

懸垂支持を考慮した鉄塔-送電線の地震応答

九州大学 正会員 小坪清真
 九州工業大学 〃 高西照彦
 九州大学 〃 鳥野 清
 〃 〃 井川克志

1. まえがき

超高電圧送電鉄塔の耐震安全性の検討のために、鉄塔-送電線系に有限要素法を適用して解析を行った場合、その自由度は膨大な数に達するとともに、その固有値解析の結果として得られる与系の振動形には、送電線の振動が主となり、鉄塔の地震応答には全く寄与しない振動形が多数現れる。これらの振動形をまとめて鉄塔-送電線系の地震応答計算を行うと、計算時間は多大となり実用的でない。したがって、著者は、これまでに有限要素法を用いるよりも合理的かつ実用的な鉄塔-送電線系の地震応答計算法を開発してきた。すなわち、あらかじめ鉄塔と送電線それぞれの自由振動解析を行い、送電線のモードに対して取捨選択を行ったのち、振動形解析法により鉄塔-送電線系の地震応答解析を行うものである。

先の研究では¹⁾、鉄塔-送電線系において鉄塔を全て耐張型と仮定して解析を行ったが、実際の鉄塔-送電線系には、図1(b)に示されるように送電線を支持する懸垂型鉄塔も多く含まれる。この懸垂型鉄塔の振動特性は、送電線および隣接鉄塔の振動の影響をあまり受けず、単体鉄塔のそれとあまり変わらないことが実験的に明らかになっている。しかし、懸垂型鉄塔を両側にもつ耐張型鉄塔の地震応答は、先の研究結果と異なることが予想される。したがって、本研究では、先の研究をさらに発展させて、懸垂型鉄塔を含む耐張型鉄塔-送電線系の地震応答計算法を示し、1つのモデルに対して数値計算を行った。

2. 解析理論

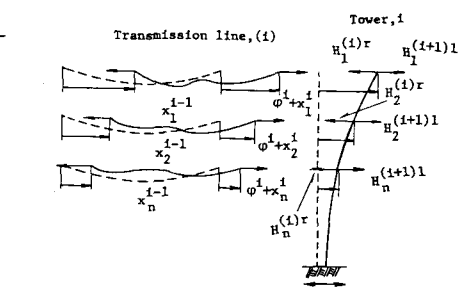
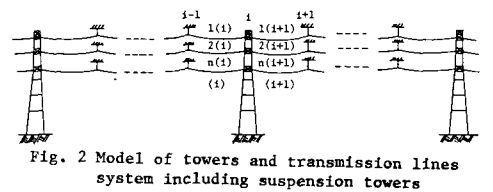
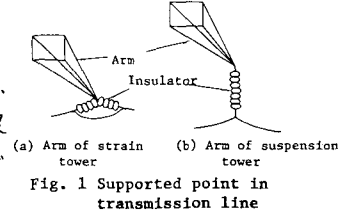
(1) 解析上の仮定 i) 鉄塔-送電線系は直線上に配置されているものとし、地震波は鉄塔-送電線系の線路平行方向に入射するものとし、鉄塔-送電線系は線路方向鉛直面内振動を行うものとする。ii) 懸垂型鉄塔は送電線および隣接鉄塔との動的相互作用を受けない。iii) 送電線は懸垂支持又は鉤直に支持されているのみで、懸垂型鉄塔の振動の影響を受けない。

