

論文 海洋環境におけるRC構造物のLCC算定による補修工法および補修時期選定システムの開発

高橋 稔明*1・酒井 通孝*2・関 博*3・松島 学*4

要旨：近年 RC 構造物における所要性能の保持や供用年数の延伸に対する要請に伴い維持管理の必要性や重要性が認識され始めている。このような状況下で、維持管理コストの低減が強く求められ LCC が注目されているが、算定方法、評価手法などに関しては確立していない。そこで、本研究では塩害を受ける RC 構造物を取りあげ LCC 算定システムの開発により維持管理案を効率的に選定しコスト管理を行う方法を検討することを試みた。

キーワード：ライフサイクルコスト, 期待費用最小の法則, 塩害, 最適補修時期・補修工法

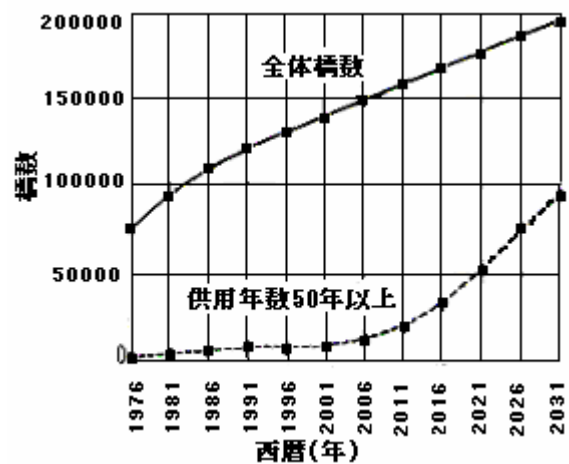
1. はじめに

RC 構造物はメンテナンスフリーと考えられてきたが近年、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などによる劣化が報告されている。また、図—1¹⁾に示すように 2030 年には供用年数 50 年以上の橋数が全体の 50%以上になると予測される。このような状況下で、RC 構造物の生涯費用（供用期間中にかかる総費用）に含まれる維持管理費用は増大し、維持管理にかかるコストの削減が要求されるようになってきた。

現在、維持管理における合理的な算定の手法としてライフサイクルコスト（以下 LCC と記す）の考え方が注目されている²⁾。しかし、現段階では正確な劣化予測をすることに困難が伴いかつ LCC 算定および評価には専門的な知識が必要なため、現場での普及は遅れている。

そこで、利用者が劣化予測に必要なデータと各費用を入力することによって、対象構造物の LCC 算定および評価を迅速に算定し、効率的にコスト管理を行うシステムの開発を試みた。

本システムでは、塩害を受ける環境下にある RC 構造物について確率的手法に基づき劣化をモデル化することにより劣化予測を行い、それ



図—1 供用年数50年以上の橋数の将来予測

を基に LCC 算定および評価を行った。補修工法として、断面修復工法、表面塗装工法、断面修復および表面塗装併用工法、建替え、電気防食工法の 5 工法を考えた。

また、補修後の再劣化を考慮するため再劣化係数を設定した。ただし、本システムでは断面修復時の断面の増厚、高品質材料の使用による強度増加などは考慮していない。また、維持管理対策としては補修のみとし、最終処分コストは現状では算定が困難なため今回は考慮していない。

*1 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学専攻（正会員）

*2 東海旅客鉄道（株）工修（正会員）

*3 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 工博（正会員）

*4 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博（正会員）

2. システムの概要

本システムは図-2 に示すように、データの入力（入力画面）、計算の実施（内部計算）、データの出力（出力画面）より構成される。これらは劣化予測パラメータおよび各費用の入力フェーズ、劣化予測フェーズ、LCC 算定および評価フェーズ、結果出力フェーズの4つにより構成されている。

2.1 劣化予測パラメータおよび各費用入力フェーズ

劣化予測パラメータおよび各費用の入力フェーズでは、ダイアログを使った入力方式を用いた。入力項目は劣化予測を行うためのパラメータとして11項目、各補修工法に関する入力項目として11項目、点検費用、足場代として3項目、時間的価値換算を行うための2項目、計27項目について入力し、次フェーズで劣化予測、LCCの算定および評価を行う。

