

文章编号:1004-7220(2016)02-0135-07

腰椎椎体有限元建模的最优单元尺寸和材料属性分布及建模方法

蔡康健, 王丽珍, 姚杰, 宫赫

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: **目的** 研究人体腰椎椎体有限元建模中有限元的单元尺寸和类型、松质骨材料属性分配方式以及皮质骨结构模拟方法对有限元结果的影响。**方法** 基于定量 CT 扫描人体腰椎的影像,采用 6 种不同的单元尺寸(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm)、2 种松质骨材料属性分配方法、2 种松质骨非均匀材料属性分配梯度(150、300)、2 种皮质骨结构建模方法,建立 22 个去除后部结构的腰椎 L2 段椎体有限元模型,计算获得 22 个有限元模型的最大位移、应变能、平均应力、轴向刚度,并对这些结果进行统计分析和验证。**结果** 单元尺寸为 0.5 mm 时,10、150、300 三种非均匀材料属性分配梯度下,模型的轴向刚度值出现明显差异;不同单元尺寸下,松质骨在 150 种非均匀材料属性分配梯度下,模型的平均应力波动变化平缓;利用最外层六面体单元模拟皮质骨结构方法,其平均应力大于利用在最外层添加蒙皮(skin)模拟皮质骨结构方法。**结论** 在进行腰椎椎体有限元建模时,选取 0.5 mm 尺寸的六面体单元、为椎体松质骨分配 150 种非均匀材料属性、利用最外层六面体单元模拟椎体皮质骨结构的建模方法,建立的有限元模型更加合理和有效。研究结果为后续大批量、个体化腰椎椎体模型的建立奠定基础。

关键词: 有限元建模; 单元尺寸; 材料属性; 皮质骨结构

中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.02.135

The optimal element size, material property distributions and modeling methods for finite element modeling of lumbar vertebra

CAI Kang-jian, WANG Li-zhen, YAO Jie, GONG He (Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Objective To investigate the effects of element size and type, material property distributions of vertebral cancellous bone and simulation methods of cortical bone structure on the finite element (FE) results during the finite element modeling of lumbar vertebral body. **Methods** Based on QCT images of lumbar spine, 22 FE models of L2 without posterior structure were built by using 6 element sizes (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm), 2 kinds of material property distribution methods of cancellous bone, 2 heterogeneous material distribution methods of cancellous bone (150, 300) and 2 cortical bone modeling methods. The maximum displacement, strain energy, average stress and axial stiffness of these models were obtained to analyze and verify the results. **Results** When the element size was 0.5 mm, the axial stiffness among the models with 10, 150 and 300 kinds of heterogeneous materials showed obvious differences; for the vertebral cancellous bone with 150 kinds of materials, the average stress appeared no distinct variation under different element sizes; the average stress of the model using the outermost hexahedral elements to simulate cortical bone structure was larger than that of the model appending the skin to the outmost. **Conclusions** It is more reasonable and effective to build the FE model

收稿日期:2015-11-11; 修回日期:2015-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(11322223, 8171753, 11572029), 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0024)。

通信作者:宫赫, 教授, 博士研究生导师, E-mail: bmegonghe@buaa.edu.cn。

of lumbar vertebral body with the method by using 0.5 mm element size, 8-noded hexahedral elements, 150 kinds of heterogeneous materials, and using the outermost hexahedral elements to simulate the cortical bone structure. The research findings will lay a foundation for building subject-specific FE models of lumbar vertebral body on a large scale in future.

Key words: Finite element modeling; Element size; Material property; Cortical bone structure

常用的脊柱生物力学研究方法有实验和计算机模拟两大类^[1]。有限元法是常用的计算机模拟方法,它将研究对象划分为有限数量的单元,通过评估每个单元的力学特性获得整个对象的特性分布^[2]。经过验证的有限元模型,其预测得到的脊柱运动角度、运动范围等生物力学特性和尸体实验结果呈现出良好的一致性^[3],且具有很多优越性,例如:和传统的尸体实验相比,有限元法成本低,计算周期短,可以计算传感器难于测量的结构内部应力、应变;模拟很多极端情况下的负载响应及其损伤机制,为运动保护设施的设计提供支持^[3]。

