

(1) 外ケーブル方式を用いたPRCばりの曲げ性状

日本大学理工学部 正会員 柳沼善明

1. はじめに

外ケーブル方式による橋梁の設計・施工が注目されている。コンクリート橋梁を施工する場合、外ケーブル方式のみならず、内ケーブル方式を併用して施工することがある。外ケーブル方式の終局耐力は、部材の変形にともない外ケーブルとはり部材図心軸との偏心距離が変化するため、内ケーブル方式の終局耐力よりも低下する。外ケーブル方式に内ケーブルを加えた混合ケーブル方式の採用は、終局耐力の増加が期待できるものと思われる。また、外ケーブル方式の場合、外ケーブルを部材にスパンの中間で支持するデビエータが設けられている。このデビエータの有無は、終局耐力に影響を与える。

そこで、本研究は各種の外ケーブル方式プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) ばりの曲げ載荷実験を行い、その曲げ性状 (終局耐力、PC鋼材の緊張量、変形状) について比較検討した。実験結果は、既報の解析方法 [1] を改良した解析方法による計算結果と比較した。

2. 供試体と実験方法

実験に用いた供試体はアンボンドのPRCばりで、表-1に示すような外ケーブル方式のPRCばり、内ケーブルと外ケーブルとを併用したケーブル方式 (混合ケーブル方式) のPRCばり、ならびに内ケーブル方式のPRCばりである。外ケーブル方式のはりは、外ケーブルを支点の中間で支持する中間支持点を設けないはり (A93ex) と設けたはり (A93sup) である。中間支持点は、治具を用いて外ケーブルをはりに支持した。中間支持点の位置は、はりの両支点からそれぞれ130cmの二ヶ所である。

PC鋼材のプレストレス力は各供試体とも27tfで一定である。混合ケーブル方式の場合、内ケーブルと外ケーブルとのプレストレス力はともに13.5tfである。供試体の形状を図-1に示す。

実験方法は二点載荷で静的に曲げ破壊させた。加力には油圧ジャッキを用い、ロードセルにより荷重を検出した。供試体は各荷重ごとにたわみ、ひずみ、ひびわれ状況などを測定した。コンクリートのクリープや乾燥収縮、PC鋼材のリラクセーションなどによるPC鋼材の応力減少を極力少なくするため、供試体の曲げ破壊実験はプレストレス力の導入後ただちに行なった。PC鋼材の緊張量は、PC鋼材にとりつけたセンサーホール型ロードセルにより測定した。

使用したコンクリートの強度を表-2に示す。使用したPC鋼材の材質はSBPR1080/1230で、使用した鉄筋の材質はSD345であった。使用した引張鉄筋、圧縮鉄筋ならびにスターラップには呼び名D10mmの異形鉄筋を用いた。PC鋼材と鉄筋の強度を表-3に示す。

表-1 供試体の種類

| beam no. | PC鋼材の断面積 cm ² | プレストレス力 tf | ケーブル方式の種類 |
|----------|-----------------------------|---------------|-------------------|
| A93ex | 4.537 (2-φ17) | 27 | 外ケーブル方式 (中間支持点なし) |
| A93sup | 4.537 (2-φ17) | 27 | 外ケーブル方式 (中間支持点あり) |
| A93mix | 5.307 (4-φ13) | 27 | 混合ケーブル方式 |
| A93in | 4.537 (2-φ17) | 27 | 内ケーブル方式 (アンボンド) |

