

空気膜構造棟に関する実験・研究（その5）

——振 動 特 性——

武 田 寿 一 真 藤 利 孝
蔭 山 満 本 間 義 教

Experimental Studies on an Existing Air Supported Structure (Part 5)

——Vibration Characteristics——

Toshikazu Takeda Toshitaka Shindo
Mitsuru Kageyama Yoshinori Honma

Abstract

The authors developed an air dome with three-way cable system based on the experience gained by their company in preparing the working designs and constructing the Expo '70 U.S. Pavilion. This paper reports on the results of experiments on vibration conducted using a large-sized experimental model with the purpose of investigating the structural characteristics of a three-way cable system. For applying forced vibration, the method of transmitting sine wave vibration force by pulling a steel wire to which initial tension had been imparted was used. The vibration amplitude aimed for was from 1 cm to 10 cm. The following findings were made as a result of the experiments. (1) When response displacement was constant, the natural frequency showed a trend of becoming proportionally higher with increase in internal pressure. In case of internal pressure being constant, natural frequency showed a trend of becoming proportionally lower with large response displacement. (2) Damping factor showed a trend of becoming larger with increase in response displacement.

概 要

空気膜構造物は、構造特性上、支配外力である風圧力あるいは雪荷重による膜屋根の挙動、密閉空間による防災・避難計画など種々の未解決の問題点がある。当社では大阪万博アメリカ館の実施設計および施工を担当し、各種の実験を行ない報告してきた。さらに、現在は当技術研究所内に建設した空気膜構造棟を用いて諸問題解決のため、施工、構造、防災、室内環境に関する一連の調査研究を実施している。この報告は、屋根面の構造特性を明らかにすることを目的として、空気膜構造棟で実施した振動実験の結果について報告するものである。実験内容は、微小振幅（1cm）時の振動特性の内圧依存性および微小振幅から大振幅（10cm）に至る振動特性の振幅依存性について調査した。

1. はじめに

1970年大阪万国博覧会のアメリカ館は、世界で初めての大規模な空気膜構造物であった。空気膜構造物は、ケーブルで補強した膜屋根を空気圧で支持するため、大スパン構造物に適しており、さらに透光性の良い膜材料を用いることにより、今までにない新しい空間が得られる。

空気膜構造物は、万国博覧会以後、耐候性の良い4フッ化エチレンコーティングガラスクロスが開発されたため、アメリカで急速に発展し、今日までにポンチアック市のシルバードームを初めとする大規模スタジアムが数棟建設されている。

日本では、法的制限のため、空気膜構造物の発展は見られなかったが、1983年に法的制限が緩和され、恒久建築物として認められるようになった。

空気膜構造物は、構造特性上、支配外力である風圧力あるいは雪荷重による膜屋根の挙動、密閉空間による防災・避難計画など種々の未解決の問題点を含んでいる。

当社では、万博アメリカ館の実施設計・施工を担当し、各種の実験を行ない報告してきた¹⁾。さらに、現在は当技術研究所内に建設した空気膜構造棟を用いて諸問題解決のため、施工、構造、防災、室内環境に関する一連の調査研究を実施している^{2)~5)}。

この報告は、屋根面の構造特性を明らかにすることを目的として、空気膜構造棟で実施した振動実験の結果について報告するものである。

2. 空気膜構造棟

空気膜構造棟は、大阪万博アメリカ館の実施設計および施工した経験を生かし開発した、世界で初めての3方向ケーブルシステム空気膜構造物である。この空気膜構

造棟の建物規模は、床面積 840 m²、スパン 36 m×24 m、高さ 9.5 m で、テニスコート1面を収容している（写真-1、図-1）。

ケーブルは、スパイラル(18φ, 1×19)を使用し、3方向に配置している。膜材は、4フッ化エチレンコーティングガラスクロスを使用している。膜材は、取付金具(アルミ型材、ネオプレンゴム、取付けプレートで構成される、図-2)を介して短辺方向のケーブルのみに取付けている。なお、取付けプレートとケーブルは、緊結していない。ケーブル相互の固定は、クランプ金物を使用しボルトで緊結している。ケーブル端部は、鉛直方向の動きに対しピン支持とし、コンプレッションリングにアンカーされている。この状態での屋根面の平均重量は、約3.5 kg/m²である。

