

送電線の面外振動による張力の架線直角方向成分

九州大学 正会員 小坪 清真

" " 園田 敏矢

" " 井嶋 克志

" 〇学生員 後藤 裕司

1. まえがき

著者らはこれまで鉄塔-送電線系の線路方向(鉛直面内)における地震応答の解析を行ってきた。本研究では、さらに鉄塔-送電線系の線路直角方向(面外方向)に作用する地震に対してその応答特性を解析するため、面外方向について送電線の動的張力および変位の振動数特性を理論的に求めた。次に、実物の約1/70の大きさの模型で振動実験を行い、数値計算で得られた結果と実験値とを比較して理論の検証を行った。

2. 理論解析

解析に当たって送電線は完全可境性、伸張性とした。一般に、実在の送電線では両支持点のレベル差はスパンと比べて小さいため、両端同レベル支持として解析した。また、サグ比(サグ/スパン)は十分小さく、微小変位を仮定し線形の範囲内で解析を行った。送電線の線形振動の範囲内では鉛直面内振動と面外振動とは連成せず、本論では面外振動のみ解析した。

送電線の座標系を図-1のとおりとする。ここに、 x, y, z は直角座標、 X, Y は送電線のたわみ曲線の座標、 S は送電線に沿う距離、 W は面外変位、 L はスパン、 D はサグである。無次元化した送電線要素の面外振動における運動方程式は次式で与えられる。

$$\pi^2 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = \frac{dx}{dS} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 $x = X/L$ は無次元面内水平座標、 $S = S/L$ は送電線に沿う無次元距離、 $W = W/L$ は無次元面外変位、 $t = \Omega_0 T$ は無次元時間、 T は時間、 $\Omega_0 = (X/L) \sqrt{(H/\rho)}$ は H の張力で張られた長さ L の弦の1次の固有円振動数、 H は初期水平張力、 ρ は単位長さ当たりの質量、 π は円周率である。送電線の無次元面外変位 W を次式で仮定する。

$$W(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\pi x) \cdot \exp(i\omega t) \quad \text{--- (2)}$$

$$= \bar{W}(x) \cdot \exp(i\omega t)$$

ここに、 a_n は任意定数、 $\omega = \Omega/\Omega_0$ は無次元円振動数、 $\bar{W}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\pi x)$ である。式(2)を式(1)に代入して時間関数を分離した後、Galerkin法を用いることにより a_n に関する連立1次方程式を求めた。さらに、この方程式において a_n の係数行列の固有値解析を行うことにより、 n 次の無次元固有円振動数 ω_n および変位モード $\bar{W}_n(x)$ が得られる。一方、送電線の無次元動的張力モードの面外方向成分 $\bar{T}_n(x)$ は、面外変位モード $\bar{W}_n(x)$ を式(1)の右辺に代入し L について積分することにより得られた。

次に、図-1の送電線の左端にスパン L で無次元化した正弦波水平変位 $\delta_e(t) = \Delta(t)/L = \bar{\delta}_e \exp(i\omega t)$ を与えたとき、無次元面外変位 W を次式のように仮定する。

$$W(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \psi_j \bar{W}_j(x) + \bar{\delta}_e(t) \bar{W}_{0e}(x) \quad \text{--- (3)}$$

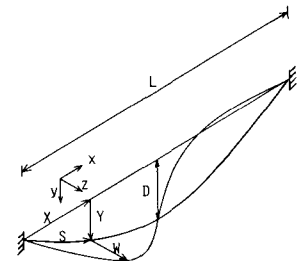


図-1 送電線の座標系

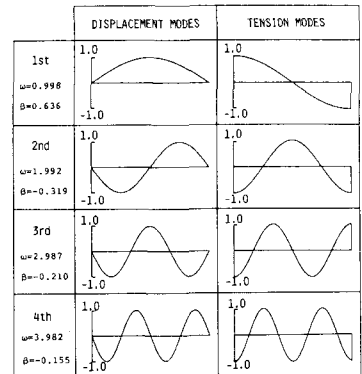


図-2 変位モードと動的張力の面外方向成分のモード

ここに、 ψ_0 は第1次の基準座標、 $\bar{u}_0(x)$ は送電線左端の無次元面外変位による送電線の無次元面外変位である。式(3)を式(1)に代入し $\psi_0(x)$ に関する微分方程式が得られる。基準座標を $\psi_0 = \bar{\psi}_0 \exp(i\omega t)$ と仮定し、この微分方程式を解けば基準座標の定常振幅値 $\bar{\psi}_0$ が得られる。したがって、送電線の無次元動的張力の面外方向成分 $\bar{h}(x)$ は次式で表される。

$$\bar{h}(x) = \sum_{j=1}^{\infty} \bar{\psi}_j \bar{h}_j(x) + \bar{\delta}_x \bar{h}_0(x) \quad (4)$$

