

垂直动态冲击下骶孔骨折伴神经根损伤的生物力学研究

全仁夫¹, 杨迪生², 苗旭东², 王以进³, 李伟¹, 谢利军¹

(1. 萧山中医院脊柱外科治疗中心, 浙江 杭州 311201; 2. 浙江大学医学院附属二院骨科; 3. 上海大学生物力学工程研究所)

摘要 目的: 探讨垂直冲击下骶孔骨折伴神经根损伤的生物力学特点。方法: 采集人体新鲜骨盆骨骼标本 10 具, 行动态冲击试验。测量动态骨折时的一系列动力学参数, 确定骨折的动力学特性; 并取骶孔骨块脱钙, 作石蜡切片, 再用 Masson 三色法、Mallory 改良法和 HE 染色, 并进行组织学观察。结果: ①骶孔边的应力集中明显, S_1 、 S_2 孔边上缘的应变为 2703 $\mu\epsilon$ 和 1689 $\mu\epsilon$, 相应的压应力分别为 25 MPa 和 16 MPa; 左右两侧边缘的最大拉应力可达 40 MPa 和 31 MPa, 比骶骨处应力高 3.1 倍。此时可计算得到 S_1 、 S_2 椎体应力集中系数分别为 1.6 和 1.9。②骶孔发生以下四种骨折方式: I 型为单纯骶孔骨折, II 型为骶孔骨折伴骶骨翼骨折, III 型为整侧骶孔纵形骨折, IV 型为骶孔劈裂状骨折。当冲击能量达到 25 J 以上时, 发生粉碎性脆性状态骨折, 形成骶孔劈裂状骨折, 并产生广泛的软组织损伤及神经根损伤, 常累及一侧或两侧的腹侧神经根损伤。③从骶孔断面的电镜观察来看, 骨折裂纹大多数在薄弱断面, 高低不平, 并在孔边的应力集中处交汇、集合、发散、扩散和发展, 骨折面较为锐利, 孔边并有一些宽度不大于 120 μm 微裂隙存在。结论: 骶孔状骨折为高能量伤, 损伤常累及神经根, 与骶骨的力学结构、力的传导、冲击动力学特性以及应力、应变分布相关。

关键词 骶骨骨折; 神经根损伤; 生物力学

Study of the biomechanics of the sacrum hole fracture and nerve root injury by impact of vertical and dynamic QUAN Renfu*, YANG Dìsheng, MIAO Xūdōng, WANG Yìjìn, LI Wēi, XIE Lìjūn.* Spinal Surgery Center, Xiaoshan Traditional Chinese Medical Hospital, Hangzhou 311201, Zhejiang, China

Abstract Objective: To study the biomechanism of the sacrum hole fracture and nerve root injury by impact of vertical and dynamic. **Methods:** Ten fresh pelvis specimens of human were collected to be carried out both the crash test in dynamic state. The dynamic parameters of the fracture in dynamic state were measured to be sure the dynamic characters of fracture. The fracture pieces of the sacrum wing were made decalcification, paraffin section and stained (Masons, Mallory, HE). Histomorphology were observed. **Results:** ①The stress was obviously concentrated in the hole edge of sacrum. The strain of the first and second hole of sacrum were 2703 $\mu\epsilon$ and 1689 $\mu\epsilon$, the depress stress were 25 MPa and 16 MPa. The most draw stress of both edge were 40 MPa and 31 MPa, and were 3.1 times of the sacrum. The stress concentration coefficient of first and second sacral vertebrae were 1.6 and 1.9 respectively. ②The hole of sacrum fracture included four types: type I of the hole of sacrum fracture, type II of the hole of sacrum fracture accompanying fracture of the wing of the sacrum, type III of homolateral erect fracture, type IV of split fracture. When the power of clash was beyond 25 J, fragility comminuted fracture appeared (type IV) and accompanied with extensive injury of tissue and nerve root, the nerve included one side or two sides of ventral nerve root. ③Under the electron microscope, the fracture flaw were on weak transection and looked irregular, it crossed, converged, delivered, scattered at the position of depress stress of the hole edge, so the fracture was uneven and sharper, there existed some cranny no more than 120 μm wide at the hole edge. **Conclusion:** The sacrum fracture is a kind of high-energy injury, with the injury of nerve root. It is relevant to the mechanics structure, the conduction of strength, the characteristic of dynamic crash, the stress, and the strain of the sacrum.

