

【論 文】

塔の三連成ばねを考慮した吊橋面外解析

Analysis of Suspension Bridges Considered
Three Coupled Springs of Tower under Lateral Load

野村 国勝*
Kunikatsu NOMURA
中崎 俊三**
Syunzo NAKAZAKI
内海 靖***
Yasushi UCHIUMI
木村 公男***
Kimio KIMURA

〔要旨〕 長大吊橋の補剛桁設計においては風荷重による面外解析が非常に重要である。しかしながら、慣用の理論では実状を無視した計算が行われてきた。すなわち、(1)補剛トラス吊橋において顕著となるハンガー定着部と桁の振り中心との偏心によるトルクの問題、(2)塔および橋台部における桁に対するウインド沓の支持条件の問題である。本文は桁のずれ変形を考慮した理論を基に上記の問題を説明するものである。計算の結果、慣用理論と比較して特に横構の断面力において設計上無視できない有意差が示された。

1. まえがき

現在、本州四国連絡橋において、既にいくつかの1,000m級吊橋が着工済みである。これらはいずれ世界の上位にランクされるであろう。

同じ1,000m級の吊橋でも、例えばアメリカのゴールデン・ゲイト橋はすでに47年前に完成している。しかし当時と現在では設計技術の背景には非常に大きな差がある。それは構造解析理論および計算機の進歩によるものが大であるが同時に長大吊橋の特有の問題としての耐風、耐震に対する研究成果の蓄積も見逃せない。

本文は長大吊橋の場合、補剛桁設計断面力に対し支配的となる面外風荷重の静的解析の問題をとりあげるものである。そして塔の弾性支持条件あるいはハンガーの面外変位に伴う桁の振り等を取り扱い、実用設計に供することを目的としたものである。

桁にはずれ変形を考慮しており、その基本式は林・樋口・田中の論文¹⁾を参考にした。

2. ずれ変形を考慮した桁の剛性マトリクス

本節の詳細は文献¹⁾に述べられているので、ここではその概要を述べる。

2-1 概要

吊橋の補剛トラスは図-1(a)のようにパネル間隔毎に桁断面の形状保持の役割をする主横トラス(上路床組荷重を主構に伝える役割もある)という箱桁のダイヤフラムに相当する部材がある。

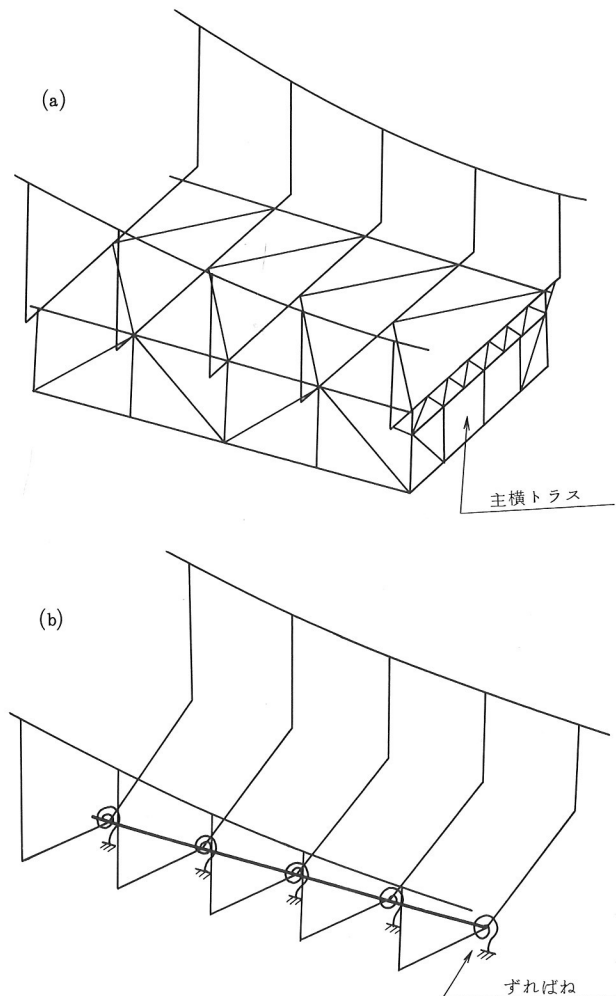


図-1 吊橋のモデル化

図-1 (b)は図-1 (a)を模式的に表わしたものである。すなわち、格点には主横トラスに相当するずればねに、格点間にはずれ剛性はないが、振り剛性のある主構・横構に相当する梁に置換することができる。従って、解析方法としては桁に対しては振り剛性はあるがずれ剛性のない剛性マトリックスを、ずればねに対しては主横トラスのずればねを求めて、格点にて外力と桁断面力の釣り合い方程式を立てればよいことになる。以下、それらの剛性マトリックスを与えるが、途中の誘導過程は文献1)に詳しいのでここでは要点のみ示すことにする。

