

# コンクリート構造物のライフサイクルコストを考慮した補修レベル

## REPARING LEVEL OF CONCRETE STRUCTURE CONSIDERING LIFE CYCLE COST

松島学\*, 横田優\*\*

Manabu MATSUSHIMA and Masaru YOKOTA

\*工博 香川大学工学部教授 安全システム建設工学科(〒761-0396 高松市林町 2217-20)

\*\*工博 四国総合研究所 土木技術部主席研究員

The method to seek the repairing timing of concrete structure is proposed in order to obtain Life Cycle Cost in this paper. LCC is computed by evaluating the repairing cost and expected damage cost caused by earthquake in life span. Optimum repairing timing is obtained by the total expected benefit minimum. Target structure is landing pier received the chloride induced damage.

**Key Words:** *Repairing timing, Life Cycle Cost, Chloride induced damage, Total expected benefit minimum*

### 1. はじめに

鉄筋コンクリートはメンテナンスフリーと考えられてきた。しかし、近年、鉄筋コンクリート構造物に塩害、アルカリ骨材反応、凍害などを原因とした劣化が報告されている。構造物を長期供用に供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来ており、土木学会のコンクリート標準示方書でも「維持管理編」<sup>1)</sup>が刊行されている。供用年数と橋梁数の推移の関係を図-1に示す。供用期間を50年と考えると、2030年以降には橋梁総数の半分以上を越えることが試算されている<sup>2)</sup>。上記情勢のもので、建設から供用停止に至るトータルコストの中で維持管理費の示す割合が高くなってくると予想される。コスト低減が強く要請される今日では、ライフサイクルコスト(Life Cycle Cost : 以降LCCと略する。)

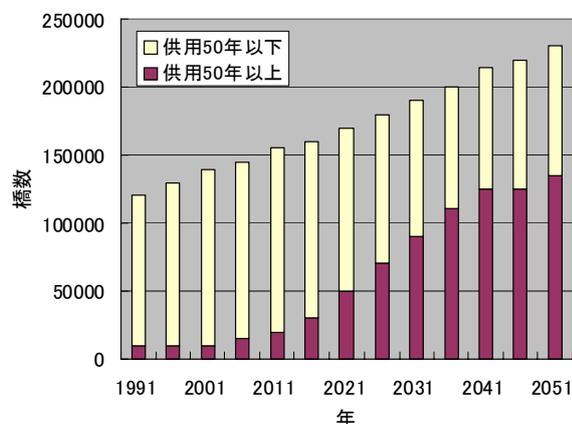


図-1 供用年数の推移<sup>2)</sup>

に注目が集まってきている。しかし、経年を考慮した構造物の性能変化、LCCの算定方法、評価方法などに関して確立されていないのが現状である。

本研究は、LCC算定<sup>3)</sup>の構造物として、海洋環境下にあり塩害にさらされる鉄筋コンクリート構造物を対象にした。塩害劣化のモデル化とLCCを計算するための基本概念や評価システムのフローを精査し、新たに再劣化を評価するための「再劣化係数」を導入した。費用は補修費用と地震時の期待損失費用を取上げ、現在価値に費用を直すことで総費用を比較し、最適な補修レベルの選定をする。この考え方を基に、栈橋上部工の鉄筋コンクリート部材に適用し、上記の方法の妥当性を検証した。

### 2. 塩害劣化のモデル

塩害劣化の過程は、4つの区分で説明される。図-2に示すように、①潜伏期、②進展期、③加速期および④劣化期の区分が考えられる。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、その後、耐力が低下し、終局を向かえる。本研究では、劣化レベル $L(t)$ と劣化状況の関係を表-1のように仮定することで、時間 $t$ の劣化レベル $L(t)$ を図-2の劣化状況を参考に式(1)のように設定した。

$$\begin{aligned}
 t=0 \sim t_1 & \quad L(t)=5 \\
 t=t_1 \sim t_2 & \quad L(t)=5-\alpha_1(t-t_1) \\
 t=t_2 \sim & \quad L(t)=4-\alpha_2(t-t_2)
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 $t$ ：経過年数、 $t_1$ ：腐食ひび割れ発生開始時間、 $t_2$ ：過大なひび割れが発生する時間である。 $\alpha_1, \alpha_2$ ：劣化速度を表す係数である。本研究では、既往の推定式などを参考に、図-3のように設定した。

