論文 大偏心外ケーブルPC複合桁の 1/36 縮小模型実験

三品 貴寛*1・井戸 功誠*2・國井 道浩*3・山﨑 淳*4

要旨:大偏心外ケーブル PC 複合桁として,3 径間連続自碇式吊橋に複合トラス桁を適用した構造について検討している。中央スパン 180m のモデル構造を試設計し,その 1/36 縮小模型を製作した。載荷実験及び3次元線形 FEM 解析を行い,この構造の耐荷機構や破壊までの挙動についての結果を報告する。

キーワード:大偏心外ケーブル構造,複合桁,自碇式吊橋

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。この構造は,大偏心外ケーブル PC 桁構造に複合桁を組み合わせた新しい構造形式である。

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,ケーブルと桁が分担して抵抗する特徴がある。ここでは,この構造の力学原理を簡潔に表す3径間連続自碇式吊橋について検討をしている。

また複合桁は,桁の軽量化・効率化の目的で

PC 箱桁のウェブを軽量な鋼構造に置換えた構造である。ここでは,鋼トラス複合桁を適用させた。

この構造について,初めに EL 設計理論 $^{2)}$ を検討し,中央スパン 180m のモデル構造を試設計した。

次に,活荷重に対する桁とケーブルの分担量 や破壊までの挙動などの耐荷機構について確認 するために,モデル構造の 1/36 縮小模型を用い た載荷実験や FEM 解析などによる検討を行っ た。初めて,同一供試体を用いた破壊までの載 荷実験を行い,結果を得た。

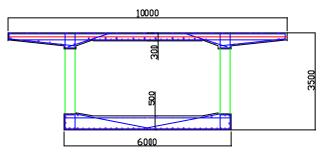


図 - 1 モデル構造断面

2. 実験装置

2.1 対象構造物

対象構造物としたモデル構造を図 - 1,図 - 2に示す。支間 36m,180m,36m,ケーブルサグ22.6m,桁高3.69m,箱桁のウェブに鋼トラスを適用させた構造である。

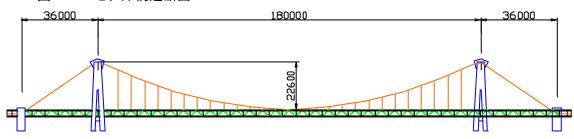


図 - 2 モデル構造側面

- *1日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)
- *2 日本大学助手 理工学部土木工学科 工修 (正会員)
- *3 日本大学 理工学部土木工学科
- *4 日本大学教授 理工学部土木工学科 Ph.D. (正会員)

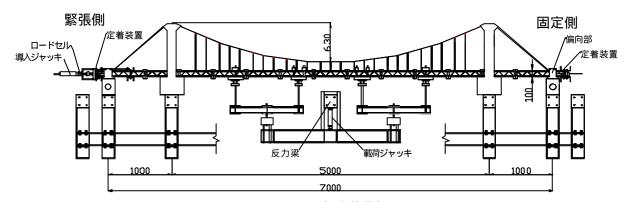


図 - 3 実験装置概要

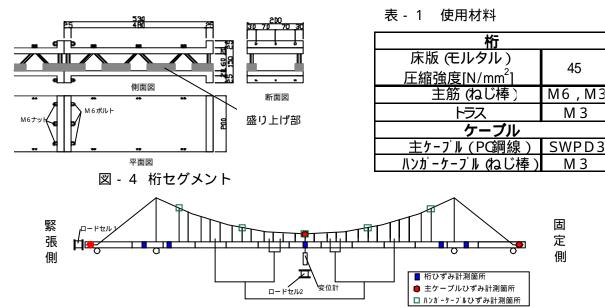


図 - 5 計測点

モデル構造は,EL設計理論²⁾を用いて設計した。この設計理論は,供用状態を対象に力学理論に基づき,最小断面・最適ケーブルサグを決めるものである。活荷重による荷重の変動に対し,桁とケーブルが分担して抵抗し,その際,たわみ限界まで変形すると考える。桁高を仮定することで,桁断面・ケーブル形状が決まる。たわみ限界まで変形させるのに必要な荷重をそれぞれ算出し,その合計が活荷重と一致した場合,最適な形状となる。

