

ETFE フィルムを用いた密閉型小規模空気膜に関する研究

中井 政義^{*}
藤井 英二^{**}
鈴木 庸介^{**}

梗概

ETFEフィルムを用いた海外の大型スポーツ施設が注目を集めている。日本では実施例も少なく、建築材料としてはあまり普及していないが、学識経験者らによる「ETFEフィルムパネル設計・施工指針（案）」が発表されるなど、その広範な利用に向けた準備が進められている。

強度をはじめとする材料特性や現在生産されている製品の厚みを考慮すると、小規模空気膜はETFEに最も適した構造形式の一つであると考えられる。筆者らはこの小規模空気膜の合理的な設計のために、特に内圧が変形に応じて受動的に変化する密閉型空気膜に着目し、静的解析および静的・動的実験を通じた構造挙動の解明を行ってきた。本報では、これら一連の研究結果について報告する。

1. はじめに

1.1 ETFE フィルム

2006年サッカーワールドカップや2008年北京オリンピックなどに向けた大型スポーツ施設の屋根や外壁にETFEフィルムが採用され、日本国内においてもその可能性に注目が集まっている。2006年には、(社)日本膜構造協会フィルム膜パネル委員会による「ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)」¹⁾も発表され、日本国内で屋根や外壁のパネル材としてETFEフィルムを使用する際に考慮すべき事項が体系的に整理されてきている。

ETFEフィルムはエチレンとテトラフルオロエチレンを95%以上含む共重合樹脂からなる透明フィルムで、他の代表的な透明材料と比較して伸び性能、耐候性、自己浄化性に優れている。他の膜材と同様、基本的に引張力を与えて膜面を安定化させる構造形式がとられるが、A種膜などに比して引張強度が低いことや、そのクリープ特性を考慮して、小規模の二重空気膜ユニットを並べた形式が採用されることが多い。

1.2 本研究の概要

二重空気膜の内圧制御方式は概して、内圧が常に設定値に維持される定圧型と、内包空気が閉鎖空間に閉じ込められ、能動的な内圧制御も行われない密閉型に分けられる(図1)。既往の中・大規模空気膜の多くは定圧型を意図して設計されているが、この場合、外力に抵抗するのは直接荷重

を受けている膜面（以下、載荷面）のみである。これに対して密閉型空気膜では、外力に伴う変形によって内圧が受動的に変化し、直接荷重を受けていない面（非載荷面）も外力抵抗に寄与するので、載荷面の膜応力や変形は定圧型に比して低く抑えられる。

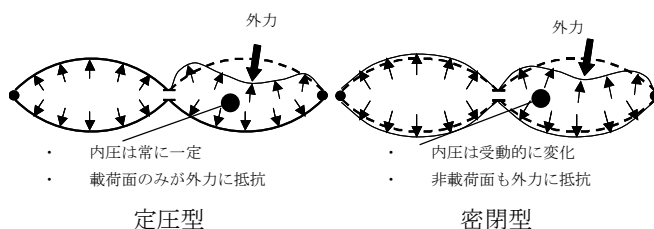


図1 二重空気膜の形式

この効果について柳井ら²⁾は、Newton-Raphson法を用いた定圧型の応力・変形解析を繰り返して変形に適合する内圧を探索する非線形静的解析手法を提示し、実験でその妥当性を検証しているが、初期内圧より著しく大きな外力が作用した場合の挙動は十分解明されていない。

また、二重空気膜パネルのユニットを複数配置して屋根や外壁を構成する場合は、維持管理の観点から幾つかのユニットの内包空気を連結することが予想されるが、このような系に動的荷重が作用した場合の挙動については、連結

* (株)竹中工務店技術研究所 主席研究員

** (株)竹中工務店技術研究所 研究員

ユニット間の空気交換の有無や、空気の付加質量の影響を受けた膜の振動特性など、様々な要因が複合するので、一概に論じることが困難である。もとより、このような系の静的挙動に関する研究例もあり見られない。