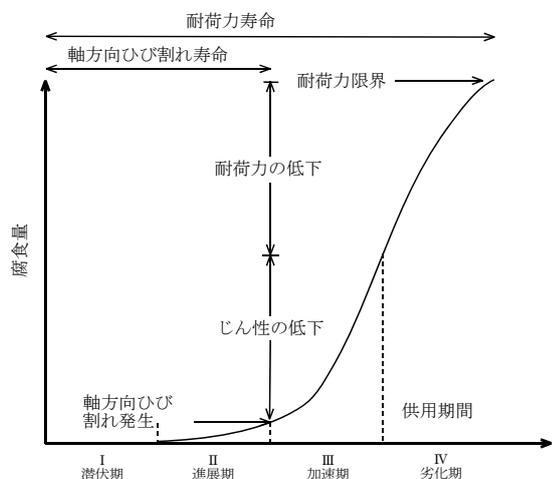


図-2 劣化モデル<sup>4)</sup>

表-1 健全度と劣化状況

健全度	記述	備考
1	かぶり部がはく離し、著しい損傷がみられる。	(劣化期)
2	ひびわれが進展し、最大ひびわれ幅で0.8mmに達する。	(加速期)
3	ひびわれが顕在化し、ひびわれ幅0.4mm程度に達する。	(進展期)
4	微細なひび割れが発生する。	(進展期)
5	健全。	(潜伏期)

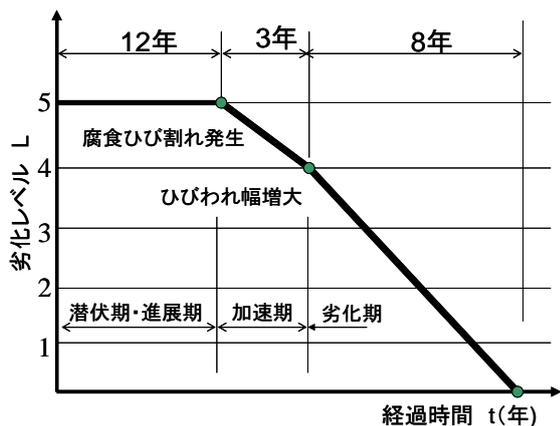


図-3 劣化レベル $L(t)$ と経過時間 $t$ のモデル

### 3. ライフサイクルコスト

#### (1)劣化モデルの構築

対象構造物がある劣化レベル以下になると地震などの異常時の荷重により倒壊すると考える。塩害劣化した経

過年数 $t$ 年での構造物の健全度を $L(t)$ とする。健全度レベルの性能関数 $f_R(L(t))$ は、平均値が式(2)で求められる健全度で、標準偏差 $\sigma_R$ の正規分布と仮定した。本研究では、健全度の推定誤差を1.0と仮定した。地震で倒壊する構造物の限界健全度レベルを $L_{cr}$ とすると、経過時間 $t$ での地震により倒壊する破壊確率 $P_f(t)$ は式(2)により計算される。

$$P_f(t) = \int_{-\infty}^{L_{cr}} f_R(L(t)) dL \quad (2)$$

ここで、 $f_R(L(t))$ ：健全度レベル $L(t)$ の性能関数で、 $L(t) = N(\bar{L}(t), 1.0)$ と仮定した。 $L_{cr}$ ：地震で倒壊する構造物の健全度レベルである。

