

鉄塔-送電線系の地震応答解析のための簡易計算図表

SIMPLIFIED NOMOGRAMS FOR ANALYZING EARTHQUAKE RESPONSES OF TOWERS AND TRANSMISSION LINES SYSTEMS

小坪清真*・高西照彦**・井嶋克志***

By Seima KOTSUBO, Teruhiko TAKANISHI and Katsushi IJIMA

Though a transmission line has tremendously numerous modes, responses of transmission lines subjected to earthquakes can be computed by the method of modal analysis adopting only a few symmetric modes of transversal wave in low frequencies and modes longitudinal one in high frequencies. This paper presents simplified nomograms for computing natural frequencies, additional tensions and participation factors of their modes of diverse transmission lines for analyzing earthquake responses of towers and transmission lines systems.

Keywords: tower, cable, earthquake resistant design

1. ま え が き

著者らは、超高速送電鉄塔の耐震安全性検討のために、鉄塔と送電線の動的相互作用を考慮した、厳密で実用的な鉄塔-送電線系の線路方向の地震応答解析法として2つの方法を提案した。

1つの方法は、送電線をばねとみなして鉄塔-送電線系の自由振動特性を求め、得られた全体系の振動特性を用いてモーダルアナリシスにより地震応答解析を行うものである²⁾。また、もう1つの解析法は、鉄塔のみの自由振動特性および送電線のみの自由振動特性を用いて、両者の連成振動としてそれぞれにモーダルアナリシスを利用して鉄塔-送電線系の地震応答解析を行う方法である³⁾。

これらの2つの解析法の合理的な点として次のことが挙げられる。両支持点に地震波を受ける送電線の張力応答には、地震波の振動数域で多数存在するモードのなかで低振動数域の横波の対称モードと高振動数域の縦波の

モードのみが寄与し、その他のモードはほとんど寄与しないのであるが、あらかじめ寄与するモードのみを取捨選択できることである。すなわち、第1の方法においては、すべての送電線のモードを使つたとすれば、送電線のばね定数の振動数特性は非常に複雑になるが、あらかじめ送電線のモードの取捨選択を行い、低振動数域の横波の対称モードと高振動数域の縦波のモードのみを採用して計算することにより、送電線のばね定数の振動数特性の簡易化を図ることができる。また、第2の解析法では、鉄塔と送電線それぞれにモーダルアナリシスを適用するとき、特に送電線の振動に対して、張力応答に大きな影響を及ぼす低振動数域の横波の対称モードと高振動数域の縦波のモードのみを採用することにより、自由度数の大幅な低減を図ることができる。

しかし、実在の鉄塔と送電線が連続する系を考えた場合、送電線の支間およびサグは種々異なり、鉄塔-送電線系の地震応答解析に採用される送電線のモードも種々異なってくるので、モードの計算およびその取捨選択にも膨大な手間を必要とする。したがって、送電線の多数のモードのなかから、鉄塔-送電線系の地震応答解析に必要なモードのみを合理的に計算選択し、それらのモードの固有円振動数、水平付加張力、刺激係数を容易に得ることができなければ上記の解析法は実用的とはいえない

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 正会員 工博 九州工業大学助教授 開発土木工学科
(〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

*** 正会員 工博 佐賀大学講師 理工学部建設工学科
(〒840 佐賀市本庄町 1)

い。これらのモードを解析的に求めるには非常に多くの計算を要するので、本ノートは、鉄塔-送電線系の地震応答解析を容易に行うために、送電線のモードの選択法およびそれらのモードの無次元固有円振動数、無次元水平付加張力、刺激係数を求めるための計算図表を示したものである。

