

## 前交叉韧带的生物力学研究

陈执平 张安祯 周金水\*

福建中医学院骨伤研究所 (福州 350003)

**【摘要】 目的** 研究前交叉韧带 (ACL) 在维持膝关节前后稳定和旋转稳定中的作用。**方法** 标本取自新鲜尸体的 5 只膝关节, 分别在 ACL 完整和切断的情况下对标本施加股四头肌力和胫股关节作用力, 采用应变计测量技术和计算机图形处理技术对受载膝关节位移和转角进行测量和图像重建。**结果** 在负载作用下, ACL 切断与否对膝关节内、外旋角度的影响很小, 但对胫骨前后位移的影响很大。**结论** ACL 是维持膝关节前后稳定的重要结构。

**【关键词】** 前交叉韧带 生物力学 应变计测量技术 膝关节稳定性

**Biomechanical Study of Anterior Cruciate Ligament** Chen Zhiping, Zhang Anzhen, Zhou Jinshui *Institute of Orthopaedics and Traumatology, Fujian College of Traditional Chinese Medicine (Fuzhou 350003)*

**【Abstract】 Aim** To study the effect of anterior cruciate ligament (ACL) on the stability of knee joint. **Methods** Five knee joints, taken from fresh cadavers, were used. The contraction force of femoral que adriceps muscle and the action force of tibiofemoral joint were applied to the knee joint with intact ACL and then with amputated ACL, and the anteroposterior displacement and rotation angle of the knee joints were measured with strain measurement technique and reconstructed the image with computer image processing technique. **Results** On loading, whether or not the ACL was amputated, the changes of rotation angle were small but the changes of anteroposterial displacement were large. **Conclusion** ACL is an important structure for maintaining the anteroposterial stability of the knee joint.

**【Key words】** Anterior cruciate ligament Biomechanics Strain measurement Stability of knee joint

膝关节为全身最大、最复杂的关节。在膝关节两端分别有股骨和胫骨构成的力杠杆, 在活动中受到比其它关节更大的应力。保持膝关节力学平衡, 对膝关节的稳定和生理功能的正常至关重要。但膝关节任何结构的异常都可导致膝关节力学失衡。交叉韧带是膝关节重要的静力性稳定结构, 交叉韧带损伤是膝关节内严重损伤之一, 是常见疾患, 而前交叉韧带 (ACL) 损伤则更为多见。国内外文献涉及临床研究的多, 而建立在生物力学实验基础之上的研究却少见报道。从国外文献看, 对 ACL 的解剖学或力学上的研究大多忽视了生理负载的作用<sup>[1~3]</sup>, 然而, 生理负载的施加与否, 对膝关节生物力学分析影响是很大的。但是要完全模拟活体膝关节的生理负载目前尚不可能, 为此, 本实验采用新鲜人体膝关节标本, 突出重点地对受试膝关节模拟施加股四头肌力及胫股关节压力等生理负载, 研究 ACL 正常及切断后膝关节的生物力学改变, 推测膝关节的病损性质, 希望对膝关节基础生物力学及膝关节损伤的诊断和治疗能有所帮助。

### 材料和方法

采用 5 只冰冻的新鲜人体膝关节。标本无病变及损伤, 保留股四头肌、内、外侧副韧带及关节囊等。实验时于室温下自然解冻, 于股骨两髁的后上方将斯氏针贯穿两髁, 使斯氏针中点恰为髁间窝中点, 并以该点为坐标系原点, 以膝关节屈曲角为 0° 时斯氏针方向为 X 轴正向, Y 轴与 X 轴互相垂直, 向前为正, Z 轴向上为正建立空间右旋直角坐标系。根据电桥平衡原理制作滑线电阻式位移传感器与 YJ-5 型静态电阻应变仪连结<sup>[4]</sup>, 测量代表膝关节运动的斯氏针空间坐标, 将传感器所得输入 586 微机, 使用 Vizicad 处理系统及自编软件, 精确地为膝关节三维运动定位, 并提供运动在各坐标平面上的投影。膝关节屈曲角度由电测角仪测量。胫骨插入特制的圆柱形中空夹具中锁定后, 浇入常温固化环氧树脂以坚强固定。用夹具夹紧股四头肌, 通过滑轮装置施加股四头肌最大载荷的 70% 即 880N 拉力<sup>[5]</sup>, 股四头肌夹具可在滑道中滑动以适应膝屈曲角度的改变。同样, 通过滑轮装置施加 700N 的胫股关节

\* 福州市第二人民医院

压力、25N 的股骨剪力及 3N·m 的旋转力矩。本实验先分别对 5 个完好膝关节施加股四头肌拉力、股股关节压力、股骨剪力和旋转力矩，在 0°~105°屈曲范围内每隔 5°测量和计算胫骨与股骨运动相对空间位置，之后切断受试膝关节 ACL，重复进行上述实验步骤。为减少标本的粘弹性作用，实验时先对标本预加 3 次最大载荷，第 3 次时给予 30 秒蠕变时间进一步降低标本的粘弹性作用。

