

## (2) 大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁の解析

日本大学	理工学部	正会員	○井戸 功誠
日本大学	大学院	正会員	本田 智昭
日本大学	大学院	正会員	大熊 康広
日本大学	理工学部	正会員	山崎 淳

### 1. はじめに

大偏心外ケーブルPC桁（自旋式吊橋）に注目し、研究を行ってきた。昨年からは、箱桁よりも効率的な複合構造にも注目し、大偏心外ケーブル方式に複合桁を取り入れた、大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁についての検討を行っている。

現在は、スパン180mに対する試設計を行い、その耐荷挙動を1/36縮小模型の載荷実験を行い確認する為に、縮小模型を製作中である。昨年、この模型の概要を説明し（井戸他、第7回シンポジウム論文集）、また、FEM解析を行うことにより、力学的挙動を確認することも行っている（河野他、第8回シンポジウム論文集）。ここでは、大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁に関するFEM解析に対し、新しい結果が出たので報告する。

昨年までに、大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁の力学的挙動を検証するために、最初の段階として全体構造に注目した2次元のFEM解析、複合桁セグメントに注目した3次元のFEM解析を弾性範囲内で行った。今回は次の段階として、大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁の全体構造の3次元FEM解析を行い、より実際の力学挙動を確認した。

今回の解析は、1/36縮小模型を解析の対象構造物とした。これは、今後行う載荷実験と直接比較検討を行うためである。よって、実験の最初の段階として、(1)プレストレス導入 (2)活荷重の変動 の2点を想定して解析を行い、全体的な挙動に対する結果を得た。

### 2. 解析モデル

#### 2.1 対象構造物

図-1に1/36縮小模型の全体図を示した。大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁のモデル構造(180m)を1/36に縮小した模型を（井戸他、第7回シンポジウム論文集）、解析の対象構造物とした。

