

# 二重ケーブルネット膜構造の振動性状について

## — 実物実験の解析 —

宋 浩\*<sup>1)</sup> 近藤一雄\*<sup>3)</sup> 樫原健一\*<sup>4)</sup> 神沢宏明\*<sup>4)</sup> 石井一夫\*<sup>2)</sup>

### 概 概

二重ケーブルネット膜構造は、新しい構造形式であり、その動的特性はまだ不明である。本論文は模型実験に引き続き、実物（大阪プール）の振動実験結果の振動解析を行い、二重ケーブルネット膜構造の動的特性を総合的に把握することを目的としている。まず、実物の振動実験から得られた振動波形をフーリエ変換し、卓越振動数を定める。次に、振動波形から減衰定数を定める。そして、固有値解析によってモード形状、卓越成分、共振を起こす可能性等を考察した。二重ケーブルネット膜構造は、剛性の高い下部ケーブルネットと上部ケーブルネットに膜面をとりつけた比較的剛性の低いケーブル膜部分をポスト材で連結されるため、特別の振動性状となると考えられ、部分構造分割によって実物の振動性状を数値として把握する。最後に、模型実験と実物実験の関連についても検討した。

### 1 背景

ケーブルネット構造はケーブル材の高強度性、軽量性、及びテンション部材であるため、無柱大空間の架構が容易とされている。膜材はガラス繊維布を四フッ化エチレン樹脂でコーティングした素材が開発された後、その優れた透光性、耐久性を生かして、影のない柔らかな陽光を室内に提供し、開放的スポーツ・レジャー空間を実現する。両者の特性を生かし、様々の構造システムが開発され、種々の建築物に用いられている。ケーブルネットによる緊張感のある美しい曲線や、膜面を透過してくる柔らかな光による明るい空間に特徴があるため、ケーブルネットと膜材を併用する構造システムは、体育施設等大空間建築に適している構造形式である。

二重ケーブルネット膜構造は斬新な発想に基いて、多く人々の貢献によって大阪市八幡屋プールに実現された。日本国内初のポテトチップスのような二重ケーブルネット膜を、およそ12メートル(m)リフトアップし架設され、スポーツ施設としての躍動感、軽快感が溢れている。軽量で張力構造であるケーブルと軽量でかつ透光性を有する膜構造の特徴を活かした新しいドームは、大空間をよく覆い、膜構造の柔らかい空間も持っている。

膜構造は大空間構造物における極めて有効、かつ経済的な構造法であるが、逆にその軽量性、剛性の低さのため他の構造ではあまり問題とならない耐風問題、それに伴う振動問題の考慮が必要となる。大規模構造

\*1 横浜国立大学 工学部建設学科博士課程

\*2 横浜国立大学 工学部建設学科 教授

\*3 東畑建築事務所構造部

\*4 鴻池組大阪本店設計部

物になるほどその振動特性を十分に把握することが重要となる。

## 2 建築概要

八幡屋プール（大阪プール）は平成9年の大阪国体の会場となる都市公園内の屋内プール施設として計画された。50m公認競泳プール、飛び込みプール、25m練習用プールからなり3500名収容の観客席を有する建物で、国際競技会から一般開放まで幅広い利用形態に対応し、冬季にはスケートリンクとして使用する設備も備えている。

以下は八幡屋プールの建築概要である。

設計、構造：東畑建築事務所

施工：フジタ・鴻池・藤木JV

建物名称：大阪プール

建設場所：大阪市八幡屋公園内

用途：体育施設（屋内プール）

敷地面積：125,000 m<sup>2</sup>

建築面積：7,664.86 m<sup>2</sup>

階数：地上2階、地下2階

最高高さ：25.8 m

### <構造>

屋根：二重ケーブルネット膜構造

下部構造：プレキャストプレストレストコンクリート構造一部、SRC構造、RC構造

基礎構造：鋼管巻場所打コンクリート杭

設計監理：東畑建築事務所

工期：1993年10月～1996年3月

## 3 構造ゾーンの種類

本ドームは、上部より以下の3ゾーンに分けられる。

- 1) 膜屋根、ケーブルネット、リングトラス、束材を組み合わせた鞍形形状のケーブルネット膜構造
- 2) ケーブルネット膜、スタンド、プール、各室を支持する下部構造
- 3) 基礎構造

