

劣化予測パラメータの空間変動性を考慮した鉄筋コンクリート構造物の ライフサイクル解析に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○宮本 祥平
早稲田大学 学生会員 萩野 統也
早稲田大学 正会員 秋山 充良

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久設計と構造設計の相互の関係について考えると、第三者影響度や美観・景観、また維持管理の容易さなど、力学的観点以外からの検討を除いた場合、耐久設計は材料劣化に起因する構造性能の低下を許容範囲内に留めることを目的として、コンクリートの品質や構造細目を定める。また、構造設計は、そのような構造性能の低下が生じても、設計耐用期間にわたり目標とする安全性を確保できることを目的として、断面諸元や鉄筋量を定めるといった関係性がある。実際に、塩害を例にして言えば、ライフタイム内の鉄筋腐食発生を認めないといった、材料劣化の進展を構造性能が低下しない範囲に抑えるような耐久設計を行い、その一方で構造設計の際には、各構成材料や断面諸元が設計当初の状態をライフタイム内で維持できるとの仮定のもとで安全性照査を行っている。

しかしながら、耐久設計の考えがまだ十分に確立されていない時代に設計施工された既存コンクリート構造物では、鉄筋の腐食やその腐食膨張圧によりかぶりコンクリートが既に剥落しているものが見られるなど、材料劣化の状態を考慮した構造性能評価が求められる場合がある。材料劣化が生じた既存コンクリート構造物の構造性能評価では、限られた数点の点検・検査結果に基づき、構造物全体の劣化状態を把握しなければならない。つまり、点検や検査結果のない地点の劣化状態をその周辺で実施した点検や検査結果により予測する必要がある。このようにして予測される鉄筋腐食量などは、空間的に大きく変動すると思われ、その状態を考慮してコンクリート構造物の構造性能は評価されなければならない。塩害環境に置かれた鉄筋コンクリート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性能の低下に及ぼす影響を考慮した研究は参考文献¹⁾²⁾などにみられるが、材料劣化は構造物全体で一様に進展すると仮定するなど、既存コンクリート構造物で実際に観察される劣化の空間的なバラツキは全く考慮されていない³⁾。限られた点検・検査結果から構造物全体に生じ得る材料劣化の状態を表現し、その材料劣化の局所的あるいは空間的な広がりや考慮した構造性能評価やライフサイクル解析が必要である。本研究では、この状況を踏まえ、海洋環境に置かれたコンクリート構造物で生じる材料劣化の進展を空間的に表現するための基礎検討を行った。

2. 塩害環境にあるコンクリート構造物に生じる材料劣化のモデル化

本研究では、図-1により塩害環境にあるコンクリート構造物に生じる材料劣化をモデル化した。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から鉄筋腐食の発錆や腐食ひび割れの発生を求め、また、腐食ひび割れが発生したことを考慮して拡散係数を変化させることで、その後の塩化物イオン濃度の浸透を再計算している。腐食ひび割れは、鉄筋腐食の腐食生成物によりかぶりコンクリートに生じる引張応力 P_{cor} がその抵抗力 P_{cr} を上回るときに発生すると仮定している。なお、本研究では、空間変動性を考慮することから、後述する解析対象RCスラブを離散化し、離散化された要素毎に P_{cor} と P_{cr} の比較などを行うことになる。

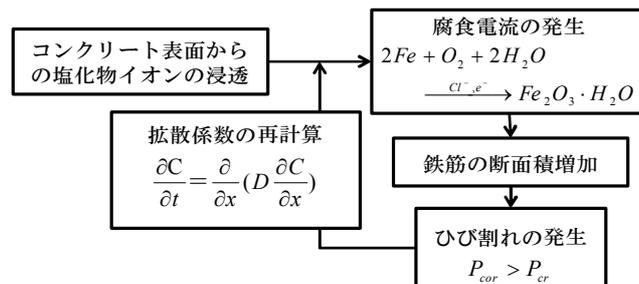


図-1 塩害によるコンクリート構造物の劣化進展

キーワード 塩害, 鉄筋コンクリート, 鉄筋腐食, 維持管理, ライフサイクル

連絡先 〒169-8555 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. Shinozuka らのモデルを用いたコンクリート構造物に生じる材料劣化の空間変動性の表現

本研究では、参考文献 4), 5), 6)にある Shinozuka らが提案するモデルに基づき、鉄筋コンクリート構造物に生じる材料劣化の空間変動性を表現する。基本となる式は、式(1)~(3)である。これを図-2の RC スラブに適用する例を示す。

$$f(x_1, x_2) = \sqrt{2} \sum_{n_1=0}^{M_1-1} \sum_{n_2=0}^{M_2-1} [A_{n_1 n_2} \cos(\kappa_{1n_1} x_1 + \kappa_{2n_2} x_2 + \Phi_{n_1 n_2}^{(1)}) + \tilde{A}_{n_1 n_2} \cos(\kappa_{1n_1} x_1 - \kappa_{2n_2} x_2 + \Phi_{n_1 n_2}^{(2)})] \quad (1)$$

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

$$\tilde{A}_{n_1 n_2} = \sqrt{2S_{f_0 f_0}(\kappa_{1n_1}, \kappa_{2n_2})\Delta\kappa_1\Delta\kappa_2} \quad \Delta\kappa_1 = \frac{\kappa_{1u}}{M_1}; \quad \Delta\kappa_2 = \frac{\kappa_{2u}}{M_2} \quad (3)$$

$$S_{f_0 f_0}(\kappa_1, \kappa_2) = \sigma^2 \frac{b_1 b_2}{4\pi} \exp\left[-\left(\frac{b_1 \kappa_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_2 \kappa_2}{2}\right)^2\right] \quad (4)$$

