

愛媛大学工学部土木工学科

正員 見沢繁光

中央復建コンサルタントKK

正員 日森重吉

1. まえがき

控え綱 (Guy Cable) を有する塔状構造物 (Guyed Tower) の動的特性に関する研究は、これまで主に風荷重にノリて来されてきた。しかし、我が国のような世界有数の地震国においては、その地震荷重に対する耐震性も欠くべからざる要素となってくる。

本研究は、控え綱を有する塔状構造物を動的に解析する際、非線型変元法を用いた Guy Cable 及び Guyed Tower の地震振動に与える挙動を最も基本的なモデルを用いて実験的に調べ、その結果を理論計算によって求めた値と比較検討したものである。

2. Guy Cable の振動特性

図-1 のようにある角度をもって張られたワイヤロープの中央質点 m は、両端の支点の水平振動に伴ってロープの軸方向及び軸に直交する方向に振動する。ロープの軸方向の振動に関するバネ定数及び減衰係数を k_n, C_n とし、軸に直交する方向に関するものを k_s, C_s と表わすならば、図-1 のようなロープは図-2 のようなバネ-質量系

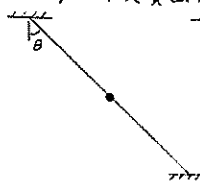


図-1

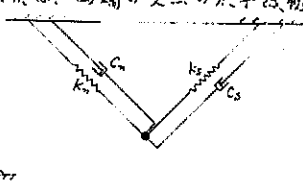


図-2

におき換えることができる。これらの諸係数のうち、軸方向のバネ定数 k_n はその値が一定である（ヤング）が比例関係にある理論的に求めることができるが、 k_s はその値が一定の関係を認めないのだから実験をくり返しゲージの近似値との比較も行った。また減衰係数 C_n, C_s についてはそれぞれ自由減衰振動を記録し、その減衰波形から実験的にその値を定めた。図-3 及び図-4 に示したグラフはこれらの実験結果の一例である。図-3 は、初張力をパラメーターとした時のワイヤロープの軸に直交する方向のバネ抵抗 (単位 N/mm) とロープの細長比との関係を表わし、図-4 は径の異なる種々のロープについて調べたワイヤロープの軸に直交する方向の減衰係数とロープ初張力との関係を表わしている。

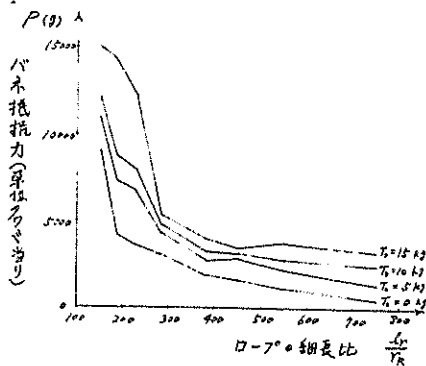


図-3

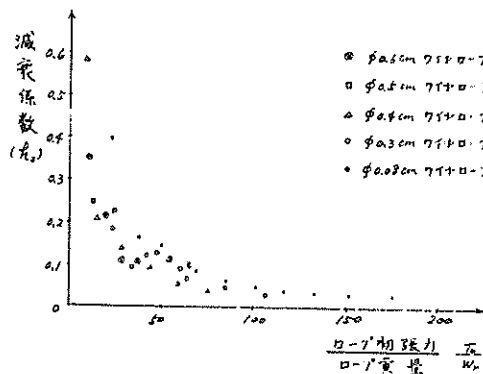


図-4

3. Guyed Tower のモデル化と応答計算

Guyed Tower の振動モデル

を作成するに当たって、Tower 及び Guy Cable として地震加速度の方向が全て同一平面内に含まれるものと仮定すれば、その振動モデルは一般に Tower 及び

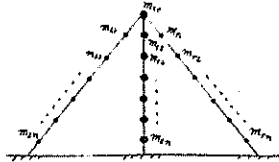


図-5

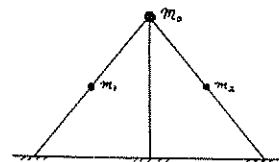


図-6

Guy Cable がそれぞれ $n+1$ 個、 n 個の集中質量を有する多質点系モデルとして図-5の様に表わされる。しかしながら、このような一般的なモデルに対する各応答値の測定は極めて困難となつてくるので、今回の実験ではまず Guyed Tower の最も単純な振動モデルとして塔頂に質量を有する Tower がそれぞれ中央に質点と有する二本の対称な控え綱によつて支持された図-6のような振動模型を使用した。そうすると、荷重はタワー上端あるいはロープ中央に集中するものとし、また塔頂の質量 m_0 は水平方向のみ、ロープ中央の質点 m_1, m_2 はそれぞれロープの軸方向と軸に直角な方向（ただし、タワー及びロープの軸を含む平面内に限るものとする）に振動すると考えることができ、3 質点系（自由度 = 5）の振動問題として取り扱うことができる。そして、この場合の振動モードはオーモード（対称または逆対称）だけである。

