

暴露供試体を用いたコンクリート表面の塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数に関する考察

Study on Chloride Ion Concentration and Diffusion Coefficient of Exposed Concrete Specimen

緑川 猛彦

福島工業高等専門学校建設環境工学科

Takehiko Midorikawa

National Institute of Technology, Fukushima College, Department of Civil Engineering

(2015年9月7日受理)

The distributions of total chloride ion of concrete specimens that exposed 10 years in coastal area were measured. And also, based on these data, the penetrations of chloride ion and the surface chloride content were recalculated taking into account the environmental conditions and the characteristics of concrete.

As the results, it was clear that the penetration of chloride ion and the specified concrete strength is inversely proportional and the surface chloride content converges to a constant value.

Key words: long term exposure test, durability, penetration of chloride ion, surface chloride content

1. はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの浸透予測には、一般に拡散方程式が用いられる。その際には、拡散係数の値を設定するとともに、環境からコンクリート表面を介して内部へ浸透する塩分量、すなわちコンクリート表面における塩分の流束を与える必要がある。しかしながら、様々な条件で推移する自然環境下では、コンクリート表面における塩化物イオンの流束を逐次把握することは困難であることから、コンクリート表面の塩化物イオン濃度で代用することが多くの研究者により行われている¹⁾。

この拡散方程式を用いて得られるコンクリートの見掛けの拡散係数とコンクリート表面における全塩化物イオン濃度は、ある時点における測定データを回帰分析すれば算定できるものの、同一条件の測定データを用いた場合においても、環境条件やコンクリート自身の状態等によりばらつきが見られ、評価が困難になるものも見受けられる。

今回、コンクリート構造物の塩害に対する耐久性を検討する目的で、10年間に渡る長期暴露試験を実施した²⁾。このように複数のコンクリート供試体を用いて長期に渡り塩化物イオンの挙動を調査した例は少ない。そこで本研究は、長期的視点に立脚し、環境条件の共通性を加

味したコンクリートの見掛けの拡散係数と表面の塩化物イオン濃度の考察を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

Table 1に使用材料を示す。セメントは、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた。後述する高流動コンクリートには、混和材として高炉スラグ微粉末を使用した。細骨材および粗骨材はいわき市内で入手することのできる一般的なものである。

2.2 コンクリートの配合

Table 2にコンクリートの配合を示す。コンクリートの種類は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリー

Table 1 Materials used in the experiment

材 料	種 類
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
	早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm ³
混和材	高炉スラグ微粉末, 密度2.89g/cm ³ 比表面積4000cm ² /g
細骨材	砕砂, 表乾密度2.63g/cm ³ 吸水率1.05%, F.M.=2.91
粗骨材	碎石, 表乾密度2.69g/cm ³ 吸水率1.47%, F.M.=6.67
混和剤	高性能AE減水剤

Table 2 The mix proportion of concrete

記号	セメント	f_{ck} (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						スランブ (cm)	空気量 (%)
					W	C	BF	S	G	SP		
O-24	普通	24	56.0	45.8	162	290	-	828	1072	2.9	10.0	5.3
O-30		30	47.5	43.3	164	346	-	761	1089	3.5	9.0	4.8
O-50		50	35.0	40.1	137	392	-	731	1119	3.9	9.0	5.1
H-50	早強	50	35.0	39.0	140	400	-	705	1128	4.6	7.5	4.5
3H-50	高流動	50	34.0	54.3	175	361	151	918	790	4.4	61.0*	3.0

