

論文 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の表記に関する一考察

細川 佳史^{*1}・森 大介^{*1}・山田 一夫^{*2}・大竹淳一郎^{*3}

要旨：本論文では、塩水乾湿繰返し環境下に暴露したコンクリートの塩化物イオン(Cl^-)の鋼材発錆限界濃度(C_{th})について検討し、コンクリート単位体積中の総量 kg/m^3 で C_{th} を表記するよりも、単位セメント量の従量 $C \times \text{mass}\%$ で表記すれば、単位セメント量の影響による C_{th} の変動が低減されることを明らかにした。さらにこの実験結果が、鋼材発錆と pH の関係ならびにセメント水和物による Cl^- 固定平衡という化学的現象に基づいた C_{th} の算定モデルにより定性的に説明可能であることを示した。

キーワード：塩化物イオン、鋼材発錆限界濃度、固定化、pH、総量、セメント従量

1. はじめに

RC 構造物の耐久性設計手法として、塩害による鋼材発錆の照査技術の開発が進められている。こうした技術では、塩化物イオン(Cl^-)の移動を拡散や移流などの物理現象に立脚したモデルで解析し、鋼材近傍の Cl^- 濃度が鋼材発錆限界濃度(C_{th})に達した時点を RC 構造物の寿命として照査する手法が主流となっている。従って、このような手法による寿命予測は C_{th} が重要な役割を果たす。わが国では、土木学会コンクリート標準示方書(示方書)に見られるように、この C_{th} をコンクリート単位体積あたりの Cl^- の質量(総量) kg/m^3 で表記する例が多い。一方欧米の文献では、 C_{th} を単位セメント量に対する質量比(セメント従量) $C \times \text{mass}\%$ として表記する場合が多く、例えば ACI の報告書では、セメント従量による表記に統一して記述することが明記されている¹⁾。

総量による表記は配合に依存せずどのようなコンクリートでも C_{th} は一定であるが、セメント従量で C_{th} を表記した場合、コンクリート単位体積中に実際に含まれる Cl^- 量は単位セメント量により変化する。逆に、単位セメント量が異なってもセメント従量で表記した C_{th} が一定とみなせる場合、これを総量に変換すれば単位セメント量に伴

って総量表記の C_{th} は変化することになる。従って、単位セメント量を変化させて寿命予測をした場合、同一の照査方法であっても C_{th} の表記により異なった結果を生ずることになる。こうした表記の相違による影響はセメントやコンクリートの Cl^- 量規制値に次に述べるような大きな影響を及ぼす。

2003 年 11 月の JIS R 5210 の改正で、普通ポルトランドセメント(OPC)の Cl^- の規格値が“0.02%以下”から“0.035%以下”に変更された。この変更は、コンクリート中の Cl^- 総量規制“0.30 kg/m^3 以下”(JIS A 5308)を遵守することを前提として結論されたものである²⁾が、この総量規制は PC グラウトなどにも適用される。従って、 Cl^- を 0.035%含む OPC を使用した $W/C = 45\%$ のペースト(単位セメント量約 1300 kg/m^3)で配合設計した PC グラウトは総量規制に抵触する可能性が出てくる。このように単位セメント量が多い場合、JIS に適合した OPC であってもコンクリートの総量規制のために使用できない場合が生じる。しかし、コンクリートの規制値が欧米諸国の EN206 や ACI318 のようにセメント従量で規定されていれば、こうした可能性は抑制されることになる。事実、欧州におけるグラウトの規格値はセメント従

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部セメント化学グループ 工修(正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部セメント化学グループリーダー 工博(正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部コンクリートソリューショングループ(正会員)

