

論文 外ケーブル方式プレキャストブロック PC はりの挙動

柳沼 善明*¹

要旨：本研究は外ケーブル方式によるプレストレスキャストブロック PC はりの曲げ載荷実験を行い、その挙動を明らかにするものである。内外併用ケーブル方式ブロックはりにおける最大耐力ならびに最大耐力時の PC 鋼材の全引張力は、外ケーブル方式ブロックはりよりも増加する。変形性状は、内ケーブルを付加することにより、外ケーブル方式の変形性状を改善させる。ブロックはりの挙動について、提案した解析方法による計算値は実験値とよく一致する。

キーワード：プレキャストブロック、外ケーブル、内外併用ケーブル、挙動解析

1. はじめに

外ケーブル方式によるプレキャストブロック工法は、橋梁の急速施工ならびに省力化を可能にする。しかしながら、外ケーブル方式を用いたプレキャストブロック PC はりの挙動は、まだ明確にされていない。さらに、その最大耐力の解析方法が確立しているとは言い難い。

外ケーブル方式 PC はりの最大耐力は、はり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ことを考慮しなければならない。偏心距離が変化するため、外ケーブル方式の挙動は、内ケーブル方式とは異なる特有の挙動を示す。また、外ケーブルと内ケーブルとを併用したケーブル方式（内外併用ケーブル方式）は外ケーブル方式の曲げ性状を改善する〔1〕。

そこで、本研究は外ケーブル方式を用いたプレキャストブロック PC はりの曲げ載荷実験を行い、その挙動（最大耐力、PC 鋼材の引張力、変形性状など）について検討したものである。さらに、実験結果と既報の解析方法〔2〕を改良した方法〔3〕による計算結果とを比較したものである。

2. 供試体と実験方法

実験に用いた供試体はプレキャストブロック PC はり（以下ブロックはり）と一体打ちの PC はり（以下一体はり）で、表-1 に示すように外ケーブル方式ならびに内外併用ケーブル方式による PC はりである。外ケーブルにはデビエータを配置せず、内ケーブルはアンボンタイプである。ブロックはりの目地は接着剤を用いていないドライジョイントとした。内外併用ケーブル

表-1 供試体の種類

はり種類	Beam No.	PC 鋼材の断面積 (cm ²)	プレストレス力 (tf)	引張鉄筋	ケーブル方式
ブロックはり	B-1	5.307(4-φ13)	13.5	不連続 " " "	内外併用ケーブル方式
	B-2	5.307(4-φ13)	27		内外併用ケーブル方式
	B-3	4.537(2-φ17)	13.5		外ケーブル方式
一体はり	S-1	5.307(4-φ13)	13.5	連続 連続 不連続	内外併用ケーブル方式
	S-2	4.537(2-φ17)	"		外ケーブル方式
	S-3	5.307(4-φ13)	"		内外併用ケーブル方式

* 1 日本大学教授 理工学部交通土木工学科、工博（正会員）

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の割合はともに50%ずつである。供試体の形状を図-1に示す。一体はりのS-3は、ブロックはりと同一な鉄筋配置で、引張鉄筋は不連続である。

実験方法は二点荷重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、目地の開きなどを測定した。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、供試体の曲げ荷重実験はプレストレスの導入後ただちに行った。PC鋼材の引張力は、PC鋼材に取り付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、使用したPC鋼材と鉄筋の強度を表-3に示す。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。

3. 解析方法

外ケーブル方式のPCはりには、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[2]を改良した解析方法[3]により行った。はり部材ははり要素として、外ケーブルははり部材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(図-2)。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。内ケーブルは、両端ピン要素をはり部材と内ケーブルの要素との間に挿入した。内外併用ケーブル方式の場合は、外ケーブル方式と内ケーブル方式とを組み合わせた。本解析で用いた要素分割数は、外ケーブル方式の場合15節点、15要素であり、内外併用ケーブル方式の場合24節点、34要素であった。

