

ライフサイクルコストを考慮した最適な補修工法の選択

A Study on Optimum repairing method based on Life Cycle Cost

松島 学*・横田 優**・関 博***

Manabu MATSUSHIMA・Masaru YOKOTA・Hiroshi SEKI

*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 (〒761-0192 高松市屋島西町2109)

***工博 早稲田大学理工学部教授 社会環境工学科 (〒109-8555 新宿区大久保3-4-1)

It has been noticed that the RC members have been deteriorated under the severe conditions and the performance of structure has decreased with elapsed time. Therefore, the maintenance works are greatly required for public structures. On the other hands, the maintenance cost gradually increases. This paper described the method to choose the adequate method of repairing the RC structures received the chloride-induced damage. For example, the adequate method of repairing is proposed which led the minimum cost during service life of structure.

Key Words: Life Cycle Cost, Chloride induced Damage, Repairing Method, Total Cost 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」¹⁾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²⁾。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。)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。

本研究では、LCC算定³⁾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

費用と初期建設費用を取上げ、現在価値に費用を直すことで総費用を比較し、最適な補修工法の選定する。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。

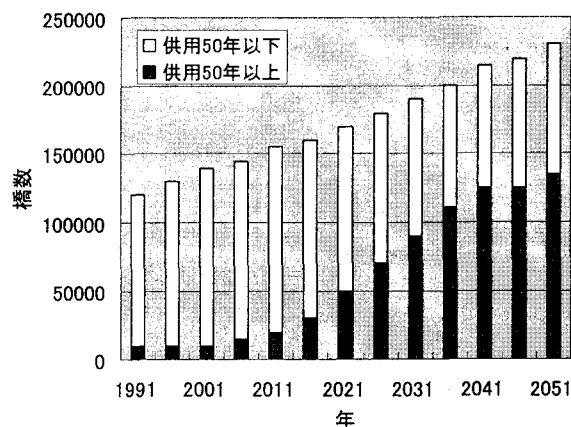


図-1 供用年数の推移²⁾

2. 補修工法のモデル

補修工法の代表的な対策工法として、「断面修復工法」、「断面修復工法と表面塗装併用工法」、「表面塗装工法」、「建替」と「電気防食工法」の5つの補修工法を選択した。以降に、各補修工法のモデルの詳しい説

明をする。

(1) 工法1：「断面修復工法」

かぶりの基準を 4.0cm とし、補修年となった場合全面補修を行なう。次回からの補修間隔は、前回の補修間隔に再劣化を考慮するための再劣化係数を乗じた値を用いる。したがって、再劣化係数による補修期間の低減は、次のように定義した。

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

ここで、 T_1 ：建設から1回目の補修までの期間（年）、 n ：補修回数、 α ：再劣化係数として定義した。再劣化係数は、既設の栈橋の劣化調査から設定した。図3は、初回までの補修期間 T_1 と初回から再度補修するまでの期間 t_2 の関係を示している。得られたデータは3ケースと少ないが、全ケースで T_1 より T_2 が短くなっている。この比率 T_1/T_2 を再劣化係数と考えると、0.8～0.9 程度の値であり、本研究では再劣化係数を $\alpha=0.9$ と設定した。

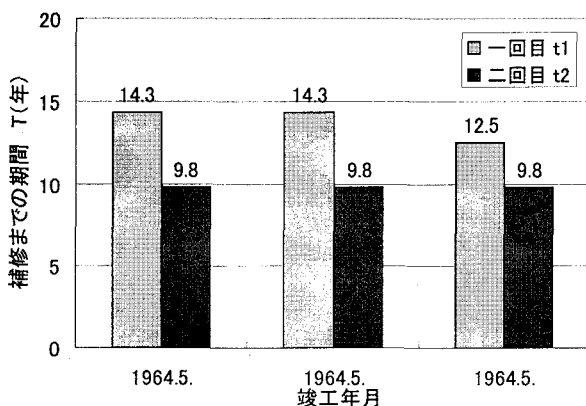


図2 再補修までの期間

(2) 工法2：「断面修復工法と表面塗装併用工法」

表面塗装の効果を等価なコンクリート厚さに換算し、かぶりを 4+2=6cm と仮定した。再劣化を考慮して断面修復を行なった。表面塗装を施した場合のコンクリートかぶりを 2cm 増加させたが、入田⁴⁾らによる表面塗装をコンクリートかぶりに換算した計算結果による。

