

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



横山博実

研究第二部 上席主任研究員

背景と目的

カーボン（炭素）、アラミド、ガラスなどの連続繊維の束をエポキシ樹脂などで棒状に硬化させた連続繊維補強材（以下FRP）は、強度がPC鋼材と同等以上で、かつ鋼材に比べて腐食しにくい、軽いなどの利点を持つことから、海岸などの腐食環境下におけるコンクリートの補強材や施工性の悪い法面のグラウンドアンカー材として利用されている。メーカー数社からは、これらの用途を目的とした種々の形状のFRP製品が販売されている（写真－1）。



写真－1 FRP製品の例

しかし、技術基準類が整備されている^{1),2)}にもかかわらず、これまでの施工実績は約15年間で160件余りに過ぎず、普及しているとは言いがたいのが現状である。その原因は材料価格が鋼材の数倍から十数倍も高いことによるところが大きいと考えられるが、それが先入観となって敬遠さ

れている面もあるようである。

そのような中、平成12年1月に「コンクリート標準示方書コンクリート[施工編]－耐久性照査型－」においてかぶりに関する規定が改定され、腐食環境で普通鋼材を用いる場合のかぶりが大幅に増大した。これにより鋼材を使用した場合とのコスト差に関する状況が変化しつつある。

また、建設投資の減少や社会資本ストックの増加に伴ってライフサイクルコスト（以下LCC）の概念が浸透し始め、メンテナンスが比較的軽微で済むFRPが注目されてきている。

本検討は、FRPの中で最も普及が進んでいるカーボンファイバー（炭素繊維；以下CFRP）を対象に、既存の文献や実設計・実施工への適用経験者に対するアンケート調査等により、鋼材と比較した長所短所や普及の障害となっている要因を整理するとともに、橋梁やグラウンドアンカーに対する試設計を基にLCCの試算を行い、今後の普及に向けての整理を行ったものである。

なお、本検討では主として新設時に用いられる棒状に硬化させたCFRPを扱うものとし、既存構造物の補修・補強用として急速に普及してきているシート系のFRPは対象外とした。

調査内容および結果

1 FRPの材質と特徴³⁾

現在主流となっているFRPの材質は、炭素繊維（CFRP）、

表－1 FRPの性能

		炭素(CFRP)	アラミド(AFRP)	ガラス(GFRP)	PC鋼より線	鉄筋
比重	－	1.5	1.3	1.7～1.9	7.85	7.85
引張強度	N/mm ²	1,900～2,300	1,400～1,800	600～900	1,700～1,900	490
ヤング係数	kN/mm ²	130～420	50～70	30	200	210
伸び	%	0.6～1.9	2～4	2	6	10
リラクセーション	%	1.5～3	5～15	10	1～2	－
線膨張係数	10 ⁻⁶ /°C	0.6	－2～－5	9	12	12
耐食性	－	○	○	○	×	×
非磁性	－	○	○	○	×	×

アラミド繊維(AFRP)、ガラス繊維(GFRP)の3種類である。

いずれも同様の性質を持ち、鋼材に比べて

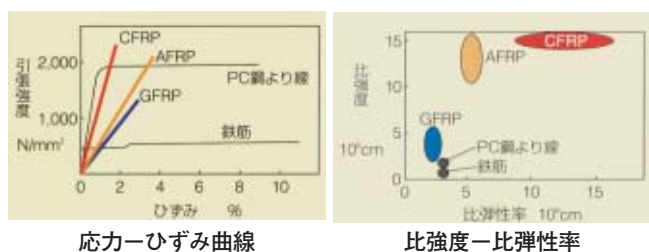
- ・耐食性に優れる
- ・軽量である（鉄筋の1/4～1/6）
- ・耐薬品性に優れる
- ・磁気を帯びない

等の利点がある反面、

- ・せん断や衝撃、表面の損傷に弱い
- ・高温や紫外線に弱い
- ・曲げ加工は工場で行う必要がある
- ・降伏せず破断する
- ・磁気を帯びないためかぶりや位置の確認が困難である

