

• 基础研究 •

胸腰椎骨质疏松骨折行磷酸钙骨水泥灌注成形的生物力学实验

施俊武^{1*}, 胡艇², 池永龙¹, 郭晓山¹

(1. 温州医学院附属第二医院骨科, 浙江 温州 325000; 2. 温州市第二人民医院骨科)

【摘要】 目的: 探讨磷酸钙骨水泥 (CPC) 注射椎体成形术后对胸腰椎骨质疏松骨折椎体的力学影响。方法: 将 4 具甲醛固定的老年尸体胸腰椎标本建立前屈方向加载单椎体骨折模型, 将固液比为 2.5 的自固化 CPC 对胸腰椎骨质疏松骨折标本行成形强化, 骨折前、成形后分别行屈曲压缩力学实验。结果: 在同样的载荷下, 单椎体 CPC 成形后的椎体应变比骨折前小, 有统计学差异 ($t = 6.37, P < 0.05$), 骨质疏松性胸腰椎标本行 CPC 灌注成形可以恢复椎体的强度和刚度, 分别增加 16.92% 和 22.31% ($P < 0.05$)。结论: 椎体内注射 CPC 能明显恢复骨质疏松骨折椎体的力学性质。

【关键词】 骨质疏松; 骨折; 椎骨; 磷酸钙类; 生物力学

Bio mechanical effects of injection with calcium phosphate cement on thoracolumbar vertebrae with osteoporotic fracture SHI Junwu^{*}, HU Ting, CHI Yong-long, GUO Xiao-shan^{*} Department of Orthopaedics, the Second Affiliated Hospital of Wenzhou Medical College, Wenzhou 325000, Zhejiang, China

ABSTRACT Objective To investigate biomechanical influence of vertebroplasty using Calcium phosphate cement (CPC) on thoracolumbar osteoporotic fracture. **Methods** A fracture of single vertebral body was produced by flexing axial loading in thoracolumbar vertebrae specimens obtained from 4 old cadaver. After fracture reduction, the middle fractured vertebral bodies were strengthened using vertebroplasty method and filled with CPC (the ratio of powder over monomer was 2.5:1). Before fracture and after vertebroplasty, biomechanical test of flexion and compression were conducted. **Results** With the same load, the displacement data of vertebral body after being packed with CPC was smaller than that before fracture ($t = 6.37, P < 0.05$). After the fractured vertebral bodies were filled with CPC, their strength and stiffness increased by 16.92% and 22.31% ($P < 0.05$) separately in comparison with osteoporotic vertebral bodies without CPC package. **Conclusion** Packing CPC into the vertebral bodies with osteoporotic fracture is very effective to restore their strength and stiffness.

Key words Osteoporosis; Fractures; Vertebrae; Calcium phosphates; Biomechanics

经皮椎体成形术治疗骨质疏松性椎体骨折已有近 10 年历史。聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 是目前临床上最常用的注入材料之一, 但它的一些不足之处, 如渗漏导致脊髓和神经根受压, 单体吸收引起人体低血压或脂肪栓塞, 持续载荷下骨水泥的机械力学稳定性逐渐减弱等限制了它的广泛应用。自固化磷酸钙骨水泥 (calcium phosphate cement, CPC) 不仅具有良好的可塑性, 而且具有良好的生物力学性质, 有骨传导性和可吸收性、生物相容性、可降解性, 反应不产热, 无毒性, 可操作性好, 可用于注射等特性, 是一种具

有生物学特性的新型的人工骨材料^[1]。对此, 本实验对老年尸体胸腰椎骨质疏松标本 CPC 注射成形术生物力学性能进行研究, 为临床治疗老年胸腰椎骨质疏松性骨折提供必要的实验依据。

1 材料与与方法

1.1 标本制备 4 具甲醛固定的老年尸体胸腰椎标本, 年龄平均 69 岁, 其中男 2 例, 女 2 例, 身高平均 166.5 cm, 体重平均 62.5 kg, 储存时间平均 5 个月, 均摄正侧位片, 以排除先天性畸形、骨折、肿瘤。采用美国 Norland 公司生产的 XR-36 型双能 X 线吸收骨密度仪 (dual energy X-ray absorptiometry, DEXA) 测试每个标本胸腰段区域的骨密度 (BMD, mg/cm^2), BMD 均值在 $860 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 以下的为骨质疏松标本^[2]。本组 4 具甲醛固定的老年尸体胸腰椎标本 BMD 分别为 801、763、786、759 mg/cm^2 。

