

九州大学 正会員 小坪清真 園田敏矢
 〃 〃 〇井嶋克志
 九州工業大学 〃 高西照彦

1. まえがき 著者は鉄塔と送電線の動的相互作用を考慮した合理的な鉄塔の地震応答解析のため、送電線をばねと見なし、送電線両端のばね定数の振動数特性を求めてきた。その結果、鉄塔の地震応答解析の対象となる振動数領域で送電線は数多くの共振系を持ち、そのばね定数の振動数特性曲線は幅の狭いピークや幅の広いピークを持ち、性状が複雑であった。しかし、送電線の地震に対する張力応答には、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みが支配的であり、幅の狭いピークに対応するモードはほとんど影響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幅の広いピークに対応するモードのみによって決まる。

本研究は、種々の送電線についてこれらのモードの固有円振動数、水平付加張力および送電線一端の面内水平変位に対する刺激係数を、送電線の形状および材料特性を表わす2つの無次元パラメーターによって計算し、振動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。なお、送電線の鉄塔に対するばね作用としては、線路方向と線路直角方向があるが、ここでは鉛直面内の微小振動を仮定し、線路方向のばね作用のみを考えた。また、解析においては、送電線は同レベル支持であり、一様等断面とした。

2. 送電線のばね定数の簡易計算法 振動解析法において採用するモードの個数を N とすると、送電線の固定長（サフィックス）と強制変位長（サフィックス e ）での無次元ばね定数 $k = K/(H/L)$ （ここに、 K ：ばね定数、 H ：送電線の初期水平張力、 L ：送電線の支間）は次式で表わされる。

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

ここに、 $\omega = \Omega/\Omega_0$ ：無次元円振動数、 $\Omega_0 = (\pi/L)\sqrt{H/\rho}$ ：初期張力 H 、スパン L の弦の基準円振動数、 ρ ：送電線の単位長さ当り質量、 ω_j, ξ_j, β_j ：それぞれ j 次の無次元固有円振動数、減衰定数、刺激係数、 $\bar{F}_j(0), \bar{F}_j(0)$ ：初期水平張力 H で無次元化された送電線両端の水平付加張力モードである。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、 $\alpha = \rho g L / (2H)$ および $\nu = \sqrt{EA/H}$ (EA は送電線の伸び剛性) である。

式(1)には、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み採用され、それらのモードは低振動数域におけるいくつかの横波の対称モードと主に高振動数域の縦波のモードである。これらのモードの $\omega_j, \beta_j \bar{F}_j(0)$ および $\beta_j \bar{F}_j(0)$ は種々の送電線について $\rho g L / (8H)$ と $\nu = \sqrt{EA/H}$ の2つの無次元パラメーターに対して計算された結果から得られる。一方、減衰定数 ξ_j は、送電線の運動に対する空気抵抗や鉄塔への送電線の振動エネルギーの逸散等により見積られるべきであるが、現在のところまだ不明であり、今後の課題と思われる。ただ、Irvine は2%かそれ以上と述べている。

(a) 低振動数域における ω_f および $\beta_f \bar{F}_f(0)$ 低振動数域における対称モードの無次元水平付加張力と刺激係数の積 $\beta_f \bar{F}_f(0)$ およびそのモードに対応する無次元固有円振動数 ω_f について、 ν を一定として $\rho g L / (8H)$ を種々変えてパラメーター解析を行った例で、それぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。一般に、送電線のサゲ比 (δ/L) は0.03~0.09の間に存在し、この程度の小さい値では $\rho g L / (8H) \approx \nu/2$ である。Fig. 1において、 β_f は送電線一端の外向き無次元変位の振幅値 $\bar{\delta} = \Delta/L = 1$ のときの値であり、 $\bar{F}_f(0)$ は送電線の下向き無次元鉛直変位

$\bar{v}_{\max} = \bar{V}_{\max}/L = 1$ のときの値である。図中の $S_1 \sim S_5$ は対称モードの1次から5次を示し、これらのモードにおいて送電線両端の無次元水平付加張力は等しく ($\bar{h}_j(0) = \bar{h}_j(\sigma)$)、これらの対称モードのなかで式(1)に採用されるモードとしては、 $\beta_j \bar{h}_j(0)$ の絶対値が大きいものをとればよい。したがって、 ν と $\rho g L / (8H)$ の値に従って、まず、Fig. 1 より $\beta_j \bar{h}_j(0)$ の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 ω_j を Fig. 2 から読みとればよい。

