

論文 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

林 大介^{*1}・横関 康祐^{*2}・永田 茂^{*3}・坂田 昇^{*4}

要旨：暴露試験および室内試験の結果等を基に、塩害を受けるコンクリート構造物の表面塩化物イオン量推定モデル、見掛けの拡散係数推定モデルおよび鉄筋腐食速度推定モデルを構築した。構築したモデルを用い、モンテカルロ法によって栈橋の梁を事例とした劣化発生確率評価を行った。その結果、かぶり、コンクリート配合、材料のばらつきおよび腐食限界塩化物イオン量の中で、劣化発生確率の低減に最も影響を与える要因はかぶりであった。また、低品質の材料を用いた部位では、劣化発生確率が高い値を示した。これらの傾向は信頼性指標からも読み取れた。こうした検討結果の活用により、構造物の高耐久化を図ることが可能になると考えられる。

キーワード：塩害、表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数、確率論、モンテカルロ法

1. はじめに

海洋環境下に供用されるコンクリート構造物の塩害が問題視されるようになって久しい。筆者らは、1991年より実海洋環境下における暴露試験および室内試験等による検討を実施してきた¹⁾。これら一連の研究の目的は、塩害を受けるコンクリート構造物の劣化過程を高精度に予測する手法の確立であり、さらには、部分安全係数を低減した合理的な耐久性能設計手法や適切な維持管理計画策定手法の確立である。一方、実構造物に生じる劣化現象は、材料、施工および環境等の不確定性によってばらつきを生じるものであり、構造物の維持管理において、これを考慮した劣化予測²⁾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。

2. 塩害劣化予測モデル

2.1 塩害の劣化進行過程

塩害を受けるコンクリート構造物の部材性能

は、進展期を経過すると著しく低下する³⁾。したがって、維持管理においては、進展期までの範囲に管理限界を設定することが考えられる。このことから、本研究では進展期と加速期の境界、すなわち腐食ひび割れの発生を構造物の限界状態と考え、潜伏期および進展期を対象とした劣化予測モデルを構築した。

2.2 潜伏期の劣化予測モデル

(1) 基本式

塩害の潜伏期の予測は、一般にフィックの拡散方程式の理論解によって行われている³⁾。ここでは、8.5年間に及ぶ暴露試験、急速塩化物イオン浸透性試験および室内浸漬試験の結果等を基に、同式の係数である表面塩化物イオン量および見掛けの拡散係数の推定モデルを構築した。対象とした材料は、普通セメント、高炉セメント、フライアッシュセメントおよびシリカフュームを混入した普通セメントを用いたコンクリートである。

(2) 表面塩化物イオン量

筆者らは、干満帯および海中における暴露試験により、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

*1 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ 研究員 (正会員)

*2 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ 主任研究員 (正会員)

*3 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ 主管研究員 工博

*4 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ長 工博 (正会員)

増加することを確認した¹⁾。

一方、暴露試験では設置場所（干満帯および海中）による表面塩化物イオン量（以下 C_0 ）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 C_0 が示されている³⁾。これらを考慮し、以下の手順に従って C_0 の推定モデルを構築した。

まず、既往の研究データ⁴⁾より、離岸距離 0km（海岸線上）、0.2km および 0.25km にある構造物の C_0 のデータを抽出した。ここで、対象データは凍結防止剤を散布していない構造物のものとした。次に、海岸線上の C_0 の平均値と暴露試験の単位セメント量ごとの平均値の比率を求めた。この比率によって、離岸距離 0.2km および 0.25km のデータを単位セメント量ごとに補正し、最終的に式(1)に回帰した。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。

$$C_0 = f(C) \cdot \ln(d) + g(C) \quad (1)$$

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

ここに、 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（表-1）

式(1)によって推定した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値を図-1に示す。図中、海岸線上の推定値を×印で示した。同図より、普通セメントの推定値は、海岸線上において示方書より大きな値を示していることから、示方書は危険側の値に設定されている可能性もあると考えられる。また、海岸から離れた範囲では単位セメント量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ の値が示方書とほぼ同程度となる傾向を示した。