基金项目: 温州市 2005 年第一期科技计划项目 (编号: 2005075)

通讯作者: 施俊武 Tel: 0577-88222285 E-mail: cocoon@mail.wzj.cn

* 现地址: 温州市第二人民医院骨科

测量每个椎体的 BMD 后用双层塑料袋包扎保存在温度 -20°C 冰柜中。测试前在室温下 (20°C) 解冻 24 h, 游离成单个椎体后将其用湿生理盐水纱布包裹, 然后用塑料袋包扎放置于恒温 (37°C) 冰箱 (广东威仕公司生产) 中至少 1 h 后进行实验^[2,3]。试剂: 采用上海瑞邦公司生产的 CPC。

1.2 标本处理与固定 每具标本随机取 6 个椎体, 切除两旁的肌肉、软组织, 去除后部结构, 两端切除椎间盘及韧带残端, 制作 24 个单椎体标本。标本置于特别夹具内, 浇灌医用骨水泥 (PMMA), 加上下两端固定, 保证两端水平 (倾斜 $\leq 1^{\circ}$), 平整以提高测量精度, 然后编号, 测量几何尺寸, 封装待用。由于本试验为自身压缩前后对照, 故可很好地消除椎体标本的个体差异和节段差异。

1.3 力学模型的建立 胸腰椎标本无论指单椎体标本还是椎体功能节段 (FSU), 均在前屈方向造成压缩性骨折。所有试验力学模型均在结构、载荷、力学性能上保持一致, 均采用新鲜标本或固定标本真实模型, 载荷以 200 N 加载, 加载速度为 $5\text{ mm}/\text{min}$ 。在椎体中心位确定后以前屈方向加载。标本在 CMT 4104 多功能力学试验机 (甘肃天水三思公司生产) 上用特制夹具上下固定, 采用距椎体前缘皮质 5 mm 为加载点^[3]。单个椎体从椎弓根处切除椎体后部结构, 置于测试模具之间, 椎体上下端埋入薄层牙托粉以防水平移动, 出现椎体塌陷或压缩骨折时停止压缩^[4]。椎体出现塌陷或压缩性骨折的标准是载荷-位移曲线出现了最高点, 即椎体的抗压力开始出现下降。试验机的载荷信号由计算机记录, 并由相应的测试分析软件计算椎体的抗压强度 (载荷-位移曲线最高处的载荷数值) 和刚度 (载荷为弹性范围内曲线的斜率)。力学模型建立后进行正式试验。先行预载, 以消除椎体、椎间盘的时间效应、松弛、蠕变等流变性质影响, 然后正式加载采集数据。

1.4 椎体内充填方法 先用直径 2 mm 的钻头在两侧椎弓根内钻孔, 注射针头通过椎弓根内所钻的孔道进入椎体前部后, 用其内芯通畅针头后, 再接上注射器推注骨水泥, 一般可以较轻松地推入, 当遇到阻力时可稍后退针头或转动针头孔的朝向, 或用内芯通畅针头。所有的椎体骨折均产生于加载侧终板下, 通过椎弓根用 5 ml 注射器直径 2 mm 针头, 将 CPC 注入到骨折间隙及椎体卸载后自动复位形成的空隙内, 尽量全部充填椎体内空隙, 每个椎体约 4 ml。

材料的凝固性能: 将固液比为 2.5:1 的 CPC 骨水泥配置好后用 5 ml 注射器 (针头内径为 2 mm), 经椎弓根注入椎体骨小梁间隙内, 注射完毕后将将其浸泡在含生理盐水的 37°C 恒温箱中。

1.5 数据处理 本次试验测得注射前后最大载荷和刚度进行比较, 应用配对资料的 t 检验进行统计学分析, 数据用 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 以 $P < 0.05$ 为差异有显著性意义, 全部计算用 SPSS 11.0 软件进行。

2 结果

2.1 CPC 注射性能和凝固性 用 5 ml 注射器约需 30~40 N 推力, 压强约为 8~10 PSI 小于文献中的 PMMA 注射 20~40 PSI^[2]。这充分证明了 CPC 的注射性能, 完全无须添加其他成分以加强其注射性能。处于骨小梁间隙内的 CPC 仍能

