DOI:10.16016/j.1000-5404.1999.07.019

实验性胫骨骨折加压外固定的生物力学分析

王序全* 李起鸿 吴梅英 (第三军医大学附属西南医院骨科)重庆,400038

提 要 目的:为临床骨折加压外固定治疗提供依据。方法:以人离体胫骨中部横行和斜行骨折行半环槽式外固定器固定为实验模型,通过电测法观测不同加压量固定的不同类型的骨折在不同等级的轴向加载时骨表面的应力值、固定器应力遮挡率及骨折端位移变化。结果:横行骨折在加压固定量为147～294 N时、斜行骨折为147 N时,骨表面应力水平与正常无显著性差异,且骨折端未见明显错位或畸形,固定器应力遮挡率仅为1.818%左右。结论:适当的加压固定可使骨折造成的局部异常力学状态被有效纠正。

关键词 胫骨骨折;加压固定;生物力学

中图法分类号 R683.42;R687.3

随着生物力学研究的不断深入,固定对骨折部的力学环境及骨折愈合的相关影响已受广泛关注[1,2]。用外固定器加压固定能有效促进骨愈合业已被临床所证实[3],但适宜的加压量如何选择或评定仍众说纷纭[4~8]。本试验拟通过对人体胫骨骨折经半环槽式外固定器固定后的力学特征进行检测分析,观测不同类型骨折在不同轴向加压固定状态时的应力场变化,为临床骨折加压外固定治疗提供参考。

1 材料与方法

1.1 标本来源及保存

完整胫骨标本20根取自10例急性外伤致死的男性健康成人新鲜尸体,年龄18～30岁。均于死亡后6 h内取材,清除所有软组织,X线检查除外异常病变,Ringer液沙布包裹,密封后存于－20℃冰箱内备用。

1.2 仪器设备

JY-25型静态电阻应变仪,P20R-20型预调平衡箱(上海);纸基浸胶箔式电阻应变片(浙江);多功能力学测试机、位移传感器、外固定器螺杆拉压传感器(重庆大学);半环槽式外固定器(本校)。

1.3 试验方法

标本分为4组,每组5例,其中A组为对照组。各固定组在测试前通过调节外固定器对骨或骨折端施加4种不同大小的轴向加压量,即加压固定,见表1。

表1 胫骨标本分组情况

Tab 1 Groups of tibial specimens

Compress of fixator(N)	Intact bone (group A)	Intact fixating bone (group B)	Transverse fracture bone (group C)	Oblique fracture bone (group D)
0	－	＋	＋	＋
147	－	＋	＋	＋
294	－	＋	＋	＋
588	－	＋	＋	＋

＋:compressive fixating; －:non-fixating

测试前,室温下复温2 h左右,于标本两端之力线点上各安放一钢珠球,以便试验加载。固定器固定于标本中段,克氏针∅2.5 mm,3根螺杆均装拉压传感器。C、D组分别用电锯于胫骨中点横形及与胫骨力线呈内上外下45°斜形截骨,斜形截骨部安装侧方加压器。于中点线或截骨线上1 cm处的骨内、外及后侧表面平行胫骨力线各粘贴应变片1片,与预调平衡箱及电阻应变仪相接,采用电测法测定。标本置力学测试机中,对骨-固定器复合体行轴向分级等速加载,各组分别以0、147、294和588 N 4个等级加载测试。每次加载2 min内完成。全部实验在室温18～20℃,相对湿度95%～100%下完成。观测指标:①骨表面各点应力值;②固定器应力遮挡率 $\eta=$(1-骨折端受力值/总载荷)×100%＝固定器螺杆受力值总和/相应总载荷;③骨断端横向位移。

1.4 数据处理

所获数据用本校数理统计学教研室提供的"SPMR"医用统计程序包进行处理分析。

2 结果

2.1 胫骨中部骨表面应力值变化

胫骨表面应力值分布结果显示,完整胫骨干中部骨表面应

* 王序全,男,33岁,主治医师,博士

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力在内侧为张应力，外侧及后侧为压应力。

B 组 4 种加压固定量在骨-外固定器复合体负载时骨表面各点的应力值与 A 组相应点的应力值间差异不显著（$P>0.05$），见图 1。

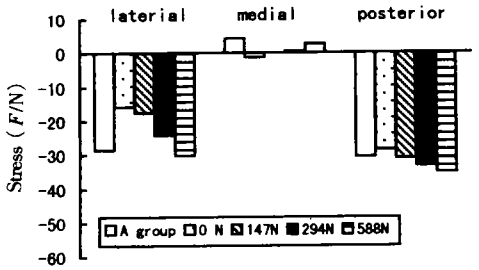


图 1　复合体负载 588 N 时 B 组 4 种加压量的应力值变化

Fig 1　Changes of bone surface stress in group B under loading of 588 N

C 组在骨-外固定器复合体负载时的骨表面应力场与 A 组比，骨折加压固定量为 147 N 及 294 N 时差异无显著性（$P>0.05$），而加压量为 0 时差异显著（$P<0.05$），在加压量为 588 N 时差异非常显著（$P<0.01$），见图 2。