等の短所もある。

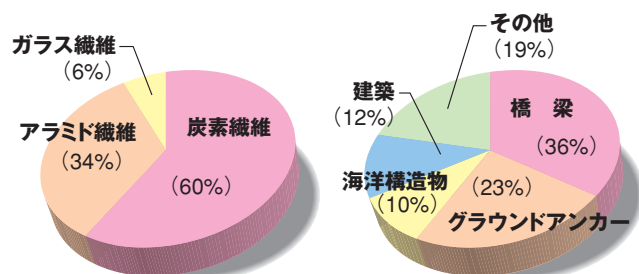
また、CFRPは他のFRPに比べて引張強度、ヤング係数が大きく、伸びが小さいという特徴がある（図－1）。



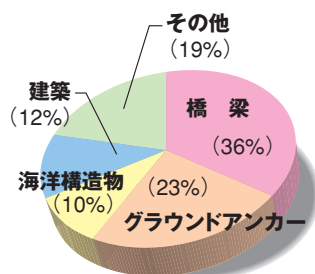
図－1 FRPの機械的性質

2 これまでの施工実績³⁾

FRPに関する業界団体であるACC倶楽部によれば、昭和62年8月から平成13年6月までに162件の施工実績が報告されている。



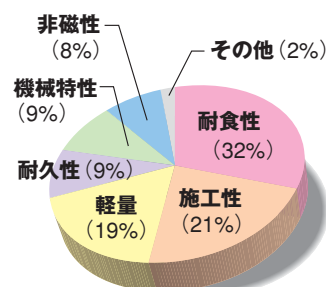
図－2 繊維の種類



図－3 用途

そのうち、平成10年10月までの124件に対する調査結果では、約7割が緊張材、残りが鉄筋代替として使用されている。繊維の種類としては、炭素繊維が全体の60%を占めている（図－2）。また、用途は橋梁とグラウンドアンカーの割合が大きい（図－3）。

また、採用理由は耐食性が30%以上と最も多く、以下施工性、軽量の順で、これらで全体の70%を占める（図－4）。



図－4 採用理由

3 発注者、設計コンサルタント、施工業者に対するアンケート

(1) 一般の発注者に対するアンケート

まず、一般の発注者がFRPに対してどの程度の認識を持っているのか調査した。アンケートの実施状況を表－2に示す。

表－2 一般の発注者向けアンケート実施状況

対 象	発送数	回収数	回収率
国土交通省九州地方整備局 の各工事事務所	39箇所	34箇所	87%
沖縄総合事務局開発建設部 の各工事事務所	7箇所	5箇所	71%
九州7県および沖縄県の 土木事業担当部署	8箇所	4箇所	50%
合 計	54箇所	43箇所	80%

結果は以下のとおりである。

- ・CFRPを使用した工法を「よく知っている」と回答したのは0%、「大まかには知っている」も13%に過ぎず、認知度は低いといえる。
- ・比較検討経験者は6%で、検討の結果はいずれも不採用だった。
- ・施工管理基準や施工完了後の維持メンテナンス等が確

立されているのか不安、という意見があった。

(2) 適用経験者に対するアンケート結果

FRPを実際に適用した経験のある発注者、設計コンサルタント、施工業者にアンケート調査を行い、鋼材と比較したFRP材の長所短所や普及の障害となっている要因を整理するとともにユーザー側の意見や要望等の抽出を試みた。アンケートの実施状況を表-3に示す。

表-3 適用経験者向けアンケート実施状況

	対 象	発送数	回収数	回収率
発注者	過去の施工実績工事の発注者	94件	59件	63%
設計 コンサル タント	建設コンサルタント協会 関東支部・北陸支部・九州 支部の会員	289社	49人	—
施工業者	過去の施工実績工事の施工者	162件	111件	69%

結果は以下のとおりである。

(発注者)

- ・施工性は橋梁では40%、グラウンドアンカーでは77%が鋼材と比較して良いと評価している。
- ・鋼材と比較すると、材料価格は8割以上が高いと認識している。施工価格は、橋梁では3割が高いと感じているが、グラウンドアンカーでは半数近くが安いと回答している。構造物価格は「高い」が4割いるが、LCCでは「高い」は5%で、「安い」が3割もいる。
- ・施工後の追跡調査が行われたのは2割程度に過ぎない。
- ・他の類似構造物に対しても適用を検討する価値を8割以上が認めている。
- ・工法（製品）が様々だし、材料単価や施工単価が不明確なので、比較検討に際して難しい面がある、という意見があった。

(設計コンサルタント)

- ・発注者と概ね同じ回答である。
- ・実施設計時の材料の融通性やトライアル計算等は従来と変わらないと評価されている。
- ・検討したが不採用とした原因は、材料の信頼性に不安がある、材料価格が高い、定着工法の施工性が悪い、等が多い。
- ・LCCを考慮して提案しても、実績がないとの理由で採