そこで本研究ではまず、密閉型小規模空気膜のパネルユニットに比較的小さな静的点荷重を与える実験を行い、複数のユニットの連結時も含めた系の基本的な静的挙動を確認する。次に、初期内圧に比して著しく大きな外力が作用した場合でも系の挙動を追跡できる非線形静的解析手法を提示し、静的面荷重を与えた実験結果と比較しながら、高荷重領域での系の挙動を解明するとともに、静的設計における密閉型空気膜の優位性について論じる。さらに、音圧加振や衝撃载荷実験を通して、単一ユニットの固有振動性状や、連結されたユニットに衝撃荷重が作用した場合の基本的な応答性状を調べる。

2. 静的挙動について

2.1. 低荷重領域における基本的挙動の確認

本節では、2つの二重空気膜ユニットを適宜連結した系に静的点荷重を作用させる実験を通して、比較的小さい外力下における二重空気膜の静的挙動を確認する。

図2に試験体を示す。主・副ユニットはそれぞれ、平面で1.5m角、ライズ1/15のETFEフィルム（膜厚200(μm)）2枚から構成されており、膜面は内圧0.3kPaで近似的に等張力曲面になるように製作されている。主ユニットは内圧付加用のファンに付設するバルブを開閉することで、定圧型／密閉型の切替を行うことができる。また、主ユニットと副ユニットは直径60(mm)のバルブ付パイプ10ヶで連結されており、これらを開閉することでユニット単体／連結の切替や連結度の調整を行うことができる。尚、外圧用ファン・チャンパーは次節以降の実験で用いる。

この試験体の主ユニットの上膜中央点に鉛直下向きの静的点荷重を作用させ、内圧や载荷点近傍の変位を計測する。表1に試験ケースを示すが、このうち $A_pC0.3$ は、静的荷重下において、主ユニットと副ユニットが完全に連結されていることを意味している。

図3に各ケースの外力と载荷点近傍の変位の関係を示す。単体・密閉型の $A_p0.3$ を基準とすると、 $A_p0.3$ より初期内圧の高い $A_p0.6$ は剛性も高く、定圧型の $B_p0.3$ では低くなった。連結・密閉型の $A_pC0.3$ は、 $A_p0.3$ より若干低めの剛性を示した。図4には外力と内圧変動比（＝内圧の増分／初期内圧）の関係を示す。内圧変動比は $A_p0.3$ が最も大きく、 $A_pC0.3$ は連結により内包気積が半減になる影響を受けて、約半分ほどの値となっている。もともと初期内圧の高い $A_p0.6$ は、更に小さい値を示した。定圧型の $B_p0.3$ では変動しない。いずれのケースでも、外力が小さい範囲では外力－変位、外力－内圧変動比関係は線形に近い。内包気積の変動比（＝気積の増分／初期気積）に関しては、それが算定できるほど多くの変位を計測していないので定かではないが、ボイルの法則に初期内圧が大気圧に比して小さいという条件を入れて考慮すれば、同じく線形的な挙動を示していると考えられる。

これらの結果から、内包気積を密閉することで系の剛性が上がる効果があること、初期内包気積や初期内圧が小さい程その度合いは大きいこと、また、外力が比較的小さい範囲では、外力－変位関係・外力－内圧変動比関係・外力－内包気積変動比関係はどれも線形的であることなどが確認された。

表 1 試験ケース

試験 ケース	内圧制御	初期内圧 p_0 (kPa)	開放した 連結バルブ
$A_p0.3$	密閉型	0.3	0 (単体)
$A_pC0.3$	密閉型	0.3	1 ヶ
$A_p0.6$	密閉型	0.6	0 (単体)
$B_p0.3$	定圧型	0.3	0 (単体)