在有限元建模过程中,有限元单元划分所使用的单元类型和尺寸对分析的精度有较大影响。对于三维实体结构,划分为六面体单元的计算精度要优于四面体单元和五面体楔形单元^[4]。Keyak等^[5]对模型中单元尺寸的影响开展量化研究,认为有限元分析结果对单元尺寸的变化比较敏感。然而为模型划分有限元网格时,不同研究采取了不同的单元尺寸^[6-8]。

同时,松质骨材料属性的分配方法也会对有限元结果造成影响。常见的松质骨材料属性分配方法有均匀^[9]和非均匀^[10]两种,后者可以较好地体现骨组织内部非均匀的材料分布^[10]。然而,目前对于松质骨非均匀材料属性的分配梯度尚无统一的设置方法。有研究认为,采取10级梯度的非均匀材料属性更接近于人体骨组织复杂的材料属性^[9];一些研究中则为松质骨设置11、76、170级等梯度的非均匀材料属性^[10-12]。

椎体由多孔的松质骨外面包围一层薄的皮质骨壳构成,皮质骨壳作为椎体结构的重要组成部分,是椎体的主要承载结构,可增大整个椎体的承载能力^[9]。研究皮质骨的力学特性和建模方法不仅可以提高有限元仿真的可靠性,而且对于骨质疏松的诊断和药物治疗也具有重要的理论指导意义^[9]。当前有限元建模中对于皮质骨建模方法的研究主要

有以下几类:一是在椎体模型的最外层添加一个固定厚度的三角面片模拟皮质骨质量结构^[8];二是利用一定算法计算出皮质骨的厚度来判定皮质骨壳结构^[9];三是使用均匀厚度的六面体单元模拟皮质骨结构^[10]。

本文在总结前人研究的基础上,设计建立22个去除后部结构的腰椎L2段椎体有限元模型,研究腰椎椎体有限元建模中的最优单元尺寸、松质骨材料属性分配方式、松质骨非均匀材料属性分配方式下的分配梯度以及皮质骨的建模方法。

1 材料与方法

选取1名年龄为66岁的男性志愿者,对其腰椎L1~4节段进行定量CT扫描,扫描参数为120 kV, 205.95 mA,层面厚度1.25 mm(分辨率512×512,像素尺寸0.938 mm)。以L2为研究对象,得到98张DICOM格式的连续断层图像,将图像导入Mimics 15.0软件中,通过阈值分割(Thresholding)、区域增长(Region Growing)和Mask编辑(Edit Masks)等操作,得到去除后部结构的腰椎L2段椎体的三维几何模型,保存为STL格式的文件;将STL格式的文件导入Geomagic studio 11.0软件中,通过细分(Refining)、快速平滑(Rapid Smoothing)、网格医生(Grid Doctor)等操作,得到表面较平滑的三角面片模型,保存为IGS格式的文件;将IGS格式的文件导入HyperMesh 11.0软件中,通过实体编辑(Solid Edit)、实体映射(Solid Map)等操作,划分为八节点六面体单元,保存为INP格式的文件;将INP格式文件导入ABAQUS 6.11软件中,添加约束条件和载荷,最终得到去除后部结构的腰椎L2段椎体有限元模型(见图1)。

主要考虑以下几种因素对于有限元结果的影响:

(1) 椎体松质骨材料属性的分配方法。

方法1 为椎体松质骨分配均匀的材料属性,

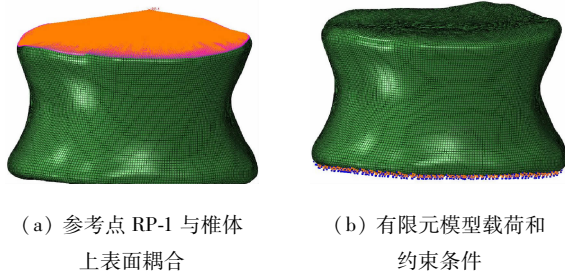


图1 去除后部结构的L2段腰椎椎体有限元模型
Fig.1 Finite element model of L2 vertebral body without posterior structure (a) Coupling of reference point RP-1 and upper surface of L2 vertebral body, (b) Load and boundary conditions of the finite element model

