論文 CFRPケーブルのPC吊橋への適用に関する研究

酒井 博士*1・奥山 和俊*2・牛島 健一*3・木村 浩*4

要旨: 引張耐力約 5000kN を想定した炭素系連続繊維補強材(CFRP)ケーブルを対象に, PC 吊橋の主ケーブルへ適用性について検討を行った。主な内容は,引張耐力 特性に関する実験および解析的検討,ハンガーケーブルを介した主ケーブルの 曲げ疲労特性に関する実験的検討である。その結果,支間 100m 程度の比較的 小規模な PC 吊橋の主ケーブルへ CFRP が適用可能であることが判明した。 キーワード:炭素系連続繊維補強材,主ケーブル,PC吊橋,引張耐力,曲げ疲労

1. はじめに

炭素系連続繊維補強材(以下, CFRPと略す)は, 鋼に比べて様々な特徴を有する材料であるが、 とりわけ高耐久性,軽量および線膨張が小さい などの特性を活かして吊橋のケーブルとしての 適用が考えられる。従来用いられている鋼のケ ーブルは,腐食に起因した劣化による大がかり な取り替えや建設初期の段階から高度な防錆対 策が必要とされるなどの問題があるのに対し、 CFRP は高耐久材料であることからこのような 配慮は不要となり,維持管理費の低減が可能と なることから, CFRP をケーブル材として用いる ことは有効な活用方法と考えられる。また CFRP は,鋼に比べてきわめて軽量であるためケーブ ルの運搬・架設費の低減が可能なばかりでなく、 超長大吊橋ではケーブル自重によっても張力が 低減できる長所もある。さらには, CFRP はきわ めて線膨張係数が小さいために, 吊橋のケーブ ルに適用すれば温度荷重に対する応答がほとん どなく,補剛桁の安定性がきわめて優れる。図 -1 は,斜張ケーブルと主ケーブルを混合させ, 斜張ケーブル部の補剛桁は PC 構造を ハンガー ケーブル部のそれは鋼構造によるハイブリッド PC 吊橋¹⁾を示したものである。



なお塔頂部は,鋼ケーブルではサドルが一般的 であるが,CFRPケーブルでは主ケーブルの曲げ の影響に配慮して定着する構造としている。

*1(株)ピーエス三菱 技術本部 技術推進部 (正会員)
*2(株)ピーエス三菱 技術本部 開発技術第一部 工修 (正会員)
*3 東京製綱(株)技術本部 事業開発部
*4 東京製綱(株)技術本部 事業開発部 工博

鋼と CFRP を比較するために 構造物全体の温度 上昇を 40 として補剛桁の変位および曲げモ ーメントの比較をそれぞれ図-2(a),(b)に示す が,補剛桁の変形および曲げモーメントが極端 に小さくできる。そのため,曲げモーメントが 支配的となる補剛桁の設計において桁高や補強 材が減少できる可能性がある。

このように、吊橋のケーブルに CFRP を適用す ることは多くの長所がある。CFRP を吊橋の主ケ ーブルに用いるには、大容量となるため CFRP を多本数束ねたものとなるが、脆性材料である ためにケーブルの引張耐力はばらつきが大きい ことが予想され、その特性値を合理的に定める 必要がある。また主ケーブルとハンガーケーブ ルの接合部は、活荷重により主ケーブルに曲げ が繰り返し作用し、主ケーブルの耐力低下が考 えられる。本研究の目的は、CFRP を図-1 に示す ような PC 吊橋に適用することを想定し、各種引 張耐力低下の要因について調べ、引張耐力の特 性値や安全性について検討するものである。

2. 主ケーブルの構成

2.1 CFRP ストランド

本研究で対象とした CFRP は7本の素線をより あわせたストランドで,その主要諸元の規格値 を表-1 に示す。

呼び名	15.2
連続繊維材	PAN系
繊維結合材	エポキシ樹脂
連続繊維混入率(%)	64
保証耐力(kN)	199
有効断面積(mm ²)	113.6
線膨張係数(/)	0.6×10^{-6}

