

論 文

[1103] 海洋環境下における鉄筋コンクリートの耐久性/劣化指標の信頼度解析

正会員 ○堤 知明(東京電力・技術研究所)

正会員 入江正明(日建設計・土木設計事務所)

鈴木正敏(同 上)

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の劣化が社会的に注目されつつある。しかしながら、鉄筋コンクリートの劣化に影響を与える因子として、施工条件、環境条件等多くの不確実性が存在しているため、劣化進行のメカニズムや劣化と構造耐力の関係については、まだ未解明な部分が多い。

その一方で、構造物の適切な維持管理計画の有効な手法として、寿命予測や劣化を考慮した耐久性設計法の必要性が高まってきており、そのためには、劣化による安全性の変化を定量的に表現する手法の開発が必要となる。定量化にあたっては、多くの不確実性が存在することを考慮すると信頼性理論の導入が有効と考えられる。

筆者らは、火力発電所等の海洋環境下に建設される構造物の塩害[1]を対象として、信頼性解析をベースとした、構造物寿命予測や劣化を考慮した耐久性設計法の手順の確立を目指している(図-1参照)。本論文は、図-1中の研究フローの内、コンクリート表面からの塩分浸透と塩分による鉄筋腐食が、どのような因子の影響を多く受けて進行していくかを実データを用いて解析し、塩分浸透の確率モデル、鉄筋腐蝕の確率モデルを作成したものである。

2. 確率モデル

2.1 塩分浸透モデルの作成

コンクリート中の塩分浸透は環境条件やびびわれ等の様々な不確実な条件下で起きている。しかしながらこれらの諸条件を考慮し理論的に塩分浸透を説明することは困難であるため、現実にはコンクリートを均一材料と見なした一定環境下での拡散現象と仮定し、Fickの拡散方程式に

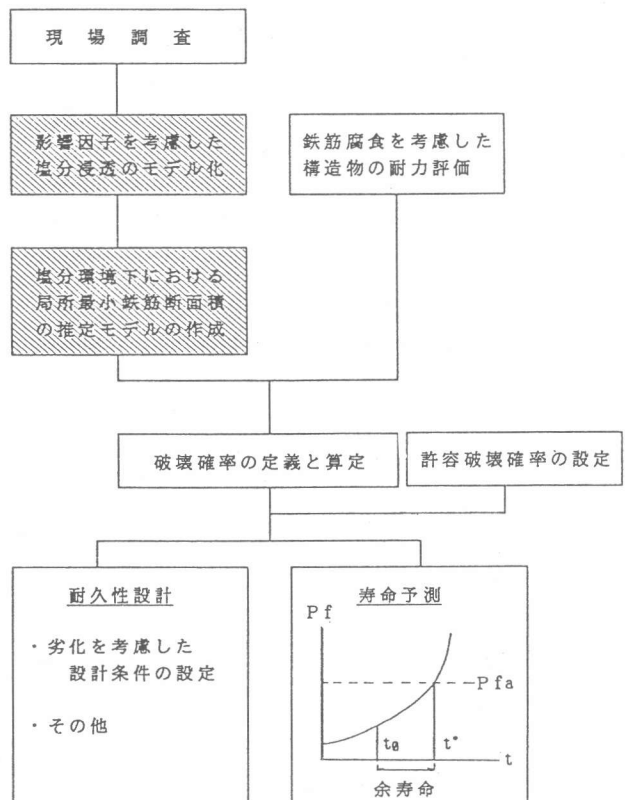


図-1 研究フロー

より説明されている。本研究では、Fickの式[2]中の拡散係数を次式に示すように環境条件やひびわれ状況に応じて変化する確率量と考えることによって、便宜的にFickの式を広義の意味で他の条件をも考慮したコンクリート中の塩分量推定式として扱った。Fickの式はこれらの条件を考慮して導かれたものでないため、物理的意味での妥当性は乏しいが、ここでは回帰式およびそのばらつきを表現する確率統計的意味での実験式として使用することとした。

$$D_c^* = \alpha \cdot E[D_c] + \sigma \cdot \varepsilon \quad \text{————— (1)}$$

- ここに D_c^* : 見掛けの拡散係数を示す確率量
 α : 健全なコンクリートにおける拡散係数を基準とした場合の補正值（環境条件、ひびわれ状況に応じて異なる値を持つ）
 $E[D_c]$: 健全なコンクリートの拡散係数の平均値
 σ : 実測したコンクリートの拡散係数の標準偏差（環境条件、ひびわれ状況に応じて異なる値を持つ）
 ε : 標準正規関数