2-2 剛性マトリックス

ウラソフ²⁾のずれ変形を考慮した桁の振りに関する微分方程式においてずれ剛性の項を除去すると

$$\left. \begin{aligned} a_w \cdot D_2'' - b_1 \cdot D_2'' + b_2 \cdot D_1' - b_1 \cdot D_3' &= 0 \\ b_2 \cdot D_2'' - b_1 \cdot D_1'' + b_2 \cdot D_3'' &= 0 \\ b_1 \cdot D_2' - b_2 \cdot D_1' + b_1 \cdot D_3' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに $a_w = E s b^2 h^2 A_c / 4$

$$b_1 = G s (h^2 F b + b^2 F h) / 2$$

$$b_2 = G s (-h^2 F b + b^2 F h) / 2$$

$$F_h = h \cdot t h$$

$$F_b = b \cdot t b$$

$$A_c = \text{弦材一本の断面積}$$

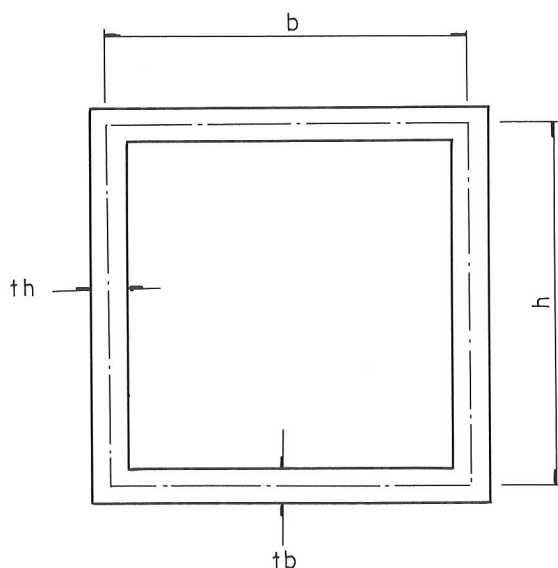


図-2 桁断面

(1)式の D_1, D_2, D_3 は図-3で定義されるように各々、振り、そり、ずれ変形に対応するものである。桁は(1)式で表わされる振りに関するもの以外に軸力および面内・面外の曲げとせん断に関する残り5個の微分方程式が得られるがそれは周知の如くである。各々の微分方程式を解くことにより次の剛性マトリックスが得られる。

$$\{F\}^m = [K]^m \{D\}^m \quad (2)$$

m は部材座標系であることを示す。

ここに

$$\left. \begin{aligned} \{F\}^m &= [F_{1a}, F_{2a}, \dots, F_{8a}, F_{1b}, F_{2b}, \\ &\quad \dots, F_{8b}]^T \\ \{D\}^m &= [D_{1a}, D_{2a}, \dots, D_{8a}, D_{1b}, D_{2b}, \\ &\quad \dots, D_{8b}]^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3)式右辺の a, b は部材のA端B端を表わす。また、 $F_1 \sim F_8, D_1 \sim D_8$ の定義は図-3に定義される。

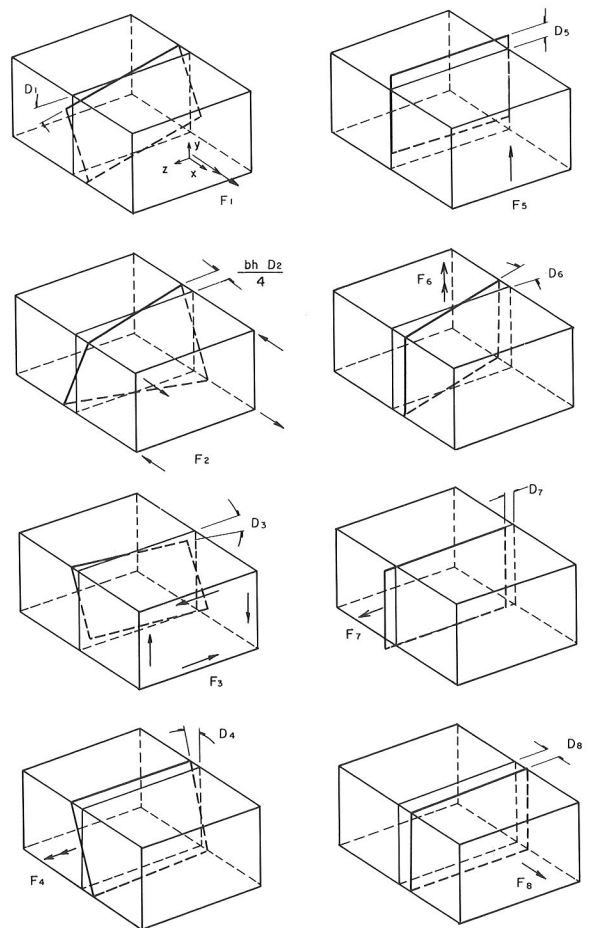


図-3 一般化力, 一般化変位

$[K]^m$ の内容は文献1)を参照されたい。なお、曲げとせん断に関する剛性にはせん断変形の影響が考慮されている。

ところで吊橋の面外解析において桁に縦断勾配がある場合は桁の角度変化を考えた全体座標系の取扱いが必要となる。図-4のように桁が全体座標系($X-Z$)面に対する傾き(α)がある場合の全体座標系に関する桁の剛性マトリクスは次のようになる。

