

論文 CFRP を外ケーブルに用いたP C連続梁の曲げ特性

齊藤宗*¹・秋山暉*²・竹田敏和*³・森井惇雄*⁴

要旨：外ケーブルP C部材は、ケーブル応力振幅の軽減等の利点があり、新規構造物ばかりでなく、既存構造物の補修・補強の観点からも最近注目されている構造形式であるが、耐力算定方法が確立されていないのが現状である。そこで筆者らは、外ケーブルP C部材の曲げ性状把握および耐力算定方法確立のため、外ケーブルP C単純梁の載荷実験を行い、曲げ耐力等を精度良く算定することができるフレーム解析や簡易式をすでに提案した。本実験では、フレーム解析等の適用範囲を連続梁にも広げるために、外ケーブルP C連続梁の載荷実験を行い、フレーム解析等の適用性検討を行ったものである。

キーワード：新素材、外ケーブルP C部材、連続梁、T型梁、曲げ特性、フレーム解析

1. はじめに

外ケーブルP C部材は、ケーブルの応力振幅の軽減や、ケーブルのグラウトが不要のためケーブルの再緊張・取換が可能である等の利点があり、新規構造物ばかりでなく、既存構造物の補修・補強の観点からも最近非常に注目されている構造形式である。外ケーブルP C部材の終局時の特性としては、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方法が示されていないのが現状である。このため、筆者らは、ケーブルにP C鋼材および耐久性に優れるCFRPストランドを用いた外ケーブルP C単純梁の載荷実験を行い、曲げ耐力や変位等を精度良く算定することができる複合フレーム解析や、簡易的に曲げ耐力等を算定することができる簡易式の提案を行った[1]、[2]。

さらに、本研究では、実際の構造物で多く用いられている連続梁構造にも、単純梁の曲げ耐力等を精度よく算定できる解析方法および簡易式の適用範囲を広げるため、ケーブルにCFRPストランドを使用した2径間連続外ケーブルP C梁の載荷実験を行い、実験値と解析値および簡易式による値の比較をすることにより、解析方法および簡易式の妥当性の検証を行ったものである。

2. 実験概要

2. 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、外ケーブルP C梁の曲げ耐力に大きな影響を与えられる、導入プレストレス量、鉄筋比の2種類をパラメータとし、以下のように考慮して合計4体の試験体を作製した。

①導入プレストレス量：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によってコンクリートの圧縮応力に差異が生じ、曲げ耐力が異なる。その影響を調べるため、導入プレストレス量を10tf、20tfと変化させた。

* 1 鹿島技術研究所第一研究部（正会員）

* 2 鹿島技術研究所第一研究部主管研究員（正会員）

* 3 新日本製鉄(株)新素材事業部部長代理

* 4 鈴木金属工業(株)市場技術開発部部长

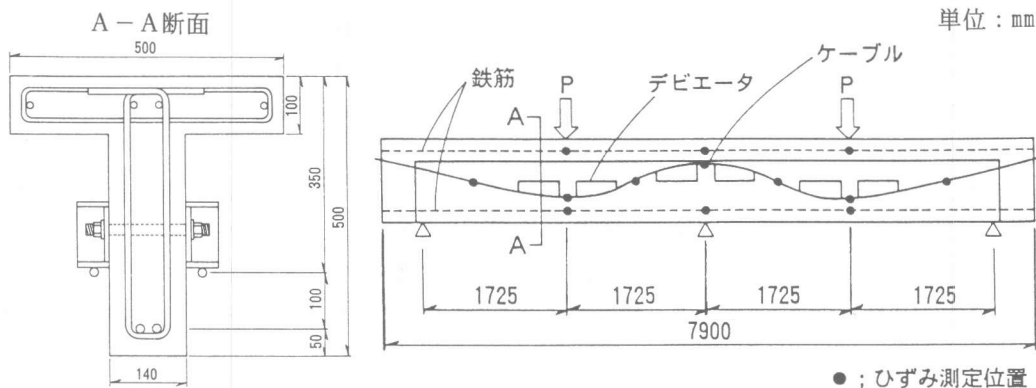
②鉄筋比：

連続梁では引張側が部材の下側（スパン中央部付近）の部分と上側（中央支

表－1 試験体の種類

試験体	引張鉄筋比、pw		使用引張鉄筋		導入プレストレス量 (tf)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)
	スパン中央(%)	中央支点(%)	スパン中央	中央支点		
No. 1	0.63	0.63	D16×2本	D10×2本、D13×2本	10.0	524
No. 2	0.63	0.63	D16×2本	D10×2本、D13×2本	20.0	545
No. 3	0.41	1.26	D13×2本	D16×4本	10.0	500
No. 4	0.41	1.26	D13×2本	D16×4本	20.0	505

