

塩害環境下におけるコンクリート構造物の劣化予測に関する研究

Prediction of Degradation for RC Structures in Marine Environment

林 大介 横関 康祐 永田 茂¹⁾ 須田 久美子 坂田 昇

I. はじめに

筆者らは、1991年より実海洋環境下における暴露試験及び室内試験などを実施し、塩害を受けるコンクリート構造物の高精度な劣化予測に関する検討を進めている¹⁾。実構造物に生じる劣化現象は、材料、施工及び環境などの不確定性によってばらつきを生じるものであり、施設の維持管理を行う上で、これを考慮した劣化予測が必要と考えられる。本報告では、まず、筆者らの一連の研究によって得られた知見を基に構築したコンクリート構造物の塩害劣化予測モデルについて示す。次に、構築したモデルを用い、コンクリート構造物の不確定性を考慮した劣化予測について事例検討を行った結果を示す。

II. 塩害劣化予測モデル

1. 表面塩化物イオン量推定モデル

これまでの研究において、コンクリートの単位セメント量の増加に伴って表面に吸着される塩化物イオン量が増加することを確認した¹⁾。一方、暴露試験では設置場所（干満帯及び海中）による表面塩化物イオン量への明確な影響は認められなかったが、土木学会コンクリート標準示方書には離岸距離に応じた値が示されている²⁾。これらを考慮して式(1)に示す推定式を構築した。ここでは、対数近似とするため、海岸線上の構造物の離岸距離を0.00001kmとした。

$$C_0 = f(C) \ln(d) + g(C) \quad (1)$$
$$f(C) = h \cdot C + i, \quad g(C) = j \cdot C + k$$

ここに、 C_0 ：表面塩化物イオン量 (kg/m^3)、 C ：単位セメント量 (kg/m^3)、 d ：離岸距離 (km)、 h, i, j, k ：セメントの種類ごとの係数 (Table 1)

普通セメントを用いたコンクリートの表面塩化物イオン量の推定値を Fig.1 に示す。図中、海岸線上の推定値を×印で示した。同図より、海岸線上では推定値の方が示方書より大きな値を示している。

2. 見掛けの拡散係数推定モデル

土木学会コンクリート標準示方書には、水セメント比から見掛けの拡散係数を推定する式が示されている²⁾。著者らがこれまでに実施した一連の実験では、水セメント比に加え、設置場所（干満帯、海中）及び環境温度の影響も受けことが確認された¹⁾。これを踏まえ、Fig.2 に示すフローに従って式 (2) の推定モデルを構築した。

$$D = [p \{l \cdot (W/C) + m \cdot P_{ad} + n\}^q] \cdot [1.28 \exp\{-1470/(273+T) + 4.83\}] \quad (2)$$

Table 1 セメントの種類ごとの係数
(Coefficient of Equation (1) and (2))

セメント種類	h	i	j	k	l	m	n
普通セメント	-0.0031	-0.398	0.0021	0.271	8.60	—	205.6
高炉セメント	-0.0032	-0.577	0.0022	0.393	3.69	-5.43	391.1
フライッシュセメント	-0.0035	-0.387	0.0024	0.264	8.34	-2.30	230.1
シリカフューム混入	-0.0052	-0.0281	0.0035	0.019	5.98	-13.0	54.89

ここに、 W/C ：水セメント比 (%), P_{ad} ：混和材置換率 (%), l, m, n ：セメントの種類ごとの係数 (Table 1), p, q ：設置場所ごとの係数 (Table 2), T ：環境温度 ($^{\circ}\text{C}$)

式(2)によって推定した環境温度 15°C における普通セメント及び高炉セメントの見掛けの拡散係数を Fig.3 に示す。同図より、普通セメント及び高炉セメント共に、海中の推定値が示方書式と近い値となり、干満帯の推定値はそれより小さな値となった。

3. 鉄筋腐食速度推定モデル

著者らがこれまでに提案している鉄筋腐食速度推定モデル³⁾には、酸素消費量を100%としていること、含水率が限定されていること、含

Table 2 設置場所ごとの係数
(Coefficient of Equation (2))

