

送電鉄塔の振動について

石崎 潑 雄・川村 純 夫

ON THE VIBRATIONS OF TRANSMISSION TOWERS

by Dr. Eng. Hatsuo ISHIZAKI and Sumio KAWAMURA

Synopsis

Free vibrations of transmission towers are understood as the flexural vibrations of continuous cone. One type of towers which have long arms shows the higher modes distinctly. Several reasons why these higher modes occur on the tower, are supposed as the resonance between the vibration of the whole tower, the arms and some member groups, and the variations of wind forces. It must be considered that the stress distributions due to the vibrations of higher modes, are different from the distributions determined by the static analysis of design.

1. ま え が き

送電鉄塔は、多数の部材よりなる立体構造物で、その振動性状は、きわめて複雑であり、形状、架構形式はもとより、支配的外力である風の動空気力学的作用により、一層複雑なものとなっている。従つて風洞実験の結果を主とした風圧力の分布による平面トラスの応力解析に基づく部材決定法、すなわち現行の静力学的な設計法のみでは不十分で、不合理な面が生じる可能性がある。また現行の設計上は充分耐力を保ち得たと思われる鉄塔の倒壊の例が報告され¹⁾、しかもこの倒壊の原因が未だ完全に究明されていない。鉄塔の設計には、動的性状をも考慮した合理的な設計法が望まれる所以である。筆者等はこの観点に立つて、鉄塔に加わる風圧力と振動の模様を測定を行つてきた。その結果の一部については、すでに報告してあるが^{1),2)}、本論では主として架線前の独立鉄塔の形状と振動性状との関係について考察する。

2. 自由振動について

鉄塔の振動には、塔全体としての振動ある一群の材の振動、あるいは各個材の振動、あるいはそれらの連成振動等いろいろ考えられるが、多くの場合、部分的な振動は塔全体の振動に比較して減衰が大きいので一応塔全体としての振動に関して論じ、特に無視できない部分的な振動に関しては別途に考察を加え、その影響を考慮する。

塔全体の自由振動についても、形状、架構形式により種々相異なつた様相を呈する。以下二つの代表的な型について述べる。

(a) アーム部分が比較的小さい場合

鉄塔の質量分布がほとんど、完全錐体に近い場合、すなわち主柱材が屈折点を持たないで、かつ主柱材、腹材の剛性分布もほぼ滑らかな場合に相当するが、この場合の撓み分布は完全錐体の曲げ振動として大体理解できる。またこの型の測定記録より判断すると、自然状態では高次の振動はほとんどみられず、2次の振動が多少生じる程度であり、動的応力の分布も滑らかで、静力学的に算出した所期の応力分布と同じ傾向にある。

この場合の測定結果、その他詳細は、すでに報告済みであるから省略する²⁾。

(b) 比較的長いアームが存在する場合

(a) の型とならんで多く存在する型で、主柱材に急な勾配の変化があり、それゆえその位置を境にして上下に剛性及び質量分布が不連続に変化する型とみなせる場合に相当し、Fig. 1 に示す鉄塔はこの型の代表的なものであり、測定はこれについて行つた。この測定結果についても前に一部報告³⁾したが、さらに考察を加えてみる。

この場合の代表的撓み分布を Fig. 2, Fig. 3 に示す。Fig. 2 (a), (b) は線路方向、高さ方向水平撓み分布を、Fig. 3 は同じく、頂部に水平方向の力を加えた場合の水平撓み分布を示す。Photo. 1 は Fig. 2 (b) の場合の記録であり、Photo. 2 は Fig. 3 の場合に相当する。

今これらの撓み分布を説明するのに次のように考えてみよう。記録より判断すると Photo. 1 及び Photo. 2 からもわかるように、この鉄塔の周期には、0.58 sec, 0.22 sec, 0.14 sec の三つがよくあらわれている。Fig. 1 の鉄塔の図からも大体想像がつくように、質量分布、剛性分布を算出すると、完全錐体と等断面との中間にあると考えられる。等断面及び完全錐体と考えた時の固有振動による撓み分布を描いてみると Fig. 4 のようになる。よつて今の鉄塔の場合の1次、2次及び3次の固有振動の撓み分布は、Fig. 4 の各