3. 実験方法

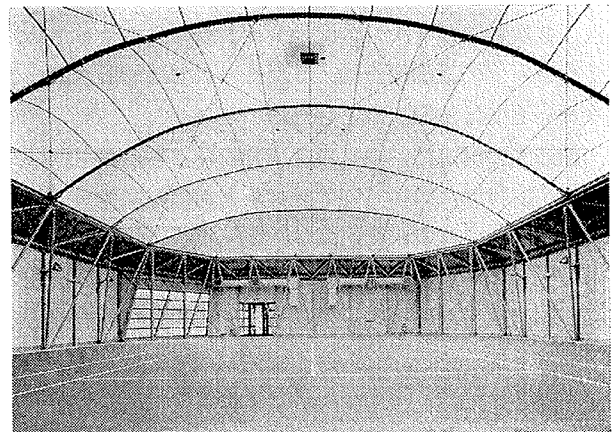
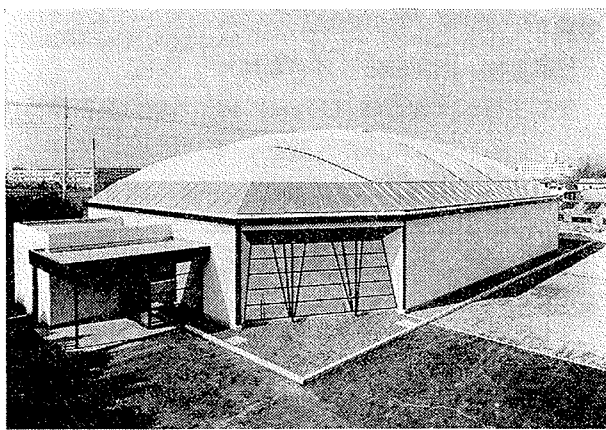


写真-1 空気膜構造棟

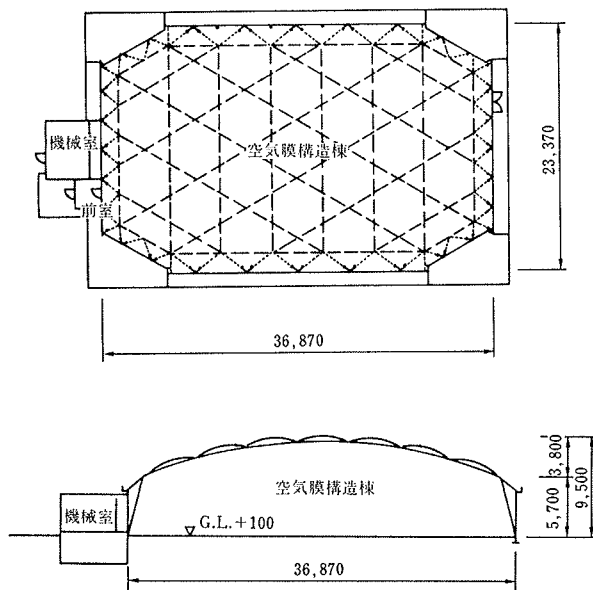


図-1 空気膜構造棟平面および断面

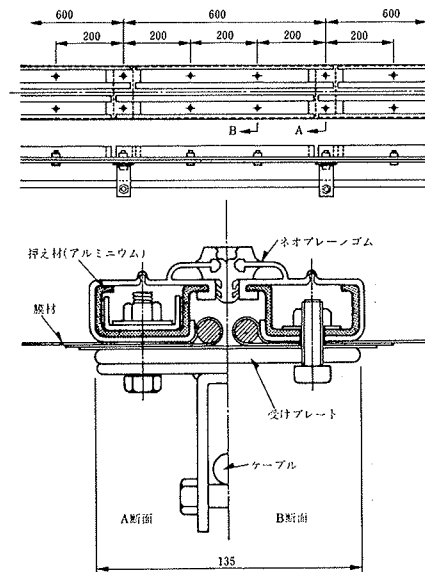


図-2 膜材取付部詳細

3.1. 加振方法

振動実験の実験方法としては、一般的に起振機実験法が多く用いられている。しかし、加振位置に起振機を積載する従来の方法では、起振機の重量が軽量の膜架構にかかるため、膜架構の特性そのものに影響を与え、実際の振動特性を得ることができない。

