

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

Reliability-based durability design for RC structures in a marine environment
based on the partial factors format

松崎裕*, 秋山充良**, 鈴木基行***

Hiroshi Matsuzaki, Mitsuyoshi Akiyama, Motoyuki Suzuki

* 修(工), 東京工業大学助教, 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 博(工), 東北大学准教授, 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

*** 工博, 東北大学教授, 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

A reliability-based durability design for reinforced concrete (RC) structures in a marine environment based on the partial factors format is proposed. In the proposed method, RC structures are designed so that the time to the occurrence of the specified amount of steel corrosion provided by the partial factor and design criterion is longer than the design lifetime. By using the proposed method, RC structures satisfy the target durability reliability level without any probabilistic calculations. Also, the effects of uncertainties involved in the evaluation of the amount of steel corrosion in durability design of RC structures are discussed based on the sensitivity analysis.

Key Words: Reliability-based design, chloride attack, RC structure, partial factors format

キーワード: 信頼性設計, 塩害, RC 構造物, 部分係数設計法

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),4)}。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として示されており、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が規定されることになる⁵⁾。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。

一方、このような部分係数フォーマットを用いた設計法は、従来、活荷重、地震動、あるいは風など、いわゆる力学的な作用に対して構築されてきた。例えば、地震ハザード曲線を用いることで、地震動強度とその頻度が

確率的に表現され、さらに構造物の応答や耐力(限界変位)の評価に介在する不確定性を考慮して地震時の破壊可能性が計算される。そして、その値を許容値に抑える、 $\gamma S \leq \phi R$ (ここに、 γ と ϕ は部分係数、 S と R はそれぞれ応答と耐力を指す)などの部分係数フォーマットに基づく耐震設計法が示されている⁶⁾。これに対し、著者らは、海洋環境下にある鉄筋コンクリート(RC)構造物を対象に、塩害危険度を表現した塩害環境ハザード曲線を提示し、さらに、鉄筋腐食進展の評価過程に介在する不確定性を既往の実験データなどに基づき定量化することで、鉄筋腐食発生あるいは腐食ひび割れ発生確率を計算する手法を提示した^{7),8)}。参考文献 8)では、設計耐用期間と腐食ひび割れ発生までの時間を比較する設計規準式までも示した。この設計規準式と提案する部分係数を用いることで、地震動の作用に対して断面諸元や鉄筋量を決める耐震設計と同じく、飛来塩分の作用に対して所要のかぶりを決める耐久設計が信頼性理論をベースに実現される。このようなかぶりを RC 構造物に付与することで、塩害環境の厳しさの大小によらず、腐食ひび割れ発生確率の制御が可能となる。

ここで、RC 構造物で設計時に許容される鉄筋腐食量

は、構造物の重要度、美観・景観や第三者影響、さらには材料劣化が構造性能に及ぼす影響などを勘案して定められるものであり、参考文献 8)のように、(許容する鉄筋腐食量) = (腐食ひび割れ発生に対応する鉄筋腐食量)，と固定することは不合理である。重要構造物では、鉄筋腐食発生を許容するべきではなく、逆に、重要度が低く設計耐用期間が短い構造物、あるいは荷重条件が厳しくなく、構造性能低下が問題とならない構造物などでは、ある程度の鉄筋腐食を許容した耐久設計も考えられる。

そこで、本研究では、参考文献 8)の設計規準式と部分係数の組み合わせを拡張し、想定した鉄筋腐食量が発生するまでの耐久限界期間(T_s)に部分係数 ϕ を乗じた期間が設計耐用期間(T_d)を上回ることを照査する耐久設計法($T_d \leq \phi T_s$)を提案する。 ϕ は想定した鉄筋腐食量が設計耐用期間内に発生する確率を制御するものであり、この照査に介入する不確定性の大きさに依存する。また、感度解析も実施し、海洋環境下にある RC 構造物の耐久設計に係る主要な不確定要因を同定し、それらの不確定性の低減が部分係数 ϕ に及ぼす影響などを考察する。

2. 海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性評価法

2.1 概説

海洋環境下にある RC 構造物の耐久設計法を信頼性理論をベースに構築する上で基本となるのは、RC 構造物の耐久信頼性(着目した鉄筋腐食量に到達する確率 pf を後述の式 (2) で信頼性指標に変換したもの)を定量的に評価する部分である。耐久信頼性の算定手法の詳細は後述するが、大きな流れとしては、図-1 に示すように、塩害を引き起す環境作用である飛来塩分について、飛来塩分を強度指標として、その生起確率を塩害環境ハザード曲線 $H(C_{air})$ として評価する。一方で、任意の飛来塩分量の作用に対して、着目した鉄筋腐食量を超過する条件付確率をモンテカルロ・シミュレーション(以下、MCS)で求め、フラジリティ曲線を得る。ここには、後述するように、コンクリートの水セメント比 W/C 、かぶり c 、鉄筋径 D といった構造諸元の相違が反映され、フラジリティ曲線は $Fr(C_{air}, W/C, c, D)$ と表記できる。最終的には、塩害環境ハザード曲線 $H(C_{air})$ とフラジリティ曲線 $Fr(C_{air}, W/C, c, D)$ の積として、着目した鉄筋腐食量を超過する確率 pf 、あるいはそれを変換した信頼性指標 β が得られる。

$$pf = \int_0^{\infty} \left\{ -\frac{dH(C_{air})}{dC_{air}} \right\} Fr(C_{air}, W/C, c, D) dC_{air} \quad (1)$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(pf) \quad (2)$$

