

文章编号: 1004-7220(2022)02-0312-05

老年人坐立转换时股骨近端应力分布的有限元分析

王攀¹, 霍洪峰^{1,2}

(1.河北师范大学体育学院, 石家庄 050024; 2.河北省人体运动生物信息测评重点实验室, 石家庄 050024)

摘要:目的 通过建立股骨近端有限元模型,分析在坐立(sit-to-stand, STS)转换站立阶段初期,股骨近端在自选速度起立和快速起立条件下的损伤风险。**方法** 将老年人股骨近端CT影像三维重建、逆向建模完成实体模型。通过材料赋值和网格划分建立有限元模型,基于有限元分析软件ANSYS,通过边界条件约束,并加载1.733、1.837 kN载荷,得到不同起立速度下股骨近端的应力分布和应变。**结果** 应力集中区域均为大转子内侧边缘和股骨颈。应力和微应变峰值出现在大转子内侧边缘。快速起立下应力峰值为30.16 MPa,微应变峰值为2 553.5;自选速度起立下应力和微应变峰值较低,分别为28.69 MPa和2 430.4。对于股骨颈应力集中区,快速、自选速度起立下应力范围分别为13.42~23.46、12.76~25.51 MPa。**结论** 频繁的STS转换会使老年人股骨近端有疲劳性骨折的风险;快速STS转换比自选速度STS转换对股骨近端有更高的损伤风险。

关键词: 坐立转换; 股骨近端; 应力分布; 老年人

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.02.019

Finite Element Analysis on Stress Distributions of Proximal Femur in the Elderly During Sit-to-Stand Transition

WANG Pan¹, HUO Hongfeng^{1,2}

(1.Physical Education Institute, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2.Hebei Provincial Key Laboratory of Human Sports Bioinformation Evaluation, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: **Objective** By establishing finite element model of the proximal femur, the injury risk of proximal femur under the conditions of self-selected speed rise and rapid rise at initial stage of standing during sit-to-stand (STS) transition was analyzed. **Methods** CT images of proximal femur in the elderly were processed with three-dimensional (3D) reconstruction and reverse modeling, so as to complete the solid model. The finite element model was established through material assignment and meshing. Based on the finite element analysis software ANSYS, the boundary conditions were constrained, and 1.733 kN and 1.837 kN loads were applied to obtain stress distributions and strain of proximal femur at different rising speeds. **Results** The stress concentrated at medial edge of the greater trochanter and the femoral neck. The peak stress and micro-strain appeared on inner edge of the larger rotor. The peak stress was 30.16 MPa and peak micro-strain was 2 553.5 at rapid rising speed. The peak stress and peak micro-strain at self-selected rising speed were 28.69 MPa and 2 430.4, respectively, which were relatively lower. For stress concentration area of femoral neck, the stress ranges at rapid rising speed and self-selected rising speed were 13.42-23.46 MPa and 12.76-25.51 MPa, respectively. **Conclusions** Frequent STS transition may increase the risk of fatigue fractures for proximal femur in the elderly. Rapid STS transition has a higher injury risk for proximal femur than STS transition at self-selected speed.

Key words: sit-to-stand (STS) transition; proximal femur; stress distribution; the elderly

收稿日期: 2021-05-16; 修回日期: 2021-07-21

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(SQ2021215), 河北省专业学位研究生教学案例建设项目(KCJSZ2020031)

通信作者: 霍洪峰, 高级实验师, E-mail: hhf413@163.com

坐立 (sit-to-stand, STS) 转换是人日常生活中常见的活动。研究表明,健康人群每天经常进行超过 50 次的 STS 活动^[1]。STS 作为一项负重任务,也比步行等运动对下肢关节有更大的负荷^[1-2]。坐姿到站姿的变换是两个稳定姿势之间的转换,需要全身部位参与运动^[3]。STS 转换是人独立日常活动的前提,影响着生活质量^[4-5]。在不同的功能需求下,下肢可以利用不同的肌肉联系来协调 STS 动作,这需要人体具有足够的力量、协调性与平衡性^[6]。STS 转换也广泛应用于临床中评价各类人群的运动功能与下肢关节炎。