式(1)の推定値と暴露試験データ¹⁾の関係を図-2に示す。同図より、干満帯および海中の推定値は、実測の中心値を精度よく推定できているものの、大きくばらつくことが確認された。

(3) 見掛けの拡散係数

土木学会コンクリート標準示方書には、水セ

表-1 セメントの種類ごとの係数

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
フライアッシュセメント	-0.0035	-0.387	0.0024	0.264	8.34	-2.30	230.1
シリカフェーム混入	-0.0052	-0.0281	0.0035	0.0190	5.98	-13.0	54.89

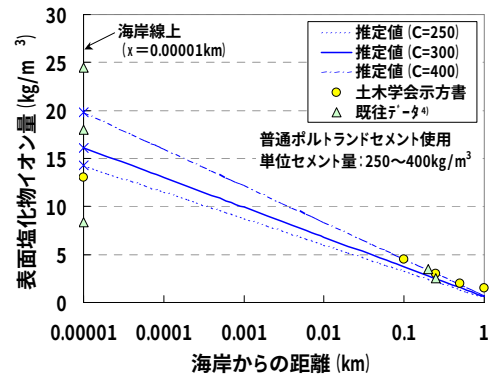


図-1 表面塩化物イオン量の推定値

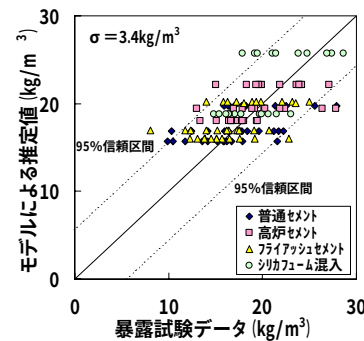


図-2 推定値と実験値の比較

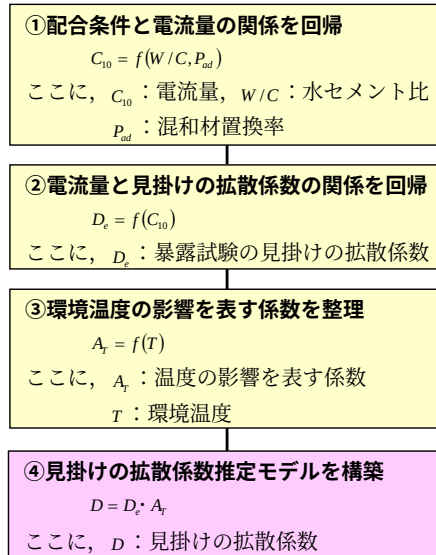


図-3 推定モデル構築フロー

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³⁾。筆者らが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）および環境温度の影響も受けることが確認された¹⁾。これを踏まえ、図-3に示すフロ

ーに従って推定モデルを構築した。

まず、急速塩化物イオン浸透性試験の配合条件と電流量の関係を式(2)に回帰した。

$$C_{10} = l \cdot (W/C) + m \cdot P_{AD} + n \quad (2)$$

ここに、 C_{10} ：電流量（クーロン）、 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（表－１）

既往の研究において、急速塩化物イオン浸透性試験の電流量の対数と、実環境の見掛けの拡散係数の間には正の相関があることが報告されている⁵⁾。図－４に示すように実験結果にも同様の傾向が認められたため、電流量と暴露試験8.5年時における見掛けの拡散係数のデータを式(3)のように非線形回帰した。

$$D_e = p \cdot (C_{10})^q \quad (3)$$

ここに、 D_e ：暴露試験の見掛けの拡散係数（ cm^2/s ）、 p, q ：設置場所ごとの係数（表－２）

最後に室内浸漬試験の結果¹⁾を基に、環境温度が見掛けの拡散係数に及ぼす影響を検討した。自然界の多くの反応の速度定数は、温度が高くなるほど指数関数的に増大するというアレニウスの理論に従うとされている⁶⁾。図－５に示すように、室内浸漬試験結果¹⁾にも同様の傾向が認められたため、暴露場所の年間平均気温である15℃における値が1となるように、環境温度の影響を表す係数を式(4)のように整理した。

