

Dynamic Relaxation 法に基づいたテンセグリティ構造形状決定法の収束性

建築都市デザイン学科 2280080041-6 高藤 永
(指導教員 張 景耀)

1. はじめに

テンセグリティは、連続な引張材と不連続な圧縮材によって構成されるピン接合構造物である。部材に張力を導入することによって、自己釣合状態および安定性を維持できる。形状と軸力分布の強い依存性によってテンセグリティ構造の自己釣合形状を決定することは難しい。

テンセグリティの形状決定に関して、多くの手法が提案されている。中でも、Dynamic Relaxation 法に基づいた形状決定法は、部材数が多く、複雑なテンセグリティ構造に有効である。しかし、自己釣合状態に収束するまでの計算コストが高い。これは、減衰を考えていない点などが理由として挙げられる。

したがって、本研究では、テンセグリティに人工的に減衰を与え、減衰係数と質量の関係を調べるとともに、固有モードに着目し、自己釣合状態に収束するまでの収束性を改善する手法を提案する。

2. 概要

本研究は、テンセグリティタワーを対象モデルとし、各時刻ステップに対してのモード係数を求め、影響の大きい固有モードを減衰させることで収束性を改善する。

2. 1 Dynamic relaxation method

Dynamic relaxation method は、仮定の慣性力や減衰力を与えることによって、人工的に静的なシステムを動的なものに変換し、構造物の全ポテンシャルエネルギーを最小化することによって、静的な釣合状態を見つける明示的な反復手法である。

質量行列を $[M]$ 、減衰係数を C 、不釣合力を $\{R\}$ と定義すると、動的な釣合い方程式は、

$$[M]\{\dot{V}^t\} + C\{V^t\} + \{R\} = 0 \quad (1)$$

(1)式より、微小時間 Δt 後の変形速度 $V^{t+\Delta t}$ は、

$$\{V^{t+\Delta t}\} = \{V^t\} - (\{R\} + C\{V^t\})\Delta t \cdot [M^{-1}] \quad (2)$$

微小時間 Δt 後の運動エネルギー E_k は、変形速度 $\{V^{t+\Delta t}\}$ を用いて、

$$E_k = \{V^{t+\Delta t}\}^T \cdot \{V^{t+\Delta t}\} \quad (3)$$

(3)式を最小化することによって、自己釣合状態を決定する。

2. 2 モード係数

固有モードを $\{\Phi_j\}$ と定義すると、 $[\Phi]$ は固有モードを列とするモードマトリクスを表す。

$$[\Phi] = [\{\Phi_1\} \{\Phi_2\} \cdots \{\Phi_j\}] \quad (4)$$

変形速度 $\{V^t\}$ は、モード係数 $\{\alpha\}$ とモードマトリクス $[\Phi]$ を用いて、次のように書ける。

$$\begin{aligned} \{V^t\} &= \sum_{i=1}^j \alpha_i \{\Phi_i\} = \alpha_1 \{\Phi_1\} + \alpha_2 \{\Phi_2\} + \cdots + \alpha_j \{\Phi_j\} \\ &= [\Phi] \{\alpha\} \end{aligned} \quad (5)$$

(2) 式の減衰項の速度ベクトル $\{V^t\}$ に $\alpha_i \{\Phi_i\}$ (モード係数と固有モードの積) を代入すると、微小時間 Δt 後の変形速度 $\{V^{t+\Delta t}\}$ は、

$$\{V^{t+\Delta t}\} = \{V^t\} - (\{R\} + \alpha_i C \{\Phi_i\}) \Delta t \cdot [M^{-1}] \quad (6)$$

(6) 式の変形速度 $\{V^{t+\Delta t}\}$ を用いて、(3) 式の運動エネルギー E_k を表すことによって、減衰対象のモードを減衰させる。

3. 解析

図 1 のようなテンセグリティタワーを解析の対象モデルとする。

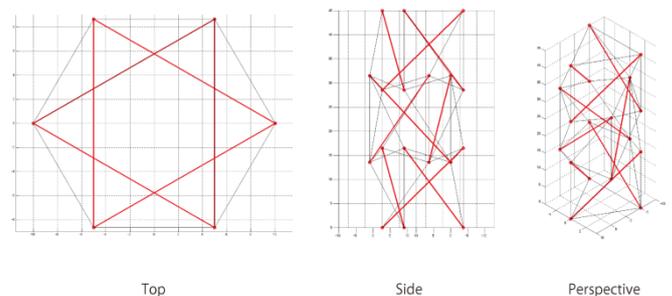


図 1 テンセグリティタワー

3. 1 減衰係数と質量

3 ~ 10 層のテンセグリティタワーについて、収束するまでのステップ数が最小になるときの減衰係数と構造物全体の質量の関係を図 2 に表すと、減衰係数と質量の関係は線形であると分かる。

