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—

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

—Part 1: Pretension level and loading test—

川口健一 —*1 金山 敬 —*2
小田憲史 —*3 内海良和 —*4
荒木直人 —*5 手島嘉隆 —*6

Ken'ichi KAWAGUCHI —*1 Takashi KANAYAMA —*2
Kenshi ODA —*3 Yoshikazu UTSUMI —*4
Naoto ARAKI —*5 Yoshitaka TESHIMA —*6

キーワード：
張力安定トラス, 実大実験, 初期張力, 載荷実験

Keywords:
Tension truss, Full scale test, Pretension, Loading test

After ten-year service time a tension-truss dome was devoted to a series of full-scale tests. Static and dynamic behavior of the tension-truss frame was examined as well as the structural behavior of the partial reinforcement system with hybrid truss elements. The results of the loading test and pretension measurement are reported here as part I. Characteristic behavior of the tension truss system with pretension effect was observed. The final failure state was brought about by buckling of a compression truss member. Comparison between designed prestress level and measured prestress is also shown.

1. はじめに

本報は、東京大学生産技術研究所六本木庁舎 C 棟屋上に 1991 年より 10 年間にわたり設置されていた「張力安定トラスドーム」を試験体として行った、一連の実大構造実験結果の報告である。実験は、研究所の移転に伴い取り壊し撤去が決定した本ドームを用い、2001 年 4 月 12 日から同年 6 月 4 日までの約 2 ヶ月間で行った。

軽量骨組構造の実大実験は実施例が少ない。特に本建物は鋼構造骨組みに積極的に張力を導入するシステムとしてはわが国でも特徴的な事例であるため、今後、軽量骨組構造分野の貴重な資料となることが予想される。本実験では以下の項目を研究目的として設定している。

1. 張力安定トラスドームの実挙動の確認と解明
2. パーツ補剛された構造物の構造挙動解明
3. 軽量空間構造の動的性状の解明

これらの目的に対応し、行った実験項目は以下のよう
に 3 つに大別される。

1. 張力安定トラスドームの存在張力測定
及び実大載荷実験
2. 「パーツ補剛によるハイブリッドトラスドーム」
載荷実験
3. 各構造の振動・波動実験

本報その 1 では、上記 1 について報告する。

(a) 外観図

(b) 内観図

写真 1：張力安定トラスドームの概観写真

*1 東京大学生産技術研究所 助教授・工博
(〒153-8505 目黒区駒場4-6-1)
*2 榊大林組エンジニアリング本部
*3 太陽工業(株)空間技術研究所 工博
*4 榊大林組技術研究所
*5 太陽工業(株)技術本部
*6 東京大学大学院 修士課程

*1 Assoc. Prof., Ph.D., Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Dr. Eng.
*2 Obayashi Corp., Engineering Division
*3 Taiyo Kogyo Corp. Advanced Structures R&D Dept., Dr. Eng.
*4 Obayashi Corp., T.R.I.
*5 Taiyo Kogyo Corp. Engineering Division
*6 Graduate Student, the University of Tokyo

図 1：建物の概要図

表 1：建物概要

建物名称：	張力安定トラス構造研究実験モデルドーム
建設場所：	東京都港区六本木 7-22-1 東京大学生産技術研究所六本木庁舎 C 棟屋上
竣工年：	1991 年 3 月
用途：	張力安定トラス構造実験棟, 研究室, 卓球場等
床面積：	271.2 m ²
建物高さ：	最高軒高さ 6.6m 最高高さ 8.0m (屋上床面より)
構造形式：	屋根／塩化ビニールコーティングポリエステル繊維膜材 主体構造／鉄骨造 (張力安定トラス構造) 基礎／鉄筋コンクリート布基礎