用されないとの意見があった。

- ・設計コンサルタントの間でも認知度が低いという意見があり、技術資料、価格や公式な歩掛り等の公表を求める声が多かった。

(施工業者)

- ・材料取り扱い性は、FRPが適用され始めた当初には損傷が懸念され注意が喚起されていたが、最近では一般材に近い感覚での取り扱いがなされているようである。
- ・軽量性が有効で、機械施工から人力施工への変化や、小運搬や高所への搬入の労務低減につながっている。
- ・緊張材やグラウンドアンカーで、モルタル充填式の定着の施工性が悪いという意見が多かったが、その他の施工性は概ね良好である。

(3) アンケート結果のまとめ

以上の結果の中で、特筆すべき項目は以下のとおりである。

- ・発注者、設計コンサルタントの認知度が低い
- ・情報や実績不足が適用の妨げになっている
- ・施工性の良さや軽量性が広く評価されている
- ・緊張や定着に関する施工性が悪い。
- ・適用経験者のほとんどが類似構造物への適用検討を行う価値を認めている

4 PC橋梁におけるLCCの比較

PC橋梁の上下部工に対して普通鋼材、CFRPを用いた場合についてそれぞれ試設計を行い、LCCを比較した。

また、今後腐食環境における適用が増加することが予想される樹脂塗装引張補強材についても、同様の比較を行った。樹脂塗装引張補強材は、普通鋼材の表面に工場で樹脂塗装を施した製品で、耐食性があり、材料価格は普通鋼材の3倍程度とCFRPに比較すると安価である（CFRPの1/4程度）、という特徴を持つ。ただし、現場での曲げ加工に際しては、補修が必要とされている。

