

研究解説

3ストラット張力システムの構造挙動とその建設に関する研究

Three Strut Tension System — Structural Behavior and Coustruction —

川口 健一*・呂 振宇**・大矢 俊治*・珠 玖 義 樹***
 久保 里 奈***・榎 原 昌 之***・藤 井 明*・槻 橋 修*

Ken'ichi KAWAGUCHI*, Zhen-yu LU**, Shunji OYA*, Yoshiki SHUKU***,
 Rina KUBO***, Masayuki KUWABARA***, Akira FUJII* and Osamu TSUKIHASHI*

1. はじめに

テンセグリティ構造はその独特な外観から、多くの研究者を惹きつけてきた。著者等は立体トラスとテンセグリティ構造の中間に最適な構造が存在するという考えから張力安定トラス構造を提案、生産技術研究所六本木キャンパス内に建設した。この構造は、鉄骨構造建築の軽量化の為に積極的に張力を導入する構法としてはわが国において先駆的な例となった。

テンセグリティの一般的定義とはR. Motroにより以下のように与えられている。「テンセグリティ・システムとは自己釣り合い応力により剛となる骨組み構造である。部材は通直で同じ長さを持つ。圧縮材 (strut) は不連続に組み合わされ、張力材 (cable) は連続に組み合わされる。各節点では少なくとも一つの圧縮材と3本の張力材が出会う。張力材は圧縮に耐えることが出来ず圧縮材はその逆となる。」。しかし、一般にテンセグリティの標準形として知られている単純なモデルすら、実際の構造物に応用された例は少ない。単純なユニット構造を集積させた構造なども提案されているが、研究の域を出ていない。ケーブルドーム等は大規模な建設例があるが、これらは基本的には圧縮リングの中のネット構造であり、上記の一般的なテンセグリティ構造のイメージとは異なる。

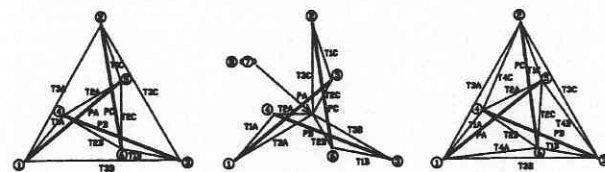
テンセグリティ構造を実際の構造物として役立てようと考えた時、意外にも、最も基本的な構造である3ストラット張力構造やそのバリエーションについても余り多くのことが分かっていないことが判る。

本報告では、東京大学生産技術研究所・千葉実験場にお

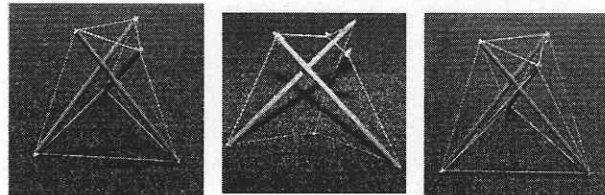
ける実験棟建設に際し、テンセグリティ構造の実構造物への応用に際して行なった、台形3ストラット張力システムの数値解析的な調査と手締めによる張力導入試験及び建設現場における張力導入計画と実施結果について述べる。

2. 3ストラット張力システム

まず、図1のような3種類の台形型3ストラット張力システムの構造性能について数値解析によって調査比較する。図1 (a)、モデル1は最もよく知られている3ストラット張力システムであり、シンプレックス構造と呼ばれることもある。6点の節点、3本の圧縮材、9本の張力材を持つ。図1 (b)、モデル2は (a) のバリエーションである。圧縮材、張力材の数は変わらないが、節点の数が8点に増える。圧縮材の端点に集まる張力材の数が2本であり、実際の設計時のディテールが簡単になる可能性がある。図1 (c)、モデル3もやはり図1 (a) のバリエーションで



(a)モデル1平面図 (b)モデル2平面図 (c)モデル3平面図



(c)モデル1 (d)モデル2 (e)モデル3

図1 台形3ストラット張力システム概形

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門
 **東京大学大学院工学系研究科
 ***太陽工業株式会社

あり、張力材が3本増えている。

モデル1に関しては、R. Motro が載荷実験を含む研究を行なっている。この構造は、1次の不静定、不安定構造物である。不安定モードに対しては初期張力によって剛性が与えられるため一般に剛性の低い構造となる。

