

石川島播磨重工業KK。成瀬輝男

同 上 息井信一

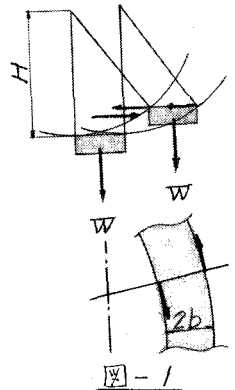
同 上 杉崎 守

まえがき

斜張橋が長空間になると、橋桁の横方向の剛性が問題になる。側面から受ける外力によって主桁が横方向に変位した場合、復原性のある又は吊橋と同じであるが、主桁と斜吊索との荷重分担、すなわち主桁の横曲げが斜吊索の存在によってどの程度軽減されるかについては、明らかでない。そこで、図-4に示すような型式の斜張橋について、解析的・実験的な検討を加えたところを述べる。実際に桁に作用する横力は動的空気力であり、それに対する斜張橋の応答もまた動的なものであるが、ここでは基本的な性質を調べる意味から、静的外力に対する静的応答のみを検討の対象としている。

1. 解法1

この近似的解析では、つぎの仮定を前提としている。(1)主桁の横たわみ量は支間長に比して微小である(2)塔頂は完全固定と考える(3)主桁が横にたわむさい索の長さは変化しない(4)主桁軸力の影響は無視しうる程度に小さい(5)横たわみと同時に生ずる垂直変位は微小であり主桁の曲げ弾性の影響は無視しうる(6)主桁は捩り変形しない。索長に変化がないとすると索の自由端の動く3面は索長 l を半径とする球面である。一方主桁格梁は橋軸に直角な平面内のみ動くから、桁と索の定着点は両面の交線——橋軸に直角な平面内の半径 H の円周上を動く。結局図-1にみるように復原力は索の橋軸直角方向の水平分力に置換されるのでバネで表現できる。これとは別に桁にはもう一つの復原要因がある。横たわみの小さい図-1にみるように桁の格梁は水平面内で回転変位するが、この回転に対して左右2本の索が偶力によって弾性的に抵抗する。この抵抗もまたバネで置換でき、結局横力に対する斜張橋の理想系は図-2のように置換しうる。



$$K_0, K_1, K_2, K_3 \quad \text{バネ定数} \quad K = \frac{2b^2 E c A c \cos \varphi}{l} \quad (\text{kg} \cdot \text{cm})$$

$$k_1, k_2, k_3 \quad \text{バネ定数} \quad k = \text{索張力}/l \quad (\text{kg}/\text{cm})$$

2. 解法2

図-3のような (x, y, z) 座標をとり S 番目のケーブル i, j を取り出す。 i 点の変位は実験の通り $(0, 0, 0)$ であり、 j 点の変位を $(0, dy, dz)$ として、 x 方向の変位は無視する。

ケーブルは $x-z$ 平面内にあり、この時 x, y, z 方向の分力は

$$V_{xs} = H_s = \frac{E c A c \sin \psi_s}{L_s} dy_{x=\lambda s} \quad (\text{ケーブル張力の増分})$$

$$V_{zs} = \frac{H_0 + H_s \cos \psi_s}{L_s} dy_{x=\lambda s} = \frac{H_0 + \frac{E c A c \sin \psi_s}{L_s} dy_{x=\lambda s} \cos \psi_s}{L_s} dy_{x=\lambda s}$$

$$V_{ys} = \frac{H_0 + H_s}{L_s} \cos \psi_s dy_{x=\lambda s} = \frac{H_0 + \frac{E c A c \sin \psi_s}{L_s} dy_{x=\lambda s}}{L_s} \cos \psi_s dy_{x=\lambda s}$$

となる。しかし H_0 はケーブルの初期張力である。上の3つの力 H_s, V_{ys}, V_{xs} の x, y, z 方向の分力は次のようになる。

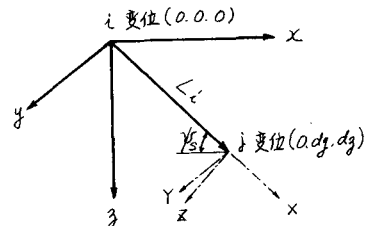


図-3

$$V_{xs} = H_s \cos \psi_s - V_{zs} \sin \psi_s = \frac{EcAcs \sin \psi_s \cos \psi_s}{L_s} d_j - \frac{Hos + \frac{EcAcs \sin \psi_s}{L_s} d_j x = \lambda_s}{L_s} \sin \psi_s \cos \psi_s d_j x = \lambda_s$$

$$V_{ys} = V_{zs} = \frac{Hos + \frac{EcAcs \sin \psi_s}{L_s} d_j x = \lambda_s}{L_s} \cos \psi_s d_j x = \lambda_s$$

$$V_{zs} = H_s \sin \psi_s + V_{xs} \cos \psi_s = \frac{EcAcs}{L_s} \sin^2 \psi_s d_j x = \lambda_s + \frac{Hos + \frac{EcAcs \sin \psi_s}{L_s} d_j x = \lambda_s}{L_s} \cos^2 \psi_s d_j x = \lambda_s$$

