報告　FRP を用いたコンクリート構造物のライフサイクルコストに関する適用性検討

渡部　寛文[*1]・西川　伸之[*2]・中井　祐司[*3]・古市　耕輔[*4]

要旨：連続繊維補強材（FRP）を用いたコンクリート構造物のライフサイクルコストに関し，プレテンション桁を用いた橋梁を取り上げ，塩害による損傷・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，FRP を適用した場合のコストとの比較を行った。土木学会「コンクリート標準示方書　維持管理編」に示される塩化物イオンの濃度浸透予測方法にしたがい，供用期間 100 年において種々の補修・補強方法を用いた場合のライフサイクルコストは，FRP を用いた場合のそれを上回り，FRP がライフサイクルコスト面で大きな効果を期待できることが判明した。

キーワード：連続繊維補強材，ライフサイクルコスト，耐久性，塩害，補修・補強

1.　はじめに

近年，コンクリート構造物におけるコンクリートの劣化や塩害による鋼材腐食が，構造物の長期耐久性を損なう問題として顕在化し，維持管理に対する社会的な関心が高まっている。これに対し，施設を建設し保有・管理する各機関では，構造物の新設時や維持管理段階において，ライフサイクルコスト（以下，LCC）評価を取り入れた検討の重要性が認識され始めている。

一方，高強度，高耐久性の連続繊維補強材（以下，FRP）をコンクリート構造物に適用する研究が行われており，土木学会から設計・施工指針類が発刊されるなど，適用にあたっての技術的な環境が整備されてきた。しかし，鋼材に比べ材料費の高い FRP は，耐久性が定量的に照査されない従来のコスト評価の概念では，割高なものと位置づけられていた。

そこで本報告では，塩害環境下にあるプレテンション方式単純床版橋を一例として劣化過程を推定し，FRP を用いた場合の初期建設コストと，既往技術で作られた構造物を種々の管理方法により 100 年間供用した場合の LCC を算出し，これらを比較することで FRP を鋼材の代替としたコンクリート構造物の適用性について検討を行なった。なお，本検討の性質上，物価の上昇による影響は含めないことにした。

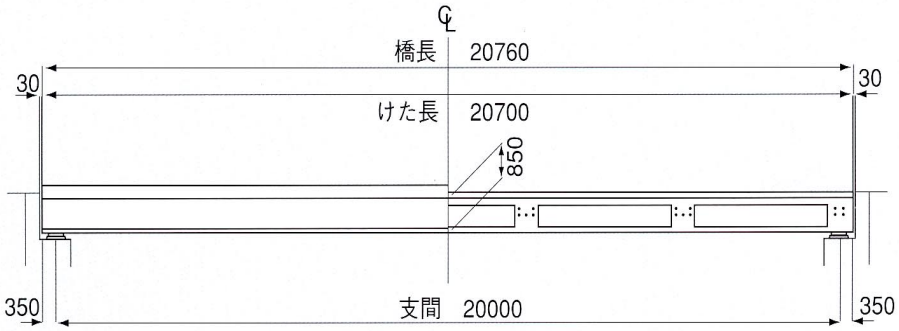
2.　検討条件

2.1　検討対象構造物

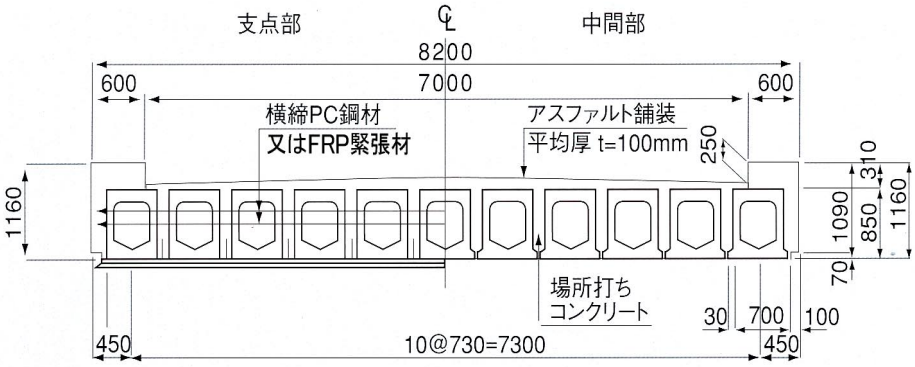
本検討では，検討対象構造物として汀線から 100m 程度離れた位置に建設されるプレテンション方式単純床版橋を想定した。以下，想定橋梁の諸元を示す。