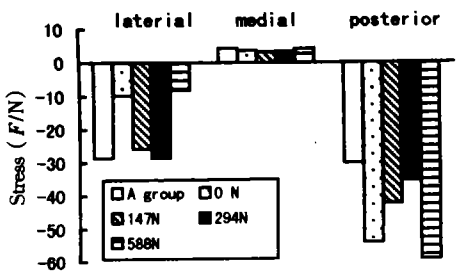


图 2　复合体负载 588 N 时 C 组 4 种加压量的应力值变化

Fig 2　Changes of bone surface stress in group C under loading of 588 N

在加压固定中，当加压固定量达 588 N 时 D 组骨折端出现明显畸形，此时对骨-外固定器复合体加载测定的骨表面应力场已无实际意义。另几种固定加压量中，加压量为 147 N 时的骨表面应力场与 A 组比较差异不显著（$P>0.05$），而其它各加压固定量差异均非常显著（$P<0.01$），见图 3。

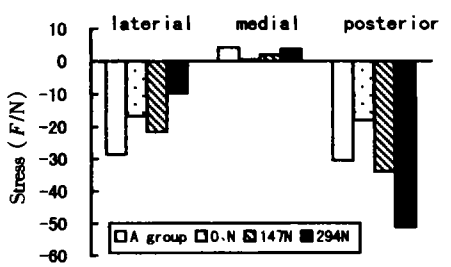


图 3　复合体负载 588 N 时 D 组 3 种加压量的应力值变化

Fig 3　Changes of bone surface stress in group D under loading of 588 N

2.2　外固定器应力遮挡率

不同固定组中，固定器应力遮挡率不同，D 组＞C 组＞B 组。固定器最高应力遮挡率 $\eta=3.121\%$（D 组加压量为 0 时），最低为 0.357%（B 组加压量为 588 N 时），平均 1.818%。不同加压固定量时，随加压量加大，应力遮挡率逐渐降低。

2.3　骨折端相对位移

在对骨折行加压固定时 C 组骨折端未见明显移位及成角畸形，D 组在固定加压量为 0～294 N 时骨折端尚稳定，但当固定加压量达 588 N 时骨折端出现明显移位及成角畸形。在骨-固定器复合体负载实验中，B、C 组及 D 组之 0～147 N 加压固定量组未见异常。

3　讨论

局部力学环境的优化是骨折良好愈合的重要条件之一，不少骨折延迟愈合和骨折不连接是由于不适宜的力学环境所致。实验研究及临床观察证实[3,4]，加压固定是改善力学环境，促进骨折愈合的有效手段之一。一方面，适量的加压能减小骨断端间隙，增加断端间静态摩擦力，从而加大骨折的固定刚度，从机械力学上使骨断端更稳定，有利于骨痂形成及爬行替代作用；另一方面，加压固定能降低固定物应力遮挡率，有利骨折端应力传导和刺激，有增强骨代谢的生物学效应。有研究表明[5]，骨折加压固定形成的压应力可通过应力电位的作用诱发细胞增殖，促进骨折愈合。虽然该作用的机制尚不清楚，但适当的加压固定能促进骨折愈合的观点已为人们所接受。

骨折加压固定有接骨板、髓内针及外固定器加压等方法。接骨板固定有损骨外膜的血运，髓内针固定又有损骨内膜及髓腔血运，均影响骨折愈合[6]。而外固定器固定为病灶外穿针，不增加局部创伤，对骨折部血运干扰小，因而在生物学治疗上具有明显优势[3]。另外，接骨板及髓内针固定存在应力保护现象，骨折端初次加压后，断端微小接触点因加压而逐渐崩溃及吸收，使断端出现间隙，实际上达不到持续加压的目的[6]。外固定器则不同，其可调节特性不仅能使骨折端持续加压，而且可根据需要随时调整压力大小。

