

(58) 外ケーブル方式プレキャストブロックPC橋の非線形解析について

鹿島建設(株)	技術研究所	○新井 崇裕
同	上	正会員 日紫喜剛啓
同	上	夏目 忠彦
鹿島建設(株)	情報システム部	相沢 旬

1. はじめに

近年、橋梁における急速施工・省力化を目的として外ケーブル方式プレキャストブロック工法が注目されている。しかし、部材の終局曲げ耐力や変位など、その性状は十分明らかにされていない状況にある。

本報告は、外ケーブル方式プレキャストブロックPC桁の特性を解明するために、単純桁と連続桁のそれぞれに対して、①内・外ケーブルの比率、②プレキャストブロック桁(以下、プレキャスト桁)と場所打ち一体桁(以下、場所打ち桁)の違いの2点が終局荷重及び終局変位に与える影響に着目し、解析的に検討した結果を述べるものである。

なお、解析の例題としては、1993年6月にフランスで開催(フランス建設協会(AFPC)主催)された「構造物における外ケーブル方式のプレストレスングに関するワークショップ」で検討されたモデル(以下、AFPCの解析モデル)を使用した。

2. 解析手法の概要

外ケーブル方式プレキャストブロックPC桁の終局の曲げ耐力を算出する際には、以下に示す非線形性を考慮することが重要である。

- ① 材料(コンクリート、鉄筋、PC鋼材)の力学的非線形性
- ② 外ケーブルとコンクリート部材の幾何学的非線形性

解析は、これらの非線形性を考慮することができる弊社が開発した複合非線形(材料非線形・幾何学的非線形)フレーム解析システムSLAP<sup>1)</sup>を用いて行った。

本解析システムは、はり断面をセル状に分割するファイバーモデルにより材料非線形性を評価<sup>2)</sup>し、応力・ひずみの参照座標系を変形につれて更新し、幾何学的非線形性を評価<sup>3)</sup>している。

さらに、座屈点近傍や軟化挙動などの強非線形性挙動を示す場合においても安定した解析が行えるものである<sup>4)</sup>。

なお、外ケーブル方式プレキャストブロックPC桁の解析に対する本システム適用性は、弊社<sup>5)</sup>及び埼玉大学との共同研究<sup>5)</sup>で実施した実験をシミュレートすることにより確認している。

3. AFPCの解析モデル

AFPCの材料特性をFig. 1に、構造モデルをFig. 2に示す。

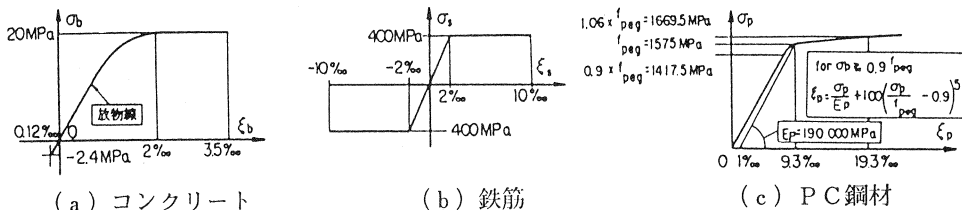
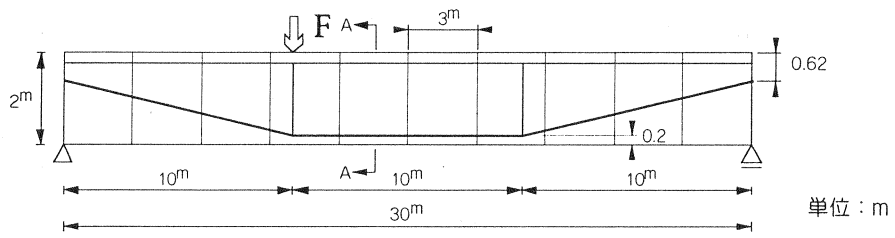
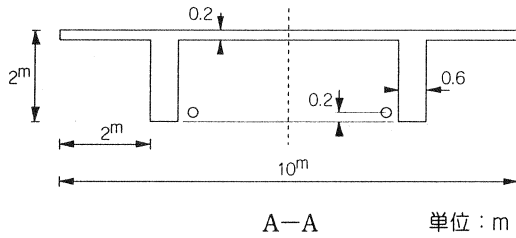


