

混合セメントを用いたモルタル中の鋼材腐食に対する塩化物イオンの限界濃度

太平洋セメント(株) 正会員 ○河野 克哉, 双龍洋灰工業(株) 梁 承奎
太平洋セメント(株) 正会員 山田 一夫, 市川 牧彦, 高橋 晴香

1. はじめに

コンクリート中に一定量以上の塩化物イオン(以下, Cl^-)が存在すると, 鋼材の不動態皮膜を破壊して腐食が生じる。この閾値となる Cl^- 濃度は, 鋼材発錆限界濃度(以下, C_{th})といい, 塩害に対する照査を行う上で重要となる。コンクリート標準示方書では, この C_{th} を材料・配合によらず一律 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ の制限値として与えている。これまで, 筆者らは C_{th} (単位: kg/m^3) が単位セメント量に比例することを明らかにしてきた¹⁾。このような背景の下で, 本研究では C_{th} に及ぼすセメント種類の影響を検討するため, 混合セメントを用いたモルタル発錆供試体に EPMA 法を適用することで各セメントの C_{th} を算定した。

2. 実験概要

(1) 使用材料ならびに配合

セメント(以下, C)には, 普通セメント(以下, N), フライアッシュセメント B 種(以下, FB), 高炉セメント B 種(以下, BB)の3種類を用いた。なお, 混合セメントは, それぞれ N の質量に対して内割でフライアッシュ II 種を 20%, 高炉スラグ微粉末 4000 を 40%置換し, B 種相当品とした。また, 水道水(以下, W), 陸砂, 消泡剤(以下, T)および 10%クエン酸アンモニウム水溶液に浸漬(60℃, 3 日間)して表面黒皮を除去した異形鉄筋(D13, SD 295 A)を用いた。配合は, $W/C=60\%$, $C=600\text{kg}/\text{m}^3$ および $W=360\text{kg}/\text{m}^3$ のモルタルとし, T を $C \times 0.05\%$ 添加して空気の連行を抑制した。

(2) 供試体ならびに Ponding 試験

供試体は, 図 1 のように鉄筋を斜めに配置し, 同一断面内でかぶりを連続的に変化させた。モルタルはブリーディングによって鉄筋との界面に欠陥が生じないように, 最小ブリーディング率となる一次水セメント比 24%のダブルミキシング法にて練り混ぜ, 鉄筋軸に鉛直な方向から打ち込んだ。材齢 28 日まで水中養生(20℃)した後, 供試体上面に 10%NaCl 水溶液を溜めて Cl^- を浸透させることで内部の鉄筋を腐食させた。また, 鉄筋軸方向の端面(2 面)を被覆して物質の出入りを防止し, 他の側面(2 面)は大気中から O_2 が供給できるように開放した。

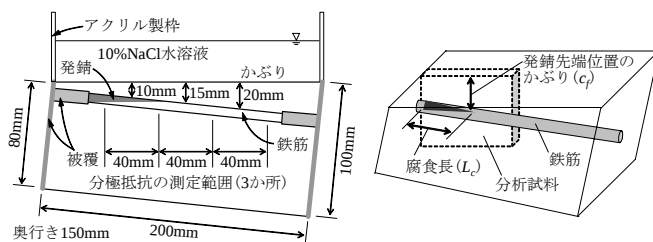


図 1 Ponding 試験の方法

図 2 試料採取の方法

(3) 測定項目

① 鉄筋の分極抵抗(以下, R_p): 所定の浸透期間で供試体上面に電流分散抑制型の対極センサ(測定範囲: 対極直下 $\phi 40\text{mm}$)を設置し, 図 1 のようにかぶり 10mm, 15mm および 20mm を中心とする位置で交流インピーダンス法(印加交流電圧 10mV, 周波数 10Hz~10mHz)にて測定した。 R_p は Cole-Cole プロットの近似円半径から算出した。

