

31. CA-ESO 法による建築構造物の形態創生に関する研究

0710920049 松居礼大
指導教員 藤井大地 教授

形状最適化, 力法, 感度解析, 逐次線形計画法, 凸線形化法, 骨組構造

1. はじめに

境界形状だけでなく内部の穴の数や穴の形状まで最適化できる位相最適化手法は、機械部品の軽量化や建築構造の形態創生など幅広く応用が進んでいる。このような位相最適化手法は、大きく数理計画法にもとづく方法と発見的手法にもとづく方法の2種に分類される。数理計画法にもとづく方法としては、均質化設計法、密度法 (SIMP 法)、レベルセット法などが代表的である。一方、発見的手法にもとづく方法としては、ESO 法、拡張 ESO 法、CA 法、GA 法などが代表的である。

この内、数理計画法にもとづく方法は、汎用ソフトにも実装され、主に機械分野の部品設計などに広く利用されている。これに対して、発見的手法にもとづく方法は、一般にはあまり普及していないのが現状である。この要因としては、計算効率、パラメータ設定の難易度、得られる解の信頼性・安定性などが考えられる。しかしながら、これまでの文献では、数理計画法にもとづく方法と発見的手法にもとづく方法の性能を直接比較したものがなく、発見的手法にもとづく方法の問題点や限界等が十分に明らかになっていない。そこで、本研究では、同じ有限要素モデルで、数理計画法にもとづく方法と発見的手法にもとづく方法との比較を行い、発見的手法にもとづく方法の性能とその限界を明らかにし、そしてより有効性を向上させることを目的としている。本論文では、従来の CA-ESO 法のシマや不要な部分等の出現、質量制約を満みたさない解析結果が検出されるなどの限界点を新たなアルゴリズムを組むことにより解消することを目標としている。

2. CA-ESO 法による位相最適化

発見的手法にもとづく方法では、各有限要素の応力を指標として要素の除去・生成を繰り返す、最終的に目的の位相を求める。この場合、数理計画法と比較して、感度解析の必要がなく、感度解析が容易でない問題にも簡単に適用できるという利点がある。

2.1 ESO 法による要素の除去

本論文で用いる CA-ESO 法では、要素除去に関しては、拡張 ESO 法のルールを用いる。拡張 ESO 法では、各要素の Von Mises 応力

$$\sigma^{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

を要素除去に関する指標とし、この応力が次式の閾値 X_{cr} 以下になると要素が除去される。

$$X_{cr} = \sigma_m - \eta \cdot \phi \quad (9)$$

ただし、 σ_m と ϕ は残存要素の Von Mises 応力の平均値と偏差平均であり、次式から計算される。

$$\sigma_m = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} \sigma_i^{VM} \quad \phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_L} (\sigma_i^{VM} - \sigma_m)^2}{N_L}} \quad (10)$$

ここに、 σ_i^{VM} は i 番目要素の Von Mises 応力、 N_L は残存要素数である。また、(9)式の η は要素の除去量を制御する制御変数である。

(9)式の X_{cr} は、応力の不均等性が高い場合は低い閾値となり、応力が平均値に均等化されてくると高い閾値となる。また、制御変数 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。

2.2 CA 法による要素の生成

拡張 ESO 法では、要素の生成は応力等値線を用いることによって行うが、CA-ESO 法では、要素の生成を CA 法のルールに基づいて行う。

本論文では、 i 番目要素の Neumann 近傍 (辺を共有する要素) に対して、次式の簡単ルールを採用する。

$$\rho_j = 1 \quad \text{if} \quad \sigma_i^{VM} \geq \sigma_m \quad ; j=1, \dots, n_i \quad (11)$$

ただし、 σ_m は(10)式の応力平均値、 n_i は(7)式で定義される辺を共有する要素数 (ノイマン近傍の要素数) である。すなわち、 i 番目の要素の Von Mises 応力が σ_m 以上であれば、すべての Neumann 近傍要素の密度が 1 になり、 σ_m 未満であれば、元の状態が保たれる。

2.3 CA-ESO 法の計算フロー

従来の CA-ESO 法との 1 つ目の変更点は、下記に記す図 1 である。従来のものとは異なり、ESO 法と CA 法をループさせるのではなく、総密度が与えた制約値より大きい場合は ESO 法による要素除去を行い、制約値以下になった場合は、CA 法による要素生成を行う。

2 つ目の変更点は、従来の総密度制約を $\pm 10\%$ の範囲を 95% から 102% までとし、目的関数値 (コンプライアンス値) が最小になる解 \mathbf{p} を保存し、これを最終的に出力する。

3 つ目の変更点は、総密度が制約値以下になる場合、各ステップで 1% ずつ応力平均値 σ_m の値を減少させている。ただし、総密度が制約値を超えた時点で元に戻し、再び、制約値以下になると同様な操作を加えている。こ

