

送電線の非線形を考慮した地震応答解析

下池 利孝¹・大谷 修²・山上 順子³・廣岡 栄子³・中山 彰³

¹株式会社コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部 振動音響技術室

(〒651-2271 神戸市西区高塚台1丁目5番5号)

E-mail:shimoike.toshinori@kki.kobelco.com

²正会員 株式会社コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部

(〒651-2271 神戸市西区高塚台1丁目5番5号)

³株式会社コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部 振動音響技術室

鉄塔-送電線系は、ライフラインで欠かす事の出来ない電気を供給する設備である。この鉄塔のような高い構造物やその高所に設置されている送電線の付属品は、巨大地震の発生に対して、耐震性の検討が進められている。これらの巨大構造の実機加振試験は不可能なことから、現状では数値シミュレーションに頼らざるを得ない。そのため、数値解析モデルは実体の挙動を的確に反映したものとする必要がある。

本報は、圧縮を負担しない送電線に非線形性トラス要素を用いて、巨大地震時の解析を行い、線形モデルとの比較を行った。

Key Words :electrical transmission lines,steel tower,non-linear,seismic response analysis

1. まえがき

2011年の東日本大震災では、鉄塔や送電線・付属部品に地震動により損傷や損壊の被害が報告されている。そのため、最近話題となっている東海・南海地震の様な巨大地震の発生に対して、鉄塔のような高い構造物やその高所に設置されている送電線の付属部品などに対する耐震性の検討が進められている。この耐震性を評価するには、実構造物にて地震波形による加振試験を行うことが有用であると考えが、このような巨大な構造物を実際に試験することは、現状ではほぼ不可能である。従って、これらの耐震評価は、実体の地震時挙動を精度良く模擬できる数値解析モデルが必要となる。

鉄塔-送電線系の地震応答解析において、課題となるのは数十mと長く、柔な送電線の非線形特性を的確にモデル化することが重要である。弊社では大型クレーンのワイヤーロープの挙動解析のために開発したロープの非線形構成則を導入し独自開発した非線形動的解析プログラムSINDYSを用いて、送電線の時刻歴応答解析をおこなった。

本論では、まず非線形トラス要素理論について示し、その適用例として送電線に非線形トラスを用いた地震応答解析結果を示す。また、このような解析での精度を得

るために必要となる分割数や時間刻みおよび減衰定数の影響などを検討した。ここでは、その一部を紹介する。

2. 理論解析

断片線形化された動的システムの運動方程式は、次のような2回微分方程式に記述される¹⁾。

$$\begin{aligned} & [M_L + M_N] \ddot{u} + [C_L + C_N] \dot{u} + [K_L + K_N] u \\ & = F - F_N \end{aligned} \quad (1a)$$

ここで、 M_L, C_L, K_L は各時間ステップで一定の線形部分の質量、減衰、剛性マトリックスである。

M_N, C_N, K_N は各時間ステップごとに变化する非線形の質量、減衰、剛性マトリックスである。また、 F_N は非線形部分によって生じる補正外力である。マトリックス $M_L, M_N, C_L, C_N, K_L, K_N$ などはあらかじめ準備された標準要素に対して有限要素法によって作成することができる。SINDYSでは標準要素として線形及び非線形の質量、減衰、ばねのスカラ要素のほか、微小変位のはりや油圧配管要素、バルブ要素などが用意されている¹⁾。本報では、今回モデル化に使用した大変位非線形

トラス要素に関する解析理論を述べる。

これらの理論は、三次元トラスの大変形解析²⁾および部材の有限な回転を厳密に記述する回転行列³⁾、さらに回転行列とあらたに先行状態におけるようその節点間寸法と要素部材力より定まる幾何剛性を導入して三次元骨組の大変形を行った研究⁴⁾をもとに、これらの静的増分理論を動的な問題に、かつ全変位法に発展させたものである。

