論文　割引率がコンクリート道路橋の LCC 評価に及ぼす影響

白武　知浩[*1]・松下　博通[*2]・鶴田　浩章[*3]・佐川　康貴[*4]

要旨：近年，社会基盤施設への LCC 評価が注目されているが，LCC 評価方法については，将来予測を含むなど仮定する部分も多く，確立されていない現状にある。そこで本研究では，塩害環境下におけるコンクリート道路橋を一例として，塩害対策 3 ケースを設定し，割引率に着目して LCC 試算を行った。その結果，割引率が補修費用，LCC 評価期間，社会的損失に大きな影響を及ぼし，各塩害対策が優位となる条件が異なることを明らかにした。

キーワード：ライフサイクルコスト，塩害，割引率，LCC 評価期間，社会的損失，

1．はじめに

近年，コンクリート構造物の長期耐久性を損なう問題が顕在化してきており，構造物の維持管理の重要性に対する関心が高まっている。 また，我が国の社会基盤施設は，高度経済成長期に集中して整備されており，今後建設後数十年を迎えることによる維持管理負担の急激な増大が懸念されている。このような状況の中，アセットマネジメントの導入など，建設マネジメントは変革の時期を迎えており，その中で，社会基盤施設へのライフサイクルコスト(以下，LCC)評価や，その中で用いられる指標に対する検討の重要性が認識され始めている。

そこで，本研究では，割引率に着目して，塩害環境下におけるコンクリート道路橋を対象に，LCC 試算ケースとして，塩害対策 3 ケース，LCC 評価期間 2 水準の全 6 ケースを設定し，割引率を 4 水準に変化させて LCC 試算を行うことにより，割引率が LCC 試算の各塩害対策，LCC 評価期間，社会的損失に及ぼす影響を検討した。

2．本研究における LCC の定義

2.1 LCC 算定式

本研究では，LCC 算定式として，事業者コストのみを評価する LCC1 と，社会的損失を考慮した LCC2 を定義することとした。

$$LCC\,1 = \sum_{t=0}^{T}\left(I + C_i + C_r + C_F\right)\left(\frac{1}{1+r}\right)^t \quad (1)$$

$$LCC\,2 = \sum_{t=0}^{T}\left(I + C_i + C_r + UC + C_F\right) \times \left(\frac{1}{1+r}\right)^t \quad (2)$$

ここに，I：初期建設段階費用，C_i：点検費用，C_r：補修費用，UC：社会的損失，C_F：破壊損失期待費用，r：割引率，t：経過年数，T：LCC 評価期間

2.3 割引率

LCC のように，長期的視点から経済的評価を行う際には，将来発生する費用に対し，試算を行う現時点からの時間的価値の差を考慮する必要がある。この換算方法としては，一般には，現在価値法を用い，次式により換算される。この換算率を割引率と呼ぶ。

$$\left[S \rightarrow P\right]_t^r = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3)$$

ここに，S：t 年目に発生する費用，P：現時点における価値，r：割引率

割引率を設定する際には，公共投資による民間投資の資金調達への影響が重要となることから，民間投資の実質利子率が参考となる。2000

*1 九州大学大学院　工学府建設システム工学専攻　(正会員)
*2 九州大学大学院　工学研究院建設デザイン部門教授　工博　(正会員)
*3 九州大学大学院　工学研究院建設デザイン部門助教授　博士　(工学)　(正会員)
*4 九州大学大学院　工学研究院建設デザイン部門助手　修士　(工学)　(正会員)

年から過去 15 年間の実質利子率の平均値は 2.88%と得られたが，今後，物価の減少が予想され，高めの割引率を設定する必要があると考えられることから, 4%を基準割引率とし設定した。また，割引率が，LCC 試算に及ぼす影響を検討するために，割引率 0，1，2%を設定した。

