

6. 炭素繊維ケーブル

6.1 はじめに

炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）は、軽量かつ高強度、高耐食等の性質を有するため、種々の土木構造物への適用が検討されている。その例として、CFRPシートによる橋脚や床版の補強、CFRPロッドを緊張材としたプレストレストコンクリート等がある。また、CFRPケーブルは、吊橋や斜張橋等の吊り材としての適用が検討されている^{1),2)}。

しかし、CFRPは、炭素繊維を樹脂で固化した複合マトリックス材料であるため、炭素繊維の方向や使用環境により材料特性が大きく変化する、あるいは、需要が少ないため、材料が高価である等の理由から土木構造物に適用された例は比較的少ない。とくに、CFRPケーブルを実橋に適用した例は、スイスの Storchbrucke Winterthur Switzerland、デンマークの Herning Bridge 等の斜張橋の吊り材のみに限られる^{3),4)}。

本章では、CFRPケーブルを吊り形式橋梁へ適用するときの強度特性を記述し、さらに、CFRPケーブルを吊橋の架設用部材として用いた使用例も紹介する。

6.2 材料特性

6.2.1 炭素繊維材料の種類

CFRPは、炭素繊維の製造原料によって強度特性が大きく異なる。製造原料の主なものとしては、ポリアクリルニトリルのPAN系、石炭・石油ピッチのピッチ系がある。図6.1⁵⁾にCFRPを含む代表的な繊維材料の引張特性を示す。建設材料に用いるCFRPとしては、高強度、高弾性の性質を持つPAN系が一般的である。とくに吊り形式橋梁の吊り材への適用においては、鋼製ケーブルの重量の約5分の1と軽く、温度による伸び縮みが小さく、高強度で破断伸びが小さくないPAN系が適当と考えられている。

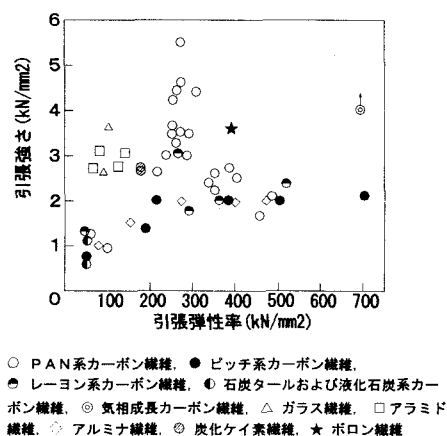


図6.1 代表的な繊維材料の引張特性

6.2.2 製造方法

CFRPは、炭素繊維を樹脂等で固化して製造する。炭素繊維は、熱処理等にて繊維化した原材料を不活性気体中で炭化・黒鉛化処理して生成する。これに未硬化樹脂を含浸・集合化させ、シート状にしたものがCFRPシートに、また、直径3～5mmに素線化して複数本を収束したものがCFRPケーブルとなる。一般的に未硬化樹脂には熱硬化性のエポキシ樹脂等を使用し、CFRPの繊維体積含有率(V_f)が約60～70%程度となるように樹脂を混入する。このため、CFRPの有効強度は、材料の見かけ上の断面積に比べて、樹脂の含有率に応じて引張強度等が低下する。しかし、繊維体積含有率が70%より大きくなると、CFRPに樹脂ひびわれや材料はく離等が発生しやすくなる傾向も確認されている。

6.3 ケーブルとしての基本特性

CFRPケーブルは、素線をよって集束したより線ケーブルと素線を平行ケーブルに集束した平行線に分類される。より線ケーブルは、素線同士の接触のより減りから、ケーブルの引張強さが素線の集合強さよりも低下するため、平行線ケーブルよりも引張強さが小さい。しかし、製作、取り扱いの面から、より線ケーブルは建設部材として一般的になっている。本節では、PAN系のより線CFRPケーブルを中心にケーブル部材を構成する定着構造と、ケーブル本体の強度特性についてそれぞれ記述する。

