

部分係数を用いた既存コンクリート構造物の耐久信頼性評価手法に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○狩野淳一, 竹中孔信

早稲田大学 正会員 秋山充良

東京都市大学 正会員 吉田郁政

1. はじめに

ISO2394¹⁾に基づく設計規準類の国際的整合化を踏まえ、我が国においても、個別の設計コード作成のための包括設計コードが準備されている^{2), 3)}。いずれも、信頼性理論をベースとした限界状態設計法の枠組みが提示されており、今後、コンクリート構造物を対象とした個別の設計コードについても、確率論的な概念を導入した限界状態設計法への移行、具体的には、部分係数フォーマットを用いた設計法の規定が予想される。部分係数の大きさは、構造物が限界状態に到達する可能性の目標値（目標破壊確率、あるいは目標信頼性指標）と介在する不確定性の大きさに応じて定められる。このような設計法を採用することで、構造安全性の大きさを定量的に示すことができるほか、実験データの蓄積や高度な数値解析の導入による不確定性の低減を部分係数の修正に容易に反映できる。例えば、参考文献4)では、海洋環境にあるコンクリート構造物を対象に、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) を提案しており、これを用いることで、Monte Carlo シミュレーションなどの確率計算を一切行うことなく、さらには、海洋環境やコンクリートの品質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所定の目標値に近づける耐久設計を可能にしている。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。つまり、新設構造物の照査に用いている部分係数をそのまま使用する必要性はなく、例えば、点検や検査の結果を再現するように劣化予測パラメータを更新することで不確定性が低減され、その程度に応じて部分係数を増加減できる。

本研究では、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照査する性能照査式とそこで用いる部分係数の算定手順の構築を目標として、コンクリート構造物の耐久性照査を例にその基礎検討を行う。

2. 部分係数の更新手順

問題を簡単化するため、式(1)の照査式を想定する。式(1)で設計された構造物で作用が抵抗を上回る確率は、式(2)の限界状態関数から計算される。

$$\phi \bar{R} \geq \gamma \bar{S} \quad (1) \quad g = R - S \quad (2)$$

ここに、 $\bar{R}$ と $\bar{S}$ はそれぞれ耐力項および作用項の特性値であり、 R と S は確率変数としての耐力項および作用項である。

既存構造物を対象とする場合、前記したように、点検・検査情報が得られることから、部分係数 ϕ や γ の更新が可能である。本研究で提案する部分係数の更新手順を図-1に示す。点検や検査結果に合致するように関係する確率変数を更新する。ここでは、参考文献5)と同じく Sequential Monte Carlo Simulation (SMCS)を用いる(図-1のstep ii)。各確率変数の更新後の変動係数などを用いて First Order Reliability Method (FORM)により部分係数を更新する(図-1のstep v)。実際には、更新後の変動係数や FORM で用いる感度係数は与える点検や検査結果によって異なることから、いくつかの条件を設定し、部分係数を繰り返し求めることで目標

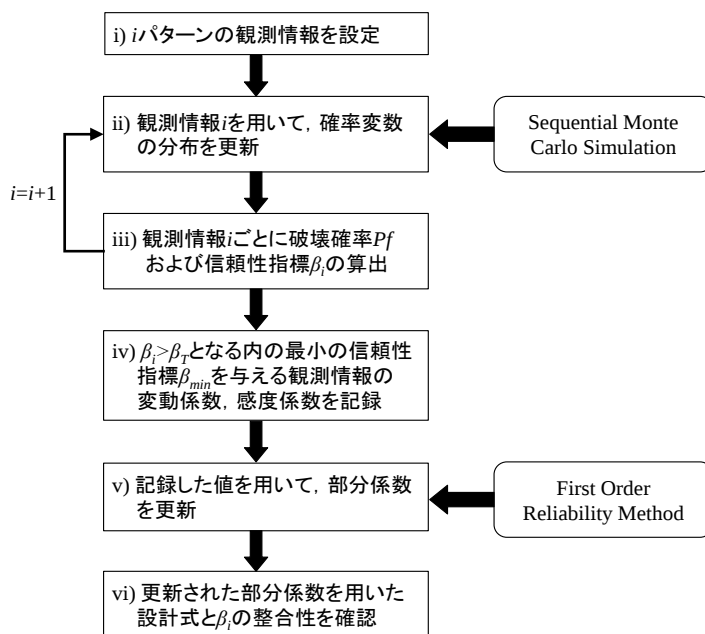


図-1 部分係数更新の提案フロー

Key Words : 信頼性設計, 部分係数, 塩害, 破壊確率, Sequential Monte Carlo Simulation

連絡先 : 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学部社会環境工学科 TEL : 03 (5286) 2694

破壊確率（目標信頼性指標 β_T ）を満足する最終的な ϕ や γ を決定する。

03. 残存供用期間内の鉄筋腐食発錆の判定式への適用

ここでは、図-1 の適用例として、以下の問題を考える。海洋環境に 30 年間曝露された鉄筋コンクリート構造物について、コア採取により塩化物イオン濃度が得られたとする。その情報を活用することで、残り 20 年間の鉄筋腐食発錆を判定する式に用いる部分係数を同定する。この照査式を満足すれば、20 年間に鉄筋腐食が発錆する確率はほぼ目標値近くを確保できていることになる。なお、本稿では、30 年目の点検・検査の時点で既に鉄筋腐食の発錆が認められるほどの材料劣化が進展している状態は想定しない。このとき、式(1)に相当する照査式は式(3)、また、式(2)に相当する限界状態式は式(4)として与えられる。

$$\phi \bar{C}_T \geq \gamma \bar{C} \quad (3) \quad g = C_T - x_1 C \quad (4)$$

$$\bar{C} = \bar{C}_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot \bar{c}}{2\sqrt{\bar{D}_c t}} \right) \right\} \quad (5)$$

