骨組膜構造物の耐震性能評価のための地震応答解析

石井一夫¹,加藤史郎²,大森博司³,小田憲史⁴,藤本益美⁵, 元結正次郎⁶,大崎純⁷,中澤祥二⁸,小西克尚⁹

梗

概

骨組膜構造物の耐震性能評価における限界耐力計算の適用性について検討し,典型的な1層のモデルに 対して地震応答解析を実行する。入力地震波は,国土交通省告示にしたがって作成する。また,膜はケ ーブルによって置換する。解析の結果,膜を付加することによる骨組の振動特性の変化は微小であり, 骨組膜の低次の振動モードは,骨組の振動をともなうモードであるため,膜の振動が卓越するような振 動モードが地震入力によって励起される可能性は小さいことを示す。また,安全限界レベルの入力に対 しても,膜は破断することはなく,支持骨組の耐震性評価のみで十分であることを例証する。

1. はじめに

膜構造の大きな発展が世界的に遂げられつつある現在,その構造 的な信頼性をどのように確保していくかは重要な課題となっている。

恒久建築としての膜構造が初めて建設されて以来(ラバン大学体 育館:アメリカ)約30年を経過した。この間,膜構造の事故は幾つ か発生しており,これらの事故解析より,構造設計上あるいは膜材 料としての改善もなされてきた。しかし,現状ではまだ十分な安全 性を獲得するには至っておらず,構造的,材料的,施工・製作的な 問題が次々に提示され,解決を求められようになっている。今後, 膜構造を一層安全なものとしていく研究と努力はなお必要なものと なっている。

膜構造に対して新しく提示された問題の一つに,基準法の改正に 伴う膜構造の耐震性の評価を明確にしなければならない点がある。

架構骨組間に初期張力を導入して安定させた膜面を設置した従来 の骨組膜構造と呼ばれる膜構造では、荷重・外力及び膜面の初期張 力による膜面の応力と、架構骨組の応力との間に力のやりとりがあ り、また、骨組間の膜面は大きな面積となり、構造耐力上主要な部 分と法的に定義される。膜面の破損は引裂伝播により、一つの膜面 全体に破損が拡大する。これは屋根面の大きな破壊を意味し、屋根 面の倒壊には至らずとも、あってはならない事故であり、構造耐力 上主要な部分とされる根拠となる。

従来は、いわゆる骨組膜構造では、常識的にあるいは工学的な判 断のもと、この膜面の軽量性ゆえ地震時に膜面の架構骨組に与える 影響は少ないという立場で単に骨組架構に膜面自重及び初期張力の 加算のみの考慮で架構骨組の耐震性について検証されていた。これ はほぼ正しい判断であったと考えられる。しかし、法的にこの判断 を数値として示していく必要が生じた。

膜面を構造耐力上主要な部分としての位置付けにおいて,大規模 建築の場合(大臣認定)には,法的に地震動によって構造耐力上主 要な部分が損傷しないことを運動方程式に基づき確かめることとな る。具体的には地震時刻歴応答解析によってその安全性を確かめる こととなる。

ここに示している研究は、このような立場で、従来のいわいる骨 組膜構造の膜面の架構骨組に与える影響を一般的な立場で検証して いるもので、膜面上の長期積雪時での地震の考慮、特殊な場合の地 震の考慮は含んでいない。しかし、手法に関しては同じものとなろ う。

ここでは、今後の膜構造の構造設計の指針の一つとして、耐震性 の評価に関する判断基準の根拠としての解析上の問題、その結果の 評価等の問題に触れていく。

1 横浜国立大学 名誉教授・工学博士

2 豊橋技術科学大学建設工学系 教授・工学博士

4 太陽工業株式会社空間技術研究所 博士 (工学)

- 5 大阪市立大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工学博士
- 6 東京工業大学大学院人間環境システム専攻 助教授・工学博士
- 7 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・博士(工学)
- 8 豊橋技術科学大学建設工学系 助手・工学博士
- 9 豊橋技術科学大学機械構造システム工学専攻 大学院生

³ 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 助教授·工学博士

2. 設計荷重設定上の問題点

2.1 膜構造における限界耐力計算の適用性

限界耐力計算(構造設計法)の考え方に従えば、極めて稀に発生 する暴風、積雪、地震の荷重値として 500 年再現期待値を使用する こととなっている。具体的には通常の 50 年再現期待値を基準として、 風荷重として 1.6 倍の荷重(風速にすると 1.25 倍)、積雪荷重では 1.4 倍の荷重を想定し、それに対して構造物が倒壊、崩壊などの危機 的な状態に陥らないことが要求されている。また、大部分の膜構造 は、その機能として、大型無柱の空間を持つことが要求されるため、 地震時や強風時に対して、屋根面の鉛直方向の振動を適切に評価、 考慮すること、すなわち、このような設計荷重に対して構造物内に 生じる応力が構造物を構成する材料の強度を上回ることのないよう に設計することが要求されることになる。

上記でいう材料の強度は,限界耐力計算の際に用いられる材料の 耐力を意味するものであり,従来から使用されてきた許容応力度設 計法における短期許容最大応力度とは本来異なるものである。近似 的に材料耐力を短期許容応力度と同一の値とする簡易的な方法も実 際的であろうが,限界耐力計算を膜構造に正しく適用する場合には, これに対応して膜の材料強度を多軸応力条件での材料試験により定 める必要がある。

膜構造物はケーブル構造と同様, 張力構造 (テンション構造) で あり, 初期張力を導入して初めて構造剛性が発生し, 安定な構造物 になる。したがって、初期導入張力の大きさは、設計荷重が構造物 に作用した場合に、その張力が消失しないように設計することを原 則とする。従来の膜構造物においては、そこで採用されている設計 荷重(50年再現期待値)で初期張力が消失しないように設計されて いるが,限界耐力計算に用いられる設計荷重に対しては一時的に初 期張力が消失してもよいという考え方もあり得る。しかし、既述の ように,張力構造物では,形態や構造の形式によって異なるものの, 一般的に言って, 初期張力が消失した際の膜構造物の挙動解析は大 変難しいものになる。張力を喪失した部分がある場合の膜構造物の 構造挙動は、場合によっては衝撃的な現象をともなうばたつきが考 えられ,静的挙動により発生する応力レベルと比べるとさらに大き なものとなることが予想される。したがって, 張力の喪失を許容す るならば、屋根面の鉛直方向の振動を適切に把握することが必要と なるが、現状ではこれは一般的に大変難しい。

一方,既述のような500年再現期待値を50年期待値の1.6倍の風 圧力,1.4倍の積雪荷重として応力を検討する方法は,膜構造に関し ては現実的ではない。空気膜構造では大雪警報とともに従来の必要 内圧の1.4倍の内圧を想定した設計が要求されることになるし,極 めて稀な暴風時になどに,おもりの役目を果たす基礎自重が浮き上 がらない条件が必要となる吊り屋根構造では、場合によっては、1.6 倍の基礎自重となってしまうなどの過剰要求とも考えられる事態が 生じてしまう。また,膜材料は他の構造材料と比べて非常に軽量で, これが膜構造物の大きな特徴ともなっている。したがって,動的物 体力(慣性力)として作用する地震荷重に対しても膜構造は極めて 有利な構造形式となるはずであり,限界耐力計算が膜構造のこの特 徴を十分生かしたものになっている必要がある。