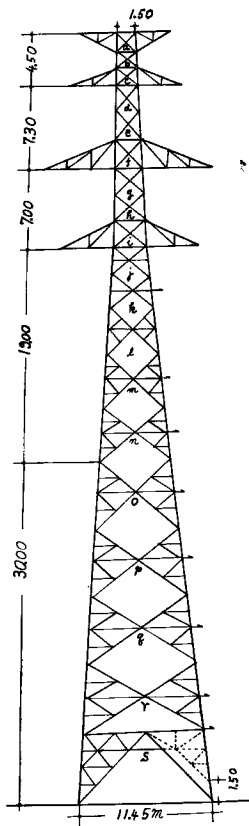


Fig. 1 The transmission tower; the stations where are horizontal diagonal members, are shown by the symbol →.

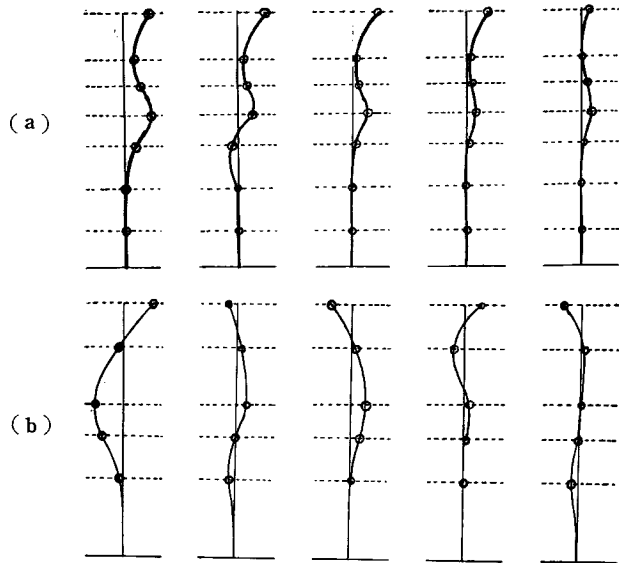


Fig. 2 The distributions of the horizontal displacement of the tower when vibrates naturally.

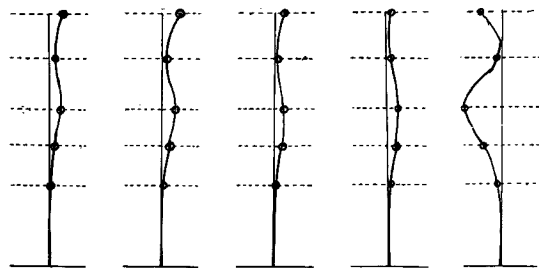


Fig. 3 The distributions of the horizontal displacement of the tower when the initial displacement is given at the top.

二曲線の間
にあると考え
られる。また
測定によつて
得られた 1
次, 2次およ
び 3 次の周期
の比は $T_1 :$
 $T_2 : T_3 = 1.0$
 $: 0.36 : 0.22$

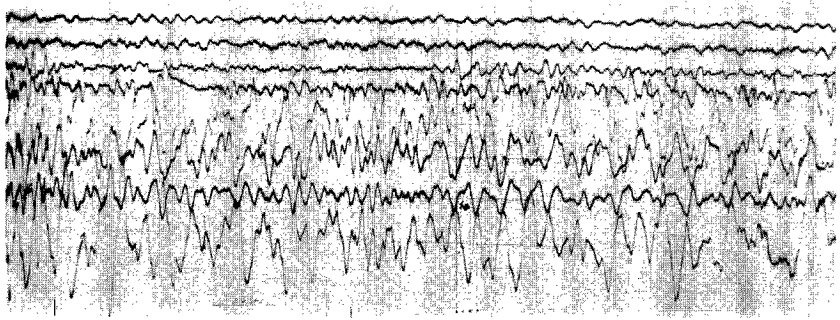


Photo. 1 The record of the natural horizontal vibration of the tower.

