

大偏心外ケーブルPC桁橋のケーブルの耐荷機構に関する検討

(株) 近代設計 正会員 工修 ○三品 貴寛
 日本大学 理工学部 正会員 工修 井戸 功誠
 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 Ph.D. 山崎 淳

1. 研究の背景と目的

大偏心外ケーブルPC桁橋について継続的に研究を行っている。図-1の模型は紅茶缶を用いてこの構造を表現している。本研究で着目した構造は、PC桁橋の長支間化、効率化を図るため、通常桁内に配置されるケーブルを桁外に大きく偏心させ配置している。井戸らにより、EL設計理論を用いて設計された中央径間180mのReal scale structure model¹⁾の側面図を図-2に、桁断面図を図-3に示す。これまでに、井戸らにより最小桁高、最適ケーブルサグを決めるためのEL設計理論の開発、Real scale structure modelの設計、その1/36縮小模型を用いた載荷実験を行って来た。

ここでは、ケーブルに着目し、縮小模型実験、FEM解析を用いて耐荷機構の検討を行った。以下にその検討について述べる。

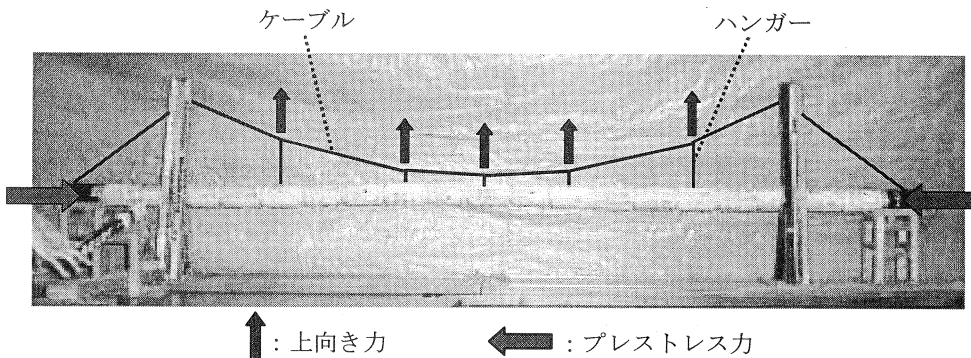


図-1 大偏心外ケーブルPC桁橋 (缶模型)

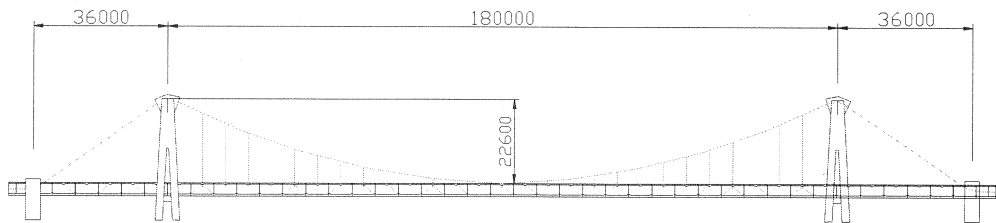


図-2 Real scale structure model 側面図

2. 検討した問題とその背景となる考え方

これまで行ってきた縮小模型実験の荷重-変位関係において、実験値と予測値との間には大きな差があった。この差について検討するためケーブルの耐荷機構に着目した。

これまで設計計算や予測値計算において

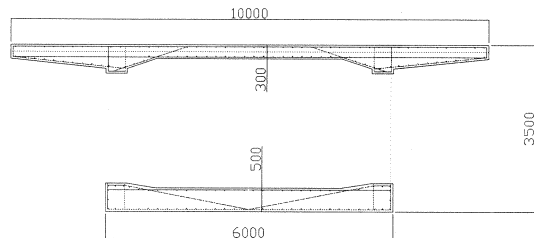


図-3 Real scale structure model 桁断面図

は、計算の簡略化のために“3つの近似と1つの簡略化”(図-4)を用いている。今回、この“3つの近似”について検討を行うこととした。ここで、主ケーブルによる上向き等分布荷重 q は、式(1)を用いている。

$$q \approx \frac{8FB}{l^2} \dots (1)$$

この式は、屈曲した主ケーブルが桁(コンクリート)に与える力を、微小区間の力の釣り合い(図-5)から次のように導かれる。

$$q_n = F \cdot \frac{\Delta\alpha}{\Delta s} = F \cdot \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left\{1 + \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \approx F \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \dots (2)$$

$$\therefore \left\{1 + \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}} \approx 1$$