Key words Sacrum fracture; Nerve root injuries; Biomechanic

骶骨骨折多由车祸和高处坠落伤等高能暴力引起,且常合并有严重的其他器官的损伤和其他部位的严重骨折。由于骶骨位置相对隐蔽,所造成的神经损伤不引人注意,因此在外伤后第一时间内常易漏诊或不被重视,仅在合并伤稳定之后,骶骨骨折所引起的神经损害症状逐渐出现时才被发现。但对于骶骨骨折同时合并的神经损伤是否需要手术减压还存在争议^[1,2]。本研究旨在通过国人骶骨-骨盆的垂直冲击试验,观察骶孔骨折的形态,了解骶骨孔骨折引起神经损伤的机制,为临床开展手术治疗提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 标本制作 选取 10 具新鲜正常青壮年男性骨盆,剔除周围皮肤、皮下组织和肌肉,完整保留关节周围韧带和骶管、L₅、骶孔内外的神经,见腰骶神经干被纤维组织固定在骶骨翼表面,进入小骨盆后与骶神经汇合成骶丛。L₅ 神经自出椎间孔后紧贴骶骨翼前壁下行,与 L₄ 腰骶干支汇合成腰骶干,进入小骨盆。骶神经出骶前孔后并非按骶骨外侧凹面的角度走行,而是偏向前内下,S₁ 神经出骶前孔后至梨状肌这一段与骶骨紧贴,S₂-S₄ 骶神经出骶前孔后一般走在梨状肌前方。制成骨盆试验标本后,将标本用双层塑料薄膜包扎-20℃保存备用。实验前 24 h 室温(20℃)下解冻,解冻后垂直动态冲击试验。

1.2 应变片及蓄能传感器的布置 在 S₁-S₃ 椎体上布置高精度、小标距动态电阻应变片,其布置及粘贴均按骶骨-骨盆的最大主应力线分布布置。并在骶骨冲击加载处布置上蓄能传感器,记录垂直冲击加载能量。

1.3 冲击装置、冲击加载方式与测量系统 冲击装置采用德制 Schenck PG-63M 材料冲击加载试验机,以三角形波为动态加载波,由 Nicolet 440 波形分析记录仪分析,XFD-8A 超低频信号发生器,SSF-12 型记忆示波器以监控波形,在冲击骶骨-骨盆上有载荷响应的压电传感器,半径为 6 mm,厚度为 0.8 mm,压电常数为(1.4 × 10⁻¹⁰) C/N,传感器信号经多路电荷放大器获得足够信噪比的电压信号,配合动态应变仪 YD-6 记录动态应变曲线。

冲击加载方式:先把骨盆置于标本夹具内,按骨盆直立位形状在骨盆下端坐骨结节及髌臼处用骨水泥坚强固定,置于冲击加载试验机内,于骶骨处自上而下垂直动态冲击加载(图 1),以三角形波为动态加载波。

测试过程:实验工况由冲击动力系统控制(伺服电机、伺服阀控制、液压、冲击头、油路系统供给)、测试仪记录装置以及数据记录系统三部分构成。该系统冲击系数最大冲击质量为 18 kg,冲头速度 2.5 m/s,加速度 88 g。每个冲击参数的可调改变均会影响撞击载荷响应,压力响应和应变响应值的大小。整个系统经调试至正常位置后再进行预试验和正式试验。测试过程中分别记录载荷压力响应和应变响应数据,同时记录加速度、撞击时间等动力参数。实验后分别观察骶孔骨折的形态和损伤神经根的形态,并摄骨盆前后位和出口位片,了解骶孔骨折的形态特点和损伤规律。