限界耐力計算で設計対象とする限界荷重に対して張力構造の安全 性の確保をどう考えるか、一般的には張力を喪失した部分を持つ膜 構造の鉛直(面外)方向振動を適切に評価することが難しい現状で, 膜構造物の限界状態と限界耐力を定義し,容易に実行できるような 限界耐力計算法を提案することは早急の検討課題である。

2.2 地震荷重設定上の問題点

2.2.1 骨組膜構造の種類

現在の設計基準では、軒高さが 60 m 未満の構造では、特殊な構 造材料や接合法を用いない限り、時刻歴応答解析による安全性の検 証は原則として必要とされていない。本研究では、本体構造自身が 時刻歴応答解析の必要とされない構造で、本体構造の剛な部材やケ ーブル材に接合された膜構造を有する建築物の地震荷重について議 論する。

膜構造は、ここ30年ほどの間に急速に発展した新しい構造形式で ある。軽量で快適な内部空間を実現し、しかも魅力ある建築形態を 実現する膜構造は、今後も需要の伸びの期待される構造であり、今 後どのような形態が現れるか予測は困難であるが、既往の膜構造を 参照して、以下のように膜構造を分類してみる。

膜構造の典型的な形式の一つとして, 膜に内圧を作用させる形式 のものがある。それらは,

- (1) 空気膜構造(1重膜で内部から圧力を作用させ安定させる構
 造)(写真 2.1)
- (2) チューブ状,球状あるいは扁平な2重空気膜構造(膜が閉じており膜内部に空気圧を作用させて安定させる構造)(写真 2.2)
- (3) 原理的に上記の構造に類似する各種の膜構造

がある。これらの構造では、比較的面積の大きな規模の膜構造が想 定され、膜構造全体が一体的な挙動をするものが多い。東京ドーム や 1970 年大阪万国博覧会での富士パビリオン等の構造がこれらの 代表例である。また、上記の他に、

(4) 膜構造の外周を剛な部材あるいはケーブルに接続し、内部の 数点で張力導入のため圧縮材で突き上げる形式のユニット 型骨組膜構造(あるいは外部から引っ張り揚げる構造)(写 真 2.3)

も考えられる。この構造も, 膜構造が構造全体として挙動するもの が多い。この形式は面積の大きなものから小さなものまで考えられ る。ホルン型とよばれる膜構造がこの代表例である。一方, 膜を組 み込んだユニット型の構造形式として,

- (5) 格子状の剛な部材が屋根面に張り巡らされ、1ユニットの面 積はそれほど大きくなく膜面が周辺の剛な部材に直接接続 されるユニット型骨組膜構造(1重膜で張力導入のための圧 縮あるいは引張り部材が骨組として組み込まれた、あるいは、 2重膜で膜自体がそれ自身で閉じた構造であり周辺の剛な部 材に接合された構造)(写真 2.4)
- (6) 格子状の剛な部材が屋根面に張り巡らされ、1 ユニットの区 画の形状が極めて細長く、膜面が周辺の剛な部材と張力導入 用のケーブルに接続されるような、ケーブル併用ユニット型 骨組膜構造(1重膜で張力導入のための押えケーブルや引き 上げケーブルが組込まれた構造)(写真 2.5)

などもしばしば使用される。秋田スカイドームは(6)の例である。さらに,

(7) 上記の(1)-(6)とは異なる新しい膜構造 も今後現れると想定されるが,本研究では,(5),(6)のタイプの膜構 造形式に焦点を合わせて議論する。



写真 2.1 空気膜構造



写真 2.2 2 重空気膜構造



写真 2.3 突き上げ式ユニット型骨組膜構造



写真 2.4 ユニット型骨組膜構造



写真 2.5 ケーブル併用ユニット型骨組膜構造

2.2.2 損傷限界相当の地震動

ユニット型骨組膜

ユニット型骨組膜は, 膜構造の規模としては一般的にそれほど大 きくない。この膜構造は周辺の剛な骨組に直接支持されるので,地 震動は骨組から膜構造に伝達される。膜構造の質量は外周の骨組に 比べて極めて小さいので、膜構造の振動が構造物全体に与える影響 は小さいと考えられる。したがって,外周の取り付け位置で規定さ れる入力が原因で膜構造が振動すると考えられる。また、一般的に 周辺の取り付け部材の規模もそれほど大きくない場合が多い(現実 的な規模として大きくても 10 m × 10 m 程度)ので,工学的には地 震時に周辺の取り付け部材は一様に振動しているとみなせる。この ようなユニット型骨組膜では、ユニット部分を取り出し、一様とみ なした X, Y, Z 方向の周辺取り付け部材位置での加速度(絶対加 速度)を入力して応答解析を実施すれば, 膜部分の応答性状を得る ことができる。取り付け部材位置に対するユニット型骨組膜の応答 倍率を1.0から2.0と想定すると,膜の応答加速度は取り付け部材位 置の加速度の1.0~2.0倍となる。地上での設計加速度(損傷限界相 当)を 100~150 cm/sec²,通常の骨組膜構造における取り付け部材 位置の加速度の応答倍率を 3~5 倍程度(高さ 60 m 未満の構造では ほぼ妥当な値)と仮定するならば, 膜構造部分の応答加速度は, 大 きく見積もっても 150 cm/sec² × 5 × 2 = 1500 cm/sec²程度である。 鉛直,水平とも同じ加速度としても,膜材料の軽量さ(3 kgf/m²あ るいは 29.4 N/m²程度) を考慮すると, 鉛直, 水平方向に高々, 4.5 kgf/m² (44.1 N/m²程度)の増加に過ぎない。膜材料の強度(短期許 容応力を 30 kgf/cm~40 kgf/cm あるいは 294 N/cm~392 N/cm 程度と 仮定)と設計導入初期張力の値(2kgf/cm あるいは 19.6 N/cm 程度) を勘案すると, 地震動による応力変動値は設計上, 問題となる大き さとはならない。したがって、許容応力度設計に基づいて設計され るユニット型膜構造物であれば、特殊な場合を除いて地震荷重は大 きな焦点とはならないことがわかる。

