

懸垂膜吊り上げ実験による膜構造大変形解析手法の検討

佐賀大学 学生会員 富岡正治, 田原慎太郎,

正会員 井嶋克志, 帯屋洋之, 川崎徳明

1. まえがき

膜構造物は軽量かつ容易に展開可能であるため, 大空間ドームや宇宙構造物など様々な構造物に利用されている. 膜構造物の力学的特徴は, 張力が大きいほど安定であるが, 張力が減少すれば容易に変形する. このため, 張力が小さい仮設時などでは不安定となり, 想定外の現象が発生することもある. したがって, 膜構造物の大変形解析は重要であるものの, 構造内において緊張域と弛緩域が混在し, 変形と共にこれらの領域が変化する現象を安定に解析できる手法は見当たらないようである.

著者等が既に開発した膜構造物の大変形解析手法¹⁾は, 膜面内は非抗圧モデルとして膜材の面外曲げ抵抗を加えた要素を用いて幾何学的非線形解析を行うものである. 膜面内非抗圧とすることにより, 解析不安定を招く多重分岐現象を排し, 釣合解は唯一となり安定な解析が可能となる. しかし, この非抗圧モデルは要素面積がゼロも許容するため, 実現象と異なる解を与えることがある.

先の研究²⁾により膜材の面外曲げ抵抗を考慮すれば, 面外力による幾何剛性が付加され要素面積がゼロになることはなく, さらに安定な解析となることが判明した. 本研究は, 懸垂膜の吊り上げ実験を行い, 提案する膜構造大変形解析手法の妥当性を検討したものである.

2. 膜要素の線材置換による面内非抗圧モデル¹⁾

要素内定ひずみを仮定する直交異方性三角形膜要素について, 図-1 のように辺方向に作用する要素端力 P_1, P_2, P_3 と辺の伸び量 $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ 間に成り立つ剛性方程式から, これに等価となる図-2 のトラス骨組を構成できる. 定ひずみ要素の剛性方程式は, 三角形要素と同じ形状を構成する3本の軸力材の各伸び剛度 k_1, k_2, k_3 , 3頂点から射出する3軸力材ともに等しい伸び剛度 k_4 およびこの3軸力材結合点の位置を与える. これら6本の軸力材の各長さと伸び剛度から, 要素が引張にのみ抵抗し非抗圧となるように双曲線関数を用いた軸力式を定めることができる. すなわち, この非抗圧モデルは3頂点が1点に収斂したとき3要素端力はゼロとなり, 辺の伸び量が無限大のとき軸力材の伸び剛度がトラス骨組のそれらに等しくなる. なお, 理論の詳細は参考文献 1)を参照されたい.

3. 回転変位自由度を必要としない膜材の面外曲げ抵抗モデル²⁾

図-3 のように1辺に隣接する2要素の面外曲げ変形から節点に回転自由度を導入することなく膜材の曲げ抵抗を考慮できる. 図-4 に示す2要素の4頂点節点座標値より幾何学的に厳密にたわみ角 $\Delta\theta_i, \Delta\theta_p$ を求めることができ, この2つのたわみ角の和を $\Delta\theta_l$ とする. この辺位置の曲げモーメント M_l とすれば, 微小変形の仮定および要素は3角形であることから, この曲げモーメントは $M_l = 2EI_l\Delta\theta_l / (a_{i0} + a_{p0})$ となる. ここに,

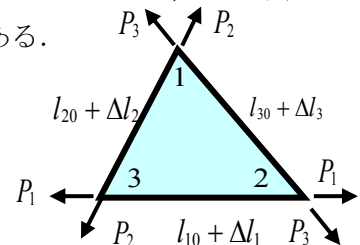


図-1 三角形定ひずみ要素

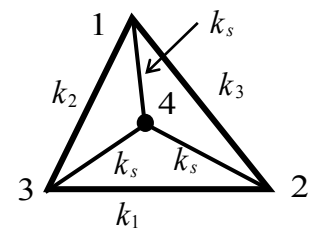


図-2 線材置換モデル

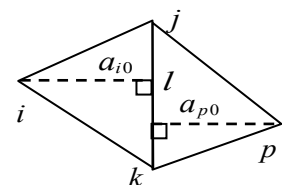
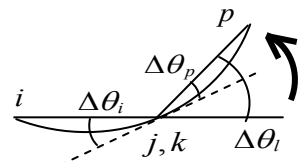
図-3 辺 l に隣接する 2 要素

図-4 2 要素の曲げ変形

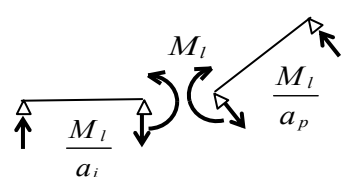


図-5 端モーメントと要素端力

キーワード: 膜構造, 幾何学的非線形, 張力場理論, 膜大変形実験
〒840-8502 佐賀市本庄 1 佐賀大学大学院工学系研究科都市工学専攻
TEL0952-28-8579

EI_l は辺 l の曲げ剛性である。

さらに、図-5 のように要素頂点がヒンジ支持とすれば端モーメントによる支点反力が面外要素端力となり、これら要素頂点が接続する節点において節点外力と要素端力が釣り合う形状を求める幾何学的非線形解析が可能となる。面外要素端力の幾何剛性は節点変位の面内成分に対する剛性となり、要素面積がゼロとなることは無い。

