

A C C 倶楽部 技術委員会
特別研究会

ライフサイクルコスト適用検討研究会
報告書

2002 年 6 月

A C C 倶楽部

はじめに

近年、コンクリート構造物においてコンクリートの劣化や塩害による鋼材の腐食が構造物の耐久性を損なう事例が増加してきており、膨大な社会資本ストックとしてのコンクリート構造物の維持管理が社会的な問題として取り上げられている。既設構造物においては適切な維持管理、これからの新設構造物においては長寿命化の要求があり、これらに関する新材料、新技術の開発が待たれている。この様な現状から“性能照査型維持管理”、“耐久性向上”、“ミニマムメンテナンス”、“ライフサイクルコスト”という言葉とともに構造物の建設、維持管理に対する取り組みが各発注機関、学会において整理されつつある。

A C C 倶楽部は、補強筋、補強材として使用される各種連続繊維補強材の建設分野への利用推進とその技術の普及および発展を目的に活動を行ってきた。現在では“橋梁の緊張材”、“グラウンドアンカーの緊張材”、“補修・補強分野での補強筋”、“非磁性分野”で活用され、その素材の特徴を発揮してきている。連続繊維補強材は非腐食材料であることから錆の発生がなく、鋼材に代わる材料としての期待が高まっている。鋼材に代わる材料として活用した場合、構造物の耐久性向上、維持補修の有無、初期建設コスト等の課題について整理していく必要がある。

従来、建設費は建設時のイニシャルコストで評価されていたが、近年、損傷・劣化に対する維持補修費用等を含めたライフサイクルコストで評価されるようになってきた。

平成13年度に設置された“L C C 適応検討研究会”では、この損傷・劣化の補修費用を考えた場合、錆びない連続繊維補強材を提案する事によってライフサイクルコスト面で効果があるか否か？について検討を行ってきた。

本報告書の構成は次の通りである。

第1章 ライフサイクルコストの適用状況に関する調査

現段階での各種発注機関、学会におけるライフサイクルコストに関する考え方、取り組み方を調査し、整理した。

第2章 F R P を用いた構造物のライフサイクルコストのケーススタディー

プレテンション桁を用いた橋梁を取り上げ、損傷・劣化の度合いに対応する補修補強方法を想定したコストと連続繊維補強材を適用した場合のコストとの比較を行った(塩害による劣化を対象)。

補修・補強に関する材料、技術開発は日進月歩の感がある。本報告書は、現段階における劣化の考え方、一般的な補修、補強の方法をケーススタディーとして検討を実施したものであり、必ずしも的を射た結果とは言えない面もある。しかし、コンクリート構造物の鋼材として錆びない材料を適用する事はライフサイクルコスト面で大きな効果が期待できることが判明した。

まだ、ライフサイクルコストの概念は統一されていないが初期建設費、補修・補強費等の維持管理を含めたライフサイクルコストの概念が構造物の長寿命化に関する新技術、新材料の発展に繋がり、連続繊維補強材がその一端を担えるよう期待したい。また、本報告書がその参考となれば幸いである。

平成14年6月

A C C 倶楽部 技術委員会 特別研究会

L C C 適応検討研究会

会長 田村 章

L C C 適用検討研究会

会長	田村章	オリエンタル建設（株）
副会長	中井裕司	住友建設（株）
	古市耕輔	鹿島建設（株）
委員	前田信吾	（株）鴻池組
	西川伸之	大成建設（株）
	酒井博士	（株）ピ・・エス
	古賀政二郎	（株）大林組
	橋本文男	東亜建設工業（株）
	大木篤	（株）日本構造橋梁研究所
	渡部寛文	川田建設（株）
	中島規道	三井建設（株）
	石川昇	ド・ピ・建設工業（株）
	椎名貴快	西松建設(株)
	山縣琢巳	ショ・ボンド建設（株）
	村上かおり	清水建設（株）
	二井谷教治	オリエンタル建設（株）
旧委員	池尾孝司	（株）鴻池組
事務局	榎本剛	東京製綱（株）
	北川洋一	新日本製鐵（株）
統括	鈴木義晃	（株）ピ・・エス

目次

1 章 ライフサイクルコストの適用状況に関する調査

1.1 はじめに

1.2 調査方法

1.2.1 調査項目

1.2.2 調査方法

1.3 集計結果の主要点

1.3.1 構造物の現状

1.3.2 L C C の適用目的

1.3.3 検討事例

1.3.4 今後の課題

1.4 まとめ

1.5 個別調査結果

1.5.1 旧建設省土木研究所の L C C に関する考え方

1.5.2 道路公団の L C C に関する考え方

1.5.3 阪神高速道路公団の L C C に関する考え方

1.5.4 鉄道総合技術研究所の L C C に関する考え方

1.5.5 港湾施設における L C C に関する考え方（その 1）

1.5.6 港湾施設における L C C に関する考え方（その 2）

1.5.7 港湾施設における L C C に関する考え方（その 3）

1.5.8 学会等における L C C に関する考え方

2 章 F R P を用いた構造物のライフサイクルコストのケーススタディー

2.1 目的

2.2 要求性能

2.3 劣化モデル

2.3.1 塩化物イオンの濃度浸透予測方法

2.3.2 表面塩化物イオン濃度

2.3.3 拡散係数

2.3.4 腐食発生限界塩化物イオン量

2.3.5 水セメント比

2.4 初期コスト

2.5 劣化の進行と対策

2.5.1 劣化の進行についての仮定

2.5.2 対策工の選定

2.6 L C C の比較

2.6.1 検討した補修・補強工法の一覧

2.6.2 L C C の比較

2.6.3 まとめ

2.7 塩害対策区分 対応の橋梁に対する維持補修等の個別検討の概要

2.7.1 維持・補修・補強工法適用の基本的考え方

2.7.2 建設時初期の対策方法

2.7.3 潜伏期末期から進展期初期の対策工法

2.7.4 進展期後期から加速期の対策工法

2.7.5 電気防食工法

1. ライフサイクルコストの適用状況に関する調査

1.1 はじめに

コンクリート構造物の経年劣化に伴う維持・補修費の増大，財政の健全化を目的とした公共投資の圧縮といった近年の社会情勢により，コスト縮減が最重点課題とされコンクリート構造物の長寿命化，維持管理コストの縮減が求められている。この中で，各種工法のコストを，建設費や維持・管理費等の個別項目で比較するのではなく，構造物の供用期間全体にわたるライフサイクルコスト（ＬＣＣ）で比較する必要性が指摘されている。

F R P材は，耐食性が高くコンクリート構造物の維持管理費の削減には有効な建設材料であると認識されている。反面，鋼材に対する価格差は未だ大きく初期建設費を引き上げてしまうことが，建設市場に浸透しない一因となっている。

ＬＣＣによるコスト算出は，F R P材の特性を適切に評価する手法として有効であり，F R P材の市場拡大に不可欠であると考えられる。しかしながら，ＬＣＣの概念は比較的新しいものであり，供用期間の長いコンクリート構造物に関しては検討を要する様々な項目が残されていることも否めない。

このため，ＬＣＣ算出手法の検討作業に先立ち，コンクリート構造物の新設，既設構造物の維持管理を行っている諸機関におけるＬＣＣへの取り組み状況の調査を行なうものとした。

1.2 調査方法

1.2.1 調査項目

一般にライフサイクルコストは下記のように定義されている。

ライフサイクルコスト：構造物に必要とする費用を，初期コスト，維持管理コスト，および最終処分コストの総計とし，現在の価値に等価換算した形で表した費用。

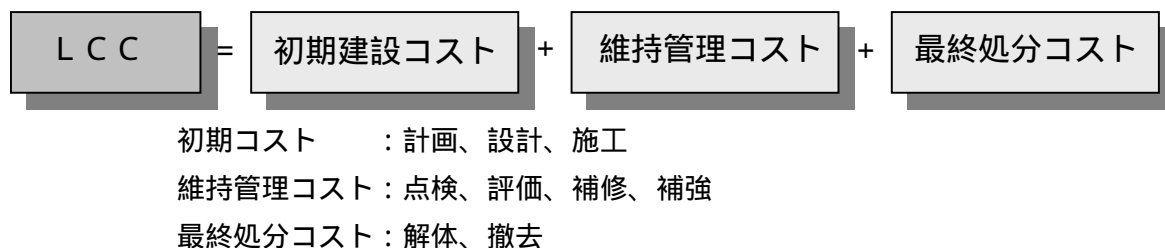


図 1.2.1 ライフサイクルコストの定義

このうち，供用が長期間におよぶ社会基盤構造物においては最終処分コストの取扱いがはっきりしないため，本調査では，初期コストと維持管理コストの合計をライフサイクルコストとし，下記の 4 点を調査項目とした。

構造物の現況
適用目的（考え方）
検討事例
適用への課題

1.2.2 調査方法

調査対象は、道路および鉄道の構造物を建設、維持・管理している諸機関および関連する研究機関とした。情報収集は、公開されている報告書、論文、広報資料等の文献資料を中心として行った。さらに、塩害や腐食などの被害が予想される港湾や下水道施設についても参考のため調査を行った。集計した各機関の一覧を表 1.2.1 に示す。

表 1.2.1 調査対象

分類	名称	主な資料
道路関係	旧建設省土木研究所	土木研究所報告
	日本道路公団	ハイウェイ技術，道路会議
	首都高速道路公団	ホームページ
	阪神高速道路公団	性能照査型維持管理要領（案）
鉄道関係	鉄道総合技術研究所	鉄道総合研究所報告他
	JR各社	土木工事標準示方書 メンテナンス工学他
その他	港湾関係 （港湾技術研究所）	港湾構造物の維持補修マニュアル 港湾技術研究所報告
	東京都土木研究所 （舗装関係）	土木学会誌，Vol.85，Feb，2000 （特集記事）
	下水道関係 （土木研究所他）	
学術機関	土木学会	土木学会誌，Vol.85，Feb，2000 （特集記事）

その他に，学術論文

1.3 集計結果の要点

1.3.1 構造物の現状

道路関係

旧建設省土木研究所が行った橋梁関係予算の推移試算結果を図 1.3.1 に示す。予測値は 1992～1996 年の 5 年間の予測値を 1 として以後 5 年毎の費用を算出している。道路橋の高齢化が進行する 2010 年頃から、架け替え費および維持補修費の増加に伴い 2 倍以上の負担を強いられることになり、道路橋のサービスレベルを維持するのが難しくなっていくことが推測されている。

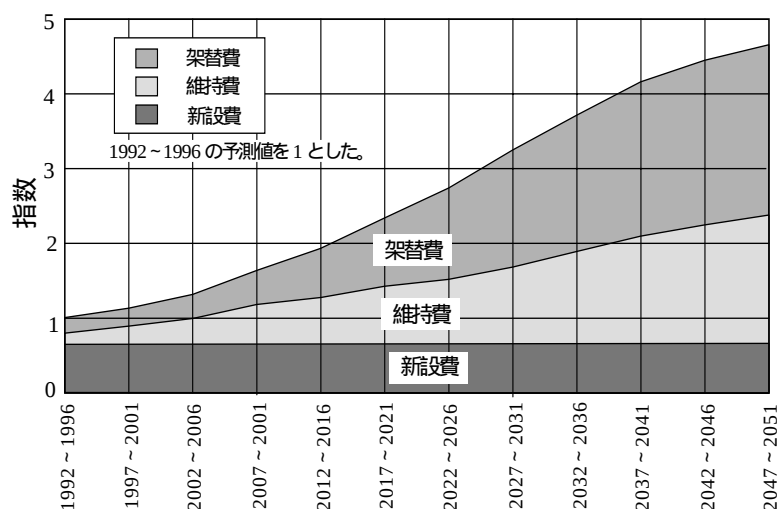


図 1.3.1 橋梁関連予算の推移

(土木研究所の資料より)

鉄道関係

鋼鉄道橋の経年別数量を図 1.3.2 に示す。50 年以上経過した橋梁が全体の半数以上を占めており、鋼鉄道橋の老朽化が進んでいる。何らかの措置を必要とする橋梁数も経年と共に増加しており、今後の補修補強対策の重要性を改めて示す結果となっている。

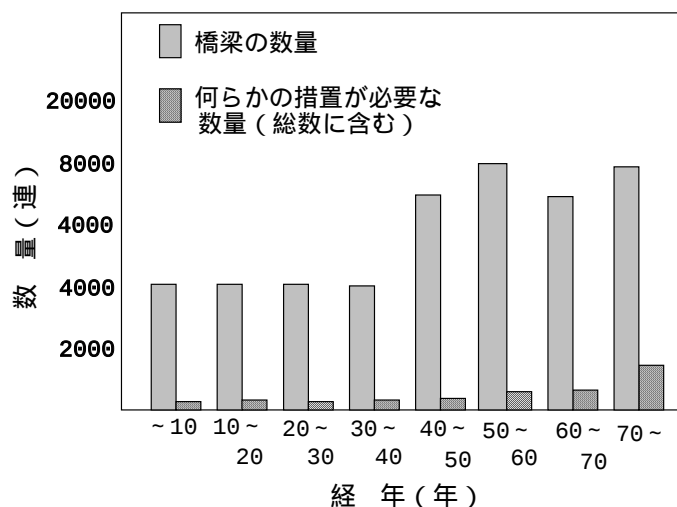


図 1.3.2 鋼鉄道橋の経年別数量

(鉄道総合技術研究所報告 Vol15, No.8 より)

その他の施設

社会基盤構造物の劣化状況のまとめを表 1.3.1 に示す。各機関とも、供用年数の経過により補修補強を要する既設構造物が増加しつつあり、維持・補修費の増大による危機感が、共通認識されている。

表 1.3.1 劣化状況

分類	名称	現況（2002）	当初計画・今後の予想
道路 関係	一般道	供用40年以上が増加中	2010年以降、橋梁関係予算（架け替え、維持保守費含む）が倍増
	道路公団	平均供用年数 20年	供用20～30年で補修費用が増大 構成部材単位の対策実施中
	首都高速	供用30年以上 34% 部分的な損傷が認められる	若返り作戦の実施中
鉄道 関係	J R 各社	供用50年以上 50%	設計耐用年数100年， メンテナンスフリー50年
その他	港湾構造物	一般的に15年程度で 劣化が発生	概ね30年以内に改良工事 （コンテナ岸壁20年以内）
	下水道 （東京都）	耐用年数50年以上 80% （管路）	

1.3.2 LCCの適用目的

ミニмумメンテナンス橋

旧建設省土木研究所の試算によると、今後は供用年数が50年を超える橋梁の割合が増加して、橋の老朽化が進むにつれ、維持管理費や架け替え費用が道路事業費を圧迫していく。また、維持管理や架け替えに伴う交通規制により交通渋滞等が生じ経済損失が生じると予測されている。

今後建設される橋梁は、架け替えを前提とせずできるだけ長持ちさせると同時に、将来にわたり維持負担を最小にしていくことが必要であると考えられている。このため、橋梁の寿命に影響を与える要因に対して、ライフサイクルコストが最小となるように維持管理作業の低減、あるいは解決できる技術を組み合わせた橋梁であるミニмумメンテナンス橋（MM橋）が必要となってくるとしている。MM橋は、供用が長期間にわたるほどLCCが有利になる試算結果を得ている。

ミニмумメンテナンス橋：原因が明らかな耐久性喪失要因に対して、技術的・経済的に可能な対策を施した橋（工学的永久橋）

（土木研究所資料より）

性能照査型維持管理

阪神高速道路公団のLCCの考え方を示す一例として性能照査型維持管理が挙げられる。性能照査型維持管理では、図1.3.3のように時間の概念が導入されており、構造物の性能を現状および供用期間終了時の2回について要求性能内にあることを照査することとなっている。

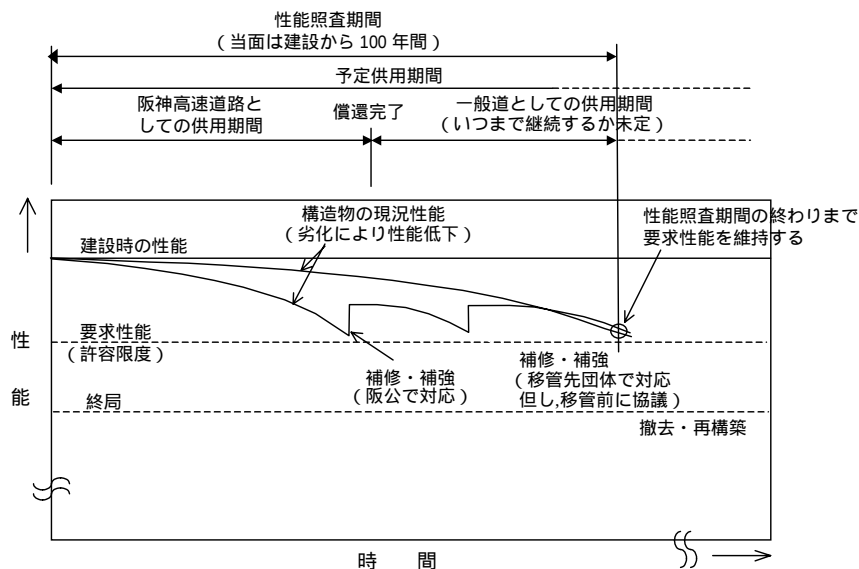


図1.3.3 性能照査期間の概念（償還期間が建設後100年未満の場合）

このような、劣化予測を行なうことでLCCを考慮した適切で合理的な対策の選定や実施時期が検討できることとなり、維持管理は、図1.3.4に示す従来の管理手法から図1.3.5に示す性能照査型の管理手法に移行することとなる。

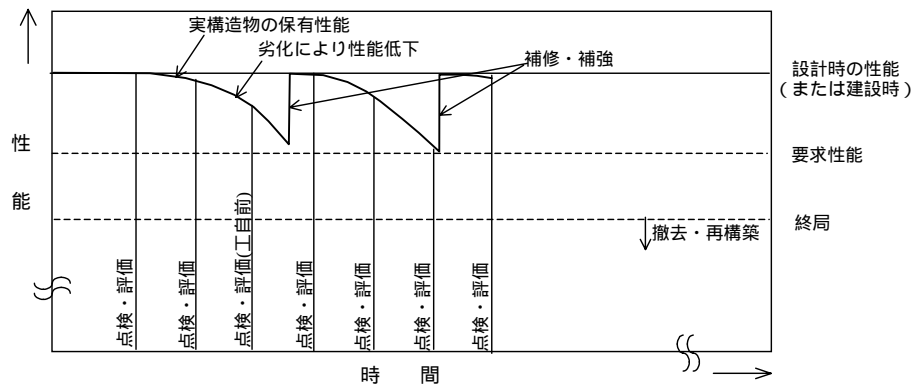


図 1.3.4 従来の維持管理

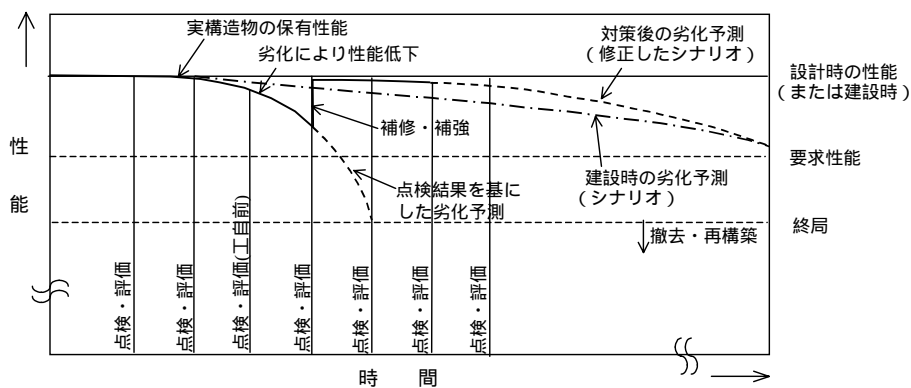


図1.3.5 性能照査型の維持管理

(性能照査型維持管理要領(案)より)

予防保全

道路公団が管理する橋梁は、設計荷重や有効幅員の広さから耐久性能が高い上に、点検の定期的な実施により損傷発生後の早期に維持管理を行ったことなどから、主桁そのものにおよぶ重要な損傷は無く、RC床版の補修補強、鋼橋の疲労損傷対策、コンクリート製壁高欄の補修など、橋梁を構成する部材単位での対策が行われてきた経緯がある。

ＬＣＣ分析による高速道路の保全費用の分析試算も行われているが、現時点で判明したことは、道路構造物は20～30年を経過すると保全費用が急激に増大する点である。2002年度の高速道路の平均経過年数は、約20年であり、まさに保全費用が急激に時代に突入しようとしている。従来の壊れたら補修するという「事後保全」から早期発見・早期補修の「予防保全」への方向転換が重要なキーワードとなっている。

(ハイウェイ技術 No.15 より)

その他の適用目的

適用目的のまとめを表1.3.2に示す。全体として、新設構造物よりは既設構造物の維持補修を主目的と考える機関が多いようである。

表 1.3.2 適用目的

	分類 / 名称	適用目的
道路 関係	旧建設省 土木研究所	・ L C C 最小：ミニマムメンテナンス（MM）橋の長期供用 ・ 今後の新設橋：架け替えを前提とせず長持ちさせる 維持負担を最小にする
	日本道路公団	・ 事後保全から予防保全へ 点検技術の効率化，診断技術の確立，新技術新工法の導入 ・ 初期損傷の早期発見，早期対応へ
	首都高速道路公団	・ 直接的な経費削減から総合的な経費削減へ ・ ライフサイクルコストの低減（＝施設の品質の向上） 維持管理費，更新費も含めたコスト低減 ・ 若返り作戦：予防保全，フェールセーフ
	阪神高速道路公団	・ 性能照査型維持管理（現状と供用終了時） ・ 設計時と点検時の劣化予測曲線を比較 ・ 照査終了時の性能が要求を下回る場合に対策を実施 ・ 劣化予測によりライフサイクルコストを考慮する
鉄道 関係	鉄道総合技術研究	・ L C C を利用して補修，補強，架け替えを最適化 ・ L C C を性能照査型設計につなげる ・ 鋼材の腐食や塗膜の劣化曲線に着目 （疲労損傷は，S-N 線図である程度の推定が可能）
	J R 各社	・ 投資代替え案の経済性評価のための意思決定指標 ・ 設計時に将来コストを減少させるための予測指標
その他	港湾施設 (港湾技術研究所)	・ 機能面から見た耐用年数の設定が重要 ・ 物理的耐用期間内の維持管理費の最小化 ・ 最小費用による施設の延命化 ・ 費用の最小化のみならず便益の最大化，効率化を目指す
	道路舗装 (東京都土木研究所)	・ 長寿命化による L C C 削減
学術 関係	東工大 三木他	・ 社会資本は，劣化しても使用し続けることが最適解の場合が多い ・ 社会基盤施設に関してインフォームドコンセントが必要 ・ 維持管理に関する研究開発は不十分
	山口大 宮本他	・ 維持管理には，知識，経験の集約総合化が必要
	土木学会座談会	・ 耐用期間，供用期間の定義，L C C に反映すべき項目が不明確 ・ 美観上の耐久性と安全上の耐久性が混在している ・ L C C を考慮した補修計画の会計監査上の取扱いが不明確 ・ 長期間にわたる費用・技術の変化の取扱いが難しい ・ ソフトウェアの評価が低いことが問題

1.3.3 検討事例

ミニмумメンテナンス橋の L C C 算出例

旧建設省土木研究所では、鋼橋をモデルとした L C C の試算を行い、従来橋梁と MM 橋梁との比較を行っている。試算を行なうにあたっては、橋梁の付属物に関しても着目する必要があり、鋼桁橋の都市部における付属物を対象とし表 1.3.3 に示す補修サイクルで算定を行っている。