在 30~45 min 内凝固。

2.2 注射前后力学性质的变化 ①骨质疏松椎体标本骨折间隙填塞成形后力学性质的变化统计数值: 骨折前最大载荷为 (1954 ± 46) N, 位移为 5.60 mm, 刚度 (349 ± 18) N/mm; 成形后最大载荷为 (2285 ± 34) N, 位移为 5.35 mm, 刚度为 (427 ± 10) N/mm。②典型椎体骨折前和成形后的载荷与位移关系见图 1。

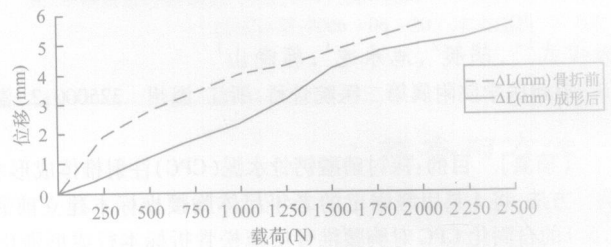


图 1 典型椎体骨折前和成形后的载荷与位移关系

Fig 1 Relationship between loading and displacement in typical vertebrae before fracture and after vertebroplasty

2.3 结果分析 骨质疏松椎体压缩骨折均发生于加载侧的终板下骨折。①在同样的载荷下, 单椎体 CPC 成形后的椎体应变比原来小, 统计显示差异有显著性意义 ($t = 6.37, P < 0.05$), 说明 CPC 修复后椎体的刚度有较大的提高, 而应变却减小。显示 CPC 成形后其椎体变“硬”, 不容易引起压缩性变形。②从单椎体的承载能力来看, 平均能承受 1954 N, 而 CPC 加强成形后能承受 2285 N, 显然采用 CPC 加强成形后的单椎体比原来强得多, 强度提高达 16.9%, 统计显示差异具有显著性意义 ($t = 17.94, P < 0.05$)。③从轴向刚度变化结构看到, 采用 CPC 加强成形后的单椎体轴向刚度比原来提高 22.31% ($t = 13.79, P < 0.05$)。④两者强度和轴向刚度比较方框图更加直观地显示它们之间的差异程度, 见图 2.3。

3 讨论

本实验由于标本量的限制, 采用老年甲醛固定标本, 试验采用自身对照方法, 因此对实验结果不会造成影响。采用经皮穿刺椎体成形术向骨质疏松椎体和骨质疏松性压缩骨折椎体内注射 CPC, 理论上可由于 CPC 扩散充填在骨小梁间从而稳定骨折的骨小梁, 协助支撑, 分担应力, 通过改善椎体力学性能达到治疗作用^[5,6]。本实验选择老年尸体标本, 根据临床骨质疏松椎体压缩骨折最常发生在胸腰段的情况, 使用胸腰段椎体进行椎体成形术和力学测试^[7]。通过本实验证实椎体内注入 CPC 后增强其最大载荷和刚度, 提示临床经皮穿刺椎体成形术治疗椎体压缩骨折时可达强化椎体、改善力学性能的作用。

骨质疏松单椎体的位移开始成线性变化, 而后随着载荷的增加, 应变呈非线性关系, 系典型的椎体应力应变规律。这是因为松质骨依靠其网状结构维持自身力学强度, 当载荷加大到断裂点时, 松质骨开始骨折, 表现为骨小梁空间结构的塌陷, 此时载荷位移曲线处于平台期, 随着大量骨小梁间隙的塌陷, 松质骨被压“实”, 又重新恢复其力学强度, 载荷位移曲线处于上升期。在同样的载荷下, 单椎体 CPC 成形后的椎体应变比原来小, 说明 CPC 修复后椎体的刚度有较大的提高, 而

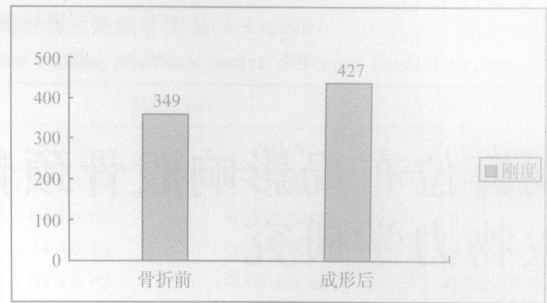
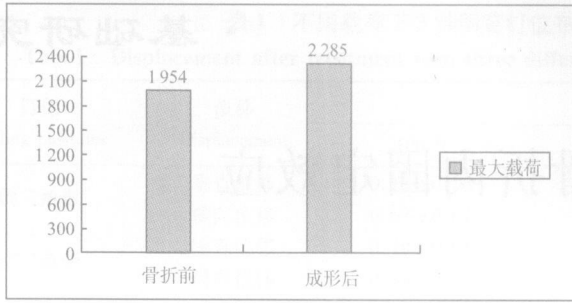


