

特集 「リニューアル」

コンクリート構造物のLCC評価システムのメンテナンス計画への適用
LCCナビの概要と適用事例



竹田 宣典



十河 茂幸



高橋 敏樹
(本社海外土木事業部)

Appreciation of LCC Estimation System for Maintenance Plan of Concrete Structure

- Outline and Appreciation of “LCC Navi” -

Nobufumi Takeda Shigeyuki Sogo Toshiki Takahashi

Abstract

A system called “LCC-Navi” has been developed, which selected a suitable maintenance plan that considered life cycle cost (LCC) of a concrete structure. This paper outlines LCC-Navi and examines an example of a maintenance plan. By comparing LCC for several maintenance plans of marine structures, it was shown that it is possible to decrease the number of repairs and to reduce LCC in service life by applying the improvement method. With this system, LCC evaluation of the maintenance plan of a concrete structure and quantitative evaluation of the effect of various repair methods are possible.

概要

コンクリート構造物のライフサイクルコスト（LCC）を考慮した適切なメンテナンス計画を選定するシステム“LCCナビ”を開発した。本文では、LCCナビの概要を示し、これを用いて、LCCを考慮したメンテナンス計画策定に関して検討した事例について述べる。海洋環境下の構造物に対する複数のメンテナンス計画についてLCCを比較した結果、建設当初あるいは補修時に、表面被覆工や高耐久プレキャスト型枠などの塩分遮断効果の高い耐久性向上工法を適用することにより、設計耐用期間中の補修回数を減少でき、供用中のトータルコストであるLCCを低減できることを示した。このシステムを用いることにより、コンクリート構造物のメンテナンス計画のLCC評価および各種補修工法の効果の定量的評価が可能である。

1. はじめに

近年、社会資本である公共構造物をできるだけ長く使用することが望まれ、コンクリート構造物の高耐久化や長寿命化が強く求められている。しかしながら、高度成長期に建設された構造物の中には、補修や更新が必要なものも多く、特に海岸地域など厳しい環境に置かれている構造物では、建設後数年で塩害などによる劣化が顕著となっている場合もある。

また、公共投資の効率的な運用の観点から、コンクリート構造物に対して、建設当初よりライフサイクルコスト(LCC)を考慮して、点検や補修を含めたメンテナンス計画を策定することが重要になってきている。これまで、既存の構造物についてLCCを事後調査した例¹⁾はあるが、LCCを考慮した構造物の設計やメンテナンス計画について本格的に実施された事例は少ない。土木学会コンクリート標準示方書[施工編](以下、示方書と記述)では、塩化物イオンの侵入による鋼材腐食(いわゆる塩害)に関する耐久性の照査方法

が示されている。これに従って、劣化予測を行った場合、Fig.1に示すように、沿岸線など厳しい環境条件においては、100年間の設計耐用期間内に鉄筋腐食が開始すると予測され、建設当初より耐久性向上対策を適用したり、耐用期間中の適切な時期に補修を行いなが

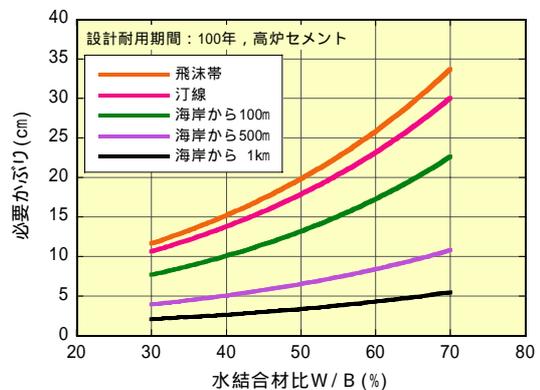


Fig.1 100年間の耐久性を確保する必要かぶり
Cover Required in order to Secure Durability for 100 years

