

#### (4) 外ケーブルを用いたPC橋の非線形解析について

鹿島建設(株)	土木設計本部	正会員	○鴻上 浩明
同上	同上	正会員	石原 重孝
同上	同上	正会員	伊東 祐之
同上	情報システム部		沖見 芳秀

##### 1. はじめに

外ケーブル方式のプレストレストコンクリート(PC)橋は、省力化と急速施工および維持管理の観点から、近年、特に注目を集めてきているが、部材断面の曲げ耐力(破壊抵抗曲げモーメント)算定に関して、付着のある内ケーブル方式と異なり断面における平面保持の仮定が適用できないため、適切な断面耐力算定式がない状況にある。

国内外で既に建設されている外ケーブル方式PC橋の事例においては、①外ケーブルの終局曲げ耐力への寄与を無視して安全側に設計する方法、②付着のない緊張材(アンボンド工法)の終局時における張力増分算定式を用い、これを曲げ耐力への寄与分として評価する方法などが採られているが、断面設計を基本とした従来の設計法とは整合せず、また、統一された見解も示されていないのが現状である。

本報告は、材料の非線形性と部材の幾何学的な非線形性および荷重増加に伴うコンクリート部材の変形とその結果として生ずる外ケーブルの張力変化や位置変化によるプレストレスの増減を評価することで、構造系としての終局曲げ耐力を算定する手法を提案したもので、1993年にフランスで行われた「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」で検討された課題に適用して、世界各国のPC桁橋非線形解析結果と比較したものである。

##### 2. 解析手法の概要

外ケーブル方式PC橋の曲げ耐力算定に考慮すべき非線形性には、次のものがある。

- 1) コンクリートの材料非線形性
- 2) 鋼材(PC鋼材・鉄筋)の材料非線形性
- 3) 外ケーブルとコンクリート部材との幾何学的非線形性

材料の非線形性については、応力とひずみとの関係を適切にモデル化する必要があり、外ケーブルとコンクリート部材との幾何学的な非線形性に関しては、デビエータで外ケーブルがコンクリート主桁を鉛直方向に支持する構造となっているために大変形解析で評価する必要がある。

本解析では、これらの非線形性を考慮するため、ファイバーモデルを用いたフレーム解析を採用した。

ファイバーモデルを用いたフレーム解析は、桁に梁理論(平面保持の仮定)を適用できるものとし、外ケーブルを軸力のみ受け持つトラス要素でモデル化するものである。断面レベルでの変形性能は、断面を細かな領域に分割することで、各小領域(ファイバー)毎の応力とひずみとの関係から評価するものである。

解析には、弊社保有の複合非線形フレーム解析プログラムSLAP(System for Large Deformed Multi-Supported Bridge with Nonlinear Material Properties)を用いた。SLAPは、PC橋の3次元静的・動的大変形フレーム解析プログラムで、材料の非線形性と幾何学的な非線形性を考慮できるものである。

なお、解析プログラムの妥当性は、参考文献1)に示すように、弊社で実施した外ケーブルPC梁の載荷実験をシミュレーションすることで確認している。

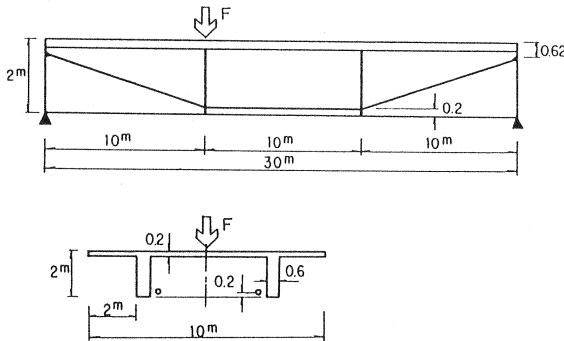
3. A F P Cでの解析条件

1993年6月にフランスで開催された「構造物における外ケーブル方式のプレストレスリングに関するワークショップ」(フランス建設協会(AFP C)主催)において、表-1に示す条件で外ケーブル方式PC橋の非線形解析を行う課題に対し、表-2の回答者(14機関)からの荷重-変位関係が紹介された。

