

論文 内外併用ケーブル方式を用いたブロック PC はりの最大耐力

斎藤準平^{*1}・柳沼善明^{*2}

要旨: 本研究では内外併用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、実験結果と解析結果とを比較検討した。解析は材料の非線形ならびに外ケーブル特有な偏心距離の変化を考慮した方法である。最大耐力ならびに最大耐力時の PC 鋼材全引張力の解析値は実験値とよく一致した。次に、ブロック長の異なる PC はりについて、内ケーブルと外ケーブルの導入時の緊張割合を変化させた数値解析を行い、最大耐力と PC 鋼材全引張力とに及ぼすブロック長、ケーブル緊張割合、デビエータの有無の影響を明らかにした。

キーワード: 外ケーブル、ブロック PC はり、ブロック長、緊張割合、数値解析

1. はじめに

外ケーブル方式を用いたプレキャストブロック工法は、工期の短縮化、高品質化、省力化等を可能にするため注目されている。しかし、ブロック長の変化が外ケーブル方式を用いたプレキャストブロック PC はりの曲げ性状に与える影響については、明らかにされていない。そこで本研究は、実験結果と解析結果から、最大耐力と PC 鋼材引張力とに及ぼすブロック長、ケーブル緊張割合、デビエータの有無の影響を明確にすることを目的とした。

本研究ではブロック長を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、材料の非線形ならびに外ケーブル特有な偏心距離の移動を組み入れた解析方法による解析結果と実験結果とを比較検討した。

2. 供試体と実験方法

実験に用いた供試体は表-1 に示されるプレキャストブロック PC はり（以下ブロックはり）で、ケーブル方式は内ケーブル方式、外ケーブル方式、内外併用ケーブル方式の 3 種類である。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 と 90cm の 3 種類とした。代表的な供試体の形状を図-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、ひび割れ状況、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、供試体の曲げ載荷実験はプレストレス導入後ただちに行なった。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

表-1 供試体の種類

タイプ	ブロック長 (cm)	ブロック数 (個)	PC 鋼材	プレストレス力 (kN)	ケーブル方式	スパン (cm)
B	30	13	2-φ17	264.6	外ケーブル方式	420
	〃	〃	4-φ13	〃	内外併用ケーブル方式	〃
L	60	7	2-φ17	264.6	外ケーブル方式	420
	〃	〃	4-φ13	〃	内外併用ケーブル方式	〃
G	90	3	4-φ17	264.6	内ケーブル方式	270
	〃	〃	〃	〃	外ケーブル方式	〃
	〃	〃	4-φ13	132.3	〃	〃
	〃	〃	〃	264.6	内外併用ケーブル方式	〃
	〃	〃	4-φ17	〃		〃

*1 日本大学大学院 理工学研究科交通土木工学専攻（正会員）

*2 日本大学教授 理工学部交通土木工学科 工博（正会員）

コンクリート、PC鋼材、鉄筋の力学的特性をそれぞれ表-2、3、4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D 10mmの異形鉄筋を用いた。

表-2 コンクリートの力学的特性

タイプ	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
B, L	43.9	2.87	4.63	339
G	46.7	3.11	4.63	364

表-3 PC鋼材の力学的特性

タイプ	PC鋼材径 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
B, L	φ13	1220	1270	201
	φ17	1220	1290	201
G	φ13	1421	1492	202
	φ17	1215	1299	201

表-4 鉄筋の力学的特性

タイプ	鉄筋径 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
B, L	D10	340	417	175
G	D10	360	491	173

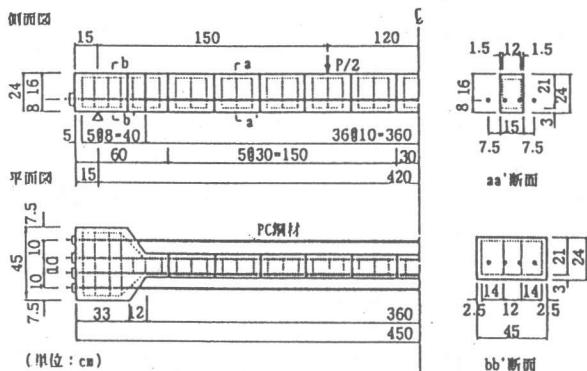


図-1 供試体の形状 (タイプB)

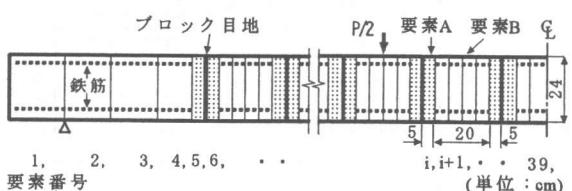


図-2 解析に用いたブロックの要素分割 (タイプB)

