

プレストレスト・ケーブルネット構造 に関する一実験

若林 實・室田達郎・南 宏一
柴田道生・田中 勉

A MODEL TEST OF A PRESTRESSED SUSPENDED ROOF

By Minoru WAKABAYASHI, Tatsuo MUROTA, Koichi MINAMI,
Michio SHIBATA and Tsutomu TANAKA

Synopsis

For the large roofs of sub-gates for EXPO'70, a prestressed suspended roof was adopted. Two types of model tests were conducted to obtain informations for the design of the structure: wind tunnel tests to know the nature of wind loading, and static loading tests to know the static performance.

Wind tunnel tests were carried out on 1/100 scale models of plastics and rubber sheets. Wind pressure distributions on roof surfaces were obtained for nine cases of horizontal and vertical wind directions. Dynamic behaviors of roof membranes in wind were observed and some results were obtained.

Also a cable model, which had a scale of 1/15, was tested statically, making use of the wind tunnel test results. Data were obtained for the determination of the initial prestressing force distribution, the situation of the change in cable tensions under load, and the deflections of the roofs.

A numerical calculation was made on the above mentioned problems. The result from the analysis is compared with the test result and a brief discussion is made.

1. ま え が き

Expo'70 では、会場の東西南北の入口に設けられるサブゲートの大屋根の構造形式として、ケーブルを使用したプレストレスト・ケーブルネット構造が採用された。(Photo. 1 参照)

この種の構造物の代表的なものとしては、F.Ottoの設計によるカナダ・モントリオール万国博覧会のドイツ館¹⁾があげられ、また、プレストレスト・ケーブルネット構造に関するいくつかの論文^{2,3,4)}も発表されているが、このようなプレストレスト・ケーブルネット構造の力学的性状を正確に、力学的な計算によって把握することは極めて困難である。

その理由の一つとして、ある仮定されたプレストレスト力が分布した曲面の決定は、質的に実施構造物の諸性質を有するモデルによってしか行なうことは出来ず、また、この構造は、内的にも、外的にも高次の不静定の変動システムとなり、力の釣合を考える場合、常に変形の影響を無視出来ないことなどがあげられる。

また、この構造物は、ケーブルで構成された網目状の曲面に屋根膜がとりつけられた、いわゆるテント構造ともなっているため、風力の問題—特に、風による振動が重要であるが、しかしながら、この問題はきわめて複雑^{5,6,7)}であって、これらに関する資料はほとんどない状態である。

それ故、本構造の構造設計に必要な基本的な設計資料を得るために、風洞模型実験と、ケーブルモデルによる静的荷重実験が計画された。

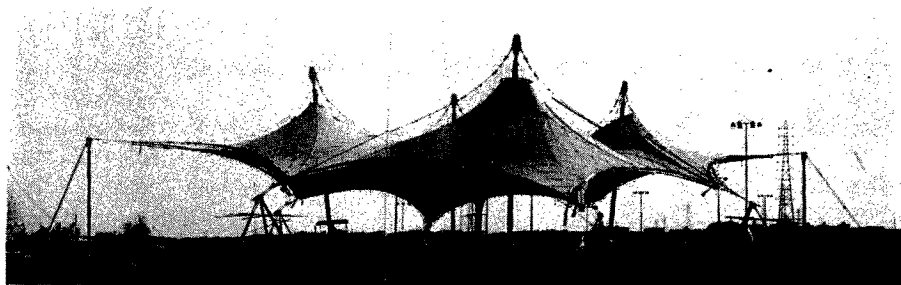


Photo. 1 West gate under construction.

まず、本構造の形状（特に、曲面の形状）を決定するために、1:50に縮尺された、ネオプレンゴムを用いたゴムモデルを作製し、ケーブル・ネットによって構成される曲面の基礎的な幾何学的データを得た。そのデータより、1:100に縮尺されたプラスチックによる風圧測定用モデルを作製し、この曲面に作用する風荷重を定量的に求め、その値をもとにして、ケーブルによって実施構造物に類似した力学的挙動を示すように工夫されたモデルで種々の荷重テストを行ない、設計に必要な定量的・定性的データを得た。

本報告は、風洞実験、およびケーブルモデルに対する荷重テストの実験結果の概要を示すものであるが、このプレストレストケーブルネット構造の力学的性状を、数値的に把握するために、ある程度の数値計算を試みたので、その結果もあわせて示す。

2. 風 洞 実 験

風洞実験はテントに静的に加わる風圧に関するものと、風の中のテントの振動性状に関するものとの2種類を行なった。前者の結果は設計資料として有用なものであると思われるが、後者については多くの問題がある。

それは風の中のテントの振動については解明されていない点が多いため、風洞模型にあらわれる現象と実際の場合との相似性が不明なことによるものである。したがって振動性状に関する実験の結果は設計資料としては定量的な価値はなく、テントの振動現象を把握するための1つの参考資料にすぎない。

なお、実験は京都大学防災研究所の風洞（回流型、口径1m）を用いて行なった。

2.1 プラスチック模型による風圧測定

プラスチック模型による実験は、テントの振動などの影響がない状態での風圧力を測定することが目的である。得られた結果はテントに作用する風圧力を知る上で最も基本的な資料であると考えられる。

2.1.1 実験方法

(1) 模型および地面板

プラスチック模型の縮尺は、1/100である。

テント面は厚さ2mmプラスチックを成型して作ったもので、支柱は鉄製である。(Photo. 2 参照)
地面板は1.4m×1.4mの木製で、その中央に模型が設置される。

(2) 風圧測定

風圧は模型の測定点に直径2mmの穴をあけ、その点の圧力をビニールパイプ（外径4mm、内径2mm）で風圧計に導いて測定した。測定点の位置は、Fig. 1に示したとおりで、点数は合計160点である。

風圧測定は1本のビニールパイプを順次測定点に挿入して行なったから、測定値にはパイプの影響による誤差はほとんどないと思われる。Photo. 3は風圧測定の状態を示す。

実験の基準速度圧は模型の風上側の先端から30~60cm風上側でピトー管によって測定した。

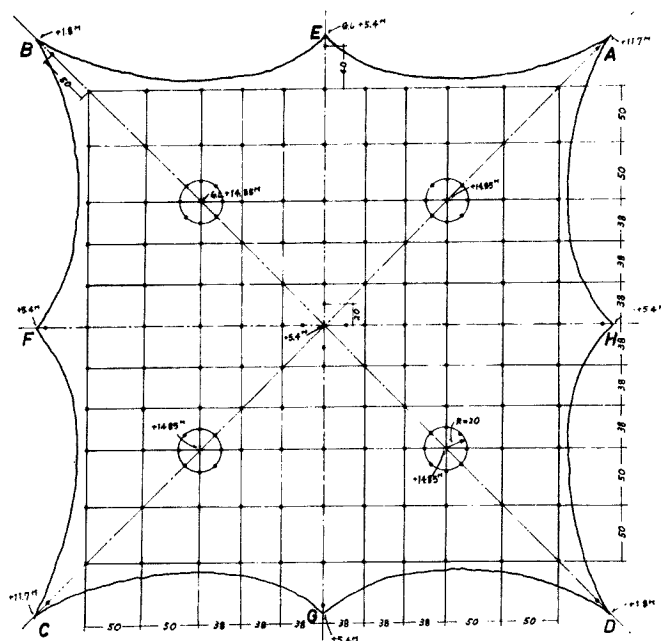


Fig. 1 Points of wind pressure measurements (unit: : mm)

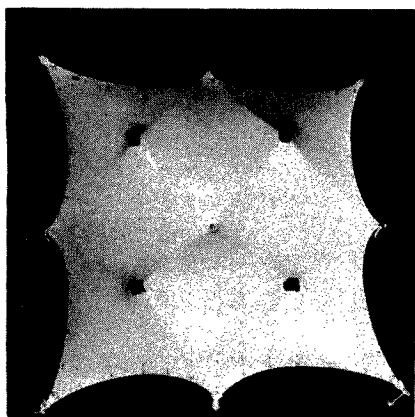


Photo. 2 Plastics model for wind pressure measurements.

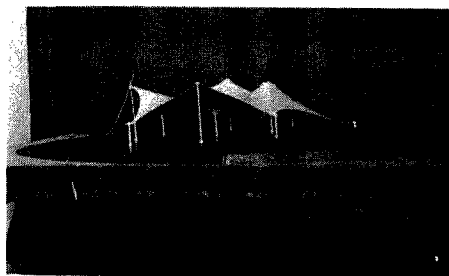


Photo. 3 Plastics model set in the wind tunnel.

(3) 垂直面内の風向変化

自然風の垂直面内の風向変化はこのサブゲートのような構造物の場合は屋根面の風圧に大きな影響を及ぼすことが予想される。本実験ではその影響を検討するために、風が地面に平行に吹く場合の他に、地面板を前後に傾斜させて「吹上げ」あるいは「吹下し」の状態を作り、その状態での風圧分布も測定した。

(4) 実験風速

実験風速は、約 21 m/s とした。したがって Reynolds 数は約 7×10^5 であるが、実物では 10^8 程度と考えられる。

2.1.2 風圧分布測定結果

風圧測定は Table 1 に示した 9 つの場合について行なった。ただし、表中の風向は Fig. 2 のとおりである。測定結果は Figs. 3 (a)~(i) に示す。

図中の数字は各測定点の風圧を風圧係数で表わしたものであり、太線はこれに基づいて描いた等風圧係数線である。ここで、風圧係数の正の値は圧力が屋根面の外側から内側へ作用する場合であり、負の値はその逆の場合である。また、同図中の平均風圧係数 $\bar{C}$ はメインザイルで囲まれた 1 つのテント面内の各測定点における風圧係数の算術平均であって、面の傾斜などを考慮した正確な平均値ではない。

以上の結果から次のことが知られる。

- (1) 屋根の大部分は負圧を受ける。ただし、風上側の縁辺には正圧が作用する。
- (2) 支柱の周辺には正または負の大きな風圧が加わる。特に *i, j, k, l* 柱の柱頭附近において著しい。
- (3) メインケーブルの通る鞍部においても風圧が大きく、鞍部の風上と風下で風圧が急激に変化する。
- (4) 垂直面内の風向の変化は風圧分布にはあまり影響はない。一般に吹上げ、吹下しの場合は風圧係数の絶対値が増加する場所が多い。特に風上側の正圧を受ける部分では、風圧係数が水平な風向の場合にくらべて 3 倍程度まで増大することがある。
- (5) 風上側の屋根面は垂直面内の風向変動に対して風圧の変動が著しい。

Table 1. Test program of measurements of wind pressure.

Case	Wind direction in horizontal plane	Wind direction in vertical plane
A	I	0°
B	I	+3°30' (blow-up)
C	I	-5°0' (blow-down)
D	II	0°
E	II	+3°30'
F	II	-5°0'
G	III	0°
H	III	+3°30'
I	III	-5°0'

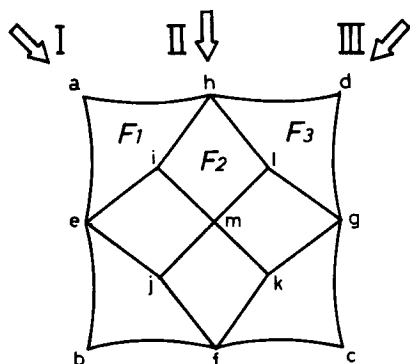


Fig. 2 Notations: I, II and III show wind directions. *a*~*m* show column positions, heights of which are as follows: *a* and *b* are 11.7 m above the ground, *b* and *d* 1.8 m, *e, f, g* and *h* 5.4 m, *i, j, k* and *l* 14.85 m. *F*₁, *F*₂ and *F*₃ show three kinds of membranes.

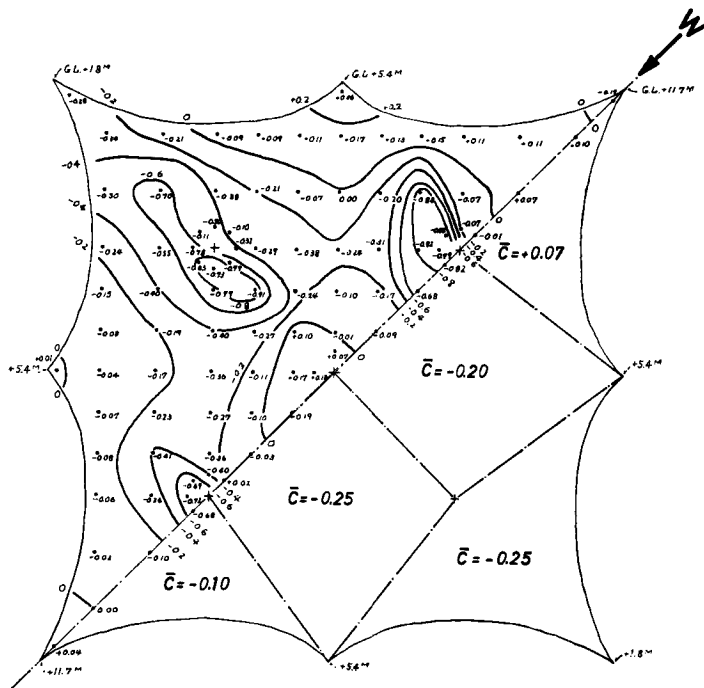


Fig. 3 (a) Distribution of wind pressure coefficient, Case (A).

