

論文

[1138] FRP緊張材の引張試験方法に関する実験的研究

正会員 〇出光 隆 (九州工業大学)

正会員 山崎竹博 (九州工業大学)

正会員 原田哲夫 (長崎大学)

正会員 吉岡民夫 (和研建設)

1. まえがき

四方を海に囲まれたわが国のコンクリート構造物は、環境次第ではコンクリート中に塩分が浸透し、鋼材腐食が問題となることが多い。そのため、鋼材に代わる補強材として炭素繊維、アラミド繊維などハイテク繊維の利用が図られている。筆者らは、FRPロッドの、PC用緊張材としての利用に焦点を当てて研究を進めているが、現時点で、実用上、最も大きな問題点はロッドの定着方法にあると考えられる。PC鋼材と同じ方法では定着部で破断する可能性が高い。そこで、筆者らはFRP緊張材を挿入した鋼管中に定着用膨張剤を注入し、その膨張圧で緊張材を定着する方法を開発した。膨張圧は液圧的に作用するから応力集中が少なく、簡単な作業によりソフトタッチで確実な定着が可能である。その上、材料費が極めて安価である。以下、同定着方法を用いて実施した炭素繊維およびアラミド繊維FRPのPC緊張材としての引張試験方法とその結果について述べる。また、プレテンションPCはり中でのFRP緊張材の疲労強度についても言及する。

供試体 I



炭素繊維FRP 7本より線
φ 12.5 mm

供試体 II



アラミド繊維FRPロッド (組紐状)
φ 12.0 mm

写真-1 FRP緊張材

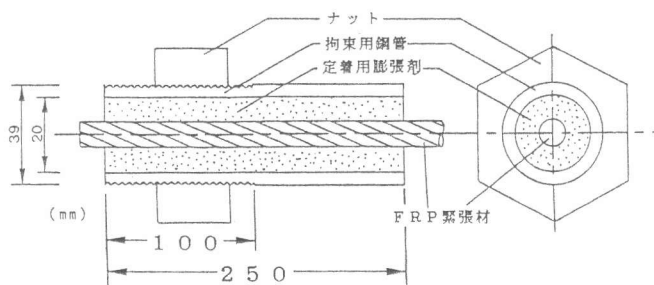


図-1 FRP緊張材定着具

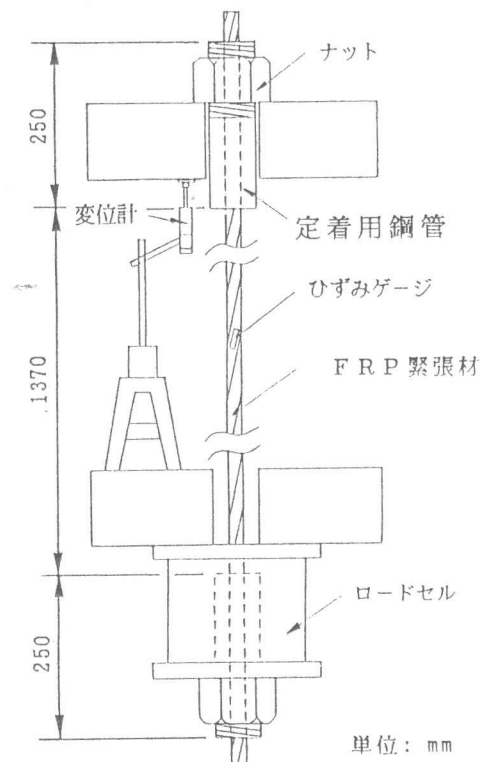


図-2 引張試験装置

2. 供試体および引張試験方法

現在、試供品程度のものを含め数十種のFRPロッドおよびより線が製作されているが、それらの中から実際に工場で生産され、PC緊張材に適していると考えられる2社の製品を選び、引張試験を実施した。写真-1にそれらの製品を示す。供試体Iは炭素繊維FRPの7本より線φ12.5mm、供試体IIは組紐状のアラミド繊維ロッドφ12.0mmである。供試体の長さは200cmとした。サンプリング方法は、供試体Iの場合は工場で600mの長さの製品が1ロットとして連続生産されるから、その中から5本ずつ、10ロットから計50本を採取した。供試体IIの場合は、バッチ製法で5mものが同時に10本製作されるから、9バッチから計45本それぞれ採取した。図-1に定着具の詳細を、図-2に引張試験の概略をそれぞれ示す。図-1の定着具はφ12mmおよびφ12.5mm用であり、拘束用鋼管の寸法は実験的に定めたものであるが〔1〕〔4〕、FRP緊張材をプレテン部材に用いた場合の伝達長が20φ程度であることも考慮して250mmとしている。载荷は鋼管の外側にネジを切り、ナットを介して引張力を作用させる方法を行った。ナットはできるだけ緊張材の応力が小さくなる自由端近くにセットすることとした。

