

[1078] 拡散理論に基づいた海岸部塩分汚染環境評価

正会員 ○横田 優 (四国電力総合開発研究所)
 浮田和明 (四国電力総合開発研究所)
 重松俊一 (四国電力総合開発研究所)
 藤枝正夫 (四国電力建設 部)

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の塩分(CI⁻)による早期劣化(塩害)が大きな社会問題となっている。特に、海岸部に位置する構造物では外部から浸透する塩分が格段に多く、その劣化は、塩分の浸透・蓄積→鉄筋の腐食→外観の変状という段階を経て進行する。このようなことから、当社では今後新設される構造物の設計・材料・施工面での塩害対策指針ならびに既設構造物の維持管理に関する劣化度判定基準の確立のために必要な基礎資料を得る目的で、四国内の経年および環境条件の異なる海岸部コンクリート構造物を対象に含有塩分量を調査するなど、塩害に直接関与するコンクリート中への塩分浸透過程に関する研究を進めている。本報告は、そのうちの拡散理論を応用して実構造物の含有塩分量分布データからコンクリート表面に付着吸収される塩分量(以下、付着塩分量という)や海水に接するコンクリート表面での塩分量(題目ではこれらを塩分汚染環境と表現)、また、コンクリートの塩分拡散係数を評価検討したものである。

2. 調査概要

2.1 調査対象構造物 調査は 図-1 に示すように、東は紀伊水道から西は伊予灘までの瀬戸内海海域に位置するAからEまでの5地点の、建設後8~27年を経過した海岸部コンクリート構造物を対象に実施した。A~D地点の調査構造物は、いずれも干満帯や飛沫帯に位置する栈橋や護岸であるが、E地点については、海岸からの距離や標高と付着塩分量との関係を検討するため陸上部の擁壁や建物外壁コンクリート(打放し)からもコアを採取した。そして、今回は構造物の位置する環境を3つに区分し整理した(表-1)。なお、工事記録等により判明した各構造物のコンクリート配合を表-2に示す。

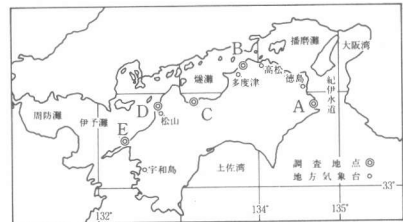


図-1 調査地点位置図

表-1 環境区分

環境区分	潮位との関係	海岸からの距離
①干満帯	L.W.L~H.W.L	0 m
②飛沫帯	H.W.L 以上	0~50m
③大気中	—	50m以上

2.2 含有塩分量分析方法

含有塩分量分析用のサンプルとしては、構造物の表面観察を行い、ひびわれもなく健全と判断される個所で径7cm、長さ8~14cmのコンクリートコアを採取した。コアは表層より2cm厚で切断し、(社)日本コンクリート工学協会より提案されている「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案)」の電位差滴定法

表-2 コンクリートの配合

調査地点	構造物	記号	粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	設計基準強度 f _{cd} (N/mm ²)	水セメント比 w/c (%)	所要ランポン量 a/a (kg/m ³)	単位体積重量 ρ (kg/m ³)	配合材料 (kg/m ³)				セメント種類	粗骨材種類	備考
								水 W	セメント C	粗骨材 S	粗骨材 G	混和剤		
A	水路側壁	A-1	25	270	53	14	37.0	160	300	728	1,238	—	F	川砂
A	水路側壁	A-2~4	25	240	56	12	39.5	169	302	765	1,170	—	F	海砂 生コン
B	水路側壁	B-1~4	25	270	51	12	35.3	163	320	645	1,180	0.8	F	海砂 20~30% 生コン
C	護岸	C-5~12	—	210	54	10	33.3	190	350	610	1,210	—	F	海砂 50% 砕石と海砂の混合 生コン
C	護岸	C-1~4	—	270	—	—	—	—	—	—	—	—	F	海砂
D	護岸	D-1~2	—	—	53	—	33.3	159	300	660	1,360	—	F	横内砂
D	護岸	D-1~4	25	—	65	12	34.7	195	300	660	1,241	—	F	海砂
E	建物、外壁コンクリート (P-C造)	E-(1)~(3)	20	350	46	15	44.3	204	441	743	933	C>0.2%	F	洗砂
E	建物、外壁コンクリート (R-C造)	E-(4)~(6)	20	210	55	15	43.0	185	336	794	1,054	C>0.2%	M	洗砂