< 標準橋梁 > 従来の設計・施工と維持管理，更新を繰返していくモデル。

< MM 橋梁 > 最小限の維持管理で最大の長寿命化を目指し，耐久性の喪失の対策となる要素技術を導入し，高度な施工管理をしたモデル

図 1.3.6 に試算結果を示す。MM 橋は，初期建設コストが従来橋梁の 1.6 倍程度となっているが，供用 30 年以降はコストの縮減効果が現れている。従来橋の架替え以降は，コスト縮減効果が大きく現れ，100 年後のコストで約 1/3 程度となることが認められる。総じて，MM 橋は，供用期間が長いほどコスト縮減効果が大きい特徴を示している。

表1.3.3 付属物と補修サイクル（鋼桁橋都市部における場合）

項目	ミニмумメンテナンス橋		従来の橋梁	
	仕様	サイクル	仕様	サイクル
架替サイクル	200年		60年	
塗装(塗膜)	亜鉛メッキ	130	塩化ゴム系塗料	15
塗替え	亜鉛溶射（全面）	70	塩化ゴム系塗料	15
床版	P C 床版	200	RC床版	40
床版補修	継目部の補修	50	部分補修・建設後20年	20
支承	ゴム支承	100	鋼製支承	30
伸縮装置	ミニмумメンテナンス仕様	20	従来仕様	10
舗装	改良アスファルト	15	普通アスファルト	10
防水層	シート防水（舗装のサイクル）	15	シート防水（舗装のサイクル）	10
防水層更新	塗膜防水（舗装のサイクル）	15	塗膜防水（舗装のサイクル）	10

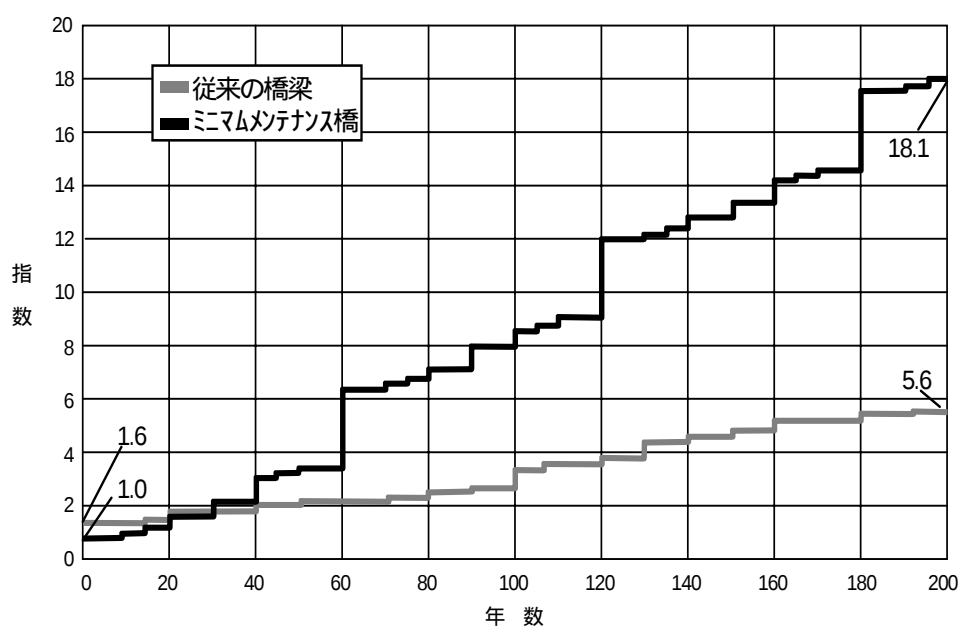


図 1.3.6 都市部における鋼桁橋の L C C 算出例
(指数は従来橋梁の初期建設費用を 1.0 とする)

(土木研究所の資料より)

鉄道橋腐食対策の L C C 検討例

鉄道橋鋼部材の L C C 評価の一例を示す。対象構造物は、支間 63.35m の下路トラス橋である。環境条件は、一般的な条件と特殊環境条件の 2 種について、防食対策としては表 1.3.4 の 7 ケースの検討が行われている。この中で、一般環境において、耐候性鋼材と溶融亜鉛メッキ鋼材は、補修塗装が不要と仮定されている。また、特殊環境においては、亜鉛メッキも 30 年でメッキ層が磨耗し塗装が必要になると仮定されている。

鋼材表面の防食方法における費用単価を積み上げた例を表 1.3.5 に示す。

表 1.3.4 防食方法と塗替え期間

		防食法	新設時	塗替え
一般	Type-A	フタル酸樹脂を用いた B 塗装系（一般環境用）	15	12
	Type-B	J-2 塗装系の修正タイプ（重防食を想定）	40	32
	Type-C	耐候性鋼材	不要	不要
	Type-D	溶融亜鉛メッキ鋼材	不要	不要
特殊	Type-E	H-2 塗装系の修正タイプ	30	24
	Type-F	海浜海岸耐候性鋼材	不要	不要
	Type-G	溶融亜鉛メッキ鋼材	30	24

表 1.3.5 防食に関する費用単価の設定例

		工程		膜厚 (μm)	単価 ($\text{円}/\text{m}^2$)
H 2 修正	新設時 工場	前処理	無機ジンク	スプレー15	7000
		2 次素地調整		-	
		第 1 層	無機ジンク	スプレー15	
		第 2 層	ミストコート	-	
		第 3 層	エポキシ下塗	スプレー120	
		第 4 層	フッ素中塗	スプレー30	
		第 5 層	フッ素上塗	スプレー25	
J 7 修正	塗り 替え	素地調整	3 ～ 4 種ケレン	-	6000
		第 1 層	フッ素中塗	スプレー30	
		第 2 層	フッ素上塗	スプレー25	
		足場費用			

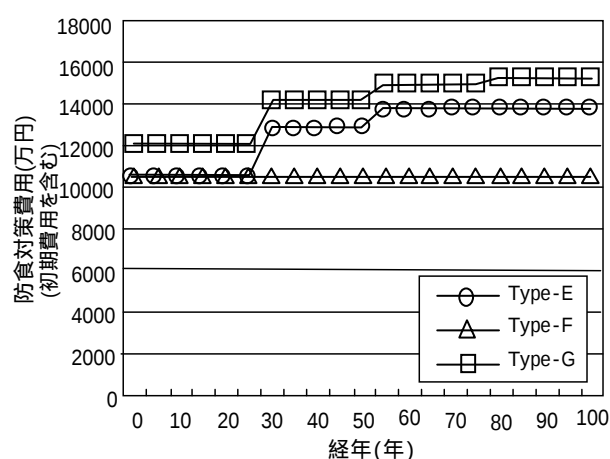
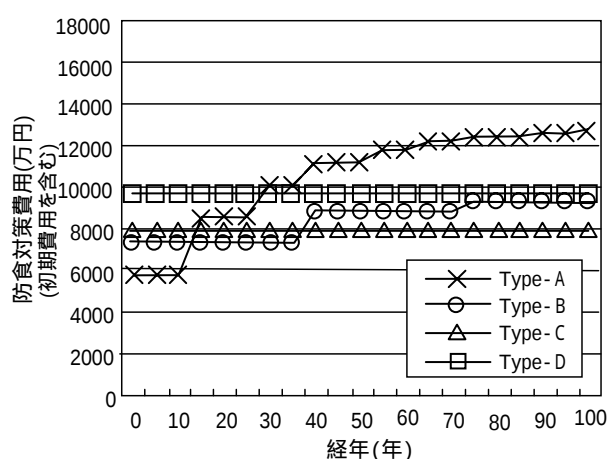


図 1.3.7 L C C 算定結果

算定結果を図 1.3.7 に示す。一般的な環境条件においては、これまで鉄道で一般的に用いられてきた B 塗装系 (Type-A) に対して、各腐食対策手法が何れも費用削減効果があることが認められる。また、経年によって最適な手法が異なってくることも示されている。

特殊な環境においては、海浜海岸耐候性鋼材 (Type-F) を利用した場合が、常に総額コストが低い結果となっており、経年によるコストの逆転は認められていない。

(鉄道総合技術研究所報告 Vol15, No.8 より)

その他の事例

ＬＣＣ適用事例のまとめを表 1.3.6 に示す。現在，主に検討されている項目は，鋼材の腐食，塗膜の劣化，塩害，地震等である。事例が多いのは，鋼橋の腐食および塗膜の劣化の検討事例であり，モデル上の検討事例も多く認められる。

表1.3.6 検討対象

項目	名称	対象	検討結果
道路関係	旧建設省土木研究所	鋼橋	・ MM化によってＬＣＣの長期評価が有利になる
	日本道路公団	鋼橋の ＲＣ床版	・ 増し厚工は，全面打替えの 8 倍の効果 ・ 初期損傷の早期発見，早期対応へ
	首都高速道路公団		・ 記述無し
	阪神高速道路公団		・ モデルによる劣化予測
鉄道関係	鉄道総合技術研究所	鋼部材の 防食	・ 耐候性鋼材や亜鉛メッキ鋼材の使用は有効 ・ 経年によって最適な対策手法が異なる
	J R 各社		・ 新幹線車両で検討例あり
その他	港湾関係 (港湾技術研究所)	港湾構造物 ＲＣ 栈橋	・ 一般建築物と比較して港湾構造物は初期建設費の割合が高く，維持補修費の最適化の効果は小さい ・ 塩害は，早期対策が有効
	東京都土木研究所 (舗装関係)	コンポジット舗装	・ 現行アスファルト舗装の 4 倍， コンクリート舗装の 2 倍
	下水道関係 (土木研究所他)		
学術機関	土木学会 山口大 宮本他		・ 構造物維持管理支援システム

1.3.4 今後の課題

劣化予測

鉄道構造物におけるコンクリート構造物の塩害予測モデルを図 1.3.8 に示す。構造物の寿命を明確にするために、構造物の劣化予測を行なう必要があるが、塩害の劣化予測に関しても、鉄筋腐食速度等の定量的な値が十分に把握されておらず、予測方法が明確なものとなっていないのが現状である。

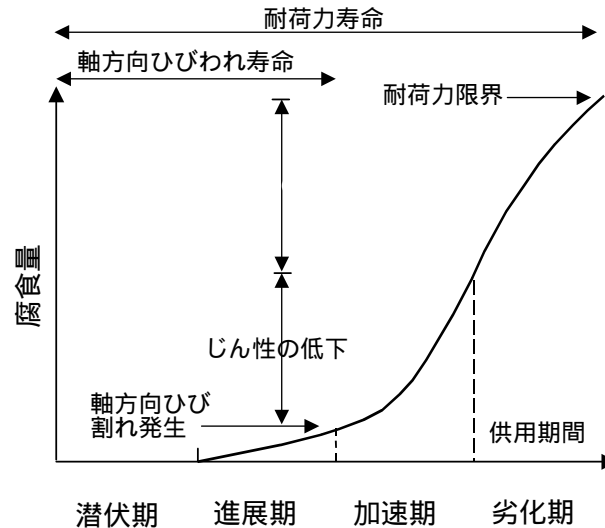


図 1.3.8 塩害予測モデル

定量的な劣化予測モデルを作成するためには、下記の二通りの方法がある。

- ・ 供試体の暴露試験あるいは実構造物の体系的な調査による劣化予測モデルの作成
- ・ 劣化予測を忠実に反映したシミュレーション

暴露試験によれば鉄筋腐食速度を把握でき、劣化予測を行なうことが可能であるが、結果を得るまでに長期間を有することや、条件が異なる場合に個々のモデルが必要になる欠点がある。

これに対し、近年コンピューターシミュレーションによる手法が提案され開発が進められている。シミュレーションにおいては、鉄筋腐食に影響を与えるコンクリート中の水分、塩分、酸素等の物質移動モデルと鉄筋腐食の電気化学モデルを構築融合することにより劣化予測を行なうこととなっている。

(第 137 回、鉄道総合技術研究所報告月例発表会より)

費用の算定

鋼鉄道橋において想定される補修事例に対する費用の算定例を表 1.3.7 に示す。補修時の費用に関して補修専門業者の経験を元にして必要となる補修項目を挙げ、個々の費用を積み上げることによって、極力実際の施工に要した費用と相違が無いように留意しながら費用単価の設定を行なう手法となっている。特に、実際の補修時間を考慮した費用の算定方法となっている点が重要である。

表 1.3.7 変状別総括一覧表

変状 No.	変状種別	変状箇所	補強内容	単位	工事	工事費	(千円)
					時間 (h)	作業時間 夜間3h以内	作業時間 夜間3h以上
1	腐食	フランジの腐食	フランジの交換	箇所あたり	28	1,967	1,057
2	腐食	ウェブの腐食	欠食部のあて板補修	箇所あたり	18	1,291	690
3	腐食	支承部の腐食	桁端構造の変更	箇所あたり	26	1,192	684
4	腐食	軽微な腐食	塗装orボルトキャップ	下フランジ 溶接あたり	1	80	63
5	腐食	ボルトの損傷	交換	主桁添接	7	841	420
6	腐食	リベットの腐食	HTBに交換	下フランジ 溶接あたり	18	1,179	589
7	疲労	上フランジの欠食, われ	われの補修と補強	箇所あたり	34	2,389	1,227
8	疲労	上下線連結材の亀裂	連結構造の補強	箇所あたり	4	124	63
9	疲労	枕木受け等カバープレートの亀裂	ガウジングして再溶接	箇所あたり	3	1,996	999
10	疲労	腕材取付け部の亀裂	取付けディテール変更	箇所あたり	12	1,562	791
11	疲労	ソールプレートの亀裂	ガウジングして再溶接, ウェブにあて板補強	箇所あたり	7	484	252
12	疲労	桁端切欠き部の亀裂	ウェブと下フランジの補強	箇所あたり	13	1,292	681
13	疲労	垂直補剛材下端部からの亀裂	TIG処理またはアングル補強	箇所あたり	5	298	149
14	疲労	支点部下フランジからの亀裂	支点部の構造改良	箇所あたり	41	3,068	1,731
15	支承損傷	支承座モルタルの損傷	支承座モルタルの交換	箇所あたり	25	2,066	1,202
16	支承損傷	アンカーボルトの損傷	支承の交換	箇所あたり	43	3,974	2,538
17	支承損傷	支障の変状					
18	支承損傷	桁(脚)の移動・不等沈下					

(鉄道総合技術研究所報告 Vol15, No.8 より)

割引率

LCC評価を行なう際に将来要する費用を積み重ねていくために、異なった時間軸上の費用の取扱いが問題となる。一般的には、将来要する費用を現在価値に置き換えて加算する方法が用いられることが多い。これを現価法といい次式で表せられる。

$$LCC = \sum (C_t / (1+r)^t) \cdots (1)$$

C_t : t年後必要となる補修費用

r : 割引率

ここで、割引率とは将来の貨幣価値を現在に置き換えるために用いられる指標であり、この割引率の大小によって、将来要する費用の現在価値が異なってくる。例えば、割引率を大きくすることは将来の貨幣価値を小さく見積もることとなっている。この割引率は、アメリカでは一般的に4%が使用されている。社会情勢が異なるものの、鉄道構造物の事例では、経済成長率として概ねこの程度の割合が妥当と判断されている。

この他、式(1)で示される費用に加えて、経済損失を考慮する考え方や、ストック価値を考慮した考え方も提案されている。しかしながら、その対象範囲や、波及効果を何処まで見込むかという問題を含んでいる。さらに、経済的損失が膨大な物になる可能性もあり、この損失額の大きさ次第ではLCC本来の評価部分が相殺されてしまうといった懸念も併せ持っている。

(鉄道総合技術研究所報告 Vol15, No.8 より)

耐用年数

耐用年数は、構造物のライフサイクルを検討する際の重要な要素であり、ランニングコストを決定づける項目である。

一例として、港湾構造物に関する要因別の耐用年数を下記に示す。

- a) 機能的耐用年数：船舶の大型化、取扱い貨物量、種類の変化等による施設機能の不足・低下
- b) 物理的耐用年数：構造材の腐食・劣化等による強度低下、外力要因による構造破壊、沈下・埋設による機能不足・低下
- c) 経済的耐用年数：施設の改良無しでは他の施設に比べて劣る状態
- d) 社会(計画)的耐用年数：社会的要請、新規計画等により施設の当初機能が不要となるか、または別の機能が求められる状態

港湾構造物における耐用年数の考え方は明確に定まっていないが、一般的には施設が持つ機能を発揮しなくなるまでの期間と捕らえられており、上記の内で最も短い期間が施設の耐用年数、ライフサイクルの終焉と考えられる。

(港湾構造物の維持・補修マニュアルより)

その他の検討課題

ＬＣＣ適用への課題の集計結果を表 1.3.8 に示す。予想期間が長期にわたるため，劣化の推定方法のみならず，貨幣価値の変動や他の要因との組合せ効果も課題となっている。

表1.3.8 今後の課題

分類	名称	今後の課題
道路関係	旧建設省土木研究所	・ 諸数値の信頼性向上 ・ 要素技術の多様化，組合せ効果 ・ 供用中の橋梁の延命化 ・ MM化に関する構造形式や構造細目の調査
	日本道路公団	・ トータルのＬＣＣ評価 ・ 高耐久化のための新形式，新技術 ・ 諸数値の信頼性向上
	首都高速道路公団	・ 記述なし
	阪神高速道路公団	・ 総合的な見地から検討を進める
鉄道関係	鉄道総合技術研究所	・ 定量的な評価手法の確立 ・ 割引率の設定 ・ 補修作業時間を考慮した費用の算定 ・ 各種損傷に関する劣化曲線の算定
	J R 各社 (車両に関して)	・ メンテナンス量の定量的な把握 ・ 環境影響評価 ・ 総合評価
その他	港湾関係 (港湾技術研究所)	・ ライフサイクルの各段階で主体となる機関が異なり，相互の連係が求められる
	東京都土木研究所 (舗装関係)	・ 交差点部 ・ ライフラインとの共生
学術機関	東工大 三木他	・ 様々な B / C 評価を L C C に取り込む必要 ・ 健全度の評価 ・ 専門技術者の養成
	山口大 宮本他	・ 最新情報処理技術の応用
	土木学会座談会	・ 情報の集中化 ・ 診断の費用 ・ 検査資格制度

1.4 まとめ

コンクリート構造物の新設，維持管理を行っている諸機関におけるＬＣＣへの取り組み状況を調査した結果、以下の点が明らかとなった。

社会基盤構造物の劣化の進行，および維持・補修費の増大による危機感が，共通認識されている。しかしながら，ＬＣＣ算出への取り組みは各機関により温度差が大きい。

ＬＣＣの適用に関しては，耐用年数や諸数値の設定方法が確立されておらず，設計に反映させることが難しい状況となっている。

鋼構造は，疲労や腐食に対する予測手法および維持管理手法がほぼ確立しており，ＬＣＣの適用が比較的容易であると判断される。

一方，コンクリート構造は，従来メンテナンスフリーとされてきた経緯があり，劣化の予測，維持管理とともに統一的な手法がないことがＬＣＣの適用の障害となっている。

コンクリート構造物の補強材として新素材を利用した場合，進行予測が難しい化学的劣化の影響が少なくなり、それに応じて維持管理作業の頻度も低減する等の効果が推測される。しかしながら、新素材のライフサイクルコスト縮減効果を把握するためには、従来の鉄筋との比較が不可欠であり、鉄筋コンクリート構造の維持補修対策の調査も併せて行っていく必要があると思われる。

1.5 個別調査結果

1.5.1 旧建設省土木研究所のLCCに関する考え方

(1) 構造物の現況およびLCCの考え方

旧建設省土木研究所では、1992～1996年の予測値を1として橋梁関連予算の推移試算結果（図1.5.1）を行なっている。これによると、道路橋の高年齢化が進行し始める2010年頃から架設費および維持補修費の増加に伴い、2倍以上の維持負担費を求められることが推測され、新設橋の整備へのしわ寄せは避けられないとしている。

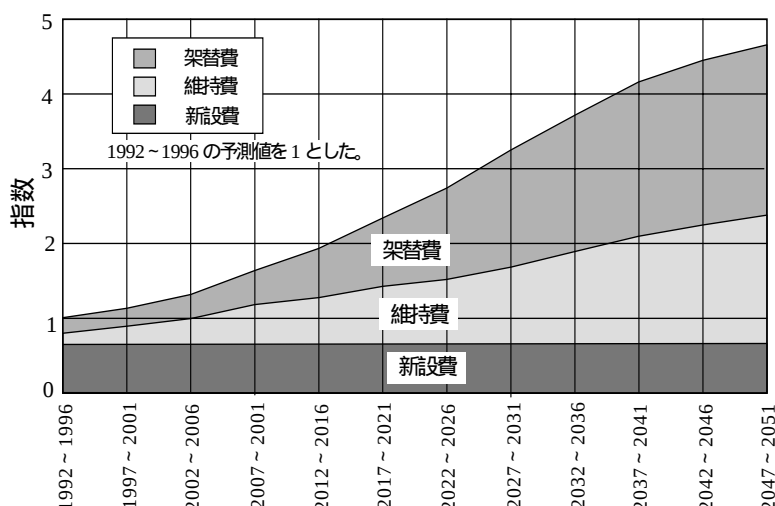


図 1.5.1 橋梁関連予算の推移

上記の予測結果により、今後は供用年数が50年を超える橋梁の割合が増加して、橋梁の老朽化が進むにつれ、維持管理費や更新費（架替え費）が増大していく。また、維持管理費や更新工事に伴う交通規制により交通渋滞が生じ経済損失を生じさせると予測している。そのため、今後建設される橋は、架け替えをせずにできるだけ長持ちさせると同時に、将来に渡り維持管理費を最小にしていけることが必要であると考えている。そのため、橋の「ライフサイクルコスト」(LCC)が最小になるために、寿命に影響を与える要員に対して、維持管理費の低減あるいは解決できる要素技術を組み合わせた橋である「ミニмумメンテナンス橋」が必要となってくるとしている。ミニмумメンテナンス(MM)橋は長期になるほどLCCは有利になる。

ここで、LCCおよびMM橋は下記の通り意味されている。

- ・ LCC：初期建設費用，維持管理費用，更新費用（架替え費用）の和
- ・ MM橋：原因が明らかな耐久性喪失要因に関して技術的・経済的に可能な対策を施した橋
(工学的永久橋)

$$\begin{aligned} \text{LCC} &= (\text{初期建設費用}) + (\text{維持管理費用}) + (\text{更新費用}) \\ &= \text{最小} \rightarrow \text{MM橋} \end{aligned}$$

図 1.5.2 LCCの概念

(2) ライフサイクルコストの試算例

旧建設省土木研究所では、鋼橋をモデルとしたLCCの試算を行い、従来の橋梁とMM橋の比較を行なっ

ている。以下に、試算例を示す。

- 標準橋梁： 従来の設計・施工と維持管理，更新を繰返していくモデル。
- MM橋： 最小限の維持管理で最大限の長寿命化を目指し，耐久性喪失の対策となる要素技術を導入し，高度な施工管理をしたモデル。

新設橋の事例

ＬＣＣの試算を行なうに当たっては付属物についても着目する必要がある。ここでは，都市部における付属物等の補修サイクルを参考資料として表 1.5.1 に示す。さらにこの補修サイクルを考慮して，都市部における鋼桁橋のＬＣＣを算出した例を図 1.5.3 に示す。

表1.5.1 付属物と補修サイクル(鋼桁橋都市部における場合)

項目	ミニマムメンテナンス橋		従来の橋梁	
	仕様	サイクル	仕様	サイクル
架替サイクル	200年		60年	
塗装（塗膜）	亜鉛メッキ	130	塩化ゴム系塗料	15
塗替え	亜鉛溶射（全面）	70	塩化ゴム系塗料	15
床版	P C 床版	200	RC床版	40
床版補修	継目部の補修	50	部分補修・建設後20年	20
支承	ゴム支承	100	鋼製支承	30
伸縮装置	ミニマムメンテナンス仕様	20	従来仕様	10
舗装	改良アスファルト	15	普通アスファルト	10
防水層	シート防水（舗装のサイクル）	15	シート防水（舗装のサイクル）	10
防水層更新	塗膜防水（舗装のサイクル）	15	塗膜防水（舗装のサイクル）	10

