

· 基础研究 ·

# 腓骨近端骨折对胫骨后外侧平台骨折影响的有限元分析<sup>△</sup>

高锦<sup>1,3</sup>, 贾鹏<sup>2</sup>, 吕飞<sup>3</sup>, 齐岩松<sup>3</sup>, 徐永胜<sup>3</sup>, 呼和<sup>3\*</sup>

(1. 内蒙古科技大学包头医学院研究生院, 内蒙古包头 014000; 2. 苏州高新区人民医院, 江苏苏州 215011; 3. 内蒙古自治区人民医院骨科中心, 内蒙古呼和浩特 010017)

**摘要:** [目的] 通过有限元分析, 探讨腓骨近端对胫骨后外侧平台骨折的力学影响。[方法] 收集1名志愿者胫腓骨CT数据, 导入SolidWorks软件, 模拟3种不同胫腓骨形态, 分为正常组(normal control, NC)、胫骨后外平台骨折钢板内固定腓骨完整组(posterolateral tibial plateau fracture with plate fixation and intact fibula, IF)、胫骨后外平台骨折钢板内固定腓骨骨折组(posterolateral tibial plateau fracture with plate fixation and fibular fracture, FF)。在施加250 N、500 N、1 000 N轴向载荷状态下, 模拟日常活动中不同受力情况下内固定受力及胫骨骨折模型的位移情况。[结果] 与NC组相比, IF组与FF组钢板与螺钉的Von Mises应力随着载荷的增大显著增加( $P<0.05$ )。在250 N、500 N、1 000 N载荷下, IF组钢板[(20.3±1.5) MPa vs (28.5±1.6) MPa,  $P<0.001$ ; (42.3±1.6) MPa vs (59.4±1.7) MPa,  $P<0.001$ ; (90.5±7.8) MPa vs (123.3±15.9) MPa,  $P=0.003$ ]及螺钉[(24.4±3.1) MPa vs (35.7±2.5) MPa,  $P<0.001$ ; (50.2±7.9) MPa vs (70.3±9.6) MPa,  $P=0.007$ ; (101.1±15.7) MPa vs (143.7±16.4) MPa,  $P=0.003$ ] Von Mises应力均小于FF组。随着载荷的增大, 两组骨折块位移及内侧胫骨平台位移均显著增加( $P<0.05$ ); 在相同载荷下, IF组骨折块的位移及内侧胫骨平台位移均显著小于FF组( $P<0.05$ )。[结论] 在胫骨平台后外侧骨折中, 完整的腓骨可以提升钢板、螺钉的整体轴向刚度, 使外侧骨折块及内侧胫骨平台更为稳定, 对骨折的愈合有促进作用。

**关键词:** 腓骨近端骨折, 胫骨后外侧平台骨折, 有限元分析, 生物力学

**中图分类号:** R683.42      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8478 (2025) 03-0249-06

**A finite element analysis of the effect of proximal fibular fracture on posterolateral tibial plateau fractures** // GAO Jin<sup>1,3</sup>, JIA Peng<sup>2</sup>, LÜ Fei<sup>3</sup>, QI Yan-song<sup>3</sup>, XU Yong-sheng<sup>3</sup>, HU He<sup>3</sup>. 1. Postgraduate School, Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia, 014000, China; 2. People's Hospital of Suzhou High-tech Zone, Suzhou, Jiangsu 215011, China; 3. Orthopaedic Center, People's Hospital of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia, 010017, China

