WHITE NOISEを用いた膜張力測定装置の開発

—装置の改良, 検証実験および実構造物への適用—

DEVELOPMENT OF MEASUREMENT EQUIPMENT OF MEMBRANE STRESS FOR MEMBRANE STRUCTURES USING WHITE NOISE SOUND WAVE

—Improvement of Measurement Equipment, Verification Experiment and Practical Measurement of Actual Suspension Membrane Structure—

陳 商煜 — * 1

大森博司 — * 2

キーワード:

膜張力, 張力測定, 音波加振, ホワイトノイズ, 誤差補正, 現場測定

Keywords:

Membrane stress, Measurement of stress, Sound excitation, White noise, Error correction, Practical measurement

SangWook JIN — * 1

Hiroshi OHMORI — * 2

A new method has been proposed by authors to measure membrane stresses in two different directions separately, where instead of measuring the membrane stresses directly, the natural frequencies of the membrane within fixed rectangular region resonated by white noise external excitation with the frequency of 0 to 500Hz induced by sound is utilized. The new method makes use of the resonance phenomena of the membrane, where the effect of added mass of surrounding air was found not to be able to ignore for high accuracy measurement, and theoretically evaluated by using an equivalent circular plate. In this paper, not only the process of the equipment improvement toward high accuracy and the result of experimental test on every process to verify its accuracy, but also the experimental test of actual suspension membrane structure are presented.

1 序

膜構造物は、本来圧縮あるいは曲げに対しては抵抗できない材料である膜材料を、適切な引張状態に保持することにより安定化し、膜構造物全体を雪や風による荷重に耐えられるようにするものである。こうした膜構造物は、張力の正確な維持管理が重要であるが、一般には困難なのが現状である。竣工後に膜構造物に生じている膜張力の大きさをすることは、維持管理の観点から大変重要で、これを可能とする技術に大きな期待が寄せられている。

筆者らは、音波を用いた膜張力測定技術を提案しており、正弦波スweepおよび White Noise を加振音源とした膜張力測定実験を行っている^{1)~6)}。その原理は、長方形の境界面を持つ膜面を、可聴域の振動数を持つ音波で加振し、膜面の持つ固有振動数近傍で起こる共振振動数を測定することで、間接的に膜面に作用している張力を測定するものである。提案している膜張力測定方法は、前述のように膜面に生じる振動の固有振動数を測定することをその基本原理としているが、筆者らのこれまでの研究により膜の固有振動に対する空気の影響が大きいたことが分かっている。これは振動体である膜が非常に軽く、振動中に空気の影響を受けるためである。膜の固有振動数を理論的に予測するためには空気による付加質量の影響を考慮することが必要となり、膜の振動面積に等価な円形板を用いて理論的に評価している^{6)~10)}。

0~500Hzの振動数領域を持つ White Noise を加振音源とした膜張力測定実験では、装置の重量増加、スピーカーの性能の相違ならびに、測定装置の膜面との接触状態の相違の影響を検証するための実験を行っている^{4), 5), 10)}。

本論では、測定時間や精度の面において有利であることが確認されている有限振動数領域を持つ White Noise を加振音源とし、実用化に向けて低張力から高張力の広い範囲で 90% 以上を目標精度とし、精度向上のために行った装置改良について報告し、本装置が A 種膜構造だけではなく、B, C 種膜構造にも適用できることを示す検証実験と、実在する B 種サスペンション膜構造を対象とした膜張力測定の結果について報告する。

2 測定装置の改良および A 種膜張力測定検証実験

既往の膜張力測定実験で用いた正弦波スweep加振は、スweepの速度や時間に応答振幅が依存する可能性があるため所定の精度を確保するために測定時間を長く必要とする。このことを解消するために、0~500Hzの振動数領域を持つ White Noise を加振音源とした膜張力測定実験を行っており、測定装置の浮き上がりにより、想定した膜面の振動の節が境界面の外側に生じる可能性を防ぐため、3.3kgの質量を持つ装置の上部に約 5kg(1208g × 4 個)の重りを載せて実験を行い、重りを載せなかった実験の結果と比較している。また、White Noise 入力測定実験から、スピーカーの能力不足による高張力時の応答振幅の不十分、アクリルボックス境界部と膜面との密着性の不十分、装置の浮き上がりによる膜面の正確な振動境界の形成不足、重り付加による張力の変化などの改善すべき点が明らかとなり、これらを受けて、高張力時に十分な応答振幅を確保できるようにスピーカーの性能をアップし、膜との密着性を高めるために測定装置の底部にゴムを付着し、検証実験を行っている。スピーカーの容量の増強により応答振幅は大きくなり、共振振動数のピーク値を検出しやすくなったが、ゴム付着による向上は見られなかつ

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生・修士(工学)
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

*2 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

*1 Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, M. Eng.

