

論文

[1203] CFRP を用いた外ケーブル部材の曲げ性状

齊藤宗*¹・森井惇雄*²・林田道弥*³・奥村一正*¹

1. はじめに

近年、鉄筋やPC鋼材の代替として軽量、高強度、耐久性に優れた連続繊維補強材の開発が活発化しており、連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の特性が数多く報告されている。また、連続繊維補強材の用途としては現在のところPC橋梁等の緊張材としての利用が主であるが、今後、耐食性と施工の省力化の観点から外ケーブル部材への適用が着目されている。外ケーブル部材の終局時の特性としては、従来のPC部材に比べて変形が大きく、コンクリートの圧縮破壊で破壊することが一般に知られているが、外ケーブルの終局時の応力変動を含めた耐力算定法が示されていないのが現状である。

そこで、本研究は連続繊維補強材(CFRPストランド)を緊張材とする外ケーブル部材の曲げ載荷試験を行い、曲げ耐力算定方法の検討を行ったものである。

2. 計画概要

外ケーブル部材の耐力算定を困難にしているのは、コンクリートとケーブルが一体化していないため、平面保持の仮定が成り立たず、一般にケーブルが降伏(破断)する前にコンクリートが曲げ圧縮破壊することである。このため、外ケーブル部材の曲げ耐力を算定するためには、破壊時の外ケーブル張力を正確に算出することが大切である。一方、外ケーブル部材と似た構造形式としてアンボンドPC構造があるが、これに関してはこれまでにいくつかの耐力算定式(実験式)が考案されている。外ケーブル部材は、ケーブルの曲げ上げ配置の違いによるコンクリートへの力の伝達がアンボンドPC部材と異なるが、これを考慮すればアンボンドPC部材の耐力算定式は外ケーブル部材の耐力算定において十分参考になるものと考えられる。

アンボンドPC部材の耐力算定式で主な変数として与えられているものは、導入プレストレス量、鉄筋比、コンクリート強度等である。そこで、本研究においては、これらの要因のうち導入プレストレス量、鉄筋比に着目し、さらに連続繊維補強材を用いる場合には緊張材の弾性係数が異なるので、これらを変数とした載荷実験を行った。実験結果に対しては部材の各荷重段階での物性を調べるために非線形フレーム解析との比較を行い、終局耐力も含めて本解析の妥当性を検証し、耐力の算定に関してはアンボンドPC部材に用いられている簡易式の適用性についても検討した。

3. 実験概要

3. 1 試験体製作

表-1に今回載荷実験を行った試験体の種類を示す。本研究ではケーブルの種類、導入プレストレス量、鉄筋比を以下のように考慮して試験体を製作し、載荷実験を行った。

* 1 鹿島技術研究所第一研究部(正会員)

* 2 鈴木金属工業(株)市場技術開発部長

* 3 新日本製鐵(株)新素材事業本部

①ケーブルの種類による影響：

外ケーブル部材は変形によってケーブル張力が変化するのでケーブルの弾性係数が異なれば、同じ変形時の張力が異なり、耐力および変形性能に影響を与える。そこで、弾性係数の違う二種類のケーブルについて比較を行うこととし、No. 1、No. 2試験体はケーブルにP C鋼材を使用

し、No. 3～No. 6試験体はケーブルにC F R Pストランドを使用した。

②導入プレストレス量による影響：外ケーブル部材の曲げ破壊はコンクリートの圧縮破壊で決まることが多く、導入プレストレス量が曲げ耐力に影響を及ぼす。そこで、その影響を調べるために、導入プレストレス量を10tf、15tf、20tfと変化させた。

③鉄筋比による影響：鉄筋比の変化はひびわれ分散性に影響を与え、変形状況に差異が生ずる。外ケーブル構造は変形によってケーブル張力が変化するので、変形条件が異なれば曲げ耐力および荷重と変位の関係に影響を及ぼすことになる。そこで、鉄筋比の影響を調べるためNo. 1～No. 4試験体の鉄筋比は、プレレストコンクリートの最小鉄筋量0.1%を満たすようにコンクリート全断面積の0.15% ($p_w = A_s / b_w d = 0.23\%$) で、No. 5～No. 6試験体はR Cの最小鉄筋量 (T型はりの場合 $p_w = 0.3\%$) を満たすように $p_w = 0.41\%$ とした。