モデル2は、モデル1と同じ部材数であるが、節点数が2つ多いため、さらに不安定次数の高い構造となる。また、圧縮材端部で、2本の引っ張り材と圧縮材が1平面内の釣り合いとなるため、その面外に対する剛性が低くなる事が予想される。モデル3は、モデル1にさらに3本の部材を追加したため安定かつ不静定な構造となっている。実際の構造物には安全性確保の観点から、ある程度の不静定次数(余剰部材)が必要と考えられるため、実際の構造物として、より実現しやすい構造である。圧縮材の端部に集まる張力材の数は4本に増えるため、ディテールの設計は複雑となる。

2. 数値解析

以下では、図1の各モデルに対し、表1, 2に示される節点座標と部材パラメータ、初期応力を用いて行なった数値解析結果について述べる。境界条件は、底辺の節点1, 2, 3がそれぞれxy平面内に自由に動けるようにローラー支持されているものとする。初期張力は各モデルの部材番号1, 2, 3の初期張力がほぼ等しくなるように設定してある。

これらの構造の剛性の特徴を捉えるには、剛性行列の固有値解析を用いると便利である。表3, 4に幾何学的非線形解析に用いられるそれぞれのモデルの接線剛性行列の固有値を示す。

それぞれのモデルは境界条件に由来する3つの零固有値を持っている。xy平面内における並進2と回転1である(図中薄墨の部分)。表3中、モデル1の12番目の固有値が零となっている。拘束すべき12の自由度に対し弾性剛性行列のランクが11であるので、モデル1は1次不安定構造である。この固有値に対応する固有ベクトルは、三角形123が三角形456に対し振れながら近づく伸び無し変位モードを表している。また、12本の部材に対して弾性剛性行列のランクが11であるので、1次の不静定構造であり、初期張力を入れるための自己釣り合い応力モードが1つ存在することが分かる。

モデル2も弾性剛性行列のランクは11であるが、拘束すべき自由度は18であるので、不安定次数が7となっていることが分かる。部材数はモデル1と同じ12であるので、自己釣り合い応力モードは1である。

モデル3は零固有値が無く弾性剛性行列のランクは12であり拘束すべき自由度と等しいため、安定な構造物である。モデル1, 2と異なり、弾性剛性によって全ての変位モードが安定化されていることが分かる。部材数は15

表1 モデルに対する部材諸量

Model 1			
Member	Area (cm ²)	Initial Force (kN)	Yielding Stress(MPa)
T1	4.9	78.40	274
T2	4.9	59.31	274
T3	4.9	25.42	274
P	40.4	-93.58	323
Model 2			
Member	Area	Initial Force	Yield Stress
T1	4.9	78.40	274
T2	4.9	102.72	274
T3	4.9	44.02	274
P	40.4	-93.58	323
Model 3			
Member	Area	Initial Force	Yield Stress
T1	4.9	77.91	274
T2	4.9	62.07	274
T3	4.9	91.22	274
T4	4.9	26.61	274
P	40.4	-116.47	323
Young's modulus : 210 Gpa		Poisson's Ratio : 0.3	

表2 モデルの節点座標

Model 1			
Joint No.	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	-606.2	-350.0	0.00
2	0.00	700.0	0.00
3	606.2	-350.0	0.00
4	-300.0	0.00	800.0
5	150.0	259.8	800.0
6	150.0	-259.8	800.0
Model 2			
Joint No.	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	-606.2	-350.0	0.00
2	0.00	700.0	0.00
3	606.2	-350.0	0.00
4	-300.0	0.00	800.0
5	150.0	259.8	800.0
6	150.0	-259.8	800.0
7	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
Model 3			
Joint No.	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	-606.3	-350.0	0.00
2	0.00	700.1	0.00
3	606.3	-350.0	0.00
4	-299.3	0.00	790.6
5	168.1	212.7	790.6
6	131.2	-248.6	790.6

表3 弾性剛性行列の固有値 (kN/cm²) 表4 幾何剛性行列の固有値 (kN/cm²)

Eigenvalue No.	Model 1	Model 2	Model 3
1	1437.00	1374.81	1501.51
2	1176.85	1374.81	1192.03
3	1176.85	1290.93	1192.03
4	505.35	677.90	511.82
5	293.44	677.90	329.37
6	293.44	332.51	329.37
7	124.07	295.03	201.95
8	124.07	295.03	201.95
9	123.26	94.58	121.88
10	46.14	94.58	77.98
11	46.14	82.71	64.91
12	0.00000	0.00000	64.91
13	0.00000	0.00000	0.00000
14	0.00000	0.00000	0.00000
15	0.00000	0.00000	0.00000
16		0.00000	
17		0.00000	
18		0.00000	
19		0.00000	
20		0.00000	
21		0.00000	