**Abstract:** [Objective] To investigate the mechanical effect of proximal fibula on posterior lateral tibial plateau fracture by finite element analysis. [Methods] The CT data of a volunteer's tibia and fibula were collected and imported into SolidWorks software to simulate 3 conditions, including the normal control (NC), posterolateral tibial plateau fracture with plate fixation and intact fibula group (IF) and posterolateral tibial plateau fracture with plate fixation and fibular fracture (FF). Under 250 N, 500 N and 1 000 N axial loads, the displacement of the model of internal fixation and tibial fracture and under daily activities was measured. [Results] Compared with that of NC group, the Von Mises stress of plates and screws in IF group and FF group was significantly increased with the increase of load ( $P<0.05$ ). Under loads of 250 N, 500 N and 1 000 N, the IF group proved significantly less than the FF group in terms Von Mises stress of the plate [(20.3±1.5) MPa vs (28.5±1.6) MPa,  $P<0.001$ ; (42.3±1.6) MPa vs (59.4±1.7) MPa,  $P<0.001$ ; (90.5±7.8) MPa vs (123.3±15.9) MPa,  $P=0.003$ ] and the screw [(24.4±3.1) MPa vs (35.7±2.5) MPa,  $P<0.001$ ; (50.2±7.9) MPa vs (70.3±9.6) MPa,  $P=0.007$ ; (101.1±15.7) MPa vs (143.7±16.4) MPa,  $P=0.003$ ]. With the increase of load, the displacement of fracture fragment and the displacement of medial tibial plateau in both groups were significantly increased ( $P<0.05$ ). Under the same load, the displacement of fracture fragment and medial tibial plateau in IF group were significantly less than the FF group ( $P<0.05$ ). [Conclusion] In posterolateral tibial plateau fractures, the intact fibula does improve the overall axial stiffness of plates and screws, make lateral fracture fragment and medial tibial plateau more stable, and promote the healing of fracture.

**Key words:** proximal fibula fracture, posterolateral tibial plateau fracture, finite element analysis, biomechanics

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.110170

<sup>△</sup>基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(编号: 2021MS08035); 内蒙古自治区科技计划项目(编号: 2021GG0127); 国家自然科学基金项目(编号: 82172444)

作者简介: 高锦, 住院医师, 在读研究生, 研究方向: 创伤骨科, (电子信箱)794776095@qq.com

\* 通信作者: 呼和, (电子信箱)huhe806@163.com

胫骨平台骨折是膝关节创伤中最常见的骨折之一，占全身骨折的 1.7%<sup>[1]</sup>，约 1/3 的胫骨平台骨折与腓骨近端骨折相关，但大多数腓骨近端骨折往往被忽视<sup>[2]</sup>，腓骨近端靠近胫骨后外侧平台，并与胫腓上联合紧密相连，腓骨近端为膝关节后外侧结构提供功能稳定性，在膝关节的解剖和临床功能中起着至关重要的作用<sup>[3, 4]</sup>。传统观念认为，腓骨不直接参与膝关节的构成，腓骨近端骨折不需要特殊处理，但随着研究的深入，越来越多的学者认为腓骨与膝关节后外侧平台有着密切的关系。罗从风的三柱概念、张世民的四柱分型理论及 Schatzker 2018 补充分类将腓骨头前点标记为一个标志点<sup>[5, 6]</sup>，腓骨近端的作用得到众学者的肯定。但由于后外侧平台与腓骨近端解剖位置的特殊性<sup>[7]</sup>，周围存在诸多血管、神经，充分显露难度大，并且关于腓骨骨折固定对胫骨平台骨折是否有治疗效果没有明确记录。本研究结合 CT 检查，通过电脑建立不同模型，研究腓骨近端对胫骨后外侧平台骨折的力学影响，为临床上改进腓骨近端骨折的治疗方式提供理论依据和生物模型参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 胫腓骨模型建立

本实验于 2023 年 5—10 月在内蒙古自治区人民医院骨科实验室开展。

设备及软件：西门子 32 排 CT；Mimics 21.0（比利时 Materialise 公司）；Geomagic 2017（美国 Geomagic 公司）；SolidWorks 2017（美国 Dassault 公司）；Hypermesh 14.0 软件（美国 Altair 公司）；MSC.Nastran 2019 软件（美国 NASA 公司）；Ansys 17.0（美国 Ansys 公司）。

收集 1 名健康成年男性志愿者右侧胫腓骨 CT 数据。志愿者年龄 26 岁，身高 170 cm，体重 60 kg。拍摄膝关节的正侧位、双斜位、动力位 X 线片，并排除骨骼畸形、骨折、肿瘤、感染等疾病，无创伤及手术病史，从而获取正常人右侧胫腓骨影像数据。

内固定物：前外侧 L 形锁定钢板，螺钉直径为 3.5 mm。

### 1.2 骨折与固定建立

实验方法：将健康志愿者右侧胫腓骨的 CT 扫描数据保存为 DICOM 格式，采用 Mimics 21.0 软件对其进行数据提取，重建出正常胫腓骨 STL 模型。在 Geomagic Studio 2014 软件中修补、降噪及曲面化，

