

X線 CT 撮影下における骨組織の圧縮実験と 個体別有限要素解析

Compression Test of Bone Tissue under X-ray CT Imaging and
Individual Finite Element Analysis

小関 道彦¹⁾ 宮下 智弥²⁾ 遠藤 孝修²⁾ 伊能 教夫³⁾

Michihiko KOSEKI, Tomoya MIYASHITA, Takano ENDO and Norio INOU

¹⁾博 (工) 信州大学繊維学部 准教授 (〒 386-8567 長野県上田市常田 3-15-1, E-mail: koseki@shinshu-u.ac.jp)

²⁾信州大学大学院工学系研究科 (〒 386-8567 長野県上田市常田 3-15-1)

³⁾工博 東京工業大学大学院理工学研究科 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Patient-specific stress analysis of a bone based on x-ray CT images provides useful information for medical diagnoses and treatments. However, almost FE models have isotropic material properties for each element even though actual bone tissue is composed of anisotropic materials. This paper proposes a compression test system build in x-ray CT device. The system was applied to a cellular rubber and a chicken humerus and an alteration of inner structure of the specimen was described.

Key Words : Biomechanics, Bone tissue, X-ray CT, Finite element analysis.

1. はじめに

筋骨格系や歯科領域の疾患に対する診断や治療に有用な情報を提供するため、三次元医用画像から患者の骨形態を個体別に有限要素モデル化し、力学状態を解析する研究が盛んに行われている。しかし、モデリングの際には計算規模の観点から骨内部の微細構造まで正確にモデル化することは難しく、簡略化されることが多い。その際、簡略化の仕方によって解析精度に大きく影響することが予想される。

そこで本研究はまず、骨組織の圧縮破壊実験を実施することにより、骨の微細構造に基づく異方性を考慮したモデリングの重要性を示す。そして、X線 CT 装置内で圧縮実験を可能とする実験システムを構築し、多孔質ゴムおよび鶏上腕骨について CT 観察下での圧縮試験および個体別応力解析を実施したことについて報告する。

2. 骨組織の圧縮破壊実験

試験片として、入手が容易な鶏の上腕骨の骨端を超硬石膏で固定し、材料試験機 (EZ-S : 島津製作所) を用いて骨の長軸方向に対して圧縮試験を行った。材料試験機により得られた荷重変位曲線を図 1 に示す。今回の試験片の場合、変位が 0.4mm 程度までは荷重と変位が線形の関係を持っている。しかしそれ以降では、荷重が増減を繰り返し、変位が約 2.3mm のとき完全破壊した。このような荷重変位曲線になることは、骨の内部で微小破壊が起っていたことが原因であると予想される。このため、骨組織に荷重が加わった際の力学的挙動を正確に把握するためには、骨内部での微小破壊を観察することが必要であると考えた。そこで、CT 観察下で圧縮試験を行い、荷重時の内部構造の変化を逐時観察することを可能とするシステムを構築した。

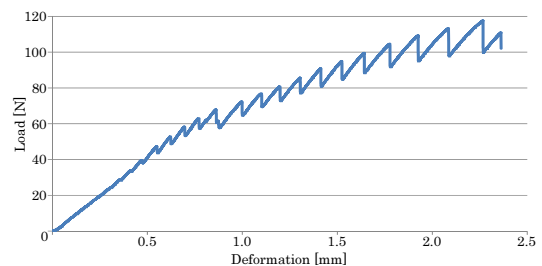


図-1 鶏上腕骨を圧縮した時の荷重変位曲線。

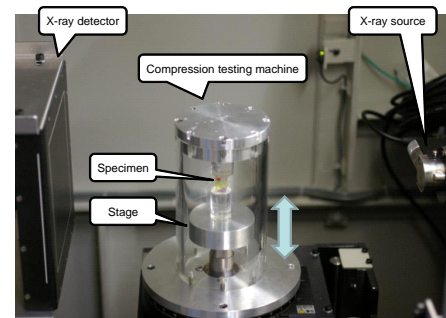


図-2 CT 装置組込型圧縮試験装置。

3. 圧縮試験機の製作

一般に X 線 CT 装置は、X 線管、X 線検出器および回転ステージから構成されている。そこで本研究では、X 線 CT 装置内で試験片に変位を与えながら CT 撮影することを可能とする、図 2 に示す装置を製作した。この装置では、試験片を回転ステージ上の円筒アクリル管の内部に設置することができ、電動シリンダ (EZHP4 : オリエンタルモーター) を動作させることによって試験片に強制変位を与えることが可能となっている。

