

骶髂关节周围各韧带对骶髂关节稳定性的影响

张少群¹, 任茹霞², 陈奕历¹, 冯梓誉¹, 李义凯¹

(1. 南方医科大学 中医药学院, 广州 510515; 2. 中山大学第七附属医院 药学部, 广东 深圳 518107)

摘要:目的 利用有限元方法分析骶髂关节周围各韧带对骶髂关节稳定性的影响。方法 建立正常腰椎-骨盆-股骨有限元模型,在该正常模型基础上分别去除双侧骶髂关节各韧带,建立无髂腰韧带模型、无骶髂前韧带模型、无骶髂后韧带模型、无骶结节韧带模型、无骶棘韧带模型和无骶髂骨间韧带模型。在各模型上分别模拟脊柱的生理运动,分析左右骶髂关节活动度(range of motion, ROM)和各关节面的平均应力,并与正常模型进行比较。结果 相比正常骶髂关节模型,无骶结节韧带模型、无骶棘韧带模型和无骶髂后韧带模型的左右两侧骶髂关节 ROM 均无明显差异,而无骨间韧带模型除在脊柱右旋转情况下左侧骶髂关节 ROM 和后伸情况下右侧骶髂关节 ROM 无明显差异外,在其他脊柱生理活动下左右两侧骶髂关节 ROM 均显著增大。无骶髂骨间韧带模型左右两侧骶髂关节在脊柱生理活动下关节面的平均应力均明显降低。结论 在所有骶髂关节周围韧带中,骶髂骨间韧带对骶髂关节的稳定性影响最大。研究结果有利于探讨骶髂关节错位的发生机制,为临床骶髂关节错位的治疗提供一定理论依据。

关键词:骶髂关节; 韧带; 应力; 活动度; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.05.008

The Influence of Ligaments Surrounding Sacroiliac Joints on Stability of Sacroiliac Joints

ZHANG Shaoqun¹, REN Ruxia², CHEN Yili¹, FENG Ziyu¹, LI Yikai¹

(1. College of Traditional Chinese Medicine, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China;
2. Department of Pharmacy, the Seventh Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, Guangdong, China)

Abstract: **Objective** To analyze the influence of ligaments surrounding sacroiliac joints (SIJs) on stability of SIJs by finite element method. **Methods** The finite element lumbar spine-pelvis-femur model was established. Based on this normal model, all SIJ ligaments in both sides were removed in turn, to establish models without iliolumbar ligaments, sacroiliac anterior ligaments, sacroiliac posterior ligament, sacrotuberous ligaments, sacrospinous ligaments, sacroiliac interosseous ligaments, respectively. The models were used to simulate physiological motions of the spine. The range of motion (ROM) and average stress on the left and right SIJs were analyzed and compared with the normal models. **Results** Compared with the normal SIJ model, no significant differences in the ROM of bilateral SIJs were found in the models without sacrotuberous ligaments, sacrospinous ligaments and sacroiliac posterior ligaments; for the model without sacroiliac interosseous ligaments, there was no significant difference in the ROM of the left SIJs under spinal right rotation and ROM of the right SIJs under spinal extension, but the ROM of bilateral SIJs increased significantly under the other spinal physiological activities. Under the phys-

iological activities of the spine, the average stress of the SIJ surface in the left and right sides of the model without acroiliacinterosseous ligaments significantly decreased. **Conclusions** Of all the sacroiliac ligaments, the sacroiliac interosseous ligaments showed the maximum influences on the stability of SIJs. The research findings are helpful to investigate the mechanism of SIJ subluxation and provide certain theoretical basis for clinical treatment of SIJ subluxation.

Key words: sacroiliac joint; ligament; stress; range of motion (ROM); finite element analysis