同时针对正常人完整的胫腓骨模拟胫骨平台后外侧柱骨折合并腓骨近端骨折的模型处理，骨折模型的建立依据罗从风教授绘制的胫骨平台后外侧柱骨折模型，通过在胫骨后外侧平台截骨处理出骨折块，建模内固定钢板螺钉结构，并按照医学骨外科手术内固定要求将骨折块与胫骨平台进行内固定装配，然后研究双腿站立、单腿站立、缓慢行走等不同状态下的胫腓骨内固定后的生物力学特性变化<sup>[8]</sup>。本研究共完成 3 组几何实体 STP 模型，分别为：（1）正常组（normal control, NC），胫腓骨正常；（2）胫骨后外平台骨折钢板内固定腓骨完整组（posterolateral tibial plateau fracture with plate fixation and intact fibula, IF）；（3）胫骨后外平台骨折钢板内固定腓骨骨折组（posterolateral tibial plateau fracture with plate fixation and fibular fracture, FF）。

### 1.3 加载与设定

将 STP 文件导入 Hypermesh 14.0 软件中进行网格划分，导出 BDF 格式文件，并在有限元前处理 MSC.Patran 2019 软件和有限元后处理 MSC.Nastran 2019 软件中进行有限元网格属性设置、材料参数定义、荷载施加、边界条件约束<sup>[10]</sup>，如表 1、表 2。假定胫腓骨的皮质骨和松质骨、钢板及锁定螺钉为各向同性、均匀、连续的线弹性材料。根据既往研究的接触设置，假设骨折面处于完全断裂状态，接触且不共节点连接，骨折块间接接触摩擦系数为 0.46<sup>[11]</sup>；胫骨与腓骨之间的相互作用被视为绑定接触，即近端胫腓关节软骨之间不允许相对运动。螺钉按常规做法将其简化为圆柱体，通过设置接触摩擦来进行约束，为模拟胫骨平台后外侧骨折内固定的钢板与螺钉的锁定作用，将钢板与螺钉设置为共节点绑定，以保证螺钉与钢板的连接可靠、不会发生松动，骨骼与螺钉设置为摩擦系数 0.3 的接触关系，钢板与骨骼表面之间采用摩擦接触，摩擦系数为 0.3<sup>[12]</sup>。

应力加载：参考已发表相关文献<sup>[13, 14]</sup>，对胫腓骨模型进行边界约束、载荷施加等设定<sup>[12]</sup>，正常组及腓骨完整组对应的胫腓骨下端固定约束；腓骨骨折组对应的胫骨下端固定约束、腓骨下端不约束，以模拟腓骨粉碎性骨折的情况；同时在胫骨平台上施加轴向载荷 250 N、500 N、1 000 N，分别模拟双足站立、单足站立、缓慢行走状态下的生物力学特性。

