

文章编号:1004-7220(2010)04-0244-05

跳伞着陆过程中膝关节损伤的有限元研究

姚杰¹, 牛文鑫¹, 王 旻¹, 樊瑜波¹, 赵沁平²

(1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191)

摘要: 目的 利用膝关节有限元模型和模拟跳伞着陆实验数据,对半蹲式跳伞着陆过程进行数值模拟,并分析膝关节损伤的机理。**方法** 对16名健康志愿者进行半蹲式模拟跳伞实验,跳落高度分别为0.32 m,0.52 m和0.72 m。基于核磁共振成像建立人体膝关节的三维有限元模型,采用实验测得的膝关节运动学和地面反力数据对跳伞着陆过程进行数值模拟。**结果** 关节内组织的应力水平随着跳落高度的增加而增加,外侧半月板和关节软骨承受了较大的载荷,前交叉韧带和内侧副韧带在屈膝角度达到最大时产生明显的应力集中。**结论** 跳伞着陆的高速冲击是造成关节损伤的直接原因,外侧关节软骨和半月板更易受到损伤,前交叉韧带和内侧副韧带较易在屈膝幅度最大时发生撕裂。

关键词: 跳伞; 膝关节; 有限元方法; 应力; 损伤

中图分类号: R318.01, R857, R873 文献标志码: A

Finite element study on knee injuries in the parachute landing

YAO Jie¹, NIU Wen-xin¹, WANG Yang¹, FAN Yu-bo¹, ZHAO Qin-ping² (1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. State Key Lab of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Objective To numerically simulate the half-squat parachute landing and analyze the mechanism of knee injuries with the finite element method based on the data of the simulated parachute landing experiment.

Method The half-squat parachuting experiment was performed by 16 healthy volunteers. The heights of simulated landing were 0.32 m, 0.52 m and 0.72 m respectively. A three-dimensional finite element model of human knee joint was developed based on magnetic resonance images. The kinematical data of the knee and the data of the reaction force obtained by experiments were used to make a numerical simulation of the parachute landing process. **Results** The stress level of the knee increased with the increase of the height. The lateral meniscus and cartilage suffered greater loads than the medial ones. Obvious stress concentrations occurred in the anterior cruciate ligament and the medial collateral ligament when the knee flexion degree reached the peak value. **Conclusions** The severe impact in parachute landing is the direct cause of injuries in parachute landing. The lateral cartilage and meniscus are more likely to be injured, and the anterior cruciate ligament and the medial collateral ligament are easier to tear when the knee flexion degree reaches the peak value.

Key words: Parachutes; Knee joint; Finite element method; Stresses; Injury

跳伞运动极易造成损伤^[1-2]。超过80%的跳伞 损伤发生在着陆阶段,其中超过70%是由着陆姿势

收稿日期:2010-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10925208),国家重点实验室开放基金,中央高校基本科研业务费专项。

作者简介:姚杰(1984-),男,博士研究生,研究方向:生物力学。

通讯作者:樊瑜波(1965-),男,教授,博士研究生导师,Tel:(010)82339428;E-mail:yubofan@buaa.edu.cn。

不正确引起的^[1]。绝大部分跳伞损伤发生在下肢,在不同的研究中都发现膝关节损伤占有跳伞损伤的约20%,发生率仅次于踝关节^[1-2]。膝关节跳伞着陆损伤包括膝关节脱位、骨折、交叉韧带和侧副韧带扭伤、半月板损伤等,其中前交叉韧带撕裂、关节脱位、骨折和半月板损伤等在着陆损伤中都被认为是严重损伤^[3-4]。跳伞着陆损伤发生的机制及其防护,从根本上来说是一个冲击生物力学问题。在这一领域国内外为数不多的研究中主要以踝关节损伤研究为主^[5-9]。因此,对膝关节的着陆损伤机制进行研究,有利于跳伞训练的科学指导和防护装备的设计。

