

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。

ACC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。

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

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「ミニマムメンテナンス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

「ミニマムメンテナンス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。

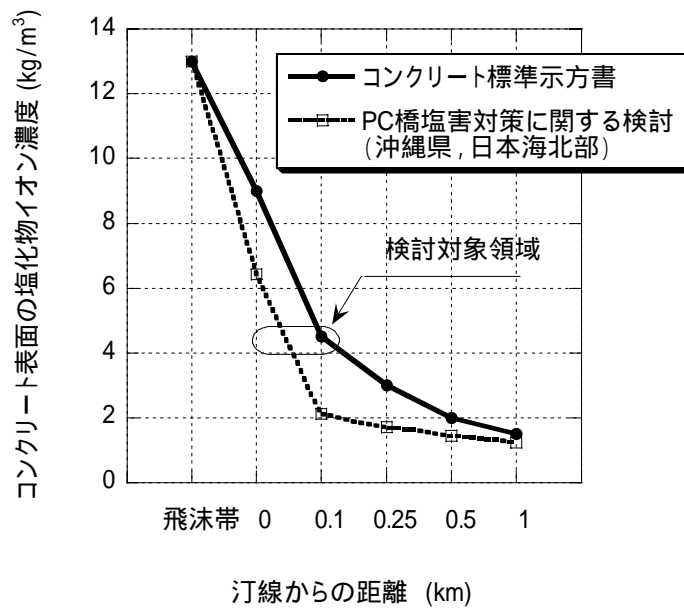


図 2.1 コンクリート表面の塩化物イオン濃度

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。

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

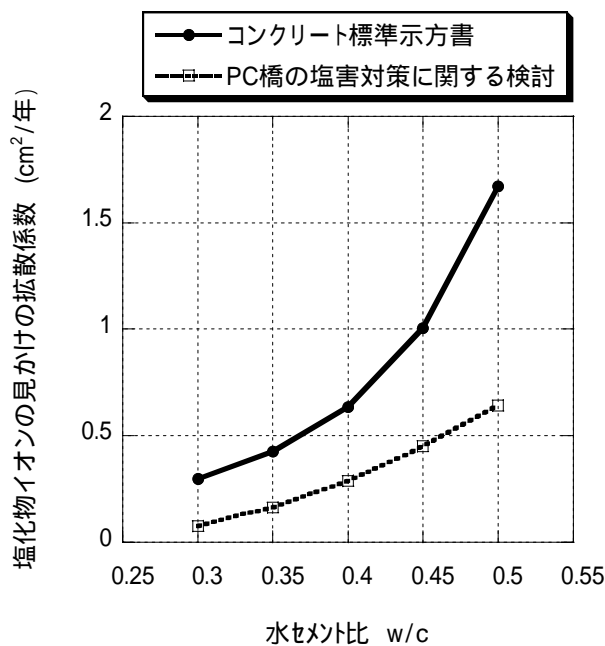


図 2.2 塩化物イオンの見かけの拡散係

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 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 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 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 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	$2.5\text{kg}/\text{m}^3$	17年暴露（都内）
土木研究所 （東京湾横断道路基本調査）	1989	$1.2 \sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$	10年間暴露 品質により異なる
土木研究所	1989	$1.2 \sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$	東北地区 実態調査
沖縄総合事務所	1997	$1.2\text{kg}/\text{m}^3$	沖縄地区 実態調査
日本道路公団東北自動車道		$\times 0.25\% \times 0.607$ $= 3.4\text{kg}/\text{m}^3$	供試体調査 実態調査
日本道路公団 塩害調査手引（案）	1993	$1.2 \sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$	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		$1.88\text{kg}/\text{m}^3$	

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 15.2 もしくは テクノーラ緊張材 4 7.5
主桁補強材	: ネフマック - G3 - 100P