表 2：ユニットの部材表

トラス材及びポスト材 STK400						
φ (mm)	t (mm)	A (cm ²)	kg/m	I (cm ⁴)	Z (cm ³)	i (cm)
76.3	3.2	7.349	5.77	49.2	12.9	2.59
妻側辺 トラス材 STK400						
φ (mm)	t (mm)	A (cm ²)	kg/m	I (cm ⁴)	Z (cm ³)	i (cm)
114.3	4.5	15.52	12.2	234	41.0	3.89
ロッド材 S35C (焼きならし)						
φ (mm)		A (cm ²)	kg/m			
16.0		2.01	1.58			
○ 降伏点 STK400：応力(24 kN/cm ²)，歪 1.14x10 ⁻³						
○トラス材長期許容圧縮応力 f_c ，オイラー座屈荷重および応力 $\lambda=300/2.59=116$ ， $f_c=6.94$ (kN/cm ²) $\pi^2 \times 2.1 \times 10^6 \times 49.2 / (300)^2 = 111$ (kN) $11.330 / 7.349 = 15.1$ (kN/cm ²)

(a) 不安定な菱形トラス (b) 張力安定トラスユニット

図 2：単位構造（ユニット）の構成

図 3：ロッド材及びその接合部詳細

2. 張力安定トラス構造モデル実験棟の概要

建物の概要を表 1、図 1、写真 1 に示す。張力安定トラス構造は、立体トラスとテンセグリティ架構の間に軽量高剛性の骨組みが存在するという着想で提案された骨組みであり、自己釣合い力により安定化された単位構造（以下、ユニットと言う）を集積した構造システムである（図 2）。ユニットは、1 つの自己釣合い応力モードを有しており、張力の存在下でロッド材も圧縮材として機能する[1]。実験棟は、47 個の同一形状のユニットを円筒形上に集積した構造で、平面形状はスパン 13.35m，桁行長さ 22.5m，断面形状は半径 6.675m の半円形上にユニットのトラス材節点が位置する。ユニットは、対角の寸法が 5.2m×3.0m の腰折れ型の菱形で、トラス材の長さは 3.0m，ポスト材の長さが 1.35m である。ポスト材は、円筒形断面から外側に 0.275m、内側に 1.075m の位置に設定している（表 2、図 3）。

3. 試験体

前掲の 3 項目の実験を行うにあたり、モデルドームをほぼ同じ骨組み構造となるように 2 つに分割した（各々 model A, B と呼ぶ。図 4）。2 分割時に除去する張力材の歪変化を測定することで、存在張力測定実験を行った。

さらに、2 分割後の model B に対し、圧縮材の座屈が生じるまでの載荷実験を行った（model A は別の実験に供したが本報では報告しない）。

4. 存在張力測定実験

ドーム分割時に除去した部材は、11 ユニット、115 部材である（図 4 中央部分のユニット 1 ～ 11）。

図4: ドームの分割およびジョイント,部材,ユニット番号

図4中央縦に並んでいる1, 8, 11の3つのユニットに含まれるロッド材24本に単軸歪ゲージを2個対に貼り付け、各作業ステップ毎に歪値を計測した。盛り替え作業などを除くと有意な作業ステップ数は46である。代表的な作業ステップを表3に示す。ユニット撤去に伴う各ユニットの存在張力の変化の様子を計測し、最終的に得られた歪データ値を基に、1, 8, 11のユニットの存在張力の変化を逆算した結果を図5に示す。

表3: 代表的な作業ステップとその時刻

時間	STEP	備考
9:59	STEP1	除去作業開始時
10:29	STEP6	ユニット1を除去
11:43	STEP11	ユニット2を除去
13:32	STEP15	ユニット3を除去
13:54	STEP18	ユニット4を除去
14:28	STEP21	ユニット5を除去
14:48	STEP24	ユニット6を除去
15:23	STEP28	ユニット7を除去
16:26	STEP34	ユニット8を除去
16:45	STEP37	ユニット9を除去
17:01	STEP41	ユニット10を除去
17:35	STEP46	ユニット11を除去

図6: 設計時導入張力(自己釣り合い状態:単位 N)

