

# 低ライズケーブル補強空気膜構造の構造特性と構造解析について

岩佐義輝\* 真柄栄毅\* 又木義浩\*  
深尾康三\* 岡村 潔\* 岡田 章\*

## 概 概

1988年3月に我が国では初めての大規模空気膜構造である東京ドームが竣工した。本報告では、その実現に至る過程で実施した各種の研究のうち、大規模な実験棟を用いた構造特性に関する実証実験結果およびこれらの実験結果を基礎データとして開発した設計上不可欠な構造解析法および耐風応答解析法について報告する。

### 1. はじめに

空気膜構造は、博覧会のパビリオンあるいはスポーツ施設などの建築物として数多く建設されてきたが、それらは、耐風性および耐久性に関し、恒久建築物として必ずしも十分な性能を保有していないことから仮設建築物に限られていた。<sup>1)</sup>

しかし、David H. Geigerによる耐風性に優れた低ライズケーブル補強空気膜構造システムの開発と、強度、耐久性共に高い四ふっ化エチレン樹脂をコーティングしたガラス繊維布の開発により、本構法による空気膜構造は恒久建築物としての性能を有するにいたり、米国においては多くの大規模な空気膜構造建築物が建設され、既に10年の実績を有している。

また、我が国では、1988年3月に、国内では初めての大規模空気膜構造の東京ドームが竣工した。

低ライズケーブル補強空気膜構造の構造上の特徴としては、他の構造形式と比較して非常に柔らかな構造であり、設計上大きな変形の生じることを前提としている。

このような構造的特徴をもつ構造が、恒久構造物として十分な構造安全性を保有するように設計するためには、各作用荷重下での力学的性状の解明およびそ

れらを加味した適切な解析法が必要である。

低ライズケーブル補強空気膜構造の力学的性状については、Exp'70のアメリカ館の建設時に行なわれた各種の実験結果が川村等<sup>2)</sup>により初めて報告されたが、近年では我が国の大空間施設建設ニーズの高揚に伴い、各研究機関から各種の研究結果が報告されてきている。<sup>3)</sup>

また、解析法についても、形状決定問題に関する解析手法が多く提案され、E. Haug<sup>4)</sup>等の解析法の提案を契機に急速な発展を遂げてきている。

一方、耐風設計に関連する研究は、川村<sup>5)</sup>等により、高ライズの空気膜構造に関するものが多く報告されているが、低ライズケーブル補強空気膜構造に関しては少なく、B.V. Tryggvason<sup>6)</sup>による風洞実験法による研究が一部見られるにすぎず、またそこで提案されている相似則は必ずしも本構造の動力学特性に裏づけられたものではない。

本報告では、本構造の構造設計に必要な構造特性に関する大規模な実験棟を用いた実証実験結果およびこれらの実験結果を基礎データとして開発した構造解析法および耐風応答解析法について報告する。

\* 株式会社 竹中工務店 技術研究所

## 2. 構造特性

### 2.1 大規模試験体の概要

構造特性を把握するために、一辺約25mの試験体（以下大規模試験体と呼ぶ）をつくり、各種の実験・実測を行った。<sup>7)</sup> (Photo. 2.1, Fig. 2.1)

屋根面境界部に設置したコンプレッションリングの形状は常時内圧 (25mmAq) 時に曲げモーメントが最小となるfunicular ringである。また、コンプレッションリングおよび膜曲面の力学性状を詳細に把握するため、リングと下部構造の間にベアリングを設置し下部構造の影響を除外した。

なお、本試験体の屋根面の平均重量は約10kg/m<sup>2</sup>である。

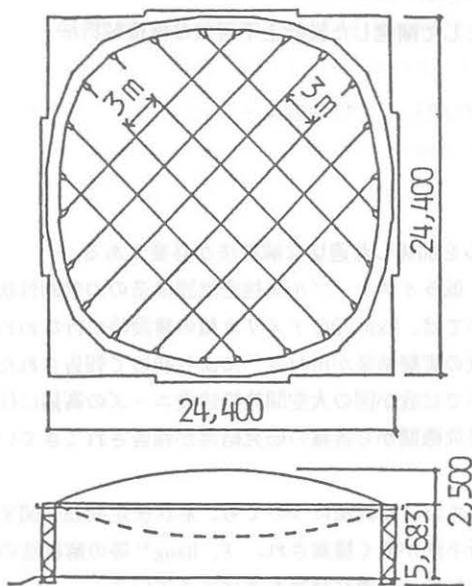


Fig. 2.1 大規模試験体



Photo. 2.1 大規模試験体

### 2.2 静力学特性

#### 1) 内圧時

内圧実験は内圧以外の要因を出来る限り少なくするため、風・温度変化の影響の少ない日時を選び夜間を実施した（風速；静穏状態、ケーブル表面温度22℃一定）。内圧20mmAq～120 mmAqの範囲を5 mmAqステップで段階的に増減させ3サイクル繰り返した。内圧実験結果によると、内圧変化に伴うケーブル交点変位の増減は50mmAq以下では非線形性が強く、50mmAq以上ではほぼ線形関係を示した (Fig. 2.2)。