そこで、起振機重量を膜架構にかけないで、加振力のみを伝える加振装置を考案した(図-3)。

この加振装置は、モーターの回転運動を上下運動(振幅 17 cm 一定)に換えるもので、下から初期張力を与えた鋼線で正弦波加振力を膜架構に伝達するものである。

加振力および加振振幅の調整は、鋼線の中間に入れたコイルバネの強さを変化させて行なった。

加振力の検出には、膜架構と鋼線の間に入れたロードセルを用いた。

3.2. 加振点と測定点

加振点および測定点を図-4に示した。加振点は、1次、2次および3次の各振動モードを発生させるため、1次モードでは加振点20、2次モードでは加振点21、3次モードでは加振点27とした。

加速度の測定は、鉛直方向成分のみとし、測定点は、膜材を取付けた短辺方向ケーブルと斜め方向ケーブルの交点とした。なお、測定点は、空気膜架構の対称性を利用して同架構の半分に配置し、モード形を求める場合には、加振点を対称位置に移動して全体のモード形を求めた。

ケーブル張力の測定は、ケーブル端部の張力測定のみとし、フォークエンド内に設けたロードセルで測定した。

3.3. 実験システム

実験管理およびデータ処理は、振動計測車のシステム

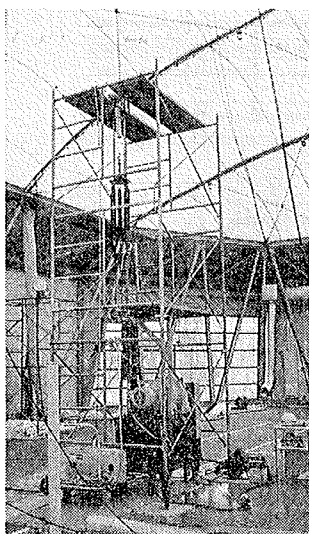
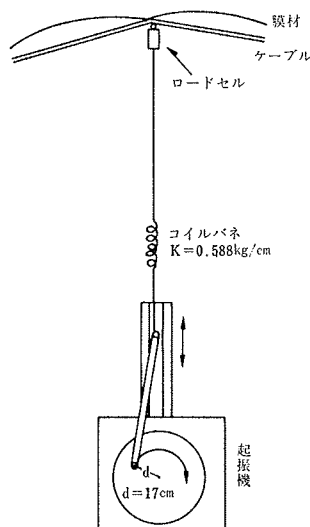