ここに、 Φ は標準正規分布の累積分布関数である。

以下では、海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性評価法における各過程の詳細を述べる。

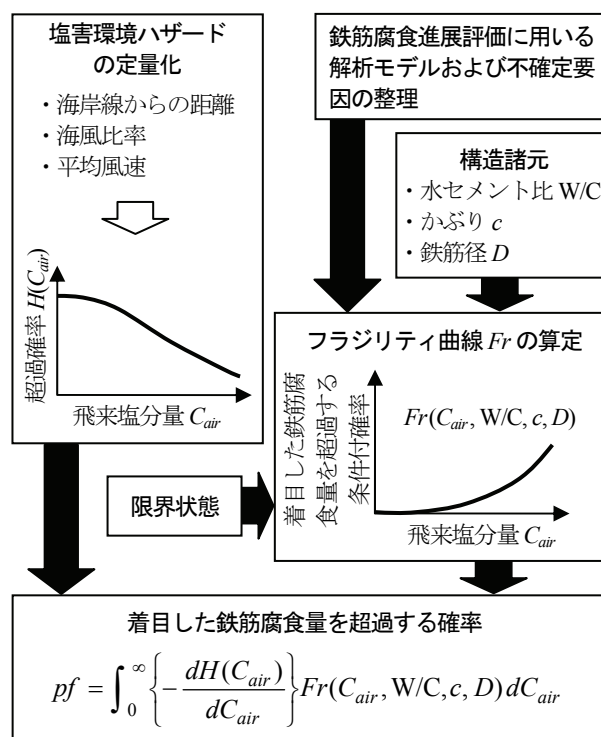


図-1 海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性評価法

2.2 着目する鉄筋腐食量

着目する鉄筋腐食量は、コンクリート標準示方書における劣化過程⁹⁾や古玉らが定めた劣化度¹⁰⁾との関係を踏まえて、構造性能あるいは鉄筋腐食進展上の変化点として次の4点を考慮する。

第一点目は、鉄筋腐食発生点であり、潜伏期と進展期の境界に対応する。第二点目は、鉄筋上の腐食生成物の体積膨張に伴う腐食ひび割れ発生点であり、進展期と加速期の境界に対応する。この点に対応する鉄筋腐食量の算定法は参考文献 8)と同じである。第三点目は、かぶり剥落に対応する鉄筋の質量減少率5%点であり、これは、加速期前期および後期(古玉らの定義では、劣化度 III と IV)の境界に相当する。第四点目は、異形鉄筋の節が腐食に伴って損失し、コンクリートとの付着劣化に伴う構造性能低下が顕在化する鉄筋の質量減少率20%点であり、加速期と劣化期の境界に対応する。

2.3 塩害環境ハザード曲線

塩害環境ハザード曲線とは、震央距離の増加とともに地震動強度が減衰することのアナロジーから、海岸線からの距離に応じて飛来塩分量が減衰することを表現したものである⁷⁾。海洋からの飛来塩分の供給量は、海風比率(海岸線に直交する方向の両側45度の範囲から風が吹く時間の比率)や平均風速によって説明しており、加えて海岸線からの距離を考慮して飛来塩分量の回帰式を作成している。なお、これら3つの説明変数のうち、不確定要因として取り扱っているものは平均風速であり、3年間平均風速の変動が考慮されている。山田ら¹¹⁾

は、構造物表面の位置と海岸線の方向の係に依じて構造物表面に到達する飛来塩分量には相違があることを指摘しており、こうした構造部材の位置・方向の違いによる飛来塩分量の相違は構造部材内での鉄筋腐食進展の空間的ばらつきの一つの要因であると考えられる。しかしながら、現状では、こうしたミクロな塩害環境の相違について不確定性を含めて定量的に評価することは困難である。そこで、本研究では、塩害環境ハザードの評価に際して、構造物表面の海岸線とのなす角度の相違などは考慮に入れず、解析対象とする地域が同じで、かつ海岸線からの距離が等しければ、同量の飛来塩分の作用を受けると仮定する。

2.4 フラジリティ曲線の評価法

(1) 概説

フラジリティ曲線は、前記したように、任意の飛来塩分量の作用下で、鉄筋腐食進展の評価に介在する不確定性を考慮して鉄筋腐食量を求め、それが着目する鉄筋腐食量を超過する確率を算定したものである。本研究では、この算定に参考文献8)に示される鉄筋腐食進展の評価法を用いる。以下にその概要を述べる。

(2) 鉄筋腐食発生の判定方法

任意の飛来塩分量 C_{air} が作用したとの条件下において、供用開始後 t 年での鉄筋腐食発生の有無は式(3)の $g_{d,1}$ で判定する ($g_{d,1} < 0$ で鉄筋腐食発生)。

$$g_{d,1} = C_T - \chi_1 \cdot C(c, \chi_2 D_c, \chi_3 C_0, t) \quad (3)$$

$$C_0 = 0.988 C_{air}^{0.379} \quad (4)$$

$$\log D_c = -6.77(W/C)^2 + 10.10(W/C) - 3.14 \quad (5)$$

$$C(c, \chi_2 D_c, \chi_3 C_0, t) = \chi_3 C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{\chi_2 D_c t}} \right) \right\} \quad (6)$$

