

コンクリート構造物の耐久性評価と L C C 算出システム

森 康 雄

正会員 株式会社熊谷組 土木本部土木技術部リニューアルグループ (〒162-8557東京都新宿区津久戸町2-1)

コンクリート構造物の耐久性評価及びL C C (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。

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り、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その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

1980年代には、コンクリート骨材のアルカリシリカ反応や骨材に含まれる塩化物イオンによるコンクリート構造物の劣化事例が数多く報告されるようになり、コンクリートの品質基準が見直された。また、最近では、トンネル覆工剥落事故を契機にコンクリート構造物の劣化が社会的問題として取り上げられ、あらためてコンクリート構造物の品質や耐久性の保証の重要性が求められるようになった。

2. システムの概要

システムの概略のフローを図-1に示す。

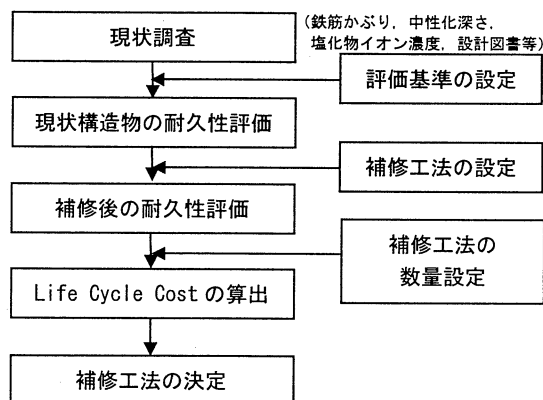


図-1 システムの概略フロー

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）、設計図書（コンクリート配合、図面等）と耐久性基準をもとに耐久性評価を行い、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

最適な補修工法を選択するために、表面被覆工法、断面修復工法、電気防食工法、再アルカリ化工法から、比較検討を行うための補修ケースを設定する。各補修工法で使用する材料の特性を設定し、ライフサイクルを予測する。

③最適補修工法の選定

各補修工法の初回補修工事費と一定期間における補修工事費の合計費用を算出・比較し、最適な補修工法を選定する。

3. 耐久性評価

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確率またはコンクリートのひび割れ発生確率を算出して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に関する中性化深さは $\sqrt{t}$ 法で、塩害に関する塩化物イオン濃度はフィックの法則に基づくものされている。

[$\sqrt{t}$ 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の拡散については差分法を用いて計算することも可能である。¹⁾

	$C(x_{i-1}, t)$	$C(x_i, t)$	$C(x_{i+1}, t)$	
--	-----------------	-------------	-----------------	--

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

図-2 差分法による拡散方程式の概念

3. 2 耐久性評価基準

コンクリート標準示方書〔維持管理編〕では、コンクリート構造物の劣化過程とその症状が、劣化機構に応じて図-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

化学的腐食

鉄筋腐食 コンクリートひび割れ 剥離・剥落

コンクリート変質 鉄筋腐食

図-3 コンクリート構造物の劣化過程

中性化と塩害の評価基準は、鉄筋腐食またはコンクリートのひび割れのいずれかについて確率で設定する。化学的腐食の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設定する。

鉄筋腐食時期の判定は、土木学会のコンクリート標準示方書〔施工編〕平成11年版をもとにした。

鉄筋の腐食発生条件²⁾

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：塩化物イオン濃度が1.2kg/m³

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、進展期は以下の通り算出する。潜伏期は、鉄筋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。進展期は各特性値の平均値による単純計算となる。

①潜伏期

構造物竣工から鉄筋の発錆までの潜伏期は以下のように計算される。³⁾

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 $C \cdot v$ 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 の正規分布である時、中性化残り深さ(鉄筋かぶり－中性化深さ)の分布 $f(D-C)$ は、平均値 $(D-C)$ 、標準偏差が $((C \cdot v)^2 + \sigma^2)^{1/2}$ の正規分布となる。

すなわち、造物建設後の経過時間 t における鉄筋の腐食確率 P は

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

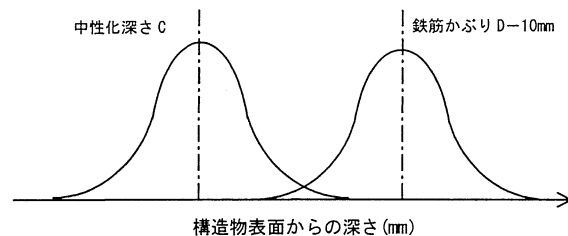


図-4 中性化深さと鉄筋かぶりの分布

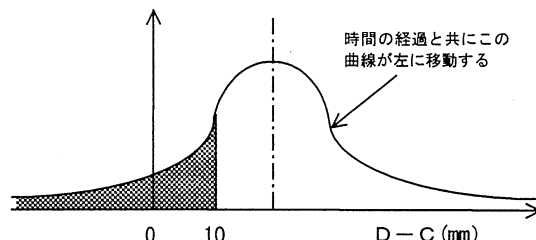


図-5 中性化深さと鉄筋かぶりの差の分布

で表され、上式の値が図-5 のハッチング部分の面積に相当し、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