对于老年人,STS 转换作为一种特定的转移技能,受到心理和生理过程的多重影响^[7]。肌力和输出功率是衡量老年人 STS 转换过程中肌肉功能的关键参数^[8-9]。由于相关的神经肌肉力量和协调性随着年龄增大而下降,对于老年人,STS 转换可能是一项具有挑战性的任务^[10]。研究发现,大多数 STS 转换中的动力学变量表现出与年龄相关的下降趋势,且取决于 STS 转换的不同阶段。老年人在 STS 中表现出与年轻人相似的策略,质心加速程度却不同^[11-13]。

快速 STS 转换在临床中也是一种可靠的功能活动测试方式^[14-15]。快速 STS 转换时,受试者髌、膝关节峰值速度增加,而起立时间没有改变^[16]。相对于自选速度,快速起立对于中老年人具有更高的难度。在 STS 转换过程中,髌关节呈现一个先屈再伸直的过程,髌关节角度在 STS 转换中不断改变。准备阶段时,髌关节主动屈曲并身体前倾,股骨近端承受较大的应力。股骨近端作为髌关节的一部分,具有独特的生物力学和解剖特性。然而,目前鲜有关于 STS 转换时股骨近端应力分布的有限元分析研究。本文通过建立老年人股骨近端有限元模型,分析在 STS 转换的站立阶段初期,股骨近端在自选速度起立和快速起立条件下的应力和应变特征,探讨老年人股骨近端损伤的风险。

1 实验方法

1.1 三维重建

采集对象为 1 名男性,年龄 67 岁,身高 168 cm,体重 61 kg,下肢无损伤史、日常活动能力正常。在采集对象髌部放松、不再发生移动后,利用 Definition AS 64 排螺旋 CT 对其髌关节进行扫描,

扫描参数如下:电压 120 kV、电流 170 mA、层厚 0.6 mm、层间距 0.6 mm。获取 CT 扫描数据,储存为 DICOM 格式文件,共 231 张图像。采集对象对实验方案及影像用途表示知情同意。

将 DICOM 文件导入 Mimics 21.0 中,将所有图像选中进行单个病例的三维重建。初步建立三维模型后,保证 CT 图像的各个解剖方向与人体坐标轴相符合。对每张图像进行区域增长操作以补充图像缺陷,并进行阈值分割。将股骨近端的骨骼三维模型从整体模型中提取出来,并以 stl 格式文件输出保存。

1.2 逆向建模

将 STL 格式的模型文件导入 Geomagic Studio 2013 软件中进行逆向建模,表达模型的拓扑信息。模型导入后,首先使用网格医生进行检测,发现模型存在的缺陷并进行自动处理,然后手动对模型坑坑洼洼的表面进行光滑处理。经过去除特征、创建流形等操作,去除不必要钉状物等影响模型的曲面因素,以及对模型不连接的位置进行优化。在保留股骨近端解剖特征的前提下,最终经过精确曲面获得实体模型,并保存为 wrp 格式文件。

1.3 有限元建模

ANSYS 工程环境中完成模型建立。将 wrp 格式的模型文件导入 Workbench 19.2 中进行建模与分析。将实体模型导入有限元软件后,基于弹性力学的假设,需要对材料参数进行设置。本文采用均一材料赋值法,设置股骨密度为 $2\ 080\ \text{kg/m}^3$ 。根据密度以及函数计算股骨的弹性模量,设置股骨弹性模型为 17 GPa。骨骼材料为非线性、非匀质、各向异性,在有限元分析中为简化问题将其视为线弹性、匀质、各向同性。综合实验需要、受试者身体情况、运动功能能力和以往研究实验的经验,设置泊松比为 0.265^[17]。

