

·基础研究·

人膝关节后交叉韧带重建后康复治疗的生物力学研究

陶 澄¹ 兰纯娜² 何爱咏¹ 王万春¹

摘要 目的:通过对人膝关节后交叉韧带(PCL)及移植物行生物力学测试,探讨韧带张力与屈膝角度和负荷的关系,为临床康复治疗提供理论依据。**方法:**应用力学实验机对 8 例新鲜冰冻人膝关节标本进行生物力学实验。在 0°、30°、60°、90°、120°五种屈膝角度下,先测量完整 PCL 在人膝关节未受力和胫骨近端受到 100N 后向负荷时韧带上纤维的应变变化情况。然后切断 PCL,取髌骨-髌腱-胫骨作为移植物行 PCL 单束纤维重建术,按同样的方法测量膝关节未受力和胫骨近端受到后向负荷时重建韧带上纤维应变。**结果:**膝关节未受到外力时,在屈曲 0°、30°、60°、90°、120°时,正常 PCL 前外束的应变量分别为 0、8.4、8.9、11.7、-3.2 $\mu\epsilon$; 胫骨上端受到 100N 后向力量时五种角度下正常 PCL 前外束的应变量分别为 -27.2、9.5、87.5、97.5、-65.6 $\mu\epsilon$; PCL 单束重建后,膝关节未受到外力时移植物纤维的应变分别为 0、10.6、18.6、20.7、-6.5 $\mu\epsilon$ 。胫骨上端受到 100N 后向力量时,重建移植物的应变量分别为 120.7、142.1、203.3、217.1、29.7 $\mu\epsilon$ 。与受力前比较,在各个屈膝角度,差异有显著性意义($P<0.01$)。**结论:**膝关节未受到外力时,PCL 几乎没有受到力。膝关节受到后向力量时,移植物张力增加。在 0—90°范围内随屈膝角度增加 PCL 应变逐渐增加,屈膝 120°时韧带最松弛。

关键词 后交叉韧带; 生物力学; 重建; 康复

中图分类号: R686, R49 文献标识码: A 文章编号: 1001-1242(2007)-07-0602-03

The biomechanics of rehabilitation therapy in reconstruction of posterior cruciate ligament in human knee/
TAO Cheng, LAN Cunna, HE Aiyong, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2007, 22(7):602—604

Abstract Objective: To study the relations among the knee flexion angles, tensile strength of ligaments and external force by measuring the biomechanics properties of posterior cruciate ligament and graft in human knee to provide theory evidences for rehabilitation therapy in PCL injury. **Method:** Eight fresh -frozen human knee specimens with intact PCL were tested while there is no external-force applied, then 100N posterior force was applied to the proximal part of tibia, bundle strain were measured as the knee flexion at 0°, 30°, 60°, 90°, 120°. After that, PCL was cut and one-bundle PCL reconstruction were done with the patella-patellar tendon-tibia as the graft. Bundle strains was measured with the same way as the knee flexion at different angles without/with external force. **Result:** While there was no external-force applied, the strain in anterolateral band of normal PCL were 0, 8.4, 8.9, 11.7, -3.2 $\mu\epsilon$ respectively while the flexion angle were 0°, 30°, 60°, 90°, 120°; after one-bundle PCL reconstruction, the strain of the graft fiber were 0, 10.6, 18.6, 20.7, -6.5 $\mu\epsilon$ correspondently. While 100N posterior force was applied on the upper part of tibia, the strain in anterolateral band of normal PCL were -27.2, 9.5, 87.5, 97.5, -65.6 $\mu\epsilon$ respectively and the strain of graft after reconstruction were 120.7, 142.1, 203.3, 217.1, 29.7 $\mu\epsilon$ while the flexion angle were 0°, 30°, 60°, 90°, 120° correspondently. **Conclusion:** There is little tension in ligament while no external force is applied on knee joint. The strain of PCL increases corresponding with the increase of flexion angles within 0—90°, but the strain release while flexion angle is 120°. The tension of graft increases while posterior force is applied on knee joint.

