

I - B12

流体の作用による膜の大変形挙動の動的連成解析

鹿島建設（株） 正会員 新明 正人
日本大学理工学部 正会員 野村 卓史

1. はじめに

空中に吊された膜の対風挙動を検討することを目的として、これまで解析法の開発が行われてきた[1,2]。しかし対象とする膜が極めて軽量でフレキシブルであるため、安定に動的連成解析を行うことが困難であった。

本研究では、これまでの検討結果を踏まえて数値モデルの再検討などを行い、新たな連成解析アルゴリズムを試みたところ、動的連成解析が行えるようになったので報告する。

2. 流体と膜のそれぞれの解析法について

流体は非圧縮性・粘性流体とし Navier-Stokes の方程式に従うものとする。また乱流効果については Smagorinsky の渦粘性モデルを用いて表現しておりその際の係数は 0.1 とした。対象とする問題では構造系の変形が大きく流体の解析領域が構造の運動とともに変形する状況を見逃すことができない。そこで解析領域の変形に伴い解析メッシュを変形させ、流れの支配方程式を運動している節点を基準とした相対的な記述により表現する ALE 法を用いた。ALE 記述された Navier-Stokes の運動方程式と連続の式に流速双線形、圧力一定の混合補間要素を用いて SUPG 法を適用し有限要素方程式を構成する[3]。解析モデル図を図-1 に示す。流体および膜の運動はいずれも鉛直の 2 次元運動に限定した。図中 ALE 記述領域と記されているところは膜の変形にあわせて解析メッシュが変形する領域を表している。流体は節点数 5014、要素数 4864 で解析を行った。また膜は図-2 に示すようにトラス要素（31 節点、30 要素）にモデル化している。膜の動的非線形解析法[4]には α -法と Newmark- β 法を併用する吉田らの方法を用いている。膜単独の動的非線形解析の詳細とその特性については別に報告する[5]。

3. 単純な連成解析アルゴリズムによる解析とその限界

まず、最も単純な連成解析のアルゴリズムを試みた。計算手順としては流体の計算を先にやり、得られた流体力を膜に作用させ膜の計算を行う。この操作を交互に行うことによって動的な解析を行った。本来、膜の計算を行う際は膜の周辺にある流体が抵抗し膜の動きを抑制する効果があるが、この単純なアルゴリズムでは膜の計算時には膜のみが運動し、その周辺にある流体のことは考慮されていない。そのため次のステップに進んだ時に流体から過大な反力が加わり解が発散してしまう。そこで、周辺流体による付加質量効果を考慮すれば解析が可能になるかどうかを確かめるため、いささか乱暴な仮定ではあるが、膜の密度を増やした解析を試みた。その結果、膜の密度を 40 倍にまで大きくしたところで解析が可能となった。

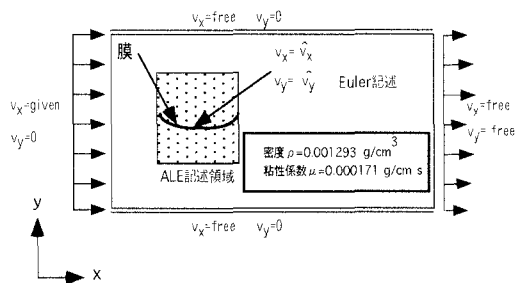


図-1 連成解析のモデル図

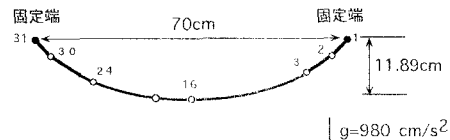


図-2 膜のモデル図

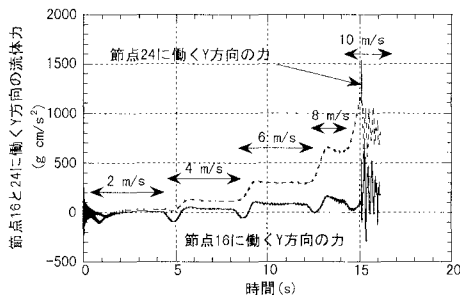


図-3 膜に作用する流体力の時間変化

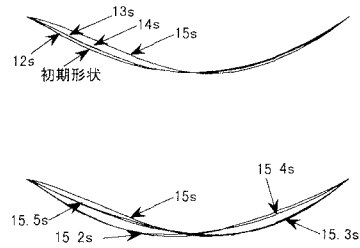


図-4 膜の形状の時間変化

図-3 は膜の節点 16 と 24（図-2 参照）に作用する Y 方向流体力の時間変化を、また図-4 は膜の形状の時間変化を表している。図-3 に示すように、上流流速を 0～10m/s まで徐々に上げていき解析を行った。時間刻み Δt は 1.0×10^{-3} s で解析を始めたが風速を 4m/s に上げたところで解が発散したためその後は 5.0×10^{-4} s で解析を行った。この解析では膜の密度が 40 倍と非常に大きいため、上流流速を 10m/s まで上げたところで膜の形状に大きな変化が現れはじめた。

流体構造相関問題、膜、ALE 法

〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8 日本大学理工学部土木工学科 TEL 03-3259-0411 FAX 03-3259-0411

膜の密度を 40 倍というのは仮定としては極端ではあるが膜とともに運動する流体の付加質量効果を取り込めれば解が成立することを示唆している。ただし、この解析においても解析を始めて最初の方で数値的な振動が見られた。

