

# テンション材補強ラチスシエルの張力導入解析法

呉 明児\*<sup>1</sup>  
大森 博司\*<sup>2</sup>  
佐々木陸朗\*<sup>3</sup>

## 梗 概

単層ラチスシエルに単位張力安定グリッド構造およびケーブルを導入することによってラチスシエルを補強する。本論文では、補強されたラチスシエルの張力導入過程を、(1)グリッド構造の東材にジャッキを挿入することによる単位構造への張力導入、(2)ケーブル端部を引き延ばすことによる全体構造物への張力導入、と想定し、線形解析による過程(1)と過程(2)における釣合方程式を定式化し、指定された張力を導入するためのジャッキ量とケーブルの張力を決定する方法を示す。

### 1. まえがき

張力膜構造やケーブルドーム等に代表されるテンション構造物は引張材の張力で外乱に抵抗するため、少ない材料を用いて大空間構造物を構成することができる。しかし、テンション構造物は一般的に剛性が低いため風や雪に対して大きな変形が発生することがある。そこで、テンション材と曲げ剛性を持つ梁材を組み合わせることで、軽量でかつ剛性が高い複合構造が提案されている。例えば、立道らのサスペン・ドーム<sup>(1)</sup>、金山らのハイブリッド単層ラチスシエル<sup>(2)</sup>等がある。テンション材の補強効果はテンション材の配置や初期張力に大きく影響され、これらに関する実験や理論研究も多くなされている<sup>(3)</sup>。

テンション材は一般的に設計外力作用時においても張力が抜けないようにするため、あるレベル以上の初期張力導入が必要である。初期張力の一般的な解析法は真柄らの線形代数による方法<sup>(4)</sup>や半谷らの一般逆行列方法による方法<sup>(5)</sup>があり、これらの方法による初期張力の計算はほとんどの場合、簡単にできる。この時初期張力により全体剛性を高める一方、過大な初期張力を避けバランス良く張力導入することが要求されるため、最適初期張力に関する解析法も提案されている<sup>(6)</sup>。

張力導入には、ターンバックルやジャッキにより部材を強制的に伸縮する方法やケーブル端部を引き延ばす方法がよく使われている。目標張力を導入するために施工性を考慮した合理的な張力導入法が

要求される。ターンバックルの配置やジャッキ部材の選択は張力導入の可能性(可制御性)や張力導入の効率を決定する。また、導入手順によって部材に大きな施工応力が発生する恐れがある<sup>(7)</sup>。

川口らは、張力安定トラス構造について、張力導入により構造物の変形と自己釣合応力に着目し、節点変位と部材軸力を制御するためのアクチュエータを有する部材の制御長さを求める方法を提案している<sup>(8)</sup>。加藤らは、静的荷重を受ける平面張弦構造にアクチュエータを導入し、変位の制約条件を満足させる制御について、制御の可能性、必要な初期導入軸力及びアクチュエータの配置方法を提案している<sup>(9)</sup>。

本論文では、図1に示すラチスシエルをテンション材で補強して得られる図2に示すような構造物を取り上げ、グリッド構造及びケーブル材に導入する張力の計算方法を提案する。グリッド構造はテンション材、東材およびトラス材による構成され、安定な構造物になっている。各グリッド構造の東材の上下両節点にそれぞれ二方向にケーブルを取り付け、グリッドおよびケーブルに初期張力を導入する。張力導入の方法はいろいろと考えられ、施工性も含めて検討する必要があるが、この例では、予め以下のように設定する。

- (1) グリッド構造を地面で組立て、ジャッキにより東材に圧縮力を導入することによってテンションロッドに張力を導入する。
- (2) グリッド構造および上下ケーブルをラチスシエルに取り付け、ケーブルの端部を引き延ばすことによって張力導入を完成する。

