

# テンセグリティ構造による タワー及びアーチの構造特性について

村 中 良 \*1  
日 野 吉 彦 \*2

## 梗 概

圧縮力のみを負担する圧縮材と引張力のみを負担する引張材より構成されるテンセグリティシステムの単位ユニットを考案し、それをタワー状の構造物やアーチ状の構造物に応用するための最適な形態を検討する。そしてそのユニットを積み重ねて計画した軽量なタワーおよびアーチの構造挙動を把握する。

### 1. はじめに

「テンセグリティ」とは、R. B. Fullerらによって考えだされた概念で、“tension”と“integrity”との合成語であり、テンセグリティ構造は、「連続的なサブシステムを構成する引張り材と、不連続なサブシステムを構成する圧縮材とで構成され、相応な初期張力を必要とする複合構造である」と定義される。

図1はテンセグリティ構造の簡単な例であるが、(a)の引張材に初期張力を導入することによって、圧縮材には圧縮力が与えられる。それに対して、(b)では引張材に初期張力を導入すれば圧縮材には引張り力が与えられ圧縮材実際には必要ないためテンセグリティ構造とはいえない。

立体トラスにこのテンセグリティシステムを利用すれば、部材数(圧縮材数)が大幅に減り、自重の低減が期待できるため大規模構造物に応用することができる。コンプレッションリングを圧縮材とし、それになかった引張材(ケーブル)に初期張力を導入することで圧縮材(ポスト)を支えるケーブルドームなどはこの例である。

テンセグリティ構造は、圧縮材の位置、次元、引張材の配置によって表1のように分類される。開いたシ

ステムとは、その張力を維持するために余分の(二次的な)支持構造(要素)を必要とするものであり、閉じたシステムとは、その架台から独立して安定しているものである。ここでは、単位ユニットを圧縮材が同一平面状にない閉じたシステムで計画し、それを応用したタワーとアーチ(基礎につながるケーブル要素を用いるため全体としては開いたシステム)を計画しその構造特性を探る。

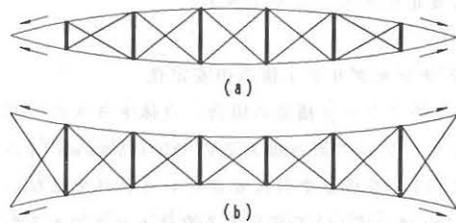


図1 1次元のテンセグリティ

表1 テンセグリティ構造の分類

| 圧縮材が同一平面上にある                   |         | 圧縮材が同一平面上にない |         |
|--------------------------------|---------|--------------|---------|
| 開いたシステム                        | 閉じたシステム | 開いたシステム      | 閉じたシステム |
| 1次元(梁など)、2次元(屋根など)、3次(複合構造として) |         |              |         |

\*1 横浜国立大学大学院

\*2 横浜国立大学工学部

## 2. テンセグリティの仕組み

### 2.1 立体トラスの安定化

J. Clerk Maxwellは、立体トラスを「いくつかの節点でつながった直線材のシステム」、剛体トラスを「直線材の長さが変わらなければ、2節点間の距離が変わらないもの」と定義し、剛体にするには、j節点に対してb本の部材が必要だと証明している。

$$b = 3j - 6 \quad (1)$$

これは、Maxwellの定理と呼ばれており、節点の全自由度数3jから剛体の自由度数6を差し引いた自由度3j-6を部材数bで拘束するということである。

しかし厳密に言えば、この式を満足するものが全て剛であるというわけではない。例えば図2の正二十面体の稜を形作る立体トラスについては、j=12, b=30で式(1)を満足するが、(b)のように節点Jにつながる5本の部材が同一平面上にある場合不安定となる。このようなものを微小変位の範囲で不安定という。

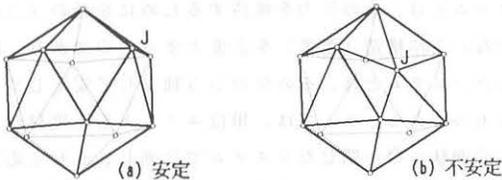


図2 正二十面体トラス

しかし節点Jにつながる5本の部材に初期張力(引張力)を導入し剛性を付与することで図2(b)のような場合も安定化することができる。

### 2.2 テンセグリティ構造の安定化

テンセグリティ構造の場合、立体トラスの一部の部材をケーブルに置き換えるので単にMaxwellの定理(式(1))を満足すれば安定というわけではない。図3の(a)は、式(1)を満足する立体トラスであるが、部材②と部材④が直交する位置にある場合のみ微小変位の範囲で不安定となる。(b)はテンセグリティ構造に

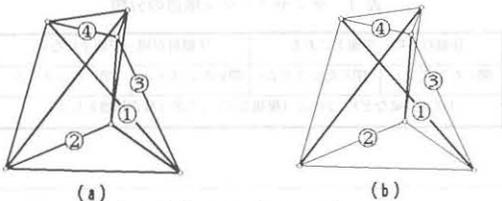


図3 立体トラスとテンセグリティ

するために(a)の9本の部材をケーブルに置き換えたものである。ケーブルは圧縮方向に剛性をもたないため、(b)は明らかに不安定である。

(b)を安定化するため適当な初期張力をケーブルに導入すると、(a)における微小変位の範囲で不安定となる形状と同一形状になり安定する。

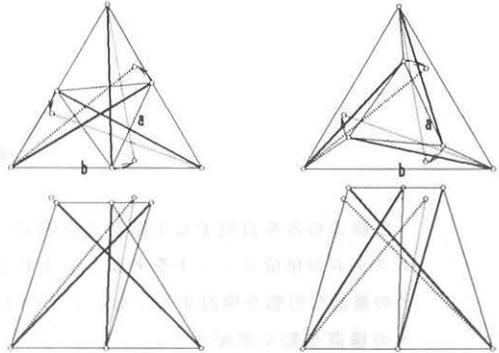


図4 テンセグリティ構造の安定化

このようにMaxwellの定理を満足するトラスは、微小変位の範囲で不安定となる形状で自己釣合い応力モードを持ち安定する。

Maxwellの定理を満足しないトラスでも初期張力の導入によって安定化できる。図5はj=12, b=27のテンセグリティシステムであるが模型のように安定であることが確かめられる。