2.2 鉄筋腐蝕の確率モデルの作成

コンクリート表面から内部に塩分浸透が生じると、鉄筋周辺が腐蝕環境下に移行して発錆し、鉄筋断面の減少が生じる。鉄筋の腐蝕形態は均一腐蝕型と局部腐蝕型に大別されるが、部材耐力低下に影響を与える腐蝕形態は孔食を有する局部腐蝕と考え、ここでは、最大孔食深さを表すパラメタとして、鉄筋局所最小断面積を提案し、次式のようにその確率モデルを作成した。

$$A = f(C_s) = \mu A(C_s) + \sigma A(C_s) \cdot \varepsilon \quad \text{————— (2)}$$

- ここに、 A : 鉄筋局所最小断面積を示す確率量
 $\mu A(C_s)$: 鉄筋位置での塩分量 C_s 下の鉄筋局所最小断面積の平均値
 $\sigma A(C_s)$: 鉄筋位置での塩分量 C_s 下の鉄筋局所最小断面積の標準偏差
 ε : 標準正規関数

モデルの作成に当たっては、表-1で定義した腐蝕グレードを2.1で予測した塩分量と鉄筋局所最小断面積を結びつけるパラメタと考えた。

3. 解析データ

解析に用いたデータは、東京湾内に位置する海洋構造物から採取したものを使用した。これらは、飛沫帯、陸上部に位置し

表-1 腐食グレード

グレード	鉄筋の状態
1	発錆がない
2	部分的に腐食が認められる軽微な腐食
3	部分的に断面が欠損している
4	鉄筋の全周にわたり断面の欠損がある
5	鉄筋の断面が当初の2/3～1/2くらい欠損している

建設後約30～60年経過した鉄筋コンクリート構造物である。表-2に塩分浸透の確率モデル作成に用いたデータを示す。また、現場調査により腐蝕グレードのランク付けを行い、各グレード毎に鉄筋10本を採取し、破断試験を実施した。この時、鉄筋局所最小断面積は、健全部分の引張り強度が公称降伏強度に保たれているとし、実際の試験で得られた降伏荷重を、この降伏強度で除して求めた。

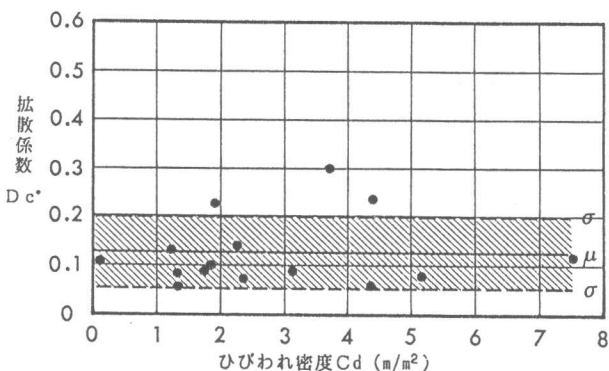
4. 解析結果

4.1 塩分浸透の確率モデル

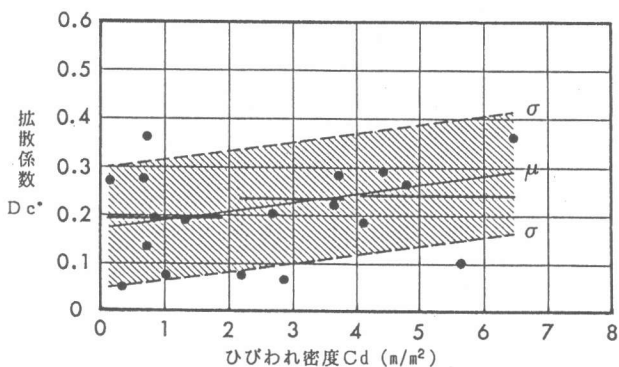
調査データから求まる見掛けの拡散係数 (D_c^*) を陸上部、飛沫帯の2種類の環境条件に区分し、ひびわれ密度 (コンクリート表面に発生したひびわれの総延長の面積密度) C_d との関係をそれぞれ図-2 (a), (b) に示す。これによると、比較的環境条件の穏やかな陸上部の D_c^* の傾きが小さいのは、塩分の飛来が少なくさらに雨水によって表面塩分が流されるためと考えられる。本研究では、建設当初の健全なコンクリートの拡散係数 D_c は、陸上部のひびわれ密度 $C_d = 0$ の場合であると考え、これを式(1)の平均 $E[D_c]$ として与えた。さらに、陸上部、飛沫帯の2種類の環境条件下で、ひびわれ密度を階級分けし、各ひびわれ密度毎に補正係数、ばらつきを算定することで、確率量としての D_c^* の設定を試みた。たとえば、ひびわれ密度を 0～1, 2～4, 4以上の3区間とした場合、陸上部では、ひびわれ密度に関係なく、 α , σ を設定し、飛

