

15. IESO 法を用いたシェル構造の形態創生に関する研究
 - 多様なシェル形態の創生 -

1510920023 木村悠亮
 指導教員 藤井大地 教授

IESO 法, シェル構造, 自重解析

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、建築家が描いた自由な曲面を、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。

また、コンクリートシェルのような連続体シェルは、形状だけでなく厚みの分布も設計対象となり、これに位相が加わると非常に複雑な最適化問題となる。

一方、上村ら¹⁾は、ボクセル分割された固定設計領域から、形状・板厚・トポロジーが同時に最適化された連続体シェル構造を創生する手法を提案している。しかし、文献 1)では、基本的な解析例しか示していないため、複雑な境界形状によって様々なシェル構造を創生できるか明確に示されていない。そこで本論文では、本手法が境界形状を変化させることで多様なシェル形態を創生できることを示す。

2. IESO 法

IESO 法^{1,2,3)}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、本手法では、要素除去の指標として、各要素の von Mises 応力の代わりに、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感度、 N_L は残存要素数、 X_{cr} は閾値で、次式で定義される。

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

ただし、 α_{av} と ϕ は残像要素のひずみエネルギー感度の平均値と偏差平均であり、次式から計算される。

$$\alpha_{av} = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} \alpha_i \quad \phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_L} (\alpha_i - \alpha_{av})^2}{N_L}} \quad (3)$$

そして、 η は要素の除去量を制御する制御変数であり、 η をプログラム内で自動計算する。

3. 解析例

図 1 に示す要素分割数 $50 \times 50 \times 25$ の解析モデルを使用する。ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、ヤング率 $E = 21000(\text{N}/\text{mm}^2)$ とし、STEP 数、目標体積比、除去率、影響半径を与え、解析を行う。以下に示されている各図の(a1)~(f1)の太線は支持条件を示している。また、各図の(a2)~(f2)は収束解の外観、(a3)~(f3)は収束解の上から見た図、(a4)~(f4)は収束解の下から見た図を示す。

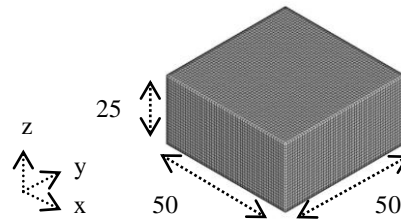
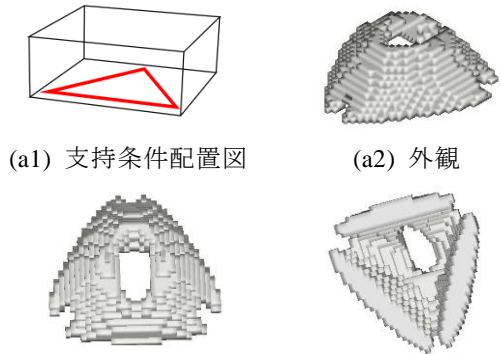


図 1 解析モデル

3.1 多角形シェル

本研究では、解析効率を考え、図 3、図 5 は 1/4 解析で行い図 2、図 4 においては 1/2 解析を行った。また、荷重条件として自重（鉛直方向の物体力）を与え、IESO 法を用いて、シェル構造の構造デザインの有効性を検討する。



(a1) 支持条件配置図 (a2) 外観
 (a3) 上から見た図 (a4) 下から見た図

53step, $\bar{V}_r = 0.05$, $\lambda = 0.05$, $b_r = 1$, $C/C^0 = 0.0036$

図 2 収束解 (a1)~(a4)

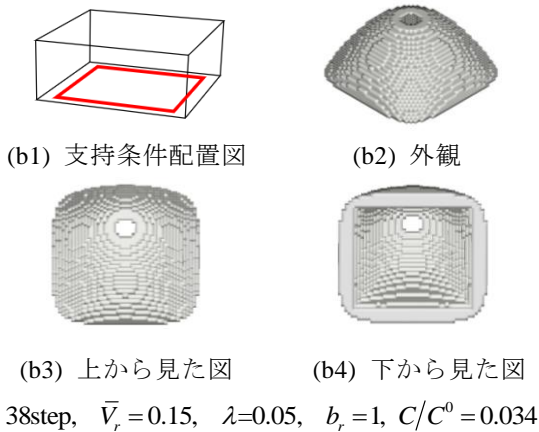


図 3 収束解 (b1)~(b4)