* セメント種類: F……普通ポルトランドセメント, M……中熱ポルトランドセメント
 混和剤: 地点B……ポリスノールS, 地点E……プラスチック

に準じて可溶性塩分の分析を実施した。結果は、コンクリート重量に対する塩分(Cl⁻)の重量パーセント(wt%)で整理した。但し、日本コンクリート工学協会の提案以前に実施したE地点の建物については以下の方法によった。輪切りにしたコアを乾燥炉(110℃)で定重量になるまで乾燥し、ジョークラッシャーにて粗粉碎し、モルタル分を取りだし、さらに乳鉢にて微粉碎した。この試料にイオン交換水300mlを加え、適時

きまぜ可溶性塩分の抽出を行った。

2日後に上澄液を取り、工業用水

試験方法(JIS K 0101-32.2)に定

められた硝酸銀(Ⅱ)滴定法により

Cl⁻を定量し、配合(表-2)を参

考に、前述と同様、コンクリート

重量に対する塩分の重量パーセン

トで整理した。

3. 塩分汚染環境評価

3.1 塩分の拡散

コンクリート中への塩分浸透量はFick

の第2法則として知られている1

次元の非定常方程式(1)の解とし

て表現できる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots (1)$$

この解については、構造物の位置

する環境(海水中か、飛沫帯か)や

初期混入塩分量の有無により表-

3のように考えられる[1,2]。

3.2 評価方法

本報告では海中部および干満帯のコンクリ

ートについては(2)式、(3)式、ま

た飛沫帯および陸上大気中のコン

クリートについては(4)式、(5)式

を用いて塩分汚染環境を評価した。

すなわち、コンクリート中の含有

塩分量分布データC(x,t)を最小

2乗法により(2)式~(5)式に近似

させ、コンクリートの塩分拡散係

数Dやコンクリート表面の塩分量

C₀あるいは付着塩分量W等を推

定した。なお、式中の誤差関数お

よび指数関数は参考文献[3]の近

似値を用いて計算した。

表-3 拡散方程式(1)の解

条件	海水中および干満帯	飛沫帯および大気中
	コンクリート表面に接する海水 コンクリート表面の塩分量は、海水の塩分濃度によって支配される。	コンクリート表面に付着した固形状の塩分(飛沫帯塩分、他) 海塩粒子の付着と蓄積によってコンクリート表面の塩分量が時間とともに大きく変化する。
計算上の仮定	コンクリート表面における塩分量(C ₀)が、時間t>0において常に一定である。即ち、C ₀ (t)=C ₀ =const.	コンクリート表面に連続して塩分が付着し、そのすべてがコンクリート中へ浸透する。 なお、付着塩分量W(t)=W=const.とする。
解	(i) 初期(コンクリート継ぎ目)に塩分混入がない場合 $C(x,t) = C_0 \cdot [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})] \quad \dots (2)$ ここで、C(x,t) : コンクリート表面からx(m)の深さにおけるt(秒)後の塩分量(wt%) C ₀ : コンクリート表面での塩分量(wt%) D : コンクリートの塩分拡散係数(m ² /s) $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-\eta^2) d\eta$ (ii) 初期に塩分混入がある場合 $C(x,t) - C' = (C_0 - C') \cdot [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})] \quad \dots (3)$ ここで、C' : 初期混入塩分量(wt%)	(i) 初期(コンクリート継ぎ目)に塩分混入がない場合 $C(x,t) = W \cdot [2 \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi D}} \exp(-\frac{x^2}{4Dt}) - 1] \cdot \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad \dots (4)$ ここで、W : 時間、時刻tにおける付着塩分量 (wt%/cm/s) その他記号 : 左に同じ (ii) 初期に塩分混入がある場合 $C(x,t) - C' = W \cdot [2 \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi D}} \exp(-\frac{x^2}{4Dt}) - 1] \cdot \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad \dots (5)$

