27. 粒子法を用いた構造部材の位相最適化に関する研究

1210920046　　丸山瑞樹
指導教員　　藤井大地　教授

位相最適化　発見的手法　有限変形　粒子法　MPS 法

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、柱や梁においても，H形鋼や角形鋼管だけでなく，様々な形態の構造部材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．

一方，位相最適化手法にも様々なものがあるが，３Ｄプリンタで出力することを考えると，まずは厚さ方向で形状が変化しない２次元問題で考える方が現実的である．また，微小変形問題で得られた解は，剛性が高くても座屈等で脆性的な破壊をする形態が求まる場合があるため，幾何非線形を考慮できる手法が望ましい．しかしながら，幾何非線形を考慮できる位相最適化手法は，未だ研究段階にあり，汎用ソフトにも組み込まれていない．これは，一般に有限要素法にもとづく方法では，感度解析が難しいことと，位相が変化すると座屈等の分岐により安定的に解を得ることが難しいためである．

そこで，本研究では，ラーメン構造の大梁の形態に着目し，力学的に合理性のある大梁の形を，幾何非線形を考慮できる粒子法（MPS法[1]）とCA-ESO法[2]を組み合わせた２次元位相最適化手法を用いて求め，その有効性を検討する．

2. CA-ESO法による形態創生手法

2.1 ESO法による粒子消去アルゴリズム

本研究では，形態を更新するための指標として，以下の式で定義されるvon Mises応力を用いる．まず，粒子間 ij におけるvon Mises応力を次式で定義する．

$$\sigma_{ij}^{VM} = \sqrt{\left(\sigma_{ij}^{nx}\right)^2 + \left(\sigma_{ij}^{ny}\right)^2 - \sigma_{ij}^{nx}\sigma_{ij}^{ny} + 3\left(\sigma_{ij}^{s}\right)^2} \tag{1}$$

ここに，$\sigma_{ij}^{nx}, \sigma_{ij}^{ny}$ は粒子間の垂直応力 σ_{ij}^{n} の x, y 方向成分，σ_{ij}^{s} は粒子間のせん断応力である．したがって，粒子 i のvon Mises応力は(1)式の重み付き平均として，次式で定義できる[1]．

$$\sigma_i^{VM} = \frac{d}{n^0}\sum_{j\in Neighbor} \sigma_{ij}^{VM} w\left(\left|r_{ij}^0\right|\right) \tag{2}$$

本手法では，(2)式により，動的弾性解析におけるvon Mises応力の時間積分の平均値を評価し，この応力が次式の閾値以下になると粒子が消去される．

$$X_{cr} = \sigma_m - \eta\phi \tag{3}$$

ただし，σ_m と ϕ は残存粒子のvon Mises応力の平均値と偏差応力であり，次式から計算される．

$$\sigma_m = \sum_{i=1}^{N} \sigma_i^{VM} \frac{m_i}{m}, \phi = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\sigma_i^{VM} - \sigma_m\right)^2 \left(\frac{m_i}{m}\right)^2}, m = \sum_{i=1}^{N} m_i \tag{4}$$

ただし，m_i は粒子 i の質量，m は総質量を表す．また，(3)式の η は制御変数であり，η が大きいと粒子が消去されにくく，η が小さいと粒子が消去されやすくなる．

2.2 CA法による粒子復活アルゴリズム

消去された粒子を復活させる条件としてCA法の考え方を用いる．ここでは，各粒子のvon Mises応力が平均von Mises応力 σ_m より大きい場合にその粒子のノイマン近傍粒子（上下左右両隣の粒子）を復活させるものとする．

2.3 CA-ESO法の計算フロー

図 1 は CA-ESO 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，材料条件，荷重条件，境界条件，(3)式の η，質量制約値 $\bar{m}$ 等がある．