3. 実験結果と解析結果の比較

3.1 解析方法

内ケーブル方式アンボンドPCはりの最大耐力の解析において、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は提案している¹⁾。著者らは、この解析方法を外ケーブル方式PCはりに特有なケーブル偏心距離の移動を組み入れた解析方法により、ブロック目地部で引張鉄筋が不連続となることからブロック内の引張鉄筋量を減少させて解析を行った²⁾。ここでは、目地部の解析精度を向上させ引張鉄筋量を減少させることなく実際の鉄筋量を用いて曲げ性状を解析した。図-2はブロック長30cmのブロックPCはりの要素分割を示したもので、ブロックPCはりは引張鉄筋が不連続であるため、解析に用いる要素はコンクリートのみの部分(要素A)と、ブロック内の鉄筋のある部分(要素B)との2種類とした。要素Aのコンクリートは、目地部になるため、コンクリートは引張抵抗を無視した。

PCはりの解析にあたり、はり端部からスパン中央までのはりの長手方向に39要素に分割し、はり断面はファイバー要素で40要素に分割した。なお、図-2ではPC鋼材、スターラップは要素分割を分かりやすくするために表示していない。

解析に用い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とし、終局ひずみは0.0035とした。これは、はりの破壊が目地部上縁コンクリートの圧壊で生じ、その時のコンクリートひずみ値が約0.0035程度であったためである。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にしたがつた³⁾。

3.2 解析結果

表-5は外ケーブル方式、表-6は内ケーブル方式、表-7は内外併用ケーブル方式についての本解析方法による最大耐力ならびに最大耐力時のPC鋼材全引張力の解析値と実験値の比較を示したものである。ブロック長、あるいはケーブル方式の相違にかかわらず実験値と解析値がよく一致した。また、デバイエータを配置したはり⁵⁾の場合においても、実験値と解析値を比較した結果、はり5体の平均値は最大耐力で0.986、PC鋼材全引張力で0.982となり、実験値と解析値がよく一致した。

表-5 実験値と解析値の比較（外ケーブル方式）

タイプ	Beam No	最大耐力		PC鋼材の全引張力	
		実験値 (kN)	実験値 解析値	実験値 (kN)	実験値 解析値
B	B96-2	48.14	0.999	353.0	1.145
	B96-3	41.38	0.977	313.2	1.027
	B95-3*	31.07	1.040	199.5	1.072
L	L96-2	48.43	0.998	334.6	1.096
G	G5	102.1	1.080	342.1	0.894
平均値		1.019		平均値	1.047

備考) *印は文献4) より計算

表-6 実験値と解析値の比較（内ケーブル方式）

タイプ	Beam No	最大耐力		PC鋼材の全引張力	
		実験値 (kN)	実験値 解析値	実験値 (kN)	実験値 解析値
B	B95-4*	47.33	1.123	259.6	1.198
G	G6	108.9	1.055	386.8	1.075
平均値		1.089		平均値	1.136

備考) *印は文献4) より計算

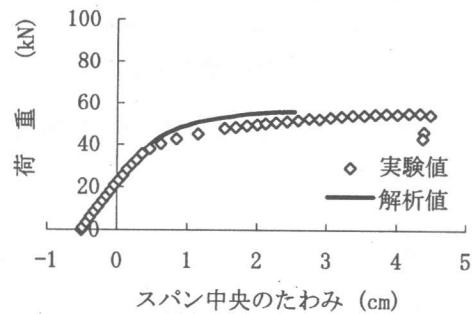
表-7 実験値と解析値の比較
(内外併用ケーブル方式)

タイプ	Beam No	最大耐力		PC鋼材の全引張力	
		実験値 (kN)	実験値 解析値	実験値 (kN)	実験値 解析値
B	B96-1	55.10	0.986	314.5	0.964
	B96-4	44.71	0.977	317.5	1.025
	B95-1*	35.97	0.935	225.2	1.080
	B95-2*	53.31	0.979	348.9	1.075
L	L96-1	56.47	1.024	310.3	0.981
	G1	96.64	0.888	365.8	0.889
	G2	93.70	0.988	388.0	1.083
	G3	69.00	0.924	244.6	1.073
	G4	109.0	1.101	385.5	0.944
平均値		0.978		平均値	1.013