図-3 加振装置



で行なった(図-5)。このシステムは、解析処理をリアルタイムで行なうため、その結果から次ステップの加振振動数を決めることができる。

4. 実験内容

実験は、実験1と実験2の2種類の実験を行なった。

実験1は、内圧の変化に対する振動特性の変化の傾向についての調査したものである。実験条件は、解析条件に合わせ微小振幅レベルとした。

実験2は、振幅の変化に対する振動特性の変化の傾向についての調査したものである。振幅は、最大 10 cm 程度を目標とし、3段階の共振振幅レベルを設定した。

その実験期間と実験主旨を次に示す。

実験1

実験期間: 昭和59年2月

実験主旨: 微小振幅(1 cm)での空気膜振動特性の内圧依存性調査

実験2

実験期間: 昭和60年5月~6月

実験主旨: 大変形時(10 cm)に至る空気膜振動特性の振幅依存性調査

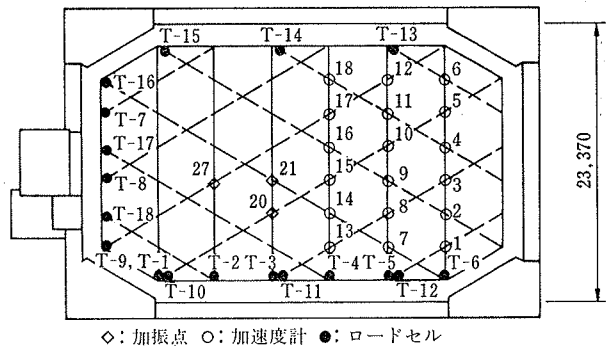


図-4 加振点および測定点

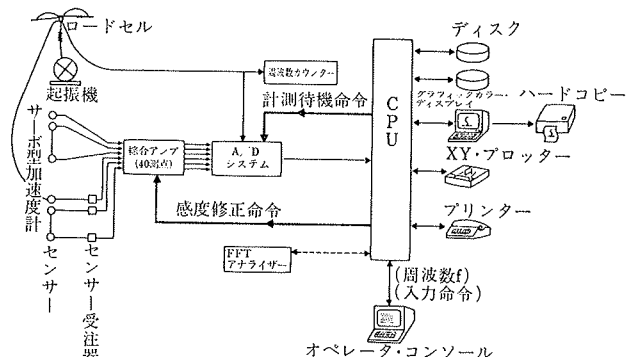


図-5 実験・解析システムのブロック図

5. 実験結果

5.1. 振動特性の内圧依存性について

この調査は、実験1で行なったもので、加振力は 10 kgf でほぼ一定であり、その共振振幅は 1 cm 程度であった。

固有振動数の 1 次と 2 次について、加振力を一定とし内圧を 12~90 mmAq まで 10 段階に変化させて求めた各共振曲線を図-6 と図-7 に示した。内圧 33 mmAq 時のモード形と固有振動数を図-8 に示した。

同一固有次数の共振応答加速度は、内圧が大きくなるほど大きくなっており、減衰定数が小さくなる傾向を示している。一般に、減衰が大きいと共振ピークの幅が広くなり、その形状より減衰を求める場合、隣接する固有次数の影響を受けて減衰定数がばらつくことになる。

このため、減衰定数は、減衰の小さな 90 mmAq の減衰定数を基準として、それ以下の内圧時の減衰定数は、90 mmAq 時の最大振幅に逆比例するものと仮定して求めた。ただし、2 次については 68 mmAq を基準とした。

$$h_n = \frac{A_{90}}{A_n} \cdot h_{90} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 A_n : n mmAq 時の応答加速度

h_n : n mmAq 時の減衰定数

以上の関係より求めた内圧と減衰定数の関係を図-9 と図-10 に示した。この結果より、先の 33 mmAq 時の減衰定数は約 3% と考えられる。

固有振動数の内圧依存性を 1 次および 2 次について図-11 に示した。

空気膜架構の剛性 K は、内圧 P による部材張力 T をすべてケーブルが負担し、かつ、形状変化が無いものと仮定した場合、剛性 K は、内圧 P による部材張力 T に比例して生ずるものであり、架構自重 M が内圧と釣合う自重釣合状態内圧 P_0 を内圧 P から差引いた付加内圧が部材張力に比例する。すなわち、固有振動数と圧力の関係は(2)式で示される。

$$K = \alpha T, \quad T = \beta(p - p_0), \quad P_0 = M/A$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/M} \quad \therefore f_0 \propto \sqrt{p - p_0} \quad \dots\dots\dots(2)$$

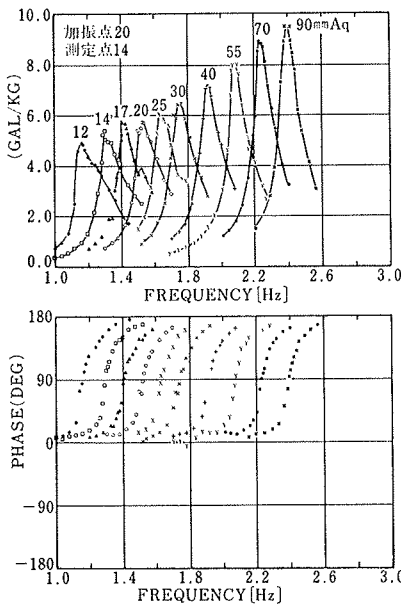


図-6 共振曲線 (1次)

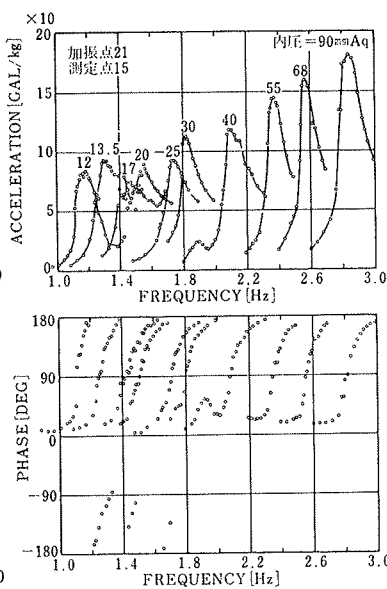


図-7 共振曲線 (2次)