$$A_t = 1.28 \cdot \exp\{-1470/(273+T) + 4.83\} \quad (4)$$

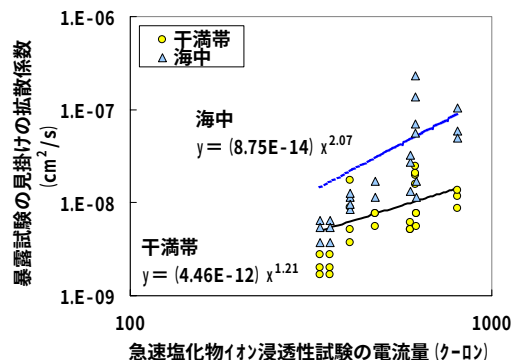
ここに、 A_t ：環境温度の影響を表す係数、 T ：環境温度（℃）

以上の検討によって得られた式(2)、式(3)および式(4)を整理し、見掛けの拡散係数の推定モデルとして、式(5)を構築した。

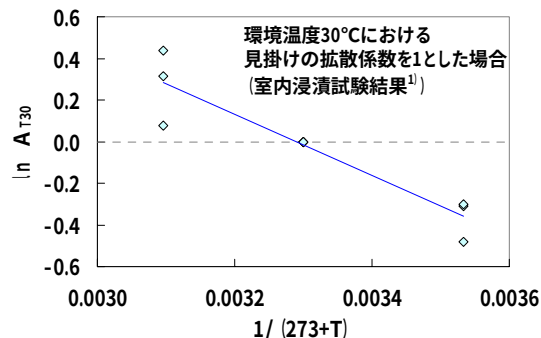
$$D = \left[p \{ l \cdot (W/C) + m \cdot P_{AD} + n \}^q \right] \cdot \left[1.28 \exp\{-1470/(273+T) + 4.83\} \right] \quad (5)$$

ここに、 D ：見掛けの拡散係数（ cm^2/s ）

式(5)によって推定した環境温度15℃における普通セメントおよび高炉セメントの見掛けの拡散係数を図－６に示す。同図より、普通セメントおよび高炉セメントともに、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



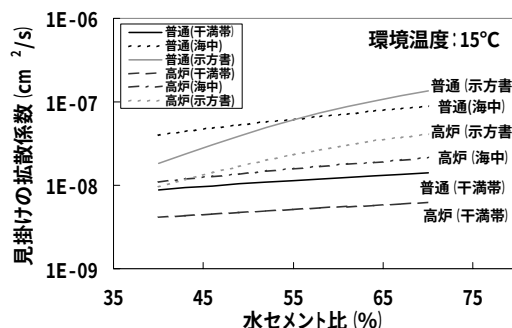
図－４ 電流量と見掛けの拡散係数の関係¹⁾



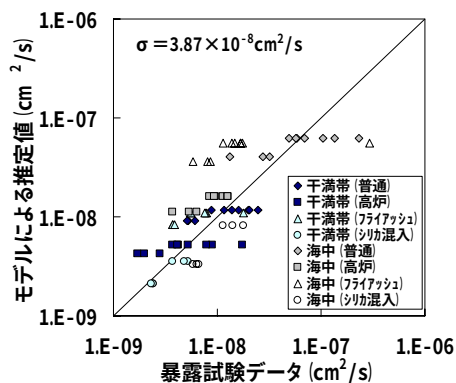
図－５ アレニウスプロット¹⁾

表－２ 設置場所ごとの係数

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



図－６ 見掛けの拡散係数の推定値



図－７ 推定値と実験値の比較

それより小さな値となった。また、式(5)の推定値と暴露試験データの関係を図－７に示す。同図より、推定値は幅広い範囲で中心値近くをと

らえていることが確認された。

2.3 進展期の劣化予測モデル

(1) 基本式

筆者らは、式(6)に示す進展期の劣化予測モデルを提案している⁷⁾。

$$T_1 = W_{cr}/W \quad (6)$$

ここに、 T_1 ：進展期 (y)， W ：鉄筋腐食速度 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{y}$)， W_{cr} ：腐食ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm^2)

