

I-B6

吊膜の風による静的変形の2次元数値流体連成解析

東京大学大学院工学系研究科 学生員 中藤誠二 東京大学大学院工学系研究科 正会員 木村吉郎
 日本大学理工学部 正会員 野村卓史 東京大学大学院工学系研究科 フェロー 藤野陽三

1. はじめに 吊膜屋根は極めてフレキシブルな構造であり、風の作用により、膜が大きく変形するとともに作用する空気力も変化する複雑な現象を示す。そこで、現象の詳細を数値解析を用いて明らかにすることを目指し、本研究ではその第一段階として、静的対風挙動の解析を行った。なお問題を単純化するため、主流方向面内における2次元解析を行うこととした。

2. 解析手法 膜は、既往の風洞実験¹⁾に用いられた両端固定で厚さ0.0201cm、密度0.6963g/cm³、ヤング率 2.0×10^{10} (dyne/cm²)で主流方向スパン70cmのものを、ピン結合されたトラス要素(要素数30)で離散化して定式化した。幾何学的非線形の影響が大きいため、構成則にはひずみの非線形成分を考慮したものを用いた。なおトラス要素を用いたのは、数値流体解析と連成させたときに境界条件の設定が容易になるためである。流体は非圧縮性、粘性流体とし、乱流モデルにはSmagorinskyモデルを用いて有限要素解析を行った。Smagorinsky定数は0.1とした。図1の境界条件と図2のメッシュ(圧力一定流速双線形四辺形要素、要素数4864)を用いた²⁾⁻⁴⁾。流体解析の時間積分法にはPredictor-Corrector法を用いた。流体解析の結果、膜前縁の凹側において要素ごとに圧力が交互に大小となり、それが下流の膜凹側にも同様の影響をおよぼす現象が見られたが、圧力が発散して計算が不安定となることはなかったため、膜に作用する空気力を移動平均することでその影響を取り除くこととした。レイノルズ数はスパン長を代表長さとして風速1m/sの場合に 5.3×10^4 である。

静的連成解析において、膜に作用する空気力は膜の形状によって異なったものとなるので反復計算が必要となる。膜が反転する場合、膜の剛性は非常に小さくなり、そのまま空気力を与えると変形が大きくなるため、空気力に関して減速緩和法を用いた。k+1回目の反復式は次のように表される。

$$\mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d}_{k+1}) = \mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d}_k) + \alpha \{ \mathbf{f}(\mathbf{d}_k) - \mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d}_k) \}$$

ここに、 $\mathbf{d}$:初期状態からの膜変位、 $\mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d})$:膜形状($\mathbf{d}$)における膜の内力(張力)、 $\mathbf{f}(\mathbf{d})$:膜形状($\mathbf{d}$)周りの流体解析によって求められる膜に作用する空気力、 α :緩和係数である。1回の反復計算中には作用する空気力は変わらないとして、不平衡力 $\mathbf{f}(\mathbf{d}_k) - \mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d}_k)$ に対して、荷重増分法(荷重増分の割合は0.5~1%とした)とNewton-Raphson法により膜のみの静的変形解析を行い、膜の形状があまり変化すると作用する空気力の変化が無視できなくなると考えられるので、膜の節点変位が設定した微小量(0.05~0.5cm)を超えたときにその回の反復計算を打ち切ることとした。そこまで用いた荷重増分の割合が緩和係数 α となる。得られた膜形状($\mathbf{d}_{k+1}$)に対して流体解析を行い $\mathbf{f}(\mathbf{d}_{k+1})$ を求める。このようにして $\mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d}_{k+1}) = \mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d}_k)$ の収束状態が得られるまで、反復計算を行った。

ある風速における膜形状まわりの流体解析を行う場合、計算初期の不安定性を緩和するため流入速度を0から目的の風速まで徐々に加速する必要があるが、膜をわずかに変形させていく場合には、膜周りの流れ場は1ステップ前の形状をもつ膜周りの流れ場に近い。そこで流体解析にALE手法を用いて、膜に仮想速度・仮想加速度をあたえて変形させながら流体計算を行い、前ステップと少し異なる膜形状周りの流れ場を求めることで計算負荷を小さくした。その際、数値的振動を抑えるために、仮想加速度および仮想速度を変形の初めと終わりで0になるようにそれぞれ時間の3次、4次の式で与えた。

3. 解析結果 まず、初期形状をサグ比0.04の懸垂状態としたケースでは、風速1m/sから10m/sにかけて計算をおこなったところ、下に凸のつり合い形状がすべての風速で得られた。風速10m/sにおける収束状態での空気力分布および流線を示す(図3)。膜前縁の狭い部分に斜め上向きの空気力が作用しているが、それ以外の後端側では下向きの力を受けている。図4に膜に作用する単位長さあたりの揚力および重力を速度圧で割った鉛直方向の外力係数分布を示す。風速が高くなるにつれて重力の影響は小さくなるが、分布形状に大きな変化はない。次に上に凸のつり合い形状を求める解析を行った。下に凸のつり合い状態から、作用している重力を徐々に上向きになるように変化させていき、重力の方向が正反対に、すなわち上向きになるまで計算を行い、上に凸の収束形状を求めた。その結果、風速5m/s以上のケースでは収束形状が得られたが、風速4m/s以下では収束形状が得られなかった。これは、奥田ら¹⁾の実験で確認された、上に凸の膜の状態が安定して存在する風速域にほぼ対応している。

