

塩害を受ける RC 部材の曲げ耐力に関する劣化曲線の更新手法に関する基礎研究

大阪大学大学院工学研究科 学生員○田中 伸幸 立命館大学理工学部 正会員 内田 慎哉
 大阪大学大学院工学研究科 学生員 松岡 弘大 大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸 清之
 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、塩害を受ける RC 部材を対象として、曲げ耐力を予測する手法¹⁾で導出した劣化曲線に対して、NDT-FEM による耐力推定手法²⁾により把握した曲げ耐力の結果を用いてベイズ理論により劣化曲線を更新し、耐力推定以降の劣化曲線のバラツキを低減する手法を構築することを目的とした。

2. 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} (年)の算出式をそれぞれ示す。

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

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

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

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： $C_{lim}, x_1, C_0, C_{error}, x_2, x_3, V_b, f'_c$ はモンテカルロ法 (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 年毎に鉄筋の質量減少率の平均値、信頼区間 95% の上限値および下限値もそれぞれ算出した。

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。導出した劣化曲線を図-1 に示す。図中の●，■，□は、鉄筋質量減少率の平均、信頼区間 95% の下限値および上限値にそれぞれ対応しており、以降、それぞれを平均シナリオ (更新前)，楽観シナリオ (更新前)，悲観シナリオ (更新前) とそれぞれ定義する。

3. 劣化曲線のベイズ更新方法

3.1 統計的劣化予測モデル

2.3 で導出した k 本の独立な劣化曲線を時間： t の関数として $f(t, k)$ と表現する。本研究では、NDT-FEM 手法により更新される劣化曲線が、2.3 で導出した劣化曲線の重み付

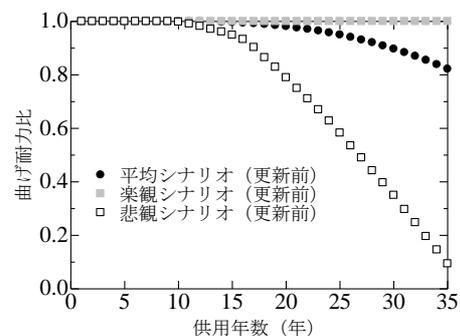


図-1 導出した劣化曲線

キーワード 塩害, RC 部材, 劣化曲線, 曲げ耐力, 非破壊試験

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

き荷重和で表わすことができると考える。このとき、供用年数 t (年)における曲げ耐力比: L^t は、

$$L^t = \sum_{k=1}^K \omega(k) f(t, k) + \varepsilon \tag{7}$$

として表現できる。ここに、 $\omega(k)$ は、 k 本目の劣化曲線に対して割り当てられた重みであり、

$$\sum_{k=1}^K \omega(k) = 1 \tag{8}$$

が成立する。なお、重みベクトルを $\omega = (\omega(1), \dots, \omega(K))$ と表わす。重みベクトルは制約条件(8)を満足するような確率変数であり、確率密度関数(事前確率密度関数)はディリクレ分布に従うと仮定する。つぎに ε は、測定誤差を表す確率変数であり、1次元正規分布: $N(0, \phi^{-1})$ に従うとし、 ϕ の確率密度関数(事前確率密度関数)はガンマ分布に従うと仮定する。これらの確率変数の値を特定化すれば、具体的な劣化曲線を得ることができる。

3.2 ベイズ更新

NDT-FEM 手法により把握した曲げ耐力の情報に応じて劣化予測モデルをベイズ更新する具体的な方法について以下に述べる。すなわち、供用開始時点から時間が経過し、供用年数: T に達したと考える。さらに供用年数 t ($t=0, \dots, T$) (年)において、NDT-FEM 手法により曲げ耐力比に関するデータ: $\bar{L}^{0,t} = (\bar{L}^0, \dots, \bar{L}^t)$ が獲得できたと考える。このとき、観測値により修正された劣化予測モデルの事後確率密度関数: $\pi(\omega, \phi | \bar{L}^t)$ はベイズの定理、

$$\pi(\omega, \phi | \bar{L}^{0,t}) \propto L(\bar{L}^{0,t} | \omega, \phi) \pi(\omega) \pi(\phi) \tag{9}$$

により算出することができる。ここで、 $L(\bar{L}^{0,t} | \omega, \phi)$ は NDT-FEM 手法により推定した曲げ耐力 $\bar{L}^{0,t}$ が観測される同時生起確率密度(尤度)であり、また、 $\pi(\omega)$ 、 $\pi(\phi)$ は確率変数である ω と ϕ の事前確率密度関数である。なお、事後確率密度関数: $\pi(\omega, \phi | L)$ を算出するためには確率分布 $L(\bar{L}^{0,t} | \omega, \phi) \pi(\omega) \pi(\phi)$ からのランダムサンプリングが必要となる。しかしながら、直接サンプリングすることは困難であるために、マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション法により事後確率密度関数: $\pi(\omega, \phi | \bar{L}^t)$ を算出する。

3.3 適用事例

ここでは、塩害環境下にある RC 部材(表-1 参照)を対

表-1 RC スラブの部材設計諸元

水セメント比(%)		47.5
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

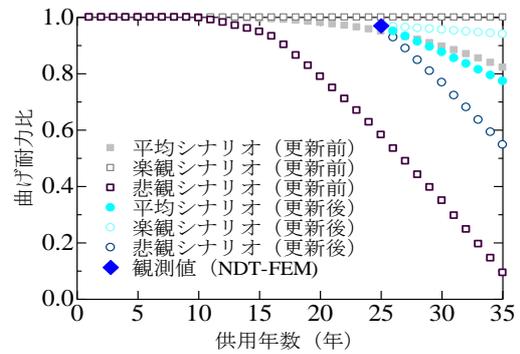


図-2 NDT-FEM による観測値と劣化モデルの更新

象に、劣化曲線のベイズ更新方法を適用した場合の結果について説明する。今回は一例として、劣化曲線の分布の平均値(平均シナリオ(更新前))よりも安全側の場合の適用結果、すなわち、供用開始後 25 年の時点で NDT-FEM 手法を実施することにより曲げ耐力比: 0.97(図-2 ◆) が得られた場合を考える。NDT-FEM 手法の実施時点(供用開始後 25 年)以降の更新した劣化曲線を図-2 に示す。例えば、供用開始後 35 年時点に着目したとき、観測値(曲げ耐力比) が得られることで楽観シナリオと悲観シナリオで表される 95%信頼区間が更新前の[1.00 0.09]から更新後の[0.94 0.55]へと縮小しており、曲げ耐力の予測精度が向上していることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、塩害を受ける RC 部材の劣化予測手法により導出した曲げ耐力に関する劣化曲線に対して、非破壊試験結果をインプットデータとする構造解析により推定した曲げ耐力を用いてベイズ更新することにより、曲げ耐力に関する劣化曲線を精緻化する手法を構築した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(B) 23760405)の援助を受けて行ったものである。ここに記して敬意を表する。

参考文献

- 例えば、木下真一、内田慎哉、鎌田敏郎：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
- 例えば、木下真一、内田慎哉、鎌田敏郎：鉄筋腐食によりひび割れが生じた RC はり部材の曲げ耐力の非破壊評価手法、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, 第 10 巻, pp.215-220, 2010
- 貝戸清之ら：空港舗装アセットマネジメントのためのハイブリッド型地盤沈下モデル, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.4, pp.463-482, 2008.12