ケーブルネット膜構造の概要は図1に示す。この二重ケーブルネット膜構造は膜面、上部ケーブル、束材、下部ケーブルネットの四つの部分から成り立っている。

ケーブルネット及び膜屋根には、初期形状における安定形態を得るために初期張力を与える。また、膜面

を取付けた上部ケーブル構造にも膜面の形状を整えるために初期張力を与える。

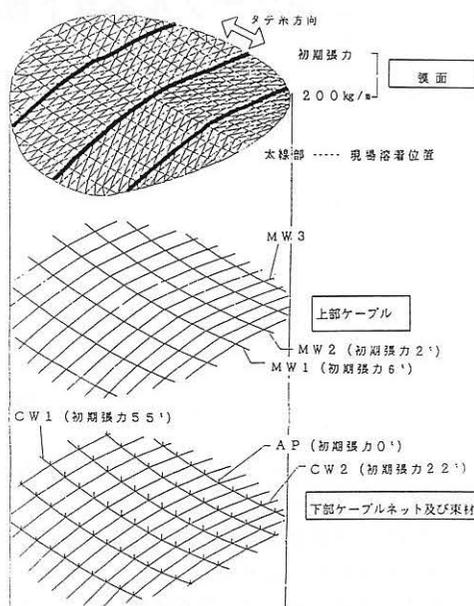


図1 二重ケーブルネット膜構造の概要

初期張力は以下による：

ケーブルネットー吊りケーブル	55 t/本	
押えケーブル	22 t	
膜材	一縦糸方向 横糸方向	200 kg/m 200 kg/m
膜補強ケーブル一棟部分	6 t/本	
その他	2 t/本	

膜材の材料常数を表1に、ケーブル、束材の材料常数を表2に表す。

表1 膜材の材料常数

膜材 シヤファイ イルII (SF-II)	引張剛性 (×厚) Et(kg/m)	ポアソン比 ν	せん断剛性 (厚) Gt(kg/m)	自重 w (kg/m <sup>2</sup> )
縦糸	174,000 (65,800)	0.66 (0.87)	9,990	1.5 (取付 金具を 含む)
横糸	99,600 (21,800)	0.38 (0.29)		

( ) は初期状態算定用

表2 ケーブル、束材の材料常数

ケーブル、束材	引張弾性率 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	断面積 ( $\text{cm}^2$ )	自重 ( $\text{kgf}/\text{m}$ )
MW 1	16,000	4.000	3.32
MW 2	16,000	3.450	2.83
MW 3	14,000	2.360	3.30
CW 1	16,000	15.250	12.60
CW 2	16,000	15.250	12.60
A P	21,000	2.919	2.39

MW 1、MW 2は押さえ側上部ケーブルであり、MW 3は吊り側上部ケーブルである。CW 1、CW 2は下部ケーブルネットの押さえケーブル及び吊りケーブルである。

#### 4 振動実験概要

実物実験はこの二重ケーブルネット膜構造の振動特徴を把握するため行なわれた。主な目的は卓越モードの確認および減衰の評価である。加振方法は主にケーブル交点の引張りによる人力加振である。昼の自動車、工場などの騒音を避けるため、常時微動を夜に行なう。測定点は膜面点1-6とケーブル点1-8である。図2(a)は膜面の測定点の分布である。図2(b)はケーブルの測定点の分布である。

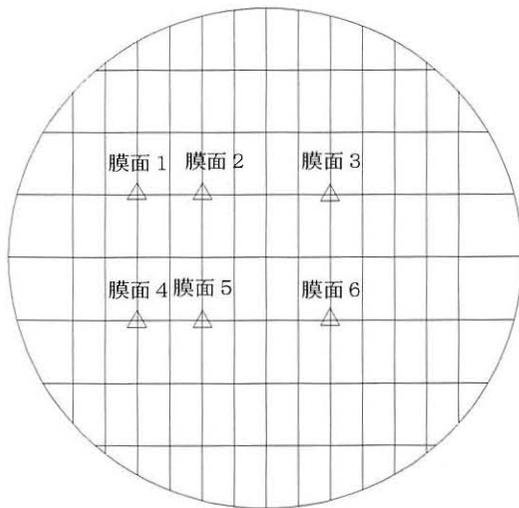


図2(a) 測定点の分布(膜面)