ここに、 C_0 は表面塩化物イオン濃度、 c はかぶり、 D_c は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの見かけの拡散係数、 W/C は水セメント比であり、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ は誤差関数である。 χ_1 は塩化物イオンの浸透予測に係る不確定性を考慮する係数で、式(6)の計算に必要なパラメータの値が全て既知のもとで得られる(実験値)/(式(6)の計算値)の統計量を反映させる。 χ_2 は見かけの拡散係数の計算に伴う不確定性を考慮する係数で、(実験値)/(式(5)の計算値)の統計量を反映させる。 χ_3 は飛来塩分量 C_{air} から表面塩化物イオン量 C_0 を推定するのに伴う不確定性を考慮する係数で、(実験値)/(式(4)の計算値)の統計量を反映させる。

なお、Fickの拡散方程式は、コンクリート中の塩化物イオンの移動現象を必ずしも厳密に表していないが、ここでは算定式の精度検証が可能なデータが豊富にあることを優先し、式(6)で塩化物イオンの浸透予測を行うこ

とにした。

(3) 腐食ひび割れ発生の判定方法

腐食ひび割れ発生の有無は、式(7)の $g_{d,2}$ で判定する。鉄筋腐食速度を V 、式(3)から求められる鉄筋腐食発生時間を T_{co} としたとき、供用開始後 t 年での鉄筋腐食量は $Q_b(V, T_{co}, t)$ と表せる。これが腐食ひび割れ発生時の単位腐食量である Q_{cr} を超過したときを腐食ひび割れ発生と判定する ($g_{d,2} < 0$ で腐食ひび割れ発生)。

なお、本研究では、腐食ひび割れの幅が 0.1mm に達したときを腐食ひび割れ発生と定義する。これは、腐食ひび割れ幅 0.1mm を境に鉄筋腐食量は急増するものが多い^{12),13)}、実験上の腐食ひび割れ発生点として用いられること、また、透水性や物質透過性がこの値を境に急変すると報告^{9),14)}されているからである。その上で、 Q_{cr} の算定式としては Q_i ・関の式¹⁵⁾を用いた。 Q_i ・関の式は、鉄筋錆の膨張圧を一樣な分布荷重として与える円筒モデルから導かれており、さらに FEM 解析と同等の解が得られる補正係数が提案されており、多数のパラメータの影響を簡易に評価できる。 Q_i ・関の式を基本とし、実験値との比較を行うことで、 $\chi_4 = (\text{実験値}) / (\text{式(8)の計算値})$ の統計量を求め、これを腐食ひび割れ発生時の限界鉄筋腐食量の計算値が持つ不確定性として反映させる。

$$g_{d,2} = \chi_4 Q_{cr}(c) - Q_b(V, T_{co}, t) \quad (7)$$

$$Q_{cr}(c) = \eta(W_{c1} + W_{c2}) \quad (8)$$

$$W_{c1} = \frac{\rho_s}{\pi(r_f - 1)} \left[\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \left\{ (2c + D)^2 + D^2 \right\}}{E_c(c + D)} f'_c{}^{2/3} \right] \quad (9)$$

$$W_{c2} = \frac{\rho_s}{\pi(r_f - 1)} \cdot \frac{c + D}{5c + 3D} w_c \quad (10)$$

$$Q_b(V, T_{co}, t) = V(t - T_{co}) \quad (11)$$

$$f'_c = -20.5 + 21.0/(W/C) \quad (12)$$

ここに、 ρ_s は鉄筋の密度、 r_f は腐食生成物の体積膨張率で 3.0 とし、 D は鉄筋径、 E_c はコンクリートの弾性係数、 f'_c はコンクリート圧縮強度(MPa)、 w_c は腐食ひび割れ幅 (0.1mm)、 α_0 、 β_0 、 α_1 、 β_1 はかぶり、鉄筋径、およびコンクリート圧縮強度の影響を考慮するための補正係数¹⁵⁾である。 η は円筒モデルの不完全さおよびせん断補強鉄筋による腐食ひび割れの進展抑制効果を考慮する補正係数であり、 $\eta = 3.68$ である⁸⁾。 V は鉄筋腐食発生から腐食ひび割れ発生までの時間変化を平滑化した鉄筋腐食速度であり、実構造物での鉄筋腐食量の測定結果を用いて腐食速度を評価した中川らの研究¹⁶⁾に基づいて定めた。

(4) 腐食ひび割れ発生後の判定方法

本研究で腐食ひび割れ発生後に着目する鉄筋腐食量は、質量減少率 5% と 20% である。そこで、供用開始後 t 年

表－1 鉄筋腐食進展評価で考慮する不確定要因の一覧⁸⁾

不確定要因	確率分布	平均値	変動係数 または 標準偏差
χ_1	対数正規	1.24	90.6%
χ_2	対数正規	1.89	184%
χ_3	対数正規	1.43	108%
χ_4	対数正規	1.00	33.0%
鉄筋腐食発生の限界 塩化物イオン濃度	正規分布	2.03kg/m ³	37.5%
かぶりの施工誤差	正規分布	8.5mm	16.6mm ^{*1)}
腐食ひび割れ発生前の 鉄筋腐食速度 V	対数正規	6.10 mg/cm ² /年	58.0%

*1) かぶりの施工誤差のみ、標準偏差を示しており、かぶりに関わらず、表中の値を一律に適用する。

の腐食量と比較することで、これらの鉄筋腐食量を超過するか否かを式(13)に基づいて判定する。

$$g_{d,3} = Q_{cr,a} - Q_a(V, \alpha_V, T_{co}, T_{cr}, t) \quad (13)$$

$$Q_a(V, \alpha_V, T_{co}, T_{cr}, t) = V(T_{cr} - T_{co}) + \alpha_V V(t - T_{cr}) \quad (14)$$

