

文章编号:1004-7220(2014)02-0141-05

关节软骨不同层区的率相关性能研究

刘志动, 高丽兰, 张春秋, 肖朋朋, 张西正

(天津理工大学机械工程学院, 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

摘要: **目的** 采用不同加载速率对关节软骨进行非围限压缩试验,探究其不同层区的率相关性能。**方法** 采用新鲜猪关节软骨作为研究对象,结合非接触式数字图像相关技术,测试不同加载率下软骨不同层区的力学性能。**结果** 在恒定加载率作用下,取相同压缩应力时,软骨浅表层的压缩应变最大,深层区压缩应变最小,中间层压缩应变鉴于表层与深层之间;沿软骨厚度方向,从浅表层到深层,软骨的泊松比逐渐增大;不同加载率作用下,软骨的压缩应力-应变曲线不重合,说明关节软骨的压缩力学性能具有率相关性;随着加载速率的增大,软骨的弹性模量呈增大的趋势;取相同压缩应力时,加载率越大,不同层区的压缩应变都减小。**结论** 关节软骨沿厚度方向,从浅表层到深层的压缩应变逐渐减小,泊松比逐渐增大,软骨不同层区的力学性能具有率相关性。实验研究可为临床软骨疾病预防、治疗提供理论依据,同时对人工软骨力学评价具有重要意义。

关键词: 关节软骨; 数字图像相关; 加载速率; 压缩应变; 力学特性; 非围限压缩试验

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Loading rate-dependent property of different layers for articular cartilage

LIU Zhi-dong, GAO Li-lan, ZHANG Chun-qiu, XIAO Peng-peng, ZHANG Xi-zheng

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Industry Systems, Tianjin 300384, China)

Abstract: Objective To investigate the loading rate-dependent property of different layers for articular cartilage by unconfined compression testing on articular cartilage at different loading rates. **Methods** The non-contact digital image correlation (DIC) technique was applied to investigate the mechanical properties of different layers for fresh pig articular cartilage at different loading rates. **Results** At constant loading rate, the compressive strain of superficial layer and deep layer was the largest, while that of middle layer was in between under the same compressive stress. The Poisson's ratio increased from superficial layer to deep layer along with cartilage depth increasing. The stress-strain curves of cartilage were different at different loading rates, indicating that the mechanical properties of cartilage were dependent on the loading rate. The elastic modulus of cartilage increased with loading rates increasing, and the compressive strains of different layers decreased under the same compressive stress with loading rates increasing. **Conclusions** The compressive strain decreased while the Poisson's ratio increased from superficial layer to deep layer along the cartilage depth. The mechanical properties of different layers for cartilage were dependent on the loading rate. This study can provide the basis for clinical cartilage disease prevention and treatment, and is important for mechanical function evaluation of artificial cartilage as well.

Key words: Articular cartilage; Digital image correlation; Loading rate; Compressive strain; Mechanical properties; Unconfined compression test

收稿日期:2013-01-29; 修回日期:2013-03-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31000422, 10872147, 11172208)。

通信作者:张春秋,教授, E-mail:zhang_chunqiu@126.com。

关节软骨是关节的重要组成部分,具有良好的摩擦、润滑及磨损等特性^[1]。软骨的组成结构随软骨深度的变化而不同,一般来说可分为浅表层、中间层和深层区,各层成分的含量具有差异,其中水分由浅表层的80%减少到深层的65%,糖蛋白浓度在浅表层较低,而在中间层则较大,胶原纤维的浓度及直径从浅表层到深层区也是逐渐增大的,且其密度和排列方式也不相同^[2-4]。

