

不同方法治疗不稳定骨盆骨折中前环损伤的有限元分析

刘敏¹, 周晓赛², 王俊诚¹, 刘良乐¹, 王伟良¹, 蔡春元¹, 杨国敬¹

(1.温州医科大学附属第三医院骨科, 浙江 温州 325204; 2.瑞安市中医院放射科, 浙江 温州 325204)

【摘要】 目的: 比较 5 种不同固定方法治疗不稳定骨盆骨折中前环损伤的生物力学稳定性, 为临床治疗提供参考。方法: 使用三维有限元方法, 建立一侧骶髂关节脱位合并耻骨支骨折的不稳定骨盆骨折模型(Tile C 型), 模拟前方采用 5 种不同的固定方法, 后方统一采用骶髂螺钉进行固定, 并在模拟站立状态下比较分析不同组合固定方法治疗后的骨盆环的 von Mises 应力及应变分布情况。结果: 竖直方向 500 N 载荷加载后, 前方骨折处最大应力 3.56 MPa(前方外固定架组), 骶髂关节和骨折处总位移和 Y 轴上垂直位移在应力下均未超过 1.5 mm。其中前方经皮入路组和前方外固定架组在内固定、骨折前方、骶髂关节处的最大应力明显大于改良 Stoppa 入路组、传统的髂腹股沟入路组、空心螺钉组, 且在骶髂关节和骨折处的总位移和 Y 轴上垂直位移也大于其他 3 组。结论: 不稳定性骨盆骨折中的前环损伤在 5 种组合方法植入物的固定后均能得到明显的改善, 但采用改良 Stoppa 入路、髂腹股沟入路、前方空心钉固定方法治疗前环损伤在生物力学总体性能要优于前方经皮入路和前方外固定架治疗的方法。

【关键词】 骨盆; 骨折; 生物力学; 骨折固定术, 内; 有限元分析

中图分类号: R683.3

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2019.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite element analysis of anterior ring injuries in unstable pelvic fractures treated by different methods LIU Min, ZHOU Xiao-sai, WANG Jun-cheng, LIU Liang-le*, WANG Wei-liang, CAI Chun-yuan, and YANG Guo-jing. *Department of Orthopaedics, the Third Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325200, Zhejiang, China

ABSTRACT **Objective:** To compare the biomechanical stability of different fixation methods for anterior ring injury of unstable pelvic fractures, and to provide reference for clinical treatment. **Methods:** An unstable pelvic fracture model (Tile C) with one side of the sacroiliac joint dislocation and the pubic rami fracture was constructed via three-dimensional finite element analysis. Five different fixation methods were used in the front, and the rear was fixed with sacroiliac screws. The von Mises stress and strain distributions of different combinations of fixation methods were analyzed under mimicking standing conditions. **Results:** After being loaded with 500 N vertically, the maximum stress in the anterior fracture was 3.56 MPa in anterior pelvic external fixation (AEF) group, the total displacement and the vertical displacement of the Y axis at the sacroiliac joint and the fracture were not more than 1.5 mm. The maximum stress at fixation, the front of the fracture and sacroiliac joints in the anterior pelvic subcutaneous approach (APA) group and AEF, was significantly higher than anterior modified Stoppa approach (ASA) group, anterior pelvic Ilioinguinal approach (AIA) group, and canulated screw fixation (CSF) group. The total displacement and the vertical displacement of the Y axis at the sacroiliac joint and the fracture in APA group and AEF group were also greater than the other three groups. **Conclusion:** Anterior ring injury of unstable pelvic fractures can be significantly improved after the fixation of the implants in the five combined methods. However, overall biomechanical properties of ASA, AIA and CSF group are superior to APA and AEF group.

KEYWORDS Pelvis; Fractures; Biomechanics; Fracture fixation, internal; Finite element analysis

临床工作中骨盆骨折中前环损伤较为常见。单纯的耻骨支骨折往往可以保守治疗, 但对于那些高

能量损伤导致的不稳定骨盆骨折患者, 在固定骨盆后方结构的同时往往需要对前方结构进行手术治疗^[1]。早期用于治疗骨盆前环损伤的方法包括传统的髂腹股沟入路, 但通过这个切口创伤大, 且一旦操作不慎, 有血管和神经损伤的严重后果。也有学者利用前方外固定架急诊治疗骨盆前环骨折, 但因钉道感染、松动以及支架与皮肤撞击等并发症而饱受诟病^[2]。近年来, 随着手术经验的积累、器械的发展以