### 1.4 测量指标

三组模型给予不同载荷，观察胫骨平台、腓骨以及钢板的应力分布及应力峰值，骨折块及胫骨内侧平台的位移值，内固定物应力峰值及应力云图。

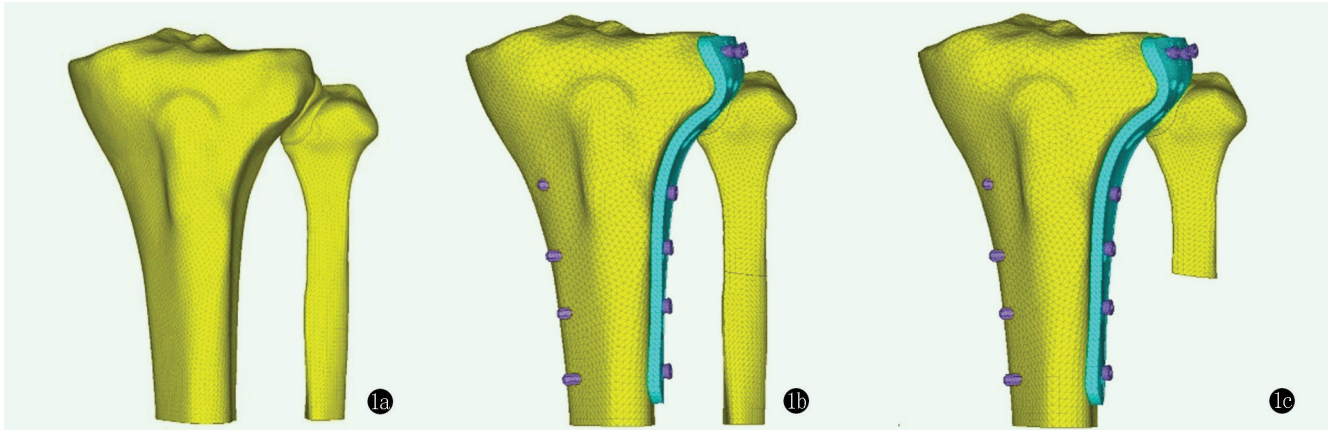


图 1. 三组几何实体 STP 模型。1a: 正常组; 1b: 腓骨完整组; 1c: 腓骨骨折组。

Figure 1. Three sets of geometric entity STP models. 1a: Normal tibiofibular model (NC); 1b: Posterolateral tibial plateau fractures with plate fixation and intact fibula (IF); 1c: Posterolateral tibial plateau fractures with plate fixation and proximal fibular fracture (FF).

表 1. 有限元网格单元划分  
Table 1. Finite element grid cell division

序列	组别	节点数 (个)	单元数 (个)
1	正常组	25 829	113 188
2	腓骨完整组	33 438	150 771
3	腓骨骨折组	31 797	143 572

表 2. 胫腓骨及内固定材料参数  
Table 2. Parameters of tibiofibular and internal fixation materials

名称	弹性模量 (MPa)	泊松比
胫腓骨皮质骨	7 000	0.30
胫腓骨松质骨	700	0.20
关节软骨	5	0.46
钢板及螺钉 (钛合金)	106 000	0.33

### 1.5 统计学方法

采用 SPSS 26.0 件进行统计学分析。计量数据以  $\bar{x} \pm s$  表示, 资料呈正态分布时, 两组间比较采用独立样本 *t* 检验, 多组间比较采用单因素方差分析, 两两比较采用 *LSD* 法,  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 模型验证

在模拟施加 1 000 N 轴向荷载时, 根据正常组模型云图得出内侧室的等效力峰值大于外侧室, 此结果与临床解剖以及文献报道的内侧室应力大于外侧室应力的现象是一致的<sup>[15]</sup>, 证明了此次模型的有效性。各组钢板及螺钉的应力均在钛合金材料安全强度范围内, 钢板及螺钉没有发生屈服或断裂等情况<sup>[16-18]</sup>。总体应力强度变化从双足站立至缓慢行走过程中随着载荷逐渐增加, 各组胫腓骨及钢板螺钉的

结构应力强度也呈现逐渐增加的趋势。

### 2.2 应力与位移

3 种不同载荷下腓骨完整组与腓骨骨折组钢板及螺钉的 Von Mises 应力变化情况见表 3, 结果显示, 随着载荷的增大, 各组钢板与螺钉所受的应力显著增加 ( $P < 0.05$ ); 在同一载荷下, 腓骨完整组钢板及螺钉的 Von Mises 应力均显著小于腓骨骨折组 ( $P < 0.05$ )。

表 3. IF 和 FF 组钢板及螺钉 Von Mises 应力结果比较  
(MPa,  $\bar{x} \pm s$ )

Table 3. Comparison of Von Mises stress of plates and screws between IF and FF groups (MPa,  $\bar{x} \pm s$ )

指标	载荷	IF 组	FF 组	<i>P</i> 值
钢板	250 N	20.3±1.5	28.5±1.6	<0.001
	500 N	42.3±1.6	59.4±1.7	<0.001
	1 000 N	90.5±7.8	123.3±15.9	0.003
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	
螺钉	250 N	24.4±3.1	35.7±2.5	<0.001
	500 N	50.2±7.9	70.3±9.6	0.007
	1 000 N	101.1±15.7	143.7±16.4	0.003
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	

3 种不同载荷下腓骨完整组与腓骨骨折组骨折块的位移变化情况见表 4, 结果显示随着载荷的增大, 两组骨折块位移及内侧胫骨平台位移均显著增加 ( $P < 0.05$ ); 在相同载荷下, 腓骨完整组骨折块的位移及内侧胫骨平台位移均显著小于腓骨骨折组 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