載荷実験を行った試験体形状および配筋状況を図-1に示す。試験体は桁長4.4m、支間長3.4mのT型ばりで主筋およびスターラップにはSD295Aの異形鉄筋を用いた。荷重は1方向の2点載荷とし、等曲げモーメント区間を50cmとした。外ケーブルは図-1に示すように、はりの両外側に1本ずつ合計2本配置し、定着はP C鋼より線の場合クサビチャックで定着し、C F R Pストランドの場合ケーブル端部にネジ付き定着スリーブを圧着し、これをナットで定着した。載荷実験時には荷重、鉄筋のひずみ、コンクリートのひずみ、スパン中央のはりの変位等を図-1に示す位置で計測した。

表-1 試験体の種類

試験体	使用ケーブル	使用鉄筋	鉄筋比 ($p_w, \%$)	導入プレストレス量 (tf)	コンクリート強度 (kgf/cm^2)
NO. 1	PC鋼より線	D10	0.23	10	499
No. 2	PC鋼より線	D10	0.23	15	509
No. 3	CFRPストランド	D10	0.23	10	570
No. 4	CFRPストランド	D10	0.23	20	580
No. 5	CFRPストランド	D13	0.41	10	541
No. 6	CFRPストランド	D13	0.41	20	610

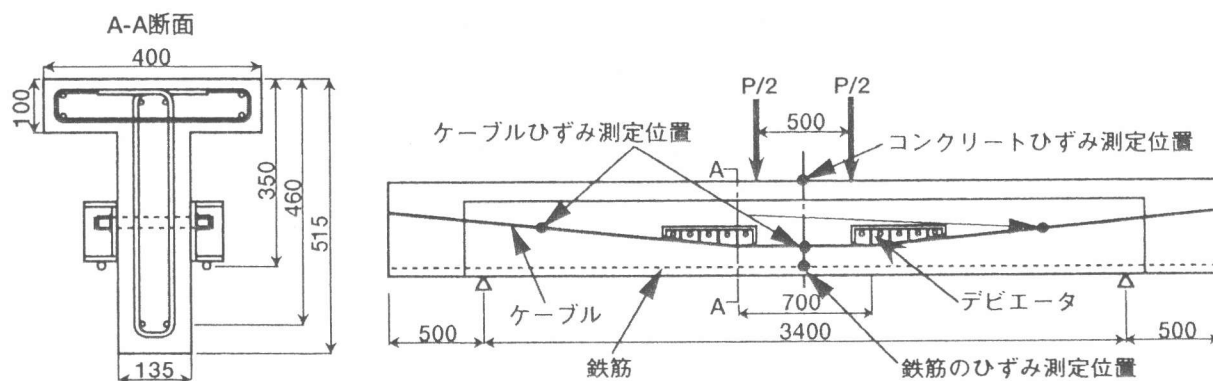


図-1 試験体図

3. 2 使用材料

外ケーブルに使用した材料は、P C鋼より線(SWPR7B, $\phi 15.2$)、P A N系C F R P 7本よりス

トランド (φ15.0) の2種類である。表-2に使用した外ケーブルの機械的性質を示す。表-2に示した値は、PC鋼より線の場合ミルシート値、CFRP 7本

表-2 外ケーブルに使用した素材の機械的性質

名称	種類	降伏点荷重 (tf)	破断荷重 (tf)	断面積 (cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
PC鋼より線	SWPR7B(φ15.2)	24.7	27.7	1.387	2.0×10 ⁶
CFRPストラッド	7本より線(φ15.0)	—	37.0	1.374	1.4×10 ⁶