基金项目: 浙江省医药卫生一般研究计划(编号: 2014KYB262); 温州市科学技术局项目(编号: Y20130330)

Fund program: The Health and Family Planning Commission of Zhejiang Province(No. 2014KYB262)

通讯作者: 刘良乐 E-mail: 153043716@qq.com

Corresponding author: LIU Liang-le E-mail: 153043716@qq.com

及微创技术的要求,出现了骨盆前侧皮下内固定架(anterior pelvic subcutaneous internal fixator, APIF)、改良的 Stoppa 切口以及闭合空心螺钉等微创治疗骨盆前环骨折。虽然这些方法获得了比较满意的临床疗效,但同时也引发了对于其生物力学稳定性的担忧。至于哪种方法治疗不稳定骨盆骨折中前环损伤的效果更佳,迄今尚未检索到相关报道。为此,应用三维有限元方法对临床目前常用的几种前方固定方法治疗不稳定骨盆骨折中前环损伤进行生物力学比较,为临床实践提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象

选取一名 32 岁健康男性,进行 X 线、B 超等检查排除骨盆发育异常、损伤、肿瘤等,对其进行 CT 扫描(64 排,层厚 0.6 mm,飞利浦)获得 DICOM 格式的数据。

1.2 研究方法

模拟一侧骶髂关节脱位合并耻骨支骨折(Tile C1 型),建立不稳定骨盆骨折模型,针对该骨折模型前方采用 5 种不同的固定方法,后方均采用骶髂螺钉进行固定。比较不同固定方法组合治疗后的骨盆环的稳定性。

1.2.1 三维有限元模型的建立 将 DICOM 数据导入 ScanIP(simpleware 6.0)以建立髌骨和骶骨的 3D 网状表面结构。然后将新的三角形网状结构模型输入 Geomagic Studio 11.0,导出带有 G1 光顺拼接的 NURBS 曲面的骨盆实体模型。然后通过 Hypermesh 10.0 将实体模型分割成无数个平均长度为 0.8 mm 的四面体结构。皮质骨部分厚度为 1 mm,包绕松质骨,所有单位由 4 节点线形四面体结构组成。松质骨的杨氏模量和泊松比取 129 N/mm² 和 0.2,皮质骨取 17 000 N/mm² 和 0.3。骶髂关节,髌臼及耻骨间盘的

软骨设置为 3D 实体单位。软骨接触面定义为摩擦系数 0-0.48 的可移动接触面。各种韧带组织定义为两节点不可压缩棒状单位,根据 Dorland 医学词典,解剖模拟韧带连接点位置。生成的骨盆三维有限元模型如图 1 所示。去除一侧的骶髂韧带结构模拟后方骶髂关节脱位,另将同侧耻骨上支模拟为骨折,从而生成不稳定骨盆骨折的三维有限元模型如图 2 所示。韧带的材料性质见表 1,各种材料的参数见表 2。

表 1 骨盆模型的韧带参数

Tab.1 Ligament parameters of pelvic model

骨盆韧带	横截面积(mm ²)	节点数
骶髂前韧带	19.38	120×2
骶髂后短韧带	35.29	160×2
骶髂后长韧带	44.11	200×2
骶髂骨间韧带	66.24	400×2
骶棘韧带	32.22	80×2
骶结节韧带	79.74	300×2
耻骨上韧带	12.82	100
耻骨弓状韧带	7.43	100
耻骨梳韧带	6.76	10×2
腹股沟韧带	20.26	20×2

1.2.2 手术固定模型的模拟 分别采用 AO 公司直径 6.5 mm 的空心钉、重建钢板及 3.5 mm 螺钉对前后环进行固定。后方统一采用骶髂螺钉固定(sacroiliac joint screw, SIJS),前方采用改良 Stoppa 入路(anterior pelvic Stoppa approach, ASA)、前方经皮下入路(anterior pelvic subcutaneous approach, APA)、传统前方髂腹股沟入路(anterior pelvic Ilioinguinal approach, AIA)、前方外固定架(anterior pelvic external fixation, AEF)、空心螺钉(canulated screw fixation,

