

股骨颈骨折愈合后钉道植骨应力分布的有限元分析

唐洪涛¹, 仝允辉¹, 张美超², 赵卫东²

(1. 河南省洛阳正骨医院, 河南 洛阳 471002; 2. 南方医科大学, 广东 广州 510515)

摘要 目的: 探讨股骨颈骨折经空心加压螺钉固定, 骨折愈合后取出螺钉遗留的钉道内是否应予植骨, 为临床选择治疗方法提供依据。方法: 重建人体股骨头颈部的三维有限元仿真模型, 模拟钉道不植骨与钉道植骨的股骨头颈部, 对模型进行虚拟加载和仿真计算。比较 2 种模型在同一载荷下的应力分布及位移情况。结果: 不植骨模型的最大应力集中在股骨头负重区, 植骨模型的最大应力集中在股骨颈下方的内后侧处即股骨矩区, 且不植骨模型股骨头负重区应力最大值($0.482 \text{ E} + 8$) 远远大于植骨模型应力最大值($0.295 \text{ E} + 8$)。钉道位置的位移测试显示, 2 组模型股骨头区位移最大, 不植骨模型的股骨头区位移值($0.391 \text{ E} - 0.3$) 明显大于植骨模型的股骨头区位移值($0.352 \text{ E} - 0.3$)。结论: 股骨颈骨折采用空心加压螺钉内固定, 骨折愈合取出螺钉后钉道内植骨有利于提高股骨头颈部的生物力学性能, 预防因股骨头部应力过于集中导致的股骨头坏死塌陷。

关键词 股骨颈骨折 股骨头坏死 生物力学 有限元分析

Finite element analysis of the stress distribution in femoral head and neck of bone grafting in nail path after femoral neck fracture healing TANG Hong - tao^{*}, TONG Yun - hui, ZHANG Mei - chao, et al. ^{*} Luoyang Orthopaedic Hospital, Luoyang 471002, Henan, China

ABSTRACT **Objective:** To investigate the rationality of bone grafting in nail path after femoral neck fracture healing and internal fixator was removed so as to provide theoretical support for clinical therapy. **Methods:** Two three - dimensional finite element models of the femoral head and neck region were reconstructed after femoral neck fracture healing and internal fixator was removed, one undergone bone grafting. Both of the models were simulated under the load of body weight, and the stress and shift on the femoral head and neck were calculated and compared. **Results:** Analysis of the three - dimension finite element model showed that the massive stress concentrated on weight loading region of femoral head without bone grafting, while the massive stress concentrated on the region of calcar femorale of grafting - bone model. The max - stress value($0.482 \text{ E} + 8$) in the weight loading region of femoral head without bone grafting was far higher than the max - stress value($0.295 \text{ E} + 8$) of ungrafting - bone model. In the nail path shift test, value of shift in the region of femoral head of the ungrafting - bone model($0.391 \text{ E} - 0.3$) significantly exceeded that of grafting - bone model($0.352 \text{ E} - 0.3$). **Conclusion:** For the treatment of femoral neck fracture with hollow compression screws, bone grafting in the channel of screw should be used to improve biomechanical integrity of femoral head and neck after fracture healed and hollow compression screws were taken out. This is of benefit to preventing the collapse of femoral head owing to excessive stress concentration on femoral head.

Key words Femoral neck fractures; Femur head necrosis; Biomechanics; Finite element analysis

股骨头缺血性坏死塌陷和骨折不愈合是股骨颈骨折术后两大并发症。近年来, 随着内固定技术的改进, 骨折不愈合率已大大降低, 但股骨头缺血性坏死塌陷的发生率却无明显下降, 特别是股骨颈骨折愈合去除内固定后股骨头坏死塌陷的发生率依然很高。危杰等^[1]分析了 137 例股骨颈骨折术后患者资料, 得出股骨头缺血性坏死和股骨头晚期塌陷总体发生率分别为 37.2% 和 24.1%, 这与国内外多数报道接近。临床上对股骨颈骨折愈合后取出空心加压螺钉遗留的钉道内是否植骨存在争议。为此, 我们通过有限元方法分析了股骨颈骨折空心加压螺钉固定, 骨折愈合