ら供用するなどのメンテナンス計画を策定することが必要となる。

このような背景から、コンクリート構造物のLCCを考慮したメンテナンス計画を選定するシステム“LCCナビ”を開発した。LCCナビは、主として塩害や中性化による劣化の進行予測を行い、これに基づきLCCを評価するシステムである。劣化予測により、ある時期に補修が必要な状態になると、登録した補修工法の中から適切な工法を選択し、設計耐用期間におけるトータルコストであるLCCを算定する。本文では、LCCナビの概要を示し、これを用いたLCCを考慮したメンテナンス計画の検討事例について述べる。

2. LCC評価システム(LCCナビ)の概要

2.1 メンテナンス計画策定, LCC評価方法の概略

LCCナビによるメンテナンス計画策定およびLCC評価の流れをFig.2に示し、LCCナビのパソコン上での初期画面をFig.3に示すが、LCCナビは、新設構造物および既設構造物のリニューアルのいずれにも適用可能である。まず、環境条件や初期建設時の構造物の諸元(かぶり、材料、配合など)を入力し、既設構造物では、補修履歴や劣化調査の結果も入力する。メンテナンス計画およびLCC算定方法は、以下の2種類の解析方法から選ぶことができる。

対話型: 入力条件から構造物の劣化予測を行い、設計耐用期間内に耐久性が確保されない場合は、表面被覆や断面修復など登録してある多数の補修工法の中から適切な工法を選択し、補修後の劣化予測もを行い、再補修の計画を立てる方法。このように、設計耐用期間に達するまでパソコンとの対話形式により、いつ、どのようなメンテナンスを実施するかを決定し、この計画に基づきLCCを算定できる。いくつかのメンテナンス計画に対するLCCを比較、評価することにより、適切な計画を選定することが可能。

最適メンテナンス選定型: 遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、LCCが最小となるメンテナンス計画を自動的に選定する方法。あらかじめ登録している補修工法の中から、いつ、どの工法を適用すればLCCが最小になるかを、解析者の意思に左右されることなく、短時間で回答を出すことが可能。

2.2 LCCの算定方法

コンクリート構造物のLCCは、一般的に式(1)に示すように、供用期間内における初期建設費用(Z_I)、補修費用(Z_{Mi})、更新費用(Z_{Ri})の合計として算定される。補修費用は、塗装の塗り替えや断面修復などの実施に必要な費用の合計である。更新費用は、設計耐用期間内における解体、撤去あるいは再建設に関する費用の合計である。