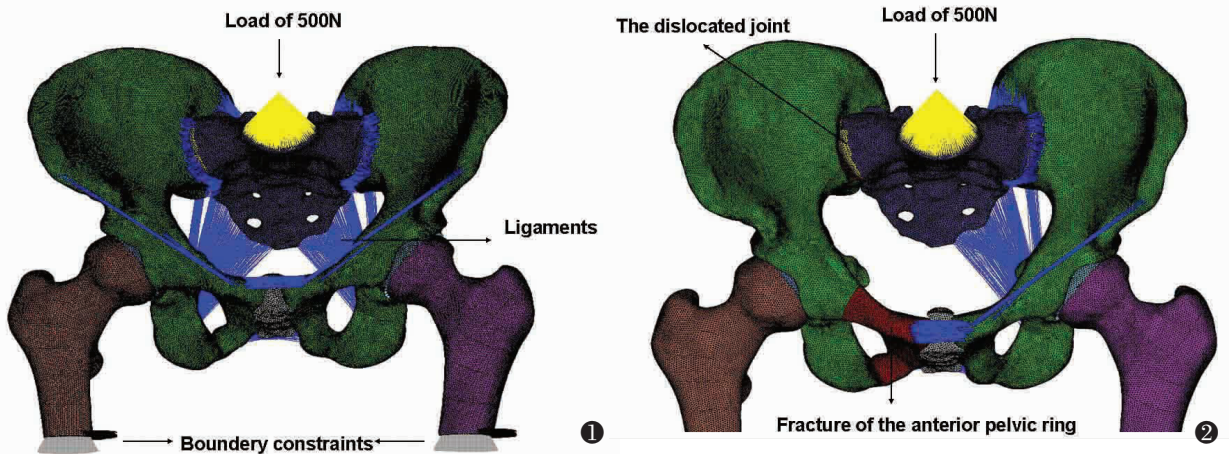


图 1 正常骨盆三维有限元模型 图 2 不稳定骨盆骨折的三维有限元模型

Fig.1 Three-dimensional finite element model of normal pelvis Fig.2 Three-dimensional finite element model of unstable pelvic fracture

表 2 有限元模型的材料属性

Tab.2 Material properties of finite element models

材料	弹性模量(MPa)	泊松比(μ)
皮质骨	17000	0.3
松质骨	129	0.2
钢板	110000	0.3
螺钉	110000	0.3
关节软骨	15	0.475
韧带	251.3	0.3
耻骨间盘	5	0.45

CSF)5 种方法进行固定。从而形成 5 种模拟固定方式如下:A 组后方骶髂螺钉+前方 Stoppa 入路,B 组后方骶髂螺钉+前方经皮入路,C 组后方骶髂螺钉+前方腹股沟入路,D 组后方骶髂螺钉+前方外固定固定,E 组后方骶髂螺钉+前方空心螺钉固定(见图 3)。

1. 2. 3 三维有限元模型的约束与加载 本研究中将髌骨和胫骨与髌胫关节之间的接触关系设置为绑定约束。空心钉与骨的接触关系为绑定约束。螺钉与骨的接触关系为绑定约束。钢板与骨的接触关系设置为滑动摩擦。螺钉头与钢板的接触关系为滑动摩擦。在 2 个髌臼施加 Z 轴方向的平动约束模拟股骨

