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 －

STUDY OF BEHAVIOR UNDER EXCESSIVE NEGATIVE PRESSURE AND
CYCLIC LOADING CONSIDERING MATERIAL NON-LINEARITY

－ Study on basic mechanical properties of sealed ETFE air cushion －

与那嶺 仁志^{*1}, 岡田 章^{*2}, 宮里直也^{*2}, 廣石秀造^{*3}, 中村 咲瑛子^{*4}*Hitoshi YONAMINE, Akira OKADA, Naoya MIYASATO,
Shuzo HIROISHI and Saeko NAKAMURA*

In general, the cushion structure allows non-linear material behavior until the second yield stress, to be used for structural design because the air supply to the cushion can increase the volume of air even if elongation of membrane caused by residual strain has occurred. However, the behavior of the cushion structure exceeding the first yield point hasn't been studied yet. In order to understand the basic mechanical properties of ETFE Sealed Air Cushion under excessive negative pressure, an experiment and a numerical analysis are conducted. Furthermore, a study of cyclic loading with the material non-linearity is considered.

Keywords : Membrane structures, Sealed air cushion, ETFE film, Excessive Negative Pressure, Cyclic Loading

膜構造, 密閉型空気膜構造, ETFEフィルム, 過大な負圧荷重, 繰り返し荷重

1. はじめに

ETFE (エチレン・テトラフルオロエチレン共重合樹脂) フィルムは薄くて軽く、透光性、耐候性に優れた材料であり、ガラスに変わる材料として近年注目を浴びている。フィルム自体は織布等で補強された膜材料に比べて伸びやすく、温度依存性と材料非線形性を有する材料であるが、「レンズ状二重空気膜構造」を採用し、パネルシステムとして剛性を高めることで、パネルの大型化が可能となる。平成 26 年 10 月の告示 1446 号¹⁾の改正により ETFE 膜構造フィルムが追加され、平成 29 年 6 月の改正²⁾にて材料強度と設計法が位置づけられ、確認申請で扱える材料となった。今後、ETFE フィルムを用いた「レンズ状二重空気膜構造」の使用が増加すると共に、規模と形状の多様化が予想される。

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、2 枚の膜材により密閉された空間 (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外力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。東京ドームを代表とする一重空気膜構造に関する研究では、丹野らによる大規模空気膜構造の実挙動に関する検討³⁾があり、設計においては、外力が働いた際にも内圧が常に設定値に維持される (これを「内圧一定型」と称す) と仮定することが一般的である。従来のレンズ状二重空気膜構造の設計においても、内圧一定型の仮定を用いて検討が行われることが一般的であるが、外装材として用いられるようなレンズ状二重空気膜構造のようにスパンが 2 ～ 4m 程度と規模が比較的小さく、特に密

閉度の高い構造では、一重空気膜構造に比べて内部の空気量が少ないため、状況によっては内圧一定の仮定を満足できず、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。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。

一方、ETFE フィルムは材料非線形性を有する材料であり、約 2% のひずみにおいて降伏 (第 1 降伏) する。その後、12% 付近で再び降伏 (第 2 降伏) し、最大で 350 ～ 450% 程度の大きなひずみを生じながら最終的に破断に至る。海外ではレンズ状二重空気膜構造を採用する際に、第 1 降伏点を超過約 10% のひずみまで許容した設計が行われているが、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り、暴風時のように過大な負圧荷重を上膜が受けた際に、内圧が減少・消失し、下膜の張力消失に伴う不安定現象の発現も懸念される。

以上を踏まえ、岡田らは既報^{4)～6)}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、および設計手法について検討を行っている。また、河端ら^{7)～11)}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¹²⁾は、ETFE フィルムの粘性特性に関する研究、中井ら¹³⁾は、小規模の密閉型空気膜に関する研究、さらに著者らは、これまでに密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動と ETFE フィルムの材料特性に着目し、「積雪荷重」のような正圧時を対象とした密閉型 ETFE レンズ状二重空気膜構造の挙動について報告している¹⁰⁾。しかし、密閉型レンズ状二重空気膜構造を対象として、

^{*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^{*2} 日本大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)^{*3} 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)^{*4} 大成建設 修士 (工学)

Ove Arup & Partners Japan Limited

Prof., Dept. of Architecture, Nihon Univ., Dr.Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Nihon Univ., Dr.Eng.