2. 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および刺激係数

送電線の面内自由振動解析は、図-1に示される座標系のもとに行った。送電線は連続体のまま取り扱い、完全可撓性、伸張性を有する一様な水平ケーブルとして、2つの無次元パラメーターのいろいろな値について送電線の面内自由振動解析を行い、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、送電線一端の面内水平変位に対する刺激係数を求めた。2つの無次元パラメーターの1つは、 $\rho g L / (8 H)$ (ρg : 送電線の単位長さ当たり重量, L : 送電線の支間長, H : 初期水平張力) であり、その値はサグ比 (D/L , D : 送電線のサグ) が0.1以下のように小さい場合、 $\rho g L / (8 H) \cong D/L$ となり、その誤差は0.3%以下である。また、もう1つのパラメーターは $\nu = \sqrt{EA/H}$ (EA : 送電線の伸び剛性) であり、送電線中の縦波の伝播速度 ($\sqrt{EA/\rho}$) と横波の伝播速度 ($\sqrt{H/\rho}$) の比を表わしている。なお、詳細な解法は論文1) に述べているので、ここでは省略する。

以下の解析においては、次式の基準化を行っている。

$$\int_0^s \{(\bar{u}_j)^2 + (\bar{v}_j)^2\} ds = 1$$

ここに、 $\bar{u}_j = \bar{U}_j/L$, $\bar{v}_j = \bar{V}_j/L$: 送電線の j 次の無次元水平、鉛直変位モード, $s = S/L$: 送電線に沿う無次元距離, S : 送電線に沿う距離, $\sigma = S_0/L$: 送電線の無次元長, S_0 : 送電線長である。

(1) 低振動数域の横波の対称モード

低振動数域の横波の対称モードの2次および3次の無次元固有円振動数 ($\omega_j = \Omega_j/\Omega_0$, Ω_0 : 長さ L , 初期張力 H の弦の基準円振動数), 送電線左端の無次元水平付加張力 ($\bar{h}_j(0) = \bar{H}_j(0)/H$), および送電線右端の右向き無次元単位水平変位 ($\bar{\delta} = \bar{\Delta}/L$) に対する刺激係数を、それぞれ図-2, 3, 4に示す。一般に、送電線のサグ比 ($D/L \cong \rho g L / (8 H)$) は0.03~0.09の間に、送電線の縦波と横波の伝播速度比 ($\nu = \sqrt{EA/H}$) は20~45の間に存在する。

図-2~4を対称モードの1次~5次まで準備し、まず、図から $\rho g L / (8 H)$ と ν の値に従って ω_j , $\bar{h}_j(0)$, β_j^r を読み取り、それらのモードのなかで $\beta_j^r \bar{h}_j(0)$ の大きい値のモードのみを送電線の応答計算に採用すればよ

い。なお、送電線の対称モードにおいて、送電線両端の付加張力は等しく ($\bar{h}_j(\sigma) = \bar{h}_j(0)$), 送電線左端の右向き無次元単位水平変位に対する刺激係数は $\beta_j^r = -\beta_j^l$ となる。対称モードの1次および4, 5次は省略した。

(2) 縦波のモード

縦波の1次モードの無次元固有円振動数、無次元水平付加張力モード値および刺激係数をそれぞれ図-5の(a), (b), (c)に示す。図中のサフィックス b は縦波の1次モードを、サフィックス b' は縦波の1次モードに近接する横波の逆対称モードを表わす。図からわかるように、 ν が偶数の値付近で、この横波の逆対称モードの無次元水平付加張力と刺激係数は大きくなり、図中の×印で縦波の1次モードのそれらの値と一致する。したがって、送電線の地震応答計算には、縦波の1次モードとともに、そのモードに近接する横波の逆対称モードも必要となる。しかし、図のように ν の値に対して、 $\bar{h}_j(0)$ および β_j^r の値が大きくと変動すれば、図からの読み取り誤差が生じるとともに、実在送電線の ν の値の誤差により $\bar{h}_j(0)$ および β_j^r の値も大きく変わり、これらの図は実用的ではない。したがって、種々の送電線の応答計算を行った結果、縦波の1次モードと横波の逆対称モードを1つのモードとして、その無次元固有円振動数は $\rho g L / (8 H)$ の値にかかわらず、 $\omega_j = \nu$, $\bar{h}_j(0)$ および β_j^r は図-5(b), (c)に示される点線から値を求めても差し支えないことがわかった。なお、(4)で示すとおり送電線の張力応答計算に点線で示される値を用いても、その誤差は1%以下であった。