Eigenvalue No.	Model 1	Model 2	Model 3
1	0.41	1.39	0.41
2	0.36	0.87	0.37
3	0.36	0.87	0.37
4	0.24	0.41	0.25
5	0.24	0.35	0.25
6	0.13	0.35	0.13
7	0.08	0.19	0.09
8	0.03	0.18	0.05
9	0.03	0.18	0.05
10	0.02	0.13	0.03
11	0.02	0.08	0.03
12	0.01	0.08	0.00001
13	0.00000	0.08	0.00000
14	0.00000	0.08	0.00000
15	0.00000	0.07	0.00000
16		0.02	
17		0.02	
18		0.01	
19		0.00000	
20		0.00000	
21		0.00000	

であるので、15 - 12 = 3より3次の不静定構造であり、自己釣り合い応力モードは3つ存在する。

3つのモデルとも最大固有値やゼロ以外の最小固有値のオーダーは近く、伸び無し変位モードの存在が3つのモデルの違いを決定付けている事がわかる。

表4を見ると、モデル1, 2共に幾何学的剛性行列には零固有値が無く、初期張力を導入することで全ての変位モードが安定化されることが分かる。しかしながら、固有値の大きさは、弾性剛性に比べ千分の一以上も小さいことがわかる。従って、初期張力のみによって、十分な初期剛性を得ることは大変難しいことが分かる。

3. 荷重変位関係

各モデルの節点4, 5, 6に等しく鉛直下向きの荷重をかけた時の荷重変位曲線を図2に示す。

各計算は初期張力と幾何学的非線形性を考慮した荷重増分解析であり、いずれかの部材が降伏荷重に至った時に終了している。また、張力材の弛緩も考慮している。モデル1とモデル2は初期にはほぼ同じ傾向を示しているが、モ

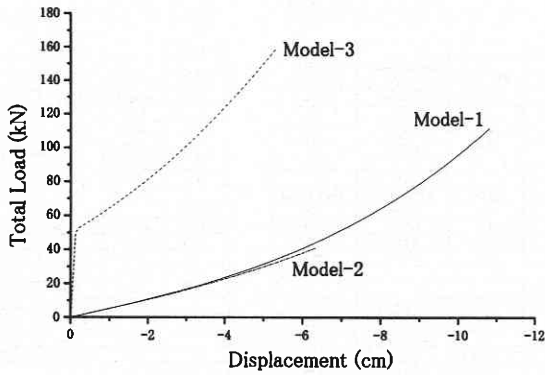


図2 荷重変位曲線

モデル1は捩れ変形により幾何学的な非線形性を示し、約100 kNで部材T1 A-Cが降伏しているのに対し、モデル2は荷重約30 kNで早々に部材T3 A-Cが降伏している。モデル3は部材T4 A-Cが弛緩するまでは、圧縮材として機能するため、初期には大変高い剛性を示し、約50 kNで部材T4 A-Cが弛緩してからは、モデル1, 2に近い挙動を示す。結局150 kNで部材T3 A-Cが降伏する。

モデル1, 2と3の大きな違いは、モデル3の張力材T4 A-Cが張力弛緩までは圧縮材として機能する点であり、主に幾何剛性で抵抗するモデル1, 2とはまったく異なる性状を示す。

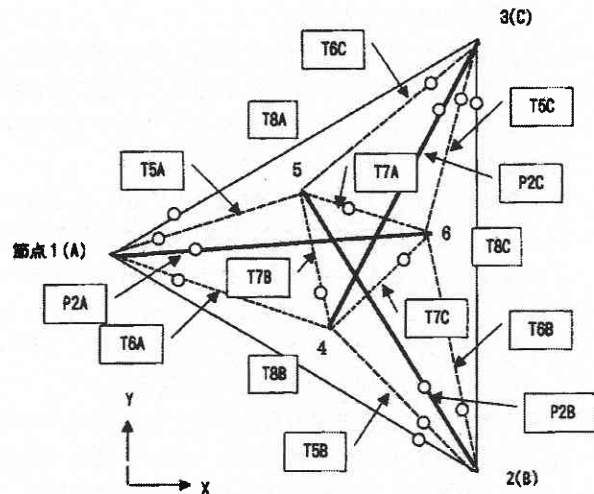
上記の結果より、3ストラット張力システムの構造挙動もモデルにより様々であることがわかる。本報告の結果として比較した3者の中ではモデル3が実用構造物として適していることが判る。特に張力材が圧縮材として機能している間の剛性の高さ、及び余剰材の存在が他の2モデルと大きく異なる。