\*<sup>1</sup>名古屋大学工学研究科建築学専攻・助手・工博

\*<sup>2</sup>同・助教授・工博

\*<sup>3</sup>同・教授・工博

本論文では、このように得られたシステムに対して、線形解析により張力指定及び張力範囲指定を目標とする束材のジャッキ量及び各ケーブルの張力量を決定する方法を示す。

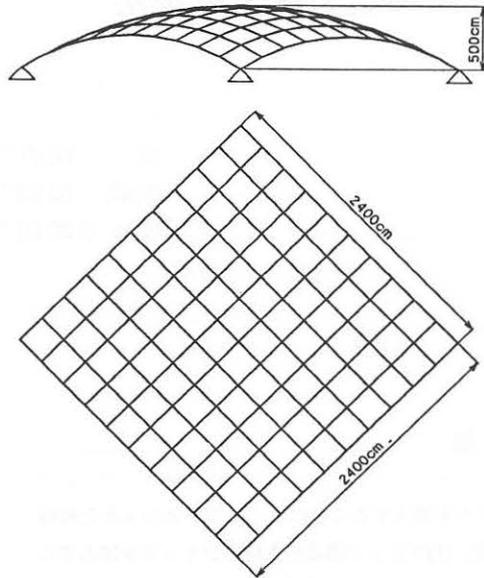
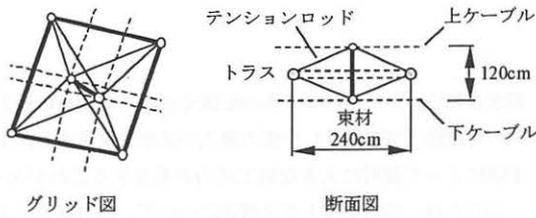
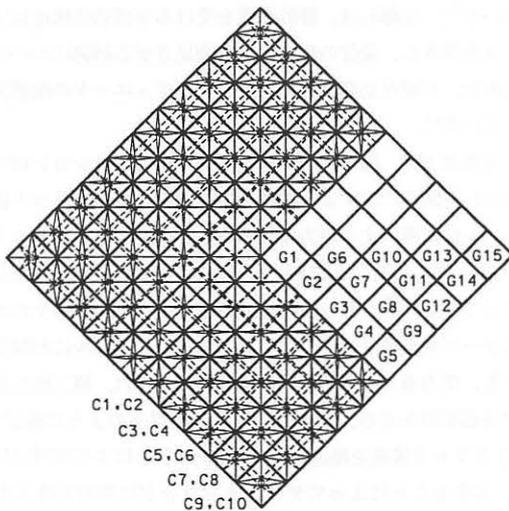


図1 ラチスシェル



(a) 張力安定グリッド構造



(b) 全体図

図2 テンション材補強ラチスシェル (解析モデル: 1/4)

## 2. グリッド構造の張力導入における釣合方程式

図2(a)に示すような引張材(引張軸力に抵抗する部材)と圧縮材(圧縮力に抵抗する部材)によるグリッド構造を考える。引張材と圧縮材を直線材でモデル化し、引張材は圧縮力に抵抗できないものとする。グリッド構造に張力導入することによって大きな節点変位が発生する場合もあるが、ここでは、張力導入による変位は微小であることを仮定し、変形後の座標(グリッドをシェルに取り付けた後の状態)を用いて釣合方程式の方向余弦や長さを計算する。グリッド構造に張力導入し、シェルに取り付けた後における直線材 $a$ (図3)の端点 $i, j$ 点の位置ベクトルを $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 、長さを $l_a$ 、方向余弦を $\lambda_a$ 、節点力を $\bar{\mathbf{f}}_{ia}, \bar{\mathbf{f}}_{ja}$ 、軸力を $\bar{n}_a$ とする。添字“-”はグリッド構造の張力導入状態を意味する。直線材 $a$ の長さを制御できる場合(例えば、ターンバックルやジャッキによる方法等)の伸縮量を $\Delta L_a$ とする。直線材の軸力を次式で表す。

