

塩害を受ける RC 建造物のライフサイクル コスト算定手法に関する基礎的研究

伊庭 孝充¹・松島 学²・関 博³・川田秀夫⁴

¹正会員 工修 株式会社大林組 名古屋支店(〒461-8506 名古屋市東区東桜 1-10-9)

²正会員 工博 香川大学教授 工学部安全システム工学科(〒761-0396 高松市林町 2217-20)

³正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

⁴(財)東京港埠頭公社 (〒105-0022 港区海岸 1-11-1 ニューピア竹芝ノースタワー 9階)

塩害を受ける鉄筋コンクリート建造物のライフサイクルコスト計算方法について検討を行い、試算を行った。ライフサイクルコストを計算するためには、建造物のライフサイクルを通じた劣化予測を行う必要があるが、本研究では確率的手法により、実建造物の持つ不確定性を考慮したプログラムを構築した。また、ライフサイクルコスト計算には期待費用最小の法則を適用し、コスト計算のためのフローを提示して RC 栈橋上部工の RC 部材における断面修復工法への適用例を示した。さらに、本手法に基づいてライフサイクルコストを考慮した最適補修間隔を求めた。

Key Words : *life cycle cost, minimum expected cost law, salt attack, deterioration model repair*

1. はじめに

この十数年の間にコンクリート建造物の劣化が顕在化し、維持管理業務の重要性が認識されるようになった。維持管理は大別すると「予防保全」、および「事後保全」がある。双方のいずれを選択すればよいかは一概に言うことはできないが、ライフサイクルコストを計算することにより、より経済的な選択ができると考えられている。

ライフサイクルコスト (Life Cycle Cost : 以下、LCC と略する) とは、建築耐用設計の ISO 原案¹⁾によれば、「あるアイテムの全生涯にわたるコストで、計画、設計、調達、運営、メンテナンス及び廃棄のコストを含み、残価があればそれを差し引く。」と定義されている。土木工学の分野では、ここ数年、LCC の試算例が報告されている。例えば、西川²⁾は最小の維持管理負担で、最大限の寿命を得ようとすることを目標としたミニマムメンテナンス橋と従来の方法による橋梁との経済性比較を LCC の試算を通して行っている。高澤、多田、小山³⁾は橋梁建造物を対

象として、耐用年数の期間に生ずる維持・補修に関する LCC の評価に関してシミュレーションモデルを作成し、維持管理計画に対する定性的な経済性比較を行っている。高澤、小山⁴⁾は建造物の劣化に関してフラクタル理論を援用し、総費用最小化原則に基づいた建造物の LCC の設定の最適化を行っている。Frangopol ら⁵⁾は、建造物の破壊損失費用を考慮した LCC 計算式を定義し、最適化問題を解くことで LCC の最適値を算出している。

本研究では、確率的手法に基づいて劣化をモデル化し供用限界の予測を行った。次に、LCC の算定手法について検討を行い、その算定手順を示すことを主な目的とした。また、塩分環境下にある鉄筋コンクリート建造物として栈橋を取り上げ、本研究における計算フローにしたがい、断面修復工法に対する LCC の試算を行った。今回は設計が既に終了した新設建造物を対象とした。維持管理対策として補修のみを考慮し、補強については考えないものとしている。

$$C(X_i^*, t) = C_0 \left[1.0 - \operatorname{erf} \left(\frac{X_i^*}{\sqrt{2D_c^* t}} \right) \right] \quad (1)$$

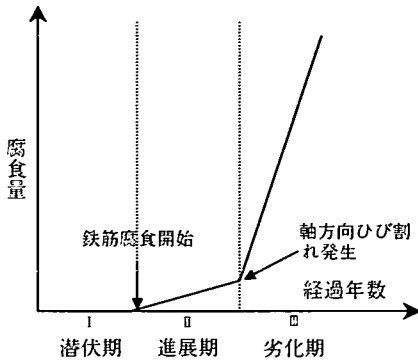


図-1 腐食解析のモデル

ここで、 t :経過時間[sec], X_i^* :鉄筋のかぶり[cm],
 C_0 :表面塩化物イオン量[kg/cm³], D_c^* :拡散係数
[cm²/sec]

鉄筋のかぶり X_i^* と拡散係数 D_c^* は、ばらつきを有する値であり、表面塩化物イオン量 C_0 は特性値として与えた。*印はその変数が確率変量であることを意味している。

鉄筋の腐食開始時期は、鉄筋近傍の塩化物イオン $C(X_i^*, t)$ が限界塩化物イオン量 C_{cri}^* に到達した時点と仮定した。すなわち、腐食開始の時間 t_{cs}^* は、式(2)で求められる。

$$t_{cs}^* = t \quad \text{when } C(X_i^*, t) = C_{cr}^* \quad (2)$$

従って、腐食開始時期は分布を持って表れる。

b) 進展期

進展期を決定する主要因は鉄筋の腐食速度とコンクリートに軸方向ひび割れが発生するときの腐食量である。進展期における腐食量は次式によって表わすことができる。

$$\Delta_{s1}^*(t) = \Theta_{s1}^*(t - t_{cs}^*) \quad (3)$$

ここで、 Θ_{s1}^* :ひび割れ発生前の腐食速度、 t_{cs}^* :腐食開始時期、 $\Delta_{s1}^*(t)$:ひび割れ発生前の時間 t における腐食量