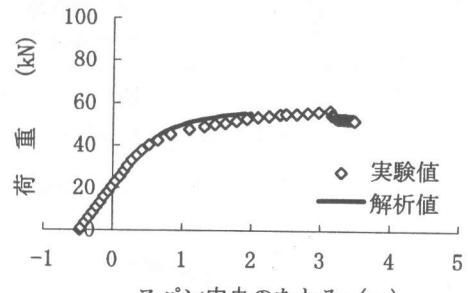
備考) *印は文献4) より計算

荷重とスパン中央のたわみとの関係について、内外併用ケーブル方式のブロック長の異なるブロックPCはりの実験結果と解析結果とを図-3に示す。ブロック長の相違にかかわらず、荷重とスパン中央のたわみとの関係において実験結果と解析結果は破壊に至るまでよく一致した。この傾向は他のケーブル方式でも同様であった。

次に、荷重と全引張力の関係について、内外併用ケーブル方式のブロック長の異なるブロックPCはりの実験結果と解析結果とを図-4



(a) B96-1 (ブロック長30cm)



(b) L96-1 (ブロック長60cm)

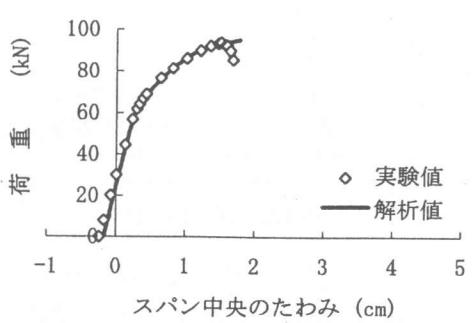


図-3 荷重とスパン中央のたわみとの関係

に示す。ブロック長の相違にかかわらず、荷重と全引張力との関係において実験結果と解析結果は破壊に至るまでよく一致した。この傾向は他のケーブル方式でも同様であった。

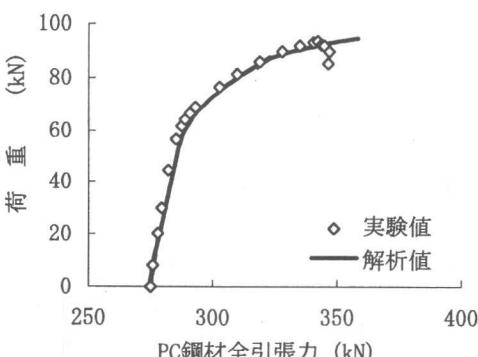
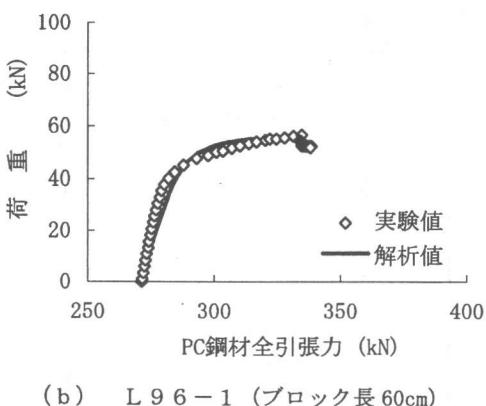
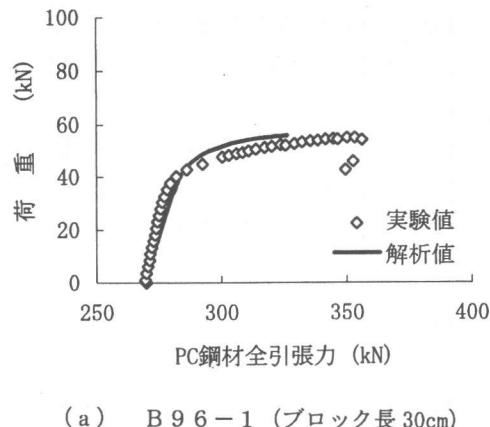


図-4 荷重とPC鋼材全引張力の関係

表-8 モデルはりの諸元（ブロックはり）

タイプ	中間ブロック		端部ブロック		合計		スパン長 (cm)
	長さ(cm)	個数	長さ(cm)	個数	長さ(cm)	個数	
MA	15	25	37.5	2	450	27	420
MB	30	11	60	2	"	13	"
ML	60	5	75	2	"	7	"
MG	90	3	90	2	"	5	"

表-9 ケーブルの緊張割合

ケース	内ケーブル		外ケーブル	
	緊張割合(%)	緊張量(kN)	緊張割合(%)	緊張量(kN)
1	100	260	0	0
2	75	195	25	65
3	50	130	50	130
4	25	65	75	195
5	0	0	100	260

