

# ロープ系連続繊維補強材を外ケーブル緊張材に用いた P C 部材の曲げ性状に関する研究

谷口裕史<sup>1</sup>・睦好宏史<sup>2</sup>・喜多達夫<sup>3</sup>・町田篤彦<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 ハザマ技術研究所技術研究部 (〒305 茨城県つくば市荻間字西向515-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

<sup>3</sup>正会員 工修 ハザマ技術研究所技術研究部第四研究室長

<sup>4</sup>正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

本研究は、ロープ系連続繊維補強材を外ケーブル緊張材に用いたP C部材を開発することを目的としたものである。まず、ロープ系連続繊維補強材を緊張材に用いた外ケーブル式ノンメタルP C部材の静的曲げ試験および繰り返し載荷試験を実施し、ロープ系連続繊維補強材は従来の連続繊維補強材と比較して曲げ配置による強度低下が少ないこと、筆者らの提案したCFRP拘束筋による靱性改善手法は外ケーブルP C部材の破壊性状を改善する上で有効であることを明らかにした。さらに、連続繊維補強材を用いた場合にも変形の適合条件および緊張材の位置変化を考慮した解析法により、その曲げ挙動を精度良く計算できることも明らかにした。

**Key Words :** external cable, externally prestressed concrete, FRP, aramid rope, ductility

## 1. はじめに

近年、わが国においても外ケーブル工法が注目されてきており、これに関する技術の現状、問題点などが調査、報告されている<sup>1)・2)</sup>。外ケーブル方式は、内ケーブル方式と比較して、1)ウェブ厚の減少による自重の低減、2)プレストレスの摩擦損失の減少、3)外ケーブル配置作業が比較的容易、4)部材内のシースが減少し、コンクリート施工が容易、5)緊張材が部材断面外に配置され、点検が比較的容易、6)緊張材の取り替え、再緊張が可能、などの利点を有している。一方、その構造的な特徴から、7)緊張材の防錆、8)デビエータ部あるいは定着部の応力検討、9)終局耐力の若干の低下、10)防振、11)緊張材の折れ線配置等の点には十分な配慮をする必要がある。

連続繊維補強材は耐食性に優れており、緊張材防錆の点で外ケーブル緊張材に適している。しかし、連続繊維補強材は鋼材と比較して伸びひずみが小さいために、コンクリート内部に配置した場合には、コンクリートのひびわれ発生に伴い、局所的な応力集中が発生し、連続繊維補強材破断の原因となる。これに対し、外ケーブル方式の場合、緊張材には、ほぼ一様な応力が作用するため、応力集中による連続繊維補強材破断の危険性を低減でき、連続繊維補強材の欠点を補う意味でも、その適用は有効である

と考えられる。しかし、睦好らの研究<sup>3)</sup>では、棒状の連続繊維補強材を外ケーブル緊張材として曲線配置する場合、その引張破断強度は直線状に配置した場合と比較してかなり低下し、破壊形式も、コンクリートの圧壊が先行するか、あるいはコンクリートの圧壊と同時に外ケーブル緊張材が破断する形式となり、非常に脆性的であることも指摘している。

以上のような観点から、本論文では、まず曲線配置による連続繊維補強材の引張破断強度の低下を改善する目的で、フレキシブルなロープ系連続繊維補強材を外ケーブル緊張材に用いたP Cはり部材の静的曲げ挙動および曲げ疲労特性を実験的に明らかにした。また、脆性的な破壊を防ぐために、筆者らの提案したCFRP拘束筋を適用する靱性改善手法<sup>4)</sup>の効果および補強材すべてを連続繊維補強材とした外ケーブル式ノンメタルP C部材の曲げ挙動についても実験的に明らかにした。さらに、部材の曲げ挙動について、変形の適合条件および外ケーブルの位置変化を考慮した解析手法を用いて解析的検討も行った。

表-1 使用した連続繊維補強材および鋼材の特性値

使用材料	公称直径 (mm)	公称断面 積(mm <sup>2</sup> )	公称破断 荷重(tf)	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
ロープ系繊維	17.0	76.4	15.0	13000	1.5
CFRP (より線)	7.5	30.4	5.8	14000	1.6
	10.5	55.7	9.8		
	15.2	113.6	20.3		
	17.8	154.9	27.7		
PC鋼より線	27.7	98.7	15.9*	20000	3.5
鋼材	9.5	71.3	18.7*	21000	>20