量として $C \times 0.1 \text{mass\%}$ となっている³⁾。

このように、 C_{th} やコンクリートの Cl^- 量規制の表記を総量とするかセメント従量とするかは、コンクリートの設計手法に大きな影響を及ぼすことになる。しかしながら、これまで総量とセメント従量それぞれの表記法としての妥当性・合理性を検討した例はほとんどないため、上記のように単位セメント量が増加する場合には、総量とセメント従量といった表記法により C_{th} やコンクリートの Cl^- 量規制の値に差異が生じ、現実にはどちらが適切であるか、判断がつかない場合が起こりうる。

そこで本研究は C_{th} に着目し、単位セメント量が増加した場合において、総量とセメント従量それぞれの表記法としての妥当性・合理性を検討することを目的として実施した。

2. 実験による C_{th} の測定

単位セメント量(B)が増加した場合における総量とセメント従量それぞれの表記法としての妥当性の評価としては、単位セメント量の異なる供試体を用いた発錆試験から C_{th} を実験により求め、総量ならびにセメント従量の双方で表記した場合を比較することが有効と考えられる。ここでは、水セメント比が一定で単位セメント量の異なる供試体に鋼材を設置し、塩水環境に暴露して鋼材を発錆させ C_{th} を測定する実験を実施した。

2.1 供試体の配合

本試験に用いた供試体の配合を表-1 に示す。本配合は W/B を 61% に固定し単位セメント量を 283 kg/m^3 から 501 kg/m^3 まで増加させた計 4 配合を試験に供した。粗骨材最大寸法は 10mm である。セメントは市販の OPC を使用した。OPC の Cl^- 含有量は $0.009 \text{mass\%}$ であった。

2.2 試験方法

(1) 供試体の概要と養生及び暴露条件

作製した供試体の概要を図-1 に示す。自然電位の測定用にリード線を予め鋼材に接続し、暴露面からのかぶり厚さが 20mm となるよう鋼材を型枠に設置した。供試体は型枠への打込み後材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで標準水中養生を実施し

表-1 供試体の配合

No.	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	S/B (%)	単位量 (kg/m^3)		28d 圧縮強度 (MPa)	備考
					W	B		
1	4.5	61	49	—	173	283	33.6	コンクリート
2			51	—	200	327	33.6	
3			100	3.18	267	437	37.2	モルタル
4				2.45	306	501	36.2	

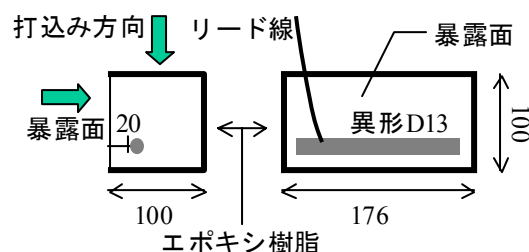


図-1 供試体の概要

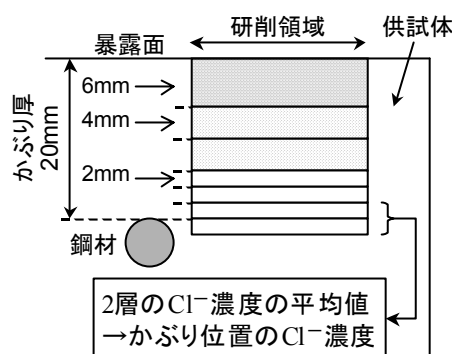


図-2 C_{th} の測定方法の概要

た。材齢 28 日で測定した圧縮強度(JIS A 1108)を表-1 に併せて示す。圧縮強度は全ての配合でほぼ同一レベルであるとみなした。養生後、暴露面以外をエポキシ樹脂でシールし、3%NaCl 水溶液浸せき 3 日 + 20°C60%RH 気中乾燥 4 日を 1 サイクルとした塩水乾湿繰返し環境に暴露した。