(3) 工法3：「表面塗装工法」

表面塗装を等価なコンクリート厚さに換算してかぶり 6cm とし、鉄筋断面の減少により破壊許容断面に達した時、建替えを行なう。建替費用は、初期建設費の2倍とした。

(4) 工法4：「建替」

かぶりを 4cm とし、③と同様に鉄筋断面の減少により

破壊許容断面に達した時、建替えを行なう。建替え費用は、建設費の2倍とする。

(5) 工法5：「電気防食工法」

陽極材等の供用年数を 20 年とし、20 年ごとに取替えを行う。再劣化による性能低下を考慮するため、2回目以降の取替えは、供用年数に再劣化係数を乗じる。

3. 現在価値のモデル

LCC³⁾は、式(2)のような費用の足合せて計算されると定義した。

$$LCC = C_I + C_M + C_R + C_W \quad (2)$$

ここで、 C_I ：初期建設費であり、企画、基本設計、実施設計、建設費の合計である。 C_M ：維持管理費用であり、式(3)のように表されると定義した。

$$C_M = C_{NS} + C_{REP} + C_{OP} \quad (3)$$

ここで、 C_{NS} ：点検にかかわる費用、 C_{REP} ：補修費用、 C_{OP} ：機会損失費用である。 C_R ：撤去、更新費用である。 C_W ：産業廃棄物費用である。

本研究では、話を簡単にするために、維持管理費は、補修費用が支配的であると考え、 $C_M = C_{REP}$ とした。さらに、 C_R 、 C_W は補修工法の費用比較では同じと考えて、比較のための LCC を式(4)のように定義した。

$$LCC = C_I + C_M + C_R \quad (4)$$

式(4)で、建替えの時は $C_M=0$ とし、補修の時は $C_R=0$ となる。補修を行なう場合、異なる時点で発生するキャッシュ・フローは時間的な価値が異なる。例えば、現時点の 10 万円と 10 年後にもらえる 10 万円は価値が異なる。なぜなら、現時点の 10 万円は銀行により、10 年後は、10 万円と利子の合計になる。経済問題の計算では、異なる時点のキャッシュ・フローをある時点に換算して評価を行なうのが普通である。本研究では、価値の異なる時点に発生した費用を現時点（0 年：算定の基準年）に換算するために、式(5)の現在価値に直すための係数を定義する。

$$C_{t=0} = \frac{1}{(1+k)^n} C_{t=n} \quad (5)$$

ここで $C_{t=n}$ ：n 年目に発生する費用、 $C_{t=0}$ ：現時点での

価値、 k ：実質利子率で式(6)で表される。

$$k = \frac{1+i}{1+h} - 1 \quad (6)$$

ここで、 i ：資本の利子率、 h 物価上昇率である。

本研究では、次のように設定した。資本の金利は、既往の研究から 2～5%の値が妥当である。土木構造物の建設時における資金調達先である日本政策投資銀行からの貸出金利などを勘案し、4%と設定した。物価上昇率は、卸売物価指数や消費者物価指数等からある程度知ることができ、日本銀行の統計などから 2%とする。

