

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 宮 里 直 也

（副査） 教授 中 田 善 久 教授 近 藤 典 夫

特任教授 岡 田 章

1988年に日本最初の大規模屋根付きスタジアムとして「東京ドーム」が実現した。東京ドームの構造は空気支持構造であり、ケーブル補強によりスパン200m級の大規模な架構を可能としたものである。この構造は、軽量で大規模な無柱空間を、構造合理性や施工性の高さに基づきローコストで形成できる利点を有する。しかしながら、内部空間の気密性を保持する必要があることや、外界気象条件や建物の使用状況に応じて内部圧力（内圧）を迅速・適正に常時制御できるシステムの構築が不可欠であることなど、構造の安全性と安定性を確保するための維持管理を含めた特殊な設計課題が存在する。このことから、現在では新規に大規模空気支持構造の計画や建設は、国際的にも行われていない。これに対して、近年、透明性の高い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、レンズ状二重空気膜構造を用いた建築外装材としての利用が特に海外で進み、空気膜構造が再び注目されている。また国内においても、平成29年6月にETFEフィルムに関する告示が施行され、ETFEを用いたレンズ状二重空気膜構造の発展が期待されている。

空気膜構造は、上記東京ドームに採用された一重空気膜構造の「空気支持式」と、ビーム式に代表される「空気膨張式」に大別されるが、本論文で対象とする「レンズ状二重空気膜構造」は、両者の性状を併せ持つ構造と位置付けられる。大気圧よりも高い内部空気の圧力（内圧）により膜自重と付加荷重が支持され、一方では荷重を受けた際には曲げ抵抗の性状を示す比較的新しいコンセプトの構造形式である。

一般的にレンズ状二重空気膜の内圧制御方法は、内部体積量が大きい一重空気膜構造の設計手法を踏襲しており、ある荷重が働いた際にも内圧が常に設定値に維持される「定圧型」の仮定を用いて検討が行われている。これは加圧装置による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。しかし、レンズ状二重空気膜構造のように規模が比較的小さく、特に空気密度の高い構造では内部の空気量が少ないため、状況により体積変化に伴う内圧変化により膜応力の急変が予想される。このような背景のもと、申請者は内部空気が密閉され内部圧力の変動が生ずる「密閉型」としての検討を行っている。本論文では、内圧制御方法に着目し、従来の内圧変動を無視できる定圧型の設計手法ではなく、実状に則したレンズ状二重空気膜構造の密閉型の設計手法を研究対象としている。

申請者は、内部圧力の変動が評価できる数値解析手法を実証し、密閉型を考慮した設計手法および内圧設定手法を確立することを本論文の目的としている。密閉型は最適な初期内圧を与えれば、その後は付加された荷重に対して定圧型のように加圧装置により圧力をコントロールする必要がなくなるため、本構造が合理的でパッシブな構造システムとなる可能性についても言及している。このような視点に立った研究例は今までほとんど見られず、申請者の取り組みは新規性の高い独創的な試みとして高く評価できる。

本論文では、まずレンズ状二重空気膜構造の内圧制御方式、設計・解析手法、設計フローについての既往の研究を概観し、内圧変動の生ずる密閉型の基本的な構造特性を定量的に評価した研究はほとんど見られないことを指摘している。そこで、様々な荷重に対して実験および数値解析による比較検証を行い、内部圧力の変動が評価できる解析手法の妥当性や影響について明らかにしている。また密閉型特有の留意点の分析により、積雪偏荷重に伴う載荷部の局所の変位や進行性ポンディングの発生、さらに暴風時のように過大な負圧荷重時の内圧減少・消失等を取り上げ、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提案し、実用化の一例としての計算手法を検討している。

本論文は、全7章で構成されている。この内、第4章から第5章の成果は、「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ー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ー」および「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ー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ー」として、それぞれ日本建築学会構造系論文集第756号と第766号に掲載されている。

本論文の審査の結果を以下に示す。

第1章「序論」では、我が国における空気膜構造の現状について考察し、特に検討の対象としているレンズ状二重空気膜構造やそれを制御するための内圧制御方式およびETFEフィルムの材料特性を分析するとともに、これらを踏まえたテーマの設定とその意義、論文の構成を示している。

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、ETFEフィルムの材料特性、内圧制御法、レンズ状二重空気膜構造の設計法に関する既往の研究等を整理・分析している。なお、平成29年6月ETFEフィルムに関する告示が施行され、現行ではETFEを用いたレンズ状二重空気膜構造の設計が規定されている。しかし、内圧制御の考え方は「定圧型」が一般的であり、既往の研究では「密閉型」の検討はほとんど行われていないことを示し、本研究の位置付けを明確にしている。