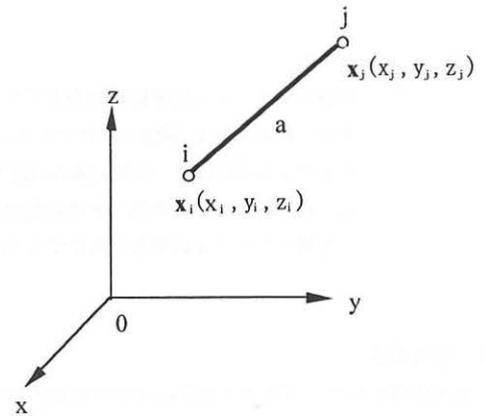


図3 直線材 $a$

$$\bar{n}_a = \frac{E_a A_a}{l_a} (\Delta \bar{l}_a - \Delta L_a) \quad (1)$$

ここに、 $E_a$ はヤング率、 $A_a$ は断面積、 $\Delta \bar{l}_a$ はグリッド張力導入における弾性変形である。 $\bar{\mathbf{d}}_{ia}$ と $\bar{\mathbf{d}}_{ja}$ を節点変位とすると

$$\Delta \bar{l}_a = \left\{ \begin{array}{cc} -\lambda_a^T & \lambda_a^T \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} \bar{\mathbf{d}}_{ia} \\ \bar{\mathbf{d}}_{ja} \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\lambda_a = \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{l_a} \quad (3)$$

直線材 $a$ の釣合方程式を次式で表す。

$$\left\{ \begin{array}{c} -\lambda_a \\ \lambda_a \end{array} \right\} \bar{n}_a = \left\{ \begin{array}{c} \bar{\mathbf{f}}_{ia} \\ \bar{\mathbf{f}}_{ja} \end{array} \right\} \quad (4)$$

式(1)~(4)より次式を得る。

$$\frac{E_a A_a}{l_a} \begin{bmatrix} \lambda_a \lambda_a^T & -\lambda_a \lambda_a^T \\ -\lambda_a \lambda_a^T & \lambda_a \lambda_a^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{d}}_{ia} \\ \bar{\mathbf{d}}_{ja} \end{Bmatrix} - \frac{E_a A_a}{l_a} \begin{Bmatrix} -\lambda_a \\ \lambda_a \end{Bmatrix} \Delta L_a = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_{ia} \\ \mathbf{f}_{ja} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} -\lambda_e \\ \lambda_e \end{Bmatrix} T_r = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_{ie} \\ \mathbf{f}_{je} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここでは、自重を考慮していない。グリッド構造の張力導入過程には、外力が存在しないので、式(5)をすべての直線材要素に適用し、すべてのグリッド構造に拡大し、合成すると次式を得る

$$\mathbf{K}_g \bar{\mathbf{d}}_g = \mathbf{F} \Delta \mathbf{L} \quad (6)$$

ここに、グリッド構造の全体自由度数を  $\bar{N}$ 、グリッド構造の制御部材数を  $M$  とすると、 $\mathbf{K}_g$  は  $(\bar{N} \times \bar{N})$  剛性マトリクス、 $\mathbf{F}$  は  $(\bar{N} \times M)$  係数マトリクス、 $\bar{\mathbf{d}}_g$  は  $(\bar{N} \times 1)$  変位マトリクス、 $\Delta \mathbf{L}$  は  $(M \times 1)$  部材伸縮量ベクトルである。

式(6)から変位  $\bar{\mathbf{d}}_g$  は次式のように求められる。

$$\bar{\mathbf{d}}_g = \mathbf{K}_g^+ \mathbf{F} \Delta \mathbf{L} + [\mathbf{I} - \mathbf{K}_g \mathbf{K}_g^+] \beta \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{K}_g^+$  は Moor-Penrose 一般逆行列、 $\beta$  は任意ベクトルである。張力導入過程におけるグリッド構造は6個の剛体運動自由度を除けば安定構造であることを前提とすると、式(7)の右辺の第2項は6個の剛体運動を示している。ここでは、弾性変形を求めるため、剛体運動項を考慮しないので、 $\beta = \mathbf{0}$  とおく。

