

# 基于有限元模型的外侧踝关节扭伤“骨错缝、筋出槽”研究

李建国<sup>1</sup> 高春雨<sup>1△</sup> 高景华<sup>1△</sup> 王宝剑<sup>1</sup> 李路广<sup>1</sup> 冯敏山<sup>1,2</sup> 孙武<sup>1</sup> 叶宜颖<sup>1</sup>

**[摘要]** 目的:基于有限元模型分析外侧踝关节扭伤“骨错缝、筋出槽”的病理状态。方法:基于 1 位外侧踝关节扭伤患者的 CT 资料,建立踝关节有限元模型并验证模型的有效性。采集踝关节扭伤后 1 d、1 周的在体动力学数据并加载于踝关节有限元模型跖屈、背伸、内翻、外翻四种工况中,分析踝关节面受力及踝周韧带的应力分布情况。结果:在相同的载荷下,四种工况中踝关节(胫距、距腓关节)面接触应力峰值在踝扭伤后随着时间的变化有增高的趋势,四种工况中踝周韧带在踝扭伤后不同时间点的应力分布及应力值存在变化。结论:所建立的踝关节有限元模型准确、有效,踝部关节面受力分布不均匀及韧带应力值的变化可能是外侧踝关节扭伤“骨错缝、筋出槽”的客观病理反映。

**[关键词]** 外侧踝关节扭伤;骨错缝;筋出槽;有限元分析

**[中图分类号]** R684.7 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2021)10-0017-05

## Study of Pathological State about “Joint Displacement and Sinew Off-Position” of Lateral Ankle Sprain Based on Finite Element Model

LI Jianguo<sup>1</sup> GAO Chunyu<sup>1△</sup> GAO Jinghua<sup>1△</sup> WANG Baojian<sup>1</sup> LI Luguang<sup>1</sup>  
FENG Minshan<sup>1,2</sup> SUN Wu<sup>1</sup> YE Yiyang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of the Second Spinal Orthopedics, Wangjing Hospital of China Academy of Traditional Chinese Medicine Sciences, Beijing 100102, China;

<sup>2</sup> Beijing Key Laboratory of Traditional Chinese Orthopedics and Traumatology, Beijing 100102, China.

**Abstract Objective:** To demonstrate the pathological state about “joint displacement and sinew off-position” of lateral ankle sprain based on finite element model. **Methods:** Based on the CT data of a patient with lateral ankle sprain, the finite element model of ankle joint was established and verified. The biomechanical data were collected and loaded into the ankle finite element model of plantar flexion, dorsal extension, varus and valgus at 1 day and 7 days after injury, then the stress distribution of ankle joint surface and peri-ankle ligament was analyzed. **Results:** Under the same load, the peak contact stress of ankle joint (tibiotalar joint and talofibular joint) increased with time after ankle sprain, and the stress distribution and value of peri ankle ligament changed at different time points after ankle sprain. **Conclusion:** Based on the accurate and effective finite element analysis of ankle joint, the uneven stress distribution of ankle joint surface and changed ligament stress value may be the objective pathological reflection of “joint displacement and sinew off-position” of lateral ankle sprain.

**Keywords:** lateral ankle sprain; joint displacement; sinew off-position; finite element analysis

外侧踝关节扭伤(Lateral Ankle Sprain, LAS)是人体在运动过程中最常见的下肢肌肉骨骼损伤类型<sup>[1]</sup>,急性期主要表现为踝关节外侧疼痛、肿胀、关节活动受限,严重时可能出现无法负重行走<sup>[2]</sup>。若就诊不

及时或治疗方法不当,后期容易发生习惯性踝关节扭伤、慢性踝关节不稳等后遗症<sup>[3-4]</sup>。现代医学认为 LAS 的损伤机制多与解剖因素、受伤姿势等有关<sup>[5-6]</sup>,中医骨伤科则认为 LAS 的发病机制可用“骨错缝、筋出槽”来解释<sup>[7]</sup>。然而“骨错缝、筋出槽”的病理状态如何被客观地体现出来是需要解决的问题。目前,关于“骨错缝、筋出槽”的病理状态研究大多局限于 X 线、CT 等影像学技术,且研究以脊柱领域为主<sup>[8-9]</sup>。三维有限元法作为一项广泛应用于生物医学领域的技术,在骨科生物力学分析方面具有费用低、可重复性好、适

