

1.はじめに

本研究では、塩害を受ける構造部材の劣化モデルを図-1に示すように提案している。提案したモデルは、①潜伏期、②進展期、③加速期の区分を考え、3直線でモデル化できるとした。つまり、コンクリート表面から塩化物イオンが浸透し、鉄筋の腐食を開始させ、鉄筋腐食膨張圧により鉄筋軸方向のひび割れを発生させ、ひび割れ後さらに鉄筋の腐食速度が加速されるモデルである。さらに、上述のモデルを利用し、耐用期間内の構造物の重要度、補修費用を考慮した最適な補修時期を求めることを後述する信頼性理論に基づいた期待費用最少の考え方で求めた。

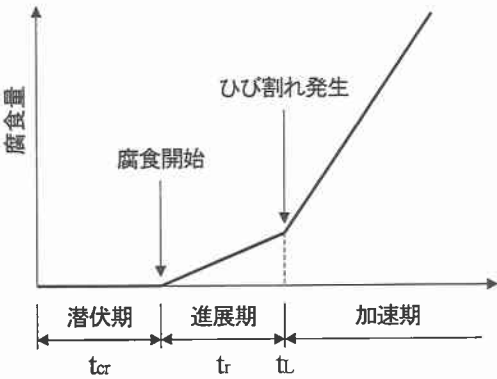


図-1 塩害劣化モデル

2.ライフサイクルコストを考慮した補修時期

(1)解析手法

耐久性のように不確実性に支配される現象は確率論的に取り扱ったほうが有効である場合が多い。表-1 にばらつきを考慮した因子の一覧を示す。補修をするべき腐食減量 Δr を定めると、耐用期間までの補修の繰り返しの関係は図-2 のようになる。図に見られるように、補修をすることにより、断面積の減量以外は、はじめの状況に回復すると仮定した。従って、鉄筋を新たに挿入することによる補強を実施し、元の鉄筋断面に復元することは考えなかった。

耐用期間内の総期待費用 C_T は、式(1)で表されると仮定した。

$$C_T = n_R \cdot C_m + P_f \cdot C_f \tag{1}$$

表-1 ばらつきを考慮した因子

項目	平均値	標準偏差	
等価拡散係数 D_c (cm/sec ²)	1.7×10^{-8}	1.59×10^{-8}	LN
限界塩化物イオン 量 C_{cr} (kg/m ³)	1.2	0.09	R
かぶり厚さ C (cm)	0.35	0.52	LN
鉄筋の腐食速度 Δ_1 (%/yr) (進展期)	0.0017	0.0009	LN
鉄筋の腐食速度 Δ_2 (%/yr) (加速期)	0.0035	0.0017	LN
コンクリートの引 張強度 σ_t (Pa)	$\bar{f}_{tu}$	$0.2 \bar{f}_{tu}$	N
ひび割れ発生式の 精度 ε	0.65	0.09	R

注：LN：対数正規分布，N：正規分布，R：矩形分布

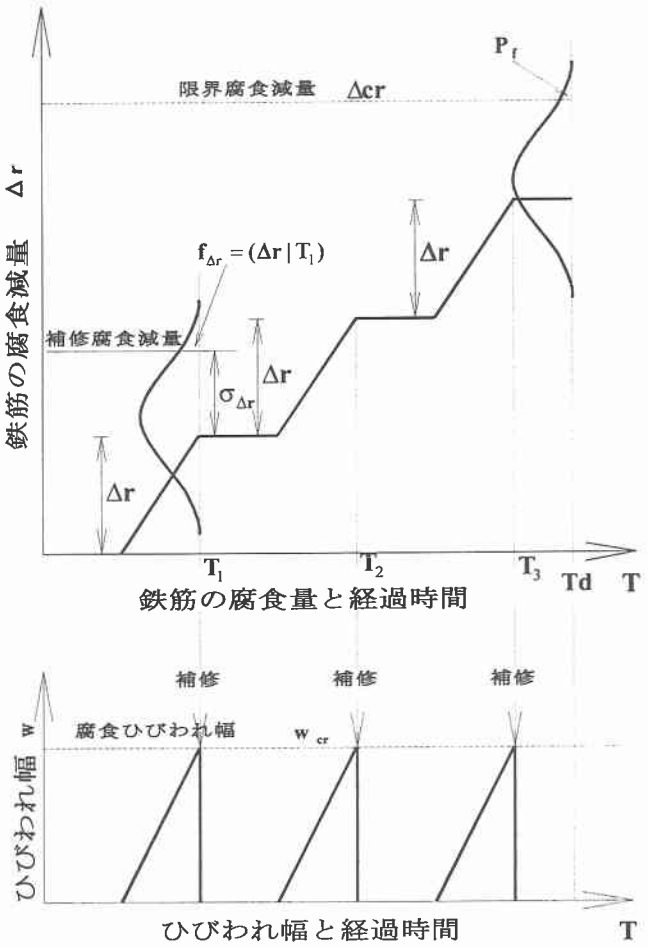


図-2 補修と耐用期間の関係

ここで、 n_R :耐用期間内の補修の回数、 C_m :補修費用、 C_f :破壊時の損失費用、 P_f :耐用期間内の破壊確率で、鉄筋の断面減少率が 10%を越える確率として定義した。10%とした理由は、この程度まで腐食すると異型鉄筋のリブ部が腐食により消滅し、付着性能が発揮できなくなり、鉄筋コンクリート構造物としての機能を持たなくなる値である。腐食した鉄筋の分布を $f_{\Delta r}(\cdot)$ で表すと、腐食した鉄筋の分布から求められる破壊確率 P_R は式(2)で表される。

