

論文

[2167] 外ケーブルと内ケーブルとを用いた PRC ばりの曲げ性状

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。

そこで、本研究は混合ケーブル方式のプレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）ばりの曲げ性状について、終局耐力、P C 鋼材の緊張量、変形性状について検討した。また、実験結果は、既報の解析方法〔1〕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。P C 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には、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 とした。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、P C 鋼材のリラクセーションなどによる P C 鋼材の応力減少を

表-1 供試体の種類

beam no.	P C 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
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

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 P C 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
P C 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

* 日本大学助教授 理工学部交通土木工学科、工博（正会員）

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。P C鋼材の緊張量は、P C鋼材にとりつけたセンタ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P C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。P C鋼材と鉄筋の強度を表-3に示す。

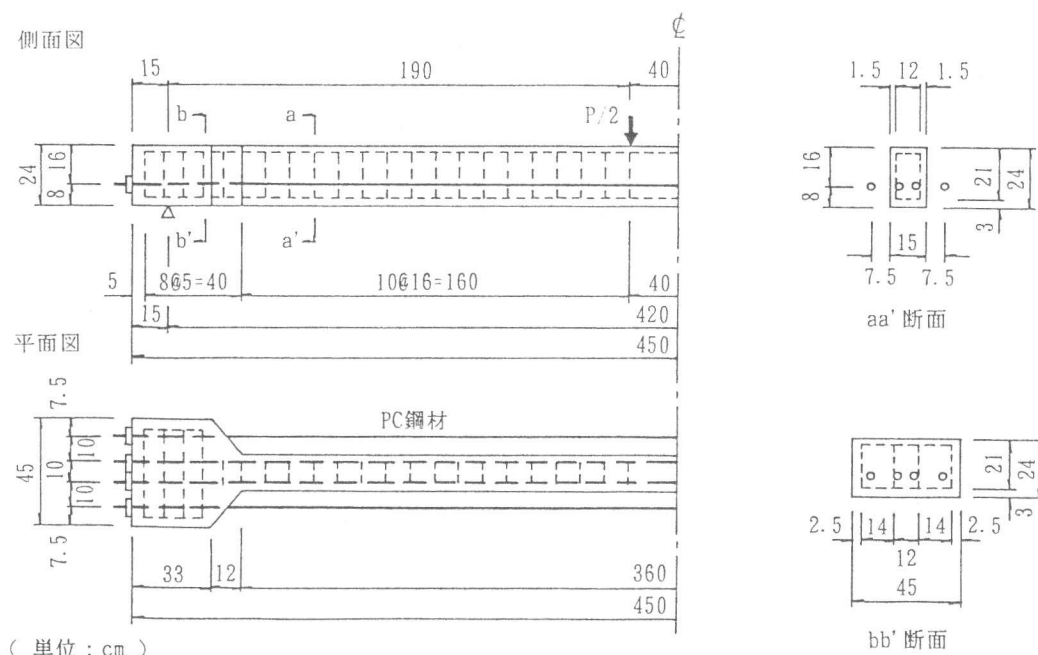


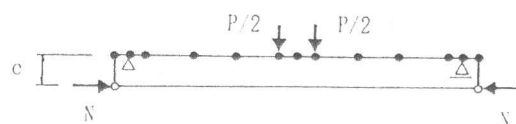
図-1 供試体の形状（混合ケーブル方式の場合）

3. 解析方法

外ケーブル方式のP R C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〕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P R C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〔2〕。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〔3〕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。P C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〔2〕にしたがった。

外ケーブル方式の場合



内ケーブル方式の場合

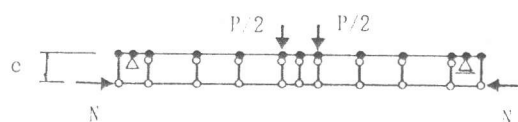


図-2 P R Cばりの要素分割

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。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。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。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の図心軸との偏心距離が変化しない。しかし、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、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合よりも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に示す。計算値は上述した本解析方法によるものである。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ている。

内ケーブル方式のPRCばりについて、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-5に示す。計算値は、内ケーブル方式によるアンボンドPCばりに対して提案されたMattock[4]、Baker[5]、Gifford[5]、Naamman[6]により求めた。ここでは、外ケーブル方式のPRCばりにも適用して計算を行なった。表-5によれば、各提案式による計算値は、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、いずれの提案式も実験値よりも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PCばりに対する提案式では、ケーブルの偏心距離が変化せずに一定であるとしているためである。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と考えられる。

