

I-32

ケーブルのばね定数の簡易解析法

九州大学 正員 小坪 清真
 九州工業大学 正員 高西 照彦
 九州大学 学生員 井嶋 克志
 〃 正員 園田 敏夫

1. まえがき 著者らは送電線により連結された超高送電鉄塔の地震に対する応答特性解析のため、送電線と鉄塔に連結されたばねと見なし、連続体としての送電線の線形理論より、そのばね定数の振動数特性を求めてきた。その結果、鉄塔の地震応答の対象となる約6 Hz以下の振動数領域で、送電線は数多くの共振点を持ち、そのばね定数の振動数特性曲線には幅の狭いピークや幅の広いピークがあり、性状が複雑であった。しかし、そのばね定数の振動数特性曲線は、一定の振動数をもつ一端の強制水平変位に対する動的付加張力の応答を示すものであって、地震波が地盤より鉄塔を通して送電線に伝わる場合には、一定の振動数が送電線に長時間作用することではなく、その特性曲線の幅の狭いピークは実際には成長しないことがわかった。したがって、送電線のばね定数の振動数特性はその特性曲線の幅の広いピークに対応するモードにより支配される。

本研究は、あらかじめ送電線のばね定数の特性曲線の幅の広いピークに対応するモードの無次元固有円振動数 $\omega_f = \Omega_f / \Omega_0$ (ここに、 Ω_f は固有円振動数、 $\Omega_0 = (\pi/L) \sqrt{H/P}$ は張力Hで張られた送電線のスパンと同じ長さLの弦の基準円振動数、Pは送電線の単位長さ当り質量)、送電線両端の無次元水平付加張力モード値 $\bar{R}_f(0)$ および $\bar{R}_f(0)$ (ここに、 $\bar{R}_f$ は送電線の初期水平張力により無次元化されており、0は送電線のスパンLで無次元化した送電線の無次元長さ) および減衰係数 ξ_f を求めておき、振動形解析法により容易に送電線のばね定数の振動数特性を求める方法を示したものである。

送電線の鉄塔に対するばね作用としては、線路方向と線路垂直方向があるが、ここでは、線路方向の微小振動を仮定し、鉛直面内振動のみを考えた。また、解析においては、送電線は同レベル支持とし、碍子は無視し、送電線は一様とした。

2. 送電線のばね定数の簡易計算法 一般の構造物の強制振動に対する応答を振動形解析法を用いて求める場合、目的とする振動数までに現われる固有振動数および固有モードは全て採用される。しかし、鉄塔の地震応答解析の奥から、送電線のばね定数の振動数特性を求めるためには、数多く存在する固有モードのなかで、その特性曲線の幅の広いピークに相当する3~5つのモードを採用すればよい。なお、たとえ低振動数領域にあっても、解の精度の奥から、その振動数より高次の幅の広いピークに相当するモードも用いなければならぬ。

振動形解析法において、採用するモードの個数をNとすると、送電線両端の無次元ばね定数 $R = K/(H/L)$ (ここに、Kは送電線のばね定数) は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} R_f(\omega) &= \sum_{j=1, n_1, n_2, \dots}^N \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 \frac{\beta_j \bar{R}_f(0)}{1 - (\omega/\omega_j)^2 + 2i\xi_j(\omega/\omega_j)} + R_0 \\ R_e(\omega) &= \sum_{j=1, n_1, n_2, \dots}^N \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 \frac{\beta_j \bar{R}_e(0)}{1 - (\omega/\omega_j)^2 + 2i\xi_j(\omega/\omega_j)} + R_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $n_1, n_2, \dots$ はばね定数の特性曲線の幅の広いピークに相当するモードの次数、 β と $\bar{R}$ はそれぞれ送電線の固定点と強制変位点の無次元ばね定数を表わすサフィックス、 ξ_j は減衰定数、 $\bar{\delta} = \Delta/L$ は送電線の支持点に与えられる無次元水平強制変位の振動値である。また、 $R_0 = K_0/(H/L)$ は送電線の無次元の静的ばね定数で、送電線両端で等しく、次式で表わされる。

$$R_0 = \alpha / \left[\alpha + \frac{1}{\nu^2} \left\{ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}(\operatorname{sech} \alpha) \right\} - \tanh \alpha - \frac{1}{\nu^2 \sqrt{\nu^4 - 1}} \ln \left(\frac{\nu^2 \cosh \alpha + 1 + \sqrt{\nu^4 - 1} \sinh \alpha}{\cosh \alpha + \nu^2} \right) \right]$$