关节软骨一旦发生损伤或病变,很难自我修复,而且轻微的关节软骨损伤会导致关节处疼痛和肿胀,恶化到一定程度,病人将会感觉疼痛,甚至不能行走,这给人类生活带来极大不便。据统计,1990年在美国骨关节炎造成的经济负担仅次于高血压、心脏病和精神病^[5],而我国每年用于骨关节炎治疗的费用高达1500亿人民币^[6]。因此,对关节软骨生物力学特性的研究具有极其重要的意义。近年来许多学者都对关节软骨进行了拉压实验研究,如董启榕等^[7]对人和兔膝关节软骨样本进行单向拉伸和黏弹性实验,得到人股骨软骨单向拉伸实验曲线和兔股骨软骨蠕变曲线及规律。但是软骨具有3层结构,整体分析不能充分体现其各层组成结构与其力学性能的关系,故对软骨不同层区的力学性能研究更加重要。

数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术是一种利用视觉技术跟踪物体表面图像子区域的运动形态,推算物体变形的位移和变形的非接触的光学变形测量方法。DIC技术依赖于匹配的记录图像中的随机图案,直接得到表面位移,测量精度高且易操作,已在软、硬生物组织力学及其他工程应用中得到广泛关注和使用^[8-9]。

本实验以猪膝关节软骨为研究对象,结合非接触式DIC技术,研究非围限压缩载荷作用下软骨不同层区的率相关性力学性能;通过图像处理,分析软骨不同加载率作用下的变形特征。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验标本取自8个月猪的股骨远端滑车处的新鲜关节软骨,屠宰时间6h以内将软骨沿关节表面弧度的法线方向切割,制成带有下骨的试样,并用手术刀对每组进行修理,以达到实验标准材料。一共

进行4组不同加载速度下的非围限压缩试验,每组加工一个试样,并放在盛有生理盐水的培养皿中待用。

1.2 实验设备与方法

实验设备采用MTF-100微型机控制电子式微型拉力机及其附带的CCD、与之相匹配的计算机及光学实验数字图像分析软件(上海大学研制)。微型拉力机可对材料进行mm、 μm 量级的拉伸和压缩,测力精度为0.05%,测力范围:0~100N。数字图像采集系统用于在线采集软骨在载荷作用下的图像,成像系统最小可视范围为0.8mm×0.6mm,位移分辨率为 μm 量级。

实验方法采用DIC技术。该技术通过光学系统捕捉物体变形图像,自动测量图像上示踪点的相对位置变化,然后经计算得到相应的位移和应变。将氧化铁纳米粒子分散嵌入在软骨样本表面作为软骨样本的示踪点(氧化铁纳米粒子直径为50nm),纳米粒子在载荷作用下产生相对位置变化,表示试样的变形,运用DIC技术跟踪试样表面的纳米粒子,进而经过计算得到应变。

实验温度是室温,加载速度分别为0.1、0.5、1和5N/s。实验前,分别测量其长、宽、厚并记录;实验时,将试样放在微型测试机夹具上加紧,调整CCD摄像头使软骨尽可能清晰地呈现在计算机的显示器上,在软骨沿厚度方向的横截面上均匀的涂抹纳米颗粒(纳米颗粒起到示踪剂的作用)以观察软骨各层的变形,在微型拉力机测试软件中设定压缩加载率及实验数据保存位置,在采集图像的软件系统中设定采集图片的时间间隔及图片的张数及保存的位置,图片的张数应保证将整个实验过程都能拍到直到实验结束,每隔0.5s拍1张。图1所示为非围限压缩载荷作用下关节软骨不同层区率相关性测试。

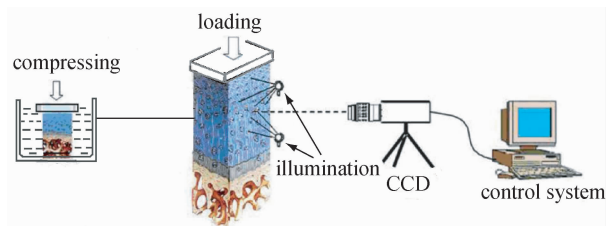


图1 关节软骨不同层区率相关性测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loading rate experiment for cartilage