W：水，C：セメント，BF：高炉スラグ微粉末，S：細骨材，G：粗骨材，SP：混和剤，s/a：細骨材率 ※はスランブフロー値

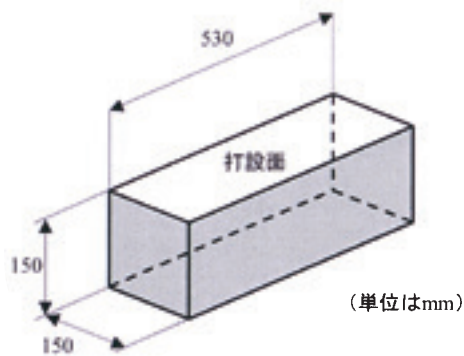


Fig.1 Shape of the specimen



Fig.2 The photograph of exposed specimens

ト、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートおよび高流動コンクリートの3種類とした。設計規準強度は、普通コンクリートで $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$, 30 N/mm^2 , 50 N/mm^2 の3水準、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートおよび高流動コンクリートでは $f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ の1水準とした。高流動コンクリートは、早強ポルトランドセメント量の30%を高炉スラグ微粉末で置換した配合とした。なお、コンクリートの製造および打設はコンクリート二次製品工場で行った。

2.3 供試体の作製

Fig.1にコンクリート供試体の形状を示す。暴露試験用供試体として $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 530\text{mm}$ の直方体を1本、圧縮試験用供試体として $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を18本（4週後、暴露時、1年後、3年後、5年後、10年後についてそれぞれ3本）、および空気量・気泡構造測定用として $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の直方体供試体を5本作製した。

2.4 暴露条件

暴露試験場は、山形県西田川郡温海町内の国道7号線沿いであり、旧暮坪橋A1橋台部に設けた特設暴露試験場である。ここは、東北有数の塩害地域に該当する場所で、海からの直線距離が数メートルであることから、特に冬場における日平均飛来塩分量が約 $6000 \text{ mg/m}^2/\text{day}$

にも達する場所である³⁾。なお、この場所は、国土交通省東北地方整備局酒田河川国道事務所より提供して頂いた。

Fig.2に供試体の設置状況を示す。設置台は木製で、供試体は地面から約60cmの高さに5cm間隔で2列に配置した。圧縮試験用供試体は設置台の下に配置した。

2.5 塩化物イオン量の測定

供試体中の塩化物イオン分布の測定は、JSCE-G 573-2010「実構造物中におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）」に準拠して、ドリル削孔により得られる粉末試料を用いて実施した。ドリル粉末の採取は、供試体側面からの浸入塩分に影響されないような供試体の中心部付近とし、深さ方向に60mmまで10mm毎に行った。全塩化物イオン量の測定は、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法により行った。

塩化物イオンの測定は、材齢1年（2005年1月19日から2005年12月20日までの335日間）、3年（2005年1月19日から2007年12月6日までの1,051日間）、5年（2005年1月19日から2009年8月8日までの1,662日間）および10年（2005年1月19日から2014年8月19日までの3,499日間）に実施した。