ここに、 $f(x_1, x_2)$ は平均 0、分散 σ の 2 次元ガウス確率場、 κ_{1u} と κ_{2u} はそれぞれ図-3の RC スラブ上の x_1 軸と x_2 軸に沿った上限波数である。 b_1 と b_2 は自己相関距離に比例したパラメータであり、今回は計算の簡略化のため $b_1=b_2=3$ とした。このとき、式(3)はパワースペクトル密度関数であり、自己相関距離は式(4)より求めることができる。

$$\alpha = 4\pi^2 \frac{S_{f_0 f_0}(0,0)}{\sigma^2} = \pi b_1 b_2 \xrightarrow{b_1=b_2=3} \begin{cases} \alpha \cong 28.274m^2 \\ \alpha_{1,2} \cong 5.317m \end{cases} \quad (5)$$

図-3に解析結果の一例を示す。また、腐食電流密度と腐食ひび割れの RC スラブ内の経時変化を図-4 および図-5 に示す。腐食電流密度や腐食ひび割れの計算に関するパラメータは、距離に応じた自己相関を有していることから、劣化は RC スラブ内でランダムに進展せず、供用開始後の早期に劣化が生じた箇所を起点に劣化が広がっている。図-4 および図-5 の計算は、実際は、起こり得る劣化進展の一つのサンプルを提示したに過ぎない。これを Monte Carlo シミュレーションの中で用いることにより、例えば、RC スラブ内のある大きさの領域で腐食ひび割れが発生する確率などが計算される。

4. まとめ

既存コンクリート構造物の維持管理では、点検や検査を実施していない箇所の材料劣化の程度を周辺の点検や検査結果から予測する必要がある。将来的には、本研究で提示したモデルと点検・検査結果を組み合わせることで、起こり得る材料劣化の空間変動性を確率的に表現することが可能になる。

参考文献 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Yoshida, I., 2010. Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides. *Engineering Structures*, 32, 3768-3779. 2) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Matsuzaki, H., 2011. Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40, 1671-1687. 3)加藤絵万, 岩波光保, 山路徹, 横田弘: 建設後 30 年以上経過した栈橋上部工から切り出した RC 部材の劣化性状と構造性能, No.1140, 2006. 4) Shinozuka, M. and Deodatis, G., 1991. Simulation of stochastic processes by spectral representation, *Applied Mechanics*, ASME, 49, 191-204. 5) Shinozuka, M. and Deodatis, G., 1996. Simulation of s multi-dimensional Gaussian stochastic fields by spectral representation, *Applied Mechanics*, ASME, 49, 29-53. 6) Papakonstantinou, K.G. and Shinozuka, M., 2013. Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structures of large dimensions considering crack effects, *Engineering Structures*, 57, 306-326.

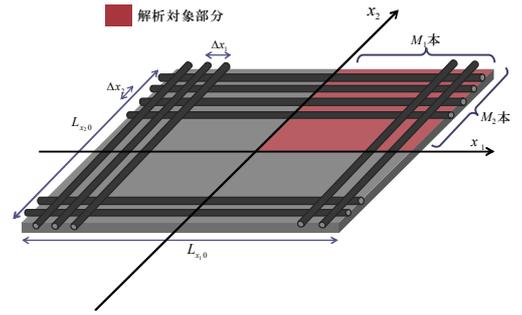


図-2 解析対象スラブ

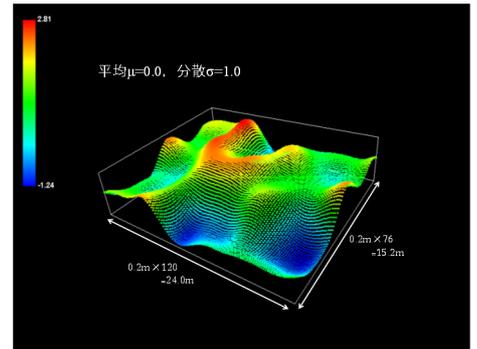


図-3 2次元分布の一例

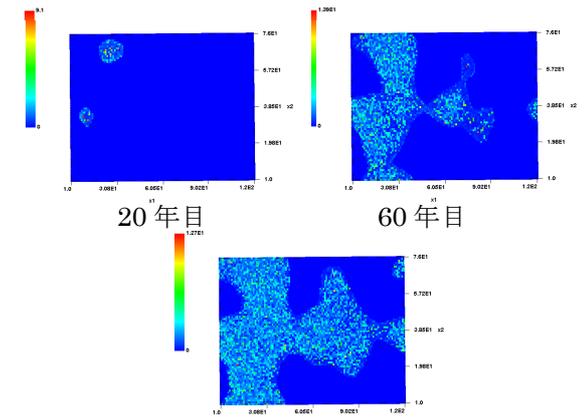


図-4 腐食電流密度の経時変化

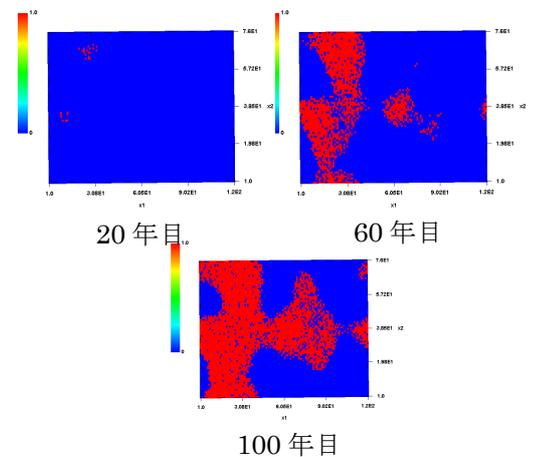


図-5 腐食ひび割れ分布の経時変化