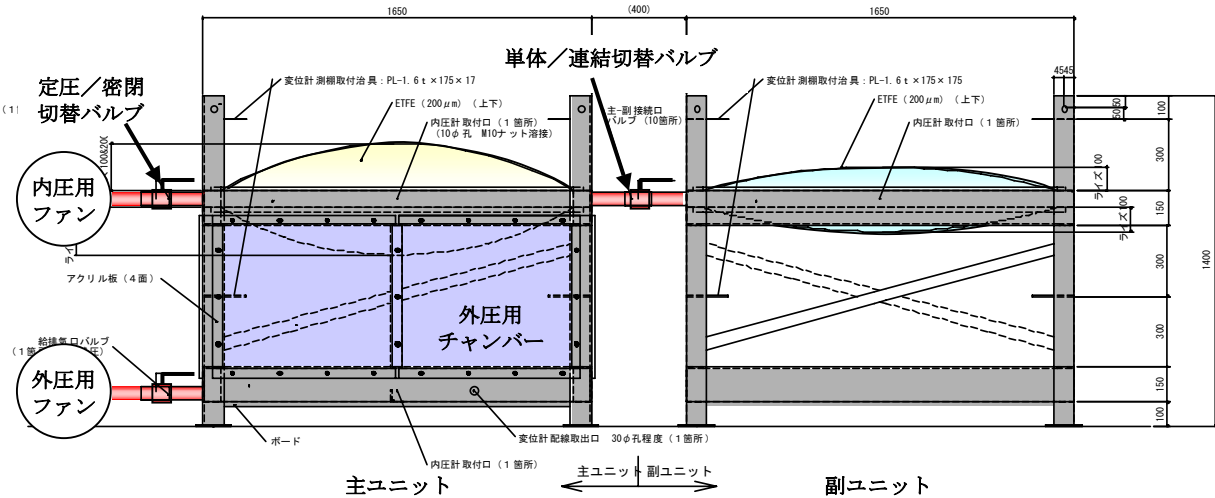


図 2 試験体

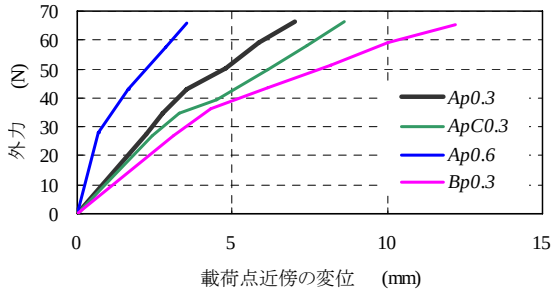


図3 外力と载荷点近傍の変位関係

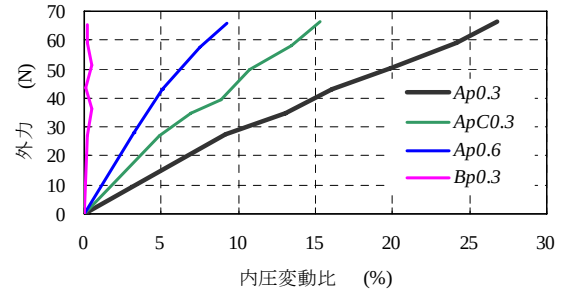


図4 外力と内圧変動比関係

2.2. 高荷重領域における挙動

ここではまず、高荷重領域においても密閉型空気膜の挙動を追跡できる非線形静的解析手法の概要を示す。求解手法には、既に膜構造の解析で広く用いられている Dynamic Relaxation Method (以下、DR 法) を適用する。次に、前節の試験体を用いた面载荷試験を行い、高荷重領域における系の挙動を解明するとともに、解析手法の妥当性を検証する。また、静的設計時における密閉型空気膜の優位性について論じる。

2.2.1 非線形静的解析手法の概要

閉鎖空間を構成する膜面を三角形有限要素で離散化し、全体座標系 XYZ と局所系 $x^e y^e$ をとる (図5)。

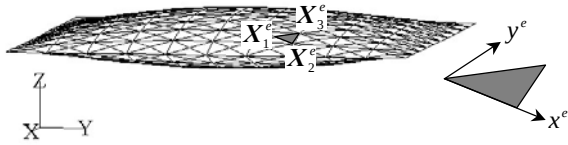


図5 座標系の定義

節点番号は外部から見て反時計回りとする。全体系要素節点位置を $X^e = \{X_1^{eT}, X_2^{eT}, X_3^{eT}\}^T$ 、変位を U^e とし、下添字 $()_0$ で初期釣合状態における値を表す。