近年来,骶髂关节病变所引发的腰腿痛已成为国内外骨科等相关学科重点关注和研究的内容^[1-5]。目前研究表明,骶髂关节病变是导致腰背部疼痛的常见原因,占腰背部中轴性疼痛病例15%~25%^[6-7],而在导致腰骶部疼痛的骶髂关节病变中,最为常见的原因之一是骶髂关节错位/半脱位/紊乱^[8-9]。刘慧等^[10]研究发现,腰椎间盘退变合并骶髂关节错位会导致人体承重力线的偏移,骶髂关节错位可加重身体两侧应力的失衡。骶髂关节错位是指在外力和其他致病因素作用下,骶骨和髂骨耳状面及关节周围的韧带、肌肉受损,关节活动超出生理范围,并使耳状面产生微小移动不能自行复位,导致该关节内外力学环境失衡及相关软组织损伤,并出现临床症状的一种疾病^[11]。骶髂关节失稳是导致骶髂关节错位的重要内在因素之一。目前普遍认为,骶髂关节周围韧带在骶髂关节的稳定性中起重要作用。其中,髂腰韧带连接骨盆和脊柱,骨间韧带和关节背侧韧带均紧密附着于关节,而骶结节韧带和骶棘韧带具有阻止骶骨向腹侧倾斜的作用^[12]。然而,骶髂关节周围韧带较多,目前对于骶髂关节各韧带在骶髂关节稳定性中所起的作用依旧所知甚少。本文通过有限元方法分析骶髂关节各韧带在骶髂关节稳定性中的作用,以期为临床指导治疗骶髂关节错位提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

选取1名女性志愿者,体质量48 kg,经CT检查证实无骨盆骨折、畸形、肿瘤、强直性脊柱等骨质破坏。采用德国西门子公司双源CT(SOMA2TOM Definition),CT平扫条件为:管电压120 kV,管电流220 mA,层厚5 mm,层间距5 mm,扫描范围从第4腰椎(L4)上缘至股骨中上段,将坐骨结节全部包含在内,扫描后将图像拆薄至层厚为1.0 mm,数据以

DICOM格式输入保存。

1.2 建立腰椎-骨盆-股骨三维有限元模型

将CT扫描的数据导入医学图像处理软件Mimics 17.0中,通过设定阈值提取相应组织,形成蒙版,对CT图中扫描不完整的地方进行补充操作;建立人体腰椎-骨盆-股骨三维模型,输出为STL文件,并导入逆向工程软件Geomagic Studio 12.0,整个过程包括点阶段、多边形阶段以及最后模型成形阶段;通过对模型进行去噪、平滑等操作后,输出为IGES格式;再导入ABAQUS 6.14进行网格划分,建立人体腰椎-骨盆-股骨三维有限元模型(见图1)。

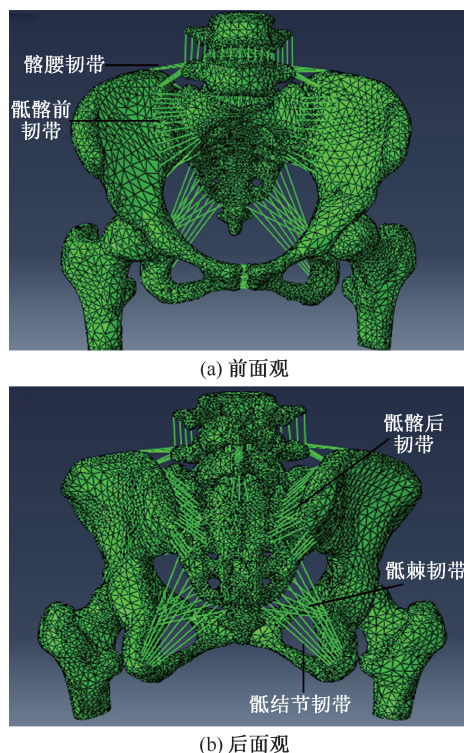


图1 女性腰椎-骨盆-股骨三维有限元模型

Fig.1 Finite element model of female lumbar spine-pelvis-femur (a) Anterior view, (b) Posterior view

本模型将髋髂关节、腰椎关节突关节及耻骨联合间的接触建模为“软接触”,并将股骨与骨盆运动学耦合。对于关节软接触的参数设置,参照 Ivanov 等^[13]的实验设置。使用 ABAQUS 的“软接触”参数模拟关节接触表面之间的软骨层,该参数根据间隙大小以指数方式调整跨越关节的力传递。当关节面完全接触时,假定关节与周围骨骼具有相同的刚度。髋骨和髌骨皮质骨根据其解剖结构构建,厚度因区域而异(0.5~5 mm)^[14]。模型中,椎体的皮质骨及椎间盘采取线性六面体构建,而椎体和骨盆的松质骨以及骨盆的皮质骨采用四面体构建。髋髂关节周围各韧带则采用桁架单元进行模拟构建^[15]。

