

座屈が生じた 4D プリント物体の形状復元解析

日本大学 学生会員 ○中野 雄太
日本大学 正会員 長谷部 寛

1. はじめに

本研究では、縦横奥行き の 3 次元に時間軸の 1 次元を加えた 4D プリント技術を構造部材へ適用することを検討している。

構造部材へ適用するためには、4D プリントした物体の変形形状を正確に予測する必要がある。そこで、本検討では 4D プリントに適用可能な形状記憶ポリマー (Shape Memory Polymer, 以下 SMP と略記) の材料諸元を用いて、圧縮した物体を対象に形状復元解析を有限要素法により実施した。

2. 形状記憶ポリマーフィラメント (SMP) ¹⁾

SMP フィラメントは、3D プリント用の形状記憶ポリマーフィラメントであり、形状記憶特性を有している。SMP を用いて 3D プリントした物体を、ガラス転移点 ($T_g = 55^\circ\text{C}$) 以上の温度で変形させた後、変形形状を保持したまま T_g 以下に冷却するとその形状が固定される (形状固定性)。さらに、材料を T_g 以上に加熱すると元の形状に回復する (形状回復性)。

本研究では、SMP の形状回復性に着目し、SMP を T_g 以上に加熱した際の材料諸元を用いて板と長柱の圧縮解析および形状復元解析を実施した。

3. 復元力の扱い

本検討では、圧縮解析と形状復元解析を 2 つに分けて実施する。圧縮解析で生じたひずみが全て残留ひずみになると仮定し、形状復元解析の解析メッシュには圧縮解析により得られた解析メッシュをそのまま使用する。また形状復元解析の復元力には、圧縮解析により生じたひずみから応力を算出し、算出した応力から変換した体積力に係数を乗じた力を用いた。復元力は要素ごとに算出する。

板の形状復元解析においては、以下の 2 つのケースで算出した応力を用いて変換した復元力を使用し、算出した応力により形状復元解析後の復元形状がどの程度異なるのかを検討する。

Case 1 応力ひずみ関係を用いた応力ベクトル

Case1 では式(1)に記す平面応力状態を仮定した応力ベクトルを用いる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^e \\ \sigma_y^e \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^e \\ \varepsilon_y^e \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 σ_x, σ_y は x, y 方向の直応力、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ は x, y 方向の直ひずみ、添え字の e は要素を表す。

Case 2 変態テンソルを用いた応力ベクトル

Case2 では都井ら ²⁾により提案された形状記憶合金の構成則に含まれる変態テンソルを用いて応力ベクトルを算出する。Case2 の応力ベクトルを式(2)に記す。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^e \\ \sigma_y^e \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_{eq}^e}{\partial \sigma_x^e} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \sigma_{eq}^e}{\partial \sigma_y^e} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^e \\ \varepsilon_y^e \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 σ_{eq}^e はミーゼス応力を表す。

復元力の算出

式(1)、(2)で算出した応力を式(3)、(4)で外力および体積力へ変換する。

$$F_i^e = \sigma_i^e A_j^e \quad (3)$$

$$b_i^e = \frac{F_i^e}{V^e} \quad (4)$$

ここで、 F は外力、 A は断面積、 b は体積力、 V は体積を表し、添え字は $i = 1, 2$ ($1 = x, 2 = y$)、 $j = 1, 2$ ($1 = y, 2 = x$) とする。

また、外力による伸びと体積力による伸びの関係から、伸びが等しくなる体積力は式(5)で表される。

$$b = \frac{2P}{LA} \quad (5)$$

ここで、 P は集中荷重、 L は棒の長さを表す。式(5)を用いて式(6)のように係数 α を算出し、式(4)で算出した体積力へ乗じることで、載荷する復元力 $b_i^{e'}$ とする。

キーワード 4D プリント, SMP, 形状復元解析, 復元力, 変態テンソル

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

$$\begin{Bmatrix} b_x^{e'} \\ b_y^{e'} \end{Bmatrix} = \alpha \begin{Bmatrix} b_x^e \\ b_y^e \end{Bmatrix}, \quad \alpha = \frac{b}{b_y^e} \quad (6)$$

本検討では、せん断力およびせん断ひずみは無視する。また、数値解析には並列有限要素解析プログラム「FrontISTR」³⁾を用いた。

4. 板の圧縮解析および形状復元解析

解析対象は高さ 100mm、幅 50mm の板とする。解析には二次元解析を適用し、支配方程式には線形弾性体の平衡方程式を用いた。解析モデルを図 1 の(a)に記す。拘束条件は、底面の節点を全て x, y 方向に拘束し、材料定数は、ヤング率には戸伏らの文献 4) の実験で得られた高温下における SMP のヤング率 ($E=27.7\text{MPa}$) を、ポアソン比には 0.3 を用いた。