健全度レベルと経過時間の関係の模式図を図-4に示す。経過時間が経過するにつれて、健全度レベルが低下する。低下することにより限界健全度レベルを超える確率が大きくなる。限界健全度レベルを $L_{cr}=1.0$ と設定した。本研究は、補修をする時期をどうするかの問題である。劣化レベルが低下すると破壊確率が大きくなり、あまり早い時期に補修をすると、耐用期間中の補修費用が増大する。被害時の構造物の重要度を考慮し、補修の健全度レベルを設定する必要がある。

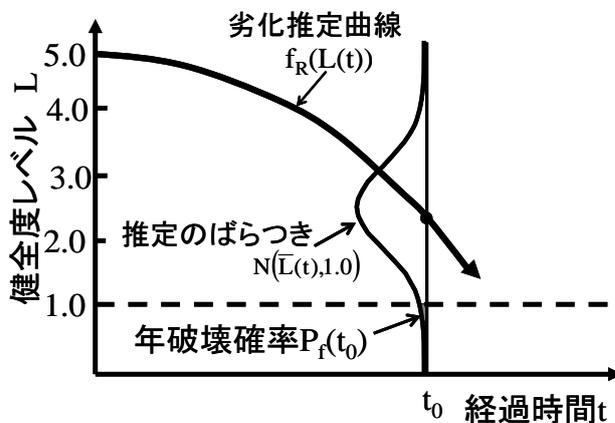


図-4 健全度レベルと経過時間

来るべき東南海地震は、ここ30年以内に80%の確率で発生すると言われている。地震の年発生確率 $P_1$ とし、 $n$ 年間に地震が発生する確率 $P_0$ は、式(3)で求められる。

$$P_0 = 1 - (1 - P_1)^n \quad (3)$$

式(3)に $n=30$ 年、 $p_1=30\%$ を代入すると、 $P_0=0.05$ が求められる。

構造物の耐用期間 $m$ 年内の破壊確率 $p_{im}$ を求める。経過年数 $t$ での構造物の破壊確率は、地震の発生確率 $P_1$ と発生

した時に破壊する確率 $P_f(t)$ を掛け合わせることで求められる。したがって、耐用期間内での破壊確率 $P_{fm}$ は、式(4)で求められる。

$$P_{fm} = 1.0 - \prod_{t=1}^m (1.0 - P_i \cdot P_f(t)) \quad (4)$$

$P_f(t)$ :  $t$ 年時での限界健全度レベル $L_{cr}=1$ 以下になる確率、 $P_i$ : 年の地震が発生する確率、 $m$ : 構造物の耐用期間である。

## (2)最適な補修レベル

次に、最適な補修レベルの求める方法を説明する。耐用期間内の補修費用と地震による期待損失費用の和を総期待費用 $C_T$ とすると、式(5)で表される。

$$C_T = n \cdot C_R + P_{fm} \cdot C_f \quad (5)$$

ここで、 $n$ : 耐用期間内の補修回数、 $C_R$ : 補修費用、 $C_f$ : 地震被害時の損失費用である。地震被害時の損失費用 $C_f$ は、直接的損失費用 $C_D$ と社会的損失 $C_S$ の2つに分類される。直接費用は、建設費 $C_c$ の2~3倍程度と定量的に評価することができる。しかし、社会的損失費用 $C_S$ は、道路橋であれば交通が遮断された場合と迂回路がある場合では異なり、評価が難しい。本研究では、式(6)のように $C_f$ の値を建設費の比率の係数 $\gamma$ で評価することにした。ここで、 $\gamma$ を構造物の重要度係数と呼称する。

$$C_f = C_S + C_D = \gamma \cdot C_c \quad (6)$$

次に、式(5)の総期待費用の式を無次元化する。 $C_R = \alpha \cdot C_c$ 、 $C_f = \gamma \cdot C_c$ と置き、式(5)を無次元化すると、式(7)が求められる。

$$\begin{aligned} \beta_T &= C_T / C_c = n \cdot C_R / C_c + P_{fm} \cdot C_f / C_c \\ &= n \cdot \alpha_R + P_{fm} \cdot \gamma \end{aligned} \quad (7)$$