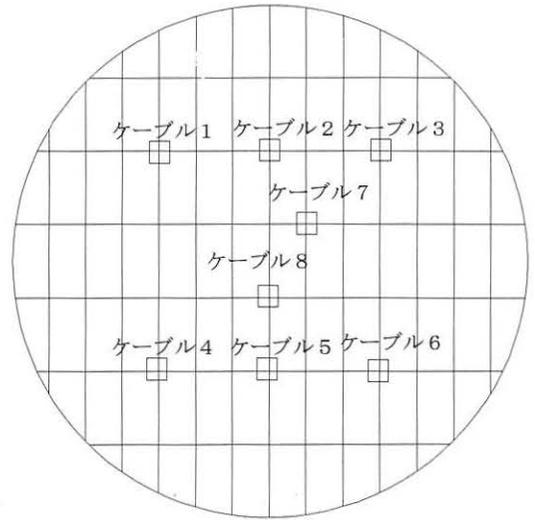


図2(b) 測定点の分布(ケーブル)

#### 4.1 卓越振動数

常時微動の場合膜面点の卓越振動数は主に1.0 Hzであり、ケーブル点は1.0 Hzと2.3 Hz二つ卓越振動数を存在する。

振動波形では、膜面点か低次振動をしているようだが、ケーブル点は振動し始めたとき高次振動が支配し、時間がたつにつれて、高次振動の成分がだんだん少なくなり、低次振動が支配しているようだ。これは高次振動が減衰の影響をうけやすいので、時間がたつにつれて高次振動が次第に減衰していく、最後はケーブル点と膜面点がおなじ低次振動をしている。言い替えば、ケーブルと膜面一体になって挙動する。

各種の加振方式による各測定点の実験波形の卓越振動数は表3に示す。

表3(a) 実験波形の卓越振動数(膜面点) 単位: Hz

加振点		膜面点1	膜面点2	膜面点3	膜面点4	膜面点5
常時振動	$f_1$	0.925	0.925	0.925	1.000	1.000
	$f_2$	1.350	1.325	1.325	1.225	1.225
中央人力加振	$f_1$	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150
	$f_2$	—	—	—	2.275	2.275
両端同位相加振	$f_1$	1.125	1.125	1.125	1.125	1.125
	$f_2$	2.280	—	—	2.225	2.280
片側加振	$f_1$	1.125	1.125	1.125	1.125	1.125
	$f_2$	2.280	2.280	2.280	2.280	2.200

表 5 剛境界モデルの固有振動数

次数	固有振動数 (Hz)				
1-5	1.677	1.775	1.800	1.823	1.828
6-10	1.862	1.903	1.978	2.053	2.172
11-15	2.283	2.304	2.341	2.375	2.458
16-20	2.488	2.545	2.562	2.622	2.724
21-25	2.753	2.828	2.908	2.951	2.986
26-30	3.029	3.036	3.117	3.143	3.171

表 3(b) 実験波形の卓越振動数(ケーブル点) 単位: Hz

加振点	ケーブル点1	ケーブル点2	ケーブル点3	ケーブル点4	ケーブル点5	ケーブル点6	ケーブル点7	ケーブル点8
常時振動	$f_1$	0.925	1.175	0.925	0.965	1.225	0.925	1.225
	$f_2$	2.750	2.650	2.650	2.650	2.625	2.700	2.625
中央人力加振	$f_1$	1.175	1.175	1.175	2.425	1.175	1.150	1.150
	$f_2$	2.675	2.275	2.550	—	2.275	2.275	2.275
両端同位相加振	$f_1$	2.150	1.200	2.150	1.125	1.125	1.125	1.150
片側短壁	$f_1$	—	2.250	—	2.225	2.250	2.150	2.250
	$f_2$	2.150	1.200	2.150	1.125	1.125	2.150	1.150

4. 2 減衰性状

人力加振する場合、中央点で 1.68 Hz の振動数で加振するとき各測定点の減衰定数について調べた(表 4 に示す)。各測定点の減衰定数は大体 1.5~4.0% の範囲に収まっている。平均的に見れば、この二重ケーブルネット膜構造の減衰は約 2.0% である。模型実験の減衰によりかなり低い数値になっている。この二重ケーブルネット膜構造の加振方法は主に人力加振であり、模型実験の強制変位をさせ加振する方法に比べ小振幅振動であり、減衰定数が小さいのは考えられることである。模型実験から大振幅振動では膜面と二重ケーブルネットの結合で大きな減衰を得られるので、実物について風など誘発した大振幅振動が発生する場合、2.0% より大きい減衰が期待できるだろう。