2.4 社会的損失

道路において，対象とする構造物の補修等に伴う使用制限により，社会的損失が生じる。本研究では，過去の研究例[1)]に従い，単純なネットワークモデルを仮定し，社会的損失として，走行時間損失, 走行費用損失, 交通事故減少損失, 環境に関する損失の 4 項目を設定し，以下の式[2)]より算定を行い，LCC 試算に導入した。

$$UC = \sum_{k} \left(B_{nk} - B_{rk} \right) \times s \qquad (4)$$

ここに，UC：社会的損失，k：リンク数，B_n：通常時便益，B_r：使用制限時便益，s：工期

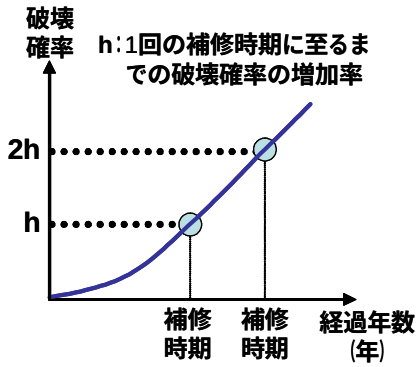
2.5 破壊損失期待費用

現状において，廃棄や更新を決定する理由の多くは機能的な理由であり，また物理的にも，補修や補強により，ほとんどが延命することができる実状を考慮すれば，廃棄や更新を前提とする LCC 評価は何ら意味をなさないと考えられる。そのため，本研究では，廃棄，更新費用について，LCC 評価期間到達時における破壊によるリスク R として捉え，破壊損失期待費用として設定し，以下に示す式により算定した。

$$R = C_F = P_f \cdot C_f \qquad (5)$$

ここに，C_F：破壊損失期待費用，P_f：破壊確率，C_f：破壊損失費用

破壊確率については，初期破壊確率，及び塩害による性能低下に伴う破壊確率の和により算定した。初期破壊確率については，設計段階における不確実性に関する安全係数による評価が，信頼性理論における 95%の信頼区間に相当するものとし，残りの 5%を初期破壊確率とした。塩害による性能低下に伴う破壊確率については，**図－1** に示すように, 1 回の補修時期に至るまで



図－1 塩害劣化による破壊確率算定過程

表－1 破壊確率算定パラメータ

項目		塩害対策	
		N, C	E
初期破壊確率 a_0	平均値	0.050	0.050
	標準偏差	0.010	0.010
	確率分布	正規分布	正規分布
破壊確率の増加率 h	平均値	0.100	0.250
	標準偏差	0.033	0.083
	確率分布	対数正規分布	対数正規分布

の性能低下に相当する破壊確率の増加率を設定し, 2 点以上の補修時期を基に 2 次の近似曲線を算定することにより，経過年数を変数とした塩害劣化に伴う破壊確率の算定式 (6)を設定した。また，破壊確率を算定する際のパラメータは**表－1** に示す値を仮定した。

$$P_f = a_0 + b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \qquad (6)$$

ここに，a_0：初期破壊確率，b_0，b_1，b_2：塩害劣化に伴う破壊確率に関する係数

また，破壊損失費用については，解体・廃棄に要する費用や対象橋梁が失われたことによる社会的影響など多大な損失が発生すると考えられる。しかし，現状においてこれらの損失を正確に把握することは困難である。そのため，破壊損失費用として，初期投資における損失として捉え，各 LCC 試算ケースにおける初期建設段階費用の 2 倍の損失が生じると仮定した。

3. LCC 試算方法

3.1 LCC 試算ケース

本研究では，LCC 試算の対象構造物として汀線から 100m 離れた位置に建設されるポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋（橋長：30.88m，幅員：11.5m）を設定し，耐力減少要因として塩害による劣化に着目した。また，塩害劣化は主桁

のみを考え，新規に建設される場合を対象に試算を行った。LCC 試算ケースとしては**表－２**に示す，塩害対策 3 ケース，LCC 評価期間 2 水準の全 6 ケースを設定した。また，劣化の進行に応じて，主桁部位のコンクリート断面補修を行うものとし，補強は考慮しないものとした。ここに, LCC 試算ケースの表記法として, 例えば, 塩害対策が無対策, LCC 評価期間 50 年の場合について N(50 年)と表記することとした。

3.2 事業者コストの設定

本研究で設定した事業者コストを**表－３，表－４**示す。ただし，これらの費用は文献 3)，4)を参考に設定した。各 LCC 試算ケースの初期建設段階費用の違いは，塩害対策方法，及び LCC 評価期間の違いからきており, また, 点検費用, 及び付属物補修費用については，全てのケースで同額であると仮定している。費用の表記に関しては，N(50 年)における初期建設段階費用を 1 とした時の比(LCC 比)によって表すこととした。なお, N(50 年)の初期建設段階費用は約 8 千万円であった。ここで，使用コンクリートの水セメント比に関して，LCC 評価期間 50 年では 40%, 100 年では 35%とした。

