

密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造特性の把握と内圧設定手法の提案

与那嶺仁志 *1
岡田章 *2
宮里直也 *3
廣石秀造 *4
進藤隆太 *5

梗概

レンズ状二重空気膜構造の内圧制御は、常に内圧を一定に維持する「定圧型」の仮定に基づく手法が一般的である。しかし、内部空気量(内部体積)が小さい構造では、風荷重などの瞬間的な荷重増加に対して、内圧制御の時間的遅れを考慮すると、内部空気が密閉された「密閉型」に近い挙動を呈すると考えられる。「密閉型」として評価するためには、内部体積変化に伴う内圧変動を考慮する必要があるが、この種の検討を考慮した内圧設定手法は提案されていない。

以上を踏まえ、本論では内圧制御を必要としない密閉型の実用化を目的として、密閉型の挙動に対する評価技術を確立し、その特性に留意した構造設計フローと内圧設定手法の提案を行う。

1. 概説

空気膜構造は、大規模な無柱空間をローコストで構築できる利点を有する。一方、常に加圧装置によって内圧の維持管理が必要であり、ランニングコストが高くなる。そのため、1997年の「パークドーム熊本」の完成以降、大規模な空気膜構造は実現されておらず、膜構造としては骨組膜構造やサスペンション膜構造が主流となった。しかし、近年、ETFE(エチレン・テトラフルオロエチレン共重合樹脂)フィルムの出現により、その材料特性を生かした空気膜構造、特に図1-a)に示すようなレンズ状二重空気膜構造を用いた事例が、海外で多くみられるようになった。一方、国内においても、2016年にレンズ状二重空気膜構造を採用した「新豊洲Brilliaランニングスタジアム(図1-b)」が完成する等、ETFEフィルムの建築への利用が積極的に進められている。

一般に、空気膜構造は、空気支持式と空気膨張式に大別される(図2)。本報で対象とするレンズ状二重空気膜構造は、二枚の膜材をフレームで支持し、内部圧力を外部圧力より高くすることで膜面に張力を与え、剛性を付加する構造システムである。内部空気により荷重を支持する一方、付加荷重時には片方の膜面が圧縮を負担し、もう片方の膜面の引張が増加することで曲げ抵抗のような性状を示す。このため、空気支持式と空気膨張式の性状を併せ持つ構造システムと位置付けられる。ここで、外部圧力と内部圧力の差圧を「内圧」と称す。



a) Allianz Arena b) 新豊洲Brilliaランニングスタジアム
図1 レンズ状二重空気膜構造の事例

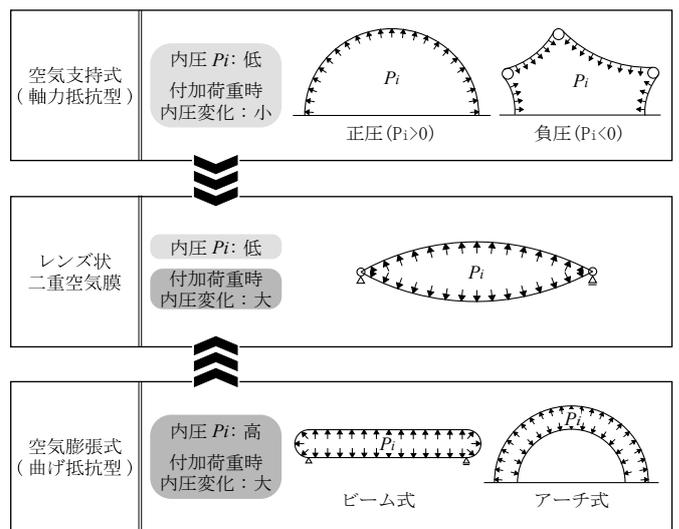


図2 空気膜構造の分類と位置付け

*1 オーヴ・アラップ・アンド・パートナーズ・ジャパン・リミテッド・博士(工学)
*2 日本大学理工学部建築学科 特任教授・博士(工学)
*3 日本大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

*4 日本大学短期大学部建築・生活デザイン学科 准教授・博士(工学)
*5 (株)梓設計・修士(工学)

図3に、レンズ状二重空気膜構造の内圧制御方式を示す。空気膜構造の内圧制御方式に関しては、1980年代に東京ドームを代表とする一重空気膜構造に関する研究が進み、多くの知見が報告されている。一重空気膜構造の設計においては、付加荷重時の内圧が常に設定値に維持される(これを「定圧型」と称す)と仮定することが一般的である。これは、比較的規模が大きく、付加荷重時の内部体積変化に伴う内圧変動や加圧装置による内圧制御の時間的遅れが、無視できるほど小さいとの前提に立脚したものである^[1]。

従来のレンズ状二重空気膜構造の設計においても、定圧型の仮定を用いた検討が一般的である。しかし、レンズ状二重空気膜構造は規模が比較的小さく、一重空気膜構造に比べて内部空気量(内部体積)が小さいため、状況により定圧型の仮定を満足できず、内部空気が密閉された状態(これを「密閉型」と称す)に近い挙動を示すと考えられる。筆者らは既報^[2]において、密閉型を定圧型と同等とみなせる規模の範囲を把握するため、内部体積をパラメータとした検討を数値解析により行った。結果は、極端に内部体積が増加しない限り定圧型とみなせず、レンズ状二重空気膜構造では、内部空気体積の変化に伴う内圧と膜応力の変動を無視できないことが確認され、密閉型特有の留意点を踏まえた設計を行う必要があることが把握された。

また定圧型は、外界気象条件や建物の使用状況に応じて内圧を設定すると共に、その設定値に内圧を変更・維持する機能を有する、送風設備も含めた加圧送風制御システムが必要である^[3]。一方、密閉型は適切な内圧を設定し完全密閉すれば、エアリークに対応する簡易な送風設備のみで良く、常時の内圧制御が不要となる可能性が期待できる。なお、本報では完全密閉を仮定して検討を行った。

本報では、世界中で多く用いられ、汎用性の高い、ETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造に関する検討を行う。ETFEフィルムの材料特性に関しては、国内外で多くの実験が行われ、文献[4]や[5]にて、多くの結果がまとめられ、設計ガイドラインも存在する。また国内では、膜構造用フィルムとして建築基準法上の指定建築材料に加わり、確認申請で扱える材料となった^{[6], [7]}。しかし、様々な荷重条件に対する適切な設計クライテリアや数値解析手法は確立されていない。加えて、設計の際には第1降伏点を超えて約10%のひずみまで許容した設計が一般的であるが、ETFEフィルムが降伏した後のレンズ状二重空気膜構造の性状は不明確である。

以上の観点から、岡田らは既報^{[8], [9]}において、強風時におけるレンズ状二重空気膜構造の内圧制御、及び設計手法について検討を行っている。また、河端ら^{[10]~[15]}はETFEフィルムを用いた四角形パネルの進行性ボンディングについての検討等のETFEフィルムに関する様々な研究、吉野ら^[16]はETFEフィルムの粘性特性に関する研究、中井ら^[17]は小規模の密閉型空気膜に関する研究を行っている。ここで、設定内圧を変更しない密閉型レンズ状二重空気膜構造の設計においては、初期内圧の設定が重要な課題となる。初期内圧の上限値は、膜応力の検定によって判断する必要があり、密閉型の挙動の把握が必