胫骨平台骨折是临床中经常遇到的骨折之一, 约

有 61.9% 的胫骨平台骨折会累及后侧关节面<sup>[19]</sup>，胫骨平台骨折不仅只与胫骨关节面相关，腓骨近端也经常受累，尤其是外侧平台的劈裂型和混合型骨折中腓骨近端骨折患病率约为 38.3%<sup>[20]</sup>，一般情况下外科医师认为仅起辅助支持作用，常忽略其功能。但在解剖学上，腓骨近端作为多条韧带和肌腱的附着点，为膝关节后外侧结构提供功能稳定性，在膝关节的临床功能中起着至关重要的作用<sup>[21]</sup>。腓骨近端还与腓总

神经紧密相邻，据报道，在胫骨平台骨折和腓骨头合并骨折的患者中，腓总神经损伤的发生率高达 21%<sup>[22]</sup>。近端腓骨结构对于膝关节后外侧固定的稳定性有重要影响，其作用机制值得研究<sup>[23]</sup>。此次膝关节三维模型的建立结合了 CT 的优势，获取骨骼数据，有限元方法的介入，减少了临床对大量尸体或动物实验的依赖，从理论角度研究其力学行为变化，模型的结果更符合实际情况。

表 4. IF 和 FF 组不同载荷下骨折块及内侧胫骨平台移位值比较 (mm,  $\bar{x} \pm s$ )

Table 4. Comparison of displacement of fracture fragment and medial tibial plateau under different loads (mm,  $\bar{x} \pm s$ )

指标	载荷	IF 组	FF 组	P 值
骨折块位移	250 N	0.1±0.0	0.2±0.0	<0.001
	500 N	0.3±0.0	0.4±0.0	<0.001
	1 000 N	0.5±0.1	0.8±0.1	<0.001
	P 值	<0.001	<0.001	
内侧胫骨平台位移	250 N	0.1±0.0	0.2±0.0	0.037
	500 N	0.2±0.0	0.3±0.1	0.003
	1 000 N	0.5±0.1	0.7±0.1	0.003
	P 值	<0.001	<0.001	

从等效应力对比中发现，施加 1 000 N 时腓骨完整组的钢板应力峰值为 91.0 MPa，腓骨骨折组为 123.7 MPa，腓骨骨折组钢板的最大等效应力上升幅度约为 35.6%；1 000 N 时腓骨完整组的螺钉应力峰值为 106.3 MPa，腓骨骨折组为 143.9 MPa，腓骨骨折组螺钉的最大等效应力上升幅度约为 35.4%，表明完整的腓骨使得钢板和螺钉承受较小的作用力，增加了内固定物的整体轴向刚度。当 1 000 N 的作用力加载于整个胫骨平台时，腓骨完整组胫骨平台内、外侧位移值分别为 0.48 mm、0.54 mm，腓骨骨折组分别为 0.67 mm、0.76 mm，腓骨骨折组位移值上升幅度约为 39.6%、40.7%。完整的腓骨使钢板和螺钉承受更小的作用力，增加了内固定物的整体轴向刚度。不论是在双足站立、单足站立、缓慢行走何种状态下，腓骨完整组骨折块的位移值均小于腓骨骨折组，完整的腓骨对骨折碎片产生了一种侧向挤压力，这在临床上会转化为骨折平面中正常压缩力，压缩力的增加使得骨折碎片位移减小，有助于骨折愈合。本研究表明，完整的腓骨增加了膝关节的机械稳定性，结合锁定钢板固定，可以帮助外科医生做出决策，确定哪些骨折类型适合早期负重物理治疗。比较胫骨后外侧平台骨折内固定后有无腓骨骨折的应力云图发现，腓骨

有助于降低外侧平台的负荷分量，而且对内侧平台也有一定的帮助，使得整个膝关节的应力分布更为均衡，患者在以后患关节炎概率亦随之降低，这与沈启捷<sup>[24]</sup>研究得出的结论相符。在做此研究之后本团队对一些合并腓骨骨折的胫骨平台骨折患者进行随访，发现不论是手术治疗还是保守治疗，大部分患者都经历了膝关节外侧疼痛和腿筋紧绷。而腓骨近端完整的患者则没有出现这些病理改变。这些症状是大部分患者在随访期内的首发和最明显的主诉，给患者造成不同程度的不便，这也给外科医师带来一些启发，治疗胫骨平台骨折时先将腓骨进行固定可能会对预后起到积极的作用。