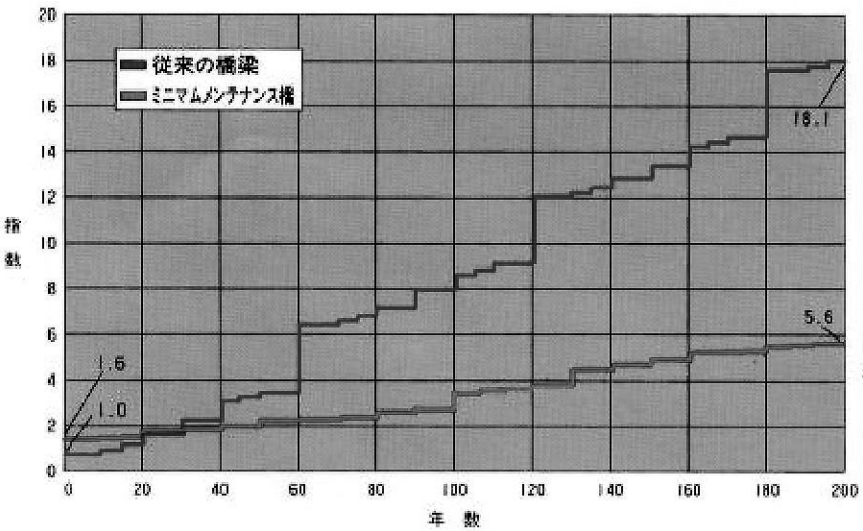


図 1.5.3 都市部における鋼桁橋のＬＣＣ試算例

既設橋の事例

既設橋においても，補修時に長寿命化を図ることの有効性を確認するための試算を行なっている。表 1.5.2 に都市部における既設鋼桁橋のMM化の要素を示す。この要素を考慮して，都市部における既設鋼桁橋のＬＣＣ算出例を図 1.5.4 に示す。

表1.5.2 既設橋に盛り込むMM要素（鋼桁橋都市部における場合）

項目	ミニマムメンテナンス橋化		従来の橋梁	
	仕様	サイクル	仕様	サイクル
橋梁の寿命	残り80年（寿命120年）		残り20年（寿命60年）	
塗替え	フッ素塗料	45	塩化ゴム系塗料	15
床版	P C 床版	200	RC床版	40
床版補修	継目部の補修	50	部分補修・建設後20年	20
支承	ゴム支承	100	鋼製支承	30
伸縮装置	ミニマムメンテナンス仕様	20	従来仕様	10
舗装	改良アスファルト	15	普通アスファルト	10
防水層更新	塗膜防水（舗装のサイクル）	15	塗膜防水（舗装のサイクル）	10

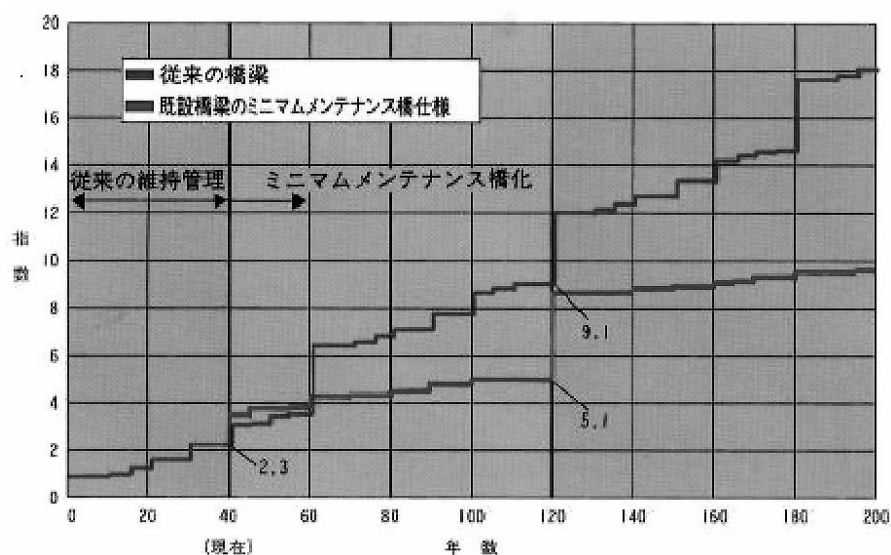


図 1.5.4 都市部における既設鋼桁橋の L C C 試算例

（３）まとめ

鋼橋をモデルとした L C C の試算を行なった。環境条件や橋種等の組合せにより L C C は変わってくるが、MM橋の長寿命化の有効性は確認できた。今後は、L C C の試算による評価方法の確立、精度の向上を図る必要があるとしており、そのための課題として下記項目を挙げている。

- ・ 架替え年数、補修時期、補修数量等に関しは、現在入手できるデータをもとに仮定の数値を用いて評価しているため、数値の信頼性はまだ十分とはいえない。今後は、詳細な実態調査のデータ等をもとに L C C の数値の信頼性を向上する必要がある。
- ・ 要素技術の効果として、特定のここの要素技術の評価しているが、多様な要素技術やその組合せの効果の評価まで至っていないため、今後、検討する必要がある。
- ・ 現在、架橋されている橋梁に関する延命化（MM化）に関する研究も、今後必要である。
- ・ MM橋の提案に向けて、耐久性、維持管理性を考慮した構造形式や構造細目に関する調査、整理が必要である。

1.5.2 日本道路公団の L C C に関する考え方

(1) 構造物の現況および L C C の考え方

保全技術の変遷

ここでは、メンテナンスコストの比重の大きい橋梁を対象にする。J H が管理する橋梁は、設計荷重や有効幅員の広さから耐久性能が高い上に、点検の定期的な実施により損傷発生後の早期に維持管理を行なったこと等から、主桁そのものにおよぶ重大な損傷はなく、鋼橋 R C 床版の補修補強、鋼橋の疲労損傷対策、コンクリート製壁高欄の補修および支承・付属物の補修など、橋梁を構成する部材単位での対策が行われてきた。このため、損傷結果を建設にフィードバックすることが容易で原因究明のための試験研究が進められながら、橋梁建設技術（設計・施工基準等）の改正が行なわれてきた。

出典：ハイウェイ技術 No.15,1999-12

ライフサイクルコスト

事業の効率化を進めアカウンタビリティを高める手法のひとつとして、事業を初期費用の大小だけでなく、計画から廃棄に至る「事業としての寿命」を通してかかる費用(L C C)により評価する手法が注目される。この L C C 分析により高速道路の保全費を分析試行しているが、現時点で判明したことは、道路構造物は 20 年から 30 年を経過すると急激に保全費用が増大するということである。1999 年度の高速道路の平均経年数は約 17 年である。まさに、保全費用が急激に増大する時代に突入しようとしている。このことから、従来の壊れたら補修するという「事後保全」から早期発見・早期補修の「予防保全」への方向転換が重要なキーワードとなっている。この予防保全には、早期発見のための点検業務の効率化・診断技術の開発が必要不可欠である。高速道路の善良な保全をさらに継続し続けるためには、新技術・新工法の開発導入するなどの新しい魅力のある保全のあり方が強く望まれる。

出典：ハイウェイ技術 No.15,1999-12

(2) ライフサイクルコストの試算例

鋼橋 R C 床版における L C C 算定の例

図 1.3.5 に床版の損傷と補修・補強の関係を概念図で示す。概念的に既設床版において、床版の曲げ剛性が健全(0~P1 間)であれば、他の鋼部材を含め疲労損傷が少ないが、重交通下で、概ね 20 年以上の疲労繰り返しを受ければ、徐々に床版剛性が低下しはじめ、主桁と対傾構との取り付け部に亀裂損傷が現れる。

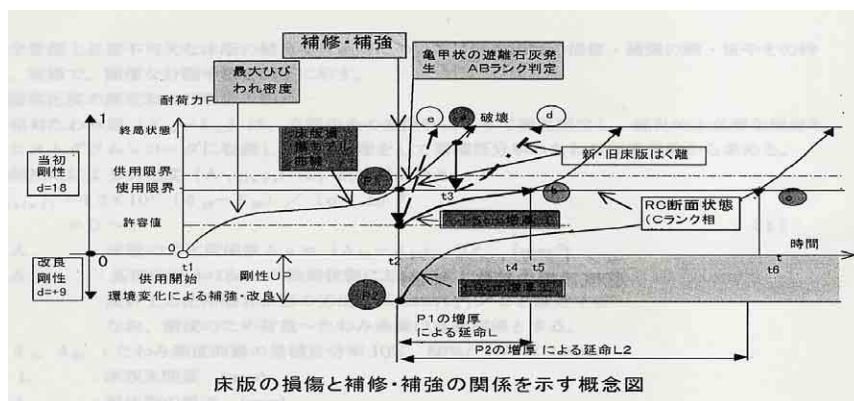


図 1.5.5 床版の損傷と補修の関係を示す概念図

設計上の使用限界状態(P1)は、ひびわれが中立軸に達した時点をも R C 断面（引張無視）として設計しているが、亀甲状のひびわれが多数発生し、貫通ひびわれから遊離石灰が溶出する状態に達しても、鉄筋応力は許容値以下であるため終局状態である押し抜きせん断破壊するまでには、相当の繰り返しを受けなければ、破壊に至らない。このため使用限界状態を越しても部分打ち換え等を行えば、道路管理上からは、使用可能である。

しかしながら、使用限界状態(P1)までの間に、床版の上・下面増し厚等の補修・補強を行った場合は、比較的安価で、かつ、長期にわたって効率的に機能保全を確保することができる。仮に、補強を行わずに放置(t3～d)すれば、当然、道路管理上の供用限界（通行止め等）を超え、増し厚等の補修・補強を行ってもその効果や持続性は期待できず、道路機能や構造上に重大な損傷をきたし、全面打ち換え等の事態になる。

費用対効果分析では、少なくともコスト縮減効果として、増し厚工は、全面打ち換え工の 8 倍以上期待できる。さらに、増し厚工は、図のようにミニマムメンテナンスの観点からその剛性回復の効果（P2～c）は、単に機能回復的な補修(+5cm)と 25t 対応を考慮した改良的な補強(+9cm)では、3 倍以上となる。

故に、増し厚工による「早期対応」は、凡そ 10 倍以上のコスト縮減が実現できる重要なファクターとなっている。維持管理の基本となるコスト縮減の決め手は、初期損傷を早期発見して、早期対応することでなければならない。

出典：1999 年，道路会議報文

（３）まとめ

- ・現在は、各部位ごとに L C C を考慮してコスト低減を検討している。
- ・このとき、ある程度の情報を元にした仮定により L C C を算定している。
- ・解体や架け替えなどを含めた、トータルとしての L C C 評価には至っていない。
- ・試験研究所では、L C C に関する研究を数年前から実施している。
- ・高耐久化のための新形式や新技術を積極的に検討して採用していく方針。

1.5.3 阪神高速道路公団のＬＣＣの考え方

(１) ライフサイクルコストの考え方

阪神公団のＬＣＣの考え方を示す一例として、先に述べた「性能照査型維持管理要領（案）ＡＳＲ橋脚編」を紹介する。

性能照査型維持管理では、時間の概念が導入されており、構造物の性能を現状および供用期間終了時の２回について要求性能内にあることを照査することになっている。このように劣化予測を行なうことで、ライフサイクルコストを考慮して適切かつ合理的な対策の選定や実施時期が検討できる。

性能照査期間

- ・ 性能照査期間とは、構造物の性能を供用できるレベルに維持管理していく期間を指す。
- ・ 阪神高速道路の主要構造物の性能照査期間は、建設から 100 年間、または償還完了までの期間のうちどちらか長いほうを採用する。

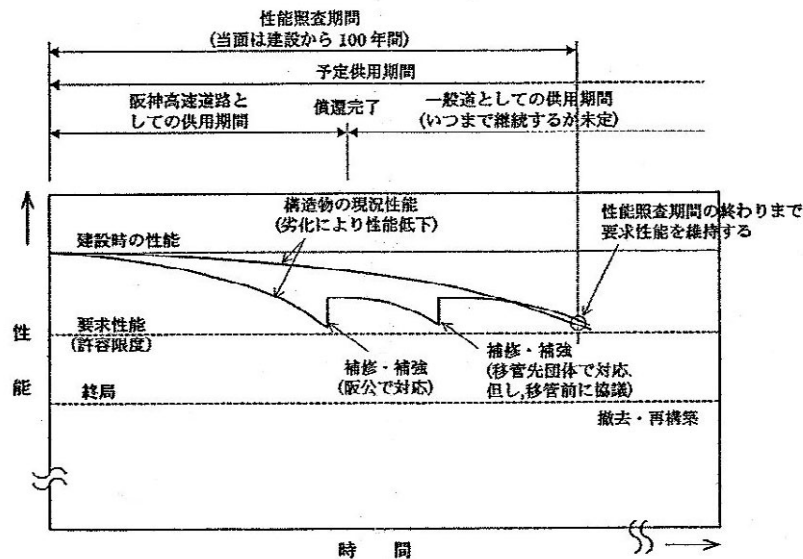


図 1.5.6 性能照査期間の概念（当面）

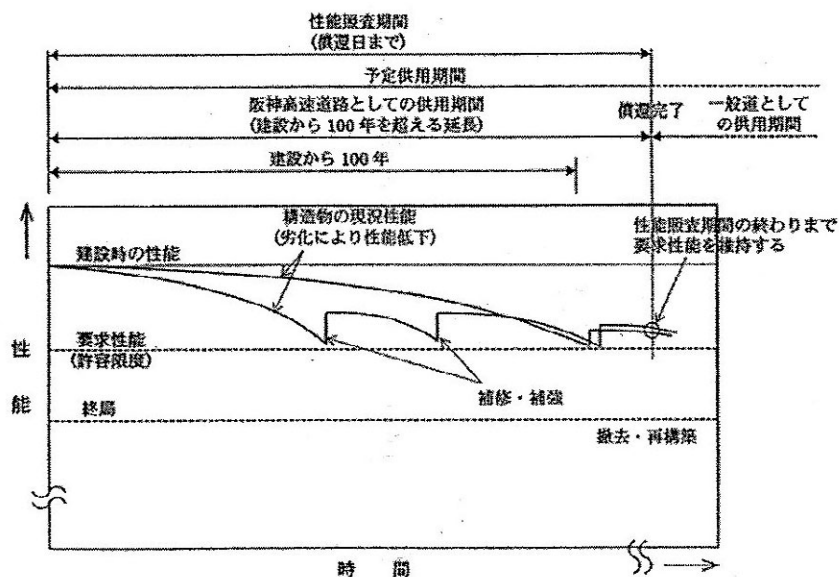


図 1.5.7 性能照査期間の概念（償還日が建設から 100 年を超える場合）

性能照査型維持管理の基本

- ・ 構造物は、維持管理区分を定め、供用期間を通じて構造物が保有すべき要求性能を許容範囲内に維持するように維持管理計画を策定し、初期点検、劣化予測、点検、評価及び判定、対策、記録を適切に行なえる維持管理体制を構築のうえ、維持管理しなければならない。
- ・ 維持管理における性能照査は、設計時の劣化予測に基づいて描かれる構造物の性能の劣化曲線（シナリオ）と、最新の点検結果から求められた現況性能の比較、およびそれを基にした劣化予測により求められた性能照査期間内の性能を比較することにより行なう。
- ・ 劣化曲線（シナリオ）は、点検を実施するたびにその点検結果及び既存の点検結果を基にして再検討する。最新の点検結果に基づく劣化予測が既存の劣化予測と異なる場合には、性能の劣化曲線もそれに合わせて修正して更新する。
- ・ 構造物の現況性能、または性能照査期間終了時の性能がその構造物の保有すべき要求性能を下回る場合には、適切な対策及びそれを実施する時期を検討する。
- ・ 対策は構造物の状態や経時劣化、劣化予測、実施時期、交通状況や路下道路などの周辺状況、ライフサイクルコストなどを考慮に入れた総合的な見地から検討を行って計画的に進めていく必要がある。

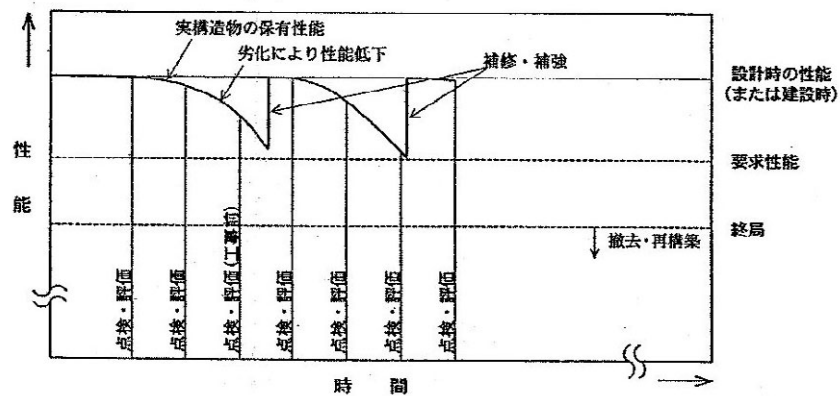


図 1.5.8 従来の維持管理

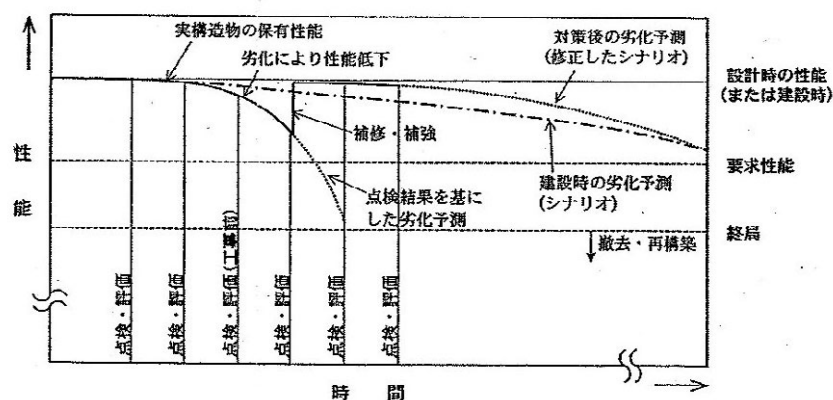


図 1.5.9 性能照査型の維持管理

出典：性能照査型維持管理要領（案）A S R 橋脚編

(3) 耐久性に対する取り組み

平成 11 年度

a) 維持管理検討部会

- ・ A S R 構造物の補修対策検討
- ・ コンクリート表面保護要領改訂
- ・ 点検評価方法の検討

b) 補修・補強検討部会

- ・ 中央ヒンジ D W 橋の補強検討
- ・ P C 桁横桁連結工法の適用範囲拡大検討
- ・ 鉄筋コンクリート桁の補修・補強工法の検討
- ・ R C 床版補強の取りまとめ

平成 12 年度

- ・ 中央ヒンジ D W 橋の補強に関する検討について

中央ヒンジ部の垂れ下がりにより車両の走行性や橋面排水等の機能に支障をきたすため外ケーブルによる垂れ下がりの抑制や舗装による路面のすりつけを実施し改善を図ってきたが、依然として垂れ下がりは進行している。それに対し、垂れ下がりの重要な要因が中央ヒンジ構造自体と考え、中央ヒンジ部分を剛結とすることを基本として補強方法を提案する。

- ・ コンクリート構造物の損傷判定手法に関する検討について

実橋床版に対し、既往の目視点検結果から得られる劣化項目のグレ－ディングによる床版劣化度の評価、および大型車荷重履歴データに基づく疲労度の計算結果からの床版劣化度の評価を検討している。

- ・ A S R 損傷構造物の維持管理手法に関する検討について

コンクリート構造物の維持管理に性能照査の考えを導入するケ－ススタディとして、阪神公団で重要な課題の一である A S R を取り上げ、A S R 構造物の維持管理に性能照査を試験的に応用してみることが目的として「性能照査型維持管理要領（案）A S R 橋脚編」の検討を開始した。

- ・ コンクリートの長期的性状に関する検討

コンクリート構造物の中性化・塩害による劣化の現状について整理し、各路線のコンクリート構造物を長期的に維持管理するための方針についてまとめている。

出典：(財) 阪神高速道路管理技術センタ－，「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」資料

1.5.4 鉄道総合技術研究所のLCCに関する考え方

(1) ライフサイクルコストの考え方

1) コンクリート構造物の維持管理

最近の維持管理の動向等について紹介しており、その中の劣化予測について示す。構造物の寿命を明確にするために、構造物の劣化予測を行なう必要があるが、現状ではその方法が明らかにされていない。塩害の劣化予測モデルとして図 1.5.10 が示されているが、鉄筋腐食速度等の定量的な値が把握されていない。

定量的な劣化予測モデルを作成するためには下記の二通りの方法がある。

- ・ 供試体の暴露試験あるいは実構造物の体系的な調査による劣化予測モデルの作成
- ・ 劣化予測を忠実に反映したシミュレーション

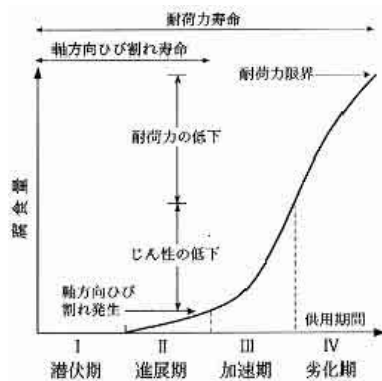


図 1.5.10 劣化予測モデル
(塩害)

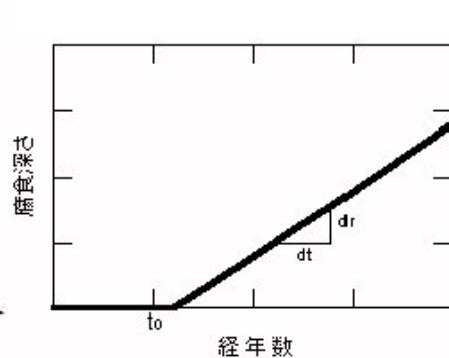


図 1.5.11 鉄筋腐食進行モデル

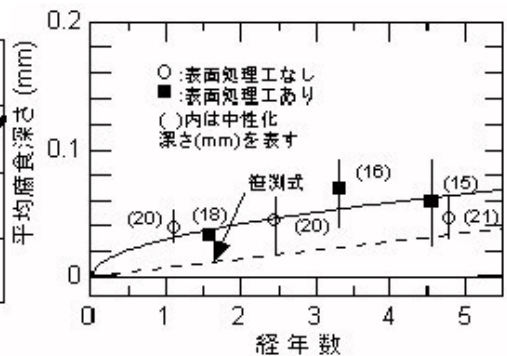


図 1.5.12 鉄建腐食状況
(中性化+塩害)

前者については、とある暴露試験結果 (40 年以上) から鉄筋の腐食進行は図 1.5.11 のように表され、鉄筋腐食速度は小さく、経年 100 年においても鉄筋腐食によって構造物の耐久性・耐荷性が著しく損なわれないことが推測されている。また、中性化と塩分の影響を受ける場合には、鉄筋腐食速度は大きくなることも判明しており (図 1.5.12)、腐食速度が 5 倍程度になっている。

このように、暴露試験によれば鉄筋腐食速度を把握でき、劣化予測を行なうことが可能であるが、結果を得るまでに長期間を有することや、条件が異なる場合に個々のモデルが必要になる等の欠点がある。これに対し、近年後者に示すコンピューターシミュレーションが提案され、鉄道総研においても開発を進めている。この方法では、鉄筋腐食に影響を与えるコンクリート中の水分、塩分、酸素等の物質移動モデルと鉄筋腐食の電気化学モデルを構築・融合することにより劣化予測を行なうことになる。

出典：第 137 回鉄道総研月例発表会

2) 鋼鉄道橋のLCC評価に関する基礎的検討

図 1.5.13 に鋼鉄道橋の経年別数量を示す。同図より、50 年以上経過した橋梁が半数以上を占めており、鋼鉄道橋の老朽化が進んでいる。また、何らかの措置を必要とする橋梁数も経年と共に増加しており、今後の補修・補強対策の重要性を改めて示す結果となっている。

今後、老朽構造物が増加し、保守投資の増加も大きく見込めない厳しい条件下で鋼鉄道橋の維持管理を効率的に行なうには、ライフサイクルコスト (以下、LCC) を考慮し、構造物の補修・補強・取替を最適化することが必要となる。さらに、LCCを考慮することは今後の性能照査型の設計体系にもつながるものと

