

報告 CFRP 仕様高性能プレテンション PC 桁橋の経済性に関する検討

金田 一男*1・富山 潤*2・瀬尾 利之*3・崎原 盛伍*4

要旨: 著者らは、橋梁長寿命化のために塩害等による腐食が生じない CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) より線を用いた腐食耐久性の高い(高性能)プレテンション PC 桁(以降: CFRP 仕様 PC 桁)を開発している。本報告は、PC 桁の材料単価、桁 1 本あたりのコストおよび実橋梁に適用する場合の建設費などを比較し、CFRP 仕様 PC 桁の実装に向けた経済性検討を行った。その結果、CFRP 仕様 PC 桁の材料費および桁 1 本あたりのコストは普通 PC 鋼より線 PC 桁より 3 割程度高くなるが、実橋梁の初期建設費の増加は僅かである。特に、ライフサイクルコスト(LCC)を考慮する場合、CFRP 仕様 PC 桁を用いた橋梁の総費用が安くなる。

キーワード: 塩害, CFRP, 腐食耐久性の高い PC 桁, 実装, 橋梁, 経済性, LCC

1. はじめに

重要な社会資本としての橋梁や栈橋等のコンクリート構造物の塩害による早期劣化が顕在化され、社会資本維持管理上の重要課題となっている。今後、我が国の社会経済情勢を踏まえ、橋梁や栈橋等の重要なコンクリート構造物の長寿命化およびメンテナンスフリーが求められる。このような課題を解決するために、塩害区分 S の地域では「道示」¹⁾に示された塗装鉄筋又はコンクリート塗装等かぶりによる方法以外の方法を併用するが、コンクリート塗装の塗替が維持管理の課題として残される。著者ら^{2), 3)}が塩害等による腐食が発生しない CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)仕様の腐食耐久性の高い(ここで高性能と称する)プレテンション PC 桁(以降: CFRP 仕様 PC 桁と称する)の技術開発に取り組み、CFRP 仕様 PC 桁の耐力および変形能力を明らかにし、実橋梁への適用可能性を示した。

CFRP 仕様 PC 桁は、普通 PC 鋼より線の代わりに高価な CFRP より線を用いるため、PC 桁コスト増による橋梁建設費用の増加が懸念される。一方、橋梁のライフサイクルコスト(LCC)を考慮した場合、普通 PC 鋼より線を用いた PC 桁(以降: 普通 PC 桁と称する)を用いた橋梁と比較し、CFRP 仕様 PC 桁を用いた橋梁の総費用が安価となる可能性が示されている^{4), 5)}。しかし、CFRP 仕様 PC 桁を用いた橋梁の経済性研究が少なく、普通 PC 桁と比較し、その建設費用増減の度合いはまだ明らかにされていない。特に材料費から実橋梁の建設工事費までの詳細検討は皆無であるため、CFRP 仕様 PC 桁橋の実装のための経済性把握が急がれている。

本報告は、普通 PC 桁と CFRP 仕様 PC 桁に対して、その補強材(緊張材およびスターラップ筋)の材料単価比

較、PC 桁 1 本あたりのコスト比較、橋梁上部工の架替を想定した建設費比較、新設橋梁に CFRP 仕様 PC 桁を適用する場合の橋梁建設費比較および新設橋梁の LCC 比較などを行い、その結果を示すものである。

2. CFRP 仕様 PC 桁の概要

著者らは、図-1 に示す CFRP 仕様 PC 桁(曲げ試験体 1 体、せん断試験体 1 体の計 2 体)に関する載荷実験を行い、更に、PC 緊張材を除く他の諸条件がほぼ同じである普通 PC 桁^{6), 7)}、全素線塗装 PC 鋼より線を用いた PC 桁等⁸⁾の実験結果との比較検討を行った^{2), 3)}。ここにその結論を再掲し、その適用可能性および経済性検討の必要性を示す。

(1)CFRP 仕様 PC 桁の定着長は 45φ(φ: 緊張材の直径)程度であり、現行基準である「道示」¹⁾に規定された定着長 65φより小さい結果となっている。CFRP 仕様 PC 桁に対し定着長 65φを用いた耐力の計算結果は、実験結果を適切に評価できる。従って、CFRP 仕様 PC 桁を設計する際に、その定着長は上記基準値(65φ)を採用してもよい。