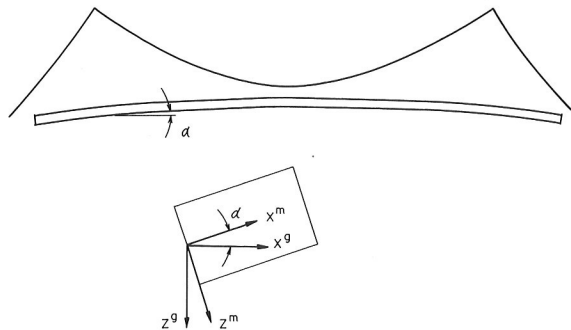


図-4 吊橋の全体座標系

$$\begin{aligned} \{F\}^g &= [K]^g \cdot \{D\}^g \\ &= [T^{-1} \cdot A \cdot T \cdot K^m \cdot T^T \cdot A^T \cdot (T^T)^{-1}] \\ &\quad \cdot \{D\}^g \end{aligned} \quad (4)$$

ここに $T = \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & t \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix}$ よりなり、 t と a は(5), (6)式に示される。

$$t = \begin{bmatrix} \frac{1}{2b} & 0 & -\frac{1}{2b} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2h} & 0 & -\frac{1}{2h} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2b} & 0 & \frac{1}{2b} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2h} & 0 & \frac{1}{2h} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{bh} & 0 & \frac{1}{2h} & 0 & -\frac{1}{2b} & 0 & \frac{1}{4} \\ 0 & -\frac{1}{bh} & 0 & \frac{1}{2h} & 0 & \frac{1}{2b} & 0 & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{1}{bh} & 0 & -\frac{1}{2h} & 0 & \frac{1}{2b} & 0 & \frac{1}{4} \\ 0 & -\frac{1}{bh} & 0 & -\frac{1}{2h} & 0 & -\frac{1}{2b} & 0 & \frac{1}{4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$a = \begin{bmatrix} (\cos \alpha + 1)/2 & (\cos \alpha - 1)/2 & 0 & 0 & (\sin \alpha)/2 & 0 & 0 & 0 \\ (\cos \alpha - 1)/2 & (\cos \alpha + 1)/2 & 0 & 0 & (\sin \alpha)/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\cos \alpha + 1)/2 & (\cos \alpha - 1)/2 & 0 & 0 & (\sin \alpha)/2 & 0 \\ 0 & 0 & (\cos \alpha - 1)/2 & (\cos \alpha + 1)/2 & 0 & 0 & (\sin \alpha)/2 & 0 \\ -\sin \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

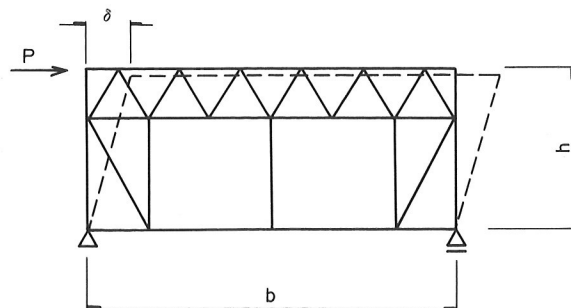


図-5 主横トラスのずれ剛性

格点のずればねマトリクスも(4)式と同様に

$$\begin{aligned} \{R\}^g &= [T^{-1} \cdot A \cdot T \cdot R^m \cdot T^T \cdot A^T \cdot (T^T)^{-1}] \\ &\quad \cdot \{D\}^g \end{aligned} \quad (7)$$

ここに $[R]^m$ の要素の内容は $[R]_{3,3}^m = [R]_{11,11}^m$ $= \Gamma_B$ であり、その他は零要素である。

ずればね Γ_B は次式で与えられる。

$$\Gamma_B = \frac{4h^2P}{\delta} \quad (8)$$

(4)式と(7)式が桁および主横トラスの全体座標系の剛性マトリクスである。

2-3 補剛トラス軸力の算出

全体の釣り合い方程式より部材両端の格点の変形 $\{D\}^g$ が求まる。これより部材座標系の断面力 $\{F\}^m$ は次のようにして求まる。

$$\{F\}^m = [K^m \cdot T^T \cdot A^T \cdot (T^T)^{-1}] \cdot \{D\}^g \quad (9)$$

この $\{F\}^m$ よりトラスの軸力を求める。

吊橋の面外解析では $\{F\}^m$ の内、必要となる断面力は面外曲げモーメント (MZ)、面外せん断力 (SZ)、曲げ振りモーメント (MW)、振りモーメント (T_1)、ずれモーメント (T_2)、の5個のみであるので3.で述べる吊橋の面外解析における桁の1格点当りの自由度は5でよい。

