

横荷重を受ける吊橋の立体解析と設計上の問題点

大阪大学工学部 正員 小松定夫

大阪大学工学部 正員 西村宣男

大阪大学大学院 学生員 西村春久

1. まえがき 水平横荷重を受ける吊橋の解析法は、福田、吉塚、後藤、Hoiseiff, Topaloff, Erzenらによって研究されてきた。これらの諸研究では吊橋全体を一本の水平曲げ部材に置き換え、横荷重に対しては鉛直軸まわりの曲げ変形のみを考えている場合が多く、曲げモーメントおよびせん断力が上下横構に均等に分配されるとしている。実際には補剛トラスの上弦残格点にハンガー取付けられることが多いので、横荷重を受けた場合にも吊橋並にねじれ変形が生じ上下横構の応力は一致しなくなる。本研究では、3径間2ヒンジ吊橋および連続補剛吊橋が横荷重を受ける場合について、吊橋並のねじれおよび断面変形(すれ)を考慮した基礎方程式を誘導し、数値計算によって上下横構に分配される断面力などを定量的に調べた。

2. 基礎方程式と解法 図1のような変形を考慮して、膜理論を用いて誘導した式を以下に記す。

$$-Hg u_c'' - \frac{Ws}{2} \left\{ u_s - u_c + \frac{h}{2} (\phi - \theta) \right\} = P_c$$

$$EI_y u_s'' + \frac{Ws}{2} \left\{ u_s - u_c + \frac{h}{2} (\phi - \theta) \right\} = P_s$$

$$a(\omega'' - b_1 \omega - b_2 \phi' - b_1 \theta') = 0$$

$$-b_2 \omega' - (b_1 + \frac{b_c^2}{2} Hg) \phi'' - (b_2 + \frac{b_c^2}{2} Hg) \theta'' = -\frac{Ws h}{2\ell} \left\{ u_s - u_c + \frac{h}{2} (\phi - \theta) \right\} + H p b c y''$$

$$-b_1 \omega' - (b_2 + \frac{b_c^2}{2} Hg) \phi'' - (b_1 + \frac{b_c^2}{2} Hg) \theta'' + \gamma \theta = \frac{Ws h}{2\ell} \left\{ u_s - u_c + \frac{h}{2} (\phi - \theta) \right\} + H p b c y''$$

ここで、 $a = EA c b^2 K / 4$ 、 $b_1 = G b h (t_1 b + t_2 h) / 2$ 、 $b_2 = G b h (t_1 b - t_2 h) / 2$ 、 Ws ：吊橋並単位重量

$$H p = -\frac{E F c}{2c} y'' \int_{\ell}^{\ell} \frac{b_c}{2} (\phi + \theta) dz$$

上式において、対傾構剛性 $\gamma > 10^3 \text{ ton}$ の場合は下線部 $(u_s - u_c) \gg \frac{h}{2} (\phi - \theta)$ であり、十分省略しうる。これらの基礎方程式を、変位に級数解を仮定して、カラーキン法を用いて解析する。

2ヒンジの場合、級数解は、

$$u_{ci}(z) = \sum_{n=1}^{\infty} d_{ni} \sin \frac{n\pi z}{\ell_i}, \quad u_{si}(z) = \sum_{n=1}^{\infty} e_{ni} \sin \frac{n\pi z}{\ell_i},$$

$$\omega_i(z) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{ni} \cos \frac{n\pi z}{\ell_i}, \quad \phi_i(z) = \sum_{n=1}^{\infty} b_{ni} \sin \frac{n\pi z}{\ell_i}, \quad \theta_i(z) = \sum_{n=1}^{\infty} c_{ni} \sin \frac{n\pi z}{\ell_i} \quad (i=1,2,3)$$

連続の場合、級数解は、

$$u_{ci}(z) = \sum_{n=1}^{\infty} d_{ni} \sin \frac{n\pi z}{\ell_i}, \quad u_s(z) = \sum_{n=1}^{\infty} e_n \sin \frac{n\pi z}{\ell},$$

$$\omega(z) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{ni} \cos \frac{n\pi z}{\ell}, \quad \phi(z) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi z}{\ell}, \quad \theta(z) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \frac{n\pi z}{\ell} \quad (i=1,2,3)$$

さらに中間支点上の変位の拘束条件として、以下の式が加えられる。

$$\sum_{n=1}^{\infty} e_n \sin \frac{n\pi \ell_1}{\ell} = 0, \quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi \ell_1}{\ell} = 0, \quad \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \frac{n\pi \ell_1}{\ell} = 0$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} e_n \sin \frac{n\pi (\ell_1 + \ell_2)}{\ell} = 0, \quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi (\ell_1 + \ell_2)}{\ell} = 0, \quad \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \frac{n\pi (\ell_1 + \ell_2)}{\ell} = 0$$

また、断面力は Selberg, Topaloff らの論文にも述べられているように、ハンガー力のみを級数解として与え、つり合いより求める。この方法を用いると、断面力の精度は級数の項数と比較的少く(精度良く)求められる。

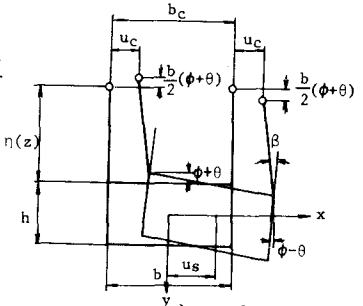


図1 座標と変形

3. 数値計算例

数値計算は南備護国大橋の基本諸元を用いた。風荷重をケーブル、吊構造に対して等分布満載状態とした場合について、図3～図8に連続および2ヒンジ吊橋に関する断面の変形状態、断面力、弦材軸力分布、横構斜材軸力分布を示した。