Author's address Dept. of Orthopaedics, the Second Xiangya Hospital, Central South University, Hunan, 410011

Key words posterior cruciate ligament; biomechanics; reconstruction; rehabilitation

后交叉韧带 (posterior cruciate ligament, PCL) 损伤常见于运动损伤和交通事故。PCL 损伤后康复治疗是很重要的。通过一定的康复程序,可以使机体尽快提高对损伤的适应性及发展代偿功能,改善关节稳定性,增强关节本体感觉功能,以至最终恢复正常运动水平,达到事半功倍的效果。但康复科与骨科医师在功能训练时机方面存在争议。本文通过对人膝关节 PCL 及移植韧带进行生物力学研究,为早期

康复治疗提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 人膝关节标本: 获赠人膝关节标本共 8 具, 左

1 湖南中南大学湘雅二医院骨科, 长沙人民路 86 号, 410011

2 湖南中南大学湘雅二医院康复科

作者简介: 陶澄, 男, 主治医师, 博士

收稿日期: 2006-09-11

右各 4 具, 男性 6 具, 女性 2 具, 生前均为健康青年, 死亡年龄为 20—31 岁(平均 24.5 岁), 标本股骨段长 20cm, 胫骨段长 20cm。取下后保留完整皮肤肌肉, 编号后用塑料袋密封, 置于-20℃冰箱中冷冻保存 20—30 天不等。实验前一天, 将标本移至 5℃冰箱冷藏室中解冻, 去除皮肤、肌肉、保留完整关节囊及内外侧副韧带, 腓骨上段用两枚皮质骨螺钉与胫骨上端固定, 外用湿生理盐水纱布覆盖, 防止水分丢失。

1.1.2 Instron 8032 型电液伺服实验机。

1.1.3 电阻应变片: 中航电测仪器股份有限公司生产, 型号为 BE120-2AA, 敏感栅尺寸为 1.9×2.2 mm, 基底尺寸为 6.2×3.4mm。

1.1.4 自制夹具一套: 利于更好固定膝关节, 供 Instron 实验机夹持。

1.2 实验方法

1.2.1 标本准备: 将 8 具人膝关节标本常温下解冻后, 在环境温度为 23℃、湿度为 70% 的条件下去除关节囊外软组织后, 切开膝关节后关节囊, 暴露 PCL 及其在胫骨和股骨内髁外侧面的附着部分。将韧带表面的滑膜层切除后, 可以辨认出 PCL 的前外束和后内束纤维。将 1 片应变片贴于前外束纤维的表面。注意选择韧带平坦面, 使应变片与之贴附良好。应变片的位置位于韧带后方, 距胫骨止点 8mm 处。用自制夹具固定好胫、股骨后, 置于 Instron 实验机上, 准备测试。

1.2.2 PCL 完整时的生物力学测试: 将上述膝关节标本固定于实验机上, 仅改变屈膝度数, 测试膝关节未受外力时, 位于屈膝 0°、30°、60°、90°、120°时 PCL 纤维上应变。然后通过实验机于胫骨近端以 5N/S 的速度施予后向力量至 100N 时, 测试 PCL 完整时膝关节位于 0°、30°、60°、90°、120°屈曲时纤维应变。

1.2.3 PCL 重建手术: 将人膝关节 PCL 切除后, 取髌骨-髌腱中 1/3-胫骨(B-PT-B)作为移植物, 髌骨块大小为厚 5mm、宽 10mm、长 25mm, 髌腱宽 10mm, 全层厚。依临床常规方法行单隧道单束重建术, 即在胫骨和股骨内髁各钻直径 10mm 隧道, 将移植物拉入隧道内, 用 Φ9mm×20mm 钛质中空挤压螺钉固定骨块隧道内。

1.2.4 PCL 重建后生物力学测试: 在手术后的移植物表面同样部位贴应变片, 将膝关节标本固定于实验机上, 改变屈膝度数, 测试膝关节位于 0°—120°、膝关节未受到后向力量时移植韧带应变。然后于胫骨近端以 5N/S 的速度施予后向力量至 100N 时, 测试膝关节位于 0°、30°、60°、90°、120°时纤维应变。

1.3 统计学分析

计量资料以均数±标准差表示; 比较应变变化时, 配对样本比较采用 Wilcoxon 秩检验, $P<0.05$ 为差异有显著性。采用 SPSS11.0 版软件。

2 结果

2.1 屈膝角度与应变的关系

对于正常膝关节, 在不受到外力时, 随着屈膝角度的变化, PCL 表面纤维的应变变化较小。0°、30°、60°、90°、120°时 PCL 前外束的应变量分别为 0.0、8.4、8.9、11.7、-3.2 $\mu\epsilon$; 屈膝 120°时, 前外束应变为负应变, 说明出现韧带松弛, 发生卸载。行 PCL 单束重建后, 胫骨受到后向外力时, 移植纤维的应变同样较小, 0—120°时分别为 0、10.6、18.6、20.7、-6.5 $\mu\epsilon$ 。屈膝 120°时, 表现为负应变, 韧带松弛。