よりストラッドの場合外ケーブルに使用したCFRPと同じロットのもので引張試験を行った結果である。

3.3 デビエータ

本実験では外ケーブルを曲げ上げ配置するために曲げ上げ部(デビエータ)を設置した。デビエータは鋼製で、曲げ上げ半径2000mmに加工し、外ケーブルとの摩擦をなるべくなくすため、表面をメッキ処理しテフロンシートを挿入した。ケーブルは曲げ上げ角度6.0°になるように配置して、緊張はデビエータ部分での摩擦損失がほとんどないことから片引きとし、確認のために両端での緊張材張力の測定、外ケーブルのひずみ測定を行った。

なお載荷実験に先立ち、曲げ上げ半径2000mm、曲げ上げ角度6.0°で曲げ上げたCFRPストラッドにテフロンシートを挿入した状態で引張試験を実施し、CFRPの保証強度を満足することと、摩擦損失もほとんどないことを確認した。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

本載荷実験で得られた、荷重と変位の関係を図-2に、ひびわれ発生状況の一例を図-3に示す。

鉄筋比の少ないNo.1~No.4試験体は、P=8.4tf~13.0tf程度(P:荷重,以下同様)で載荷点直下とスパン中央にひびわれが発生すると同時に鉄筋が降伏し、デビエータ設置部にもひびわれが発生した。その後、荷重の増加に伴い等曲げ区間のひびわれ幅が大きくなりコンクリートが圧縮破壊すると同時に最大荷重を示した。

鉄筋比の大きいNo.5、No.6試験体はP=8.4tf、13.0tfでスパン中央にひびわれが発生し、その後等曲げ区間とデビエータ部分に複数のひびわれが発生し、等曲げ区間のひびわれ幅が大きくなりコンクリートが圧縮破壊し、かぶり部が剥離した。

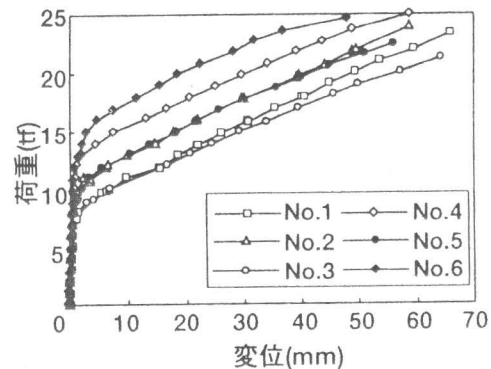


図-2 荷重と変位の関係

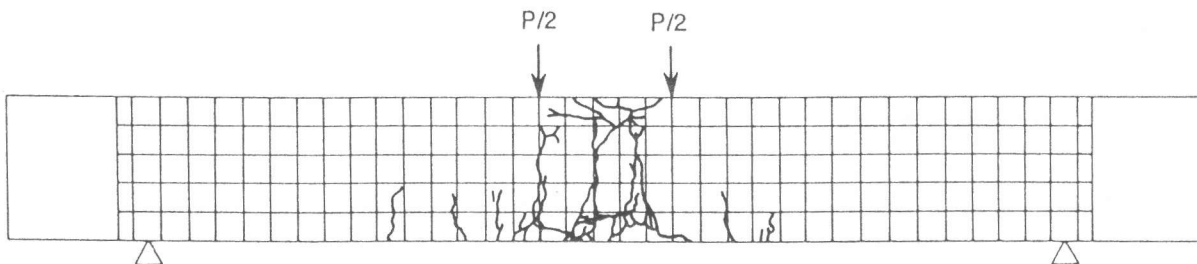


図-3 ひびわれ状況図(No.6)

なお、圧縮破壊後
 載荷を続けると帯鉄
 筋の拘束効果により
 ただちに耐力を失う
 ことはなかった。ま
 た、全ての試験体で
 せん断ひびわれは発
 生しなかった。

さらに、今回の実
 験では、外ケーブル
 の最大張力は26tfに
 達したが、CFRPスト
 ランドとデビエータ
 の接している部分
 を観察したところ、
 CFRPストランドに
 損傷は認められな
 かった。