1.3 模型材料属性

有限元模型中使用的材料属性参数参照文献[16-17],其中皮质骨和松质骨、椎间盘纤维环和髓核、髋髂关节周围韧带和关节的材料属性总结如表1所示。

表1 腰椎-骨盆-股骨三维模型各材料的材料属性

Tab.1 Material properties of lumbar spine-pelvis-femur models

构成	材料性质	本构关系	元素类型
椎体皮质骨 ^[16]	$E = 12 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$	各向同性,弹性	C3D8
椎体松质骨 ^[16]	$E = 100 \text{ MPa}$, $\nu = 0.2$	各向同性,弹性	C3D8
骨盆皮质骨 ^[16]	$E = 17 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$	各向同性,弹性	C3D4
骨盆松质骨 ^[16]	$E = 10 \text{ MPa}$, $\nu = 0.2$	各向同性,弹性	C3D4
纤维环基质 ^[17]	$C_{10} = 0.035$, $K_1 = 0.296$, $K_2 = 65$	超弹性,各向异性(HGO)	C3D8
髓核 ^[16]	$E = 1 \text{ GPa}$, $\nu = 0.499$	各向同性,弹性	C3D8
韧带 ^[16]	非线性应力-应变曲线	亚弹性	T3D2
髋髂关节 ^[16]	—	非线性软接触	—
关节突关节 ^[16]	—	非线性软接触	—
耻骨联合 ^[16]	—	非线性软接触	—

1.4 有限元模型验证

为了验证所建女性腰椎-骨盆-股骨模型的可信

度,本文在此模型上模拟 Lindsey 等^[18]大体标本研究的加载条件。在单腿站立(左腿)状态下,将7.5 N·m纯矩负载施加于L4顶端终板,模拟脊柱前屈、后伸、左/右侧屈、左/右旋转活动,计算各种脊柱活动下两侧髋髂关节活动度(range of motion, ROM),并将有限元分析结果与 Lindsey 等^[18]研究结果进行比较。

1.5 边界条件及载荷模拟设置

将所建腰椎-骨盆-股骨三维有限元模型的两侧股骨下端设置为固定边界条件,以防止在有限元分析过程中双下肢发生相对移动^[13,16]。将上部躯体的荷载设定为400 N^[15],模拟人体上部躯干质量对骨盆的力学影响。在L4椎骨上表面施加10 N·m弯曲力矩,模拟脊柱生理屈曲、伸展、侧向弯曲和轴向旋转^[15]。

1.6 实验模型建立

将以上完整模型定义为正常髋髂关节模型,并作为对照模型。在对照模型的基础上,分别去除双侧髋结节韧带、髋棘韧带、髋髂后韧带、髋髂前韧带、骨间韧带和髋腰韧带,并分别命名为无髋结节韧带模型、无髋棘韧带模型、无髋髂后韧带模型、无髋髂前韧带模型、无骨间韧带模型和无髋腰韧带模型。以上模型均作为实验模型。所有实验模型的边界条件和载荷模拟设置均与对照模型一致。

1.7 数据分析

对比对照模型,分析并比较各实验模型在相同边界条件和载荷模拟设置的情况下,左右髋髂关节各关节面的平均应力及左右髋髂关节ROM变化。

2 结果

2.1 模型验证结果

本文所建立的女性腰椎-骨盆-股骨模型模拟 Lindsey 等^[18]大体标本研究加载条件所得的关节ROM数据都在后者的实验数据标准差内,可见本模型具有较高的可信度,模型有效(见图2)。

2.2 不同模型髋髂关节ROM

在实验模型中,无髋结节韧带模型、无髋棘韧带模型和无髋髂后韧带模型相较于正常髋髂关节模型而言,其左右两侧侧髋髂关节在各脊柱生理活动下关节ROM均无明显差异;而无骨间韧带模型相对于正常髋髂关节模型而言,除在脊柱右旋转