ここでは、既往の研究等を基に、これまでに提案している鉄筋腐食速度の推定モデルを改良した。なお、腐食ひび割れ発生限界腐食量については、弾塑性 F E Mモデルに基づく既存推定モデル⁷⁾を提案している。

(2) 鉄筋腐食速度の推定モデルの改良

既往の鉄筋腐食速度推定モデル⁷⁾の課題として、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、含水率の低下とともに腐食速度が増加することおよび温度の影響を考慮していないこと等が挙げられる。そこで、以下の手順に従ってモデルを改良した。

まず、秋田ら⁸⁾が提案した相対含水率と相対湿度の関係式(7)および魚本らの研究⁹⁾に基づく式(8)の腐食反応率を既往の鉄筋腐食速度推定モデル⁷⁾に乗じて式(9)を構築した。

$$\begin{aligned} S_{avg} = & 33.4 + 1.46(RH) - 0.287(W/C) - 0.0158(RH)^2 \\ & - 0.0145(RH)(W/C) + 0.000422(W/C)^2 \\ & + 0.0000773(RH)^3 + 0.000174(RH)^2(W/C) \\ & - 0.00000422(RH)(W/C)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\alpha = 0.151 \cdot (S_{avg} - 24.5) / 75.5 \quad (8)$$

ここに、 α ：腐食反応率， S_{avg} ：相対含水率(%)， RH ：相対湿度(%)， W/C ：水セメント比(%)

$$W_{\alpha} = \{-a \cdot \ln(S_{avg}) + b\} / L \quad (9)$$

$$a = 25.4(W/C) + 836 \quad (W/C < 50\%)$$

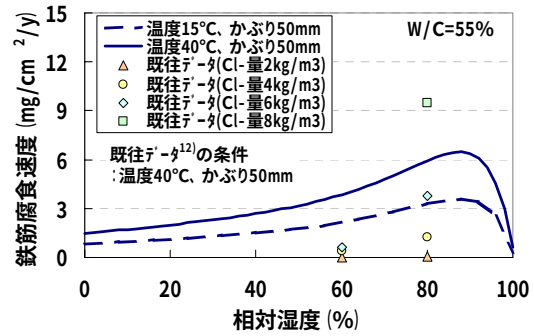
$$a = 98.9(W/C) - 2842 \quad (W/C \geq 50\%)$$

$$b = 117(W/C) + 3852 \quad (W/C < 50\%)$$

$$b = 455(W/C) - 13075 \quad (W/C \geq 50\%)$$

ここに、 W_{α} ：腐食反応率を考慮した腐食速度 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{y}$)， L ：コンクリートのかぶり (mm)

次に、含水率による腐食速度の低減効果を考



図－8 鉄筋腐食速度推定値

慮するため、佐伯らの研究¹⁰⁾による含水率の変化と拡散係数変化率の関係式(10)を式(9)に乗じて、式(11)を得る。

$$f(S_{avg}) = 0.0032 \cdot 10^{0.025 \cdot S_{avg}} \quad (10)$$

$$W_s = f(S_{avg}) \cdot W_{\alpha} \quad (11)$$

ここに、 $f(S_{avg})$ ：含水率による拡散係数変化率， W_s ：含水率による腐食速度の低減を考慮した腐食速度 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{y}$)

最後に、既往の研究において酸素拡散律速の腐食速度は 30°C 上昇するごとに 2 倍になることが示されていることから¹¹⁾，温度の影響を式(12)のように定式化し、式(11)に乗じて式(13)に示す鉄筋腐食速度推定モデルを構築した。

$$g(T) = 0.707 \cdot \exp(0.0231 \cdot T) \quad (12)$$

ここに、 $g(T)$ ：温度による腐食速度の変化率， T ：温度 (°C)

$$W = f(S_{avg}) \cdot g(T) \cdot W_{\alpha} \quad (13)$$

ここに、 W ：腐食速度 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{y}$)