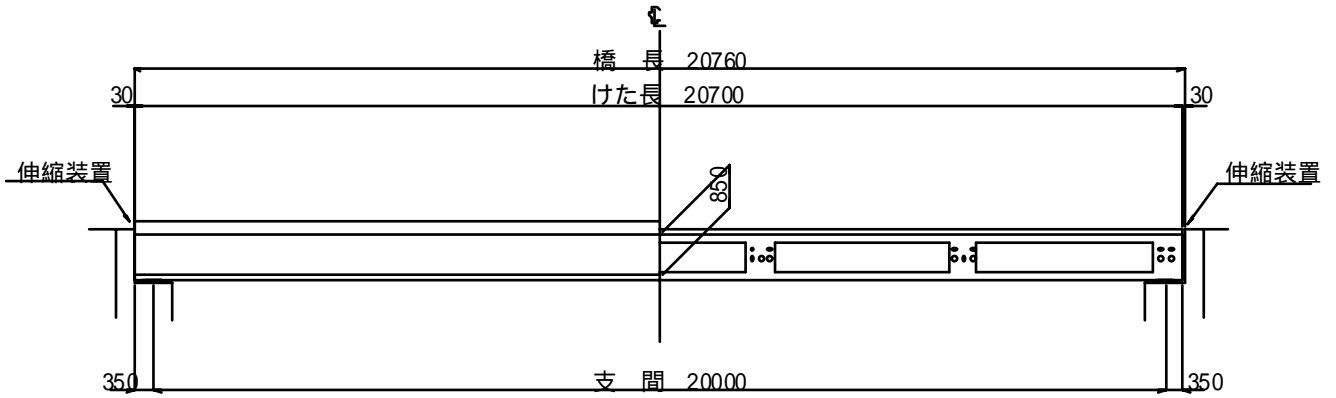
表 2.4 道示コンクリート橋編 表 5.2.1 塩害の影響による最小かぶり (mm)

部材・部位		(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
塩害の 影響の 度合い	対策区分			
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 (Support part) 中間部 (Intermediate part)