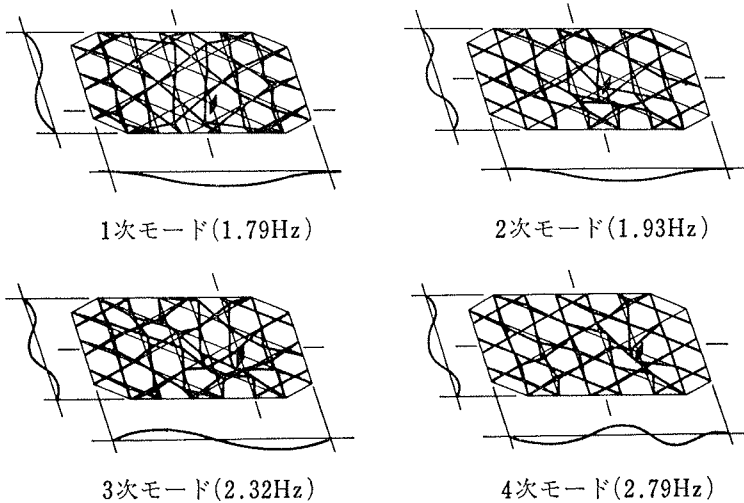


図-8 モード図

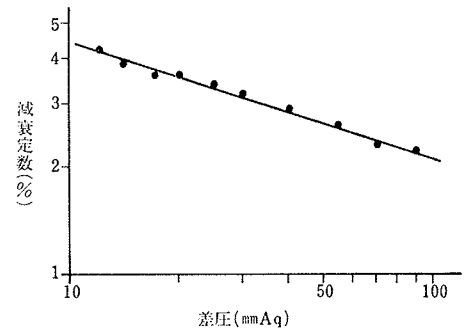


図-9 内圧と減衰定数の関係 (1次)

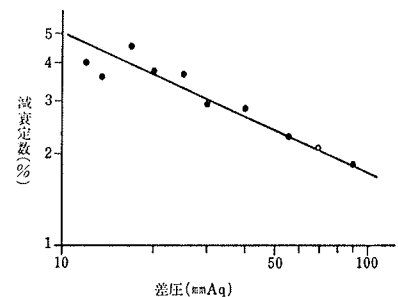


図-10 内圧と減衰定数の関係 (2次)

ここで、 α, β は比例定数、 A は膜面積 (m^2) である。固有振動数 f_0 と付加内圧 ($P-P_0$) の関係を両対数で示すと、その勾配が $1/2$ の直線となる。自重釣合状態内圧を $P_0=8 \text{ mmAq}$ とすると、図-12 に示したようにほぼ直線となるが、その勾配は理論値の $1/2$ より小さい。この原因としては、形状変化による部材張力 T と付加内圧の比例定数 β の低下、およびケーブルと膜材などの応力負担割合の変化の影響によるものと考えられる。

5.2. 振動特性の振幅依存性について

5.2.1. 加振力特性について 実験2は、内圧を 33 mmAq 一定とし、共振振幅が、数 cm から 10 cm 程度となるように、加振力を 25 kgf からその $6\sim 8$ 倍までの範囲で3段階に変化させて行なった。この場合、加振力は、加振点の膜架構の応答が $1\sim 2 \text{ cm}$ 程度の小振幅の場合にはほぼ一定となるが、数 cm 以上の大振幅の場合には、共振帯域とその他の振動数域で大きく変動する。3種類のバネによる加振力特性の代表例を図-13に、各次数の最大応答振幅を表-1に示した。

5.2.2. 振動特性の振幅依存性について 3段階の加振力によって得られた共振曲線と位相曲線を各加振点別

に図-14に示した。同図は各加振力を 1 kgf 当りに標準化した加速度応答であり、固有振動数に関係なく、各加振力の共振応答振幅の比率は減衰定数に逆比例したものとなる。

この共振振幅比の結果では加振力の大きいものほど減衰が大きくなっている。減衰の大きいものはモード干渉が大きく共振曲線の形状から減衰を求める事が難しく、しかも、大加振時の振動数領域の加振力変動が激しいことを考えると、共振曲線の形状から減衰定数を算定することはできない。

このため、実験1の内圧変化時の算定と同様に、減衰定数が小さく共振曲線形状より求まる減衰定数の信頼性が高い小加振時の減衰定数を用い、それを基準として大加振時の共振振幅比より減衰評価を行なった。

	最大共振 応答振幅(cm)	振 幅 ライズ	振 幅 スパン(短辺)
目標値	10.0	1/34	1/196
1次	9.7	1/35	1/202
2次	12.5	1/27	1/157
3次	8.8	1/38	1/223

