

# FRPを外ケーブルに用いたPCはりの力学的性状および曲げ耐力

睦好宏史\*・町田篤彦\*\*

本研究は、FRPを緊張材として外ケーブルに用いたPCはり部材を開発し、その基本的力学的性状を実験的に明らかにするとともに、このような部材の終局曲げ耐力を解析的に求める手法を明確にしたものである。FRPを外ケーブルに用いたPC部材は、FRPの長所（高強度でさびない）を生かし、欠点（伸びひずみが小さい）を補う有るな構造形式であるといえる。

**Keywords:** FRP, PC, external cable

## 1. はじめに

鋼材で補強したコンクリート構造物が出現してから約1世紀以上たち、今や、鋼およびコンクリートは建設構造物にとって欠かすことのできない材料であると言える。しかし、最近、コンクリート中の鋼材が塩分により腐食し、鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート(PC)構造物の劣化が大きな社会問題となってきた。このことは、従来のコンクリートあるいは鋼材が、必ずしも建設構造物に必要とされる十分な材料特性を有しているとは言い難いことを示唆するものである。従って、今後は、鋼、コンクリートに代わって、建設構造物が必要とする材料特性を有する新材料を開発していくことが強く望まれる。このような中において、最近の複合材料の発展はめざましいものがある。中でも、建設材料として最も注目すべき材料のひとつに繊維強化プラスチック(FRP)があげられる。FRPの引張強度は鋼材と同等あるいはそれ以上で、鋼材のように腐食することがなく、さらに鋼材よりも軽い等の利点がある。一方、鋼材のような延性材料とは異なり、伸びひずみが小さく、その破壊も脆性的であり、価格も高いという欠点がある。このようなFRPを鋼材に代わるコンクリート補強材として有効に使うためには、FRPがもつ材料特性の有利な点を生かし、その欠点を補うような使い方が望ましい。このような観点から、FRPをPC用緊張材に利用することは、望ましい構造形式の一つである。FRPをPC用緊張材に用いたPC部材に関する研究は、近年盛んに行われ、その力学的特性が明らかにされつつあるとともに、実際の橋梁への適用例もいくつか見受けられるようになってきた<sup>1)</sup>。しかし、これらの研究

に使用されたPC部材あるいは実構造物のほとんどは、FRPをコンクリート内に配置してプレストレスを導入したものである。一方、このような方式とは異なり、PC鋼材を外ケーブルに用いたPC構造物がヨーロッパを中心にして建設されつつある<sup>2)</sup>。外ケーブル方式のPC構造物の利点は、1) ウェブ厚の減少による自重の軽減、2) 施工性の向上、3) ケーブルの取り替え、または再緊張による維持監理が可能、4) PC鋼材の摩擦による応力損失の軽減等が考えられる。我が国においては、PRC桁に用いたり、内ケーブルとの併用、あるいは損傷を受けたり、老朽化した橋の補修・補強等に用いられている。先程述べたように、FRPの長所を生かし、欠点を補う構造形式のひとつとして、外ケーブル方式によるPC構造物が考えられる。すなわち、FRPを外ケーブルとして配置することによって、ケーブルに応力が一様にかかるため、応力集中によりFRPが破断する可能性をかなり低減できる利点がある。さらに、FRPは腐食の心配がないことから、外ケーブルとして、既設の老朽化した橋梁や水槽等の補強にも利用できる利点がある。しかし、FRPを外ケーブルとして使用したPC部材に関する研究は、これまで全く行われていないのが現状である。

本研究は、FRPを緊張材として外ケーブルに用いたPCはり部材を開発し、その基本的力学的性状を実験的に明らかにして、このような部材の終局曲げ耐力を解析的に求める手法を明確にしたものである。

## 2. 実験概要

実験に用いたのは供試体は、Fig.1に示すようなT型はりで、主筋およびスターラップにD10、SD35の異形鉄筋を用いた。この場合の引張鉄筋比は0.41%、せん断補強筋比は1.4%である。外ケーブルは図に示すように、はりの両外側に配置した。外ケーブルに使用した

\* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科  
(〒338 浦和市下大久保 255)