(1) 非線形トラス要素

図-1に示すように右手直交座標系x, y, zを全体座標系とし、時刻 t_0 のときの部材端A, Bの全体座標を

A (x_1, y_1, z_1), B (x_2, y_2, z_2) とする。時刻 $t = t_0$ から $t = t_0 + \Delta t$ 間に生じる材端A, Bでの部材弾性力の増分と変位増分間の関係式は、変位の2次項まで考慮すると次のように得られる²⁾。

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_A \\ \Delta F_B \end{Bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} A & -A \\ -A & A \end{bmatrix} + \frac{T}{l} \begin{bmatrix} W & -W \\ -W & W \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \Delta u_A \\ \Delta u_B \end{Bmatrix} \quad (2a)$$

ただし

$$\Delta F_A = \begin{Bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \\ \Delta F_z \end{Bmatrix}, \Delta F_B = -\Delta F_A$$

$$\Delta u_A = \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta v_1 \\ \Delta w_1 \end{Bmatrix}, \Delta u_B = \begin{Bmatrix} \Delta u_2 \\ \Delta v_2 \\ \Delta w_2 \end{Bmatrix}$$

$$A = \frac{EA}{l_0} \begin{bmatrix} X^2 & XY & XZ \\ XY & Y^2 & YZ \\ XZ & YZ & Z^2 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X^2 & XY & XZ \\ XY & Y^2 & YZ \\ XZ & YZ & Z^2 \end{bmatrix} \end{Bmatrix}$$

$$X = (x_2 - x_1)/l$$

$$Y = (y_2 - y_1)/l$$

$$Z = (z_2 - z_1)/l$$

EA : トラスの軸剛性

l_0 : 無応力時の部材長

l : 時刻 t_0 における部材長

T : 時刻 t_0 における部材張力

非線形トラス要素は、式(2a)の $l - l_0 < 0$ となる場合は、運動方程式[式(1a)]で、剛性マトリックスが0になる

とした。(すなわち、圧縮力を受け持たない非線形トラス要素)

また、式(2a)は増分系で書かれている。時刻歴応答における運動方程式[式(1a)]の時間積分は全変位で行うほうが便利のため、式(2a)を全変位系で表示することを考える。式(2a)を各トラス要素についてまとめると次式が得られる。

$$\Delta F_i = K_T \cdot \Delta u_i \quad (2b)$$

式(2b)は、図-2に示す補正外力 F_c を導入することによって全変位系で次のように表すことができる。

$$K_T u_{i+1} = F_{i+1} - F_c \quad (2c)$$

補正外力 F_c は図-2より次のようにして求まる。

$$F_c = F_i - K_T \cdot u_i \quad (2d)$$

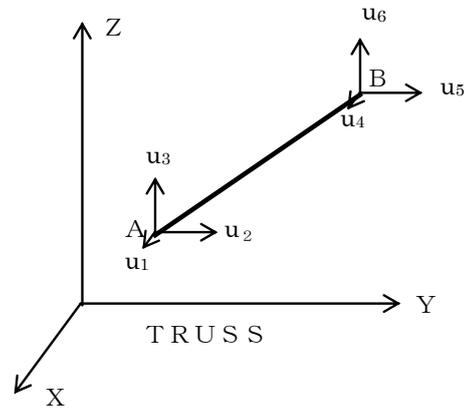


図-1 トラス要素

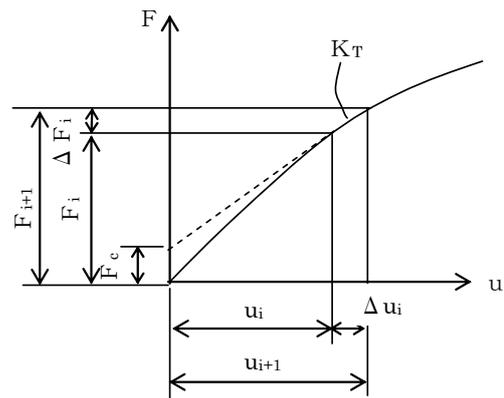


図-2 増分系と全変位系

慣性力と減衰力に関しては、トラス要素の質量を集中質量として扱い、減衰は剛性比例型とし、これらを式(1a)の運動方程式に組み込む。

3. 解析例

(1) 解析モデル及び境界条件

本章の解析モデルは、図-3に示すように2鉄塔1スパンとし、以下に示す条件とした。また、方向は、鉄塔AからBに向かう方向（以下、電線軸方向と称す。）を東西方向、鉄塔AからBに向かう方向の直角方向（以下、電線軸直角方向と称す。）を南北方向とした。