設置場所	p	q
干満帯	4.46E-12	1.21
海中	8.75E-14	2.07

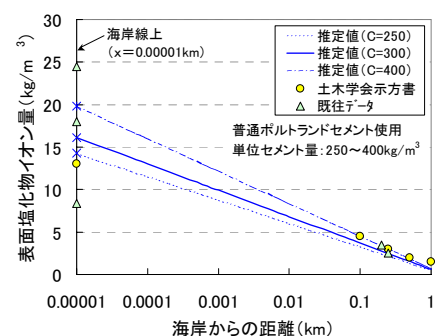


Fig.1 表面塩化物イオン量の推定値
(Predicted Amount of Surface Chloride Ions)

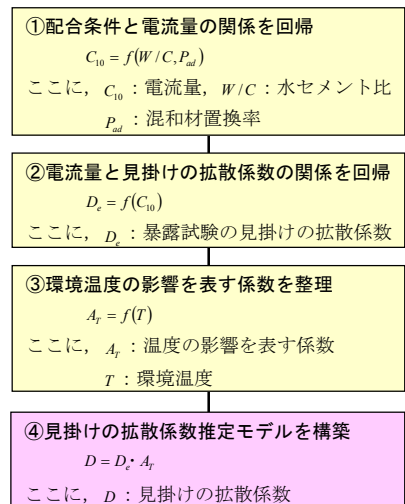


Fig.2 推定モデル構築フロー
(Flow Chart for Modeling)

水率の低下とともに腐食速度が増加すること及び温度の影響を考慮していないことなどの課題があった。ここでは、既往の研究成果⁴⁾などを基に式(3)のようにモデルを改良した。同式では、相対湿度85%程度において腐食速度が最大となる。

$$W = [0.0032 \cdot 10^{0.025S_{avg}}] [0.707 \cdot \exp(0.0231 \cdot T)] \{ [-a \cdot \ln(S_{avg}) + b] / L \} \quad (3)$$

$$S_{avg} = 33.4 + 1.46(RH) - 0.287(W/C) - 0.0158(RH)^2 - 0.0145(RH)(W/C) \\ + 0.000422(W/C)^2 + 0.0000773(RH)^3 + 0.000174(RH)^2(W/C) \\ - 0.00000422(RH)(W/C)^2 \\ a = 25.4(W/C) + 836 \quad (W/C < 50), \quad a = 98.9(W/C) - 2842 \quad (W/C \geq 50) \\ b = 117(W/C) + 3852 \quad (W/C < 50), \quad b = 455(W/C) - 13075 \quad (W/C \geq 50)$$

ここに、W：腐食速度 (mg/cm²/y)、S_{avg}：相対含水率 (%), RH：相対湿度 (%), W/C：水セメント比 (%), T：温度 (°C) L：コンクリートのかぶり (mm)

Ⅲ. 不確定性を考慮した劣化予測の事例検討

1. 不確定性を考慮した劣化予測方法

前章に示した劣化予測モデルを用い、腐食ひび割れ発生を限界状態として (式 (4)), モンテカルロ法による劣化発生確率の事例解析を行い、劣化発生確率に影響を及ぼす要因について検討を行った。

$$P_f = P[W_{cr} - W_t \leq 0] \quad (4)$$

ただし、P [] は確率を表す。ここに、P_f：劣化確率、W_{cr}：腐食ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm²), W_t：時間 t の鉄筋腐食量 (mg/cm²)

2. 事例検討

栈橋の梁を事例として Table 3 に示す条件を設定した。ケース 1 は実構造物のデータを基に設定したものであり、水セメント比の標準偏差として、圧縮強度の変動係数 10% に相当する値を与えた。ケース 2 は水セメント比及び単位セメント量の平均値を海洋コンクリートの値としたもの²⁾であり、ケース 1 と同様、水セメント比の標準偏差として圧縮強度の変動係数 10% に相当する値を与えた。ケース 3 は水セメント比と単位セメント量のばらつきを抑えたものである。ケース 4 は材料の品質を確保できなかった部位を想定して水セメント比及び単位セメント量の値を設定したものである。ケース 5 は、かぶりの平均値を設計値である 70mm としたものである。ここで、ケース 1 ～ 5 の腐食限界塩化物イオン量の平均値は、実環境で 1.2 から 2.4kg/m³ とされていること²⁾を参考に 1.8kg/m³ とし、ケース 6 では 2.4kg/m³ に設定した。