$$LCC = Z_I + \sum_{i=1}^n Z_{Mi} + \sum_{i=1}^m Z_{Ri} \quad (1)$$

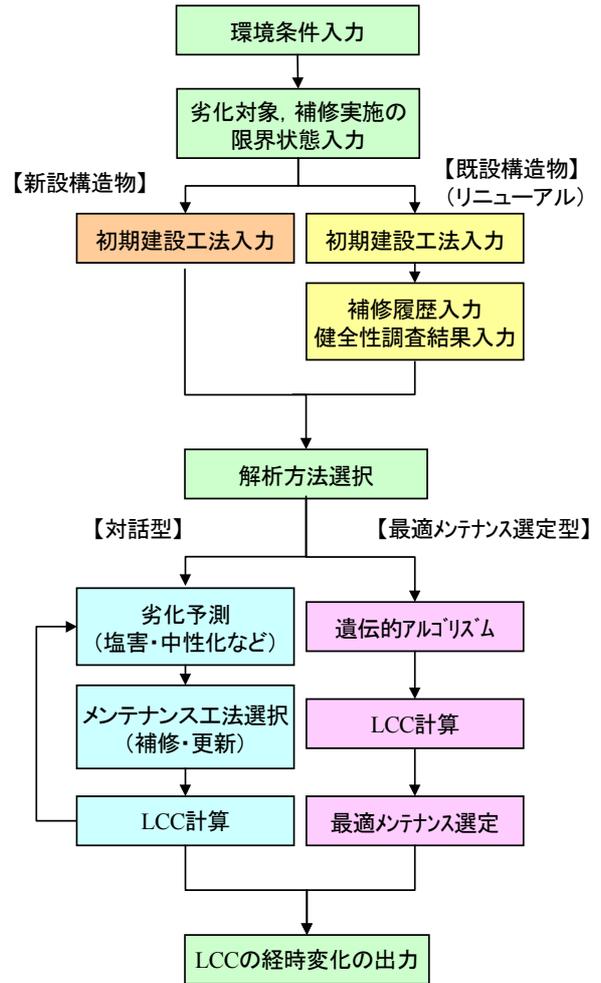


Fig.2 メンテナンス計画策定およびLCC評価の流れ
Flow of Maintenance Plan and Estimation for LCC

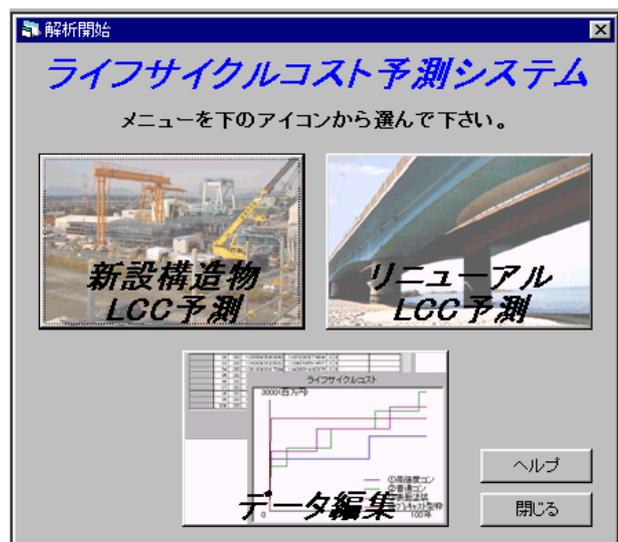


Fig.3 LCCナビの初期画面
Initial Screen on LCC-Navi System

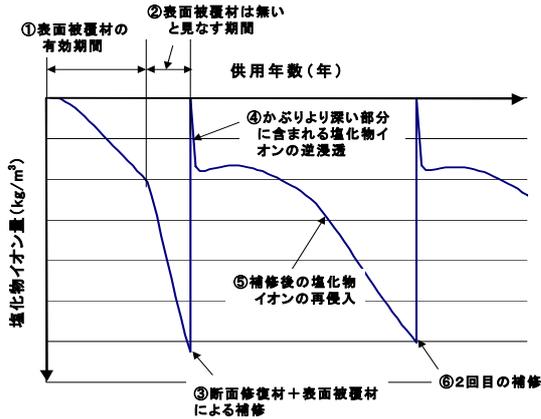


Fig.4 鉄筋位置の塩化物イオン侵入量の予測曲線
A Sample of Prediction Curve for Chloride Ion Penetration

2.3 劣化予測方法

塩害および中性化などの劣化予測は示方書に示されている方法で行う。塩害環境を対象とした場合の塩化物イオンの浸透予測は、当社独自の長期海洋曝露試験に基づいたデータベースを用いた拡散解析により行う。一例として、鉄筋位置に腐食限界塩化物イオン量が侵入した時点で補修を行うとし、断面修復および表面被覆による補修を行った場合の塩化物イオン侵入量の予測曲線を Fig.4 に示す。このような劣化予測曲線を描くことにより、設計耐用期間内に何回補修を必要とするか予測でき、LCCの算定が可能となる。

2.4 LCCナビの操作手順

LCC ナビを用いたメンテナンス計画策定および LCC 算定の手順の概略を以下に示す。

2.4.1 条件入力 下記の項目について数値入力および条件選択を行う。

- (1)環境条件：環境区分，海岸からの距離など
- (2)劣化対象と補修時期：対象とする劣化要因，設計耐用期間，補修を実施する限界状態など
- (3)構造物に関する項目：建設当初のセメント，コンクリートの種類，水セメント比，かぶり，鉄筋径，表面被覆材の有無，構造物の表面積，初期コストなど
- (4)構造物調査結果：調査時期，塩化物イオン量，中性化深さなど (Fig.5 参照)