4. 懸垂膜の吊り上げ実験

懸垂膜の吊り上げ実験は、膜内に緊張域と弛緩域が混在し、膜の変形とともにこれらの領域は変化する。図-6 に本実験装置を示す。実験は $0.5\text{m} \times 1.1\text{m}$ の矩形膜左右短辺を固定し、図-6 の初期状態から自由辺の中央部付近の一部を上方に吊り上げるものである。使用した膜材は、ナイロン基布に塩ビコーティングされた TSG と呼ばれるものであり、直交異方性の材料特性を有する。

吊り上げ試験に先立ち、膜材の引張試験を行い材料定数の計測を行った。引張試験では、まず、電子ノギスによる伸び量の測定とひずみゲージ(KFEN-2-120-C1L1M2R 共和電業)によるひずみの測定を比較した。その結果、ひずみゲージによる測定はひずみゲージそのもの、あるいはゲージを貼り付ける接着剤のいずれかの原因により膜材の伸び変形にひずみゲージが追従していないことが判明した。

引張試験により得られた直交異方性膜材の材料定数は E_u 、 E_v をナイロン繊維の縦糸横糸方向のヤング率、 t を膜厚として単位面積重量 $wt = 0.471\text{N/m}^2$ 、 $E_u t = 945\text{N/m}$ 、 $E_v t = 596\text{N/m}$ 、ポアソン比 $\nu_u = 0.212$ 、 $\nu_v = 0.138$ であった。

5. 実験結果と計算結果の比較

図-7 および図-8 は引張試験より得られた材料定数を用いた解析結果と実験結果を比較したものである。図-7 は強制変位を 0.21m 与えたときの実験における膜の変形形状を図の上側写真に、下の図は解析結果である。また、図-7 に示す変位計測点の位置をトータルステーションにより求め、解析結果と比較したものを図-8 に示している。両図から、提案している膜構造物の大変形解析手法による結果はほぼ実験値と同様の値を示していると思われる。

参考文献: 1)井嶋克志、帯屋洋之、川崎徳明：線材置換を用いた張力場理論による膜構造の有限変位応答に関する考察、構造工学論文集, Vol57A, pp.41-52, 2011.3., 2) 田原慎太郎、三吉隆博、井嶋克志、帯屋洋之、川崎徳明：面外曲げ抵抗を考慮した膜構造の大変形解析、土木学会第 68 回年次学術講演会, pp879-880, 2013.9.

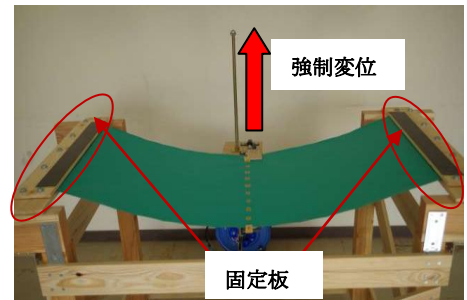


図-6 懸垂膜の吊り上げ試験

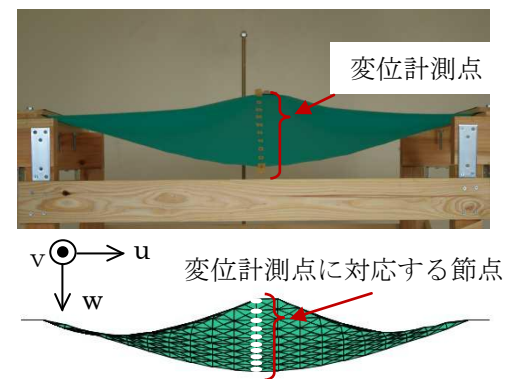


図-7 吊り上げ時(0.21m)の変形と解析解

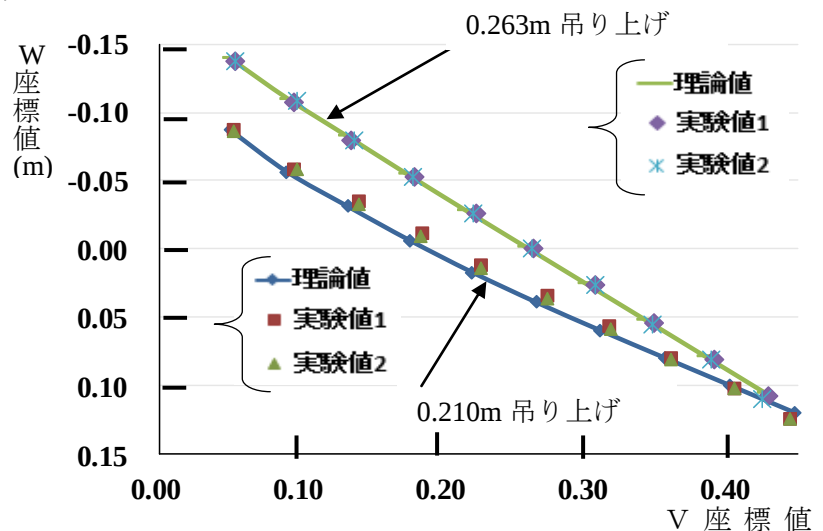


図-8 変位計測点の v-w 座標値の実験値と理論値の比