

[165] FRP ロッドを用いたプレストレストコンクリート構造に関する研究

正会員 ○石田 博彰(東京大学大学院)
 正会員 小林 一輔(東京大学生産技術研究所)
 正会員 趙 力采(東京誠売理工専門学校)
 則武 良具(住友建設土木部)

1. まえがき

近年、コンクリート中の鋼材の塩分腐食による劣化がクローズアップされ、我が国だけでなく多くの国々で、社会的な問題になっているが、海洋環境下に設けられたプレストレストコンクリート構造物の緊張材(PC鋼材)の腐食も例外ではない。そこで、本研究はPC用緊張材を従来のPC鋼線から繊維強化プラスチックロッド(FRPロッド)に置き換える方法を取り上げ、その実用化を目的として実施したものである。まず、FRPロッドの物理的特性として引張試験及び引張疲労試験を行なった。次に、FRPロッドと各種シースとの摩擦係数を測定した。最後に、実際に単純ばりを作製して、応力を導入し、応力導入時のセットによる緊張材引張力の減少、コンクリートのクリープ・乾燥収縮、緊張材のリラクセーションによる緊張材引張力の減少、梁の静的載荷時の荷重-中央点たわみ関係について測定した。

2. 従来の問題点

FRPロッドをPC用緊張材として用いるアイデアは決して新しいものではなく、1950年代から1960年代にかけてアメリカ・イギリス及びソ連で研究が行なわれていたが、いずれも実用化までいかなかった。その理由は2つの大きな問題点があったからである。1つはいわゆる「静的疲労」の現象で、これは、FRPロッドに引張荷重を持続して加えた場合、ロッド中の個々の繊維に生ずる引張応力が一様でないために、時間の経過と共に引張耐力が低下する現象である。もう1つは、緊張及び定着装置の問題である。FRPロッドは一方にしか強化されていないので、通常の高張力鋼製緊張材に用いられているクサビを用いて引張ると、グリップ近辺で応力集中がおこるためにその付近でロッドが破断してしまうのである。

3. 使用したFRPロッド及び緊張・定着装置

今回、実験に使用したFRPロッドはアラミド繊維(帝人のHM-50)とビニルエステル樹脂から成り、繊維の体積混入率が63%のものである。Pultrusion方法により製造されており、この製造方法によって静的疲労による問題が大幅に改善されている。Pultrusion方法とは図-1に示す様に、繊維に一定の張力を加えながら、集束・成形・強化してFRPロッドを製造させる方法である。又、従来の一方強化繊維の表面を軸直角方向にスパイラル状に繊維強化しており、グリップ近辺での応力集中によるロッドの破断を防いでいる。

緊張及び定着装置は図-2に示す、東京大学生産技術研究所小林研究室において開発したFRPロッド用の圧縮摩擦型グリップを用いて、FRPロッドの引張試験を行なった結果、混合則による理論強度の約91%の値が得られており、又、破断箇所もロッドの中央部であった。従って、このグリップを用いてFRPロッドを緊張・定着することが期待できる。

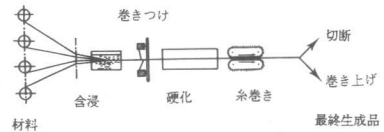


図-1 Pultrusion方法

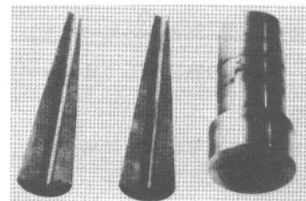


図-2 圧縮摩擦型グリップ

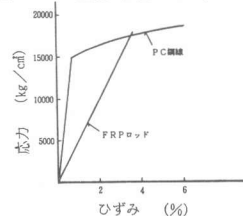


図-3 応力-ひずみ関係

FRPロッドの物理的性質として特徴的であるのは、図-3に示す様に、引張強度はPC鋼線とほぼ同等であるが、弾性係数がPC鋼線の約1/4であること(487,000kg/cm²)、破断時まで応力-ひずみの関係がほぼ直線であり、いわゆる降伏点がないことである。比重は1.26であり、これは鋼材の約1/6である。又、下限応力を静的引張強度の10%として行なった疲労試験では、図-4に示す様に100万回疲労強度が静的引張強度の約45%という結果となっており、PC鋼線とほぼ同等であるが、ロッドの表面のスパイラル状の補強繊維と軸方向繊維の間ですべりが起きて、ロッドが破断している例が見られ、両繊維間の付着を改善すれば、疲労特性が向上するものと思われる。