2.4.2 補修工法の選定 (Fig.6 参照) LCC ナビには、Table 1 に示す補修工法が登録されおり、劣化予測の結果，設定した補修を要する状態になった時点で、性能やコストを考慮して適切な補修工法を選択する。なお、新しい補修工法は、性能とコストをデータベースに入力することにより追加登録することができる。

2.4.3 メンテナンス計画と LCC 評価の出力 劣化予測と補修工法を選択を繰り返し行い、その都度 LCC の値が示される。設計耐用期間までの耐久性の確保を確認し、最終的なメンテナンス計画と LCC が出力される。塩害環境における構造物の塩化物イオンの浸透量予測と LCC の算定例を Fig.7 に示す。

Fig.5 調査結果の入力画面
Input Screen for Investigation Data on LCC-Navi System

Fig.6 補修工法の選択画面
Selection Screen on LCC-Navi System for Repair Methods

Table 1 登録されている補修工法の例
Registered Repair Methods

断面修復工法	コンクリート打替え，ホリマーセメントなど
表面被覆工法	エポキシ樹脂，ビニルエステル樹脂など
電気化学的工法	電気防食工法，脱塩工法など
高耐久性プレキャスト型枠工法	

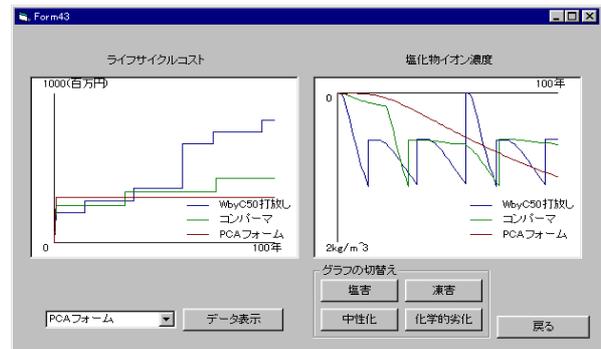


Fig.7 LCC 評価の出力例
A Sample of Output Screen on LCC-Navi System

3 .コンクリート構造物のメンテナンス計画策定とLCC 評価事例

3.1 対象構造物および解析条件

LCC ナビを用いて、塩害を受けるコンクリート構造物のメンテナンス計画策定と LCC 評価を行った結果を以下に述べる。対象構造物は、海洋環境下の橋梁のコンクリート床版とし、表面被覆材や高耐久性プレキャスト型枠（以下 PC 型枠と記述）などの耐久性向上工法を建設当初から適用する場合と補修対策として適用する場合の2ケースについて、設計耐用期間を 150 年として劣化予測に基づき LCC 算定を行った。

橋梁の海岸からの距離は 100m とし、鉄筋のかぶり厚は 5cm とした。表面被覆材や PC 型枠の適用部位は床版下面とし、初期建設における適用面積は 2000m² とした。補修工事における断面修復および表面保護工の適用面積は 100m² とし、表面被覆材の遮塩性が確保される期間は 20 年間とした³⁾。補修工法としては、塩化物イオンが浸透した部分のコンクリートを鉄筋位置まで除去し、断面修復と表面被覆を行う方法および PC 型枠を用いて既設コンクリートとの間をモルタル充填する方法を対象とした。

