

文章编号: 1004-7220(2007)01-0064-04



## 膝关节前交叉韧带与内侧副韧带粘弹性实验研究

朴成东<sup>1</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 马洪顺<sup>2</sup>

(1. 吉林大学第二医院, 长春 130027; 2. 吉林大学南岭校区工程力学系, 长春 130022)

**摘要:** 目的 研究了新鲜成人尸体膝关节前交叉韧带和内侧副韧带的粘弹性力学性质, 为临床提供生物力学参数依据。方法 对前交叉韧带和内侧副韧带进行应力松弛、蠕变实验。结果 对实验数据进行归一化处理, 得出了归一化应力松弛函数、蠕变函数, 以回归分析的方法处理实验数据, 得出了回归系数和拟合曲线。结论 内侧副韧带 7200s 应力松弛、蠕变量小于前交叉韧带。对实验结果进行分析讨论。

**关键词:** 膝关节; 前交叉韧带; 内侧副韧带; 应力松弛; 蠕变

**中图分类号:** R318.01 **文献标识码:** A

### Experiment study on viscoelasticity of anterior cruciate ligament and medial collateral ligament of knee joint

PIAO Cheng-dong<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, MA Hong-shun<sup>2</sup>. (1. The Second Hospital of Jilin University, Changchun 130027, China; 2. The Mechanical department of Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract: Objective** To make the research on the biomechanical properties and viscoelasticity with fresh adult corpse to provide the biomechanics parameters for clinic. **Method** The stress relaxation and creep tests were made. **Result** The reduced stress relaxation function and creep function were obtained by making the experimental data normalization and then using regression analysis to obtain the coefficient and fitting curve. **Conclusion** The quantities of stress relaxation and creep of MCL are lower than that of ACL in 7200s. The experimental results were analyzed and discussed.

**Key words:** Knee joint; ACL; MCL; Stress relaxation; Creep

关于膝关节活动稳定性的研究, 国内外文献涉及临床的研究较多, 而建立在生物力学实验研究报道较少, 关于人膝关节前交叉韧带应力松弛、蠕变、粘弹性等力学性质的研究更少见报道。膝关节韧带与许多连接性软组织类似, 具有随时间及过程相关的粘弹性特点, Woo等<sup>[1]</sup>用冯元桢的准线性粘弹性理论描述了犬内侧副韧带的蠕变、应力松弛和滞后等特性, 韧带的粘弹性属性反映了胶原的固有性质及胶原与基质之间的相互作用, 在临床上有着广泛的应用。

在膝关节的所有韧带中前交叉韧带(ACL)和内侧副韧带(MCL)是常见的用作对比研究的模型, 因

为它们有着显著的愈合差异性, 并且这两种韧带损伤占膝关节韧带运动损伤的90%左右。从已有的研究可以看到, ACL与MCL和肌腱等其他致密结缔组织相比, 既有差异性, 又有相同点。所以对它们进行对比研究, 可以帮助了解关节囊内和关节囊外韧带在愈合上的差异性, 并进而为ACL和MCL的损伤治疗提供理论基础<sup>[2]</sup>。鉴于临床实际的需要, 作者对正常国人新鲜尸体膝关节前交叉韧带和内侧副韧带进行应力松弛、蠕变实验研究, 得出了应力松弛、蠕变数据和曲线, 对应力松弛、蠕变数据进行归一化处理, 得出了其归一化应力松弛函数时, 蠕变函数及曲线。对应力松弛、蠕变数

收稿日期: 2006-04-10; 修回日期: 2006-07-03

作者简介: 朴成东(1971-), 男, 副教授, 研究方向: 骨科临床和骨科生物力学研究。

通讯作者: 马洪顺, E-mail: mahs@jlu.edu.cn

据进行一元线性回归, 得出了回归系数。

### 1 材料与方 法

本实验所用10个标本均取自急性性头部外伤致死的新鲜男性尸体, 年龄20~39岁。标本于死者死亡1~2小时之间解剖取下膝关节, 保留关节周围软组织, 用以生理盐水浸湿的纱布包裹于膝关节周围, 装入塑料袋中, 密封后置于-20℃冰箱内保存。

实验前取出标本, 在常温下解冻后加工, 剔除膝周软组织, 从韧带两端胫、股骨附着处尽可能多地取下ACL和MCL, 以手术刀沿标本纵向切取试样, 每个标本切取2个试样, ACL和MCL各10个试样。以读数显微镜测量试样的原始尺寸, 试样尺寸为长15~16 mm、宽8~9 mm、厚为1.8~2.0 mm。