2ヒンジ吊橋に関しては、

1) 弦材力は $\delta = 15 \times 10^5$ ton 程度の δ 値に対してはほとんど上、下弦材での差を生いない。

2) 横構斜材軸力はかなり δ 値の影響を受けており、中央径間支点上で20%程度下横構が大きくなっている。

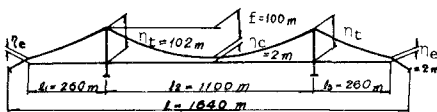


図2 吊橋一般図

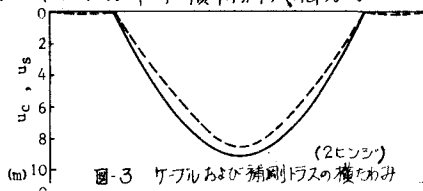


図3 ケーブルおよび補剛トラスの横たわみ (2ヒンジ)

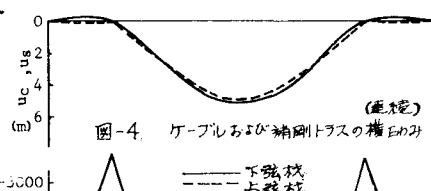


図4 ケーブルおよび補剛トラスの横たわみ (連続)

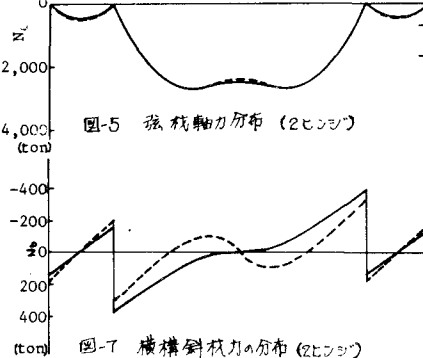


図5 弦材軸力分布 (2ヒンジ)

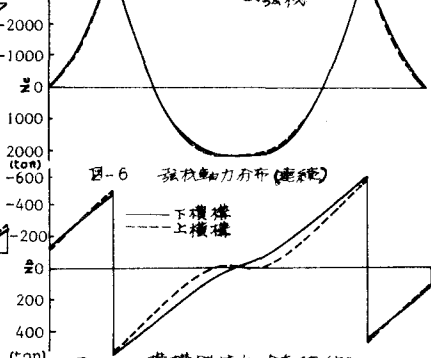


図6 弦材軸力分布 (連続)

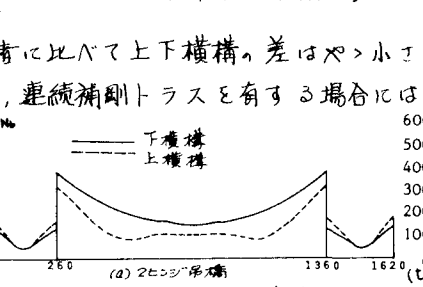


図7 横構斜材力の分布 (2ヒンジ)

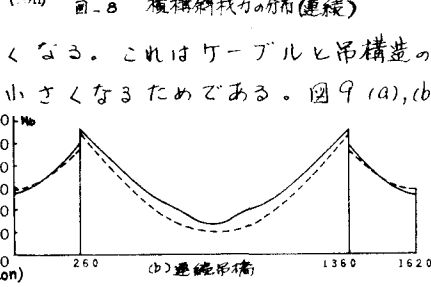


図8 横構斜材力の分布 (連続)

連続吊橋では、前者に比べて上下横構の差は γ が小さくなる。これはケーブルと吊構造の横方向変位の差が、連続補剛トラスを有する場合には小さくなるためである。図9(a),(b)にケーブルに作用する風荷重は全径間に分布するものとし、吊構造

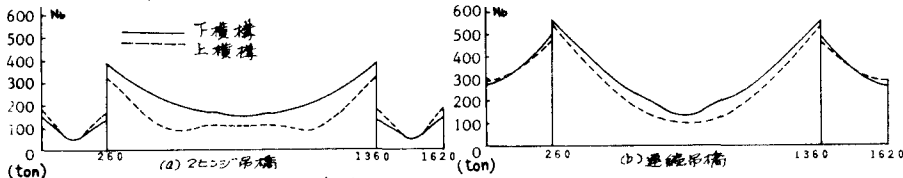


図9 横構斜材力最大値の分布

に作用する風荷重は等分布移動荷重として、2ヒンジおよび連続吊橋の横構斜材軸力の最大値の分布を示した。中央径間では上横構斜材軸力に比して下横構斜材軸力はかなり大きくなっており、とくに δ 値付近では両者の比は2/5程度になっている。この吊橋では側径間が短いので側径間横構斜材軸力は中央径間とは逆の傾向にある。次に対傾構剛性の影響に関しては、上下弦材の応力の差は δ 値が小さくなると必ずしも生ずるが、 $\delta = 10^5$ ton 程度では両者の差は極めて小さい。横構斜材力は δ 値に大きく影響される、 $\delta = 10^3, 10^4, 10^5$ ton とそれぞれについて、上横構と下横構最大軸力の比は $1/3.00, 1/1.438, 1/1.217$ となっている。本橋の場合上下横構の応力の差は δ 値を 10^5 ton 程度に大きくしても2ヒンジでは20%程度の差を解消できない。

4. あとがき スパン長、補剛トラス高、ケーブルと補剛トラス剛性などを用いて無次元化したパラメーターで吊構造の応力分配特性を整理した結果は当日発表する。