② モルタルの全 Cl^- 濃度分布: 所定の浸透期間で供試体を解体し, 図 2 のように鉄筋の発錆が進展している先端位置までの腐食長(以下, L_c)を測定した。また, 図 2 のようモルタル部分の試料(寸法 $75 \times 75 \times 10\text{mm}$)を切り出して EPMA 法による Cl^- の面分析を行った。なお, 面分析データから Cl^- が浸透するセメントペースト部分とそれ以外の細骨材部分を分離するために CaO , SiO_2 , SO_3 の構成元素である Ca, Si, S についても同時に分析した。 Cl^- の面分析データは水平方向に平均することで, 鉛直方向, すなわち Cl^- の浸透方向の全 Cl^- 濃度分布曲線を作成した。

3. 実験結果

(1) 鉄筋の分極抵抗ならびに腐食状態

図 3 はそれぞれ N, FB および BB を用いた供試体のかぶり 10mm, 15mm および 20mm 付近における鉄筋の R_p の経時変化を示したものである。なお, 図中には CEB による鋼材腐食判定基準も併記した。いずれのセメントにおいても, R_p は浸透期間とともに徐々に低下し, かぶりが減少するほど低い値を示した。かぶり 10mm 付近に着目すると, 浸透期間 64 週の R_p は FB がもっとも小さく, BB がもっとも大きく, N はそれらの中間となった。「中~高程度の腐食速度」と判定される $R_p=26\text{k}\Omega\text{cm}^2$ 以下となる浸透期間は, N の場

キーワード 混合セメント, 分極抵抗, EPMA, 塩化物イオン, 鋼材発錆限界濃度

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) 中央研究所 TEL. 043-498-3909

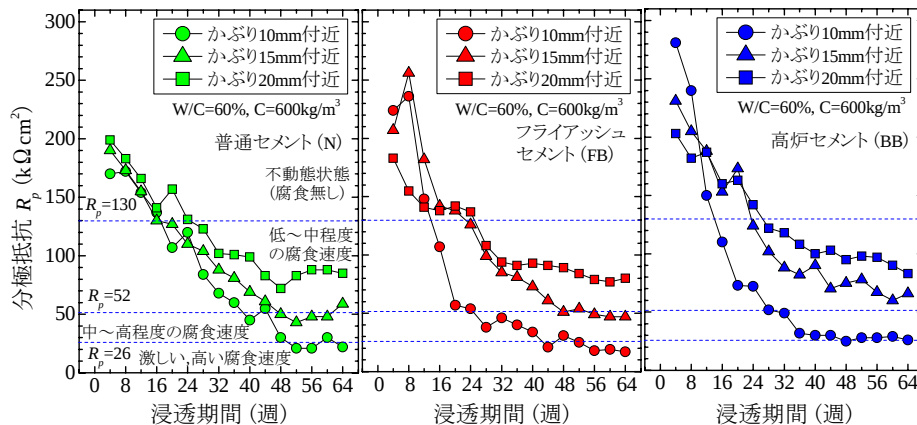


図3 鉄筋の分極抵抗の経過時間変化 (N, FB および BB)

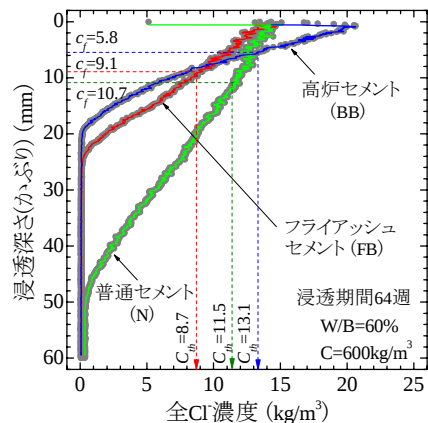


図5 全 Cl 濃度分布曲線

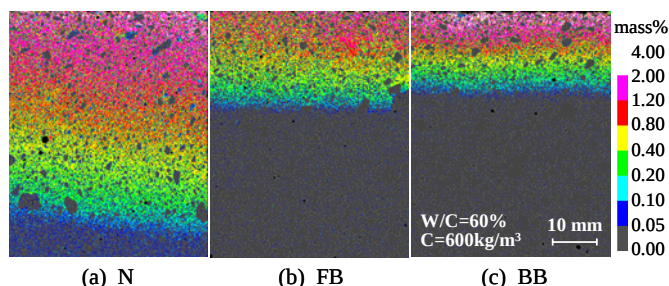


図4 Cl のカラーマッピング画像 (浸透期間 64 週)