図-4のような斜張橋に横荷重が対称に作用した

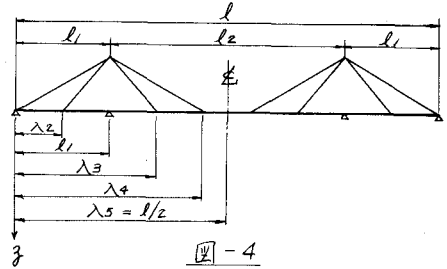
場合の y, z 方向の撓みのモードを

$$dy = \sum a_n (\sin i x - k \sin j x)$$

$$dz = \sum b_n (\sin i x - k \sin j x)$$

$$\text{しかし } i = \frac{n\pi}{l}, j = \frac{(n+2)\pi}{l}, n = 1, 3, 5, \dots$$

$$k = \frac{\sin i l_1}{\sin j l_1}$$



と仮定する。

水平力 P がセンタースパンのみに対称に作用した場合に水平力 P のなす仕事と d_j だけ垂直変位した時自重 W がなす仕事、ケーブルが橋に対してなす仕事およびケーブルの取付点で集中曲げモーメントによってなされる仕事は次のようになる。

$$W = \int_{l_1}^{l_1+l} p dy dx + \int_{l_1+l}^{l_1+l_2} w dz dx - 2 \sum_{s=1}^n V_{zs} d_j x = \lambda_s - 2 \sum_{s=1}^n V_{zs} d_j x = \lambda_s - 4 b^2 \sum_{s=1}^n \left\{ \frac{EcAcs}{L_s} \cos \psi_s (\Delta d_j)^2 \right\}$$

軸力及び曲げモーメントによる歪エネルギーの増加は次のようになる。

$$V = 2 \sum_{s=1}^n \left\{ \left(Hos + \frac{Ns}{2} \right) \frac{Vs}{EA_s} (\lambda_{SH} - \lambda_s) + 2 \sum_{s=1}^n \int_{\lambda_s}^{\lambda_{s+1}} \left\{ Ms \frac{d^2(d_j)}{dx^2} + \frac{EI_z}{2} \left(\frac{d^2(d_j)}{dx^2} \right)^2 \right\} dx + 2 \int_0^{l/2} \frac{EI_x}{2} \left(\frac{d^2(d_j)}{dx^2} \right)^2 dx \right\}$$

しかし

$$N_{s0}; \text{各区分の初期軸力}, N_s = -\sum_{s=1}^n V_{zs}, M_s = Hos + Sox x - \frac{W}{2} x^2$$

$$Mos; \text{各区分一端の初期曲げモーメント}, Sos; \text{各区分一端の初期せん断力}$$

以上より $E = W - V$ を求めて $\frac{\partial E}{\partial a_n} = 0, \frac{\partial E}{\partial b_n} = 0$ を満足する係数 a_n, b_n を求めればよいことになるが、 W, V の計算は非常に複雑であり、 a_n, b_n を求める方程式は非線形となる。しかし、今 H の値を仮定すると、 a_n, b_n は独立となり解法1と同様な計算式となる。この時

$$\frac{\partial E}{\partial a_n} = p \left\{ -\frac{1}{i} \cos i (l_1 + l_2) + \frac{1}{i} \cos i l_1 + \frac{k}{j} \cos j (l_1 + l_2) - \frac{k}{j} \cos j l_1 \right\} - 4 \sum_{s=1}^n \frac{Hos + H_0}{L_s} \cos \psi_s (\sin i \lambda_s - k \sin j \lambda_s) \sum_n a_n (\sin i \lambda_s - k \sin j \lambda_s) - \frac{EI_z}{2} \left\{ (i^4 l + k^2 j^4 l) a_n - k_{n-1} i^4 l a_{n-1} - k_n j^4 l a_{n+1} \right\} - 8 b^2 \sum_{s=1}^n \frac{EcAcs}{L_s} \cos \psi_s (i \cos i \lambda_s - k j \cos j \lambda_s) \sum_n a_n (i \cos i \lambda_s - k j \cos j \lambda_s)$$

