

鋼材発錆限界濃度の表記法に基づいたコンクリートの塩化物イオン含有量規制及びRC 構造物の塩害照査に関する一考察

太平洋セメント(株) 正会員 ○細川佳史, 森 大介, 山田一夫, 大竹淳一郎

1 はじめに

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、わが国では、塩化物イオン(Cl^-)の鋼材発錆限界濃度(C_h)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が、欧米では、ACI の報告書¹⁾にみられるように C_h 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い。このような C_h の表記法の相違については、これまで詳細に検討された報告例はなく、 C_h の表記法の妥当性・合理性の検討が求められている。本報では、単位セメント量やセメント種類が異なる場合の C_h を実験によって求め、 C_h の表記法の相違がコンクリートの Cl^- 含有量規制及び RC 構造物の塩害の照査に及ぼす影響について考察した。

2 実験の概要

2.1 供試体の配合

表 1 に供試体の配合を示す。用いたセメントは市販の OPC(N)、および、N に高炉スラグ微粉末(SG) ($\text{Bl}^1 4000\text{cm}^2/\text{g}$)と石灰石微粉末(LS) ($\text{Bl}^1 5400\text{cm}^2/\text{g}$)を、それぞれ質量比で 64.3, 14.3, 21.4 の割合で混合した汎用強度コンクリート用のセメント²⁾ (BL)の 2 種類である。水粉体比 W/B は、N, BL 共に、28d 材齢圧縮強度が 36MPa となるよう設定した。単位セメント量 B はコンクリート、モルタルそれぞれで分離が生じない程度まで増加させた。以上、表 1 に示す計 7 配合を試験に供した。なお全ての配合で $G_{\text{max}} = 10\text{mm}$ とした。

2.2 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た。供試体は型枠への打込み・脱型後、材齢 28 日まで標準水中養生を実施した。材齢 28 日で測定した圧縮強度を表 1 に併せて示す。圧縮強度は 36MPa より若干低い N と BL でほぼ同一であることが確認された。養生後、暴露面以外をエポキシ樹脂でシールし 3%NaCl 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。

2.3 鋼材発錆のモニタリング

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た。自然電位は示方

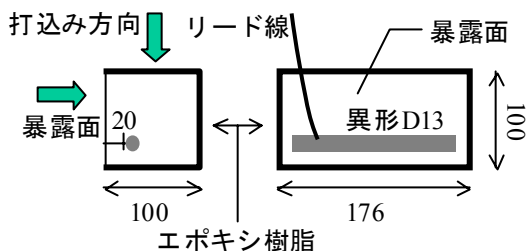


図 1 供試体の概要(単位:mm)

表 1 供試体の配合

No.	セメント種類	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	S/B (%)	単位量 (kg/m^3)		28d 圧縮強度 (MPa)	備考
						W	B		
1	N	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	
5	BL	51	51	46	—	168	330	32.1	コンクリート
6				100	2.51	264	519	36.4	モルタル
7				—	1.96	299	587	32.5	

書[規準編]JSCE-E 601 - 2000 に準拠し測定した。

2.4 C_h の測定方法

暴露終了後の供試体を、フライス盤を用いて、暴露面上の $7\text{cm} \times 5\text{cm}$ の領域を 2mm の厚さで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 C_h とした。全 Cl^- 濃度の測定は JIS A 1153:2003 に準拠した。

3 結果及び考察

3.1 単位セメント量の影響

図 2 に総量表記における C_h の測定値と単位セメント量 B との関係を示す。同図中には JIS A 5308 における Cl^- 含有量規制値 0.3kg/m^3 、および示方書における塩害照査の限界値 1.2kg/m^3 も示した。また、図 3 にはセメント従量表記における C_h の測定値と単位セメント量 B との関係を示す。同図中には欧州規格 EN206-1 における Cl^- 含有量規制値のうち最も小さい値 $0.1\text{mass}\%$ を示した。塩害照査の限界値 $0.4\text{mass}\%$ については、セメント従量表記における塩害照査の限界値の標準的な値が具体例として存在しないので、ここでは、総量表記における照査の限界値と規制値の比率 (4 倍) を基に塩害照査の限界値 $0.4\text{mass}\%$ を設定した。

キーワード：鋼材発錆限界濃度、総量、セメント従量、塩化物イオン含有量規制、耐久性照査

〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 Tel:043-498-3909 Fax:043-498-3849

両図から、明らかに C_{th} は単位セメント量に伴い変動し、総量表記の方がより変動幅が大きいことがわかる。特に、セメントが N の場合における総量表記の C_{th} をみると、単位セメント量 B の増加により C_{th} が 2.5 倍に変動し、規制値や照査の限界値との乖離が大きくなる。これは安全側の乖離であるが、セメントが富配合になるに従いその差が極めて大きくなるため、 B が 1300 kg/m^3 となるグラウトでは、こうした総量表記の規制値や限界値は、安全側としては

