

# 冷却塔の耐震試験

## Anti-earthquake Tests of Cooling Tower



(気)生産部 技術第1課  
水 沢 充  
Mituru Mizusawa

The author outlines an earthquake, and describes an analysis of vibration and a method for analyzing a response to an earthquake, all being a major consideration in dynamic analysis for cooling towers. The author further ascertains how the cooling tower responds to an earthquake by attempting a comparison between the anti-earthquake experiment and the theoretical analysis of the cooling tower. The results indicate that the analyzed values are found to be reasonable, and promising for optimum anti-earthquake design of cooling towers in the future.

### まえがき

近年、都市再開発の活性化に伴い、地域冷暖房設備 (District Heating and Cooling 以下DHC) の設置例が急増しており、適用される冷却塔も年々大型化している。またビル屋上に設置される例がほとんどである。

このような場合、耐震構造設計基準として水平震度1.0 G (980 cm/sec<sup>2</sup>) が採用されている。

一方冷却塔の耐震設計に関しては、従来静的解析での対応が主であり、動的解析はなされておらず、地震に対する応答については不明な点が多かった。今回、DHC用冷却塔の合理的な構造設計の一助として、株式会社神戸製鋼所技術開発本部振動音響室の協力を得て、振動台による耐震試験を行ったので、その概要について報告する。

### 1. 地震と振動特性

#### 1.1 マグニチュードと震度

一般に地震の規模を表すのに「マグニチュード」と「震度」が使用される。

「マグニチュード」とは、地震エネルギーを表わす尺度であり、地震規模を等級づけるものである。これを計測量より求める場合「震央距離から100 km 地点でのウッドアンダーソン型地震計が記録する最大振幅 (マイクロン単位)

の常用対数値により定義される。(Gutenberg-Richter マグニチュード)

実際にはちょうど100 km のところに地震計があるとは限らず、距離により適当な補正式を使っている。わが国では次式による。

$$M = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83$$

ここに、

M: マグニチュード

A: 観測点最大振幅 (マイクロン)

Δ: 震央からの距離 (km)

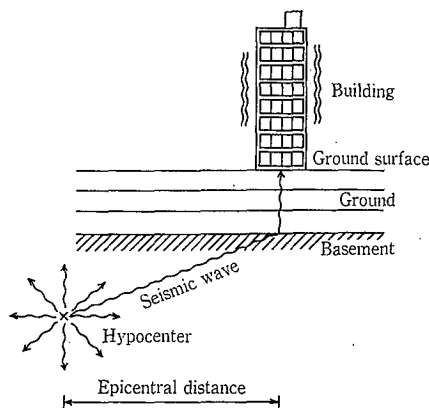
一方「震度」とは、地震発生時に、ある地点での地震の強さを人体の感覚や物体の揺れ方などを目安に階級別に表したものであり、第1図に示すように震央からの距離に従い、震度は小さくなる。

わが国では、第1表に示す気象庁の震度階表が用いられており、震度0 (無感) から震度7 (激震) までの8段階に分けられている。

#### 1.2 震度と加速度

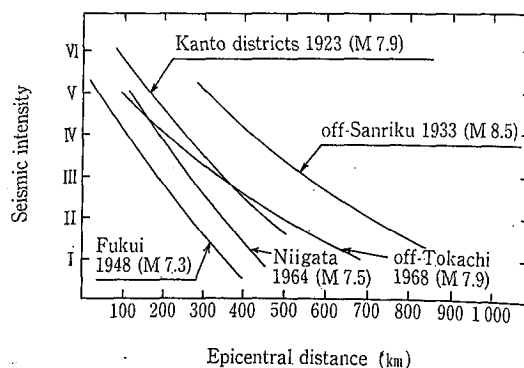
建築物の耐震設計を行う場合、地震の強さを表わすための物理量を通常加速度で定義し、ガル(gal)あるいはcm/sec<sup>2</sup> という単位を用いる。