ここで、式(2)に図-5のケーブル形状(2次放物線)を代入すると、式(1)を導くことができる。

従って、式(1)をサグスパン比の大きい大偏心外ケーブルPC桁橋に適用する場合は、上記の式の誘導過程による誤差が無視できないくらい大きくなることが考えられる。そこで今回、別の方法を用いてケーブルの耐荷機構について検討することとした。

3. 検討方法

3.1 1/36 縮小模型実験²⁾

縮小模型側面図を図-6、桁セグメントを図-7に示す。桁セグメントはRC構造とし、床版にモルタル(圧縮強度45N/mm²)、主筋にM6ネジ棒を用いた。鋼トラス材は、M3ネジ棒(一箇所につき4本)とした。桁は桁セグメント13個を繋げた。主ケーブルはSWPD3(2.9mm³本より線)を使用し、2面吊となっている。ハンガーにはM3ネジ棒(一箇所につき2本)を用いた。載荷は載荷ジャッキを用いて4点載荷を行い、主ケーブルの緊張作業は緊張側より導入ジャッキを用いて片引きで行った。

載荷実験の初期状態は、設計ロードバランス(以降、設計LB)である。今回の実験の初期状態(設計LB)を図-8に示す(※上向き荷重は、主ケーブル張力から3.2の方法を用いて計算した)。

〔設計LB：“ケーブルによる上向き荷重(Q)”と“桁自重(D)+載荷装置自重+縮小化に伴う桁自重補正荷重+1/2活荷重(L)”がバランスしている状態。〕

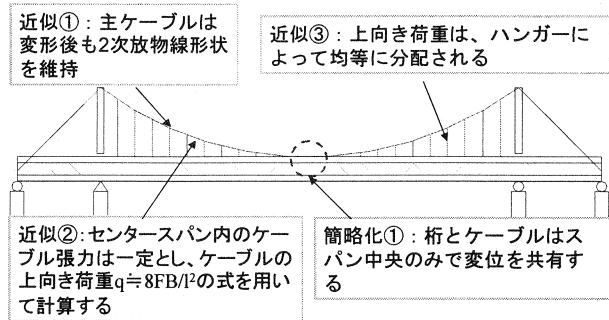
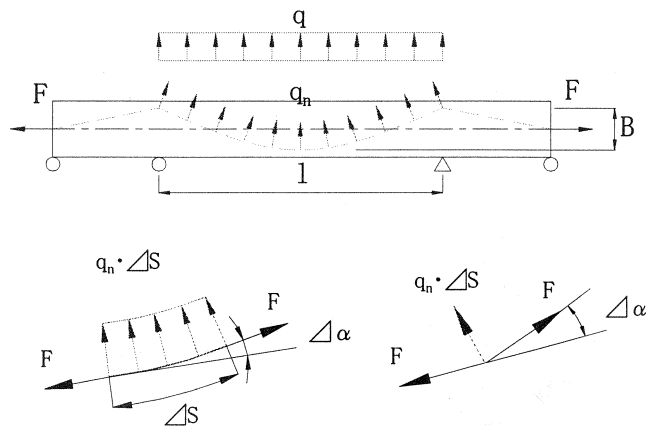