模型の形状は、3スパン連続桁、モノケーブル自旋式PC吊橋、中央支間長5m、桁幅20cm、ケーブルサグ63cm、サイドスパン長1mである。

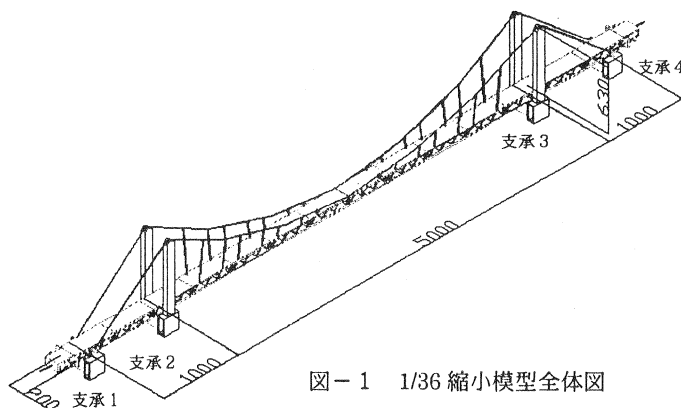


図-1 1/36縮小模型全体図

桁には、箱桁のウェブを鋼トラスウェブに置き換えた、長方形断面の複合桁とした。

2. 2 解析モデル

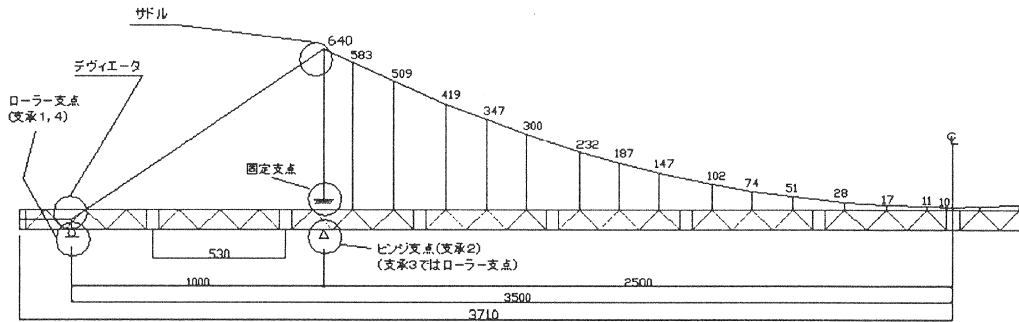


図-2 解析モデル説明図

図-2に、解析モデルの半分の側面図を示した。

表-1に解析モデルの解析条件を示した。

全体構造の解析というのを考え、解析モデルは、可能な限り単純化したモデルを考えた(図-2.3)。

解析モデルの要素は、桁端部でのケーブルの桁への定着部と上下床版は shell 要素、その他の部材については、beam 要素とした。

支持点での境界条件を次のようにした。この構造は、主塔と桁は一体化されていないため、主塔下端部を床版の上側に設け、境界条件は、固定支承とした。支承 1,3,4 はローラー支点とし、鉛直成分の変位のみ固定した。支承 2 はヒンジ支点とし、3 方向の変位に関して固定した。

また、主塔の頂上部、支承 1 での偏向部には、微小区間に変形性に富んだ部材を設定することにより、すべり移動ができるようにした。

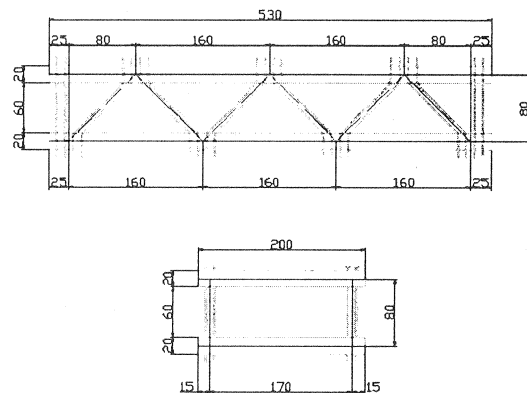


図-3 解析モデル詳細図(桁セグメント)

図-3には、桁セグメントに着目し、詳細を示した。

表-1 解析モデル

トラス部材のうち斜材部分は、一ヶ所に4本あるものを1本と考え、4本の中心に配置した。鉛直部材は、4本の中心ではなく床版と斜材との格点部に配置した。

	断面形状	弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	解析要素
ケーブル	φ6mm	2000000	Beam
ハンガーケーブル	φ3mm×2本	2100000	Beam
トラス	φ3mm×4本	2100000	Beam
主塔	60×100mm	280000	Beam
床版	20mm厚	280000	shell
定着部	50mm厚	2100000	shell

### 3. 解析方法

構造のモデル化・解析・解析結果出力には、汎用 FEM 解析プログラム「Lusas」を用いた。解析は、以下の2種類に対して行った。

#### 解析1 プレストレス導入

設定した荷重に対し、ロードバランス(ケーブルによる上向き力=荷重)となるために、必要なプレストレス力を導入した状態について、各部材の作用力の状態や変形などに対し検討する。

解析では、ロードバランス状態をスパン中央部のたわみ $\delta=0$ となる状態とした。よって、あらかじめ設定した荷重に対して、たわみ $\delta=0$ となるプレストレス力を解析により求め、その状態について検討を行った。プレストレスの導入は、線膨張係数を仮定し、温度設定することにより与えた。

荷重は次のように決定した。実験では、180m モデル構造を 1/36 に縮小した縮小模型を用いることから自重の補正を行う必要がある。そこで、桁の橋軸方向の応力状態を合わせるよう荷重に補正を行う。

ロードバランス状態での軸応力は、コンクリートの許容応力度  $100\text{kgf/cm}^2$  の  $1/2$  の  $50\text{kgf/cm}^2$  としている。桁の軸応力と桁断面積より、プレストレス力  $F$  が決定する。よって、模型の形状・プレストレス力  $F$  と分布荷重の釣合い式

$$FB = \frac{w\ell^2}{8} \quad \dots\dots(式3-1)$$

( $F$ :プレストレス力  $B$ :ケーブルサグ  $w$ :活荷重  $\ell$ :中央スパン)

