

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 ○平野 正大
大阪大学大学院工学研究科 正会員 鎌田 敏郎

立命館大学理工学部 正会員 内田 慎哉

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⁾を活用して求めた劣化過程²⁾(潜伏期、進展期、加速期および劣化期)の推移(ここでは劣化曲線という)に対して、対象とする部材の点検結果を想定した調査結果を用いてベイズ理論により先に求めた劣化曲線を更新し、点検時点以降におけるバラツキを低減する手法を構築するとともに、手法の妥当性の評価も併せて行った。

2. 劣化曲線を算出する方法

2.1 鉄筋腐食開始、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻の算出

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

$$t_{corr.} = \frac{1}{4\alpha_2 D} \left\{ \frac{0.1(c + c_{error})}{\text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_{lim}}{\alpha_1 C_0}\right)} \right\}^2 \quad (1)$$

$$t_{cra.} = t_{corr.} + \frac{\alpha_3 \eta W_c}{V_b} \quad (2)$$

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

$$t_{de.} = t_{cra.} + 0.5t_{corr.} \quad (4)$$

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)～(4)の確率変数： C_{lim} 、 α_1 、 C_0 、 c_{error} 、 α_2 、 α_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 塩害劣化進行過程の各期間の算出

2.1で求めた $t_{corr.}$ (年)、 $t_{cra.}$ (年)および $t_{de.}$ (年)を用いて、各劣化過程の定義²⁾および既往の研究³⁾から、各劣化過程の期間を次に示すように算出した。

$$t < t_{corr.} < t_{cra.} < t_{de.} \quad \cdots \text{潜伏期} \quad (5)$$

$$t_{corr.} < t < t_{cra.} < t_{de.} \quad \cdots \text{進展期} \quad (6)$$

$$t_{corr.} < t_{cra.} < t < t_{de.} \quad \cdots \text{加速期} \quad (7)$$

$$t_{corr.} < t_{cra.} < t_{de.} < t \quad \cdots \text{劣化期} \quad (8)$$

$t_{corr.}$ (年)、 $t_{cra.}$ (年)および $t_{de.}$ (年)を10000回のシミュレーションを行って求め、供用年数0から50年までの劣化曲線を算出した。算出した結果を図-1に示す。

3. 点検結果を反映した劣化進行過程の更新手法

潜伏期に表面塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見かけの拡散係数を各種非破壊試験により点検した結果であると仮定した確率分布に従って、それぞれ20個のデータを生成した。なお、本研究では、表面塩化物イオン濃度はガーゼ法や土研法などにより測定し、塩化物イオンの見かけの拡散係数は4プローブ法⁴⁾により計測された電気抵抗率から推定されることを想定している。

3.1 点検結果の反映方法

本研究では、点検結果を反映した表面塩化物イオン

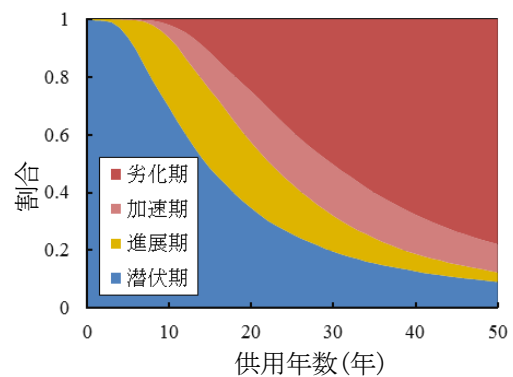


図-1 劣化曲線

濃度および塩化物イオンの見かけの拡散係数は、ガンマ分布に従うと仮定した。表面塩化物イオン濃度の確率分布に点検結果を反映させる手法について述べる。すなわち、表面塩化物イオン濃度に関するデータ： $\bar{C}_0^{1,n} = (\bar{C}_0^1, \dots, \bar{C}_0^n)$ 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： $\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^{1,n})$ はベイズの定理、

$$\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^{1,n}) \propto L(\bar{C}_0^{1,n} | \alpha, \beta) \pi(\alpha) \pi(\beta) \quad (9)$$