基金项目:国家自然科学基金面上项目(81473694)

<sup>1</sup> 中国中医科学院望京医院脊柱二科(北京,100102)

<sup>2</sup> 中医正骨技术北京市重点实验室

△通信作者 E-mail:gaochunyu8526@sina.com(高春雨)

gaojinghua64@sina.com(高景华)

应性强等优势<sup>[10]</sup>。本研究通过建立踝关节有限元模型,从踝关节面受力及韧带的应力分布角度分析 LAS 后“骨错缝、筋出槽”的病理状态。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

2018 年 10 月于本院骨科急诊收集急性右侧外踝关节扭伤男性受试者 1 名,年龄 26 岁,身高 170 cm,体质量 63 kg。向患者告知试验方案并签署知情同意书,且通过望京医院伦理道德委员会批准。

1.2 诊断标准

根据中华人民共和国中医药行业标准《中医病证诊断疗效标准》(1994 年)制定:1)有明确的踝部外伤史;2)扭伤后踝关节外侧即出现疼痛,局部肿胀,皮下瘀斑,伴跛行;3)局部压痛明显,将足作内翻动作时,外踝前方剧痛;4)关节活动受限;5)X 线摄片检查未见骨折、脱位。

1.3 方法

1.3.1 数据采集 采用本院放射科 64 排螺旋 CT 机(德国西门子公司),扫描层厚 1.25 mm,层间距 0.75 mm,对患者的右下肢自胫骨中下 1/3 远端部分进行扫描。扫描后的图像以 DICOM 格式储存并导出至 Mimics 10.0 软件。

1.3.2 踝关节有限元模型的建立 基于 Mimics 10.0 软件对 CT 扫描图片进行矢量化处理,形成各断层图像的边界轮廓。对定位后图像进行骨质阈值界定,以分离骨性结构及周围软组织。对处理好的骨性区域手动进行三维(3D)表面光滑处理,从而使骨骼表面质量最优化。利用三维建模软件 Solidworks 2016 将 Mimics 中所生成的点云数据进行逆向处理,得到骨骼结构整体外表面,借助网格划分软件 Hypermesh 12.0,通过手动调整边界网格质量,先后进行二维分网、节点合并,从而生成完整的三维网格模型。

由于 CT 显示韧带、软骨等软组织图像模糊的局限性,无法利用 Mimics 软件进行分割提取,本研究采用人工模拟添加韧带、软骨的方法。采用只受拉不受压的杆单元模拟踝关节的韧带,根据各韧带的起止点、解剖走形<sup>[11]</sup>,在 Abaqus 6.13 中手动添加韧带(见图 1),包括踝周内外侧共 9 组。结合踝关节关节面的解剖特点,采用主-从接触算法模拟接触关系、构建关节软骨(见图 2)。

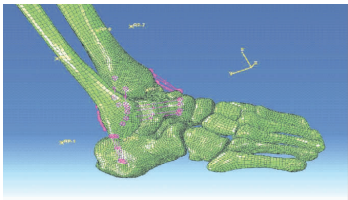


图 1 踝关节三维网格模型及杆单元  
模拟的踝关节韧带(粉色部分)

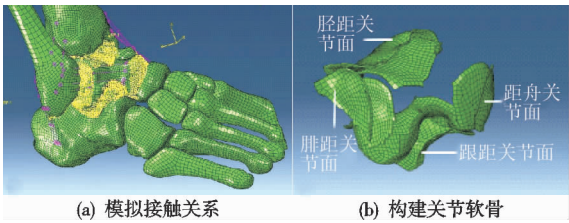


图 2 主-从接触算法模拟接触关系和构建关节软骨  
生物力学研究中将骨骼、软骨视为各向同性材料,且将弹性模量分成不同的等级来模拟骨骼的皮质骨、松质骨和软骨。骨骼及韧带单元的材料参数通过查阅既往文献<sup>[12-13]</sup>进行设定,具体见表 1-表 2。

表 1 足踝部骨与软骨材料参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比
皮质骨	7 300	0.30
松质骨	100	0.35
软骨	150	0.42

表 2 足踝部韧带的材料参数

韧带	弹性模量/MPa	泊松比	截面积/mm <sup>2</sup>
胫腓前韧带	260	0.4	18.4
胫腓后韧带	260	0.4	18.4
距腓前韧带	255.5	0.4	12.9
距腓后韧带	216.5	0.4	21.9
跟腓韧带	512	0.4	9.7
胫距腓前韧带	184.5	0.4	13.5
胫距腓后韧带	99.5	0.4	22.6
胫跟韧带	512	0.4	9.7
胫舟韧带	320.7	0.4	7.1