以下では、モデル3を基本構造とした実大実験モデルの手締めによる張力導入法に焦点を当て、そのモックアップ実験と建設について報告する。

4. モックアップモデルによる張力導入実験

上記の結果に基づき実構造物へ応用する際の、張力導入計画と実大構造物によるモックアップ実験について述べる。本モックアップは、「東京大学生産技術千葉実験場・実験棟建設工事」で、施工されるテンセグリティB部分を予め仮組みをし、張力材への張力導入手順、導入張力、施工変位量、短部金物ディテール等及び、施工方法を確認する事を目的とする。

図3, 4, 表5, 6に示すような形状と部材諸元を用いて実大の台形3ストラット張力システムを組み立て、張力導入実験を行なった。



○ はゲージ貼付位置

図3 現大モデル平面図と歪ゲージ取り付け位置

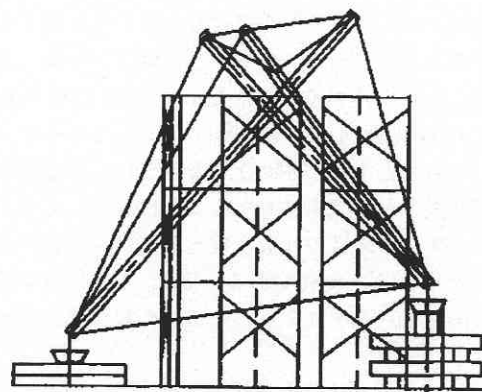


図4 モックアップ実験用実大モデル形状

表5 部材諸元

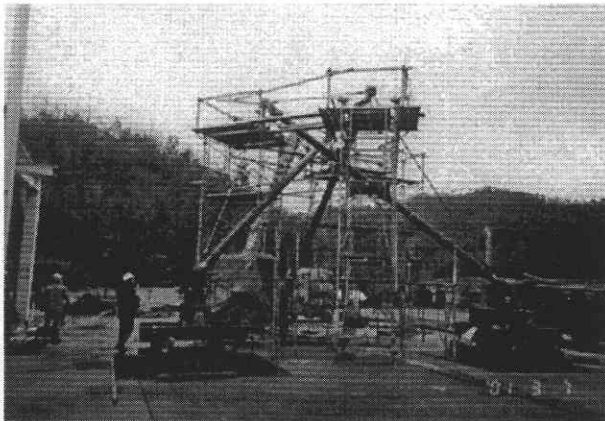
節点番号	部材名称	材質	直径 (mm)	降伏点 (MPa)
(1-5)	T5A	NHT690	32	323
(2-4)	T5B	NHT690	32	323
(3-6)	T5C	NHT690	32	323
(1-4)	T6A	NHT691	25	324
(2-6)	T6B	NHT691	25	324
(3-5)	T6C	NHT691	25	324
(6-5)	T7A	NHT692	28	323
(5-4)	T7B	NHT692	28	323
(6-4)	T7C	NHT692	28	323
(1-3)	T8A	NHT693	25	323
(2-1)	T8B	NHT693	25	323
(3-2)	T8C	NHT693	25	323
(1-6)	P2A	STK490	216.3	216
(2-5)	P2B	STK490	216.3	216
(3-4)	P2C	STK490	216.3	216

表6 設計座標

節点番号	設計座標(cm)		
	x軸	y軸	z軸
1	-1528.3	0	300
2	-886.8	-374.8	400
3	-886.8	374.8	400
4	-1180.5	-170.9	879.6
5	-1326.7	85.4	856.8
6	-1034.3	85.4	902.4

実測座標

節点番号	実測座標(cm)		
	x軸	y軸	z軸
1	-1528.3	0	300
2	-887.3	-374.2	400.2
3	-887.9	374.6	400.5
4	-1182.8	-171.2	879.1
5	-1325.4	87.6	857.3
6	-1033.2	83	902.2



(a) 全体風景



(b) 張力導入作業

図5 張力導入実験風景

5. 張力導入計画

図1に示したモデル1, 2は自己釣り合い応力モードが1であったため、いずれか1本の部材の長さを調整することで全体に自己釣り合い応力を導入することができる。しかし、モデル3は自己釣り合い応力モードが3つあるため、希望の初期応力状態を実現するには3つの独立な部材を適切に調整しなくてはならない。また、今回の建設においては、張力導入作業をジャッキ等の器具によらず、張力材に仕込まれたターンバックルを人力により締め込むという手作業で導入することとした。

