

香川大学大学院 学生会員 ○田中 秀周  
 (株)四国総合研究所 正会員 横田 優  
 香川大学工学部 正会員 松島 学

## 1. はじめに

我が国は、その周囲を全て海に囲まれた狭い島国であるため、鉄筋コンクリートにとって厳しい環境条件である海岸・海洋地域に構造物を多く建設してきた。そのような厳しい環境に建設されたコンクリート構造物の多くが塩害により損傷している。構造物を長期供用するためにも、維持管理の必要性や重要性が認識されるようになってきている。

本研究は、塩害劣化モデルの構築し、耐用期間内のライフサイクルコストを求めることで、最適な補修計画をモデル化した。ライフサイクルコストは、ある腐食量以上になると地震時に崩壊する可能性を求めた破壊確率と耐用期間内の補修費用を求めることで説明した。

## 2. 塩害劣化モデルの構築

塩害劣化の過程は、①潜伏期、②進展期、③加速期、④劣化期の4つの区分が考えられる。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ひび割れが発生し、その後腐食速度が加速され、耐荷力が低下し、終局を迎える。劣化過程を予測することは、各期間を求めることであり、各期間を決定する要因などは以下のように仮定した。

①潜伏期…潜伏期では、塩化物イオンの拡散と初期含有塩化物イオン濃度が期間を決定する要因となる。塩化物イオンの拡散、見かけの拡散係数と付着塩分量(表面塩分量)により鉄筋位置での塩化物イオン量は計算される。コンクリート標準示方書から発錆限界イオン量は、鉄筋位置での塩化物イオン量が  $1.2\text{kg/m}^3$  に達した時に鉄筋は腐食を開始すると仮定し、それまでの腐食速度はゼロとした。

②進展期…進展期では鉄筋の腐食量が期間を決定する要因となる。塩化物イオン量の増大により腐食速度が早くなるとし、腐食量を決定した。腐食量が  $50\text{mg/cm}^2$  に達した時にひび割れが発生すると仮定した。

③加速期…進展期同様、鉄筋の腐食量が期間を決定する要因となる。腐食速度を求め、その値を3倍した。加速期に入るとひび割れ幅が大きくなり、酸素や水、塩化物イオンの浸透量が増え、腐食速度が大幅に上昇すると考えた。

## 3. 健全度レベルの構築

コンクリート構造物はある程度外観上で判断することができ、特にひび割れ幅は劣化評価の大きな指標となっている。本研究では健全度レベルをひび割れ幅で評価することにした。健全度レベル  $L$  とひび割れ幅  $W$  の関係を表1のように仮定した。鉄筋の腐食量は、既往の研究からひび割れ幅と線形の関係にあることがわかっており、ひび割れ幅から腐食量を求めることで、健全度レベルとの関係を求めた。

表1 健全度レベル  $L$  とひび割れ幅の関係

| 健全度<br>レベル $L$ | 一般的状況           | ひび割れ<br>幅 $W$ |
|----------------|-----------------|---------------|
| 5.0            | 健全であり、損傷は認められない | なし            |
| 4.0            | 微小なひび割れが発生する    | 約 0.2mm       |
| 3.0            | ひび割れが顕在化する      | 約 0.4mm       |
| 2.0            | ひび割れが大きく進展する    | 約 0.8mm       |
| 1.0            | かぶり部が剥離し、損傷が著しい | 1.0mm 以上      |

## 4. ライフサイクルコスト

### (1) 破壊確率のモデル

対象となるコンクリート構造物の鉄筋の断面減少量が20%以上になると、地震時の荷重により倒壊すると考えた。この理由は、20%を超えると鉄筋の節が腐食により無くなり、鉄筋コンクリートが成り立たなくなると考えたからである。鉄筋の腐食量のばらつきを正規分布で仮定し、既往の乾湿繰返実験結果を参考に、変動係数を0.4とした。

耐用期間内での破壊確率  $P_{\text{fm}}$  を式(1)のように求めた。

$$P_{fm} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_f(t) \cdot P_i) \quad (1)$$

ここで、 $P_f(t)$  :  $t$  年時での鉄筋の断面減少量が 20% 以上になる確率、 $P_i$  :  $i$  年に地震が発生する確率、 $m$  : コンクリート構造物の耐用期間である。