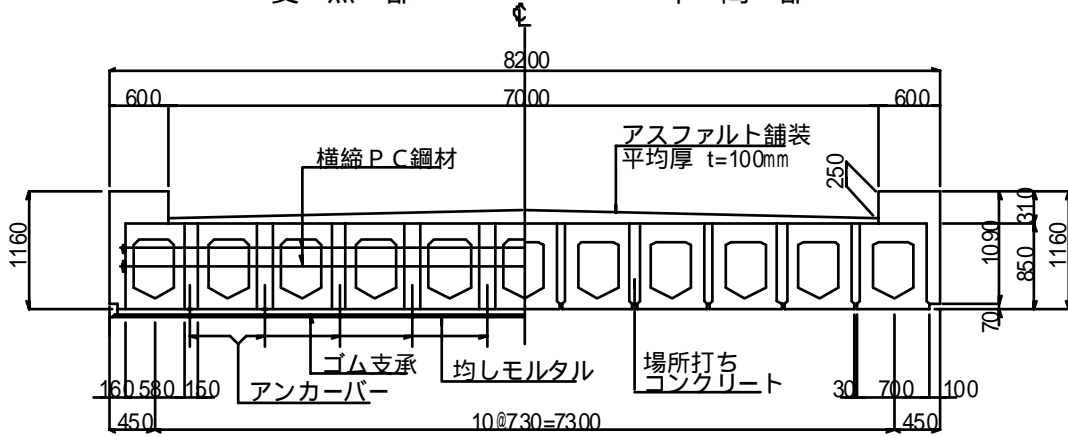


図 2.3 橋梁の一般図

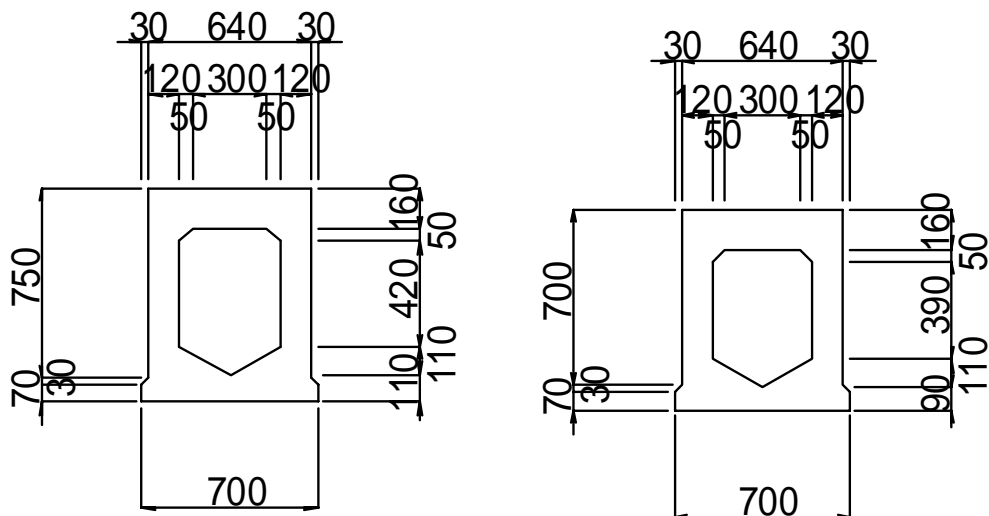


図 2.4 塩害対策区分の断面 (PC 鋼材)

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FRPを用い、FRP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FRP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、スーパー塩害対策橋梁のCASE-1 とCASE-2 は1.15 と1.07 となり、FRP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FRP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	ck=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	850	850	850	800	800	800	800
主ケーブル	1S15.2	1S15.2	1S15.2	AFRP4 7.4	CFCC15.2	AFRP4 7.4	CFCC15.2
	21	21	21	19	28	19	28
補強筋	鉄筋D10	鉄筋D10	エポ鉄筋D10	ねすックFTMC3	ねすックFTMC3	ねすックFTMC3	ねすックFTMC3
	283kg	283kg	283kg	21m	510m	21m	510m
主桁単価	1,002,636	1,002,636	1,132,325	2,318,859	2,250,179	2,318,859	2,250,179
主桁費	11,029,000	11,029,000	12,456,000	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	AFRP4 7.4	CFCC 25
	28	28	28	28	28	36	24
直接工事費	22,099,000	25,486,000	23,643,000	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	9,169,000	10,891,000	9,650,000	13,332,000	13,082,000	14,206,000	14,737,000
合計	31,268,000	36,377,000	33,293,000	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を使用した場合は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鋼材がブレンディングに適用できるかは、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。

