

4D プリントのための形状復元解析の初期検討

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

近年、3D プリント技術は金属材料や樹脂材料にも適用され、3D プリントされた物体に何らかの刺激を与えることで、物体の形状が変化するという技術にまで発展している。

本研究では、このような縦横奥行き 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、3D 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、物体の形状復元解析の初期検討を有限要素法により実施したものである。

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。そのため SMP を用いて 3D プリントされた物体は、ガラス転移点 ($T_g=55^{\circ}\text{C}$) 以上に加熱すると軟化してゴム状態となり、容易に形状を変化させることができる。また、変形させたまま物体を冷却すると、変形形状を維持することができる (形状固定性)。そして、再度 T_g に加熱すると元の形状に戻る (形状回復性)。SMP の挙動イメージを図 1 に示す。

本研究では、SMP の形状回復性に着目し、SMP を T_g に加熱した際の材料諸元を用いて二次元板の圧縮解析および形状復元解析を実施した。

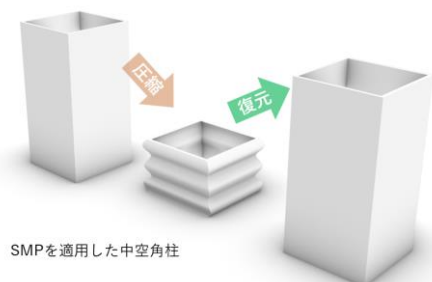


図 1 SMP の挙動イメージ

3. 支配方程式と復元力の扱い

本検討の数値解析には並列有限要素解析プログラム「FrontISTR」を用いた。支配方程式には式(1)～式(3)に記す線形弾性体の平衡方程式を用いている。

$$\partial^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \partial \mathbf{u} \quad (3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、 \mathbf{b} は物体力、 \mathbf{E} は弾性係数行列、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみ、 \mathbf{u} は変位、 ∂ は微分演算に関する行列である。

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が、圧縮解析で発生したひずみが全て残留ひずみになると仮定し、形状復元解析の初期ひずみとして与える。

また、以下の 2 つの Case で算出した体積力を復元力として与え、復元形状の比較検討を行う。

Case (1) 線形変換による応力の算出

式(4)～式(6)に記すように圧縮解析で発生したひずみを応力へ変換し、外力および体積力を算出する。

$$\sigma_i^e = E \varepsilon_i^e \quad (4)$$

$$F_i^e = \sigma_i^e A_j^e \quad (5)$$

$$b_i^e = \frac{F_i^e}{V^e} \quad (6)$$

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

Case (2) 変態テンソルを考慮した応力の算出

形状記憶物質には SMP の他に形状記憶合金が挙げられる。形状記憶合金の構成式は都井ら²⁾により提案され、相当応力を直ひずみで微分した残留ひずみ方向テンソルを含んだ変態テンソルが組み込まれることで応力が導かれている。そこで残留ひずみ方向

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

テンソルを含んだ応力を式(7)のように算出する.

$$[\sigma^e] = E \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma_x^e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma_y^e} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \tau_{xy}^e} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^e \\ \varepsilon_y^e \\ \gamma_{xy}^e \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここで σ_{eq} はミーゼス応力, τ_{xy} は剪断ひずみである. Case2 では, 式(7)で導いた応力を上述した式(5), 式(6)を用いて体積力を算出する.

本検討は初期検討であるため, 剪断力および剪断ひずみは無視して考えるものとする.

4. 解析対象と解析条件

解析対象は高さ 100mm, 幅 50mm の二次元板とする. また解析モデルは図 2 の (a) に記すように, 1要素あたり高さ 10mm, 幅 12.5mm で 40 分割した解析モデルを使用し, 底面の節点を全て x, y 方向に拘束した. 材料定数として, ヤング率には戸伏らの文献³⁾で算出さ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.

圧縮解析の荷重条件は, 上面に 2.0N/mm^2 の分布荷重を鉛直下向きに载荷させ, 板を圧縮させる.

形状復元解析の荷重条件は, 3章で述べた Case(1) (2) で算出した体積力を復元力として与え, 圧縮解析で発生した変位方向と逆向きに载荷する.

5. 解析結果と復元形状の比較

3章で算出した体積力を復元力として载荷し, 圧縮した板の形状を復元させる. この時, Case (1) と (2) の復元力で復元した形状の比較検討を行う.

圧縮解析結果を図 2 の(b)に記す. 圧縮解析では, 分布荷重を载荷することで, 上面が鉛直下向きに約 7.17mm に変位し, 水平方向にはポアソン効果により約 1.08mm 膨らんだ. この結果を用いて形状復元解析 Case (1) (2) を行った.

形状復元解析の結果を図 2, 図 3 の (c) に記す. 解析結果の形状を比較すると Case1 は, 鉛直方向および水平方向に大きく変形し, 元の形状とは異なる形状となった. 一方で Case2 は, 元の形状に近い形状に復元した. また, 表 1 に板の上面中央節点の y 座標を記す. 表 1 より, Case1 で算出した体積力は過大評価となり形状が大きく変形するが, Case2 では

変態テンソルを含むことで妥当な変形形状となることが分かった. 元の形状との誤差は剪断力やせん断ひずみは無視していることによると考える.

表 1 上面中央節点の y 座標

解析モデル	圧縮解析	Case1	Case2
100.00	92.83	126.83	99.93

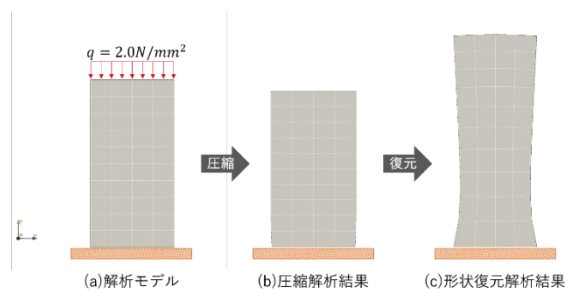


図 2 Case1 の解析結果

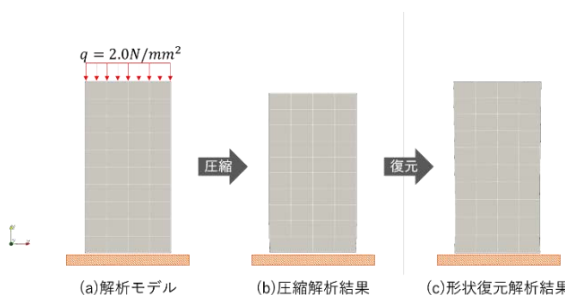


図 3 Case2 の解析結果

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の初期検討を行った. その結果, 変態テンソルを含む応力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, 元の形状と形状復元解析結果の形状誤差の修正および 3次元解析への拡張, そして, 文献3)で提案されている SMP の構成則を解析へ適用することが必要となる.

参考文献

- 1) 株式会社 SMP テクノロジーズ HP, <http://www.smp techno.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, p391-398, 2008-3
- 3) 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, p502-508, 2000-3