一方、ケーブル端部張力は、内圧の大きさによらず線形関係を示した (Fig. 2.3)。

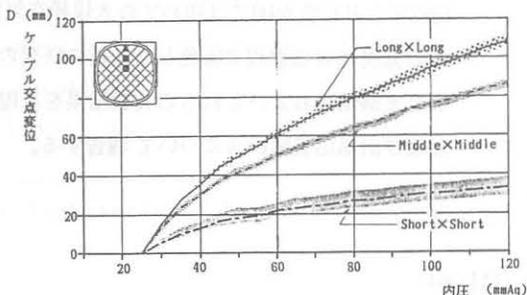


Fig. 2.2 内圧とケーブル交点変位の関係

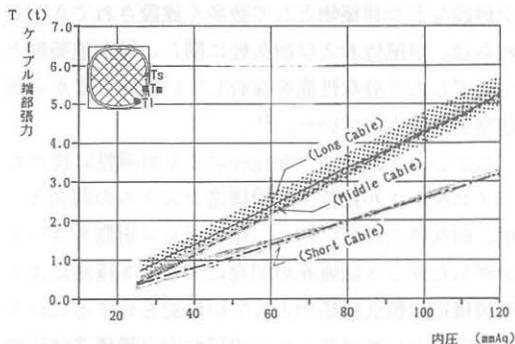


Fig. 2.3 内圧とケーブル端部張力の関係

#### 2) 雪荷重時

屋根面への積雪は内圧と反対方向の荷重であるためケーブル張力の減少に伴い屋根面の剛性を徐々に低下させ、大変形を生じさせる原因となる。また吊物等により生じた凹部分への局所的な積雪によりボンディングと呼ばれる不安定現象が生ずる可能性があることも指摘されている<sup>8) 9)</sup>。

ここでは大規模試験体の1/10のモデルによるライズ・スパン比が0.1、0.15、基準内圧が15、45mmAqの組み合わせによる4タイプの実験結果を示す<sup>10)</sup>。荷重、ケーブル交点変位、ケーブル端部張力はそれぞれ付加

内圧 $\Delta P_i$  (内圧-自重)、無載荷時のライズ $f_0$ 、張力 $T_0$ で無次元化している。この無次元化方式を用いると、荷重-変位、荷重-張力関係はライズ・スパン比、基準内圧に拘わらず荷重モード毎に一義的に定まり、無次元量 $P/\Delta P_i$ 、 $T/T_0$ 、 $\delta/f_0$ は力学的特性を表現する有効なパラメータとなっている (Fig. 2.4)。

荷重に対する変位の増加量は徐々に増大しており、 $P/\Delta P_i=0.8$  ではばライズの 1/5の変形が生じている (Fig. 2.4(a))。ケーブル末端部張力に関しては、Longケーブル( $T_L$ )は $P/\Delta P_i=1.1$  を越えると初期荷重段階の減少傾向が増加傾向に変化し、中央部分のケーブルがサスペンド状態になったものと推察される。一方 Shortケーブル張力( $T_s$ )は $P/\Delta P_i=0.6$  近傍で増加傾向から減少傾向に移行している (Fig. 2.4(b))。

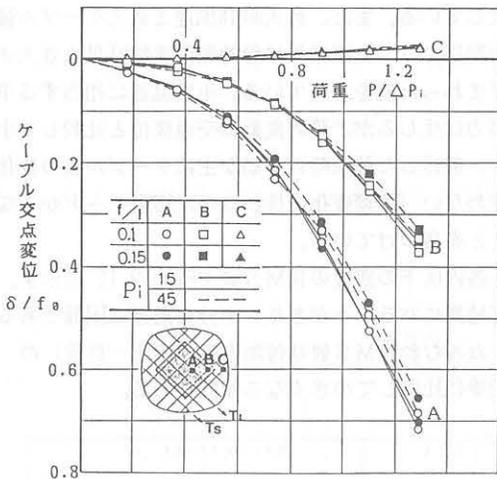


Fig. 2.4(a) 荷重とケーブル交点変位の関係

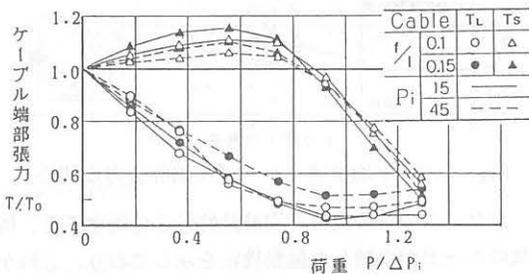


Fig. 2.4(b) 荷重とケーブル末端部変化の関係

## 2.3 動力学特性

### 1) 強制加振実験による動力学特性

大規模試験体において、Fig. 2.5に示す固有モードを再現するため、●印の個所を繰り返し加振し、安定振動が得られた時点に加振を止め、自由振動を測定した。

1次、2次モードに関する共振時の変位、張力波形および内圧変動をFig. 2.6、2.7に示す。1次モードにおいては測定点D26とD29の変位が、2次モードではD5とD16の変位が逆位相になっており、解析で得られた振動モードが再現されている。モード振動は体積変化を伴わない振動であり、ケーブル張力に与える動的影響は少ない。

Table 2.1、2.2にこれらの波形より求めた固有振動数および減衰定数を示す。減衰定数は速度比例型の減衰振動と仮定して変位振幅比より求めた。固有振動数は内圧の増加に伴い徐々に大きくなり、特に1次固有振動数は付加内圧 (内圧-自重) の1/2乗にはほぼ比例して増加している。