表 - 1 CFRP の主要緒元

2.2 CFRP ケーブル

まず紫外線や雨水などの劣化および損傷から の保護を目的に, CFRP を高密度ポリエチレンで 被覆する。これを表-2 に示すような手順で複数 本束ねて CFRP ケーブルとする。すなわち, CFRP を7本束ねユニット7 15.2 を構成し, ケーブ ルの両端に定着用膨張材による付着式定着体を 取り付ける。次に,任意のユニット数を組み合 わせてケーブルを構成するが本研究では図-1 に示す主ケーブルに適用することを想定してユ ニット数を5とした35 15.2とする。ケーブル 一般部は全 CFRPを隙間なく並べるが,定着部付 近では各ユニットごとにネジ定着とするために, 集束クランプで偏向させる。

			- X (<u>-</u> - ···/)	
15.2		CF	CC1×7 15.2	_
端末		PE被覆		Ţ
				*
300		1000		
7 15.2	_	~		
定着体	A	В	A-A E	8 - B
600	A	B 1800		
<u>35 15.2</u>		<u>ナット</u>		
<u>A - A</u>	A	<u>7 15.2</u>	<u>定着体</u>	
				₿
7	<u>15.2</u> A	\支圧板	集束クラン	゚プ

表 - 2 CFRP ケーブル構成(単位:m)

3. 引張耐力に関する検討

3.1 検討方法

CFRP の引張耐力は PC 鋼材のような高張力鋼 にくらべて脆性的で,かつばらつきが大きいこ とが知られていることから,破壊確率と引張耐 力の関係を明らかにするため,引張試験と解析 の両者を併用して検討する。

(1) 引張試験

土木学会規準の「連続繊維補強材の引張試験 方法(案)(JSCE-E531-1995)」に準じて引張試験 を行い,荷重とひずみの関係を計測する。対象 ケーブルは 15.2 と7 15.2 の2種類で,供試 体諸元は表-2 に示すとおりである。

(2) 解析

CFRP のような脆性材料を複数本束ねたケー ブルの引張耐力は,図-3に示すようなモデルを 用いてモンテカルロ法により算出²⁾することが 可能である。解析は, 15.2の引張試験で得ら れた引張耐力分布や引張剛性および両者の相関 係数などの統計量を母集団とし,対象とする N 本の CFRP で構成されるケーブルの引張耐力の 母集団を求める。なお CFRP の長さは, 15.2 の引張試験に合わせて 1m とする。



(3) 検討方法

15.2 のような引張耐力の比較的小さな供 試体では,試験規模が小さいために大標本供試 体の引張試験による母集団の推定が可能である が,7 15.2 のような引張耐力の大きな場合は それが困難であるため,標本数の小さな引張試 験を行い,解析でその妥当性の確認や母集団の 推定を行う。

各ケーブルの構成に応じて,表-3に示すよう な引張試験と解析を行う。まず 15.2の引張試 験を行い荷重とひずみの関係を測定する。供試 体の抽出はCFRP 製造1ロットあたり5~6体と し,引張耐力や引張剛性などに関する各種統計 量が母集団と見なせるだけの十分な大きさの供 試体数とするため,全30ロット,供試体総数約 170体とした。次に7 15.2を対象として,供 試体数10体の引張試験と解析を行い,両者を比 較して解析方法や定着体の性能などを検討する。 これらの事項を明らかにした上で,35 15.2に ついて解析により引張耐力の母集団を推定する。

表 - 3 検討方法

ケーブル	引張試験	解析
15.2		
7 15.2		
35 15.2		

- 3.2 検討結果
- (1) 引張試験結果

15.2 および7 15.2 の引張試験は,いずれ の供試体も荷重とひずみの関係はほぼ直線を保 持したまま突然破壊に至った。供試体の破壊形 態はいずれも CFRP の破断であり,端末や定着体 の異常な変形や CFRP の抜け出しなどは確認さ れなかった。したがって, 15.2 の引張試験結 果は CFRP の引張特性が,7 15.2 では定着体を 含めたシステムのそれが把握できる結果と考え られる。引張耐力のヒストグラムおよび後述す る確率分布関数を図-4 に示す。ここで7 15.2 の引張耐力は,試験結果を CFRP 本数(N=7)で除 して表している。

筆者は,本研究で対象としたのと同一種類の CFRP の引張耐力は,ワイブル分布への適合性が 良いことを示している³⁾⁴⁾。図-5 に平均ランク 法により求めた破壊確率と引張耐力の関係をワ イブル確率紙へのプロットした結果を示す。こ の図より直線性が良く引張耐力はワイブル分布 に適合していると考えられる。また, 15.2の 引張試験で得られた引張耐力と引張剛性の関係 を図-6 に示すが,両者にはほとんど相関が見ら れない。