TAISEI CORPORATION, M.Eng.

第 1 降伏点を超える過大な負圧荷重に対する材料非線形性を考慮した検討は、著者らの知る限り報告されていない。

以上の背景を踏まえて、本報では風荷重を想定した負圧载荷時を対象に、第 1 降伏点を許容する材料非線形性を考慮した密閉型 ETFE レンズ状二重空気膜構造の挙動の把握を目的として、実験及び数値解析により検討を行う。まず全面負圧载荷の単調载荷時の検討を行い、次に、レンズ状二重空気膜構造の内圧が 0 となり、片側の膜張力が消失した際の挙動の確認を行う。さらに、载荷側の膜応力が第 1 降伏点を超える範囲で繰り返し载荷を行い、残留歪が発生した際の挙動について検討を行う。また、数値解析により、初期内圧、アスペクト比、規模及び膜厚の違いが及ぼす影響、及び载荷による ETFE フィルムの塑性化の影響を検討する。なお、本報は文献 15) の内容を修正・加筆したものである。

2. 全面負圧载荷に対する検討

2.1 実験及び数値解析概要

レンズ状二重空気膜構造の膜張力消失時及び繰り返し载荷時の挙動の把握を目的として、矩形平面のレンズ状空気膜の模型を用いた負圧载荷実験を行った。実験概要を Fig. 1 に示す。実験では ETFE フィルム 2 枚を重ねてシワのないように外周を固定し、密閉されたフィルムの間へパネル隅角部から空気を送風することで初期形状を形成した。また、初期内圧は常時に比較的低内圧となるように配慮し、事前の数値解析結果に基づき、最大膜応力が 3MPa (長期許容応力度の 1/2) となる内圧値として 280Pa と設定した。試験体は一辺が 500mm でアスペクト比 1 の矩形平面とし、膜材は ETFE フィルム 100 μm を用いて製作した。载荷はチャンバー内の空気を吸引することによる全面負圧载荷とした。なお、負圧载荷は風荷重を想定しているが、ETFE フィルムの自重が十分に小さいことを考慮し、実験治具の都合から下膜への下向きの载荷により実験を行った。内圧は圧力計に接続したチューブを試験体隅角部より挿入し、測定を行った。

荷重ケースは Fig. 1-c) に示す 3 ケースとした。ここで、「ケース A」は -10,000Pa まで単調载荷したもの、「ケース B」は内圧が 0 となり膜張力が消失した際の挙動の把握を目的として、载荷により内圧が 0 となった時点で载荷を終了し、除荷を行うサイクルを 3 回繰り返し、その後 -10,000Pa まで载荷を行ったもの、「ケース C」は第 1 降伏点を超える範囲での繰り返し载荷時の挙動の把握を目的として、-1,000Pa 以降に除荷を挟んで -1,000Pa 刻みで荷重を -10,000Pa まで増加させたものである。なお、本実験は 6 月に日本大学理工学部駿河台校舎実験室にて、空調により室温管理 (摂氏 22 ~ 25 度) のもと、風、日射の当たらない環境で実施した。また、数値解析に用いた材料特性は、同様の室温環境で得られたものを用いた。

数値解析概要を Fig. 2 に示す。本解析は、レンズ状二重空気膜構造の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) により行っている。解析モデルは膜面相互の接触を考慮し、平面状の 2 枚の膜要素の間に設置した空気要素に初期内圧を与えた後、内部空気量を一定とすることで、密閉型をモデル化した。また、本モデルは等方硬化則、von Mises の降伏条件を用いている¹⁶⁾。膜面の変位は四周の境界高さを 0 として上膜側を正とし、圧力は膜面を押す側を正とした。載

Fig.1 Outline of experiment

Fig.2 Outline of numerical analysis

Fig.3 Relationship of load pressure and displacement(Case A)

Fig.4 Relationship of load pressure and Internal air pressure(Case A)

Fig.5 Relationship between load pressure and maximum membrane stress(Case A)

Fig.6 Relationship of load pressure and displacement(Case B)

Fig.7 Relationship of load pressure and internal air pressure(Case B)

Fig.8 Correlation between internal air pressure and load pressure(Case B)