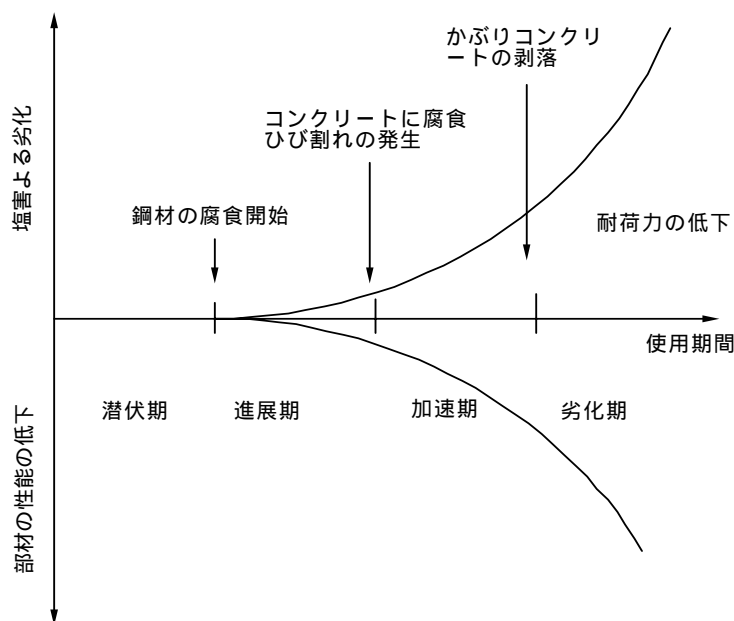


図 2.5 塩害による劣化進行過程

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

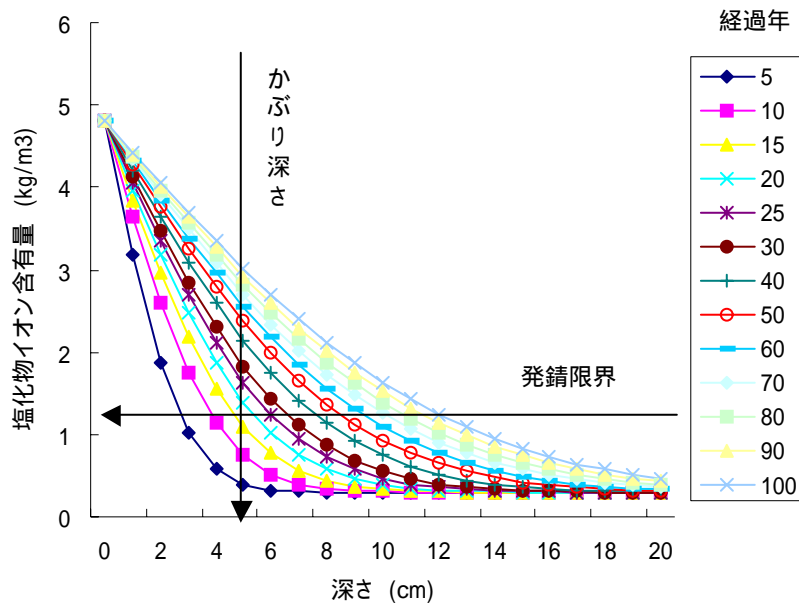
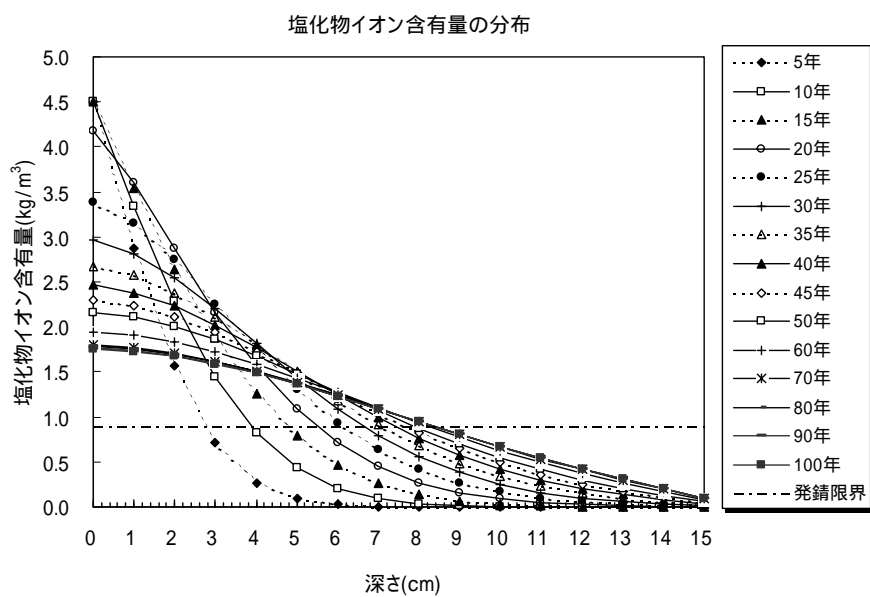


図 2.6 塩化物イオン濃度の経年変化の推定値

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。



表面被覆工を19年目に実施した場合の鋼材位置における塩化物イオンの経年変化

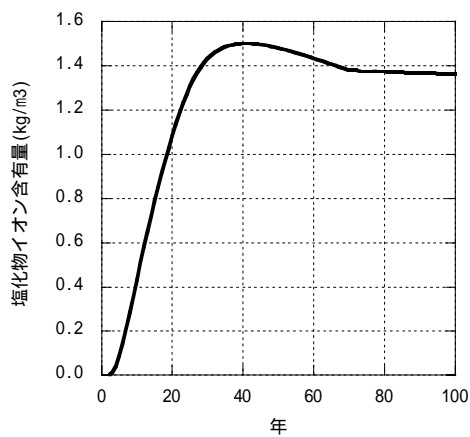


図 2.7 19年目に表面被覆を実施した場合，鋼材位置の塩化物イオン含有量の推移

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PC部材への適用性が明らかでない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 PC 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。