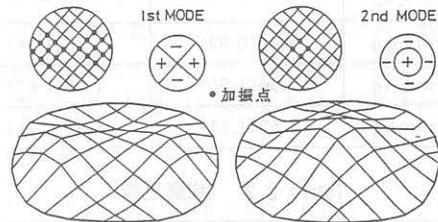


Fig. 2.5 固有モード加振位置

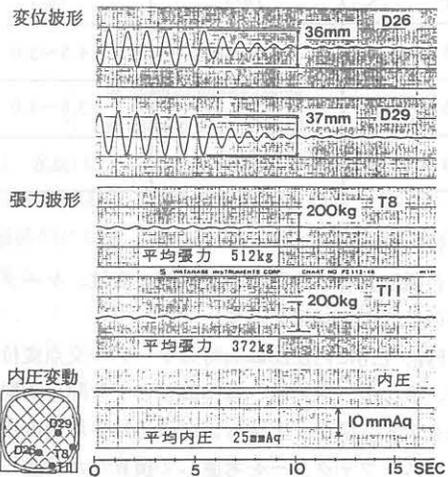


Fig. 2.6 振動波形 (1次モード)

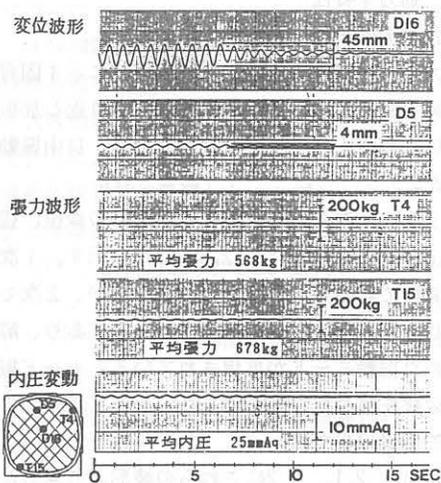


Fig. 2.7 振動波形 (2次モード)

Table 2.1 固有振動数 (Hz)

( )内は解析値

振動モード	1st モード	2nd モード
内圧		
25 mmAq	1.06(0.92)	1.43(1.24)
35 mmAq	1.36(1.20)	1.58(1.67)
50 mmAq	1.62(1.53)	1.92(2.11)

Table 2.2 減衰定数

振動モード	1st モード	2nd モード
内圧	減衰定数 (%)	減衰定数 (%)
25 mmAq	6.0~7.0	4.5~5.0
35 mmAq	5.4	3.8~4.0
50 mmAq	4.2	3.6

## 2) 強風時の振動性状

台風8218号の強風時の屋根面の変位、ケーブル張力等の動的測定結果を示す。

Fig. 2.8に内圧25mmAq時のケーブル交点変位の最大値、最小値、平均値、標準偏差と1分間平均風速の関係を示す。図中、実線および破線は平均速度圧あるいはガストファクターを考慮して換算した荷重に対応する静的風荷重実験結果である<sup>7)</sup>。台風時の平均変位は静的載荷実験結果にほぼ一致している。

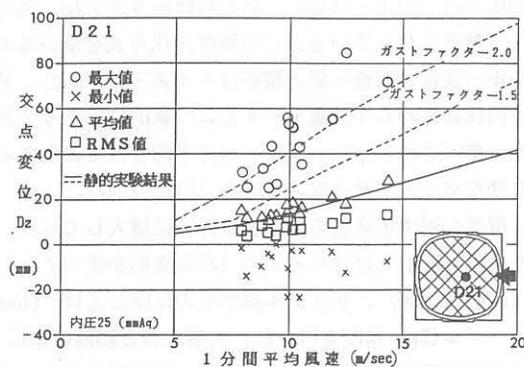


Fig. 2.8 平均風速とケーブル交点変位の関係

次に、風速とケーブル端部張力の関係をFig. 2.9、2.10に示す。平均風速とケーブル端部張力の関係では、平均張力は静的載荷実験結果と、最大張力はガストファクターを1.5とした場合の静的載荷実験結果とほぼ一致している。また、最大瞬間風速と最大ケーブル張力の関係では、実測結果は静的載荷実験結果より大きく下まわった値を示している。平均風速に相当する平均張力は生じるが、張力変動は交点変位と比較して小さく、前述した強風時の挙動が主にケーブル長の変化を伴わない(体積変化の伴わない)振動モードからなることを裏づけている。

各内圧下の変位のRMS値をFig. 2.11に示す。測定結果にバラツキがあり、十分な把握は困難であるが、おおむねRMS値は付加内圧(内圧-自重)の1/2乗に比例して小さくなる傾向にある。

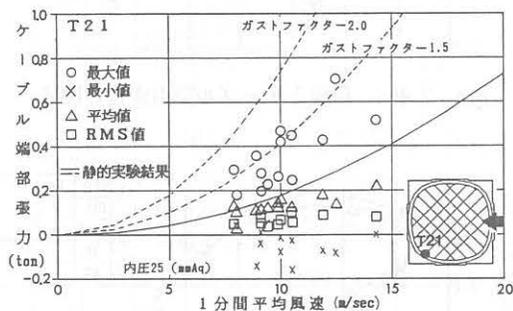


Fig. 2.9 平均風速とケーブル端部張力の関係

また、この時の変位の周波数特性を分析すると、低次のモードが卓越した振動性状を示しており、これからの強風時の挙動はケーブル長の変化を伴わない(体積変化の伴わない)振動モードが主であることがわかる(Fig. 2.12)。