現場における作業環境を考えると、人力により導入できる部材軸力は30 kNと想定することが出来る。従って、張力導入計画においては、導入張力を30 kN程度に抑える計画とする必要がある。このような判断に基づき、本構造の張力導入計画では、まず、モデル1の形状を作成し、導入張力を30 kNとして所定の軸力を導入し、次いで部材T6A～Cを設置、低軸力で長い距離を締め込むことで部材T1A～Cに最大軸力200 kNを導入することとした。

6. 実験手順

上記の考察に従い、以下のような張力導入手順を設定、手締めによる張力導入実験を行なった。

1. P2, T5, T7, T8材組立
2. T5材に初期張力30 kNを導入 (ステップ1)
3. サポート開放 (ステップ2)
4. T6材取付
5. T6材に18 kNを導入 (ステップ3)

7. 実験結果

実験結果を図6に示す。ステップ1における張力導入は、T1A, B, Cのみのターンバックルを締め込む場合と、T5A, B, C, を同時に締め込む場合とを試した。両

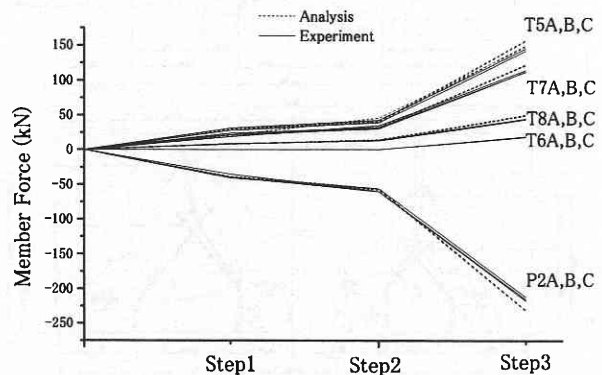


図6 張力導入実験結果・軸力変化

方の場合に同じ応力状態が実現することを確認した。

ステップ3における張力導入は、張力材T6A, B, Cを同時に締め込んだ。締め込みの足りない部材は歪の量が少ないという形でリアルタイムにモニターできるため、適切な張力導入が行なえることが分かった。

実験値は解析値とよく一致し、設計通りの張力導入が行なえることが分かった。但し、張力材T5A, B, Cの軸力を30kNから150kNに増やすために、張力材T6A, B, Cの締め込み長さは、8cmと大変長いことが分かる。設計の際にターンバックルのねじ込み長さを十分に確保しておく必要がある。また、ステップ3においては、自己釣り合いによる釣り合い形状が大きく変化するため、ジョイント部分における部材同士の交差角の変化を予め見込んだ設計が必要となる

8. 建設現場における張力測定計画と張力導入作業

上記の結果に基づき、3ストラット張力システムを用いた実構造物の設計・建設を行った。

建設場所は東京大学生産技術研究所・千葉実験所内の敷地である。建物は実験施設を覆う上屋として機能すると同時に、構造自体が建築張力構造の実験モデルであり、施工前後を通して継続的な観測を行なう。構造物の概要を図1に示す。

大小2基の3ストラット張力システムにより膜屋根構造を突き上げる構造となっている。膜屋根を突き上げる束材は、膜材の抑えケーブルと各3ストラット構造の3頂点から張力材によって支えられ、空中に浮遊した状態になって