后钉道植骨与不植骨模型在站立时股骨头颈部的应力分布情况, 现报告如下。

1 材料与方法

1.1 股骨三维重建 依据中国虚拟人男 1 号的断面切削数据集重建股骨上段的三维立体模型(图 1)。经过南方医科大学生物力学实验室购买的自由造型系统“计算机雕刻”软件的处理及矢量化输出等方法^[2], 把股骨模型导入大型有限元软件 Ansys 的前处理模块。采用四面体单元对模型进行网格划分, 建立起股骨的有限元网格模型, 其中包括皮质骨 43 827 个单元, 88 649 个结点; 松质骨 99 432 个单元, 151 578 个

结点。性质定义如下^[2-3]:皮质骨 $E = 10\,000\text{ Mpa}$, $\sigma = 0.3$; 松质骨 $E = 500\text{ Mpa}$, $\sigma = 0.25$ 。我们将植骨模型理论上看作正常的股骨; 不植骨模型在距离大转子下 1 cm 处 2 个钉道、4 cm 处 1 个钉道, 呈倒三角形, 钉道深度达股骨软骨面下 5 mm, 将钉道内的单元属性指定为空单元, 这种单元不参加任何形式的计算(图 2)。

1.2 三维有限元模型模拟加载及求解 模型加载方向为重力方向。通过模拟人单腿站立时的状态, 对 2 个模型分别施加相似的载荷条件: 固定股骨体下表面, 对股骨头最高点处施加相当于正常人体质量一半的压力约 500 N。设置求解条件后分析计算 2 种模型的应力和位移情况。

2 结果

2.1 载荷 - 应力关系 不植骨与植骨有限元模型在同一载荷(500 N)加载下, 钉道位置的应力测试显示, 钉道底部及股骨头区为应力集中区, 不植骨模型的最大应力集中在股骨头负重区, 植骨模型的最大应力集中在股骨颈下方的内后侧处即股骨矩区, 且不植骨模型股骨头负重区应力最大值为 $0.482\text{ E} + 8 (0.482 \times 10^8)$ 远远大于植骨模型应力最大值 $0.295\text{ E} + 8 (0.295 \times 10^8)$ (图 3)。

2.2 载荷 - 位移关系 不植骨与植骨有限元模型在

同一载荷(500 N)加载下, 钉道位置的位移测试显示, 2 组模型股骨头区位移最大, 不植骨模型的股骨头区位移值为 $0.391\text{ E} - 0.3$, 明显大于植骨模型的股骨头区位移值 $0.352\text{ E} - 0.3$ (图 4)。

3 讨论

大多数学者仍然认为血液循环障碍是股骨颈骨折后股骨头发生塌陷坏死的主要原因^[4]。但单纯按缺血性股骨头坏死的理论, 骨折时股骨颈周围血管已发生损害, 这就很难解释股骨头在骨折愈合后数年内会发生坏死。马信龙等^[5]认为应力因素改变在股骨头坏死的发生和病理演变过程中起着重要作用。Brown 等^[6]用有限元方法证实了应力集中是股骨头坏死病情进展的主要原因。Kim 等^[7]对坏死股骨头的软骨下骨和中部松质骨进行了力学测定, 也证明了其力学性能的降低与股骨头坏死塌陷有直接关系。

有限元股骨模型载荷 - 应力测试结果显示, 不植骨模型较植骨模型应力更为集中, 且股骨头负重区最大应力远远大于植骨模型。这表明钉道植骨后股骨头应力集中区发生改变, 股骨头负重区的应力减小。有限元股骨模型载荷 - 位移测试结果显示, 在同一载荷下不植骨模型最大位移区(股骨头区)的最大位移值大于植骨模型。这表明钉道植骨后股骨头颈部力学性能有所改善, 承重能力增强。