\*降伏荷重

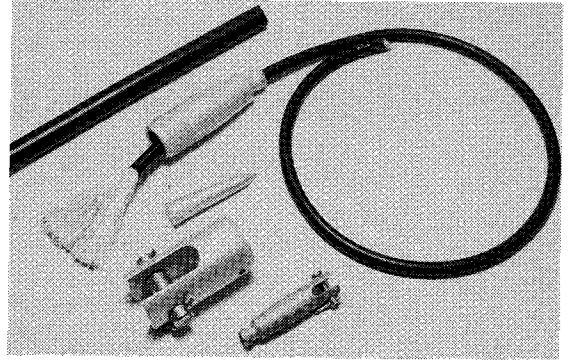


写真-1 ロープ系連続繊維補強材および定着具の外観

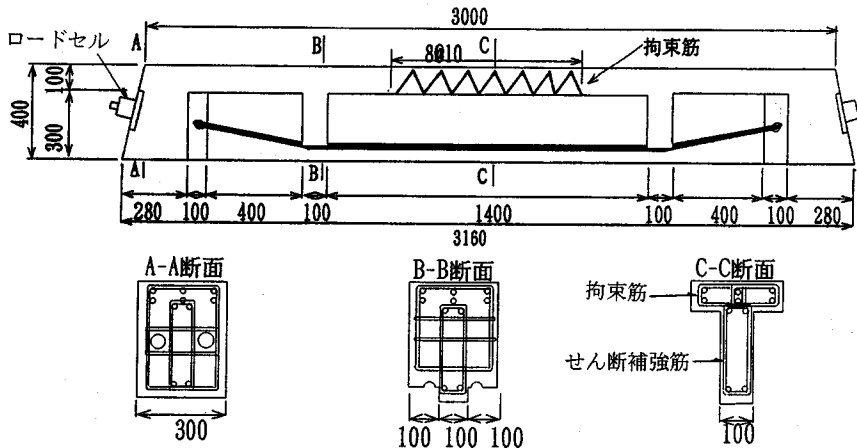


図-1 供試体の形状寸法

## 2. ロープ系連続繊維緊張材を用いた外ケーブルPC部材の静的曲げ性状

### (1) 概説

ロープ系連続繊維補強材は、繊維を樹脂で固めないため、可撓性に富むことから、曲線状に配置した場合の引張強度の低下が小さく<sup>3)</sup>、樹脂で硬化した連続繊維補強材よりも外ケーブル緊張材への適用性が高いと考えられる。このような観点から、まず、3種類の緊張材を用いた外ケーブルPC部材の基本的な曲げ挙動を実験的に明らかにすることにより、ロープ系連続繊維補強材の外ケーブル緊張材としての適用性を検討した(実験ケースI)。さらに、外ケーブルPC部材の脆性的破壊および靱性を改善する目的で、筆者らの提案したCFRP拘束筋を用いた靱性改善手法<sup>4)</sup>の効果を明らかにする(実験ケースII)とともに、内部補強筋(引張補強筋、せん断補強筋)にもCFRPを使用したノンメタルPC部材の曲げ挙動についても実験的に検討した(実験ケースIII)。

### (2) 実験概要

#### a) 使用材料および供試体の形状

本実験に使用した連続繊維補強材および鋼材の特性値を表-1に示す。ロープ系連続繊維補強材はアラミド繊維の並列繊維束を芯材としその周囲をポリエチレンで被覆したものであり、その外観および代表的な定着具の概要を写真-1に示す。ロープ系連続繊維補強材の公称破断荷重は15.0tfである。比較のために用いたPC鋼より線は降伏荷重がロープ系連続繊維補強材と同程度のものを選定した。また、CFRPは曲げ配置による強度低下が大きいという睦好らの報告<sup>3)</sup>を参考にし、公称破断荷重がロープ系連続繊維補強材の約2倍となるものを選定した。引張補強筋には鋼材および径の異なる3種類のCFRPを、せん断補強筋および拘束筋には、鋼材およびφ10.5mmのCFRPを使用した。なお、CFRPは、すべてより線タイプであり、拘束筋としての適用効果は確認されている<sup>4)</sup>。

本実験に用いた供試体の形状を図-1に示す。デビエータ部では、コンクリートと外ケーブル緊張材の摩擦を低減する目的でテフロンシートを挿入した。

表-2 静的載荷試験の実験概要

No	外ケーブル	引張補強筋	拘束筋	せん断補強筋	緊張力 (tf)	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	ロープ系繊維	鋼材	鋼材	鋼材 (10cm間隔)	12	320
2	CFRP φ17.8	鋼材	鋼材	鋼材 (10cm間隔)	12	360
3	PC鋼より線	鋼材	鋼材	鋼材 (10cm間隔)	12	300
4	ロープ系繊維	CFRP φ10.5	CFRP	CFRP φ10.5(5cm間隔)	12	263
5	ロープ系繊維	CFRP φ10.5	なし	CFRP φ10.5(5cm間隔)	13	317
6	ロープ系繊維	CFRP φ10.5	CFRP	CFRP φ10.5(5cm間隔)	13	351
7	ロープ系繊維	CFRP φ7.5	CFRP	CFRP φ10.5(5cm間隔)	13	330
8	ロープ系繊維	CFRP φ15.2	CFRP	CFRP φ10.5(5cm間隔)	13	393

また、拘束筋は、はり中央部フランジの80cmにわたって配置しておりその拘束筋比(Pw)は0.5%である。なお、フランジ部のかぶり厚は、CFRPの耐腐食性および拘束効果を考慮して、ほぼ0としている。

b) 実験要因および載荷試験の概要

実験要因を表-2に示す。供試体No.1~3は実験ケースⅠ、供試体No.4~6は実験ケースⅡ、供試体No.6~8は実験ケースⅢに対応している。なお、供試体No.4~8は、鋼材を補強筋として全く用いていないノンメタル外ケーブルPC部材である。プレストレスの導入量は12.0および13.0tfであり、これはロープ系連続繊維補強材で公称破断荷重の約40%、CFRPで約22%、PC鋼より線で降伏荷重の約38%である。この導入率は、従来のPC部材と比較して低い値であるが、①連続繊維補強材は降伏域を持たないために、破断荷重に達すると即破断し、部材の崩壊につながることで、②拘束筋による靱性改善手法をより有効に適用するためには、圧縮部コンクリートの圧壊が先行しても緊張材が破断しないようにする必要があり、③実構造物への適用を考えた場合、引張強度の設計値、リラクゼーション、セット量などを考慮すると、現時点では供用時のプレストレス量は、公称破断荷重の40~50%程度となることを考慮して選定した。なお、ロープ系連続繊維補強材は定着具内でのスリップを防ぐ目的で、所定の緊張力を導入する前に公称破断荷重の60%のプレロードを与えた。

