

(112) 偏向部を有する連続繊維マルチ緊張材の引張強度特性に関する検討

(株) 国際建設技術研究所 技術部 正会員 ○金海 鉦
 極東工業(株) 技術本部 正会員 中田 順憲
 ドーピー建設工業(株) 技術センター 正会員 濱田 謙
 (株) ピー・エス 土木技術部 正会員 酒井 博士

1. はじめに

PC桁の外ケーブル工法による補強において、連続繊維緊張材が実用されつつあるが、容量100tfを超えるようなマルチ緊張材システムについては、適用実績は無く、開発段階にあると考えられる。

本研究では、大容量マルチ緊張材システムの外ケーブル工法への適用に当たり、同工法における検討項目の一つである偏向部の曲げ上げが、マルチ緊張材の引張強度特性に与える影響を検討する目的で実施したものである。

今回対象とした連続繊維は炭素系とアラミド系の2種類で、130tfの保証荷重を有する長さ3mの緊張材である。これを偏向角10°の状態では配置した場合の引張強度特性を引張試験により確認するとともにモンテカルロ法¹⁾によるシミュレーション解析を実施し、試験結果と比較検討を行い、さらに本マルチ緊張材システムの曲げ上げに伴う強度低下率も試算した。

2. 緊張材の引張試験

(1) 試験体

実験に使用した連続繊維マルチ緊張材は、既往の研究²⁾において130tf以上の保証荷重を想定した定着体の仕様やマルチ構成に関する実験的検討がなされており、直線配置状態での引張強度や緊張材のひずみ分布が確認されているものである。試験体はCFRP、AFRPともに充填式定着体を用いており、緊張材試験部の長さを3.0mとして製作した。試験体の諸元を表-1に示す。

表-1 連続繊維マルチ緊張材の諸元

種別	緊張材					マルチ定着体			保証荷重
	繊維材	結合材	径	形状	本数	長さ	内径	充填材	
CFRP	PAN系	Eポキシ系	12.5mm	より線状	11本	500mm	68mm	Eポキシ系樹脂	136tf
AFRP	ハラ系	Eポキシ系	14.7mm	組み紐状	7本	600mm	60mm	セメント系膨張材	143tf

(2) 試験装置

図-1は載荷装置の外観平面形状を示したものである。試験時の載荷は鋼製フレームを反力台として使用し、静的引張試験、動的疲労試験ともに200tfサーボジャッキを用いて行った。偏向装置の構造は実橋梁への適用を前提として検討を行い、マルチ緊張材を束ねた状態で曲げ上げる集中型構造を採用するとともに、10°の偏向角度を設定した。曲げ上

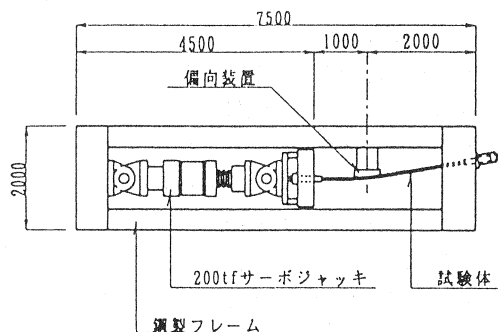


図-1 載荷装置の外観形状

げ半径は、偏向部の湾曲がマルチを構成する各単線の引張強度におよぼす影響を極力少なくするように配慮し、単線の曲げ引張強度に関する既往の研究³⁾を参考にして3.0mとした。偏向装置と緊張材の接触部は、摩擦の低減と腹圧力の緩和を期待すること、疲労試験時の緊張材接触面の磨耗、劣化を防ぐことを目的として保護管および二重の滑動材を装着したすべり構造とした。偏向装置の構造および使用材料を図-2に示す。

(3) 試験方法

静的引張試験はCFRP、AFRP各3体の試験体について行った。引張試験においては各単線同士のねじれ・交差が生じていないことを確認しながら徐々に荷重を増加し、破断までの緊張側および固定側の荷重と各単線のひずみを測定した。単線のひずみは図-3に示す各測点にひずみゲージを貼付し計測を行った。

一方、疲労試験はCFRP、AFRP各1体の試験体について行った。載荷条件として下限荷重は表-1に示した保証荷重の60%、荷重振幅は外ケーブル工法を想定した荷重変動の試算等に基づいて5.3%とし、3~5Hzの速度で変位制御による300万回の繰り返し載荷を行った。疲労試験時には偏向部に発生する摩擦熱の影響に配慮して、熱電対により偏向部での緊張材および滑動材の温度を管理した。また、繰り返し載荷終了後に静的引張試験を実施し、残存強度を確認した。