\*\* 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

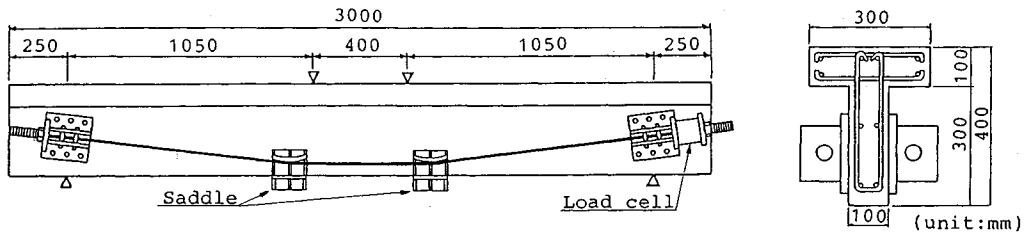


Fig.1 Details of test beams

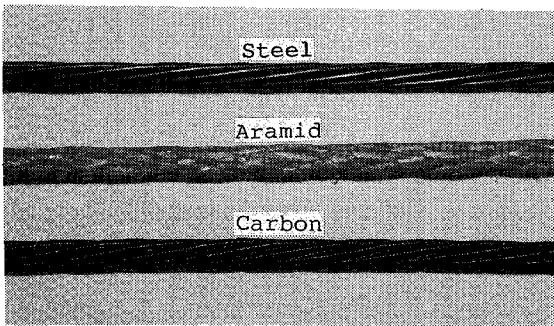


Photo.1 Used FRP

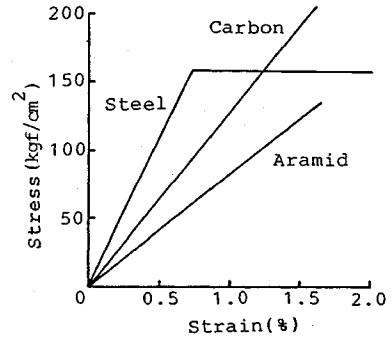


Fig.2 Stress-strain relationships of cables

Table 1 Experimental variables

Beam No.	Material	Type	Introduced Prestress (kgf)/a cable	Tensile Strength of Cable(kgf)	Concrete Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	SWPR7A	I	7000	19000	370
2	AFRP	I		16500	
3	CFRP	II		14500	
4	CFRP	II		14500	
5	AFRP	II	6000	16500	
6	CFRP	II		14500	

Type I and II: bending angles are 7.1° and 11.3° respectively.

材料は、Photo.1に示すように、鋼より線(SWPR7A)、アラミド繊維(AFRP)を組紐状にしたもの、炭素繊維(CFRP)をより線状にしたものの3種類である。

Fig.2は、使用したケーブルの引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を示したものである。この場合、ひずみはケーブルのほぼ真ん中に設置した変位計(検長200mm)から測定される変位より求め、応力はケーブルの樹脂を含む有効断面積(steel: 92.90 (mm<sup>2</sup>), Aramid: 150.0 (mm<sup>2</sup>), CFRP: 76.0 (mm<sup>2</sup>))で荷重を除して求めたものである。ケーブルの端末定着装置は、いずれの材料に対しても同一で、表面にネジ加工した鋼管にケーブルを挿入し、樹脂で固めたものである。また、ケーブルとはり供試体との定着はFig.1に示すように、はりのウェブ側面に鋼制定着装置を取り付け、ウェブ両側からPC鋼材にプレストレスを導入して定着装置を締め付けたもので、定着装置とウェブコンクリートとの摩擦力で、軸方向の緊張力に抵抗する構造とした。ケーブルを曲線配置とするために、はり下縁部2箇所鋼製折り曲げ器具(サドル)を設置した。サドル内面の曲率半径は20cmで、ケーブルの見掛けの折り曲げ角度は、タイプIが7.1°、タイプIIが11.3°である。このようにサドルを設けた場合、ケーブルとサドルとの摩擦により緊張力がケーブル全体に均等に伝達しないことが考えられる。そこで、サドルとケーブルの接する面にテフロンシートを貼付した。予備緊張試験から、サドルとケーブルとの摩擦による緊張力の損失はほとんど認められなかった。導入プレストレス力は、はりNo.1~No.4は14tonf、

No.5, No.6は12tonfとした。これらの値は、FRPをアンボンドPC部材に用いた既往の研究[7]から定めたもので、ケーブル1本当たりの導入プレストレス力と保証切断荷重との比は、36~48%である。ケーブルへの緊張力の導入は、定着装置外側に取り付けられたロードセルの荷重を測定しながら、2台の油圧ジャッキにより2本のケーブルへ同時に行われた。Table 1は各供試体の実験要因を示したものである。荷重は一方荷重とし、荷重、たわみ、導入プレストレスの変化、ひびわれ幅等を測定した。なお、No.6は、疲労荷重実験を行った。

### 3. 実験結果

Fig.3は静的荷重実験から得られた荷重-変位曲線を示したものである。いずれのはりも、初期クラック発生までは弾性的な挙動を示している。クラック発生荷重は導入プレストレスの大きさによって異なり、14tonf導入したもの(No.1~No.4)では、いずれのはりも9

