

報 時 震 驗

第 10 卷 第 3, 4 號

鐵 塔 の 振 動 の 測 定

本 多 弘 吉, 伊 藤 博

1. 緒言.
2. 塔狀構造物の振動.
3. 聯成振動.
4. 鐵塔の振動測定方法.
5. 測定の經過.
6. C鐵塔及びD鐵塔 (85m).
7. K鐵塔 (85m).
8. A鐵塔及びB鐵塔 (75m).
9. 測定結果の概要と一般的考察.

1. 緒 言

一般に建造物の耐震性や耐風性を調べるには靜力學的の力が働くとした場合を論ずると共に動力學的の力が働く場合を考へなければならぬ。地震による地動が振動的である事は云ふ迄も無い。暴風に際しても風速は時間的に決して一定ではなく、「風の息」と稱せられる週期的の著しい變動がある。従つて靜力學的に考へて地震動の或る震度や風速の幾ら迄に對して安定であると云つても、萬一地震動又は風の擾亂の週期が建造物の固有振動の週期に近い場合には所謂共振れの現象を起して振動の振幅は極めて大きくなり、不測の災害を生ずる事も有り得る。よつて建造物の耐震性又は耐風性を論ずるには先づ其の固有振動の週期並びに固有振動の自然減衰の程度を知る事が極めて肝要である。

又外見は同じ様な建造物でも所謂剛く出来上つてゐれば固有週期は短く、柔かければ長いから、固有週期は建造物の剛柔の度合を示す一つの目安ともなる。

特に煙突、燈臺、塔等の塔狀構造物は其の基礎面の大きさに比べて高さが著しく高く震動を受ける事が甚しく、地震や暴風によつて倒壊した例が多い。従

つて新様な塔狀構造物の耐震性に關する研究は頗る多く、就中塔狀構造物の振動に就ての大森博士の實測並びに物部博士の理論的研究は有名である。しかし大森博士の測定されたのは概ね煉瓦造り又は鐵筋コンクリート造りの煙突であつて、例へば無線電信用の高い鐵塔の類の振動を測定した例は未だ餘り無い様である。近時無線電信・電話用の鐵塔や送電線用の鐵塔の建造される數は夥しいものであつて、地震や颱風の危險に曝される可能性の多い我が國では是非とも之等鐵塔の耐震性及び耐風性を徹底的に研究する必要が痛切に感ぜられる所である。

先頃圖らずも國際電氣通信株式會社の御協力により無線鐵塔の振動を測定する好機會に恵まれた。即ち同社の加藤安太郎氏始め多くの方々の御援助のもとに高さ 85m の自立式鐵塔 3 基及び 75m のもの二基に就て振動測定を行ふ事が出來た。元來無線鐵塔は空中線吊架線及び振止め用支線により數基が連結されてゐる爲にかなり複雑な振動をする。所が上記 5 基の鐵塔のうち 2 基は最近建造されたばかりで未だ支線も何も張られてをらず全く自由の状態のままでその固有振動を測定し、かつ更に 2 基の鐵塔をワイヤー・ロープで軽く連結して種々の試験を行ひ、之等兩鐵塔の聯成振動の状態を明かにする事が出來た。

次に之等 5 基の無線鐵塔の振動測定によつて得られた結果の概要を報告する。但し記述の便宜上先づ一般に塔狀構造物の振動に關する理論並びに是迄に得られた測定結果の概要及び聯成振動に關する理論を簡單に記す。その上で之等の理論を参照し乍ら無線鐵塔の振動測定結果を述べることにする。

2. 塔狀構造物の振動

(i) 理論的研究 一端の固定された壙狀、圓錐狀又は楔狀の所謂塔狀構造物の固有振動並びに地震動による強制振動に就ては物部博士の詳細なる研究がある。⁽¹⁾⁽²⁾

(1) 物部；“塔狀構造物の震動並びに其耐震性に就て”，土木學會誌，第 5 卷第 3 號 (1919)，561~647.

(2) 物部；“載荷せる構造物の震動並びに其耐震性に就て” 同上，第 6 卷第 4 號 (1920)，581~690.

今回我々が振動測定を行つた自立式鐵塔は鐵骨を組合せたものであるから其の振動を正確に解く事はかなり困難である。しかし全體として極めて概略的に見ると一種の載荷圓錐體とも見られる。或は更に簡略にして一端の固定された塙狀物體として其の固有振動の状態を豫め明かにしておけば實際の鐵塔の振動測定結果を處理するに當り少くとも大體の目やすを與へるものとして参考になる。

第1圖に示す様に x 軸を塙體の長さの方向にとり、 y 軸を之に直角な方向にとる。 $x=0$ の面で塙體は固定されてゐるとし、塙體の高さを l とする。今高さ x なる點の變位を y とすると、塙體が圖の面内に振動する時にはその振動方程式はよく知られてゐる様に

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0$$

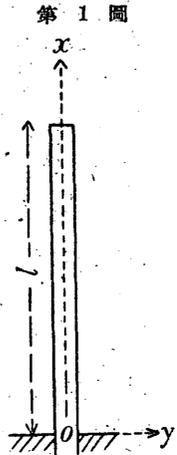
である。こゝに ρ は塙體の密度、 E はヤング率、 I は斷面の慣性能率、 A は斷面積とする。

振動に際しては 1) 空氣の抵抗、2) 塙體の物質の粘彈性及び 3) 振動勢力の一部の地盤への逸散等により振動は次第に減衰する。1) に就ては物部博士の⁽¹⁾研究があり、空氣の抵抗は運動速度に比例するとして振動の方程式を

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + c \frac{\partial y}{\partial t} = 0, \quad (c \text{ は常數})$$

とて解かれた。2) に就ては故末廣博士の研究がある。即ち縦粘性係数を ξ 、物質の延びの割合を e とすると固體粘性による“normal viscosity”は $\xi \frac{\partial e}{\partial t}$ で表はされると考へ、塙體の振動方程式として

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \xi I \frac{\partial^5 y}{\partial t \partial x^4} = 0 \quad (3)$$



(1) 前出、土木學會誌 第5卷第3號 79頁。

(2) 末廣；“塙狀體の減衰振動”地震研究所彙報 第6號 (1929), 63~70。

(3) 此の方程式は嘗て妹澤博士の得られたものと同一である。妹澤；“粘彈性體に於ける波動の老衰に就て”地震研究所彙報、第3號 (1927), 43~53。

を得られた。之を

$$\begin{aligned}
 x=0 \text{ に於ては固定, 従つて} \dots & \quad y=0, \quad \frac{\partial y}{\partial x}=0 \\
 x=l \text{ に於ては自由, } \dots\dots\dots & \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}=0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}=0
 \end{aligned}$$

なる条件を入れて解くと

$$\begin{aligned}
 y = & P \{ (\sin ml + \sinh ml) (\cos mx - \cosh mx) \\
 & + (\cos ml + \cosh ml) (-\sin mx + \sinh mx) \} \\
 & \times e^{-\frac{1}{2} m^4 \frac{\xi}{\rho} k^2 t} \cos \left(\frac{1}{2} \sqrt{4m^4 \frac{E}{\rho} k^2 - m^8 \frac{\xi^2}{\rho^2} k^4} t - \alpha \right) \dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

となる。但し P, α は常数; k は断面の廻轉半径で $I = Ak^2$ なる関係がある。

m は

$$\cos ml \cosh ml + 1 = 0$$

によつて與へられる。 $n = ml$ とおくと n は第 1 次 (基本), 第 2 次, 第 3 次振動 $\dots\dots$ (第 2 圖参照) に對して夫々 $n_1 = .875, n_2 = 4.694, n_3 = 7.855 \dots\dots$

となる。 ξ が小さい場合には (1) 式は減衰振動を示し, その週期 T は近似的に

$$T = 2\pi \cdot \frac{1}{k \cdot \frac{n^2}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}}$$

で表される。

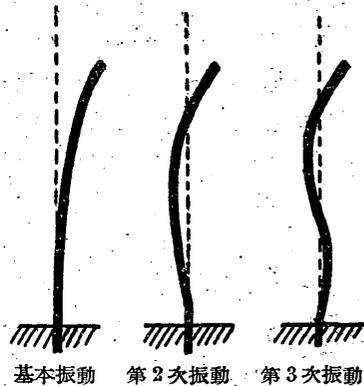
振幅が時と共に減衰する割合は

$$e^{-\frac{1}{2} m \frac{\xi}{\rho} k^2 t} = e^{-\frac{1}{2} \frac{\xi}{E} \frac{4\pi^2}{T^2} t} \dots\dots\dots (2)$$

である。従つて實測結果から振幅減衰の割合と週期 T とを求めると ξ/E の値が得られる譯である。

3) の振動勢力の一部の地盤への逸散の問題は極めて重要視されるべきものではあるが取扱ひはかなり複雑である。又 1) の空氣の抵抗の振動體に及ぼす

第 2 圖 構體の振動

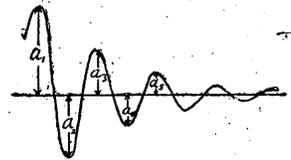


影響は固体粘性に因るものに比べて一般に小さいと考へられてゐる。こゝでは假に 2) の固体粘性だけを考慮に入れた (1) 式を以て鐵塔の固有振動の大勢を示すものとして實測結果の整理に際し参考にする事とする。

(ii) 鐵筋コンクリート造りの煙突及び無線塔の振動測定結果 次に参考として塔狀構造物のうちでも特に細長い構造を有する鐵筋コンクリート造りの煙突及び無線塔の振動に就て是迄に得られた結果の二三を述べやう。

(1) 大森博士は實測の結果佐賀關にある高さ 550 ft の鐵筋コンクリート造りの煙突の固有週期として 2.53~2.55 秒、助川の 100 ft の煙突に就ては 0.81 秒、東京醫科大學の同じく 100-ft の煙突に於て 0.85 秒を得られた。(2) 次で同博士は原ノ町にある高さ 660 ft の鐵筋コンクリート無線塔の固有週期を測定して 2.07 秒 (鐵框を付けた後は 2.12 秒) を得、又工事中 290 ft, 414 ft 及び 522 ft 迄出來上つた都度週期を測定して夫々 0.72 秒, 1.25 秒及び 1.67 秒を得られた。

(3) 福富氏は東京千駄ヶ谷にある 22.7 m の鐵筋コンクリート煙突に就て固有週期 0.61 秒及び固有減衰振動の減衰比 1.07、東京帝大構内にある高さ 45.4 m の鐵筋コンクリート煙突の固有週期 0.80 秒及び減衰比 1.05 を得、又前記大森博士の報告にある助川の煙突の振動の記録から同煙突の振動減衰比として 1.05



第 3 圖

を得た。こゝに減衰比と云ふのは例へば第 3 圖に示す様な減衰振動に於て

$$r = \frac{a_1}{a_2} = \frac{a_2}{a_3} = \frac{a_3}{a_4} = \dots \dots \dots \text{を以て表される値である。}$$

3. 聯 成 振 動

空中線用鐵塔は一般に空中線吊架線及び振止め用共通支線等によつて數基が相互に連結され、且つ兩端の鐵塔は受支線により地上の錨塊に固定されてゐ

- (1) 大森; "Vibration of Reinforced Concrete Chimneys." 震災豫防調査會紀要, 第 9 卷第 1 號, (1918), 1~29.
- (2) 大森; "Measurement of Vibration of the 660-Foot Wireless Telegraph Station Tower at Haranomachi." 同上, 第 9 卷第 3 號, (1921)
- (3) 福富; "On the Vibration of Buildings and Reinforced Concrete Chimneys due to Earthquake Motion." 77~99. 地震研究所彙報, 第 12 號, (1934), 492~516.