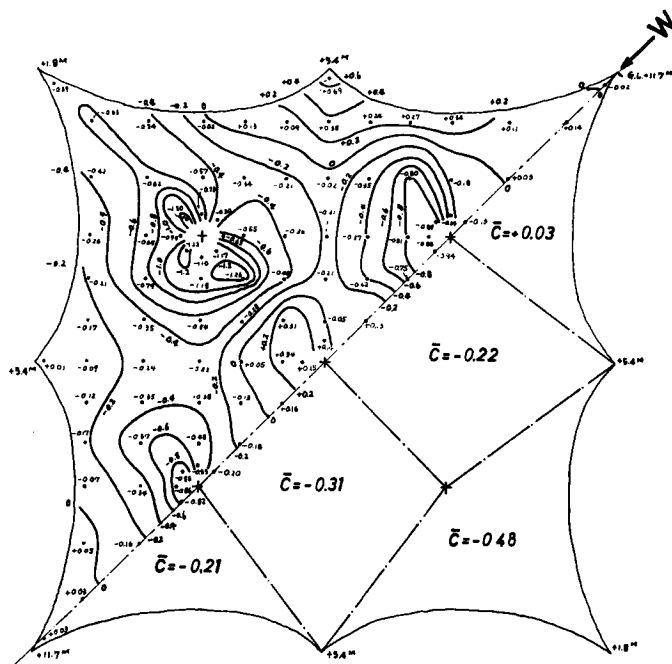
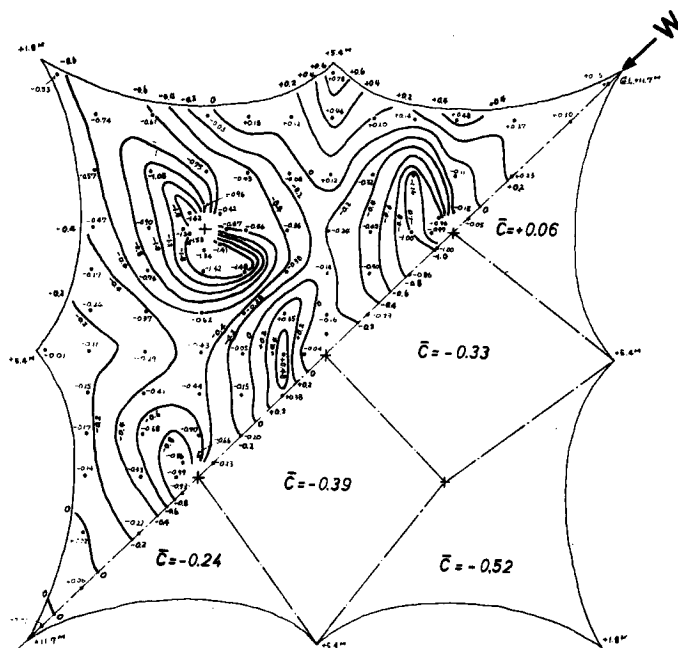


Fig. 3 (b) Distribution of wind pressure coefficient, Case (B).



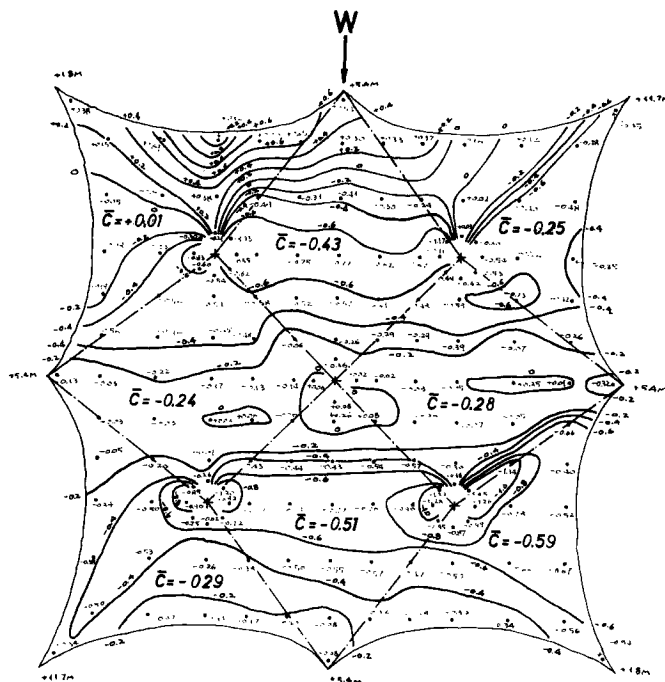


Fig. 3 (e) Distribution of wind pressure coefficient, Case (E).

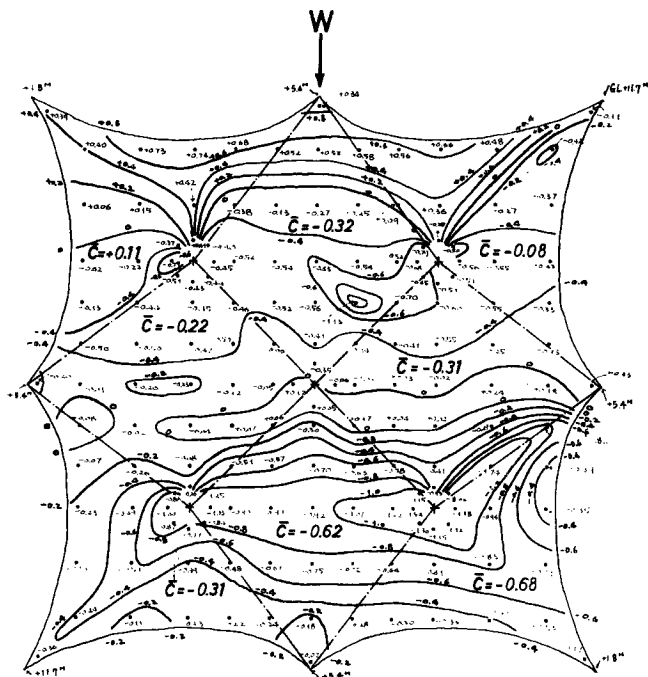


Fig. 3 (f) Distribution of wind pressure coefficient, Case (F).

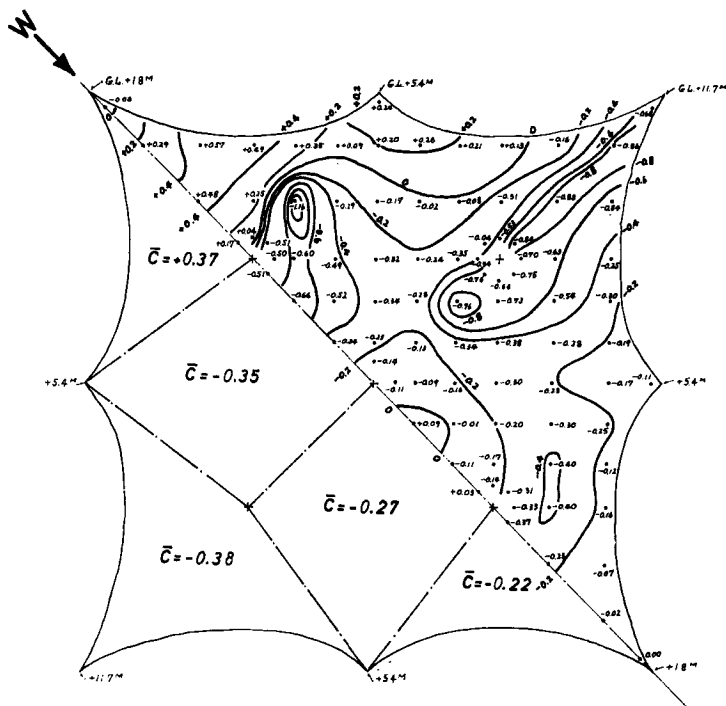


Fig. 3 (g) Distribution of wind pressure coefficient, Case (G).

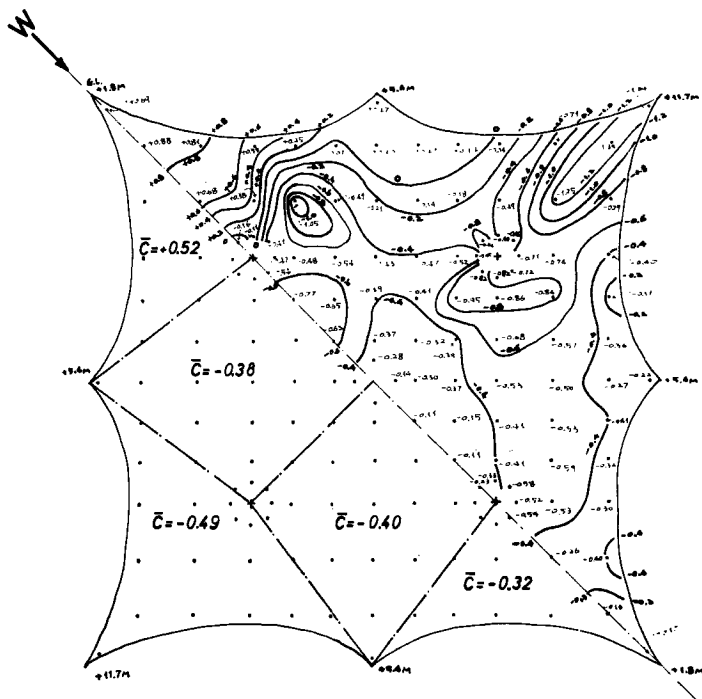


Fig. 3 (h) Distribution of wind pressure coefficient, Case (H).

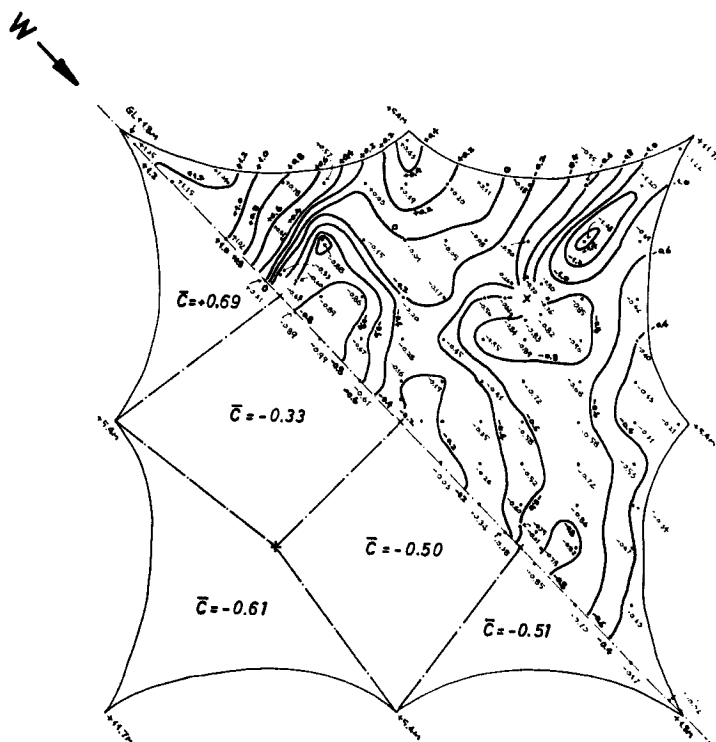


Fig. 3 (i) Distribution of wind pressure coefficient, Case (I).

