

文章编号:1004-7220(2012)03-0329-04

## 足支撑时相跟腱不同拉力负荷时足底压力的分布

张伟, 荀福兴, 谭为, 孙超, 赵卫东, 张美超  
(南方医科大学 解剖教研室, 广东省医学生物力学重点实验室, 广州 510515)

**摘要:** **目的** 探讨足支撑时相跟腱不同拉力负荷过程中足底前、后部压力分布的变化。**方法** 将6个新鲜足标本置于 Bose 材料试验机上,保持足标本中立位,调整垂直压力 350 N 不变,通过砝码分别给予跟腱 0~80 kg 不同级别(0、100、200、300、400、500、600、700、800 N)的拉力;分别放置两个秤在足底前、后部,记录足底前、后部在不同跟腱提拉力下的压力值。**结果** 在跟腱不同提拉力下,前足底的压力值不断增加,后足底的压力值不断降低,前足底和后足底压力值占整个足底压力值的百分比与跟腱拉力呈线性关系( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.996$ )。**结论** 本研究模拟了人活体状态下足的支撑时相,探讨了支撑期足底前、后部压力值的变化趋势,为临床上一些由于跟腱收缩紊乱引起足底压力变化而导致的疾病(如糖尿病足底溃疡、跖骨痛)提供理论基础。

**关键词:** 足底压力; 跟腱拉力; 支撑时相; 生物力学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

## Plantar pressure distributions during support phase under different Achilles tensile loads

ZHANG Wei, XUN Fu-xing, TAN Wei, SUN Chao, ZHAO Wei-dong, ZHANG Mei-chao (Department of Anatomy, Guangdong Provincial Medical Biomechanical Key Laboratory, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China)

**Abstract:** **Objective** To investigate changes in plantar pressure distributions on forefoot and hindfoot region during the support phase under different Achilles tensile loads. **Methods** Six fresh frozen human below-knee specimens were used and placed on the material testing machine. The ankles were kept in neutral position and the axial load of 350 N was applied on the specimens. Achilles tensile loads varied from 0 kg to 80 kg (0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 N) were applied by weights. Two scales were placed under the forefoot and hindfoot region of the specimen, respectively, to record the pressure under the Achilles tensile loads. **Results** With the increasing Achilles tensile force, the pressure on forefoot region was increasing, while the pressure on the hindfoot was decreasing. The percentage of average plantar pressure in forefoot and hindfoot region over the total plantar pressures presented a linear relationship with the Achilles tensile force ( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.996$ ). **Conclusions** The support phase of foot *in vitro* was simulated and the plantar pressure distributions on forefoot and hindfoot region was investigated in this paper. The result can provide theoretical evidences for some diseases (such as diabetic foot ulcers, metatarsalgia) caused by plantar pressure changes due to Achilles tensile contracture in clinic. **Key words:** Plantar pressure; Achilles tensile force; Support phase; Biomechanics

足底压力是足部生物力学研究重要的一部分,国内外学者已经对足底压力及其相关指标进行了大

量研究<sup>[1-5]</sup>,通过测量正常人足底压力的参数值,并在此基础上分析各种不同病理状态下足的异常参

收稿日期:2012-01-21; 修回日期:2012-03-15

基金项目:国家 863 资助项目(2012AA02A603),北京市科技发展计划研发攻关项目(Z090507017709022)。

通讯作者:张美超,副教授,硕士研究生导师, Tel: (020)62789091; E-mail: zmc@fimmu.com。

数,为病足的病因探索、病程的变化、治疗效果及治疗后足功能评定等提供重要的参考依据,并进一步为临床和康复医学提供理论支持<sup>[6-9]</sup>。然而,目前的研究较少涉及足底压力分布的形成机制以及小腿部和足底肌肉力对足底压力的影响,尤其是跟腱拉力与足底压力分布的关系。

跟腱力在人行走中使人体重心向前移,从而改变足底压力的分布。本研究通过人体足踝标本实验,模拟足支撑时相不同的跟腱拉力负荷,测量各状态下足底前、后部压力分布值,分析足底前、后部压力分布变化与跟腱力变化的关系,试图解释临床上由于跟腱收缩紊乱引起足底压力变化导致的相关足部疾病的病理机制,为相关手术治疗提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