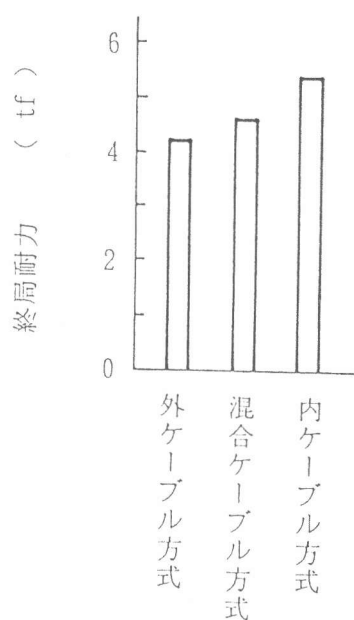


図-3 各ケーブル方式の終局耐力

表-4 終局耐力の実験値と計算値との比較

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

表-5 終局曲げモーメントの計算値/実験値

beam no.	Mattock	Baker	Gifford	Naamman
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

各ケーブル方式のPC鋼材緊張量を図-4に示す。プレストレス導入時から終局耐力時に至るPC鋼材緊張量の増加量は、外ケーブル方式と比較して、混合ケーブル方式では1.41倍、内ケーブル方式では1.55倍であった。混合ケーブル方式の場合、PC鋼材緊張量の増加量は外ケーブルで2.02tf、内ケーブルで2.46tfとなり、内ケーブルの増加量は外ケーブルの約1.22倍であった。

次に、終局耐力時におけるPC鋼材緊張量の実験値と計算値との比較を表-6に示す。本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。本解析は載荷荷重を漸次増加させて行い、最大荷重は上縁コンクリートのひずみが終局ひずみに達したとき、あるいは荷重の増分が収束値以内になったときとしている。本実験の供試体の場合、上縁コンクリートのひずみが終局ひずみとならず、荷重の増分が収束し、最大荷重が得られている。実験では、はりの降伏荷重後荷重がほぼ一定値ではりのたわみが増加し、最終的にコンクリートの圧潰ではりが破壊している。このたわみの増加にしたがい、PC鋼材の緊張量は増加することになる。解析では、ほぼ一定値の荷重でたわみが増加する現象を十分精度良く解析できないために(図-7参照)、PC鋼材緊張量の増加量が小さく計算されたものと思われる。

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PC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-7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。

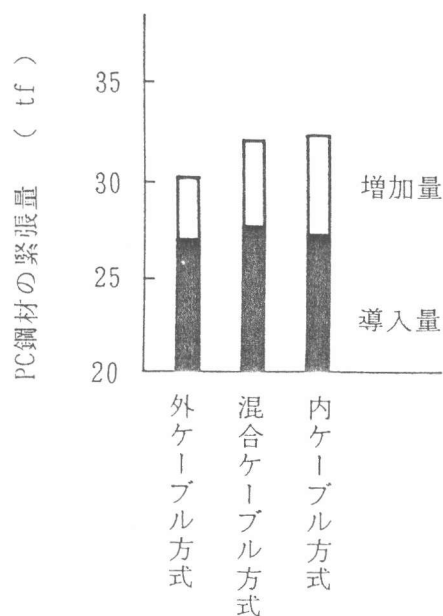


表-6 終局耐力時におけるPC鋼材緊張量の
実験値と計算値との比較

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

図-4 各ケーブル方式のPC鋼材緊張量

表-7 終局耐力時のPC鋼材緊張量の計算値/実験値

beam no.	Mattock	Baker	Gifford	Naamman
A93in	0.975	0.936	1.151	0.932

4.3 変形性状

図-5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じ変形性状を示している。ひびわれ発生後、混合ケーブル方式（A93mix）の荷重-たわみ曲線は、外ケーブル方式（A93ex）と内ケーブル方式（A93in）との間にある。各ケーブル方式の終局耐力時のスパン中央のたわみは、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1.42倍となった（図-6）。

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-7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。