また、地震による加速度と重力加速度の比を震度という (震度階による震度とは異なる)。例えば建築基準法で設計



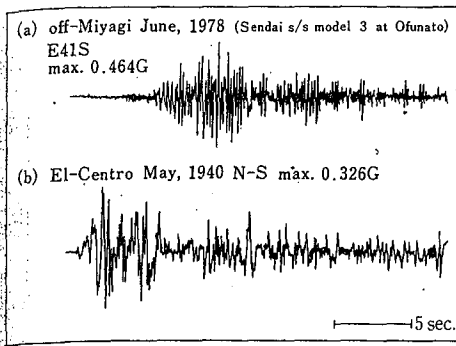
第1図 震央からの距離と震度との関係

Fig. 1 Relationship between epicentral distance and seismic intensity



第1表  
気象庁震度階 (1949年制定)  
Table 1  
Seismic intensity scale by  
the meteorological agency

Intensity scale	Term	Acceleration [gal]
0	Unfelt	0~0.8
I	Slight	0.8~2.5
II	Weak	2.5~8
III	Rather strong	8~25
IV	Strong	25~80
V	Very strong	80~250
VI	Disastrous	250~400
VII	Very disastrous	400 morethan



第2図 地震波形例  
Fig. 2 Examples of seismic waves

震度0.2G という場合、

$$980 \text{ cm/sec}^2 \times 0.2 = 196 \text{ cm/sec}^2$$

という加速度を用いて、地震による外力検討を行う。

### 1. 3 地震波と日本における震度期待値

#### 1. 3. 1 地震波

実際に建物に到達する地震波は、種々の周期を持つ正弦波の重ね合わせであり、地震の規模、震央距離、地盤の種類によって異なる。第2図に地震波の時刻歴例を示す。またこの地震波のパワースペクトル分布（周波数ごとの加速度分布）を第3図に示す。同図の地震例では、地盤卓越周波数が5 Hz以下であり、地震の大部分が同様の傾向を示す。

#### 1. 3. 2 震度期待値

日本における各地の地震数、再来年数から、特定の年数が再来年数となるような震度階の分布を求めて、各地の震度期待値として統計値が得られる。これを最高震度期待値の分布としてまとめたものを第4図に示す。<sup>1)</sup> 同図は75年間に一度発生すると予想される例であり、東京350 gal, 大阪300 gal, 東海500 galを示している。これらの値が耐震設計の地盤震度の目安として使用される。

## 2. 振動解析

### 2. 1 固有振動解析

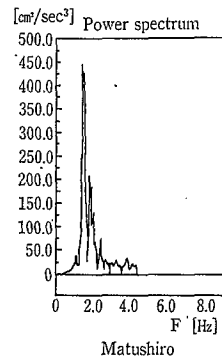
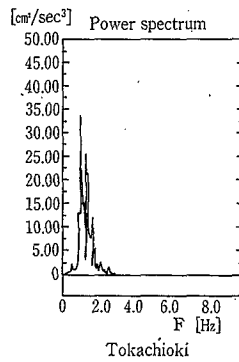
一般に多質点系の振動方程式は、マトリックス表現を用いて次の形をとる。

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{p\}$$

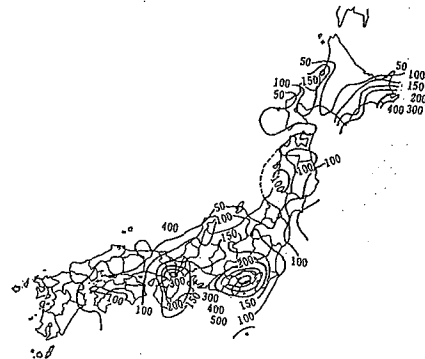
ここに、 $[m]$  : 質量マトリックス  
 $\{\ddot{x}\}$  : 加速度ベクトル  
 $[c]$  : 減衰マトリックス  
 $\{\dot{x}\}$  : 速度ベクトル  
 $[k]$  : 剛性マトリックス  
 $\{x\}$  : 変位ベクトル  
 $\{p\}$  : 外力ベクトル

