

研究結果報告書

2017年11月12日

<研究課題>

高齢者大腿骨近位部骨折の骨折リスク予測を目的とした 新鮮凍結屍体における有限要素解析と力学試験

代表研究者 千葉大学医学部附属病院整形外科 講師 中村 順一
共同研究者 千葉大学大学院医学研究院環境生命医学 助教 鈴木 崇根
千葉大学医学部附属病院材料部 助教 松浦 祐介

【まとめ】

新鮮凍結屍体 10 例 20 大腿骨を対象として有限要素法と力学試験を行い、信頼性と妥当性の検証を行った。大腿骨近位部について、Keller for vertebra の予測式が fracture load と stiffness について力学試験と強い相関を示した(それぞれ $R^2=0.6187$ と $R^2=0.6345$)。大腿骨骨幹部についても同様に Keller for vertebra の予測式が力学試験と強い相関を示し、特に shell thickness が 0.4mm の場合に最も再現性が高かった。以上より、大腿骨の有限要素法の信頼性と妥当性が示された。

も高齢者骨折の好発部位である。また、大腿骨頸部骨折においては血流が乏しい部位であることから骨接合樹の成績が不良であり、一般に人工骨頭挿入術というインプラント置換術が適応となることが多い。人工骨頭挿入術においては大腿骨骨幹部でのステムとの固定性が成績を左右するが骨粗鬆症を有する高齢者での大腿骨骨幹部の骨強度は報告が少ない。そこで、研究 1-1 に関連して、新鮮凍結屍体における大腿骨骨幹部の有限要素法と力学試験の信頼性と妥当性の検証を行うことを研究 1-2 の目的とする。

1. 研究の目的

1-1 大腿骨近位部の骨折リスク予測

股関節は人体最大の荷重関節であり、歩行機能に最も関与する。高齢者大腿骨近位部骨折は寝たきりの原因となり生命予後にも影響することが知られている。骨粗鬆症により骨密度が低下すると骨強度が低下し骨折リスクが増加すると推測される。従って、股関節の強度を評価することは大腿骨近位部骨折の骨折リスクの予測や予防など臨床的に有用な情報となる。近年、画像技術の進歩により CT データから骨強度の有限要素解析が可能となった。しかし、股関節の有限要素解析の妥当性については報告が少なく、特に最新の画像ソフトウェアでの検証が求められている。新鮮凍結屍体はホルマリン固定をしていないため、骨組織の強度低下がなく正確な計測値を得ることが出来る。本学では新鮮凍結屍体の有限要素解析と力学試験を行うための設備を有している。本研究の目的は、新鮮凍結屍体における大腿骨近位部の有限要素法と力学試験の信頼性と妥当性の検証を行うことである。

1-2 大腿骨骨幹部の骨折リスク予測

前述の目的 1-1 に加えて、大腿骨骨幹部

2. 研究方法と経過

2-1 大腿骨近位部の骨折リスク予測・方法

新鮮凍結屍体 10 例 20 大腿骨を対象とした(男 5 例と女 5 例の同一個体の左右 10 大腿骨ずつ)。平均死亡時年齢は 87.1 歳(74 歳から 101 歳)であり、死因は肺炎 3 例、老衰 2 例、心不全 2 例、慢性腎不全 1 例、乳がん 1 例、すい臓がん 1 例であった。股関節手術の既往のあるご遺体は適応外とした。解剖により股関節を展開したのちに、大腿骨を摘出し軟部組織を取り除いた。大腿骨は CT 値を補正するために水槽に入れ、ファントム(QRM-BDC, QRM, Möhrendorf, DE)とともに CT 撮影した。CT 装置は東芝製 320 列 Aquilion ONE であり、製撮像条件は、120 kV, 200 mA, slice thickness 0.5 mm, pixel width 0.3 mm、骨頭から大腿骨遠位まで軸状断像とした。DICOM データを解析ソフト MECHANICAL FINDER に取り込み、有限要素解析を行った。静的及び動的応力解析、幾何学的非線形解析を行った。大腿骨近位部モデルの拘束条件は過去の文献の方法に準じて、大腿骨遠位を拘束して冠状面で大腿骨軸に対して 20 度傾け、骨頭へ垂直方向に荷重する立位モデルとした。同一の股関節を島津社性万能力学試験機で破断強度

