

I-A 164 膜屋根の対風挙動の数値流体解析

大成建設	正会員	太田 匡司
東京大学工学系研究科	正会員	木村 吉郎
日本大学理工学部	正会員	野村 卓史
東京大学工学系研究科	フェロー	藤野 陽三

1. 研究目的

施工時の防雨を目的として提案されている、2本の主ケーブルで膜を張り渡す吊形式膜屋根は、重力による初期張力のみが作用する懸垂膜を主構造とするため、きわめてフレキシブルであり対風挙動が安全性を支配する。風的作用により生じるこの膜屋根の不安定現象は、膜形状が変化するとともに吊膜屋根全体のねじれ変形が急激に増大するという、きわめて複雑なものである事が著者らの風洞実験より明らかとなっている¹⁾。

本研究では、この現象の基本的な発生メカニズムを明らかにすることを目的に、膜の有限要素振動解析と数値流体解析を連成させて現象を再現することを試みた。なお問題を単純化するため、主流方向面内における二次元解析を行い、吊膜の両端は固定とした。

2. 解析方法

膜は、風洞実験に用いたものに類似の厚さ0.02cm、密度0.70g/cm³のナイロン地で主流方向スパン70cmのものを対象とし、張力変動・幾何的非線形を考慮した支配方程式を、トラス要素（要素数=30）で離散化して定式化した。一方、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²⁾。境界条件を図1に示す。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、ALE法を適用してメッシュ変形を行った。時間積分法は、膜にNewmark- β 法、流体にPredictir-Corrector法を採用した。安定に解析できる最も大きい時間刻みとして膜に比べ流体は50~100倍大きなものを用いた。そこで流体1ステップ毎に、対応する膜と流体の挙動を整合させるようにした。

3. 解析結果

まず流体力を除いた膜のみの解析を行った。計算を安定に行うために、時間刻みは縦振動が1要素を通過する時間の1/2程度（10⁻⁶sのオーダー）に小さくとる必要があった。小さいサグ（サグ比約1/12）の場合は微小振動の固有振動数が理論値と一致した。また、図3にサグ比1/6の場合の例を示すように、本解析で主な対象とした大変形挙動についてはサグ比に関わらずほぼ捉えることができた。一方、流体力については、膜形状に類似の剛体翼（G6417）に作用する静的流体力の解析結果を既往の実験値と比較したところ、揚力係数は約1/2の大きさとなった（図4）。しかし、流体力分布などは定性的には再現されており、連成解析にこのまま用いても現象を定性的には再現できると考えた。

連成解析は、まず、より計算上安定な線形解析（張力は初期張力のまま一定、変位の自由度は鉛直方向のみ）を、初期張力を与えた小さいサグ比の場合（初期張力 2.5×10^6 dyn/cm²、サグ比0.0026）について行った。風速1.0m/s以上で微小振動が発現したが、その際の2つの時刻における膜周辺の圧力分布を図5に示す。図をみると流体力と膜の振動が連成している様子が分かる。しかし、さらに風速を上げると大変形を生じて解析不可能となった。そこで変形を再現するように、変形に応じた張力の増加が考慮される非線形解析を行ったが、圧力分布が要素毎に正負の値を繰り返すチェッカーボードモードが生じ、数十ステップで計算は発散してしまった。原因を探るため、膜の水平方向変位を拘束した解析を行ったところ、実験で観察されるような膜のフラッタや反転現象³⁾は再現できなかったが、高風速でも計算は発散せずに解析を行うことができた。このことより、水平方向変位を拘束しない場合膜要素毎には要素軸方向の高周波数の微小振動が生じているが、これが膜要素に連動している流体要素を強制的に振動させることで、流体の計算を不安定にしていることが計算が発散する原因として考えられる。また、チェッカーボードモードを起こしやすい要素内圧力一定の要素を用いていることも計算を不安定にしている一因として挙げられる。

4. まとめ

本研究で対象とした吊膜は、非常に变形しやすく流体との相互干渉も大きいため、対風挙動を数値流体解析で再現するのは計算の不安定性が高く難しい問題であったが、検討の結果をもとにして、今後は流体メッシュ変形に膜要素軸方向振動が影響しないような工夫、使用する流体要素の変更などを試みていく予定である。