图 2 骨质疏松椎体骨折间隙填充成形前后最大载荷的变化 图 3 骨质疏松椎体骨折间隙堵塞成形前后的刚度变化

Fig. 2 Changes of maximal loading before and after vertebroplasty of osteoporotic vertebral bodies Fig. 3 Changes of stiffness before and after vertebroplasty of osteoporotic vertebral bodies

应变却减小,显示 CPC成形后其椎体变“硬”,不容易引起压缩性变形。

CPC具有很好的黏接性,凝固后与骨质紧密接触,起黏接固定骨折块作用。本实验利用其与骨质的紧密接触和快速凝固性能,及其远远高于松质骨的力学性质,在椎体内充填缺损和裂隙,使得骨折后的椎体再复位后不仅能维持椎体的外形结构,而且恢复内部的完整结构,阻止椎体内的微动,提供一个有利于愈合的稳定的环境。CPC材料注入椎体骨质疏松后的力学性质还与注入部位有关。老年骨质疏松往往多见于终板(尤其是上终板)下骨折,因此该部位应是椎体成形的关键部位。从本实验可以发现,CPC注入椎体内后,在椎体上下终板间形成柱状结构,就可以较小的剂量恢复原来的力学性质。

本组实验数据是在老年尸体胸腰椎骨质疏松标本上获得,其力学分析均为即刻测试结果,向椎体内注入 CPC的椎体成形术能即时加固和稳定伤椎,并填充了伤椎孔隙,避免了纤维组织填充,使骨形成有爬行替代的空间。采用这种办法成形后的骨折椎体,塌陷的松质骨和 CPC的力学性质均高于正常的骨小梁结构的力学性质,因而成形后的椎体力学性质优于原来骨折前椎体。

4 结论

通过本实验可证实骨质疏松性胸腰椎标本行 CPC灌注成形后增强其最大载荷和刚度,明显恢复骨折椎体的力学性质。提示临床经皮穿刺椎体成形术治疗椎体压缩骨折时可达

到强化椎体、改善力学性能的作用。

参考文献

- 1 Nakano M, Hiran o N, Matsuura K, et al Percutaneous transpedicular with calcium phosphate cement in the treatment of osteoporotic vertebral compression and burst fracture J Neurosurg (Spine 1), 2002, 97: 287-293
- 2 Bekoff SM, Mathis JM, Jasper LE, et al An ex vivo biomechanical evaluation of a hydroxyapatite cement for use with vertebroplasty. Spine, 2001, 26 1542-1546.
- 3 Tohmeh AG, Mathis JM, Fenton DC, et al Biomechanical efficacy of unipedicular versus bipedicular vertebroplasty for the management of osteoporotic compression fractures Spine 1999, 24: 1772-1776
- 4 Bai BQ, Laith M J, Frederick J. The use of injectable, biodegradable calcium phosphate bone substitute for the prophylactic augmentation of osteoporotic vertebrae and the management of vertebral compression fractures Spine, 1999, 24: 1521-1526.
- 5 Bekoff SM, Maroney M, Fenton DC, et al An in vitro biomechanical evaluation of bone cements used in percutaneous vertebroplasty. Bone, 1999, 25(2): 23S-26S.
- 6 Kekott SM, Mathis JM, Dermond H, et al An ex vivo biomechanical evaluation of a hydroxyapatite cement for use with kyphoplasty. AJNR Am J Neuroradiol 2001, 22(6): 1212.
- 7 David RW, Elizabeth RM, John MM, et al Effects of augmentation on the mechanics of vertebral wedge fractures Spine 2000, 25 158-165

(收稿日期: 2005-10-21 本文编辑: 连智华)

欢迎浏览新的《中国骨伤》网站

《中国骨伤》新的网站已开通,其网址为 <http://www.zggszz.com>。其内容有:《中国骨伤》杂志的历史回顾、编辑委员会名单、投稿指南、稿件查询、自创刊以来的文章检索、期刊浏览、会议征文、学术论坛、病例讨论、杂志订阅、读者留言等。欢迎广大读者和作者上网浏览。

《中国骨伤》杂志社