

(71) 内外併用ケーブル方式ブロックPCはりの曲げ性状に及ぼすブロック長の影響

日本大学理工学部 正会員 柳沼 善明
 日本大学大学院 齊藤 準平

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ため、注目されている。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はりの曲げ性状は、まだ明確にされず、最大荷重の解析方法が確立しているとは言い難い。ブロックPCはりの破壊は、目地部の上縁コンクリートの圧壊によった¹⁾ため、ブロックPCはりの曲げ性状はブロック長の相違により影響されるものと思われる。

本研究は、ブロック長を30cmと60cmに変化させたプレキャストブロックPCはりの曲げ載荷実験を行い、その曲げ性状(最大荷重、PC鋼材の引張力、変形性状など)に及ぼすブロック長の影響を検討したものである。さらに、六車²⁾が内ケーブル方式アンボンドPCはりで提案した解析方法を、外ケーブル方式で特有な偏心距離の移動を組み入れて改良した解析方法により挙動解析を行い、実験結果と解析結果とを比較検討し、ブロックPCはりの解析上の問題点を指摘した。実験に用いたPCはりのケーブル方式は、内外併用ケーブル方式ならびに外ケーブル方式の2種類である。

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に示すような内外併用ケーブル方式ならびに外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ドタイプである。ブロックはりはブロック長が30cmと60cmの2種類とし、ブロック数はタイプB(ブロック長30cm)で13個、タイプL(ブロック長60cm)で7個である。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である。プレストレス力は全てのPCはりで264.6kNである。内外併用ケーブル方式の場合には、内ケーブルと外ケーブルとの引張力の割合はともに50%ずつである。供試体の形状をタイプBの場合について図-1に示す。

表-1 供試体の種類

タイプ	はりの種類	Beam No.	PC鋼材の断面積 (cm ²)	ケーブル方式
B	7ブロックはり (7ブロック長30cm)	B96-1	5.307(4-φ13)	内外併用ケーブル方式 外ケーブル方式
		B96-2	4.537(2-φ17)	
L	7ブロックはり (7ブロック長60cm)	L96-1	5.307(4-φ13)	内外併用ケーブル方式 外ケーブル方式
		L96-2	4.537(2-φ17)	
S	一体はり	S96-1	5.307(4-φ13)	内外併用ケーブル方式 外ケーブル方式
		S96-2	4.537(2-φ17)	

表-2 コンクリートの強度

圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	曲げ強度 N/mm ²
43.9	2.87	45.1

表-3 PC鋼材と鉄筋の強度

種類	径	降伏点強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
PC鋼材	φ13	1220	1270	201
	φ17	1220	1290	201
鉄筋	D10	340	417	175

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鋼材のリラクゼ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力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鋼材ならびに鉄筋の強度を表-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。

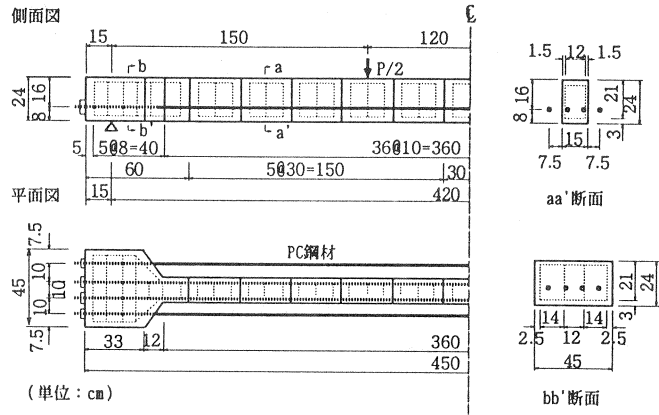


図-1 供試体の形状 (タイプBの場合)

3. 実験結果

3.1 最大荷重

外ケーブル方式ならびに内外併用ケーブル方式の最大荷重 P_u を図-2に示す。ブロックはりの P_u は、外ケーブル方式の場合ブロック長にかかわらずほぼ等しい値を示し、内外併用ケーブル方式の場合タイプLの P_u はタイプBの1.02倍でごくわずかに増加している。また、ケーブル方式の相違についてみると、ブロックはりならびに一体はりともに内外併用ケーブル方式の P_u は外ケーブル方式の P_u よりも増加している。その増加割合は、ブロックはりではブロック長の相違にかかわらず約16%増加し、一体はりでは約17%増加している。これは、 P_u 時のPC鋼材全引張力 F_{up} がケーブル方式により異なることに起因しているものと考えられる。