(2)曲げ試験体のひび割れ荷重および曲げ破壊荷重の実測値は、「道示」¹⁾に準じて算出した計算値を上回っており、曲げ耐力には問題ない。

(3)せん断試験体はせん断耐力の計算値(504kN)の約 1.1 倍(560kN)まで載荷しても、ひび割れの発生や異常変形などが確認されず、PC 桁 WEB に貼り付けた三軸ひずみゲージの測定値を用いて、コンクリートに生じた最大主応力度 σ_{max} および最大せん断応力度 τ_{max} の計算結果も小さいため、せん断耐力にも問題はないと判断した。

*1 有明工業高等専門学校 創造工学科 建築コース 教授 博士(工学) (正会員)

*2 琉球大学 工学部 工学科 社会基盤デザインコース 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京製綱インターナショナル(株) CFCC 土木建築事業部 部長

*4 (株)ホープ設計 技術管理部 工修

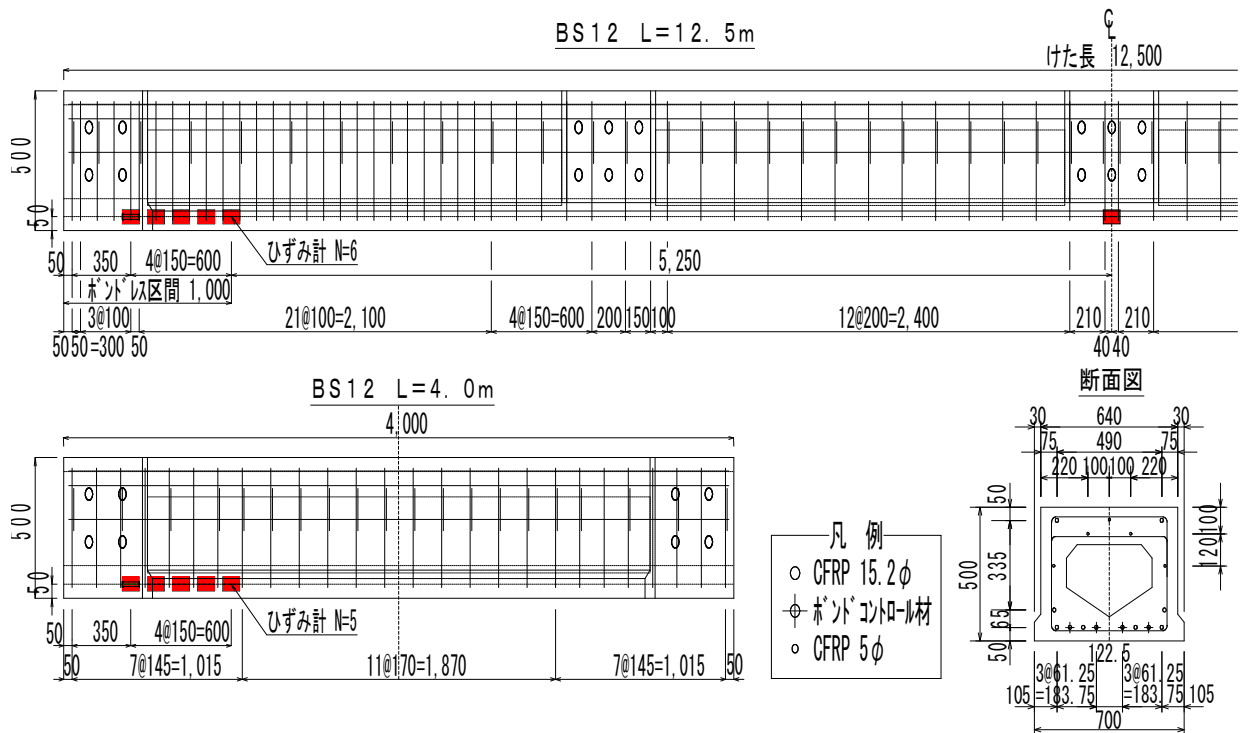


図-1 提案した CFRP 仕様 PC 桁の詳細図³⁾

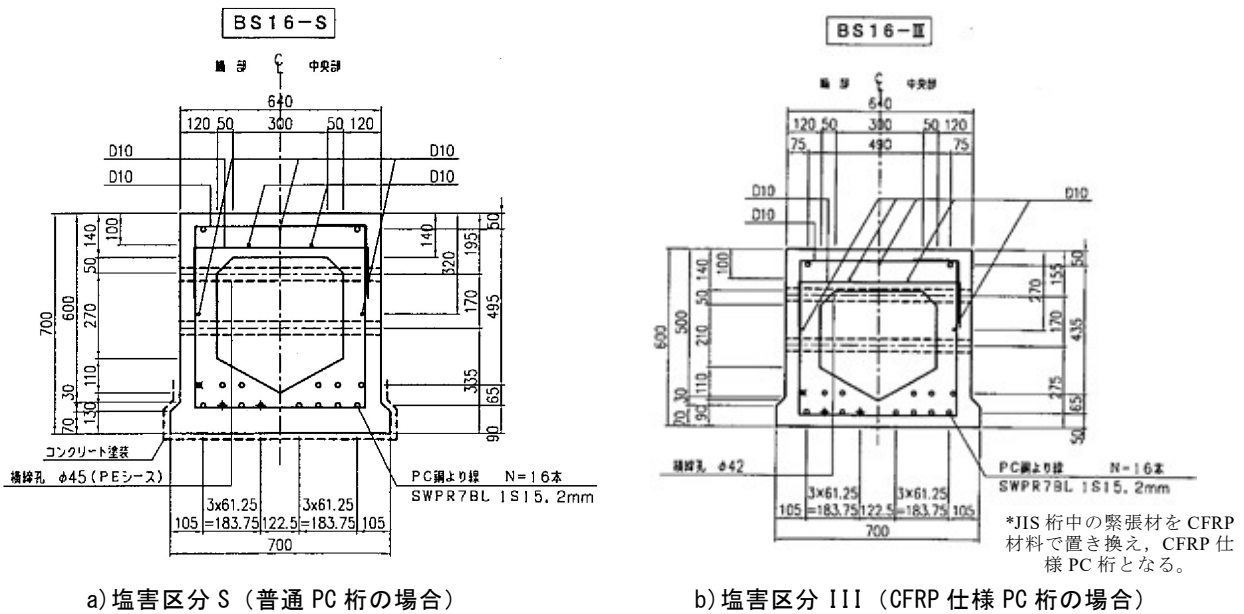


図-2 普通 PC 桁と CFRP 仕様 PC 桁の断面比較 (桁長 L=16m の場合)

(4)文献 6), 7)に示された試験体 NN, EN および EN-1 の研究成果と比較し, CFRP 仕様 PC 桁の曲げ耐荷力, せん断耐荷力および変形能力はほぼ同等である。

(5)CFRP 仕様 PC 桁の耐荷力および変形能力は普通 PC 桁とほぼ同じであるため, その経済性に関する検討を加え, 耐久性と経済性を総合的に考慮した実装が期待される。

3. CFRP 仕様 PC 桁の定性的評価

図-2 は, 文献 11)に示された B 活荷重桁橋の塩害区分