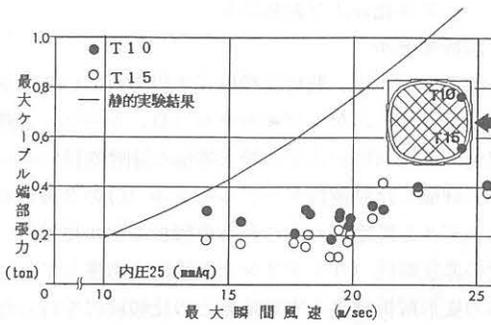


Fig. 2.10 最大瞬間風速と最大ケーブル端部張力の関係

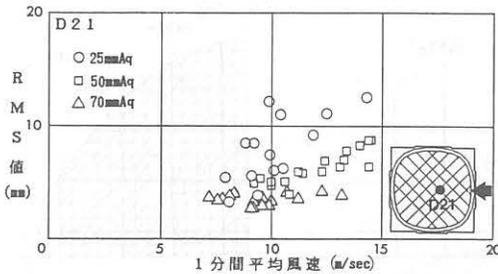


Fig. 2.11 各内圧下における交点変位のR.M.S値

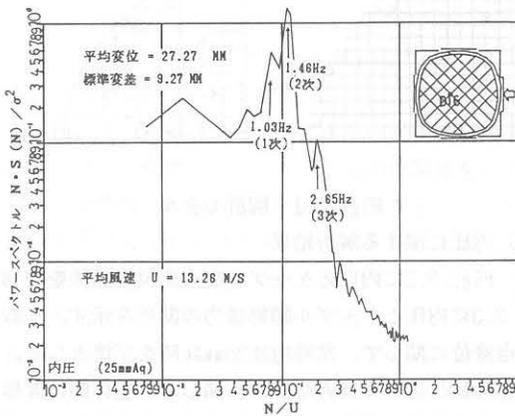


Fig. 2.12 交点変位のパワースペクトル

### 3. 構造解析法

#### 3.1 定式化

複雑な実構造物の大変形挙動を詳細に追跡し、解析と実験の両面より、膜構造の設計のための基礎資料を得ようとするものとして、幾何学的非線形性を考慮したF.E.M.が一般化しつつある。

展開の手順として、まずTotal Lagrange変位定式(以下T.L.定式)を用いた増分形による有限要素支配方程式の導入を図り、次に応力を既知、変位を未知とした狭義の形状解析にUpdated Lagrange変位定式(以下U.L.定式)を適用する<sup>11)</sup>。

一般に、有限要素内部の変位 {U} の補間は要素節点変位 {u} および、形状関数 {N} により、次のように表現できる。

$$\{U\} = [N] \{u\} \quad (3.1)$$

また、変位勾配 {d} は {u} により、次式で表現できる。

$$\{d\} = [B_d] \{u\} \quad (3.2)$$

ここに、[B<sub>d</sub>] は要素節点変位と変位勾配を関係づけるマトリックスである。歪-変位関係は、変位のテイラー展開を2次迄行ったものを線形項と非線形項に分離すると

$$\{\epsilon\} = ([B(L)] + [B(N)]) \{u\} \quad (3.3)$$

となる。ここに {ε} は Greenの歪、[B] は歪-変位マトリックスを表し、(L) (N) はそれぞれ線形項と非線形項を示す。ここで、構成則を考慮に入れて、仮想仕事の原理を物体力を無視した形で適用すれば、次式が成立する。

$$\int_V \delta \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dV = \int_S \delta \{u\}^T \{P\} dS \quad (3.4)$$

ここに、δ : 変分パラメータ

{σ} : 2nd Piola-Kirchhoff の応力

{P} : 表面力

V : 変形前の物体の体積

S : 変形前の形状を参照した力の境界

式 (3.4) において、変形後の各々の値をその直前の既知形状における値と、それからの増分で表現すると、最終的には以下の増分形による有限要素支配方程式を得る。

$$([K(L)] + [K(u)] + [K(\sigma)]) \Delta \{u\} = \Delta \{P_s\} \quad (3.5)$$

ただし、

$$[K(L)] = \int_V [B(L)]^T [D] [B(L)] dV \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned}
 [K(u)] = & 2 \int_V [B(N)]^T [D] [B(L)] dV \\
 & + 2 \int_V [B(L)]^T [D] [B(N)] dV \\
 & + 4 \int_V [B(N)]^T [D] [B(N)] dV \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

$$[K(\sigma)] = \int_V [B_d]^T [S_0] [B_d] dV \quad (3.8)$$

ここに、 $\Delta$  : 増分パラメータ

$\Delta \{P_s\}$  : 表面力に等価な節点荷重増分

$[D]$  : 構成マトリックス

$[K^{(u)}]$  : 微小変位剛性マトリックス

$[K^{(w)}]$  : 初期変位剛性マトリックス

$[K(\sigma)]$  : 初期応力剛性マトリックス

$[S_0]$  : 初期応力マトリックス

次に、式 (3.5) の接線剛性マトリックスにおいて、弾性伸びを無視し、初期応力剛性項のみを評価すると、応力を規定した場合の増分形による有限要素支配方程式が得られ、次のように表せる。

$$[\bar{K}(\sigma)] \Delta \{u\} = \Delta \{P_s\} \quad (3.9)$$

ここに  $[\bar{K}(\sigma)]$  : 初期固定応力剛性マトリックス式 (4.9) において、 $[\bar{K}(\sigma)]$  は増分段階で一定であるので修正 Newton-Raphson 法が適用できるが、たとえば内圧を受ける空気膜構造などのように、仮定形状の与え方によっては内圧の変形依存性を考慮する必要が生じる場合がある。式 (3.9) において、増分段階での変形を考慮した U.L. 定式を適用し、一旦収束した時点で、荷重を修正する反復手順を採用している。この方法の利点は、空気膜構造においては、その基準形状の張力分布が均等となるような無歪仮定曲面形状を比較的簡単に設定できることである。

## 3.2 モデル化および解析結果

### 1) 解析モデル

解析モデルは、既の実験結果の得られている空気膜構造について、ケーブルモデル (A)、ケーブルと膜の複合モデル (B) および、膜と等価な剛性を持つケーブルで評価した膜置換ケーブルモデル (C) の 3 種類の解析モデルを設定した。これらの解析モデルに対し、部材の非圧縮性 (リンクリング条件) を考慮して行った応力変形解析結果と実験結果との比較検討を行った。

