521 有限要素法による PS 型人工膝関節の深屈曲解析

Deep Flexion Analysis of Posterior-Stabilized (PS) Prostheses by Finite Element Method

○ 山口 勝太(九大院) 正 東藤 貢(九大応力研)
長嶺 隆二(片井整形外科)

Shota YAMAGUCHI, Grad. School, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka
Mitsugu TODO, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
Ryuji NAGAMINE, Katai Orthopedic Hospital

1. 緒言

近年、高齢者人口の増加や食生活の変化により、変形性膝関節症の患者が年々増加しており、全国で3000万人の患者がいると推定されている。症状の重い患者に対する最終的な手術療法として人工膝関節全置換術(total knee arthroplasty; TKA)が行われている。しかし、人体内でのTKAを施した膝関節の動作状態は完全には把握されておらず、過度の応力集中による超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)製の脛骨インサートの疲労破壊や磨耗、また、後十字靱帯を切除する場合に使用するPS型人工膝関節においては、脛骨インサートのPostの損傷などが重要な問題となっている。有限要素法(FEM)を用いた数値解析は、人工膝関節の応力状態を知る有効な方法であるが、これまでの解析では歩行を模擬したものがほとんどであり、屈曲が進んだいわゆる深屈曲の状態での解析はほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、PS型人工膝関節のCADデータを用いて3D-FEMモデルを構築し、LS-DYNAを用いて3次元動的応力解析を行った。深屈曲を考慮した境界条件を設定し、旧タイプとPost部とその周辺での応力集中の低減を考慮した新タイプの2種類のモデルについて解析を行い、特に摺動面とPost部に着目して応力集中状態の比較を行った。

2. 解析方法

解析には過去に使用されていたPS型モデル(1st)と、Post周りの形状が見直された新型モデル(2nd)を用いて比較検討した。これらのモデルの3D-CADデータよりFEMモデルを作成した。本研究では深屈曲時の大腿骨コンポーネントと脛骨インサート間の接触による応力状態に注目しているため、脛骨コンポーネントの形状はステムを取り除き、簡略化したモデルを用いている。また計算コストの低減のために脛骨インサートの材質であるUHMWPEより遥かに剛性の高い大腿骨コンポーネント、脛骨コンポーネントは剛体として取り扱った。なお、脛骨インサートは弾塑性体を仮定している。解析に使用したモデルは4節点4面体要素で要素分割を

行った。2種類のモデルの要素分割図をFig.1に示す。

深屈曲時に起こるロールバックを再現するために、脛骨インサートの前方及び後方に2本ずつ計4本の非線形バネを取り付けた(Fig.2)。このバネの力学的特性は以下の式で表され、前後十字靱帯を切除した場合を考慮している。

$$F=0.18667d^2+1.3313d \quad (1)$$

ここで、 F はバネ要素にかかる荷重、 d は変位量である。このバネモデルの導入により、Post-cam 接触までは脛骨インサートの動きを制限し、接触後は自然にロールバックが起こることを狙いとしている。

本研究では直立状態での膝の屈曲角を0degとして135degまでスクワットを行った際の荷重の変動を文献を参考にして設定し解析を行った。境界条件として、大腿骨コンポーネントはZ軸方向の変位のみを許してZ軸方向から荷重を加え、脛骨コンポーネントはY軸方向の変位のみを許してY軸方向から荷重を加えた(Fig.2)。屈曲と共にこれら2方向の荷重の大きさを変化させた。屈曲にともなう荷重の変化をFig.3に示す。また屈曲方法としては大腿骨コンポーネント下部の形状に沿った円を想定し、その中心を通る軸に対して屈曲を行った。

3. 結果と考察

Fig.4に3種類の屈曲角度における相当応力分布図を示す。

Fig.1 FEM models of PS type artificial knee joints.

Fig.4 より、45deg では、まだ Post と Cam は接触しておらず、応力集中は大腿骨コンポーネントとの接触部のみで生じている。なお、1st、2nd 両モデルにおいて、55deg 以下の領域では、相当応力は 20MPa 程度を最大値としてほぼ一定であった。90deg では Post と Cam が接触し、Post 部に強い応力集中が生じている。その値は 120deg でより増加している。Post 部での屈曲にともなう最大相当応力の変動を Fig.5 に示す。両モデルとも 60deg 付近で Post と Cam は接触し、その後は屈曲とともに急激に最大相当応力が上昇し、120deg 付近でピークを迎える。その数値を比較すると、ピーク時において 1st では 87.6MPa、2nd では 57.6MPa となっており、2nd モデルが 1st に比べて応力集中が低減されていることが確認できる。しかし、日常生活では歩行動作が多いため屈曲頻度が高いのは 100deg 以下であり、この領域では 2nd モデルの方が 1st モデルよりも高い応力状態にあることが確認できた。このことから 1st に比べ 2nd のほうが、100deg 以下の領域の屈曲を繰り返す場合には Post への負担が大きくなる可能性が考えられる。これは 2nd モデルの Post が 1st モデルに比べて太く、1st モデルより浅い屈曲角で Post と cam が接触するためであり、このような形状は 2nd において、Post 根元での応力集中を低減するために Post 周りを削ったことで Post が折れる危険性を低減するために作られたと考えられる。

以上のように、屈曲 120deg 程度の屈曲で生じる最大相当応力の最大値は 2nd モデルでは低減できているが、屈曲 100deg 以下では 2nd の方が最大相当応力が高い結果となった。通常の動作では 100deg 以下の動作が多いことを考えると、形状を修正した 2nd の方が応力的に厳しい状態にあるのかもしれない。Post 部の損傷にとり応力状態との関係については、膝関節シミュレータを用いた実験結果と FEM 解析結果を比較検討し分析を進めていくことが重要である。

Fig.2 Boundary conditions.

Fig.3 Mechanical boundary conditions.

Fig.4 Equivalent stress distributions.

Fig.5 Relation between max equivalent stress and flexion angle.