

# 論文 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

相原 康平\*1・松下 博通\*2・鶴田 浩章\*3・佐川 康貴\*4

**要旨:** 今後予想される維持管理負担の増大に対し、社会基盤施設への LCC 評価導入の試みがなされ始めている。本研究は、塩害環境下におけるコンクリート道路橋を対象に、LCC 評価手法に対する提案を行い、初期条件として、特に対策を行わない場合、コンクリート表面をアクリルゴム系樹脂で被覆した場合、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した場合の 3 ケースについて、試算年数を 50, 100 年とした場合の LCC 試算を行った。その結果、各ケースにおいて優位性を示す条件が異なることを明らかにした。

**キーワード:** LCC, 塩害, 社会的損失, 表面被覆工, エポキシ樹脂塗装鉄筋

## 1. はじめに

我が国の社会基盤整備は、高度経済成長期に集中し、他の国々と比較して急ピッチで整備されてきた。しかし、これらの社会基盤施設は、我々の生活を豊かにした反面、今後の維持管理負担の急激な増大が予想されている。このような状況において、新規事業の減少に伴う公共投資の減少が予想される中、後世に価値あるものとして継承していくためには、補修時期の分散化、および維持管理負担の低減を図る必要がある、これを目的とした建設マネジメントとして、欧米諸国で実践されているアセットマネジメントの導入がわが国においても検討されている。

アセットマネジメントの最大の特徴は、ライフサイクルコスト（以下 LCC と略）ツールを用いて長期的視点から費用を比較し、最適な維持管理方法、補修計画等を決定することである。これを実施するためには、LCC ツールに資金調達のためのアカウンタビリティを果たすような信頼性があるかどうかの問題となるが、LCC 評価に関して歴史の浅い我が国にとって、信頼できるデータが不足している現状を考慮すると、更なる検討を積み重ねる必要がある。

このような我が国の現状において、資金調達

のためのアカウンタビリティを果たすという観点から、LCC 評価手法に対する検討を行うことを本研究の目的とした。その中で、ケーススタディと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 6 ケースを設け、試算結果について比較、検討を行った。

## 2. LCC 評価手法に対する検討

### 2.1 社会的損失

社会基盤施設をライフサイクルの観点から評価する際に、対象とする構造物の補修等に伴う使用制限により、所有者や利用者、および周辺社会に多大な影響が及ぼされる。本研究では、その社会的な影響度を社会的損失と定義した。この社会的損失を算定する際の問題点として、大きく分けて以下に示す 2 つが挙げられる。

- 1) 社会的損失の影響は、直接的な収入や支出だけでなく、利便性、生活環境等の非金銭的な要素を含む。
- 2) 土木構造物の特徴として、外部性を有しているため、周辺社会全体に広範に影響を及ぼす。これらの問題点により、社会的損失を正確に把握することは困難を極め、社会的損失の影響度を見誤ることにより、維持管理計画が非効率

\*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士（工学） 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

なものとなる危険性を有している。しかし、LCC ツールの機能として、維持管理計画の最適化や資金調達のためのアカウントビリティを果たす目的があるとすれば、社会的損失を考慮しなければならないことに疑いの余地はない。そのため、現状においては、社会的損失を考慮する場合としない場合について比較、検討を行い、総合的な評価を行う必要があると考えられる。