式(3)より求められた $\Delta_{s1}^*(t)$ がひび割れ発生時の腐食量 Δ_{cr}^* に到達した時点をはびび割れ時期 t_{cr}^* とする。

c) 劣化期

ひび割れ発生以後、計算に用いるパラメータはひび割れ発生後の腐食速度のみに依存するものと仮定する。この場合、ひび割れ発生以後の腐食量は次式によって表わされる。

$$\Delta_{s2}^*(t) = \Theta_{s2}^*(t - t_{cr}^*) \quad (4)$$

ここで、 Θ_{s2}^* :ひび割れ発生後の腐食速度、 t_{cr}^* :ひび割れ発生時期、 Δ_{s2}^* :ひび割れ発生後に生成した腐食量

なお、ひび割れ発生前後における鉄筋の腐食速度および算出された腐食量の分布は、劣化しやすいものはさらに劣化しやすいと言う実現象を考慮し、また、値が常に正領域に存在することを考慮して、対数正規分布に従うものと仮定した。本文における塩害劣化過程モデルの概念を図-2に示した。

2. 確率論的手法に基づいた塩害劣化の予測

(1) 塩害劣化過程のモデル化

構造物の LCC を計算するには、構造物のライフサイクルのシナリオを作成する必要がある。このためには、劣化を予測し補修の時期を設定することが求められる。

塩分環境下にある鉄筋コンクリート構造物の主な劣化現象は塩害である。塩害による劣化過程としては、塩害の進行過程を4段階に区分して考えるモデルが提示されている⁶⁾。すなわち、構造物の供用開始からコンクリート中の鉄筋の腐食開始までの期間を指す潜伏期、鉄筋の腐食開始からコンクリート表面にひび割れが発生するまでの期間を指す進展期、部材に軸方向ひび割れが発生しじん性が低下するまでの期間を指す加速期、そして耐荷力の低下による劣化期である。本文では、図-1のようにひび割れ発生前後において腐食速度を変化させることとし、進展期の後に劣化期が現れる比較的簡単な腐食解析モデルを設定した。これは軸方向ひび割れ発生により鉄筋の腐食が促進され、構造部材の性能に影響を与えると想定したためである。

ところで、実環境にある構造物では環境条件、コンクリートの品質、施工誤差等に起因して、劣化現象のばらつきの大きいことが挙げられる。そこで本研究では、実構造物の不確実性に対して確率論的手法を用いることを試みた。

a) 潜伏期

コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透現象は Fick の拡散方程式により求められるものとする。

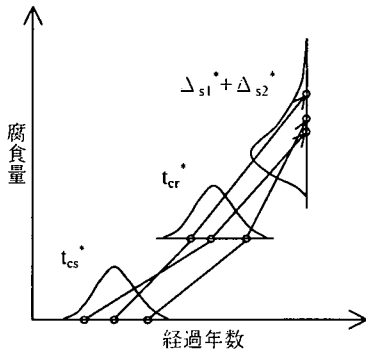


図-2 ばらつきを考慮した塩害劣化モデルの概念図

(2) 補修を考慮した劣化過程

a) 補修の有無の判断指標

現在、構造物の維持管理の現場では、外観目視を主な点検手法として採用し、必要に応じて自然電位測定法等の詳細点検を実施している。外観目視点検を主体とする場合、補修の有無はひび割れ幅などによって判断されることが多い⁷⁾。従って、本研究においても、かぶり表面のひび割れ幅によって補修の有無を判断するものとする。

b) 補修基準値の定義

既往の研究によれば、鉄筋の腐食量とかぶり表面のひび割れ幅には相関関係があることが知られている⁸⁾。この関係に従えば、補修を必要とする「許容ひび割れ幅」に対応した鉄筋の腐食量を算出することができる。これより、腐食していると判断されたデータのうち、許容ひび割れ幅に到達している確率 P_{cr} (以降、許容ひび割れ幅到達確率と称する) は、許容ひび割れ幅に対応した腐食量を閾値として、腐食量分布がこの値を超える確率として定義することとする。すなわち、

$$P_{cr} = \int_{\Delta_{cr}}^{\infty} f_R(\Delta_r) d\Delta_r \quad (5)$$

ここで、 Δ_{cr} : 許容ひび割れ幅に対応した鉄筋の腐食量、 $f_R(\Delta_r)$: 鉄筋の腐食量の分布

図-3 は解析結果の内訳を示したものである。分布として現れるデータは、「腐食発生」部分のみであり、「腐食発生」のデータは「許容ひび割れ幅に到達 P_{cr} 」と「許容ひび割れ幅に未到達 P_{ncr} 」に区分される。この場合、補修と判断されるためには、「腐食発生」かつ「許容ひび割れに到達」となる必要がある。従って、補修が必要と判断される確率 P_{rep} は次式によって表わされる。

$$\begin{aligned} P_{rep} &= (1 - P_0) \cdot P_{cr} \\ &= (1 - P_0) \cdot \int_{\Delta_{cr}}^{\infty} f_R(\Delta_r) d\Delta_r \end{aligned} \quad (6)$$

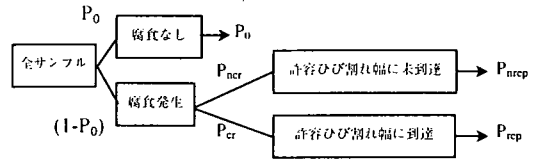


図-3 補修の有無の判断

ここで、 P_0 : 解析結果のうち腐食量が0となる割合、

P_{cr} : 許容ひび割れ幅到達確率

補修が必要と判断される確率 P_{rep} は、対象とする部材もしくは構造物の表面積全体に対する補修を必要とする表面積の比率という解釈も可能であり、 P_{rep} は「劣化顕在化率」とも表現しうる。

