

空気膜構造の自然風中における振動性状に関する実験

石崎潑雄・桂 順治・谷池義人・柏崎太郎

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF A PNEUMATIC STRUCTURE IN NATURAL WINDS

By *Hatsuo ISHIZAKI, Junji KATSURA,*
Yoshihito TANIKE and Taro KASHIWAZAKI

Synopsis

As a pneumatic structure is always affected by dynamic wind pressures and a large deformation of its roof membrane is liable to occur, the dynamic as well as static behaviors of the membrane in natural winds must be studied. But the characteristics of wind pressures acting on the membrane and the response of this are very complicated. Therefore nowadays these problems are not enough understood. In this paper, regarding the low-rise pneumatic structure, the relation between wind pressures acting on the membrane and the static and dynamic displacements is qualitatively examined.

1. ま え が き

空気膜構造のように常に動的な風圧力を受ける場合、静的な変位だけではなく動的な変位に関しても充分調べる必要がある。特に自然風中における膜の挙動は、膜の形状が変化し、また空気力学的諸外力を伴うために、非常に複雑なものとなっており、その性状を把握することは難しい問題である。空気膜構造に関する研究^{1)~3)}は、現在でも数多くなされているが、それらの内容は平均風圧に限られたものが多く、自然風の下で、しかも柔模型による膜の挙動に関する研究⁴⁾は現在でも数少ないようである。

本研究では、低ライズ型空気膜構造物を対象に実験を行った。解析は、速度圧と膜の変位に限定して行い、静的・動的の2つの面から膜の基本的性質を調べてみた。同時に、強制変位を人工的に加え、膜の自由振動実験を行った。

2. 実 験 概 要

2.1 実験模型

実験は昭和58年12月から60年にかけて、潮岬風力実験所にて行った。模型は Fig. 1 のようなスパンが約5 m、高さが1.2 mの正方形平面をした直方体の屋根に膜を張ったもので、膜の形状は曲率半径が約7.2 m、ライズ比が1/10の球冠形をした、いわゆる低ライズ型空気膜構造物と呼ばれるものである。ケーブルの配置は水平面に投影したとき直交になるようにしてある (Fig. 2 参照)。膜の材料はナイロン製の物を使用し、引張強度が137.0 kg/3 cm のものを使用した。なお、

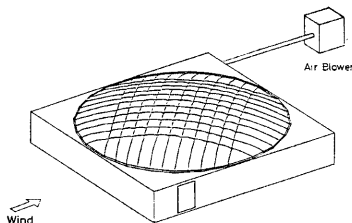


Fig. 1 Perspective of model

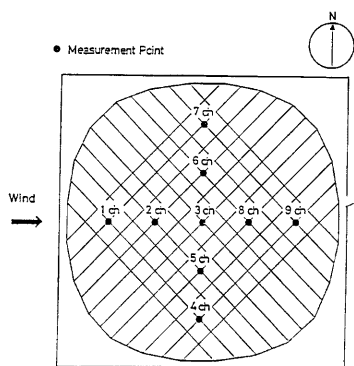
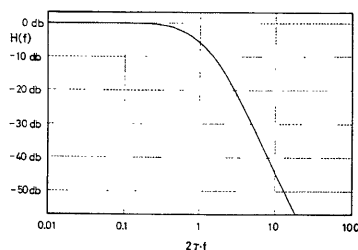


Fig. 2 Arrangement of displacement meter

たローパスフィルターを得るために、その逆フーリエ変換から Fig. 4 に示すような重み関数 $h(t)$ を求め、それとのコンボリューションからフィルターを実現させている。Fig. 3 の周波数特性のグラフから読み取れるように、 $1/2\tau$ のカットオフ周波数を持ったローパスフィルターと等価であるとして、解析に用いた。

Fig. 3 Frequency characteristics of digital filter $H(f)$

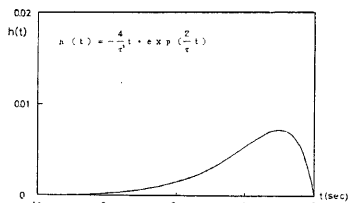
内圧は本研究では 4 mmAq に一定して行った。

2.2 計測方法

風速は西風を想定し、実験模型の西方 5 m の位置に超音波風速計を設置し、風速及び風向を計測した。膜の変位は、模型内部から差動トランス型変位計を取り付け測定した。採取したデータはそれぞれアンプを通じ、マルチプレクサーにより PCM に変換してレコーダーに録音した。解析には風が強く吹いているときを選んで、およそ 1 時間連続的に記録したものをを用いた。

