

論文

廃棄碍子を細骨材に用いた

モルタルの圧縮強度と

塩分浸透抵抗性^{※)}

東 山 浩 士^{※※)}
柳 下 文 夫^{※※※※※)}

松 岡 慶^{※※※※)}
高 橋 修^{※※※※※※※)}

佐 野 正 典^{※※※※※)}
酒 井 研 二^{※※※※※※※※)}

1. はじめに

産業廃棄物のなかでも、電力や鉄道関連から廃棄される送配電線と鉄塔・電柱などの絶縁に用いられている碍子は、その一部が路盤材やブロック材にリサイクルされているが、埋立て処分されている量も多く、資源のさらなる有効利用の検討が急務である。国内における2008年度の廃棄碍子の発生量を見てみると、東京電力¹⁾では2800t、関西電力²⁾では2500t（ガラス・陶磁器くずを含む）となっている。

一方、国外では陶磁器類のタイル・ブロック、装飾品、衛生器類などの建設用骨材へのリサイクルに関する研究が2000年頃から実施されており、廃棄陶磁器類をモルタルやコンクリートの細・粗骨材、あるいは微粉碎した粉末として有効利用している研究が見られる^{3)~7)}。Ayら³⁾やLavantら⁶⁾は、微粉碎したタイル材や屋根瓦がボゾラン反応性を有していることを明らかにしている。Senthamaraiら⁴⁾は、ジョークラッシャーにより破碎した送配電用の懸垂碍子をコンクリートの粗骨材として活用し、従来のコンクリートに比べて、圧縮強度、引張強度、曲げ強度が僅かながら低下したものの、ワーカビリティが向上したと述べている。Binici⁵⁾は、建設業や窯業から廃棄される陶磁器を粉碎し、コンクリートの細

骨材の一部として活用し、圧縮強度の増大、塩分浸透抵抗性の向上を明らかにしている。また、Pachero-Torgalら⁷⁾も陶磁器を粉碎して粗骨材、細骨材、微粉末として活用し、圧縮強度、透水性、塩分浸透性の検討を行っている。

本研究で対象とした送配電用の懸垂碍子をリサイクルして有効利用しようとする試みは、国内外において少なく、Senthamaraiら⁴⁾や畑ら⁸⁾は、微粉碎した廃棄碍子のボゾラン反応性について検討している。このように、廃棄碍子をモルタルやコンクリートの骨材として有効利用するためには、強度特性や耐久性などについて、さらに検討を加える必要がある。

そこで本研究では、送配電用の懸垂碍子を破碎・研磨した細骨材および破碎・研磨過程で排出される粉末をモルタルにリサイクルしたときの圧縮強度特性および塩分浸透抵抗性について検討することを目的とした。以下では、まず、廃棄懸垂碍子の破碎・研磨方法⁹⁾について説明する。次に、碍子骨材を用いたモルタル（以下、碍子モルタル）の圧縮強度特性および塩分浸透抵抗性について、川砂を用いたモルタル（以下、川砂モルタル）と比較することによりその有効性を評価する。また、破碎・研磨過程で排出される粒径0.075mm未満の粉末をセメントと置換した場合（内割り）、あるいはモルタルに添加

※) 論文内容の一部は、骨材資源、No163、p.p.117~125 (2009) に掲載済。

※※) 近畿大学理工学部 社会環境工学科 准教授 博(工)