2 实验结果

2.1 不同加载率对软骨压缩性能的影响

图2显示了0.1、0.5、1及5 N/s加载率下软骨的压缩应力-应变曲线。不同加载率作用下的应力-应变曲线不重合,说明关节软骨的压缩力学性能具有率相关性。随着加载速率的增大,软骨的弹性模量呈现增大的趋势;同一压缩应力对应的应变随加载速率的增大而减小,当压缩应力为0.5 MPa时,0.1 N/s加载率下的应变为26.36%,5 N/s加载率下的应变为17.23%。

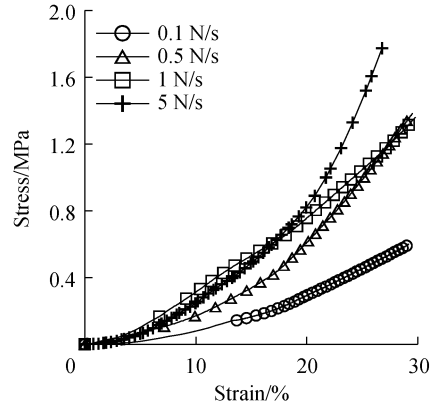


图2 不同加载率下软骨的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of cartilage at different loading rates

2.2 恒定加载率下软骨不同层区的压缩性能

图3显示了恒定加载率下软骨不同层区的应力-应变曲线。软骨不同层区的应力应变曲线不重合,说明软骨各层区的力学性能是有差异的。恒定加载率作用下,软骨浅表层应变增加幅度最大,其次是中间层,深层的应变增加幅度最小;不同加载率作

用下,取相同压缩应力时发现,随着加载速率的增大,软骨各层区的压缩应变都减小。

2.3 不同加载率下软骨不同层区的泊松比

图4显示了0.5、1 N/s加载率下软骨不同层区泊松比随压缩量变化的曲线。相同压缩量下,软骨

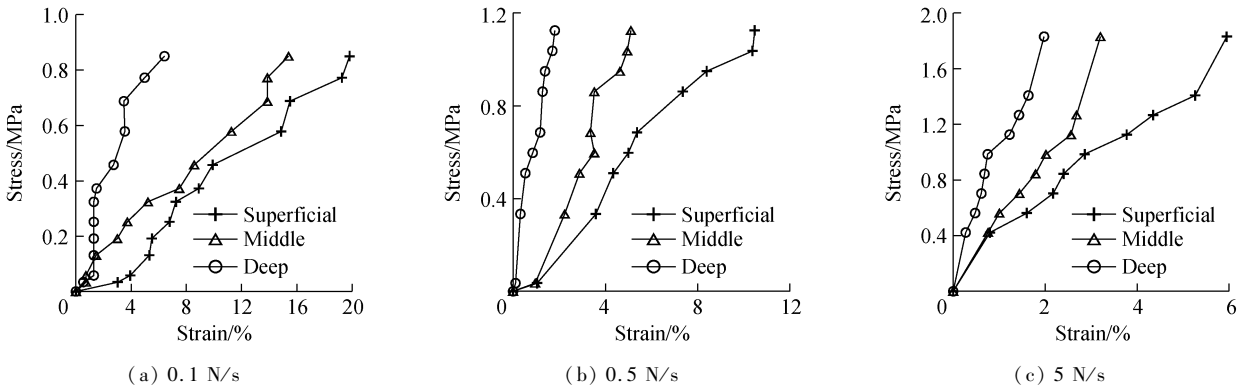


图3 恒定加载率下软骨不同层区应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of different layers for cartilage at constant loading rates