本研究では、橋梁における社会的損失の算定に対して、道路投資の費用対効果分析で用いられている便益算定法を基に社会的損失を算定することとした<sup>1)</sup>。対象とする社会的損失は、便益項目に対応した走行時間損失、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、以下の式により算定を行った。

$$UC = \sum_k (B_{nk} - B_{rk}) \times s \quad (1)$$

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

## 2.2 LCC 算定式

一般に、LCC 算定式は、以下の式により定義される。

$$LCC = I + M + R \quad (2)$$

ここに、 $I$ ：初期建設段階費用、 $M$ ：維持管理段階費用、 $R$ ：廃棄、更新段階費用

ここで、本研究において定義する各段階における費用の内訳を以下に示す。

### (1) 初期建設段階費用 $I$

$I$ は企画、設計、建設費の総和である。

### (2) 維持管理段階費用 $M$

維持管理段階において、社会的損失のLCC評価に対する影響を検討するため、社会的損失を考慮する場合としない場合により、以下の式(3)、(4)を定義した。

$$M = C_i + C_r \quad (3)$$

$$M = C_i + C_r + UC \quad (4)$$

ここに、 $C_i$ ：点検に関する費用、

$C_r$ ：補修、補強に関する費用

### (3) 廃棄、更新段階費用 $R$

現状において、廃棄や更新を決定する理由の

多くは機能の陳腐化によるとの報告があり、社会的影響に大きく依存している。これら进行评估することは現状において困難であり、また、たいていの場合、補修や補強により延命できることを考えると、本研究の目的においては、廃棄や更新を前提としたLCC試算は何ら意味を持たない。そのため本研究では、廃棄、更新段階における費用は考慮しないこととした。

## (4) 時間的価値換算法

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。この換算法には、一般に経済性工学における現在価値法を用い、次式により換算される。この換算率を割引率と呼ぶ。

$$[S \rightarrow P]_t^r = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (5)$$

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

割引率の基本解は、公共投資が民間投資の資金調達にどのような影響を与えるのかという視点から、民間投資の実質利子率を採用した。実質利子率については以下の式で表される。

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

ここに、 $k$ ：実質利子率、 $i$ ：資本の利率、 $h$ ：物価変動率

ここで、資本の利率として全国銀行貸出約定平均金利、および物価変動率として建設工事費デフレーター<sup>2)</sup>の各年変動値を設定し、これを基に割引率を算定すると、図-1に示す通りとなる。これを基に、2000年から過去15年間を平均し、割引率の基本解を求めると2.88%という値となった。しかし、今後の公共投資の減少に伴い、更なる物価の減少が予想されることから、基本解よりも高い数値を採用すべきであり、本研究では、現在、費用便益分析で用いられている4%を設定することとした。

これらを考慮し、LCC算定式として、社会的損失を考慮せず、事業者コストのみを評価する

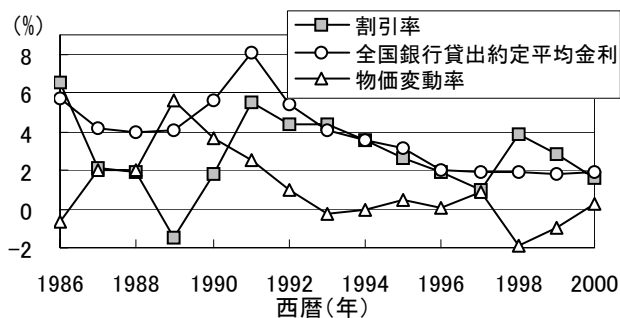


図-1 割引率の設定

LCC1として式(7)を、また、社会的損失を考慮したLCC2として式(8)を定義することとした。

$$LCC1 = \sum_{t=0}^T (I + C_i + C_r) \left( \frac{1}{1+r} \right)^t \quad (7)$$

$$LCC2 = \sum_{t=0}^T (I + C_i + C_r + UC) \left( \frac{1}{1+r} \right)^t \quad (8)$$

ここに、 $t$ : 経過年数,  $T$ : 試算年数

### 3. LCC 試算モデルの設定

#### 3.1 初期設定

本研究では、LCC 試算モデルの対象構造物としてプレテンション単純T桁橋(橋長: 30m, 幅員: 11.5m)を設定し、耐力減少要因として、塩害による鋼材腐食に着目し、主桁のみを劣化の対象とした。LCC 試算ケースを表-1に示す。初期設定として、無対策、コンクリート表面被覆、エポキシ樹脂塗装鉄筋の3ケースを設定し、コンクリート表面被覆による延命効果としては、かぶり厚さに相当すると仮定した<sup>2)</sup>。一方、試算年数として50、100年の2水準を設定し、LCC 試算を行った。