2.2 1/36縮小模型

供試体は,180m のモデル構造を可能な限り 形状に忠実に 1/36 縮小化したものである¹)。図

- 3 に実験装置概要,図-4 に桁セグメント,表
- 1 に使用材料を示す。

中央支間 5000mm,側径間 1000mm,ケーブ

ルサグ 630mm, 主ケーブルは 2 面吊で 2.9×3 の PC 鋼より線を用いている。鋼トラス複合桁は RC 構造とし,13 個の桁セグメントをつなげた構造であり,桁高 100mm,床版厚 20mm である。床版にはモルタルを使用し,トラス部材には,M3 のネジ棒を1 箇所に4本配置した。

主ケーブルと桁は,ハンガーケーブルで接続され,1箇所に M3 のネジ棒 2 本を配置している。主塔頂部および偏向部には,テフロンシートを用いて主ケーブルの滑り摩擦を低減している。

図 - 5 計測点を示す。但し,桁ひずみは上下床 版上下面の橋軸方向ひずみを計測した。スパン 中央のたわみを変位計を用いて計測する。

2.3 載荷装置

主ケーブルの緊張(プレストレス導入)は,

桁端部に取付けた油圧ジャッキ(以後,導入ジャッキ)により片側から2本同時に緊張する構造にした(導入ジャッキを取付ける側を緊張側,反対を固定側と呼ぶ)。

桁への載荷は,中央スパンの4等分点に載荷した。油圧ジャッキ(以後,載荷ジャッキ)をスパン中央下に取付け,荷重分配梁を介して桁に伝える構造にした(図-3参照)。

3. 実験の目的と方法

実験は,プレストレス導入実験,荷重載荷実験の2段階に分けて行った。ここでは,導入ジャッキによるケーブルの緊張力を"導入荷重"と言う。載荷ジャッキによる4点載荷の全荷重のうち設計ロードバランスまでは,縮小化に伴い不足した自重補正量のため,"補正荷重"と言い設計ロードバランスからの荷重の増分を"載荷荷重"と言うことにする。

3.1 プレストレス導入実験

プレストレス導入実験は,導入ジャッキにより主ケーブルを緊張し,載荷実験(3.2 参照)の初期状態である,設計ロードバランス状態にするための実験である。

実験では,自立ロードバランス状態と設計ロードバランス状態にすることにより,主ケーブ

ルに導入した張力により発生する上向き荷重が 想定量発生することを確認するとともに,試験 装置のディテールも確認する。

以下に用語の説明をする。

ロードバランス: "ケーブルによる上向き荷重"と"自重や載荷荷重など下向き荷重"がバランスしたわみが0となる状態(図 - 6参照)。

自立ロードバランス:実験供試体レベルでロードバランスした状態。下向き荷重=「"桁自重"+ "載荷装置自重"」。

設計ロードバランス (FEM 解析では Load Case1): 設計荷重「死荷重 + 1/2 活荷重」を想定しもの。下向き荷重 = 「"桁自重" + "載荷装置自重" + "補正荷重"」。

3.2 荷重載荷実験

設計ロードバランス状態を初期状態とし,載荷ジャッキにより載荷荷重を与え,この構造の荷重変動に対する桁とケーブルの荷重分担,破壊までの挙動を確認する。

実験は、荷重レベルの低い供用状態の検討と, 破壊までの終局状態の検討の2つに分けて検討 を行った。

4. FEM 解析

表 - 2

縮小模型実験後,1/36縮小模型を図-7のよう

解析モデル

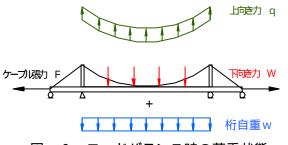


図 - 6 ロードバランス時の荷重状態



表 - 3 境界条件

	境界条件	
サドル部		
偏向部	ローラー支点	
支承 , ,		
支承	ヒンジ支点	

図 - 7	解析モデル全体

に,Shell 要素と Beam 要素を用いてモデル化を行い,3次元線形 FEM 解析を行った。用いた材料特性・要素を表-2に,また境界条件を表-3に示す。またプレストレス導入は,主ケーブルの温度変化で与えた。今回は,Load Case1:設計ロードバランス時(「死荷重+1/2活荷重」を想定),とLoad Case2:設計荷重作用時(「死荷重+活荷重」を想定)の2つの供用状態の解析を行った。