点部付近）の部分があり、それぞれの鉄筋比の割合によって、変形状や破壊形態が異なる。外ケーブルP C部材は、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やケーブル張力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に、スパン中央部付近と中央支点部付近のいずれの鉄筋比も0.63%とした試験体とスパン中央部付近を0.41%とし、中央支点部付近を1.26%とした試験体の載荷実験を行った。また、試験体は試験体長7.9m、支間長3.45mのT型梁で、主筋およびスターラップにはSD295Aの異形鉄筋を用いた。なお、荷重は1方向の1支間1点集中載荷とした。外ケーブルは、図－1に示すように、梁の両外側に1本ずつ合計2本配置し、定着は、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、載荷荷重、ケーブル張力、鉄筋のひずみ、コンクリートのひずみ、スパン中央の梁の変位等を図－1に示す位置で計測した。



図－1 試験体図

2. 2 外ケーブル

外ケーブルP C部材は文字通りケーブルがコンクリート断面の外にある構造なのでケーブルが腐食環境に置かれる。このため現状では鋼材に防食対策を施して使用している。しかし、鋼材に比べ軽量・高強度・耐久性に優れる連続繊維補強材を使用すれば、防食対策の必要がなくなるばかりでなく、軽量であるため施工性の向上も計れる。そこで、本研究では今後外ケーブルの分野で利用拡大が見込まれる連続繊維補強材の一種であるCFRPストランドをケーブルとして使用した。今回使用したCFRPストランドは、外径15.0mmの7本より線で、表－2に

表－2 CFRPストランドの機械的性質

名 称	保証荷重 (tf)	断面積 (cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
CFRPストランド7本より15.0mm	28.0	1.374	1.40×10 ⁶

その機械的性質を示す。

2. 3 デビエータ

本研究では、外ケーブルを図-1のように部材の引張側に配置するため、曲げ上げ部（デビエータ）を片側に6個配置した。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、表面をメッキ加工しテフロンシートを挿入した。ケーブルは曲げ上げ角度を 5.9° および 8.6° となるように配置して、初期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。

3. 実験結果

3. 1 破壊状況

各試験体の最大荷重や変位等を表-3に、荷重と変位の関係を図-2に、ひびわれ発生状況の一例としてNo.4試験体の終局時のひびわれ図を図-3に示す。

いずれの試験体も載荷荷重が7.36~16.8tfでスパン中央部にひびわれが発生すると同時に、中央支点部にもひびわれが発生し、荷重の増加に伴いスパン中央部、中央支点部近傍にひびわれが数本発生するとともに、ひびわれ幅が増大した。その後、スパン中央部と中央支点部

の引張鉄筋比を同一($P_w=0.63\%$)とした、No.1、No.2試験体は、中央支点部の引張鉄筋が降伏した後、スパン中央部の引張鉄筋が降伏したが、スパン中央部($P_w=0.41\%$)と中央支点部($P_w=1.26\%$)の引張鉄筋比が異なるNo.3、No.4試験体は、スパン中央部の引張鉄筋が降伏後、中央支点部の引張鉄筋が降伏した。また、いずれの試験体も中央支点部のコンクリートが圧縮破壊する直前に最大荷重を示した。

3. 2 導入プレストレス量による影響

導入プレストレス量(P_e)が異なるNo.1とNo.2およびNo.3とNo.4の試験結果の比較から、導入プレストレス量が大きいほどひびわれ発生荷重が高く、鉄筋の降伏荷重も高いことがわかる。しかし、鉄筋降伏後の荷重と変位関係の勾配には、ほとんど影響がないことがわかる。また、本実験の範囲では最大荷重は導入プレストレス量の多い方が大きい傾向を示した。これは最大荷重時の破壊が中央支点部の圧縮コンクリートの圧壊で決まったことおよび、破壊時の緊張材張力が異なるため、破壊断面内のひずみ分布が異なっていること等に起因していると考えられる。