S (影響が激しい) および塩害区分 III (影響を受ける) 地域に適用する桁長 L=16m の PC 桁 (JIS 桁) の断面形状, 緊張材配置を 1 例として示す。同図より桁長は同じであるが, 必要とするコンクリートのかぶり厚さが異なるため, 塩害区分 S 地域に適用する PC 桁の桁高(700mm)が塩害区分 III 地域に適用する PC 桁の桁高(600mm)より 100mm 高くなる。また, PC 桁下フランジ面のコンクリート保護塗装との併用が必要である。一方, CFRP 仕様 PC 桁 (緊張材およびスターラップ筋はすべて CFRP 仕

様)は塩害の発生リスクがないため、塩害区分Ⅲ地域に適用する桁高が塩害区分Ⅰ地域にそのまま適用できる(緊張材のみ置き換え)。CFRP仕様PC桁の経済性に関する定量的評価と別に、普通PC桁と比較すると、CFRP仕様PC桁を以下のように定性的に評価できる。

- (1) 塩害区分Ⅲ(JIS桁)を使用することにより、桁高が1ランク程度低くできるため、PC桁の自重が約10%の減少だけでなく、コンクリート使用量の減少に伴う材料費の縮減、また、運搬重量の軽減や架設機械の小型化、下部工に対する上部工死荷重の減少に繋がる。
- (2)CFRP仕様PC桁は、塩害区分Ⅰ地域においてもコンクリート表面の保護塗装との併用は必要ないため、塗装塗替の維持管理課題が解決できる。そのため、供用期間中の維持管理費用が大幅に軽減でき、LCCが有利となる。
- (3)橋梁上部工の架替えの際に、道路縦断線形の維持が重要である。CFRP仕様PC桁を用いる場合、桁高が低くなるため、桁高を上げる必要はない。また、桁下面と下部工橋座面とのクリアランスが高くなるため、現行基準に基づく支承の取り換えもしやすくなる。そのため、縦断線形の維持がしやすく、多くのケースでは全体工事費の軽減が図れる。