式(2)を式(1)に代入し、すべての直線材の軸力を一つの式にまとめると次式になる。

$$\bar{\mathbf{n}} = \mathbf{A}_g \bar{\mathbf{d}}_g + \mathbf{B}_g \Delta \mathbf{L} \quad (8)$$

式(7)を式(8)に代入すると次式を得る。

$$\mathbf{G}_g \Delta \mathbf{L} = \bar{\mathbf{n}} \quad (9)$$

ここに、

$$\mathbf{G}_g = \mathbf{A}_g \mathbf{K}_g^+ \mathbf{F} + \mathbf{B}_g \quad (10)$$

### 3. 全体構造の張力導入における釣合方程式

グリッド構造に張力を導入した後、すべてのグリッド構造およびケーブルをラチスシェル構造に取り付け、ケーブルに張力を導入する。ここでも、張力導入過程における変位が微小であることを仮定する。

#### (1) ケーブル材

ケーブルの張力はケーブル境界部の引き伸ばしによって導入される。ケーブルの摩擦を考慮しなければ、各ケーブルの張力は一定である。この場合、 $r$  ( $r=1,2,\dots,R$ ,  $R$ :ケーブル総数) 本目のケーブルの  $e$  ( $e=1,2,\dots,G_r$ ,  $G_r$ : $r$  番目ケーブルの要素総数) 番目ケーブル要素の釣合方程式は次式で表せる。

ここに、 $\lambda_e$  は要素  $e$  の方向余弦、 $T_r$  は  $r$  番目ケーブルの張力、 $\mathbf{f}_{ie}$  と  $\mathbf{f}_{je}$  は節点力である。

#### (2) ラチスシェル

ラチスシェルの部材を梁要素として扱う。全体座標系における梁要素  $b$  の剛性マトリクスを  $\mathbf{k}_b$ 、両端の節点の変位を  $\mathbf{d}_b$ 、節点力を  $\mathbf{f}_b$  とする。材料および変形を線形と仮定すると次式が成立する。

$$\mathbf{k}_b \mathbf{d}_b = \mathbf{f}_b \quad (12)$$

#### (3) グリッド構造

ケーブルに張力を導入する前に、グリッド構造の各部材に既に  $\bar{\mathbf{n}}$  の軸力が導入されている。グリッド構造の直線材  $a$  の節点力を  $\mathbf{f}_{ia}$  と  $\mathbf{f}_{ja}$ 、軸力を  $n_a$ 、ケーブルに張力導入による端点  $i$ 、 $j$  点の節点変位を  $\mathbf{d}_{ia}$  と  $\mathbf{d}_{ja}$  とすると次式が成立している。

$$n_a = \frac{E_a A_a}{l_a} \begin{Bmatrix} -\lambda_a^T & \lambda_a^T \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_{ia} \\ \mathbf{d}_{ja} \end{Bmatrix} + \bar{n}_a \quad (13)$$

$$\frac{E_a A_a}{l_a} \begin{bmatrix} \lambda_a \lambda_a^T & -\lambda_a \lambda_a^T \\ -\lambda_a \lambda_a^T & \lambda_a \lambda_a^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_{ia} \\ \mathbf{d}_{ja} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\lambda_a \\ \lambda_a \end{Bmatrix} \bar{n}_a = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_{ia} \\ \mathbf{f}_{ja} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

ここに、 $\bar{n}_a$  はグリッド構造の張力導入における軸力である。微小変形の仮定のため、式(13)(14)の  $l_a$  と  $\lambda_a$  は式(5)の長さと同方向余弦と近似的に同じものであることを利用している。式(14)をすべての部材およびグリッドに拡大し、 $\bar{\mathbf{n}}$  は自己釣合軸力のためこれらの項を合成するとゼロになることを考えると、次式が得られる。

$$\mathbf{K}_g \mathbf{d}_g = \mathbf{f}_g \quad (15)$$

ここに、 $\mathbf{d}_g$  はケーブルに張力導入によるグリッド構造の変位、 $\mathbf{f}_g$  は節点力を表す。

式(11)をすべてのケーブル要素に、式(12)をすべての梁要素にそれぞれ適用し、式(15)と合成すると次式が得られる。

$$\mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{C} \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (16)$$