考えられる。以下に、鋼鉄道橋を対象としたLCCの考え方を明らかにし、費用調査、劣化曲線の設定等を試み、鋼鉄道橋のLCCの一項目となる防食対策に関して鉄道総研で試算した例を示す。

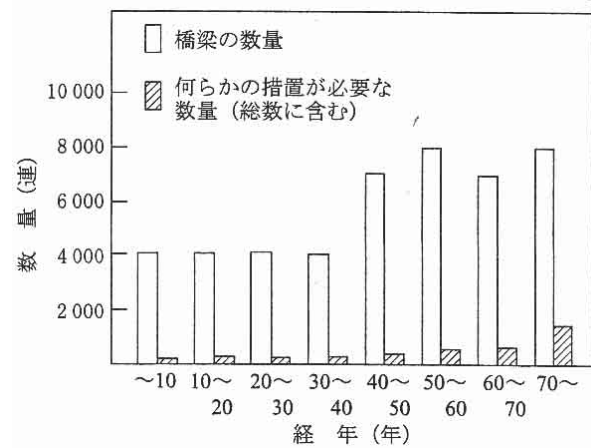


図 1.5.13 鋼鉄道橋の経年別数量

3) LCC評価の現状と問題点

鋼鉄道橋として定量的なLCC評価を導入するために、主に橋梁を対象とし、各研究機関でどのような研究がなされているかその一部を表 1.5.3 に示す。

表 1.5.3 ライフサイクルを考慮した一例

研究者(事業体)	鉄道 ³⁾ 軌道(鉄道総研)	道路 ⁴⁾ (旧建設省)	山口大学 ⁵⁾	アメリカ ⁶⁾ (N.Y.市)
システム名	—	—	BMSシステム	—
対象	軌道 (マルチ突き固め)	舗装と ミニマムメンテナンス橋	コンクリート橋	鋼橋
目的	マルチの最適配置	床版取り替え 橋梁形式の比較	橋梁の健全度判定	維持管理費の削減
特徴	費用、劣化曲線を仮 定したLCC評価	費用、劣化曲線を仮 定したLCC評価	劣化曲線の設定法 損傷の類推法	劣化曲線の設定法 全橋梁の維持管理
費用	設定	設定	設定	設定
劣化曲線	設定(周期的)	設定(周期的)	部材別に設定	部材別に設定しそれ を修正加算して1橋 梁として評価

LCC評価は各方面で盛んに検討されているが、中にはその前提条件となる構造物や部材の劣化曲線の考え方や補修費用の算出過程が明確でない場合も見受けられ、加えて対象としている変状も鋼鉄道橋で想定している変状とは必ずしも合致したものではない。鋼鉄道橋においてLCCの考え方は古くから用いられてきた実績が見られるが、比較的短期間を対象としていたことや、一部の項目に限定して検討されていたことなどから、長期間を対象とした構造物全体における定量的な評価指標というものが必ずしも十分に整備されていないと考えられる。以上のことから、鋼鉄道橋のLCC評価手法の確立が望まれる。LCC評価手法では鋼鉄道橋としての補修作業時間を考慮した費用の算定と、鋼鉄道橋において生じる恐れのある各種損傷に対する劣化曲線の設定が重要となる。

ライフサイクルコスト評価の方法

LCC評価を行なう際に将来要する費用を積み重ねていくため、異なった時間軸上の費用の取扱いが問題となる。一般的には将来要する費用を現在価値に置き換えて加算する方法が用いられることが多い。これを現価法という。現価法は次のような式で表される。

$$LCC = \sum \frac{C_i}{(1+r)^i} \text{ ----- (1)}$$

ここに、 C_i ： t 年後に必要となる補修費用

r ： 割引率

ここで、割引率とは将来の貨幣価値を現在に置き換えるために用いられる指標である。この割引率の値の大小によって、将来要すると考えられる費用の現在価値が異なってくる。例えば、割引率を大きくすることは将来の貨幣価値を小さく見積もることになる。この割引率はアメリカでは一般的に4%を使用している。社会情勢は異なるものの、経済成長率として概ねこの程度の割合が妥当と判断されることから、ここでは割引率を4%と設定した。

この他、式(1)で示される費用に加えて、経済的損失を考慮する考え方やストック価値を考慮した考え方も提案されている。しかしながら、その対象範囲や波及効果をどこまで見込むかといった問題を含んでいる。さらに経済的損失額が膨大なものになる可能性もあり、この損失額の大きさ次第ではLCC本来の評価部分が相殺されてしまうといった懸念も併せて持っている。このようなことから、ここでは新設時および補修時の費用のみを取り扱うこととする。

費用調査

鋼鉄道橋において想定される補修事例に対する費用の算定を試みた。ここでは、補修時の費用に関して補修専門業者の経験を基にして必要となる補修項目を挙げ、個々の費用を積み上げることによって極力、実際の施工に要した費用との相違がないように留意しながら費用単価の設定を行なう方法とした。鋼鉄道橋で生じる変状を明らかにするため、鋼構造物の補修・補強・改造の手引きを参考して、広く一般的に発生することが予想される変状を抽出した。抽出した変状種別総括一覧表を表1.5.4に示す。

表 1.5.4 変状種別総括一覧表

変状 No.	変状種別	変状箇所	補修内容	単位	工事 時間 (h)	工事費(千円)	
						作業時間 夜間3h以内	作業時間 夜間3hを越える
1	腐食	フランジの腐食	フランジの交換	箇所あたり	28	1,967	1,057
2	腐食	ウェブの腐食	欠食部のあて板補強	箇所あたり	18	1,291	690
3	腐食	支点部の腐食	桁端構造の変更	箇所あたり	26	1,192	684
4	腐食	軽微な腐食	塗装orボルトキャップ	下フランジ 添接あたり	1	80	63
5	腐食	ボルトの損傷	交換	主桁添接	7	841	420
6	腐食	リベットの腐食	HTBIに交換	下フランジ 添接あたり	18	1,179	589
7	疲労	上フランジの欠食、われ	割れの補修と補強	箇所あたり	34	2,389	1,227
8	疲労	上下線連結材の亀裂	連結構造の補強	箇所あたり	4	124	63
9	疲労	枕木受け等カバープレートの亀裂	ガウジングして再溶接	箇所あたり	3	1,996	999
10	疲労	腕材取り付け部の亀裂	取り付けディテール改良	箇所あたり	12	1,562	791
11	疲労	ソールプレートの亀裂	ガウジングして再溶接、ウェブにあて板補強	箇所あたり	7	484	252
12	疲労	桁端切り欠き部の亀裂	ウェブと下フランジの補強	箇所あたり	13	1,292	681
13	疲労	垂直補剛材下端部からの亀裂	TIG処理またはアングル補強	箇所あたり	5	298	149
14	疲労	支点部下フランジからの亀裂	支点部の構造改良	箇所あたり	41	3,068	1,731
15	支承損傷	支承座モルタルの損傷	支承座モルタルの交換	箇所あたり	25	2,066	1,202
16	支承損傷	アンカーボルトの損傷	支承の交換	箇所あたり	43	3,974	2,538
17	支承損傷	支承の変状					
18	支承損傷	桁(脚)の移動・不等沈下					

劣化曲線

補修費用の投入時期の判断指標として用いられるのが構造物や部材の劣化曲線である。ここでは鋼材の腐食や塗膜の劣化程度を対象とした劣化曲線に着目する。この理由として、鋼鉄道橋に生じる損傷として一般

的に腐食と疲労が考えられるが、疲労損傷の場合、S-N線図を参考にすれば、ある程度、損傷が発生するまでの期間を推定することが可能であると判断したためである。

図 1.5.14 に塗膜の劣化曲線の一例を示す。同図において、初期値と最終劣化状態の値を与えた後、実測データを入力すると、劣化曲線が一義的に定められる。この劣化曲線が定まると、塗り替え時期までの残存期間を推定することができる。さらに性能設計に対応して、塗り替え時期を早まるような選択を行なった場合でもそれに応じた L C C の算定が可能となる。

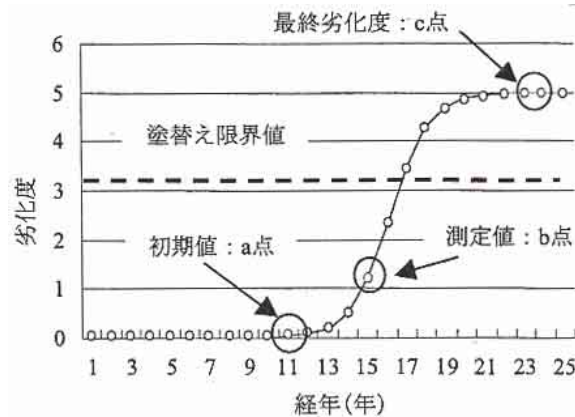


図 1.5.14 塗膜の劣化曲線例

出典：鉄道総研報告 Vol.15, No.8, 2001. 8

(2) L C C の試算例

鋼部材の防食対策に関連する L C C 評価の一項目について紹介する。対象構造物は、支間 63.35m の下路トラス橋である。鋼鉄道橋の防食方法としては、一般環境で広く用いられているフタル酸樹脂を用いた B 塗装系 (Type-A) と重防食を想定した J-2 塗装系の修正タイプ (Type-B)、耐候性鋼材 (Type-C) および溶融亜鉛メッキ鋼材 (Type-D) を対象とした。各々の補修塗装までの期間は Type-A の塗り替え年数が新設時 15 年、塗り替え時 12 年と想定される環境での各材料の寿命は仮定した。Type-B では新設時の耐久性を 40 年、塗り替えの周期を 32 年、耐候性鋼材と溶融亜鉛メッキ鋼材では補修塗装が不要と仮定した。

同様に特殊環境に対して H-2 塗装系の修正タイプ (Type-E)、海浜海岸耐候性鋼材 (Type-F) および溶融亜鉛メッキ鋼材 (Type-G) を対象とした。特殊環境における塗り替え年数は新設時では 30 年、塗り替え時は耐久性が 20% 低下すると仮定し 24 年と設定した。海浜海岸耐候性鋼材は実績がないが、滞水、滞塵芥が生じないように構造ディテールに十分注意することを前提に、所定の性能が十分に発揮できるとし補修塗装が不要と仮定した。また、メッキの場合にはこれまでの事例を踏まえて 30 年でメッキ層が消耗し、塗装が必要になると仮定した。

鋼材表面の防食方法における費用単価を積み上げた例を表 1.5.5 に示す。

表 1.5.5 防食に関する費用単価の設定例

		工程	膜厚 (μm)	単価 ($\text{円}/\text{m}^2$)
H 2 修正	新設時 工場	前処理 - 無機ジंक	スプレー15	7000
		2次素地調整	-	
		第1層 無機ジंक	スプレー75	
		第2層 ミストコート	-	
		第3層 エポキシ下塗	スプレー120	
		第4層 フッ素中塗	スプレー30	
		第5層 フッ素上塗	スプレー25	
J 7 修正	塗り 替え	素地調整 3〜4種ケレン	-	6000
		第1層 フッ素中塗	スプレー30	
		第2層 フッ素上塗	スプレー25	
		足場費用	-	

LCC算定結果を図 1.5.15 および図 1.5.16 に示す。一般環境を想定した前者より、これまで鉄道で一般的に用いられてきた B 塗装系 (Type-A) に対して、各腐食対策手法がいずれも費用削減効果があることが明らかである。また、経年によって最適な対策手法が異なってくることも読み取れる。一方、海岸付近等の特殊環境を想定した後者では、海浜海岸耐候性鋼材を利用した場合が常に総額コストが低い結果となり、前者のような対策手法の間における逆転現象は見られなかった。

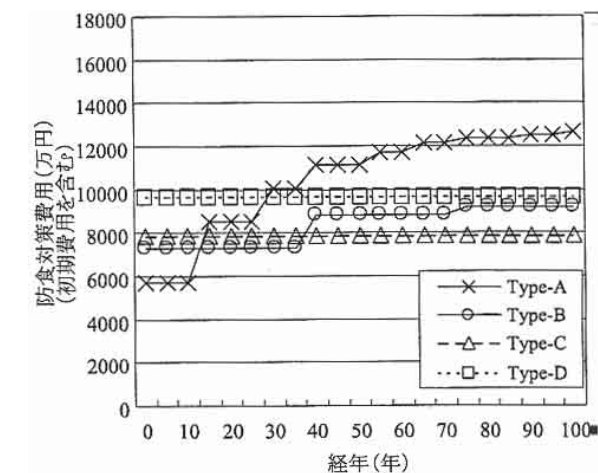


図1.5.15 一般環境におけるLCC算定結果

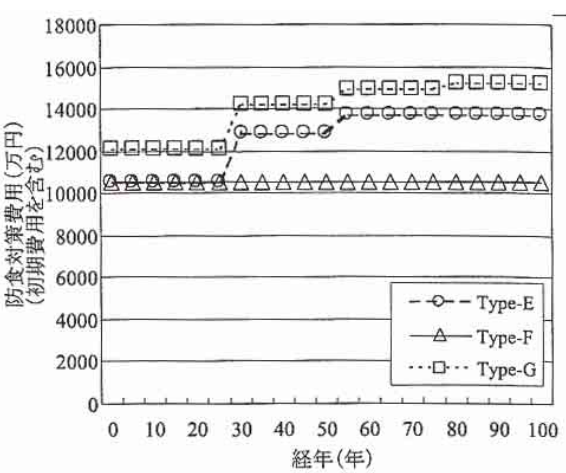


図1.5.16 特殊環境におけるLCC算定結果

出典：鉄道総研報告 Vol.15, No.8, 2001. 8

(3) 耐久性に関する取り組み

耐久性に関する内容を下記にまとめる。

設計耐用年数について

- ・ 設計耐用期間は概ね 100 年とする。
- ・ 環境条件による耐久性上の設計耐用期間としては、一般に 50 年間メンテナンスフリーを目標とする。通常の環境では 100 年程度の耐用年数を想定して、かぶり、水セメント比等を定める。

材料の設計用値

- ・ 材料の品質は、強度その他、『耐久性』によっても評価する。

耐久性に対するひび割れの検討

- ・ 鋼材の腐食に関するひび割れ幅の制限値を示している。
- ・ 曲げひび割れ幅の算定式を示している。

かぶりと水セメント比について

- ・ 塩害の可能性がある場合の、最小かぶりと最大水セメント比を示す。
- ・ 凍結融解作用の影響を受ける場合の、最大水セメント比を示す。
- ・ 化学的侵食の可能性がある場合の、最大水セメント比を示す。
- ・ 水密性を必要とする場合の、最大水セメント比を示す。

出典：『鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物』，平成 4 年 10 月

1.5.5 港湾施設における L C C に関する考え方（その 1）

（ 1 ） 港湾構造物の維持管理戦略

構造物の点検・調査の結果、劣化の進行が認められた場合、あるいは劣化の進行が予測される場合には、残存耐用期間を十分考慮した上で、維持管理戦略を検討することが必要である。維持管理対策として、点検強化、補修、補強、解体・撤去の中から最も合理的な対策を選定する。維持管理対策の要否と選定は、技術的判断に加えて、残存耐用期間やライフサイクルコスト(L C C)、使用可能な予算規模、構造物の社会的影響、などを総合的に検討して選定することが重要である。維持管理対策の策定に当たっては、構造物の機能があるレベル以上に維持する考え方に幾つかあり、その例として以下の図 1.5.17 のようなものがある。

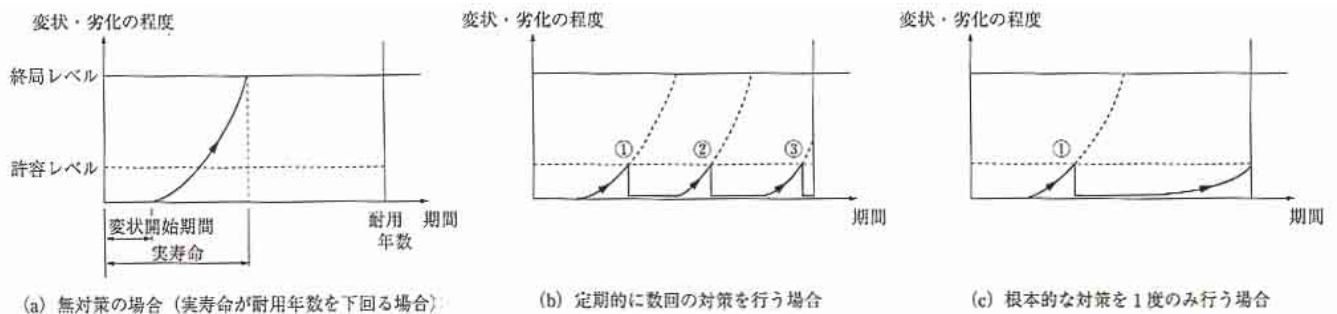


図 1.5.17 補修の考え方（ライフサイクルを考慮して）

上図(a)に示す考え方は、耐用年数に達するまで補修をせずに供用するというものである。残存耐用期間が比較的短い場合は、このような考え方も成立する。図(b)に示す考え方は、耐用年数に達するまでに複数回の補修を繰返して、残存耐用期間の間の継続的供用を行なう場合である。1回の補修は比較的簡易なものであり、低コストのものであることが要求される。図(c)に示す考え方は、1回の補修を行なうことにより、残存耐用期間の間、供用を継続するというものである。ある意味で、「徹底的な」補修を行なうことを意味する。なお、この場合は、補修効果が長期間継続することが確認されていることが要求され、一般的にはコストは高くなると考えられる。いずれにしても、構造物のライフサイクルコストを考慮した維持管理対策を立てることが望まれる。

（ 2 ） 港湾構造物のライフサイクルコスト（ L C C ）

1）ライフサイクルコスト

構造物のライフサイクルコストとは、構造物の計画設計、建設整備、運用管理、解体・撤去といった構造物のライフサイクルの段階毎に費やされる費用の総額を指す。通常、ライフサイクルコストの検討は計画段階からはじまり、段階毎にライフサイクルコストを検討することによる費用の最小化を目的として実施される。L C C を検討する場合の 3 要素には、() 効果(E)、() イニシャルコスト(IC)、() ランニングコスト(RC)があり、これらの組合せから最適な状態を検討するが、検討に際しては資本金利と物価変動の影響を加味しなければならない。以下にライフサイクルの各段階における検討方法を示す。

計画・段階での検討

- ・ IC を一定範囲に固定、E/RC を最大にし、RC の加減により、便益を最大にする。
- ・ IC+RC を一定範囲に固定、E を最大にし、総費用を固定した上で、IC と RC との配分を操作することで便益の最大化を図る
- ・ E と IC を一定の範囲に固定、RC を最大化し、予め想定した便益を RC の操作から最適化を図る

設計契約段階での検討

- ・ E を一定の範囲に固定。IC+RC を最小にし、想定の便益を定め、費用最小化を図る

運用段階での検討

- ・ E を一定の範囲内で固定し、最小の RC を求める
- ・ RC を一定の範囲内で固定、E を最大化し、RC の運用方法を検討する

2) 耐用年数

LCC を検討する上で重要な項目として、ランニングコストを決定づける耐用(供用)年数がある。耐用年数の考え方は構造物のライフサイクルを検討する時の重要な要素であり、施設整備計画を検討する上でも不可欠な項目である。港湾構造物における耐用年数の考え方は明確に定まっていないが、一般的には施設が持つ機能を発揮できなくなるまでの期間がライフサイクルの終焉と考えられる。下記に要因別の耐用年数を示す。

- ・ 機能的耐用年数：船舶の大型化、取扱い貨物量・種類の変化等による施設機能の不足・低下
- ・ 物理的耐用年数：構造物の腐食・劣化等による強度低下、外力・外的要因による構造破壊、沈下・埋設等による機能不足・低下
- ・ 経済的耐用年数：施設改良なしには他施設に比べて経済的に劣る状態
- ・ 社会(計画)的耐用年数：社会的要請、新規計画等により施設の当初機能が不要となるか、または別の機能が求められる状態

以上 4 つの耐用年数の内で最も短い期間が施設の耐用年数、ライフサイクルの終焉と考えられる。

3) 適用方法

施設の維持管理を検討する際には、先に示した計画設計段階、契約・契約段階、運用管理段階の各々の段階で LCC の検討を行なうことで、施設毎の最も経済的かつ効果的な計画、設計、管理、維持補修方法を選択することができる。従って、施設の計画段階から維持管理についての LCC を検討することで最小費用化を図ることが重要である。同時に当然ではあるが新規に建設される施設だけでなく、既に建設され社会資本として蓄積されている既設構造物の運用管理段階の LCC を検討し維持管理・補修を実施することも、総費用を低減するための重要な項目となる。

一般的な建築構造物と港湾構造物の一連のライフサイクルに係わる総コストを比較した場合、大きく異なる点は LCC における初期建設費と維持補修費等の割合である。施設毎に割合の差異はあるが、建築構造物では大まかに分けると初期建設費が約 2 割、維持・補修費で 5 割、廃棄処分費等で 3 割といった割合であるのに対し、港湾構造物では初期建設費が約 8~9 割とその殆どを占めている。したがって、初期建設費用の割合が高い分だけ、建築構造物に比べ施設の LCC を検討することにより得られる費用便益は低いものとなる。しかし、限られた港湾整備費を有効に活用し、同時に限られた港湾空間および港湾施設を良好な状態に維持するために、社会資本整備を行なう上で費用の低減は重要である。

4) 課題

我が国においては、港湾構造物の計画、設計、施工および維持管理の各段階で主体となる機関が異なるので、一連のライフサイクル全体を統合した施設の維持管理体系の中で、経済的かつ効果的な施設運営および維持管理を行なうために、各機関が保有する施設情報交換などの組織間の関係が非常に重要である。

(3) まとめ

港湾構造物の維持管理にあたっては、原則として供用開始以前に維持管理計画を策定する必要があり、その計画に基づいて点検・調査を実施し、対象施設の健全度を評価して、必要に応じて補修を行なうものである。効果的かつ経済的な維持管理を実施するため、維持管理計画および施設利用計画を基に対象施設のＬＣＣを検討し、維持管理、補修、補強等の計画を策定することが望ましい。

出典：(財)沿岸開発技術研究センター「港湾構造物の維持・補修マニュアル」(平成 11 年 6 月)

1.5.6 港湾施設におけるLCCに関する考え方（その2）

ライフスパンの長い港湾構造物はメンテナンスが不可欠であり，効果的なメンテナンスの実施，ひいては施設の有効利用の点からライフサイクルコスト(LCC)の評価が重要である。以下に，港湾技術研究所が係留施設のコスト発生事例について調査した結果，および港湾構造物のLCCに着目した効率的な施設整備のあり方，維持管理および改良更新方策に向けた基本的な検討結果について示す。

