

腐食ひび割れ発生点を限界状態とした海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性設計法

東京工業大学 正会員 ○松崎 裕
 東北大学 正会員 秋山充良
 東北大学 フェロー 鈴木基行

1. はじめに

著者らは、飛来塩分量の評価から鉄筋腐食発生の評価までの一連のプロセスに介在するバラツキを陽に取り込み、算定される設計耐用期間内における鉄筋腐食発生確率をある目標値へと誘導する耐久信頼性設計法を提案した¹⁾。本研究では、腐食ひび割れ発生点までであれば構造性能は健全時とほとんど変わらず、第三者影響も無いことを踏まえ、腐食ひび割れ発生点を限界状態として、確率計算を必要としない部分係数を用いた耐久信頼性設計法を構築する。

2. 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計法

2.1 設計規準式と部分係数

部分係数 γ_1 と γ_2 を介した腐食ひび割れ発生時間の設計値 $T_{crack,d}$ が、設計耐用期間 T_d 以上であることを照査する次の設計規準式と部分係数の組み合わせを用いる。

$$\frac{T_d}{T_{crack,d}} \leq 1 \quad (1) \quad T_{crack,d} = \frac{T_1}{\gamma_1} + \frac{T_2}{\gamma_2} \quad (2)$$

ここに、 T_1 は式(3)の関係式を満足するように定める鉄筋腐食発生までの時間、 T_2 は式(4)により定める鉄筋腐食発生から腐食ひび割れ発生までの時間である。また、 γ_1 と γ_2 はそれぞれ T_1 と T_2 の評価に介在する不確定性に対応する部分係数であり、設計時に設定する目標信頼性指標の大きさにより変化させる。

$$C_{0,d} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_{c,d} T_1}} \right) \right\} = C_{lim,d} \quad (3) \quad T_2 = \frac{Q_{cr,d}}{V_d} \quad (4)$$

$$C_{0,d} = 4.2r^{0.25}u^{0.1}d^{-0.25} \quad (5) \quad \log D_c = -6.77(W/C)^2 + 10.10(W/C) - 3.14 \quad (6)$$

ここに、 $C_{0,d}$ は表面塩化物イオン濃度の設計値であり、式(5)に基づいて与え、 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。また、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ は誤差関数、 c_d は設計かぶり、 $D_{c,d}$ は見かけの拡散係数の設計値、 $C_{lim,d}$ は鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度の設計値、 $Q_{cr,d}$ は腐食ひび割れ発生の限界腐食量の設計値、 V_d は鉄筋腐食速度の設計値である。なお、 $D_{c,d}$ は式(6)による D_c の算定値として水セメント比 W/C に基づいて与え²⁾、 $C_{lim,d}$ 、 $Q_{cr,d}$ 、 V_d の各値は、後述する C_r 、 Q_{cr} 、 V の各統計量の中央値として与える。

2.2 部分係数の算定手順

式(2)では2つの部分係数 γ_1 と γ_2 を用いたが、ここでは $\gamma_2 = 1.0$ とし、 γ_1 のみを目標耐久信頼性に応じて変化させることにした。これを踏まえて、部分係数は次のように決定される。1) 目標信頼性指標 β_T を設定する。2) 部分係数 γ_1 の値を仮定する。3) 参考文献1)と同様の全国38地点を対象に、式(1)を満足する設計かぶり c_d を算定し、後述する方法で腐食ひび割れ発生確率 pf_i ($i = 1, 2, \dots, 38$)を算定する。4) 腐食ひび割れ発生確率 pf_i を式(7)に基づいて信頼性指標 β_i に変換する。5) 式(8)の目的関数 w を最小にする部分係数 γ_1 の値を探索できるまで、2)~4)を繰り返す。

$$\beta_i = -\Phi^{-1}(pf_i) \quad (7) \quad w = \sum_{i=1}^{38} (\beta_i - \beta_T)^2 \quad (8)$$

3. 海洋環境下にある RC 構造物の腐食ひび割れ発生確率の算定法

3.1 概説

設計耐用期間 T_d 内における腐食ひび割れ発生確率 pf は、参考文献1)と同様に、飛来塩分量 C_{air} を指標とした塩害環境ハザード曲線 $H(C_{air})$ で地域の塩害環境の厳しさを評価し、ある飛来塩分量 C_{air} の作用下において、設計耐用期間内に着目した限界状態を超過する確率をフラジリティカーブ $Fr(C_{air}, T_d)$ で評価した式(9)により算定される。

Key Words : 塩害, 腐食ひび割れ, RC 構造物, 耐久信頼性設計, 部分係数

連絡先 : 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-10 TEL : 03(5734)2922 FAX : 03(5734)3810

$$pf = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dH}{dC_{air}} \right) Fr(C_{air}, T_d) dC_{air} \quad (9)$$

