

30. IESO 法を用いた構造部材の形態創生に関する研究

1210920054 西郡祥
指導教員 藤井大地 教授

位相最適化 IESO 法 ボクセル有限要素法 3次元構造 構造形態創生

1. はじめに

近年、製造技術の革新により、建築分野においても、大型の 3D プリンタを用いて建築物を建造する試みが始まっている。今後、このような技術が進歩すれば、床スラブや壁などの構造材も、様々な形態のものが開発される可能性がある。一方、力学的に合理性のある構造形態を創生する方法として、位相最適化手法（ソフトウェア）が普及しつつある。したがって、今後、このような手法を建築構造部材の最適形態を求める方法として活用して行くことが考えられる。

そこで、本研究では、梁および床スラブ・屋根スラブの構造形態に着目し、力学的に合理性のある構造部材の形を、BESO 法¹⁾、拡張 ESO 法²⁾、CA-ESO 法³⁾の利点を組み合わせ、初期の ESO 法を改良した 3次元改良型 ESO 法（以下では IESO（Improved Evolutionary Structural Optimization）法と呼ぶ）を用いて求め、その有効性を検討する。

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²⁾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る。したがって、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、 N_L は残存要素数、 X_{cr} は(2)式の閾値であり、 α_i は i 番目要素のひずみエネルギー感度である。ただし、IESO 法では、ひずみエネルギー感度の計算法は BESO 法¹⁾に準じる。

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

ここに、 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。

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

ここに、 η は要素の除去量を制御する制御変数であり、 η が大きいと要素が除去されにくく、 η が小さいと除去されやすくなる。IESO 法では、BESO 法と同様に各ステップの要素除去率を与え、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。

図 1 は IESO 法の計算フローを示したものである。本解析に必要な入力データとしては、有限要素解析に必要なデータとして、設計領域の大きさ (L_x, L_y, L_z)、分割数 (n_x, n_y, n_z)、ヤング係数、ポアソン比、境界条件、荷重条件がある。また、最適化計算に必要なデータとして、影響半径 r_{min} 、残存要素数の下限値 \bar{N}_L 、除去率 λ がある。また、設計領域内に空間や固定スラブ等を設定する場合は、設計対象から除外する要素の番号・密度情報 (0/1) を入力する必要がある。

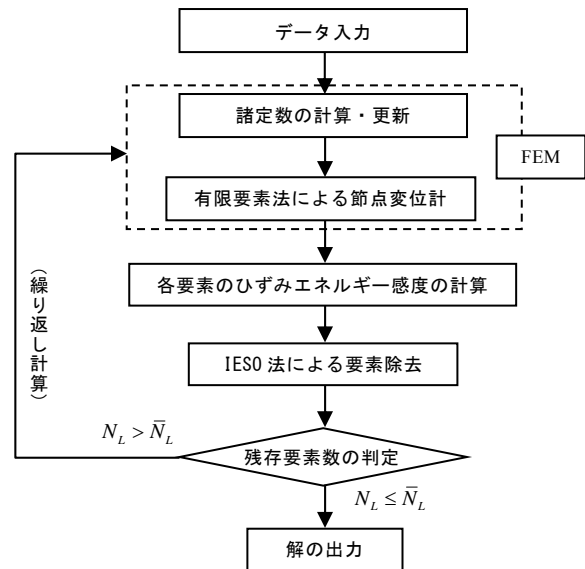


図 1 IESO 法の計算フロー

3. 解析例

3.1 梁の例題

まず、構造部材の最適化の一例として、梁の形態創生例を示す。図 2 は解析モデルを示す。梁の寸法は 6m × 0.2m × 0.6m、要素分割数は 300 × 10 × 30 としている。境界条件は、梁両端の上下端を拘束し、荷重条件は、梁上面に鉛直等分布荷重 0.1kN/m²を加えている。また、除去後の目標体積は領域体積の 20%、影響半径倍率は要素長の 2 倍、除去率は 0.025 としている。図 3,4 は、解析結果の側面図と透視図を示している。本結果の有効性を確かめるため、梁せいが同じ同体積の中実梁と剛性を比較した結果、コンプライアンス比は、中実梁の方が 10.13 倍となり、十分な剛性が確保されていることがわかった。

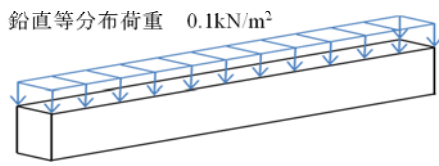


図 2 解析例 1 の解析モデル

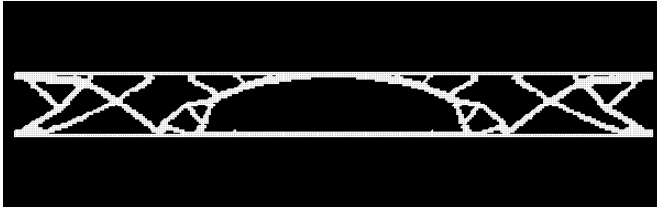


図 3 解析例 1 の解析結果 (側面図)