6.3.1 定着構造

(1) 定着ソケットの種類

CFRPケーブルの定着構造は、ケーブル、ソケット本体、充填材から構成される。CFRPケーブルは局所的な曲げや圧縮、せん断変形に弱いいため、充填材には弾性係数が比較的小さいエポキシ樹脂が使用され、これによってケーブルとソケット本体が連結される。ケーブルとソケット本体の連結方法であるくさび定着、樹脂定着等を図6.2に示す。くさび定着とは、CFRPケーブルの末端部分をエポキシ等の樹脂を用いてくさび形状に成形し、これをソケット本体のアンカーに挿入してケーブルとソケット本体を一体化する定着方法である。一方、樹脂定着は、充填材にエポキシ等の樹脂を使用し、硬化樹脂の付着あるいは形状抵抗にてケーブルとソケット本体を一体化する定着方法である。

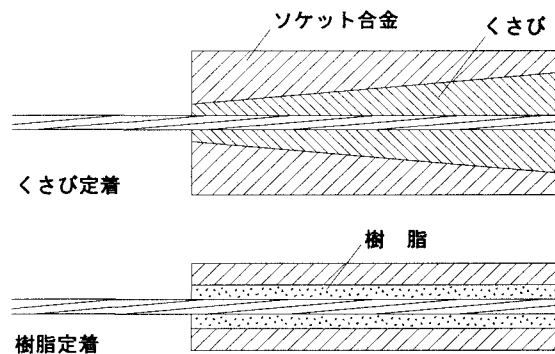


図6.2 CFRPケーブルの定着構造

(2) 樹脂くさび定着ソケット

CFRPケーブル特有の定着方法である樹脂くさび定着について若干紹介する。

樹脂くさび定着はスイスを中心に開発が行われ、図6.3に示す樹脂くさびの形状抵抗によるケーブルとソケット本体の定着方法が提案されている。本方法では、ソケット内部でケーブルに発生する応力集中を緩和するため、ケーブル軸方向に充填材の弾性率を混合材料等にて変化させることが特徴である⁶⁾。

一方、著者らは、CFRPケーブルをソケット内部でほうき状に成形し、ケーブルとエポキシ樹脂の付着効率を高め、ソケット長の小型化が可能となる図6.4に示す樹脂くさび定着を提案している。本方法では、ソケット荷重端側に発生するケーブル振動等による疲労を低減するため、充填材を荷重端からソケット長の約4分の1程度の部分まで

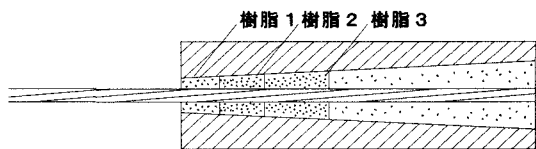


図6.3 スイスで開発された樹脂定着

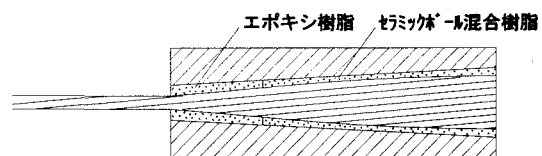


図6.4 小型化対応の樹脂定着

緩衝材としてエポキシ樹脂のみを配置するとともに、ソケット自由端側で樹脂くさびの強度を向上させるため、自由端側に粒径約3mmのセラミックボールをエポキシ樹脂に混合することが特徴である。なお、本定着方法の破壊メカニズムを把握するため、著者らは、図6.4のソケット供試体にて静的引張実験および有限要素法解析を実施している。この結果、ソケット本体に十分な剛性があり、かつ充填材が弾性体であれば、充填材の発生応力は荷重端側で大きくなることを確認した。しかし、CFRPケーブルの引張力が増加すると、図6.5に示すように荷重端側から自由端側に向かって充填材が塑性し、終局時には充填材の発生応力がほぼ均一化することを確認した。