- i) 鉄塔は、曲げ・捻り・せん断剛性をもつはり要素にてモデル化し、単体でそれぞれ表1の固有振動数をもつモデルとした。参考として鉄塔Aの固有振動モード図を図-4に示す。また、曲げの固有振動数は、東西方向、南北方向2方向に発生するが、同じ固有振動数、すなわち同じ曲げ剛性になるようにモデル化した。
- ii) 送電線のモデル化は、前章で述べた非線形性を的確にモデル化したトラス要素を用いた。また、比較として圧縮力を受け持つ線形トラス要素を用いた計算を行った。
- iii) 送電線の分割数は24分割とした。
- iv) 鉄塔の付属品などは質量・剛性にて考慮することが可能であるが、本解析では考慮していない。
- v) 地震波形は巨大地震を想定し、兵庫県南部地震 神戸市中央区中山手での観測波形を2倍にした波形を用い、東西・南北方向の単独入力と水平2方向同時入力とした。図-5に入力波形とその波形の周波数分析結果を示す。地震波形入力位置は、地面に設置されている鉄塔下部とした。
- vi) 解析時間積分の刻み Δt は、1msecとした。
- vii) 鉄塔と送電線の減衰は剛性比例減衰とし、 $CK=1.0 \times 10^3$ とした。

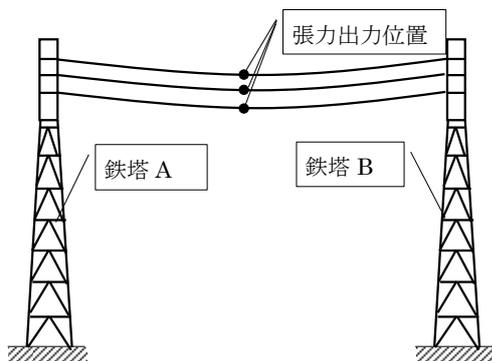


図-3 解析モデル図

表-1 鉄塔の固有振動数

	固有振動数 (Hz)	
	鉄塔A	鉄塔B
曲げ	3.0	4.0
ねじり	8.0	7.0

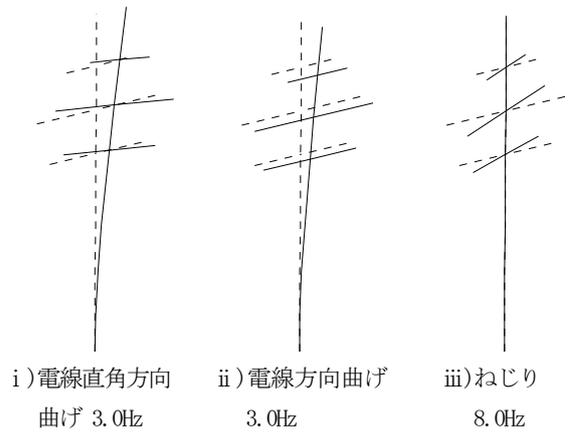
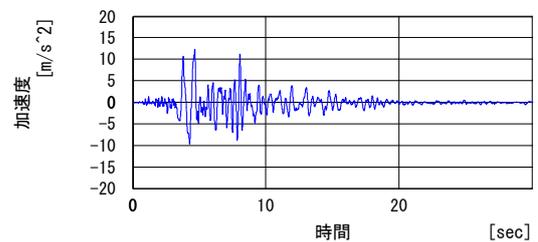
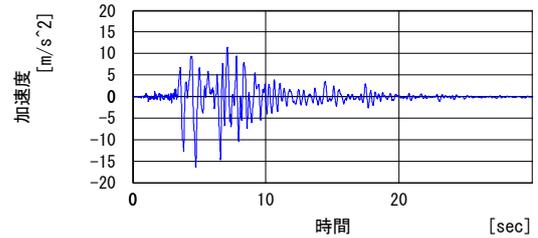