3.3 劣化予測

本研究では，塩害による劣化に関して，確率的手法によりばらつきを考慮した予測を行い，**図－２**に示すフローに従い，塩害による劣化に伴うコンクリート断面補修時期の算定を行った。

(1) 鋼材発錆時期の予測

塩化物イオンの浸透を拡散現象とみなし, Fick の拡散方程式 [5]により鋼材位置における塩化物イオン濃度を求め，以下の条件において鋼材発錆時期 t^*を算定した。

$$t^* = t \quad when \quad C(c,t) = C_{lim} \qquad (7)$$

ここに，c：かぶりの期待値(mm)，$C(c,t)$：鋼材位置における塩化物イオンの設計値(kg/m^3)，C_{lim}：鋼材腐食発生限界濃度(kg/m^3)

本研究では, 鋼材腐食発生限界濃度は 1.2kg/m^3 として解析を行った。

(2) 鋼材腐食進行過程の予測

表－２ LCC 試算ケース

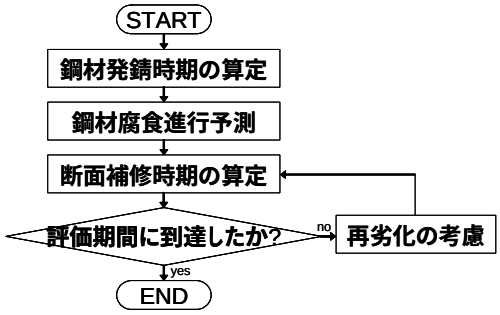
ケース	塩害対策	LCC評価期間
N	無対策	50年 及び 100年
C	コンクリート表面被覆	
E	エポキシ樹脂塗装鉄筋	

表－３ 各ケースにおける LCC 試算パラメータ

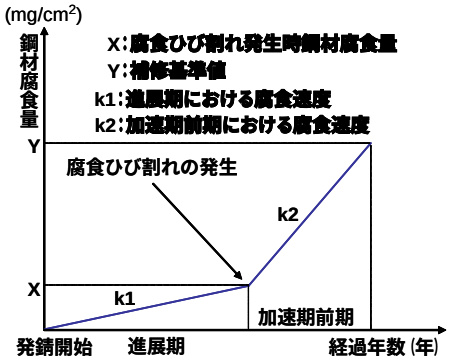
LCC試算ケース	N(50年)	C(50年)	E(50年)	N(100年)	C(100年)	E(100年)
LCC試算年数	50年			100年		
塩害対策	N	C	E	N	C	E
初期建設段階費用	1.00	1.07	1.23	1.11	1.16	1.26
断面補修費用	0.58	0.60	0.67	0.63	0.65	0.73
断面補修工期 (日)	28	30	40	28	30	40

表－４ 全ケース共通の LCC 試算パラメータ

項目		費用	工期(日)	サイクル(年)
点検	定期点検	0.015	-	10
	詳細点検	0.020	-	-
付属物補修	支承工	0.096	5	50
	伸縮装置工	0.067	3	30
	防水工	0.007	2	20
	舗装工	0.023	4	20
	高欄塗装工	0.002	-	10
	表面被覆塗り替え	0.027	2	20



図－２ 補修時期算定フロー



図－３ 鋼材腐食進行予測モデル

一般に，塩害の劣化モデルは，潜伏期，進展期，加速期，劣化期の 4 段階に区別される。しかし，本研究では，鋼材腐食進行予測を**図－３**に示すモデルのように仮定した。ここで，鋼材腐食量が X に達した時, 腐食ひび割れが発生し,

表－５ コンクリート断面補修時期算定パラメータ

項目	平均値	標準偏差	確率分布	項目	平均値	標準偏差	確率分布
表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)	4.5	0.5	正規分布	エポキシ樹脂拡散係数 D_{epd} (cm^2/year)	2.0×10^{-6}	6.7×10^{-7}	対数正規分布
かぶりの期待値 c (mm)	60	3	正規分布	進展期に相当する腐食速度 k1 (mg/cm^2/year)	2	0.67	対数正規分布
表面被覆工のコンクリート相当かぶり厚さ期待値 c' (mm)	20	2	正規分布	加速期前期に相当する腐食速度 k2 (mg/cm^2/year)	12.4	4.13	対数正規分布
エポキシ樹脂塗膜厚さ c_{ep} (mm)	0.22	0.02	正規分布	軸方向ひび割れ発生時鋼材腐食量 X (mg/cm^2)	10	0.67	正規分布
コンクリート拡散係数(50年) D_d (cm^2/year)	0.449	0.150	対数正規分布	補修が必要な時の鋼材断面減少率 Y (%)	10		
コンクリート拡散係数(100年) D_d (cm^2/year)	0.398	0.133	対数正規分布	再劣化係数 α	0.9	0.02	正規分布