1.3.3 模型验证 有限元模型的可靠性和有效性是进一步生物力学分析的前提。本研究采用在体试验测量结果与施加相同载荷后有限元模型计算结果对比的方法完成模型的验证。

1)在体试验数据获取

利用自行研制的力学数据手套及运动捕捉系统,分别在受试者踝关节扭伤后第 1 天、1 周及 2 周采集患踝被动背伸、跖屈、内翻、外翻施加的载荷大小及踝关节运动角度,作为模型加载的数据基础。以扭伤后 2 周采集的载荷数据作为验证有限元模型有效性的加载值。

2)载荷参数及边界条件

载荷参数:根据在体试验中被动活动踝关节的操作情况,确定三维有限元模型载荷加载的位置、大小及方向(见图 3)。由于内外翻运动为复合运动,因此结合在体试验中得到的载荷数值,在有限元模型中计算内外翻施力时的力臂,转换为扭矩来代表踝关节内外翻时的动力。

边界条件:对模型中的小腿上端进行全约束,同时将模型中除踝关节外的其余关节进行刚性约束。

3)模型运动角度的提取

患者扭伤后 2 周右踝关节症状已明显缓解,故以

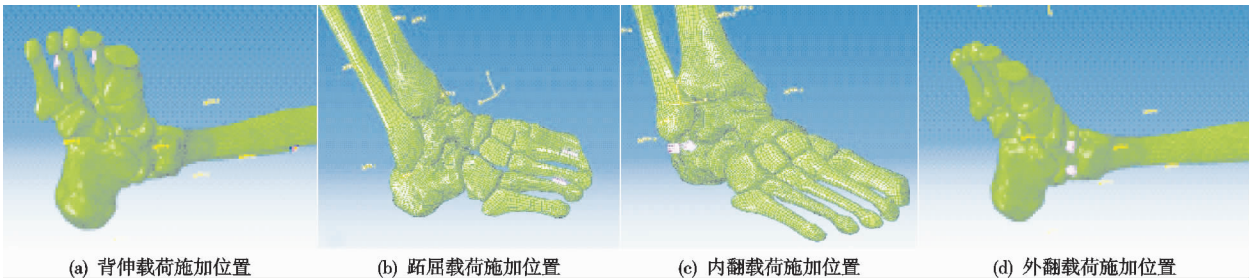


图 3 模型中载荷施加位置(粉色部分)

扭伤后 2 周采集的数据作为验证有限元模型有效性的加载值,在 Abaqus 后处理程序中提取加载载荷后有限元模型运动前后的节点坐标值,然后根据相同节点运动前后的坐标变化计算出踝关节模型运动角度。

**1.3.4 踝扭伤后关节、韧带的应力分析** 在踝关节有限元模型准确、有效的基础上,将扭伤后 1 d 及 1 周在体试验所施加载荷及运动角度加载于有限元模型中进行计算,模拟得出踝关节各关节面接触应力峰值及韧带的应力分布情况。

2 结果

2.1 在体试验数据

在采集踝关节被动运动施加载荷及运动角度时,为保证不同时间点踝关节运动角度及关节面、韧带应力值之间具有可比性,通过力学数据手套控制不同时间点施加载荷的一致性。在体试验中受试者踝关节载荷由操作者双手拇指施加,载荷的大小及不同时间点踝关节运动角度见表 3~表 4。

表 3 双手拇指施加载荷的大小(N)

工况	左手	右手
跖屈	22.84	38.8
背伸	38.83	47.53
内翻	18.5	15.6
外翻	23.66	20.2

表 4 踝关节运动角度(°)

工况	扭伤后 1 d	扭伤后 1 周	扭伤后 2 周
跖屈	15.3	16.5	22.8
背伸	26.5	27.5	31.7
内翻	19.9	21.3	22
外翻	10.2	12.9	14

2.2 模型的有效性验证

通过编写 MATLAB 程序,对加载载荷的踝关节模型运动角度进行计算,得出踝关节扭伤后 2 周模型的有限元计算角度,并与在体试验的实际运动角度对比,验证模型的有效性,见表 5。