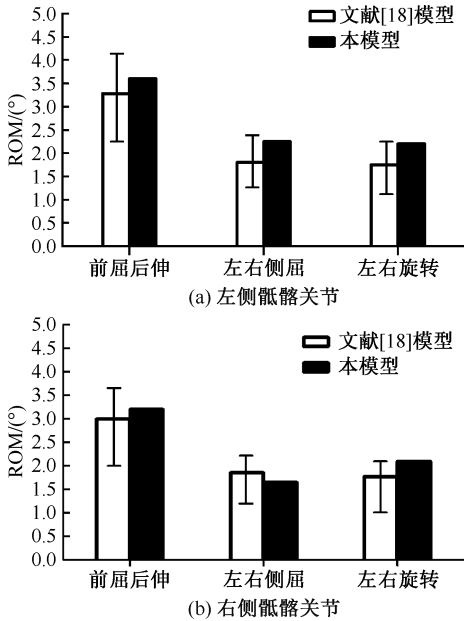


图2 有限元模型验证结果

Fig.2 Validation results of the finite element model

(a) Left sacroiliac joint, (b) Right sacroiliac joint

情况下左侧骶髂关节 ROM 以及脊柱后伸情况下右侧骶髂关节 ROM 无明显差异外,左右两侧骶髂关节在其他生理活动下关节 ROM 都显著增大。其中,左侧骶髂关节 ROM 为正常骶髂关节模型的 1~25.59 倍,而右侧骶髂关节 ROM 则为正常骶髂关节模型的 1~4.86 倍(见图 3)。

2.3 不同模型骶髂关节各关节面平均应力

在实验模型中,无骶结节韧带模型、无骶棘韧带模型和无骶髂后韧带模型、无骶髂前韧带模型和无髂腰韧带模型相较于正常骶髂关节模型而言,其左侧骶

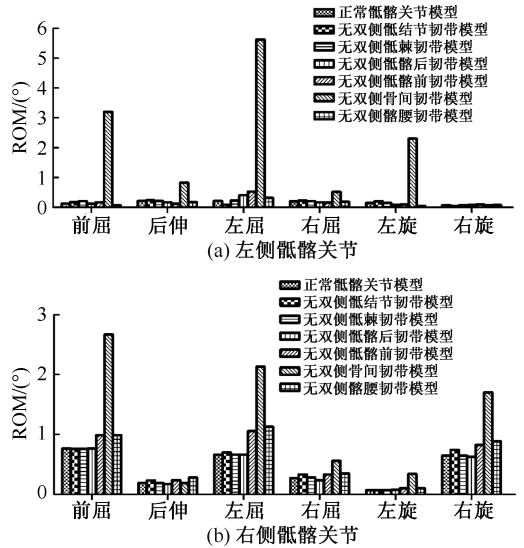


图3 不同模型左右两侧骶髂关节 ROM

Fig.3 ROM of sacroiliac joints for both sides of different models

(a) Left sacroiliac joint, (b) Right sacroiliac joint

髂关节(包括骶骨耳状面和髂骨耳状面)在各生理活动下关节的平均应力都无明显差异;而无骨间韧带模型相对于正常骶髂关节模型而言,左右两侧骶髂关节(包括骶骨耳状面和髂骨耳状面)在脊柱生理活动下关节面的平均应力明显降低。在无骨间韧带模型中,左侧骶髂关节髂骨、骶骨关节面平均应力分别下降 21.63%~26.48% 和 23.58%~36.39%;右侧骶髂关节髂骨、骶骨关节面平均应力分别下降 8.54%~24.42% 和 10.88%~16.20% (见图 4)。

2.4 不同模型骶髂关节各韧带平均应力

在实验模型中: ① 无论在脊柱何种活动情况下,缺失骶结节韧带均会导致左右两侧骶棘韧带

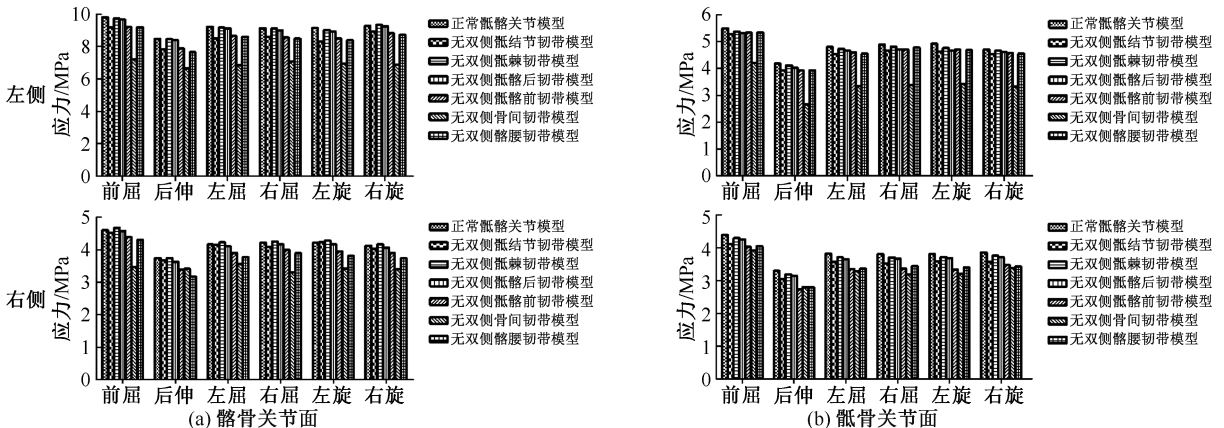


图4 不同模型左右骶髂关节各关节面的平均应力

Fig.4 Average stress on the left and right sacroiliac joints in different models (a) Iliac articular surface, (b) Sacral articular surface

