

31. CA-IESO 法の基本特性に関する研究—慣性力を受ける構造に関する検討—

1710920074 上原瞳実

ボクセル有限要素法, CA-IESO 法, 3次元解析, 位相最適化

指導教員 藤井大地 教授

1. はじめに

藤井ら¹⁾は, ボクセル有限要素法を用いた位相最適化手法として, IESO 法(+仕上アルゴリズム)を提案し, 力学的合理性を有する多様な構造形態を創生できることを検証している. しかし, 3D 解析では, 固定設計領域の要素(ボクセル)数は, 数十万から数百万になり, 目標とする解の要素数はその 10%程度となる場合が多いため, 要素数の少ない初期形態から出発して最適解が求めれば, 計算効率を大幅に改善できる. そこで本論文では, 多様な初期形態から進化させることが可能な位相最適化手法として, IESO 法と, CA 法を組み合わせた CA-IESO 法を提案し, その有効性を検証する. ただし, この CA-IESO 法は, 文献 2)に用いている仕上アルゴリズムと理論的には同じ手法と言えるが, 仕上アルゴリズムは, IESO 法で得られた解に修正を加えるもので, 多様な初期形態から最適解を求める方法ではない. 一方, 数理計画法に基づく手法では, 除去要素の材料密度は完全には 0 とはしないため, 初期形態の要素数は, 計算効率の改善には寄与しない.

そこで, 本研究では, CA 法の付加アルゴリズムと IESO 法を組み合わせることで, 最適化の目標要素数以下の初期形態から解析を進めて最適形態を求める新たな位相最適化手法(CA-IESO 法)を提案し, その有効性を検討する.

2. CA-IESO 法

CA-IESO 法では, 目標体積に達するまでは IESO 法による要素除去が行われる. そして, 目標体積に達すると CA 法による付加が 1 回行われ, 再度, 複数回の IESO 法の繰り返しで要素除去が行われる. 以上の繰り返しで, 目標体積が満足された(残存要素数以下となった解)のみを保存していく.

IESO 法の要素除去のルールは次式で表される.

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

ここで, ρ_i, α_i は i 番目要素の要素密度と感度指標, N_L は残存要素数, X_{cr} は閾値である.

次に, CA 法の要素付加のルールは次式で表される.

$$\rho_{s_j} = 1 \text{ if } \alpha_i \geq \eta_A \cdot \alpha_{av} ; i=1, \dots, N_L, j=1, \dots, n_i$$

ここで, は i 番目要素と面を共有する要素の要素番号と要素数を表す.

また, 重力や地震慣性力などの物体力は, ここで扱うボクセルがすべて同体積の n 節点直方体要素であるため, 次式で表される節点荷重として与える.

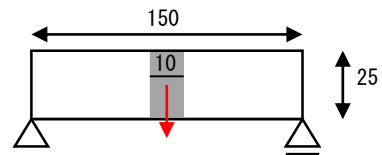
$$f_{xj}^{(i)} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \rho_i \cdot \gamma \cdot (l_x \cdot l_y \cdot l_z) \cdot g_x$$

$$f_{yj}^{(i)} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \rho_i \cdot \gamma \cdot (l_x \cdot l_y \cdot l_z) \cdot g_y \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$f_{zj}^{(i)} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \rho_i \cdot \gamma \cdot (l_x \cdot l_y \cdot l_z) \cdot g_z$$

ここに, $f_{xj}^{(i)}, f_{yj}^{(i)}, f_{zj}^{(i)}$ は, ボクセル i の j 節点の節点荷重, γ は単位体積質量, $(l_x \cdot l_y \cdot l_z)$ はボクセル体積, g_x, g_y, g_z は X, Y, Z 方向の加速度を表す.

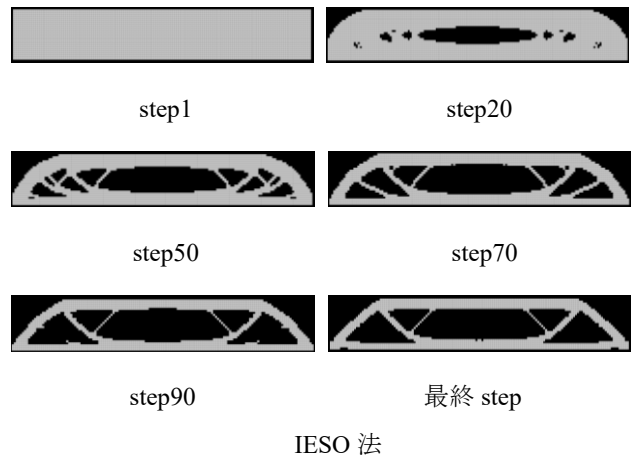
3. 解析例



case1 $\lambda_e = 0.01 \quad \lambda_A = 0.01 \quad \lambda_e^f = 0.01 \quad \lambda_A^f = 0.01 \quad v_r = 0.4 \quad b_r = 1$

case2 $\lambda_e = 0.02 \quad \lambda_A = 0.04 \quad \lambda_e^f = 0.02 \quad \lambda_A^f = 0.04 \quad v_r = 0.4 \quad b_r = 1$