対象とした表面保護工の仕様、塩化物イオン拡散係数および単位面積当たりの単価を Table 2 に示す。対象とした表面被覆材は、中塗り材が (A) 柔軟型エポキシ樹脂 (道路橋の塩害対策指針案⁴⁾ 塗装系 B 種)、(B) 厚膜型エポキシ樹脂 (同指針案 塗装系 C 種)、(C) 厚膜型ビニルエステル樹脂 (同指針案 塗装系 C 種)、(D) アクリル系ポリマーセメントの 4 種類とした。表面保護材の塩化物イオンの拡散係数は、表面被覆材を塗布したコンクリート (W/C : 50%) を 10 年間海洋環境下に曝露し、塩化物イオン侵入量の分布より拡散方程式を用いて求めた結果、表面被覆材の拡散係数を 10⁻¹¹~10⁻⁹cm²/sec とした⁵⁾。また、PC 型枠のモルタル層の拡散係数は 3.0×10⁻⁹cm²/sec、ポリマー層の拡散係数は 1.0×10⁻¹¹cm²/sec、コンクリート (W/C : 50%)

の拡散係数は 2.4×10⁻⁸cm²/sec、ポリマーセメントモルタルの拡散係数は 0.8×10⁻⁸cm²/sec とした。

表面保護工や PC 型枠などの単価 (材料・施工費)、初期建設費および LCC は、ユニットという単位を用いて表すこととした。

3.2 新設構造物のメンテナンス計画と LCC 評価

建設当初より表面被覆工や PC 型枠を適用し、設計耐用期間まで補修を行う場合の LCC を評価した例を以下に示す。補修実施時期は、示方書における耐久性照査に用いられる鉄筋位置の塩化物イオン量が 1.2kg/m³となった時とし、同一の補修工法を繰り返し実施するものとする。検討を行った初期建設工法と補修工法の組合せを Table 3 に示す。

Table 2 に示す初期建設工法と補修計画を実施した場合の鉄筋位置 (かぶり 5cm) の塩化物イオン量の予測値を Fig.8 に示す。建設後 150 年間における補修回数は、初期建設時に表面被覆を行わず、補修時に断面修復のみ行う場合 (A) は 5 回、初期建設時に表面被覆を行い、補修時に断面修復および表面被覆を行う場合 (B) は 3 回となり、初期建設時に PC 型枠を用いる場合 (C) は補修を必要としない結果となった。また、このようなメンテナンス計画を実施する場合の 150 年間の LCC の推移を Fig.9 に示す。建設当初および補修時に表面

Table 3 初期建設工法と補修工法の組合せ
Combination of Initial construction and Repair Method

	初期建設工法	補修工法		初期建設費 (ユニット)
		断面修復	表面被覆	
A	コンクリート (W/C:50%) + 表面被覆なし	ポリマーセメントモルタル (PCM)	なし	500×10 ⁴
B	コンクリート (W/C:50%) + 厚膜型エポキシ樹脂	ポリマーセメントモルタル (PCM)	厚膜型エポキシ樹脂	550×10 ⁴
C	高耐久性プレキャスト型枠	目地の取り替え (断面修復, 表面被覆はしない)		580×10 ⁴

Table.2 各種補修工法の仕様、性能および単価
Specification, Performance and Cost of Various Kinds of Repair Method

表面保護工名		材料の種類		層数	膜厚 (μm)	拡散係数 (cm ² /sec)	単価 (ユニット/m ²)
無塗装		-		-	0	-	-
表面被覆材	(A) 柔軟型エポキシ樹脂	中塗	柔軟型エポキシ樹脂	1	60	4.7×10 ⁻¹¹	100
		上塗	柔軟型ポリウレタン樹脂	1	30		
	(B) 厚膜型エポキシ樹脂	中塗	エポキシ樹脂	3	450	1.2×10 ⁻¹⁰	200
		上塗	アクリルウレタン樹脂	2	40		
	(C) 厚膜型ビニルエステル樹脂	中塗	柔軟型ビニルエステル樹脂	1	350	7.8×10 ⁻¹¹	200
		上塗	ポリウレタン樹脂	1	30		
	(D) アクリル系ポリマーセメント	中塗	アクリル系ポリマーセメント	2	2500	1.9×10 ⁻⁹	200
		上塗	アクリルウレタン樹脂	1	30		
高耐久性プレキャスト型枠		ポリマー層		1	3000	1.0×10 ⁻¹¹	600
		高強度モルタル層		1	50000	3.0×10 ⁻⁹	
断面修復材		コンクリート (W/C : 50%)		-	-	2.4×10 ⁻⁸	200
		ポリマーセメントモルタル		-	-	0.8×10 ⁻⁸	500