取6具正常成人新鲜尸体足标本(由南方医科大学解剖教研室提供),左、右各3个,于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存,所有标本经摄X线片排除足部的疾病,如肿瘤、关节炎、骨折和代谢性疾病等。采用本科室提供的Bose材料试验机(ELF-3510AT, Bose, Inc, 美国)对足标本进行力的加载,利用两个秤(广东香山衡器集团股份有限公司, 中国)来进行足底压力的测量<sup>[10]</sup>,秤的精度为 $0.1\text{ kg}$ ,使用前经校正,可满足实验要求。标本均保留相同的高度(自胫骨干近端截骨平面至足底水平面),剔除小腿上段的皮肤、皮下组织及肌肉组织,充分暴露胫腓骨干,利用聚甲基丙烯酸树脂对标本进行包埋,包埋过程中利用铅垂进行矫正,保证足在加载时处于中立位。试验前12 h将标本自低温冰箱取出解冻,实验过程中喷洒生理盐水防止标本干燥而影响测量结果。

### 1.2 实验方法

将足标本置于Bose材料试验机上,保持足标本中立位,调整垂直压力 $350\text{ N}$ 不变,模拟人体站立时足承重状态。通过砝码分别给予跟腱 $0\sim 80\text{ kg}$ 不同级别( $0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800\text{ N}$ )的提拉力,模拟足在支撑时相跟腱拉力的变化。把两个秤分别放在足底前、后部,记录足底前、后部在不同跟腱提拉力下的压力值(见图1)。

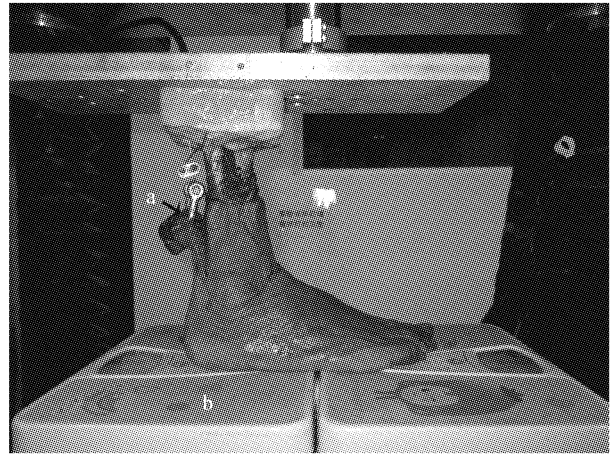


图1 标本置于材料实验机上(a-跟腱提拉装置,b-人体秤)

Fig.1 Specimen mounted at the material testing machine

### 1.3 统计学分析

记录6个标本足在不同跟腱拉力下前、后足底压力值,分别计算后足底压力与跟腱拉力之和与前足底压力的比值和前、后足底压力值占足底总压力值的百分比。百分比数值用均数 $\pm$ 标准差表示,利用统计软件SPSS 13.0对前、后足底压力占足底总压力百分比的均数与不同的跟腱拉力值进行线性回归分析。

## 2 结果

不同跟腱拉力下,前、后足底的压力值见表1,前、后足底压力值占足底总压力值的百分比见表2。表1结果显示,随着跟腱拉力的不断增加,前足底压力逐渐增大,后足底压力逐渐减小,后足底压力与跟腱拉力之和与前足底压力的比值波动范围较小。表2结果显示,不断提高跟腱拉力,前足底承受的压力比例逐渐增大,后足底承受的压力比例相应减小,当跟腱拉力值处于 $0\sim 700\text{ N}$ 时,后足底承受的压力比例均大于前足底承受的压力比例。对前、后足底压力占足底总压力百分比的均数与不同的跟腱拉力值之间的关系进行线性回归分析,结果显示两者 $P$ 值均为 $0.000$ , $R^2 = 0.996$ ,说明两者和跟腱拉力间均具有线性关系(见图2)。

表 1 前、后足底压力与不同跟腱拉力之间的关系  
 Tab.1 Relationship between plantar pressure on forefoot and hindfoot region and different Achilles tensile force

跟腱拉力 (C)/N	足底压力/N		
	前足(A)	后足(B)	(B+C)/A
0	50.00 ± 12.65	283.33 ± 12.52	6.00 ± 1.58
100	62.50 ± 15.08	272.50 ± 14.05	6.25 ± 1.48
200	79.17 ± 13.93	257.50 ± 13.32	5.93 ± 1.06
300	96.67 ± 14.02	240.83 ± 14.29	5.71 ± 0.94
400	115.00 ± 18.17	224.17 ± 18.28	5.55 ± 0.97
500	135.83 ± 22.45	202.50 ± 20.92	5.31 ± 1.00
600	157.00 ± 25.64	181.00 ± 23.02	5.10 ± 0.99
700	163.75 ± 20.56	167.50 ± 22.17	5.37 ± 0.81
800	180.00 ± 25.50	151.25 ± 24.96	5.37 ± 0.85

