

(47) 鉄塔-送電線系の地震応答解析法

九州大学 工学部 正会員 小坪 清真  
 九州工業大学           〃 高西 照彦  
 九州大学 工学部       〃 鳥野 清  
                           〃           〃 〇井 嶋 克 志

1. まえがき

最近、多く建設される超高電圧鉄塔は、鉄塔の規模が大きいととも、一基の鉄塔重量に対して一支間の送電線、桿子総重量がその約1/2にもなる。したがって、超高電圧鉄塔の耐震安全性検討のためには、鉄塔と送電線の動的相互作用を考慮した地震応答解析が必要となる。この鉄塔-送電線系の地震応答計算法としては、i)有限要素法を用いる方法、ii)送電線をばねと見なす方法などが挙げられる。しかし、鉄塔-送電線系は非常に長く連続した構造物であるため、i)の方法では自由度数が膨大となり実用的でない。また、ii)の方法は、送電線両端の張力の定常応答値を使用しているが、送電線が地震波のような不規則波をうけるときには、その成長程度が明白でないため、この方法で得られた鉄塔-送電線系の振動形が地震時に発生するが確定でない。

したがって、本研究は、鉄塔-送電線系の厳密で実用的な地震応答解析法として、送電線と鉄塔それぞれ単独の固有振動特性を用いて、振動形解析法により鉄塔と送電線との連成振動応答を求める方法を示したものである。本法の特徴は、1) 地震波の振動数域内において、1本の送電線は約100個以上の振動形を有するが、地震時の送電線の張力応答に寄与するモードは、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みである。したがって、送電線に振動形解析法を適用するときに、あらかじめ送電線のモードの取捨選択を行うことにより、鉄塔-送電線系の自由度数を大幅に低減することができ、2) 送電線の張力の定常応答値を用いないため、鉄塔-送電線系の地震応答計算結果に対する信頼性が高い。3) 各鉄塔基礎の地震波が異なる場合および耐張型鉄塔と懸垂型鉄塔が混在する場合に対しても本法は容易に適用できる、等の利点を持つことである。

2. 解析理論

(1) 解析上の仮定 送電線は連続体のまま、鉄塔は平面トラスとして、それぞれにそれぞれの固有振動数、振動形は得られているものとする。解析上の仮定は、i) 送電線は線形振動を行う。ii) 鉄塔は平面的に同一直線上に配置されているものとし、鉄塔と送電線は鉛直面内振動のみ行う。iii) 送電線の張力が鉄塔に作用する方向は、水平方向のみを考慮し、鉛直方向のそれは無視する。iv) 懸垂型鉄塔と送電線は相互に動的相互作用を受ける。

(2) 鉄塔および送電線の振動方程式 図1の座標系のもとに、まず、送電線 $m^{(c)}$ と鉄塔それぞれ別の運動エネルギー、ひずみエネルギーおよび換算外力を求めたのち、それぞれの振動方程式を導けば、送電線 $m^{(c)}$ は式(1)鉄塔は式(2)で表わされる。

$$\begin{aligned}
 & c_m^i \ddot{y}_m^{(c)} + 2 \sum_{m_j^{(c)}} c_{m_j^{(c)}}^i \dot{y}_m^{(c)} + c_m^i y_m^{(c)} \\
 & + (T_{m_j^{(c)}}^i)^2 c_{m_j^{(c)}}^i = -\beta_{m_j^{(c)}}^i \ddot{z}_m^{i-1} \\
 & - \beta_{m_j^{(c)}}^i \ddot{z}_m^i \quad (1) \\
 & T_{m_m}^i \ddot{y}_m^i + 2 \sum_{m_j^i} T_{m_j^i}^i \dot{y}_m^i \\
 & + (T_{m_j^i}^i)^2 \dot{y}_m^i = -\beta_{m_j^i}^i \ddot{z}_m^i
 \end{aligned}$$