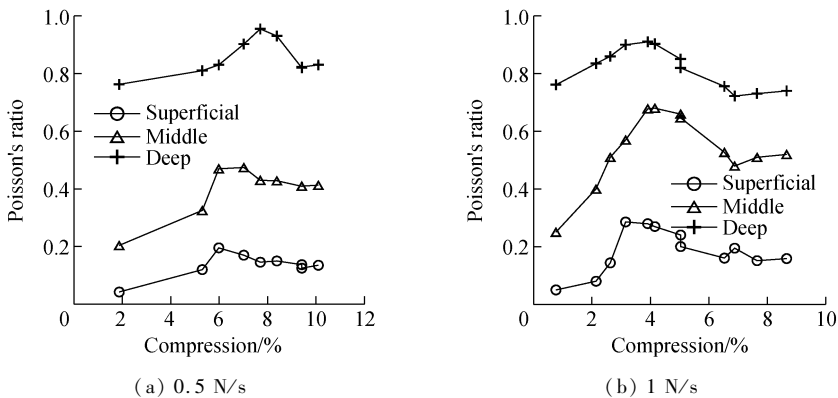


图4 不同加载率下软骨不同层区泊松比-压缩量曲线

Fig.4 Poisson's ratio-compression value curves of different layers for cartilage at different loading rates

深层的泊松比最大,中间层次之,浅表层的泊松比最小,即沿软骨厚度方向,从浅表层到深层,软骨的泊松比逐渐增大;且对比发现加载率越大,软骨浅表层和中间层的泊松比随压缩量变化幅度较大,深层的变化幅度较小。

3 讨论与结论

关节软骨由于独特的力学性质及其不可替代的作用,受到国内外学者的广泛研究^[10-14]。国内学者主要是从宏观上对软骨进行非围限压缩行为的实验研究。孟维春等^[10]对人股骨头软骨进行压缩特性的研究,得到了软骨宏观的应力-应变曲线,并指出关节软骨的应力-应变曲线呈非线性指数曲线关系;吴几恺等^[11]通过对新鲜尸体的关节软骨进行单轴压缩试验,得到了定载荷条件下的蠕变曲线,并将其与椎间盘纤维环(纤维软骨)的力学性质进行比较。国外学者则对软骨不同深度的力学行为进行研究。Sakai等^[12]通过压缩试验发现局部压应变随软骨的深度而变化。Kiviranta等^[13]对软骨的泊松比进行研究,发现泊松比在浅表层最小,得出泊松比主要是由胶原纤维决定的结论。Salman等^[14]建立一个双相(孔隙介质)、纤维嵌入式软骨模型,用于模拟非围限压缩条件下依据时间和深度变化的泊松比;其参数来源于对牛关节软骨的实验,结果得到依据深度和时间变化的压缩条件及松弛条件下不同层区的泊松比变化曲线,并指出胶原纤维控制拉伸模量,进而决定依据深度变化的泊松比。然而,压缩载荷作用下软骨不同层区的率相关行为研究甚少。当加载率较高时,单位拉伸载荷施加的时间较短,相应地高分子链段发生变形的时间也较短,

本文采用非接触式 DIC 技术,研究不同加载率压缩作用下软骨不同层区的率相关特性。不同加载率作用下,在同一应力时,加载率越大应变越小,这是因为加载率越大,施加在软骨上的载荷越快,软骨发生瞬间变形,没有时间让软骨组织挤出液体的原故,而这种负荷一旦消失,软骨可以迅速复原,这种瞬间变形和复原反应在软骨抵抗冲击负荷中具有重要的作用。恒定加载率压缩作用下,软骨不同层区变形的不同与其各层的微观组成结构有关,在软骨的浅表层、中间层、深层区胶原纤维的分布是不均匀的,其中浅表层的胶原纤维密集排列并与关节表面