ACL和MCL应力松弛、蠕变实验设备为日本岛津AG-10TA自动控制电子万能试验机, 载荷由载荷传感器传递。该机具有自动控制应力、应变增加速度的功能, 可以实现人机对话, 实验结束后计算机自动输出实验结果。

生物材料在应力作用下都有滞后现象, 在变形过程中有熵的改变, 有机械能损失, 所以实验前必须对试样进行预处理。本实验对所有试样在其最大应力为其破坏应力的30%应力水平下对试样反复加卸载循环20次, 预处理后进行实验<sup>[3-5]</sup>。

#### 1.1 ACL与MCL应力松弛实验

分别对经过预处理ACL和MCL样进行实验。首先向计算机输入试样序号、试样长度和宽度尺寸等参数, 设定应力松弛实验程序。将试样

置于pH值为7.4的生理盐水中, 将生理盐水和试验机上下夹头连接, 对ACL和MCL各10个试样分别以每分钟50%的应变增加速度对试样施加常应变, 当ACL应变达到7.0%时, 应力达到2.06 MPa MCL应变达到5.67%时, 应力达到2.06 MPa。使应变保持恒定, 应力随时间的改变不断下降, 计算机程序设定从时间t(0)开始采集数据, 每0.6 s采集一个数据, 采集10次, 之后每10 s采集一个数据, 采集40次; 之后136 s采集一个数据, 采集50个数据, 共采集100个数据, 历时7 200 s, 达到设定时间后打印机自动打印出应力松弛实验数据和曲线, 各组应力松弛实验曲线经计算机拟合见图1, 各组归一化应力松弛函数曲线, 经计算机拟合见图2。

以一元线性回归的方法处理实验数据, 由应力松弛曲线可以看出其是以对数关系变化的。

松弛曲线是以对数关系变化的, 因此设:

$$G(t) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ c \ln t + dA & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 c、d 为待定常数, 令  $\varphi(c, d) = \sum_{i=1}^n [G(t) - G_{(实)}]_i^2$ ,

$$\text{则 } \frac{\partial \varphi}{\partial c} = 0 \quad \frac{\partial \varphi}{\partial d} = 0 \quad \text{即:}$$

$$\begin{cases} c \sum_{i=1}^n \ln^2 t + d \sum_{i=1}^n \ln t - \sum_{i=1}^n G_{实} \ln t = 0 \\ c \sum_{i=1}^n \ln t + \sum_{i=1}^n d - \sum_{i=1}^n G_{实} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

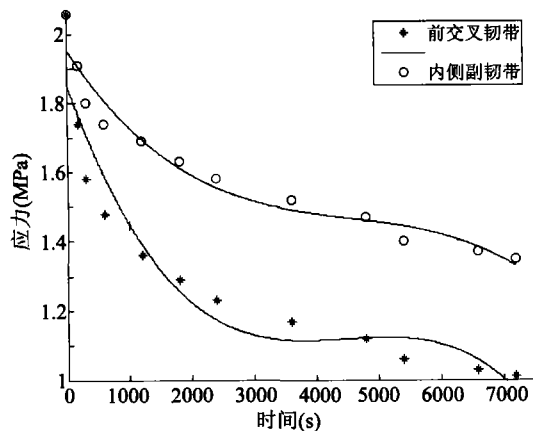


图1 应力松弛曲线

Fig. 1 The curve of stress relaxation

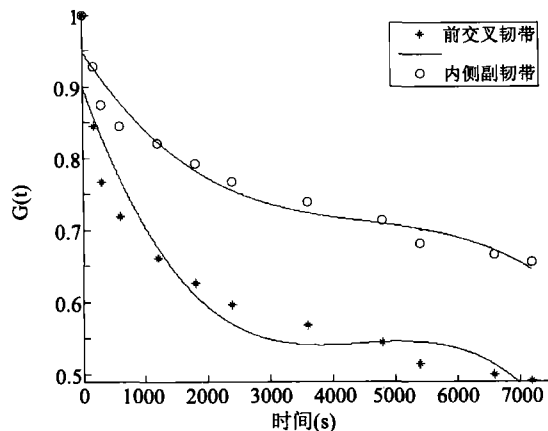


图2 归一化应力松弛函数曲线

Fig. 2 The curve of normalization stress relaxation function

将各组实验数据代入(2)式, 解出各组 c、d 值后, 将 c、d 值代入(1)式得出:

$$\begin{aligned} \text{前交叉韧带} G(t) &= \begin{cases} 1 & t=0 \\ -0.060 \ln t + 1.0664 & t>0 \end{cases} \\ \text{内侧副韧带} G(t) &= \begin{cases} 1 & t=0 \\ -0.040 \ln t + 1.0636 & t>0 \end{cases} \end{aligned}$$