※※※) 近畿大学大学院総合理工学研究科環境系工学専攻

※※※※) 正会員 評議員 近畿大学理工学部 社会環境工学科 教授 工博

※※※※※) 近畿大学理工学部 社会環境工学科 教授 工博

※※※※※※) ㈱関電L&A

※※※※※※※) 関西電力㈱電力技術研究所



図1 懸垂碍子

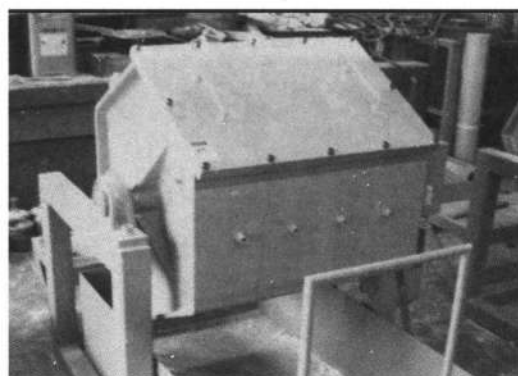


図2 六角回転式研磨機

した場合（外割り）についても検討を加えた。

2. 廃棄碍子の骨材化

2.1 破碎・研磨方法

本研究で対象とした送配電用の懸垂碍子を図1に示す。懸垂碍子は笠状の磁器絶縁部の両側に連結金具が接着されていることから、まず、笠状の磁器絶縁部の碍子と連結金具をハンマーなどにより分離する1次破碎処理を行う。1次破碎処理した碍子片は50～100mm程度の大きさであるため、特製クラッシャーによる2次破碎処理を行い、30mm以下の碍子片とする。本研究で使用した特製クラッシャーは10kg/minの破碎能力を有しており、碍子片の9割以上を所定の粒径に破碎することが可能である。

碍子は非常に硬い材料であるため、2次破碎後の碍子片の縁端部は極めて鋭利な形状を有しており、骨材としてそのまま使用するには取扱いに危険性が伴う。そこで、骨材としての取扱いが安全である形状に加工するために研磨機を開発し、骨材の安全度評価を検討してきた⁹⁾。研磨機の開発にあたっては、碍子片の縁端部の鋭利幅が安全であると判断できる値に至るまでの研磨時間が短い、研磨過程で排出される微粉末の発生量が少ないといったことが要求性能として挙げられる。ここで、碍子片の鋭利幅が安全であると判断できる値として、コンクリートに用いられる碎石と同程度の縁端部幅である0.5mmを基準としている。

使用した研磨機は、図2に示す六角回転式研磨機（容量160L）であり、研磨機内部には研磨促進用の太径鉄

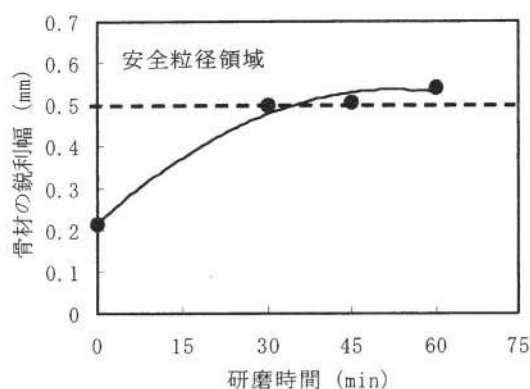


図3 鋭利幅と研磨時間の関係

筋が配されている。研磨機に投入する破碎碍子量は鋭利幅0.5mmに至るまでの時間効率を考慮して115Lとした。骨材の鋭利幅と研磨時間の関係を図3に示す。本研磨機によれば、鋭利幅0.5mmに至る時間は45～60分程度であることがわかる。研磨時間60分後の碍子骨材の粒径分布は、30～20mmが5%、20～13mmが32%、13～5mmが39%、5～12mmが13%、1.2mm以下が11%であった。

2.2 碍子骨材

本研究に用いた懸垂碍子の化学組成を表1に示す。本研究は碍子骨材を用いたモルタルの圧縮強度および塩分浸透抵抗性について検討することを目的としているため、粒径5mm未満、0.075mm以上の碍子骨材を細骨材として、また、0.075mm未満を微粉末として使用することにした。研磨後の碍子骨材および比較に用いる川砂の粒度分布を図4に示す。碍子骨材の粒度分布は、一部の粒径

表1 懸垂碍子の化学組成

化学組成 (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
70.9	21.1	0.81	0.76	0.24	1.47	3.57	0.33

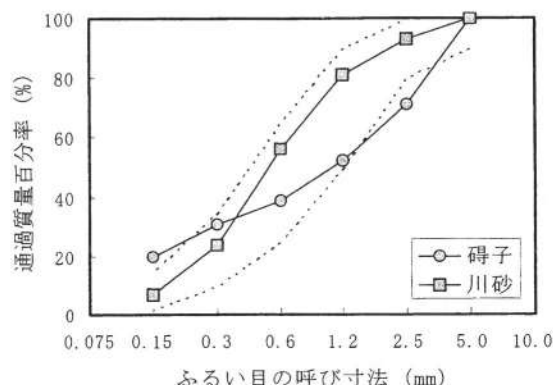


図4 碍子骨材と川砂の粒度分布

においてJIS A 5005のコンクリートに用いる砕砂の標準粒度分布（図中の破線）を満足しないところがある。そこで、圧縮強度試験に用いる碍子骨材は川砂の粒度分布と一致するように粒度調整を行った。塩分浸透抵抗性試験では、粒度分布の影響は小さいものと考え、粒度調整を行わずにそのまま使用することにした。

