

27. HMPS法とCA-IESO法を用いたコンプライアントメカニズムの創生に関する研究

1710920032 鮫島 有太佳
指導教員 藤井大地 教授

Hamiltonian MPS法, CA-IESO法, コンプライアントメカニズム, 有限変形

1. はじめに

コンプライアントメカニズムは弾性変形によって入力または変位を別の点に伝達し自身の柔軟性によりジョイントやバネの機能を実現する構造体である。構造体として形状を支えるための剛性と、有限変形を実現するための柔軟性をあわせもつ。コンプライアントメカニズムの採用により、部品点数の削減、潤滑剤充填作業の省略、組み立て手順を回避するなどの利点を有しており幅広い分野において利用されつつある。このような形態を創生する方法として多くの手法が提案されている。その中でもトポロジー最適化手法は力学的根拠に基づいた最適な形態を創生できる有効な手法である。

そこで本研究では、コンプライアントメカニズムの最適設計を行うため、これまでボクセル有限要素法として開発したトポロジー最適化手法（CA-IESO法）に鈴木・越塚によって開発された粒子法（HMPS法）を併用して用いることにより有限変形を考慮したコンプライアントメカニズムの形態創生を検証する。

2. HMPS法の概要

HMPS法は、変形を数学的に記述する変形勾配テンソルを影響半径内の粒子に対する重み付き最小二乗近似によって求めるところに特徴があり、これにより回転行列等の定義が必要無くなるため、定式化もプログラミングも非常に容易に行える。本研究では、動的緩和法を用いたHMPS法による静的弾性解析プログラムを開発し、建築構造解析に必要となる軸方向変形、せん断変形、曲げ変形に対する解析精度を検証している。

本論文では、本手法を、ボクセル解析法に基づくトポロジー最適化手法に適用する。ただし、本研究では、ボクセルを立方体要素とし、ボクセルの各節点に粒子を配置するものとする。

3. コンプライアントメカニズムの創生法

本解析では、最適化の各ステップで、図1(a)~(d)に示す4ケースの解析を行う。ここでは、入力点*i*に与えられた力を F_{in} とし、出力点*j*の応答を Δ_{out} とする。図1(a)は入力点*i*に入力荷重、出力点*j*に出力応答があるときの原問題の解析、図1(b)は仮想仕事の原理を用い、出力点に仮想荷重を与えることで出力ポートの変位 Δ_{out} を求めるための解析、また、図1(c)は入力点の力を出力点に伝える剛

性を確保するための解析、図1(d)は出力点の反力を入力点に伝える剛性を確保するための解析である。

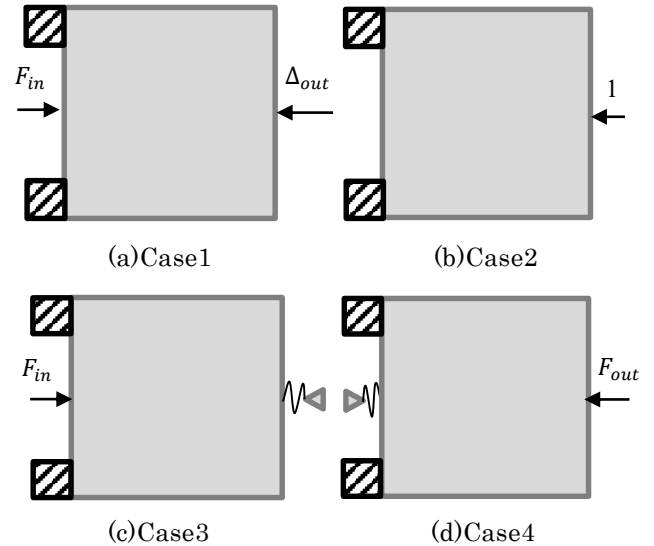


図1 4ケースの解析条件

本研究では、コンプライアントメカニズムを創生する最適化問題の目的関数を(1)式のように定義する。

$$f(\rho) = -w \cdot \frac{C_{21}(\rho)}{C_{21}^0} + (1-w) \cdot \frac{C_3(\rho) + (F_{in}/F_{out})C_4(\rho)}{C_3^0 + (F_{in}/F_{out})C_4^0} \cdot \frac{N_L(\rho)}{N_L^0} \quad (1)$$