式(12)による腐食速度と相対湿度の関係を図－8に示す。同図より、式(12)では相対湿度 85% 程度において腐食速度が最大となる結果となった。また、これを松村らの室内試験データ¹²⁾と比較したところ、相対湿度 60% では推定値の方が大きな値となったが、80% では試験データに近い値を示した。

3. 不確定性を考慮した劣化予測の事例検討

3.1 不確定性を考慮した劣化予測

前章で構築した劣化予測モデルによって、実測値をほぼ再現できることが確認された。一方、推定値に対して実測値はばらつきを生じたことから、劣化予測では確率論に基づく評価が必要

と考えられる。

これまでに、潜伏期を対象とした確率論的評価²⁾や、簡易なモデルによる進展期までの確率論的評価¹³⁾はされているが、詳細なモデルによって進展期までを評価した研究はほとんどない。

ここでは、前章で構築した劣化予測モデルを用い、式(14)すなわち腐食ひび割れの発生を限界状態として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。

$$P_f = P[W_{cr} - W_t \leq 0] \\ = \Phi(-\beta) \quad (14)$$

ただし、 $P[]$ は確率を表し、 $\Phi()$ は正規確率分布関数を表す。ここに、 P_f ：劣化確率、 W_t ：時間 t の鉄筋腐食量 (mg/cm^2)、 β ：信頼性指標

3.2 事例検討

栈橋の梁を事例として表-3に示す条件を設定した。ケース1は実構造物のデータ¹⁴⁾に基づいて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は水セメント比およ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¹⁵⁾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およ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。また、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

表-3 検討ケース（上段：平均値，下段：標準偏差）

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	限界Cl量
水セメント比(%)	正規分布	50 4.4	45 4.0	50 0.5	70 10.0	50 4.4	50 4.4
単位セメント量(kg/m^3)	正規分布	302 15	330 15	302 2	280 30	302 15	302 15
限界Cl ⁻ 量(kg/m^3)	正規分布	1.8 0.3	1.8 0.3	1.8 0.3	1.8 0.3	1.8 0.3	2.4 0.3
かぶり(mm)	正規分布	61 14	61 14	61 14	61 14	70 14	61 14
鉄筋間隔 ⁷⁾ (mm)	正規分布	150 15	150 15	150 15	150 15	150 15	150 15
鉄筋径 ⁷⁾ (mm)	確定値	16	16	16	16	16	16
クリープ係数 ⁷⁾	確定値	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
鉄筋体積膨張率 ⁷⁾	確定値	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
鉄筋腐食角度 ⁷⁾ (°)	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