表-3 実験結果

試験体	最大荷重 (tf)	緊張材張力 (tf)	スパン中央変位 (mm)	ひびわれ発生荷重 (tf)	引張鉄筋降伏荷重(tf)	
					スパン中央	中央支点
No.1	46.6	23.7	73.0	7.36	19.0	14.0
No.2	47.0	25.1	64.4	16.8	23.9	21.0
No.3	34.7	13.6	34.7	11.0	16.0	20.0
No.4	40.0	20.5	41.0	14.0	19.0	25.0

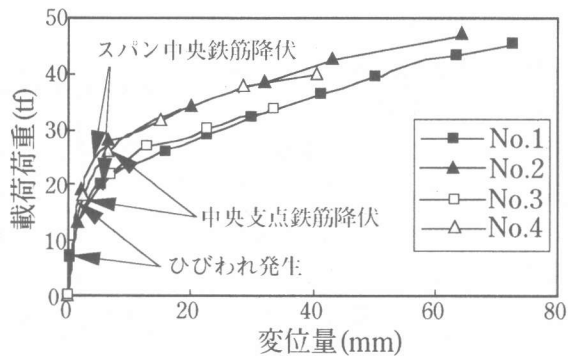


図-2 荷重と変位の関係

3. 3 鉄筋比による影響

鉄筋比(p_w)が異なるNo. 1とNo. 3およびNo. 2とNo. 4の試験結果の比較から、今回の実験の範囲では、荷重と変位の関係はほぼ一致したものとなった。しかし、最大荷重・緊張材張力・最大荷重時平均変位は、スパン中央部および中央支点部の引張鉄筋比を同一としたNo. 1、No. 2の方が大きかった。

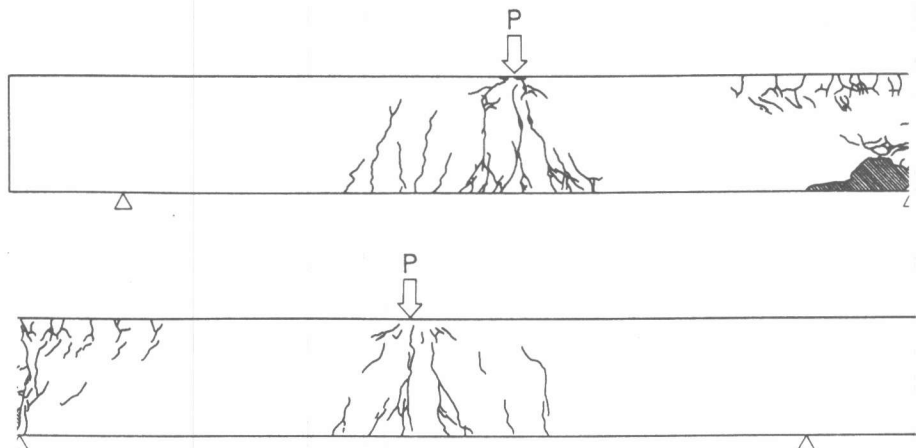


図-3 ひびわれ状況図(No. 4)

4. 解析方法の妥当性検証

今回用いた解析方法は、材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に考慮出来るフレーム解析「SLAP」である[3]、[4]。筆者らは、以前外ケーブルP C単純梁の曲げ耐力や変形や増分張力等を、「SLAP」を用いれば精度よく算定することができることを確認している[3]ので、本実験においても「SLAP」を用いて解析方法の妥当性検証を行った。今回解析に使用した鉄筋の応力とひずみの関係は、図-4に示すようにバイリニアで、表-4に示す降伏点と破断点を結ぶ線であると仮定した。表-4に示す値は鉄筋の引張試

表-4 解析に使用した鉄筋の特性値

鉄筋名	降 伏		破 断	
	ひずみ(ϵ_y) (%)	応 力(σ_y) (kgf/cm ²)	ひずみ(ϵ_u) (%)	応 力(σ_u) (kgf/cm ²)
D10	0.18	3745	27.0	5122
D13	0.17	3582	27.0	5153
D16	0.18	3867	23.0	5408