ここに、 $Q_{cr,a}$ は質量減少率 5%または 20%に相当する単位腐食量、 T_{cr} は式(7)から求められる供用開始から腐食ひび割れ発生までの時間、 α_V は腐食ひび割れ発生前後での腐食速度増加率で $\alpha_V=13.0$ とする⁸⁾。実際の腐食速度は、腐食ひび割れ幅の増大に伴って漸増していくと思われる。しかし、この腐食速度の時間変化に関する十分な実験や調査結果がないことから、実構造物での測定結果に基づく中川らの研究¹⁶⁾に基づき、腐食ひび割れ発生前の腐食速度に $\alpha_V=13.0$ を乗じることで腐食ひび割れ発生後の腐食速度を評価することとした。なお、中川らの調査結果によると、腐食速度の変動係数は、腐食ひび割れ発生の有無によらず同じ値とみなせることから、 α_V は確定値として扱う。

(5) 耐久信頼性評価で考慮する不確定要因

耐久信頼性評価の中で考慮される各不確定要因の統計量の一覧を表－1に示す。

3. 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法と主要な不確定要因の抽出

3.1 概説

2.で述べた耐久信頼性評価法を直接的に用いれば、かぶり等を適当に変更しながら、着目した鉄筋腐食量を超過する確率を繰り返して算定し、目標とする耐久信頼性を有するような RC 構造物の耐久設計が可能である。しかしながら、設計者がそうした確率計算を行うのは複雑な作業であり、設計実務への適用を念頭に置くと、耐久設計に用いる部分係数を設計耐用期間や目標とする耐久信頼性に応じて予め算定しておくことが望ましい。

本章では、設計者が確率計算を一切行うことなく、着

目する鉄筋腐食量を超過する可能性を目標値に漸近させることが可能な設計かぶりを決定できる設計規準式と部分係数の組み合わせを提案する。

3.2 提案する設計規準式と部分係数

参考文献17)では、耐久設計に用いる照査式として、耐久限界期間(T_s)>設計耐用期間(T_d)、が提案されている。本研究では、この参考文献17)の耐久設計法を参考に、耐久限界期間の設計値を設計時に許容する鉄筋腐食量に応じて算定した上で、目標とする耐久信頼性を確保するための部分係数 ϕ を乗じた、式(15)の設計規準式を提案する。

$$T_d \leq \phi T_s \quad (15)$$

式(15)の形から明らかなように、部分係数 ϕ は耐久限界期間の設計値を割り引く役割をしており、目標とする耐久信頼性が大きいほど、および耐久限界期間 T_s の算定に伴う不確定性が大きいほど、より小さい部分係数 ϕ を用いることになる。耐久限界期間 T_s は、設計時に許容する鉄筋腐食量に応じて次のように算定する。

$$T_s = \begin{cases} T_1 & (\text{鉄筋腐食発生点}) \\ T_1 + T_2 & (\text{腐食ひび割れ発生点}) \\ T_1 + T_2 + T_3 & (\text{質量減少率5\%点}) \\ T_1 + T_2 + T_4 & (\text{質量減少率20\%点}) \end{cases} \quad (16)$$

ここに、 T_1 は鉄筋腐食発生までの時間の設計値、 T_2 は鉄筋腐食発生から腐食ひび割れ発生までの時間の設計値、 T_3 は腐食ひび割れ発生から質量減少率 5%点に到達するまでの時間の設計値、 T_4 は腐食ひび割れ発生から質量減少率 20%点に到達するまでの時間の設計値であり、それぞれ次のように算定される。

$$C_{0,d} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_{c,d} T_1}} \right) \right\} = C_{lim,d} \quad (17)$$

$$T_2 = \frac{Q_{cr,d}}{V_d} \quad (18)$$

$$T_3 = \frac{Q_{5,d} - Q_{cr,d}}{\alpha_V V_d} \quad (19)$$

$$T_4 = \frac{Q_{20,d} - Q_{cr,d}}{\alpha_V V_d} \quad (20)$$

ここに、 c_d は設計かぶりであり、 $C_{lim,d}$ は鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度、 $D_{c,d}$ は見かけの拡散係数、 V_d は腐食ひび割れ発生前の鉄筋腐食速度、 $Q_{cr,d}$ は腐食ひび割れ発生時の限界鉄筋腐食量のそれぞれ設計値であり、 $C_{lim,d}$ と V_d は表－1 から求められる平均値と中央値として与える。また、 $D_{c,d}$ は式(5)から求められる D_c と同じとし、 $Q_{cr,d}$ は表－1 から求められる中央値を代入した χ_4 を式(8)の Q_{cr} に乗じた値とする。 $Q_{5,d}$ および $Q_{20,d}$ はそれぞれ質量減少率 5%および質量減少率 20%に対応する鉄

表-2 部分係数算定の対象地域

番号	地域名(都道府県名)	番号	地域名(都道府県名)
1	稚内(北海道)	20	萩(山口)
2	留萌(北海道)	21	福岡(福岡)
3	小樽(北海道)	22	長崎(長崎)
4	江差(北海道)	23	牛深(熊本)
5	苫小牧(北海道)	24	枕崎(鹿児島)
6	釧路(北海道)	25	油津(宮崎)
7	根室(北海道)	26	宇和島(愛媛)
8	深浦(青森)	27	室戸(高知)
9	酒田(山形)	28	潮岬(和歌山)
10	宮古(岩手)	29	尾鷲(三重)
11	石巻(宮城)	30	勝浦(千葉)
12	小名浜(福島)	31	与那国島(沖縄)
13	新潟(新潟)	32	宮古島(沖縄)
14	伏木(富山)	33	石垣島(沖縄)
15	輪島(石川)	34	西表島(沖縄)
16	敦賀(福井)	35	南大東島(沖縄)
17	舞鶴(京都)	36	久米島(沖縄)
18	境(鳥取)	37	名護(沖縄)
19	浜田(島根)	38	那覇(沖縄)