$$X^e = X_0^e + U^e \quad (1)$$

要素内一様ひずみ、等方性・材料線形を仮定すると、要素応力ベクトル σ^e は次で表される。

$$\sigma^e = D B^e R^e U^e \quad (2)$$

D は応力-ひずみ関係、 B^e はひずみ-変位関係、 $R^e(X^e)$ は座標変換を表す行列である。本研究では、 σ^e から求められる主応力2成分の内、負値となったものを0と設定することでしわの効果を考慮する。0または正值の主応力を $x^e y^e$ 軸方向に戻したものを σ'^e とし、全体系等価節点内力ベクトル F^e を次式で表す。

$$F^e = t A^e R^{eT} B^{eT} \sigma'^e \quad (3)$$

t は膜厚、 A^e は無ひずみ時の要素面積である。大気圧を p_a とし、密閉型の内包気体はボイルの法則に従うものとする、内圧 p_i は次で表される。

$$p_i = (p_{i0} + p_a) V_0 / V - p_a \quad (4)$$

V は内包気積で、原点と三角形要素で構成される四面体の体積 V^e の総和として計算される。

$$V = \sum_e V^e = 1/6 \sum_e \{ (X_1^e \times X_2^e)^T X_3^e \} \quad (5)$$

DR 法は、時刻歴解析の過程で強制的・意図的な減衰を与え、静的釣合状態を求める手法である。時刻歴解析に陽的時間積分法を用いる。ある拘束されていない節点 k に作用する不釣合力ベクトル F_k を、次のように表す。

$$F_k = -F_{ek} + F_{pk} + F_{fk} \quad (6)$$

F_{ek} は節点 k を共有する要素の F^e から、 F_{pk} は p_i から、 F_{fk} は外力からの寄与分を表す。節点 k の集中質量を m_k とすると、加速度ベクトル $\ddot{U}_k$ は次式で計算される。

$$\ddot{U}_k = 1/m_k F_k \quad (7)$$

ある時刻 t_n および Δt 後の時刻 t_{n+1} における諸量を $()_n$ 、 $()_{n+1}$ で表し、次のように速度 $\dot{U}_k$ 、変位 U_k を更新する。

$$\dot{U}_{k,n+1} = \dot{U}_{k,n} + \ddot{U}_{k,n} \Delta t \quad (8)$$

$$U_{k,n+1} = U_{k,n} + \dot{U}_{k,n+1} \Delta t \quad (9)$$

$U_{k,n+1}$ に対して、(1),(2)より σ^e を求め、主応力の操作を経て σ'^e を算出すると、(3)より F^e が定まる。さらに(4)~(6)などから $F_{k,n+1}$ が、(7)より $\ddot{U}_{k,n+1}$ が求められる。このようにして時刻歴解析を行い、系の運動エネルギーが減少し、転じた時点で全節点の $\dot{U}_k$ を強制的に0と設定することを繰り返せば、全自由度で不釣合力が0となる静的釣合状態解が求められる。この手法は、しわの発生で全体剛性が極端に低下しても殆どの場合には解が求められるという利点があるが、その安定性は保証されない。

2.2.2 静的面荷重作用時の挙動

図2の試験体において連結バルブを全て閉鎖して主ユニットを単体とした上で、下部に設けたチャンバー内をファンでゆっくりと(0.1(kPa/min)程度)加減圧することで下膜の外圧 p_w を載荷する。図6には、この試験体を模した解析モデルを示す。膜材料は比重1.75、膜厚 $t=200$ (μm)のETFEで、解析においてはポアソン比0.44⁴⁾の等方性材料とし、ヤング係数は別途材料試験で算定された870 (MPa)を用いている。表2に試験・解析ケースを示す。A0.3, B0.3は初期内圧 $p_o=0.3$ (kPa)の等張力曲面だが、A0.15はA0.3にあらかじめ $p_{io}=0.15$ (kPa)を作用させたもので、等張力曲面ではない。

図7に、外圧 p_w と内圧 p_i の関係を示す。解析と実験は良く整合している。密閉型の場合、 p_i は $p_w \sim (p_w \geq 0)$ 、もしくは $0 \sim (p_w < 0)$ 漸近している。これは、正の外圧下では、載荷面である下膜は徐々に弛緩し、非載荷面である上膜が外圧と同等の内圧を受けることを示している。逆に、負の外圧下では、上膜が弛緩し、ほぼ下膜のみが外圧に抵抗する。