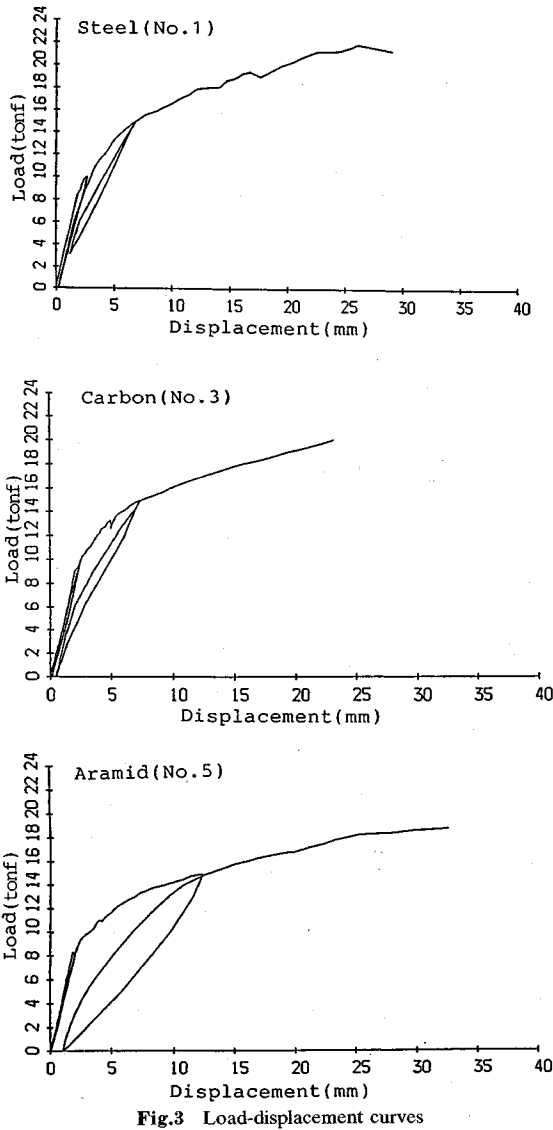


Fig.3 Load-displacement curves

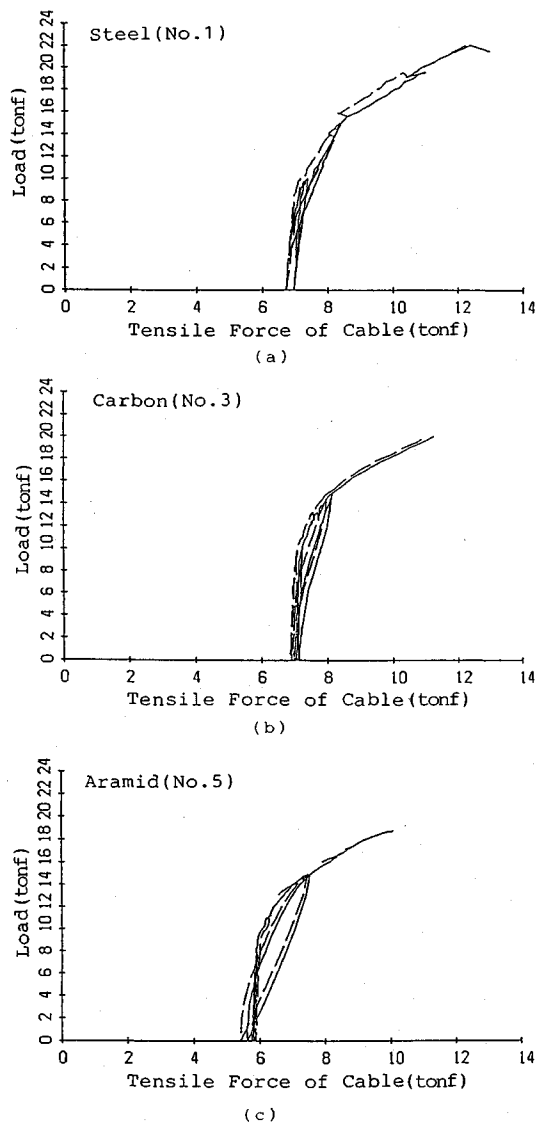


Fig.4 Load-tensile force curves of cables

tonf 前後で、12 tonf 導入したものでは (No.5) 約 8 tonf であった。クラック発生後は変位の増大とともに剛性が低下している。載荷を行っている間、鈍い音が発生し、あたかもケーブルが定着具の鋼管からスリップしているかのような現象が何度か観察された。しかし、この量は非常にわずかであり、全体の挙動およびケーブルの緊張力におよぼす影響はほとんど認められなかった。AFRP, CFRP, 鋼より線を用いた各部材について、荷重-変形状を比較してみると、いずれの部材も、通常の PC 部材とほぼ同様な性状を示し、概して良好であると言える。また、材料による相違はほとんど認められなかった。