本研究的局限性：研究中使用的骨质参数是固定不变的，而在生活中由于患者个体和年龄的差异这些参数相差很大，且未考虑软组织对膝关节的影响，还需在动物关节、尸体骨模型上进行多次生物力学实验，进一步验证本研究的结论，为临床提供指导。

综上所述，该有限元模型表明，腓骨近端与胫骨后外侧平台骨折的力学稳定性密切相关，结合锁定钢板系统，完整的腓骨使胫骨内外侧平台受力更均衡，对骨折的愈合有促进作用。

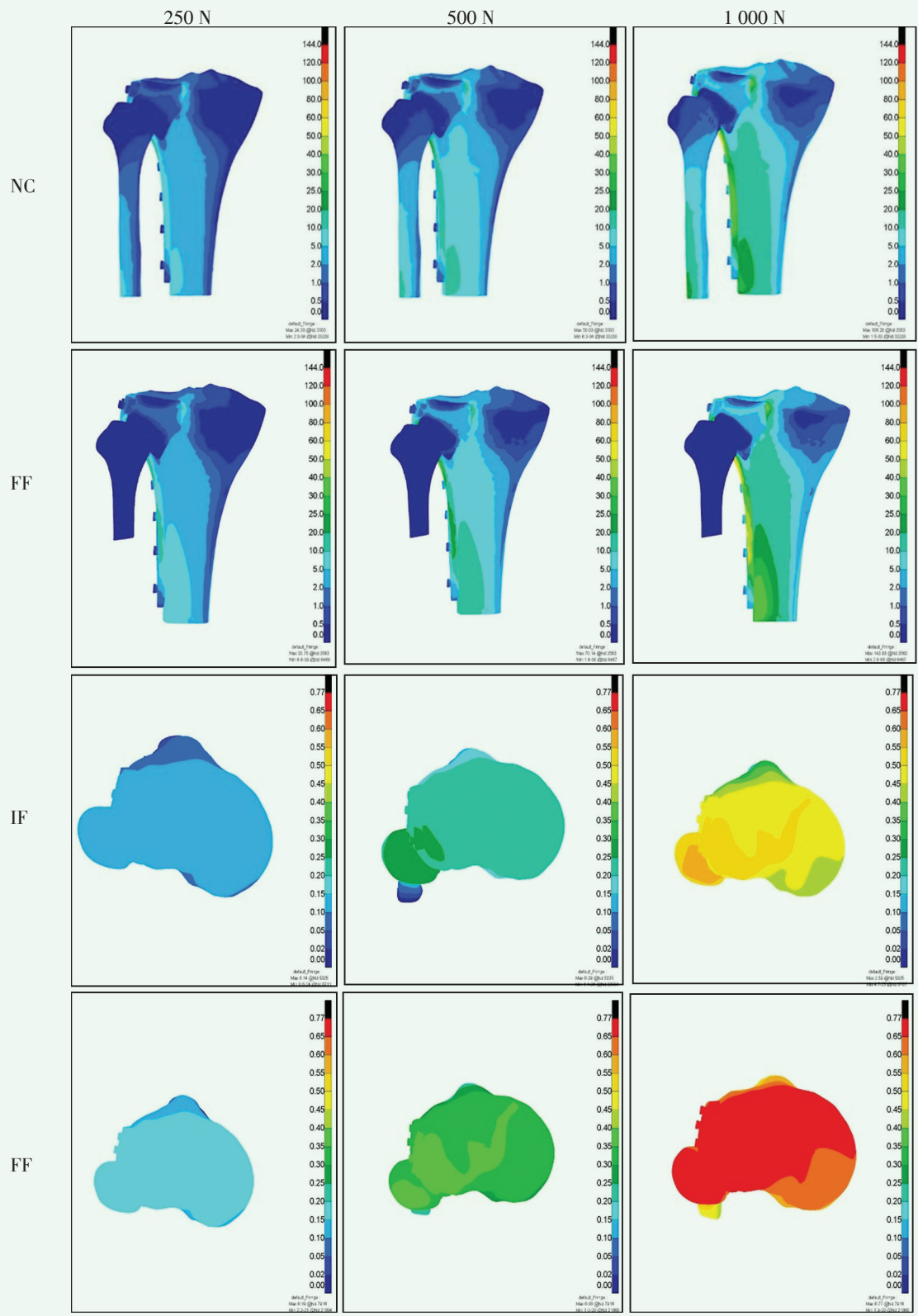


图 2. 腓骨不同载荷下等效应力云图, 250 N 的等效应力云图相当于双足站立; 500 N 的等效应力云图相当于单足站立; 1 000 N 的等效应力云图相当于缓慢行走。

