

# コンクリート構造物の耐久性評価とLCC算出システム

森 康雄\*

コンクリート構造物の耐久性評価及びLCC (Life Cycle Cost) 算出システムは、既設コンクリート構造物を補修する際の最適な補修工法を選定するためのツールであり、多くの機関でシステムの開発が行われている。

本システムは、中性化、塩害、化学的腐食等により劣化したコンクリート構造物の耐久性評価と補修後のライフサイクルの予測を行うシステムである。本システムにおいては、耐久性評価基準や補修材料の特性を設定することにより、いくつかの補修工法について初回の補修工事費と其後の維持管理費を含めたトータルコストを比較し、一定期間内で最も経済的な補修工法を選択することができる。

キーワード：コンクリート構造物、ライフサイクルコスト、耐久性評価

## 1. はじめに

コンクリート構造物を新しく建設する場合、もしくは既設構造物をリニューアルする場合においても、初期にかかる工事費だけでなく、その後必要となる維持更新費を含めた、いわゆるライフサイクルコストをもとに構造や施工法を選定することが重要である。

既設コンクリート構造物を補修する際の最適な補修工法を選定するためには、構造物の物理的耐久性をもとに、ある一定期間に必要な補修工事のトータルコスト、いわゆるLCCを算出することが重要である。ここでは、開発したLCC算出システムの概要と適用事例について紹介する。

## 2. システムの概要

構造物の耐久性評価及びLCC算出システムの概略のフローをFig.1に示す。

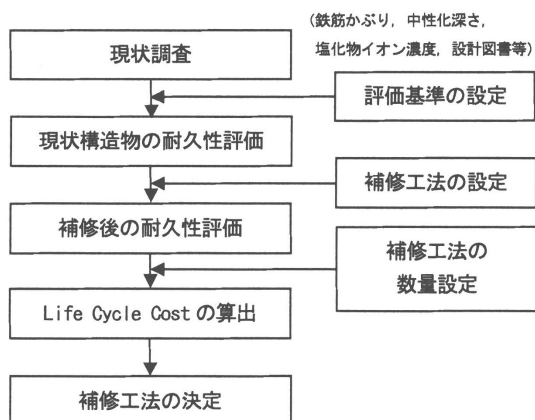


Fig. 1 システムの概略フロー

\* 土木本部 土木技術部 リニューアルグループ

### ①現状構造物の耐久性評価

現状構造物の調査データ（鉄筋かぶり、中性化深さ、塩化物イオン濃度）と設計図書（コンクリート配合、図面等）をもとに現状構造物の耐久性評価を行う。ここでは、設定した耐久性評価基準をもとに、残存耐用年数を算出し補修の要否を決定する。

### ②補修後のライフサイクルの予測

補修工法として、表面被覆工法、断面修復工法、電気防食工法、再アルカリ化工法の中から選定し、各工法で使用材料の物性値や標準的な耐用年数を設定し、これをもとに、各工法で補修した場合の構造物のライフサイクルを予測する。

### ③最適な補修工法の選定

各補修工法について初回補修工事費と其後の一定期間における補修工事費の合計費用を算出・比較し、最適（最も経済的）な補修工法を選定する。

## 3. 耐久性評価

構造物の任意の時刻における中性化深さや塩化物イオン濃度分布から鉄筋の腐食発生確率またはコンクリートのひび割れ発生確率を算出し、劣化の進展度を定量的に評価する。さらに、劣化の進展度を耐久性評価基準と比較し、ライフサイクルを計算する。

### 3.1 モデル

中性化と化学的腐食の進行による構造物の中性化深さは下式(1)に示すように $\sqrt{t}$ 法で、塩害の進行による塩化物イオン濃度の浸透は、下式(2)で示すようにフィックの法則に基づくものとして解析する。

[ $\sqrt{t}$ 法]

$$x = k\sqrt{t} \quad (1)$$

x : 中性化深さ

k : 中性化速度係数  
t : 時間

[フィックの法則]