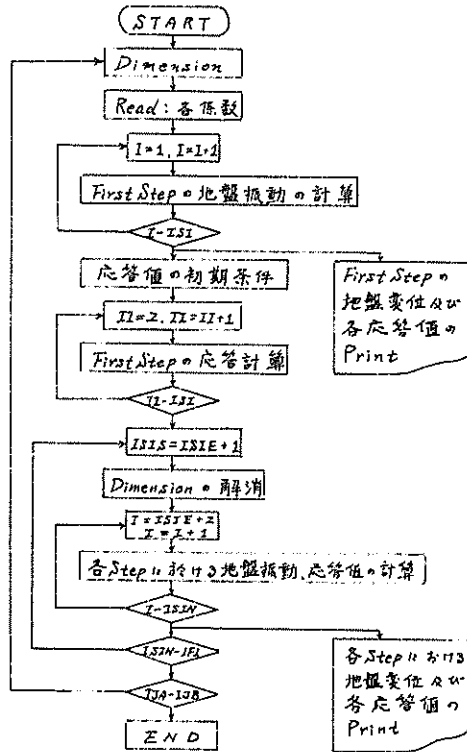


図-7

この振動モデルに対して Lagrange の方程式を適用し、塔頂及びロープ中央の三個の質点に関する動的平衡方程式を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{u}_{12n} &= -\frac{m_1 \ddot{u}_{12n}^0 - k_{11} (u_{12n}^0 - u_{12n}^0 \sin \theta) - C_{11} \dot{u}_{12n}^0}{m_1 + C_{11} \frac{\Delta t^2}{2}} \\ \ddot{u}_{12n} &= -\frac{m_1 \ddot{u}_{12n}^0 - k_{11} (u_{12n}^0 - u_{12n}^0 \sin \theta) - C_{11} \dot{u}_{12n}^0}{m_1 + C_{11} \frac{\Delta t^2}{2}} \\ \ddot{u}_{03} &= -\frac{m_0 \ddot{u}_{03}^0 - k_{01} (u_{03}^0 - u_{03}^0 \sin \theta) - k_{02} (u_{03}^0 - u_{03}^0 \sin \theta) - C_{01} \dot{u}_{03}^0 - C_{02} \dot{u}_{03}^0}{m_0 + C_{01} \frac{\Delta t^2}{2} + C_{02} \frac{\Delta t^2}{2}} \\ \ddot{u}_{23n} &= -\frac{m_2 \ddot{u}_{23n}^0 - k_{21} (u_{23n}^0 - u_{23n}^0 \sin \theta) - k_{22} (u_{23n}^0 - u_{23n}^0 \sin \theta) - C_{21} \dot{u}_{23n}^0 - C_{22} \dot{u}_{23n}^0}{m_2 + C_{21} \frac{\Delta t^2}{2} + C_{22} \frac{\Delta t^2}{2}} \\ \ddot{u}_{23n} &= -\frac{m_2 \ddot{u}_{23n}^0 - k_{21} (u_{23n}^0 - u_{23n}^0 \sin \theta) - k_{22} (u_{23n}^0 - u_{23n}^0 \sin \theta) - C_{21} \dot{u}_{23n}^0 - C_{22} \dot{u}_{23n}^0}{m_2 + C_{21} \frac{\Delta t^2}{2} + C_{22} \frac{\Delta t^2}{2}} \end{aligned}$$

これらの式が求まれば、各質点の変位、加速度などの各応答値は数値解析法を用いることによって比較的容易に計算できる。その演算プログラムのフローチャートは図-7に示してある通りである。なお、実際の計算は愛媛大学工学部の電子計算機 (Hi pac 103) によって行なつた。

4. Guyed Towerの振動模型実験

(1) 実験装置

図-8に示すような実験装置を用いてGuyed Towerの振動模型実験を行った。振動台の変位あるいはタワー上端及びロープ中央での質点変位は差動トランスを用いて変位測定器によって、またロープ張力は図-9に示したような銅板にひずみゲージを張り合わせて作った張力

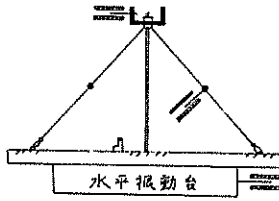


図-8

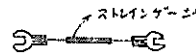


図-9

計を用いて動的ひずみ測定器によって測定し、それぞれ電磁オシログラフに記録した。さらには振動台には加速度変換器を取り付け、その加速度も測定した。なお、Towerとして径の異なる5種類の鋼棒を、Guy Cableにはそれぞれ種類のロープ控え角($\theta_1=47.5^\circ$ 、 $\theta_2=40.0^\circ$ 、 $\theta_3=31.0^\circ$)及びロープ初張力($T_0=0g$ 、 $T_0=500g$ 、 $T_0=1000g$)をパラメーターとして使用した。

今回の実験は、上記の装置を用い各パラメーターについて、振動台の振動数を150~800 $\frac{1}{\text{分}}$ で50 $\frac{1}{\text{分}}$ 毎に10段階に変化させるが各部の応答値も測定記録した。