る。記述の便宜上之等鐵塔が直線狀に配列されてゐる方向を“並列方向”と名付け、之に直角な水平方向を“直角方向”と呼ぶ事とする。鐵塔は直角方向にはかなり自由で鐵塔自身の固有振動に近い振動をするが、並列方向には隣接鐵塔と所謂聯成振動をなし振幅は普通の唸りの現象に見られる様な著しい變化をする。鐵塔としての聯成振動をそのまま理論的に計算する代りにこゝでは出来るだけ簡単に模型的に取扱ふ事とする。即ち二つの同様な簡単な振子が弾性を有する糸によつて連結されてゐる場合を考究し、その結果から實際の鐵塔の聯成振動を推察しよう。

減衰性を有する二個の振子の聯成振動に關しては例へば Max Wien⁽¹⁾の研究がある。次にその特別の場合として固有週期が T_0 (振動數 $n_0 = 2\pi/T_0$) 及び減衰係數が ε で x 方向に振動する全く同様な二つの振動體が、兩者の相對的變位に比例する力で聯成されてゐるとする。一方の振動體の變位を x_1 、他方の夫を x_2 とし、 f を正の常數とすると、二つの振子の運動方程式は夫々

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\varepsilon\dot{x}_1 + n_0^2 x_1 &= f \cdot (x_2 - x_1) \\ \ddot{x}_2 + 2\varepsilon\dot{x}_2 + n_0^2 x_2 &= -f \cdot (x_2 - x_1) \end{aligned} \right\}$$

である。之は又

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\varepsilon\dot{x}_1 + n^2 x_1 - sn^2 x_2 &= 0 \\ \ddot{x}_2 + 2\varepsilon\dot{x}_2 + n^2 x_2 - sn^2 x_1 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

と表はされる。但し $n_0^2 + f = n^2$, $f = sn^2$ ($s > 0$)

$$x_1 = A_1 e^{\alpha t}, \quad x_2 = A_2 e^{\alpha t} \quad \text{とおくと}$$

$$\left. \begin{aligned} A_1(\alpha^2 + 2\varepsilon\alpha + n^2) - sn^2 A_2 &= 0 \\ A_2(\alpha^2 + 2\varepsilon\alpha + n^2) - sn^2 A_1 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

となり

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\alpha^2 + 2\varepsilon\alpha + n^2}{sn^2} = \frac{sn^2}{\alpha^2 + 2\varepsilon\alpha + n^2}$$

で之から α に就て

$$\alpha^4 + 4\varepsilon\alpha^3 + (2n^2 + 4\varepsilon^2)\alpha^2 + 4\varepsilon n^2 \alpha + n^4(1-s^2) = 0$$

なる 4 次方程式を得る。 $\alpha = \varepsilon - \varepsilon$ とおくと

(1) Max Wien: Wiedemann Annalen der Physik, Bd. 61, 1897, p. 151~189.

$$z^4 + 2\gamma^2 z^2 + \gamma^4 - s^2(\gamma^2 + \varepsilon^2)^2 = 0, \quad \gamma^2 = n^2 - \varepsilon^2$$

となり z に關する 2 次方程式となり

$$z^2 = -\gamma^2 \pm s(\gamma^2 + \varepsilon^2)$$

従つて $\alpha = \pm \sqrt{-\gamma^2 \pm s(\gamma^2 + \varepsilon^2)} - \varepsilon$ を得る。

s が小さいとして $-\gamma^2 \pm s(\gamma^2 + \varepsilon^2) < 0$ とすると

$$\alpha = -\varepsilon \pm i\gamma \sqrt{1 \pm s \frac{\gamma^2 + \varepsilon^2}{\gamma^2}} = -\varepsilon \pm i\gamma \sqrt{1 \pm s \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon^2}{n^2}}} \quad \text{となる。}$$

$$p_1 = \sqrt{1 + s \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon^2}{n^2}}}, \quad p_2 = \sqrt{1 - s \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon^2}{n^2}}} \quad \dots\dots (3)$$

と置けば

$$\alpha = -\varepsilon + i\gamma p_1 \quad \text{のとき} \quad A_2/A_1 = -1$$

$$\alpha = -\varepsilon - i\gamma p_1 \quad \text{"} \quad A_2/A_1 = -1$$

$$\alpha = -\varepsilon + i\gamma p_2 \quad \text{"} \quad A_2/A_1 = +1$$

$$\alpha = -\varepsilon - i\gamma p_2 \quad \text{"} \quad A_2/A_1 = +1$$

となる。よつて A, B, C, D を常數とすると

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= Ae^{-\varepsilon t} \sin p_1 \gamma t + Be^{-\varepsilon t} \cos p_1 \gamma t + Ce^{-\varepsilon t} \sin p_2 \gamma t + De^{-\varepsilon t} \cos p_2 \gamma t \\ x_2 &= -Ae^{-\varepsilon t} \sin p_1 \gamma t - Be^{-\varepsilon t} \cos p_1 \gamma t + Ce^{-\varepsilon t} \sin p_2 \gamma t + De^{-\varepsilon t} \cos p_2 \gamma t \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

となる。振子は何れも釣合の位置に靜止してゐるとし、最初一方の振子に一度だけ衝撃を與へたとすると最初の條件として

$$t=0 \quad \text{に於て} \quad x_1=0, \quad \dot{x}_1=\dot{x}_{10}, \quad x_2=0, \quad \dot{x}_2=0$$

を得る。之と (4) とより

$$B=0, \quad D=0, \quad \dot{x}_{10} = Ap_1\gamma + Cp_2\gamma, \quad 0 = -Ap_1\gamma + Cp_2\gamma$$

なる關係を得るから

$$A = \frac{\dot{x}_{10}}{2p_1\gamma}, \quad C = \frac{\dot{x}_{10}}{2p_2\gamma} \quad \text{となる。よつて結局 } x_1, x_2 \text{ は}$$

$$x_1 = \frac{\dot{x}_{10}}{2\gamma} \left[\frac{1}{p_1} \sin p_1 \gamma t + \frac{1}{p_2} \sin p_2 \gamma t \right] e^{-\varepsilon t} \quad \dots\dots (5)$$

$$x_2 = \frac{\dot{x}_{10}}{2\gamma} \left[-\frac{1}{p_1} \sin p_1 \gamma t + \frac{1}{p_2} \sin p_2 \gamma t \right] e^{-\varepsilon t} \quad \dots\dots (6)$$

と表される。特に聯成作用の力が弱い時には f , 従つて s は小さく, p_1 と p_2 との差は小さい。この場合には

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{\dot{x}_{10}}{2\gamma} r_1 e^{-\epsilon t} \sin(p_1 \gamma t - \theta_1) \\ x_2 &= \frac{\dot{x}_{10}}{2\gamma} r_2 e^{-\epsilon t} \sin(p_1 \gamma t - \theta_2) \end{aligned} \right\}$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{1}{p_1^2} + \frac{1}{p_2^2} + \frac{2}{p_1 p_2} \cos(p_1 - p_2) \gamma t},$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{1}{p_1^2} + \frac{1}{p_2^2} - \frac{2}{p_1 p_2} \cos(p_1 - p_2) \gamma t},$$

$$\tan \theta_1 = \frac{\frac{1}{p_2} \sin(p_1 - p_2) \gamma t}{\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \cos(p_1 - p_2) \gamma t},$$

$$\tan \theta_2 = \frac{\frac{1}{p_2} \sin(p_1 - p_2) \gamma t}{-\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \cos(p_1 - p_2) \gamma t}.$$

の形に表す事が出来る。(5), (6) の解は最初に第一の振子が或振幅で振動してゐる間は第二の振子は殆ど振動しないが, そのうちに振動勢力は第一の振子から第二の振子に移り, 次に第一の振子が再び振動し出すと云ふ場合に振動勢力の往復が起り, しかも全體としての振幅は漸次減少する事を示す。聯成作用も振動體の減衰性も何れも弱い時には s , f 及び ϵ はすべて小さいとして, 全體としての唸り振動の相隣る振幅の極大と極大との時間 τ は近似的に

$$\tau = \frac{2\pi}{(p_1 - p_2)\gamma} = \frac{T}{s} \quad (T \text{ は振動體の固有週期}) \dots (7),$$

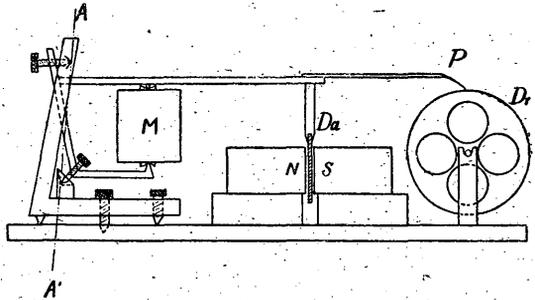
と求められる。

4. 鐵塔の振動測定方法

(i) 振動計 鐵塔の最上部の中央に据附けて鐵塔の振動を記録させた振動計は第 4 圖に模式的に示す様に水平振子の原理を用いたものである。AA' は振子の廻轉軸, M は質量 4 kg の重錘, Dr は記録圓筒で燻煙紙上に記録する方

法による。N・S は馬蹄形磁石、 D_a は制振器用銅板である。振動計の倍率は 5.0, 振子の固有週期は 3 秒前後とし制振度は 4 乃至 5 以上とした。後に述べる様に測定した鐵塔の固有週期は 1 秒程度に過ぎないから此

第 4 圖 水平動振動計略圖



の振動計の記録は殆ど補正を要せずその儘で鐵塔自身の振動を表すと考へてよい。

振動測定に際して振動計据附けの方向を變へたり調節をしたりする毎に簡単な檢定を行つた。尙測定中は振動計を天幕で蔽ひ、風により振動計の重錘の動搖するのを防いだ。

(ii) 測定の方法 或る鐵塔の振動を測定するには數基の鐵塔が空中線吊架線及び振止め用支線によつて直線狀に連結されてゐる方向（並列方向）と之に直角な水平方向（直角方向）とに分けて觀測した。鐵塔の最上部で振動を測らうとする方向に 1 名又は 2 名の人が鐵塔を一二度搖り動かすと鐵塔は容易に振動する。最上部に於ける振幅は數耗程度で倍率 5 倍の振動計により充分に記録される。鐵塔は直角方向には規則正しい固有の減衰振動に近い振動をする。並列方向には隣接鐵塔との聯成振動が顯著で著しい唸りの振動をする。鐵塔が何處にも連結されず全く自由である時には何れの方向にも極めて規則正しい固有の振動をする事は勿論である。

