

10. 力法を用いた単層ラチスシェルの形状最適化に関する研究

1510920067 諫山明依  
指導教員 藤井大地 教授

形状最適化 力法 感度解析 座屈 シェル構造

1. はじめに

近年、構造解析や施工技術の発達により、より不定形で自由な形態の建築物が建築されるようになってきている。また意匠設計者の求める恣意的な形状に対して、形状最適化手法を適用して修正を行う方法が発達している。このような形状最適化手法は、ベジエ曲線やBスプライン曲線のパラメータを設計変数とする方法やベースベクトル法などが提案されているが、本研究室では、節点座標を直接設計変数とする力法を用いている。この方法は、目的関数（コンプライアンス）の節点座標に関する感度に負号を付けた値を節点荷重として加え、その時の変形にしたがって形状を修正していく方法で、形状の自由度を制限せずに形状最適化を行うことができる。

一方、より自由な曲面形状を表現できる単層ラチスシェルは、近年多くの魅力ある建築を生み出しつつあるが、複層ラチスシェルに比較して、全体座屈崩壊の危険性が高く、形状最適化手法等による形状修正がより必要な構造形式である。しかしながら、既往の研究では、剛性最大化を目的として形状修正されたものが、全体座屈に対しても有効なものになっているかどうかは十分に確かめられていない。

そこで本論文では、単層ラチスシェル構造を対象として、剛性最大化を目的関数として形状最適化されたシェル構造の座屈特性を調査することにより、このような形状最適化手法が座屈に対しても有効かどうかを検証する。

2. 力法による形状最適化

力法では、まず、目的関数（コンプライアンス）の各節点の  $x, y, z$  座標に関する感度を求め、この感度に負号を付けたものを各節点の  $x, y, z$  方向荷重として加える。ただし、該当する節点がある方向のみの移動となる場合は、移動可能方向のみの感度を求め、その方向のみの荷重を加えることになる。そして、線形弾性解析によって各節点の変位を求め、この変位に適切な倍率を掛けたものを節点座標の増分  $\Delta \mathbf{q}$  とする。なお、変位に掛ける倍率は、徐々に小さくして収束させる。以上の計算を繰り返し、収束解を最適解とする。なお、力法は、一種の勾配法であり、局所解の可能性はあるにしても、収束解は目的関数の最小解を与えると考えられる。

形状変更の倍率としては、本論文では、要素長さの平均値  $\bar{l}$  を基準とし、初期（第1ステップ）の節点座標増分の最大値（絶対値）が  $\alpha \bar{l}$  となるように変更倍率を設定する。また、最適化の総計算ステップ数を  $N_{op}$  とすると、 $N_{op}/\beta$  までは、変更倍率（ $\alpha \bar{l}$ ）の絞り込みは行わず、それ以降のステップでは  $\alpha \bar{l} / \gamma^{(k-N_{op}/\beta)}$  となるよう絞り込みを行う。ただし、 $k$  はステップ数、 $\gamma$  は 1~1.1 の範囲で与えるものとする。

3. 座屈解析

形状最適化前後の座屈荷重は、骨組の弾性座屈解析プログラムによって求める。本プログラムは、本研究のために独自に開発したもので、文献 1) に示される初期応力マトリクスを用いて座屈方程式を組み立て、固有値問題を解くことによって座屈荷重を求めるものである。

図 1 は、開発プログラムの有効性を確かめるために、10 要素分割した柱の座屈荷重をオイラー座屈荷重値と比較したものである。図より、すべての境界条件に対して、オイラーの座屈荷重値と一致した解が得られることがわかる。

	座屈荷重 (N)	
	解析値	計算値
拘束条件 1 水平移動拘束 回転両端ピン	0.0987	0.0987
拘束条件 2 水平移動拘束 回転下端固定, 上端ピン	0.2019	0.2014
拘束条件 3 水平移動拘束 回転両端固定	0.3949	0.3948
拘束条件 4 水平移動自由 回転両端固定	0.0987	0.0987
拘束条件 5 水平移動自由 回転下端固定, 上端ピン	0.0247	0.0247

図 1 比較データ

#### 4. 解析例

まず、2次元の基本的な例題に対して、形状最適化前後の座屈荷重の比較を行う。図2は、放物線、半円、カタナリー曲線、SIN関数の4つ曲線を初期形状として、最適化前後の座屈荷重を比較したものである。ただし、境界条件は両端ピン支持とし、要素分割数は20、荷重はすべての節点に鉛直等分布荷重を加えている。また、形状最適化のパラメータは $\alpha=0.001$ 、 $\beta=2$ とし、ステップ数は1000~10000回としている。図には初期形状、修正形状、座屈荷重比（修正形状の座屈荷重/初期形状の座屈荷重）が示されている。また、修正形状は、最適化によってコンプライアンスが10~20%低減されたものを採用している。図より、最適形状の座屈荷重は、初期形状とほとんど変わらない