上式で  $\{p\} = \{0\}$ ,  $\{c\} = \{0\}$  のときは、振動中外力も加わらず、振動エネルギーの減衰もない状態を示し非減衰自由振動と呼ばれている。この時上式は、

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\}$$



第3図 地震波パワースペクトル  
Fig. 3 Seismic wave power spectrum



第4図 最高震度期待値の分布 (単位 gal)  
(再来年数75年間の場合)  
Fig. 4 Distribution of meizoseismic expectation (units: gal)  
(at intervals of 75 years)

となり、上式の微分方程式の一般解を、

$$\{x\} = \{u\}e^{i\omega t}$$

ここに、 $\{u\}$  : 基準モード形状ベクトル  
 $e^{i\omega t}$  : 複素共役関数 ( $= \sin \omega t + i \cos \omega t$ )

とおいて、上式に代入し、

$$([k] - \omega^2 \cdot [m]) \cdot \{u\} = \{0\}$$

が得られる。ここで  $\{u\} \neq \{0\}$  ならば、上式は、

$$[k] - \omega^2 \cdot [m] = [0]$$

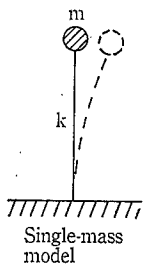
となり一質点系の場合  $\omega = \sqrt{k/m}$  で固有振動数が求められる。 $[k]$ ,  $[m]$  が  $n \times n$  のマトリックスならば、 $\omega^2$  に関して  $n$  次の多項式となり  $n$  個の  $\omega$  および  $\{u\}$  が存在する。振動問題では、 $\omega_n$  を固有振動数、 $\{u\}$  を固有ベクトルと呼ぶ。また、 $n \times n$  のような多質点系の場合は、 $\omega$ ,  $\{u\}$  をマトリックスの固有値問題として数値解析により計算機を用いて求める。

### 2. 2 応答解析

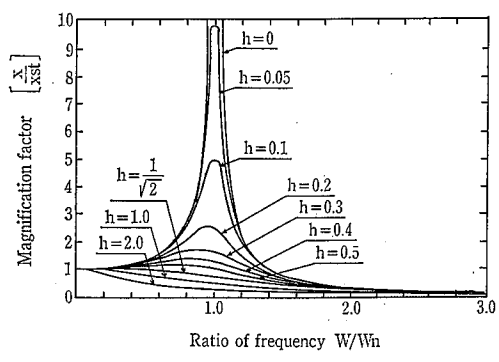
一質点系において、正弦波加振状態の運動方程式は、

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t)$$

上式の変位応答値は、 $x_{st}$  を外力による静的変位、 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ,  $2h\omega_n = c/m$  とすれば、



第5図 1質点系変位応答倍率曲線  
Single-mass model  
Fig. 5 Magnification factor (Single-mass model)



$$\frac{x}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

- ここに、 $f(t)$  : 加振力 (=  $P \cdot \sin \omega t$ )  
 $h$  : 減衰比  
 $\omega$  : 加振振動数  
 $x_{st}$  : 基準変位  
 $\omega_n$  : 固有振動数 (=  $\sqrt{k/m}$ )  
 $x$  : 応答変位

となり、第5図に示す応答倍率曲線が示される。これは、固有振動数  $\omega_n$  を持つ系に、 $\omega$  なる振動数で外力 (加振力) を加えた時の変位応答倍率を示す値である。

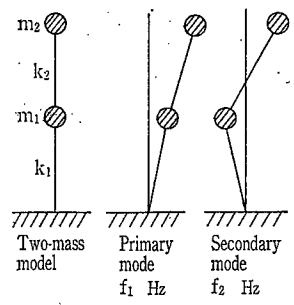
多質点系の場合、2.1項のように、 $n$  次の固有振動数 ( $\omega_n$ )、 $n$  個の固有ベクトル (固有モード形状変位) を持ち、各モードの重ね合せにより、多質点系の変位応答倍率が求められる。第6図に2質点系の例を示す。