なお,大雪時で滑雪処理が施されない場合のようなきわめて大き な積雪を想定する必要がある場合については,今後,研究が必要で ある。

ケーブル併用ユニット型骨組膜

ケーブル併用ユニット型骨組膜では、平面は、ほぼ矩形状あるい は細長い場合が多く(幅は大きくても10m程度)、両端の長辺部分は 剛な骨組部材に接続され、剛な骨組部材と平行に膜中央に設置され るケーブルや内部からの突き上げなどにより膜張力の導入を行うこ とが多い。したがって、ケーブル部分は谷間状あるいはこの逆に尾 根状になる。このような構造では、膜材のクリープ等で膜に弛緩が 発生するのでケーブル端部には張力再導入の機構が設置される。膜 には設計初期張力として2kg/cm(19.6 N/cm)程度が導入されるこ とが多く、膜張力は十分に大きいので、膜構造部分の振動数は骨組 構造に比して高い。仮にこの膜構造に骨組を介して振動が発生して も、短周期の振動が生ずるが、4 節に示すように、骨組が振動する モードと膜の振動するモードのなかで、地震入力によって励起され るモードの固有周期は異なるので、加速度応答倍率は高々2 程度で あろう。地上での設計加速度(損傷限界相当)を100~150 cm/sec², 通常の骨組膜構造における取り付け部材位置の加速度の応答倍率を 2~5倍程度と仮定するならば、膜の取り付け位置での応答加速度は、 大きくても 200~750 cm/sec²程度である。膜が細長いので,ある部 分は 200 cm/sec²程度,ある部分は 750 cm/sec²程度と, 膜は異なる加 速度で加振される。このような膜は、短辺方向に関する1方向性の 強い振動性状を有するので,取り付け位置における最大加速度の発 生している部分の加速度波形を入力とすれば、工学的にはその応答 性状を把握できる。取り付け位置に対する膜部分の応答倍率を 1.0 ~2.0 程度と推定するならば、膜部分の応答加速度は、高々1500 cm/sec²程度である。押えケーブルの振動も問題となるが、膜に発生 する荷重は, X, Y, Z方向に高々4.5 kgf/m² (44.1 N/m²程度) に過 ぎないのでケーブル張力の変動はそれほど大きくない。もし、ケー ブル張力の変化がそれほどでなく、短期の許容応力度内に収まり、 かつ、張力の消失が生じないことが確かめられれば、ケーブル張力 についても損傷限界相当の地震荷重に対して設計上大きな問題が生 じない。この点については、8節の応答解析を通してその妥当性を 検証する。

なお,大雪時で滑雪処理が施されがない場合のように,極めて大 きい積雪荷重を想定する必要がある場合については、 ユニット型骨 組膜と同様,今後,研究が必要となろう。

2.2.3 安全限界相当の地震動

上記の議論より,損傷限界相当の地震動に対して,膜およびケー ブルには構造上大きな問題が生じないことが推測できる。それでは、 安全限界相当の地震動についてはどうであろうか。

安全限界相当の地上での地震動の強さは、建設地の地盤特性に大 きく影響を受ける。安全限界相当の地震動を受けると,地盤の塑性 化等により、加速度応答は損傷限界相当の地震動の場合の 2~4 倍程 度となる。塑性化の小さい地盤は1種あるいは2種の地盤であり、 この場合は地震動の加速度はそれほど増幅されず、地表で300~600 cm/sec²程度となる。一方,塑性化の大きな3種の地盤では,増幅率 は塑性化によって低減され、地表での加速度は大きくても 500 cm/sec²程度と考えられる。仮に、地盤種別に関わりなく地表の加速 度を 600 cm/sec²と想定すると、加速度だけをみれば、損傷限界に先 に仮定した加速度値 150 cm/sec²の 4 倍である。したがって, 2.2.2 節の議論をふまえれば、膜部分の加速度応答は、1500 cm/sec²の 4 倍の 6000 cm/sec²となる。 膜材料の重量 (3 kgf/m² あるいは 29.4 N/m² 程度)を考慮すると、鉛直、水平方向に高々27 kgf/m² (265 N/m²程 度)の増加である。雪荷重が60 kgf/m2 (588 N/m2程度)を想定する と、上記の値は雪荷重の 1/2 程度に過ぎない。雪荷重に対する安全 性が確認されることは設計の基本条件であるので、安全限界相当の 地震力に対しても膜部分が安全であることが推測できる。

なお,2.2.2 節と同様に,大雪時で滑雪処理されないような場合に ついては,今後,研究が必要となろう。

2.4 下部構造の変形にともなう膜構造の損傷

空間構造の特徴は、スパンの大きな構造が多いことである。した がって、外周も長くなる。外周が長くなれば、そこでの変位は一様 でなくなり、多少の不均一性が生ずる。したがって、とくに、長細 いケーブル併用ユニット型骨組膜では、この不均一性が膜に損傷を 与える危険性も想定される。しかしながら、膜の剛性は、膜を取り 付ける骨組の剛性に比して相当に小さく,許容される伸びひずみは,

骨組に比べて相当に大きい。したがって、このような膜材料の変形 性状から判断すれば、下部構造が大きな損傷を受ける以前には膜に は大きなひずみの発生がないと考えられる。この点についても、本 研究で分析する。

以下の節では,損傷限界,安全限界及びその中間の修復限界相当 の地震動を国土交通省告示にしたがって作成し,1 つの典型的な骨組 膜構造物の固有振動解析と地震時応答解析を行い、

膜構造物の地震 時の挙動を解明して、実務設計での時刻歴応答解析の必要性につい て考察する。

3. 建築基準法における膜構造の位置づけ

現時点では、膜構造、ケーブル構造の構造安全性に関する告示は 存在しない。したがって、建築基準法における膜構造の位置づけに ついては、議論する資料と拠り所がない。構造安全性に関する検証 を行うとするならば、超高層建築物等の設計時に必要とされる時刻 歴応答解析によることとなろう。また、膜材料を主要な構造材とし て用いるならば,建築基準法37条による大臣認可を得て使用する こととなる(正確には、告示を待って議論したい)。

以上の理由により, 社会的行為としての膜構造の構造設計とその 建築基準法における膜構造の位置づけについては、膜構造、ケーブ ル構造の構造安全性に関する告示が施行されてから議論する。

本研究では、時刻歴応答解析結果に基づき、ごく標準的な膜構造 物の地震時の安全性に関する検討結果を示し、これをもって、今後 告示が定められた場合、膜構造の安全性に関する一般的につながる ような基礎資料を提示することを目的とする。

4. 解析モデルおよび解析手法

4.1 解析モデル

梁間方向が28.2m, 桁行方向が38.0m及び軒の高さが8.1mの平 屋建て体育館を想定する。下部構造は、妻と桁の両方向に耐震壁を 有する RC 造ラーメン構造で、柱脚は剛支持とする。耐震壁は剛性 が等価なブレースに置換する。屋根は鋼管によるアーチ梁と中央が ケーブルで押えられた膜構造で構成され、アーチ梁は RC 造の柱頭 で剛接合されているものとしている。なお, 膜材料は A 種膜材料で ある。下部構造とアーチ梁の骨組モデルを図 4.1 に示す。また、主 要な部材の断面は、表4.1に示したとおりである。

| | 表 4.1 王要な部材の断面 |
|---------|-------------------------------|
| 部位 | 断面 |
| 柱 | 妻面: BxD = 550x1100 |
| | 妻面以外: BxD = 800x550 |
| 梁 | 地中梁: BxD = 400x2000 |
| | 上部の梁: BxD = 600x900 |
| 置換ブレース | WT1: $A = 275.7 \text{ cm}^2$ |
| 1 | WT2: $A = 411.9 \text{ cm}^2$ |
| アーチ梁 | φ457.2 ×t19.0 |
| アーチ間繋ぎ梁 | ϕ 139.8 × t6.6 |



膜面の要素分割は、図 4.1 に示す外周梁や屋根アーチ梁の分割節 点を通り、アーチ梁方向に 16 分割、外周梁の柱間を 2 分割したほぼ 4 辺形のメッシュとする。以下で示す「膜モデル」では、この 4 辺 形をさらに 4 分割したモデルを用いて等張力の膜面形状を解析した 後に、固有振動解析を行う。しかし、骨組の解析のために通常実務 で用いられるプログラムでは、4 辺形の有限要素を用いることはで きない。したがって、以下のような手順で、三角形要素の各辺にケ ーブル材が配置された「ケーブル置換モデル」を定義する。ケーブ ル置換の詳細については、文献[1]などを参照すること。