2.2 ゴム模型による振動実験

2.2.1 実験方法

(1) 模型および地面板

振動測定用の模型は風圧測定の場合と同じく縮尺1/100で、直径 2 mm のシンチュウ線をメインケーブルの代りに使用し、この上に厚さ 0.34 mm のゴム膜を初期張力を加えてかぶせ、メインケーブルとゴム膜を糸で緊結したものである。(Photo. 4参照)。メインケーブルのシンチュウ線はほとんど動かないから、振動はメインケーブルに囲まれたゴム膜の面内のみ生じる。地面板は風圧測定実験の場合と同じものを使用した。

(2) 振動測定

ゴム膜面の数個所に測定点を選び、それぞれの点の変位の垂直方向成分を測定した。測定は計器の都合上一点ずつ、数種類の風速について行なった。

測定方法は、測定点から直径 1 mm のガラス棒を地面板にあけた穴を通して鉛直に吊し、その先端にシンチュウの円板(直径 20 mm, 厚さ 0.3 mm)をつけて電極にし、電極に対向してキャパシタマイクロメータを置き、膜面の変位による電極とキャパシタマイクロメータの間の電気容量変化を測定するという方法である。(Photos. 5 (a), (b) 参照)

なお、記録は電磁オシログラフによった。

(3) 実験風速

振動実験は 0~23 m/s の風速範囲で行なった。この場合の Reynolds 数は最大 8×10^5 である。

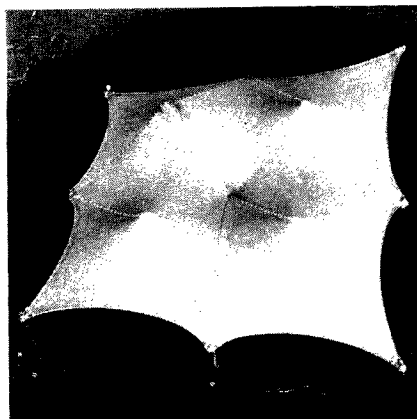


Photo. 4 Rubber model for vibration test.

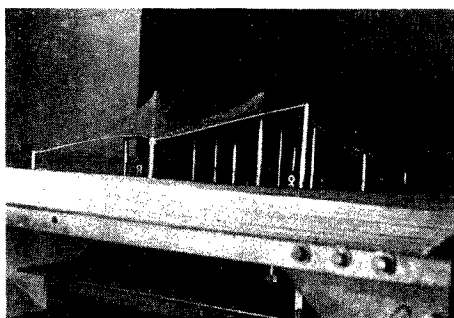


Photo. 5 (a) Measurement of membrane displacement.

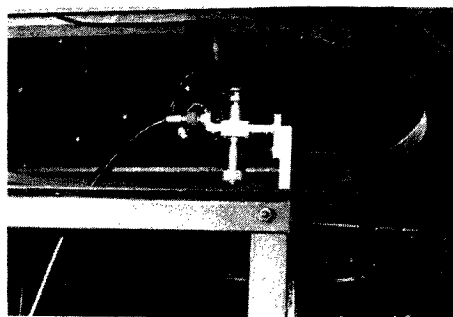


Photo. 5 (b) A set-up of capacitance micrometer.



Fig. 4 Typical record of vibration

2.2.2 振動実験結果

静的変位, および振巾の速度圧に対する関係を図示したのが, **Figs. 5 (b), (c)** である。**Fig. 4** は振動記録の一例であるが, 静的変位および振巾の意味はこの図に示したとおりである。

また, **Figs. 5 (b), (c)** の実験番号は, **Fig. 5 (a)** に示される各膜面の測定位置での測定値を示すものであり, 各膜面の固有振動数 N は $32 \sim 38 \text{ c/s}$ で, 減衰常数 h は $0.08 \sim 0.12$ であった。

振動の観察結果から以下のことがわかった。

- (1) 膜面は1次モードで振動することが多い。
- (2) 膜面には2つの異なる振動数をもった振動が合成されたような振動を生じる。この2つの振動の振動数は非常に接近しており, いずれも膜面の固有振動数に近い。
- (3) 静的変位は速度圧にほぼ比例して増加する。

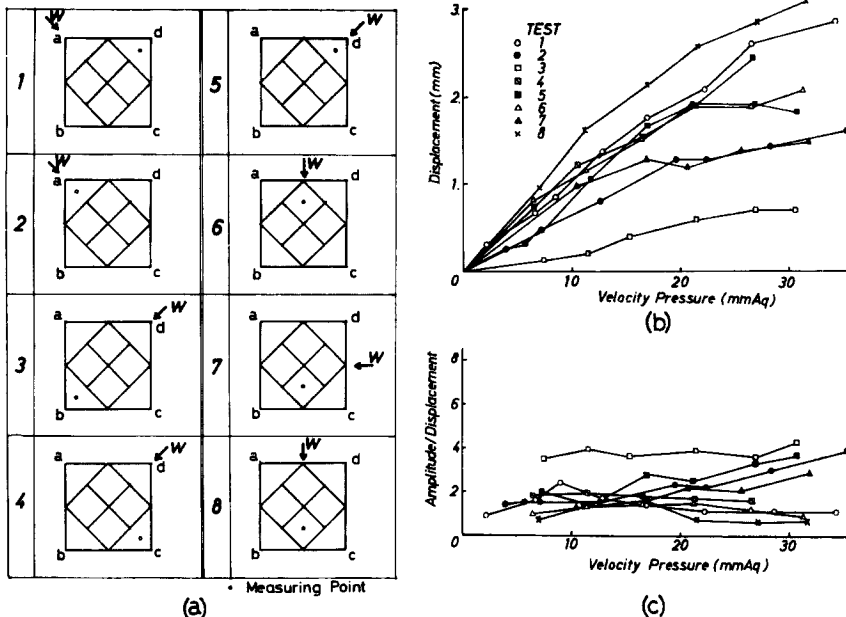


Fig. 5 Test results for vibration characteristics.

(4) 静的変位に対する振巾の比は速度圧にはあまり関係がなく一定値をとる。その値は $F1$ および $F3$ 面で大きく、 $F2$ 面では小さい。(面の記号は Fig. 1 参照)

2.3 風洞実験結果の考察

プレストレスト・ケーブルネット構造に作用する風荷重を静的な荷重に換算する場合は、風が水平に吹く場合の平均風圧を基本値とし、これに垂直面内の風向変化および振動の影響を乗じて定める必要がある。前者はその変動の周期が短い場合は、それ自体振動の原因となるが、本実験で扱った垂直風向の傾角 $+3^\circ 30' \sim 5^\circ$ をもった風は平均風速 40 m/s の場合、10秒程度継続するし、一方、実物のテント面の固有振動周期は10秒以下であろうと思われるから、この風向変動の影響は静的なものと考えられ、別個に考えるべきである。垂直風向変化の影響については、本実験で $+3^\circ 30' \sim -5^\circ$ の角度を与えて風圧分布を測定した結果によれば、水平な風向の2倍程度の風圧が作用することが予想される。

振動の問題は、本実験結果によれば、振動振巾は風圧に比例し、静的変位に対する振巾の比は、風速に無関係に $1 \sim 4$ 程度である。この実験では、面の張力や減衰などの影響が検討されておらず、上の数値をそのまま採用することは出来ないが、実施構造物においても、振動振巾が静的変位の数倍になることは、十分考えられることであろう。

3. ケーブルモデルによる荷重実験

風洞実験の結果より、設計用風圧係数 C の値として、 $C = \alpha \cdot \beta \cdot C_0$ (C_0 は風圧係数基本値、 α は風向変動の影響を表わす係数、 β は振動の影響を表わす係数) として与えられることが示された。具体的な数値として $C_0 = \pm(0.30 \sim 0.35)$ $\alpha = 2.0$ $\beta = 1.5$ を考え、基準速度圧 q_0 として、 $q_0 = 150 \text{ kg/m}^2$ の値を採用して、このプレストレスト・ケーブル・ネット構造の膜面に作用する風荷重の指標として、 150 kg/m^2 という定量的な値を求め、つぎのケーブルモデルによる荷重実験を行なった。

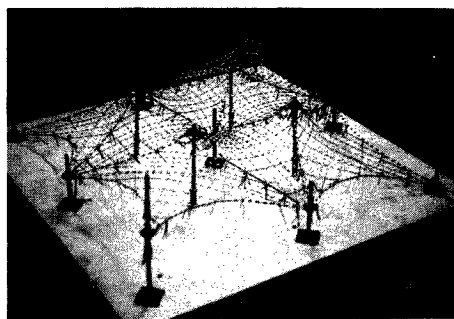


Photo. 6 Rubber model.

3.1 実験計画

この種の実験で、もっとも重要なことは、実施構造物の力学的性状と相似性を示すプレストレス・ケーブル・ネット構造としてのモデルを作製することである。

したがってモデルの柱材、メインケーブルおよび、サブケーブルの径・ケーブルの予想使用荷重、ケーブルの端部定着の方法（シーリングおよびソケットングの方法）、 i, j, k, l, m 柱の柱頭、柱脚の支持方法、メインケーブルとサブケーブルの取り付け方法、サブケーブルとサブケーブルの交点の取り付け方法などモデル製作上の問題、初期プレストレスの導入法、載荷法、張力測定法、および変位測定法などの実験技術上の問題を考慮して実験計画をたてた。

計画されたモデルは、1:15に縮尺され、曲面の最高高さ、最低高さは、ほぼ実施のものと同一であるが、サブケーブルの配置が実施のものと異なる。実施されたサブケーブルの配置は、曲面に対して135 cm × 135 cm のメッシュになっているが、モデルでは、実施されたものに比して、ほぼ2倍の間隔になっている。また、メインケーブルとサブケーブルの取り付け位置は、それぞれ柱頭間のメインケーブルの軸に沿って等間隔になるように配置されておりメインケーブルとサブケーブルとの交点は偏心のないように計画された。(Fig. 8 のケーブル伏図を参照)

なお、実施構造物では、メインケーブルの方向を転向させる位置に設けられた水平サドル（ケーブルの重なりを防ぐためのもの）は、ケーブルの変形とともに、移動できるようになっているが、モデルでは、不動として取りあつかわれている。

3.2 モデルの作製

3.2.1 実験に使用したケーブル

使用したケーブルは、メインケーブル（メインケーブル1, 2, 3とも）に対して6×19%の4.2 mm サブケーブルについては1×7%の1.54 mm のものを使用した。それぞれのケーブルの引張試験の結果をFig. 6 に示す。それぞれのケーブルに対してあらかじめ切断荷重の1/2のプリテンションを負荷したものを扱い、使用荷重は、メインケーブルについては、100~300 kg、サブケーブルについては10~50 kg とした。

3.2.2 ケーブルのソケットング

一般に行なわれているケーブルの端部定着方法（以下ソケットングと呼ぶ）としては、ケーブルの径に合わせた、ソケットに溶融金属をいこむ方法が採用されているが、本実験では、溶融金属のかわりに、接着剤として使用されるアラルダイトを用いた。取扱いが、溶融金属に比して簡単で、充てん性も良好であり、単調および10数回の繰返し荷重実験を行なって、十分ケーブルの使用荷重に対して定着されることを確めた*。

*しかし、荷重実験中、ケーブルがソケットよりぬける状態が、数本のワイヤーに対して生じたが、その理由としては接着剤の衝撃的荷重に対する弱さ、疲労に対する弱さが考えられる。

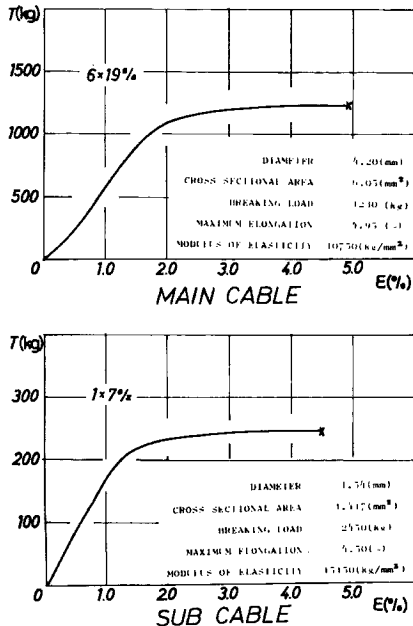


Fig. 6 Mechanical properties of cable.

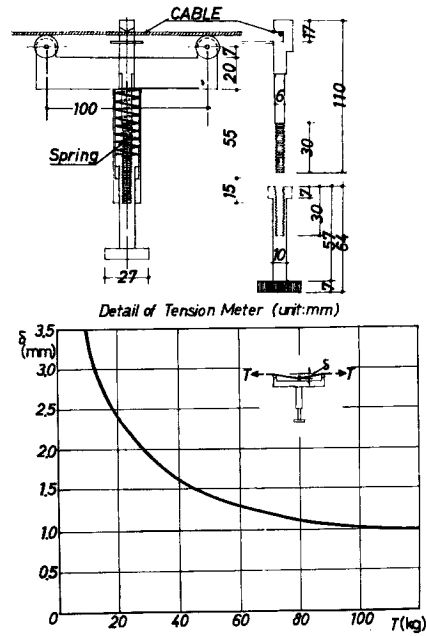


Fig. 7 Tension meter.