以上より、本研究では補修の判断指標を「許容ひび割れ幅」と「劣化顕在化率」によって定義することとする。ただし、この指標ではひび割れが生じている部位を具体的に示すことはできない。従って、補修を実行する際には所定の「劣化顕在化率」で全部位を補修するものとした。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化物を完全に除去することは困難であり、塩化物の含有量によっては構造物の再劣化も懸念される。しかしこれを正確に評価する評価する手法が見当たらない。このため、今回は補修の判断指標は供用中変化させず、補修後は鉄筋の断面積以外は完全に復旧すると仮定した。このために補修間隔は等しくなる。

c) 補修を考慮した劣化過程

以上の方法によって、供用年数内に補修を繰り返した場合、鉄筋の腐食量と補修の繰り返しの関係の概念図は図-4のように表される。図-4 (a) は鉄筋の断面減少量を腐食量に換算して時系列に追跡したものである。また、図-4 (b) はひび割れ幅に対応した腐食量を表現したものであり、補修後は腐食量が0に戻る。図-4 (a) および図-4 (b) に描かれている直線は鉄筋の腐食量の平均値を示している。さらに、前項に示した補修に関する設定により、各直線の勾配および補修間隔は等しくなる(すなわち $T_d - T_{d-1} = T_{d+1} - T_d$)。補修は図-4 (b) の確率密度関数の許容ひび割れ幅に対応する腐食量(図中の破線)を超えた部分の面積が劣化顕在化率に等しくなった時点で実行される。

3. ライフサイクルコストの計算手法

(1) ライフサイクルコスト計算のフロー^{9),10)}

ライフサイクルコストについて、図-6に示す計算フローを設定した。一連の流れは以下である。

LCC を計算するためには、対象および目的を明確にし、LCC 計算を行う際の基本条件を設定することが必要である。基本条件として以下の4項目を考慮するものとした。

- ①劣化予測に必要なパラメータ
- ②構造物の維持管理シナリオ

点検計画、維持管理の規準（補修の有無の判断指標等）、補修を必要とした場合の工法の選定等。

- ③維持管理を行う際の構造物の処置

維持管理を選択した場合の構造物の供用停止の有無等。

- ④LCC 計算期間

LCC 検討期間全体を通した補修計画を設定すると、必要な費用の単価を定め、費用の統合を行うことでLCC は求められる。しかし、一般的には時間的価値が存在するため、LCC を計算するためには「資本の利率」と「物価変動率」というパラメータによって、発生した費用を同一の時点に換算する計算が必要となる。最後に計算結果の評価を行う。

(2) ライフサイクルコスト計算式の定義

LCC 計算式は大きく次の3要素より成り立っているといえる。

$$LCC = C_I + C_M + C_R \quad (8)$$

ここで、LCC：ライフサイクルコスト、 C_I ：初期建設費用、 C_M ：維持管理費用、 C_R ：撤去・更新費用式(8)は全て顕在化が予測される費用であるが、一方では構造物の設計や維持管理計画が内包するリスクを考慮することができない。構造物のライフサイクルにおいて考慮される点は、より安全で経済的であるといった矛盾する要因の整合であると考えられる。本研究では信頼性設計法の1手法である期待費用最小の法則に着目し、立案した維持管理計画のリスクを内包できるLCC計算式を次のように定義した。

$$LCC = C_I + C_M + C_R + C_W + C_P \quad (9)$$

ここで、各コストの詳細は次の通りである。

・ C_I は初期建設費用であり、企画、基本設計、実施設計、建設費の合計である。

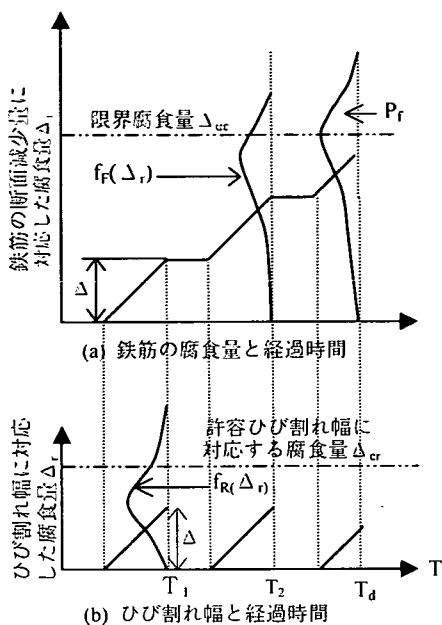


図-4 補修を考慮した劣化過程

(3) 限界腐食量と供用限界確率

構造物が劣化によって供用停止もしくは破壊に到る可能性は維持管理対策によっても相違するものと考えられる。本文では維持管理対策に対するリスクを「破壊確率」で表現した。破壊確率は、閾値（腐食減少率）を設定して腐食量の確率密度関数を積分することによって、次式で求められるとした。

$$P_f = (1 - P_0) \cdot P_{uc} \quad (7)$$

$$= (1 - P_0) \cdot \int_{\Delta_{uc}}^{\infty} f_r(\Delta_r) d\Delta_r$$

ここで、 Δ_{uc} ：限界腐食量、 P_{uc} ：限界腐食量到達確率、 P_f ：破壊確率、 $f_r(\Delta_r)$ ：鉄筋の断面減少量に対応した腐食量の分布

図-4(a)に破壊確率 P_f を示した。本図より、補修を行ったとしても鉄筋径は減少を続けるため、 P_f は供用年数と共に増加することとなる。

以上のモデルの具体的な解析のフローを図-5に示す。本解析は1年毎に求められる腐食量の分布から劣化顕在化率と破壊確率を求める計算が設定年数に到るまで繰り返される。劣化顕在化率が補修基準値に到った場合は補修を実行し、鉄筋径以外のデータは初期値に戻る。なお、計算手法はモンテカルロ法を用い、各年毎10,000個のデータを用いた。