表 2 前、后足底压力占足底总压力的百分比与不同跟腱拉力之间的关系

Tab.2 Relationship between percentage of plantar pressure in forefoot and hindfoot region over the total plantar pressures with different Achilles tendon force

跟腱拉力/N	足底压力所占百分比/%	
	前足	后足
0	15.00 ± 3.75	85.00 ± 3.75
100	18.65 ± 4.38	81.35 ± 4.38
200	23.50 ± 4.04	76.50 ± 4.04
300	28.82 ± 4.14	71.18 ± 4.14
400	33.87 ± 5.12	66.13 ± 5.12
500	40.12 ± 6.11	59.88 ± 6.11
600	46.40 ± 6.84	53.60 ± 6.84
700	49.48 ± 6.10	50.53 ± 6.10
800	54.33 ± 7.25	45.68 ± 7.25

### 3 讨论

足底压力的研究在活体上比较容易测量,但只能得到不同时相和病理状态下足底压力的情况,不能明确足底压力和足部周围肌腱的关系,掌握足底压力分布变化和周围肌腱的关系可以进一步了解足踝周围肌肉对足功能的影响,指导足踝外科手术,阐明足踝疾病病理机制。

从力学原理对本研究结果进行解释,足踝部位

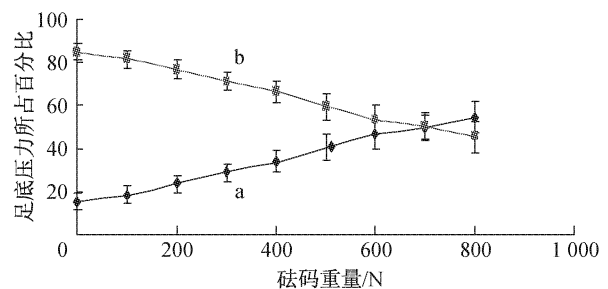


图 2 前(a)、后(b)足底压力占足底总压力百分比均数与不同跟腱力间的关系

Fig.2 Percentage of average plantar force of the forefoot (a) and hindfoot (b) region over the total plantar pressure forces Achilles tendon force

可以看成是一个杠杆系统,以踝关节中心为支点,分为前、后足两部分。当踝关节处于平衡时,前足受到地面支持力,后足受到地面支持力及跟腱拉力,前、后足所受作用力与它们距杠杆中心的距离成反比,即前、后足所受作用力的比值应当等于前、后方力臂比值的倒数,理论上这个比值保持不变。对此比值的分析结果如表 1 所示,本研究结果显示其有小范围的波动,这可能与实验过程本身存在的误差有关,如不同拉力下踝关节支点的变化、秤读数的记录误差、标本个体间差异所引起的误差等。

Ward 等<sup>[10]</sup> 研究结果表明,缺少跟腱拉力时,前足底压力所占百分比范围为 14% ~ 30%,后足底压力所占百分比范围为 70% ~ 85%,但其仅测量了跟腱在两种拉力状态下足底压力的分布,不够全面。Aronow 等<sup>[11]</sup> 把足底分成了前、中、后 3 个区域,在没有跟腱拉力时,前足底、后足底、足底中部压力百分比范围分别为 (17.6 ± 4.1)%、(75.1 ± 6.5)%、(7.3 ± 4.3)%;跟腱拉力最大加到 94.5 N,范围较小。上述研究表明,足底压力分布从后足底向前足底进行了转移,与本研究结果相一致。

临床常见疾病,如糖尿病足底溃疡、跖骨痛和足底筋膜炎等均与足底压力的改变有关系。Mueller 等<sup>[12]</sup> 研究表明,由于踝关节背伸受限(如跟腱收缩痉挛),前足底压力增加,可引发足底溃疡,经过跟腱延长术可明显减少溃疡的复发。Caselli 等<sup>[13]</sup> 研究了不同程度神经病性糖尿病患者前足底压力和后足底压力比值的变化,结果显示比值增加,说明神经病性糖尿病患者前足底压力增加。Jung 等<sup>[14]</sup> 研究