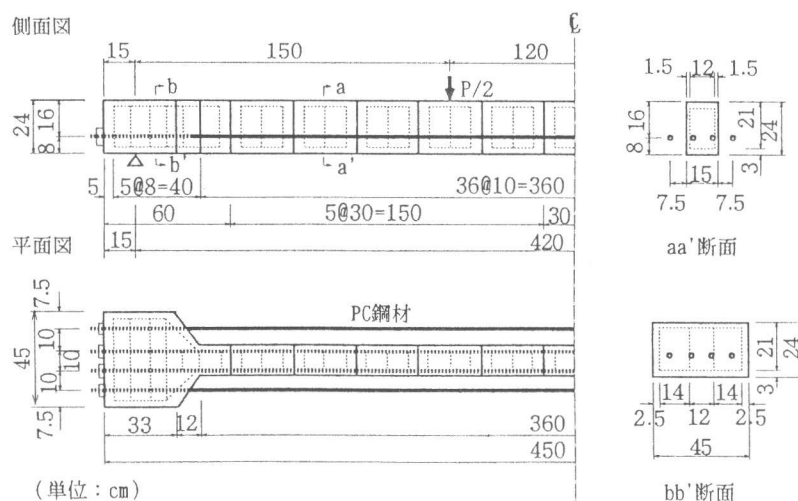


図-1 供試体の形状

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
446	31.2	47.2

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	$\phi 13$	142.9	149.8	2.039×10^4
	$\phi 17$	120.3	130.6	2.039×10^4
鉄筋	D10	34.9	50.4	1.860×10^4

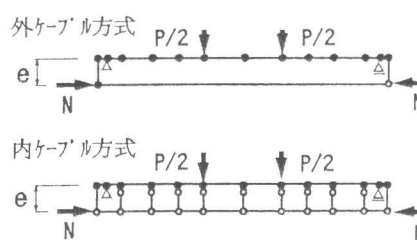


図-2 要素分割

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み合わせとして、終局ひずみは0.0035とした〔4〕。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〔5〕を採用した。一体はりの場合はコンクリートの引張抵抗を考慮し、ブロックはりの場合はコンクリートの引張抵抗を無視した。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〔4〕にしたがった。

4. 実験結果

4. 1 最大耐力

外ケーブル方式ならびに内外併用ケーブル方式の最大耐力 P_u を図-3に示す。ブロックはりにおいて、内外併用ケーブル方式の P_u は、外ケーブル方式よりも約16%増加している。一体はりにおいても、内外併用ケーブル方式の P_u は、外ケーブル方式よりも約23%増加している。これは次のように考えられる。内外併用ケーブル方式は外ケーブル方式のP Cはりに内ケーブルを付加したものである。内ケーブルの偏心距離（ケーブルとはり断面図心軸との距離）は、ケーブルがはり内部に配置されているため、はりがたわむことにより変化しない。しかし、外ケーブルははり断面の外部に配置されているため、はりがたわむことにより偏心距離は変化する。そのため、内ケーブルの引張力は外ケーブルの引張力よりも大きくなる（図-10参照）。したがって、 P_u 時のケーブルの全引張力は、外ケーブル方式よりも内外併用ケーブル方式の方が大きくなるため、内外併用ケーブル方式の P_u が外ケーブル方式よりも増加するものと考えられる。各ケーブル方式ともに、ブロックはりの P_u は一体はりの P_u よりも低下している。ブロックはりの P_u は一体はりと比較して、外ケーブル方式で0.794、内外併用ケーブル方式で0.747となり、約21~25%低下している。これは、一体はりの引張鉄筋は連続して配置されているが、ブロックはりには連続した引張鉄筋がないためである。

次に、内外併用ケーブル方式において、ブロックはりと一体はりとの最大耐力 P_u を図-4に示す。ブロックはりの P_u において、B-2はB-1よりも P_u が約48%増加している。これは、導入プレストレス力の相違によるもので、B-2の導入プレストレス力はB-1の約2倍であるためである。また、ブロックはりのB-2の P_u は、一体はりのS-1（B-1と同量の導入プレストレス力）よりも約11%増加している。一体はりのS-3は、組立鉄筋をブロックはりと同一に配置しているために連続した引張鉄筋がない。そのため、S-3の P_u はS-1よりも著しく約27%低下し、ブロックはりのB-1とほぼ同じ最大耐力を示している。

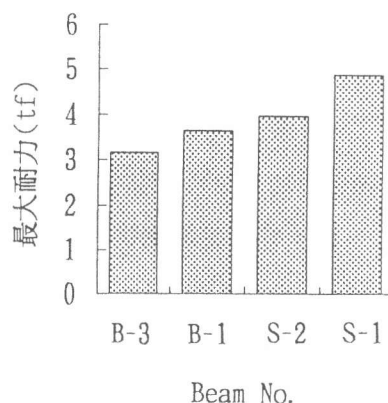


図-3 最大耐力
(ケーブル方式の影響)