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} \quad (2)$$

C : 塩化物イオン濃度  
D : 塩化物イオンの拡散係数  
x : 構造物表面からの深さ  
t : 時間

補修後の塩化物イオン濃度分布は、Fig. 2 の式(3)に示す差分法を用いて計算することも可能である。<sup>1)</sup>

	C(x <sub>i-1</sub> , t)	C(x <sub>i</sub> , t)	C(x <sub>i+1</sub> , t)	
--	-------------------------	-----------------------	-------------------------	--

$$C(x_i, t + \Delta t) = \frac{C(x_{i-1}, t) - 2C(x_i, t) + C(x_{i+1}, t))}{\Delta x^2} \Delta t + C(x_i, t) \quad (3)$$

Fig. 2 差分法による拡散方程式の概念

### 3. 2 耐久性評価基準

土木学会のコンクリート標準示方書 [維持管理編] (2001 年制定) では、コンクリート構造物の劣化過程とその症状が、劣化機構に応じて Fig. 3 のように示されている。

	潜伏期	進展期	加速期	劣化期
中性化塩害		鉄筋腐食	コンクリートひび割れ	剥離・剥落
化学的腐食	コンクリート変質	鉄筋腐食		

Fig. 3 コンクリート構造物の劣化過程

構造物の耐用期間やライフサイクルは耐久性評価基準によって異なる。ここでの、中性化と塩害の耐久性評価基準は、鉄筋腐食またはコンクリートのひび割れのいずれかをその発生確率で設定する。また、化学的腐食の耐久性評価基準はコンクリートの腐食深さ(≒中性化深さ)または表面被覆材の劣化のいずれかを任意に選択、設定する。

土木学会のコンクリート標準示方書 [施工編] (平成 11 年版) では鉄筋の腐食発生条件が、以下のように示されている。<sup>2)</sup>

中性化の場合 : 中性化残り深さ (鉄筋かぶり - 中性化深さ) が 10mm

塩害の場合 : 鉄筋位置における塩化物イオン濃度が 1.2kg/m<sup>3</sup>

### 3. 3 劣化症状発生確率

#### (1) 中性化と塩害

中性化と塩害の潜伏期、進展期における耐久性を以下の

通り評価する。

潜伏期は、鉄筋組立の施工誤差によるかぶりのバラツキと劣化因子の進展速度のばらつきを考慮して劣化症状をその発生確率で評価する。一方、進展期間は、構造物やその周辺環境に関わる特性値による単純計算とする。

#### ①潜伏期

構造物竣工後の鉄筋腐食の進展状況 (鉄筋の腐食発生確率) は以下のように計算する。<sup>3)</sup>

中性化の場合は、任意の時刻における中性化深さの分布 f(C) が、平均値 C、標準偏差が C・v の正規分布に、鉄筋かぶりの分布 f(D) は、平均値 D、標準偏差が σ の正規分布であるとすると、中性化残り深さ (鉄筋かぶりと中性化深さの差) の分布 f(D-C) は、平均値 (D-C)、標準偏差が ((C・v)<sup>2</sup> + σ<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup> の正規分布となる。

すなわち、構造物竣工後の経過時間 t における鉄筋の腐食発生確率 P は

$$P(t) = \int_{-\infty}^{10} f(D-C) d(D-C) \quad (4)$$

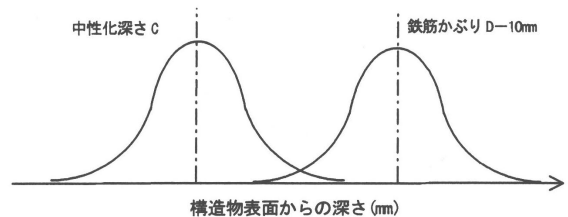


Fig. 4 中性化深さと鉄筋被りの分布

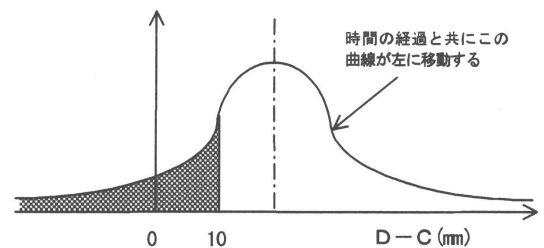


Fig. 5 中性化深さと鉄筋かぶりの差の分布

で表され、式(4)の値が Fig. 5 のハッチング部分に相当する。ここで、鉄筋の腐食発生確率とは、評価対象とする鉄筋全延長に対する腐食している鉄筋の延長の割合を意味する。