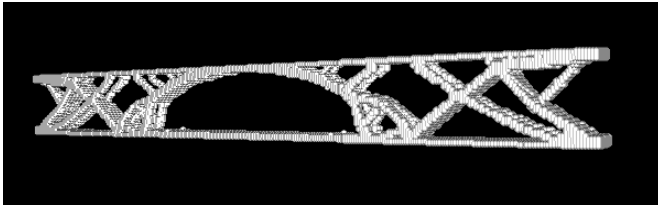


図 4 解析例 1 の解析結果 (透視図)

3.2 正方形床スラブの例題

次に、正方形床スラブの形態創生例を示す。図 5 は解析モデルを示す。床スラブの寸法は $3.6\text{m} \times 3.6\text{m} \times 1.2\text{m}$ とし、要素分割数は $120 \times 120 \times 4$ としている。境界条件は、周面の下端を拘束し、荷重条件は、スラブ上面に鉛直等分布荷重 5kN/m^2 を加えている。また、目標体積は領域体積の 50%、影響半径は要素長の 3 倍、除去率は 0.01 としている。

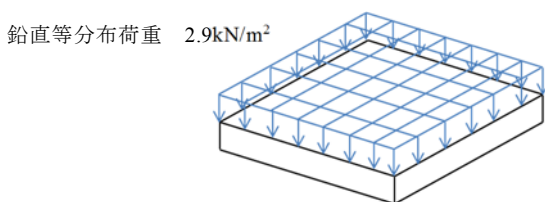


図 5 解析例 2 の解析モデル

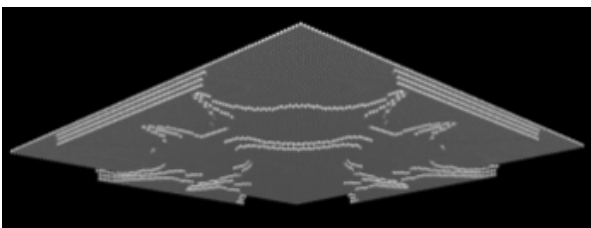


図 6 解析例 2 の解析結果

図 6 は、解析結果を示す。本結果の有効性を確かめるため、同体積の等厚スラブと剛性を比較した結果、等厚スラブのコンプライアンスが $\circ\circ$ 倍となり、十分な剛性が確保されていることがわかった。

3.3 L 形床スラブの例題

次に、L 形床スラブの形態創生例を示す。図 7 は解析モデルを示す。設計領域の寸法は $9.1\text{m} \times 9.1\text{m} \times 0.3\text{m}$ とし、要素分割数は $182 \times 182 \times 6$ としている。その他の条件は 3.2 節の正方形床スラブと同じである。図 8 は、解析結果を示す。本結果の有効性を確かめるため、同体積の等厚スラブと剛性を比較した結果、等厚スラブのコンプライアンスが $\circ\circ$ 倍となり、十分な剛性が確保されていることがわかった。

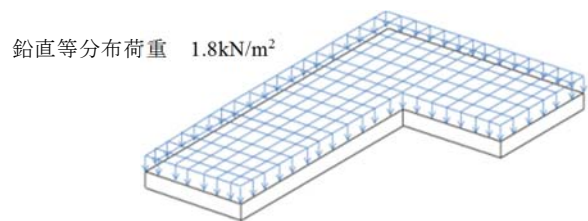


図 7 解析例 3 の解析モデル

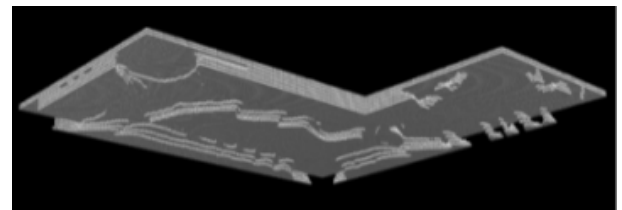


図 8 解析例 3 の解析結果

4. まとめ

本研究では、梁および床スラブの構造形態に着目し、力学的に合理性のある構造部材の形を IESO を用いて求め、その有効性を検討した。その結果、梁は橋梁のような形態となり、床スラブに関しては、応力が大きくなる箇所が厚くなる積層構造となることがわかった。また、同体積の中実梁、等厚スラブと比較した結果、本解析結果は十分な剛性が確保されていることがわかった。

参考文献

- 1) Huang, X., Xie, Y.M. : Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.43, pp.1039-1049, 2007
- 2) 崔昌禹, 大森博司, 佐々木睦朗 : 拡張 ESO 法による構造形態の創生—三次元構造への拡張—, *日本建築学会構造系論文集*, 第 576 号, pp.79-86, 2004.2
- 3) 藤井大地, 岡部 諒, 真鍋匡利 : CA-ESO 法とボクセル有限要素法を用いた 3 次元構造物の位相最適化, *日本建築学科構造系論文集*, Vol.79, No.703, pp.1279-1286, 2014.9