また、重ね合せの際、各モードの影響度を、固有変位ベクトル ( $\{u\}$ ) と、質量マトリックス ( $\{m\}$ ) により次の式より求める。

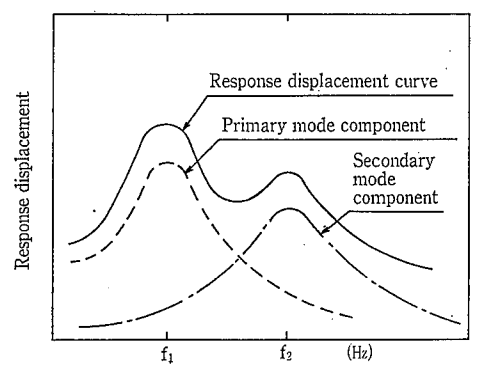
$$\beta_j = \frac{\sum_{r=1}^n m_r \cdot j u_r}{\sum_{r=1}^n m_r \cdot (j u_r)^2}$$

- ここに、 $r = 1 \sim n$  質点数  
 $m_r$  = 質量  
 $j u_r$  =  $j$  次モード形状値  
 $\beta_j$  =  $j$  次刺激係数

一方、地震のように、時々刻々外力 (この場合加速度) が変化する応答を求める場合、前述の運動方程式を「微分方程式の初期値問題をステップバイステップで解く」という数値解析問題に置き換え、次の手順で求めることができる。



第6図 2質点変位応答曲線  
Two-mass model  
Primary mode  
Secondary mode  
Fig. 6 Displacement response (Two-mass model)  
 $f_1$  Hz  $f_2$  Hz



$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t)$$

- において、時刻  $t$  から  $\Delta t$  秒後の状態を  
 $x(t + \Delta t) = x(t) + \dot{x}(t) \times \Delta t$   
 $\dot{x}(t + \Delta t) = \dot{x}(t) + \ddot{x}(t) \times \Delta t$   
 $\ddot{x}(t + \Delta t) = f(t)/m + (c/m \cdot \dot{x} + k/m \cdot x)$

の関係により求める。

多質点系の場合、それぞれのモード形状 ( $\{j u\}$ )、係数 ( $\beta_j$ ) を介して、各時間ごとの応答の重ね合せ (ド重畳) により求めることができる。

このような解析を、モーダルアナリシス (modal analysis) と呼んでいる。

### 3. 1/2モデル冷却塔振動試験

#### 3.1 耐震試験装置

耐震試験装置を第7図に示す。加振装置は(株)神戸研究所の、10 ton油圧加振台によった。写真1に実況を示す。

#### 3.2 供試試験体

当社標準鋼製冷却塔 (4F4a2 モデル) の1/2縮小モデルを使用した。縮小モデル設計に当っては、部材断面を1/2とし、固有振動数、固有モード形状を、実機と相対して、振動解析を行い設計した。

#### 3.3 実験方法

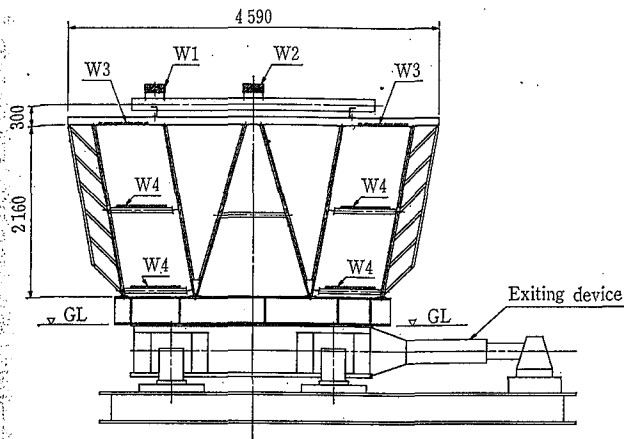
第8図に加速度センサー、主要骨組材の歪ゲージ取付を示す。使用地震波は、エルセントローNS波を使用加振方向を冷却塔の短辺、長辺方向のそれぞれについていた。

