

論文

[2152] ロープ状新素材を外ケーブルに用いたプレストレストコンクリートはりに関する研究

土田一輝<sup>\*1</sup>・陸好宏史<sup>\*2</sup>・谷口裕史<sup>\*3</sup>・喜多達夫<sup>\*4</sup>

1. はじめに

連続繊維補強材 (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する研究が盛んに行われている。FRPの引張強度は鋼材と同等あるいはそれ以上であり、腐食しない等の利点を有しているものの、鋼材と異なり伸び歪が小さくその破壊性状は脆性的であるという欠点も有している。このような欠点を補い、FRPの特性を有効に利用できる構造形式として外ケーブル方式のプレストレストコンクリート (PC) 部材が挙げられる。外ケーブル方式によりFRPを使用した場合、ケーブルに応力が一様にかかるため、コンクリート中に配置した場合と異なり応力集中によるFRPの破断の可能性を軽減することができる。しかしながら、樹脂で固められたロッド状のFRPをケーブルとして使用し、曲線状に配置した場合、曲げ上げ部の引張耐力が低下しFRPの高強度を有効に利用できないことが報告されている [1]。また、FRPを緊張材として用いたPC部材において、圧縮部コンクリートを拘束することによって、その破壊性状が改善できることが報告されている [2]。

本研究では、以上のような観点から、樹脂で固められていないロープ状新素材を外ケーブルに使用し、圧縮部コンクリートに拘束筋を用いたPCはり部材の実験的検討を行った。また、外ケーブル方式PC部材の耐力評価についても検討を行った。

表-1 外ケーブルに用いた材料の特性

種類	降伏点荷重 (tf)	切断保証荷重 (tf)	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
アラミドロープ	—	15.0	76.4	12900	1.5
SWPR7B	15.9	18.7	98.7	20000	3.5
CFRP φ17.8	—	27.7	154.9	14000	1.6

2. 実験概要

外ケーブルに使用したFRPおよび鋼材の特性値 (メーカー値) を表-1に示す。ケーブルに使用したロープ状新素材はアラミド繊維を並列繊維束として芯材にし、その周囲をポリエチレンなどのプラスチックで被覆したロープ (以下アラミドロープと称す) である。

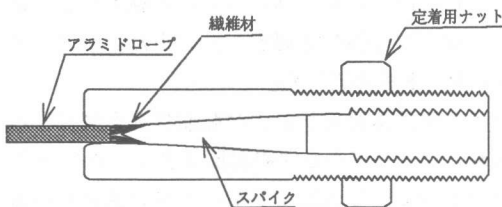


図-1 アラミドロープ定着具

\*1 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)  
 \*2 埼玉大学助教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)  
 \*3 (株)ハザマ 技術研究所 研究第2部第2研究室、工修 (正会員)  
 \*4 (株)ハザマ 技術研究所 研究第2部第2研究室 室長、工修 (正会員)

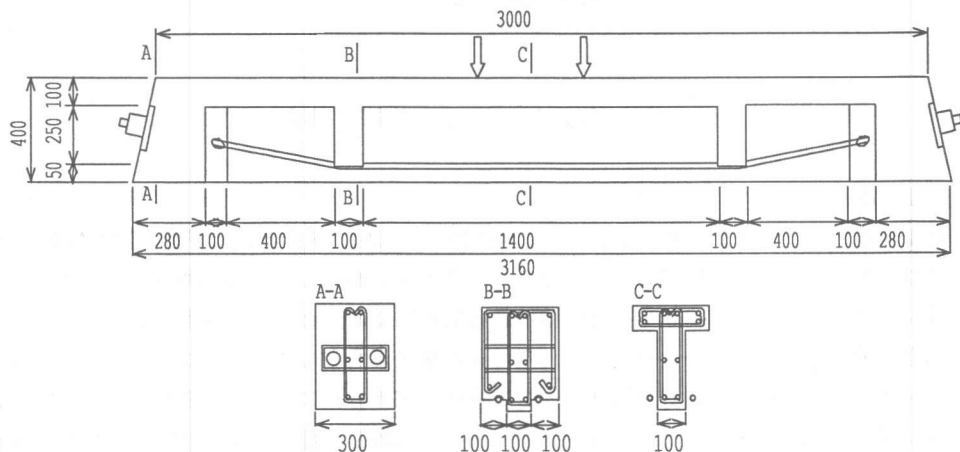


図-2 供試体形状寸法 (mm)

