

東日本鉄工 正会員 ○山田 稔
 東京都立大学 正会員 野上邦栄
 東京都立大学 正会員 伊藤文人

1. まえがき 吊橋平行線ケーブルの滑り挙動に関する研究としては Wyatt⁽¹⁾, 西村新家⁽²⁾⁽³⁾, 伊藤の論文がよく知られている。が、今般に塔頂サドル上に発生する素線相互の滑り挙動について、理論的論文及び数値計算から解析している論文は見あたらない。本報告は伊藤の理論を基礎に塔頂サドル上における平行線ケーブルの滑り層発生挙動、特に主ケーブルに発生する滑り線パターン、滑り線長さに注目し理論と数値計算(有限剛体要素モデル⁽⁴⁾)による解析)の両面から比較検討したものである。

2. サドル上層間圧力 主ケーブルがサドル上で方向を変えることにより生じる素線間圧力は、図-1より微小要素の層間圧力 $dP = \frac{2 \sin \theta \cdot dN_0}{2\theta(R+y)} \approx \frac{dN_0}{R+y}$ —(1) で与えられるから、任意部の層間圧力は $P = n_0 \cdot \log \left[\frac{1}{1 - \frac{2}{R+y}} \right]$ —(2) になる (n_0 は単位張力)。今限界摩擦せん断応力度を τ^* 、摩擦係数を μ 、ケーブルの死荷重応力によるワイヤ応力度を σ_0 とすると、式(2)の級数近似より $\alpha = \eta / (R+y)$ とおいて $\tau^* = \mu \sigma_0 \left(\alpha + \frac{\alpha^2}{2} \right)$ —(3) で与えられる。

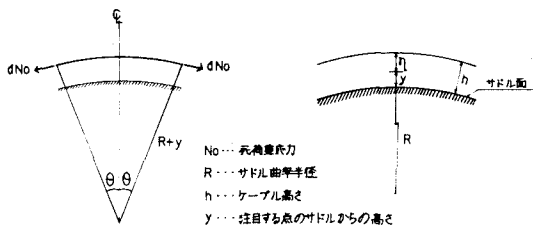


図 - 1

3. 多層滑り理論 理論解析にあたっては、ケーブルを多層に分割し滑り線を想定し、その滑り線の先端で張力と滑っている部分の摩擦力が釣り合うという前提により 釣り合う程式を立てる。考えている部分は半無限長ケーブルの端部とし、片側の張力のみに影響を受ける。一層の厚さを $d\eta$ 、端部張力 N は応力 σ_e を用いて $\sigma_e \cdot d\eta$ と表わす。予想される滑り線パターンについて以下の関係を得る。(図-2)

(Pattern-1) $\sigma_B / \sigma_T > 0$
 (Pattern-1) $\sigma_e(\eta) \cdot d\eta = d\tau^* [l(\eta) \cdot d\eta] = l(\eta) \cdot d\tau^*$ —(4) より
 任意深さの滑り線長さ $l(\eta) = \sigma_e(\eta) / [d\tau^* / d\eta]$ —(5)

(Pattern-2) サドル上及び最外層滑り線長さ l_B , l_0 はそれぞれ
 次式により求まる $\int_0^{l_0} \sigma_e(\eta) d\eta = -l_B \cdot \tau_B^*$ —(6)

$l_0 = (\sigma_e(0) - \frac{1}{h} \int_0^h \sigma_e(\eta) d\eta) / [d\tau^* / d\eta]_{\eta=0} + \tau_B^* / h$ —(7)
 中間部(深さ η)の滑り線長さ $l(\eta)$ は

$\{ \tau_B^* + \tau_B^* + (h-\eta) \frac{d\tau^*}{d\eta} \} \frac{d\eta}{d\eta} + (h-\eta) \frac{d^2 \tau^*}{d\eta^2} l(\eta) = (h-\eta) \frac{d\sigma_e}{d\eta}$ —(8)

において端条件を $\eta=0$ で $l=l_0$ とし求める。

(Pattern-3) Pattern-3は図からも明らかなように Pattern-1と Pattern-2の中間的性格を有している。 τ_B^* の影響を受け始める深さを η_0 とすると、 η_0 と σ_B , σ_T の間に次の関係が導かれる。

$(\eta_0/h) = (2\sigma_T - \sigma_B - \sqrt{\sigma_T^2 - 2\sigma_T \sigma_B + 2\sigma_B^2}) / (\sigma_T - \sigma_B)$ —(9)

式(9)は $-3\sigma_T < \sigma_B < 0$ の範囲が対応する。従って滑り線パターンと張力分布の関係も図中に示した値が対応する。滑り線長さは $\eta < \eta_0$ の範囲では式(5)、サドル上滑り線長さは $l_B = l(\eta_0) = \sigma_e(\eta_0) / [d\tau^* / d\eta]_{\eta=\eta_0}$, $\eta > \eta_0$ の範囲では式(8)において端条件を $\eta=\eta_0$ で $l(\eta_0)=l_B$ とし導出することができる。

4. 剛体要素モデルによる解析 有限剛体要素モデル(図-3)での解析にあたり、次の仮定を導入している。(1) ケーブル素線の変形は活荷重状態を考える。

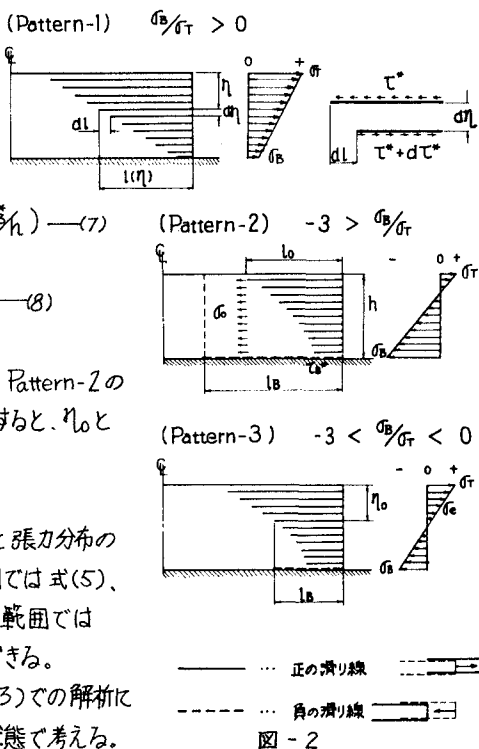


図 - 2

(2) 索線は互いに平行とする。(3) 滑りの発生は索線間に働くせん断応力度が限界摩擦せん断応力度に達した時である。(4) 限界摩擦せん断応力度はケーブル軸方向一定。(5) 変形後もケーブル断面形は変化しない。(6) 活荷重は側径間側と中央径間側で対称荷重とする。有限剛体要素モデルは、ケーブルを剛体要素に分割し、これらの接触境界面で相対変位を拘束する2種類のばね、軸力に関する伸びばね k_{ij}^e 、滑りに関するせん断ばね k_{ij}^s を用いて連結する。剛要素の変形や力の伝達はこれらのばねを介して行われる。変位・部材力は各要素の重心点で考えればよく、自由度数は F, E, M に比べ少なくすむ。

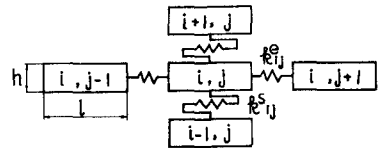
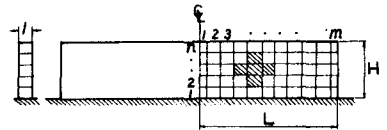


図-3

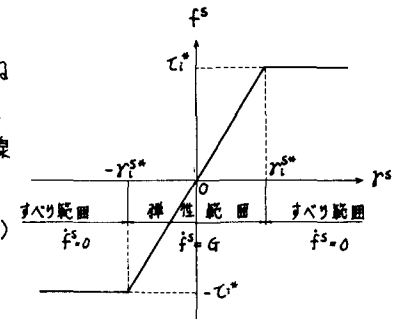


図-4

ばね定数は要素を連続体とみなした時の歪エネルギーと有限剛体要素モデルのばねの歪エネルギーが等価になるように決定し、さらに着目しているのが塔頂サドル上のケーブルの滑り挙動であることから伸びばねに関しては線形ばねとし、このばね定数は $k_e = \frac{(m-1) \cdot E \cdot A_h}{L}$ で与えられ、せん断ばねは完全弾塑性的挙動をする材料非線形を考慮した非線形ばねとし、せん断ひずみを $\gamma_{ij}^s = (u_{ij} - u_{i-1,j}) \cdot n/H$ で与える。図-4。ここで E はヤング係数、 A_h は伸びばねの係る面の断面積、 u_{ij} は要素 (i,j) の変位、 m はケーブル軸方向分割数、 n はケーブル半径方向分割数とする。

本解析モデルでの全ポテンシャルエネルギーは次式で与えられる。

$$\Pi = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2} k_e \alpha_{ij}^2 \right) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\int_0^{\gamma_{ij}^s} f_{ij}^s(\gamma_{ij}^s) d\gamma_{ij}^s \right] - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot u_{ij} \quad (10)$$

ここで $\alpha_{ij} = u_{i,j+1} - u_{ij}$, $\gamma_{ij}^s = u_{ij} - u_{i-1,j}$ 。

従って Π の変数による第1変分より釣合方程式が次式のように得られる。

$$-k_e u_{i,j-1} + 2k_e u_{ij} - k_e u_{i,j+1} + f_{ij}^s - f_{i-1,j}^s - P_{ij} = 0 \quad (11)$$

この式を Newton-Raphson 法により解き、変位、ばね力の収束計算を行い滑りの判定を行った。

5. 解析結果 分割要素の寸法は正方形になるほど収束性が良かった。種々の活荷重状態に対して滑り線パターンは理論と良い一致を示した(図-5)。滑り線長さについては理論値に比べ解析値は小さめの値となった(図-6)。さらに実際の吊橋に作用する活荷重状態を考え、本解析結果からサドル中央部まで滑り線が到達することはないものと思われる。

文献：(1) Wyatt: "Secondary Stress in Parallel Wire Suspension Cable," A.S.C.E. V1.128 No.3 402-1963

(2) 西村・新家他: "ワイヤラップされた吊橋平行線ケーブルの二次応力

解析," J.S.C.E. No.288 1978 (3) 土木学会・ケーブル学会 "吊橋のケー

ブルに関する検討," J.53.3 (4) 野上・伊藤 "有限剛体要素モデルによる柱の耐力力解析," 第30回 応用力学連合論文集 1980.