腐食速度が k1 から k2 に変化する。これにより，補修が必要な時の断面減少率 Y に到達するまでの期間を算定し，補修時期を算定した。

(3) 再劣化の考慮

補修後については，コンクリートに浸透した塩化物イオンを完全に除去することは困難であり，再劣化を考慮する必要がある。本研究では，その手法として再劣化係数を導入し，以下の式を用いて 2 回目以降の補修時期を算定した。

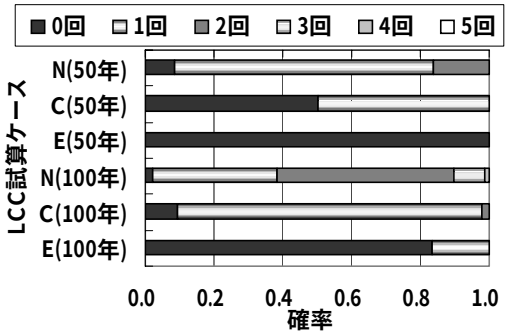
$$s_n = \alpha s_{n-1} \tag{8}$$

ここに，s_n：(n-1)回目の補修から n 回目の補修までの間隔，s_{n-1}：(n-2)回目の補修から(n-1)回目の補修までの間隔，α：再劣化係数

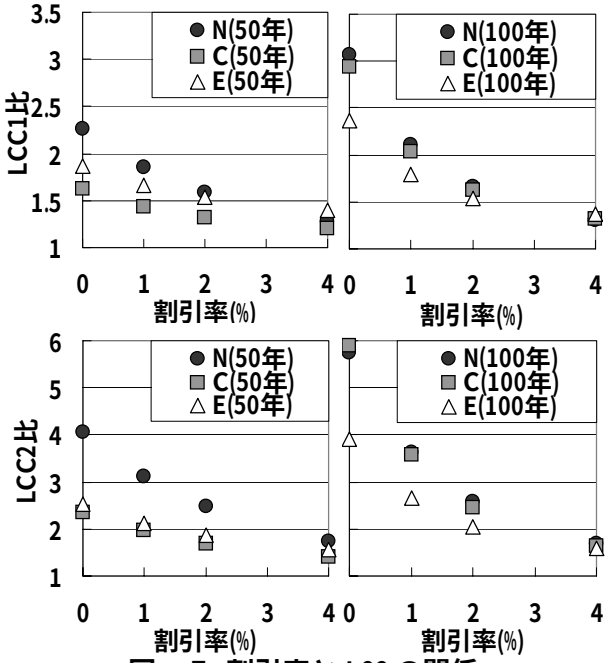
4．コンクリート断面補修時期の算定結果

各LCC試算ケースにおける主桁のコンクリート断面補修時期を算定する際の解析パラメータを**表－５**に示す。表中の各確率変量項目の平均値は，土木学会コンクリート標準示方書，及び文献6)を基に設定した。また，標準偏差，及び確率分布に関しては，独自に設定した値を用いている。解析手法についてはモンテカルロ手法を用い，各確率変量項目に対し，5000のデータを発生させた。

解析結果として，**図－４**にLCC評価期間内に生じる，コンクリート断面補修発生回数の確率を示す。これにより，塩害対策Eの場合が最も耐久性に優れ，試算年数50年の場合では，補修を一度も必要としない結果となった。しかし，塩害対策Nの場合においても，補修を一度も必要としない可能性があるという結果となった。