で表される。こゝでは実験D-IIIについて計算すると次のようになる。

各デimeンジヨンは3. 横形実験の項に示す通りであり、ケーブルの初期張力は次の通りである。

$$H_{01} = 0, H_{02} = 14.73 \text{ kg}, H_{03} = 13.89 \text{ kg}, H_{04} = 22.03 \text{ kg}$$

$$y = 2.08587 \left(\sin \frac{\pi}{2} x - 0.74223 \sin \frac{3\pi}{2} x \right) + 0.04905 \left(\sin \frac{5\pi}{2} x + 2.532089 \sin \frac{7\pi}{2} x \right)$$

以上のモードより求めた変位が実験より大きめに出てくるのは $H = 0$ と置き、ケーブル張力の増分の影響を無視し、これによって曲げモーメント、せん断力、自重の影響などすべて無視されたことによつていふと思はれる。応力度については実験とよく一致しているが、中間支束附近についてはずれるのは仮定されたモードによる必然的なものと思はれる。

3 模型実験

解析との対比を目的として、図-5に示すような模型によって実験を行なった。斜張索の上端は解析に対応して、桁と関係のない剛な固定点に定着した。

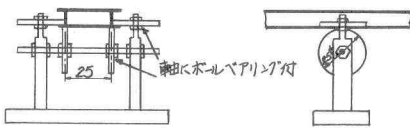
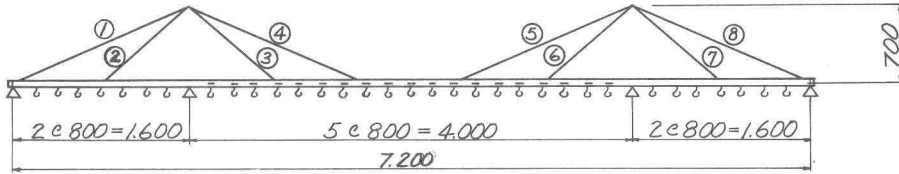


図-6 支承詳細図

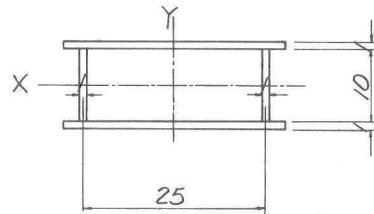


図-5 模型諸寸法
(長さ単位 mm)

構成部材の材料は黄銅であり、弾性係数は桁については単純桁のため試験を行ない $E = 1.13 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、吊桁については別に引張試験を行ない $E = 1.04 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ をえたが、計算にはすべて $E = 1.13 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ を使用した。鉛直・水平の両荷重は等分布荷重の代りに全長 7.2m を 36 等分

主 桁	吊 桁
$I_x = 0.1982 \text{ cm}^4$	2mm ϕ
$I_y = 0.7625 \text{ cm}^4$	$A = 0.0314 \text{ cm}^2$
$A = 0.80 \text{ cm}^2$	

表-1 模型断面諸元

した位置に、すなわち 20cm の等間隔に格点荷重の形で戴荷した。鉛直荷重は適当量の Preload をかけた状態を 0 として 0kg (A) 0.7kg (B) 1.4kg (C) 2.1kg (D) 2.5kg (E) の 5 段階とし、これらの各段階について同じ (格点荷重で 0.2kg (Ⅰ) 0.4kg (Ⅱ) 0.6kg (Ⅲ) の 3 段階の横力を作

用させ、桁の支点および吊桁定着格点の変位と歪、および吊桁の歪を測定した。横力は重錘による鉛直力を滑車で水平に置換する形で得たが、滑車軸受 (ボール

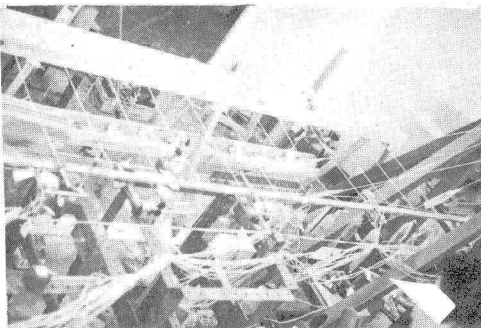


写真-1

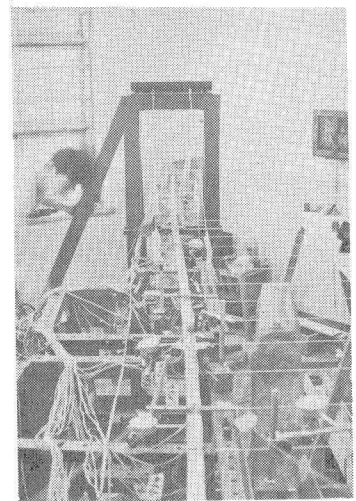


写真-2

ベアリング付)の摩擦による張力損失を5 kg および 0.2 kg の重錘張力についてバネの伸びの相違から照査した結果、平均 8% の張力損失が確認され、この値によって載荷横力の値を補正した。

