

26. IESO 法を用いた建築構造の形態創生に関する研究

1110920055 新内洋平  
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、解析技術や生産・製造技術等の発達により、様々な形態の建築物が造られるようになってきている。また、3D プリンタの普及により、より軽量で剛性の高い3次元構造形態を創生する技術の必要性が高まっている。位相最適化手法は、このようなニーズに応える形態創生手法の一つである。

3次元問題の位相最適化手法としては、SIMP 法<sup>1)</sup>などの数理計画法にもとづく方法や、CA-ESO 法<sup>2)</sup>、拡張 ESO 法<sup>3)</sup>、BESO 法<sup>4)</sup>などの発見的な手法にもとづく方法が有効な手法として提案されている。しかし、いずれの手法も3次元の大規模問題を解く場合、計算効率、パラメータ設定の難易度、結果として得られる位相(形態)の質など、まだまだ改良の余地がある。

そこで本研究では、3次元の CA-ESO 法<sup>2)</sup>の ESO 部分を改良した非常に計算効率の良い改良型 ESO 法(Improved ESO 法、以下 IESO 法と呼ぶ)を提案する。

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<sup>1)</sup>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<sup>4)</sup>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  $\alpha_i$  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、 $N_L$  は残存要素数、 $X_{cr}$  は閾値で、

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

ただし、 $\alpha_{av}$  と  $\phi$  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。

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

また、(2)式の  $\eta$  は要素の除去量を制御する変数である。ひずみエネルギー感度の場合、von Mises 応力と比較して、この  $\eta$  の与え方が難しい。そこで、IESO 法では、BESO 法と同様に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  $\eta$  をプログラム内で自動計算する。

2.1 IESO 法の計算フロー

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、ボクセル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  $r_{mn} (= b_r \cdot L_x / n_x)$ 、残存要素数の下限値  $\bar{N}_L$  (実際には、目標体積比  $\bar{V}_r = \bar{N}_L / (n_x \cdot n_y \cdot n_z)$  で与える)、除去率  $\lambda$  がある。

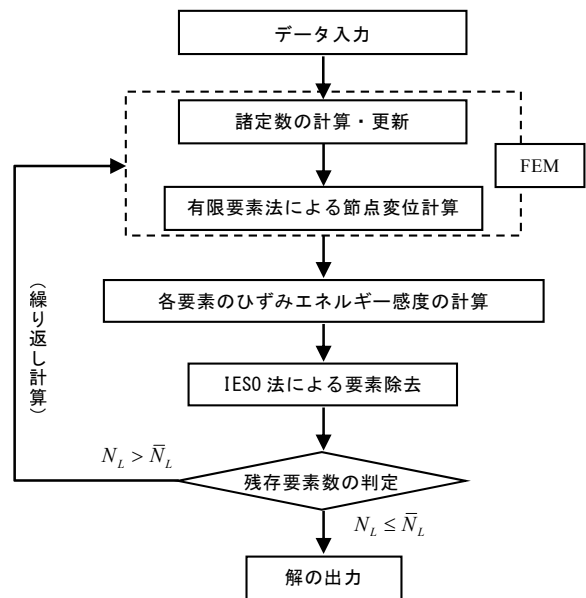


図 1 IESO 法の計算フロー

3. 解析例

3.1 フィレンツェ新駅コンペ案

まず、図 2 に示すフィレンツェ新駅コンペ案<sup>1)</sup>の解析を行う。解析は対称性を利用して 1/4 領域で行い、要素分割数は  $150 \times 42 \times 30$  としている。また、目標体積比  $\bar{V}_r$  は 0.116、影響半径倍率  $b_r$  は 2.0、除去率  $\lambda$  は 0.1 としている。なお、目標体積比は文献 2) と合わせている。

図 3 は、IESO 法と CA-ESO 法<sup>2)</sup>の解析結果を示し、図 4 は、IESO 法の体積比およびコンプライアンス比の各計算ステップの推移を示している。これらの図より、IESO 法では、わずか 21 ステップで解が得られ (CA-ESO 法は 100 ステップ)、CA-ESO 法の解と比較しても遜色のない結果となっていることがわかる。

