

信頼性理論を用いた塩害環境下にあるコンクリート構造物の劣化予測に関する研究

東北大学 学生会員 ○小森谷隆
東北大学大学院 学生会員 中嶋啓太

東北大学大学院 学生会員 山口恭平
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

1. はじめに

近年、地震や風作用と同様に、飛来塩分などの環境作用に対しても、性能規定型の耐久設計が構築されつつある。しかしながら、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、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。これまで、各種不確定性を確率変数で評価し、設計耐用期間内の鉄筋コンクリート構造物の腐食ひび割れ発生などの生起確率を許容値に抑える耐久設計法が提案されている¹⁾。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可能である。例えば、設計時には供用開始後 30 年である腐食ひび割れ発生確率に達すると予測されたものが、その時点の点検で腐食ひび割れが発見されない場合は、予測に係るパラメータの確率分布が更新され、より確かな情報に基づいた、その後の残存供用期間内の劣化予測が可能となる。

そこで、本研究では、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 (以下、SMCS) を用いた更新理論によって現場位置の点検・検査情報を反映した構造物の余寿命評価を行う。

2. 更新理論

既存構造物の耐久性信頼性評価では、目視などの点検情報を活用した確率パラメータの合理的更新方法、および、それに基づく信頼性解析の方法が課題となる。この種の問題を解く手法として、モンテカルロ法をベースとした研究が積極的に進められている。こうした方法は Particle filter, Recursive MCS あるいは Sequential MCS とも呼ばれているが、本稿では SMCS と呼ぶ。SMCS は、i) 劣化状態の確率分布を予測する、ii) 時間の経過に従い分布の更新を行う、iii) ii) で得られた分布を観測情報に従い尤度を求め、その尤度に従い更新を行うことでより適切な新しい分布を得る、iv) 観測情報を得るたびに ii), iii) の行程を行い逐次更新していく、というフローで行われる。

3. 劣化を考慮したコンクリート構造物の信頼性評価

(1) 限界状態確率算定式

本研究では、海洋環境下にあるコンクリート構造物を対象に、塩害による構造性能の低下を考慮した構造信頼性評価を行った。曲げ破壊を限界状態とした場合、飛来塩分と交通荷重の作用を同時に受けるコンクリート構造物の供用開始後における限界状態確率 pf は秋山ら²⁾に従い式(1)より算出する。

$$pf = 1 - \prod_{t_i=0}^{t_i=t} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp \left[-\lambda_{S_1} \cdot \left[\Delta t_i - \int_0^{t_i} F_{S_1} \{ r \cdot a_i \cdot g(t) - s_2 \} dt \right] \right] \cdot f_{S_2}(s_2) f_{R_0}(r) f_{A_i}(a_i) ds_2 dr da \quad (1)$$

ここで、 R_0 は初期耐力、 S_1 は時間依存性のある作用、 S_2 は時間依存性のない作用で、 $g(t)$ は構造性能劣化曲線²⁾で、 A_i はその不確定性を考慮する係数、 $f_{R_0}, f_{S_2}, f_{A_i}$ 及び F_{S_1} はそれぞれの確率密度関数および累積分布関数である。また、また、 λ_{S_1} は単位時間内で S_1 が生起する平均回数、 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ である。

(2) 解析対象構造物および諸条件

対象とする構造物は、Mori³⁾の研究を参考に RC スラブとし、スパン：9000mm、幅：9000mm、高さ：355mm、かぶり厚：75mm とした。また、鉄筋径：19.1mm、鉄筋降伏強度：414MPa、水セメント比：0.45、コンクリート強度：27.6MPa とした。また、対象地域は新潟市の海岸線からの距離 0.1km を想定し、初期耐力および活荷重、死荷重の平均値および変動係数、発生頻度は Mori³⁾の研究に従った。

4. 観測情報のモデル化

様々な観測情報を与えた SMCS により、構造物の現状を反映した余寿命評価が可能となる。そこで、観測情報として目視点検による劣化のランクおよびコンクリート中の塩化物イオン濃度のモデルを利用した⁴⁾。劣化ランク

Key Words : 塩害, 信頼性理論, 余寿命評価, 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

(1~4)は、鋼材質量減少率を基準に 2.3%以下, 2.3~5%, 5~20%, 20%以上と4つの分類に定めた。さらに、曲げ剛性に関する観測項目として実構造物載荷試験による曲げ剛性にも着目した。載荷試験より得られる曲げ剛性を観測情報とし、既往の実験データ(例えば⁵⁾)に基づき、残存曲げ剛性 ϕ -鋼材質量減少率 ΔW 関係を整理した。表-1は整理した関係を、鋼材質量減少率ランクに対応した剛性ランクの発生確率として表す。なお、 ϕ のランク(I~IV)は健全時の98%以上, 98~90%, 90~80%, 80%以下とした。