ロープの定着はステンレス製の定着具内にロープを挿入し繊維芯材中心にスパイク金具を挿入して固定することによって行った。定着具を図-1に示す。また、定着具内でのスリップを防ぐ目的で実験前に切断保証荷重の約60%のプレロード

表-2 実験要因

供試体 No.	ケーブル種類	補強筋種類	導入プレストレス量 (tf)	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	アラミドロープ	鋼材	1.2	3.20
2	アラミドロープ	CFRP	1.3	3.51
3	アラミドロープ	CFRP	1.2	2.63
4	鋼より線	鋼材	1.2	3.60
5	CFRP	鋼材	1.2	3.00

を与えた。はり供試体とケーブルとの定着はアラミドロープの定着具の表面にネジ加工を施し、供試体両端で固定する構造とした。

載荷実験に先立ちアラミドロープの性状を把握する目的で予備実験として引張試験およびはり供試体を用いてのプレストレス導入試験を行った。引張試験では、載荷実験に用いる供試体を想定し試験長を3mとして行った。また、プレストレス導入試験では、アラミドロープ表面のシース部に歪ゲージを貼付しロープの伸びを測定した。また、サドルとロープの摩擦をできるだけ除去するために、テフロンシートを挿入した。

載荷実験に用いたはり供試体の形状および配筋状況を図-2に示す。はり供試体は、T型はりでありケーブル定着部およびケーブルを曲線配置とするための曲げ上げ部(サドル)を有している。サドル面の曲率半径は40cmで、これによるケーブルの見かけの折り曲げ角度は11.3°である。はり中央部フランジには圧縮部コンクリートを拘束するために拘束筋を配置した。表-2に実験要因を示す。ケーブルにはアラミドロープを使用し、比較のために鋼より線およびCFRPを用いた。補強筋は鋼材(D10,SD340)およびCFRP(φ10.5)の2種類とした。なお、No2およびNo3供試体は鋼材を一切使用していない。プレストレス導入量はアラミドロープの切断保証荷重の40%程度と決め、1本あたり6tfとした。鋼より線およびCFRPのプレストレス導入量はアラミドロープと同量とした。載荷は1方向静的2点載荷とし、等曲げモーメント区間を40cmとした。載荷時には荷重、はり中央の変位、ケーブル張力の変化およびひび割れ等の測定を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 予備実験

予備実験として行ったアラミドロープの引張試験結果を表-3に示す。また、供試体を使用したアラミドロープのプレストレス導入試験より得られたケーブルの歪分布を図-3に示す。歪に多少のばらつきはあるものの、ほぼ一様にケーブルが伸びていることがわかる。また、ケーブル両端でのケーブル張力を測定したところ両端での張力の差はほとんどなく、サドル部における摩擦による影響がほとんどないことが明らかとなった。

#### 3.2 破壊性状

本実験に用いた供試体のうち、No.2を除く4体はコンクリートの圧壊が先行し、その後拘束効果により変形が進んだ。アラミドロープおよびCFRPをケーブルに用いた供試体では最終的にケーブルが破断に至った。供試体No.2は、拘束効果が発揮される前にコンクリート内に配置した主筋が破断した。

#### 3.3 荷重-変位関係

図-4および図-5に荷重-変位関係を示す。図-4に示す荷重-変位関係は、いずれもアラミドロープをケーブルとして用いた供試体のものである。初期クラック発生までは弾性的な挙動を示し、クラック発生後は補強筋に鋼材を使用した供試体No.1では変位の増大とともに剛性が低下していくことがわかる。補強筋にCFRPを用いている供試体No.2,3は、ともにクラック発生後、荷重の増加に対しほぼ一定の剛性を保っている。供試体No.2は荷重30tf過ぎで急激な耐力低下を示し、供試体No.3は荷重25tf過ぎで剛性の低下を示すもののやはり急激な耐力低下を示している。この供試体No.2およびNo.3における急激な耐力低下は圧縮部コンクリートの圧壊が生じるのとほぼ同時に主筋に用いたCFRPが終局歪に達し破断したためである。このことから、CFRPを主筋に用いる場合、どのように荷重を受け持たせるかを考慮し、主筋量、緊張材量