ブロックはりの P_u は各ケーブル方式ともブロック長にかかわらず一体はりの P_u よりも約23~25%低下している。これは、一体はりの軸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軸鉄筋がないためである。

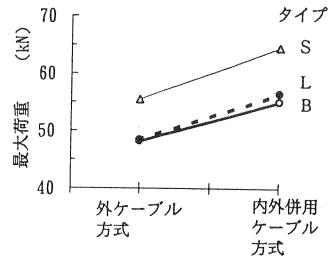


図-2 最大荷重

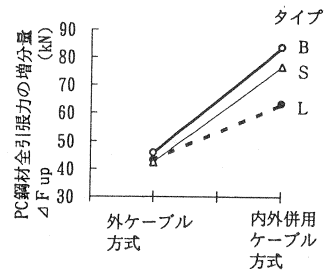


図-3 PC鋼材全引張力の増分量

3.2 PC鋼材全引張力の増分量

各ケーブル方式における最大荷重時までのPC鋼材全引張力の増分量 ΔF_{up} を図-3に示す。外ケーブル方式の ΔF_{up} は、一体はりとはブロックはりともほぼ同じ値 (42.4~45.8kN) であり、外ケーブル方式ブロックはりの ΔF_{up} はブロック長の相違にかかわらず、タイプB、Lともほぼ同じ値である。しかし、内外併用ケーブル方式の ΔF_{up} は、タイプB (ブロック長30cm) がタイプL (ブロック長60cm) よりも約32%増加している。これは、外ケーブル方式のブロックはりの場合ブロック長の相違にかかわらずほぼ同じ変形性状を示している (図-4(b) 参照) が、内外併用ケーブル方式のブロックはりの場合タイプBの P_u 時のた

わみ量がタイプLよりも増加していること(図-4(a)参照)に起因していると考えられる。

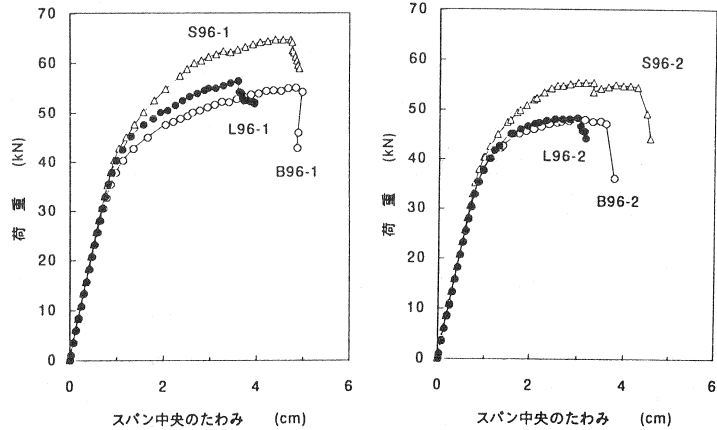
ブロックはりならびに一体はりにおいて、内外併用ケーブル方式の ΔF_{up} が外ケーブル方式より約47~82%増加している。これは、たわみが増加するにつれて、内ケーブルの引張力が外ケーブルの引張力よりも増加するためである。

3.3 変形状

荷重とスパン中央のたわみとの関係を図-4に示す。図-4から、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、荷重が大きくなると、ブロックはり一体はり(タイプS)との変形状は異なってくる。これは、軸鉄筋の連続性に起因するものである。

図-4(a)から、内外併用ケーブル方式ブロックはりの変形状において、ブロック長の影響が顕著に表れている。

最大荷重時のスパン中央のたわみ δu について、タイプB(ブロック長30cm)の δu はタイプL(ブロック長60cm)の δu よりも増大している。この傾向は外ケーブル方式においても同様である(図-4(b))。



(a) 内外併用ケーブル方式

(b) 外ケーブル方式

図-4 荷重とスパン中央のたわみとの関係

3.4 ひびわれ状況と目地部のひずみ

図-5にひびわれ状況を示す。タイプBのB96-1はブロック内のコンクリートに曲げひびわれが発生していないが、タイプLのL96-1ではブロック内に曲げひびわれが発生している。ブロックはりにはタイプB、LともにP_uの約80%程度の荷重のとき、はりの1/2付近の高さから横方向へのひびわれが発生している。