4. 経済性に関する検討

4.1 検討方法

まずは、橋長12m以上の橋梁PC桁に使用されている呼び径15.2mmの普通PC鋼より線の材料単価を建設物価版等から引用し、各メーカーの緊張材1mあたりの平均単価を算出する。同じ呼び径(15.2mm)であるCFRPより線の材料単価はメーカー見積もり単価を採用する。これらの材料単価を比較し、材料単価の差異を定量的に把握する。次に、塩害影響の最も厳しい沖縄県を含め、九州地方・関東地方の塩害区分Ⅰ地域におけるB活荷重仕様のホロー桁橋の普通PC桁の見積もり単価(設計単価)を調査する。また同時に、普通PC桁費用の中で緊張材及びスターラップ筋等の補強材費用の割合についてヒアリング調査を実施する。

PC桁の見積単価の内訳は公表されていないため、ヒアリング調査を通して補強材費用の変動幅を把握し、経済性検討に用いる。普通PC桁の緊張材及びスターラップ筋等の費用をCFRPより線の費用と置き換え、CFRP仕様PC桁1本あたりの単価を求め、普通PC桁とCFRP仕様PC桁の桁長毎のコスト比較を行う。なお、普通PC桁とCFRP仕様PC桁の自重が異なり、運搬・架設費用が変わることも考えられるが、経済性比較ではこれを考慮していない。さらに、既設橋梁上部工の架け替えを念頭に、普通PC桁とCFRP仕様PC桁の上部工工事費の比較を行う。その後、塩害区分Ⅰ地域に建設された実橋梁の建設工事費(直接工事費)をベースに、その上部工にCFRP仕様PC桁を使用する場合の建設工事費を計算し、CFRP仕様PC桁を用いた橋梁の建設工事費を検討する。最後に、新設実橋梁の直接工事費をベースにLCCに関する検討を行い、設計耐用年数100年間の維持管理費用を含めた総費用を示す。

4.2 検討対象の実橋梁

検討対象とする実橋梁の一般図を図-3、その上部工を図-4、下部工を図-5にそれぞれ示す。本橋梁の橋長は15.9m、桁長は15.8mであり、総幅員は12.2mである。上部工には16本のB活荷重規格のホロー桁(桁高600mm)から構成され、下部工躯体形式は逆T式橋台で