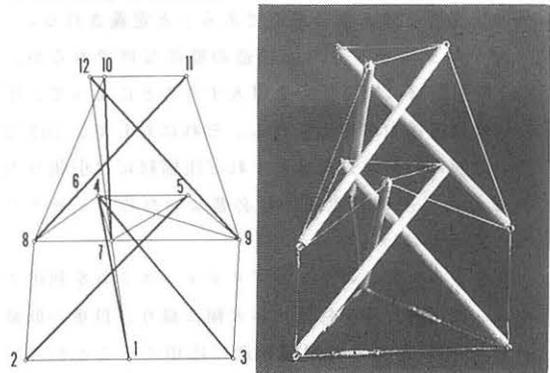


図5  $b-3j+6 < 0$ のテンセグリティシステム

これらの自己釣合い応力とメカニズムの関係は2次元のトラスで説明される。釣合い方程式のマトリックスの次元により次の式が導かれる。

$$b - 2j + 3 = s - q \quad (2)$$

s: 自己釣合い応力モードの独立なもの数

q: 微小変位の範囲でのメカニズムの数

図6のトラスは  $j=4, b=4$  で  $s-q=-1$  となる。(a)は外力が零の状態では各部材が張力を持たずに節点の釣合い式を満足する。よって  $s=0$  であり、 $q=1$  で一つのメカニズムを持つことになる。(b)は各部材が一直線上に配置されたもので部材14に圧縮力、他の部材に引張りという自己釣合い応力のモードをもち  $s=1$  である。よって  $q=2$  で二つの微小変位の範囲でのメカニズムを持つことになる。これは節点2, 3の部材14に垂直な方向のメカニズムに相当する。

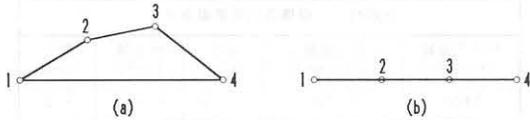


図6 4節点トラス

三次元の場合も(2)式と同様な式が導かれる。

$$b - 3j + 6 = s - q \quad (3)$$

図3のトラスの場合  $j=6, b=12$  で  $s=q$  となり部材②と部材④が垂直な場合は  $q=1$  で  $s=1$  であり自己釣合い応力のモードを一つもつ。垂直でない場合は  $s=q=0$  となり自己釣合い応力モードをもたないため、テンセグリティシステムにはできない。

### 2.3 自己釣合い応力モード

自己釣合い応力を求めるには、節点力が零のときの釣合い方程式をとけばよい。

いま、節点数  $j$ 、要素数  $b$  のトラス構造を考える。

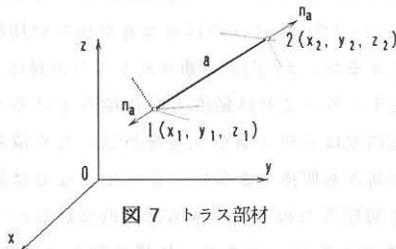


図7 トラス部材

部材  $a$  についての釣合い式は、

$$\frac{1}{l_a} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \\ x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{bmatrix} n_a = \begin{bmatrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ f_{1z} \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ f_{2z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

これを構造全体でまとめると、

$$B n = f \quad (5)$$

$n$  : 軸力ベクトル

$f$  : 節点力ベクトル

$B$  :  $m=3j$  (全自由度数) 行、 $n=b$  (部材数) 列の方向余弦に関するマトリックス

これが軸力のみによって平衡状態となる場合は  $f=0$  のときで、

$$B n = 0 \quad (6)$$

この式の解は  $\beta$  を任意のベクトルとすると、

$$n = [I_n - B^{-1}B] \beta \quad (7)$$

となる。ここで、 $B^{-1}$  は  $B$  の一般逆行列であり、 $B$  のランクを  $r$  とすると  $B^{-1}B$  のランクも  $r$  であり、

$$\text{rank}(I_n - B^{-1}B) = n - r \quad (8)$$

となる。 $q=n-r$  は独立な適合条件の数で、不静定次数とよばれる。いま、

$$[I_n - B^{-1}B] = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_q] \quad (9)$$

として独立な列ベクトルを  $g_1, g_2, \dots, g_q$  とすれば、式(7)は、

$$n = \beta_1 g_1 + \beta_2 g_2 + \dots + \beta_q g_q \quad (10)$$

$\beta_1, \dots, \beta_q$  : 任意の実数

$g_1, \dots, g_q$  : 自己釣合い応力モード

となる。

このようにして自己釣合い応力は求めることができる。しかし、図3のトラスのように自己釣合い応力の存在する形態が明らかな場合はよいが、もっと複雑なフレームになると自己釣合い応力の存在する形態を明らかにできない場合が多い。そのような場合は、模型をつくりその釣合い形態に近い形状を得てから、圧縮材に圧縮力、あるいは引張材に引張り力を導入し、非線形を考慮した応力変形解析を行なうことで自己釣合い形態、自己釣合い応力モードを得ることができる。

### 3. タワー状構造物

#### 3.1 単位ユニットの構成

図8のユニットについて、自己釣合い応力モードや鉛直荷重に対する挙動をもとにタワー状構造物に応用するための最適な形態を検証する。

このユニットの形状を決定するパラメーターとして

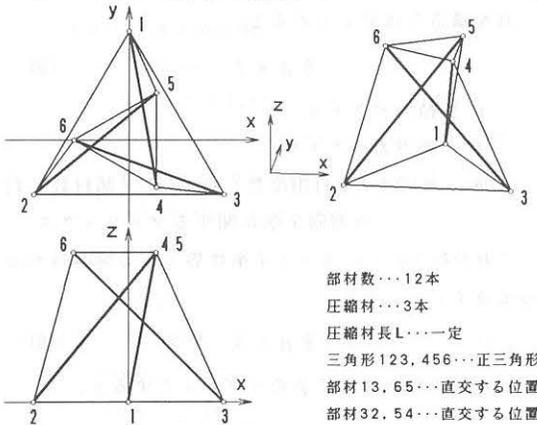


図 8 単位ユニット T

部材数…12本  
 圧縮材…3本  
 圧縮材長L…一定  
 三角形123, 456…正三角形  
 部材13, 65…直交する位置  
 部材32, 54…直交する位置

圧縮材長、半径 $r_2$ 、半径 $r_2$ :半径 $r_1$ の三つが挙げられ、ここでは $r_2$ を圧縮材の長さ $L$ の1/2に固定した場合を考える。そうすると圧縮材長が一定の場合は、図9に示すように $r_2$ と $r_1$ の比によって高さが変わる。 $r_1:r_2$ が3:10~10:10のモデルの各部材の自己釣合い応力モードを圧縮材の軸力の値を-1として図10に示す。