(2) 鋼材発錆のモニタリング方法

鋼材発錆の判断は ASTM C 876 に準拠して鋼材の自然電位が $-0.35(\text{V vs CSE})$ 以下となった時点とし、この時点で塩水乾湿繰返し環境への暴露を停止した。自然電位の測定は、飽和カロメル電極を照合電極として示方書[規準編]JSCE-E 601 - 2000 に準拠して測定した。なお、測定の前処理として、供試体を水中に 3 時間浸せきさせた後、供試体が乾燥しないように湿布で覆って 1 日保管し供試体表面の含水状態を調整した。

(3) C_{th} の測定方法

鋼材の発錆後、暴露を停止した供試体のかぶり深さにおける全 Cl^- 濃度が、求める C_{th} となる。 C_{th} の測定方法の概要を図-2 に示す。暴露面上の $7\text{cm} \times 5\text{cm}$ の領域を、図-2 に示す厚さでフライス盤を用いて暴露面から順次研削して粉末試料をサンプリングし、かぶり深さを挟んだ2層の試料の全 Cl^- 濃度を測定して両層の平均値を求め、これをかぶり深さにおける全 Cl^- 濃度、つまり C_{th} とした。全 Cl^- 濃度の測定は JIS A 1153:2003 に準拠した。

3. 鋼材発錆限界濃度 C_{th} の算定モデル

ここでは、既往の研究による鋼材腐食の要因に基づいて C_{th} を算定するモデルを導き、単位セメント量が増加した場合において、総量およびセメント従量それぞれにより表記した C_{th} を計算により求める方法について述べる。

3.1 空隙水の組成と鋼材発錆の関係

コンクリート中における鋼材の発錆条件は、空隙水の OH^- による鋼材表面保護膜の保持形成と Cl^- による保護膜破壊の平衡関係に依存しており、 OH^- 濃度 $[\text{OH}^-]$ と鋼材発錆時の Cl^- 濃度 $[\text{Cl}^-]_{th}$ の間に次の関係が成り立つことが知られている⁴⁾。

$$[\text{Cl}^-]_{th}/[\text{OH}^-] = K_{th} \quad (1)$$

式(1)の K_{th} として Hausman は 0.6、Diamond は 0.3 を報告している⁴⁾。このように鋼材発錆と空隙水の pH とは密接な関係がある。

3.2 全 Cl^- 濃度で求めた鋼材発錆限界濃度

上記から、鋼材発錆限界濃度は空隙水の $[\text{Cl}^-]_{th}$ によって表すことが可能となるが、空隙水の Cl^- 濃度の測定には硬化体からの空隙水の圧搾抽出といった操作が必要で、より簡便な酸溶解の抽出により測定される全 Cl^- 濃度によって鋼材発錆限界濃度を表す方が好ましい。

コンクリート硬化体中の Cl^- は、一部がセメント水和物によりフリーデル氏塩などとして固定され、空隙水中の Cl^- (自由 Cl^-) は固定された Cl^- (固定 Cl^-) と平衡関係を保持しながら存在する。その平衡関係については Freundlich 式や Langmuir 式などの吸着平衡モデルの適合性が Tang らによ

って報告されている⁵⁾。Tang らの検討によれば、OPC を用いた $W/C = 0.4 \sim 0.8$ の範囲のペースト及びモルタルにおいて、固定 Cl^- と自由 Cl^- の間に次の平衡モデルが成り立つ⁶⁾。

$$C_b = 3.57 \times 10^{-3} W_{hyd} \cdot c^\gamma \quad (2)$$

ここに C_b は固定 Cl^- 濃度 ($\text{kg}/\text{m}^3_{\text{conc}}$)、 c は自由 Cl^- 濃度 ($\text{kg}/\text{m}^3_{\text{sol}}$) である。なお、本論文では、 Cl^- 濃度を硬化体単位体積あたりの質量で表す場合は大文字、空隙水単位体積あたりの質量で表す場合は小文字で示すものとする。式(2)の γ は定数 ($= 0.3788$) であり、 W_{hyd} は硬化体単位体積中の水和物量 ($\text{kg}/\text{m}^3_{\text{conc}}$) で次のように表される。

$$W_{hyd} = I^\infty B \alpha \quad (3)$$

ここに、 I^∞ は終局結合水量、 α はセメントの水和率、 B は単位セメント量 ($\text{kg}/\text{m}^3_{\text{conc}}$) を表す。