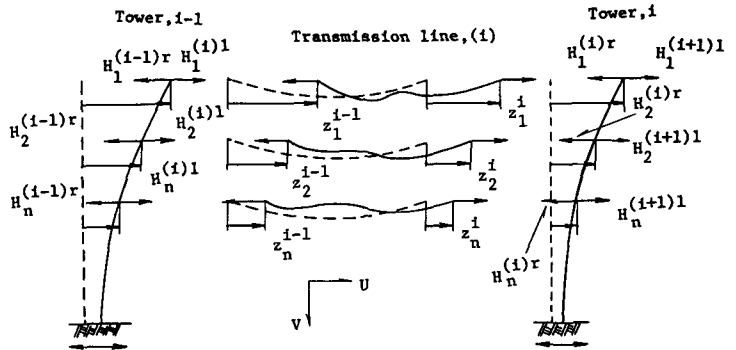


Fig.1 Definition diagram for seismic response of towers and transmission lines

$$-\left[ \sum_{m=1}^{M^i} \bar{X}_{nm}^i \left\{ \sum_{j=1}^{J_n^{(i)}} c_{m_j}^{(i)} \bar{H}_{m_j}^{(i)}(S_{m_0}^{(i)}) - z_n^i H_{m_0}^{(i)} + z_n^i H_{m_0}^{(i)} - \sum_{j=1}^{J_n^{(i+1)}} c_{m_j}^{(i+1)} \bar{H}_{m_j}^{(i+1)}(0) + z_n^i H_{m_0}^{(i)} - z_n^{i+1} H_{m_0}^{(i+1)} \right\} \right] / \left\{ (\bar{X}_m^i)^T M^i \bar{X}_m^i \right\} \quad (2)$$

ここに、 $c_{m_j}^{(i)}$ 、 $c_{\xi_{m_j}}^{(i)}$ 、 $\Omega_{m_j}^{(i)}$ はそれぞれ送電線 $m^{(i)}$ の $j$ 次の基準座標、減衰定数、固有円振動数、 $T_{\psi_m}^i$ 、 $T_{S_m}^i$ 、 $\Omega_{m_m}^i$ はそれぞれ鉄塔 $i$ の $m$ 次の基準座標、減衰定数、固有円振動数、 $c_{\beta_{m_j}^L}$ 、 $c_{\beta_{m_j}^R}$ はそれぞれ送電線 $m^{(i)}$ の左端および右端の右向き変位に対する $j$ 次の刺激係数、 $T_{\beta_m}^i$ は鉄塔 $i$ の基礎地盤の変位に対する $m$ 次の刺激係数、 $\bar{X}_m^i$ は鉄塔 $i$ の $m$ 次の変位モードにおける上から $m$ 番目の送電線支持兵の変位、 $\bar{H}_{m_j}^{(i)}(S_{m_0}^{(i)})$ 、 $\bar{H}_{m_j}^{(i)}(0)$ はそれぞれ送電線 $m^{(i)}$ の右端の $j$ 次の付加張力モード、送電線 $m^{(i+1)}$ の左端の $j$ 次の付加張力モード、 $H_{m_0}^{(i)}$ 、 $H_{m_0}^{(i+1)}$ はそれぞれ送電線 $m^{(i)}$ 、 $m^{(i+1)}$ の一端の外向き単位水平静変位による付加張力、 $M^i$ 、 $\bar{X}_m^i$ は鉄塔 $i$ の質量マトリックス、 $m$ 次の変位モード、 $M^i$ は1支間当りの送電線本数、 $J_n^{(i)}$ は送電線 $m^{(i)}$ の採用モード数、 $\tau$ は転置、 $\cdot$ は時間による微分を表わす。また、 $z_n^i$ は鉄塔 $i$ において、上から $m$ 番目の送電線支持兵の変位であり、耐張型鉄塔においては、鉄塔の基準座標 $T_{\psi_m}^i$ を用いて次式で表わされる。

$$z_n^i = \varphi^i + \sum_{m=1}^{M^i} T_{\psi_m}^i \bar{X}_{nm}^i \quad (3)$$

ここに、 $\varphi^i$ は鉄塔 $i$ の基礎地盤の変位、 $M^i$ は鉄塔 $i$ の採用モード数である。

一方、懸垂型鉄塔は図2のなかの $i-1$ あるいは $i+1$ としてモデル化できるため、懸垂型鉄塔については式(2)の振動方程式を求める必要はなく、また、懸垂型鉄塔の送電線支持兵の変位は、 $z_n^i$ そのものを未知量とする。この懸垂支持兵 $z_n^{i-1}$ において、送電線 $m^{(i-1)}$ と $m^{(i)}$ の水平張力ガ

$$\sum_{j=1}^{J_n^{(i-1)}} c_{m_j}^{(i-1)} \bar{H}_{m_j}^{(i-1)}(S_{m_0}^{(i-1)}) - z_n^{i-1} H_{m_0}^{(i-1)} + z_n^{i-1} H_{m_0}^{(i-1)} = \sum_{j=1}^{J_n^{(i)}} c_{m_j}^{(i)} \bar{H}_{m_j}^{(i)}(0) - z_n^{i-1} H_{m_0}^{(i)} + z_n^i H_{m_0}^{(i)} \quad (4)$$