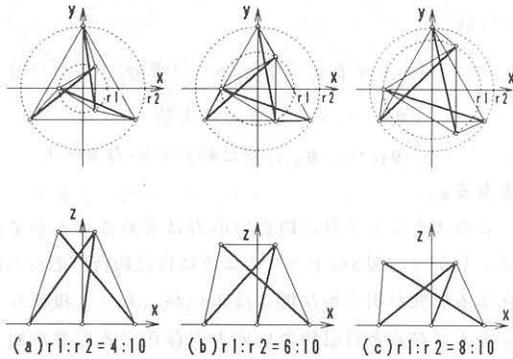


図 9 ( $r_1:r_2$ ) と単位ユニット T の関係

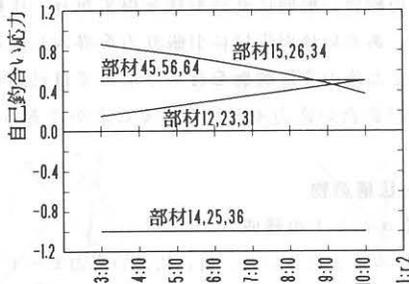


図 10 ( $r_1:r_2$ ) と自己釣り合い応力の関係

### 3.2 単位ユニットの構造挙動

$r_1:r_2$ の異なる8モデルに対して全体での剛体変位を拘束し、それぞれの形態に初期張力を導入したうえで節点1, 2, 3に鉛直荷重をかけて幾何学的非線形解析を行なった。想定した部材および拘束・荷重条件は次のとおりで圧縮材の長さ $L$ は2m、 $r_2$ は1mとした。図13に $r_1:r_2=9:10, 7:10, 5:10, 3:10$ のモデルの荷重と各部材張力の関係を示す。

表 II 解析パラメーター

| 圧縮材 (一般構造用炭素鋼鋼管)      |                               |            |                   |            |
|-----------------------|-------------------------------|------------|-------------------|------------|
| ヤング係数<br>( $t/cm^2$ ) | 単位重量<br>( $kg/m \cdot cm^2$ ) | 外径<br>(mm) | 断面積<br>( $cm^2$ ) | 厚さ<br>(mm) |
| 2100                  | 0.78                          | 101.6      | 9.892             | 3.2        |

| 引張材 (スパイラルロープ)        |                               |           |                   |
|-----------------------|-------------------------------|-----------|-------------------|
| ヤング係数<br>( $t/cm^2$ ) | 単位重量<br>( $kg/m \cdot cm^2$ ) | 径<br>(mm) | 断面積<br>( $mm^2$ ) |
| 1400                  | 0.827                         | 20        | 240               |

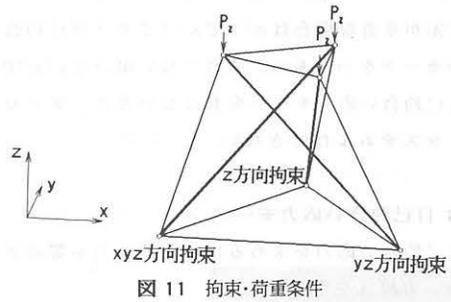


図 11 拘束・荷重条件

自己釣合い応力モードの点では、背の低いもの特に $r_1:r_2=9:10$ のモデルがばらつきが少ない初期張力を導入できるが、z方向の荷重に対して各部材に大きな応力が発生する。これは鉛直方向に積み上げるタワー状の構造物では不利に働くうえ背が低い積み上げたときの高さも期待できない。よってここでは高さも期待でき初期張力のバランスも比較的良好な $r_1:r_2=5:10$ のモデルを使ってタワー状構造物を計画する。

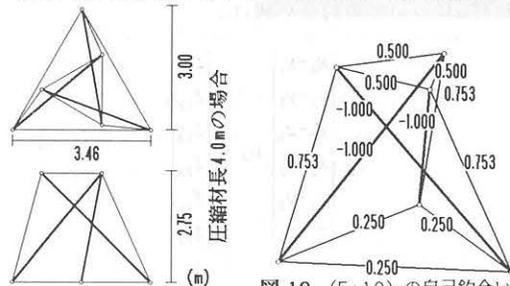


図 12 (5:10) の自己釣り合い応力

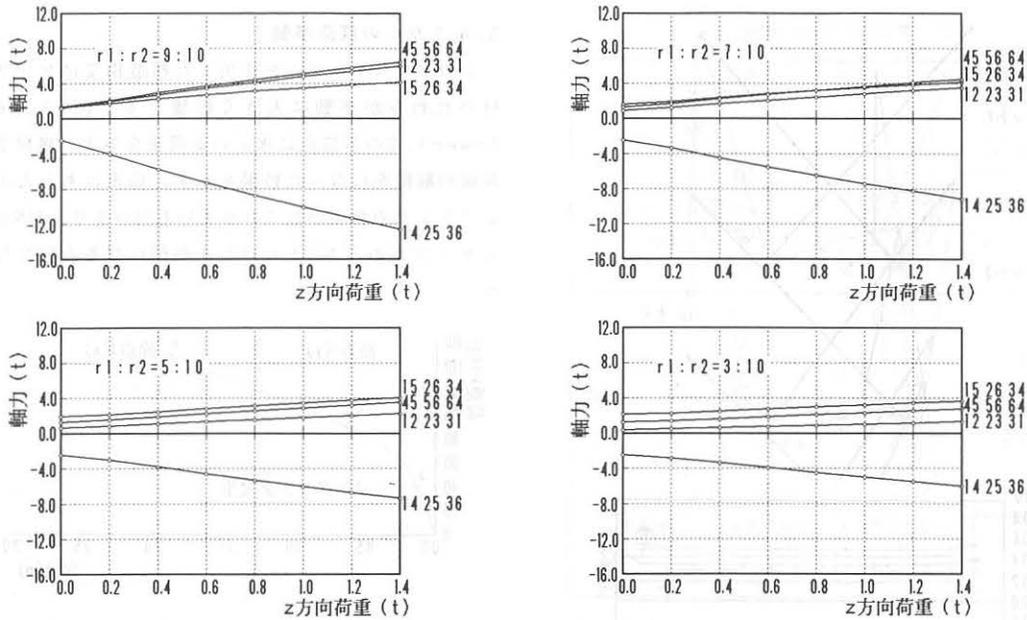


図 13 ユニットTの荷重・軸力関係

### 3.3 タワーの構成

単位ユニットTを応用したタワー状構造物として、

- ・ 同じユニットを単純に積み重ねたもの Tower 1
- ・ 逆向きのねじれをもつユニットを交互に積み重ねたもの - Tower 2
- ・ Tower 1の引張材数を減らしたもの - Tower 3
- ・ Tower 2の引張材数を減らしたもの - Tower 4

