

衝撃圧力を受ける超弾性薄膜の膨張展開挙動について

大同工業大学大学院 学生員 ○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 軽量の膜構造は大空間を容易に、かつ経済的に架構することを可能にし、大型の利用空間を作り出すドームやテント、飛行船、消波用フレキシブルマウンドなどの仮設構造物や常設構造物に用いられている¹⁾。また、膜構造は軽量で収納性が良好であるため、地上構造物だけでなく宇宙や月面上の構造物等への適用も考えられている。このような膜構造の形状決定問題は幾何学的非線形性の強い問題であり、これまでに多くの研究が報告されているが、超弾性膜の静的及び動的な膨張展開のメカニズムは、必ずしも明確にされてい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、空気圧を受ける超弾性半球膜の膨張挙動について検討を行い、膨張過程の飛び移り現象について明らかにしている。また、動的圧力の変動に伴う超弾性薄膜の膨張応答についても検討を行っている。

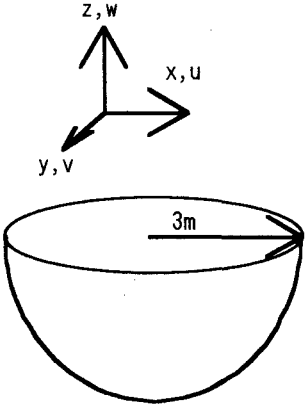


図-1 半球形状膜モデル図

2. 解析手法 膜の運動方程式を3次元有限変位弾性理論と仮想仕事の原理を用いて定式化している。膜は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^{2) 3)}、Newmark のβ法により動的な非線形応答解析を行っている。式の定式化にあたり、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。 $[M] \{^{t+\Delta t} \ddot{u}\} + [^{t+\Delta t} K_T] \{\Delta u\} = \{^{t+\Delta t} P\} - \{^t F\} \dots\dots\dots (1)$ ここで $[^{t+\Delta t} K_T]$ = 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 $\{^{t+\Delta t} \ddot{u}\}$ = 加速度ベクトル、 $\{^{t+\Delta t} P\}$ = 外力ベクトル、 $\{^t F\}$ = 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。 $P_t = \alpha P_0(t) \delta(t - t_0) \dots\dots (2)$ ここで、 P_0 は初期圧力、 $\alpha = P_t/P_0$ である。

3. 数値計算例と考察 ここでは、図-1に示すような、変動圧力を受ける周辺が固定された半球形膜の膨張展開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。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、半球形膜の外側から圧力を増大させながら、膨張させた時の半球形状膜の中心点でのたわみと圧力の関係が示してある。圧力 P は0から $0.70(kPa)$ まで変化させている。図-3は、各圧力での中央断面における膨張変形が示してある。

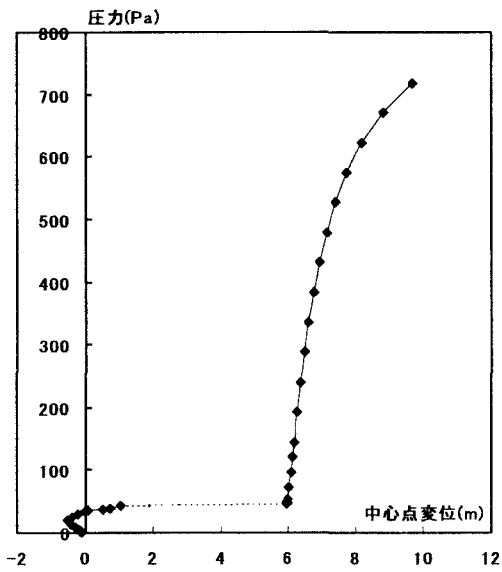


図-2 半球形状膜の中心点のたわみと圧力の関係

これより、半球状の膜では圧力の増大に伴に中心点の変位も増大し、ある圧力に達すると急激な膨張変形を伴う、飛び移り現象が生じる。飛び移り後は、圧力の増大にしたがって、超弾性の影響により大きな膨張変形をするので、非線形な圧力－変位曲線を示している。また、膨張変形は図-3 から、圧力の増大に伴に、中央部に局所的な下凸の変形が生じ、また固定端周辺部に局所的な変形が形成される。さらに圧力を増加させると、急激な膨張を伴い安定した膨張つり合い形状が得られる。ここで示した半球形状の膜の飛び移り現象は、自重のみでつり合う初期つり合い形状の深さに関係している。