1.4 组织切片及病理学观察 取新鲜骶孔块,先行脱钙,作石蜡切片,用 Masson 三色法、Mallory 改良法和 HE 染色,进行组织学观察。锯取相同骨折块 10 块,经蒸馏水冲洗,乙醇逐级脱水,乙酸异戊酯浸泡,临界点干燥、喷金,行骨折断面的扫



图 1 动态冲击加载试验
Fig.1 The crash test in dynamic state

描电镜观察。

2 结果

2.1 骶骨的等应力结构 骶骨是等应力结构(图 2,3),当骶骨受压时,骶椎上的正应力 S 和剪应力 T 分别呈抛物线形状分布。试验测得最大应变分别为 878 με 和 473 με,在正常人体重下应力分别为 13 MPa 和 7 MPa。从曲线图上看到,在 S₁ 前孔上方所受的应力最大,从 S₃ 开始应力迅速下降,说明 S₁ 承受来自腰椎传递的重力,并把大部分的重力通过耳状面传递至髌骨,由于 S₁、S₂ 以下截面积减小较快,应力也同样衰减,到尾椎处应力几乎为零。

2.2 骶孔应力集中 当以冲击质量为 18 kg,冲头速度 2.5 m/s,加速度 88 g 的方式冲击时,S₁、S₂ 骶孔上缘的应变分别为 2703 με 和 1689 με,相应的压应力分别为 25 MPa 和 16 MPa;S₁、S₂ 骶孔的左右两侧边缘最大拉应力分别可达 40 MPa 和 31 MPa,比骶骨处应力高 3.1 倍,此时可计算得到骶骨 S₁、S₂ 应力集中系数分别为 1.6 和 1.9(图 4)。这充分说明了拉应力在骶孔骨折中起着主导作用,并且实验中测出的最大主应变值,与理论上骨折的方向相一致。

2.3 骶孔骨折形态和神经根损伤特点 本次冲击试验中,骶孔劈裂状骨折 4 例为最多,占 40%,单纯骶孔骨折 2 例,占 20%,骶孔骨折伴骶骨翼骨折 2 例,占 20%,其余为整侧骶孔纵形骨折(见图 5)。实验发现,单纯骶孔骨折往往造成 S₁ 神经根损伤,骶孔骨折伴骶骨翼骨折常常累及 L₅ 及 S₁ 神经根损伤,整侧骶孔纵形骨折则伤及一侧骶神经根,往往表现为直肠、膀胱功能障碍。当冲击能量达到 25 J 以上时,发生粉碎性脆性状态骨折,形成骶孔劈裂状骨折,并产生广泛的软组织损伤及神经根损伤,常累及一侧或二侧的腹侧神经根损伤,主要表现为 L₅、S₁ 和 S₂ 腹侧神经根损伤。从 4 具骶孔劈裂状骨折的标本来看,骶骨距冲击点 L₅ 处较近,L₅ 载荷直接传递给 S₁,在骶骨切迹剪应力作用下产生裂纹,裂纹呈劈裂状汇集向下延伸不断扩展,通过骶外侧嵴与骶正中嵴的交界薄弱区,在骶孔巨大的应力集中处拉应力作用下破裂。由于载荷的脉冲式冲击使裂纹会合、辐射,环向延伸,当超过临界应变的部位裂纹再继续扩展,加上 S₃、S₄ 椎体厚度变薄,应力增