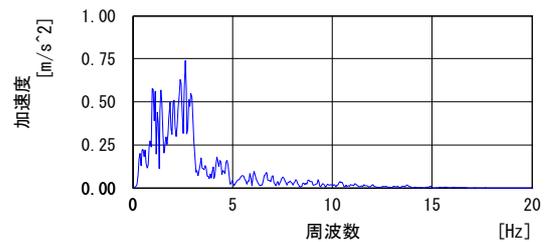
図-4 鉄塔の固有振動数および振動モード



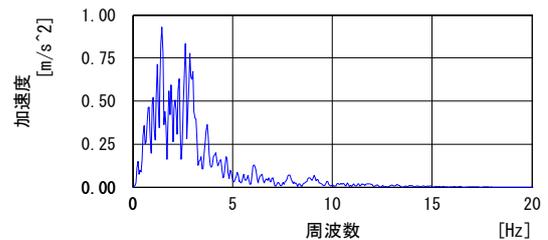
i) 電線方向（東西方向）入力波形時刻歴



ii) 電線方向（南北方向）入力波形時刻歴



iii) 電線方向（東西方向）入力波形周波数分析結果



iv) 電線方向（南北方向）入力波形周波数分析結果

図-5 入力地震波形

(2) 解析結果

ここでは、東西・南北方向同時入力の結果のみを示す。

まず、送電線のモデル化を線形と非線形にした場合の比較として、6本の送電線の張力の最大値を表-2に、代表例として下北側送電線の張力の時刻歴応答を図-6に示す。送電線張力の出力位置は、図-3に示す中央位置とする。この結果より、図-6において非線形と線形では、圧縮力の発生の有無により、時刻歴応答の波形に違いが発生している。また、表-2により張力の最大値の比較を示したが、約5%~12%程度違いがある。中南を除くと線形モデルの方が大きくなっている。この結果では、線形モデルの方が安全側の設計となる。しかし、地震波形の特性や大きさなどにより、安全側と断定することは出来ない。このことから、送電線のモデル化は、精度の良い非線形トラス要素を用いる方がよいと思われる。

図-7に下北側送電線張力の応答結果を示す。この結果より、図-7に示す張力結果は、約4~7s付近(図-7①)および11.9s,13s(図-7②)に示すように送電線が縮む側に行くと張力は0となり、非線形トラス要素が理論通りの結果になっていることが検証できた。

ここでは割愛したが、入力地震波形を南北・東西のそれぞれ単独入力した場合と同時入力した場合の比較では、単独入力の最大張力は、東西方向が同時入力より約5%程度低い値となる。ただし、各方向単独入力の解析結果の二乗平均和をとると安全側の設計となる。

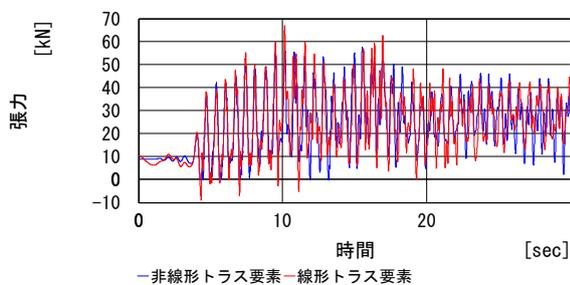


図-6 下北側送電線中央の張力
(非線形トラス要素と線形トラス要素の比較)

表-2 送電線張力の最大値

送電線位置	張力 (kN)	
	非線形トラス要素	線形トラス要素
上北	79.6	84.8
上南	79.1	84.4
中北	74.3	80.0
中南	80.0	77.0
下北	59.5	67.0
下南	65.9	67.0