2.2 劣化予測フェーズ

劣化予測フェーズでは、図-3 に示すフローに沿って劣化予測を行った。

本システムでは、コンクリート表面から塩化物イオンが Fick の拡散則に従い浸透するものとし、式(1)により表わした。

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

ここで、 t ：経過時間[sec]、 x_c ：鉄筋のかぶり[cm]、 C_0 ：表面塩化物イオン量[kg/cm³]、

D_c ：コンクリートの拡散係数[cm²/sec]

また、コンクリートの拡散係数 D_c については次式により水セメント比を用いて表わした³⁾。

$$D_c = 10^{4.5 \times (w/c)^2 + 0.14 \times (w/c) - 8.47} \quad (2)$$

ここで、 D_c ：コンクリートの拡散係数[cm²/sec]、 W/C ：水セメント比

塩化物イオンが浸透し鉄筋表面での塩化物イオン量が限界値に達すると鉄筋腐食が開始し、その後鉄筋腐食によりコンクリート表面にひび割れが発生し拡大していくものとした。

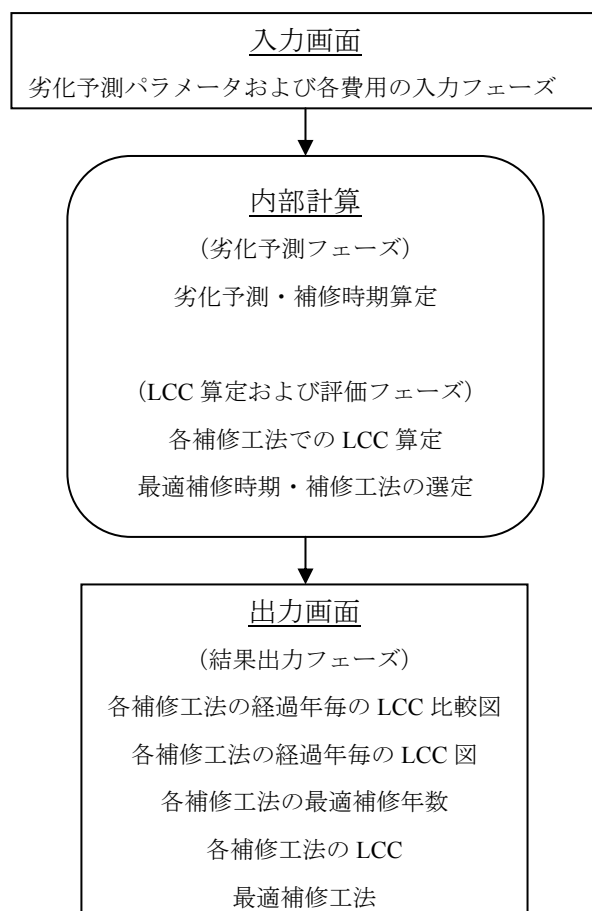


図-2 システム概要

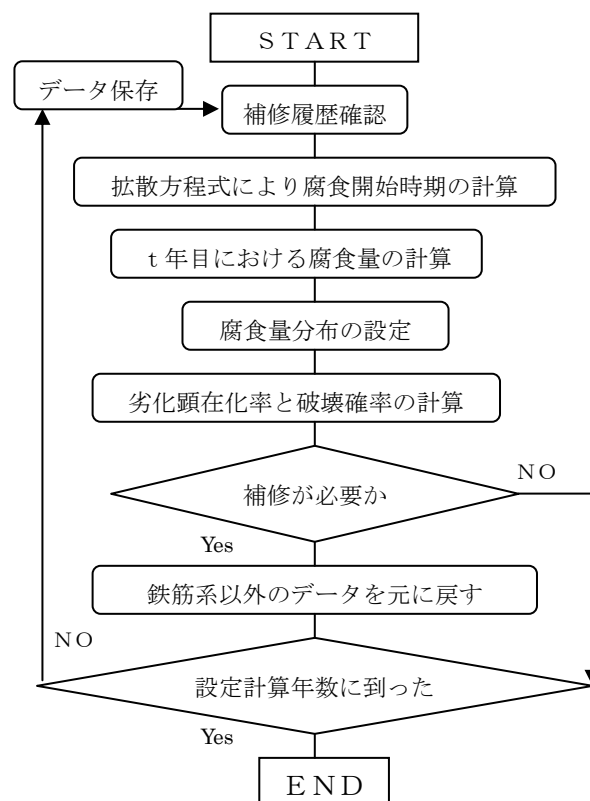


図-3 劣化予測フロー

補修開始の有無に関しては、許容ひび割れ幅と補修許容割合（許容ひび割れ幅に到達する確率）を指標とし、構造物の供用限界については鉄筋断面減少率と破壊割合（鉄筋断面減少率が設定された値に到達する確率）を指標とし、モンテカルロ法を用いて確率的観点から劣化を評価するものとした。