表 5 在体试验及有限元模型计算角度(°)

工况	在体试验	有限元模型
跖屈	22.8	22.2
背伸	31.7	32.3
内翻	22.0	21.6
外翻	14.0	14.2

从表 5 可以看出:在相同的载荷条件下,踝关节在体运动角度与有限元模型运动角度数值一致,故认为本研究所建立的踝关节有限元模型准确、真实,利用该模型可以准确模拟踝关节不同条件下各关节面及韧带的应力分布情况。

2.3 踝关节各关节面接触应力峰值

通过对踝关节模型跖屈、背伸、内翻、外翻四种工况的计算,踝关节扭伤后 1 d 及 1 周胫距关节及距腓关节面的接触应力值见表 6。

表 6 四种工况下踝扭伤后 1 d 及 1 周胫距及距腓关节面接触应力峰值(MPa)

工况	扭伤后 1 d		扭伤后 1 周	
	胫距关节	距腓关节	胫距关节	距腓关节
跖屈	24.5	18.0	25.0	22.7
背伸	49.5	26.0	50.5	27.5
内翻	17.7	12.5	18.5	13.2
外翻	17.5	9.3	20.0	10.3

由表 6 可以看出:在相同的施加载荷下,四种工况中踝关节面(胫距、距腓关节)接触应力峰值在踝关节扭伤后随着时间的推移而变化,均有增高的趋势。

2.4 踝关节韧带的应力分布

如图 4 所示,通过对有限元模型的分析,四种工况中踝关节的内外侧韧带应力分布在踝扭伤后 1 d 及 1 周存在主次变化。如表 7 所示,在跖屈工况中,踝扭伤后 1 d 及 1 周的最大受力韧带分别为距腓前韧带和胫距前韧带,在背伸、内翻及外翻工况中,踝关节扭伤后 1 d 及 1 周时各自最大受力者为同一韧带,分别为跟胫韧带、跟腓韧带、跟胫韧带,但相应韧带的应力值随着时间推移增加。

表 7 四种工况下踝扭伤后 1 d 及 1 周最大受力韧带及应力值(MPa)

工况	扭伤后 1 d	扭伤后 1 周
跖屈	距腓前韧带(8.995)	胫距前韧带(1.100)
背伸	跟胫韧带(1.572)	跟胫韧带(1.724)
内翻	跟腓韧带(1.000)	跟腓韧带(1.251)
外翻	跟胫韧带(1.729)	跟胫韧带(2.082)

