

論文 塩害を受ける RC 構造物のライフサイクルコスト算定における感度解析

酒井通孝*1・伊庭孝充*2・松島 学*3・関 博*4

要旨：本研究では塩害環境下の構造物の最適なライフサイクルコストに関して、パラメータの感度分析を行うことでパラメータの影響を評価した。また、実構造物の不確実性を確率的手法を用いて検討し、リスクを定量的に評価し期待費用最小の法則をもちいることで最適なライフサイクルコストを評価した。これにより、割引率、かぶり、コンクリートの拡散係数がライフサイクルコストに及ぼす影響が大きいことがわかった。

キーワード：Life Cycle Cost, リスク, 期待費用最小の法則, 塩害, 感度解析

1. はじめに

コンクリートはメンテナンスフリーな材料と考えられてきたが、ここ数十年にコンクリート構造物の劣化が顕在化し、コンクリート構造物の劣化のメカニズムの解明や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「コンクリート標準示方書[維持管理編]」によると一般に「予防保全」と「事後保全」に大別される。どちらの保全方法を選択するのが最適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で、より経済的な案を選択することができると考えられている。また、計画段階でもシステムズアナリシス²⁾を行う際に、投資判断としてライフサイクルコストがひとつの指標となる。費用便益分析を行う必要があるが本研究では便益の部分は予測が困難であるので考慮していない。

ライフサイクルコスト(Life Cycle Cost: 以下、LCC と略する)とは、建設耐用設計の ISO 原案によれば、「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。

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い、それをもとに LCC の算定を行った。その上で、主なパラメータのについて感度解析を行い、LCC におけるパラメータの影響を定量的に比較した。また、構造物の破壊を確率(ハザード)を用いリスクとして定量的(本研究ではコストに換算)に扱った。本研究では、塩分環境下にある鉄筋コンクリート構造物として栈橋の床版を取り上げ、断面修復工法に対する LCC の試算を行った。今回は修復後のコンクリート中の塩分再拡散、修復時の断面の増厚や高品質材料の使用などは検討外とした。また、新設構造物を対象とし、維持管理対策としては補修のみを考慮し、補強については考えないものとした。

2. 確率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 を算定するには、構造物の劣化過程を予測し補修の時期を設定することが必要である。

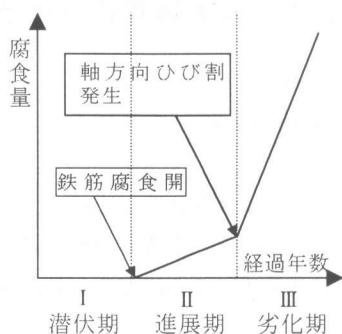
塩分環境下にある鉄筋コンクリート構造物の主な劣化現象は塩害である。塩害の劣化過程と

*1 早稲田大学大学院修士課程 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 大林組株式会社 工修

*3 香川大学教授 工学部安全システム工学科 工博 (正会員)

*4 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)



図—1 劣化モデル

して劣化過程を4段階に区分するモデルが提示されている。ここでは、塩害の劣化過程を潜伏期，進展期，劣化期，加速期に区分している。本研究では，図—1のような比較的簡単な線形腐食解析モデルを用いた。また，実構造物においては材料条件，施工条件，環境条件等により劣化現象に大きなばらつきが見られる。このため本研究ではそれらの不確実性を考慮するために確率論的手法を導入することを試みた。

1) 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。

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

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]

鉄筋のかぶり x_c^* とコンクリートの拡散係数 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 は一定値として与えた。*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量が限界塩化物イオン量 C_{cr}^* に達した時点と仮定した。

2) 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。

$$\Delta_{s1}^*(t) = \Theta_{s1}^* (t - t_{cs}^*) \quad (2)$$

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(2)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割れ時期 t_{cr}^* とする。

3) 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。

$$\Delta_{s2}^*(t) = \Theta_{s2}^* (t - t_{cr}^*) \quad (3)$$

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，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いう実現象を考慮して対数正規分布にしたがうものと仮定した。

(2) 補修を考慮した劣化過程

1) 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法等の詳細点検を行っている。外観目視点検を行う際，補修の有無はひび割れ幅によって判断されることが多い。従って，本研究では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した。

2) 補修基準の定義

既往の研究によると，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。この関係によると補修を必要とする「許容ひび割れ幅」に対応した鉄筋の腐食量を算定することができる。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(割合) P_{rep} は，許容ひび