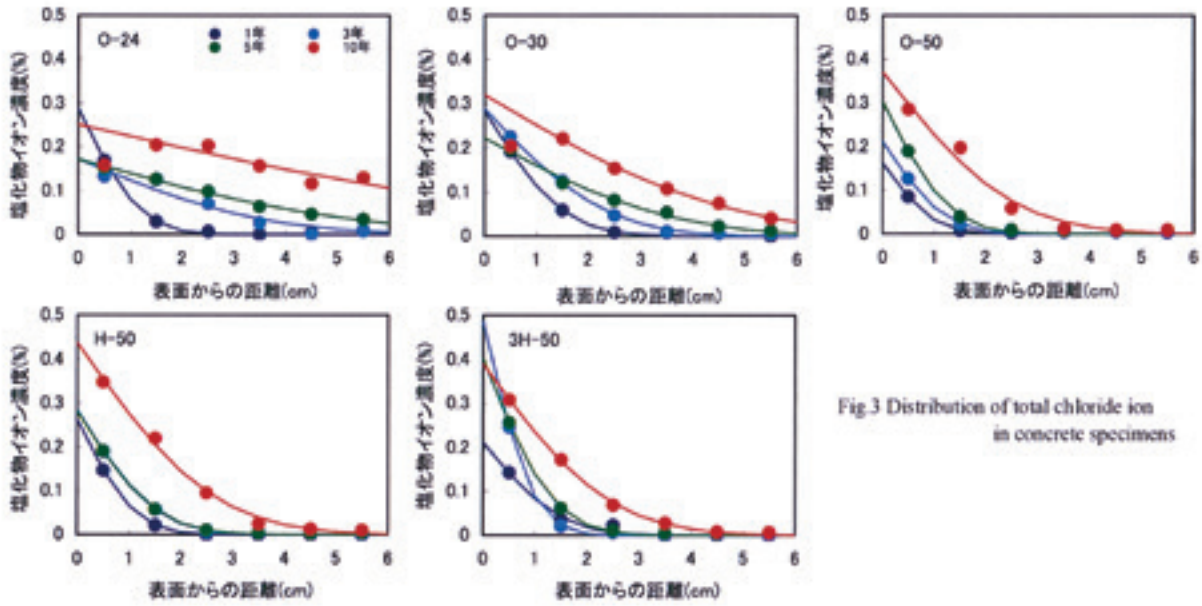


Fig.3 Distribution of total chloride ion in concrete specimens

3. 実験結果および考察

3.1 全塩化物イオンの分布状況

Fig.3に全塩化物イオン量の分布状況を示す。セメントの種類や強度の違いに関わらず、全ての供試体に塩分が浸透していることが分かり、また塩分の浸透量は暴露期間が長くなるほど大きく、深くなる結果となった。しかしながら、コンクリート中に存在する塩分の分布状況は全てのケースで異なり、全体的にはコンクリートの設計標準強度が低いほど塩分浸透量が大きくなっているようである。設計標準強度が24N/mm²である供試体については、10年間暴露後の深さ6cmにおける塩化物イオン濃度が、発錆限界塩化物イオン濃度である1.2kg/m³（約0.05%）の約3倍ほどであった。

これらのことを定量的に表すために、見掛けの拡散係数とコンクリート表面における塩化物イオン濃度を算出することとした。

Table 3に見掛けの拡散係数 D とコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 を示す。 D および C_0 は、次式に示すFickの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて、ドリル粉末毎に各深さ位置で測定された全塩化物イオン濃度を回帰分析し算出したものである。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$: 深さ x (cm) .暴露期間 t (年) において測定された全塩化物イオン濃度 (%), C_0 : 供試体表面における塩化物イオン濃度 (%), D : コンクリートの見掛けの拡散係数 (cm²/年) を表す。

D と C_0 の傾向に着目すると、 D が大きいものは C_0 が小

Table 3 Penetration of chloride ion and surface chloride content of concrete specimens

見掛けの拡散係数 D (cm²/年)

	1年	3年	5年	10年
O-24	0.461	1.335	1.908	2.950
O-30	0.777	0.585	0.854	0.698
O-50	0.331	0.154	0.113	0.202
H-50	0.406	0.238	0.157	0.222
3H-50	0.750	0.098	0.124	0.190

コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 (%)

	1年	3年	5年	10年
O-24	0.287	0.172	0.171	0.251
O-30	0.284	0.289	0.223	0.320
O-50	0.163	0.212	0.304	0.371
H-50	0.262	0.283	0.282	0.438
3H-50	0.211	0.487	0.402	0.390

さいようである。Fig.3で全塩化物イオンの分布状況が同じようであるにもかかわらず、Table 3で D と C_0 の値が大きく異なるものも見られるのは、 D と C_0 が互いに大きく影響し合うためである。したがって、適切な D や C_0 を算定するためには、拡散方程式の適用に際して、暴露条件から導きだされる共通性を考慮に入れることが必要であると思われる。

3.2 D および C_0 の再評価

コンクリート表面における塩化物イオン濃度は、飛来塩分量に比例して際限なく増加するとは考え難い⁴⁾ことや、単位時間当たりの飛来塩分量が一定的环境下では、暴露時間の経過とともにコンクリートの表面塩分濃度