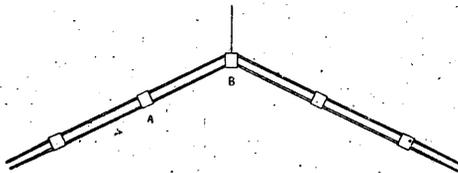
又強制振動による鐵塔の共振れの現象を調べる目的で、試みに自轉車の後輪の輻の一部に 4 kg 乃至 4.5 kg の鉛の塊を取附けたものを發振機（振動發生裝置）として、鐵塔の最上部に据附けて車輪を回轉させると週期的の力で鐵塔を搖り動かす事になる。回轉の週期が鐵塔の固有週期に近付くと鐵塔の振幅は急激に増大する。此の方法によつて共振れの程度を知ると共に鐵塔の固有週期を求める事も出来る。

5. 測定 の 経 過

(i) K 鐵塔 國際電気通信株式會社小室受信所（埼玉縣北安立郡小室村）にある高さ・85 m の自立式鐵塔 4 基が直線狀に連結されてゐるものゝうち最も東方にある鐵塔の振動を測定した。今後之を K 鐵塔と呼ぶ事とする。逓信省工務局の金原技師、國際電気通信株式會社の加藤安太郎氏及び小室受信所の方々の御協力のもとに昭和 13 年 9 月 21 日午後測定を行つた。當日は晴天で時々多少の風はあつたが大した事はなく、測定實施中の風速は鐵塔の最上部に於ても概して 5 m/sec 程度以下で、風の爲に鐵塔の振動する影響は極めて小さかつた。K 鐵塔に就ては並列方向及び直角方向の振動を測定し、發振機による強制振動の調査は行はなかつた。

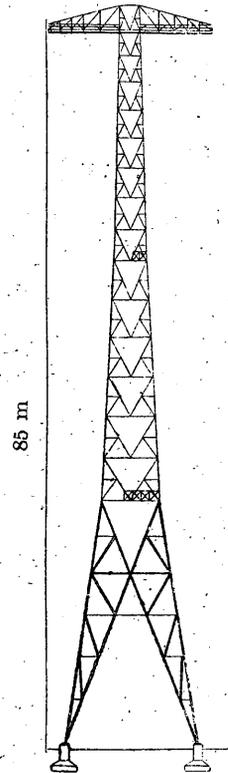
(ii) A 鐵塔及び B 鐵塔 國際電気通信株式會社依佐美送信所（愛知縣碧海郡依佐美村）に於ける高さ 75 m の自立式鐵塔 5 基が第 6 圖に示す様に連

第 6 圖 A, B 等の鐵塔配置圖



結されてゐるうち、直線部の A 鐵塔及び屈曲部の B 鐵塔に就て測定を行つた。加藤安太郎氏・鶴飼章一氏及び依佐美送信所の方々の御協力を得て昭和 13 年 9 月 22 日午前 A 鐵塔、同日午後 B 鐵塔に就て測定を行つた。當日は殆ど終日小雨で風は弱く、鐵塔の最上部でも風速は 5 m/sec 程度以下であつた。A 鐵塔は並列方向及び直角方向の振動を測定し、B 鐵塔は並列方向と受支線の方向との振動を測定した。固有振動の他に臨時に自

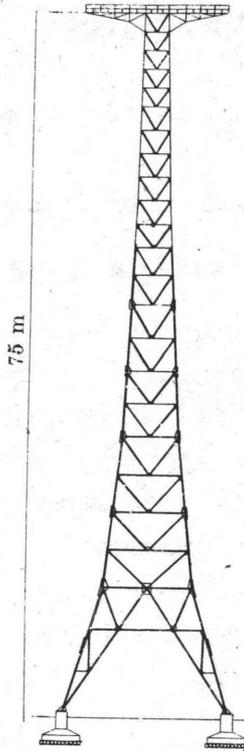
第 5 圖 K 鐵塔側面圖



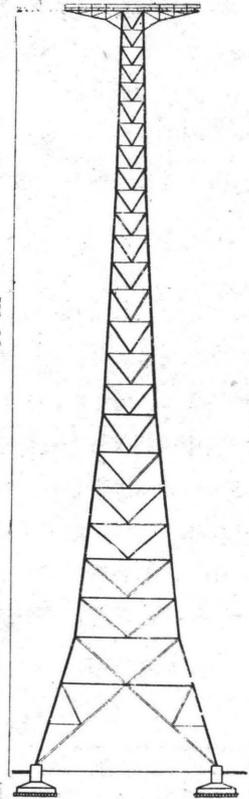
轉車の後輪に 4 kg の鉛塊を取付けたものを發振機として鐵塔の最上部で廻轉させ、強制振動による共振の影響を調べた。

(iii) C 鐵塔及び D 鐵塔 依佐美送信所に高さ 85 m の自立式鐵塔が 5 基新しく建設され、未だ空中線吊架線や支線を張るに至らない自由状態のままで種々の測定や試験を行つた。直線状に並列してゐる 5 基のうち最も西方にあるものを C 鐵塔とし、その次のを D 鐵塔とする。鶴飼章一氏・市川覺逸氏及び依佐美送信所の方々の御協力を得て昭

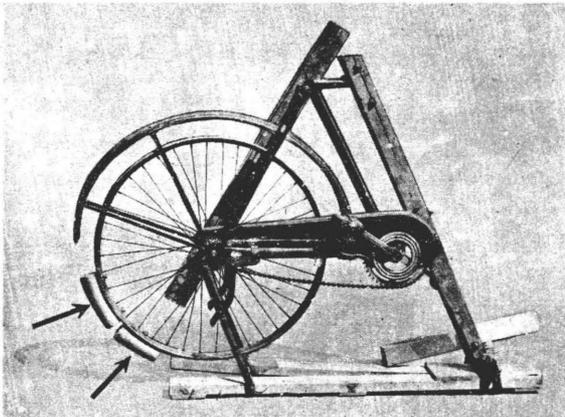
第 7 圖 A 鐵塔側面圖



第 8 圖 C, D 鐵塔側面圖



第 9 圖 發振機



和 14 年 3 月 30 日午前中に C 鐵塔、同日午後 D 鐵塔の振動を測定した。強制振動を調べる爲の發振機として今回は自轉車の前半部を取り適當に加工したものの(第 9 圖)を用ひ、之を鐵塔の最上部に水

平に据附けた。車輪の一部に取附けた鉛塊の質量は 4.5 kg であつた。

(iv) K 鐵塔, A 鐵塔及び B 鐵塔の振動測定に當つては何の場合にも鐵塔の最上部に 8 名の人がおり, C 鐵塔では 7 名, D 鐵塔では 6 名の人がゐた。鐵塔の最上部に多數の人がゐると固有週期の値に幾分影響を及ぼす譯であるが, 最上部構造即ち腕金の部分の質量に比べて 6, 7 名の人の質量は小さいから測定値に左程影響を及ぼす事はないと考へられる。

6. C 鐵塔及び D 鐵塔 (85 m)

頂上に長さ 20 m の腕金を有する高さ 85 m の自立式鐵塔 5 基が夫々 150 m の間隔をおいて直線狀に並列してゐる。それ等のうち最も西方にあるものを C 鐵塔とし, その次のものを D 鐵塔とする。之等鐵塔は最近工事が終つたばかりで未だ空中線吊架線や支線を張るに至つてゐないので鐵塔自身の固有振動を調査するのに非常に都合がよかつた。又 C・D 兩鐵塔をワイヤー・ロープで連結して, それによる聯成振動を調査する事が出來た。

(i) 固有振動 鐵塔が一つの支線も張られないで全く自由に立つてゐる状態に於てその固有振動を調べた。鐵塔の最上部に於て 1 名の人が振動を測定し

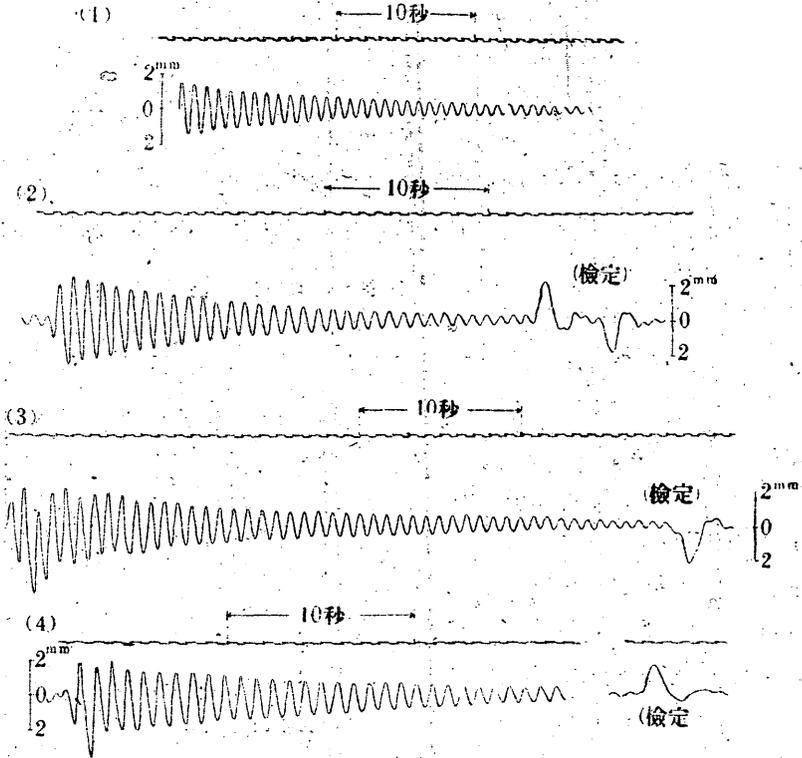
第 1 表 C・D 兩鐵塔固有振動の
20 振動に要する時間及び
平均固有週期

番 號	C 鐵 塔		D 鐵 塔	
	並列方向	直角方向	並列方向	直角方向
	秒	秒	秒	秒
1	16.3	16.6	16.5	15.7
2	16.4	16.5	16.5	16.8
3	16.4	16.7	16.5	16.7
4	16.4	16.6	16.5	16.8
5	16.4	16.7	16.5	16.8
6	16.4	16.9	16.4	16.7
7	16.4	16.8	16.4	16.7
8	16.5	16.8	16.5	16.8
9	16.5	16.8	16.5	16.7
10	16.4	16.8	16.5	16.8
平均	16.41	16.72	16.48	16.75
固有週期	0.821	0.836	0.824	0.838

やうとする方向に一度だけ鐵塔を揺り動かした上靜かに放置すると鐵塔は極めて規則正しい減衰振動をする。最初の振幅は大體 1.0~1.5 耗の程度であつた。C・D 兩鐵塔に就て並列方向及び直角方向の固有振動の記象の例を第 10 圖に示す。之等の各々に就て 20 振動の時間を測定し(第 1 表)それ等の平均として固有週期は C・D 兩鐵塔に就て何れも並列方向には 0.82 秒, 直角方向には 0.84 秒と求められた。C・D 兩鐵塔は構造が全く同一であるが, 固有