ここに、LCC 試算ケースの表記法として、例えば、ケース1の試算年数50年の場合を1-50と表記することとする。

#### 3.2 コンクリート断面補修時期算定モデル

補修時期を算定するには、本研究で対象としている塩害について劣化予測を行う必要がある。

表-1 LCC 試算ケース

ケース	初期設定	試算年数
1	無対策	50年 及び 100年
2	コンクリート 表面被覆	
3	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	

そこで本研究では、確率的手法を用いて劣化予測モデルを設定し、それに応じた補修時期算定モデルを構築した。以下に、その詳細を示す。

#### (1) 腐食開始時期の予測

塩化物イオンの浸透は以下のFickの拡散方程式<sup>3)</sup>に従うとする。

$$C(c,t) = C_0 \left[ 1.0 - \operatorname{erf} \left\{ \frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left( \frac{c}{\sqrt{D_d}} + \frac{c_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right\} \right] \quad (9)$$

ここに、 $C(c,t)$ : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_0$ : 表面における想定塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c$ : かぶりの期待値(mm),  $D_d$ : 塩化物イオンに対する設計拡散係数( $\text{cm}^2/\text{year}$ ),  $c_{ep}$ : エポキシ樹脂の塗膜厚さの期待値(mm),  $D_{epd}$ : エポキシ樹脂への見掛けの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{year}$ ),  $t$ : 経過時間(year)

ここで、以下の条件において、腐食開始時期 $t^*$ を算定した。

$$t^* = t \quad \text{when} \quad C(c,t) = C_{lim} \quad (10)$$

ここに、 $C_{lim}$ : 鋼材腐食発生限界濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

#### (2) 腐食進行過程の予測

一般に、塩害の劣化モデルは、鋼材腐食が開始するまでの潜伏期、鋼材が腐食し、ひび割れが発生する進展期、ひび割れ幅が増大し、劣化が加速的に進行する加速期、ひび割れのはく離や鋼材が露出する劣化期の4段階に区分される。しかし、本研究では、鋼材腐食発生後の腐食進行過程の予測として、計算を容易にするため、図-2のようなバイリニア型の鋼材腐食モデルを設定し、進展期、および加速・劣化期における腐食速度を一定であると仮定した。

上記の劣化予測モデルを用いた補修発生時期の算定フローを図-3に示す。供用後、初めての補修時期の算定方法としては鋼材腐食量に対する補修基準値を設定し、その補修基準値に達した年数を補修時期とした。また補修後は、通常、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、再劣化について考慮する必要がある。本研究では、その手法