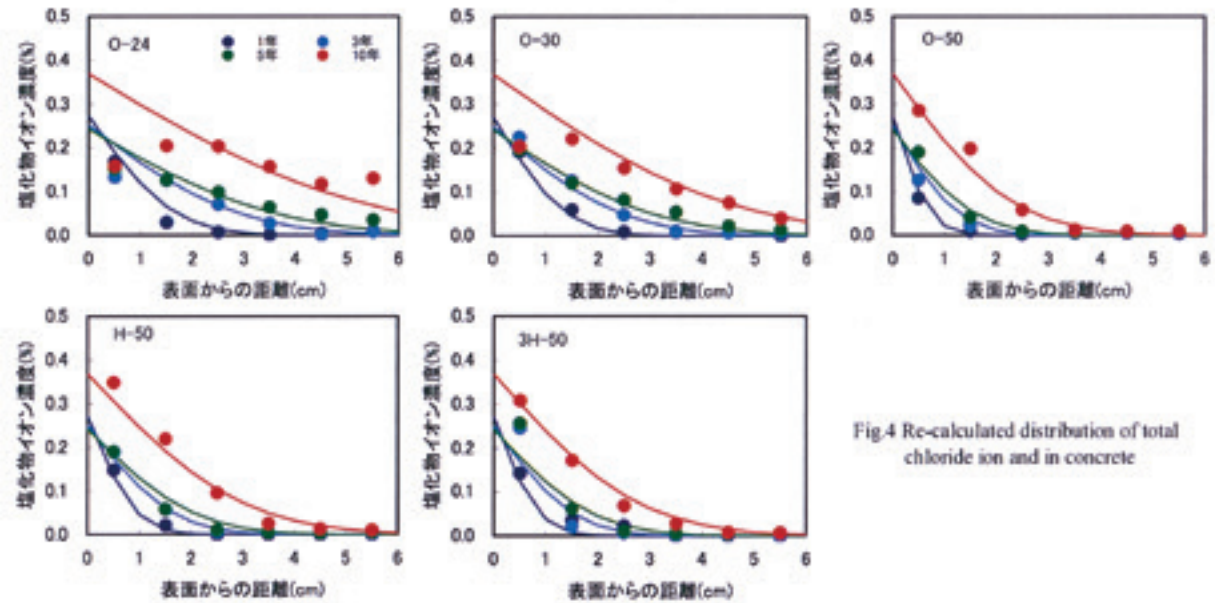


Fig.4 Re-calculated distribution of total chloride ion and in concrete

は一定の値に収束する⁵⁾こと等が明らかになっている。

今回の暴露試験では、供試体の設置位置に数十cmのずれはあるもののほぼ同一の条件下で暴露されているものと考えられることから、各測定年毎で供試体表面の塩化物イオン濃度は同値であると推察される。つまり、Table 3の下段におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度の値が、コンクリートの種類に関わらず測定年毎に同一であると仮定することができる。

一方、コンクリート自体の見掛けの拡散係数は、セメントの水和反応の進行に伴う組織の緻密化や環境要因によるコンクリートの劣化、気温や湿度等により常に変化していることが予想されるものの、巨視的に見れば数十年を通してほぼ一定であると見なすことができる。このため、Table 3の上段における見掛けの拡散係数は、1年から10年を通してコンクリートの種類毎に一定値である必要がある。

以上のことを条件とし、暴露期間1年から10年までの全てのデータを回帰分析し、見掛けの拡散係数とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を再計算することとした。

Table 4に再計算した見掛けの拡散係数とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を示す。また、Fig.4に再計算した値での塩化物イオン濃度の分布状況を示す。

Fig.5にコンクリートの設計規準強度と見掛けの拡散係数との関係を示す。コンクリートの見掛けの拡散係数はコンクリートの強度と反比例し、コンクリートの内部組織が緻密で強度が高いほど物質が染み込み難くなるものと考えられるが、Fig.5ではそのような傾向を適切

Table 4 Re-calculated value of penetration of chloride ion and surface chloride content of concrete specimens

	拡散係数 D(cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度C ₀ (%)			
		1年	3年	5年	10年
O-24	0.887				
O-30	0.643				
O-50	0.175	0.272	0.250	0.242	0.368
H-50	0.283				
3H-50	0.250				

