

論文の内容の要旨

有限要素法非線形解析による脊椎椎体圧縮強度の予測に関する研究

指導教官：中村耕三 教授

東京大学大学院医学系研究科

平成 12 年 4 月入学

医学博士課程

外科学専攻

氏名 今井一博

1. 背景・目的

有限要素法 (FEM) は構造物の数値解析法である。主に大腿骨近位部の有限要素法解析が行われ骨強度の予測が骨密度測定よりすぐれていることが示されてきた。しかし脊椎椎体については形状が複雑であること、弾塑性であること、皮質シェルが薄いことより、骨強度を精度よく予測できる有限要素法解析モデルは確立されていなかった。

本研究ではヒト脊椎椎体の圧縮強度を十分な精度で予測できる有限要素法解析モデルを構築することを目的とした。そのために実証試験として力学試験機による椎体の単軸圧縮荷重試験を行い、予測解析の精度を検証した。

2. 方法

東京大学附属病院にて研究倫理審査委員会の承認および患者家族への説明同意を得て死後 24 時間以内に採取した 12 脊椎骨椎体 (T11, T12, L1、男性 31, 55, 67, 83 歳) を使用した。全ての椎体は軟 X 線画像と CT 画像にて骨折、癌転移などの骨病変がないことを確認した。椎体を生理食塩液中に沈めて 1 mm スライス厚で骨量ファントムと共に CT を撮像した。CT データから骨を抽出して 1 辺が 2 mm の四面体

要素による有限要素モデルを構築した。表面に1辺が2 mm、厚さ0.4 mmの三角形平板を構築して皮質シェルを表現した。骨は不均質材料として海綿骨のヤング率および降伏応力は各要素に対応するCT値から個々に算出した。皮質シェルの材料特性はヤング率を10 GPaに設定した。椎体に対する荷重は単軸圧縮荷重とし、有限要素法非線形解析を行った。非線形解析はNewton-Raphson法を用いた荷重増分法で解析した。圧縮試験は0.5 mm/分の準静荷重負荷とした。骨折荷重値として、有限要素法解析では1要素が降伏する荷重値、1要素が破壊する荷重値、連続2要素が破壊する荷重値、の3点を定義した。力学試験では、荷重変位曲線での降伏荷重値と最大荷重値の2点を定義した。骨折荷重値について解析と力学試験を比較してピアソンの相関係数の検定を行った。

3. 結果

力学試験での降伏荷重値は解析での1要素降伏荷重値と相関係数0.949と高相関であった (Fig. 1)。

最大荷重値は、解析での1要素破壊荷重値との比較で相関係数0.978、回帰直線の傾きが1.0752、連続2要素破壊荷重値との比較で相関係数0.987、回帰直線の傾きが1.1056でいずれも高相関であった。1要素破壊荷重値の方が回帰直線の傾きが1に近く最大荷重値を正確に表現しているものと思われた (Fig. 2)。

Fig. 1

力学試験:降伏荷重値、解析:1要素降伏荷重値の相関

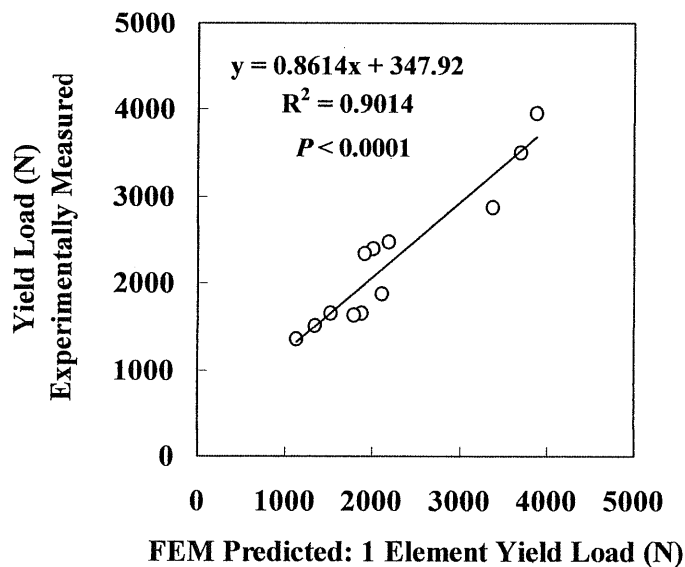
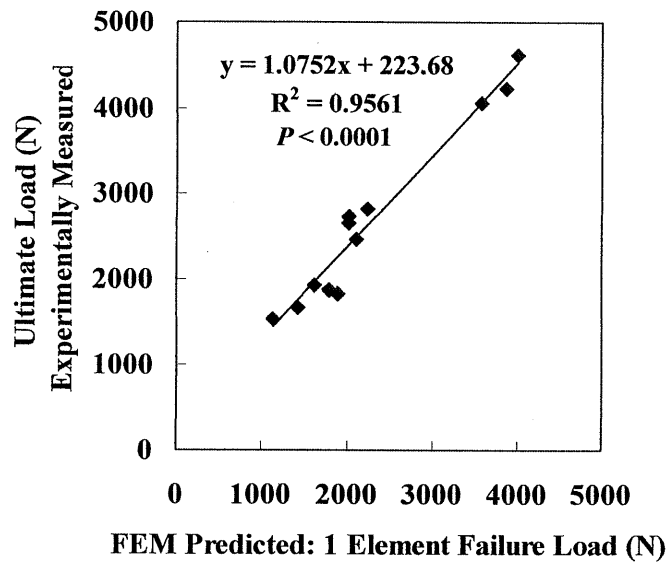