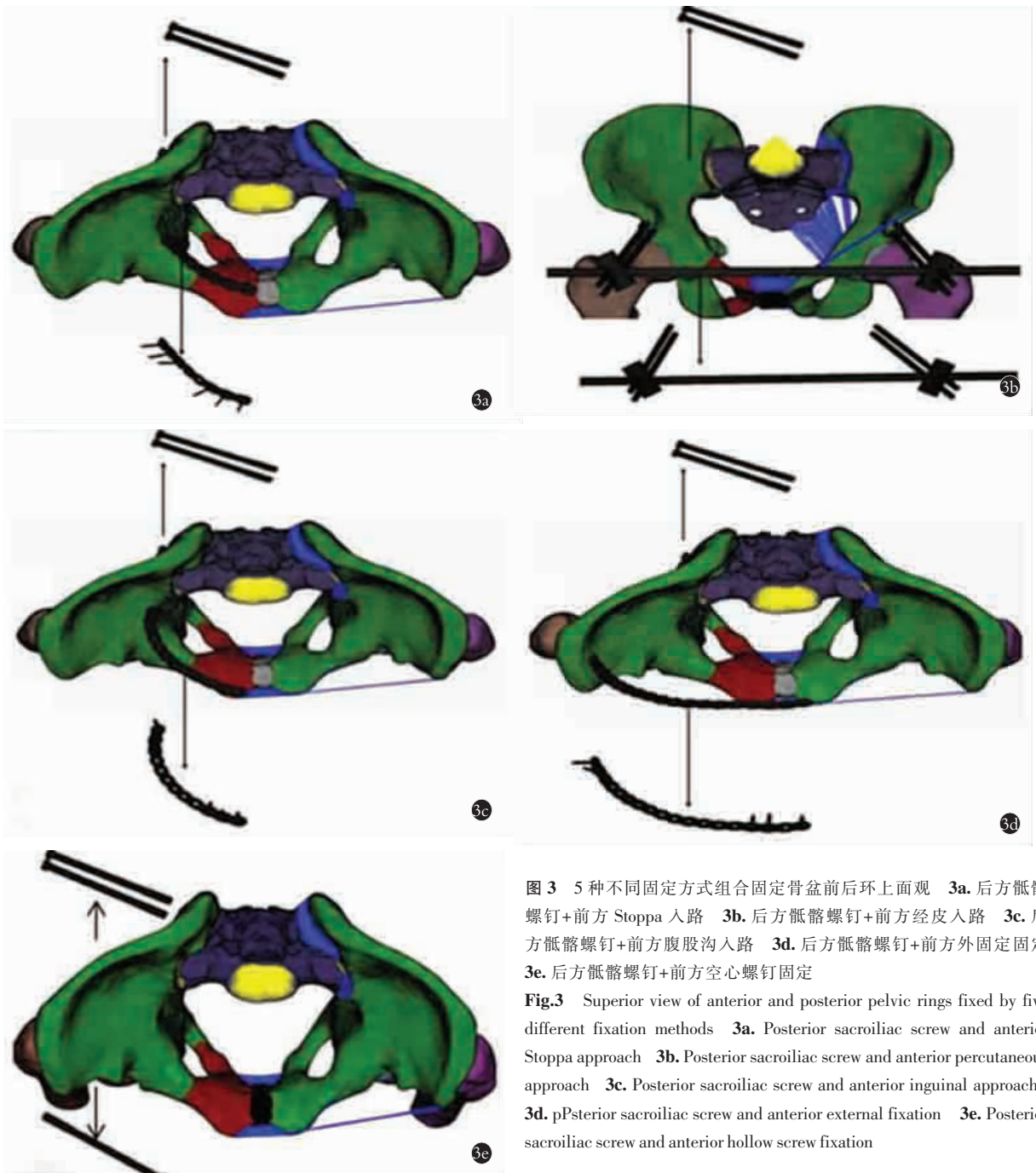


图 3 5 种不同固定方式组合固定骨盆前后环上面观 3a. 后方骶髂螺钉+前方 Stoppa 入路 3b. 后方骶髂螺钉+前方经皮入路 3c. 后方骶髂螺钉+前方腹股沟入路 3d. 后方骶髂螺钉+前方外固定固定 3e. 后方骶髂螺钉+前方空心螺钉固定

Fig.3 Superior view of anterior and posterior pelvic rings fixed by five different fixation methods 3a. Posterior sacroiliac screw and anterior Stoppa approach 3b. Posterior sacroiliac screw and anterior percutaneous approach 3c. Posterior sacroiliac screw and anterior inguinal approach 3d. pPosterior sacroiliac screw and anterior external fixation 3e. Posterior sacroiliac screw and anterior hollow screw fixation

对上身的支撑作用。在骶骨上表面施加垂直向下载荷 500 N 模拟上半身的重力, 模拟站立状态下受力情况, 最后将模型导入 Abaqus 6.10 软件进行有限元分析评估。分析比较不同内固定组合方式的 von Mises 应力及应变分布情况。

2 结果

2.1 整体应力分析

5 种不同组合内固定后, 在内固定前方、前方骨折处、骶髂关节处、骨盆环整体的最大 von Mises 应力分布见表 3。结果显示, 在后方固定方式相同的情况下, 在前方骨折处的最大应力依次为 A 组 (2.45 MPa) < C 组 (2.48 MPa) < E 组 (2.56 MPa) < B 组 (3.39 MPa) < D 组 (3.56 MPa)。而内固定前方的最大应力分布依次为 A 组 (10 MPa) < C 组 (12.09 MPa) < E 组 (12 MPa) < D 组 (22.65 MPa) < B 组 (66.32 MPa), 5 组的最大应力除 B 组稍偏高外, 其余 4 组差距不大。从这个结果可以看出: 在骨盆后方得到良好的复位固定后, 常见的 5 种前方固定方法都能将骨折处的应力起到很好的“屏蔽”作用。B 组和 D 组在内固定前方、前方骨折处、骶髂关节处的最大应力明显大于其他 3 组, 这可能与 B 组和 D 组仅提供间接复位固定, 而其余 3 组均提供的是直接复位, 复位固定更加彻底牢靠。