圧縮解析は、上面に 2.0N/mm^2 の分布荷重を鉛直下向きに載荷させて板を圧縮させる。圧縮解析結果を図 1 の(b)に記す。圧縮解析の結果として鉛直下向きに 7.17mm 変位し、ポアソン効果により水平方向に 1.08mm 膨張した。この圧縮解析結果を用いて形状復元解析を実施する。

形状復元解析は、圧縮解析で得たひずみを式(1)～(6)で変換した復元力を、圧縮解析で発生した変位ベクトルの逆方向へ載荷する。

形状復元解析結果を図 1(c)と図 2(c)に記す。解析結果から case1, case2 共に圧縮前の形状に復元する方向へ変形することが分かった。また、若干ではあるが変態テンソルを用いた case2 の方が、より元形状に近い形状へ復元させることができることを確認した。

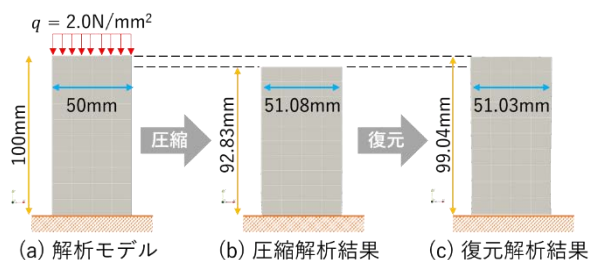


図 1 Case1 の解析結果

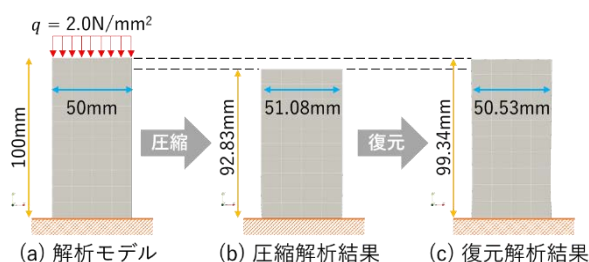


図 2 Case2 の解析結果

5. 長柱の圧縮解析および形状復元解析

解析対象は 10mm の正方形断面で高さ 100mm の長柱とする。解析モデルを図 3(a)に記す。拘束条件は底面を x, y, z 方向、上面を x, y 方向に拘束した。圧縮解析の構成則は Neo Hookean 超弾性モデルを使用し、座屈挙動が現れるまで荷重を載荷した。圧縮解析結果を図 3(b)に記す。

形状復元解析では線形弾性体の構成則を使用し、4 章の板の形状復元解析と同様にして、3 次的に拡張した復元力を算出し、さらに一様に倍率をかけた復元力を載荷する。

形状復元解析結果を図 3(c)に記す。結果として、面内変形の一方向の座屈挙動であれば、線形解析でもほとんど元形状に近い形状へ復元させることができることを確認した。

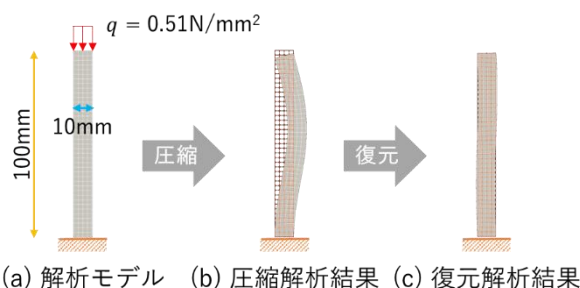


図 3 長柱の解析結果

6. まとめと今後の課題

SMP の形状回復性に着目し、有限要素解析を用いて形状復元解析を実施した結果、変態テンソルを用いた応力ベクトルから算出した体積力を復元力として扱うことの有効性を確認することができた。

今後の課題として、算出した体積力へ乗ずる係数の検討および SMP を使用してプリントした物体を用いた実測値と比較する必要があると考える。

参考文献

- 1) 株式会社 SMP テクノロジーズ HP, <http://www.smptechno.com/>, (閲覧日 2021.12.15)
- 2) 都井裕ら：形状記憶合金素子の組合せ応力下における超弾性挙動の計算モデリング, 日本機械学会論文集(A 編), 74 巻 739 号, pp.391-398, 2008
- 3) 一般社団法人 FrontISTR, <https://www.frontistr.com/>
- 4) 戸伏壽昭ら：形状記憶ポリマーのメカニカル構成モデル, 日本機械学会論文集(A 編), 66 巻 643 号, pp.502-508, 2000