図－４ 発生回数の確率



図－５ 割引率と LCC の関係

5．LCC 試算による検討

5.1 平均値を用いた LCC 結果

図－５に LCC 評価期間到達時における，割引率と LCC の関係を示す。ただし，LCC 試算は各パラメータの平均値を用いて算定している。

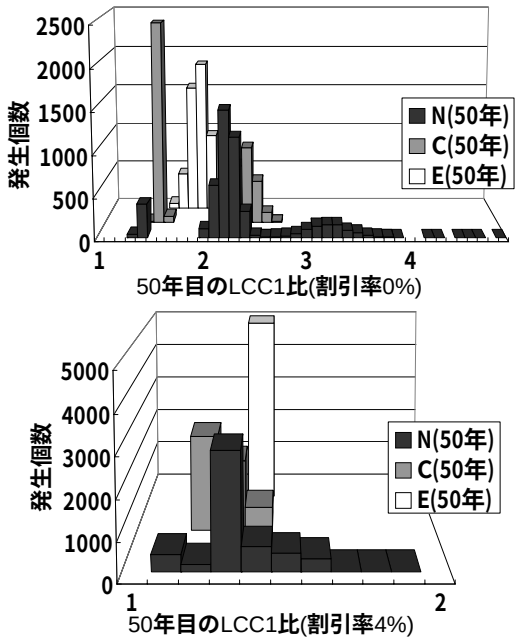
LCC 評価期間 50 年における LCC1 を比較すると，

割引率に関係なく塩害対策Cが最も優位となる結果となった。また，塩害対策N，Eに着目すれば，割引率0%では，塩害対策Eの方が，塩害対策Nに比べ，LCC1が小さいが，割引率4%ではその結果が逆転していることが分かる。これは，塩害対策Nに生じる補修費用が大きく割り引かれている一方で，塩害対策Eの初期建設段階費用が大きすぎるためと考えられる。また，LCC評価期間100年におけるLCC1を比較すると，割引率0%では，塩害対策Eが優位となるが，割引率の増加に伴い，その優位性は失われ，割引率4%では，全てのケースにほとんど差異は生じなかった。これは，LCC評価期間50年の時と同様に，補修費用が大きく割り引かれたためと考えられる。次に，LCC2を比較すると，社会的損失も割引率により大きく影響されるものの，LCC評価期間50年のLCC1の時にあったような逆転現象は生じていない。これは，割引率が高い経済環境においても，社会的損失のLCC結果に及ぼす影響が大きいためと考えられる。このことを考慮すれば，補修の発生を最も抑制できる塩害対策Eが最も優位になると言え，その傾向は，LCC評価期間が100年の時に顕著に出ている。

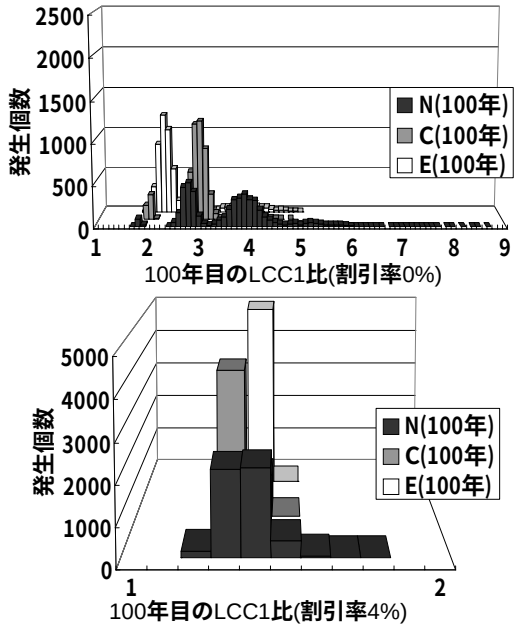
5.2 ばらつきを考慮した LCC 結果

図－６，**図－７**に LCC 評価期間 50，100 年における，LCC1 の試算結果を示す。但し，横軸に LCC 評価期間到達時における LCC を，縦軸にその LCC の発生個数を示している。

まず，割引率0%におけるLCC1結果に着目すると，塩害対策Nは他の設定に比べ，LCC評価期間内に生じる補修回数が多くなる可能性が高いことから，その他の設定よりもLCC1が高くなる可能性が高く，そのため，塩害対策Nに優位性は認められなかった。そこで，塩害対策C，Eに着目すると，塩害対策Cの方が，ばらつきが大きく，LCC1が低くなる可能性がある一方で，塩害対策Cは補修が生じる確率が，LCC評価期間50年で49.7%，LCC評価期間100年で90.6%あり，補修が生じた場合には，LCC評価期間内に補修が生じない可能性が高い塩害対策Eの方が，LCC1が低