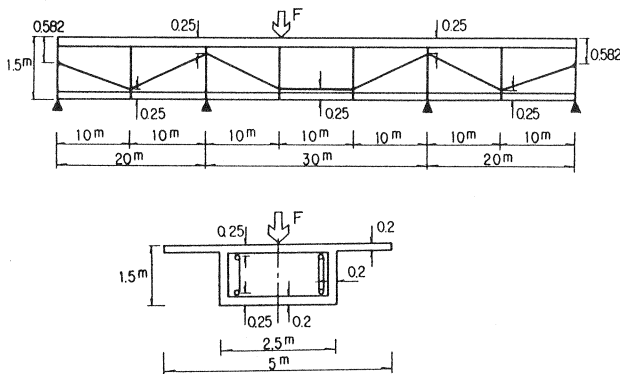
構造モデルを図-1に、材料特性を図-2に示す。

表-1 AFP Cでの解析条件

1	構造形式	単純桁・連続桁
2	製作方法	場所打ち桁・プレキャスト桁
3	内・外のケーブル比率	100%外ケーブル
		50%外ケーブル・50%内ケーブル
		100%内ケーブル



(a) 単純桁



(b) 連続桁

図-1 構造モデル

主桁断面:

断面積  $A = 4.16 \text{ m}^2$

断面二次モーメント  $I = 1.63 \text{ m}^4$

PC鋼材(1断面2本):

断面積  $A_p = 5000 \text{ mm}^2$  /本

緊張力  $P_e = 6000 \text{ KN}$  /本

鉄筋(下縁より10cm):

断面積  $A_s = 2000 \text{ mm}^2$

主桁断面:

断面積  $A = 1.94 \text{ m}^2$

断面二次モーメント  $I = 0.629 \text{ m}^4$

PC鋼材(1断面2本):

断面積  $A_p = 2250 \text{ mm}^2$  /本

緊張力  $P_e = 3000 \text{ KN}$  /本

鉄筋(上・下縁より10cm):

断面積 上床版  $A_s = 3000 \text{ mm}^2$

下床版  $A_s = 4000 \text{ mm}^2$

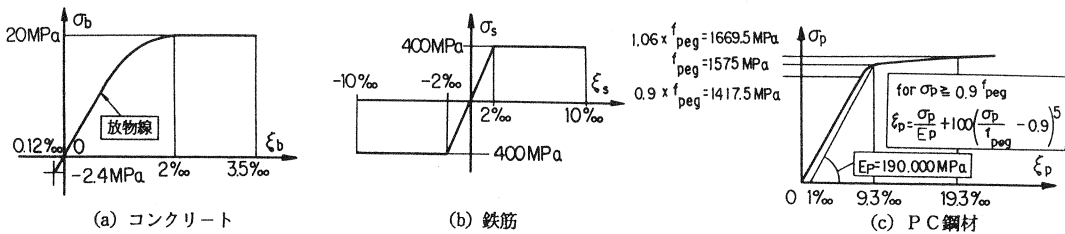


図-2 材料特性

表-2 A F P Cへの回答者一覧

番号	回 答 者	所 属	解析プログラム
1	Prof. KÖNIG QIAN	Technische Hochschule Darmstadt Germany	FEMAS
2	F.J. ULM V. MAGNAT	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées France	CESAR
3	Prof. J. SCHLAICH T. KUCHLER	Universität Stuttgart Germany	—
4	Dr. J. - M. FRANSSEN	Université de Liège Belgium	SAFIR
5	T.I. CAMPBELL	Queen's University Canada	NAPCCB
6	C. STADLER Dr. M. WICKE	Universität Innsbruck Austria	RAHM
7	Prof. J. EIBL I. RETZEPIS J. HUANG	Universität Karlsruhe (TH) Germany	DLTPC ABAQUS
8	Prof. Zivota PERISIC Nebojsa OJDROVIC	University of Belgrade	Concrete Mac
9	Prof. Dr. - Ing. György IVANYI W. BUSCHMEYER Y. HU	Universität Essen Germany	VOV
10	Jan L. VITEK Petr VITEK	Czech Technical University of Prague Czech Republic	VOK - 2
11	Antoine E. NAAMAN Sang - Mo JEONG	University of Michigan U.S.A.	—
12	GARCIA MENEZES FOURE	CEBTP France	SNOB
13	Prof. Filip C. PHILIPPOU	University of California U.S.A.	PCBEAM
14	Dr. Mineo MORIMOTO Mitsuharu KOMURO	New Structural Engineering Japan	—