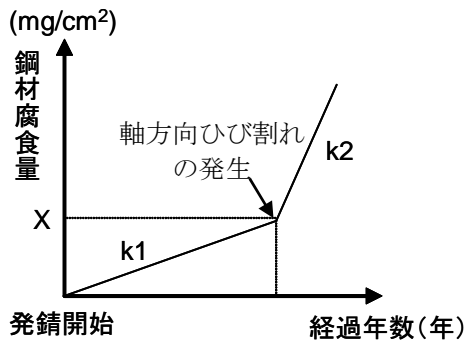


図-2 鋼材腐食進行モデル

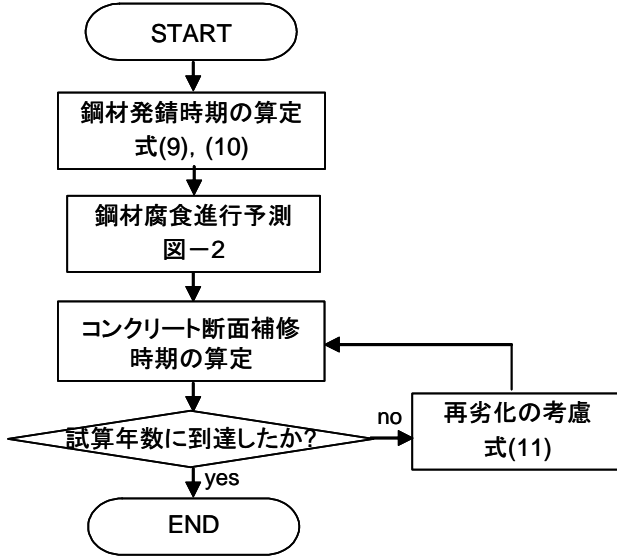


図-3 補修時期算定フロー

として再劣化係数を導入し<sup>4)</sup>、以下の式を用いて2回目以降の補修時期を算定した。

$$s_n = \alpha s_{n-1} \quad (11)$$

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、 $\alpha$  : 再劣化係数

### 3.3 交通ネットワークモデル

社会基盤施設は外部性を有するため、社会的損失を算定するに当たり、対象とする橋梁が使用制限されたことによる影響範囲を設定する必要がある。そのためには対象とする構造物を周辺ネットワークの一部として捉える必要がある。そこで、図-4にリンクモデルを、表-2にリンク条件、表-3に各リンクの交通条件を示す。これらの条件下において、社会的損失の算定を行った。なお、本研究では、リンク3が使用制限された場合、その交通量はすべてリンク1およびリンク2に分配されるものとした。

表-2 リンク条件



リンク	リンク長 (km)	沿道条件	車線数	主要交差点数	中央帯有無
1	0.3	DID	2	1	無
2	0.4	DID	2	1	無
3	0.5	DID	2	1	無

図-4 リンクモデル

表-3 交通条件

リンク	交通量(台/日)			合計	日平均走行時間(分)	日平均速度(km/h)
	乗用車類	小型貨物	普通貨物			
1	6154	1231	615	8000	1.20	30
2	9615	1923	962	12500	1.60	30
3	7692	1538	769	10000	2.00	30

## 4. LCC 試算による検討

### 4.1 LCC 試算パラメータの設定

3. で示した各 LCC 試算ケースにおける主桁のコンクリート断面補修の発生時期を算定する際の確率変量に対する解析パラメータを表-4 に示す。表中の値は、土木学会コンクリート標準示方書及び文献 3), 5)を基に設定している。研究解析方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。解析パラメータの既定値としては、使用コンクリートの水セメント比を試算年数 50 年では 40%、試算年数 100 年では 35%とした。また、塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度を  $1.2\text{kg/m}^3$ 、補修基準値として鋼材の断面減少率を 10%、再劣化係数を  $0.9^4)$ として解析を行った。

次に、塩害劣化予測により得られたコンクリート断面補修に関して、図-5に試算年数 50 年および 100 年におけるコンクリート断面補修時期を、表-5に補修が行われる回数とその確率を示す。これらを見ると、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用したケース 3 が最も耐久性に優れ、特に試算年数 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。また、コンクリート表面被覆工を施したケース 2 においても、ケース 1 に比べ、補修時期を約 2 倍程度遅らせることが可能であるという結果が得られた。しかし、ケース 1 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。

また、表-6、表-7は文献 6), 7)を参考に

表-4 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 (kg/m <sup>3</sup> )	4.5	0.5	正規分布	コンクリート拡散係数 (cm <sup>2</sup> /year) (試算年数100年)	0.398	0.133	対数正規分布
かぶりの期待値 (mm)	60	3	正規分布	エポキシ樹脂拡散係数 (cm <sup>2</sup> /year)	2.0 × 10 <sup>-6</sup>	6.7 × 10 <sup>-7</sup>	対数正規分布
表面被覆かぶり相当期待値 (mm)	20	2	正規分布	軸方向ひび割れ発生時鋼材腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )	10	0.67	正規分布
エポキシ樹脂塗膜厚さ (mm)	0.22	0.02	正規分布	腐食速度k1 (mg/cm <sup>2</sup> /year)	2	0.67	対数正規分布
コンクリート拡散係数 (cm <sup>2</sup> /year) (試算年数50年)	0.449	0.150	対数正規分布	腐食速度k2 (mg/cm <sup>2</sup> /year)	12.4	4.13	対数正規分布

