

単位セメント量が異なるコンクリート中における塩化物イオンの鋼材発錆限界濃度

太平洋セメント(株) 正会員 ○河野 克哉, 山田 一夫, 細川 佳史, 双龍セメント(株) 梁 承奎

1. はじめに

コンクリート中の鋼材発錆は、内在あるいは外来する塩化物イオン(以下、 Cl^-)の作用により引き起こされる劣化現象であり、気象作用などの外的条件のほか、コンクリート自体の品質の関与も大きい。このため、鋼材腐食の性能照査では、コンクリートの配合、品質、使用環境などの様々な影響因子を考慮する形で、 Cl^- の発錆限界濃度(以下、 C_{th})を設定することが重要である。しかしながら、現行の示方書では C_{th} をコンクリートの配合にかかわらず、コンクリート単位容積当りの量(以下、総量)として一律に $1.2kg/m^3$ と規定している。このため、本研究では、コンクリートの配合、とくに単位セメント量の違いに着目して鋼材発錆試験を行い、適切な C_{th} の設定方法について再考察した。

2. 実験概要

(1) 使用材料ならびに配合：普通セメント(以下、C)、小笠産陸砂(以下、S)および最大寸法 10mm の岩瀬産碎石(以下、G)を、また、空気の混入をできるだけ抑制する目的で消泡剤(以下、T)を用いた。腐食させる鋼材は、10%クエン酸アンモニウム水溶液に浸漬(60℃、3 日間)して表面の黒皮を除去した異形鉄筋(D13, SD 295 A)とした。配合は、表 1 に示すように水セメント比を 60%一定の下で、単位セメント量を $300\sim600kg/m^3$ の 5 水準に変化させた。供試体作製に必要なコンシステンシーを十分に確保するため、 $C=400kg/m^3$ 以下の配合はコンクリートとし、 $C=400kg/m^3$ 以上の配合はモルタルとした。なお、 $C=400kg/m^3$ の配合では粗骨材の有無が実験結果に及ぼす影響を考慮する観点から、コンクリートならびにモルタルの両方を準備した。

(2) 供試体：供試体は図 1 に示すように鉄筋を斜めに配置し、かぶりを断面内で連続的に変化させた。コンクリート(もしくはモルタル)は、ブリーディングによる鉄筋との界

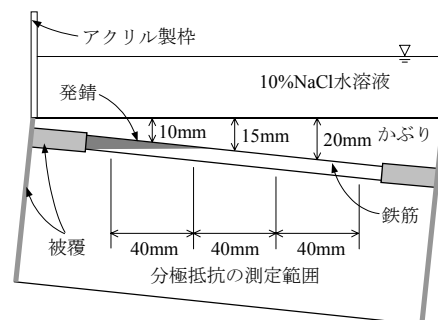


図 1 供試体ならびに Ponding 試験の方法

面で欠陥が生じないように一次水セメント比 24%のダブルミキシング法で練り混ぜ、鉄筋軸に鉛直な方向から打ち込んだ。供試体は、材齢 28 日まで水中養生(20℃)した。

(3) Ponding 試験：図 1 に示すように上面に 10%NaCl 水溶液を溜めることで供試体に Cl^- を浸透させた。その後、所定の浸透期間において、以下の測定を行った。

- ① 分極抵抗：かぶり 10mm, 15mm および 20mm の位置で、それぞれ鉄筋の分極抵抗を交流インピーダンス法で測定し、発錆を検知する指標とした。なお、本測定では鉄筋の測定範囲を対極直下の約 4cm に限定するセンサを用いた。
- ② 全 Cl^- 濃度：発錆した供試体は、図 2 に示すように分析試料を切り出して、EPMA による塩素の面分析から濃度プロファイルを作成し、発錆フロント位置における Cl^- 濃度が発錆限界に相当するものと仮定して C_{th} を算定した。