5. 観測情報を考慮した既存構造物の余寿命評価

供用開始後30年目において、i)更新を行わない場合、ii)腐食ひび割れ幅ランクII⁴⁾が得られた場合、iii)ケースii)に加え、図-1に示す塩化物イオン濃度分布A~D⁴⁾が得られた場合、iv)残存曲げ剛性ランクI~IVが得られた場合、の4ケースの点検、検査結果が得られたとする。なお、図-1の累積10%、50%、90%の分布は、解析対象構造物の条件に対してMCSで求めた塩化物イオン濃度のデータを小さい順に並べ、小さいほうから10%、50%、90%の位置にあるデータの値である。この観測情報を基に劣化の再予測を行う。また、余寿命評価の際に目標信頼性指標 β_m を3.1とした⁶⁾。

図-2にケースi)~iii)の信頼性指標 β の経時変化を示す。ケースi),ii)を比較すると、更新を行わない場合30年目で信頼性指標 β が β_m を下回っているのに対し、目視による観測情報を得られた場合、45年目まで β_m を保つことができる。これは目視による観測情報により、劣化予測に係るパラメータの見直しが行われたためといえる。さらにケースiii)に着目すると、時間の経過とともに予測に変化が生じ、塩化物イオン濃度の分布による違いが大きく現れる。これはコンクリート表面からの塩化物イオン濃度分布を観測することにより、塩化物イオンの浸透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、ケースi),iv)の結果を図-3に示す。観測情報が、残存曲げ剛性ランクIIおよびIIIの場合には更新を行わない場合と概ね一致した予測となる。これは表-1に示す、実験値より求めた ϕ - ΔW 関係に大きな不確実性が存在するため、劣化予測に係るパラメータの見直しがほとんど有用でないためである。これより、曲げ剛性の低下量から鋼材の質量減少率を予測するのに伴う不確実性が大きい現状では、目視検査や塩化物イオン濃度の測定の方が、コンクリート構造物の将来予測を行う上で有用な情報であると判断できる。

6. まとめ

提案手法により、現場位置での点検検査を反映させた、より確かな情報に基づく信頼性解析が可能になる。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構造物のライフタイム評価を行う上で有力なツールであるといえる。

参考文献

- 1)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, No.4, pp.541-559, 2008.
- 2)中嶋啓太, 秋山充良, 鈴木基行, 大木文宏: 塩害環境下にあるコンクリート桁橋の構造性能劣化曲線と構造信頼性評価への適用, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 5-204, pp.407-pp.408, 2008.
- 3)Mori, Y.: Reliability-based condition assessment and life prediction of concrete structures, PhD thesis, Johns Hopkins University, Baltimore, Md, 1992.
- 4)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成果報告書, コンクリート技術シリーズ, Vol.83, 2008.
- 5)古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘他: 棧橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1001, 2001.
- 6)Sarja, A. and Vesikari: Durability Design of Concrete Structure, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, 1994.

表-1 載荷試験による観測情報の不確実性

		残存曲げ剛性ランク			
		I	II	III	IV
鋼材質量減少率ランク	1	0.562	0.058	0.120	0.260
	2	0.462	0.065	0.128	0.345
	3	0.397	0.060	0.130	0.413
	4	0.291	0.053	0.124	0.532

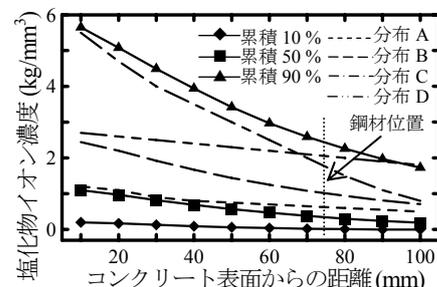


図-1 想定した塩化物イオン濃度分布

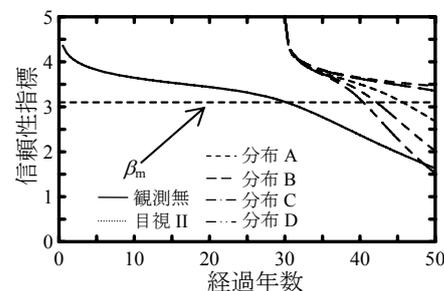


図-2 ケースi)~iii)の信頼性指標の経時変化

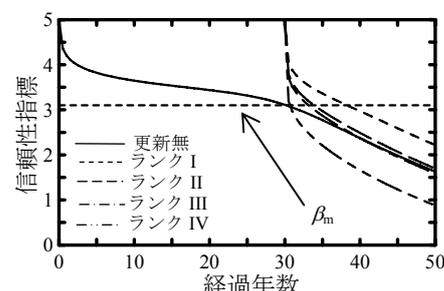


図-3 ケースi),iv)の信頼性指標の経時変化