(2) 確率分布関数

図-7 は CFRP 本数をパラメータとしたケーブ ルの引張耐力について,解析で得られた母集団 をワイブル確率分布関数で表したものと図-4 で示したそれを比較したものである。ただしい ずれの解析結果も,引張試験結果と同様に引張 耐力をケーブルを構成するCFRP本数Nで除して 示している。

(3) 引張試験と解析結果の比較(7 15.2)

7 15.2 に着目して引張試験結果と解析結果 を比較すれば,両者の形状は大差なく,試験結 果は解析結果をほぼ平行移動する形状となって いる。表-4 はワイブル母数を比較したものであ るが,ばらつきを表す形状母数(m)はほぼ同じで あるのに対し,尺度母数()は試験結果の方が 小さい。



表 -	4	ワイ	゙ブ」	し母数	北較
13	_		~ /		-L+X

		尺度母数 (kN)	形状母数 m
15.2	試験	248.7	21.1
7 15.2	試験	215.5	20.6
	解析	226.6	21.1
35 15.2	解析	209.9	20.9



これらのことから,両者の違いの原因は主に 定着体の性能に起因しており,両者の比は定着 効率と考えることができる。破壊確率50%およ び 0.135%における引張耐力(以下,それぞれ P50,P0.135と記す)と定着効率を表-5に示す が,破壊確率によらず定着効率はほぼ一定とな っている。以上より,本解析により引張耐力の 母集団が推定可能と考えられる。

表 - 5 引張耐力と定着効率(7 15.2)

破壊確率	引張耐フ	定着効率	
(%)	試験結果	解析結果	試験/解析
50	211.7	222.7	0.95
0.135	156.3	165.7	0.94

(4) 解析結果(7 15.2,35 15.2)

図-7 に示す解析結果によれば,システムを構 成する CFRP 本数が増加するにつれて,ばらつき が小さくなりながら,最頻値が減少していく。 システムを構成する CFRP 本数と P50, P0.135 の関係を示したのが図-8 である。これによれば, 35 15.2 の引張耐力の特性値は,破壊確率を 0.135%とした場合, CFRP 一本あたり 153kN と なり,ケーブルとしてはそれに本数(N=35)を乗 じて 5355kN となる。

4. 引張耐力に関するその他の検討

4.1 クリープ強度

土木学会規準の「連続繊維補強材のクリープ 破壊試験方法(案)(JSCE-E533-1995)」に準じて, 引張試験と同一ロットから供試体を数体抽出し て行った。試験結果を図-9に示す。

縦軸は,対応する各ロットごとに行われた



15.2 の引張耐力の平均値に対する持続荷重比 を示している。荷重比が0.9 では100時間まで クリープ破壊しないが,破壊した供試体の荷重 と経過時間の対数を直線回帰し,100 万時間の クリープ強度を荷重比で示すと0.85 となる。

4.2 CFRP の長さに関する検討

引張耐力に関する検討では,表-2の供試体 15.2や図-3に示すようにCFRPの試験部母材長 は1m としているが,図-1のような実構造物で はケーブルが長い。母材が長くなれば引張耐力 が小さくなるがその影響は最弱リンクモデルを 表現した直列モデルにより解析的に推定可能⁴⁾ である。すなわち表-2に示す 15.2,長さ1mの 供試体を110体直列配置したモデルを想定し, 表-4に示す 15.2の母数を用いて解析すれば, 母材長が引張耐力に及ぼす寸法効果の影響は 0.8となる。

4.曲げ疲労に関する検討

図-1の吊橋では,ハンガーケーブルの張力が ハンガークランプ(以下,単にクランプと称す) を介して主ケーブルへ伝達されため,繊維方向 の純引張力と,繊維直角方向にせん断または曲 げが活荷重によって繰り返し作用する。一般に CFRP は,鋼線と比較して異方性の高い材料であ り,せん断強度が低いため耐力低下が懸念され る。そこで図-1に示すクランプと主ケーブルの 接合部に着目し,主ケーブルの疲労特性を実験 的に確認する。