*2 Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

図 1 測定装置の改良

た。むしろ、緩衝作用をするゴムを付着することにより、高張力になるに従って固くなった膜面に境界面を作りにくくなっているため、膜面に接する装置の境界として柔らかいゴムは適していないこと、さらに測定装置にレーザー変位計を固定させる金属の金具が音波によって振動することが明らかになった³⁾⁻⁵⁾。

それらを受けて本報では、 $20 \times 30\text{cm}$ の平面形状に 20cm の高さを有する測定装置において、膜面と接する境界部を境界箱の素材であるアクリルを用い、その接する面積を減らして鋭くし、レーザー変位計固定金具を新しく設計した。さらに、実験の方法において、膜の振動により空気が閉じ込められないように装置の上部は開放されているものの、その内部において膜面からの音波の反射や散乱を吸収させるための吸音材を付けることと、振動境界を強制的に決め、より正確な誤差補正用のデータを得るために膜面の下に境界固定用フレームを設置することにより振動境界を明確にしたサンドウィッチ型の実験を同時に行った。

図 1 は既述した問題点を改善するため設計した装置の詳細である。装置の境界が鋭すぎると測定時に膜が破れる恐れがあるので、約 1mm の幅を持たせた面接触にした。レーザー変位計を測定装置に固定する金具は音波の放射による振動を抑えるよう剛性の高い設計になっている。膜の下側に設置する境界固定用フレームにはアジャストボルトを設け、その回転により高さの調整が自由にできる。これにより、膜をその上部に乗せた測定装置の境界部と下部に設置した固定フレームの間に挟み込むことで、膜面境界を確実にしている。また、装置からレーザー変位計が着脱できるようになっており、境界固定フレームにも取り付け実験を行うことにより、レーザー変位計による音波の妨害の有無を確認する。

測定実験のパターンを図 2 に示す。図の中の A-1 は既往の方法、B-1 は膜下面に境界固定用フレームを設置し、装置に取り付けたレーザー変位計から膜面の振幅を測定する方法、C-1 は膜下面に設置した境界固定用フレームにレーザー変位計を設けて、膜面の振動を測定する方法で、スピーカーから放射された音波が妨害されずに膜面に到達することを目的としている。さらに、B-2、C-2 は B-1、C-1 それぞれに F-4LF¹¹⁾の吸音材をつけた実験パターンを示す。

実験に用いた膜材は、A 種膜（太陽工業の製、品名：SF-II）であり、面密度 $1.3\text{kg}/\text{m}^2$ を有する。導入張力は、A タイプにおいて、X、Y 方向それぞれに 0 から $20\text{kgf}/\text{cm}$ の間を $1\text{kgf}/\text{cm}$ 幅の間隔で増分させた、X、Y 方向の張力比 1:1 の等張力と、1:2 と 2:1 の異張力にし、測定装置を膜面に載せた後、ある程度の時間が経過し、膜の応力変化が止まったときの二軸引張装置のロードセルから読み取った張力値にした。一方、B、C タイプの実験においては膜下

		Sound Absorption (F-4LF)	
		Non Sound Absorption	With Sound Absorption
Original Method	A-1		
		Membrane	Membrane
Fixed Membrane's Boundary	B-1		
	B-2	Membrane	Membrane
Measurement Under the Membrane	C-1		
	C-2	Membrane	Membrane

図 2 実験のパターン

面に設けたフレームや吸音材の影響を調べる実験であるので、X、Y 方向の張力比 1:1 の等張力のみを導入張力とした。

図 3 に各パターンの実験によって求められた結果を示す。縦軸に示す共振振動数の割合 E_f/T_f は、実験から求められた共振振動数 E_f を、導入した張力下の共振振動数の理論値 T_f で割った値であり、横軸は基準となる張力値を示している。横軸で、例えば、 $10\text{kgf}/\text{cm}$ の ○ 印は A-1 のタイプ（従来法）で張力が X 方向 $10\text{kgf}/\text{cm}$ 、Y 方向 $20\text{kgf}/\text{cm}$ とした場合を示している。膜面の下に境界固定フレームを設置した B タイプの実験、フレームにレーザー変位計を取り付けた C タイプ共に、吸音材をつけることによる測定精度の向上は見られない。さらに、A-1 と C-1 との間にも共振振動数の精度の差がほとんどないことが分かる。これらから、膜面の下に設けたフレームおよびレーザー変位計の位置による精度の向上は期待できず、既往の方法である A タイプの方法で十分満足できる測定結果が得られることが明らかになった。