平均应力增大;② 脊柱后伸位情况除外,在其他脊柱活动情况下,缺失骶髂关节骨间韧带均会导致左右两侧骶髂后韧带平均应力的增大;③ 无论在

脊柱何种活动情况下,缺失骶髂关节前韧带均会导致左右两侧髂腰韧带平均应力的增大(见图5)。

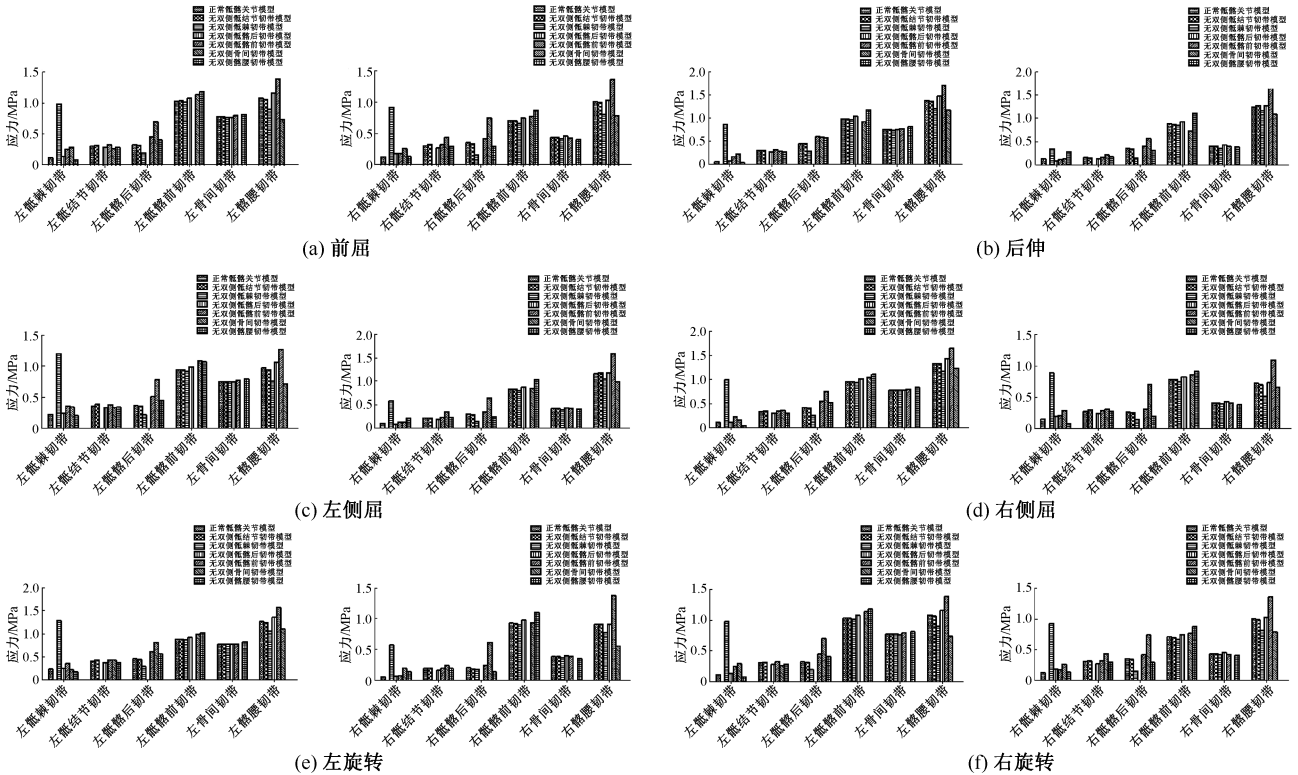


图5 不同模型在不同运动下骶髂关节各韧带平均应力情况

Fig.5 Average stress on each ligament of sacroiliac joints in different models under different movement (a) Under Flexion, (b) Under Extension, (c) Under Left flexion, (d) Under Right flexion, (e) Under Left rotation, (f) Under Right rotation