また、地震波加振試験に先立ち、正弦波スイープによる固有振動数、固有モード形状の確認を行った。表および写真2に計測装置を示す。

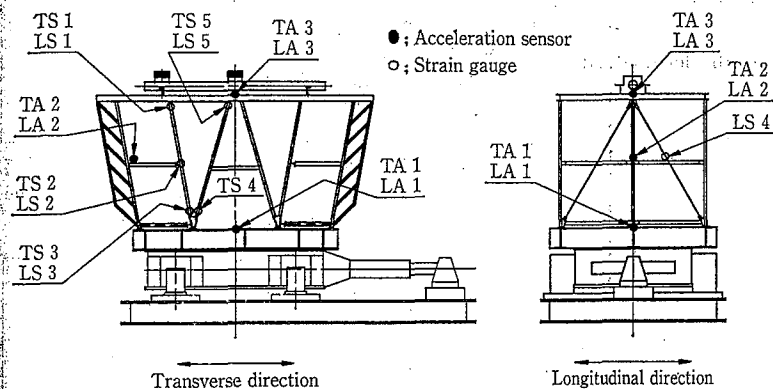
#### 3.4 実験結果

##### 3.4.1 固有振動数及び固有モード形状

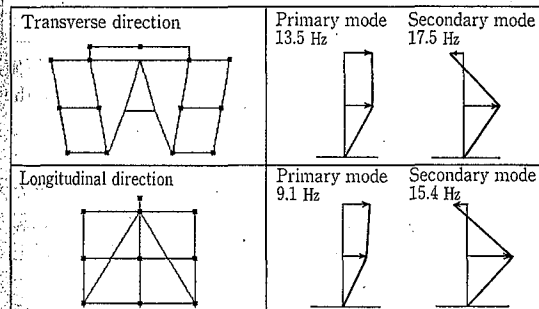
加振台の振動数を順次変化させ、その時の応答加速固有振動数を求める試験をスイープ試験と呼ぶ。ま



第7図 冷却塔耐震試験装置  
Fig. 7 Anti-earthquake testing device for cooling tower



第8図 加速度センサー，歪ゲージ取付位置  
Fig. 8 Arrangement of acceleration sensors and strain gauges



第9図 固有振動数，固有モード形状（実験値）  
Fig. 9 Natural frequencies and natural modes  
(Experimental values)

られた加速度応答倍率，位相データから共振点における加速度分布図を作成することができ，その形状より，各固有振動数のモード形状を知ることができる。

第9図に本試験より得られた固有振動数，モード形状図を示す。

### 3. 4. 2 地震波加振による応答結果

地震波加振による応答加速度および部材応力の時刻歴を第10, 11図に示す。

同図は，地震波による，冷却塔基礎加振時の加速度センサーおよび歪ゲージによる応答値の時間的変化を記録した

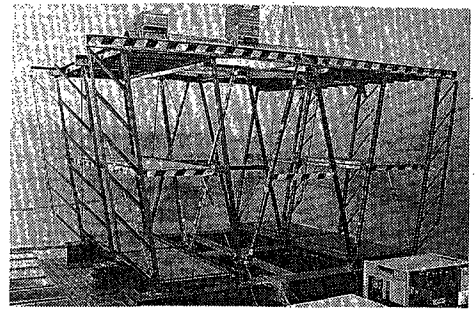


写真1 耐震試験装置  
Photo. 1 Anti-earthquake testing device

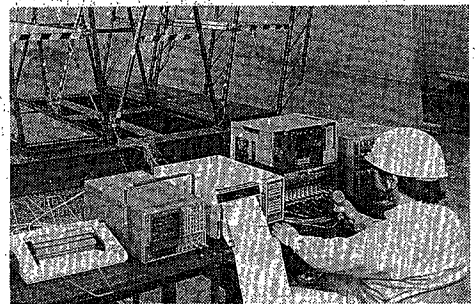


写真2 計測機器  
Photo. 2 Measuring instruments

第2表 計測機器  
Table 2 Measuring instruments

Instrument name	Specification
Strain gage	w/steel 120 $\Omega$ 5M3 wire
Accelerometer	Response 0-100 Hz 5G meter
Accelerometer	Response 0-40 Hz 1G meter
Dynamic strain meter	Response 0-5 KHz
Taperecorder	FM14Ch. +1VOICE
FFT analyzer	2Ch. FFT
Thermal analyzer	A/D 16Ch. thermal print
A/D transformer	16Ch. 12bit board type