図 1 解析例 1 の解析モデルとパラメータ値



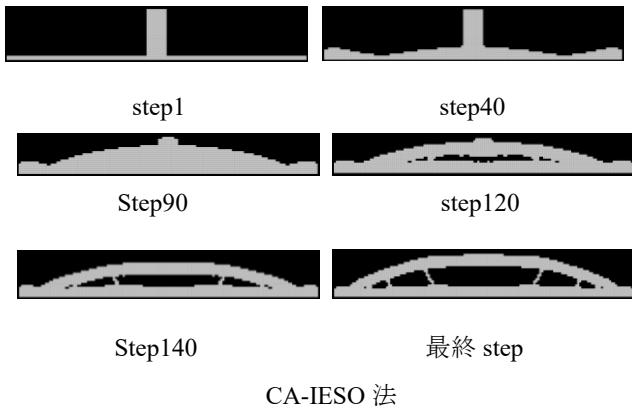
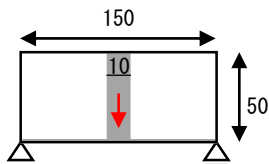


図2 case1 の解析結果



図3 case2 の最終 step の解析結果

解析例1の梁の高さを倍にした解析例で解析をした。



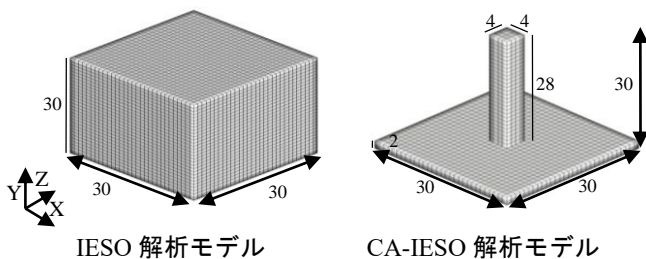
$$\lambda_e = 0.01 \quad \lambda_a = 0.01 \quad \lambda_e^f = 0.01 \quad \lambda_a^f = 0.01 \quad \nu_r = 0.4 \quad b_r = 1$$

図4 解析例2の解析モデルとパラメータ値



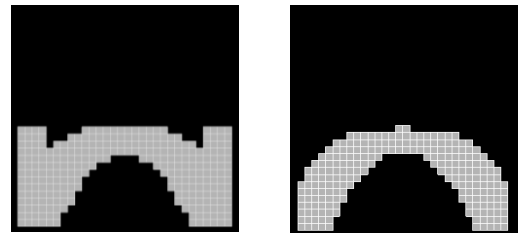
図4 解析例2の最終 step の解析結果

図5は、3Dモデルとなり、重力だけ考慮したモデルとなっている。中央部分を設計対象とし、最適な構造形態を求めるとともに、どのような構造形態に変化していくかも検討したものである。IESO法は中央部分がなくなったアーチになり、CA-IESO法は中央部分がある綺麗なアーチになった。

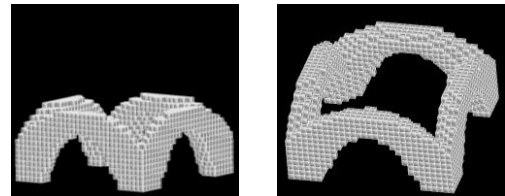


$$\text{case1 } \lambda_e = 0.04 \quad \lambda_a = 0.04 \quad \lambda_e^f = 0.04 \quad \lambda_a^f = 0.04 \quad \nu_r = 0.1 \quad b_r = 1$$

図5 解析例3の解析モデルとパラメータ値



2次元での最終 step の形態 (正面)



3次元での2方向から見た最終 step の形態 (立体)

図5 case1 の最終 step 解析結果

4. まとめ

本論文では、CA法の付加アルゴリズムとIESO法を組み合わせたCA-IESO法を提案し、慣性力を受ける構造に対して、その有効性を検討した。その結果、基本的例題では、IESO法の結果と類似した最適形態が得られ、またパラメータ値を変えることで、最適形態にも変化がみられた。

以上から、本方法は、初期解を設計者が設定し、その進化過程をコントロールすることで、より設計者の意図を反映させた解析が行える手法であることが検証された。

参考文献

- 1) 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物の自然形態, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.731, pp.97-103, 2017.1
- 2) 三井和男: セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.101-105, 2002.5
- 3) 大谷昂暉, 寺井雅和, 齋藤正, 藤井大地: IESO法を用いた無筋コンクリートシェルの形態創生に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 67B, 2021.4