式(1)、(2)、(5)のなかの各鉄塔基礎地盤の変位( $\varphi^i$ 等)および加速度( $\ddot{\varphi}^i$ 等)が与えられれば、これらの連立微分方程式を解くことにより、鉄塔の地震応答が得られる。

### 3. 数値計算結果

(1) 数値計算モデル 数値計算に採用した鉄塔-送電線系のモデルを図3に示す。Case 1~3は鉄塔をすべて耐張型とした場合、Case 4は3基の耐張型鉄塔の間

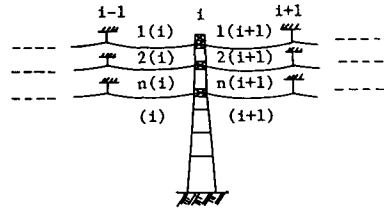


Fig. 2 Model of towers and transmission lines system including suspension towers

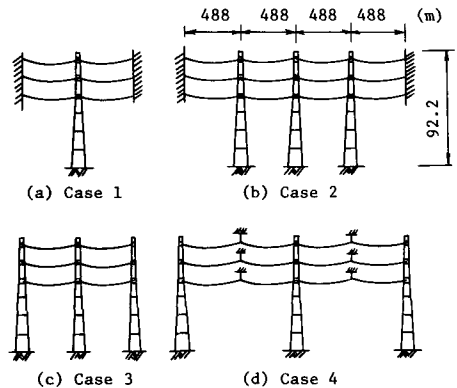


Fig. 3 Models of towers and transmission lines

Table 1 Natural circular frequencies ( ${}^c\Omega_j$ ), participation factors ( $\beta_j^L, \beta_j^R$ ) and additional tension modes ( $\bar{H}_j(0), \bar{H}_j(S_0)$ ) of transmission line

| Mode | ${}^c\Omega_j$<br>(rad/s) | $\beta_j^L$ | $\beta_j^R$ | $\bar{H}_j(0)$<br>(kN) | $\bar{H}_j(S_0)$<br>(kN) |
|------|---------------------------|-------------|-------------|------------------------|--------------------------|
| 1    | 1.274                     | 0.147       | 0.147       | 0.007                  | -0.007                   |
| 2    | 1.818                     | 1.559       | -1.559      | 0.082                  | 0.082                    |
| 3    | 2.573                     | 0.074       | 0.074       | 0.013                  | -0.013                   |
| 4    | 3.086                     | 1.734       | -1.734      | 0.272                  | 0.272                    |
| 5    | 3.866                     | 0.049       | 0.049       | 0.019                  | -0.019                   |
| 6    | 3.868                     | 2.814       | -2.814      | 0.830                  | 0.830                    |
| 7    | 4.596                     | 0.881       | -0.881      | 0.385                  | 0.385                    |
| 8    | 5.159                     | 0.037       | 0.037       | 0.026                  | -0.026                   |
| 39   | 25.80                     | 0.089       | 0.089       | 1.510                  | -1.510                   |
| 40   | 26.26                     | 0.220       | 0.220       | 30.874                 | -30.874                  |
| 41   | 26.46                     | 0.004       | -0.004      | 0.067                  | 0.067                    |
| 80   | 51.63                     | 0.002       | 0.002       | 0.128                  | 0.128                    |
| 81   | 52.08                     | 0.039       | -0.039      | 67.992                 | 67.992                   |
| 82   | 52.28                     | 0.043       | -0.043      | 3.092                  | 3.092                    |

に懸垂型鉄塔が入ったモデルである。これらのモデルの諸元は九州電力南九州幹線系統中のNo.239~241 モデルにシミュレートするものであるが、本研究は数値計算の一例を示すことを目的として、鉄塔および送電線はすべて同一形状、同一規格とした。

本計算に採用された送電線のモードを表1に示す。表が31本の送電線は0~8 Hzの振動数域に約80個のモードを持つことがわかる。しかし、送電線の張力の地震応答には、表中の四角で囲まれた低振動数域の対称モード(4, 6, 7次)および縦波の1次, 2次モード(40, 81次)のみが寄与し、その他のモードはほとんど寄与しない。したがって、鉄塔-送電線系の地震応答計算には、これらのモードのみが採用される。

