

White Noise を用いた膜構造物の膜張力測定装置の開発

—膜材の相違への対応と実膜構造物の張力測定実験—

陳 商煜*1

大森博司*2

梗 概

著者らは、膜構造物の膜面に生じる膜張力を高精度を持ちながら、定量的に、2軸別々に測定でき、かつ現場で簡単に利用できる測定方法として音波を用いた方法を提案し、実験により精度の検証を行っている。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、膜面の持つ共振振動数近傍で起こる励起振動を測定することで、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。膜の共振振動数を理論的に予測するため空気による付加質量の影響を考慮しており、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、精度向上のための装置改良およびその検証実験を行っている。本論では、測定時間や測定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、本装置が A 種膜だけでなく、B、C 種膜などの多様な膜構造物にも適用できることを示す検証実験と、実在する3件の膜構造物を対象に張力測定を行ったので報告する。

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、正弦波スイープおよび White Noise を加振音源とした膜張力測定実験を行っている¹⁾⁻⁵⁾。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起す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^{2), 6)-8)}。

膜張力測定装置の実用化を目標とした一連の研究では、低張力から高張力の広い範囲で90%以上を目標精度とし、0~500Hzの振動数領域を持つ White Noise を用いた測定方

法による種々の改良を加えて来ている。測定装置そのものについては、スピーカーの必要性能の把握、測定装置と膜面との接触状態の相違の影響の検討、剛性の高い金具の改良を行い、さらに、実験の方法においては、吸音材や境界固定用フレームなどを設けた検証実験を行っている^{4), 9)}。A 種膜材を用いたそれらの検証実験から測定誤差が張力レベルの増加にほぼ2次関数的に増加していることが判明したので、これによるフィッティングを行うことにより、設定張力20kgf/cm以下の全領域において誤差±10%以内の精度を実現することができた⁹⁾。

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、本装置が A 種膜構造だけでなく、B、C 種の膜構造にも適用できることを2軸引張試験装置による実験により検証し、実在する3件の膜構造を対象とし膜張力測定を行ったのでその結果を報告する。

2 膜材の相違への対応

膜材は基布にコーティングを施して作られたものであり、それらの材質により表1のように分類されている。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_k を変えることにより、膜種

表1 膜材料の種類

通称	基布	コーティング材
A 種	ガラス繊維基布	四フッ化エチレン樹脂
B 種	ガラス繊維基布	塩化ビニルなどの合成樹脂
C 種	合成繊維基布	塩化ビニルなどの合成樹脂

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生 修士(工学)

*2 名古屋大学大学院環境学研究科 教授 工学博士

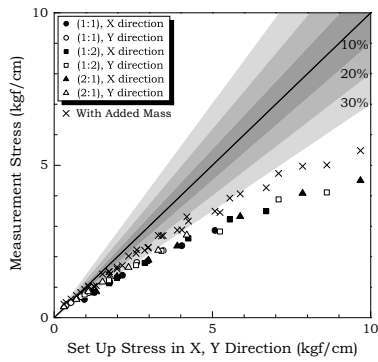


図 1 測定結果 (B 種膜)

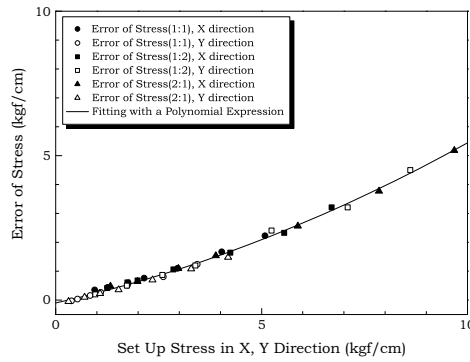


図 2 誤差補正 (B 種膜)

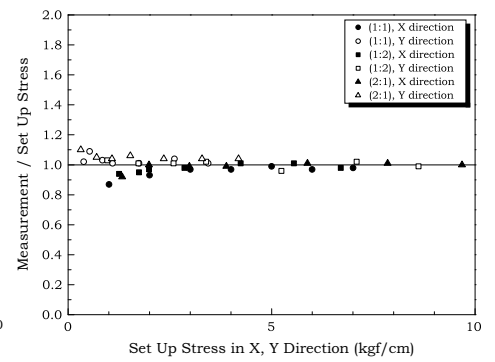


図 3 誤差補正による測定装置の精度 (B 種膜)