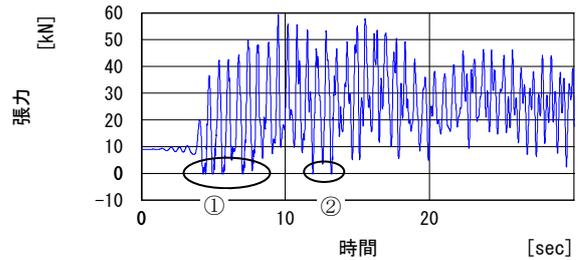


図-7 下北側送電線中央の張力

4. 送電線解析モデル化の解析精度検討

(1) 解析モデル及び境界条件

3章の解析に先立ち解析モデルの精度検討をおこなった。ここでは、分割数について報告する。

本章では、送電線の分割数の影響を把握するために図-8に示すように2鉄塔1スパンに送電線1線(2本)とした。また、方向、鉄塔名称は3章と同様とした。解析条件は、以下の様な条件とした。

- i) 鉄塔は、3章と同様の固有振動数の曲げ・捻り・せん断剛性をもつはりモデルにてモデル化した。
- ii) 鉄塔の付属品などは、3章と同様に本解析では考慮していない。
- iii) 地震波形は、図-5に示す3章と同様の兵庫県南部地震の神戸市中央区中山手での観測波形の1倍の波形を用いた。(図-5の1/2の応答波形)加振方向は、東西・南北方向の水平2方向同時入力とした。
- iv) 送電線の分割数は表-3の4条件とし、非線形トラス要素を用いた。
- v) 解析時間積分の刻み Δt は、3章と同様に1msecとした。
- vi) 鉄塔間の距離は、27.5mと仮定した。
- vii) 鉄塔と送電線の減衰は剛性比例減衰とし、 $C/K=1.0 \times 10^3$ とした。

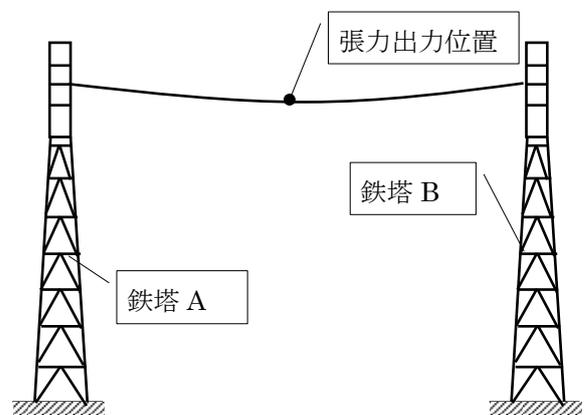


図-8 解析モデル図

表-3 鉄塔の分割数

送電線の分割数
4分割
8分割
16分割
24分割

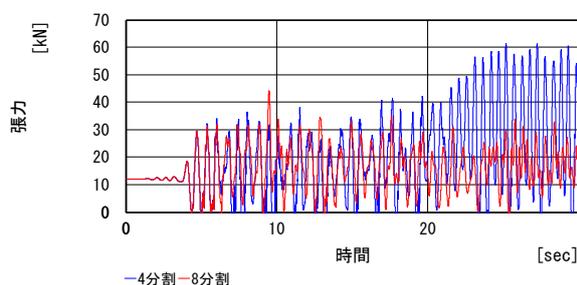
(2) 検討結果

各分割数の送電線中央張力（出力位置図-8参照）の応答結果および周波数分析結果を図-9に示す。本結果より、電線張力は、4分割が20s以降非常に大きくなっている。この4分割の応答が大きくなっている振動数を確認すると約1.9Hzとなっている。この1.9Hzは、鉄塔Bの曲げの固有振動数（鉄塔Bの曲げの固有振動数は、送電線の質量により低くなっている。）となっており、各分割数の振動モード図を図-10 iii)に示す。この振動モード図から送電線が4分割では送電線の振動モード図が表現できずに、1次に近いモード形態となっていることがわかる。このことから、電線が曲げによる力の吸収ができなくなり、応答が大きくなっている。また、張力にて1.9Hz以外の卓越している振動数0.4Hzと1.4Hzの振動モードを図-10 i), ii)に示す。この振動モードは、4Hzが電線の1次