4. FRPロッドとシースとの摩擦係数

4.1 実験方法

図-5に示す鋼製のフレームを作製し、FRPロッド及びPC鋼線と各種シースとの摩擦係数(μ)を測定した。フレームは曲率を3種類かえられる様になっており、上から各々、0.583・0.395・0.199ラジアンである。シースの種類としては通常のPC鋼線用の鋼製シース、塩化ビニル製シース、硬質ポリエチレン製シースの3種類である。シースの種類を換えた理由は緊張材をPC鋼線からFRPロッドに置き換えたのと同じ様に何か腐食しない材料に置き換えることを考えたからである。緊張はフレームの片側からFRPロッド用に開発したセンターホールジャッキを用いて行ない、フレームの両端に取り付けたロードセルによって、緊張材両端の荷重を測定し、両ロードセル間の荷重差を摩擦による応力損失分とした。

4.2 結果及び考察

実験結果を表-1に示す。通常、シース(鋼製のシース)とPC鋼材との摩擦係数(μ)は0.2~0.6と言われており、土木学会の「プレストレストコンクリート標準示方書」ではPC鋼線の場合、 $\mu = 0.3$ とすることになっている。実験値はこれよりかなり低い値となっており、その理由としてフレームの長さが2.1mと実際の構造物に比べて短いこと、コンクリートを打ち込んだ場合の局所的なシースのたわみやつぶれがこの実験方法では全くないこと、シースの径に比して緊張材の径が小さかったこと、等が考えられる。

PC鋼線・FRPロッドの場合とも、塩化ビニル製シースの摩擦係数が他のシースに比べて大きくなっているが、これはシースの内面が平滑であり、それだけシースと緊張材との接触面積が大きくなるためであると考えられる。硬質ポリエチレン製のシースは鋼製のシースと比較してもかなり小さな摩擦係数の値を示しており、耐食性のみならず摩擦が少ない点で優れていると言える。

5. 応力導入時のセットによる緊張材引張力の減少

5.1 使用材料及び試験体の作製

セメントは早強ポルトランドセメント、骨材は川砂と砕石(最

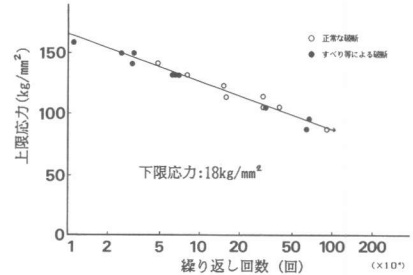


図-4 疲労試験結果

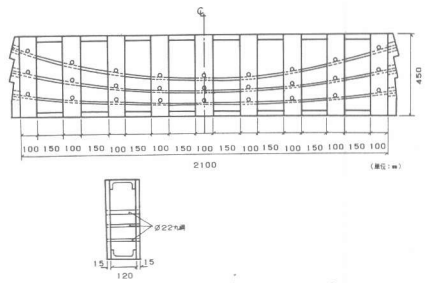


図-5 実験用フレーム

表-1 摩擦係数測定結果

シース	PC鋼線		FRPロッド			
	鋼	塩化ビニル	ポリエチレン	鋼	塩化ビニル	ポリエチレン
曲率(ラジアン)						
0.583	0.0784	0.174	0.0404	0.154	0.238	0.0484
0.395	0.1020	0.236	0.0414	0.182	0.215	0.0433
0.199	0.1540	0.217	0.0517	0.118	0.226	0.0621
平均	0.1115	0.209	0.0445	0.151	0.226	0.0513

表-2 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法(mm)	水セメント比 w/c (%)	粗骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
			水 w	セメント C	粗骨材		
					S	G	G
15	50	48	197	394	859	669	287

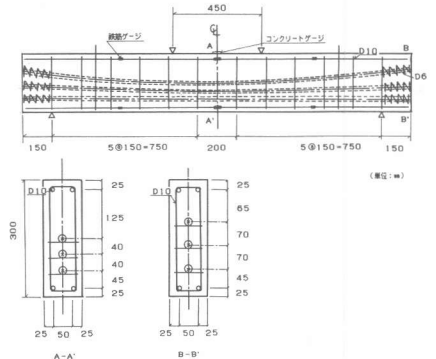


図-6 試験体

大寸法 15 mm) を用いており、配合を表-2 に示す。

試験体は図-6 に示す様な 10×30 cm 断面で長さが 2 m の単純ばりであり、1 試験体に曲率をかえて 3 本のシースを配置した。曲率は上から各々、0.24・0.12・0 (直線) ラジアン の 3 通りである。FRP ロッド用試験体 6 本と PC 鋼線用試験体 2 本の合計 8 本を作製した。FRP ロッド用の試験体はシースの種類をかえている。打設後、24 時間湿空養生して脱型し、更に 4 週間湿空養生を行ない、その後空中放置した。