図4.2 に示すように,4 辺形メッシュ(膜モデルで4分割する前の 4 辺形)を1つの対角方向に分割した三角形メッシュを考える。図 4.3 のような要素分割において,X,Y方向及び斜め方向のケーブル の伸び剛性は,膜のたて糸,よこ糸方向の伸び剛性及びせん断剛性 が等価になるように決める。膜のたて糸方向とよこ糸方向は,膜の 単位幅あたりの弾性剛性に負担幅を乗じて求める。ここで,膜の応 力ひずみ関係は非線形であるが,本研究では,自己釣合い状態から の付加変形が問題になるため,弾性係数には,釣合い応力レベルで の接線係数を用いる。また,図4.3 に示すように,置換したケーブ ルは,X方向(たて糸方向)にほぼ1.85 m間隔に,Y方向(よこ糸 方向)にほぼ2.25 m間隔に配置されている。せん断剛性は,図4.4 のように,膜要素をせん断変形させるために必要な力が等価になる ように決定する。本研究の解析モデルでの膜,押えケーブルの剛性 と,置換ケーブルの等価伸び剛性を表4.2 に示す。







| | 膜と押えケーブル の剛性 | ケーブルの 等価伸び剛性 |
|-----------------|--|--|
| X 方向 ケーブル | 膜のたて糸方向 E _{tたて} = 1180 kN/m | $EA_{x} = E_{t \not\approx \tau} \times l_{2}$ = 1180×1.85 = 2183 kN |
| Y 方向 ケーブル | 膜のよこ糸方向 E _{t よこ} = 962 kN/m | $EA_{Y} = E_{t,t,z} \times l_{1}$ = 962×2.25 = 2165 kN |
| 斜め方向 ケーブル | 膜のせん断剛性 G _t = 66.6 kN/m | 図 4.4 の式より, EA _d = 415kN |
| 押えケーブル (30¢) | $E = 140 \text{ kN/mm}^2$ A = 438 mm ² | 同左 |

表 4.2 ケーブル置換モデルの等価伸び剛性

次に,置換したケーブルの初期張力を算定する。膜面の設計初期 張力は,たて糸とよこ糸方向ともに 2.0 kN/m である。置換ケーブル の間隔は,X方向(たて糸方向)ケーブルはほぼ 1.85 m,Y方向(よ こ糸方向)ケーブルはほぼ 2.25 m なので,X,Y方向のケーブル初期 張力は,それぞれ 2.0×1.85 = 3.7kN,2.0×2.25 = 4.5 kN であるが, 簡単のためこれらを 4.0 kN 及び 5.0 kN で近似する。たて糸とよこ糸 方向の初期張力をX方向とY方向のケーブルの初期張力で置換した ため,斜めケーブルの初期張力は微小と仮定し,1.0 kN とした。ま た,形状解析に用いた押えケーブルの設定初期張力は 20 kN であり, 膜モデルとケーブル置換モデルの振動解析でも 20 kN とした。

なお、このようにして得られた置換ケーブルの初期張力は、正確 には各節点での釣合い条件を満足していない。しかしながら、設定 張力場で再度ケーブルの釣合い形状を解析した置換モデルの修正膜 面形状と修正前形状との差異は微小である。したがって、本研究の 目的のひとつである簡略化手法に基づく膜構造の応答評価という観 点から、厳密には節点での力の釣合いを満足しない修正前形状を振 動解析に用いた。

4.2 解析方法

固有振動解析と地震時応答解析法の概要について述べる。膜のような形態抵抗型構造物では、幾何学的非線形を考慮した解析が行われるのが一般的ではある。しかし、図 4.2 に示したような骨組膜モデルでは、骨組の変形は十分に小さく、さらに、押えケーブルによって膜の変形が抑制されるので、線形剛性行列と幾何剛性行列のみを用い、節点移動の影響を考えない線形解析とする。基本的性状の確認という観点からは、このような解析方法で十分である。したがって、地震力作用下における形態変化は小さく、さらに、各ケーブル内の張力変化は微小であり、張力の値は 4.1 節で示した初期張力値を保持すると仮定する。

4.2.1 固有振動解析

上記の仮定にしたがうと,固有値解析は,以下のような線形固有 値問題に帰着する。

$$\left[-\omega_i^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}_T\right] \Phi_i = \mathbf{0} \tag{4.1}$$

ここで, M, Krは質量マトリクスおよび初期剛性マトリクスであり,

ω_i及びΦ_iは i 次の固有円振動数および固有振動モードである。な お,質量マトリクスとしては集中質量マトリクスを採用し,初期剛 性マトリクスは初期張力の影響を考慮した次式にて定義されるもの とする。

$$\boldsymbol{K}_T = \boldsymbol{K}_L + \boldsymbol{K}_G(\boldsymbol{N}_0) \tag{4.2}$$

ここで、 K_L は線形剛性マトリクスである。また、 K_G は通常幾何剛性 マトリクスと呼ばれる行列であり、初期張力ベクトル N_0 にて計算さ れる。本来、幾何剛性マトリクスは対象時刻における存在応力によ り決定されるものであるが、上述したように、初期釣合い形状近傍 での微小振動を考え、ケーブルの張力は初期張力値を保つという仮 定から、 K_G を計算するための張力は一定とする。

4.2.2 地震応答解析

固有振動解析と同様に、本研究では、対象とする膜構造物を線形 システムとして仮定しているため、解くべき運動方程式は次式で表 される。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K_T u = -MI\ddot{u}_g \tag{4.3}$$

ここで、1 は地震力作用方向成分のみが単位の大きさであるような ベクトル、u は節点変位ベクトル、üg は入力地震加速度である。ま た、C は減衰マトリクスであり、本研究では剛性比例型の減衰(1 次モードに対して 2%あるいは 3%の 2 種類)を採用している。

線形システムを考えているので,式(4.3)を固有モード分解し,モ ード重ね合わせ法による時刻歴応答解析を行う。具体的には,固有 値解析により得られたモードを用いて,式(4.3)をモード空間に展開 した後,各モードに関する1自由度系の運動方程式をNigam-Jennings 法により解く。詳細は文献[2]などを参照すること。

5. 入力地震動

構造物への入力地震動は国土交通省告示[3]にしたがって作成す る。まず、平12建告第1461号で与えられた加速度応答スペクトル に適合した地震動を作成する。模擬地震動は、位相スペクトルに日 Centro NS の位相特性を設定し、目標とする応答スペクトルに適合す るようにフーリエ振幅スペクトルを収束計算により求める[4]。建設 省告示において、希に発生する地震波(損傷限界)とその5倍に値す る極めて希に発生する地震波(安全限界)を定めている。本研究では、 図5.1に示すように、損傷限界の2.5倍に値する修復限界を定めた。 ここで、T は固有周期である。