筋腐食量である。 $C_{0,d}$ は表面塩化物イオン濃度の設計値であり、飛来塩分量の回帰式(距離減衰式)に基づき、次式で算定する⁸⁾。

$$C_{0,d} = 4.2r^{0.25}u^{0.1}d^{-0.25} \quad (21)$$

ここに、 r は海風比率、 u は平均風速、 d は海岸線からの距離である。

3.3 部分係数の算定手順

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、設計時に許容する鉄筋腐食量毎に、次の手順により決定する。なお、部分係数を算定する際に想定する構造物の建設地点は、参考文献 7) と同じ表-2 に示す全国 38 地域とする。

- 1) 目標信頼性指標 β_T と設計耐用期間 T_d を設定する。
- 2) 部分係数 ϕ の値を仮定する。
- 3) 全国 38 地域に対して、式(15)を満足する設計かぶりを算定する。
- 4) 3) で求めた設計かぶりを有する RC 構造物について、着目する鉄筋腐食量を超過する可能性(信頼性指標 $\beta_i (i=1, 2, \dots, 38)$) を算定する。
- 5) 以下の目的関数 w を最小にする部分係数 ϕ の値を探索できるまで、2)~4) を繰り返す。

$$w = \sum_{i=1}^{38} (\beta_i - \beta_T)^2 \quad (22)$$

表-3 部分係数 ϕ (許容する鉄筋腐食量: 鉄筋腐食発生点)

	$\beta_T = 1.5$	$\beta_T = 2.0$	$\beta_T = 2.5$
設計耐用期間 25 年	0.84	0.22	0.076
設計耐用期間 50 年	0.79	0.21	0.075
設計耐用期間 75 年	0.75	0.21	0.073

表-4 部分係数 ϕ (許容する鉄筋腐食量: 腐食ひび割れ発生点)

	$\beta_T = 1.5$	$\beta_T = 2.0$	$\beta_T = 2.5$
設計耐用期間 25 年	1.16	0.48	0.20
設計耐用期間 50 年	0.96	0.34	0.15
設計耐用期間 75 年	0.91	0.30	0.14

表-5 部分係数 ϕ (許容する鉄筋腐食量: 質量減少率 5% 点)

	$\beta_T = 1.5$	$\beta_T = 2.0$	$\beta_T = 2.5$
設計耐用期間 25 年	1.09	0.56	0.23
設計耐用期間 50 年	1.01	0.36	0.16
設計耐用期間 75 年	0.90	0.31	0.14

表-6 部分係数 ϕ (許容する鉄筋腐食量: 質量減少率 20% 点)

	$\beta_T = 1.5$	$\beta_T = 2.0$	$\beta_T = 2.5$
設計耐用期間 25 年	—*	—*	0.39
設計耐用期間 50 年	1.14	0.49	0.21
設計耐用期間 75 年	1.01	0.38	0.17

*最小かぶり 10mm であっても、全ての地点で β_T よりも大きな耐久性が確保されるため、部分係数の探索は行わなかった。

3.4 部分係数の試算

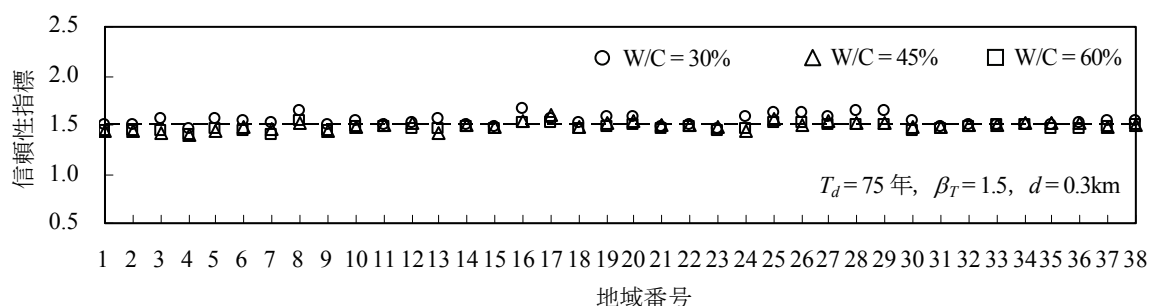
設計耐用期間および目標信頼性指標に対応した部分係数を試算する。具体的には、設計耐用期間を 25 年、50 年、および 75 年の 3 ケース、目標信頼性指標 β_T として 1.5、2.0、および 2.5 の 3 ケースを設定する。RILEM の報告¹⁸⁾によれば、目標信頼性指標の目安として、耐久性の損失により大きな修復コストが必要となる場合、耐久設計で $\beta_T = 2.5$ 、耐久性の損失による影響が軽微な場合、耐久設計で $\beta_T = 1.5$ を確保することが提案されている。また、現行のコンクリート標準示方書に従ってかぶりを決めた場合、鉄筋腐食発生確率に対応する信頼性指標は概ね 1.5~2.0 程度である⁷⁾。前記の β_T の 3 ケースはこれらの値を参考に設定した。なお、 β_T は、既存構造物へのキャリブレーションのほか、構造物の重要度なども勘案して定めるべきものであり、その決定には別途の検討が必要である。