3.2.3 ケーブルの取り付け金具（支持部材に対する接合金具）

両端部がソケットリングされたメインケーブル、サブケーブルに **Photo. 7 (a)** に示すような接合金具が取り付けられた。メインケーブル、サブケーブルの接合はユニバーサル・ジョイントになるように工夫され、メインケーブル、サブケーブルの一方の端部には、ケーブルの長さが調整できるような金具（ターンバックルと同じシステムのもの）を取り付けた。

3.2.4. i, j, k, l および m 柱の柱頭

柱脚 *i, j, k, l* および *m* 柱の柱高が調整可能なこと、かつ、柱脚が2方向ピン支持であるという条件を満たすように、柱頭には、それぞれガセットプレートを立てて、ワイヤー接合金具を取り付け、柱脚はユニバーサルジョイントとした。（**Photos. 7 (b), (c), (d)** を参照）

3.2.5 縁ケーブルの外周柱への支持方法

3.1節において述べたように、水平サドルの位置を **Photo. 7 (c)** に示すように、H 形鋼柱に所定の高さの位置に水平のガセットプレートを立てて、そのガセットプレートにワイヤーの接合金具を取り付けた。

3.2.6 サブケーブルの交点

サブケーブルの交点は、初期プレストレス力を、メインおよびサブケーブルに導入した後、針金で緊結した。

3.2.7 初期プレストレス力の導入

ゴムモデル（**Photo. 8** 参照）によって得られた基礎的な幾何学的データをもとにして、各メインケーブル、サブケーブルの長さを計算によって求めた後、ケーブルの端部をソケットリングした。そして必要な接合金具を取り付けたケーブルを、*i, j, k, l* 柱を所定の柱高さより低くし、*m* 柱の柱高さを高くした状態で、順次、所定の個所に取り付けた。全てのケーブルの取り付けを完了した後、各ケーブルの長さを金具に設けられたターンバックルで調整して、*i, j, k, l* および *m* 柱を所定の柱高さにすることにより各ケーブルにプレストレス力を導入した。仮定したプレストレス力の分布になるように、個々のケーブルの長さを部

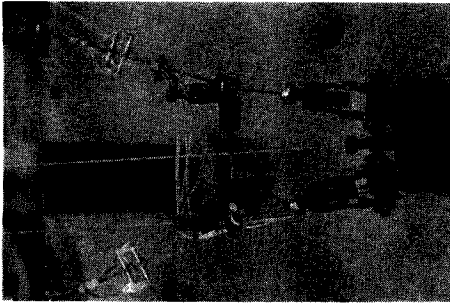


Photo. 7 (a) Socket and adjustable fixture for main cables

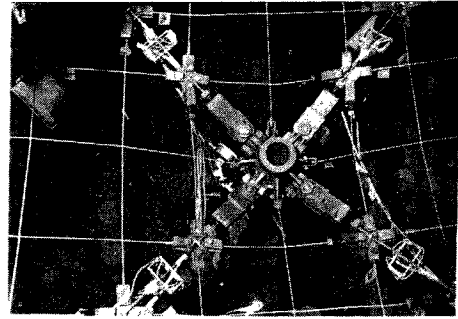


Photo. 7 (b) Fixed main cables to column m.

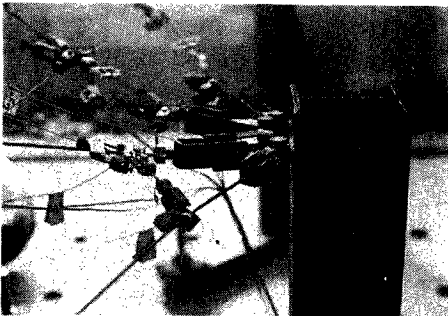


Photo. 7 (c) Details of column top, column a.

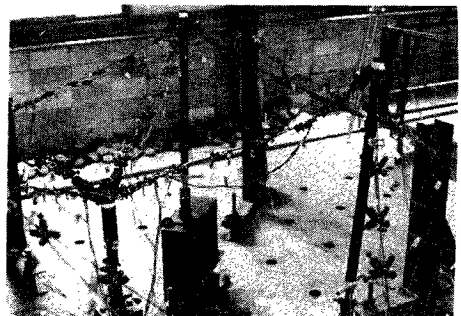


Photo. 7 (d) Details of columns i, j, k, l.

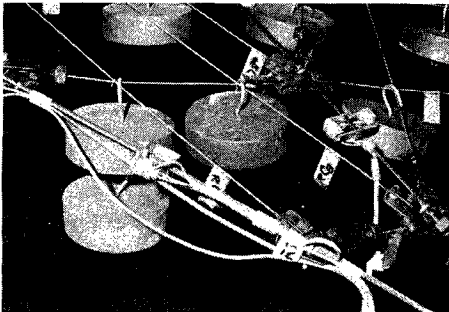


Photo. 8 Weights.



Photo. 9 Introducing initial prestressing force to cable.

分的に修正した。

初期プレストレス力を導入したモデルの完成した状態を **Photo. 9** に示す。

3.3 ケーブルの張力測定方法

メインケーブル、サブケーブルの張力を測定するために、**Fig. 7** に示すような張力計を試作した。検定実験により、張力 (T) と、張力計に示されるたわみ量 (δ) との関係から、**Fig. 7** に示すような $T-\delta$ 曲線を求め、張力計に示されるケーブルのたわみ量から、ケーブルの張力を換算する方法を採用した。張力計の測定誤差は $\pm 10\%$ 程度であった。なお、メインケーブル、サブケーブルの張力測定位置は各ケーブルのほぼ中央部である。

3.4 載 荷 方 法

Photo. 8 に示すような、フック付きの重錘を、サブケーブルの交点につるすことによって载荷を行なった。用意した重錘は、2 kg, 1 kg, および 500 g の3種であり、曲面の水平投影面に対して、一様の等分布荷重になるよう、3種の重錘を適当に組み合わせた。下向载荷は、**Photo. 10 (a)** に示すように、直接、サブケーブルの交点につるすことによって行なわれたが、上向き载荷は **Photo. 10 (b)** に示すように、反力受けの架構を設け、この架構に滑車を設置し、サブケーブルの交点に上向き荷重载荷が重錘をつるすことによって行なわれるようにした。

作用荷重の最大値をほぼ 150 kg/m^2 とし、2～3段階の荷重階で、上向き、下向きとも载荷した。

3.5 変位測定方法

各曲面の、ほぼ中央面の変位は、周辺に設置した4台のトランシットで、標尺を読み取る方法によって測定した。 i, j, k, l 柱の柱頭の水平変位は下げぶりにより、また中央 m 柱の水平変位は、直向する2方向から取り付けたダイヤルゲージによって測定した。

3.6 載 荷

まず、このプレストレスト・ケーブルネット構造の基本的な力学的性状を把握するために、全曲面、HP内部曲面および外周曲面に、ほぼ等分布荷重、上向き 150 kg/m^2 、下向き 100 kg/m^2 を载荷した。次に、それぞれの風圧分布に対応する载荷を行ない、実験は **Table 2** に示すように、9つの荷重状態について行なった。

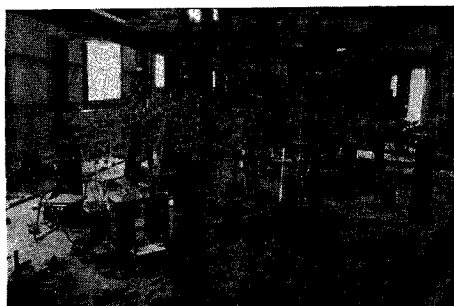


Photo. 10 (a) Downward loading.



Photo. 10 (b) Upward loading.

Table 2 Loading condition for model test.

case 1-1	Uniformly distributed load	Downward
case 1-2		Upward
case 2-1	Uniformly distributed load only on inner surface	Downward
case 2-2		Upward
case 3-1	Uniformly distributed load only on outer surface	Downward
case 3-2		Upward
case 4-1	Distributed load according to the distribution of measured wind pressure	Corresponding to Case (I) in wind tunnel test
case 4-2		Corresponding to Case (E) in wind tunnel test
case 4-3		Corresponding to Case (C) in wind tunnel test

なお、載荷したサブケーブルの交点は、チドリとした。

3.7 実験結果

各載荷状態に対するメインケーブルおよびサブケーブルの張力の測定結果を **Figs. 9 (a) ~ (f)** に示す。

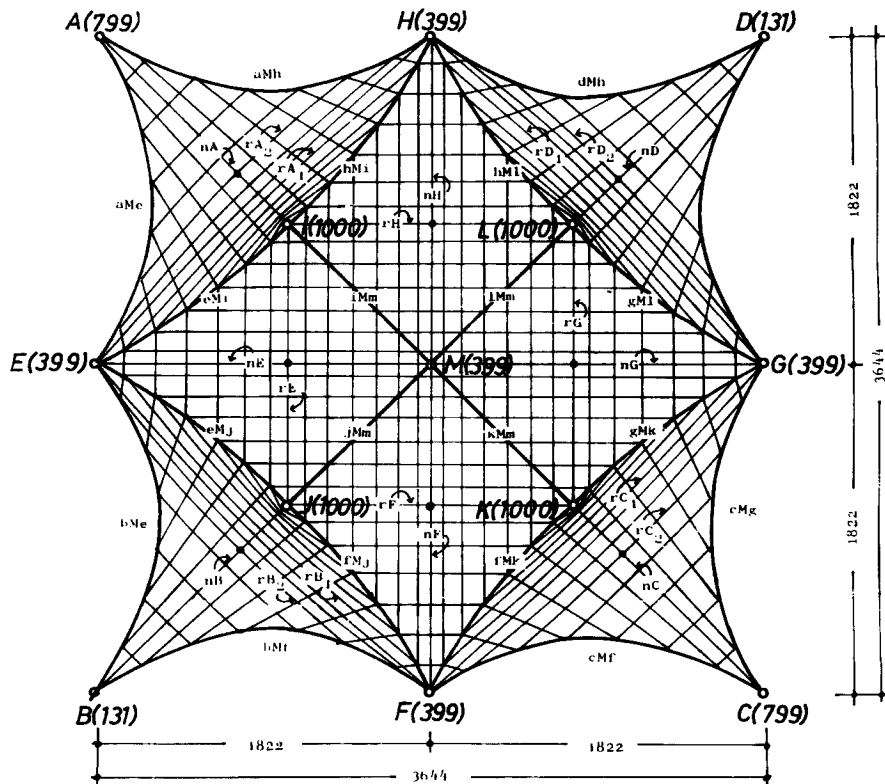
Fig. 9 に示されるケーブルの張力としては、荷重分布の対称性、および曲面形状の対称性を考慮して、対称位置にあるケーブルの張力を平均化した値を採用した。図中の縦軸は、荷重階を表わし、横軸はケーブル張力の実測値を示す。メインケーブル、サブケーブルの各称を **Fig. 8** に示す。

3.8 荷重実験結果の考察

3.8.1 初期プレストレス力の分布

全曲面、上向および下向等分布という理想化した載荷実験によって示された、このプレストレス・ケーブル・ネット構造の基本的な力学的性状について述べる。(Figs. 9 (a), (b), (c) 参照)

設計曲面を形成する各ケーブルの初期プレストレス力の分布として、外周を結ぶメインケーブル および m 柱に集る柱メインケーブル 3 に対して 100 kg, i, j, k, l 柱を結ぶメインケーブル 2 に対して 200 kg, サブケーブルに対して 20 kg/本 (測定値のバラツキを平均化した値) という値が示された。



Note: Main Cable 1 : aMe, bMe, bMf, cMf, cNg, dMg, dMh, aMh

Main Cable 2 : eM1, eMj, fMj, gMk, gM1, hM1, hM1

Main Cable 3 : iMm, jMm, kMm, lMm

Numbers in the parentheses indicate column lengths

• indicates the location of points for displacement measurement.

