

## 論文

## [1142] 信頼性理論に基づいた塩害に対する最適かぶり厚さ

正会員○松島 学 (東電設計研究開発部)

正会員 堤 知明 (東京電力技術研究所)

正会員 関 博 (早稲田大学土木工学科)

正会員 松井邦人 (東京電機大学建設工学科)

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の劣化損傷例が数多く報告されてきた。特に、除塩不足の海砂使用あるいは、海洋環境での海塩に起因する鋼材腐食による塩害による損傷の報告例は多く、補強例も増加の一途をたどっている。このように、孔食による鋼材伸び能力の低下あるいは鋼材断面の減少による耐力の低下等が心配される。

コンクリート構造物の有する種々の性能は長期的には低下するものであり、その低下の速度は、設計、施工、維持管理などの各要因の影響を受ける。これらの対応策として、耐久性設計の適用が提案されているが、手法的には、まだ一般化した方法が見られないのが現状である。

Bažant [1], [2] は、コンクリート中の鋼材の腐食現象に物理モデルを適用し、構造物の耐用年数を計算する方法を提案している。Browneら [3], [4] は、かぶりコンクリート中の塩分浸透に基づき、非破壊試験のデータから構造物の健全度の評価方法と耐用年数の推定方法を提案している。しかし、実構造物への適用に対しては問題も多く、精度のよい予測を行うには至っていない。「鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する考え方」[5]でも鉄筋の腐食開始時間を限界状態とし、物理的モデルによる耐久性の評価式を提案しているが、その評価式の精度は大きくばらついている。この理由として、計算条件として与えたデータの不確実性に含まれる誤差、塩分浸透作用自身が持つばらつきなどの影響が考えられる。

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、最適なかぶり厚さを求めたものである。一般に、劣化に関する各パラメータは、おおきなばらつきを有することが多く、確定量として取り扱うには無理がある。本研究では、劣化に関する各パラメータが確率変量であるとして取り扱い、コンクリート構造物の劣化の推定を行い、期待費用最小の考え方に基づいて最適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。コンクリート表面から浸透しコンクリート中に浸透蓄積する塩化物は、固体空隙溶液中のイオンの拡散、乾湿による移動、細孔中の毛管現象、塩素イオンの一部のセメント水和物との反応による固定化、コンクリートの炭酸化による塩素イオンの移動など総合した要因により生ずる。[6], [7] 現在、この種の現象すべて理論的、解析的に表現する段階にはなっておらず、本研究では、マクロ的に従来から適用されてきたFick [8], [9] の拡散方程式を仮定することとした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (1)$$

この一次元拡散方程式の解は、式(2)で求められる。

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

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(2)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すると、式(3)のような性能関数が設定される。

$$f_{Dc}(t) = C_{limit} - C_1 - C_c(X_t, t) < 0.0 \quad (3)$$

ここで、 $C_{limit}$ は限界塩分量である。 $C_1$ 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 $f_{Dc}(t)$ が負となるときが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 $C_1$ および④限界塩分量 $C_{limit}$ を確率変量として取り扱うものとした。

### 3. 各パラメータの仮定

#### (1) 拡散則のモデル

実際の拡散はFickの拡散則のように一次元的に表されるものではなく、三次元的な複雑な挙動をする。本研究では、一次元の拡散則を適用しており、どの程度まで現実の理論と一致しているかを見るために、図1に栈橋床版中の全塩分量の実測値と計算値を比較した既往の研究を示す[10]。実測値と計算値は、その傾向を満たしており、塩素イオンの浸透は拡散則で説明されるようであるが、その値にはばらつきが含まれる。このように、ひびわれのない場合はコンクリート表面から塩素イオンが拡散によってコンクリート中に浸透してゆくが、実構造物ではひびわれを含むことから直接外気に鉄筋が接する場合もあり、上記の見かけの拡散係数はさらにばらつきが大きくなる。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、このモデルの三次元的な挙動を簡単にすることによる誤差をも含まれたばらつきとなっている。

大即、原茂ら[11]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。その結果、図2に示すように平均で $4.65 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、標準偏差 $4.47 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の対数正規分布で表される。ただし、これらの環境条件は栈橋の設置位置を考えると、飛沫部である。

#### (2) 鉄筋のかぶり

耐久性を確保する基本は、密実で均一なコンクリートを用いてかぶりを大きく取ることで、これによりマイクロセル、あるいはより腐食速度の大きなマクロセルについても良好な防食効果がある。