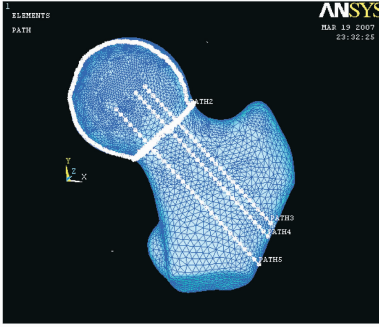
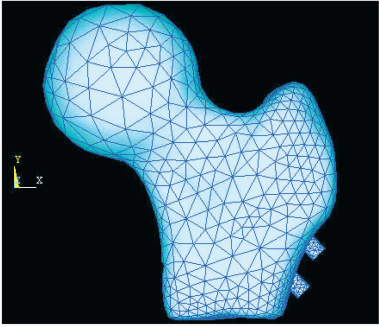
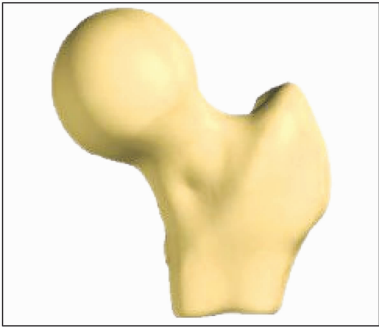
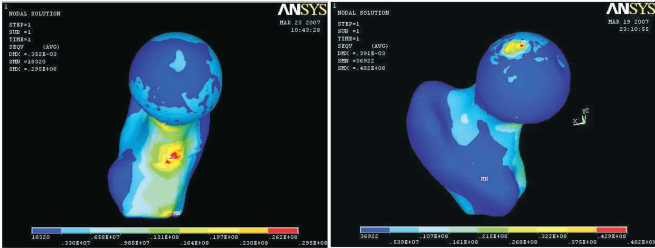


图 1 股骨上端三维立体模型

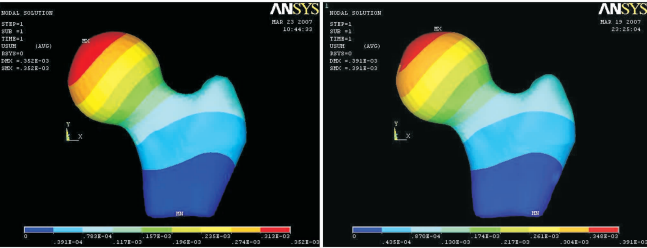
(1) 正常股骨模型

(2) 钉道不植骨模型

图 2 股骨上段有限元模型



(1) 植骨模型的范氏力分布图 (2) 不植骨模型的范氏力分布图



(1) 植骨模型的位移分布图 (2) 不植骨模型的位移分布图

图 3 同一载荷下 2 种模型的范氏力分布图

图 4 同一载荷下 2 种模型的位移分布图

红色区域代表最大应力集中区, 应力强度阶梯由高至低依次为红、橙黄、黄、黄绿、绿、蓝绿、浅蓝、蓝、深蓝色

红色区域代表最大位移变化区, 位移幅度由大至小依次为红、橙黄、黄、黄绿、绿、蓝绿、浅蓝、蓝、深蓝色

了明确诊断。本组资料显示,当患者具有明显的临床症状又具有特征性的影像学征象时,应用传统影像学检查多能明确诊断 AS;此时,SPECT-CT 及 SPECT-DR 融合图像同样具有特征性的表现,在 AS 的病变部位可见明显的放射性核素异常浓聚,并且对 AS 累及的部位、范围和程度的显示往往较传统影像学图像更加全面,对于传统影像检查不能显示的病变亦可准确显示;由于 AS 受累部位的传统影像学表现相同时其病理分期及病变的活跃程度可能不同,此时传统影像学检查无法区分,而融合图像则能准确判断病变部位的病程分期及病变的活动程度;因此,图像融合技术对于传统影像学能够确诊的 AS 仍然具有重要的应用价值。当患者具有一定的临床症状,而传统影像学表现不典型或无异常发现时,AS 的诊断就非常困难;此时,应用图像融合技术就显得至关重要。依据融合图像中放射性核素在病变部位的浓聚表现(尤其是当多部位受累时),结合实验室检查大多可以早期作出诊断。同时,融合图像对 AS 所致的骨炎和软组织炎也能清晰显示,为全面、客观地了解病变提供了科学依据,其作用是其他影像学检查所不能替代的。另