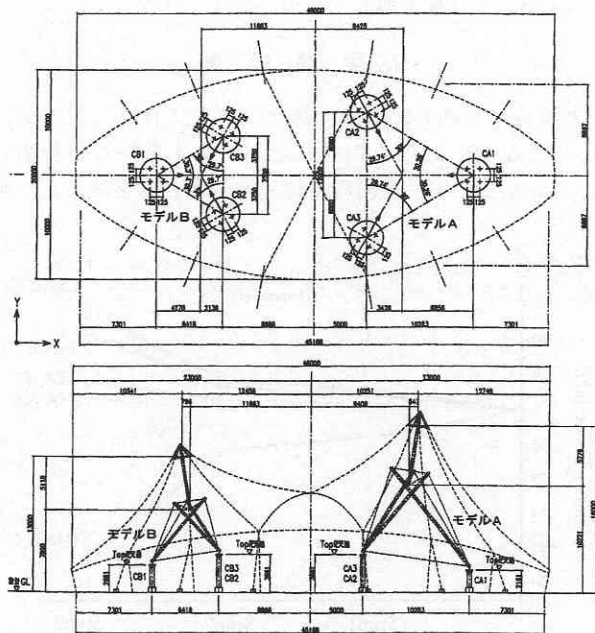


図7 建物概要

いる。この部分で、膜構造特有の大変位を吸収し、3ストラット構造への外力入力を和らげる構成となっている。

大きい方の3ストラット構造の底辺は1辺が約12mである。小さい方の底辺は1辺が約9mである。

以下、大きいほうの3-strut構造をモデルA、小さいほうの3-strut構造をモデルBと呼ぶ。

9. 張力測定計画

測定対象は張力材及び圧縮材の軸力である。所有しているスイッチボックスのチャンネル数と部材数の関係から、各部材に1対の2方向歪ゲージを貼り4ゲージ法により1チャンネル分の軸方向歪値を出力する方法を採用した。膜を突き上げる為の束材とそれを支える張力材を含めて全部で19チャンネル×2(モデルA, B)分の測定チャンネルを確保している。図8に測定計画を示す。

10. 張力導入計画

モックアップ試験の結果に基づき表8のような張力導入計画を立て、これに従って張力導入作業を行った。

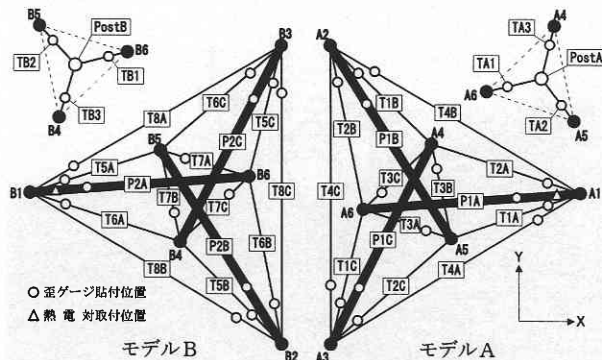


図8 測定計画

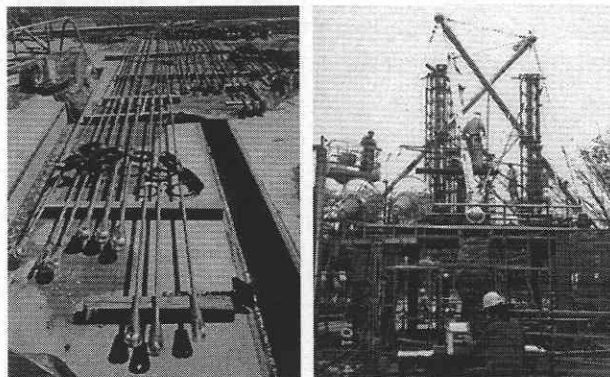
表8 張力導入計画

作業 手順 Step	作業内容	
	モデルA	モデルB
1	各部材の組立前軸力測定 T1, T2 ターンバックルネジ付測定	各部材の組立前軸力測定 T5, T6 ターンバックルネジ付測定
2	サポート A4, A5, A6 設置	サポート B4, B5, B6 設置
3	P1, T3, T4 組立	P2, T7, T8 組立
4	T1 取付 (設計寸法)	T5 取付 (設計寸法)
5	1 T1 張力導入 (5kN)	T5 張力導入 (5kN)
6	2 サポート A4, A5, A6 開放	サポート B4, B5, B6 開放
7	3 -	T5 張力導入 (43kN)
8	節点 A1~A6 位置測定 ターンバックル縮み量測定	節点 B1~B6 位置測定 ターンバックル縮み量測定
9	T2 取付 (設計寸法)	T6 取付 (設計寸法)
10	4 T2 張力導入 (31.8kN)	T6 張力導入 (30kN)
11	節点 A1~A6 位置測定 ターンバックル縮み量測定	節点 B1~B6 位置測定 ターンバックル縮み量測定

11. 張力導入結果

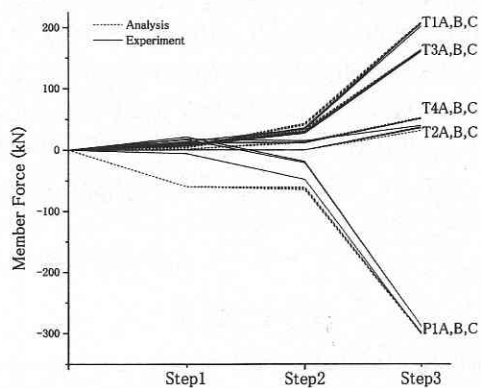
モデルAの張力導入作業は平成13年4月6日(晴れ, 気温22°C)に行い, モデルBはステップ3までを平成13

年4月7日(晴れ, 気温17°C)ステップ4を平成13年4月9日(晴れ, 気温23°C)に行った. いずれの場合も部材歪値をリアルタイムにデータロガーに表示し, 結果を直ちに張力導入作業にフィードバックすることにより, 良好な張力導入を行うことが出来た. 張力導入結果を図10に示す.

