

報告

[1176] コンクリート補強用炭素繊維複合材ケーブルの基本的特性

正会員○木村 浩 (東京製綱 研究所)

白鳥 信令 (東京製綱 研究所)

高木 宏 (東京製綱 研究所)

1. はじめに

炭素繊維やアラミド繊維、ガラス繊維等の高強度、高弾性繊維を樹脂と組合せて成形し、コンクリート構造物の補強材に応用していく研究が各方面で進められている。PC鋼より線等のスチール製補強材と比較した場合、これら新素材製補強材の特長として軽量性、耐食性、非磁性等が挙げられるが、成形の自由度が大きいこともその一つに加えられよう。新素材製補強材を構成する素材、成形方法は多様であり、それに応じて機械的性質や断面形状も異なる。換言すれば、新素材製補強材は使用目的に応じた性状を付与するために素材の選定及び形状の調整をすることができる材料である。

筆者らの開発した炭素繊維複合材ケーブルはより線状の形態をしているのが特徴であり、ロープの製造経験に基づいた製造設計がなされている。本報では炭素繊維複合材ケーブルの諸特性の試験結果を報告し、PC鋼より線と比較しながらコンクリート補強材としての基本性状をあきらかにすることを目的とした。以下では本ケーブルを便宜上CFCC(Carbon Fiber Composite Cable)と略称する。

2. 原材料および製造方法

PAN系炭素繊維の高強度タイプを強化繊維とし、熱硬化性樹脂を含浸したものを原材料としている。以下これをプリプレグと呼ぶ。強化繊維の特性を発揮するためには強化繊維と含浸樹脂とのぬれ性が良好であることや成形体に欠陥のないことが重要である。欠陥のない成形体を得るために原材料の性状と加工工程とのマッチングが必要であり、その観点から樹脂種類、樹脂含有率、粘度等の原材料の調整がされている。表1に炭素繊維と樹脂の材料物性を示す。

表1 原材料の特性

原材料	種類	比重	直径 μ	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸び (%)
炭素繊維	PAN系高強度	1.77	7	380	24,000	1.6
樹脂	変性エポキシ	1.22	—	9.0	360	4.2

製造方法はロープの製造方法を基礎にして開発したものであり、大きくわけて4つの工程から成る。まず、プリプレグを所定本数より合わせ、素線を作る。次に、この素線にポリエステル繊維を巻き付けることにより被覆を形成する。第3の工程ではこれらの素線を芯に一本、側に6本の構成でより合せストランド化する。最終工程で熱処理し、マトリックス樹脂を熱硬化させる。こうして7本の素線構成から成るストランド状のCFCC (以下7本の素線で構成されていることの意味でCFCC 1×7と呼ぶ。1×19、1×37も同様) が得られる。ストランドのより角度はPC鋼より線とほぼ同等である。本方法によれば、プリプレグのより合わせ本数をかえることで素線径を調整でき、したがって任意外径のCFCCを得ることができる。また、1×7を芯にしてさらに12本、18本というように素線のより合せを重ねていくことで、1×19、1×37など多層構造で太径のCFCCを

得ることができる。

ここでは外径12.5φのCFCC 1×7（以下CFCC 1×7 12.5φと呼ぶ）を対象に述べる。比較材にはこれに近い構造、外径のPC鋼より線としてSWPR 7A（以下PC 1×7 12.4φとも呼ぶ）を用いた。

3. CFCCの構造

CFCCの断面構造を図1に示す。図1に示すように各素線は炭素繊維と樹脂からなるコンポジット部とその周辺を取り巻くポリエステル被覆層から成っており、スキン（被覆層）－コア（コンポジット部）ともいえる構造である。スキンであるポリエステルはコアに密接して巻きつけられており、かつ介在する樹脂によって相互が接着されているためスキンとコアは一体となっている。CFCCはより合わせ構造であり炭素繊維の方向はケーブルの長手方向に対し若干の角度を有しているものの、近似すれば、強化繊維の方向が長手方向と一致した一方向複合材に近い。したがってコアは外傷に敏感である。スキンの存在はコアのこすれやひきかき等による機械的損傷の防止に有効であり、かつ紫外線や瞬間的な高熱に対してもコアをまもる効果も期待できる。また、後述するように、CFCCの高いコンクリート付着強度もスキンの存在が関与しているものと思われる。

