多発骨盤骨折の内固定における力学解析

Mechanical Analysis of Multiple Pelvic Fracture with Plate Fixation

○学 野口 愛子 (新潟工大) 正 勝山 恵子 (新潟工大) 正 笹川 圭右 (新潟工大)
正 尾田 雅文 (新潟大) 塩田 直史 (岡山医療センター)
正 寺島 正二郎 (新潟工大) 正 原 利昭 (新潟工大)

Aiko NOGUCHI, Niigata Institute of Technology, 1719 Fuzihashi, Kashiwazaki, Niigata

Keiko KATHUYAMA, Niigata Institute of Technology

Keisuke SASAGAWA, Niigata Institute of Technology

Masafumi ODA, Niigata University, Ikarashi 2-8050, Nishi-ku, Niigata, Niigata

Naofumi SIOTA, Okayama Medical Center, Tamasu 1711-1, Kita-ku, Okayama, Okayama

Shouzirou TERASHIMA, Niigata Institute of Technology

Toshiaki HARA, Niigata Institute of Technology

Key Words: Finite Element Analysis, Pelvic Fracture, Plate Fixation, Pelvic tilt

1. 緒言

交通事故等では高エネルギー外力が作用し、多発骨折に至るケースが少なくない。この種の骨折では、複数箇所から骨が離断することから骨折部にはプレート固定法等が適用される。骨盤骨折では多様な骨折状態が見られることが多く、インスツルメントの選択や固定位置の選定は、医師の経験や勘に基づいて考慮される場合が多い。

一般的に、骨折の治癒はプレート固定後の多発骨折部であっても、骨折面に荷重負荷があると治癒効果が期待できる。プレートの固定状態が適切でない場合には、「偽関節」や「プレート破損」が見られた報告もある。更には、高エネルギー外傷骨折では、骨癒合に要する期間の遷延や癒合しない症例も報告されている。従って、術前に力学的観点からインスツルメントの選択や固定方法を十分に検討する事が、治療方針の検討や方法を決定する上でも、極めて重要である。

骨折治癒における有限要素(FE)解析は単純骨折での報告が多くあるが⁽¹⁾、多発骨折でのプレートやスクリュー等による固定を対象としたFE解析例は少ない。そこで、本研究では、骨盤の多発骨折時に適用するプレート固定法を解析対象とし、骨折治癒の効率化を目指す上で重要なプレート固定部の応力状態を明らかにするため、骨盤骨折患者の臨床例を用いた力学解析を行った。

2. 解析方法

2・1 解析対象

骨盤の両側骨折を受傷し、骨折部をプレート(Plate)とスクリュー(Screw)による固定法が施された患者(女性75歳)を対象とした。Fig.1に示すように、右恥骨と右仙腸関節骨折部はロッキング機構の付いたプレートとスクリューで、一方、右腸骨翼と左恥骨はスクリューで、それぞれ固定されている。

2・2 有限要素モデルの構築

患部のX線CT画像を用いて、3次元画像編集ソフトウェア『Mimics』(Version 15.01, Materialise, BE)により骨盤及びプレート、スクリューそれぞれの形状モデルを作成した。Fig.1に示すように、骨折線に沿って厚さ1mmの仮骨(Callus)を設置することで骨折部を再現し⁽¹⁾、皮質骨部として、骨盤モデル表面に厚さ1mmのシェルを設定した⁽²⁾。FEメッシュは線形弾性体とし、要素サイズは約2mm、要

素総数1,042,613であった。骨盤骨の物性値は、CT値に基づき $E=2017.3 \rho^{2.46}$ (ρ :骨密度)の式から算出⁽²⁾し、プレート周囲に生じたメタルアーチファクトによる異常値には、ヤング率700MPaを設定して周囲の骨の状態に近づけた。その他の各材料のヤング率とポアソン比は、皮質骨は17GPa, 0.3, 関節軟骨は15MPa, 0.45⁽⁴⁾、及びスクリューとプレートについては、Plate-1とScrew-1,2はチタン製で110GPa, 0.3, Plate-2はスチール製で206GPa, 0.3とした。

Fig.1 Position of the plates and screws used to fix pelvic fracture and the callus at fracture line

