張力安定トラスドームを用いた 実大実験報告

—その2: 振動実験—

A REPORT OF FULL-SCALE TESTS OF A TENSION-TRUSS DOME

—Part2: Vibration test—

西田明美 —*1 川口健一 —*2
劉 鵬 —*3 内海良和 —*4
金山 敬 —*5 荒木直人 —*6
小田憲史 —*7

Akemi NISHIDA —*1 Ken'ichi KAWAGUCHI —*2
Peng LIU —*3 Yoshikazu UTSUMI —*4
Takashi KANAYAMA —*5 Naoto ARAKI —*6
Kenshi ODA —*7

キーワード:

張力安定トラス, 実大実験, 振動実験, 卓越周波数, 減衰定数, パーツ補剛

Keywords:

Tension truss, Full scale test, Vibration test, Peak frequency, Damping factor, Stiffening with the supplementary parts

The main objective of this research is to investigate the dynamic properties of a full scale model of tension truss dome. Vibration tests and Wave propagation tests of the tension truss dome used as an annex on the former institute building of I.I.S., the University of Tokyo, were performed. In this paper, outline of the vibration tests and the test results of each model are shown. The results show the influence of the existence of membrane, the stiffness, yield members, etc., for the dynamic properties of a lightweight frame structure.

1. はじめに

立体トラスなどの軽量立体架構の実大実験例は数少なく、その振動特性など動的性状に関する報告例はさらに少ない。特に減衰特性についてはまだ十分解明されていないため、定量的評価のための実測データの蓄積が必要とされている。今回、東京大学生産技術研究所の旧六本木庁舎屋上ドームを試験体とした実大実験を行う機会を得た。この屋上ドームは張力安定トラスユニット¹⁾²⁾(図1)を集積した構造システムで、屋根材としてC種膜材を用いた骨組み膜構造である。静的載荷実験については前報⁶⁾で述べている。動的実験として、膜の有無、おもりの重さ、おもりの偏心、構造ユニットの部分的抜き取り、パーツ補剛⁴⁾、そして、載荷実験前後における張力安定トラスの動特性変化など様々な観点から振動・波動実験を実施した(図2)。本報告では、そのうち、振動実験の概要および結果について述べる。前半では、実験概要として試験体、実験方法、測定方法などについて述べる。後半では、各モデルに対して得られた時刻歴応答およびそのフーリエ振幅スペクトルを示し、各モデルの動特性について減衰挙動を中心に考察する。

2. 振動実験概要

2.1 試験体

スパン約13m、桁行き方向長さ9または21m、高さ約6.5mの張力安定トラスドームに対し、おもりを利用した初期変位解放による実大自由振動実験を行った。試験体を図3～図5に示す。妻面の支柱を外し屋根膜撤去前の状態を全体モデル(膜あり)と呼び、屋根膜を撤去した状態を全体モデル(膜なし)と呼ぶ(写真1, 2)。さらに、中央部

図1 張力安定トラスユニット

図2 実験工程フロー図

*1 東京大学生産技術研究所 助手・工博
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

*2 東京大学生産技術研究所 助教授・工博

*3 東京大学大学院 博士課程

*4 ㈱大林組技術研究所

*5 ㈱大林組エンジニアリング本部

*6 太陽工業㈱事業企画室

*7 太陽工業㈱空間技術研究所 工博

*1 Research Assoc., Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Dr. Eng.

*2 Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Dr. Eng.

*3 Graduate Student, the University of Tokyo

*4 Obayashi Corp., T.R.I.

*5 Obayashi Corp., Engineering Division

*6 Taiyo Kogyo Corp., New Business Development Division

*7 Taiyo Kogyo Corp., Advanced Structures R&D Dept., Dr. Eng.