次に, 地盤の地震応答解析を行った。地震動は基盤面から鉛直上 方に伝達し、基盤面は水平にのみ振動すると仮定して、図 5.2 に示 すように,成層地盤を1次元せん断質点系でモデル化する。成層地 盤の最下部は自由端とし,基盤面との境界条件に Lysmer, Kuhlemeyer によって提案された粘性境界を仮定する。これにより, 有限の領域による解析において,広域な広がりを考慮することがで きる。成層地盤はすべて砂質土とし、1層あたり2mとする。成層 地盤のパラメータを表 5.1 に示す。また、工学的基盤は、単位体積 あたり質量 2100 kg, せん断波速度 500 m/s とする。地盤の塑性は等 価線形化法を用いて考慮する。各層の剪断ひずみに応じ,平12建告 第1457号表第一から剛性の低減係数を求め、平12建告1457号別表 第二から減衰定数を求める。図 5.3 に表層の加速度応答スペクトル を示す。地盤の剛性が小さくなるにともない、スペクトルのピーク が長周期化しており、例えば構造物の1次固有周期が0.5s程度であ る場合,地盤が最も固い T0.2H10M の地震波が最も大きな応答とな っている。したがって、8節の応答解析では、図5.1の損傷限界、修 復限界,安全限界のスペクトルに適合する地震波を基盤面で作成し, T0.2H10M の成層地盤モデルを用いて増幅された地震波を,それぞ れ「損傷限界レベル」、「修復限界レベル」、「安全限界レベル」の地 震波とし、それらの波を用いて時刻歴応答解析を行う。なお、作成 した模擬時地震動のデータは、http://www.st.tutrp.tut.ac.jp/~kyozai/で 公開している。





まち1 式屋地般のパラノータ

| | 地盤厚 | 田太国期 | 剪断波 | 単位体積 |
|----------|--------------|-------|------------|--------|
| モデル名 | さ | 回有同别 | 速度 | 質量 |
| | <i>H</i> [m] | I [s] | $V_S[m/s]$ | ρ [kg] |
| T0.2H10M | 10 | 0.2 | 200 | 1850 |
| T0.3H10M | 10 | 0.3 | 133 | 1850 |
| T0.3H20M | 20 | 0.3 | 267 | 1850 |
| T0.4H20M | 20 | 0.4 | 200 | 1850 |
| T0.5H20M | 20 | 0.5 | 160 | 1850 |
| T0.6H20M | 20 | 0.6 | 133 | 1850 |
| T0.5H30M | 30 | 0.5 | 240 | 1850 |
| T0.6H30M | 30 | 0.6 | 200 | 1850 |
| T0.7H30M | 30 | 0.7 | 171 | 1850 |
| T0.8H30M | 30 | 0.8 | 150 | 1850 |



図 5.3 表層の加速度応答スペクトル(h=0.02)

6. ケーブル置換モデルの検証

4 節で述べたように、本研究では膜部分をケーブル置換して、有 限要素解析プログラムでのトラス要素を用いて解析を行う。本節で は、このモデル化の数値解析上の妥当性について、部分モデルを用 いて検証する。なお、本研究では膜構造の動的挙動を明らかにする ことを目的としていることから、ケーブル置換モデルおよび膜要素 モデルの両モデルによる固有振動解析を通して検証することとする。 図 6.1 に解析対象モデルを示す。このモデルは、図 4.2 に示した全 体モデルの中央3スパンのみを取り出したものとなっている。境界 条件は、両桁部分(図中の a-a 線上および a'-a'線上)の節点を単純 支持として、両側のアーチ部分(図中の b-b 線上および b'-b'線上) の節点を x 方向拘束ローラー支持としている。アーチ部分をローラ ー支持とした理由は、全体モデルにおける挙動に準ずるよう配慮し たためである。また、ケーブル置換モデルに対して膜要素モデルは、 約2倍の要素分割を施している。これは、これは、膜要素モデルに よる解を厳密解として取扱うために精度の向上を図ったためである。



図 6-1 膜要素モデル及びケーブル置換モデル

図 6.2 および図 6.3 に,固有振動解析結果を示す。図 6.2 は,固有 周期と各方向に対する有効質量比の関係を示している。図中,〇は 膜要素モデルによる,■はケーブル置換モデルの結果である。ここ に,I次固有モードの *id* 方向加振に対する有効質量比_{*id*} *M*_I は各方向 に対して次式で定義される。

$$_{id}\overline{M}_{I} = \frac{_{id}\beta_{I}^{2}}{_{id}M_{total}}, \qquad _{id}\beta_{I} = \frac{\phi_{I}^{T}\mathbf{M}\mathbf{1}_{id}}{\phi_{I}^{T}\mathbf{M}\phi_{I}}$$
(6.1)

ここに、Mは質量マトリクス、 1_{id} は全自由度中対象となる方向成分 のみを1としたベクトル、 ϕ_I はI次固有モードである。また、 $_{id}M_{iotal}$ は対象方向に関する全質量であり、対象方向変位が自由である節点 の質量の総和に相当する。

両結果は、ほぼ同様な分布状況となっていることから、同じ固有 周期を持つモードはほぼ同じ有効質量比を有することを意味してい る。すなわち、ケーブル置換モデルと膜要素モデルがほぼ同様の振 動特性を有することを意味している。さらに、図 6.3 は有効質量比 が大きい 1~3 次の両モデルの固有振動モードを示したものである。 モードの符号が入れ替わっているものもあるが、形状をみると、膜 モデルの 1,2,3 次モードが置換ケーブルモデルの 1,3,2 次モードにそ れぞれ対応しており、それらの固有周期も十分な精度で一致してい ることがわかる。







1次 (0.2526 sec)

1次 (0.2449 sec)



2次 (0.2182 sec)

3次 (0.2034 sec)



(a) 膜モデル
 (b) ケーブル置換モデル
 図 6.3 両モデルによる固有ベクトル

以上より,4節で示したケーブル置換モデルでの膜剛性評価,膜 張力評価および質量評価が妥当であり、ケーブル置換モデルは、そ の原型である膜要素モデルをよく近似したモデルであることがわか る。したがって、本ケーブル置換モデルを動的解析に用いることが 可能であり、以下の節においては、ケーブル置換モデルのみを用い て解析するものとする。

7. 固有振動解析

膜(解析上は置換ケーブル)の振動特性への影響を考察するため、 骨組モデル(膜のないモデル)と骨組膜モデル(ケーブル置換モデ ル)の50次までの固有周期と刺激係数を表7.1に示す。1次から6 次までの固有周期と刺激係数には、骨組モデルと骨組膜モデルに差 が見られない。固有モードも同様であることを確認している。した がって、この範囲では、膜あるいはケーブルが局所的に振動するモ ードは存在せず、それらの剛性と質量が振動特性に及ぼす影響が小 さいといえる。図7.1、7.2に、1層モデルの1次モード2次モード を示す。これらのモードは、それぞれX方向、Y方向の有効質量が 最大になるモードである。

表 7.1 からわかるように, 骨組モデルの 7 次モードは, Z 方向入 力に対して励起されるモードであり, 骨組膜モデルの 31 次モードに 対応している。同様に, 骨組モデルの 9 次モードは, 図 7.3 にも示 すように, 骨組膜モデルの 35 次モードに対応している。したがって, 骨組膜モデルの 8~31 次モード及び 32~34 次モードには, 膜面の振 動にともなう骨組膜モデル固有のモードであるといえる。