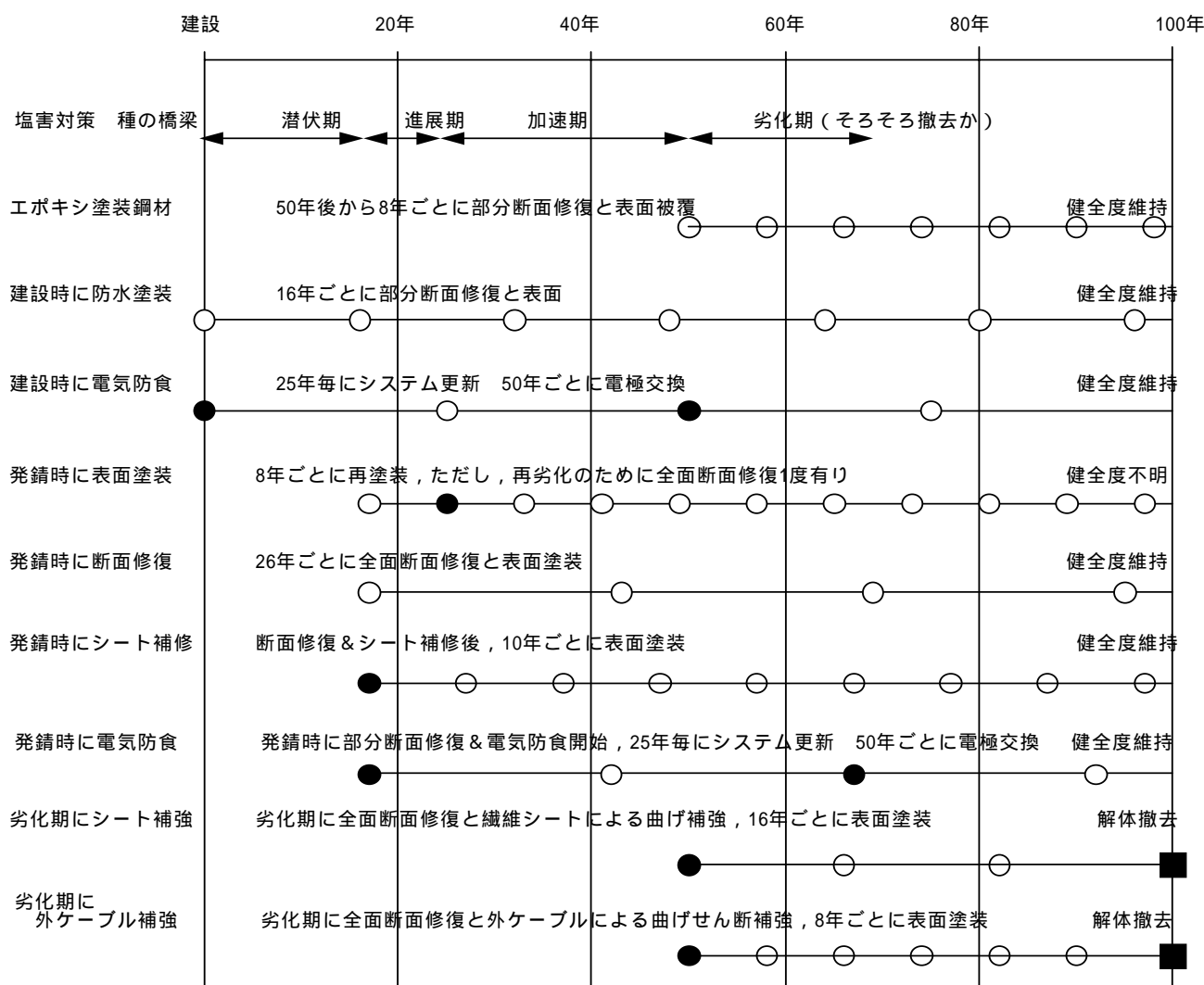


図 2.8 補修補強工法の一覧

2.6.2 LCCの比較

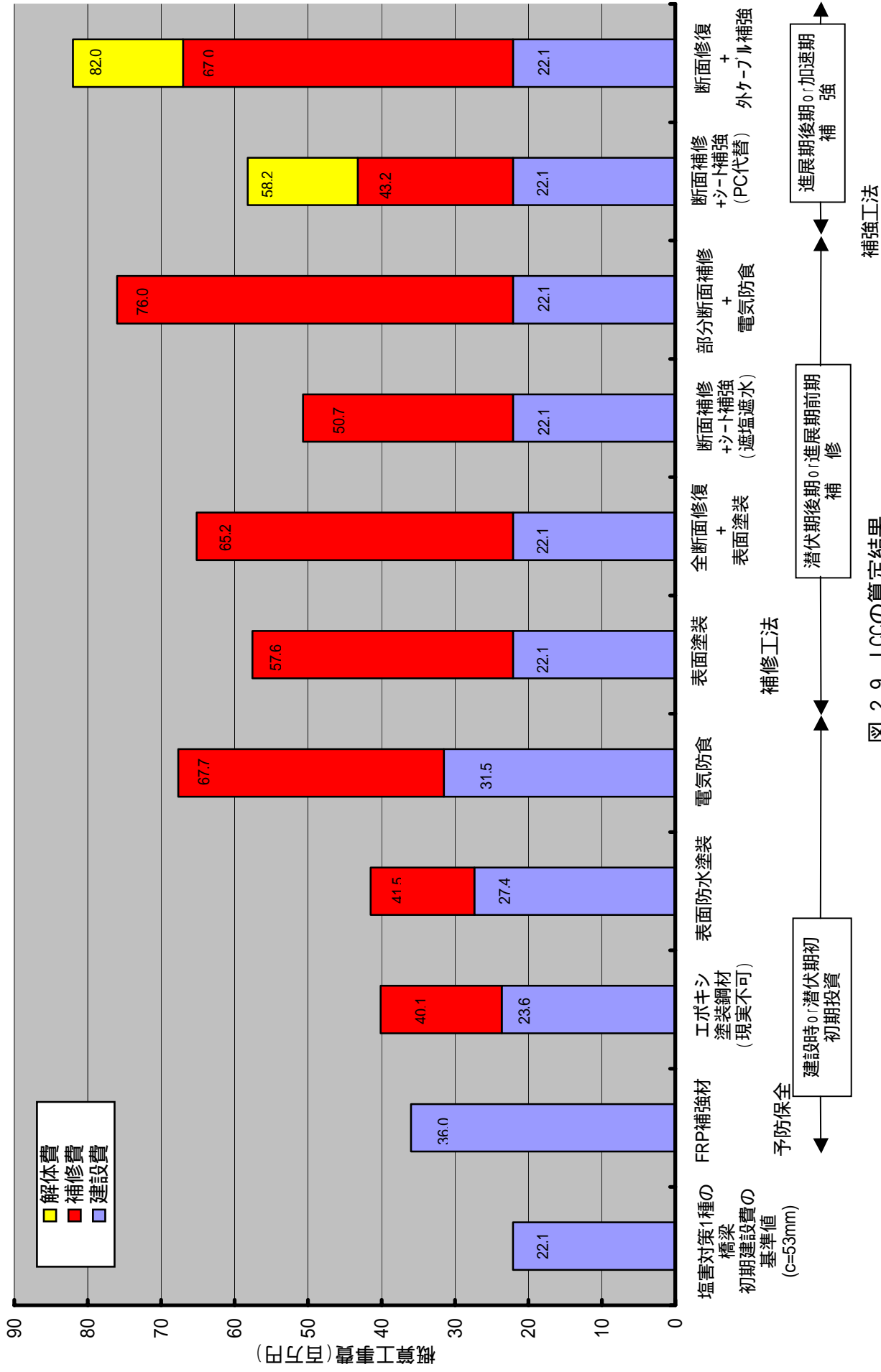


図 2.9 LCCの算定結果

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らないが、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は否めない。