4. 数値解析

4.1 解析概要

数値解析に用いたモデルはりの諸元を表-8に示す。モデルはりのブロック長は15, 30, 60, 90cmの4種類とした。表-9に示すように数値解析ではケーブル緊張割合を5ケースに変化させた。ここで、ケーブル緊張割合とは、全引張力に対する外ケーブルと内ケーブルとの引張力の割合である。プレストレス力は260kNとした。解析上、はり断面、はり長さ、載荷点幅は全モデルはりにおいて、本実験で使用したタイプB, Lの供試体形状と同一とし、スパン長は420cmとした(図-1参照)。データについて、支点からスパン中央に向かってスパン長の1/4点の2ヶ所に配置し、PC鋼材は直線配置とした。解析に用いた引張鉄筋、圧縮鉄筋、PC鋼材の断面積はそれぞれ1.4266cm², 1.4266cm², 4.690cm²とした。コンクリートの圧縮強度は40N/mm²、引張強度は1.81N/mm²とした。また、鉄筋の降伏強度は345N/mm²、PC鋼材の引張強度は1100N/mm²とした。コンクリートのヤング係数は31kN/mm²、鉄筋、PC鋼材のヤング係数はともに200kN/mm²とした。

4.2 解析結果

(1) 最大曲げモーメント

デビエータのないモデルはりについて最大曲げモーメント (M_{max}) に及ぼすブロック長の影響を図-5に示す。また、 M_{max} 時のスパン中央のたわみとブロック長の関係を図-6に示す。ケース1(全内ケーブル方式)はブロック長が長くなるにしたがって M_{max} が減少している。しかし、ケース5(全外ケーブル方式)はブロック長が長くなるにしたがって M_{max} は増加している。これは次の理由によるものと考えられる。ケース1の場合、タイプMAとMGを比較すると、 M_{max} 時のスパン中央のたわみについて、タイプMAでは4.37cmでありタイプMGの2.15cmより2.22cm増加している。ケース1は全内ケーブル方式であるため、偏心距離の移動がない。そのため、たわみが大きくなるにしたがってPC鋼材引張力が増加し、 M_{max} が増加することが考えられる。したがって、タイプMAの M_{max} はタイプMGより増加するものと思われる。それに対して、ケース5の場合では、 M_{max} 時のスパン中央のたわみについて、タイプMAでは3.62cmであり、タイプMGの2.16cmより1.46cm増加している。しかし、ケース5は全外ケーブル方式であるため、偏心距離の移動が生じる。そのため、たわみが大きくなるにしたがって、偏心距離の移動が大きくなり、 M_{max} が減少することが考えられる。したがって、タイプMAの M_{max} はタイプMGより減少するものと思われる。

(2) 全引張力増分量

デビエータの無いモデルはりについて、全引張力増分量に及ぼすブロック長の影響を図-7に示す。全ケースにおいてブロック長が長くなるにしたがって全引張力増分量は小さくなる。それは、内ケーブル緊張割合が大きいもの程顕著に見られる。これも、上記で述べたように M_{max} 時のたわみ量の変化にともなうPC鋼材引張力に起因するものであると考えられる。