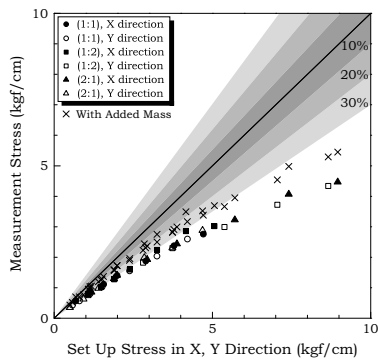


図 4 測定結果 (C 種膜)

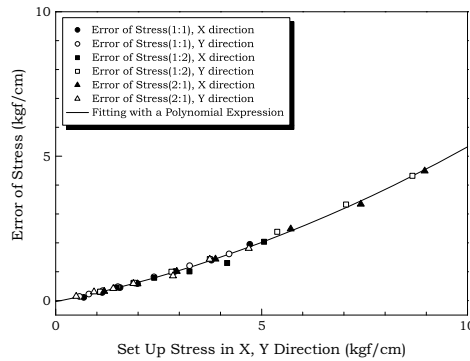


図 5 誤差補正 (C 種膜)

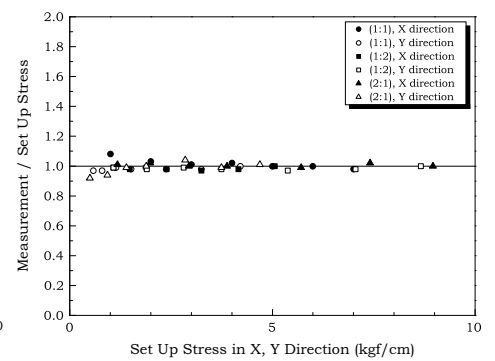


図 6 誤差補正による測定装置の精度 (C 種膜)

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。

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

ここで、

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

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、 m, n は振動モードの波の数を、 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_k は膜の単位面積当たりの質量を表している。

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, 5kgf/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。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 2 軸引張装置のロードセルから読み取った。

2.1 B 種膜材検証実験

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、10cm×10cm 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 1 に測定結果を示す。横軸の設定張力に対し、縦軸は測定から求められた測定張力を示している。例えば、横軸の設

定張力 5kgf/cm の記号 \times は、X、Y 方向の設定張力比を 1:1 にしたときの、X 方向の設定張力 5kgf/cm に対し、3kgf/cm の張力が得られたことを示しており、直上の記号 \times は測定値において空気の付加質量を考慮した張力を示している。図の中の対角線上は目標とする張力であり、この線に近いほど精度がよいことになる。また、目標精度を中心とし、グレイの明暗により誤差 $\pm 10, 20, 30\%$ の領域を定めており、空気の付加質量を考慮することにより、全張力レベルにおいて約 20% の精度の向上が図られている。図 2, 3 には、多項式

表 2 B 種膜の膜張力の誤差と膜張力の関係

$y = A + B_1x + B_2x^2$		
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 C 種膜の膜張力の誤差と膜張力の関係

$y = A + B_1x + B_2x^2$		
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7 イベントテラスの全景



図8 測定の様子

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。決定係数は、回帰分析で得られる相関係数の2乗を示し、回帰曲線によって総変動のうちどれくらい説明できているのかを表す数値であり、標準誤差はデータからの推定結果が本当の値に対してどの程度の誤差を持つかを表すものである。したがって、決定係数0.99579はその回帰式で目的変数の変動全体の99.579%を説明していることを示す。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。

2.2 C種膜材検証実験

検証実験に用いたC種膜は、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種の膜面密度はB種膜と同じ方法で求めた平均値0.8692(kg/m²)を用いた。

図4, 5, 6それぞれに、測定結果、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次多項式補間により誤差10%以内の、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。

3 実膜構造物の張力測定

以上の検証実験結果を受けて、3件の実膜構造物を対象とし、張力測定実験を行った。

3.1 名古屋大学 IB 電子情報館イベントテラス

3.1.1 概要

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。2003年11月竣工の膜屋根は、図7, 12に示すように、全体が4面の膜に分けられた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面のパネルの寸法7200mm×4800mmのHP曲面形状を持っている。