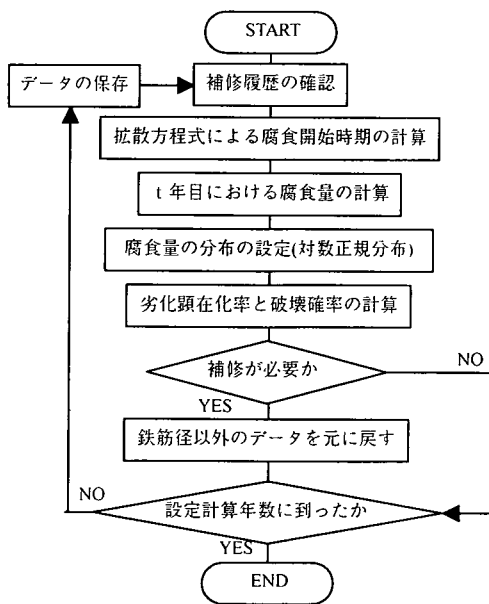


図-5 補修を考慮した塩害劣化予測プログラムのフロー

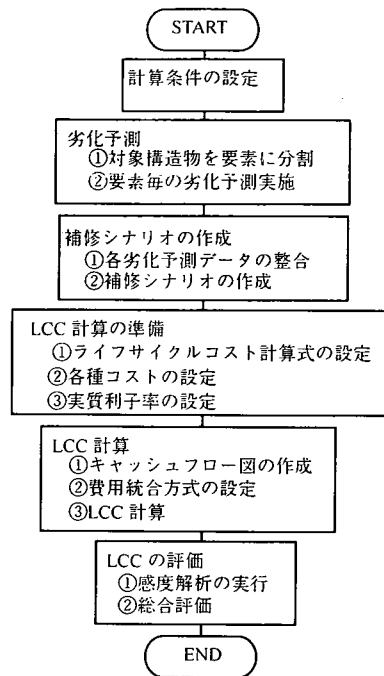


図-6 ライフサイクルコスト算出フロー

・ C_M は維持管理費用であり、次式のように表される。

$$C_M = C_{INS} + C_{REP} + C_{OP} \quad (10)$$

C_{INS} : 点検に関わる費用。

C_{REP} : 補修に関わる費用。具体的には断面修復費用等を指し、材工込みの費用。

C_{OP} : 機会損失費用。機会損失費用は、「行動の選択に対する代償」の応用。本文では、「維持管理を実行することにより期待される収入が失われること」を費用として見ることで定義。

・ C_W は産業廃棄物処分費用である。補修行為の結果として、コンクリートや鉄筋等の産業廃棄物が発生する。この処分費用は維持管理費用のうちの補修費用に含まれていることがあるが、将来的にリサイクル技術の開発によって、コンクリート等から収入が得られる可能性もある。このことを考慮して、今回は産業廃棄物処分費用は別要素とした。

・ C_F は破壊損失期待費用であり、次式により計算される。

$$C_F = C_f \cdot P_f \quad (11)$$

ここで、 C_f : 破壊によって生じる損失に相当する金額、

P_f : 供用期間中の構造物の破壊確率

破壊損失期待費用は破壊の可能性（破壊確率）から求められる期待金額である。従って、この費用はいわば“潜在的な費用”である。 C_f は単純に撤去・再建

費用のみを考慮すればよいわけではなく、施設あるいは構造物が使用できなくなったことによる社会的な損失、心理的損失（あるいは企業の信用失墜による損失）等を考慮する必要があるが、これらを見積ることは極めて難しい¹¹⁾。従って、期待費用最小の法則を扱った既往の研究^{5), 12)}から、なんらかの規準金額を定め、その整数倍として扱うこととした。また、供用期間に到達した段階での残存価値などを含めることも考えられるが、現状はこれを定量的に評価することが困難であるために今回は含めないこととしている。

(3) 構造物の撤去費用に関する考察

LCCの定義にしたがえば、供用終了時点において発生する構造物の撤去費用を含めなければならない。しかしながら、式(9)は供用終了時における撤去費用を考慮していない。この理由について以下に述べる。

供用終了時の撤去費用は、何らかの原因により構造物が供用する価値がないと判断された場合に発生する。構造物が寿命を終えたと判断するための基準として最も理解しやすいのは物理的寿命であるが、この場合は補修・補強により延命できることが多く、現実的には管理者の維持管理能力の問題となることが指摘されている²⁾。経済的寿命や機能的寿命も存在するが、構造物が撤去される理由のほとんどが

機能の陳腐化によるものであることも指摘されている²⁾。すなわち、構造物の待遇はその時点における社会的背景等に大きく依存しているといえる。従って、LCCに供用終了時の撤去費用を適切に含めるのは困難であると考えられる。本文においては、LCC計算期間内は構造物を供用し続けるべき最低年数であるとして計算を行った。供用終了時の撤去費用を含めたLCCは現時点で構造物の撤去時期が決まっている場合のみに考えることが可能であると思われる。

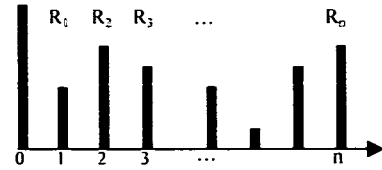


図-7 キャッシュフロー図

(4) 時間的価値を考慮したライフサイクルコスト

a) 顕在化費用の現在価値

構造物の維持管理シナリオと劣化予測結果による補修間隔の設定によって、式(9)に示されている C_I , C_M , C_W の費用発生時期が判明する。経済計算を行う場合、費用を時系列に沿って並べるキャッシュフロー図¹³⁾を図-7に示す。このように異なる時点に発生した費用を現時点(0年目)に換算するためには次式の現価係数を用いることとする。

$$[S \rightarrow P]_n^k = \frac{1}{(1+k)^n} \quad (12)$$

ここで、 S : n 年目に発生する費用、 P : 現時点における価値、 k : 実質利子率で次式

$$k = \frac{(1+i)}{(1+h)} - 1 \quad (13)$$

ここで、 i : 資本の利率、 h : 物価変動率

現在価値とは将来にわたって発生する費用を現時点において支払うと仮定した場合に必要な費用を意味している。

毎年同額の支出がある場合には、次の年金現価係数を用いることで、計算の簡略化が可能となる。

$$[M \rightarrow P]_n^k = \frac{(1+k)^n - 1}{k(1+k)^n} \quad (14)$$

ここで、 M : 毎期末均等払いの値に換算した平均値(年価)