**实验结果**

根据刚体运动学原理，物体的平面运动可分解为刚体上一点的平动和绕该点的转动。本实验将股骨髁的运动在胫骨平台上的投影来描述膝关节的运动。因此，图 1、图 2 表示胫骨前后直向移动情况，表 1、表 2、表 3 反映胫骨的旋转情况。

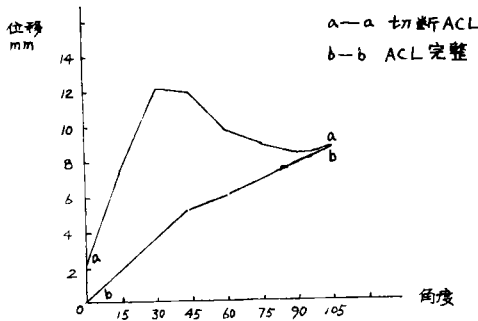


图 1 ACL 完整与切断膝胫骨前后位移与屈曲角度的关系

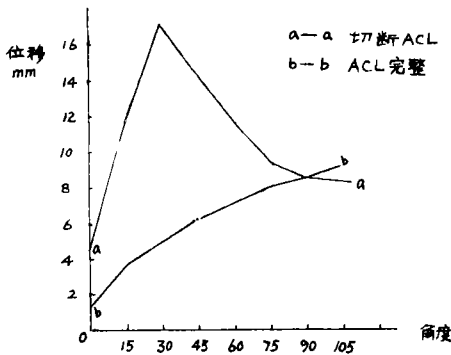


图 2 剪力作用下 ACL 完整与切断膝胫骨前后位移与屈曲角度关系

**讨 论**

从实验结果(图 1)可见，ACL 完整膝在未施加外加载荷时，胫骨相对股骨的前移量随着屈曲角度增加基本上呈线性增长。切断 ACL，则在 0°屈曲位即发生 2.2mm 的初始胫骨相对前移；伴随屈曲角度的增加，前移加大，至 30°时达到最大值 12mm；之后，胫骨前

移量逐渐变小，在 90°屈曲后接近 ACL 完整膝的情况。对比 ACL 完整与切断膝，0°~30°范围内两者胫骨前移量都呈线性增加，不同的仅是后者斜率较大，即前移量变化较大，但 30°后却表现出相反的变化趋势。这种现象产生的原因与股股、髌股关节的复杂形状和复杂运

表 1 未施加旋转力矩时不同屈曲角下胫骨旋转角

屈曲角度	ACL 完整之胫骨旋转角	ACL 切断之胫骨旋转角
0	0	1.1
15	3.6	3.8
30	8.1	6.7
45	11.2	9.9
60	13.0	9.6
75	13.9	12.8
90	14.8	13.7
105	15.1	13.9

表 2 外部力矩作用下 ACL 完整膝不同屈曲角下胫骨旋转角

屈曲角度	股骨内旋力矩作用下胫骨旋转角	股骨外旋力矩作用下胫骨旋转角
0	-1.5	2.2
15	1.3	6.5
30	4.1	10.8
45	7.6	13.5
60	10.2	15.3
75	12.3	16.4
90	13.6	17.1
105	13.9	17.3

表 3 外部力矩作用下 ACL 切断膝不同屈曲角下胫骨旋转角

屈曲角度	股骨内旋力矩作用下胫骨旋转角	股骨外旋力矩作用下胫骨旋转角
0	0	3.3
15	2.3	6.7
30	4.7	9.4
45	7.4	11.9
60	9.6	13.5
75	11.0	14.6
90	12.1	15.3
105	12.6	15.5

动密切相关。正由于如此，髌骨在屈曲活动中的空间位置以及它与胫骨、股骨的相对位置的变化很大，使得起于髌骨止于胫骨的髌韧带张力大小和方向不断改变。屈曲过程中，两股骨髁在股股关节面上呈既滚又滑的运动。我们认为，在膝关节屈曲过程中，使胫骨相对股骨髁前移的力量是髌韧带张力的水平向前分量及髌骨对股骨髌股接触面的向后压力，这种使胫骨相对前移

