

# 実存煙突の振動実験

表 佑太郎 安井 護  
武田 寿一 角田 智彦

## Vibration Test of Existing Chimney

Yutaro Omote Yuzuru Yasui  
Toshikazu Takeda Tomohiko Tsunoda

### Abstract

The chimney tested was constructed by a sliding form system and is a flue type reinforced concrete structure 180 meters in height. This report discusses the results of vibration tests of the chimney and of analyses carried out thereon.

Three kinds of tests were conducted. These were observation of microtremors, free vibration tests for the first mode and the usual vibration generator tests for high modes. Damping constants obtained by these tests were almost equal at around 1% for the first to third modes. Natural periods were shorter than the design value.

The mathematical model of the chimney was a bending type multi-lumped-mass system, and when assuming rocking and swaying effects on the foundation obtained from test results and also assuming the elastic modulus of concrete to be 1.3 times the design value by considering concrete compressive strength and reinforcement effect, the simulation analysis was in good coincidence with the test results.

### 概要

本報告は SVETHO 工法によって建設された鉄筋コンクリート造180M煙突の振動実験結果とその解析結果とについて述べたものである。実験は鋼製ロープの引張り切断法による自由振動、起振機による強制振動、及び風力を主とする常時微動測定を行ない、当煙突の周期、減衰、振動モード等の振動性状を調べた。実験結果のうち減衰定数に関しては1次から3次までいずれも1%前後である。本実験の解析は煙突を多質点曲げ振動系に置換して固有値解析を行なった。解析の結果、基礎には実験から求めた回転、水平バネ定数を仮定し、筒身部分の弾性係数に、コンクリートの圧縮強度及び鉄筋による割増しを考慮して設計時の約1.3倍( $E=300\text{t/cm}^2$ )を仮定すれば、周期、振動モード等の実験結果が比較的良くシミュレートできた。

## 1. 実験煙突概要

本煙突は、某火力発電所ボイラー用煙突で、当社が SVETHO 工法によって施工したフルタイプ鉄筋コンクリート造初の超高煙突である。煙突諸元は図-1に示すように、全高180M、頂部外直径5.8M、壁厚25CM、底部外直径17.5M、壁厚60CMで、基礎はウォールファンデーション杭41本によって、G.L. -17MのN値80以上の砂質頁岩に支持している。

## 2. 実験方法

本実験は昭和49年10月14日～22日に行なった。この期間は外筒駆体工事、内筒フル工事が完了し、煙道ダクトの取付け作業中であった。実験時の煙突全景を図-2に示す。

実験は以下に概略述べるように常時微動測定、自由振動実験、強制振動実験を行なった。

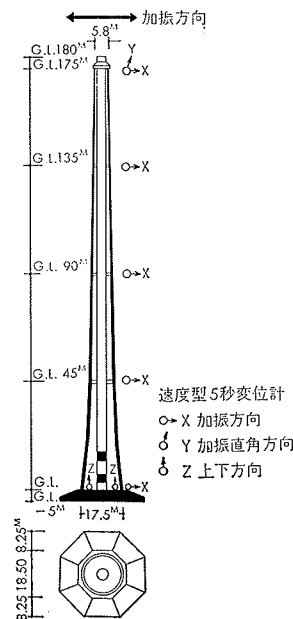


図-1 実験煙突と測定点

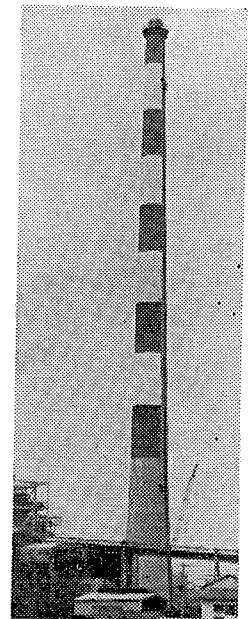


図-2 実験時全景

## 2.1. 常時微動測定

常時微動を生ずる外乱は通常の場合、地盤の微動、通行車両による振動、風力による振動などが主な要因であるが、煙突の場合にはこのうち特に風力による影響が強い。従って本測定の目的は通常のゆれに於る煙突の振動性状を握むことにある。測定は図-1中に示すようにG. L. +175M, 135M, 90M, 45Mの高さ方向4点と、G. L. 位置での水平、鉛直成分を各々速度型5秒変位計（国際機械振動研製）にて行なった。測定の方法は後述の自由振動実験、強制振動実験に於る加振方向に同一としたが、同時に頂部ではこれの直角方向も測定している。

## 2.2. 自由振動実験

高煙突のように1次周期が2～4秒にもなる長周期構造物の1次に対する振動実験は起振機能力の範囲を越えるので他のいずれかの方法によらなければならず、例えば文献1), 2)の実験方法があるが、ここでは鋼ワイヤーを用いた引張切断法を採用した。即ち、煙突頂部のアンカーから加振方法に張った14φスチールワイヤーを図-3のように、切断プレート（鋳物）、動力計を介してチルホールで引張り、任意の強制変形を煙突頂部に与えた後に、鋳物プレート（耐力5t）を割切断することによって急激に変形を解除し、1次振動モード型の自由振動を得ることができる。