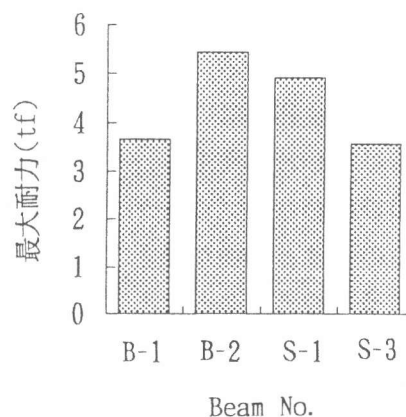


図-4 最大耐力
(内外併用ケーブル方式)

4. 2 変形状

荷重とスパン中央のたわみとの関係を図-5、6に示す。また、最大耐力時のスパン中央のたわみ δu を図-7、8に示す。ケーブル方式の相違による変形状を示している図-5から、ブロックはりにおいて作用する荷重が小さい場合、各ケーブル方式の変形状はほぼ同じである。しかし、荷重が大きくなり、たわみが増加すると、それぞれのケーブル方式の変形状は異なってくる。これは、ケーブルの偏心距離の変化に起因するものであると考えられる。また、図-7から、内外併用ケーブル方式の δu は、外ケーブル方式よりも大きくなっている。以上により、外ケーブル方式に内ケーブルを付加することにより、変形状が改善されることがわかる。

さらに、内外併用ケーブル方式の変形状を示している図-7から、ブロックはりにおいて、導入プレストレス力の影響が顕著に表れている。導入プレストレス力を大きくしたブロックはり、導入プレストレス力の小さな一体はりよりも、同一たわみにおいて荷重が大きくなっている。

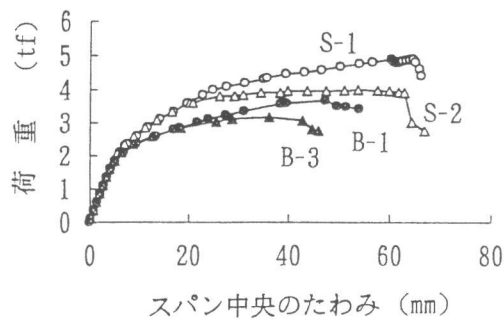


図-5 変形状（ケーブル方式の影響）

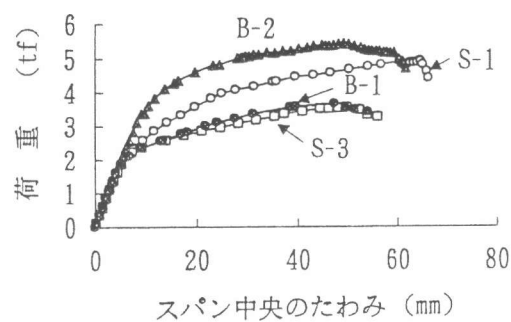


図-6 変形状（内外併用ケーブル方式）

ブロックはりの δu は、導入プレストレス力の相違にかかわらずほぼ同値である（図-8）。連続した引張鉄筋のないS-3（一体はり）の変形状は、B-1（ブロックはり）とほぼ同じである。これは、引張鉄筋のない部分からひびわれが発生し、このひびわれがブロックはりの目地と同様な働きをするためであると考えられる。S-3の配筋はブロックはりとまったく同じであり、ブロックはりの目地にあたる一体はりの部分には引張鉄筋がない。

