

37 . IESO 法を用いたシェル構造の形態創生に関する研究

1310920059 上村紘一
指導教員 藤井大地 教授

位相最適化 シェル構造 IESO 法 3次元構造 構造形態創生

1. はじめに

自由な曲面を実現できるコンクリートシェルは、これまで多くの魅力ある建築物を生み出してきた。また、近年、コンクリートの高強度化、軽量化、新素材による補強の多様化に伴い、デザインのにも様々なコンクリートシェルが建設されつつある。一方、このようなコンクリートシェルは、解析的には連続体として扱われ、有限要素法等、一般の建築物に比較してより高度な解析技術が必要となる。また、数学的関数を用いない自由曲面シェルでは、応力分布が複雑になり、力学的に最適な曲面を見つけることは容易ではない。このような背景から、シェル構造に関しては、形状最適化等の最適化技術の導入が進んでおり、建築家が描いた恣意的な曲面を、形状最適化手法を用いて修正する方法が実際に用いられている。しかしながら、位相を最適化する技術については、研究は進んでいるが、未だ実用化には至っていない。

そこで本研究では、ボクセル有限要素法を用いた位相最適化手法を用いて厚肉連続体シェル構造の形態を創生する手法を提案する。本手法は、ボクセル分割された設計領域全体に物体力を与える方法であり、鉛直方向の物体力を与えた場合はカテナリー曲線と同様な形態が得られ、鉛直方向と同時に水平方向にも物体力を与えれば、地震力にも対応した形態を得ることも可能である。本論文では、初期の ESO 法を改良した IESO 法^{1,2)}を用い、本手法に鉛直方向と水平方向の物体力を与えることで厚肉連続体シェル構造の形態創生が可能となることを示す。

2. IESO法による3次元構造の位相最適化

IESO 法では、要素除去に関しては、拡張 ESO 法のルールを用いる。ただし、要素除去の閾値としては、ひずみエネルギー感度を用い、ひずみエネルギー感度の計算法は、BESO 法で用いられている方法を用いる。

いま、 i 番目要素のひずみエネルギー感度を α_i とすると、IESO 法の要素除去のルールは次式となる。

$$\rho_i = 0 \quad \text{if} \quad \alpha_i < X_{cr} \quad ; i=1, \dots, N_L \quad (1)$$

ここに、 ρ_i 、 α_i は i 番目要素の密度とひずみエネルギー、 N_L は残存要素数、 X_{cr} は次式で定義される閾値。

$$X_{cr} = \alpha_{av} - \eta \cdot \phi \quad (2)$$

ただし、 α_{av} と ϕ は残存要素のひずみエネルギー感度の平

均値と偏差平均、 η は要素の除去量を制御する制御変数であり、IESO 法では、各ステップの要素除去率をデータとして与え、この除去率を近似的に満たす η をプログラム内で自動計算する。

次に、1つのボクセル(直方体要素)の物体力は次式で与えられる。

$$B_k^{(i)} = \rho_i \cdot \gamma \cdot (l_x \cdot l_y \cdot l_z) \cdot g_k, \quad (k=X, Y, Z) \quad (3)$$

ここに、 $B_k^{(i)}$ は i 番目ボクセルの X, Y, Z 方向の物体力、 γ は単位体積重量、 $(l_x \cdot l_y \cdot l_z)$ はボクセルの体積、 g_k は X, Y, Z 方向の加速度を表す。ここで扱うボクセルは、すべて同体積であり、8 節点直方体要素であるため、(3)式は各要素の節点荷重として次のように表される。

$$f_{kj}^{(i)} = B_k^{(i)} / 8 = (1/8) \cdot \rho_i \cdot \gamma \cdot (l_x \cdot l_y \cdot l_z) \cdot g_k, \quad (j=1, \dots, 8) \quad (4)$$

したがって、物体力はボクセルの各節点に(4)式の集中力を与えればよい。なお、このような物体力を与える解析では、節点が連続しない孤立要素が現れやすくなり、このような要素が現れると連立方程式が特異となって発散する。このため、本論文の解析では、(1)式の ρ_i は 0 とせず、 $1/1000$ として解析を行う。

3. 解析例

3.1 基本的な例題

まず、基本的な例題として、図 1 に示す解析例をとりあげる。要素分割数は $100 \times 100 \times 50$ とし、全ての要素に自重(鉛直方向の物体力)を与える。また、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、ヤング率 $E=210$ (N/m²)、目標体積比(目標体積/領域の初期体積) $\bar{V}_r=0.1$ 、除去率 $\lambda=0.05$ 、影響半径倍率 $b_r=3$ とする¹⁾。図 2、図 4、図 6 は支持条件と解析結果を示す。図 3、図 5 は、解析結果の断面図とカテナリー曲線との比較、図 7 は解析結果の側面図とカテナリー曲線との比較、また、それぞれの図にはカテナリー曲線の軸力分布も示している。

これらの図より、支持条件を変えると、それに応じた厚肉シェルの形態が創生されることがわかる。また、図 2 は半球シェル、図 4 は円筒シェル、図 6 は EP シェルに近い形態になることがわかる。また、創生された形態の輪郭は、カテナリー曲線とほぼ一致する。カテナリー曲線は力学的に安定した形であり、創生されたシェルも力学的に合理性を有する形態であることがわかる。図 2 では相対的に中央頂部付近の軸力が小さく、頂部が削られ穴