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

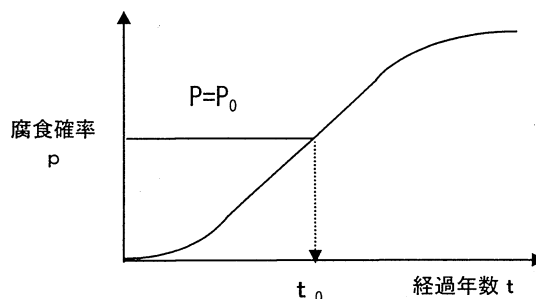


図-6 腐食確率の経時変化

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/m³ 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は、「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。

進展期間 T_{ck} の算出⁴⁾

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

α_{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

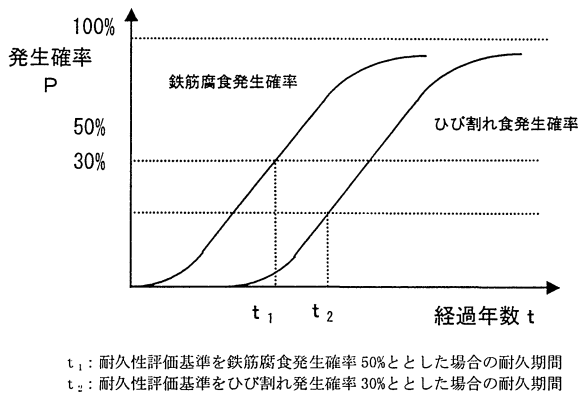


図-7 鉄筋腐食発生率とコンクリートひび割れ発生確率

(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ていないため潜伏期や進展期の算出は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。また、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される（≒中性化深さ）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結果をもとに、補修工法と初回の補修時期を数ケース設定する。

表面被覆工法とは、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形成する工法である。

断面修復工法とは、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クラックにより剥離した部分をはつり、ポリマー入りセメントコンクリート等でもとの形状に修復する工法である。

電気防食工法とは、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。

再アルカリ化工法とは、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させ、鉄筋腐食の進行を停止させる工法である。

脱塩工法とは、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。

各補修工法の劣化進展抑制効果を表-1に示す。

表-1 補修工法の劣化進展抑制効果

	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）及び塩化物イオン浸透量についての基準を表-2、表-3に示す。

表-2 表面被覆材の中性化阻止性能基準⁵⁾

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	

表-3 表面被覆材の塩化物イオン浸透抑制基準⁵⁾

基準名	発行	種類	塩化物イオン透過量 (mg/cm ² ・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

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年程度と考えられている。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も、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。コンクリート標準示方書〔施工編〕に示されている中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数の算出式は以下の通りである。⁶⁾

①中性化速度係数 k_0 (cm/ $\sqrt{\text{年}}$)

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

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 : $k=0.7$
 Ad : 単位体積あたりの混和材の質量
 β : 環境の影響を表す係数で以下の通りとする
 乾燥しにくい環境または
 南に面している場合 : $\beta=1.6$
 乾燥しやすい環境または
 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
 $\log D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 0.97$ (8)

- ・高炉セメントを用いる場合
 $\log D = 19.5(W/C)^2 - 13.8(W/C) + 1.76$ (9)

4. 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、各種補修工法等の代替案の比較である。

維持管理に必要な費用が発生する時期が異なるため、額面上同じ金額でも実質の価値が異なる。一般的には、この要因として物価上昇率 e と利子率 i を考慮し、現在価値に変換して比較する方法が採用されている。

現在価格 P_0 の物を 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図-8 に示す。

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

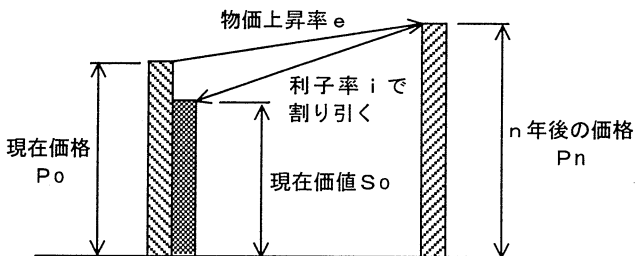


図-8 現在価値への変換の概念

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。実際には物価上昇率や利子率として設定する値により、LCC評価による結果が異なることへの公共的（社会的）な理解が必要である。また、物価上昇率や利子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。

