

エコセメントを用いた硬化体の鉄筋腐食抵抗性

広島大学大学院工学研究科
太平洋セメント（株）
広島大学大学院工学研究科
太平洋セメント（株）

正会員 河合 研至
正会員 松本 健一
学生会員○石田 剛朗
非会員 横山 滋

1. はじめに

近年のリサイクル意識の高まりや最終処分場の残余年数の逼迫といった状況を受け、都市型廃棄物を原料とするセメント・エコセメントの開発がなされている。都市型廃棄物は多量の塩素を含むため従来のエコセメントはセメント質量に対し 5000~15000ppm の塩素を含有し、用途は無筋コンクリート分野に限られていた。しかし塩素バイパスシステム等の技術開発により塩素含有量を 1000ppm 以下に低減したエコセメント（普通形エコセメント）の製造が可能となっている。塩素含有量を現行 JIS 規格である 200ppm 以下にまで低減することも技術的には可能であるが、更なる脱塩素処理にはエネルギーの増加を伴うため必要以上の処理は好ましくない。たとえ JIS 規格を上回る塩素を含有しているとしても鉄筋腐食への影響が無視できる範囲にあるのならば、RC 材料への適用も可能であると考えられる。本研究ではエコセメントが将来的により広い範囲で汎用的に使用されることを想定し、エコセメントの鉄筋腐食抵抗性について明らかとすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには普通形エコセメント 2 種（塩素含有量をそれぞれ 500、700ppm を目標として製造されたもの、以下 E500、E700 と称す）、ならびに普通ポルトランドセメント（以下 NC と称す）を使用した。実験によっては NC の練混ぜ水に塩化ナトリウムを添加して塩素含有量を E500、E700 と同一としたもの（以下 NC500、NC700 と称す）を比較検用として使用した。セメントの化学組成、鉱物組成を表 1 に示す。

表1 セメントの化学組成ならびに鉱物組成

| 名称 | 化学組成(%) | | | | | | | | | |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|-------|-------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Cl | total |
| NC | 20.1 | 5.04 | 3.08 | 64.3 | 1.13 | 2.09 | 0.30 | 0.37 | 0.01 | 96.4 |
| E500 | 17.1 | 7.94 | 4.36 | 61.4 | 1.80 | 3.74 | 0.24 | 0.02 | 0.054 | 98.7 |
| E700 | 17.0 | 7.90 | 4.35 | 61.6 | 1.88 | 3.74 | 0.16 | 0.01 | 0.087 | 98.9 |

| 名称 | 鉱物組成(%) | | | | |
|------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------|
| | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | total |
| NC | 64.8 | 9.4 | 8.2 | 9.4 | 91.7 |
| E500 | 52.2 | 9.6 | 13.7 | 13.3 | 88.8 |
| E700 | 54.0 | 8.0 | 13.6 | 13.2 | 88.9 |

2.2 エコセメントの水和性状に関する実験

主に水和過程における塩素の挙動を明らかとすることを目的とし、W/C=0.40 のセメントペーストを使用して細孔溶液を抽出し溶存イオン濃度の分析を行った。また併せて硬化体に関する分析を行った。

2.3 細孔溶液組成を有する合成溶液中における鉄筋腐食試験

細孔溶液中の溶存イオン濃度に基づき、試薬の塩化ナトリウムと水酸化ナトリウムを用いて細孔溶液を模した溶液および比較検討用の溶液を作製した。溶液浸漬（10分）と気中暴露（5時間50分）の乾湿繰り返しによる鉄筋の促進腐食試験を行い、500サイクル経過後に鉄筋の腐食減量を測定した。

2.4 炭酸化時の塩分挙動に関する実験

セメント硬化体が炭酸化を受けた場合、炭酸化部では硬化体中に固定されていた塩素が遊離して Cl⁻濃度が上昇する。その後濃度拡散現象によって未炭酸化部へと Cl⁻が移動し塩分濃縮が起こるとされており、鉄筋腐食に与える影響が懸念されている。特にエコセメントは内在塩分を多く含むため、炭酸化時の塩分挙動を把握することが重要と考えられる。本実験では W/C=0.50 のセメントペーストを用いて促進炭酸化試験を行い、炭酸化時の塩分挙動に関する検討を行った。

2.5 鉄筋コンクリート腐食試験

鉄筋コンクリート供試体を用いて 3%塩化ナトリウム溶液浸漬（4日）と気中暴露（3日）の乾湿繰り返しによる促進腐食試験を行った。定期的に自然電位の測定を行い、鉄筋の腐食状況を推定した。

3. 実験結果および考察

3.1 エコセメントの水和性状

細孔溶液中の Cl^- 濃度の経時変化を図 1 に示す。 Cl^- 濃度はいずれのセメントにおいても初期材齢で高い値を示すが、その後急激に低下しておりフリーデル氏塩や C-S-H へ塩素が固定されていると考えられる。同一の塩素含有量で NC と EC (エコセメント) を比較すると EC の塩素固定能力が高いことが分かるが、 C_3A 含有量の多寡ならびに塩素の存在形態の相違に起因するものと推察される。