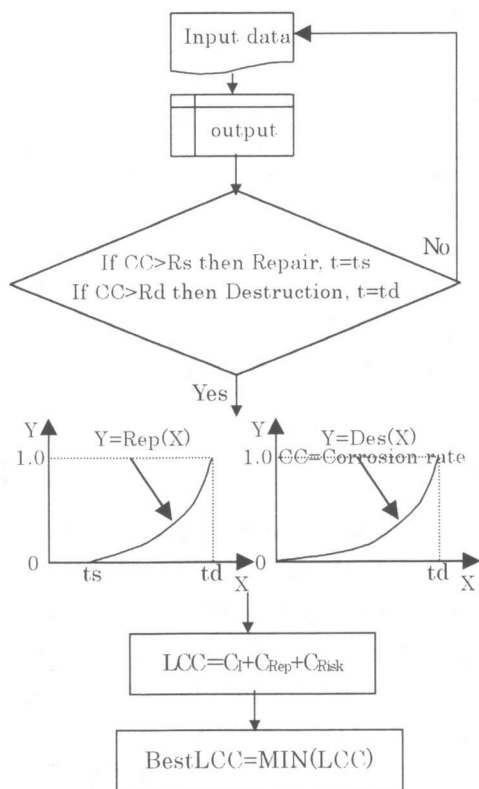


図-2 LCC 算定フロチャート

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した。すなわち、

$$P_{rep} = \int_{\Delta_{cr}}^{\infty} f_R(\Delta_R) d\Delta_R \quad (4)$$

ここで、 Δ_{cr} ：許容ひび割れ幅に対応した鉄筋の腐食量、 $f_R(\Delta_R)$ ：鉄筋腐食量の分布
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の比率と仮定し、 P_{rep} を「補修割合」とした。これは、補修を行う際の点検での劣化割合と同様のものになると考えた。また、本研究では供用ひび割れ幅を $0.4[\text{mm}]$ とし、供用ひび割れ幅に対応した腐食量を $0.392[\text{mg}/\text{mm}^2]$ とした。

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「補修割合」によって定義した。今回は補修の判断指標は供用中変化させず、補修後は完全に旧に復するものと仮定した。こ

れにより、許容年数内の補修間隔は等しくなる。

(3) 破壊の定義

構造部材の劣化が進むと破壊に至ることになる。本研究では破壊を考え、リスクマネジメントにより構造物の破壊の原因(例えば、鉄筋の断面欠損による応力集中等)を「ペリル」とし、その生起確率を「ハザード」とした。また、それによって発生する損失費用を「リスク」と定義した。塩害ではコンクリート中への塩分の浸透により鉄筋が腐食し断面欠損し、構造物が破壊に至ること(ペリル)で、損失費用(リスク)が生じるのである。このリスクを算定するために破壊確率(ハザード)が必要となる。ハザードの算定は、閾値(破壊時の腐食量)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求めることができる。

$$P_{des} = \int_{\Delta_{uc}}^{\infty} f_R(\Delta_R) d\Delta_R \quad (5)$$

ここで、 Δ_{uc} ：破壊時の腐食量、 P_{des} ：ハザード

1 年毎に求められる腐食量の分布から補修割合とハザードを求める計算が破壊時まで繰り返される。補修割合が補修基準に至った時点で補修し、すべてのデータを初期値に戻すことにする。なお、計算方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。

3. LCC の算定手法

(1) LCC 計算のフロー

ライフサイクルコストについては図-2 に示す計算フローをもとに計算した。一連の流れは以下である。

LCC の計算では、LCC 検討期間全体を通した補修計画を設定し、必要な費用の単価を設定し、費用の統合を行うことで LCC は求められる。しかし、時間的価値²⁾が存在するため、LCC を計算する際には「資本の利率」と「物価変動率」の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。本研究では将来の価値を現時点に割り引いて算定する現在価値法を用いて算定した。

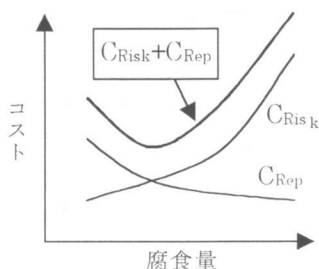


図-3 期待費用最小のモデル図

(2) ライフサイクルコスト計算の定義

LCC 計算では次の3要素より成り立っているといえる。

$$LCC = C_I + C_R + C_S \quad (6)$$

ここで、LCC：ライフサイクルコスト、 C_I ：初期投資(建設)費用、 C_R ：維持管理のための費用、 C_S ：撤去・更新費用

式(6)では顕在化した費用のトータルコストが算定されるが、リスクは内包されない。構造物の LCC を算定する際、過度に安全であったり過度に経済的であってはならない。このため図-3のような信頼性設計法の1手法である期待費用最小の法則³⁾を用いて最適値を算定することで、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。

$$LCC = C_I + C_{Rep} + C_{Risk} \quad (7)$$

ここで、 C_{Rep} ：補修費用、 C_{Risk} ：リスク
今回は最終的な撤去・更新を考慮しないものとした。また、機会損失費用(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という考えの費用)は後述するように考慮していない。