由于实验方法不同，以及骨折愈合不同时期刚度逐渐增强的愈合区组织对应力刺激水平的要求不尽相同，因此目前国内外尚未就骨折适宜加压量水平作出理想的评定标准。Hart[4]、Laros 等[6]倾向于生理性或轻度加压（1.9 kg/cm² 左右），谭瑞诚等[7]认为犬股骨骨折以 3～4 倍于动物体重之加压量（0.457 kg/mm²）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

最佳，而王以进等[8]认为人股骨骨折加压固定的应力值应为17 kg/mm^{2}左右。显然，不同动物及人的实验结果差异较大，这与研究对象的行走方式及骨骼构成不同有关，因此要慎用动物的实验结果来恒量人的加压量大小。如以人体正常负重状态下骨骼的力学状态为标准来评定骨折加压固定量的大小可能更具合理性。本实验以此为出发点，对正常胫骨及骨折固定后胫骨表面的应力状态变化进行了对比分析。结果发现，胫骨横行骨折采用半环槽式外固定器轴向加压147～294 N(约为人体重的1/4～1/2左右)固定及斜行骨折轴向加压147 N(约人体重的1/4左右)固定后，骨折部骨表面的应力水平与正常水平差异无显著性，且骨折端未见明显错位或畸形，说明用上述加压量固定时骨折端不仅有良好的稳定性，而且由骨折所造成的不利于骨折愈合的局部异常力学状态亦被有效纠正。该结果在一定程度上为骨外固定条件下骨折愈合的最适加压量(或最佳力学环境)提供了参考。

本实验结果还表明，正常骨固定前后(即A、B组之间)骨表面应力场差异无显著性，说明所用外固定器对骨应力场无明显干扰作用，这是由于该固定器采用细克氏针多平面交叉穿放，使固定的骨段受力均匀，避免了偏心性受力或应力集中现象发生。同时细克氏针的低弯曲刚度及固定器的轴向加压作用使固定器的应力遮挡作用极低，仅1.818%(0.357%～3.121%)左右，有利于骨折端的应力传导和刺激，符合骨折治疗的"弹性固定准则"，对防止因固定所致的骨质疏松或骨折延缓愈合有重要意义[9]。

参考文献

1 Chao E Y S, Aro H T, Lewallen D G, *et al*. The effect of rigidity on fracture healing in external fixation. Clin Orthop, 1989, 241: 24

2 Foux A, Yeadon A J, Uhthoff H K. Improved fracture healing with less rigid plates. Clin Orthop, 1997, 339: 232

3 李起鸿，马树枝，周仲安，等. 下肢短缩伴骨不连与骨缺损患者的加压外固定与肢体延长治疗. 中华外科杂志，1990，28(3)：161

4 Hart M B, Wu J J, Chao E Y S, *et al*. External skeletal fixation of canine tibial osteotomies: Compression compared with no compression. J Bone Joint Surg(Am), 1985, 67(4): 598

5 李建福，李起鸿. 兔胫骨应力电位与骨折愈合相关性研究. 中华实验外科杂志，1996，13(3)：178

6 Laros G S. Fracture healing: Compression V S fixation. Arch Surg, 1974, 108: 698

7 谭瑞诚，郭仁棣，张宏民，等. 骨折愈合的动物实验研究. 中国生物医学工程学报，1985，4(2)：71

8 王以进，王公林，赵关泉，等. 骨折外固定支架的生物力学原理与实验. 上海生物医学工程通讯，1985，17(4)：28

9 Chase L. The mechanical and morphological properties of bone beneath internal fixation plates of differing rigidity. J Orthop Res, 1989, 7(2): 170

(收稿：1998-07-12；修回：1999-01-07)

(编辑 王 红)

Biomechanical analysis of compressive external fixation in treatment of tibial fracture

Wang Xuquan, Li Qihong, Wu Meiying (Department of Orthopedics, Southwest Hospital, Third Military Medical University, Chongqing, 400038)

Abstract Objective: To provide a experimental basis for management of fracture with compressive external fixation. Methods: After the middle transverse or oblique fracture of human tibia was fixed with different kinds of compressive external fixation, changes in the bone surface stress, stress－protecting rate of fixator and movement of fracture segment under different loads were determined with electrometric method. Results: When the fixing compress was 147～294 N in transverse fracture or 147 N in oblique fracture, the level of bone surface stress was similar to that in the control group and no movement of fracture segment occurred. Stress－protecting rate of the fixator was about 1.818%. Conclusion: The abnormal bone surface stress caused by fracture can be corrected by appropriate compressive fixation.

Key words tibia; fracture; compressive fixation; biomechanics

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net