設計時に許容する鉄筋腐食量毎に、これら設計耐用期間と目標信頼性指標に対応した部分係数 ϕ を試算した結果を表-3~表-6 に示す。なお、試算に際しては、以下の条件を設け、部分係数 ϕ に対応した式(15)の設計規準式を満足させた。

・海岸線からの距離 d : 全国 38 地域それぞれに対して、



a) 設計時に許容する鉄筋腐食量：鉄筋腐食発生点 ($\phi=0.21$)



b) 設計時に許容する鉄筋腐食量：腐食ひび割れ発生点 ($\phi=0.91$)



c) 設計時に許容する鉄筋腐食量：質量減少率 5%点 ($\phi=0.23$)



d) 設計時に許容する鉄筋腐食量：質量減少率 20%点 ($\phi=0.49$)

図-2 提案した設計規準式と部分係数を用いて設計した RC 構造物の耐久信頼性指標

$d=0.1\text{km}, 0.2\text{km}, 0.3\text{km}, 0.5\text{km}, 1.0\text{km}$
 ・水セメント比 W/C : 30%, 45%, 60%
 ・軸方向鉄筋 : D32
 ・かぶり : 最小かぶりを 10mm として, 10mm 間隔で変更
 表-3~表-6 に示されるように, 目標信頼性指標 β_T が大きいほど, 部分係数 ϕ が低減している。これは, 耐

久信頼性評価における耐久限界期間算定の不確定性を踏まえて, 高い耐久信頼性を確保するためには, 式(15)における設計耐用期間 T_d と耐久限界期間 T_s の差を大きく確保する必要があるためである。また, 同一の設計耐用期間と目標信頼性指標であっても, 大きな鉄筋腐食を許容するほど部分係数 ϕ が増加している。これは, 後述