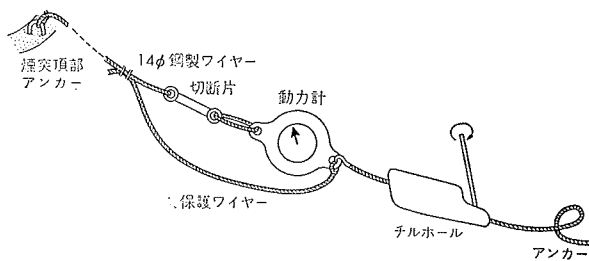


図-3 引張り加力装置

## 2.3. 強制振動実験

本実験はBCS-A型起振機（最大加振力3ton）を用いて、2次、3次の振動性状を求めた。起振機の据付け場所は通常の建物の場合であれば屋階近くにセットすることによって加振力を有効に伝達しうるが、煙突の場合には頂部に据付けることがまず不可能であるから、今回は基礎スラブと一体になるように配慮して底面加振とした。加振の偏心モーメントは2次振動に対しては  $mr_0=200\text{ kg}\cdot\text{m}$ 、3次振動に対しては  $50\text{ kg}\cdot\text{m}$ で行なった。

## 3. 実験結果

### 3.1. データ処理方法

実測記録は当技術研究所振動研究室で開発したデータ処理システムにより一貫処理した。即ち、データレコーダーに収録された電気アナログ量は、D. C. アンプ、マルチスキャナー、A-Dコンバーターを通過して数値化し、常時微動記録に対してはフーリエスペクトルを、強制振動記録に対しては起振機に同期した基準信号と、ピックアップで測定した信号との相互相関数を計算して煙突の真の振幅を求め、共振曲線、位相曲線等が得られる。尚自由振動実験に対しては波形の手読みで処理した。

### 3.2. 常時微動測定結果

図-4に高さ方向各点でのフーリエスペクトルを示す。同図から、 $T=2.60\text{sec}$ の所に明瞭なピークが認められ、常時に於ては1次振動が卓越していることがわかる。尚、本測定中での頂部の最大振幅レベルは、大むね  $300\mu$ （全振幅）程度であった。

### 3.3. 自由振動実験結果

本実験は頂部での換算水平引張力を0.67t, 0.83t, 1.28tとして計3回行なったが、ここでは最大引張力を得た1.28tの場合についての結果を記す。自由振動波形は図-5に示す通りで、波形から読み取った自由振動周期

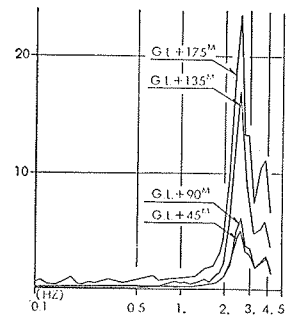


図-4 フーリエスペクトル

期は  $T_1=2.818\text{sec}$  で、先の常時微動測定によるものよりは長い。本実験の場合、頂部最大振幅レベルが全振幅で  $5000\mu$  以上（スケールオーバーの為推定値）であるから、この差は振幅レベルによる差と考える。更に、この時の加振直角方向周期は  $2.838\text{sec}$  で、加振方向と比較して1.2%程度長いが、これは煙道ダクト用開口、及び搬入用仮開口などによる影響かと思う。

波形の振幅比から対数減衰率法で求まる減衰定数は約0.5～1.0%であり、またロッキング中心深さは大略G. L. - (6～8)mであった。

### 3.4. 強制振動実験結果

2次、3次の共振曲線をそれぞれ図-6(a), (b)に示す。同図から、周期は  $f_2=1.515\text{Hz}$  ( $T_2=0.660\text{sec}$ )、 $f_3=3.38\text{Hz}$  ( $T_3=0.296\text{sec}$ )である。共振曲線を用いて  $1/\sqrt{2}$ 法で減衰定数を求めると  $h_2=0.85\%$ 、 $h_3=1.04\%$ となり、先の結果とあわせて、本煙突の微動範囲での減衰定数は1次から3次まで大略1%前後である。

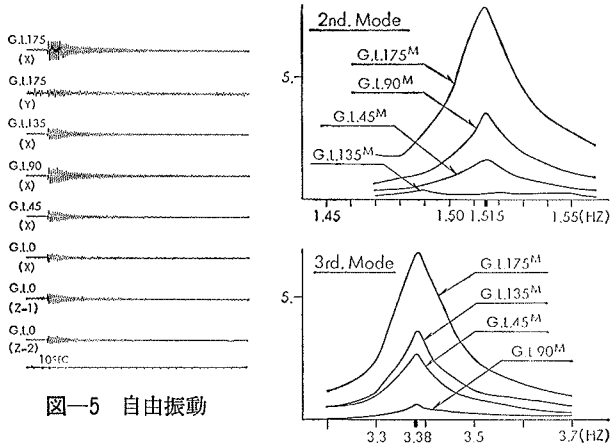


図-5 自由振動

図-6 共振曲線

#### 4. 実験結果の検討

##### 4.1. 地盤のバネ定数

ロッキング、スウェーの比較的卓越している3次振動波形から、地盤の水平バネ定数、回転バネ定数を下式によって算出する。

$$K_H = \omega_0^2 \sum_{i=0}^n m_i u_i / u_0 \quad (\text{水平バネ定数}) \quad \dots\dots(1)$$

$$K_R = \frac{\omega_0^2}{\theta} \left( \sum_{i=1}^n m_i u_i H_i + \theta I_0 \right) \quad (\text{回転バネ定数}) \quad \dots\dots(2)$$