4. 2 ケーブルの種類による影響

ケーブルの種類（弾性係数： E_p ）の異なる試験体の荷重と変位関係の一例として、図-4にNo.1とNo.3試験体の結果を示す。どちらの試験体もひびわれ発生までは同じ挙動を示すが、その後、荷重が増えるにしたがって弾性係数の小さなNo.3試験体の変位はNo.1試験体に比べて大きくなり、両者は離れる傾向を示した。また、曲げ耐力はNo.1試験体の方が10%程度大きかった。このように、弾性係数の差は同一荷重に対する変位量の差になって表われることが確認できた。

4. 3 導入プレストレス量による影響

導入プレストレス量（ P_o ）が異なる試験体の荷重と変位関係の一例として、図-5にNo.5とNo.6試験体の結果を示す。どちらの試験体も、ひびわれ発生後の荷重と変位関係の勾配はほとんど等しいが、導入プレストレス量が多いほどひびわれ発生荷重が大きい。また、本試験の範囲では、導入プレストレス量が多いほど曲げ耐力が大きい傾向を示した。

4. 4 鉄筋比による影響

鉄筋比（ p_w ）の異なる試験体の荷重と変位関係の一例として、図-6にNo.4とNo.6試験体の結果を示す。どちらの試験体も導入プレストレス量が等しいのでひびわれ発生荷重は等しい。しかしNo.4試験体はひびわれ発生と同時に鉄筋が降伏し剛性低下が著しいのに対して、No.6試験体はひびわれ発生後も鉄筋降伏までは剛性低下が少なく、その後、著しい剛性低下を示すことが認められた。しかし、曲げ耐力においては、両者に大きな差は認められなかった。また、No.4とNo.6と

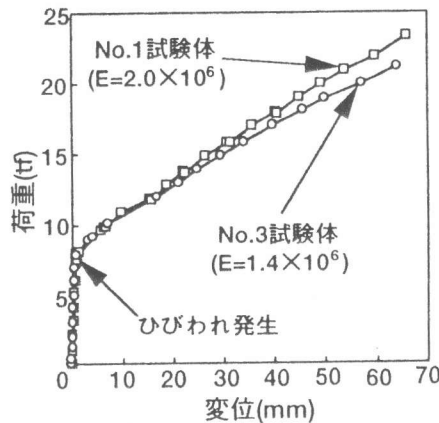


図-4 ケーブル弾性係数の影響

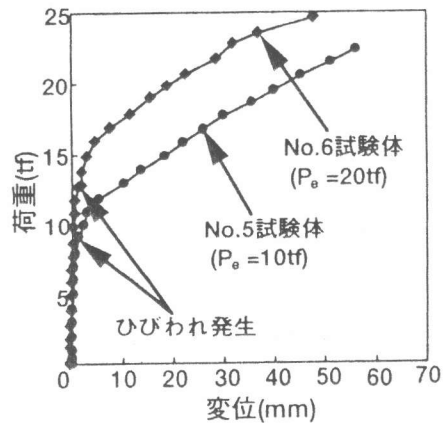


図-5 導入プレストレス量の影響

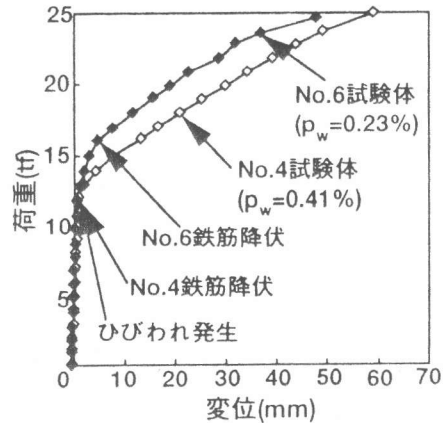


図-6 鉄筋比の影響

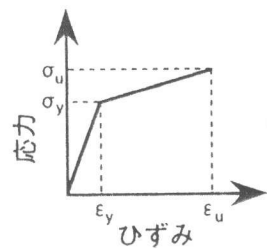


図-7 PC鋼線のモデル

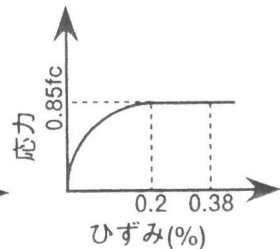


図-8 コンクリートのモデル

表-3 解析に使用した鉄筋の特性値

鉄筋名	降伏		破断	
	ひずみ ($\epsilon_y, \%$)	応力 (σ_y) (kgf/cm ²)	ひずみ ($\epsilon_u, \%$)	応力 (σ_u) (kgf/cm ²)
D10	0.17	3592	27	5296
D13	0.16	3285	28	4990