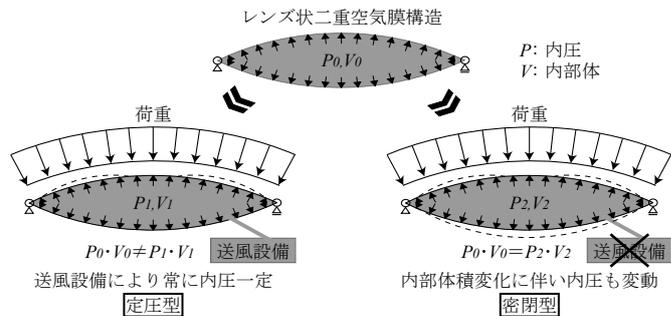


図3 レンズ状二重空気膜構造の内圧制御方式

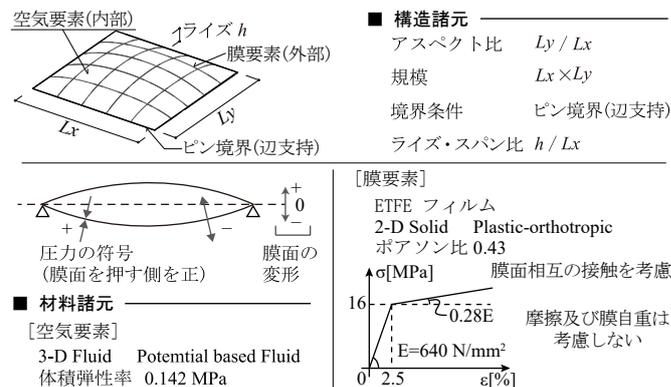


図4 数値解析概要

要となる。

このことから、河端ら^[18]は密閉型の円形パネルを対象に体積変化に伴う内圧変動、フィルムの降伏等の影響に関して検討を行っている。また、筆者らは既報^[2]において数値解析を用いて、密閉型における正圧載荷及び負圧載荷時の挙動について報告している。さらに、初期内圧の下限値の判断には、積雪時の偏分布の影響や貯水による進行性ボンディング、過大な負圧荷重時の内圧減少・消失時の挙動把握が必要不可欠である。これに対して、既報^{[19], [20]}において実験と数値解析により、積雪荷重時の挙動や進行性ボンディングの検討、及び過大な負圧荷重時と繰り返し荷重時における挙動の検討を報告している。しかし、それらの密閉型特有の留意点を多角的に考慮した内圧設定手法は、著者らの知る限り報告されていない。

以上の背景より、本報ではETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の実用化を目的として、既報^{[2], [19], [20]}の検討を踏まえた適切な内圧設定手法を提案する。まず、3章と4章において、既報^{[19], [20]}における検討(積雪荷重時と風荷重時の挙動)について概説する。その後、それらの内容を踏まえた構造設計フローを5章に示す。加えて、6章において密閉型特有の留意点を考慮した適切な内圧設定手法を提案する。ここで、5章及び6章は既報^[2]の内容を修正・加筆したものであり、特に6章では様々なパネルサイズや膜厚、荷重に対する内圧設定の検討結果について新たに報告する。なお、本報は文献[21]の内容に基づき、密閉型特有の挙動だけでなく内圧設定手法とその検討結果についてまとめたものである。

2. 数値解析概要

数値解析概要を図4に示す。本報における数値解析は、幾

何学非線形解析を行える汎用数値解析ソフト「ADINA(Ver. 9.5)」を用いて検討を行った。本解析は、内部空気を流体要素(完全流体)としてモデル化し、ポテンシャル理論に基づいた流体解析(有限要素解析)により行った。膜面は、面外方向への変形により抵抗が可能な2D-Solid要素とし、膜面同士の接触を考慮できるモデルとした。また、膜材は第1降伏点(16MPa)を考慮したバイリニア型とした。なお、本解析では等方硬化則を用いて、引張応力やせん断応力が複合した場合の降伏を判定するために、相当応力であるミーゼスの降伏条件式を用いた^[22]。

3. 積雪荷重時の挙動の把握

レンズ状二重空気膜構造に積雪が加わる場合、その分布が広範囲な際に、内部体積の減少と共に内圧が増加し、これにより荷重に対する抵抗能力が増加する可能性がある。一方で局所的な積雪分布に対しては、膜面に局所的な凹みが生じ、そこに雪や雨水等が更に貯水される場合がある。その際、内部体積や内圧の変化を伴わずに局所的な変位が増大し、さらには滞水による進行性ボンディングの発生が懸念される。

以上のことから、既報^[19]においては、全面載荷及び半面載荷時における挙動の把握を目的として、内圧をパラメータとした実験及び数値解析を行った。さらに、偏荷重に伴う載荷部の局所変位の増大、雨水等の滞水による進行性ボンディングの発生の可能性について、初期形状及び載荷範囲をパラメータとして検討を行った。以下に検討結果を示す。

3-1. 全面・半面正圧載荷時の挙動の把握

短辺500mm、長辺1,000mmのアスペクト比2のモデルを対象として、正圧載荷実験及び数値解析を行った。実験概要と数値解析モデルを図5、図6にそれぞれ示す。初期内圧は、最大膜応力が長期許容応力度(7MPa)となる750Paとし、膜材にはETFEフィルム100 μ mを用いた。載荷は、チャンバー内へ空気を送風することによる全面正圧載荷、及びチャンバー内に設置したエアバックへ送風することによる半面正圧載荷とした。なお、載荷は雪荷重を想定しているが、実験治具の都合により、膜自重が十分に小さいことを考慮して、下膜への上向き載荷とした。なお、数値解析は実験と同様の載荷条件とした。

全面正圧載荷時の荷重-膜面鉛直変位及び内圧関係を図7に示す。実験及び数値解析共に、全面正圧載荷において、荷重の増加に伴い、載荷面である下膜と非載荷面となる上膜が共に上方へ変位し、内圧が増加する性状を把握した。特に、上膜と下膜は初期形状のデブスをはば保ちながら変形する性状が確認された。また、数値解析において荷重が約2,000Paで第一降伏応力の16MPa以上となり、上膜に降伏が生じたが、実験及び数値解析結果共に変形状に大きな変化はなく、膜面降伏後も安定して荷重に抵抗できることが確認された。さらに、実験では荷重が3,000Pa以上になると下膜面の反転を生じ、剛性が低下する性状が見られた。ここで、上膜の初期値に実験値と解析値で差異が見られる。これは実験において上膜側に空気送風用及び内圧測定用のチューブを取り付けたことによる試験体製作上の誤差だと考えられる。しかし、実験値と解析値での変位の挙動はほぼ一致する