(1) 港湾施設の整備状況

施設の改良

調査した港湾施設が初期整備年から何年後に改良を実施したのかを図 1.5.18，その改良理由を図 1.5.19 に示す。

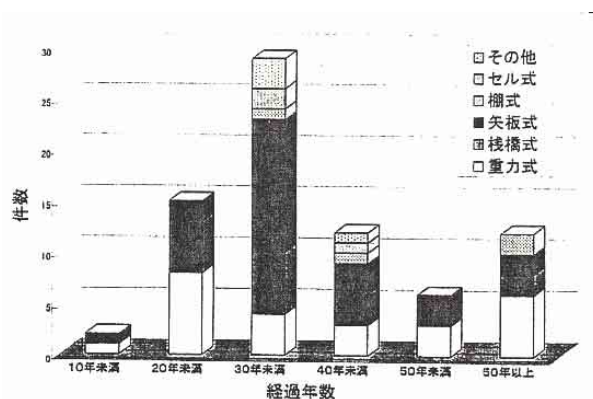


図 1.5.18 改良前の構造形式

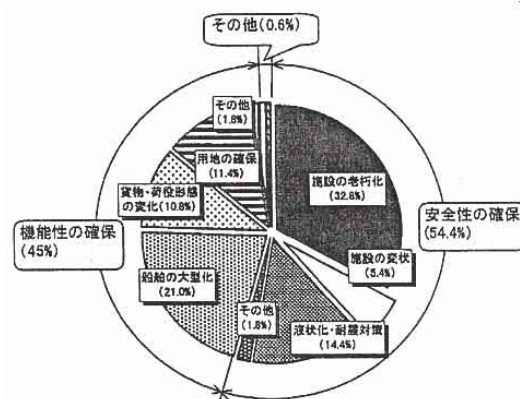


図 1.5.19 改良理由

上図の結果から，当初計画を上回る機能施設に改良する時期(経過年数)は，構造形式によって異なるが，およそ 30 年未満に改良される例が多かった。構造形式別に見ると，栈橋式や矢板式の鋼構造物は改良までの時期が短く，コンクリート構造物は長い傾向にあった。改良理由としては，安全性の確保と機能性の確保の双方がほぼ同じ割合であったが，その中でも多かったのは施設の老朽化と船舶の大型化であり，すなわち物理的要因と機能変化に対する要求がその理由として挙げられる。この 2 つの理由の違いが顕著に表れているのが，コンテナ岸壁と，それ以外の一般岸壁における改良事例である。

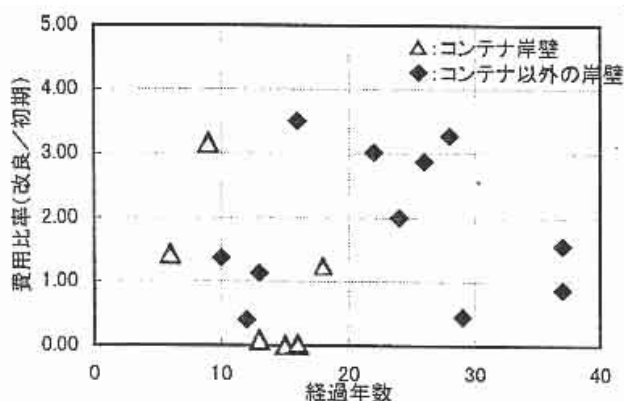


図 1.5.20 改良までの経過年数と費用比率

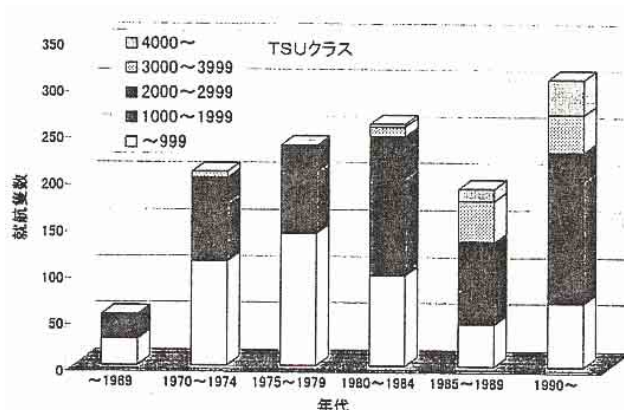


図 1.5.21 年代別コンテナ船就航隻数

コンテナ岸壁(改良前も殆どがコンテナ岸壁)の改良に至る供用開始時からの年数は 図 1.5.20 に示すとおり、一般の岸壁に比べ改良に至るまでの経過年数が短く、改良を行なった施設の全てが 20 年未満で、短いものは 6 年程度で改良されていた。この理由として、対象施設の多くが 1970 年代初頭に建設されており、設計時点での対象船舶が図 1.5.21 に示すコンテナ船就航隻数のように、2000TEU 以下の割合が高かったのに対して、1985 年以降は 2000TEU 以上の大型コンテナ船が増加し、それに対応するため岸壁の増深等の改良が行なわれたためであると考えられる。改良時に機能増を考慮した場合の改良費は殆どの場合で初期の建設費よりも大きく、1995 年価格に換算して最大で 3.5 倍程度の整備費を要していた。

施設の維持補修

「メンテナンス」を老朽化の進行防止、機能維持を図る行為、「補修」を当初機能及び構造への回復させる行為とし、防舷材の修理や荷役機械の整備と舗装、上部工事の補修工事を区別した。その補修工事等の発生までの経過年数と年当りメンテナンス費の比率（メンテナンス総額 / 初期建設費用 / 供用年数）および補修費の比率（補修総額 / 初期建設費）との関係を図 1.5.22 および図 1.5.23 に示す。

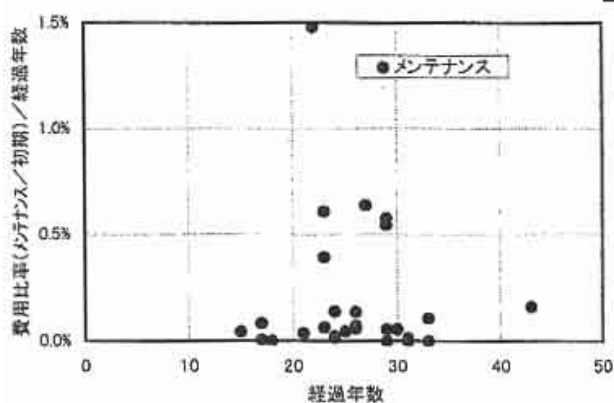


図 1.5.22 メンテナンス費用と経過年数

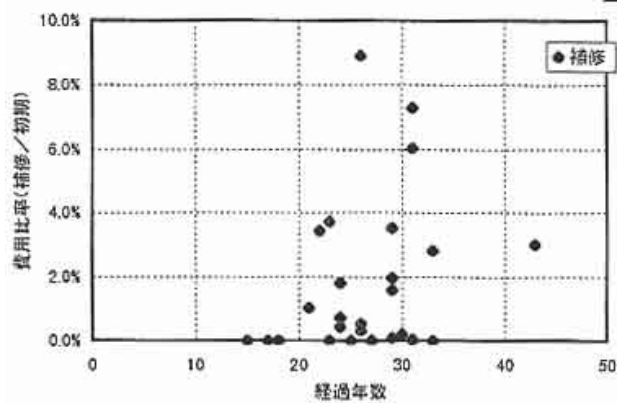


図 1.5.23 補修費用と経過年数

施設建設後の年数が 35 年以上経過した施設そのものは絶対数が少ないため、表上には明確に示されていないが、「維持補修」は供用開始年からほぼ 15 年が経過した時期から発生し、経過年数につれて比率が高くなる傾向にあった。しかしメンテナンス費用および補修費用は供用開始からの経過年数により多少変化するが、「メンテナンス費」で約 0.5%/年、「補修費」で約 3%/初期建設費となっていた。これは建築物に比べて低い値であるといえる。

(2) 港湾構造物の L C C

港湾構造物は設計上の耐用年数が長く、現実的には半永久構造物かつメンテナンスフリーであるような据え方をする傾向がある。つまり、構造物のライフサイクルを生涯過程と定義し、施設計画上に考慮するといった考え方はなかった。通常、建築物の L C C（建設、運用管理および廃棄の総計）に占める建設費の割合は建物の規模にもよるが 15～20%であるのに対し、メンテナンスで 25～30%、補修で 10～15%程度と試算されている。それに対して、例えば仮に 25 年経過した港湾構造物では、初期建設費に対してメンテナンスが $0.5\% \times 25 \text{ 年} = 12.5\%$ 、補修は $3\% \times 1 \text{ 回} = 3\%$ となり、全体コストの約 13%程度の比率となった。一方、改良を行なった場合は初期建設費の 1～3 倍程度の費用を必要とする事例が多かった。したがって、港湾施設の L C C は、対象とする耐用(供用)年数の設定により、コストに占める費目の割合が変化する傾向にあった。つまり L C C には供用期間が重要な要素となり、また建設費の額そのものが大きく影響することがわかった。

(4) まとめ

港湾構造物の L C C における維持補修費の割合は建築物に比べ低く、建設費以外の費用の効率化におけるトータルコストの低減化は難しい傾向にある。費用面に加え便益面から施設機能の工学的評価を定量化し組み込むことで L C C の概念が施設整備を検討する上で効果的となると考えられる。

出典：松淵，横田「港湾構造物の供用期間とライフサイクルコストの検討」，
土木学会第 53 回年次学術講演会，平成 10 年 10 月

1.5.7 港湾施設における LCC に関する考え方（その 3）

（1）ライフサイクルコストの試算

港湾構造物のライフサイクルコストに占める各段階における費用比率を、図 1.5.24 に示す。図には、比較のために建築構造物のライフサイクルコストに占める各段階の費用比率も示している。

建築構造物のライフサイクルコストに占める初期建設費の割合に対し、港湾構造物の初期建設費の比率は非常に高く、年当りの維持補修率が高いグループ「港湾構造物(1)」でもライフサイクルコストの 7 割以上、年当りの維持補修率が低いグループ「港湾構造物(2)」ではライフサイクルコストの 8 割以上を占めている。これは、建築構造物は、その構成が構造体本体、内外装等装飾、空調設備、上下水道、消火施設、電気設備、電話設備、昇降設備など複数の設備群の集合で機能している構造物であるのに対し、港湾構造物の場合、建築構造物ほど付帯設備が多くなく、構造がシンプルであることと、構造物の維持補修の対象が基本的に構造機能面に限定され、付帯施設等の維持などがあまり無いなどが割合の差となっていると考えられる。

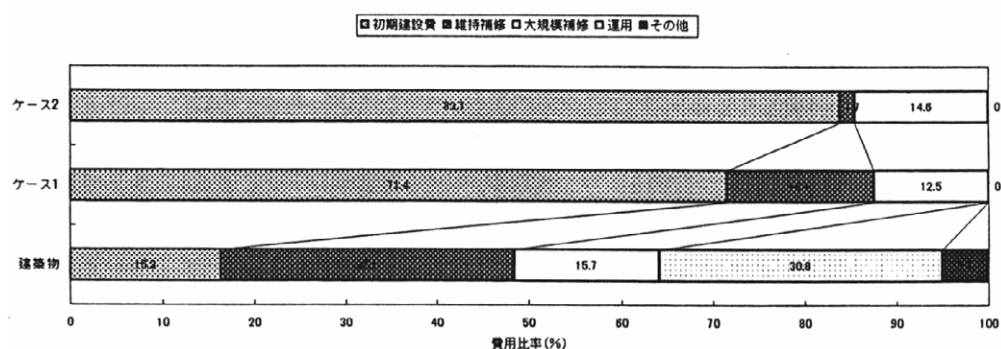


図 1.5.24 ライフサイクルコストの費用比率

建築構造物と港湾構造物総コストを比較した結果を図 1.5.25 に示す。ライフサイクルコストは、効果(E)、イニシャルコスト(IC)、ランニングコスト(RC)という3要素であらわせるが、ここではイニシャルコスト(IC)を同額とし、建築構造物と港湾構造物の総コストを比較する。

建築物の事例は、中規模事務所建物の試算例で総額約 87 億円、初期建設コスト(イニシャルコスト)が 14.2 億円である。それに対し、仮に初期建設費が 14.2 億円の係留施設の場合には総額が約 67 億円の差となっている。つまり、港湾構造物のライフサイクルコストにおける維持管理、補修費といったランニングコストの割合の低さから初期建設費以外の維持管理関連費用の最小化によるコスト低減の効果が建築構造物に比べ少ない。また、初期建設費を減らすことが、ライフサイクルコストの低減に比較的大きく、かつ直接的に効いてくると考えられ、維持補修費の最適を計るよりもイニシャルコストの低減の方がライフサイクルコストにより大きく影響する。

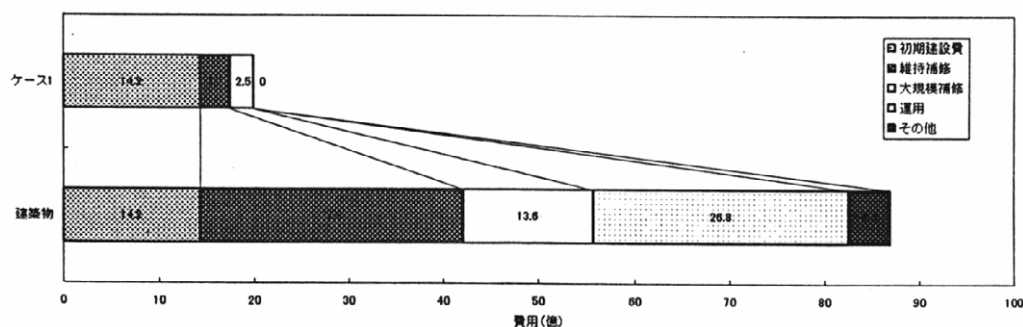


図 1.5.25 費用比較

(2) 港湾施設のライフサイクルコストへの影響因子

図 1.5.26 に示すように、ケース 1 のように物理的(設計)耐用年数の間施設を維持管理する場合よりも、ケース 3 および 4 では、物理的耐用年数の到達前に機能的・社会的理由で改良を行った施設のライフサイクルコストに占めるランニングコストが低い。つまり、維持関連費用の最小によるコスト低減の効果が更に低いと考えられる。

港湾構造物のような社会資本のライフサイクルコストを検討する場合は、有限の資本の最適活用が目的ではなく、毎年ある程度確実に確保される予算の存在を前提とし、その使用額を最小にしようとするのが目的となると考えられるが、施設によって検討方法が異なる。現実的に供用開始から改良までの期間が短く、今後も係船対象となる船舶の大型化の速度が速いことや作業機械・岸壁構造に変化が生じるような荷役作業の急激な革新が生まれる可能性がある施設では、物理的耐用年数よりも機能的耐用年数が短いことが一般的で、短いライフサイクルでの改良を前提としたライフサイクルコストの検討手法が適用可能と考えられる。コンテナ岸壁以外の一般的な岸壁では、設計上では物理的耐用年数の期間に対してはメンテナンスフリーであることから、最小費用による超長期にわたる供用を見据えた維持管理を考慮したライフサイクルコストの検討を行なうべきであると考えられる。

建築構造物に比べ港湾構造物(岸壁)では、ライフサイクルコストの検討によるランニングコスト(RC)の削減となる対象額が少ない。しかし、事業の効果的な実施のためには費用縮減は効果の大小に関係なく実施すべき問題であり、これからの港湾構造物の施設整備において費用最小化に関する検討は必須である。したがって、港湾の係留施設において、ライフサイクルコストによる費用便益の検討をすることで、効果の程度の大小はあるにしても効率的な事業実施を遂行すべきであると考えられる。

港湾構造物においてライフサイクルコストの最小化を検討する場合、以下の 2 項目を目的とする。

- ・ 物理的耐用期間の維持管理の最小費用化(効率化)
- ・ 最小費用による施設の延命化(超長期共用化)

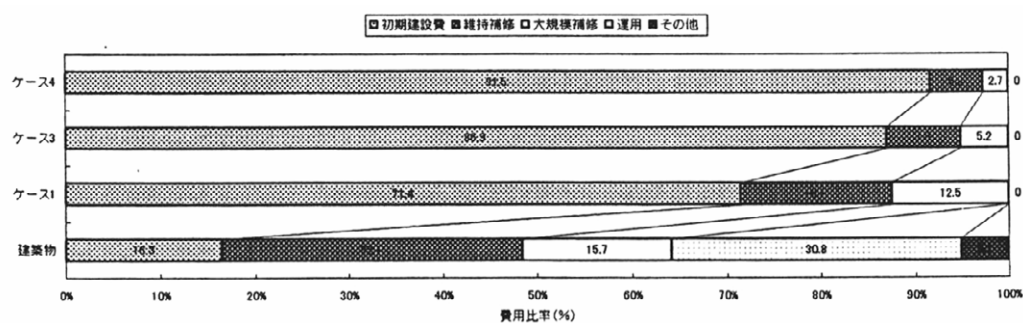


図 1.5.26 改良時のライフサイクルコストの費用比

出典：松淵，横田「係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意思決定支援システムの構築に関する基礎的研究」，港湾技術研究所報告 第 38 巻第 2 号 1999 年 6 月

1.5.8 学会等における L C C に関する考え方

(1) 社会基盤の長寿化に向けた維持管理技術の動向 (三木千壽 東京工業大学学部土木工学科)

維持管理の必要性

- ・社会資本は消費財と違って、劣化しても使い続けることが最適解であるケースが多く、また、取り替えることが困難なケースがある。
- ・すでに社会資本に劣化現象が生じ始めている。

インフォ - ムドコンセント

- ・社会基盤施設についてインフォ - ムドコンセント (知らされた上での同意) が重要である。
- ・土木技術者の説明に同意が得られないのなら、信頼を取り戻すことから始める必要がある。

維持管理更新は新しい分野

- ・既設の社会基盤施設の維持管理更新に関する研究開発は不十分である。

橋の L C C とくに維持管理更新に対する B / C

- ・補修・補強・架け替えの決定評価のため、直接的な経費の他様々な便益を L C C に取り込む必要がある。

健全度の評価

橋のインテリジェント化

もう一つの重要課題：技術者の養成

(2) 土木構造物の維持管理とライフサイクルエンジニアリング (金氏眞 鹿島建設(株)土木技術本部)

土木構造物のライフサイクル

- ・土木構造物のライフサイクルは、「計画」「建設」「保全」の三つのステップがつながって輪になっていると捉える。

従来の維持管理

事後保全と予防保全

土木構造物の耐用年数

- ・設計耐用年数の意味が不明になりつつある。耐用年数経過後にぎりぎりの性能を有すればよいのか、新設時と同様の性能を有するものなのか？今後、スクラップアンドビルドが困難になるのであれば、維持管理の考え方も変えていかなければならない。

計画的な維持管理

技術課題

- ・劣化の将来予測、耐久性評価指標、L C C による事業評価システムの定着

(3) 構造物維持管理支援システム (宮本文穂 山口大学工学部知能情報システム工学科)

維持管理に必要なもの - それは知識、経験の集約・総合化 -

- ・構造物の劣化・損傷に関する知識、経験の集約・総合化のためには点検データ、診断結果、対策データ等を「記録」として次世代に引き継ぎ、全世界の技術者が共有して有効活用することが重要。その実現手段はコンピュータと最新情報処理技術の活用である。

最新情報処理技術の応用と役割

構造物維持管理支援システムの実例

- ・「橋梁維持管理支援システム」「ファジ - 推論、エキスパートシステム、ニューラルネットワーク」「遺伝的アルゴリズム、免疫アルゴリズム」「ラフ集合、データマイニング」等の概要紹介。

(4) 港湾施設の維持管理 (横田弘 運輸省港湾技術研究所)

港湾施設の特長

港湾施設の維持管理と機能増との関係

維持管理と補修

維持補修に要する費用

- ・ 既存構造物の調査によると、維持管理費用は使用開始からほぼ 15 年経過して発生している。
- ・ 維持管理費用の初期建設費に対する比率は 0.1 ~ 0.5%にとどまっている。
- ・ 港湾施設では、構造物のライフサイクルを施設計画の際に考慮するという考え方は一般に行われていない。
- ・ 同様に、施設のライフサイクルの各段階で必要とする費用の総額を評価する方法も採用されていない。
- ・ しかしながら、今後はライフサイクルコストを考慮した維持管理戦略が重要である。
- ・ 構造物の機能変化シミュレーション、費用便益評価手法の確立が急務である。

(5) 長寿命舗装 (L S P) (関口幹夫 東京都土木技術研究所)

目標性能は現行アスファルト舗装の 4 倍以上

- ・ 重交通路線でも構造的寿命約 40 年以上、機能的寿命 15 年以上を目標性能とする。

メリットは利便性向上・沿道環境改善・コスト縮減

- ・ L S P の導入により 工事渋滞の縮減 沿道住民の環境向上 ライフサイクルコストの縮減等が期待される。

舗装構造はコンポジット形式 / 設計は性能照査型

- ・ 「 L C C 」の試算によるコストパフォーマンスは現行アスファルト舗装に比較してコンクリート系コンポジット舗装が有利である。

早期導入を目指す。

過酷な交差点の舗装をどうするか

ライフラインとの共生のあり方

(6) 橋梁マネージメントシステム (B M S) (佐藤弘史 建設省土木研究所構造研究室)

路橋の維持管理の概要

- ・ 「橋梁点検要領 (案)」「道路管理データベースシステム M I C H I」の概要について。
- ・ B M S は、道路橋の維持管理において健全度評価、補修計画作成支援に利用できる。

橋梁マネージメントシステム

- ・ B M S を構成する「健全度評価モジュール」「補修計画作成モジュール」の概要についても説明している。
- ・ システムで算定される補修による「利得」として、管理者の利得以外に利用者の利得も考慮していく必要がある。

(7) 下水道維持管理の新技术 (岩部秀樹 (株)クボタ 上下水プラント技術第一部)

1 兆円産業とその特長

施設の延命化と維持管理技術

- ・ 東京都区部では管渠は 8 割が法定耐用年数の 50 年を超え、処理設備も約 40%が耐用年数を超えている。
- ・ コスト縮減のため設備・施設の延命化を図ることが真のニーズと認識している。
- ・ そのためには「予防保全」「ライフサイクルコスト」の考え方が必要である。

高機能化と維持管理技術

これからの事業形態

- ・施設管理の民間委託が増加している。これまでは維持管理業務は労働集約型産業であり、役務提供を主とした業態であった。しかし、ＬＣＣを考えたとき、機能の高度化が求められるようになってくれば、物を作り供給する立場と維持管理が一体化しなければ本当にはコスト縮減につながらないであろう。

(8) 座談会 「維持管理の新たな視点」

(石橋：ＪＲ東日本，上野：建設省 金氏：鹿島建設 三木：東京工業大学)

第三者被害

情報の集中化

診断の費用

検査資格制度

維持管理と更新

ライフサイクルコストの最小化

- ・耐用期間，供用期間という概念が今までになかったが，ＬＣＣの中に何を考慮するかということをもまず議論すべきである。
- ・建設省ではＬＣＣを取り入れてミニマムメンテナンス橋というコンセプトを整理して，幅広く周知を図っている段階である。
- ・それを考えたとき，過剰品質になっていた部分があるのでは？ペンキを例にとると，さびが出て汚いという話と板厚は減って問題だという話は分離すべきである。そういう観点がトータルライフをミニマムにすることにつながる。
- ・ＬＣＣを考慮した補修計画を出す例があるが，公共の場合，会計検査院の段階でどのように取り扱われるのか危惧がある。
- ・100 年のライフが過ぎたところのパフォーマンスを設定した上で，いろいろなパツを決めなければならない。それがちゃんと説明できれば会計検査院の問題は二次的なこととなる。
- ・メンテナンスコストは時代とともに補修工法も変わるのでそのコストをどう考えるかで大幅に異なる。
- ・原則としてメンテナンスフリーに近い構造物を作ることルールとする必要があるのでは。
- ・日本の土木は一般にソフトウェアに金を払わない，また，誰が高い知識を持っているかという判断もなかなかできない。本当はこの構造物にはもう金をかけないでいいよという判断をちゃんとできる人にたくさんをペイを払うような仕組みができれば，本当はそれがメンテナンスの世界で一番大事なところだろう。

出典：「特集 社会基盤の維持管理と再生を考える」，土木学会誌 vol.85, Feb. 2000

2. FRPを用いた構造物のライフサイクルコストのケーススタディー

2.1 目的

繊維補強補強材（FRP）は、高強度と高耐久性を有する材料である。この材料をコンクリート構造物に適用する研究は、世界をリードするように日本で始まり、20年以上を経過している。この間、土木研究所、土木学会、建築学会などから、FRPをコンクリート構造物へ適用するための設計施工指針が発刊されている。これらの成果を元に、FRPを用いた構造物は、日本国内で180余を数えるようになったが、腐食環境下での適用事例は少ないのが現状である。しかしながら、塩害に苦しむ北米地域では、日本に先駆けFRPを用いた大規模な橋梁が建設されているのも事実である。