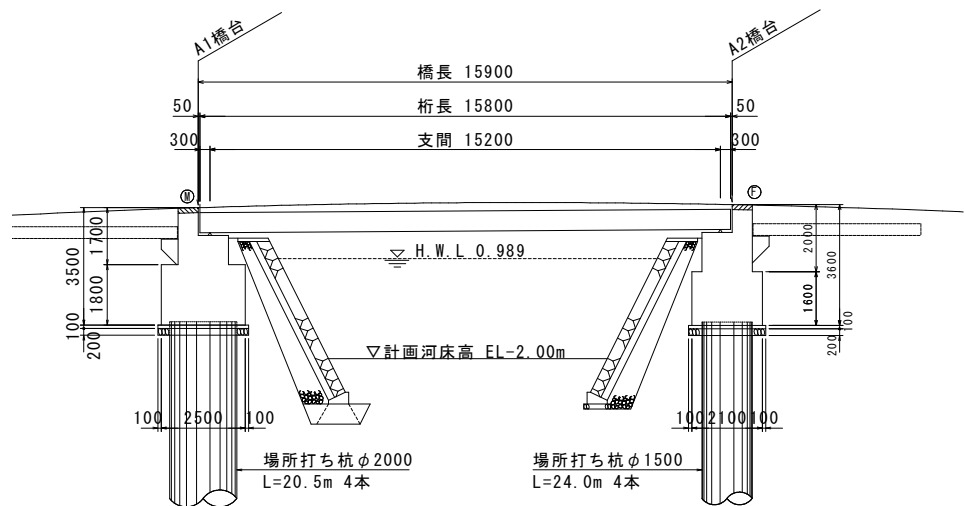


図-3 検討対象橋梁一般図

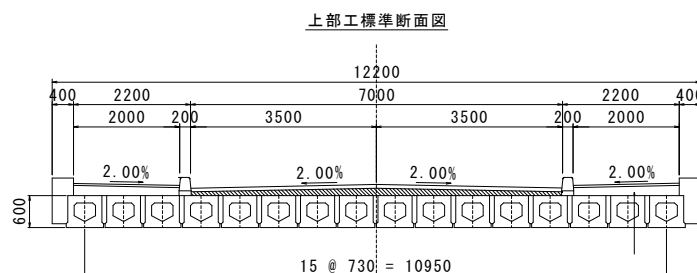


図-4 検討対象橋梁上部工一般

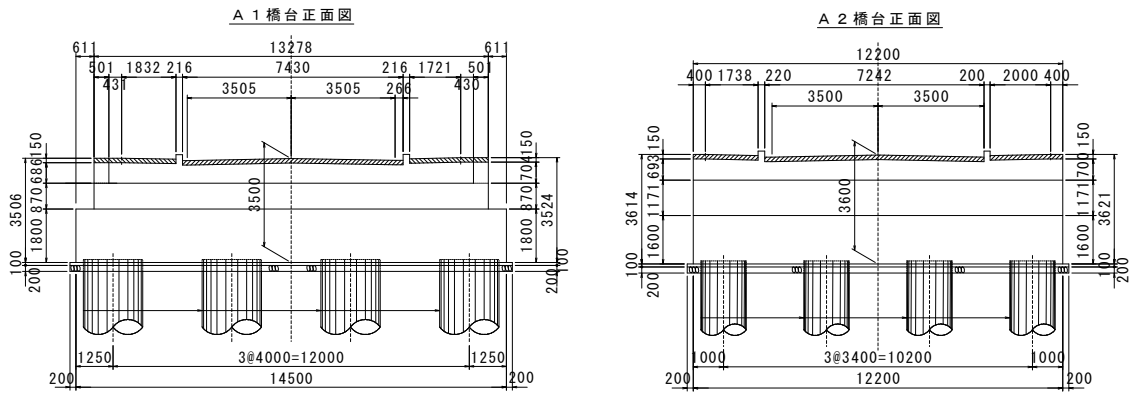


図-5 検討対象橋梁下部工一般図

あり、基礎形式は、杭径 2000mm の場所打ち杭（各橋台 4 本ずつ、全周回転オールケーシング工法にて施工）を採用している。橋台の前面に河川護岸工があるため、経済性検討にそれを考慮する。

4.3 材料単価の比較結果

呼び径 φ15.2mm の緊張材を対象に、建設物価版¹⁰⁾より通常の SWPR7B、積算資料¹¹⁾より全素線塗装 PC 鋼より線、Ducst ストランド及び全素線塗装アンボンドの PC 鋼より線の単価を調べ、それを 1m 当たりの材料単価に換算し、その結果を表-1 に示す。表-1 には CFRP より線の見積もり単価を合わせて示している。同表より、普通 PC 鋼より線の種類や防食処理方法などによって、材料単価には差異があり、その平均単価は約 667 円/m である。それに対して、CFRP より線の見積もり単価は 1600 円/m であるため、材料単価が約 2.4 倍割高となっている。

表-1 PC 鋼より線と CFRP より線の材料費比較

品名	直径	1m 当たりの価格(円)	出典
SWPR7B	15.2 (mm)	557	建設物価 2017. 10
全素線塗装PC鋼より線		555	
Ducst ストランド		699. 3	積算資料 (2018. 4)
全素線塗装PC鋼より線アンボンド		854. 7	
CFRP より線		1, 600	東京製綱(株)

4.4 普通 PC 桁と CFRP 仕様 PC 桁の単価比較

PC 桁の運搬距離を 30km と設定し、運搬費の見積もり結果（九州地区設計見積もり単価）を表-2 に示す。この運搬費を含め、沖縄、九州および関東地方について、塩害地域（塩害区分 S）における B 活荷重対応の普通 PC 桁の見積もり単価（現場引き渡し費用、設計単価）の調査結果を表-3 に示す。図-6 は、表-3 に示す A 社～E 社の見積もり単価を桁長ごとにプロットしたものである。その結果、見積もり単価のばらつきが ±15%以内となり、1 本当たりの普通 PC 桁の見積もり単価と桁長との関係を、指数関数型の回帰式である提案式(1)で表せる。式(1)の相関係数 R は $R^2=0.991$ である。

一般的に、PC 桁の見積もり単価は現地渡しの見積もり

表-2 普通 PC 桁 1 本当たりの運搬費

BS- (m)	8	10	12	14	16	18	20	22	24
運搬費 (千円)	47. 3	47. 3	47. 3	64. 8	71. 0	77. 1	106	106	105. 5

$$y = 237.55e^{0.0911x} \quad (1)$$

ここに、y：普通 PC 桁の見積もり単価（千円/本）

x：桁長(m)