表 4 各測定点の減衰定数

減衰 (%)	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6
上部ケーブルネットと膜面	2.14	1.61	3.34	1.65	1.46	—
下部ケーブルネット	1.92	1.69	2.17	1.99	2.03	2.08

4. 3 固有値解析

解析モデルは図 1 示した膜面、二重ケーブルネット、束材からなる剛境界モデルである。

始めに、本研究室開発したプログラムを利用し、初期張力状態で剛境界モデルの変位および張力を求める。求めた変位および張力を使って、剛境界モデルの固有値解析を行った。30 次までの固有振動数は表 5 に示す、8 次までのモード形状は図 4 に示す。

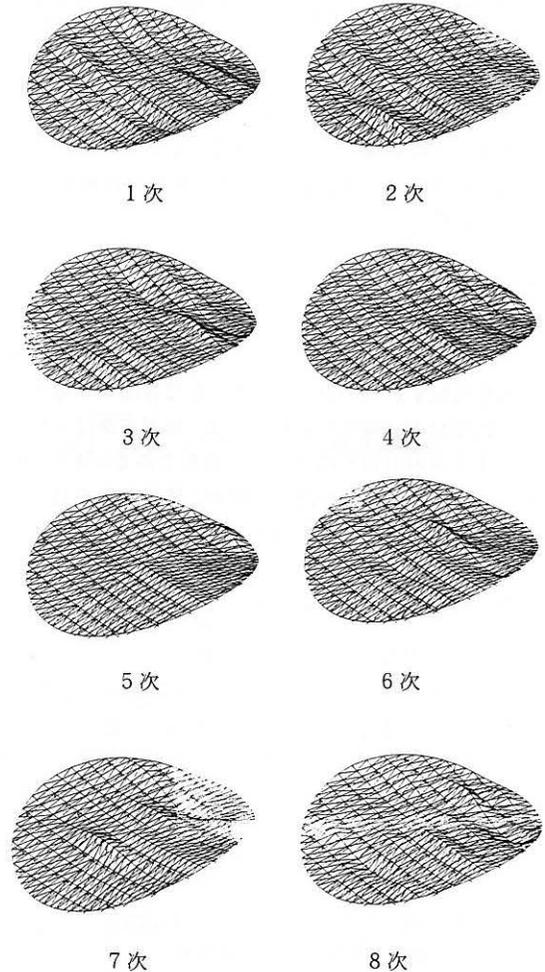


図 3 固有値解析によるモード形状

図 4 に示したのは実物実験で観測されたモード形状である。図 3 固有値解析によるモード形状の中の第 1 次モード形状とほぼ一致し、同じく逆対称形状である。

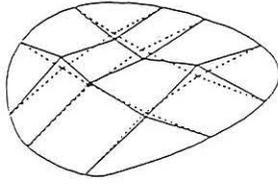


図4 実物実験で観測されたモード形状

#### 4.4 共振を起こす可能性の考察

二重ケーブルネット膜構造の変動風圧にたいする挙動を把握するため風洞実験が日本建築総合試験所によって行なわれた。実験結果として、一つケース（正面に風を当たるとき）の変動風圧の無次元パワースペクトル密度を図6に示す。他のケースにおいても、パワースペクトルのピークは  $nB \times V = 0.1$  付近である。（ $B$ は建物の幅、ここでケーブルネット膜構造部分の幅をとり約65m、 $V$ は設計風速  $V$  約35m/sec、 $n$ は建物の振動数である）。一方、二重ケーブルネット膜構造の無次元固有振動数は、1次で3.12となっており、変動風圧のパワースペクトルのピークより高周波数側に位置している。従って、共振成分が卓越することはないと推測され、二重ケーブルネット膜構造が変動風圧により共振を起こす可能性は少ないと思われる。