載荷は、静的2点載荷とし、等曲げモーメント区間を40cm、スパン長を250cmとした。載荷ステップは0.5tfとし、各荷重毎にはり中央部およびデビエータ部の変位、緊張材張力の変化(定着部にセットしたロードセルにより測定)、緊張材およびコンクリートのひずみ、ひびわれ発生状況および最大ひびわれ幅などを測定した。

表-3 静的載荷試験の実験結果

No	ひびわれ発生荷重(tf)	最大荷重(tf)	破壊形式	終局時ケーブル荷重(tf)
1	7.5	20.4	緊張材破断	28.0
2	8.0	25.2	緊張材破断	34.3
3	8.0	23.9	緊張材降伏	34.8
4	9.0	26.6	補強筋破断	(27.4)
5	8.5	24.7	コンクリート圧壊	破断せず
6	8.5	24.7	補強筋破断	(28.8)
7	9.5	23.2	補強筋破断	- *
8	9.5	34.4	補強筋破断	破断せず

\* 補強筋と同時に破断したため測定できず

(3) 実験結果および考察

a) ひびわれ発生状況および破壊性状

実験結果を表-3に示す。実験ケースⅠにおいて、連続繊維緊張材を用いた供試体は、いずれもコンクリートの圧壊が先行する。拘束筋を有しない場合には、この時点で部材は崩壊すると考えられるが、その後も部材は崩壊せず変形が増大しており、拘束筋の効果により、部材の変形能(靱性)が改善されていることが確認された。なお、最終的には外ケーブル緊張材の1本が破断し終局に至った。この場合、ロープ系連続繊維緊張材は繊維が断続的に破断するために比較的ゆっくりと終局に至ったが、CFRPは爆裂音を発して一瞬で終局に至った。

実験ケースⅡにおいて、拘束筋を用いない供試体No.5は、圧縮部コンクリートにひびわれが発生し、変形が若干進んだ後、フランジ内に配置された軸筋が破断し、急激な破壊を示した。外ケーブル方式の場合、緊張材はコンクリート外部に配置されるため、部材変位が大きくなるに従い、部材に対する緊張材位置が高くなる。このために、圧縮部コンクリートが圧壊した瞬間に2次モーメントが作用し、急激な破壊を引き起こしたと考えられる。一方、拘束筋を

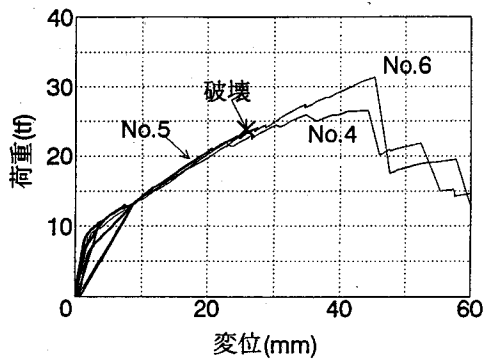


図-2 荷重-変位関係 (実験ケースII)

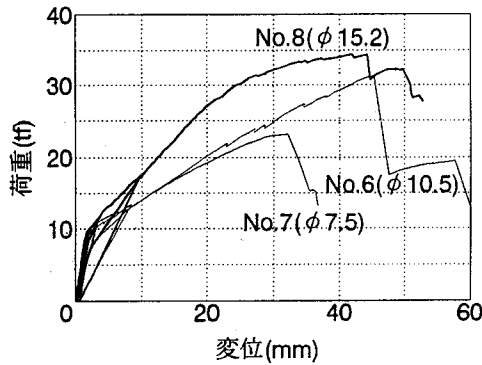


図-3 荷重-変位関係 (実験ケースIII)

配した供試体は圧縮部コンクリートにひびわれが生じ、かぶりコンクリートが剥離した後も変位が増大し、最終的にはロープ系連続繊維緊張材の1本が破断して終局に至った。このように、圧縮部コンクリートをCFRP拘束筋で拘束することにより、外ケーブル部材特有の急激な破壊を防ぐことができ、部材に靱性を付与できることが確認された。

CFRP補強筋を使用した実験ケースIIIでは、圧縮部コンクリートにひびわれが発生し、その後拘束筋の効果により変位が進んでくると、引張補強筋の少ない供試体No. 4, No. 6 (φ 10.5mm) および供試体No. 7 (φ 7.5mm) では、引張補強筋が破断する状況が確認された。一方、引張補強筋が多い供試体No. 8 (φ 15.2mm) では、引張補強筋が破断することはなく、フランジ部に配した圧縮補強筋が破断した。しかし、圧縮部コンクリートは拘束筋の効果により破壊することなく、いずれの引張補強筋を用いた場合にも、最終的な破壊はロープ系連続繊維緊張材の破断により終局に至った。