平行,含水量也最多,故在法向应力作用下容易变形;中间层的胶原纤维间隙增大排列不规则且分布与关节表面呈一定角度交错,含水量较少,故在法向应力作用下变化缓慢;深层区胶原纤维与关节表面基本垂直且含水量最少,故深层应变变化最小。不同层区的泊松比变化不同与其微观构成也是密不可分的,在法向压缩应力作用下,软骨横向方向上会形成拉伸应变,软骨基质中的胶原纤维会抵抗横向的扩张。由于浅表层胶原纤维密集排列且与关节面基本平行(即与横向基本平行),它的抗膨胀扩张的能力最强,因而浅表层横向变化最小;而深层区由于纤维垂直排列,故抗扩张能力最弱,其横向变化最大;中间层胶原纤维间隙增大、排列不规则,介于两层之间。又由于浅表层法向变化最大,深层最小,故横向与法向相对位移值的比(即泊松比)在深层区最大,浅表层最小,中间层介于浅表层与中间层之间。这与 Salman 等^[14]所阐述的胶原纤维决定沿深度变化的泊松比的结论是一致的。

实验结果证明,关节软骨不同层区的力学性能都具有率相关性,在相同应力下,加载率越大,软骨不同层区的压缩应变越小;在时间足够的情况下,较小的加载率同样可以产生较大的变形,而这种变形可能会对软骨的内部结构造成破坏,使软骨出现病变而不能正常发挥功能,因此应避免长时间的负重,防止慢性应力的损伤^[15]。本实验研究结果可为临床软骨疾病预防、治疗提供理论依据,同时对人工软骨力学评价具有重要意义。

参考文献:

- [1] Mow VC, Ateshian GA. Lubrication and wear of diarthrodial joints [M]// Basic Orthopaedic Biomechanics. Mow VC, Hayes WC, ed. Philadelphia, USA: Lippincott-Raven, 1997: 273-315.
- [2] Lipshitz H, Etheredge R, Glimcher MJ. Changes in the hex-osamine content and swelling ratio of articular cartilage as functions of depth from the surface [J]. J Bone Jt Surg Am, 1976, 58(8): 1149-1153.
- [3] 晏丹,周广东,曹谊林. 关节软骨生化结构及其与力学性能关系研究进展 [J]. 上海交通大学学报: 医学版, 2009, 29(3): 341-345.
- [4] Hunziker EB. Articular cartilage structure in humans and experimental animals [M]// Articular cartilage and osteo-

- arthritis. Kuettner KE, Schleyerbach R, Peyron JG, et al, ed. New York: Raven Press, 1992: 183-199.
- [5] Hogan A. A direct comparison of long-term hyaluronic acid and corticosteroid intra-articular injections for moderate arthritis in patients aged twenty-five to fifty years old [D]. USA: Cornell University, 2011.
- [6] 那键, 刘艺, 马克勇, 等. 老年性骨关节炎的分子生物学机制及治疗展望[J]. 中国老年学杂志, 2010, 30(20): 3035-3036.
- [7] 董启榕, 郑祖根, 王以进. 关节软骨的生物力学特性研究[J]. 苏州医学院学报, 1999, 19(3): 244-246.
- [8] Bastawros AF, Bart-Smith H, Evans AG. Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam [J]. J Mech Phys Solids, 2000, 48(2): 301-322.
- [9] Bey MJ, Soslowsky L. Two-dimensional intratendinous strains of the human rotator cuff: Technique and preliminary results [J]. Trans Annu Meet Orthop Res Soc, 2000, 25: 405.
- [10] 孟维春, 董启榕. 关节软骨压缩特性的实验研究[J]. 医用生物力学, 2003, 18(1): 28-33.
- Meng WC, Dong CR. The experiment study on the compression properties of articular cartilage [J]. J Med Biomech, 2003, 18(1): 28-33.
- [11] 吴凡恺, 张均一, 梁路光, 等. 关节软骨粘弹性的实验研究[J]. 中国医学物理学杂志, 1995, 12(3): 144-146.
- [12] Sakai N, Hagihara H, Furusawa T, et al. Analysis of biphasic lubrication of articular cartilage loaded by cylindrical indenter [J]. Tribol Int, 2012, 46(1): 225-236.
- [13] Kiviranta P, Rieppo J, Korhonen RK, et al. Collagen network primarily controls poisson's ratio of bovine articular cartilage in compression [J]. Orthop Res, 2006, 24(4): 690-699.
- [14] Chegini S, Ferguson SJ. Time and depth dependent poisson's ratio of cartilage explained by an inhomogeneous orthotropic fiber embedded biphasic model [J]. J Biomech, 2010, 43(9): 1660-1666.
- [15] Cooper C. Occupational activity and the risk of osteoarthritis [J]. J Rheumatol Suppl, 1995, 43: 10-12.