表-1 最大共振応答振幅

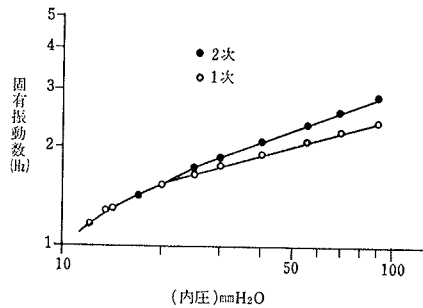


図-11 内圧と固有振動数の関係

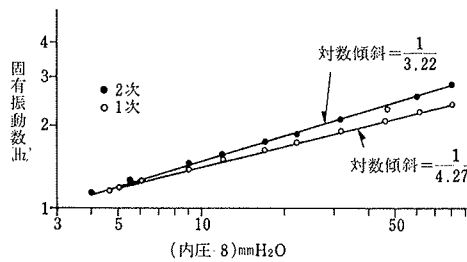


図-12 付加内圧と固有振動数の関係

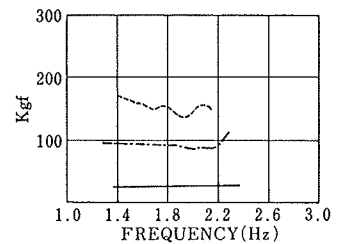


図-13 加振力特性

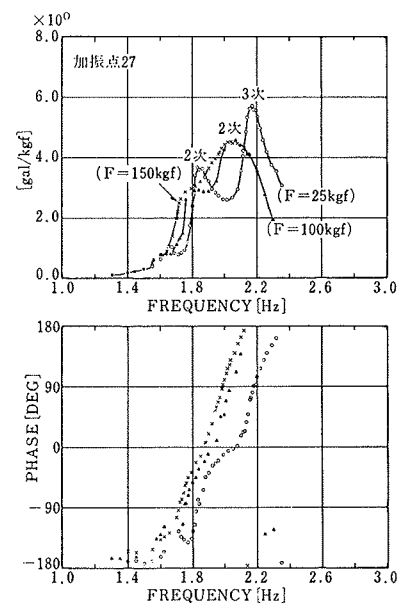
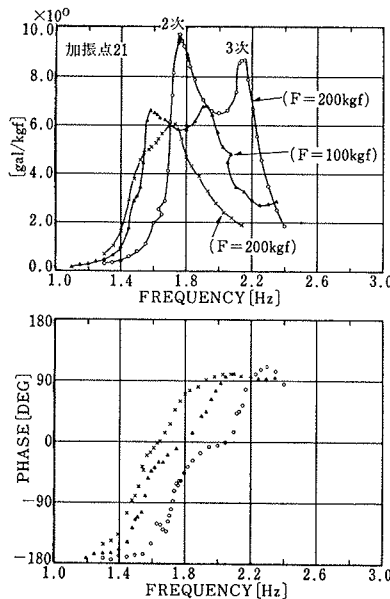
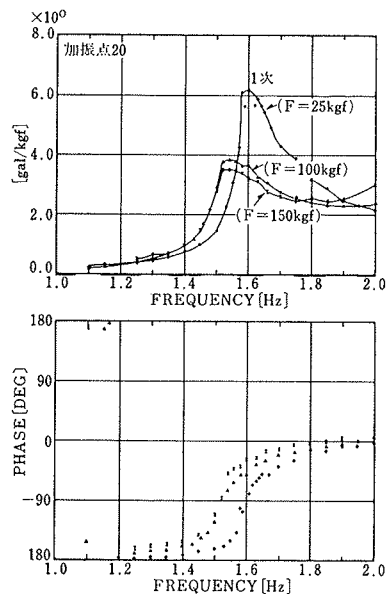


図-14 各加振力の共振曲線と位相曲線

以上の方法で求めた減衰定数とその共振応答振幅の関係を図-15に示した。減衰定数は、その共振振幅が大きくなる程大きくなる傾向にあることが分かった。また、共振加振時の加振ワイヤー切断による自由振動波形（ケーブル張力波）も前述の傾向を示した（図-16）。

共振応答振幅と固有振動数の関係を図-17に示した。大加振時の2次の共振曲線は3次との干渉が大きく、その正確な固有振動数を見出すことができなかったが、1次と3次の固有振動数はその共振応答振幅が大きくなる程低下する傾向にあることが分かった。

