

亀裂進展解析における大腿骨モデルと簡易モデルの比較 Comparison of Femur Model and Simplified Model in Crack Growth Analysis

○岩崎有稀¹, 平佐知暉², 久留隆史³, 内木場文男⁴, 金子美泉⁴

*Yuki Iwasaki¹, Tomoki Hirasaka², Takashi Hisatome³, Fumio Uchikoba⁴, Minami Kaneko

Abstract: Although total hip arthroplasty has been gaining importance in recent years, peri-stem fractures have been reported, and the mechanism of these fractures has not been clarified. The purpose of this study was to analyze crack growth in order to elucidate the mechanism. Two types of models were created: a femur model created from CT data and a model that simply reproduces the femur structure. The results showed that both models showed similar trends. The results were similar for both models.

1. 緒言

整形外科手術の一つとして、人工股関節全置換手術 (Total Hip Arthroplasty : THA) があげられる。THA は変形股関節症、大腿骨頭壊死、関節リウマチなどによる股関節の機能障害に対して有効な手術法の一つであり、股関節を THA カップ、ライナー、インナーヘッド、ステムの4つの部品からなる人工関節に置き換える手術法を指す。近年、高齢化などの影響から THA の手術件数は増加し続けており、今後もこの傾向は継続すると考えられている^[1]。

一方で THA 手術をうけた患者の中には転倒などの外的要因により大腿骨に埋め込まれたステム周辺で骨折が生じる事例が報告されており、ステム周囲骨折と称されている。ステム周囲骨折は患者への負担が大きく死亡率も高いが、詳細な発生メカニズムは解明されていない^[2]。以上よりステム周囲骨折が生じる原因・メカニズムの解明が求められている。

ステム周囲骨折の解析において Enrico らはステムの挿入された大腿骨の CT データから 3D モデルを作成し応力解析をおこなった^[3]。この報告で 3D モデルでの解析結果と実際の大腿骨モデルの結果の比較から、どちらの解析においてもほぼ同等の結果を得られることが明らかにされ、3D モデルを利用した解析は大腿骨骨折の応力解析において有効であると証明された。しかし先行研究ではステムの挿入された大腿骨における亀裂進展解析は行われておらず、単純な荷重をかけたときの亀裂進展の傾向を比べるという観点では行われていない。亀裂進展解析を行うことにより骨折の途中経過の違いを知ることが可能となり、骨折の危険性が低いステムの挿入法の確立などにつながる可能性がある。

亀裂進展解析においては実構造による解析が必要である一方で、計算負荷が大きくなる。本研究の目的は計算負荷を減らすために簡易モデルを作成し、その解

析結果と大腿骨モデルでの解析結果の傾向と比較し、亀裂進展解析における簡易モデルの有効性を調べることである。

2. シミュレーションモデルと解析方法

大腿骨モデルの作成は大腿骨の CT 画像データから 3DSlicer(ver 2023 R2, Ansys Inc, USA)を用いて、モデルのメッシュ作成およびステム挿入を行った。大腿骨は外側に皮質骨、内側に海綿骨という2種類の骨で成り立っている。本実験ではスポンジ状である海綿骨が強度に与える影響はほぼないと考えてモデルから省略した。簡易的なモデルについては CT 画像から作成した大腿骨モデルの寸法を参考に曲面や微細な凹凸を省いたものを作成した。またステム先端部と初期傷、荷重をかける箇所は実際のモデルと同じ関係になるよう調整した。モデルの概略図を Figure 1 に示す。

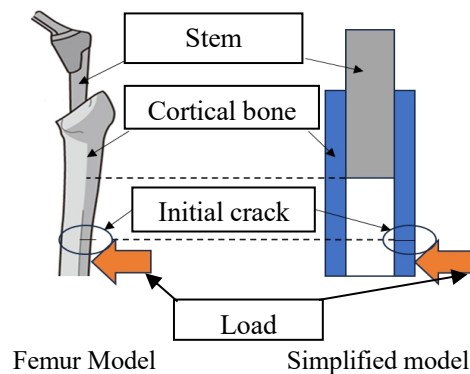


Figure 1. Model schematic diagram

有限要素解析には Abaqus/CAE (Abaqus 2022, HKS Inc, USA)を用い、それぞれのモデルに外力を加えて結果を比較した。骨折のきっかけとなる衝撃を再現した外力は Figure 1 のように大腿骨の中央部に地面と平行な荷重 3000N をかけることで表現した。物性値のヤング率・ポアソン比は先行研究を参考に付与した^{[4][5]}。

1: 日大理工・学部・精機 2: 日大理工・院 (前)・精機 3: 日本大学病院 4: 日大理工・教員・精機

一般的に脆性材料にはさまざまな大きさ、向き、大きさの微小亀裂が含まれている、荷重がかかる際に1つの亀裂先端にかかる応力が理論的な材料の強度を超えた際に亀裂が成長する。本実験では亀裂進展解析を行うにあたりステム先端から5cmの位置に微小亀裂に見立てた初期傷を設定した。