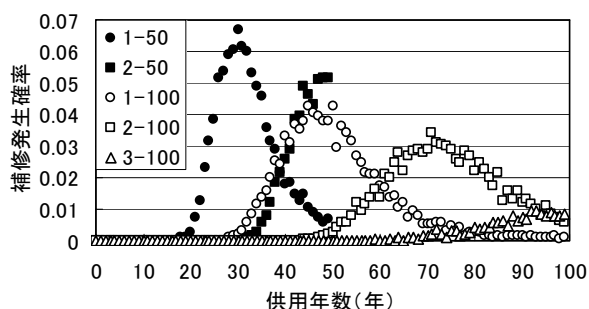


図-5 補修時期算定結果

表-5 補修発生回数の確率

補修回数	LCC試算ケース					
	1-50	2-50	3-50	1-100	2-100	3-100
	確率					
0	0.087	0.503	1.000	0.022	0.094	0.835
1	0.753	0.497	0.000	0.362	0.886	0.165
2	0.159	0.000	0.000	0.516	0.020	0.000
3	0.002	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000

表-6 各ケースにおけるLCC試算パラメータ

項目	1-50	2-50	3-50	1-100	2-100	3-100
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	-	0.63	0.65	0.73
断面補修工期(日)	28	30	-	28	30	40

表-7 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	0.020	-	10
	詳細点検	0.030	-	-
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

注) 但し、これらの数値は試算ケースに関係なく一定とする。また、表面被覆塗り替えはケース2のみとする。

設定したその他のLCC試算パラメータであり、これらを基にLCC試算を行った。

本研究では、試算ケース1-50における初期建設段階費用を1とした時の、50年後あるいは100年後までに生じる全ての費用をLCC<sub>pt</sub>として定義し、LCC試算を行った。

#### 4.2 LCC試算結果

試算年数50年におけるLCC1およびLCC2の試算結果を図-6、図-7に、また、試算年数100年におけるLCC1およびLCC2の試算結果を図-8、図-9に示す。

まず、ケース1に着目すると、LCC1、LCC2共に最も経済的となる可能性がある一方で、その他の設定に比べばらつきが著しく大きく、最もLCCが高くなる可能性もあることを示している。この傾向は、試算年数が長い場合、また社会的損失を考慮する場合に顕著となることが分かった。しかし、初期建設段階費用は最も安く、試算年数50年では、LCC1が最も大きくなる可能性は16.5%と比較的低いことから、社会的損失の影響が小さい場合で、LCCの評価期間を短く設定でき、かつ、最もLCCが高くなることのリスクを容認する場合には有効であると考えられる。

また、ケース2に着目すると、ケース1に比べ、LCC評価に及ぼす社会的損失の影響が低減され、さらに、ばらつきが小さくなる結果が得られた。また、LCC1について、ケース1のLCC<sub>pt</sub>の期待値との間に大きな差が認められないことから、ケース1に伴うリスクを低減する目的と