それら5個の断面力の符号の定義を図-6に示す。

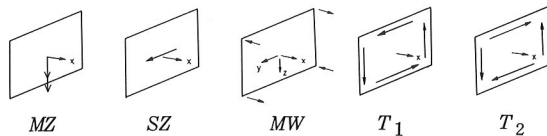


図-6 断面力の定義

これにおいて部材座標が図-3で定義したものから時計方向に 90° 回転している。これは図-4において吊橋補剛桁の側面を ($X-Z$) 面で定義し、その面で角度変化を考えたからである。

部材 A , B 端共、断面力の符号の定義は同じである。これらより、トラスの各部材力を求める。

1) 主構斜材面のせん断力 Sd

$$Sd = \frac{h}{2bh} (T_1 B + T_2 B) \quad (10)$$

B は部材 B 端の断面力であることを示す。

2) 横構面のせん断力 Sb

SZB の方向を正とする。

$$\left. \begin{aligned} \text{上横構面; } Sbu &= \frac{SZB}{2} + \frac{b}{2bh} (T_1 B - T_2 B) \\ \text{下横構面; } Sbl &= \frac{SZB}{2} - \frac{b}{2bh} (T_1 B - T_2 B) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3) 弦材軸力

図-7に示すような横構と斜材の取り合いの関係から4種類のトラスタイプがある。タイプによって弦材軸力の式は異なる。それを表-1に示す。

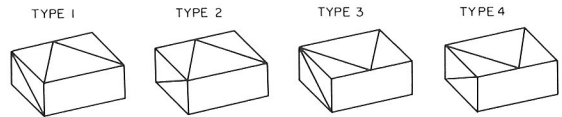
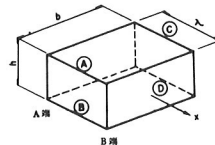


図-7 主構トラスのタイプ

表-1 主構トラスのタイプ別弦材軸力

	①	②	③	④
TYPE 1	$\frac{MA}{2b} - \frac{T}{2bh} \cdot \lambda - \frac{MW}{2bh}$	$\frac{MA - MW}{2b}$	$-\frac{MA}{2b} - \frac{T}{2bh} \cdot \lambda + \frac{MW}{2bh}$	$-\frac{MA + MW}{2b}$
TYPE 2	$\frac{MA + MW}{2b}$	$\frac{MA}{2b} + \frac{T}{2bh} \cdot \lambda + \frac{MW}{2bh}$	$\frac{MA - MW}{2b}$	$-\frac{MA}{2b} - \frac{T}{2bh} \cdot \lambda - \frac{MW}{2bh}$
TYPE 3	$-\frac{MB + MW}{2b}$	$-\frac{MB}{2b} - \frac{T}{2bh} \cdot \lambda + \frac{MW}{2bh}$	$\frac{MB + MW}{2b}$	$\frac{MB}{2b} + \frac{T}{2bh} \cdot \lambda - \frac{MW}{2bh}$
TYPE 4	$-\frac{MB}{2b} - \frac{T}{2bh} \cdot \lambda - \frac{MW}{2bh}$	$-\frac{MB + MW}{2b}$	$\frac{MB}{2b} - \frac{T}{2bh} \cdot \lambda + \frac{MW}{2bh}$	$\frac{MB - MW}{2b}$



$T = T_1 B$
 $MW = MW B - MWA$
 $MA = MZA$
 $MB = MZB$

3. 吊橋の面外解析

吊橋の面外解析を行うためには2.で求めた桁の剛性マトリクスの他にケーブルおよびハンガーの剛性マトリクスが必要である。

3-1 ケーブル剛性マトリクス

ケーブルは面外変形もするので三次元的に変形する。この場合の剛性マトリクスは(12)式に示される。

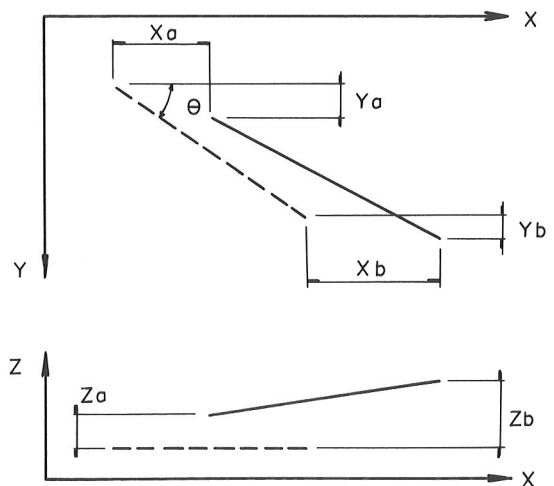


図-8 ケーブルの変形

$$\begin{Bmatrix} FXa \\ FYa \\ FZa \\ FXb \\ FYb \\ FZb \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & & -A & -B \\ B & C & & -B & -C \\ & & D & & -D \\ -A & -B & & A & B \\ -B & -C & & B & C \\ & & -D & & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} Xa \\ Ya \\ Za \\ Xb \\ Yb \\ Zb \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ここに