2.3 解析方法

解析は、採取したデータをデジタル化しマイクロコンピュータを用いて行った。膜の静的な変位を取り出すために、本研究ではデジタルフィルターを用いた。Fig. 3 のように滑らかに落ちる周波数特性を持った

Fig. 4 Function $h(t)$ in time space

3. 結果および考察

3.1 強制変位自由振動実験に関して

測定点 2 および測定点 3 に強制変位を加えたときの膜の頂部（測定点 3）の振動波形を Fig. 5 に示す。試行はそれぞれ 5 回ずつ行ない図に重ねて表示した。波形から、振動は非常に減衰の高いものであることがわかる。測定点 2 に強制変位を加えた場合は、単一周波数を持った正弦波のようなかたちをしているが、測定点 3 の場合は、それとは異なり、むしろ 2 つの近い周期を持った波の連成振動のようなかたちをしている。これは膜材料の剛性の異方向性によるものではないかと思われる。これらの波形を波形解析装置にかけスペクトルを求めたものが図の下段に示してある。いずれの場合も 5 Hz 近傍にピークを持っており、膜がこの周波数で固有振動していると考えられる。

次に、膜の頂部（測定点 3）に強制変位を加えたときの、他の測定点での膜の振動をみてみる。その結果の一部を Fig. 6 に示してある。各点での振動波形から、膜は頂部（測定点 3）、周辺部（測定点 1）を膜に

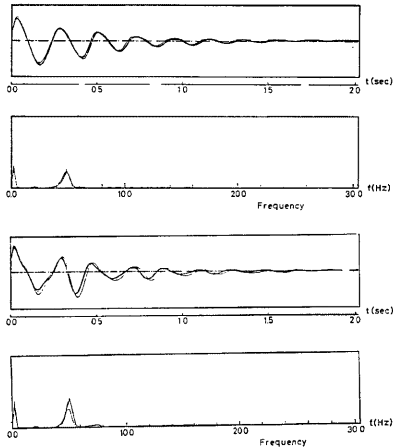


Fig. 5 Free vibration record and its power-spectral-density function at point 3 under forced displacement on point 2 (upper), Free vibration record and its power-spectral-density function at point 3 under forced displacement on point 3

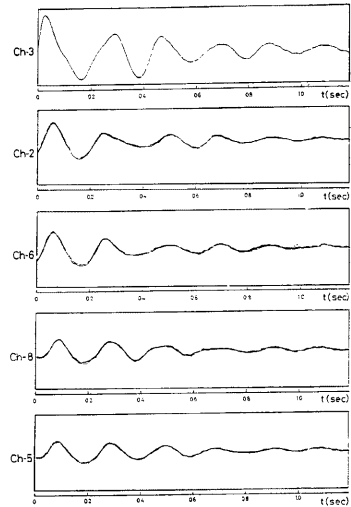


Fig. 6 Free vibration records (CH-3,2,6,8,5)

し、その中央部あたり（測定点）を節として、同心円上の点が同期しながら上下動するようなモードを持って振動していることがわかる。しかし減衰が非常に大きく、完全に定在波が形成されているとは言いきれないようである。

3.2 静的な膜の変形に関して

膜の変形は膜に及ぼす平均風圧力に依存することが予想される。そこでどのような時間的スケールの変位を静的なもの、つまり風圧力によるものであると定義するかが問題となる。逆にこのスケールを求めることにより静的な変形に関して考慮すべき風圧力の評価時間を知ることができる。

そこで最初に前述のローパスフィルターを膜の変位および速度圧に施し、それらの相関性を調べた。Fig. 7 は膜の頂部周辺5点に関して評価時間の τ の違いによる相関係数をプロットしたものである。このグラフにより、およそ6～8秒程度で速度圧と変位により相関が得られていることがわかる。