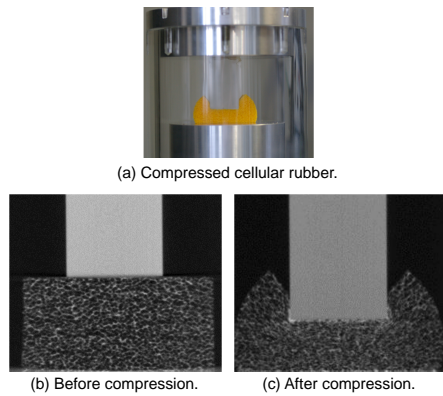


図-3 多孔質ゴム試験片の圧縮試験。

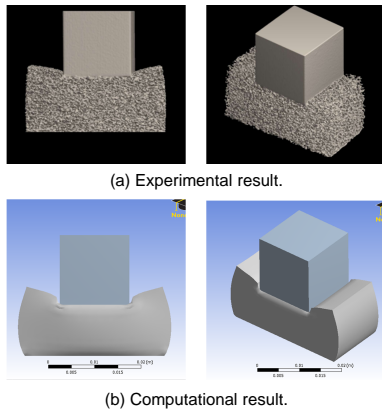


図-4 多孔質ゴム試験片の実験結果と解析結果。

4. 圧縮試験時の内部観察と応力解析

試験片を圧縮した時の内部構造の変化について、製作したシステムによる観察と、数値シミュレーション結果を比較することを試みた。

(1) CT 観察下における人工物の圧縮試験

縦 15mm 横 30mm 高さ 15mm の多孔質ゴム試験片に対し、その中央部を縦 16mm 横 16mm 高さ 29mm のアクリル材で圧縮した。図 3 に実験時の様子および圧縮前後の縦断層画像を示す。圧縮前後の縦断層画像を比較すると、中央の圧縮箇所では周辺箇所に比べて組織が密になっており、内部構造の空洞が変形していることが確認できる。

次に、この状態について汎用有限要素解析ソフトウェア ANSYS12.1 (ANSYS inc.) を用いて解析を行った。解析では、多孔質ゴム試験片とアクリル材は等方弾性体であると仮定し、多孔質ゴム試験片のヤング率には 10MPa、アクリル材のヤング率には 3GPa を設定した。

多孔質ゴムを 4mm 圧縮した時の三次元再構成画像および解析結果を図 4 に示す。両者の変形は非常に類似しているが、解析結果の方が側方へのふくらみが大きいようである。この原因として、実際の多孔質ゴムでは圧縮時に内部の空洞が潰れているのに対し、解析モデルでは空洞のない密な材料としてモデル化されているためであると考えられる。以上のことから、多孔質ゴムや骨梁構造をモデル化する際には、空洞を考慮することが重要であると示唆される。

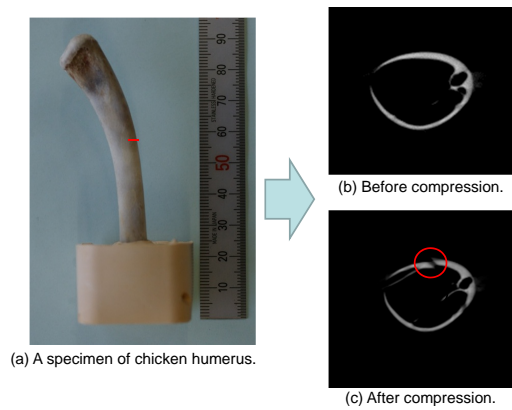


図-5 鶏上腕骨試験片と試験前後の CT 画像。

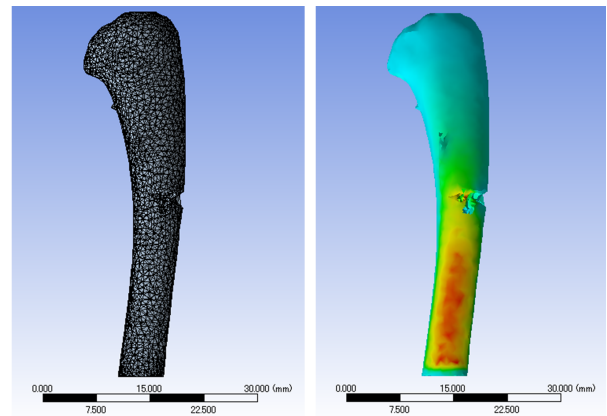


図-6 鶏上腕骨試験片の解析結果。

(2) CT 観察下における骨組織の圧縮試験

変形を観察しやすいように骨幹部に約 2.5mm の切れ込みを入れた鶏上腕骨の試験片に対し、CT 撮影を行いながら圧縮実験を実施した。その結果、1.5mm 変位を与えたところで切れ込み先端部から部分破壊が生じ、2.0mm で完全破壊した。撮影した破壊前と破壊後の CT 画像を図 5 に示す。図 5(c) には赤丸で示すように、圧縮することにより生じた骨折が明確に示されている。

最後に、鶏上腕骨試験片の応力解析を行った。試験片を CT 撮影し、筆者らが提案しているモデリング手法によって有限要素モデルを作成した。作成したモデルおよび最大主応力分布を図 6 に示す。解析の結果、切れ込み先端部で応力が最大となっており、この部分での破壊が生じやすいことを確認できた。

5. まとめ

X 線 CT 装置内に組み込み可能な圧縮試験機を製作し、2 種類の試験片を用いて CT 撮影下における圧縮試験を行った。そして、鶏上腕骨の CT 画像から個別別モデルを作成し、有限要素解析を実施した。ただし、今回の鶏上腕骨の有限要素モデルには、従来通り等方性材料を設定している。今後、高分解能な CT 画像に基づいて骨の微細組織による構造異方性の情報を抽出し、これを有限要素モデルの各要素の材料異方性として設定することにより、等方性材料を設定した解析よりも信頼性の高い解析を行うことを目指したい。