3. 解析結果と考察

Figure 2, Figure 3 に簡略化したモデルの亀裂進展解析の解析結果並びに大腿骨の3Dモデルでの亀裂進展解析の解析結果を示す。Figure 2が簡易モデル、Figure 3が大腿骨モデルである。Figure 2, Figure 3において青実線は初期傷、赤点線は解析で生じた亀裂を示している。

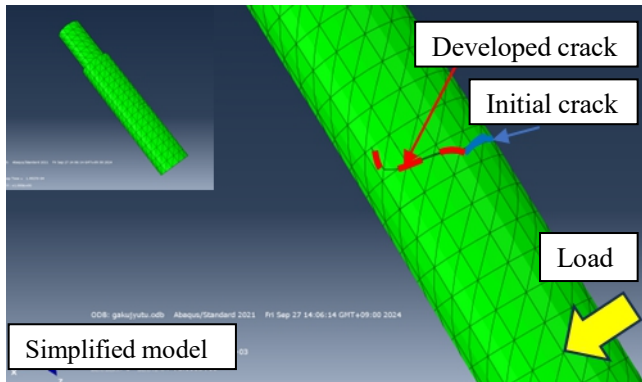


Figure 2. After crack growth analysis (Simplified model)

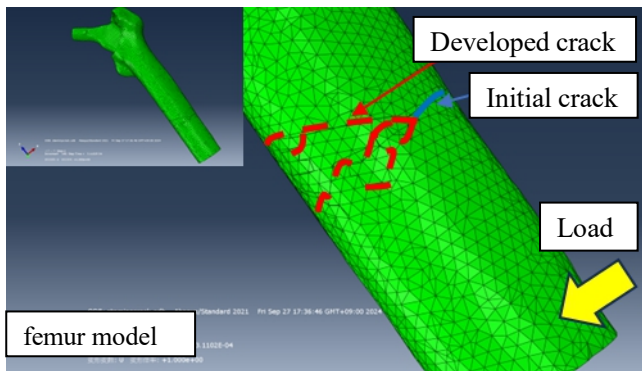


Figure 3. After crack growth analysis (femur model)

それぞれの解析結果から簡易モデルと3Dモデルの両方で亀裂の進展に同じような傾向がみられた。どちらのモデルも亀裂先端からステム先端に沿って亀裂が進展していき最終的に破断した。ただし大腿骨モデルでは破断の直前に亀裂が拡散したのに対し、簡易モデルでは亀裂が拡散せずに破断した。

解析の結果から、それぞれのモデルでステム先端から5cmの位置に設定した初期傷からステムに沿って亀裂が進展していく様子が確認できた。それぞれのモデ

ルの亀裂が同じ傾向で進展した理由として、固い物質であるステムとの接触面が同じであり、荷重のかかり方が共通しているため亀裂も応力が集中するステムの先端にむかって進展したのだと考えられる。

一方で簡易モデルの解析では大腿骨モデルの解析であらわれた破断の直前の亀裂の拡散が現れなかった。大腿骨モデルの破断直前にあらわれたこの亀裂の拡散は大腿骨の内部構造によるものだと考えられる。簡易モデルの作成の際に省略した大腿骨の帳面にある微小な凹凸により亀裂先端にかかる応力が偏り亀裂の成長が一定にならず亀裂の拡散につながったと考えられる。

そのため計算負荷の軽減を目的として大腿骨モデルの代わりに簡易モデルでの解析を行う場合、内部構造や大腿骨の微小な凹凸をどの程度まで簡略化させるのが重要になると考えられる。今後の実験ではどの程度までならば大腿骨モデルを簡略化しても解析結果に問題がないのかを確かめていく。

4. 結論

本実験では簡易的に大腿骨を再現したモデルと大腿骨モデルでの解析結果から傾向を比較し、亀裂進展解析において簡易モデルでの解析が有効であるか調べることを目的に亀裂進展解析をおこなった。その結果、どちらのモデルでも同じような傾向で亀裂が進展していく様子が確認できた。今後は亀裂進展解析において簡易モデルを使用する場合、どの程度まで実際のモデルに近づけるかを検討していく。

5. 参考文献

- [1] 加畑多文：「人工関節置換術の基本知識—有効なりハビリテーションのために—」, p698-703, 2017.
- [2] 久保俊一：「股関節学」, 金芳堂, p984-987, 2014.
- [3] Enrico Schileo et al：”Subject-specific finite element models implementing a maximum principal strain criterion are able to estimate failure risk and fracture location on human femurs tested in vitro ”,Journal of Biomechanics, Vol41 ,No.2,p356-367,2008.
- [4] 久留隆史ら：「前傾位設置と中間位設置におけるTHAステム周囲の応力解析」, Hip Joint, 45, 553-558, 2019.
- [5] 手塚大地：「大腿骨頸部骨折治療におけるインプラント周囲の応力場の解析」, 日本機械学会, 第24回バイオフロンティア講演会講演論文集, 2013.