分のユニット2列分および北側端部2ユニットを撤去することで2つの同等な架構へと分割した試験体をそれぞれモデルA、Bと呼ぶ(図3参照)。モデルAの初期状態をモデル A_{0-0} 、パーツ補剛による効果を確認するために既存2ユニットを抜き剛性を弱めた架構をモデル A_{0-2} 、さらに既存2ユニットを抜き補剛パーツと置換えた架構をモデル A_{2-2} と呼ぶ。パーツは自己応力釣り合い型の単体構造で、立体架構に適宜はめ込むことによる補剛効果を期待している。本実験では張力安定トラスユニットのポスト材の長さを約1.2倍とし剛性を高めたものをパーツとして用いている。パーツ補剛の詳細については文献4)にゆずる。各試験体の諸元および実験項目を表1に、部材表を表2に示す。材料は全て構造用鋼材で、トラス材およびポスト材にはパイプ材、ケーブル材には鋼棒が用いられている。

2.2 実験方法

実験はおもりによる初期変位を解放する方法を採用した。おもりの吊り下げ位置は、励起する振動モードを考慮し、アーチの頂部(90度位置、A-A')と45度位置(B-B')の2カ所を選択した。前者を起振1、後者を起振2とよぶことにする。吊り下げ位置は図4および図5に示されている。吊り下げ状態概略を図6に示す。図中に示すように、おもりはワイヤーケーブルを利用してユニットの短辺をまたぎ2つのジョイントからV字型に吊り下げた。また、モデル A_{0-2} と A_{2-2} は非対称な架構であり非対称モードの存在が予想されたため、図6中示すようにおもり位置をx方向にdだけ偏心させて起振を行った。お

図3 試験体

表1 試験体諸元および実験項目

	スパン (m)	桁行方向 長さ(m)	ユニット 数	パーツ の有無	膜の 有無	偏心実験 の有無	載荷後実験 の有無
全体モデル(膜あり)	13.35	21.0	47	×	○	×	×
全体モデル(膜なし)			47	×	×	×	×
モデル A_{0-0}		9.0	17	×	×	×	○*
モデル A_{0-2}			15	×	×	○	×
モデル A_{2-2}			15	○	×	○	○

* 同形のモデルBで実施。

(□は全体モデルの起振用ロープ吊り下げ位置)

図4 張力安定トラスドーム平面図

図5 張力安定トラスドーム断面図

表2 部材の諸元

トラス材およびポスト材 STK400				
φ(mm)	t(mm)	A(cm ²)	kg/m	I(cm ⁴)
76.3	3.2	7.349	5.77	49.2
ロッド材 S35C 焼きならし				
φ(mm)		A(cm ²)	kg/m	
16		2.01	1.58

写真1 張力安定トラスドーム：全体モデル(膜あり)
(妻面撤去後振動実験を実施)

写真2 張力安定トラスドーム：全体モデル(膜なし)

もりを吊り下げた番線を瞬時に切断し初期変位を解放した。

振動特性と振幅との関係を調査するため、おもりの全重量は100kgw, 150kgw, 200kgwの3通りを採用した(写真3)。それぞれの重量に対して最低3回試行を行った。また、載荷後の試験体は剛性が低くなっていたため、人力で加振した。

2.3 測定方法

測定にはひずみゲージ式加速度計(最大5G)を用い、構造物のジョイントに8個から12個を設置して計測を行った。ジョイントの状態に応じてジョイントの上部または下部に加速度計を固定し、いずれの場合も設置方向は断面アーチの法線方向に対して外向き正とした(写真4)。各モデルの加速度計の配置を図7に示す。収録にはニコレー社製モジュール(MP200: 最小時間刻み1 μ s)を用いた。主な収録時間刻みは5ms, ナイキスト周波数は100Hz, 収録データ数は最小2000 最大12000(応答の継続時間により調整), 収録時間は最短10sec 最長60secである。

3. 実験結果

初期振幅の大きさによる卓越周波数および減衰定数の差は各モデルとも小さかったため、以下に示されている結果は、特に記載があるものの以外はおもり200kgwの結果である。また、起振1(頂部からの吊り下げ)ではジョイント7, 起振2(45度位置からの吊り下げ)ではジョイント8の応答が示されている。各モデルの振動実験から得られた主な卓越周波数とその減衰定数を表3にまとめて示す。表中には18Hz以下の卓越周波数のみが示されている。減衰定数はフーリエ振幅スペクトルを平均して $1/\sqrt{2}$ 法²⁾を適用することによりジョイントごとに評価し、表中には全ジョイントの平均値を示した。