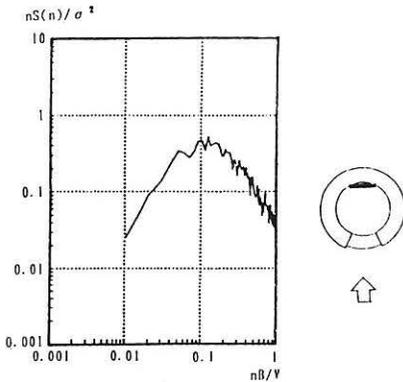


図5 変動風圧の無次元パワースペクトル密度

#### 4.5 部分構造合成法による二重ケーブルネット膜構造の振動性状の究明

部分構造合成法は、全体の構造物を適当な小部分に分割し、それぞれを実験なり、FEMで解析し、それらの結果を逐次合成して、全体特性を得ようとする部分構造合成方式である。部分分割で大規模構造物や複雑な系の振動解析を可能にし、分割系の動特性も容

易に把握することができる。かつてこの方法は特性が非常に異なる構造によく利用され、計算の発散等に対しても有効の手段として知られている。国外の文献では、剛性、質量ともに大きく違っている構造物と設備について、よく構造物と設備各々に固有値解析を行い、それを合成し、より精確に構造物と設備の振動特性を取らえる。このような剛性、質量の高い分割系と低い分割系が結合されるシステムは、P S (Primary-Secondary) システムと呼ばれ、多く研究がなされている。大空間建築において、この方法の可能性も指摘されている。P S (Primary-Secondary) システムは主に三つの特徴を有している。

##### (1) 調和性 (Tuning)

調和性というのは、主システム (Primary System) と次システム (Secondary System) の振動数が同時に発生し、重なることである。

##### (2) 非標準的減衰 (Nonclassical damping)

二つシステムの減衰は異なっているため、両方とも普通の比例減衰だとしても、結合したシステムの減衰性状は非比例減衰である。

##### (3) 相互作用 (Interaction)

二つシステムの振動性状はお互いに影響する。

部分分割で大規模構造物や複雑な系の振動解析を可能にし、分割系の動特性も容易に把握することができる。剛性の高い分割系と低い分割系が結合する場合、結合系でも剛性の高い分割系の共振点と剛性の低い分割系の共振点の二つピークが発生する。本解析では主体となる剛性の高いケーブルネットと剛性の低い膜面を部分分割して、固有値解析を行う。初期状態は二重ケーブルネット膜構造の初期釣り合い状態の変位と初期張力を使っている。それぞれの30次までの固有値は表6(a)、表6(b)に示される。

表6(a) 上部ケーブルネットと膜面の固有振動数

次数	固有振動数 (Hz)				
1-5	1.105	1.142	1.272	1.275	1.377
6-10	1.414	1.469	1.544	1.569	1.616
11-15	1.710	1.744	1.757	1.771	1.856
16-20	1.934	1.949	2.015	2.031	2.047
21-25	2.059	2.133	2.169	2.170	2.219
26-30	2.303	2.308	2.327	2.334	2.349

表 6(b) 下部ケーブルネットの固有振動数

次数	固有振動数(Hz)				
1-5	2.956	3.207	3.455	3.646	3.994
6-10	4.162	4.338	4.423	4.518	4.651
11-15	4.774	4.791	4.916	5.052	5.078
16-20	5.182	5.243	5.366	5.410	5.420
21-25	5.449	5.471	5.606	5.641	5.684
26-30	5.731	5.751	5.821	5.836	5.872

上部膜面と下部ケーブルネットの第一次固有振動数はそれぞれ 1.10Hz、2.95Hz であることが明らかである。そして実験から二重ケーブルネット膜構造では 1.00Hz と 2.30Hz 二つ卓越振動数を存在することが、二重ケーブルネット膜構造の上部ケーブルネットと膜面部分と下部ケーブルネット部分それぞれの卓越振動数である。部分構造合成法で分割された部分を解析することより、実際の構造物の振動性状をかなり把握ができるようになっている。

#### 4.6 モード解析における振幅比率による卓越振動数の推定

二重ケーブルネット膜構造の振動性状を把握するために、卓越振動数の推定は重要である。ここで、初期張力状態で、分割したモデルと全体モデルの各振動成分の振幅の比率を比較することによって、卓越振動数の推定を試みる。