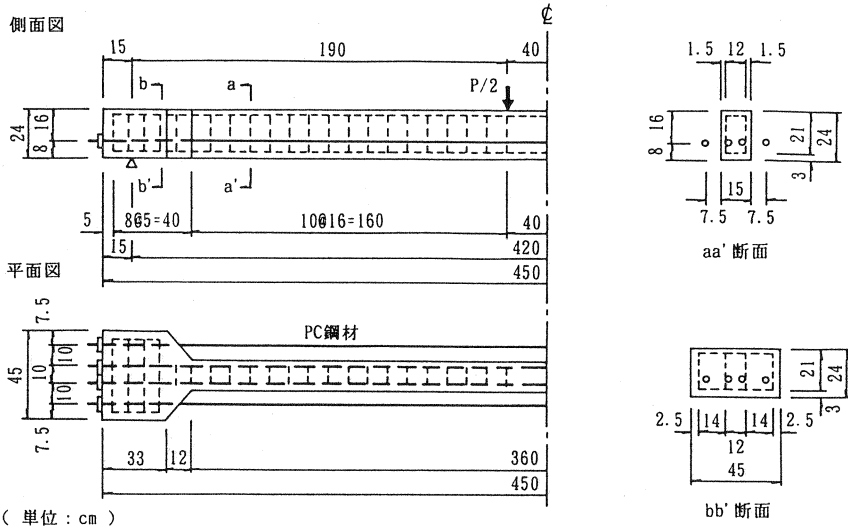


図-1 供試体の形状(混合ケーブル方式の場合)

表-2 コンクリートの強度

| 圧縮強度 kgf/cm ² | 引張強度 kgf/cm ² | 曲げ強度 kgf/cm ² |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 330 | 28.1 | 36.2 |

表-3 PC鋼材と鉄筋の強度

| 種類 | 径 | 降伏点強度 kgf/mm ² | 引張強度 kgf/mm ² | 弾性係数 kgf/mm ² |
|------|-----|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| PC鋼材 | φ13 | 145.2 | 152.1 | 2.06x10 ⁴ |
| | φ17 | 117.2 | 130.6 | 2.05x10 ⁴ |
| 鉄筋 | D10 | 36.7 | 50.1 | 1.76x10 ⁴ |

3. 解析方法

外ケーブル方式のPRCばりの解析は、材料の非線形と幾何学的な非線形とを考慮した有限要素解析[1]を改良した方法である。既報の解析方法によると、PC鋼材の緊張量の計算値が実測値よりも8~13%小さく計算される傾向にあった[2]。これは、材料の非線形性を考慮する低減係数に起因しているものと考えられる。そこで、ここでは伸び剛性(EA)の減少率βを $N / (\epsilon_s \cdot E_o \cdot A_o)$ とした。ここに、Nは軸力、 ϵ_s は図心位置でのひずみである。EoとAoはひびわれ発生前の弾性係数と断面積である。なお、既報の解析方法[1]は、 $\beta = (E_c \cdot A_c) / (E_o \cdot A_o)$ であった。ここに、EcとAcはひびわれを考慮した弾性係数と断面積である。

図-2に示すように、はり部材ははり要素として、外ケーブルは部材の図心軸から偏心距離eだけ離れた位置に棒要素としてモデル化した。導入プレストレス力は、その効果を等価な外力で置き換えるために初期ひずみと外力Nとを外ケーブルの定着位置に与えた。内ケーブル方式の場合、両端ピン要素をはり部材の要素とケーブルの要素との間に挿入した。本解析で用いた要素分割数は、外ケーブル方式のPRCばりの場合は15節点、15要素であった。

圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は二次式と直線との組合せとして、終局ひずみは0.0035とした[3]。引張を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係はひずみ軟化を考慮し、岡村・前川モデル[4]を採用した。鉄筋の応力-ひずみ関係は降伏点以降ただちにひずみ硬化に入るものとし、降伏後は $E_s/100$ の勾配を持つものとした。PC鋼材の応力-ひずみ関係は土木学会コンクリート標準示方書[3]にしたがった。