荷は、実験と同条件の範囲及び荷重ケースで膜面に法線方向の荷重を与えた。なお、実験値との比較のため、数値解析においても下膜への下向きの載荷とした。解析モデルのETFEフィルムの材料特性は、第1降伏点(16MPa)を考慮したバイリニア型により検討を行った。また、ETFEフィルムの自重は荷重の大きさに比べて極めて小さいことから、本検討では考慮していない。なお、本報では数値解析に汎用解析プログラムADINA(Ver. 9.3)を用いた。

2.2 実験及び数値解析結果

2.2.1 ケースA(単調載荷)の結果

Fig. 1-c)のケースAの荷重-膜面変位関係をFig. 3、荷重-内圧関係をFig. 4、荷重-最大膜応力関係をFig. 5に示す。変位は、周辺境界位置の水平面を基準とした値である。最大膜応力は下膜中央部のミーゼス応力である。また、本実験では等分布による載荷のため、片面の各測定点において傾向が一致し、最大変位が中央で発生したため、中央変位のみを抽出して考察する。Fig. 3、4における実験値と解析値の差異は、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埋め込んだことで、当該部分に局所的に上方向の膨らみが生じ、上膜の表面積と内部体積が大きくなったことが原因と考えられる。Fig. 3より、実験および数値解析共に、全面負圧載荷において、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下方向へ変位する性状が把握された。ただし、上膜の初期値に実験値と解析値で差異が見られる。しかし、実験値と解析値での変位の挙動はほぼ一致している。数値解析において上下膜のデプス(上下膜の中央の鉛直方向距離)は、初期形状時は約45mmであり、-10,000Pa載荷時には約50mmであった。このことから、上

膜と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。

Fig. 4より、内圧は徐々に減少し、実験では荷重約-1,500Paから-6,000Paの間で0Paの状態を保った後に負圧へ移行する性状を示した。また、内圧が負圧へ移行するタイミングが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のチューブを取り付けたことが原因で生じた、試験体の誤差と考えられる。しかし、実験値と解析値での変位の挙動はほぼ一致することが確認された。数値解析では荷重約-1,500Paにおいて内圧が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、実験でもほぼ同様な挙動を示した。

以上のことから、本構造では、下膜に下向きの分布荷重が加わる場合、荷重の増加に伴い、以下のように性状が変化するものと推定できる。①外力が小さい範囲では、膜内部の空気の体積が増加し内圧が減少し、これに伴い上膜張力の減少と下膜張力の増加が生じる。②さらに荷重が増加すると、内部体積はさらに増加し、内圧がゼロ状態に達する。この時、下膜張力は増加する一方で、上膜は初期の取付時の状態になる。本実験の場合には、上膜張力は消失することになる。③さらに荷重が増加すると、内圧は負圧へ移行し、上膜は反転すると共に張力が発生する。結果として上膜、下膜ともに引張力が生じ、釣合状態(安定状態)が形成される。

Fig. 5に、数値解析における荷重-最大膜応力関係を示す。最大膜応力が第1降伏点の16MPaとなる荷重-3,220Pa時に膜材が降伏し、

Fig.9 Relationship of load pressure and displacement(Case C)

Fig.10 Relationship of load pressure and internal air pressure(Case C)

Fig.11 Correlation between internal air pressure and load pressure(Case C)

Fig. 3 の変位の結果と照らし合わせても挙動に変化が生じていることが把握された。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、デプス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。本報の解析結果では、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。

2.2.2 ケース B (張力消失時の挙動の把握) の結果

ケース B の荷重 - 膜面鉛直変位関係を Fig. 6 に、荷重 - 内圧関係を Fig. 7、内圧と外力の相関関係を Fig. 8 に示す。Fig. 6、7 に示すように、変位・内圧共に包絡線は Fig. 3、4 のケース A と概ね同様の経路を辿る事が確認された。実験及び解析共に、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 Fig. 8 のように 0Pa から初期内圧 280Pa 近くまで戻る性状を示した。実験では載荷毎に若干の内圧の低下が確認されたが、これは試験体の若干の空気漏れが要因と考えられる。ケース A と同様に、内圧 0Pa 時において、載荷面 (下膜) の反対側の膜面 (上膜) は曲面形状が保たれず、膜面がフラット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。また上膜と下膜は、初期形状のデプスをほぼ保ちながら変形する性状も把握された。