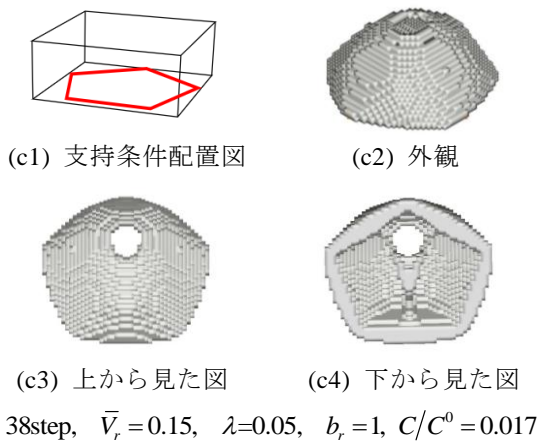


図 4 収束解 (c1)~(c4)

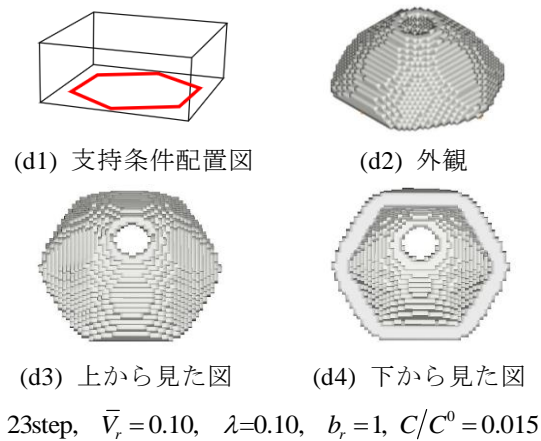


図 5 収束解 (d1)~(d4)

検証した結果、上記の図に示されている通り、支持条件を変化させるとそれに応じたシェル形態が創生される。支持条件の段階で、奇数多角形よりも偶数多角形の方が、広い内部空間が存在する形態が創生された。また、すべての解析例において頂部が削られて穴が開いた形態が創生されたが、これは、相対的に中央部分付近の面内応力が小さくなったためと考えられる。

3.2 骨組シェル

3.1 節同様に、図 1 に示す要素分割数 $50 \times 50 \times 25$ の解析モデルを使用する。目標体積比をさらに小さくして IESO 法を用いて、シェル構造の構造デザインの有効性を検討する。

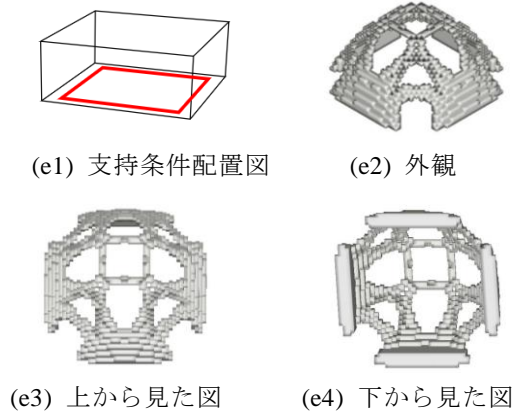


図 6 収束解 (e1)~(e4)

目標体積比を小さくすることにより、開口部の空いた骨組のようなシェル形態が創生された。図 6 では四角形の四隅に応力が集中してしまったため、角が取れた形態が創生されたと考えられる。

4. まとめ

本論文では、IESO 法を用いて、鉛直方向の物体力を加え支持条件を変化させることにより、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、シェル構造の最適な形態を導き出せることがわかった。図 6 で示した骨組シェルについては、本手法により多彩な形態の創生が可能であることを示した。この解析結果を用いて、デザイン性と構造的性の両方を兼ね備えたシェル構造の可能性を見いだせた。

以上の結果から、IESO 法は、コンクリート等の材料を用いた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、様々な支持条件下での有効性も示せた。

参考文献

- 1) 上村 紘一, 眞鍋 匡利, 松本 慎也, 藤井 大地: IESO 法を用いた連続体シェル構造の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.745, p.459-465, 2018
- 2) 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
- 3) 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