最適な補修レベル $L_{Ropt}$ は、式(7)を最小にする補修レベルが選ばれ、式(8)のように求められる。

$$\text{Min } \{ \beta_T \} \text{ such that } L_{Ropt} = L_R \quad (8)$$

## (3)再劣化のモデル

全ての部位を補修しても、塩害を受けた構造物を補修した場合、コンクリート中に浸透した塩分の全てを除去することは困難であり、再劣化も懸念される。そのため、補修後構造物は新設と全く同じ条件とはならず、劣化は

早期に発生すると考えられる。本研究では、再劣化を考慮するための再劣化係数を考えた。補修間隔に対して式(9)に示すように再劣化係数を乗ずることで再劣化を考慮した。

$$T_k = T_1 \cdot \alpha^{k-1} \quad (9)$$

ここで、 $T_k$ :  $k$ 回目の補修間隔、 $T_1$ : 1回目の補修間隔、 $\alpha$ : 再劣化係数で、既往の研究を参考に0.9と設定した。

## (4)時間的価値の評価方法

補修を行う際の時間的な差異によって生じる時間的価値の差を、経済学でよく用いられる現在価値法を用いた。この方法は、将来支出される費用を金利を考え、現在の価値に割り戻す方法であり、式(10)で表される。

$$\begin{aligned} C_p &= R_p(k, n) \cdot C_F \\ R_p &= \frac{1}{(1+k)^n}, k = \frac{(1+i)}{(1+h)} - 1 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $n$ : 経過年数、 $i$ は資本の利率、 $h$ は物価上昇率である。本研究では、 $i=3\%$ 、 $h=1\%$ と仮定すると、 $k=2\%$ となる。同様に、地震による期待費用も現在価値に割り戻した。

## (5)補修費用のモデル

補修費用は、大きく足場などの仮設費用と補修費用の2つに区分される。そのため、補修費用のモデルを図-6のように一定の費用が指数的に増大するとした。特に、健全度レベルが小さい場合は、補修というよりも補強となるために補修費用を大きく見積もった。

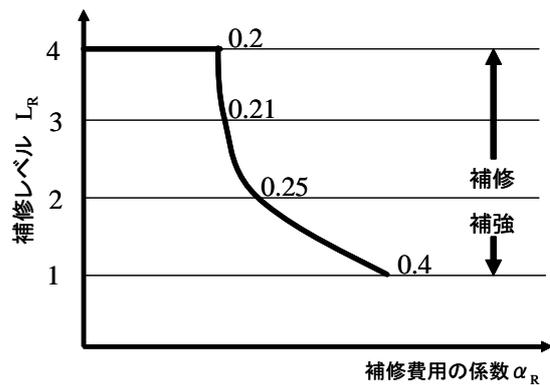


図-6 補修レベルと補修費用

## 5. 計算例

対象の構造物は、海洋環境に曝されているコンクリートコンクリート橋とする。コンクリート橋の劣化曲線に図-3を採用する。耐用期間を75年とする。対象とす

る地震動の年発生確率 $P_i=5\%$ として、破壊確率を求める。補修レベルを $L_R=3$ の時の計算した劣化の過程と経過年数の関係を図-7に示す。図に見られるように、補修の繰り返しの影響を受け、補修までの期間が徐々に小さくなっていく。この補修では、耐用期間内に5回の補修を繰り返すことがわかる。この計算を補修レベル $L_R=1.0\sim 4.0$ までを0.5刻みで、耐用期間内の破壊確率と補修回数を求めた。補修レベルと破壊確率の関係を図-8に、補修レベルと補修回数の関係を図-9に示す。補修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り、逆に、補修レベルが高くなると補修回数が多くなる。この両者の重みを考慮することで、最適な補修レベル $L_{Ropt}$ が決定される。補修レベル $L_R$ と補修費用 $C_R$ 、破壊時の期待損失費用 $C_f$ および総期待費用の関係、重要度係数 $\gamma=2.0, 5.0$ および $10.0$ の場合について、図-10(a), (b)および(c)におおの示す。 $\gamma$ の値の設定は、2.0は社会的損失費用を考慮しない場合、5.0、10.0は社会的費用を中くらいに考慮した場合、10.0は大きく考慮した場合である。各図に見られるように補修費用は、補修レベルが大きくなるにつれて大きくなり、破壊時の損失費用は逆転する。