2.2.3 ケース C (第 1 降伏点を超える範囲での繰返し載荷) の結果

ケース C の荷重 - 膜面変位及び内圧関係を Fig. 9 に、荷重 - 内圧関係を Fig. 10、内圧と外力の相関関係を Fig. 11 に示す。ケース C の実験では -1,000Pa 以降に除荷を挟んで -1,000Pa 刻みで荷重を -10,000Pa まで繰返し増加させたが、Fig. 9、10 より載荷により徐々に変位が進行し、それに伴い内圧が減少する傾向となり、変位・内圧共に包絡線は概ね Fig. 3、4 のケース A と同様の経路を辿る事が確認された。

Fig. 11 の実験結果において、荷重が 0 ～ 約 -3,000Pa の範囲では、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、除荷後はほぼ初期状態に戻る性状を示した。これは膜応力が弾性範囲内であったためと考えられる。また、荷重が約 -3,000 ～ -6,000Pa の範囲では、膜材料が降伏し、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が 0Pa となった。-6,000Pa 以降は内圧値が 0Pa を保つ性状を示した後、載荷に伴い内圧が負圧へ増加する傾向が認められた。本検討の範囲内においては内圧 0Pa 時は架構が不安定とならないことが確認され、また内圧値が負とな

Table1 Numerical analysis case

Parameter	Internal pressure (Pa)	Aspect ratio	Panel size (mm)	Membrane thickness (μ m)
Internal pressure	60	1	500 × 500	100
	150			
	280			
	420			
	580			
	760			
Aspect ratio (Longitudinal length / Short-side length)	Internal pressure at which the ratio of depth and span is 0.1	1	500 × 500	100
		1.1	500 × 550	
		1.2	500 × 600	
		1.5	500 × 750	
		2	500 × 1000	
		3	500 × 1500	
Panel size and membrane thickness	Internal pressure that maximum membrane stress is 3MPa when the form shaped	1	1000 × 1000	100
				200
				250
		1	2000 × 2000	300
				100
				200

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 以下において第 1 降伏点を超える範囲での繰返し載荷においても架構が不安定とは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 載荷・除荷後には残留歪は残るものの、今回の検討範囲内では残留歪の影響により崩壊には至らないことが確認された。

3. 初期内圧・アスペクト比・規模及び膜厚の違いに関する検討

3.1 数値解析概要

実際に用いられるレンズ状二重空気膜構造においては、アスペクト比 (長辺と短辺の比) や初期内圧、パネル規模などが異なることが想定される。そのため、前章までのアスペクト比 1、初期内圧 280Pa 時を対象とした検討に加え、初期内圧、アスペクト比、パネル規模及び膜厚などの諸元が及ぼす影響の把握を目的として、数値解析による比較を行った。検討ケースを Table1 に示す。数値解析には Fig. 2 と同様の解析モデルを用いて、平面状の 2 枚の膜要素の間に設置した空気要素に初期内圧を与えた後、内部空気量を一定とすることで、密閉型をモデル化した。以下に、初期内圧、アスペクト比、パネル規模、膜厚をパラメータとした検討結果を示す。荷重は、

Fig.12 Numerical analysis result (Different initial internal pressure)

Fig.13 Numerical analysis result (Different aspect ratio)

Fig. 1-c) のケース A と同様に、全面負圧荷重を単調載荷した。

3.2 初期内圧による比較

初期内圧をパラメータとした数値解析結果を Fig. 12 に示す。初期内圧は事前の数値解析結果に基づき、最大膜応力が 1MPa となる 60Pa から長期許容応力度である 7MPa となる 960Pa まで、応力度が 1MPa 刻みで変化するように増加させて比較を行った。

Fig. 12-a) の荷重 - 内圧関係より、いずれの初期内圧においても、内圧が初期内圧から徐々に下がり、0Pa を保った後に負圧へ移行する性状を示し、2 章の荷重ケース A における単調載荷の結果と同様の性状を示すことが確認された。