被覆を行わない場合に比べて、表面被覆を行う場合はLCCを約10%を低減でき、PC型枠を用いる場合は、LCCを約30%低減できると予測される。なお、PC型枠を用いた場合、PC型枠自体を取り替える必要は生じないが、10年程度毎にPC型枠の目地(シーリング材)の取り替えが必要となるためLCCは漸増する。

補修費と初期建設費の比率は(M/I)は、建設当初および補修時に表面被覆を行わない場合では1.1となり、補修費が初期建設費を上回るが、建設当初および補修時に表面被覆を行う場合は0.72、建設当初にPC型枠を用いる場合は0.2となり、補修費の比率が低減される。このように、建設当初に表面被覆やPC型枠などの耐久性向上対策を講じることにより、イニシャルコストは若干高くなるが、LCCは低減すると評価される。

3.3 既設構造物のリニューアル計画とLCC評価

補修対策として各種の表面被覆材やPC型枠を適用した場合のLCCを評価した例を以下に示す。

初期建設時に水セメント比50%のコンクリートを用い、20年後にコンクリート打ち替えあるいは表面保護工による補修を実施した場合における鉄筋位置の塩化物イオン量の予測値をFig.10に示す。補修は同一工法を、設計耐用期間の間、繰り返し実施するものとする。補修工法として、水セメント比50%のコンクリートを打ち替える工法を適用する場合は、10年程度に一度の補修が必要であるが、断面修復材として水セメント比50%のコンクリートを用い、表面被覆材として厚膜型エポキシ樹脂を用いて補修する場合は、補修の実施間隔は約25年に延長される。また、断面修復材および表面被覆材として、ポリマーセメントモルタルおよび厚膜型エポキシ樹脂を用いて補修する場合は、補修の実施間隔は約40年となる。このように、塩化物イオン遮断性の高い断面修復材および表面被覆材を用いる

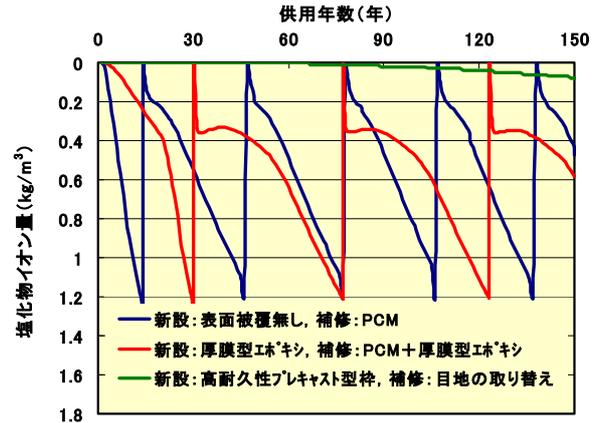


Fig.8 初期建設工法と補修工法が異なる場合の塩化物イオン量の予測値

Prediction of Chloride Ion in Case Methods of Initial Construction and Repair Differ

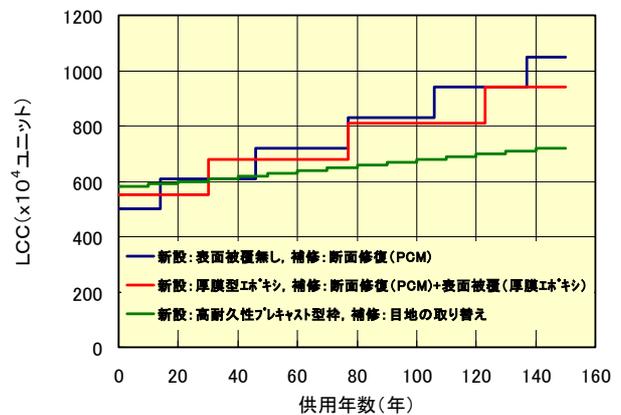


Fig.9 初期建設工法と補修工法が異なる場合のLCC
Life Cycle Cost in Case Methods of Initial Construction and Repair Differ