表-2 塩分浸透確率モデルに関するデータ

環境条件	コア数	暴露期間
陸上部	15ヶ所	32年
飛沫帯	18ヶ所	58年



(a) 陸上部



(b) 飛沫帯

図-2 拡散係数-ひびわれ密度関係

沫帯については図-2(b)の太線で示されるように、各区分毎に α を一定値とすることを提案する。 α 、 σ についての提案値を表-3にまとめて示す。ここで作成したコンクリート中の塩分量推定式は、いわばFickの式の拡張的な使い方であり、あくまで実データをもとにした係数決定であった。従って、今後より多くのデータによる検証が必要と考えられる。

表-3 拡散係数 D_c 算定のための提案値

	ひびわれ密度	飛沫帯	陸上部
α (補正係数)	$0 < C_d \leq 2$ $2 < C_d \leq 4$ $4 < C_d$	1. 1 3 1. 3 6 1. 4 1	1. 0 平均 $E[D_c]$ $=0.126$
σ (標準偏差)	$0 < C_d \leq 2$ $2 < C_d \leq 4$ $4 < C_d$	0. 1 1 0. 1 8 0. 1 0	0. 0 7

注) C_d : 単位面積当りのひびわれ長さの総延長

4.2 鉄筋局所最小断面積推定の確率モデル

4.2.1 鉄筋腐蝕グレードと塩分量の関係

鉄筋腐蝕グレードとその位置における塩分量の関係を図-3に示す。腐蝕グレードの増加と共に、鉄筋位置における塩分量の平均値、標準偏差共増大している様子がうかがえる。ただし、腐蝕グレード 4, 5においてはデータ数が少なく同様の解析が出来なかった。そこで、以後の計算では腐蝕グレード 4, 5における塩分量の平均値、標準偏差は、腐蝕グレード 3と同一のものと仮定した。

4.2.2 腐蝕グレードと鉄筋局所最小断面積の関係

鉄筋局所最小断面積と腐蝕グレードの関係は図-4のようにまとめられる。当初、同一断面積であった鉄筋が、腐蝕グレードが進につれて減少していることがわかる。すなわち、鉄筋の

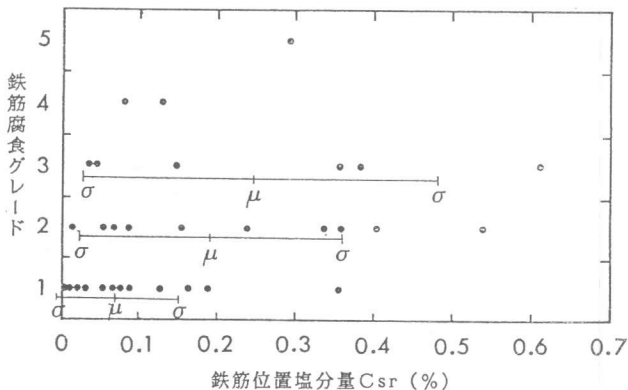


図-3 腐蝕グレード-鉄筋位置塩分量関係

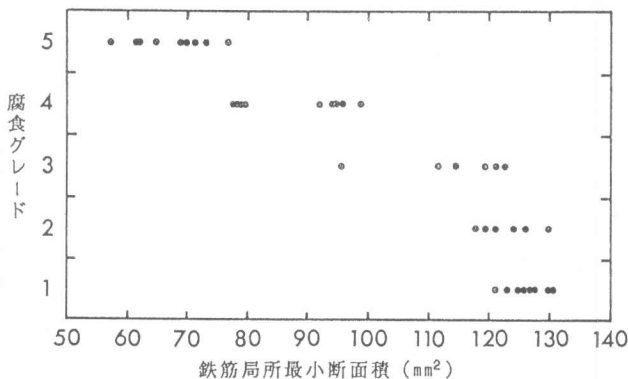


図-4 腐蝕グレード-鉄筋局所最小断面積関係

平均的な腐蝕度合を表している腐蝕グレードは、耐力にも関係していると考えられる鉄筋局所最小断面積を推定する間接的指標としても有効と考えられる。

4.2.3 鉄筋局所最小断面積推定の確率モデル

鉄筋局所最小断面積推定に当たっては、最初に対象とする鉄筋付近における塩分量を2.1 によって算出する。次に、この様な塩分量分布に曝されている鉄筋がどの腐蝕グレードになっているかの推定を行う。この際、図-3にあるような関係を用いて各グレードになる確率を求める。一方、図-4の関係を用いて各腐蝕グレードである時の鉄筋局所最小断面積分布は算定されているので、ある塩分量の時に鉄筋局所最小断面積がどのように分布しているかが算定できる。