FRPの実用化された1990年代は、アルカリ骨材反応や海砂の使用によるコンクリート構造物の早期劣化が問題となった時期であり、FRPの高い耐食性は新しい補強材として期待されていた。しかしながら、新材料の高コストの問題（イニシャルコストが高い）が、厳しい腐食環境における適用に、大きな足かせとなった。近年、コンクリート構造物の劣化事例が増大して対策の緊急性や高い維持コストが認識されだし、また、経済の持続的発展の要件として、社会資本をライフサイクルコスト（LCC）で評価する意義の重要性が認識され始めている。

AAC倶楽部は、「FRP材を使用したコンクリート部材の耐久性の調査・検討 報告書」を2000年3月に出版し、FRP材料の耐久性に関する資料を公開している。今回、FRPの高耐久性に着目し、FRPを用いた構造物の初期コストと既往の技術で作られた構造物のLCCに関するシミュレーションを行い、LCCの考え方の普及とFRPを用いた構造物の適用拡大の一助になることを期待し、本調査研究を行った。

FRPを用いた構造物のLCCを現状の技術で完全に評価することは困難である。FRPが塩分環境やアルカリ環境に暴露されても、腐食や劣化しないことは明確であるが、その他の予期しない劣化形態については無防備なままである。したがって、FRPを用いた構造物をメンテナンスフリーと断言することは出来ないが、最小限度の維持管理により未知の劣化も予防保全できるものと考えて、本シミュレーションを行っている。

2.2 要求性能

管理者や構造物により維持管理の対象となる要求性能は多岐にわたり、同一の土俵では議論が難しい。維持管理の方法も予防維持管理から無点検維持管理まで幅広い。ここでは、様々な管理者が、様々なレベルの維持管理を施し、100年以上供用することを議論の対象とする。なお、その時点における残存価値（性能およびリスク）については、評価の対象外とした。

2.3 劣化モデル

劣化因子について

コンクリート構造物の耐久性の問題は、大きく分けて、補強材料の腐食による劣化とコンクリートの劣化がある。ここでは、同一のコンクリートを用いて、FRP材料と既往の補強材料との耐食性の差異に着目した検討を行なうこととした。補強材料の腐食を促進する因子は塩害と中性化が考えられるが、重要土木構造物に適用されるコンクリートの水セメント比が50%以下と推定されるので、コンクリート標準示方書にしたがい中性化の検討は省き、劣化因子として塩化物イオンを対象とした。

塩化物イオンのコンクリートへの浸透予測は次の仮定にしたがった。

2.3.1 塩化物イオンの濃度浸透予測方法

1次元の拡散理論を用いるのが主流であるので、これにしたがった。

$$C(x,t)=C_0\left(1-erf\frac{x}{2\sqrt{D\cdot t}}\right)+C(x,0)$$

2.3.2 表面塩化物イオン濃度

表面塩化物イオン濃度は、「コンクリート標準示方書 維持管理編」と「道路橋示方書 コンクリート橋編」の改定資料と思われる「ミニмумメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書（ ）- PC橋の塩害対策に関する検討 -」で異なる。ここでは、表面塩化物イオン濃度は、4.5kg/m³とした。

表 2.1 コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C₀ (kg/m³) by JSCE

飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

「ミニмумメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書（ ）- PC橋の塩害対策に関する検討 -」：平成 13 年 3 月：国土交通省材料施工部コンクリート研究室・構造橋梁部橋梁研究室・(社)プレストレストコンクリート建設協会 によると、次の手順で算出する。

沖縄県と日本海北部における、1km 換算飛来塩分量 C₁ は、0.6mg/dm²/day(mdd)である。汀線から 0.1km における飛来塩分量は、汀線からの距離の関数として次式で与えられ、2.4mdd となる。

$$C_{air} = C_1 * d^{-0.6}$$

その地点におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度は、次式で与えられ、2.1kg/m³となる。

$$C_0 = 1.5 * C_{air}^{0.4}$$

沖縄県や日本海北部の汀線から 100m までの領域、つまり、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が 2kg/m³を超える場合、過去の損傷事例よりスーパー塩害対策^(注1)を推奨している。また、飛沫帯における塩化物イオン濃度 C₀ = 13kg/m³としている。

本シミュレートではこれらの事情を考え、対象構造物を汀線から 0.1km 以内の構造物を対象とすることとし、表 2.1 に示されているコンクリート表面の塩化物イオン濃度 4.5kg/m³を用いることとした。

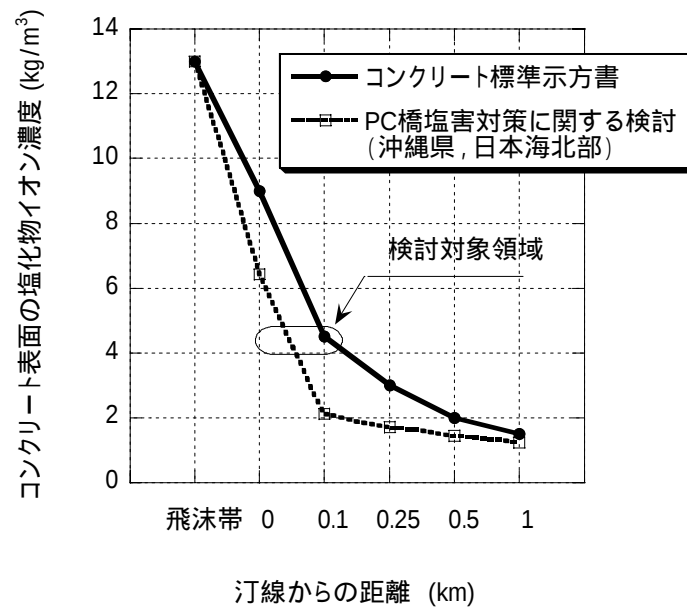


図 2.1 コンクリート表面の塩化物イオン濃度

注 1

スーパー塩害対策は、次の点に配慮して、複数の塩害対策を併用するものとする。

- 1) 複数の対策の組合せにより鋼材腐食の発生確率を低減する。
- 2) 供用後の不測の事態のために時間的余裕を確保する。

2.3.3 拡散係数

拡散係数も，上記の文献間で異なる。これらの研究が未だ途上であることがわかる。
普通ポルトランドセメントを用いた場合，コンクリート標準示方書は次式を与えている。

$$\text{Log}D = [4.5(w/c)^2 + 0.14(w/c) - 8.7] + \log(3.15 \times 10^7) \quad (\text{cm}^2/\text{年})$$

「PC橋の塩害対策に関する検討 報告書」は，次式を与えている。

$$D_c = (5 \times 10^{-7}) \cdot e^{-1.6(c/w)} \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

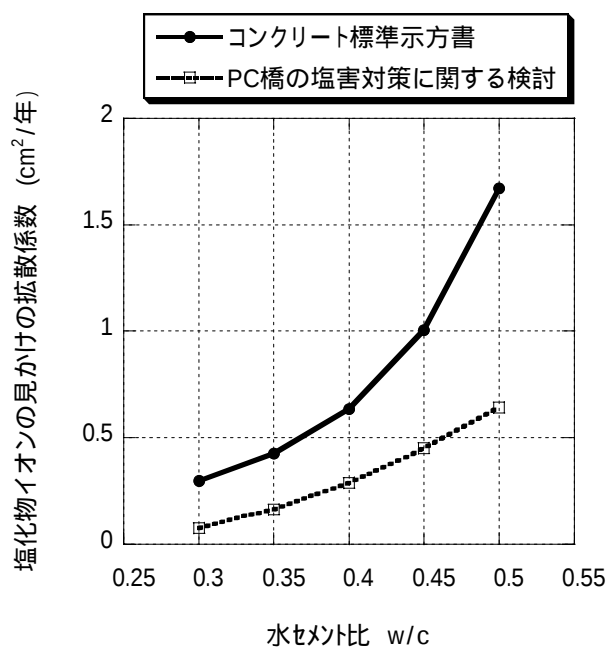


図 2.2 塩化物イオンの見かけの拡散係

両者の見かけの拡散係数は，2～3 倍の差異が認められる。本検討では，コンクリート標準示方書の見かけの拡散係数を用いることにより，安全側に評価することにした。

2.3.4 腐食発生限界塩化物イオン量

腐食発生限界イオン量の実態調査結果を表 2.2 に示す。発錆限界塩化物イオン量は、環境外力およびコンクリートの抵抗性などにより変動すると考えられている。ここでは、コンクリート標準示方書および道路橋示方書が想定している腐食発生限界イオン量 1.2kg/m^3 を用いるものとする。なお、初期含有塩化物イオン濃度 $C(x,0)$ は 0.3kg/m^3 を用いる。

表 2.2 発錆限界塩化物イオン量の一覧

提案者	年	イオン量	摘要
コンクリート耐久性向上総プロ	1989	2.5kg/m^3	17 年暴露（都内）
土木研究所 （東京湾横断道路基本調査）	1989	$1.2 \sim 2.5\text{kg/m}^3$	10 年間暴露 品質により異なる
土木研究所	1989	$1.2 \sim 2.5\text{kg/m}^3$	東北地区 実態調査
沖縄総合事務所	1997	1.2kg/m^3	沖縄地区 実態調査
日本道路公団東北自動車道		$\rho \times 0.25\% \times 0.607$ $= 3.4\text{kg/m}^3$	供試体調査 実態調査
日本道路公団 塩害調査手引（案）	1993	$1.2 \sim 2.5\text{kg/m}^3$	供試体調査 実態調査
大井埠頭棧橋劣化調査・補修 マニュアル		1.88kg/m^3	

2.3.5 検討対象の構造物の水セメント比

本検討では、道路橋示方書（表 2.3）で想定している工場で製作されるプレキャスト部材に相当する水セメント比 36%を用いることとした。

表 2.3 道示コンクリート橋編 解 5.2.1 想定している水セメント比

部材・部位	(1) 工場で製作される プレキャスト部材	(2) (1)以外のプレスト レストコンクリート構 造	(3) (1)以外の鉄筋コン クリート構造
想定している水セメント比	36%	43%	50%

2.4 初期コスト

本検討では、汀線から 100m 程度離れた位置に建設されるプレテンション橋（図 2.3，図 2.4）の L C C の検討について紹介する。初期コストは下記の条件で算出した。算出対象は橋梁上部工のみである。

プレテンション橋の諸元

橋長	: 20.76m
径間割	: 単純梁
幅員	: 8.2m
橋面積	: 170.2m ²
斜角	: 90°
橋格	: 1 等橋 (TL25)
塩害対策	: 区分 (かぶり 52mm , 最下段 P C 鋼材位置 70mm) 「塩害対策指針 (案) にもとづくプレテンションげた : P C 建協 , 平成 6 年 10 月」

積算条件

積算時期	: 平成 13 年 8 月
主桁製作場所	: 東京 23 区内
架設位置	: 主桁製作位置より 100km
架設条件	: 河川内で 300tfm クレーンにて 1 日で架設
F R P の労務費	: 一般 P C 鋼材 , 鉄筋の場合と同一
F R P 緊張材	: CFCC φ 15.2 もしくは テクノローラ緊張材 4 φ 7.5
主桁補強材	: ネフマック - G3 - 100P

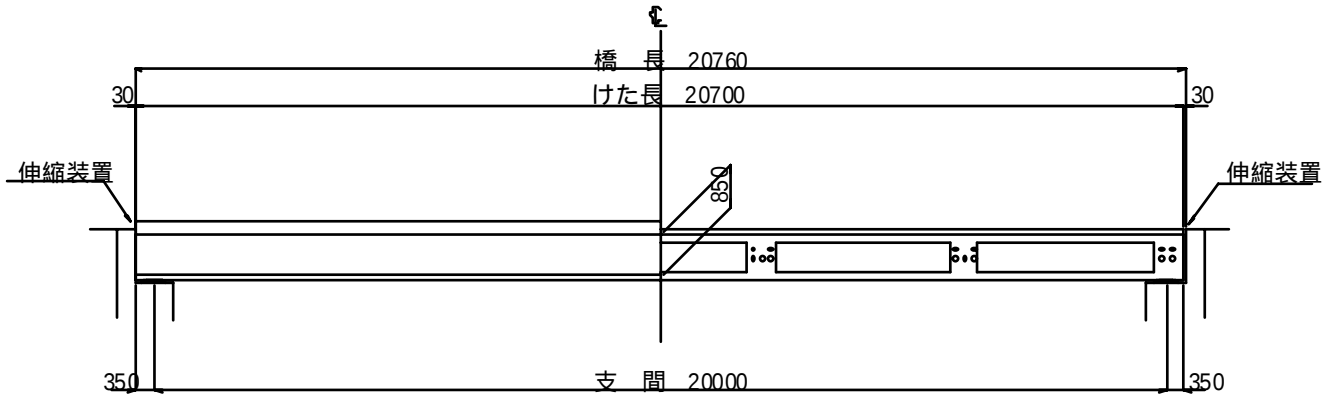
表 2.4 道示コンクリート橋編 表 5.2.1 塩害の影響による最小かぶり (mm)

部材・部位 塩害の 影響の 度合い 対策区分		(1) 工場で製作される プレキャスト部材	(2)(1)以外のプレスト レストコンクリート構 造	(3)(1)以外の鉄筋コン クリート構造
影響が激しい	S	70 ^{*1}		
影響を受ける		50	70	
		35	50	70
				50
影響を受けない		6.6.1 「かぶり」による		

*1 塗装鉄筋の使用またはコンクリート塗装を併用

道示コンクリート橋編 (平成 14 年 3 月版) には , 対策区分「 S 」が追加された。本検討では , 対策区分「 」で初期コストを算出したことになる。

側 面 図



断 面 図

支 点 部 中 間 部

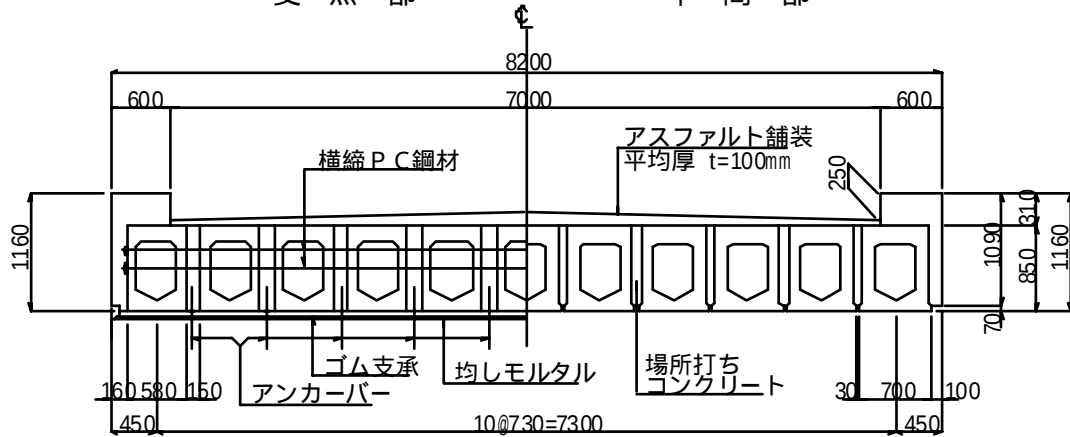


図 2.3 橋梁の一般図

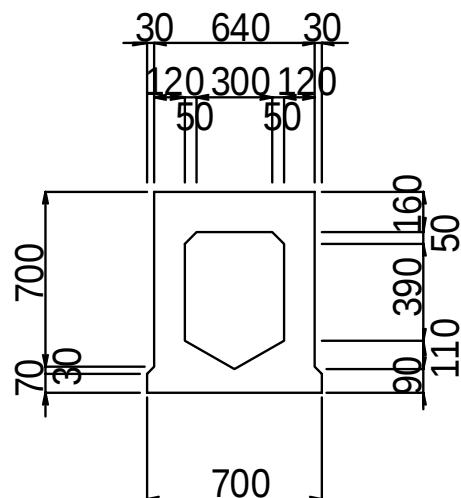
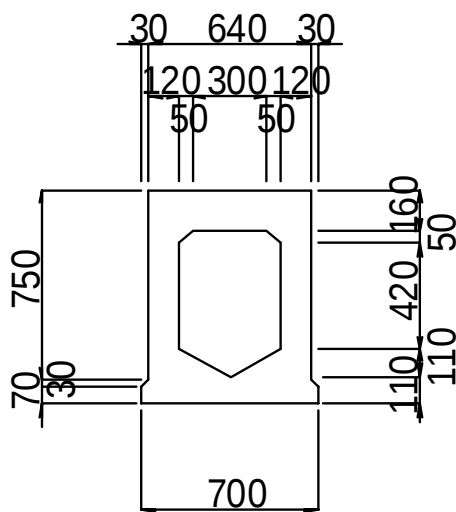


図 2.4 塩害対策区分 の断面 (PC 鋼材)

塩害対策区分 の断面 (FRP 緊張材)

初期コストは、表 2.5.1 に示す 7 ケースについて算定した。CASE-0 は一般の塩害対策区分 の橋梁で、CASE-1 と 2 はスーパー塩害対策を想定した橋梁で、塩害区分 のけたにコンクリート塗装と橋面防水工もしくはエポキシ鋼材を用い橋面防水工も併用した場合である。CASE-3 と 4 は、標準のかぶりを有するけたに緊張材料として炭素繊維もしくはアラミド繊維製 F R P を用い、F R P 製グリッド筋を補強材として用いた場合である。CASE-5 と 6 は、CASE-3、4 に横締め緊張材も F R P 製緊張材を用いた場合である。なお、橋面工は必要最低限度の費用が含まれている。参考として、CASE-0 積算例を表 2.5.2 に示す。

橋梁上部工の初期建設コストの直接工事費は、CASE-0 を 1.0 とした場合、ス - パー塩害対策橋梁の CASE-1 と CASE-2 は 1.15 と 1.07 なり、F R P 製の緊張材をプレテンションけたに用いた橋梁の CASE-3 と CASE-4 は 1.63 程度となり、ポストテンションの横締め緊張材も F R P 製とした橋梁の CASE-5 と CASE-6 は 1.75 程度となる。

表 2.5.2 積算例 (CASE-0)

Case-0

(主ケーブル PC 鋼線 15.8 + 横締 1S17.8+鉄筋)

橋面防水+塗装 なし

主桁仕様:塩害対策1種 PC鋼材かぶり 70mm 普通鉄筋

工 種	種 別	仕 様	単 位	数 量	単 価	金 額
直接工事費						
主桁製作工		塩害対策桁 (L=20.0m)	本	11.0	1,002,000	11,022,000
主桁運搬工		100km	t	207.9	5,500	1,143,450
支承工		typeA	箇所	22.0	53,800	1,183,600
主桁架設工		300tクレーン,昼	t	207.9	9,500	1,975,050
横組工	コンクリート工	σck=300kgf/m ²	m ³	14.5	31,900	462,550
	底型枠工		m	207.0	1,040	215,280
	PCケーブル工	1S17.8	m	220.6	1,840	405,904
	PC定着工		本	28.0	12,400	347,200
	吊り足場工	側部足場	m	41.4	4,930	204,102
		吊り足場	m ²	178.0	3,400	605,200
	機械器具損料		式	1.0	89,700	89,700
	小 計					2,329,936
橋面工	地覆工		m	41.4	19,000	786,600
	高欄工	アルミ高欄 (KR-1211-10)	m	41.4	52,200	2,161,080
	伸縮継手工	ゴムジョイント (N -20)	m	14.0	67,900	950,600
	排水工		箇所	2.0	20,000	40,000
	舗装工	車道	m ²	144.9	3,500	507,150
		歩道	m ²	0.0	7,200	0
	主桁塗装工	t=2mm	m ²	0.0	12,000	0
	橋面防水工		m ²	0.0	2,500	0
	小 計					4,445,430
小 計		(A)				22,099,466
間接工事費						
共通仮設費		(B)=(共通仮設費率)×((A)-主桁製作工費)				1,830,000
純工事費		(C)=(A)+(B)				23,929,000
現場管理費		(D)=(現場管理費率)×(C)				3,776,000
工事原価		(E)=(C)+(D)				27,705,000
一般管理費		(F)=(一般管理費率)×(E)				3,563,000
合 計						31,268,000

表 2.5.1 建設費の比較

ケース	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
桁種別	塩害対策桁	塩害対策桁	塩害対策桁	標準桁	標準桁	標準桁	標準桁
塩害対策の仕様	かぶり52mm	かぶり52mm コンクリート塗装 橋面防水	かぶり52mm エポキシ鉄筋 エポキシPC鋼材 橋面防水	かぶり32mm Rebar GFRP PCtendon AFRP	かぶり32mm Rebar GFRP PCtendon CFRP	かぶり32mm Rebar GFRP PCtendon AFRP 横桁横締 AFRP	かぶり32mm Rebar GFRP PCtendon CFRP 横桁横締 CFRP
桁高	(mm)	850	850	800	800	800	800
主ケーブル	1S15.2	1S15.2	1S15.2	AFRP4φ7.4	CFCC15.2	AFRP4φ7.4	CFCC15.2
	21	21	21	19	28	19	28
補強筋	鉄筋D10	鉄筋D10	エポキシ鉄筋D10	ねすかけFTMC3	ねすかけFTMC3	ねすかけFTMC3	ねすかけFTMC3
	283kg	283kg	283kg	21m	510m	21m	510m
主桁単価	円/桁	1,002,636	1,002,636	2,318,859	2,250,179	2,318,859	2,250,179
主桁費	11本	11,029,000	11,029,000	25,507,000	24,752,000	25,507,000	24,752,000
横締ケーブル	1S17.8	1S17.8	1S17.8	1S17.8	1S17.8	AFRP4φ7.4	CFCCφ25
	28	28	28	28	28	36	24
直接工事費	円	22,099,000	25,486,000	36,436,000	35,617,000	38,172,000	38,906,000
比率	1.00	1.15	1.07	1.65	1.61	1.73	1.76
間接工事費	円	9,169,000	10,891,000	13,332,000	13,082,000	14,206,000	14,737,000
合計	円	31,268,000	36,377,000	49,768,000	48,699,000	52,378,000	53,643,000
比率	1.00	1.16	1.06	1.59	1.56	1.68	1.72

CASE-3,4の主桁にFRPを使用した場合：塩害区分の橋梁に対して、直接工事費で約1.63倍になる。

CASE-2のエポキシPC鋼材がプレテンション桁に適用できるかは、今後の研究課題である。

2.5 劣化の進行と対策（維持管理の区分と内容）

コンクリート標準示方書維持管理編によると維持管理の区分は以下に分けられる。

- A：予防維持管理
- B：事後維持管理
- C：観察維持管理
- D：無点検維持管理

劣化の進行は次のようにグレード分けされている。

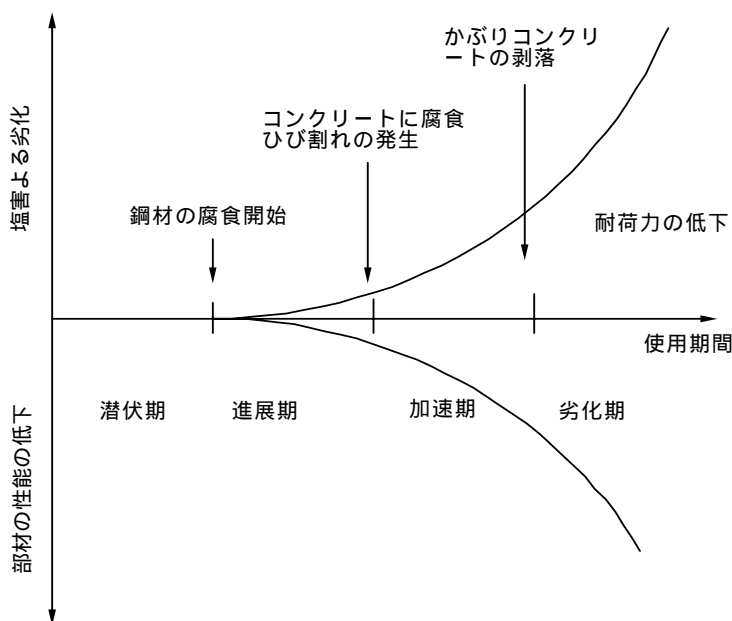


図 2.5 塩害による劣化進行過程

塩害環境にある場合、部材内へ拡散した塩分が鋼材を腐食状態に導いてゆく。したがって、予防維持管理としては、建設直後の潜伏期から塩害対策を講じる必要が有る。これまでの国内の維持管理体制は、進展期後期もしくは加速期になって、補修対策を実施するケースが多く、本質的な部材の性能劣化を予防できないでいるのが現状である。