3.2 細孔溶液組成を有する合成溶液中における鉄筋腐食試験

乾湿繰り返し 500 サイクル経過後の鉄筋腐食減量率を図 2 に示す。 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ は鉄筋腐食を検討する際の指標の一つとされており、これをパラメータとして用いた。比較検討用として作製した溶液 (①~④) では腐食が生じていることが分かるが、NC ならびに EC の細孔溶液組成を模した溶液 (⑤~⑦) では鉄筋腐食減量率は非常に低い値を示しており、ほとんど腐食は進行していないと考えられる。

3.3 炭酸化時の塩分挙動

E500 の水溶性塩分測定結果を図 3 に示す。フェノールフタレインによる中性化深さ試験に基づき、炭酸化部、炭酸化フロント部、未炭酸化部にわけて炭酸化を受ける面から深さ方向に試料を採取した。炭酸化部において Cl^- 濃度の増加が見られるが未炭酸化部では変化が認められない。炭酸化部ではフリーデル氏塩が分解を受けて Cl^- が遊離し濃度が増加するが、未炭酸化部では濃度拡散現象により移動してきた Cl^- が再びフリーデル氏塩に固定されるため Cl^- 濃度が変化しないものと推察される。

3.4 鉄筋コンクリート腐食試験

表 2 に促進腐食 62 週経過時点での自然電位 (E) による鉄筋腐食状況の推定結果を示す。各配合の供試体 7 体の電位がどの領域に含まれるかを表している。EC は NC に比べやや腐食の進行が速い傾向が見られる。EC と同様に塩素を含有する NC700 において電位の低下が見られないことから EC は NC に比べ Cl^- の浸透速度が大きい可能性がある。

表 2 鉄筋腐食状況の推定結果

| | 90%以上の確率で腐食なし ($-80\text{mV} < E$) | 不確定 ($-220\text{mV} < E \leq -80\text{mV}$) | 90%以上の確率で腐食あり ($E \leq -220\text{mV}$) |
|-------|--------------------------------------|---|--|
| NC | 5 | 2 | 0 |
| NC700 | 3 | 4 | 0 |
| E500 | 0 | 3 | 4 |
| E700 | 3 | 2 | 2 |

4. 結論

EC は塩素固定能力が高いことが明らかとなった。また炭酸化を受けた場合に、炭酸化部で Cl^- 濃度が増加するが未炭酸化部では Cl^- が再びフリーデル氏塩に固定されるため Cl^- 濃度が変化しないことが明らかとなった。鉄筋コンクリート腐食試験より Cl^- の浸透速度が大きい可能性が示唆された。

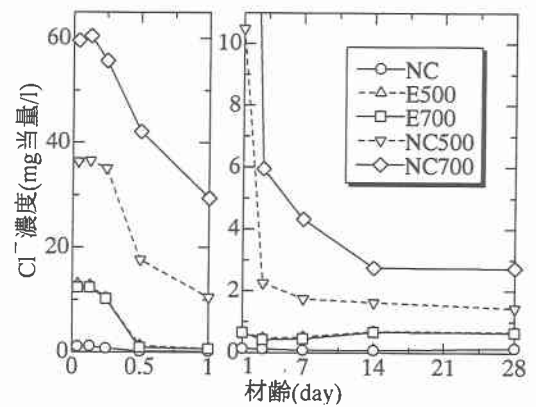


図 1 細孔溶液中の Cl^- 濃度の経時変化

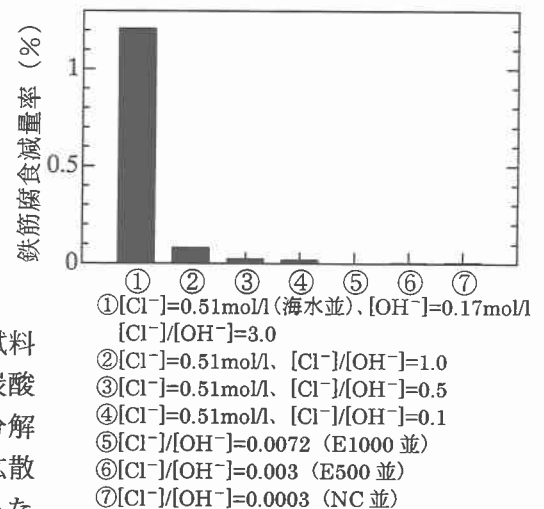


図 2 鉄筋腐食減量率

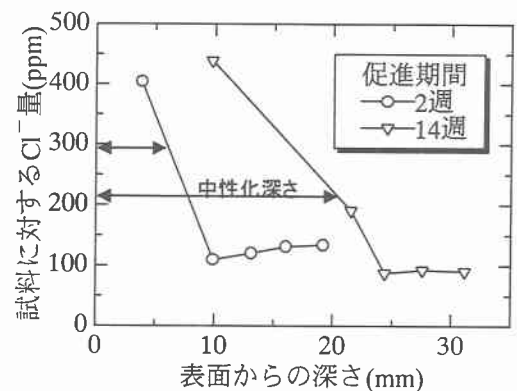


図 3 E500 水溶性塩分測定結果