3. 試験結果

(1) 引張強度と破断状況

表-2は、曲げ上げ配置時のマルチ緊張材の静的引張強度と直線配置時の静的引張強度を比較したものである。マルチ緊張材に作用する引張力は偏向部の摩擦により緊張側と固定側とで差異が生じるため、ここでは破断時の緊張側引張力をマルチ緊張材の破断荷重として定義した。同表に示したように曲げ上げ時の引張強度は、直線配置時に比べてその平均値においてCFRPで8%、AFRPで9%減少しており、明らかにに曲げ上げに伴う引張強度の低

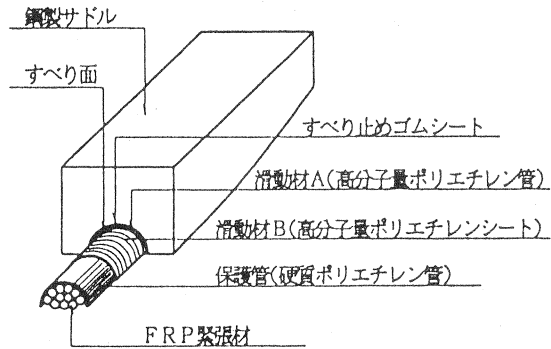


図-2 偏向装置の構造

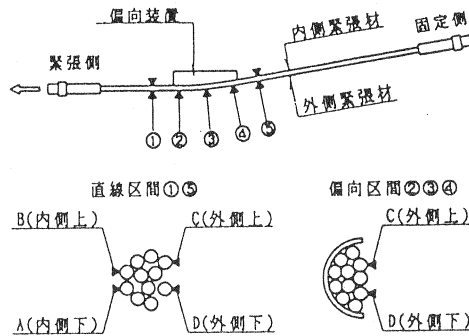


図-3 ひずみの計測箇所

表-2 緊張材の引張強度

		単位:tf		
状態	試験体 NO.	CFRP	AFRP	
直線配置時	静的引張試験	NO. 1	179	160
		NO. 2	170	166
		NO. 3	165	169
		NO. 4	180	178
		NO. 5	169	175
		平均値 A	173	170
曲げ上げ時	静的引張試験	NO. 1	151	154
		NO. 2	164	152
		NO. 3	163	155
		平均値 B	159	154
		疲労残存強度	160	160
荷重比率 B/A		0.92	0.91	

下が見られる。一方、疲労試験終了後の残存引張強度は、CFRP、AFRPともに静的引張強度とほぼ同等であった。このことから、マルチ緊張材の引張強度特性は、用いた偏向装置により曲げ上げ配置された場合でも繰り返し載荷による疲労の影響はほとんど受けないことが明らかとなった。なお、疲労試験後の目視調査では緊張材の偏向部での磨耗等は認められなかった。また、疲労試験時における緊張材偏向部の表面温度は、試験開始時で20~25℃、最高時で40~50℃であり、偏向部の摩擦による温度上昇は緊張材の引張強度特性に対し特に影響を与えていない。これらのことから、偏向装置のすべり構造が有効に機能していたことが確認された。

写真-1は静的引張試験における緊張材の破断状況の一例を示したものである。CFRPはマルチを構成する単線のうち1本の単線が破断した後他の単線が連鎖的に破断し緊張材全体の破壊に至っているのに対し、AFRPでは1本の単線のみが破断している。緊張材はCFRPおよびAFRPともに直線区間で破断しており、偏向部での破断や定着体からの抜け出しは生じていない。また、AFRPはいずれの試験体も湾曲の外側に位置する単線が定着体口元において破断しており、このことは緊張材の曲げ上げに伴う局所的な応力変化が偏向部のみならず定着体近傍にまで影響を与えていた可能性を示唆している。

なお、偏向部の摩擦による緊張力の損失は、破断直前の載荷状態においてCFRPで6~8%、AFRPで4~7%であった。

(2) 緊張材のひずみ分布

図-4は緊張側測点①における荷重と各単線のひずみの関係を示したものである。荷重~ひずみ曲線は若干下に凸の傾向が現れているものの、ほぼ直線形状を保ったまま破断点まで達している。また、マルチを構成する各単線間のひずみのばらつきは初期載荷時から荷重が増加するにしたがい漸増しており、この傾向はCFRPの方がAFRPより顕著に現れている。