该过程在 ABAQUS 6.11 软件中实现,根据该椎体 CT 报告给出的松质骨平均密度,计算得到其弹性模量为 3 GPa,泊松比为 0.3^[6]。

方法 2 为椎体松质骨分配非均匀的材料属性,将 HyperMesh 11.0 软件中生成的六面体网格模型文件导入 Mimics 15.0 软件中。首先将体模已知密度和其灰度进行线性回归得到密度-灰度关系式^[12],然后根据 CT 灰度值的分布,通过给定材料分配的梯度进行材料属性分配。将椎体松质骨按照 150、300 种材料属性赋值^[6],灰度-密度公式^[12]和弹性模量-密度公式^[6]分别为:

$$\rho = 0.0008HU + 0.0296 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} E &= 2980\rho^{1.05} \\ \rho &< 0.0527 \text{ g/cm}^3 \\ E &= -34.7 + 3230\rho \\ \rho &\geq 0.0527 \text{ g/cm}^3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; E 为弹性模量 (MPa);泊松比取为 0.3^[6]。

(2) 单元尺寸。分别建立尺寸为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm 六面体单元模型。将所建的不同单元尺寸模型导入 ABAQUS 6.11 软件中进行分析。

(3) 皮质骨的建模方法。在上述建模方法的基础上,建立腰椎 L2 段皮质骨的模型,采取两种皮质骨的建模方法验证不同皮质骨建模方法对有限元分析结果的影响。取六面体单元的尺寸为 0.5 mm,根据该椎体 CT 报告给出的最大密度,计算得到皮质骨弹性模量为 6 GPa,泊松比为 0.3。利用两种方法分别对均匀和非均匀两种松质骨材料属性分配方法

进行建模。

方法 1 为模型最外层 0.5 mm 厚的实体六面体单元赋予弹性模量为 6 GPa、泊松比为 0.3 的皮质骨材料属性。

方法 2 在椎体的外表面添加一层弹性模量为 6 GPa、泊松比为 0.3 的 0.5 mm 厚的蒙皮 (skin),来模拟皮质骨结构。

载荷的施加方式为耦合加载,即在椎体上表面上方中心位置选 1 个参考点 RP-1,将该参考点与椎体的上表面耦合,然后在参考点上施加 400 N 的集中压力。为了保证参考点只在轴向方向上平移,约束参考点上除 U3 以外的其他自由度,椎体下表面完全固定^[11]。

通过上述两种松质骨材料属性的分配、6 种单元尺寸以及 3 种模拟皮质骨的方法,建立 22 个模型 (见表 1)。其中,模型 1~6 讨论单元尺寸对有限元

表 1 根据不同方法建立的 22 个模型

Tab.1 22 models based on different modeling methods

模型编号	椎体松质骨材料属性	椎体皮质骨模拟方法	模型单元尺寸/mm
1	均匀	无皮质骨	0.5
2	均匀	无皮质骨	1.0
3	均匀	无皮质骨	1.5
4	均匀	无皮质骨	2.0
5	均匀	无皮质骨	2.5
6	均匀	无皮质骨	3.0
7	150 种非均匀	无皮质骨	0.5
8	150 种非均匀	无皮质骨	1.0
9	150 种非均匀	无皮质骨	1.5
10	150 种非均匀	无皮质骨	2.0
11	150 种非均匀	无皮质骨	2.5
12	150 种非均匀	无皮质骨	3.0
13	300 种非均匀	无皮质骨	0.5
14	300 种非均匀	无皮质骨	1.0
15	300 种非均匀	无皮质骨	1.5
16	300 种非均匀	无皮质骨	2.0
17	300 种非均匀	无皮质骨	2.5
18	300 种非均匀	无皮质骨	3.0
19	均匀	0.5 mm 厚实体六面体	0.5
20	均匀	0.5 mm 厚外表面 skin	0.5
21	150 种非均匀	0.5 mm 厚实体六面体	0.5
22	150 种非均匀	0.5 mm 厚外表面 skin	0.5