$$P_R = \int_{\Delta_{cr}}^{+\infty} f_{\Delta r}(\Delta_r) d\Delta_r \tag{2}$$

ここで、 Δ_{cr} :鉄筋の限界断面減少量(=10%)、 $f_{\Delta r}(\Delta_r)$:鉄筋の腐食減量の分布である。しかし、腐食した鉄筋の分布は、腐食が発生した部分のみであり、ある経過時間での鉄筋の状態は、「腐食した確率(1- P_0)」と「腐食していない確率 P_0 」で表される。従って、破壊確率 P_f は、式(3)で表される。

$$P_f = (1 - P_0) \cdot P_R \tag{3}$$

式(1)を無次元化するために、すべての費用が初期建費用 C_c の比率で表されると仮定すると、式(1)は、式(4)のように書き換えられる。

$$\beta_T = \alpha \cdot n_R + \gamma \cdot P_f \tag{4}$$

さらに、時間的価値を考慮する。つまり、すべての費用を建設時の時間 $p=0$ での費用に換算するために各費用を式(5)を用いて変換した。

$$C_{p=0} = \frac{(1+f)^t}{(1+k)^t} C_{p=t} \tag{5}$$

ここで、 $C_{p=t}$ は、建設後 t 年で発生する費用、 k は実質利率で、 f は物価上昇率で、本研究では $k=0.05, f=0.03$ とした。従って、 β_T の値が最小となる補修をすべき腐食減量が、最適な補修レベルとなる。

各係数 α, γ は、既往の文献等から定められる。 γ は破壊した後、取り壊して、再度建設するというので、最小が 2.0 である。本研究では、人的な被害が生じないと考え、 $\gamma=10.0$ とした。 α は、どこまでの補修費用を見こむのか難しい面があるが、0.03 という文献もある。また、建築物では α が 0.3 を超えると、補修ではなく新設するという意見もある。従って、0.03 が最小で、0.3 が最大とも言える。本研究では、 $\alpha=0.05$ と仮定した。

(2) 腐食ひびわれ幅と腐食減量

腐食減量は、腐食ひびわれ幅と密接な関係にあり、線

形の関係にある。補修の良否の判断は、現場ではひびわれ幅から行われていることを考えると、腐食減量よりも腐食ひびわれ幅の方が指標としては有効である。このように、劣化の評価指標として腐食ひび割れ幅が大きな因子として考えられる。電食実験から得られた腐食ひびわれ幅と腐食減量の関係を式(6)に示す。本研究では、式(6)を使って、腐食減量ではなく腐食ひびわれ幅に置き換え、劣化レベルを評価した。

$$\Delta_m = 2.24 W_c + 0.41 \tag{6}$$

ここで、 W_c :ひび割れ幅(mm)である。

一般に点検調査では、ひびわれ幅は、最大ひびわれ幅が採用されている。従って、ひびわれ幅は、分布のばらつきを考慮して、平均値に標準偏差を加えた鉄筋腐食減量(85%信頼値)と一致すると判断した。

3.試算例

耐用年数は、一般の海洋構造物を想定し 30 年とした。試算では、補修費用の係数 $\alpha=0.05$ 、破壊時の損失費用を表す係数 $\gamma=10.0$ とした。求める補修ひびわれ幅は、0.1~0.9mm とした。計算条件は、表面塩化物イオン濃度を $C_0=20\text{kg/m}^3$ とし、比較的厳しい外洋環境(太平洋側の外洋に面した地域を想定)に設定した。鉄筋の設計かぶりは、 $X_t=8\text{cm}$ 、鉄筋径を $\phi=22\text{mm}$ とした。補修回数と腐食ひび割れ幅の関係を図-3に示す。補修ひび割れ幅が大きくなるに連れて、言いかえると補修時の鉄筋腐食量が増大するに連れて、補修費用は小さくなる。逆に、破壊損失期待費用は補修ひび割れ幅が大きくなるにつれて増加する。総期待費用最小の原理から最適な補修ひび割れ幅を求めると、0.2mm が最適な補修ひび割れ幅となる。

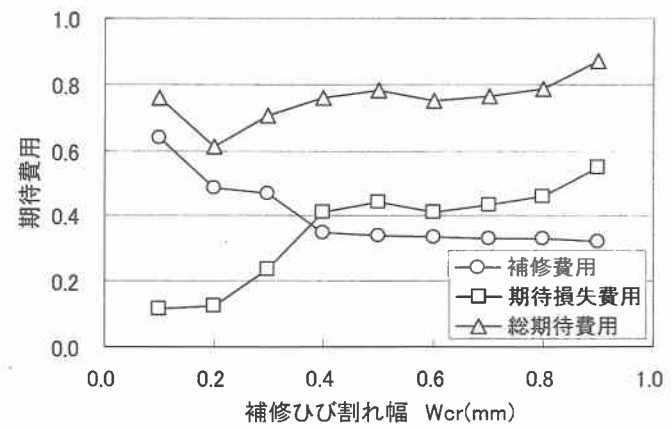


図-3 期待費用と腐食ひび割れ幅