材料设定完成后,进行网格划分。逆向建模中尽可能保留股骨近端的解剖形状特征,从而保留不规则的曲线特征,故采用四面体网格进行划分。网格的单元平均质量为 0.711 84,在模型精度合格的范围内。网格划分是网格模型质量的关键。考虑计算机运行计算能力和研究精度的需要,选择 1 mm 网格精度并进行自动划分,最后手动调整低质量的网格单元,完成有限元模型建立(见图 1)。

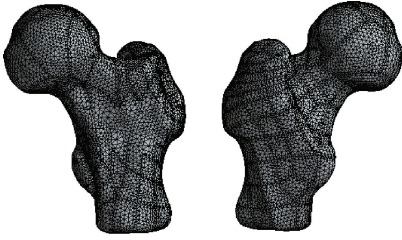


图1 股骨近端有限元网格模型

Fig.1 Finite element mesh model of proximal femur

1.4 模型有效性验证

将完成的有限元模型模拟中立位单腿站立姿势,与前人研究对比验证有效性。取正常髌白下髌白覆盖程度 30° 的股骨近端状态,对股骨上下端横断面进行约束,没有位移和转动,负荷条件为 1.7 kN (约3倍体重^[19]),与矢状轴成 15° 角。仿真结果显示,股骨颈内侧小转子存在高的压应力分布区,股骨头应力峰值为 8.18 MPa 。由此可见,分析得到的应力特征与文献[18]中的结论一致,表示模型具备有效性。

1.5 有限元分析条件

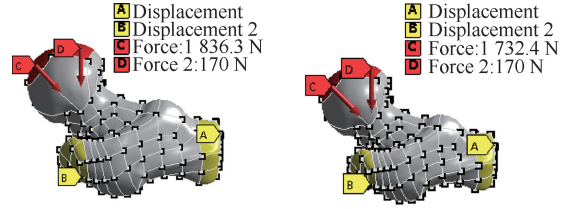
以往研究建立了多种 STS 转换的动作模式模型与力学计算模型。本文采用老年人 STS 转换的生物力学模型^[20],即以合力矩原理为依据,把人体按照选定的人体模型看成由多个环节组成的刚性系统,通过推导和计算,得到站立时下肢所需肌肉力量与人体身高和体质量的关系式:

$$F = 1.7254 Hmg \quad (1)$$

式中: F 为下肢单侧肌肉群合力; H 为身高; m 为人体质量; g 为重力加速度, $g=9.8\text{ m/s}^2$ 。分析需加载 f 和竖直向下 170 N 重力;固定模型下端与股骨大转子作为边界条件。

1.5.1 自选速度起立的受力 根据受试者的身高和体质量,并进行统一单位制得到下肢单侧肌群合力为 1.733 kN ,即用于加载有限元分析的载荷为 1.733 kN ,方向垂直于股骨头球面[见图2(a)]。

1.5.2 快速起立的受力 STS 转换快速起立的最大伸膝力矩与自选速度下起立相比具有显著性差异^[16],其比值为 $88:83$ 。可以以此推导,得到快速起立速度的下肢合力为 1.837 kN 。由于快速起立时身体向前的加速度会增加,矢状轴分力相应增加,加载力的角度由股骨头球面的垂直法线方向向矢状轴偏移 1.5° [见图2(b)]。



(a) 快速起立

(b) 自选速度起立

图2 边界条件与载荷加载情况

Fig.2 Boundary conditions and loading (a) Rapid rise, (b) Rise at self-selected speed

2 结果

由模拟 STS 转换自选速度起立和快速起立得到的等效应力和应变云图可知,整个股骨近端的应力变化较复杂,应力集中区域均为大转子内侧边缘和股骨颈。应力和微应变峰值出现在大转子内侧边缘,快速起立下应力峰值为 30.16 MPa ,微应变峰值为 2553.5 ;自选速度起立下应力和微应变峰值较低,分别为 28.69 MPa 和 2430.4 。对于股骨颈应力集中区,快速起立下应力范围为 $13.42\sim 23.46\text{ MPa}$,自选速度起立应力范围较大($12.76\sim 25.51\text{ MPa}$),峰值较高(见表1、图3)。