ただし、

$$C_{21}(\rho) = \mathbf{d}^{(2)T} \mathbf{K}(\rho) \mathbf{d}^{(1)} \\ C_3(\rho) = \mathbf{d}^{(3)T} \mathbf{K}(\rho) \mathbf{d}^{(3)}, \quad C_4(\rho) = \mathbf{d}^{(4)T} \mathbf{K}(\rho) \mathbf{d}^{(4)} \quad (2) \\ \rho = \{\rho_1, \dots, \rho_i, \dots, \rho_N\}, \quad \mathbf{K}(\rho) = \mathbf{A}_{i=1, N_L} (\rho_i \mathbf{k}_i^0), \quad N_L(\rho) = \sum_{i=1}^N \rho_i$$

ここで、(1)式の第1項は出力点の無次元変位、第2項は入力荷重を出力点に伝達するための無次元剛性を表す。ただし、第2項の $N_L(\rho)/N_L^0$ は、残存要素数が減少しても第2項の剛性項を1に近い値に保つための係数である。また、 $C_{21}^0, C_3^0, C_4^0, N_L^0$ は、初期ステップのコンプライアンスと残存要素数、(1)式の w は第1項と第2項の割合を決定する重みを表す。また、(2)式の \mathbf{K} は全体剛性マトリクス（記号Aは重ね合わせを表す）、 ρ_i, \mathbf{k}_i^0 は*i*番目要素の密度と初期剛性マトリクス、 $\mathbf{d}^{(1)}, \mathbf{d}^{(2)}, \mathbf{d}^{(3)}, \mathbf{d}^{(4)}$ は、Case1~4の問題の節点変位ベクトル、 N は全要素数を表す。

(1)式から CA-IESO 法の感度指標を次式のように導く。

$$\frac{\partial f(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} = -w \cdot \frac{\mathbf{d}_i^{(2)T} \mathbf{k}_i^0 \mathbf{d}_i^{(1)}}{C_{21}^0} + (1-w) \cdot \left(\frac{\mathbf{d}_i^{(3)T} \mathbf{k}_i^0 \mathbf{d}_i^{(3)} + (F_{in}/F_{out}) \mathbf{d}_i^{(4)T} \mathbf{k}_i^0 \mathbf{d}_i^{(4)}}{C_3^0 + (F_{in}/F_{out}) C_4^0} \cdot \frac{N_L(\boldsymbol{\rho})}{N_L^0} + \frac{C_3(\boldsymbol{\rho}) + (F_{in}/F_{out}) C_4(\boldsymbol{\rho})}{C_3^0 + (F_{in}/F_{out}) C_4^0} \cdot \frac{1}{N_L^0} \right) \quad (3)$$

ただし、(1)式の重み w は、入力データとして、(1)式の第2項の重みを除いた剛性部分の制約値 \bar{c}_r と重みの初期値 w_0 を与え、最適化の過程で剛性部分が制約値以上になった場合は、制約値以下に収まるまで前ステップの重みに $1/2$ を掛けて減少させる。また、最適化の仕上過程においては、剛性の制約値を満足する場合は、重みを $w_0/100$ ずつ増加させ、剛性の制約値を満足しない場合は、 $w_0/100$ ずつ減少させる。このような重みの制御を行うのは、コンプライアントメカニズムの創生において、しばしば構造体の連結が失われる状態が発生するためである。

4. 解析例

提案手法の有効性を検証するため、まず、図2にコンプライアントグリッパーの形態を創生する。解析諸元は、ヤング係数205 [Gpa]、ポアソン比0.3、ボクセル分割を $50 \times 25 \times 2$ とする。解析パラメータは、重み w を0.1、CA-IESO法の除去率を0.05、剛性制約値を1.5として解析を行った。また、荷重は有限変形が生じる大きさに設定している。図3は、創生された形態とその変形を示すが、既往の研究³⁾で得られている解と類似した形態になっていることがわかった。