合に 52 週, FA の場合に 44 週となり, FA の方が N よりも早期に腐食が進行しているものの, BB の場合は全浸透期間を通じて $R_p=26\text{ k}\Omega\text{ cm}^2$ 以下の値を示さなかった。そこで, 実際に浸透期間 64 週の各供試体を解体して鉄筋の状態を観察したところ, いずれのセメントの場合もかぶり 10mm 付近のみで鉄筋腐食が生じていた。鉄筋の L_c は, FB の場合がもっとも長く, BB の場合がもっとも短く, N の場合はそれらの中間であり, 鉄筋の R_p の傾向とよく一致した。

(2) EPMA によるモルタル中の Cl の面分析

図4は浸透期間 64 週における各供試体の Cl 分布をカラーマッピングしたものである。この図から N よりも混合セメント (FB ならびに BB) の方が Cl の内部浸透を抑制できることがわかる。図5は, これらの面分析の結果から, 各供試体の全 Cl 濃度分布曲線を作成したものである。なお, 図の横軸はモルタル中の全 Cl を単位容積質量当りの量に換算表示している。Cl が到達した深さは N の場合で 52mm 程度, FB の場合で 24mm 程度, BB の場合で 20mm 程度となり, 内部への遮塩性は N よりも FB ならびに BB の方が高いことがわかる。ただし, BB の場合は他のセメント (N ならびに FB) よりも表層部の Cl 濃度が高い傾向を示した。

(3) 全 Cl 分布曲線を利用した C_{th} の算出

各供試体において, 鉄筋の L_c から配筋の勾配にもとづいて発錆先端位置のかぶり (以下, c_f) を算出した値を図5中に記した。ここで c_f の位置に存在する鉄筋は発錆に対して

限界状態であると考えられる。このため曲線上で c_f に対応する全 Cl 濃度が C_{th} に相当するものと仮定できる。この考え方によって全 Cl 濃度分布曲線から算定された C_{th} は, 図5のように N の場合で 11.5 kg/m^3 となるのに対し, FB の場合は 8.7 kg/m^3 と低く, BB の場合は 13.1 kg/m^3 と高くなった。

(4) C_{th} に及ぼすセメント種類の影響

モルタル中で鋼材発錆に寄与する Cl は全 Cl の内で水和物に固定されず液相中に存在する自由 Cl のみである。混合セメントは N よりも Cl の固定能が高く, 自由 Cl は減少する。しかし発錆には液相中の Cl 濃度だけでなく OH 濃度も関与しており, それらの比の $[\text{Cl}]/[\text{OH}]$ で本質的に説明できる。混合セメントではアルカリイオンを吸着しやすい低 C/S 比の C-S-H が生成し, N の場合よりも OH 濃度が低下する。つまり混合セメントの場合, 水和物の Cl 固定による自由 Cl 濃度の低下と C-S-H のアルカリ吸着による OH 濃度の低下という 2 つの効果がバランスすることで発錆が決定する。同じ混合セメントの C_{th} でも FB と BB では N の C_{th} に対する大小関係が違ったことは, 混合材の種類によって 2 つの効果が寄与できる程度に差があり, $[\text{Cl}]/[\text{OH}]$ に影響したと考える。なお, 本試験で見られたような FB の C_{th} が低下する現象は, Thomas が暴露発錆供試体から得た結果²⁾とも整合している。

4. まとめ

混合セメント (FB, BB) を用いた場合, 遮塩性は N の場合よりも向上するものの, C_{th} は N の場合よりも FB で低く, BB で高くなり, 異なる傾向を示した。このことから, セメントの種類に依存して C_{th} は変化することがわかった。

【参考文献】

- 1) 河野克哉ほか: 単位セメント量が異なるコンクリートにおける塩化物イオンの鋼材発錆限界濃度, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集第 V 部, pp.507-508, 2006.
- 2) Michel Thomas : Chloride Thresholds in Marine Concrete, Cem. Concr. Res., Vol.26, No.4, pp.513-519, 1996.