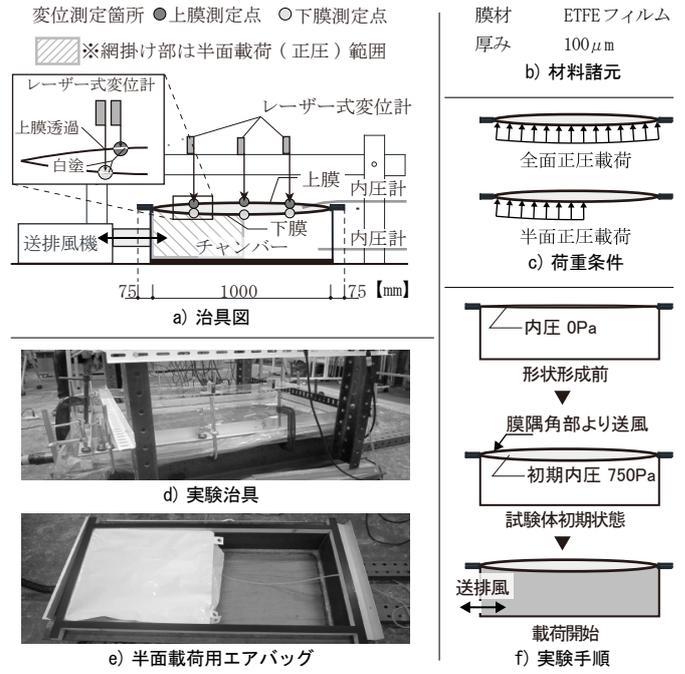


図5 実験概要

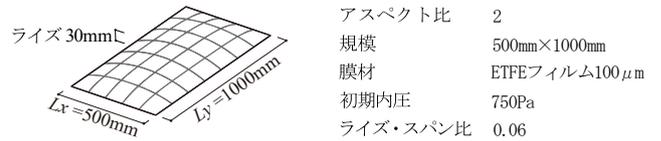


図6 数値解析モデル

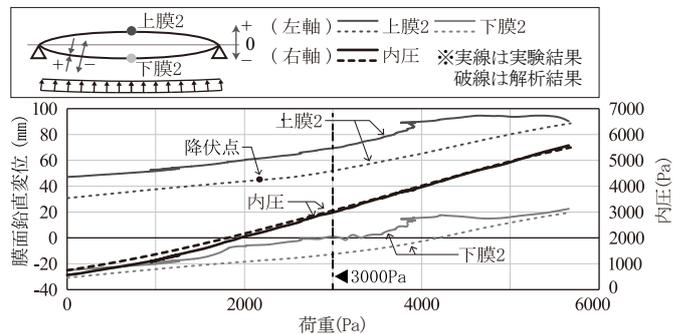


図7 全面正圧載荷時の実験・解析結果

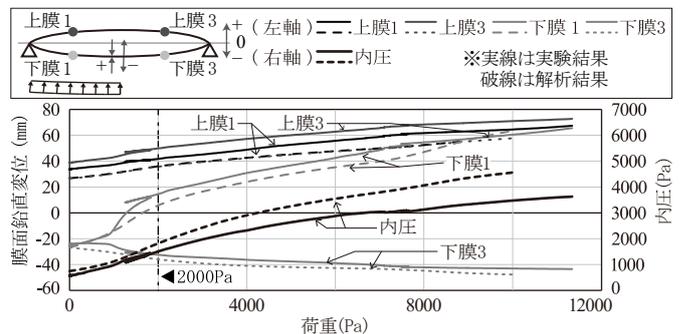


図8 半面正圧載荷時の実験・解析結果

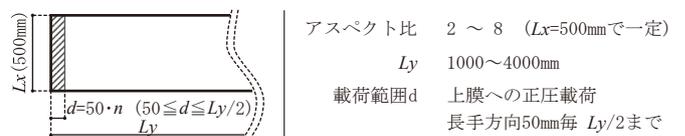


図9 載荷範囲による検討

ことが確認された。

半面正圧載荷時の荷重-膜面鉛直変位及び内圧関係を図8に示す。半面正圧載荷においては、実験と数値解析共に、載荷面の下膜1の変位が顕著に進行し、下膜と上膜が接触する現象が見られた。一方、非載荷側の下膜3では、載荷方向と逆方向に膨らむ性状が見られた。これは、内部空気の移動による変位であり、膜材が殆ど伸びない変形(伸びなし変形)と考えられる。また、荷重の増加と共に内圧の増加が緩やかになる非線形性状が得られた。これは、荷重に対する内部空気の移動量の変化に伴うものと考えられる。

3-2. 載荷範囲の影響

長辺Lyを1,000~4,000mmとしたアスペクト比2~8(短辺500mmで一定)を対象として、荷重の載荷範囲を変えて数値解析を行った。検討概要を図9に示す。載荷範囲はモデルの長辺Lyに対し、載荷する範囲の割合とし、試験体端部から50mm間隔で範囲を増加させて検討を行った。ここで、膜面4周の境界面と載荷側膜面が平行となる時の荷重を、膜面の反転が生じ始める荷重という意味から「反転荷重」と定義する。なお、その他の諸元及び条件は、前節と同じとした。

反転荷重と載荷範囲の関係を図10に示す。アスペクト比2では載荷範囲30%で反転荷重が最も小さく(最小反転荷重と称す)、容易に変形することが把握された。また、アスペクト比が大きくなるほど反転荷重は小さくなると共に、反転が生じる載荷範囲も小さくなる傾向が確認された。

反転荷重時における内圧-載荷範囲関係を図11に示す。アスペクト比が大きくなるほど、最小反転荷重時の初期内圧からの内圧増加量は小さくなることを把握された。

3-3. 進行性ボンディングに対する検討

短辺2,000mmで一定としたアスペクト比2, 3, 4, 8のパネルを対象として、進行性ボンディングに対する検討を行った。数値解析諸元を表1に示す。初期内圧は最大膜応力が長期許容応力度(7MPa)となる365Paとし、膜材にはETFEフィルム200 μ mを用いた。

進行性ボンディングの数値解析フローを図12に示す。まず、初期形状を形成後、積雪荷重を載荷する(Step1)。なお、載荷範囲は図10の各アスペクト比における最小反転荷重時の載荷範囲とした。また、積雪荷重は20N/m²/cmとし、積雪深は30~100cmを想定した600~2,000Paとした。本報では、積雪荷重2,000Paの検討結果のみを示す。次に、積雪荷重載荷後の形状に対してパネル境界の水平面(基準面)を下回る箇所に、各節点の変位から算出した貯水荷重を載荷する(Step2)。この時、Step1で載荷された積雪荷重は載荷状態を保持したままとし、積雪荷重によって生じたくぼみに雨水や雪解け水が流れ込むことを想定し、貯水可能範囲の体積分の貯水荷重を載荷した。さらに、Step2より生じる変位から前Stepとの差分の貯水荷重を各節点に載荷する(Step3)。以後、変位に応じて貯水の増加を繰り返し、貯水荷重による変形後に対する変形前の貯水量の割合が99%に達した時点で、滞水した水が外に溢れ出る「オーバーフロー」が生じたのみならず、検討を終了した。

