

論文の内容の要旨

氏名：與那嶺 仁 志

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：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

レンズ状二重空気膜構造は2枚の膜材を周囲のフレームにより支持し、密閉された空間(2枚の膜材の内部)の圧力を外部の圧力より高くすることにより膜面に張力を与え、剛性を付加することで付加荷重に抵抗する構造システムである。ここで、外部圧力に対する内部圧力の差圧を「内圧」と称す。

一般に、空気膜構造は、東京ドームに代表される一重空気膜構造の「空気支持式」と、ビーム式に代表される「空気膨張式」に大別される。この分類は荷重抵抗形式に基づいたもので、これにより二つの構造形式には構造設計思想や設定される内圧に大きな差異が存在する。前者の「空気支持式」は内圧により荷重を支持する荷重抵抗形式を有し、必要内圧は比較的小さく抑えることが可能となる。例えば東京ドームの常時内圧は1気圧の0.3%程度である。一方、「空気膨張式」の付加荷重時の荷重抵抗形式は、片方の膜面が圧縮力を、もう片方の膜面が引張力をそれぞれ負担することで、曲げ抵抗を示す。この時、圧縮力を負担する膜面にしわ(wrinkling)を発生させない設計思想から、必要とする内圧はほぼ1気圧程度の高い数値となる。本論文で対象とする「レンズ状二重空気膜構造」は、「空気膨張式」のように曲げ抵抗のような性状を有しながらも、「空気支持式」のように内圧により荷重を支持させようという構造であり、両者の性状を併せ持つ構造形式である。本構造における内圧は空気支持式と同程度の低い値に抑えることが通常であるが、これは膜面のしわの発生を許容していることと同意である。

一重空気膜構造の設計においては、付加荷重を受けた際にも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。これは内圧制御の時間的な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。これを踏まえ、従来のレンズ状二重空気膜構造においても、定圧型の仮定を用いて検討が行われることが一般的である。しかし、密閉度の高いレンズ状二重空気膜構造では、一重空気膜構造に比べて内部の空気量が少ないため、状況によっては定圧型の仮定を満足できず、内部体積変化に伴う内圧変動により膜応力の急変も危惧されるが、その性状は不明確であり、これまで十分な検討がなされていない。よって、レンズ状二重空気膜構造においては、内部空気が密閉された状態（これを「密閉型」と称す）の挙動も無視することはできないと考えられる。例えば、強風時のように急激な内圧変動が予想される場合には、内圧制御により内圧一定を保持する仮定は現実的ではない。また大型パネルへの空気供給やパネルを直列に連結した際の内圧制御は、加圧装置の能力に依存するため、積雪時においても内圧を常に一定と仮定することも事実上困難である。また近年では、薄くて軽く、透光性、耐候性に優れるETFE（エチレン・テトラフルオロエチレン共重合樹脂）フィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造が、海外ではスタジアムなどの大規模施設から、建物に付属する小規模キャノピーなどの外装材として多くの事例に採用されているが、設計は基本的に定圧型を前提としており、密閉型を考慮した設計・解析手法は筆者の知る限り確立されていない。

上述のような背景を踏まえ、レンズ状二重空気膜構造における「密閉型」の構造特性を把握すると共に、本構造の安全性と安定性を確保するためには、積雪荷重や風荷重に対する挙動を予測できる構造解析手法をまず確立する必要がある。さらに、積雪等の偏荷重に伴う載荷部の局所的な変位の増大や、雨水等の滞水による進行性ボンディングの発生、暴風時の過大な負圧荷重時に想定される内圧の減少・消失の際の不安定現象の発現等が懸念されるため、それらを多角的に考慮した構造設計フローと適切な内圧設定手法を確立する必要がある。

本論文では、以上の点を踏まえて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に関する以下の2つのテーマを設定し論じた。

- (1) 密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動に対する評価技術の確立
- (2) 密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案

なお、本論文においては、平成29年6月の法改正により国内でも使用することが可能となったETFE

フィルムを用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に対する数値解析および実験を行い、上記テーマについて検証を行った。

本論文は7章より構成されている。

第1章「序論」では、我が国における空気膜構造の建設までの背景や分類、レンズ状二重空気膜構造の現状を概観し、さらに内圧制御方式を分析し、研究目的を明らかにするとともに、論文の全体構成および本論で使用する用語の定義を示した。