3 讨论

骶髂关节位于骨盆后部,在骶骨和髌骨之间,由骶骨耳状面和髌骨耳状面构成。骶髂关节具有稳定的特性,两侧关节面相互吻合,在重力作用下紧密嵌合,关节 ROM 很小,在功能上属于微动关节。Harrison 等^[19]推测,骶髂关节的活动可能仅限于平移和沿 6 个自由度的旋转活动。Walker^[20]总结前人研究发现,骶髂关节的平均旋转角度为 1°~12°,能够平移的距离为 3~16 mm。Adam 等^[21]对以往骶髂关节 ROM 研究进行系统评价分析,结果表明:骶髂关节在关节 X 轴上旋转角度为-0.11°~2.2°,平移距离为-0.3~8.0 mm;在 Y 轴上旋转角度为-0.8°~4°,平移距离为-0.2~7.0 mm;在 Z 轴上旋转角度为-0.5°~8°,平移距离为-0.3~6.0 mm。Vleeming 等^[22]研究发现,正常骶髂关节

在关节 3 个平面上 ROM 平均都不会超过 2°。骶髂关节周围韧带能够限制关节活动,同时也使得骶髂关节更加稳定。骶髂关节周围韧带包括骶髂前韧带、骶髂后韧带、骶棘韧带、骶结节韧带和骨间韧带。从功能角度来看,这些韧带能够共同阻止骶髂关节的分离和骨盆沿骶骨各轴线的活动。在人体质量由躯干传递到下肢的过程中,这些韧带能够共同起到维持骶髂关节处于一个绷紧状态的作用^[23]。同时,这些韧带也与骶髂关节周围的肌肉和筋膜组织起到协同工作的作用,共同支持和控制人体下半身的活动^[24]。

骶髂关节结构复杂且特殊,在传统生物力学实验的研究上已经渐渐进入瓶颈期。然而随着科学技术的发展,有限元技术已成为一种分析此类复杂解剖结构器官的重要研究方法。三维有限元模型能突破传统实验的限制,从另一个角度来研究骶髂

关节的生物力学特征^[25-26]。对有限元模型而言,三维几何模型的精确性至关重要;但对于复杂的医学模型,如何准确地获取韧带几何模型一直是研究的热点。本文所建立的骶髂关节有限元模型参数参考文献[13,15-16]骶髂关节有限元研究中的模型参数,但本模型区别与以往骨盆模型,将韧带材料属性设置为亚弹性材料,且骶髂关节、腰椎关节突关节和耻骨联合之间的接触均设置为软接触。此外,本文还对所建模型与 Lindsey 等^[18]的大体标本生物力学实验数据进行验证,结果表明本模型具有较高的可靠性。

本研究发现,骶髂骨间韧带在骶髂关节稳定性中所起的作用最大,骶髂骨间韧带的损伤或缺失会最大程度增加骶髂关节 ROM。杨金星等^[27]通过力学试验发现,当骶髂关节骨间韧带离断时,骶髂关节在内旋、由前至后及由下至上方向可承受的最大应力均明显下降,其中在垂直由下至上方向的下降幅度最大,达 38.01%。由此可见,骶髂骨间韧带具有防止骶髂关节垂直、前后和内旋移位的作用。Eichenseer 等^[28]通过有限元方法分析骶髂关节周围韧带在载荷下所承担的应力,发现骶髂关节骨间韧带所承担的应力最大,该结果与本研究结果一致。

此外,与 Pool-Goudzwaard 等^[29]研究结果不同的是,本文发现髂腰韧带的缺失对骶髂关节 ROM 和骶髂关节面应力的影响并不明显,而 Pool-Goudzwaard 等^[29]则发现髂腰韧带在横断后骶髂关节 ROM 明显增加。但 Conza 等^[30]研究认为,髂腰韧带对骨盆动力学没有影响。本文对各韧带进一步的应力分析表明,骶髂关节前韧带缺失会导致左右两侧髂腰韧带平均应力增大。由此可推测,以往有关髂腰韧带对骶髂关节稳定性的研究结果不尽相同,原因可能与骶髂关节周围各韧带的相互作用有关。在骶髂关节前韧带损伤或缺失的情况下,髂腰韧带可能会对骶髂关节 ROM 产生较大的影响。另外,骶髂关节前韧带、骶髂关节骨间韧带以及骶结节韧带的缺失,均有可能导致骶髂关节其他韧带的疲劳损伤,使得骶髂关节失稳加剧。