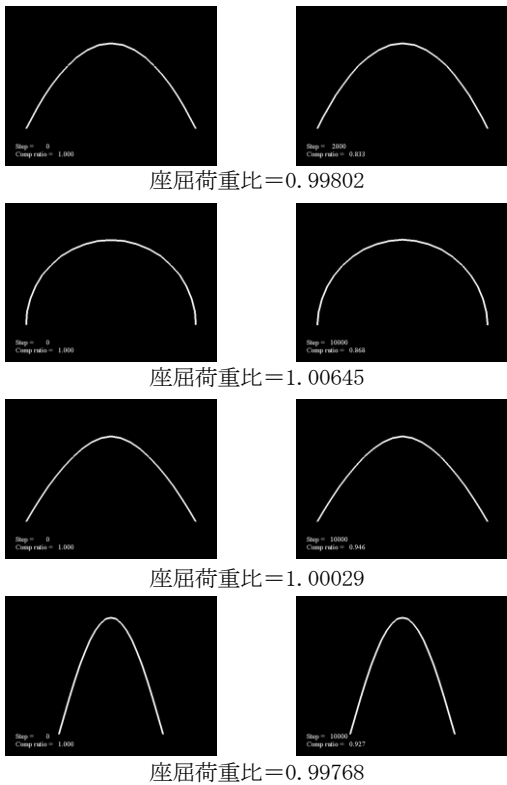


図2 2次元解析結果

次に、図3に示す自由曲面ラチスシェルの例題に対して形状最適化前後の座屈荷重の比較を行う。ただし、境界条件は両端ピン支持とし、荷重はすべての節点に鉛直等分布荷重を加えている。

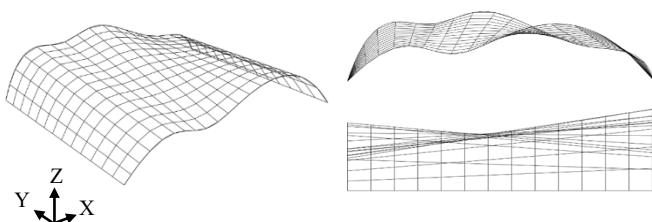


図3 解析モデル初期形状

図4は、形状最適化による修正形状とコンプライアンス比、図5は、座屈荷重比（最適形状の座屈荷重/初期形状の座屈荷重）を示している。ただし、形状最適化のパラメータは $\alpha=0.001$ 、 $\beta=2$ とし、ステップ数は400回としている。図より、形状最適化によって形状修正されたシェル構造では、剛性は大きく改善されるが、座屈荷重に関しては大きな変化がないことがわかる。

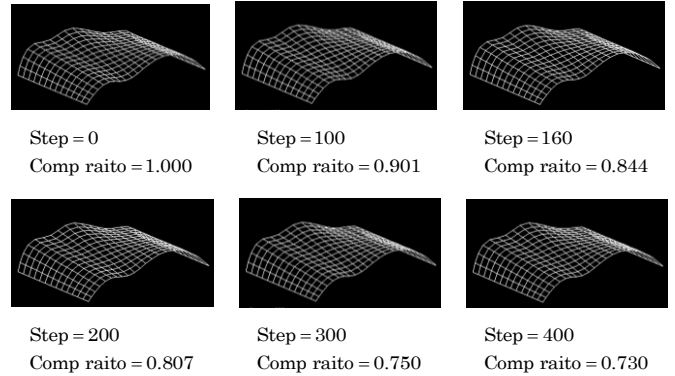


図4 力法による解析結果

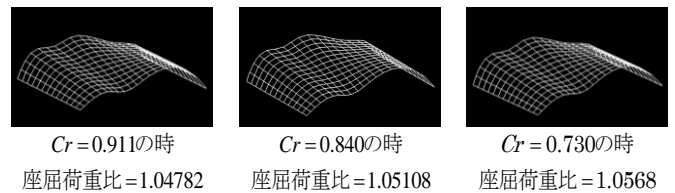


図5 座屈解析

#### 5. まとめ

本論文では、単層ラチスシェル構造を対象として、剛性最大化を目的関数として形状最適化されたシェル構造の座屈特性を調査し、形状最適化が全体座屈荷重も改善できるかどうかを検討した。その結果、形状最適化によって、全体剛性は大きく改善されるが、全体座屈荷重に関してはあまり変化がないことが明らかになった。したがって、形状最適化によって全体座屈荷重の改善は望めないが、悪化を招くこともないため、力法による形状最適化手法を単層ラチスシェルに適用することは有効であると結論づけられる。

#### 参考文献

- 1) 鷲津久一郎他, 有限要素法ハンドブックII, 培風館 1983
- 2) 藤井大地, 垣田仁: 力法による骨組構造の形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.682, pp.1881-1886, 2012.12