- 橋　　長：20.76m
- 径 間 割：単純梁
- 幅　　員：8.2m
- 橋 面 積：170.2m2
- 斜　　角：90°
- 橋　　格：１等橋（TL25）
- 塩害対策：対策区分１（かぶり 52mm）
  ：対策区分３（かぶり 32mm，FRP を用いた場合）

*1 ACC 倶楽部　技術委員会　(正会員)
*2 ACC 倶楽部　技術委員会　(正会員)
*3 ACC 倶楽部　技術委員会　(正会員)
*4 ACC 倶楽部　技術委員会　(正会員)

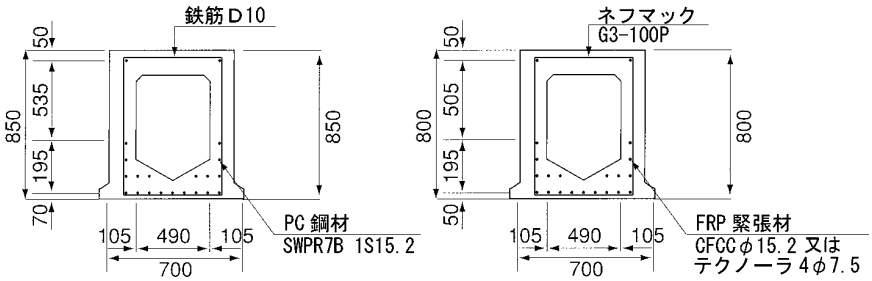


図－１　橋梁一般図（側面図）



図－２　橋梁一般図（断面図）

補強材および緊張材に用いた FRP は**表－１**のとおりで，有効プレストレスが PC 鋼材を用いた場合と同等になるよう，配置本数を設定した。また，コンクリートの水セメント比については，道路橋示方書で想定している「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。



図－３　桁断面図

表－１　FRP の仕様

使用箇所	材　質	サイズ (mm)	耐力 (kN)
緊張材	炭素繊維	15.2	199
	アラミド繊維	4-7.4	299
補強材	ガラス繊維	3.3	5.1

2.2 劣化モデル

(1)　劣化因子

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は 50%以下と推定されるので，コンクリート標準示方書に従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。

(2) 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，これに従った。

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

ここに,

$C(x,0)$ ：初期含有塩化物イオン濃度（kg/m³）

C_0 ：表面における塩化物イオン濃度（kg/m³）

D ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数（cm²/年）

erf ：誤差関数

(3) 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」に従い,汀線より0.1kmの値として4.5kg/m³を用いた。

(4) 初期含有塩化物イオン濃度

練混ぜ時の使用材料や環境等に起因するコンクリートの初期含有塩化物イオン濃度は，規定値上限の0.3kg/m³と仮定した。

(5) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

コンクリート標準示方書によると，塩化物イオンの見掛けの拡散係数Dは次式および**図－4**で与えられる。

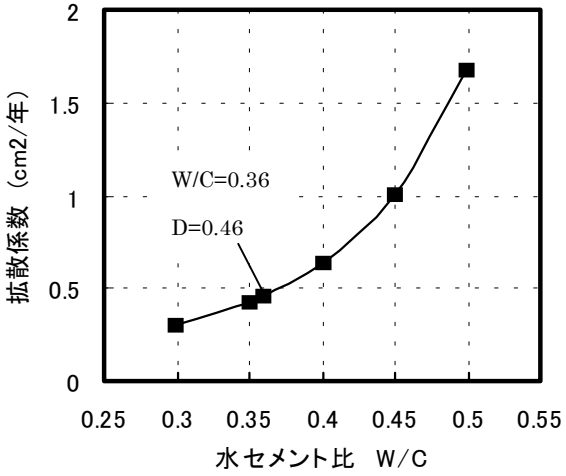
$$\log D=\left[4.5(W/C)^2+0.14(W/C)-8.47\right]+\log\left(3.15\times10^7\right) \quad (2)$$