3.1 全体モデル(膜あり)と全体モデル(膜なし)の比較

全体モデル(膜あり)と全体モデル(膜なし)の起振1および起振2の

図6 おもり吊り下げの様子(偏心なしと偏心あり)

写真3 おもり吊り下げの様子
(全体モデル・起振2・200kgw)

写真4 加速度計の設置状況
(全体モデル(膜あり))

図7 加速度計配置図(図中口は起振1, □は起振2のケーブル取り付け位置を表し, 番号はジョイント番号を表す)

図8 全体モデルの加速度の時刻歴応答と
フーリエ振幅スペクトル(起振1, ジョイント7)

図9 全体モデルの加速度の時刻歴応答と
フーリエ振幅スペクトル(起振2, ジョイント8, 200kgw)

(a) 1次モード(6.13 Hz) (b) 2次モード(13.08 Hz)
図10 全体モデル(膜なし)の固有振動数と固有モード
(トラス材, ピン接合部でモデル化した解析結果)

実験結果として加速度の時刻歴応答およびフーリエ振幅スペクトルを図8および図9に示す。全体モデル(膜あり)と全体モデル(膜なし)は形態は異なるが、起振1起振2ともにほぼ同じ周波数が卓越していることがわかる。また、起振1は2次モードである対称モード(約16Hz)を、起振2は1次モードである逆対称モード(約5-6Hz)を励起していることが確認できる。全体モデル(膜なし)の固有値解析により得られた1次と2次の固有振動数および固有モードを図10に示す。実験結果より得られた卓越周波数は解析結果と比較的良好一致を示している。減衰は起振位置および膜の有無によって異なり、起振1で16Hz近傍、起振2で5-6Hz近傍の周波数に対応する減衰定数 h の平均値を求めると、起振1の膜あり、膜なしでそれぞれ1.7%と0.4%、起振2で同じく2.7%と1.8%となる。起振2では、振幅が起振1と同程度あるいは小さいにもかかわらず、膜ありで起振1の約1.5倍(2.7%と1.7%)、膜なしで約4倍(1.8%と0.4%)の減衰が生じている。また、同様に膜ありと膜なしの結果を比較すると、起振1で膜ありは膜なしの約4倍(1.7%と0.4%)、起振2で約1.5倍(2.7%と1.8%)の減衰が生じている。これは、起振位置により励起される振動モードが異なるため、空力減衰の影響も異なるものと予想される。

3.2 モデル A_{0-0} 、モデル A_{0-2} 、および、モデル A_{2-2} の応答の比較

図11および図12に、モデル A_{0-0} 、モデル A_{0-2} 、および、モデル A_{2-2} のそれぞれ起振1および起振2における加速度の時刻歴応答、および、フーリエ振幅スペクトルを示す。いずれも偏心なしで実験を行った結果である。全体モデルと比較すると応答値が大きくなり、フーリエ振幅スペクトルのピークが鮮明に出ていることがわかる。モデル A_{0-0} 、 A_{0-2} 、 A_{2-2} の卓越周波数はほぼ同じである。ただし、モデル A_{0-2} と A_{2-2} では2つのユニットが除去されていることによりモデル A_{0-0} より剛性が低くなっていると推測できる。起振2の卓越周波数がモデル A_{0-2} と A_{2-2} はモデル A_{0-0} より若干低く現れているのはこの影響と考えられる。モデル A_{0-0} の各ジョイントの実測加速度を2回積分して変位を求め、さらに卓越周波数近傍でバンドパスフィルター処理して得られた5Hz(起振2)および13Hz(起振1)近傍の変形モードを図13に示す。それぞれ逆対称モードおよび対称モードを表していることが確認できる。減衰についてはモデル A_{0-2} 、モデル A_{0-0} 、モデル A_{2-2} の順に小さくなり、特にモデル A_{2-2} はモデル A_{0-2} と比較すると約半分の減衰定数となっている。パーツ補剛されたユニットのトラス材は隣接する張力安定トラスユニットのトラス材と上下に重ねて配置されているため⁹⁾、モデル A_{2-2} はモデル A_{0-2} よりも部材数が増えており、減衰が小さい一因とも考えられる。