Fig. 12-c) の最大膜応力 - 荷重関係より、荷重が約 -3,200Pa で最大膜応力は、第 1 降伏点である 16MPa 程度となり、載荷面の下膜の変位は概ね 38mm 程度となることが把握された。この傾向は初期内圧によらず、ほぼ一定である。また、どの内圧においても下膜に載荷されることで下膜が最初に弾性に伸び、レンズ状二重空気膜の内部空気が膨張して内圧が低下する傾向が見られた。一方、上膜は載荷されていないため、変位は弾性範囲において下膜とは異なる挙動を示す。すなわち、初期内圧を上昇させると、上膜の張力が消失する荷重及び上膜の形状がフラットになる荷重を、増大させるために有効であることが確認された。第 1 降伏点を超える荷重以降は変位が増大し、剛性が弾性範囲時よりも小さくなる性状を示したが、下膜、上膜ともにそれぞれ変形が進行している。これはレンズ状二重空気膜が密閉されることで、内圧が正圧から負圧に移行してもレンズ状二重空気膜は一体として挙動し、下膜の変位に上膜が追従していると考えられる。また、-8,000Pa 載荷した際の内圧は、初期内

圧 60Pa で -2,767Pa、初期内圧 960Pa で -936Pa となり、それぞれ初期内圧から 2,827Pa、1,896Pa だけ減少しており、初期内圧の増加により内圧の減少量が小さくなることが把握された。なお、本報のように 2 枚の ETFE を平らに重ねた状態から膨らませる方法でレンズ状二重空気膜を形成する場合、膜応力が第 1 降伏点の約半分である 7MPa を長期許容応力として設定すると、スパン 500mm に対しライズ・スパン比約 0.05 までが形成可能な限界となる。これ以上のライズでの検討を行う場合は、立体裁断が必要となる。

3.3 アスペクト比による比較

アスペクト比をパラメータとした数値解析結果を Fig. 13 に示す。アスペクト比は、1、1.1、1.2、1.5、2、3、4、8(長辺 L=500、550、600、750、1,000、1,500、2,000、4,000mm) の計 8 類を対象とした。本節では短辺方向 (L=500mm) を基準にデプス D を一定とし、全てのアスペクト比で初期内圧時にデプス・スパン比 (D/L) が 0.1 となるように初期形状を形成した。

Fig. 13-a) 荷重 - 内圧関係及び Fig. 13-c) 荷重 - 最大膜応力関係より、アスペクト比が 1 の場合のみ初期形状時の内圧と応力度が高いことが確認された。また、アスペクト比が 1.1 以上の場合、アスペクト比 1 に比べて初期内圧を低く抑えられるものの、外力が付加された際に早い段階で内圧が 0Pa となり、小さい荷重で第 1 降伏点に達することが把握された。これはアスペクト比 1 では 2 方向に均等な膜面剛性を持つため、載荷後の膜応力が 2 方向に分配され、膜応力の増大が他のアスペクト比に比べて小さくなったことが要因と考えられる。また Fig. 13-b) 荷重 - 変位結果より、アスペクト比が大きくなるほど変位は大きくなり、今回の検討範囲内ではアスペク

Fig.14 Numerical analysis result (Scale : 1000mm × 1000mm)

Fig.15 Numerical analysis result (Scale : 2000mm × 2000mm)

ト比 1.5 以上の場合、空気膜内圧・膜面変位・最大膜応力は概ね同等の値を示すことが把握された。

3.4 パネル規模及び膜厚による比較

パネル規模及び膜厚をパラメータとした数値解析結果を Fig. 14 及び Fig. 15 に示す。載荷時の最大膜応力が 22MPa となるまでの結果を示す。なお、事前の数値解析結果に基づき、形状形成時の最大膜応力が 3MPa となる内圧値を初期内圧として初期形状を形成した。膜厚は、一般的に用いられる 100, 200, 250, 300 μm の計 4 種類とした。Fig. 14 に、パネル規模 1000mm × 1000mm の結果を示す。Fig. 14-a) 荷重 - 内圧関係及び Fig. 14-c) 荷重 - 最大膜応力関係より、膜厚が増加することで内圧減少量が小さくなり、最大膜応力も抑えられることが確認された。また、最大膜応力は膜厚 100 μm で荷重約 -1,700Pa 時に第 1 降伏点の 16MPa となり、膜厚 200 μm では約 -3,400Pa、膜厚 300 μm で約 -5,000Pa と、厚みと降伏荷重がほぼ比例関係にあることが把握された。一方、Fig. 14-b) 荷重 - 変位結果より、膜厚の増加により膜面変位量も小さくなり剛性が大きくなっている。これも膜厚自体の剛性の相違によるものと考えられるが、内圧もそれぞれ異なるため初期形状の違いによる剛性の違いの影響も考えられる。