劣化発生確率評価結果を Fig.4 に示す。ケース 1 ～ 6 を比較すると、本検討の範

囲において最も劣化発生確率の低減に影響を及ぼす要因はケース 5 のかぶりの確保であり、次にケース 6 の腐食限界塩化物イオン量であった。海洋コンクリートの配合としたケース 2 では劣化発生確率の低減が認められたものの、かぶりの確保及び腐食限界塩化物イオン量の影響に比べてその程度は小さかった。また、材料のばらつきを抑えたケース 3 では劣化発生確率の低減がほとんど認められなかった。一方、材料を低品質に設定したケース 4 では、劣化発生確率が高い値となり、材料の製造及び施工における品質管理の重要性が確認される結果となった。

Ⅳ. おわりに

本研究では、塩害劣化モデルを構築し、不確定性を考慮した劣化予測の事例解析を行った。こうした検討結果を設計、施工及び維持管理に反映させることにより、構造物の耐久性を向上させることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 林ほか；コンクリート中への塩化物イオン浸透性に関する研究，鹿島技術研究所年報，Vol.50，(2002.9)，pp.71-78.
- 2) 土木学会；コンクリート標準示方書[施工編]，1996 及び 2002.
- 3) Yokozeki et al.；A Rational Model to Predict the Service Life of RC Marine Structures, Forth CANMET/ACI Int.Conf.,(1997),pp.777-799.
- 4) 例えば魚本ほか；コンクリート中の鉄筋の腐食速度に関する基礎研究，JCI 年次論文報告集，Vol.18，No.1，(1996)，pp.777-782.

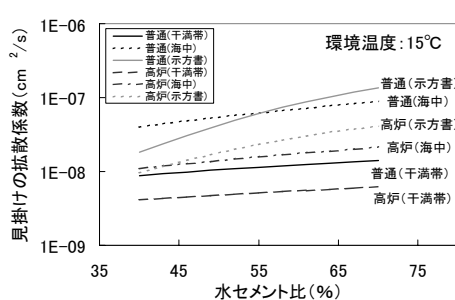


Fig.3 見掛けの拡散係数の推定値 (Predicted Diffusion Coefficient)

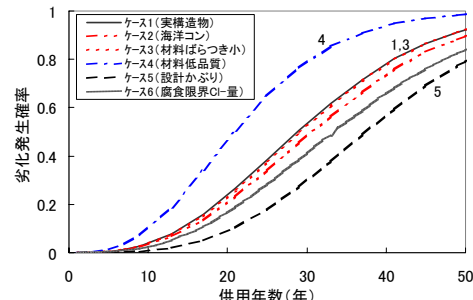


Fig.4 劣化発生確率 (Probability of Degradation)

Table 3 検討ケース (上段：平均値，下段：標準偏差) (Cases of Prediction for Degradation)

パラメータ	確率分布	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6
		実構造物	海洋構造物の配合	材料のばらつき小	材料低品質	設計かぶり	腐食限界 Cl ⁻ 量
水セメント比(%)	正規分布	50	45	50	70	50	50
	標準偏差	4.4	4.0	0.5	10.0	4.4	4.4
単位セメント量(kg/m ³)	正規分布	302	330	302	280	302	302
	標準偏差	15	15	2	30	15	15
腐食限界塩化物イオン量(kg/m ³)	正規分布	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	2.4
	標準偏差	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
かぶり(mm)	正規分布	61	61	61	61	70	61
	標準偏差	14	14	14	14	14	14
鉄筋間隔(mm)	正規分布	150	150	150	150	150	150
	標準偏差	15	15	15	15	15	15
鉄筋径(mm)	確定値	16	16	16	16	16	16
クリップ係数	確定値	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
鉄筋体積膨張率	確定値	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
鉄筋腐食角度(°)	確定値	360	360	360	360	360	360
離岸距離(km)	確定値	0.00001 (干満帯)	0.00001 (干満帯)	0.00001 (干満帯)	0.00001 (干満帯)	0.00001 (干満帯)	0.00001 (干満帯)
年平均気温(°C)	確定値	15	15	15	15	15	15
年平均湿度(°C)	確定値	85	85	85	85	85	85