3.2 鉄筋腐食発生の判定方法

式(10)の限界状態式が負となった場合に、鉄筋腐食が発生すると判定する。すなわち、Fick の拡散方程式に基づいて、供用開始後 t 年における鉄筋位置での塩化物イオン濃度 C を算定し、それが鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度 C_T を超過するか否かにより判定する。

$$g_1 = C_T - C(c_d, C_0, D_c, t) \quad (10)$$

$$C(c_d, C_0, D_c, t) = \chi_1 \cdot C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left\{ \frac{0.1(c_d + \chi_2)}{2\sqrt{\chi_3 D_c t}} \right\} \right] \quad (11)$$

$$C_0 = \chi_4 \cdot 0.988 C_{air}^{0.379} \quad (12)$$

ここに、 χ_1 は Fick の拡散方程式による塩化物イオン濃度の計算値の不確定性を表す係数、 χ_2 はかぶりの施工誤差を表す係数である。 D_c は見かけの拡散係数であり、式(6)による計算値に対して、(実験値)/(計算値)の不確定性を表す係数 χ_3 を考慮する。また、 C_0 は表面塩化物イオン濃度であり、飛来塩分量から表面塩化物イオン濃度を推定する際の不確定性を表す係数 χ_4 を考慮した式(12)に基づいて与える。

3.3 腐食ひび割れ発生の判定方法

腐食ひび割れ発生は、式(10)で $g_1 = 0$ を満足する時間 T_{co} から設計耐用期間 T_d 内に生じる鉄筋腐食量が、腐食ひび割れ発生の限界腐食量 Q_{cr} を超過するか否かで判定する。その際、期間内の平均的な鉄筋腐食速度 V は中川ら³⁾の報告に基づいて統計量を定め、腐食ひび割れ発生の限界腐食量 Q_{cr} は Qi・関⁴⁾の算定式に基づいて与える。なお、松島ら⁵⁾、中川ら⁶⁾の乾湿繰返し実験結果に基づき、Qi・関の算定式による計算値を用いて、(実験値)/(計算値)の不確定性を χ_5 により考慮する。式(13)の限界状態式が負となった場合に、腐食ひび割れが発生すると判定する。

$$g_2 = Q_{cr} - Q(V, T_{co}, T_d) \quad (13)$$

$$Q(V, T_{co}, T_d) = V(T_d - T_{co}) \quad (14)$$

3.4 考慮する不確定要因の一覧

腐食ひび割れ発生確率の評価の際に考慮する不確定要因の一覧を表-1に示す。

4. 部分係数の試算

設計耐用期間 T_d を 50 年とし、目標信頼性指標 β_T を参考文献 1) と同様に、 $\beta_T = 1.5, 2.0$ として部分係数を試算した結果を表-2に示す。また、水セメント比 W/C を 45%，軸方向鉄筋を D32，信頼性指標を $\beta_T = 2.0$ とした場合を例として、海岸線からの距離 $d = 0.1\text{km}, 0.3\text{km}$ における全国 38 地点における信頼性指標を図-1に

示す。提案する設計規準式と部分係数を用いることで、確率計算を必要とせずに、コンクリートの品質や地域の塩害環境の相違に関わらず、概ね目標信頼性指標を確保した耐久設計がなされていることが確認できる。

5. まとめ

飛来塩分量の評価から腐食ひび割れ発生の評価までに介在するバラツキを考慮した上で、腐食ひび割れ発生確率を算定し、それを目標値へと漸近させることのできる耐久信頼性設計法を構築した。構築した耐久信頼性設計法は、煩雑な確率計算を必要としない部分係数を用いた設計法であり、試算した部分係数を用いることで、コンクリートの品質や地域の塩害環境によらずに所要の耐久信頼性を確保可能である。

参考文献

1) 秋山充良ほか：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。2) 前田聡ほか：塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.109-120，2004。3) 中川貴之ほか：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。4) 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。5) 松島学ほか：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1669-1674，2004。6) 中川裕之ほか：塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.110-121，2008。

表-1 考慮する不確定要因の一覧

不確定要因	確率分布	平均値	変動係数 (標準偏差)
χ_1	対数正規	1.24	0.906
χ_2	正規分布	8.5mm	16.6mm ^{*1)}
χ_3	対数正規	1.89	1.84
χ_4	対数正規	1.43	1.08
χ_5	対数正規	3.68	0.330
C_T	正規分布	2.03kg/m ³	0.375
V	対数正規	6.10 mg/cm ² /年	0.580

*1) かぶりの施工誤差のみ，標準偏差である。

表-2 目標信頼性指標と部分係数

β_T	γ_1	γ_2
1.5	1.0	1.0
2.0	4.1	1.0

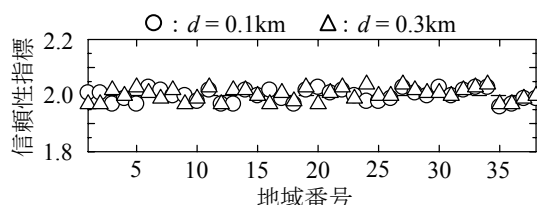


図-1 耐久信頼性設計結果