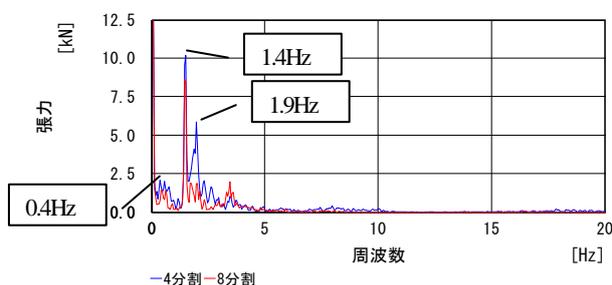
曲げモード、1.4Hzが鉄塔Aの曲げモード（鉄塔Bと同様に、送電線の質量により固有振動数が低くなっている。）となっている。この結果より、4分割では、0.4Hzの振動モードは表現できているが、1.4Hzの時点で振動モードが表現できていないことがわかる。

送電線の張力は、本解析結果より、送電線の1次、鉄塔の電線方向曲げの固有振動数の振動成分が卓越する傾向にあることがわかった。また、それ以外に3~4Hz付近の成分も卓越しているが、これは地震波形の南北方向の振動成分に3~4Hzの振動成分があり、これにより、振動が大きくなっていると考えられる。

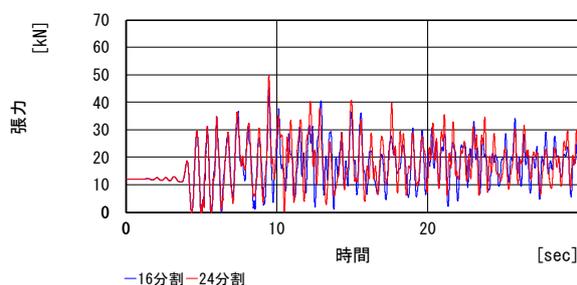
この卓越している0.4Hz、1.4Hz、1.9Hzの固有振動数の振動モードと張力の応答、周波数分析結果から、最低限必要な分割数を考えると、波の数は表4に示すように、1.9Hzでは24分割で8波となり、図-9に示したように張力の応答は16分割と24分割でほぼ同じとなっている。このことから、今回のスパンでは、24分割程度あれば、問題ないと考えられる。