第 10 圖 C 鐵塔及び D 鐵塔の固有振動

- (1) C 鐵塔並列方向 (2) C 鐵塔直角方向
 (3) D 鐵塔並列方向 (4) D 鐵塔直角方向



週期も亦同じ方向には殆ど同じ値となつてゐる。直角方向は並列方向より週期が僅に長く求められてゐるが之は腕金が直角方向に延びてゐる爲に兩方向に就て質量分布及び構造上の多少の差異が現れてゐるものと考へられる。

鐵塔の固有振動の振幅を x とすると全體としての振幅の減衰は

$$x = Q \cdot e^{-\epsilon t} \dots \dots \dots (8)$$

の形で表はされる。こゝに ϵ は減衰係數と呼ばれる量である。 ϵ と減衰比 v との間には

$$\log_{10} v = \frac{1}{2} \epsilon T \log_{10} e \dots \dots \dots (9)$$

なる関係がある。T は近似的に固有週期と見てよい。

$$\log_{10}x = y, \quad \log_{10}Q = a, \quad \epsilon T \log_{10}e = b \quad \dots\dots (10)$$

とおけば $y = a - b \cdot \frac{t}{T} \quad \dots\dots (11)$

となる。實測結果から (11) の b を求めると

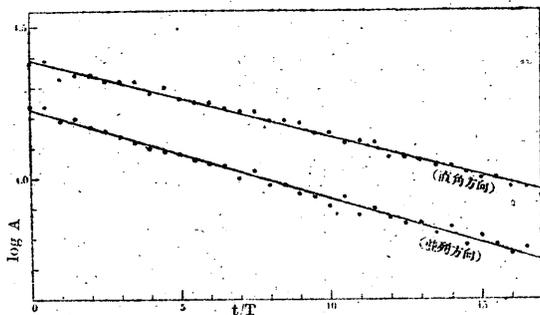
$$\log_{10}v = \frac{1}{2}b, \quad \epsilon = \frac{b}{T \cdot \log_{10}e} \quad \dots\dots (12)$$

により減衰比 v 及び減衰係数 ε を求めることが出来る。

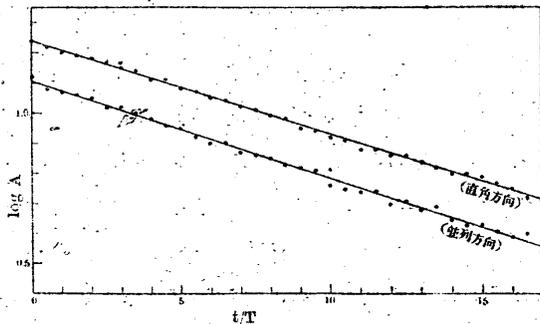
C 鐵塔の並列・直角の兩方向及び D 鐵塔の並列方向には夫々 3 例に就て、D 鐵塔の直角方向には 2 例

に就て、夫々 t/T の種々の値に對する y の平均値を求めると第 11 圖及び第 12 圖に示す様に y と t/T との間には殆ど完全な直線的關係が成立つてゐる。之等の各々に就て最小自乘法により b を求め之から v 及び ε を計算すると第 2 表に示す様

第 11 圖 C 鐵塔の固有振動
A; 振幅 (1/10 mm)



第 12 圖 D 鐵塔の固有振動
A; 振幅 (1/10 mm)



第 2 表 C・D 兩鐵塔に
關する b, v, ε の値

	C 鐵塔	
	並列方向	直角方向
b	0.0323	0.0307
v	1.038	1.036
ε	0.0905	0.0846
	D 鐵塔	
	並列方向	直角方向
b	0.0295	0.0255
v	1.035	1.030
ε	0.0824	0.0701

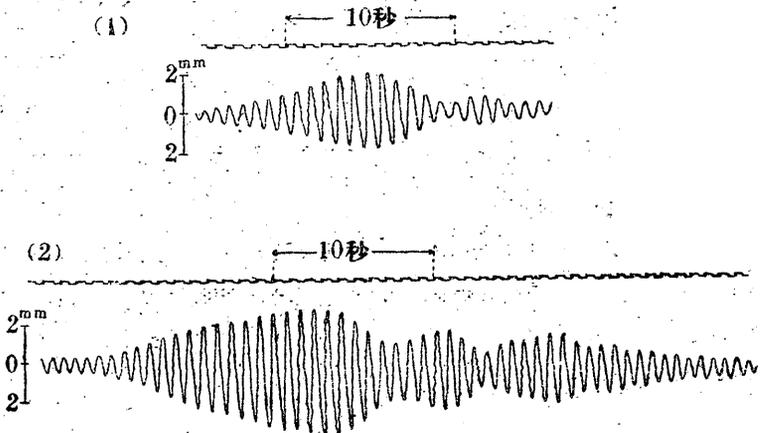
に、C・D 兩鐵塔に關して減衰比 v は 1.03~1.04、減衰係数は 0.07~0.09 の程度である事が判つた。

(ii) 強制振動 自轉車を改造して後輪の輻の一個所に 4.5 kg の鉛塊を取附けたものを發振機とする。之を鐵塔の最上部に水平に据附け、之による並列方向及び直角方向の振動を測定する。發振機の廻轉週期が鐵塔の固有週期に近づくと鐵塔の振幅は急に極めて大きくなる。斯様にして鐵塔の強制振動を調べる事が出来る譯ではあるが、何分今回使用した發振機では廻轉週期の微細な調節を行ひ難く、完全な強制振動を得る程に同一週期の廻轉を續ける事は困難であつた。従つてこゝに得られた記録から例へば振幅と振動週期との關係を示す曲線を求めると共振れの影響を示す重要な参考となる事は勿論であるが、嚴密な意味に於ける「共振れ曲線」とは多少相異なる點があるかも知れない事は充分注意を要する。又發振機の廻轉數を餘り大きくする事は出来なかつたので此處に取扱つたのは鐵塔の基本振動の前後の範圍に限り、第 2 次振動や第 3 次振動には觸れなかつた。

C・D 兩鐵塔の夫々並列及び直角の兩方向に關する強制振動の記象の數例及び之等から得られた調査結果の數例を第 13~16 圖に示す。第 15 圖 a は C 鐵塔の並列方向の強制振動を示すもので横軸には經過時間を取り、縦軸にはその時刻の振幅(實線)と週期(破線)をとつてある。同圖 b は同じ材料に基き横軸に週期を取り縦軸には振幅をとつたものであつて 0.82~0.83 秒の週期

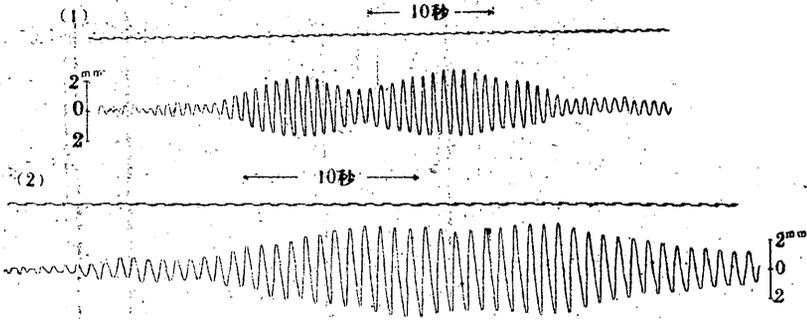
第 13 圖 C 鐵塔の強制振動

(1) 並列方向 (2) 直角方向



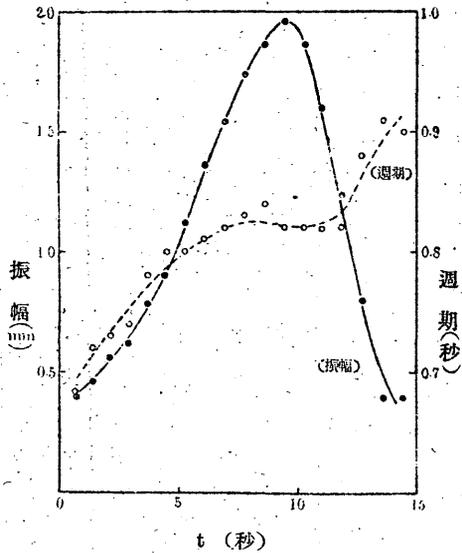
第 14 圖 D 鐵塔の強制振動

(1) 並列方向 (2) 直角方向



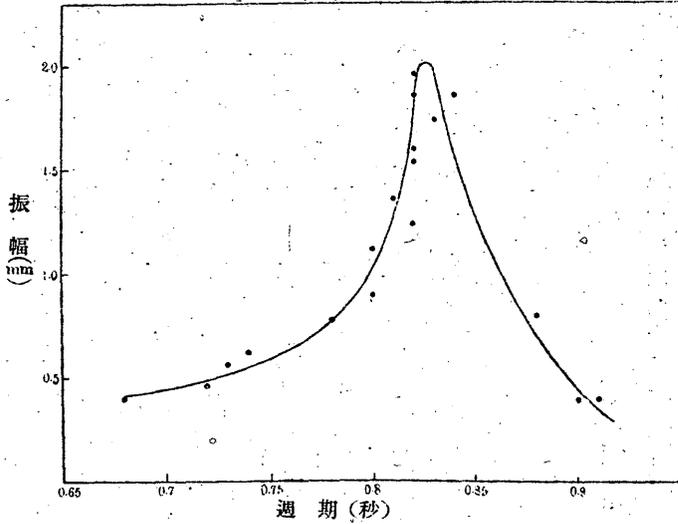
の邊で振幅が著しく大きくなつてゐる。C 鐵塔並列方向の固有振動週期は 0.82 秒であるから之は丁度基本振動に関する共振れに他ならない。第 15 圖 e は C 鐵塔直角方向の強制振動で週期が 0.83~0.84 秒の時に振幅は顯著な極大を示してゐる。第 16 圖 a は D 鐵塔並列方向、第 16 圖 b 及び c は D 鐵塔直角方向の強制振動を示す。D 鐵塔直角方向に関する第 16 圖 e を見るとその方向の固有週期 (0.84 秒) に近い 0.85 秒邊で振幅は

第 15 圖 (a) C 鐵塔並列方向の強制振動

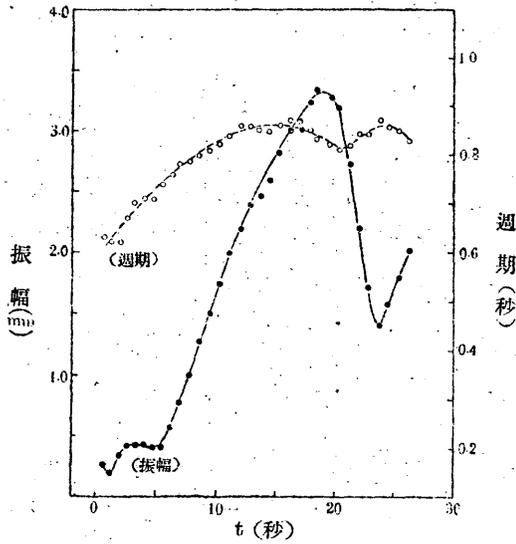


極めて大きくなり、例へば 0.3~0.4 秒の週期の時の振幅に比べると十倍以上にもなつており共振れの現象が如何に顯著であるかが明瞭に現れてゐる。尚 C・D 兩鐵塔の數例に就て見ると鐵塔の固有週期に近い振動が 6~12 回位續くと振幅が極めて大きくなることが判る。

