

(82) PC ケーブルトラス桁の曲げ性状に関する研究

ドービー建設工業(株) 技術センター ○濱田 譲  
 同上 竹本 伸一  
 三井建設(株) 土木本部 PC技術部 渡辺 宗樹  
 三井建設(株) 技術研究所 篠崎 裕生

1. はじめに

桁の軽量化を図り、PC 橋の適用支間を拡大する構造として、PC ケーブルトラス橋が考えられる。この構造は、従来の外ケーブル方式 PC 橋の PC ケーブルを桁高以上に偏心させ、主桁と PC ケーブルおよびストラット(デビエータ)により擬似トラスを構成するもので、同様の構造は海外ではフランスの Truc de la Fare 橋<sup>1)</sup>や斜張橋と組み合わせたドイツのタールオーペレアルゲン橋<sup>2)</sup>などで採用されている。図-1 に本構造形式の一例を示す。

著者等は、単純桁(支間 50m)の試設計<sup>3)</sup>を行い、本構造形式の道路橋への適用性および従来の外ケーブル方式 PC 箱桁橋よりも桁自重を小さくできることなどを確認している。ここでは、試設計した桁の縮小モデル試験体で行った曲げ荷重試験により、曲げ性状を把握するとともに、終局耐力の検討で用いた汎用非線形解析(材料非線形および幾何学的非線形を考慮)の妥当性を検証するものである。

2. 試験体の設計

試験体の概略の形状を決定するにあたっては、試設計<sup>3)</sup>を参考にした。試設計においては、図-1 に示す支間 50m の桁のストラットの数も固定(5ヶ所)し、桁高  $h$  を 0.75~1.50m、偏心量  $e$  を 4.0~8.0m の範囲で変化させた。主桁コンクリートの設計基準強度は  $400\text{kgf/cm}^2$  とし、外ケーブル(37T15.2)の設計荷重時応力を  $0.4\sigma_{pu}$  に制限した場合の試設計結果として、図-2 に桁高と外ケーブル応力変動および桁自重の関係を、図-3 に偏心量とたわみの関係を示す。

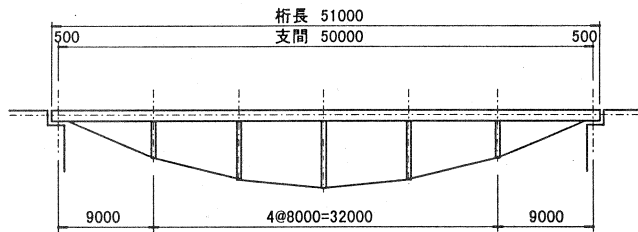


図-1 PC ケーブルトラス橋

図-2 より、桁高を小さくすれば桁自重は減少するが、外ケーブルの応力変動量は大きくなるのが分かる。桁自重は、桁高 0.75m の場合、PC 単純箱桁(659tf)の約 73%(483tf)となった。

図-3 の偏心量とたわみの関係より、偏心量が小さくなるとたわみが大きくなり、桁高 0.75m で偏心量 4.0m のケースでは、たわみの慣用的な制限値 ( $L/600$ 、 $L$  は支間長)を満足しなかった。

桁高と偏心量のバランスは、架設場所や施工法など諸条件により左右されるが、本試設計では、コンクリート応力度の許容値を満足しなかったのは、桁高 0.75m で偏心量 4.0m と 5.0m のケースだけであり、内・外

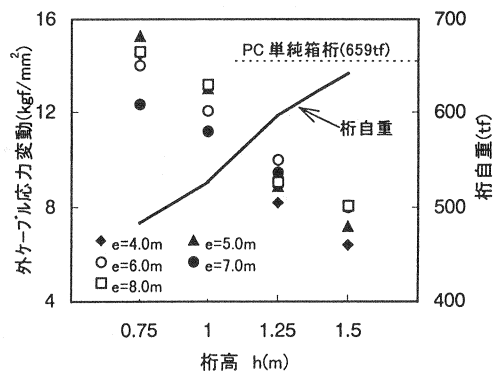


図-2 桁高と応力変動および桁自重の関係

ケーブルの比率を変えることによって、多様なケースに対応可能であることが分かった。

試験体の桁高および外ケーブルの偏心量は、試設計におけるパラメータのそれぞれ中間的な値である桁高 1.0m、偏心量 6.0m のケースを採用することとし、試験体の縮尺は載荷装置等を考慮して桁長も含めて約 1/7 とした。ただし、桁高(100/7=14cm)については定着具の大きさを考慮して 25cm とした。

