

RC 煙突の風洞実験用弾性模型の開発

田 村 幸 雄* 西 村 功**

Elastic model of reinforced concrete chimney for wind tunnel testing

Yukio TAMURA, Isao NISHIMURA

This paper presents an investigation on the material of the elastic model for a wind tunnel testing which simulates the dynamic behavior of a reinforced concrete chimney under wind loadings. Although it has been very difficult to coincide exactly the natural vibration modes or high order natural frequencies of a model with a full-scale structure, dynamic characteristics and aeroelastic behavior of a model made of the material presented here coincide with those of a full-scale structure only by being manufactured geometrically proportionally. The material consists of mainly Epoxy resin and iron powder. The basic wind tunnel testing using the model made of this material are done and the results are discussed.

1. はじめに

風による構造物の振動を風洞実験の対象とする場合には弾性模型を使わなければならない。変形特性を考慮にいれると相似則が飛躍的に厳しくなり、一般的な材料で幾何学的に相似な弾性模型の製作は困難である。そこで従来は、①建物そのものは剛体として、脚部に所定のばねを入れたロッキング模型による方法、②所定の条件を満たすヤング率の棒を軸にして、構造物の形状を相似とするための外装を取り付ける方法、③構造物を構成する各部を剛体的に作成し、相互の結合点あるいは支持点に所要のヤング率をもつばねを挿入する方法、等々により弾性模型を近似的に製作することが多かった。しかし、これらの方法では振動モ

ードを正確に相似にすることが難しく、質量分布などを厳密に相似にすることもできない。また、模型から直接各部の応力を計測できないなどといった多くの問題がある。

本研究は、超高 RC 煙突の動的実験を全く幾何学的に相似な模型によって行うことを前提として、空力弾性的な相似模型を作成するための材料を開発し、この材料によって試作した弾性模型を用いた基礎的な風洞実験を行ったものである。

2. 相似則

実物と模型の煙突の空力的振動性状を相似にするためには、以下の相似パラメータの一致が必要である¹⁾。

- ① 密度比: σ/ρ
- ② 弾性パラメータ: $E/\rho U^2$
- ③ 減衰定数: h
- ④ レイノルズ数: $\rho U D/\mu$

* 建築学科 助教授

** 早稲田大学建築学科大学院
昭和 62 年 9 月 25 日受理

ここで、E: ヤング率, h : 減衰定数, ρ : 空気密度, U : 風速, D : 代表長さ(外径), σ : 材料の密度, μ : 空気の粘性係数である。

通常の場合, 空気密度 ρ および空気の粘性係数 μ は実物と風洞実験とでは等しい。よって密度比を一致させるためには, 模型材料の密度と実際の構造物の材料の密度が一致しなければならない。このとき, 減衰定数とレイノルズ数を別途考慮することにすれば, 幾何学的に相似な模型の場合は弾性パラメータが一致すればよいことになる。

3. 模型材料の開発

模型材料は, 安価で手に入り易く, 合成, 注型の比較的容易なエポキシ樹脂を選んだ。合成する時に添加材を加えることで施工性, 密度およびヤング率などをかなり自由に調整することが出来る。

3-1. 材料の密度

実際の構造物として鉄筋コンクリート造(RC造)を対象とする場合, 2.で述べたように, 模型材料の密度は鉄筋コンクリートの密度と一致しなければならない。しかし, エポキシ樹脂の密度は約 1.2 g/cm^3 で, 鉄筋コンクリートの密度 2.4 g/cm^3 よりはるかに小さい。そこで, 添加材として鉄粉を加えて, 模型材料の密度を鉄筋コンクリートの密度 2.4 g/cm^3 まで高めることにした。また, エポキシ樹脂を硬化させるための硬化剤, さらに, 鉄粉の沈降防止と熱膨張率および硬化時の収縮低減のための炭酸カルシウムを添加材として使用するが, これらを加えすぎると粘性が高まり過ぎて, 施工性が悪くなったり, 密度やヤング率が変わったりする。

以上述べたような条件を考慮して, 配合比を種々変えた 17 ケースの試験体を製作した。はじめに, 主剤(日本合成化工: R-11), 硬化剤(日本合成化工: H-89), 炭酸カルシウム, 鉄粉を計量する。続いて, これらをカップに入れて, ハンドミキサーを使って総量に応じて 10 分から 30 分ほど混合する。このとき材料の中に多量の気泡が混入するのでカップごとデシケータに入れて真空ポンプを使用して真空脱泡を行う。時間は, 泡が

出なくなってからさらに 5 分とした。つぎにこれを用途に応じた塩ビ製の型枠に静かに流し込み, 80°C に設定した加熱炉で 3,4 時間加熱する。こうしてできあがった樹脂を用途に応じて切削した。