ここに、 $\mathbf{K}$  は  $(N \times N)$  剛性マトリクス ( $N$ :全体自由度数)、 $\mathbf{d}$  は  $(N \times 1)$  変位ベクトル、 $\mathbf{C}$  はケーブル要素の方向余弦から構成される  $(N \times R)$  マトリクス、 $\mathbf{T}$  は  $(R \times 1)$  ケーブル張力ベクトル、 $\mathbf{f}$  は  $(N \times 1)$  外力ベクトルである。

自己釣合張力を扱う場合、外力  $\mathbf{f} = \mathbf{0}$ 。式(16)は次式になる。

$$\mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{C} \mathbf{T} \quad (17)$$

### 4. 張力指定の制約条件

張力を導入した各引張材および圧縮材の軸力は設計値あるいは

設計範囲にならなければいけない。また、張力導入のためのジャッキ部材の伸縮量およびケーブルの引張力にも制御範囲がある。ここで、制約条件を以下の等式及び不等式で表す。

$$n_i = n_{i0} \quad i=1,2,\dots,S \quad (18)$$

$$n_{j1} \leq n_j \leq n_{j2} \quad j=1,2,\dots,L \quad (19)$$

$$A_{k1} \leq A_k \leq A_{k2} \quad k=1,2,\dots,Q \quad (20)$$

$S$  は張力指定部材数、 $L$  は張力範囲指定部材数、 $Q$  は張力範囲指定ケーブル本数と伸縮量範囲指定部材本数の和である。 $A_k$  はベクトル  $\Lambda$  の要素で、 $\Lambda$  は  $\Delta L$  と  $T$  から構成される。

$$\Lambda = \begin{Bmatrix} \Delta L \\ T \end{Bmatrix} \quad (21)$$

式(9)(13)を利用し、式(18)~(20)をマトリクス方程式に書くと

$$A_{g1} d + G_{g1} \Delta L = n_0 \quad (22)$$

$$n_1 \leq A_{g2} d + G_{g2} \Delta L \leq n_2 \quad (23)$$

$$\Lambda_1 \leq S \Lambda \leq \Lambda_2 \quad (24)$$

ここに、 $A_{g1}$  と  $G_{g1}$  はそれぞれ  $(S \times N)$  型と  $(S \times M)$  型マトリクス、 $n_0$  は  $(S \times 1)$  指定した張力ベクトルである。 $A_{g2}$  と  $G_{g2}$  はそれぞれ  $(L \times N)$  型と  $(L \times M)$  型マトリクス、 $n_1$  と  $n_2$  は  $(L \times 1)$  張力範囲ベクトルである。 $S$  は  $(Q \times (M + R))$  型係数マトリクス、 $\Lambda_1$  と  $\Lambda_2$  は  $(Q \times 1)$  変数範囲ベクトルである。

##### 5. 張力導入の解析

ここに、全体構造は安定構造であることを前提とする。式(17)より

$$d = K^{-1} C T \quad (25)$$

式(25)を式(22)に代入すると

$$G \Lambda = n_0 \quad (26)$$

ここに、 $\Lambda$  は式(21)に定義されている。マトリクス  $G$  は次式である。

$$G = [G_{g1} \quad A_{g1} K^{-1} C] \quad (27)$$

式(26)が解を持つ条件、つまり式(22)を満足する制御可能な条件は次式で表すことができる。

$$[I - G G^+] n_0 = 0 \quad (28)$$

式(28)が成立する場合、式(26)の解は次のように求められる。

$$\Lambda = [I - G^+ G] \alpha + G^+ n_0 \quad (29)$$

式(28)(29)において、 $G^+$  は Moore-Penrose 一般逆行列である。式(29)の  $\alpha$  は任意なベクトルである。

$[I - G^+ G] = 0$  の場合、式(29)から  $\Lambda$  を決める。 $\Lambda$  により各部材の軸力を求め、制御条件(23)(24)が満足されれば、制御部材の配置による張力導入が可能である。制御条件が満足されなければ、制御部材の配置または制御条件を修正する必要がある。