張力測定位置は図12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

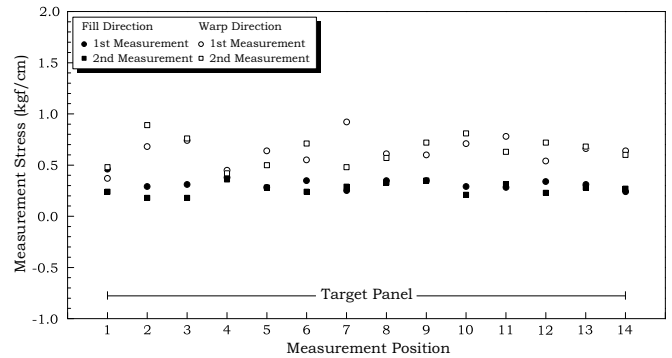


図9 ターゲットパネルの測定張力

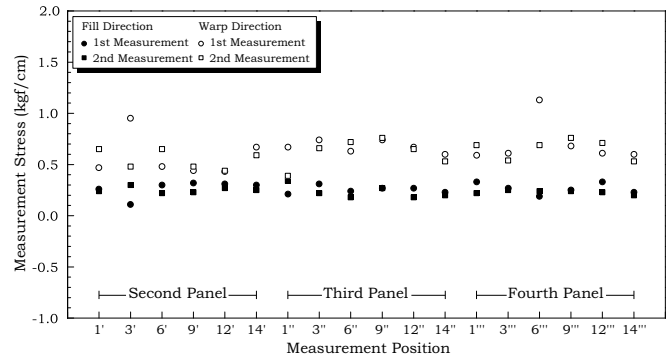


図10 2, 3, 4パネルの測定張力

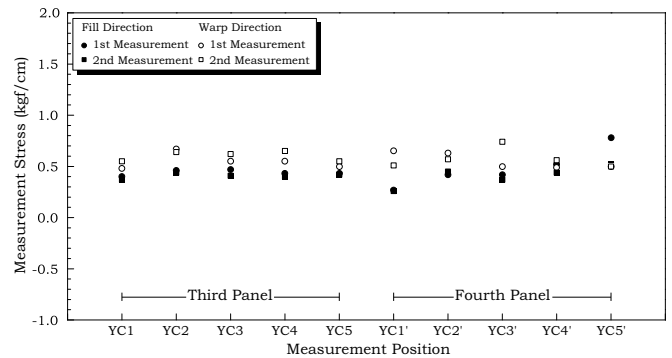


図11 3, 4パネルの溶着ライン上の測定張力

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12の下図、および図8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。

3.1.2 測定結果

図9, 10, 11それぞれにターゲットパネル、2, 3, 4パネル、および3, 4パネルの溶着ライン上の測定結果に第2節で明らかにした、誤差を補正した結果を示す。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12の測定位置番号に対応している。さらに、図13は張力の大き