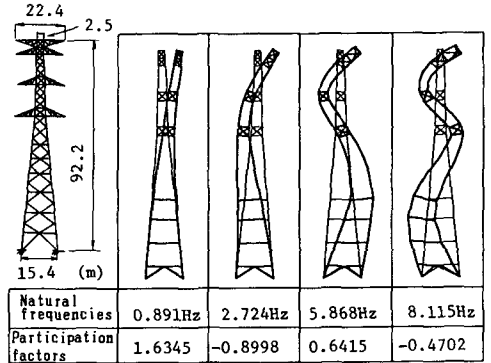


Fig.4 Modes of single tower

また、鉄塔については図4に示すモードを用いた。

(2)本解析法(第2法)による結果と送電線をばねと見なした解析法(第1法)による結果の比較 Case1のSan

Fernando地震(N21E成分,  $\ddot{\phi}_{max}=216 \text{ cm/s}^2$ )に対する応答を、本解析法によって計算し、鉄塔の加速度、変位、支柱材および斜材の部材応力の最大応答値を裏線で図5に示す。図には、送電線両端のばね定数の振動数特性を用いて鉄塔-送電線系の地震応答計算を行った結果を裏線で示した。2つの解法には、多少の相違が認められる。その理由は、i)本解析法では、送電線の付加張力の定常応答値を用いることなく応答計算が行われているが、第1法ではその定常応答値より得られたばね定数を用いて鉄塔-送電線系の地震応答を求めている

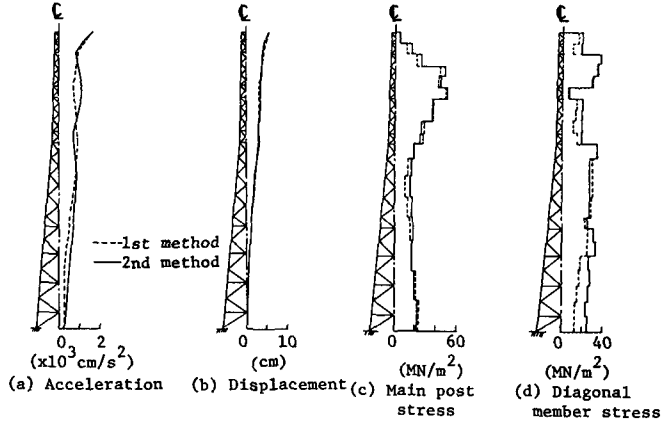


Fig.5 Comparison between results computed by the 1st method and the 2nd one (San Fernando earthquake, N21E component,  $\ddot{\phi}_{max}=216 \text{ cm/s}^2$ )

ること、ii)本解析法と第1法とでは、鉄塔の固有振動数、振動形がわずかに異なるので、十分な大きな次数のモードまで採用しなければ両方法の計算結果に完全な一致が得られないこと、等によるものである。

しかし、本解析法が送電線の付加張力の定常応答値であるばね定数を用いることなく計算できる点に

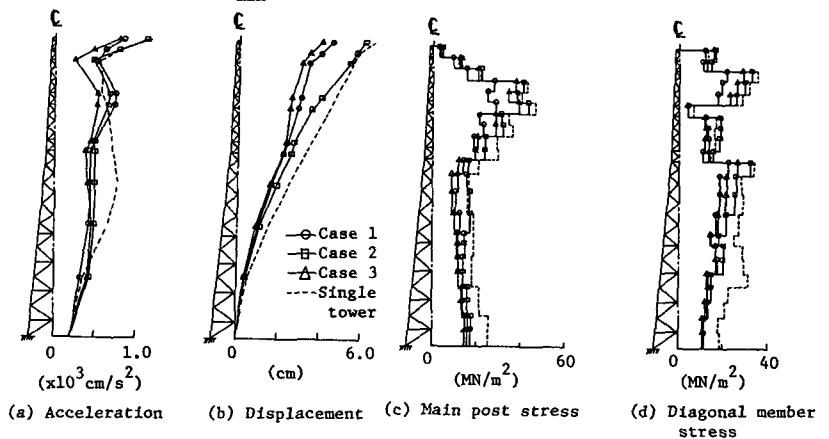


Fig.6 Peak responses of tower for the San Fernando earthquake (N21E component,  $\ddot{\phi}_{max}=216 \text{ cm/s}^2$ )

て、第1法よりも解に対する信頼性は高いものと思われる。

(3) すべて耐張型鉄塔としたCase1~3の地震応答計算結果

本解析法を用いて、図3のCase1~3について、San Fernando地震に対する中央鉄塔の加速度、変位および部材応力の最大応答値を図6に示す。各鉄塔基礎地盤の変位および加速度は