を解くことにより、荷重( $w\ell$ )が決定する。

ここで、決定した荷重は、4032kgf となった。この荷重状態を Load Case 2 (以降、LC2) とする。

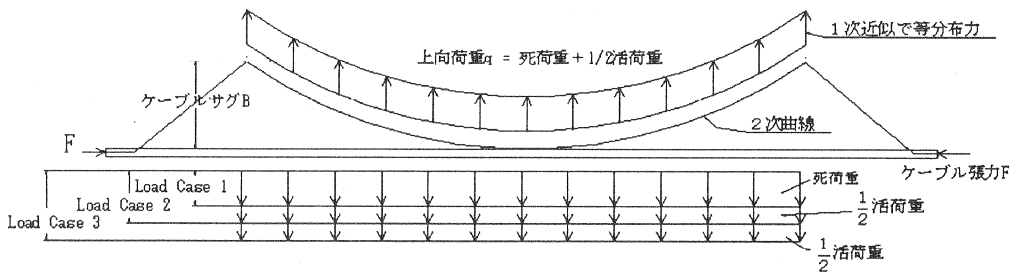


図-4 Load Case 概念図

#### 解析2 活荷重の変動

図-4に Load Case の概念図を示し、表-2に荷重を示した。

設計では、“死荷重+1/2 活荷重”に対し、ロードバランスを考えている。よって、解析1の結果LC2(4032kgf)を“死荷重+1/2 活荷重”とし、そこからの変動量である 1/2 活荷重

(175kgf)を、引いた値(3857kgf)を“死荷重”の状態 Load Case 1 (以降、LC1)、足した値 4207kgfを“死荷重+活荷重”の状態 Load Case 3 (以降、LC3)として、供用状態で3つの荷重状態の解析を行なった。

表-2 Load Case

	荷重状況	荷重(kgf)	状況
Load Case 1	D	3857	最小荷重
Load Case 2	D+L/2	4032	ロードバランス
Load Case 3	D+L	4207	最大荷重

D:死荷重 L:活荷重

4 解析結果

4.1 解析1(プレストレス導入)

表-3に解析1の結果をまとめた。

表-3 解析1結果

導入プレストレス力は、目標値 4000kgf(式3-1で使用した値)に対し、解析結果 4418kgf(ケーブルの端部での軸力)となり、目標値より 10.5%増という結果になった。

	目標値	解析値	割合(%)
載荷荷重(kgf)	4032	4032	
たわみ(mm)	0	0	
導入P/S(kgf)	4000	4418	110.5
上向き荷重(kgf)	4032	3969	98.4
上床版応力(支承2)(kgf/cm <sup>2</sup> )	50	47.8	95.6
下床版応力(支承2)(kgf/cm <sup>2</sup> )	50	47.9	95.8
上床版応力(スパン中央)(kgf/cm <sup>2</sup> )	50	50.2	100.4
下床版応力(スパン中央)(kgf/cm <sup>2</sup> )	50	49.2	98.4

図-5に変形図を載せた。主塔頂上部(支承3側)のケーブルの水平変位 1.31mm に対し、スパン中央部のたわみが無いことがわかる。(解析値はゼロとした。)

図-6にハンガーケーブル軸力分布を示した。

ハンガーケーブルは、一つのセグメントにつき、片側3ヶ所で結合している。一ヶ所につき平均66kgfを負担したことになるが、実際は±15kgf程度の差があることがわかった。

ハンガーケーブルに作用している力の合計より、上向き力は、目標値 4032kgf に対し、3969kgf となり、1.6%減であった。

床版の応力は、スパン中央に比べ、支点上の応力が 5%近く少なめとなったが、上下床版での差は、2%程度の誤差であった。このことから、この時の軸応力は、ほぼ一律に 50kgf/cm<sup>2</sup> が作用した。

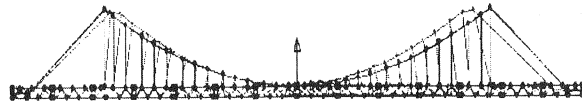


図-5 Load Case 2 変形図

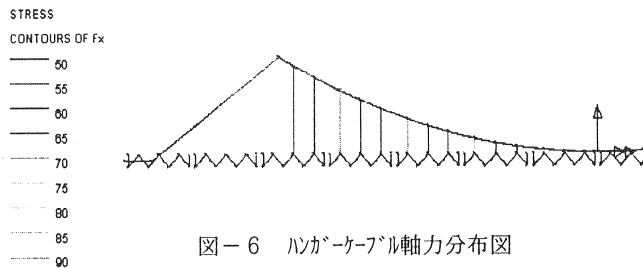


図-6 ハンガーケーブル軸力分布図

表-4 解析2結果(活荷重の変動)