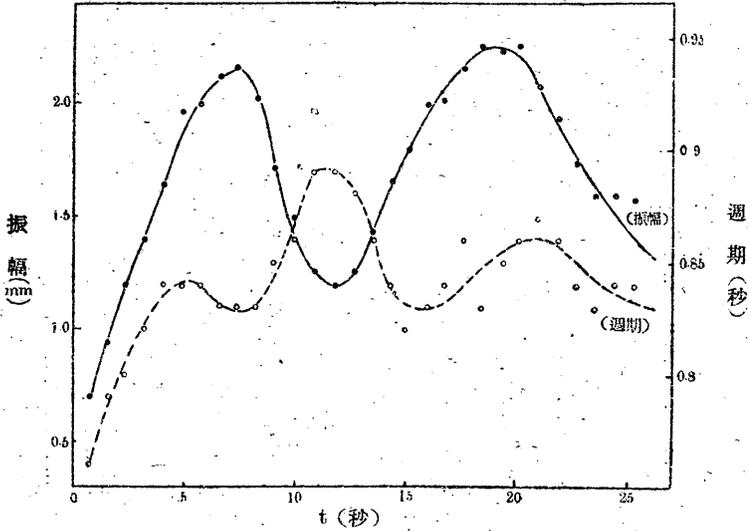
第 15 圖 (b) C 鐵塔並列方向の強制振動



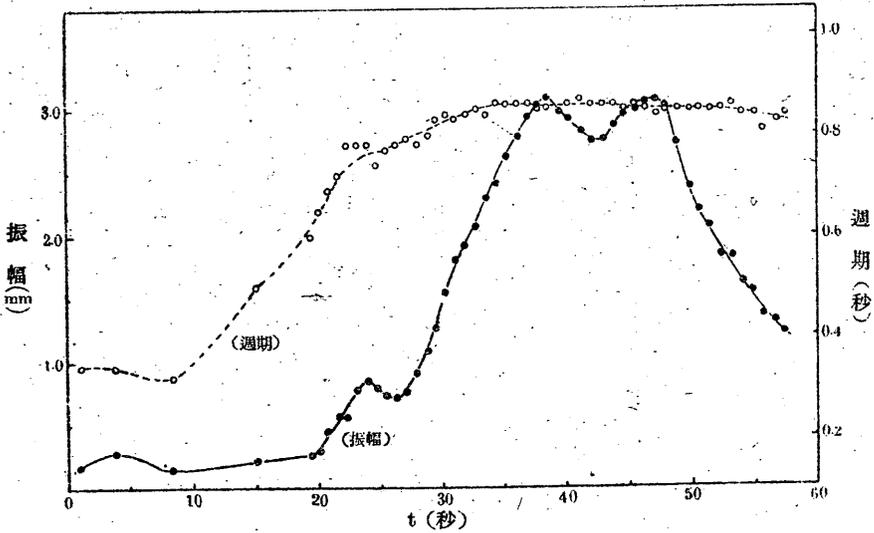
第 15 圖 (c) C 鐵塔直角方向の強制振動



第 16 圖 (a) D 鐵塔並列方向の強制振動

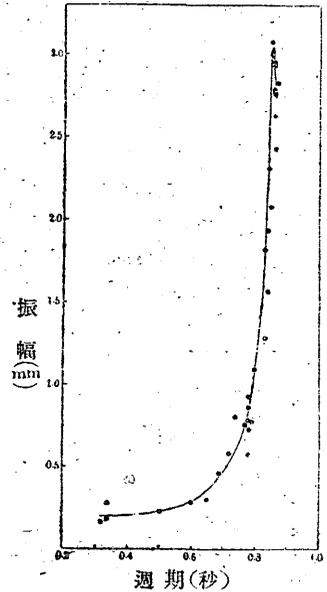


第 16 圖 (b) D 鐵塔直角方向の強制振動

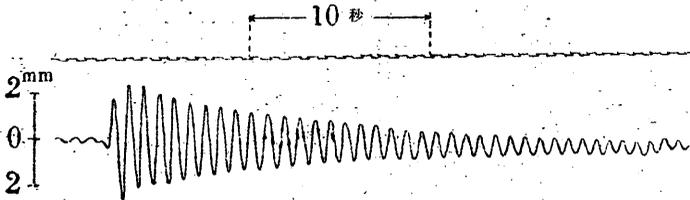


(iii) 聯成振動 數基の鐵塔が空中線吊架線及び振止め用支線等により連結された場合の状態を研究する參考として C・D 兩鐵塔の最上部を互にワイヤーロープで連結してその時の振動を調べた。ワイヤーロープとしては直徑 9 mm のもの 2 本を用ひ兩者に合計 500 kg の張力が働く様にした。これにより C・D 兩鐵塔は直角方向の振動には殆ど影響を受けないが(第 17 圖), 並列方向には著しい影響を受ける(第 18 圖)。例へば C 鐵塔を並列方向に一度揺り動かした上靜に放置すると C 鐵塔の振幅は約 9 振動の間隔で極めて著しく増減する。最初 D 鐵塔を動かした場合の D 鐵塔の振動も, 或は又最初 C 鐵塔を動かした場合の D 鐵塔の振動もすべて全く同

第 16 圖 (e) D 鐵塔直角方向の強制振動



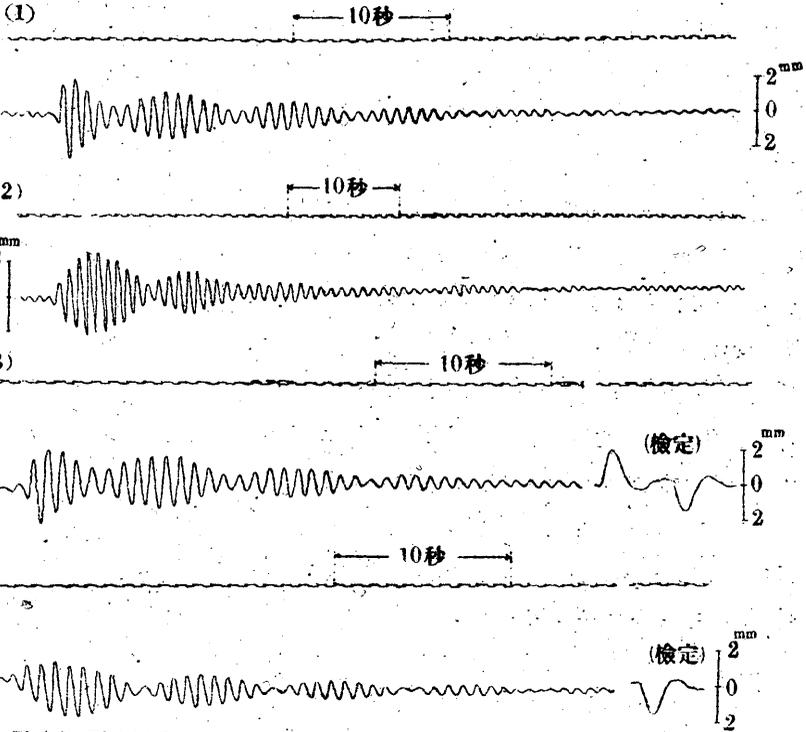
第 17 圖 C・D 兩鐵塔を軽く連結した場合の C 鐵塔直角方向の固有振動



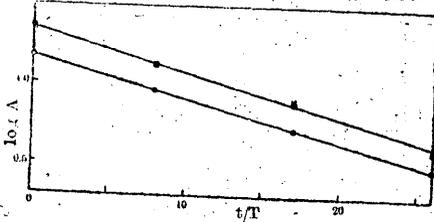
様で約 9 振動の週期で振幅が著しい變化をする。之等の各々の場合に就て夫々振動の極大の部分の振幅を測定してその減衰状態を調べると(第 19 圖)次の如くである。

最初 C 鐵塔を動かした場合の C 鐵塔の振動の減衰比として	1.032
" D " " D "	1.033
" C " " D "	1.027

第 18 圖 C・D 兩鐵塔を軽く連結した場合の並列方向の聯成振動



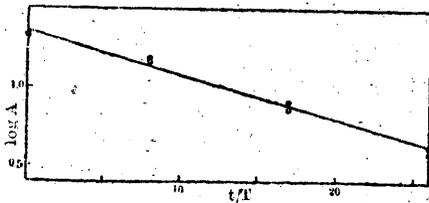
第 19 圖 (a) 聯成振動 A; 振幅(1/10mm)
最初 C 鐵塔を動かした場合の C 鐵塔の振動



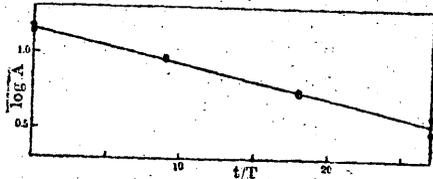
(第 18 圖の説明)

- (1) 最初 C 鐵塔を動かした場合の C 鐵塔の振動
 (2) " D " " C "
 (3) " D " " D "
 (4) " C " " D "

第 19 圖 (b) 最初 D 鐵塔を動かした場合の D 鐵塔の振動



第 19 圖 (c) 最初 C 鐵塔を動かした場合の D 鐵塔の振動



で何れの場合にも全體としての振幅の減衰比は約 1.03 である。此の値は C・D 兩鐵塔各々單獨の場合の此の方向の減衰比 1.03~1.04 と一致してゐると考へてよい。聯成振動の記象に於て連続した 20 振動から平均週期を求めると 0.82 秒となり並列方向の週期と同じである。

C 鐵塔と D 鐵塔とは固有週期も減衰比も夫々相等しく、且つ今の場合には單に兩者をワイヤーロープで連結したゞけであるから第 3 章に考へた二つの振子の聯成振動に近似的に相當すると考へる事が出來やう。實測により聯成振動の振幅の相隣る極大間の時間 τ は大體 9 振動週期に相當する事が判つたから $\tau = T/s$ の式から

$$s = 0.111 \quad \text{となる。従つて}$$

$$p_1 = 1.054, \quad p_2 = 0.943, \quad 1/p_1 = 0.949, \quad 1/p_2 = 1.060 \quad \text{を得る。}$$

實測結果と比較する爲に聯成振動の式

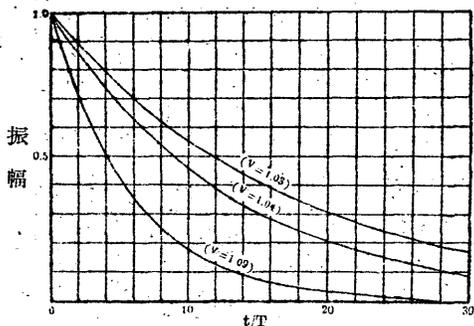
$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{x_{10}}{2\gamma} \left[\frac{1}{p_1} \sin p_1 \gamma t + \frac{1}{p_2} \sin p_2 \gamma t \right] e^{-\epsilon t} \\ &= \frac{x_{10}}{2\gamma} \left[\frac{1}{p_1} \sin 2\pi p_1 \frac{t}{T} + \frac{1}{p_2} \sin 2\pi p_2 \frac{t}{T} \right] e^{-\epsilon t} \end{aligned}$$