に表現することができた。

また、Fig.6に暴露期間とコンクリート表面の塩化物イオン濃度との関係を示す。コンクリート表面の塩化物イオン濃度は長年の間にある一定値に近づくと考えられるが、グラフではこの傾向が表されている。一般的に、コンクリート表面の塩化物イオン濃度については以下の式が提案されている⁶⁾。

$$C_0 = S\sqrt{t} \quad (2)$$

$$C_0 = \alpha \{1 - \exp(-\beta t)\} \quad (3)$$

ここに、S、 α 、 β ：実験定数を表す。

Fig.6には再計算で求められた塩化物イオン濃度とともに回帰分析で求めた上記2式の推定値を描いている。それぞれの決定係数を比較すると、本実験範囲内では式(3)による推定値が比較的良く一致していることがわかる。このことから、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、暴露開始後約1年で一定値に収束する可能性がある。

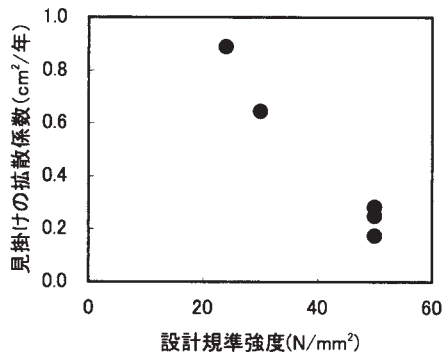


Fig.5 Relationship between specified concrete strength and penetration of chloride ion

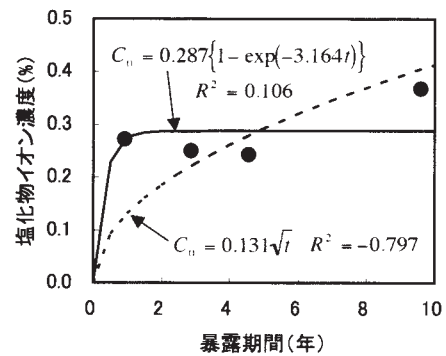


Fig.6 Relationship between exposed period and chloride cocontent

4. まとめ

コンクリート材料の長期的な耐久性を検討するために、厳しい塩害環境下において約10年間に渡り暴露試験を実施した。コンクリートの見掛けの拡散係数と表面の塩化物イオンの値についてこれまでの結果を纏めた所、以下の知見を得た。

- (1)設計規準強度40N/mm²のコンクリート供試体では、コンクリート表面から深さ6cmにおいて、鋼材の発錆限界塩化物イオン濃度である1.2kg/m³を超過する可能性がある。
- (2)見掛けの拡散係数とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を回帰分析するに当たり、コンクリートの拡散係数をコンクリート固有の値と仮定し一定値に固定し、かつ、コンクリート表面の塩化物イオン濃度を環境要因に関する値として複数の供試体で同値に固定した結果、良好な結果を得た。
- (3)コンクリートの見掛けの拡散係数は、コンクリートの設計規準強度と反比例し、強度が高くなるほど小さくなる。また、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、暴露開始後1年で一定値に収束する可能性がある。

謝 辞

本研究は、東北コンクリート保全技術検討会（元東北学院大学 大塚浩司委員長，活動期間：平成14年～平成20年）によって実施された暴露試験の結果の一部を取

りまとめたものである。幹事会社である常磐ピーシー（株）および関係者各位には多大なご協力を頂いた。ここに記し深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向：土木学会，2003
- 2) 緑川猛彦，武田三弘，小山田哲也，阿波稔：長期暴露試験による表面含浸材を塗布したコンクリートの塩化物イオン浸透性状，土木学会論文集E2，pp.451-461，2011
- 3) 藤田弘昭，上原子晶久，津村浩三，石澤徹：青森県日本海沿岸におけるRC橋梁の塩害に関する調査，土木学会論文集E，Vol.62，No.2，pp.330-340，2006
- 4) 佐伯竜彦，堀岡祐介：新潟県沿岸の飛来塩分環境とコンクリートへの塩分浸透性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.923-928，2006
- 5) 山下寛生，下村匠，山田文則：飛来塩分の影響を受けるコンクリートの表面塩分に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.1011-1016，2007
- 6) 佐伯竜彦，植木稔，島毅：コンクリート表面における塩化物イオン濃度に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.985-990，1999