ものであり，応答応力については，部材軸応力と曲げ応力を測定点の表裏2枚の歪ゲージの応答データよりそれぞれ求めた。

第10, 11図のTS1, TS3, TS4, LS3の上段の線図は軸力を示し，下段は曲げ力を示している。第11図のLS4は軸力のみを示している。

同図から従来静的解析では，しばしば接合部をピンとして扱っていたが，構造部材に曲げ応力が発生しているから，剛接合に近いと考えられる。

### 4. 解析結果と実験結果の比較

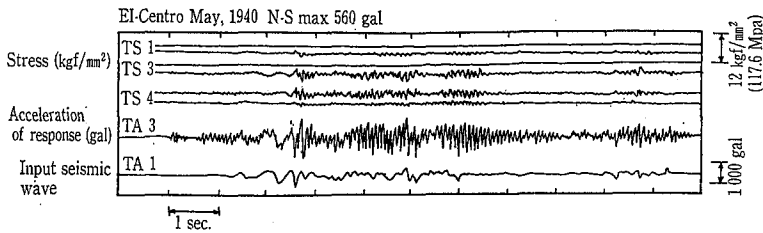
本試験に使用した供試体の有限要素解析（以下FEM）と実験値との比較により解析の検証を行った。

第12図に3次元解析モデル図を示す。

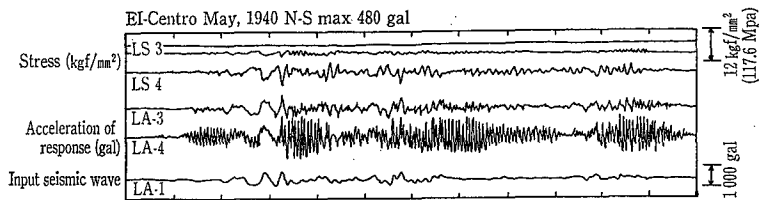
#### 4. 1 固有振動数と固有モード形状

FEM解析によって得られた供試体の固有振動数とモード形状図を第13, 14図に示す。

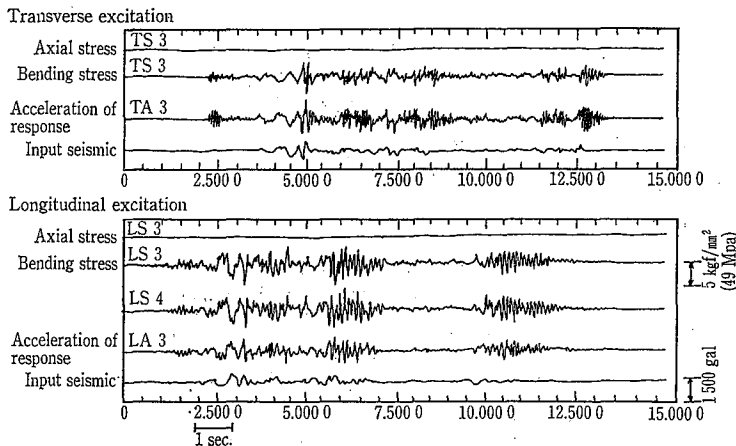
同図と第9図の実験値を比較した結果，FEM解析の固有振動数がやや高い値となっている。これは解析の部材接合条件（剛接合）と実験塔との相違による影響と考えられる。



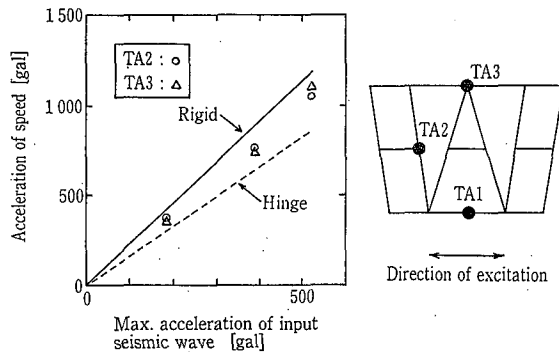
第10図 短辺方向応答加速度，部材応力（実験値）  
 Fig. 10 Acceleration of response and stress in member in the transverse direction (Experimental values)



