

学位論文題名

椎間板椎体単位の圧縮剛性に関する研究

学位論文内容の要旨

1. 緒言

従来より、椎間板の力学的特性について数多くの研究がなされてきた。椎間板は解剖学的に椎体と固着した構造であり、椎間板に比べて椎体の剛性は高いので、従来より脊椎機能単位(Functional spinal unit)、椎間板椎体単位(Disc-body unit)を用いて、椎間板の力学的特性の評価が行われてきた。過去の研究に使用されたDisc-body unitの椎体部分の上下方向の長さについて調べたところ、研究者によって様々であった。Disc-body unitという複合体で圧縮剛性を求めている以上、その椎体部分の長さによって圧縮剛性に差が生じると考えられるが、そのことについて調べた報告はない。また、従来の別の研究で椎間板に圧縮荷重が加わると椎体終板が椎体内に膨隆することが示されている。椎体終板の椎体内膨隆は、解剖学的構造から海綿骨の物性の影響を受ける。つまり、椎間板の変形は椎体、特に海綿骨の物性の影響を受け、椎間板椎体間に力学的相互作用が存在すると考えられる。しかし、従来の研究ではこの力学的相互作用については不明であった。そこで本研究では、Disc-body unitの圧縮剛性における椎体の影響について検討するため、次の2つの実験を施行した。実験1ではDisc-body unitの圧縮剛性における椎体部分の長さの影響についての実験、実験2では椎間板の圧縮剛性における海綿骨の物性の影響についての実験である。

2. 実験材料および方法

【実験1】

Disc-body unitの圧縮剛性における椎体部分の長さの影響についての実験(n=5)

実験には、後方要素、肋骨を切除した生後約6カ月のウシ胸椎Th 6/7 Disc-body unit(以下DBU)を用いた。まず、DBUに圧縮荷重を最大1500Nまで加え、上下端で変位量を測定し荷重変位曲線を記録した。試験終了後、DBUを椎間板に隣接する上下のepiphyseal plateで切離し、上のepiphyseal plateより上位のTh 6 vertebral body、中央のDisc-epiphysis unit(以下DEU)、下のepiphyseal plateより下位のTh 7 vertebral bodyの3つに分割した。DEUとTh 7 vertebral body(以下V. Body)にDBUと同一条件で圧縮荷重を加え、荷重変位曲線を記録した。圧縮荷重試験には、材料試験機MTS 858 Bionix Test Systemを用いた。得られた荷重変位曲線はいずれにおいても非線形であるため、最大荷重を3つに分け、各荷重及び荷重範囲における変位量、剛性値を求めた。さらに、DEU及びV.Bodyの物性を表す弾性係数を計算

した。標本の上下長は平均65.0mm(DBU)、18.7mm(DEU)、21.8mm(V. Body)であった。断面積は平均13.5cm²であり、椎間板高は平均5.0mmであった。

【実験2】

椎間板の圧縮剛性における海綿骨の物性の影響についての実験(n=7)

実験には、椎弓根で後方要素を切除した生後約2カ月のウシ腰椎L5/6 Disc-body unit(正常Disc-body unit:以下正常DBU)を用いた。標本の上下長は平均43.1mm、椎間板高は平均4.9mmであった。まず、正常DBUに圧縮荷重を最大2000Nまで加え、椎間に設置した伸び計で変位量を測定し荷重変位曲線を記録した。試験終了後、上下椎体の海綿骨を椎間板近位まで可及的に削り、歯科用レジンで置換した(置換後Disc-body unit:以下置換DBU)。置換DBUに、正常DBUと同一条件で圧縮荷重を加え、同一部位の変位量を測定し荷重変位曲線を記録した。得られた荷重変位曲線はいずれにおいても非線形であるため、最大荷重を4つに分け、各荷重及び荷重範囲における変位量、剛性値を求めた。

3.結果

【実験1】

各荷重における変位量の平均値は、DBUで0.18mm(500N)から0.40mm(1500N)であり、DEUで0.10mm(500N)から0.23mm(1500N)であった。すべての荷重においてDBUとDEUの変位量の差に統計学的有意差を認めた。剛性値の平均値は、DBUでは3.1MN/M(0-500N)から5.3MN/M(1000-1500N)であり、DEUでは5.1MN/M(0-500N)から8.5MN/M(1000-1500N)であった。すべての荷重範囲において両者の剛性値の差に統計学的有意差を認めた。次に、DEUとV. Bodyの測定結果から物性を表す弾性係数を求めた。stressとstrainの関係は非線形であるため、0から1000kPaを500kPa毎に2つのstressの範囲に分けて弾性係数の平均値を求めると、DEUでは73.7MPa(0-500kPa)から104.6MPa(500-1000kPa)であり、V. Bodyでは173.7MPa(0-500kPa)から253.1MPa(500-1000kPa)であった。