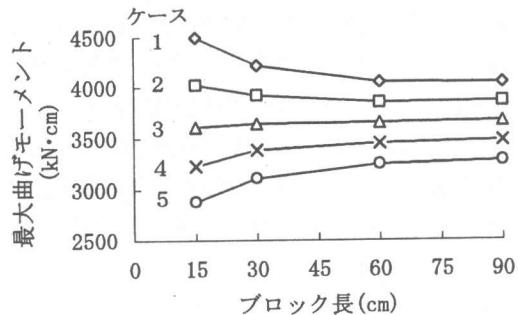


図-5 最大曲げモーメントに及ぼすブロック長の影響

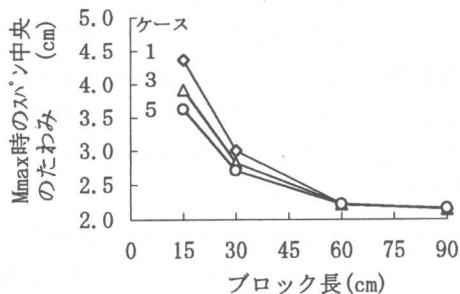


図-6 M_{max} 時のスパン中央のたわみとブロック長の関係

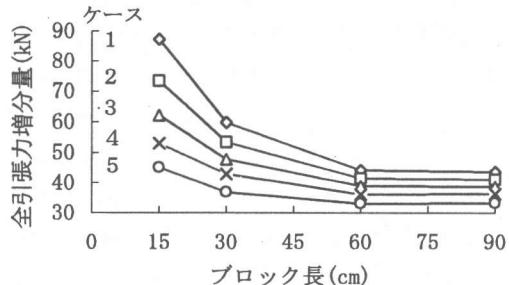


図-7 全引張力増分量に及ぼすブロック長の影響

(3) M_{max} およびPC鋼材全引張力増分量に及ぼすデビエータの有無の影響

図-8に M_{max} に及ぼすケーブル緊張割合の影響を示す。図-9に全引張力増分量に及ぼすケーブル緊張割合の影響を示す。デビエータがあるモデルはりは M_{max} およびPC鋼材全引張力増分量がデビエータの無いモデルはりよりも増加している。この理由は、はりがたわむことによって生じる偏心距離の移動量をデビエータの存在で減少させているためである。また、

デビエータを設けることによる M_{max} の増加は外ケーブル緊張割合が増加するにしたがって顕著となっている。さらに、ブロック長が短くなるにしたがって M_{max} の増加量は大きくなっている。図-9から、デビエータを配置した場合の M_{max} はデビエータを配置しない場合と比較して、タイプ MA では、1.32 倍、タイプ MG では 1.18 倍増加している。

4.まとめ

本研究で対象とした内外併用ケーブル方式ブロック PC はりの挙動について、実験結果と解析結果とを比較し、さらに内外併用ケーブル方式ブロック PC はりのモデルはりの数値解析を行った結果をまとめると、次のとおりである。
 1) 本解析方法による解析結果はブロック長、ケーブル緊張割合などの相違にかかわらず、またデビエータの有無にかかわらず、実験結果とよく一致した。

2) 荷重と全引張力の関係および荷重とスパン中央のたわみとの関係における実験結果と解析結果は破壊に至るまでよく一致した。

3) モデルはりに対する数値解析の結果、ブロック長が短いブロックはりは内ケーブル緊張割合が大きくなるにしたがって、最大曲げモーメントおよび全引張力増分量が大きくなる。しかし、外ケーブル緊張割合が大きくなるにしたがって、最大曲げモーメントおよび全引張力増分量が極端に小さくなる。

4) デビエータのあるモデルはりはブロック長が短くなるにしたがって M_{max} は増加する。また、外ケーブル緊張割合が大きくなるにしたがって M_{max} の増分は大きくなる。

以上により、内外併用ケーブル方式ブロック PC はりに対する本解析方法の妥当性が確認できた。さらに、数値解析結果から、最大耐力ならびに PC 鋼材全引張力などに対する、ブロック長、プレストレス力、ケーブル緊張割合などの相違、デビエータの有無による影響が明確となった。

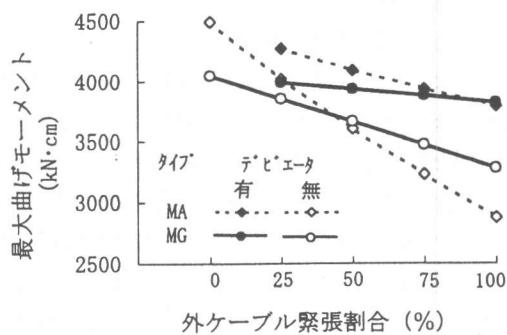


図-8 最大曲げモーメントに及ぼす
ブロック長の影響

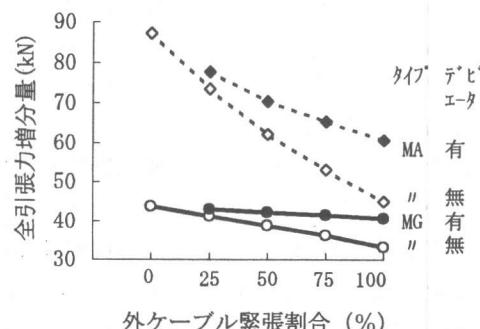


図-9 全引張力増分量に及ぼすケーブル
緊張割合の影響

参考文献

- 六車熙・渡辺史夫・西山峰広：アンボンド PC 部材の曲げ終局耐力に関する研究、プレストレスコンクリート、Vol. 26, No. 1, pp. 10-16, 1984.
- 柳沼善明・齊藤準平：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、プレストレスコンクリート技術協会、第7回シンポジウム論文集、pp. 375-380, 1997.
- 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，1996.
- 柳沼善明：外ケーブル方式プレキャストブロックPC はりの挙動、日本コンクリート工学協会、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 2, pp. 1109-1114, 1996.
- 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.