结果的影响,模型7~18讨论松质骨材料属性分配方法对有限元结果的影响,模型1、7、19~22讨论皮质骨建模方法对有限元结果的影响。

将表1中的22个模型导入ABAQUS 6.11软件中进行计算分析。

2 结果

2.1 六面体单元尺寸对有限元结果的影响

建立去除后部结构的人体腰椎L2段椎体有限元模型,模型1~6的六面体单元和节点数如表2所示。

表2 不同单元尺寸下模型单元和节点数

Tab.2 Numbers of elements and nodes in the models with different sizes

模型	单元尺寸/mm	单元数	节点数
1	0.5	377 784	392 850
2	1.0	46 098	49 842
3	1.5	14 868	16 625
4	2.0	4 740	5 603
5	2.5	4 140	4 901
6	3.0	2 312	2 862

在松质骨非均匀材料属性的分配过程中,单元尺寸的不同会影响模型中单元的弹性模量^[5]。因此,为了只有单元尺寸1个变量,首先采取松质骨均匀材料属性的分配方法。将模型1~6导入ABAQUS 6.11中进行分析计算,得到各个模型的最大位移、应变能、平均应力(见表3)。在单元尺寸小于2.5 mm时,随着单元尺寸的增加,最大位移缓慢变化,应变能保持不变,平均应力在一个很小的水平

上波动;而当单元尺寸大于2.5 mm时,最大位移急剧增加,应变能和平均应力急剧下降。

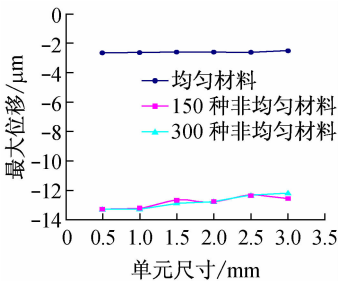
表3 松质骨分配均匀材料属性下不同单元尺寸的分析结果

Tab.3 Results of models with different element sizes and materials of cancellous bone

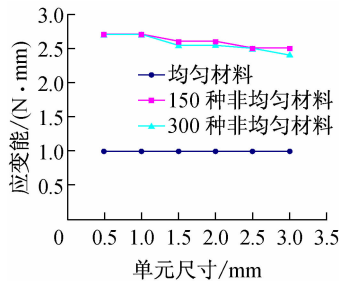
模型	单元尺寸/mm	最大位移/ μm	应变能/mJ	平均应力/kPa
1	0.5	-2.64	0.52	270
2	1.0	-2.62	0.52	268
3	1.5	-2.59	0.52	270
4	2.0	-2.59	0.52	270
5	2.5	-2.61	0.52	270
6	3.0	-2.50	0.50	270

2.2 松质骨材料属性的分配方法对有限元结果的影响

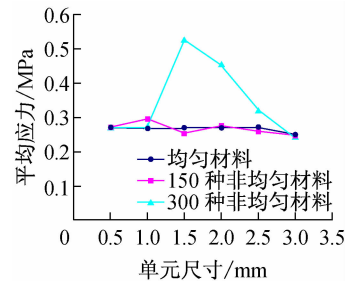
为椎体松质骨分配均匀和非均匀两种材料属性。为了研究两种材料属性的分配方法对有限元结果的影响,将模型1~18导入ABAQUS 6.11中进行分析计算,得到各个模型的最大位移、应变能、平均应力。将计算得到的数据以单元尺寸为自变量,以最大位移、应变能、平均应力为因变量,分别绘图(见图2)。相对于松质骨均匀材料属性,松质骨非均匀材料属性下模型的最大位移和应变能增加[见图2(a)、(b)];在各个单元尺寸下,松质骨300种非均匀材料属性分配方法的平均应力的波动较大,松质骨150种非均匀材料属性分配方法的平均应力波动变化平缓;松质骨300种非均匀材料属性分配方法下,当单元尺寸大于1.0 mm时,平均应力变化较大;当单元尺寸小于1.0 mm时,平均应力变化平缓[见图2(c)]。



(a) 单元尺寸-最大位移



(b) 单元尺寸-应变能



(c) 单元尺寸-平均应力

图2 模型1~18最大位移、应变能、平均应力与单元尺寸的关系

Fig.2 Relationships between element sizes and maximum displacement, strain energy, average stress for Models 1-18

(a) Element size-maximum displacement, (b) Element size-strain energy, (c) Element size-average stress