#### 4. S L A Pによる解析

世界各国における外ケーブル方式PC橋の非線形解析と比較するため、AFPCと同じ条件でSLAPによる解析を行った。解析は場所打ち桁を対象とし、内ケーブル量の韌性（回転性能）に与える影響を見るため、25%内ケーブル・75%外ケーブルのケースを追加した。

##### (1) 主方向のモデル化

コンクリート主桁は梁要素で、外ケーブルはトラス要素でモデル化した。また、デビエータは剛体としてモデル化し、デビエータと外ケーブルとはバネ要素で結合した。主方向の解析モデルを図-3に示す。

なお、各部材の非線形性は、次のように考慮した。

##### ①コンクリート主桁

変形から各断面のファイバー位置でのひずみを平面保持の仮定より求め、各ファイバーの応力とひずみとの関係を用いて剛性を評価するとともに、幾何学的非線形性を同時に評価する。

##### ②外ケーブル

PC鋼材の応力とひずみとの関係に基づき剛性を評価するとともに、幾何学的非線形性を同時に評価する。

##### (2) 断面のモデル化

コンクリート断面はファイバーでモデル化した。また、部材内に配置されている鋼材（PC鋼材・鉄筋）もファイバーでモデル化した。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。断面のモデル化を図-4に示す。

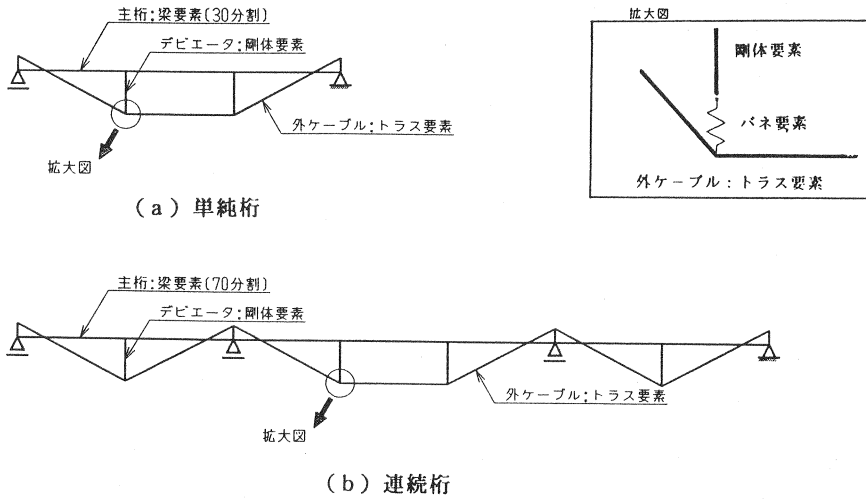


図-3 主方向の解析モデル

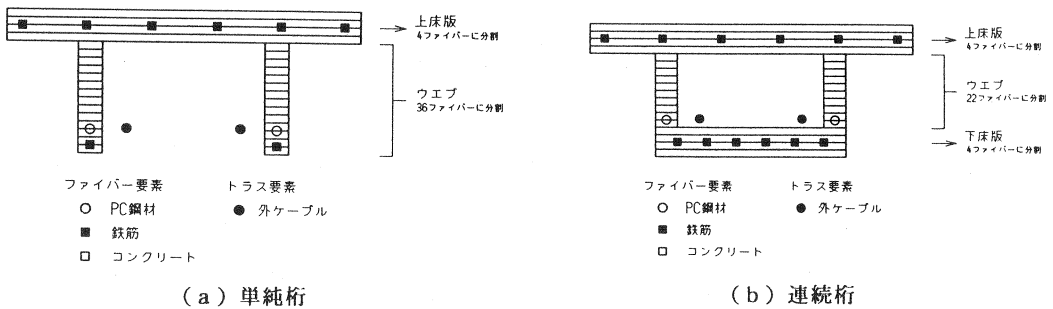


図-4 断面のモデル化

### 5. 解析結果

本解析は、SLAPを用いて、径間中央部におけるヒンジ形成(圧縮縁コンクリートひずみ $3500\mu$ )を破壊(終局時)と位置付け、ファイバーモデルによる非線形解析を行ったものである。SLAPによる解析結果を表-3に、径間中央部における荷重-変位曲線を図-5に示す。