Fig. 8, Fig. 9 は速度圧と膜の変位のスペクトル、およびコヒーレンス（速度圧と測定点3に関するも

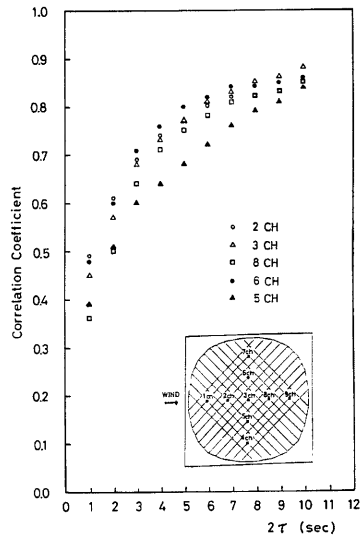


Fig. 7 Correlation coefficients between dynamic pressure and membrane displacement with various averaging time

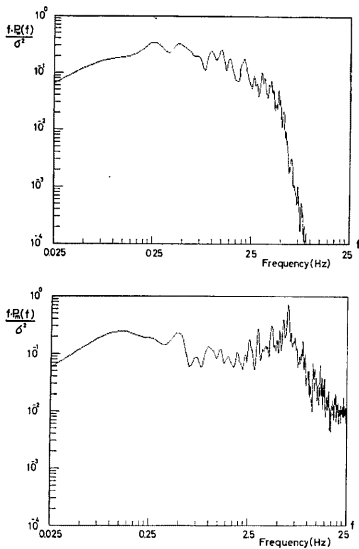


Fig. 8 Power-spectral-density function of dynamic pressure and membrane displacement (at point3)

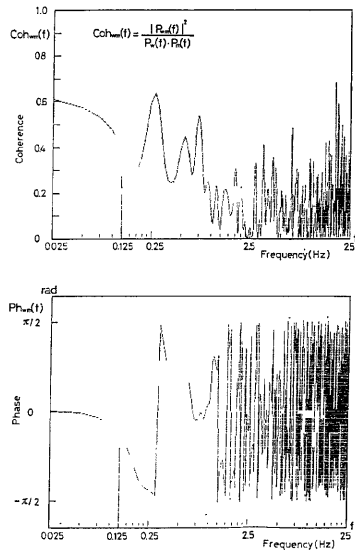


Fig. 9 Coherence and phase between dynamic pressure and membrane displacement (at point3)

の)と位相差を表したものである。解析はサンプリングタイムを0.2秒とした2分間のデータについて行っている。スペクトルに関して言えば、速度圧の高い方は高い周波数領域で滑らかに落ちていく典型的な形をしている。一方、膜変位の方は、むしろ高い周波数領域にかたよった形をしていることがわかる。これらのコヒーレンスを見ると、周波数空間でおよそ0.125 Hz まで位相のずれのない高いコヒーレンスが得られている。つまり時間空間でいえば、約8秒ぐらいまでは位相差のない相関が速度圧と膜変位の間にあることがわかる。これは模型のスケールで言えば、解析データの平均風速が約10 m/s であることから、構造物の大きさのおよそ16倍の長さの空気の流れが膜面の静的な変位に関しているということが言える。

次に、このような0.125 Hz 以下の周波数域で速度圧と膜変形がどのような関係を持っているかを調べてみた。横軸に速度圧、縦軸に膜の変位をとり、ひとつの突風のデータについてプロットしたものが Fig. 10 である。図から膜の変形が速度圧と比例的関係にある

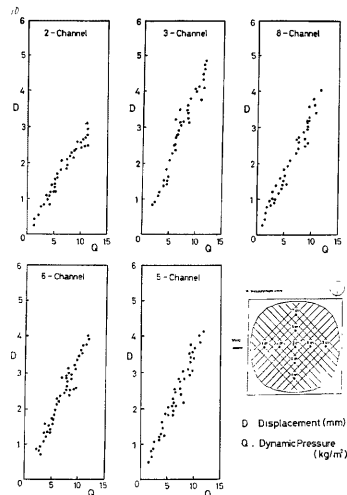


Fig. 10 Dynamic pressure and membrane displacement

ことがわかる。つまり膜の変形は風速の 2 乗に比例するといえる。

そこで、速度圧に対する膜の変位の比を近似的に求め、それが膜面の頂部において 1 となるように他の測定点の比を換算し図式化してみたのが **Fig. 11** である。つまりこの図は、膜が速度圧の変化に伴い変形する形を示している。実験に用いた模型と同様な形をしたドームの風圧分布のかたち²⁾を比較してみると近似した形状をしていることがわかる。