Load Case1 は,設計ロードバランス状態の下向き荷重の実験値である 14.92kN を載荷し,スパン中央変位がゼロになる温度変化を主ケーブルに与えた。

Load Case2 は, Load Case1 の条件に載荷荷重2.09kN (1/2 活荷重に相当)を加えた。

5. 実験結果と考察

5.1 プレストレス導入実験

図 - 8 にプレストレス導入量と主ケーブルひずみの関係を示した。PC 鋼線の初期変形の影響を無視するために、自立ロードバランス状態を原点として図を作成した。計測点(緊張側・スパン中央・固定側)のひずみと予測値は非常によく一致し、主ケーブルの張力が固定側の端部まで伝達されていることを確認し、縮小模型の偏向部などのディテールが適切であったことを確認した。

表 - 4 にロードバランス状態の各作用荷重をまとめた。上下方向の荷重がほぼ一致し、主ケーブルによる上向き荷重が適切に発生したことを確認した。ここで、下向き荷重は載荷ジャッキの値であり、上向き荷重はケーブル張力から式(1)を用いて算出した。

$$q = \frac{8FB}{l^2} \tag{1}$$

(F:ケーブル張力,B:ケーブルサグ,q:上向き力,1:スパン長)

以上より、設計ロードバランス状態を模型実験と FEM 解析により確認できた。

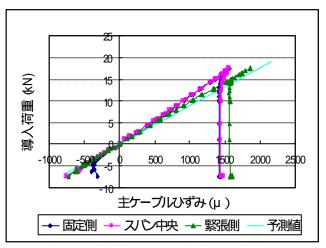


図 - 8 導入荷重 - 主ケーブルひずみ関係

表 - 4 ロードバランス状態

	自立ロード	設計ロード
支間中央変位 (mm)	0	0
ケーブル張力 (kN)	6.76	19.47
導入軸応力 (N/mm ²)	0.84	2.43
桁自重 (kN)	-1.31	-1.31
載荷装置自重 (kN)	-4.63	-4.63
載荷荷重 (kN)	0	-10.29
下向き荷重 (kN)	-6.87	-19.21
上向き荷重 (kN)	6.81	19.63
差 (kN)	0.05	-0.41

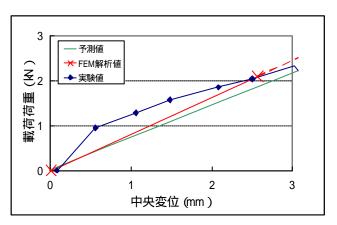


図 - 9 載荷荷重 - 変位関係

5.2 載荷実験

この構造の耐荷機構を確認するために,供用状態と終局状態の2つに分けて検討する。

(1)供用状態の検討

供用状態について EL 設計理論による予測値, 実験値および FEM 解析を比較検討する。

図 - 9 に載荷荷重 - 変位関係を示した。載荷荷重 - 変位関係は,予測値,FEM 解析値と実験値共に近い挙動を示した。表 - 5 に桁とケーブ

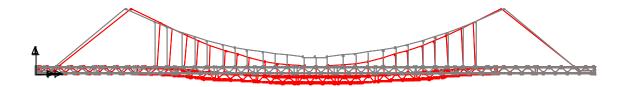


図 - 10 Load Case2 変形 (50倍)

ルの荷重分担割合を示した。ケーブルと桁の荷 表 - 5 桁とケーブルの荷重分担割合 重分担割合は,非常に近い値を示した。

EL 設計理論の予測値が実験値, FEM 解析値 と近い値となることを確認した。

また,図-10にLoad Case2の変形図を50倍 で示す。

ここで,荷重分担割合とは,載荷荷重に対す る桁とケーブルの分担荷重の割合である。ケー ブルの分担荷重は,設計ロードバランス状態と 載荷後の上向き荷重を式(1)を用いて算出し,そ の差となる。桁の分担荷重は,載荷荷重とケー ブルの分担荷重の差となる。

(2)終局状態の検討

a) 耐荷機構について

図 - 11 に載荷荷重 - 変位関係を示した。載荷 荷重 - 変位関係は,供用状態ではほぼ予測値と 一致していたが,終局状態では低い荷重となっ た。図 - 12 に載荷荷重 - 主ケーブルひずみ関係 を示した。載荷荷重とケーブルひずみ関係は, 予測値と非常によく一致した。このことより, 図 - 11 の載荷荷重 - 変位関係が予測値に対し, 実験値が低い値を示したのは、桁の剛性が予測 値よりも低いためだと考えられる。