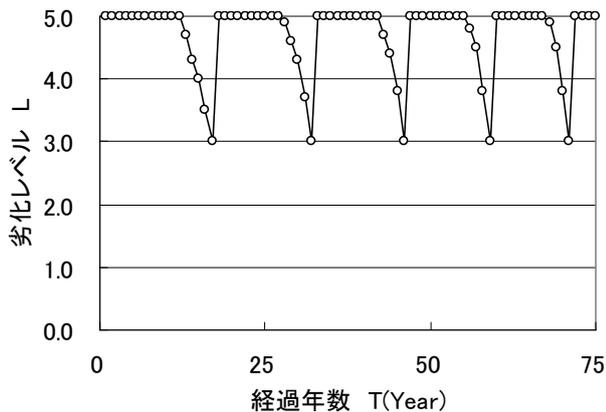


図-7 健全度レベル $L(t)$ と経過年数 $T$

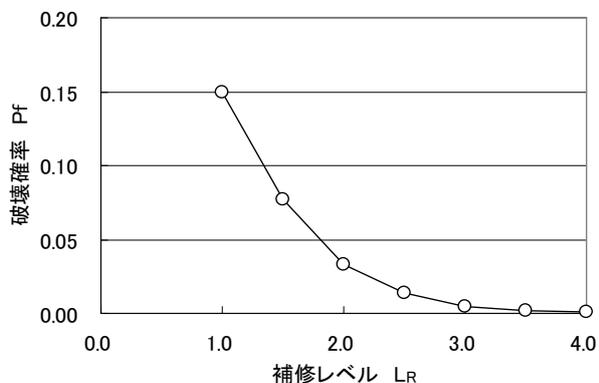


図-8 補修レベル $L_R$ と破壊確率 $P_f$

損期待費用が最小を最適な補修レベルと考えると、 $\gamma=2.0$ の時は補修レベル $L_R=1.5$ が最適になり、 $\gamma=5.0$ および $\gamma=10.0$ の時は補修レベル $L_R=3.0$ が最適になる。このように、損失費用が小さな場合は、補修をせずに、問題が出た時に補修をするということを意味している。重要度係数が大きい場合の解は変わらず、ある程度重要であれば補修を早めにするのが重要であることを示唆している。

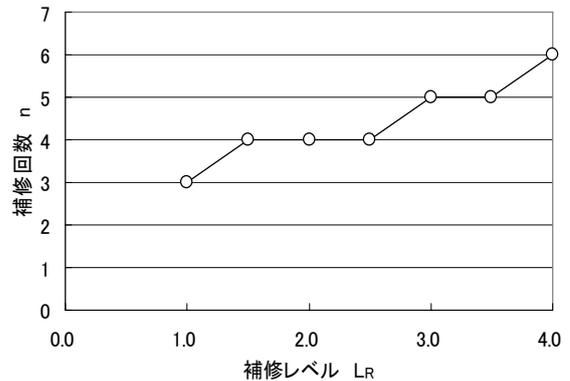


図-9 補修レベル $L_R$ と補修回数 $n$

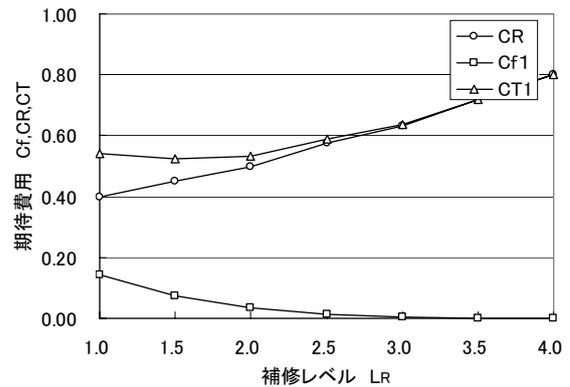


図-10 (a) 期待費用と補修レベル $L_R$  ( $\gamma=2.0$ )