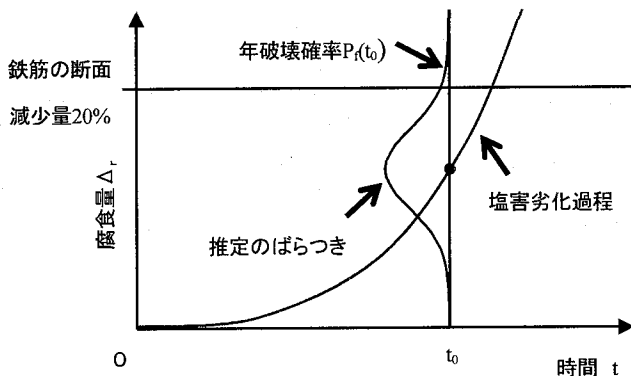


図-1 破壊確率のモデル

## (2) 期待費用のモデル

総期待費用  $C_T$  は、耐用期間内の補修費用と地震時の期待損失費用の和で表されるとし、式(2)と定義した。

$$C_T = n \cdot C_R + P_{fm} \cdot C_f \quad (2)$$

ここで、 $n$  : 耐用期間内の補修回数、 $C_R$  : 補修費用、 $P_{fm}$  : 地震時の破壊確率、 $C_f$  : 地震時の期待損失費用である。

さらに、 $C_R = \alpha \cdot C_c$ 、 $C_f = \gamma \cdot C_c$  と置き、式(2)を無次元化すると式(3)が求められる。

$$\frac{C_T}{C_c} = C_{0T} = n \cdot \alpha + P_{fm} \cdot \gamma \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$  : 補修費用の係数、 $\gamma$  : 重要度係数である。補修費用の係数は  $\alpha = 0.2 \sim 0.4$  とした。補修費用を大きく区分すると、足場などの仮設費用と補修費用の 2 つがあり、補修費用は健全度レベルが小さくなると、補修というよりも補強となるため費用を大きく見積もった。図-2 に、その内訳を示す。

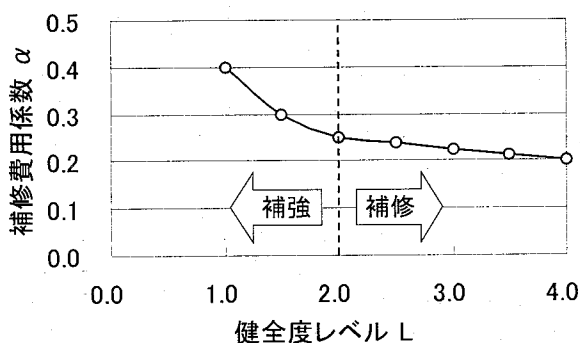


図-2 補修費用係数

## 5. 最適補修レベルの考察

健全度レベル  $L = 1.0 \sim 4.0$  までは 0.5 刻みで、耐用期間内の破壊確率と補修回数を求めた。耐用期間は 75 年とした。地震の年発生確率  $P_i = 5\%$  と仮定した。重要度係数は  $\gamma = 10$  とした。

図-3 に示すように健全度レベルが低くなるにつれて指数的に破壊確率は大きくなる。逆に、図-4 に示すように健全度レベルが高くなると補修回数が多くなる。

健全度レベルと期待費用の関係を図-5 に示す。損失費用  $C_f$ 、補修費用  $C_R$  の関係から、全期待費用  $C_T$  が最小値を取る時が最適補修レベルとなる。健全度レベルが 2.5 の時に補修を行うのが最適であると結果が得られた。

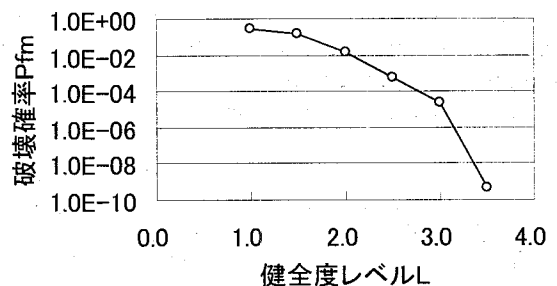


図-3 破壊確率と健全度レベル

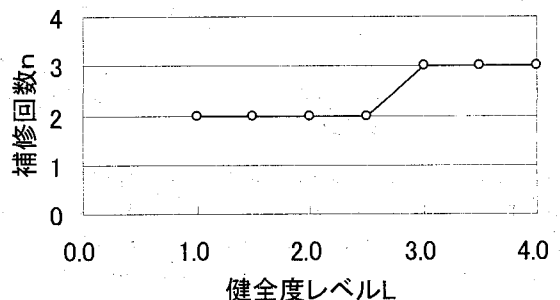


図-4 補修回数と健全度レベル

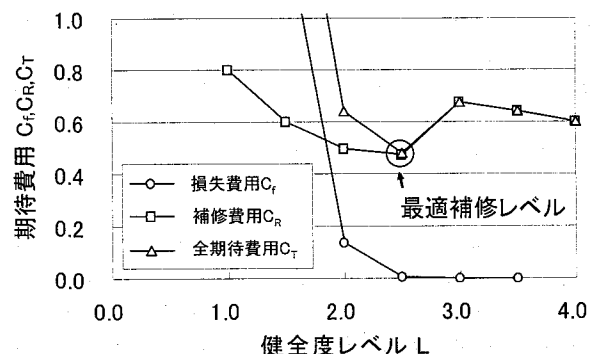


図-5 最適補修レベル