[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アウトゲ-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。

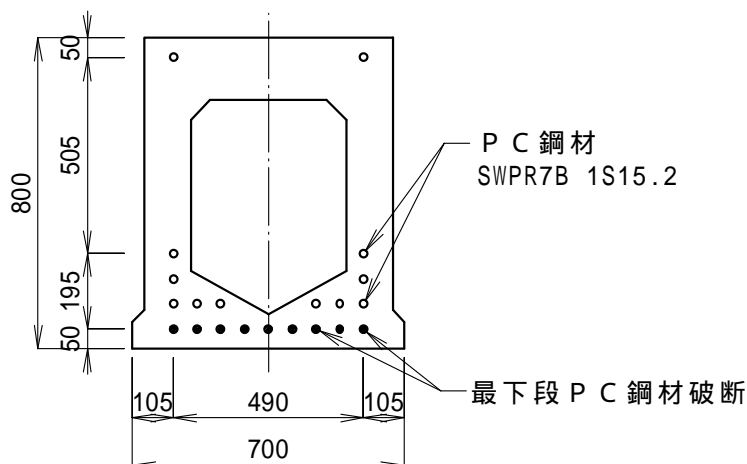


図 2.10 PC 鋼材破断の仮定

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PC鋼材の補修・補強にPC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ために必要な炭素繊維シートの概算