Fig. 1 材料特性



側面図



**主桁断面**

断面積 :  $A=4.16\text{m}^2$

断面二次モーメント :  $I=1.63\text{m}^4$

**鉄筋** (下縁より10cm)

断面積  $A_s=2,000\text{mm}^2/\text{ウェブ}$

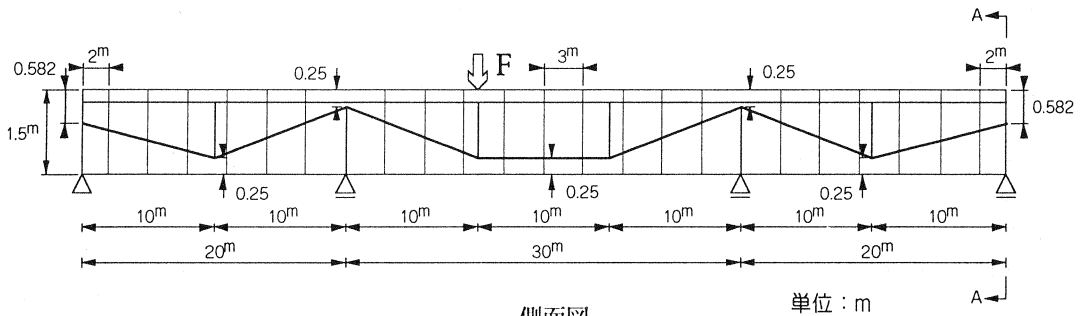
**P C鋼材** (1断面2本)

断面積  $A_p=5,000\text{mm}^2/\text{本}$

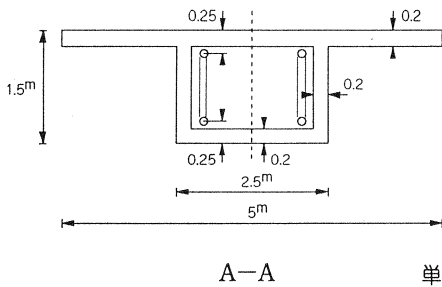
緊張力  $P_e=6,000\text{kN}/\text{本}$

\*内ケーブルは付着あり

(a) 単純桁



側面図



**主桁断面**

断面積 :  $A=1.94\text{m}^2$

断面二次モーメント :  $I=0.629\text{m}^4$

**鉄筋** (上・下縁より10cm)

断面積 上床版  $A_s=3,000\text{mm}^2$

下床版  $A_s=4,000\text{mm}^2$

**P C鋼材** (1断面2本)

断面積  $A_p=2,250\text{mm}^2/\text{本}$

緊張力  $P_e=3,000\text{kN}/\text{本}$

\*内ケーブルは付着あり

(b) 連続桁

Fig. 2 構造モデル

4. SLAPによる解析

4.1 解析ケース

AFPCの解析条件の構造形式と製作方法のそれぞれに対して、外ケーブル75%・内ケーブル25%と外ケーブル25%・内ケーブル75%のケースを追加した。解析ケースをTable 1に示す。

4.2 解析モデル

軸方向、断面及びプレキャストブロックの接合面の解析モデルをそれぞれFig. 3~5に示す。

軸方向については、コンクリート桁は梁要素で、外ケーブルはトラス要素で、デビエータによる桁と外ケーブルの接合は、接合部で摩擦が生じないものとして、外ケーブルの軸力がデビエータ(剛体要素)の左右で等しくなるように斜バネで結合することによりモデル化した。

