

V-107 海洋環境下におけるコンクリート中への塩分浸透に関する研究

大林組技術研究所 正会員 竹田 宣典
東海大学海洋学部 正会員 迫田 恵三
大林組技術研究所 正会員 十河 茂幸

1. はじめに

海洋環境下におけるコンクリート中には、施工後、外部より塩分が浸透し蓄積される。これらの塩分は、鉄筋腐食の要因となり、鉄筋コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす。塩分の浸透速度は、コンクリートの品質および使用されている環境条件によって異なると考えられるが、種々の海洋環境下における塩分の浸透速度については、十分に明らかにされていないのが現状である。本報告は、海洋暴露試験による測定結果から、コンクリート中への塩素イオンの浸透速度について検討を行ったものである。

2. 試験方法および解析方法

(1) 供試体…… 供試体はΦ150x150mmの円柱供試体とした。塩素イオンが一方向のみから浸透するように、周面と底面をエポキシ樹脂でコーティングを行った。表-1にコンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性質を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（NP）、B種高炉セメント（BB）、耐硫酸塩ポルトランドセメント（SR）の3種とした。

(2) 暴露試験方法…… 供試体は、材令42～50日において、浸透面を上にして、海洋における暴露を開始した。暴露試験場は清水港沖約500mにある防波堤において、飛沫帯（㊸）、海中（㊹）、海上大気中（㊺）の3環境条件とした。表-2にそれぞれの環境条件を、表-3に実験の組合せを示す。

(3) 塩素イオン分析方法…… 34ヶ月間の暴露後、コンクリート中の塩素イオンの含有量を測定した。分

表-1 配合およびフレッシュコンクリートの性質

記号	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				A _F 減水率 (ℓ/m ³)	フレッシュコンクリート	
				W	C	S	G		スラブ (cm)	空気量 (%)
NP	15	50	48	166	332	847	935	0.83	12.0	5.1
BB				162	324	851	940	0.81	10.5	4.4
SR				166	332	849	937	0.83	13.0	4.1

析は、コンクリートドリルを用いて採取したコンクリート粉（149μmふるい通過）を試料とし、塩素イオンを電位差滴定法により全塩分量について行った。また暴露後12ヶ月、34ヶ月において圧縮強度を測定した。

(4) 塩分浸透解析…… 一般に、塩素イオンの拡散はFickの法則により①式のように表わされる。

表-2 暴露環境条件

表-3 実験の組合せ

34ヶ月間暴露した後の塩素イオン量より、最小二乗法によって、①式における表面の塩分量（C₀）および塩素イオンの拡散係数（D_c）を算出した。

区分	環境条件
A. 飛沫帯 堤防側面	H.W.L. + 1.7 Mと L.W.L. + 0.0 Mの間位置
B. 海中 水深 11m	海水温度 18.4℃ pH 8.29 Cl ⁻ イオン濃度 18.4 % 溶存酸素量 7.98 ppm
C. 海上大気中 (堤防上)	L.W.L. + 5.0 M位置 波しぶき、潮風を受ける

セメント 種別	環境条件			
	飛沫帯 ㊸	海中 ㊹	海上 ㊺	海上
NP	○	○	○	
BB	—	○	○	
SR	—	○	○	

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right] \right\} \dots \textcircled{1}$$

x: 表面からの深さ (cm), t: 経過時間 (sec)

C: xでの塩素イオン含有量 (%)

C₀: x = 0での塩素イオン含有量 (%)

D_c: 塩素イオンの拡散係数 (cm²/sec)

$$\operatorname{erf}: \text{誤差関数} \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} \cdot dt$$

3. 解析結果および考察

(1) 圧縮強度…… 表-4に圧縮強度の測定値を示す暴露後34ヶ月においては、いずれの環境条件においても、コンクリートの強度劣化は認められなかった。

表-4 圧縮強度

セメント 種別	圧縮強度 (kgf/cm ²)							
	NP				BB		SR	
	飛沫帯	海中	海上	海中	海上	海中	海上	
試験日								
材令28日	359				356		377	
暴露後12ヶ月	549	514	479	541	514	501	497	
暴露後34ヶ月	536	535	471	552	523	486	510	