一方、全 Cl^- を C_T ($\text{kg}/\text{m}^3_{\text{conc}}$) とすると、これは固定 Cl^- と自由 Cl^- の和であるから次のように表される。

$$C_T = \varepsilon + C_b \quad (4)$$

ここに、 ε は硬化体の単位体積に占める空隙水の体積割合 ($\text{m}^3_{\text{sol}}/\text{m}^3_{\text{conc}}$) である。

以上により空隙水の鋼材発錆限界濃度を全 Cl^- によって表すことが可能となる。すなわち、鋼材発錆限界に達した空隙水の自由 Cl^- 濃度を c_{th} とし、そのときの固定 Cl^- 濃度、全 Cl^- 濃度をそれぞれ C_{bth} 、 C_{Th} とすれば、空隙水の pH と式(1)により $[\text{Cl}^-]_{th}$ つまり c_{th} が求められ、 c_{th} と式(2)、式(3)、式(4)により C_{Th} が算定されることになる。

3.3 硬化体の空隙率 ε の算定

式(4)に含まれる ε は一般に硬化体の空隙率として測定される値である。 C_{th} を計算により求めるには、 B と ε の関係を明らかにする必要があるが、一般に ε は材料の種類、配合条件、養生条件、水和率など多くの要因に依存して複雑に変化するため B と ε の関係を理論的にモデル化するのは困難である。ここでは、 ε に関する種々の経験則を活用し、標準水中養生した硬化体の ε の測定値から単位セメント量と ε の関係の実験式を導出する。

図-3 は、既往の文献⁷⁾で報告されたデータを使用して、標準水中養生されたコンクリート (使

用セメントは OPC のみ) の材齢 28 日における圧縮強度 f_c と ε の関係を示したものである。ここの ε の測定は ASTM C642-97 “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hard- ened Concrete” に準拠している。本方法は硬化体の絶乾状態と飽水状態の密度差から ε を測定する方法であり、空隙水の体積割合としての ε を評価する方法として最適と考えられる。図-3 のデータを直線回帰することにより、

$$f_c = -2.49\varepsilon + 72.1 \quad (5)$$

が得られた。一方、圧縮強度とセメント水比 B/W (ここに W : 単位水量 $\text{kg}/\text{m}^3_{\text{conc}}$) は

$$f_c = p(B/W) + q \quad (6)$$

として一般に表される。従って、式(5)と式(6)から ε と B/W の関係を表す式として

$$\varepsilon = (-p(B/W) - q + 72.1) / 2.49 \quad (7)$$

が得られる。 p と q については、第 2 章で述べた試験において作製した 3 水準の B/W ($=1.41 \sim 1.89$) のコンクリート供試体から、 $p = 35.34$, $q = -23.80$ を得た (決定係数 $r^2 = 0.995$)。

ただし、上述したとおり、式(7)は限られた測定データから得られた本研究の範囲で有効な実験式であり、いかなる場合にも適用可能な汎用性を有するものではない。

3.4 総量及びセメント従量で表記した C_{th}

以上のように、鋼材発錆時における空隙水の pH と自由 Cl^- 濃度の関係、ならびに自由 Cl^- と固定 Cl^- 濃度の平衡モデルを用いて、与えられた配合条件 (B と B/W) における C_{Th} を算定することができることを示した。式(2)~(7)により C_{Th} を c_{th} から求める式は