$$A = \cos^2 \theta \frac{EA}{\ell} + \sin^2 \theta \frac{T}{\ell}$$

$$B = \cos \theta \cdot \sin \theta \left(\frac{EA}{\ell} - \frac{T}{\ell} \right)$$

$$C = \sin^2 \theta \frac{EA}{\ell} + \cos^2 \theta \frac{T}{\ell}$$

$$D = \frac{T}{\ell}$$

 ℓ = ケーブル部材長 EA = ケーブルの伸び剛性 T = ケーブルの初期軸力

3-2 ハンガーの剛性マトリクス

ハンガーはケーブルと桁を結合する部材である。従ってハンガー軸力はケーブルに対して三次元的な荷重になるし、桁に対しては曲げ変形および振り変形を与える荷重となる。

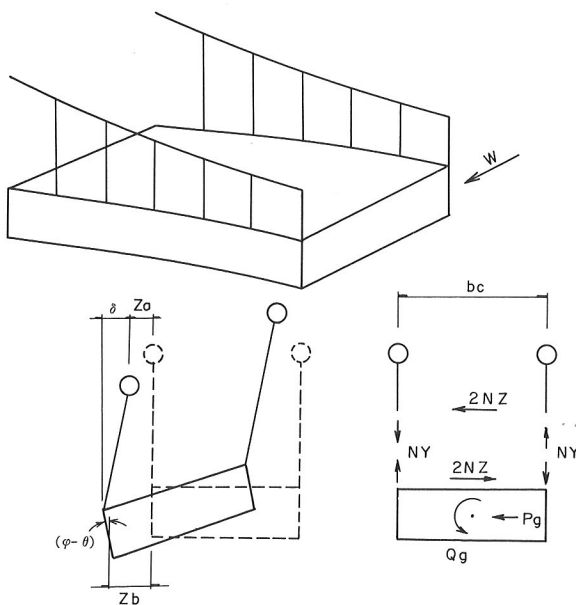


図-9 吊橋の面外変形

1) 桁への面外荷重 NZ

図-9を参照するとハンガー張力 T の水平成分 NZ が桁に作用する。

$$-NZ = -\frac{T}{\ell} \cdot \delta \quad (13)$$

δ はハンガーの上下端の面外相対変位差を示し、次式で与えられる。

$$\delta = Zb + \frac{h}{2}(\varphi - \theta) - Za \quad (14)$$

ここに Za ; ケーブルの面外変位 Zb ; 桁の振り中心の面外変位 φ ; 振り角 (図-3の D_1) θ ; ずれ角 (図-3の D_3)

2) 桁に対する面外曲げモーメント MZ

桁が面外方向に回転すると、ケーブルと桁の間に橋軸方向の相対変位差が生じる。その結果、ハンガーはその相対変位を食い止めようとする橋軸方向水平力 NX が生ずる。図-10に示すようにこの NX は反対側ケーブル