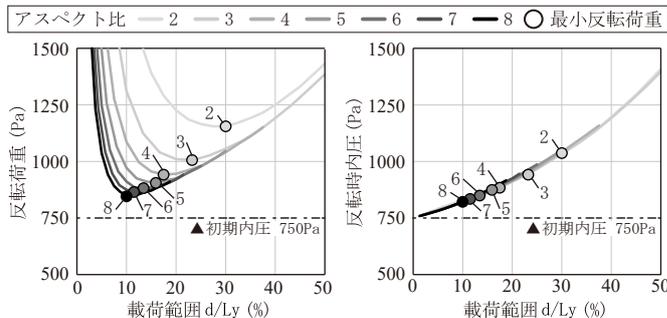


図10 反転荷重-載荷範囲関係

図11 反転時内圧-載荷範囲関係

表1 進行性ボンディングの数値解析諸元

構造諸元		材料諸元	
アスペクト比	2~8	膜要素	ETFEフィルム 200 μ m
規模	短辺 2000mm 長辺 4000~16000mm	水密度	1t/m ³
初期内圧	365 Pa	荷重条件	
ライズh	125mm	積雪荷重	2000Pa(上膜への正圧載荷)

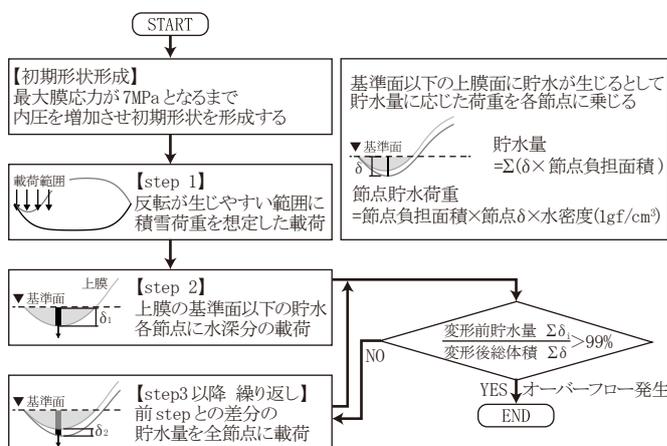


図12 進行性ボンディングの数値解析フロー

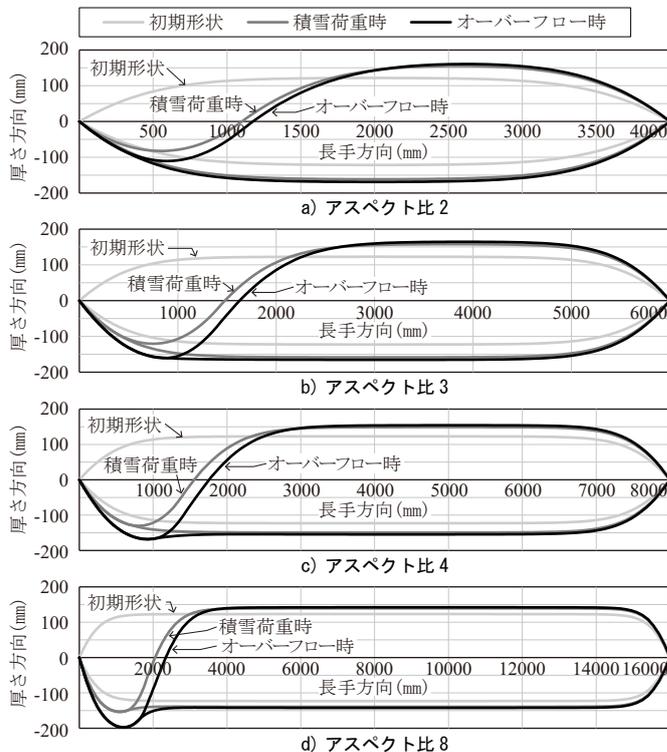


図13 長手方向の断面形状(積雪荷重2,000Pa時)