ここで、経年の補修費用は劣化予測から得られた「補修割合」より次式によって求められる

$$C_{Rep} = C_r \cdot P_{rep} \quad (8)$$

ここで、 C_r ：全面補修費用
今回腐食量の割合がある許容値を超過した時点

割合(r_s)とする。

また、経年のリスクは次式により計算した。

$$C_{Risk} = C_f \cdot P_f \quad (9)$$

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 ：ハザード

ここでも、腐食の割合がある許容値を超過した時点

以上から LCC は次式によって算定される。

$$LCC = C_I + \sum \left\{ \left[C_r \times Rep(X) + C_f \times Des(X) \right] \times \frac{1}{(1+r)^X} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $Rep(X)$ ：補修割合の関数、 $Des(X)$ ：破壊割合の関数、 r ：割引率、 X ：補修年数
補修割合や破壊割合の関数は式(8)、(9)の経年の値から求められる。式(10)より補修年数を変動させることで(期待費用最小の法則)最小値を最適値とする LCC を算定することができる。

リスクはハザードから求められる期待費用である。したがって、この費用は“潜在的な費用”である。 C_r は単純に撤去・更新費用のみを考慮すればよいのではなく、第三者障害等の社会的損失、心理的損失(企業の信用失墜による損失等)等を考慮する必要があるが、これらを見積もることはきわめて困難である。従って、本研究ではなんらかの基準額を設定し、その整数倍を損失費用(社会的損失期待費用)とした。また、割引率は、資本の利率と物価変動率によって決まる。資本の利率は将来の価値をデフレートするもので、物価変動率は将来の価値をインフレートするものである。

4. LCC の感度解析

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したがい感度解析を行う。計算対象とした構造物は栈橋の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 100 年間供用した場合の LCC の感度解析を行った。

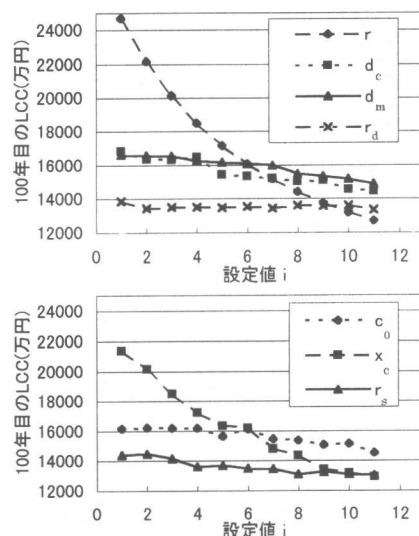
劣化予測に必要なパラメータを表—1 にまとめた。これらのパラメータの値は東京湾内の海洋構造物の調査結果や既往の研究を参考にして設定した。LCC 算定に必要なパラメータを実績に基づいて表—2 のように設定した。資本の利率は利子率や国債の利回り等によって算定される。アメリカの例は OBM 通達 A-94 にその試算結果が見られる。民間等では 3 %, EU などの海外では 2 ~ 10 % という報告も見られるが、本研究では公共事業で一般的に用いられている社会資本利率 4 % をベースとし、この値を割引

表—1 劣化予測パラメータ

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	平均値	12.4[mg/cm ² /year]
	標準偏差	6.2[mg/cm ² /year]
腐食速度	分布形状	対数正規分布

表—2 LCC 算定パラメータ

費用の種類		費用
初期建設費用 C_i		8600[万円/ブロック]
維持管理 費用 C_{rep}	断面修復 工法	8000[万円/ブロック]
	基準値	
破壊損失期待 費用 C_r	基準値	初期投資費用 × 3 倍
資本の利率	基準値	4[%]
物価変動率	基準値	0[%]



図—4 パラメータの LCC

(* 記号の説明は本ペーパー最終ページの「後注」に記す)