Fig. 8 Plan of cable model. (unit : mm)

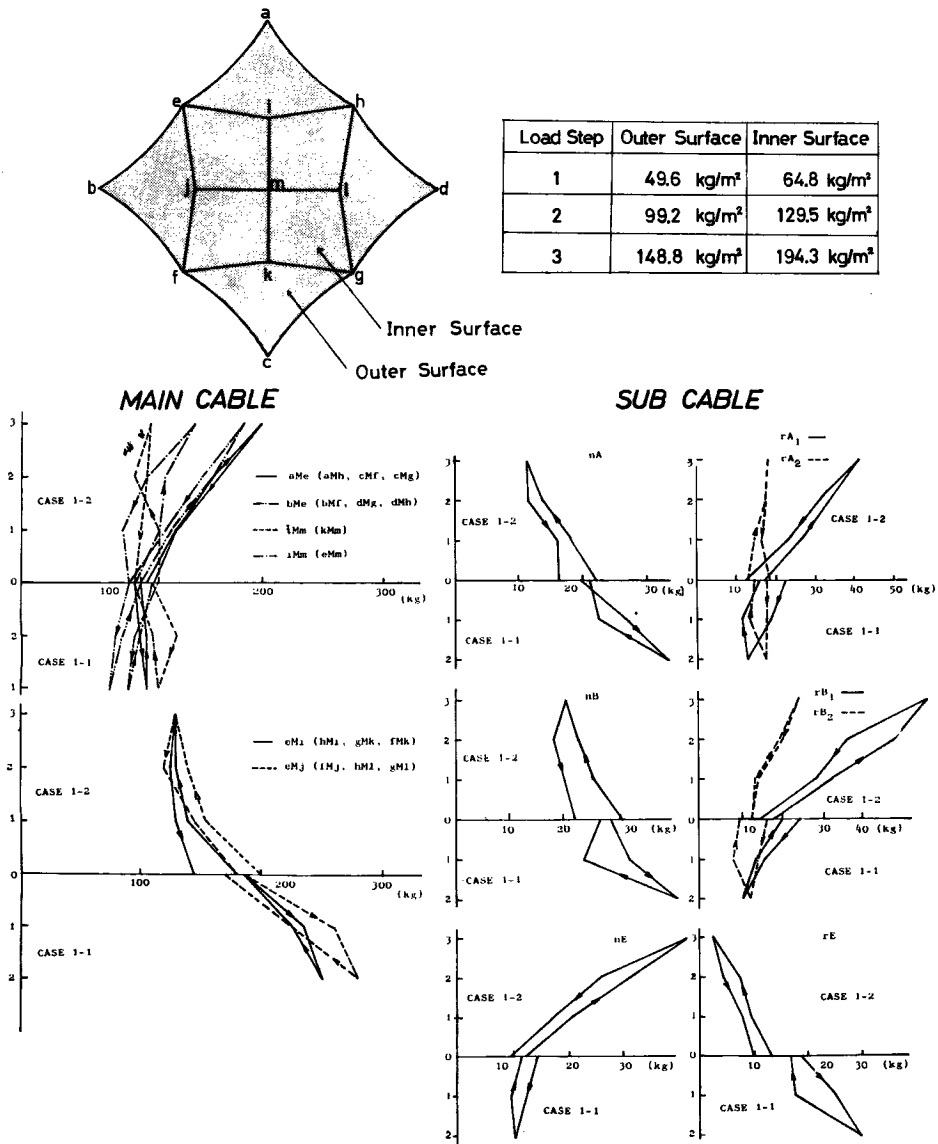


Fig. 9 (a) Cable tension vs load, Case 1-1 and Case 1-2.

このプレストレス力の分布状態に対して上向き等分布荷重 150 kg/m² が負荷されると、メインケーブル 1 の張力は初期プレストレス力のほぼ 2 倍まで増加し、メインケーブル 2 の張力は 0.75 倍程度まで減少するが、メインケーブル 3 の張力は、初期プレストレス力に対して、わずかに増加する傾向を示す。サブケーブルについては、外周曲面の normal 方向のケーブル（つりケーブル）の張力は減少し、ring 方向のケーブル（おさえケーブル）は、初期プレストレス力の 3 倍程度まで張力が増加する。内部 HP 曲面では、normal 方向のケーブル（おさえケーブル）の張力は初期プレストレス力の 3 倍程度まで増加し、ring 方向のケーブル（つりケーブル）の張力は減少する傾向を示す。下向き等分布荷重 100 kg/m² については、

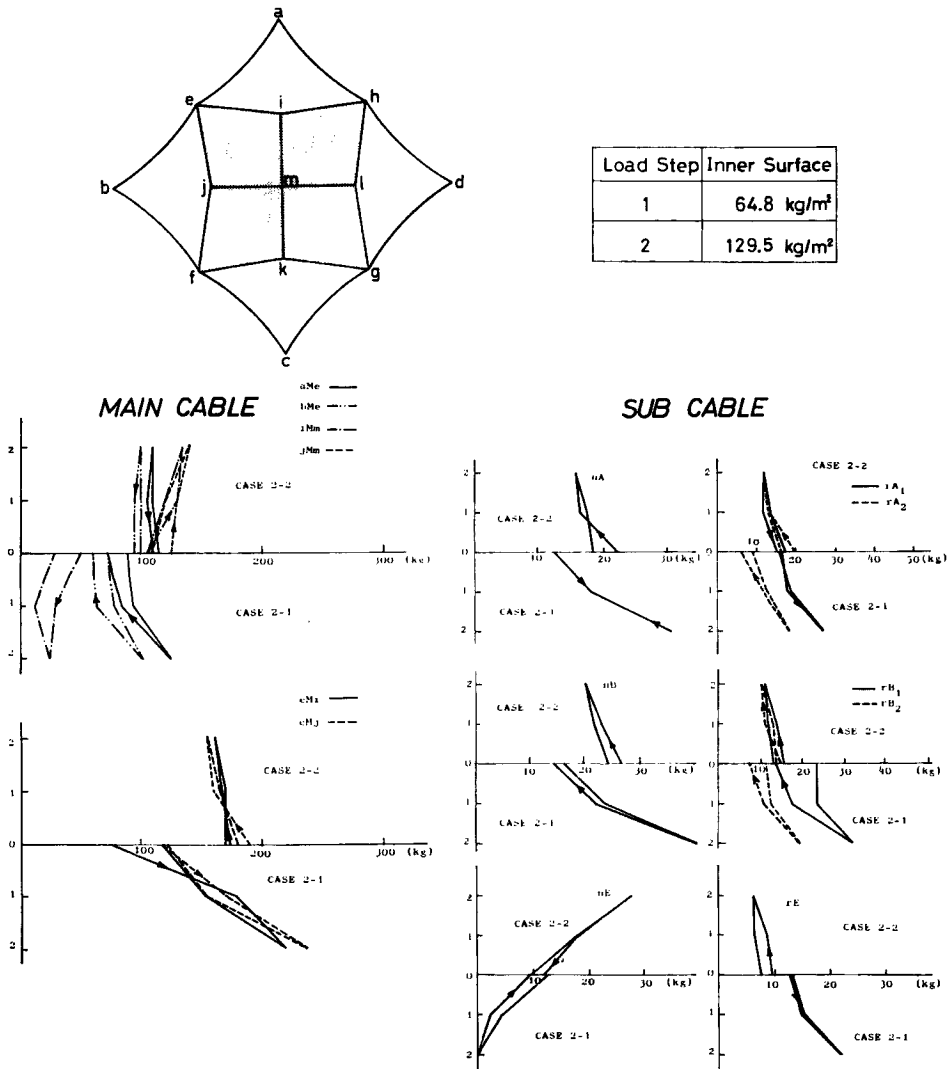


Fig. 9 (b) Cable tension vs load, Case 2-1 and Case 2-2.

メインケーブル1, メインケーブル3の張力の変動はあまり示されず, メインケーブル2の張力は, 初期プレストレス力の1.5倍程度まで増加する。それぞれのサブケーブルの張力の変動は, 上向き载荷と, 逆の傾向を示している。上向き, および下向き载荷とも各ケーブルの張力の変動は, 一般的に非線型としての挙動を示しているが, 局所的なケーブルの張力の変動としては, ほぼ線型に近い挙動を示している個所が見られる。

上記の初期プレストレス力が導入された曲面に対して, 上向き等分布荷重 150 kg/m² 下向き等分布荷重 100 kg/m² が载荷されたが, 各ケーブルの張力が0となるような状態は示されなかった。したがって予想作用荷重に対して, このケーブル・ネット構造が, 安定した力学的挙動を示すために必要な初期プレストレス力の値として, 上記に示された初期プレストレス力の一つの指標となると考えられる。

3.8.2 風荷重時における張力の変動

風洞実験によってえられた風圧分布に対応した载荷実験の結果は, **Figs. 9 (d), (e), (f)** に示されるが,

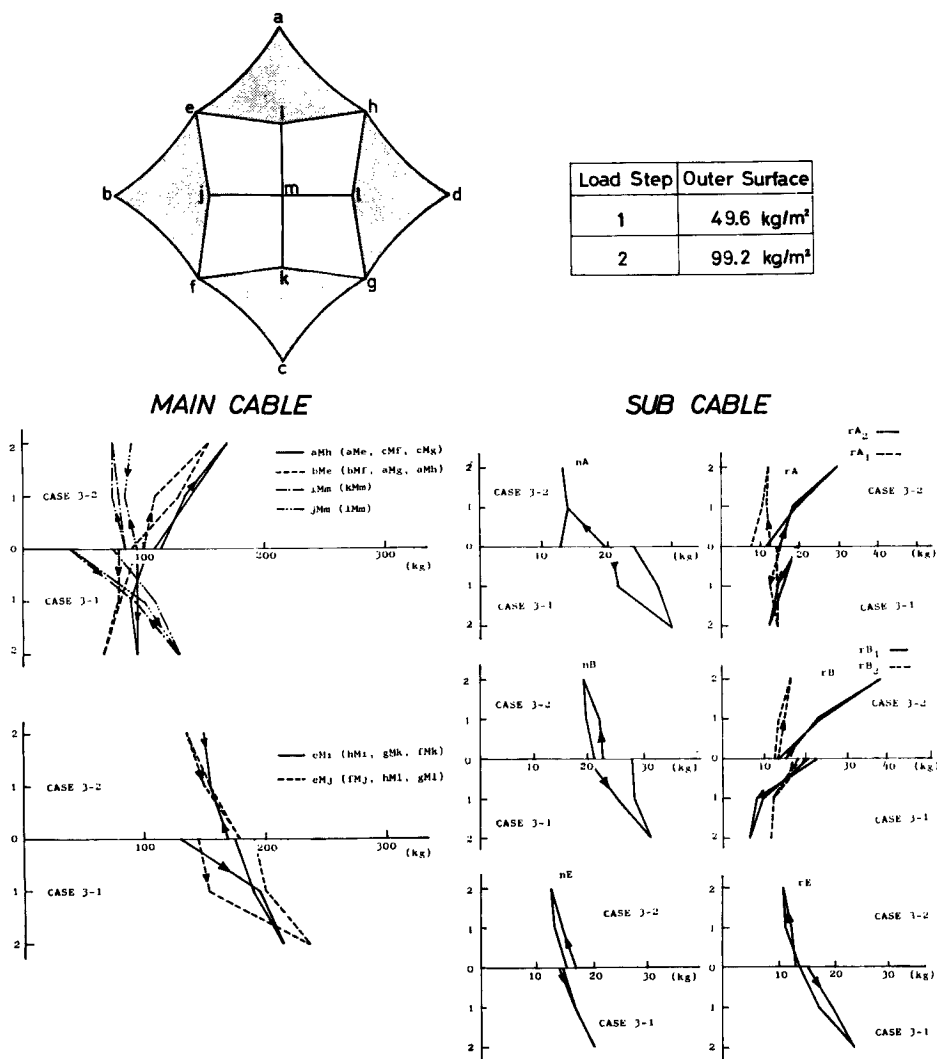
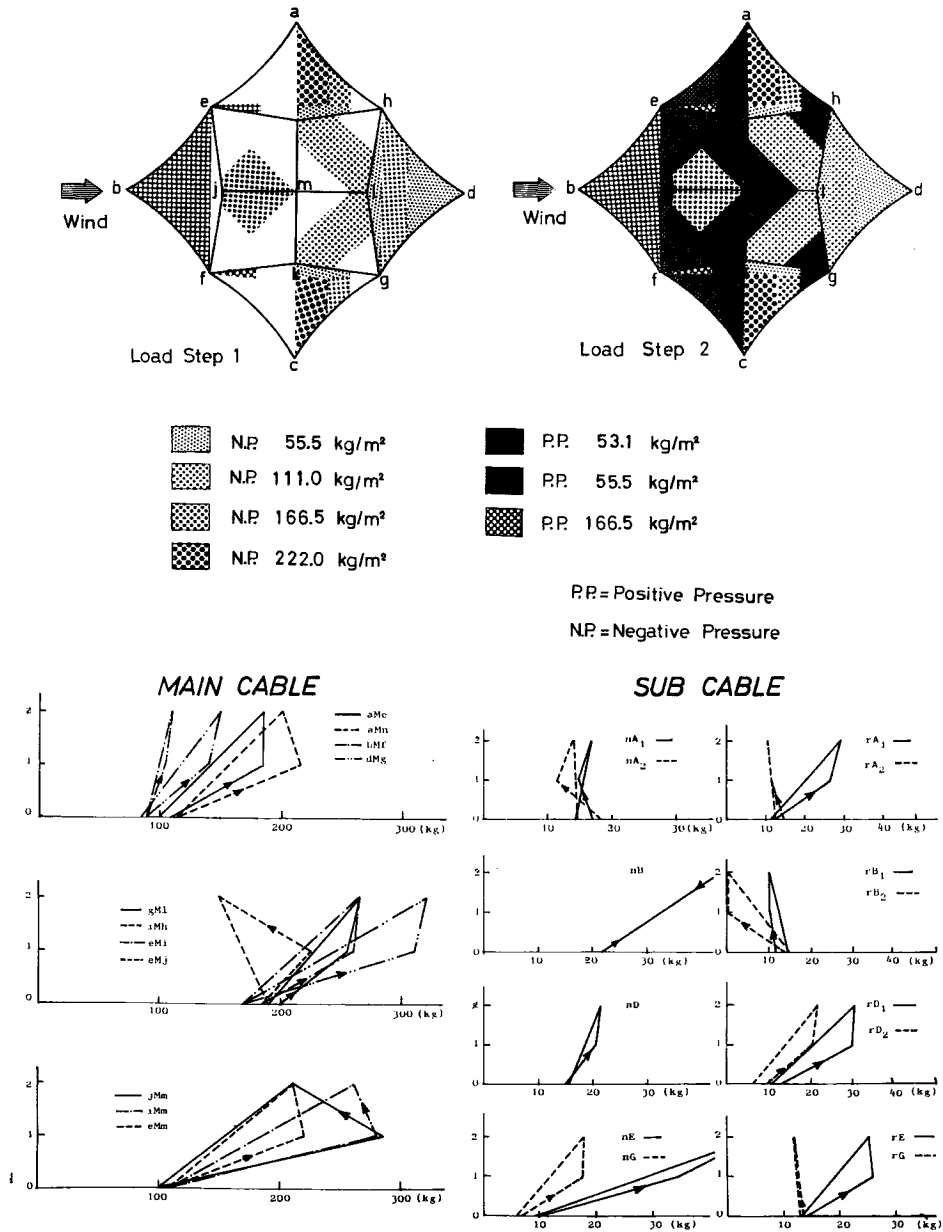