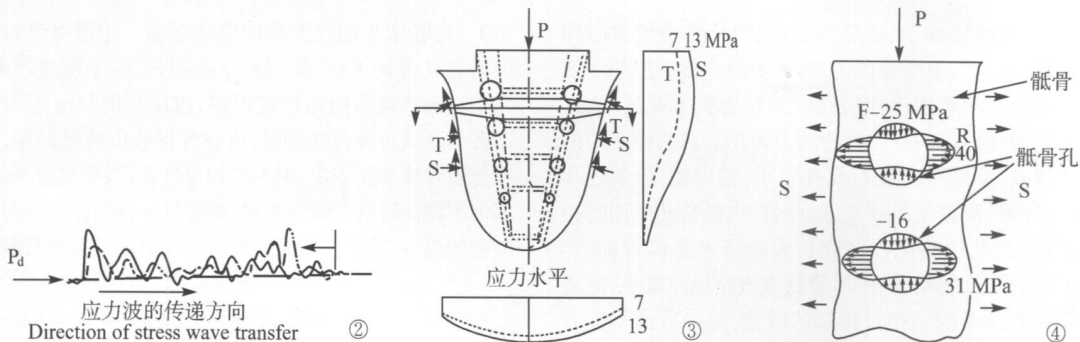


图 2 冲击应力波 图 3 骶骨的等应力结构 应力水平: 正应力 S; 剪应力 T 图 4 骶孔应力集中现象 冲击载荷 P; 拉应力 S; 应力集中峰值 RF

Fig. 2 The crashing stress wave Fig. 3 The isostress structure of sacrum Stress level: direct stress S; shearing strength T

Fig. 4 The stress concentration in the hole of sacrum Dynamic state P; tensile stress S; stress peak value RF

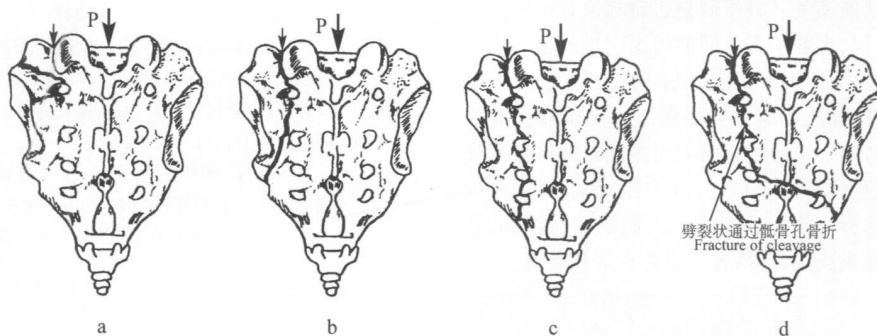


图 5 骶孔骨折形态图 a. 单纯骶孔骨折; b. 骶孔骨折伴骶骨翼骨折; c. 整侧骶孔纵形骨折; d. 骶孔劈裂状骨折

Fig. 5 Topographical map of sacrum hole fracture a. The hole of sacrum fracture; b. The hole of sacrum fracture accompanying fracture on the wing of the sacrum; c. Homolateral erect fracture in the hole of sacrum; d. Fracture of cleavage

大, 裂纹在薄弱区穿引, 形成横形骨折, 加重了骶骨的结构破坏, 产生不可逆转变形, 最终导致整个骶骨的破坏。

2.4 骶骨孔骨折断面的扫描电镜观察 从骶孔断面的电镜扫描观察来看, 骨折裂纹大多数在薄弱断面, 高低不平, 孔洞边的应力集中处交汇、集合、发散、扩散和发展, 有的较为锐利, 孔边有一些宽度不大于 120 μm 微裂隙存在(图 6)。