して有効であると考えられる。

一方、ケース 3 に着目すると、その他の設定に比べばらつきが著しく小さく、LCC2 において優位性を示す結果となったが、その一方で、LCC1 は最も不利な結果となった。これは、ケース 3 の初期建設段階費用が、試算年数 50 年の場合で、1.23、試算年数 100 年の場合で 1.26 と大幅に割高となるためであり、このことを考慮すると、ケース 3 は LCC 評価に及ぼす社会的損失の影響が多大であるような状況において有効であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、LCC 評価に社会的損失を考慮し、評価手法にリスクという概念を導入し、3つのケースにおける比較を行った。その結果、本研究の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 対策を行わなかったケース 1 は、LCC 結果のばらつきが大きく、最も LCC が高くなるリスクを伴うが、試算年数が 50 年で、かつ、そのリスクを容認する場合には有効である。
- (2) 表面被覆工を施したケース 2 は、ケース 1 でのリスクが大き過ぎるような場合において、リスクを低減する手法として有効である。
- (3) エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用したケース 3 は、ケース 1、2 に比べ、初期建設費用は割高となるが、社会的損失の影響が大きいような状況において有効である。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 入田一ほか：アクリルゴム系防水材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
- 3) 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
- 4) 高橋稔明ほか：海洋環境における RC 構造物の

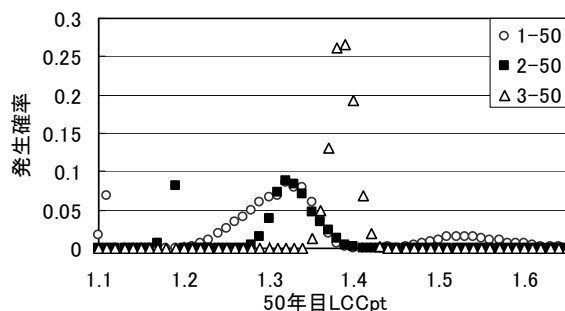


図-6 試算年数 50 年における LCC1 結果

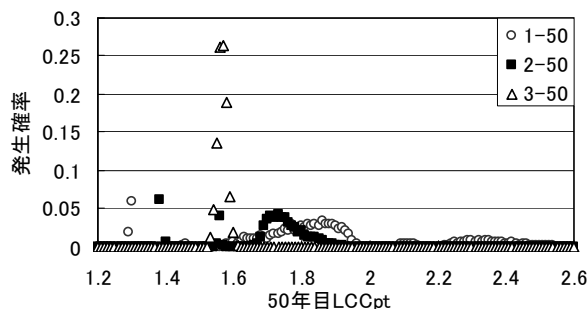


図-7 試算年数 50 年における LCC2 結果

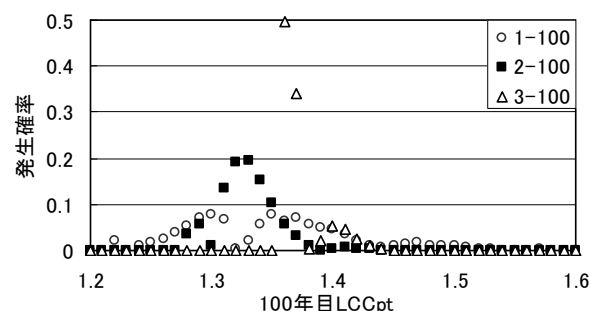


図-8 試算年数 100 年における LCC1 結果

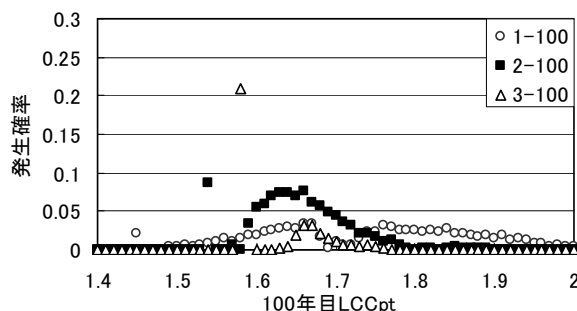


図-9 試算年数 100 年における LCC2 結果

- 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，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1945-1950，2003
- 5) 堤智明ほか：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
- 6) 国交省土木研究所ほか：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)，2001.3
- 7) 建設物価調査会：建設物価，No.968，2003.3