(2) 振動方程式 鉄塔には i で表わされる番号を付け、各スパンは (i) として送電線には $m^{(i)}$ の番号を付ける。図2,3を参照して、振動形解析法により、送電線には両支持点の水平変位 ξ 、鉄塔には基礎の地動変位および送電線の水平付加張力が外力として作用すると考え、送電線と鉄塔それぞれの運動エネルギー、ひずみエネルギー、一般力を求め、これを Lagrange の運動方程式に代入すると、次の微分方程式を得る。まず、送電線 $m^{(i)}$ の i 次基準座標 ${}^c Y_{m_j}^{(i)}$ について、

$$c \ddot{Y}_{m_j}^{(i)} + 2 c \xi_{m_j}^{(i)} c_{\Omega m_j}^{(i)} \dot{Y}_{m_j}^{(i)} + (c_{\Omega m_j}^{(i)})^2 Y_{m_j}^{(i)} = -c \beta_{m_j}^{(i)l} \ddot{x}_n^{i-1} - \frac{c}{\beta_{m_j}^{(i)r}} (\ddot{\varphi}^i + \sum_{m=1}^M T \ddot{\psi}_m^i Y_{nm}^i) \quad (1)$$

つぎに、鉄塔 i の m 次基準座標 $T \psi_m^i$ について

$$T \ddot{\psi}_m^i + 2 T \xi_m^i T_{\Omega m}^i T \dot{\psi}_m^i + (T_{\Omega m}^i)^2 T \psi_m^i$$



$$= -T_{nm}^i \ddot{\varphi}^i - \left[\sum_{n=1}^N Y_{nm}^i \left\{ \sum_{j=1}^J c_{Y_{nj}}^{(i)} H_{nj}^{(i)}(S_{mo}^{(i)}) - \alpha_n^{i-1} H_{no}^{(i)} + (\varphi^i + \sum_{m=1}^M T_{Y_{nm}^i} Y_{nm}^i) H_{no}^{(i)} - \sum_{j=1}^J c_{Y_{nj}}^{(i+1)} H_{nj}^{(i+1)}(0) \right. \right. \\ \left. \left. + (\varphi^i + \sum_{m=1}^M T_{Y_{nm}^i} Y_{nm}^i) H_{no}^{(i+1)} - \alpha_n^{i+1} H_{no}^{(i+1)} \right\} \right] / \{ (Y_m^i)^T M^i Y_m^i \} \quad (2)$$

を得る。ここに、 $c_{S_{nj}}^{(i)}$ 、 $c_{S_{nj}}^{(i)}$ は送電線 $n^{(i)}$ の j 次の減衰定数、固有円振動数、 $c_{\beta_{nj}}^{(i)}$ 、 $c_{\beta_{nj}}^{(i)}$ は送電線 $n^{(i)}$ の左端の内向き、右端の外向き水平変位に対する j 次の刺激係数、 φ^i は鉄塔 i の基礎の地動変位、 Y_{nm}^i は耐張型鉄塔 i の m 次振動形における上から m 番目の腕先端の変位、 α_n^{i-1} は懸垂型鉄塔 $i-1$ における上から m 番目の送電線支持兵の変位であり、 \cdot は時間を表わす。一方、式(2)において、 $T_{S_{nm}^i}$ 、 $T_{S_{nm}^i}$ 、 $T_{\beta_{nm}^i}$ はそれぞれ鉄塔 i の m 次の減衰定数、固有円振動数、基礎の水平変位に対する刺激係数、 $H_{nj}^{(i)}(S_{mo}^{(i)})$ 、 $H_{nj}^{(i+1)}(0)$ は送電線 $n^{(i)}$ の右端および送電線 $n^{(i+1)}$ の左端の j 次の水平付加張力モード値、 $H_{no}^{(i)}$ 、 $H_{no}^{(i+1)}$ はそれぞれ送電線 $n^{(i)}$ および $n^{(i+1)}$ の一端の静的な単位水平変位による水平付加張力、 Y_m^i は鉄塔 i の m 次の変位ベクトル、 M^i は鉄塔 i の質量マトリックス、 $\{ (Y_m^i)^T M^i Y_m^i \}$ は m 次の換算質量を表わす。また、懸垂支持兵 n^{i-1} において、送電線 n^{i-1} と $n^{(i)}$ の水平付加張力がつり合っているから、

$$\sum_{j=1}^J c_{Y_{nj}}^{(i-1)} H_{nj}^{(i-1)}(S_{mo}^{(i-1)}) - \alpha_n^{i-2} H_{no}^{(i-1)} + \alpha_n^{i-1} H_{no}^{(i-1)} = \sum_{j=1}^J c_{Y_{nj}}^{(i)} H_{nj}^{(i)}(0) - \alpha_n^{i-1} H_{no}^{(i)} + (\varphi^i + \sum_{m=1}^M T_{Y_{nm}^i} Y_{nm}^i) H_{no}^{(i)} \quad (3)$$