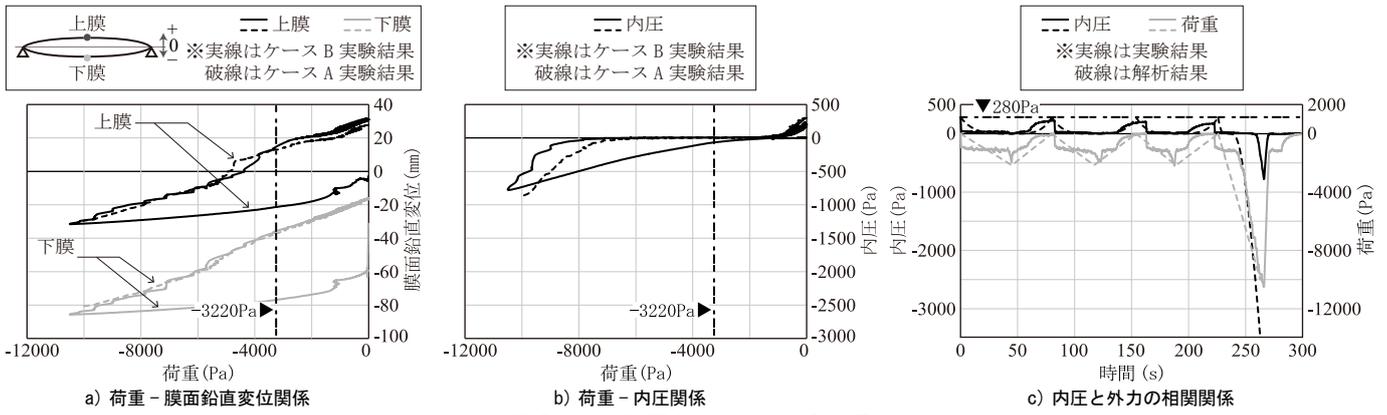


図17 ケースB(張力消失時)の検討結果

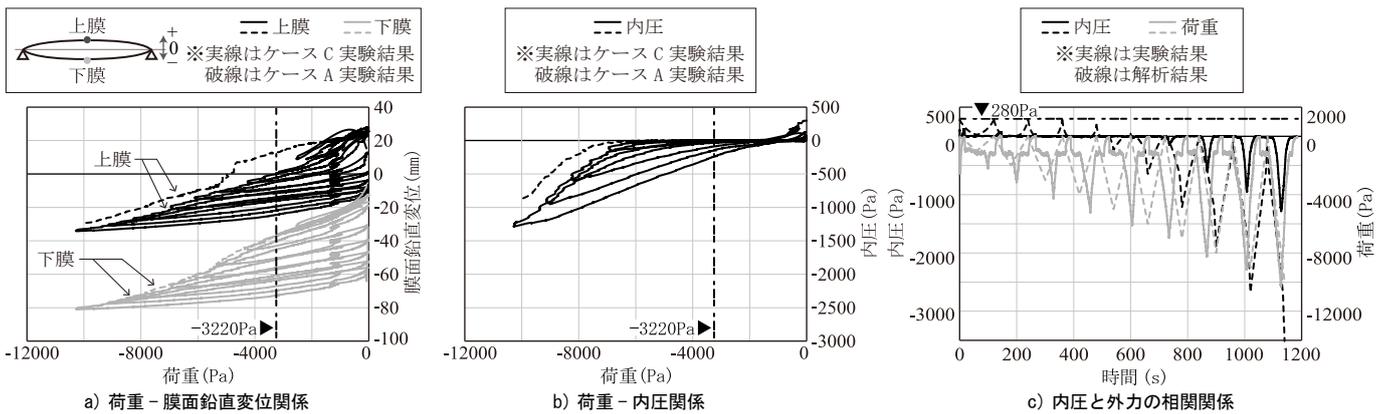


図18 ケースC(第1降伏点を超える範囲での漸増載荷)の検討結果

下膜は初期形状のデプスをほぼ保ちながら変形する性状が把握された。ここで、上膜の初期値に実験値と解析値で差異が見られる。これは、3章の載荷実験と同様に試験体製作上の誤差が原因と考えられるが、実験値と解析値の変位の挙動はほぼ一致することが確認された。

図16-b)より、載荷に伴って内圧は徐々に減少し、0Paの状態を保った後に負圧へ移行する性状が見られた。また、内圧が負圧へ移行するタイミングに着目すると、実験と数値解析で差異が見られた。これも実験において内圧測定用チューブの取付けによる試験体の誤差が原因と考えられる。数値解析では約-1,500Pa時に内圧が0Paとなり、非載荷面である上膜は周辺境界と同じ高さとなり、膜面は平坦となるが、下膜は曲面形状を保っており、架構として不安定とはならず、荷重に抵抗できることが確認された。一方、実験においてもほぼ同様な挙動を示した。

図16-a), c)より、最大膜応力が第1降伏点の16MPaとなる-3,220Pa時に膜材が降伏し、挙動に変化が生じた。また、膜材の降伏は上下膜の変位の進行にほとんど影響を及ぼさず、初期形状のデプス(上下膜の中央方向距離)に相当する一定の距離をほぼ保ちながら変形する性状が確認された。本検討の数値解析結果では、最大膜応力が約20MPa程度であるが、ETFEフィルムの第2降伏点(約22MPa)を大きく超える場合には、トリリニア型での検討が必要となる。

4-2. ケースB(張力消失時)の結果

ケースBの検討結果を図17に示す。図17-a), b)に示す

ように、変位・内圧共に包絡線はケースAと同様の経路を辿ることが確認された。内圧が0Paとなる荷重約-1,500Paを3回繰り返した時点では弾性域内であるため、膜面は初期状態まで戻り、それと共に内圧も図17-c)に示すように0Paから初期内圧280Paの近傍まで戻る性状を示した。さらに、ケースAと同様に内圧0Paにおいて、非載荷面(上膜)は曲面形状が保たれず、膜面が平坦となる挙動が見られたが、載荷面(下膜)は、曲面形状を保っており架構として不安定とはならず、荷重に抵抗できることが確認された。また、初期形状のデプスをほぼ保ちながら変形する性状についても確認された。

4-3. ケースC(第1降伏点を超える範囲での漸増載荷)の結果

ケースCの検討結果を図18に示す。図18-a), b)より変位・内圧共に包絡線はケースAと概ね同様の経路を辿ることが確認された。図18-c)において、0~約-3,000Paの荷重範囲では、載荷時は内部体積が増加することで内圧が減少していくが、除荷後はほぼ初期形状に戻る性状を示した。また、約-3,000~-6,000Paの荷重範囲ではフィルムが降伏し、除荷後の内圧が初期内圧よりも減少する傾向が見られ、最終的には除荷後の内圧は0Paとなった。さらに、-6,000Pa以降は内圧値が0Paを保つ性状を示した後に、載荷に伴い内圧が負圧へ増加する傾向が見られた。本検討の範囲内においては、内圧0Pa時においても架構が不安定とならないことが確認された。また、内圧値が負となる範囲においても膜面変位は安定的に推移している。このため、内圧0Pa以下における第1降伏点を超える範囲での繰り返し載荷においても、架構

が不安定とならない設計が可能であることが示唆された。また、最終的に -10, 000Pa の除荷後には残留歪が残るものの、本検討の範囲内では残留歪の影響による崩壊には至らないことが確認された。

5. 構造設計フローの提案

1章で述べたように、レンズ状二重空気膜構造は内部体積が比較的小さく、付加荷重時の内圧変動が大きいいため、密閉型特有の留意点を踏まえて設計する必要があると考える。しかし、密閉型特有の留意点を多角的に考慮した構造設計フローは、確立されていない。このため、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の実用化を目的として、前述の検討を踏まえた構造設計フローの提案を行う。

図19に密閉型の構造設計フローを示す。また、表2に各検討を行う際の留意点をまとめる。以下に、これまでの検討結果を概説しながら、各留意点及び検討方針について示す。

5-1. ライズ・スパン比、初期内圧及び膜厚の仮定

既報^[20]の検討より、パネル形状が正方形に近い(アスペクト比が1.5を超えない)場合は、二方向で膜面が抵抗し、応力分散を可能とするが、長方形になると一方向での抵抗となる。このため、膜厚を決定する際には、アスペクト比が重要となる。また、ライズ・スパン比は、最低限の曲率で形成されることが多いが、積雪の影響等で荷重が大きい場合は、それよりも大きいライズ・スパン比の設定を行う場合もある。

初期内圧は、一般的に定圧型では付加荷重時に内圧を増加する運用方針が多いことから、常時内圧には200~300Paを採用することが多い。一方、密閉型においても、既報^[19]の検討より、低内圧で正圧荷重に対して十分な剛性が確保できたため、同様に200~300Paといった低内圧を目安とする。

5-2. 長期に対する検討

ETFEフィルムはクリープの影響を大きく受けやすいため、常時の膜応力を可能な限り小さくする配慮が必要である。告示^[6]による長期許容応力度は7MPaであるが、クリープを考慮した場合には約1/2の3~4MPa以下とすることが望ましい^[22]。

また、初期形状の形成には、立体裁断なしと立体裁断ありの二種類が考えられる。立体裁断なしでは、平面膜の二枚の間に空気を送風することで、初期形状を得ることが可能なため、この時の内圧を初期内圧として設定できる。ただし、発生膜応力を許容値以下とする必要があり、得られる初期形状のライズ・スパン比に限界がある。このため、高ライズを計画する場合、立体裁断の検討が必要となる。さらに、初期形状時の膜応力の検定により、初期内圧の上限値が定まる傾向がある。立体裁断ありでは、等張力に近い曲面を製作することにより、内圧を与えた際の応力を低減できる利点があるが、一方では製作に手間がかかるデメリットもある。以上より、初期形状の形成手法は、状況に合わせて使い分ける必要がある。