Fig. 9 (c) Cable tension vs load, Case 3-1 and Case 3-2.

各ケーブルの張力の変動について特色的な性状について述べる。

風荷重時において、メインケーブルの張力は、初期プレストレス力の値より、いずれも増大する傾向にある。case 4-1 (B 面 5° の吹下しの状態) の場合、その張力の増加は他の場合に比して顕著である。メインケーブル 1 の張力は、初期プレストレス力の 2 倍、メインケーブル 3 については 3 倍、メインケーブル 2 については 2 倍、それぞれ増加する傾向にある。case 4-2 (E 面 3.5° の吹上げの状態) の場合では、メインケーブル 1、メインケーブル 2 の張力の変動はわずかであるが、メインケーブル 3 の張力は初期プレストレス力の 2 倍に増加する傾向を示す。case 4-3 (A 面 5° の吹下しの状態) の場合は、case 4-1, case 4-2 の場合に比して、メインケーブルの張力の変動は、いずれも極めて微少である。サブケーブルの張力の変動は、いずれの場合においても局部的に初期プレストレス力の 3 倍まで増加する傾向が見られる。なお、メインケーブルのそれぞれの平均的な張力の増加は初期プレストレス力に対して、それぞれ case 4-1 におい



て、メインケーブル1では1.8倍、メインケーブル2では1.5倍、メインケーブル3では2.2倍となり、case 4-2, 4-3 においては、メインケーブル1では1.5倍、メインケーブル3では1.8倍、メイスケーブル2では1.25倍程度と考えられる。

3.8.3 曲面のたわみ

曲面のたわみ量は、かなり不規則な挙動を表わしている。その原因としては、たわみなどの変位の測定技

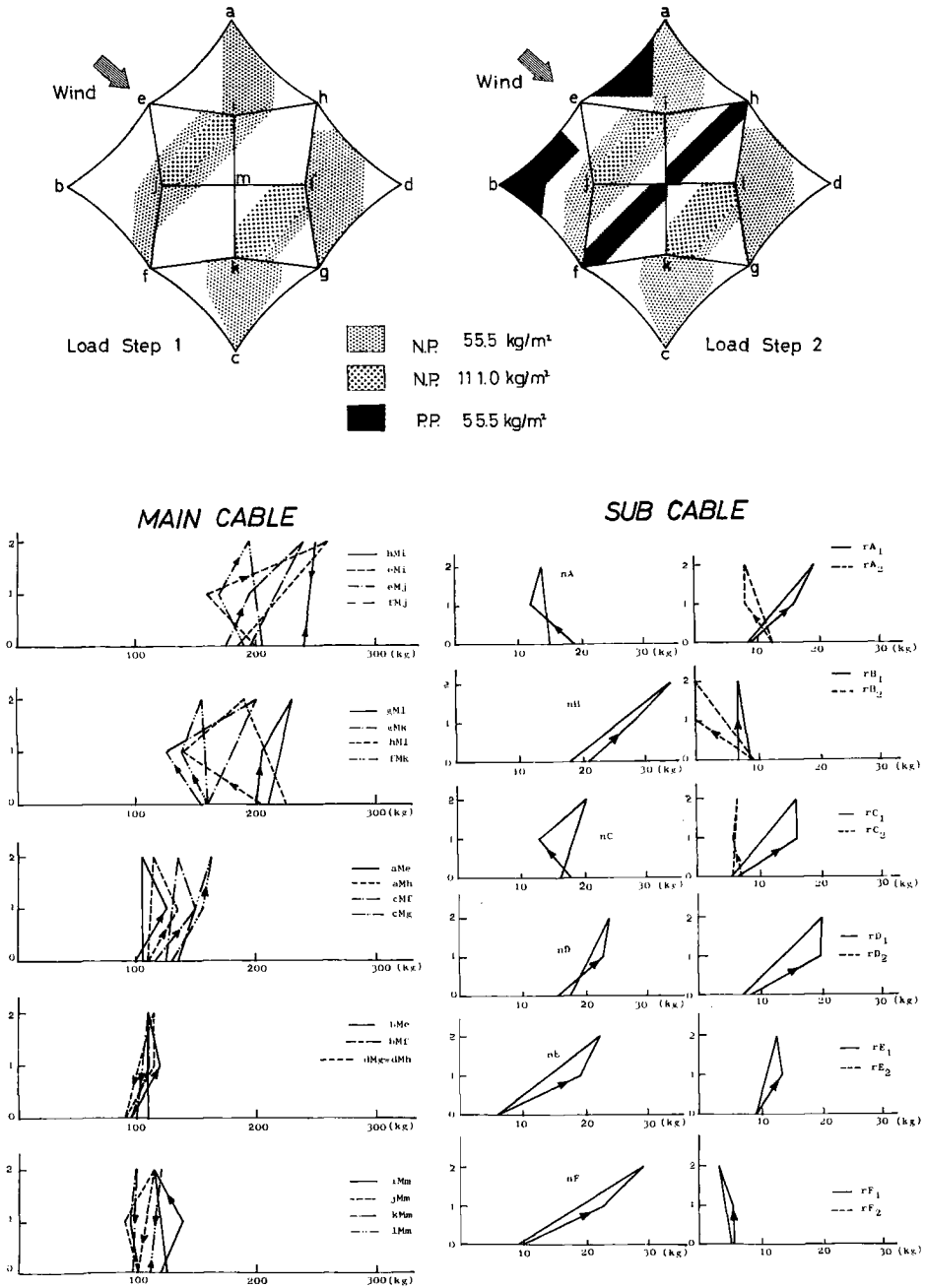


Fig. 9 (c) Cable tension vs load, Case 4-2.

術の不備などが考えられ、定量的なデータとしてはあまり参考にはならない。しかし、定性的な挙動は、ケーブルの張力の変動から推察される曲面の動きとほぼ一致している。

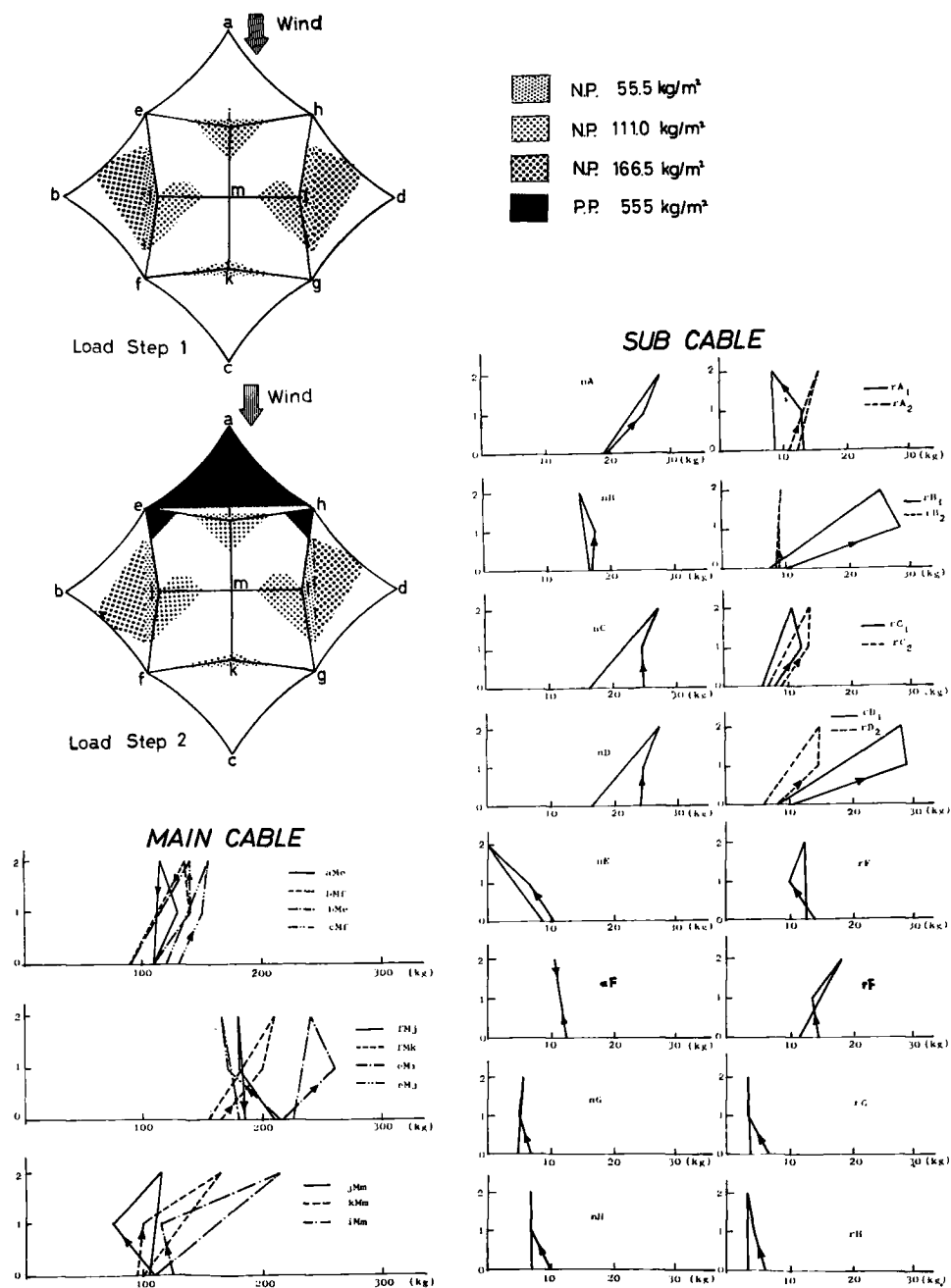


Fig. 9 (f) Cable tension vs load, Case 4-3.

