

建設省 道路局 正員 沢井 元之
 近畿地方建設局 ク 旧中 淳之
 大日本コンサルタント ク 小神野 竹男

1. まえがき

架設段階における吊橋のケーブル、補剛トラスに生ずる変形や応力に関する研究は少ない。特に架設時の耐風剛性を増すために、補剛トラスを順次に床合しながら架設する場合には、問題はさらに複雑で、これに関する研究は見当たらない。そこで変形理論を用いて、架設各段階での変形や応力を計算し、架設が進むにつれて、これからどのように変動するかを追跡して、架設中の補剛トラスに過大な応力を生じさせないような架設方法、順序を見い出すと共に、完成時に所定の形状を得るためには架設各時点でどのような形状があるべきかを検討した。

2. 理論解析

ケーブルに作用する荷重をすべて節点荷重に換算し、ケーブルの形状は各節点間では直線であると仮定する。変形後の状態で節点ごとの力の釣合いを考え、次に示す修正を行なう。

1) 垂直方向の修正 ケーブルが(図-1)のような荷重を受けて変化すると、ケーブル張力は次のようになる。

$$T_i = \frac{M_{\max}}{f_{\max}} \times B_i / (x_{i+1} - x_i) \quad (1)$$

この \$M_{\max}\$ は単純梁とした場合の最大曲げモーメント。 \$B_i\$ は変形後のケーブル長。

$$T_i \text{ から無応力長 } C_i \text{ を逆算すると、} C_i = B_i - T_i \cdot C_i / E_c A_c - \alpha \cdot t \cdot L \quad (2)$$

となる。これが実際の無応力長 \$C_i\$ に等しくなければ、

$$\Delta f = \frac{f \cdot \Delta L}{\sqrt{L^2 + 16f^2 + h^2} - L} \quad (3) \quad \text{この } L = \int_0^L \sqrt{1 + (y')^2} dx = \int_0^L \sqrt{\left(\frac{h}{L}\right)^2 + \left(\frac{4f}{L}\right)^2 (1 - 2x/L)^2 + 1} dx$$

$$\Delta L = \sum_{i=1}^n (C_i' - C_i) \text{ でサグを補正し、新しいサグ } f'_{\max} = f_{\max} - \Delta f \quad (4)$$

を用いて(1)以下を計算し、\$| \Delta f | < \epsilon_f\$ (精度) になるまで繰り返す。

2) 水平方向の修正 1) でケーブル伸びが解ると水平張力 \$H_i\$ は、

$$H_i = \frac{E_c A_c (B_i - C_i) (x_{i+1} - x_i)}{B_i \times C_i} \quad (5) \text{ で計算できる。}$$

この水平張力 \$H_i\$ は、全径間を通じて同じ値でなければならぬが、変形が正しく求められていないときは、 $\Delta H_i = |H_i - H_{\text{mean}}| > \epsilon_h \quad (6)$

の差が残っている。この誤差は、ハンガー間隔を補正し、新しいハンガー間隔を

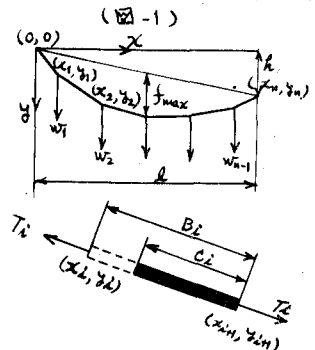
$$x_i' = x_i - \Delta H_i \cdot x_i / E_c A_c \quad (7) \text{ として } | \Delta H_i |_{\max} < \epsilon_h \text{ になるまで(1)~(7)式を繰り返せば}$$

よい。なお、多径間の場合の \$\Delta H_i\$ による \$x_i\$ の修正は全径間を通じて行ない、\$\Delta f\$ の修正は各径間ごとに行なわなければならない。

3) 補剛桁の曲げモーメント 架設完了時のケーブルのたわみを \$q_{c_i}\$、ハンガーの伸びを \$q_{h_i}\$、ハンガー間隔を入い、補剛桁の断面は次モーメント \$I x_i\$ とすれば、補剛桁の変形は \$q_{g_i} = q_{c_i} + q_{h_i}\$ である。この \$q_{g_i}\$ によって補剛桁には次に示す曲げモーメントが生ずる。

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \vdots \\ M_{n+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_0, 2(K_0 + K_1), K_1 \\ K_1, 2(K_1 + K_2), K_2 \\ \vdots \\ K_n, 2(K_n + K_{n+1}), K_{n+1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{x_1}, -(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}), \frac{1}{x_2} \\ \frac{1}{x_2}, -(\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3}), \frac{1}{x_3} \\ \vdots \\ \frac{1}{x_n}, -(\frac{1}{x_n} + \frac{1}{x_{n+1}}), \frac{1}{x_{n+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{g_0} \\ q_{g_1} \\ \vdots \\ q_{g_{n+2}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{この } K_i = \frac{\lambda_i}{6 E I x_i}$$