$C_{Th} = (u(B/W) + v + wI^\infty B\alpha \cdot (c_{th})^{\gamma-1}) \cdot c_{th}$ (8)
となる。ここで、 u, v, w は定数でそれぞれ、 -14.19 , 38.51 , 3.57×10^{-3} である。また式(1)から c_{th} を pH を用いて表すと

$$c_{th} = 10^{(\text{pH}-14)} \cdot K_{th} \quad (9)$$

となる。

さて、式(8)は鋼材発錆限界濃度を総量で表記した式に相当するが、これをセメント従量で表記するためには、式(8)を単位セメント量 B で除すれば

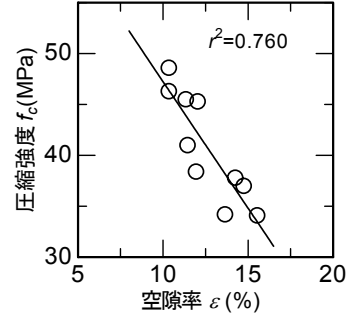


図-3 圧縮強度 f_c と空隙率 ε の関係 (既往の文献⁷⁾ のデータを用いたプロット)

よい。これを $\hat{C}_{Th}$ で表せば、

$$\begin{aligned} \hat{C}_{Th} &= \frac{C_{Th}}{B} \times 100 \\ &= \left(\frac{u(B/W) + v}{B} + wI^\infty \alpha \cdot (c_{th})^{\gamma-1} \right) \cdot c_{th} \times 100 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。以上、ここまで記した鋼材発錆限界濃度の表記方法をまとめて、総量表記を C_{Th} 、セメント従量表記を $\hat{C}_{Th}$ とし、両者を総称して鋼材発錆限界濃度を表すときは C_{th} で表すこととする。

4. 結果及び考察

第 2 章による C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ の測定結果と、式(8)~(10)を用いた算定モデルによる C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ の計算結果を図-4 および図-5 にそれぞれ示す。

ここで、計算に用いた諸定数 (表-2) について説明する。 K_{th} は Hausman の値、 I^∞ は Tang らの値⁵⁾を用い、セメントは完全水和状態と仮定して $\alpha = 1$ とした。空隙水の pH は、通常 Na^+ や K^+ の存在により石灰飽和状態よりも高い 13 以上の pH に保たれる¹⁾。ここでは 13.6 を用いた。

4.1 実験による C_{th} の測定結果

ここでは、第 2 章の実験によって測定した C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ の測定結果について着目する。 C_{th} を総量で表した C_{Th} は、 B の増加に伴い約 $3.2\text{kg}/\text{m}^3_{\text{conc}}$ から $7.3\text{kg}/\text{m}^3_{\text{conc}}$ まで約 2.3 倍増加した。一方、 C_{th} をセメント従量で表した $\hat{C}_{Th}$ についてみると、測定値は B の変化に対し最小で $0.98B \times \text{mass}\%$ 、最

表-2 C_{Th} の算定に使用した諸定数

K_{th}	pH	I^∞	α
0.6	13.6	1.25	1.0

大で $1.46 B \times \text{mass}\%$ と約 1.5 倍となった。いずれの場合も増加傾向を示したが、 C_{Th} の変化に比較すれば $\hat{C}_{Th}$ の変化量は小さい。このことは、異なる単位セメント量に対する C_{Th} の表記法としてセメント従量が妥当であることを示している。

4.2 算定モデルによる C_{Th} の計算結果

算定モデルにより求めた総量表記に相当する C_{Th} は、実験による測定値と同様に B の増加に対し増加した。ただしその値は約 $4.1 \text{ kg/m}^3_{\text{conc}}$ から $6.3 \text{ kg/m}^3_{\text{conc}}$ までで測定値に認められた変化より小さい。一方、セメント従量表記に相当する $\hat{C}_{Th}$ は、測定値の傾向と異なり B の変化に対し若干減少の傾向を呈したが、実験による測定値と同様、 C_{Th} の変化に比較し $\hat{C}_{Th}$ の変化量が小さい結果となった。従って、算定モデルによる計算によっても、セメント従量が C_{Th} の表記法として妥当であることが示された。