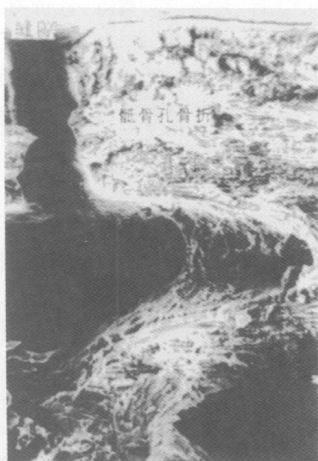


图 6 骶孔骨折的电镜照片 X25

Fig. 6 The picture of sacrum cause fracture

3 讨论

3.1 骶孔骨折的形态及神经根损伤的特点 骶骨受到冲击

后, 各部位均产生一定的动应变, 通过变形吸收能量, 在骶骨翼与骶嵴界面首先达到临界应变, 使此部位产生裂隙骨折辐射。根据低应力脆断原理, 宏观裂纹的存在大大降低了材料的断裂应力, 骶骨上由于高低不平、骶孔大小不一, 应力集中明显, 因此导致骶孔裂纹骨折。单纯骶孔骨折往往造成 S₁ 神经根损伤, 随着暴力继续冲击, 裂纹继续穿行、不断扩展, 即使能量不大, 也能促进骨折的扩展, 于是在骶骨薄弱处裂纹扩展, 促使骨折断面附近组织变形能量的释放, 加上冲击波的振荡, 使骨折由上而下不同部位产生劈裂状骨折。本组冲击试验以骶孔劈裂状骨折居多(占 40%)。笔者认为, 经骶孔骨折, 因骨折块受骶棘肌的作用, 常向头侧移位, 使神经根受到牵拉、挤压, 或因骨块直接压迫、粘连, 导致神经根损伤。

3.2 对临床的指导意义 由于骶骨的位置及形态特点, 普通的 X 线片对合并的神经损伤不能提供直接的依据, 而骨盆出口位片、CT 扫描对本病的诊断意义较大, Xu 等^[1]的研究结果表明, 出口位片能很好地显示骶孔形态。CT 检查能很好地显示骶孔形态及孔内有无骨块压迫, 确定骨折部位, 但应作 2~3 mm 间隔扫描, 或采用矢状位重建和 MR 检查意义更大, 它为神经损伤的准确定位诊断提供了一个有效的方法。如果怀疑骶神经损伤, 应及早请泌尿科会诊, 做膀胱内压测定, 因为膀胱内压力测定对明确合并的植物神经功能损害有十分明确的意义。

对于骶孔骨折同时合并的神经损伤是否需要手术减压还存在争论^[1,2], 目前多数学者认为骶孔骨折合并神经损伤, 最好的方法是早期骨折复位, 直接解除神经压迫。而对骶孔骨

折移位不明显,仅神经挫伤、血肿压迫、应力传导造成暂时性传导功能丧失,而致大小便障碍者,非手术治疗后一般均可恢复正常。但最近有学者提出经后路骶神经管扩大减压术,达到对骶前孔处神经损伤的针对性松解及减压。认为骶孔的结构为“喇叭”型或“漏斗”型,骶后孔孔径小,偏内侧,骶前孔孔径大,且偏向外下,所以在向前外下方向扩大骶后孔的同时也扩大了骶前孔,因此后路骶神经管扩大减压术是可行的^[3]。而我们从骶骨的局部解剖来看,尽管后方进路风险较小,但由于后方进路一方面干扰了相对正常的骶管,另一方面不能有效地移除前移的骨块以解除其对 S₁ 神经根的压迫,因此主张前路减压^[4]。但前路减压有一定的难度和风险,首先要求术者对该区域的解剖结构十分熟悉,其次在手术过程中除注意对周围主要血管的保护之外,还应尽量少干扰下腹丛,以免造成医源性的植物神经功能紊乱。减压后是否对移位骨折进行固定,目前也仍存在争议,多数学者认同的内固定指征是不稳定骨折,建议水平移位用骶骨棒固定,纵向移位用 π 棒内固定^[2],但骶骨棒在横向加压固定中可能引起或加重骶神经损伤,建议在骶骨棒固定时,两侧髂后嵴的内侧安置螺母防止过度加压,从而避免损伤骶神经。总之,由于各种原因,骶孔骨折及其由它所造成的神经损伤还未引起人们足够的重视,有关它的治疗在国内尚未成熟,有待进一步的观察和研究。

3.3 在临床诊治过程中应注意事项 ①骶骨骨折的患者常同时合并骨盆不稳,头、胸、下肢损伤,常不能进行系统检查,早期诊断神经根损伤比较困难,建议早期行电生理检查^[5,6]。②若遇到整排骶孔骨折时,可视骨折移位情况而定,横向不稳可行骶骨棒加压固定,但不宜加得过紧,以免加重神经根损伤;横向不稳同时合并纵向不稳,则建议 π 棒固定。③对于骶神经断裂的患者,建议在减压同时应在显微镜下直接行断端吻合。