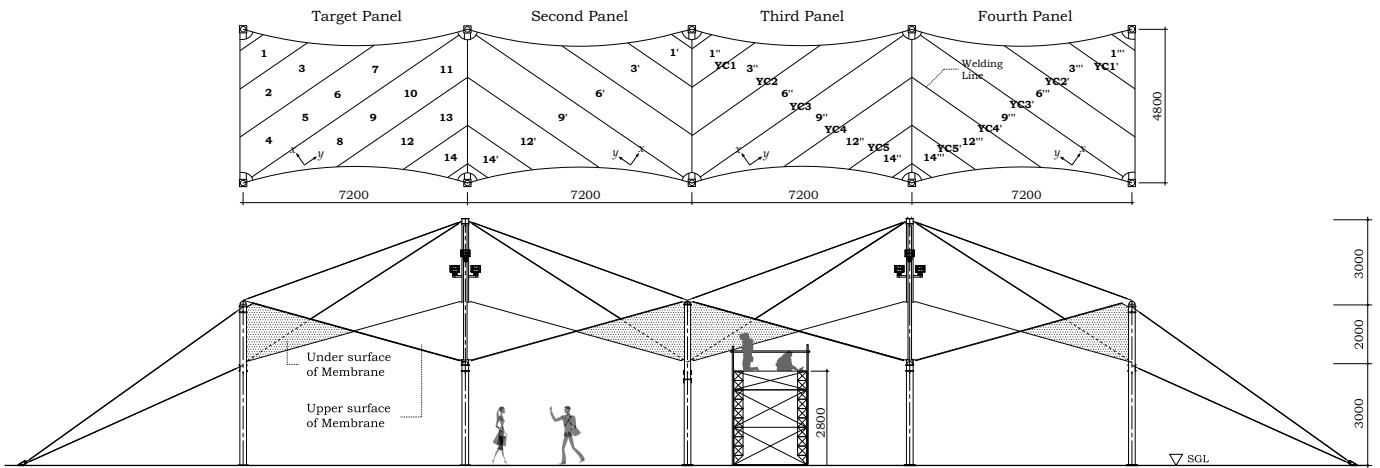


図 12 名古屋大学 IB 電子情報館イベントテラス膜屋根の測定位置および立面¹²⁾

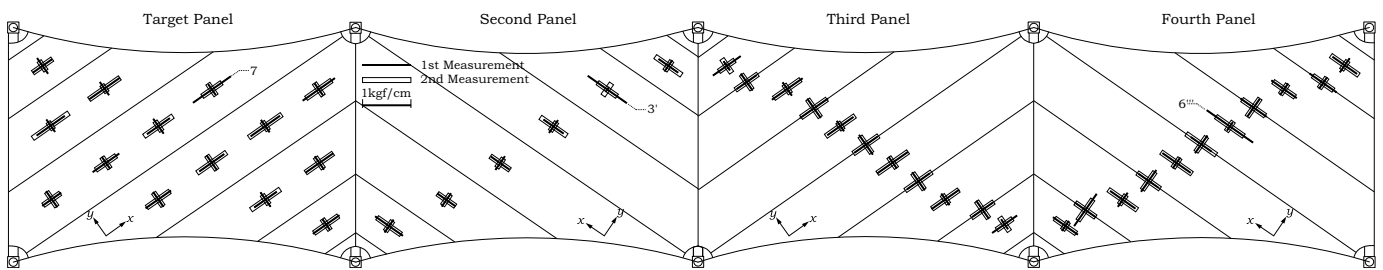


図 13 名古屋大学 IB 電子情報館イベントテラス膜屋根の測定張力

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箇所が見られるが、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。

イベントテラス膜屋根の設計張力は、 x, y 両軸共に目標張力が 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。測定当時竣工後 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。

3.2 柏の杜

3.2.1 概要

バイクの格納倉庫として柏市に建設された柏の杜と名づけられた建物は、B 種膜 (品名: スタードーム) で覆われた、約 40000m^2 を超える日本最大規模のストラット式張力膜構造物である。2007 年 7 月竣工の膜構造物のユニットは 600 個に近い。大規模の膜構造物の内、一部のゾーンの 3 つのパネルを対象にし、建設の期間中に測定を行った。使用されている膜材の面密度は 0.815kg/m^2 であり、図 14, 15 に示すように、1 つの膜パネルは $6000\text{mm} \times 7000\text{mm}$ を基本ユニッ

トとするホルン型の曲面を持つ。図 14 に A, B, C パネルにおける測定位置を示す。

測定は図 16 に示すように、イベントテラスと同じく膜面の下に高さ約 1.8m の足場を組み、膜下面からとした。一方、C パネルの C1 と C2 においては、図 17 に示しているように、膜上面からの測定も可能であるため、両面から測定を行うことにより、膜下面からの測定がどの程度の精度を持つかの検証も行った。また、各測定ポイント 1 ケ所に対して 3 回の測定を行うことにより測定ミスを防ぐようにした。

3.2.2 測定結果

図 18 に A, B, C パネルの誤差補正による測定結果を示す。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 14 の測定位置番号に対応している。また、C1, C2 の測定位置では膜上面から行った測定も横軸の C1, C2 に示している。寸法の小さい A パネルのように曲面形状により無視できない程度の曲率や、膜面の下から装置を押しこむことで張力を負の方向に向かせることなどにより、C2, B2, B4, A2, A3 のように 1, 2, 3 回目の測定において偏差の大きい箇所が見られる。膜下面からの測定は、測定者が装置を下から押して膜下面に密着させる形になるため、膜面に 4 辺の境界を正確に定めるのが難しく、手のぶれや力の加減などに大きく影響されることはイベントテラスの測定でも経験しているが、C1 と C2 における膜上面からの結果に比べ、測定に偏差はあるものの、ほぼ同じ値が測定されているので、膜下面からの測定も十分可能であることが確認できる。