4.3 B の変化に対する C_{Th} の変動

実験による測定値と算定モデルによる計算値を比較すると、 $\hat{C}_{Th}$ については測定値と計算値で僅かながら逆の傾向となり、また、 C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ 共に、測定値と計算値は完全には一致しなかった。しかし、測定値及び計算値は、共に、セメント従量の妥当性を示唆する結果を示した。これらの結果について、以下のとおり考察した。

表-3 に示した数値は、 B が $283 \sim 501 \text{ kg/m}^3_{\text{conc}}$ まで変化した場合における C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ の変動を、それぞれの最大値と最小値の差を最小値で除して百分率により表したものである。これらの値は、安全側の設定として、 C_{Th} やコンクリート Cl^- 規制値を C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ の最小値に設定した場合に、これら安全側の設定値が単位セメント量の変化により、現実に発錆する値からどれだけ変動するかを示した値に相当する。表-3 の値から、測定値および計算値のいずれにおいても、 B の増加に対する $\hat{C}_{Th}$ の変動が、 C_{Th} に比べ約 6~6.5 割ほど低く抑えられていることがわかる。このように、表-3 に示した変動は測定値と計算値のいずれにおいても同様な傾向を示したことから、 C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ は B により変化し、その変化の度合いが C_{Th} と

表-3 B の変化に対する C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ の変動

	C_{Th}	$\hat{C}_{Th}$
測定値	128%	49%
計算値	54%	19%

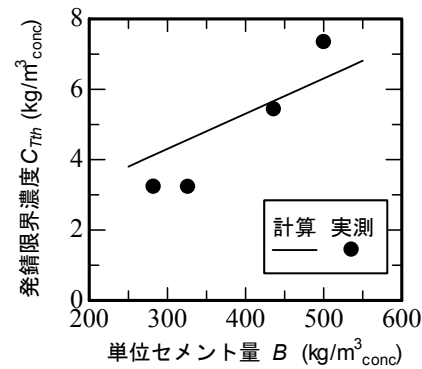


図-4 C_{Th} の測定結果と算定モデルの計算結果

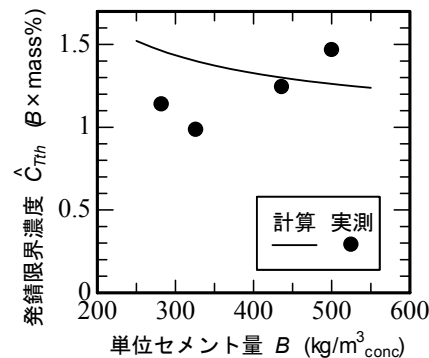


図-5 $\hat{C}_{Th}$ の測定結果と算定モデルの計算結果

$\hat{C}_{Th}$ の間で大きく異なるという理論的予測が実験によって裏付けられた。

従って、 C_{Th} 、ならびに、 C_{Th} によって設定されるコンクリートの Cl^- 規制値を全 Cl^- 濃度で表す場合に、全 Cl^- 濃度を総量で表記すれば、この値は単位セメント量の変化に伴い大きく変動し、セメント従量で表記すれば単位セメント量の変化に対する変動は小さく抑えられることから、 C_{Th} ならびにコンクリートの Cl^- 規制値はセメント従量による表記が好ましく、かつ妥当な方法であると言えることができる。また、その妥当性については、鋼材発錆時の空隙水組成の平衡や水和物による Cl^- の固定に基づいた考察によって理論的に説明できることから、セメント従量による表記はコンクリート内部で生じている現象に基づいた合理的な表記であると言えることもできる。