参考文献

- 1 Xu RM, Nabil AE, Jason R, et al. Radiologic and anatomic evaluation of the anterior sacral foramens and nerve grooves. Spine, 1996, 21(4): 407.
- 2 吴乃庆,王青,金正帅,等. 骶骨骨折的手术治疗. 骨与关节损伤杂志, 2002, 17(3): 186-187.
- 3 刘永刚,白靖平,锡林宝勒,等. 骶骨前孔区应用解剖学研究. 中国临床解剖学杂志, 2004, 22(2): 143-147.
- 4 全仁夫,胡文跃,孙观荣,等. 骶骨骨折伴神经根损伤的手术治疗. 骨与关节损伤杂志, 2002, 17(2): 100-101.
- 5 路青林,刘庆胜,李树锋,等. 骶骨骨折伴神经损伤的治疗. 中华创伤骨科杂志, 2005, 7(1): 91-92.
- 6 白靖平,党耕町,锡林宝勒,等. 陈旧性 II 型骶骨骨折合并骶神经损伤的诊断与治疗. 中华骨科杂志, 2004, 24(9): 551-556.

(收稿日期: 2005-04-26 本文编辑: 连智华)

• 短篇报道 •

指骨牵引治疗 Bennett 骨折

郑仁德, 赵龙

(石嘴山市第二人民医院骨科, 宁夏 石嘴山 753000)

1998 年至 2004 年, 我科对 36 例 Bennett 骨折采用指骨牵引治疗, 效果满意, 报告如下。

1 临床资料

本组 36 例, 均为男性; 年龄 21~35 岁; 受伤时间 1 h~11 d, 平均 18 h。致伤原因多为握拳位撞击伤; 掌骨基底部内侧所形成的三角形骨块占关节面小于 1/5 者 9 例, 1/5~1/4 之间 8 例, 1/4~1/3 之间 6 例, 1/3 以上者 13 例。

2 治疗方法

患指指根阻滞麻醉, 用手摇钻在拇指远节指骨基底钻入直径 0.8 mm 克氏针 1 枚, 用钢丝钳剪短, 两侧露出皮外 5 mm, 患指前臂石膏管型外固定, 管型远侧缘达掌指关节, 并将拇指固定于外展位, 用 8 号钢丝弯成弓形, 宽度正好位于拇指两侧, 钢丝两端固定在石膏管型中。用回形针自制马蹄牵引弓, 弓的两脚勾在克氏针两端上, 弓底用橡皮筋挂在弓形钢丝上, 橡皮筋的松紧度以牵引骨折复位为度。固定完成后摄 X 线片, 如骨折未复位, 可适当收紧橡皮筋, 或调整钢丝角度。

4 周后拆除牵引, 功能锻炼。

3 结果

疗效评定标准: 优, 骨折于解剖位愈合良好, 第一腕掌关

节灵活, 恢复正常功能, 无痛, 有力; 良, 骨折愈合良好, 腕掌关节功能恢复 80% 以上, 无痛, 有力; 可, 骨折愈合, 腕掌关节功能恢复 60%~80%, 稍有疼痛, 略感无力; 差, 骨折不愈合或畸形愈合, 腕掌关节功能活动明显受限, 且力弱。本组 36 例均达到一次性复位, 28 例获得随访, 8 例因与患者失去联系无法随访。优 24 例, 良 2 例, 差 2 例。

4 讨论

Bennett 骨折易复位不易固定。传统悬吊牵引治疗, 将拇指、第一掌骨、大多角骨和桡骨在一条直线上牵引很容易复位。但悬吊牵引胶布容易脱落, 且卧位、坐位、站立时经常改变牵引方向和力量, 不能保持持续牵引。指骨牵引的着力点近于掌骨本身, 牢固, 力量恒定, 通过向外侧及远方的牵引作用, 既可对抗向近端回缩的作用, 又可对抗向外侧脱位的趋势。橡皮筋、牵引弓具有弹性固定效果, 不仅可用于调整复位, 而且在固定期间允许拇指有一定的活动, 可以预防肌腱粘连, 关节僵直, 对关节功能的早期恢复具有积极作用。虽然穿针部远离骨折端, 但仍需遵循无菌操作原则, 预防针孔感染。

(收稿日期: 2005-01-17 本文编辑: 王宏)