## 1.2 ACL 与 MCL 拉伸蠕变实验

ACL 与 MCL 拉伸蠕变实验的加载方式、实验温度、试样预调处理、数据采集方法与应力松弛试验相同。以每分钟 0.5 GPa 的应力增加速度对试样施加应力, 各组应力达到 2.06 MPa 时, ACL 应变达到 7.07%, MCL 应变达到 5.47%, 使应力保持恒定, 应变随着时间的改变不断上升, 达到设定的时间后计算机自动输出蠕变数据。10 个试样, 蠕变曲线经计算机拟合见图 3。根据  $J(t)=L(t)/L^0$  计算出 ACL 和 MCL 的归一化蠕变函数  $J(t)$  值, 拟合的归一化蠕变函数曲线见图 4。

对试验数据进行一元线性回归分析, 根据  $J(t)$  曲线。可以看出  $J(t)$  随时间的变化规律与指数函数接近。故设:

$$J(t) = a + be^{-t} \quad (3)$$

由最小二乘法确定 a、b。令

$$\alpha(a, b) = \sum_{i=1}^n [J(t) - J_{\text{实}}]_i^2$$

正则方程

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n a + \sum_{i=1}^n e^{-t} b = \sum_{i=1}^n J_{\text{实}} \\ \sum_{i=1}^n a e^{-t} + \sum_{i=1}^n (e^{-t})^2 b = \sum_{i=1}^n e^{-t} J_{\text{实}} \end{cases} \quad (4)$$

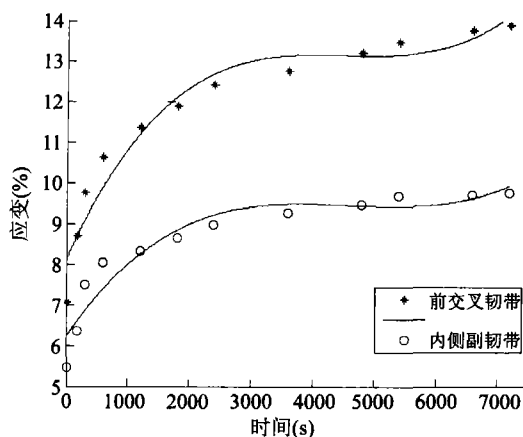


图3 蠕变曲线  
Fig. 3 The curve of creep

将实验数据代入(4)式解出各组的 a、b 值, 将各组的 a、b 值代入(3)式得出:

$$\begin{aligned} \text{前交叉韧带}(t) &= \begin{cases} 1 & t=0 \\ -0.1197e^{-t} + 1.1197 & t>0 \end{cases} \\ \text{内侧副韧带}(t) &= \begin{cases} 1 & t=0 \\ -0.0869e^{-t} + 1.0869 & t>0 \end{cases} \end{aligned}$$

## 2 结果与讨论

本实验以一元线性回归的方法处理实验数据, 得出回归系数 a、b、c、d 值, 结果表明实验值与理论值误差为 3%, 很好的处理了实验数据, 也说明本实验数据精度较高。

**应力松弛蠕变**实验结果表明, 最初 600 s 变动较大, 之后应力缓慢下降, 应变缓慢上升, 前交叉韧带 7 200 S 应力松弛量为 0.95 Mpa, 蠕变量为 6.82%, 内侧副韧带 7 200 S 应力松弛量为 0.71 Mpa 蠕变量为 4.29%, 前交叉韧带 7 200 S 应力松弛量, 蠕变量均大于内侧副韧带, 由于 ACL 和 MCL 韧带组织组成上存在差异性, Jiang<sup>[7]</sup>等发现 MCL 韧带的糖胺聚糖极少, 而 ACL 韧带的糖胺聚糖较多, 尤其是在细胞周围更多。糖胺聚糖高度带负电荷并具有高度亲水性, 它能摄取水, 构成充满细胞间隙的细胞外基质, 使组织具有抗压力能力。ACL 高度的亲水性, 使其具有良好的应力松弛、蠕变力学性质, 也是其应力松弛、蠕变大于 MCL 的重要因素。