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、密閉型と定圧型の性状の違いを定量的に検討している。具体的には、数値解析を用いてレンズ状二重空気膜構造の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検討を行っている。密閉型は、内部体積を大幅に増大させない限り定圧型と同等の性状が得ることができず、従来の定圧型による空気膜構造の設計法を密閉型に適用することは状況により危険側の評価につながる可能性があること、システムとして定圧型よりも剛性が高く、加圧装置により内圧を高める必要がなく信頼性が高いこと、等の結果を示している。ここで、密閉効果による内圧変動の挙動を評価するために、ポテンシャルベースド流体を用いたレンズ状二重空気膜構造の数値解析モデルを新規に提案しており、工学的有用性を有しているものと高く評価できる。

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、レンズ状二重空気膜構造において留意すべき積雪荷重、特に偏荷重時における構造特性と、雨水等の滞水によって生じる進行性ボンディング現象について検証を行っている。正圧状態で全面、半面載荷試験を行い、第3章で示した解析モデルと実験結果を比較し、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検証している。全面載荷時には荷重が均等にかかるため、内圧増加に伴い剛性が高くなる性状を示すこと、偏荷重時には内部空気が移動することによる内圧増加の少ない「伸びなし変形」に近い性状を示し、貯水による進行性ボンディング現象が生じるが、今回の検討範囲内ではオーバーフローし架構の崩壊に至らないこと、等の結果を示しており、工学的に有用性を有しているものと高く評価できる。

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、実状の風荷重を想定した全面負圧載荷を行い、密閉の影響により内圧が0となり片側の膜張力が消失する際の検証を行っている。加えて、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についても検証し、第4章と同様に負圧載荷においても実験と解析結果が概ね一致することを確認している。特に過大な全面負圧荷重時は、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示すこと、非載荷側の膜面張力が抜けても載荷側膜面の張力は抜けずに曲率を保ち、架構として不安定とならないこと、等の貴重な結果を示しており、工学的に有用性を有しているものと高く評価できる。

第6章「構造設計フローおよび内圧設定手法の提案」では、ETFEフィルムを用いた密閉型のレンズ状二重空気膜構造の実用化を目的として、第3章～第5章で検証した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ている。また、実用化の一例として、一般地域の積雪荷重600Pa、6種類のパネルサイズ、±1000Pa～3000Paの荷重をパラメータとし、上記のフローに則った密閉型レンズ状二重空気膜構造の必要膜厚（4種類から選択）および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ている。この構造設計フローおよび内圧設定手法の提案は、工学的有用性のみならず貴重な構造設計資料となり得る成果であり高く評価できる。

第7章では、本研究の総括を述べると共に、密閉型レンズ状二重空気膜構造の今後検討すべき課題と展望について示している。

以上、本論文はETFEを用いたレンズ状二重空気膜構造を対象として、材料・構造諸元と構造性能の関係について実験、数値解析を用いて分析、整理し、提案した密閉型レンズ状二重空気膜構造について検討を行っており、以下のような独創性が見られる。

- ① 従来の空気支持式の一重空気膜構造の設計手法を踏襲した定圧型ではなく、実状を踏まえて内圧変動を考慮した密閉型の数値解析・設計手法を提案していること。
- ② 内部空気を密閉することで、従来の定圧型に比べて密閉型のレンズ状二重空気膜構造は、荷重に応じて内圧と剛性がパッシブに変更されることで、加圧装置に対する依存度が少ない信頼性の高い形式であることを実証したこと。
- ③ 空気要素としてポテンシャルベースド流体を用いたレンズ状二重空気膜構造の数値解析モデルを提案し、実験結果との比較により、数値解析手法の妥当性を検証していること。
- ④ ETFE フィルムを用いた密閉型の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構造設計フローおよび適切な内圧の設定手法等を提案していること。
- ⑤ 密閉型は最適な初期内圧を与えれば、その後は付加された荷重に対して定圧型のように加圧装置により圧力をコントロールする必要がない、合理的な構造システムの構築が可能であることを実証したこと。

このように、本研究は現在の空気膜構造の範疇では捉えられない新たな構造形式を対象としたものであり、今後の発展も十分に期待される研究と評価でき、今後、レンズ状二重空気膜を用いた建築物の発展に寄与できる有用な知見を示したものと考えます。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するために必要な能力およびその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和2年10月22日