キーワード: 吊膜屋根, 大変形挙動, 数値流体解析, 静的対風応答

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 03-3812-2111 (内線6099)

図5に鉛直方向の外力係数分布を示す。風速によって分布形状が異なることが分かる。風速5m/sより低い風速では、膜が降下するとともに、膜前縁側の上向きの揚力が小さくなり、さらに膜前縁が降下するため、上に凸の形状が得られなくなると考えられる。サグ比0.06でも同様な傾向が見られた。

サグ比0.1のケースでは1m/sから3m/sまでは下に凸の収束形状が得られたが、4m/s以上では得られなかった。風速3m/sにおける空気力分布および流線を示す（図6）。膜上流側に作用する空気力が大きくなり、膜下流側に作用する下向きの揚力が小さくなっている。鉛直方向の外力係数分布（図7）をみると、風速の上昇にともなって重力の影響が小さくなると同時に分布形状も変化する。さらに風速を上げた場合には上向きの揚力が卓越して収束状態が得られなくなる。また、下に凸のつり合い形状が得られたケースでも、上に凸の収束形状は得られなかった。サグ比0.164の場合には風速1m/s、2m/sで下に凸の収束形状が得られたが、3m/s以上では得られなかった。

4. おわりに 膜の変形と膜に作用する空気力が連成した静的対風応答を解析した。膜の静的つり合い位置を求める計算において、安定に解析するために膜の変形の与え方を工夫した。サグの小さいケースでは、上に凸となるつり合い形状が高風速において得られており、実験の結果を定性的には再現している。今後の課題として、ケーブルに支持された吊膜に発生するダイバージェンス現象⁵⁾の再現のために、膜を弾性支持した解析を行うなどがあげられる。

参考文献 1) 奥田ほか：日本風工学会誌，第63号，pp189-190，1995 2) 野村：土木学会論文集，第455号，pp55-63，1992 3) 太田ほか：第51回年次講演会第1部(A)，pp328-329，1996.9 4) 中藤ほか：第52回年次講演会第1部(B)，pp34-35，1997.9 5) 木村ほか：構造工学論文集Vol.42A，pp867-872，1996

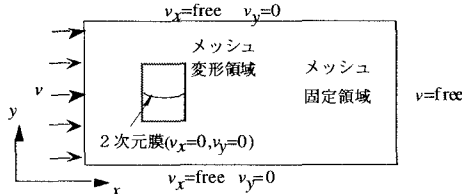


図1 境界条件

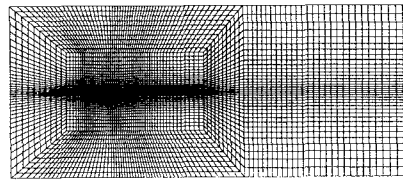


図2 使用メッシュ

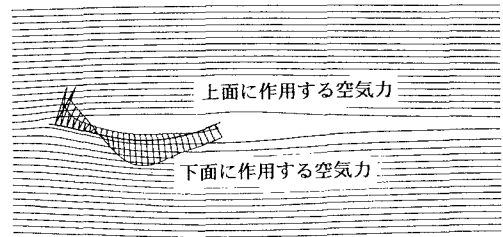
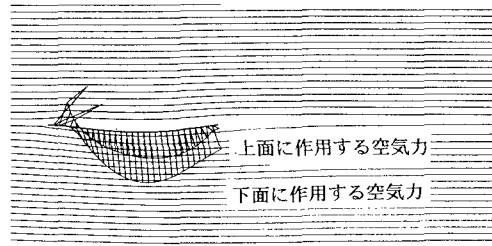


図3 空気力分布・流線図（サグ比0.04，風速10m/s） 図6 空気力分布・流線図（サグ比0.10，風速3m/s）

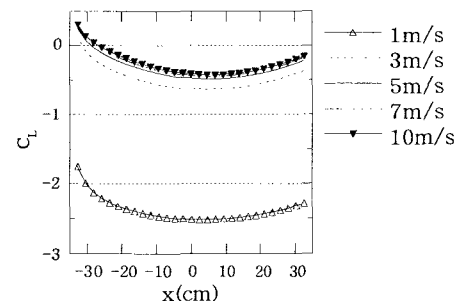


図4 鉛直方向の外力係数分布
（サグ比0.04，下に凸）

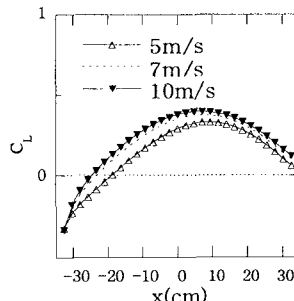


図5 鉛直方向の外力係数分布
（サグ比0.04，上に凸）

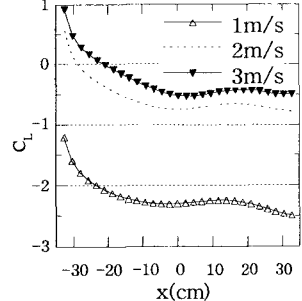


図7 鉛直方向の外力係数分布
（サグ比0.10，下に凸）

* 全ての図において左側が風上側となっている