#### b) 荷重-変位関係

実験ケースIIにおける荷重-変位関係を図-2に示す。初期ひびわれ発生までは、弾性的な挙動を示し、ひびわれ発生後は、ほぼ一定の剛性を保つ。コンクリート内部に配置した引張補強筋であるCFRPの

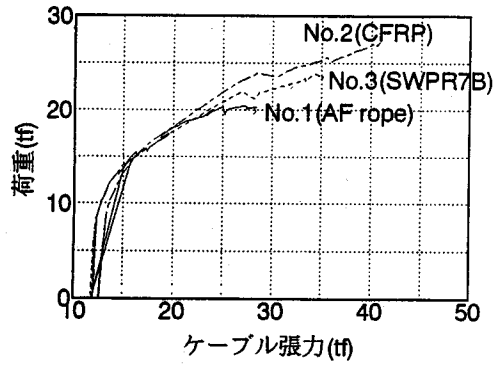


図-4 荷重-緊張力関係 (実験ケースI)

直径が一定であれば、すなわち、引張補強筋量が同じであれば、拘束筋の有無に拘わらず、圧縮部コンクリートにひびわれが発生するまでは同様な荷重-変位関係を示した。一方、圧縮部コンクリートのひずみが $3500\mu$ を越えひびわれが発生すると、拘束筋を配していない供試体No. 5は急激な破壊を示したのに対し、拘束筋を配した供試体No. 4およびNo. 6は拘束効果により圧縮部コンクリートが破壊せず、その後も荷重および変位が増大し、部材の変形能が大幅に改善された。

実験ケースIIIにおける荷重-変位関係を図-3に示す。引張補強筋量が多いほど曲げ耐力は増大するが、最も太径のCFRPを用いた供試体No. 8は、コンクリートの圧縮ひずみが $3000\mu$ を越えたあたりから剛性が低下し、荷重が増大せずに変位のみが増大する傾向が認められた。この原因としては、太径のCFRPを用いたことにより、ある荷重段階でCFRPの付着性状が変化したことが考えられる。

#### c) 荷重-緊張材張力関係

実験ケースIにおける荷重と緊張材張力の関係を図-4に示す。いずれの供試体もひびわれ発生までは緊張材張力の増加は少なく、ひびわれ発生後、荷重の増加にともない、張力も顕著に増大していく傾向が認められた。外ケーブル部材の場合、ひびわれ発生後コンクリートの変位が進むに従い外ケーブル緊張材との偏心量が大きくなり、緊張材に作用する張力も増大するものと考えられる。また、連続繊維緊張材を用いた供試体は最終的にはこれらの破断により終局に至っており、CFRPの場合には、公称破断荷重の約72%で破断しており、顕著な強度低下を示した。また、CFRPの破断箇所はデビエータ部であり、大きな爆裂音とともに一瞬に破断した。一方、ロープ系連続繊維緊張材の場合、公称破断荷重の約93%であり、連続繊維補強材のもつ高強度を有効に活用できると考えられる。破断位置はデビエータ部および定着部にある程度集中していたもののケーブル全長にわたっていた。また、破断時にも繊維

が順次破断するために、比較的緩やかに耐力が低下した。以上のことから、ロープ系連続繊維補強材は曲げ配置による強度低下が少なく、外ケーブル緊張材に適していることが明らかとなった。

### 3. ロープ系連続繊維補強材を外ケーブル緊張材に用いたPC部材の曲げ解析

#### (1) 概説

アンボンドPCあるいは外ケーブルPCにおいては、コンクリートと緊張材の間に付着が無いために、緊張材にひずみと緊張材位置のコンクリートひずみは一致せず、精解を得るためにはある荷重段階における緊張材の伸びと緊張材位置の全変形量が等しくなるという変形の適合条件を用いる必要がある。さらに、外ケーブルPCに関しては、その形状の特徴から、部材の変形にともないケーブル位置の変化が生じることも考慮する必要が生じる。このために、部材全体の变形を求め、各荷重段階におけるケーブル位置を求めることが必要となるが、これを考慮することにより外ケーブルPC部材の精度良い曲げ解析が行えることが報告されている<sup>3)・6)</sup>。

以上のような研究成果を踏まえ、ここでは連続繊維緊張材を用いた外ケーブルPCはり部材の曲げ挙動を变形の適合条件および緊張材位置の変化を考慮した精算法を用いて検討した。

#### (2) 解析方法

使用材料の応力-ひずみ関係は以下のように仮定した。1)鋼材およびPC鋼より線はそれぞれの降伏応力を折れ曲がり点とする完全弾性体とする。2)連続繊維補強材は降伏域を持たない直線関係とする。3)プレーンコンクリートは、原点から最大応力点までを2次曲線で、その後終局応力点までを直線とし、終局ひずみは $3500\mu$ とする。一方、拘束コンクリートは鋼製の拘束筋を用いた場合には境らの提案モデル<sup>7)</sup>を、CFRP拘束筋を用いた場合には、筆者らの提案したモデル<sup>4)</sup>を適用することにより、拘束コンクリートの最大応力、終局応力、最大応力時のひずみおよび終局ひずみを求めることができる。

