

衝撃負圧力を受ける膨張膜の収縮運動について

(株)総合技術コンサルタント 正会員 田中宏明
大同工業大学工学部 正会員 水澤富作

1. はじめに 柔軟で軽量の膜は、スタジアム等の Roof、消波用フレキシブルマウンド、オイルフェンスなどとして用いられている。最近では、建設経費削減のため、展開して一度使用した構造物を再度回収・収納して構造物を再利用する試みもなされているので、膜構造の膨張展開と収縮運動のメカニズムを知ることは設計上重要な課題である。著者らは、空気圧を受ける膜の膨張挙動について検討を行い、膜の膨張展開のメカニズムを明らかにしている。しかしながら、空気圧を受ける超弾性膜の収縮運動のメカニズムに関する研究は、さほど見受けられないように思われる。本文では、アイソパラメトリック膜要素と Viscous Relaxation 法を用いて、膨張した半球膜に衝撃的にステップ圧力を作用させ収縮させた場合の収縮運動のメカニズムについて検討を行っている。

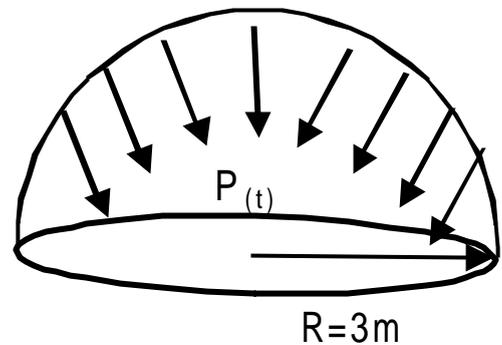


図 - 1 膨張した半球膜

2. 解析手法 膜は3次元有限変位弾性理論と仮想仕事の原理に基づくアイソパラメトリック・膜要素で離散化し、Viscous Relaxation 法を用いて膨張膜の初期つり合い形状解析を行ったのち、Newmark の法により動的な非線形応答解析を行っている。ここで、次のような解析仮定を設けている。(1) 膜の厚さは非常に薄く、曲げ剛性を無視し、平面応力状態を仮定する。(2) 面内引張り応力のみには抵抗し、面内圧縮応力には抵抗しない。(3) 有限変位と有限ひずみを考慮する。(4) 膜の材料は硫化ゴムのような超弾性材料とする。(5) 減衰の影響は無視する。時間 $t + \Delta t$ における運動方程式は、増分反復法において増分値を時間ステップで置き換えれば、膜要素の非線形運動方程式として、次式で表せる。

$$[M] \{ \ddot{u} \} + [K_T] \{ \Delta u \} = \{ P \} - \{ F \} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで $[K_T]$ = 接線剛性マトリックス、 $[M]$ = 質量マトリックス、 $\{ \Delta u \}$ = 増分変位ベクトル、 $\{ \ddot{u} \}$ = 加速度ベクトル、 $\{ P \}$ = 外力ベクトル、 $\{ F \}$ = 内力ベクトルである。

膜の外側からかかる変動圧力はステップ圧力を仮定し、次式で与えられる。 $P_t = aP_0(t-t_0) \dots \dots (2)$

ここで、 P_0 は初期圧力、 $a = P_t/P_0$ である。

3. 数値計算例と考察 ここでは、図 - 1 に示すような、衝撃圧力を受ける周辺が固定された膨張半球形膜の収縮運動のメカニズムについて検討している。計算条件は半球形膜の半径 $R_0=3m$ 、初期膜厚 $h_0=3mm$ 、膜の材料を超弾性材料(Mooney-Rivlin 材)の定数は $C_1=110KN/m^2$ 、 $C_2=38 KN/m^2$ 、密度は $52.0(kgsec^2/m^4)$ に仮定している。また、半球膜は圧力 $0.144kPa$ で膨張しているものとする。要素分割は対称性を考慮して 1/2 領域のみを 8 節点アイソパラメトリック膜要素で 16 分割に離散化している。図 2 は、膨張した半球膜に衝撃的にステップ負圧力を作用させ収縮させた場合の変位応答が示してある。こ

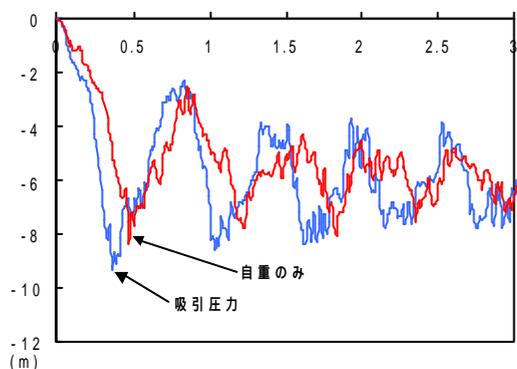


図 2 半球膜の中心点の変位応答

キーワード：衝撃圧力, 超弾性, 収縮運動, 半球膜

ここで、衝撃的に減圧させ自重のみで収縮する場合（赤線）と、衝撃的に吸引力を作用させ収縮する場合（青線）の2パターンで解析をしている。これより、収縮方法にかかわらずほぼ同一時刻で収縮している。図3には中央断面における各時刻での収縮運動が示してある。A)は自重のみで収縮する場合が示してあり、B)には吸引力で収縮する場合が示してある。これより、自重のみで収縮する場合には、内圧が急激に下がると、膜全体がしぼみ始め、膜全体がドーナツ状に変形し中央部が急激に収縮し、自重のみによるつり合い形に移行する。この収縮挙動は、膨張展開挙動とまったく逆経路をたどっている。一方、吸引力により収縮する場合には、内圧が急激に下がると、膜全体がしぼみ始めると同時に、中央部に下凸の局所変形が生じる。時刻が経過すると、自重による収縮挙動とは異なり、固定辺周辺部から下向きに展開していき、さらに時刻が経過すると負圧力により、中央部が固定辺周辺部より先に展開し、最後に固定辺周辺部が展開する。