表-4-(1) 各構造物のコンクリートの拡散係数、表面塩分量および付着塩分量

調査地点	構造物の種類	構造物の位置する環境	コア採取位置	コア採取時の使用年数	記号	拡散係数D	表面塩分量C ₀	付着塩分量W	初期混入塩分量C'
						10 ⁻⁴ m ² /s	wt%(Cl ⁻)	10 ⁻⁴ wt%/cm/s (Cl ⁻)	wt%(Cl ⁻)
A	水路側壁	干満帯	港内	21	A-1	1.00	0.014	—	0.0
		干満帯	港内	11	A-2	3.21	0.058	—	0.008
		干満帯	港内	16	A-3	0.57	0.293	—	0.003
		干満帯	港内	10	A-4	1.91	0.224	—	0.003
		干満帯	港内	13	B-1	1.27	0.226	—	0.0187
	水路側壁	干満帯	港内	12	B-2	1.48	0.115	—	0.0103
		干満帯	港内	14	B-3	0.52	0.647	—	0.0120
		干満帯	港内	12	B-4	0.60	0.248	—	0.0172
		干満帯	港内	—	C-1	3.55	0.396	—	0.004
		干満帯	港内	8	C-2	7.95	—	2.37	0.794
B	水路側壁	干満帯	港内	8	C-3	4.36	—	0.85	0.285
		干満帯	港内	8	C-4	2.30	0.526	—	0.014
		干満帯	港内	8	C-5	4.06	0.484	—	0.02
		干満帯	港内	19	C-6	3.41	—	2.03	0.680
		干満帯	港内	19	C-7	0.53	—	1.63	0.546
	水路側壁	干満帯	港内	19	C-8	5.19	0.204	—	0.02
		干満帯	港内	20	C-9	3.07	—	4.00	1.34
		干満帯	港内	20	C-10	3.71	—	1.27	0.425
		干満帯	港内	20	C-11	4.00	—	1.75	0.586
		干満帯	港内	20	C-12	6.23	—	2.49	0.834
C	水路側壁	干満帯	港内	24	D-1	1.47	0.988	—	0.0329
		干満帯	港内	24	D-2	2.90	—	3.35	1.12
		干満帯	港内	24	D-3	0.52	0.588	—	0.009
		干満帯	港内	27	D-4	1.20	—	1.41	0.472
		干満帯	港内	27	D-5	1.40	—	1.23	0.412
	水路側壁	干満帯	港内	27	D-6	0.36	—	3.19	1.07
		干満帯	港内	9	E-1	4.16	0.217	—	0.025
		干満帯	港内	9	E-2	3.12	—	2.02	0.677
		干満帯	港内	11	E-3	2.02	0.873	—	0.0175
		干満帯	港内	11	E-4	6.07	—	6.32	2.12
D	水路側壁	干満帯	港内	9	E-5	1.68	0.670	—	0.0223
		干満帯	港内	9	E-6	1.31	0.878	—	0.355
		干満帯	港内	10	E-7	0.83	—	1.04	0.348
		干満帯	港内	10	E-8	2.70	—	2.47	0.827
		干満帯	港内	10	E-9	2.31	—	1.01	0.338
	水路側壁	干満帯	港内	10	E-10	2.95	—	0.71	0.238
		干満帯	港内	110	E-11	4.70	—	0.654	0.219
		干満帯	港内	120	E-12	4.64	—	0.384	0.129
		干満帯	港内	20	E-13	2.70	—	2.47	0.827
		干満帯	港内	20	E-14	2.31	—	1.01	0.338
E	水路側壁	干満帯	港内	10	E-15	2.95	—	0.71	0.238
		干満帯	港内	110	E-16	4.70	—	0.654	0.219
		干満帯	港内	120	E-17	4.64	—	0.384	0.129
		干満帯	港内	20	E-18	2.70	—	2.47	0.827
		干満帯	港内	20	E-19	2.31	—	1.01	0.338
	水路側壁	干満帯	港内	10	E-20	2.95	—	0.71	0.238
		干満帯	港内	110	E-21	4.70	—	0.654	0.219
		干満帯	港内	120	E-22	4.64	—	0.384	0.129
		干満帯	港内	20	E-23	2.70	—	2.47	0.827
		干満帯	港内	20	E-24	2.31	—	1.01	0.338

*「構造物の種類」欄のうち、「水路側壁」は且び付着防止のための塗装あり。

表-4-(2) E地点建物コンクリートの拡散係数および付着塩分量

調査地点	構造物の種類	構造物の位置する環境	コア採取位置	コア採取時の使用年数	記号	手続-1 コンクリートの拡散係数の決定	手続-2 コンクリート表面への付着塩分量の決定	付着塩分量W	初期混入塩分量C' = 0.0017 wt%
						拡散係数D (10 ⁻⁴ m ² /s)	平均値	NaCl換算 mg/dm ² /day	NaCl換算 mg/dm ² /day
(A) 建物外壁コンクリート (P.C造)	大気中	西面	EL+11m	7.5	E-①	1.17	0.92	2.66	0.270
		西面	EL+20m	7.5	E-②	0.97	0.92	2.35	0.239
		西面	EL+30m	7.5	E-③	0.62	0.92	1.72	0.175
		西面	EL+45m	7.5	E-④	3.46	0.92	2.26	0.229
		西面	EL+50m	7.5	E-⑤	—	0.92	—	—
	海からの距離約100m	西面	EL+60m	7.5	E-⑥	3.40	0.92	1.00	0.102
		西面	EL+45m	7.5	E-⑦	2.90	0.92	1.35	0.137
		西面	EL+50m	7.5	E-⑧	15.11	0.92	1.17	0.119
		西面	EL+60m	7.5	E-⑨	2.89	0.92	1.00	0.102
		西面	EL+60m	7.5	E-⑩	2.89	0.92	1.00	0.102