ここに

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} \cdot \exp \frac{-(x-x)^2}{2\sigma^2} \quad (5)$$

塩害の場合は、前述の中性化深さを鉄筋が腐食開始する塩化物イオン濃度 1.2kg/m<sup>3</sup>の深さに置き換えて計算する。

#### ②進展期

鉄筋腐食からひび割れ発生までの進展期間 T<sub>ck</sub> は、Fig. 6 に示すように、土木学会の「コンクリート構造物の

維持管理指針(案)」をもとに計算する。<sup>4)</sup>

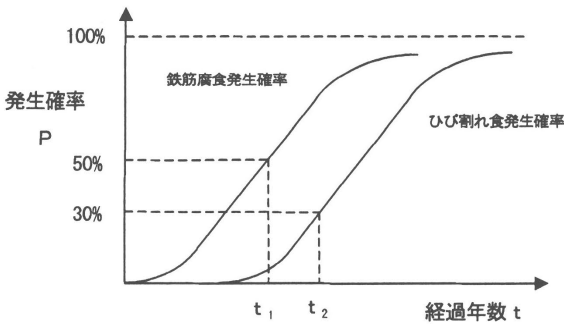
$$T_{ck} = \frac{\alpha_{ck} \cdot C_c \cdot Q_{ck}}{E_{ck}} \quad (6)$$

$\alpha_{ck}$  : かぶりコンクリートのひび割れ抵抗性にかかわる係数

$C_c$  : 鉄筋かぶり

$Q_{ck}$  : ひび割れ発生時間にかかわるコンクリートの品質係数

$E_{ck}$  : ひび割れ発生時間にかかわる環境係数



$t_1$  : 耐久性評価基準を鉄筋腐食発生確率 50%とした場合の耐久期間  
 $t_2$  : 耐久性評価基準をひび割れ発生確率 30%とした場合の耐久期間

Fig. 6 鉄筋腐食発生率とコンクリートひび割れ発生率

(2) 化学的腐食

化学的腐食では、鉄筋の腐食を評価の対象としないため構造物の耐久性、中性化や塩害とは異なりコンクリートの腐食深さ(≒中性化深さ)または表面被覆材の劣化を対象として評価する。

①潜伏期

潜伏期間とは、表面被覆材などのコンクリート保護層が劣化してコンクリートが浸食されるまでの時間であるが、コンクリート保護層の劣化(劣化因子の浸透)過程が定量化されていないため、耐久性評価は困難である。従って、コンクリート保護層がない構造物では、潜伏期が存在せず、構造物竣工と同時に進展期を迎える。

②進展期

コンクリートが、ある一定深さまで浸食(中性化)される進展期間は、 $\sqrt{t}$ 法をもとに計算するものとし、浸食速度のばらつきは考慮しない。

4. 補修効果の設定

現状構造物の耐久性評価の結果をもとに、初回の補修時期と補修工法を設定する。2回目以降の補修時期は補修効果を考慮して耐久性評価を行い、耐久性評価基準をもとに自動計算される。

補修工法は以下の工法から選択可能である。

①表面被覆工法

構造物表面に液状の材料を塗布するかシート状の膜を貼るか断面修復材と共に打ち込んで、二酸化炭素、塩化物イオン、硫酸イオン、水、酸素などの劣化因子の浸透を抑制する塗膜を構造物表面に形成する工法である。

②断面修復工法

中性化領域や塩化物イオン濃度が高い部分または鉄筋の腐食やひび割れにより剥離した部分をはつり、ポリマー入りセメントモルタル等でもとの形状に修復する工法である。

③電気防食工法

構造物表面に電極を埋め込んで微弱の電流を鉄筋に流すことにより、電気化学的に鉄筋腐食の進行を停止させる工法である。

④再アルカリ化工法

中性化したコンクリート構造物の表面からアルカリ性溶液を浸透させ、アルカリ性を回復させると同時に、鉄筋の表面に不動態皮膜を形成し、鉄筋腐食の進行を停止させる工法である。