参考文献

- 1) 木村吉郎ほか：ダム施工時の防雨用吊形式膜屋根の対風挙動，構造工学論文集，Vol.42A，平成8年3月，pp.867-872.
- 2) 野村卓史：ALE有限要素法による流れ・構造連成解析への予測子・修正子法の適用と計算過程に関する技法，土木学会論文集，No.455/I-21，平成4年10月，pp55-63.
- 3) 奥田泰雄ほか：風洞気流中に懸垂した膜の挙動，日本風工学会誌，第63号，平成7年4月，pp.189-190.

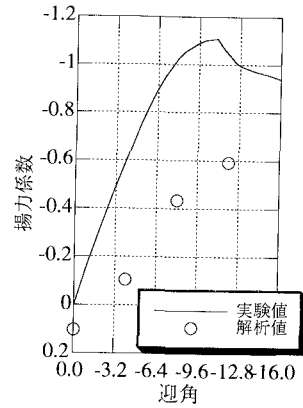


図4 迎角による揚力係数の変化

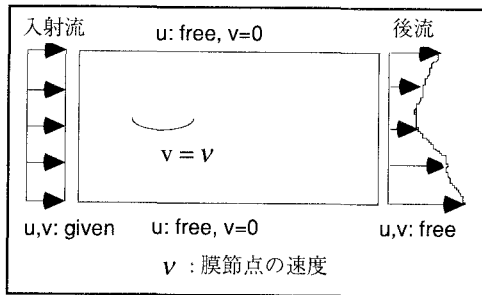


図1 境界条件

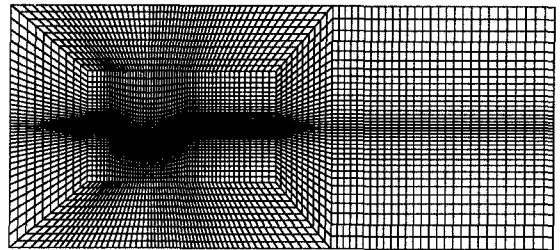


図2 使用メッシュ

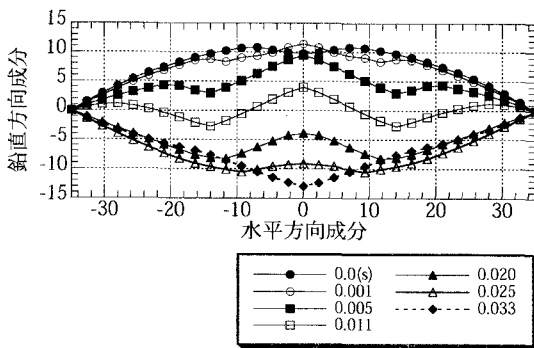


図3 大変形挙動の例（反転状態からの自由落下）

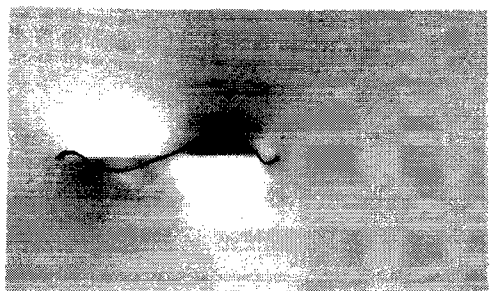
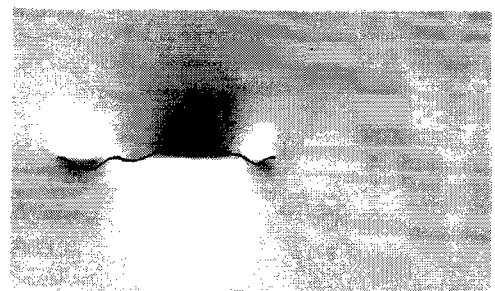


図5 振動時の圧力分布
（白：正圧，黒：負圧，
膜の鉛直方向変位は100倍に拡大）