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 貴寬^{*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。

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。



- *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 - 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



図 - 7 解析モデル全体

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

縮小模型実験後, 1/36 縮小模型を図 - 7 のよう

	弹性係数 (ℕ/mm ²)	解析要素
ケーブル	223000	Beam
ハンガーケーブル	210000	Beam
床版	24000	Shell
トラス	210000	Beam

表 - 2 解析モデル

表 - 3 境界条件

	境界条件
サドレ部	
偏向部	ローラー支点
支承,,	
支承	ヒンジ支点

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 - 変位関係 図 - 11



図 - 1 2 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