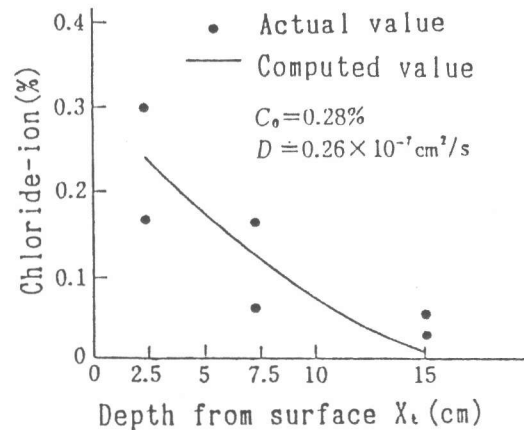


図1 全塩素イオン含有量の実測値と計算値

構造物の鉄筋のかぶりの大きさは、施工時の型枠・鉄筋の加工組立の誤差、鉄筋の寸法誤差や曲がり、コンクリートの打ち込み時の型枠・鉄筋の移動などによってばらつきが生じる。

総合プロ土木構造物の調査 [12] によると、スペーサ使用量とかぶり不足量には明瞭な関係にあり、スペーサ使用量が $1\text{m}^3$ 当り2個程度使用すると、施工精度が向上する傾向にある。本研究では、スペーサ使用量については無視をすることとし、図3のように整理した。図にみられるように、床版の方が、柱よりもばらつきが大きい傾向にあるが、ここではどちらも同じとして取り扱っている。従って、式(4)に示すようにかぶり厚さ $X_t$ は設計かぶり厚さ $X_{t,d}$ に対して最大かぶり厚さの不足量 $X_{t,s}$ のばらつきを考えるものとして表される。

$$X_t = X_{t,d} - X_{t,s} \quad (4)$$

図3より、最大かぶり厚さの不足量 $X_{t,s}$ は、平均値 $0.82\text{cm}$ 、標準偏差 $0.83\text{cm}$ の対数正規分布としてモデル化できうる。

### (3)初期塩分量

藤井ら [13] 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。その結果から初期塩分量は、全塩分量表示側の11橋梁の塩害調査を行っている。その結果から初期塩分量は、全塩分量表示で、平均値 $0.06\text{kg/m}^3$ 、標準偏差 $0.07\text{kg/m}^3$ の対数正規分布にモデル化することができる。その分布モデルを図4に示す。

### (4)限界塩分量

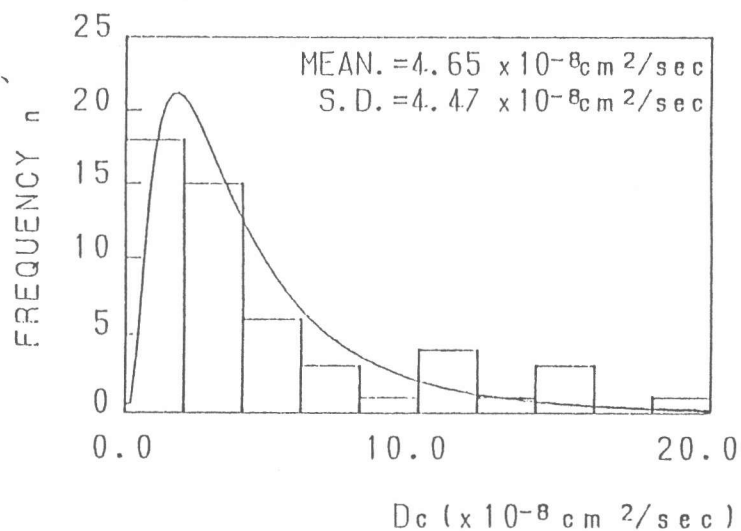


図2 見かけの拡散係数 $D_c$ のモデル

▨: slab □: column

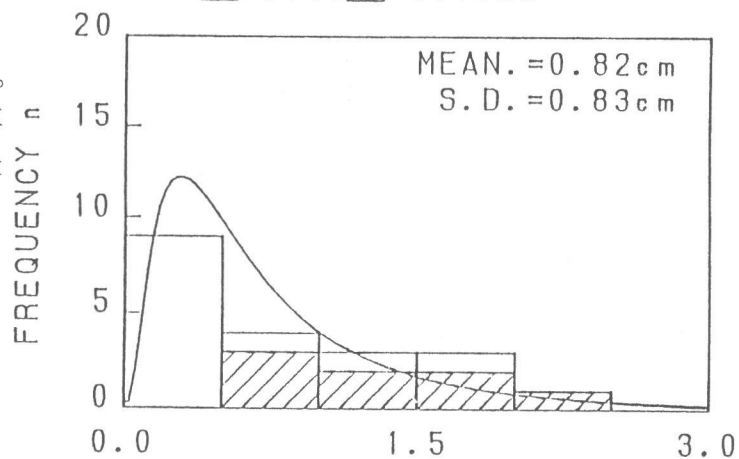


図3 かぶり最大不足量の分布  $X_t$  (cm)