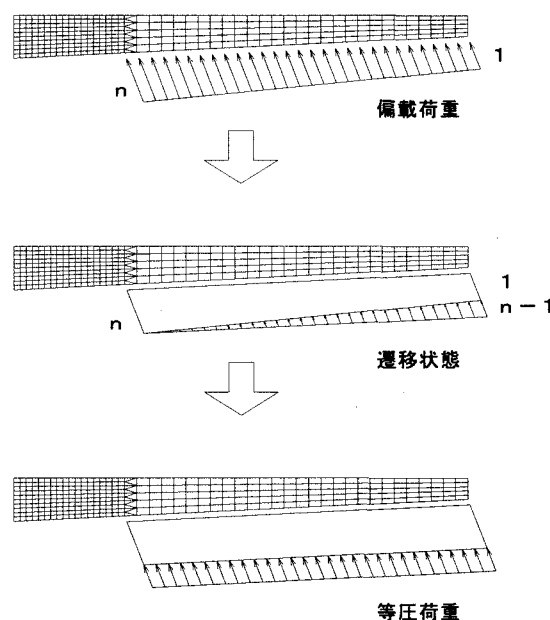


図6.5 樹脂定着ソケットの破壊メカニズム

6.3.2 ケーブルの基本特性

(1) 静的強度

CFRPケーブルの引張強さおよび弾性係数は、繊維、硬化樹脂、断面形状等に依存し、とくに、繊維体積含有率に大きく依存する。建設材料への適用が検討される繊維体積含有率が60%程度のCFRPケーブルの応力・ひずみ曲線を図6.6に示す。CFRPケーブルは、高張力鋼ケーブルのような降伏点がなく、ひずみがわずか2%程度で急激に破断にいたる特徴があり、弾性係数は吊橋用平行線ケーブル等の高張力鋼ケーブルの70%程度の 150kN/mm^2 と小さい。しかし、CFRPケーブルの引張強さは 2.5kN/mm^2 と大きく、高張力鋼ケーブルで現状もっとも高強度である 2.0kN/mm^2 をはるかに上回る。また、CFRPケーブルは高張力鋼ケーブルの約5分の1と軽いため、ケーブル自重あたりの吊り能力を示す比強度は、高張力鋼ケーブルの約6倍と高く、吊り効率にすぐれる。

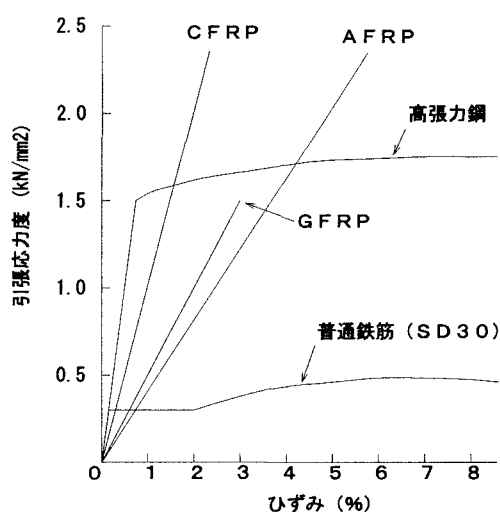


図6.6 各種ケーブルの応力ひずみ曲線

つぎに、CFRPケーブルに曲げを与えた状態でのケーブルの引張強度特性を図6.7に示す。CFRPケーブルはケーブル直径の約80倍以下に曲げると、引張強さが低下する。高張力鋼ケーブルの約40倍に比べると、CFRPケーブルは曲げによる強度低下が生じやすい。