3. モンテカルロ法による破壊荷重の計算

構造物の破壊荷重や破壊確率が理論的に算出できない場合、一般にはシュミレーション法によりそれらを算出することができる。シュミレーション法は、規定した確率分布関数を満足する確率変数をコンピューターを用いて無数に抽出し、たまたま抽出された一組の確率変数より構造物の破壊荷重などを算出するというような試行を必要な数だけ繰り返す、数値実験手法の

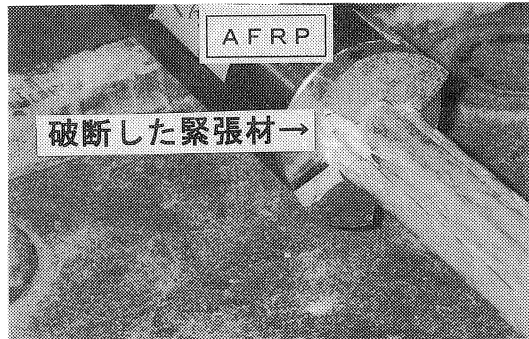
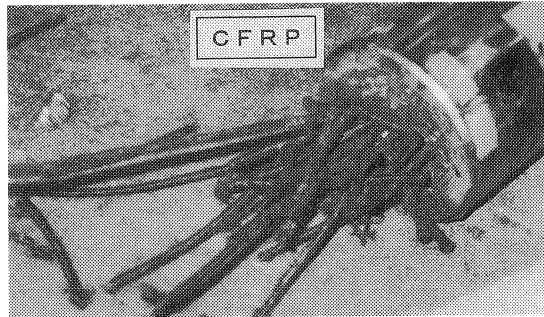


写真-1 緊張材の破断状況

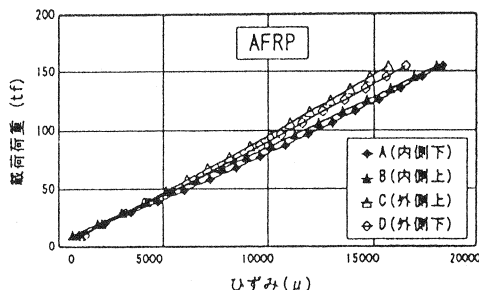
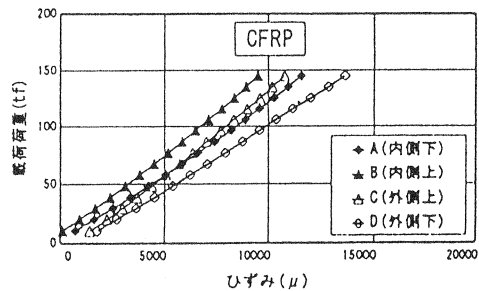


図-4 荷重とひずみの関係

一つである。モンテカルロ法とは、乱数を取り扱う手法の総称である。信頼性解析におけるシュミレーション法は、実際の解析において確率変数の抽出に乱数を用いることから、一般にはモンテカルロ法(モンテカルロ・シュミレーション)と呼ばれる。ここでは、曲げ上げ角度をパラメーターとしてモンテカルロ法によりマルチ緊張材の破壊荷重を算出し、マルチ緊張材の強度に及ぼす曲げ上げ角度の影響について検討を行った。

(1) 解析方法

1) 解析要因

マルチ緊張材の曲げ上げに伴う強度低下は、以下の要因により生じると考えられる。

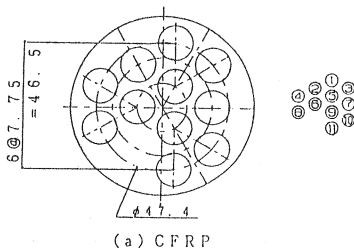
- ① 曲げ上げに伴う単線自身の強度低下
- ② 偏向部での摩擦に起因する強度低下
- ③ 曲率差によって生じる単線の応力差に起因する強度低下

これらに対して予備検討を行った結果、①については、曲げ上げた単線の既存の引張試験データより半径を3000mmとすれば単線の強度低下は生じないと判断した。また、②については、摩擦の低減を図るために偏向装置と緊張材の間にすべり構造を設けることとし、本検討で提案したすべり構造が有効に機能することを予備試験にて確認した。そこでここでは、③曲率差によって生じる単線の応力差に起因する強度低下に着目し、曲げ上げたマルチ緊張材の破壊荷重をモンテカルロ法にて算出することにした。