が考えられる。

それぞれのモデルは安定化するためにユニットのねじれと同方向のねじれをもつが、Tower 2, 4は逆向きのねじれをもつユニットを交互に積み上げることで全体のねじれを押さえている。部材の長さ、ユニット数はタワーとして、ある程度の大きさ（30m級）をもたせるため圧縮材長4.0m、ユニット数15とした。また、Tower 3, 4については初期張力のバランスがかなり偏ったものになり実用的ではないためここでは取りあげない。図15, 16にTower 1, 2の各部材の自己釣合い応力のモードを示す。地面に接続するための支えケーブルであるユニット15の部材①と部材④の負担張力が大きくなるが、全体にはほぼ均等な張力を導入できる。なお単位ユニットのように簡単に(7)式の解が得られないためタワーの形状を決めた後、圧縮材に適当な圧縮力を導入し幾何学的非線形解析を行なうことで釣合い形態および自己釣合い応力を求めた。

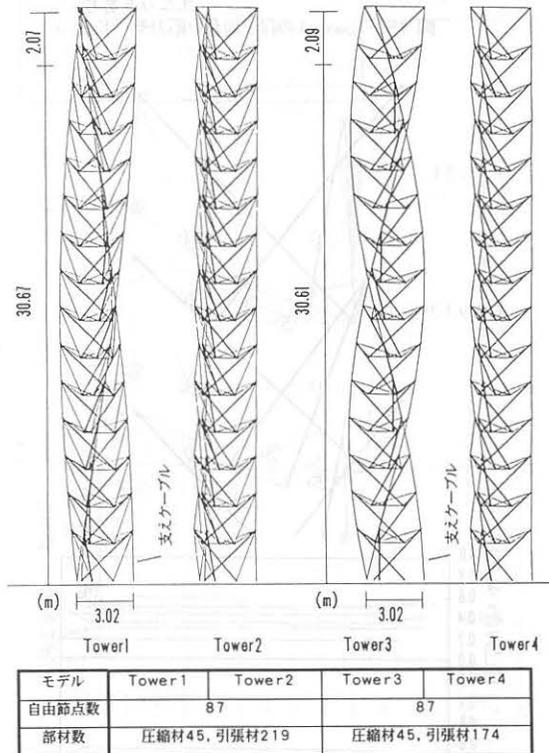


図 14 ユニットTを用いたタワー状構造物

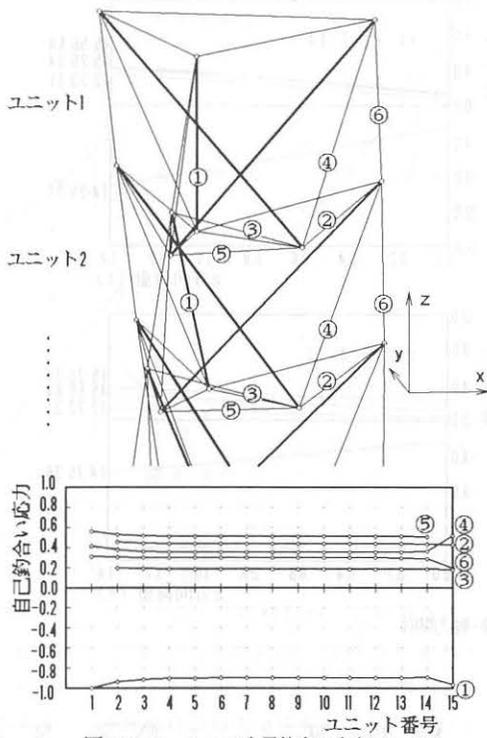


図 15 Tower1の自己釣り合い応力モード

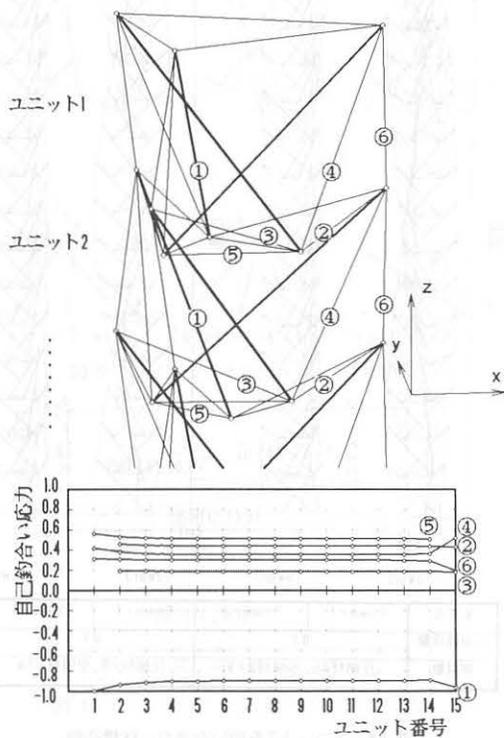


図 16 Tower2の自己釣り合い応力モード

### 3.4 タワーの構造挙動

このようなケーブルを使用した構造物ではケーブル材のたわみが挙動に大きく影響する。図17, 18に Tower1, 2の各節点に水平の等荷重を与え、幾何学的非線形解析を行なった結果を示す。荷重はもっともリンクリングの発生が起りやすい方向つまり、3本の支えケーブルのうち1本だけが圧縮側になる方向に与えた。

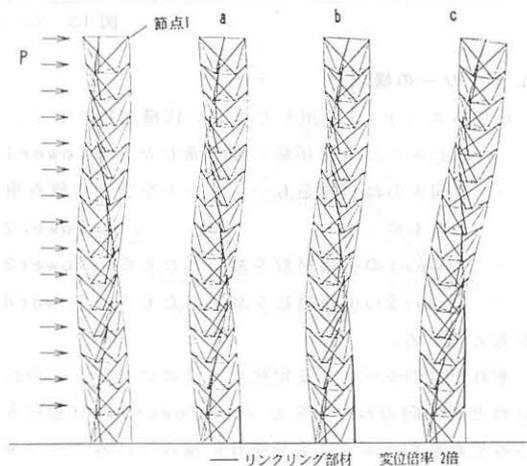
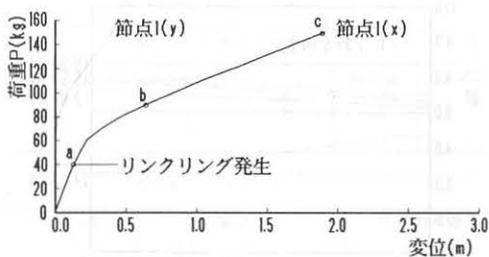