試験体の設計においては外ケーブルを支えるストラットおよびサドル、載荷治具の自重も考慮した。

試験体の設計条件を以下に示す。

- ①コンクリートの設計基準強度は 500kgf/cm<sup>2</sup> とする。
- ②桁内 PC 鋼材 (以下、内鋼材) の有効緊張力は  $0.5\sigma_{pu}$  とし、プレテンション方式によりプレストレスを導入する。
- ③各試験体とも載荷前の主桁下縁圧縮応力が 45kgf/cm<sup>2</sup> になるように、外ケーブルの緊張力を決定する。
- ④設計時 (主桁下縁応力度が -18kgf/cm<sup>2</sup> 時とする) の外ケーブル応力度は  $0.4\sigma_{pu}$  以下とする。

試験では、内鋼材と外ケーブルの比率および外ケーブルの偏心量に着目することにし、上記 1/7 モデルを基本試験体として合計 4 ケースを考えた。

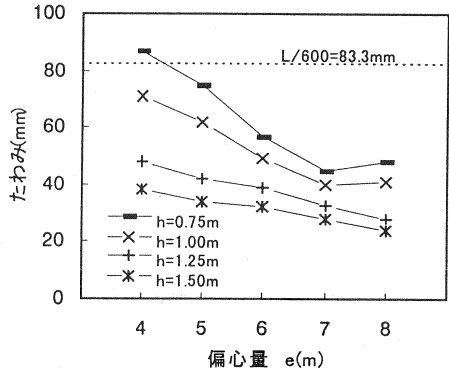


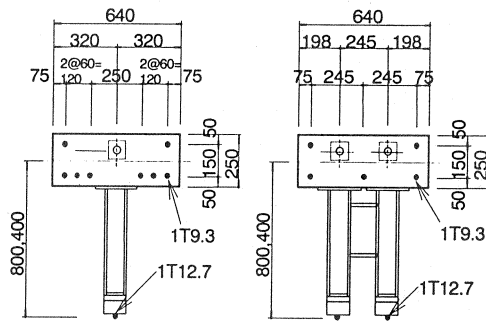
図-3 偏心量とたわみの関係

表-1 試験体一覧

試験体	偏心量 (cm)	外ケーブル(1T12.7)		桁内 PC 鋼材(1T9.3)	
		本数	緊張力 (tf/本)	本数	緊張力 (tf/本)
E8-2	80	2	3.306	5	4.516
E8-1	80	1	4.300	8	4.516
E4-2	40	2	5.668	5	4.516
E4-1	40	1	7.460	8	4.516

表-2 PC 鋼材の材料特性値 (kgf/mm<sup>2</sup>)

項目	1T9.3(SWPR7A)	1T12.7(SWPR7B)
降伏強度	150	160
引張強度	175	190
弾性係数	$2.0 \times 10^4$	



断面図

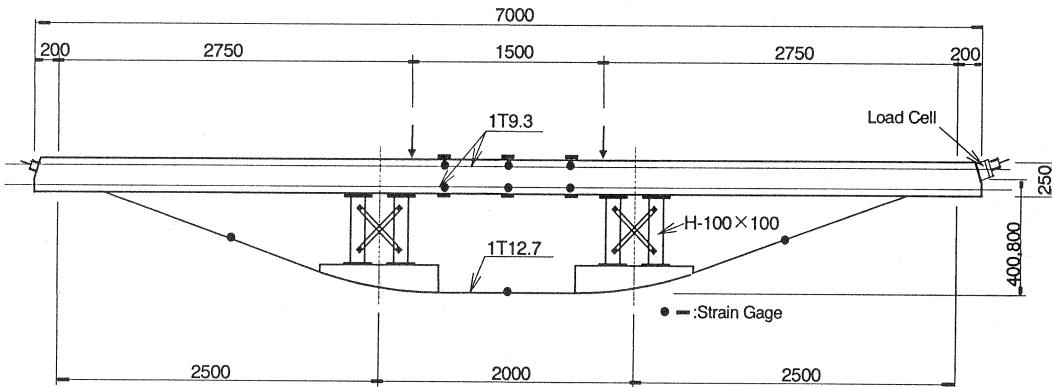


図-4 試験体形状

### 3. 実験概要

試験体の形状を図-4に、試験体一覧を表-1に示す。

主桁スパン長は7.0m、断面の大きさは幅0.64m×高さ0.25mで外ケーブルの偏心量を80cmと40cmの2通りとした。それぞれの偏心量で、外ケーブル(1T12.7)の本数を2本(内鋼材(1T9.3)は5本)または1本(同8本)とし、外ケーブルと内鋼材の比率を変化させた。なお、桁内フープ筋は各試験体ともD10を10cm間隔で配置した。

