

不確定性を考慮したコンクリート構造物の塩害劣化予測

山口大学 正会員 ○中村秀明
山口大学 中尾信宏
山口大学 フェロー会員 宮本文穂

1. はじめに

我が国は四方を海に囲まれており、また、多湿であることから、塩害劣化が起こりやすい環境である。適切な維持管理を行うために重要となるのが、劣化予測である。そのため、構造物の劣化予測に関しては各所で様々な研究が行われているが、既往の研究には確定論的アプローチを行っているものが多く、ばらつきを考慮しているものは未だ少ない。そこで、本研究では、海洋環境下にある塩害にさらされている鉄筋コンクリート構造物を対象に、劣化因子の不確定性が塩害劣化に及ぼす影響を考慮した確率論的モデルでの塩害劣化予測のシミュレートを行った。

2. 塩害劣化予測モデル

コンクリート構造物における塩害劣化は、4つの期間に分けられる。本研究では、塩害劣化を潜伏期、進展期、加速期・劣化期の3つの過程に分けて考える。劣化予測モデルでは、各期間の長さを求めることを基本とする。

2.1 潜伏期

潜伏期では、Fick の一次元拡散式に初期塩化物イオン濃度を足し合わせる。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$ ：塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_i ：初期混入塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_0 ：表面における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm²/年)、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ ：誤差関数である。

2.2 進展期

進展期の算定には、水セメント比、かぶり、鉄筋位置での塩化物イオン濃度をパラメータとする梶田ら¹⁾の式を用いた。なお、本研究では水セメント比は、55%を仮定した。

$$y = \frac{78}{\sqrt{10 \cdot x}} (0.578 \cdot C + 0.023 \cdot W/C - 1.52) \quad (2)$$

ここに、 y ：進展期の鉄筋の腐食速度(mg/cm²/年)、 C ：かぶり位置での塩化物イオン濃度(kg/m³)、 W/C ：水セメント比

(%) である。

2.3 加速期・劣化期

加速期・劣化期では、鉄筋の腐食速度が加速されることから、鉄筋の腐食速度は、松島ら²⁾の研究結果より、進展期の3.7倍と考える。

2.4 破壊確率の算定

本研究では、部材中の鉄筋の耐荷性能の限界として、鉄筋の断面減少率が20%を越えた点を仮定している。したがって、年ごとの破壊確率は、以下の式から近似的に計算できる。

$$\text{破壊確率(\%)} = \frac{\text{鉄筋の断面減少率が20\%を越えたものの個数}}{\text{モンテカルロシミュレーションの全体の個数}} \times 100 \quad (3)$$

2.5 モンテカルロシミュレーション

モンテカルロシミュレーションとは、乱数を用いたシミュレーションを十分多く行うことにより近似解を求める計算手法である。本研究では、疑似乱数の生成に非常に長い周期を持ち、高次元空間に均等分布する Mersenne Twister³⁾を使用した。本研究では、表-1 および表-2 に示す確率分布を持った2,000個の乱数を発生させ計算を行った。

表-1 潜伏期で扱うパラメータ

パラメータ	分布	平均値	標準偏差
初期混入塩化物イオン濃度(kg/m ³) C_i	対数正規分布	0.00	1.00
コンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m ³) C_0	対数正規分布	13.00	2.00
塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm ² /year) D	対数正規分布	0.55	0.50
鉄筋のかぶり(cm) x	正規分布	8.00	1.00
腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m ³) C_{lim}	対数正規分布	3.07	1.26

表-2 進展期で扱うパラメータ

パラメータ	分布	平均値	標準偏差
かぶり位置での塩化物イオン濃度(kg/m ³)	潜伏期と同様で計算		
コンクリートの水セメント比(%)	正規分布	55.00	2.00
鉄筋のかぶり(cm)	正規分布	8.00	1.00
鉄筋径(cm)	確定値	1.27	

3. シミュレーションの実施

3.1 潜伏期のシミュレーション

潜伏期のシミュレーションでは2.5節の不確定量を用い、式(1)を使って0.01年刻みで2,000回の計算を行った。図-1に潜伏期のイメージを示し、図-2に潜伏期の終端時間 t_f (年)の度数分布を示す。