3. 実験結果

(1) 鋼材腐食の状況：いずれの単位セメント量においても、かぶり 10mm における鉄筋の分極抵抗は浸透期間とともに低下し、浸透 7 週で $75\sim115k\Omega\cdot cm^2$ 、浸透 17 週で $20\sim46k\Omega\cdot cm^2$ となった。CEB による判定基準では、およそ浸透 7 週の供試体は「低～中程度の腐食速度」、浸透 17 週の供試体は「中～高程度の腐食速度」に相当する。実際に解体して内部鉄筋を目視観察したところ、いずれの供試体も浸透

表 1 配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (L/m ³)	T (C×%)
C300	60	58.6	180	300	1105	300	0.02
C400			240	400	867		
M400		100	300	500	1647	0	
M500			360	600	1409		
M600			360	600	1170		

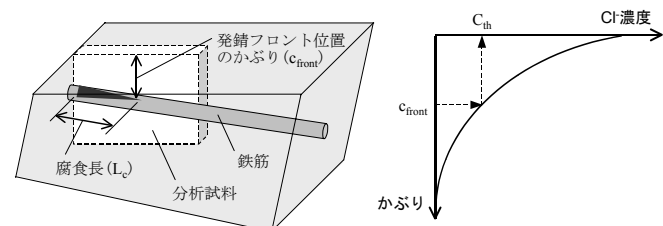


図 2 EPMA 用試料の採取方法ならびに発錆限界濃度の算定方法

キーワード 単位セメント量, 塩化物イオン, 鋼材発錆限界濃度, 総量, セメント従量

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

表2 発錆フロント位置におけるかぶり(浸透17週)

配合名	C300	C400	M400	M500	M600
c_{front} (mm)	9.4	8.2	8.1	7.8	7.7

7週では腐食しておらず、浸透17週において腐食を確認することができた。表2は、浸透17週の供試体から発錆フロント位置におけるかぶり(以下、 c_{front})を算出した結果である。なお、かぶり15mmならびに20mmの位置では、いずれの単位セメント量においても、浸透17週までの分極抵抗は $130\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上(不導態状態)であった。

(2) 全Cl⁻の濃度プロファイル：図3は、浸透17週における全Cl⁻の濃度プロファイルを示したものである。左側の図はCl⁻濃度を総量[kg/m^3]として縦軸に表記したものであり、単位セメント量によってプロファイルが変化している。一方、右側の図は縦軸に示したCl⁻濃度をコンクリート中のセメントに対する質量比(以下、セメント従量)[$\text{C}\times\%$]として表記したものである。この場合、単位セメント量にかかわらずプロファイルがほぼ一致する形となった。このことは、Cl⁻の浸透はセメントペースト部分で生じる現象であり、コンクリート(もしくはモルタル)断面内の骨材部分などの局所的なCl⁻分布には影響を及ぼすものの、セメントペースト組成が一定であれば(W/Cが一定)、全体的な断面内のCl⁻分布に大きく影響しないことを意味するものと考えられる。

(3) 単位セメント量と発錆限界濃度の関係：図4は、表2に示した c_{front} に対応するCl⁻濃度(C_{th})を図3の濃度プロファイルから算定し、単位セメント量との関係について整理したものである。左側の図は総量表記した C_{th} の場合であり、単位セメント量が増加すると C_{th} は直線的に増加した。一方、右側の図はセメント従量表記した C_{th} の場合であり、 C_{th} は単位セメント量にかかわらず一定となった。これらの結果は、鋼材発錆に単位セメント量が直接関与したことを示唆している。コンクリート中で鋼材発錆に寄与するCl⁻