Fig. 15 に、パネル規模を 2000mm × 2000mm とした場合の結果を示す。Fig. 14 と比較すると、例えば膜厚 300 μm 、パネル規模 1000mm × 1000mm では、荷重約 -5,000Pa 時に第 1 降伏点に達するが、パネル規模 2000mm × 2000mm では同状態に達する荷重は半分の約 -2,500Pa であった。また、Fig. 15-c) より、第 1 降伏点の 16MPa に至る荷重は膜厚 100 μm で約 -800Pa、膜厚 200 μm で約 -1,600Pa、膜

厚 300 μm で約 -2,500Pa となり、パネル規模を大きくした場合においても、厚みと第 1 降伏点に至る荷重は比例関係となることが把握された。

Fig. 14-b) 及び Fig. 15-b) より、パネル規模が大きくなることで変位が増加し、第 1 降伏点に達する荷重に違いが見られたものの、挙動の傾向は規模が異なってもほぼ同じであった。また、Fig. 14-a) 及び Fig. 15-a) より、内圧もパネル規模の増加に伴い、早期に減少し負圧に移行する傾向が見られたが、挙動の傾向はほぼ同じであった。

4. まとめ

本報では、密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動と ETFE フィルムの材料特性に着目し、「負圧荷重」時に、第 1 降伏点を超える応力を許容することを目的として、材料非線形を考慮した密閉型 ETFE レンズ状二重空気膜構造の挙動を把握するために、実験及び数値解析により検討を行った。さらに初期内圧、アスペクト比、パネル規模及び膜厚の違いが及ぼす影響を、数値解析により検討した。本報で得られた知見を以下に示す。

- 全面負圧単調載荷においては、デプスをほぼ一定に保ちながら変位が進行する性状を確認した。
- 負圧載荷時は内圧が初期内圧から徐々に低下し、0Pa 状態を一定期間維持した後、負圧に移行する性状を把握した。
- 載荷面と反対側の膜面張力が消失し、形状がフラットな状態となっても、載荷面は張力を維持した状態で曲率を保ち架構として不安定とらないことが把握された。

・繰り返し载荷により、残留歪の発生と共に初期内圧が低下するという密閉型特有の性状が見られたが、本検討の範囲内では不安定挙動は認められなかった。

また、数値解析により、

- ・初期内圧を上昇させることにより、非载荷側の上膜の張力が消失する荷重及び上膜の形状がフラットになる荷重が、増大する傾向が確認された。しかし、初期内圧の大きさに関わらず、下膜が第1降伏点に達する荷重は一定であり、これに伴う下膜の変位もほぼ一定となった。
- ・アスペクト比1.5以降は空気膜内圧、膜面変位、最大膜応力は概ね同等の値を示すことから、2方向から1方向への荷重抵抗の変化が示された。
- ・パネル規模が異なっても、膜厚を厚くすることで内圧減少量が小さくなり、剛性が大きくなることが示された。弾性範囲においては、概ね膜厚と第1降伏点に至る荷重が比例関係にあることが把握された。

今後、崩壊系を確認するために、ETFE フィルムの第2降伏点（約22MPa）を考慮したトリニニア型での数値解析を用いた検討や、強風下での膜面と内圧変動の動的な検討等を行う予定である。また、膜張力消失時の膜のばたつきに関する検討においては、負圧荷重により非载荷側の膜面が反転する際の動的挙動の検討も必要と考えられる。