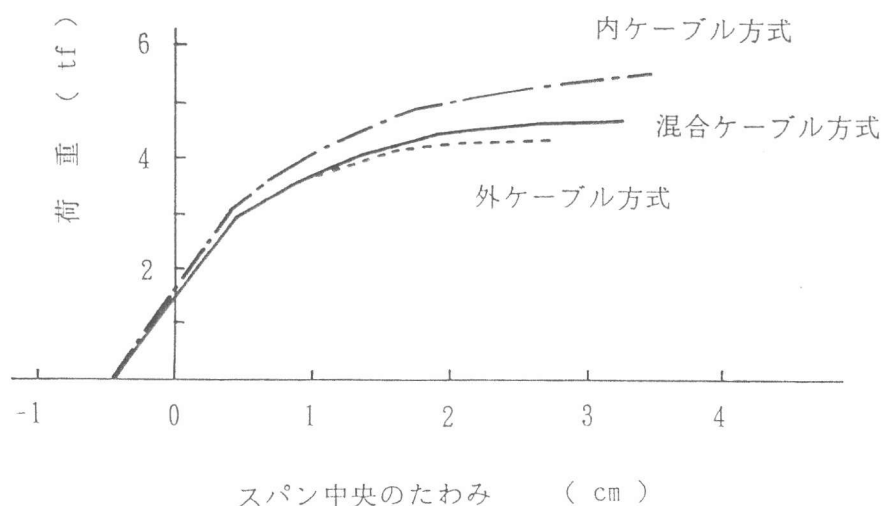


図-5 各ケーブル方式の変形性状

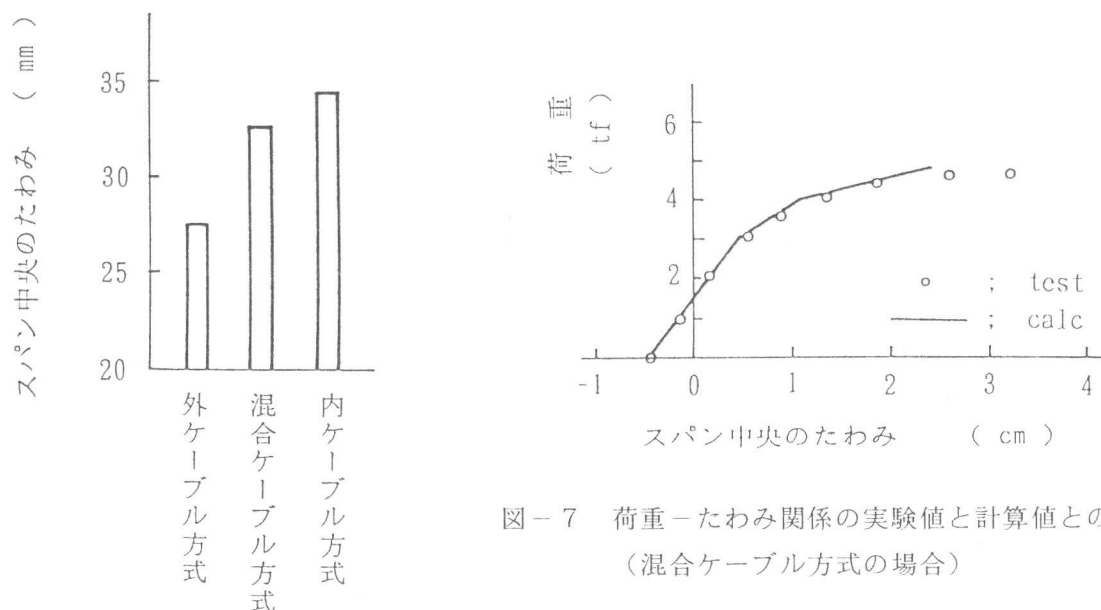


図-7 荷重-たわみ関係の実験値と計算値との比較
（混合ケーブル方式の場合）

図-6 終局耐力時における各ケーブル方式の
スパン中央のたわみ

5. まとめ

混合ケーブル方式のPRCばりの曲げ性状について、外ケーブル方式、内ケーブル方式のPRCばりと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、混合ケーブル方式のPRCばりは外ケーブル方式よりも終局耐力が増加する。
- ② 変形状について、混合ケーブル方式のPRCばりは外ケーブル方式と内ケーブル方式との間の変形状を示す。
- ③ 終局耐力時のスパン中央のたわみについて、混合ケーブル方式のPRCばりは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、混合ケーブル方式のPRCばりは、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。本実験の場合、外ケーブル方式の終局耐力はアンボンドの内ケーブル方式と比較して約22%の減少を示し、また終局時のたわみは約20%減少した。一方、混合ケーブル方式は、外ケーブル方式と比較し終局時の耐力ならびにたわみを改善し、内ケーブル方式の耐力ならびにたわみに近づいた。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ならびに適切な位置にデビエータを設けること〔7〕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板橋正明、小川隆幸、菅井英一君たちに感謝いたします。

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) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、1986
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 柳沼善明・北田勇輔：アウトケーブルを用いたPRCばりの挙動に及ぼすスパンの影響、コンクリート工学年次論文報告集、10-3、pp.23-28、1988