引張試験の手順は次の通りである。

- ① 供試体両端に定着用鋼管を定着する。鋼管の中心に供試体をセットして、定着用膨張材グラウトを隙間に注ぎ込む。作業は1グループ5本分を同時に行う。
- ② 供試体中央部の素線軸方向にストレインゲージを3枚貼付する。
- ③ 膨張圧が500 kgf/cm²に達してから、引張試験機にセットする。膨張圧は1グループにつき1本の鋼管にゲージを貼付して測定した。
- ④ 伸び測定用の変位計をセットする。

表-1 引張試験結果
(炭素繊維FRPより線)

グループ	破断荷重 (tf)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸び率 (%)
A	16.00	14,780	1.52
	15.70	14,070	1.57
	16.40	14,030	1.64
	16.50	14,308	1.60
	16.60	13,678	1.70
B	15.50	13,139	1.66
	15.25	16,403	1.48
	16.10	14,090	1.74
	15.50	13,717	1.59
	15.90	13,318	1.68
C	*14.25	13,735	1.46
	*14.00	14,570	1.35
	*14.00	13,046	1.51
	*14.90	12,784	1.64
	*12.30	13,013	1.33
D	*14.08	11,744	1.63
	15.75	13,227	1.62
	15.95	13,715	1.58
	*14.10	11,879	1.72
	*13.12	11,561	1.54
E	*14.20	14,070	1.42
	15.00	13,687	1.54
	15.00	14,115	1.50
	*14.00	14,437	1.36
	15.60	15,125	1.45
F	15.28	12,761	1.63
	*15.00	12,899	1.58
	*14.25	11,835	1.64
	*14.62	12,277	1.62
	*13.50	13,702	1.34
G	15.50	13,568	1.56
	*14.85	12,259	1.65
	*13.93	11,836	1.60
	*14.53	14,541	1.36
	15.23	13,171	1.58
H	15.57	14,398	1.47
	*12.20	14,154	1.17
	15.43	13,268	1.58
	16.00	15,589	1.40
	*14.57	11,827	1.68
I	15.50	11,351	1.86
	15.28	10,896	1.91
	16.30	13,970	1.59
	*13.57	10,377	1.78
	*12.58	10,477	1.64
J	*12.33	11,116	1.51
	*13.65	10,896	1.71
	15.72	12,527	1.71
	*13.90	11,715	1.62
	15.90	13,970	1.55
平均値	(14.82) 15.71	(13,152) 13,730	(1.57) 1.60
標準偏差	(1.14) 0.44	(1,343) 1,139	(0.14) 0.12

() 全データ

*: 引抜け時の荷重

⑤破壊時に炭素繊維の微細な破片が飛散するため、覆いを設けて引張荷重を載荷する。

3. 引張試験結果 および考察

試験結果を表-1および2に示す。供試体Iの破壊形式は全てより線の破断であったが、試験値にはかなりのばらつきが見られた。メーカーの保証破断荷重14.5tfは試験値51個の平均値から3σを差し引いて求めた値であるが、同じ方法で表-1の値から保証破断荷重を求めてみると11.4tfとなり、両者は同一母集団から得られた値とは見なし得ない。そこで、その差の原因となる試験方法の違いを調べてみたところ、本試験ではケーブルをそのまま定着用膨張剤で掘んで定着しているのに対し、メーカーの試験では、7本の素線をばらばらにして鋼管に挿入し、樹脂で固めて定着していることが分かった。そこで、改めて定着部に注目してストランドの破断状況を調べてみたところ、以下のことが明らかとなった。何れの供試体とも破壊は瞬時に生じ、ストランドは数箇所破断してバラバラの状態となっているが、よく観察してみると、破断面にファイバーがヒゲ状に残っている場合とせん断されたように短く切れている場合とが見られた。ヒゲが残っている場合の破断荷重は何れも15tf以上の値であった。それに対し、数箇所生じた破断面がすべてせん断破断と見なされるもの、7本より線の中央1本のみがせん断破断して他の6本は破断していないものなどがあり、それらはほとんど15tf以下