次に、ブロックはりの目地部におけるはり高さ方向のひずみ分布を図-6に示す。ひずみの測定はパイゲージにより行った。図-6によれば、ひずみ分布は荷重が小さいときは直線分布しているが、荷重が大きくなるとひずみ分布は線形でなくなる。これは、目地部のひびわれ状況(図-5)で、横方向へのひびわれが発生したことに起因していると考えられる。また、ブロックはりの上縁から1cm下の位置における軸方向のコンクリートのひずみ分布を図-7に示す。荷重が小さいときはほぼ一定のひずみ値を示しているが、荷重が増加するとブロック端部のひずみが中央部のひずみよりも増大している。

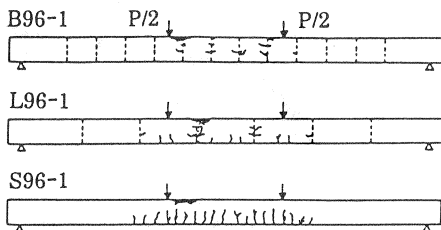


図-5 ひびわれ状況

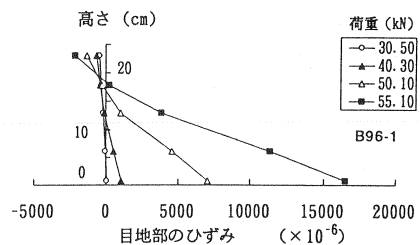
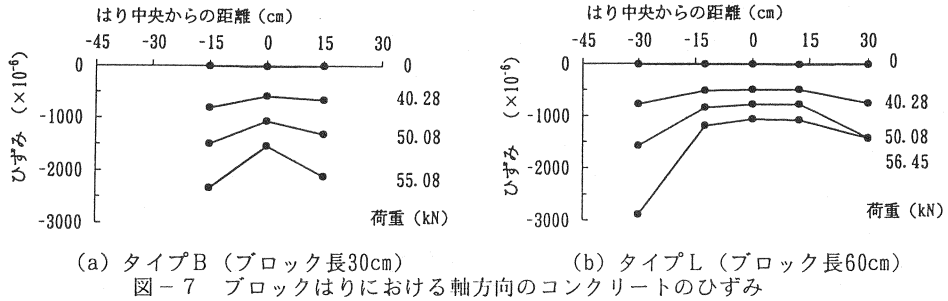


図-6 目地部のひずみ分布



4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 解析方法

内ケーブル方式アンボンドPCはりの最大荷重の解析において、コンクリートとケーブルとの間に付着がないため、ケーブルの伸びとケーブル位置のコンクリートの全変形量が等しいという変形の適合条件を用いた解析方法を六車ら²⁾は提案している。ここでは、この解析方法を外ケーブル方式PCはりで特有なケーブル偏心距離の移動を組み入れて改良した解析方法により、曲げ性状の解析を行った。ブロックはりには引張鉄筋が不連続であるため、解析に用いる要素は、引張鉄筋が不連続な目地部では鉄筋のないコンクリートのみ部分(図-8の区間A)と、ブロック内の鉄筋のある部分(図-8の区間B)との2種類とした。図-8の区間Aの端部が目地の位置になるため、区間Aのコンクリートは引張抵抗を無視し、引張鉄筋のある区間Bのコンクリートは引張抵抗を考慮した。ここで引張鉄筋とは、はりのひびわれ発生後引張側に存在している鉄筋とした。PCはりの解析にあたり、はり端部からスパン中央まではりの長手方向に20要素に分割し、はり断面を40要素に分割した。

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で、最大応力は $k_3 \cdot f_c'$ で $k_3=0.85$ とし、終局ひずみは0.0035とした。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。

ブロック内の鉄筋量がブロックはりの曲げ挙動解析に及ぼす影響を考慮するため、表-4のような解析条件で行った。これは次の理由からである。実験から得られた荷重と引張鉄筋ひずみとの関係を図-9に示す。一体はり(S96-1)は荷重の増加にとまぬ引張鉄筋ひずみが増加する。しかし、ブロックはりのタイプB(B96-1)では目地部が開き始めると引張鉄筋ひずみが増加せず、最大荷重に達し破壊している。タイプL(L96-1)では引張鉄筋ひずみが増加しているが、ひずみ値は一体はりの約1/2程度である。これらは、最大荷重に及ぼす引張鉄筋の寄与率がブロック長の相違により異なることを示しているものと考えられる。そこで、ブロック長の相違が引張鉄筋の寄与率に及ぼす影響を表-4のように引張鉄筋量を減少させることで検討した。すなわち、ブロック長が短い場合、引張