$[I - G^+ G] \neq 0$  の場合は、 $\alpha$  を求める必要がある。ここでは、最適化問題として  $\alpha$  を決定する。目的関数としてはいろいろがあるが、ここでは、以下の関数を採用する。

$$f = w_1 \cdot \Lambda^T \cdot \Lambda + w_2 \cdot \sum_{r=1}^{R-1} (T_{r+1} - T_r)^2 \quad (30)$$

ここに、 $w_1$  と  $w_2$  は重み係数である。式(30)を次のように表示する。

$$f = \Lambda^T \cdot V \cdot \Lambda \quad (31)$$

$V$  はマトリクスである。制約条件としては、式(23)(24)を採用する。式(29)を式(31)に代入する。

$$f = \alpha^T P \alpha + Q \alpha + R \quad (32)$$

ここに、

$$P = [I - G^+ G]^T \cdot V \cdot [I - G^+ G] \quad (33)$$

$$Q = (G^+ n_0)^T \cdot (V + V^T) \cdot [I - G^+ G] \quad (34)$$

$$R = (G^+ n_0)^T \cdot V \cdot (G^+ n_0) \quad (35)$$

制御条件式(23)を考える。式(25)(29)を式(23)に代入する。

$$n_1 \leq [G_{g2} \quad A_{g2} K^{-1} C] [I - G^+ G] \alpha + [G_{g2} \quad A_{g2} K^{-1} C] G^+ n_0 \leq n_2 \quad (36)$$

式(36)を次式に書き直す。

$$\tilde{n}_1 \leq C_1 \alpha \leq \tilde{n}_2 \quad (37)$$

ここに、

$$\tilde{n}_1 = n_1 - [G_{g2} \quad A_{g2} K^{-1} C] G^+ n_0 \quad (38)$$

$$\tilde{n}_2 = n_2 - [G_{g2} \quad A_{g2} K^{-1} C] G^+ n_0 \quad (39)$$

$$C_1 = [G_{g2} \quad A_{g2} K^{-1} C] [I - G^+ G] \quad (40)$$

同様に、制御条件式(24)を次式に書き換える。

$$\tilde{\Lambda}_1 \leq C_2 \alpha \leq \tilde{\Lambda}_2 \quad (41)$$

ここに、

$$\tilde{\Lambda}_1 = \Lambda_1 - \mathbf{S}\mathbf{G}^+\mathbf{n}_0 \quad (42)$$

$$\tilde{\Lambda}_2 = \Lambda_2 - \mathbf{S}\mathbf{G}^+\mathbf{n}_0 \quad (43)$$

$$\mathbf{C}_2 = \mathbf{S}[\mathbf{I} - \mathbf{G}^+\mathbf{G}] \quad (44)$$

張力導入解析問題は次の2次計画問題になる。

$$f = \alpha^T \mathbf{P}\alpha + \mathbf{Q}\alpha + \mathbf{R} \rightarrow \min \quad (45)$$

$$\text{subject to } \tilde{\mathbf{n}}_1 \leq \mathbf{C}_1\alpha \leq \tilde{\mathbf{n}}_2, \quad \tilde{\Lambda}_1 \leq \mathbf{C}_2\alpha \leq \tilde{\Lambda}_2$$