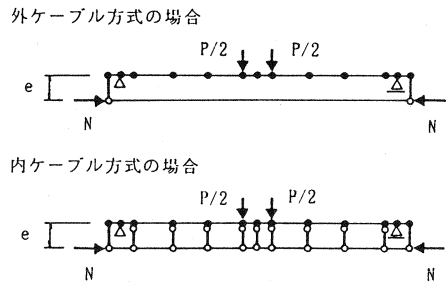


図-2 PRCばりの要素分割

4. 実験結果

4.1 終局耐力

各ケーブル方式の終局耐力を図-3に示す。中間支持点のない外ケーブル方式(A93ex)の終局耐力は、他のケーブル方式の終局耐力よりも低下している。中間支持点のない外ケーブル方式(A93ex)と比較して、内ケーブル方式(A93in)の終局耐力は約28%増加し、混合ケーブル方式(A93mix)の終局耐力は約9%増加している。また、中間支持点のある外ケーブル方式(A93sup)の終局耐力は約20%増加している。内ケーブル方式の場合、内ケーブルはコンクリート断面内部に配置されているために、ケーブルとはり部材図心軸との偏心距離が変化しない。しかし、中間支持点のない外ケーブル方式の場合、外ケーブルはコンクリート部材の外部に配置されているために、はりのたわみが増加するにともない、偏心距離が変化する。このため、中間支持点のない外ケーブル方式は内ケーブル方式よりも終局耐力が低下することになる。混合ケーブル方式の場合は、一部のケーブルが内ケーブルとなり、偏心距離が変化しなくなる。そのため、外ケーブルのみの場

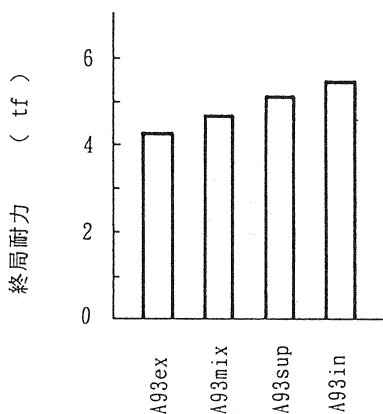


図-3 各ケーブル方式の終局耐力

表-4 終局耐力の実験値と計算値との比較 (改良した解析方法)

| beam no. | test tf | calc tf | calc/test |
|----------|---------|---------|-----------|
| A93ex | 4.261 | 4.282 | 1.005 |
| A93mix | 4.661 | 4.724 | 1.014 |
| A93in | 5.461 | 5.069 | 0.928 |
| A93sup | 5.111 | 4.907 | 0.960 |
| 平均値 | | | 0.977 |

表-5 終局耐力の実験値と計算値との比較 (既報の解析方法)

| beam no. | test tf | calc tf | calc/test |
|----------|---------|---------|-----------|
| A93ex | 4.261 | 4.622 | 1.085 |
| A93mix | 4.661 | 4.768 | 1.023 |
| A93in | 5.461 | 5.201 | 0.952 |
| 平均値 | | | 1.020 |

合よりも終局耐力が増加したものと考えられる。中間支持点のある外ケーブル方式は、外ケーブルとはり部材図心軸との偏心距離の減少割合が、中間支持点の存在により中間支持点のない場合よりも小さくなるために、終局耐力が増加したものと考えられる。

次に、終局耐力の実験値と計算値との比較を表-4、5に示す。計算値は上述した本解析方法によるものである。改良した解析方法の終局耐力の計算値は、いずれのケーブル方式の場合にも良く実験値と一致し、既報の解析方法による計算値よりもばらつきが少ない(表-4、5参照)。

内ケーブル方式のP R Cばかりについて、終局曲げモーメントの各提案式による計算値と実験値との比較を表-6に示す。計算値は、内ケーブル方式によるアンボンドP Cばかりに対して提案されたMattock [5]、Baker [6]、Gifford [6]、Naaman [7]により求めた。ここでは、外ケーブル方式のP R Cばかりにも適用して計算を行なった。表-6によれば、各計算値は、内ケーブル方式(A93in)に対しては良く実験値と一致している。しかし、外ケーブル方式(A93ex)に対しては、いずれの計算値も実験値よりも24~39%大きく計算されている。これは、内ケーブル方式のアンボンドP Cばかりに対する提案式では、ケーブルの偏心距離の変化を考慮していないためである。したがって、外ケーブル方式の終局耐力の計算には、ケーブルの偏心距離の変化を考慮しなければならないため、外ケーブル方式の終局耐力の計算に各提案式をそのまま適用することは困難である。