2.3 LCC 算定および評価フェーズ

LCC 算定および評価フェーズでは図-4 に示すフローにしたがい LCC の算定および評価を行う。本システムでは LCC 算定の基本概念として式(3)を用いた。

$$LCC = C_I + C_M + C_F \quad (3)$$

ここで、 C_I ：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、 C_M ：維持管理費用、 C_F ：破壊損失期待費用
また、 C_M は式(4)のように表わされる。

$$C_M = C_{INS} + C_{REP} + C_{OPP} \quad (4)$$

ここで C_{INS} ：点検に関わる費用、 C_{REP} ：補修費用、 C_{OPP} ：機会損失費用

本研究では、機会損失費用 C_{OPP} は「維持管理を実行することにより期待される収入の損失」を費用として表わしたものと定義し、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とした。

その上で、LCC 算定にあたり次に示す4つの概念を用いた。これらを用いて LCC 算定の最適化を行った。

(1) リスクの考慮⁴⁾

本システムでは、式(5)を用いて、補修時期を遅らせたことにより増大する破壊確率と構造物が破壊することにより生じる損失費用を基にリスクを定量的に評価した。

$$C_F = C_{RISK} = C_f \cdot P_f \quad (5)$$

ここで C_{RISK} ：リスクを定量的に評価した値（リスクコスト）、 C_f ：破壊によって生じるであろう最大損失費用、 P_f ：破壊確率

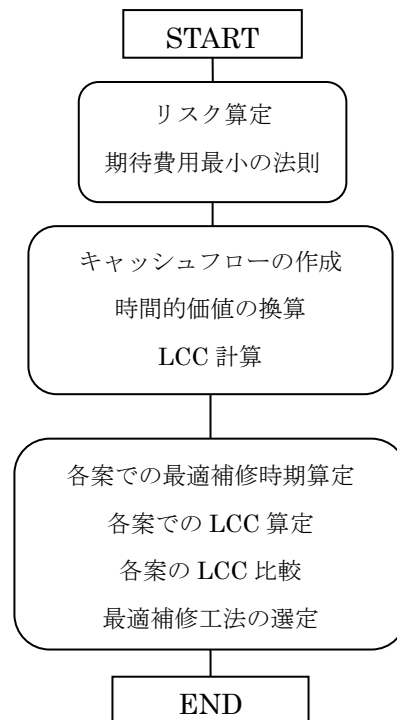


図-4 LCC 算定および評価フロー

(2) 時間的価値換算⁵⁾

本システムでは、補修を行う際の時間的差異によって生じる時間的価値の差を、経済性工学における現在価値法を用い、次式により換算した。

$$[S \rightarrow P]_n^k = \frac{1}{(1+k)^n} \quad (6)$$

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 : 実質利率

k は次式で表される。

$$k = \frac{(1+i)}{(1+h)} - 1 \quad (7)$$

ここで、 i : 資本の利率、 h : 物価上昇率
資本の利率および物価上昇率に関しては供用年数内で変化するものと考えられるが、現段階ではこの変化を設定する定量的方法はなく、本システムでは固定値を用いることとした。

(3) 期待費用最小の法則

本システムでは期待費用最小の法則を用いて補修期間および LCC の最小化(最適化)を行った。この最小化(最適化)システムは式(8)のように表される。

$$[C_M + C_{RISK}]_{\min} = \min \left[\sum_{\alpha_1}^A (C_M + C_{RISK}) \frac{1}{(1+k)^t} \right] \quad (8)$$

ここで、 $[C_M + C_{RISK}]_{\min}$ ：維持管理費用とリスクコストの和の最適値、 $[\] : [\]$ 内の最小値を選択する、 k ：実質利子率、 t ：補修年であり、 $t = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, A$ とする。 α_1 は初回の補修年で α の添え数字は補修回数を表す。また、 A は最終補修年を示す。