第2章「ETFE フィルムおよびレンズ状二重空気膜構造の概説と既往の研究」では、まず ETFE フィルムの材料特性に関する既往の研究を調査、高分子材料である ETFE フィルムに起因する留意点を分析し、現状の法規、ETFE フィルムの材料強度および許容応力度等を整理した。次に内圧制御法とレンズ状二重空気膜構造の設計法、構造解析手法に関わる既往の研究等に対して、調査、整理を行った。最後に、上記に関わる構造問題および課題を整理することにより、本研究の位置付けを明確にした。

第3章「密閉型レンズ状空気膜構造の基本構造特性の把握」では、数値解析を用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造の内部体積量を変化させながら内部体積量と内圧変動の関係性を検証し、密閉型と定圧型それぞれの特徴や力学性状について確認した。さらに、全面正圧載荷、全面負圧載荷および半面正圧載荷における挙動について比較検証を行った。本章では「密閉型」の特性について次のような知見を得た。

- (1) 密閉型の内部体積を大幅に増大させると定圧型と同等の性状となる。この点から大規模な空気膜構造の設計を定圧型で仮定していることの妥当性が得られた。一方、規模を考慮しないで定圧型で設計することは、危険側の評価につながる可能性がある。
- (2) 密閉型は、片側の膜面のみで抵抗する定圧型と比べて剛性も高く、膜応力も小さくできる。

第4章「積雪荷重時における挙動と進行性ボンディングの検討」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積雪荷重時の挙動の把握を目的として、実験および数値解析による比較検証を行った。次に数値解析により、アスペクト比(四角形パネルの辺長比)および載荷範囲をパラメータとして、偏荷重が膜面変位に与える影響の検討、さらに雨水等の滞水による進行性ボンディング現象の挙動について検証した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験と解析結果が概ね一致することを確認し、密閉型の数値解析手法の妥当性を実証した。
- (2) 偏荷重時、アスペクト比が大きいほど内圧増加の少ない「伸びなし変形」に近い性状を示すことを確認した。
- (3) 進行性ボンディング現象が生じる危険がある場合には貯水を考慮した検討が必要であるが、本検討の範囲内ではオーバーフローし、架構の崩壊には至らないことを把握した。

第5章「過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握」では、風荷重を想定した全面負圧載荷を単調載荷した際の挙動、内圧が0となり片側の膜面張力が消失した際の挙動、および膜応力が第1降伏点を超える範囲で繰り返し載荷を行い残留歪が発生した際の挙動等の把握を目的として、実験および数値解析により比較検証を行った。次に数値解析により、初期内圧、アスペクト比、規模および膜厚の違いが及ぼす影響について検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験と解析結果が概ね一致することを確認し、密閉型の数値解析手法の妥当性を実証した。
- (2) 過大な負圧荷重時は、内圧が初期内圧から徐々に下がり、0Pa 状態の維持後、負圧に移行する性状を把握した。
- (3) 非載荷側の膜面張力が抜けても、載荷側の膜面張力は抜けずに曲率を維持し、架構として不安定にならないことを確認した。

第6章「構造設計フローおよび内圧設定手法の提案」では、第3章～第5章で検証した内容を踏まえ、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、密閉型特有の留意点を考慮した多角的な視点での構造設計フローおよび適切な内圧の設定手法の提案を行った。

設計フローでは、まず長期許容応力度、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を考慮し、負圧荷重時における内圧消失の回避、および積雪偏荷重時の載荷側膜面の反転を許容しないことで進行性ポンドイングの回避等を基本方針とした。この設計フローに則り、6種類のパネルサイズ、4種類のフィルム厚、一般的な都市における荷重である積雪荷重 600Pa および ±1000Pa～3000Pa の荷重に対して、密閉型レンズ状二重空気膜構造の適切な初期内圧量を表を用いて簡単に選定する手法を提案した。

最後に、第 7 章において総括を行った。本検討により、内部圧力の変動が評価できる数値解析手法から密閉型の留意点を考慮した設計手法を確立することを目的として、「密閉型レンズ状二重空気膜構造の評価方法」および、これに基づいた「構造設計フローと内圧設定手法」に関して提案し、その有効性を実証した。また、密閉型は最適な初期内圧を与えれば、その後は常時、非常時荷重に対して機械的に圧力をコントロールする必要はない合理的でパッシブな構造システムであることを確認した。