外,图像融合技术尚可应用于 AS 的疗效评价,通过对治疗前后放射性核素在病变部位分布范围和程度变化的对比,并进行半定量分析,为临床制定治疗方案提供客观的依据。

5 参考文献

- [1] 许建荣. 风湿病影像学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2007:64-70.
- [2] van der Linden S, Valkenburg HA, Cats A. Evaluation of diagnostic criteria for ankylosing spondylitis. A proposal for modification of the New York criteria. *Arthritis Rheum*, 1984,27(4):361-368.
- [3] 李广宙,李现军,刘志翔,等. 骨显像对强直性脊柱炎的早期诊断价值[J]. 中华核医学杂志,2001,21(6):339-340.
- [4] 张敏,陈亚玲,刘玉珂,等. 应用图像融合技术诊断骨质疏松[J]. 中医正骨,2010,22(11):22-26.
- [5] 张敏,刘玉珂,陈亚玲,等. 应用图像融合技术诊断骨折愈合[J]. 中医正骨,2010,22(10):22-24.
- [6] 耿会霞,赵德善,高桂珠,等. SPECT/CT 融合图像和 MRI 在诊断髋关节良性病变中的比较[J]. 中国医学影像技术,2010,26(2):337-339.

(2010-12-20 收稿 2010-12-28 修回)

(上接第 23 页)

笔者认为股骨颈骨折采用空心加压螺钉内固定,骨折愈合取出螺钉后钉道内植骨可改善股骨头应力集中、降低股骨头负重区应力、改善股骨头颈部力学性能、增强承重力。植骨后植入骨还能在受体骨内生长愈合,钉道植骨对股骨头颈部的力学性能改善会更为有效,使股骨头坏死塌陷的发生率大大降低。

与动物实验、生物力学实验相比,有限元仿真具有实验条件容易控制、测量部位不受限制和分析指标全面等优点。早期有限元分析由于受多种因素限制,导致有限元模型比较粗糙、分析结果不准确。目前的有限元仿真在几何模型重建及单元材料性质上都有了进一步的发展。本研究建立了逼真的股骨上段有限元模型,并且鉴于分析过程为小变形,近似地把股骨处理为线性材料进行有限元分析,结果比较可信,但仍需生物力学实验及动物实验进一步验证。

4 参考文献

- [1] 危杰,周力,王满宜. 股骨颈骨折术后股骨头缺血性坏死的发生及转归[J]. 中华骨科杂志,2005,25(1):1-6.

- [2] 张美超,史风雷,赵卫东,等. 髋关节外展不同角度股骨颈应力分布的有限元分析[J]. 第一军医大学学报,2005,25(10):1244-1246.
- [3] Sugano N, Takaoka K, Ohzono K, et al. Prognostication of nontraumatic avascular necrosis of the femoral head. Significance of location and size of the necrotic lesion[J]. *Clin Orthop Relat Res*,1994,(303):155-164.
- [4] Chung SM. The arterial supply of the developing proximal end of the human femur[J]. *J Bone Joint Surg Am*,1996,58(7):1961-1970.
- [5] 马信龙,张华峰,马剑雄,等. 生物力学因素对大鼠激素性股骨头坏死的作用[J]. 中国中西医结合外科杂志,2010,16(1):32-35.
- [6] Brown TD, Pedersen DR, Baker KJ, et al. Mechanical consequences of core drilling and bone-grafting on osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Bone Joint Surg Am*,1993,75(9):1358-1367.
- [7] Kim YM, Lee SH, Lee FY, et al. Morphologic and biomechanical study of avascular necrosis of the femoral head[J]. *Orthopedics*,1991,14(10):1111-1116.

(2010-06-20 收稿 2010-10-21 修回)