ここに  $\omega_0$ ; 3次の共振円振動数

$m_i$ ; 各測点位置でのみかけの質点質量

$u_i/u_0$ ; 基礎に対する各測点での振幅比

$\theta$ ; 基礎の回転角測定値

$H_i$ ; 各測点のG. L.からの高さ

$I_0$ ; 基礎の回転慣性モーメント

$\omega_0, u_i/u_0, \theta$ を測定値から求め、 $m_i, H_i, I_0$ を設計時の値から求めて式(1), (2)を計算すると

$$K_H = 11.75 \times 10^5 \text{ (t/m)} \quad (\text{設計値 } 3.59 \times 10^5 \text{ t/m})$$

$$K_R = 1.87 \times 10^9 \text{ (t}\cdot\text{m/rad)} \quad (\text{設計値 } 1.60 \times 10^9 \text{ t}\cdot\text{m/rad})$$

となり、設計値と較べると水平バネ定数は3倍強硬いが、回転バネ定数はほぼ一致した結果を得ている。

##### 4.2. 筒体のヤング率

今回は実験時のコンクリートシリンダー試験を行っていないので、4週圧縮強度と配筋とからコンクリートのヤング率を推定する。当煙突の材令28日強度の平均値は  $F_c = 300 \text{ kg/cm}^2$  であるので  $E_c = 257 \text{ t/cm}^2$  となる<sup>3)</sup>。鉄筋によるヤング率の割増し率は全断面について計算した値の平均値から約20%となるので、当煙突筒体のヤング係数は  $E = 310 \text{ t/cm}^2$  と推定される。設計時には強震時を予想して  $E = 240 \text{ t/cm}^2$  と仮定しているため表-1の様に実験値と設計値の周期は一致していない。

##### 4.3. 実験値のシミュレーション解析

計算は当社で開発したR. C. 造煙突の弾塑性応答解

析プログラムを用いる。即ち、煙突を多質点曲り振動系に置換し、基礎にロッキング・スウェーを考慮して非減衰の自由振動方程式を解く。入力定数として、基礎のバネ定数に4.1.で求めた実験値を、筒体のヤング率は4.2.の値を用いると、周期、及び頂部変位に対するロッキング率、スウェー率は表-1の様になり、振動モードは図-7の様になって比較的良い結果が得られた。

#### 5. 結び

本報告は鉄筋コンクリート造超高煙突の振動実験結果とその考察について述べた。結果の要約は以下の通りである。

1) 各次の固有周期比は、

$$T_1 : T_2 : T_3 = 1.0 : 0.25 : 0.11$$

となり、本煙突の場合脚部にアールがついているものの、上記の比率は一般の変断面型煙突の平均的比率<sup>2)</sup>と同等な値である。

2) 各次の減衰定数はいずれも1%前後であり、次数による差は顕著でない。即ち内部減衰的な傾向は示していない。

3) 基礎の回転、水平のバネ定数に実験値を用い、筒身のヤング係数を4.2.で述べたように割増して考えて解析すると実験結果をほぼシミュレートできる。

4) 本報告では述べなかったが、種々解析の結果、1次2次の固有周期を大きく左右する要因は筒身のヤング率であり、3次以降の振動性状は基礎に関する定数によって影響を受ける。

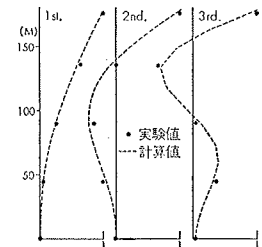


図-7 振動モード

	固有周期 (sec)			スウェー率(%)			ロッキング率(%)		
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	1次	2次	3次	1次	2次	3次
実験値	2.60 2.82	0.660	0.296	0.14	1.2	3.4	3.9	18.2	34.9
解析値	2.644	0.665	0.295	0.06	0.6	3.7	0.	3.5	42.0
設計値(参考)	3.056	0.749	0.453	—	—	—	—	—	—

表-1 実験値と解析値の比較

#### 引用文献

- 1) 中川・寺村他「大阪大林ビル振動実験」大林組技研所報 No. 7 1973
- 2) 武藤・内田他「超高RC造煙突の振動実験」建論報第208号 昭48.6
- 3) 建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」p. 50

謝辞 本実験を行うに当り多大な御協力をいただきました大林組大牟田工事々務所の方々にお礼申し上げます。