2) 曲げ上げたマルチ緊張材のモデル化

図-5に各システムの定着部における単線配置状況を示す。システムが曲げ上げて配置される場合、各単線にはそれぞれの中心間距離と同量の曲率差が生じることとなる。ここでは、曲率差により各単線の定着体間距離が変化することに着目し、定着体の傾きを変化させて曲率差の影響を考慮した。

図-6に解析モデル図を示す。実供試体の曲げ上げ角度は 10° 、半径は3000mmである。また、図の中には各システムの曲率差と定着体間隔差の関係を示す。



緊張材 番号	CFRP		AFRP	
	曲率差	定着体間隔	曲率差	定着体間隔
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	7.75	1.35	10.50	1.83
3	7.75	1.35	10.50	1.83
4	15.50	2.71	21.00	3.67
5	15.50	2.71	21.00	3.67
6	23.25	4.06	31.50	5.50
7	23.25	4.06	31.50	5.50
8	31.00	5.41		
9	31.00	5.41		
10	38.75	6.76		
11	46.50	8.12		

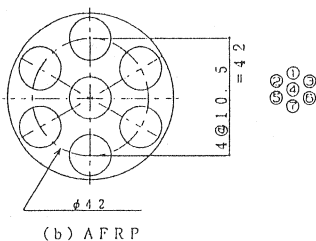


図-5 単線の配置状態

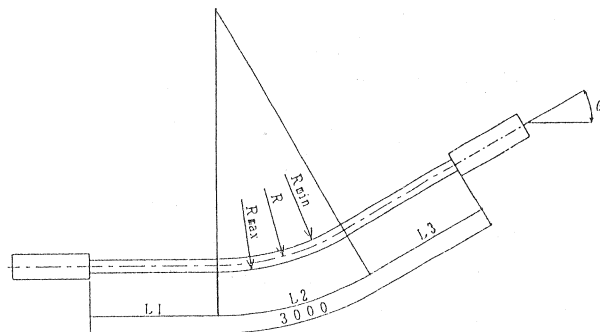


図-6 解析モデル図

3) 解析条件⁴⁾

曲げ上げ角度を $n=0\sim 30^\circ$ とした場合の供試体の破壊荷重をそれぞれ一万個算出した。単線の荷重～ひずみ関係は、破壊荷重と破壊ひずみの交点と原点とを結ぶ直線とし、荷重とひずみの相関により引張剛性が変化するようモデル化した。また、単線長さは $L=3000\text{mm}$ 、単線長さの誤差は生じていないものとした。

(2) 解析結果

図-7に、破壊荷重の最小値、平均値および最大値と曲げ上げ角度の関係を示す。CFRP、AFRPとも、各統計値は曲げ上げ角度の増加とともに減少していくが、最小値や平均値の減少量は、CFRPよりAFRPの方が小さい。これは、引張剛性の小さいAFRPの方が、定着体間距離の差によって生じる張力差が小さくなるためであると思われる。

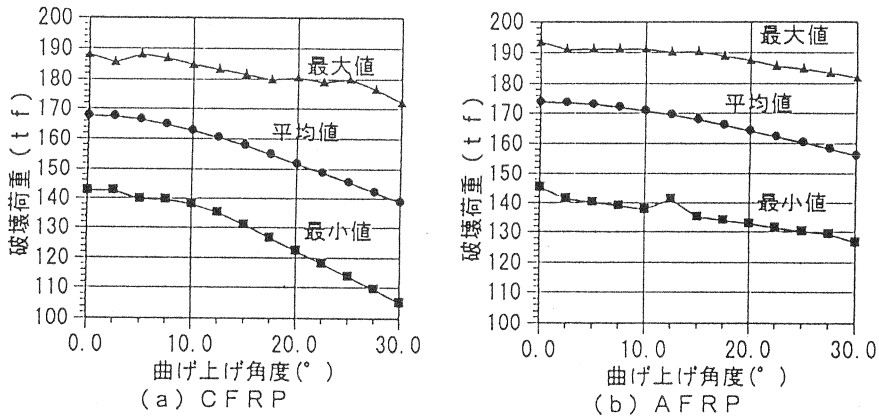


図-7 破壊荷重の最小値、平均値および最大値と曲げ角度の関係

4. 解析結果と試験結果の比較検討

平均破壊荷重や標準偏差について、解析結果と試験結果を比較した。比較結果を表-3に示す。CFRPの解析結果と試験結果が比較的一致しているのに対し、AFRPは一致しなかった。この理由の一つとして、まず曲げ上げ試験に用いた供試体数が $n=3$ 体と比較的少なかったことが挙げられる。また、破断時のひずみのばらつきにおいて考察されているように、本解析で考慮しなかった強度低下要因、例えば定着体口元における角折れなどにより、AFRPの単線の強度が低下したとも考えられる。