断面については、コンクリート、鉄筋及び内ケーブルをファイバー要素で、外ケーブルをトラス要素でモデル化した。

プレキャストブロックの接合部については、鉄筋が配置されている部分をR区間、鉄筋が配置されていない部分を無筋区間としてモデル化した。

なお、PC鋼材の有効プレストレス力は初期ひずみとして与えた。

Table 1 解析ケース

解析ケース	構造形式	製作方法	ケーブル比率		
			外ケーブル	内ケーブル	
P-1	単純桁	プレキャスト ト桁	100%	0%	
P-2			75%	25%	
P-3			50%	50%	
P-4			25%	75%	
P-5			0%	100%	
C-1			場所打ち桁	100%	0%
C-2				75%	25%
C-3				50%	50%
C-4				25%	75%
C-5				0%	100%
P-6	連続桁	プレキャスト ト桁	100%	0%	
P-7			75%	25%	
P-8			50%	50%	
P-9			25%	75%	
P-10			0%	100%	
C-6		場所打ち桁	100%	0%	
C-7			75%	25%	
C-8			50%	50%	
C-9			25%	75%	
C-10			0%	100%	

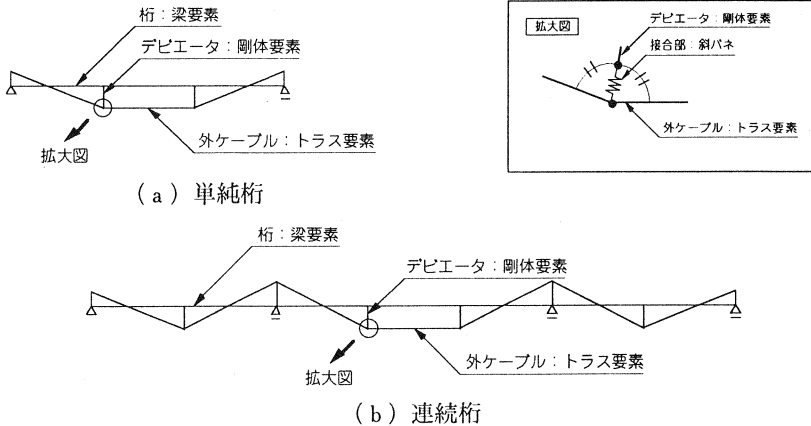


Fig. 3 軸方向の解析モデル

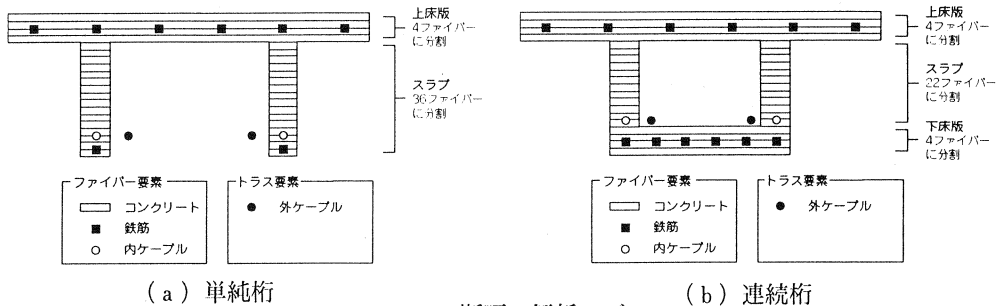


Fig. 4 断面の解析モデル

5. 解析結果

解析結果をTable 2に、単純桁の場合の荷重と支間中央の鉛直方向変位 (以下、変位) の関係をFig. 6.1に、連続桁の場合の荷重と変位の関係をFig. 6.2に示す。また、終局荷重と内・外ケーブルの比率の関係をFig. 7に、終局変位と内・外ケーブルの比率の関係をFig. 8に示す。終局荷重と終局変位のそれぞれに関して、プレキャスト桁と場所打ち桁の比をTable 2に示す。

なお、本解析では、桁の圧縮縁ひずみが0.35%に達した時を終局 (破壊) とみなし、図中の○印で示した。また、桁の圧縮縁ひずみが最初に0.35%に達した位置をFig. 9に示す。