表-3 引張試験結果

	アラミドロープ破断荷重 (tf)	アラミドロープ破断時の伸び (%)
1	13.97	1.25
2	12.50	1.12
3	14.67	1.40

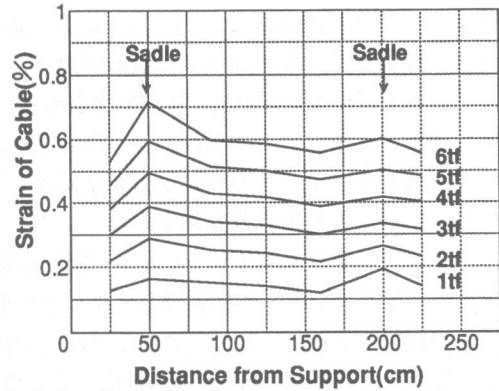


図-3 ケーブルの歪分布

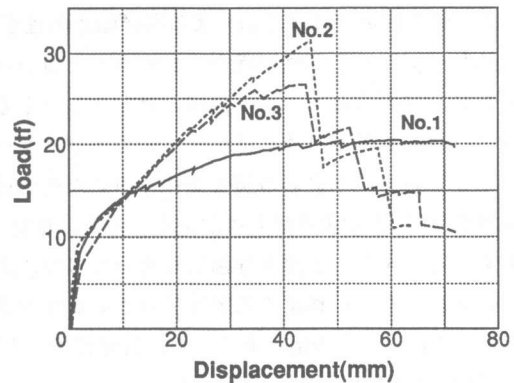


図-4 アラミドロープを用いたはりの荷重-変位関係 (No.1, 2, 3)

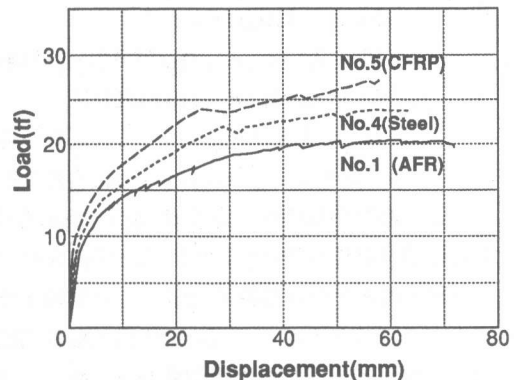


図-5 荷重-変位関係 (No.1, 4, 5)

および拘束筋量を的確に選定する必要があると考えられる。

外ケーブルの種類異なる供試体の荷重-変位関係を図-5に示す。いずれのケーブルを用いてもその性状はほぼ同様である。

### 3.4 荷重-ケーブル張力関係

荷重-ケーブル張力関係を図-6に示す。CFRPの場合、爆裂音とともにサドルで破断が生じ、サドルの曲げ上げによる耐力低下は切断保証荷重の70%程度であった。アラミドロープの場合は繊維が徐々に破断していき緩やかに耐力が下がり、切断保証荷重の90%以上の張力を示した。また、アラミドロープの破断箇所はサドル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渡り繊維が破断していた。予備実験と比較してもサドルでの曲げ上げによる強度低下はほとんどないことが確認された。これは、アラミドロープが樹脂で固められておらずフレキシブルな性質を有しているためであり、外ケーブルの曲線配置には有効であると考えられる。

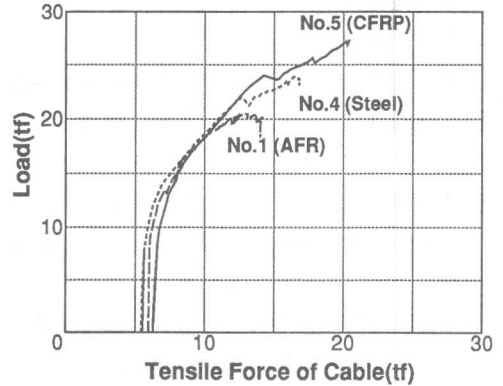


図-6 荷重-ケーブル張力関係

### 4. 簡易式および精算法による曲げ耐力の推定

外ケーブルPC部材の場合、ケーブルとコンクリートの間に付着がないため部材の各断面においてケーブル歪とケーブル位置のコンクリート歪が一致せず平面保持の仮定が成り立たない。そのため精算を得るためにはケーブルの伸びとケーブル位置のコンクリートの変形が部材全長に渡って等しいという変形の適合条件を用いなければならない。ここでは、変形の適合条件を用いた精算法[1]による曲げ耐力の推定を行った。精算法では最初にケーブル歪を仮定し各部材断面に作用するモーメントを要素分割法を用いて求め、次に部材全長に変形の適合条件を適用する手法を用いた。また、これまでに提案されているアンボンドPC部材の曲げ終局時の緊張材応力算定式を用いた曲げ耐力の推定を行った。計算に用いた既往の緊張材応力算定式を以下に示す。

