

複雑形状の機械的特性予測に関する研究

機械情報システム課 中村陽文、吉江真太郎

1. 緒言

高齢化の進展に伴い、変形性股関節症や関節リウマチなどのために壊れてしまった股関節を、人工の器械である人工股関節に置き換える手術が増加傾向にある。人工股関節のうち、ステムと呼ばれる金属製人工骨は、3Dプリンタで作製可能な3次元の中空構造であるラティス構造とすることで、生体に適した材料特性とすることが可能であると期待されている⁽¹⁾。一方、ステムの生体適用のためには、国際規格に規定される試験による耐久性の評価が必要であるとされており、開発コスト削減のためには工学支援システム(CAE)を用いた設計段階での耐久性の事前予測が有効であると考えられる。しかしながら、ラティス構造は形状が複雑であることから、そのままの3D-CADモデルでは有限要素法による計算は難しい場合が多い。

そこで本研究では、ラティス構造の金属製ステムの耐久性について、モデルの簡略化方法として均質化法を用いた有限要素解析による予測を行い、実際に3Dプリンタで作製されたステムの耐久性試験を行うことでCAE手法の検証を行う。

2. 実験方法

図1に、本研究で対象とする人工股関節ステムの外観およびX線CTによる断層画像を示す。このステムは、金属積層造形装置(EOSINT-M280、EOS)を用いてSUS316Lで作製された。図1bに示されるように、ステムのネック部は中実、それより下部は、1.5 mm厚のシェル内部がラティス構造となっており、骨との弾性率の差を

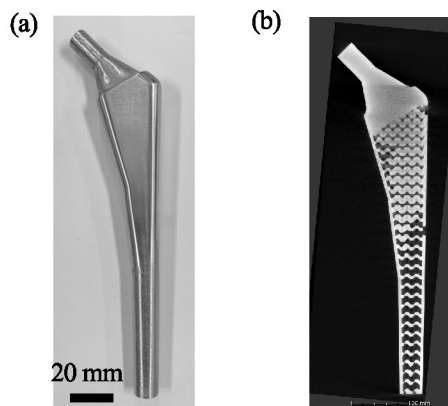


Fig. 1 (a)Printed-out optimal stem and (b)CT image of the cross section

低減するように、最適化計算により密度分布が30–70%の範囲で傾斜している。なお、ステムの詳細な設計方法は文献⁽¹⁾を参照されたい。まず、ステムに、ISO7206-4:2010に規定の耐久性試験に相当する荷重を負荷した際に、各部にかかる応力について有限要素法による評価を行う。図2に、解析モデルおよび境界条件を示す。

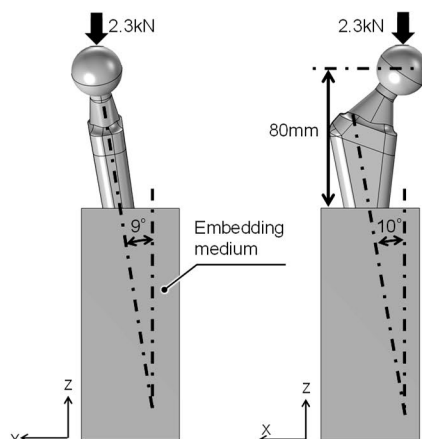


Fig. 2 Schematic diagram of the FEM evaluation

図2に示されるように、ステムをXZ面で10°、YZ面で9°傾けた状態で上部骨頭中心から80 mmの位置以下の部分を骨セメントで固定し、骨頭から鉛直下向きに2.3 kNの荷重を負荷する。ラティス構造をすべてモデル化して解析を行うことはCADデータ構造の複雑さ、および計算時間の都合により困難であったため、均質化法を用いて等価な材料物性値を中実構造のステムに適用することで解析を行った。均質化法を用いて、異なる密度におけるラティス構造の等価な弾性係数を計算し、ステムのラティス構造部の密度分布に合わせて、線形補間された等価な物性値を適用した。なお、ラティス構造の均質化法に関する詳細は文献⁽²⁾を参照されたい。ステムおよび骨頭の物性はSUS316L(ヤング率185 GPa、ポアソン比0.29)とし、固定部は骨セメント(ヤング率6 GPa、ポアソン比0.29)とした。有限要素解析は汎用解析ソフト(COMSOL Multiphysics 5.6、COMSOL AB)を用いて行った。