同様の関係にあるNo. 3とNo. 5においても曲げ耐力に差は認められなかった(表-4参照)。

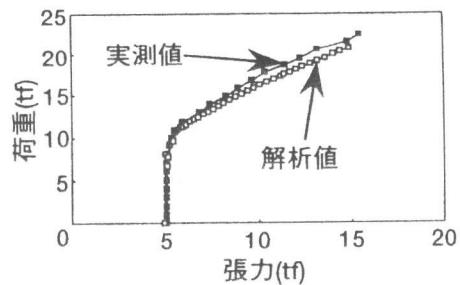
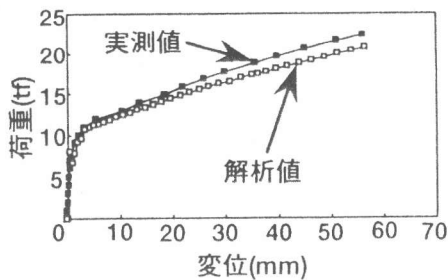


図-9 荷重と変位の比較図(No. 5) 図-10 荷重と張力の比較図(No. 5)

5. 解析値と実測値の比較

今回の実験において、耐力を精度よく算定するには終局時までの変形が大きいこと、また非線形領域の材料特性を考慮することが大切である。外ケーブル部材は、平面保持の仮定を適用出来ないためRC梁と外ケーブルを別の部材としてモデル化を行い、幾何学的

表-4 解析値との比較

試験体	曲げ耐力(tf)			緊張材張力(tf)			変位(mm)		
	実測値	解析値	／ 実測値	実測値	解析値	／ 実測値	実測値	解析値	／ 実測値
No. 1	23.4	20.5	0.88	18.4	17.1	0.93	66.0	49.7	0.75
No. 2	24.0	22.0	0.92	19.5	18.7	0.96	59.0	45.9	0.78
No. 3	21.2	18.9	0.89	16.2	15.3	0.94	64.3	58.5	0.91
No. 4	25.0	22.4	0.90	20.4	19.0	0.93	59.0	51.8	0.88
No. 5	22.4	20.8	0.93	15.5	14.9	0.96	56.1	56.6	1.01
No. 6	24.7	25.0	1.01	17.8	19.4	1.09	49.3	53.6	1.09

非線形性・材料非線形性を考慮できるフレーム解析手法を用いて検討した。使用したモデルは、全体を26分割し、各断面は55層としたもので、鉄筋の応力とひずみの関係は、図-7に示すようにバイリニアで、降伏点と破断点を結ぶ線であると仮定し、ミルシートの値(表-3参照)を参考にした。コンクリートの応力とひずみの関係は、図-8に示すように、降伏点のひずみを0.2%、応力を $0.85f_c$ (f_c :コンクリートの圧縮強度)とし、破壊ひずみは実験値と比較するため実験で得られた破壊ひずみである0.38%を使用した。本実験で得られた曲げ耐力、曲げ破壊時の外ケーブル張力および変位について、実験値と解析値を比較して表-4に示し、荷重と変位および荷重と張力関係を比較して図-9、図-10に示した。これより実験値と解析値は曲げ耐力と曲げ破壊時の外ケーブル張力と変位のいずれについてもよく一致していることが分かった。また、荷重と変位の関係と、荷重と張力の関係についても、精度よく求めることが出来、本解析手法は外ケーブル部材の算定に有効であることが分かった。