	LC2(解析結果)	LC1(変動量)	LC3(変動量)
荷重状態	D+0.5L	D	D+L
載荷荷重(kgf)	4032	-175	175
たわみ(mm)	0	-1.23	1.21
導入P/S(kgf)	4418	-64.6	64.7
上向き荷重(kgf)	3969	-45.9	45.9
上床版応力(支承2)(kgf/cm <sup>2</sup> )	47.8	6.1	-6.1
下床版応力(支承2)(kgf/cm <sup>2</sup> )	47.5	-7.4	7.1
上床版応力(スパン中央)(kgf/cm <sup>2</sup> )	50.4	-6.3	4.85
下床版応力(スパン中央)(kgf/cm <sup>2</sup> )	49.4	5.15	-5.3

4.2 解析2(活荷重の変動)

表-4には解析2の結果として、LC2から、各Load Caseごとの変動値を示した。

図-7に変形図を示した。変形図からも、活荷重による変形が、荷重状況ごとにLC2を中心に上下に変形していることが分かる。解析結果では、スパン中央のたわみは、LC1では上方に $\delta=1.23\text{mm}$ 、LC3では下方に $\delta=1.21\text{mm}$ となった。よって、全活荷重350kgfでのたわみは $\delta=2.44\text{mm}$ で、たわみ/スパン長は、 $1/2049$ となった。

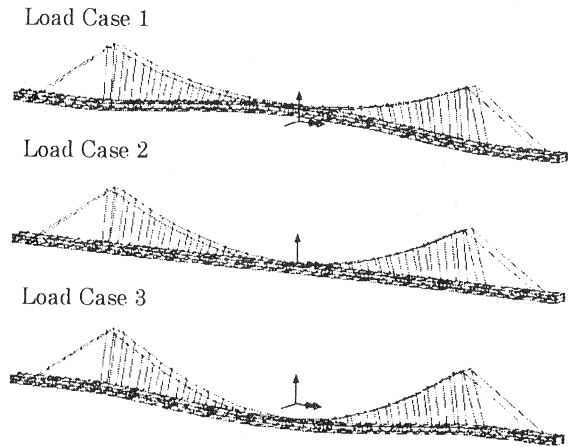


図-7 変形図

図-8には、上床版の橋軸方向応力をコンター図で示した。図からも、LC2では、ほぼ一律に軸力が作用していることが分かる。

表-4より、変動量は支承2では平均 $6.68\text{kgf/cm}^2$ 、スパン中央では平均 $5.40\text{kgf/cm}^2$ となった。比較すると、 $0.553:0.447$ となった。

このスパン比 $1:5:1$ の3径間連続桁での、支承部とスパン中央での全モーメントに対するモーメントの割合は、 $0.588:0.421$ であり、わずかに、誤差がでた。

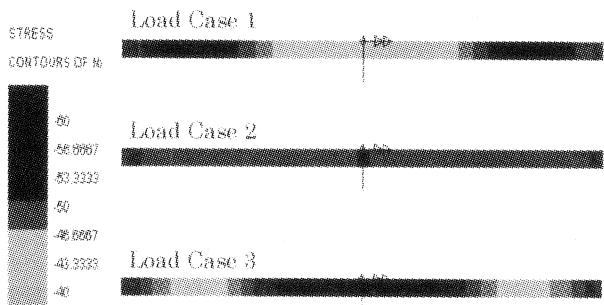


図-8 上床版橋軸方向応力分布図

図-9には、トラス材の圧縮・引張について示している。薄い線が圧縮部材であり、濃い線が引張である。LC1、LC3では、ほとんどの部材で、圧縮部材と引張部材が入れ代わっていることが分かった。最大圧縮力はLC3で $55.9\text{kgf}$ となり、最大引張力はLC3で $46.2\text{kgf}$ 作用した。