を測定した。大腿骨長は大転子尖から 12cm とし、大腿骨軸を 20 度傾けて縁位をレジンで固定した。骨頭にも均一に圧がかかるようにレジンで固定した。万能試験機は島津製 Autograph AG-20kN X plus を使用し、圧縮用 20KN をセットし、降伏応力と破断強度を測定した。

2-2 大腿骨骨幹部の骨折リスク予測・方法

研究 1 と同一の大腿骨の骨幹部を使用し、大転子尖から 12cm の切断面から 20cm 遠位までを大腿骨骨幹部と定義した。力学試験モデルは 3 点曲げ試験とした。近位と遠位 2.5cm をレジンで固定した。中央で 5mm/分の垂直応力をかけ、降伏応力と破断強度を測定した。CT データは研究 1 を利用し、有限要素解析を行った。

3. 研究の成果

3-1 大腿骨近位部の骨折リスク予測・結果

予備研究として、有限要素解析で汎用される Keyak、Carter、Minamisawa、Keller for vertebra の 4 つの予測式について、力学試験との再現性を評価した。fracture load (力学曲線の頂点) と stiffness (力学曲線の傾き) は、Keller for vertebra の公式がもっとも優れていた。fracture load は力学試験で 3435.8 N (SD: 1802.1)、Keller for vertebra で 4520.3 N (SD: 1879.0) であった。(Mechanical fracture load) = $0.8201 \times (\text{FEA predicted fracture load}) + 1702.6$, $R^2 = 0.6187$, $p = 0.001$ 。stiffness は力学試験で 1280 N/mm (SD: 847)、Keller for vertebra で 1566 N/mm (SD: 664) であった。(Mechanical stiffness) = $0.5810 \times (\text{FEA predicted stiffness}) + 0.8223$, $R^2 = 0.5499$, $p = 0.001$ 。fracture load と stiffness は相関を認めた。力学試験: (fracture load) = $1.6943 \times (\text{stiffness}) + 1266.9$, $R^2 = 0.6345$, $p = 0.001$ 。有限要素解析: (fracture load) = $2.7207 \times (\text{stiffness}) + 259.65$, $R^2 = 0.9240$, $p = 0.001$ 。左右差は認めなかった。fracture load は 1 歳歳をとるごとに力学試験で 142.6 N、有限要素解析で 153.8 N 低下することが示され、加齢による影響 (骨脆弱性と骨折リスクの増大) が示唆された

3-2 大腿骨骨幹部の骨折リスク予測・結果

研究 1 と同様に、予備研究として、有限要素解析で汎用される Keyak、Carter、Keller、Keller for vertebra の 4 つの予測式について、力学試験との再現性を評価した。fracture load は、力学試験で 4582.8 N (SD: 2019.4) であった。その R^2 は、それぞれ 0.013, 0.056, 0.039, 0.66 であり、Keller for vertebra の公式がもっとも優れていた。stiffness は力学試験で 942.0 N/mm (SD: 335.0) であった。その R^2 も、それぞれ 0.013, 0.17, 0.031, 0.50 であり、Keller for vertebra の公式がもっとも優れていた。shell thickness の影響について、0.3mm, 0.4mm, 0.5mm の場合の R^2 は、fracture load で 0.66, 0.76, 0.66 であり、0.4mm がもっとも優れていた。stiffness でもそれぞれ 0.50, 0.54, 0.52 であり、0.4mm がもっとも優れていた。

4. 今後の課題

研究 1 では、大腿骨近位部の有限要素解析は Keller for vertebra の公式がもっとも予測式として優れていることが示された。高齢者における骨折リスクの予測に役立つことが期待される。しかしながら、本研究は立位モデルのみの解析であり、転倒モデルでの検証も必要である。また、有限要素解析での骨折部位を予測することに関しては、今後の課題として残された。

研究 2 では、大腿骨骨幹部においても Keller for vertebra の公式がもっとも予測式として優れていることが示された。shell thickness が 0.4mm の場合に最も再現性が高いことが明らかとなり、骨折リスクの予測に役立つことが期待される。今後の課題は、ねじれ試験や軸圧試験での評価を行うことである。

将来展望としては、骨密度評価や骨代謝マーカーによる骨粗鬆症の診断に加えて、CT による有限要素解析による骨折リスクの予測が可能になれば、高齢者の健康寿命の増進に寄与できると期待している。

5. 研究成果の公表方法

研究 1 と研究 2 はともにデータ解析を終え、英文雑誌に投稿中である。

以上