Figure 2. Equal-effect force cloud image of fibula under different loads. The 250 N is equivalent to standing on two feet, the 500 N is equivalent to standing on one foot; and the 1 000 N is equivalent to walking slowly.

利益冲突声明 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 高锦: 课题设计、实施和论文写作、采集分析和解释数据、统计分析、提供技术或者材料支持; 贾鹏: 课题设计、设计实验、提供行政及技术或材料支持; 吕飞: 采集数据及提供行政

及技术或材料支持; 齐岩松: 设计实验、采集和解释数据; 徐永胜: 课题设计、酝酿和设计实验、分析和解释数据; 呼和: 课题设计、采集分析和解释数据、论文审阅及提供行政及技术或材料支持、支持性贡献

参考文献

- [1] Liu Y, Zhang Y, Liang X, et al. Relative incidence of proximal fibula fractures with tibial plateau fractures: an investigation of 354 cases [J]. *J Knee Surg*, 2020, 33 (6) : 531-535. DOI: 10.1055/s-0039-1681045.
- [2] Yao X, Lv B, Hu M, et al. Classification and treatment strategies of concomitant fibular column injuries in tibial plateau fractures [J]. *Biomed Res Int*, 2021, 2021: 2698642. DOI: 10.1155/2021/2698642.
- [3] Ben Amotz O, Ramirez R, Husain T, et al. Complications related to harvest of the proximal end of the fibula: a systematic review [J]. *Microsurgery*, 2014, 34 (8) : 666-669. DOI: 10.1002/micr.22309.
- [4] Huntley K, Al-Hardan W, Pretell-Mazzini J. Surgical management of benign tumors of the proximal fibula [J]. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev*, 2021, 5 (9) : e21.00207. DOI: 10.5435/JAAOSGlobal-D-21-00207.
- [5] 罗从风, 胡承方, 高洪, 等. 基于 CT 的胫骨平台骨折的三柱分型 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2009, 11 (3) : 201-205. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2009.03.001.  
Luo CF, Hu CF, Gao H, et al. Three-Column Classification for tibial plateau fractures [J]. *Chinese Journal of Orthopaedic Trauma*, 2009, 11 (3) : 201-205. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2009.03.001.
- [6] Kfuri M, Schatzker J. Revisiting the Schatzker classification of tibial plateau fractures. *Injury* [J]. 2018, 49 (12) : 2252-2263. DOI: 10.1016/j.injury.2018.11.010.
- [7] 张月雷, 万里甫, 章乐成, 等. 后内侧联合前外侧入路治疗复杂胫骨平台骨折 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (14) : 1341-1344. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.14.22.  
Zhang YL, Wan LP, Zhang LC, et al. Posteromedial and anterolateral approaches for open reduction and internal fixation of complex tibial plateau fractures [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2023, 31 (14) : 1341-1344. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.14.22.
- [8] Ren D, Liu Y, Lu J, et al. A novel design of a plate for posterolateral tibial plateau fractures through traditional anterolateral approach [J]. *Sci Rep*, 2018, 8 (1) : 16418. DOI: 10.1038/s41598-018-34818-5.
- [9] Chen P, Lu H, Shen H, et al. Newly designed anterolateral and posterolateral locking anatomic plates for lateral tibial plateau fractures: a finite element study [J]. *J Orthop Surg Res*, 2017, 12 (1) : 35. DOI: 10.1186/s13018-017-0531-1.
- [10] Ni M, Wong DW, Niu W, et al. Biomechanical comparison of modified Calcanail system with plating fixation in intra-articular calcaneal fracture: a finite element analysis [J]. *Med Eng Phys*, 2019, 70: 55-61. DOI: 10.1016/j.medengphy.2019.06.004.
- [11] Beirami S, Nikkhoo M, Hassani K, et al. A comparative finite element simulation of locking compression plate materials for tibial fracture treatment [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2021, 24 (10) : 1064-1072. DOI: 10.1080/10255842.2020.1867114.
- [12] Samsami S, Herrmann S, Pätzold R, et al. Finite element analysis of bi-condylar tibial plateau fractures to assess the effect of coronal splits [J]. *Med Eng Phys*, 2020, 84: 84-95. DOI: 10.1016/j.medengphy.2020.07.026.