5.2 結果及び考察

応力導入は、コンクリートの材令が 2 か月で圧縮強度 580 kg/cm²、弾性係数が 320,000 kg/cm² の時点で行なった。緊張はシースの上側、下側、中側の順番で行ない、上側・下側は同じ側から、中側は反対側から定着し、片引きによる緊張材両端の荷重差を相殺する様にした。直線配置されている下側の緊張材の定着側のロードセルで定着前後の荷重を測定し、その荷重減少量をセットによる緊張材引張力の減少量とした。実験結果を表-3、図-7 に示す。

セットによって生ずる緊張材引張力の減少量は、緊張材とシースとの間に摩擦抵抗がない場合には、

$$\Delta P = \frac{\Delta \ell}{\ell} A_p E_p \quad (1) \text{ で表わされる。}$$

記号 ΔP ; 緊張材のセットによる引張力の減少量

$\Delta \ell$; セット量

ℓ ; 緊張材の長さ

A_p ; 緊張材の断面積

E_p ; 緊張材の弾性係数

(1)式に実験値を代入してセット量を求めると、PC 鋼線のセット量は 1.8 mm、FRP ロッドのセット量は 1.4 mm となる。通常、PC 鋼線をクサビを用いて定着した場合のセット量は 2~4 mm と言われており、実験値もほぼ等しい値となっている。表-3 より PC 鋼線に比べ FRP ロッドの引張応力度の減少量が約 1/6 になっているが、これはセット量が約 3/4 であるのと、FRP ロッドの弾性係数が PC 鋼線の弾性係数の約 1/4 であるため、弾性係数の小さいことの利点があらわれているためである。

6. 緊張材引張力の経時変化

6.1 実験方法

プレストレス導入後の緊張材の引張力は、コンクリートのクリープ・乾燥収縮、緊張材のレラクセーションによって時間の経過と共に次第に減少する。そこで、緊張材両端に取り付けたロードセルによってはりの静的載荷時まで緊張材引張力の経時変化を測定した。なお、応力を導入した試験体には、緊張材とコンクリートを一体化するために、応力導入 24 時間後、グラウトの注入を行なった。

表-3 セットによる応力損失

試 験 体	PC鋼線			FRPロッド							
	No. 1	No. 2	平均	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	平均	
減少量 (mm)	329	333	331	100	71	100	108	62	62	84	
	309	299	304	79	70	90	100	78	71	82	
減少応力 (kg/cm ²)	16.8	17.0	16.9	3.5	2.5	3.5	3.8	2.2	2.2	3.0	

注: は緊張側のロードセルによる定着前後の荷重減少量

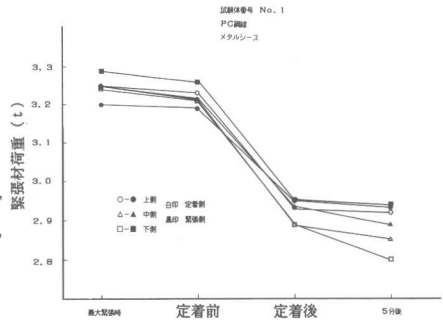


図-7 セットによる引張力減少 (PC 鋼線)

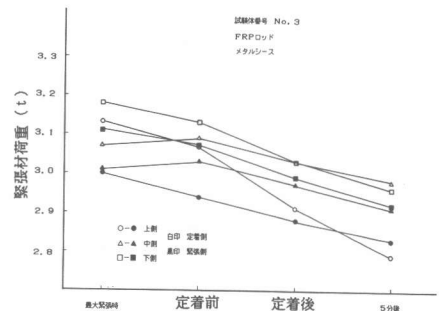


図-7 セットによる引張力減少 (FRP ロッド)

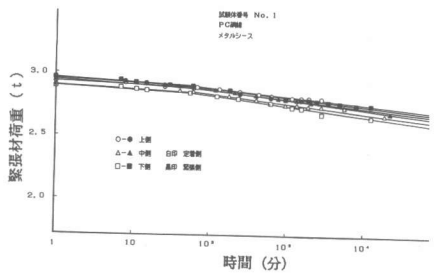


図-8 引張力の経時変化 (PC 鋼線)

