

## 大偏心外ケーブルPC 鋼トラス複合桁模型の FEM 解析

日本大学 大学院	正会員	○國井 道浩
日本大学 理工学部	正会員 工学修士	井戸 功誠
日本大学 大学院		三品 貴寛
日本大学 理工学部	正会員 Ph.D.	山崎 淳

### 1. はじめに

大偏心外ケーブルPC 複合桁構造について検討している。大偏心外ケーブルPC 桁構造は、外ケーブルPC 桁の外ケーブルを桁外に出し大きく偏心させた構造であり、活荷重による荷重変動に対してケーブルと桁が分担して抵抗する特徴がある。本研究では、大偏心外ケーブルPC 桁構造の1つである図-1に示すような構造について検討している。また、桁の軽量化・効率化の目的でPC 箱桁のウェブを軽量の鋼トラスに置換えた鋼トラス複合桁構造を取り入れた。

効率的な設計を行うためEL 設計理論を検討し、中央スパン 180m のモデル構造 (図-1) を試設計した<sup>1)</sup>。また、その 1/36 縮小模型の製作・プレストレス導入実験及び載荷実験・2 次元の線形 FEM 解析を行い、この構造の耐荷機構や破壊挙動について検討してきた<sup>2)</sup>。載荷実験では、トラス材の変形に起因する破壊を確認した<sup>2)</sup>。本報告では、供用状態において縮小模型実験と比較するために新たに行った 3 次元の線形 FEM 解析を中心に報告する。

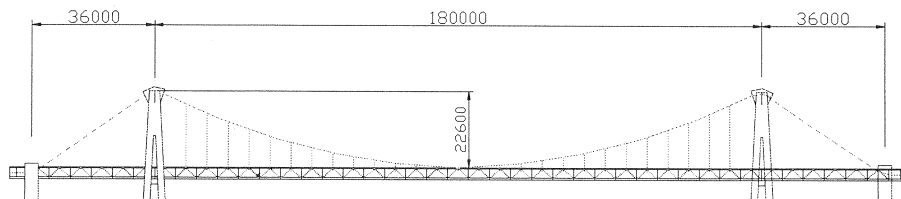


図-1 モデル構造側面 (単位 : mm)

### 2. 1/36 縮小模型

モデル構造をもとに床版厚さを除いて 1/36 に縮小した模型を製作した。上下床版厚さは、模型製作の困難点のため、厚さ 20mm 以下では出来ず、約 1/10 の縮小率になっている。1/36 縮小模型側面・桁セグメント図をそれぞれ図-2、図-3、使用材料を表-1 に示す。実験は、プレストレス導入・載荷実験に分けて行った。桁へのプレストレス導入は、桁端部緊張側に取付けた油圧ジャッキにより主ケーブルを 2 本同時に緊張して定着することにより行った。鉛直載荷では、スパン中央に設置した載荷ジャッキにより 4 点にそれぞれ等しい荷重が載荷できるトーナメント形式で載荷した。

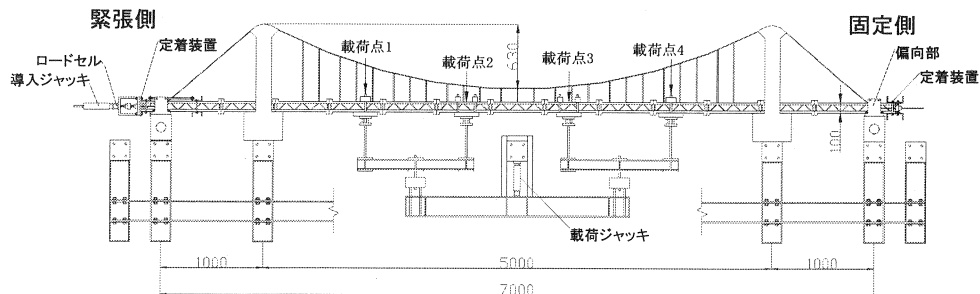


図-2 1/36 縮小模型側面 (単位 : mm)

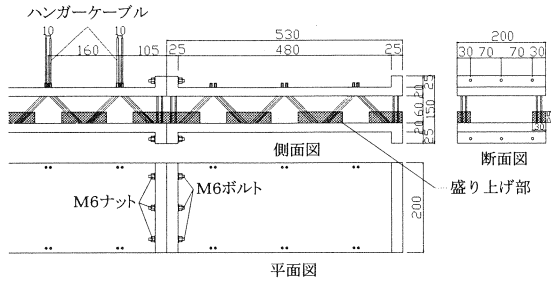


図-3 桁セグメント側面・平面・断面 (単位: mm)