6. 簡易的な耐力算定式について

これまでに提案されている、アンボンドPC部材の曲げ耐力算定式はいくつかあるが、外ケーブル部材への適用まで拡張したものにNaamanによる提案式がある[1]。ま

表-5 簡易式(計算値はNaaman式)との比較

試験体	曲げ耐力(tf)			緊張材張力(tf)		
	実測値	計算値	／ 実測値	実測値	計算値	／ 実測値
No. 1	23.4	23.0	0.98	18.4	21.7	1.18
No. 2	24.0	24.6	1.02	19.5	23.5	1.20
No. 3	21.2	21.0	0.99	16.2	19.3	1.19
No. 4	25.0	24.2	0.97	20.4	22.9	1.12
No. 5	22.4	22.0	0.98	15.5	18.3	1.18
No. 6	24.7	26.2	1.06	17.8	22.9	1.28

た、この式はケーブルの弾性係数、鉄筋比を変数として評価できるため、ここではこの式の適用性を検討した。Naamanによる提案式を以下に示す。また、曲げ耐力と破壊時の緊張材張力の実験結果と計算値の比較を表-5に示す。表-5より計算値は緊張材の張力が実験値よりやや大きいものの耐力値はよく一致しており、外ケーブルの弾性係数、導入プレストレス量、鉄筋比の違いを考慮出来る簡易的な算定方法のひとつであると言える。緊張材張力の誤差が大きい(最大30%程度)点に関しては、今後さらに実験データの蓄積を行って検討する必要がある。

☆Naamanによる提案式[1]

$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_p \epsilon_{cu} (d_{ps}/c - 1) (L_1/L_2)$	f_{ps} : 曲げ終局時緊張材応力
ここで、 $c = (-B_1 + (B_1^2 - 4A_1 C_1)^{0.5}) / 2A_1$	f_{pe} : 導入プレストレス
$A_1 = 0.68 f_c b$	ϵ_{cu} : コンクリート終局ひずみ
$B_1 = A_{ps} (E_p \epsilon_{cu} \Omega_u (L_1/L_2) - f_{pe}) - A_s f_y$	d_{ps} : 緊張材の有効高さ
$C_1 = -A_{ps} E_p \epsilon_{cu} \Omega_u d_{ps} (L_1/L_2)$	f_c : コンクリート強度、 b : 部材幅
$\Omega_u = 3 / (L/d_{ps})$	A_{ps} : 緊張材断面積、 L_1 : 載荷スパン長
	L_2 : 緊張材長さ、 A_s : 鉄筋断面積
	f_y : 鉄筋降伏強度、 L : スパン長

7. まとめ

本研究は、CFRPストランドの外ケーブル梁への適用をねらいとして、T型外ケーブル梁の載荷実験を行い、解析値との比較および簡易式との比較を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) ケーブルの弾性係数が小さいと変形が大きくなり、相対的に部材剛性を低減することになる。
- (2) 導入プレストレス量が多いと、ひびわれ発生荷重を高めるが、その後、荷重と変位関係への影響は少ない。
- (3) 鉄筋比はひびわれ発生後の剛性に著しい影響を与える。
- (4) 幾何学的非線形性・材料非線形性を考慮できるフレーム解析法を用いて外ケーブル部材の曲げ耐力や緊張材張力や変位を履歴も含めて精度よく算出することが出来る。
- (5) 本実験では実験値とNaamanによる提案式を用いて算出した耐力はほぼ一致した。しかし、緊張材張力の算定については今後さらに検討が必要である。

[謝辞] 本研究の解析手法につきましては、鹿島情報システム部沖見芳秀氏に多大なご協力を頂きました。ここに、厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

[1] Naaman, A. E. : "External Prestressing For Rehabilitation Analysis and Design Implications", Fourth International Conference on Structural Failure Durability and Retrofitting, pp. 485-495, Jul. 1993

[2] 土田一輝、睦好宏史、谷口裕史、喜多達夫：ロープ状新素材を外ケーブルに用いたプレストレスコンクリートはりに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2, pp. 899-904, 1993