が空いた形態が得られたと考えられる。

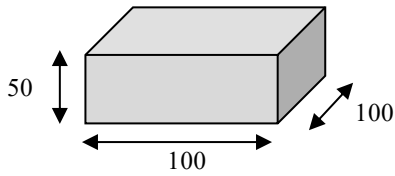


図 1 解析モデル

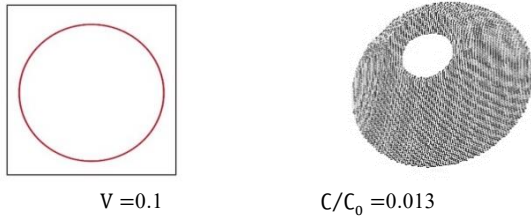


図 2 (左:支持点配置図, 右:解析結果)

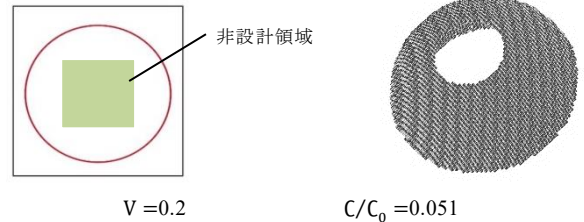


図 8 (左:支持点配置図, 右:解析結果)

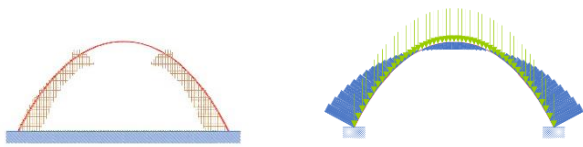


図 3 (左:カテナリー曲線と断面の比較, 右:軸力図)

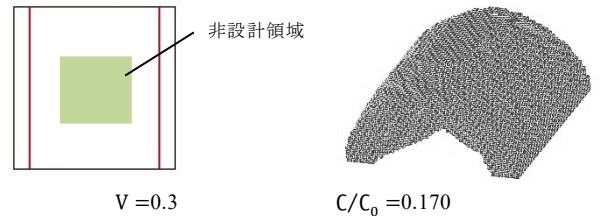


図 9 (左:支持点配置図, 右:解析結果)

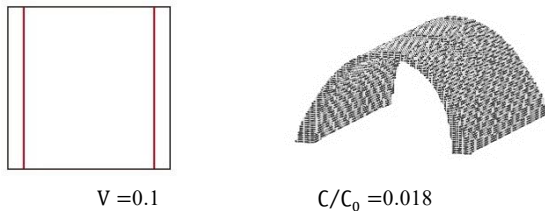


図 4 (左:支持点配置図, 右:解析結果)

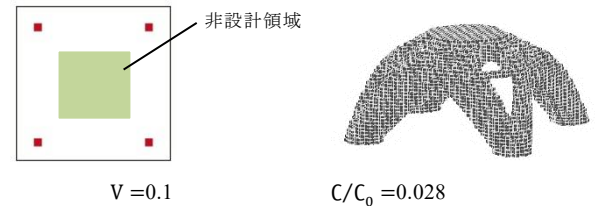


図 10 (左:支持点配置図, 右:解析結果)

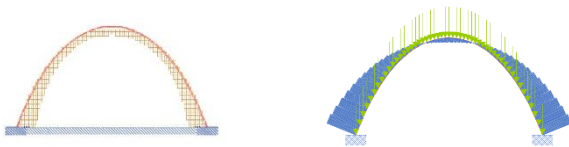


図 5 (左:カテナリー曲線と断面の比較, 右:軸力図)

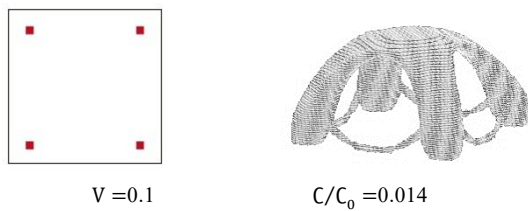


図 6 (左:支持点配置図, 右:解析結果)

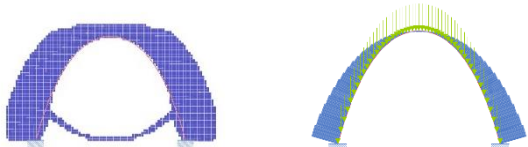


図 7 (左:カテナリー曲線と形態の比較, 右:軸力図)

3.2 地震力を加えた例題

次に、荷重条件としてすべての要素に自重（鉛直方向の物体力）と自重の 0.2 倍の地震力（水平方向の物体力）を加えた解析例をとりあげる。解析モデルは、 $60 \times 60 \times 30$ の要素分割数とした。また、解析モデルの中央に、非

設計領域を与えた。ただし、荷重、目標体積比、要素分割数以外の解析条件は前節と同じである。図 8、図 9、図 10 は支持条件と解析結果を示す。これらの図より、地震力を加えると、自重のみの場合とはかなり異なる形態になることがわかる。特徴として、ライズが下がり、境界部が分厚くなる傾向が見られた。ライズが下がるのは地震による慣性力を抑えるためと考えられる。

4. まとめ

本論文では、IESO 法を用い、鉛直方向と水平方向の物体力を与えることで厚肉連続体シェル構造の形態創生を行う方法を提案し、その有効性を検討した。その結果、様々な支持条件下で、シェルの最適な形態を導きだせることがわかった。また、本手法に鉛直方向と水平方向の物体力を与えることで、地震力を考慮した厚肉連続体シェル構造の形態創生が可能となることがわかった。

以上の結果から、IESO 法は、コンクリートシェル等の厚肉連続体シェルの形態創生手法の一つになりえることが確かめられた。

参考文献

- 1) 新内洋平, 松本慎也, 藤井大地: 改良型 IESO 法を用いた 3 次元構造物の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, vol.81, NO.723, p.851 - 858, 2016.5
- 2) 新内洋平, 松本慎也, 藤井大地: IESO 法を用いた建築構造の形態創生—鉛直荷重と地震荷重に抵抗する建築の自然形態, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.731, p.97-103, 2017.1