表-1 使用材料

上下床版	モルタル
主鉄筋	M 6, M 3 ねじ棒
トラス材	M 3 ねじ棒
主ケーブル	S W P D 3
ハンガーケーブル	M 3 ねじ棒

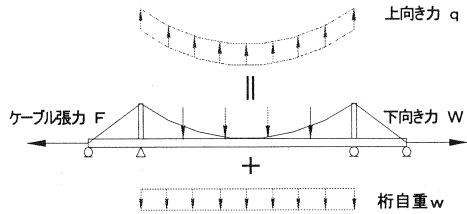


図-4 Load Case1 の荷重状態

### 3. FEM 解析

解析モデルの作製、解析計算には、有限要素法汎用構造解析プログラム「LUSAS/Ver.13.4」を使用した。

#### 3. 1 解析モデル

解析モデル全体図を図-6、桁セグメント解析モデル側面図を図-5、拘束条件を表-2、解析条件を表-3に示す。解析モデルは1/36縮小模型として供用状態での3次元FEM解析を行った。

サドル部と偏向部は、外部支承とし、y方向のみ固定した。また、主ケーブルに与えるプレストレスは、温度変化 $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$ によって張力 $T=1\text{N}$ を得るように線膨張係数を仮定して、温度応力解析機能による温度変化で与えた。

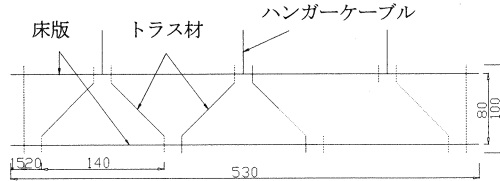


図-5 桁セグメント解析モデル側面 (単位 mm)

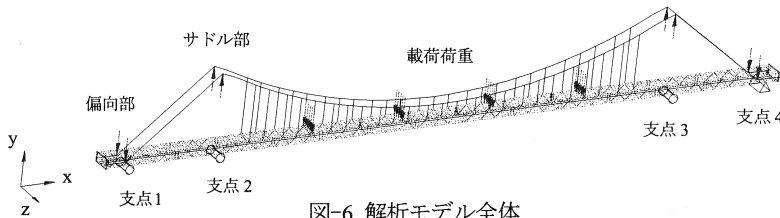


図-6 解析モデル全体

表-2 拘束条件

部位	拘束方向
支点1・2・3	y方向
支点4	xy方向
偏向部	y方向
サドル部	y方向

表-3 解析条件

部材	断面積 (mm <sup>2</sup> )	板厚 (mm)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	解析要素
上下床版	—	20	24000	0.2	shell
主ケーブル	19.82	—	223000	0.3	beam
ハンガーケーブル	10.06	—	210000	0.3	beam
トラス材	20.12	—	210000	0.3	beam
定着部	—	10	210000	0.3	shell

#### 3. 2 解析方法

解析では以下の2つの状態 (Load Case) を考えた。

- Load Case 1: (設計ロードバランス状態) 「死荷重+1/2活荷重」を想定。

桁自重 (1.31kN)、载荷装置自重 (4.63kN)、载荷荷重 (実験値 10.29kN) による下向き力と主ケーブルによる上向き力が釣り合い桁に曲げモーメントが発生していない状態。解析では、中央変位がゼロになるよう主ケーブルに張力を与えた。(図-4)

- Load Case 2: (設計荷重作用状態) 「死荷重+活荷重」を想定。

設計ロードバランス状態から1/2活荷重 (実験値 2.09kN) を载荷。

#### 4. 解析結果

以下に解析結果を示す。解析結果、予測値、実験値との比較を行った。ここで、予測値は、桁と主ケーブルは支間中央でたわみを共有するものとし、主ケーブルは変形後も2次放物線を維持するものと仮定し、スパン中央のたわみに対するケーブルの分担荷重（上向き力の増分）と桁の分担荷重を別々に計算した。

##### 4. 1 載荷荷重—中央変位関係

全体的な解析結果として、図-7は Load Case 1 を起点とした載荷荷重—中央変位関係を示している。FEM 解析値は、供用状態で実験値及び予測値に近い値を示している。