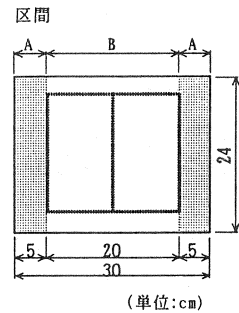


図-8 解析に用いたブロックの要素分割(タイプB)

表-4 解析条件

ケース	区間Bの仮定した引張鉄筋量
1	0
2	$A_s/4$
3	$A_s/2$
4	A_s

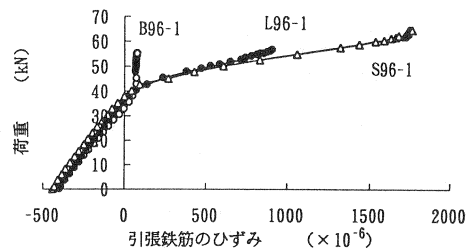


図-9 荷重と引張鉄筋ひずみとの関係

鉄筋の寄与がほとんどないためその断面積をゼロと仮定した。一体はりの引張鉄筋量は連続しているためAsとして解析した。ここに、Asはブロック内に配置されている引張鉄筋量である。

4.2 解析結果に及ぼす引張鉄筋の寄与

最大荷重 P_u ならびに P_u 時のPC鋼材全引張力 F_{up} を各ケースについて解析し、それぞれ解析値/実験値と仮定した引張鉄筋量との関係を内外併用ケーブル方式についてそれぞれ図-10、11に示す。図-10によれば、仮定した引張鉄筋量が増加すると P_u の解析値/実験値は増加する。タイプBの場合、配筋された引張鉄筋量 A_s を用いて解析すると(ケース4)、 P_u の解析値は実験値よりも約1.11倍大きくなり、危険側に算出されている。また、仮定した引張鉄筋量が増加すると、 F_{up} の解析値/実験値は減少している(図-11)。これらの傾向は外ケーブル方式のブロックはりにおいても同様である。

次に、荷重とスパン中央のたわみとの関係を図-12に、荷重とPC鋼材の全引張力との関係を図-13に示す。それぞれ実験値と解析値とが比較されている。図-12、13から、ブロック長が短いタイプB(30cm)の場合、解析条件で引張鉄筋を無視したケース1の解析結果が実験値とよく一致している。ブロック長が長いタイプL(60cm)の場合、引張鉄筋を無視したケース1の解析結果は実験結果よりも低下し、配筋された断面積としたケース4の解析結果は実験値よりも高い値を示している。ケース2とした解析結果が実験結果と一致している。これらの傾向は外ケーブル方式のブロックはりにおいても同様である。

曲げ性状に及ぼす引張鉄筋量の影響が明確となり、ブロック長の相違により引張鉄筋量の寄与率が異なるため、実験結果とよく一致する解析条件で行った解析結果を表-5に示す。すなわち、引張鉄筋量を配筋された量 A_s よりも減少させて解析した。以上により、曲げ性状に及ぼすブロック長の相違による引張鉄筋の効果が明かとなった。すなわち、タイプB(30cm)では引張鉄筋を無視して解析してよいが、タイプL(60cm)では引張鉄筋の寄与をある程度考慮し、引張鉄筋量を $A_s/4$ にした解析

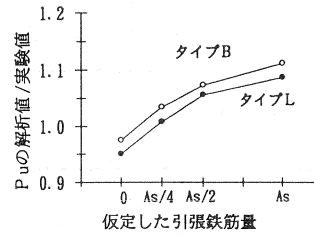


図-10 最大荷重に及ぼす引張鉄筋の影響

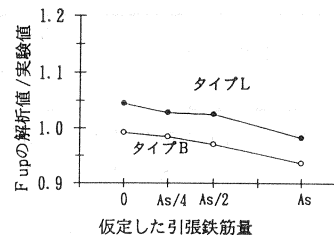
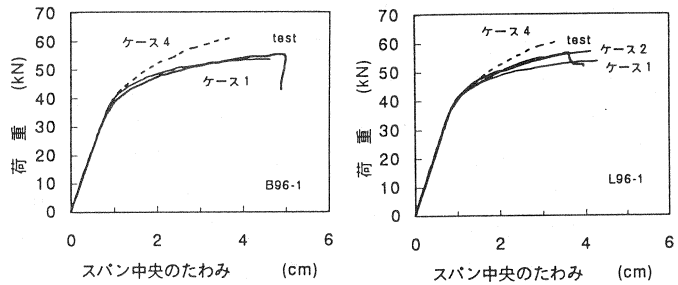
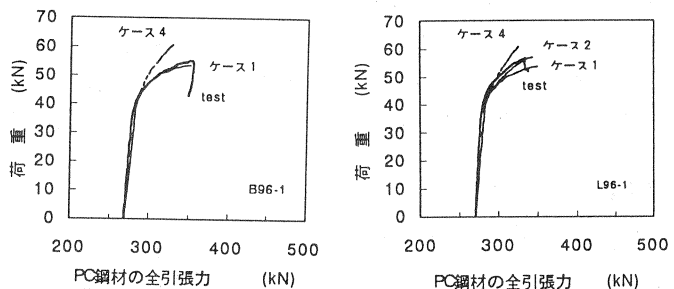