風荷重時 case 4-1 の状態において、曲面のたわみは、他の状態に比して顕著であり、外周曲面の中央部では、最大値として 3.02 cm のたわみとなっている。

4. 解 析

このプレストレスト・ケーブルネット構造の基本的な力学特性を検討するために、全曲面、上向き、下向き等分布荷重という単純化した荷重状態で、メインケーブル、サブケーブルの張力変動のデータを得たが、それらについて解析的な検討を試みる。なお、今回の計算は、京都大学大型計算機センター FACOM 230-60 によって行なわれた。

4.1 架構のモデル化

架構の2軸対称性からその1/4をとりだして Fig. 10 (a) のようにモデル化する。Fig. 10 (a) において丸で囲まれた数字は節点番号を表わし、①～④⑥は変位を拘束されていない節点（自由節点）、④⑦～⑤⑩は固定点である。一方、無印の数字は部材番号を表わし、1～18および99はメインケーブル、21～98はサブケーブル、19, 20は両端ピンの柱であり100～115は対称性を満たすために設けられた材長、剛性とも充分大きい仮想部材である。計算に用いた各部材の断面積を Table 3 に示す。この計算用モデルでは、サブケーブルのピッチがケーブルモデルの場合の約1/3倍であるのでその断面積はケーブルモデルの1/3倍と仮定し、等価弾性係数はメインケーブル、サブケーブルとも 15000 kg/mm² とした。

4.2 基本式

節点 i に n 本の部材 $j_1, j_2, \dots, j_n$ が接続し、その相手側の節点を $k_1, k_2, \dots, k_n$ とする。変形の前後において各部材の方向余弦の変化量が1に較べて充分小さい範囲では変形後の部材 j の応力 T_j は、

$$T_j = \bar{T}_j + K_j \{ l_j \cdot (u_k - u_i) + m_j \cdot (v_k - v_i) + n_j \cdot (w_k - w_i) \} / L_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

となり、節点に働く外力の x 方向成分を Q_x とすれば、節点 i での x 方向釣合方程式は

$$\sum_{m=1}^n [T_{jm} \{ l_{jm} + (u_{km} - u_i) / L_{jm} \}] + Q_x = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

であらわされる。ここに、部材 j に関し $\bar{T}_j$ は初張力、 l_j, m_j, n_j は方向余弦、 L_j は材長、 $K_j \equiv E_j A_j$ は等価伸び剛性であり、 u_i, v_i, w_i は i 点の x, y, z 方向変位である。(1) 式を(2)式に代入し変位の2次以上の項を省略すると、

$$\sum_{m=1}^n [(u_{km} - u_i) \{ \bar{T}_{jm} + K_{jm} \cdot l_{jm}^2 \} / L_{jm} + \{ (v_{km} - v_i) m_{jm} + (w_{km} - w_i) n_{jm} \} K_{jm} \cdot l_{jm} / L_{jm} + \bar{T}_{jm} \cdot l_{jm}] + Q_x = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、 y, z 方向の釣合方程式も同様に求まる。

従って、自由節点の総数を N 個とすると、変位 u, v, w は $3N$ 元連立方程式の解として求まり、(1) 式によって各部材応力が定まる。

4.3 初張力時の釣合位置

初張力時の釣合位置および応力状態を求めるため、節点の座標としてワイヤモデルの実測値から推定した値を与え、各節点を仮に拘束する。この拘束した状態のもとで、各ザイルに必要なと思われる初張力を与えた後、各節点の拘束を解除すると、節点は釣合の位置に移動し、部材張力も釣合式を満足するものとなる。こうして得られた状態を初張力時の釣合状態と考え、外力が作用したときの解析の初期条件とする。もしこの時の部材張力が当初期待した張力と著るしく異なる場合は、この時の座標を初期値として再度前項の操作を行えばよい。

Table 3 Assumed section area for calculation.

Member name	Main cable			Sub cable	
	1～12	13～18	99	21～26 42～47	27～41 48～98
Section area (mm ²)	6.05	3.025	24.2	1.653	3.306

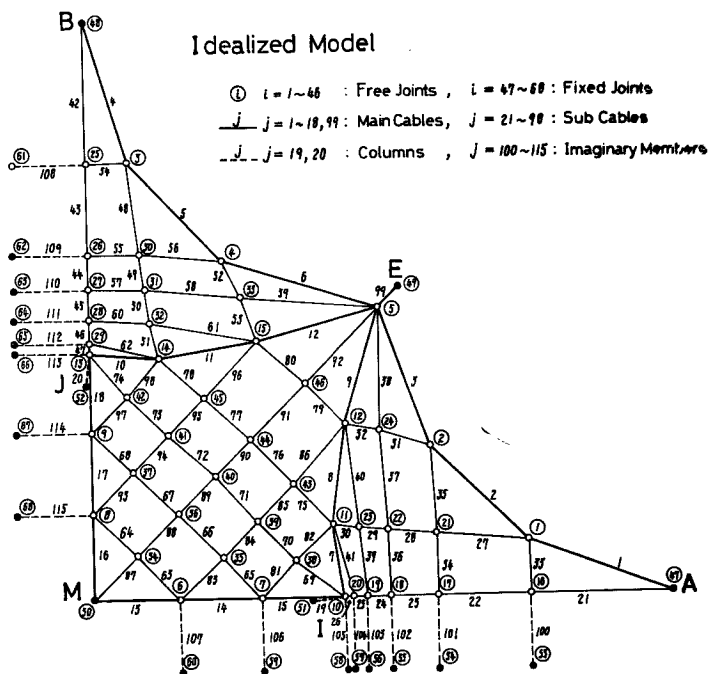


Fig. 10 (a) Idealized model.

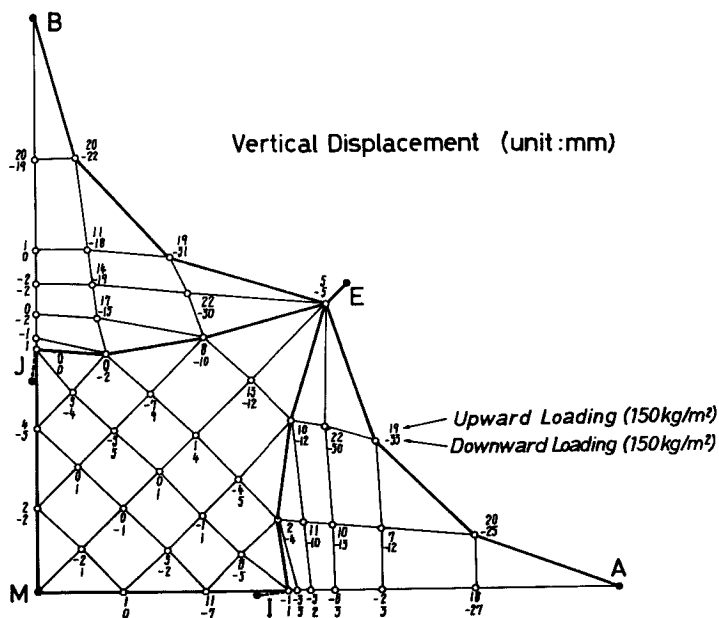


Fig. 10 (b) Vertical displacement (unit:mm).

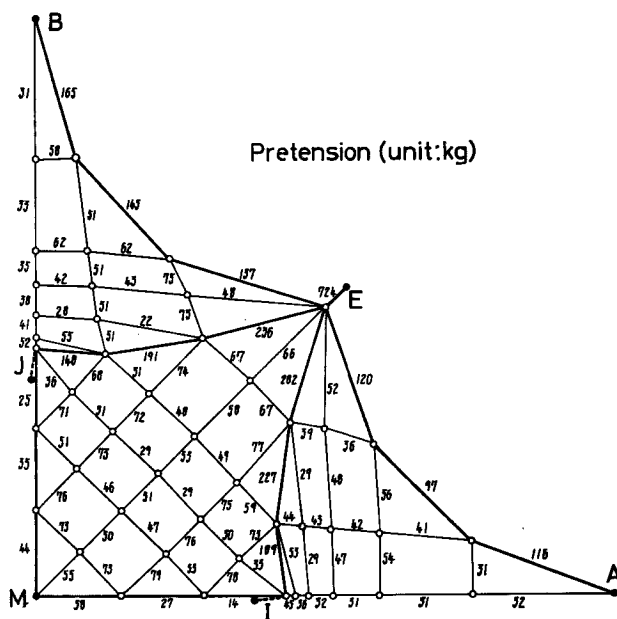


Fig. 10 (c) Pretension (unit; kg).

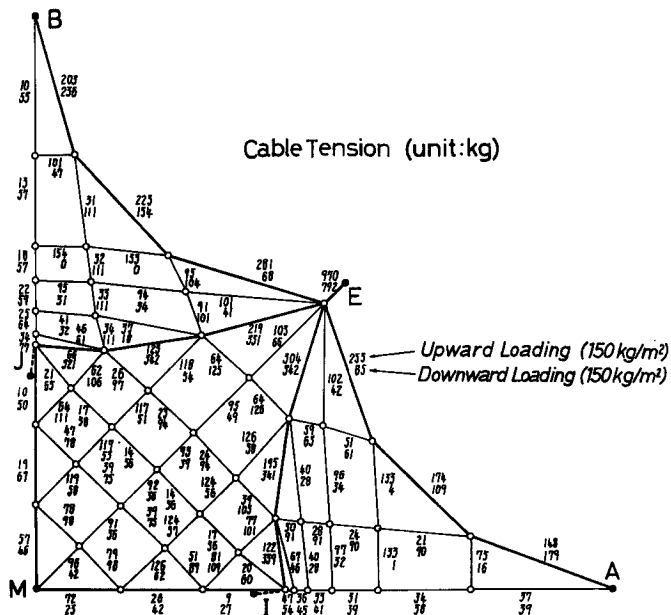


Fig. 10 (d) Cable tension under load (unit; kg).

4.4 荷 重

n 個の節点 $A_1, A_2, \dots, A_n$ で囲まれたパネルを考え、 O 点をそのパネルの幾何学的中心とする。このパネルは、複雑な曲面を形成するはずであるが、これを n 個の三角平面 $\triangle A_i A_{i+1} O$ で形成された折板と近似する。今、外力として風荷重を考えると各節点に働く力は、その節点の負担面積に比例し、その方向は面の法線方向であるから、このパネルの風圧力のうち A_i 点に作用する力 Q は、膜面に作用する荷重を w_i 、部材 $A_i - A_{i+1}$ の中点を ${}_iB_{i+1}$ とすると次式で表現することができる。(Fig. 11 参照)

$$Q = w_i \times [{}_iB_i A_i \times O A_i + {}_iB_{i+1} A_i \times O A_i] / 2$$

従って、 A_i 点の受ける外力の総和は A_i 点のまわりのパネルから受ける Q のベクトル和として求めることができる。今回の計算にあたってはケーブルモデルの実験と比較するため各節点とも、 $w_i = \pm 150 \text{ kg/m}^2$ とした。

4.5 非線形挙動

(3) 式は微小変形の範囲内では厳密であるが、実際の架構に荷重が作用した場合、変形に伴う幾何学的変化および初張力の変動による剛性の変化によって非線形挙動を示すことが予想される。これを正しく評価するためいくつかの荷重段階を設け、1段階毎にその時点での節点座標および部材張力をもとに架構の剛性を求め、挙動を追跡することにする。この荷重段階はいずれかの部材の初張力が0となるときを原則とし且つ一段階の幅が最大荷重の $\frac{1}{2}$ (即ち $w = \pm 30 \text{ kg/m}^2$) を越えないように設定した。

4.5 解析結果とその検討

初張力時、および上、下向き荷重時の各部材張力の解析結果を Figs. 10 (c), (d) に示す。初張力は、メインケーブル (部材番号 1~6) において、100~150 kg、メインケーブル 2 (7~12) において、150~280 kg、メインケーブル 3 (13~18) において、30~90 kg [対称軸上の部材張力の計算値は、実際の $\frac{1}{2}$ となる]。サブケーブルでは平均してほぼ 50 kg で、ケーブルのモデルでの値に換算すると 20 kg/本となり、いずれも実験値と良好な一致をみている。

荷重が加わったときの張力変動は、HP 曲面をなす内部曲面では小さいが、比較的平坦な三角形の外部曲面では大きく、特に、下向き荷重の場合には、不安定になりやすい傾向がある。しかしながら、計算結果によれば少なくとも、下向き 130 kg/m² までは、どの部材の張力も0になることはない。荷重時の張力変動は下向きに凸な曲率をもつ部材は、下向き荷重時に張力が増大し、上向き荷重時には減少する。一方上向きに凸な曲率をもつ部材はこれと逆の傾向を示すが、ほぼ水平面内の曲率をもつメインケーブル1と、2重曲率をもつメインケーブル3においては、この傾向は、みられない。なお、初張力時における各節点の座標値を Table 4 に示す。

Fig. 10 (b) に上向き、下向き荷重時の鉛直方向の節点変位を示す。内部曲面の変位小さいが、外部曲面の、特に外周部分では、変動が大きく、下向き荷重時には 30 mm を越える変位を生ずる。この傾向はケー

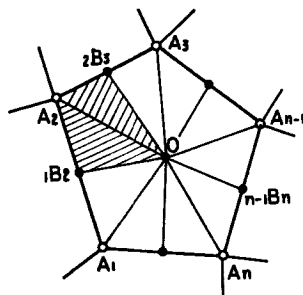


Fig. 11 Loading area.