表1 模型应力特征与应变峰值

Tab.1 Model stress characteristics and strain peaks

参数	自选速度起立	快速起立
应力集中区域	大转子内侧边缘、 股骨颈	大转子内侧边缘、 股骨颈
应力峰值/MPa	28.69	30.16
股骨颈应力范围/MPa	12.76~25.51	13.42~23.46
微应变峰值	2430.4	2553.5

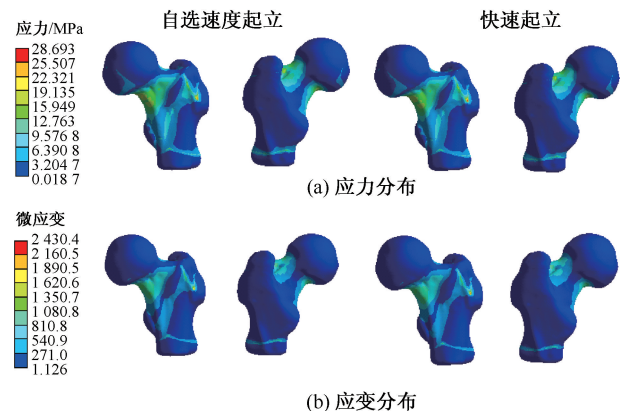


图3 不同速度起立下股骨近端有限元分析结果

Fig.3 Finite element analysis results of proximal femur at different rising speeds (a) Stress distributions, (b) Strain distributions

3 讨论

实际运动中,髋关节传递的作用力有所倾斜,将降低股骨颈处的拉应力,而且周围肌肉、韧带等也对股骨的拉应力具有一定弱化作用^[21]。当老年人从能够完成站立的最低座高站立起来时,要使用97%的最大肌力^[22]。因此,老年人 STS 转换往往需要上肢支撑力或他人协助,这也使得股骨近端的受力比分析结果要小。受 CT 影像质量限制,本文建立模型采用均一赋值法,并没有对皮质骨和松质骨分别进行材料定义。股骨近端分布不均的皮质骨、松质骨是良好的抵抗弯曲应力的结构^[23]。其中,以松质骨对抵抗弯曲应力,保持股骨的弹性稳定贡献最大,皮质骨对抵抗破坏能力最强^[24]。根据股骨近端的骨骼材料特性来看,仿真呈现的应力特征比较合理。由于骨骼的非线性、非匀质性、各向异性均较弱,基于弹性力学假设,可以将骨骼设为线弹性、匀质、各向同性。

物体受到外力或其他因素的作用以后,物体内各个部分之间产生相互作用的内力,单位面积上的内力称为应力。应力是组织产生磨损的重要因素,磨损进而会影响组织的正常功能。由图 3 应力峰值的集中区域可见,在股骨大转子内侧边缘有着比较高的损伤风险。从临床经验和结构材料特性上看,股骨大转子本身并不是易损伤的部位,但应力集中造成的磨损容易引起大转子周围组织的损伤^[17]。因此,频繁的 STS 转换可能会引起大转子滑囊炎。两种速度下 STS 转换均显示出股骨颈下侧为应力集中区域。股骨颈处截面相对较小、厚度较薄、密度较低,且截面变化大、应力集中程度也相对较高,容易首先发生损伤。大部分股骨颈骨折的老年人存在骨质疏松症状^[25];随年龄增长的骨量下降,使得老年人在日常生活中更容易在股骨颈处发生损伤。对于股骨颈处的应力特征,与模型整体呈现的峰值对比不同,STS 转换自选速度起立比快速起立有着更高的峰值;自选速度下应力最集中区域与峰值出现在股骨颈下侧,而快速起立同时出现在上侧与下侧。当前倾角改变时,股骨应力承受能力变差,同时还会承受更大的应力^[26]。本文推测,因为快速起立出于向前快速移动的要求,增加了对股骨近端矢状轴上的分力,导致股骨颈处的应力分布