なお、時間的価値は式(12)によって考慮されるため、キャッシュフロー図上の費用は現在における金額が描かれることになる。

式(12)によって、式(9)における顕在化費用の現在価値 $C1$ は次式のように表される。

$$C1 = C_I + (C_{INS} + C_{REP} + C_{OP}) + C_F \quad (15)$$

$$= C_I + \left(\sum_{t=0}^T \alpha_t c_{ins} + \sum_{t=0}^T \beta_t c_{rep} + \sum_{t=0}^T \gamma_t c_{op} \right) + C_F$$

ここで、 C_I : 初期建設費用、 C_{INS} : 点検費用の現価の総和、 C_{REP} : 補修費用の現価の総和、 C_{OP} : 機会損失費用の現価の総和、 c_{ins} : 点検の単価、 c_{rep} : 補修単価、 c_{op} : 機会損失費用の単価、 C_F : 破壊損失期待費用、 α_t , β_t , γ_t : 実質利子率による現価係数

b) 破壊損失期待費用の現在価値

本論文における劣化予測では、破壊確率を鉄筋の腐食量分布から求めている。補修を行うことにより、鉄筋径以外、断面は元の状態に戻るものと仮定している。さらに、補強を考慮していないため、計算期間内における破壊確率は非減少関数となると考えられる。そこで、計算の簡略化のために破壊確率の経年変化は2次関数に従うものと仮定した。

$$Y_f(X) = A \cdot X^2 \quad (16)$$

ここで、 X : 供用年数、 $Y_f(X)$: X [年]における破壊確率、 A : 供用期間中で最大の破壊確率となる1点を代入することから求められる係数

本文では、時間的価値を考慮した破壊損失期待費用は、各年度毎の破壊確率の増分に、式(11)により時間的価値を考慮した破壊損失費用を乗じることから求められるものとした。ところで、構造物が破壊する可能性は離散的に発生するものではなく、供用中、常に存在するものと考えられる。これを考慮するために、破壊損失期待費用のキャッシュフローを時間に関する連続関数として扱うことを考える。

破壊確率の経年変化が2次関数で与えられているため、破壊確率の増分 $y_f(X)$ は次式の1次関数として与えられる: すなわち、

$$y_f(X) = \frac{dY_f(X)}{dX} = 2AX \quad (17)$$

式(17)で与えられる微小時間における破壊確率の増分に時間換算を考慮しない破壊損失費用を乗じた

ものはそのまま連続関数として扱われるキャッシュフローになる。キャッシュフローを時間の連続関数として扱う場合は瞬間利率による時間換算式によって、現価に換算することとする¹³⁾。すなわち、

$$P_0 = P(t) \cdot e^{-jt} \quad (18)$$

ここで、 P_0 : 現在価値、 $P(t)$: 時間 t における発生費用、 e^{-jt} : 瞬間利率 j による時間 t における現価係数。

瞬間利率と資本の利率との関係は次式によって表される¹³⁾。

$$e^j = 1 + i \quad (19)$$

ここで、 j : 瞬間利率、 i : 資本の利率

$P(t)$ は式(16)より、次のように表される。

$$P(t) = Y_f(X) \times C_f \quad (20)$$

ここで、 C_f : 破壊損失費用

従って、時間 T までの現価の総和は次式によって表される。

$$\begin{aligned} C_F &= \int_0^T y_f(X) \times (c_f \times e^{-jx}) dx \\ &= \int_0^T (2Ac_f) \times (Xe^{-jx}) dx \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 C_F : 破壊損失期待費用。

4. ライフサイクルコストの試算

(1) 計算条件の設定

3章において示したライフサイクルコストの計算フローにいたがい試算を行う。計算対象とした構造物は図-8に示すような栈橋の1ブロック分である。上部工は床版と梁で構成されるRC構造物であり、下部工は鋼管パイルである。上部工は飛沫帯に位置し塩害により鉄筋が腐食する可能性のある環境である。今回はこの栈橋の上部工を断面修復工法によって50年間供用した場合のLCC計算を行なった。

劣化予測に必要なパラメータを表-1^{14), 15)}にまとめた。これらパラメータの値は東京湾内の湾岸の構造物の調査結果や既往の研究を参考にして設定をした。また、維持管理シナリオについては表-2に示した。

耐用年数の扱い方についてはさまざまな議論があるが、今回は鉄筋の断面減少率が10%に達した時点から耐用年数と設定した¹⁶⁾。

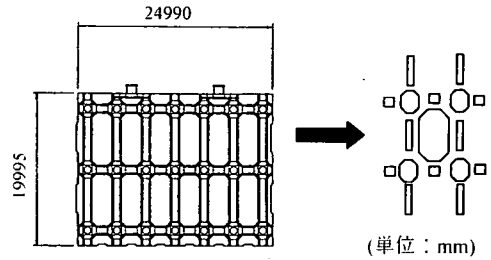


図-8 対象構造物の分割

表-1 解析条件

項目	数値	
表面塩化物イオン量	17.6[kg/m ³]	
設計かぶり	5[cm]	
かぶりの施工誤差*	平均値	0.35[cm]
	標準偏差	0.52[cm]
拡散係数	平均値	1.73×10 ⁻⁸ [cm ² /sec]
	標準偏差	1.59×10 ⁻⁸ [cm ² /sec]
限界塩化物イオン量	分布範囲	1.0~1.2[kg/m ³]
	分布形状	矩形分布
ひび割れ発生前の腐食速度	平均値	1.2[mg/cm ² /year]
	標準偏差	0.6[mg/cm ² /year]
ひび割れ発生後の腐食速度	分布形状	対数正規分布
	平均値	12.4[mg/cm ² /year]
標準偏差	標準偏差	6.2[mg/cm ² /year]
	分布形状	対数正規分布