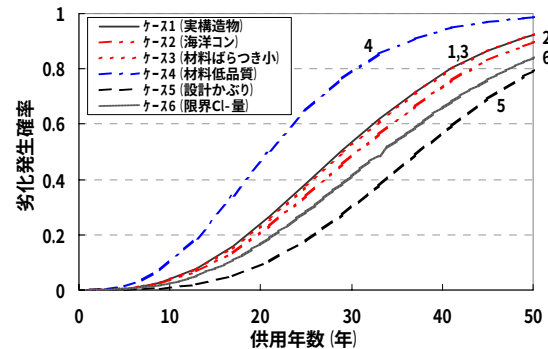


図-9 劣化発生確率評価結果

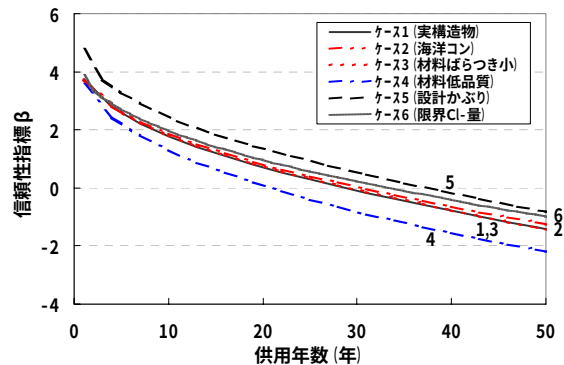


図-10 信頼性指標β

2.4 kg/m^3 とされていること³⁾を参考に1.8 kg/m^3 とし、ケース6では2.4 kg/m^3 に設定した。

劣化発生確率評価結果を図-9に示す。ケース1とほぼ同条件の栈橋の調査結果では、建設後14年において部材面積の10～40%程度に剥離が認められており¹⁴⁾、これに対応するケース1の供用14年における劣化発生確率は0.1程度であった。実構造物の状態と劣化発生確率の対応については、今後、検証していく必要がある。

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、かぶりの確保およ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、材料の製造およ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。

信頼性指標 β を図-10に示す。同図より、本検討における信頼性指標 β は、ケース4が最も低く、次いでケース1およびケース3が同程度であり、以下、ケース2、ケース6、ケース5の順に低くなっており、上記と同様の傾向が読み取れる。ISO規格¹⁶⁾には、目標信頼性指標による既存構造物の管理に関する方法が示されており、今後、耐久性に関する目標信頼性指標についても検討していく必要があると考えられる。

以上のような検討結果を設計、施工およ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。

4. まとめ

- (1) 各種の実験結果等を基に、セメント種類、単位セメント量および離岸距離をパラメータとした表面塩化物イオン量の推定モデルを構築した。また、セメント種類、水セメント比、混和材置換率、設置場所（干満帯および海中）および環境温度をパラメータとした見掛けの拡散係数の推定モデルを構築した。
- (2) 水セメント比、コンクリートの含水率およびかぶりをパラメータとする既往の腐食速度評価モデルを、腐食反応率、含水率による腐食速度の低減効果および温度の影響を考慮したモデルとして改良した。
- (3) 構築した劣化予測モデルを用い、モンテカルロ法による事例検討を行った。その結果、

部材面積の10～40%に剥離が生じている状態に対応する劣化発生確率の予測値は0.1程度であった。また、かぶりの確保、コンクリート配合、材料のばらつきの低減および腐食限界塩化物イオン量の中で、最も劣化発生確率の低減に有効な要因はかぶりの確保であった。一方、低品質な材料を使用する場合、高い劣化発生確率を示すことが確認された。これらの傾向は信頼性指標からも読み取れた。こうした検討により、構造物の高耐久化に有効な情報が得られると考えられる。

参考文献

- 1) 林、横関、渡邊、坂田：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, pp.71-78, 2002.9
- 2) 例えば永田ほか：材料・配合の地域特性を考慮した確率論的劣化評価手法の研究、複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理に関するシンポジウム、pp.37-44, 2001.5
- 3) 土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]および[施工編]、2001-2002
- 4) (独)土木研究所：土研資料「既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果」、2001
- 5) 鳥居ほか：コンクリートの塩素イオン透過性に関する研究、セメント技術大会、第44回、pp.584-589, 1990
- 6) ムーア：物理化学、東京化学同人、1974
- 7) Yokozeki, K. et al. : A Rational Model to Predict the Service Life of RC Marine Structures, Forth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, pp.777-799, 1997
- 8) 秋田ほか：乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法、土木学会論文集、No.490/V-23, pp.101-110, 1994.5
- 9) 大住、加藤、魚本：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.777-782, 1996
- 10) 佐伯ほか：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.963-968, 1996
- 11) ユーリック、レヴィー：腐食反応とその制御、産業図書、1989
- 12) 松村ほか：海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法、土木学会論文集、No.634/V-45, pp.303-314, 1999.11
- 13) 例えば伊庭、松島、関、川田：塩害を受けるRC構造物のライフサイクルコスト算定に関する基礎研究、土木学会論文集、No.704/V-55, pp.1-11, 2002.5
- 14) 守分ほか：既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性、土木学会論文集、No.520/V-28, pp.111-122, 1995.8
- 15) 土木学会コンクリート標準示方書[施工編]、1996
- 16) ISO13822 Bases for design of structures-Assessment of existing structures, 2001.12