⑤脱塩工法

コンクリート中に浸透した塩化物イオンを電気泳動の原理を利用してコンクリート表面に移動させ、除去する工法である。

各補修工法の補修効果をTable1に示す。

Table1 補修工法の補修効果

	中性化	塩害	化学的腐食
表面被覆工法	二酸化炭素浸透抑制	塩化物イオン浸透抑制	硫酸イオン浸透抑制
断面修復工法	アルカリ性回復	塩化物イオン除去	強度回復 アルカリ性回復
電気防食工法	(鉄筋腐食進行停止)	鉄筋腐食進行停止	—
再アルカリ化工法	アルカリ性回復 鉄筋腐食進行停止	—	—
脱塩工法	—	塩化物イオン除去	—

a) 表面被覆工法

表面被覆材の中性化阻止性能(促進試験により測定)及び塩化物イオン浸透量についての基準をTable2, Table3に示す。

表面被覆材の耐用年数は、材質、厚さ、施工条件、環境に応じて異なるが、一般には10~15年程度とされている。また、表面被覆材の経年劣化による性能低下を考慮すれば、より現実的な評価が可能となる。

b) 断面修復工法

断面修復材の中性化速度係数や塩化物イオンの拡散係数は、材料の水セメント比(水結合材比)やポリマー混入率によって異なる。土木学会のコンクリート標準示方書[

Table2 表面被覆材の中性化阻止性能基準<sup>5)</sup>

基準名	発行	中性化阻止性
維持修繕要領(橋梁編)	日本道路公団	1mm以下
	首都高速道路公団	1mm以下
コンクリート構造物維持管理マニュアル(案)	J R 西日本	有機材料 0.75mm以下
		無機材料 1.2mm以下
建造物保守管理の標準	鉄道総合技術研究所	3mm以下

$$S_0 = P_0 \cdot (1+e)^n / (1+i)^n \quad (10)$$

Table3 表面被覆材の塩化物イオン浸透抑制基準<sup>5)</sup>

基準名	発行	種類	塩化物イオン透過量 (mg/cm <sup>2</sup> ・day)
道路橋の 塩害対策指針(案)	日本道路協会	A種	0.01
		B種	0.01
		C種	0.001
塩害を受けた土木構造物 の補修指針(案)	建設省総プロ	1種	0.001以下
		2種	0.01以下
港湾コンクリート構造部の 劣化防止・補修に関 する技術調査報告書	沿岸開発技術 センター	I・II	0.01以下
		III・IV	0.001以下
		V・VI	0.0001以下

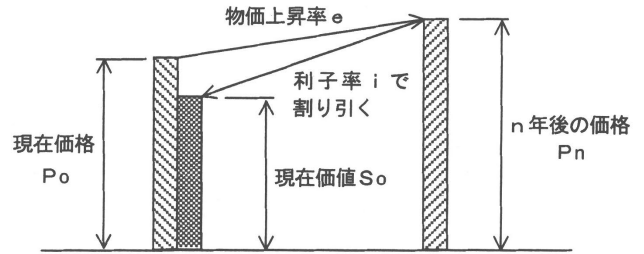


Fig.7 現在価値への変換の概念

この考え方は、将来予測における時間的要因をどう考慮するかを表現したものであるが、実際には物価上昇率や利率率を変化させることにより、LCC評価結果が異なってしまうという課題もある。また、物価上昇率や利率率は常に変動するうえ、補修に必要な資金の調達方法も多種多様であるため、LCCの適正な予測は難しいと言える。

施工編]では中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数を以下の通り算出するとしている。<sup>6)</sup>

①中性化速度係数  $k_0$  (cm/√年)

$$k_0 = \beta (-0.357 + 0.9 \times (W/B)) \quad (7)$$

ここに

$W/B$  : 有効水結合材比 (=  $W / (C_p + k \cdot A_d)$ )