以上から解を求めれば、制御部材配置による張力導入が可能である。

条件式(28)が満足されない場合を考える。つまり、指定した制御部材の配置に対しては張力制御式(22)を満足する $\Lambda$ が存在しない。この場合は、制御部材を変えるか、或いは $\Lambda$ の近似解を求めるか、と考える。例えば、式(26)より $\Lambda$ の最小2乗近似解を次式で求める。

$$\Lambda = \mathbf{G}^+\mathbf{n}_0 \quad (46)$$

この場合、誤差の確認及び条件式(23)(24)の検討が必要である。

## 6. 数値解析

ここでは、図1と図2に示すモデルの1/4(図2)について張力導入解析を行う。表1と表2は解析ためのパラメータを示している。図2(b)のG1~G15はグリッド構造の番号、C1~C10はケーブルの番号である。

表1 ラチスシェル

スパン	24m
ライス	5m
部材サイズ	P-165.2φ×4.5 t
境界	4点ピン支持

表2 グリッド構造

寸法	2.4m×2.4m, 束材長さ1.2m(概ね)
トラス材	E=2.1×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> , A=7.349 cm <sup>2</sup>
テンションロッド	E=2.1×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> , A=3.464 cm <sup>2</sup>
束材	E=2.1×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> , A=7.349 cm <sup>2</sup>
上下ケーブル材	E=1.4×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> , A=2.810 cm <sup>2</sup>

各ケーブル材になるべく等しくかつ小さい張力を導入するために、式(30)の目標関数の重み係数 $w_1$ と $w_2$ を共に1.0とする。また、最終張力導入目標を以下のように設定する。

(1)束材：圧縮力-4000kgf (G15)

-3500kgf (G5, G9, G12, G14)

-3000kgf (その他のグリッド)

(2)テンション材：1000kgf~5000kgf

(3)ケーブル材：1500kgf~5000kgf

端部のグリッド(G5, G9, G12, G14)及び角部のグリッド(G15)はケーブル材より束材に大きな圧縮力を受けているので、ここでは、

表3 ケーブル導入張力(kgf)

番号	C1~C10
導入張力	1500

表4 グリッド構造の部材の軸力

グリッド	ジャッキ量(cm)	束材軸力(kgf)	テンション材軸力(kgf)	トラス材軸力(kgf)
G1	0.5726	-3000 (-3151)	2141~2341 (2363~2367)	-3501~-3391 (-3154~-3154)
G2	0.5834	-3000 (-3186)	2063~2394 (2391~2403)	-3680~-3447 (-3207~-3188)
G3	0.5968	-3000 (-3205)	2040~2416 (2416~2435)	-3700~-3532 (-3266-3208)
G4	0.6099	-3000 (-3192)	2011~2475 (2422~2450)	-3720~-3467 (-3314-3194)
G5	0.6184	-3500 (-3118)	1894~2452 (2391~2428)	-3744~-3393 (-3323~-3121)
G6	0.5946	-3000 (-3220)	1931~2445 (2413~2447)	-3736~-3590 (-3242~-3242)
G7	0.6087	-3000 (-3242)	1875~2494 (2430~2490)	-3804~-3668 (-3304~-3264)
G8	0.6224	-3000 (-3228)	1809~2603 (2428~2514)	-3861~-3551 (-3353~-3251)
G9	0.6270	-3500 (-3130)	1665~2635 (2370~2483)	-3799~-3453 (-3339~-3154)
G10	0.6240	-3000 (-3265)	1855~2556 (2441~2543)	-3829~-3827 (-3330~-3330)
G11	0.6390	-3000 (-3252)	1844~2679 (2431~2579)	-3889~-3654 (-3382~-3319)
G12	0.6396	-3500 (-3128)	1747~2724 (2344~2537)	-3805~-3486 (-3342~-3195)
G13	0.6561	-3000 (-3242)	1936~2811 (2414~2628)	-3882~-3742 (-3376~-3376)
G14	0.6569	-3500 (-3110)	1901~2896 (2313~2591)	-3794~-3399 (-3332~-3246)
G15	0.6580	-4000 (-2972)	1488~3276 (2199~2559)	-3592~-3148 (-3198~-3196)