LCCとしては、建設費、維持管理費、取壊し費を計上した。なお、取り壊した後のコンクリート殻の処分費については、CFRPを含むコンクリートの場合、処分時にCFRP

をすべて分離する必要があるか否かについて明確な判断根拠がないため、ここでは除外した。

鋼材のかぶり、普通鋼材は「コンクリート標準示方書 コンクリート〔施工編〕－耐久性照査型－」に、それ以外については従来のコンクリート標準示方書に準拠した。

(1) 設計条件

- ・設計耐用年数 : 100年
- ・水セメント比 : 上部工0.4 下部工0.5
- ・普通鋼材のかぶり: 図-5参照
- ・その他のかぶり : 35mm

その他の条件は図-6を参照

(2) LCC試算の考え方

維持管理費：設計耐用年数を100年としているので補修は考慮しない。ただし、鋼材は10年に1回の割合で建設費の1%の維持費をかけて点検するものとする。

取壊し費：CFRPは無筋コンクリートの扱いとする。

(3) 試算結果

試算結果を図-8に示す。

今回の条件では、CFRPは鋼材よりも建設費、LCCとも安くなったが、樹脂塗装引張補強材よりは建設費、LCCとも若干高くなった。

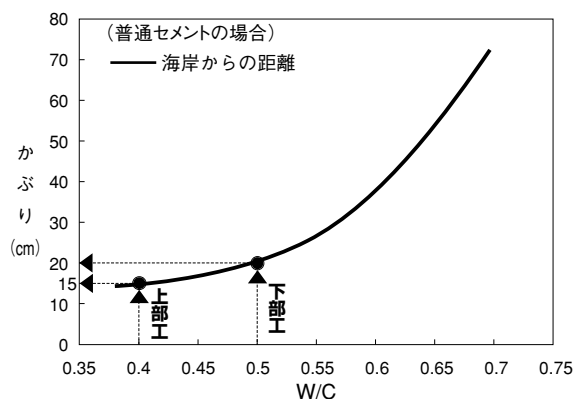


図-5 普通鋼材の最小かぶり