図 6 に示したように、上部ケーブルネットと膜面モデルでモード解析による各次モードの振幅は第 5 次でもっとも大きく、つづいて第 2 次、第 9 次モードの振幅も大きい、他のモードの振幅はその三つの振幅に比べ、かなり小さくなる。第 5 次 (1.38Hz)、第 2 次 (1.14Hz) 及び第 9 次 (1.57Hz) の振動数が卓越すると思われる。表 3(a) に示した常時振動の実験波形の卓越振動数 (膜面点) は第 1 次卓越振動数は 0.92~1.00Hz で、第 2 次卓越振動数は 1.22~1.33Hz で、解析値 (第 2 次の 1.14Hz、第 5 次の 1.38Hz) と少し差があるものの、常時振動の卓越振動数を解析よりある程度把握することができると考えられる。

図 7 に示したように、下部ケーブルネットモデルでモード解析による 20 次前の各次モードの振幅がかなり接近し、どちらが卓越するのは断言できない。ケーブルネットに高次振動が現れやすいのは、特定の条件で 20 次前で各次モードの発生は皆有り得るためである。常時振動の実験波形の卓越振動数 (ケーブル

点) は特定できるものの、逆フーリエ変換図形では、同数量級のピークが多数存在している。

図 8 に示したように、全体モデルでモード解析による各次モードの振幅は第 5 次でもっとも大きく、そのほかのモードの振幅もかなり接近しかつ大きい。実測波形で時には主に低次振動が現れ、時には高次振動も強く現れる現象は、二重ケーブルネット膜構造が膜面の低次振動数とケーブルネットの高次振動数を両方備えていると思われる。

図 8 の振幅分布は図 6 と図 7 から合成されるようだが、実は PS システムの理論によって、全体システムのモードは各システムのモードと一対一に対応している。すなわち、主システム (Primary System) と次システム (Secondary System) の振動数が同時に発生し、重なることである。

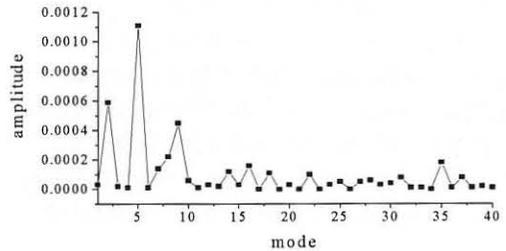


図 6 モード振幅比率による上部ケーブルネットと膜面モデル卓越振動数

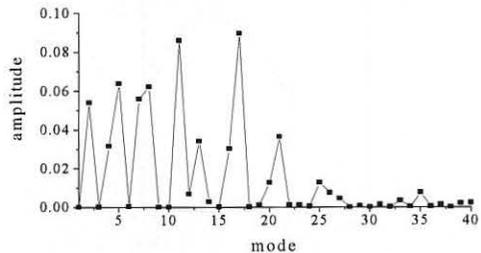


図 7 モード振幅比率による下部ケーブルネットモデル卓越振動数

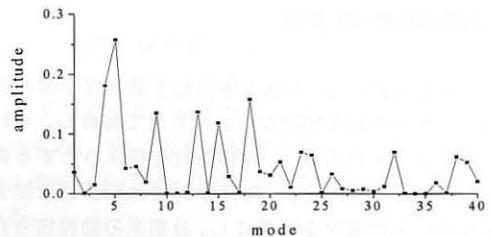


図 8 モード振幅比率による二重ケーブルネット膜構造モデルの卓越振動数

#### 4.7 空気の付加質量の影響の有無

文献(7)では小規模膜構造ではその振動性状に空気の付加質量を考えなければならないと結論づけているが、これはあくまで小規模膜構造という前提であり、大規模二重ケーブルネット膜構造についてはその影響の度合いはまだ不明である。

更に、文献(7)では、振動性状に関し、通常の一重ケーブルネット膜構造と二重ケーブルネット膜構造との比較では、二重ケーブルネット膜構造は、空気の付加質量の影響が通常の一重ケーブルネット膜構造に比べその影響は少ないだろうも示している。一重ケーブルネット膜構造では、構造挙動はすべて主構造となる膜面を有するケーブルネット面だけで力学挙動が決まるが、二重ケーブルネット膜構造では、膜面を有しない下面のケーブルネット構造が構造挙動の主体となるため、その影響を受けにくいだろう。

ここでは二重ケーブルネット膜構造を上部構造(膜面を有する上部ケーブルネット)と下部構造(膜面を有しないケーブルネット)に分け、その各々の固有値を空気付加質量を考慮しないで解析してみた結果と常時微動、人力加振の実験結果から得た卓越振動数を表7に示す。