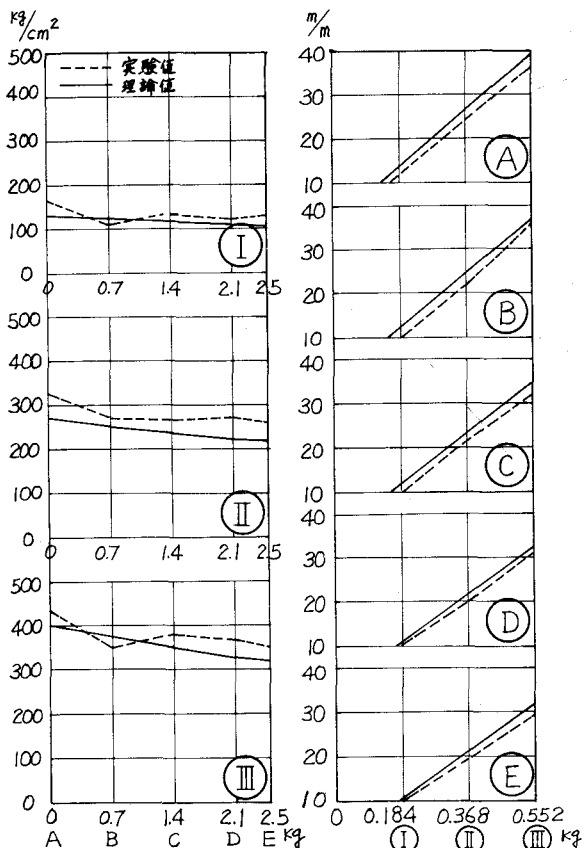


図-7 支間中央横曲が応力 (横力一定 鉛直荷重変化) 図-8 支間中央横撓み (鉛直荷重一定横力変化)

まとめ

吊橋の復原力が主索と吊索の2段構えて構成されるのに対し、斜張橋の復原力は主索から直接作用する点で異なる。支間が長大で索張力も十分に大きく、また横たわみも大きくする場合でないに索による大巾な復原効果は期待しがたいが、ここでは実橋におけるこれらの量的な関係についてはふれていない。また解析法についていえば、変形量が大であるのにかかわらず、数値計算は線形理論によって行っている。非線形理論解との比較および線形理論の適用限界に対する照査はなされていない。これらの残された問題については当日口述したい。ここで扱ったところはすべて図-5のような索を放射状に張った斜張橋を対象にしてゐる。横剛性が問題とされるような長大な斜張橋では、対風安定性の上からも、この型式が最も有利であることを風洞における別実験から判断したためである。また  のようなテーパをつけて索を張った場合についても同様の実験を行ったが、結果の報告は省略する。この場合の復原性は非常に効果的であるが、反面横たわみ時の風上側索の過載荷に注意を要する。最後に本実験に御協力頂いた早大土木工学科平嶋研究室に謝意を表したい。 以上

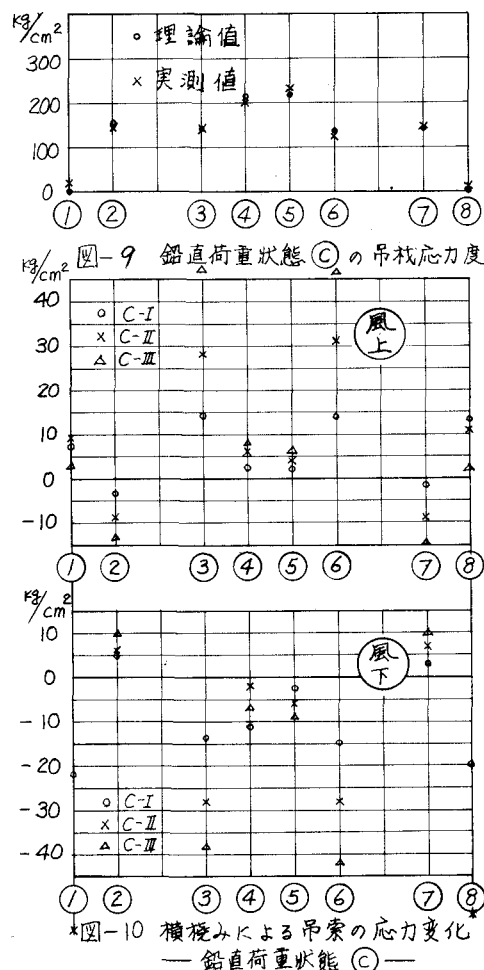


図-9 鉛直荷重状態 C の吊索応力度 図-10 横撓みによる吊索の応力変化 — 鉛直荷重状態 C —