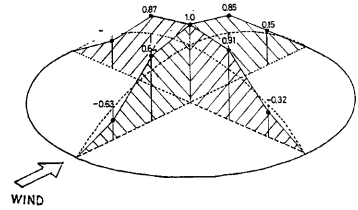


Fig. 11 Mean displacement of membrane

しかし、膜面の周辺部に関しては、負圧が生じているのにもかかわらず下方に変位している。これは膜が体積変化を生じないような形で変形するからだと思われる。

3.3 平均風速の違いによる膜の振動

Fig. 12 は風速が 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s の 4 種類について、その速度圧のスペクトルを表したものである。横軸は周波数、縦軸は生のスペクトルを分散でわり正規化し、さらに周波数をかけて表示してある。以後スペクトルはすべてこの形で正規化し表わすこととする。

この 4 種類のスペクトルを見ると、部分的にはかなりばらつきが見られるが、総体的に見れば、いわゆる Davenport 型のスペクトルの形を示している。

Fig. 13 はこの 4 種類の風速下での、膜の頂部の変動のスペクトルを表したものである。このとき前項で取上げた静的な変形を除く意味で 0.125 Hz 以上の成分のみを扱っている。**Fig. 13** から読み取れるように、風速の違いによりその振動性状が大きく異なっていることがわかる。平均風速が 8 m/s の場合、1 Hz の近傍

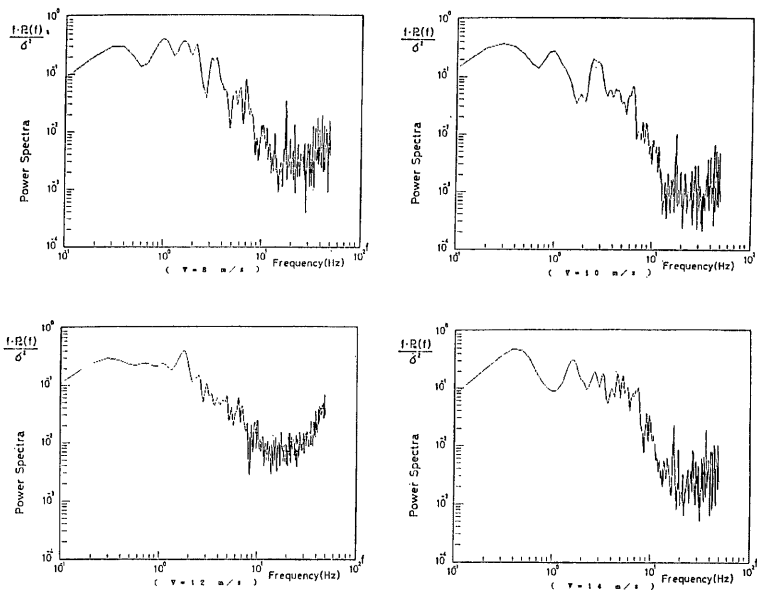


Fig. 12 Power-spectral-density functions of dynamic pressure with various wind velocities