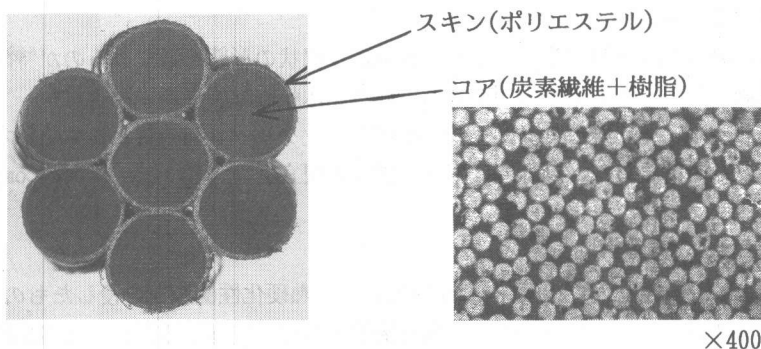


図1 CFCC 1×7 12.5φ断面

4. CFCCの特性

(1) 試験方法

CFCCの端末定着は試験片の端部を鋼製スリーブに挿入し、エポキシ樹脂を充填、硬化する方法で行った。引張試験における試験片の全長は1.6mとした。

引張試験には50t油圧引張試験機を使用し、伸びの測定にはダイヤルゲージ式伸び計（ゲージ長500mm）を使用した。CFCCの弾性係数は荷重－伸び曲線において切断荷重の20～60%の範囲の勾配から求めた。CFCCの有効断面積は被覆を除外したコンポジット面積とし、引張強度および弾性係数は有効断面積で算出した。

線膨張係数には熱機械分析装置を使用し、20～200℃の範囲で求めた。

曲げ剛性は二点支持中央載荷試験において荷重とたわみを測定し曲げの式からEIを算出した。

コンクリート付着強度は試験片の一端を断面10×10cm、長さ15cmのコンクリートに埋め込み、その引抜き力を埋め込み表面積で除して得た。

レラクセーションには自動平衡型20tレラクセーション試験機を使用した。試験荷重は公称切断荷重（CFCCは14.5tf、PC鋼より線は16.3tf）に対する50、65、80%とした。

引張疲労には油圧サーボ式30t疲労試験機を使用し、周波数3～4Hzの正弦波応力、200万回繰り返し条件での切断の有無で引張疲労強度を評価した。

(2) 試験結果および考察

表2にCFCCの諸特性をPC鋼より線と比較して示す。CFCCの切断荷重と弾性係数は23ロットの測定値を集積し整理した結果であり、それぞれのヒストグラムを図2に示す。

CFCCの切断荷重および弾性係数のヒストグラムはほぼ正規分布に近い分布をしている。それぞれの変動率は3.7%、1.9%でありこれらはCFCCの原料の炭素繊維の変動率(引張強度が5%以下、弾性係数が2%以下) [1]と良い対応を示した。したがってCFCCの切断荷重および弾性係数のばらつきは原料繊維の特性のばらつきを主に反映していると考えられる。

CFCCの切断荷重および弾性係数はPC鋼より線対比でそれぞれ約90%、70%であり両者の特性は近い。またCFCCの引張強度はPC鋼より線を若干上回っている。CFCCの引張強度の変動率はPC鋼より線の約6倍、弾性係数では約2倍であり比較的大きい。

CFCCの単位重量はPC鋼より線の約1/5、線膨張係数は1/20、曲げ剛性は約1/4であった。

CFCCの曲げ剛性が小さい理由は、CFCCの素線自体の曲げ剛性が小さいことに加えてPC鋼より線と同様により線の構造をしていることによる。従ってCFCCはコイル巻きが容易であり、ある程度曲げた状態での使用も可能と考えられる。

表2 CFCCおよびPC鋼より線の特性(1)

特 性	CFCC 1×7 12.5φ			PC 1×7 12.4φ		
	平均	変動率 (%)	n 数	平均	変動率 (%)	n 数
有効断面積 (mm ²)	76.0	—	—	93.0	—	—
単位重量 (g/m)	153	2.4	90	729	—	—
切断荷重 (kgf)	16,400	3.7	127	18,170	0.6	15
引張強度 (kgf/mm ²)	216	3.7	127	195	0.6	15
弾性係数 (kgf/mm ²)	14,000	1.9	90	20,140	0.8	5
伸び (%)	1.6	3.5	81	6.4	8.2	15
線膨張係数 (/°C)	0.6×10^{-6}	—	—	12×10^{-6}	—	—
曲げ剛性EI (kgf・cm ²)	5,800	—	—	21,000	—	—