3. 使用材料と試験方法

3.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³、比表面積：3360cm²/g）を使用した。川砂は表乾密度：2.59g/cm³、吸水率：1.73%、粗粒率：2.39、碍子骨材は気乾密度：2.30g/cm³、吸水率：0.47%、粗粒率：3.74である。碍子骨材の吸水率は、川砂の1/4程度と非常に小さいことから、気乾状態で使用することにした。

モルタルの基本配合（表2）は、水セメント比（W/C）=0.5、セメント砂比（S/C）=2.0とした。

3.2 圧縮強度試験

圧縮試験では、直径50mm、高さ100mmの円柱試験体を使用した。試験体の種類としては、配合表（表2）に示すように、川砂モルタル（S-1）、碍子モルタル（G-1）に加え、碍子モルタルのセメントを碍子微粉末で10%、20%、30%（内割り）置換したもの（GIシリーズ）、

表2 モルタルの配合表

試験体	水セメント比 W/C	砂セメント比 S/C	微粉末 ×C (%)
S-1	0.50	2.0	—
G-1			—
GI-1	0.56	2.2	10
GI-2	0.63	2.5	20
GI-3	0.71	2.9	30
GE-1	0.50	2.0	10
GE-2			20
GE-3			30

さらに、碍子モルタルに碍子微粉末をセメントに対して10%、20%、30%（外割り）添加したもの（GEシリーズ）とした。試験体は、打設後24時間以内に脱型し、20±2℃の実験室内にて水中養生を行った。

圧縮試験は材齢28日に実施した。圧縮試験装置は500kN万能載荷試験機を用い、載荷速度は0.6N/mm²/secとした。また、圧縮応力-ひずみ関係およびヤング係数を得る目的で、円柱試験体の側面には、長さ30mmのひずみゲージを貼付した。

3.3 細孔径分布試験

モルタルの細孔径が塩分浸透抵抗性と相関を有することから^{10), 11)}、水銀圧入法による細孔径分布を調べた。試験体は、圧縮強度試験の結果をもとに、表2に示した川砂モルタル（S-1）、碍子モルタル（G-1）、碍子モルタルのセメントを碍子微粉末で20%（内割り）置換した試験体（GI-2）、さらに、20%（外割り）添加した試験体（GE-2）とした。なお、試験は圧縮強度試験に供した試験体と同様の円柱試験体を用いて材齢28日において実施した。

3.4 塩分浸透抵抗性試験

塩分浸透抵抗性試験では、直径100mm、高さ200mmの円柱試験体を作製し、打設後24時間以内に脱型した後、20±2℃の実験室内にて水中養生を1週間行った。その

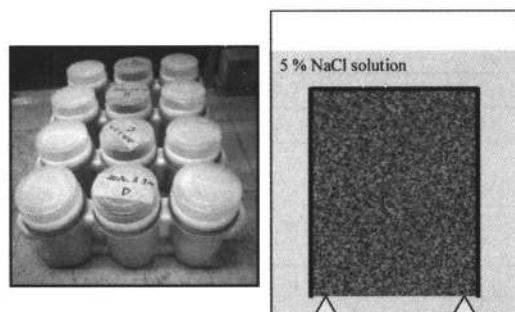


図5 塩化ナトリウム水溶液浸漬試験



図7 ドリル粉の採取箇所

後、打込み側表面から50mmをコンクリートカッターにより切断し、試験体高さを150mmとした。さらに、試験体表面が乾燥した後、研磨紙により表面のセメントペースト層を除去し、打込み面のみを残してエポキシ樹脂により表面を被覆した。エポキシ樹脂硬化後、図5に示すように、濃度5%の塩化ナトリウム水溶液中にエポキシ樹脂で被覆していない開放面が下側となるようにして、密封容器内にて3ヶ月間の浸漬を $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の実験室内にて実施した。

試験体は、細孔径分布試験と同様に、試験体S-1、試験体G-1、試験体GI-2および試験体GE-2である。浸漬期間が経過した後、硝酸銀溶液噴霧法による塩分浸透深さ試験および蛍光X線分析による塩化物イオン濃度分布試験を実施した。