各々モデル図を Fig. 3.1 に示す。要素分割としては A モデルは比較的粗く、B、C モデルについては比較的細かく分割した<sup>12)</sup>。

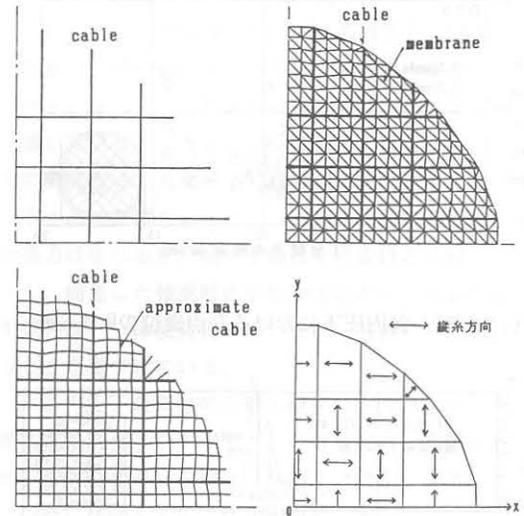


Fig. 3.1 解析モデル

### 1) 内圧に関する解析結果

Fig. 3.2 に内圧とケーブル交点変位の関係を、Fig. 3.3 に内圧とケーブル端部張力の関係を示す。なお、交点変位に関して、常時内圧 25 mmAq を基準とした。変位性状に関しては A モデルに関して、全体的に変形量が実験結果に比較して、若干小さくなる傾向があり、また、非線形性は低内圧時に比較的強く、高内圧時ではほぼ線形的な挙動を示しており、実験結果との整合性は良い。

一方、B モデルに関して、実験結果の追従性はさらに良くなっているが、Short ケーブル交点についてはモデルの改善効果は小さい。また、C モデルの解は、B モデルとはほぼ一致しており、線材置換による影響は非常に小さいと言える。

また応力性状に関してはAモデルに関して、Shortケーブルの張力が実験結果より、50%程度高めであり、その他のケーブル張力は10~20%程度高い。一方、B、Cモデルにおいては、いずれも測定領域内、またはその近傍であり、実験結果との対応は非常に良い。

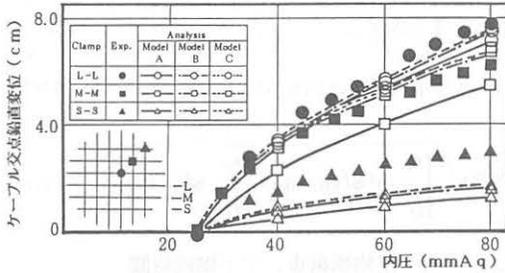


Fig. 3.2 内圧とケーブル交点変位の関係

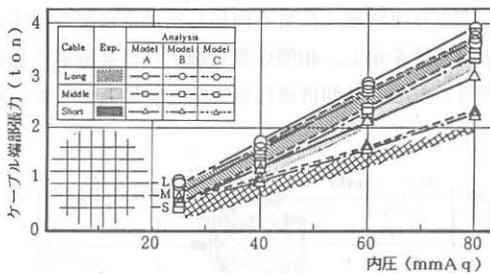


Fig. 3.3 内圧とケーブル端部張力の関係

## 2) 雪荷重に関する解析結果

Fig. 3.4に雪荷重とケーブル交点変位の関係を、Fig. 3.5に雪荷重とケーブル端部張力の関係を示す。なお、交点変位に関して、60mmAqを基準とした。なお、解析結果はAモデル（ケーブルモデル）による。

変位性状に関しては裾部から中央部に行くに従って、解析結果の方が実験結果より高めとなっており、荷重の増加とともにその傾向は顕著である。解析結果が高めとなる原因として、実測値にはケーブルの曲げ剛性による影響が含まれ、低荷重域になると伴に、その傾向が顕著に現れてきたものと推察される。過大評価の観はあるが、実用上支障はないと考えられる。

また、応力性状に関しては、解析結果と実験結果は載荷荷重とともに、ほぼ平行に推移しており、内圧60mmAq時の張力差を無視すれば、比較的良く一致していると言える。若干、Shortケーブルの張力減少が実験結果より急であるが、無荷重に近い不安定領域の近傍における解析精度としては十分と考えられる。