図 4 は A-1 パターンの測定誤差（測定誤差 (kgf/cm) = 導入張力 - 測定張力）に、文献 10) から明らかになった空気の付加質量を考慮した誤差を表しており、XY 平面上に立っている棒 ■（黒色）と ■（灰色）が、X、Y 方向のそれぞれの導入張力に対する誤差の大きさを表す。XZ 平面上の ● は X 方向の誤差を同平面上に射影したものであり、YZ 平面上の ○ は Y 方向の誤差を射影したのである。誤差は、既往のスイープ加振、White Noise 加振実験と同じく、張力レベルの増加にほぼ 2 次関数的に増大している。また、図 5 は A-1 タイプの重り付加による張力の増分を導入張力で割った張力増分の割合である。 $5\text{kgf}/\text{cm}$ 以下の低張力時には増分が激しいので測定に際してはこのことを十分考慮しなければならないことが分かる。

図 3 共振振動数の割合

図 4 空気の付加質量を考慮した測定誤差

図 5 増分張力の割合

図 6 多項式によるフィット

図 7 多項式フィットで得られた誤差曲面

図 8 誤差補正

3 誤差補正

図 4 に示すように、空気の付加質量を考慮した誤差は張力レベルの増加にほぼ 2 次関数的に増大しているので、誤差の傾向を表すために多項式を用いたフィットを行った。図 6 の中の図形は、実験で導入した全ての張力レベルの X, Y 方向の誤差をプロットしたのであり、曲線は、2 次の多項式を用いて誤差データにフィットさせた結果を示している。表 1 に得られた多項式の係数を示している。決定係数は、回帰分析で得られる相関係数の二乗を示し、回帰曲線によって総変動のうちどれぐらい説明できているのかを表す数値である。したがって、決定係数 0.99662 はその回帰式で目的変数の変動全体の 99.662% を説明していることを示す。

導入張力レベルの全組み合わせの領域で実験が行われ、誤差が図 6 のように補正できたとしたら、図 7 のように誤差曲面を描くことができ、XY 平面上の全てのポイントで誤差の補正が可能になる。図 8 に誤差を補正することによって得られた結果を示す。全導入張力領域で誤差 10% 以内の精度が得られていることが分かる。

表 1 測定張力の誤差と測定張力の関係 (A 種)

$y = A + B_1x + B_2x^2$		
y : 測定張力の誤差, x : 測定張力		
パラメータ	値	標準誤差
A	0.03845	0.07636
B_1	0.12371	0.01766
B_2	0.02475	8.37855E-4
決定係数	標準偏差	N (データポイント数)
0.99662	0.21089	80

4 B, C 種膜張力測定検証実験

本測定装置は理論上、測定対象の膜材が変わった時、膜張力算定式の式 (1) において、膜面密度 ρ を変えることにより、膜種に関係なく対応できるようになっている。しかし、現場での実測定を行うには実験上の検証が必要となるので、B, C 種膜を用いた検証実験を行う。

$$\{T\} = [A]^{-1} \{f\} \quad (1)$$

$$\text{ここで、}\{T\} = \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \end{Bmatrix}, [A] = \begin{bmatrix} \frac{m_1^2}{a_1^2} & \frac{n_1^2}{b_1^2} \\ \frac{m_2^2}{a_2^2} & \frac{n_2^2}{b_2^2} \end{bmatrix}, \{f\} = 4\rho \begin{Bmatrix} f_1^2 \\ f_2^2 \end{Bmatrix},$$

T_x, T_y はそれぞれ x, y 方向の単位長さ当たりの張力を、 a_1, b_1 は振動数 f_1 の、 a_2, b_2 は振動数 f_2 の、それぞれ加振音源境界の各辺の長さを、 ρ は膜の単位面積当たりの質量を、 m, n は振動モードの腹の数を表しており、振動モードは通常 1 次モードが卓越するので、 m_1, n_1, m_2, n_2 は 1 になる。

導入張力は、B, C 種共に、X, Y 方向それぞれに 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 kgf/cm を設定し、X, Y 方向の張力比 1:1 の等張力と、Y, X 方向の張力比をそれぞれ 2 倍した 1:2, 2:1 の異張力の 3 つのケースにした。A 種と同様に、張力値は測定装置を膜面に載せてある程度の時間が経ち、膜の応力変化が止まったときの二軸引張装置のロードセルから読み取った。