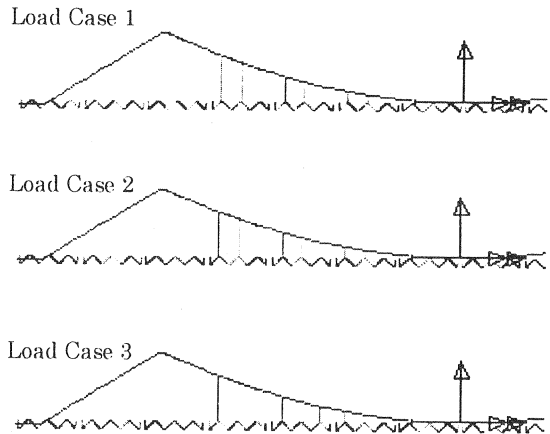


図-9 トラス軸力分布図

図-10では、床版の剪断応力分布を示した。最大値 $\pm 1.6\text{kgf/cm}^2$ と応力は小さいが、桁セグメント間の接合部で大きな値となった。各Load Caseでほぼ同じ分布状況になった。

また、桁端部付近では、大きな数値となっている。これは、サイドスパンには、ハンガーケーブルを配置してないためと、考えられる。

表-4にて、ケーブル端部の張力増加量を示した。変動量は、LC1で-64.6kgf、LC3で64.7kgfとほぼ一致した。ケーブルの変動量は導入張力4418kgfに対して、2.93%であった。

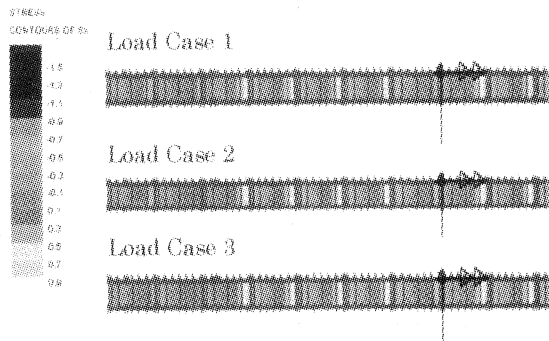


図-10 上床版の剪断応力分布図

また、表-5では、荷重分担割合を示した。表-4より、上向き力(ハンガーケーブル張力の合計)の増加量は、LC1で-45.9kgf、LC3で45.9kgfとなった。この変動量の合計91.8kgfは、上向き力3969kgfに対して2.31%の変動量となった。また表-5より、活荷重350kgfに対する割合(ケーブル分担割合)は26.3%であり、桁の分担割合は73.7%となった。

表-5 荷重分担割合

	荷重(kgf)	割合
活荷重	350	100.0%
ケーブル分担割合	91.9	26.3%
桁分担割合	258.1	73.7%

## 5. まとめ

ここでは、(1)プレストレス導入 (2)活荷重の変動 に関する面から解析を行い、模型製作及び実験を行うために必要な以下のような結果を得ることができた。

### プレストレス導入

ロードバランス時のケーブル張力は、目標値4000kgfに対し10.4%増となった。

ロードバランス時の載荷荷重4032kgfに対して、ケーブルによる上向き力は3969kgfであることから、ケーブルが荷重に対して抵抗していることが確認できた。

### 活荷重に対する3ケースの検討

活荷重のたわみ率は、1/2049となった。

活荷重に対する荷重分担割合は、ケーブル26.3% 桁73.7%であった。

ロードバランス状態(LC2)を軸に、LC1とLC3は対称的な挙動をすることが、確認できた。

今回は、弾性範囲内の荷重に対する挙動を確認した。今後は、今回の結果では、解明できなかった、細部の解析や、終局状態へ解析と進めていく予定である。

## 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  
P C技術協会第8回シンポジウム論文集、1998年10月、pp.579-584
- [2]: 張・永島・井戸・山崎: 鋼トラスセグメント模型の製作と載荷実験  
P C技術協会第8回シンポジウム論文集、1998年10月、pp.585-588
- [3]: 河野・井戸・張・山崎: 大偏心外ケーブル鋼トラス複合桁解析  
P C技術協会第8回シンポジウム論文集、1998年10月、pp.589-598