表-6 終局曲げモーメントの計算値/実験値

| beam no. | Mattock | Baker | Gifford | Naaman |
|----------|---------|-------|---------|--------|
| A93ex | 1.270 | 1.243 | 1.393 | 1.241 |
| A93in | 0.968 | 0.946 | 1.054 | 0.944 |

4.2 PC鋼材の緊張量

終局耐力時におけるP C鋼材緊張量の実験値と計算値との比較を表-7、8に示す。既報の解析方法による計算値は、実験値よりも約8~13%小さく計算されている(表-8)。しかし、改良した解析方法による計算値は実験値と良く一致しているものと思われる(表-7)。

内ケーブル方式(A93in)に対して、内ケーブル方式のアンボンドP Cばかりで提案されている各提案式による計算値と実験値との比較を表-9に示す。Giffordによる計算値は実験値よりも約15%大きく計算されたが、他の提案式による計算値は実験値と良く一致している。

表-7 終局耐力時におけるP C鋼材緊張量の実験値と計算値との比較 (改良した解析方法)

| beam no. | test tf | calc tf | calc/test |
|----------|---------|---------|-----------|
| A93ex | 30.17 | 30.97 | 1.027 |
| A93mix | 32.00 | 32.62 | 1.019 |
| A93in | 32.06 | 32.49 | 1.013 |
| A93sup | 31.33 | 32.19 | 1.027 |
| 平均値 | | | 1.022 |

表-8 終局耐力時におけるP C鋼材緊張量の実験値と計算値との比較 (既報の解析方法)

| beam no. | test tf | calc tf | calc/test |
|----------|---------|---------|-----------|
| A93ex | 30.17 | 27.76 | 0.920 |
| A93mix | 32.00 | 28.62 | 0.894 |
| A93in | 32.06 | 27.88 | 0.870 |
| 平均値 | | | 0.895 |

表-9 終局耐力時のP C鋼材緊張量の計算値/実験値

| beam no. | Mattock | Baker | Gifford | Naaman |
|----------|---------|-------|---------|--------|
| A93in | 0.975 | 0.936 | 1.151 | 0.932 |

4.3 変形状

図-4に荷重とスパン中央のたわみとの関係を示す。ひびわれ発生まではいずれのケーブル方式とも同様な変形状を示している。ひびわれ発生後、混合ケーブル方式(A93mix)ならびに中間支持点のある外ケーブル方式(A93sup)の荷重-たわみ曲線

は、中間支持点のない外ケーブル方式(A93ex)と内ケーブル方式(A93in)の間にある。各ケーブル方式の終局耐力時のスパン中央のたわみは、中間支持点のない外ケーブル方式と比較して、混合ケーブル方式が1.18倍、内ケーブル方式が1.24倍、中間支持点のある外ケーブル方式(A93sup)が1.15倍となった。

中間支持点のある外ケーブル方式ならびに混合ケーブル方式の場合について、本解析方法によるたわみの計算値と実験値との比較を図-5に示す。図によれば、荷重-たわみ曲線の計算値は実験値と一致している。他のケーブル方式についても同様である。