なお、表-3に示す保証荷重はそれぞれ130tfを上回っているもので、各緊張材とも保証荷重に対しては安全であると思われる。

(3) 曲げ上げに伴う強度低下率の計算

表-3 解析結果と試験結果の比較表

(I)式を用いて、曲げ上げに伴う強度低下率を算出した結果を表-4に示す。

$$\beta = R_{m.b} / R_{m.s} \quad (I)$$

ここに、

$R_{m.b}$: 曲げ上げたマ材緊張材の保証荷重

$R_{m.s}$: 直線状態のマ材緊張材の保証荷重

β : 曲げ上げに伴う強度低下率

	CFRP		AFRP	
	試験結果	解析結果	試験結果	解析結果
単線本数(本)	11		7	
平均破壊荷重	159.3	162.8	153.7	170.8
標準偏差	7.234	7.201	1.528	7.377
保証荷重	137.6	141.2	131.6 ^注	148.7

注)

解析結果の標準偏差を使用して保証荷重を算出した。

表-4 曲げ上げによる強度低下率

	CFRP		AFRP	
	試験結果	解析結果	試験結果	解析結果
単線本数(n)	11		7	
Rm. s	152.9	148.5	148.3	153.7
Rm. b	137.6	141.2	131.6	148.7
β	0.900	0.951	0.887	0.967

本検討では、メーカーに対するヒヤリング調査より曲げ上げによる強度低下率を0.90と仮定してシステムの必要容量を試算したが、CFRPは試験値、実験値ともこれを上回っている。これに対し、AFRPでは解析値が0.90を上回っているが、試験値はこれを下回っている。また、試験値と解析値には大きな差があるので、AFRPの曲げ上げに伴う強度低下率を設定する際には注意する必要がある。

4. まとめ

本検討では、偏向装置を用いて130tf級のFRPマルチ緊張材システムの曲げ上げに伴う強度特性を実験的に確認するとともに曲げ上げ角度をパラメーターとしてモンテカルロ法によりマルチ緊張材の破壊荷重を算出し、マルチ緊張材の強度に及ぼす曲げ上げ角度の影響について検討を行った。また、直線状態と曲げ上げた状態の保証荷重をそれぞれ比較し、曲げ上げに伴う強度低下率を試算した。以下に結論を示す。

- ① 角度10°・半径3.0mで曲げ上げられたマルチ緊張材の破断荷重は、直線配置時に比べ、CFRPで8%、AFRPで9%減少することが判明した。
- ② CFRP、AFRPともに疲労試験後の残存強度は静的引張強度と同等であり、引張強度特性は偏向状態での繰り返し載荷の影響を受けないこと、偏向部の耐磨耗性に問題はないことが確認された。
- ③ 平均破壊荷重や標準偏差について、解析結果と試験結果を比較した結果、CFRPの解析結果と試験結果が比較的一致しているのに対し、AFRPは一致しなかった。この理由の一つとして、本解析で考慮しなかった強度低下要因、例えば定着体口元における角折れなどにより、AFRPの単線の強度が低下したことが挙げられる。
- ④ 本検討では、曲げ上げによる強度低下率を0.90と仮定したが、AFRPの試験値はこれを下回っている。また、試験値と解析値には大きな差があるので、AFRPの曲げ上げに伴う強度低下率を設定する際には注意する必要がある。
- ⑤ 本検討で試算した保証荷重はそれぞれ130tfを上回っているため、各緊張材とも保証荷重に対しては安全であると思われる。

なお、本研究は、阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」の研究業務の一環として行われたものであり、同委員会各位には多大な御指導をいただいた。また、本研究を遂行するにあたり、東京製綱(株)ならびに神鋼鋼線工業(株)には多大な協力をいただいた。ここに記して謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、星谷 勝・石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986
- 2) PC構造物の補修・補強法に関する検討業務報告書，阪神高速道路公団，1995.3
- 3) 榎本 剛他：CFRPストラット[®]の曲げ引張耐力に関する実験的研究，土木学会第46回年次学術講演概要集第5部，pp.232~233，1991
- 4) 濱田・袴田・井上・宮川：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的考察，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol.17, No.1, pp.1185~1190，1996