

# 塩害環境下にある RC スラブに生じる材料劣化の 2 次元非ガウス確率場によるモデル化とその構造的な性能評価に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○増田 啓佑, 西谷 直樹, 福島 弘之  
早稲田大学 正会員 秋山 充良

## 1. はじめに

既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物では, コンクリートの品質, あるいはかぶり不足などが原因となり, 中性化や塩害による鉄筋腐食が生じる場合がある. 同一の部材においても, 位置により劣化に対する抵抗力が異なるため, 腐食の程度は構造物内の各地点で変動する. つまり, 腐食量が大きい, あるいは腐食量が小さい場所が空間的に変動しているため, その分布によって部材耐力や変形能もばらつきを持つことになる. 劣化 RC 構造物の構造的な性能評価の精緻化には, この材料劣化の空間変動性の考慮が不可欠である.

塩害環境に置かれた RC 構造物を対象として, ライフタイムにわたる材料劣化の進展とそれが構造的な性能の低下に及ぼす影響を考慮した研究は参考文献<sup>1)</sup>などに見られるが, そこでは, 材料劣化は構造物全体で一様に進展すると仮定しており, 劣化の空間変動性は考慮されていない. 本稿では, 塩害環境に置かれた RC 構造物で生じる材料劣化の進展を 2 次元ガウス・非ガウス確率場にて表現し, その構造的な性能評価を行った結果を報告する.

## 2. 塩害環境にある RC 構造物に生じる材料劣化のモデル化

本研究では, 塩害環境にある RC 構造物に生じる材料劣化を Papakonstantinou and Shinozuka<sup>2)</sup>を参考に図-1 のようにモデル化した. 具体的には, コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透量をもとに鉄筋腐食による断面減少と腐食ひび割れの発生を求める. ここで, 腐食ひび割れは腐食生成物による膨張圧  $P_{cor}$  がかぶりコンクリートの抵抗力  $P_{cr}$  を上回るときに発生すると仮定している. その際, 腐食ひび割れの幅に応じて塩化物イオンの拡散係数を変化させている.

解析対象をある長さごとに離散化し, それぞれの要素に対して図-1 のモデルを適用することで, 劣化進展の空間変動性を表現する. 各要素に与えられる劣化予測パラメータの空間変動性は, Shinozuka and Deodatis<sup>3)</sup>が提唱した Spectral Representation Method (SRM) を用いてモデル化する. SRM を用いると空間的に相関性を有する確率場を容易に表現することができる. 2 次元正規確率場の SRM は, 式(1)~(4)を用いて表される.

$$f(x_1, x_2) = \sqrt{2} \sum_{n_1=1}^{M_1} \sum_{n_2=1}^{M_2} \left[ A_{n_1 n_2} \cos(\kappa_{1n_1} x_1 + \kappa_{2n_2} x_2 + \Phi_{n_1 n_2}^{(1)}) + \tilde{A}_{n_1 n_2} \cos(\kappa_{1n_1} x_1 - \kappa_{2n_2} x_2 + \Phi_{n_1 n_2}^{(2)}) \right] + \mu \quad (1)$$

$$A_{n_1 n_2} = \sqrt{2S_{f_0 f_0}(\kappa_{1n_1}, \kappa_{2n_2}) \Delta\kappa_1 \Delta\kappa_2} \quad \tilde{A}_{n_1 n_2} = \sqrt{2S_{f_0 f_0}(\kappa_{1n_1}, -\kappa_{2n_2}) \Delta\kappa_1 \Delta\kappa_2} \quad (2)$$

$$\kappa_{1n_1} = n_1 \Delta\kappa_1 \quad \kappa_{2n_2} = n_2 \Delta\kappa_2 \quad \Delta\kappa_1 = \frac{\kappa_{1M_1}}{M_1} \quad \Delta\kappa_2 = \frac{\kappa_{2M_2}}{M_2} \quad (3)$$

