17.　HMPS 法と 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

1510920021　　高見一輝
指導教員　　藤井大地　教授

Hamiltonian MPS 法，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．

しかしながら，従来の方法は微小変形理論にもとづく手法がほとんどであり，有限変形を考慮できるトポロジー最適化手法はあまり開発されてこなかった．これは，従来多く用いられている有限要素法による解析では，有限変形による要素の歪みにより解の精度が悪化し，収束解がなかなか得られないためである．

そこで本研究では，有限要素法の代わりに粒子法（Hamiltonian MPS 法，以下 HMPS 法と記述）[1)]を用いることでこの問題を解決し，さらに，トポロジー最適化手法として，藤井らが開発した除去要素の密度を完全に 0 にでき，事前解析がほとんど必要ない改良型 ESO 法（IESO 法）[2)]を適用することで，非常に計算効率がよい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

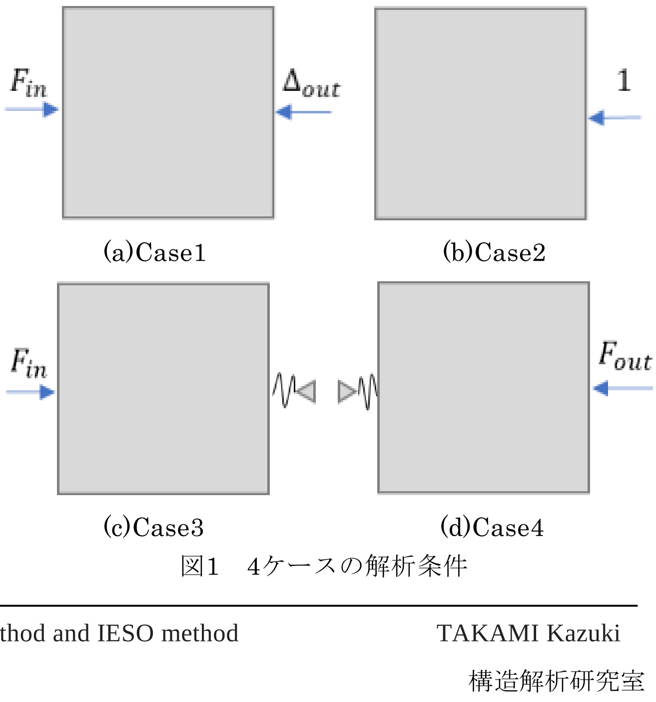
本解析では，最適化の各ステップで，図1(a)～(d)に示す4ケースの解析を行う．ここでは，入力点iに与えられた力をF_{in}とし，出力点jの応答をΔ_{out}とする．図1(a)は入力点iに入力荷重，出力点jに出力応答があるときの原問題の解析，図1(b)は仮想仕事の原理を用い，出力点に仮想荷重を与えることで出力ポートの変位Δ_{out}を求めるための解析，また，図1(c)は入力点の力を出力点に伝える剛性を確保するための解析，図1(d)は出力点の反力を入力点に伝える剛性を確保するための解析である．

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．ただし，ここでは有限要素法の表記を用いている．

$$f\{\boldsymbol{\rho}\} = -w\mathbf{d}^{(2)T}\mathbf{K}\mathbf{d}^{(1)} + (\mathbf{d}^{(3)T}\mathbf{K}\mathbf{d}^{(3)} + \mathbf{d}^{(4)T}\mathbf{K}\mathbf{d}^{(4)})/F_{\mathrm{in}} \tag{1}$$

ここで，$\mathbf{K}$ と$\mathbf{d}^{(1)}, \mathbf{d}^{(2)}, \mathbf{d}^{(3)}, \mathbf{d}^{(4)}$ は，Case1~4の問題の全体剛性マトリクスと節点変位ベクトルを表す．また，(1)式の第1項は出力点の応答変位Δ_{out}に重み係数wを掛けたものを表し，第2項はCase3, 4の剛性（コンプライアンス）の和を入力荷重で割ったものを表す．また，$\boldsymbol{\rho}$ は(2)式で示される設計変数（要素密度）を示し，(3)式に示す要素密度の総和を要素数で割った総密度比が制約条件となる．

$$\boldsymbol{\rho} = \{\rho_1 \cdots \rho_i \cdots \rho_N\} \qquad \rho_i = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{2}$$



