Pedicle screw and rod system が隣接椎間に及ぼす生体力学的影響

Biomechanical effect of pedicle screw and rod system on adjacent segments

○ 岡久 和正 (三重大院) 米川 淳也 (三重大院)

正 吉川 高正 (三重大工) 正 加藤 貴也 (三重大) 正 稲葉 忠司 (三重大工)

榊原 紀彦 (三重大医) 王 卓 (三重大院) 笠井 裕一 (三重大医)

Kazumasa OKAHISA, Junya YONEKAWA, Takamasa YOSHIKAWA, Takaya KATO, Tadashi INABA

Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie, 514-8507, Japan

Toshihiko SAKAKIBARA, Taku O, Yuichi KASAI, Mie University, 2-174, Edobashi, Tsu, Mie, 514-8507, Japan

Key Words: lumbar spine, pedicle screw and rod system, adjacent segmental disease, ROM

1. 緒言

脊椎は生体内において重要な器官の一つであり、その役割は体幹の支持や上半身の運動性賦与、脊髄の保護である。ところで、腰椎は脊椎すべり症や椎間板ヘルニアなどの疾患を発症しやすい部分であり、症状によって手術が必要になる。代表的な手術方法に除圧術と固定術がある。除圧術は神経を圧迫している組織を取り除くことで症状を緩和する術法である。一方で、固定術は除圧術をした後に患者自身の骨もしくは人工骨で椎間を癒合させる方法である。固定術の際に脊椎固定具 (spinal instrumentation) と呼ばれる金属製インプラントを用いることがある。脊椎固定具の目的は患者の早期離床や不安定になった椎間の即時安定性確保、骨癒合の促進である。Pedicle screw and rod system (以下 PS) は代表的な脊椎固定具であり、その役割を十分に果たして短期的な臨床成績は良好である。しかしながら、PS を長期的に装着すると固定した椎間に隣接する椎間に障害 (以下隣接椎間障害) が発生すると報告されている⁽¹⁻³⁾ (Fig.1)。森ら⁽³⁾は、腰椎変性すべり症に対して pedicle screw 併用の後側方固定術を行い、術後9年以上31例に対して経過観察を行い、そのうち13例に隣接椎間障害と考えられる症状が発現したと報告している。隣接椎間障害に関する研究はしばしば行われているが、その原因は未だ不明である。

そこで、本研究では PS 固定時における各椎間の変形挙動を調査することにより、隣接椎間障害の原因の解明を目的とした。試験体にイノシシ屍体腰椎を用いて6軸材料試験機で前後および左右方向への曲げ試験を行った。

2. 実験方法

試験体はイノシシ屍体腰椎 L2 から L5 を4体使用し、-30℃で冷凍保存してある試験体を自然解凍した後に、余分な脂肪や筋肉を除去した。その後、歯科用レジンで L2 および L5 を固定し、治具を用いて試験機に取り付けた。ここで、脊椎の安定要素である椎間板や椎間関節、棘間および棘上靱帯を保存した状態を正常モデルとした (Fig.3(a))。L3 と L4 間の椎間板変性の手術を想定して L3 と L4 の間の椎間板に側方から直径3mm かつ3mmの間隔で3ヶ所ドリルを用いて貫通させて、両側の椎間関節を除去し、棘間および棘上靱帯にはさみで切りこみを入れたモデルを損傷モデルとした (Fig.3(b))。損傷させた L3 と L4 間に PS を装着した状態を PS 固定モデルとして (Fig.3(c))、計3モデルを同一試験体に対して段階的に作成した。

本実験に用いた試験機は当研究室で開発された6軸材料試験機である⁽⁴⁾。本試験機は2本1組の直動型アクチュエータを120°対称に並行配置した垂直直動型パラレルメカニズムが採用されており、この6本の直動型アクチュエータはそれぞれ独立に制御されている。よって、本試験機は x, y, z 軸

それぞれの方向の並進および回転運動を実現でき、各軸の力およびトルク、変位および角変位を手先部の6軸力学センサで計測できる。本実験では曲げ試験を行うため、x 軸方向への並進および回転運動と z 軸方向への並進運動を許容した3自由度に設定した。負荷方向は腹側を前方、背側を後方として前方から左および右をそれぞれ左右方向とした。

角速度は椎間板の粘弾性の特性を考慮して 0.1[deg/s]とした。本実験は角変位を規定した試験を行うことで、正常状態と損傷後に PS 固定を施した試験体について、同一動作時の各椎間における変形挙動の違いを調査した。規定した角度は正常モデルで前後屈において±1.5[Nm]、左右側屈において±1.3[Nm]まで達した時の角度である。各椎間の角変位を測定するために各椎体に2個ずつ計8個のマーカーを施し、試験中の様子をデジタルビデオカメラ (HDR-XR350V, sony 製) 2台で撮影した。撮影した動画から3次元動画解析ソフト (Move-tr/3D, ライブラリ社製) を用いてマーカーを自動追跡して各椎間の角変位を計測した。

規定角度に達した時の椎間の可動域を range of motion (以下 ROM) と定義し、正常モデルにおける ROM を基準として、損傷・PS 固定モデルにおける ROM の変化率を算出した。正常モデルに対して ROM が増加した場合は正で、減少した場合は負の値で示した。

Fig.1 X-ray of diseased lumbar spine.

Fig.2 The 6-axis material testing machine.

Fig.3 Schematic diagram of experimental models.