(6) 腐食発生限界塩化物イオン量

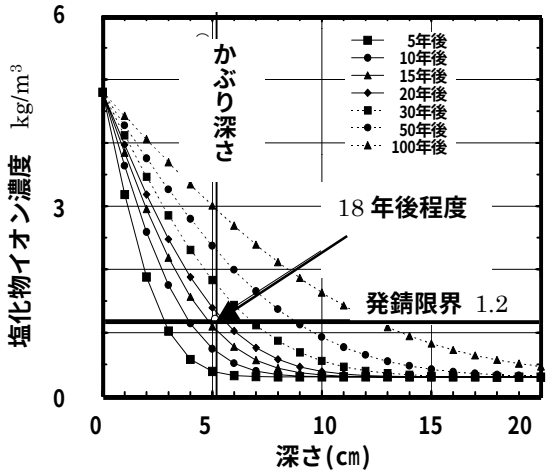
腐食発生限界イオン量は，環境外力およびコンクリートの抵抗性などにより変動すると考えられているが，ここでは，コンクリート標準示方書および道路橋示方書が想定している腐食発生限界イオン量1.2kg/m³を用いることにした。

2.3　塩化物イオン濃度の経年変化の推定

前節に示した劣化モデルを用いて，塩化物イオン濃度の経年変化を推定した。その結果を**図－5**に示す。今回想定した構造物では，18年程度でかぶり52㎜の位置における鉄筋が腐食発



図－4　塩化物イオンの拡散係数



図－5　塩化物イオン濃度の経年変化

錆限界に達することが分かった

2.4　劣化進行と対策

コンクリート標準示方書に示されている維持管理の区分は,「予防維持管理」,「事後維持管理」,「観察維持管理」および「無点検維持管理」の4項目である。

塩害環境下にある場合，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ある。しかし，これまでの国内における維持管理体制は，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場合が多く，本質的な部材の性能劣化を予防できないのが現状であった。

そこで本検討では，以下の条件で 100 年供用の LCC 算定を行った。

a) 建設時あるいは潜伏期初期に塩害対策を行った場合(予防保全)

b) 進展期初期に塩害対策を行った場合(補修工法)

c) 加速期あるいは劣化期初期に塩害対策を行った場合(補強工法)

なお本検討では，前節**図－５**に示した結果をもとに潜伏期を 18 年とした。また，進展期と加速期については，提案されているいくつかの計算手法による結果および実例などを参考に，進展期を 7 年(25 年まで)，加速期を 25 年(50 年まで)と仮定した。

2.5 積算条件

本検討において仮定した積算条件を**表－２**に示す。なお供用期間 100 年を超えて余寿命のある場合はその時点で検討を打ち切り，供用不能となった場合は解体撤去費を計上する。

2.6 補修・補強工法

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・補強工法と電気化学的防食システムの積算基準を**表－３**に示す。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対象から除外した。なお，参考単価は直接工事費であり，**表－３**に示す以外の工法については，個別に積算した金額を用いた。

3. 検討結果

3.1 初期コストの試算

初期コストの試算を，**表－４**に示す 7 ケースを対象として橋梁上部工のみについて行った。

表－２ 積算条件

供用開始時期	平成 13 年 8 月
供用期間	100 年
主桁製作場所	東京 23 区内
架設位置	主桁製作位置より 100㎞
架設条件	河川内で油圧クレーンにて 1 日で架設
FRP の労務費	一般 PC 鋼材および鉄筋の場合と同一
物価上昇	考慮しない
点検費用	含まない

CASE-0 は一般の塩害対策区分１の橋梁である。CASE-1 と 2 は，スーパー塩害対策を想定した（塩害対策区分 S）橋梁で，塩害対策区分１の桁にコンクリート塗装と橋面防水工，あるいはエポキシ鋼材を用い橋面防水工を併用した場合である。CASE-3 と 4 は，標準のかぶりを有する桁（塩害対策区分３）に緊張材として炭素繊維製 FRP（CFRP）あるいはアラミド繊維製 FRP（AFRP）を用い，ガラス繊維 FRP 製格子材（GFRP）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。

表より，CASE-3，4 の主桁に FRP を使用した場合，塩害区分１の橋梁に対して，直接工事費で約 1.63 倍になる。なお，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課題である。