Fig. 2

力学試験:最大荷重値、解析:1要素破壊荷重値の相関



4. 考察

脊椎椎体の有限要素法解析モデルを構築するために、椎体の複雑な3次元曲面形状を構築すること、弾塑性を表現すること、薄い皮質シェルの材料特性を設定することが必要であった。四面体要素構造を用いることで椎体全体の複雑な形状を構築することができた (Fig. 3)。また、椎体の弾塑性を表現するために非線形解析を行った。皮質シェルは薄くてCTでは正確に描出できないため、海綿骨の外側に厚み 0.4 mm、ヤング率 10 GPa の皮質シェルを設定した。

この解析モデルで実証試験を行い予測解析の精度を検証したところ、降伏荷重値、最大荷重値ともに相関係数 0.95-0.98 の高い相関で回帰直線の傾きが 1 に近くなっていた。本研究で構築した有限要素法解析モデルで椎体の圧縮強度を正確に定量評価できると考えられた。

5. 展望

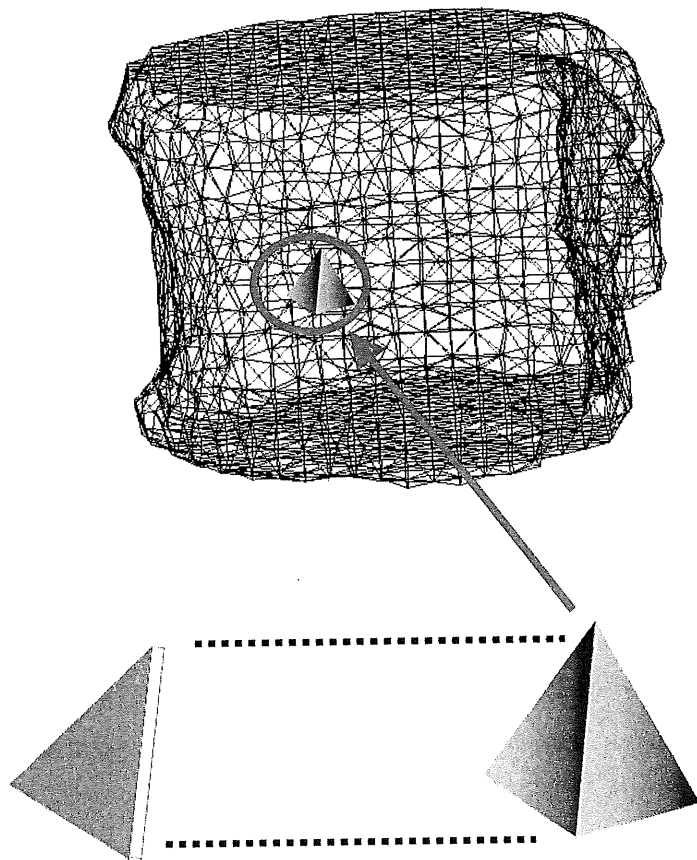
本研究は脊椎椎体の準静的単軸圧縮強度の予測に関するものである。骨折危険度の評価方法として臨床応用するためには、本研究で構築したモデルを応用して患者の日常生活での様々な荷重条件を検証する必要がある。また、今回使用した

検体は全員男性であった。骨粗鬆症の診療に応用するためには、女性、閉経後の女性についても検討する必要がある。さらに骨粗鬆症患者に対して本法で予測した骨折荷重値と骨折発生率との関係を見る大規模コホート研究が行われることが望ましい。

本研究で確立した有限要素法解析モデルを発展させて、骨粗鬆症患者での椎体骨折の危険度の判定、骨粗鬆症治療薬の効果判定として臨床応用されることが期待される。

Fig. 3 本研究で構築した有限要素法解析モデル

四面体要素で海綿骨を構築しその表面に三角形平板を構築して皮質シェルに対応させた。



皮質骨：三角形平板

海綿骨：四面体要素