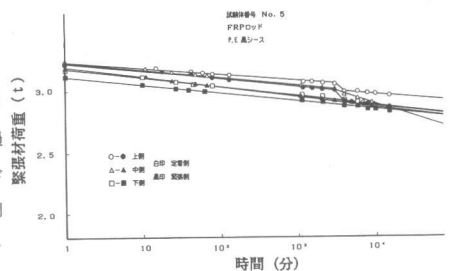


図-8 引張力の経時変化 (FRP ロッド)

6.2 結果及び考案

実験結果を図-8に示す。図から明らかな様に、緊張材の引張荷重と対数で表示した時間とはほぼ直線関係にある。この直線関係が30年後まで成立すると仮定した場合、PC鋼線では初期プレストレスカの約85%、FRPロッドで約82%が有効プレストレスカとして残ると考えられる。これは、FRPロッドの方がレラクセーション率が大きいためであるが、セットによる応力損失も考慮に入ると、FRPロッドは最大緊張応力の約79%、PC鋼線は約77%が有効プレストレスカとして残ると考えられ、逆にFRPロッドの方が有利となる。

7. はりの静的荷重試験

7.1 実験方法

応力を導入したはりの静的荷重試験は、材令が3か月、コンクリートの圧縮強度 620 kg/cm^2 、弾性係数 $355,000\text{ kg/cm}^2$ 、グラウトの圧縮強度 310 kg/cm^2 の時点で行なった。図-9に示す様にスパンを 170 cm とし、2点集中荷重により荷重した。

7.2 結果及び考察

荷重時のはりの荷重-中央点たわみ曲線を図-10に示す。ひびわれ発生荷重は 4 t であったが、ひびわれ発生までは、はりは弾性的挙動を示し、弾性計算より求めたたわみ量とほぼ一致している。引張側の鉄筋降伏後、終局耐力付近では、PC鋼線を用いたはりはPC鋼線の降伏にともなって、たわみが急に増加しているが、FRPロッドを用いたはりでは、はりの破壊時まで、荷重及びたわみはほぼ一定の割合で増加している。これは、FRPロッドの応力-ひずみ関係がロッドの破断時までほぼ直線のためであると考えられる。又、緊張材の両端に取り付けたロードセルによって、荷重試験時の緊張材の荷重変化を測定した結果、FRPロッドとグラウトは十分に一体化されていたと思われる。

8. まとめ

本研究の範囲内で明らかになった事項は以下の通りである。

- (1) 材料レベルだけでなく、施工レベル・実用化レベルにおいても、FRPロッドをPC用緊張材として使用して、基本的に問題はない。
- (2) 防食性からシースの材質としては硬質ポリエチレンが良く、更にFRPロッドとの摩擦を低減できる。
- (3) 30年後の有効プレストレス力はPC鋼線を用いた場合とほぼ同等である。
- (4) FRPロッドは降伏点がないため、はりの静的破壊時にたわみが急激に増加することはない。
- (5) 軸直角方向の繊維と軸方向の繊維の付着を改善することにより、施工性・安全性を高めることができる。

9. あとがき

帝人様には、FRPロッドの試料に関して多大の御協力を頂いた。又、本研究の実施に当っては、千葉工業大学生児山雅裕君に御協力頂いた。ここに記して心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) 小林, 趙: 繊維強化複合材料プレレストコンクリート用緊張材の開発研究, 昭和59年度科学研究費研究成果報告書

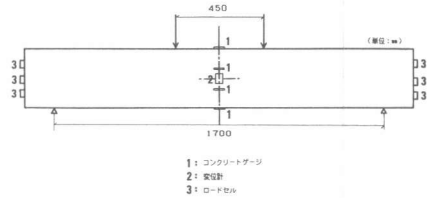


図-9 荷重試験体

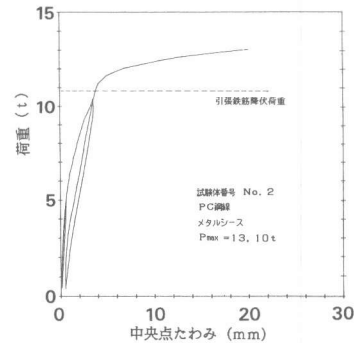


図-10 荷重-中央点たわみ曲線(PC鋼線)

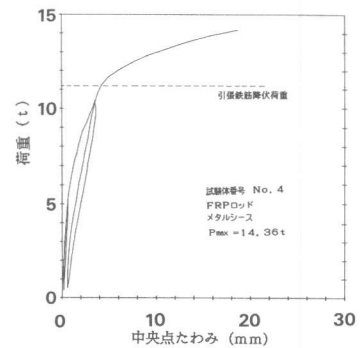


図-10 荷重-中央点たわみ曲線(FRPロッド)