図 17 Tower1の荷重・変位曲線

Tower1はねじれ方向への回転で変位を吸収するためTower2よりもx方向の変位は小さくなっている。ユニット15の圧縮側の⑥部材(支えケーブル)が最初たるみ、荷重の増加にともないそれに続くケーブルがたるんで荷重方向の変位が増大している。荷重と直角方向(y)へも変位しており、ねじれ変形を起こしていることがわかる。

つぎにこの二つのタワーについてリンクリングのないように静的な設計をした結果を示す。なお解析は幾何学的非線形解析を用い、たるみやすい部材には形状

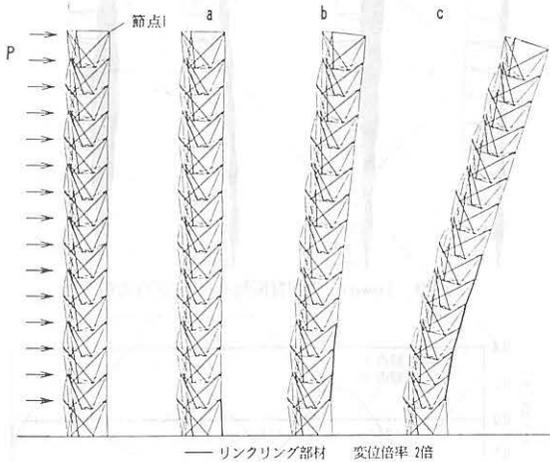
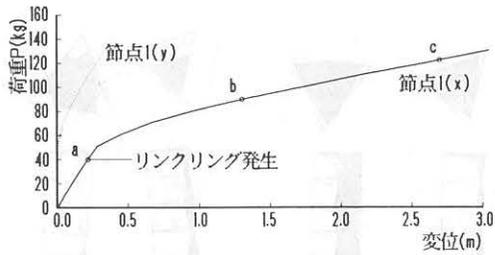


図 18 Tower2の荷重・変位曲線

が変わらない程度の大きな初期張力を導入している。荷重は軽量な構造体なので風荷重を用いた。荷重方向は等荷重を与えたときと同様にリンクリングの発生しやすい方向とし、風力係数は各部材0.8、速度圧は  $120h^{1/4}$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) とした。

部材⑥は基礎に接続した3本の支えケーブルにつながるケーブルでもっとも荷重による張力の変動が大きい部材である。Tower1の部材⑥は螺旋を描くので風下側、風上側というのは支えケーブル（ユニット15の部材⑥）の位置のことである。

表 IV Tower1の荷重

|           | 固定荷重 (kg) | 風荷重 (kg) |       | 静的地震荷重 (kg) (水平震度 0.3) |
|-----------|-----------|----------|-------|------------------------|
|           |           | X        | Y     |                        |
| UNIT1の頂部  | 187.38    | 91.20    | 86.39 | 56.21                  |
| UNIT1の底部  | 177.14    | 80.25    | 82.24 | 53.14                  |
| 略         |           |          |       |                        |
| UNIT15の頂部 | 185.34    | 91.25    | 89.92 | 55.60                  |
| UNIT15の底部 | 153.43    | 76.31    | 72.20 | 46.03                  |
| 合計        | 16117     | 6854     | 6857  | 4835                   |

表 V Tower2の荷重

|           | 固定荷重 (kg) | 風荷重 (kg) |        | 静的地震荷重 (kg) (水平震度 0.3) |
|-----------|-----------|----------|--------|------------------------|
|           |           | X        | Y      |                        |
| UNIT1の頂部  | 187.38    | 90.50    | 88.52  | 56.23                  |
| UNIT1の底部  | 177.14    | 82.40    | 79.62  | 53.14                  |
| 略         |           |          |        |                        |
| UNIT15の頂部 | 185.32    | 92.28    | 89.10  | 55.60                  |
| UNIT15の底部 | 153.43    | 76.31    | 72.203 | 46.03                  |
| 合計        | 16117     | 6854     | 6862   | 4835                   |

表 VI 使用部材

| 圧縮材 (一般構造用炭素鋼鋼管)          |  |            |         |
|---------------------------|--|------------|---------|
| ヤング係数 ( $\text{t/cm}^2$ ) | 単位重量 ( $\text{kg/m}\cdot\text{cm}^2$ ) | 外径 (mm)    | 厚さ (mm) |
| 2100                      | 0.78                                   | 267.4      | 9.0     |
| 断面積 ( $\text{cm}^2$ )     | 長期許容応力 (t)                             | 短期許容応力 (t) |         |
|                           | 73.06                                  | 104.5      | 157.1   |

| 引張材 (スパイラルロープ)            |  |            |          |
|---------------------------|--|------------|----------|
| ヤング係数 ( $\text{t/cm}^2$ ) | 単位重量 ( $\text{kg/m}\cdot\text{cm}^2$ ) | 径 (mm)     | 切断荷重 (t) |
| 1600                      | 0.827                                  | 50         | 215      |
| 断面積 ( $\text{mm}^2$ )     | 長期許容応力 (t)                             | 短期許容応力 (t) |          |
|                           | 1499                                   | 71.7       | 97.7     |

