

東電設計研究開発部○正会員 福田 靖大
 東京電力技術研究所 正会員 堤 知明
 東電設計研究開発部 正会員 松島 学

1. はじめに

近年コンクリート構造物の劣化損傷事例が数多く報告され、それに呼応するように耐久性設計の適応が提案されてきたが、一般化した方法が見あたらないのが現状である。耐久性設計に関連して寿命予測手法の確立に関する研究が試みられ、かぶり厚さと劣化に至る経過時間との関係が求められている。本研究は、コンクリート構造物の表面塩分量 C_0 が得られている場合に、 t 年後の鉄筋近傍の塩分量を求め、その値が限界塩分量に達した時を限界状態とし、期待費用最小の考え方に基づいて最適設計かぶり厚さを求めるものとする。

2. 塩害による劣化モデル

塩害による鉄筋コンクリート部材の劣化は、塩化物の浸透による鉄筋の不動態皮膜の破壊が発端と考えられる。このような現象はFickの法則に従うことが認められており、本研究でも式(1)に示す一次元の拡散方程式を採用した。

$$C_c(x_t, t) = C_0 \left(1.0 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_t}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

ここで、 $C_c(x_t, t)$ はコンクリート表面からの深さ x_t で、浸透開始からの時間 t における塩分量である。 C_0 は塩素イオンのコンクリート表面濃度であり、式(1)はこの塩分量が既知であるとして、竣工 t 年後の鉄筋近傍の塩分量を求めるものである。この塩分量が鉄筋の酸化皮膜を破壊する塩分量を越えた時を限界状態とし、この時の塩分量を限界塩分量とすると、式(2)のような性能関数が設定される。

$$f_{D_c}(t) = C_{i \lim t} - C_i - C_c(x_t, t) < 0.0 \quad (2)$$

ここで、 $C_{i \lim t}$ は限界塩分量、 C_i はコンクリート内に含まれる初期塩分量である。性能関数 $f_{D_c}(t)$ が負となると、つまり、鉄筋近傍の総塩分量が限界塩分量を越えたとき劣化が発生すると仮定できる。

本研究では、これらの各因子の中で、①見かけの拡散係数 D_c 、②鉄筋のかぶり厚さ x_t 、③初期塩分量 C_i および④限界塩分量 $C_{i \lim t}$ を確率変量として取り扱うものとした。

3. 劣化因子の設定

本研究で採用した劣化因子の確率モデルを表1に整理して示す。

大即、原茂¹⁾らは、全国96箇所の栈橋施設を対象にコンクリートの見かけの拡散係数を調査している。このデータを利用して、確率変量を設定した。従って、実構造物を対象としたために、ここで仮定した見かけの拡散係数は、本来の一次元の拡散則の意味とこのモデルの3次元的な挙動を簡単にすることによるばらつきの両方が含まれたことになる。

総合プロ土木構造物の調査²⁾では、施工時の最大かぶり不足量を調査している。このデータを利用して、最大かぶり不足量のばらつきの確率モデルを、設定した。従って、最大かぶり不足量のばらつき $(X_{t,d})$ と設計かぶり厚 $(X_{t,d})$ の関係は、式(3)のように設定される。

$$X_t = X_{t,d} - X_{t,s} \quad (3)$$

藤井ら²⁾は、北陸地方の日本海側の11橋梁の塩害調査を行っている。その結果を整理することから表1に示すような確率モデルを設定した。

限界塩分量を求めることを目的に、文献(4)では、普通ポルトランドセメントを用いて、一か月間の暴露試験を行ったデータを基に、鉄筋の腐食率(=腐食面積/鉄筋の全面積)と鉄筋近傍の全塩分量の関係を求めている。このデータと鉄筋近傍の塩分量が、酸化皮膜層を破壊する時を限界状態とするという仮定から、限界塩

分量に達していると思われる腐食率を0.2~0.5%の範囲にある場合と仮定し、この仮定をもとに限界塩分量の変量を求め、この塩分量を限界値として採用した。

表1 各パラメータの確率変量

パラメータ	平均値	標準偏差	単位	分布形状
拡散係数	4.65×10^{-8}	4.47×10^{-8}	cm ² /sec	対数正規分布
鉄筋の最大かぶり不足量	0.82	0.83	cm	対数正規分布
初期塩分量	0.06	0.07	kg/m ³	対数正規分布
限界塩分量	3.68	1.18	kg/m ³	対数正規分布