この補正された $\bar{h}_j(0)$ および β_j^r の値をまとめて図-6に示す。縦波の1次モードの水平付加張力は送電線両端で逆対称 ($\bar{h}_j(\sigma) = -\bar{h}_j(0)$), 送電線左端の右向き無次元単位水平変位に対する刺激係数は右端の右向き変位に対するそれと等しい ($\beta_j^r = \beta_j^l$)。図には縦波の2次モードも示しており、その無次元固有円振動数は $\rho g L / (8 H)$ の値にかかわらず $\omega_j = 2\nu$, 無次元水平付加張力は送電線両端で等しく ($\bar{h}_j(\sigma) = \bar{h}_j(0)$), その値は縦波の1次モードの2倍の値、刺激係数は $\beta_j^r = -\beta_j^l$ となる。

最後に、送電線一端の静的な外向き無次元単位水平変位による無次元水平付加張力 ($h_0 = H_0/H$) を図-7に示す。

(3) 次元化

以上の図から得られた送電線の無次元固有円振動数、無次元水平付加張力、刺激係数の値の次元化は、刺激係数についてはそのまま β_j^r , β_j^l の値を用い、他の値は次式で計算すればよい。

$$\Omega_j = \Omega_0 \omega_j = (\pi/L) \sqrt{H/\rho \omega_j}$$

$$\bar{H}_j(0) = (H/L) \bar{h}_j(0)$$

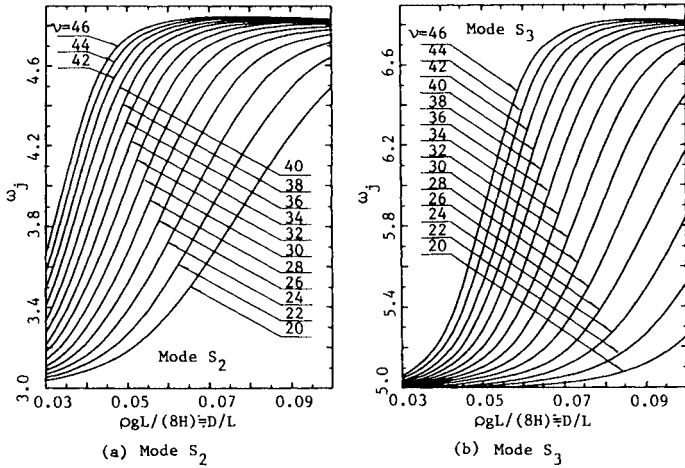
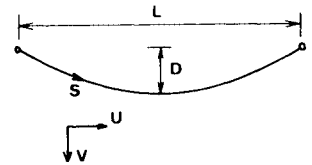
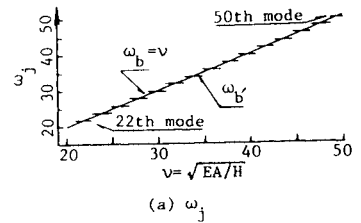


Fig. 2 ω_j of symmetric models in low frequencies.



ρ : Mass per unit length
 EA : Extensional rigidity
 H : Horizontal component of static tension

Fig. 1 Transmission line.