図8に、外圧 p_w と上・下膜中央点の変位 u_u, u_l の関係を示す。密閉型では、外圧抵抗への寄与が大きい方の膜面($p_w \geq 0$ なら上膜 $p_w < 0$ なら下膜)における $p_w - u_u, u_l$ 関係はほぼ線形で、解析と実験の整合性も高い。弛緩する方の膜面も、外圧と外圧に応じた内圧がバランスしているため、安定的な挙動を示している。これに対し、定圧型調性も小さく、 $p_w > p_o$ では下膜が反転する。

外圧 p_w と膜面に作用する実効圧 p_e (上膜では $=p_i$ 、下膜では $=p_i - p_w$)の関係を図9に示す。仮に、上・下膜ともに $p_e \leq 0.8$ (kPa)(膜応力を制限、 $p_e \geq 0.0$ (kPa)(膜面の反転を防止)、という設計条件を設定すると、それらを満たす外圧 p_w の範囲、即ち設計可能範囲は、定圧型では $-(0.8 - p_o) \leq p_w \leq p_o$ (kPa)の範囲に留まるのに対して密閉型では最大で $-0.8 < p_w < 0.8$ (kPa)近くにまで広がることになる。実際は、膜応力が小さくなり過ぎると風荷重によりフラッター現象が起こるので、ここまでの荷重範囲をとることはできないが、定圧型に対する密閉型の優位性は明らかに見てとれる。

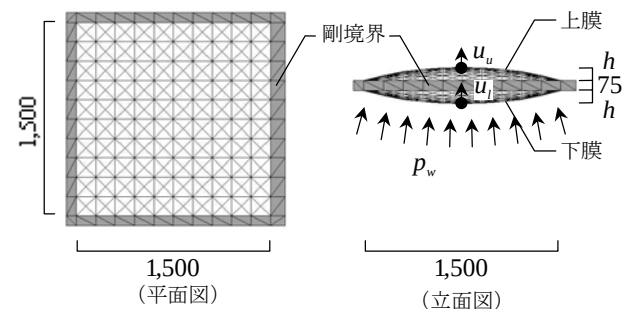


図6 解析モデル

表2 試験・解析ケース

試験 ケース	内圧制御	初期内圧 p_o (kPa)	初期張力※ (MPa)	ライズ h (mm)
A0.3	密閉型	0.3	2.5	102
A0.15	密閉型	0.15	1.1~2.5	98
B0.3	定圧型	0.3	2.5	102