Fig.4 はケーブル端部に設置されたロードセルから測定されたケーブル 1 本当たりの導入プレストレス、すな

わち、作用引張力と荷重の関係の一例を示したものである。初期クラックが発生するまでは、導入プレストレスはほとんど変化せず、クラック発生後、荷重の増大とともにケーブルの作用引張力が増加していくのが分かる。図から、両側に配置されている 2 本のケーブルの引張力の変化量はほとんど等しいことが分かる。終局破壊形式は、鋼より線 (No.1) および AFRP (No.2, 5) を用いたはりではコンクリートの圧壊が生じ、CFRP (No.3, 4) を用いたはりではコンクリートの圧壊と同時にケーブルが破断し、終局に至った。この理由として、CFRP の実破断荷重が他のものよりも小さいにも拘わらず、他のはりと同じ量のプレストレスを導入したこと、また、Fig.1 に示したように、ケーブルは等モーメント

**Table 2** Initial cracking load and ultimate flexural strength by the already proposed equations

Beam	Cracking Load (tonf)		Flexural Strength (tonf)		
	Exp.	Cal.	Exp. ( $\Delta P$ )	Pannel	Mattock( $\Delta P$ )
1	8.5	8.8	22.2 (10.9)	20.1	16.8 (7.3)
2	9.0	8.8	19.0 (7.0)	29.3	17.5 (8.4)
3	9.0	8.8	20.0 (8.6)	17.1	16.6 (7.0)
4	9.5	8.8	21.0 (9.6)	17.1	16.6 (7.0)
5	8.3	7.8	18.7 (8.3)	25.9	16.3 (8.4)

$\Delta P$ : increase of tensile force in cable

区間の外側において、曲げ上げられているため、折り曲げ部が弱点となったことが考えられる。すなわち、Fig.4 に示したように、CFRP ケーブルが破断した時、ケーブルに設置されているロードセルから測定された荷重はメーカーによる保証切断荷重の 80% 程度であった。このことは、FRP を曲線状に配置して緊張力を導入する場合には、FRP の設計引張強度のとり方に十分注意することが必要である。

#### 4. ひびわれ荷重および簡易式による曲げ耐力の推定

外ケーブル方式の PC 部材では、コンクリートと緊張材との付着が無く、定着部のみで一体化されている。このため、部材の各断面で、ケーブルのひずみとコンクリートのひずみは同一とはならず、平面保持の関係が成立しない。従って、通常の曲げ理論によって終局耐力を求めることはできない。ここではこれまでに提案されているアンボンド PC 部材の耐力評価式を用いて曲げ耐力の推定を行った。計算に用いた式は以下に示すものである。

1) Pannel 式<sup>3)</sup>

$$M_u = b \cdot d^2 \cdot f_c' \cdot q_u \cdot (1 - 0.9 \cdot q_u) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $q_u = (q_e + \lambda) / (1 + 2\lambda)$ ,  $q_e = p_p \cdot \sigma_{ef} / f_c'$ ,  
 $\lambda = 12 \cdot p_p \cdot E_p \cdot 0.00325 / f_c' \cdot l$

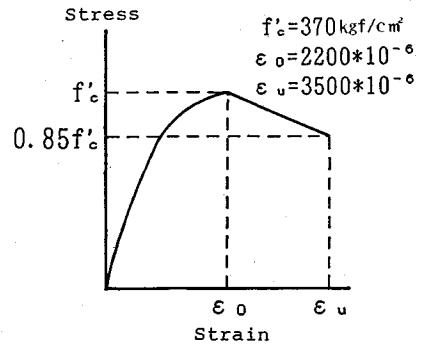
$M_u$ : 終局曲げモーメント,  $b$ : 部材幅,  $d$ : 緊張材位置の有効高さ,  $f_c'$ : コンクリート強度,  $p_p$ : 緊張材比,  $\sigma_{ef}$ : 緊張材の有効プレストレス,  $l$ : 緊張材長さ

2) Mattock 式<sup>4)</sup>

曲げ終局時に対する緊張材応力として、以下の式が提案されている。

$$\sigma_{pu} = \sigma_{ef} + 1.4 \cdot f_c' / 100 \cdot p_p + 700 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots \dots (2)$$