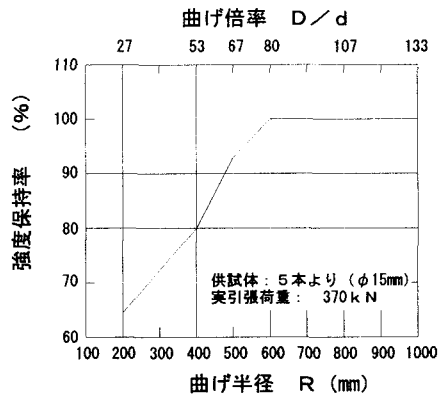


図6.7 曲げ引張強度特性

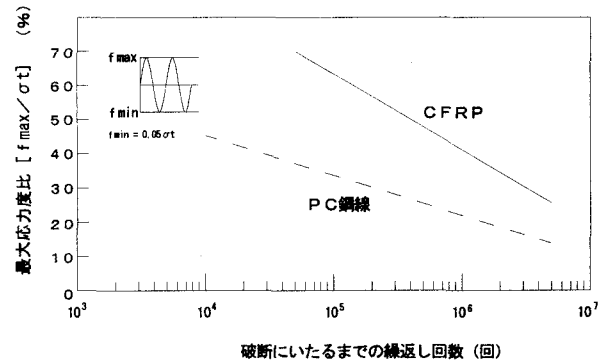


図6.8 単純引張疲労特性

(2) 疲労特性

ケーブルの疲労特性は、通常、単純引張疲労、曲げ引張疲労、振動疲労等で評価される。単純引張疲労とは、ケーブルを曲げずに単純引張変動荷重を作用させた時の疲労特性を意味し、一方、曲げ引張疲労とは、ケーブルに曲げを与えた状態でケーブルに引張変動荷重を作用させた時の疲労特性を意味する。また、振動疲労とは、ケーブルに張力を作用させた状態で、張力の法線方向に変動荷重を作用させた時の疲労特性を意味する。

CFRPおよび鋼製ケーブルの単純引張疲労を図6.8⁷⁾に示す。図の縦軸は、ケーブルの公称引張強さに対する疲労載荷実験の振幅応力の上限値の比率を示す。CFRPケーブルは、載荷回数が500万回でも高張力鋼ケーブルに比べ疲労強度が高い。しかし、CFRPケーブルの疲労強度の低下率は高張力鋼ケーブルよりも著しく、過度の振動が作用する場合については、疲労強度の検討が必要である。

一方、曲げ引張疲労特性は、図6.9に示す方法で実験検討が行われ、載荷回数12万回でも、引張強さがほとんど低下しないことが確認されている。

また、振動疲労特性については、図6.10に示す方法で載荷回数200万回の振動疲労実験が行われ、

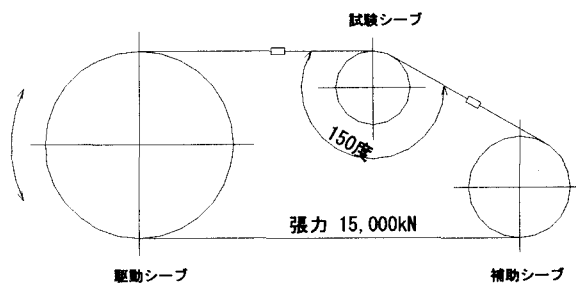


図6.9 曲げ引張強度特性

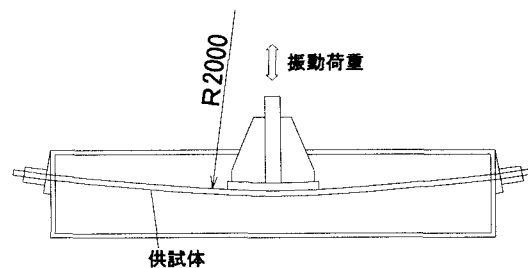


表6.1 CFRPケーブルの振動疲労特性

ケース	載荷条件			強度保持率
	上限応力度	全振幅	繰返し数	
1	917 N/mm ²	162 N/mm ²	200万回	100%
2	1223 N/mm ²	162 N/mm ²	200万回	100%

たわみ角変動が片振幅で約7度の載荷条件では、表6.1に示すように載荷終了後でも、ケーブルの引張強度が低下しないことが確認されている。

以上の結果から、CFRPケーブルの疲労特性は高張力鋼ケーブルと同等以上といえる。

(3) クリープとリラクセーション

クリープとは、部材に一定の持続応力を作用させたとき、時間の経過とともにひずみが増加する現象である。本特性は、クリープによるひずみを弾性限度内でのひずみで除したクリープ係数で評価し、クリープ係数が大きいほど持続荷重によるひずみが多い。一方、リラクセーションとは、ひずみが一定の条件で引張応力度が低下する現象である。本特性は、ひずみが一定のもとで起こる引張応力度の減少量を、最初に与えたケーブル引張応力度で除したリラクセーション率で評価する。リラクセーション率が小さいほど、引張強度の変化が小さい。とくに本特性は、吊り形式橋梁のケーブルの許容応力度の規定において考慮されるケーブル材料の重要な指標である。