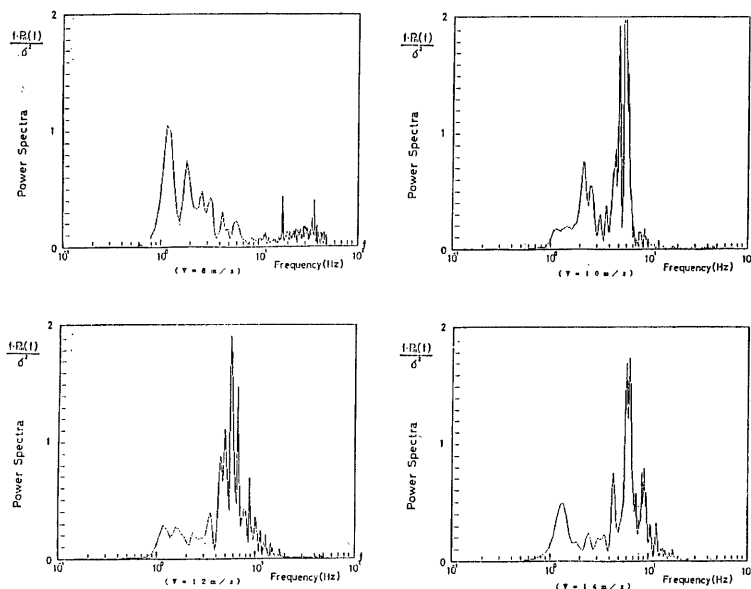


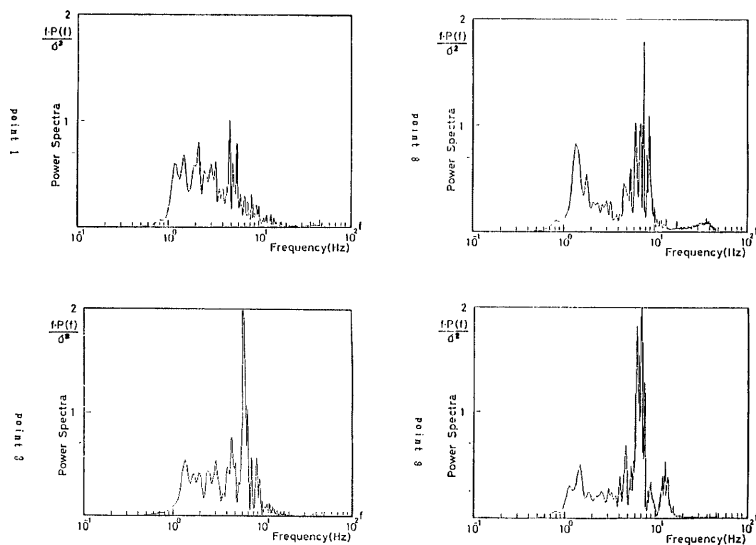
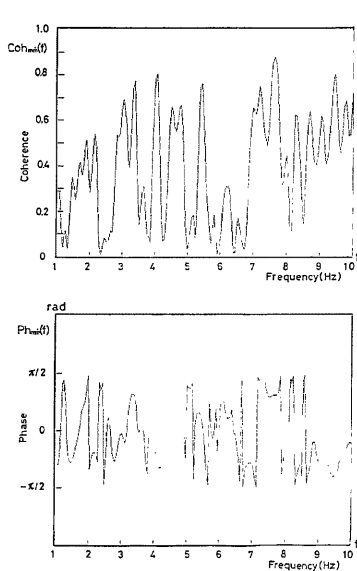
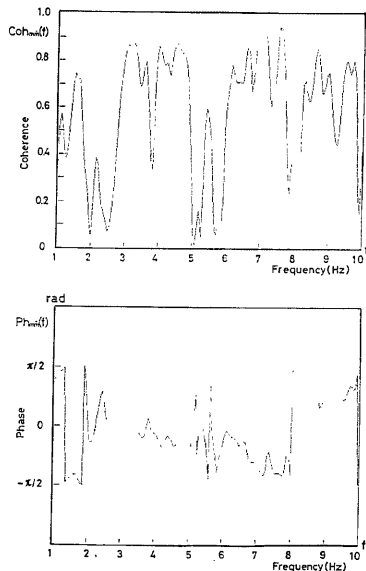
Fig. 13 Power-spectral-density functions of membrane displacement with various wind velocities

にパワーが集まっているのに、平均風速が 10 m/s 以上については、どれも 5 Hz の近くにパワーが集中している。しかも風速が高くなるにつれて、ピークの周波数領域がわずかに高くなっていることがわかる。平均風速が 10 m/s 以上のときのスペクトルピークが生じる 5 Hz 前後の振動数は自由振動モードを想定させる。しかし低風速時にその振動モードが発生しないことから、膜の静的な変形が 5 Hz 前後の振動の発生に関与しているものと考えられる。

3.4 振動モードに関して

膜全体の振動性状を調べる意味で、ひとつの風速域（平均風速 12 m/s）の下での、風向方向に一列に並んだ 4 点について、0.125 Hz 以上のスペクトルを求めてみた。Fig. 14 にそれを示す。図からわかるように、風上側の測定点 1 では頂部でみられるような鋭いピークは見られない。一方、風下へいくほど幅の狭いピークが見られることがわかる。したがって、膜全体としてはひとつの周波数では振動していないように思われる。