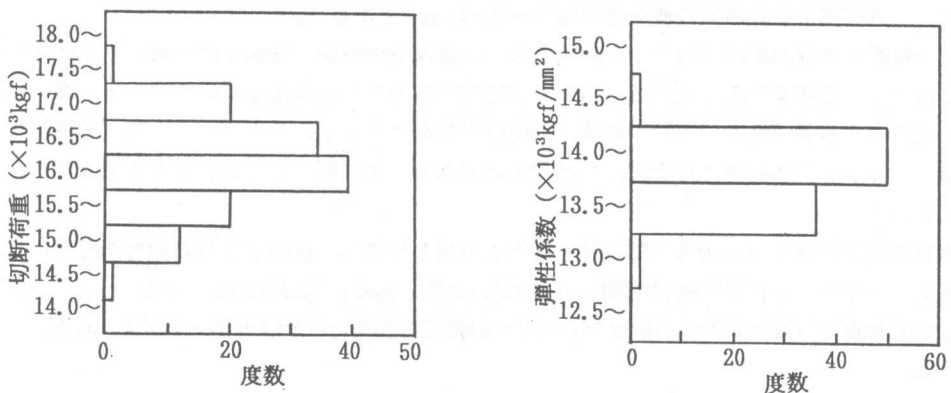


図2 CFCC 1×7 12.5φ 切断荷重および弾性係数の度数分布

コンクリート付着、レラクセーション、引張疲労の各試験結果を表3に示す。

表3 CFCCおよびPC鋼より線の特性(2)

特 性	測 定 条 件	CFCC 1×7 12.5φ	PC 1×7 12.4φ	
コンクリート付着強度	水セメント比 40% 細骨材率 100% 圧縮強度 486kgf/cm ² 埋め込み寸法 10×10×φ15cm	73.7kgf/cm ²	29.1kgf/cm ²	
レラクセーション	22℃ 100h	0.50Pu	0.54%	1.28%
		0.65Pu	0.93%	1.72%
		0.80Pu	1.18%	7.47%
	22℃ → 80℃ → 22℃ 2h → 10h → 3h 35h 計50h	0.50Pu	4.09%	4.23%
		0.65Pu	3.50%	8.81%
		0.80Pu	3.74%	15.08%
引張疲労強度	試験応力域 平均応力50~150kgf/mm ² 200万回繰り返し	30kgf/mm ²	10~15kgf/mm ² [2]	

CFCCのコンクリート付着強度はPC鋼より線の約2.5倍を示した。もともとCFCCの各素線の表面には、ポエステルの巻き付け被覆から生ずる凹凸の条痕が長手方向に対し直角の方向についている。コンクリートを割って観察したところ図3に示すように、この凹凸形状がコンクリートに写っているのが観察された。これがアンカーとなってコンクリート付着強度を高めていると考えられる。

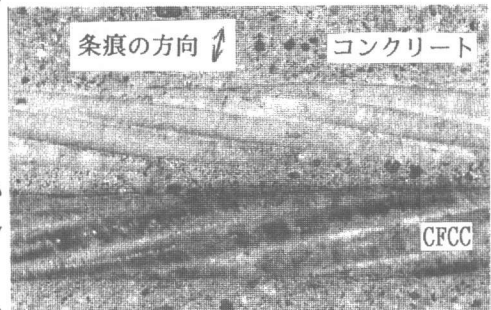


図3 CFCCを埋め込んだ後、へき開したコンクリート面およびCFCC

CFCCのレラクセーションはいずれの条件においてもPC鋼より線より小さかった。また、試験荷重や温度の影響はCFCCにおいては小さく、PC鋼より線においては大きかった。

平均応力50~150kgf/mm²の範囲でのCFCCの引張疲労強度(許容応力振幅)は約30kgf/mm²であった。一方PC鋼より線の引張疲労強度は10~15kgf/mm²である[2]。

CFCCの荷重-伸び曲線は切断まで直線的であり引張荷重の負荷、除荷を繰り返してもヒステリシスを示さず、切断までの全荷重域において弾性的であることを確認している。一方PC鋼より線は降伏点を有する弾塑性体であり、降伏点以降は明白なヒステリシスを示す。CFCCの良好なレラクセーションや引張疲労性はCFCCが全域弾性体であることに関係していると考えられる。

5. まとめ

炭素繊維複合材ケーブルの基本的特性をPC鋼より線と比較し、次のような特徴を明らかにした。
①CFCCのコンクリート付着強度はPC鋼より線の約2.5倍である。
②CFCCのレラクセーションは22℃においてPC鋼より線の約1/2である。
③CFCCの引張疲労強度はPC鋼より線の約2倍である。

参考文献

- 1)小川 博靖:技術予測シリーズ 第9巻 新素材技術 日本ビジネスレポート 1990 PP.165-176
- 2)関、山元、新保、豊川:PC鋼より線の引張疲労強度 材料 Vol.18, No.190 1969 PP.12-16