また、AFPCにおける世界各国での解析結果とSLAPによる解析結果との比較を図-6に示し、比較結果の概要を以下に述べる。

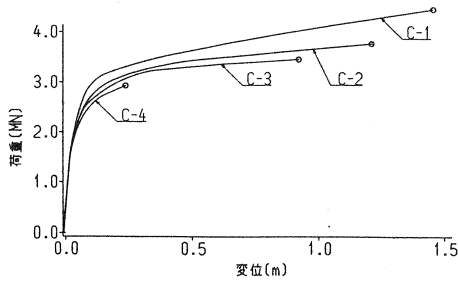
- 1) 単純桁におけるSLAPの結果は、AFPCの世界各国での解析値と比較して、ほぼ中央値を示した(解析ケース C-1, 2, 4)。
- 2) 連続桁におけるSLAPの結果は、100%外ケーブル(C-8)と50%内・外ケーブル(C-6)とが下限値に近く、100%内ケーブル(C-5)では中央値を示す結果となった。
- 3) 単純桁・連続桁とも、終局時における圧縮縁コンクリートひずみを $3500\mu$ として解析結果を比較すると、100%外ケーブル(C-4, 8)は、50%内・外ケーブル(C-2, 6)および100%内ケーブル(C-1, 5)に比べ、変形性能が著しく小さかった。50%内・外ケーブル(C-2, 6)と100%内ケーブル(C-1, 5)とでは、曲げ耐力に若干の相違はあるものの変形性能に顕著な差は見受けられなかった。なお、50%内・外ケーブル(C-2, 6)および25%内ケーブル・75%外ケーブル

(C-3, 7)と100%内ケーブル(C-1, 5)との曲げ耐力を比較すると、単純桁ではそれぞれ85%・77%であり、連続桁ではそれぞれ94%・90%であった。

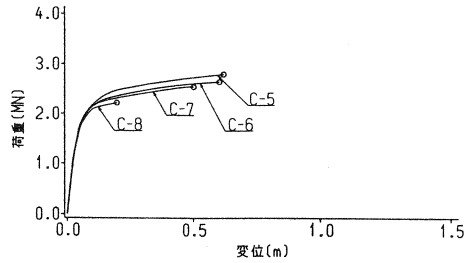
4) 単純桁の100%内ケーブルにおいて、ボンドタイプの曲げ耐力を算定し、これを荷重に置き換えると4.1MNとなり、SLAPで得られた4.4MNとほぼ対応するものであった。

表-3 SLAPによる解析結果

解析 ケース	構造形式	ケーブルの比率		終 局 時	
		内ケーブル	外ケーブル	荷重(MN)	変位(m)
C-1	単純桁	100%	0%	4.42	1.44
C-2		50%	50%	3.76	1.19
C-3	場所打ち	25%	75%	3.42	0.91
C-4		0%	100%	2.89	0.23
C-5	連続桁	100%	0%	2.80	0.62
C-6		50%	50%	2.63	0.59
C-7	場所打ち	25%	75%	2.52	0.50
C-8		0%	100%	2.19	0.19

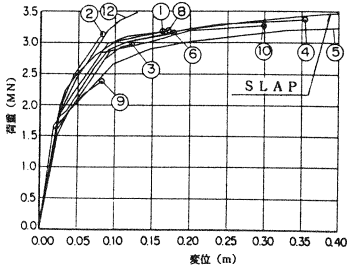


(a) 単純桁

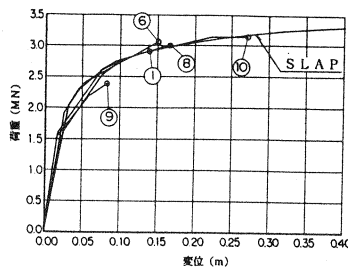


(b) 連続桁

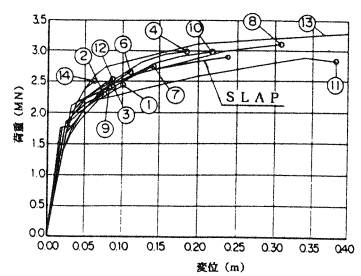
図-5 径間中央部における荷重-変位曲線 (SLAPによる解析結果)