通过对受试者进行实验测试是研究跳伞着陆生物力学的有效方法之一^[5-7]。这种方法能够在实验室条件下测量出受试者在模拟跳伞着陆过程中运动学、地面反力和肌电活动性等参数。但是,这种方法存在局限性。首先,为了保护受试者安全,实验采用的着陆速度往往小于实际跳伞的着陆速度,并且避免恶劣的着陆条件,从而难以再现实际着陆过程中的高危情况。其次,能够通过无损测量手段所取得的数据有限,这大大限制了对着陆损伤机制和防护手段的研究。有限元模拟方法可以有效地克服这两个局限性。但是到目前为止,国外对跳伞着陆的生物力学有限元研究大多基于滚翻式的着陆姿势^[8-9],而我国的跳伞着陆姿势大多为半蹲式^[5]。另外,之前的模型主要为基于人体特征参数的多刚体模型,而目前基于医学影像建立的三维有限元模型具有较高的几何相似性和力学相似性,并已被广泛应用于运动损伤的研究领域,但以此对跳伞着陆损伤进行的模拟研究尚不多见^[10-11]。

在先前的实验研究中发现,地面冲击力会随着着陆速度的增加而显著增加^[5]。这可能是引起膝关节损伤的主要因素之一,但对其如何作用于关节组织的具体机理并不清晰。本文利用膝关节的三维有限元模型,基于实验数据对3组不同高度的跳伞实验进行数值模拟,研究不同强度的着陆冲击对膝关节软组织应力应变分布的影响,并对跳伞损伤的机理和趋势进行分析。

1 材料与方法

1.1 数据采集

对16名健康志愿者进行了模拟跳伞着陆实验,

年龄(24.5 ± 4.2)岁,体重(56.1 ± 23.5)kg,身高(170.9 ± 2.8)cm。对志愿者进行标准跳伞着陆姿势培训,使其以半蹲式着陆姿势右脚落于 Bertec FP4060-08-100 测力台(美国 Bertec 公司,采样频率1 kHz)内。实验高度分别为0.32 m、0.52 m 和0.72 m^[5]。分别在股骨大转子、股骨外上髁、腓骨头、外踝等骨性标记点处粘贴 marker 点,采用运动捕捉系统 NDI(NDI 公司,加拿大)对股骨和胫腓骨的位移信息进行采集,采样频率为50 Hz。每组实验进行5次,每次至少间隔60 s,以避免疲劳对实验结果产生干扰。

1.2 有限元仿真

对健康膝关节进行核磁共振(MR)扫描(30岁男性志愿者)。保持膝关节伸展,不承受任何外载。采用1.5T、脂肪抑制、梯度回波序列扫描膝关节矢状面。层厚为2 mm,像素大小为0.469 mm × 0.469 mm。利用医学图像处理软件 MIMICS (Materialise 公司,比利时)重建出膝关节的三维几何模型,包括股骨、胫骨、腓骨、前交叉韧带(ACL)、后交叉韧带(PCL)、胫侧副韧带(MCL)、腓侧副韧带(LCL)、内侧半月板、外侧半月板和关节软骨。采用三维四面体单元对骨、软骨和半月板进行网格划分,采用六面体单元对韧带进行网格划分。

设定关节软骨、半月板与韧带之间的有限变形接触,由于关节内摩擦极小,故不考虑摩擦。由于骨的变形最小故假设为刚体。软骨、半月板的变形相对较小,假设为各项同性线弹性材料,软骨的弹性模量为5 MPa,泊松比为0.35,半月板的弹性模量为59 MPa,泊松比为0.49^[12-13]。由于韧带的变形较显著,采用超弹性模型 Mooney-Rivlin 对韧带进行模拟,并用实验测得的应力应变曲线对韧带的本构关系分别进行定义^[14-16]。则

$$W = C_{10}(I_1^e - 3) + C_{01}(I_2^e - 3) + (J - 1)^2/d \quad (1)$$

式中: W 为应变能密度函数, I_1^e 和 I_2^e 分别为 Cauchy 应变张量的第一、第二不变量; J 为变形梯度张量的行列式; C_{10} 、 C_{01} 和 d 为系数,与剪切模量 μ 、泊松比 ν 和初始体积模量关系为:

$$\begin{aligned} C_{10} + C_{01} &= \mu/2 \\ d &= (1 - \nu)/(C_{10} - C_{01}) \\ k &= 2/d \end{aligned} \quad (2)$$