図-5 は、 x 軸に補修回数を取り、 y 軸に式(8)を用いて費用をとる。補修回数が増加すると維持管理費用は増大するが、リスクコストは減少する。その半面で補修回数が減少すると維持管理費用は減少するがリスクコストは増大する。

本システムでは、各補修回数での総維持管理費用と(1)で述べたリスクの概念を適用し、構造物の破壊確率からリスクを算定し、リスクコストを加算したものの最小値を最適補修回数とした。

(4) 再劣化の考慮

構造物の点検から、補修箇所を全体のなかで特定することは繁雑である。

そのため本システムでは、補修を実行する際には全部位を補修するものとした。しかし、全部位の補修を行ったとしても、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。そのため、補修後構造物は新設とまったく同一の条件とならず、劣化は早く開始すると考えられる。そこで再劣化を考慮するために再劣化係数を設定した。補修間隔に対して次式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。

$$T_n = T_1 \times \alpha^{n-1} \quad (9)$$

ここで、 T_n ： n 回目の補修間隔、 T_1 ：1 回目の補修間隔、 α ：再劣化係数

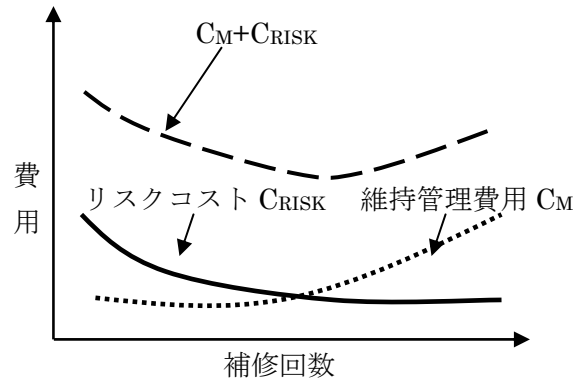


図-5 本システムの補修回数と費用の関係

(5) LCC 算定

(1)～(4)の4手法を用いて LCC の最適化を行った。現価に換算するときの LCC 計算に用いる基本式を式(10)に示す。

$$\begin{aligned} LCC_{t=0} &= C_I + C_{INS} + C_{REP} + C_{OPP} + C_{RISK} \\ &= C_I + \left[\sum_{t=a_1}^A C_{ins} \frac{1}{(1+k)^t} + \sum_{t=b_1}^B C_{rep} \frac{1}{(1+k)^t} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{t=b_1}^B C_{opp} \frac{1}{(1+k)^t} + \sum_{t=b_1}^B C_{risk} \frac{1}{(1+k)^t} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、 C_I ：初期建設費用、 C_{ins} ：点検費用の単価、 C_{rep} ：補修費用の単価、 C_{opp} ：機会損失費用の単価、 C_{risk} ：リスクコストの単価、 t ：年数 $a_1, \dots, A$ ：点検年、 $b_1, \dots, B$ ：補修年、 k ：実質利子率

2.4 出力フェーズ

出力フェーズでは、グラフとテキストを用いることにより入力したデータから求めた LCC および最適補修時期、最適補修工法の結果を表現した。ここで、グラフでは各補修工法の供用年数内の LCC 経年変化図および各補修工法の比較図が表示される。またテキストでは、各補修工法での最適補修年数および LCC、最適補修工法が表示される。

3. 選定補修工法および点検⁶⁾

本システムでは5つの工法についておのおの LCC 算定が行われる。その後に LCC 評価フェーズで各補修工法を比較し最も LCC が低いものを最適補修工法として評価した。

(1) 断面修復工法

補修年において全断面修復を行う。次回からの補修間隔は再劣化を考慮し再劣化係数を乗じたものとする。

(2) 断面修復および表面塗装併用工法

表面塗装による効果をかぶりに換算し⁷⁾、かぶりを基準としたかぶりに 2cm 加え断面修復を行うものとする。

(3) 表面塗装工法

表面塗装による効果をかぶりに換算して 2cm 増加するものとし、鉄筋断面減少率が破壊許容割合に達した時点で建替えをするものとする。

(4) 建替え

鉄筋断面減少率が破壊許容割合に達した時点で建替えを行うものとする。

(5) 電気防食工法

設定された取替え年により取替えを行う。次回からの補修間隔は再劣化を考慮し再劣化係数を乗じたものとする。

(6) 点検

通常点検と詳細点検を行うものとし、詳細点検は補修が行われるときに実施されるものとする。

4. 算定例

以上に説明したシステムを用いて最適補修時期および補修工法を実際選定する。今回選定対象とした構造物は栈橋の 1 ブロック分とした。上部工は床版と梁で構成され、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下の RC 構造物である。