本研究尚存在以下不足之处:① 骨盆解剖结构复杂,其稳定性同时依赖于骨盆骨结构和骨盆周围韧带肌肉等软组织^[26,31]。本文所建模型虽然构建了韧带组织,但模型中依然缺乏肌肉力加载,并

不完全符合骨盆的整体受力情况;② 所涉及的骨盆材料力学特性为均质、连续且各向同性,而骨盆实际情况并非均质、连续,且呈各向异性的特征,这使得实验结果存在一定偏差^[32-33]。

4 结语

本文通过有限元建模和对所建模型进行验证评估后,分析骶髂关节在分别缺失不同骶髂关节韧带情况下骶髂关节 ROM、关节应力及其他骶髂关节韧带应力的变化,发现骶髂骨间韧带在维持骶髂关节稳定性中起着最为重要的作用。此外,骶髂关节骨间韧带、骶结节韧带以及骶髂关节前韧带的缺失或损伤,均有可能导致骶髂关节其他韧带的疲劳损伤,进而使骶髂关节失稳加剧,而这可能是骶髂关节错位的发病机制之一。研究结果有利于探讨骶髂关节错位的发生机制,为临床骶髂关节错位的治疗提供一定理论依据,具有相当的临床应用前景和使用价值。

参考文献:

- [1] STEVEN PC, YIAN C, NATHAN JN. Sacroiliac joint pain: A comprehensive review of epidemiology, diagnosis and treatment [J]. *Expert Rev Neurother*, 2013, 13 (1): 99-116.
- [2] HAKAN L, AHMET A, OMER NK, et al. Sacroiliac joint dysfunction [J]. *Turk Neurosurg*, 2010, 20(3): 398-401.
- [3] JONATHAN PE, JUAN GR, FRANK C, et al. Value of examination under fluoroscopy for the assessment of sacroiliac joint dysfunction [J]. *Pain Physics*, 2015, 18 (5): 781-786.
- [4] 师宁宇, 沈国权, 何水勇, 等. 骶髂关节紊乱与腰椎间盘退变之间相关性的流行病学研究与生物力学分析[J]. *中国骨伤*, 2014, 27(7): 560-564.
- [5] 江军. 骶髂关节紊乱的发病机制与临床治疗研究进展[J]. *职业与健康*, 2012, 28(19): 2407-2409.
- [6] AMICO M, RONCOLETTA P, FELICE F, et al. LBP and lower limb discrepancy: 3D evaluation of postural rebalancing via underfoot wedge correction [J]. *Stud Health Technol Inform*, 2012, 176: 108-112.
- [7] FREBURGER JK, HOLMES GM, AGANS RP, et al. The rising prevalence of chronic low back pain [J]. *Arch Intern Med*, 2009, 169(3): 251-258.
- [8] 李义凯. 软组织痛的基础与临床[M]. 香港: 世界医药出版社, 2011: 340.
- [9] 梁善皓, 叶淦湖, 陈焕亮, 等. 骶髂关节半脱位的临床研究