相对分散。研究表明,起立速度的增加会使 STS 转换中下肢关节力矩^[16,27]。从应力峰值上看,STS 转换任务中快速起立比自选速度起立要更大,与前人的研究结论相符。

应变是用来描述物体各部分线段的长度和两线段夹角的改变,是指在外力或其他作用因素下物体局部的相对变形。变形量过大,会改变骨的材料特性并降低骨的力学性能。根据“机械负荷理论”可知,结构载荷产生的微应变为 100~1 500 时,骨组织的吸收和重塑形成平衡状态;微应变为 1 500~3 000 时,骨组织重塑变得频繁且活跃,同时微骨折损伤开始形成并随应变提高而加剧;当微应变超过 3 000 时,疲劳造成的微损伤不易修复,从而导致程度较高的微骨折甚至有疲劳骨折的风险^[28]。不同速度起立 STS 转换站立初期的高微应变区域为 1 500~3 000,即处于损伤的风险中。该结果提示,频繁的 STS 转换可能会引起老年人股骨近端的疲劳损伤。快速起立的 STS 转换比自选速度起立有着更高的应变峰值和平均值,即有着更高的损伤风险,提示在日常生活中,老年人 STS 转换站立阶段初期应尽量使用自选速度,而在临床试验中对于 STS 转换快速起立的使用也应慎重。相较于年轻人进行双腿站立、坐、蹲、上下楼梯和单腿站立等日常动作,老年人在 STS 转换站立初期有着更大的微应变^[29]。本文推测原因是 STS 转换动作对人体产生的负荷较大,或者老年人髋关节伸展肌的虚弱和动作策略的改变使得骨骼损伤风险较高^[11]。

本文仅建立老年人股骨近端模型,模拟仿真站立阶段初期的动作,而不同性别、年龄、体重人群在 STS 转换不同动作阶段,其各下肢环节具有不同生物力学特征^[11-13],后续研究可以着眼于此。此外,座椅高度是 STS 转换任务最重要的决定因素之一,从不同的座椅高度上起立时通常采取不同的起立策略,对人体造成的负荷不尽相同,也是值得研究的问题^[7,30]。

4 结论

本文建立老年人股骨近端有限元模型,对自选速度起立 STS 转换与快速起立 STS 转换的站立阶段初期进行模拟仿真,得到其应力特征与应变。结果表明,股骨近端的股骨颈和大转子内侧边缘为应

力集中区,有着较高的损伤风险。频繁的 STS 转换会使老年人股骨近端有疲劳性骨折的风险,而快速起立 STS 转换比自选速度起立 STS 转换对股骨近端有着更高的损伤风险。

参考文献:

- [1] DALL PM, KERR A. Frequency of the sit to stand task; An observational study of free-living adults [J]. *Appl Ergon*, 2010, 41(1): 58-61.
- [2] KATIA T, STÉPHANE A, DANIEL F, *et al.* Sit-to-stand alterations in advanced knee osteoarthritis [J]. *Gait Posture*, 2012, 36(1): 68-72.
- [3] OTTAVIANO E, CASTELLI G. A procedure for experimental evaluation of the sit-to-stand for the design of assisting devices [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2013: 44-47.
- [4] MAO YR, WU XQ, ZHAO JL, *et al.* The crucial changes of sit-to-stand phases in subacute stroke survivors identified by movement decomposition analysis [J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 185.
- [5] ALICIA MR, DIRK W, PABLO L, *et al.* Assessment of asymmetric leg loading before and after total hip arthroplasty using instrumented shoes [J]. *J Neuroeng Rehabilitation*, 2014, 11(1): 20.
- [6] KHEMLANI MM, CARR JH, CROSBIE WJ. Muscle synergies and joint linkages in sit-to-stand under two initial foot positions [J]. *Clin Biomech*, 1999, 14(4): 236-246.
- [7] LORD SR, MURRAY SM, CHAPMAN K, *et al.* Sit-to-stand performance depends on sensation, speed, balance, and psychological status in addition to strength in older people [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2002, 57(8): M539-543.
- [8] REID KF, FIELDING RA. Skeletal muscle power; A critical determinant of physical functioning in older adults [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2012, 40(1): 4-12.
- [9] ULRICH L, HOLGER C, MICHAEL S, *et al.* Measuring power during the sit-to-stand transfer [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2003, 89(5): 466-470.
- [10] JEON W, HSIAO HY, GRIFFIN L. Effects of different initial foot positions on kinematics, muscle activation patterns, and postural control during a sit-to-stand in younger and older adults [J]. *J Biomech*, 2021, 117: 110251.
- [11] SMITH TM, HESTER GM, HA PL, *et al.* Sit-to-stand kinetics and correlates of performance in young and older males [J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2020, 91: 104215.
- [12] TINETTI ME. Performance-oriented assessment of mobility problems in elderly patients [J]. *J Am Geriatr Soc*, 1986, 34(2): 119-126.
- [13] MASAHIRO F, LI-SHAN C. Dynamic balance control during sit-to-stand movement: An examination with the center of mass acceleration [J]. *J Biomech*, 2012, 45(3): 543-548.
- [14] FRANCESC MM, IVÁN VF, JUAN LC, *et al.* Five times sit-to-stand test in subjects with total knee replacement: Reliability and relationship with functional mobility tests [J]. *Gait Posture*, 2018, 59: 258-260.
- [15] BENJAMIN FM, ROSS AC, KELLY JB, *et al.* Five times sit-to-stand following stroke: Relationship with strength and balance [J]. *Gait Posture*, 2020, 78: 35-39.
- [16] WANG J, SEVERIN AC, SIDDICKY SF, *et al.* Effect of movement speed on lower and upper body biomechanics during sit-to-stand-to-sit transfers: Self-selected speed vs. fast imposed speed [J]. *Hum Mov Sci*, 2021, 77: 102797.
- [17] YEKUTIEL K, ZOHAR Y. New insights on the proximal femur biomechanics using digital image correlation [J]. *J Biomech*, 2020, 101: 109599.
- [18] 李长有, 王禹祥, 范广宇. 髋臼发育不良性髋关节的三维有限元非线性接触压力分析 [J]. *医用生物力学*, 2005, 20(1): 18-24.
- LI CY, WANG YX, FAN GY. Nonlinear contact stress analysis by three dimensional finite element on dysplastic hip joint [J]. *J Med Biomech*, 2005, 20(1): 18-24.
- [19] NOBLE PC, ALEXANDER JW, LINDAHL LJ, *et al.* The anatomic basis of femoral component design [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1988, 235: 148-165.
- [20] 胡文刚, 关惠元. 基于生物力学的老年人坐立转换模型 [J]. *林业工程学报*, 2020, 5(6): 174-178.
- [21] SHIH KS, TSENG CS, LEE CC, *et al.* Influence of muscular contractions on the stress analysis of distal femoral interlocking nailing [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(1): 38-44.
- [22] MICHAEL AH, BARRY SM, MARGARET LS. The role of strength in rising from a chair in the functionally impaired elderly [J]. *J Biomech*, 1996, 29(12): 1509-1513.
- [23] 郑利钦, 林梓凌, 何祥鑫, 等. 有限元法分析不同侧方跌倒角度下股骨颈骨折裂纹扩展的断裂力学特征 [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(8): 1203-1207.
- [24] THOMAS C, MAYHEW PM, POWER J, *et al.* Femoral neck trabecular bone: Loss with aging and role in preventing fracture [J]. *J Bone Miner Res*, 2009, 24(11): 1808-1818.
- [25] 魏文卿, 崔海坡, 陈舰, 等. 不同固定方式对股骨颈骨折固定效果的影响 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(2): 216-222.
- WEI WQ, CUI HP, CHEN J, *et al.* Influence of fixation methods on fixation effects of femoral neck fracture [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(2): 216-222.