これは、応力平均値が変化せず、ステップが進んでも要素生成が行われない場合があるためである。

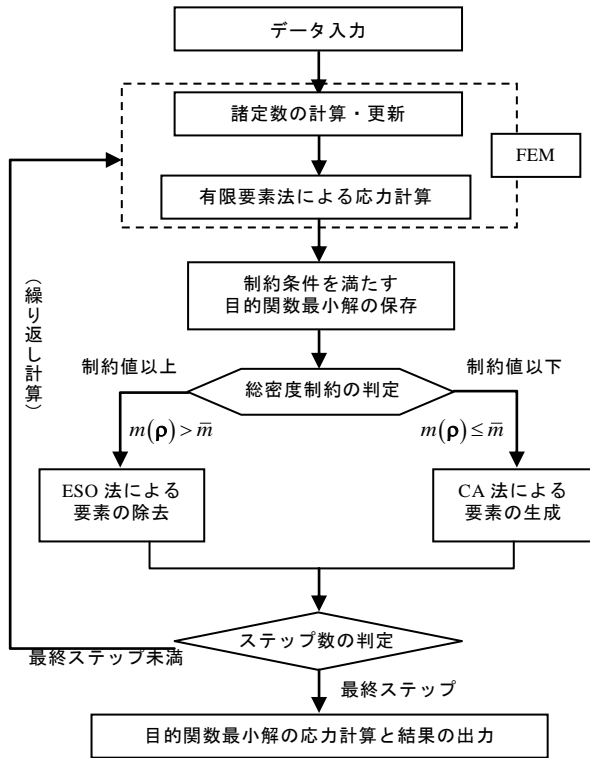


図 1 CA-ESO 法の計算フロー

3. 解析例

従来の CA-ESO 法の解析ではシマや不要な部分等の出現、質量制約を満みたさない解析結果が検出されるなどの限界が生じる。そして、本論文による新たな CA-ESO 法においても解析を行い、密度法による解析結果と比較を行い、有効性を確認する。

3.1 片持ち梁の解析例

ヤング係数 $E=206 \text{ kN/m}^2$ ，ポアソン比 $\nu=0.3$ ，質量制約 0.8 とし，初期形状の X,Y 分割(30.20)とする。 η を従来の CA-ESO 法，本論文による新たな CA-ESO 法，共に 0.7 とする。密度法による Filter WT を 0 として解析，比較する。

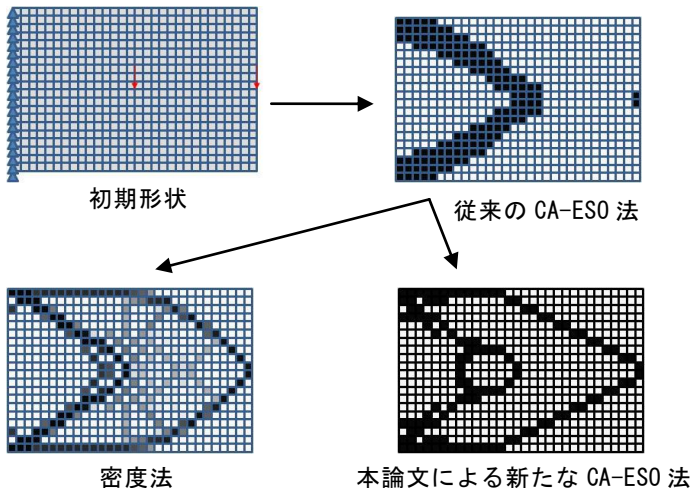


図 2. 片持ち梁の解析例

3.2 単純梁の解析例

ヤング係数 $E=206 \text{ kN/m}^2$ ，ポアソン比 $\nu=0.3$ ，質量制約 0.8 とし，初期形状の X,Y 分割(29.29)。 η を従来の CA-ESO 法，本論文による新たな CA-ESO 法，共に 0.7。密度法による Filter WT を 0 として解析，比較する。

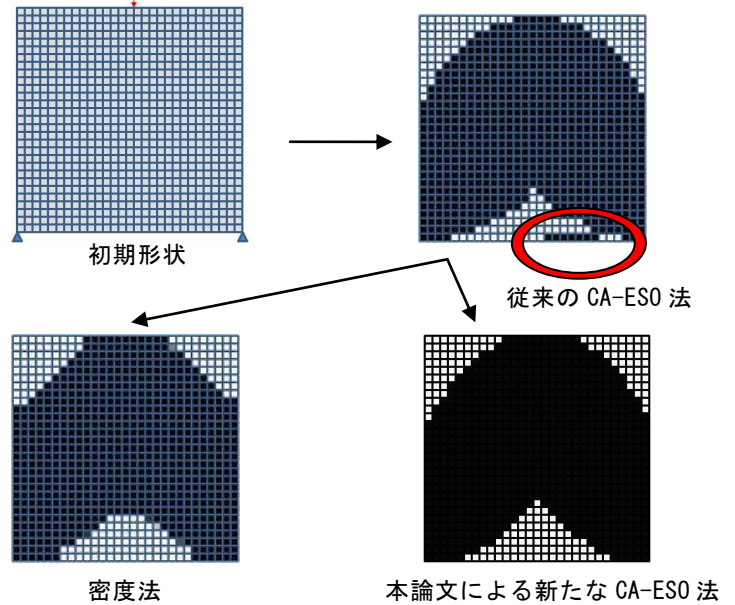


図 3. 単純梁の解析例

4. まとめ

本論文では、まず、位相最適化手法で提案された従来の CA-ESO 法と密度法との比較により、問題点を明らかにした。そして、解決策を定義し、CA-ESO 法の有効性の向上を目指した。

従来の CA-ESO 法はパラメータ η に依存する割合が大きく、シマや不要な部分等の出現、質量制約満たしていない時があり、矛盾図形の出現もある。従来の CA-ESO 法では対応力に欠けることがわかった。

そして新たなプログラムでは密度法との比較により従来法では満足に解析結果を得ることが出来なかった部分すべてにおいて満足のゆく結果を得ることが出来た。これにより、より有効性が向上したと考えられる。

参考文献

- 1) 真鍋匡利, 藤井大地, 粒子法を用いた位相最適化手法の提案, コロキウム構造形態の解析と創生 2008, pp. 41-46, 日本建築学会, 2008
- 2) 真鍋匡利, 藤井大地, 粒子法を用いた弾性体の位相最適化 CA-ESO 法の適用, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.32, 201, 2009. 3
- 3) 間野明人, CA-ESO 法を用いた位相最適化に関する研究, 学位請求論文, 2012. 1