が成り立つ。

式(1)~(3)のなかの鉄塔および送電線個々の固有円振動、振動形は既知とする。ここに、鉄塔-送電線系の地震応答計算の対象となる振動数域で、送電線のモードは多数存在する。しかし、送電線の水平付加張力の地震応答には低振動数域の対称モードと、高振動数域の繰波のモードのみが寄与するため、鉄塔-送電線系の地震応答解析にはこれらのモードのみが採用される。

式(1)~(3)を鉄塔-送電線系の全ての送電線、耐張型鉄塔および懸垂支持兵について求め、 $T_{Y_{nm}^i}$ 、 $c_{Y_{nj}}^{(i)}$ 、 α_n^{i-1} に関するこれらの連立微分方程式を数値積分法により解けば、与系の地震応答が得られる。

3. 数値計算結果

図4に示したモデルと単体鉄塔の地震応答計算結果を図5,6に示す。図は、Case1, Case2の中央鉄塔および単体鉄塔の釧路地震およびSan Fernando地震に対する最大応答値(与系の減衰定数は全て2%)を示したものである。図から、懸垂支持を考慮したCase2の応答はCase1(全て耐張型)に比べて、高々同程度であることがわかる。

参考文献 小坪他: 鉄塔-送電線系の耐震安全と、初回自然災害総合科学シンポジウム講演要旨集, 1984.10

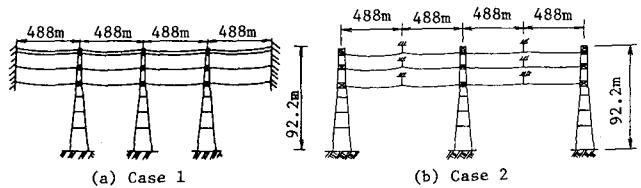


Fig. 4 Models of towers and transmission lines

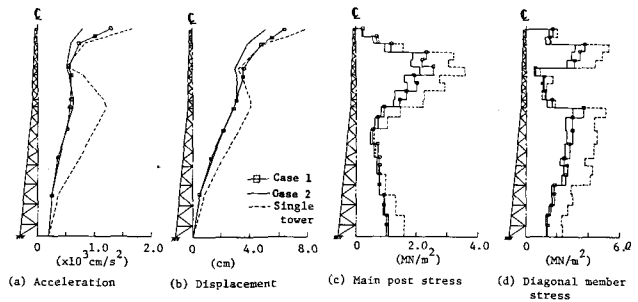


Fig. 5 Peak responses of tower for the Kushiro earthquake (E-W component, $\ddot{\varphi}_{max} = 216 \text{ cm/s}^2$)

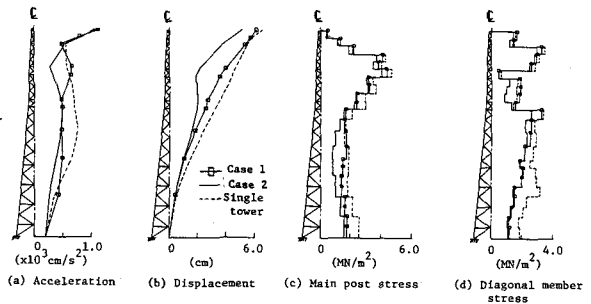


Fig. 6 Peak responses of tower for the San Fernando earthquake (N21E component, $\ddot{\varphi}_{max} = 216 \text{ cm/s}^2$)