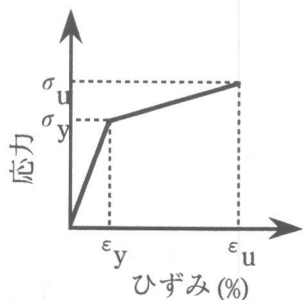


図-4 鉄筋のモデル

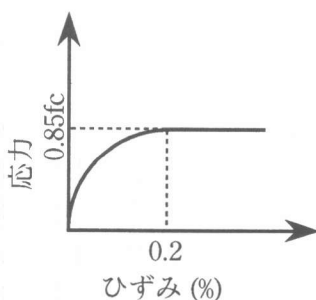


図-5 コンクリートのモデル

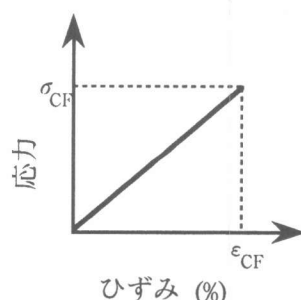
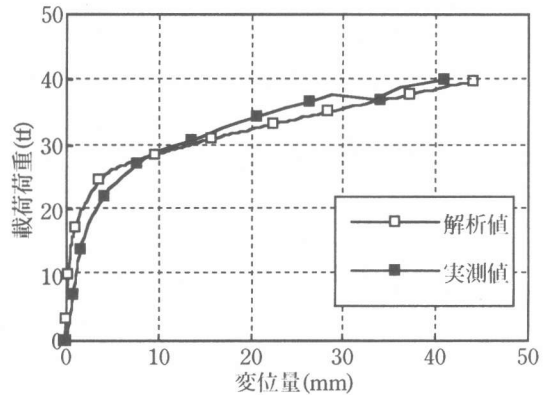
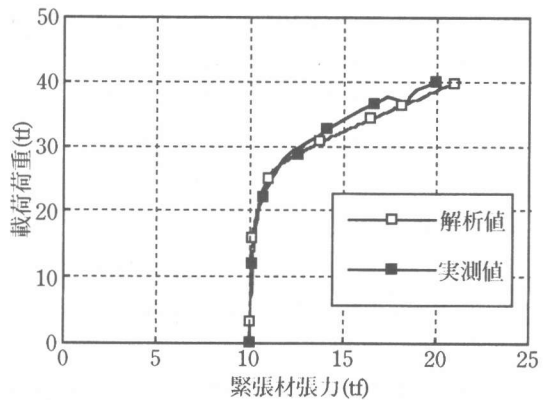


図-6 CFRPストランドのモデル

験結果より求めたものである。また、コンクリートの応力とひずみの関係は、コンクリート標準示方書[5]に示されているように、ひずみが0.2%までは2次曲線で、それ以降は応力を $0.85f_c$ (f_c :コンクリートの圧縮強度)で一定とした図-5に示すモデルを使用した。CFRPストランドの応力とひずみの関係は、図-6に示すように、原点と保証荷重時応力(σ_{CF})と保証荷重時ひずみ(ε_{CF})の交点を直線で結んだモデルとした。本実験で得られた荷重とスパン中央変位および緊張材張力の関係と解析結果の比較図の一例(No. 4)を図-7に示す。これより実験値と解析値は、荷重とスパン中央変位および緊張材張力関係のいずれについてもよく一致しており、本解析方法は単純梁ばかりでなく連続梁においても外ケーブルPC部材の曲げ性状算定に有効であることが確認された。また、コンクリート標準示方書[5]等で規定されている曲げ耐力(圧縮コンクリートのひずみが0.35%の時)についても精度よく算定することが出来ると思われるが、本実験では破壊コンクリートひずみの測定が出来なかった等の問題があり、確認が出来なかった。今後、さらに破壊コンクリートひずみの測定が出来る試験体の載荷実験を行ったり、スターラップによる圧縮コンクリートへの拘束の影響を解析に組み込む等の検討が必要である。



荷重とスパン中央変位の関係



荷重と緊張材張力の関係

図-7 実測値と解析値の比較(No. 4)