各補修工法での費用のモデルを表-1 に示す。費用は、初期投資費用、補修費用、建替費用で表されると仮定した。これ以外に通常点検費用、詳細点検費用も耐用期間中には必要であるが、本研究では表記の費用から見て無視できると考えた。本構造物は、代替施設の利用が可能であるとして、機会損失費用は考えないものとする。①「断面修復工法」、②「断面修復工法と表面塗装併用工法」は、補修できると考え、補修費用を計上した。③「表面塗装工法」、④「建替」は、補修は出来なくなるまで使用し、建替えると考えた。建替え費用は、新設の 2 倍と計上した。⑤「電気防食工法」は、陽極材を取り替える費用を補修費用に計上した。

表-1 費用のモデル

修復工法	初期投資費用 (万円)	補修費用 (万円)	建替費用 (万円)	備考
①「断面修復工法」	8,600	8,000	-	補修
②「断面修復工法と表面塗装併用工法」	9,952	9,352	-	補修
③「表面塗装工法」	9,952	0	19,904	建替
④「建替」	8,600	0	172,00	建替
⑤「電気防食工法」	12,200	3,600	-	陽極材の取替

4. 塩害劣化の予測

劣化モデルは塩害劣化をモデル化し、進行過程を 3 つの区分に分けた。すなわち、構造物が供用開始からコンクリート中の鉄筋の腐食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、腐食膨張圧により部材にひび割れが発生し、じん性が低下するまでの期間を指す加速期に区分した。これらの詳しい方法については、既往の

研究⁹⁾に譲るとして、各補修工法での鉄筋の腐食量、経過時間、および補修時期の関係は次のようになる。

①「断面修復工法」、②「断面修復工法と表面塗装併用工法」では、補修を前提にしているので、補修ひび割れ幅が 0.4mm となった時を補修時期としている。表面塗装による潜伏期の寿命の延命は、4 年とする。③「表面塗装工法」、④「建替」では寿命が来たら建替えることになるので、補修ではなく寿命となるので、ひび割れ幅が 0.8mm となった時とした。したがって、①「断面修復工法」、②「断面修復工法と表面塗装併用工法」よりも加速期が 2 倍の延命が望めるものと考えた。表-2 に以上

表-2 各補修工法の劣化モデル

修復工法	潜伏期	進展期	加速期	備考
①「断面修復工法」	8 年	2 年	4 年	ひび割れ幅 0.4mm として計算。
②「断面修復工法と表面塗装併用工法」	12 年	2 年	4 年	表面塗装を等価 2cm 厚さのコンクリートとして適用。
③「表面塗装工法」	12 年	2 年	8 年	建替時のひび割れ幅を 0.8mm と考える。
④「建替」	8 年	2 年	8 年	建替時のひび割れ幅を 0.8mm と考える。
⑤「電気防食工法」			20 年	陽極材の耐用期間を 20 年とした。

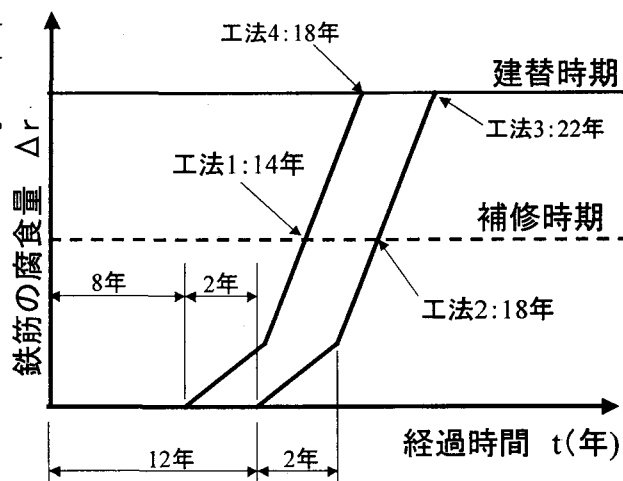


図-3 各補修工法と鉄筋の腐食量、経過時間

のことをまとめて示す。図-3 に各補修工法と鉄筋の腐食量、経過時間の関係を示す。図中には、各工法の補修あるいは建替時期の年数も示してある。

5. 補修工法の選択

耐用期間を 50 年として、今まで説明した方法と条件を用いて LCC を計算する。計算された各補修工法の費用と経過時間の関係を図4 に示す。費用は全て建設時の現在価値に直し表示している。

