628 有限要素法による股関節接触面圧に対する軟骨厚さ及び

適合性の影響の検討

Evaluation of the influence of the cartilage thickness and the compatibility
on contact stress at hip joint using finite element method

○学 宮崎 交司 (名大院) 正 元田 英一 (労災リハビリテーション工学センター)
正 山本 創太 (名大) 正 田中 英一 (名大)

Koji MIYAZAKI, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

Eiichi GENDA, Rosai Rehabilitation Engineering Center, 1-10-5 Komei, Minato-ku, Nagoya

Sota YAMAMOTO, Nagoya University

Eiichi TANAKA, Nagoya University

Key Words: Biomechanics, Hip Joint, Finite Element Method

1. 緒言

股関節は、ほぼ球形の大腿骨頭とこれを覆う寛骨臼からなる球関節であり、3次元の広い可動域を持つ一方、直立時や歩行時に体重を支える関節であるため、運動性と安定性を両立する必要がある。股関節の関節軟骨に変性・磨耗が生じる変形性股関節症の進行には、関節軟骨に対する負荷状況が大きく関与していると考えられる。関節面での接触面圧の分布は関節面の形状や接触面積の他、関節合力や軟骨の力学特性等様々な影響を受け変化する。よって、シミュレーションにより股関節にかかる接触面圧の分布を把握することは、変形性股関節症の進行状況や手術の必要性を知る上で有用である。

これまで著者らは有限要素法を用い、軟骨にかかる応力を関節面圧と考えてその大きさや分布について解析を行ってきた。しかしこれまでのモデルにおいては、主に軟骨厚さの変化による荷重分布の変化に着眼しており、それに伴う変化する適合性の影響を定量的に評価できていないという問題があった。

そこで、従来著者らが使用してきたモデルを改良し、

1. 接触面積の違う3種類のモデルの圧分布の違いの評価
2. 接触面積を変化させず、軟骨厚さのみを変化させた場合の圧分布の変化の評価

を行い、関節面の適合性と軟骨厚さの変化のそれぞれが圧分布に及ぼす影響を検証した。

2. 解析モデル

本解析においては、股関節付近の3次元形状を再現したモデルを用いた。これは正常な股関節(24才、男性)を3mm間隔で撮影したCT断層写真を基に、大腿骨と骨盤を再構築したものである。従来のモデル⁽¹⁾は、軟骨層にあたる弾性層と骨表面にあたる剛体層の片側二層構造であったが、今回軟骨層に加えてさらに皮質骨層、海綿骨層を弾性体として近似した(図1)。また、骨盤の寛骨臼の関節面の曲率を変えることで、骨頭・骨盤間の適合性を変化させた。これらのモデルを用い、接触面積だけを変化させた場合、軟骨厚さだけを変化させた場合の二種類の解析を行った。以下に解析条件の詳細を示す。

・形状

大腿骨頭側、骨盤側共に関節軟骨、皮質骨、海綿骨を線形弾性体近似し、弾性体要素の内側に剛体要素を作成した。各弾性層の厚さは1mmとした。大腿骨頭側において、各弾性層の材料定数を変えることで、軟骨厚さを1mm、2mm、3mmと変化させることとする。その際、骨頭の外形は同一に保った。また正常な白蓋のモデルをAとし、

そこから0.5mmづつ曲率を大きくしたモデルをB、Cとした(図2)。これにより大腿骨頭との接触面積を変化させた。

・境界条件

骨盤側剛体面の自由度を完全に拘束し、大腿骨頭の剛体部分の中心の回転の自由度を拘束した。骨頭の初期位置は、モデルA、モデルBにおいては同位置、モデルCにおいては上方に1.4mm動かした。また大腿骨頭の剛体中心に2kNの荷重を与えることで大腿骨要素を変位させ、寛骨臼と大腿骨骨頭の軟骨を模擬した弾性体要素同士を接触させた。これは歩行時にかかる最大荷重である。

・材料特性

関節軟骨のヤング率を30MPa、皮質骨のヤング率を6.9GPa、海綿骨のヤング率を500MPaとし、ポアソン比を0.3、要素間の摩擦係数を0.01とした。

解析の実行にはHibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 製汎用

Fig.1 Finite element model of hip joint. (1) Cartilage, (2) Cortical bone, (3) Cancellous bone are modeled by elastic material. (4) Other elements are modeled by rigid body.

Fig.2 Three types of articular surface with various curvature.

非線形有限要素解析プログラム ABAQUS ver.5.8-1 を使用した。

3. 結果と考察

3-1 接触面積の変化に伴う圧分布の違い

図3に骨頭上の接触圧分布を示す。図中の白線は白蓋の外縁を示しており、白線の左側を白蓋が覆う。図より、接触領域が骨頭上部、白蓋外縁付近の前方及び後方にあることがわかる。また白蓋半径の違いにより、最大接触圧及び接触面積が変化した。最大接触圧は、全てのモデルにおいて白蓋外縁後方にみられた。次に接触面積を図4に示す。これから、接触面積と白蓋曲率は単純な相関ではないことがわかる。また図5に最大接触圧の変化を示す。最大接触圧は接触面積とほぼ線形関係にあることがわかる。

モデルAとモデルBの間では、白蓋の曲率の増大により接触面積が減少し、最大接触圧が増加している。これからモデルAの適合性はモデルBに比べて良いといえる。一方、モデルA、Bに比べモデルCでは、白蓋外縁前方の荷重支持が少なくなり、骨頭後方における支持面積が大きく増加することで最大接触圧が減少している。このような荷重支持位置の変化は、モデル形状の変更に伴いモデルCのみ骨頭の初期位置を上方に移動したため、接触部位が変化したことによる影響が考えられる。

モデルCのように接触面積が増大し最大接触圧が下がる傾向は、関節間の接触状態としては良い傾向にある。今後、関節間の適合性が向上する位置関係とは何かを、さらに検討する必要がある。

Fig. 3 Change of the stress distribution by the difference in contact area

3-2 軟骨厚さの変化に伴う圧分布の違い

図6は軟骨厚さの変化による最大接触圧を示す。軟骨厚さを1mmから2mmとした場合にみられる最大接触圧の減少率に比べ、3mmとした場合の最大接触圧の減少率は小さいことが分かる。これまで著者らの解析では軟骨厚さが

Fig. 4 Contact area

Fig. 5 Relationship between contact area and stress

増すに従い、より効果的に応力集中が緩和できると結論付けていた。しかし今回の結果からは、軟骨厚さ自体の応力緩和率は、厚さが増しても上昇することはなかった。このことから、軟骨厚さを厚くすることによる最大接触圧の減少は、主に関節面での適合性が変化した事によると結論付けられる。

Fig. 6 Relationship between thickness of cartilage and contact stress

4. 結言

今回の解析で接触面の形状の変化や、骨頭-白蓋間の相対位置の変化に起因する荷重分担点の変化は、接触面圧の分布状況に大きな影響を及ぼしていることが分かった。また軟骨厚さが最大接触圧の減少に及ぼす影響は、厚さが薄いほど大きいことが分かった。今後の解析においては、関節間の適合性が向上する位置関係についてさらに検討する。

参考文献

- (1) 長谷川ら, 股関節3次元接触面圧の有限要素法での解析, 機講論 No. 01-27, (2001), pp. 25-26.