以上の手順を図-5に示す。

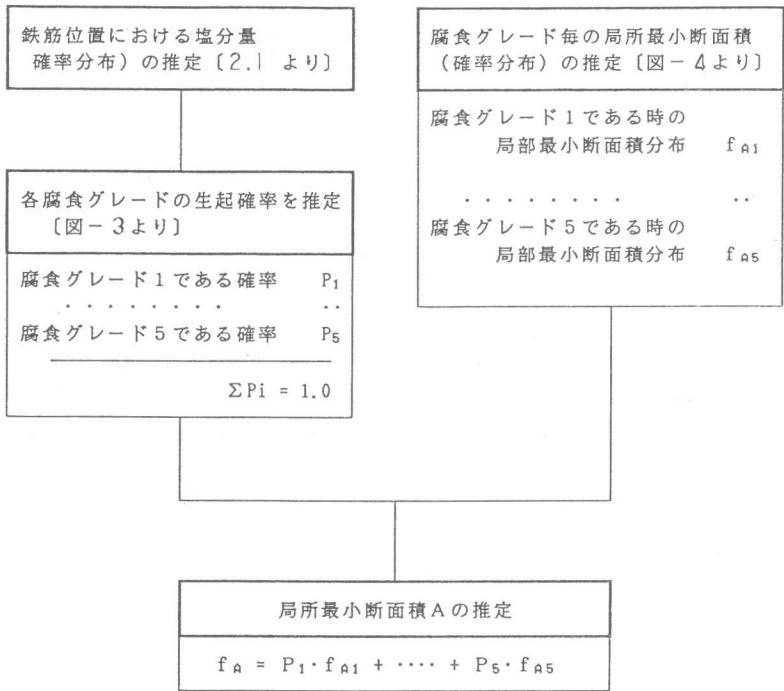
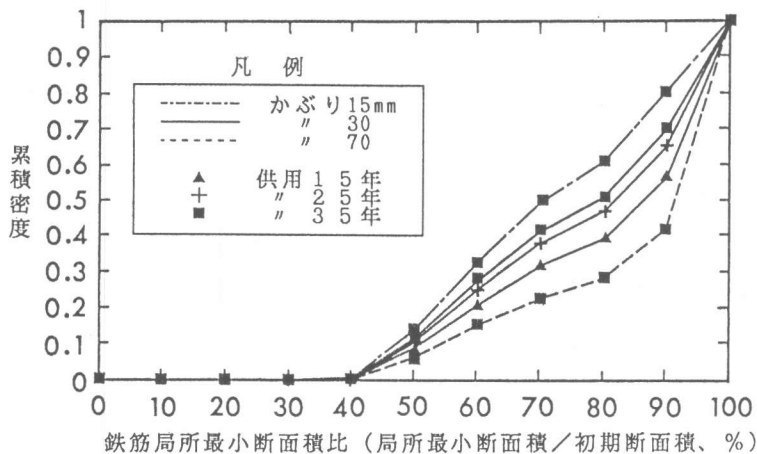


図-5 鉄筋局所最小断面積推定フロー

5. ケーススタディ

今、調査によりひびわれ密度 $Cd=0.3m/m^2$ ，表面塩分量 $C_0=0.8\%$ ，鉄筋径 $\phi 13$ であるとされた場合、4.1 で提案したモデルにより塩分量を推定し、4.2.3 のモデルに従って供用年別に鉄筋局所最小断面積を推定した結果を図-6に示した。たとえば、供用年35年の時、鉄筋の断面積は、局所的に当初の80%以下〔3〕である確率が52%程度になっていると推定される。また、この図には、同様の条件で鉄筋かぶり厚が15mmと70mmの場合も示しているが、70mmの場合、同様に鉄筋断面積が当初の80%以下になる確率は30%程度と推定され、かぶり厚の増大が鉄筋腐蝕の防止に寄与していることがわかる。さらに供用期間に着目すると、供用が長くなれば断面減少が生じる傾向を示している。



図－6 鉄筋局所最小断面積累積密度分布

6. おわりに

劣化のメカニズムはその要因の多さ、また複雑さ故に未だ理論的に説明されているとはいえない。このような現状では、これまでに得られているデータの解析を通して当面必要とされる劣化による耐久性低下の定量的把握を行うことも有効なアプローチと考えられる。本研究では、東京湾岸部で採取された塩分浸透量、鉄筋腐蝕量などに関する劣化データをベースにして塩分浸透予測モデル、構造部材の耐力に関係すると考えられる腐蝕による鉄筋断面減少量予測モデルを提案した。今後さらに多くのデータを蓄積し提案したモデルの妥当性を検討することが必要であると共に、耐力評価モデルを開発することにより耐久性設計に向けて劣化を考慮した構造物の信頼度算定法を確率することが必要である。

〔参考文献〕

1. 長内 進、宮本幸始、「塩分浸透を受けたコンクリート構造物の実態調査」、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp145～148
2. Crank, J., ed., 「The Mathematics of Diffusion. 」, Clarendon Press, OXFORD
3. (財)国土開発技術研究センター編、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術」、技報堂出版、1986、pp137～143