MFM 概念とそれを応用したモバイルブリッジの 研究開発

1. まえがき

近年、Holnicki ら^{1),2)}がパンタグラフ状のトラス部 材からなるショックアブソーバーシステムを持つマルチ フォールディング概念 (MFM) を提唱し、基礎的なア クティブ制御実験を行っている。

このショックアブソーバー機能を持ったスマート構造 の一例として、屋根トラスを水平方向に重ね合わせたよ うなパンタグラフ型トラス構造を考えると、水平方向に 圧縮力を受けるとき、各々の屋根トラスは飛び移り座屈 を生じて、順次折りたたまれていく収納過程に入る。ま た、収納された状態から引張り力を与えることにより展 開過程となる展開構造物でもある。

ここでは、この構造の折りたたみ機構をコントロー ルすることを目的として、シミュレーションによる折り たたみ解析の結果について報告する。また、この MFM 概念を応用した収納・展開構造の一例として、迅速施工 可能な展開型の応急橋についても報告する。

2. エネルギー法による解析解

図 -1 に示すような周期的パンタグラフ型トラス構造の非線形つりあい系をエネルギー法により定式化する。この周期トラス構造の振幅を L とし、半周期長を $h_i = \gamma_i L$ と仮定する。トラス部材の初期長さは $\ell_i = \sqrt{L^2 + h_i^2} = L\sqrt{1 + \gamma_i^2}, (i = 1, \dots, n)$ と表現され、n は周期の数である。変形後の部材長は $\hat{\ell}_{i,k}$ は節点変位の関数として以下のように表わされる。

$$\hat{\ell}_{i,k} = L\sqrt{1 + (\gamma_i - \bar{v}_{i,k} + \bar{v}_{i+1,k})^2}, = L\sqrt{1 + (\gamma_i - q_{i,k})^2}, for k = a, b; i = 1, \cdots, n$$
(1)

ここで、k = a, b は対称位置である上および下節点を 意味し、 $\bar{v}_i = v_i/L$,かつ $q_{i,k} = \bar{v}_{i,k} - \bar{v}_{i+1,k}$ である。

計算の簡便化のためにグリーンひずみの定義を用いる と、各々のトラス部材の伸びひずみ $\varepsilon_{i,k}$ は



東北学院大学	正員	中沢正利
広島大学大学院	正員	有尾一郎
施工技術総合研究所	正員	谷倉泉
施工技術総合研究所	正員	小野秀一



図-1 多層折り畳みトラス構造の基本モデル

$$= \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + (\gamma_i - \bar{v}_{i,k} + \bar{v}_{i+1,k})^2}{1 + \gamma_i^2} - 1 \right\}$$

= $\frac{1}{2} \frac{q_{i,k} (q_{i,k} - 2\gamma_i)}{1 + \gamma_i^2},$ (2)
for $k = a, b; \quad i = 1, \cdots, n$

と表わされる。これらより、この構造系の総ポテンシャ ルエネルギー *U* は

$$U \equiv \sum_{i=1}^{n} \sum_{k} \frac{EA_{i}\ell_{i}}{2} \left(\varepsilon_{i,k}^{2}\right) - fv_{1}$$
$$= \sum_{i=1}^{n} \sum_{k} \frac{\beta_{i}L}{8} \left\{q_{i,k}^{2} \left(q_{i,k} - 2\gamma_{i}\right)^{2}\right\} - f\bar{v}_{1}L$$

と得られる。ここで、 f は節点 1 に作用する集中荷重 であり、 $\beta_i = EA_i / (1 + \gamma_i^2)^{3/2}$ である。 つりあい方程 式は、以下に示すポテンシャルエネルギーの停留条件よ り得られる。

$$F_{i,k} = \frac{\partial U}{\partial v_{i,k}} = \frac{\partial U}{\partial \bar{v}_{i,k}} \frac{\partial \bar{v}_{i,k}}{\partial v_{i,k}} = 0$$
(3)

いま、 $\beta_i = \beta$ かつ $\gamma_i = \gamma$ のような単純な場合を仮定 すると、つりあい方程式より、二つの変形解が次のよう