本シミュレートでは、上記を鑑み、以下の条件で100年供用のLCCの算定を行った。100年後、余寿命のある場合はその時点で検討を打ち切り、寿命が尽きた場合は解体費を計上した。

建設時もしくは潜伏期初期に塩害対策を行った場合

進展期初期に塩害対策を行った場合

加速期もしくは劣化期初期に塩害対策を行った場合

2.5.1 劣化の進行についての仮定

塩化物イオンの拡散モデルは 3 章に示した方法を用いた。解析条件を再掲すると下記である。本ケースでは，18 年程度でかぶり 52mm の位置における鉄筋が腐食を開始することになる。

コンクリート表面塩化物イオン濃度	C_0	= 4.5kg/m ³
初期含有塩化物イオン濃度	$C(x, 0)$	= 0.3kg/m ³
コンクリートの水セメント比	w/c	= 36%
腐食発生限界塩化物イオン濃度	C_{cr}	= 1.2kg/m ³

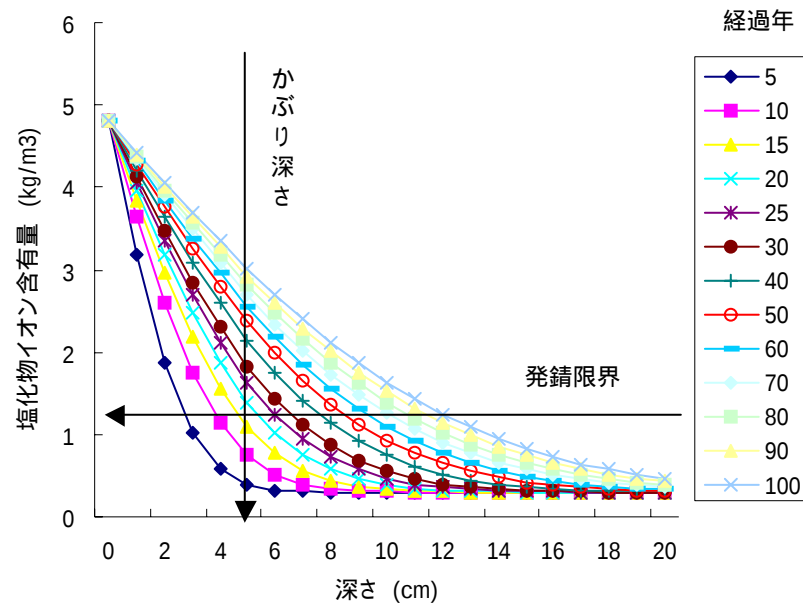


図 2.6 塩化物イオン濃度の経年変化の推定値

進展期の算定については，腐食速度と腐食ひび割れ発生限界値が必要となる。腐食速度については，かぶり，水セメント比，塩化物イオン量などさまざまなパラメータを元にした，数多くの推定式が提案されている。一方，腐食ひび割れ発生限界については，明確な値や算定式はほとんどなく，いくつかの参考となるものが示されているの状況である。今回は，この中の複数の方法により進展期を予測した結果 5～15 年となった。さらに，加速期については，ほとんど知見がないため，実例などを参考に経験的に決めることとした。

そこで本検討では，潜伏期を 18 年，進展期を 7 年(25 年まで)，加速期を 50 年までとした。

なお，進展期に入ってから表面被覆工法のような遮塩工法を用いた場合，塩化物イオンの再拡散が生じ，補強筋位置での塩化物イオン含有量は増加する傾向を示すので，劣化は進行すると推定される。

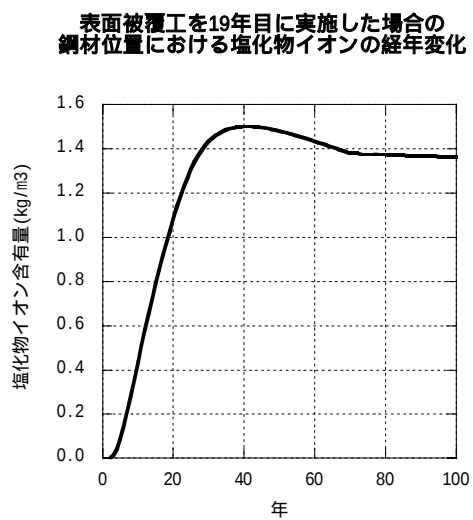
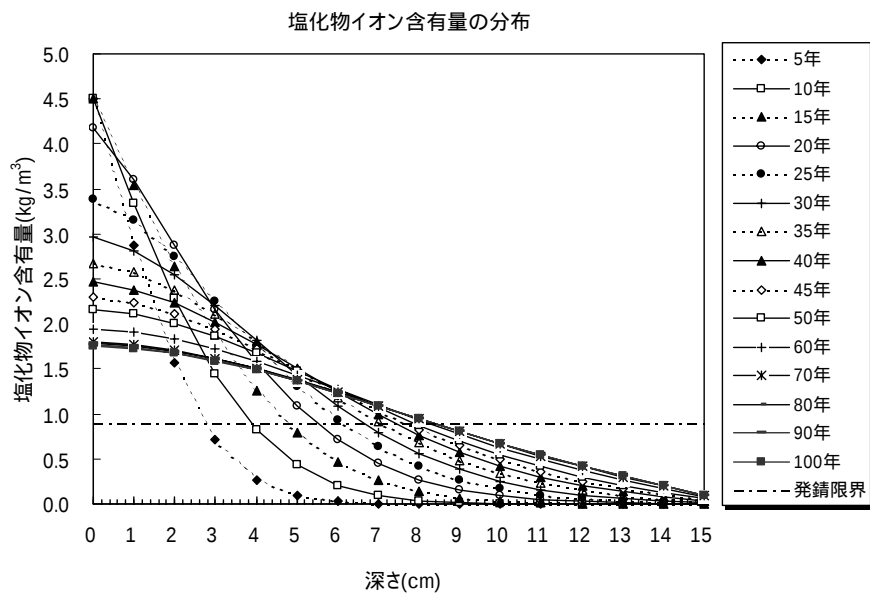


図 2.7 19年目に表面被覆を実施した場合，鋼材位置の塩化物イオン含有量の推移

2.5.2 対策工の選定

ミニマムメンテナンスを目的としたシステム，および，補修工法，補強工法と電気化学的防食システムについて検討した。脱塩工法についてはP C部材への適用性が明らかなので検討していない。なお，参考単価は直接工事費である。表 2.6 以外の工法については，個別に積算した金額を用いた。

表 2.6 補修工法の単価

項目	細目	単位	参考単価	耐用年数	摘要
断面修復工	t =7cm (全面)	円 /m ²	77,000		
断面修復工	t =5cm (部分)	円 /m ²	54,000		
防水塗装工	膜厚 500 μ	円 /m ²	20,000	ライニング 8 年	
表面被覆塗装工	膜厚 190 μ	円 /m ²	10,000	8 年	
電気防食	設置時	円 /m ²	120,000		
	システム更新	円 /m ²	20,000	25 年	
	電極更新	円 /m ²	100,000	50 年	
	運転費	円 /m ² 年	600		
足場工		円 /m ²	3,500		

2.5.3 100 年目における残余寿命と性能

各補修補強工法は機能が異なるので，補修補強後の構造物の性能もおのずと異なる。前述したように，有害な塩化物イオン量を有する構造物への表面被覆工法と断面修復工法は，その後の劣化の進行に影響を与えることは明らかである。しかしながら，100 年後の性能を予測することも難しいので，ここでは，定性的に100 年後の余寿命と性能を参考として記述しておく。

2.6 LCC の比較

2.6.1 検討した補修・補強工法の一覧

検討した補修・補強工法の一覧と想定した工法の耐久性の一覧を図 2.8 に示す。100 年後の構造物の性能は、塩化物イオン浸透防止策と内部塩分を除去した工法の場合は健全度を維持するとし、劣化期まで構造物を放置し補強工法を用いた場合は余寿命が尽きたものとした。電気防食工法については、100 年後を予測することは難しいが、健全度を維持しているものとした。

なお、現状ではエポキシ塗装鋼材を用いた構造物に関するケースは、エポキシ塗装 P C 鋼線を用いてプレテンション桁を製作することに技術的な課題があること、エポキシ塗装のピンホールと腐食の関係が明らかでないことなどから、参考として記述している。

各工法の詳細については、次節にて解説する。

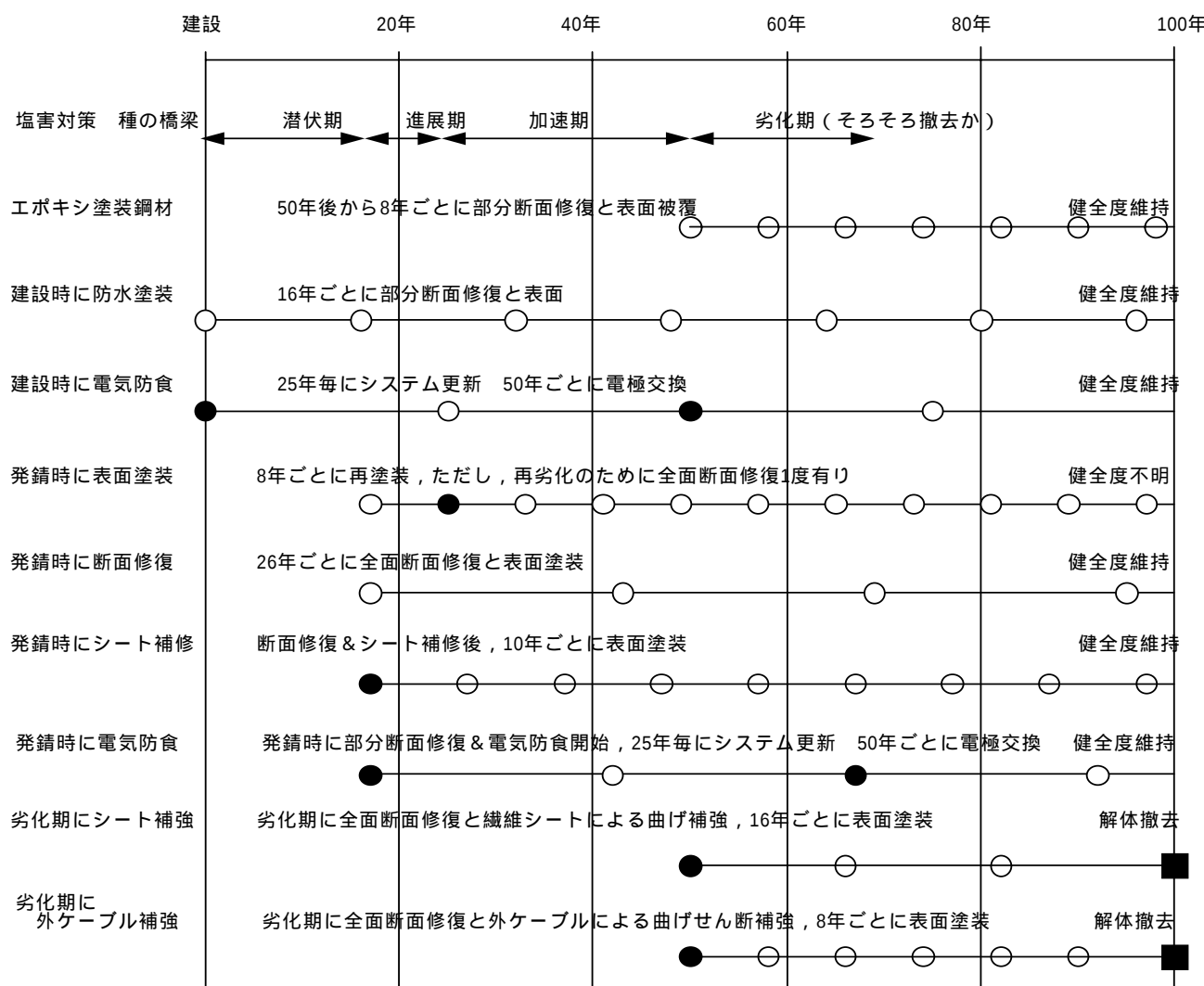


図 2.8 補修補強工法の一覧

2.6.2 LCC の比較

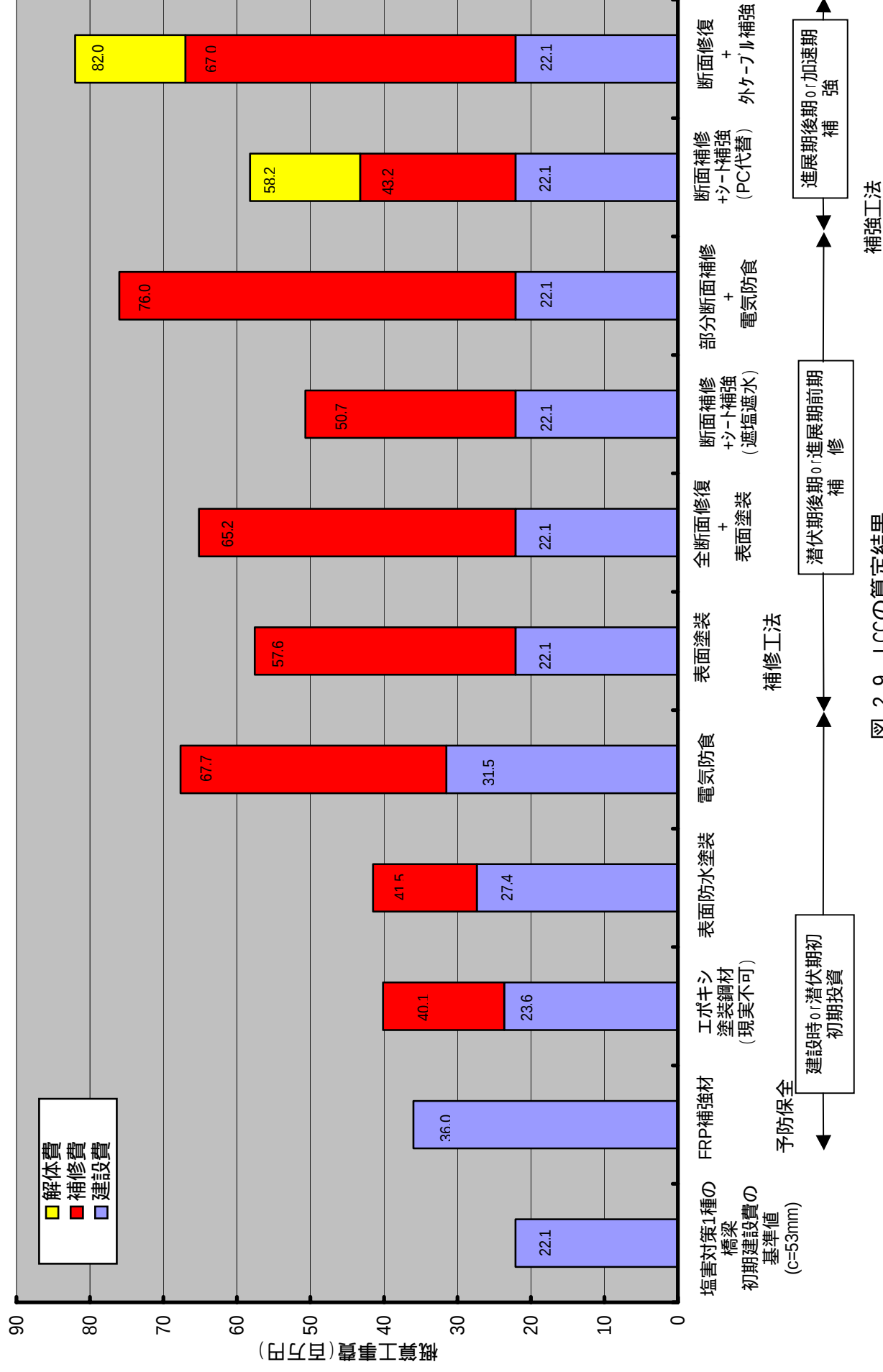


図 2.9 LCCの算定結果

ＬＣＣの算定結果を図 2.9 に示す。厳しい塩害環境下でコンクリート構造物を維持保全して行くのに多大のＬＣＣを要することがわかる。図に示す工事費とは、現在の価格における直接工事費の予測値である。注意しなければならないことは、将来の技術、金利動向や構造物の残存価値とリスクとその管理などが複雑に絡み、単純な工事費のみの比較は出来ないことを含みおく必要がある。

〔 予防保全 〕

新設時に予防保全を実施する案では、100 年間のＬＣＣは、塩害対策 種の橋梁の初期建設費に対して 1.6 ～ 2 倍程度となります。このなかでは、FRP を用いた場合が最も安価で、1.63 倍になる。当然、FRP を用いた橋梁も予期しない劣化が生じる可能性があり、点検などの維持管理を必要とすることには変わりないが、厳しい塩害環境下では高い優位性を示すと考えられる。表面防水塗装を 16 年ごとに塗替えて保全する手法は、塗替えコストが大きくなり、初期建設費に対して 1.9 倍になった。今後、高い耐久性を有するコンクリート用塗装材料の開発が望まれます。近年注目されている電気防食工法は、システムの初期費や更新費の割高感是否めない。

〔 補修工法 〕

潜伏期もしくは進展期初期に補修対策を講じる案は、内部に塩分が多く残存しているので、ＬＣＣは初期建設費の 3 倍程度となり、予防保全よりも割高な工法になる。この種の維持管理を繰返すと 100 年後の構造物の健全度は維持されていると思われるが、点検と維持管理の頻度が高くなると想像される。塩害の進行が予測される構造物に対しては、予防保全を講じることが望ましい。

〔 補強工法 〕

進展期後期もしくは加速期に補強を講じる案は、構造物に色々な損傷や劣化が生じていると推定され、供用を継続するためにはリスク管理が必要と考えられる。補強工法にも比較的大きな費用が生じる。また、補強工法を適用しても、橋梁に対するすべての要求性能を満足することは困難と想像される。100 年の供用後、解体撤去すれば、ＬＣＣは初期建設費の 2.6 ～ 3.7 倍となり、さらに新設費が必要となる。

2.6.3 まとめ

厳しい塩害環境では、予防保全を実施することがＬＣＣを最小にし、そのなかでもFRP補強材を用いて、錆びない劣化しない構造物を構築することは最善の選択肢の一つといえる。今後、社会の持続的な発展のためにも、本構造が採用されることを期待します。

2.7 塩害対策区分 対応の橋梁に対する維持補修等の個別検討の概要

2.7.1 維持・補修・補強工法適用の基本的考え方

塩化物イオンの侵入と浸透および拡散の解析から得られた

- ・ 建設後 18 年でスターラップ(かぶり 50mm)の発錆と腐食開始
- ・ 建設後 50 年で P C 鋼材最下段(かぶり 70mm)の発錆と腐食開始

および、これを踏まえて設定した塩害による劣化過程の進行

- ・ 潜伏期：0～18 年
- ・ 進展期：18～25 年
- ・ 加速期：25～50 年

を基に、検討橋梁の供用期間 100 年の間に行なうべき維持・補修・補強工法の適用の方針と考え方を、表 2.8 に整理した。この各工法を適用するに当たっての個々の考え方を示したものが、2.7.2 節以下である。

なお、2.6 節で行った L C C 比較は、これらの中から代表的と考えられる工法を選定したものについて直接工事費を算定したものである。

表 2.8 塩害による劣化進行と維持・補修・補強工法の適用方針

供用経過年 と劣化現象	0 年	18 年	25 年	50 年	100 年
	建設	スターラップ 腐食開始		P C 鋼材腐食開始	
建設時初期 の 対策工法	橋面地覆部被覆塗装 190 μ + 桁下面被覆塗装 190 μ 以後 ,・ 8 年毎に塗装面 1 %を断面補修 50mm および塗装全面上塗り補修 ・ 32 年毎に全面断面補修 50mm および被覆塗装 190 μ				健全性 保持
	橋面地覆部防水塗装被覆 500 μ + 桁下面防水塗装被覆 500 μ 以後 ,・ 15 年毎に塗装面 1 %を断面補修 50mm および塗装全面上塗り補補修				健全性 保持
	電気防食 以後 ,・ 供用全期間に亘って維持電力必要 ・ 25 年毎にシステムの部分補修 ・ 50 年毎に電極取替				健全性 保持
潜伏期末期 進展期初期 対策工法	無対策	桁下面被覆塗装 190 μ 以後 ,・ 8 年毎に塗装面 1 %を断面補修 50mm および塗装全面上塗り補修 ・ 32 年毎に全面断面補修 50mm および被覆塗装 190 μ			健全性 保持
	無対策	桁下面の断面補修 50mm + 被覆塗装 190 μ 以後 ,・ 8 年毎に塗装面 1 %を断面補修 50mm および塗装全面上塗り補修 ・ 32 年毎に全面断面補修 50mm および被覆塗装 190 μ			健全性 保持
		桁下面の断面補修 50mm 以後 ,・ 18 年毎に断面補修 50mm を繰返し補修			健全性 保持
		桁下面の断面補修 50mm + 被覆塗装 190 μ 以後 ,・ (18+8)年毎に断面補修 50mm + 被覆塗装を繰返す			健全性保 持
		桁下面の断面補修 50mm + F R P シート被覆 1 枚 以後 , 10 年毎に樹脂上塗りを繰返し補修			健全性 保持
		桁下面の断面補修 50mm + 電気防食 以後 ,・ 維持電力必要 ・ 25 年毎にシステムの部分補修 ・ 50 年毎に電極取替			健全性 保持
進展期工期 加速期 対策工法	無対策	無対策	断面修復 70mm + F R P シート 5 枚補強 以後 , 10 年毎に樹脂上塗りを繰返し補修		撤去
			断面修復 70mm + 被覆塗装 190 μ + F R P アウターブル補強 以後 , 8 年毎に被覆塗装を繰返し補修		撤去

2.7.2 建設時初期の対策工法

(1) 対策工法の基本的考え方

供用年数 100 年を確保するために建設初期に行なう対策工法として、

建設時から塩化物イオンの侵入を遮断する被覆工法

一時的に塩化物イオンの侵入を許すものの、鉄筋位置における将来の塩化物イオン濃度が発錆限度以下である時期に、以後の塩化物イオンの侵入を遮断する被覆工法

塩化物イオンの侵入を自由に許し、発錆限度に達した時期から電氣的に発錆・腐食を抑える電気防食工法を考えることができる。

しかし、およびの方法は、コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数等、多くの仮定に基づいて鉄筋位置における塩化物イオン濃度が鉄筋の発錆限度に達する時期を推定する必要があり、被覆工法の施工時期、または電気防食工法の通電時期を明確に予想することが困難である。

したがって、ここでは、

の被覆工法は、の被覆工法に含まれるものとする。

の電気防食工法は、建設直後から通電するものとして対策工法を検討する。

(2) 橋面地覆部および桁下面の被覆塗装 190 μ の繰返し工法

被覆工法として、

- ・橋体完成時に、橋面の地覆部および桁下面に被覆塗装 190 μ を施工する。また、この被覆効果を維持するために、以後、被覆塗装の有効期間 8 年を基準に、
- ・8 年毎に塗装面 1 % を断面補修 50mm および被覆塗装全面の上塗りを繰返し補修
- ・32 年毎に被覆塗装全面を断面補修 50mm および被覆塗装全面の上塗り補修を行なうものとする。

(3) 橋面地覆部および桁下面の防水塗装被覆 500 μ の繰返し工法

被覆工法として、

- ・橋体完成時に、橋面の地覆部および桁下面に防水塗装被覆 500 μ を施工する。
- また、この被覆効果を維持するために、以後、被覆塗装の有効期間 15 年を基準に、
- ・15 年毎に塗装面 1 % を断面補修 50mm および塗装全面上塗り補修を行なうものとする。