(a)ユニット1 張力変化

(b)ユニット8 張力変化

(c)ユニット11 張力変化

図5: ユニット存在張力の変化の様子

(a)作業状況

(b)張力材の除去

写真2：ユニット除去作業の様子

5. 実大載荷実験

図4のmodelBに対し、載荷実験を行った。加力は風圧力を想定し、ドーム上中心に向かって45度位置の同一高さの4ジョイントを鋼棒を介して内側に引っ張り載荷した(図4, 7)。載荷は各載荷点毎1基、合計4基の油圧ジャックを配し、個別の手押しポンプを油圧源とした。制御はロードセル値を見ながらの号令で行った。載荷は支配面積を考慮し中央2点を1.0、端部の荷重を0.5の割合とした。以下、荷重は中央点の荷重を代表として考える。載荷値は中央点で1kNピッチとし、図4に示す点の変位と部材の歪を測定した。22.4kN時にトラス材(図4 BP9)に座屈が生じた為、載荷を終了した(写真3)。尚、本構造には本来初期応力による初期歪が存在するが、測定歪値は全て実験開始時を基準値(零)としている。

6. 実大載荷実験結果

6.1 荷重-変位関係

図8にドーム中央付近の3つのジョイント(図4, 9 BD3, BD7, BD11)における荷重-変位曲線を示す。ロッド材の圧縮下での張力消失や引っ張り下での部材降伏などにより剛性低下が起こり全体的にソフトニングの傾向を示すことがわかる。図9に20kN時の中央断面におけるドームの変形状態を表4にこの時の各ジョイント移動量を示す。載荷条件から想像できるように、Y方向へ平行に移動しZ方向へ逆対称型に変位していることがわかる。

6.2 ロッド材の荷重-歪関係

載荷反対側B2ユニット(図4)におけるロッド材の荷重-歪関係を図10に示す。荷重5kNまで圧縮を受け持っていた長手下弦B2-ED,WD材の張力が消失し、その後座屈している(写真4)。載荷側のB6ユニットにおけるロッド材の荷重-歪関係を図11に示す。短手下弦B6-ND,SDは圧縮に耐えた後、荷重9kNで張力消失後座屈し、長手下弦B6-ED,WDは逆に引っ張りで15kNで降伏している。(張力材の位置名称については表5の下欄参照。)

図7：実大載荷実験加力断面概略図

(a) Y 方向

(b) Z 方向

図8：3ジョイントの荷重-変位関係

図9：中央断面附近におけるドームの変形状態(20kN時)

表4：20kN時のジョイント移動量(mm)

節点 No.	BD1	BD3	BD4	BD7	BD9	BD11	BD12
Y 方向	-80	-125	-115	-111	-115	-123	-67
Z 方向	25	46	16	18	-28	-49	-17
移動量	84	133	116	112	115	132	69

(a) 短手ロッド材

(b) 長手ロッド材

図10：B2ユニット：ロッド材の荷重-歪関係

(a) 短手ロッド材

(b) 長手ロッド材

図11：B6ユニット：ロッド材の荷重-歪関係

図 12 : トラス材の荷重-歪関係

写真 3 : 載荷により座屈したトラス材 BP-9

写真 4 : 張力消失後座屈した B2-WD 材

6.3 トラス材の荷重-歪関係

載荷反対側ユニットのトラス材(BP1~4)及び東側(載荷側)トラス材(BP5~8)の荷重-歪関係を図 12 に示す。特徴的なことは載荷反対側トラス材 BP1~4 が載荷荷重 5kN までは引っ張り力を負担していることである。5kN 以降は前述の隣接するロッド材 B2-ED,WD(図 10(b))の張力消失により徐々に圧縮に転ずる。載荷側トラス材(BP5~8)は載荷点に接続する BP6,7 が特に圧縮を負担し、前述ロッド材 B6-ND,SD(図 11(a))の張力消失に伴いさらに圧縮力の負担が増える様子がわかる。