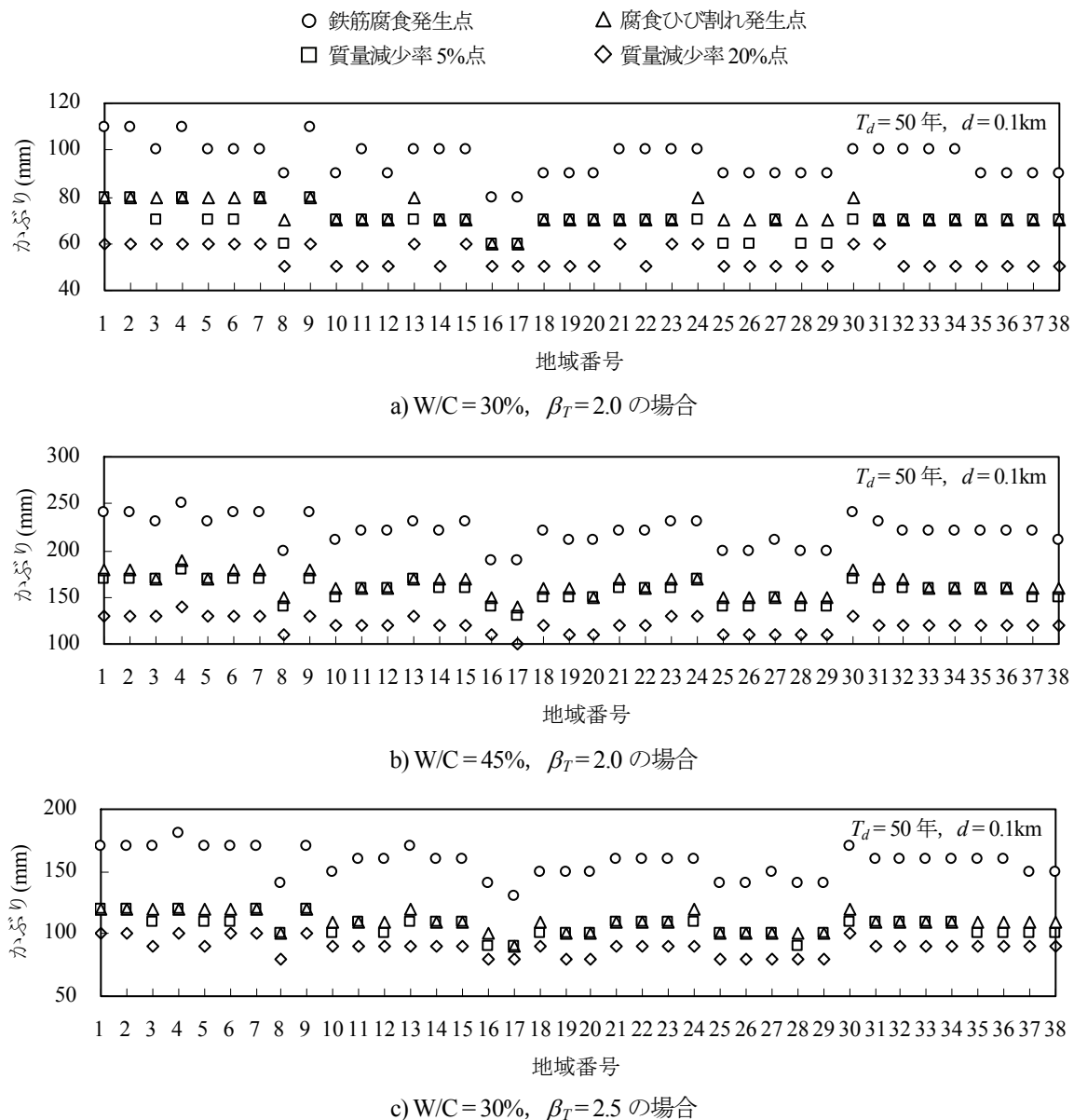


図-3 設計時に許容する鉄筋腐食量と必要かぶりの関係

するように、設計時に許容する鉄筋腐食量に関わらず、耐久限界期間 T_s の主たる不確定性は T_1 算定時の不確定性によって支配されており、その他の $T_2 \sim T_4$ が有する不確定性は相対的に小さく、同一の設計耐用期間において、部分係数 ϕ を割り増せるためである。

表-3～表-6 に示した部分係数を用いて耐久設計された RC 構造物の耐久信頼性を式(1)と式(2)から求めた。結果の一例を図-2 に示す。図から明らかなように、設計時に許容する鉄筋腐食量、および、コンクリートの水セメント比 W/C や塩害環境の相違に関わらずに、式(15)の設計規準式と部分係数で耐久設計を行うことで、かぶりが適切に定められ、目標信頼性指標を概ね確保した RC 構造物が設計される。また、図-3 には、 $T_d=50$ 年、 $d=0.1$ km の条件で、設計時に許容する鉄筋腐食量と必要とされるかぶりの関係について、幾つかの例を示した。

図-3 の a) と b) を比較することで、W/C の違いがかぶりに及ぼす影響を、同じく a) と c) を比較することで、 β_T の違いがかぶりに及ぼす影響を知ることができる。図-3 より、質量減少率 5% を設計時に許容しても、それによって得られるかぶりの低減効果は、腐食ひび割れ発生までに鉄筋腐食量を抑えた場合と大差ないことが分かる。つまり、設計時に許容する鉄筋腐食量の大きさとして、質量減少率 5% を用いることは不適切であることが示唆されている。最終的には、許容する鉄筋腐食量毎に得られる設計かぶり、対象構造物の重要度や材料劣化に起因する構造性能低下量の大きさなどを勘案し、式(16)の T_s を選択することになる。

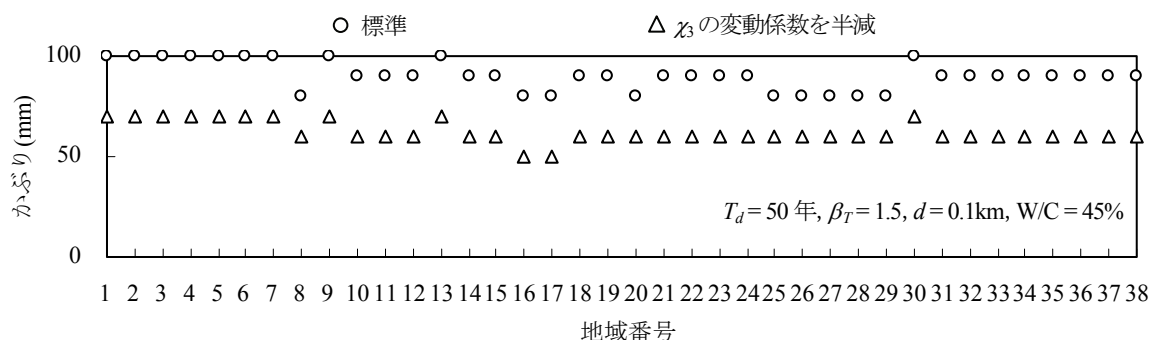


図-4 $C_{air}-C_0$ 変換式の不確定性が必要かぶりに及ぼす影響

表-7 $\beta_T=1.5$ の場合の感度解析結果

項目	部分係数 ϕ
標準	0.96
χ_1 の変動係数を半減	1.47
χ_2 の変動係数を半減	1.08
χ_3 の変動係数を半減	1.59
χ_4 の変動係数を半減	0.96
V の変動係数を半減	0.92

表-8 $\beta_T=2.5$ の場合の感度解析結果

項目	部分係数 ϕ
標準	0.15
χ_1 の変動係数を半減	0.20
χ_2 の変動係数を半減	0.23
χ_3 の変動係数を半減	0.22
χ_4 の変動係数を半減	0.15
V の変動係数を半減	0.16

3.5 塩害に対する RC 構造物の耐久設計における主要な不確定要因の抽出

3.4 で試算した部分係数 ϕ は、耐久信頼性評価に介在する不確定性の影響が総合的に反映された上で決定されている。従って、耐久信頼性評価に関係するパラメータの部分係数 ϕ に対する感度解析を実施することにより、海洋環境下にある RC 構造物の耐久設計における主要な不確定要因を抽出することができる。

ここでは、設計時に許容する鉄筋腐食量を腐食ひび割れ発生点とした場合を対象に、各パラメータの部分係数に対する感度を検討する。その際、耐久設計に用いる各パラメータの推定精度が向上した場合を想定し、各パラメータの中央値を変更しないまま、その変動係数を半減させた場合の解析を行う。また、かぶりの大小によって、各パラメータの変動係数を同様に半減させた場合であっても、部分係数に対する感度は異なることが予想される。そこで、目標信頼性指標 β_T を 1.5 および 2.5 と設定する。設計耐用期間は 50 年とする。その他の部分係数 ϕ の定め方は前節までと同じである。