図-11 F_{up} に及ぼす引張鉄筋の影響



(a) タイプB (b) タイプL
図-12 荷重とスパン中央のたわみとの関係



(a) タイプB (b) タイプL
図-13 荷重とPC鋼材の全引張力との関係

結果が実験結果とよく一致した。ブロックはりの解析において、ブロック内に配置されている引張鉄筋量 A_s を用いると、最大荷重ばかりでなく曲げ性状を大きく算出してしまふ危険性がある。

表-5 最大荷重ならびに最大荷重時のP C鋼材全引張力における実験値と解析値との比較

はりの種類	タイプ	Beam No.	最大荷重 (kN)			P C鋼材の全引張力 (kN)		
			実験値	解析値	$\frac{\text{解析値}}{\text{実験値}}$	実験値	解析値	$\frac{\text{解析値}}{\text{実験値}}$
ブロックはり	B	B96-1	54.98	53.60	0.975	353.3	350.5	0.992
		B96-2	48.12	48.38	1.005	314.5	317.1	1.008
	平均値			0.990	平均値			1.000
	L	L96-1	56.45	56.91	1.008	334.6	343.8	1.028
L96-2		48.41	50.31	1.039	310.3	326.5	1.052	
平均値			1.024	平均値			1.040	
一体はり	S	S96-1	64.58	61.94	0.959	346.6	344.8	0.995
		S96-2	55.47	54.40	0.981	310.2	309.8	0.999
	平均値			0.970	平均値			0.997

備考) 表中の解析結果は、解析条件をタイプBではケース1、タイプLではケース2、タイプSではケース4として求めた。

5. まとめ

内外併用ケーブル方式ならびに外ケーブル方式を用いたプレキャストブロックP Cはりにおいて曲げ載荷実験を行い、ブロックはりの曲げ性状について検討した結果をまとめると次の通りである。

- ① 最大荷重について、内外併用ケーブル方式のブロックはりはブロック長の相違にかかわらず外ケーブル方式よりも最大荷重が増加する。
- ② ブロックはりの変形性状について、内外併用ケーブル方式ではブロック長の相違による影響が表れるが、外ケーブル方式ではブロック長の相違による影響が表れずほぼ同様な変形性状を示す。
- ③ ブロックはりの曲げ性状(P_u、F_{up}、変形性状)の解析結果について、ブロック長の相違により引張鉄筋の寄与率が異なる。ブロック長が短いタイプBでは引張鉄筋を無視し、ブロック長が長いタイプLでは引張鉄筋量を $A_s/4$ とした解析結果が実験結果とよく一致する。
- ④ ブロック内に配置されている引張鉄筋量 A_s を用いた曲げ性状(P_u、F_{up}、変形性状)の解析結果は、実験結果よりも大きく算出される。ブロック長が短い場合、ブロック長が長い場合よりも A_s の影響が大きくなる。

以上により、内外併用ケーブル方式ブロックはりの曲げ性状は、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曲げ性状を改善させる。ブロックはりの曲げ性状の解析において、引張鉄筋の寄与を考慮した解析結果は実験結果と良く一致している。引張鉄筋の寄与を考慮にいれず、配筋されている引張鉄筋量 A_s を用いて解析した場合、最大荷重ばかりでなく他の曲げ性状の解析結果は実験結果よりも大きくなり、危険側に算出する傾向にある。この傾向は、ブロック長が短い場合に顕著に表れる。

参考文献

- 1) 柳沼善明：外ケーブル方式プレキャストブロックP Cはりの曲げ性状、プレストレストコンクリート技術協会、第6回シンポジウム論文集、pp.137-142、1996
- 2) 六車ほか：アンボンドP C部材の曲げ終局荷重に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol.26、No.1、pp.10-16、1984
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、1996