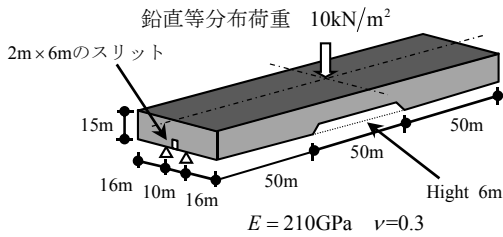


図 2 解析例 1

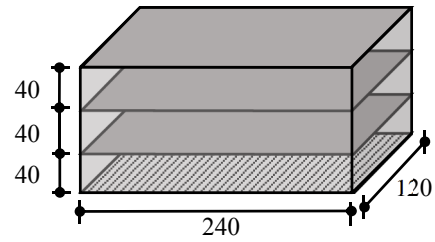


図 5 解析例 2

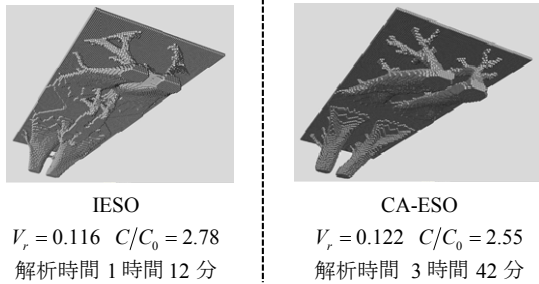


図 3 IESO 法と CA-ESO 法の結果

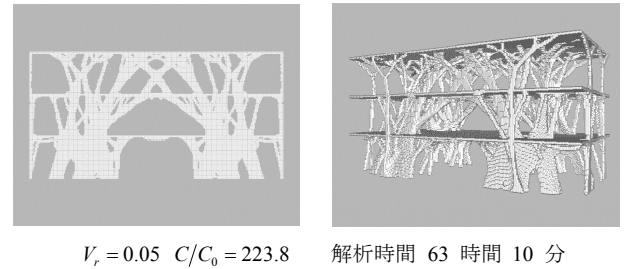


図 6 IESO 法の結果

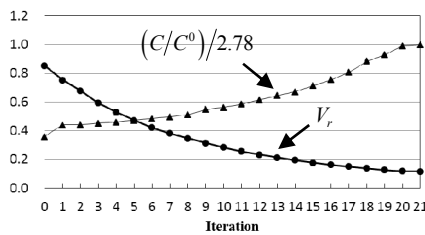


図 4 各ステップにおける体積比とコンプライアンスの推移

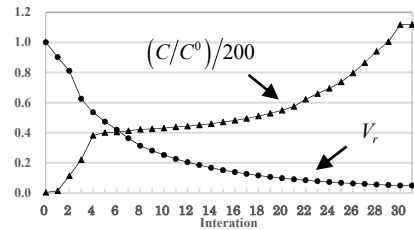


図 7 各ステップにおける体積比とコンプライアンスの推移

### 3.2 地震力を受ける 3 階建てビル構造

次に図 5 に示す 3 階建てのビルを想定したモデルについて解析を行う。要素分割は  $240 \times 120 \times 120$  とし、2,3 階の床および屋上スラブは密度固定要素とし、ここに鉛直等分布荷重と Ai 分布による地震荷重 ( $C_0 = 0.2$ ) を両方向から加える。また、境界条件は、1 階の床スラブの節点をすべて固定とする。また、目標体積比  $V_r$  は 0.05、影響半径倍率  $b_r$  は 2.0、除去率  $\lambda$  は 0.1 としている。

図 6 は、IESO 法による解析結果を示す。図より、樹木が床を支えているような形態が得られていることがわかる。また、図 7 は、体積比およびコンプライアンス比の推移を示している。図より 4 ステップまで大きく体積が減少し、そこから徐々に体積が減少して行くことがわかる。また、この場合も、31 ステップで解が求まっており、非常に計算効率が良いことがわかる。図 8 は、図 7 の結果を 3D プリンタで出力し、その模型を用いて作成した建物モデルである。

### 4. まとめ

本論文で提案した IESO 法は、収束が速く、しかも CA-ESO 法と比較しても遜色のない位相が得られることがわかった。これにより、非常に計算時間のかかる大規模問題も通常のパソコンで解くことが可能となった。



図 8 外観パース

### 参考文献

- 1) 崔昌禹, 大森博司, 佐々木睦朗: 拡張 ESO 法による構造型態の創生—三次元構造への拡張—, 日本建築学会構造系論文集, pp.79-86, 2004.2
- 2) 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, 日本建築学会構造系論文集, pp.1279-1286, 2014.9
- 3) 藤井大地: パソコンで解く構造デザイン, 丸善, 2002
- 4) 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