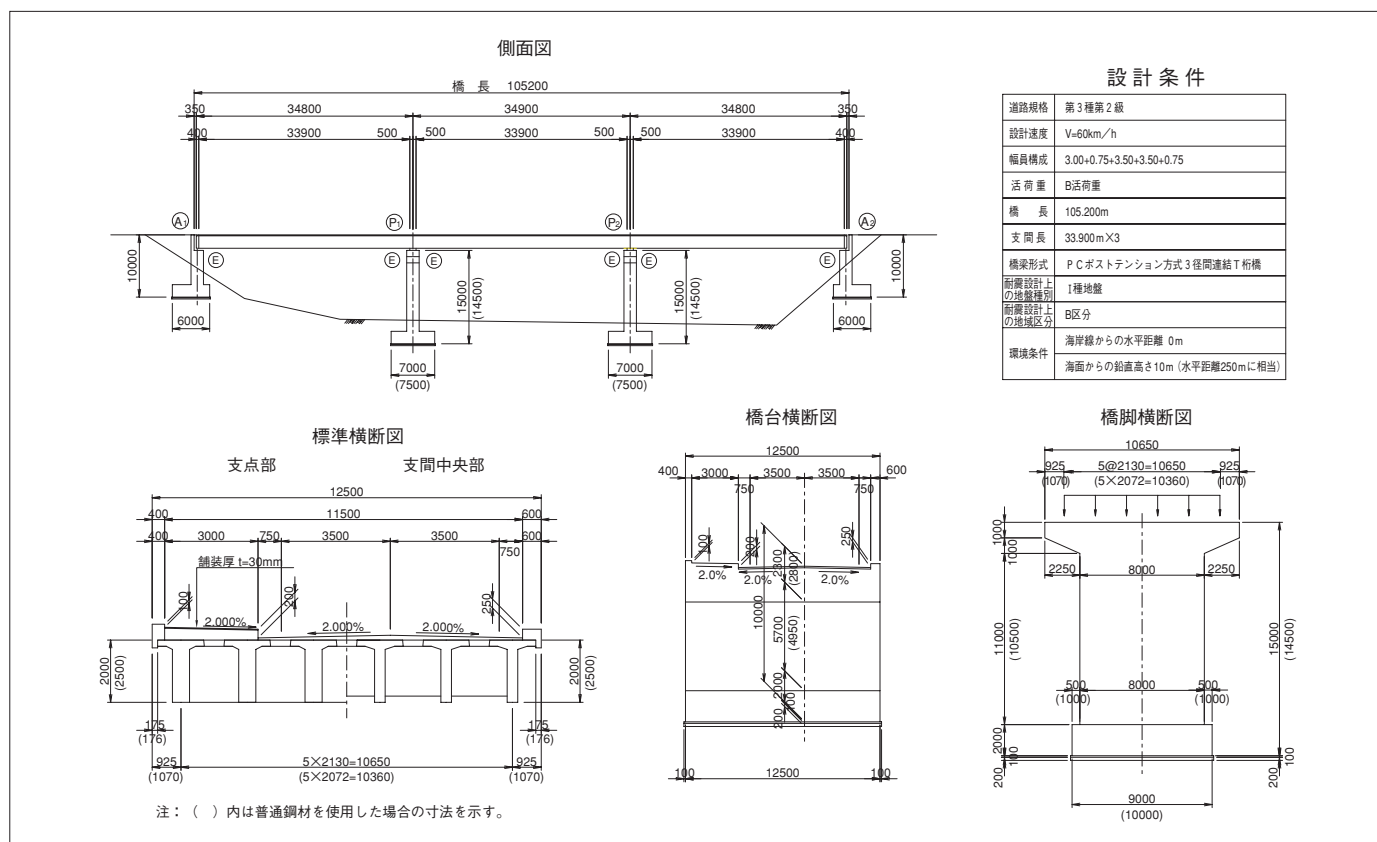


図-6 モデル橋梁一般図

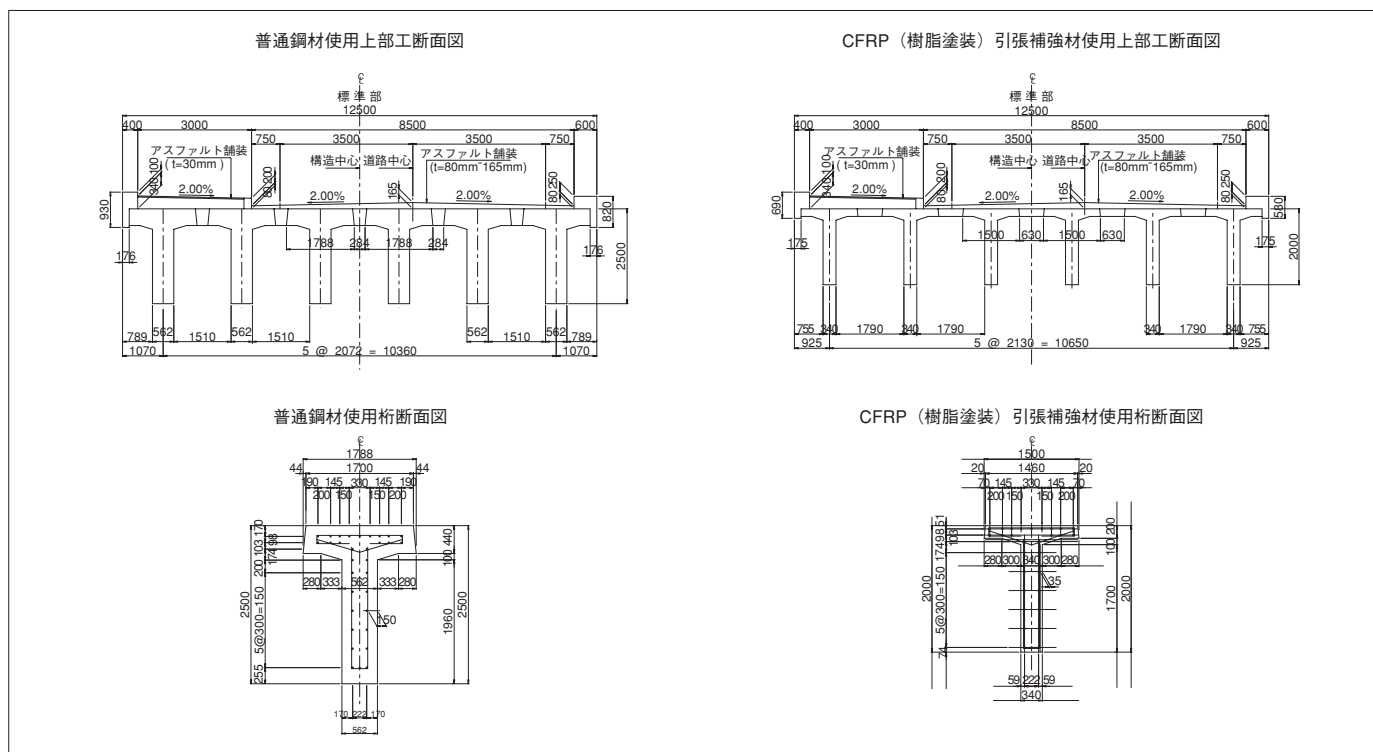


図-7 上部工断面試算結果

従来、CFRPは維持管理費では鋼材よりも安価であることは認識されていたが、条件によっては建設費も安くなることは注目すべきである。

鋼材のかぶりや維持管理の考え方、構造物の諸元や現場条件等によっては、金額および順序が変動するが、CFRPも十分樹脂塗装材の比較対象となると考えられる。

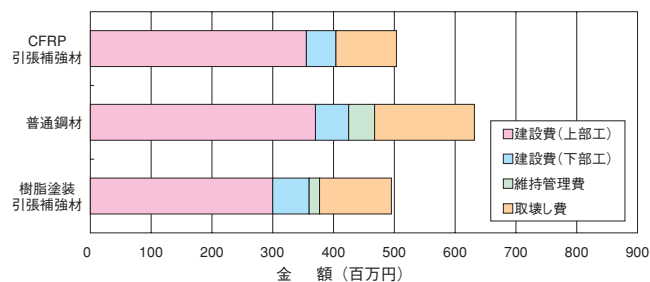


図-8 橋梁モデルにおけるコスト試算(LCC)結果

5 グラウンドアンカーにおけるLCCの比較

グラウンドアンカーに対して鋼材を使用した在来工法(タイプルアンカー)と、CFRPを使用した工法(NMアンカー、CFRPアンカー)について試設計を行い、LCCを比較した。

(1) 設計条件

- ・種別 : 永久アンカー
- ・設計荷重 : $P=518.6 \text{ kN/本}$
- ・安全率 : $F_s=2.5$
- ・アンカー斜角 : $\alpha=35^\circ$ (水平面から下向き)
- ・自由長 : $L_f=7.5\sim 13.5 \text{ m}$ (平均自由長10.5m)