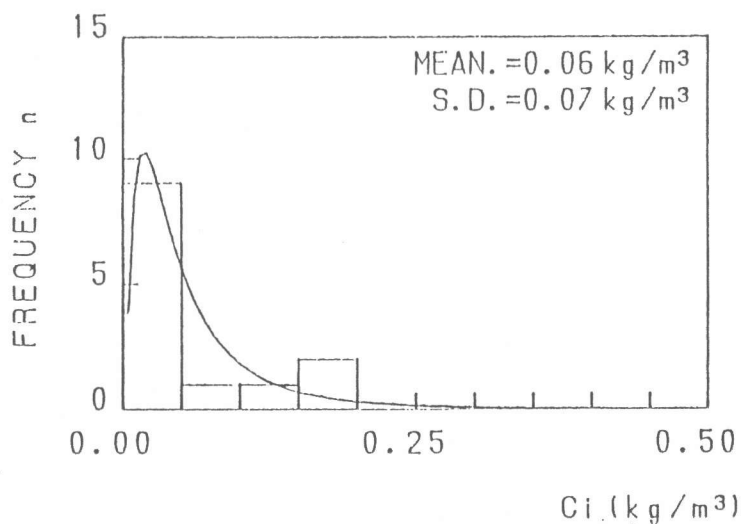


図4 初期塩分量の分布

塩害を受けるコンクリート構造物の寿命としては種々のレベルのものが想定可能である。比較的安全側ではあるものの、合理的な寿命予測方法は、腐食による軸方向ひびわれの発生まで、すなわち潜伏期と進展期との和をもって寿命とすることであろう。しかし、酸素の拡散によって支配される進展期が塩素イオンの拡散によって支配される潜伏期に比べてはるかに短いものであるならば、潜伏期を寿命として用いる方が簡便であり実用的である。文献 [14] でも

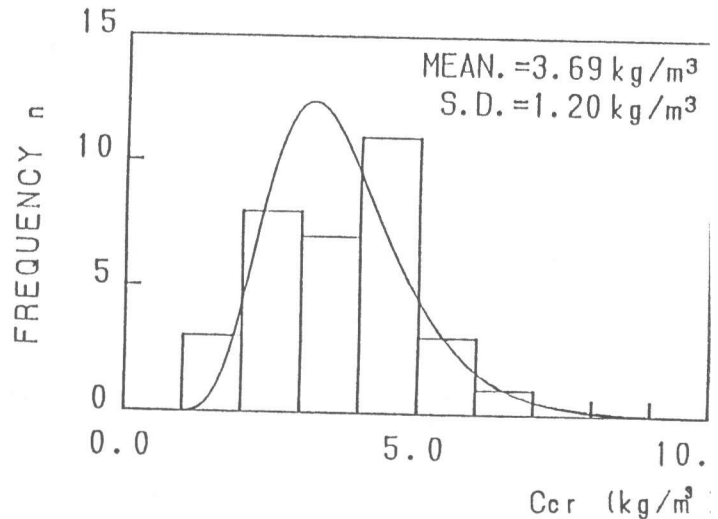


図5 限界塩分量の分布

鉄筋近傍の塩分量が、酸化皮膜層を破壊する時をもって限界状態としている。本研究では、このことを考えて限界状態の設定を「潜伏期間」と安全側に仮定した。

筆者の一人は、限界塩分量を求めることを目的として、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 [15] を行っている。本実験のパラメータとして、水セメント比 $W/C=40, 55, 70\%$ 、試験体を塩水に浸漬した場合とその繰り返しを行った場合を採用している。その結果から鉄筋の腐食率 (=腐食面積/鉄筋の全面積) と鉄筋近傍の全塩分量の関係を探っている。本研究では、これらの試験データで、腐食の限界塩分量を $0.2\sim 0.5\%$ の腐食率の範囲にある場合と仮定した。その結果、図5に示すように限界塩分量は、平均値 $3.68\text{kg/m}^3$ 、標準偏差 $1.18\text{kg/m}^3$ の対数正規分布としてモデル化できる。本研究では、この塩分量を限界値として採用した。