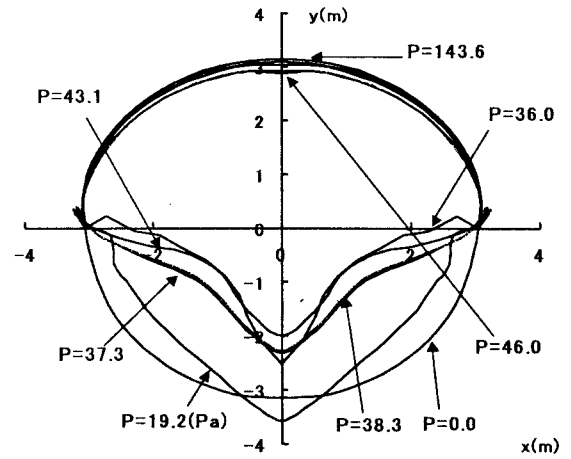


図-3 中央断面における各圧力のつり合い形状

図-4 は衝撃圧力を受ける図-5 に示すような半球形状の超弾性膜の中心点の変位応答曲線を示している。ここで、膜厚は 3mm に仮定し自重のみでつり合った初期つり合い形状を初期条件としている。また衝撃荷重はステップ圧力で与えている。ここで、衝撃圧力は 47.9, 95.8 と 143.6(Pa.) に変化させている。また、図-5 は各時刻での中央断面の膨張変形応答が示してある。図-5 より、衝撃圧力が作用すると中央部に上凸状の局所変形が生じ、時刻の経過に伴に複雑な変形を伴い、急激な膨張挙動が示される。衝撃圧力の大きさが大きいほ

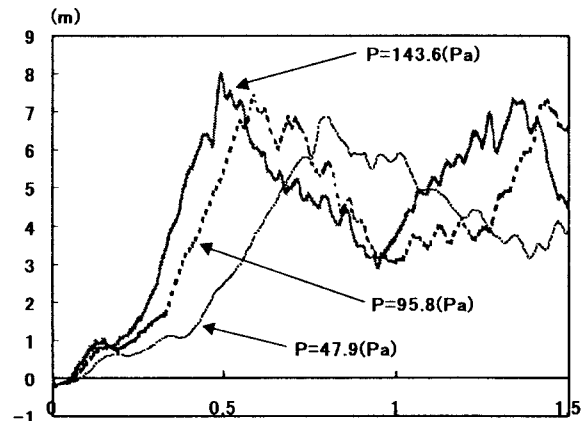


図-4 衝撃圧力を受ける半球形状膜の中心点の変位応答曲線

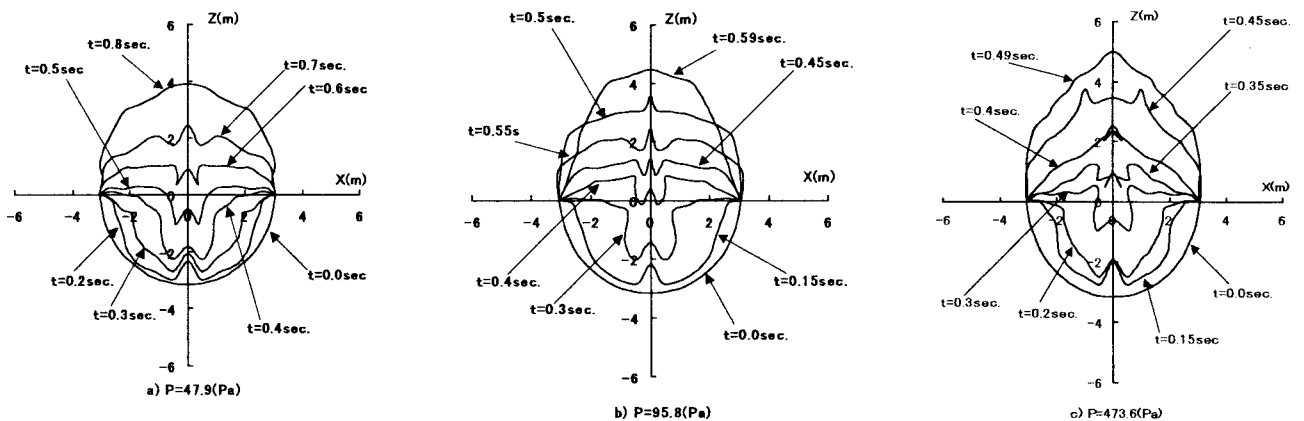


図-5 中央断面における半球形状膜の各時刻の膨張運動図

ど、急激な膨張応答が示される。また高圧ほど、中央部での局所変形が時刻の経過に伴に、折れたたまるるように変形し、急激な膨張展開が示される。静的解析の結果と比較すると、膨張する場合の中央部での局所変形が異なっている。

4. まとめ 1) 外圧を受ける半球形状の超弾性膜の膨張展開は、ある圧力になると、急激に膨張展開する飛び移り現象が生じる。2) 半球形状の超弾性膜を衝撃的な圧力で膨張させると、静的に膨張させた場合と異なり、中央部に上凸の局所変形が生じ、時刻の経過に伴に複雑な変形を形成し急激な膨張応答が示される。衝撃圧力の大きさが大きいほど、中央部での局所変形が時刻の経過に伴に、折れたたまるように変形し、急激な膨張運動が示される。また、膨張応答に与える膜厚の影響は、膨張時間と変形状として現れる。

参考文献 1) J.W.Leonard: Tension Structures, McGraw-Hill, 1987. 2) 水澤他: 膨張膜の非線形解析について, 構造工学論文集 Vol.37A, pp.15~23, 1991. 3) 田中他: 圧力を受ける薄膜の膨張と収縮挙動について, 第 54 回年次学術講演会講演概要集 I-A39, pp78-79, 1999.