2.3 皮质骨的建模方式对有限元结果的影响

在探讨皮质骨建模方法对有限元分析结果的影响时,首先对模型 1、7、19~22 的单元类型、单元数以及节点数进行统计(见表 4)。

表 4 模型 1、7、19~22 单元类型、单元数以及节点数

Tab. 4 Types and numbers of elements and nodes for Models 1, 7, and 19-22

模型	4 节点壳单元	六面体	节点数
1	0	377 784	392 850
7	0	377 784	392 850
19	0	377 784	392 850
20	29 732	377 784	392 850
21	0	377 784	392 850
22	29 732	377 784	392 850

将模型 1、7、19~22 导入 ABAQUS 6.11 软件中进行有限元计算,得到各个模型的最大位移、应变能、皮质骨平均应力、松质骨平均应力以及模型的整体平均应力(见表 5)。无论松质骨如何分配材料属性,添加皮质骨结构模型(模型 19~22)的应变能、最大位移以及平均应力都相对于无皮质骨结构模型(模型 1、7)发生变化;通过 3 种平均应力的对比可见,无论松质骨如何分配材料属性,将最外层的六面体单元设置为皮质骨的方法(模型 19、21),其皮质骨平均应力、松质骨平均应力以及整体平均应力均大于在椎体外表面加一层蒙皮模拟皮质骨的方法(模型 20、22);相同的皮质骨建模方法下,松质骨非均匀材料属性分配方法(模型 21、22)的 3 种平均应力、应变能以及最大位移都大于松质骨均匀材料属性分配方法(模型 19、20)。

表 5 模型 1、7、19~22 有限元结果统计

Tab. 5 Finite element results of Models 1, 7 and 19-22

模型	最大位移/ μm	应变能/ mJ	皮质骨平均 应力/ kPa	松质骨平均 应力/ kPa	整体平均 应力/ kPa
1	-2.64	0.52	—	—	270
7	-13.30	0.27	—	—	270
19	-2.53	0.50	350	270	270
20	-24.20	0.48	240	250	240
21	-11.00	2.00	113	220	290
22	-9.36	1.85	890	200	250

2.4 模型的验证

Christiansen 等^[7]在关于松质骨和皮质骨的不同力学贡献导致老龄相关椎体强度变化出现性别差异的研究中,30 名青年男性受试者[年龄(38 ± 1.8)岁]的轴向刚度为(37.8 ± 7.7) MN/m,30 名老年男性受试者[年龄(78 ± 2.4)岁]的轴向刚度为(29.4 ± 9.6) MN/m。本文中受试者为男性(年龄 66 岁),建立了 22 个不同的去除后部结构的腰椎 L2 段椎体有限元模型,计算得到每个模型的轴向刚度(见表 6)。对比模型 1~6 和模型 7~18 的轴向刚度值,松质骨分配均匀材料属性模型的轴向刚度值范围明显不在文献[7]的结果范围内,而松质骨分配非均匀材料属性的模型的轴向刚度值均在文献[7]的结果范围;对比模型 7、21 的轴向刚度值,无皮质骨结构的模型虽然有效,但是其轴向刚度值在文献结果范围的边缘,而添加皮质骨结构模型的轴向刚度值和文献[7]结果的一致性更高;对比模型 21、22,模型 21 的轴向刚度与文献[7]中给出结果的一致性更高。

表 6 模型 1~22 轴向刚度值

Tab. 6 Axial stiffness of Models 1-22

模型	轴向刚度/ $(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	模型	轴向刚度/ $(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$
1	160.0	12	32.0
2	153.0	13	30.1
3	154.0	14	30.2
4	154.0	15	31.1
5	153.0	16	31.4
6	152.0	17	32.4
7	30.1	18	32.8
8	30.3	19	158.0
9	31.1	20	16.5
10	31.3	21	36.4
11	32.4	22	42.7

为了讨论松质骨非均匀材料分配梯度的合理性,计算单元尺寸为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm,松质骨分配 10 种非均匀材料属性,将无皮质骨结构模型的轴向刚度与模型 7~18 轴向刚度进行汇总(见图 3)。150 和 300 种非均匀材料属性分配方法得到的各个尺寸模型的轴向刚度值相近,而 10 种非均匀材料属性分配方法下各个尺寸模型的

轴向刚度与其他两种相差比较大;单元尺寸大于1.0 mm时,3种非均匀材料属性分配梯度下得到的模型轴向刚度的差异不明显;而当单元尺寸为小于1.0 mm时,3种非均匀材料属性分配梯度下轴向刚度出现明显差异,且单元尺寸为0.5 mm时差异最大。