- [J]. 中国康复医学杂志, 2007, 22(2): 172-173.
- [10] 刘慧, 张喜林, 周楠, 等. 步态仿真下腰椎间盘退变合并骶髂关节紊乱的有限元分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(1): 46-53.
LIU H, ZHANG XL, ZHOU N, *et al.* Finite element analysis of lumbar disc degeneration with sacroiliac joint disorder by gait simulation [J]. J Med Biomech, 2017, 32(1): 46-53.
- [11] 栾明拥, 栾明义, 汪超, 等. 栾氏正骨诊治骨关节错缝的特点[J]. 辽宁中医杂志, 2002, 29(8): 462-463.
- [12] BRUNNER C, KISSLING R, JACOB H. The effects of morphology and histopathologic findings on the mobility of the sacroiliac joint [J]. Spine, 1991, 16(9): 1111-1117.
- [13] IVANOV AA, KIAPOUR A, EBRAHEIM NA, *et al.* Lumbar fusion leads to increases in angular motion and stress across sacroiliac joint [J]. Spine, 2009, 34(5): E162-169.
- [14] PHILLIPS A, PANKAJ P, HOWIE C, *et al.* Finite element modelling of the pelvis: Inclusion of muscular and ligamentous boundary conditions [J]. Med Eng Phys, 2007, 29(7): 739-748.
- [15] JOUKAR A, SHAH A, KIAPOUR A, *et al.* Gender specific sacroiliac joint biomechanics during standing upright: A finite element study [J]. Spine, 2018, 43(18): E1053-E1060.
- [16] LINDSEY D, KIAPOUR A, YERBY S, *et al.* Sacroiliac joint fusion minimally affects adjacent lumbar segment motion: A finite element study [J]. Int J Spine Surg, 2015, 9: 64.
- [17] SHAHRAKI NM, FATEMI A, GOEL VK, *et al.* On the use of biaxial properties in modeling annulus as a Holzapfel-Gasser-Ogden material [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2015, 3: 69.
- [18] LINDSEY D, PEREZ-ORRIBO L, RODRIGUEZ-MARTINEZ N, *et al.* Evaluation of a minimally invasive procedure for sacroiliac joint fusion. An *in vitro* biomechanical analysis of initial and cycled properties [J]. Med Devices, 2014, 7: 131-137.
- [19] HARRISON DE, HARRISON DD, TROYANOVICH SJ. The sacroiliac joint: A review of anatomy and biomechanics with clinical implications [J]. J. Manipulative Physiol Ther, 1997, 20(9): 607-617.
- [20] WALKER JM. The sacroiliac joint: A critical review [J]. Phys Ther, 1992, 72(12): 903-916.
- [21] GOODE A, HEGEDUS EJ, SIZER P, *et al.* Three-dimensional movements of the sacroiliac joint: A systematic review of the literature and assessment of clinical utility [J]. J Man Manip Ther, 2008, 16(1): 25-38.
- [22] VLEEMING A, SCHUENKE MD, MASI AT, *et al.* The sacroiliac joint: An overview of its anatomy, function and potential clinical implications [J]. J Anat, 2012, 221(6): 537-567.
- [23] WILLARD F. The anatomy of the lumbosacral connection. The anatomy of the lumbosacral connection [M]//Spine: State of the art reviews. USA: Hanley & Belfus, 1995: 333.
- [24] COHEN SP, CHEN Y, NEUFELD NJ. Sacroiliac joint pain: A comprehensive review of epidemiology, diagnosis and treatment [J]. Expert Rev Neurother, 2013, 13(1): 99-116.
- [25] 李黎, 吴山, 范志勇. 骶髂关节的有限元建模及临床应用研究进展 [J]. 北京生物医学工程, 2016, 35(4): 429-434.
- [26] 郑琦, 廖胜辉, 石仕元, 等. 个性化全骨盆三维有限元建模及骶髂关节骨折脱位模拟 [J]. 医用生物力学, 2008, 23(4): 296-300.
ZHENG Q, LIAO SH, SHI SY, *et al.* Patient-specific FE modeling of whole pelvis and simulation of sacroiliac joint fracture [J]. J Med Biomech, 2008, 23(4): 296-300.
- [27] 杨金星, 刘黎军, 陈宏贤, 等. 骶髂骨间韧带的解剖及生物力学分析 [J]. 中国实用医药, 2015, 10(29): 28-30.
- [28] EICHENSEER PH, SYBERT DR, COTTON JR. A finite element analysis of the sacroiliac joint ligaments in response to different loading conditions [J]. Spine, 2011, 36(22): E1446-E1452.
- [29] POOL GA, HOEK VDG, MULDER P, *et al.* The iliolumbar ligament: Its influence on stability of the sacroiliac joint [J]. Clin Biomech, 2003, 18(2): 99-105.
- [30] CONZA NE, RIXEN DJ, PLOMP S. Vibration testing of a fresh-frozen human pelvis: The role of the pelvic ligaments [J]. J Biomech, 2007, 40(7): 1599-1605.
- [31] 沈金根, 陈杰, 陆仲绩. 人骨盆的生物力学研究 [J]. 计算力学学报, 1984, 1(3): 63-69.
- [32] 谌祖江, 杨先文, 向孝兵, 等. 屈膝屈膝按压法作用于骨盆的三维有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2015, 30(3): 233-237.
CHEN ZJ, YANG XW, XIANG XB, *et al.* 3D finite element analysis on pelvis under compressing manipulation by flexing hip and knee [J]. J Med Biomech, 2015, 30(3): 233-237.
- [33] 李宁, 杨涵, 黄秋悦, 等. 3D 打印钛合金个性化骨盆假体静态和步态有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(6): 487-493.
LI N, YANG H, HUANG QY, *et al.* Static and gait finite element analysis on individualized titanium alloy pelvic prosthesis manufactured by 3D printing [J]. J Med Biomech, 2017, 32(6): 487-493.