506 腰椎の有限要素法解析による脊椎分離シミュレーション

Spondylolysis Simulation of Lumbar Vertebra by Finite Element Analysis

正 ○坂井田喜久 (静岡大) 学 塚本 大徳 (静大院)
小林 良充 (聖隷浜松病院)

Yoshihisa SAKAIDA, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku Hamamatsu, 432-8561 JAPAN
Hironori TSUKAMOTO, Graduate school, Shizuoka University
Yoshimitsu KOBAYASHI, Seirei Hamamatsu Hospital, 2-12-12 Sumiyoshi Hamamatsu, 430-8558 JAPAN

1. 緒言

成長期スポーツ選手の腰椎分離症の多くは、関節突起間部に発生¹⁾²⁾し、関節突起間部の応力集中による骨折が主原因と考えられているが、椎弓部での一側分離やその後の完全分離過程の解明には至っていない。また、椎弓部以外のたとえば椎体等の腰椎分離についても原因は明らかになっていない。

本研究は、腰椎の関節突起間部とそれ以外の部位に生じる腰椎分離の発生メカニズムを解明するために、腰痛患者の腰部断層写真から腰椎全体をモデル化したイメージベースドモデルを作成した。ついで、有限要素法解析によりスポーツ時に腰椎に働く応力場を求め、腰椎の脊椎分離過程についてシミュレーションした。

2. 解析方法

2.1 腰椎の抽出と3次元モデル

Fig.1に示す人体腰部のX線断層写真から腰椎部の皮質骨、海綿骨、椎間軟骨を分離し、Fig.2に示すように、L5腰椎の皮質骨と海綿骨を組合せた3次元モデルを作成した。

腰部断層写真は、Tiff形式に画像変換した後、画像処理ソフト(RATOC製)により皮質骨、海綿骨、椎間軟骨をそれぞれ抽出し、断層画像間を補間して3次元化した。なお、3次元モデルは、椎体下面がxy平面とほぼ平行となるように回転操作し、一辺0.75mmの8節点立方体要素で要素分割した。モデルの要素数と節点数は130,291, 180,463で、その内、皮質骨の要素数と節点数は、93,902, 131,838であった。Table 1とTable 2は、海綿骨と皮質骨に与えた弾性定数を示す³⁾⁴⁾⁵⁾。海綿骨の弾性定数は等方性を仮定した。一方、骨折起点となる皮質骨は、等方性と直交異方性を仮定した場合の弾性定数をそれぞれ代入し、皮質骨の弾性異方性が腰椎の応力場や脊椎分離に及ぼす影響を検討した。

2.2 腰椎の応力解析

腰椎の応力解析は、有限要素法ソフトANSYSより行った。解析は、回旋運動と伸展運動を模擬し、Fig.2の椎体下面をz方向に拘束した状態で、上下関節突起の左側①(回旋運動)、

または、両側①と②(伸展運動)に同じ強制変位量を与えた。なお、L5腰椎は、L4腰椎または仙椎と、上下関節突起間の椎間関節を介して干渉するため、回旋と伸展運動時の強制変位は、関節突起部の干渉面に垂直な方向に与えた。

3. 解析結果および考察

3.1 回旋または伸展運動による腰椎の一側分離

安静時に腰椎に発生する主応力は、椎体皮質骨中央の海綿骨との界面や側外面の円周方向、上下関節突起の干渉面、椎弓外面①(Fig.4参照)などに高い引張応力が分布し、その値は立位よりも座位が高く、第一主応力で最大17.5MPa程度となる⁶⁾。ただし、関節突起間部後方から見た応力場はほぼ左右対称で、椎体骨折はもとより、椎弓部での一側分離は発生しない⁶⁾⁷⁾と考えられる。

一方、スポーツ時に腰椎間の上下関節突起が干渉する運動には、回旋運動と伸展運動がある。Fig.3(a)~(d)は、皮質骨の弾性定数を等方性または異方性と仮定した場合の回旋または伸展運動時に発生する第一主応力分布を示す。また、第一主応力の上位5点の発生箇所と応力値、主応力方向をTable 3にまとめて示した。なお、主応力の高い箇所④~⑥はFig.4に示し、第一主応力 σ_1 は皮質骨の弾性定数を等方性と仮定したときの最大値を1.0として規格化した値で示した。なお、 l_1 , l_2 , l_3 は各軸との方向余弦である。

回旋運動時に発生する第一主応力分布は、弾性異方性の有無で若干異なるが、最大値の発生箇所はほぼ一致した。また、Fig.5(a), (b)にベクトル表示したように、強制変位を

Table 1. Stiffness of cancellous bone for lumbar vertebrae³⁾⁴⁾

Young's modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, ν
0.10	0.20

Table 2. Stiffness of cortical bone for lumbar vertebrae³⁾⁴⁾⁵⁾

Stiffness matrix	E_x	E_y	E_z	G_{23}	G_{31}	G_{12}	ν_{23}	ν_{31}	ν_{12}
(I) Isotropy	12.0	12.0	12.0	4.6	4.6	4.6	0.3	0.3	0.3
(II) Anisotropy	11.3	11.3	22.0	5.4	5.4	3.8	0.20	0.40	0.48

Unit of E_i and G_{ij} : GPa

Fig.1 CT images of lumbar spine.