外ケーブルを支えるストラットは、H形鋼(H-100×100)を主部材として主桁にボルトで固定し、ケーブルの接触部にはR=2600の円周を削り出した鋼製のサドルを取付けた。サドルとケーブルの接触面にはテフロンシートを貼り付け摩擦を低減した。

試験体の荷重方法は、曲げスパン1.5mの2点荷重とした。荷重は静的一方向荷重とし、設計時(主桁下縁応力度が $-18\text{kgf/cm}^2$ )とひびわれ発生時に一度除荷し、その後破壊まで連続荷重した。計測項目は桁の変位、荷重重、内鋼材のひずみ、外ケーブルのひずみと張力およびコンクリートのひずみとした。

### 4. 実験結果

#### (1) 荷重-桁中央変位

図-5に荷重と桁中央変位の関係を示す。内鋼材の降伏はひずみゲージの値で、外ケーブルの降伏はひずみゲージと定着部に取り付けたロードセルにより確認した。

E8-1試験体は外ケーブルと内鋼材の降伏がほぼ同時期に発生したが、その他の試験体は内鋼材の降伏の後、外ケーブルが降伏した。外ケーブル降伏後は変位が急増し、E4-2試験体はコンクリートの圧壊で、その他は外ケーブルの破断(定着体(ウェッジタイプ)で発生)で破壊に至った。

偏心量が小さいE4-2、E4-1試験体は、最大耐力は劣るが、終局時の桁の変形が大きくなった。また、4体ともひびわれ発生後の桁の剛性は、内鋼材が降伏してもほとんど変化せず、外ケーブルの特性が桁の剛性に及ぼす影響が大きかった。

#### (2) 設計荷重時応力変動量と初期剛性

表-3に設計荷重時までのコンクリートおよび外ケーブルの応力変動量を示す。設計荷重は各試験体の桁下縁応力度が $-18.0\text{kgf/cm}^2$ 時とした。コンクリートおよび外ケーブルに発生する応力は、ひずみゲージの値(コンクリートについては3測点の平均値)

を用いてそれぞれの材料の弾性係数で換算した。また、計算値は通常の弾性フレーム解析によって算出した。

コンクリート下縁の荷重開始時の応力は $45\text{kgf/cm}^2$ であるので変動量は計算上 $63.0(45+18)\text{kgf/cm}^2$ となる。これに対し、実験値は $51.4\sim 57.3\text{kgf/cm}^2$ と比較的小さい値

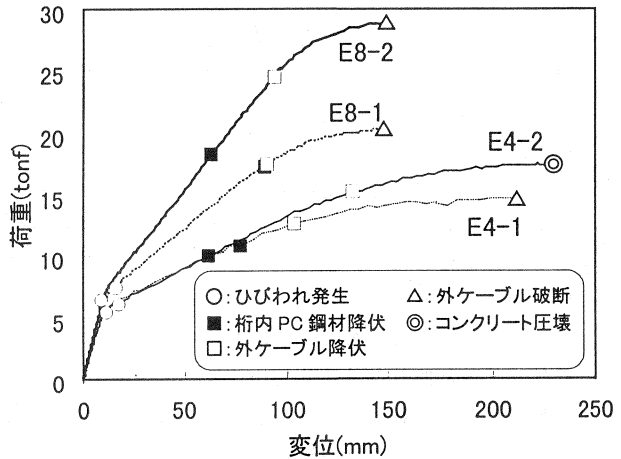


図-5 荷重-桁中央変位の関係

表-3 設計荷重時応力変動量

試験体名	設計荷重 (tf)	コンクリート(kgf/cm <sup>2</sup> )				外ケーブル (kgf/mm <sup>2</sup> )	
		上縁		下縁		Exp.	Cal.
		Exp.	Cal.	Exp.	Cal.		
E8-2	4.374	79.7	65.7	55.1	63.0	8.4	10.9
E8-1	3.716	56.0	64.3	53.9	63.0	8.4	10.9
E4-2	3.432	56.4	64.4	57.3	63.0	4.6	5.9
E4-1	3.246	55.8	63.8	51.4	63.0	4.1	5.9