図-4 設計計算に用いた3つの近似と1つの簡略化



〔但し、F：ケーブル張力，B：ケーブルサグ，l：スパン，
q：ケーブルによる上向き力〕

図-5 主ケーブルによる上向き力

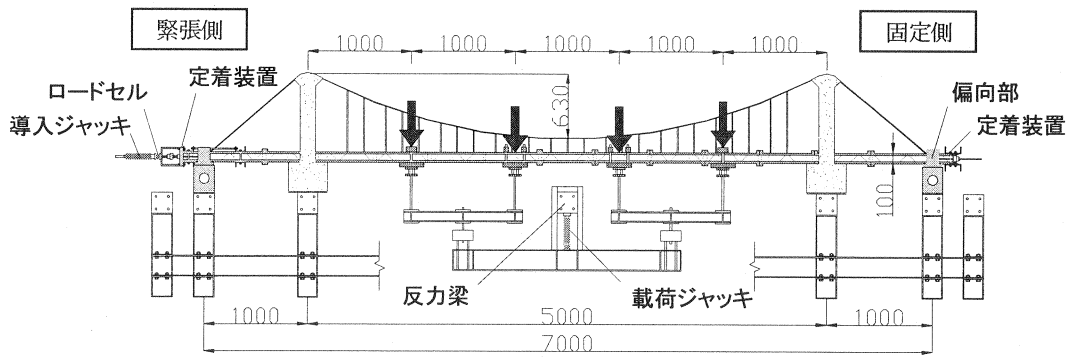


図-6 1/36 縮小模型側面図(単位:mm)

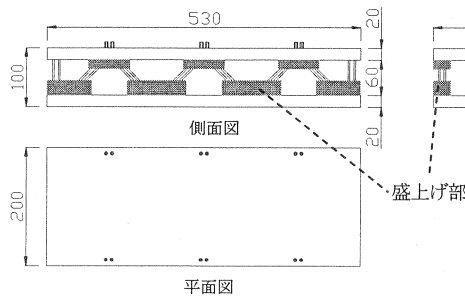


図-7 桁セグメント(単位:mm)

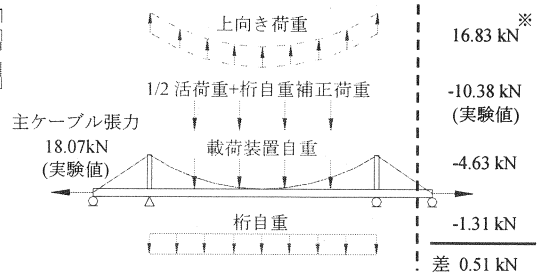


図-8 荷重実験の初期状態

3.2 3次元線形FEM解析

FEM解析モデル全体図を図-9に、桁セグメント解析モデルを図-10に、境界条件を表-1に、解析要素を表-2に示す³⁾。桁自重を面載荷、荷重荷重 P を線載荷し、主ケーブルの緊張は温度変化 Δt で与えた。今回、Load Case1(設計LB時、 $D+1/2L$ を想定： $[w_c+P_1+\Delta t]$)とLoad Case2(設計荷重作用時、 $D+L$ を想定： $[w_c+P_1+P_2+\Delta t]$)の2つの供用状態の解析を行った。但し、 w_c ：桁自重(-1.31kN)、 P_1 ：1/2活荷重+桁自重補正荷重の実験値(-10.38kN)、 P_2 ：1/2活荷重、 Δt ：主ケーブルの温度変化。

解析は以下に示す手順で行った。

- ① 先ず下向き荷重(w_c+P_1)を載荷し、主ケーブルに任意に温度変化を与え下向き荷重による桁中央のたわみがゼロになるような主ケーブルの温度変化(Δt)を探す(Load Case1)。
- ② ①の状態から他の荷重は変化させず、下向き荷重を P_2 (1/2活荷重)だけ増加させる。

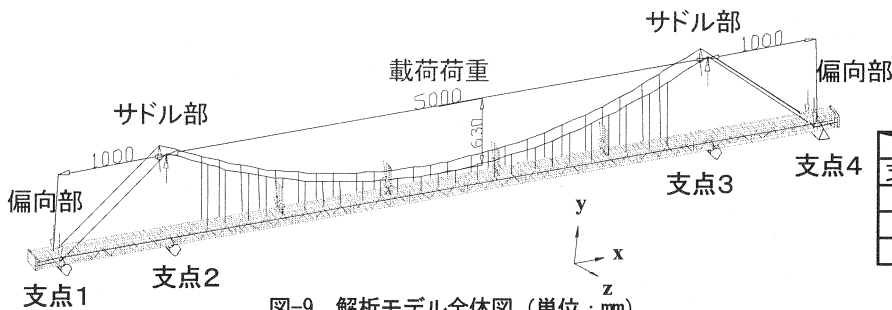


図-9 解析モデル全体図(単位:mm)