図3に実験による耐久性試験の外観を示す。ステムは骨セメント(オストロン II、ジーシー(株))でホルダに固定され、せん断方向の荷重がかからないような機構となっている上部の圧盤より、周波数15 Hzで最小0.25 kN、最大2.3 kNの荷重を負荷した。試験は、油圧サーボ式疲労試験機(FT-5、(株)鷲宮製作所)を用いて行い、繰り返し数は500万回とした。

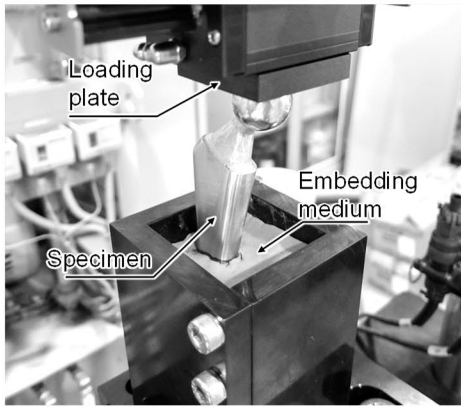


Fig. 3 Overview of the endurance test

3. 実験結果および考察

図 4 に、有限要素法により計算された最大主応力分布を示す。図 4 に示されるように、最大主応力はネック部および固定部で特に大きな値を示し、それぞれ約 175 MPa および約 85 MPa であった。ステムに使用した SUS316L の疲労強度は、積層造形用材料の疲労特性を調査した先行研究³⁾を参考にすると、200 MPa 程度であり、第 1 主応力は材料の疲労強度に比べて低い値を示していることがわかる。以上の結果より、安全率は低いものの、ステムは耐久性試験に耐えられるものと予測された。また、最も大きな主応力を示したネック部は中実構造の部分であるた

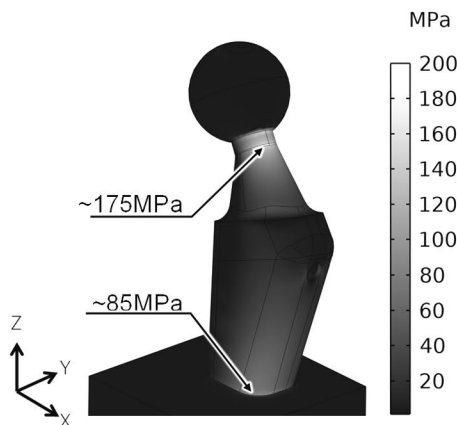


Fig. 4 Maximum principal stress distribution

キーワード：積層造形、ラティス構造、人工股関節、疲労

Endurance Properties of a Femoral Stem with Three-Dimensional Porous Architecture

Mechanics and Digital Engineering Section; Takafumi NAKAMURA and Shintaro YOSHIE

A durability test was conducted on a femoral stem with a three-dimensional porous architecture. The homogenization method was used to simplify the geometry for structural analysis. The CAE results indicated that the stress on the stem during the durability test remained below the material's fatigue limit. The durability test results showed no breakage or cracking of the stem after 5 million cycles of 2.3 kN loading, which is the test standard.

め、ラティス構造にしたことによるステムの破損への影響は少ないものと考えられる。一方、本研究では均質化法を利用した解析のため、ラティス構造の詳細な応力分布の確認は行うことができない。それゆえ、仮にラティス構造部で局所的に高い応力が発生する箇所があった場合には、確認ができないことには留意しておく必要がある。

耐久性試験を行った結果、規定の荷重負荷後においても、外観の目視観察ではステムの折損および亀裂は認められなかった。また、X線CT装置(inspeXio SMX-225CT FPD HR、(株)島津製作所、分解能 28 μm)を用いた内部観察の結果においても、ステム内部に特に亀裂は認められなかった。

4. 結言

ラティス構造の金属製ステムの有限要素法を用いた耐久性予測、ならびに実際に 3D プリンタで作製されたステムの耐久性試験を行うことで、CAE によるステムの耐久性の事前予測手法の検証を行った。均質化法を用いて計算されたラティス構造の等価物性値を、中実構造のステムに適用して有限要素法による構造解析を行った結果、安全率は低いものの、ステムは耐久性試験に耐えられるものと予測された。実際にラティス構造のステムの耐久性試験を行った結果、国際規格に規定される負荷をかけた後でも破損は確認されなかった。

参考文献

- 1)中村陽文他:富山県産業技術研究開発センター研究報告, 37(2023) pp.74
- 2)中村陽文他:富山県産業技術研究開発センター研究報告, 34(2020) pp.90-91
- 3)A.B. Spierings *et al.*:*Rapid Prototyp. J.*, 19(2013) pp.88-94