(2) 実験結果

Guyed Towerの振動模型実験結果から、ロープの控え角及び初張力の各々の場合に対する各応答スペクトル図を描き、それぞれを整理すると右図のようなグラフを求めることができる。ここで、図-10はロープ控え角(θ)とタワー上端及びロープ中央の変位との関係を表わし、また図-11はロープ初張力(T_0)とタワー上端の変位との関係を表わしたグラフの一側である。また、Guyed Towerのタワー上端の振動及びロープ中央点の振動について、実験結果と数値計算結果とを比較したいくつかの例を表-1および表-2に示している。

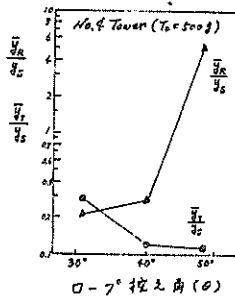


図-10

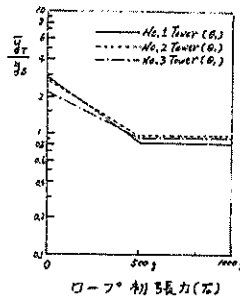


図-11

表-1. タワー上端の振動

	振 幅		周 期	
	計算値	実験値	計算値	実験値
No.1タワー($\theta_1, T_0=0$)	0.231 cm	0.239 cm	0.18 sec	0.18 sec
No.2タワー($\theta_1, T_0=500g$)	0.232 cm	0.236 cm	0.179 sec	0.178 sec
No.3タワー($\theta_1, T_0=0$)	0.212 cm	0.224 cm	0.17 sec	0.17 sec

表-2. ロープ中央点の振動

	振 幅		周 期	
	計算値	実験値	計算値	実験値
No.1タワー($\theta_1, T_0=0$)	0.58 cm	0.60 cm	0.88 sec	1.02 sec
No.2タワー($\theta_1, T_0=0$)	0.61 cm	0.65 cm	0.88 sec	0.82 sec
No.1タワー($\theta_2, T_0=0$)	0.69 cm	0.67 cm	0.51 sec	0.47 sec
No.2タワー($\theta_1, T_0=1000g$)	0.85 cm	0.88 cm	0.17 sec	0.17 sec

5. 考 察

図-10のグラフから、ロープ控え角を大きくすればロープの控え効果(タワー上端の変位を抑える効果)はよくなるが、控え綱の長さが長くなるためにロープ自身の振動も大きくなることわかる。また、図-11のグラフを見ると、ロープ初張力を大きくすればロープの控え効果は初めのうちは顕著的に向上するが、初張力がある程度以上大きくなるとほとんど変化しなくなる。

ついで、表-1及び表-2から次のような事がいえる。タワー上端の変位については、その振幅はわずかにひびきのみみられるが、周期についてはほとんどその差が見られない。また、ロープ中央点の変位については、ロープ控え角が小さく控え綱の長さが短い場合あるいはロープ初張力の大き

い場合のようにロープ中央点での変位が小さい範囲では、計算値と実験値はよく一致する。しかし、ロープ中央点の変位が大きくなってくると、差動トランスの働きが悪くなるので振幅、周期ともに多少のひらきがまじてくる。

6. 結 び

本実験により次のような事が明らかとなった。

(1) ワイヤロープの軸に直角な方向のバネ抵抗力は、使用するロープの細長比によっても左右される。またワイヤロープの軸に直角な方向の振動に関する減衰係数は初張力の増大に伴って減少する。

(2) *Guyed Tower* の控え角の決定には、タワー及びロープの固有の振動特性を考慮しなければならない。控え綱の初張力は大きくとればよいというものではない。

(3) 本研究で利用した数値解析法による *Guyed Tower* の応答計算結果は、振動模型実験結果とはほぼ一致する。

7. あとがき

ここに述べた事は、非常に単純化された振動模型による *Guyed Tower* の基礎的研究であり、今後は自由度の大きいより実際の模型による振動実験を行なうて行かなければならない。そして、最終的にはランダム発振器を用いて実際の地震波を適用した振動実験にもって行ないたいと考えている。(数値解析法によれば、地盤振動がランダムな場合でもプログラムの最初の入力部分を少し修正するだけで比較的容易に計算できる。)なお、現在3質点系(自由度=5)の非対称な *Guyed Tower* に対するプログラム修正を終え、タワーに5個の質点を有する7質点系(自由度=9)の非対称な *Guyed Tower* に対する応答計算プログラムの作成を行なっているところである。

参考文献

- 1) 見沢、日笠他; 控え綱を有する塔状構造物の振動に関する基礎実験, 才 回土木学会中国四国支部講演集, 昭和 年.
- 2) Timoshenko; *Vibration Problem in Engineering*, D. VAN NOSTRAND, 1955.
- 3) John M. Biggs; *Introduction to Structural Dynamics*, Mc Graw-Hill, 1964.
- 4) 白正書房; ワイヤロープ便覧, 1967.
- 5) 土木学会編; 土木技術者のための振動便覧, 1966.