3.3 おもり偏心の有無による応答の比較

図14および図15に、モデル A_{0-2} のそれぞれ起振1および起振2における加速度の時刻歴応答、および、フーリエ振幅スペクトルを示す。起振1では、おもりを偏心させることにより、偏心なしではほとんど現れなかった10Hz以下の長周期のモードが励起されていることがわかる。起振2では、偏心の有無による卓越周波数の変化はほとんどみられなかった。図13同様、モデル A_{0-2} の起振1・偏心ありの実測加速度より求めた4Hzおよび8Hz近傍の変形モードを図16に示す。図中試験体はアーチ頂部より手前半分のみが示されており、太線が初期形状、細線が変形モードを表す。これらのモードは試験体を桁行き方向に2分割する面に対する非対称モードであり、アーチ頂部が非対称に上下に振動している様子がわかる。モデル A_{2-2} でも同様の結果が得られている。

3.4 静的載荷実験の前後における応答の比較

モデルBとモデル A_{2-2} に対しては載荷実験が実施された⁹⁾。風荷重を想定して45度方向のジョイントを加力点とし、鋼棒を介してジャッキを用いてドーム中心に向かって載荷を行った。載荷装置は図5中に示されている。加力は部材が降伏しトラス材が座屈するまで行われた。モデルBとモデル A_{0-0} は同形であるので、載荷前としてモデ

図11 モデル A_{0-0} 、 A_{0-2} 、 A_{2-2} の加速度の時刻歴応答とフーリエ振幅スペクトル(起振1, ジョイント7, 200kgw)

図12 モデル A_{0-0} 、 A_{0-2} 、 A_{2-2} の加速度の時刻歴応答とフーリエ振幅スペクトル(起振2, ジョイント8, 200kgw)

図13 モデル A_{0-0} の変形モード

ル A_{0-0} 、荷役後としてモデルBの加速度の時刻歴応答およびフーリエ振幅スペクトルをそれぞれ図17に示す。モデル A_{0-0} の結果は、1次モードが卓越している同モデル起振2の結果が示されている。荷役後の最低次卓越周波数(約2.5Hz)は荷役前(約5Hz)の約半分となっており、この結果は部材降伏および座屈による剛性低下のためと推定される。また、減衰定数は荷役前後であまりかわらない結果となっている。

3.5 卓越周波数と減衰定数

荷役後の結果を除いた全振動実験の結果をまとめて、横軸に周波数、縦軸に減衰定数としてプロットしたものを図18に示す。図中の直線は全データの最小二乗法による直線近似を示している。減衰定数は、卓越周波数によって異なり、周波数が高くなると減衰が小さくなる

図14 モデル A_{0-2} の偏心の有無による応答の比較
(起振1, ジョイント7, 200kgw)

図15 モデル A_{0-2} の偏心の有無による応答の比較
(起振2, ジョイント8, 200kgw)

図16 モデル A_{0-2} の変形モード(垂直面はアーチの2分割面)

る傾向がある。

4. 実験結果の考察およびまとめ

実大の張力安定トラストームに対し、おもりを利用した自由振動実験を行った。その結果、膜の有無、おもりの重さ、おもりの偏心、ユニットの部分的抜き取りによる剛性変化、パーツ補剛、および、部材降伏や座屈等が張力安定トラスの動特性に与える影響として以下のようことがわかった。

(1) 全体モデルにおいて、卓越周波数については膜の有無による違いはほとんどみられなかった。減衰については起振位置および膜の有無によって異なり、膜ありで起振2は起振1の約1.5倍(2.7%と1.7%)、膜なしで同じく約4倍(1.8%と0.4%)の減衰が生じており、低次モードが励起される起振の方が大きな減衰を生じることがわかった。また、膜の有無で比較すると、起振1で膜ありは膜なしの約4倍(1.7%と0.4%)、起振2で同じく約1.5倍(2.7%と1.8%)の減衰が得られた。この違いは励起モードの違いによる空力減衰の違いに依存していると考えられる。