図-8は Load Case 2 における桁の変形図である。供用状態での桁の変形状態が確認できる。図は変形を50倍で示してある。

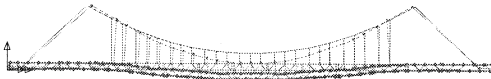


図-8 Load Case 2 変形図 (50倍)

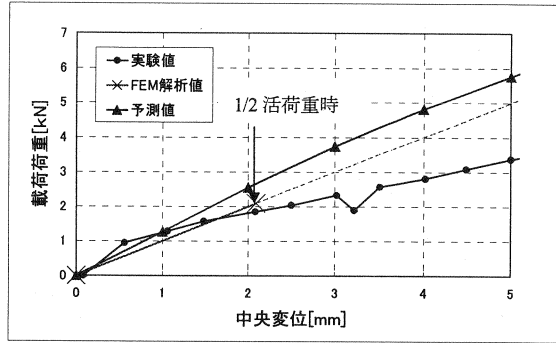


図-7 載荷荷重—中央変位関係

##### 4. 2 上床版上縁軸方向応力

図-9は、各 Load Case においての上床版上縁軸方向の応力コンター図を示している。導入したプレストレス力は、22750N であり、Load Case1 では  $2.84\text{N/mm}^2$  の軸圧縮力が発生すると予測される。Load Case1 は、全体的にほぼ  $3\text{N/mm}^2$  前後で一様に軸圧縮力が分布している。Load Case2 では、Load Case1 と比べ、載荷点付近の応力が大きくなっていることを確認した。

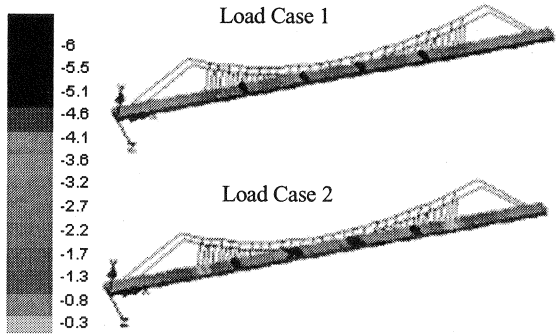


図-9 上床版上縁軸方向応力コンター (単位:  $\text{N/mm}^2$ )

##### 4. 3 トラス材作用力

図-10に、Load Case2 でのトラス材の作用力を示した。解析値では、トラス材の最大引張力は1192N となり最大圧縮力は1150N となった。予測値では、1806N となり差が生じた。また、最大圧縮力と最大引張力の位置は、載荷実験で破壊した桁セグメントの位置と一致している。

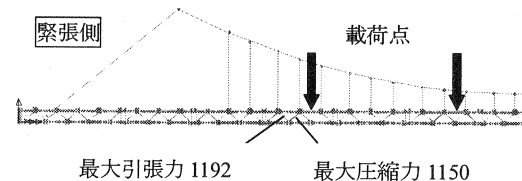


図-10 Load Case2 トラス材作用力 (単位: N)

##### 4. 4 主ケーブル張力

表-4 主ケーブル張力

	予測値(N)	実験値(N)	FEM(N)
LC1	19060	19470	19383
LC2	20358	20708	20641

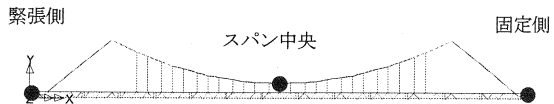


図-11 主ケーブル計測点

表-4は Load Case1 および Load Case2 での主ケーブルの張力を示している。解析値は図-11 のように緊張側、スパン中央、固定端側の3点の平均値を取った。張力増分は、予測値が1298N で実験値が1238N で解析値が1258N となり大きな差は見られなかった。主ケーブル張力の解析値から上向き力を式(1)より算出すると、Load Case1 では19538N で、Load Case2 では、20883N であった。ただし、この式は誤差を含むのでさらなる

検討が必要である。

$$q = \frac{8FB}{l^2} \dots \text{式 (1)} \quad (F: \text{ケーブル張力}, B: \text{ケーブルサグ}, q: \text{上向き力}, l: \text{スパン長})$$