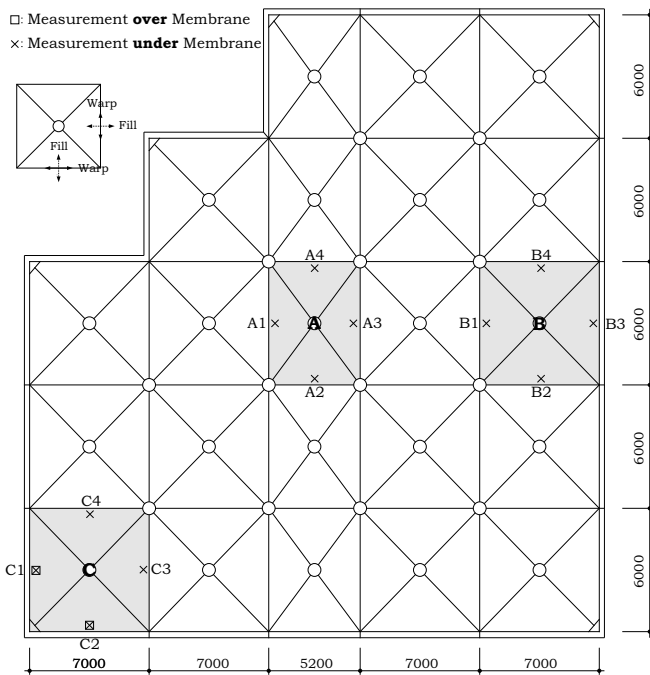


図 14 測定位置¹³⁾

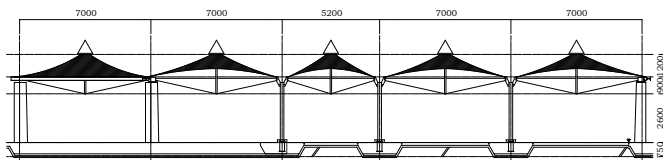


図 15 柏の柱立面¹³⁾



図 16 膜下面からの測定の様子 図 17 膜上面からの測定の様子

さらに、図 19 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、 \square は 2 回目、 --- は 3 回目の張力の大きさを、それぞれ軸に沿って示している。

柏の柱の膜構造の各ユニットは縦、横の両軸ともに 1.5kgf/cm になるよう設計されており、膜の応力緩和を考慮し施工段階では 5kgf/cm の導入張力で施工されている。測定を行ったパネルは施工から 1 ヶ月程度が経過しており、応力緩和が徐々に進行していると判断される。

3.3 愛知児童総合センター

3.3.1 概要

愛・地球博記念公園（旧・愛知青少年公園）に位置する愛知児童総合センターの卵形平面をしたプレイアトリウムゾーンは、展望階を持つ鉄骨造の斜塔と透明な骨組膜屋根の大空間形式としている。プレイアトリウムのゾーンの主体