5. 簡易式の妥当性検証

筆者らが提案した、外ケーブルPC単純梁の曲げ耐力等を簡易的に精度良く算定することが出来る式[2]の妥当性検証も行った。本簡易式は、コンクリートの終局ひずみがある値(一般的には、0.35%)として算定するものである。しかし、本実験では最大荷重時の破壊が中央支点部の圧縮コンクリートの圧縮で決まっているが、破壊時のコンクリートひずみが測定出来なかったため、直接的に実測値と簡易式との比較が行えない。そこで、外ケーブルP

表-5 解析値と簡易式の比較

試験体	曲げ耐力(tf)			緊張材張力(tf)		
	解析値	計算値	計算値 解析値	解析値	計算値	計算値 解析値
No. 1	20.7	22.3	1.08	8.20	8.70	1.06
No. 2	26.2	26.6	1.02	11.7	12.8	1.09
No. 3	21.9	23.6	1.08	8.00	7.40	0.93
No. 4	27.5	28.6	1.04	12.5	11.8	0.94

C部材の曲げ性状を精度良く追える解析方法「SLAP」を用いて算定した曲げ耐力（圧縮コンクリートひずみが0.35%の時）、および曲げ耐力時の緊張材張力と簡易式との比較を行った。表-5に解析値と簡易式の比較を示す。この表より、解析値と簡易式により算定した値はよく一致しており、この簡易式を用いて、単純梁ばかりでなく連続梁についても、外ケーブルPC部材の曲げ耐力や張力を算定出来ることが確認された。曲げ耐力算定式を式(1)、(2)、(3)に示す[2]。

$$Mu = As \cdot fy(d - 0.416x) + Apc \cdot fps(de - 0.416x) \quad (1)$$

ここで、Mu:曲げ耐力、As:引張鉄筋断面積、fy:引張鉄筋降伏応力、d:有効高さ、
x:中立軸高さ、Apc:外ケーブル断面積、fps:終局時のケーブル応力、
de:ケーブル高さ

$$fps = fpe + Epc \cdot a \cdot \epsilon_{cu}(de - x) / x \quad (2)$$

ここで、fpe:初期緊張応力、Epc:ケーブル弾性係数、 ϵ_{cu} :コンクリート終局ひずみ
(0.35%)、 $a = (L0 + de) / L$ (今回は、 $a = 3de / L$)、L0:等曲げ区間長、L:ケーブル長

$$x = \{-B + (B^2 - 4A \cdot C)^{1/2}\} / 2A \quad (3)$$

ここで、 $A = 0.68fc \cdot b$ 、 $B = Apc(a \cdot Epc \cdot \epsilon_{cu} - fpe) - As \cdot fy$ 、 $C = -Apc \cdot a \cdot Epc \cdot \epsilon_{cu} \cdot de$
fc:コンクリート圧縮強度、b:圧縮縁幅

6. まとめ

本研究は、外ケーブルPC単純梁の曲げ耐力等を精度良く算定出来る解析方法および簡易式の、外ケーブルPC連続梁への適用性検証を主目的として載荷実験を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 導入プレストレス量が多いほど鉄筋の降伏荷重が高く、ひびわれ発生後の見かけの部材の剛性が大きい等、基本的な曲げ特性が確認できた。
- (2) 材料非線形性と幾何学的非線形を同時に考慮できるフレーム解析を用いれば、単純梁のみならず、連続梁においても荷重と変位や張力の関係を精度よく算定できる。
- (3) 筆者らが提案した簡易式を用いて、単純梁のみならず、連続梁においても曲げ耐力や緊張材張力を精度よく算定することが確認された。

[参考文献]

- [1] 齊藤宗・森井惇雄・林田道弥・奥村一正：CFRPを用いた外ケーブル部材の曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.1215-1220、1994.6
- [2] 秋山暉・齊藤宗・奥村一正：新素材を外ケーブルに用いたPC梁の曲げ特性、鹿島技術研究所年報、Vol.42、pp89-92、1994.10
- [3] 沖見芳秀・右近八郎：複合非線形フレーム解析システムの開発、土木学会誌、Vol.80、No.1、pp.14-17、1995.1
- [4] 沖見芳秀・齊藤宗・右近八郎：複合非線形フレーム解析による外ケーブルPC梁の耐力解析、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、Vol.49、No.5、pp.774-775、1994.9
- [5] (社)土木学会：コンクリート標準示方書[平成3年版]設計編、(社)土木学会、pp.21-22、pp.50-54、1991