表-1 境界条件

	拘束方向
支点1、2、3	y
支点4	x,y
偏向部	y
サドル部	y

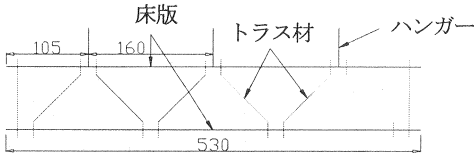


図-10 桁セグメント解析モデル (単位: mm)

表-2 解析要素

	断面積 (mm ²)	板厚 (mm)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	解析要素
上下床版	-	20	24000	0.2	thick shell
主ケーブル	19.82	-	223000	0.3	thin beam
ハンガー	10.06	-	210000	0.3	thin beam
鋼トラス材	20.12	-	210000	0.3	thin beam
定着板	-	10	210000	0.3	thick shell

3.3 予測値計算

検討に用いた予測値計算は、材料および幾何学的非線形を考慮した。

これまで、設計計算において、主ケーブルによる上向き荷重は、近似②の $q=8FB/1^2$ の式を用いてきた。ここでは、主ケーブルによる上向き荷重を力の多角形を用いた計算方法にて算出した。ハンガー張力の合計を上向き荷重とし、主ケーブルとハンガーを図-11のように線分でモデル化を行い、各点における力の釣り合いから上向き荷重を計算した。

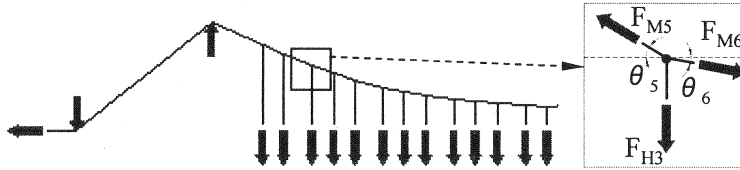


図-11 力の多角形を用いた計算モデル

4. 検討項目と結果

4.1 変形後の主ケーブル形状

FEM 解析における Load Case2 (設計荷重作用時) の結果を用いて、主ケーブルの形状確認を行った。変形後の主ケーブル各接点の x, y 座標と 2次放物線と仮定した場合の座標を比較したところ、主ケーブルは変形後も 2次放物線形状をほぼ維持していることが分かった (表-3)。

このことから、近似①に矛盾は無いことが分かった。

4.2 主ケーブル張力分布

FEM 解析、力の多角形を用いた計算方法、載荷実験 (載荷荷重 2.46kN [D+L]) における主ケーブル張力分布 (中央径間内) を図-12 に示した。FEM 解析値と力の多角形を用いた計算値はほぼ一致し、中央径間内の主ケーブル張力は一定でないことが分かった。

このことから、近似②において中央径間内の主ケーブル張力を一定とし式 (1) を用いることに矛盾があることが分かった。従って、主ケー

表-3 主ケーブルの形状確認

スパン中央からの距離 (mm)	2500	2120	1960	1750	1590	1430	1220
(1) 変形後Y座標 (mm)	632.5	455.5	389.4	310.5	256.2	207.2	151.0
(2) 放物線の場合Y座標 (mm)	632.5	454.8	388.8	309.9	255.9	207.0	150.7
(1)/(2) %	100.0%	100.2%	100.2%	100.2%	100.1%	100.1%	100.2%
スパン中央からの距離 (mm)	1060	900	690	530	370	160	0
(1) 変形後Y座標 (mm)	114.0	82.2	48.2	28.3	13.7	2.6	0.0
(2) 放物線の場合Y座標 (mm)	113.7	82.0	48.2	28.4	13.9	2.6	0.0
(1)/(2) %	100.2%	100.2%	100.0%	99.5%	99.1%	99.0%	-