(上接第 134 页)

- [3] 黄家阳, 邱义芬, 颜吟雪, 等. 弹射座椅的静态舒适性仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(10): 1168-1171.
- [4] 王春洁, 曾福明. 弹射座椅动态舒适性与人椅动力学特性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 375-378.
- [5] 程明. 浅谈民用飞机驾驶员座椅的设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2009, 2: 41-44.
- [6] 周有礼, 江升修, 罗世忠. 人体坐姿与坐椅界面间之生物力学分析[J]. 医用生物力学, 1999, 14(2): 65-73.
- Zhou YL, Jiang SX, Luo SZ. Biomechanical analysis of body posture and seating interface [J]. J Med Biomech, 1999, 14(2): 65-73.
- [7] 徐明, 夏群生. 体压分布的指标[J]. 中国机械工程, 1997, 8(1): 55-58.
- [8] 张鄂, 洪军, 梁建, 等. 汽车人机接触界面体压分布的实验与评价研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 538-542.
- [9] 黄榕熙, 胡国清, 陈雄, 等. 人体压力分布测量技术的研究现状与发展综述[J]. 生命科学仪器, 2006, 4(6): 10-15.
- [10] de Looze MP, Kuijt-Evers LF, van Dieen J. Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures [J]. Ergonomics, 2003, 46(10): 985-997.
- [11] Kyung G, Nussbaum MA. Driver sitting comfort and discomfort (part II): Relationships with and prediction from interface pressure [J]. Int J Ind Ergonom, 2008, 38(5-6): 526-538.
- [12] Moes NC. Variation in sitting pressure distribution and location of the points of maximum pressure with rotation of the pelvis, gender and body characteristics [J]. Ergonomics, 2007, 50(4): 536-561.

(上接第 140 页)

- [10] Xiong FL, Chong CK. Parametric numerical investigation on haemodynamics in distal coronary anastomoses [J]. Med Eng Phys, 2008, 30(3): 311-320.
- [11] 乔爱科, 刘有军. 具有不同移植管-宿主动脉直径比的冠状动脉搭桥术的血流动力学仿真比较[J]. 中国生物医学工程学报, 2006, 25(4): 453-459.
- [12] Vimmr J, Jonašova A, Bublik O. Effects of three geometrical parameters on pulsatile blood flow in complete idealised coronary bypasses [J]. Comput Fluids, 2012, 69: 147-171.
- [13] Lee D, Su JM, Liang HY. A numerical simulation of steady flow fields in a bypass tube [J]. J Biomech, 2001, 34(11): 1407-1416.
- [14] Cole JS, Watterson JK, O'Reilly MJG. Numerical investigation of the haemodynamics at a patched arterial bypass anastomosis [J]. Med Eng Phys, 2002, 24(6): 393-401.
- [15] Perktold K, Resch M, Florian H. Pulsatile non-Newtonian flow characteristics in a three-dimensional human carotid bifurcation model [J]. J Biomech Eng, 1991, 113(4): 464-475.
- [16] 程彬彬, 李玉青, 严志强, 等. 切应力诱导的内皮祖细胞在与血管平滑肌联合培养的内皮细胞表面黏附及其机制[J]. 医用生物力学, 2009, 24(S): 13.