塩分浸透深さ試験では、試験体を割裂させ、その破断面に0.1N硝酸銀溶液を散布し、図6に示すように、白色に変色した部分の深さを3箇所（中央およびその両側25mmの位置）計測した。

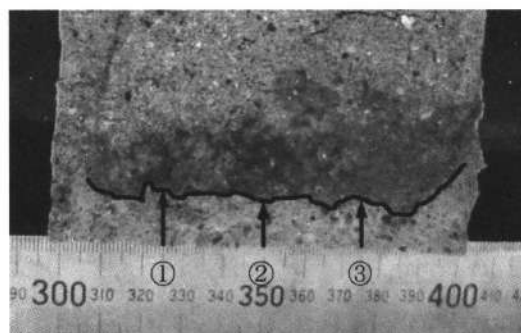


図6 塩分浸透深さ測定箇所

蛍光X線分析では、 0.1kg/m^3 程度までの塩化物イオンの定量分析が可能である分析装置（OURSTEX101FA）を用いた。本試験では、図7に示すように、5箇所からのドリル粉を四分法により20g程度採取し、さらに0.15mm以下に微粉砕した5～7g程度を試料とした。塩化物イオン濃度分布は、試験体表面から深さ方向に10mm間隔で採取したドリル粉を用いて計測したため、計測された塩化物イオン濃度は10mm区間の平均値を表すことになる。

4. 試験結果と考察

4.1 圧縮強度

材齢28日におけるモルタルの圧縮強度およびヤング係数を表3に示す。また、それぞれの圧縮強度を図8に示す。試験体S-1（川砂モルタル）に比べて、試験体G-1（碓子モルタル）の圧縮強度およびヤング係数はそれぞれ10

表3 材齢28日におけるモルタルの圧縮強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
S-1	51.6	26.4
G-1	58.7	30.1
GI-1	57.2	30.8
GI-2	53.1	31.7
GI-3	32.6	28.2
GE-1	61.5	34.8
GE-2	62.8	34.5
GE-3	67.4	35.7

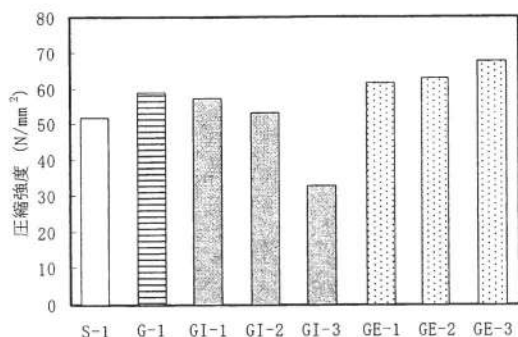


図8 圧縮強度の比較

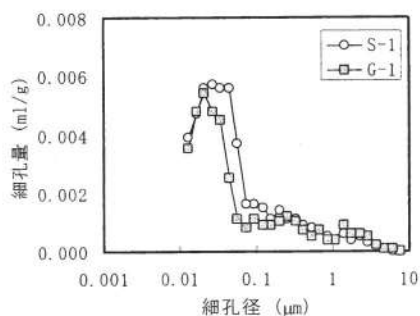
%, 14%程度大きくなった。これは罫子自身の強度およびヤング係数が非常に大きいことによるものと考えられる。次に、内割りで罫子微粉末を添加した試験体を見てみると、内割り10%の試験体GI-1の圧縮強度およびヤング係数は、試験体G-1とほぼ同じであり、内割り20%の試験体GI-2においては僅かに圧縮強度が低下しているものの、試験体S-1を上回る圧縮強度を有している。しかし、内割り30%の試験体GI-3では急激な強度低下が見られる。よって、内割り20%程度までであれば、罫子微粉末をセメントと置換して使用できる可能性があると考えられる。

一方、外割りで罫子微粉末を添加した試験体では、添加量とともに圧縮強度が増加する傾向が見られる。畑らの研究⁸⁾によると、罫子微粉末で細骨材を置換した場合、置換率の増大とともに圧縮強度が増加する結果が得られている。本研究で使用した罫子微粉末の粉末度は、畑らが用いた罫子微粉末より粗いものであるが、外割りで罫子微粉末を添加することによる強度増加が期待できそうである。