これら 17 体の試験体の密度を測定した結果, 各材料の重量配合比がエポキシ樹脂 1, 硬化剤 0.15, 炭酸カルシウム 0.38, 鉄粉 2.4 の場合に, 密度が鉄筋コンクリートの密度 2.4 g/cm^3 と一致し, 施工性も問題なかった。

3-2. 材料のヤング率

本実験に使用する風洞装置の実用風速が $3 \text{ m/s} \sim 15 \text{ m/s}$ ということから, 弾性パラメータを一致させるためにはヤング率を約 $1.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ の間にしなければならない。種々の配合比で作成した 15 本の供試体について, ヤング率を知るための引張試験を行った。実験は供試体にひずみゲージ(KYOWA KFC-2-D 16-11-L 500)をはって, 万能試験機(RES-10 t)で荷重をかけ, 静ひずみ計(KYOWA UCAM-5)によりひずみを測定した。

その結果については詳述しないが, 密度が鉄筋コンクリートと一致した前述の配合比により作成された供試体(3本)についてのみ言えば, これら供試体 3 本の平均ヤング率は $9.7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ となり, RC 煙突の風洞実験用の模型材料として使用可能範囲に入っていることが確かめられた。なお, ポアソン比は 0.346 であった。

4. 模型の製作

前述の配合比の材料を使用して, 外径 3.3 cm , 内径 2.94 cm , 長さ 50 cm の円筒と, その半分の縮尺の円筒の 2 体を製作した。模型は薄肉のため直接注型して作ることは難しく, 厚肉円筒を旋盤で切削して製作した。また, 旋盤の機構上あまり長いものの切削は無理なため, 長さ 10 cm のピースを 5 本作り, 同じ配合比の材料で接着し, 一本の円筒に仕上げた。

5. 風洞実験

製作した弾性模型で実際にひずみの検出が可能かどうか, また共振風速が風洞風速範囲に入るか

どうか等, 基礎的事項を検定するために, 風洞実験を行った. ここでは, 長さ 50 cm の円筒模型についてのみ述べる.

5-1. 実験方法

(1) 使用風洞

開回路式噴流型風洞装置(測定洞断面: 高さ 0.9 m×幅 1.1 m, 測定部長さ: 5.4 m)を用いて実験を行った.

(2) 使用模型

打撃試験より得られた模型の一次固有周波数は 47.5 Hz であった. また, 減衰定数 h はほぼ実物の RC 煙突に近い 0.012 であった.

(3) 使用気流

ベキ指数 α が 1/3.5 の境界層流を用いた.

(4) 測定及び解析方法

Fig. 1 に示すように, 外部からの雑振動を防ぐために風洞実験室の床に防振ゴムを敷き, 約 200 kg の仮設鋼材を組み上げて, 模型底部を固定支持した. Fig. 2 に示すように, 模型底部より 5 cm の位置から 10 cm ピッチで合計 5 レベルにひずみゲージ (KYOWA KFC-2-D 16-11-L 500) を表裏合計 10 枚貼り, 動ひずみ計 (San-ei MULTI-ACE 6 G 01) を用いて模型のひずみを計測した.

出力は 114 Hz のローパスフィルター (JEIC-TYPE 3012) を介して, サンプル間隔 $\Delta t = 0.0025$ 秒, データ数 2048 個 (評価時間 5.120 秒) でサンプリングした. スペクトル密度は FFT 法により, ハニングウィンドを 10 回かけ, 16 個の