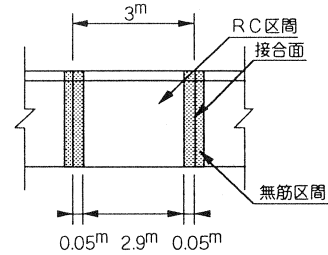


Fig. 5 プレキャストブロックの接合面の解析モデル

Table 2 解析結果

解析ケース	構造形式	ケーブル比率		終 局 時					
		外ケーブル	内ケーブル	プレキャスト桁①		場所打ち桁②		①/②	
				荷重 (MN)	変位 (m)	荷重 (MN)	変位 (m)	荷重	変位
P-1, C-1	単純桁	100%	0%	1.86	0.06	3.04	0.34	0.61	0.18
P-2, C-2		75%	25%	3.03	0.26	3.39	1.01	0.89	0.26
P-3, C-3		50%	50%	3.46	0.63	3.71	1.20	0.93	0.53
P-4, C-4		25%	75%	3.69	0.79	4.02	1.33	0.92	0.59
P-5, C-5		0%	100%	3.94	0.89	4.32	1.40	0.91	0.64
P-6, C-6	連続桁	100%	0%	1.24	0.05	2.14	0.19	0.58	0.26
P-7, C-7		75%	25%	1.83	0.10	2.69	0.39	0.68	0.26
P-8, C-8		50%	50%	2.98	0.25	3.34	0.52	0.89	0.48
P-9, C-9		25%	75%	2.84	0.36	3.04	0.60	0.93	0.60
P-10, C-10		0%	100%	3.00	0.40	3.23	0.64	0.93	0.63

以下に単純桁及び連続桁のプレキャストブロック構造の性状を中心に、得られた知見をまとめる。

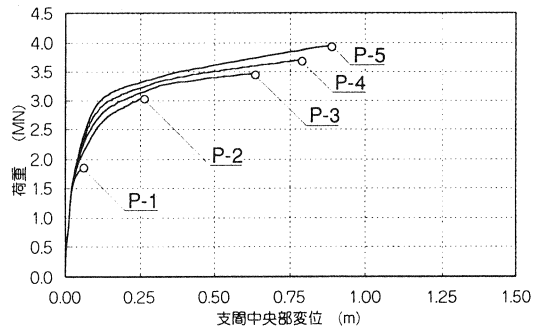
(1) 単純桁

a) 内・外ケーブルの比率が終局荷重及び終局変位に及ぼす影響

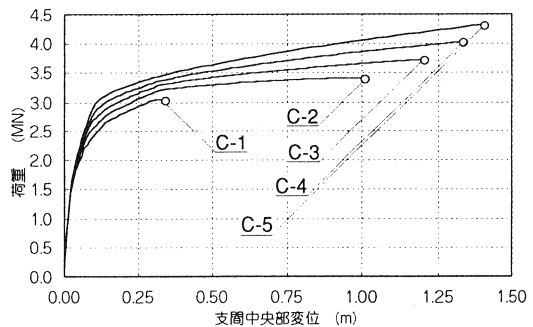
Fig. 6.1 (a) の荷重-変位関係より、外ケーブル100% (P-1) では、終局荷重及び終局変位とも小さく脆性的な性状であるが、内ケーブルの比率を増加させると、終局荷重及び終局変位とも増加することがわかる。

この関係を明確にするため内・外ケーブルの比率との関係で示したFig. 7, 8をみると、終局荷重は内ケーブルの比率が0~25%以外は内ケーブル比率に対してほぼ比例的に増加するのに対し、終局変位は曲線的な増加傾向を示している。内ケーブルの比率が50%程度までは終局変位への影響が大きいようである。