(a)Case1　(b)Case2　(c)Case3　(d)Case4

図1　4ケースの解析条件

$$\sum_{i=1}^{N} \rho_i \Big/ N \le \bar{m} \tag{3}$$

ここで，i番目要素の要素剛性マトリクスは

$$[\mathbf{k}_i(\rho_i)] = \rho_i[\mathbf{k}_i^0] \tag{4}$$

と表すことができる．この場合，(1)式の目的関数の感度は(4)式を用いて次式のように導かれる．

$$\frac{\partial f(\rho_i)}{\partial \rho_i} = w\mathbf{d}_i^{(2)T}\mathbf{k}_i^0\mathbf{d}_i^{(1)} - \left(\mathbf{d}_i^{(3)T}\mathbf{k}_i^0\mathbf{d}_i^{(3)} + \mathbf{d}_i^{(4)T}\mathbf{k}_i^0\mathbf{d}_i^{(4)}\right)/F_{\mathrm{in}} \tag{5}$$

ここで，(5)式の各項は，Case1～4の解析で得られる各要素のひずみエネルギーの2倍から計算されるものであることがわかる．したがって，本提案手法では，(5)式の感度を粒子法（HMPS法）によって求め，この感度をもとにIESO法による要素除去を行う．また，図1のCase3, 4に示される拘束点のバネは，拘束点の粒子速度を自由の場合の1/100にすることで模擬する．したがって，本解析の入力パラメータは，総密度制約$\bar{m}$とIESO法の除去率，影響半径，それに出力応答の重みwのみとなる．

4. 解析例

提案手法の有効性を検証するため，まず，図2に示す変位インバータの形態を創生する．解析諸元は，ヤング係数210〔Gpa〕，ポアソン比0.3，ボクセル分割を50×50×2とする．解析パラメータは，重みwを3，IESO法の除去率を0.05, 影響半径をボクセル長の1.5倍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．

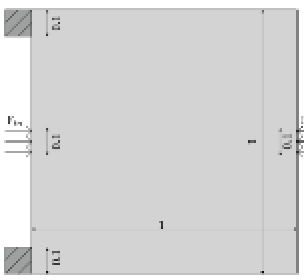


図2　解析モデル

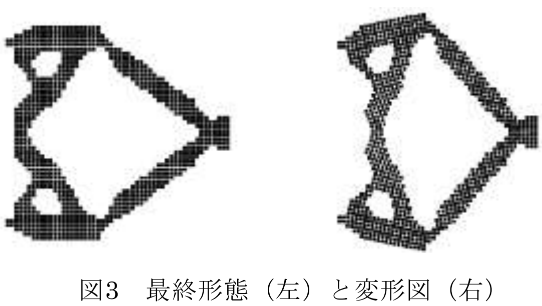


図3　最終形態（左）と変形図（右）

次に，図4に示すコンプライアントグリッパーの解析を行った．ボクセル分割は50×25×2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2，IESO法の除去率を0.05，影響半径をボクセル長の1.5倍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．

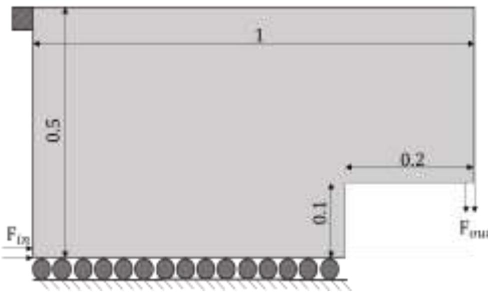


図4　解析モデル

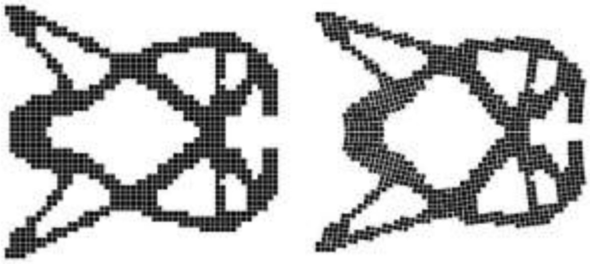


図5　最終形態（左）と変形図（右）

5. まとめ

本論文では, HMPS 法と 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．

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

構造解析研究室