解析における部材の曲げ終局時は、圧縮部コンクリートが終局ひずみに達するか、あるいは緊張材にひずみが終局引張ひずみに達した時とする。また、外ケーブル緊張材とデビエータ部の摩擦は無視する。なお、実験に用いた拘束筋を有する供試体は、すべて拘束コンクリートとして解析を行う。

要素の分割方法は、はりの長手方向でははり中央部から片側の端までの半分に対して約20の要素に分割した。一方、断面に関しては約30の要素に分割し

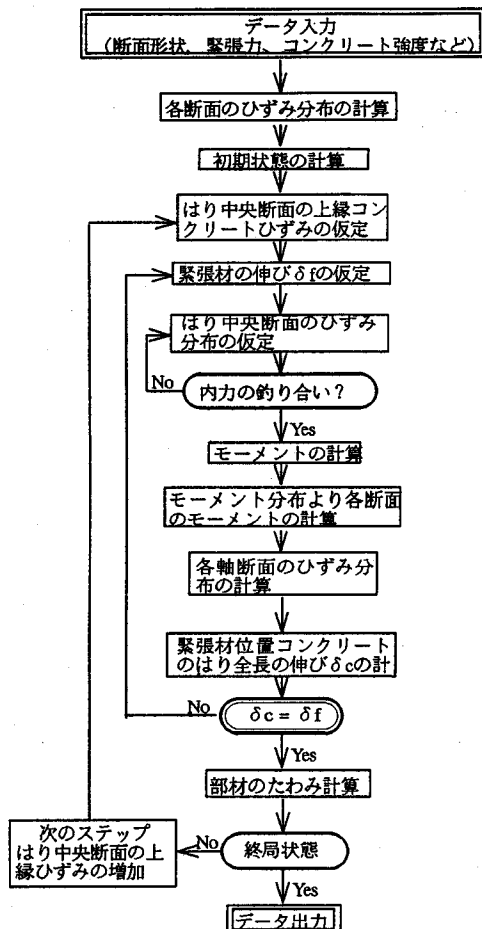


図-5 解析フロー

た。

解析のフローを図-5に示す。今回の解析では、はり中央断面の上縁ひずみにより計算ステップを制御しており、各ひずみ段階での部材の耐力および変形などを求めている。

#### (3) 解析値の検討

供試体No.1の荷重-変位関係および荷重-緊張材張力の関係を図-6および7に示す。曲げ耐力および破断時の緊張材応力は実験値の方が若干小さくなる傾向を示した。しかし、解析では、公称破断荷重までロープ系連続繊維緊張材は破断しない条件で計算しているのに対し、実験では公称破断荷重の約93%で破断していることを考慮するとほぼ一致していると言える。荷重-変位関係で見ると、コンクリート内部に配置された引張鉄筋が降伏するまでの剛性が解析値の方が若干大きくなっているものの、その後は、実験値をほぼ同等の剛性で荷重と変位が増大し

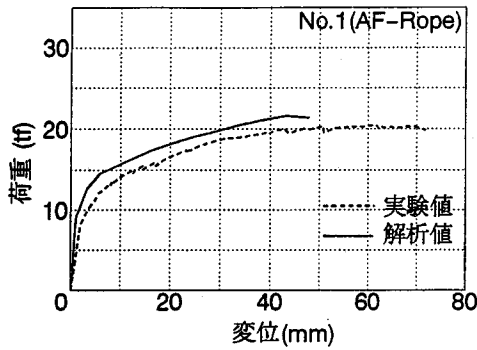


図-6 荷重-変位関係 (供試体No. 1)

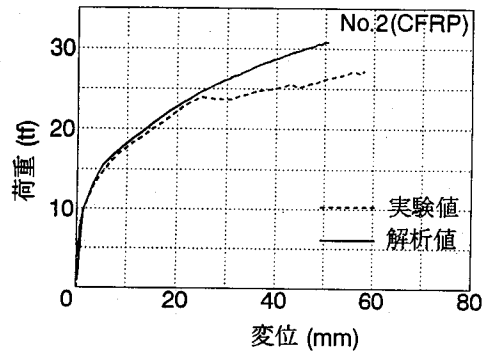


図-8 荷重-変位関係 (供試体No. 2)

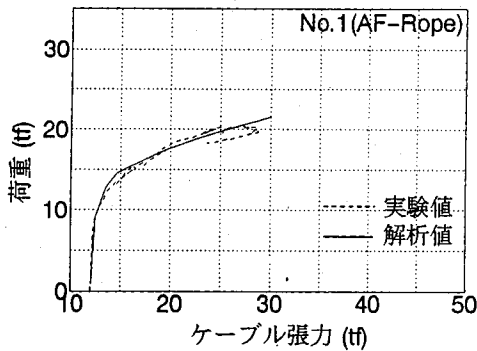


図-7 荷重-緊張力関係 (供試体No. 1)

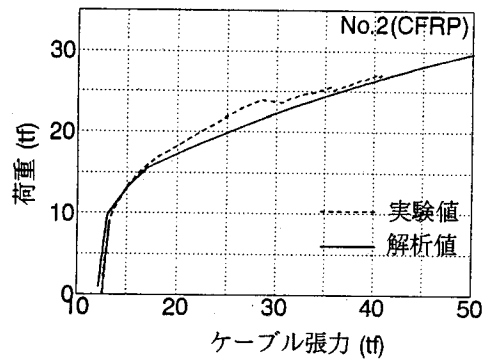


図-9 荷重-緊張力関係 (供試体No. 2)