表-2 維持管理シナリオ

点検計画	通常点検	1年間隔
	詳細点検	補修実施年のみ
補修の有無の判断指標		許容ひび割れ幅 0.4[mm]
		劣化顕在化率 50%
補修工法		断面修復工法
破壊確率の定義		鉄筋断面減少率 10%
維持管理を行う際の構造物の処遇		補修中の代替施設あり
LCC 検討期間		50年

(2) 劣化予測による補修間隔の設定

図-9は表-1の条件による劣化予測結果である。これより、補修は15年間隔と一定となる。劣化予測より得られる破壊確率の経年変化を図-10に示す。

(3) LCC計算のための準備作業

解析に用いたLCC計算式は次の式(22)である。今回は、構造物の補修における代替施設の利用が可能であったため、機会損失費用を考慮しないこととした。

$$\begin{aligned} LCC &= C_i + (C_{INS} + C_{REP}) + C_F \\ &= C_i + \left(\sum_{i=0}^T \alpha_i c_{ins} + \sum_{i=0}^T \beta_i c_{rep} \right) + C_F \end{aligned} \quad (22)$$

破壊損失期待費用 C_F は式(21)より求められる。

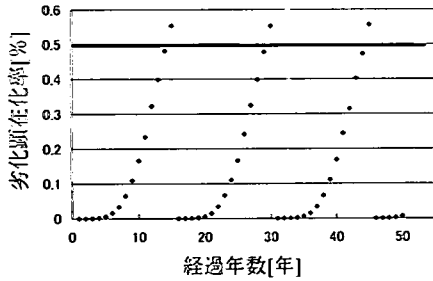


図-9 劣化予測結果

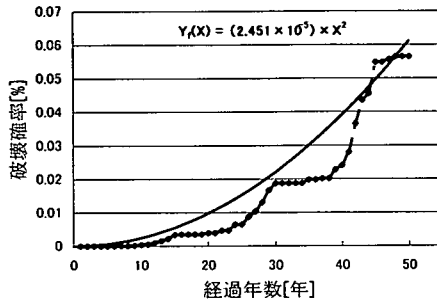


図-10 破壊確率の経年変化

式(22)より、LCC 計算に必要な費用項目は図-11 のように分類される。この分類に従って、実績に基づき表-3のように各費用を設定した。ここで、資本の利率は文献¹⁷⁾より4%と固定した。また、点検費用、維持管理費用、破壊損失費用の物価変動率は0%とした。従って、式(13)より実質利率は4%となる。

費用発生の時期に関しては、次の2つを考慮する。

- ①初期建設費用は建設時点(0年目)において一括して支出される。
- ②点検費用、補修費用等の維持管理費は、その年内に発生した費用が一括されてキャッシュフロー上に描かれる。

(4)LCC 計算

初期建設費用、点検費用、補修費用を時系列に沿って列挙すると、概念的に図-7のようなキャッシュフロー図となる。なお、キャッシュフロー図上には顕在化費用のみを描くことができるため¹³⁾、破壊損失期待費用は含んでいない。

まず、キャッシュフロー図上の費用を現価に換算し、統合する。すなわち、破壊損失期待費用の計算に際し、図-10に示すように、破壊確率の最大値は

①初期建設費用

②維持管理費用

- 点検費用
 - 目視点検費用
 - 詳細点検費用
- 補修費用
 - 断面修復費用
 - 足場代

③破壊損失費用——初期建設費用の整数倍として設定

図-11 費用の分類

表-3 LCC 計算パラメータ

費用の種類		費用
初期建設費用		8600[万円]
点検費用	補修を行わない年	22[万円]
	補修を実施する年	127[万円]
維持管理費用	断面修復工法	8000[万円]
破壊損失費用		初期建設費の10倍をベース
資本の利率		4%
物価変動率		0%をベース

$$C_I + (C_{INS} + C_{REP})$$

$$\begin{aligned}
 &= 8.6 + (0.127 + 0.022 \times [M \rightarrow P]_{30}^{4\%}) \\
 &+ ((8.127 - 0.022) \times [S \rightarrow P]_{15}^{4\%} + (8.127 - 0.022) \\
 &\times [S \rightarrow P]_{10}^{4\%} + (8.127 - 0.022) \times [S \rightarrow P]_{5}^{4\%}) \\
 &\approx 17.6 \quad (23)
 \end{aligned}$$

0.0565であり、最初に現れる48年目を破壊確率として採用した。これより、破壊確率の経年変化は式(16)より、次のように表される。

$$Y_f(X) = 2.45 \times 10^{-5} \times X^2 \quad (24)$$

破壊確率の増分は式(24)をXで微分することで得られる。

$$y_f(X) = 4.90 \times 10^{-5} \times X \quad (25)$$

供用年数T=50[年]、 $c_i=86$ [千円]であり、瞬間利率は式(19)より約3.9%となる。これらを式(21)に代入すると破壊損失期待費用 C_F は、

$$\begin{aligned}
 C_F &= \int_0^T y_f(X) \times (c_f \times e^{-iX}) dx \\
 &= 1.61 \quad (26)
 \end{aligned}$$

式(23)と式(26)の結果の和がLCCとなる。従って、19.2[千円]となる。

図-12はLCC比率図を示しており、LCCには初期建設費用そのものが重要となっている。これは松濤らの研究¹⁸⁾と同様の傾向を示している。

(5) 最適補修間隔の算定

第三者障害が起りにくい構造物で劣化進行によっても構造物の機能が保持できるならば、補修の時期を経済的な観点から遅らせることも可能である。そこで、本節ではLCC 最小となる許容ひび割れ幅と補修間隔を推定することとする。