表 7.2 に,時刻歴応答解析で考慮すべきモード数を算定するため に用いられる累積有効質量比を 10 次ごとに示す。本解析例では,X 方向,Y方向の応答に関しては,累積有効質量比から判断すると, 骨組モデルでは 20 次まで,骨組膜モデルでは高々70 次まで考慮す れば十分であるといえる。

| | 表 | 7.1 | 固有周期 | (sec) | と刺激係数(| ton |) |
|--|---|-----|------|-------|--------|-----|---|
|--|---|-----|------|-------|--------|-----|---|

| | 價 | 組モ | デル | | /6-? | 骨組膜 | モデル | |
|----|--------|-------|--------|-------|--------------|-------|--------|-------|
| 次数 | 固有周期 | 束 | 引激係数 | 女 | 固有周期 刺激係数 | | | |
| | | X | Y | Z | | X | Y | Z |
| 1 | 0.2932 | 14.99 | 0.00 | 0.00 | 0.2938 | 15.03 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 0.2615 | 0.00 | -13.29 | 0.00 | 0.2621 | `0.00 | -13.34 | 0.00 |
| 3 | 0.2321 | 0.00 | 0.00 | -1.97 | 0.2349 | 0.00 | 0.00 | 2.16 |
| 4 | 0.2276 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2268 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 0.2075 | -6.20 | 0.00 | 0.00 | 0.2112 | -5.85 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 0.2004 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2073 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7 | 0.1795 | 0.00 | 0.00 | -1.08 | 0.2072 | 0.00 | -0.07 | 0.00 |
| 8 | 0.1791 | 0.00 | 1.36 | 0.00 | 0.2062 | 0.00 | 0.00 | 0.05 |
| 9 | 0.1753 | 10.93 | 0.00 | 0.00 | 0.2061 | 1.52 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 0.1603 | 1.35 | 0.00 | 0.00 | 0.2030 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 0.1565 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2013 | 0.00 | 0.38 | 0.00 |
| 12 | 0.1502 | 0.00 | -14.11 | 0.00 | 0.2011 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 13 | 0.1456 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.2004 | 0.53 | 0.00 | 0.00 |
| 14 | 0.1213 | 0.00 | 0.00 | -1.08 | 0.2001 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 15 | 0.1211 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1919 | 0.00 | 0.00 | 0.74 |
| 16 | 0.1179 | 0.00 | 0.90 | 0.00 | 0.1906 | 0.22 | 0.00 | 0.00 |
| 17 | 0.1163 | 0.00 | -2.32 | 0.00 | 0.1904 | 0.00 | 0.00 | 0.17 |
| 18 | 0.1047 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1902 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 19 | 0.0995 | 0.00 | 0.00 | -0.15 | 0.1895 | -1.17 | 0.00 | 0.00 |
| 20 | 0.0928 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1877 | -0.85 | 0.00 | 0.00 |
| 21 | 0.0892 | -1.20 | 0.00 | 0.00 | 0.1877 | 0.00 | 0.00 | 0.05 |
| 22 | 0.0883 | 0.00 | 0.88 | 0.00 | 0.1872 | 0.61 | 0.00 | 0.00 |
| 23 | 0.0875 | 0.00 | 0.00 | -1.39 | 0.1869 | 0.00 | -0.55 | 0.00 |
| 24 | 0.0857 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.1861 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 25 | 0.0755 | 0.00 | -0.76 | 0.00 | 0.1833 | 0.00 | 0.00 | 0.43 |
| 26 | 0.0749 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1829 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| 27 | 0.0686 | 0.00 | 0.00 | 1.72 | 0.1825 | 0.00 | -0.33 | 0.00 |
| 28 | 0.0620 | 0.00 | 0.00 | 0.32 | 0.1824 | 1.48 | 0.00 | 0.00 |
| 29 | 0.0620 | -0.21 | 0.00 | 0.00 | 0.1804 | 0.00 | -0.68 | 0.00 |
| 30 | 0.0618 | 0.00 | -0.60 | 0.00 | 0.1802 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 31 | 0.0600 | -0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.1785 | 0.00 | 0.00 | -0.76 |
| 32 | 0.0584 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1776 | 0.00 | 0.86 | 0.00 |
| 33 | 0.0573 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | 0.1773 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 34 | 0.0562 | -0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.1769 | -0.01 | -0.94 | 0.00 |
| 35 | 0.0557 | 0.00 | -0.01 | 0.00 | 0.1764 | 9.77 | 0.00 | 0.00 |
| 36 | 0.0557 | 0.00 | 0.00 | 1.84 | 0.1744 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 37 | 0.0539 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 0.1744 | 0.00 | 0.43 | 0.00 |
| 38 | 0.0532 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1724 | 0.89 | 0.00 | 0.00 |
| 39 | 0.0404 | 0.00 | 0.00 | -0.12 | 0.1720 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 40 | 0.0402 | 0.00 | -0.01 | 0.00 | 0.1715 | 0.00 | 0.00 | 0.07 |
| 41 | 0.0392 | -0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.1709 | -4.07 | 0.00 | 0.00 |
| 42 | 0.0377 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1694 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| 43 | 0.0375 | 0.00 | 0.27 | 0.00 | 0.1694 | -0.01 | 0.00 | -0.02 |
| 44 | 0.0369 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.1693 | 0.04 | 0.00 | 0.00 |
| 45 | 0.0351 | 0.00 | -0.40 | 0.00 | 0.1692 | -1.18 | 0.00 | 0.00 |
| 46 | 0.0334 | 0.00 | 0.00 | 0.41 | 0.1680 | -0.01 | -0.15 | 0.00 |
| 47 | 0.0332 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.1680 | 1.56 | -0.02 | 0.00 |
| 48 | 0.0315 | 0.00 | 0.00 | -0.06 | 0.1678 | -0.05 | -0.04 | 0.00 |
| 49 | 0.0309 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.1678 | 0.03 | 0.67 | 0.00 |
| 50 | 0.0295 | 0.00 | 0.00 | -0.51 | 0.1672 | 0.01 | 0.00 | -0.02 |



図 7.3 骨組モデルの9次モードと骨組膜モデルの 35 次モード

主77 用穗古动质昌山

| | | 12 1.4 | 术很生 | 引加良 | ILL. | |
|---------------|------|---------|---------|------|--------|---------|
| 次数 | 骨 | 組モデ | ジル | 骨糸 | 眼モ | デル |
| in the second | (全質) | 量 386.0 |)16ton) | (全質: | 量 387. | .67ton) |
| | X | Y | Z | X | Y | Z |
| 10 | 1.00 | 0.46 | 0.01 | 0.68 | 0.46 | 0.01 |
| 20 | 1.00 | 0.99 | 0.02 | 0.68 | 0.46 | 0.01 |
| 30 | 1.00 | 1.00 | 0.03 | 0.69 | 0.46 | 0.01 |
| 40 | 1.00 | 1.00 | 0.04 | 0.94 | 0.47 | 0.02 |
| 50 | 1.00 | 1.00 | 0.04 | 0.99 | 0.47 | 0.02 |
| 60 | | | | 1.00 | 0.47 | 0.02 |
| 70 | | | | 1.00 | 0.97 | 0.02 |

8. 地震応答解析結果

解析の準備として、安全限界レベルの地震波を X 方向に入力し、 時間刻みと採用次数を変化させたときの最大応答変位、最大応答加 速度、最大応答膜ひずみを求めた。結果を表 8.1 に示す。ここで、1 次の減衰定数 h₁は 0.05 であり、膜ひずみの最大値を評価する際に、 せん断ひずみを求めるための斜め部材のひずみは除いている。また、 変位は相対変位、加速度は絶対加速度である。採用モード数は、前 節の固有振動解析結果での累積有効質量からも判断できるが、表 8.1 より、50 次までで十分であることがわかる.また、時間刻みは 0.01 として良い。