3. 実験結果

Fig.4 前後および左右方向への曲げ試験における各椎間の ROM の変化率 (%) を示す。まず、損傷モデルについて述べる。損傷させた L3/4 の ROM の変化率は前後屈, 左右側屈それぞれ 41.8 ± 13.8 (%), 19.5 ± 6.5 (%) であり, 正常モデルと比較して増加していた。一方で, L2/3 における前後屈, 左右側屈での ROM の変化率は -30.4 ± 9.9 (%), -20.3 ± 3.1 (%) で減少していた。この結果は L4/5 でも同様な傾向で前後屈では -23.7 ± 2.9 (%) で, 左右側屈では -9.0 ± 5.5 (%) であった。次に PS 固定モデルについて述べる。PS で固定した L3/4 の ROM の変化率は前後屈で -62.9 ± 3.6 (%), 左右側屈で -76.8 ± 14.7 (%) であり, 正常モデルと比較して共に減少していた。固定をした L3/4 の上位に隣接する L2/3 の ROM の変化率は前後屈, 左右側屈それぞれ 15.8 ± 7.5 (%), 21.7 ± 9.1 (%) で増加する傾向にあった。固定椎間の下位に隣接する L4/5 では前後屈で 20.4 ± 5.8 (%), 左右側屈で 34.6 ± 5.7 (%) であり, L2/3 と同様に ROM の変化率は増加していた。

Fig.5 に各モデルにおける規定角度まで達した時のトルク [Nm] を示す。損傷モデルでのトルクは前後屈で 0.7 ± 0.2 [Nm] となり, 正常モデルのトルクのおよそ 0.5 倍であった。左右側屈でのトルクは 0.6 ± 0.1 [Nm] であり, トルクは正常モデルの 0.5 倍程度であった。固定モデルでのトルクは前後屈で 3.1 ± 0.6 [Nm] で正常モデルのおよそ 2 倍であった。左右側屈でのトルクは 2.3 ± 0.4 [Nm] で正常モデルより約 1.8 倍上昇した。

Fig.4 Rate of ROM change at each segments.

Fig.5 Torque of each sample models.

4. 考察

まず、損傷モデルについて考察する。前後および左右方向への曲げ試験の結果から、損傷モデルにおいて損傷させた L3/4 の ROM の変化率は正常モデルより増加していた。一方で, L2/3 および L4/5 の ROM の変化率は減少していた。また, 規定角度に達した時の最大トルクは正常モデルより減少していた。これは L3/4 の椎間板, 椎間関節, 棘上および棘間靭帯を損傷させたために L3/4 の剛性が低下し, 低いトルクで正常状態より大きく変形したと考えられる。故に, 低いトルクで規定角度に達したために損傷させていない L2/3 と L4/5 の ROM の変化率が低下したと考えられる。次に PS 固定モデルについて考察する。L3/4 に PS を装着して前後屈, 左右側屈を行った結果, 固定した L3/4 の ROM の変化率は曲げの方向によらず減少していた。一方で, 固定椎間に隣接する L2/3 および L4/5 の ROM の変化率は前後屈, 左右側屈で増加していた。また, 規定した角度に到達したときのトルクも正常より上昇していた。これは L3/4 に PS を装着することで L3/4 の剛性が正常よりも上昇し, 変形に要するトルクが正常状態よりも高くなったためであると考えられる。したがって, 規定角度に達するまでのトルクが正常モデルより大きくなり, 正常な状態の L2/3 および L4/5 の ROM の変化率が正常モデルより大きくなったと考えられる。

以上より, PS を装着した状態で正常状態の時の同じ動作をすると固定椎間に隣接する椎間の負担が大きくなり, 椎間板の変性や椎間のすべりを促進させると考えられる。したがって, PS の長期使用により発症する隣接椎間障害は PS 固定の高い固定性が一つの要因であると示唆された。

ところで, 固定椎間の上下に隣接する椎間への影響だけではなく, さらに離れた椎間の影響を調査する必要があると報告されている⁽⁹⁾。したがって, 今後われわれは固定した椎間の上位 2 つの椎間の変形挙動を調査する予定である。

5. 結言

本実験はイノシシ屍体腰椎 L2 から L5 に対して角度を規定した前後及び左右方向への曲げ試験を行い, PS 固定が隣接椎間に及ぼす生体力学的影響を調査した。その結果, 隣接椎間障害の一つの要因は PS を装着したことによる剛性の上昇であり, 正常の状態の時と同じ動作を行うと隣接椎間にかかる負担が大きくなると示唆された。この負担が固定椎間に隣接する椎間板の変性やすべりを促進させ, PS を長期的に使用すると隣接椎間障害が発生すると考えられた。

6. 参考文献

- Gray G, Jeffrey CW et al. : Adjacent Segment Degeneration in the Lumbar Spine. J Bone Joint Surg 86 :1497-1503, 2004.
- 須藤英毅, 鏝邦芳 他: PLF 単独および PLIF 併用の脊柱再建術が隣接椎間に与える生体力学的影響. 臨整外 40:791-798, 2005.
- 森英治, 芝啓一郎: 腰椎変性すべり症に対する pedicle screw 併用後側方固定術の長期成績: 日本腰痛会誌, 11 (1) : 198-203, 2005.
- 増田峰知, 藤原基芳: 脊椎の力学特性を測定するための 6 軸試験機の開発. 平成 16 年度三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告 29:41-46, 2005.
- Kasai Y, Uchida A et al. : Influence of injury or fusion of single motion segment on other motion segments in the spine. Spinal Reconstruction Clinical Example of Applied Basic Science, Biomechanics and Engineering, Informa, New York : 109-117, 2007.