采用最小二乘法来确定 C_{10} 、 C_{01} 和 d ,

$$E = \sum_{i=1}^n (1 - \sigma_i^{\text{th}} / \sigma_i^{\text{test}})^2 \quad (3)$$

式中: σ_i^{th} 为 Mooney-Rivlin 模型下的理论应力值; σ_i^{test} 为实验测得的应力值。通过改变 C_{10} 、 C_{01} 和 d , 令实验值和理论值的相对偏差的平方和 E 取得最小, 来构造 Mooney-Rivlin 函数, 使之最佳平方逼近试验曲线。采用文献[17]中报道的膝关节实验的结果验证模型的有效性。

应用有限元软件 Abaqus (Simulia 公司, 美国) 对膝关节有限元模型进行分析。将实验获得的股骨、胫骨与腓骨的位移与测力板冲击反力的数据作为模型的边界条件, 计算膝关节模型的应力应变分布情况。

2 结果

以 0.32 m、0.52 m 和 0.72 m 3 组高度着陆时, 平均冲击反力关于时间的变化过程如图 1 所示。冲击反力的峰值发生在接触地面的 2 ms 内, 大小随着高度的增加而增加, 依次为体重的 3.47 倍、4.24 倍和 5.27 倍。大约在 5 ms 后开始呈线性下降的趋势, 直至到达体重的 50% 后趋于平衡。同时, 屈膝的过程由肌肉控制, 滞后于最大冲击的时刻, 在大约 15 ms 后膝关节达到屈膝的峰值, 屈膝角度随着跳落高度的增大而增大。

以作用反力和膝关节的运动信息作为载荷和边界条件对膝关节内应力应变的分布情况进行计算, 可以发现: 关节内的应力水平普遍随着跳落高度的增加而增加。其中, 在冲击力达到峰值时 (见图 2), 胫骨软骨的峰值应力由 0.32 m 时的 2.19 MPa 增长到 0.52 m 时的 2.60 MPa, 直至 0.72 m 时的

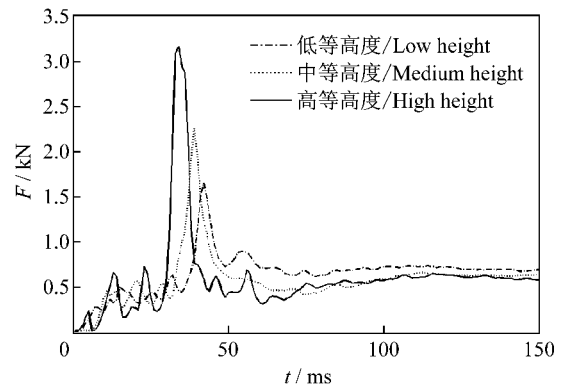


图1 从 0.32 m、0.52 m 和 0.72 m 三组高度跳落着陆时, 平均冲击反力关于时间的变化过程

Fig.1 The histories of the impact force during parachute landing from heights of 0.32 m, 0.52 m and 0.72 m

3.24 MPa。应力集中发生在外侧软骨的内侧靠近。同时, 外侧半月板较之内侧半月板也承受了更多的载荷, 内侧半月板向后侧的位移也随着冲击力的增加而增加。在屈膝角度达到峰值时 (见图 3), 应力集中仍分布于外侧半月板和外侧软骨上, 并且随着跳落高度的增加而增加。此外, 外侧半月板上的高应力随着冲击的增大而前移, 而内侧半月板则有一定程度的后移。