5-3. 短期に対する検討

主に風荷重、積雪荷重を対象とした検討を行う。風荷重に関して、極端に風速が大きい地域を除き、高さ10~30m程度の建物規模であれば、国内における暴風時の風荷重(再現期

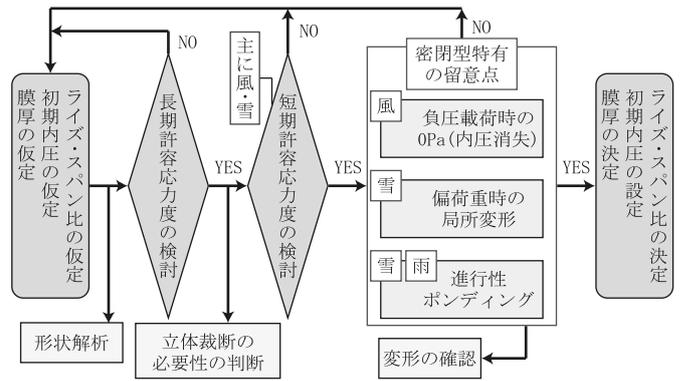


図19 密閉型の構造設計フロー

表2 各検討時の留意点

ライズ・スパン比 初期内圧 膜厚の仮定	アスペクト比: 1.5程度を超えると、二方向の抵抗から一方向による抵抗に変化 ライズ・スパン比: 0.1程度を目安とし、荷重条件によりライズを増加 初期内圧: 目安は 200Pa ~ 300Pa
長期に対する 検討	長期許容応力度は 7MPa、クリープを考慮した場合には 1/2 の 3MPa ~ 4MPa 以下を推奨 初期形状の形成は、立体裁断なしと立体裁断ありの 2 種類
短期に対する 検討	内圧消失前は、上下膜により抵抗 消失後は、正圧荷重では下膜(非荷重面)、負圧荷重では上膜(荷重面)で主に抵抗し、最大応力が発生
負圧荷重時の 内圧消失現象	内部体積の増加に伴い内圧が減少 その後 0Pa となり下膜の張力が消失 台風以外で常時起こりうる風速以下の風荷重においては、内圧が 0Pa とならない初期内圧の設定を推奨
偏荷重時の 局所変形と 進行性 ボンディング	局所変形が凹状になると、進行性ボンディングが生じる可能性 初期内圧を上げて剛性を高め、凹状変形の未然防止を推奨 凹状変形が生じた場合においても、オーバーフローにより、ボンディング状態を留まらせることが可能

間50年)は概ね1, 000~3, 000Pa程度である^{[23], [24]}。また、積雪荷重は一般地域と多雪地域に分かれ、雪国での使用を想定しなければ都市部での積雪荷重は600Paである。一方、1m深の多雪地域であれば3, 000Paとなり、短期でなく中長期、中短期扱いとなる^{[23]~[25]}。なお、地震荷重に関しては、自重が軽く、影響が小さいことから、パネルの検討では、無視しても問題はない。

既報^[2]の検討より、短期荷重時の密閉型レンズ状二重空気膜構造の抵抗形式は、内圧消失前は上下膜面共に抵抗するが、消失後は主に正圧荷重で下膜(非荷重面)、負圧荷重で上膜(荷重面)により抵抗し、各抵抗した膜に最大応力が発生する。よって、正圧と負圧の荷重の比較により、最大応力が発生する膜面が判断でき、膜応力の検定を行うことで、初期内圧の上限値が定まる。

5-4. 負圧荷重時における内圧消失現象

既報^[2]及び4章の検討より、密閉型レンズ状二重空気膜構造では、全面等分布に近い負圧荷重時に、内部体積の増加に伴って内圧が減少する。その後、0Paとなり、下膜の張力が消失する。結果、非荷重面は曲面形状が保たれない挙動を示したが、荷重面は曲面形状を保ち、架構としては不安定とはならなかった。しかし、実状を考慮した場合、内圧が0Paとなっ

て非載荷面の張力が消失し、その膜面に風荷重によるバタつきが生じることは望ましくないと考え。よって、バタつきによる影響を極力避けるために、暴風時以外で常時起こりうる風速(基準風速 $V_0=20\text{m/s}$ 程度^[26])以下の風荷重(暴風時の約30%)においては、内圧が0Paとならないことをクライテリアとした初期内圧の設定を推奨する。これにより、初期内圧の下限値が定まる。

5-5. 偏荷重時の局所変形と進行性ポンディング現象

3章の検討より、レンズ状二重空気膜構造のパネル規模や形状によって、偏分布の積雪荷重を検討する必要があることが把握された。その際、内圧の増加は小さいものの、伸び無し変形のような局所的な変形が生じる可能性がある。この変形が凹状になると、さらなる滞雪と貯水が生じ、進行性ポンディング現象が生じる。よって、実際の設計においては、初期内圧を上げることで剛性を大きくし、凹状の変形を未然に防ぐことが望ましい。このことも、初期内圧の下限値の設定根拠となる。なお、初期内圧を大きく設定すると、オーバーフロー(滞水した水が外にあふれ出る現象)時の最大膜応力が小さくなる傾向を示し、貯水を考慮した際の膜面変位の進行が小さくなる。このため、凹状変形が生じた場合にも、初期内圧を上げることで、オーバーフローにより、ポンディング状態を留まらせることが可能となり、崩壊には至らないと考えられる。

6. 内圧設定手法の提案

5章の構造設計フローに則り、規模、膜厚、荷重を条件とした際の最適な初期内圧の設定手法を提案する。検討条件を表3に、初期内圧を設定する際の設計クライテリアを表4に示す。

6-1. 検討結果

図20に検討例(正方形パネル $1\text{m}\times 1\text{m}$ 、膜厚 $100\mu\text{m}$)を示す。荷重条件は、一般的な都市部における風荷重 $\pm 2,000\text{Pa}$ 、積雪荷重 600Pa とする。

長期、短期の応力に関しては、検定比が1より小さければ許容する。積雪荷重時には、局所変形によりポンディング現象が生じず、上膜を反転させないものとする。内圧消失荷重においては、暴風時($-2,000\text{Pa}$)に対して内圧が全く消失しないものを安全とする。また、暴風時以外で常時起こりうる風速(基準風速 $V_0=20\text{m/s}$ 程度^[26])以下の風荷重である -600Pa までは、内圧を保持し張力が消失しないクライテリアとする。以上を踏まえると、初期内圧 $400\sim 800\text{Pa}$ が採用可能な初期内圧となる。実際には、初期内圧を抑えた方が検定比も小さくなり、長期時のクリープ等の影響を低減できる。このため、本検討においては、 400Pa が最適な初期内圧となる。