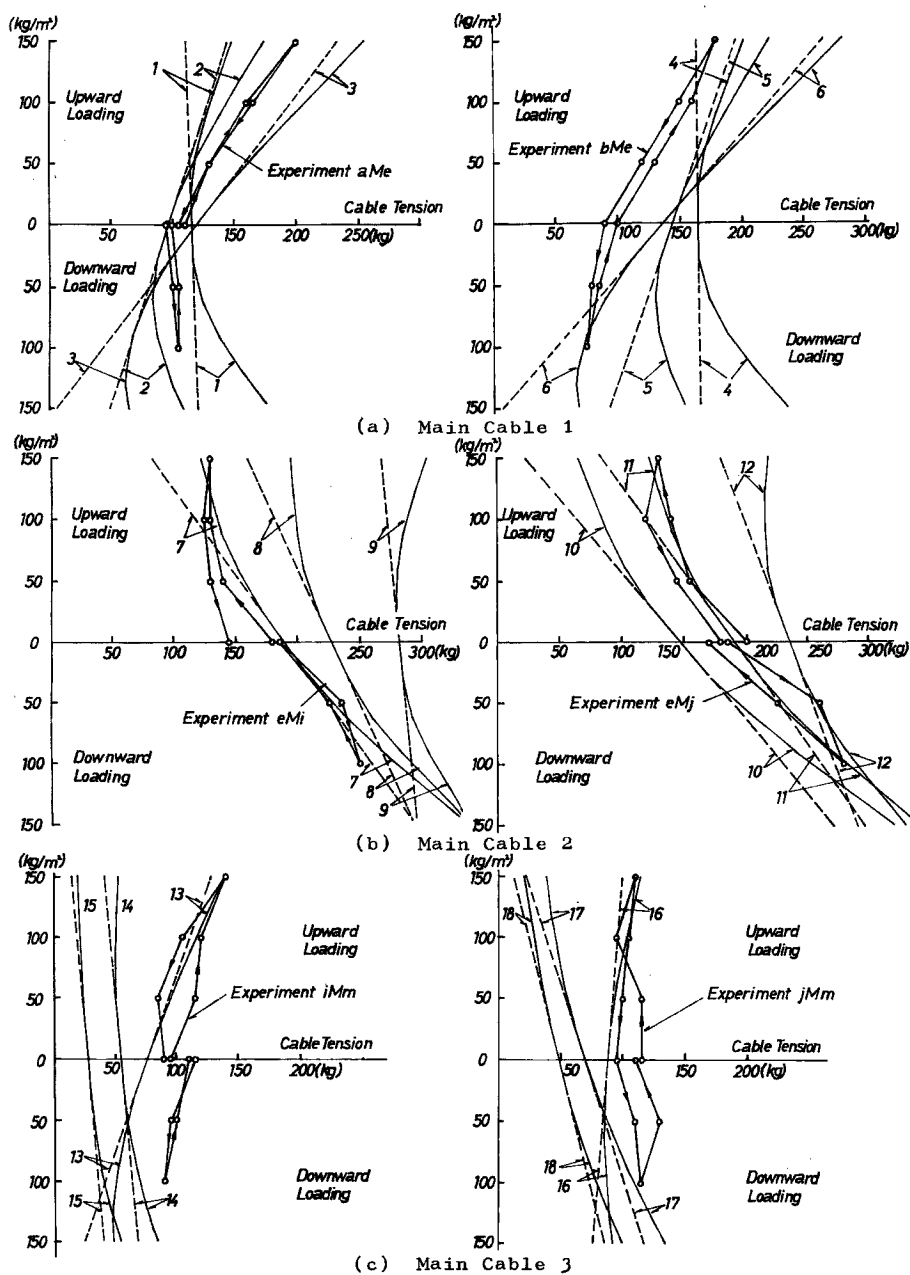


Fig. 12 (a), (b), (c) Load vs main cable tension.

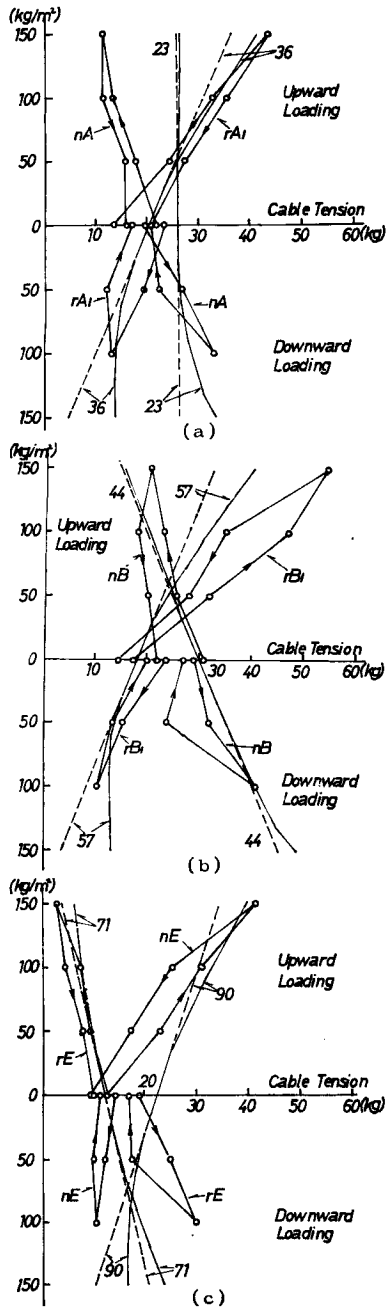


Fig. 13 (a), (b), (c) Load vs sub cable tension.

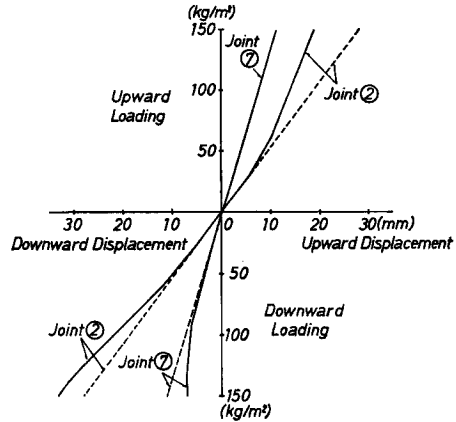


Fig. 14 Load vs displacement.

ブルモデルの荷重実験における挙動とよく一致している。なお、Fig. 14 に計算によって得られた、荷重と変位の関係の一例を示す。実線は、4.5節で示した非線形解で、点線は、初張力時の剛性が常に保たれていると仮定した場合の線形解である。

Figs. 12 (a), (b), (c) に荷重とメインケーブルの張力の関係を示す。

実験値は各ケーブルのほぼ中央で測定されているから、材軸に沿った張力変化の平均値的な値を示すと考えられる。全体的に、非線形解によって得られた曲線は、実験値によって得られた非線形の挙動の傾向を、よく追跡していると考えられる。計算結果によって示されることは、非線形の効果を考慮すると、低荷重時に、張力は減少することがあっても、ある程度以上の荷重が負荷されると、その傾向は反転し、逆に張力は増大することである。この傾向は、線形解によっては把握できるものではなく、曲面の安定に対しては、非線形の効果は、負荷荷重 $w = \pm 150 \text{ kg/m}^2$ の範囲では、少なくとも、有利な要素になると考えられる。

Figs. 13 (a), (b), (c) に荷重とサブケーブルの張力の関係の一例を示す。計算値は特に測定点の近傍と考えられるものだけを示した。実験値によって示される挙動は、よく計算結果とよく一致している。

5. む す び

プレストレスト・ケーブルネット構造に関して、一つの実験と、一つの解析を試み、ある程度、静的な荷重が作用する場合の、構造物の力学的挙動が明らかにされたが、このようなテン

Table 4. Joint coordinate sunder pretension (unit : m).

Joint	x	y	z	Joint	x	y	z
1	1.895	0.233	0.226	26	0.000	1.508	0.070
2	1.471	0.655	0.123	27	0.000	1.361	0.173
3	0.181	1.914	-0.135	28	0.000	1.232	0.298
4	0.589	1.484	-0.019	29	0.000	1.126	0.442
5	1.264	1.268	-0.069	30	0.224	1.505	0.047
6	0.366	0.000	0.141	31	0.243	1.351	0.138
7	0.730	0.000	0.304	32	0.261	1.203	0.239
8	0.000	0.369	0.137	33	0.661	1.319	0.047
9	0.000	0.728	0.299	34	0.191	0.191	0.103
10	1.068	0.000	0.671	35	0.556	0.178	0.215
11	1.042	0.315	0.373	36	0.372	0.373	0.184
12	1.100	0.765	0.157	37	0.177	0.557	0.209
13	0.000	1.070	0.671	38	0.875	0.161	0.357
14	0.301	1.057	0.335	39	0.711	0.340	0.243
15	0.730	1.126	0.127	40	0.530	0.532	0.206
16	1.903	0.000	0.253	41	0.333	0.715	0.231
17	1.502	0.000	0.273	42	0.158	0.883	0.342
18	1.288	0.000	0.341	43	0.867	0.497	0.244
19	1.179	0.000	0.417	44	0.688	0.691	0.200
20	1.119	0.000	0.484	45	0.491	0.874	0.221
21	1.491	0.266	0.236	46	0.936	0.939	0.119
22	1.271	0.285	0.285	47	2.520	0.000	0.294
23	1.147	0.300	0.330	48	0.000	2.520	-0.347
24	1.245	0.733	0.136	49	1.350	1.350	-0.120
25	0.000	1.912	-0.124	50	0.000	0.000	-0.120

ション構造物の力学的な特性である、非線形の要素については、いまだ基礎的な研究も充分といいがたく、今後の研究の課題と言える。また、この実験では、風荷重によって生ずる振動の影響を、あくまでも静的なものに置換するという条件下で行なわれたものであり、動的な挙動—特にフラッター現象など—については、何一つ解明されていない。今後、このようなプレストレスト・ケーブルネット構造における動的な挙動に対する、研究のなされることを期待する。

謝 辞

ケーブル・モデルによる荷重実験は1968年の夏行なわれ、当時の研究室のメンバーである中村 武、小城修、三谷 勲、岡本晴仁、高枝新伍、古村勝寛、林邦昭、木村信也、山口清士、石丸一彦、市村達朗、高木信芳、山口 猛、山本 昇、山本春樹、岡田正彦の諸氏の参加による協同実験によって完遂されたものであります。ここに記して深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Leonhardt F., Egger H. und Haug E. : Der Deutsche Pavillon auf der Expo'67 Montreal-eine vorgespannte Seilnetzkonstruktion, DER STAHL-BAU, Heft 4, April 1968, pp. 97~106, and Heft. 5, July 1968, pp. 133~145.
- 2) Otto, F.: Tensile Structure, Volume 2, The MIT Press, 1965.

- 3) Siev, A. and J. Eidelman: Stress Analysis of Prestressed Suspended Roofs. Proceedings, ASCE, Vol. 90, St. 4, August, 1964, pp. 103~121.
- 4) Siev, A.: Prestressed Suspended Roofs Bounded by Main Cables. MEMOIRES ABHANDLU NGEN PUBLICATIONS, 1967, pp. 171~186.
- 5) 横尾義貫・多賀直恒: ザイルネット構造の振動性状(鞍型曲面の振動, その1 エネルギー法による). 日本建築学会論文報告集, 第113号, 昭和40. 7, pp. 12~18.
- 6) Esquillan, N. and Y. Saillard: "Hanging Roofs", Proceedings of the IASS Colloquium on hanging roofs, etc., Paris 9-11, July, 1962.
- 7) 川村純夫・辻 英一: 吊屋根面の風による振動について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭44. 8, pp. 737~738.