4. 最適設計かぶり厚さ

劣化の発生確率を3.で求めた各確率変量を用いてモンテカルロ法により計算した。乱数の個数は10000とした。表面塩分量を $C_0=8.0\text{kg/m}^3$ として、鉄筋のかぶり厚さが5.0, 7.0, 10.0および15.0cmの場合の経過年数と劣化の発生確率の関係を図1に示す。全体に、経過年数が大きくなるにつれて、劣化の発生確率が大きくなることが見られ、かぶり厚さが小さいと、その傾向は顕著である。次に期待費用最小の考えに基づいて最適かぶり厚さを求める。塩害による最適設計かぶり厚さは、ある設計かぶり厚さ $X_{t,d}$ を選択した場合に、塩害が発生しないと判断した時の期待損失費用 $C_{t,1}(X_{t,d})$ とその逆の期待損失費用 $C_{t,2}(X_{t,d})$ が一致した時を最適設計かぶり厚さ $X_{t,opt}$ と決定した。

$$X_{t,opt} = X_{t,d}, \text{ when } C_{t,1}(X_{t,d}) = C_{t,2}(X_{t,d}) \tag{4}$$

$$C_{t,1}(X_{t,d}) = P_t(X_{t,d}) \times L_1 \quad C_{t,2}(X_{t,d}) = (1 - P_t(X_{t,d})) \times L_2$$

ここで、 $P_t(X_{t,d})$ は、設計かぶり厚さ $X_{t,d}$ の時の劣化の発生確率である。 L_1 は劣化が発生しないと判断した時に発生した損失費用で、 L_2 はその逆である。つまり、 L_1 の損失となる場合は判断が危険側に誤った場合であり、 L_2 の損失は安全側となる。本手法では、 $L_2=2.0 \times L_1$ として、2倍の重みを考えた。この重みで、式(4)を解くと $P_t(X_{t,d})=33.3\%$ となる。図2に設計かぶり厚さと劣化の発生確率の関係を $C_0=8.0, 12.0\text{kg/m}^3$ について示す。図にみられるように、設計かぶり厚さが大きくなるにつれて、劣化の発生確率は指数的に小さくなっていく。この結果から、式(4)を用いて最適設計かぶり厚さを求めると、表面塩分量 $C_0=8.0\text{kg/m}^3$ の場合、最適設計かぶり厚さ $X_{t,opt}=9.0\text{cm}$ が、表面塩分量 $C_0=12.0\text{kg/m}^3$ の場合、最適かぶり厚さ $X_{t,opt}=12.0\text{cm}$ が選択される。

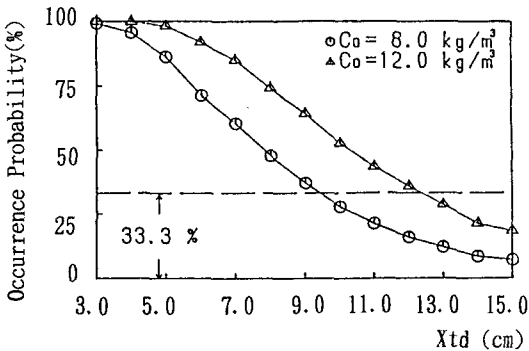


図1 経過時間と劣化発生確率の関係

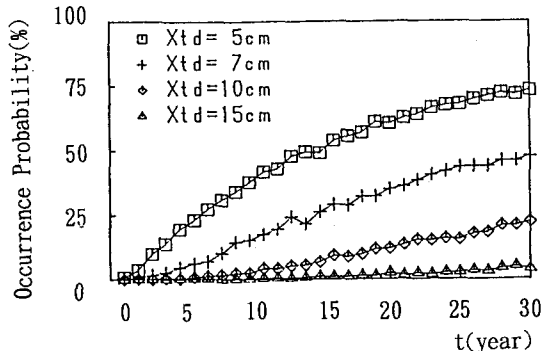


図2 かぶり厚さと劣化発生確率の関係

(参考文献)

- 1) 大即信昭 原茂雅光 浜田秀則: 橋樑コンクリート上部工実態詳細調査報告, 港湾技術研究所報告, pp. 3~22
- 2) 建設省・国土開発技術センター, 建設省総合技術開発プロジェクト, コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書, 1988. 11
- 3) 藤井教: コンクリート構造物への塩素イオンの浸透について, 早稲田大学理工学部土木工学科修士論文, 1986. 2
- 4) 堤知明 本橋賢一, ミスラ・スディール, 山本明雄: 若材令で海水に接するコンクリート中の鉄筋腐食に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告13-1, pp. 651~656, 1991.