

不同受力方向条件下兔直肠黏膜位移量的有限元模拟分析

柯敏辉¹, 叶 玲¹, 陈立武¹, 牛素生², 郑鸣霄¹, 张之玺³

1. 福建中医药大学附属第二人民医院肛肠科, 福建 福州 350003; 2. 福建中医药大学骨伤学院, 福建 福州 350122; 3. 福州大学光弹实验室, 福建 福州 350108

【摘要】目的:观测受力方向对兔直肠黏膜位移量的影响。**方法:**通过测算直肠黏膜内脱垂(IRP)兔直肠黏膜层与黏膜下层的力学指标建立IRP兔肛门直肠有限元模型,模拟在直肠黏膜上施加大小相同方向不同的两种力(一种力垂直向下,一种力平行于直肠黏膜方向),以黏膜脱垂相对明显层面的不同节点为观测对象,计算两种力作用下的节点位移量。**结果:**测得兔直肠黏膜与黏膜下层的杨氏弹性模量为 (4.088 ± 0.1615) MPa、泊松比为 0.4700 ± 0.0050 、剪切弹性模量为 (1.3909 ± 0.0595) MPa。将数据输入兔肛门直肠有限元模型后,测算得两种力在兔直肠腹侧848与850节点的黏膜位移量无显著性差异($P > 0.1$),但在直肠中间位852节点、背侧的854与856节点存在显著性差异($P < 0.05$)。**结论:**受力方向影响兔直肠黏膜位移量,提示黏膜受力方向的差异可能影响排便。

【关键词】直肠;黏膜;位移量;有限元;受力方向;节点;模拟分析

【中图分类号】R318.01

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)06-0781-04

Finite element simulation analysis of the displacement of rabbit's rectal mucosa in different forced directions

KE Min-hui¹, YE Ling¹, CHEN Li-wu¹, NIU Su-sheng², ZHENG Ming-xiao¹, ZHANG Zhi-xi³

1. Department of Anorectum, Second People's Hospital Affiliated to Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350003, China; 2. College of Fractures, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, China; 3. Photoelastic Laboratory, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

Abstract: Objective To observe the influence of different forced directions on the displacement of rabbit's rectal mucosa. **Methods** The finite element model of internal rectal prolapse (IRP) rabbit's anorectum was established by measuring the mechanics index of the IRP rabbit's rectal mucosa and submucosa to simulate two kinds of forces with the same strength but in different directions which were applied on the rectal mucous. One force was vertical downward, while the other was parallel to the direction of the rectal mucous. The different nodes of the level with relatively obvious mucosal prolapse were taken as observed objects to calculate the displacement of nodes. **Results** Young's elastic modulus of the rabbit's rectal mucosa and submucosa was (4.088 ± 0.1615) MPa, and the Poisson's ratio was 0.4700 ± 0.0050 , and the elastic shear modulus was (1.3909 ± 0.0595) MPa. These data were inputted into the finite element model of rabbit's anorectum. No significant differences were found in the displacement of the rectal ventral node 848 and node 850 between these two kinds of forces ($P > 0.1$). However, significant differences were found in the displacement of rectal middle node 852, and dorsal node 854 and node 856 ($P < 0.05$). **Conclusion** The displacement of rabbit's rectal mucosa is affected by the forced direction, which means the different forced directions may affect the bowel movement.

Key words: rectum; mucosa; displacement; finite element; forced direction; node; simulation analysis

【收稿日期】2015-05-16

【基金项目】国家自然科学基金(81173272);福建省自然科学基金(2015J01402)

【作者简介】柯敏辉(1981-),男,硕士,主治医师,主要从事肛门直肠疾病的临床研究。E-mail: 48330132@qq.com。

【通信作者】叶 玲(1957-),女,主任医师。E-mail: yeling0223@163.com。

前言

排便困难是直肠黏膜内脱垂(Internal Rectal Prolapse, IRP)的常见症状之一,但引发该症状的生物力学机理尚未明确。有限元的生物力学仿真结果已被证明是准确可信的^[1-2],它是模拟软组织形变最经典的方法^[3]。本研究在兔肛门直肠有限元模型中