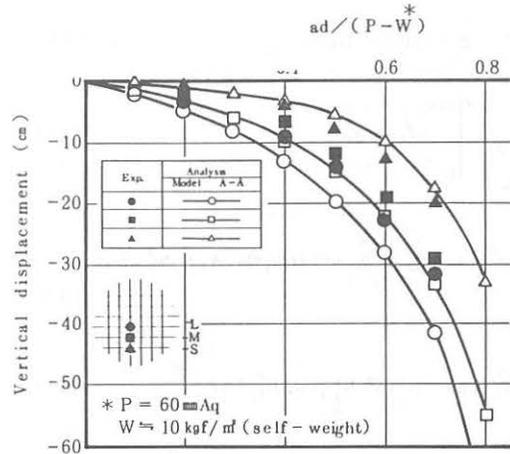


Fig. 3.4 雪荷重-ケーブル交点変位の関係

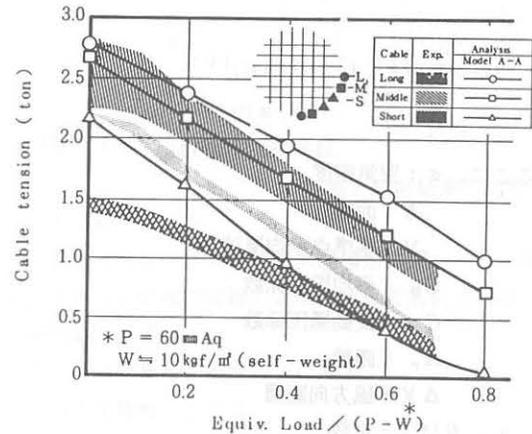


Fig. 3.5 雪荷重-ケーブル端部張力の関係

## 4. 耐風応答解析法<sup>2,3)</sup>

### 4.1 ケーブル設計用風荷重の算定方法

空気膜構造の基本的振動モードは、前述したように内部体積の変化が少ないモードであり、このようなモードで屋根面が振動しても、ケーブルにはほとんど張力が付加されない。したがって、屋根面の振動に関しては風荷重の分布性状が大きく影響するが、ケーブル張力に関しては、分布性状の影響は少なく、屋根面全体に作用する合力としての風荷重のみを評価すればよい。

したがって、屋根面全体に作用する平均風圧力Fおよび変動風圧力σは各々次式で表現できる。ここでは屋根面をN面素<sup>1,3)</sup>に分割して考える。

$$F = \sum_{i=1}^N 1/2 \rho V^2 C_{Di} A_i \quad (4.1)$$

$$\sigma_f^2 = \int_0^{n_0} S^f(n) dn \quad (4.2)$$

$$S^f(n) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho^2 V^2 C_{\sigma i} C_{\sigma j} A_i A_j S_{ij}^f(n) \quad (4.3)$$

$$S_{ij}^v(n) = S^v(n) R_{ij}^v(n) R_{ij}^{\phi}(n) \quad (4.4)$$

$$R_{ij}^v(n) = \exp(-kn \Delta r_{ij} / V) \quad (4.5)$$

$$R_{ij}^{\phi}(n) = \exp(-j 2\pi n \Delta X_{ij} / \beta V) \quad (4.6)$$

$$j = \sqrt{-1} \quad (4.6)$$

ここに、 $\sigma$  : 空気密度

A : 面積

V : 基準点平均風速

$C_D$  : 平均風圧係数

$C_{\sigma}$  : 変動風圧係数

$\Delta r$  : 距離

$\Delta X$  : 風方向距離

$k, \beta^{(4)}$  : 定数

$S^v(n)$  : 基準点の風速のスペクトル

$n_0$  : 積分上限周波数

サフィックスは面素を示す。

また、変動風圧係数に関しては、

i) 各点の圧力変動を自然風の乱れ成分で説明可能な成分と、それに無相関な成分とからなる確率過程と仮定し、直交原理を用いて期待値として評価する方法

ii) 準静的理論を適用し、圧力変動が完全に風速変動に追従すると仮定し平均風圧係数を使用する方法が考えられる。変動風圧係数は各々、次式となる。

$$\text{前者 } C_{\sigma i} = 1/2 R_i C_{\sigma i}^* / I \quad (4.7)$$

$$\text{後者 } C_{\sigma i} = C_{Di} \quad (4.8)$$

ここに、

R : 気流と圧力の相関係数

I : 気流の乱れ強さ

$C_{\sigma}^*$  : 基準速度圧で無次元化された変動風圧係数

なお、風荷重の最大値  $F_{max}$  は、極値理論を用いて次式により評価することができる。

$$F_{max} = \bar{F} + P \sigma_f \quad (4.9)$$

$$P = \sqrt{2 \ln \nu T} + 0.5776 / \sqrt{2 \ln \nu T} \quad (4.10)$$

$$\nu = \sqrt{\int_0^{n_0} n^2 S^f(n) dn / \int_0^{n_0} S^f(n) dn} \quad (4.11)$$

ここに、 $F$  : 平均風荷重、 $T$  : 継続時間

次に、本風荷重算定式を大規模試験体に適用し、台風時の実測結果と比較した結果を示す (Fig. 4.1)。図より平均風圧係数を使用した場合は最大張力の極限値を示し、相関係数を導入した変動風圧係数を使用した場合は期待値の値を示していることがわかる。

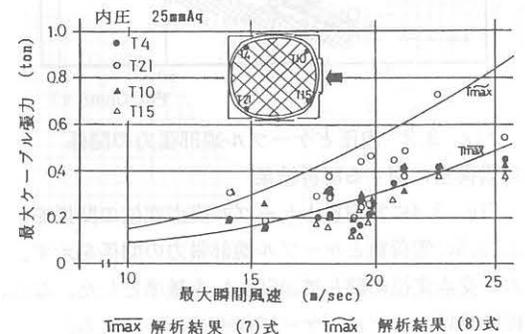


Fig. 4.1 最大瞬間風速とケーブル張力の関係

#### 4.2 屋根面の強風時振動応答解析法

本構造の屋根面は、平面的広がりをもっており、本解析法ではその影響を前述と同様 (4.4)~(4.6) 式 の形で考慮する。

解析モデルを Fig. 4.2 に示す。

運動方程式は次式で表現できる。

$$[m] \{\ddot{z}\} + [c] \{\dot{z}\} + [k] \{z\} = \{f\} \quad (4.12)$$

$$f_j = \sum_{l_j} \rho V_j l_j v_j l_j C_{\sigma j} l_j A_j l_j \quad (4.13)$$

ここに、 $m$  : 質量

$c$  : 減衰係数

$k$  : 剛性

$f$  : 荷重

$z, \dot{z}, \ddot{z}$  : 応答変位、速度、加速度

$v$  : 気流の乱れ成分

(4.12) 式をフーリエ変換し、モード分離すると応答変位のスペクトル  $S_z(n)$  は次式で表わせる。

$$[S_z] = [X][H^*][X]^T [s^f][X][H][X]^T \quad (4.14)$$

$$[s^f] = \left[ \sum_{\ell_j=1}^{N_j} \sum_{\ell_i=1}^{N_i} p^2 V_i \ell_i V_j \ell_j C_i \ell_i C_j \ell_j A_i \ell_i A_j \ell_j S_{ij}^v \ell_i \ell_j \right] \quad (4.15)$$