劣化予測に必要なパラメータ値は既設のデータと即往の研究²⁾による値を参考にして設定した。LCC 算定に必要なパラメータを次のように設定した。

劣化予測パラメータとして供用年数 100 年、かぶり 5cm、水セメント比 65%、鉄筋径 19mm、表面塩化物イオン量 17.6kg/m³、許容ひび割れ幅 0.4mm、限界鉄筋断面減少率 10%、補修許容割合および破壊許容割合の LCC に対する感度解析の結果、補修許容割合は影響が小さく、破

壊許容割合は影響が大きいことがわかったが、今回はともに 10% とした。破壊損失倍率は 2 倍、再劣化係数 0.9 とした。

各補修工法の費用パラメータ（いずれも下記の値は $\times 10^2$ 万円）は、断面修復工法にかかる初期投資費用 86.0、補修費用 80.0、断面修復および表面塗装併用工法にかかる初期投資費用は建設時に表面塗装を行うものとして 99.52、補修費用 93.52、表面塗装工法にかかる初期投資費用は建設時に表面塗装を行うものとして 99.52、補修費用は建替えを行うものとして初期投資費用の 2 倍、建替えにかかる初期投資費用 86.0、建替え費用は初期投資費用の 2 倍、電気防食工法にかかる初期投資費用は、建設時に電気防食を設置するものとして 122.0、取替え費用として 36.0、取替え間隔は 20 年とした。

また、通常点検費 0.22、詳細点検費用 1.27 とし、各補修工法での足場代は補修費用に含めたので入力画面での足場代は 0 とした。

資本の利率は、公共事業で一般的に用いられている社会資本利率 4% をベースとし、物価上昇率については日本銀行の統計を参考に 0% と設定した。

また今回は、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。

図－6 入力画面

以上のパラメータを入力し算定された結果は図

－ 7 (a)、図－ 7 (b) のように表示される。出力データより供用期間 100 年とした場合、今回の仮定では電気防食工法が最適補修工法であり最適な補修時期（取替え時期）は 20 年、38 年、54.2 年、68.8 年、81.9 年、93.7 年となることがわかる。

5. まとめ

本システムの開発では塩害を受ける RC 構造物に関して維持管理案を迅速かつ効率的に選定しコスト管理することを試みた。

本システムを用いた試算結果により各補修工法での LCC 算定ができた。またそれにより、最適補修時期、最適補修工法を選定することができた。

本システムでは LCC の評価に関してコストのみの視点から行っている。しかし、各入力パラメータにより LCC 算定の結果が大きく変わってくることから感度解析を評価に加えることにより、状況に応じた最適な補修工法および補修時期を算定できるようにするのが今後の課題である。

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。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集 No. 501/I-29, pp. 1～10, 1994. 10
- 2) 伊庭孝充, 松島学, 関博, 川田秀夫：塩害を受ける RC 構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、土木学会論文集 704 巻，V-55 号 pp. 1-11, 2002. 5
- 3) 須田久美子, 村山八洲雄, 溝淵利明, 永田茂, 増川淳二：コンクリート構造物の劣化ポテンシャル評価手法に関する研究，複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム pp. 131-137, 2001. 5
- 4) 南方哲也：リスクマネジメントの基礎理論，晃洋書店，p. 20, 1993



図－ 7 (a) 各補修工法の LCC 比較図表示画面



図－ 7 (b) 各補修工法の最適補修年数、LCC、および最適補修工法表示画面

- 5) 千住鎮雄, 伏見多美雄：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. 75～100, 1982. 4
- 6) コンクリート標準示方書[維持管理編]，(社)土木学会，pp.1～52, 97～112, 2001.1
- 7) 入田一，大城武，武田晋治：アクリル系防水材料のコンクリート相当かぶりの厚さに関する一考察，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.155～156, 1990.10.