耐久設計から定められるかぶりが相対的に小さい場合、すなわち $\beta_T=1.5$ の場合の部分係数に対する感度解

析結果を表-7 に示す。塩化物イオンの浸透評価におけるパラメータの中でも、特に $C_{air}-C_0$ 変換式の不確定性を表す χ_3 、Fick の拡散方程式のモデルの不確定性を表す χ_1 の部分係数への感度が大きい。これらは、式(3)および式(6)から明らかなように、いずれも、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の算定値に直接乗じられるパラメータであり、その他の見かけの拡散係数の不確定性を表す χ_2 などのような塩化物イオン濃度算定時の入力パラメータに比べて、部分係数への影響が大きいことが分かる。図-4 には、 χ_3 の変動係数を半減させた場合に、同一の目標信頼性指標を確保する上で必要となるかぶりの変化を示す。前記した部分係数への感度の大きさを反映して、必要かぶりの大きさには、鉄筋腐食発生の評価(式(3))における不確定性が支配的に影響していることが示されている。なお、腐食ひび割れ発生の限界鉄筋腐食量算定に伴う不確定性を表す χ_4 の変動係数を半減させても、部分係数には変化がなく、当該閾値の不確定性は、鉄筋腐食発生時間の算定に伴う不確定性の中に埋もれていることが分かる。また、鉄筋腐食速度 V の不確定性を低減させた場合には、部分係数が低減、すなわち、かぶりがより必要になる方向へと変化している。これは、目標信頼性指標が $\beta_T=1.5$ と小さいことから、MCS ベースでの fragility 曲線算定の際に、鉄筋腐食が発生した試行のうちの半数以上が腐食ひび割れ発生の限界鉄筋腐食量を超過しており、鉄筋腐食速度の不確定性の低減により、腐食速度の中央値よりも小さい側の裾野の変化が信頼性指標に影響しているためである。

続いて、耐久設計から定められるかぶりが大きい場合、すなわち $\beta_T=2.5$ の場合の部分係数に対する感度解析結果を表-8 に示す。この場合には、 $\beta_T=1.5$ の場合と異なり、鉄筋腐食速度の不確定性の低減により、部分係数が増加している。すなわち、鉄筋腐食速度の不確定性の低減がかぶりの低減へと寄与している。このように、高い目標信頼性指標を確保し、相応のかぶりを有する RC 構造物に対しては、鉄筋腐食速度の不確定性の低減は耐久設計の合理化につながる。その他の不確定要因の感度についても、必要かぶりが小さい $\beta_T=1.5$ の場合に比べて、塩化物イオンの浸透評価に係る各パラメータの影響度

の順序に違いは見られるものの、やはり、鉄筋腐食発生後の挙動の評価に係る不確定性に比べて、鉄筋腐食発生の評価に係る不確定性が支配的となっている。

4. 結論

本研究から得られた結論を以下に示す。

- 1) 海洋環境下にある RC 構造物を対象に、鉄筋腐食発生点、腐食ひび割れ発生点、質量減少率 5%点、および質量減少率 20%点に着目し、各鉄筋腐食量に到達するまでの時間である耐久限界期間と設計耐用期間とを部分係数を介して比較する設計規準式を提案した。
- 2) 提案した設計規準式と部分係数の組み合わせを用いることで、コンクリートの品質(水セメント比)や塩害環境の相違に関わらず、また、設計者が確率計算を行うことなく、所要の耐久信頼性を確保した RC 構造物を設計可能であることを示した。
- 3) 設計時に許容する鉄筋腐食量として腐食ひび割れ発生点を対象に、耐久設計に用いる各パラメータの推定精度が向上した場合を想定し、それらの変動係数を半減させた場合の部分係数への感度として、海洋環境下にある RC 構造物の耐久設計における支配的な不確定要因の抽出を試みた。その結果、ある程度大きな鉄筋腐食を設計時に許容した場合であっても、塩化物イオンの浸透評価に係るパラメータの不確定性の影響が大きく、それらの低減を図ることにより、耐久設計の合理化が図られることが示された。

参考文献

- 1) ISO: International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998.
- 2) 地盤工学会：包括基礎構造物設計コード 地盤コード 21 ver. 1, 2000.
- 3) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本, 2002.
- 4) 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.
- 5) 秋山充良:コンクリート構造物の信頼性設計法に関する研究, コンクリート工学, Vol. 41, No. 6, pp. 61-66, 2003.
- 6) Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O. and Foutch, D. A.: Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 526-533, 2002.
- 7) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 2, pp. 385-401, 2006.
- 8) 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.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], 2008.
- 10) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也: 栈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.
- 11) 山田文則, 細山田得三, 下村匠: 構造物表面に到達する飛来塩分量の数値解析による予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1041-1046, 2007.
- 12) 榊田佳寛, 花栄浩, 松林裕二, 原謙治, 安田正雪: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 435 号, pp. 19-27, 1992.
- 13) 松林裕二, 榊田佳寛, 笹刈優樹: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する屋外暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp. 9-15, 2000.
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 2002.
- 15) QI Lukuan, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp. 161-171, 2001.
- 16) 中川貴之, 瀬下雄一, 鬼束俊一, 堤知明: 海洋環境下における RC 構造物の鉄筋腐食速度の評価, コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, pp. 325-330, 2004.
- 17) 土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(案), コンクリートライブラリー第 82 号, 1996.
- 18) Sarja, A. and Vesikari, E.: Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, 1994.

(2009 年 9 月 24 日受付)