CFRPケーブルのクリープ特性およびリラクセーション率の経時変化を表6.2、図6.11に示す。CFRPケーブルのクリープ特性は高張力鋼ケーブルとほぼ等しく、リラクセーション特性については、低リラクセーションPCケーブルよりも小さく、CFRPケーブルは吊り部材に適する。

(4) 側圧による引張強度特性の変化

吊橋の主ケーブルは、ケーブルバンドで約10.0N/mm²の側圧を受ける。ケーブルは側圧の作用により、引張強さが低下するため、ケーブル材料の設計では側圧の検討が行われる。そこで、著者らはCFRPケーブルの引張強さと側圧の関係を把握するため、側圧を変数としたCFRPケーブルの引張強度実験を行った。図6.12⁸⁾に側圧を受けるφ36mmのCFRPケーブルの引張強さの変化を示す。φ36mmのCFRPケーブルでは、19.6 N/mm²以上の側圧を受けると、側圧の大きさに応じて引張強さが低下する。しかし、CFRPケーブルに作用する最大側圧を高張力鋼ケーブルの設計側圧と同様の10.0N/mm²と規定すれば、高張力鋼ケーブルと同等に使用することができる。

表6.2 CFRPケーブルのクリープ特性

ケーブル	直径 (mm)	対切断荷重比	時間 (時間)	クリープ (%)	備考
高張力鋼ケーブル	5.0	0.4	400	0.0070	20±8°C
炭素繊維ケーブル	12.5	0.65	1000	0.0068	7本より

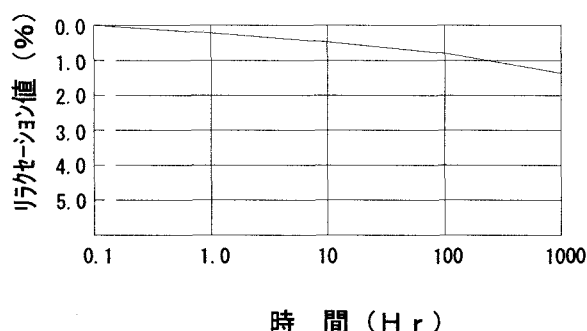


図6.11 CFRPケーブルのリラクセーション特性

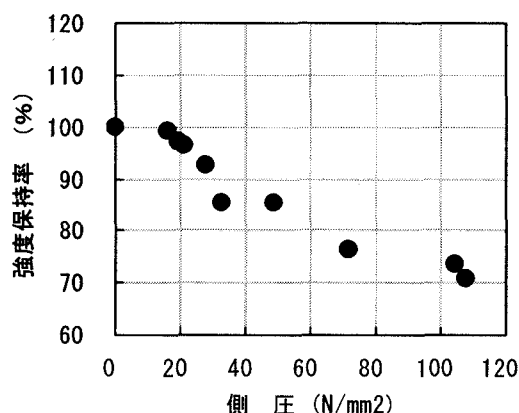


図6.12 側圧が作用する時の強度保持率

(5) 摩擦特性

吊橋の鋼製ケーブルバンドは、ケーブルとの接触面における摩擦力によるすべり抵抗を期待して設計が行われる。そこで、筆者らはCFRPケーブルについても同様の係数を算定するため、CFRPケーブルと鋼製クランプの摩擦実験を行い、表6.3⁹⁾の結果を得た。本州四国連絡橋公団

(以下、本四公団)の「ケーブルバンド設計要領」と同様にすべりに対する安全係数を3とした場合、鋼製ケーブルとバンド間の摩擦係数が0.15を標準としている⁷⁾ことを比較すると、CFRPケーブルの摩擦係数は最大でも0.11と小さい。