4) 荷重の分配 補剛桁が補剛化されている区間に荷重が載荷されると、その一部 P_{si} は補剛桁に作用し、残りの $P_{ei} = P_i - P_{si}$ はハンガーを伝ってケーブルに作用する。この荷重の配分は分配マトリックスによってなされる。 P_{si} による補剛桁の変形(η_{si})が、ケーブルとハンガーの変形から求めた補剛桁の変形($\eta_{ei} + \eta_{si}$)と一致すれば、荷重の分配が正しくなれたことになるが、そうではない場合は、分配マトリックスで荷重分配率を修正し、 $|\eta_{ei} - \eta_{si} - \eta_{ei}|$ にとなるまで繰り返して計算する。

3. 計算例

幾つかの吊橋について、架設各段階での変形や架設応力を計算したが、ここでは(図-2)に示す吊橋について(図-3)の順序で架設した計算例にとめる。この計算例での架設途上にある補剛桁最大応力は、設計応力の30%程度、完成時にはほぼ零となった。(図-5参照)これは主ケーブルのサグ、ハンガー長などをあらかじめ調整しておいたためである。しかし補剛桁の剛性や載荷位置の如何によつては、許容応力を上回る応力が生ずることもありうるので、吊橋架設に際しては、架設方法を種々検討し、架設各段階での変形や応力等について危険な状態とならないよう十分な配慮が必要である。なお吊橋架設完了時のケーブル形状は、(図-6)の如くカテナリーに近いことが解った。一般に短径間の吊橋はケーブル自重に比べ吊構造部の死荷重が大きいのでパラボリックに近くなるが、長径間吊橋の場合はカテナリーでもパラボリックでもない形状をなしているようである。

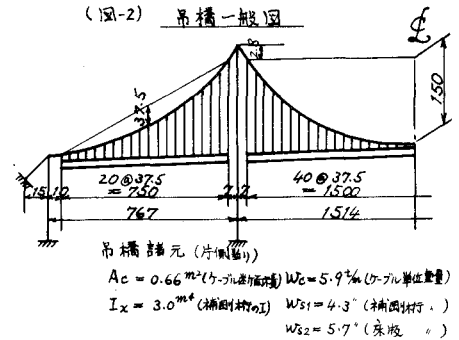
この計算では無応力長を厳密に計算したが、近似的にパラボリックと仮定して完成時のケーブル長から単純に弾性伸び分を差し引いたものを無応力長とした場合の、吊橋完成時の補剛桁に生ずる残留応力を計算したものが(図-7)である。但し、この計算での全死荷重は橋軸水平方向に等分布載荷とせた。

最後に、プログラムの開発に終始御援助下さった法政大学大坪三教授に感謝の意を表します。

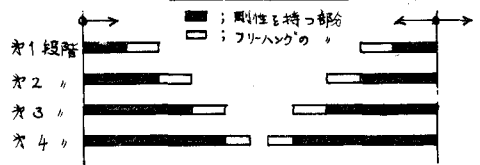
(参考文献)

- 1) Broton, D. M. and Arnold - The Solution of Suspension Bridge Problems, The Structural Engineer, London, England, July, 1963.
- 2) Broton, D. M. - A. General Computer Programme for the Solution of Suspension Bridge Problems, Structural Engineer, May, 1966.

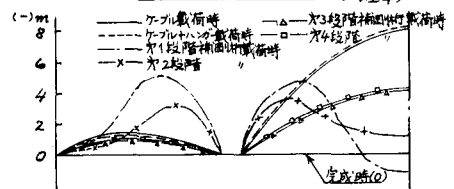
(図-2) 吊橋一般図



(図-3) 補剛桁架設順序図 (左右対称)

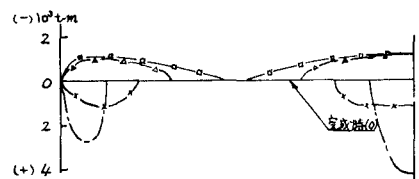


(図-4) 架設各段階の変形図 (完成時基準)

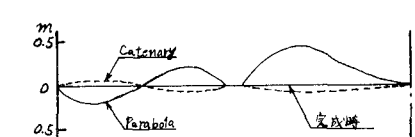


(図-5) 架設各段階の曲げモーメント図

記号は(図-4)に同じ



(図-6) 吊橋完成時のケーブル形状図



(図-7) 近似解析による補剛桁の残留曲げモーメント図