4. アルゴリズムの改良

流体力を本来の軽い膜に直接作用させると膜に過大な加速度が生じ、これが次のステップで膜周辺の流体に過大な加速度を与え、膜がさらに大きな流体力を受けるため解が発散してしまう。そこで膜とともに動く流体の影響を取り込むために流体と膜の計算を短い時間範囲で繰り返し行うことにより流体からの反力も考慮した流体力を膜に作用させるアルゴリズムを新たに構成した。具体的には流体の計算を行った後、得られた流体力をあらかじめ定めた繰り返し数で割ったものをこの回の流体力として膜に作用させ次の流体の計算に進む。再び得られた流体力を同様に繰り返し数で割り、それを前回の流体力に加えて膜の計算を行う。この操作を短い時間範囲で繰り返し、最終的には所定の繰り返し回数で平均化された流体力を膜に作用させるようにした。この操作を行うことによって、本来の軽い膜の解析が可能となった。今回は繰り返し計算の回数を 10 回にし、上流流速を 0~2m/s まで 1.0s かけて上昇させ、その後は風速 2m/s に保ったままの解析を行った。なお、時刻間 Δt は 1.0×10^{-3} s としている。

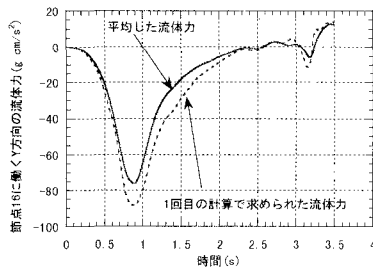


図-5 平均と1回目の流体力

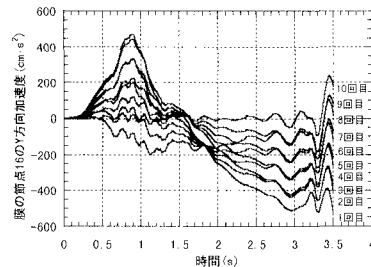


図-6 膜の加速度の変化

図-5は節点16（図-2参照）のY方向に作用する平均された流体力と繰り返し1回目の計算で求められた流体力を、図-6は節点16のY方向の加速度が繰り返し1回目~10回目までのように時間変化したかを表している（ $t=0\sim 3.5$ s）。図-6より膜に働く加速度は繰り返し計算が進むたびに小さくなっていることが確認された。また図-5より平均した流体力と繰り返し1回目の流体力の大きさと方向がおおよそ同じであることが分かる。

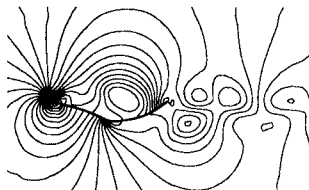


図-7 $t=3.5$ sの圧力線図

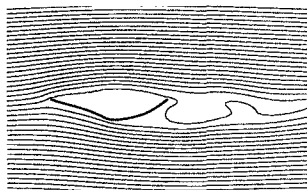


図-8 $t=3.5$ sの流線図

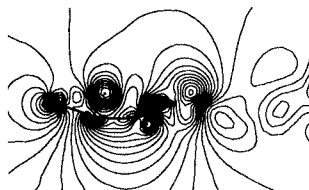


図-9 $t=5.0$ sの圧力線図

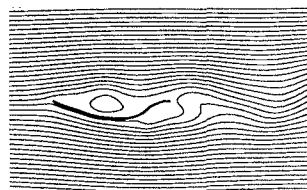


図-10 $t=5.0$ sの流線図

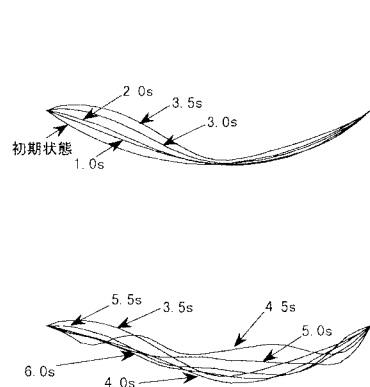


図-11 膜の形状の時間変化

図-7~図-10は $t=3.5$ s、 $t=5.0$ sにおける膜周辺の圧力線図、流線図を表しており、図-11は膜の形状の時間変化を表している。図-7より膜の上側の圧力が低くなり膜が上に持ち上がっている様子が読み取れる。また図-11より膜は上流側から徐々に持ち上がっており、その後は圧力の低い所が膜の上下に交互に現れ、膜か風になびいている様子をとらえることができ、物理的に妥当な形状の変化を示していると思われる。

5. まとめ

膜が非常に軽量であるため単純に流体力を直接作用させると膜に大きな加速度が生じ、その結果次のステップにおいて流体から過大な反力を受け解析の不安定につながるということが明らかになった。そこで、流体の付加質量効果を考慮するために、その反力を短い時間範囲で平均化して膜に作用させることにより流体と膜の動的な連成解析が可能であることがわかった。

【参考文献】

- [1]太田 他：土木学会年次講演会概要集 第1部(A),pp328~329,1996. [2]中藤 他：土木学会年次講演会概要集 第1部(B),pp34~35,1997. [3]野村：土木学会論文集, No.455/I-21,1992. [4]吉田 他：構造工学における数値解析法シンポジウム論文集 第17巻 pp525~530,1993. [5]清水 他：トラス要素を用いたケーブルの非線形動的解析,土木学会年次講演会概要集,1998.