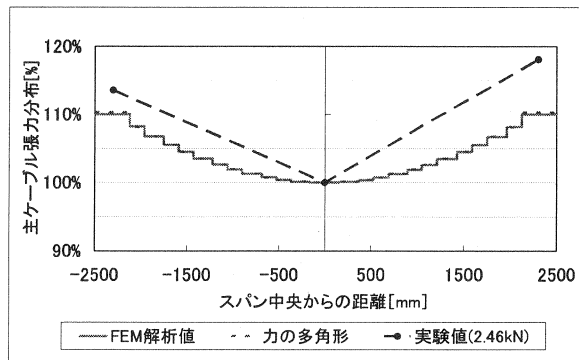


図-12 主ケーブル張力分布

ブルによる上向き荷重は今回検討を行った力の多角形を用いた計算方法を用いる必要があるのではないかと考えた。

4.3 ハンガー張力の分担率

FEM解析と力の多角形を用いた計算方法の全ハンガー張力に対する各ハンガーの分担率を図-13に示す。各ハンガーの分担率にはばらつきがあるもののほぼ一定に分布することが分かった。これはハンガーの配置間隔が均等でないことによるものと考えたため、力の多角形を用いた計算方法を用いて供試体と同本数(25本)のハンガーで等間隔(200mm)で計算したところ、分担率はすべて4%となった。

このことから、ハンガー張力は配置間隔が均等ならば一定となることが分かった。また、今回用いた縮小模型においても、ハンガーの配置間隔が均等でないもののほぼ均等になる。従って、近似③に矛盾は無いことが分かった。

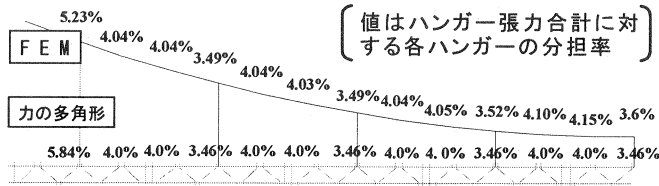


図-13 ハンガー分担率

4.4 破壊挙動

載荷実験の結果として、載荷荷重-中央変位関係を図-14に、破壊状況を写真-1に示す。載荷荷重 31.62 kN [9.3 (D+L)], 中央変位 74.04mmの時、数本のトラス材破断音の後、写真-1のような桁のお急激な破壊となった。

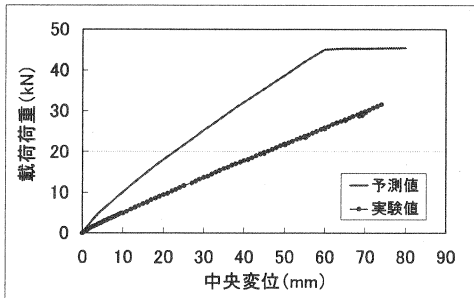


図-14 載荷荷重-中央変位関係

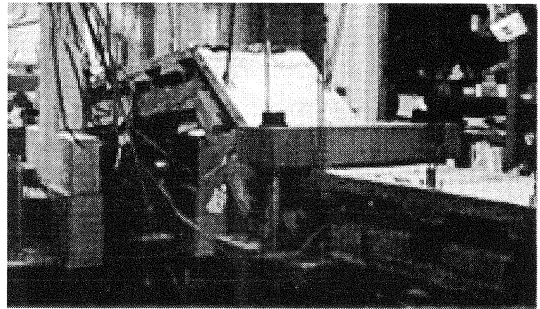


写真-1 破壊状況

4.5 荷重増分に対する耐荷機構

実験の基点である、設計LBからの荷重増分に対する桁とケーブルの荷重分担割合に着目し検討を行った。中央変位-主ケーブルひずみ関係を図-15に示す。荷重分担割合は、載荷実験の初期状態からの荷重増分に対する主ケーブルの分担割合から算出した。ここで、荷重増分によって生じる桁中央のたわみ、主ケーブルの張力増加から力の多角形を用いた方法を用いて載荷実験の初期状態からの主ケーブルによる上向き荷重の増分を主ケーブルの分担荷重とし算