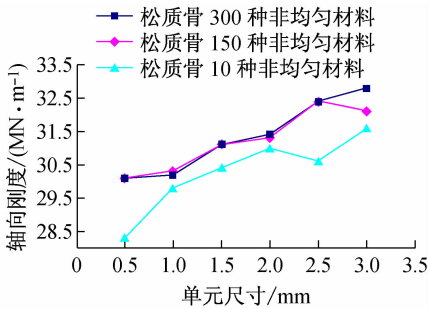


图3 单元尺寸-轴向刚度曲线

Fig. 3 Relationship between elements size and axial stiffness

通过0.5 mm六面体单元尺寸、松质骨分配150种非均匀材料属性、利用为最外层六面体单元分配皮质骨材料属性模拟皮质骨结构方法得到的模型21的松质骨应力分布剖面图如图4所示。

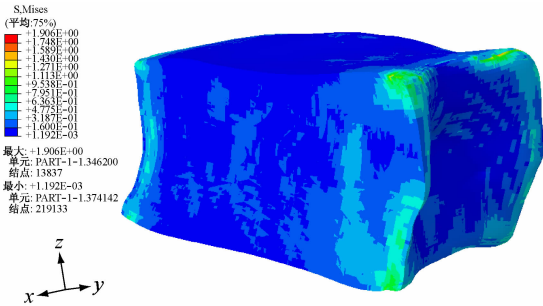


图4 模型21松质骨应力分布剖面图

Fig. 4 Cross-sectional view of stress distributions in cancellous bone of Model 21

3 讨论

本文从松质骨材料属性分配方式、松质骨非均匀材料分配梯度、有限元单元尺寸以及椎体皮质骨结构建模方法4个方面探究腰椎椎体有限元建模的方法,并从中选取最为合理的有限元建模方法,为后续大批量、个体化的建模仿真工作奠定基础。

在为椎体松质骨赋予均匀材料属性的建模中,

选取小于2.5 mm的单元尺寸对有限元分析结果影响较小(见表3);当椎体松质骨分配300种非均匀材料属性时,单元尺寸小于1.0 mm时,平均应力的波动变化平缓[见图2(c)],故建议当为椎体松质骨分配较小梯度的非均匀材料属性时,选取小于1.0 mm的单元尺寸对有限元分析结果影响较小。人体内骨组织分布不均匀,且骨材料呈显著的异质性分布,具有不同种族、个体及生理病理上的差异^[13],故在均匀材料属性和不同梯度非均匀材料属性分配方式下,得到的模型轴向刚度存在明显差异。当单元尺寸小于1.0 mm时,不同分配梯度的刚度差异明显变大;且单元尺寸为0.5 mm时,刚度的差异最为显著(见图3)。因此,在松质骨赋予较小梯度非均匀材料属性的有限元建模中,应在不影响计算效率的前提下,选择0.5 mm的六面体单元。

人体内骨组织分布不均匀,且骨材料呈显著的异质性分布^[13]。Kopperdahl等^[10]认为,非均匀材料属性分配方法可以较好体现骨组织内部非均匀的材料分布。对比本文所建22个模型的轴向刚度(见表6)与Christiansen等^[7]的研究结果,非均匀材料属性分配方法得到的模型轴向刚度与文献研究结果显示出了很高的一致性。因此,在进行腰椎有限元建模中,为椎体松质骨分配非均匀材料属性更为合适。由3种不同梯度非均匀材料属性的刚度汇总(见图3)可以得出结论,松质骨非均匀材料属性的分配梯度会对有限元模型造成影响;而且如果分配的梯度足够小,则该影响较小,即为有限元模型选择较小分配梯度的非均匀材料属性对分析结果影响较小。因此,在腰椎有限元建模中,应该为椎体分配较小梯度的非均匀材料属性。由150、300种非均匀材料属性模型平均应力的波动性变化[见图2(c)]对比可知,松质骨150种非均匀材料属性对有限元分析结果影响较小。因此,在腰椎椎体有限元建模过程中,建议为椎体的松质骨分配150种非均匀材料属性。