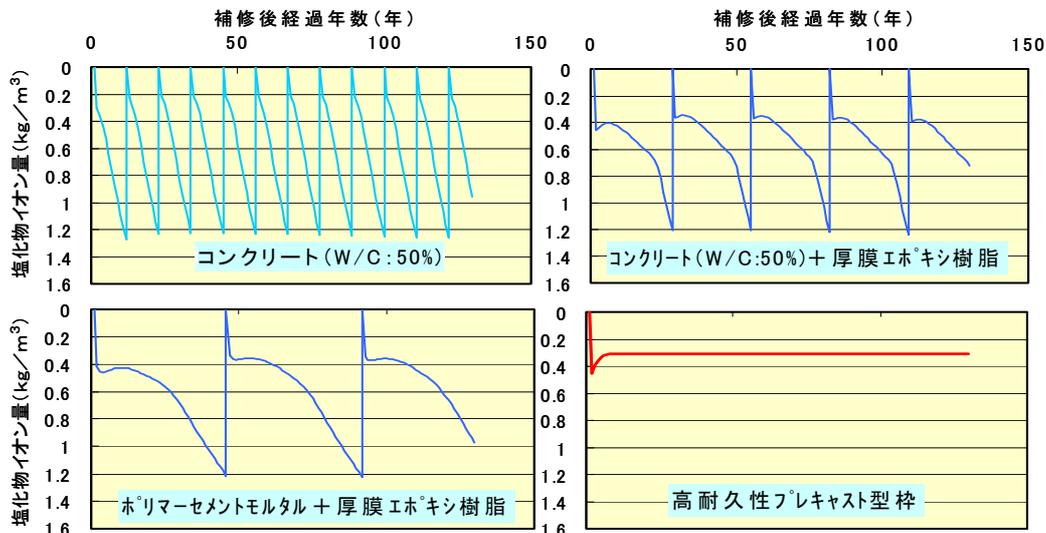
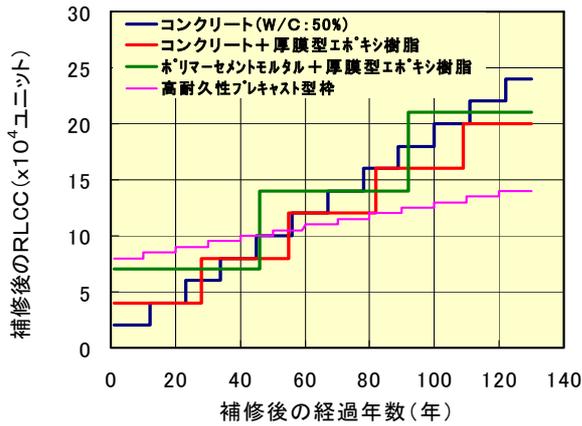
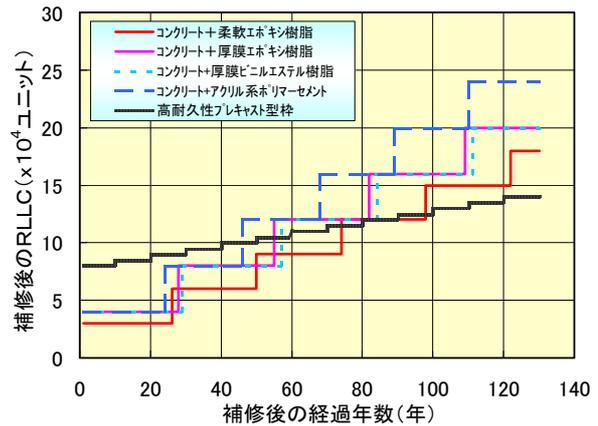