内圧 33 mmAq 時における、実験1と実験2の小加振時の結果を比較すると、実験2の固有振動数は、実験1より 0.2 Hz 程度低下していた。

実験モードに対応する解析値の固有振動数は、1次固有振動数=1.349 Hz, 2次=1.552 Hz, 3次=1.653 Hz であり、実験値に対し 0.2~0.4 Hz 低い値となった。解析値のモード形は、実験値と比較的良好一致を示した。

実験2のモード形については実験1と同じであり、省略する。

5.3. 内圧変動とケーブル張力変動

5.3.1. 内圧変動 加振力、内圧およびケーブル張力の変動記録（加振点21, 加振力 100 kgf）の1例を図-18に示した。内圧変動の位相は、共振時以外の周波数帯では、加振力に対して同位相あるいは逆位相を示したが、共振時には $\pi/2$ の位相ずれが認められた。

最大共振応答振幅時の内圧変動の最大値は、1次では 3.0 mmAq, 2次では、3.5 mmAq, 3次では、0.3 mmAq であった。

5.3.2. ケーブル張力 ケーブル張力変動と共振応答振幅の関係を図-19に示した。張力変動は、共振応答振幅の増大とともに増加する傾向にあり、その傾向は、1次では、ほぼ線形と見出し得るものの、2次、3次では線形と見なし得るほど増分は一定ではない。

最大共振応答振幅時の張力変動は、1次において斜めケーブル T-8, T-9, T-13, T-14で初期張力に対し、40~60%の増分を示した。2次および3次における張力変動は、1次の約半分の20~30%程度の増分であった。

