建材用膜構造物の大変形・接触シミュレーション Deformation and Contact Simulation of Membrane Structure

島 俊平・富山県立大学

Shunpei Shima・Toyama Prefectural University

木下 貴博・富山県立大学

Takahiro Kinoshita・Toyama Prefectural University

松田 力・三協立山株式会社

Tsutomu Matsuda・Sankyo Tateyama, Inc.

川上 崇・富山県立大学

Takashi Kawakami・Toyama Prefectural University

大浦 豊・三協立山株式会社

Yutaka Oura・Sankyo Tateyama, Inc.

Key Words: Membrane structure, FEM, Large deformation simulation, Contact simulation

建材用膜構造物を対象に、有限要素法に基づく大変形・接触シミュレーションをおこなった。初期張力の導入方法として、重力を用いた方法について検討を行った。初期張力の導入時と積雪を模擬した外部荷重を負荷した時の膜の変形状態に関して検討をくわえることができた。

1. 緒言

膜構造は、近年の膜材自身の耐久性や耐火性の向上により恒久構造物として広く用いられるようになった⁽¹⁾。膜構造物は薄い膜材を利用して空間を架構するため、他の構造に比べて容易かつ経済的に大きな空間を得ることができるという長所を持つ。その一方で、圧縮力や、面外せん断応力、面外曲げモーメントに対して抵抗力をもたず、ほぼ面内に作用する面内張力によって架構されるため、形状を維持し難いという短所がある⁽²⁾。したがって、膜構造の形状には制限があり、設計者の意図する曲面が膜構造として必ずしも適切な曲面とならない場合がある。

膜材料は一般に面外方向に対する剛性が小さいために、膜材料を用いて形成された曲面は比較的大変形が大きくなる。そのため、膜材料の幾何学的な非線形性を考慮した解析をおこなう必要がある。幾何学的な非線形性にくわえて、材料非線形性を考慮した解析も必要だが、設計コストの観点から、材料線形と幾何学的非線形を用いて解析されている場合が多く、複雑解析・応力解析が多方面から研究されている^(1, 3-5)。また、製作前の設計段階において完成品の形状に検討を加えたいという要望も多くある。

本研究では建材用膜構造物を対象に、初期張力の導入の方法に着目し有限要素法に基づく大変形・接触シミュレーションをおこない、外部荷重に対する膜の変形挙動について検討をくわえた。

2. シミュレーション方法と環境

2-1 シミュレーション対象

膜とフレームから構成される構造物をシミュレーションの対象とした。シミュレーション対象には対称性があることから、1/4 対称モデルをシミュレーションに用いた。変形挙動解析に関係のない膜構造物の詳細形状は簡略化してあるが、膜とフレームが接触する部分の形状（幅・曲率半径）に関しては再現した。1/4 対称モデルを Fig.1 に示した。本研究で用いた物性値を Table1 に示した。

2-2 大変形・接触シミュレーション

重力により膜をフレーム部に接触させた後、膜に張力を与えることで初期状態を模擬した。その後積雪に相当する荷重を膜に負荷した。計算プロセスを Fig. 2 に示した。プロセス1では重力により膜をフレーム部に接触させた。プロセス2では膜に張力を与え、初期状態を模擬した。プロセス3において、積雪に相当する荷重を負荷した。膜は大変形を考慮しており、膜とフレーム間は摩擦係数ゼロの接触状態とした。

Fig. 1 FEM model of membrane and frame structure. (Quarter area model)

Fig. 2 Simulation process under snow weight condition.

Table 1 Material properties

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Mass density [kg/m ³]
Frame(Al)	70	0.350	2,700
Membrane	0.719	0.141	1,330

2-3 シミュレーションコードとワークステーション

シミュレーションには有限要素法に基づく大規模並列シミュレーションコード ADVENTURECluster⁽⁶⁾ (Version : 4.8) を用いた。本研究で使用したワークステーションは CPU : Intel (Xeon X5690 3.47 GHz) × 2 (12 コア)、メモリ : 96 GB から構成されている。

2-4 要素分割

要素分割には有限要素モデル作成のための汎用プリ・ポストシステム HyperMesh⁽⁷⁾ (Version : 11.0) を用い, 6 面体要素を用いて要素分割をおこなった. 応力集中が予想されるフレームの角部や膜におけるフレームとの接触部には密な要素分割をおこなった. また, 6 面体要素を用いて要素分割をおこなうことでモデル全体の自由度を有効的に削減した. 要素の種類は 6 面体 1 次要素とした. 要素数は 115,483, 自由度は 643,896 であった.

3. シミュレーション結果

外部荷重負荷前の初期状態と外部荷重負荷後の膜の変形状態についてそれぞれ検討を加えた. 初期張力導入後のモデルの変形状態を Fig. 3 に示した. 図中の A 点から矢印方向に取得した膜厚方向(z 軸負の方向)の変位を Fig. 4 に示した. 最大の変位となった点を B 点として矢印方向に取得した膜厚方向の変位を Fig. 4 に示した. 膜の中央付近で約 27mm のたわみが生じた. 積雪荷重負荷後のモデルの変形状態を Fig. 5 に示した. 図中の A 点から矢印方向に取得した膜厚方向の変位を Fig. 6 に示した. 膜の中央付近で, 約 40mm のたわみが生じた. 最大の変位となった点を B 点として矢印方向に取得した膜厚方向の変位を Fig. 6 に示した.

4. 結言

膜とフレームから構成される構造物を対象に 1/4 対称モデルを作成し, 大変形・接触シミュレーションをおこなった. 重力を用いて膜をフレームに接触させた後, 張力を負荷し膜構造物の初期状態を模擬し, 積雪荷重を負荷した. 膜の変形状態に関して検討をおこなった. まとめを以下に示した.

- 1) 6 面体要素を用いることで有効的に自由度を削減し, フレームの膜接触部の形状・寸法を模擬したモデル化ができた. また, 膜構造物の初期状態を模擬するための初期張力導入法として重力を用いる手法を提案できた.
- 2) 積雪荷重を模擬した外部荷重を負荷し膜の変形状態を得ることができた.

参考文献

- 1) Kay ISHIHARA, Takanori YAGI, Nobuyuki HAGIWARA, Hiroshi OHMORI, SHAPE FINDING ANALYSIS OF MEMBRANE STRUCTURE, 日本建築学会構造系論文集, No.469, 1995, pp.61-70.
- 2) 護 雅史, 大森 博司, 松井 徹哉, 松岡 理, 萩原 伸幸, 張力構造に関する基礎的研究 (その 3: 有限要素法による軸対称極小曲面の解析)
- 3) 吉野 達矢, 加藤 史郎, 材料非線形性を考慮した構成方程式の膜構造物への応用
- 4) 岡本 紀明, 有限要素法による非線形接触問題の解析
- 5) 福井 直輝, 岡田 章, 宮里 直也, 永井 佑季, 斎藤 公男, 福田 隆徳, ホルン型張力膜構造に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概
- 6) 株式会社アライドエンジニアリング (<http://www.alde.co.jp/>) (2013/8/30)
- 7) アルテアエンジニアリング株式会社 (<http://www.altairjp.co.jp/Default.aspx>) (2013/8/30)

Fig. 3 Deformation of membrane structure under initial tension.

Fig. 4 Displacement of Membrane structure under initial tension.

Fig. 5 Deformation of membrane structure under snow weight condition.

Fig. 6 Displacement of membrane structure under snow weight condition.