

腐食ひび割れ発生点を限界状態とした既存 RC 構造物の耐久信頼性照査に用いる部分係数

早稲田大学 学生会員 ○尾武 佑亮, 狩野 淳一
早稲田大学 正会員 秋山 充良

1. はじめに

新設構造物を対象に、部分係数フォーマットを用いた鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐久設計の例として、著者らは、参考文献 1)や 2)を報告している。海洋環境にある RC 構造物を対象に、構造物のライフタイム T_d と、鉄筋腐食の発錆や腐食ひび割れが発生するまでの期間 T を比較する照査式 ($T_d \leq \phi T$, ここに ϕ は部分係数) を提案している。部分係数 ϕ を所定の目標損傷確率や目標信頼性指標が得られるように値を予め定めておくことで、Monte Carlo Simulation (MCS) などの確率計算を一切行うことなく、さらには、海洋環境 (飛来塩分量の大小) やコンクリートの品質 (使用するコンクリートの水セメント比) などの設計条件に関係なく、ライフタイム内に鉄筋腐食や腐食ひび割れが発生する確率を目標値に近づけることが可能になる。

一方、既存構造物では、これに加えて、サイト周辺の特性や実際の構造物で用いられている材料の情報などが得られることから、新設構造物の設計時に比べてそれらの評価に伴う不確定性を小さくできる。設計時の情報のみから劣化予測を行っていた場合に比べ、コンクリート構造物の点検・検査時点の安全性や耐久性、あるいはそれらの将来的な経時変化を精度良く推定できるようになる。この種の研究として、著者らは参考文献 3)や 4)を報告しているが、所定の目標損傷確率、あるいは目標信頼性指標を想定する残存供用期間内で確保できているのか否かを照査するためには、点検や検査の結果に基づいて Sequential Monte Carlo Simulation (SMCS) などの更新理論に従い、各変数の確率密度関数を修正し、残存供用期間の終了時点での構造物の損傷確率や信頼性指標が目標値を確保していることを確認する必要がある。

そこで、既存構造物が要求される性能をある信頼性水準のもとで確保していることを確認する照査式とそこで用いる部分係数の算定手順の一般化を将来的な目標として、本研究では海洋環境下にある RC 構造物の耐久性照査を例にその基礎検討を行う。具体的には、部分係数を用いた新設構造物の設計式と同様に、 $\phi R \leq \gamma S$ (ϕ , γ : 部分係数, R : 耐力項, S : 作用項) の照査式を対象とする既存 RC 構造物が満足していれば、残存供用期間内に想定した限界状態に到達する確率が目標値に収まっていることを確認できる耐久性照査式を提案する。着目する限界状態は、腐食ひび割れ発生点である。

2. 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした既存 RC 構造物の耐久信頼性照査

本研究で提案する既存 RC 構造物の耐久信頼性照査の流れを以下に示す (図-1)。

- 1) 照査対象とする既存 RC 構造物から塩化物イオン濃度を入手する。
- 2) 入手した塩化物イオン濃度分布を最も再現できる表面塩化物イオン濃度 $C_{0,a}$ と拡散係数 $D_{c,a}$ を算出する。
- 3) 残存供用期間、および残存供用期間終了時において確保する腐食ひび割れ発生確率 (目標信頼性指標) を決定する。そして、目標信頼性指標に応じた部分係数 ϕ を選択する。
- 4) 式(1)の照査式を満たしていれば、残存供用期間内に腐食ひび割れが発生する可能性は目標値を確保できている。一方で、照査式を満たさない場合には、所定の信頼性を確保できていないことから、腐食ひび割れを防ぐための補修が残存供用期間内に必要となる。

$$\phi Q_{cr,a} \leq Q_{b,a} \tag{1}$$

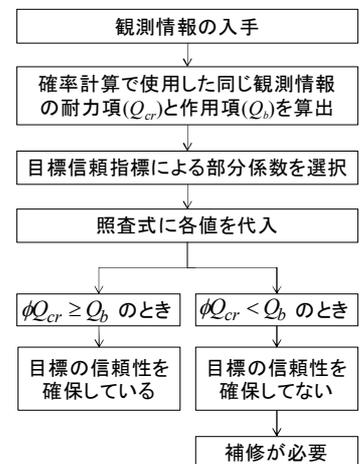


図-1 耐久信頼性照査

キーワード 塩害, コンクリート構造物, 耐久性, 信頼性理論, 部分係数

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

$$Q_{b,a} = V(T_s + T_r - T_{co}) \quad (2)$$

ここに、 $Q_{cr,a}$ 、 $Q_{b,a}$ および c_a は、それぞれ、既存 RC 構造物の耐久信頼性照査に用いる腐食ひび割れ発生の限界腐食量、供用開始後 t 年後での鉄筋腐食量、および設計かぶりである。 $Q_{cr,a}$ は実験的に得られた腐食ひび割れ幅-腐食量の算定式を基本としている³⁾。また、 V は鉄筋腐食発錆から腐食ひび割れ発生までの鉄筋腐食速度で、 T_s は供用開始後から点検実施までの期間、 T_{co} は供用開始後から鉄筋腐食発生までの期間、そして T_r は残存供用期間である。なお、著者らは、点検・検査後の残存供用期間内に鉄筋腐食が生じる可能性が許容値以内にあるのかを判定する耐久信頼性照査法を提案している。 T_{co} の算定方法の詳細は、参考文献 5) を参照されたい。

$$Q_{cr,a} = \eta \frac{\rho_s}{\pi(\gamma_v - 1)} \left[\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ (2c_a + D^2) + D^2 \}}{E_c(c_a + D)} f_c^{\frac{2}{3}} + \alpha_1 \beta_1 \frac{c_a + D}{5C + 3D} w_c \right] \quad (3)$$

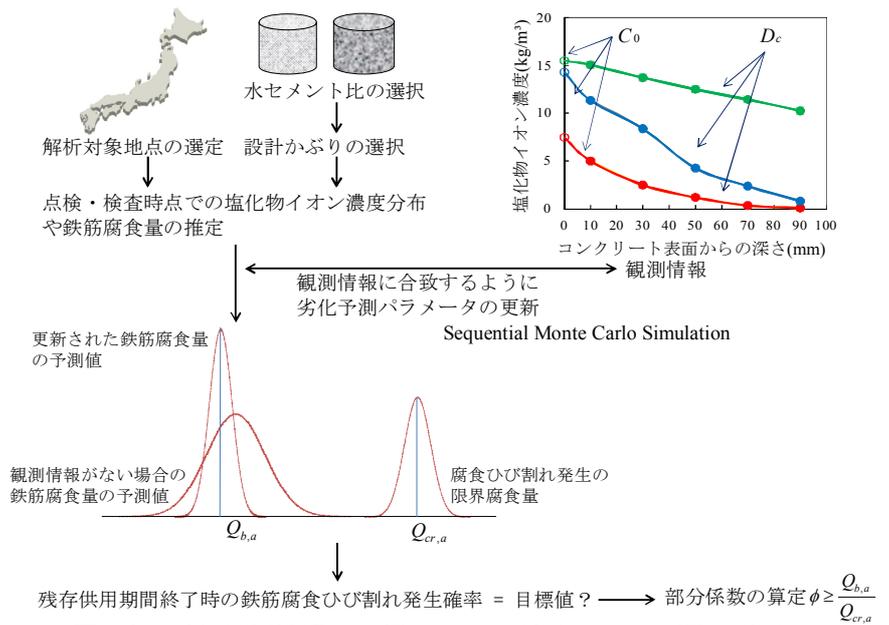


図-2 耐久信頼性照査に用いる部分係数の算定手順の概要

部分係数 ϕ は、コードキャリブレーションの考えに基づき定める。算定手順の概要を図-2 に示す。塩害環境の異なる全国 38ヶ所、目標信頼性指標 β_T は 1.0 (腐食ひび割れ発生確率 0.16 に相当)、水セメント比 W/C は 45%, 55%, 65%, かぶりは 50mm, 100mm, コア採取による塩化物イオン濃度分布は 3000 パターンを想定し、また、塩化物イオン濃度分布は供用開始から 30 年後に与えられ、残存供用期間は 20 年で固定した。確率分布を更新する際には、参考文献 3) と同様に SMCS を用いている。この条件で部分係数 ϕ を各地域の塩害環境ハザードを考慮して求めた結果を図-3 に示す。式(1)において、 $\phi=0.44$ を用いて照査すれば、地域、水セメント比やかぶり、あるいは点検・検査情報として与えられる塩化物イオン濃度分布の大きさにかかわらず、残存供用期間 20 年以内に腐食ひび割れが発生する確率が許容される値に収まっているのかを判定できる。

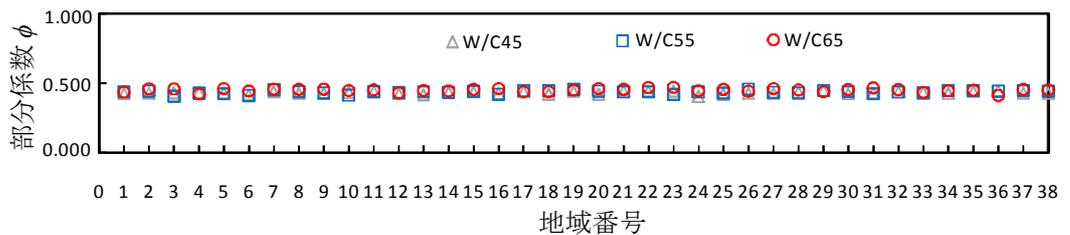


図-3 全国 38 地域から算定された部分係数

3. まとめ

本稿では、信頼性理論と更新理論を用いた部分係数書式の耐久信頼性評価法を提示した。点検・検査情報を用いることで、劣化予測に関わるパラメータのばらつきが低減され、新設構造物の設計時に比べて有利な部分係数を用いることができる。部分係数の修正が容易に可能となる点が信頼性の考えを耐久性照査に用いる大きな利点である。

参考文献 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Suzuki, M.: Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of R/C structures in a marine environment, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.8, No.2, pp.125-134, 2012. 2) 松崎裕, 秋山充良, 鈴木基行: 部分係数を用いた海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性設計, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 733-741, 2010. 3) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Yoshida, I.: Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides, Engineering Structures, Vol. 32, No. 11, 3768-3779.2010. 4) 吉田郁政, 秋山充良, 鈴木修一, 山上雅人: Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 3, pp.758-775, 2009. 5) 狩野淳一, 秋山充良, 吉田郁政: 点検・検査情報を活用した既存 RC 構造物の耐久信頼性照査に用いる部分係数, 構造工学論文集, Vol. 61A, 2015. (印刷中)