3 讨论

LAS 属于中医骨伤科“筋伤”的范畴,其发病机制可用“骨错缝、筋出槽”来解释,然而,目前对于 LAS

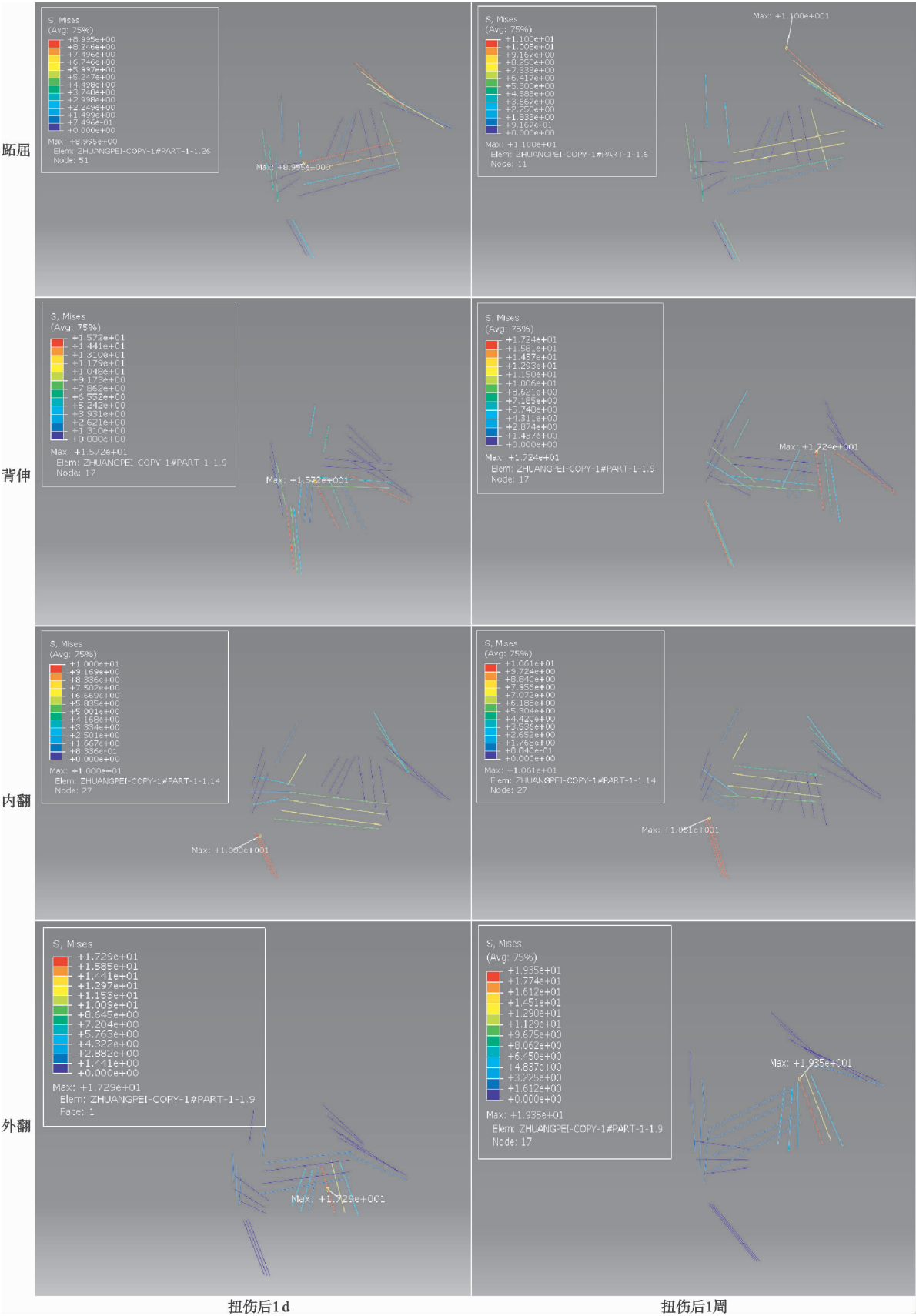


图 4 四种工况下踝扭伤后 1 d 及 1 周踝周 9 组韧带应力分布情况

“骨错缝、筋出槽”的认识尚处于理论假说层面,鲜有对其客观化机制的本质性研究。本研究基于有限元分析技术平台,通过对比踝关节扭伤后不同时间点关节被

动活动时踝关节面及踝周韧带的应力变化情况,间接证明“骨错缝、筋出槽”的病理性状态。

首先,在踝关节有限元模型跖屈、背伸、内翻、外翻



四种工况中加载踝关节扭伤后 1 d 及 1 周的在体动力学数据,有限元计算的结果显示:在相同的载荷下,四种工况中踝关节接触面(胫距、距腓关节面)应力峰值在踝关节扭伤后随着时间的变化有增高的趋势,这一结果预示着随着踝关节扭伤的恢复,其关节面承受负重的能力逐渐增加,同时也暗示了踝关节接触面存在潜在的病理环境。而关节软骨是关节负重的主要承担者,从生物力学角度分析关节软骨的主要功能是通过扩散载荷以降低关节面的磨损,软骨面分布欠均匀使得踝关节存在低负重区及高负重区<sup>[14]</sup>。因此,笔者认为关节软骨的损伤及接触面的应力分布不均匀可以作为“骨错缝”的反映指标。本研究虽没有直接观察到踝关节扭伤后关节软骨的损伤,但是笔者发现扭伤后 1 d 及 1 周踝关节活动时接触面的应力值存在动态变化,这一结果可以作为“骨错缝”病理状态存在的证明。传统意义上的“骨错缝”多指的是骨骼之间非生理性的、不正常的吻合状态<sup>[7]</sup>,但是程度较轻的“骨错缝”凭借常规的影像学手段不易看出<sup>[15]</sup>,本研究为轻度“骨错缝”病理状态的研究提供了新思路、新手段。