5. 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選定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	: 高速道路高架橋橋脚
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 ²
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

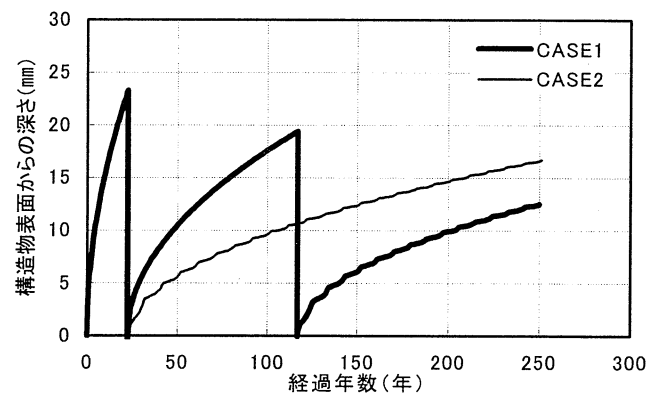


図-9 中性化深さ経時変化

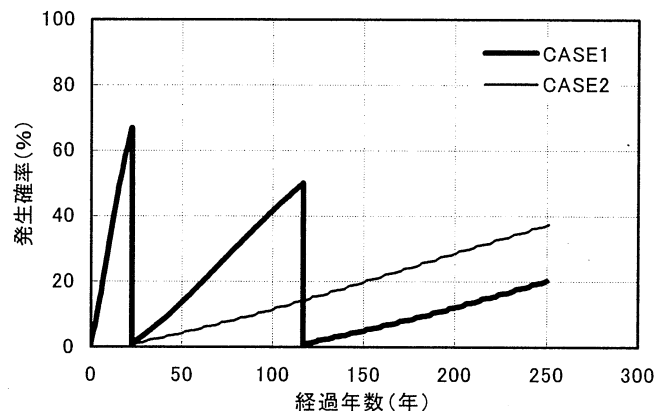


図-10 鉄筋腐食発生確率の経時変化

⑥LCC 算出

LCC 算出結果を図-11 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。

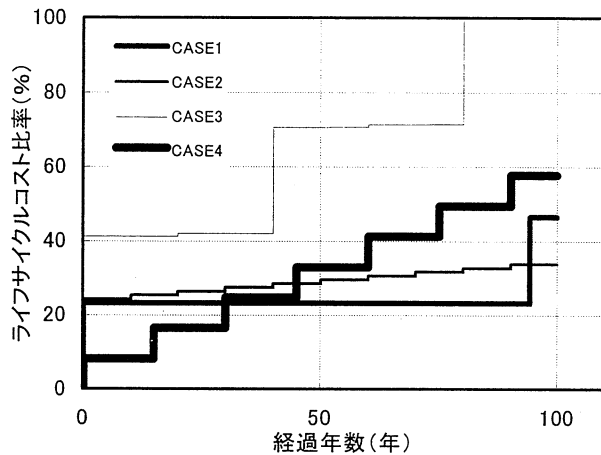


図-11 LCC 算出結果

⑦考察

現状構造物の建設時の水セメント比 0.59 をもとに、式 (7) から算出される中性化速度係数 1.7～2.8mm/√年と比較すると、調査データをもとにした中性化速度係数 4.9mm/√年は、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るとおり、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/mm²
水セメント比 : 0.56
鉄筋径 : 19mm

表-9 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表-10 及び図-12～図-14 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/cm²・day）

表-10 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 ² /年	0.3	0.5
塩化物イオン浸透率	mg/cm ² ・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

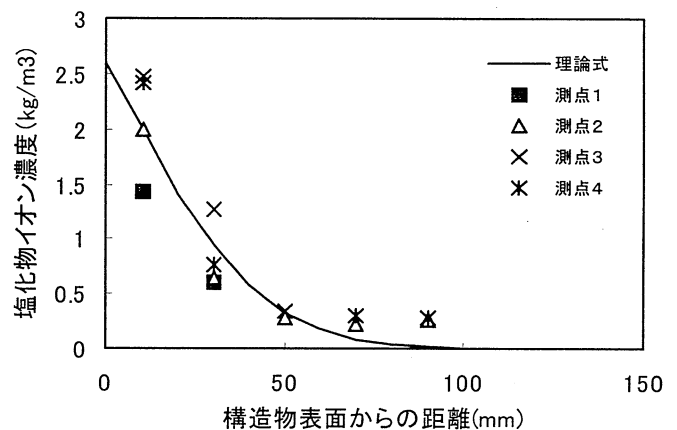


図-12 塩化物イオン濃度分布 (エリア 1)

