

飛沫帯にある RC 部材における各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測結果に与える影響に関する感度分析

大阪大学大学院工学研究科 学生会員○田中 伸幸 佐賀大学大学院工学系研究科 正会員 内田 慎哉
大阪大学大学院工学研究科 正会員 鎌田 敏郎

1. はじめに

本研究では、まず、著者らが提案している RC 部材の曲げ耐力の予測手法¹⁾を活用し、飛沫帯における RC 部材(表-1 参照)を対象として、塩害劣化進行過程における潜伏期および進展期の各期間を算出した。続いて、各期間において、同手法で設定した各種劣化因子の変動程度が曲げ耐力の予測結果に与える影響についての感度分析を行った。最後に、各期間における維持管理上の重要な調査項目を把握する方法についての提案を行った。

2. 著者らが提案している劣化曲線の導出方法の概要¹⁾

2.1 鉄筋腐食開始および腐食ひび割れ発生時刻の算出

鉄筋腐食開始時刻： $t_{corr.}$ (年)および腐食ひび割れ発生時刻： $t_{cra.}$ の算出式をそれぞれ示す。

$$t_{corr.} = \frac{1}{4x_2D} \left\{ \frac{0.1(c + c_{error})}{\text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_{lim}}{x_1C_0}\right)} \right\}^2 \quad (1)$$

$$t_{cra.} = t_{corr.} + \frac{x_3\eta W_c}{V_b} \quad (2)$$

$$W_c = \frac{100\rho_s}{\pi(\gamma-1)} \left[\alpha_0\beta_0 \frac{0.22\left\{2(c + c_{error}) + \varphi\right\}^2 + \varphi^2}{E_c(c + c_{error} + \varphi)} (f'_c)^{\frac{2}{3}} + \alpha_1\beta_1 \frac{c + c_{error} + \varphi}{5(c + c_{error}) + 3\varphi} w_{cr} \right] \quad (3)$$

ここで、 c ：かぶり(mm)， D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)， C_{lim} ：鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m^3)， C_0 ：表面塩化物イオン濃度($=-6.0d+15.1=14.0(\text{kg}/\text{m}^3)$)， d ：H.W.L.から部材下面までの距離[=0.19(m)]， W_c ：腐食ひび割れ発生時の腐食量(mg/cm^2)， η ：腐食ひび割れ発生時の腐食量に関する補正係数[=3.68]， V_b ：腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)， ρ_s ：鉄筋の密度[=7.85(mg/mm^3)]， γ ：腐食生

成物の体積膨張率[=3.0]， w_{cr} ：腐食ひび割れ発生時のひび割れ幅[=0.1(mm)]， $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$ ：補正係数である。式(1)～(3)の確率変数： C_{lim} ， x_1 ， C_0 ， c_{error} ， x_2 ， x_3 ， V_b ， f'_c はMCMにより発生させた標本観測値である。

2.2 鉄筋の質量減少率の平均値の算出と経時変化

MCMにより生成した $t_{corr.}$ ， $t_{cra.}$ および標本観測値を用いて、腐食ひび割れが既に発生している場合(式(4))，鉄筋は腐食しているが腐食ひび割れは発生していない場合(式(5))および鉄筋が腐食していない場合(式(6))のケースごとに腐食量をそれぞれ算出した。

$$Q(V_b, V_a, t_{corr.}, t_{cra.}, t) = V_b(t_{cra.} - t_{corr.}) + V_a(t - t_{cra.}) \quad (4)$$

$$Q(V_b, t_{corr.}, t) = V_b(t - t_{corr.}) \quad (5)$$

$$Q = 0 \quad (6)$$

ここで、 V_a ：腐食ひび割れ発生後の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)である。式(4)の確率変数： V_a は、MCMにより発生させた標本観測値である。続いて、供用年数1年ごとに鉄筋の質量減少率の平均値： $\omega_{ave.}$ を算出した。

2.3 曲げ耐力に関する劣化曲線

2.2で求めた「鉄筋の質量減少率の平均値と供用年数との関係」と、既往の研究の成果を整理し得られた「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係」から、RCスラブの劣化曲線を導出した。

3. 塩害劣化進行過程における潜伏期および進展期の算出方法

2.1に示す方法により求めた10,000個の $t_{corr.}$ に対し、供用年数5年毎にカウントし、さらに総数10,000個で除すことにより、腐食が開始する確率を算出した。この平均値を鉄筋腐食開始時刻(供用年数26年)とした。したがって、潜伏期は、供用年数0～26年となる。同様に、腐食ひび割れ発生時刻を算出した結果、供用年数31年となった(進展期は供用年数26年～31年)。両者の結果を図-1および図-2にそれぞれ示す。

4. 感度分析

例えば、鉄筋位置での塩化物イオン濃度： X_1 の変動が曲げ耐力に与える影響を把握する場合は、以下の手順により計算を行った。すなわち、 X_1 の累積分布関数を算出し、確率40%および60%に相当する標本観測値 $x_{40\%}$ および $x_{60\%}$ を

表-1 RCスラブの部材設計諸元

スラブ厚さ(mm)		350
引張側主鉄筋	直径(mm)	13
	かぶり(mm)	63.5
コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)		32.6
コンクリートの弾性係数(kN/mm^2)		28
水セメント比(%)		47.5