(4) 電気防食工法

電気防食工法として、

- ・桁製作および桁架設後の場所打ちコンクリート施工時に、必要な全システムを設置
- ・上部工完成と同時に通電を行なう。

また、電気防食効果を維持するために、以後、

- ・供用全期間に亘る電力の供給
- ・25 年程度毎にシステムのメンテナンスと補修
- ・50 年程度毎に電極の交換

を行なうものとする。

なお、電気防食の考え方は、2.7.5 節に改めて述べる。

2.7.3 潜伏期末期から進展期初期の対策工法

(1) 対策工法の基本的考え方

本検討では、コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数等、多くの仮定に基づいた解析結果ではあるものの、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が鉄筋の発錆限度に達する時期を、橋体完成後 18 年と推定した。また、この時期を鉄筋の腐食開始時期であると仮定した。

供用年数 100 年を確保するためにこの時期に行なう対策工法として、

これ以後の塩化物イオン侵入を遮断する被覆工法

鉄筋位置までの塩化物イオンを含んだかぶりコンクリートの除去および断面補修によるかぶりコンクリート打ち替え工法

塩化物イオンの侵入を自由に許すものの、発錆限度に達した時期から電氣的に発錆・腐食を抑える電気防食工法

を考えることができる。

これらの方法は、実構造物において、錆汁等により鉄筋発錆が確実に認められ、また錆の進行に伴って発生するコンクリート表面のひび割れが発生した時点で対策工法として実施することが可能である、という高い融通性を有している。しかし、その反面、の被覆工法は、対策工法実施後の塩化物イオン侵入を遮断することができるものの、すでに侵入した塩化物イオンがコンクリート内部で拡散して、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が鉄筋の発錆限度を超えることを防止することが出来ない。の電気防食工法は、鉄筋間が電氣的に完全に連続していることが必要という欠点を有している。

したがって、ここでは、それぞれの対策工法を実施するに当たり、鉄筋かぶり 50mm に相当する部分をハツリ取って鉄筋表面に必要な防錆処置を施したのち断面修復を行なうことにより、これらの欠点を除去するものとする。

(2) 桁下面被覆塗装 190 μ または防水塗装被覆 500 μ の繰返し工法

上記 の理由から、18 年より前の時期で被覆塗装が必要である。

従って、考え方は前記の 2.7.2(2)と同様である。

(3) 桁下面の断面補修 50mm、および、被覆塗装 190 μ の繰返し工法

被覆工法として、橋体完成後 18 年の時点で、

- ・桁下面のかぶりコンクリート 50mm の除去と断面補修
- ・被覆塗装 190 μ を施工する。

また、この被覆効果を維持するために、以後、

- ・8 年毎に被覆塗装 190 μ の全面補修
- ・32 年毎に被覆塗装全面を断面補修 50mm および被覆塗装全面の上塗り補修を繰返し行なうものとする。

(4) 桁下面の断面補修 50mm の繰返し工法

かぶりコンクリート打ち替え工法は、橋体完成後 18 年以降、かぶりコンクリート 50mm の有効期間である 18 年毎に、

・桁下面のかぶりコンクリート 50mm の除去と断面補修
を繰返し施工する

(5) 桁下面の断面補修 50mm と被覆塗装 190 μ の併用・繰返し工法

被覆工法として、橋体完成後 18 年の時点で、

- ・桁下面のかぶりコンクリート 50mm の除去と断面補修
- ・被覆塗装 190 μ

を併用して施工する。また、この被覆効果を維持するために、以後、かぶりコンクリート 50mm の有効期間 18 年と被覆塗装 190 μ の有効期間 8 年を合計した 26 年毎に、

- ・桁下面のかぶりコンクリート 50mm の除去と断面補修
- ・被覆塗装 190 μ

を併用して繰返し行なうものとする。

(6) 桁下面の断面補修 50mm と CFRP シート被覆の併用工法

被覆工法として、橋体完成後 18 年の時点で、

- ・桁下面のかぶりコンクリート 50mm の除去と断面補修
- ・桁下面に連続繊維シート 200g/m² の貼付

を併用して施工する。また、この被覆効果を維持するために、以後、連続繊維シートの含浸接着に使用した樹脂上塗りの耐候性有効期間 10 年毎に、

- ・含浸接着樹脂上塗りの再塗装

を繰返して行なうものとする。

(7) 桁下面の断面補修 50mm と電気防食の併用工法

電気防食工法として、橋体完成後 18 年の時点で、

- ・桁下面のかぶりコンクリート 50mm の除去と断面補修
- ・電気防食システムを設置
- ・桁下面のかぶりコンクリート 50mm の断面補修
- ・上部工完成と同時に通電

を併用して行なうものとする。また、電気防食効果を維持するために、以後、

- ・供用全期間に亘る電力の供給
- ・25 年程度毎にシステムのメンテナンスと補修
- ・50 年程度毎に電極の交換

を行なうものとする。

2.7.4 進展期後期から加速期の対策工法

(1) 対策工法の基本的考え方

本検討では、コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数など、いくつかの仮定に基づいて算定した結果から、P C 鋼材の破断時期を橋体完成後 50 年とした。

また、この時期に最下段部の P C 鋼材すべてが同時に破断すると仮定した。

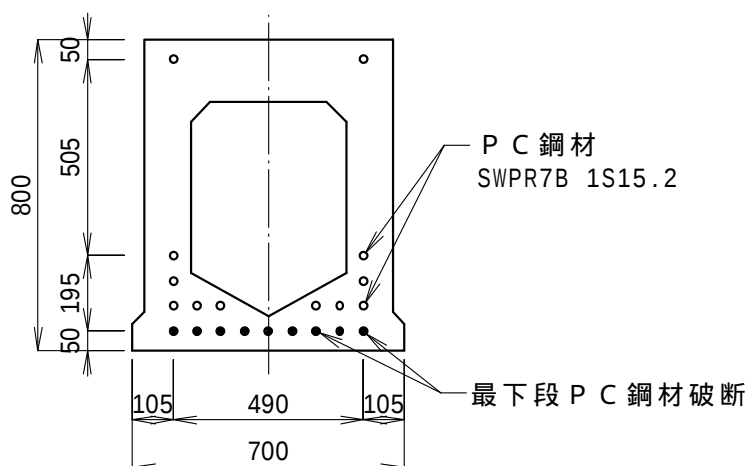


図 2.10 PC 鋼材破断の仮定

供用年数 100 年を確保することを目的として、この時期に行なう対策方法としては、

P C 鋼材位置までの塩化物イオンを含んだかぶりコンクリートの除去、及び、断面修復によるかぶりコンクリートの打ち替え工法

これ以後の塩化物イオンを遮断する被覆工法

腐食破断した P C 鋼材の代替工法

の併用が考えられる。

なお、P C 鋼材位置までの塩化物イオンを含んだコンクリートの除去を行なうこととしたのは、ここで行なうの被覆工法によって新たな塩化物イオンの侵入を遮断できるものの、それまでに侵入しすでに内在した塩化物イオンのために、P C 鋼材位置での塩化物イオン濃度を発生限度以下にできないことによる。

一方、上記の P C 鋼材代替を主目的とする補強工法を実施する 50 年の時点では、18 年以後に進んだ補強鉄筋の腐食が進行し、補強鉄筋の下部が腐食・破断して十分な定着が獲れず、せん断耐力が低下することも想定されるが、一般的なプレテン桁ではせん断破壊が想定されにくいことから、ここでは主 P C 鋼材の補強のみを想定して補強の計画を行なうこととした。

なお、外ケーブル補強については、せん断耐力の向上効果も付加できる工法である。

(2) 繊維シート補強(+断面補修 70mm)案

本工法においては，以下の機能を期待する。

- ・コンクリート中の鋼材に対する外的劣化要因の遮断
- ・腐食劣化して断面欠損した P C 鋼材の補修・補強に P C 鋼材代替材として使用し，
パーシャルプレストレス部材としての耐力を負担する。

なお，鋼材に対する外的劣化要因のうち，塩化イオンに対する炭素繊維シートの遮断効果は，土木学会「コンクリートライブラリー101・連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強設計」中の表 6.7.2 で，以下のように定められている。

表 2.9 連続繊維シートの塩化イオン遮蔽効果が持続する年数（年）

シートの積層数	環境区分	
	一般の環境	気象作用の激しい環境
1 層のみの場合	10	5
2 層以上の場合	15	7.5

)終局荷重作用時の曲げ耐力を確保するに必要な炭素繊維シートの概算

P C 鋼材の設計基準値を以下の通りとする。

最下段 P C 鋼材種別：SBPR7BN- ϕ 15.2mm

断面積 $A_p = 9 \text{ 本} \times \phi 15.2\text{mm} = 9 \times 138.7 \text{ mm}^2 = 1248.3 \text{ mm}^2$

破断強度 $\sigma_{pu} = 190 \text{ kgf/mm}^2 = 1900 \text{ N/mm}^2$

降伏強度 $\sigma_{py} = 160 \text{ kgf/mm}^2 = 1600 \text{ N/mm}^2$

許容応力度 $\sigma_{pa} = 114 \text{ kgf/mm}^2 = 1140 \text{ N/mm}^2$

ヤング係数 $E_p = 2.0 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2 = 195 \text{ kN/mm}^2$

したがって，破断部分の保有降伏耐力 P_{py} は，

$$P_{py} = 1248.3 \times 1600 = 1997.3 \text{ kN}$$

であったこととなり，これを炭素繊維シートで補強すれば良い。

炭素繊維シートの設計基準値を以下の通りとする。

炭素繊維シート種別：繊維目付け量 300g/m^2

断面積 $A_{cf} = (167 \text{ mm}^2/\text{枚m}) \times (0.700\text{m}/\text{桁幅}) = 116.9 \text{ mm}^2/\text{枚桁}$

破断強度 $\sigma_{cfu} = 350 \text{ kgf/mm}^2 = 3500 \text{ N/mm}^2$

許容応力度 $\sigma_{cfa} = 280 \text{ kgf/mm}^2 = 2800 \text{ N/mm}^2$

ヤング係数 $E_{cf} = 2.5 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2 = 245 \text{ kN/mm}^2$

したがって，炭素繊維シート必要枚数は，次の通りとなる。

$$\begin{aligned} \text{必要断面積 } A_{cf} &= P_{py} \times (1/\sigma_{cfa}) \times (E_p/E_{cf}) \times (d_p/d_{cf}) \\ &= 1997.3 \times 1000 \times (1/2800) \times (195/245) \times 1.00 \\ &= 582.3 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{必要枚数 } n_{cf} = 582.3/116.9 = 5.0 \text{ 枚}$$

なお、曲げ補強に要した炭素繊維シートは、その耐久性が促進試験により 50 年はあると言われており、残存耐用年数 50 年間に再補強する必要が無いと考えられる。

ただし、この炭素繊維シートは、塩化物イオンの侵入阻止にも有効に抵抗させるためには、補強施工後（表 2.9）、15 年毎に、含浸接着樹脂・上塗りの繰り返し（表 2.10 参照）が必要となる。

）概算工事費

表 2.9 炭素繊維シート貼付工（50 年目）、概算直接工事費

工種・品質	数量	単位	単価(円)	金額(円)
1.下地処理工	170.23	m ²	2,600	442,598
2.面取り工	41.52	m	3,700	153,624
3.プライマー工	170.23	m ²	2,100	357,483
4.不陸修正工	170.23	m ²	6,200	1,055,426
5.炭素繊維シート貼付工 300g/m ² × 5 層	170.23	m ²	16,000 × 5 = 80,000	13,618,400
6.塗装工	170.23	m ²	2,000	340,460
7.足場工	200.00	m ²	3,500	700,000
合 計				16,667,991

表 2.10 塗膜補修工（15 年毎）、概算直接工事費

工種・品質	数量	単位	単価(円)	金額(円)
1.下地処理工	170.23	m ²	2,600	442,598
2.塗装工	170.23	m ²	2,000	340,460
3.足場工	200.00	m ²	3,500	700,000
合 計				1,483,058

）L C C 算定結果

L C C 算定結果を表 2.11 に示す。

表 2.11 繊維シート補強案 L C C 算定結果

経過 年数	状況	内容	工事費 (万円)	累計工事費 (万円)
0 年	新設		2,200	2,200
50 年	P C 鋼線破断 曲げひび割れ発生	補強（炭素繊維シート）	1,667	3,867
65 年	塗膜の遮塩性低下	塗装補修	148	4,015
80 年	塗膜の遮塩性低下	塗装補修	148	4,163
90 年	通行制限		0	4,163
95 年	塗膜の遮塩性低下	塗装補修	148	4,331
100 年	解体	解体	1,500	5,811

(3) 外ケーブル補強工法案(+断面修復 70mm と被覆塗装)案

)補強設計の仮定

- ・プレテンションけた鋼材破断時および外ケーブル配置時の曲げ応力度の計算は、「JIS 橋げたによる P C 道路橋 JIS A 5313 設計・製造便覧,(社) プレストレストコンクリート建設業協会」の BS20 標準設計値を参考にする(表 2.12 参照)。
- ・塩害対策区分 および塩害対策区分 のけたとも、最下段 P C 鋼材破断時および外ケーブル配置時のコンクリートの曲げ応力度への効果は、BS20 標準設計とほぼ等しいものとする。
- ・曲げ応力度の検討は、中央断面のみで行なう。
- ・外ケーブルには、炭素繊維補強ケーブル(CFCC)を使用するものとする。

)外ケーブルの配置

外ケーブルは、「外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強実例図集,(社) プレストレストコンクリート建設業協会」プレテンション方式単純 I 桁橋の例を参考とし、桁間コンクリートにダイヤモンドコア搾孔し、けた端部の上縁で定着する方法とする。外ケーブルには、CFCC CT-130 (11-CFCC 1×7 12.5φ) を使用する。外ケーブルの配置図を図 2.11 に示す。

表 2.12 けたの応力状態

	PC鋼材応力度 (N/mm ²)		プレストレス導入直後 (N/mm ²)			設計荷重作用時 (N/mm ²)		
	直 後	有 効	桁自重	導入直後 プレストレス	合 成	設計荷重	有 効 プレストレス	合 成
BS20	1156	881	7.0	-2.2	4.8	16.8	-1.7	15.1
			-6.7	21.7	15.0	-17.1	16.6	-0.5
最下段 破断時	-	881	-	-	-	16.8	1.1	17.9
						-17.1	7.5	-9.6
外ケーブル 補強時	-	1010	-	-	-	16.8	-3.3	13.5
						-17.1	16.6	-0.5

- ・外ケーブル: CFCC CT-130 (11-CFCC 1×7 12.5φ, 規格耐力 1490kN)
- ・断面積: Af= 1130.8 mm²
- ・有効プレストレス: σ_{ef} = 813.6 N/mm²
- ・有効プレストレス力: P_{ef}= 920 kN

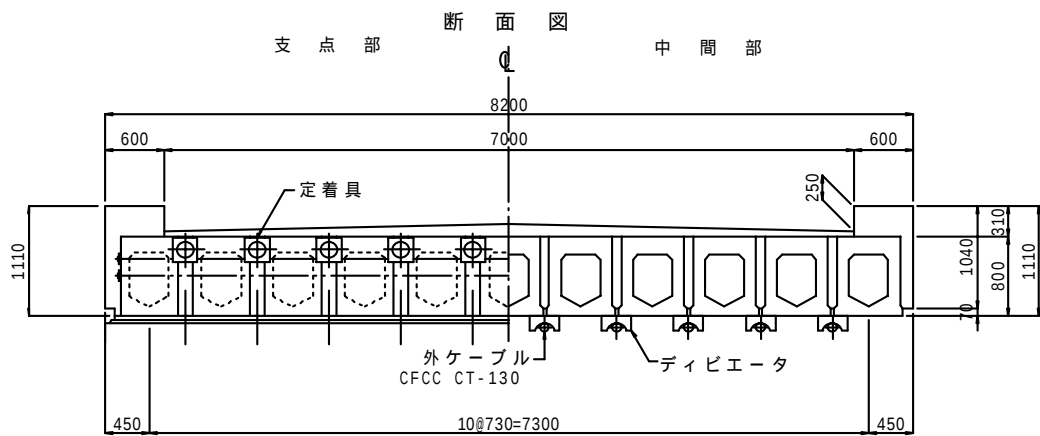
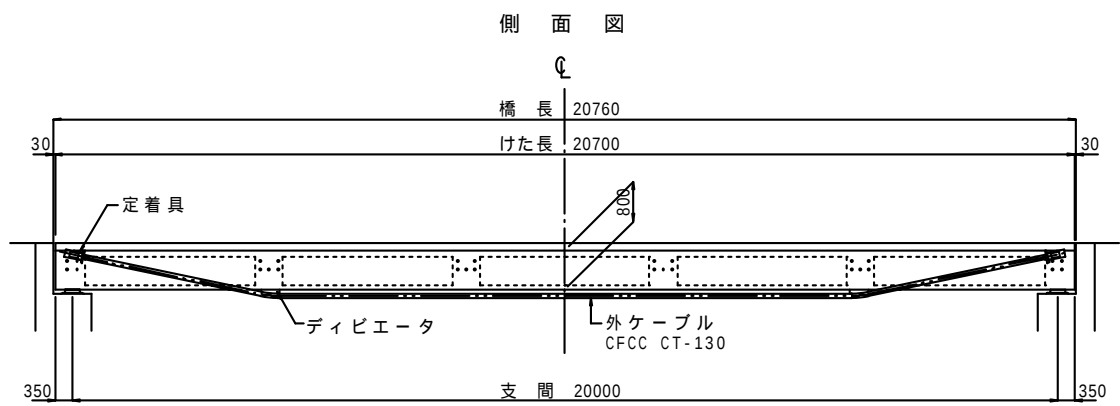


図 2.11 外ケーブルの配置図

)各費用算定

・新設費用

新設工事費用は、2.4 節の CASE-0 より、2200 万とする。

・外ケーブル補強工事費

項目	数量	単価	計	仕 様
断面補修(全面)	157	77,000	12,089,000	
ライニング	157	10,000	1,570,000	
舗装撤去復旧費	1	300,000	300,000	10 m ² , 3.5m ³
削孔工	1	2,000,000	2,000,000	Φ110×3.3m×20 箇所
外ケーブル工	1	16,000,000	16,000,000	CFCC11 - Φ12.5×210m, 定着具×20 個, 他
緊張工	1	900,000	900,000	緊張×20 ケーブル, その他
足場費	200	3,500	700,000	
合計			33,559,000	

・再塗装

項目	数量	単価	計
ライニング	157	10,000	1,570,000
足場費	200	3,500	700,000
合計			2,270,000

・解体費

その他の実績などから新設費用の7割と仮定する。

項目	数量	単価	計
解体	1	22,000,000	15,400,000
合計			15,400,000

) L C C 算定

L C C 算定結果を表 2.13 に示す。

表 2.13 外ケーブル補強案 L C C 算定結果

年	事象	対策工	直接工事費	累計	比率
0	建設		22,000,000	22,000,000	1.0
18	鉄筋腐食開始		0	22,000,000	1.0
23	腐食ひび割れ発生		0	22,000,000	1.0
40	ひび割れ伸展 下面コンクリート剥離		0	22,000,000	1.0
50	下段 P C 鋼線破断	断面補修(全面) +ライニング +外ケーブル配置	33,559,000	55,559,000	2.5
58	塗装表面劣化	表面塗装	2,270,000	57,829,000	2.6
66	塗装表面劣化	表面塗装	2,270,000	60,099,000	2.7
74	塗装表面劣化	表面塗装	2,270,000	62,369,000	2.8
82	塗装表面劣化	表面塗装	2,270,000	64,639,000	2.9
90	塗装表面劣化	表面塗装	2,270,000	66,909,000	3.0
100		解体	15,400,000	82,309,000	3.7

(4)まとめ

進展期後期から加速期における対策について、炭素繊維シートおよび炭素繊維ケーブルによる二種類について検討した。

その結果、シート補強案についてのライフサイクルコストは、初期建設費の 3.31 倍で、解体を含めないと 2.61 倍となる。

同様に P C 鋼材の代替として炭素繊維ケーブルを用いた外ケーブル補強では、50 年時に外ケーブル補強と断面修復を行い、その後も断面修復部分については 8 年毎に表面塗装を施すことになる。このときのライフサイクルコストは 3.7 倍であり、解体費を含めないと 3.0 倍となる。

外ケーブル補強案が割高なのは、シート補強に比べて穿孔などの施工手間や定着体などに費用がかかり、50 年目の補強だけでも約 2 倍の差があること、および遮塩のための塗装の間隔と仕様(シートの場合はシート自体の遮塩性があるため補修間隔が長く、その材料も簡易なものでよいとされている)が異なることも影響している。

ただし、外ケーブル補強では、せん断耐力の付加も同時にできるという付加的な利点がある。

2.7.5 電気防食工法

2.4 節で示した塩害対策区分のプレテンション方式PC単純床版橋について、電気防食工法によって橋梁を100年間維持する場合についてのLCCの検討を行った。ここでは、電気防食工法による対象橋梁の維持・補修対策に関する考え方について示す。

電気防食工法による維持・補修対策の方法は、表2.14に示すように、建設当初から通電する場合 建設後18年（潜伏期末期または進展期初期）から通電する場合の2ケースについて検討を行った。

電気防食工法を施した場合、通常、桁の表面近くに陽極を設置するため、電気泳動によってコンクリート中の塩化物イオンが陽極に引き寄せられ、電気防食システムに通電を行っている期間は、外部から飛来塩分の供給があり、表面塗装を施さない場合でも、鋼材位置の塩化物イオン量は増加しないことが副次効果として考えられている。ところが、PC橋への電気防食の適用例は少なく、通電年数もまだ十分でないため、100年間程度電気防食を行った後のPC橋の状況は明らかでない。したがってここでは、電気防食システムに通電している期間は、少なくとも、鋼材の腐食の進行はなく、耐荷性能や鋼材の付着性状は低下しないものと仮定した。システムおよび電極の寿命に関しては、システムが20年、電極が40年と仮定する場合もあるが、ここでは、それぞれ25年および50年と仮定した。また、システムおよび電極を建設時に設置する場合は、施工性を考慮して既設橋梁に施工する場合の1/2と仮定した。

この仮定のもとで、建設後100年における対象橋梁の健全性を保持する設定とし、上記の2対策について検討した。その結果、建設当初から通電を開始する場合の方が、若干LCCは小さくなるものの、建設後18年から通電を開始する場合と大差はなく、基準とする塩害対策桁の初期コストの約3倍程度となった。電気防食工法では、通電中は鋼材腐食が進行しないと考えられるため、橋梁の耐荷力の面から見れば有効な方法であると考えられる。しかしながら、ランニングコストが他の補修・補強工法と比較して大きく、結果としてLCCに影響している。また、PC橋梁に対する施工例も少なく、その効果および問題点も十分抽出されているとは言えない。今後、長期的なデータの収集、システムおよび電極の単価の低減あるいは長寿命化が課題であると考えられる。

表 2.14 塩害による劣化進行と対策計画

供用経過年と劣化現象	0年	18年	25年	50年	100年
	建設	鉄筋腐食開始		PC鋼材腐食開始	
建設時当初からの対策	・建設時にシステムおよび電極を設置 (ただし、建設時のシステムおよび電極設置単価は表-6に示す供用中の設置単価の1/2とする。) ・25年ごとにシステムの取替え ・50年ごとに電極の取替え ・供用全期間にわたって維持電力必要				健全性 保 持
潜伏期末期または進展期初期からの対策	無対策	・建設後18年にシステムおよび電極を設置 ・桁下面1%の断面修復50mm ・25年ごとにシステムの取替え ・50年ごとに電極の取替え ・設置後、供用全期間にわたって維持電力必要			健全性 保 持

L C C 適用検討研究会報告書 (2002.6)

編集著作人 A C C 倶楽部 技術委員会 L C C 検討適用研究会
発行所 A C C 倶楽部 事務局
〒103-0022 東京都中央区日本橋室町 2-3-14 古川ビル
エー・エム・エンジニアリング株式会社内
Tel. 03-3231-0690
Fax. 03-3242-7584

印刷人

ISBN