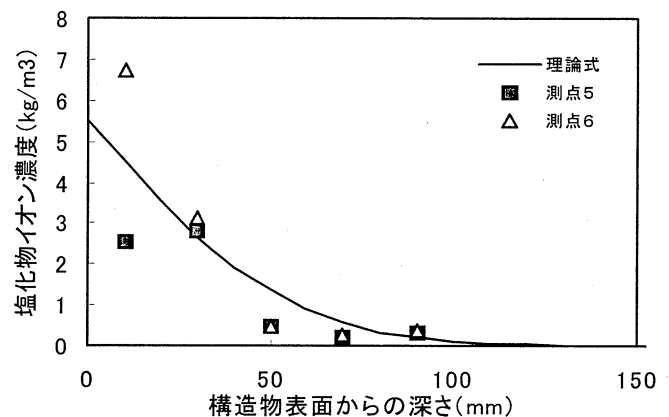


図-13 塩化物イオン濃度分布 (エリア 2)

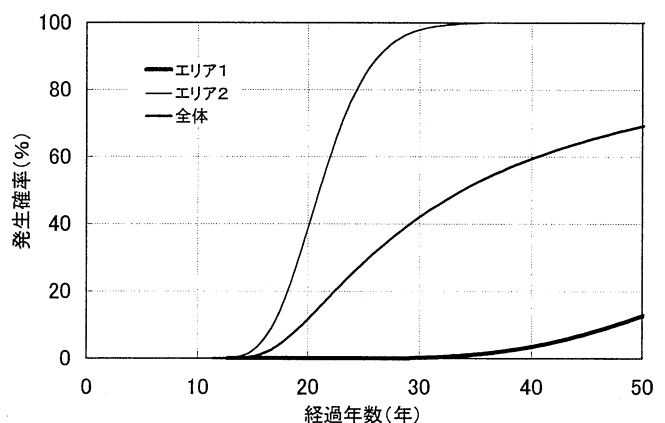


図-14 コンクリートひび割れ発生確率の経時変化

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：0.2cm²/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：0.2cm²/年，塩化物イオンの浸透率：

0.001mg/cm²・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）

⑤LCC算出

LCC算出結果を図-15に示す。

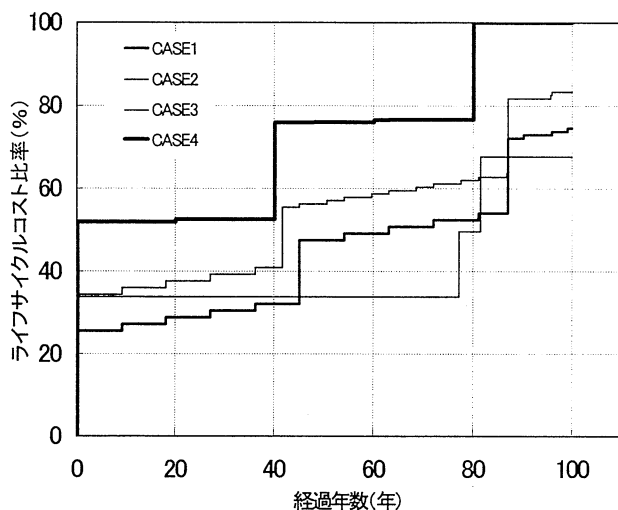


図-15 LCC 算出結果

⑥考察

現状構造物の建設時の水セメント比 0.56 をもとに、式 (8) から算出される塩化物イオン拡散係数 3.3cm²/年は、調査データをもとにした塩化物イオン拡散係数 0.3～0.5cm²/年とは大きく異なる。

表面被覆工法によって塩化物イオン浸透率を 0.001 mg/cm²・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 cm²/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。

6. 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。

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が不明確であることが多いため、材料の選定が適切に行われているか疑問である。

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のか？」ということは、構造物の使用計画、技術開発の早さと関係する問題として残される。

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）の技術的開発を考えると、一定期間ごとに再評価を行い、常に最善の方法を選択する必要があるが生じてくる。

7. 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、コンクリート構造物の補修工事について思うところを述べて終わりとする。

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とは違い、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が、コンクリート補修材料としての規格化が望まれる。特に、構造物のうち構造部材となる部分については、構造検討が必要であり、施工に際しても、材料の強度や性能を保証するための品質管理や検査のほか適切な養生が不可欠である。

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