4.1 B 種膜張力測定検証実験

実験に用いた B 種膜材は、酸化チタン光触媒膜 (太陽工業製、品名: CMX270NM) であり、膜の面密度は、10 × 10 cm の膜材料の重量を 5 回測って平均を取った値 0.8114 (kg/m²) とした。

図 9 付加質量を考慮した測定誤差 (B 種)

図 10 多項式によるフィット (B 種)

図 11 誤差補正 (B 種)

図 12 付加質量を考慮した測定誤差 (C 種)

図 13 多項式によるフィット (C 種)

図 14 誤差補正 (C 種)

図 9, 10, 11 それぞれに、空気の付加質量を考慮した測定誤差、多項式によるフィットおよび誤差補正による測定精度を示す。また、表 2 に 2 次多項式による測定張力の誤差と測定張力の関係を示す。A 種膜と同様に、誤差は張力レベルの増加にほぼ 2 次関数的に増大しており、全データに対して決定係数 0.99579 の 2 次多項式による補正により誤差 10% 以内の精度が得られていることが分かる。

表 2 測定張力の誤差と測定張力の関係 (B 種)

$$y = A + B_1x + B_2x^2$$

y : 測定張力の誤差、 x : 測定張力

パラメータ	値	標準誤差
A	-0.10006	0.03312
B_1	0.32128	0.01918
B_2	0.233	0.0021
決定係数	標準偏差	N (データポイント数)
0.99579	0.08267	42

表 3 測定張力の誤差と測定張力の関係 (C 種)

$$y = A + B_1x + B_2x^2$$

y : 測定張力の誤差、 x : 測定張力

パラメータ	値	標準誤差
A	-0.03711	0.03198
B_1	0.28478	0.01847
B_2	0.02511	0.00209
決定係数	標準偏差	N (データポイント数)
0.99565	0.07354	42

図 15 膜屋根の全景

図 16 東側からのビュー

図 17 測定の様子 1

図 18 測定の様子 2

4.2 C 種膜張力測定検証実験

検証実験に用いた C 種膜材は、C 種膜の一種である酸化チタン光触媒膜 (太陽工業製、品名: SCC200) である。C 種膜の膜面密度は B 種膜と同じ方法で求めた平均値 $0.8692(\text{kg}/\text{m}^2)$ を用いた。

図 12, 13, 14 それぞれに、空気の付加質量を考慮した測定誤差、多項式によるフィットおよび誤差補正による測定精度を示す。表 3 に示すように決定係数は 0.99565 であり、2 次多項式補正により誤差 10% 以内の、A, B 種膜と同じ程度の精度が得られており、膜張力算定式 (1) の中の面密度を測定対象膜の種類に応じて変えることにより、十分適用可能であることが確認できる。

図 19 膜パネルの張力測定位置および立面図

図 20 サスペンション膜屋根測定結果

図 21 サスペンション膜屋根測定張力

5 サスペンション膜構造物の張力測定

以上の検証実験結果を受けて、サスペンション膜構造物の張力を実際に測る実験を行った。対象とした膜構造物は、名古屋大学内にある IB 電子情報館のイベントテラスの膜屋根である。平成 15 年 11 月竣工のこの膜屋根は、図 15, 16 および 19 に示すように、全体が 4 面のユニットに分けられた B 種膜（品名：CMX2700NM）で覆われているサスペンション膜であり、その 1 面のパネルの平面寸法が 7200 × 4800 の HP 曲面の形をしている。

張力測定位置は図 19 の上図に示すように、1 つのパネルを実験の「ターゲットパネル」とし、等間隔で領域を区切り、全部で 14 ヶ所を測定することにした。他の 3 つのパネルは溶着ラインと直角の対角線に沿って測定し、ターゲットパネルと比較を行った。また、各測定ポイント 1 ヶ所に対して 2 回の測定を行うことにより測定ミスを防ぐようにした。さらに、1 面の膜パネルは工場製作幅約 1.2m の膜面 8 枚が溶着されて作られているので、3, 4 パネルでは溶着ライン上 (YC1~YC5') も測定を行った。測定軸は各パネルごとに膜

の縦糸軸を x 、横糸軸を y 軸と取っている。

これまで行ってきた膜面の上に装置を載せて行う検証実験での測定方法は、測定環境上、難しいと判断されたため、図 17, 18 および 19 の下図に示すように、膜面の下に高さ 2.8m の足場を組み、測定者が装置を下から押して膜下面に密着させる形で測定を行った。

図 20 に測定結果を示す。縦軸は測定張力を、横軸は測定位置を示しており、横軸の番号は図 19 の測定位置番号に対応している。さらに、図 21 は張力の大きさを図形で表したものであり、図形—は 1 回目、□は 2 回目の張力の大きさを、それぞれ軸に沿って示している。