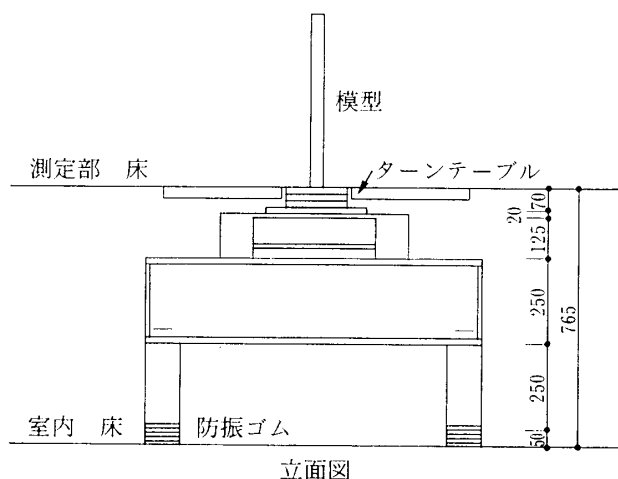


Fig. 1 風洞への模型のとり付け

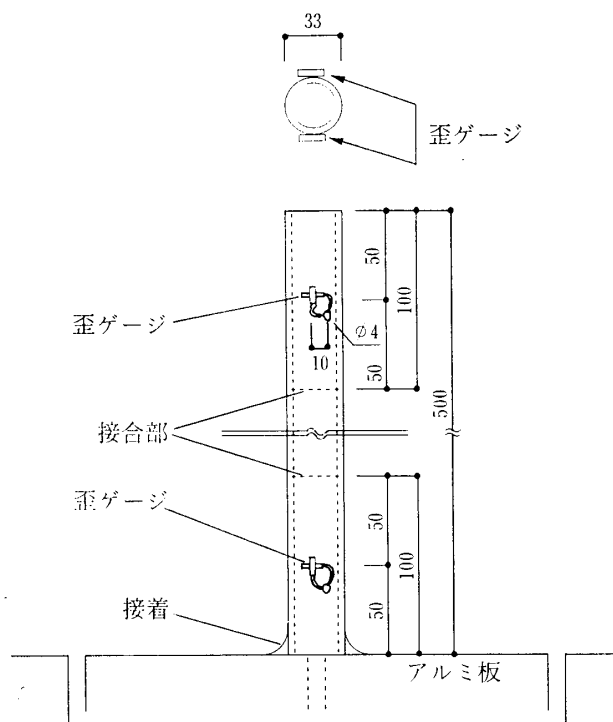


Fig. 2 模型への歪ゲージの設置

アンサンブル平均をとって算出した.

風速は模型より風上側 90 cm, 測定部床より 65 cm, 測定部壁より 30 cm の位置に設置されたピトー管とバラトロン (310 BH) により測定した. 模型の歪計測実験は風速 3 m/s から 1 m/s ピッチで 13 m/s まで増加させて行った. ただし, 共振風速付近は 0.25 m/s ピッチで測定した. 結果は模型の 2/3 高さの風速 (基準風速) にて整理した.

なお, 風方向の変形によるひずみを風方向ひずみ X , 風直角方向の変形による風直角方向ひずみを Y とし, 以下では模型最下部のゲージ出力の裏表の平均についてのみ述べる.

5-2. 風洞実験結果とその考察

(1) ひずみと風速の関係

Fig. 3 に基準風速とひずみの関係を示した. 風方向ひずみの rms 値 σ_x は基準風速 U のほぼ 3 乗に比例して増加している. 一方, 風直角方向ひずみの rms 値 σ_y は 7.5 m/s 付近から急激に増加し, 8.6 m/s 付近で明瞭なピークを持つ. これは明らかに渦励振の発現を表している. 風方向ひずみの平均値 \bar{X} , および rms 値 σ_x にも若干そ