(2) 塩分の浸透速度……コンクリート中の塩素イオン濃度および算出された C_o 、 D_c の値を表-5に示す。表面における塩分量(C_o)は環境条件によって異なり、飛沫帯(0.74%)、海中(0.5~0.75%程度)、海上大気中(0.2%程度)の順に大きい。また、海中・海上大気中における塩素イオンの拡散係数(D_c)は、NPで $3.2\sim 3.9\times 10^{-8}$ cm^2/sec 、BBで $3.2\sim 3.9\times 10^{-8}$ cm^2/sec 、SRで 4.65×10^{-8} cm^2/sec であり、環境条件が異なってもセメントの種類が同じであれば、 D_c の値は同程度であった。ただし、飛沫帯における D_c は他の環境に比べて大きい。以上のことより、 C_o は使用環境条件に、 D_c はコンクリートの品質に依存すると考えられる。

(3) 塩分浸透量の予測値……図-1に前項で算出した C_o 、 D_c を用いて予測した、10年、20年、50年後の塩素イオンの浸透量を示す。表-6に、深さ10cmの位置における、20年、50年後の塩素イオン量の予測値を示す。海上大気中に比べて、海中部では3~4 倍程度、飛沫帯では5倍程度となる。一般に腐食に対しては、海中部では海上大気中に比べて緩やかであるとされているが、本実験の様に水深約10mの水圧の作用する海中部においては、海上大気中に比べて塩素イオンの浸透速度は速い。

また、鉄筋の発錆がはじまる塩分量については、十分明らかにされていないが、種々の調査結果より、この値を仮定することにより鉄筋の発錆の開始時期を予測することが可能であると考えられる。

4. あとがき

本解析では、環境条件は変化しないと考え、 C_o 、 D_c は時間的に一定であると仮定した。しかし、現実には雨水や波しぶき等による C_o の経時変化、あるいはコンクリートの品質の変化による D_c の経時変化があると考えられる。今後さらに長期的な海洋暴露試験により解明して行く予定である。

《参考文献》

迫田他：『海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食の進行状況』コンクリート工学年次論文報告集 10-2, 1988, P487-492

表-5 塩素イオン濃度および表面塩分量・拡散係数

セメント 環境	深さ (cm)	塩素イオン濃度の測定値 (%)					計算値	
		1	3	5	7	9	C_o (%)	D_c^*
NP	飛沫帯	0.586	0.363	0.157	0.059	0.036	0.74	4.88
	海中	0.469	0.288	0.081	0.046	0.029	0.61	3.90
	海上	0.160	0.058	0.035	0.026	0.024	0.20	3.22
BB	海中	0.594	0.181	0.049	0.040	0.030	0.76	2.21
	海上	0.160	0.044	0.028	0.026	0.022	0.20	2.71
SR	海中	0.444	0.244	0.115	0.048	0.029	0.55	4.65
	海上	0.143	0.067	0.030	0.025	0.027	0.17	4.65

* ($\times 10^{-8}$ cm^2/sec)

表-6 深さ10cmの位置における塩素イオン量 (%)

年 数	20年			50年		
	飛沫帯 A	海中 B	海上 C	飛沫帯 A	海中 B	海上 C
セメント の 種 類						
NP	0.27	0.18	0.05	0.41	0.31	0.09
BB	—	0.13	0.04	—	0.29	0.08
SR	—	0.19	0.06	—	0.30	0.09

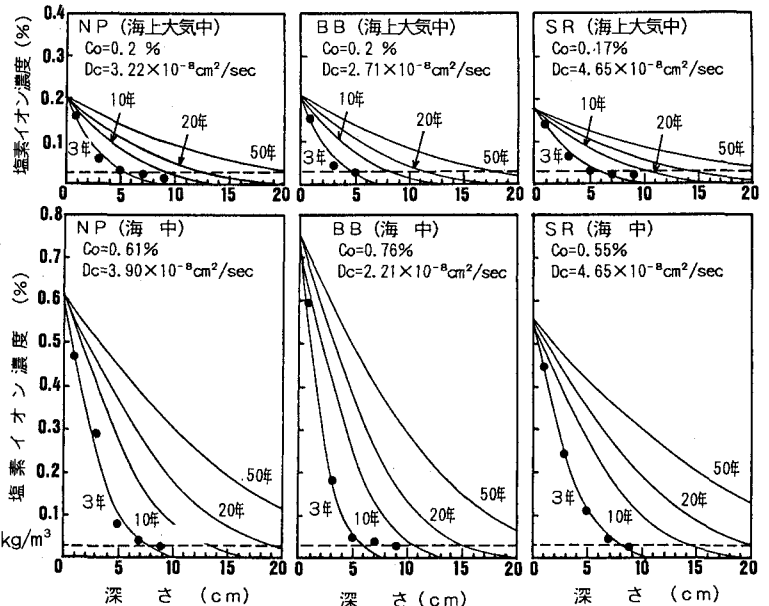


図-1 塩素イオンの浸透量の予測値