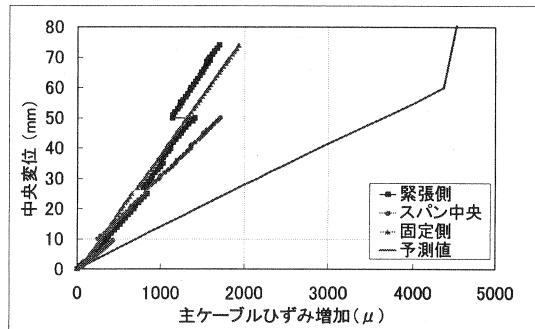


図-15 中央変位-主ケーブルひずみ関係

出した。設計荷重作用時におけるケーブルと桁の荷重分担割合を表-4に、載荷実験における載荷荷重-荷重分担割合関係を図-16に示す。

設計荷重作用時においては、ケーブルと桁がほぼ均等に荷重増分に対して抵抗し、載荷荷重の増加に伴い、桁分担が減少しケーブル分担が増加することが分かった。また、実験値と予測値はほぼ同じ傾向を示した。

5. まとめ

本論文では、ケーブルの耐荷機構に着目しケーブルによる上向き力の計算方法について検討を行った。これまでケーブルによる上向き力の計算の簡略化のために用いてきた“3つの近似と1つの簡略化”について、縮小模型実験、3次元線形FEM解析、力の多角形を用いた計算を用いて検討を行った。“3つの近似と1つの簡略化”のうち、近似①・③に矛盾は無かった。また、簡略化①についても載荷実験とFEM解析の結果を見ても大きな矛盾は無かった。しかし、近似②については、主ケーブル張力が中央径間内で一定とならないことから、これまでの $q=8FB/l^2$ の式ではなく力の多角形を用いた方法を用いる必要があることの裏付けが得られた。

この方法を用いて改めて大偏心外ケーブルPC桁橋の耐荷機構について検討を行った。設計荷重作用時においては、ケーブルと桁がほぼ均等に荷重増分に対して抵抗し、載荷荷重の増加に伴い、桁分担が減少しケーブル分担が増加することが分かった。しかし、載荷荷重-中央変位関係における予測値と実験値との間には、再び大きな差が生じた。

今後、この載荷荷重-中央変位関係における予測値と実験値の間の差について検討する必要がある。

〔参考文献〕

- 1) Kosei Ido : “EXPERIMENTAL STUDY FOR COMPOSITE PRESTRESSED CONCRETE GIRDER BRIDGE WITH EXTERNAL TENDONS OF LARGE ECCENTRICITIES”
Proceeding of the first fib congress2002 volumel session5 pp, 85-86
- 2) 三品・井戸・國井・山崎 : “大偏心外ケーブルPC複合桁の1/36縮小模型実験”, コンクリート工学年次論文集第25巻, pp, 739-744, 2003. 7
- 3) 國井・井戸・三品・山崎 : “大偏心外ケーブルPC鋼トラス複合桁模型のFEM解析” 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp, 673-676, 2003. 10

表-4 設計荷重作用時における荷重分担割合

	実験値	FEM解析値	予測値
ケーブル	53.5%	55.3%	58.4%
桁	46.5%	44.7%	41.6%

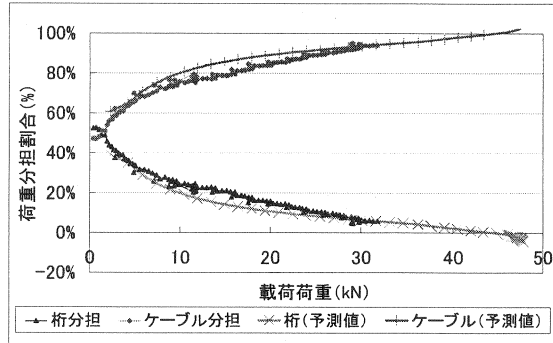


図-16 載荷荷重-荷重分担割合関係