表-3 普通 PC 桁 1 本当たりの単価

仕様 BS-	長×高×幅 (mm)	1本あたりの単価(千円)					平均
		A社	B社	C社	D社	E社	
8	8400×400×700	415	450	434	430	543	454
10	10500×450×700	549	630	558	561	682	596
12	12500×550×700	620	660	734	733	785	706
14	14500×600×700	794	1, 034	981	884	911	921
16	16600×650×700	945	1, 188	1, 065	1, 071	1, 044	1, 063
18	18600×750×700	1, 173	1, 391	1, 235	1, 232	1, 204	1, 247
20	20700×850×700	1, 376	1, 650	1, 504	1, 500	1, 414	1, 489
22	22700×950×700	1, 654	1, 909	1, 740	1, 737	1, 656	1, 739
24	24700×1050×700	1, 918	2, 189	1, 989	2, 002	1, 896	1, 999

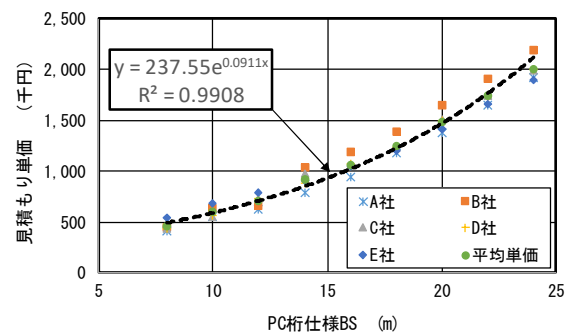


図-6 PC 桁仕様 BS（桁長）と見積もり単価との関係

単価であり、材料費・製作費・運搬費・製作会社の諸経費等が含まれる。単価の内訳は公表されていないが、関係者へヒアリングした結果、普通 PC 桁の見積もり単価に占める補強材（普通 PC 鋼より線およびスターラップ

筋) の材料費の割合が 10~20%程度である。

CFRP より線を使用する場合、専用接続治具の使用や緊張する際に多めに手間がかかる。しかし、CFRP 仕様 PC 桁断面は、かぶりを最小限に抑えることができるため、使用する型枠を小さくでき、コンクリートや緊張材の使用量も少なくなる。これらの費用を定量的に示すことは困難であるが、PC 桁製造業者への聞き取り調査では、これらの費用の増減がほぼ打ち消されるものであり、本文ではこれらの影響を考慮していない。表-3 に示す普通 PC 桁 1 本当たりの単価のうち、補強材の材料費を CFRP より線の単価 (約 2.4 倍高い) に置き換え、また、補強材の材料費が桁全体費用の 10% (以降: ケース 1 と称する) と 20% (以降: ケース 2 と称する) の 2 ケースについて検討し、その結果を表-4 に示す (例えば、CFRP 仕様 BS-8 の単価=[454+ (0.1~0.2)×454×(2.4-1.0)]=518~581 千円)。同表より、CFRP 仕様 PC 桁 1 本あたりの単価は、普通 PC 桁と比べケース 1 の場合では約 14%、ケース 2 の場合では約 28%割高となる。

4.5 橋梁上部工の直接工事費比較

既設橋梁上部工の架け替えを想定し、図-3 に示す実橋梁上部工の直接工事費を着目して比較検討を行う。但し、比較検討には既設上部工の撤去費用は含まれていない。本橋梁の上部工に仕様 BS-16 の普通 PC 桁と CFRP 仕様 PC 桁 (ケース 1、ケース 2) の単価を適用して検討した結果を表-5 に示す。なお、表-5 に示す「PC 橋架設工」以外の工種の工事費が変わらないものとした。表-5 より、ケース 1 は、上部工の直接建設費の増加は約 7%、ケース 2 は、上部工の直接建設費の増加は約 14% である。

表-4 CFRP 仕様 PC 桁 1 本当たりの単価 (単位: 千円)

仕様BS- (m)	8	10	12	14	16	18	20	22	24
①普通PC桁見積り単価平均値	454	596	706	921	1,063	1,247	1,489	1,739	1,999
CFRP仕様PC桁単価	②ケース1	518	679	805	1,050	1,212	1,422	1,697	2,279
	③ケース2	581	763	904	1,179	1,361	1,596	1,906	2,559
割高比	②/①		1.14						
	③/①		1.28						