模拟两种受力方向测算直肠黏膜不同节点的位移量,初步分析IRP引起排便困难的力学原理。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 动物 8只健康新西兰兔,1月龄,体质量0.7 kg~0.8 kg,雌雄各半,分别编号。由上海松联实验动物养殖场提供,许可证号:SCXK(沪)2012-0011。

1.1.2 药品 生大黄液、番泻叶液、无水酒精等由福建中医药大学附属第二人民医院提供。

1.1.3 仪器 万能材料试验机(型号:AGIC-20KN)、50倍读数显微镜、SUPER-SAP有限元软件:由福建中医药大学骨重建生物力学实验室(中医药管理局三级实验室)提供。

1.2 方法

1.2.1 动物造模 按照柯敏辉^[4]的IRP兔造模方案,采用中药生大黄液和番泻叶液灌胃、站立与无水酒精肛周注射3种方法联合造模,时间两个月。

1.2.2 模型标准 根据兔的生物学特性,参考2012年中华中医药学会制定的直肠内脱垂诊断标准^[5]和武忠弼等^[6]在描述的直肠脱垂病理征象,确定IRP兔模型诊断标准如下:(1)肛门镜下见松弛的直肠黏膜遮挡肛镜视野范围在3/4以上;(2)排便时兔直肠黏膜未脱出肛外;(3)直肠HE染色镜下见:黏膜层腺体增生,黏膜层与肌层血管扩张,黏膜层与黏膜下层炎细胞浸润聚集,黏膜下层间质水肿、疏松。

1.2.3 标本取材 在水合氯醛兔耳缘静脉麻醉后,以组织剪于IRP兔肛门直肠外缘周围分离出直肠,沿直肠纵轴取部分直肠组织,用特制刀片清除直肠黏膜层与黏膜下层以外的组织后,制成长10 mm、宽2 mm的试件。

1.2.4 观测指标及测试方法

1.2.4.1 观测指标 IRP兔的直肠黏膜与黏膜下层的杨氏弹性模量、泊松比与剪切弹性模量,在兔肛门直肠有限元模型中测算直肠黏膜不同节点的位移量。

1.2.4.2 测试方法 将试件沿纵轴方向拉伸(图1)。测试方法如下:在组织纵轴中段取a、b两点,在a、b两点间横向上取c、d两点。先用50倍读数显微镜读取静止状态下a、b两点间的长度(L1,单位:mm)与c、d两点的宽度(L2,单位:mm),然后用50倍读数显微镜读取组织的厚度,将上述数据输入试验机的电脑。将纵轴方向的组织两端固定于万能材料试验机的夹

板上,往两端进行最长拉伸,记录最长拉伸所用的力(P,单位:N)、最长拉伸时黏膜的横截面积(A,单位:mm²)、拉伸后a、b两点黏膜的长度(L3,单位:mm)与宽度(L4,单位:mm),计算拉伸前后长度的改变 $\Delta L1$ ($\Delta L1=L3-L1$,单位:mm)与宽度的改变 $\Delta L2$ ($\Delta L2=L4-L2$,单位:mm)。



图1 万能试验机拉伸直肠组织

Fig.1 Rectum tissue stretched by universal testing machine

力学指标的计算:(1)杨氏弹性模量(E,单位:MPa),它的计算公式: $E=(P/A) \times (\Delta L1/L1)$;(2)泊松比(μ),它的计算公式: $\mu=(\Delta L2/L2)/(\Delta L1/L1)$;(3)剪切弹性模量(G,单位:MPa),它的计算公式: $G=E/[2 \times (1+\mu)]$ 。

