

個体別モデリング手法によるラット椎体の頑健性評価

Evaluation of Mechanical Robustness of Rat's Vertebral Body by an Individual Modeling Method

正 伊能 教夫 (東工大) 正 小関 道彦 (東工大) 見留 徹 (東工大)
上西 雅也 (東工大) 榎 宏太郎 (昭和大) 村山 寿 (呉羽化学)

Norio INOU, Michihiko KOSEKI, Toru MITOME, Masaya JONISHI

Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, O-okayama, Tokyo

Koutarou MAKI, Department of Orthodontics, Showa University, Ohta-ku, Tokyo

Hisashi MURAYAMA, Kureha Chemical Industry Co., Ltd. Shinjuku-ku, Tokyo

Key Words: Robustness of bone, CT image, Vertebra, Individual Modeling, Finite Element Method

1. 緒言

近年大きな社会問題となりつつある骨粗鬆症の診断では骨体の強度を判定する基準として骨密度が利用されている。しかし、骨密度が低い箇所でも骨体に生じる応力が低ければ骨折の危険性は低く、その逆に骨密度が高い箇所でも応力が高ければ骨折の危険性は大きい。そのため、構造を考慮した骨体の頑健性評価が必要である。本研究室では、X線 CT 画像から骨体の形態的特徴を反映させる個体別モデリング手法を開発し¹⁾、頑健性評価の指標として「応力/強度」を提案した²⁾。

今回は頑健性評価指標の妥当性を検証するためにラットの椎体を用いた圧縮破壊実験を行い、その破壊箇所と解析から得られる「応力/強度」分布が最大となる箇所の比較を行ったので報告する。

2. ラット椎体を用いた圧縮破壊実験

前報²⁾において、ウサギ椎体の頑健性評価を試み、その指標である「応力/強度」の妥当性を検証した。しかし、将来的にヒトの脊椎骨に適用することを考えると、この報告にも改善すべき点があることがわかった。

第一に試験体にウサギ椎体を用いたことである。ウサギ椎体は入手しやすく試験体として加工しやすい大きさであるが、ほとんどの部分が緻密骨でできており、内部に海面骨をもつヒト椎体とは構造が異なる。

第二に荷重分布の計測に感圧シートを用いたことである。感圧シートを用いることにより簡便に荷重測定を行えるが、実験後の濃度分布が椎体破壊時の荷重を示しているとは限らない。

最後に上下を成型する樹脂に歯科用レジンを用いたことである。この樹脂は速やかに硬化するため試験片の作成が容易であるが、硬化の過程で気体が発生し、気泡として内部に残留しやすい。これにより樹脂の物

性値が一定とならない恐れがある。

これらの点に考慮し、今回新たに実験を行った。まず試験体として、ヒト椎体と同様、内部に海面骨を持ち、入手が容易なラット椎体を用いた。

次に骨折時の荷重をより正確に把握するため上下各4点に荷重を与え、これをそれぞれ別のロードセルで記録した。なお圧縮速度を0.1mm/minとし、荷重が下がり始めた時点で骨折が起こったと判断して試験機を止めた。

そして樹脂に関しては硬化の過程で気泡が混入しにくいエポキシ樹脂(Z-2/H07, GH Craft社製)を用いた。

Compression testing machine

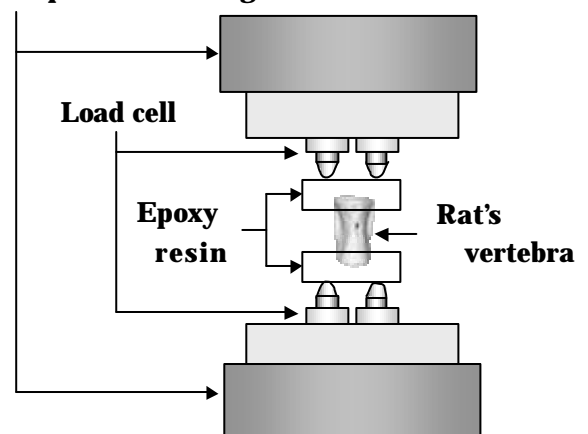


Fig.1 A rat's vertebra with resin

3. モデリング手法

圧縮破壊実験を行う前に、あらかじめ樹脂部分も含めた試験片全体をCTで撮影し、四面体要素でモデリングを行った。

ウサギ椎体を用いた試験片では、ウサギ椎体の体積

に比べ樹脂の体積はそれほど大きくはなかった。しかし、今回使用した試験片はラット椎体の体積が樹脂の体積に比べて圧倒的に小さい。このため、試験片全体を等しいサイズの要素でモデリングした場合、椎体部分の要素数が少なくなり、解析の効率が悪い。そこで、椎体と樹脂の要素サイズを可変とし、椎体部分に要素を集中させる要素生成アルゴリズムを開発した。