表-5 実橋梁の上部工直接工事費の比較

工種	上部工	普通PC桁 (千円)	CFRP仕様PC桁 (千円)	
			ケース1	ケース2
PC 橋架設工		14,637	16,418	18,199
床組工・地覆工・歩道工		1,127	647	400
舗装工 (車道)・排水工		433	234	
高欄工・防水工		2,694	791	
支承工・伸縮装置工		2,005	2363	
上部工直接工事費の合計		25,332	27,113	28,894
割高比		1:1.000	1:1.070	1:1.141

4.6 新設橋梁建設時の直接工事費比較

図-3~5 に示す実橋梁建設時の直接工事費を着目して比較検討を行った。橋梁の上部工に表-5 に示す普通 PC 桁と CFRP 仕様 PC 桁 (ケース 1、ケース 2) の上部工直接工事費を採用した。なお、橋梁の直接工事費には下部工および仮設工 (図-3~5 に示す実橋梁の詳細設計費) を含めた。橋梁上部工以外の下部工および仮設工の工事費が変わらないものとして検討を行った。その結果を表-6 に示す。表-6 より、普通 PC 桁橋に対し、CFRP 仕様 PC 桁を採用したケース 1 では、橋梁建設時の直接建設費の増加は約 3%、ケース 2 では、橋梁建設時の直接建設費の増加は約 5%に収まっている。

4.7 新設橋梁のライフサイクルコスト (LCC)

LCC の検討は、表-6 に示す橋梁の直接工事費を初期建設費とし、LCC の試算は設計上の目標期間 (100 年間) とした。また、維持管理シナリオを図-7 のように想定した。厳しい塩害地域では飛来塩分が主桁の下フランジ部に付着し、その浸透により、普通 PC 桁中の補強材が腐食するため、文献 9) よりコンクリートの塗装を計上している。コンクリート塗装が経年劣化していくため、コンクリート塗装材料の耐用年数を考慮し、15 年ごとの再塗装 (沖縄地区過去の調査設計実績: 再塗装単価: 10,000 円/m², 吊足場単価: 3,500/m²) を行うこととした。

表-6 橋梁直接工事費の比較

工種	上部工	普通PC桁 (千円)	CFRP仕様PC桁 (千円)	
			ケース1	ケース2
上部工直接工事費		25,332	27,113	28,894
下部工 / 仮設工		31887 / 11670		
橋梁の直接工事費合計		68,889	70,670	72,451
割高比		1:1.000	1:1.026	1:1.052

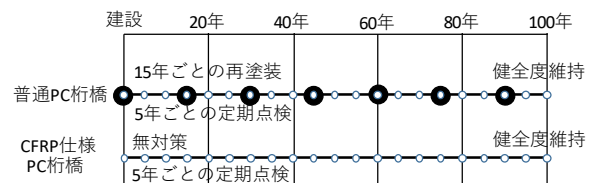


図-7 設計耐用年数における維持管理シナリオ

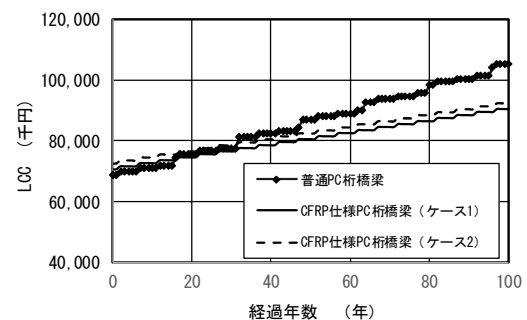


図-8 設計耐用年数における LCC の経年推移

一方、著者らが提案した CFRP 仕様 PC 桁は補強材にすべて CFRP より線を使用するため、補強材の腐食劣化のリスクがなく、コンクリートの再塗装の補修シナリオを設定しないものとした。定期点検については、平成 26 年より実施開始した「道路維持修繕に関する省令」により、近接目視による橋梁の定期点検が 5 年に 1 回の頻度で実施するように義務化されたため、いずれのケースも 5 年ごとの定期点検 (1,500 円/m²) を想定した^{12), 13)}。なお、検討対象は新設橋梁であるため、設計耐用年数を 100 年としているので、その他の補修 (ひび割れ注入工・断面修復工) および上部工の架け替えは考慮していない。

LCC の経年推移の試算結果を図-8 に示す。今回の諸条件では、CFRP 仕様 PC 桁を用いた橋梁の初期建設費が若干高い (3~5%) が、普通 PC 桁の 15 年ごとの再塗装を計上すると、ケース 1, 2 共に 20 年間前後で LCC が逆転し、その後、CFRP 仕様 PC 桁を用いた橋梁の経済性が有利となる。また、設計耐用年数 100 年で考えると、1,270~1,450 万円の総費用が節約できる。