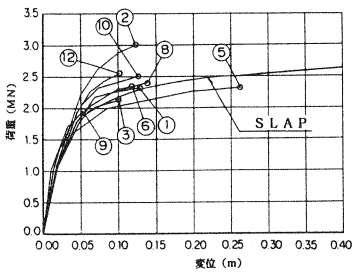
(a) 解析ケースC-1



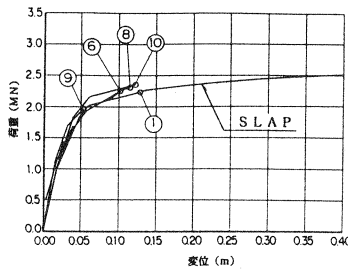
(b) 解析ケースC-2



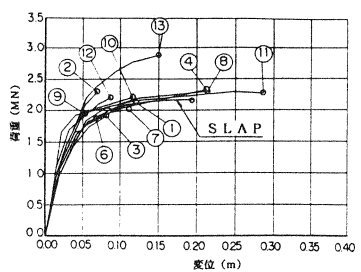
(c) 解析ケースC-4



(d) 解析ケースC-5



(e) 解析ケースC-6



(f) 解析ケースC-8

図-6 径間中央部における荷重-変位曲線 (AFPCでの解析結果とSLAPによる解析結果との比較)

## 6. 今後の課題

外ケーブル方式PC橋は、自重の軽減や施工性の向上、さらにケーブルの再緊張あるいは取り換え可能であるなど様々な利点を有しているが、本格的な実施例も少なく、設計・施工に関する基準類の整備も十分でない状況にある。

しかし、省力化や急速施工の観点から、外ケーブル方式に対する関心は、部材のプレキャスト化と併せて今後ますます高くなっていくものと思われる。

そこで、外ケーブル方式PC橋の解決すべき技術的課題を整理し、以下に列挙する。

### (1) プレキャストセグメント工法への適用性

プレキャストセグメントの接合面は、鋼材が連続していないので、曲げモーメントやせん断力の伝達に関して適切なモデル化が必要になるとともに、十分な靱性(回転性能)を確保するために最小限必要となる内ケーブル量を把握しておかなければならない。さらに、セグメント端部の圧縮縁におけるスターラップの拘束効果を評価する方法も確立しておかなければならない重要な課題である。

### (2) デビエータの適切な構造と設計方法

外ケーブル構造が十分な耐荷性能を保持するためには、デビエータの健全度が保証されていなければならない。すなわち、外ケーブルの張力変動の適切な把握が重要となってくる。また、デビエータ出入口でのせりあいは、過度の応力集中や配置角度の変化に繋がるため、高い設置精度も要求される。そこで、デビエータのプレキャスト化や合成構造の適用にも目を向ける必要がある。

### (3) 外ケーブルの耐久性に関する検討

外ケーブルは、外的環境(気候・温度等)の影響を受けやすいため、効果的な防錆・防食・防水技術を確立する必要がある。これには、新素材の適用性の可否が大きな鍵を握るものと思われる。

### (4) デビエータにおける外ケーブルの構造

外ケーブルはデビエータで支持された形式であるため、外ケーブルの張力変動がデビエータを通じ構造全体に及ぶことになり、これにより曲げ耐力が低下すると考えられている。そこで、外ケーブルの張力変動区間を制御し、曲げ耐力を向上させることが考えられる。欧州では、外ケーブルの長さ40m以内にデビエータを設置し、その位置で外ケーブルを拘束することにより、曲げ耐力を向上させる方向で進んでいる模様である。実験的な確認も含め、十分な研究が必要であろう。

## 7. おわりに

近年の労働事情の悪化と将来に向けた高齢化社会を考える時、橋梁工事における省力化と急速施工に関する技術開発は必要不可欠なものである。

建設技能者の不足は、また、コンクリート構造物の品質にも問題を投げかけており、外ケーブル方式の採用は、橋梁建設におけるこれらの問題への大きな解決策になるものと思われる。すなわち、設計・施工上に幾多の課題は残されているものの、部材のプレキャスト化と組み合わせることにより、省力化と急速施工の要求に答えることができるからである。

ここに報告した外ケーブル方式PC橋の解析技術が、上述の検討課題の一つの方向性を与え、21世紀へ向けた技術開発の一助となれば幸甚である。

## 参考文献

- 1) 齊藤・森井・林田・奥村：CFRPを用いた外ケーブル部材の曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 1215-1220, 1994. 6
- 2) E. Conti・R. Tardy: Synthesis of the Calculation Test, Workshop - Behaviour of External Prestressing in Structures, AFPC, 1993. 6