のうち $\frac{1}{p_1} \sin 2\pi p_1 \frac{t}{T} + \frac{1}{p_2} \sin 2\pi p_2 \frac{t}{T}$ の値を二つの正弦波の和として圖上で

求めると 9 振動週期を週期とする振幅の著しい變化が明瞭に現れる。之に減衰比 $v = 1.03$ に相當する振幅の變化(第 20 圖)を考慮に入れると振幅の極大・極小の値は漸次減少する。斯様にして得られた振幅の最初の極大の部分の全振幅を M_1 、最初の極小

の部分の全振幅を m_1 とし、更に相次ぐ極大・極小の全振幅を夫々 $M_2, m_2, M_3, m_3, \dots$ とする。假に M_1 を 1 として m_1, M_2, m_2, \dots の値を求めると第 3 表の上段に示す如くなる。

第 20 圖 振幅の減衰



第3表 C・D 兩鐵塔聯成振動の振幅

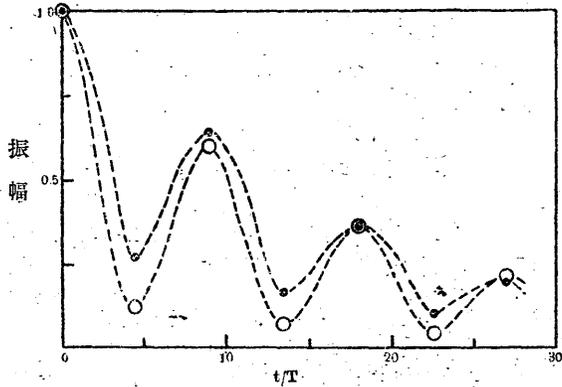
		M_1	m_1	M_2	m_2	M_3	m_3	M_4
最大全振幅	理論値 $v=1.03$	1.00	0.12	0.60	0.07	0.36	0.04	0.21
	實測値	1.00	0.27	0.64	0.16	0.36	0.10	0.20

C・D 兩鐵塔の聯成振動の實測結果のうち最初C鐵塔を動かした場合のC鐵塔の振動の3例及び最初D鐵塔を動かした場合のD鐵塔の振動2例に就て M_1 を1として m_1, M_2, m_2, \dots を求めそれ等の平均を計算すると第3表下段に示す様になる。

第21圖の横軸には t/T をとり縦軸には $M_1, m_1, M_2, m_2, \dots$ をとると理論による計算値と實測結果とはかなりよく一致する。但し點線の曲線は大體の振幅變化の傾向を示す爲に參考迄に描

第21圖 C・D 兩鐵塔の聯成振動

○理論値
●實測値



第4表 C・D 兩鐵塔聯成振動振幅の實測値 (1/10 mm)

		M_1	m_1	M_2	m_2	M_3	m_3	M_4
C 鐵 塔	a	14.7	3.8	9.0	2.6	5.1	1.7	2.9
	b	23.0	4.9	13.3	3.0	7.7	1.8	4.0
	c	22.5	5.9	13.4	3.7	8.2	2.4	4.3
D 鐵 塔	I	20.8	7.0	15.3	4.1	8.3	1.9	4.3
	II	21.3	6.1	14.3	3.2	7.4	1.9	4.4

いたものである。尙詳しく見ると M_1, M_2, M_3, M_4 の値は理論と實測とがよく一致してゐる。しかし m_1, m_2, m_3 は實測値が理論値に比べてかなり大きくなつてゐる。この差異は理論の不充分に基くものであるかも知れないが或は斯様に振幅の小さい所では今問題にしてゐる聯成振動の他に風や地盤の脈動等によ

る鐵塔の振動の影響が現れて来る爲かも知れない。

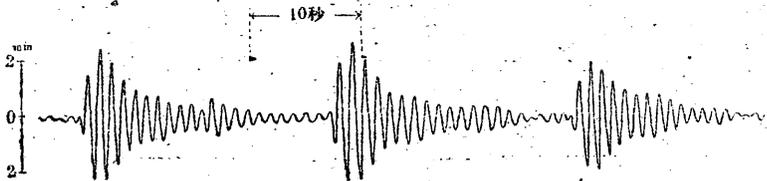
何れにしても鐵塔の聯成振動と云ふ複雑な問題が單に二つの振子の聯成振動として取扱つた簡単な理論によりかなりの程度迄説明出来るのは興味深い事柄である。

7. K 鐵 塔 (85 m)

頂上に長さ 20 m の腕金を有する高さ 85 m の自立式鐵塔 4 基が夫々 150 m 間隔を以て直線狀に建設され各腕金間には 2 條の空中線吊架線を渡し、之から空中線が懸垂されてゐる。此の他に振止め用共通支線が各鐵塔の腕金の兩端間に張られ、兩端の鐵塔では受支線が地上に固定されてゐる。今回振動を測定したのはそれ等 4 基の鐵塔のうち東端に位置し假に K 鐵塔と名づけたものである。

(i) 固有振動 K 鐵塔の直角方向の固有振動の記象例を第 22 圖に示す。そ

第 22 圖 K 鐵塔直角方向の固有振動

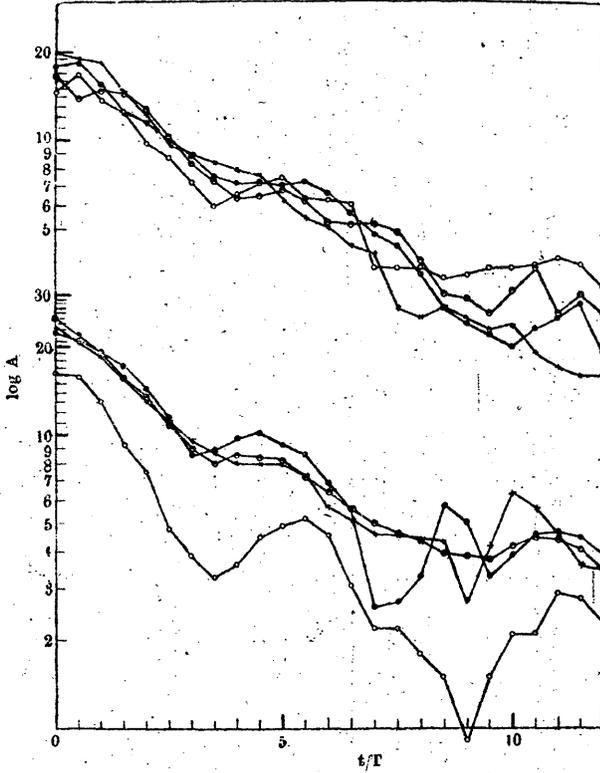


第 5 表 K 鐵塔
直角方向固
有振動の 10
振動に要す
る時間

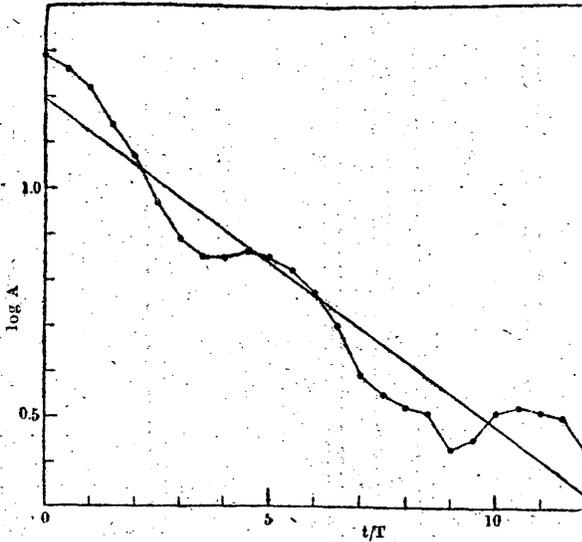
11.0
10.8
10.7
10.8
11.3
11.1
11.0
10.9
11.1
平均 10.97

の 9 例に就て夫々 10 振動に要する時間を測定し (第 5 表), 固有週期として 1.10 秒を得た。尙風による 10 振動からも同じく 1.10 秒と求められた。直角方向の固有振動の記象 8 例に就き, t/T と振幅の對數との關係を見ると第 23 圖に示す様に全體としては振幅は大體直線的に減少してはゐるが尙仔細に見ると稍週期的の變化がある様である。よつて同じ t/T に對する振幅の對數の平均をとると (第 24 圖) 約 5.5 振動の週期で多少の増減を示す規則正しい曲線が得られた。今全體としては兩者

第 23 圖 K 鐵塔直角方向の固有振動 A; 振幅 (1/10 mm)



第 24 圖 K 鐵塔直角方向の固有振動 (平均)



の関係は直線的に表されるとすると C・D 兩鐵塔の場合と同様にして

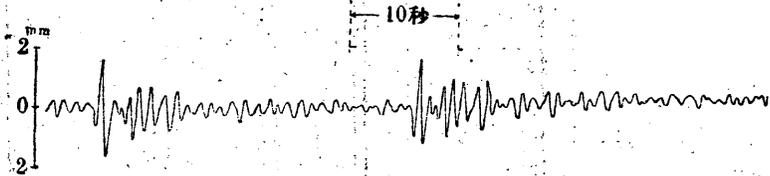
$$b = 0.0725, \quad v = 1.087, \quad \varepsilon = 0.152 \text{ 秒}^{-1}$$

と求められ、結局 K 鐵塔直角方向の固有週期は 1.10 秒、減衰比は 1.09 である事が判つた。並列方向には空中線吊架線及び振止め用支線により連結されてゐて著しい聯成振動をする爲に、此の方向の固有週期や減衰比は簡單には求め難いが、C・D 兩鐵塔に就て得た結果を参照すると並列方向にも直角方向と略々同じ値をとるものとしても大差あるまいと思はれる。

又直角方向固有振動の振幅に約 5.5 振動週期の變化の現れるのは或は隣接鐵塔との聯成振動と考へられる向きもあるかも知れないが、若し然りとすれば振幅の變化は更に甚しい筈である。實測結果に見られる様な些少な變化は直接鐵塔とするよりむしろ之より慣性の小さい空中線吊架線・空中線或は振止め用支線等との聯成振動として説明されるべきものかと考へられる。