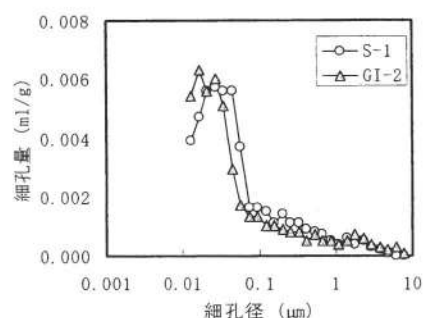
これら圧縮強度の結果、罫子微粉末を内割りで30%添加した場合の圧縮強度が急激に低下したことから、以下に述べる細孔径分布試験、塩分浸透抵抗性試験は、試験体S-1（川砂モルタル）、試験体G-1（罫子モルタル）、内割り20%の試験体GI-2およびその比較として外割り20%の試験体GE-2について実施した結果を示す。

4.2 細孔径分布

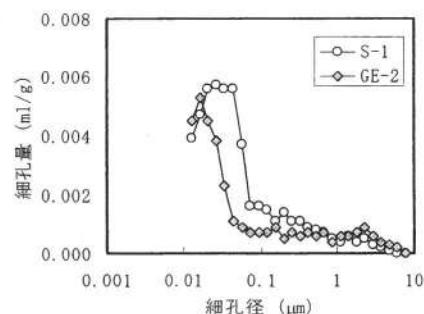
図9は材齢28日におけるモルタル試験体G-1、GI-2、GE-2の細孔径分布を試験体S-1と比較した結果である。



(a) 試験体G-1



(b) 試験体GI-2



(c) 試験体GE-2

図9 細孔径分布

試験体S-1に比べて、罫子骨材を用いた、いずれの試験体も細孔径 $0.03\mu\text{m}$ から $1.0\mu\text{m}$ 付近までの細孔量が少ないことがわかる。羽原¹⁰⁾や松下¹¹⁾によると、イオンの透過性は $0.05\mu\text{m}$ ～ $2.0\mu\text{m}$ の細孔量と相関があるとされている。そこで、細孔径 $0.05\mu\text{m}$ ～ $2.0\mu\text{m}$ の細孔量を図10に示す。試験体S-1の細孔量に比べて、試験体G-1

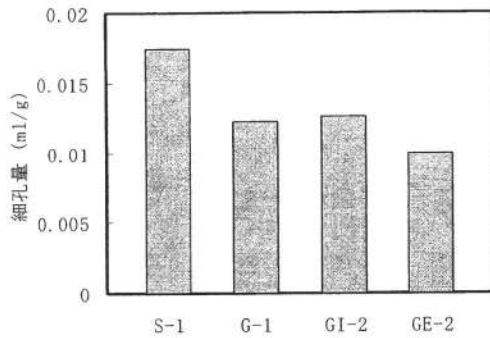


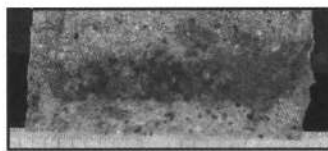
図10 モルタル試験体の細孔径
0.05 μm ~ 2.0 μm の細孔量

は30%、試験体GI-2は28%、試験体GE-2は43%ほど低下しており、碇子骨材および碇子微粉末を用いることにより、イオンの透過性に相関があるといわれている範囲の細孔量が低下し、緻密化していることがわかる。また、透気性や通水性については細孔径0.1 μm 以上の空隙が関係するとされていることから¹⁰⁾、イオンの透過性に加えて、透気性や通水性についてもその抵抗性を期待するところが大いといえる。