であるが、ほぼ計算値に近い値が得られた。また、上縁応力度についても、ばらつきはあるがほぼ計算値と一致した。また、外ケーブルの応力変動は、偏心量が80cmの試験体で8.4kgf/mm<sup>2</sup>、40cmの試験体で4.1~4.6kgf/mm<sup>2</sup>となり、計算値の70~80%の値となった。

これらの結果より、本試験体の弾性域内の挙動については、概ね通常の弾性フレーム解析でも推定できることが明らかとなった。

(3) 桁の剛性

表-4にひびわれ時までの試験体の剛性(初期剛性)を示す。実験値は計算値よりも15~24%ほど大きな値を示しているが、外ケーブルの偏心量が大きく、本数が多いほど剛性が大きくなるという傾向は一致していた。

表-4 桁の剛性

試験体名	初期剛性(tf/m)	
	Exp.	Cal.
E8-2	696	598
E8-1	625	504
E4-2	547	467
E4-1	499	432

5. 非線形解析の概要

解析は、幾何学的非線形性および材料の非線形性を考慮できる汎用非線形解析プログラムを用いた。解析モデルを図-6に示す。

桁およびストラットには梁要素を、外ケーブルにトラス要素を用いた。内鋼材はコンクリートとの完全付着を仮定した埋め込み鉄筋要素を用いた。

サドルと外ケーブルとの接触部分については摩擦を無視し、図中N1、N2節点の水平方向変位はフリー、鉛直方向変位のみ拘束することでモデル化した。

ただし、サドル部には、概念図に示すように外ケーブルの張力PによってP<sub>1</sub>の力がストラットに作用する。P<sub>1</sub>のx方向の分力は、主桁に対して負のモーメントとして作用するため、サドルの水平方向変位をフリーとしたこのモデルでは、その影響を考慮する必要がある。ここでは、外ケーブルの張力から算出される、この分力を各解析ステップにおいて外力として作用させた。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、道路橋示方書<sup>4)</sup>に準じたモデルを用いた

が、立ち上がりの勾配には圧縮強度試験で得られた弾性係数を用いた。また、PC鋼材の応力-ひずみ関係は、図-7に示すように降伏荷重から引張荷重までを曲線でモデル化した。

6. 解析結果

図-8には荷重-変位関係の解析結果との比較を示す。解析結果は主桁のひびわれ発生前後の剛性および剛性の変化点をよい精度で再現しているものの、終局時においては実験値とのずれが大きくなった。