2.2 后向负荷与应变的关系

胫骨上端受到 100N 后向力量时, 完整 PCL 的膝关节位于屈曲 0°、30°、60°、90°、120°时前外束的应变量分别为 -27.2、9.5、87.5、97.5、-65.6 $\mu\epsilon$, 可见前外束在 0°时松弛, 30°时开始出现加载, 屈膝 60°—90°时, 应变量达到最大, 而 120°时出现卸载, 韧带松弛。与受力前比较, 屈膝 0°、30°时比较差异无显著性意义 ($P>0.05$), 其他角度时 $P<0.01$, 差异有显著性意义(表 1)。

行单束重建后, 胫骨上端受到 100N 后向力量时, 0°、30°、60°、90°、120°时移植物的应变量分别为 120.7、142.1、203.3、217.1、29.7 $\mu\epsilon$, 移植物的应变变化的总体趋势与正常时前外束相似, 即在屈膝 0°—90°范围内时, 随角度增加应变逐渐增加, 屈膝 120°时, 应变量迅速下降。与受力前比较, 在各个屈膝角度, $P<0.01$, 差异有显著性意义(表 2)。

表 1 正常 PCL 受力前、后不同角度下的韧带的应变 ($\bar{x}\pm s, \mu\epsilon$)

负荷	0°	30°	60°	90°	120°
0 N	0.0±0.0	8.7±4.6	8.9±4.1	11.7±3.3	-1.9±3.5
100 N	-27.2±23.4	9.5±18.8	87.5±13.2 ^①	95.8±14.3 ^①	-65.6±14.4 ^①

受力前、后比较: 屈膝 0°, $Z=-1.86$ $P>0.05$; 屈膝 30°, $Z=-0.34$ $P>0.05$; 其他角度^① $P<0.01$

表 2 重建 PCL 受力前、后不同角度下的韧带的应变 ($\bar{x}\pm s, \mu\epsilon$)

负荷	0°	30°	60°	90°	120°
0 N	0.0±0.0	25.6±8.8	31.5±9.2	36.8±11.3	-5.6±4.4
100 N	56.7±11.8 ^①	75.2±17.8 ^①	153.3±28.4 ^①	186.8±22.8 ^①	29.7±14.4 ^①

①与受力前比较, 在各个屈膝角度 $P<0.01$

3 讨论

对于 PCL 损伤后的非手术和手术治疗来说, 康复治疗都是很重要的。随着国内外关节康复治疗的研究进展迅速, 已经形成了一套比较完整的 PCL 重建术后的康复治疗计划^[1], 即术后尽早行功能锻炼。

术后 2—3 周是最重要的时期, 有利于减轻疼痛、防止关节囊挛缩、减少瘢痕形成, 有利于关节功能的恢复^[2]。虽然在康复医学界已经有了 PCL 重建术后的康复治疗计划, 但是很多骨科医师却觉得难以接受这套方案, 认为术后过早开始关节活动度的训练, 移植植物承受的应力较大, 会对移植韧带固定、重塑和成熟产生生物学影响。早期康复治疗应将患者固定于伸直位, 避免膝关节屈曲功能锻炼。我们研究了 PCL 和移植韧带生物力学特征, 为功能训练提供了理论依据。

PCL 重建术后的康复治疗应重点放在避免移植植物上张力过大, 直到 PCL 植入物愈合。PCL 损伤后保守治疗或行重建手术后的康复治疗包括股四头肌肌力训练和活动范围的练习。Li 等^[3]人对 8 个人膝关节进行生物力学测试, 发现在屈曲 60° 范围内股四头肌肌肉力量的增强有助于维持关节稳定。PCL 重建术后早期行股四头肌功能锻炼, 有利于恢复正常肌力。多数文献对于早期行股四头肌肌力训练达成一致, 但对于早期关节活动范围的训练有争议, 认为急性 PCL 损伤行保守治疗时或重建手术后应将膝固定于伸直位 2—4 周^[4-5]。我们的实验显示胫骨未受到后向力量时, 正常 PCL 和移植植物只受到轻微张力, 且韧带应变随角度的变化是很小的。我们认为在未负重情况下, 术后早期膝关节 0—60° 范围内被动屈曲锻炼, 对于移植韧带张力的影响较小, 不至于导致手术失败, 且有利于防止关节内粘连。当胫骨近端受到后向负荷时, 韧带张力明显增加, 所以术后一定要注意避免后向负荷, 包括小腿自身重力, 尽可能取侧卧位和俯卧位, 加强股四头肌肌力训练可以防止胫骨后移。韧带愈合后行腘绳肌锻炼, 使膝关节屈伸肌力比值趋向平衡, 进而提高膝关节的动力性稳定^[6]。目前较常用的康复程序是^[1]: 术后第一天开始股四头肌肌力训练, 早期进行关节被动活动, 屈伸范围要求第 1 周达到 0°—60°, 第 2 周达到 0°—90°, 以后逐渐增加至正常; 主动关节活动度在第 2 周为 0°—30°, 第 4 周达到 0°—60°, 第 7 周达到 0°—90°, 第 8 周放开支具开始练习行走; 术后负重训练应在第 6 周负重 25% 体重, 第 7 周负 50% 体重, 第 8 周负 75% 体重, 完全负重应在手术 3 个月。也有人主张术后第二天在支具的保护下患肢负重站立^[7]。由于韧带初步愈合后进入塑形期, 在应力作用下, III 型胶原纤维表达逐渐减少, 最后以 I 型胶原纤维表达为主。负重可以增加应力刺激, 增强韧带愈合强度。尽管目前保守和激进的康复没有一个明确的界定, 根据生物力学研究结果, 我们认为行 PCL 重建术后, 早期用调节支具控制膝关节角度, 屈膝角