Key Words: Multi-Folding Microstructures, Pantographic truss, Numerical Simulation, Mobile Bridge 〒 985-8537 多賀城市中央一丁目 13-1・TEL 022-368-7444・FAX 022-368-7070



 $\square -2$ Analytical solution



$$f = \frac{\beta}{27} \bar{v}_1 \left(\bar{v}_1 - 3\gamma \right) \left(\bar{v}_1 - 6\gamma \right), \text{ for primary path}$$

$$f = \pm \frac{\beta}{3\sqrt{3}} \left(\bar{v}_1 - 2\gamma \right) \left(\bar{v}_1 - 4\gamma \right)$$

$$\cdot \sqrt{-(\bar{v}_1 - \gamma)(\bar{v}_1 - 5\gamma)}, \text{ for bifurction paths}$$

for bifurcation paths

この基本経路の極値は $\bar{v}_1 = (3 \mp \sqrt{3}) \gamma$ に対して $f = \pm \frac{2}{3\sqrt{3}} \beta \gamma^3$ であることは $\frac{\partial f}{\partial \bar{v}_1} = 0$ から容易に得られる。また、この点はHill Top 分岐点である。

この解析解としてのつりあい経路を図-2 に示す。つ りあい経路の分岐点 (BP 点) から二つの分岐経路が生 じており、荷重に対して対称な軌跡を描いている。

3. 数値計算手法の概要と接触問題

この種の問題は分岐挙動を含むため、次のような疑似 的な動的問題に定式化した上で、ルンゲ・クッタ法によ り増分非線形問題を解いている。

$$[M]\ddot{\boldsymbol{v}}(t) + [C]\dot{\boldsymbol{v}}(t) + F(\bar{\boldsymbol{v}}(t)) = \boldsymbol{f}$$

ここで、 $F(\bar{v}(t))$ には変位による幾何学的非線形が含まれる。この際の質量、減衰定数および時間間隔は数値解析を安定化させるように設定しており、荷重制御および変位制御手法の両者が適用可能である。

また、このトラス構造の中心軸上の節点1が左方向に 圧縮力を受ける場合、節点1が移動して節点3を通り 過ぎることのないよう、節点同士の接触問題を考慮し た。具体的には、節点1-3間、2a-4a間、2b-4b間に 仮想のバネ要素を追加し、節点間距離がある値より小さ くなった場合にのみバネ剛性が有意な値を持つような非 線形計算を行っている。



⊠−3 Numerical equilibrium path of 3 layer truss with contact effect

4. シミュレーション結果

図-3 にパンタグラフ型トラス構造の場合の数値解析 結果を示す。まず、解析解と一致する数値解析結果が得 られている。

次に、荷重制御型解析によるシミュレーションでは、 分岐点 (BP) 以降は飛び移りによる多段階分岐経路を示 しているが、抵抗力 (荷重) が減少するような挙動は無 い。

ところで、この三層トラス構造ではトラス各層での座 屈が可能であり、分岐後経路は3種類に大きく分けら れる。図-3の青線は、上層トラスが先に座屈する場合 の変位制御型シミュレーション結果を示している。上層 トラスがBP点において一旦座屈すると、上層と中層の トラス部材は接触したまま連動して動く(d点以降)た め、次に下層トラスが座屈することになり、最後は3本 のトラスが同調して動くため、図中のg点以降は伸び剛 性は単独の場合の3倍となっていることが分かる。

5. 展開構造およびモバイルブリッジへの応用

このような折り畳み構造系における荷重と変位の非線 形関係を利用した、折り畳み-展開可能なトラス構造の 適用例として、例えば迅速に展開が可能な応急橋への応 用は今後有用と考えられる。

参考文献

- J. Holnicki-Szulc, P. Pawlowski and M. Wiklo: Highperformance impact absorbing materials - the concept, design tools and applications, *Smart Materials and Structures*, No.12, pp.461-467, 2003.
- 有尾一郎, P.Pawlowski, J.Holnicki: 災害用の軽量展開構 造系の設計概念と構造解析, 第 VI 部門, 第 62 回土木学会 全国大会, 2007.