の破断荷重であった。破断面に残っているやや長いヒゲ状の炭素繊維は、その箇所でCFRPが引張破断したことを示すものであり、せん断による破断面は引張破断の反動で大きな軸圧縮力が衝撃的に作用し、破壊した跡と考えられる。したがって、一供試体に生じた破断面がすべてせん断によるものと見なされる場合は、一方の定着部で突然すべりが生じ、その反動で他方の定着部でせん断破断が生じたものと推測される。事実、改めて定着

表-2 引張試験結果
(アラミド繊維FRPロッド)

グループ	破断荷重 (tf)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸び率 (%)
A	14.17	7,115	2.62
	14.85	7,603	2.57
	14.42	8,284	2.29
	14.38	6,938	2.73
	13.97	6,768	2.72
B	14.97	8,288	1.81
	15.20	7,023	2.16
	15.68	7,400	2.12
	15.27	7,303	2.09
	14.28	7,025	2.03
C	*9.50	6,307	1.51
	*10.50	6,607	1.59
	*11.50	7,025	1.64
	*11.00	5,722	1.92
	*10.10	5,606	1.80
D	*8.50	6,687	1.27
	*9.83	5,842	1.68
	10.00	5,550	1.80
	*7.50	6,167	1.22
	*8.00	6,687	1.20
E	*10.50	5,663	1.85
	11.53	5,781	1.99
	*10.97	5,550	1.98
	10.42	5,606	1.86
	12.05	8,812	1.47
F	15.18	6,529	1.94
	*11.63	6,938	1.68
	12.72	6,529	1.95
	*7.50	5,904	1.27
	11.90	5,663	2.10
G	12.20	5,904	2.07
	11.82	6,099	1.94
	11.25	5,550	2.03
	12.05	6,307	1.91
	12.80	6,852	1.87
H	12.90	6,607	1.95
	12.65	6,529	1.94
	12.48	7,025	1.78
	11.95	7,115	1.68
	12.60	6,307	1.20
I	14.17	7,303	1.94
	14.23	7,400	1.92
	14.02	6,687	2.10
	13.77	6,607	2.09
	14.65	6,852	2.14
平均値	(12.23) 13.27	(6,623) 6,792	(1.90) 1.96
標準偏差	(2.18) 1.50	(772) 797	(0.36) 0.48

() 全データ * : 引抜け時の荷重

部を調べてみると抜け出しの跡が見られた。以上のことから、当初、破壊形式をすべて引張破壊と見なしていたが、定着部の抜け出しによって破断したものが約半数の24本（表-1中の*印）含まれていることが分かった。そこで、それらを除く引張破断した供試体について平均値と標準偏差を求めてみると、それぞれ15.7 tfおよび0.44 tfとなり、保証値も14.4 tfとメーカーの値とほとんど等しくなった。

抜け出しの原因は、膨張圧の設定値500 kgf/cm²がやや小さすぎたことにある。実際にP

C緊張材として使用する場合は、緊張力は0.7×（保証荷重）≒10 tf程度であるから、膨張圧500 kgf/cm²でも定着は十分であるが、引張試験に用いる場合は、膨張圧発現状況およびCFRPより線の表面状態等のバラツキを考慮すると、700 kgf/cm²程度は必要と考えられる。低い膨張圧しか得られない場合は、定着用鋼管をテーパ管とすれば、くさび作用が付加され、定着力が増すものと考えられる。

ストレインゲージを用いて測定したひずみをより線の軸方向のひずみに補正し、応力～ひずみ曲線を描くとほとんど直線となる。図-3に引張破断した供試体の例を示す。弾性係数はその勾配から、またのび率は、直線を延長して破断時応力に対するひずみからそれぞれ求めて表-1に併記した。供試体の弾性係数はメーカーの示した標準値14000 kgf/mm²よりやや小さめの値を示した。同図で変位計から求めたのび率とひずみから求めたそれとの差1.92-1.74=0.18%は両定着部での引抜き量に起因するものである。したがって、その値から、片側定着部での引抜き量を求めてみると約1.3 mmとなる。

供試体IIの場合も、定着部での抜け出しによる破壊は生じた。しかしながら、AFRPロッド自身は抜け出しの反動でもせん断破壊しなかったから、CFRPの場合より破壊形式を識別し易かった。表-2に*印で示したように45本中13本が付着破壊した。引張破断したものの平均値、標準偏差はそれぞれ13.3 tf、1.50 tfで、変動係数は11.3%となり若干ばらつきが大きいようである。その原因として、製造方法がバッチ式であったことが挙げられる。

4. FRPより線のPCはり中での疲労強度

PCはり中でのFRP緊張材の疲労強度を調べるため、プレテンションPCはり供試体を製作して疲労試験を実施した。はり断面は横10 cm×縦20 cmとし、引張試験の供

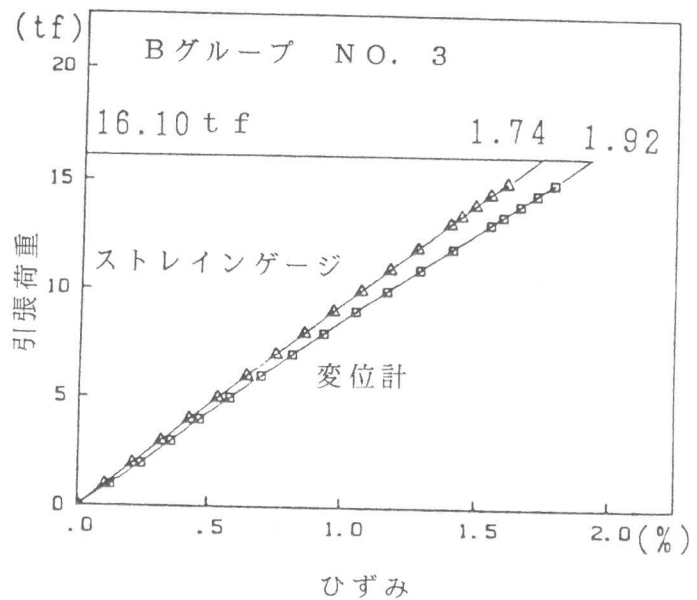


図-3 応力～ひずみ曲線
(炭素繊維FRPより線)

試体 I と同じ FRP 緊張材を偏心距離 6.38 cm に配置して、プレストレスを導入した〔2〕。初期緊張材力は 7.40 tf、試験時の有効プレストレス力は 6.6 tf となった。また、コンクリート強度は 850 kgf/cm² であった。供試体には FRP 緊張材以外の補強材は用いていない。荷重方法は、スパン 165 cm の 3 等分点 2 点荷重とした。

静的試験の結果、はりは 8.52 tf でせん断付着破壊した。

表-3 PC はり疲労試験結果

供試体	繰返し荷重 (tf)	試験結果	破壊状況
a	1.0~6.0	200万回未破壊	————
b	1.0~7.5	187万回破壊	せん断付着破壊
c	1.0~7.5	200万回未破壊	————
d	1.0~7.5	80万回破壊	CFRP 破断
e	1.0~7.5	51万回破壊	せん断付着破壊

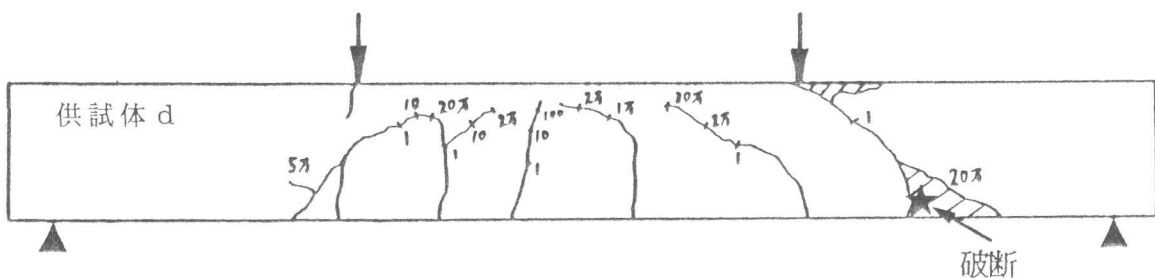


図-4 PC はり破壊時ひびわれ状況

FRP 緊張材はせん断に対して弱いとされており、また部材端部での付着性状を調べる目的もあって、同破壊形式をとるように配慮した。

疲労試験の結果を表-3に示す。先ず最初の供試体では、繰返し荷重 1.0 tf ~ 6.0 tf を荷重したが、繰返し回数 200 万回でも破壊しなかった。そこで以後最大荷重を上げて 1.0 ~ 7.5 tf で試験を実施した。

4 本中 3 本が破壊し、1 本は 200 万回まで未破壊であった。破壊形式は 3 本中 2 本

が静的試験の場合と同じせん断付着破壊であった。問題は緊張材の破断によるものが 1 本含まれていることである。図-4 は破壊時のひびわれ状況を示したものであるが、同図か