PC鋼材の設計基準値を以下の通りとする。

最下段PC鋼材種別：SBPR7BN- 15.2mm

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

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

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

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

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 $c_{fu} = 350 \text{ kgf/mm}^2 = 3500 \text{ N/mm}^2$

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

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。

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

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

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

) LCC算定結果

LCC算定結果を表 2.11 に示す。

表 2.11 繊維シート補強案 LCC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	PC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 PC 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 PC 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挿入し、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 12.5)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 12.5, 規格耐力 1490kN)
- ・断面積: Af= 1130.8 mm²
- ・有効プレストレス: ef= 813.6 N/mm²
- ・有効プレストレス力 Pef= 920 kN

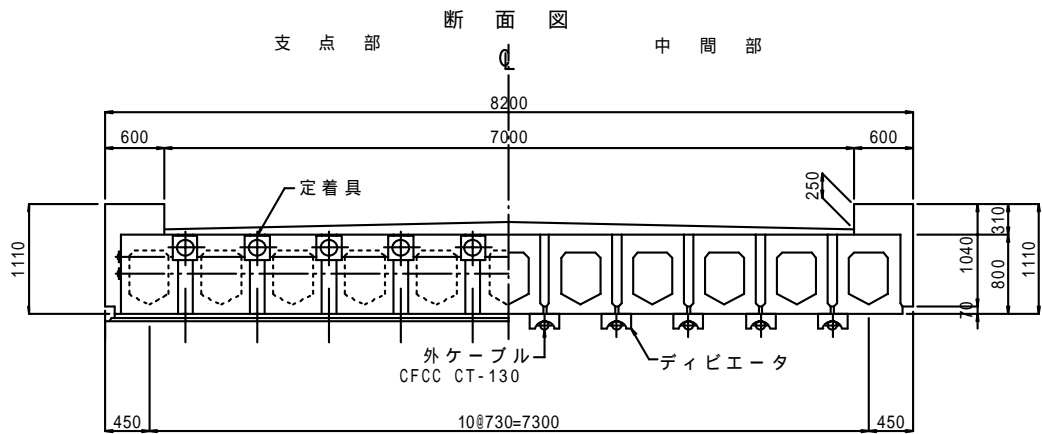
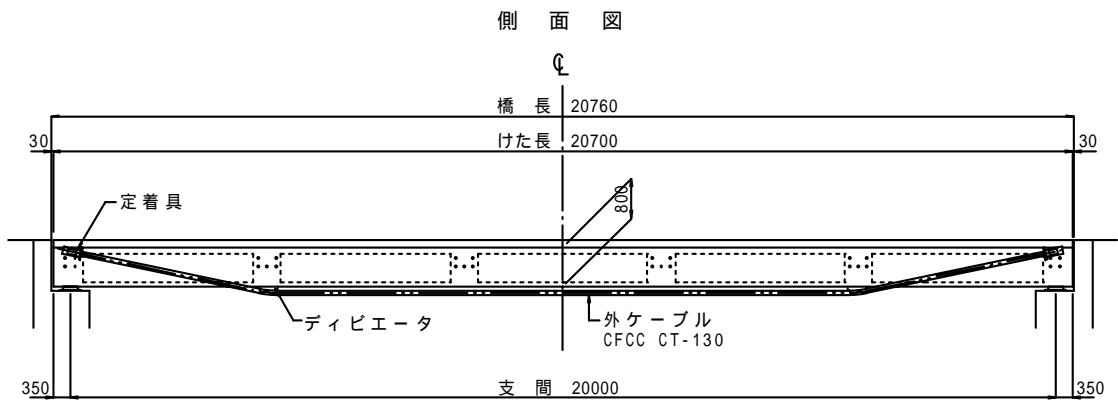


図 2.11 外ケーブルの配置図

)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	110×3.3m×20箇所
外ケーブル工	1	16,000,000	16,000,000	CFCC11 - 12.5×210m, 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	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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