$W$  : 単位体積あたりの水の質量

$B$  : 単位体積あたりの有効結合材の質量

$C_p$  : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

$k$  : 混和材の種類により定まる定数

フライッシュの場合:  $k=0$

高炉スラグの場合:  $k=0.7$

$A_d$  : 単位体積あたりの混和材の質量

$\beta$  : 環境の影響を表す係数で以下の通りとする

乾燥しやすい環境または

南に面している場合:  $\beta=1.6$

乾燥しにくい環境または

北に面している場合:  $\beta=1.0$

どちらでも無い場合:  $\beta=1.3$

②塩化物イオン拡散係数

・普通ポルトランドセメントを用いる場合

$$\log D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 0.97 \quad (8)$$

(8)

・高炉セメントを用いる場合

$$\log D = 19.5(W/C)^2 - 13.8(W/C) + 1.76 \quad (9)$$

## 5. LCC算出

ライフサイクルコスト算出の目的は、評価する期間に発生するトータル金額の絶対値の算出ではなく、各種補修工法の代替案の比較である。

構造物の補修時期は補修工法ごとに異なるため、仮に単純計算したトータル金額が同じでも、現在の価値に変換した場合LCCが異なることがある。

現在価格  $P_0$  の品物を  $n$  年後に購入する費用  $P_n$  の現在価値  $S_0$  は式 (10) で表される。現在価値への変換の概念を Fig. 7 に示す。

## 6. 実施例

以下に、実際に中性化と塩害で劣化した構造物において、LCCをもとに最適な補修工法を検証した事例を紹介する。

### (1) 中性化劣化事例

#### ①調査データ

構造物	: 鉄道橋橋脚
建設時期	: 1980年
場所	: 四国地方山間部
鉄筋かぶり深さ	: 29mm (平均値)
中性化深さ	: 23mm
竣工からの経過年数	: 22年
コンクリート強度	: 21N/mm <sup>2</sup>
水セメント比	: 0.59
鉄筋径	: 19mm

②耐久性評価基準: 鉄筋腐食発生確率 50%

③現状構造物の耐久性評価結果

中性化速度係数	: 4.9mm/√年
耐久期間	: 16年
残存耐用年数	: -6年 (6年超過)
現状構造物の鉄筋腐食発生率	: 66%

④補修工法設定

- Case1: 断面修復工法 (ポリマー入りセメントモルタル, 中性化速度係数: 2mm/√年)
- Case2: 断面修復工法+表面被覆工法 (ポリマー入りセメントモルタル, 中性化速度係数: 1mm/√年, 表面被覆材の耐用年数: 10年)
- Case3: 電気防食工法 (耐用年数: 40年)
- Case4: 再アルカリ化工法 (アルカリ性保持期間: 15年)