**Table 2** はひびわれ発生荷重および曲げ耐力の計算値と実験値を示したものである。ひびわれ発生荷重は、ケーブルに導入したプレストレスの変化がないものとして、通常の曲げ理論によって求めたものである。表からひび



**Fig.5** Stress-strain relationship of concrete for analysis

われ発生荷重はどのほりも同程度の大きさであり、計算値は実験値とよく一致していると言える。一方、上で述べた計算式および実験値から得られた最大耐力を見てみると、Pannel 式を用いた場合には、供試体によりばらつきが大きいことが分かる。また、Mattock 式では、全般に計算値は実験値よりも小さな値となっており、ケーブルの引張力の増分量を比べてみると、AFRP では実験値に近い値が得られてはいるものの、他のものでは、かなり小さな値となっている。この理由として、これらの式は鋼材を用いた実験式であること、また、緊張材比は曲げ耐力に大きな影響をおよぼすが、これを求める場合、ケーブルの断面積をどのように考えるかによって、計算結果が大きく異なってくる。ここでは、樹脂を含めた断面積を用いて計算した。今後、FRP を外ケーブルとして利用する場合、曲げ耐力の評価法について詳細に検討することが必要である。

#### 5. 精算法による終局曲げ耐力の検討

前章で述べたように、外ケーブル方式の PC 部材では、部材断面において、緊張材と緊張材位置にあるコンクリートのひずみが同一とはならず、平面保持の関係が成立しない。従って、精解を求めるためには、緊張材位置におけるコンクリートのひずみと緊張材のひずみが部材全体において等しいという変形の適合条件を満足する必要がある。

(1) 解析に用いた仮定

部材中に配置した軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係は、実降伏点およびヤング係数 ( $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ) から定まる完全弾塑性とした。また、コンクリートの応力-ひずみ曲線は、Fig.5 に示すように、2次曲線と直線で表した<sup>5)</sup>。FRP の応力-ひずみ関係は、Fig.2 で示したように、実測された応力-ひずみ直線を用いた。なお、計算を簡略化するために、ケーブルは等曲げモーメント区間の位置に直線状に配置されているものとした。

(2) 解析手法

外ケーブル方式の PC はり部材では、緊張材ひずみ

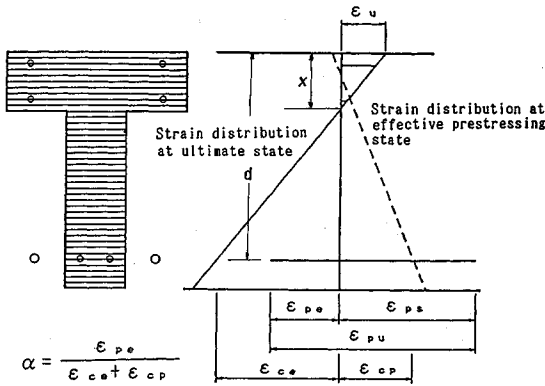


Fig. 6 Discrete element and strain distribution of critical cross section

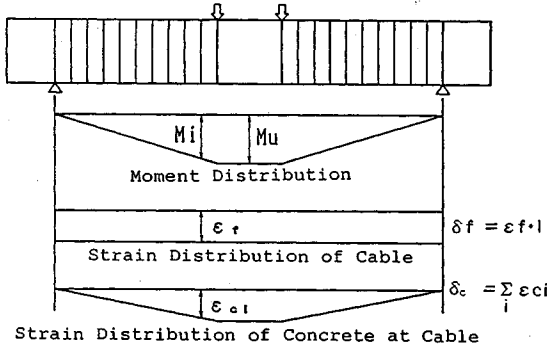


Fig. 7 Division of longitudinal element and distribution of moment, cable strain and concrete strain

と緊張材位置におけるコンクリートのひずみが異なる。そこで、曲げ終局時の破壊断面において、緊張材のひずみの増分量と緊張材と同位置にあるコンクリートのひずみの比を表す係数  $\alpha$  を導入した<sup>5)</sup>。すなわち、曲げ終局時における緊張材のひずみは次式で表わされる。

$$\epsilon_{pu} = \epsilon_{ps} + \alpha \cdot (\epsilon_{cp} + \epsilon_u \cdot (d-x)/x) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\epsilon_{pu}$ ：曲げ終局時における緊張材のひずみ、 $\epsilon_{ps}$ ：有効プレストレス時における緊張材のひずみ、 $\epsilon_{cp}$ ：有効プレストレス時における緊張材位置にあるコンクリートのひずみ、 $\epsilon_u$ ：コンクリートの終局圧縮ひずみ ( $3500 \times 10^{-6}$ )、 $\alpha$ ：曲げ終局時の破壊断面において、緊張材のひずみの増分量と緊張材位置にあるコンクリートひずみの比