4. 5 ハンガーケーブル

表-5 Load Case 1 ハンガーケーブル作用力 (単位 N) ・分担率

LC1	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5	HC6	HC7	HC8	HC9	HC10	HC11	HC12	HC13
作用力	931.814	721.024	720.478	622.71	719.436	719.168	621.93	719.89	722.17	628.074	731.004	739.184	638.644
分担率	5.23%	4.04%	4.04%	3.49%	4.04%	4.03%	3.49%	4.04%	4.05%	3.52%	4.10%	4.15%	3.58%
LC1	HC14	HC15	HC16	HC17	HC18	HC19	HC20	HC21	HC22	HC23	HC24	HC25	合力
作用力	733.394	731.658	627.826	721.95	719.862	621.82	718.914	719.412	622.584	720.274	720.656	932.468	17826.34
分担率	4.11%	4.10%	3.52%	4.05%	4.04%	3.49%	4.03%	4.04%	3.49%	4.04%	4.04%	5.23%	100.00%

表-6 Load Case 2 ハンガーケーブル作用力 (単位 N) ・分担率

LC2	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5	HC6	HC7	HC8	HC9	HC10	HC11	HC12	HC13
作用力	992.184	767.756	767.156	663.064	766.07	765.758	662.234	766.558	768.95	668.782	778.386	787.074	680.03
分担率	5.23%	4.04%	4.04%	3.49%	4.04%	4.03%	3.49%	4.04%	4.05%	3.52%	4.10%	4.15%	3.58%
LC2	HC14	HC15	HC16	HC17	HC18	HC19	HC20	HC21	HC22	HC23	HC24	HC25	合力
作用力	780.908	779.08	668.52	768.716	766.528	662.118	765.488	766.042	662.932	766.94	767.364	992.882	18981.52
分担率	4.11%	4.10%	3.52%	4.05%	4.04%	3.49%	4.03%	4.04%	3.49%	4.04%	4.04%	5.23%	100.00%

ハンガーケーブルの作用力から上向き力に対する各ハンガーケーブルの分担率に着目する。ただし、ハンガーケーブルの番号は、緊張側から HC1、HC2、HC3、…とした。Load Case 1 から Load Case 2 に荷重が増加しても、分担率は変わっていない。表-5 と表-6 の各ハンガーケーブルによって伝達された上向き合力は、主ケーブル張力から式 (1) を用いて算出した上向き力の Load Case1 では 91.2% で、Load Case2 では 90.9% となり一致しなかった。これに関しては、今後も検討をする。

4. 6 荷重分担割合

表-7 に Load Case1 から Load Case2 までの荷重増分に対する荷重分担割合を示した。主ケーブル張力増加分と荷重増加分から計算した。実験値では、桁の分担割合の方が大きいですが、予測値及び FEM 解析ではほぼ同じ分担割合となった。

表-7 荷重分担割

	予測値(%)	実験値(%)	FEM(%)
主ケーブル	48.6	45.7	49.33
桁	51.4	54.3	50.67

5. まとめ

本報告では、1/36 縮小模型を対象に供用状態に相当する範囲での FEM 解析を行い、予測値と実験値との比較を行った。

まず、載荷荷重-中央変位関係では、予測値・実験値・解析値が供用状態に近い値を示した。上床版上縁軸方向応力では、予測される圧縮力に近い圧縮力が発生した。トラス材作用力では解析値と予測値とで差が生じた。主ケーブル張力では張力増加に大きな差はなく解析値と予測値と実験値とが近い値を示した。ハンガーケーブルによって伝達された上向き力は、主ケーブルの張力から算出した上向き力と差が生じた。荷重分担割合では、実験値は桁の分担割合の方が大きいですが、予測値及び実験値はほぼ同じ分担割合になった。

今後は、今回の解析で差が生じた項目の検討を行う。また、モデル構造 (図-1) の解析や非線形解析を用いた終局状態の解析を行う必要がある。

[参考文献]

- 1) 井戸・大熊・張・山崎：大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁模型の設計・製作  
PC 技術協会第 8 回シンポジウム論文集、pp, 579-584, 1998,10
- 2) Kosei, Ido : EXPERIMENTAL STUDY FOR COMPOSITE PRESTRESSED CONCRETE GIRDER BRIDGE WITH EXTERNAL TENDONS OF LARGE ECCENTRICITIES  
Proceeding of the first fib congress2002 volume 1 session5 pp,85-86