1.2.4.3 黏膜位移量 将测算所得的E、 μ 、G输入由SUPER-SAP有限元软件建立的兔肛门直肠有限元模型^[7]中,该模型由15层平面图组成,内含1342个单元、1800个节点,设定施加1 N方向平行于直肠黏膜表面与垂直向下的力(图2a、图2b)。因黏膜脱垂相对显著的层面为兔肛门直肠有限元第14层面,以该层面的848、850、852、854、856等5个节点为研究对象,计算得出不同节点的直肠黏膜位移量(图3)。

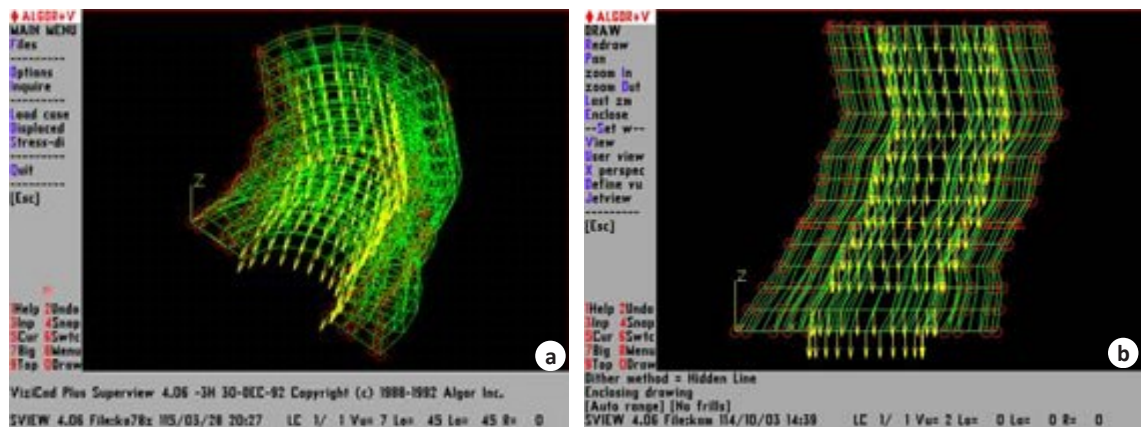
1.3 统计学处理

统计分析用SPSS17.0软件,结果以均数±标准差表示,比较用t检验分析, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 实验动物数量分析

纳入兔8只,造模中2只死亡及时补充,最终8只兔进入结果分析无脱失值。



a: Parallel to the direction of the rectal mucous

b: Vertical downward

图2 不同受力方向示意图

Fig.2 Diagram of different forced direction

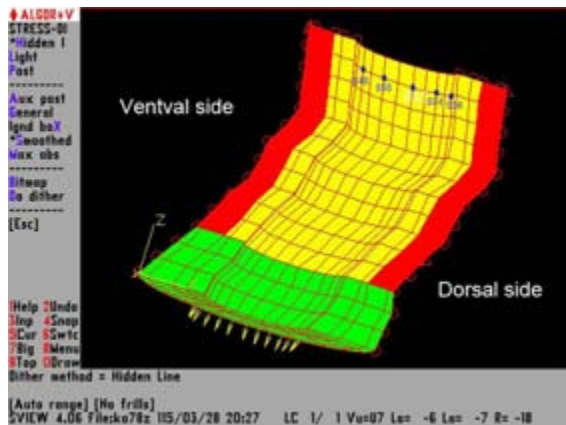


图3 兔肛门直肠有限元第14层面的节点

Fig.3 Nodes in the floor 14 of rabbit's anorectum finite element model

2.2 兔直肠黏膜与黏膜下层的杨氏弹性模量、泊松比与剪切弹性模量

测得杨氏弹性模量为 $(4.088\ 8\pm0.161\ 5)$ MPa,泊松比为 $0.470\ 0\pm0.005\ 0$,剪切弹性模量为 $(1.390\ 9\pm0.059\ 5)$ MPa。

