26.　CA-ESO 法による建築構造の形態創生に関する研究

0810920016　大倉　有貴
指導教員　　藤井　大地　教授

位相最適化　CA 法　ESO 法　密度法　有限要素法　発見的手法

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分野の構造形態の創生手法として，幅広く応用が進んでいる．このような位相最適化手法は，大きく分けて，均質化法，レベルセット法，密度法（SIMP 法）などの数理計画法に基づく方法と，CA（Cellular Automaton）法，ESO（Evolutionary Structural Optimization）法，拡張 ESO 法，遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm）などの発見的手法に基づく方法がある．数理計画法は，数学的背景がしっかりしており最適解への収束が保証されるなどの利点があるが，感度解析が難しい問題には適用しにくいなどの欠点がある．一方，発見的手法は，近似解を簡単なアルゴリズムで求める事ができ，様々な最適化問題に容易に適用できる利点があるが，得られた解が最適解である保証がなく，優良解を得るために膨大な計算時間がかかるなどの欠点がある．どちらの方法も多くの論文が発表されているが，発見的手法と数理計画法の解の性能を詳細に比較した研究は見あたらない．

また，真鍋が提案した手法で粒子法を用いた位相最適化手法（CA-ESO 法）がある．これは，CA 法と ESO 法を組み合わせた発見的手法で，感度を求めなくていいので他の手法に比べ，比較的計算が楽になり，応力の小さい要素を機械的に消していくため,考え方が簡単である．

そこで本研究では，粒子法による CA-ESO 法を有限要素法に適用し，数理計画法にもとづく密度法との比較により，CA-ESO 法の建築物への有効性を検討する．

2.　CA-ESO 法

まず，ESO 法の敏感数（要素消去の条件）として，次式で定義される von Mises 応力 σ^{VM} を用いる．

$$\sigma^{VM} = \sqrt{{\sigma_x}^2 + {\sigma_y}^2 + \left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + 6{\tau_{xy}}^2} \tag{1}$$

ESO 法では，各要素の敏感数が与えられた閾値よりも小さくなるとその要素が消去される．大森ら [6)] の拡張 ESO 法では，この敏感数（ここでは応力 σ^{VM} ）の閾値 X_{cr} は，応力の平均値 σ_{cr} と平均値からの偏差平均 ϕ を用いて次式で定義される．

$$X_{cr} = \sigma_{cr} - \eta \cdot \phi^p \tag{2}$$

ここに， η は適当に与えられる制御変数である．また， σ_{cr} と ϕ は次式により定義される．

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^{VM}, \qquad \phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\sigma_i^{VM} - \sigma_{cr}\right)^2}{N}} \tag{3}$$

ここに， N は要素数，また，(2)式の p は 2 に設定する．

また，有限要素法では，要素を消去すると計算が不安定になるため，消去された要素のヤング係数を $1/10^3$ にすることで対応する．(2)式の X_{cr} は，応力の不均等性が高い場合は緩い閾値となり，応力が平均値に均等化されてくると平均値に近い閾値となる．また，制御変数 η が大きくなると要素が消去されにくくなり， η が小さくなると消去されやすくなる．

次に，消去された要素を復活させる条件として CA 法の考え方を用いる．CA 法は，各要素の敏感数にしたがってその要素の近傍要素の生滅を決めるもので，ここでは, 各要素の σ^{VM} が σ_{cr} より大きい場合にその要素の近傍要素を発現（復活）させるものとする．ただし，ここでは，近傍要素を Neumann 近傍（辺を共有する要素）とする．

3.　解析例（密度法との比較）

CA-ESO 法の有効性の検討として，密度法との比較を行う．

まず，図 1 に示す解析モデルで解析を行う．要素分割数は 97×60 とし，スラブにより 3 層に分け，スパン比を 1 対 1 対 1 になるように固定部を設け，鉛直分布荷重と水平荷重をかける．ただし，ヤング係数 $E = 206\text{kN/m}^2$，ポアソン比 $\nu = 0.3$ となっている．

図 2 では解析モデル 1 での CA-ESO 法と密度法の両手法からそれぞれ得られた最適位相の比較図である．

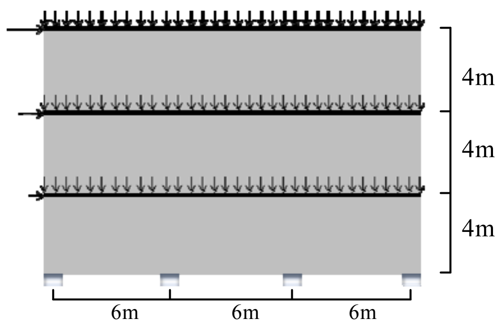


図 1　解析モデル 1

Study on topology optimization of structure using CA-ESO method

OOKURA yuuki

構造解析研究室

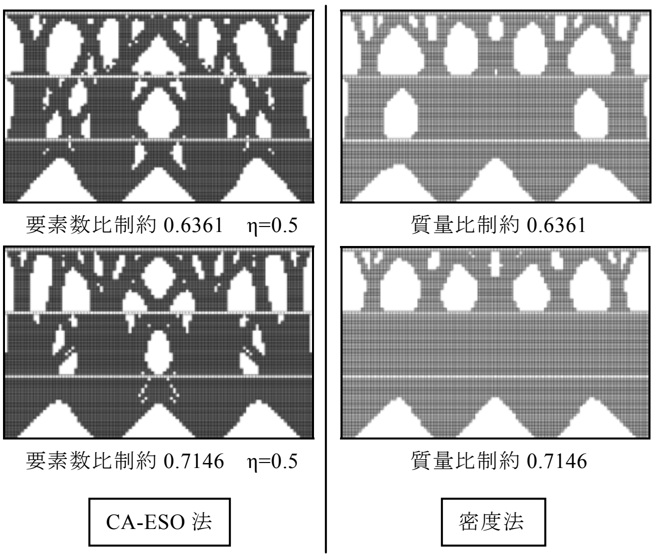


図 2　解析モデル 1 での密度法との比較

図 3 は解析モデル 2 で，要素分割数を 97×120 とし，スラブにより 6 層に分け，スパン比を 1 対 1 対 1 となるように固定部を設け, 鉛直分布荷重と水平荷重をかける.