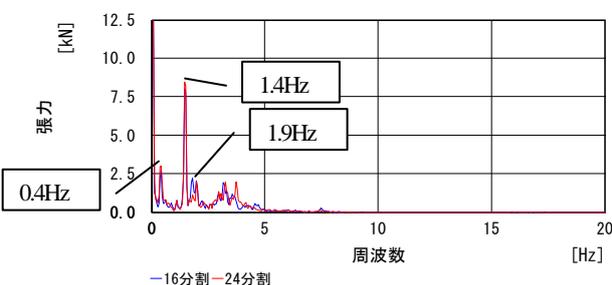
i)時刻歴応答結果（4分割，8分割）



ii)周波数分析結果（4分割，8分割）



iii)時刻歴応答結果（16分割，24分割）



iv)周波数分析結果（16分割，24分割）

図-9 送電線の張力応答結果

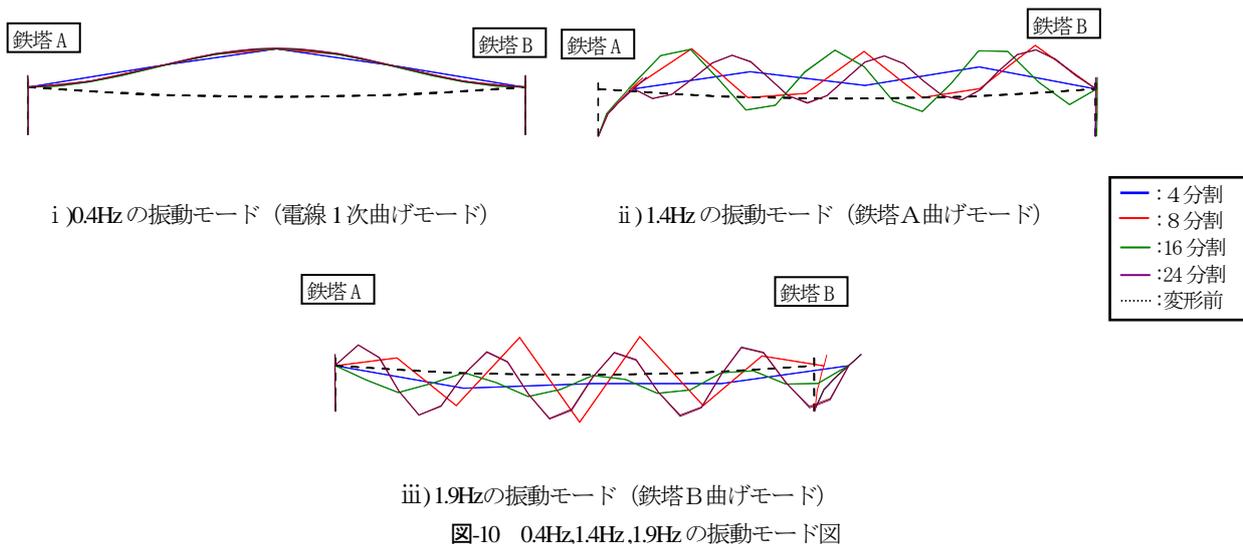


図-10 0.4Hz,1.4Hz,1.9Hzの振動モード図

表-4 送電線の分割数と振動モード表現の関係係数

送電線の 分割数	振動モードの波の数					
	0.4Hz		1.4Hz		1.9Hz	
	波の数	判定	波の数	判定	波の数	判定
4分割	1波	○	3波	×	1波	×
8分割	1波	○	5波	×	7波	×
16分割	1波	○	6波	○	7波	×
24分割	1波	○	6波	○	8波	○

5. あとがき

本論文では、送電線に非線形性を考慮した鉄塔—送電線系の地震応答解析について報告した。本解析により、以下のような結果を得た。

(1) 今回の送電線—鉄塔モデル系での地震応答解析において、送電線のモデル化に非線形トラス要素と線形トラス要素を用いた場合、応答挙動の違いから、電線張力最大値が約5%~12%程度の違いがみられた。更に巨大地震になるほど、この差異は大きくなると予想される。

(2) 入力地震波形を南北・東西のそれぞれ単独入力した場合は、同時入力した場合と張力で約5%程度の違いである。単独入力解析結果の各最大張力の二乗平均和をとると安全側の設計となる。

(3) 送電線の振動応答を把握するための分割数は、入力する地震波形の振動成分の影響もあるが、曲げなどの鉄塔の低次の固有振動数付近の送電線の振動モードが表現できる程度に分割する必要がある。

参考文献

- 1) 藤川, ほか2名: 神戸製鋼技報, 34-3, 109., 1984.
- 2) 頭井, ほか2名: 神戸製鋼技報, 25-1, 6., 1975.
- 3) 前田, ほか1名: 土論, 253, 6., 1975
- 4) 後藤: 土論, 355, 1., 1983

(???????)受付)

THE NONLINEAR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF THE POWER TRANSMISSION LINE

Toshinori SHIMOIKE, Osamu OTANI, Jyunko YAMAKAMI,
Eiko HIROOKA and Akira NAKAYAMA

Recently about a structure such as the steel tower and the accessories of the power transmission line, the earthquake-resistant evaluation for the great earthquake is carried out. Since it is impossible to have an actual shaking test about such huge structures, a numerical simulation is effective. Therefore it is required to raise the accuracy of numerical analysis and it is important for a simulation model to reflect the actual behavior.

In this paper, as the seismic response analysis for the great earthquake, the nonlinear truss element was used for the power line which does not consider compression and we compared the results with the ones for the linear truss element.