前述のように、測定装置を測定者が押して膜面に密着させる過程において、測定者の力加減によって、ターゲットパネルの 7、2 パネルの 3' および 4 パネルの 6''' 番のように、1 回と 2 回目の測定において偏差の大きい個所が見られるが、全体的には安定した測定が出来ていることが分かる。溶着ライン上の YC1~YC5' では、膜の横糸軸 (y 軸) の張力が高めに測定されているのが分かる。その理由として考えられるのは、溶着ラインは 2 枚の膜が重なって溶着され

ているので、応力が集中しているためであることが挙げられる。

測定対象のサスペンション膜構造の設計張力は、X、Y 両方向共に目標張力が 1kgf/cm になるように施工されているが、測定を行った結果、それを下回る張力が得られた。竣工後 3 年が経っているので、応力緩和が起きていると判断される。

6 結

本研究では、膜張力測定装置の実用化を目標とし、低張力から高張力の広い範囲で 90% 以上を目標精度とし、装置の改良および検証実験を行った。さらに、多様な膜構造物に対応できるよう、B、C 種膜を用いた検証実験を行い、その結果を受けて実際にサスペンション膜構造物を対象に現場測定を行った。

装置改良検証実験では、境界を固く鋭くし、吸音材をつけたり、膜面の下に境界を決めてくれると期待したフレームを設けて実験を行ったが、吸音材やフレームによる精度の向上は期待できず、既往の方法で十分良好な結果が得られることを確認した。誤差は張力レベルの増加にほぼ 2 次関数的に増大しており、2 次の多項式を用いて補正することにより、導入張力全領域において誤差 10% 以内の精度が得られることが分かった。

B、C 種膜の検証実験では、A 種膜検証実験と同等な精度が得られており、測定対象膜材に応じて表 1, 2, 3 のように、測定張力の誤差が評価できる式を整える必要はあるものの、膜の面密度を変えるだけで本測定装置が他の膜材にも対応できることが確認できた。

サスペンション膜屋根の張力測定実験では、膜上面に装置を乗せた測定方法の代わりに膜面の下からの測定を行ったため、測定者の力加減の影響を受け、測定に偏差の大きい個所が見られるなど問題は残されているが、測定環境に依らず膜面の下からも測定が可能であることや比較的に安定した結果が得られる測定装置であることが確認できた。今後は、A、C 種膜構造物の実測定を行う予定である。

謝辞: 本研究の実験には(株)太陽工業空間技術研究所の全面的な協力を得た。また、(株)太陽工業空間技術研究所の八木孝憲氏には、測定対象サスペンション膜構造物の貴重な資料を提供していただいた。記して深謝する。

参考文献

- 1) 大森博司, 呉 明児: 膜張力の非接触測定法の開発に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), B-1, pp.847-848, 2002
- 2) S.W. Jin, H. Ohmori: Development of Measurement Equipment of Membrane Stress - Evaluation of Added Mass of Air, Proceedings of the International Symposium on Shell and Spatial Structures, Vol.1, pp.29-36, 2005
- 3) 陳 商煜, 大森博司: 膜構造物の膜張力測定方法の提案とその検証実験, 日本建築学会大会学術報告集, 第 24 号, pp.105-108, 2006.12
- 4) 陳 商煜, 大森博司: White Noise を用いた膜張力測定方法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-1, pp.809-810, 2006
- 5) 陳 商煜, 大森博司: White Noise を用いた膜構造物の膜張力測定装置の開発 - 測定装置の改良と検証実験, 膜構造研究論文集 2006, No.20, pp.65-70, 2007.2
- 6) SangWook JIN, Hiroshi OHMORI: Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures - By Using White Noise Sound Wave, Proceedings of the International Symposium on Shell and Spatial Structures, MB11, pp.170-171, 2006
- 7) 陳 商煜, 大森博司: 膜構造物の簡易膜張力測定装置の開発, 膜構造研究論文集 2005, No.19, pp.35-40, 2006.2
- 8) 陳 商煜, 候 興国, 呉 明児, 大森博司: 空気の付加質量を考慮した簡易膜張力測定法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), B-1, pp.917-918, 2004
- 9) 陳 商煜, 大森博司: 膜張力測定法における空気の付加質量の理論的評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), B-1, pp.915-916, 2005
- 10) 陳 商煜, 大森博司: 音波を用いた膜張力測定手法における空気の付加質量の影響の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 612 号, pp.111-116, 2007.2
- 11) <http://homepage.mac.com/aranobi/images/flex/f-4lf.html>

[2007年4月19日原稿受理 2007年7月26日採用決定]