2・3 解析条件

有限要素解析ソフト『ABAQUS』(Version 6.12, Simulia, US)を用いて、プレート固定術後の骨盤骨折モデルに有限要素法による非線形応力解析を行った。境界条件は、仙骨上端面の節点を完全固定し、荷重条件には、立位での体重負荷を想定した荷重を寛骨臼に加えた⁽³⁾。骨盤-スクリュー及びプレート、骨盤-仮骨の間の接触面は結合拘束した⁽³⁾。仮骨(Callus)は治癒過程を考慮し、手術直後のヤング率は1MPaを、骨治癒の進行した状態では100MPaをそれぞれ設定した⁽¹⁾。骨折断面間の仮骨のヤング率の設定値を段階的に増加させることで骨折治癒過程を想定したときの、仮骨及びプレートに加わる応力状態の変化を評価した。さらに、高齢者の姿勢を考慮し、骨盤の傾斜角を解析条件に加えた。骨盤角度が前傾10°(-10deg)や後傾10°(+10deg)での応力状態を比較した。

Fig.2 Maximum von Mises stress at the calluses at different healing stages

Fig.3 Maximum von Mises stress at the plates & screws at different healing stages

3. 結果および考察

解析により、プレート固定術後骨盤骨折モデルでの仮骨並びにプレートとスクリューに作用したミーゼス応力の最大値を Fig.2 と Fig.3 にそれぞれ示す。仮骨のヤング率が 1MPa から 100MPa に増加するに従い、応力値の減少を示した callus-R4 を除くすべての callus で応力値の増加がみられた。その反面、プレートとスクリューに作用した応力値は、すべてにおいて減少する傾向にあった。仮骨部の応力状態を詳しく見てみると、骨癒合の進行に伴い、仮骨に加わる圧縮力および引張力はともに増加しており、特に callus-R1 では引張力の著しい増加がみられ(Fig.4)、引張力の増加は骨折部の離断のおそれが考えられる。全体的には圧縮力の増加が見られることから、骨治癒の進行による荷重伝達の向上が考えられる。callus-R4 の応力値減少については、callus-R4 がプレートやスクリューによる固定がなされていないこと、ならびに恥骨部の荷重伝達等による影響が考えられる。

高齢者の姿勢を考慮して骨盤の傾斜角度による骨折部への影響を検討した。骨盤傾斜を前傾 10°、標準 0°、後傾 10° としたときに callus-R1、R3 および plate-1 のそれぞれに生じた最大ミーゼス応力値を Fig.5 に示す。骨盤傾斜が前傾から後傾になるにつれて、callus-R1 を含む骨治療の進行が良好にみられた仮骨部でミーゼス応力値が高くなった。また plate-1 を含むプレートおよびスクリューでのミーゼス応力値も高くなる傾向にあった。ところが、骨癒合し難く応力値の低かった恥骨部の callus-R3 での応力値はあまり変化せず、骨盤傾斜の影響は小さい傾向にあった。骨盤が後傾すると恥骨部を除く仮骨に加わる応力値が高くなることから、骨盤傾斜 0° の解析よりも高齢者の姿勢を考慮した後傾姿勢での解析が重要であると考えられる。

以上のことから、仮骨のヤング率が増加するに従い、骨による荷重伝達の向上がみられ、プレートとスクリューへの負荷は減少しているため、骨治癒が良好に進展するものと推察できる。一方、恥骨部においては、負荷による応力

Fig.4 Variation of pressure stress at the calluses at different healing stages

Fig.5 Change of maximum von Mises stress at the calluses and plate for postures from anterior (-10deg) to posterior (+10deg) pelvic tilts (Young's modulus of the callus is 1MPa)

値が低く、応力値の推移も他の領域と異なる結果となった。これらの解析結果から骨片間圧力が低い部分は骨癒合が進行し難いことが考えられ、恥骨部が結合していなかったという患者症例の状況と一致していた。したがって、骨折部の応力状態を解析することで、骨折部の骨癒合の進展をシミュレーションで示唆された。

4. 結言

骨盤の多発骨折時に適用されるプレート固定法を解析対象とし、骨折治癒の効率化を目指す上で重要なプレートおよび骨盤固定部の応力状態を明らかにするため、FE 解析を行った。骨治癒を想定した解析を行ったところ、骨治癒の進行により仮骨部の応力値増加、プレートとスクリューへの作用応力の減少がみられ、骨治癒により骨折部の体重支持が可能になることが示唆された。また実際に骨癒合が進行し難い恥骨部の解析結果は臨床例との一致を示した。このことから骨折固定部の応力状態を解析すると骨癒合のシミュレーションが可能であることが示唆され、さらに骨盤姿勢を考慮することで、高齢者を対象とした詳細な解析が可能となる。

参考文献

- (1) H. Fouad: *Medical Engineering & Physics* 33, 2011, pp.456-463.
- (2) M. Dalstra et al.: *Transactions of ASME* 117, 1995, pp.272-278.
- (3) J. Böhme et al.: *Clinical Biomechanics* 27, 2012, pp.872-878.
- (4) X. Zhao et al.: *Journal of Orthopaedic Science* 15, 2010, pp.632-640.