其次,在踝关节有限元模型跖屈、背伸、内翻、外翻四种工况中加载动力学数据后,有限元计算结果也显示在相同的载荷下,LAS 后不同时间点跖屈工况中踝关节周围最大受力韧带存在变化,其余三种工况中踝关节周围最大受力韧带虽然未改变,但随着病程的推移相应韧带的应力值逐渐增加。踝关节周围韧带复合体具有约束、维系及维持踝关节稳定性的作用<sup>[16]</sup>,LAS 发生后其周围的肌腱、韧带等部分撕裂肿胀,弹性性能及维系能力减弱或脱离正常的解剖位置,即“筋出槽”,具体可表现为筋弛、筋纵、筋挛或筋骤等病理状态。因此,本研究根据踝扭伤后关节活动时韧带应力值大小来体现踝周韧带弹性性能、维系能力及客观反映“筋出槽”病理状态具有合理性。由于正常踝关节在不同运动状态下各韧带的应力值大小缺乏可靠的标准,笔者对比了 LAS 后不同时间点关节活动时最大受力韧带及其应力值。最大受力韧带及韧带应力值的动态变化预示了“筋出槽”的存在,而随着病程推移韧带应力值的增加也提示其弹性性能及维系能力的增强。

此外,有限元模型的验证结果提示在体试验与模型计算的踝关节运动角度具有一致性,可以认为本研究所建立的踝关节有限元模型准确、有效。与既往研究不同,本研究直接采用踝关节扭伤患者的 CT 影像学资料作为有限元模型构建的载体,从而保证模型与真实踝关节具有更加可靠的拟合度。而且既往研究大多将尸体标本或文献报道的数据作为踝关节有限元模型有效性验证的参考依据<sup>[17-18]</sup>,有一定的误差。本研究利用同一受试者的在体动力学试验数据作为有限元

模型有效性验证的基础,具有更好的真实性。

总之,通过有限元分析技术能够充分反映整体内外部应力、应变、位移等力学参数的变化情况<sup>[19]</sup>。本研究基于有限元模型尝试探索 LAS 后“骨错缝、筋出槽”的病理状态,虽具有模型准确、有效等优势,但仍存在不足之处。为了计算方便,在建模过程中忽略了肌肉、肌腱等软组织,可能影响试验结果。此外,本研究通过对扭伤后的踝关节活动时关节面、韧带应力的分布变化间接证明了“骨错缝、筋出槽”状态,如何选取能够直接反映“骨错缝、筋出槽”病理状态的参数及如何通过模型直接构建模拟踝关节扭伤的动态过程,是今后应该关注的研究方向。

## 参考文献

- [1] DELAHUNT E, BLEAKLEY C M, BOSSARD D S, et al. Clinical assessment of acute lateral ankle sprain injuries (ROAST): 2019 consensus statement and recommendations of the International Ankle Consortium[J]. Br J Sports Med, 2018, 52(10): 1304-1310.
- [2] CHEN W L, JAAFAR Z. Effects of lateral ankle sprain on range of motion, strength and postural balance in competitive basketball players: a cross-sectional study[J]. J Sports Med Phys Fitness, 2020, 60(6): 895-902.
- [3] POURKAZEMI F, HILLER C E, RAYMOND J, et al. Predictors of recurrent sprains after an index lateral ankle sprain: a longitudinal study[J]. Physiotherapy, 2018, 104(4): 430-437.
- [4] GRIBBLE P A, DELAHUNT E, BLEAKLEY C, et al. Selection criteria for patients with chronic ankle instability in controlled research: a position statement of the International Ankle Consortium[J]. Br J Sports Med, 2014, 48(13): 1014-1018.
- [5] PUREVSUREN T, KIM K, BATBAATAR M, et al. Influence of ankle joint plantarflexion and dorsiflexion on lateral ankle sprain: A computational study[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2018, 232(5): 458-467.
- [6] KAUMEYER G, MALONE T R. Ankle injuries: anatomical and biomechanical considerations necessary for the development of an injury prevention program[J]. J Orthop Sports Phys Ther, 1980, 1(3): 171-191.
- [7] 李永恒, 洪茂, 陈兆军, 等. 中医骨伤科对踝关节扭伤的认识及治疗方法[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2017, 25(3): 70-71.
- [8] 黄学成, 叶林强, 江晓兵, 等. 基于“筋出槽、骨错缝”理论探讨神经根型颈椎病的 CT 特征[J]. 中华中医药杂志, 2019, 34(8): 3483-3487.
- [9] 莫灼锚, 张人文, 唐树杰. 脊柱“骨错缝、筋出槽”理论的研究进展[J]. 中医正骨, 2017, 29(5): 16-19.