- [13] Moran E, Zderic I, Klos K, et al. Reconstruction of the lateral tibia plateau fracture with a third triangular support screw: a biomechanical study [J]. *J Orthop Translat*, 2017, 11: 30-38. DOI: 10.1016/j.jot.2016.12.002.
- [14] Van den Berg J, Reul M, Nunes Cardozo M, et al. Functional outcome of intra-articular tibial plateau fractures: the impact of posterior column fractures [J]. *Int Orthop*, 2017, 41 (9) : 1865-1873. DOI: 10.1007/s00264-017-3566-3.
- [15] 张秋月, 张春秋, 葛洪玉, 等. 膝关节三维有限元模型的建立及分析 [J]. *天津理工大学学报*, 2015, 31 (3) : 27-30, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1673-095X.2015.03.006.  
Zhang QY, Zhang CQ, Ge HY, et al. Establishment of 3-dimensional finite element model of human knee joint and biomechanical analysis [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2015, 31 (3) : 27-30, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1673-095X.2015.03.006.
- [16] Chang H, Zheng Z, Yu Y, et al. The degree of fracture displacement does not affect the risk for concomitant proximal fibular fractures in tibial plateau fractures [J]. *Int Orthop*, 2021, 45 (11) : 2963-2971. DOI: 10.1007/s00264-021-05034-0.
- [17] Sillat T, Parkkinen M, Lindahl J, et al. Fibular head avulsion fractures accompanying operative treated medial tibial plateau fractures [J]. *Skeletal Radiol*, 2019, 48 (9) : 1411-1416. DOI: 10.1007/s00256-019-03191-3.
- [18] Liu J, Zhang Y, Zheng Z. Research progress on biomechanics for internal fixation in tibial plateau fracture [J]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*, 2024, 38 (1) : 113-118. DOI: 10.7507/1002-1892.202309077.
- [19] Zhang BB, Wang BH, Mei J, et al. Biomechanical study of a new rim plate fixation strategy for two kinds of posterolateral depression patterns of tibial plateau fractures: a finite element analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18 (1) : 840. DOI: 10.1186/s13018-023-04315-1.
- [20] Van Veelen NM, van de Wall BJM, Bleeker NJ, et al. The value of fibular fixation in patients with stabilized distal tibia fractures [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2022, 48 (4) : 3257-3263. DOI: 10.1007/s00068-022-01888-0.
- [21] Selçuk E, Erem M, Çopuroğlu C, et al. Comparison of AO, Schatzker, and three-column classification systems in tibial plateau fractures: Impact on functional outcomes [J]. *Jt Dis Relat Surg*, 2024, 35 (1) : 112-120. DOI: 10.52312/jdrs.2023.1256.
- [22] Torge H, Jakob N, Jan R, et al. Nerve trauma of the lower extremity: evaluation of 60, 422 leg injured patients from the TraumaRegister DGU between 2002 and 2015 [J]. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*, 2018, 26 (1) : 40. DOI: 10.1186/s13049-018-0502-5.
- [23] 梁周, 杨博, 文立春, 等. 复杂胫骨平台骨折数字和 3D 打印手术规划的意义 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (2) : 119-124. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.02.05.  
Liang Z, Yang B, Wen LC, et al. Significance of surgical planning by digital virtual reality and 3D printing for open reduction and internal fixation of complex tibial plateau fractures [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (2) : 119-124. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.02.05.
- [24] 沈啟捷, 舒衡生, 邢国胜, 等. 关节镜辅助复位内固定治疗胫骨平台骨折相关问题 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (8) : 722-726. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.08.10.  
Shen QJ, Shu HS, Xing DS, et al. Relevant problems in arthroscopic reduction and internal fixation of tibial plateau fractures [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (2) : 119-124. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.02.05.

(收稿:2024-03-05 修回:2024-10-10)  
(同行评议专家: 张元智, 张立峰)  
(本文编辑: 宁桦)