⑤補修後の耐久性評価

補修後の中性化深さの経時変化を Fig. 8 に、鉄筋の腐食発生確率の経時変化を Fig. 9 に示す。

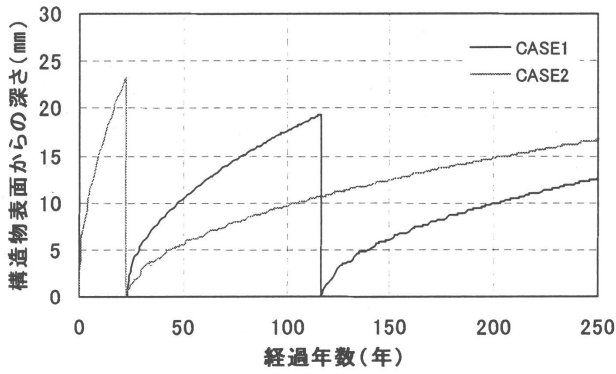


Fig. 8 中性化深さ経時変化

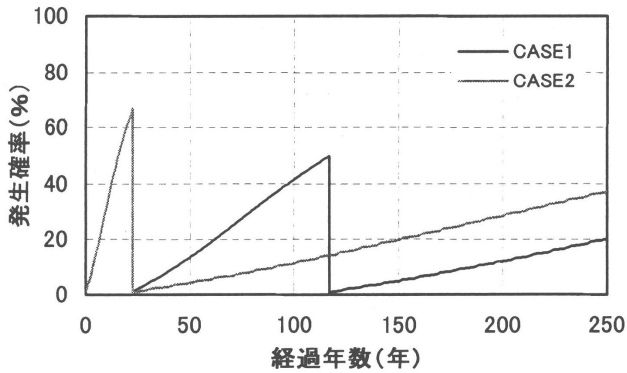


Fig. 9 鉄筋腐食発生確率の経時変化

⑥LCC算出

LCC算出結果を Fig. 10 に示す。ここで、ライフサイクルコスト比率とは、100 年間の LCC が最大となる補修ケースの LCC に対する各補修ケースの LCC の比率である。また、LCC とは初回補修時期以降 100 年間に必要となる補修工事費の合計である。

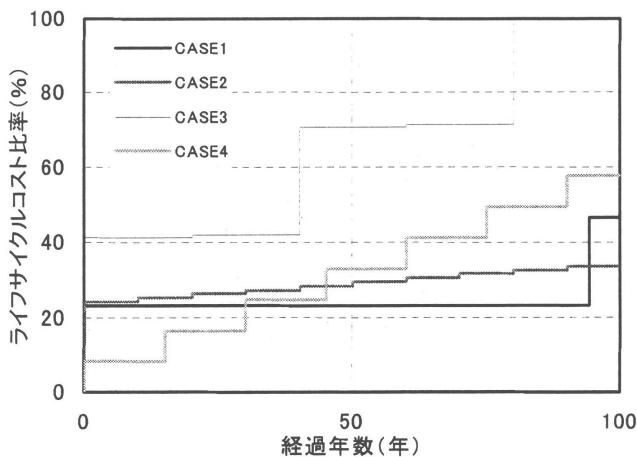


Fig. 10 LCC算出結果

⑦考察

調査データをもとにした現状構造物の中性化速度係数 4.9mm/√年と建設時の水セメント比 0.59 をもとに、式 (7) から計算した中性化速度係数 1.7~2.8mm/√年を比較すると、かなり大きな値となっており、中性化の進行を促進するような環境条件にあったものと考えられる。

初回補修時期から100年間のLCCの比較からも判断されたとおり、中性化による劣化に対しては、断面修復工法や表

面被覆工法で中性化速度係数を1~2mm/√年に抑えることができれば、経済的に耐久性が確保されることが分かる。再アルカリ化工法もイニシャルコストが小さいため、アルカリ性保持期間を長く設定できれば、経済的な工法となる。

(2) 塩害劣化事例

構造物 : 道路高架橋箱桁  
 建設時期 : 1984 年  
 場所 : 瀬戸内海沿岸部  
 竣工からの経過年数 : 18 年  
 コンクリート強度 : 24N/mm<sup>2</sup>  
 水セメント比 : 0.56  
 鉄筋径 : 19mm

Table4 調査データ

調査データ	単位	エリア1	エリア2
鉄筋かぶり深さ(平均値)	mm	47	41
限界塩化物イオン濃度深さ	mm	24	53

②耐久性評価基準 : コンクリートひび割れ発生確率 20%

③現状構造物の耐久性評価結果

現状構造物の耐久性評価結果を Table5 及び Fig. 12 に示す。

④補修工法設定

Case1 : 表面被覆工法 (塩化物イオン浸透率 : 0.001mg/cm<sup>2</sup>・day)

Case2 : 断面修復工法 (ポリマー入りセメントモルタル, 塩化物イオン拡散係数 : 0.2cm<sup>2</sup>/年)

Case3 : 断面修復工法+表面被覆工法 (ポリマー入りセメントモルタル, 塩化物イオン拡散係数 : 0.2cm<sup>2</sup>/年, 塩化物イオンの浸透率 : 0.001mg/cm<sup>2</sup>・day, 表面被覆材の耐用年数 : 10 年)

Case4 : 電気防食工法 (耐用年数 : 40 年)