Fig.2. Finite element model and analysis conditions.

(a) Circling mov.-Iso (b) Circling mov.-Ani (c) Extension mov.-Iso (d) Extension mov.-Ani
Fig.3. Maximum principal stress field, σ_1 , during circling or extension exercises.

Table 3. Maximum principal stress and direction cosine generated during exercises.

Ranking	1st	2nd	3rd	4th	5th	Ranking	1st	2nd	3rd	4th	5th
Location	(E)	(F)	(G)	(D)	(H)	Location	(E)	(F)	(N)	(D)	(H)
σ_1	1.00	0.46	0.28	0.28	0.25	σ_1	1.00	0.54	0.43	0.33	0.26
l_1	0.516	-0.310	-0.462	0.538	0.843	l_1	0.492	-0.285	0.757	0.592	0.837
l_2	0.776	0.778	0.550	0.587	0.532	l_2	0.763	0.744	0.349	0.611	0.544
l_3	0.363	0.547	-0.696	-0.605	0.076	l_3	0.419	0.605	0.553	-0.526	0.06
Ranking	1st	2nd	3rd	4th	5th	Ranking	1st	2nd	3rd	4th	5th
Location	(E)	(C)	(F)	(A)	(H)	Location	(E)	(F)	(I)	(C)	(H)
σ_1	1.00	0.88	0.70	0.62	0.43	σ_1	1.54	1.01	0.73	0.56	0.42
l_1	0.513	0.690	-0.326	-0.428	0.862	l_1	0.502	-0.082	0.973	0.673	0.856
l_2	0.780	-0.534	0.776	0.769	0.505	l_2	0.762	0.839	0.162	-0.359	0.517
l_3	0.358	0.488	0.540	0.475	0.035	l_3	0.411	0.538	0.166	0.646	0.008

Fig.5. Predicted unilateral spondylolysis portions during circling and extension exercises.

与えた上下関節突起部と椎弓との境界線 (図の断面 α) 上に、境界面を引き裂く方向に引張応力が発生し、断面 α での一側分離が最も骨折の危険性が高い部位と判断できる。

同様に、伸展運動時の発生応力から一側分離面を予測すると、Fig.5(c), (d) のようになった。伸展運動では関節突起の両側①と②に強制変位を与えているので、Fig.3(c), (d) のように巨視的にはほぼ左右対称に近い応力場となるが、強制変位を与えた上下関節突起部と椎弓との境界線上に働く主応力の大きさや方向は、左右で大きく異なる結果となった。本研究で、モデル化した患者の腰椎では、椎弓部の上縁と下縁の骨の厚みは左右で異なり、左上縁の厚さは右骨の 1/5 と非常に薄い。よって、伸展運動においても弾性異方性の有無にかかわらず、断面 α での一側分離が最も骨折の危険性の高い部位となった。なお、断面 α での一側分離は、関節突起部での発生件数が高い部位¹⁸⁾⁹⁾ とほぼ一致する。

3.2 一側分離後の脊椎分離 (2 次骨折) 過程

前節より、回旋運動や伸展運動時に発生する応力場により関節突起部と椎弓との境界断面 α での一側分離が発生することがわかった。そこで、断面 α での一側分離後、さらに運動を継続した場合の脊椎分離過程について検討した。

Fig.6(a), (b) は、一側分離後に回旋①、または、伸展運動①②を行ったときの第一主応力分布を示す。なお、図は皮質骨の弾性異方性を考慮したときの結果で、一側分離面を強調するために、実際の変位を 77 倍に拡大したものである。

一側分離後、さらに上下関節突起①に回旋運動を継続さ

Fig.4. Typical maximum principal stress points generated during exercises.

(a) Circling mov.-Ani (b) Extension mov.-Ani

Fig.6. Maximum principal stress field, σ_1 , during exercises after unilateral spondylolysis.

Fig.7. Predicted secondary spondylolysis portions after unilateral spondylolysis.

せると、Fig.7(a), (b) に示したように、弾性異方性の有無により主応力の発生位置と方向は若干異なるが、椎弓根の頭側と椎体との接合界面①に最大値が発生し、第二位の主応力発生点③または⑧と、副突起と椎弓根の尾側との境界点④や⑨とを結ぶ断面 β で 2 次骨折する危険性が高い。なお、L5 腰椎の断面 β での骨折はバレーボールや棒高跳選手の症例⁹⁾ とほぼ一致する。

一方、Fig.7(c), (d) は、一側分離後に伸展運動を継続したときの結果を示す。伸展運動を継続すると、回旋運動で 2 次骨折する断面 β に沿った⑨点の応力も高いが、①点や椎弓部の③に最大値が発生し、椎弓部の①や①とを結ぶ断面 γ で 2 次骨折する可能性が高い。なお、L5 腰椎の断面 γ での骨折は長距離やバレーボール選手の症例⁹⁾ とほぼ一致する。

以上、腰椎の 3 次元モデルを用いた有限要素法解析により、脊椎分離過程を予測できることがわかった。また、腰椎などの骨は、個体差が激しいので骨折原因の解明には、断層写真を元にしたイメージベースドモデルが有効である。

結言および参考文献 (省略)