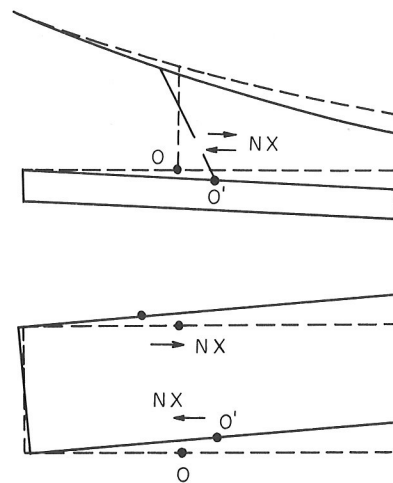


図-10 桁の面外変形

面では逆方向となるので、結局この一対の NX により桁に面外曲げモーメントとして作用する。

$$MZ = bc \cdot NX \quad (15)$$

3) 桁への振りモーメント T_1

図-9より桁はハンガー張力の水平成分 NZ 及び鉛直方向の付加軸力 NY により振りモーメントが作用する。振りモーメントの定義より

$$T_1 = -h \cdot NZ - bc \cdot NY \quad (16)$$

4) 桁へのずれモーメント T_2

図-9より, 振りモーメントと同様, ずれモーメント
の定義より

$$T_2 = k \cdot NZ - bc \cdot NY \quad (17)$$

ケーブルに対しては NY, NZ が外力となる。

NX, NY は図-11を参照すると次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} NX &= \frac{EA}{\ell} \cdot \frac{X}{\ell} \left\{ \frac{X}{\ell} (Xb - Xa) + \frac{Y}{\ell} (Yb - Ya) \right\} \\ &\quad + \frac{T}{\ell} (Xb - Xa) \\ NY &= \frac{EA}{\ell} \cdot \frac{Y}{\ell} \left\{ \frac{X}{\ell} (Xb - Xa) + \frac{Y}{\ell} (Yb - Ya) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ここに, $Xb = -\frac{bc}{2} \theta_z$, $Yb = \frac{bc}{2} (\varphi + \theta)$

よってハンガーの剛性マトリクスは次式で表せる。

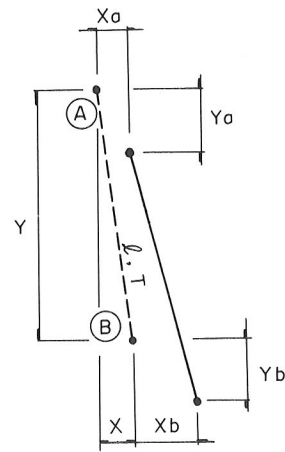


図-11 ハンガーの変形

$$\begin{bmatrix} NX \\ NY \\ NZ \\ T_1 \\ MW \\ T_2 \\ MZ \\ SZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A+D & B & & & -B \cdot \frac{bc}{2} & -B \cdot \frac{bc}{2} & A \cdot \frac{bc}{2} \\ & C & & & -C \cdot \frac{bc}{2} & -C \cdot \frac{bc}{2} & B \cdot \frac{bc}{2} \\ & & D & & -D \cdot \frac{h}{2} & D \cdot \frac{h}{2} & -D \\ & & & C(\frac{bc}{2})^2 + D(\frac{h}{2})^2 & C(\frac{bc}{2})^2 & -D(\frac{h}{2})^2 & -B \cdot (\frac{bc}{2})^2 \\ & & & & & & D(\frac{h}{2}) \\ & & & & & C(\frac{bc}{2})^2 + D(\frac{h}{2})^2 & -B \cdot (\frac{bc}{2})^2 & -D(\frac{h}{2}) \\ & & & & & & A \cdot (\frac{bc}{2})^2 + D(\frac{bc}{2})^2 \\ (対称) & & & & & & & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa \\ Ya \\ Za \\ \varphi \\ \omega \\ \theta \\ \theta_z \\ Zb \end{bmatrix} \quad (19)$$

ここに $A = 2 \frac{EA}{\ell} \left(\frac{X}{\ell} \right)^2$, $B = \frac{2EA}{\ell} \frac{XY}{\ell^2}$

$C = 2 \frac{EA}{\ell} \left(\frac{Y}{\ell} \right)^2$, $D = 2 \frac{T}{\ell}$

ここで(19)式における空欄は全体の剛性方程式を作成す

る際, ケーブルおよび桁の剛性マトリクスと重ね合わせるために便宜上設けたものである。

以上のように吊橋の面外解析を行うために必要な剛性マトリクスは全て揃ったことになる。

4. 桁の支承に対する処理

これまでの吊橋の面外解析では面外の桁支点は桁の振り中心に置かれており、上下の横構設計断面力は全く同一のものであった。しかしながら、実際、ウィンド沓の位置が桁の振り中心に一致するのは取り合い構造上の問題から稀である。その場合、横構断面力は上下でかなり異なったものとなる。ここではそのような問題に対する計算方法を示す。

4-1 塔の三連成ばね支承

本四ルート吊橋では補剛トラスは図-12に示すように主構の上・下弦材にウィンド沓が設けられており、それが塔柱の側壁に当る構造となっている。この場合、上下のウィンド沓に対する塔のばねが等しければ上下横構断面力は等しくなるが、そうでないとアンバランスが生じる。ここではそのような問題を塔の三連成ばねで対処する。

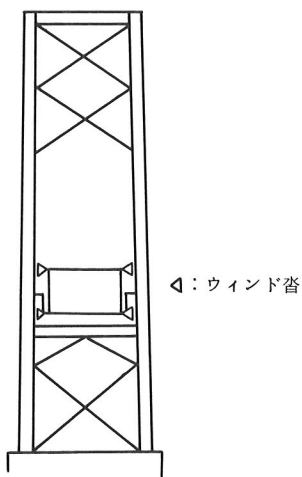


図-12 ウィンド沓と塔の関係

4-1-1 塔の三連成ばね

立体の汎用プログラムでは塔も全体解析モデルの中に入れて解析するが吊橋一般部のように規則的な構造の中に塔のような構造物を入れるとバンド幅が急に大きくなるので解析上不経済である。ここで述べる三連成ばねは塔のモデルだけ取り出してばね定数を計算し、そのばね定数を入力するもので、連成とはケーブル支点と桁支点とが独立したばねでなく相互に影響し合うばねであることを意味する。図-13はそれを示すもので P_1 はケーブル支点反力、 P_2, P_3 は各々、上下ウィンド沓反力を