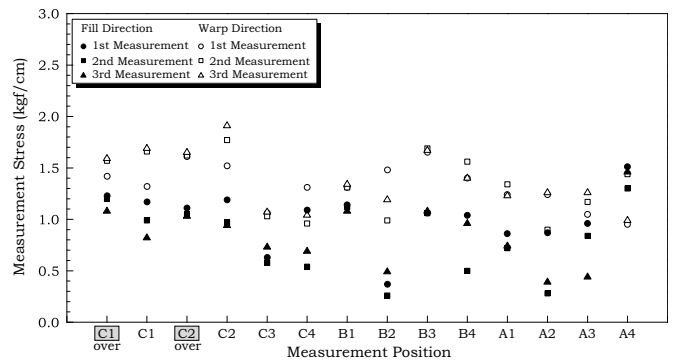


図 18 測定張力

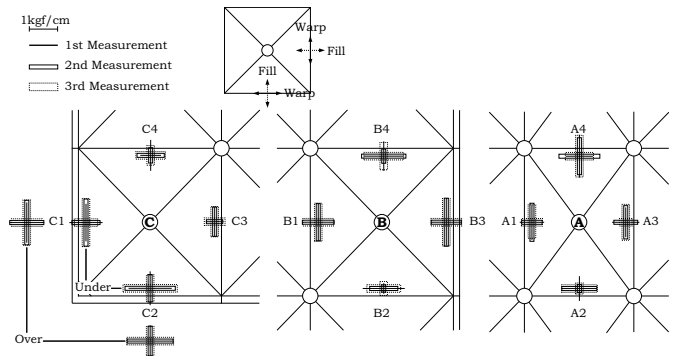


図 19 柏の柱の測定張力

構造であるシャフト構造の上部に設けた内部リング梁と、外周に設けた短径 41m、長径 51m の一回り大きな卵形平面をした外周リング梁との間を、膜と組み合わせた張弦梁アーチを放射状に架け渡すことによって、透明で軽快な骨組膜方式による卵形ドームの屋根を構成している¹⁴⁾。

1996 年 7 月竣工のこの建物の屋根に用いられた膜材は A 種膜（品名：SF-2）であり、 $1.30 \pm 0.13 \text{kg}$ の面密度を有する。図 20 に示すように、28 個のパネルによって構成されている膜屋根は、さらに、それぞれ 6 枚の膜材が溶着されて 1 つのパネルとなっている。名古屋大学 IB 電子情報館イベントテラスおよび柏の柱では、測定環境上、測定者が装置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が、本膜構造物の測定においては、図 21, 22 に示すように、本来の測定方法である膜上面からの測定が可能であるものの、傾斜により装置が安定しないため、図 23 に示すように、測定者が装置を持ち、測定者の力加減が最小限になるよう、装置が安定できる程度の力で押す方法で測定した。各測定ポイント 1 ヶ所に対して 3 回の測定を行うことにより測定ミスを防ぐようにした。

3.3.2 測定結果

図 24, 25 に、A 種膜の誤差補正⁹⁾による測定結果を示す。前述したように、膜上面からの測定であるため、イベントテラスや柏の柱に比べ、3 回の測定にばらつきが少なく、安定した結果が得られていることが分かる。一方、G, H パネルの測定結果が他のパネルより多少高く測定されている。規模が大きかったため、測定は 3 日に分けて行われている。G

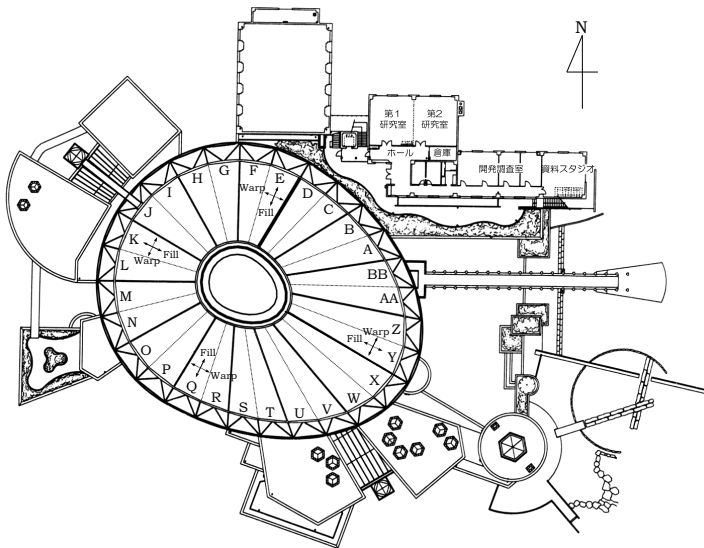


図 20 愛知児童総合センターの3階平面および測定位置¹⁵⁾

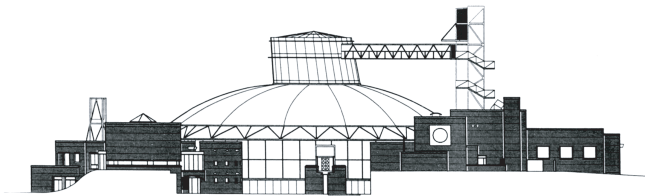


図 21 愛知児童総合センターの立面¹⁵⁾



図 22 測定の様子 1



図 23 測定の様子 2

パネルは測定日 2 日目に行った最初の測定パネルであり、未明まで雨が降っていたため、測定開始時には膜が完全に乾いておらず、湿気を含んでおり、その分、膜の面密度に影響を与えた可能性が考えられる。さらに、図 26 には愛知児童総合センターの測定張力を図形で表しており、図形 — は 1 回目、□ は 2 回目、◻ は 3 回目の張力の大きさを、それぞれ軸に沿って示している。