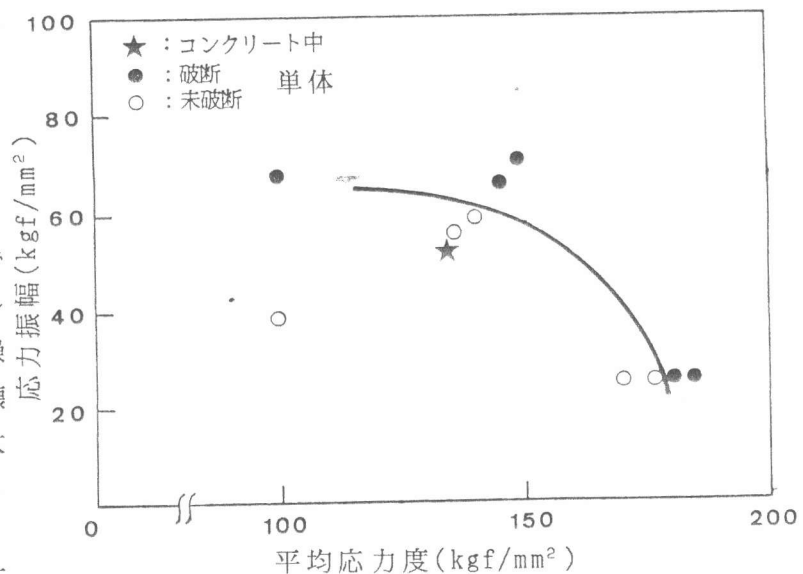


図-5 耐久線図 (炭素繊維 FRP より線)

ら明らかなように、破断箇所はせん断ひびわれ位置であった。FRP緊張材単体の引張疲労試験結果から図-5に示す耐久線図が得られている〔3〕。FRP緊張材が破断したはりの場合、FRP緊張材の受ける繰返し応力は、平均応力 $\sigma_m = 138 \text{ kgf/mm}^2$ 、応力振幅 $\sigma_r = 51.4 \text{ kgf/mm}^2$ となる。その値を図-5中にプロットすると、本来疲労破壊しない範囲に点が入ってくる。試験数が少なく、確たることは言えないが、FRP緊張材の疲労強度は単体よりPCはり中の方が小さくなるようである。

FRP緊張材をPCに用いる場合、ひびわれを許すPRC的な使い方も考えられるが、せん断ひびわれが発生すると、疲労強度が若干低下することを注意しておかなければならない。

5. まとめ

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- ①市販の鋼管と定着用膨張剤を用いる実用的なFRP緊張材の引張試験方法を提案した。今回は目標膨張圧をやや低めに設定したため、定着部で付着破壊したものが生じた。改善策としては、目標膨張圧の割増し、定着長の増大、テーパ管の使用など適切な方策を構じれば、FRP緊張材が定着部で抜け出すことはないものと考えられる。
- ②CFRPより線(7本より $\phi 12.5 \text{ mm}$)の引張試験では、引張破壊した26本分の実測破断荷重から求めた保証破断荷重(平均値 -3σ)はメーカーの値とほとんど等しくなった。また、変動係数は3%程度の値であった。
- ③組紐状AFRPロッドの場合、引張破壊した32本の破断荷重から求めた変動係数は11.1%となり、バラツキがやや大きいようである。その原因として、製造方法がバッチ式であったことがあげられる。
- ④せん断ひびわれを有するPCはり中での、炭素繊維FRPより線の疲労強度は単体の引張疲労強度より若干小さくなるようである。

謝辞：本研究の実施に際しご協力頂いた九州工業大学学生下岸正史君、越智啓介君およびご援助を賜った「膨張剤による定着法研究会」各位に謝意を表す。

参考文献

- 〔1〕小坂・原田・出光：緊張材としてのFRPロッドの静的破砕剤による定着について、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第5部、pp320~321、1989.10
- 〔2〕橋本・森本・出光：ハイテク繊維の緊張材としての利用に関する基礎的研究、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp630~631、1990.3
- 〔3〕榎本・白鳥：炭素繊維複合材料ケーブルの引張疲労特性、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部、pp324~325、1990.9
- 〔4〕原田・小坂・出光：静的破砕剤によるCFRPロッド緊張材の定着方法とそのポストテンションはりへの適用について、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp636~637、1990.3