このように、表から簡単に密閉型の最適初期内圧を決定することが可能と考える。図21に想定する風荷重が $\pm 1,000\text{Pa}$ 時及び $\pm 2,000\text{Pa}$ 時における初期内圧の検討結果を示す。

7. まとめ

本報では、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気構造を対象に、既報^{[2], [19], [20]}と今回の検討を踏まえ、本構

表3 検討条件

規模	正方形パネル: $1\text{m}\times 1\text{m}$, $2\text{m}\times 2\text{m}$, $3\text{m}\times 3\text{m}$
	長方形パネル: $1\text{m}\times 2\text{m}$, $2\text{m}\times 4\text{m}$, $3\text{m}\times 6\text{m}$ (アスペクト比2)
	膜厚: $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $250\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$
	ライズ・スパン比: 0.1
荷重	長期は、自重を省略し、膜応力は内圧により発生した応力のみ 風荷重: $\pm 1,000\text{Pa}$, $\pm 2,000\text{Pa}$
	積雪荷重: 600Pa
	積雪時の局所変形は、半面載荷時の載荷面の反転の有無
ETFEフィルムの許容応力度 ^[4]	長期許容応力度: 7MPa
	短期許容応力度(風): 12.6MPa
	短期(中短期)許容応力度(積雪): 16.8MPa
初期内圧	$100\text{Pa}\sim 1,000\text{Pa}$ の範囲(100Pa 刻み)

表4 設計クライテリア

長期	検定比0.5以下を安全、1.0以上を危険、その他を許容内
短期(風、雪)	検定比0.7以下を安全、1.0以上を危険、その他を許容内
積雪時の局所変形	想定荷重で膜面が反転しないことを安全
内圧消失荷重	想定荷重の100%以上を安全、30%以下を危険、その他を許容内

安全	許容	危険	最適初期内圧		採用可能範囲						
初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期の検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.05	1.17	
短期(風)の検定比	正圧	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.87	0.88	0.91	0.95
	負圧	0.81	0.82	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.91	0.96
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転有無	有			無							
内圧消失荷重(Pa)	-230	-460	-690	-940	-1220	-1500	-1800	-2140	-2420	-2560	

図20 検討例(規模 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 、膜厚 $100\mu\text{m}$ 、風荷重 $\pm 2000\text{Pa}$ 、積雪荷重 600Pa)

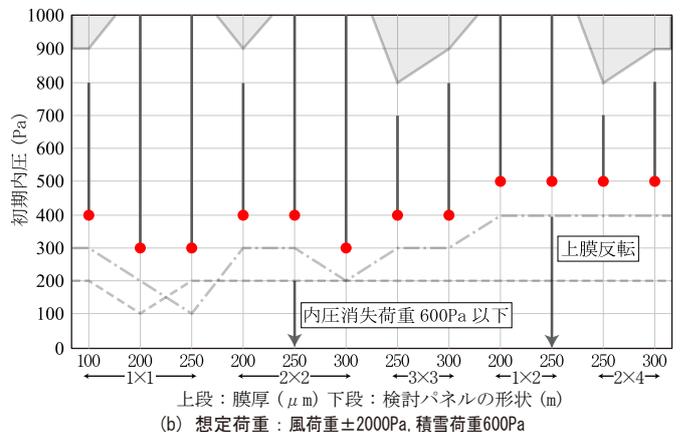
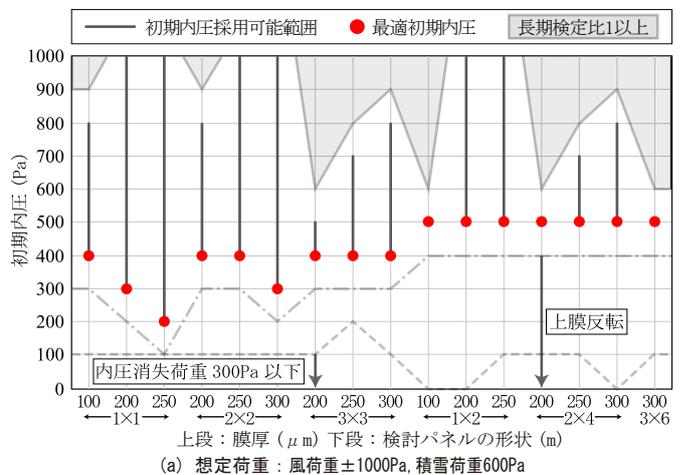


図21 初期内圧の検討結果

造の実用化を目的に、密閉型特有の留意点を多角的に考慮した構造設計フロー、及び適切な内圧設定手法を提案した。

構造設計フローでは、長期許容応力度、積雪・風荷重に対する短期許容応力度の検討を行い、加えて密閉型特有の挙動である負圧荷重時における内圧消失の回避、及び積雪偏荷重時の載荷側膜面の反転を許容しないことによる進行性ボンディングの回避等についても考慮した。

以上の構造設計フローに則り、6種類のパネルサイズ、4種類の膜厚、積雪荷重600Pa及び±1,000Pa、±2,000Paの風荷重に対して、本構造の適切な初期内圧量を表により簡単に選定する手法を提案した。なお、本報で設定した設計クライテリアは一案を示すものであり、建物形状の特殊性や要求性能に応じて設計者の判断が必要となることは言うまでもない。しかしながら、設計初期時にパネル規模や必要内圧及び

加圧装置の仕様を決定する上では有効な手法と考える。

密閉型レンズ状二重空気膜構造は、定圧型に比べて剛性が高いため力学的にも優れ、また定圧型のように機械的に圧力を制御する必要がない合理的でパッシブな構造システムである。実際に、施工時とエアリークに対応する送風設備の設置のみで運用が可能となり、かつ維持管理が容易なため、コストダウンも可能となる有効なシステムと考えられる。今後は、多雪地域におけるの検討など荷重条件の違い、屋根勾配の影響など広範囲に展開する予定である。

