、今後はこの環境対応型碍子モルタルの構造体として環境耐久性について評価を行い、その適用範囲を検討していく予定である。

<引用文献>

- ① H. Higashiyama, K. Yamauchi, M. Sappakittipakorn, M. Sano, O. Takahashi, A Visual investigation on Chloride Ingress into Ceramic Waste Aggregate Mortars having Different Water to Cement Ratios, Construction and Building Materials, 2013, Vol. 40,

pp. 1021-1028.

- ② H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Sano, F. Yagishita: Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate, Construction and Building Materials, 2012, Vol. 33, pp. 48-54.
- ③ H. Higashiyama, F. Yagishita, M. Sano and O. Takahashi: Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate, Construction and Building Materials, 2012, Vol. 26, No.1, pp. 96-101.
- ④ H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Sano, O. Takahashi, S. Tsukuma: Characteristics of chloride ingress into mortars containing ceramic waste aggregate, Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol.17, No. 3, 2015, pp. 513-521.
- ⑤ H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Mizukoshi, O. Takahashi: Mechanical properties and chloride diffusion of ceramic waste aggregate mortar containing ground granulated blast-furnace, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol.9, No.9, 2015, pp. 843-848.
- ⑥ H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Mizukoshi, O. Takahashi: Characteristics of chloride diffusion and pore volume in ceramic waste aggregate mortar containing GGBS, International Journal of GEOMATE, Vol. 11, Issue 26, 2016, pp. 2568-2575.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Mizukoshi, O. Takahashi: Characteristics of chloride diffusion and pore volume in ceramic waste aggregate mortar containing GGBS, International Journal of GEOMATE, 査読有, Vol.11, Issue 26, 2016, pp. 2568-2575, <http://geomatejournal.com/articles/2016/11/26>
- ② H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Mizukoshi, O. Takahashi: Mechanical properties and chloride diffusion of ceramic waste aggregate mortar containing ground granulated blast-furnace, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural

Engineering, 査読有, Vol.9, No.9,
2015, pp. 843-848,
<http://waset.org/Publications/?path=Publications&p=105>

- ③ H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Sano, O. Takahashi, S. Tsukuma: Characteristics of chloride ingress into mortars containing ceramic waste aggregate, Journal of Material Cycles and Waste Management, 査読有, Vol.17, No.3, 2015, pp.513-521,
DOI 10.1007/s10163-014-0264-8

〔学会発表〕 (計0件)

〔その他〕

ホームページ

<http://cse-lab.sakura.ne.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東山 浩士 (HIGASHIYAMA, Hiroshi)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：60319754