により算出することができる。ここで、 $L(\bar{C}_0^{1,n} | \alpha, \beta)$ は点検結果 $\bar{C}_0^{1,n}$ が観測される同時生起確率密度（尤度）であり、また、 $\pi(\alpha)$ 、 $\pi(\beta)$ は確率変数である α と β の事前確率密度関数である。なお、事後確率密度関数： $\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^n)$ を算出するためには確率分布 $L(\bar{C}_0^{1,n} | \alpha, \beta) \pi(\alpha) \pi(\beta)$ 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： $\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^n)$ を算出する。塩化物イオンの見かけの拡散係数も同様に点検結果を反映させる。

3.2 生成した2ケースの点検結果

2 ケースの点検結果は、供用年数 15 年目の潜伏期（図-1 参照）とした。ケース 1 は今後の劣化進行が比較的遅く、ケース 2 は劣化進行が比較的早いと考えられるものを想定した。具体的には、ケース 1 における表面塩化物イオン濃度は平均値 $10.0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、標準偏差 $5.05 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ の正規分布、塩化物イオンの見かけの拡散係数は平均値 0.20 、標準偏差 0.24 の対数正規分布とした。ケース 2 では表面塩化物イオン濃度は平均値 $20.0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、標準偏差 $5.05 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ の正規分布、塩化物イオンの見かけの拡散係数は平均値 0.60 、標準偏差 0.24 の対数正規分布とした。それぞれの分布に従って 20 個のデータを生成した。

3.3 劣化曲線の妥当性の評価

点検結果を反映した確率分布を用いて、2 章で示した方法により劣化曲線を算出した（図-2 および図-3 参照）。ケース 1 を反映した場合とケース 2 を反映した場合を比較すると、ケース 1 の方が潜伏期は大きく、劣化期が小さくなっていることがわかる。これらは劣化の進行が遅い場合を想定したケース 1 と、劣化の進行が早い場合を想定したケース 2 をそれぞれ適切に反映できており、本手法の妥当性が検証できたものと考えられる。

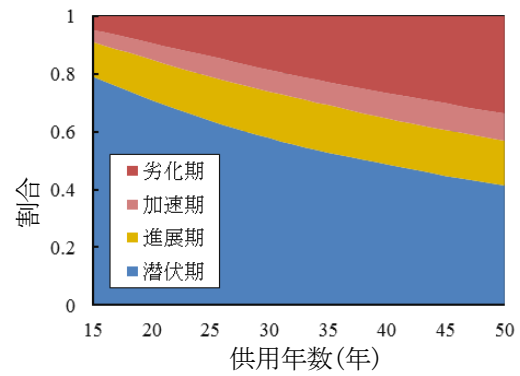


図-2 ケース 1 を反映した劣化曲線

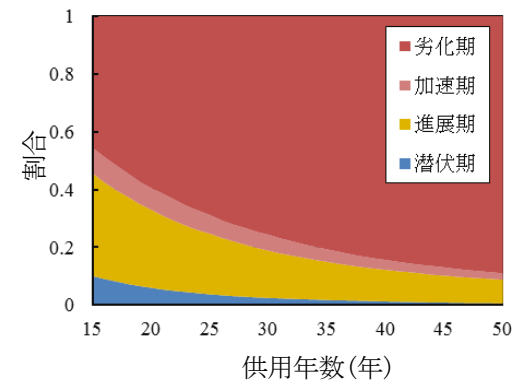


図-3 ケース 2 を反映した劣化曲線

4. まとめ

本研究では、著者らの過去の研究成果に基づき劣化曲線を求めるとともに、点検結果を反映させることにより、劣化曲線を更新し、将来時点での不確実性を低減する方法を構築することができた。今後は、実際の点検結果のデータを用いて本手法を適用し、実構造物に対する本手法の有効性を検証することが課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2007
- 3) 高橋順，江本久雄，宮本文穂：コンクリートコア試験に基づく橋梁健全度評価システムの検証法に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1399-1404，2012
- 4) 榎原彩野，齋藤佑貴，皆川浩，久田真：電気抵抗率による物質透過性評価に及ぼす塩化物イオン濃度の影響，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010.9