※上・下膜とも同じ分布で、主応力による表示

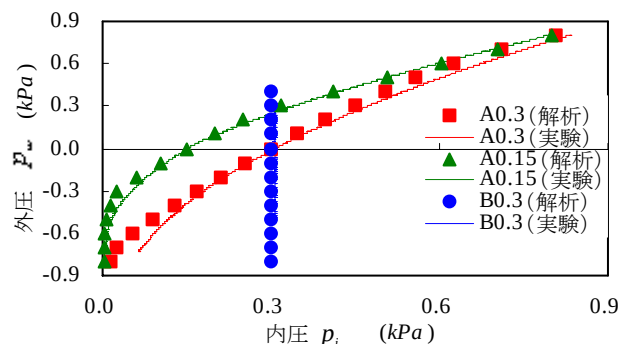


図7 外圧と内圧の関係

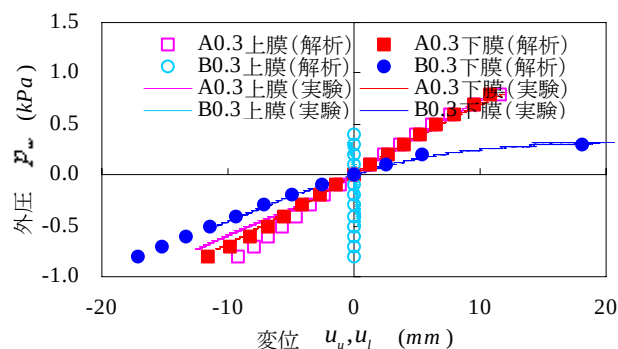


図8 外圧と膜中央点変位の関係

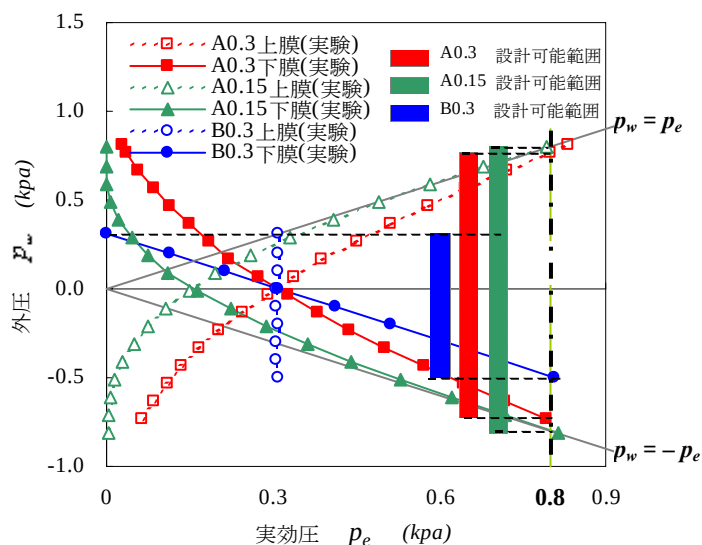


図9 外圧と実効圧の関係

3. 動的挙動について

一般に膜構造の振動特性は、高い幾何非線形性や周辺空気による影響を複合的に受けるため、数値解析のみでその挙動を明らかにすることは困難である。密閉型小規模空気膜については、受動的に変化する内圧の効果や、(個々のユニットを連結した場合は)ユニット間の内包気体の移動など、さらに複雑な条件が加わる。本節では、単一ユニットと連結ユニットの加振実験を通して、密閉型小規模空気膜の基本的な動的挙動を調べる。

3.1 単一ユニットの固有振動性状

ここでは、図2の試験体の連結バルブを全て閉鎖して主ユニットを単体とした上で、下部のチャンバー内に設置したスピーカーによって下膜を音圧加振し、系の固有振動性状を調べる。また、付加質量を考慮した一重膜の固有値解析を行い、実験値との比較を行う。

実験は、表3に示す試験ケースの内、U-03 (初期内圧 0.3(kPa)), U-06 (同0.6(kPa)) について行った。図10に、実験で得たモード形状を示す。対応する振動数はU-06の方が高いが、U-03、U-06ともに、まず逆対称・上下同位相、次に逆対称・上下逆位相のモード形状が検出された。いずれも、内包気積の変化、ひいては内圧変動を抑えるようなモード形となっている。さらに高次になると、逆対称と軸対称の複合など、複雑なモード形状が検出された。

本試験体をコーン型スピーカーに置き換えて考えた場合、音響インピーダンスは、図11に示すように、波長定数 $k_d(2\pi a/\lambda)$ が小さいため、リアクタンス項は、レジスタンス項に比べて大きくなり、質量リアクタンスに近似できる^{5,9)}。すると片面に加わる空気の付加質量は質量リアクタンスのみから約 2kg/m^2 と求まるので、それを付加した上で通常の固有値解析を行った結果、1次固有振動数はU-03で18.3Hz、U-06で21.8Hzと、実験値に近い値が得られた。

表 3 試験ケース

試験ケース		内圧制御	開放した連結バルブ
初期内圧 0.3kPa	初期内圧 0.6kPa		
U-03	U-06	密閉型	0 (単体)
U-03-O	-	定圧型	
C1-03	C1-06	密閉型	1 ケ
C2-03	C2-06		5 ケ
C3-03	C3-06		10 ケ