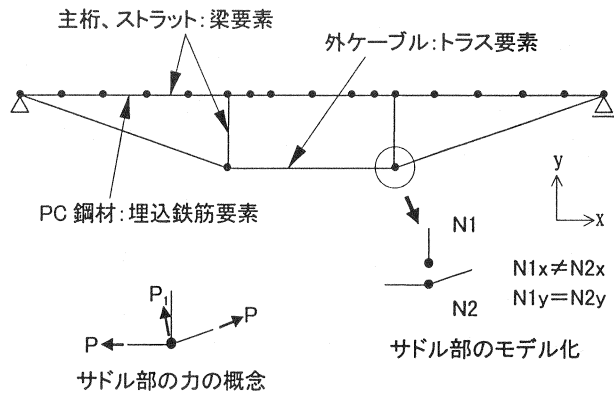


図-6 解析モデル

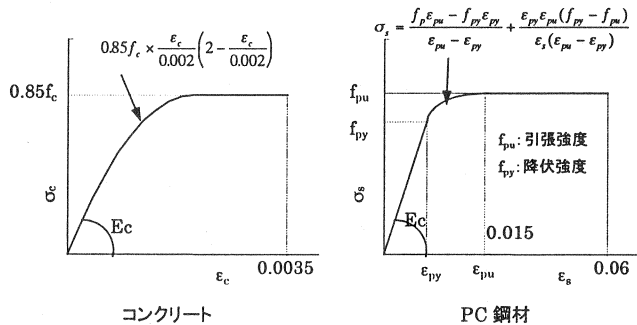


図-7 材料の応力-ひずみ関係

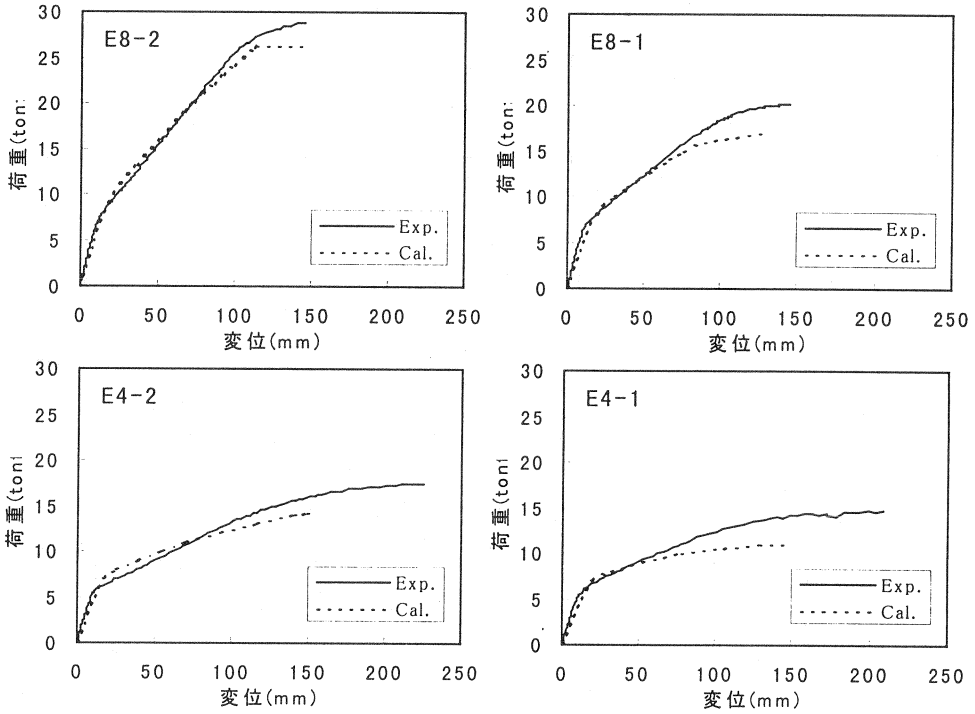


図-8 荷重-変位関係の解析値との比較

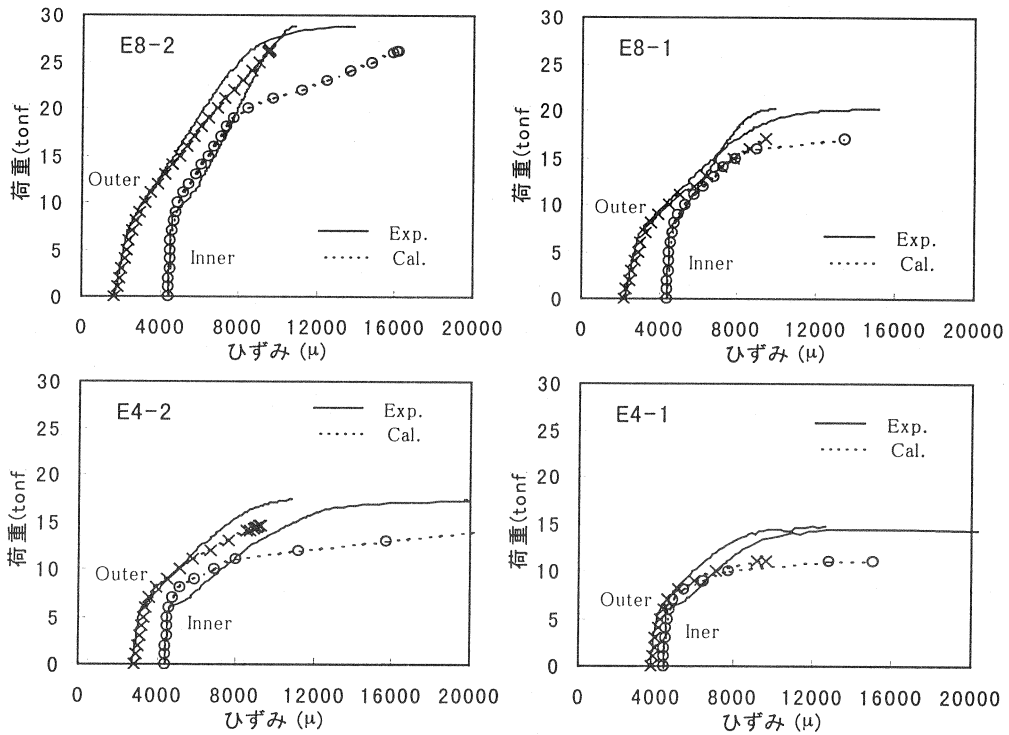


図-9 外ケーブルおよび内鋼材ひずみの計算値との比較

表-5 解析結果一覧

試験体	f <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	P <sub>cr</sub> (tf)		P <sub>iy</sub> (tf)		P <sub>oy</sub> (tf)		P <sub>u</sub> (tf)	
			Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
E8-2	703	3.48×10 <sup>5</sup>	6.0	6.0	18.0	18.6	24.5	22.8	28.9	26.3
E8-1	769	3.55×10 <sup>5</sup>	7.0	5.0	16.5	14.4	16.6	14.7	20.2	17.1
E4-2	743	3.50×10 <sup>5</sup>	5.2	4.4	10.0	10.5	15.3	13.5	17.4	14.6
E4-1	652	3.44×10 <sup>5</sup>	5.5	4.3	10.8	9.8	12.5	10.5	14.8	11.1

なお、解析結果はいずれの試験体も外ケーブルと内鋼材の降伏後、コンクリートの圧壊で破壊した。

荷重と外ケーブルおよび内鋼材ひずみの関係を図-9に示す。ひずみはいずれも桁中央位置での値を示した。図より、外ケーブル、内鋼材ともに比較的低い荷重段階からひずみの増加が著しくなり、実験結果と異なる挙動を示した。実験結果との差異が大きくなる荷重レベルは、荷重-変形関係において、解析結果と実験結果のずれが生じ始める荷重とほぼ一致していた。したがって、解析では同荷重レベルにおいて桁の剛性を小さく評価していると考えられる。

表-3に解析結果一覧を示す。ひびわれ発生荷重(P<sub>cr</sub>)、内鋼材降伏荷重(P<sub>iy</sub>)、外ケーブル降伏荷重(P<sub>oy</sub>)は各試験体とも実験値と解析値はよく一致した。終局荷重(P<sub>u</sub>)については、実験値の75~81%と精度は落ちるが試験体間の曲げ耐力の差異は良好に推定できた。