(ii) 聯成振動 K 鐵塔を並列方向に一度動かして放置すると直角方向とは全然違つて振幅は極めて著しい變化をする(第 25 圖)。振幅の相隣る極大と極

第 25 圖 K 鐵塔並列方向の振動



大との間隔は約 3 振動に相當するから聯成振動の式 $\tau = T/s$ より

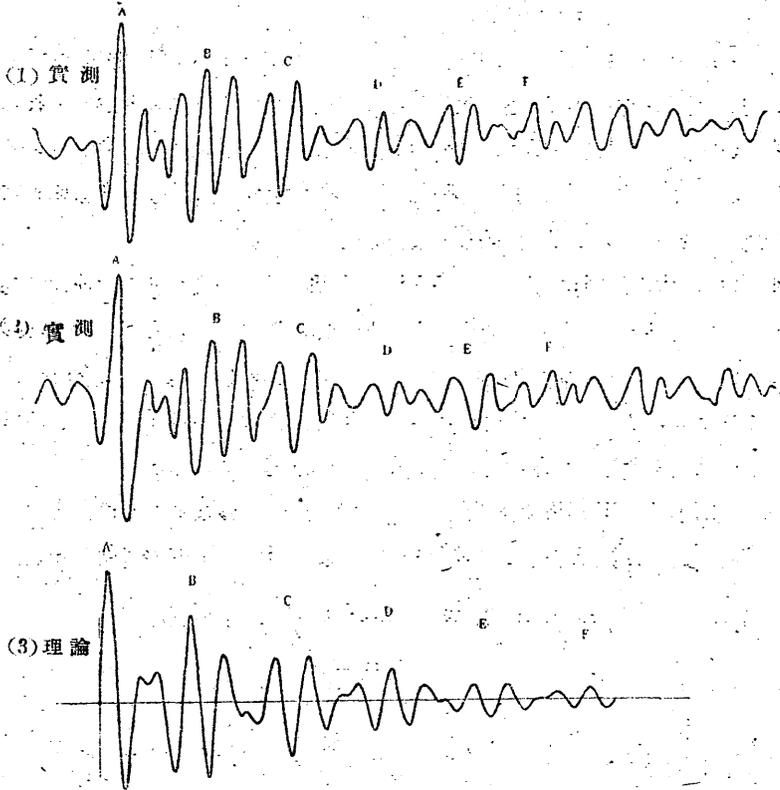
$$s = 0.33, \quad \text{従つて } p_1 = 1.153, \quad p_2 = 0.819, \quad 1/p_1 = 0.867, \quad 1/p_2 = 1.221$$

と求められる。K 鐵塔及び之に隣接する鐵塔の並列方向の固有週期は互に等しく、且つ減衰比は K 鐵塔直角方向と同様に 1.09 であるとし、且つ二つの振子の聯成振動を表はす式

$$x_1 = \frac{x_{10}}{2\gamma} \left[\frac{1}{p_1} \sin p_1 \gamma t + \frac{1}{p_2} \sin p_2 \gamma t \right] e^{-\varepsilon t}$$

が此の場合にも適用されると假定する。上に得た數値を代入して x_1 を計算すると第 26 圖最下段(3)に示す様な振動が得られる。同圖の(1)及び(2)は實

第 26 圖 K 鐵塔並列方向の聯成振動の實測結果と理論値との比較



際の記録の 2 例を擴大したものであつて之等を今得た計算結果と比較すると
 多少の相異はあるが全體としては充分によく一致してゐると見てよさうであ
 る。唯最初の部分に於て稍相違する點があり、第 2 番目の極大の所で實測結
 果には著しい振幅の山が 3 つあるのに計算結果には 2 つしかない事などの相
 違が指摘される。之は實際には人が自分のゐる鐵塔を揺り動かすのであるから
 どうしても理論に假定した様に一度だけ力を働かせる譯には行かない事など
 の爲に生じた差違かとも考へられる。又理論値は全體として實測結果よりも甚し
 く減衰してゐるが之は鐵塔並列方向の減衰比を 1.09 と假定した爲であつて此
 の値を 1.08 乃至 1.07 とすれば實測結果と更によく一致する筈である。

何れにしても第 26 圖に示す様な一見極めて複雑な K 鐵塔並列方向の振動が

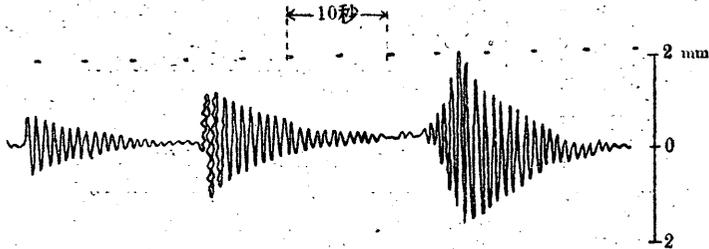
簡単な聯成振動の理論によりかなり詳細な點に至る迄説明されるのは實に興味深い事である。又鐵塔の振動が隣接鐵塔により影響を及ぼされることは上に數例を示した様に意想外と云つてよい位に甚しいから鐵塔の耐震性・耐風性を論ずるには單に個々の鐵塔としてだけでなく實際の連結状態における性質を充分に研究しておく必要がある。

8. A 鐵塔及び B 鐵塔 (75 m)

高さ 75 m の自立式鐵塔 5 基が第 6 圖に示す様に並んでゐるものうち、直線部の A 鐵塔と屈曲部の B 鐵塔とに就て測定を行つた。B 鐵塔の構造は A 鐵塔とは稍異つてゐる。又 A 鐵塔は並列方向には二方に連結され、B 鐵塔は受支線も入れると三方に連結されてゐるから A・B 兩鐵塔に於て比較的自由に振動するのは A 鐵塔の直角方向だけである。

(i) 固有振動 A 鐵塔直角方向の固有振動記象 (第 27 圖) より 10 振動に

第 27 圖 A 鐵塔直角方向の固有振動



要する時間を讀取り (第 6 表), その平均として固有週期は 0.83 秒と求められる。

固有振動の 8 例に就いて t/T と振幅の對數との關係を見ると (第 28 圖) 兩者の間には略々直線的的關係が成立つ。同一の t/T に對する振幅の對數の平均をとり (第 29 圖), 最小自乘法により

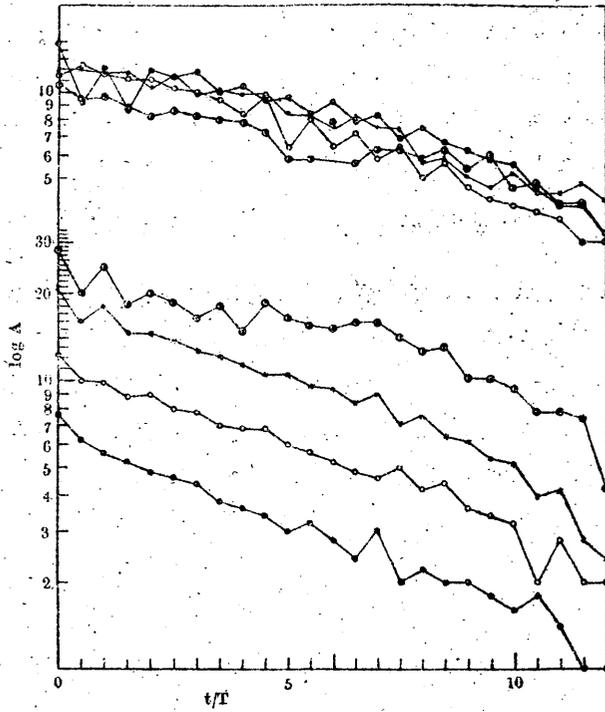
$b=0.0508$, よつて $v=1.060$, $\epsilon=0.142 \text{ 秒}^{-1}$ を得る。

B 鐵塔は受支線の方角には稍固有振動に近い振動をするものゝ如く平均として此の方角の固有週期として (第

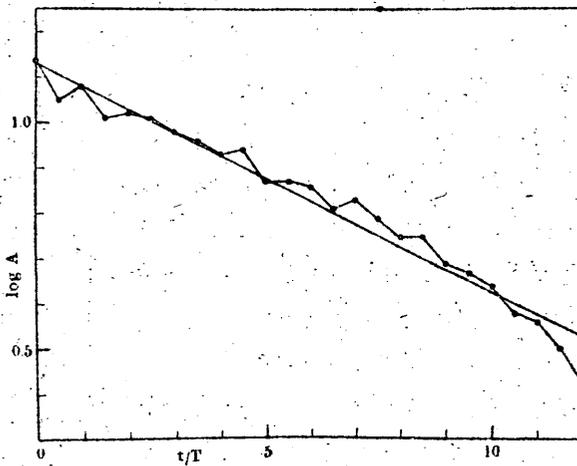
第 6 表 A 鐵塔直角方向固有振動 10 振動に要する時間

8.5
8.4
8.2
8.2
8.2
8.1
8.4
8.1
平均 8.26

第 28 圖 A 鐵塔直角方向の固有振動

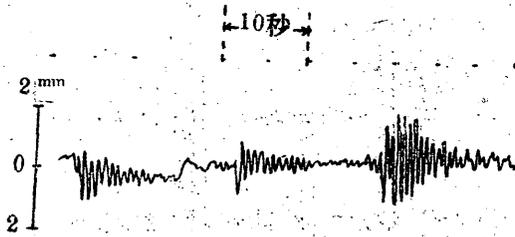


第 29 圖 A 鐵塔直角方向の固有振動 (平均)