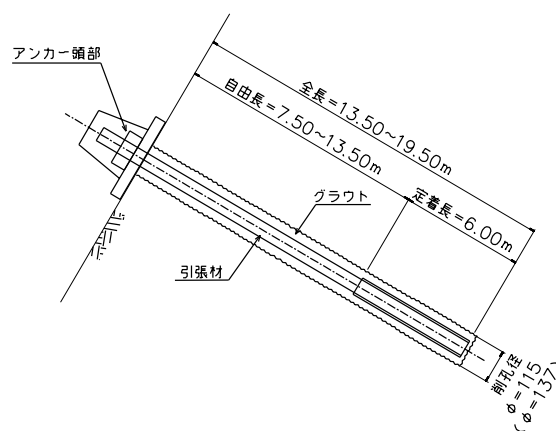


図-9 グラウンドアンカー一般図

- ・全長 : $\Sigma L=13.5\sim 19.5$ m (平均全長16.5m)
- ・本数 : 20本
- ・定着層 : 風化岩(極限周面摩擦抵抗 $\tau_s=0.6\text{N/mm}^2$)

(2) コスト試算の考え方

維持管理費：鋼材は緊張力の管理とグラウトへのクラック発生の原因となりうる変形の有無の確認を目的に、3年に1回の割合で建設費の0.5%の維持費をかけて調査する。CFRPは腐食しないので前者のみとし、鋼材の1/2とする。

取壊し費：鋼材は建設費の50%、CFRPはその1/2とする。

(3) 試算結果

試算結果を図-10に示す。

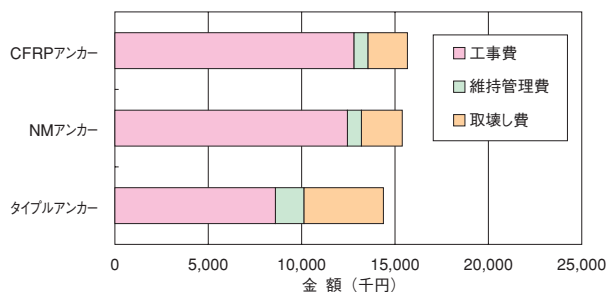


図-10 グラウンドアンカーのLCC試算結果

今回の条件では、CFRPは従来工法より建設費で約1.5倍、LCCでは約1.1倍となった。

建設費のみでは比較の対象にはならないが、LCCでは維持管理の考え方、構造物の諸元や現場条件等によっては金額および順序が変動することもあると考えられるため、CFRPも十分比較対象となると考えられる。

6 CFRPを利用した諸構造物の普及に向けて

以上の検討結果をふまえると、今後のCFRPの普及に向けて以下のことが望まれる。

(メーカーに対して)

- ・材料価格低減の努力を行う。
- ・技術資料を整備して公表するとともに、業界と協力して歩掛かりや概算単価の自責を蓄積し、公表する。

(業界団体に対して)

- ・これまで普及が進まなかった原因は、発注者および設計コンサルタントの認知度の低さによるところも大きいことを鑑み、工法の内容や実績等を積極的にPRする。
- ・腐食性環境等の条件が揃えばCFRPは十分価格競争力があること、法面や作業空間の制約が厳しい環境下ではCFRPは軽量性に起因する施工性の良さが期待できることを発注者や設計コンサルタントにPRし、CFRPを含めた比較検討がなされる仕組みが作られるよう働きかける。
- ・信頼性があり、施工性の良い緊張・定着方式の開発を進める。

今後の課題

コスト算定の前提条件となる以下の項目については、まだ各方面で議論が行われているところであり、今後も規定の変更や新たな規定の追加が予測される(実際に、いずれも平成14年3月に大幅に改定されたコンクリート標準示方書や道路橋示方書でもそのような動きが見られた)。

- ・腐食環境におけるかぶり
- ・供用期間の設定
- ・維持管理費の算定手法

技術標準の動向を追跡し、最新の鋼材とCFRPのコスト関係を把握しておくことが重要と考えられる。

また、今後は環境面への配慮も無視できない。FRPは製造時に発生する二酸化炭素の量が鋼材に比べて大幅に少ないという観点からもCFRPの普及を考えていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 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)、コンクリートライブラリー第88号、1996。
- 2) 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。
- 3) ACC倶楽部、ACC(Advanced Composite Cables)新素材施工実績集Vol.2、1998。
- 4) 財団法人国土技術研究センター、カーボンファイバーを利用した諸構造物の実用化に関する検討業務報告書、2002。
(国土交通省九州地方整備局宮崎工事事務所からの受託業務報告書)