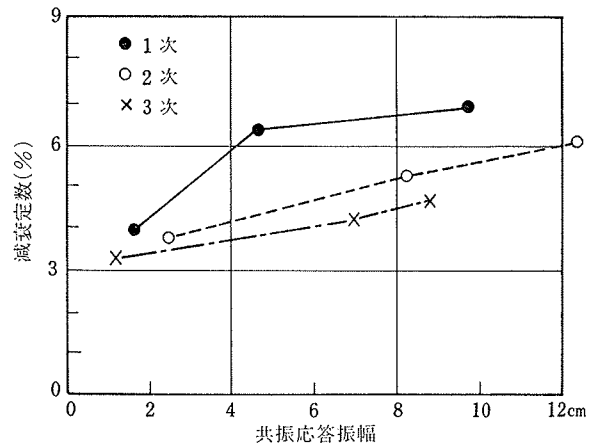


図-15 減衰定数と共振応答振幅の関係

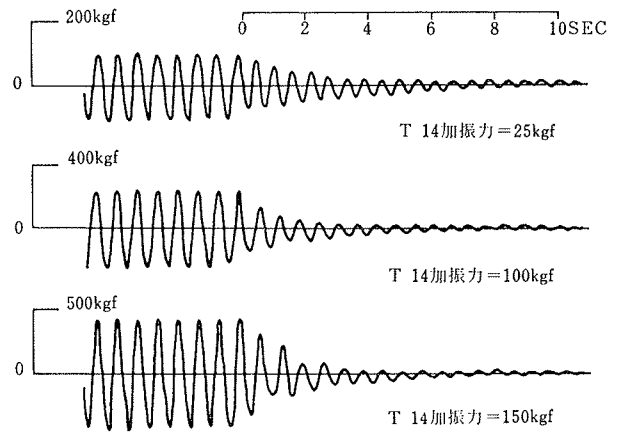


図-16 自由振動波形（ケーブル張力）

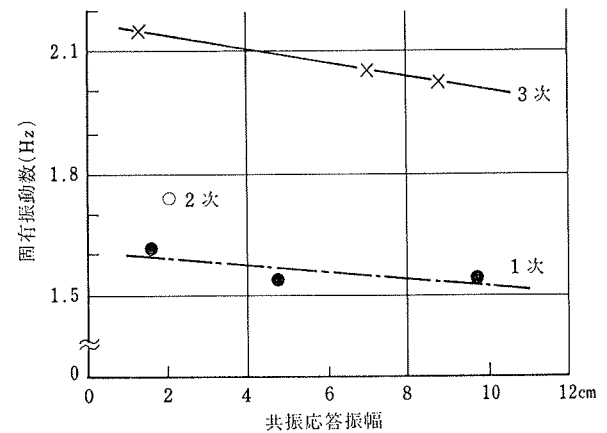


図-17 固有振動数と共振応答振幅の関係

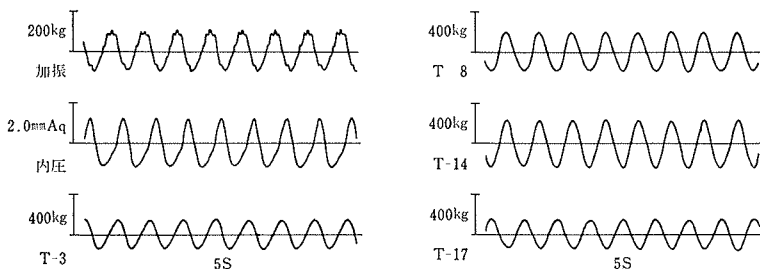


図-18 変動波形（加振点27, 加振力 100kgf）

6. まとめ

低ライズケーブル補強空気膜構造物の屋根根面の構造特性を明らかにすることを目的として行なった振動実験の結果、以下の知見を得た。

(1) 固有振動数は、応答振幅が一定の場合、内圧の増大とともに高くなる傾向にあ

った。また、内圧が一定の場合、応答振幅が大きくなる程、低下する傾向にあった。

(2) 内圧に対する固有振動数の勾配は理論値より小さかった。これは、内圧による屋根形状の変化により、剛

性が変化するためと考えられる。

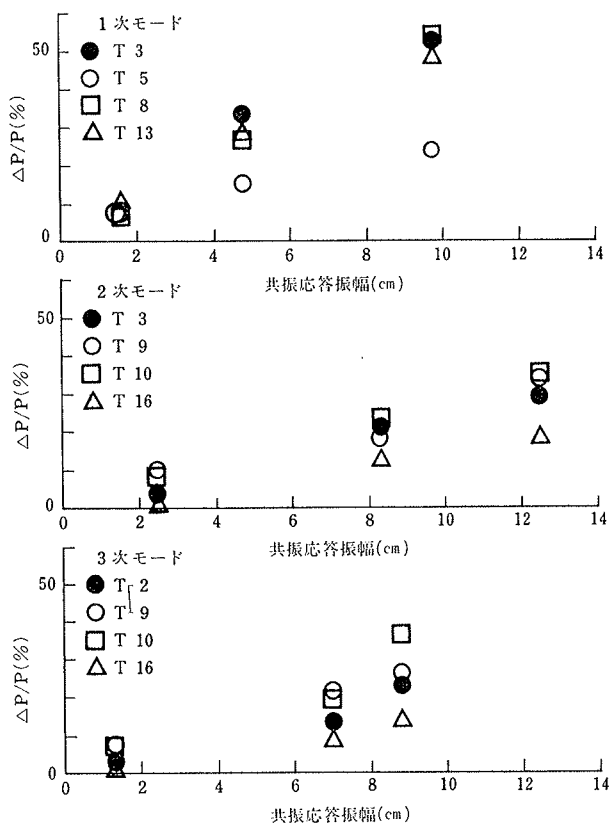
(3) 減衰定数は、応答振幅が一定の場合、内圧の増大とともに小さくなる傾向にあった。また、内圧が一定の場合、応答振幅の増大に伴い大きくなる傾向にあった。

(4) 竣工1年後の固有振動数は、竣工直後のものと比べ0.2 Hz程度の低下が見られた。

(5) 竣工1年後の小変形時の固有振動数と解析値を比べた場合、実測値は解析値に対して約10%程度高い値を示した。

参考文献

- 1) 昇高, 他: 空気膜構造の実験報告 I~IV, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和45.9), pp. 609~616
- 2) 中川, 他: 空気膜構造棟に関する実験・研究(その1~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和59.10), pp. 1037~1038, pp. 89~90, pp. 979~980, pp. 949~950, pp. 301~302
- 3) 真藤, 他: 空気膜構造棟に関する実験・研究(その1~4), 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 188~197, No. 33, (1986), pp. 98~107
- 4) 蔭山, 他: 空気膜構造物の振幅レベルとその特性に関する研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和60.10), pp. 427~430
- 5) Takeda, et al.: Experimental Studies on Structural Characteristics of a Cable-Reinforced Air-Supported Structure, Proc. of IASS, Osaka, Japan, (Sept. 1986), pp. 141~148



図—19 張力変動と共振応答振幅の関係