図 4 では解析モデル 2 での CA-ESO 法と密度法の両手法からそれぞれ得られた最適位相の比較図である.

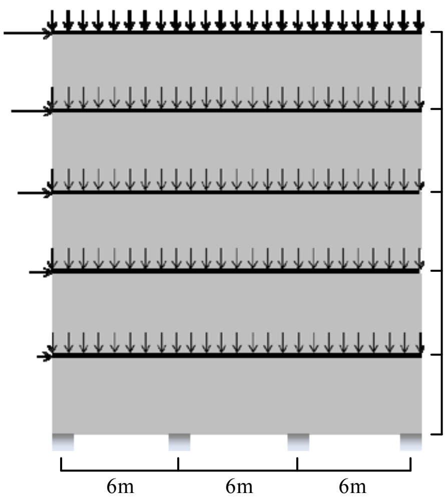
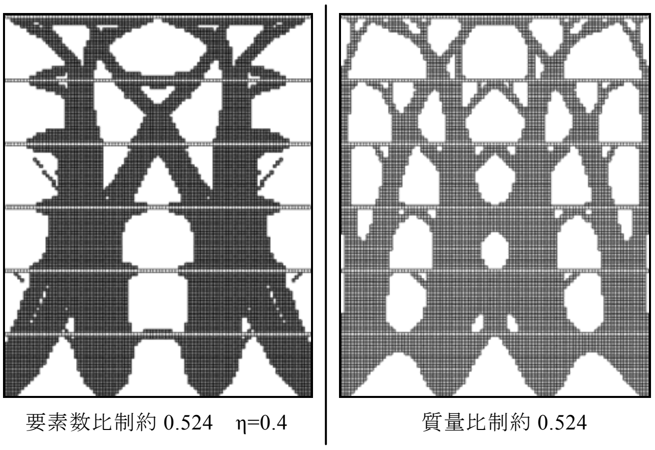


図 3　解析モデル 2



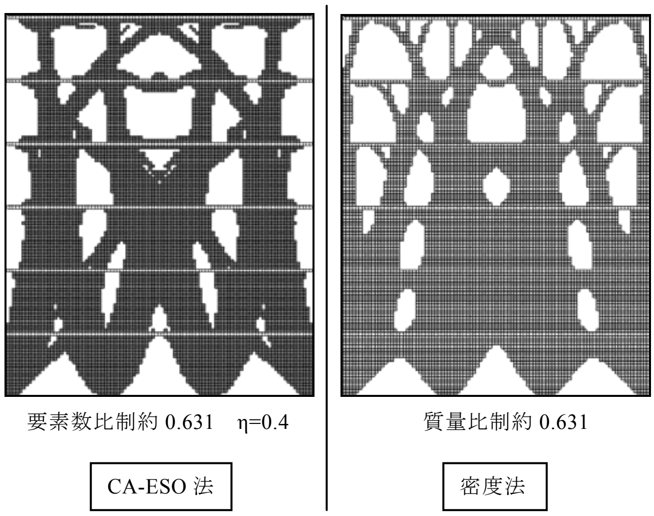


図 4　解析モデル 2 での密度法との比較

図 5 は，それぞれの手法で得られた位相を参考にしてつくり出したファサードの例である.

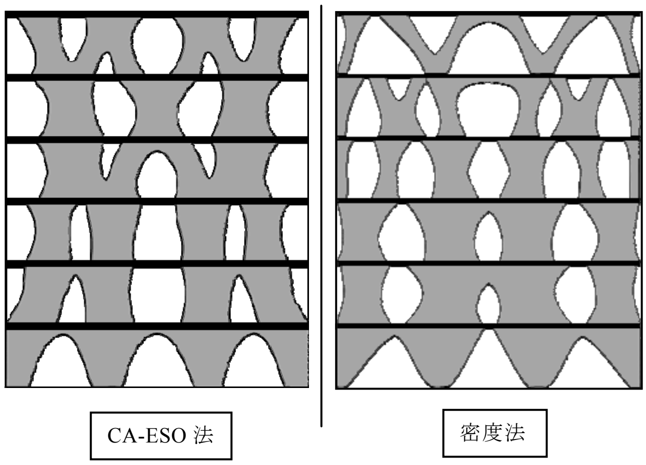


図 5　ファサード例

4.　まとめ

本研究では，粒子法による位相最適化手法 [1)-4)]で提案された CA-ESO 法を有限要素法に適用し，数理計画法にもとづく密度法との比較により，CA-ESO 法の建築物への有効性を検討した.

その結果，有限要素法に適用した CA-ESO 法で得られた最適位相と，数理計画法にもとづく密度法で得られた最適位相は，非常に近い位相となることがわかった.

また，密度法で得られた位相に比べ，CA-ESO 法で得られた位相は，要素の空きが多く，デザイン的にも優れた形状となった.

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