第11図 長辺方向応答加速度，部材応力（実験値）  
 Fig. 11 Acceleration of response and stress in member in the longitudinal direction (Experimental values)



第15図 モーダル時刻歴解析結果  
 Fig. 15 Results of modal analysis with the lapse of time



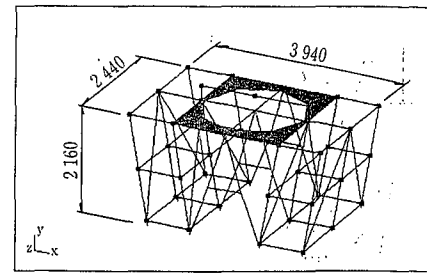
第16図 入力加速度と応答加速度の関係  
 Fig. 16 Relationship between input acceleration and response acceleration

また，モード形状図の比較では実験値と良く一致した。

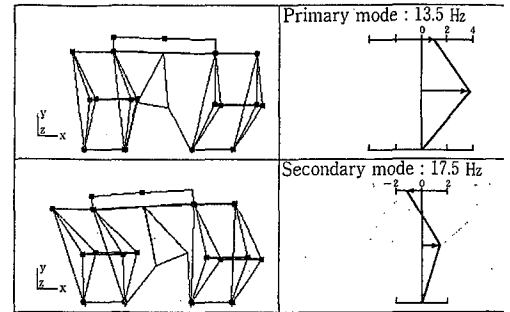
#### 4. 2 応答加速度と応答応力の比較

実験に使用した地震波のデジタルデータを用い，FEMによるモーダル時刻歴解析結果を第15図に示す。

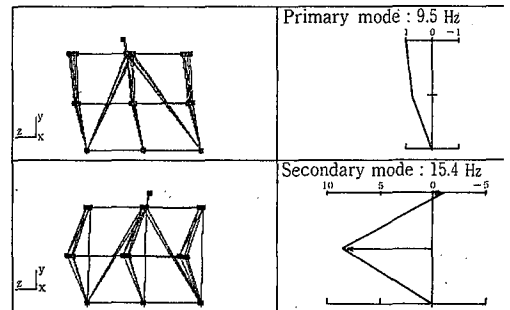
同図は，第10，11図の実験値によく追従しており，解析値は供試試験体の振動性状をよく表していると考えられる。



第12図 3次元立体解析モデル  
 Fig. 12 Three-dimensional analytic model



第13図 短辺方向固有振動数，固有モード形状(解析)  
 Fig. 13 Natural frequencies and natural modes in transverse direction (Analysed values)



第14図 長辺方向固有振動数，固有モード形状(解析)  
 Fig. 14 Natural frequencies and natural modes in longitudinal direction (Analysed values)

一方，入力地震波の加振力（最大加速度）を変化させた場合の実験値との比較を第16図に示す。同図は，時刻歴結果の最大応答値と入力地震波の最大加速度との関係を示したものである。

同図から本実験加速度範囲では線形性を保っており，造体としては弾性域であることが確認された。また，応答値との比較では，部材接合条件が剛接合とピン接合中間に位置すると考えられ，剛接合による解析値が安全であることが確認された。

#### むすび

従来不明な点が多かった冷却塔の地震応答について，実験と解析により，その振動性状を知ることができた。

今後は本研究結果を基に，より合理的な冷却塔の構造計を目指す所存である。

本研究を行うにあたり，株式会社神戸製鋼所技術開発部振動音響室，頭井洋主任研究員の指導および適切な助言をいただき，深く感謝します。

#### 【参考文献】

- 1) 河角広：わが国における地震危険分布，東大地震研29，1；建築雑誌，昭和26年4月