表－３ 補修工法の単価

項　　目	細　　目	単 位	参考単価	耐用年数
断面修復工	ｔ=7cm（全面）	円/m²	77,000	
断面修復工	ｔ=5cm（部分）	円/m²	54,000	
防水塗装工	膜厚 500μ	円/m²	20,000	ライニング８年
表面被覆塗装工	膜厚 190μ	円/m²	10,000	８年
電気防食	設置時	円/m²	120,000	
	システム更新	円/m²	20,000	25 年
	電極更新	円/m²	100,000	50 年
	運転費	円/m²年	600	
足場工		円/m²	3,500	

表－4　初期建設費の比較

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 52	かぶり 52 Ｃ塗装 橋面防水	かぶり 52 エポ鉄筋 エポＰＣ 橋面防水	かぶり 32 PC-AFRP 補 -GFRP	かぶり 32 PC-CFRP 補–GFRP	かぶり 32 PC-AFRP 補 -GFRP 横 -AFRP	かぶり 32 PC-CFRP 補 -GFRP 横 -CFRP
桁高	mm	850	850	850	800	800	800	800
主ケーブル	種別	1S15.2	1S15.2	エポ 1S15.2	AFRP 4φ7.4	CFCC 15.2	AFRP 4φ7.4	CFCC 15.2
	本数	21	21	21	19	28	19	28
補強筋	種別	鉄筋 D10	鉄筋 D10	エポ鉄筋 D10	NEFMAC FTMC3	NEFMAC FTMC3	NEFMAC FTMC3	NEFMAC FTMC3
	数量	283kg	283kg	283kg	21m	510m	21m	510m
主桁単価 主桁費	円/桁	1,002,636	1,002,636	1,132,325	2,318,859	2,250,179	2,318,859	2,250,179
	11 本	11,029,000	11,029,000	12,456,000	25,507,000	24,752,000	25,507,000	24,752,000
横締め ケーブル	種別	1S17.8	1S17.8	1S17.8	1S17.8	1S17.8	AFRP 4φ7.4	CFCC φ25
	本数	28	28	28	28	28	36	24
直接工事費	円	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	円	9,169,000	10,891,000	9,650,000	13,332,000	13,082,000	14,206,000	14,737,000
合計	円	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	1.15	1.06	1.59	1.56	1.68	1.72

エポ　：エポキシ塗装材
かぶり：単位 mm　　補：補強材
Ｃ塗装：コンクリート塗装　　横：横締め緊張材

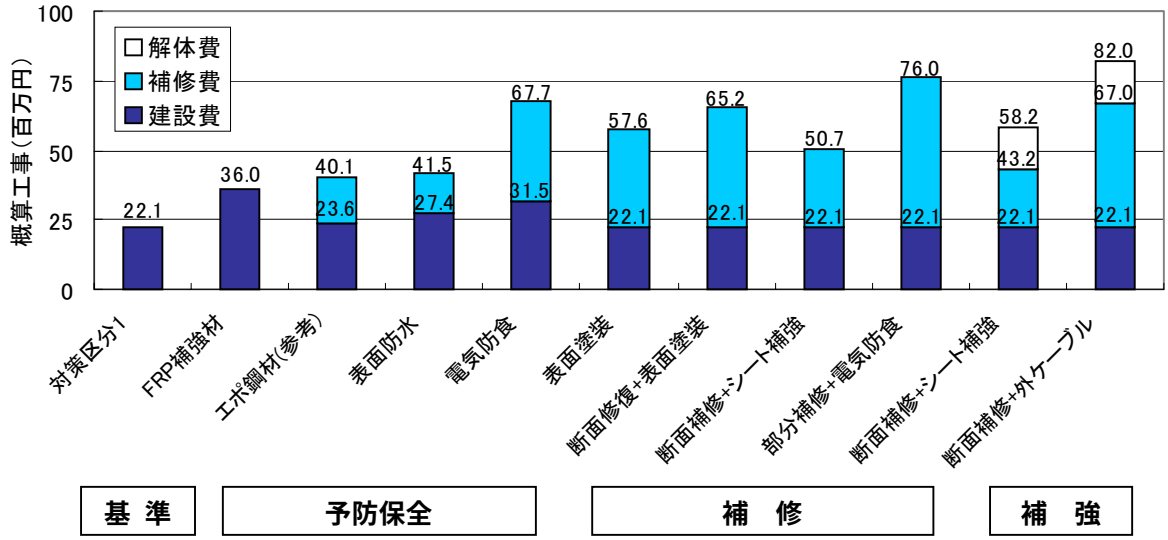
3.2　補修・補強工法による耐久性

検討した補修・補強工法による耐久性の比較を**表－5**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除去を講じた場合に健全度を維持し，劣化期まで構造物を放置，その後補強工法を用いた場合は寿命が尽きるものとした。電気防食については，100 年後を予測すること