(2) 卓越周波数と減衰の関係に着目すると、本実験結果においては卓越周波数が高くなると減衰は小さくなる傾向にある。このことは、文献7)等に示されている報告とも符合する。

図17 荷役前後の応答の比較(ジョイント8)

写真5 荷役後の人力加振の様子

図18 卓越周波数と減衰定数

- (3) 今回採用したおもり重量 100kgw から 200kgw の範囲では初期振幅の違いによる卓越周波数および減衰定数の差は顕著にはみられなかった。振幅の増加につれ減衰定数が一定値に収束する傾向があるとの報告⁷⁾もあるため、今後振幅のオーダーと減衰の関係については詳細に検討する予定である。
- (4) 全体モデル、モデル A_{0-0} 、 A_{0-2} 、 A_{2-2} ともに、4-5Hz 近傍でアーチの逆対称モードが、13-17Hz 近傍で対称モードが生じた。特に逆対称モードについては各試験体による卓越周波数の差が小さい。このことは同一アーチを有する架構（ただし妻部が固定されていない場合）であるためと考えられる。
- (5) 張力安定トラスのパーツ補剛効果を確認するために、剛性を弱めたモデル A_{0-2} に対しパーツ補剛を施した。補剛後のモデル A_{2-2} は、補剛前のモデル A_{0-2} と比較して減衰が小さくなっているが、卓越周波数、卓越モードともにほとんど変化しないことがわかった。減衰が小さくなった一因としてモデルの部材数の増加が関係して

表 3 卓越周波数と減衰定数

		重り (kgw)	全 体 モデル (膜あり)	全 体 モデル (膜なし)	モデルA ₀₋₀ (モデルB と同形)	モデルA ₀₋₂ (偏心なし)	モデルA ₀₋₂ (偏心あり)	モデルA ₂₋₂ (偏心なし)	モデルA ₂₋₂ (偏心あり)
起振 1	卓越 周波数 (Hz)	100	16.5	13.2(13.1) 16.5	7.08 13.2(8.97) 14.6	4.35 8.15 12.7/12.9	4.24 8.05 12.7	12.7	4.13 8.03 12.7
		150	15.6	13.1(13.1) 16.4	7.07 12.9(8.97) 14.1	4.35 8.08 12.7/12.9	4.22 8.04 12.7	12.7	4.13 8.02 12.7
		200		13.0(13.1) 16.3	7.13 13.0(8.97) 14.1	8.10 12.7/12.9	4.21 8.04 12.6	4.13 12.7	4.11 8.01 12.7
	減衰 定数 (%)	100	2.3	0.99 0.46	1.1 0.91 0.65	1.1 1.3 0.81/0.68	2.4 1.5 0.74	0.40	0.68 0.58 0.48
		150	1.2	0.82 0.50	1.2 0.77 0.95	2.6 1.8 0.79/0.78	2.2 1.4 0.76	0.43	0.65 0.56 0.45
		200		0.62 0.31	1.5 0.71 0.48	1.4 0.79/0.65	2.0 1.5 0.80	0.63 0.49	0.62 0.55 0.44
起振 2	卓越 周波数 (Hz)	100	5.57	5.16(6.13)	4.58(5.65)	3.71/4.31 8.17 12.6/13.0	3.71/4.30 8.15 13.0	3.76/4.13	3.76/4.14 8.05
		150		5.13(6.13)	4.54(5.65)	3.73/4.25 8.11 12.6	3.76/4.28 8.10 13.0	3.76/4.13	3.76/4.13 8.03
		200	5.76	5.16(6.13)	4.54(5.65)	3.71/4.22 8.04 12.6	3.74/4.25 8.15 12.9	3.76/4.13	3.76/4.13 8.03
	減衰 定数 (%)	100	1.5	1.7	1.3	1.8/1.3 0.49 0.31/0.35	3.3/2.6 1.3 0.48	0.67/0.71	0.68/0.62 0.51
		150		2.1	1.1	1.7/1.7 1.3 0.33	2.9/3.1 1.8 0.45	0.71/0.70	0.76/0.58 0.54
		200	3.9	1.7	1.1	1.6/1.9 2.65 0.35	3.0/2.5 1.9 0.57	0.68/0.69	0.70/0.60 0.53
載荷後の 人力加振	卓越 周波数 (Hz)	-			2.53 5.05			1.28 2.55 3.86	
	減衰 定数 (%)	-			1.5 0.95			2.4 1.7 0.67	