キーワード 維持管理, 調査, RC部材, 塩害, 曲げ耐力, 劣化予測

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 TEL06-6879-7618

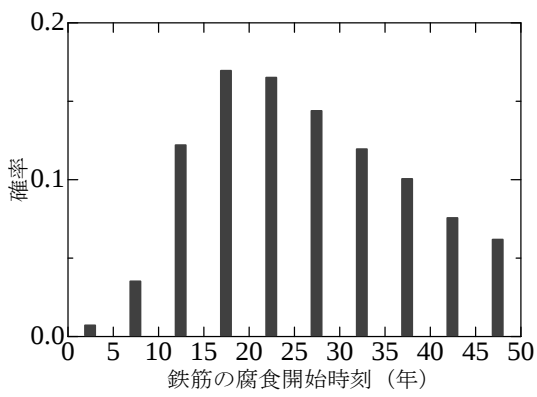


図-1 鉄筋の腐食開始確率

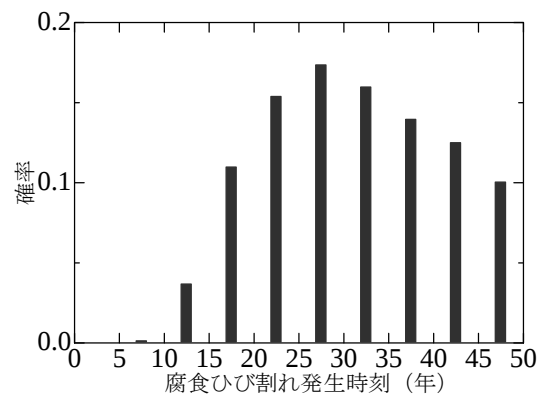


図-2 腐食ひび割れ発生確率

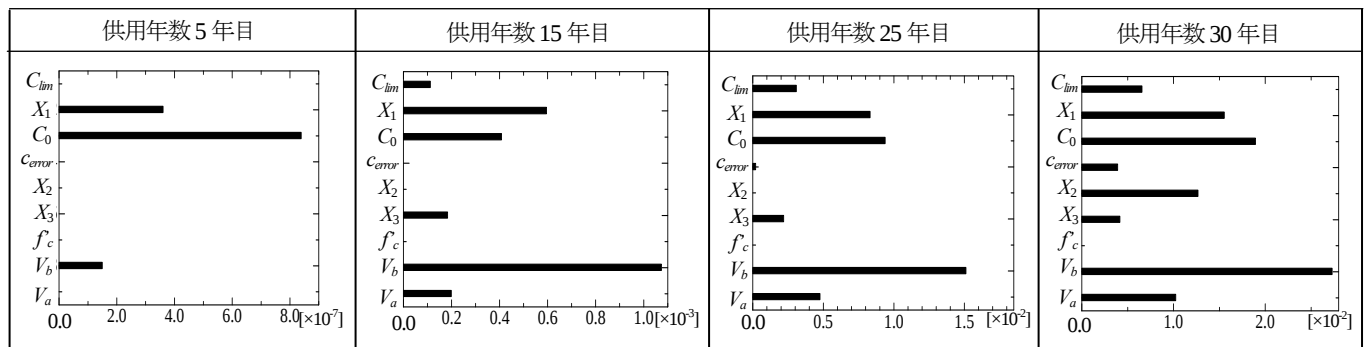


図-3 各供用年数における曲げ耐力比の基準値と最小値との差

それぞれ求める。次に、確率変数 X_1 の標本観測値である $x_{40\%}$ を確定値とし、その他の C_{lim} , C_0 , c_{error} , X_2 , X_3 , f_c , V_b および V_a を確率変数として取り扱い、設定した供用年数における曲げ耐力比を算出する。同様に、標本観測値 $x_{60\%}$ を確定値として上記の計算により曲げ耐力比を求める。以上の手順にしたがって、全ての確率変数における標本観測値 $x_{40\%}$ および $x_{60\%}$ をそれぞれ求め、それぞれに対応する曲げ耐力比を算出した。各確率変数で得られた 2 つの曲げ耐力比のうち、値が小さいものを当該確率変数における曲げ耐力比とし、2.3 で求めた曲げ耐力比（基準値）から差し引いた。これを「曲げ耐力比の基準値と曲げ耐力比の最小値との差」と定義した。得られた結果を図-3 に示す。ただし、最小値が基準値より大きい場合は 0 とした。

図-3 より、5 年目（潜伏期）では、 C_0 の変動が曲げ耐力比に与える影響が大きいことがわかる。15 および 25 年目では、 C_0 に加えて、 X_1 および V_b の影響も大きくなっていることが確認できる。供用年数 30 年目（進展期）では、15 および 25 年目と同様に、 V_b , C_0 , X_1 の順に曲げ耐力に与える影響が大きくなっている。

5. 維持管理における重要な調査項目の抽出方法の提案

まず、対象の RC 部材の設置環境条件および部材諸元をもとに、曲げ耐力に関する劣化曲線を導出する。これが感度分析における曲げ耐力比の基準値となる。次に、感度分

析を実施する供用年数を決定する。設定した供用年数において感度分析を実施し、曲げ耐力の基準値を下回る確率変数を抽出する。その確率変数に対応する項目について重点的な調査を行えば、曲げ耐力を適確に把握（予測）することが可能である。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 飛沫帯にある RC 部材を対象に、著者らが提案している曲げ耐力の予測手法を応用して、塩害劣化進行過程における潜伏期および進展期の期間を算出する方法論を提示した。
- (2) 算出した期間ごとに RC 部材の各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測結果に与える影響についての感度分析を行った結果、潜伏期の初期の段階では塩化物イオン濃度が、また、潜伏期の後期から進展期ではこれに加えて鉄筋の腐食速度の影響が大きいことがわかった。
- (3) 上記(1)および(2)より、曲げ耐力を適確に把握するためには、潜伏期および進展期ごとに、感度分析結果に対応した項目についての調査をそれぞれ行うことが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 内田慎哉, 鎌田敏郎ほか: 飛沫帯にある RC 部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.887-892, 2011