いま、 $\alpha$  をある値に仮定して、要素分割法によって終局曲げモーメントを求めることにする。Fig. 6 は、終局時における破壊断面の要素分割とひずみ分布を示したもので、図に示すように、断面を  $n$  分割 (ここでは  $n=160$ ) し、コンクリートおよび鉄筋は平面保持が成り立つものとした。圧縮縁において、コンクリートの終局ひずみ ( $\epsilon_u$ ) を与え、断面の曲率を仮定すると、分割された各要素のひずみ分布が求まり、先に述べたコンクリートおよび鉄

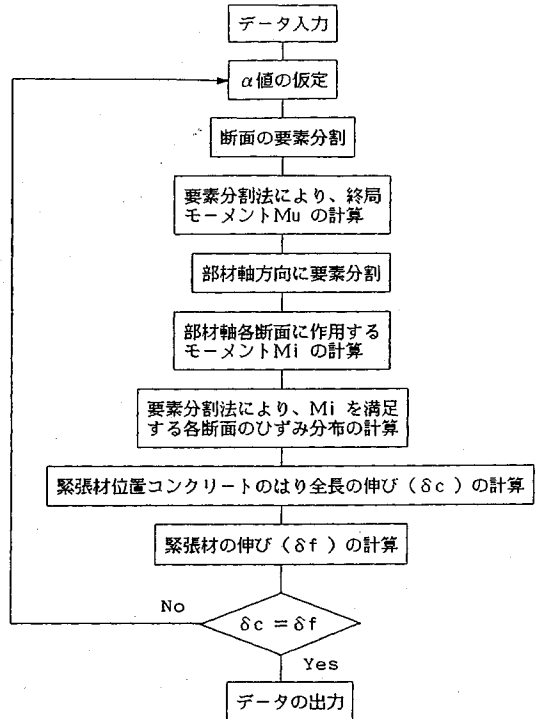


Fig. 8 Process of analysis for ultimate flexural strength

筋の応力-ひずみ関係から、各要素の応力が求まる。さらに、仮定した  $\alpha$  より緊張材の引張力が求められる。このようにして計算した圧縮合力と引張合力から、内力の釣り合いが満足されるまで、曲率を仮定し直し、同様の計算を繰り返し行うのである。内力の釣り合いが満足されれば、仮定された  $\alpha$  に対する終局曲げモーメントが求められたことになる。計算された終局曲げモーメントから、はり軸方向のモーメント分布が Fig. 7 に示すように描かれ得る。次に図に示すように、せん断スパンを部材軸方向に  $m$  分割 (ここでは  $m=30$ ) すると、はり軸方向のモーメント分布から、各断面の作用モーメント ( $M_i$ ) が求まり、上で述べた要素分割法により、各部材断面に作用している外力モーメントを満足する断面のひずみ分布を計算する。すなわち、圧縮縁ひずみを仮定し、上で述べた方法により内力の釣り合い、内力と外力モーメントが等しくなるまで繰返し計算を行い、各要素のひずみ分布を求めるのである。このようにして、部材軸方向における各断面のひずみ分布が求まれば、緊張材位置におけるコンクリートのひずみが求まり、以下に示す条件、すなわち、変形の適合条件を満足するかどうかをチェックする。

$$|\delta_c - \delta_f| < \Delta \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\delta_c = \sum \epsilon_{cpi}$ 、 $\delta_c$ ：緊張材位置におけるコンクリートの伸び、 $\epsilon_{cpi}$ ：部材軸方向  $i$  断面における緊張材位置にあるコンクリートひずみ、 $\delta_f = l \cdot \alpha \cdot (\epsilon_{cp} + \epsilon_u \cdot (d-x)$

Table 3 Experimental and calculated results at ultimate state

Beam No.	$\alpha$	Total tensile force of cables (tonf)		Flexural Strength (tonf)	
		Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
1	0.36	25.3	30.4(1.20)	22.2	21.8(0.98)
2	0.35	22.3	25.3(1.13)	19.0	18.9(0.99)
3	0.35	22.3	24.2(1.09)	20.0	18.2(0.91)
4	0.35	24.0	24.2(1.00)	21.0	18.2(0.87)
5	0.35	20.0	23.7(1.19)	18.7	17.9(0.96)

( ) : (Calculated value) / (Experimental value)

$/x$ ),  $\delta_f$  : 緊張材の伸び,  $l$  : 緊張材長さ,  $\Delta$  : 許容誤差 (= 0.01 mm)  $\delta_e \approx \delta_f$  ならば, 仮定した  $\alpha$  の値は正しく, 計算された終局曲げモーメントが正解となる.  $\delta_e \approx \delta_f$  ならば, 最初に戻り,  $\alpha$  を仮定し直し, 上記条件が満足されるまで計算を行う. 以上の計算過程を Fig.8 に示す.

