

塩害による劣化進展の空間分布を考慮した 既存鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性評価に関する基礎的研究

東北大学大学院 学生会員 ○小森谷隆 東北大学大学院 正会員 秋山充良
東北大学大学院 フェロー 鈴木基行 東京都市大学 正会員 吉田郁政

1. はじめに

海洋環境にあるコンクリート構造物の余寿命評価において、たとえば、建設位置やコンクリートの水セメント比などの設計時に得られる情報のみから、50年後や100年後の塩化物イオンの浸透を予測することは極めて大きな不確定性を伴う。そのような中、既存構造物ではその現場位置で点検・検査を行なうことで、劣化予測に係るパラメータの見直しができ、より確かな情報に基づいた、その後の劣化予測が可能となる。一方、コア採取を行う検査の場合、より多くのサンプルを用いて構造物全体の劣化状況を予測することが理想であるが、経済性、あるいは構造物に損傷を与えるなどの理由でサンプル数を無限に増やすことはできない。

本研究では、確率・統計的なアプローチを用いることにより、劣化進展の空間的なばらつきを踏まえた、点検・検査におけるサンプル数の影響と、その結果を用いた、劣化予測に係るパラメータの更新方法を議論する。具体的には、海洋環境下にある既存コンクリート構造物を対象に、逐次モンテカルロ法を用いた更新理論により、現場位置の点検・検査情報と、その際に用いるサンプル数の影響を考慮した構造物の信頼性評価手法を提示する。

2. 更新理論

既存構造物の耐久信頼性評価では、点検・検査情報を活用したパラメータの合理的な更新方法、およびそれに基づく信頼性評価手法が課題となる。そこで本研究では、これらの問題を解決する手法として、モンテカルロ法をベースとした逐次モンテカルロ法(以下、SMCS)を用いる¹⁾。

SMCSは、i)初期の確率分布によりサンプルを発生させる、ii)時間の経過に従い劣化予測を行う、iii)観測情報により求めた各サンプルの尤度に従い確率分布を更新する、iv)リサンプリングを行う、v)観測情報を得るたびにii)~iv)を繰り返し行う、の流れで行われる。詳細は参考文献1)に掲載されている。

3. 空間分布を考慮したコンクリート構造物の耐久信頼性評価

塩害に対する点検・検査の1つにコア採取による塩化物イオンの濃度分布の測定が挙げられる。ここで、実構造物の塩化物イオンを測定した事例²⁾では、同じ構造物でも拡散係数や表面塩化物イオン濃度に大きなばらつきが生じるという見解が得られている。そのため、観測情報を有効に活用するためには、塩化物イオンの浸透性状に空間的なばらつきを考慮した信頼性評価が必要になる。具体的には、構造物を細かく要素分割し、空間統計学の理論³⁾より求まる要素間の空間的な結びつきの強さを示す相関係数を用いて、要素ごとに劣化予測に係るパラメータを算定する。これにより、離散的に空間分布を表現することになる。本研究では、空間的な結びつきの強さを示す相関係数は、既往の研究²⁾を基に推定を行った。ここで、海洋環境下にあるコンクリート構造物の供用開始後 t 年における限界状態超過確率 pf および信頼性指標 β は式(1)より算出する。

$$pf = P\left(\bigcup_{i=1}^{n_e} (R_i(t) - S_i(t) < 0)\right), \beta = -\Phi^{-1}(pf) \quad (1)$$

ここに、 n_e は要素数、 $R_i(t)$ 、 $S_i(t)$ は供用開始後 t 年に設定した限界状態に対する要素 i 番目の耐力項と作用項、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積分布関数である。

本研究で想定した限界状態は、腐食ひび割れの発生点である。すなわち、 $R_i(t)$ は腐食ひび割れ発生の限界鉄筋腐食量、 $S_i(t)$ は t 年における鉄筋腐食量となり、限界状態超過確率は、腐食ひび割れの発生確率となる。

4. 観測情報のモデル化

現場位置の観測情報を与えることにより、構造物の現状を考慮した信頼性評価が可能となる。そこで、観測情報としてコア採取により塩化物イオン濃度分布が得られる場合を想定した。設定した塩化物イオン濃度の分

Key Words : 塩害, 信頼性評価, 逐次モンテカルロ法

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) 7449 FAX : 022 (795) 7448

布は、5. (2)に示す解析条件によりモンテカルロ法により求めた、建設後 25 年の塩化物イオン濃度分布を参考にした。設定した塩化物イオン濃度の分布を表-1に示す。なお、塩化物イオン濃度は、コンクリート表面から深さ 10mm, 30mm, 50mm, 70mm, 90mm の位置で観測したとした。