同一位相の同一地震波とし、減衰定数は鉄塔および送電線ともに2%とした。

図6から、いずれのケースにおいても中央鉄塔の応答値は、本計算例では、単

体鉄塔の応答値と比べてほぼ等しいか小さい値になっている。

(4) 懸垂型鉄塔を含む鉄塔-送電線系の地震応答計算結果 懸垂型鉄塔を含むCase4について、San Fernando地震に対する与系の中央鉄塔の加速度、変位および部材応力の最大応答値を図7に実線で示している。また、比較のため、単体鉄塔の応答値を点線で、Case2の中央鉄塔の応答値を二重線で示している。なお、計算では、鉄塔および送電線の減衰定数はともに2%とした。

(5) 各鉄塔基礎で地震波の位相差を考慮した鉄塔-送電線系の地震応答計算結果 本解析法は、各鉄塔基礎が異なる地震波を受ける場合に対しても容易に用いることができる。ここでは、一例として、Case2の鉄塔-送電線系に対して線路方向に、釧路地震(E-W成分,  $\ddot{y}_{max}=216\text{ cm/s}^2$ )が同じ波形で伝播速度1 km/s, 2 km/sで伝播するときの与系の中央鉄塔の加速度、変位および部材応力の最大応答値を図8に示す。図中には比較のため、地震波が各鉄塔基礎に対して同一位相の場合も示している。

参考文献 1)小坪他:超高速送電鉄塔の動的試験とその耐震性に関する検討,土木学会論文集,第333号,1983年5月, 2)小坪他:送電線のばね定数の振動数特性,土木学会論文集,第344号/I-1,1984年4月, 3)小坪他:鉄塔の耐震性に及ぼす送電線の影響,土木学会論文集,第344号/I-1,1984年4月, 4)川島他:数値化精度を考慮したSMAC-B2型強震計記録の計器補正法および変位計算法,土木学会論文集,第325号,1982年9月

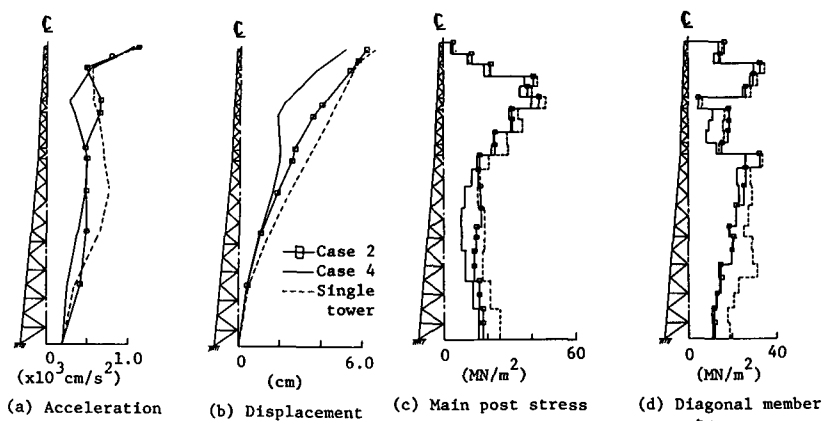


Fig.7 Peak responses of tower for the San Fernando (N21E component,  $\ddot{y}_{max}=216\text{ cm/s}^2$ )

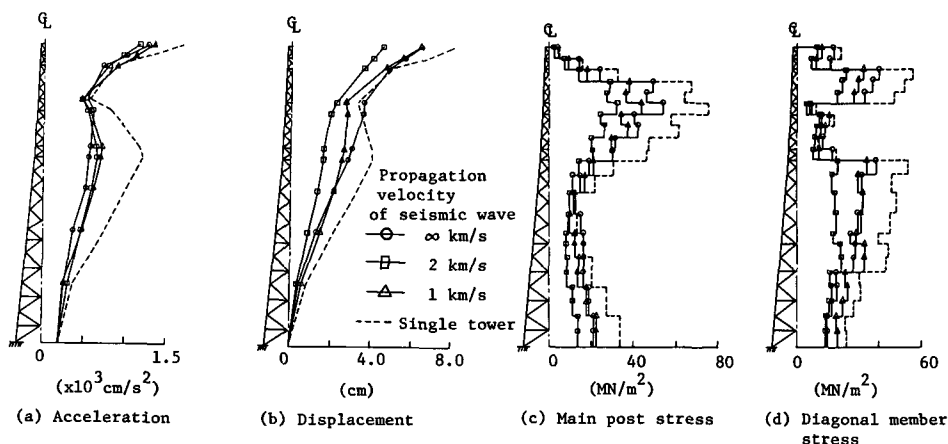


Fig.8 Peak responses of the middle tower in Case 2 for the Kushiro earthquake (E-W component,  $\ddot{y}_{max}=216\text{ cm/s}^2$ )