ここに、 $\alpha = \rho g L / (2H)$ (ρg は送電線の単位長さ当り重量)、 $\nu = \sqrt{EA/H}$ (EA は送電線の伸び剛性) で

ある。

式(1)において採用される特性曲線の幅の広いピークに対応するモードは次のように選ばれる。

a. 低振動数領域における特性曲線の幅の広いピークに対応するモード

送電線の無次元固有円振動数、無次元水平付加張力モード値、刺激係数は $\rho g L / (8H) = \alpha/4$ と $\nu = \sqrt{EA/H}$ の2つのパラメータで決まる。ここに、 $\rho g L / (8H)$ は送電線の初期形状を放物線と仮定すると送電線のサグ比 D/L (D はサグ) に等しい。また、 ν は送電線の縦波と横波の伝播速度比である。

実在の送電線 ($\rho g L / (8H) = 0.06$ および $\nu = \sqrt{EA/H} = 40.5$) の厳密な無次元ばね定数を図-1に示す。図中、横軸の $\omega = 1$ は 0.65 rad/sec に対応する。図-1(b) は図-1(a) の $0 \leq \omega \leq 10$ の振動数領域を拡大したもので、図中の $S_1 \sim S_5$ は対称モードの共振点であり、 $A_1 \sim A_4$ は逆対称モードのそれである。図から明らかなように、逆対称モードに相当するピークの幅は非常に狭く、対称モードのそれは広い。

この低振動数領域における対称モードの無次元固有円振動数および無次元水平付加張力モード値と刺激係数の積を $\rho g L / (8H)$ と $\nu = \sqrt{EA/H}$ の2つのパラメータに従って求めた一例を図-2(a)(b)に示す。送電線両端の無次元水平付加張力モード値は、送電線の無次元鉛直変位 $\bar{v}_{\max} = \bar{v}_{\max} / L$ ($\bar{v}$ は送電線の鉛直変位) のときの値である。また、刺激係数 β_j は送電線一端の無次元強制変位の振幅値が $\bar{\delta} = \bar{\Delta} / L = 1$ のときの値である。

式(1)に採用されるモードは、 $\rho g L / (8H)$ と ν の値に従って、まず図-2(b) より $-\beta_j \bar{F}_j(0)$ が大きい値から読みとり、その読みとられたモードに対応する無次元固有円振動数を図-2(a)から読みとればよい。

b. 高振動数領域における特性曲線の幅の広いピークに対応するモード

図-1(a)において、 $\omega \geq 10$ の振動数領域では、送電線の縦波の共振点である ω_b 以外のピークの幅は非常に狭い。この ω_b に対応するモードの無次元水平付加張力と刺激係数の積を $\rho g L / (8H)$ と $\nu = \sqrt{EA/H}$ の2つのパラメータに従って求めた一例を図-3に示す。 $\beta_b \bar{F}_b(0)$ は縦波の共振点である ω_b に対応し、 ω_b の隣りの逆対称モードの共振点に対応する $\beta_b' \bar{F}_b'(0)$ と一印で接している。本来、縦波と横波は独立するものであるが、 ν の値により、縦波の共振点と逆対称モードの横波の共振点が近接する場合、それぞれの無次元水平付加張力モード値は等しくなる。

式(1)に採用されるモードは、 $\rho g L / (8H)$ と ν の値に従って図-3より $\beta_b \bar{F}_b(0)$ および ν の値に応じて $\beta_b' \bar{F}_b'(0)$ を読みとればよい。なお、縦波の無次元共振円振動数 ω_b は ν に等しく、また、 $\beta_b \bar{F}_b(0)$ に対応する ω_b も ν にほぼ等しい。送電線のばね定数の数値計算例については、講演時に発表する。