#### 1) Naamanによる提案式[3][4]

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_{ps} \epsilon_{cu} (d_{ps}/c - 1)$$

ここで、 $c = (-B1 + (B1^2 - 4A1C1)^{0.5}) / 2A1$

$$A1 = 0.85 f_c b_w \beta_1$$

$$B1 = A_{ps} (E_{ps} \epsilon_{cu} \Omega_u (L1/L2) - f_{pe}) + A_s' f_y' - A_s f_y + 0.85 f_c' (b - b_w) h_f$$

$$C1 = -A_{ps} E_{ps} \epsilon_{cu} \Omega_u d_{ps} (L1/L2)$$

$$\Omega_u = 2.6 / (L/d_{ps}) \dots \dots 1 \text{点載荷の場合}$$

$$\Omega_u = 5.4 / (L/d_{ps}) \dots \dots 2 \text{点載荷の場合}$$

$f_{ps}$ : 曲げ終局時緊張材応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)     $f_{pe}$ : 有効プレストレス (kgf/cm<sup>2</sup>)     $A_{ps}$ : 緊張材断面積 (cm<sup>2</sup>)

$E_{ps}$ : 緊張材弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)     $L1$ : 載荷スパン長 (cm)     $L2$ : 緊張材長さ (cm)     $L$ : スパン長 (cm)

$d_{ps}$ : 緊張材までの有効高さ (cm)     $c$ : 中立軸までの高さ (cm)     $b$ : 断面の幅 (cm)     $b_w$ : ウェブ幅 (cm)

$h_f$ : フランジ幅 (cm)     $A_s$ : 引張側補強鉄筋断面積 (cm<sup>2</sup>)     $A_s'$ : 圧縮側補強鉄筋断面積 (cm<sup>2</sup>)

$f_y$ : 引張側補強鉄筋の降伏強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)     $f_y'$ : 圧縮側補強鉄筋の降伏強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\epsilon_{cu}$ : コンクリート終局歪     $\beta_1$ : 低減係数 (=0.8)

表-4 曲げ耐力と緊張材応力の推定

供試体 No.	ケーブル応力 $f_{ps}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )					曲げ耐力 (tf)				
	実験値	Naaman	Pannel	Mattock	精算法	実験値	Naaman	Pannel	Mattock	精算法
1	14686	18452 (1.25)	12387 (0.84)	11636 (0.79)	14921 (1.02)	19.3	21.5 (1.11)	15.3 (0.79)	14.6 (0.76)	20.3 (1.05)
2	14215	18452 (1.29)	12091 (0.85)	12589 (0.89)	15364 (1.08)	27.0	31.7 (1.17)	24.5 (0.91)	24.9 (0.92)	28.1 (1.04)
3	12958	18452 (1.42)	10646 (0.82)	11087 (0.86)	14583 (1.13)	23.0	31.3 (1.36)	22.6 (0.98)	20.3 (0.88)	26.4 (1.15)
4	9929	14100 (1.42)	12441 (1.25)	9187 (0.93)	15299 (1.54)	18.0	20.9 (1.16)	18.7 (1.03)	14.9 (0.83)	24.9 (1.38)
5	9148	16920 (1.85)	8091 (0.88)	6080 (0.66)	9813 (1.07)	24.0	38.2 (1.59)	18.8 (0.78)	14.3 (0.56)	24.7 (1.07)

( ): 計算値/実験値

2) Pannelによる提案式[5]

$$f_{ps} = f_{pe} + \gamma_s (1 - c/d_p)$$

ここで、 $c = (\mu_p A_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y - C_f) / (0.85 \beta_1 f_{cbw} + \gamma_s A_{ps} / d_p)$

$$C_f = 0.85 f_c' (b - b_w) h_f$$

$c < h_f$  の場合  $C_f = 0, b_w = b$

$$\gamma_s = 10.5 E_{ps} \epsilon_{cu} / (L / d_{ps}) \quad \mu_p = f_{pe} + \gamma_s$$