膜の存在しない骨組のみのモデルに対し,安全限界,修復限界及 び損傷限界レベルの3つの地震波をX,Y方向に入力した場合の解 析結果を表8.2に示す。ここで,h₁=0.05である。また,最大変位と 最大加速度の方向は,全ての場合で入力方向に一致している。

| _ | 10 | 0.1 17/11/ | XX HUIHIXIV | C加日重。7天1 | |
|----|------------|---------------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|
| ÷ŧ | 採用 ニード数 | 時間刻み (sec) | 最大変位 (m) | 最大加速度 (m/sec ²) | 最大 膜ひずみ (×10 ⁻³) |
| | 50 | 0.01 | 0.05321 | 24.51 | 0.8698 |
| | 80 50 | 0.01 0.002 | 0.05275 | 24.45 24.55 | 0.8604 0.8718 |

表 8.1 採用次数・時間刻みと応答量の関係

表 8-2 骨組モデルの応答解析結果

| 地震波 | 入力方向 | 最大変位(m) | 最大加速度 (m/sec ²) | |
|-----|------|---------|--------------------------------|--|
| 安全 | Х | 0.05030 | 22.03 | |
| 修復 | Х | 0.04112 | 19.75 | |
| 損傷 | х | 0.01695 | 8.67 | |
| 安全 | Y | 0.02138 | 11.92 | |
| 修復 | Y | 0.01989 | 11.50 | |
| 損傷 | Y | 0.00872 | 5.17 | |

表 8.3 安全限界レベル地震波に対する応答解析結果

| 減衰 | 入力 | 最大変位(m) | 最大加速度 | 最大膜ひずみ |
|------|----|---------|-----------------------|----------------------|
| 定数 | 方向 | | (m/sec ²) | (×10 ⁻³) |
| 0.05 | x | 0.05321 | 24.51 | 0.869 |
| 0.02 | x | 0.06868 | 43.34(Z) | 1.108 |
| 0.05 | Y | 0.02343 | 13.14 | 0.732 |
| 0.02 | Y | 0.02763 | 15.74 | 0.771 |

表 8.4 修復限界レベル地震波に対する応答解析結果

| 減衰 定数 | 入力 方向 | 最大変位(m) | 最大加速度 (m/sec ²) | 最大膜ひずみ (×10 ⁻³) | |
|----------|----------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| 0.05 | X | 0.0427 | 24.50(Z) | 0.716 | |
| 0.02 | x | 0.0634(Z) | 46.00(Z) | 0.920 | |
| 0.05 | Y | 0.0217 | 12.39 | 0.590 | |
| 0.02 | Y | 0.0261 | 15.05 | 0.686 | |

表 8.5 損傷限界レベル地震波に対する応答解析結果

| 減衰 | 入力 | 最大変位(m) | 最大加速度 | 最大膜ひずみ |
|------|----|-----------|-----------------------|----------------------|
| 定数 | 方向 | | (m/sec ²) | (×10 ⁻³) |
| 0.05 | X | 0.0176 | 12.43(Z) | 0.2980 |
| 0.02 | x | 0.0318(Z) | 24.95(Z) | 0.3539 |
| 0.05 | Y | 0.0095 | 5.63 | 0.2547 |
| 0.02 | Y | 0.0117 | 7.05(Z) | 0.2918 |

表8.2 より、応答量は、安全限界、修復限界、損傷限界の順に小 さくなっていることが確認できる。しかし、とくにY方向入力に対 しては、安全限界と修復限界の応答量はそれほど変わらない。これ は、Y方向入力に対して励起される最低次のモード(2次固有モー ド)の固有周期(0.2621 sec)付近で、図5.3のT0.2H10Mで示した ように、安全限界と修復限界の応答スペクトルがほぼ等しい値とな っていることに対応している。







(a) X 方向入力



(b) Y 方向入力 図 8.1 最大応答加速度(安全限界, h_i=0.05)

次に,ケーブル置換モデルについて, h_1 が 0.02 と 0.05 の場合の 解析を行った。最大変位,最大加速度及び置換ケーブルの最大ひず みを表 8.3~8.5 に示す。ここで,カッコ内は最大値の生じている方 向であり,とくに明記しない場合は入力方向と一致している。この 結果より, h_1 =0.02 のときは,応答量は概ね 0.05 のときの 1.3 倍程度 となることがわかる。また,表 8.1 に示した骨組のみの解析結果と ケーブル置換モデルの h_1 =0.05 の解析結果を比較すると,応答量は 多くても 1 割増し程度である。

膜のひずみは極めて小さいことから, 膜は骨組にしたがって振動 し, 膜自身が振動するモードは励起されていないことがわかる。そ の原因としては,表7.1,7.2 に示したように,膜の局所振動モードの 刺激係数が小さいことが考えられる。屋根の勾配が大きい場合や, 膜の支点間距離が大きい場合には,応答は大きくなる可能性がある が,本解析結果から判断して,安全限界レベルの入力に対しても, 膜の破断につながるような応答が生じることは,極めて稀であると 予想される。さらに,表8.3~8.5 において,膜のひずみは,大きく ても骨組の最大変位を支点間距離(4.5 m)で割った値より1桁小さい 値であり,骨組及びアーチが入力方法に逆位相で振動するような状

態も発生していないことが確認できる。

h₁=0.05 のときの安全限界の入力に対する最大応答加速度及び最 大応答変位を図 8.1,8.2 に示す。ここで,最大変位と最大加速度は正 の値を有する絶対量であり,これらの図がある時刻での変形状態に 対応しているものではない。図 8.1,8.2 より,支持構造物の壁部分は, 入力方向と垂直な方向に大きく撓んでいることがわかる。しかし, それらが逆位相で振動するような状況が生じていないことが,低次 の固有振動モード形状からも確認できる。







(a) X 方向入力





(b) Y 方向入力 図 8.2 最大応答変位(安全限界, h₁=0.05)

膜とケーブルの損傷について検討するため、押えケーブルと置換 ケーブル材の最大応答ひずみの詳細を表 8.6 に示す。このうち、安 全限界レベル時の最大ひずみに相当する膜張力を表 8.7 に示す。表 8.6 で、網掛け部は、各部材種別での最大ひずみである。全ての部材 種別で、1 次の減衰定数が 0.02 のとき、0.05 の場合と比べて最大応 答量は大きくなっている。また、膜の置換部材では X 方向入力に対 する応答が大きく、押えケーブルでは、Y 方向入力に対する応答が 大きくなっている。

応答ひずみから応答張力を計算すると、押えケーブルでは、張力 が初期張力の10%程度、境界を除く膜では0.45 kN, すなわち、初 期張力の 20%程度増減している。また,妻境界部の膜では,0.55 kN 程で,初期張力の 25%程度増減している。

表8.3 より, h₁=0.02 の場合,安全限界レベルの地震波による膜部の最大応答加速度は43.34 m/sec²である。それにも関わらず,膜に生じる張力は,初期張力の20%程度である。したがって,4gを超える加速度に対しても,地震時に膜が損傷することはないことが分かる。損傷荷重レベルの地震波に対する応答膜張力は,安全限界レベルの地震波に対する膜張力の2.5~3.0分の1である。すなわち,初期張力の7~8%に過ぎない。