$$S_{f_0 f_0}(\kappa_{1n}, \kappa_{2n}) = \sigma^2 \frac{b_1 b_2}{4\pi} \exp \left[ - \left( \frac{b_1 \kappa_{1n}}{2} \right)^2 - \left( \frac{b_2 \kappa_{2n}}{2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここで,  $f(x_1, x_2)$  は平均  $\mu$ , 標準偏差  $\sigma$  の 2 次元正規確率場,  $S_{f_0 f_0}$  はパワースペクトル密度関数,  $\phi$  は  $[0, 2\pi]$  の一様分布の乱数,  $b$  は自己相関距離に比例するパラメータである. 本研究では, Papakonstantinou & Shinozuka<sup>2)</sup>を参考に  $b=3$  とした.

SRM を用いた 2 次元ガウス確率場の例を図-2 に示す. なお, 非ガウス確率場は, Shields et al.<sup>4)</sup>の手法を用いてガウス確率場から変換することで得られる.

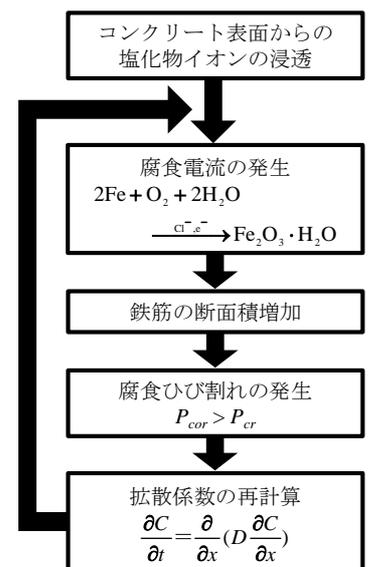


図-1 塩害による RC 構造物の劣化進展モデル

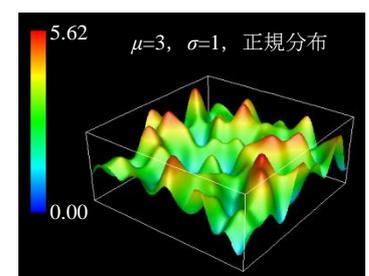


図-2 2次元確率場の一例

キーワード Spectral Representation Method, 鉄筋腐食, 空間変動性, 有限要素解析

連絡先 〒169-0853 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 Tel: 03-5286-2694

### 3. 空間変動性を考慮した RC スラブの塩害劣化予測

図-3 に示す橋軸方向 10m, 橋軸直角方向 7m の RC スラブを解析対象とした。空間変動性を表現する際, その離散化は, 橋軸方向, および橋軸直角方向ともに 750mm ずつに分割し, 各要素の中心位置で表-1 に示す劣化予測パラメータの値を用いた計算を図-1 のフローに従って実施することで, RC スラブの腐食分布の経時変化を求めた。表-1 に示すパラメータが空間的に変動することで, 結果として, 鉄筋腐食量などが 2 次元非ガウス確率場として表現される。解析結果の一例として, 供用開始から 30 年目, 60 年目, そして 100 年目の腐食分布を図-4 に示した。時間の経過とともに, 腐食範囲が拡大する様子や, 位置により腐食量が異なる様子が表現されている。

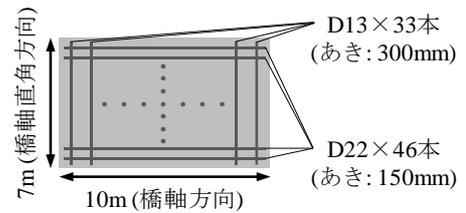


図-3 解析対象 RC スラブ

表-1 SRMを適用する劣化予測パラメータ

劣化予測パラメータ	確率分布
拡散係数	対数正規
コンクリートのかぶり深さ	正規
コンクリート表面の塩化物イオン濃度	正規
腐食限界塩化物イオン濃度	正規
配合係数	正規
コンクリートのヤング係数	正規
コンクリートの引張強度	正規