図－６ LCC 評価期間 50 年における LCC1 結果



図－７ LCC 評価期間 100 年における LCC1 結果

くなる結果となった。この傾向は，LCC評価期間100年において顕著に現れた。

しかし，割引率4%におけるLCC1結果に着目すると，LCC評価期間に関わらず，塩害対策N，Cの発生個数のピークが，塩害対策Eが示すピークよりも左側にあり，塩害対策N，Cの方が経済的となることが明らかとなった。このことは，塩害対策N，Cにおいて発生する補修費用が，割引率によって大きく割り引かれたため，塩害対策Eの初期建設段階費用の割高がLCC評価に顕著に

現れたためであると考えられる。また，割引率4%において塩害対策N, Cを比較すると，塩害対策Nは最もLCC1が低くなる可能性はあるが，補修が2回以上発生して，塩害対策CよりもLCC1が高くなる可能性が高いことを考慮すると，塩害対策Cが最も優位となると考えられる。しかし，LCC評価期間50年においては，このリスクが占める確率は, 約16%とあまり大きくないことから, このリスクの保有を認めれば, 塩害対策Nが最も優位であると言える。

次に，割引率4%における社会的損失を考慮したLCC2に関する検討を行った。なお，割引率が0，1，2%のケースについては，LCC1結果と同様に，割引率が低い水準では，塩害対策Eが最も優位となることは明らかであるため，検討対象外とした。**図－８**に，割引率4%における各LCC評価期間のLCC2結果を示す。その結果，割引率が4%と高い水準においても，社会的損失の影響により，補修が生じた場合における損失が著しく大きくなり，そのためLCC評価期間，及び初期建設段階費用の割高に関わらず，補修の発生を最も抑制できる塩害対策Eが最も優位となる結果となった。

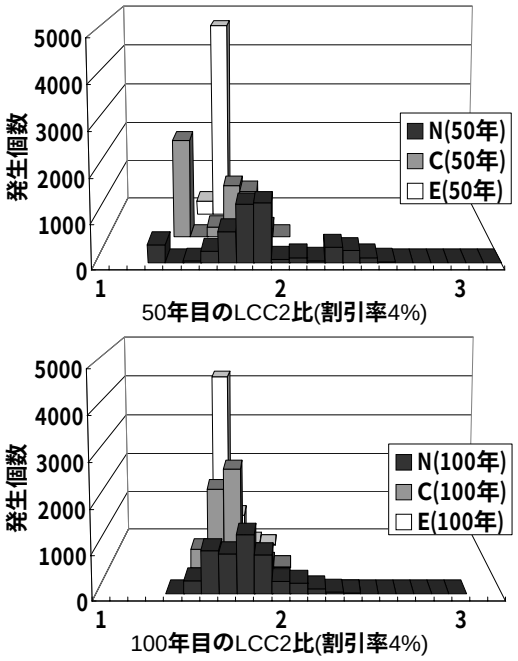
6．結論

本研究の範囲内において得られた知見は以下に示す通りである。

(1) 割引率がLCC結果に及ぼす影響は非常に大きく，特に補修費用が大きく影響を受ける。

(2) 割引率の増加に伴い，維持管理費用のLCCに占める割合が減少し，初期建設段階費用の影響が大きくなる。そのため，割引率が低い経済環境では，維持管理段階に発生する費用をどのように抑制するかが問題になり，また，割引率が高い経済環境では，初期建設費用を抑制するような対策が優位となる。

(3) 割引率4%では, 経過年数50年目以降に発生する費用がほとんどLCC評価に影響を与えていないことから，割引率の大小はLCC評価期間にも影響を与えると考えられる。



図－８ 各 LCC 評価期間における LCC2 結果

(4) 割引率は社会的損失にも大きく影響を及ぼすが，割引率が高い経済環境においても社会的損失がLCC結果に及ぼす影響は大きい。

参考文献

1) 相原康平ほか：塩害環境下におけるコンクリート道路橋のLCC評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vo.26，No.2，pp.1783-1788，2004.6

2) 道路投資の評価に関する指針検討委員会編：道路評価の評価に関する指針（案），（財）日本総合研究所，1998.9

3) 国土交通省土木研究所ほか：ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書(I) －ライフサイクルコスト算出手法に関する検討－，2001.3

4) 建設物価調査会：建設物価‐第996号‐，2004.12

5) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いるコンクリートの設計施工指針[改訂版]，コンクリートライブラリー112，2003.11

6) 堤知明ほか：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No.544/V-32，pp.33-41，1996.8