为了研究同一跳落高度下韧带上的应力分布随着载荷的变化而改变的情况, 对 0.72 m 跳落高度下的内侧副韧带进行分析。由图 4(a) 可以看到, 在屈膝角度达到峰值时, 内侧副韧带上的最大应力比其在冲击峰值时的最大应力增加了大约 66.5%, 并在上端和中部发生了应力集中现象。图 4(b) 显示了 0.72 m 跳落时, 前交叉韧带的应力分布和变形情况。与内侧副韧带的情况相似, 与处地时相比, 屈膝

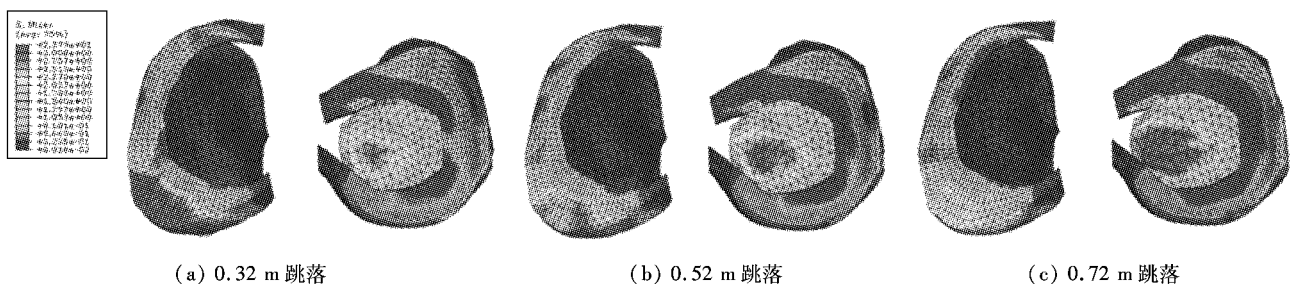


图2 冲击力达到最大时, 半月板和胫骨软骨上的应力分布

Fig.2 The stress distribution of meniscus and cartilage when the impact force reached the peak value

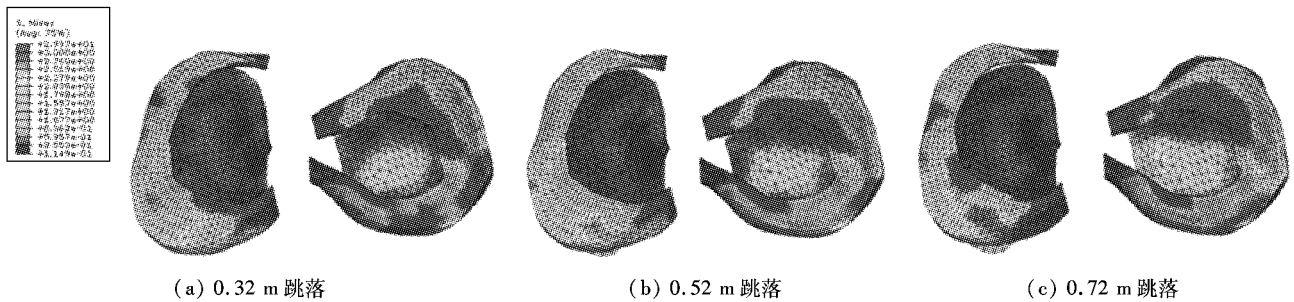


图3 屈膝角度最大时,半月板和胫骨软骨上的应力分布
Fig.3 The stress distribution of meniscus and cartilage when the knee flexion degree reached the peak value