### (3) 精算法による曲げ終局耐力と実験値との比較

Table 3 は, 上述した解析手法に基づいて計算した, 曲げ終局耐力,  $\alpha$  値, ケーブルの終局時引張力を実験値と比較したものである. 計算から得られた  $\alpha$  値を見てみると, 鋼より線を用いた No.1 では  $\alpha=0.36$ , AFRP, CFRP を用いたはりでは, いずれも  $\alpha=0.35$  と, ほぼ同一の値となった. このことは, ケーブルに用いた材料によらず, 破壊断面において, 緊張材と緊張材と同位置にあるコンクリートのひずみの比はほとんど等しいと言える. しかし, 終局状態におけるケーブルのひずみの絶対量は, 用いた材料により, 若干の差がみられた. 次に終局曲げ耐力を比較してみると, 計算値に対する実験値の比は, 0.88~0.99 となり, 両者はよく一致していると言える. また, 終局時におけるケーブルの緊張力をみてみると, 計算値の方が実験値よりもやや大きいものの, 比較的よく一致していると言える. 実験値と計算値に若干の差がみられたのは, 実際にはケーブルを曲線配置しているのに対し, 解析では直線と仮定していること, また, サドル部において, ケーブルと鋼板の間にテフロンシートを配置して, 摩擦力をできるだけ生じないようにしたが, 終局時において, どの程度このような影響を取り除くことができたか明確ではない. しかしながら, 上記の計算結果は, 実験値とよく一致しており, 本解析手法により, 十分な精度で, FRP を外ケーブルに用いた PC 部材の耐力等を評価できるものと思われる.

## 6. FRP を外ケーブルとして使用した PC 部材の疲労性状の検討

FRP を外ケーブルとして用いた PC 桁の静力学的性状は, PC 鋼線を用いたものとほぼ同等の性能を有することが確認できた. 前述したように, FRP には錆の心配がないため, 外ケーブルとして既設橋梁の補修・補強

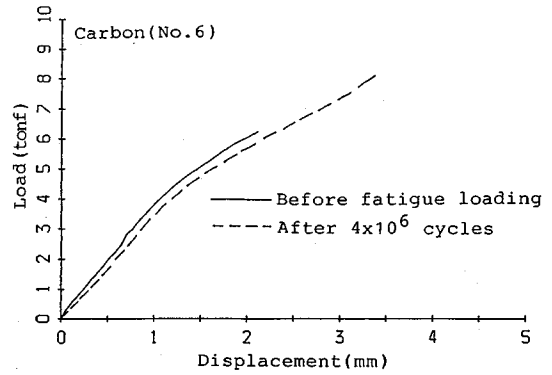


Fig.9 Load-displacement curve before and after fatigue loading

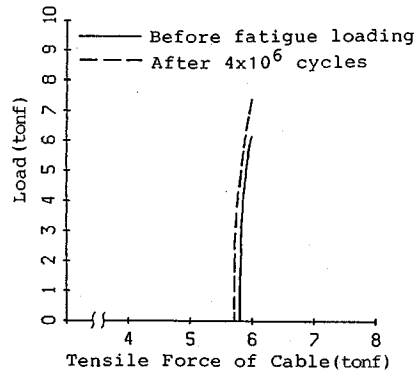


Fig.10 Load-tensile force relationship of cables before and after fatigue loading

等に利用することが考えられる. このようなことから, 供試体 No.6 は, 外ケーブルによるコンクリート桁の補強方法としての適用性を検討することを目的として疲労実験を行った. 供試体には, 予め引張縁に 0.2~0.3 mm 幅のひびわれを入れておき, その後 CFRP を外ケーブルとして配置して緊張を行った. 疲労荷重は, 終局耐力の 2.5% および 40% に相当する荷重を, それぞれ下限荷重および上限荷重とした. この場合, ケーブルに作用する引張荷重の保証切断荷重に対する割合は, 約 40% (下限荷重) および約 42% (上限荷重) である. 実験では, 緊張力の変化, 桁の挙動等を観察した. Fig.9 は, 疲労載荷を行う前と 400 万回疲労載荷を行った後の, 荷重-変形性状を比較したもので, Fig.10 は同様にして, 緊張力の変化と静的載荷荷重の関係を示したものである. 図に示すように, 400 万回載荷後においても荷重-変形性状および緊張力はほとんど変化していないことが分かる. さらに, 1000 万回載荷した後, 桁の荷重-変形性状を調べた結果, 疲労載荷前におけるものとほぼ同等の性状を示すことが確かめられた. 以上のことより, 本実験で使用した, FRP, 定着装置, サドル等に限って言えば, FRP を外ケーブルで補強した PC 部材の疲労性状