図 27 には、測定位置 Q と BB において、異なる 3 人の測定者により測定結果にどの程度影響を与えるのかを検証した結果を示す。測定位置 Q において、M 氏の結果が若干低めに、測定位置 BB においては、C 氏の結果が高めに測定されていることが分かる。測定者の力加減による影響は現われるものの、ほとんど誤差範囲に収まり、測定者の相違により測定結果に大きい影響は与えないことが示されており、本

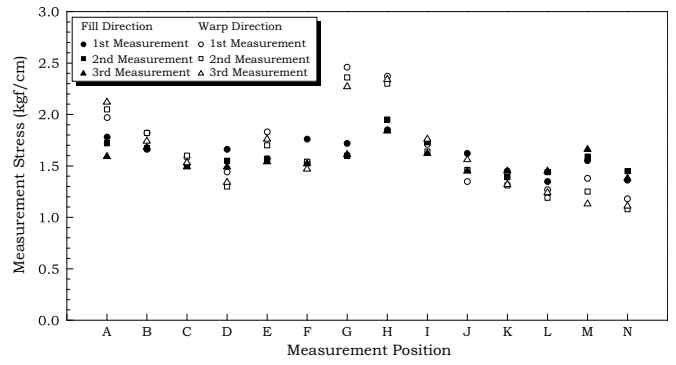


図 24 測定位置 A ~ N の誤差補正結果

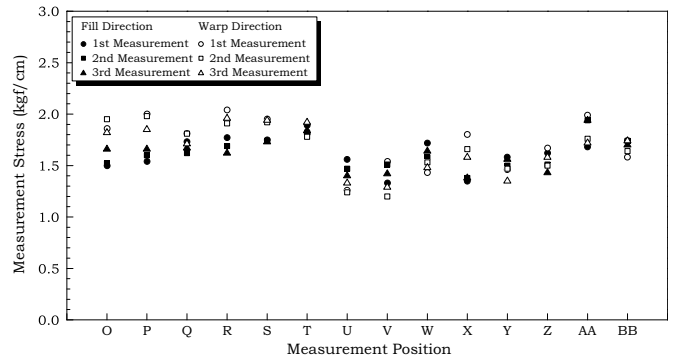


図 25 測定位置 O ~ BB の誤差補正結果

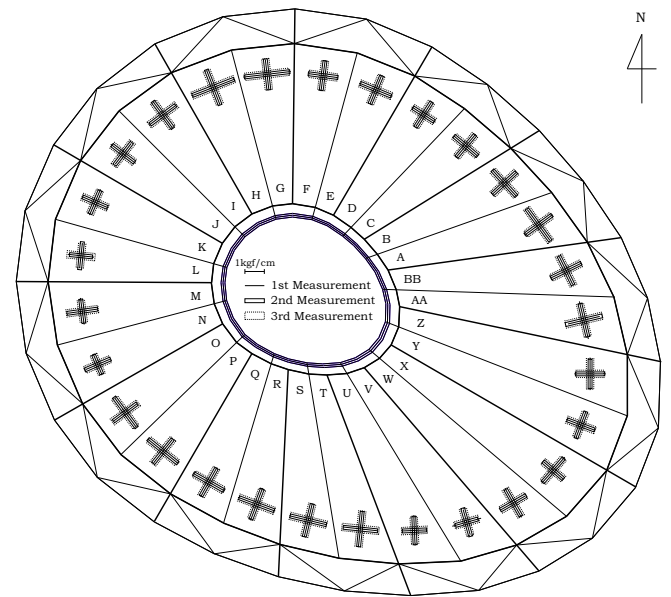


図 26 愛知児童総合センターの測定張力

装置の目標でもある特殊な技能を必要としない膜張力測定装置となっていることが確認できた。

愛知児童総合センターの膜構造の設計張力は、縦、横の両軸共に目標張力が 2kgf/cm になるように施工されており、測定を行った結果、全パネルにおいて 1.5 ~ 2kgf/cm 前後の張力が求められており、設計張力を若干下回るが、竣工後 11 年が経っているにもかかわらず、設計どおりの張力が導入されていると判断される。