表－5　補修・補強工法による耐久性の比較

対策方法 対策時期		対策種別	0 年 潜伏期 建設	18 年 進展期 鉄筋腐食	25 年 加速期	50 年 劣化期 PC 鋼材腐食	100 年 健全度
予防保全 建設時 潜伏期初期	1	対策区分1	無対策			解体撤去 (供用 70 年)	×
	2	FRP 補強	無対策				○
	3	エポ鋼材	無対策			[橋面地覆部，桁下面断面修復 50mm＋表面被覆塗装 190 μ]　×8 年毎	○
	4	表面防水	[橋面地覆部，桁下面防水塗装被覆 500 μ]×1 回(建設時) [橋面地覆部，桁下面断面修復 50mm＋表面被覆塗装 190 μ]　×16 年毎				○
	5	電気防食	[電気防食(新設)]×1 回(建設時) システム更新×25 年毎＋電極取替×50 年毎				○
補修工法 潜伏期後期 進展期初期 (鉄筋発錆)	6	表面塗装	無対策	[桁下面断面修復 70mm]×1 回(26 年目) [表面被覆塗装 190 μ]×8 年毎			不明
	7	全断面修復 表面塗装	無対策	[桁下面断面修復 70mm＋表面被覆塗装 190 μ]　×26 年毎			○
	8	全断面補修 シート補修	無対策	[桁下面断面修復 70mm＋FRP シート補修]×1 回 [全面塗膜補修]×10 年毎			○
	9	部分断面補修 電気防食	無対策	[桁下面断面修復 70mm＋電気防食(新設)]×1 回 システム更新×25 年毎＋電極取替×50 年毎			○
補強工法 加速期 劣化期初期 (耐力低下)	10	全断面補修 シート補強	無対策			[断面修復 70mm＋FRP　シート 300g/m²(5 層)]×1 回 [全面塗膜補修]×16 年毎	×
	11	全断面修復 外ケーブル	無対策			[断面修復 70mm＋FRP　外ケーブル 補強]×1 回 [表面被覆塗装 190 μ]×8 年毎	×



図－６　LCC の比較

は難しいが，健全度を維持するものとした。

3.3　LCC の比較

以上のデータをもとに算出した LCC の比較を**図－６**に示す。上図より，厳しい塩害環境下でコンクリート構造物を維持保全するのに多大の費用を要することがわかる。

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１主桁の初期建設費の２～３倍程度になる。その中で，FRP 補強材を用いた場合が，最も安価になり得る。ただし，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，維持管理を必要とすることに変わりはない。表面防水塗装を塗り替えて保全する手法は，耐久性の高いコンクリート用塗装材料の開発が望まれる。電気防食工法は近年注目されているが，LCC の観点からは割高となる。

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ため，LCC は初期建設費の 3 倍程度と割高な工法である。この種の維持管理を繰返すことによる，100 年後の構造物の残存価値は十分高いと考えられるものの，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。

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測され，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。補強工法も比較的大規模となり，解体撤去費用を入れると補修工法を用いた LCC に相当する程度となった。

4.　まとめ

LCC の観点では，FRP を補強材料として用いた構造物が決して割高とはならないことが分った。今後，社会の持続的な発展のために，本構造が採用される参考資料となれば幸いである。

参考文献

1)　土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，2001.3
2)　土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計･施工指針(案)，1996.9
3)　PC 建設業協会：塩害対策指針(案)にもとづくプレテンション桁，1994.10
4)　ACC 倶楽部：FRP 材を用いた PC 道路橋設計・施工マニュアル(案)，1998.4
5)　日本道路協会：道路橋示方書・同解説 3 コンクリート橋編，1996