(b) 高振動数域における ω_j および $\beta_j \bar{h}_j(0)$ 高振動数域のモードのなかから、式(1)に採用されるモードは、縦波のモードと ν の値によってはその縦波のモードに近接する横波のモードである。これらのモードの $\beta_j \bar{h}_j(0)$ と ω_j のパラメータ解析例を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。縦波の1次モードは $\beta_b \bar{h}_b(0)$ と ω_b で示され、そのモードに近接する横波の逆対称モードは $\beta_b' \bar{h}_b'(0)$ と ω_b' で示されている。 ν が 20 から 50 へと変わっても縦波の1次モードの ω_b は ν に等しく、それに近接する横波のモードは 22 次から 50 次へと変わる。 ω_b と ω_b' はば一致するとき、 $\beta_b \bar{h}_b(0)$ と $\beta_b' \bar{h}_b'(0)$ の値も一致し、式(1)の形から高振動数域において採用されるモードの $\beta_j \bar{h}_j(0)$ と ω_j は、 $\beta_b \bar{h}_b(0)$ と $\beta_b' \bar{h}_b'(0)$ の和と ν を用いて差し支えないと思われる。Fig. 5(a) はこの $\beta_b \bar{h}_b(0)$ と $\beta_b' \bar{h}_b'(0)$ の和についてパラメータ解析を行ったものであり、式(1)に採用される $\beta_j \bar{h}_j(0)$ は Fig. 3 を用いる必要はなく、Fig. 5(a) を使えばさめなうと思われる。また、縦波の2次モードの $\beta_j \bar{h}_j(0)$ も同様にして Fig. 5(b) で示されている。なお、この縦波の2次モードの ω_j は ν の2倍の値となる。

3. 数値計算例 スパン $L = 998\text{m}$ 、サグ $D = 57\text{m}$ 、単位長さ当り重量 $P_g = 29.2\text{N/m}$ 、伸び剛性 $EA = 85.1\text{MN}$ の4つの値で代表される送電線の無次元ばね定数の数値計算例を Fig. 6 に示す。上記4つの値から求めた $\rho g L / (8H) = 0.057$

と $\nu = 36.5$ の2つのパラメータに従って、Fig. 1, Fig. 2, Fig. 5(a) から比例計算によって Table 1 に示す近似値が得られる。Fig. 6 では、式(1)において70個のモードを採用した解と5個のモードのみ採用した解とを比較しているが、実線で示される送電線の地盤応答には現れられない共振を除いてほとんど一致している。

Table 1 Adopted ω_j and $\beta_j \bar{h}_j(0)$ in Eq. (1)

	Approximate values		Exact values	
	ω_j	$\beta_j \bar{h}_j(0)$	ω_j	$\beta_j \bar{h}_j(0)$
S_1	2.80	-69	2.79	-71
S_2	4.65	-413	4.62	-424
S_3	5.52	-659	5.48	-656
S_4	7.07	-45	7.03	-43
1st l.w. mode	36.47	2431	36.54	2445

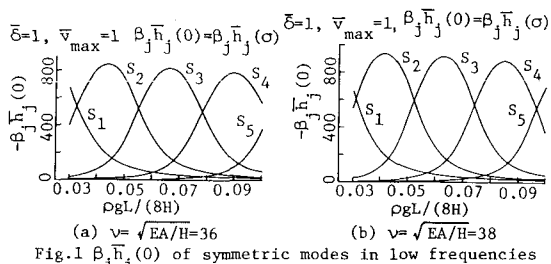


Fig. 1 $\beta_j \bar{h}_j(0)$ of symmetric modes in low frequencies

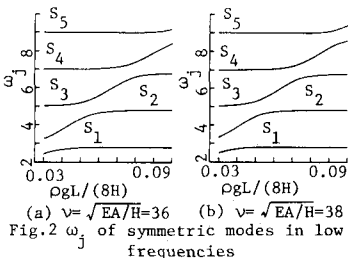


Fig. 2 ω_j of symmetric modes in low frequencies

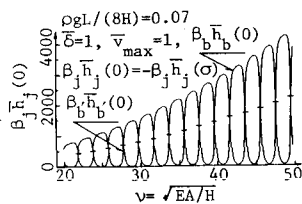


Fig. 3 $\beta_j \bar{h}_j(0)$ of 1st mode of longitudinal wave

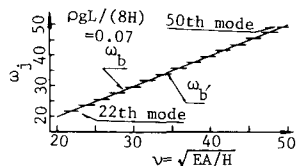


Fig. 4 ω_j of 1st mode of longitudinal wave

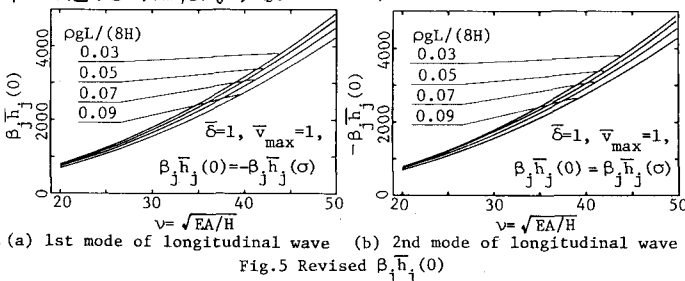


Fig. 5 Revised $\beta_j \bar{h}_j(0)$

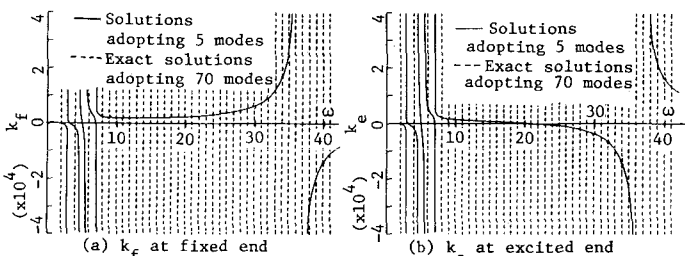


Fig. 6 Dimensionless spring constants of transmission line