常時微動、人力加振の実験結果が解析した結果とほぼ一致しており、空気の付加質量の影響があるとしてもかなり少ないと思われる。

表 7 実物上、下部構造の第一次固有振動数

第一次固有振動数	解 析	実物実験
膜面と上部ケーブルネット構造	1.10Hz	1.00Hz
下部ケーブルネット構造	2.95Hz	2.30Hz

1/10の模型での振動実験の振動性状も上部構造と下部構造に分けて考慮すれば(空気付加質量を考慮しない)、解析結果としてその第1次卓越振動数は12.00Hzと24.00Hzであった。一方、上部構造(膜面を有する上部ケーブルネット)に実験した結果、第1次卓越振動数は4.00~7.5Hzであり、全体構造の第1次卓越振動数12.00Hzより小さく、空気の付加質量の影響が伺われる。(表8)

表 8 模型上部構造の第一次固有振動数

第一次固有振動数	解 析	振動実験
膜面と上部ケーブルネット構造	12.00Hz	4.00~7.5Hz

#### 5 実物実験、解析のまとめ

- 1) 二重ケーブルネット膜構造の変動風圧にたいする挙動を把握するため風洞実験が日本建築総合試験所によって行われた。二重ケーブルネット膜構造の無次元化固有振動数は、変動風圧のパワースペクトルのピークより高周波数側に位置している。従って、共振成分が卓越することはないと推測され、二重ケーブルネット膜構造が変動風圧により共振を起こす可能性は少ないと思われる。
- 2) 人力加振する場合、中央点で1.68Hzの頻度で加振するとき各測定点の減衰定数について調べてみた。各測定点の減衰定数は大体1.5~4.0%の範囲に収まっている。平均的に見れば、この二重ケーブルネット膜構造の減衰は約2.0%である。
- 3) 二重ケーブルネット膜構造を上部構造(膜面を有する上部ケーブルネット)と下部構造(膜面を有しないケーブルネット)に分け、その各々の固有値を空気付加質量を考慮しないで解析してみた結果、常時微動、人力加振の実験結果とほぼ一致しており、空気の付加質量の影響があるとしてもかなり少ないと思われる。部分構造合成法で分割された部分を解析することより、実際の構造物の振動性状をかなり把握ができるようになっている。
- 4) 二重ケーブルネット膜モデルは膜面と補強ケーブルモデルより、空気が膜構造物の卓越振動数を低減させる効果は少なくなり、風による共振の危険性も小さくなる。

#### 6 模型実験と実物実験の関連

実物膜屋根と模型供試体との相似則を検討するために、両者の形状、変形、初期張力を行う(文献7に参照)。膜面の変形に対するスパンの比は、実物膜屋根で1/60~1/85となっているのに対して、模型供試体では短辺方向に対して1/32~1/37長辺方向では1/63~1/75となっている。若干の差があるものの、模型実験としてシステム全体の振動性状を把握するためには、支障がないと思われる。

減衰性に関しては、模型が平均8%で、実物が平均2%

程度であるということが実験より得られた（共に常時振動するとき評価した結果）。模型のほうが、実物より減衰が大きい。第一次卓越振動数では、模型が10Hz台、実物が1.0Hz台で、両者の大きさの比率とほぼ一致する。両者の関連については、初めて二重ケーブルネット膜構造の模型実験と実物実験と共に行ったため、今後さらに実験を重ねていくことが必要であろう。

## 7 模型実験と実物実験の総括

二重ケーブルネット膜構造は、通常一層のケーブルネット構造に、屋根膜材を取り付けるため、ケーブル交点に束材を立て、その束材上にさらにケーブルを配置し、それに膜を取り付けていた。膜を取り付けるためのケーブルはこれまでは構造上の寄与を考慮されておらず、一層のケーブルネット構造として成立させていた。

しかし、ここでは積極的に膜取り付け用のケーブルを構造にも寄与させようとし、相応の強度及び剛性を与え、二重ケーブルネット間の束材を媒体とした二重ケーブルネット構造とし、全体で荷重を負担させる構造とするものである。

これにより発生する様々な構造上の問題をここでは扱い、その構造特性、特に振動特性を明らかにしようとするを目的としている。

ケーブルネット構造の振動特性はこれまで余り顧みられず、単に固有値解析がなされていた程度である。減衰性についてその測定例もほとんど得られていない。この減衰性を考慮した二重ケーブルネット膜構造の振動では、比較的変形の大きいケーブル構造の形態非線形性及び複雑な曲面性ととともに、振動解析を難しいものとしている。