5. 観測情報を考慮した既存構造物の劣化予測

(1) 概説

ここでは、海洋環境下にある既存鉄筋コンクリート構造物に対して、SMCS を用いて観測情報を活用した耐久信頼性評価を行う。観測情報として、離散的な観測であるコア採取を行い、観測サンプル数が違うケースについて、空間分布を考慮した評価を行う。

(2) 解析条件

対象構造物は、スパン：10000mm，幅：10000mm，高さ：600mm，かぶり：140mm，鉄筋径：19.1mm，水セメント比：0.45 の鉄筋コンクリート構造物とした。また、解析対象地点は、愛媛県宇和島市の海岸線から 1km の地点を想定し、供用期間は 50 年とする。その他の条件は参考文献 4)と同じである。

(3) 観測情報を活用した既存コンクリート構造物の耐久信頼性評価

空間分布のモデル化の例を示す。5. (2)で設定した解析条件の下で、25 年目における 1m のスパンでの塩化物イオン濃度の空間分布を図-1に示す。

次に、供用開始後 25 年目においてコア採取の観測を行った場合の耐久信頼性評価を行う。コア採取は、離散的な観測であるとし、サンプル数の比較を行う。ここで、コアを採取する間隔を 5m, 1m, 0.5m とし、全てのコアで表-1に示す塩化物イオン濃度分布が得られたと仮定した。図-2に信頼性指標 β の経時変化を示す。図-2より、観測を行った 25 年目で劣化予測が更新されることを確認できる。これは観測情報を活用することで、劣化予測に係るパラメータの見直しが行われ、より確かな劣化予測が可能になるためである。また、観測サンプル数について着目すると、狭い間隔でコアを採取した場合(サンプル数が多い)の方が、広い間隔でコアを採取した場合(サンプル数が少ない)に比べ、観測後の信頼性指標 β の値が大きくなる。これは、広い間隔でコア採取を行った場合、塩化物イオン濃度分布の空間的なばらつきを捉えにくくなるため、観測情報が反映されにくいためである。劣化の空間分布を考慮した本手法を用いることにより、離散的な点検・検査の観測情報を反映させた耐久信頼性評価が可能になる。

6. まとめ

確率・統計のアプローチを用いることにより、現場位置での点検・検査の結果を反映し、さらに、劣化進展の空間的なバラツキの影響を考慮した劣化予測(限界状態超過確率の経時変化の算定)が可能になる。劣化予測に伴う様々な不確実性が介在することが避けられない現状では、SMCSによる耐久信頼性評価手法は有力なツールであるといえる。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート構造物の信頼性設計法に関する研究小委員会(336委員会)成果報告書、コンクリート技術シリーズNo.83, 2008. 2) 加藤絵万, 岩波光保, 山路徹, 横田弘：建設後30年以上が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, 港湾空港技術研究所資料, No.1140, pp.1-87, 2006. 3) 地球統計学研究委員会：地球統計学, 森北出版, 2003. 4) 秋山充良, 松崎裕, 佐藤広和, 内藤英樹, 鈴木基行：塩害環境下にあるRC橋脚の耐震安全性確保の観点から定めた限界鉄筋腐食量とその耐久設計法に関する確率論的考察, 土木学会論文集E, Vol.64, pp.541-559, 2008.

表-1 想定した塩化物イオン濃度

コンクリート表面からの深さ(mm)	10	30	50	70	90
塩化物イオン濃度(kg/m ³)	0.41	0.28	0.19	0.12	0.07

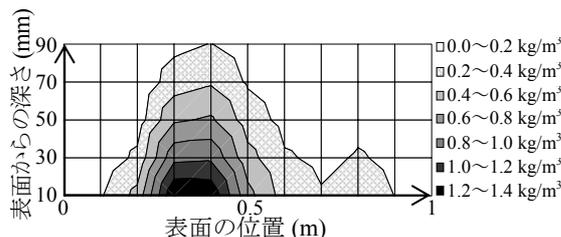


図-1 塩化物イオン濃度分布のモデル例

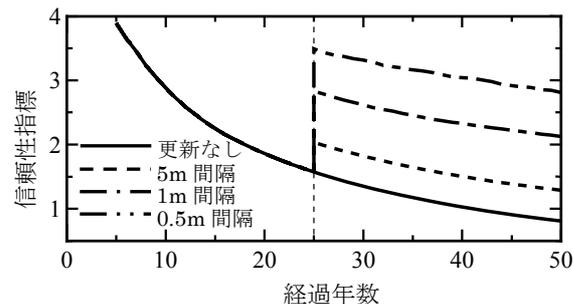


図-2 信頼性指標の経時変化