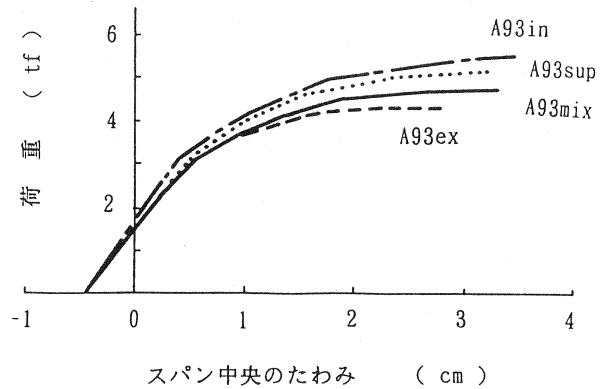
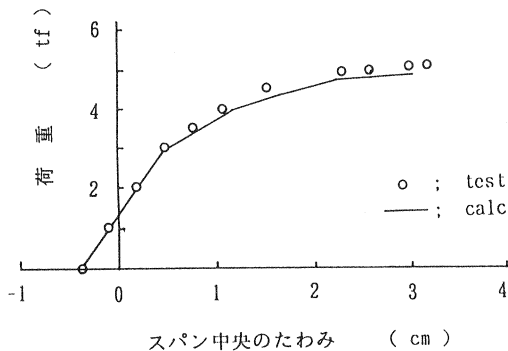
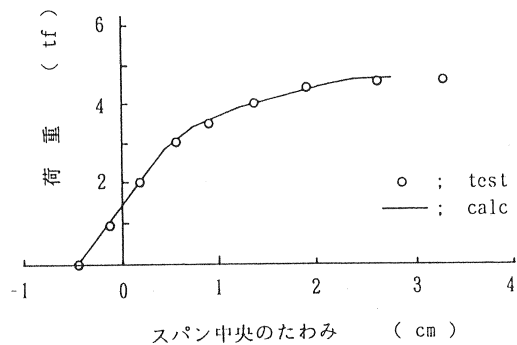


図-4 各ケーブル方式の変形状



(a) 中間支持点のある外ケーブル方式



(b) 混合ケーブル方式

図-5 荷重-たわみ関係の実験値と計算値との比較

5. まとめ

外ケーブル方式、混合ケーブル方式、内ケーブル方式のPRCばりの曲げ性状について比較した結果をまとめると次の通りである。

- ① 終局耐力について、混合ケーブル方式ならびに中間支持点のある外ケーブル方式のPRCばりは、中間支持点のない外ケーブル方式よりも終局耐力が増加する。
- ② 変形性状について、混合ケーブル方式ならびに中間支持点のある外ケーブル方式のPRCばりは、中間支持点のない外ケーブル方式と内ケーブル方式との間の変形性状を示す。
- ③ 終局耐力時のスパン中央のたわみについて、混合ケーブル方式ならびに中間支持点のある外ケーブル方式のPRCばりは、中間支持点のない外ケーブル方式と内ケーブル方式との間のたわみ値を示す。

以上により、混合ケーブル方式ならびに中間支持点のある外ケーブル方式のPRCばりは、中間支持点のない外ケーブル方式のPRCばりの曲げ性状を改善し、内ケーブル方式のPRCばりの曲げ性状に近づくものと思われる。したがって、外ケーブル方式においては、内ケーブルを併用すること、あるいは適切な位置にデビエータを設けることにより、曲げ性状を著しく改善することができるものと思われる。

最後に、実験ならびに図表の整理に協力してくれた菅井英一君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 柳沼善明：アウトケーブルを用いたPRCばりの非線形解析、コンクリート工学年次論文報告集、13-2、pp. 689-694、1991
- 2) 柳沼善明：外ケーブルと内ケーブルとを用いたPRCばりの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、pp. 1003-1008、1994
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、1986
- 4) 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析、土木学会論文集、No. 360/V-3、pp. 1-10、1985. 8
- 5) Mattock, A. H., Yamazaki, J. & Kattula, B. T. : Comparative study of prestressed concrete beams, with and without bond, J. of ACI, Vol. 68, No. 2, pp. 116-12, 1972
- 6) 宮本征夫・岩崎岩夫：アンボンドPC部材の静的曲げ強度、鉄道技術研究所報告、No. 826、pp. 1-24、1973
- 7) Naaman, A. E. & Alkhairi, F. M. : Stress at ultimate in unbonded post-tensioning tendons, Part 2 Proposed methodology, ACI Structural Journal, 1991, Nov. -Dec. , pp. 683-692