度 < 60° 负重是有益无害的。韧带愈合后, 完全负重是必须的, 不必 3 个月。早期完全负重可有效预防关节软骨因缺乏承重刺激引起的退行性变, 减轻术后制动造成的肌萎缩和本体感觉的过度下降^[8]。

实验还发现, 无论是正常 PCL 还是重建的 PCL, 在不受外力时屈膝 120° 时应变最小, 其次为 0° 位, 说明 120° 时韧带最松弛。Li 等^[9]人的实验也证明膝关节极度屈曲时 PCL 的张力明显减小, 几乎没有作用。PCL 损伤后行保守治疗或 PCL 重建术后, 如果单纯为了防止韧带紧张, 利于重建物的愈合, 理论上应将膝关节固定于过屈位。而目前绝大多数文献均认为膝关节应固定于伸直位, 其理由是伸直位时膝关节内侧和后外侧韧带结构紧张, 减轻了韧带的非正常应力^[5]。我们认为术后固定于伸膝位的理由是: ①在屈膝 90° 以上时, 虽然 PCL 的张力小, 但内、外侧韧带及后关节囊均处于松弛状态, 这些次要限制因素没有发挥作用, 且长时间固定后关节易发生挛缩, 出现关节伸直功能受限。②过屈位固定膝关节患者难以忍受, 不便于护理。③实验证明在不受外力时, 韧带上应变随角度变化是很小的, 固定于 0° 或 120° 都不会出现因韧带紧张而导致手术失败。膝关节固定于伸直位是一个权衡利弊后的选择, 而不是因为伸直位时韧带最松弛。

目前还很难找到一种简明、全面的运动创伤康复程序的模式, 虽然有许多关于 PCL 损伤后如何进行功能锻炼康复治疗的论述, 但缺乏一种能使临床医生完全遵照执行的康复模式。我们认为无论患者的情况如何, 早期被动活动膝关节不会出现因移植韧带上张力过大而导致的移植植物疲劳、松动。当然, 最有效的康复程序应该是根据患者的实际情况, 制订个性化的训练方案。

参考文献

- [1] 王惠芳. 膝关节镜下修复重建手术后的康复 [J]. 现代康复, 2000, 4(1): 26—27.
- [2] 伍刚, 张长杰, 汤长发. 膝关节前交叉韧带损伤与康复 [J]. 中国康复医学杂志, 2004, 19(2): 154—155.
- [3] Li G, Gill TJ, DeFrate LE, et al. Biomechanical consequences of PCL deficiency in the knee under simulated muscle loads—an in vitro experimental study [J]. J Orthop Res, 2002, 20(4): 887—892.
- [4] 狄正林, 章军辉, 何志勇, 等. 关节镜下应用 Endopearl 与 Intrafix 固定四股半腱肌腱重建膝关节后交叉韧带 [J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2006, 21(4): 274—276.
- [5] 赵金忠, 蒋垚, 沈灏, 等. 采用腘绳肌腱和微型钢板纽扣重建后十字韧带后的康复训练 [J]. 中国临床康复, 2006, 6(24): 3684—3685.
- [6] 钱开林, 王彤, 张勤. 腘绳肌练习对脑卒中后膝关节稳定性的影响 [J]. 中国康复医学杂志, 2004, 19(11): 830—831, 849.
- [7] 李棋, 李箭. 膝关节交叉韧带修复重建治疗中的康复干预 [J]. 中国临床康复, 2005, 9(18): 185—187.
- [8] 葛杰, 周谋望, 敖英芳, 等. 关节镜下膝前交叉韧带重建术后的康复 [J]. 中国康复医学杂志, 2003, 18(12): 743—746.
- [9] Li G, Zayontz S, Most E, et al. In situ forces of the anterior and posterior cruciate ligaments in high knee flexion: an in vitro investigation [J]. J Orthop Res, 2004, 22(2): 293—297.