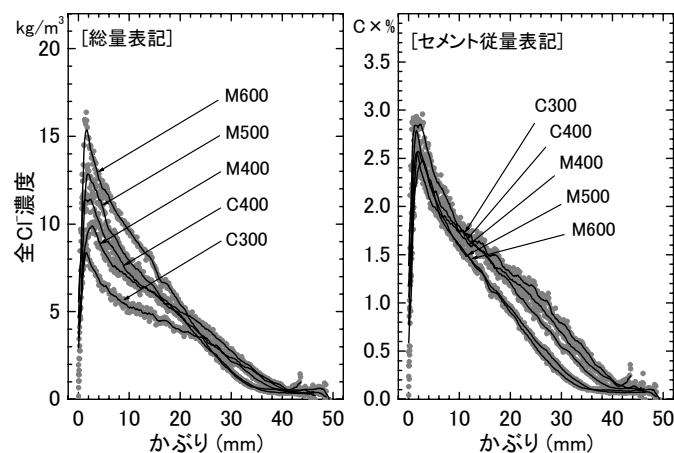


図3 供試体のCl濃度プロファイル(浸透17週)

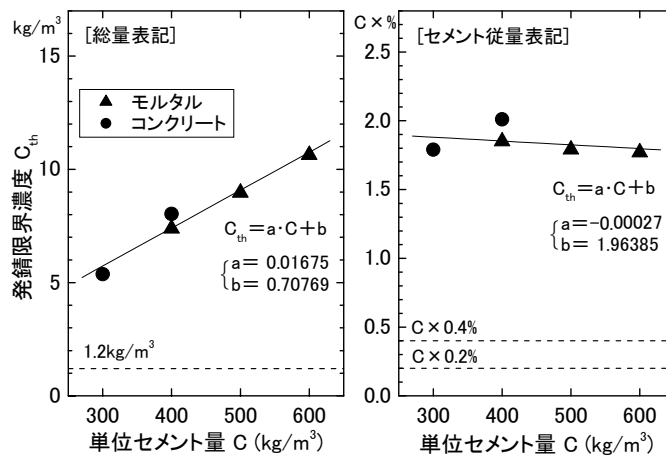


図4 単位セメント量と発錆限界濃度の関係

は、セメント水和物に固定されず液相中に存在する自由Cl⁻である。すなわち、コンクリート中のCl⁻量(総量)を一定とすると、単位セメント量が多い配合では固定されるCl⁻量も多くなり、相反する形で液相中のCl⁻濃度は低下する。このことが、単位セメント量に強く依存する形で総量表記の C_{th} が増加した原因である。発錆に関わるCl⁻量はコンクリート中の総量ではなく、セメントペーストの量とその組成に対応した変化量であることを考えると、 C_{th} をセメント従量として設定する方が合理的である。このような観点から、欧州規格EN206では鉄筋コンクリート中のCl⁻をセメント従量で0.2%もしくは0.4%に規制している。なお、 C_{th} として示方書では $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ (セメント従量で $\text{C}=300\sim600\text{kg}/\text{m}^3$ の場合に0.2~0.4%相当)を採用しているが、本実験で得られた C_{th} はこの値よりもかなり大きいものであった。本実験ではブリーディングや気泡を低減させたため、鉄筋とコンクリートの密着性が高い状態と考えられ、このような密着性が発錆に与える影響は大きいことが知られている¹⁾。したがって、現実のコンクリートで C_{th} を設定する際、本実験で得た C_{th} の値をそのまま適用できないことは自明であるが、少なくとも、セメント従量とした C_{th} の表現方法を採用することで発錆に与える配合的要因まで一括した形で性能照査が行えるものと考えられる。

4. まとめ

単位セメント量異なるコンクリートにおいてCl⁻浸透による鋼材発錆試験を実施し、EPMAを利用した全Cl⁻濃度プロファイルから発錆限界濃度を算定した。その結果、発錆限界濃度はセメント従量表記することで単位セメント量にかかわらず一定となることが実験的に検証できた。

参考文献：例えば、1) M. A. Baccay et al.: Influence of Bleeding on Minute Properties and Steel Corrosion in Concrete, J. Adv. Concr. Tech, 2, [2], 187-200, (2004).