表 3 5 种不同固定方式组合固定后骨盆环不同部位的最大应力 (MPa)

Tab.3 Maximum stress in different parts of pelvic ring after combined fixation with five different fixation methods (MPa)

固定方式	内固定前方	前方骨折处	骶髂关节处	骨盆环整体
A 组	10	2.45	2.45	231.3
B 组	66.32	3.39	3.39	270.3
C 组	12.09	2.48	2.48	230.4
D 组	22.65	3.56	3.56	234.5
E 组	12	2.56	2.56	230.4

注: A 组后方骶髂螺钉+前方 Stoppa 入路, B 组后方骶髂螺钉+前方经皮入路, C 组后方骶髂螺钉+前方腹股沟入路, D 组后方骶髂螺钉+前方外固定固定, E 组后方骶髂螺钉+前方空心螺钉固定

Note: Group A posterior sacroiliac screw and anterior Stoppa approach, group B posterior sacroiliac screw and anterior transdermal approach, group C posterior sacroiliac screw and anterior inguinal approach, group D posterior sacroiliac screw and anterior external fixation, group E posterior sacroiliac screw and anterior hollow screw fixation

2.2 位移分析

应力下在骶髂关节和骨折处的最大位移和 Y 轴上垂直最大位移见表 4。发现 5 种方法固定后, 骶

髂关节和骨折处的总位移和 Y 轴上垂直位移在应力下均没有超过 1.5 mm, 但 B 组和 D 组在骶髂关节和骨折处的总位移和 Y 轴上垂直位移均要大于其他 3 组, 在相同应力下骨折处的总位移从小到大移位依次分别为 A 组 < C 组 < E 组 < B 组 < D 组, Y 轴上垂直位移从小到大移位依次分别为 A 组 < E 组 < C 组 < B 组 < D 组。可见, 对于前方复位固定方面, 骨盆稳定性在 5 种方法植入物的固定后均能得到明显的改善。Stoppa 入路、经典的髂腹股沟入路、前方空心钉组的效果要好于外固定和前方经皮入路组固定。

表 4 5 种不同固定方式组合固定后骨盆环最大位移 (mm)

Tab.4 Maximum displacement of pelvic ring after combined fixation with five different fixation methods (mm)

固定方式	骨折处总位移	骶髂关节处总位移	骨折处 Y 轴位移	骶髂关节处 Y 轴位移
A 组	0.287	1.118	0.227	0.752
B 组	0.393	1.285	0.253	0.954
C 组	0.297	1.127	0.237	0.832
D 组	0.423	1.285	0.243	0.913
E 组	0.322	1.215	0.231	0.841

注: A 组后方骶髂螺钉+前方 Stoppa 入路, B 组后方骶髂螺钉+前方经皮入路, C 组后方骶髂螺钉+前方腹股沟入路, D 组后方骶髂螺钉+前方外固定固定, E 组后方骶髂螺钉+前方空心螺钉固定

Note: Group A posterior sacroiliac screw and anterior Stoppa approach, group B posterior sacroiliac screw and anterior transdermal approach, group C posterior sacroiliac screw and anterior inguinal approach, group D posterior sacroiliac screw and anterior external fixation, group E posterior sacroiliac screw and anterior hollow screw fixation

3 讨论

高能量损伤导致的不稳定骨盆骨折治疗一直是创伤骨科领域的热点和难点, 据统计, 这种骨折的发生率占骨盆骨折的 17%~30%^[3]。临床工作中, 往往将治疗重点放在了骨盆后方稳定性的恢复上, 而忽视了对于骨盆前环结构损伤的修复。Hill 等^[4]研究表明: 尽管耻骨支骨折伤后 1 年的死亡率远好于髌部骨折, 但两种损伤的 5 年死亡率近似, 考虑较差的预后可能与被迫延长的制动和持续的疼痛有关, 而且, 这种不理想的情况常常发生在存在后环损伤而未被及时发现的患者。目前主流的观点认为, 在 Tile C 型骨盆骨折损伤中, 为了能早期活动及防止术后发生再移位, 任何类型的前后环损伤均应予以固定^[1,5]。