表6.3 CFRPケーブルと鋼製クランプの摩擦係数

ケーブル種類	実験結果				参考値
	炭素繊維ケーブル				鋼製ケーブル
表面状態	乾燥	湿潤	油分を塗布		-
媒体	-	水	潤滑剤	グリス	-
摩擦係数	0.11	0.10	0.09	0.02	0.15

注) 表中の参考値は、本四公団「ケーブルバンド設計要領(案)」に記述される鋼製ケーブルと鋼製バンドの摩擦係数の標準値を示す。

(6) 巻き取り特性

前述のとおり、ケーブルは曲げによって引張強さが低下する。通常、ケーブルはリールに巻き取り、輸送・保管する。ケーブルの巻き取りによる引張強さの変化を把握すべく、筆者らはリール径を変数としてφ36mmのCFRPケーブルをリールに巻き取り、1週間放置した時のケーブルの強度保持率を求めた⁸⁾。図6.13に示すように、CFRPケーブルをケーブル直径の約40倍以上のリールに巻き取れば、ケーブルの引張強さは低下せず、ケー

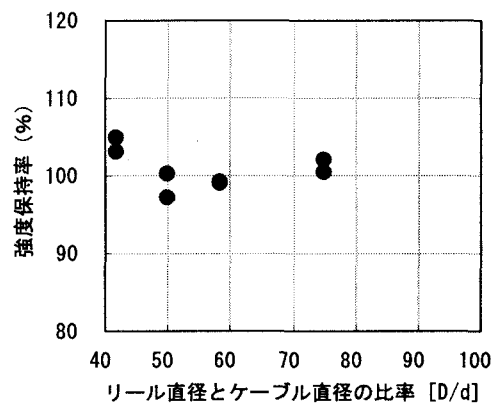


図6.13 巻き取り直径比率による強度保持率

ブル表面の樹脂割れも発生しないことを確認した。ちなみに、高張力鋼ケーブルは施工基準等において、巻き取りリールの直径をケーブル直径の18倍以上に規定している。しかし、巻き取り時間もケーブルの強度特性に変化を与えるため、今後これについても検討が必要である。

(7) 温度特性

吊り形式橋梁では、ケーブルの発生応力をケーブルの架設形状にて管理する。ケーブル材料は温度の影響を受けやすいため、ケーブル架設形状の管理にあたっては、材料の温度特性の把握が重要である。CFRPケーブルの線膨張係数は $1.0 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ であり、高張力鋼ケーブルの線膨張係数 $1.2 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$ の12分の1と非常に小さい。このため、CFRPケーブルは高張力鋼ケーブルに比べて設計、架設において非常に有利であるといえる。

(8) 耐食性

炭素繊維単体は耐食性に優れた材料であるが、CFRPを構成するエポキシ樹脂は塩分付着あるいは日射(紫外線)等により強度特性が劣化しやすい。そのため、CFRPケーブル本体の強度特性が変化

する。塩分によるCFRPケーブルの強度特性の変化を把握するため、内陸および海洋上の2地点の日射のない場所にて、ケーブルの引張強さの約50%の張力を与えた状態で、約20ヶ月にわたる屋外実験が行われて¹⁰⁾。この結果、暴露地点によらず、ケーブルの残存引張強さは約90%程度であることが確認され、塩分による強度劣化がほとんどないことが確認された。また、日射によるCFRPケーブル

の強度特性の変化を把握するため、海洋上で日射の有無を変数とした屋外暴露実験が行われた¹⁰⁾。なお、供試体には非緊張状態で32ヶ月間暴露したもの、ケーブル引張強さの約60~80%の初期張力を与えて42ヶ月間暴露したものの6種類がある。この結果、日射を受け、かつ80%の初期張力を受けた供試体は、初期より数%程度残存引張強さが低下することが確認された。しかし、その他の供試体については、強度特性の変化は確認されていない。