謝辞

論文の作成に協力頂いた瀧澤峰義氏、進藤隆太氏をはじめとする日本大学理工学部建築学科空間構造デザイン研究室の学生各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ministry of Construction Notification Number 1446, 2004. 5. 31
建設省告示第1446号, 2004. 5. 31
- 2) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Notification Number 666, 2017.6.5
国土交通省告示第666号, 2017. 6. 5
- 3) Tanno,Y. Okada,A. Fukao,K. Hayashida,H. Iwasa,Y. and Kihara,S.: Actual Structural Behavior under Internal Pressure Control of Large-Scale Air-Supported Structure (Part I), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B, Structure I, pp.1203-1204, 1989.7 (in Japanese)
丹野吉雄, 岡田章, 深尾康三, 林田英俊, 岩佐義輝, 木原碩美: 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, 構造 I, pp. 1203-1204, 1989. 7
- 4) Ono,S. Nagai,Y. Kanzaki,S. Miyasato,N. Okada,A. Saitoh,M.: ON STRUCTURAL BEHAVIOR OF LENTICULAR PNEUMATIC STRUCTURES UNDER STRONG WINDS -Proposal of dynamic response analytical method and setting of internal air-pressure under winds-, Journal of Structural Engineering, Vol.56B, pp.521-526, 2010.3 (in Japanese)
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. 1. 56B, pp. 521-526, 2010. 3
- 5) Enoki,N. Okada,A. Miyasato,N. Hiroishi,S. Saitoh,M. Jouichi,Y.: Basic Study on Control Method of Internal Air-Pressure for Lenticular Pneumatic Structure (Part2)Optimum Setting Method of Internal Air-Pressure Based on Dynamic Behavior Under Winds,

Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure I, pp.1061-1062, 2013.7 (in Japanese)
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

- 6) Yoshino,S. Yonamine,H. Okada,A. Miyasato,N. Hiroishi,S. Shinotsuka,K. and Miyauchi,J.: EVALUATION OF RESPONSE UNDER STRONG WINDS AND PROPOSAL OF SETTING METHOD OF INTERNAL AIR-PRESSURE FOR LENTICULAR PNEUMATIC STRUCTURE, Journal of Structure and Construction Engineering(Transaction of AIJ), Vol.82, No.742, pp.1905-1913, 2017.12 (in Japanese)
吉野誠一, 与那嶺仁志, 岡田章, 宮里直也, 廣石秀造, 篠塚浩太, 宮内隼: 矩形平面を有するレンズ型二重空気膜構造に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 742, pp. 1905-1913, 2017. 12
- 7) Masaki,K. Kawabata,M. and Moriyama,F.: A Fundamental Study of Material and Structural Characteristics on ETFE, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B, Structure I, pp.941-942, 2003.7 (in Japanese)
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 分冊, 構造 I, pp. 941-942, 2003. 7
- 8) Moriyama,F. Kawabata,M. and Masaki,K.: Elasto-plastic characteristic of ETFE film, Research Report on Membrane Structures 2003, No.17, pp.21-26, 2004 (in Japanese)
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
- 9) Kawabata,M. Moriyama,S.: Study on Strain Velocity Dependency and Structural Characteristics of ETFE films, Research Report on Membrane Structures 2004, No.18, pp.41-46, 2005 (in Japanese)
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, pp41-46, 2005
- 10) Kawabata,M. Moriyama,F. and Aida,H.: Viscoelastic characteristic of ETFE film, Research Report on Membrane Structures 2005, No.19, pp.1-8, 2006 (in Japanese)
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, pp1-8, 2006
- 11) Jeong,E. and Kawabata,M.: Visco-plastic Constitutive Equation of ETFE film - Study on the determination of viscoplastic constant and the loading path under uniaxial tensile -, Research Report on Membrane Structures 2009, No.23, pp.9-14, 2010 (in Japanese)
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
- 12) Yoshino,T. Kato,S.: Viscous characteristics of ETFE Film sheet - A non-linear viscoelastic constitutive equation under biaxial tensions -, Research Report on Membrane Structures 2015, No.29, pp.13-20, 2016 (in Japanese)
吉野達矢, 加藤史郎: 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
- 13) Nakai,M. Fujii,E. and Suzuki,Y.: Studies on Air Cushion Membranes Using ETFE Films, Research Report on Membrane Structures, 2006 (in Japanese)
中井政義, 藤井英二, 鈴木庸介: 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
- 14) Yonamine,H. Okada,A. Miyasato,N. Hiroishi,S. and Miyauchi,J.: STUDY OF BEHAVIOR UNDER PARTIAL DISTRIBUTED SNOW LOAD AND PROGRESSIVE PONDING CONSIDERING MATERIAL NON-LINEARITY, Journal of Structure and Construction Engineering(Transaction of AIJ), Vol.84, No.756, pp.217-225, 2019.2 (in Japanese)
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ポンドイングに関する検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 84, No. 756, pp. 217-225, 2019. 2
- 15) Okada,A. Miyasato,N. Hiroishi,S. Yonamine,H. Nakamura,S.