率として用いた。

LCC 計算式は式(10)である。今回は構造物の補修においての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。感度解析を行う上で表面塩化物イオン量、割引率、コンクリートの拡散係数、補修許容割合、破壊許容割合、社会的損失期待費用をパラメータとして LCC への影響を調べた。感度解析を行う上で中央値を設定し、変動係数を設定することで比較をした。パラメータの中央値は表—1, 2 の値を中央値とし、補修・破壊許容割合は 50 % を中央値とした。変動係数を 0.5 として分布を求め、その範囲で LCC を感度解析した。その結果が図—4 である。これより、割引率、かぶり、コンクリートの拡散係数が LCC の計算を行う上で大きな影響を及ぼすことがわかる。さらにこれら 3 つのパラメータの相互関係を追うことで感度解析を行った。その結果を図—6, 7, 8 にしめす。これら三次元の図の最大値と最小値の差を図—9 に示した。これより、LCC の算定において割引率、かぶり、拡散係数の順に影響が大きい、他のパラメータは比較的傾きが小さく影響が小さいことがわかる。

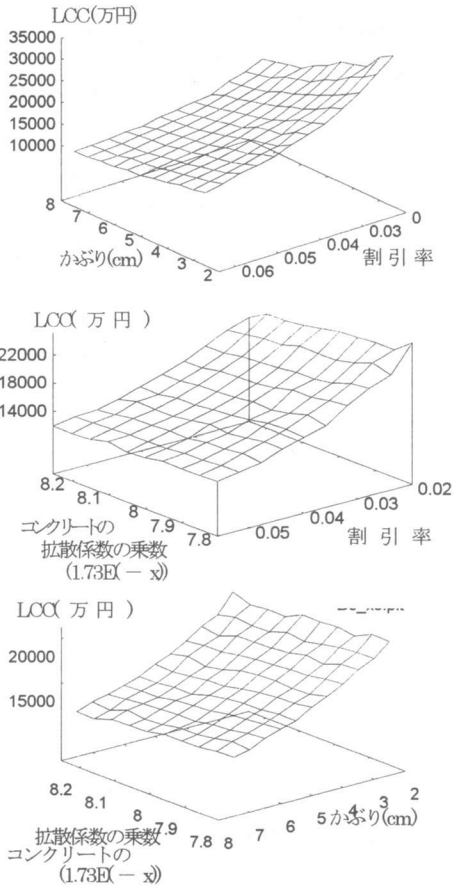


図-5 パラメータの相関図

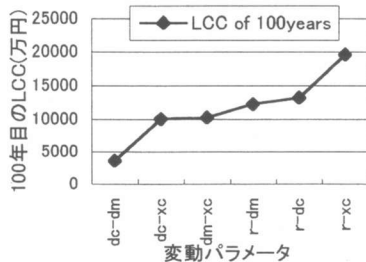


図-6 LCC における差

5. 考察およびまとめ

感度解析の結果、今回の試算では割引率がLCCの計算に大きく影響を与えることがわかった。このことから、LCCを算定する際、各案の比較を行う際には割引率には注意をして議論を進める必要があることとなる。特に供用期間が大きくなるとLCCの値に割引率が大きく影響してくるので割引率の設定には注意を払わなくてはならないことになる。また、構造部材

の観点からのLCCにおいてはかわぶり、コンクリートの拡散係数がLCCに対して大きな影響を与えることとなることがわかる。コンクリートの拡散係数はコンクリートの品質の指標でもあるので、設計や施工段階においてかわぶりが適切・確実にとられていて、品質の良い構造物はLCCの観点からに有利であることも示された。一方、環境の基準ともなる表面塩化物イオンの影響が小さいことから、環境にはあまり構造物のLCCは影響を与えないことがわかる。また、 $C_{Rep}+C_{Risk}$ の関数の極小値が左側にあったことにより補修を早期にすることが最適と判断される。このため、今回の計算ではリスク評価の許容割合とリスクの値はLCCの算定に大きく影響しないと思われる。

注) ; C_0 : 表面塩化物イオン量, x_c : かわぶり, r_s : 補修許容割合, r : 割引率, d_c : コンクリートの拡散係数, d_m : 社会的損失期待費用, r_d : 破壊許容割合パラメータの設定では、

$$C_0 : c_0 = 26.4 - 1.76 \times (i - 1)$$

$$x_c : x_c = 2.5 + 0.5 \times (i - 1)$$

$$r_s : r_s = 25 + 5 \times (i - 1)$$

$$r : r = 0.02 + 0.004 \times (i - 1)$$

$$d_m : d_m = 4.5 - 0.3 \times (i - 1)$$

$$d_c : d_c = 7.8 + 0.05 \times (i - 1)$$

$$r_d : r_d = 25 + 5 \times (i - 1)$$

ここで、 i : 設定値 (=1 ~ 12)

参考文献

- 1) 土木学会誌 7月号「リスクマネジメント入門」, Vol. 85, pp. 5 ~ 45, 2000. 7
- 2) 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
- 3) 星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性工学, 鹿島出版, pp. 153 ~ 158, 1986. 5