最後に, 膜の変形について検討する。表 8.3 より, 安全限界レベルの地震波に対する膜部の最大変位は 6.8 cm, 膜の支点間距離に対する比は 6.8/450 = 1/66 で, 膜構造の変位制限の 1/15 に比べると非常に小さい。さらに,表 8.2 より,損傷限界レベルの地震波に対する変形は 3.18 cm,膜の支点間距離に対する比は 3.18/450 = 1/141 であり,膜に損傷を及ぼすことはない。

表 8.6 押えケーブル及び置換ケーブルの 応答最大応答ひずみ (×10⁵)

| | 位置 | 安全限界 | 修復限界 | 損傷限界 |
|----------------------|------|--------|-----------------|--------|
| X方向 | 押え | 1.89 | 1.68 | 0.79 |
| h1=0.05 | ケーブル | | | |
| | X 方向 | 53.20 | 42.47 | 19.70 |
| | Y 方向 | 54.78 | 46.90 | 20.00 |
| | 斜め方向 | 240.67 | 209.27 | 88.81 |
| | 妻部境界 | 86.98 | 71.61 | 29.81 |
| X 方向 | 押え | 3.05 | 2.94 | 1.44 |
| h1=0.02 | ケーブル | | e (len Agenge | 104 |
| | X 方向 | 70.87 | 57.06 | 27.34 |
| | Y 方向 | 67.83 | 56.50 | 28.33 |
| | 斜め方向 | 29.84 | 253.03 | 106.88 |
| 54) | 妻部境界 | 110.76 | 92.00 | 35.39 |
| Y方向 | 押え | 3.12 | 2.94 | 1.32 |
| h ₁ =0.05 | ケーブル | | nt court attent | |
| | X 方向 | 35.34 | 33.54 | 15.05 |
| | Y方向 | 23.67 | 19.05 | 8.22 |
| | 斜め方向 | 132.97 | 121.46 | 53.42 |
| | 妻部境界 | 73.21 | 59.01 | 25.48 |
| Y方向 | 押え | 3.71 | 3.56 | 1.63 |
| h1=0.02 | ケーブル | | | |
| | X方向 | 43.63 | 39.83 | 17.88 |
| | Y方向 | 24.92 | 22.11 | 9.40 |
| | 斜め方向 | 154.84 | 145.73 | 64.96 |
| | 妻部境界 | 77.07 | 68.56 | 29.18 |

| 表 8.7 | 安全限界レベ | ルでの押えケー | ブル及び置換ケー | -ブルの張力 |
|-------|--------|---------|----------|--------|
| | | | | |

| | 置換ケーブルの ひずみ (×10 ⁵) | 相当張力 |
|---------------|------------------------------------|---|
| 押えケーブル | 3.708 | $(3.708 \times 10^{-5}) \times 140 \times 438$ = 2.273 kN = 0.227 kgf |
| たて糸 | 70.87 | $(7.087 \times 10^{-4}) \times 1180/1.85$ = 0.452 kN/m = 45.2 kgf/m |
| よこ糸 | 67.83 | $(6.783 \times 10^4) \times 962/2.25$ = 0.290 kN/m = 29.0 kgf/m |
| 妻部境界 (たて糸) | 110.8 | $(7.83 \times 10^{-4})\cos \theta$ × 1180/1.85 = 0.49 kN/m = 49.0 kgf/m |
| せん断変形角 | 240.7 | $2.407 \times 10^{-3} \times 2913/1.85$ = 0.293×10^{-3} rad |

9. 結論

1 層の骨組膜モデルに対して国土交通省告示で定められた地震波 を入力して応答解析を行うことにより,次のような結論を得た。

- 膜のたて糸とよこ糸方向の変形と、せん断変形を、それぞれ 等価なケーブルで置き換えて得られるケーブル置換モデルに よって、膜の動的特性を十分な精度で表現できる。
- 置換ケーブルにプレストレスを導入することによる不釣合い は,膜の振動特性に対してほとんど影響を及ぼさない。

- 3. 膜の質量は骨組の質量と比べて極めて小さく, 膜を付加する ことによる骨組の振動特性の変化は微小である。
- 骨組膜の低次の振動モードは、骨組の振動をともなうモード であり、膜の振動が卓越するような振動モードが地震入力に よって励起される可能性は小さい。したがって、膜自身の振 動による地震応答は微小である。
- 安全限界レベルの入力に対しても、膜は、繊維方向ひずみ及びせん断ひずみの両者を考慮しても破断することはない。また、適切な初期張力の下ではしわが発生することもない。

以上のように,限られた条件での解析結果であるが,支持骨組が 十分な耐震安全性を有する場合において,膜構造物の地震時の安全 性が確認された。したがって,小規模な骨組膜構造物では,時刻歴 応答解析を行う必要はない。また,応答解析が必要な場合でも,ケ ーブル置換モデルを用いることにより,汎用有限要素解析プログラ ムの利用が可能である。今後は,多くの典型的な膜構造物に対して 地震応答解析を実施し,一般的傾向を見出すためのデータを収集す る必要がある。

参考文献

- [1] 日本鋼構造協会編,吊構造,コロナ社,1975.
- [2] 柴田明徳,最新耐震解析,森北出版, 1981.
- [3] 国土交通省住宅建築指導課,国土交通省建築研究所,財団法人 日本建築センター,社団法人建築研究振興協会編集:2001 年版 限界耐力計算法の計算例とその解説,2001.
- [4] 大崎順彦,新・地震動のスペクトル入門,鹿島出版会,1994.

Response Analysis for Evaluation of Seismic Performance of Frame-Supported Membrane Structures

Kazuo Ishii¹, Shiro Kato², Hiroshi Ohmori³, Kenshi Oda⁴, Masumi Fujimoto⁵, Shojiro Motoyui⁶, Makoto Ohsaki⁷, Shoji Nakazawa⁸, Yoshinao Konishi⁹

Time-history response analysis has been carried out for evaluation of seismic performance of a frame-supported membrane structure. The membrane is modeled by equivalent cables. The structure is subjected to artificial seismic motions with three levels that are generated from the response spectrum at the bedrock and are amplified by the surface soil layers.

The major conclusions drawn from the numerical results are as follows:

- 1. Dynamic characteristics of a membrane can be successfully modeled by equivalent cables.
- 2. The unbalanced forces due to prestresses of cables are negligibly small; i.e. form finding analysis is not necessarily be carried out before dynamic analysis.
- 3. Existence of membrane does not have any effect on dynamic properties of the frame, because the additional mass by membrane is very small.
- 4. The modes with frame vibration dominate during earthquake, and the membrane vibration is not excited.
- 5. Vibration of frame and membrane do not lead to wrinkling or fracture of membrane under severe earthquake.

It can be concluded from these results that dynamic analysis is not needed for designing a frame-supported membrane structure if it is not requires for the frame itself. A cable model can easily be used even for the case where dynamic analysis is required.

- 3. Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
- 4. Center for Space Structures Research, Taiyo Kogyo Corporation
- 5. Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City University
- 6. Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology
- 7. Dept. of Architecture and Architectural Systems, Graduate School of Engineering, Kyoto University
- 8. Dept. of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology

^{1.} Prof. Emeritus, Yokohama National University

^{2.} Dept. of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology

^{9.} Dept.of Mechanical and Structural System Engineering, Toyohashi University of Technology