Takizawa,M. and Shindo,R.: Study of Basic Mechanical Properties of Scaled ETFE Air Cushion(Part1)~(Part3), Architectural Institute of Japan, Structure I , pp.1099-1104, 2018.9 (in Japanese)

岡田章, 宮里直也, 廣石秀造, 与那嶺仁志, 中村咲瑛子, 瀧澤峰義, 進藤隆太: 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(その1)~(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.1099-1104, 2018.9

- 16) Yoshino,T. Segawa,S. and Oda,K.: MATERIAL CHARACTERISTICS OF ETFE FILM UNDER THE BI-AXIAL TENSION AND STRESS-DISPLACEMENT ANALYSIS CONSIDERING THE ELASTO-PLASTIC CHARACTERISTICS, Research Report on Membrane Structures 2004, No.18, pp.41-46, 2005 (in Japanese)

吉野達矢, 瀬川信哉, 小田憲史: ETFE フィルムの2軸引張特性と弾塑性応力・変形解析, 膜構造研究論文集 2004, No.18, pp41-46, 2005

STUDY OF BEHAVIOR UNDER EXCESSIVE NEGATIVE PRESSURE AND CYCLIC LOADING CONSIDERING MATERIAL NON-LINEARITY

– Study on basic mechanical properties of sealed ETFE air cushion –

Hitoshi YONAMINE^{*1}, *Akira OKADA*^{*2}, *Naoya MIYASATO*^{*2},
Shuzo HIROISHI^{*3} and *Saeko NAKAMURA*^{*4}

^{*1} Ove Arup & Partners Japan Limited

^{*2} Prof., Dept. of Architecture, Nihon Univ., Dr.Eng.

^{*3} Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Nihon Univ., Dr.Eng.

^{*4} TAISEI CORPORATION, M.Eng.

In recent years, the adoption of the rectangular ETFE cushion as a roof cladding element has become widespread. It is anticipated that this trend will continue and that the size and shape of the panels made of ETFE will become more diverse. The cushion structure allows non-linear material behavior until the second yield stress, because the supply of air to the cushion can increase the volume of air even if elongation of membrane caused by residual strain has occurred. However, the behavior of the cushion structure exceeding the 1st yield point hasn't been studied and investigated yet.

In this paper, the behavior of ETFE sealed air cushion under Excessive Negative Pressure and Cyclic Loading was examined. As a result of comparative studies using experiments and numerical analyses,

- It was confirmed that there was a trend that both the upper and lower membranes deformed almost equally keeping the initial cushion depth under full monotonous negative pressures.
- The internal pressure gradually decreased and showed a tendency to become negative after initially maintaining zero Pa under full negative pressures.
- Although the residual strain remained in the membrane and the initial internal pressure reduced due to the material non-linearity after the excessive load was applied, it was confirmed that the system did not collapse within the scope of this study.
- Under cyclic loading, the residual strain occurred and the initial internal pressure decreased which is a typical characteristic of the sealed air cushion. However, it was confirmed that the system did not collapse within the scope of this study.

In addition, because of numerical analyses,

- By increasing the initial internal pressure, it was able to delay the disappearance of the tension of the upper membrane on the unloaded side and to delay the deformation of the upper membrane into a flat shape. However, regardless of the difference in the initial internal pressure, the load at which the lower membrane reached the first yield point was constant, and the displacement of the lower membrane associated therewith was almost constant.
- When the aspect ratio was 1.5 or more, the results of internal air pressure of the cushion, membrane displacement and maximum membrane stress showed approximately equivalent values.
- Even if the panel scale was different, the decrease in internal pressure could be reduced and the cushion stiffness was increased by using thicker film. In the elastic range, it was confirmed that the relationship between the film thickness and the load to the first yield point were approximately proportional.

(2019年4月10日原稿受理, 2019年8月21日採用決定)