であつたが,

錐体の場合は $T_1 : T_2 :$
 $T_3 = 1.0 : 0.42 : 0.23$ であり, 等断面と考えた場合は
 $T_1 : T_2 : T_3 = 1.0 : 0.16 :$
 0.06 である。このことから
考えて一応この鉄塔の固有
振動による撓み分布は Fig.
4 の錐体の場合の曲線にほ
ぼ近い形と考えられる。こ
のように考えて, Fig. 4 の
1 次, 2 次及び 3 次の固有
振動による振巾を $y_1, y_2,$
及び y_3 とすると, Fig. 5
の (a) は $y = y_1 - y_2 + y_3$
(b) は, $y = y_2 + 0.5y_3$ に
より得られた曲線である。

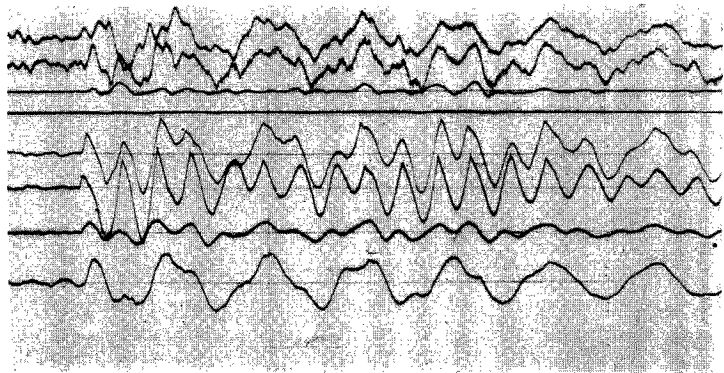


Photo. 2 The record of the horizontal and vertical vibrations of the tower when the initial displacement is given at the top. The two curves above in the figure show the vertical vibrations at the base of the tower, and other six curves show the horizontal vibrations of the tower.

Fig. 2 (a), Fig. 3 に示した測定撓み分布と
Fig. 5 の (a) とを比較すると, アーム部分
下の位置でよらみ出す傾向が一致し曲線の形
もよく似ている。又 Fig. 2 (b) の測定撓み
分布のうち, (1) と (3) は, Fig. 5 の
(b) の理論曲線とほぼ一致している。Fig. 2
(b) の (2), (4), (5) は, y_3 のみ, すな
わち 3 次振動のみで説明される。

結局 Fig. 1 の鉄塔の場合には, (a) の型
と違つて高次の振動が生じやすいということ
になる。この理由については, 前にも報告し
たように³⁾ いろいろ考えられた。すなわち,
アーム部分直下 I 点の位置の一群の材の振動
と塔全体の二次振動との共振, あるいはまた
風により主材背後に生じると仮定した渦の作

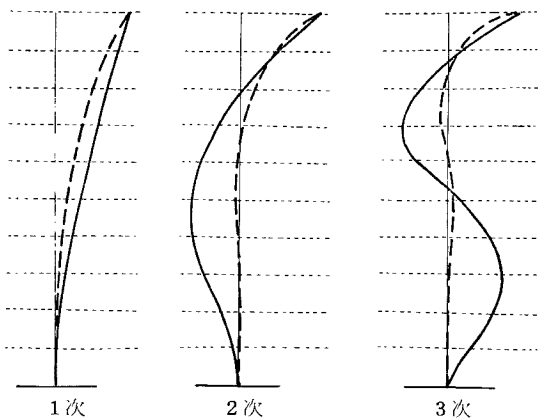


Fig. 4 The normal mode configurations of the flexural vibration of the bar and the cone; the curves with full lines shows that of the bar, the curve with broken lines shows that of the cone.

用に基づく振動等であつた。しかし Fig. 3 あるいは Photo. 2 からもわかるように、水平加力時にも基本振動の外に高次の振動が生じていること、また塔の水平動と上下動との波形が非常に良く似ている点が前の理由では理解しがたい。このようにいかなる場合でも高次の振動が発生していることがすでにこの種鉄塔の固有の性質であると思われる。よつて比較的大きい重量を有するアーム部分が振動中に上下方向の振動を生じ、これが塔全体の高次の振動を誘起せしめるものと仮定し、塔全体と最大の重量を有するアームについてそれぞれ振動数を求めてみよう。いま塔全体の振動を完全錐体の曲げ振動とみなして1次、2次及び3次の振動数を下式より算定する。

$$f_i = c_i \frac{1}{L^2} \left(\frac{EI_0}{\rho A_0} \right)^{1/2}$$

ここに f_i : 振動数 (cycle/sec.)