4. 結果および考察

4. 1 コンクリートの拡散係数

図-2は、表-4-(1)~(2)のうち工事記録により水セメント比が判明しているものとコンクリートにおける塩分拡散係数の推定値との関係を示したものである。この結果から、拡散係数は $5 \times 10^{-9} \sim 8 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲にあり、水セメント比の増加に伴って増大する傾向にあることが認められる。

4. 2 コンクリート表面の塩分量

図-3は、干満帯に位置するコンクリートについて、その表面塩分量を一定と仮定して求めたその推定値と塩分拡散係数の関係を示したものである。なお、A~C地点のうち水路側壁コンクリートについては、貝類付着防止のため1~3年に1回の頻度で膜厚80~200 μm の塗装を実施している。その結果、打放しコンクリートの表面塩分量は品質、材令にかかわらず、コンクリート重量に対して0.2~1.0wt%の範囲を採ることがわかる。また、塗装したコンクリートの表面塩分量は膜厚等により異なるが、打放しのものに比べ1/2~1/10程度になっていることが確認できた。

4. 3 付着塩分量

図-4は、飛沫帯および大気中にあるコンクリート表面に付着し浸透する塩分量を推定したものである。この結果から、海岸部では年間1 m^2 当たり約36g前後の塩分(1mdd相当)がコンクリート中に浸透することがわかる。また、同一環境別に見ると、塩分拡散係数が大きいコンクリートほどこの付着塩分量が多くなる傾向が認められる。

図-5は、E地点における付着塩分量の推定値と海岸からの距離の関係を示したものである。曲線Ⅰは、S市平野部におけるガーゼ法による海岸からの距離別大気中塩分量分布実測例[4]で、曲線ⅡはISOにおいて取りまとめた平野部におけるウェットキャンドル法による実測例[4]である。この結果より、E地点の実構造物中の塩分分布量データから推定したコンクリートの表面に付着し、浸透する可溶性塩分量は、S市における実測例よりもやや大きい値を示しているが、その分布形状はよく類似していることが判明した。また、一般に海岸から200m位までの大気中の塩分量は0.3~

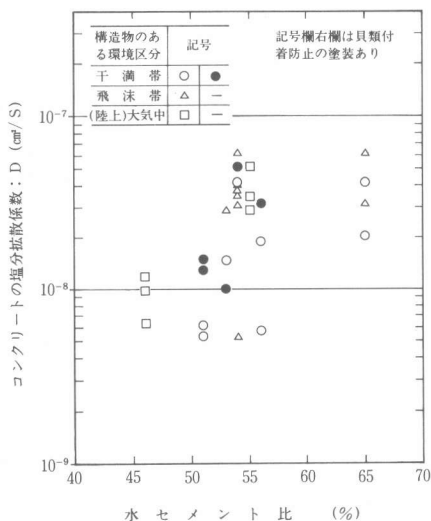


図-2 コンクリートの塩分拡散係数の推定値と水セメント比の関係

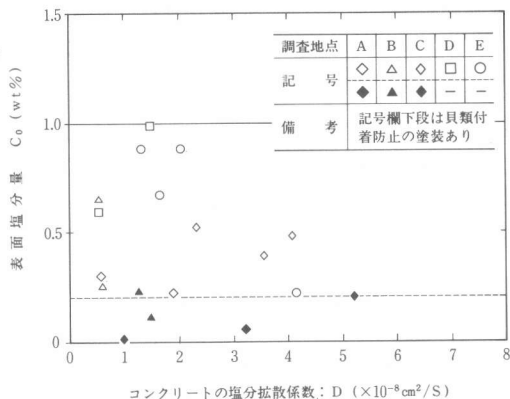


図-3 干満帯のコンクリート表面塩分量推定値

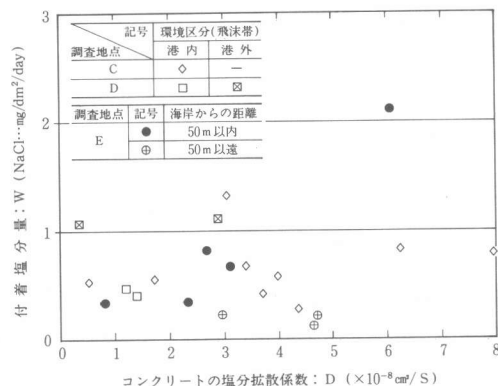


図-4 飛沫帯および大気中のコンクリート表面への付着塩分量の推定値 - C, D, E 地点 -

0.8mdd, 1 kmまでの距離では平均0.2mddと言われている[5]が, 前者については同等もしくはそれ以上の, 後者については海岸から420m離れた地点で0.13mddの付着塩分量が確認出来た。