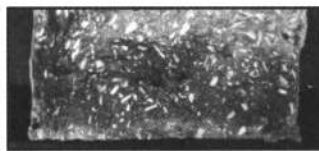
4.3 塩分浸透抵抗性

1) 硝酸銀溶液噴霧法による塩分浸透深さ

浸漬期間3ヶ月後の試験体破断面に0.1N硝酸銀溶液を噴霧し、白色に変色した状況を図11（図の下側が開放面）に示す。浸漬期間3ヶ月後の塩分浸透深さは、試験体



(開放面)
(a) 試験体S-1



(開放面)
(b) 試験体G-1



(開放面)
(c) 試験体GI-2



(開放面)
(d) 試験体GE-2

図11 硝酸銀溶液噴霧後の状況

S-1が12.33mm、試験体G-1が7.18mm、試験体GI-2が7.30mm、試験体GE-2が5.95mmであり、明らかな差が見られた。試験体S-1（川砂モルタル）に比べて、試験体G-1（碇子骨材モルタル）の塩分浸透深さは約1/2であった。また、内割り、あるいは外割りで碇子微粉末を20%添加した試験体GI-2、試験体GE-2の塩分浸透深さも同様に、試験体S-1の約1/2であった。このことから、碇子骨材を細骨材として用いたモルタルは、非常に高い塩分浸透抵抗性を有していることがわかる。また、碇子微粉末を内割りで20%添加した試験体GI-2の塩分浸透深さは、試験体G-1とほぼ同じであり、碇子微粉末を外割りで20%添加した試験体GE-2の塩分浸透深さは、試験体G-1より1mm程度小さい。これらの結果は、図10に示した細孔径0.05 μm ~ 2.0 μm の範囲における細孔量の結果と整合している。

タイルやレンガ、衛生器類などの廃棄陶磁器類を細骨材、粗骨材に用いたコンクリートに関する既往の研究^{3), 4)}においても、それらが高い塩分浸透抵抗性を有していることが明らかにされているが、本研究で対象とした懸垂碇子を細骨材に用いたモルタルにおいても同様な特性のあることがわかった。

2) 蛍光X線分析による塩化物イオン濃度分布

割裂したモルタルの破断面に0.1N硝酸銀溶液を噴霧し、白色に変色した境界位置における全塩化物イオン濃度は、いくつかのばらつきがあることから¹²⁾、全塩化物イオン濃度分布を定量的に評価するために蛍光X線分析を実施した。

浸漬期間3ヶ月後の塩化物イオン濃度分布を図12に示す。試験体S-1（川砂モルタル）に比べて、碇子骨材を用いた、いずれの試験体も塩化物イオン濃度が低下していることがわかる。それは表面から深くなるほど顕著である。試験体G-1と試験体GE-2を比べると、塩化物イオン濃度分布はほぼ同じであり、碇子微粉末添加の効果は見られない。また、試験体GI-2はセメントと碇子微粉末を置換していることから、僅かに塩分浸透抵抗性が低下している。

次に、塩化物イオン濃度分布の結果と

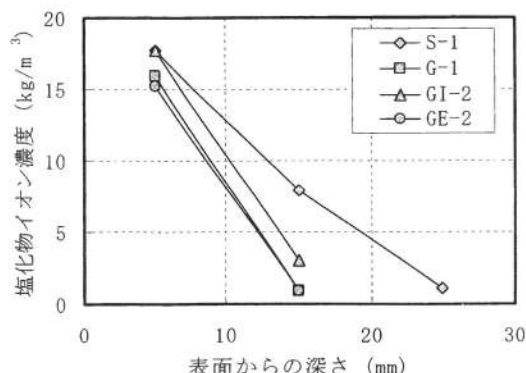


図12 塩化物イオン濃度分布

フィックの第2法則である拡散方程式から得られる次式の塩化物イオン濃度予測式¹³⁾により、各試験体における見かけの拡散係数の相対比較を行った。なお、初期含有塩化物イオン濃度は考慮しないものとした。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$ は深さ x (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 は表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D_{ap} は塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 erf は誤差関数である。

式(1)の予測式による塩化物イオン濃度分布のカーブフィッティングを図13に、また、その結果から得られた塩化物イオンの見かけの拡散係数と表面における塩化物イオン濃度を表4に示す。試験体S-1に比べて、試験体G-1および試験体GE-2の拡散係数は約1/5と大きく低下することがわかる。また、セメントを碇子微粉末で20%置換した試験体GI-2においても約1/3に低下している。

塩分浸透抵抗性に及ぼす要因¹⁴⁾として、細孔構造、セメント水和物への塩化物イオンの固定化、細孔表面への吸着などが挙げられるが、本研究の範囲では、碇子を細骨材に用いたモルタルの塩分浸透抵抗性向上のメカニズムまでを明らかにするには至っていない。また、塩分浸透抵抗性に及ぼす水セメント比や細骨材量の影響についても調べていく必要がある。これらについては今後の課題としたい。