Fig.10 各種表面保護工による補修を実施した場合の鉄筋位置の塩化物イオン量の予測値
Prediction of Chloride Ion at the Time of Repairing by Using Various Kinds of Surface Coating



(a)各種断面修復工法を用いた場合のRLCC



(b)各種表面被覆材を用いた場合のRLCC

Fig.11 補修後のRLCC

Remainder Life Cycle Cost after Repair (RLCC)

ことにより、再補修を実施するまでの期間を長くすることが可能である。また、PC型枠を補修に用いる場合は、補修後130年間、鉄筋位置の塩化物イオン量は、腐食開始塩化物イオン量に達することはないと予測されるために再補修の必要はないが、10年に1回、目地の取り替えが必要となる。

各種補修工法を適用した場合の補修後のLCC(以下RLCCと記述)の推移をFig.11に示し、補修の必要回数と補修後130年間のRLCCをTable 4に示す。断面修復工法として、水セメント比50%のコンクリートを毎回打ち替え、表面被覆を行わない場合に比べて、表面被覆材を用いて補修を行う場合、LCCを低減することができる。例えば、厚膜型エポキシ樹脂を用いて補修を行う場合は、表面被覆を行わない場合に比べて、130年間の補修回数は半分以下となり、RLCCは15%程度低減されると予測される。このように、補修材料の種類により、塩化物イオンの遮断性能は大きく異なるため、予定供用期間における補修回数やLCCには差異が生じる。したがって、LCCを正確に算定するためには、補修材料の塩化物イオン遮断性能を、事前に精度良く評価しておくことが重要である。

4. まとめ

建設当初より耐久性向上工法を適用した場合、あるいは各種の補修工法を適用した場合のコンクリート構造物の劣化予測とLCC評価を行った結果、以下の知見が得られた。

1) 海洋環境下の構造物について、複数のメンテナンス計画についてLCCを比較した結果、建設当初あるいは補修時に、表面被覆工や高耐久性プレキャスト型枠などの塩分遮断効果の高い耐久性向上工法を適用すると、初期コストは若干大きくなるが、設計耐用期間中の補修回数を減少でき、トータルコストであるLCCを低減できる場合がある。

Table 4 補修の必要回数と補修後のRLCC

The Number of Times of Repair and RLCC after Repair

	断面修復材	表面被覆材	解析結果	
			補修回数	RLCC (ユニット)
1	コンクリート	なし	12	24×10^4
2		エポキシ樹脂	6	18×10^4
3		厚膜型エポキシ樹脂	5	20×10^4
4		厚膜型ビスフェノール樹脂	5	20×10^4
5		アクリル系ポリマーセメント	6	23×10^4
6	ポリマーセメントモルタル	なし	4	22×10^4
7		厚膜型エポキシ樹脂	3	21×10^4
8	モルタル	高耐久性プレキャスト型枠	1	14×10^4

2) LCC評価システム“LCCナビ”を用いることにより、構造物のメンテナンス計画のLCC評価および各種補修工法の効果の定量的評価に適用可能である。

今後、耐久性設計や維持管理設計の実務にLCC評価を反映させるには、補修工法の性能把握、劣化予測モデルの構築、補修後構造物の調査データの蓄積などが必要である。また、日常点検に要する維持管理コスト、物価や資産価値の変動などの経済的要因についても検討し、LCC評価技術を確立してゆく必要がある。

参考文献

- 1) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究 - コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査 - ,土木研究所資料3881号, (2001)
- 2) 竹田宣典・十河茂幸・迫田恵三・出光隆: 種々の海洋環境条件下におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集No.599/V-40, pp91-104, (1998)
- 3) 藤原博・三宅将: 鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究: 土木学会論文集No.696/ -58, pp.111-123, (2002)
- 4) 日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案), pp.51,(1984)
- 5) 竹田宣典・高橋敏樹・十河茂幸: 海洋環境下のコンクリート構造物に対するライフサイクルコストを考慮した補修計画の評価, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文集第1巻, pp.45-50, (2001)