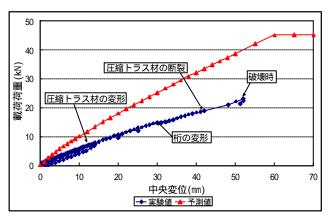
図 - 13 に破壊までの載荷荷重 - 分担割合を 示した。荷重の増加に伴い,ケーブル分担が増 加し,桁分担が減少していく。最終的には,完 全にケーブルが分担する状態となった。桁の剛 性が下がった後もケーブルが分担することでね ばりのある挙動を示した。

b) 破壊までの挙動

設計ロードバランス状態 (写真 - 1)(プレス トレス導入荷重 19.45kN,補正荷重 10.29kN) より、載荷を開始した。

載荷荷重 6.9kN にて,圧縮トラス材の変形を

	予測値	FEM解析值	実験値
ケーブル	46.9%	49.3%	45.7%
桁	53.1%	50.7%	54.3%



載荷荷重 - 变位関係 図 - 11

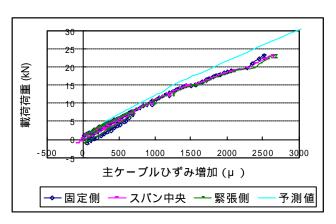


図 - 12 載荷荷重 - ケーブルひずみ関係

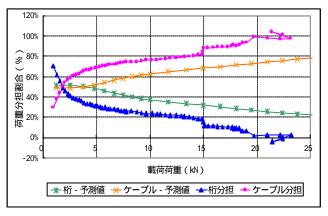


図 - 1 3 載荷荷重 - 分担割合関係図

目視にて確認した。その後載荷点付近で,多数のトラス材の変形が進み,破断直前には写真2のように変形した。

載荷荷重 14.9kN では,中央変位約 1mm 程度の変形が進む間に,荷重増加がなく載荷点付近で桁の局部変形が起こった。

載荷荷重 23.2kN では,引張トラス材が破断する音がし,数秒後,大きな音とともに破壊した(写真-3)。トラス材の変形を確認してから約5倍の変形を示した。

6. まとめ

本研究は,大偏心外ケーブル PC 複合桁構造 のうち,自碇式吊橋に鋼トラス複合桁を取り入 れた新しい構造形式について検討している。

ここでは,1/36 縮小模型を用い,耐荷機構や 破壊までの挙動に着目した実験を行い,FEM 解 析などとあわせて検討を行った。

供用状態の検討では、EL 設計理論による予測との実験結果が、近い値となることを確認できた。また、終局状態の検討では、変動荷重に対する桁とケーブルの分担割合の推移や破壊までの挙動の確認により、桁の耐力低下をケーブルがカバーし、粘り強い挙動となることを確認できた。

今後の課題として,偏載荷に対する挙動や耐震性能などについて取り組む必要がある。

謝辞

本論文は,平成13年度修士2年萩原直樹氏, 卒研生宮越洋行氏・四十八願晃氏とともに行っ た実験および研究をまとめたものである。ここ に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井戸功誠ほか: 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) 井戸功誠ほか:箱桁・複合桁を適用した大 偏心外ケーブル PC 桁の試設計, PC 技術協



写真 - 1 設計ロードバランス状態

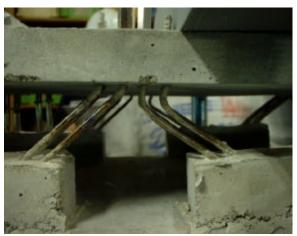


写真 - 2 トラス材変形



写真 - 3 破壊状況

会第 10回シンポジウム論文集, pp, 825-830, 2000, 10

- 3)萩原直樹ほか: 大偏心外ケーブル PC 鋼トラス複合桁の 1/36 縮小模型実験, PC 技術協会第 10 回シンポジウム論文集, pp, 35-40 2000, 10
- 4)萩原直樹ほか:大偏心外ケーブル PC 鋼トラス複合桁のせん断力に起因する終局限界状態の実験, PC 技術協会第 11 回シンポジウム論文集,pp,441-446,2001,11