的力量与 ACL 的限制力量形成动态平衡,维持关节稳定的运动。切断 ACL 后,ACL 限制胫骨相对前移的力量消失,平衡被打破,故在  $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$  区内胫骨前移急剧加大,直至  $30^{\circ}$  时的最大值 12mm。约在膝关节  $30^{\circ}$  屈曲之后,髌骨空间位置及胫股关节相对位置发生改变使得髌韧带张力水平向前分量减少、髌股作用力减小,也就是说使胫骨相对前移的力量减小,于是出现实验结果(图 1)所示的  $30^{\circ}$  后胫骨相对前移逐渐接近 ACL 完整膝的情况。从以上分析看,髌骨在这里起着引导髌韧带张力、髌股作用力大小和方向的作用,因此髌骨正常与否对膝关节的直向稳定是非常重要的,尤其在 ACL 断裂后。图 2 示剪力作用下 ACL 完整膝与切断膝胫骨相对前移与屈曲角的关系。在 ACL 完整膝,剪力作用下胫骨在  $0^{\circ}$  初始状态下即产生 1.4mm 相对前移,之后曲线走势与图 1 无剪载荷条件下 ACL 完整膝曲线十分相近,由此可见在 ACL 完整时,纯剪力对胫骨前后直向位移的影响是很小的。然而,切断 ACL 后,情况不同了,首先,  $0^{\circ}$  胫骨初始相对位移从 ACL 完整膝的 1.4mm 跃升至 ACL 切断膝的 4.6mm,当屈曲角增至  $30^{\circ}$  时位移剧增到最大值 17mm,此时 ACL 完整者与切断者位移相差达 12mm。可见 ACL 切断后,剪力作用对胫骨前后直向位移影响很大。表 1 为未施加旋转力矩时不同屈膝角度下胫骨旋转角度。本实验中,在 ACL 完整条件下测得的胫骨内旋转角较预先估计的小,这可能与本实验对受试标本施加了生理负载有关。实验结果表明 ACL 切断后,除了  $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$  屈曲时旋转角较 ACL 完整膝稍大外,其余都较小,平均小  $1.6^{\circ}$ 。据此认为 ACL 在膝关节旋转中的制导作用是:  $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$  屈曲时限制胫骨内旋,  $15^{\circ}\sim 105^{\circ}$  屈曲中则引导胫骨内旋,并且可见 ACL 对膝关节旋转的作用较小。以上实验没有对膝关节施加外部旋转力矩,但在日常活动中,膝关节是受外部旋转力矩作用的,为此,本实验探讨了外部旋转力矩的作用。表 2 为外部对股骨施加内旋、外旋力矩时对 ACL 完整膝胫骨旋转角度的影响。对比表 1、表 2 可见,对 ACL 完整膝股骨施加外旋力矩引起胫骨内旋角度平均增加  $2.4^{\circ}$ ,施加内旋力矩则使胫骨内旋角度平均减小  $2.3^{\circ}$ 。由表 1、表 3 见,对 ACL 切断膝股骨施加外旋力矩可致胫骨内旋角度平均增加  $1.3^{\circ}$ ,施加内旋力矩则使胫骨内旋角度平均减小  $2.5^{\circ}$ 。以上结果显示,在施加外部力矩的条件下,切断 ACL 与否对膝关节旋转的影响也同样是很不显著的。

总之,ACL 的作用使得股胫关节抗剪切作用的能力大大加强,它对膝关节前后直向稳定是很重要的。相

比之下,ACL 对膝关节旋转稳定性的作用则不明显。对此结论可作如下解释:根据前后交叉韧带的解剖特点,在膝关节伸屈活动中,前后交叉韧带的交叉点所形成的运动轨迹即近于膝关节的暂时运动中心<sup>[10]</sup>。根据力学原理,由 ACL 产生的膝关节内部旋转力矩等于韧带力与该力的作用线至暂时运动中心(转动瞬心)垂直距离的乘积。因股胫关节的旋转运动非定轴转动,而呈既滑又滚运动,故转动瞬心的位置在不同的屈曲角下是不断改变的。由 ACL 起止点的解剖位置及屈伸中股胫关节转动瞬心位置,可以看到在生理活动中,ACL 的旋转力臂是很小的,这样,ACL 所能提供的旋转力矩就非常有限,这就是 ACL 对膝关节的旋转运动影响甚小的原因。从解剖上看,胫骨髁间隆突的形状使膝关节旋转时股骨髁必须滑上胫骨髁间隆突而抬高。在日常生理活动中股胫关节面压力是很大的,股骨髁的上升需要的机械功就比较大。此外,巨大的股胫关节面压力使股骨髁上滑需要克服较大的摩擦力( $f=\mu N$ )。以上两个因素极大地限制了膝关节的旋转。其次,膝关节周围的内外侧副韧带、关节囊、韧带、肌肉等都都对膝关节的旋转起稳定作用。

本研究的主要结论是:单独的 ACL 损伤对膝关节旋转稳定性影响较小,而对直向稳定的影响很大;股胫关节的复杂形状及巨大的关节面压力是膝关节旋转稳定的主要因素。

#### 参考文献

1. Butler DL, Noyes FR, Grood ES. Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. A biomechanical study. *J Bone Joint Surg*, 1980, 62A (2): 259
2. Markolf KL, Graff-Radford A, Amstutz HC. In vivo knee stability. A quantitative assessment using an instrumented clinical testing apparatus. *J Bone Joint Surg*, 1978, 60A (5): 664
3. Noyes FR, Grood ES, Suntay WJ, et al. The three-dimensional laxity of the anterior cruciate deficient knee as determined by clinical laxity tests. *Iowa Orthop J*, 1984, 3 (1): 32
4. 刘烈全. 实验应力分析中的电测法. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 1979. 89
5. 王以进. 骨科生物力学. 第 1 版. 北京: 人民军医出版社, 1989. 307
6. 毛宾尧. 膝关节外科. 第 1 版. 北京: 人民卫生出版社, 1991. 152

(收稿: 1997-10-21 修回: 1998-04-07)