2.3 不同节点黏膜位移量

经 t 检验,两组间比较:在腹侧的848节点($P=0.384>0.1$)与850节点($P=0.279>0.1$),两种受力方向的黏膜节点位移量无显著性差异。中间位的852节点($P=0.04<0.05$)、背侧的854节点($P=0.033<0.05$)与856节点($P=0.031<0.05$),这3个节点两种受力方向的黏膜节点位移量存在差异。见表1。

表1 两种受力方向的不同节点的黏膜位移量($\bar{x}\pm s$,mm)

Tab.1 Mucosal displacements of different nodes in different forced directions ($Mean\pm SD$, mm)

	Node 848	Node 850	Node 852	Node 854	Node 856
Vertical downward	1.901 0 \pm 0.028 4	1.737 6 \pm 0.030 0	1.739 5 \pm 0.027 1	1.760 0 \pm 0.030 4	1.951 1 \pm 0.013 5
Parallel to the rectal mucous	1.914 1 \pm 0.030 0	1.914 1 \pm 0.024 7	1.709 2 \pm 0.263 8	1.724 5 \pm 0.029 5	1.905 8 \pm 0.037 2

3 讨论

目前关于肛门直肠生物力学分析的文献较少。Martins等^[8]建立肛提肌主动收缩与被动拉伸时的有限元模型。宋红芳等^[9]运用MIMICS有限元软件获取包含肛提肌、骨盆和闭孔内肌的盆底整体三维结构模型,真实反映健康女性盆底组织解剖构型。Bush等^[10]发现在粪块通过直肠的过程中,不同阶段不同的肌肉收缩或放松,使直肠壁组织在不同方向上移位打开肛管直肠角,阻止粪块通过直肠的力是

直肠壁的黏性摩擦力,它能使粪便形状改变。通过动态排粪CT或MR平扫观察到:肛门直肠的形变不仅能够减少直肠壁的黏性摩擦力,也能改变粪便的形状。孙源等^[11]利用有限元仿真,通过改变电极的形状及位置以增强肛门直肠角控制排便的能力。但尚未检索到从直肠黏膜进行生物力学有限元研究的文献。

本研究假设直肠黏膜受力作用点在相同位置、力的大小相同,但受力方向不同。从表1可以看出,在IRP兔肛门直肠有限元模型中,在同一平面部分位

置受力方向的不同造成直肠黏膜位移量存在差异。说明直肠黏膜受力的方向(由粪便运行中产生的力的方向与直肠黏膜周围肌肉组织收缩舒张的力的方向等联合产生)将影响粪便从直肠黏膜通过。从力学结构上看,当粪便通过直肠时,因肛门直肠角存在曲度,背侧的直肠黏膜首当其冲,腹侧则影响相对小,这可能是造成受力方向不同、背侧黏膜位移量存在显著性差异的主要原因。

因直肠组织质软,我们无法运用游标卡尺进行接触式测量,选用50倍读数显微镜(精确至千分之一毫米)进行非接触式测量;参考既往研究^[12-14],将组织固定于万能试验机夹头上。测算杨氏弹性模量等力学指标时,参考冯元桢^[15]的“拟弹性”理论,将直肠黏膜设为拟弹性体,采用研究弹性体的方法来研究。本研究存在局限性:排便时直肠受力的大小与方向都在不断变化,很难真实模拟。为使结果具有可比性,本研究假设直肠不同节点受力的大小相同。

通过IRP兔直肠黏膜位移量有限元分析可以得出受力方向影响粪便顺利排出体外,临床医师在治疗过程中需关注直肠黏膜层的受力方向。本实验是对受力方向影响直肠黏膜位移的初步探讨,将为IRP型便秘的治疗提供理论参考。