図2および表1に椎体と樹脂の要素サイズが等しい場合と異なる場合の比較を示す。両者は椎体部分の要素数がほぼ等しいが、全体の要素数には大きな差が生じている。また、図2の両者を同じ境界条件で応力解析を行ったところ、椎体部分の応力分布が概ね等しくなり、樹脂部分の要素を粗くすることによる椎体部分への影響が少ないことを確認した。なお、有限要素法による応力解析はCAEFEM(Concurrent Analysis Corporation社)を用いた。

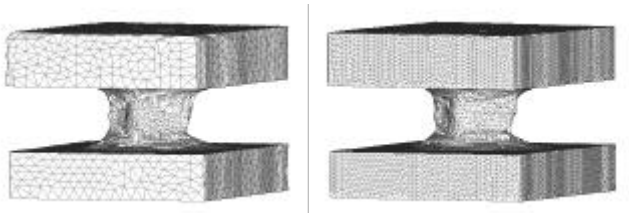


Fig.2 Finite element models of a specimen
New model (left) and old model (right)

Table.1 Number of nodes and elements

		New model	Old model
Number of nodes	Vertebra	4,811	4,606
	Resin	8,179	62,035
	Total	12,990	66,641
Number of elements	Vertebra	25,630	23,815
	Resin	46,778	354,517
	Total	72,078	378,332

4. 応力解析

骨体部のヤング率および強度はCarterらの文献³⁾を参考にし、CT値から算出した。樹脂のヤング率はあらかじめ材料試験を行いヤング率2.06[GPa]を設定した。

図3に圧縮破壊実験後に撮影した試験片の透過画像を示す。また、図4に試験片の有限要素モデルの応力分布を、図5に「応力/強度」分布を示す。

最大応力値は前面の横突起根元部分に見られるが、ここは強度が高いために「応力/強度」は低くなっている。また背側中央部分の応力は横突起根元部分よりも低い強度が小さいため「応力/強度」が最大となる。この箇所は圧縮破壊実験より得られた骨折箇所とほぼ一致している。

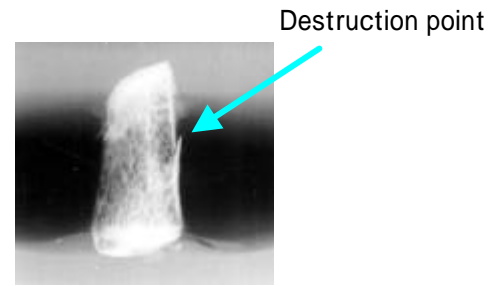


Fig.3 X-ray image of the specimen

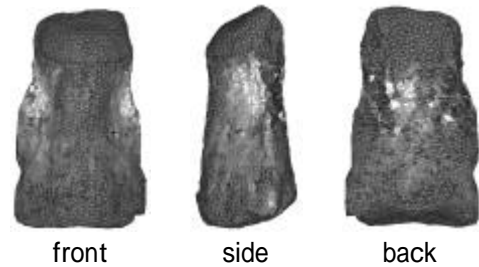


Fig.4 Stress distribution

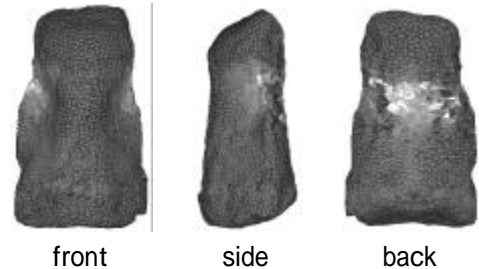


Fig.5 Stress/strength distribution

5. 結言

骨体の頑健性評価のためにラット椎体を用いた圧縮破壊実験を行うと同時に、個別モデリング手法による数値解析を行った。解析で得られた「応力/強度」の最大箇所は骨体の破壊箇所とよく一致した。なお、今回の解析ではMisesの相当応力を基準にしたが、主応力、最大せん断応力についても調査したいと考えている。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究B(11558105)の補助を得て遂行している。

参考文献

- 1) 伊能, 奥村, 鈴木, 宇治橋, 槇: 脊椎骨の個別モデリングと骨体の頑健性評価, 日本機械学会 1999 年度年次大会講演論文集(), pp641-643, 1999
- 2) 伊能, 見留, 奥村, 宇治橋, 槇, 村山: 個別モデリング手法による椎体の頑健性評価, 日本機械学会 第13 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 [No.00-35], pp.122-123, 2001
- 3) D.R.Carter and W.C.Hayes: Bone Compressive Strength: The Influence of Density and Strain Rate, Science, 194, pp.1174-1176, 1976