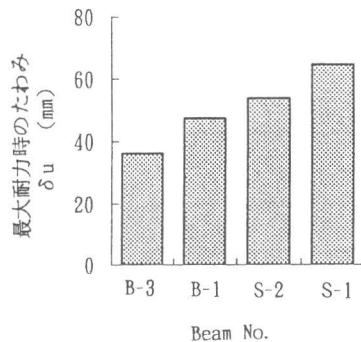


図-7 最大耐力時のたわみ（ケーブル方式の影響）

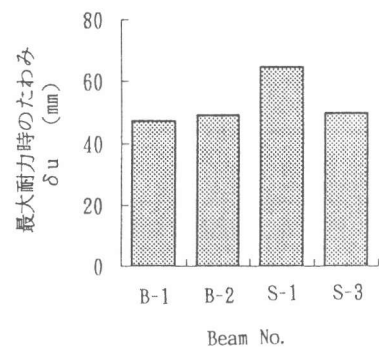


図-8 最大耐力時のたわみ（内外併用ケーブル方式）

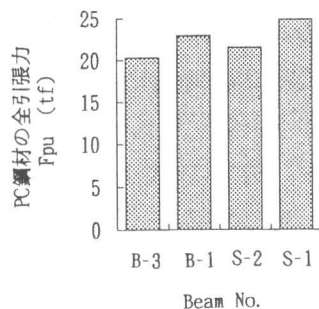


図-9 最大耐力時のPC鋼材の全引張力

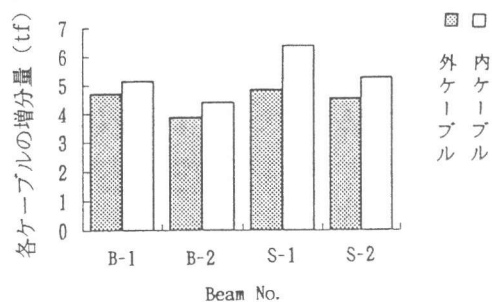


図-10 PC鋼材引張力の各ケーブルの増分量

4.3 PC鋼材の引張力

各ケーブル方式の最大耐力時のPC鋼材の全引張力 F_{pu} を図-9に示す。ブロックはりならびに一体はりにおいて、内外併用ケーブル方式の F_{pu} が外ケーブル方式より約13~15%増加している。これは、たわみが増加するにつれて、内外併用ケーブル方式において内ケーブルのみの増分量が外ケーブルのみの増分量よりも大きくなるためであると考えられる。内外ケーブルそれぞれの増分量は、ブロックはりとはりはりのいずれにおいても、内ケーブルの増分量が外ケーブルよりも増大している（図-10）。全引張力が最も大きいS-1（内外併用ケーブル方式）の場合、内ケーブルのみの増分量は6.35tf、外ケーブルのみの増分量は4.82tfであり、内ケーブルのみの増分量は外ケーブルのみの増分量の1.32倍となっている。これは、ケーブルの偏心距離の変化に起因するものである。

4.4 目地の開き

ブロックはりにおける目地の開きを図-11に示す。目地のひらきは、载荷点間にあるブロック目地4ヶ所の目地の開きの平均値である。目地の開きの測定位置は、はり断面の下縁から0.75cmである。目地が開き始めると、わずかな荷重の増加により、目地の開きは急激に増加している。

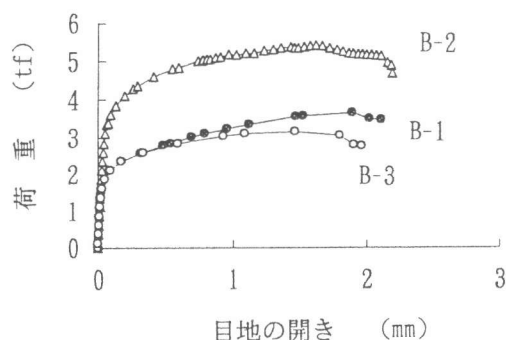


図-11 荷重と目地の開きとの関係
(ブロックはり)

5. 計算結果

最大耐力 P_u ならびに最大耐力時のPC鋼材の全引張力 F_{pu} の実験値と計算値との比較を表-4に示す。計算値は、前述の解析方法により求めた。

ブロックはりにおいて、 P_u の計算値は実験値よりも約3%減少し、 F_{pu} の計算値は実験値よりも約1%増加している。一体はりにおいて、 P_u の計算値は実験値よりも約1%増加し、 F_{pu} の計算値は実験値よりも約5%減少している。ブロックはりならびに一体はりにおいて、 P_u ならびに F_{pu} の計算値は、ケーブル方式の相違にかかわらず実験値と良く一致している。

ブロックはりの場合について、スパン中央のたわみの実験値と計算値との比較を図-12に示す。PC鋼材の全引張力の実験値と計算値の比較を図-13に示す。スパン中央のたわみならびにPC鋼材の全引張力との実験値は計算値と良く一致している。一体はりについても、ブロック