【参考文献】

- [1] Erdemir A, Guess TM, Halloran J, et al. Considerations for reporting finite element analysis studies in biomechanics[J]. J Biomech, 2012, 45(4): 625-633.
- [2] Mousavi SR, Khalaji I, Sadeghi NA, et al. Statistical finite element method for real-time tissue mechanics analysis[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2012, 15(6): 595-608.
- [3] 王荣洁, 曾融生, 朱 凯. 应用有限元法预测正颌术后三维软组织形变的初步探讨[J]. 中国口腔颌面外科杂志, 2012, 10(2): 90-95.
Wang RJ, Zeng RS, Zhu K, et al. A pilot study of three-dimensional soft tissue prediction after orthognathic surgery by finite-element method[J]. China Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2012, 10(2): 90-95.
- [4] 柯敏辉, 叶 玲, 陈立武, 等. 兔直肠黏膜内脱垂模型的建立[J]. 世界中医药, 2013, 8(12): 1458-1460.
Ke MH, Ye L, Chen LW, et al. The animal model of internal rectal prolapse in rabbits[J]. World Chinese Medicine, 2013, 8(12): 1458-1460.
- [5] 中华中医药学会. 中医肛肠科常见病诊疗指南[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2012: 330.
China Association of Chinese Medicine. Anorectal diseases of TCM diagnosis and treatment guidelines[M]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2012: 330.
- [6] 武忠弼, 杨光华. 中华外科病理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2002: 765.
Wu ZB, Yang GH. The surgical pathology[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2002: 765.
- [7] 柯敏辉, 叶 玲, 陈立武, 等. 兔肛门直肠三维有限元模型的建立[J]. 世界华人消化杂志, 2013, 21(25): 2585-2589.
Ke MH, Ye L, Chen LU, et al. Establishment of a 3D finite element model of the rabbit anorectum[J]. World Chinese Journal of Digestology, 2013, 21(25): 2585-2589.
- [8] Martins JA, Pato MP, Pires EB. Finite element studies of the deformation of the pelvic floor[J]. Ann N Y Acad Sci, 2007, 101(5): 316-318.
- [9] 宋红芳, 雷玲玲, 黄 跃, 等. 基于磁共振图像的女性盆底组织三维几何重建[J]. 中华妇幼临床医学杂志, 2012, 8(4): 348-349.
Song HF, Lei LL, Huang Y, et al. Three-dimensional reconstruction of feminine pelvic floor structure based on magnetic resonance imaging[J]. Chinese Journal of Obstetrics & Gynecology and Pediatrics, 2012, 8(4): 348-349.
- [10] Bush M, Petros P, Swash M, et al. Defecation 2: Internal anorectal resistance is a critical factor in defecatory disorders[J]. Tech Coloproctol, 2012, 16(6): 445-450.
- [11] 孙 源, 周 奇, 王志刚. 有限元方法分析直肠电极在直肠角的生物电学效应[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2013, 27(12): 101-105.
Sun Y, Zhou Q, Wang ZG. Finite element analysis of bio-electricity effects of rectal probe in anorectal angle[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2013, 27(12): 101-105.
- [12] 刘守尧, 王云亭, 蔡蓉蓉, 等. 家兔腓肠肌拉伸试验设备和夹具的选择[J]. 中日友好医院学报, 2014, 28(2): 110-112.
Liu SY, Wang YT, Cai RR, et al. Rabbits gastrocnemius tension test equipment and fixture choosen[J]. Journal of China-Japan Friendship Hospital, 2014, 28(2): 110-112.
- [13] 彭传刚, 杨 琦, 李 鹏, 等. 青年与老年人脊柱黄韧带的力学特性[J]. 中国老年学杂志, 2013, 33(9): 4455-4456.
Peng CG, Yang Q, Li P, et al. The mechanical properties of young and the elderly spine yellow ligament[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2013, 33(9): 4455-4456.
- [14] 赵奕李, 李新颖, 李 鹏, 等. 人脊柱棘间韧带与黄韧带应力松弛实验的研究[J]. 生物医学工程研究, 2014, 33(3): 162-165.
Zhao YL, Li XY, Li P, et al. The experimental study on stress relaxation of human spinal interspinous ligaments and ligamentum flavum[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2014, 33(3): 162-165.
- [15] 冯元桢. 生物力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 83-100.
Feng YZ. Biomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1983: 83-100.