#### 4. 最適かぶり厚さ $X_{t, opt}$ の評価

各パラメータが確率変数として取り扱うことができるならば、性能関数を前述した式(3)で表せることから、性能関数と劣化の発生確率の関係は図6のように表せる。

一般に、特性値として分布の95%の値、逆に5%の危険度を認めることが工学的に許されている。しかし、構造物の破壊に関する許容危険確率に

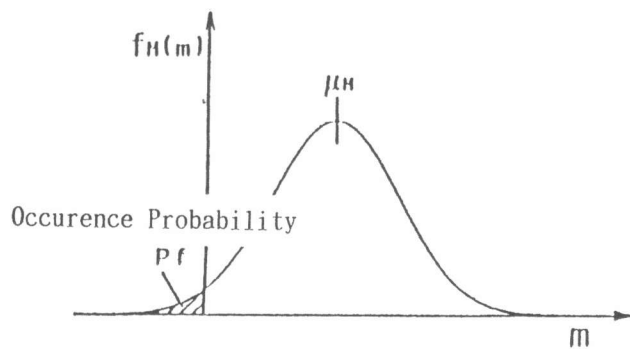


図6 性能関数と劣化の発生確率の関係

比較して、劣化のようにその状態になったとしても早急に問題とならない場合は、もう少し大きな危険確率が許されるはずである。本研究でもこの考え方に従って考えるものとする。計算はモンテカルロ法を利用して、乱数の個数を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 $15.0\text{cm}$ の場合の経過年数と劣化の発生確率の関係を比較して図7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。

ここまでの解析は、経過年数による劣化の発生確率を統計学的手法 [16] を用いて定量的に評

価したものである。塩害による最適設計かぶり厚さは、ある設計かぶり厚さ $X_{td}$ を選択した場合に、発生しないと判断した時の期待損失費用 $C_{f1}(X_{td})$ とその逆の期待損失費用 $C_{f2}(X_{td})$ が一致した時を最適設計かぶり厚さ $X_{t,opt}$ と決定した。

$$\begin{aligned}
 X_{t,opt} &= X_{td}, \text{ when } C_{f1}(X_{td}) = C_{f2}(X_{td}) \\
 C_{f1}(X_{td}) &= P_f(X_{td}) \times L_1 \\
 C_{f2}(X_{td}) &= (1 - P_f(X_{td})) \times L_2
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

ここで、 $P_f(X_{td})$ は、設計かぶり厚さ $X_{td}$ の時の劣化の発生確率である。 $L_1$ は発生しないと判断した時に発生した時の損失費用で、 $L_2$ 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。どのように推定しても誤るならば、安全側に誤った方が期待される損失は小さい。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(7)を解くと $P_f(X_{td}) = 33.3\%$ となる。図8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る。この結果から、式(7)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 $X_{t,opt} = 9.0 \text{ cm}$ が選択され、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。

### 5. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の表面塩分量が既知である場合に、限界塩分量に達する発生確率を求め、劣化の予測から、期待費用最小の考えを用いて最適設計かぶり厚さを求めたものである。以下に得られた結果を要約する。

(1) 塩害による劣化モデルを確率論的な立場から、Fickの拡散方程式の性能関数を定義した。この中で、①みかけの拡散係数 $D_e$ 、②鉄筋のかぶり厚さ $X_t$ 、③初期塩分量 $C_i$ 、④限界塩分量 $C_{limit}$ を確率変数として取り扱うものとした。