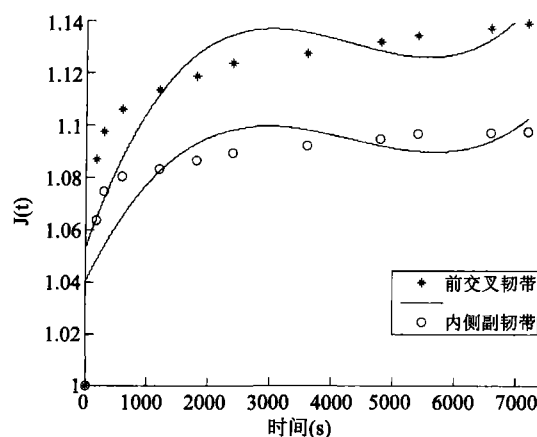


图4 归一化蠕变函数曲线  
Fig. 4 The curve of the curve of normalization creep function

ACL 和 MCL 等韧带是维持膝关节稳定的重要结构。膝关节韧带与许多连接性软组织类似, 具有随时间过程相关的粘弹性特点。作者做了这样的预实验, 当对 ACL 施加国人平均体重 75 kg 负载时, 初始应力为 4.55 MPa, 应变为 10.21%; 7 200 s 的应力松弛量为 2.14 MPa, 蠕变量为 9.62%。当对 MCL 施加国人平均体重 75 kg 负载时, 初始应力为 4.55 MPa, 应变为 8.16%; 7 200 s 时的应力松弛量为 1.65 MPa, 7 200 s 蠕变量为 7.86%。结果表明, 施加的应力越大, 应力松弛量和蠕变量越大。分析认为, 以正常人平均体重 75 kg 计, ACL 蠕变量不宜超过 6.41%, 应力松弛量不宜超过 1.43 MPa, 这有利于膝关节缓解载荷和保持稳定性。ACL 和 MCL 损伤吻合重建后持续时间对膝关节损伤的估计和各种疾患的治疗具有很大的意义。当关节受到持续低载荷作用一段时间后, 软组织产生缓慢变形或蠕变。在加载后的 6~8h 这种蠕变现象最显著, 但在以后数月中蠕变将以缓慢的速率进行着<sup>[8]</sup>。韧带损伤可进行重建以适应它的力学需要, 韧带的应力增加时, 韧带的强度和刚度也会增加, 而韧带的应力减小时, 韧带的强度和刚度也会减小。

Noyes 等<sup>[9]</sup>为韧带制动, 将灵长类动物的膝关节用石膏固定 8 周, 对这些动物固定后的 ACL 作拉伸实验并与对照组动物的韧带比较, 表明最大破坏载荷下降 40%, 固定后韧带刚度也明显减小。

在关节功能重建病人初期, 不易承受太大载荷, 动物实验表明随着时间的增加 12 个月修复训练后韧带具有了同正常韧带相当的强度和刚度。

ACL 和 MCL 应力松弛、蠕变定量指标对人工韧带材料的研制, ACL 和 MCL 损伤后重建和对膝关节功能影响等的研究提供了有益的实验依据。

#### 参考文献:

- [1] Woo SL, Gomez MA, Akeson WH. The time and history-dependent viscoelastic properties of the canine medial collateral ligament[J]. *J Biomech Eng*, 1981, 103(4):293-298.
- [2] 李江. 膝关节韧带的生物力学研究进展[J]. *医用生物力学*, 2005, 20(1): 59-64.
- [3] 马洪顺, 陆有, 杨清江, 等. 静脉血管应力松弛实验研究 *中国生物医学工程学报*[J], 1996, 15(1):94-96.
- [4] 马洪顺, 朱伟民, 贺家宁, 等. 小儿肠套叠肠管与人阑尾归一化应力松弛函数蠕变函数[J]. *中国生物医学工程学报*, 1998, 17(4):367-373.
- [5] 马洪顺, 张忠君, 黎晓华. 胎儿臂丛神经上干粘弹性实验研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2004, 23(3): 374-378.
- [6] 冯元桢著. *生物力学*[M]. 北京: 科学出版社, 1983, 124.
- [7] Jiang Qinglin, Gongzhou Qu, Mianyu Cui, et al. Cartilage-like phenomenon in the anterior cruciate ligament [J]. *China Med Sci J*, 2001, 16(2):103-106.
- [8] Vicor H. Frankee Margareta Nordin 主编. 戴冠戎, 王以进, 周健男等译. *骨骼系统的生物力学基础* [M]. 上海: 学林出版社, 1985, 117.
- [9] Noyes, FR: Function Properties of knee ligaments and alterations induced by immobilization [J]. *Clin Orthop*, 1977, 123:210.

### 本刊通知

本刊自 2006 年起对投寄本刊的稿件, 实施收取稿件处理费规定。故请作者来稿时同时邮寄稿件处理费每篇 50 元, 并在汇款单上写明第一作者姓名、论文题目及“稿件处理费”字样。编辑部在给作者寄出收稿单时同时寄上稿件处理费收据, 稿件处理费不再退还。编辑部在收到稿件处理费后, 立即安排稿件进入编辑部的送审运作过程。特此通知!

《医用生物力学》编辑部