Table5 耐久性評価結果

項目	単位	エリア1	エリア2
塩化物イオン拡散係数	cm <sup>2</sup> /年	0.3	0.5
塩化物イオン浸透率	mg/cm <sup>2</sup> ・d	0.001	0.003
耐久期間	年	56	18
残存耐用年数	年	38	0
現状構造物のひび割れ発生率	%	0	19

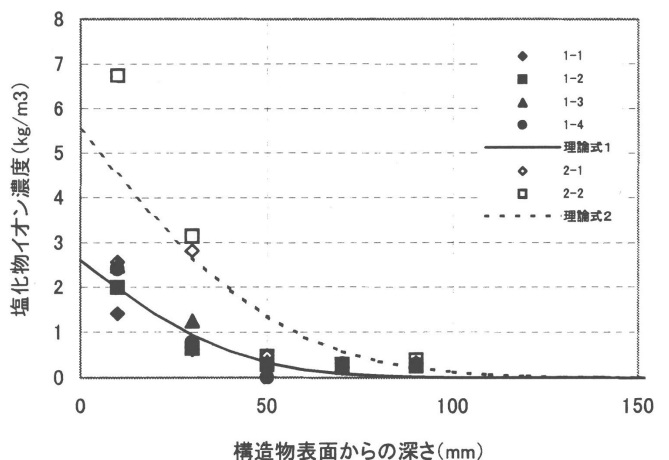


Fig. 11 塩化物イオン濃度分布

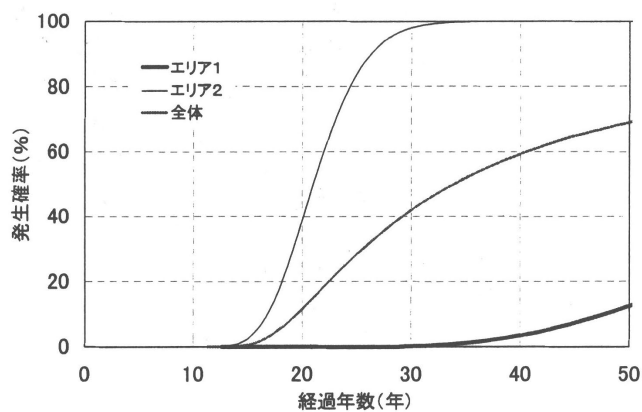


Fig. 12 コンクリートひび割れ発生確率の経時変化

⑤LCC算出

LCC算出結果をFig. 13に示す。

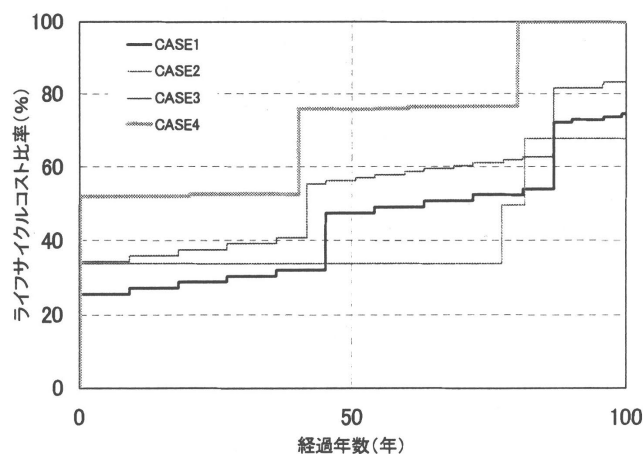


Fig. 13 LCC 算出結果

⑥考察

現状構造物の塩化物イオン拡散係数  $0.3\sim 0.5\text{cm}^2/\text{年}$ は、建設時の水セメント比  $0.56$  をもとに、式 (8) から計算した塩化物イオン拡散係数  $3.3\text{cm}^2/\text{年}$  よりも小さく、良質なコンクリートであったと判断される。

表面被覆工法によって塩化物イオン浸透率を  $0.001\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$  に、断面修復工法によって塩化物イオン拡散係数を  $0.2\text{cm}^2/\text{年}$  程度に抑えることができれば、初回補修時期から  $100$  年以内においては、いずれも電気防食工法よりも経済的であることが分かる。