しかし、今後、ケーブル複合構造が、大空間架構造として取り上げられていくなか、その振動特性を明確にしていく必要がある。

このため、本論文では

模型実験による振動性状の把握

実物での振動測定

振動解析

を行い、ケーブルネット構造、特に二重ケーブルネット膜構造の振動性状に注目し、振動形態非線形性、減衰性状の把握、振動解析法、空気の付加質量の影響を中心に研究をまとめている。

一層のケーブルネット構造では見られない振動特性

が明らかにされ、二重ケーブルネット膜構造の減衰性の寄与が大きいことがわかった。

減衰性に関してはその規模、振動モードによって異なるが、本構造に関しては、模型が平均8%、実物が平均2%程度ということが実験より得られた。この値は振動解析で様々な利用を可能にしている。

今後、ケーブル複合構造はその軽量性ゆえ一層、空間構造として用いられるだろうが、その振動特性は形態と規模と、ケーブルレイアウトと初期張力などによって大きく異なることが予想されるが、その振動特性は順次積み上げていき、この種の構造の正確な構造特性を明確に予測しなければならないだろう。

## 謝辞

本実験の計画及び実施に際し、鴻池組本社技術研究所、フジタ・鴻池・藤木JV、太陽工業（株）の関係各位にご助言、ご助力を得た。ここに謝意を表します。

## （参考文献）

- 1) 有竹剛、石井一夫：ケーブルネット構造の振動特性に関する研究 ー主に減衰性状について；膜構造研究論文集' 9 3、日本膜構造協会、No.7、1993
- 2) 正岡 典夫：サスペンション膜構造の振動性状に関する研究ー剛境界で支持された膜構造の自由振動特性について、日本建築学会構造系論文報告集、第4 7 1号、1995年5月
- 3) 藤井 淳一：膜面のしわ波発生を考慮した振動解析、膜構造研究論文集' 9 1、日本膜構造協会、No.5、1991.
- 4) Ivring B. Crandall: Vibrating Systems and Sound, London Macmillan and Co., Limited, ST. Martins Street, 1926.
- 5) O.C.ツイエンキービッツ：マトリックス有限要素法、培風館、1975.
- 6) Kazuo Ishii, Kazuo Kondo, Kenichi Katagihara, Hiroaki Kamisawa : Vibration Behavior of Double Layered Cable-net Membrane Covering Roof, Proc. of IASS Symposium on Conceptual Design of Structures
- 7) 宋 浩、石井一夫：二重ケーブルネット膜構造の振動特性に関する研究、膜構造研究論文集' 9 5、日本膜構造協会



写真 大阪プール外観

---

## VIBRATION CHARACTERISTICS OF A DOUBLE CABLE-LAYERED MEMBRANE STRUCTURE

—Analysis of Full-sized Experiment—

Hao SONG<sup>\*1</sup> Kazuo ISHII<sup>\*2</sup>

Kazuo Kondo<sup>\*3</sup>, Kenchi Katagihara<sup>\*4</sup>, Hiroaki Kamisawa<sup>\*4</sup>

### SYNOPSIS

The double cable-layered membrane structure is one type of newly-developed structure form and is quite unknown about its dynamic characteristics. Following model experiment, the author tries to have a general grasp of the dynamic characteristics of double cable-layered membrane structure by analysis of full-sized experiment result of Osaka Pool. First, the resonance frequencies are obtained using techniques such as Fast Fourier Transformation. Then damping values are decided from vibration waves obtained from experiment. By eigenvalue analysis, the author got mode shapes, resonance sphere of Osaka Pool and discussed the possibility of resonance with wind. The double cable-layered membrane structure is consisted of high-stiffness down-layered cable-net and low-stiffness upper-layered membrane, it is considered to act specially compared to ordinary single-layered structure. Utilizing partial structural division method, the special vibration behavior is grasped numerically. At last, the connection between model experiment and full-size experiment is discussed.

---

\*1 Graduate Student of Doctor Course, Graduate School of Yokohama National University

\*2 Professor, Dr.-Eng, Yokohama National University

\*3 Tohata Architects & Engineers, Inc.

\*4 Konoike Construction Co., Ltd.