したがって、CFRPケーブルを引張強さの60%程度以下の張力状態で使用する場合は、塩分付着あるいは日射によるケーブルの強度特性の変化はほとんどないといえる。

表6.4 暴露前後のCFRPケーブル強度特性の変化

6.4 来島大橋でのCFRPケーブル適用例

日本において、CFRPケーブルを斜張橋や吊橋の本体構造に適用した例はない。しかし、本四公団の来島大橋において、主ケーブル架設用のワイヤブリッジ（以下、キャットウォーク）の耐風安

	暴露前	暴露後		
		試料1	試料2	試料3
破断強度 (kN/mm ²)	2.54	2.52	2.54	2.50
弾性係数 (kN/mm ²)	120.8	119.7	120.6	118.7

定用部材であるスティロープにCFRPケーブルが適用された。本ロープには、径が30mm、35mmのPAN系のより線が使用され、ケーブルの引張強さのほぼ半分に相当する686kN、931kNの張力状態で約1年にわたり適用された。なお、CFRPケーブル交差部はケーブル同士の接触によるケーブルの切断を防ぐため、保護具が設置された。実橋に適用し、低張力で暴露したCFRPケーブルの強度特性を把握すべく、本スティロープ撤去後に著者らは単純引張実験を実施した。その結果を表6.4に示す。本ケーブルは初期引張強さとほぼ同等の残存強度を有し、使用期間が約1年程度であれば、構造用部材としても十分適用できることを把握した。

6.5 まとめ

CFRPケーブルは長期にわたり構造物に使用された例がないため、強度特性が不明な点も多い。しかし、本材料は軽量かつ高強度であるため、架設用機材の小型化や比強度あたりの材料単価等のメリットから、吊り形式橋梁に適用が検討される例は増加しつつある。また、海外の斜張橋では、CFRPケーブルをケーブル部材に適用した実績もあり、十分適応可能な状況にある。一方、吊橋については、側圧の作用による強度特性の変化を改善できれば、吊橋の主ケーブルへの適用も可能といえる。今後、CFRPケーブルを吊り形式橋梁へ適用するにあたっては、低コスト化、防食等の性能保証はもちろんのこと、側圧によるケーブルの引張強さが低下しにくいケーブルを開発する必要がある。また、ケーブルの強度特性が最大限に活用できるようなケーブル形状となる吊り橋梁形式も検討することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：新素材の構造部材への適用調査，JSSCテクニカルレポート，No.23，pp.48～54，1993。
- 2) 今野信一，聖生守雄，高橋稔彦，竹田敏和：超長大吊橋ケーブルに関する検討，本州・北海道架橋シンポジウム，pp.167～184，1996。
- 3) Ustr Meier and Heinz Meier：CFRP finds use in cable support for bridge，MODERN

PLASTICS INTERNATIONAL, pp.83~84, 1996.4.

- 4) L.Hauge, J.Christoffersen, J.Bjerrum, and H.E.Jensen : CFRP Cable-Stayed Footbridge, SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITES IN INFRASTRUCTURE, pp.456~465, 1998.
- 5) 新素材ハンドブック編集委員会 : 新素材ハンドブック, 丸善, pp.115~120, 1988.1.
- 6) M.A.Erki, S.H.Rizkalla : Anchorages For FRP, Concrete International, pp.54~59, 1993.6.
- 7) Markus Wernli, Frieder Seible, etc : ADVANCED COMPOSITE STAY-CABLE SURVEY SHORT-AND-LONG TERM TESTS, University of California San Diego, 1999.7.
- 8) 今野信一, 野呂直以, 山崎伸一, 毎熊宏則 : 炭素繊維ケーブルの強度特性, 橋梁と基礎, Vol.33, No.9, pp.29~32, 1999.9.
- 9) 本州四国連絡橋公団 : 吊橋のケーブルに関する検討, 本州四国連絡橋公団, 1978.3.
- 10) 西崎到, 佐々木徹 : FRPケーブル材料の暴露試験, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.5, pp.22~30, 1998.5.