ている。しかし、変位が30mmを越えたあたりから実験ではほとんど荷重の増加が進まないに対して、解析では一定の剛性で荷重も増大している。変位が30mmのあたりは、圧縮部コンクリートの圧壊が開始する変位であり、本実験に用いた供試体はかぶりコンクリートが薄く、徐々に剥離したために、耐力は増加せず変位のみが進行したと考えられる。これに対して、解析では、かぶりコンクリートは全く剥離しないと仮定していることから、一定の剛性をもって荷重も増加し続け、実験値よりも小さな変位でロープ系連続繊維緊張材の破断強度に達したと考えられる。

CFRP緊張材を用いた供試体No. 2の荷重-変位関係および荷重-緊張材張力の関係を図-8および図-9に示す。曲げ耐力および破断時の緊張材張力は解析値の方が、過大評価する結果となっている。荷重-変位関係では、コンクリートの圧壊が開始する変位25mmまでは、解析値と実験値はほぼ一致している。その後は、ロープ系連続繊維緊張材の場合と同様に、剛性が低下して変位のみが進行する結果となった。この供試体は曲げ配置による強度低下を考慮して、ロープ系連続繊維緊張材の約2倍の公称破断荷重を有するCFRPを配置している。このため、解析値では、圧縮部の拘束コンクリートが終局ひずみに達

するが、実験ではCFRPの破断により終局に至っている。このことから、CFRPが破断しなければ、最終変位はロープ系連続繊維緊張材を用いた場合と同様に大きくなると考えられる。

以上のように、連続繊維緊張材を外ケーブルに用いた場合にも、鋼材を用いた場合と同様に精算法により曲げ挙動を概ね解析可能であることが明らかとなった。ただし、この場合、連続繊維緊張材の曲げ配置による強度低下、すなわち、実際の破断荷重を解析に用いること、さらに拘束筋を配置した圧縮部コンクリートをプレーンコンクリートと拘束コンクリートの複合体として取り扱うことによりさらに精度良く解析できると考えられる。

#### 4. ロープ系連続繊維緊張材を用いた外ケーブル式ノンメタルPC部材の曲げ疲労特性

##### (1) 概説

2. では外ケーブルにロープ系連続繊維補強材、補強筋にCFRPを用いた鋼材を全く用いないノンメタル外ケーブルPC部材の静的曲げ挙動を明らかにした。このようなノンメタルPC部材を実構造物に適用することが可能となれば、鋼材を補強筋とした場合に懸念される腐食の問題を解決することがで

表-5 繰り返し載荷試験の実験結果

No	ひびわれ発生荷重 (tf)	ひびわれ幅 0.2mm時荷重 (tf)	ひびわれ幅 0.5mm時荷重 (tf)	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大荷重 (tf)	破壊形式
1	9.5	10.0	18.5	336	40.24	圧壊先行 200万回以上
2	9.5	11.0	16.0	319	38.61	圧壊先行 200万回以上
3	11.5	13.5	16.0	280	31.72	圧壊先行 200万回以上

表-4 繰り返し載荷試験の概要

No	上限荷重 (tf)	下限荷重 (tf)	載荷速度 (Hz)	緊張力 (tf)	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	9.5	2.5	2	13	327
2	16		1		346
3				17	350

き、第三種PCのようにひびわれを許容した適用方法も可能となると考えられる。

以上のような観点から、ここでは、ひびわれを許容した外ケーブル式ノンメタルPC部材が繰り返し荷重を受けた場合に問題となると考えられるコンクリートの疲労、外ケーブル緊張材の時間および繰り返し荷重による変化、さらにはコンクリート内部に配置したCFRPの疲労について実験的に検討した。

(2) 実験概要

本実験に使用した材料および供試体の形状は、静的載荷試験で用いた供試体No.8と同様である。実験要因を表-4に示す。供試体は3体であり、上限荷重および緊張力を実験要因とし、緊張力は13.0および17.0tfとした。また、上限荷重は、ひびわれ発生荷重(9.5tf)および最大ひびわれ幅が0.5mmとなる荷重(16.0tf)とした。この条件は、ひびわれを許容する場合に考えられる標準的な条件および最も厳しいと考えられる条件を想定している。繰り返し載荷回数は、200万回とし、200万回までに破壊しない場合には、繰り返し載荷終了後、破壊するまで静的載荷を行い、残存耐力および変形性状を確認した。

(3) 実験結果および考察

a) ひびわれおよび破壊性状

実験結果を表-5に示す。今回の実験条件の範囲内では、200万回の繰り返し載荷の途中で破壊する供試体は認められておらず、特に、緊張力を17.0tf

(公称破断荷重の約53%)とした場合にもロープ系連続繊維緊張材の破断は生じず、いずれの部材も良好な疲労特性を有していると言える。

また、いずれの供試体においてもせん断ひびわれおよびせん断補強筋の破断も認められておらず、現在提案されているせん断耐力算定式(例えば8)・9)で求めら

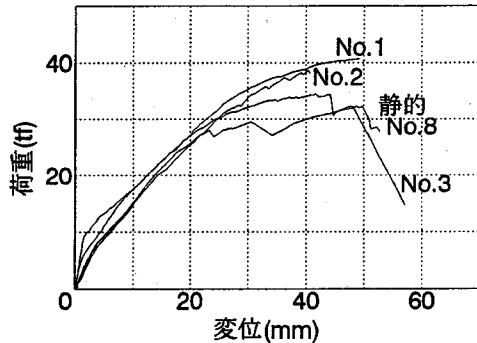


図-10 荷重-変位関係 (200万回載荷後)