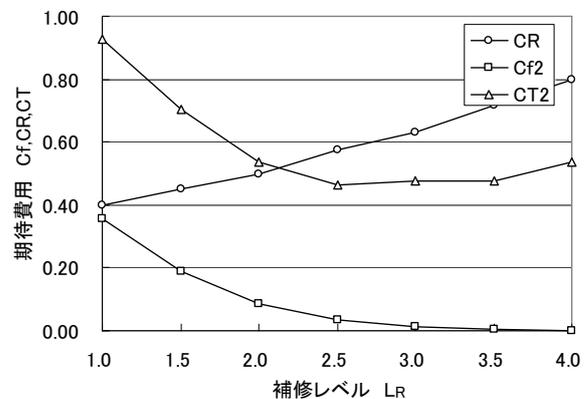


図-10 (b) 期待費用と補修レベル $L_R$  ( $\gamma=5.0$ )

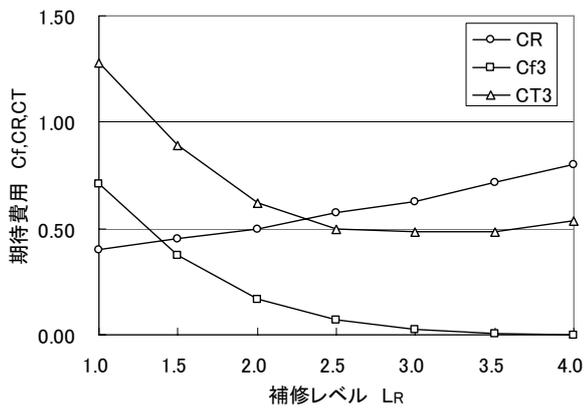


図-10(c) 期待費用と補修レベル $L_R$  ( $\gamma=10.0$ )

## 6. まとめ

本研究では、LCC算定の構造物として、海洋環境下において塩害にさらされる鉄筋コンクリート構造物を対象にした。耐用期間内の塩害劣化による補修費用と地震時の期待損失費用を取上げ、現在価値に費用を直すことで総費用を比較し、最適な補修レベルの選定をした。本研究で、明らかになったことを以降に箇条書きで示す。

- (1) 塩害劣化を受けるコンクリート構造物の補修費用と地震力による倒壊の期待費用の足合わせによる総期待費用を設定し、最適補修レベルの求め方を提案した。
- (2) 重要な橋梁構造物では、早めの補修が必要で、健全度レベル3.0での補修が必要となる。
- (3) 交通上あまり問題のない橋梁構造物は、劣化が厳しくなり問題が発生して補修するのが最適となった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：[2001年制定]コンクリート標準示方書[維持管理編]、土木学会、pp.185、2001.1.
- 2) 国土交通政策研究所：「我が国経済社会の長期展望と社会資本整備のあり方に関する研究—持続可能な成長と国民の多様な選択の実現に向けたストックの形成—」、建設政策研究センター報告書 (PRC NOTE第23号)、1999.3.
- 3) 伊庭孝充、松島 学、関博、川田秀夫：塩害を受けるRC構造物のLCC算定手法に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.704/V-55、p.11~11、2002.5.
- 4) 宮川豊章：Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文,1985.2.
- 5) 高橋稔明,酒井通孝,関博,松島学：塩害環境下におけるRC構造物のLCC算定と補修工法選定システムの開発, コンクリート工学論文集,第16巻第3号,pp.21~29,2005.9.