過大な評価になると言える。一方、セメント従量で C_{th} を表記した場合には、こうした安全側への過大評価は低減される。

一般に、規制値や照査の限界値は安全性の確保から現実の値より小さく設定される。そこで、 C_{th} の測定値と Cl^- 含有量規制値 C_d および塩害照査の限界値 C_{lim} との差を、それぞれ次のような安全度として定量的に評価することとする。

$$\text{規制値の安全度} \quad S_d = (C_{th} - C_d) / C_d \quad (1)$$

$$\text{照査の限界値の安全度} \quad S_{lim} = (C_{th} - C_{lim}) / C_{lim} \quad (2)$$

C_{th} を総量、セメント従量のそれぞれで表記した場合の S_d 、 S_{lim} を各配合について算出し、セメント種類ごとに単位セメント量の変化に対する S_d 、 S_{lim} の平均値および変動係数を求めて表 2 に示した。安全度の平均値は、これが高いほど単位セメント量に関わらず Cl^- 含有量規制値 C_d および塩害照査の限界値 C_{lim} の設定が安全側であることを示す。総量とセメント従量の表記法で安全度を比較すると、いずれの場合においても総量表記の安全度がセメント従量より大きい。安全度の変動係数を両表記法で比較すると、全ての場合でセメント従量とした場合の安全度の変動係数が総量の場合の半分以下であった。規制値の信頼性や RC 構造物の耐久性の品質確保といった観点から考えれば、安全度は一定であることが望ましく、また過度の安全度は経済性を損なうと言える。したがって、 C_{th} の表記はセメント従量である方が好ましく、かつ合理的であると考えられる。このことは、 Cl^- 含有量の規制および塩害照査の限界値の設定は、総量表記よりもセメント従量表記の方がより合理的であることを表している。

3.2 セメントの種類の影響

セメント種類の N と BL を比較すると、BL の安全度が常に低位であった。 C_{th} は空隙水の pH が高いほど、また水和物による Cl^- 固定量が多いほど大きくなるが³⁾、BL の場合、SG の添加によって Cl^- 固定量が増し、LS による希釈効果でアルカリが減じて pH が低下する。このことから考察すれば、BL の安全度が低位であったのは、LS の希釈による pH 低下の効

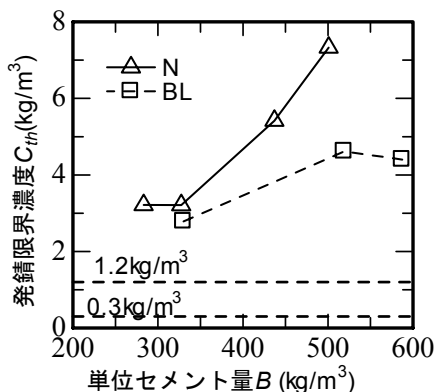


図 2 総量表記における C_{th} の測定値と単位セメント量 B との関係

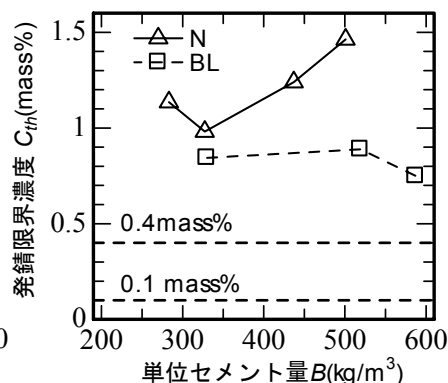


図 3 セメント従量表記における C_{th} の測定値と単位セメント量 B との関係

表 2 各表記法における安全度の平均および変動係数

セメント種類	表記法	規制値の安全度 S_d		照査限界値の安全度 S_{lim}	
		平均	変動係数	平均	変動係数
N	総量	15.0	44.2%	2.99	55.2%
	セメント従量	11.0	18.3%	2.01	25.1%
BL	総量	12.1	27.5%	2.28	36.6%
	セメント従量	7.27	9.8%	1.07	16.7%

果が、SG による Cl^- 固定量増加より卓越したためと推察される。このように、セメント種類によって安全度が変化することから、 Cl^- 含有量規制値や塩害照査の限界値は、セメントの種類に関わらず同一の安全性が確保されるように設定する必要があると考えられる。

4 まとめ

(1) 発錆限界濃度 C_{th} は単位セメント量の変化に伴って変動するため、総量表記の場合、グラウトのような富配合では Cl^- 含有量規制値や塩害照査の限界値が安全側として過度な評価となるが、セメント従量表記であればそのような過度な評価は低減される。

(2) 規制値の信頼性・RC 構造物の耐久性の確保・経済性といった観点から、 Cl^- 含有量規制値や塩害照査の限界値はセメント従量による表記が合理的と言える。

(3) Cl^- 含有量規制値や塩害照査の限界値は、同一の安全性が確保されるようにセメント種類毎に設定する必要があると

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) 小津博ほか：養生期間が三成分系混合セメントモルタルの中性化速度に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.463-470，2002
- 3) 細川佳史ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，投稿中