表-4 最大耐力とPC鋼材の全引張力の実験値と計算値との比較

はり種類	Beam No.	最大耐力 (tf)			PC鋼材の全引張力 (tf)		
		実験値	計算値	$\frac{\text{計算値}}{\text{実験値}}$	実験値	計算値	$\frac{\text{計算値}}{\text{実験値}}$
ブロックはり	B-1	3.67	3.558	0.969	22.98	20.47	0.891
	B-2	5.44	5.438	1.000	35.60	38.54	1.083
	B-3	3.17	2.990	0.943	20.36	21.78	1.070
	平均値			0.971	平均値		1.015
一体はり	S-1	4.91	4.928	1.004	24.86	23.87	0.960
	S-2	3.99	4.224	1.059	21.56	19.37	0.898
	S-3	3.57	3.434	0.962	23.38	23.22	0.993
	平均値			1.008	平均値		0.950

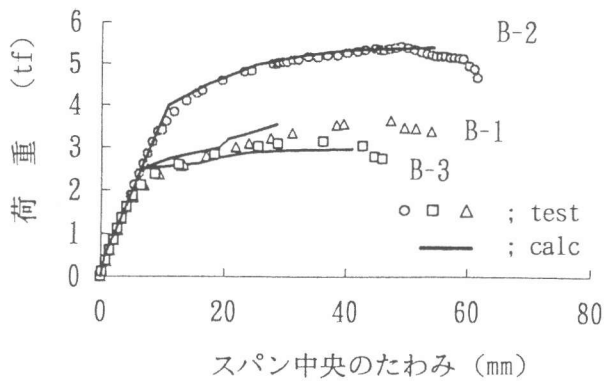


図-12 スパン中央のたわみの実験値と計算値との比較

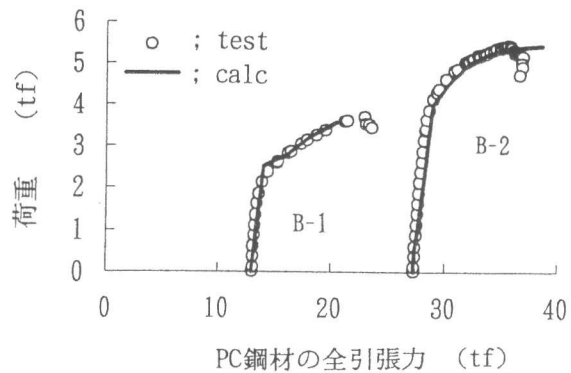


図-13 PC鋼材の全引張力の実験値と計算値との比較

はりと同様にスパン中央のたわみならびにPC鋼材の全引張力との実験値は計算値と良く一致している。

6. まとめ

外ケーブル方式ならびに内外併用ケーブル方式のプレキャストブロックPCはりの曲げ載荷実験を行い、ブロックはりの挙動について検討した結果をまとめると次の通りである。

- ① 最大耐力について、内外併用ケーブル方式のブロックはりは外ケーブル方式よりも最大耐力が増加する。
- ② 変形性状について、内外併用ケーブル方式のブロックはりは内ケーブルの効果により変形性状が改善される。
- ③ 最大耐力時のPC鋼材の全引張力について、内外併用ケーブル方式のブロックはり内ケーブルの引張力の増分量が、外ケーブルよりも増加する。
- ④ 連続した引張鉄筋がない一体はりの挙動は、ブロックはりの挙動とほぼ同じである。
- ⑤ 本解析方法による計算値について、最大耐力、最大耐力時のPC鋼材の全引張力、荷重とスパン中央のたわみとの関係、荷重とPC鋼材の全引張力との関係における計算値は、ブロックはり一体はりで実験値と良く一致する。

以上により、内外併用ケーブル方式ブロックはりの挙動は、内ケーブルの効果により外ケーブル方式ブロックはりの挙動を改善させる。ブロックはりにおいて、コンクリートの引張抵抗を無視した計算値は実験値と良く一致した。したがって、一体はりで提案した本解析方法はブロックはりの挙動においても良く計算できるものと思われる。

参考文献

- [1] 柳沼善明：外ケーブルと内ケーブルとを用いたPRCはりの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、pp. 1003-1008、1994
- [2] 柳沼善明：アウトケーブルを用いたPRCはりの非線形解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 2、pp. 689-694、1991
- [3] 柳沼善明：外ケーブル方式を用いたPRC梁の終局曲げ耐力の非線形解析、プレストレスコンクリート、Vol. 37、No. 3、pp. 54-65、1995
- [4] 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、1986
- [5] 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