【実験2】

各荷重における変位量の平均値は、正常DBUでは、0.19mm(500N)から0.59mm(2000N)であり、置換DBUでは、平均0.19mm(500N)から0.49mm(2000N)であった。1000N以上の荷重において、両者の変位量の差に統計学的有意差を認めた。剛性値の平均値は、正常DBUでは2.6MN/M(0-500N)から4.0MN/M(1500-2000N)であり、置換DBUでは2.8MN/M(0-500N)から5.8MN/M(1500-2000N)であった。500から1000N以上の荷重範囲において、両者の剛性値の差に統計学的有意差を認めた。

4.考察

健全な椎間板に圧縮荷重が加わると、髓核の内圧が上昇する。この内圧は線維輪と上下の椎体終板を押し力となり、線維輪は水平方向に膨隆し、椎体終板は軸方向に変形する。また、過度の圧縮荷重をDisc-body unitに作用させると、線維輪の損傷より先に、椎体終板の骨折が起こることが示されている。実験2で用いたDisc-body unitは、生後約2カ月のウシ腰椎なので健全であると考えられる。伸び計を可及的に椎間板近位部に設置しているため、測定された変位量は主に椎間板の圧縮方向の変形量を表している。歯科用レジンで海綿骨を置換することは椎

体終板の膨隆を抑制し、非圧縮性の物性を持つ髄核の内圧を容易に上昇させる。これによって、椎間板の圧縮剛性が増加し置換DBUの剛性値を増加させたと考えられる。つまり、椎体海綿骨の物性は椎間板の圧縮剛性に直接影響を与えると考える。次に、実験1における同一圧縮荷重時のDBUとDEUの変位量の差について検討する。DBUをDEUと上下のvertebral bodyを構成体とする複合体のモデルとして考える。荷重FがDBU及びDEUに加わった場合の変位量をそれぞれD及びdとし、Th 6 vertebral bodyの長さをL、DEUの長さをM、Th 7 vertebral bodyの長さをN、Th 6及びTh 7 vertebral bodyの弾性係数をE、DEUの弾性係数をeとすると、DBUとDEUの同一圧縮荷重時(F)の変位量の差である $D-d$ は、 $D-d=F(L+N)/AE$ となる。つまり、同一圧縮荷重時のDBUとDEUの変位量の差は、上下のvertebral bodyの弾性係数(E)と長さ(L+N)によって決まる。

本研究の実験1では、Disc-body unitの圧縮剛性において、その椎体部分の長さの影響があることが示され、実験2では椎体海綿骨の物性が椎間板の圧縮剛性に直接影響を及ぼすことが示された。よって、Disc-body unitの圧縮剛性を評価する際には、椎体特に海綿骨の物性が重要な役割を持っていることが示唆された。

5. 結語

1. Disc-body unitの圧縮剛性における椎体の影響について検討するため、2つの実験を施行した。
2. 実験1では、Disc-body unitの椎体部分の長さが異なると剛性値に差があった。
3. 実験2では、椎体海綿骨の剛性を増加させると、椎間板の圧縮剛性は増加した。
4. 椎体海綿骨の物性は、椎間板の圧縮剛性に直接影響を与えると考えられた。
5. Disc-body unitの圧縮剛性を評価する際には、椎体特に海綿骨の物性が重要な役割を持っていることが示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 田 清 志
副 査 教 授 阿 部 和 厚
副 査 教 授 宮 坂 和 男

学 位 論 文 題 名

椎間板椎体単位の圧縮剛性に関する研究

1. 緒言

従来より、椎間板椎体単位(以下Disc-body unit)の圧縮剛性で、椎間板の圧縮剛性の評価がなされてきた。しかし、Disc-body unitの圧縮剛性における椎体の影響については不明な点が多い。そこで本研究では、Disc-body unitの圧縮剛性における椎体の影響について検討するため、次の2つの実験を施行した。実験1ではDisc-body unitの圧縮剛性における椎体部分の長さの影響についての実験、実験2では椎間板の圧縮剛性における海綿骨の物性の影響についての実験である。

2. 実験材料および方法

【実験1】

Disc-body unitの圧縮剛性における椎体部分の長さの影響についての実験(n=5)