不稳定骨盆前环损伤的复位治疗经历了外固定支架、钢板螺钉、空心螺钉等不同的方式, 至今缺乏统一的标准。近年来, 随着术中透视系统的发展和微创技术的改进, 骨盆骨折的微创手术逐渐风靡起来,

包括闭合空心螺钉、Stoppa 入路、骨盆前侧皮下内固定架等^[6-9]。大量的解剖和临床研究证实了微创治疗方法的安全性和有效性，但同时也引发了对微创复位固定后生物力学稳定性的担忧。回顾文献，发现虽然有不同学者通过骨盆标本的力学模拟实验对上述骨盆前环治疗方法进行了力学性能的比较，但由于受标本来源、个体差异等诸多因素的限制而使其结论可靠性受到质疑^[10]。

为此，为了克服传统方法的不足，设计了利用计算机有限元建立不稳定骨盆骨折模型，分析比较不同方法治疗耻骨上支骨折的稳定性研究。结果显示，在骨盆后方得到良好的复位固定后，5 种方法在前方骨折处的最大应力均被限制在 5 MPa 以下，骶髂关节和骨折处的总位移和 Y 轴上垂直位移在应力下均没有超过 1.5 mm。可见常见的 5 种前方固定方法都行之有效，将骨折处的应力起到很好的“屏蔽”作用，很好的恢复了骨盆的稳定性。同时发现采用前方外固定和前方经皮入路组仅仅提供了骨折处的间接复位固定，相较于 Stoppa 入路、经典的髂腹股沟入路、前方空心钉组的直接复位固定，总体生物力学稳定性要差。同时本实验基于正常骨盆 CT 图像重建骨盆三维有限元模型，同时构建不稳定骨盆骨折的三维有限元模型，具备很高的几何仿真度及较高的力学仿真度，为今后利用骨盆三维有限元骨折模型进行其他生物力学实验亦提供了基础和经验。

参考文献

[1] Tile M, Helfet DL, Kellams JF. Fractures of the pelvis and acetabulum [M]. 3rd Edition. Philadelphia:Lippincott Williams & Wilkins, 2003:131-167.
 [2] Mason WT, Khan SN, James CL, et al. Complications of temporary and definitive external fixation of pelvic ring injuries[J]. Injury,

2005;36(5):599-604.
 [3] Kabak S, Halici M, Tuncel M, et al. Functional outcome of open reduction and internal fixation for completely unstable pelvic ring fractures(type C):a report of 40 cases[J]. J Orthop Trauma, 2003, 17(8):555-562.
 [4] Hill RM, Robinson CM, Keating JF. Fractures of the pubic rami. Epidemiology and five-year survival[J]. J Bone Joint Surg Br, 2001, 83(8):1141-1144.
 [5] Bucholz WR, Heckman JD, Court-Brown C. Fractures in adults[M]. 6th Edition. Philadelphia:Lippincott Williams & Wilkins, 2006:1665-1714.
 [6] 毕大卫, 祖罡, 韩雷, 等. 骨盆环不稳定性骨盆骨折的手术入路和内固定选择[J]. 中国骨伤, 2017, 30(3):213-216.
 BI DW, ZU G, HAN L, et al. Choices of the internal fixation and approaches on unstable pelvic ring fractures[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2017, 30(3):213-216. Chinese with abstract in English.
 [7] 徐启飞, 林岚然, 赵代杰, 等. 骶髂关节螺钉联合前环耻骨支螺钉在 Tile B 型骨盆骨折中的应用[J]. 中国骨伤, 2017, 30(3):202-207.
 XU QF, LIN KR, ZHAO DJ, et al. Clinical application of percutaneous iliosacral screws combined with pubic ramus screws in Tile B pelvic fracture[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2017, 30(3):202-207. Chinese with abstract in English.
 [8] Hiesterman TG, Hill BW, Cole PA. Surgical technique:a percutaneous method of subcutaneous fixation for the anterior pelvic ring: the pelvic bridge[J]. Clin Orthop Relat Res, 2012, 470(8):2116-2123.
 [9] Oh HK, Choo SK, Kim JJ, et al. Stoppa approach for anterior plate fixation in unstable pelvic ring injury[J]. Clin Orthop Surg, 2016, 8(3):243-248.
 [10] Garcia JM, Doblare M, Sera B, et al. Three dimensional finite element analyses of several internal and external pelvis fixations[J]. J Biomech Eng, 2000, 122(5):516-522.

(收稿日期:2018-04-18 本文编辑:王玉蔓)