L : 塔長

E : ヤング率

I_0 : 断面二次率の固定端の値

ρ : 密度

A_0 : 断面積の固定端の値

$c_1=1.39, c_2=3.37, c_3=6.12$

である。

その結果 $f_1=7.65$ (cycle/sec), $f_2=18.8$ (cycle/sec), $f_3=32.6$ (cycle/sec) となる。次に中アームを支柱材の部分で固定された錐体とみなして同じように振動数を求めると1次振動数 $f_1'=31.6$ cycle/sec となり塔全体の3次振動に非常に近い値となる。このように鉄塔に取りつけられたアーム部分の上下方向の撓み振動が塔全体の高次振動に近い振動数をもつために、高次の振動がよくあらわれたのではないと思われる。このことから、上下動と塔の水平撓み分布との密接な関係が理解できる。また2次振動も同じような理由でアーム部分と塔全体の振動との共振によるものと推察される。

以上のように高次振動が発生するのは、アーム部分と塔全体との共振によるものであり、この種鉄塔固有の性質であるとする、現在までの測定結果を大体説明できる。

3. 風による強制振動

自然風は、一様な空気の流れではなく、常に時間的、空間的に変動する。この自然風の乱れと鉄塔の振動との関係は複雑であつて、多くの鉄塔について、種々の状態において測定を行わなければ問題の解決は困難であり、Fig. 6 はある瞬間における例を示したものであつて、この瞬間における前後の風圧力の変化等を考えなければならぬ。しかし図でみてもわかるように振巾と風圧との間にはなんらかの関係があることは明らかである。その詳細は不明

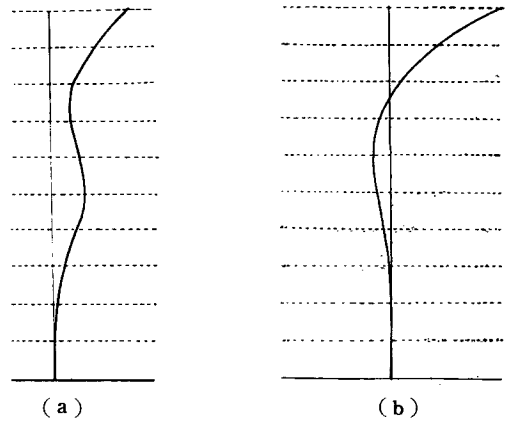


Fig. 5 The curve obtained by the combination of the normal mode configurations of the cone.

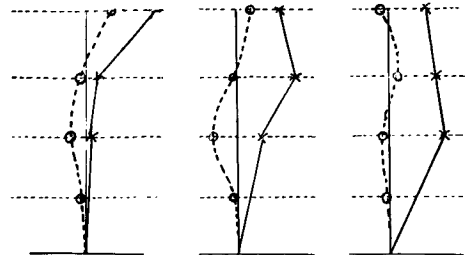


Fig. 6 The deflection and the wind pressure distributions.

であるが、傾向としては、以下のようなことが記録からわかる。

すなわち風向の振巾より風に直角方向の振巾の方が一般に大きく、風の乱れの大きい時ほど振巾が大きく、かつ高次の振動が生じやすい。

4. む す び

以上考察したように鉄塔全体としての自由振動は、一応完全錐体のような連続体で説明できるが、ある種の鉄塔のようにアーム部分すなわち附属部分が比較的大きい場合には、この部分の振動と塔全体、またはある一群の材の振動とが共振して、鉄塔全体に高次の振動を誘起せしめることがある。高次の振動が発生すると、その動的応力の分布は、所期の静力学的応力分布と非常に変るから注意しなければならない。それゆえアーム等附属部分の算定に当つても、よく塔全体の剛性等と比較して高次の振動が発生しにくいようにすべきであると考えられる。それらの具体的な問題については今後さらに研究を進めたい。

終りに鉄塔測定のを機会をあたえていただいた関西電力株式会社工務部送電課に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 岡沢鉄夫：高鉄塔の振動；鉄塔 第3号，昭和31年1月。
- 2) 石崎澄雄・川村純夫・中地博司：鉄塔の振動について(1)日本建築学会論文報告集 第57号，昭和32年7月。
- 3) 石崎澄雄・川村純夫：鉄塔の振動について；日本建築学会論文報告集 第60号，昭和33年10月。