以上の結果から、外ケーブルおよび内鋼材が降伏する荷重レベルまでは、本解析手法が充分適用可能であることが明らかとなった。しかし、降伏荷重以降の挙動については、同荷重レベルの桁の剛性が小さく評価しているため、実験値との差異が大きくなった。

### 7. まとめ

桁高以上に外ケーブルを偏心させ、主桁とPCケーブルおよびストラットによりトラスを構成するPCケーブルトラス橋について、試設計結果を基に作製したモデル桁の曲げ載荷実験を行い、その曲げ破壊性状を把握するとともに、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮した解析を行いその妥当性を検証した。その結果、ひびわれ発生荷重およびPC鋼材の降伏荷重は、本解析手法によって精度良く推定できることが分かった。また、曲げ終局荷重については、降伏荷重以降の桁の剛性を小さく評価していたため、実験値の75~81%となった。これは、ストラットに作用する外ケーブル張力による負のモーメントを考慮する際に、特に高い荷重レベルにおける外ケーブルのひずみを適切に評価することで、解析の精度を向上することができると考えられる。また、ストラットが桁軸方向に幅を持って主桁を支持していることや、載荷点の近傍にストラットが存在することの影響などについても今後、検討する必要があると考える。

試験体の破壊モードは1体をのぞいてすべて外ケーブルの破断であり、解析結果とは異なる結果となった。これは、試験体の定着体にウェッジタイプを用いていたのも一因と考えられる。また、終局付近で、桁の変形が進むにしたがい、サドル端部において外ケーブルが角折れしたのも見られた。このような構造上の弱点となりうる部位については、疲労試験等によって検討する予定である。

### 8. 参考文献

- 1) M. Virlogeux: The Truc de la Fare Bridge, FIP 12<sup>th</sup> International Congress (1994)
- 2) 日経BP社: 日経コンストラクション、1993 7-9
- 3) 松井・濱田・渡辺・篠崎: PCケーブルトラス構造の道路橋への適用、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第5部、1997
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説、平成2年2月