ここに

$H$  : 伝達関数

$X$  : 固有マトリックス

以上より、 $i$  質点の最大応答変位  $Z_{max, i}$  は次式で定義できる。

$$Z_{max, i} = \bar{Z}_i + P_i \sigma_{z, i} \quad (4.16)$$

$$\sigma_{z, i}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{z, i}(n) dn \quad (4.17)$$

$$P_i = \sqrt{2 \ln \nu T + 0.5776} / \sqrt{2 \ln \nu T} \quad (4.18)$$

$$\nu = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} n^2 S_{z, i}(n) dn \int_{-\infty}^{\infty} S_{z, i}(n) dn} \quad (4.19)$$

ここに、 $\bar{Z}_i$  : 平均応答変位、また風速のスペクトルを、

$$\frac{nS^v}{\sigma_{\bar{z}}^2} = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda_p V_n}{n^2 + (\lambda_p V)^2} \quad (4.20)$$

$\lambda_p$  : スペクトルのピーク波数

で表現すると、最大応答変位は留数積分を利用し解析的に求めることができる<sup>13)</sup>。

次に、本強風時振動応答解析法を大規模試験体に適用し、台風時の実測結果と比較した結果を示す。使用した固有値は、内圧25mmAq、平均風速 12.4m/s 相当の剛性を用いて評価した。応答解析に用いた固有振動数は風速のスペクトルを考慮した刺激係数を参考にその採用次数を決定した。その他の条件は前記風荷重の算定に示す値によった。なお、風圧係数は、相関係数を導入した変動風圧係数を用いている。

台風時の実測結果と解析結果の一例をFig. 4.3に示す。図より、解析結果は、台風時の振動性状を概略説明している。

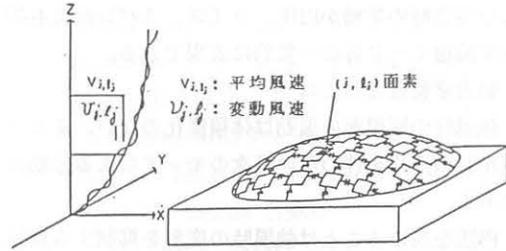


Fig. 4.2 解析モデル

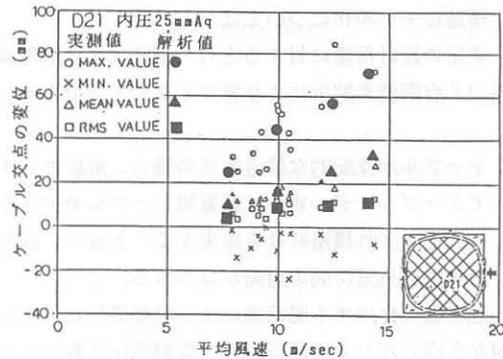


Fig. 4.3 屋根面の振動変位

(実測と解析結果の比較)

## 5. まとめ

低ライズケーブル補強空気膜構造に関し、その構造特性とともに構造解析および耐風応答解析法に関する検討結果を述べた。

それらの結果をまとめて以下に示す。

### 1) 静力学特性としては

#### ・内圧時

i) 変位は自重、内圧比に影響され、低内圧領域では、強い非線形性を示す。

ii) 張力は内圧と線形関係にある。

#### ・風荷重時

i) 張力は変位と比較して荷重の偏在性による影響を受けにくく、同一ケーブル両端では同程度の張力値を示す。

ii) 内圧を高めることは強風時の変形を抑制する有効な方法である。

#### ・雪荷重時

i) 無次元化パラメータ  $\frac{\text{内圧}}{\text{付加内圧}}$  ,  $\frac{\text{張力}}{\text{無載荷時の張力}}$  ,  $\frac{\text{変位}}{\text{無載荷時のライズ}}$  ,

により積雪時の挙動が内圧、ライズ、スパン比にも拘わらず荷重モード毎に一義的に表現できる。

## 2) 動力学特性としては

i) 強風時の屋根面の振動は体積変化のない、またケーブル長の変化を伴わない低次のモードによる振動が主である。

ii) 内圧を高めることは強風時の変形を抑制する有効な手段であり、内圧の上昇に伴い、固有振動数は増加し、減衰定数は減少する。

## 3) 構造のモデル化については

i) 通常の設計荷重に対する応力・変位は大変形理論に基づく有限要素解析により算定することができる。

ii) ケーブルが支配的な構造形式の場合、解析モデルとしてケーブルモデル或いは膜置換ケーブルモデルを用いることにより構造特性を損失することなく、計算及び計算前後処理時間の短縮がはかれる。

iii) 屋根面に作用する風荷重および振動変位は、風洞実験から得られた平均風圧係数、変動風圧係数および風速と圧力の相関係数を用い、準静的理論を応用した確率統計的解析手法により予測することができる。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、構造解析および実験に関して御指導、御意見、御示唆を頂きました法政大学川口衛教授、横浜国立大学石井一夫教授、日本大学斎藤公男助教授また、耐風応答に関し貴重なご意見をいただきました近畿大学石崎滋雄教授、大阪市立大学川村純夫教授、京都大学桂順治教授ならびに本研究全般に御理解と御協力を頂きました当社特殊構造本部、設計部を初めとした関係各位の皆様に対して、厚く感謝の意をここに表します。