予め束材の張力導入目標値を大きめに設定している。

表3と表4に解析結果を示している。表3に示すようにすべてのケーブル材に1500kgfの張力が導入されている。表4は各グリッド構造の束材のジャッキ量、束材軸力、テンション材軸力範囲およびトラス材軸力範囲を示している。括弧内の数値はグリッド構造に張力導入後の状態を示している。各グリッドの寸法に若干の差があるので、導入される張力がばらついているが、束材、テンション材およびケーブル材に目標張力が導入されている。

## 7. 結論

本論文では、単位張力グリッド構造を予め組立て、全体構造物に取り付け、最後に全体の張力導入を実施することでテンション材補強ラチスシェルを施工するプロセスを考えた。このような手法は特に複雑な張力構造の張力導入に有効であることが予想される。本論文では、テンション材補強ラチスシェルを例として取り上げ、以上のような張力導入過程を考慮し、ケーブル材・トラス材および曲げ材による構成される構造物の張力導入線形解析法を提案した。

目標関数と付帯条件を指定すれば、理論的に最適手法だけで張力導入解析ができる。しかし、本論文に示されている例では、変数の数や制約条件の数が多いため、そのまま最適化すればかなりの計算量が必要であろう。本論文では、張力指定による変数を低減し、簡単な最適化手法を用いる方法を示した。

本論文では、指定した張力を導入することだけを目標としている。グリッド構造の形状や導入する張力はケーブル補強ラチスシェルの構造性能に大きな影響があると予想される。これらの問題は今後の課題であろう。

## 参考文献

- (1) 立道郁生, 川口衛等: サスペン・ドームの開発, (その1) 構造システムの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), p.p.1809-1810, 1992.8
- (2) 金山 敬, 半谷裕彦: 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, p.p.79-86, 1999.8
- (3) 斎藤等: Tensegric Truss Arch (Type1)の構造特性に関する研究(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), p.p.1033-1038, 2000.9
- (4) 真柄栄毅, 国田二郎, 川股重也: 混合法によるケーブルネットの解析 その(1) 不安定架構の性質およびリンク機構の解析, 日本建築学会論文報告集, 第218号, 昭和49年4月, p.p.37-48, 1974
- (5) 半谷裕彦, 川口健一: 形態解析, 培風館, 1991
- (6) 杉内章内, 吳明児, 川口健一, 半谷裕彦: ケーブル構造の張力導入の最適化—異なる手法の比較—, 膜構造研究論文集, No.12, pp.43-49, 1998.12
- (7) 大崎純等: ケーブル補強骨組構造物の張力導入法(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), p.p.1017-1020, 2000.9
- (8) 川口健一, 半谷裕彦: アクチュエータやターンバックルを有するトラス構造の逆解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), p.p.1991-1992, 1994.9
- (9) 加藤史郎, 中澤祥二: 静的荷重を受ける平面張弦構造の軸力決定法に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, p.p.147-154, 1995.8

---

## Pre-Stress Introduction Analysis of a Lattice Shell with Tensile Members

Minger Wu<sup>\*1</sup>  
Hiroshi Ohmori<sup>\*2</sup>  
Mutsuro Sasaki<sup>\*3</sup>

## SYNOPSIS

In this paper, the pre-stress introducing process of a lattice shell with tensile members is analyzed. The lattice shell is reinforced with tensile unit structures and cables. Every unit structure consists of tensile members and compressive members and is stabilized by introducing pre-stress through elongating a compressive member before it is installed to the lattice shell. Cables are also used to improve the out-plane stiffness of lattice shell. In this paper, the equilibrium equations for unit structures and for the whole structure are formulated and the elongation of every jacking element and the tensile force of every cable are determined in order to introduce proper pre-stress into the system.

---

<sup>\*1</sup>Research Associate, Dr.-Eng., Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>\*2</sup>Associate Professor, Dr.-Eng., Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>\*3</sup>Professor, Dr.-Eng., Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya University