

I-434

送電線の振動特性に及ぼす碍子の影響

九州大学 工学部 成 員 小坪 清真
佐賀大学 理工学部 成 員 井嶋 克志
九州大学 工学部 学生員 ○畑元 浩樹

1、まえがき

著者らは、これまでに鉄塔・送電線系の地震応答解析法として、鉄塔及び送電線それぞれの振動形を求めたのち、鉄塔には基礎の地動変位と送電線の付加張力が外力として働き、送電線にはその支持点変位が鉄塔から与えられるものとして、両者の連成振動として振動形解析法により解析する方法を示した¹⁾。その解析法では、碍子は単に鉄塔の腕金に付加した質量として鉄塔の振動形を求め、送電線は一樣ケーブルとしてその振動形を求めている。しかし、実在の鉄塔・送電線系において、碍子の重量は送電線に比べて非常に大きく、送電線・碍子系の振動特性は送電線のみ振動特性と異なると考えられる。また、碍子の振動により鉄塔腕金に作用する張力も、碍子を単に鉄塔腕金への付加質量として見積る場合とは異なると思われる。従って、本研究では送電線の振動特性に及ぼす碍子の振動の影響を求めるために、送電線・碍子系の自由振動解析を行った。解析法としては、碍子及び送電線部分の変位をそれぞれ sin 級数で仮定し Galerkin 法を用いてそれぞれの変位モードおよび付加張力モードを求め、碍子と送電線それぞれに振動形解析法を適用して解析を行うものである。

2、理論解析

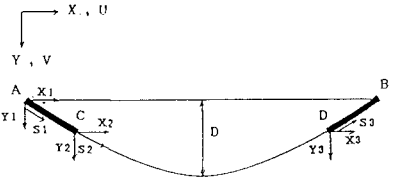
解析は次の仮定のもとに行った。1) 送電線及び碍子は完全可撓性とし、曲げ剛性は考慮しない。2) 送電線及び碍子の伸張性は線形の範囲で考慮する。3) 送電線及び碍子の動的付加張力はその初期張力を超えるほどにはならない。4) 架線の変位もスパンに比べて十分に小さく、微小振動を仮定し、線形振動とした。

図-1 の座標系のもとに、架線要素の鉛直面内振動における運動方程式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial T^2} &= \frac{\partial}{\partial S_i} \left\{ \left[H \frac{dS_i}{dX_i} + E_i A_i \left(\frac{dX_i}{dS_i} \right)^2 \right] \frac{\partial U_i}{\partial S_i} + E_i A_i \frac{dX_i}{dS_i} \frac{dY_i}{dS_i} \frac{\partial V_i}{\partial S_i} \right\} \\ \rho_i \frac{\partial^2 V_i}{\partial T^2} &= \frac{\partial}{\partial S_i} \left\{ E_i A_i \frac{dX_i}{dS_i} \frac{dY_i}{dS_i} \frac{\partial U_i}{\partial S_i} + \left[H \frac{dS_i}{dX_i} + E_i A_i \left(\frac{dX_i}{dS_i} \right)^2 \right] \frac{\partial V_i}{\partial S_i} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 U_i, V_i は水平及び鉛直変位、 X_i, Y_i は碍子及び送電線の初期形状における水平及び鉛直座標値、 S_i は架線に沿う距離、 T は時間、 H は初期水平張力、 ρ_i 及び $E_i A_i$ は架線の単位長さ当りの質量、伸び剛性である。ここに、 $i=1, 3$ は碍子部分、 $i=2$ は送電線部分を表す。

図-1 送電線・碍子の座標系
(AC, DB: 碍子部分)



送電線及び碍子部分において、両端固定の境界条件のもとに水平及び鉛直変位を次式のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} U_i(T, S_i) &= \sum_{n=1}^{\infty} a_{ni} \sin \frac{n\pi S_i}{S_{0i}} \cdot \exp(i\Omega T) = \bar{U}_i(S_i) \cdot \exp(i\Omega T) \\ V_i(T, S_i) &= \sum_{n=1}^{\infty} b_{ni} \sin \frac{n\pi S_i}{S_{0i}} \cdot \exp(i\Omega T) = \bar{V}_i(S_i) \cdot \exp(i\Omega T) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 S_{0i} は碍子及び送電線の全長、 Ω は円振動数である。式(2)を用いて固有値解析することにより、 j 次の固有円振動数 Ω_{ij} および変位モード $\bar{U}_{ij}(S_i), \bar{V}_{ij}(S_i)$ が得られる。一方、送電線及び碍子の j 次のモードにおける付加張力の水平成分 $\bar{T}_{ij}^H(S_i)$ 、鉛直成分 $\bar{T}_{ij}^V(S_i)$ は式(2)を式(1)の右辺に代入し S_i について積分すれば求まる。

次に、振動形解析法により送電線及び碍子についてそれぞれの運動エネルギー、ひずみエネルギーを求め、これを Lagrange の運動方程式に代入すれば、送電線及び碍子の j 次の基準座標 Ψ_{ij} に関する非減衰の運動方程式が次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\Psi}_{ij} + (\Omega_{ij})^2 \Psi_{ij} &= -\beta_{ij}^{uc} \ddot{\Delta}_c^u - \beta_{ij}^{vc} \ddot{\Delta}_c^v \\ \ddot{\Psi}_{2j} + (\Omega_{2j})^2 \Psi_{2j} &= -\beta_{2j}^{uc} \ddot{\Delta}_c^u - \beta_{2j}^{vc} \ddot{\Delta}_c^v - \beta_{2j}^{ud} \ddot{\Delta}_d^u - \beta_{2j}^{vd} \ddot{\Delta}_d^v \\ \ddot{\Psi}_{3j} + (\Omega_{3j})^2 \Psi_{3j} &= -\beta_{3j}^{ud} \ddot{\Delta}_d^u - \beta_{3j}^{vd} \ddot{\Delta}_d^v \end{aligned} \right\} (3)$$

ここに、 $\beta_{ij}^{uc}, \beta_{ij}^{vc}$ は、 $i=1, 3$ のとき碍子及び $i=2$ のとき送電線部分でのC点（DはD点の場合を示す）の右向き水平変位（U）および鉛直変位（V）に対するj次の刺激係数を表す。 Δ_c^U, Δ_c^V と Δ_d^U, Δ_d^V はC点とD点の水平および鉛直変位である。式（3）において、 $\Delta_c^U = \Delta_c^U \cdot \exp(i\Omega T)$ 、 $\Delta_c^V = \Delta_c^V \cdot \exp(i\Omega T)$ 、 $\Delta_d^U = \Delta_d^U \cdot \exp(i\Omega T)$ 、 $\Delta_d^V = \Delta_d^V \cdot \exp(i\Omega T)$ 、 $\Psi_{ij} = \Psi_{ij} \cdot \exp(i\Omega T)$ と仮定し、C点およびD点で接続している送電線端と碍子端の付加張力は等しいという条件より、送電線・碍子系の固有円振動 Ω_j 、基準座標の振幅値 Ψ_{ij} が求まる。

3、数値計算結果

送電線のみの場合（Case 1）及び送電線・碍子の場合（Case 2）について自由振動解析を行うことにより、それぞれのCaseの固有振動数、変位モード、水平付加張力モードを求めた。Case 1, Case 2ともに両支持点は同レベルとし、Case 2において両側の碍子は同一のものとした。Case 1では送電線全長 $S_0 = 504.5\text{m}$ 、サグ $D=30.3\text{m}$ 、送電線の単位長さ当りの重量 $\rho_2 g = 10.8\text{kgf/m}$ 、送電線の伸び剛性 $E_2 A_2 = 1.828 \times 10^7 \text{kgf}$ とし、初期水平張力 $H=11.18\text{tf}$ である。一方、Case 2では碍子全長 $S_{01} = 6.0\text{m}$ 、送電線全長 $S_{02} = 492.5\text{m}$ 、サグ $D=30.8\text{m}$ 、碍子の単位長さ当たりの重量 $\rho_1 g = 334.4\text{kgf/m}$ 、碍子の伸び剛性 $E_1 A_1 = 1.372 \times 10^7 \text{kgf}$ とし、 $\rho_2 g$ 、 $E_2 A_2$ および H はCase 1と同じものとする。

Case 1, Case 2それぞれの固有振動数、変位モード及び無次元化した水平付加張力モードを図-2に示す。

図より、送電線のみの場合を見てみると、低振動数域の横波の対称モードにおける水平付加張力は6次が非常に大きく、また縦波のモードは41次となっている。一方、送電線・碍子系の水平付加張力は、低振動数域においては11次の横波の対称モードが非常に大きく、送電線のみの場合と比べてやや大きな値となっている。また、縦波のモードは46次であり、その水平付加張力は送電線のみの場合に比べて小さい。

<参考文献> 1) 小坪清真 他：鉄塔-送電線系の地震応答解析法，第18回地震工学研究発表会

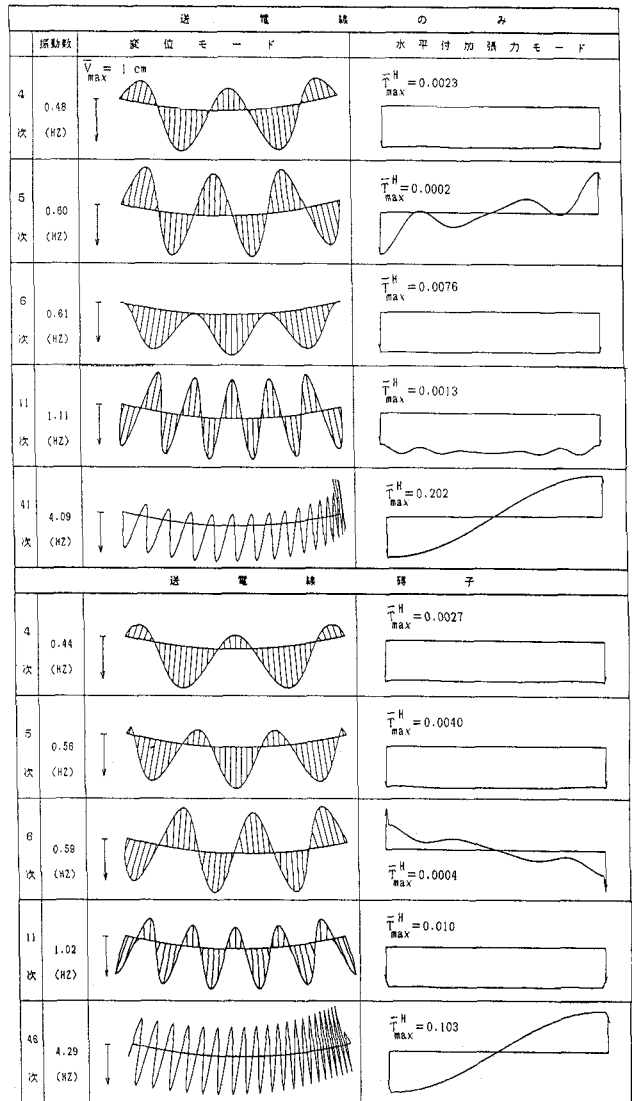


図-2 変位モードおよび水平付加張力モード