れるせん断補強筋量を配筋することによりCFRPせん断補強筋による部材の崩壊は防げるものと考えられる。

一方、200万回繰り返し載荷後に行った載荷試験における部材の変形および破壊性状は、いずれの供試体も、コンクリートの圧壊が先行し、その後、圧縮部コンクリート内に配筋したCFRP拘束筋の効果により部材は崩壊せずに変形が進行し、最終的にはロープ系連続繊維緊張材が順次破断することにより崩壊に至っており、繰り返し載荷を受けた場合にも、静的載荷の場合と同様な破壊過程を示すことが確認された。このように、CFRP拘束筋および拘束コンクリートも繰り返し荷重を受けた場合にも健全であり、コンクリート圧壊時に部材が破壊せず、脆性的な破壊性状が改善され、さらに、変形能を改善することが可能であることが確認できた。

b) 荷重-変位関係

200万回載荷後に行った静的載荷試験時における荷重-変位関係を図-10に示す。なお、図中には比較として静的載荷試験における供試体No.8の荷重-変位関係も示している。200万回の繰り返し載荷を行った供試体は、初期の部材剛性はすでにひびわれが発生しているために、静的載荷時と比較して小さくなる傾向が認められるが、その後の挙動には顕著な差は認められない。すなわち、200万回の繰り返し載荷を経験した場合にも、いずれの供試体も圧縮部コンクリートにCFRP拘束筋を配置した効果により、部材に靱性を付与し、脆性的な破壊性状を改善していることがわかる。また、残存耐力を比較し

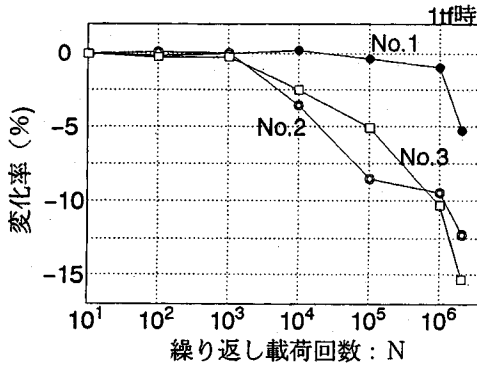


図-11 繰返し载荷に伴う緊張力の変化

た場合にも緊張力を13.0tfとした供試体No.1およびNo.2は静的载荷時の部材耐力と同等以上の残存耐力が得られており、繰返しにともなう終局耐力の低下が認められなかった。

一方、緊張力を17.0tfとした供試体No.3は供試体No.1およびNo.2と比較して部材変位が小さい段階で圧縮部コンクリートが圧壊に至ったためにCFRP拘束筋による拘束効果は十分に得られているものの、最大耐力は小さくなる傾向を示した。すなわち、導入プレストレスが大きい場合には、コンクリートの圧壊が早く始まる場合が考えられる。このため、導入プレストレス量とコンクリート強度の関係には十分注意を払う必要がある。

#### c) 外ケーブルの緊張力の変化

繰返し载荷による外ケーブルの緊張力の変化を図-11に示す。導入緊張力が13.0tfの場合、上限荷重が9.0tfの供試体No.1では100万回までは緊張力の低下はほとんど認められなかった。一方、上限荷重を16.0tfとしたNo.2では、繰返し载荷回数が10,000回あたりから緊張力の低下が認められ、200万回終了時には約12%の緊張力の低下が認められた。また、緊張力を17.0tfとした供試体No.3でも、同様な緊張力の低下が認められており、約15%の緊張力の低下が認められた。このように、上限荷重が大きいものほど緊張力の低下が大きくなる傾向が認められる。荷重一ひずみ関係あるいは破壊状況からもわかるように、繰返し载荷中における繊維の破断は生じておらず、緊張力の低下の原因は、ロープ系連続繊維緊張材自身のリラクゼーションおよび、上限荷重が大きいものほど応力振幅が大きくなるため、定着具内でのケーブルのずれによると考えられる。

一方、破壊時におけるロープ系連続繊維緊張材の破断箇所はいずれの供試体も定着具近傍およびデビエータ部でありほぼ同程度の繊維の破断が認められた。繰返し载荷後のロープ系連続繊維緊張材の外観は、上限荷重が9.0tfの場合では顕著な変化は認

められていないのに対し、上限荷重が16.0tfの場合では、デビエータ部でシース部が磨耗している状況が観察されており、大きな応力振幅を受ける場合には、デビエータ部でのシースの磨耗を減少させることが必要であると考えられる。

以上のように、上限荷重を大きくした場合には、緊張力の低減およびシースの磨耗の問題があることから、現状では、ノンメタル部材の場合でも、ひびわれ発生荷重を上限とした範囲で適用する必要があると言える。