図中での工法は、

工法 1 : 「断面修復工法」

工法 2 : 「断面修復工法と表面塗装併用工法」

工法 3 : 「表面塗装工法」

工法 4 : 「建替」

工法 5 : 「電気防食工法」

を意味する。図に見られるように、工法 3 : 「表面塗装工法」が一番高価な結果になり、工法 5 : 「電気防食工法」が、LCC を考慮すると、一番安い補修工法が工法 5 「電気防食工法」となる。他の工法 1 : 「断面修復工法」、工法 2 : 「断面修復工法と表面塗装併用工法」、工法 4 : 「建替」はほぼ同じような費用となる。このように、塩害が厳しい条件では、工法 5 : 「電気防食工法」が初期投資が一番大きい、LCC を考慮すると一番経済的な補修工法となる。しかし、塩害の環境条件が緩やかであれば、最適解は違った補修工法になることが予想される。LCC を考慮した各補修工法での総費用の比較を図-5 に示す。

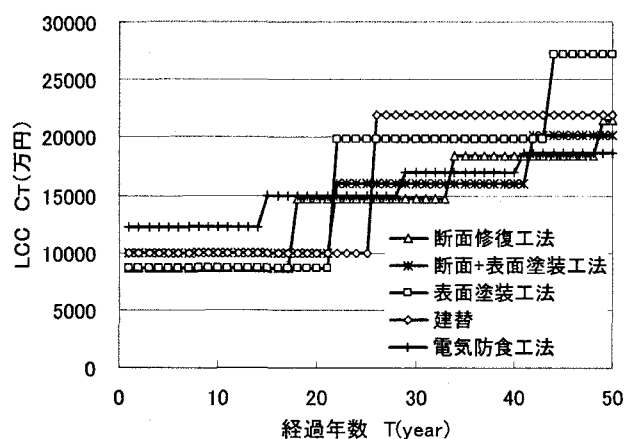


図4 各補修工法の費用と経過時間

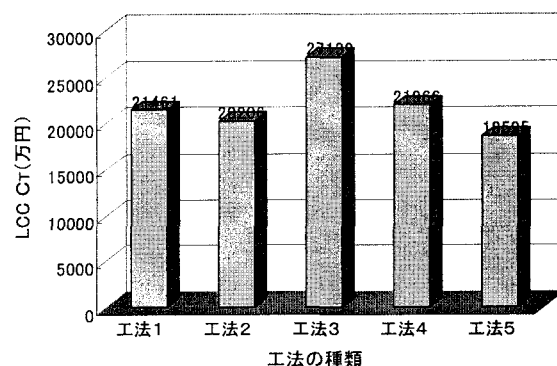


図-5 各補修工法での LCC の比較

6. まとめ

本研究では、塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物に対し、LCC の算定手法と評価方法を示した。本解析結果から次のようなことが明らかになった。

- (1) 劣化予測を定義し、LCC の計算方法を示した。劣化の算定に当たっては、再劣化の考え方を導入した。さらに、費用の時間的価値および経済的側面を考慮して、費用を現在価値に割り戻す方法を示した。
- (2) 耐用期間内の LCC の算定を行い、最適な補修工法を選択する例題を示した。その結果、LCC を考慮すると初期投資が最大である「電気防食工法」が最適解として選ばれた。

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、No.704/V-55、p.11~11、2002.5.
- 4) 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.
- 5) 松島 学、堤 知明、関 博、松井邦人：塩害環境下における RC 構造物の設計かぶり、土木学会論文、No.490/V-23、pp.41~49、1994 年 5 月.