### 4. 劣化 RC スラブの構造性能評価

塩害劣化予測によって求めた腐食分布を入力値とした 2 次元非線形有限要素解析により劣化 RC スラブの構造性能評価を行った。各非線形構成則において, 劣化の影響は Lim et al.<sup>4)</sup>の研究成果を基に考慮した。離散化した各要素における鉄筋断面減少率をもとに, かぶりコンクリートの劣化, 付着の劣化, 鉄筋断面積の減少を計算することで構造性能の低下をモデル化している。そして, RC スラブの上面全体に等分布荷重を載荷し, 引張鉄筋が降伏したときの荷重を曲げ耐力とした。

図-1 に示した塩害劣化予測モデルを用いて 10 パターンの腐食分布を求め, 有限要素解析による曲げ耐力の評価を行った。供用期間と曲げ耐力比 (有限要素解析で求めた曲げ耐力を, 断面減少率が 0% の RC スラブの曲げ耐力で除したもの) の関係を図-5 に示す。材料特性が要素毎に異なるため, 10 パターンそれぞれで異なる曲げ耐力が得られ, 図-5 に示すように, そのばらつきは時間の経過とともに大きくなる。供用開始から 100 年後の曲げ耐力比は 86.3~98.2% の範囲に広がっている。劣化予測パラメータの空間変動性を表現する統計量の継続的な見直しが必要であるが, 劣化 RC 構造物の構造性能は, 材料劣化の空間変動性に強く依存するといえる。

### 5. まとめ

空間変動性を考慮した塩害劣化の予測と非線形有限要素解析を連動することで, 同じ腐食環境に置かれる RC 構造物であっても, 発現する耐荷力にばらつきが生じることを表現できる。本稿で示した計算結果は, 平均的な鉄筋腐食量が同じであっても, 鉄筋腐食の進展に伴い, 得られる耐荷力のばらつきが大きくなる既往の実験結果を説明できるものである。SRM は, 乱数を用いて確率場を表現しており, モンテカルロ計算と容易に一体化でき, 信頼性解析を行うことができる。今後は, 材料劣化の空間変動性を考慮した RC 構造物のライフサイクル信頼性解析へ応用していきたい。

### 参考文献

1) Akiyama M., Frangopol D. M., Yoshida I.: Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides, *Engineering Structures*, Vol. 32, pp.3768-3779, 2010. 2) Papakonstantinou K. G., Shinozuka M.: Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structure of large dimensions considering crack effect, *Engineering Structures*, Vol. 57, pp.306-326, 2013. 3) Shinozuka M., Deodatis G.: Simulation of stochastic process by spectral representation, *Applied Mechanics Reviews*, ASME, Vol.44, No.4, pp.191-204, 1991. 4) Shields M. D., Deodatis G., Bocchini P.: A simple and efficient methodology to approximate a general non-Gaussian stationary stochastic process by a translation process, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.26, pp.511-519, 2011. 5) Lim S., Akiyama M., Frangopol D. M.: Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, *Engineering Structures*, Vol.127, No.15, pp.189-205, 2016.

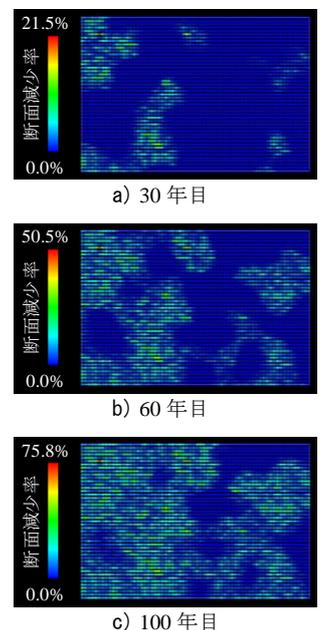


図-4 腐食分布の経時変化

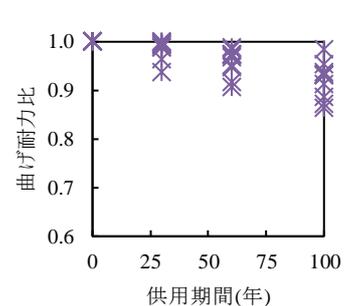


図-5 曲げ耐力比の推移