の影響が見られる。

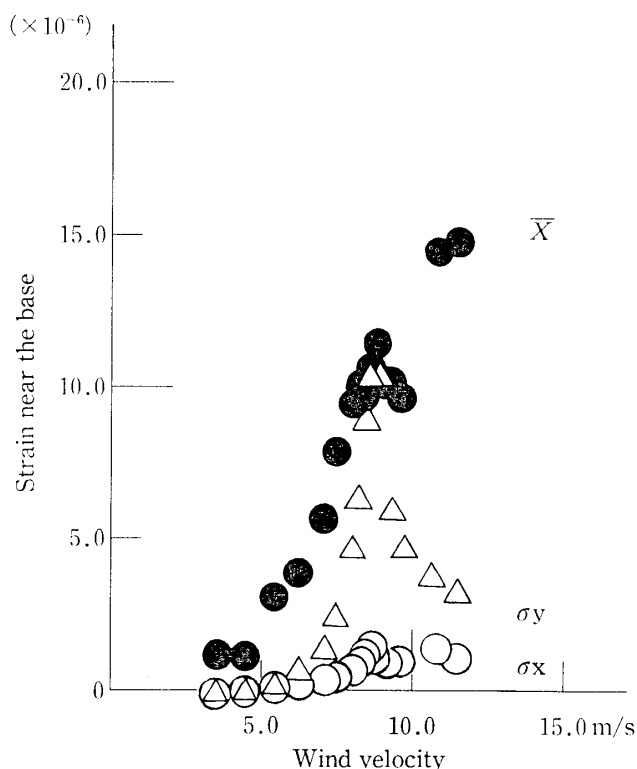


Fig. 3 歪応答値と風速の関係

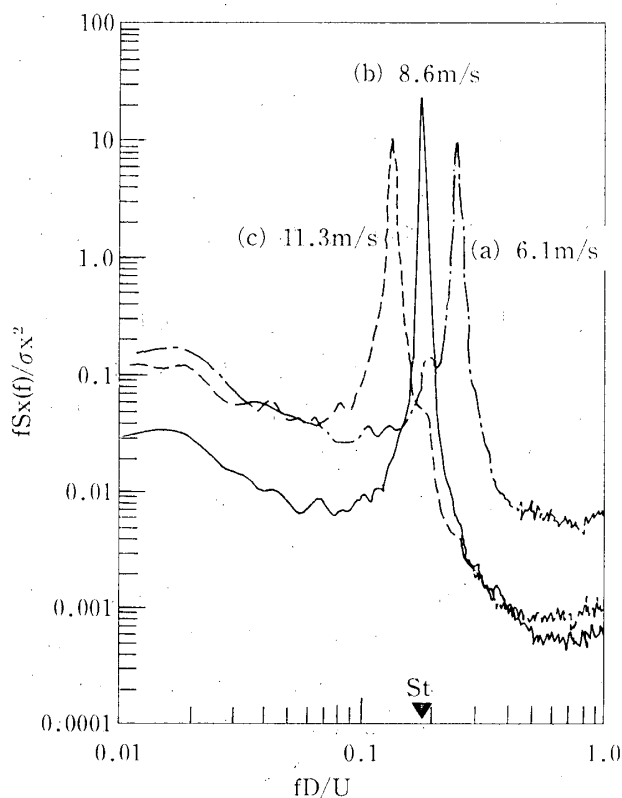


Fig. 4 風方向歪のパワースペクトル密度

(2) ひずみのパワースペクトル密度

Fig. 4 に風方向ひずみ X のパワースペクトル密度を, Fig. 5 に風直角方向ひずみ Y のパワースペクトル密度をそれぞれ, 渦励振の (a) 共振風速以下, (b) 共振風速付近, (c) 共振風速以上の 3 ケースについて示した. 縦軸は $f \cdot S(f)/\sigma^2$ と無次元表示し, 横軸は無次元周波数 fD/U である. ただし, f : 周波数, σ^2 : 分散である. Fig. 4 の風方向ひずみのスペクトル $S_x(f)$ には (b) の共振風速付近以外では渦発生周波数のピーク (ストローハル数成分) はほとんど見られず, 固有周波数によるピークのみが現れている. しかし, Fig. 5 の風直角方向ひずみのスペクトル $S_y(f)$ には全ての場合にストローハル数成分のピークが明瞭に存在し, このピークは (b) の共振風速付近の場合に最も高くなる.

6. おわりに

これまでの, 振動学的にも空力的にも相似な模型を作ることが困難であったが, 本研究で開発した材料で RC 煙突の空力弾性的相似模型の製作が可能となった. 基礎的風洞実験の結果も, この弾

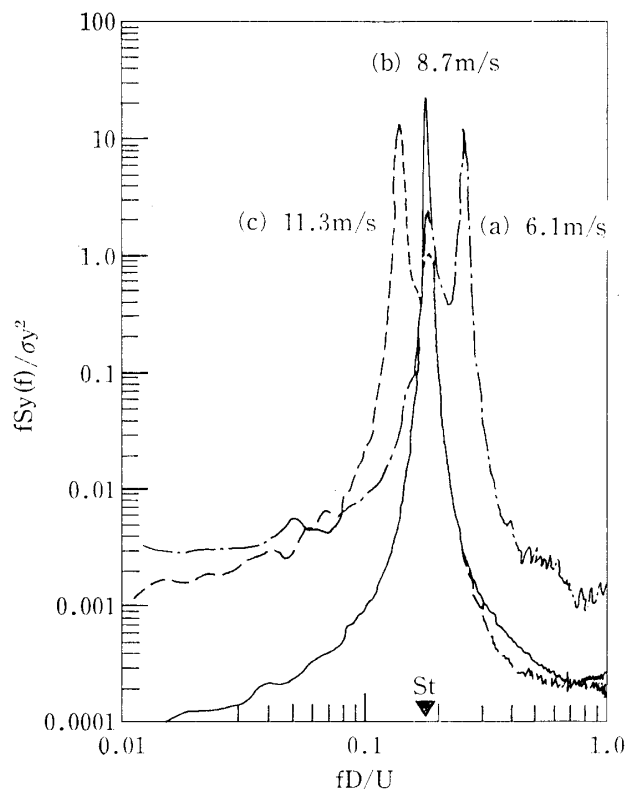


Fig. 5 風直角方向歪のパワースペクトル密度

性模型材料が RC 煙突の動的な風洞実験に極めて有効であることを示している。

建築科昭和61年度卒論生の笹野邦彦君のご協力を得ました。厚く御礼申し上げます。

謝 辞

本研究において材料の選択にあたり日本合成化工の寺崎勝幸氏，また風洞実験にあたり清水建設技術研究所防耐風グループの皆様のご協力を頂きました。また，実験全般にわたって東京工芸大学

参 考 文 献

- 1) 片桐純治，大熊武司，丸川比佐夫，風工学シンポジウム論文集，1984 年。
- 2) 垣内弘，エポキシ樹脂，昭晃堂。