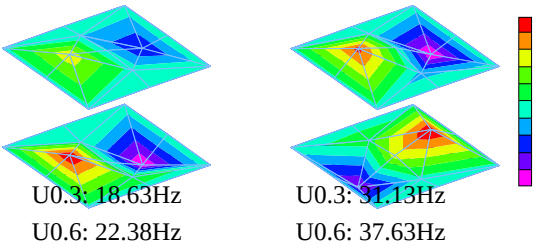


図 10 モード形状

3.2 衝撃荷重作用時の連結ユニットの挙動

ここでは、図2の試験体の連結バルブを操作して主・副ユニットを適宜連結した上で、主ユニットの上膜面にインパルスハンマーで衝撃荷重を与える。表3に示すように、実験パラメータは初期内圧および開放する連結バルブ数とする。得られた内圧の時刻歴応答や周波数分析結果を用いて、系の基本的な動的挙動について論じる。

初期内圧が0.3(kPa)のケースのみについて、図12に内圧変動比の時刻歴を示す。インパルスハンマーが主ユニット上膜に接触していたのは、およそ0.95~1.05secの間と考えられる。単体・密閉型のU-03では、内圧変動比は0を中心に振動している。単体・定圧(開放)型のU-03-Oでも内圧変動比は振動するが、衝撃加振時内包空気が内圧付加用ファンの送風口(1-φ60)から流出するので振動の中心は数%から始まり、徐々に0へと移動していく。連結・密閉型のC1,C2,C3-03の主ユニットでも、同様に衝撃直後の変動比低下が見られるが、その後はより複雑な応答を示している。副ユニットの変動比は、主ユニットと位相が概ね π ずれていることから、空気がユニット間を周期的に行き来していることがわかる。連結バルブ数が多いほどこの現象は顕著になり、振幅・振動数ともに大きくなる傾向がみられた。初期内圧を0.6(kPa)としたケースも同様である。

図13に全ケースの内圧のフーリエスペクトルを示す。連結バルブ数が少なくなるに従って、前述した主・副ユニット間の周期的な空気交換の影響が薄れ、単体・密閉型に近づく様子がわかる。すなわち、ユニット間を連結していたとしても、その連結度合いが小さい場合は、衝撃荷重に対する動的挙動は単体のユニットのものに近くなる。尚、初期内圧が小さい場合は特に、図10の低次振動モードもいくらか内圧変動を引き起こしていると思われるが、外力によるものに比べるとその影響は小さい。

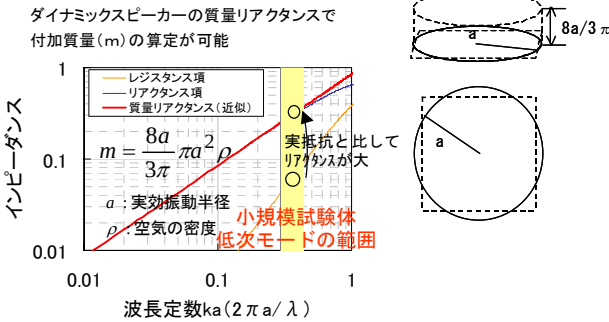


図 11 付加質量の算定

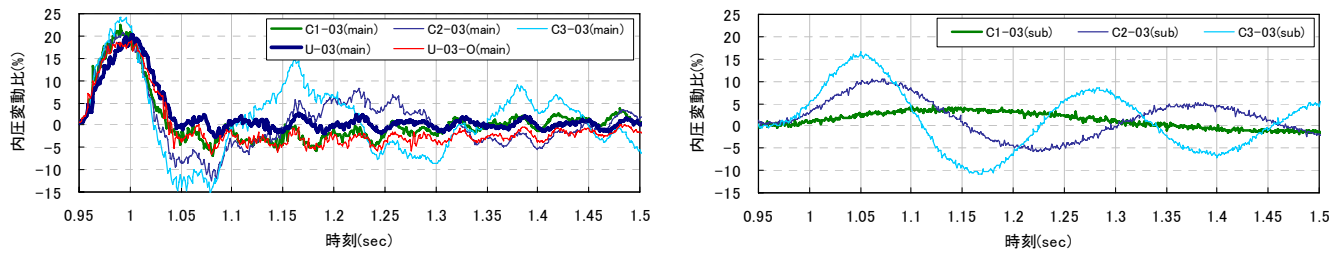


図 12 内圧変動比の時刻歴(左:主ユニット 右:副ユニット)