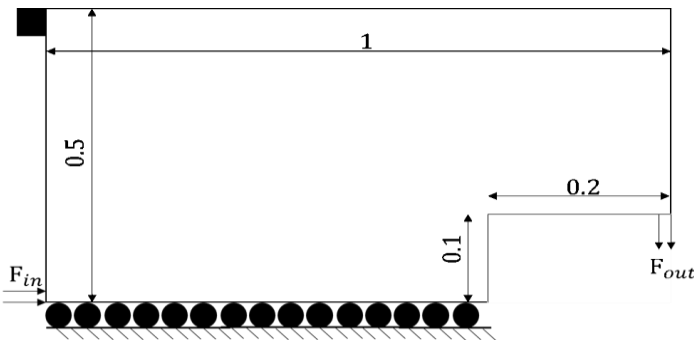


図2 解析モデル

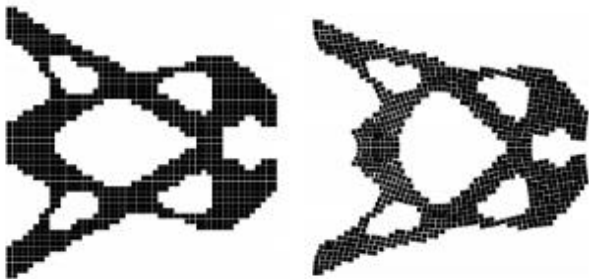


図3 最終形態 (左) と変形図 (右)

次に、図4に示す変位インバーターの解析を行った。ボクセル分割は $50 \times 50 \times 2$ で、それ以外の諸元は同じである。解析パラメータは、重み w を0.3、CA-IESO法の除去率を0.05、剛性制約値1.2として解析を行った。また、荷重は有限変形が生じる大きさに設定している。図5は、創生された形態と変形を示すが、この場合も既往の研究³⁾で得られている解と類似した形態になっていることがわかった。

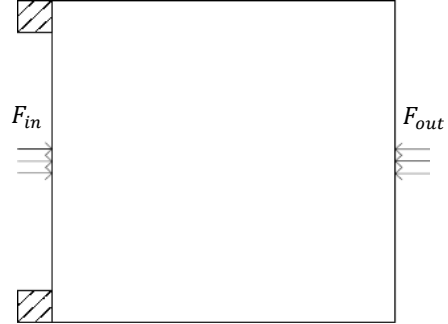


図4 解析モデル

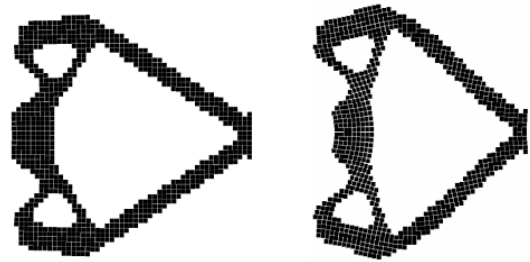


図5 最終形態 (左) と変形図 (右)

5. まとめ

本論文では、HMPS法とCA-IESO法を用いた有限変形を考慮したコンプライアントメカニズムの創生法を提案し、その有効性を検討した。その結果、基本的例題においては、既往の研究の解析結果と類似した形態を創生できることがわかった。また、有限変形を考慮することで、既往の手法に比較して非常に高速にコンプライアントメカニズムを創生できることがわかった。

今後は三次元の例題と更なる応用的な問題に対応できるか検討していきたい。

参考文献

- 1) 菊池貴博, 越塚誠一ら: 壁境界条件としてペナルティ法を導入した Hamiltonian MPS 法による超弾性体モデルの単軸圧縮シミュレーション, 日本計算工学会論文集, 2014.9
- 2) 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
- 3) Y. Li, X. Huang, Y. M. Xie, S. W. Zhou: Evolutionary topology optimization of hinge-free compliant mechanisms, International Journal Of Mechanical Sciences, Vol.86, pp.69-75, 2014.9