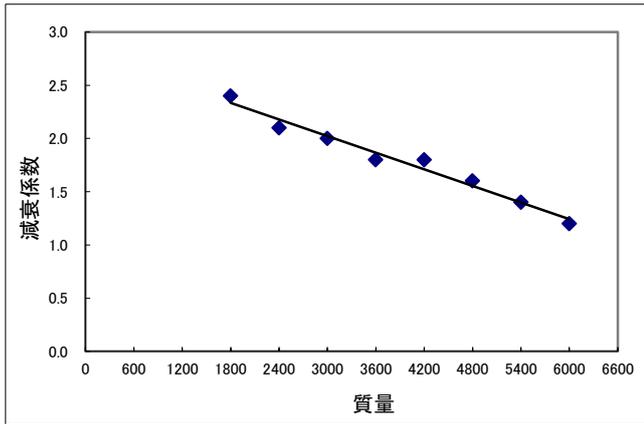


図2 減衰係数と質量

3. 2 モードの減衰

3. 2. 1 例題1

3層のテンセグリティタワーについて考える。各時刻に対してのモード係数を図3に表すと、2次モードの影響が最も大きい。

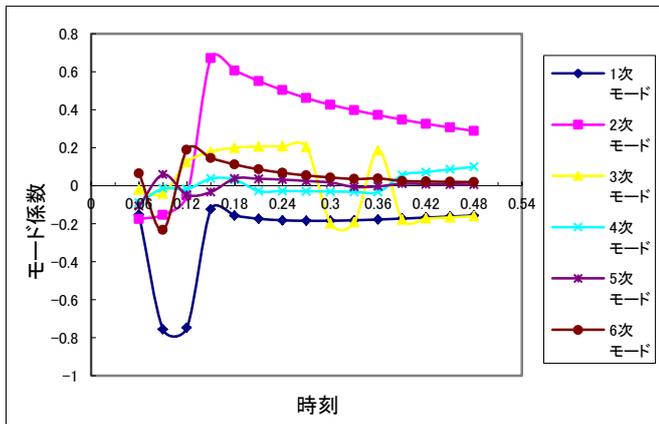


図3 3層の時刻歴モード係数

時間刻み 0.15 と 0.30 において、モードを減衰させる前のステップ数は、21005、13104 になる。表1は、各固有モードを減衰させたときのステップ数を表す。

表1 3層の収束ステップ数(減衰後)

時間刻み 0.15		時間刻み 0.30	
固有モード	ステップ数	固有モード	ステップ数
1	19956	1	12816
2	19952	2	12815
3	19956	3	12817
4	19956	4	12817
5	19956	5	12817
6	19956	6	12817

3. 2. 1 例題2

6層のテンセグリティタワーについて考える。各時刻に対してのモード係数を図4に表すと、1次モードの影響が最も大きい。

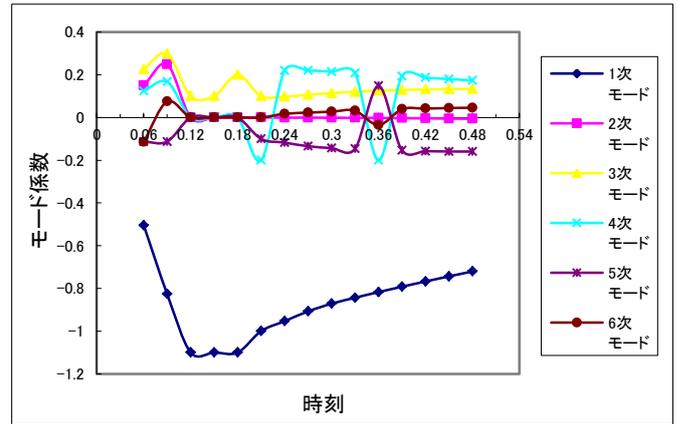


図4 6層の時刻歴モード係数

時間刻み 0.15 と 0.30 において、モードを減衰させる前のステップ数は、79598、42514 になる。表2は、各固有モードを減衰させたときのステップ数を表す。

表2 6層の収束ステップ数(減衰後)

時間刻み 0.15		時間刻み 0.30	
固有モード	ステップ数	固有モード	ステップ数
1	79465	1	42477
2	79598	2	42482
3	79474	3	42483
4	79598	4	42482
5	79598	5	42482
6	79598	6	42482

4. 考察と結論

本研究では、Dynamic Relaxation 法に基づいた形状決定法の収束性を、1) 減衰係数と質量、2) モード係数と固有モードの2点から検討した。固有モードを利用し減衰させることによって、収束性を改善することができた。しかし、どの固有モードを減衰させるかに関係なく、釣合状態に収束するまでのステップ数は近い。この理由としては、減衰係数の定め方に問題があると考えられ、減衰係数の設定が今後の課題となってくる。

参考文献

- 1) M.R. Barnes : Form-Finding and Analysis of Prestressed Nets and Membranes (Comparers & Structures, Vol.30, No.3, pp.685-695, 1988)
- 2) J.Y. Zhang and M. Ohsaki : Adaptive Force Density Method for Form-finding Problem of Tensegrity Structures (International Journal of Solids and Structures, 43, 5658-5673, 2006)
- 3) J.Y. Zhang and M. Ohsaki : Form-finding of Tensegrity Structures Subjected to Geometrical Constraints (International Journal of Space Structures, Vol. 21, No. 4, 183-195, 2006)
- 4) Li Zhang , Bernard Maurin and René Motro : Form-finding of Nonregular Tensegrity Systems (Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 9, 1435-1440, 2006)