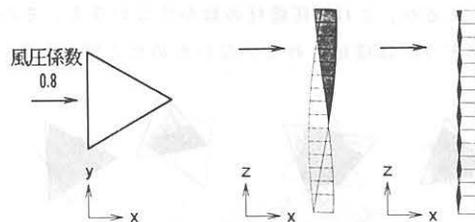


図 19 風荷重方向

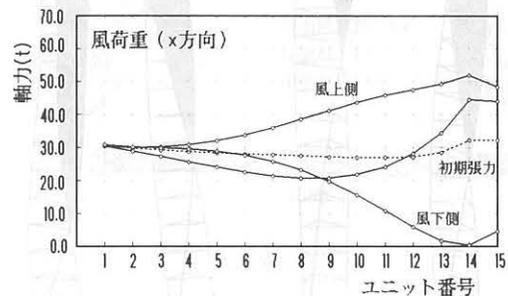


図 20 Tower1の部材⑥の発生張力

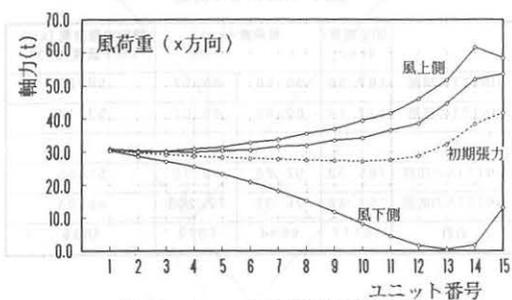


図 21 Tower2の部材⑥の発生張力

つぎに動的な挙動を把握するため、リンクリングが発生しない程度の初期張力を導入した状態でモード解析(非減衰自由振動)を行なった。固有振動モード・固有周期および、タワーの頂部(節点1)と腹の部分(節点2)の2節点の時刻歴の変位を示す。なお固有値解法にはハウスホルダー法を用い、モード解析の初期変位としてはx方向風荷重に対する応答変位を用いた。図22, 23は模式的にモード図をあらわしたもので、基礎部、節点1を含む平面、節点50を含む平面の図も付してある。両モデルとも1次モード、3次モードにねじれが見られ、これ以上に次数があがるとTower1は曲げのモード、Tower2はねじれのモードが多くあらわれる。振動の周期が大きいことからかなり柔らかい構造といえるが、これは圧縮材の数が少ないうえ、その圧縮材どうしは接続されていないためだと思われる。

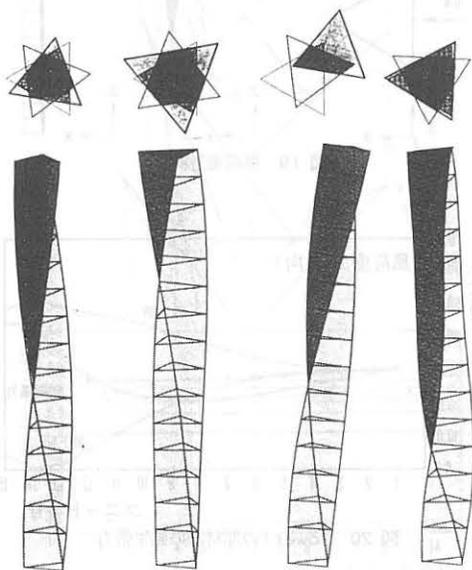


図 22 Tower1の固有振動モード・固有周期

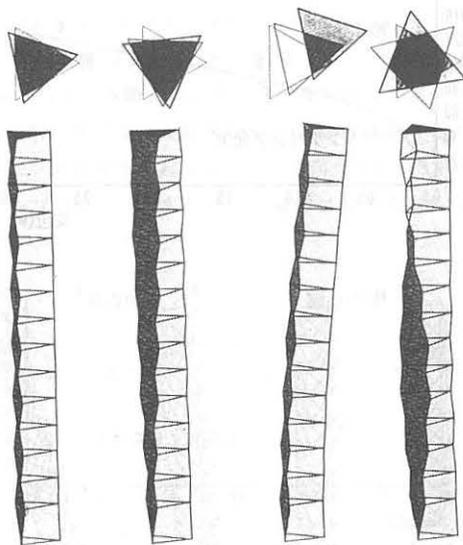


図 23 Tower2の固有振動モード・固有周期

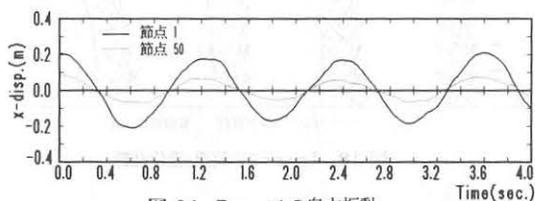


図 24 Tower1の自由振動

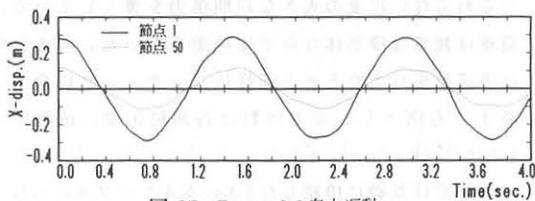


図 25 Tower2の自由振動

#### 4. アーチ状構造物

##### 4.1 単位ユニットの構成

タワーに用いたユニットTは制約条件(上面と底面が正三角形となり、平行)を設けたため自己釣合い応力モードの存在する釣合い形態が簡単に求めることができるが、一般的にテンセグリティのフレームは釣合い形態を求めるのが困難である。そこでここで用いるユニットは、模型により自己釣合い応力モードの存在すると思われる形態に適切な初期張力を導入し幾何学的非線形解析によって釣合い形態を求めた。

アーチを構成するためのユニットとして、図26の位

相のユニットを考える。その際、

- ・ 自己釣合い応力のバラつきが少ないもの
- ・ 圧縮材どうしが接触しない距離に配置されるもの (図26 (b))
- ・ 積み重ねる方向にながさを持つ (部材12と部材34のなす角度 $\alpha$ が小さいもの (図26 (a)))

のを考慮してつぎのユニットA (図27) を用いる。

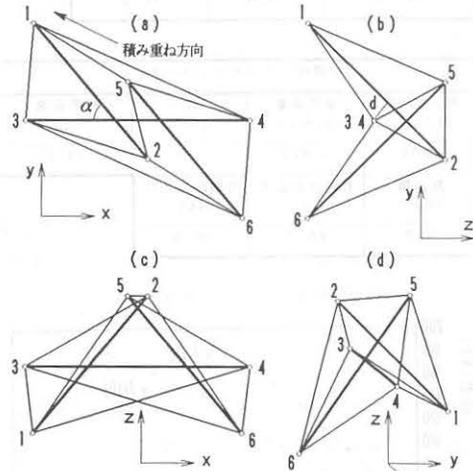
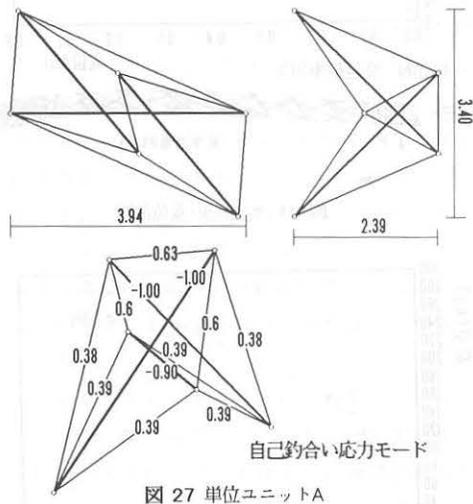


図 26 単位ユニットの構成



自己釣合い応力モード

図 27 単位ユニットA

#### 4.2 アーチの構成

単位ユニットAを応用したアーチ状構造物として、つぎの2種類が考えられる。

- ・ 同じユニットを単純に積み重ねたもの - Arch1
- ・ Arch1の部材数(引張材)を減らしたもの

- Arch2

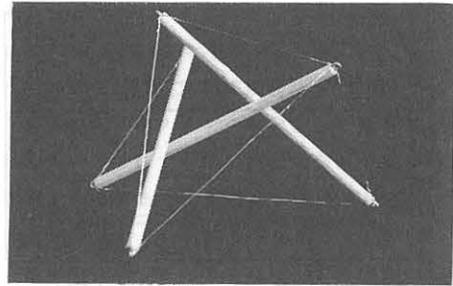
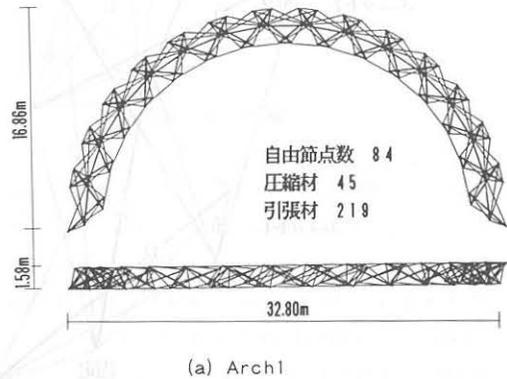
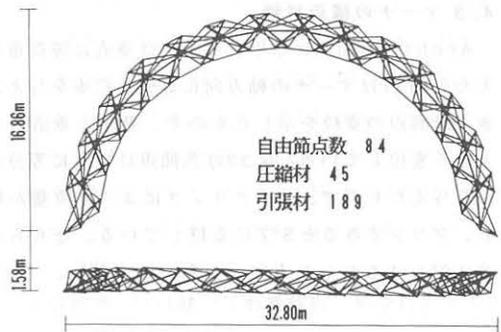


図 28 単位ユニットの模型

圧縮材長、ユニット数は、それぞれ4.0m, 15とした。Arch2は部材数が少ないためねじれが大きく、初期張力のモードもかなり偏ったものになるためここでは取りあげない。



(a) Arch1



(b) Arch2

図 29 アーチ状構造物

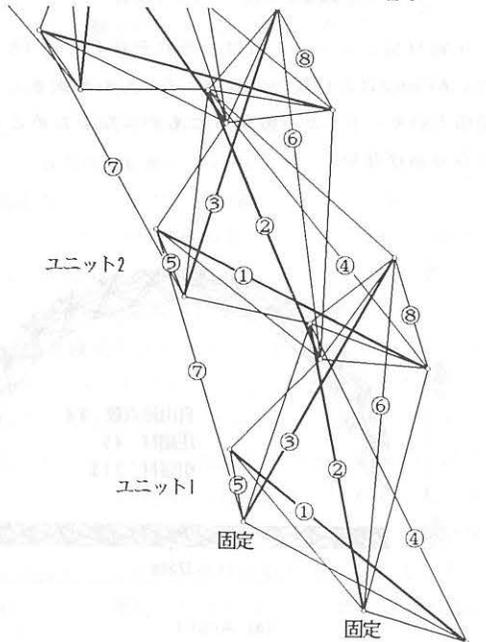
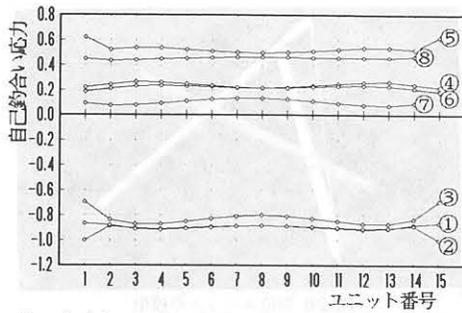


図 30 Arch1の脚部と自己釣り合い応力

33に部材②⑦⑧の発生張力を示す。

表 VII 使用部材

| 圧縮材 (一般構造用炭素鋼鋼管)      |                               |               |            |
|-----------------------|-------------------------------|---------------|------------|
| ヤング係数<br>( $t/cm^2$ ) | 単位重量<br>( $kg/m \cdot cm^2$ ) | 外径<br>(mm)    | 厚さ<br>(mm) |
| 2100                  | 0.78                          | 165.2         | 7.0        |
| 断面積<br>( $cm^2$ )     | 長期許容応力<br>(t)                 | 短期許容応力<br>(t) |            |
| 34.79                 | 50.8                          | 76.2          |            |

| 引張材 (スパイラルロープ)        |                               |               |             |
|-----------------------|-------------------------------|---------------|-------------|
| ヤング係数<br>( $t/cm^2$ ) | 単位重量<br>( $kg/m \cdot cm^2$ ) | 径<br>(mm)     | 切断荷重<br>(t) |
| 1600                  | 0.827                         | 30            | 79.2        |
| 断面積<br>( $mm^2$ )     | 長期許容応力<br>(t)                 | 短期許容応力<br>(t) |             |
| 539                   | 26.7                          | 36.0          |             |

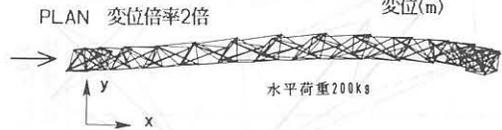
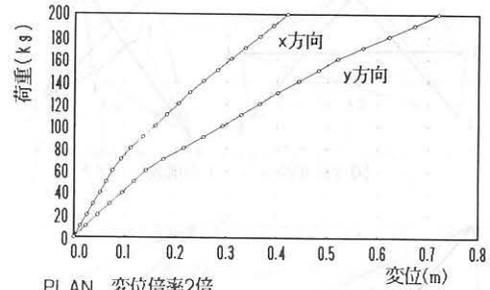


図 31 水平荷重・変位曲線

#### 4.3 アーチの構造挙動

Arch1の各節点に水平、あるいは垂直に等荷重を与えた。図31はアーチの軸方向に等分布荷重を与えたときの最高点の変位を示したもので、荷重と垂直方向に大きく変位している。図32は各節点に垂直に等分布荷重を与えたもので、リンクリングにより変位量が増大し、プランで見るとS字に変位している。どちらの荷重に対してもねじれ方向への変形が大きい。

つぎにこの二つのタワーについてリンクリングのないように静的な設計をした結果を示す。なお解析は幾何学的非線形解析を用い、荷重はタワーと同様に風荷重を用いた。風荷重方向はアーチの軸方向、風力係数は各部材0.8、速度圧は $120h^{1/4}$  ( $kg/cm^2$ )とした。図

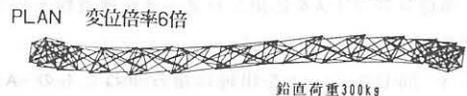
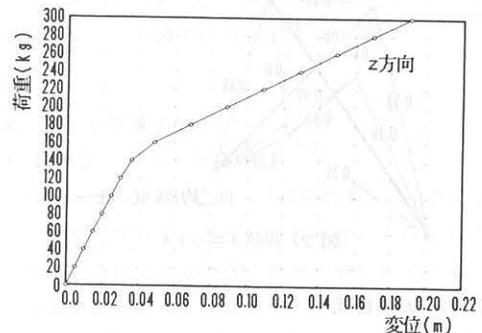


図 32 鉛直荷重・変位曲線

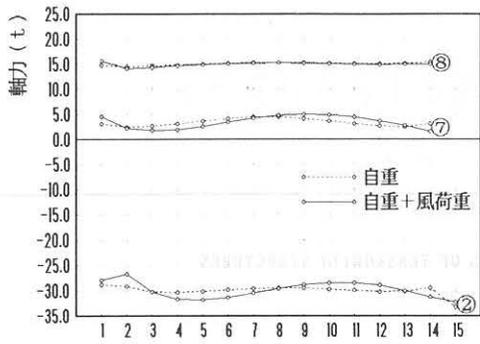


図 33 風荷重時の発生張力 ユニット番号

## 5. まとめ

本研究でテンセグリティシステムの特性をタワー、アーチを設計し応力解析、モード解析等を行なうことにより把握することができた。まず計画段階で得られたことを記すと、

- 1) 立体トラス構造をテンセグリティシステムにするためには、自己釣合い応力モードの存在する形態を見つけ出すことが必要である。
- 2) その形態を手計算で釣合い式を検討することにより求めることができるのは、ごく限られた場合で、それができないときは模型を作り自己応力モードの存在する形態に近い形態を得て、初期張力を想定して幾何学的非線形解析を行えば容易に求めることができる。
- 3) 本論では具体的に示してはいないがテンセグリティのユニットを応用してタワー、アーチ等を構成する場合に圧縮材間の距離が問題となる。互いに接触しないような釣合い形態を見つけださねばならない。
- 4) テンセグリティシステムはねじれを持つ。タワーのように一端が完全に自由なものは形態的な問題は起こらないが、アーチのように両端に拘束がある場合は平面がS字になるという問題が生じる。このため単位ユニットの形をいくつも吟味する必要がある。
- 5) 部材数や自重の低減により、施工性、経済性を期待できる。

以上のことがあげられ、問題点として形態が自由に決められないということがあがるがオブジェ等の魅力的な形が求められる構造物にとっては、ねじれを積極的に

利用したおもしろい形態を得ることができる。つぎに挙動の点で得られたことを記す、

- 6) 水平荷重を受けると圧縮側に圧縮材を持たない場合があり、リンクリングが発生してしまう。そのためケーブルに大きな初期張力が必要となり、圧縮材、引張材とも必要断面が大きくなる。
- 7) 外力を受けるとねじれ変形を起こす。
- 8) 固有周期はかなり大きく、ゆっくりとしたゆれ方をする。固有モードのなかにはねじれのモードが多く見られる。

以上がテンセグリティシステムのタワーおよびアーチの構造特性である。構造体全てをテンセグリティで構成するだけでなく他の構造形式との複合構造としても考えられ、支えケーブルを使うなど工夫をすれば構造としての可能性はより大きくなる。

## 参考文献

- [1] Gernot Minke: TENSEGRITY-TRAGERKE, Zodiac21, 132-145, Edizioni di Comunità, 1972
- [2] R. Buckminster Fuller: DESIGN SCIENCE-ENGINEERING, AN ECONOMIC SUCCESS OF ALL HUMANITY, Zodiac19, 59-74, Edizioni di Comunità, 1969
- [3] C. R. Calladine: BUCKMINSTER FULLER'S "TENSEGRITY" STRUCTURES AND CLERK MAXWELL'S RULES FOR THE CONSTRUCTION OF STIFF FRAMES, Int. Jour. Solids and Structures, Vol. 14, 161-172, 1978
- [4] Rene Motro, Salem Najari, Paul Jouanna: TENSEGRITY SYSTEMS. FROM DESIGN TO REALIZATION, Proc. of 1st Int. Conf. on Light weight Structures in Architecture, Sydney, Aug. 1986
- [5] James Ward, D. L. Richter: THE ARTIFACTS OF R. BUCKMINSTER FULLER, Vol. 4, Garland Publishing, Inc., 1985
- [6] 半谷裕彦, 川口健一: 形態解析一般逆行列とその応用, 培風館, 1991
- [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, 日本膜構造協会, 1991
- [8] 戸川隼人: 有限要素法による振動解析, サイエンス

ス社, 1975

- [9] 高重伯: 複合ケーブル構造とその構造の特性に関する研究, 横浜国立大学学位論文, 1992

---

A STUDY ON STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF TENSEGRITY STRUCTURES

- ON TOWER AND ARCH -

Ryo MURANAKA\*<sup>1</sup>

Yoshihiko HINO\*<sup>2</sup>

SYNOPSIS

A tensegrity system consists of tensile stressed elements which form a continuous sub-system, and compressive stressed elements forming a discontinuous sub-system. This system is realized by replacement tension members of truss structures with cable members, and stabilized by cable tension. Reducing the number of compression members, tensegrity structures can be composed of light weight members, and apply to the large-span structures effectively.

In this paper, we designed tensegrity units composed of three compression members and nine tension members connected by six pin-points, and searched suitable form for real structures, tower and arch. Then we designed Tensegrity Tower and Tensegrity Arch composed some units which are selected as better forms, and studied an structural characteristics of these structures by non-linear analysis and modal analysis.

---

\*<sup>1</sup> Student of Master course, Yokohama National University

\*<sup>2</sup> Student, Yokohama National University