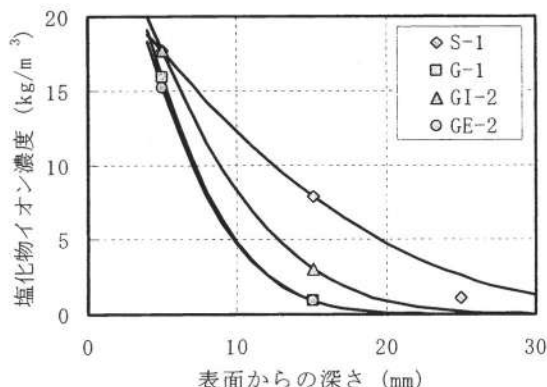


図13 式(1)による塩化物イオン分布のカーブフィッティング

表4 塩化物イオンの見かけの拡散係数

試験体	C_0 (kg/m^3)	D_{ap} ($\text{cm}^2/\text{年}$)
S-1	23.63	4.85
G-1	34.34	0.92
GI-2	30.24	1.67
GE-2	32.85	0.93

5. まとめ

本研究では、電力関連から廃棄される送配電用の懸垂碇子をセメント系材料用骨材としてリサイクルすることを目的に、碇子骨材を用いたモルタルの圧縮強度と塩分浸透抵抗性についての基礎的検討を行った。主な結果をまとめると以下のとおりである。

1) 材齢28日における碇子モルタルの圧縮強度およびヤング係数は、川砂モルタルに比べて、それぞれ10%、14%程度増加した。また、セメントを碇子微粉末で30%まで置換したところ、置換率20%までは川砂モルタルを上回る圧縮強度を得ることができたが、置換率30%では急激な強度低下が見られた。さらに、碇子微粉末を外割りで30%まで添加した結果、圧縮強度の増加が見られた。

2) 碇子モルタル、内割りおよび外割り20%のモルタルの細孔径分布は、イオンの透過性に相関のある細孔径 $0.05 \mu\text{m} \sim 2.0 \mu\text{m}$ の細孔量が川砂モルタルより少なかった。

3) 濃度5%の塩化ナトリウム水溶液中に3ヶ月間浸

漬した後の硝酸銀噴霧および蛍光X線分析の結果から、碍子モルタルの塩分浸透抵抗性は、川砂モルタルに比べて非常に高いことがわかった。また、内割りおよび外割り20%のモルタルについても同様に塩分浸透抵抗性が高いが、内割り20%のモルタルの塩分浸透抵抗性は、碍子モルタルや外割り20%のモルタルに比べて僅かながら低下した。

参考文献

- 1) <http://www.tepco.co.jp/eco/report/rc1/01-j.html>.
- 2) <http://www.kepco.co.jp/corporate/csr/data/data02.html>.
- 3) N. Ay and M. Unal : The use of waste ceramic tile in cement production, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.3, pp.497-499, 2000.
- 4) R.M. Senthamarai and P.D. Manoharan : Concrete with ceramic waste aggregate, *Cement & Concrete Composites*, Vol.27, No.9-10, pp.910-913, 2005.
- 5) H. Binici : Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties, *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.6, pp.1191-1197, 2007.
- 6) A.E. Lavant, M.A. Trezza and M. Poggi : Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture, *Waste Management*, Vol.29, pp.1666-1674, 2009.
- 7) F. Pachero-Torgal and S. Jalali : Reusing ceramic wastes in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.24, No.5, pp.832-838, 2010.
- 8) 畑 治広・中下明文・大村 剛・伊藤秀敏・廃棄碍子微粉末を混入したコンクリートの強度発現性、*コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, pp.1683-1688, 2004.
- 9) 佐野正典・登日宣匡・高橋 修・酒井研二：破碎碍子の鋭利度測定と安全粒径骨材化について、*骨材資源*, No.163, pp.117-124, 2009.
- 10) 羽原俊祐：コンクリート構造とその物性（わかりやすいセメント科学）、セメント協会、pp.78-104, 1993.
- 11) 松下博通・佐川康貴・川端雄一郎：再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下、*土木学会論文集E*, Vol. 62, No.1, pp.230-242, 2006.
- 12) N. Otsuki, S. Nagataki and K. Nakashita : Evaluation of AgNO_3 Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials, *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.6, pp.587-592, 1992.
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕2007年制定、pp.111-114, 2008.
- 14) 吉田 行・田口史雄・名和豊春・渡辺 宏：高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの塩分浸透に及ぼす諸要因の影響、*コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, pp.777-782, 2004.