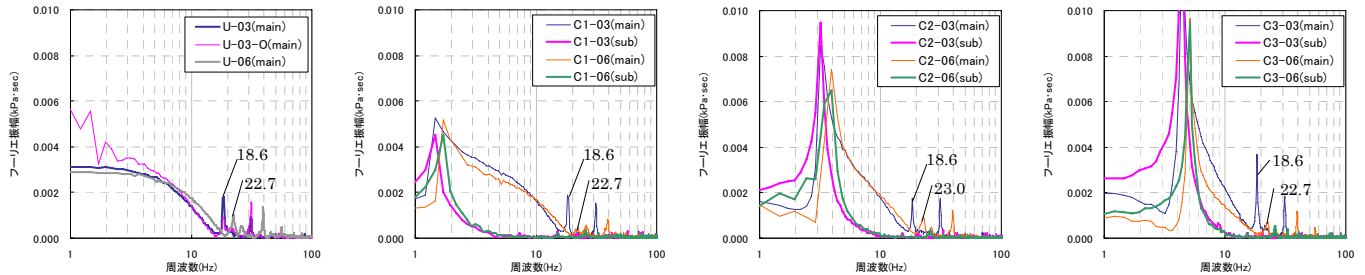


図 13 内圧のフーリエスペクトル

4. まとめ

本研究では、ETFE フィルムを用いた密閉型小規模空気膜パネルに対して静的点荷試験を行い、パネルユニット内の空気を連結した場合も含めて系の基本的な静的挙動を確認した。また、高荷重領域も追跡可能な密閉型空気膜の静的解析手法を示し、片面に著しく大きな外圧を受ける系の挙動を解析・実験の両面から調べた。その結果、大きな正の外圧に対しては内圧が外圧に漸近して非載荷面の膜のみが外圧に抵抗すること、負の外圧に対しては内圧が 0 に漸近して載荷面の膜のみが抵抗することなどが明らかになった。密閉型の設計可能範囲は概して定圧型より大きいことになる。

動的挙動については、単体のパネルユニットの固有振動試験を行うとともに、連結された 2 つのユニットに衝撃荷重を与えて内圧の応答測定・周波数分析を行った。その結果、ユニット間の空気の連結度合いを小さくするとそれぞれの挙動は単体のそれに近づくことや、初期内圧が小さいほど膜の自励振動が内圧変動に与える影響

は大きくなるがその度合いは外力によるものに比べて小さいことなどが観察された。

【参考文献】

- 1) 社団法人日本膜構造協会：ETFE フィルムパネル設計・施工指針（案），膜構造研究論文集 2005，2006 年 2 月
- 2) 柳井，斎藤，岡田，宮里，佐藤：レンズ型二重空気膜構造の基本構造特性（その 1）小規模模型実験による検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp911-912，2004 年
- 3) 藤井，上林，鈴木，橋本，中井：密閉型小規模空気膜に関する研究（その 1）・（その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp919-922，2005 年
- 4) 正木，河端，森山：ETFE フィルムの機械的特性と構造挙動に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp941-942，2003 年
- 5) 正岡，村中，石井：サスペンション膜構造の振動性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第 471 号，pp.91-100
- 6) 二村，奥田，城戸，曾根：『電気音響工学 I』pp96

Studies on Air Cushion Membranes Using ETFE Films

Masayoshi Nakai ^{*)}

Eiji Fujii ^{**)}

Yosuke Suzuki ^{**)}

SYNOPSIS

Large sports facilities using ETFE films have recently been attracting attentions in overseas. The trend has been growing also in Japan as seen in the publication of "Recommendations for Design and Construction of ETFE Films (draft)", while they have not yet commonly been used as a building material.

Use of ETFE films in Japan is expected to be mostly in a form of small-scale pneumatic membranes. In this paper, air cushions, where internal air pressure passively changes, are focused as an effective design approach for the films and the researches by the authors, including a newly developed analysis tool and experimental tests, are introduced.

^{*)} Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation

^{**)} Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation