

## 信頼性理論を用いた塩害劣化作用を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価の試み

東北大学大学院	正会員	○秋山充良
東日本旅客鉄道(株)	正会員	伊東佑香
東北大学大学院	フェロー	鈴木基行

## 1. はじめに

信頼性理論を基礎とする性能設計法の確立が検討され、ISO2394<sup>1)</sup>や欧州の設計標準となる EuroCode においても信頼性設計の考え方が取り込まれている<sup>2)</sup>。こうした背景のもと、著者らは、コンクリート構造物の環境劣化作用に対する性能照査を信頼性理論に基づく限界状態設計法の枠組みの中で実現するための準備を進めている。このような設計法の構築により、コンクリート構造物の耐久性評価に係る不確定要因のばらつきを低減する努力が安全係数の減少に容易に反映される(例えば、力学モデルに基づき精緻に腐食ひび割れを予測する、またはその予測式の精度の向上が安全係数の低減につながる)など、このような耐久設計法を構築する意義は大きい。

本研究は、耐久信頼性設計法を構築するための基礎的研究として、塩害劣化作用を受ける鉄筋コンクリート(RC)構造物で生じる鋼材の腐食発生確率(損傷確率)の定量化を試みた。

## 2. 耐久設計に用いる塩害劣化作用の確率モデル

RC 構造物で生じる鋼材腐食の発生確率を算定するフローは、以下の3つの手順に分けることができる。

(手順1) 塩害環境を表す指標のひとつである飛来塩分量の確率モデル(ハザード曲線  $F_s(C_{air})$ )の作成。

(手順2) 塩化物イオンの拡散を予測し、鋼材位置における塩化物イオン濃度とその腐食発生限界量を超過する確率を求めたフラジリティカーブ  $F_r(C_{air})$  の作成。

(手順3) ハザード曲線とフラジリティカーブの掛け合わせにより、供用開始後  $t$  年における鋼材腐食発生確率を式(1)に従い算定。

$$pf = \int_0^{\infty} \left( -\frac{dF_s(C_{air})}{dC_{air}} \right) \cdot F_r(C_{air}) dC_{air} \quad (1)$$

(手順1)では、海岸線位置の年平均風速  $u$  (m/s)と、海岸線から  $X$  km 離れた位置での飛来塩分量の実測値  $C_{air,e}$  の関係を整理し、その距離減衰式を作成する。ここでは、海岸線からの距離  $X$  で飛来塩分量の変化を表現し、 $u$  と  $X$  の関数となる距離減衰式から求められる  $C_{air,c}$  と  $C_{air,e}$  の比の統計量より空間的ばらつきを評価した。飛来塩分量の実測値としては、土木研究所の全国飛来塩分量調査(III)<sup>3)</sup>を、年平均風速  $u$  は飛来塩分量観測地点から最も海岸線に近い位置にある気象台で得られた観測値を用いた。得られた距離減衰式を式(2)に示す。また、その距離減衰式をもとに、解析対象構造物位置で飛来塩分量が特定の値  $c_{air}$  を超過する確率を算定する式を式(3)に示す。

$$C_{air} = 1.29 \times r \times u^{0.386} \cdot X^{-0.952} \quad (2)$$

$$F_s(c_{air}) = \int_0^{\infty} [P(C_{air} > c_{air} | u, X = a) f_u(u)] du \quad (3)$$

ここに、 $r$  は海風比率(海風の吹く時間の比率)、 $f_u(u)$  は年平均風速の確率密度関数である。

図-1に、酒田地域(山形県)および石巻地域(宮城県)のハザード曲線を示す。それぞれ、海岸線からの距離は  $a=0.1$  km および  $0.5$  km である。海風比率および年平均風速の大きさを反映し、酒田地域は、石巻地域に比べ厳しい塩害環境であると評価された。

(手順2)では、任意の飛来塩分量の作用に対し、鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度を超

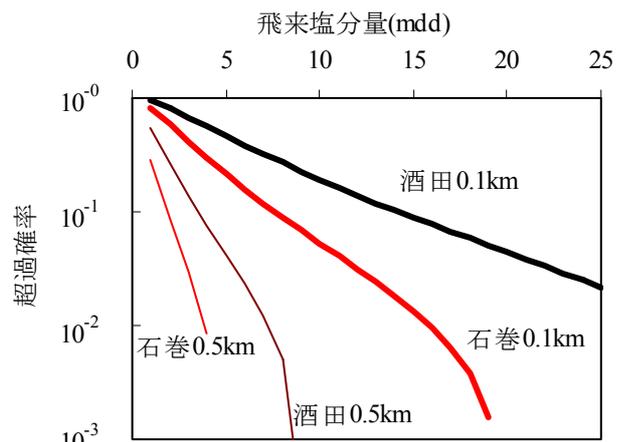


図-1 ハザード曲線の比較

**Key Words** : 塩害, 信頼性理論, 損傷確率, 飛来塩分量, フラジリティカーブ, 表面塩化物イオン濃度

連絡先: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 Tel: 022(795)7447 Fax: 022(795)7448

える確率を算定する。つまり、限界状態式は、 $g=(\text{鋼材腐食発生限界濃度})-(\text{鋼材位置の塩化物イオン濃度})$ であり、 $C_{air}$ を横軸に、 $g < 0$ となる確率を縦軸に表したものがフラジリティカーブ  $F_i(C_{air})$ である。なお、 $g < 0$ となる確率は、Monte Carlo 法により算定する。考慮した主な不確定要因は、次の(i)~(v)である。(i)表面塩化物イオン濃度(飛来塩分量  $C_{air,e}$ の実測を行ったのと同じ地点で実施されたコンクリート暴露試験から求めた表面塩化物イオン量  $C_0$ <sup>4)</sup>より  $C_{air,e}$ と  $C_0$ の関係式を求め、( $C_0$ の実測値)/( $C_{air,e}$ と  $C_0$ の関係式から求められる計算値)の統計量を考慮)、(ii)見かけの拡散係数(セメント種類や水セメント比を用いて見掛けの拡散係数の回帰式を求め、(実験値)/(回帰式の算定値)の統計量を考慮)、(iii)拡散方程式(コンクリート暴露試験において、(深さ 0~6cm 位置の塩化物イオン濃度の実験値)/(拡散方程式による計算値)の統計量を考慮)、(iv)かぶりの施工誤差(参考文献 5)に示されるかぶりの施工誤差の調査結果を考慮)、(v)鋼材腐食発生限界濃度(参考文献 6)に示される統計量を考慮)。

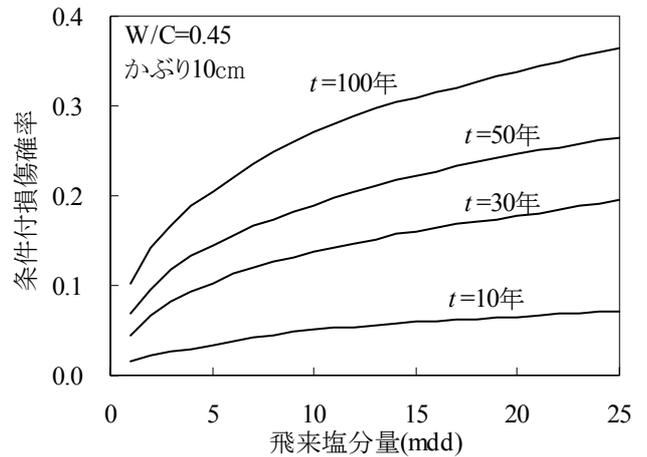


図-2 フラジリティカーブの一例

上記の(i)~(v)に加え、水セメント比 0.45 とかぶり厚さ 10cm を仮定して求めたフラジリティカーブを図-2 に示した。信頼性理論を用いることで、供用年数  $t$  の増加による鋼材腐食の発生可能性の変化が定量化される。