※ () 内は解析値を、/ で区切られた数値は同一モード中におけるふたつに分かれたピークを表す。各欄の数値は周波数が低い順に上から記してあり、それぞれの卓越周波数と減衰定数は上から順に対応している。同一モードと推定されるものの横並びはそろえて記した。

いると考えられる。また、これらのモデルは非対称架構であり、おもりを偏心させた実験によりアーチ頂部における2種類の非対称モードの存在を確認した。

- (6) モデルBの載荷実験終了後の最低次卓越周波数は載荷実験前の約半分となった。また、減衰はあまりかわらなかった。卓越周波数の低下は部材の降伏および座屈による剛性低下のためと推測されるが、減衰があまり変化しなかったということから振動モードが変化している可能性もあり、今後詳細に検討する予定である。

参考文献

- 1) K. Kawaguchi, K. Oda and Y. Hangai : Experiments and Construction of Truss Structure Stabilised by Cable Tension, Proc. of International Symposium on Shell & Spatial Structures, Vol 1, pp.421-429, 1997. 11.
- 2) 半谷裕彦, 川口健一, 小田憲史: 張力安定トラス構造の構造挙動と構造設計, 東京大学生産技術研究所報告, 第36巻, 第2号, 1991.5
- 3) 西田明美, 劉 鵬, 川口健一, 内海良和, 荒木直人, 金山 敬, 小田憲史: 六本木庁舎屋上ドームを利用した実大振動実験速報, 生産研究, 53巻, 11・12号, pp.45-48, 2001.11
- 4) 東京大学生産技術研究所川口研究室・(株)大林組・太陽工業(株), 張力安定トラスドーム及びパーツ補剛によるハイブリッドトラスドーム実大実験報告書, 2001.12
- 5) 西田明美, 川口健一, 金山 敬, 小田憲史, 内海良和, 荒木直人, 手島嘉隆, 劉 鵬: 張力安定トラスドームを用いた実大実験報告 その1～その7, 日本建築学会大会, B-1, pp.869-882, 2002.8
- 6) 川口健一, 金山 敬, 小田憲史, 内海良和, 荒木直人, 手島嘉隆: 張力安定トラスドームを用いた実大実験報告-その1: 存在張力測定実験と載荷実験-, 日本建築学会技術報告集, 第16号, pp.83-88, 2002.12
- 7) 日本建築学会, 建築物の減衰, 2000.10

訂正: 本報告その1(文献6), 技術報告集第16号, pp.83-88)掲載の表5(85頁)にデータ整理上のミスが見つかった。誤りを含むデータを報告したことをお詫びすると同時に下記のように訂正します。

表 5 : 設計張力と実存在張力の比較

場所	実張力(N)	設計張力(N)	導入率(%)
1-WU	4429.8	9800	45%
1-WD	8466.3	2850	297%
1-NU	1759.5	2850	62%
1-ND	3456.9	5253	66%
1-SU	2235.6	2850	78%
1-SD	3291.3	5253	63%
1-EU	4429.8	9800	45%
1-ED	8756.1	2850	307%
8-WU	13703.4	14700	93%
8-WD	9936.0	4270	232%
8-NU	5257.8	4270	123%
8-ND	6541.2	7880	83%
8-SU	5402.7	4270	126%
8-SD	6251.4	7880	79%
8-EU	13744.8	14700	93%
8-ED	10225.8	4270	239%
11-WU	13558.5	14700	92%
11-WD	8631.9	4270	202%
11-NU	8073.0	4270	189%
11-ND	7783.2	7880	99%
11-SU	7327.8	4270	171%
11-SD	8673.3	7880	110%
11-EU	15566.4	14700	106%
11-ED	8880.3	4270	208%

ユニット内の各部材名称

[2002年10月17日原稿受理 2003年2月25日採用決定]