了跖骨痛和前足底压力变化的关系,结果显示前足底压力增加可以引起跖骨痛。上述研究表明,前足底压力增加可以引起糖尿病足底溃疡、跖骨痛和足底筋膜炎等疾病的发生。如何减少前足底压力增大是预防上述疾病发生的有效手段之一。本实验进一步验证了在足支撑时相,随着跟腱拉力不断增加,足底压力分布由后足底向前足底转移,并且前足底和后足底压力值所占百分比的均数与不同的跟腱拉力值呈线性关系。由此可以推断,任何使得跟腱拉力增大的异常因素(如跟腱痉挛),均可使足底压力由后足底转向前足底,使得前足底压力增大。在此基础上,如果伴有其他疾病(如糖尿病),则在前足底承受高压力的情况下就会促使这些疾病产生并发症,如足底溃疡、跖骨痛等。为了治疗这些疾病,临床上通常利用跟腱延长术来降低跟腱的拉力,从而减少前足底的压力,达到降低上述疾病发生并发症的目的。本研究为临床上跟腱延长术治疗上述由于跟腱痉挛收缩导致的足底压力分布改变引起的足部疾病提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Keijsers NL, Stolwijk NM, Pataky TC. Linear dependence of peak, mean, and pressure-time integral values in plantar pressure images [ J ]. *Gait Posture*, 2010, 31 ( 1 ): 140-142.
- [ 2 ] Chevalier TL, Hodgins H, Chockalingam N. Plantar pressure measurements using an in-shoe system and a pressure platform: A comparison [ J ]. *Gait Posture*, 2010, 31 ( 3 ): 397-399.
- [ 3 ] Vidmar G, Novak P. Reliability of in-shoe plantar pressure measurements in rheumatoid arthritis patients [ J ]. *Int J Rehabil Res*, 2009, 32(1): 36-40.
- [ 4 ] 杨阳,蒲放,钱雅君,等. 日常运动时足底压力实时检测方法研究[ J ]. 医用生物力学, 2011, 26(4): 299-304.  
Yang Y, Pu F, Qian YJ, *et al.* Real-time plantar pressure measurement for monitoring exercise load in daily life activities [ J ]. *J Med Biomech*, 2011, 26(4): 299-304.
- [ 5 ] 闫松华,董灿,杨进,等. 性别与 BMI 对儿童动态足底压力分布的影响[ J ]. 医用生物力学, 2010, 25(5):363-368.  
Yan SH, Dong C, Yang J, *et al.* Effects of gender and BMI on dynamic plantar pressure distribution in children [ J ]. *J Med Biomech*, 2010, 25(5): 363-368.
- [ 6 ] Tong JW, Acharya UR, Chua KC, *et al.* In-shoe plantar pressure distribution in nonneuropathic type 2 diabetic patients in Singapore [ J ]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2011, 101(6): 509-516.
- [ 7 ] Monteiro MA, Gabriel RE, Neves ECM, *et al.* Exercise effects in plantar pressure of postmenopausal women [ J ]. *Menopause*, 2010, 17(5): 1017-1025.
- [ 8 ] Gaymer C, Whalley H, Achten J, *et al.* Midfoot plantar pressure significantly increases during late gestation [ J ]. *Foot (Edinb)*, 2009, 19(2): 114-116.
- [ 9 ] 鄢淑燕,张庆民,张致媛,等. 拇外翻对前足底压力分布的改变[ J ]. 医用生物力学, 2010, 25(3): 224-229.  
Qie SY, Zhang QM, Zhang ZY, *et al.* Distribution changes of forefoot plantar pressure in hallux valgus [ J ]. *J Med Biomech*, 2010, 25(3): 224-229.
- [ 10 ] Ward ED, Phillips RD, Patterson PE, *et al.* 1998 William J. Stickel Gold Award. The effects of extrinsic muscle forces on the forefoot-to-rearfoot loading relationship in vitro. Tibia and Achilles tendon [ J ]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 1998, 88(10): 471-482.
- [ 11 ] Aronow MS, Diaz-Doran V, Sullivan R, *et al.* The effect of triceps surae contracture force on plantar foot pressure distribution [ J ]. *Foot Ankle Int*, 2006, 27(1): 43-52.
- [ 12 ] Mueller MJ, Sinacore DR, Hastings MK, *et al.* Effect of Achilles tendon lengthening on neuropathic plantar ulcers. A randomized clinical trial [ J ]. *J Bone Joint Surg Am*, 2003, 85-A(8): 1436-1445.
- [ 13 ] Caselli A, Pham H, Giurini JM, *et al.* The forefoot-to-rearfoot plantar pressure ratio is increased in severe diabetic neuropathy and can predict foot ulceration [ J ]. *Diabetes Care*, 2002, 25(6): 1066-1071.
- [ 14 ] Jung HG, Zaret DI, Parks BG, *et al.* Effect of first metatarsal shortening and dorsiflexion osteotomies on forefoot plantar pressure in a cadaver model [ J ]. *Foot Ankle Int*, 2005, 26(9): 748-753.