実験には、後方要素、肋骨を切除した生後約6カ月のウシ胸椎Th 6/7 Disc-body unit(以下DBU)を用いた。まず、DBUに圧縮荷重を最大1500 Nまで加え、上下端で変位量を測定し荷重変位曲線を記録した。試験終了後、DBUを椎間板に隣接する上下のepiphyseal plateで切離し、上位のTh 6 vertebral body、中央のDisc-epiphysis unit(以下DEU)、下位のTh 7 vertebral body(以下V. Body)の3つに分割した。DEUとV. BodyにDBUと同一条件で圧縮荷重を加え、荷重変位曲線を記録した。荷重変位曲線はいずれにおいても非線形であるため、最大荷重を3つに分け、各荷重及び荷重範囲における変位量、剛性値を求めた。さらに、DEU及びV. Bodyの物性を表す弾性係数を計算した。

【実験2】

椎間板の圧縮剛性における海綿骨の物性の影響についての実験(n=7)

実験には、椎弓根で後方要素を切除した生後約2カ月のウシ腰椎L5/6 Disc-body unit(以下正常DBU)を用いた。まず、正常DBUに圧縮荷重を最大2000Nまで加え、椎間に設置した伸び計で変位量を測定し荷重変位曲線を記録した。試験終了後、上下椎体の海綿骨を椎間板近位まで可及的に削り、歯科用レジンで置換した(以下置換DBU)。置換DBUに、正常DBUと同一条件で圧縮荷重を加え、同一部位の変位量を測定し荷重変位曲線を記録した。荷重変位曲線はいずれにおいても非線形であるため、最大荷重を4つに分け、各荷重及び荷重範囲における変位量、剛性値を求めた。

3.結果

【実験1】

各荷重における変位量の平均値は、DBUでは0.18mm(500N)から0.40mm(1500N)であり、DEUでは0.10mm(500N)から0.23mm(1500N)であった。すべての荷重においてDBUとDEUの変位量の差に統計学的有意差を認めた。剛性値の平均値は、DBUでは3.1MN/M(0-500N)から5.3MN/M(1000-1500N)であり、DEUでは5.1MN/M(0-500N)から8.5MN/M(1000-1500N)であった。すべての荷重範囲において両者の剛性値の差に統計学的有意差を認めた。次に、DEUとV. Bodyの測定結果から物性を表す弾性係数を求めた。stressとstrainの関係は非線形であるため、0から1000kPaを500kPa毎に2つのstressの範囲に分けて弾性係数の平均値を求めると、DEUでは73.7MPa(0-500kPa)から104.6MPa(500-1000kPa)であり、V. Bodyでは173.7MPa(0-500kPa)から253.1MPa(500-1000kPa)であった。

【実験2】

各荷重における変位量の平均値は、正常DBUでは0.19mm(500N)から0.59mm(2000N)であり、置換DBUでは0.19mm(500N)から0.49mm(2000N)であった。1000N以上の荷重において、両者の変位量の差に統計学的有意差を認めた。剛性値の平均値は、正常DBUでは2.6MN/M(0-500N)から4.0MN/M(1500-2000N)であり、置換DBUでは2.8MN/M(0-500N)から5.8MN/M(1500-2000N)であった。500から1000N以上の荷重範囲において、両者の剛性値の差に統計学的有意差を認めた。

4.考察

実験1において、DBUをDEUと上下のvertebral bodyを構成体とする複合体のモデルとして考えると、同一圧縮荷重時のDBUとDEUの変位量の差は、上下のvertebral bodyの弾性係数と長さによって決まる。よって、Disc-body unitの椎体部分の長さが異なれば、本実験のように同一圧縮荷重時の変位量に差がある。

健全な椎間板に圧縮荷重が加わると、椎体終板が椎体内に膨隆する。実験2では、伸び計を可及的に椎間板近位部に設置しているので、測定された変位量は主に椎間板の圧縮方向の変形量を表している。歯科用レジンで海綿骨を置換することは椎体終板の膨隆を抑制し、非圧縮性の物性を持つ髄核の内圧を容易に上昇させる。これによって、椎間板の圧縮剛性が増加し置換DBUの剛性値を増加させたと考えられる。つまり、椎体海綿骨の物性は、椎間板の圧縮剛性に直接影響を与えると考える。

従来より、Disc-body unitの圧縮剛性で椎間板の圧縮剛性が評価されてきた。その理由として、椎間板の解剖学構造、椎体の剛性が椎間板に比べて高いことなどが考えられる。本研究の実験1では、Disc-body unitの圧縮剛性において、その椎体部分の長さの影響があることが示され、実験2では椎体海綿骨の物性が椎間板の圧縮剛性に直接影響を及ぼすことが示された。以上のことから、Disc-body unitの圧縮剛性を評価する際には、椎体特に海綿骨の物性が重要な役割を持っていることが示唆された。

以上、本研究は椎間板椎体単位の圧縮剛性における椎体の影響を明らかにしたものであり、博士(医学)の学位を授与するに値するものと認定された。