## 参 考 文 献

- 1) ニューマチック構造(空気膜構造)設計基準、建設省住宅局建築指導課 昭和46年 5月18日
- 2) 川村純夫、室田達郎、木本英爾、昇高淳; 空気膜構造の実験報告V (EXPO-70'アメリカ館-振動性状と耐風安定性)、日本建築学会大会梗概集、昭和45年9月、617-618
- 3) 膜構造研究論文集'87、社団法人日本膜構造協会
- 4) Haug, E. and Powell G. H.: Analytical Shape Finding for Cable Nets, IASS Pacific Symposium (1971) pp. 83-92
- 5) 川村純夫、他; ニューマチック構造の耐風性に関する研究(その1)~(その6)、日本建築学会近畿支部研究報告集、昭和53年、日本建築学会大会梗概集、昭和53年、54年、55年、56年
- 6) B. V. Tryggvason; Aeroelastic modeling of pneumatic and tensioned fabric structures, 5-th international conference on wind engineering, 1979, VIII-8-1~12
- 7) 深尾康三、岡田章、藤本康和; 低ライズケーブル補強空気膜構造の力学性状に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集第 378号昭和62年 8月
- 8) Glockner, P. G. and Szyskowski, W., "Some Stability Consideration of Inflatable Structures", I. A. S. S. Symposium (Sep. 1983)
- 9) David J. Malcolm & Peter G. Glockner: Collapse by Ponding of Air Supported Spherical Caps, Proceedings of the ASCE, Journal of the Structural Division Vol. 107, No. ST9, "8109" pp. 1731 ~1742
- 10) 斎藤公男、真柄栄毅、岡田章他: ケーブル補強空気膜構造の静力学特性に関する研究(その1)、日本建築学会学術講演梗概集(北陸)、昭和58年
- 11) Magara, H., Okamura, K. and Kawaguchi, M.: A Study on Analysis of Membrane Structures, IASS Symposium, Rio (1983) pp. 1-12
- 12) 真柄栄毅、岡村潔、川口衛: 膜構造建築物の幾何学的非線形解析(その1、2)、日本建築学会学術講演梗概集(昭和59年10月)
- 13) 又木義浩、岩佐義輝、深尾康三; 高層建築物のパフェッティング振動の解析に関する研究、多面素、多質点系への拡張、日本建築学会大会梗概集、昭和52年10月、929-930
- 14) Takeo Mori; On dynamic response of a flat long-span roof to action of wind, 日本建築学会論文報告集、第 241号、昭和51年3月、91-109
- 15) Y. Tsuboi (Chairman): Recommendation for Air Supported Structures: IASS, Madrid, 1985, 213

pages (和訳: カラムNos. 97, 98, 99; 1985. 7, 10, 1986. 1)

- 16) Ishii, K.: Structural Design of Cable-Reinforced Membrane, IASS Symposium, Rio (1983) pp. 56-75
- 17) 又木義浩、岩佐義輝、林田英俊、茅野紀子; 低ライズケーブル補強空気膜構造に作用する風圧力について、平均風圧係数の性状、日本建築学会大会梗概集、昭和59年10月、2619-2620
- 18) 対馬義幸、岩佐義輝、真柄栄毅、又木義浩、深尾康三、岡田章、林田英俊、藤本康和; 低ライズケーブル補強空気膜構造の力学性状に関する実験的研究(その1)~(その4)、日本建築学会大会梗概集、昭和59年10月、2633~2640
- 19) 深尾康三、岩佐義輝、又木義浩、岡田章; 低ライズケーブル補強構造の力学性状に関する実験的研究、風圧力の性状と風荷重時の静力学特性について、第8回風工学シンポジウム、1984年12月、137-144
- 20) Mataki, Iwasa, Fukao, Okada: Experimental Research on the Structural Characteristics of Low-Profile Cable-Reinforced Air-Supported Structures-Wind Pressure Distribution and Statical Behavior Under Wind Load-IASS Symposium Moscow (1985)
- 21) Fukao, Iwasa, Mataki, Okada: Experimental Test and Simulation Analyses of the Dynamic Behavior of low-Profile, Cable-Reinforced, Air-Supported structures, IASS Symposium, Osaka (1986)
- 22) Okada, A. and Fukao, Y.: An approach to internal pressure control of low-profile cable reinforced air-supported structures, IASS Symposium Osaka (1986)
- 23) MATAKI, IWASA, FUKAO, OKADA : Wind Induced Response of Low-Profile Cable-Reinforced Air-Supported Structures, 7th ICWE, 1987

A study on Structural characteristics and design of low-profile cable-reinforced air-supported structures  
Yoshiteru IWASA, Hideki MAGARA, Yoshihiro MATAKI  
Yasuzo FUKAO, Kiyoshi OKAMURA, Akira OKADA

#### SYNOPSIS

In general, air-supported structures are designed primarily against wind load or snow load which causes the greatest stresses or the large deflections in the environmental condition.

Due to the high flexibility of an air-supported structure, its equilibrium shape and the associated external loading are greatly influenced by the interactions between the structure and the load.

In this paper, we describe an experimental research on the structural characteristics of low-profile cable reinforced air-supported structure by using a large-scale model (span 25m).

And also we describe practical method of shape finding, geometrically nonlinear analysis of membrane structures and wind resistant design method.