劣化予測条件や経済パラメータ等の基本的な条件は(1)と同様とする。許容ひび割れ幅は0.1[mm]から1.0[mm]まで0.1[mm]毎に変化させ、それぞれのひび割れ幅について劣化顕在化率を10%から90%まで変えて、各許容ひび割れ幅におけるLCCを算出した。

a) 劣化顕在化率を50%に固定した場合

まず、劣化顕在化率を50%と固定し、許容ひび割れ幅を変数としてLCCの計算を行った。供用年数が50年、30年の場合の結果を図-13、14に示す。図中のプロット肩に示してある数字は補修間隔年数であり、各折れ線における最小値には丸印をつけた。なお、各折れ線において、許容ひび割れ幅に対応した補修間隔年数は等しい。本図によると破壊損失費用が大きくなると、許容ひび割れ幅が小さくなる傾向となる。これは破壊損失費用を構造物の重要度と同義とする場合、重要な構造物ほど劣化を許容できないことを反映しているものと思われる。供用年数30年でもほぼ同様の結果となった。

次に、供用年数30年および50年と破壊損失費用の大きさの関係を見ると、 $20C_1$ の場合と $2C_1$ の場合は供用年数を変化させても、LCC 最小となる許容ひび割れ幅に変化が見られないが、 $10C_1$ の場合は、供用年数を長くすると許容ひび割れ幅が大きくなる傾向が見られる。これより、破壊損失費用がある範囲を超え大きくなると、LCC 最小となる許容ひび割れ幅は変化しなくなるのではないかと推察される。

b) LCC が最小となる許容ひび割れ幅と劣化顕在化率の組み合わせ

図-15および図-16は、劣化顕在化率を変化させた場合における許容ひび割れ幅ごとの最小のLCCをまとめたものである。なお、供用期間として設計上で30年及び50年と設定した場合を取り上げ、破壊損失費用は $C_f=10C_1$ とした。計算では、所定の許容ひび割れ幅ごとに劣化顕在化率と補修間隔を変化させた時のLCCの最小値を求めた。これより、供用年数50年の場合、LCC が最小となるものは許容ひび割れ幅0.3[mm]、補修間隔19年(劣化顕在化率80%)であり、供用年数30年の場合、許容ひび割れ幅0.2[mm]、補修間隔17年(劣化顕在化率80%)という結果となった。供用年数を設定すると、その年数内で補修回

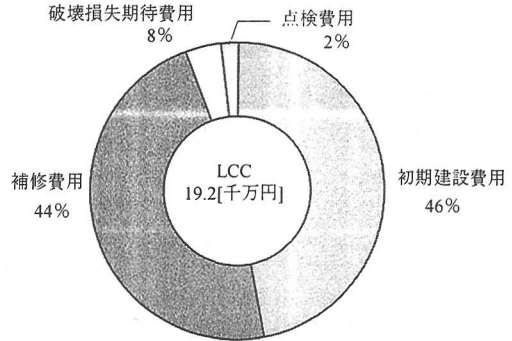


図-12 LCC 比率図

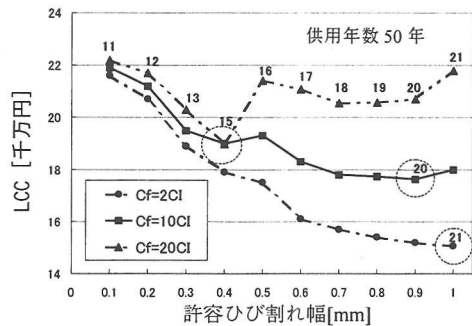


図-13 許容ひび割れ幅と LCC (供用年数 50 年, 劣化顕在化率 50%)

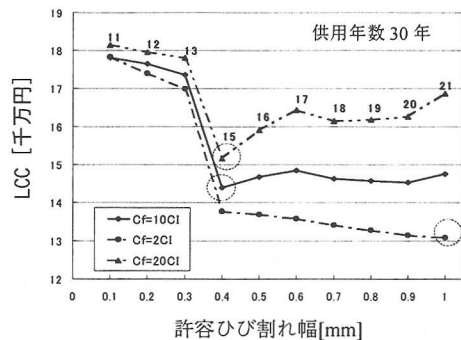
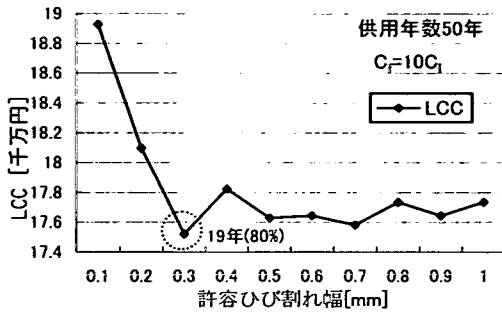


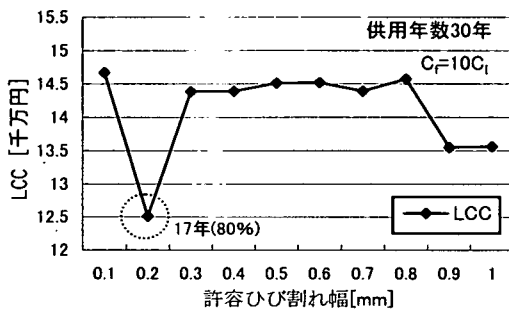
図-14 許容ひび割れ幅と LCC (供用年数 30 年, 劣化顕在化率 50%)

数が LCC 計算結果に影響を与えているものと考えられている。

本文における計算手法および計算パラメータを用いた場合に、供用期間内で LCC が最小となる補修間隔を算出することができた。これは、LCC のコスト要素として破壊損失期待費用を導入した結果であると考えられる。



図一15 LCC 最小となる許容ひび割れ幅と補修間隔(供用年数 50 年)



図一16 LCC 最小となる許容ひび割れ幅と補修間隔(供用年数 30 年)

5. 結論

本研究では、ライフサイクルコストの計算フローを提示し、それに従って、塩分環境下にある RC 部材の LCC 試算を行った。今回は事例として、棧橋上部工の断面修復工法に本手法を適用することを試みた。なお、劣化予測には、確率論的手法に基づいた劣化予測プログラムを構築した。