内ケーブルの比率を増加させると終局荷重及び終局変位が増加するのは、内ケーブルの比率



(a) プレキャスト桁



(b) 場所打ち桁

Fig. 6.1 単純桁の荷重と支間中央部変位の関係

を増加させることによって、桁の圧縮縁ひずみが低減するためと考えられる。

b) 場所打ち桁との比較

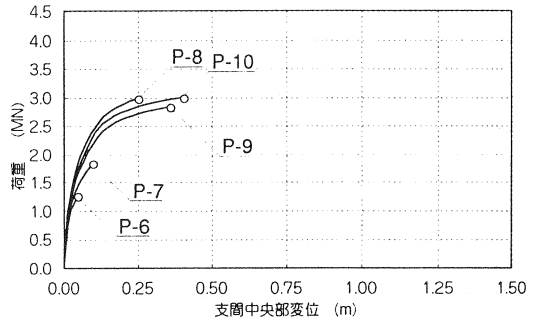
Fig. 6.1及びTable 2より、プレキャスト桁の場合は、場所打ち桁と比較して終局荷重は61~91%に、終局変位は18~64%に低下した。同じケーブル比率でプレキャスト桁と場所打ち桁を比較した場合、終局荷重より終局変位の方がより大きく低下する傾向となる。

ただし、終局荷重だけに注目した場合は、内ケーブルの比率を25%以上にすれば場所打ち桁の90%程度の終局荷重が得られると考えられる。

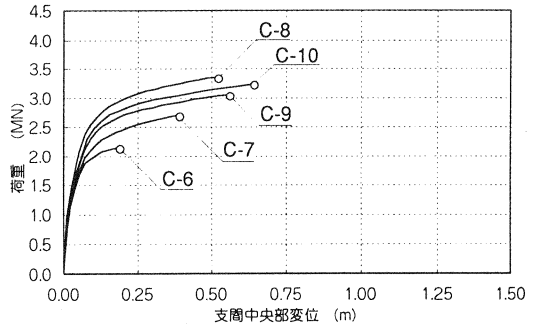
(2) 連続桁

a) 内・外ケーブルの比率が終局荷重及び終局変位に及ぼす影響

連続桁では、載荷点付近もしくは中間支点上のいずれかが終局状態に達することになるが、今回のモデルでは、P-6~8(内ケーブルの比率:0~50%)は載荷点付近が、P-9,10(内ケーブルの比率:75~100%)は中間支点上のコンクリート圧縮縁が終局状態となり、破壊モードが異なった結果となった(Fig. 9参照)。



(a) プレキャスト桁



(b) 場所打ち桁

Fig. 6.2 連続桁の荷重と支間中央部変位の関係

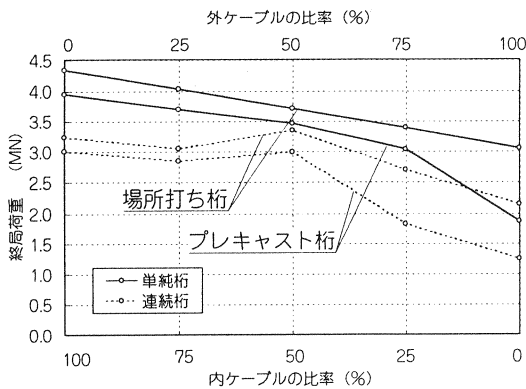


Fig. 7 終局荷重と内・外ケーブルの比率の関係

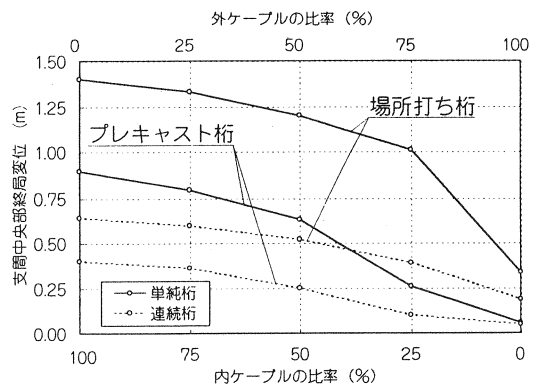
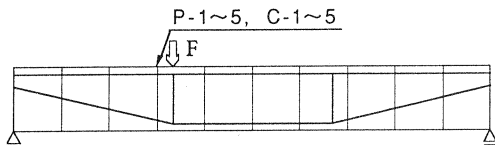
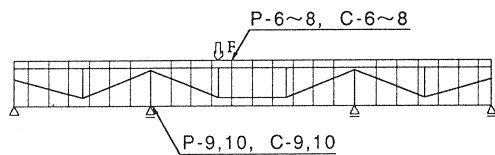