7. 考察

7.1 存在張力測定実験

ユニット除去作業から逆算した各ユニットの初期存在張力と設計張力値の比較を表 5 に示す。長手部材

(EU,ED,WU,WD)は 50%程度の誤差範囲で設計張力相当の初期張力が存在していたことがわかる。これに対し、短手部材(NU,ND,SU,SD)は設計張力値に対し 219%~95%とばらつきが大きいことがわかる。このことは、施工時に短手材の張力が入りにくかったことと対応している。施工時には第 1 次緊張を行い、現場の測定結果(2 ユニット)に基づいて、短手材に対し増し締めを行っている。現場測定は第 1 次緊張時のみ行われたため、増し締め後の張力状況は分かっていない。図 13 に施工時の第 1 次緊張時の導入張力測定結果(2 ユニット分)を示す。

また、図 5 より、各ユニットの自己釣り合い状態は独立ではなく、お互いにやり取りがあることが分かる。ユニット 1 の撤去はユニット 8, 11 の存在張力に対し、若干の変動を与えている(10:29)。また、直接に接しているユニット(ユニット 8 に対する 3,5,6,7, ユニット 11 に対する 2,4,9,11 等)間では、かなりの力のやり取りが見られる。ユニット 3(13:32)及びユニット 5(14:28)を外した際のユニット 8 の張力変化や、ユニット 2(11:43)及びユニット 4(13:54)を外した際のユニット 11 の張力変化は特にはっきりと現れている。

周辺ユニットの撤去は境界条件の拘束が緩くなることにもなる。長手上弦材、短手下弦材は周辺ユニットの拘束がなくなることにより張力が減少し、残りの部材は逆の傾向が見られる。実験の初期にユニット 8 と 11 の間にある、ユニット 1 を外したため、ユニット 1 をまたいだ関係にあるユニット同士の影響は余り見られない。

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 (%)
11-WU	13558.5	9800	138%
11-WD	8631.9	9378.6	92%
11-NU	8073.0	2734.2	295%
11-ND	7783.2	9339.4	83%
11-SU	7327.8	2734.2	268%
11-SD	8673.3	9339.4	93%
11-EU	15566.4	9800	159%
11-ED	8880.3	9378.6	95%
1-WU	4429.8	9800	45%
1-WD	8466.3	9378.6	90%
1-NU	3456.9	2734.2	126%
1-ND	1759.5	9339.4	19%
1-SU	2235.6	2734.2	82%
1-SD	3291.3	9339.4	35%
1-EU	4429.8	9800	45%
1-ED	8756.1	9378.6	93%
8-WU	13703.4	9800	140%
8-WD	9936.0	9378.6	106%
8-NU	5257.8	2734.2	192%
8-ND	6541.2	9339.4	70%
8-SU	6251.4	2734.2	229%
8-SD	5402.7	9339.4	58%
8-EU	13744.8	9800	140%
8-ED	10225.8	9378.6	109%

ユニット内の各部材名称

図 13 : 施工時の第 1 次緊張時の導入張力測定結果

図 14 : 施工時の第 1 次緊張時の測定 2 ユニット (斜線)

7.2 実大載荷実験

トラス材は張力材の弛緩以降に、より不利な状況となることがわかる。トラス材 BP1~4 が初期に引っ張りを負担するのは、ロッド材が初期張力の存在により圧縮材として効果的に機能していることを示している(図 12(a))。この初期の性質は張力安定トラス固有の特徴的な性状であり、この構造が超軽量構造として成り立つ大きな要因である。トラス材にはロッド材の初期張力相当の初期圧縮軸力が存在するので、実際には圧縮力の減少という形で引っ張り力を負担していると考えられる。ロッド材の張力消失以降は、トラス材が主に荷重を負担することとなりトラス材応力は徐々に圧縮に転じる。