3) Mattockによる提案式[5]

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + 1.4 f_c' / \rho_{ps}$$

$\rho_{ps}$ : 緊張材比

曲げ耐力およびケーブル応力の実験値と計算値を表-4に示す。本実験に用いた供試体は拘束筋を使用しているためコンクリートが終局歪(0.35%)に達した後も圧縮部コンクリートは崩壊せず耐力は落ちない。そのため、アラミドロープおよびCFRPを外ケーブルに用いた供試体では最終的にケーブルが破断した。しかしながら、ここで計算に用いた既往の3式は通常の拘束筋を用いない部材の終局耐力の算定に適用される式である。そこで、実験値には圧縮部コンクリート歪が0.35%に達した時、即ち拘束筋を用いない場合、破壊となる時を終局時とし、その時の耐力およびケーブル応力を使用した。

Naaman式より得られた曲げ耐力およびケーブル応力は、いずれの供試体に対しても実験値よりも大きな値となっている。また、Pannel式では外ケーブルにアラミドロープおよびCFRPを用いた供試体に対し、かなり低い値となっている。Mattock式ではいずれの供試体に対しても計算値は実験値より低く、特にCFRPを用いた供試体では計算値と実験値の差が大きい。Mattock式では外ケーブルの弾性係数が含まれておらず、NaamanおよびPannelの式には弾性係数が含まれているが基本的に鋼材を用いたアンボンドPCはりに適用することを前提としていることが原因として考えられる。さらに、緊張材のプレストレス導入量が降伏強度の50%以上の範囲にのみ適用できることも本実験と異なる条件として挙げられる。一方、精算法により得られた曲げ耐力およびケーブル応力の場合、実験値に比べ全体的にやや高いものの、供試体No4を除くとほぼ一致していることが分かる。

これらの結果から、アラミドロープおよびCFRPを用いた外ケーブル方式のPC部材の耐力評価に既往の耐力算定式を用いることは困難であり、適用するためには弾性係数等の違いを考慮して算定式に用いられている係数等について検討する必要がある。変形の適合条件を用いた精算法の場合は、FRPを外ケーブルに用いたPC部材の耐力評価が可能であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究ではロープ状新素材を外ケーブルに用いたPCはりの載荷試験を行い、鋼より線およびCFRPをケーブルに用いたものとの比較を行った。また、既往の簡易式および精算法により曲げ耐力等の推定を行った。その結果、以下のことが言える。

- (1) ロープ状新素材を外ケーブルに用いたPC部材は、鋼より線を用いたものと同等の破壊性状を得ることができる。
- (2) ロープ状新素材をケーブルに用いた場合、曲げ上げによる耐力低下はほとんど生じない。
- (3) CFRPを補強筋として用いる場合、主筋量、緊張材量および拘束筋量の的確な選定が必要である。
- (4) FRPをケーブルとして用いた場合、既往の簡易式での耐力推定は困難であり耐力評価法の検討が必要である。変形の適合条件を用いて計算を行った場合、概ね耐力評価が可能である。

謝辞 本研究を行うに当たり、埼玉大学技官土澤英幸氏、元埼玉大学大学院生細井良二氏、元埼玉大学学生高橋一浩君、山口統央君には多大な協力を頂いた。また、埼玉大学教授町田篤彦先生、埼玉大学助手ウィリアム・タンゾ先生より貴重なご助言を頂いた。さらに、帝人(株)、東京製鋼(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] 陸好宏史、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、No.442/V-16、pp.153~159、1992.2
- [2] 谷口、陸好、喜多、町田、細井：CFRPを主筋および拘束筋に用いたPC部材の曲げ性状、コンクリート技術シリーズ、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.247~252、1992
- [3] Naaman, Antoine E., and Alkhairi, Fadai M., "Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons-Part 1: Evaluation of the State-of-the Art", ACI Structural Journal, Vol 88, No5, Sept-Oct. 1991, pp. 641-651.
- [4] Naaman, Antoine E., and Alkhairi, Fadai M., "Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons-Part 2: Proposed Methodology", ACI Structural Journal, Vol 88, No6, Nov-Dec. 1991, pp. 683-692.
- [5] Harajli, M.H., and Kanj, M.Y., "Ultimate Flexural Strength of Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons", ACI Structural Journal, Vol 88, No6, Nov-Dec. 1991, pp. 663-673.