確率論的手法に基づいた塩害劣化予測に関しては、

- (1) 塩害に関する各種パラメータにばらつきを持たせシミュレーションした鉄筋腐食量がばらつきを持って現れることにより、「劣化顕在化率」および「破壊確率」を定義した。
- (2) 補修の効果として、鉄筋径以外の断面が元に戻るものと仮定すると、補修間隔は一定となる。

上記の結果を導入してライフサイクルコストに関しては、以下の結果が得られた。なお、ライフサイクルコスト計算式は以下の通りである。

$$\text{LCC} = \text{初期建設費} + \text{維持管理費} + \text{産業廃棄物処分費} + \text{破壊損失期待費}$$

維持管理費 = 点検費 + 補修費 + 機会損失費用

- (1) ライフサイクルコスト算定フローを構築し、これにより妥当性を検討した。本論文による計算フローによりライフサイクルコストを概算することが可能であると思われる。
- (2) 費用の時間的価値を考慮した破壊損失期待費用の計算方法を提案した。
- (3) 最適補修間隔の算定方法を示した。破壊損失期待費用を考慮した計算手法を用いた場合に、供用期間内において LCC が最小となる補修間隔を算出できる可能性を示した。

ライフサイクルコストの算定において、多くの項目が関連し現状では明確ではないことも多い。たとえば、耐用年数の設定、再劣化と補修の評価、割引率の設定などが挙げられる。今後、これらをより明確とすることにより、より精度を高めた LCC の算定が可能となる。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金(種目 基礎研究(C)一般)によって実施されたものであることを附記する。

謝辞 本研究の遂行に当たり、浜田秀則氏(運輸省港湾技術研究所)などには種々御助言をいただきました。また、本文の作成に当たり酒井通孝君(早稲田大学大学院2年)には、煩雑な作業にも関わらず多大な協力して頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 白山和久:建築におけるライフサイクルマネジメントとライフサイクルコスト(LCCシリーズ・その1)、ステンレス建築, No.11, 1998年6月。
- 2) 西川和廣:道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, 第501号/I-29, pp.1~10, 1994年10月。
- 3) 高澤和典, 多田栄一, 小山 健:維持管理を考慮に入れた橋梁のライフサイクルコストの評価について, 建設マネジメント研究論文集, Vol.3, pp.195~206, 1995。
- 4) 高澤和典, 小山 健:ライフサイクルコストを考慮した構造物の経済性評価について, 建設マネジメント研究論文集, Vol.4, pp.91~98, 1996。
- 5) Frangopol, D.M., Lin, K.Y. and Estes, A.C.: LIFE-CYCLE COST DESIGN OF DETERIORATING STRUCTURES, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, pp.1390~1401, OCTOBER, 1997。
- 6) 大即信明, 櫻野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章:

- コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(Ⅰ), 技報堂出版株式会社, 1986. 5. 20.
- 7) 堤 知明, 中川貴之, 松島 学, 大賀宏行: 鉄筋コンクリート構造物の補修実施の判定基準に関する研究, 土木学会論文集, 第 599 号/V-40, pp. 41~48, 1998. 8.
 - 8) 例えば 堤 知明, 安田 登, 松島 学, 大賀宏行: 腐食生成物によるひび割れ幅のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, 第 599 号/V-38, pp. 69~77. 1998. 2.
 - 9) 建設大臣官房技術調査室監修(財)国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会: 保全・耐久性向上技術の経済性評価手法(建築物の耐久性向上シリーズ建築経済編), 技報堂出版, 1986. 7.
 - 10) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集, pp. 95~123, 1988. 4.
 - 11) 星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版, pp. 153~156. 1986. 5. 30.
 - 12) 松島 学, 関 博, 松井邦人: RC 栈橋施設の最適検査間隔, 土木学会論文集, 第 451 号/V-17, pp. 197~201, 1992. 8.
 - 13) 千住鎮雄, 伏見多美雄: 新版 経済性工学の基礎, 日本能率協会マネジメントセンター, pp. 84~87, 1982. 4. 25.
 - 14) 堤 知明, 白井伸一, 安田 登, 松島 学: 塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価, 土木学会論文集, 第 544 号/V-32, pp. 33~41, 1996. 8.
 - 15) Matsushima, M., Tsutsumi, T., Seki, H. and Matsui, K.: A Study of the application of reliability theory to the design of concrete cover, Magazine of concrete Research, No.1, pp.5~16, March, 1998.
 - 16) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998. 10
 - 17) 港湾投資の社会経済効果に関する調査委員会編: 港湾投資の評価に関するガイドライン, pp. 21~37, 1999. 4.
 - 18) 松淵 知, 横田 弘: 港湾構造物の供用期間とライフサイクルコストの検討, 土木学会第 53 回年次学術講演会VI, pp. 584~585, 1989. 9.

(2000.8.16 受付)

CALCULATION METHOD OF LIFE CYCLE COST TO REINFORCED CONCRETE STRUCTURES DETERIORATED WITH SALT ATTACK

Takamitsu IBA, Manabu MATSUSHIMA,
Hiroshi SEKI and Hideo KAWADA

Cost of concrete structures has to include maintenance cost in addition to initial construction cost from the standpoint of economical usage. The paper deals with life cycle cost of RC piers constructed under sea environments and tries to evaluate life cycle cost (CLI). The functionality of structures decreases according as time elapses because of salt attack. It is, therefore, necessary to estimate deterioration of structures, to which the paper applies the probability approach and constructs the program in consideration of uncertainty. Law of expected minimum cost is applied to calculate life cycle cost and the calculation flow of CLI is proposed. The calculation technique is, then, shown to the existing pier according as the calculation flow. Finally, the adequate interval of maintenance is indicated.