ここに、 $\bar{h}_0(x)$ は送電線左端の単位無次元面外変位による送電線の無次元張力の面外方向成分である。

3. 数値計算

実在の送電線について数値計算を行った。送電線のスパンは $L = 488.0 \text{ m}$ 、サグは $D = 28.9 \text{ m}$ 、(サグ比) $D/L = 0.06$ 、単位長さ当りの重量は $\rho = 2.7 \text{ kg/m}$ である。送電線の初期水平張力は $H = 2780 \text{ kgf}$ 、その初期水平張力で張られた長さ L の弦の1次の固有円振動数は $\omega_0 = 0.65 \text{ rad/s}$ である。送電線の無次元固有円振動数 ω_j 、刺激係数 β_j 、変位モードおよび動的張力モードの面外成分を図-2に示す。また、図-3に送電線左端($x=0$)の無次元正弦波水平変位 $\bar{\delta}_x = 1$ による送電線両端の動的張力の面外方向成分 $\bar{h}(x=0)$ および $\bar{h}(x=1)$ の振動数特性を示す。なお、減衰は考慮していない。

4. 理論解析結果と実験値との比較

実験に用いた架線のスパンは $L = 66.0 \text{ cm}$ 、サグは $D = 46.4 \text{ cm}$ 、(サグ比) $D/L = 0.07$ 、単位長さ当りの重量は $\rho = 0.131 \text{ kg/m}$ 、初期水平張力は $H = 154 \text{ kgf}$ である。架線の右端($x=L$)は支柱に固定し、左端($x=0$)に振動台より正弦波の水平変位を架線に与えた。加速度計を架線の左端および架線の左端から $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ の位置に取りつけて測定し、この加速度から各点の変位を計算した。また、架線左端と振動台とをバネで接続し、バネ側面の歪みから架線左端における動的張力の面外方向成分を測定した。強制変位の振動数が $0.6 \sim 4.0 \text{ Hz}$ の間で、振動が定常状態まで成長したの5測定を行った。

架線模型に一端強制変位を与えたとき強制変位点における動的張力の面外方向成分の振動数特性の理論値および実験値を図-4に示す。実験値は一端強制変位を $\bar{\delta} = 1 \text{ cm}$ に換算した場合の動的張力の面外方向成分である。振動数が約 2.5 Hz までには3つの共振点があり、理論値と実験値とはよく一致している。図-5に架線の左端から $3L/4$ の位置の面外変位の振動数特性を示す。振動数が約 4.0 Hz まで理論値と実験値とはほぼ一致し、架線の左端から $L/4$ および $L/2$ の位置の面外変位の振動数特性も同様のことが示された。以上より理論の検証ができた。

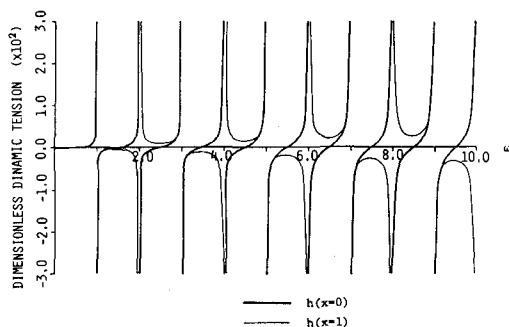


図-3 送電線左端($x=0$)に強制変位を与えたときの送電線両端における動的張力の面外方向成分の振動数特性

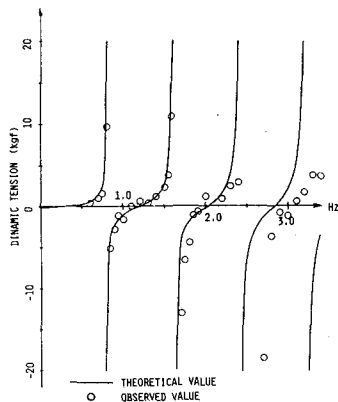


図-4 強制変位点における動的張力の面外方向成分の理論値および実験値

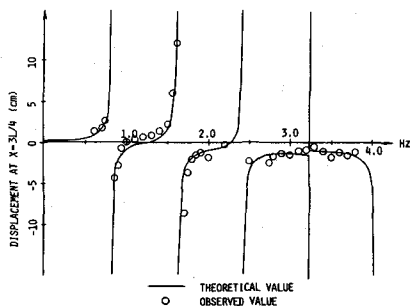


図-5 $x = 3L/4$ の位置における送電線の面外変位の理論値および実験値