は概して良好であることが確かめられた。今後はさらに、より詳細に検討していくことが必要である。

## 7. 結 論

FRPを鋼材に代わるコンクリート補強材として有効に使うためには、FRPがもつ材料特性の有利な点を生かし、その欠点を補うような使い方が望ましい。このような観点から、FRPを緊張材として外ケーブルに用いたPCはり部材を開発し、その基本的力学的性状を実験的に明らかにした。さらに、このような部材の曲げ終局耐力を解析的に求める手法を明確にし、疲労性状についても検討を行った。本研究の範囲内から以下のことが言える。

(1) AFRP, CFRP, 鋼より線を外ケーブルに用いたPC部材の荷重-変形性状を比較してみると、いずれの部材も、通常のPC部材とほぼ同様な性状を示し、概して良好な荷重-変形性状を示した。また、材料による相違はほとんど認められなかった。

(2) FRPを曲げ上げる等して、曲線状に配置した場合、その引張破断荷重は、直線状に配置した場合と比べて、かなり低下することが確認された。従って、FRPを曲線状に配置して緊張力を導入する場合には、設計引張強度のとり方に十分注意することが必要である。

(3) FRPを外ケーブルに用いたPC部材の曲げ耐力算定法は現在のところ確立されていない。従って、これまでに提案されている、鋼材を用いたアンボンドPC部材の耐力算定法を用いて計算した結果、実験値と異なることが明らかとなった。

(4) 曲げ耐力を精度よく計算するために、終局時におけるケーブルの伸びと、ケーブル位置にあるコンクリートの伸びが等しいという、変形の適合条件を仮定して、曲げ耐力を計算した。その結果、計算から求まる曲げ耐力、ケーブルの引張力等は実験値とよく一致し、本計算手法の妥当性が確かめられた。しかし、計算がやや複雑であるため、今後さらに検討して、実用設計に耐え

られる計算法を確立することが必要である。

(5) 外ケーブルによるコンクリート桁の補強方法としての適用性を検討することを目的として疲労実験を行った。その結果、本実験で使用した、FRP、定着装置、サドル等に限って言えば、FRPを外ケーブルで補強したPC部材の疲労性状は概して良好であることが確かめられた。

(6) 以上のように、FRPを外ケーブルに用いた構造物は、FRPの長所(高強度でさびない)を生かし、欠点(伸びひずみが小さい)を補う有望な構造形式のひとつであると言える。今後は、設計法、適用範囲、構造細目等について、詳細に検討していくことが必要である。

本研究を行うに当たって、当時埼玉大学生であった、高山英樹、檀 智之両君には多大な協力を頂いた。また、(株)ショーボンド建設吉田 弘氏、佐野 正氏、三井建設(株)田村富雄氏から貴重な御助言を頂いた。さらに、東京製綱(株)、神鋼鋼線(株)から材料の提供を頂いた。ここに記して、厚く御礼申し上げる次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば、日経ニューマテリアル、2-12, No. 75, 1990.
- 2) プレストレストコンクリート, Vol. 32, No. 5, 1990.
- 3) Pannel, F.N. : The ultimate moment of resistance of unbonded prestressed concrete beams, Magazine of Concrete Research, March, 1969.
- 4) Mattock, A.H., Yamazaki, J. and Kattula, B.T. : Comparative Study on Prestressed Concrete Beams, With and Without Bond, ACI Journal Feb., 1971.
- 5) 六車・渡辺・西山 : アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 1, Jan. 1984.
- 6) Park, R. and Paulay, T. : Reinforced Concrete Structures.
- 7) Mutsuyoshi, H., Machida, A. and Shiratori, N. : Application of Carbon Fiber Reinforced Cables to Concrete Structures, IABSE SYMPOSIUM BRUSSELS, 1990.

(1991. 6. 17 受付)

## MECHANICAL PROPERTIES AND FLEXURAL STRENGTH OF PC BEAMS USING FRP AS EXTERNAL CABLES

Hiroshi MUTSUYOSHI and Atsuhiko MACHIDA

Fiber reinforced plastics (FRP) developed recently is one of new structural materials. FRP is made of high strength continuous carbon, aramid or glass fibers impregnated with resin. FRP has some excellent properties such as 1) non-corrosion, 2) non-magnetization and 3) very small relaxation. This paper describes the mechanical properties of the prestressed concrete (PC) beams reinforced with FRP as external cables instead of ordinary steel tendons. The load-displacement behaviour of the beams using FRP showed almost the same as that using the ordinary steel tendon. The ultimate flexural strength of the beams could be calculated on the assumption that the elongation of the cable at the ultimate state is equal to that of the concrete which is in the same location as the cable. The external cable system using FRP can be applied to actual structures.