(2) 塩害による劣化モデルと期待

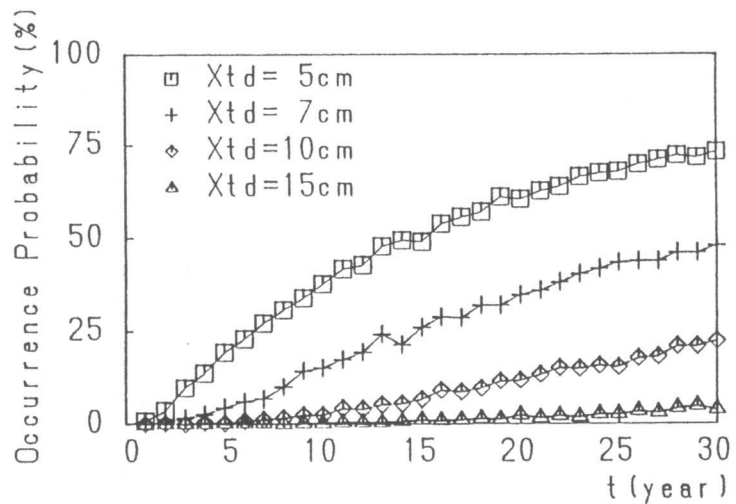


図7 経過時間と劣化の確率の関係

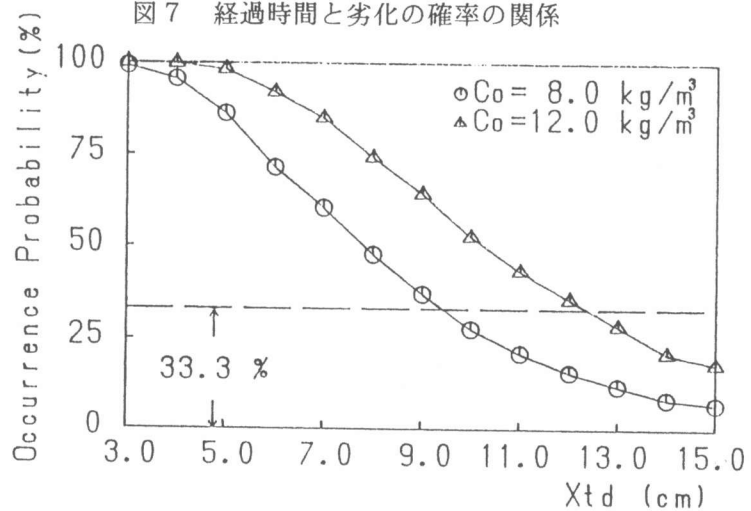


図8 最適かぶり厚さの選定

費用最小の考えから最適設計かぶり厚さを求める手法を提案した。その結果、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 $X_{t_{dopt}}=9.0\text{cm}$ が選択され、表面塩分量 $C_0=12.0\text{kg/m}^3$ の場合、最適設計かぶり厚さ $X_{t_{dopt}}=12.0\text{cm}$ が選択される。

謝辞:本研究を遂行するにあたり、奥村敏恵 東京大学名誉教授から常に適切な助言をいただきました。また、元東京電機大学卒論生(現竹中工務店)の速水一生氏には、計算に協力をいただきました。ここに深く感謝致します。

(参考文献)

- 1) Bažant, Z. P.: Physical model for steel corrosion in concrete sea structure-Theory. J. of the Str. Div. Vol. 105. No. ST6, pp. 1137~1153, June 1979.
- 2) Bažant, Z. P.: Physical model for steel corrosion in concrete sea structure-Application. J. of the Str. Div. Vol. 105. No. ST6, pp. 1155~1166, June 1979.
- 3) Browne R. D.: Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environments, Durability of Building Materials, pp. 113~125, 1(1982), Elsevier Scientific Publishing Company.
- 4) Browne R. D., Geoghegan M. P., Baker A. F.: Analysis of structural condition from durability results, Corrosion of Reinforcement In Concrete Construction, pp. 193~222, Ellis Horwood Limited, 1983.
- 5) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方, 日本コンクリート工学協会, 1991, 5.
- 6) 小林一輔, 白木亮司, 河合研司: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, 第1巻第2号, 1990, 7.
- 7) 小林一輔, 宇野祐一: コンクリートの炭酸化のメカニズム, コンクリート工学論文集, 第1巻第1号, 1990, 1.
- 8) John Crank, The Mathematics of Diffusion, 1956, Oxford Univ. Press.
- 9) 永野広雄, 塩分汚染コンクリート構造物の診断手法の提案, 大成建設技術研究所報, 第18号, pp. 69~73.
- 10) 大即信昭, 樫野紀元, 片脇静士, 小林明夫, 宮川豊章, コンクリートの耐久性シリーズ・塩害(I), 1988, 9, 10, 技報堂, pp. 16~21.
- 11) 大即信昭, 原茂雅光, 浜田秀則: 棧橋コンクリート上部工劣化実態詳細調査報告, 港湾技術研究所報告, pp. 3~22.
- 12) 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.
- 13) 藤井敦: 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.
- 14) 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.
- 15) Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang (伊藤学, 亀田弘行訳): 土木建築のための確率・統計の応用, pp. 53~82, 丸善株式会社, 昭和63年1月30日.