ただし、 C_{th} の算定モデルを導出する際に、本研究で利用した鋼材発錆時の空隙水組成の平衡関係や、水和物による Cl^- の固定モデルは、コンクリート内部における化学的な現象であり、同じく鋼材発錆に影響を及ぼすと考えられる、硬化体や鋼材周辺の微細構造といった物理的要因の影響については、ここでは考慮されていない。一方、コンクリート中における鋼材の発錆については、コンクリートと鋼材の密着度が重要であり、鋼材界面の空隙の存在が発錆を誘発するとの報告がある⁸⁾。従って、この報告を考慮すれば、本研究の実験は、 B の増加によりブリーディングが低減されて鋼材界面がより密実となったため、 B の増加に対する C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ の変動が計算値より高くなったものと推察される。また、 $\hat{C}_{Th}$ の測定値と計算値とが逆の傾向を示したことについては、式(10)をみれば B の増加に対し $\hat{C}_{Th}$ の計算値が減少するのは自明であるが、上述のとおり、 B の増加による鋼材界面の密実化が発錆の抑制に寄与したため、実験による $\hat{C}_{Th}$ の測定値が計算値に反して増加したと考えることができる。このように、鋼材界面の密実性といった物理的要因も C_{th} に大きな影響を及ぼすことから、今後はこうした要因についても検討を加える必要があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究は、 Cl^- の鋼材発錆限界濃度 C_{th} を総量あるいはセメント従量で表記する場合に、どちらの表記法によれば C_{th} あるいはコンクリートの Cl^- 量規制値を設定する上で合理的であるかを検討するため、理論的および実験的なアプローチにより実施し、以下の知見を得た。

- (1) コンクリート中の鋼材発錆時における空隙水の pH と自由 Cl^- 濃度の平衡関係、ならびにセメント水和物による Cl^- の固定モデルに基づき、総量およびセメント従量で表した C_{th} をそれぞれ計算によって求める算定モデルを理論的に導出した。
- (2) 鉄筋を設置した単位セメント量 B の異なるコンクリートの塩水暴露試験により総量およびセメント従量で表した C_{th} を測定し、算定モデルによ

り計算される値と比較した。その結果、セメント従量で表した C_{th} の B の変化による変動量が、総量で表した C_{th} の変動量に比べ約 6~6.5 割ほど低減されることが試験による測定値及び計算値の双方で認められた。

- (3) C_{th} あるいはコンクリートの Cl^- 量規制値はセメント従量による表記がより妥当であり、セメント従量は空隙水組成の平衡関係や Cl^- の固定といったコンクリート内部で生じる化学的現象に基づいた合理的な表記であると考えられた。また、鋼材界面の密実性といった物理的要因を考慮することによって、 C_{Th} 及び $\hat{C}_{Th}$ における測定値と計算値の差を説明することも可能となった。

参考文献

- 1) ACI Committee 222: ACI 222R – 01 Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, MANUAL OF CONCRETE PRACTICE, p.10, 2001
- 2) 日本規格協会：日本工業規格 JIS R 5210「ポルトランドセメント」, 2003
- 3) European Committee for Standardization: EN447: 1996 Grout for prestressing tendons – Specification for common grout, p.3, 1996
- 4) Bentur, A. *et.al.* : *Steel Corrosion in Concrete*, E & FN SPON, pp.24 – 28, 1997
- 5) Tang, L. *et.al.*: Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars, *Cement & Concrete Research*, Vol.23, pp.247 – 253, 1993
- 6) Tang, L.: On Chloride Diffusion Coefficients Obtained by Using the Electrically Accelerated Method, RILEM international workshop “Chloride Penetration into Concrete”, 1995
- 7) 東京大学国際・産学共同研究センター：「高品質吹付けコンクリートの開発」各種混和材料を変化させた吹付け実験 共同研究報告書, pp.66 – 74, 2000
- 8) Mohammed, T. U., *et.al.*: Chloride-Induced Corrosion of Steel Bars in Concrete with Presence of Gap at Steel-Concrete Interface, *ACI Mat. J.*, Mar.-Apr. pp. 149 – 156, 2002