### 3. 塩害劣化作用を受ける RC 構造物で生じる鋼材腐食の発生確率の算定例

ここでは、道路橋示方書<sup>7)</sup>およびコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に従いかぶり厚さを決めた構造物を対象に損傷確率を算定した例を図-3 に示す。図-3 は、前記した飛来塩分量が実測された 38 地域において、海岸線からの距離を 0.1km および 0.5km とした場合の解析結果である。同図より、塩害に対する鋼材腐食の発生確率は地域ごとのばらつきが大きいこと、道路橋示方書では、同一地域であっても海岸線からの距離により損傷確率に大きな差が生じていること、などが確認される。

### 4. まとめ

提示した手法を用いることにより、地域ごと、また同じ地域でも、海岸線からの距離などによらず等しい耐久信頼性を有する RC 構造物を設計することが可能になる。今後は、Monte Carlo 法などを行うことなく、所定の耐久信頼性(目標損傷確率)を確保できる安全係数ベースの耐久信頼性設計法を提案していきたい。

参考文献 1) ISO : International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998. 2)吉田郁政, 鈴木修一: 限界地震動指標を用いた損傷確率の効率的な算定方法, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.201-206, 2003. 3) 建設省土木研究所: 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(III)―調査結果およびデータ集―, 土木研究所資料, 第 2687 号, 1988. 4)建設省土木研究所: 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(IV)―飛来塩分量の分布特性と風との関係―, 土木研究所資料, 第 3175 号, 1988. 5) 川村力ほか: 実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.253-266, 2004. 6) Val, D. V. and Stewart, M. G : Life-Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Structures in Marine Environments, Structural Safety, Vol.25, pp.343-362, 2003. 7)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 下部構造編, 2002. 8)土木学会: コンクリート標準示方書 施工編, 2002.

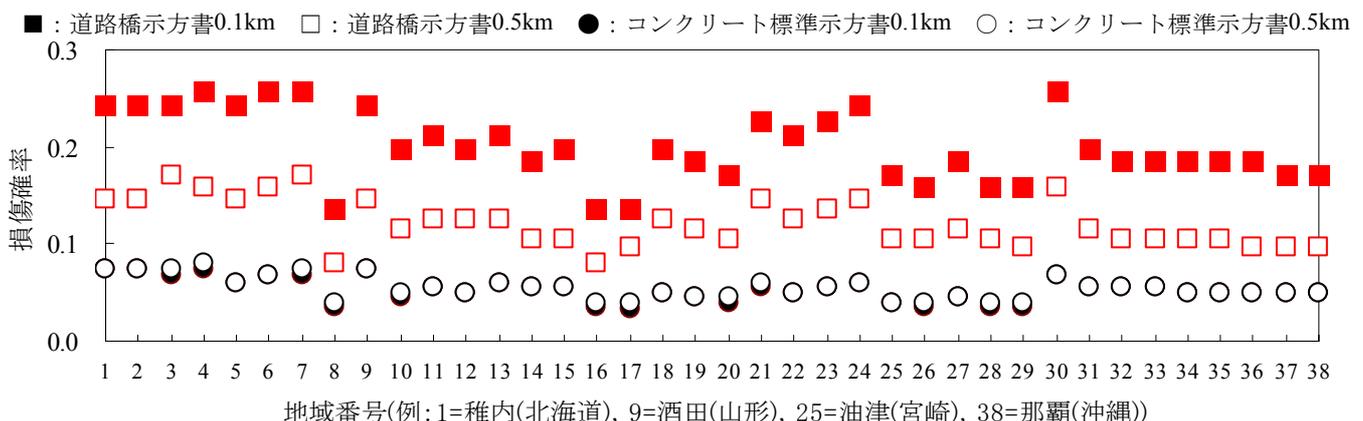


図-3 道路橋示方書およびコンクリート標準示方書でかぶり厚さを決めた構造物の損傷確率