そこで、膜の頂部に関して、風上側（測定点 1）および風下側（測定点 9）とのコヒーレンスと位相差を求めてみた。頂部と風上側の点とのコヒーレンスと位相差を表したものが Fig. 15 で、Fig. 14 に見られる頂部のスペクトルのピーク域（6~7 Hz）に注目してみると、コヒーレンスは、概して低くまた位相に関しても非常にばらつきがあることがわかる。Fig. 16 は頂部と風下側とのコヒーレンスと位相差を示したものであるが、同じピーク域を見ると、前図に比べ高いコヒーレンスがみられ、また位相の違いもあまりみられないことがよくわかる。以上のことから、膜の個々の部分を見る限り 1 つの周期を持って膜は振動しているようだが、全体が同期した 1 つのモードで振動しているとは言い難いと言える。ここでも、Fig. 11 にみられる静的な下向きの変位が生じる風上側と、曲率が大きくなる頂部から風下側にかけての部分とは膜の剛性が


 Fig. 14 Power-spectral-density functions at point 1, 2, 8 and 9 ($V=12$ m/s)

 Fig. 15 Coherence and phase at point 3 and point 1 ($V=12$ m/s)

 Fig. 16 Coherence and phase at point 3 and point 9 ($V=12$ m/s)

不均一になっていることを考え合わせて、6~7 Hz の振動の発生には静的な膜の変形が関連しているものと考えられる。

4. ま と め

本研究では、膜構造のひとつである低ライズ型のものについて自然風中の模型を用い、その膜の挙動に関して実験的研究を試みた。以上の結果をまとめてみると下記ようになる。

- (1) 膜の静的な変位は速度圧に比例する。これは風速により風圧係数が変化しないことを意味しているであり、剛模型で求めた風圧係数による外力算定に妥当性を与えるえであると言える。
- (2) その変形のしかたは、風圧分布の形とは若干異なり、膜の周辺部で下方に変形し、頂部では上方に変形する。つまり、膜は全体として体積変形を起こさないような形で変形する傾向にあることがわかった。
- (3) 平均風圧力の評価に関しては、時間的スケールで言えば、およそ8秒、模型のスケールで言えば、スパンの約16倍の長さの空気の流れを考慮して評価すればよいと思われる。
- (4) 動的な変形に関しては、高い風速の下と低い風速の下では著しく異なった動きをすることがわかった。

低い風速の下では、風の小さいスケールの性質に大きく依存した形で振動するように思われる。

一方、高い風速の下では、膜面の静的な変形による剛性の不均一が生じ、固い部分に集積する歪エネルギーが振動の形で柔らかい部分に伝達して消散するものと考えられる。この振動は静的変形が大きくなるほど振動数が高くなり、間欠的に発生することが特徴である。

- (5) 風速のパワースペクトルは膜のそれに比べて低周波域にかたよった形をしている。また外力として風圧力は非対象な形で膜に加わる。そのようなことから、風圧力に励起され、しかも大変形を伴うような自励的な振動は起こりにくいことが言える。

最後に、この解析に用いた計測データは潮岬風力実験所の林 泰一助手、尾崎寿秀、河内伸治技官によって収録されたものであり、計測機器の設置や模型の維持管理を含めて諸氏の熱意に対して感謝する。また模型の提供ならびに計測器を貸与して下さった株式会社竹中工務店にも感謝します。

参 考 文 献

- 1) 川村純夫・木内龍彦：空気膜構造の耐風性に関する研究—その2・膜の静的変形、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和53年。
- 2) 石井一夫：西川 薫：空気膜構造の動的特性に関する研究—その3・中規模模型による振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和59年。
- 3) 福島義幸：低ライズケープル補強空気膜構造の力学性状に関する実験的研究—その4・動力学的基本性状について、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和59年。
- 4) 大スパン空気膜構造耐風研究会編：高ライズ円筒状空気膜構造耐風設計指針、昭和57年。
- 5) 大スパンドーム耐風構造研究会：大スパンドームの耐風設計法に関する調査研究報告書、昭和58年。