次に、衝撃的に減圧させ自重のみで収縮する場合の収縮運動に与える膜材料の影響が示してある。ここで、弾性材料の材料定数は、ヤング係数 $E = 4903\text{kPa}$, ポアソン比 $\nu = 0.45$ と仮定している。図4は、半球膜の変位応答に与える膜材料の影響を示している。青線が超弾性材料を示し、赤線が弾性材料を示している。また図5には、各時刻での収縮運動図が示してある。これより、収縮時間は超弾性材料と比較すると、中央部と固定辺周辺部の両方に局所変形が生じるので、短時間で収縮する。膜材料による収縮挙動の違いは、超弾性材料の場合は膜全体がしぼみ始め、急激に中心部が収縮していくのに対し、弾性材料では、中心部から収縮し始め、固定辺周辺部を順次巻き込みながら収縮していく。このように、超弾性膜と弾性膜では収縮挙動が異なっている。

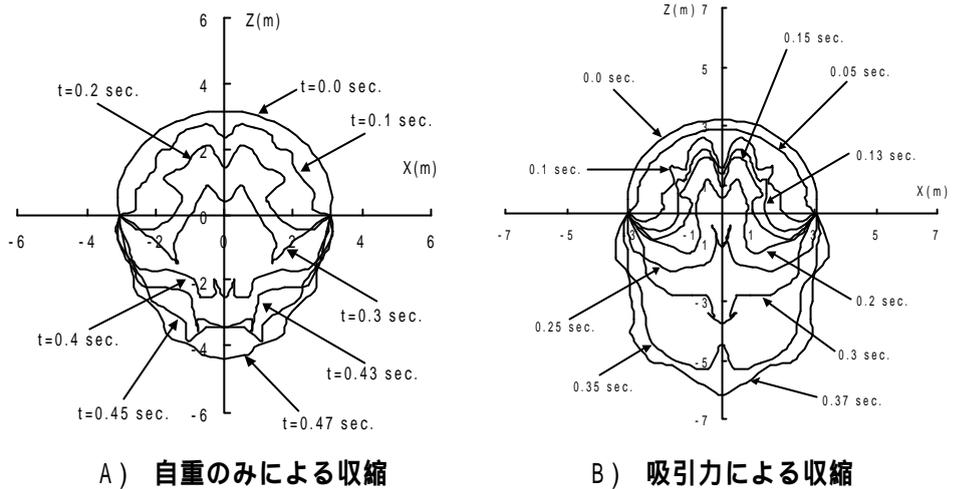


図 3 中央断面における各時刻での収縮運動図

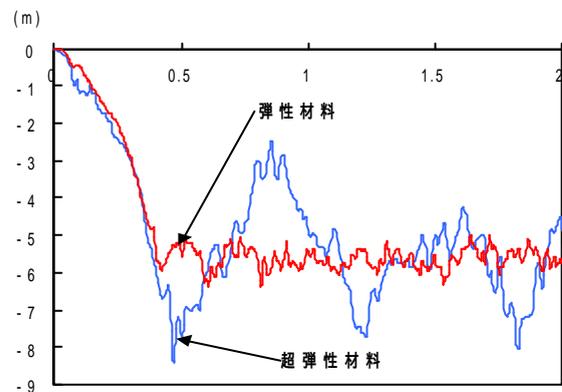


図 4 半球膜の中心点の変位応答図に与える膜材料の影響

4. まとめ 本文で得られた主な結果をまとめると以下ようになる。1) 膨張した半球形状膜を衝撃的に減圧させると、膜全体がドーナツ状に収縮性状を示しながら、中央部が急激に収縮運動して自重のみによるつり合い形状に移行する。また、収縮挙動に与える膜材料の影響は収縮時間と変形状として現れ、超弾性膜と弾性膜では収縮挙動が異なっている。2) 膨張した半球形状膜に衝撃的に負圧力を作用させ収縮させると、固定辺周辺部と中央部の変形が交互に現われる。

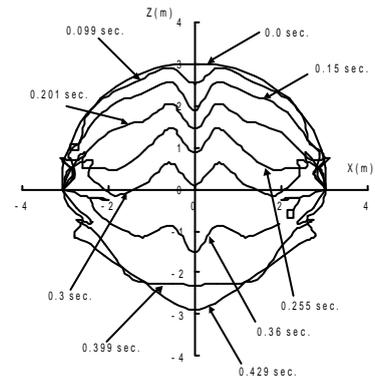


図 5 中央断面における各時刻での収縮運動図

参考文献 1) 田中宏明, 水澤富作: 衝撃圧力を受ける超弾性薄膜の膨張展開挙動について, 中部支部研究発表会講演概要集 I-31, pp.79-80, 2000.