Eswaran等^[4]研究了从椎体表面去除皮质骨后的力学特性,认为皮质骨壳是重要的承载结构,可增大整个椎体的承载能力。由各个模型刚度的对比分析(见表6)可以得出结论,添加皮质骨结构且利用最外层六面体单元模拟皮质骨方法的模型轴向刚度和Christiansen等^[7]研究结果一致性更高;添加皮质

骨结构会对有限元结果造成影响(见表5)。因此,在腰椎有限元建模时,应该为模型添加皮质骨结构。通过不同模型的有限元分析结果(见表6)对比可知,最外层六面体单元模拟皮质骨方法优于椎体外表面添加蒙皮的皮质骨模拟方法;相同的材料属性和单元尺寸下,利用最外层六面体单元模拟皮质骨方法得到的模型(模型21)与Christiansen等^[7]研究结果的一致性高于椎体外表面添加蒙皮的皮质骨模拟方法得到的模型(模型22)。因此,在对椎体进行有限元建模时,建议利用椎体最外层六面体单元模拟皮质骨结构。

综上所述,在腰椎有限元建模时,选取0.5 mm尺寸的六面体单元、为松质骨分配150种非均匀材料属性、利用最外层六面体单元模拟皮质骨结构的建模方法,建立的有限元模型更加合理和有效。

参考文献:

- [1] 肖智韬. 基于非线性有限元法的人体腰椎强度预测及其在腰椎相关疾病中的应用[D]. 长春:吉林大学博士学位论文, 2013.
- [2] Morgan EF, Bouxsein ML. Use of finite element analysis to assess bone strength [J]. *BoneKEy*, 2005, 2(12): 8-19.
- [3] 原芳, 薛清华, 刘伟强. 有限元法在脊柱生物力学应用中的新进展[J]. *医用生物力学*, 2012, 28(5): 585-589.
Yuan F, Xue QH. Recent advances about finite element applications in spine biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2012, 28(5): 585-589.
- [4] 牛文鑫, 丁祖泉. 三种三维有限元建模方法在跟骨模型建立中的应用和比较[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(4): 345-350.
Niu WX, Ding ZQ. Comparative study on three different methods applied to establish 3D finite element calcaneus model [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(4): 345-350.
- [5] Keyak JH, Skinner HB. Three-dimensional finite element modeling of bone: Effects of element size [J]. *J Biomech Eng*, 1992, 14(11): 483-489.
- [6] Mirzaei M, Zeinali A, Razmjoo A, *et al.* On prediction of the strength levels and failure patterns of human vertebrae using quantitative computed tomography (QCT)-based finite element method [J]. *J Biomech*, 2009, 42(11): 1584-1591.
- [7] Christiansen BA, Kopperdahl DL, Kiel DP, *et al.* Mechanical contributions of the cortical and trabecular compartments contribute to differences in age-related changes in vertebral body strength in men and women assessed by QCT-based finite element analysis [J]. *JBMR*, 2011, 26(5): 974-983.
- [8] Matsumoto T, Ohnishi T, Bessho M, *et al.* Prediction of vertebral strength under loading conditions occurring in activities of daily living using a computed tomography-based nonlinear finite element method [J]. *Spine*, 2009, 34(14): 1464-1469.
- [9] Eswaran SK, Bayraktar HH, Adams MF, *et al.* The micro-mechanics of cortical shell removal in the human vertebral body [J]. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 2007, 196(31-32): 3025-3032.
- [10] Kopperdahl DL, Morgan EF, Keaveny TM. Quantitative computed tomography estimates of the mechanical properties of human vertebral trabecular bone [J]. *J Orthop Res*, 2002, 20(4): 801-805.
- [11] Crawford RP, Cann CE, Keaveny TM, *et al.* Finite element models predict *in vitro* vertebral body compressive strength better than quantitative computed tomography [J]. *Bone*, 2003, 33(4): 744-750.
- [12] Gong H, Zhang M, Fan YB, *et al.* Relationships between femoral strength evaluated by nonlinear finite element analysis and BMD, material distribution and geometric morphology [J]. *Ann Biomed Eng*, 2012, 40(7): 1575-1585.
- [13] 苟福兴. 不同材料属性分配方法对椎体有限元模型力学性能的影响[D]. 广州:南方医科大学硕士学位论文, 2010.