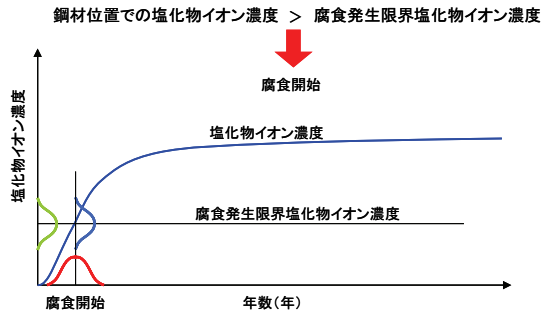


図-1 潜伏期のイメージ

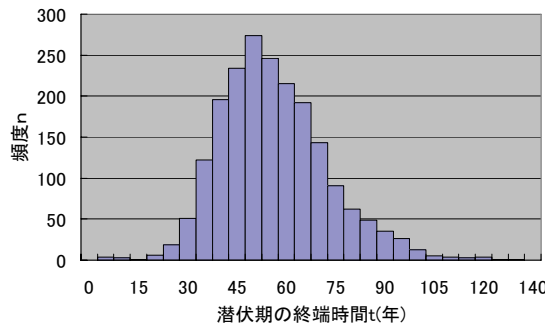


図-2 潜伏期の終端時間の度数分布

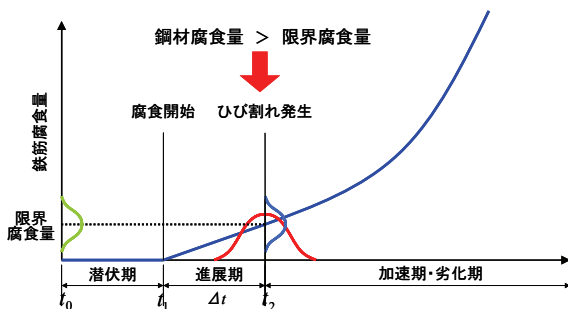


図-3 進展期のイメージ

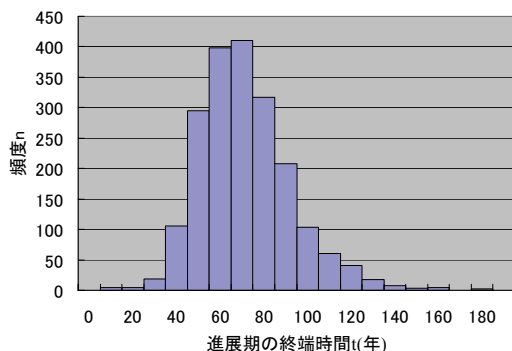


図-4 進展期の終端時間の度数分布

3.2 進展期のシミュレーション

進展期も同様に、2.5節の不確定量を用いて、0.01年刻みで2,000回の計算を行った。図-3に進展期のイメージを示し、図-2に進展期の終端時間 t_2 (年)の度数分布を示す。

3.3 加速期・劣化期のシミュレーション

加速期・劣化期も同様にシミュレーションを行った。図-5に加速期・劣化期のイメージを示す。また、表-3に各劣化期間の平均値と標準偏差を示す。

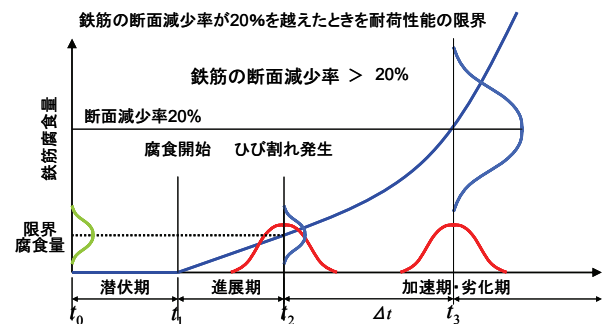


図-5 加速期・劣化期のイメージ

表-3 各劣化期間の平均値と標準偏差(年)

劣化期間	平均値	標準偏差	期間合計
潜伏期の終端時間	54.8	21.8	平均 92.5
進展期の期間	12.8	4.2	
進展期の終端時間	66.8	22.6	標準偏差 34.5
加速期・劣化期の期間	24.9	8.5	
耐荷性能の終端時間	91.7	30.8	

4. まとめ

本研究では、海洋環境下において、塩害にさらされるコンクリート構造物を対象にし、確率論に基づいて塩害劣化予測のシミュレーションを行った。モデルの構築や考慮している因子や統計量には仮定が多いものの、塩害劣化予測を確率論的に評価することが可能となった。

今後の課題として、モデルの精度向上と各種統計量等のデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 笹渕優樹, 梶田佳寛, 中村成春: 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曝露試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.317-322, 1998.
- 2) 松崎康晴, 松島学, 横田優, 中川裕之: コンクリート構造物の塩害劣化予測モデル, 土木学会第62回年次学術講演会概要集 5-075, pp.149-150, 2007.9
- 3) M. Matsumoto and T. Nishimura, Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations*, 1998