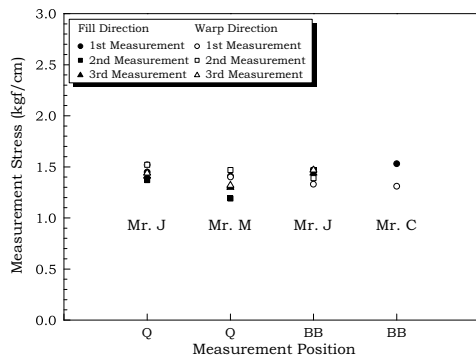


図 27 測定者の相違による影響

4 結

本研究では、ここで開発している膜張力測定装置が、既に報告している A 種膜だけではなく、B 種、C 種の膜材に対しても同様の精度で膜張力が測定できることを 2 軸引張試験装置による実験により検証し、実在する 3 件の膜構造物を対象に現場測定を行った。

B, C 種膜材を用いた検証実験で、A 種膜と同様に誤差 $\pm 10\%$ 以内の精度が得られており、本測定方法が膜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、多様な膜種に適用可能であることが確認できた。

実在する 3 件の膜構造物を対象に行った現場測定においては、名古屋大学電子情報館イベントテラスや柏の杜のように、測定の環境上、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箇所が見られたり、実験室での誤差補正値を形状や曲率の異なる現場でそのまま利用す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。一方、本来の測定方法である膜上面からの測定を行った愛知児童総合センターの結果においては、偏差が少なく、安定した結果が得られていることや、測定者の相違による影響がないことが確認できており、本装置が現場で十分利用可能であることが示された。

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。実測定において、(株) 太陽工業空間技術研究所の八木孝憲氏には、名古屋大学の IB 電子情報館イベントテラスの貴重な資料をいただき、(株) 太陽工業の斉藤嘉仁氏および日本大学の斉藤研究室には柏の杜の測定において、愛知県庁の越山信氏および愛知児童総合センターの関係者には愛知児童総合センターの測定において、それぞれ全面的な協力を得た。ここに記して深謝する。

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, 日本建築学会技術報告集, 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: 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
- [6] S. W. Jin, H. 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 陳 商煜, 大森博司: White Noise を加振音源とした膜張力測定装置を用いたサスペンション膜の張力測定実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), B-1, pp.909-910, 2007
- [12] (株) 太陽工業: 名古屋大学電子情報館イベントテラス膜屋根図面, 2006
- [13] 日本大学斉藤研究室: BDS 柏の杜オークション会場図面, 2007
- [14] 佐々木睦朗: プレイアトリウムゾーンの構造計画, 新建築社, 9 月号, pp.239, 1996
- [15] 愛知児童総合センター, 新建築社, 9 月号, pp.234-236, 1996

Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures Using White Noise Sound Wave

–Correspondence to Difference of Membrane Materials and Practical Measurement of Actual Membrane Structures–

Sang Wook JIN*¹
Hiroshi OHMORI*²

SYNOPSIS

A new method is 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 sweep external excitation induced by sound is utilized.

In this paper, through experiments it is proved that the newly developed equipment can be used for not only the membrane materials of the kind of A but also for the kinds of B and C, and in addition, the experimental tests of actual membrane structures are presented.

In verification experiments of the membrane materials of the kinds of B and C, we obtained the results that are equivalent to those of A kind and this proved that the equipment is adoptable to any kinds of membrane by changing the area density ρ_k of membrane.

In the practical measurement of two kinds of membrane structure we measured stress from the lower side instead measuring from the upper one. Although the difference of measurers could affect the result and there are some points where the deviation of the data is large, it is confirmed that the equipment is still useful to measure without considering the environmental conditions. On the other hands, through the practical measurement of the stress, it is proved that the proposed measurement equipment is available to stably measure the membrane stresses which exist in the membrane materials of the actual membrane structures.

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

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