5.1 試験方法および供試体諸元

疲労試験の概念を図-10 に示す。供試体とな る CFRP ケーブルは 表-2 に示す 35 15.2 とし, CFRP ケーブルに死荷重を想定した張力を一旦 与え,供試体中央に取り付けられたクランプを 介して加振機で強制変位を繰返す。クランプの 詳細を図-11 に示すが ,クランプ部の CFRP の PE 被覆を剥がし、CFRP とクランプの隙間には定着 用膨張材を充填する。また、クランプ両側の内 面は CFRP の曲げ変形が容易となるように曲面 加工してある。変位条件は,図-1のクランプ部 に着目し,設計で得られた死荷重による主ケー ブルの折角を下限とし,活荷重によるそれを基 本に振幅がそのおおむね4倍,7倍となるよう に2ケースを表-6と図-12に示すように設定し た。試験は,供試体が異常な変形や破壊するか, または200万回に到達した時点で終了とする。 試験結果が後者の場合,クランプ部および直線 部から供試体を切断して取り出し,各 CFRP 一本 ごとの引張試験を行う。図-13 にクランプ部か らの供試体採取方法を示す。



\geq		_ 張力 P(kN)	外力 p(kN)	角度 (deg)	変位 (mm)
設計	最大 最小 振幅	1462 1138 324		2.528 2.449 0.079	229.6 222.4 7.2
載 荷 ケ	最大 最小 振幅	1238 1124 114	130 101 29	3.329 3.000 0.329	302.5 272.5 30.0
ス2	最大 最小 振幅	1502 1287 215	185 129 56	3.537 3.000 0.537	321.4 272.5 48.9

表 - 6 疲労試験条件



図 - 1 3 引張試験用供試体採取寸法(単位:mm)

5.2 試験結果

両ケースともに載荷中に異常がなく 200 万回 まで到達しため, CFRP を切断して取出し引張試 験を実施した。

残存引張耐力の確率分布関数を図-14 に,破 壊確率と引張耐力および引張剛性の平均値を表 -8 に,それぞれ 15.2 の直線部とクランプ部を 比較して示す。ケース1,2 の供試体はそれぞれ 異なったロッドから供試体が制作されているた め,残存引張耐力の分布は異なっているが,直 線部とクランプ部を比較した場合,いずれのケ ースも引張耐力や引張剛性に差はあまり見られ ない。したがって,クランプ部の曲げの影響に よる引張耐力の低下はないと考えられる。

6.まとめ

CFRP 35 15.2 の引張耐力の特性値は,母材長 を 1m とした場合 5355kN となる。これに定着効 率 0.95,ケーブル長 110m を想定した寸法効果 の影響 0.8,100 万年を考慮したクリープ強度の 影響 0.85 など各種低下要を独立とすれば,これ



図 - 14 ワイブル確率分布関数(疲労後の引張耐力)

表 - 8 疲労試験後の引張特性(kN)

供試体		試験	引張耐力 (kN)		引張剛性	
種類			体数	P ₅₀ P _{0.135}		
クラン	載荷	1	27	247.5	213.7	15816
プ部	ケース	2	30	264.7	217.3	15522
直線部	載荷	1	9	249.4	202.7	15854
	ケース	2	15	265.2	209.3	15582

らを乗じて引張耐力の特性値は 3450kN となる。 CFRP ケーブルの引張耐力は解析的に推定可 能である。

本研究で行った曲げ疲労条件では,CFRPケー ブルの引張特性の低下は見られない。

7.参考文献

1)武村浩志,大浦隆,大主宗弘,田辺忠顕:吊 り区間を含む PC 斜張橋「ハイブリッド斜張橋」 の検討,第 10 回プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム論文集,pp131-136, 2000.10

2)濱田譲,袴田文雄,井上晋,宮川豊章:連続
 繊維緊張材を用いた大容量マルチ定着システムの引張強度に関する確率論的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1,
 pp1185-1190,1996

3) 酒井博士,足立幸郎,真島光保,宮川豊章: 連続繊維緊張材を用いた大容量マルチ定着シス テムの引張強度特性に関する実験的検討,コン クリート工学年次論文報告集,Vol.18,No.1, pp1191-1196,1996

4) 酒井博士,濱田譲,林田充弘,服部篤史,宮 川豊章:連続繊維緊張材の引張特性に与える寸 法効果の影響,土木学会論文集,No641/V-46, pp219-230,2000.2