謝辞

論文作成に協力頂いた日本大学理工学部空間構造デザイン研究室の中園崇仁氏、及び同研究室の卒業生に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 丹野吉雄, 岡田章, 深尾康三, 林田英俊, 岩佐義輝, 木原貞美: 大規模空気膜構造の内圧制御下における実挙動に関する研究(その1) 東京ドームの内圧実験及び強風時の挙動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B分冊, pp.1203-1204, 1989.7
- [2] 進藤隆太, 岡田章, 宮里直也, 廣石秀造, 与那嶺仁志: ETFE フィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 - 密閉型と定圧型の比較及び密閉型の構造設計フローの提案 -, 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol.90, pp.297-300, 2020.03
- [3] A.Okada, Y.Fukao : An Approach to Internal Pressure Control of Low-profile Cable-reinforced Air-supported Structures, Proc. of IASS Symp.(Osaka) Vol.2, pp.325-332, 1986.9
- [4] TensiNet ETFE Working Group, DESIGN RECOMMENDATIONS FOR ETFE FOIL STRUCTURES, 2013
- [5] 日本膜構造協会: ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案), 2006.3
- [6] 建築省告示第1446号, 2017.6.5
- [7] 国土交通省告示第666号, 2017.6.5
- [8] 小野晋, 永井佑季, 神崎聡美, 宮里直也, 岡田章, 斎藤公男: レンズ型二重空気膜構造の強風時の構造挙動について - 動的応答解析手法の提案と風応答に基づく強風時の内圧設定 -, 構造工学論文集, Vol.56B, pp.521-526, 2010.3
- [9] 榎紀佳, 岡田章, 宮里直也, 城一祐樹, 廣石秀造, 斎藤公男: レンズ型空気膜構造の内圧制御手法に関する基礎的研究(その2) 強風時の動的挙動に基づく最適内圧設定手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.1061-1062, 2013.7
- [10] 正木佳代子, 河端昌也, 森山史朗: 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分冊, pp.941-942, 2003.7
- [11] 森山史朗, 河端昌也, 正木佳代子: ETFE フィルムの弾塑性挙動について, 膜構造研究論文集 2003, No.17, pp.21-26, 2004
- [12] 河端昌也, 森山史朗, 薛学禎: ETFE フィルムを用いた四角形パネルの進行性ボンディング, 膜構造研究論文集 2003, No.17, pp.27-33, 2004
- [13] 河端昌也, 森山史朗: ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造的挙動について, 膜構造研究論文集 2004, No.18, pp.41-46, 2005
- [14] 河端昌也, 森山史朗, 會田裕昌: ETFE フィルムの粘弾性挙動について, 膜構造研究論文集 2005, No.19, pp.1-8, 2006
- [15] 丁乙碩, 河端昌也: ETFE フィルムの粘塑性構成式 - 粘塑性定数の決定と1軸引張の負荷過程に関する検討 -, 膜構造研究論文集 2009, No.23, pp.9-14, 2010
- [16] 吉野達矢, 加藤史朗: ETFE フィルムの粘性特性 -2軸張力場における非線形粘弾性構成方程式 -, 膜構造研究論文集 2015, No.29, pp.13-20, 2016
- [17] 中井政義, 藤井英二, 鈴木康介: ETFE フィルムを用いた密閉型小規模空気膜に関する研究, 膜構造研究論文集 2006, No.19, pp.37-43, 2007
- [18] 河端昌也, 角田啓輔: ボイル・シャルル則とフィルムの弾塑性を考慮した円形工アクションの静的挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol.86, No.784, pp934-944, 2021.6
- [19] 与那嶺仁志, 岡田章, 宮里直也, 廣石秀造, 宮内隼: 材料非線形性を考慮した積雪偏荷重時における挙動と進行性ボンディングに関する検討 -ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 -, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.756, pp.217-225, 2019.2
- [20] 与那嶺仁志, 岡田章, 宮里直也, 廣石秀造, 中村咲瑛子: 材料非線形性を考慮した過大な負圧荷重時と繰り返し荷重時の挙動の把握 -ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 -, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.766, pp.1557-1565, 2019.12
- [21] 與那嶺仁志: 密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造特性の把握と内圧設定手法の提案, 日本大学大学院理工学研究科博士論文, 2020.11.9
- [22] 日本膜構造協会: 膜構造用フィルム・ETFE に係る改正告示の説明会資料, 2017.8.28
- [23] 日本建築センター: 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2015
- [24] 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- [25] 日本建築学会: 雪と建築, 2010
- [26] 日本建築学会: 期限付き建築物設計指針, 2013

EVALUATION ON STRUCTURAL PROPERTIES AND PROPOSAL ON SETTING METHOD OF INTERNAL AIR PRESSURE FOR SEALED TYPE AIR CUSHION STRUCTURES

Hitoshi YONAMINE*¹ Shuzo HIROISHI*⁴
Akira OKADA*² Ryuta SHINDO*⁵
Naoya MIYASATO*³

Summary

The Pneumatic structure is classified into an "Air-supported Structure" represented by Tokyo Dome, and an "Air-inflated Structure" such as beam and arch types. The "Air Cushion Structure" that is the subject of this paper is positioned as a structural system that has both characteristics of Air-supported and Air-inflated structures. The Air cushion structure consists of two layers of film, an enclosing framework and pressurized air between the layers, which makes a highly rigid structural panel system. Here, the pressure difference between outside and inside of the cushion structure is referred to as "Internal Air Pressure".

In designing an air-supported structure, it is common to assume that the internal air-pressure is always maintained at a constant value even when an external load applies (this is called a "Constant Pressure Type"). It is based on the assumption that the time delay of internal air-pressure control by an air supply equipment is so brief that it can be ignored. Following this assumption, it is general that the Air cushion structure is also designed using the constant pressure type assumption. However, the Air cushion structure which is a relatively small scale has a smaller amount of internal air than typical Air-supported structure, and therefore, it would be difficult to achieve the assumption of constant internal pressure, depending on the loading conditions. Furthermore, a sudden change of film stress under a sealed condition (this is called a "Sealed Type") is likely to be predicted due to a change of internal air pressure with the influence of internal air volume change, but its behavior is unclear.

In recent years, the Air cushion structure using ETFE (Ethylene tetrafluoroethylene) film has already been used worldwide in not only large-scale buildings such as stadiums but also small canopies as cladding elements. However, the design method is basically based on the constant pressure type, and as far as the author knows, the design and analysis method considering the sealed type has not been established yet properly.

Based on the background mentioned above, it is necessary to understand the "Sealed Type" structural characteristics of the Air cushion structure and establish an appropriate structural analysis method under snow and wind loads that may occur normally. Besides, it is vital to establish a structural design flow and setting method of an appropriate internal air pressure for the Air cushion structure multidirectionally considering specific attentions of the Sealed type.

Therefore, this paper deals with the following two themes regarding the Sealed type air cushion structures.

- An evaluation method to check behavior of Sealed type air cushion structure is established.
- A structural design flow and a setting method of an appropriate internal air pressure for the Air cushion structure are proposed. In this paper, numerical analysis and experiments were conducted on the Sealed type air cushion structure using the ETFE film that is utilizable in Japan after the revision of the Building Standards in Japan in June 2017.

The study concludes that we proposed "Evaluation method on structural properties for the Sealed type air cushion structure" and "Structural design flow and Setting method of internal air pressure" based on the evaluation method and demonstrated its effectiveness, in order to establish a numerical analysis method that can evaluate fluctuations of internal air pressure and a design method that takes into consideration the Sealed type attentions. In addition, the author confirmed that the Sealed type is a rational and passive structural system, in which an appropriate initial internal pressure is applied at the beginning, and thereafter it is not necessary to mechanically control the pressure under snow and wind loads.

*1 Dr.Eng. Ove Arup & Partners Japan Limited

*2 Dr.Eng.Prof.at Nihon University.Dept.of Architecture

*3 Dr.Eng.Prof.at Nihon University.Dept.of Architecture

*4 Dr.Eng.Assoc.Prof.at Nihon University.Dept.of

*5 M.Eng. AZUSA SEKKEI Co.,Ltd.