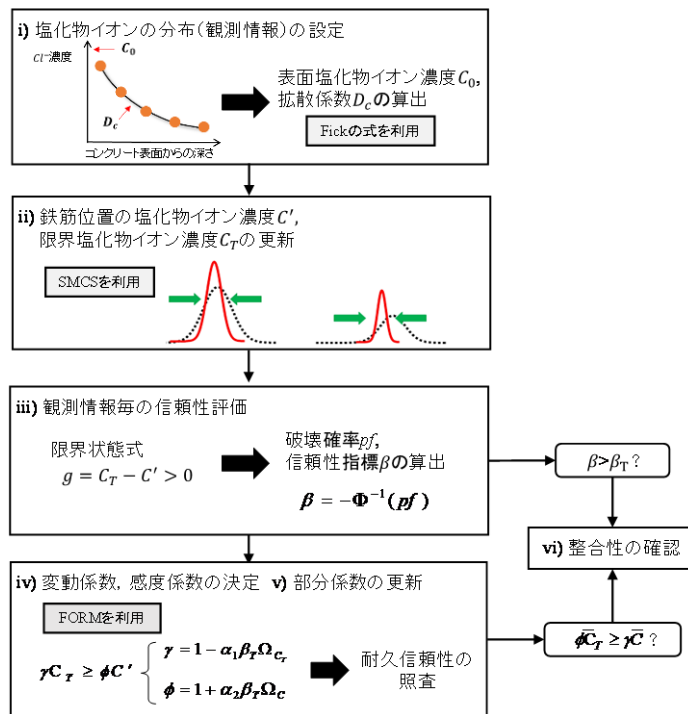


図-2 提案フローのケーススタディ

ここに、 C_T は鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度(kg/mm^3)、 C は鉄筋位置での塩化物イオン濃度(kg/mm^3)、 x_1 は塩化物イオンの浸透予測に関わる不確定性を考慮する係数である。 $\bar{C}_T$ および $\bar{C}$ はそれぞれ鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度(kg/mm^3)、鉄筋位置での塩化物イオン濃度(kg/mm^3)であり、 $\bar{C}_0$ と $\bar{D}_c$ はそれぞれ観測情報から求めた表面塩化物イオン濃度(kg/mm^3)と拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 $\bar{c}$ は施工誤差の平均値を加えたかぶり(mm)、 t は経過時間(年)、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ は誤差関数である。

表-1 部分係数の比較

	目標信頼性指標 $\beta_T = 2.0$						目標信頼性指標 $\beta_T = 1.0$					
	宇和島			新潟			宇和島			新潟		
	ϕ	γ	γ/ϕ	ϕ	γ	γ/ϕ	ϕ	γ	γ/ϕ	ϕ	γ	γ/ϕ
新設構造物	0.589	6.42	10.9	0.682	6.83	10.0	0.795	3.71	4.67	0.841	3.92	4.66
既存構造物	0.316	2.21	7.00	0.325	2.24	6.89	0.728	1.62	2.23	0.728	1.59	2.18

部分係数を試算する際の条件は、(a)構造物は、塩害環境の厳しい新潟と比較的穏やかな宇和島に置かれる、(b)使用するコンク

リートの水セメント比は 30%に固定、(c)設計かぶりは 100mm に固定、(d)コア採取により得られる塩化物イオン濃度分布（コンクリート表面からの距離と塩化物イオン濃度の関係）は 30 パターンを想定、(e)鉄筋腐食の発錆までの予測に必要な確率変数の統計量は参考文献 5)のものを使用する、としている。想定したケーススタディにおいて部分係数を同定するまでの手順の詳細を図-2 に示す。表-1 には、得られた部分係数をまとめて示す。表中、新設構造物とは、塩化物イオン濃度の分布が与えられない条件下で通常の FORM により部分係数を定めたものである。塩化物イオン濃度分布が与えられることで、鉄筋腐食発錆の評価に用いられる確率変数のバラツキが小さくなり、結果として部分係数比 (γ/ϕ) を小さくできている。これは、既存構造物を対象とする場合、残り 20 年間の鉄筋腐食発錆の判定において過度に安全側の部分係数を使用する必要はないことを意味し、合理的な照査を可能にする。

4. まとめ

本稿では、点検や検査結果を用いた既存構造物の性能照査に用いる部分係数の算定手順を示した。今後は、材料劣化により構造性能低下が生じているコンクリート構造物などを対象に提案フローの適用性を検討していきたい。

参考文献 1) ISO: International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998. 2) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本, 2002. 3) 土木学会：包括設計コード(案) 性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語 第1版 code PLATFORM ver. 1, 2003. 4) 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. 5) 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, Vol. 32, No. 11, 3768-3779.