7. 今後の課題

最近では、公共工事の事業計画から個別の構造物の建設や維持管理など建設関係では、いろいろな場面で LCC という言葉が用いられている。「当面かかる費用だけでなく、その後の維持管理費も含めたトータルコストで評価する。」という考え方は大切である。しかし、構造物の物理的耐用年数を定量的に精度よく予測評価することは、非常

に難しく、構造物の耐久性評価は未だ試行錯誤の段階であると言える。以下に、耐久性評価と LCC 評価に関する課題を述べる。

①耐久性評価

現在、中性化や塩害は主に簡単な数値計算により個別の事象として解析されているが、構造物の劣化因子である二酸化炭素、酸素、水、塩化物イオンなどとコンクリートの細孔および pH と鉄筋の腐食を複合的に解析できるモデルの開発が望まれる。

また、最近では多くの補修材料が開発されているが、補修後の耐久性評価に欠かすことのできない、表面被覆材や断面修復材の塩化物イオン浸透率、中性化速度係数、塩化物イオン拡散係数を明確にし、適切な材料を選定する必要がある。

②LCC 評価

コンクリート標準示方書 [維持管理編] では、設計耐用年数の上限を  $100$  年としているが、「LCC 評価期間を何年に設定すればよいか?」ということは、構造物の将来的な使用計画をもとに決定されるが、非常に難しい問題である。

耐久性評価や LCC 評価は将来予測であり、さまざまな条件設定のもとに将来を予測するものであること、さらに、将来的な補修工法 (材料) の技術開発を考えると、一定期間ごとに構造物の耐久性の再評価を行い、常に最善の維持管理方法を選択する必要がある。

8. おわりに

今後、本格的な維持・再生の時代を迎えるにあたって、最近のコンクリート構造物の補修工事について所感を述べる。

コンクリート構造物を大規模に補修する場合は、小規模な補修として左官仕上げするのは異なり、設計・施工に際して幅広い検討が必要である。現状では、多くの材料メーカーが独自で開発した材料を施設管理者が個別に検討して使用している。しかし、補修材量の物性値も不明確であり、構造物の耐久性 (性能) が保障されないまま施工されているのが現状である。本格的に構造物を補修・補強するようになってからの歴史は浅く、長期的な耐久性や強度が確認されない材料や工法で施工せざるを得ない状況であることを考えると、第三者への安全を確保しつつ、「実物構造物を使った実験」であるとの認識をもって、関係者が共同で技術開発を進める必要があると考える。

参考文献

- 1) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信昭, 三浦成夫: 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp.115, 1995.8
- 2) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会: 平成 11 年版コンクリート標準示方書 [施工編], pp.10-11, 2000.1
- 3) 和泉意登志, 喜多達夫, 前田照信: コンクリート構造物の耐久性

- シリーズ中性化, pp. 50-52, 1990. 9
- 4) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会  
 会耐久性・耐久設計部会：コンクリート構造物の耐久性設計指針  
 (案), コンクリートライブラリー第82号, pp. 88-96, 1995. 11
- 5) コンクリート工学協会コンクリート構造物のリハビリテーション  
 研究委員会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員  
 会報告書, pp. 157, 186, 1998. 10
- 6) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員  
 会：平成 11 年版コンクリート標準示方書 [施工編], pp. 60-62,  
 2000. 1

## Durability Evaluation of a Concrete Structure and LCC Calculation System

Yasuo MORI

### Abstract

Durability evaluation of a concrete structure and LCC (Life Cycle Cost) calculation system are the tools for selecting the optimum repair method at the time of repairing an established concrete structure, and development of a system is performed by many organizations.

It is the system which evaluates durability of the concrete structure which deteriorated by neutralization, salt damage, chemical corrosion, etc., and predicts the life cycle after repair. The total cost which includes first-time repair work expense and subsequent maintenance administrative expenses about some repair methods of construction by setting up the characteristic of a durability valuation basis or repair material is compared, and the most economical repair method of construction within a fixed term can be chosen.

Keyword : concrete structure, life cycle cost, durability evaluation