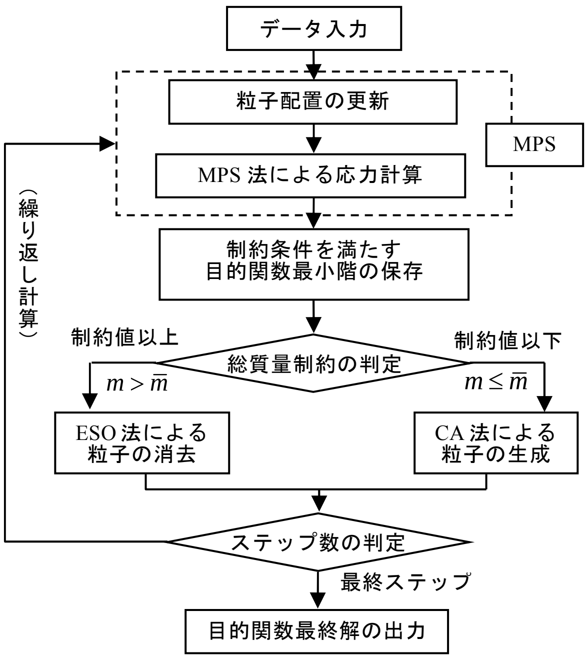


図1　CA-ESO法のフローチャート

3. 解析例

3.1 有限要素解析との比較

まず，本手法の解析精度を確かめるため，MPS法に小さい荷重を与え，ボクセル有限要素法を用いたCA-ESO法の解（微小変形問題）との比較を行う．図2は，解析モデルを示し，MPS法の粒子数は○○×○○，ヤング率は $210\,\mathrm{N/m^2}$，単位体積質量 $76800\,\mathrm{N/m^3}$，ポアソン比 0.3 としている．図3は，分布荷重値を 40N/m とし，質量の制約値を初期質量の20%，40%，60%にした場合の結果を示す．また，比較に用いている有限要素解は，分割数を○○×○○とし，MPS法と同様の条件下で解析した結果である．これらの図より，微小変形の場合，本手法の結果と有限要素法を用いた手法による結果は，類似した位相になることがわかる．

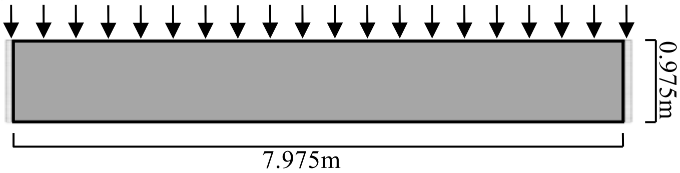
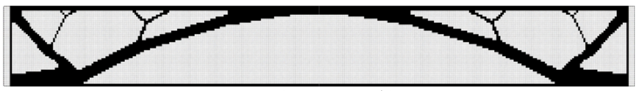


図2　解析モデル

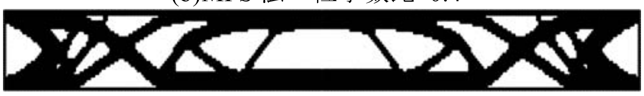
(a)IESO 法　体積比：0.2



(a)MPS 法　粒子数比：0.2

(b)IESO 法　体積比：0.4

(b)MPS 法　粒子数比：0.4



(c)IESO 法　体積比：0.6

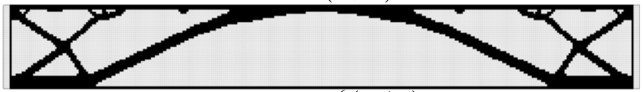
(c)MPS 法　粒子数比:0.6

図3　解析結果の比較

3.2 設計荷重による位相の変化

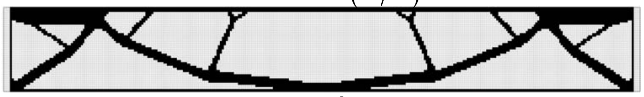
次に，図4，5，6は，質量の制約値を初期質量の20%，40%，60%にした場合の，微小変形問題の結果と，荷重を大きくして大変形となる場合の結果を示したものである．これらの図より，大変形問題では，細い圧縮材が少なくなり，よりシンプルな形態となることがわかる．

$w:40(N/m)$



$w:1.0\times10^6(N/m)$

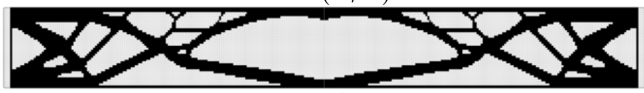
$w:1.0\times10^7(N/m)$



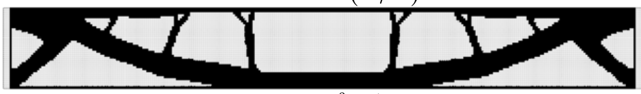
$w:1.0\times10^8(N/m)$

図4　解析結果

$w:40(N/m)$



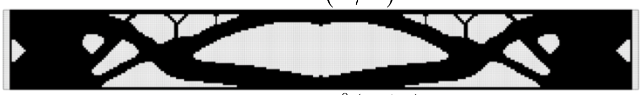
$w:1.0\times10^8(N/m)$



$w:1.0\times10^9$ N/m

図5　解析結果

$w:40(N/m)$



$w:1.0\times10^8(N/m)$

$w:1.0\times10^9(N/m)$

図6　解析結果

4. まとめ

本研究では，力学的に合理性のある大梁の形を，幾何非線形を考慮できる粒子法（MPS法）とCA-ESO法を組み合わせた２次元位相最適化手法を用いて求め，その有効性を検討した．その結果，本手法は，微小変形問題では，有限要素法を用いた手法の解と類似した位相が得られ，荷重を大きくした大変形問題では，細い圧縮材が少なくなり，座屈に強い，よりロバスト性のある解が得られることが確かめられた．

参考文献

1)　越塚誠一：粒子法，丸善，2005
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，日本建築学科構造系論文集，Vol.79，No.703，pp.1279-1286，2014