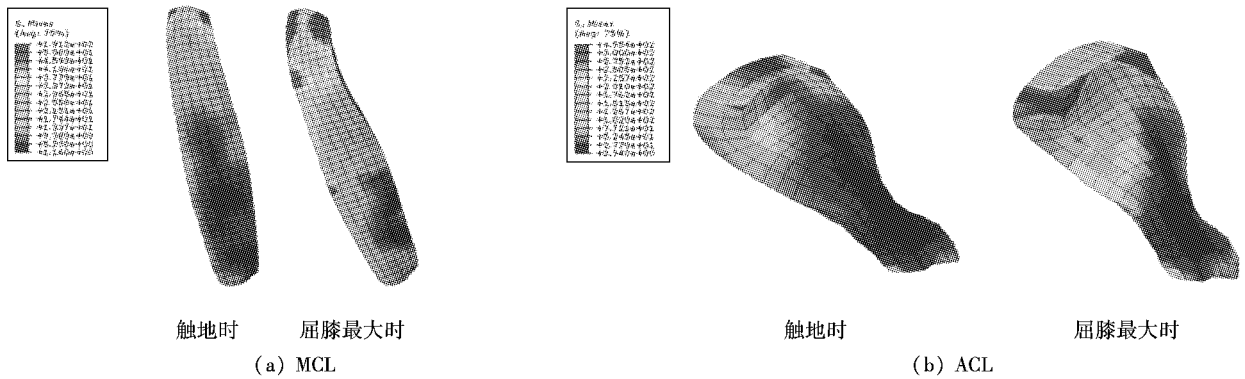


图4 0.72 m 跳落时,内侧副韧带(a)和前交叉韧带(b)上的应力变化情况
Fig.4 The stress changes of MCL(a) and ACL(b) when dropping from 0.72 m

角度达到峰值时的最大应力比冲击力达到峰值时的最大应力增长了大约 56.6%,且在股骨附着点附近出现了较明显的应力集中现象。

3 讨论

本文对半蹲式跳伞的着陆过程和膝关节的损伤机理进行了研究。分别以 0.32 m、0.52 m 和 0.72 m 3 种高度对跳伞着陆的过程进行了模拟实验,采集了着陆过程中膝关节的运动信息和地面反力。同时,基于 MRI 医学图像重建了正常人体的膝关节三维有限元模型,包括股骨、胫骨、腓骨、前交叉韧带、后交叉韧带、胫侧副韧带、腓侧副韧带、内侧半月板、外侧半月板和关节软骨。通过与文献的实验测量结果进行对照,证明该模型具有较好的几何相似性和力学相似性^[17]。进而以实验得出的数据作为边界条件,对着陆过程的关节内应力应变分布情况进行了模拟和分析。

计算结果显示,随着跳落高度的增加,关节内的

应力水平也随之相应地提高。在实际的跳伞过程中,高速冲击导致的巨大作用反力是造成膝关节内软组织损伤的直接原因。同时,由关节内的应力应变分布情况可以看到,外侧的关节软骨和半月板较之内侧承受了更大的载荷。应力集中多发生在外侧关节软骨的内侧和外侧半月板的附着处。这些区域可能是关节软骨和半月板发生损伤的高危区域。除了急性损伤外,长期从事跳伞活动的人,可能会因为这些区域的不正常应力分布而产生慢性损伤和关节疾病^[18]。

对同一组高度的承载过程进行分析可以发现:无论是内侧副韧带还是前交叉韧带,应力集中均发生在屈膝角度最大的时刻,而非冲击力最大的时刻。可以认为,此时韧带和关节软组织吸收了大部分跳伞过程的动能,起到缓冲和保护内脏器官的作用;但此时韧带内的势能较大,应力集中处有可能导致韧带撕裂,急性的撕裂将会使得膝关节在短时间内失稳,无法吸收的动能将会导致周边组织发生损伤,例