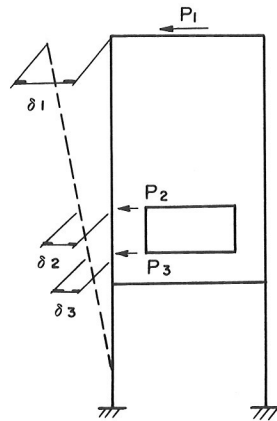


図-13 塔の変形

示す。

三連成ばね定数は次のようにして求める。

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

ここに $\delta_{11}, \delta_{12}, \dots, \delta_{33}$ は単位荷重 (= 1 ton) をかけた時の変位 (m) の影響値である。(20)式より

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

(21)式の右辺の第一項目の逆行列が三連成ばねを表す。

表現を変えると

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

4-1-2 塔位置の桁の変形条件

塔位置における塔頂及び桁の変形条件は図-14を参照すると次式のように表せる。

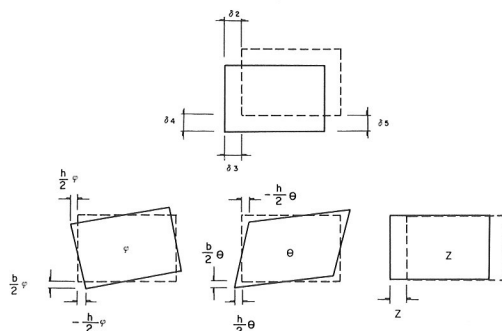


図-14 塔位置の主横トラスの変形

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \delta_c \text{ (塔頂面外変位)} \\ \delta_2 &= Z + \frac{h}{2} \varphi - \frac{h}{2} \theta \\ \delta_3 &= Z - \frac{h}{2} \varphi + \frac{h}{2} \theta \\ \delta_4 &= \frac{b}{2} \varphi + \frac{b}{2} \theta \\ \delta_5 &= -\frac{b}{2} \varphi - \frac{b}{2} \theta \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

4-1-3 塔位置の拘束条件

塔位置にある主横トラスへの塔からの反力を図-15のように $P_2 \sim P_5$ とする。振りモーメント T_1 、ずれモーメント T_2 および面外力 FZ は定義により次のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= -h \cdot P_3 + b \cdot P_4 + (P_2 + P_3) \cdot \frac{h}{2} \\ &= \frac{h}{2} \cdot P_2 - \frac{h}{2} \cdot P_3 + b \cdot P_4 \\ T_2 &= h \cdot P_3 + b \cdot P_4 - (P_2 + P_3) \cdot \frac{h}{2} \\ &= -\frac{h}{2} \cdot P_2 + \frac{h}{2} \cdot P_3 + b \cdot P_4 \\ FZ &= P_2 + P_3 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

(24)式は(22)、(23)式より次式のように表せる。

$$\begin{bmatrix} FZC \\ T_1 \\ T_2 \\ FZG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h/2 & -h/2 & b/2 \\ 0 & -h/2 & h/2 & b/2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & 0 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2K_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h/2 & -h/2 & 1 \\ 0 & -h/2 & h/2 & 1 \\ 0 & b/2 & b/2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_c \\ \varphi \\ \theta \\ Z \end{bmatrix} \quad (25)$$

4-2 橋台部の処理

橋台部では塔のように連成の問題はない。端主横トラスへの反力と変位の関係は図-16を参照すると次式のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= K_2 \cdot \delta_2 \\ P_3 &= K_3 \cdot \delta_3 \\ P_4 &= K_4 \cdot \delta_4 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

(23)、(24)、(26)式より、端主横トラスへの反力(T_1 , T_2 , FZG)は次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ FZG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h/2 & -h/2 & b/2 \\ -h/2 & h/2 & b/2 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_2 & 0 & 0 \\ 0 & K_3 & 0 \\ 0 & 0 & 2K_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h/2 & -h/2 & 1 \\ -h/2 & h/2 & 1 \\ b/2 & b/2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ Z \end{bmatrix} \quad (27)$$

塔位置に対しては(25)式、橋台部では(27)式を全体剛性方程式を作成する際に外力として追加すればよい。しかし、外力というものそのものでなく未知変位を含む外力であるから方程式の左辺に移行し、他の剛性マトリクスと重ね合わせねばならない。