8. まとめ

実大実験により張力安定トラス構造物の実挙動を確認した。張力安定トラス構造物の構造挙動は、初期張力の消失まではロッド材が圧縮力を負担するというメカニズムにより、特に初期に特徴的な挙動を示す。

全体性状は、今回の荷重条件下では張力材の弛緩及び引っ張り降伏により徐々に剛性を失うソフトニングの性状を示した。

設計時設定初期張力と実際に存在していた初期張力との間には全体的には一致する傾向が見られたものの、短手張力材を中心にかんがりのばらつきがあることも確認された。本構造のような張力導入型の構造物では、張力導入手順や張力管理が重要である。設計時には施工性及び

設定張力の実現性等も充分視野に入れて計画することが望ましい。

本建物は、10 年間にわたり一通りの外乱を経験し、材料等の経年劣化も適度に進行しているものと思われる。この間、架構は C 種膜材によって覆われ、風圧などの外力を架構へ伝えていた。また、膜材張力は手作業により導入されており、膜張力が架構応力状態へ与えた影響はごく小さいと考えている。

本報告ではなるべく多くの実験結果を掲載するために考察の記述は最小限に留めている。実験結果の考察や解析結果との比較検討を含めた張力安定トラスの構造的性状に関する調査結果は今後別の機会に発表していく予定である。

本報告が今後の軽量空間構造の発展に対し貴重な資料を提供するものと確信している。

参考文献

- [1] D.G.Emmerich, "Exercices de Geometrie Constructive Traveaux d'etudiants", Ecole Nationale Supérieure des Beaux Arts, Architecture, Paris, 1970.
- [2] 半谷, 川口, 小田, 張力安定トラス構造の自己応力と構造挙動, 生産研究, 第 42 巻 4 号, pp.17-22, 1990.4
- [3] 東京大学生産技術研究所・太陽工業株式会社: 張力安定トラスの研究開発, -張力安定型空間構造に関する共同研究報告書-, 全 171 頁, 1990.3
- [4] Y.Hangai, K.Kawaguchi and K.Oda, The Structural Behaviors of Truss Structures Stabilized by Cable Tension, Proceedings of the Third Summer Colloquium on Shell and Spatial Structures, Taegu, Korea, 1990, pp.413-429.
- [5] 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 号通巻 231 号 1991.5.
- [6] 「大スパンを軽快に覆う張力安定トラス構造-東大生研と太陽工業が共同開発した新屋根架構-」日経アーキテクチャ, 1991, 10-28, pp.262-265.
- [7] 小田憲史, 川口健一, 半谷裕彦, 張力安定トラス構造の構造設計, 膜構造研究論文集'91, pp.33-45.
- [8] Y.Hangai, K.Kawaguchi and K.Oda, Self-Equilibrating Stress System and Structural Behaviors of Truss Structures Stabilized by Cable Tension, International Journal of Space Structures, 1992, Vol.7, No.2, pp.91-99.
- [9] 「張力安定トラス実験棟」建築文化 1992 年 2 月号, pp.152-158.
- [10] 「張力安定トラス実験棟」半谷裕彦, 藤井明, 川口健一, 及川清昭, 小田憲史, 建築雑誌増刊作品選集 1993, pp.56-57.
- [11] K.Kawaguchi, K.Oda and Y.Hangai, Experiments and Construction of Truss Structure Stabilized by Cable Tension, Proceedings of IASS'97, Vol.1, pp.421-429.
- [12] 金山, 半谷, パーツ方式によるハイブリッド単層ラチスシェル及び対座屈荷重設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集第 522 号, 1999.8, pp.79-86.
- [13] 金山, 福本, 藤井, 和田, 川口, パーツ方式によるハイブリッド単層ラチスシェルの試設計と解析, 日本建築学会技術報告集第 12 号, 2001.1, pp.83-88.
- [14] 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, 東京大学生産技術研究所, 株式会社大林組, 太陽工業株式会社 2001.12.

[2002 年 4 月 19 日原稿受理 2002 年 7 月 23 日採用決定]