#### 5. まとめ

本研究では、ロープ系連続繊維補強材を外ケーブル緊張材に用いたはり部材の静的曲げ挙動および曲げ疲労特性を実験的に明らかにするとともに、精算法を用いて曲げ挙動を解析的に検討し、その妥当性および問題点を明らかにした。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

(1) 外ケーブルにCFRP緊張材を用いた場合、CFRPがデビエータ部で爆裂音を発して急激に破断した。また、破断時の張力は公称破断荷重の約70%程度となり、曲線配置による強度低下が顕著であり、十分な配慮が必要である。一方、外ケーブルにロープ系連続繊維緊張材を用いた場合、破断荷重は、公称破断荷重の90%以上であり、連続繊維補強材のもつ高強度特性を十分に発揮できると考えられる。また、破断時の状況も繊維が徐々に破断することから、急激な破断を防ぐことができた。

(2) 拘束筋を用いない外ケーブル部材は、圧縮部コンクリートの圧壊が生じた瞬間に2次モーメントが作用し、非常に急激で危険な破壊性状を示した。これに対し、CFRP拘束筋を用いた靱性改善手法を適用することにより、このような急激な破壊性状を改善できるとともに、部材に靱性を付与することが可能となった。

(3) CFRP引張補強筋量を増大させることにより、部材の最大耐力を増大させることが可能となる。しかし、太径のCFRPを用いた場合には、耐力が頭打ちになる傾向も認められており、引張補強筋の配筋(CFRPの径および本数)および補強筋比を的確に選定することが必要である。

(4) 外ケーブル緊張材に連続繊維補強材を用いた場合にも、変形の適合条件およびケーブルの位置変化を考慮した精算法によりその曲げ挙動を解析することが可能である。しかし、外ケーブルの曲線配置による強度低下が大きい連続繊維補強材を用いた場合には、曲げ配置による強度低下を考慮した破断荷重を解析に適用する必要がある。



(5) 緊張力がロープ系連続繊維緊張材補強材の公称破断荷重の40~50%の範囲では、上限荷重をひびわれ発生荷重および最大ひびわれ幅0.5mmとなる荷重とした場合にも、200万回の繰り返し載荷で破壊せず、また、残存耐力も静的載荷の場合と同等であり、十分な疲労特性を有している。

(6) 上限荷重を大きくした場合には、ロープ系連続繊維緊張材に作用する応力振幅が大きくなり、載荷回数が10,000回を越えたあたりから緊張力の低下が認められた。また、デビエータ部でシースが磨耗する状況も観察されており、十分な配慮をする必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、当時埼玉大学大学院生であった土田一輝君、山口統央君、埼玉大学学生であった河田洋志君、藤岡篤史君の協力を得た。また、帝人(株)および東京製綱(株)より材料を提供して頂いた。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) 睦好宏史：外ケーブルPC構造物の現状と問題点，コンクリート工学，Vol. 31, No. 8, pp. 24-35, 1993.
- 2) ディビダーク協会：外ケーブルに関する調査研究報告書—最新の海外文献調査—，DYWIDAG技術資料93-2, 1993. 7.
- 3) 睦好宏史, 町田篤彦：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，土木学会論文集，V-16, No. 442, pp. 153-159, 1992.
- 4) 睦好宏史, 谷口裕史, 喜多達夫, 町田篤彦：連続繊維補強材を用いたPC部材の曲げ靱性改善に関する研究，土木学会論文集，V-18, No. 460, pp. 103-111, 1993.
- 5) 工藤朗太, 谷口裕史, 岡崎収輔, 石井誠司：緊張材用ロープ系連続繊維補強材の諸性質，第4回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 263-266, 1994. 10.
- 6) 睦好宏史, 土田一輝, MATUPAYONT Songkiat, 町田篤彦：外ケーブルPC部材の曲げ性状および曲げ耐力算定法に関する研究，土木学会論文集，No. 508/V-26, pp. 67-77, 1995. 2.
- 7) 境有紀：横拘束された高強度コンクリートの構成則，コンクリート工学年次論文報告集，第13巻，第2号，pp. 43-48, 1991.
- 8) 丸山久一, 小林俊彦, 清水敬二, 金倉正三：CFRPロッドを主筋およびスターラップに用いたコンクリートはりのせん断性状，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集，pp. 187-192, 1992.
- 9) 谷口裕史, 喜多達夫, 睦好宏史, 町田篤彦：FRPで補強したコンクリート部材のせん断耐力算定式の一評価，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp. 334-335, 1993.

(1995. 10. 12受付)

## BENDING CHARACTERISTICS OF PC MEMBERS USING ARAMID ROPE AS EXTERNAL CABLES

Hirofumi TANIGUCHI, Hiroshi MUTSUYOSHI, Tatsuo KITA  
and Atsuhiko MACHIDA

The objective of this study is to develop PC members using aramid ropes as external cables. First, static and dynamic characteristics of PC members using aramid ropes as external cables was investigated. It was found that aramid rope is more suitable than ordinary FRP when it is used for external cable. And, the ductility of PC members using FRP as external cables was improved by method using transverse CFRP to confine concrete. Second, it was found that the analytical method based on the compatibility of deformation and change of eccentricity showed a good agreement with test results.