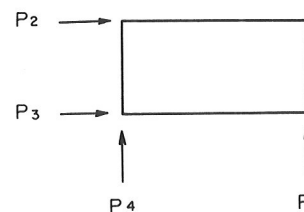
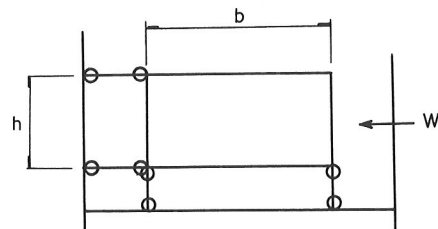


図-15 塔位置の主横トラスへの反力

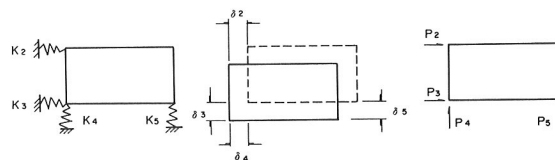


図-16 橋台部の端主横トラスの変形と反力

4-3 計算例

上述の塔の弾性支持条件並びにハンガー定着部と桁の振り中心との偏心を考慮した場合とそれらを全く無視した場合との比較を表-2の条件で解いた比較結果を図-17に示す。

表-2 計算諸元

	側径間	中央径間
死荷重 ($t/m/Br.$)	46.0	45.0
ケーブル断面積 ($m^2/cab.$)	0.709	0.709
主 橋 巾 (m)	30.0	30.0
主 橋 高 (m)	13.0	13.0
桁の面外断面二次モーメント ($m^4/Br.$)	127.8	143.0
斜材の換算板厚 (mm)	4.93	5.38
横橋の換算板厚 (mm)	2.43	2.67
主橋トラスのずればね ($tm/Rad.$)	支点部	3.8×10^6
	一般部	5.0×10^6
風 荷 重 ($t/m/Br.$)	ケーブル	0.9
	桁	5.4

これから、特に横構において顕著な差がみられることがわかるであろう。中央径間一般部での上下横構の差は、ハンガー定着部と桁の振り中心との偏心によるものであり、塔部での差は上、下ウィンドダブに対する塔のパネの大きさの差、橋台部での差は下弦材のみにウィンドダブを設けたことによるものである。

5. あとがき

本文では吊橋面外解析において無視できない塔の支持条件およびハンガー定着部の偏心の問題を取り扱った。

計算例でもわかるように特に前者の影響はかなり大きく、従来の慣用的方法では問題があることがわかった。このような正確な計算が行えるようになったのは計算機の発達によるものが大きく、この種の厳密な取扱いは今後、増々、可能になるであろう。

参考文献

- 1) 林・樋口・田中：断面変形を考慮した薄肉弾性ばり理論によるトランス橋の立体解析，土木学会論文報告集，第249号，1976.
- 2) Vlasov V.Z. (奥村敏恵・他 共訳)：薄肉弾性ばりの理論，技報堂，1967.

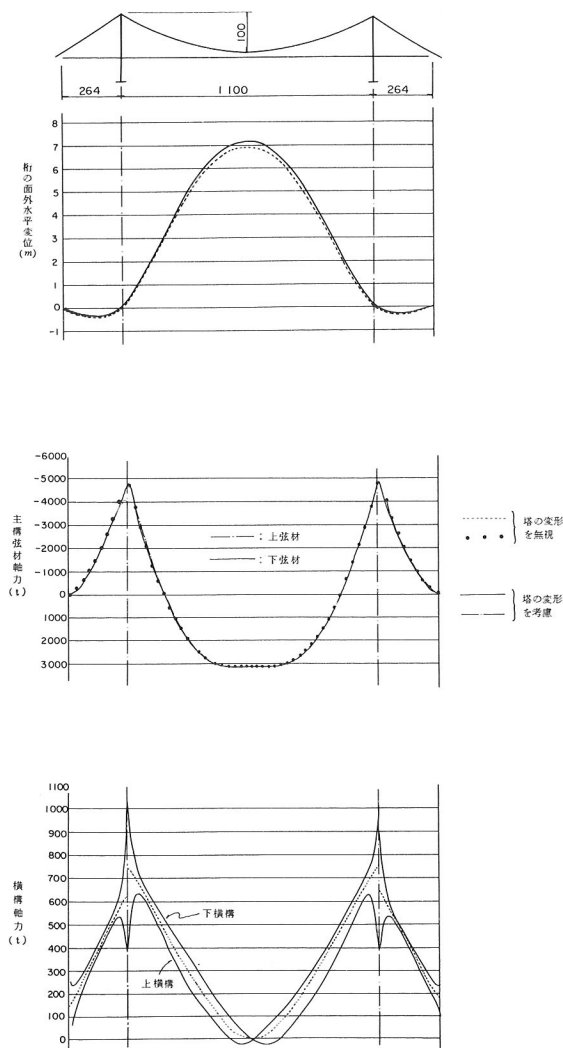


図-17 三径間連続吊橋の面外解析