(a) ω_j

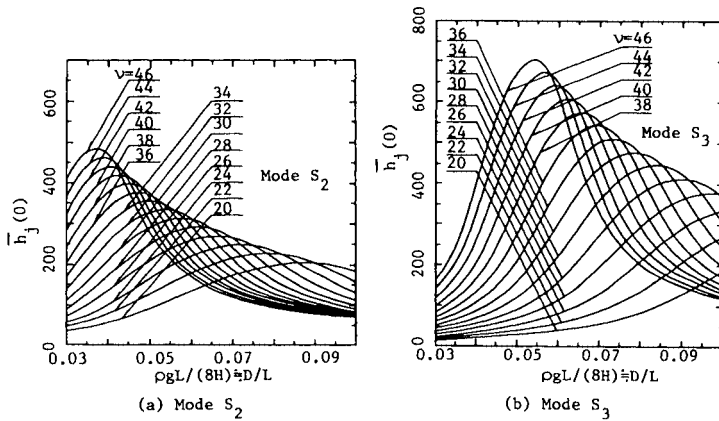
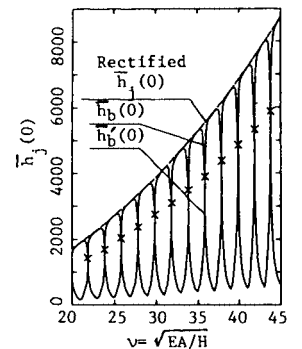


Fig. 3 $\bar{h}_j(0)$ of symmetric modes in low frequencies ($\bar{h}_j(\sigma) = \bar{h}_j(0)$).



(b) $\bar{h}_j(0)$ ($\bar{h}_j(\sigma) = -\bar{h}_j(0)$)

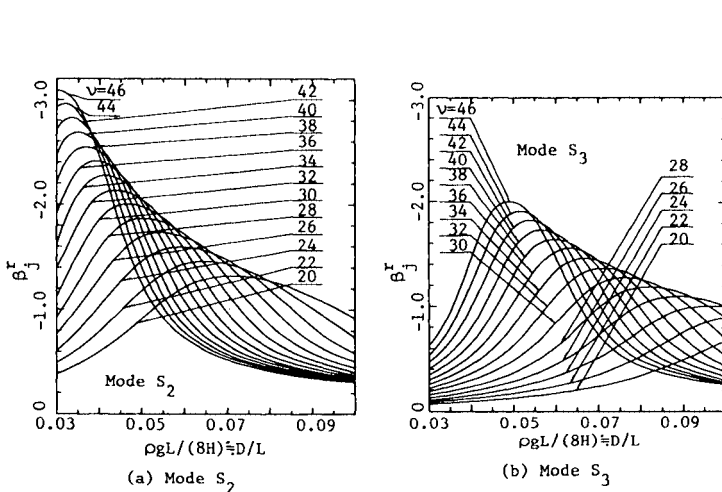


Fig. 4 β_j^r of symmetric modes in low frequencies ($\beta_j^i = -\beta_j^r$).

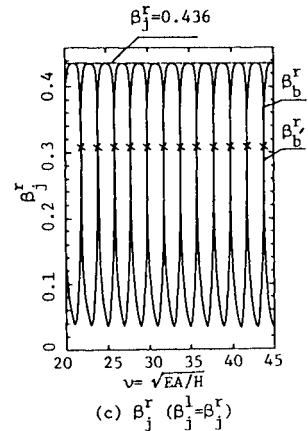


Fig. 5 1st mode of longitudinal wave ($\rho g L / (8 H) = 0.05$).

$$\bar{H}_j(S_0) = (H/L)\bar{h}_j(\sigma)$$

$$H_0 = (H/L)h_0$$

(4) 数値計算例

上述の図を用いて、表一2の左に示す鉄塔-送電線系の地震応答計算を行った。数値計算に用いた鉄塔と送電線の諸元は文献3)の中で用いたそれと同じであり、送電線については、支間長 $L=488$ m, サグ $D=28.9$ m, 単位長さ当たり質量 $\rho=10.8$ kg/m, 伸び剛性 $EA=179$ MN, 初期水平張力 $H=110$ kN である。これらの値から本送電線について、 $\rho g L / (8H) = 0.059$, $\nu = \sqrt{EA/H} = 40.2$ の2つの無次元パラメーターが得られ、図表から送電線の無次元固有円振動数, 刺激係数, 無次元水平付加張力を求めれば、表一1のB欄に示す値となった。表一1のA欄には理論値を示しているが、A欄の値とB欄の値はほぼ等しいことがわかる。