5. おわりに

本文では、普通 PC 桁と CFRP 仕様 PC 桁の単価比較、既設橋梁上部工の架替工事および新設橋梁工事に CFRP 仕様 PC 桁を適用する場合の経済性検討を行った。ここで得られた知見を以下に示す。

(1) CFRP 仕様より線の材料単価 (1m 当たり) は、普通 PC 鋼より線と比較し、約 2.4 倍割高となる。

(2) CFRP 仕様 PC 桁 1 本あたりの単価は、普通 PC 桁と比較して 14~28%割高となる。

(3) 補強材の材料費が桁全体費用の 10%であるケース 1 では、CFRP 仕様 PC 桁を用いて上部工架け替えの直接建設費の増加は約 7%、新設橋梁の直接建設費の増加は約 3%である。補強材の材料費が桁全体費用の 20%であるケース 2 では、CFRP 仕様 PC 桁を用いて上部工架け替えの直接建設費の増加は約 14%、新設橋梁の直接建設費の増加は約 5%に収まっている。

(4) LCC の経年推移の試算結果、CFRP 仕様 PC 桁を用いた場合、橋梁の初期建設費が僅か高いが、20 年間前後で LCC が逆転し、その後、CFRP 仕様 PC 桁を用いた橋梁の経済性が有利となる。なお、LCC 算定に割引率は考慮していない。

以上より、塩害区分 S を始めとする塩害の厳しい地域では、PC 桁の経済性と耐久性および橋梁建設の総工事費を総合的に検討し、耐久性のよい CFRP 仕様 PC 桁の積極的な使用が望まれる。

謝辞

本論文は、一般社団法人 沖縄しまたて協会「平成 28

年度 沖縄地域の建設技術に関する技術開発および調査研究支援事業」の助成を受け、「CFRP 仕様の高性能プレテンション PC 桁に関する技術開発」(研究代表者: 金田一男) の一部について取りまとめたものである。本研究に関し、大城武・琉球大学名誉教授に多大のご指導・ご助言を頂きました。データ整理においては、株式会社技建の宮野伸介室長、有明工業高等専門学校平成 29 年度卒業生の井上勝夢、松永健太郎両氏の協力を頂きました。ここで厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会, 「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編」, p.183, 2017.11
- 2) 金田一男, 富山 潤, 宮野伸介, 崎原盛伍: CFRP 仕様の高性能プレテンション PC 桁に関する技術開発, 一般社団法人 沖縄しまたて協会, 平成 29 年度技術環境研究所研究発表会論文集, pp.1-8, 2017.10
- 3) 金田一男, 富山 潤, 宮野伸介, 崎原盛伍: 「CFRP 仕様の高性能プレテンション PC 桁の曲げ・せん断耐力」, JCI (日本コンクリート工学会) コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.403~408, 2018.7
- 4) 横山博実: カーボンファイバーを利用した諸構造物の普及に向けた検討, JICE REPORT Vol.3, 2003.3
- 5) 古村豊, 大山博明, 中井聖棋, 榎本 剛: 繊維補強材を使用した超高耐久 PC 橋の適用性に関する基礎的検討, プレストレストコンクリート工学会, 第 24 回シンポジウム論文集, pp.69-72, 2015.10.
- 6) 宮野伸介: 沖縄県に適した高耐久性プレテンション PC 桁製作に関する技術開発, 平成 25 年度 技術環境研究所研究発表会論文集, 一般社団法人 沖縄しまたて協会, 2013.10.30
- 7) 宮野伸介: プレテンション PC 桁の付着性能とせん断耐力に関する研究, 平成 27 年度 技術環境研究所研究発表会論文集, 一般社団法人 沖縄しまたて協会, 2015.10.30
- 8) 大城 武, 富山 潤, 平井 圭: 全素線塗装型 PC 鋼より線を用いたプレゼンテーション PC 桁の耐荷性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.517-522, 2011.7
- 9) (社) プレストレスト・コンクリート建設業協会: 塩害に対するプレキャスト PC 桁の設計・施工資料 (平成 17 年 3 月改定版), 2005.3
- 10) 一般財団法人: 建設物価調査会: 建設物価, 2017.10
- 11) 一般財団法人 経済調査会: 積算資料, 2018.4
- 12) 道路橋定期点検要領 国道交通省道路局 2014.6
- 13) 道路維持修繕に関する省令, 国土交通省, 2014.3