図-6は, E地点における付着塩分量の推定値と標高の関係を示したものである。但し, 直線Ⅰは海岸から100mの距離に隣接して建つ2つの建物の外壁コンクリートからの推定値であり, 直線Ⅱは海岸からの距離も異なる擁壁等の土木構造物からの推定結果である。なお, 両者の付着塩分量の差は, 主に分析方法の違いによるものと考えられる。これらの結果から, 一般に大気中の塩分の高さ方向の分布量は, 海岸周辺では地上100m位まではほぼ同じであるとされている[4]が, 今回の推定計算から得られた高さ方向の付着塩分量は, 海岸からの距離別塩分量の飛沫傾向と同様に, 指数関数的に減少する関係が認められた。

5. まとめ

以上, 今回調査した構造物は場所, 環境, 供用年数, 品質等種々の条件下にあるが, その含有塩分量分布データに拡散理論を適用することにより, その地域の塩分汚染環境を評価できる見通しが得られた。一方, コンクリート中の塩分腐食に関しては, 劣化判定基準としての限界塩分量(腐食閾値)の提案がされてきている(例えば[6,7])。今後は更にデータの蓄積を図ると共に, これらを組合せることにより, その地域にあった構造物の設計ならびに維持管理に反映していく予定である。

参考文献

- [1] R.D.Browne: Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP65-11, pp.169~204 [2] 山内幸裕, 片脇清士: プレストレストコンクリート構造物の腐食に関する研究—飛沫帯におけるコンクリートへの塩分浸透に関する調査結果—, 第37回土木学会年次学術講演会, V-135, pp.269~270, 1982 [3] 新数表シリーズ3, 正規分布表, コロナ社, pp.13, 1961 (C.Hasting: Approximations for Disital Computers 1955参照) [4] 樫野紀元: コンクリート構造物の劣化対策, 塩分による鉄筋の腐食と防食対策, あらか第二集—建設省建築研究所成果撰, 建築研究振興協会, 1984. 10 [5] 岸谷孝一, 西澤紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(I), 技報堂出版, pp.13, 1986. 5 [6] 宮川豊章: 樹脂: 用途が広がる補修, 補強用材料, 土木学会誌 Vol.70, pp.43~47, 1985.11 [7] 横田優他: 塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の診断法の提案, 第39回土木学会中国四国支部講演会概要集, V-11, 1987. 5

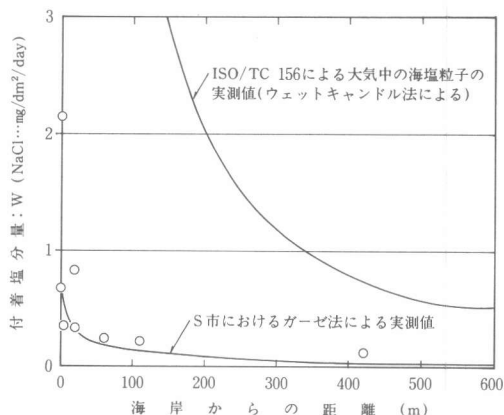


図-5 飛沫帯および大気中のコンクリート表面への付着塩分量の推定値と海岸からの距離の関係

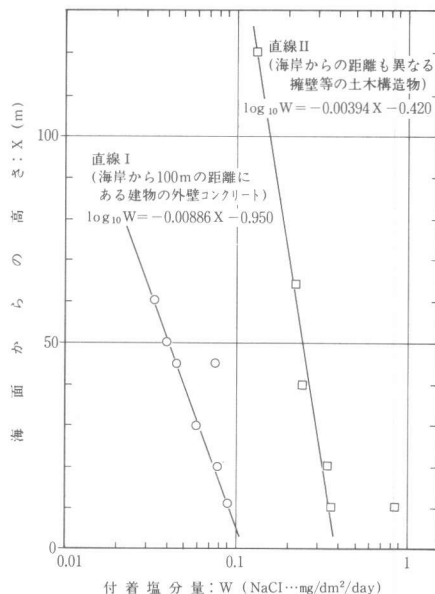


図-6 飛沫帯および大気中のコンクリート表面への塩分量の推定値と標高との関係