如半月板撕裂,软骨损伤和关节脱位等。因此,在跳伞着陆过程中,正确的着陆姿势,肌肉发力的方式和维持膝关节稳定的护具将对跳伞的安全性产生重要的影响。

着陆过程的损伤不仅和着陆的姿势有关,也和着陆点的地面情况有着密切的联系。着陆地面的角度和硬度等都有可能对着陆的安全造成影响,将会在进一步的研究中加以考虑。此外,对有限元模型的材料属性的近似处理,以及未考虑肌肉的影响降低了整个系统的刚度,使得应力水平较之真实应力偏大;在进一步的研究中,将考虑肌肉和周边软组织的影响,以期更深入地研究跳伞着陆损伤的生物力学机理和有效的防护手段。

参考文献:

- [1] Ekeland A. Injuries in military parachuting: a prospective study of 4499 jumps[J]. *Injury*, 1997, 28(3): 219-222.
- [2] Amoroso PJ, Bell NS, Jones BH. Injury among female and male army parachutists[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1997, 68(11): 1006-1011.
- [3] Amamilo SC, Samuei AW, Hesketh KT, *et al.* A prospective study of parachute injuries in civilians[J]. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 1987, 69-B(1):17-19.
- [4] Cilli F, Mahirogullari M, Inan M, *et al.* Parachuting injuries: a retrospective study of 43,690 military descents[J]. *Balkan Military Medical Review*, 2006, 9(4): 144-147.
- [5] Niu W, Wang Y, He Y, *et al.* Biomechanical gender differences of the ankle joint during simulated half-squat parachute landing[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2010, 81(8): 761-767.
- [6] Whitting JW, Steele JR, Jaffrey MA, *et al.* Parachute landing fall characteristics at three realistic vertical descent velocities[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2007, 78(12): 1135-1142.
- [7] 牛文鑫,樊瑜波,王珏,等. 半蹲式跳伞着陆运动生物力学双侧下肢对称性研究[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(增): 138.
- [8] Kong W, Kasturi K, Lee C. Biomechanical modeling of paratrooper landing[C]. 16th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference. Boston, Massachusetts, 2001: AIAA 2001-2029.
- [9] Kasturi K, Kwok P, Lee C. Design and evaluation of protective devices for injury prevention during paratrooper landing[C]. 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Munich, Germany, 2005: AIAA 2005-1632.
- [10] Li G, Suggs J, Gill T. The Effect of Anterior Cruciate Ligament Injury on Knee Joint Function under a Simulated Muscle Load: A Three-Dimensional Computational Simulation[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2002, 30(5): 713-720.
- [11] Yao J, Snibbe J, Maloney M, *et al.* Stresses and strains in the medial meniscus of an ACL deficient knee under anterior loading: a finite element analysis with image-based experimental validation[J]. *J Biomech Eng*, 2006, 128(1):135-141.
- [12] Shepherd DE, Seedhom BB. The 'instantaneous' compressive modulus of human articular cartilage in joints of the lower limb[J]. *Rheu*, 1999, 38(2): 124-132.
- [13] LeRoux MA, Setton LA. Experimental and biphasic FEM determinations of the material properties and hydraulic permeability of the meniscus in tension[J]. *J Biomech Eng*, 2002, 124(3): 315-321.
- [14] Peña E, Calvo B, Martínez MA, *et al.* A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint[J]. *J Biomech*, 2006, 39(9): 1686-1701.
- [15] Butler DL, Sheh MY, Stouffer DC, *et al.* Surface strain variation in human patellar tendon and knee cruciate ligaments[J]. *J Biomech Eng*, 1990, 112(1): 38-45.
- [16] Quapp KM, Weiss JA. Material characterization of human medial collateral ligament[J]. *J Biomech Eng*, 1998, 120(6): 757-763.
- [17] 姚杰,樊瑜波,张明,等. 前交叉韧带损伤导致膝关节继发性损伤的生物力学研究[J]. *力学学报*, 2010, 42(1): 102-108.
- [18] Murray-Leslie CF, Lintott DJ, Wright V. The knees and ankles in sport and veteran military parachutists[J]. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 1977, 36(4): 327-331.