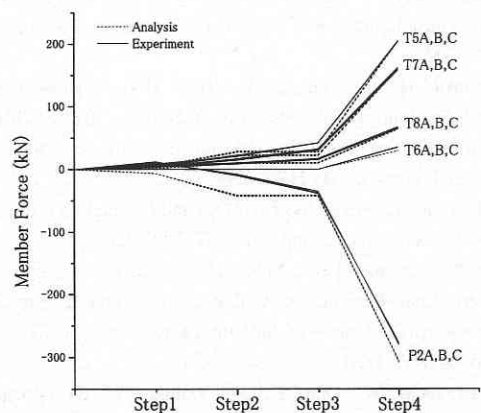


(a) 歪ゲージを貼った張力材 (b) データロガーによる張力測定

図9 張力導入作業



(a) モデルA



(b) モデルB

図10 張力導入結果と解析値

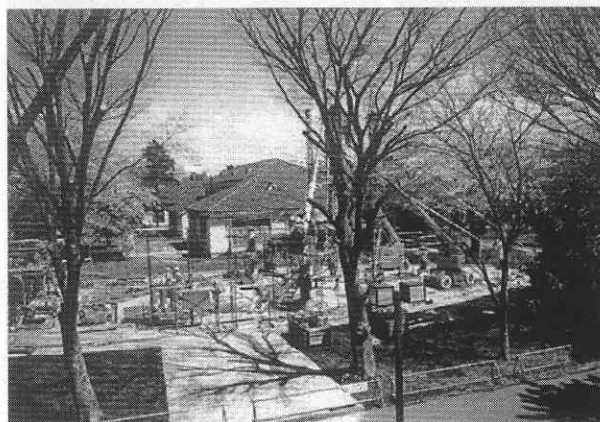


図11 施工開始した現地



図12 張力導入後の2基の3-strut張力システム

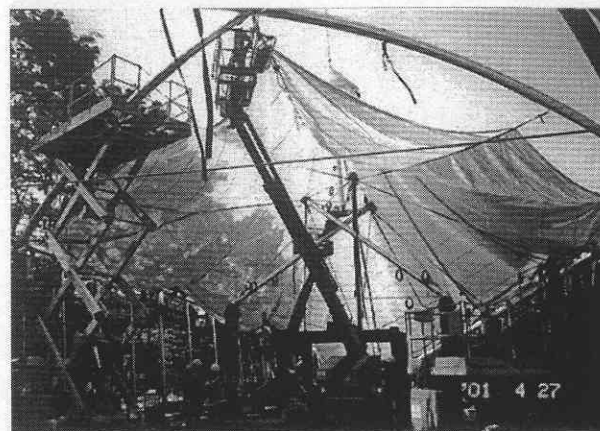


図13 膜展張作業

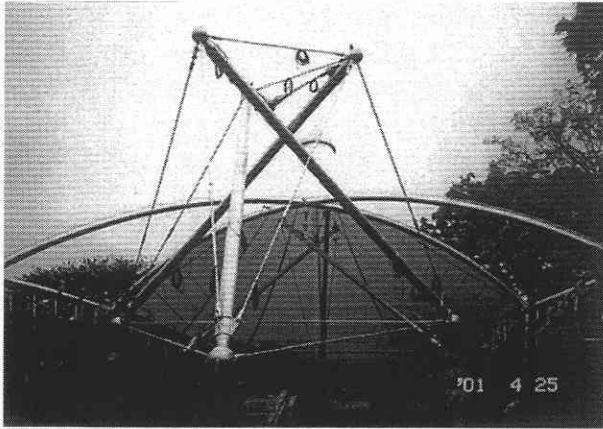


図14 モデルBと膜展張後のモデルA

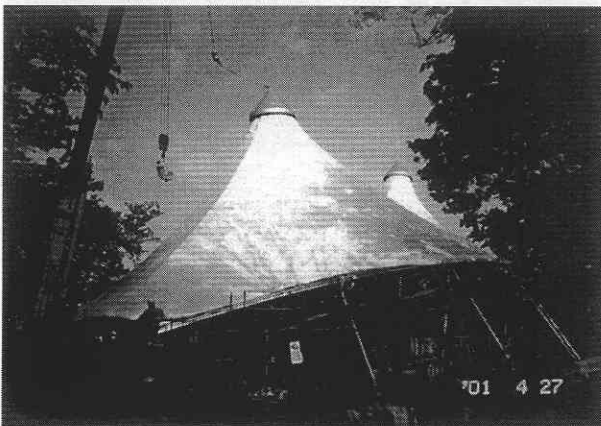


図15 膜展張作業終了直後外観

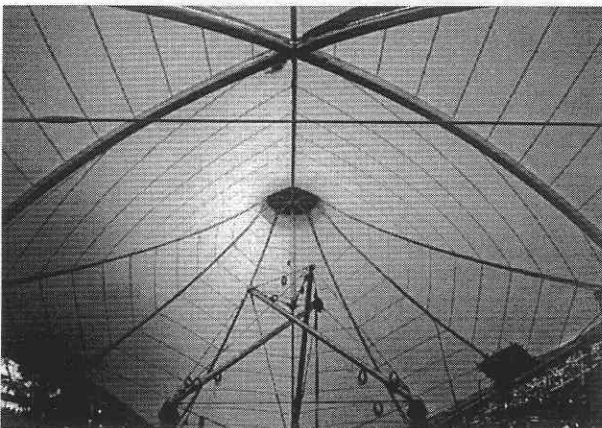


図16 膜展張作業終了直後内観

5. ま と め

テンセグリティ構造は、独特の外観や、張力による骨組みの軽量化の可能性が指摘されながらも、張力に依存する挙動変化が大きいため、従来は良くわからない難しい構造

として扱われ、実構造物として利用される機会はほとんど無かった。

本研究では、最も単純な構成のテンセグリティ骨組みである3ストラット構造に対し数値解析と構造モデル作成による詳細な検討を行った。これにより、構造挙動を充分把握した上で、東京大学生産技術研究所の実験棟として設計、建設を行なった。この様な規模でのテンセグリティ構造の実構造物への適用は世界でも初めての試みとなる。

テンセグリティ骨組みを覆う屋根葺き材は、B種の建設用膜材であり、ガラス繊維織布を塩化ビニール系の樹脂でコーティングしたものである。塩ビ系の膜材はマトリクス材の紫外線劣化による汚損が問題となるが、今回は特に自浄作用の強い酸化チタンコーティングの膜材を用いることとした。現在のところ酸化チタンコーティング膜はC種膜材にのみ一般利用されている。従って、実大規模での酸化チタンコーティングB種膜材の利用としても国内初となる。

本報告では、3-strut張力システムの実構造物への応用例として、数値解析による分析、実大モックアップによる張力導入実験及びそれらの結果に基づく設計と施工現場における張力導入計測を行なった。部材軸力をリアルタイムでモニターできる計測環境と適切な張力導入計画により、人力による張力導入を設計値通り行なうことができた。

モデルA、Bに貼付した歪ゲージ以外に測定用の熱電対を接続しており、今後は気温、部材温度と導入軸力の変化などの測定を続けていく予定である。

(2001年5月30日受理)

参 考 文 献

- 1) Calladine, C.R., Buckminster Fuller's "Tensegrity" structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames, *International Journal of Solids Structures*, 1978, Vol.14, 161-172.
- 2) Motro, R., Forms and forces in tensegrity systems, *Proceedings of the Third International Conference on Space Structures*, 1984, 283-288.
- 3) Tanaka, H. and Hangai, Y., Rigid Body Displacement and Stabilization Conditions of Unstable Truss Structures, *Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames*, ed. By Heki, 1986, 55-62.
- 4) Motro, R., Tensegrity Systems? Past and Future, *Proceedings of the IASS International Symposium '97*, 1997, 69-79.
- 5) Hanaor, A. and Liao, M.K., Double-Layer Tensegrity Grids: Static Load Response I: Analytical Study and II: Experimental Study, *ASCE-Journal of Structural Engineering*, 1991, Vol. 117, No. 6, 1660-1684.
- 6) Kawaguchi, K., Oda, K. and Hangai, y., Experiments and Construction of Truss Structure Stabilized by Cable Tension, *Proceedings of the IASS International Symposium '97*, 1997, 421-429.