Fig. 8 終局変位と内・外ケーブルの比率の関係



(a) 単純桁



(b) 連続桁

Fig. 9 桁のコンクリートの圧縮縁ひずみが最初に0.35%に達した位置

Fig. 6.2 (a) の荷重-変位関係より、内ケーブルの比率の増加に対して、終局変位は増加する傾向であるが、終局荷重は必ずしも増加する傾向ではないことがわかる。

この関係を明確にするため、内・外ケーブルの比率との関係で示したFig.7,8をみると、終局荷重は内ケーブルの比率が0~50%では増加傾向であるが、75~100%ではほとんど増加していない。また、終局変位は単純桁と同じような曲線的な増加傾向を示している。

#### b) 場所打ち桁との比較

Fig. 6.2及びTable2より、プレキャスト桁の場合は、場所打ち桁と比較して終局荷重は58~93%に、終局変位は26~63%に低下した。同じケーブル比率でプレキャスト桁と場所打ち桁を比較した場合、単純桁の場合と同様にして、終局荷重より終局変位の方がより大きく低下する傾向となる。

ただし、終局荷重だけに注目した場合は、内ケーブルの比率を50%以上にすれば場所打ち桁の90%程度の終局荷重が得られると考えられる。

### 6. おわりに

AFPCの解析モデルを例題として、外ケーブル方式プレキャストブロックPC桁の特性について、複合非線形フレーム解析により検討した範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 単純桁では、内ケーブルの比率を増加させると、終局荷重、終局変位とも増加する傾向にあるが、終局荷重については内ケーブルの比率25%の場合が、終局変位については50%の場合がそれぞれの増加の割合が最も大きいことがわかった。
- (2) 連続桁では、内ケーブルの比率を増加させても、終局荷重は必ずしも増加するとは限らず、終局荷重、終局変位とも内ケーブルの比率50%の場合が、それぞれの増加の割合が最も大きいことがわかった。
- (3) 単純桁、連続桁とも、場所打ち桁と比較して、終局荷重、終局変位とも低下するが、内ケーブルの比率を単純桁は25%以上、連続桁は50%以上にすることにより、場所打ち桁の90%程度の終局荷重が得られることがわかった。
- (4) 連続桁では、内・外ケーブルの比率によって破壊モードが異なることがわかった。

なお、今回の解析ではコンクリートの材料特性はAFPCのものを使用した。外ケーブル構造は、桁の圧縮縁ひずみが部材の終局荷重及び終局変位の決定要因の一つになるので、解析を行うにあたっては、コンクリートの材料特性における軟化域の評価が重要になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 沖見芳秀, 右近八郎: 複合非線形フレーム解析システムの開発, 土木学会誌 技術最前線, Vol. 80, pp. 14~17, 1995.1
- 2) Yamada, Y. et al.: Stress-Strain Based Inelastic Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures, Proc. of IABSE International Symposium, Delft, 1987
- 3) Bathe, K. J. and Bolourchi, S.: Large Displacement Analysis of Three-dimensional Beam Structures, Int. J. Num, Meth. Engng, Vol. 14, pp. 961~986, 1979
- 4) Bathe, K. J. and Dvorkin, E. N.,: On the Automatic Solution of Nonlinear Finite Element Equations, Comp. Struct., Vol. 17, pp. 871~879, 1983
- 5) 新井崇裕 他: 外ケーブルを用いたプレキャストブロックPC部材の基本的曲げ性状, 第22回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 512~513, 1995.3
- 6) 相沢旬 他: 複合非線形フレーム解析による外ケーブルプレキャストセグメントPC梁の耐力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17-2, pp. 767~772, 1995.6