30 圖) 0.74 秒を得る (第 7 表)。

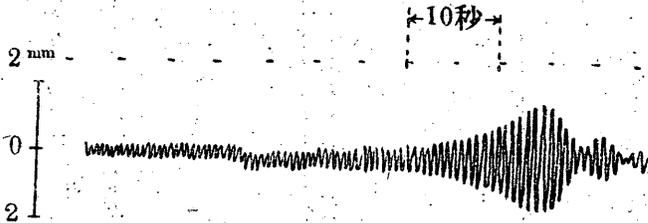
第 30 圖 B 鐵塔腕金長軸方向の固有振動



第 7 表 B 鐵塔腕金長軸方向固有振動 10 振動に要する時間

秒
7.5
7.2
7.4
平均 7.4

第 31 圖 A 鐵塔直角方向の強制振動

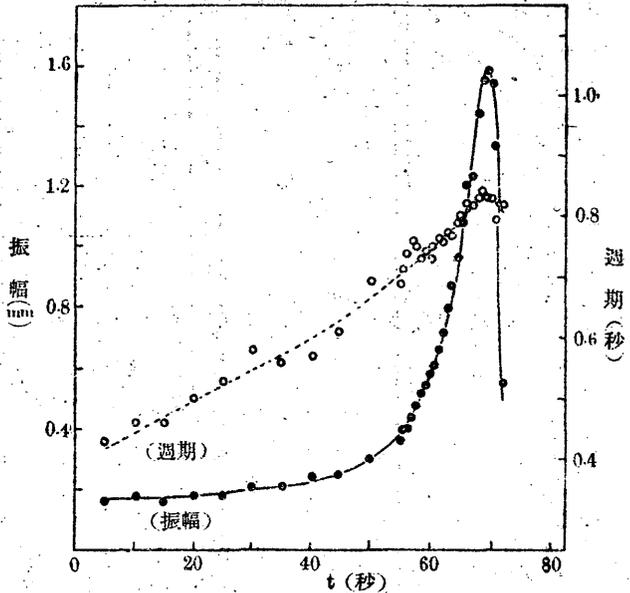


(ii) 強制振動

自轉車の後輪の一個所に 4.0 kg の鉛塊を取附けたものを發振機として鐵塔の最上部で廻轉させて強制振動を調べた。

A 鐵塔直角方向では振動週期が鐵塔の固有週期 (0.83 秒) に近い 0.83~0.84 秒附近で振幅が著しく大

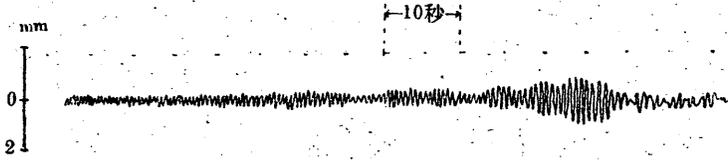
第 32 圖 A 鐵塔直角方向の強制振動



きくなつてゐる (第 31 圖及び第 32 圖)。B 鐵塔受支線の方 (腕金の長軸の

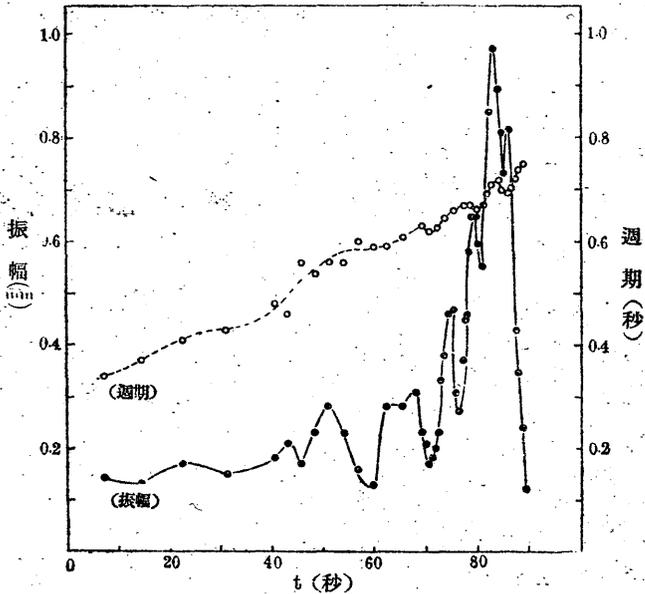
方向)には振幅の變化は單調ではないが(第33圖及び第34圖), 振動週期が

第33圖 B鐵塔腕金長軸方向の強制振動



0.71~0.72 秒附近で振幅は極大となつており、之は此の方向の固有週期として得られた 0.74 秒と大體一致する。

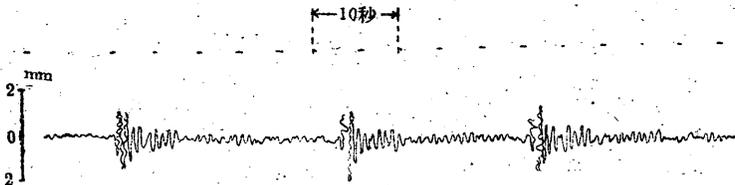
第34圖 B鐵塔腕金長軸方向の強制振動



(iii) 聯成振動 A鐵塔を並列方向に一度揺り動かすとK鐵塔の場合と同様に著しい聯成振動をする(第35

圖)。3乃至4振動に相當する週期で振幅は著しく増減する。しかしK鐵塔の時より一層振動が複雑になつてゐるが之は或はB鐵塔が三方に張られてゐてそ

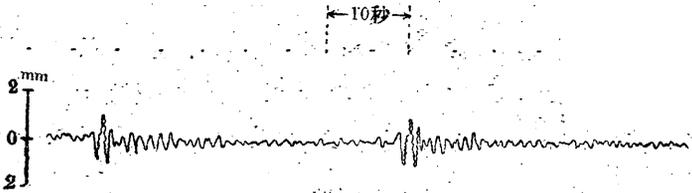
第35圖 A鐵塔並列方向の振動



の振動が簡単でない爲かとも考へられる。

第 36 圖は B 鐵塔を腕金の短軸の方向に一度揺り動かした場合の振動記録である。やはり 3 乃至 4 振動に相當する週期で聯成運動をしてゐる。

第 36 圖 B 鐵塔腕金短軸方向の振動



9. 測定結果の概要と一般的考察

(i) 高さ 85 m の鐵塔 C, D 及び K の 3 基及び 75 m の鐵塔 A, B の 2 基, 合計 5 基の自立式空中線用鐵塔に就て夫々の鐵塔の固有振動, 強制振動並びに數基の鐵塔が互に連結されてゐる場合の聯成振動の詳細なる測定を行った。第 8 表に測定によつて得た之等鐵塔の固有週期及び減衰比等を表示する。

第 8 表 鐵塔振動測定結果の概要

鐵塔	高さ (米)	方 向	固有週期 T (秒)	減衰比 ν	減衰係數 ϵ (秒 ⁻¹)	$\frac{\xi}{E}$ (秒)
C	85	並列 直角	0.82	1.04	0.091	3.1×10^{-3}
			0.84	1.04	0.085	3.0
D	85	並列 直角	0.82	1.04	0.082	2.8
			0.84	1.03	0.070	2.5
K	85	直角	1.10	1.09	0.152	9.3
A	75	直角	0.83	1.06	0.142	5.0
B	75	*(直角)	(0.74)			

*腕金の長軸方向

斯く今回振動を測定した鐵塔の固有週期は 0.8~1.1 秒程度であるが、風にも此の程度の週期の擾亂の含まれてゐる事も知られて居り特に地震動に至つては一秒前後の週期の振動の含まれる場合は甚だ多い。しかも鐵塔の固有振動減衰

比は 1.03~1.09 で甚だ小さいから共振れの現象は著しく大きく現はれ易い。又實測によると鐵塔は隣接鐵塔と顯著な聯成振動をするが之は簡單に二つの振子の聯成振動としてかなり詳細な點に至る迄説明出来る。しかも聯成振動の影響は意外に甚しいから耐震性、耐風性を論ずるには充分注意を要する事などが判つた。

(ii) 是迄に鐵塔の振動の測定された例は餘り無いので他と比較する譯に行かない。参考の爲に大森博士及び福富氏等によつて得られた鐵筋コンクリート造りの煙突及び無線塔の固有週期(第9表)と比較して見よう。第37圖に

第9表 大森博士及び福富理學士による鐵筋コンクリート造り煙突及び無線塔の振動測定結果

番號	測定者		高さ	固有週期	減衰比 (福富氏による)
1	大森	佐賀關, 煙突	167.6 ^米	2.53~2.55 ^秒	—
2	"	助川, "	30.5	0.81	1.05
3	"	東京醫科大學, "	30.5	0.85	—
4	"	原ノ町, 無線塔	201.2	2.07	—
5	"	"	88.4	0.72	—
6	"	"	126.2	1.25	—
7	"	"	159.1	1.67	—
8	福富	東京千駄ヶ谷, 煙突	22.7	0.61	1.07
9	"	東京帝大, 無線塔	45.5	0.80	1.05

於て横軸には高さをとり縦軸には固有週期をとる。高さとの固有週期との關係に關する限りに於て鐵筋コンクリート造りの煙突或は無線塔等と全然構造の違ふ鐵塔とが略々同じ値となつてゐるのは注目に値する。更に鐵筋コンクリート造り煙突及び無線塔等の固有振動減衰比として福富氏は 1.05~1.07 と求められたが、今回我々の測定した鐵塔の減衰比は 1.03~1.09 で前者と殆ど相違は無い。

第2章に述べた様に鐵塔の振動減衰は假に鐵塔の粘彈性又は内部摩擦に由來するものとし、且つ鐵塔を均一な塊狀體と看做した場合の見掛けの粘彈性係數とヤング率との比 ξ/E を求めよう。固有振動の減衰は理論的には $e^{-\frac{1}{2} \frac{\xi}{E} \frac{4\pi^2}{T^2} t}$ (2) で表はされるが、之は實測結果の整理に際しては $e^{-\dots}$ と

おいたものに他ならない。よ
つて

$$\frac{\xi}{E} = \frac{1}{2\pi^2} \epsilon T^2$$

なる関係を得る。此の式により
實測結果から ξ/E の値を
求めると第 8 表に示す様に
 $3 \sim 9 \times 10^{-3}$ 秒と求められる。
嘗て本多光太郎博士は鋼
鐵に就て 2.5×10^{-4} と求めら
れ、末廣博士は煉瓦及び鐵筋
コンクリートの梁に就て 10^{-3}
⁽¹⁾ 程度と得られたのと比較する
と、鐵塔に就てもやはり同じ
程度の値が出て來たのは面白い。

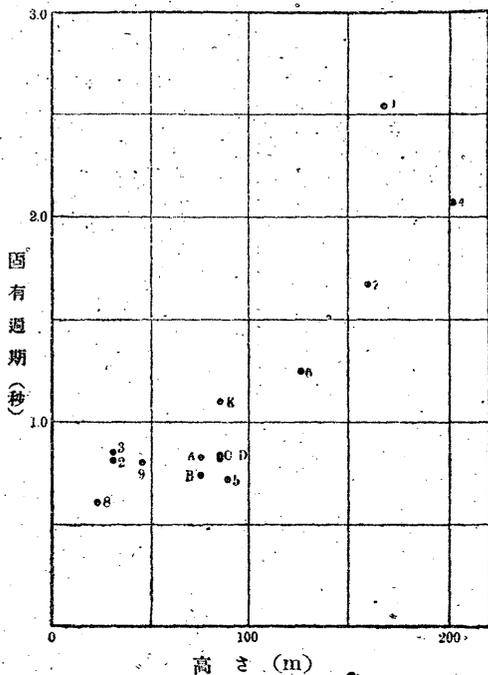
(iii) 本報告に於ては實測

結果を整理するに當り鐵塔を均一壙體として取扱つたり、又聯成振動を調べる
に當つては鐵塔を簡単な振子で置き代へたりしたが之等はすべて取扱ひを簡單
にする便宜上の爲である。次の問題として (1) 鐵塔を載荷錐體的構造物とし
てその固有振動を計算し實測結果と比較すること、(2) 空中線吊架線・空中線
及び振止め用支線等に関する必要な數値を與へて聯成振動を定量的に研究する
こと、(3) それ等の研究結果に基き耐風性及び耐震性に関する具體的研究を行
ふ事など種々重要な問題が未解決のままに残されてゐるが之等はすべて次の機
會に譲る事とする。

終に臨み終始御懇篤なる御指導を賜はる岡田臺長先生及び藤原先生に厚く御
禮中上げる。今回の測定の大部分は國際電氣通信株式會社の御援助によつて出

(1) 末廣；前出。

第 37 圖 塔狀構造物の高さ
と固有週期との關係



來たもので同社及び特に同社の加藤安太郎氏の御厚意に對して深甚の謝意を表す。又測定に當り御協力下さつた鶴飼章一氏、市川覺逸氏、大内善兵氏、酒井武夫氏及び依佐美送信所並びに小室受信所の方々に御禮申上げる。又K鐵塔の測定に當り御世話下さつた逓信省工務局の金原技師及び種々御激勵下さつた東大工學部の草間教授、田中(豐)教授に感謝の意を表す。最後に計算及び製圖を御手傳下さつた木澤綏、高見良枝の兩君に御禮申上げる。

(昭和 14 年 5 月 中央氣象臺にて)