また、表一2には鉄塔-送電線系の San Fernando 地震 (N 21 E, 最大加速度 216 cm/s²) に対する応答を、表一1のA欄とB欄それぞれの値を用いて計算した結果を示している。鉄塔と送電線の減衰定数はともに2%とした。鉄塔と送電線の接続点の水平付加張力の応答最大値および鉄塔塔端の加速度の応答最大値は、図表から得られた送電線の自由振動特性値を用いてもよい精度の値が得られることがわかる。

3. あとがき

本ノートは、送電線両端のばね定数の振動数特性計算¹⁾, および論文2), 3)に示した鉄塔-送電線系の地震応答計算を容易に行うために必要な送電線の低振動数域の対称モードと高振動数域の縦波のモードの固有円振動数, 水平付加張力, 刺激係数の計算図表を示したものである。

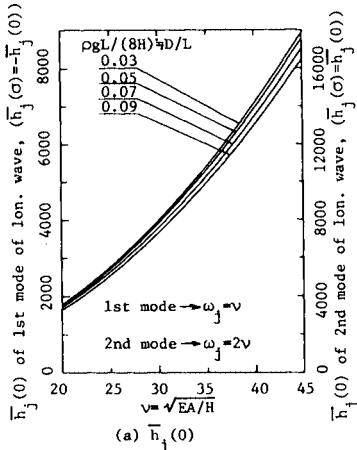


Fig. 6 Rectified $\bar{h}_j(0)$ and β_j^r of 1st mode of longitudinal wave and 2nd one.

参考文献

- 1) 小坪清真・高西照彦・井嶋克志・園田敏矢: 送電線のばね定数の振動数特性, 土木学会論文集, No. 344/I-1, pp. 225~234, 1984. 4.
- 2) 小坪清真・高西照彦・井嶋克志・鳥野 清: 鉄塔の耐震性に及ぼす送電線の影響, 土木学会論文集, No. 344/I-1, pp. 271~278, 1984. 4.
- 3) 小坪清真・高西照彦・井嶋克志・鳥野 清: 鉄塔-送電線系の地震応答解析法, 土木学会論文集, No. 368/I-5, 1986. 4.

(1985. 8. 31・受付)

Table 1 Dimensionless natural circular frequencies, participation factors and dimensionless additional tensions.

	ω_j		β_j		$\bar{h}_j(0)$	
	A	B	A	B	A	B
S_1	2.805	2.80	-0.8589	-0.86	66.72	60
S_2	4.760	4.76	-0.9703	-0.95	217.0	210
S_3	5.966	6.00	-1.724	-1.70	605.7	600
S_4	7.090	7.10	-0.5524	-0.56	274.0	280
S_5	8.987	8.99	-0.1422	-0.14	113.4	110
L_1	39.80	40.4	0.0614	0.43	959.5	7000
	40.50		0.4293		6949	
L_2	80.33	80.8	-0.2170	-0.22	13820	14000
	80.64		-0.0306		1962	

A: Theoretical values

B: Values obtained by nomograms

L_1, L_2 : 1st mode of longitudinal wave and 2nd one

Table 2 Peak responses of tower and transmission lines for the San Fernando earthquake.

Dimensionless dynamic tension, h		Acceleration at the top of tower (cm/s ²)	
A	B	A	B
0.1003	0.1001	1117	1067

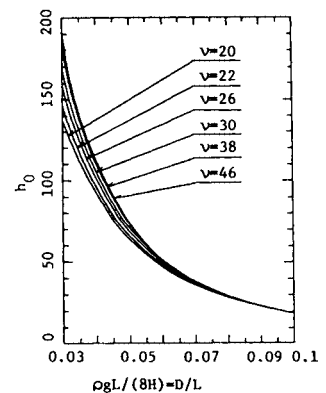


Fig. 7 Dimensionless static additional tension h_0 .