

文章编号:1004-7220(2009)01-0152-05

# 足横弓的维持及生物力学

李 兵, 俞光荣

(同济大学附属同济医院 骨科, 上海 200065)

**摘要:** 足弓包括内外侧纵弓和中前足的横弓。对内外侧纵弓的结构、生物力学及临床意义已有较深入的研究,而对横弓的探讨相对较少。足横弓的组成与生物力学目前认识不尽相同,成为争论的热点。本文主要就足横弓近年来的研究进展作一综述。

**关键词:** 足横弓; 纵弓; 生物力学

**中图分类号:** R318.01 **文献标志码:** A

## Biomechanics of foot transverse arch and its maintenance

LI Bing, YU Guang-rong. (Department of Orthopedics, Tongji Hospital, Shanghai 200065, China)

**Abstract:** Foot arch includes medial, lateral longitudinal arch and transverse arch. Deep research has been performed on its construction, biomechanics and clinical significance of longitudinal arch. However, the study of transverse arch is deficient. There are some different opinions on the construction and biomechanics of transverse arch, which becomes one of the hot issues. This paper focuses on reviews of the progress of foot transverse arch researches in recent years.

**Key words:** Transverse arch; Longitudinal arch; Biomechanics

足横弓的完整和稳定对足部功能的实现至关重要,足横弓塌陷以至不能提供相应的缓冲支持可能是许多足部病症发生的直接原因,但目前对足横弓的研究较少且认识不尽相同。本文主要就足横弓的组成、维持因素、生物力学及临床意义进行简要综述。

### 1 足横弓的组成与功能

对于足横弓的组成一直是足踝外科争论的热点,有几种不同的观点。Ridola 等<sup>[1]</sup>指出足在负重时主要通过三点与地面接触,即后方的跟骨粗隆,前内方的第1跖骨头,前外方第5跖骨头。他们认为足横弓由两部分组成,第1横弓位于中足和前足之间,即跖跗关节水平,由骰骨、3块楔骨及5块跖骨的基底部构成,且具有固有的稳定性;第2横弓与前足相对应,位于跖趾关节水平,与第1横弓相比更为

扁平,由5个跖骨头和5个近节趾骨基底部构成。另一观点认为足横弓仅有一个,即由骰骨、3块楔骨及5块跖骨的基底部构成的相对稳定的拱形结构。而负重时各跖骨头完全着地,且中间跖骨头的相对位置更低,故他们认为跖骨头水平没有解剖性的固有横弓<sup>[2]</sup>。但目前大多数学者认为非负重时第1、4、5跖骨头相互作用构成前足横弓的基底,2、3跖骨头微微向上抬起,从而在横断面上构成一个较低的弓,当负重时2、3、4跖骨头下沉,前足变宽,横弓消失。从解剖及生物力学的角度来看,跖骨头水平的横弓在吸收震荡,缓冲足底应力方面也起重要作用<sup>[3-4]</sup>。因此,前足横弓不是一成不变的,而是随步态的不同周期动态变化的横弓。

由于人类要不停的行走、站立和跑跳,这就要求足底有一定的弹性从而缓冲地面对身体的冲击。足

收稿日期:2007-05-10; 修回日期:2007-08-27

作者简介:李兵(1980-),男,博士,研究方向:足踝外科。

通讯作者:俞光荣, Tel: (021)56951910; E-mail: yuguangrong2002@yahoo.com.cn。

横弓与内外侧纵弓在足部形成一个力学性能非常合理的拱形弹力结构系统,保护足底的神经和血管免受压迫,使足底应力均匀分布,从而吸收震荡、保护大脑和内脏免受损伤。

## 2 足横弓的解剖及维持因素

足横弓是由跗骨、跖骨及其连接共同组成的一个突向上方的弓,由足骨、韧带、肌肉三部分共同维持的具有一定弹性,可以进行缓冲的三维结构。骨性结构的正常解剖为韧带和肌腱等结构发挥各自的作用提供了适当的解剖位置和力学环境,而韧带和肌肉结构可保证骨性结构的正确对位对线关系。因此三者相互作用、相互依存,共同构成维持足弓稳定的整体。

### 2.1 维持横弓的骨性结构

组成足横弓各骨的形状、大小各不相同,依次排列,构成形态和功能各不相同的关节,并相互嵌合,赋予足横弓特有的外形和静态稳定性。

**2.1.1 楔骨** 3块楔骨以楔形嵌合,形成关节。内外侧楔骨的宽面朝上,窄面向下,中间楔骨正好相反,三者相互嵌合从而形成一个突向上方的拱形结构。内外侧楔骨向远侧突出,超出中间楔骨,从而形成一个隐窝,接纳第2跖骨基底,使其牢固嵌入其中,这些解剖特点增强了足横弓的稳定<sup>[5]</sup>。

**2.1.2 跖骨** 第1跖骨与第2跖骨底之间无关节,也无任何韧带相连,所以具有较大的活动度。Tschauer等<sup>[6]</sup>通过试验指出,由于第1跖骨的活动度相对较大,故负重时中间3个跖骨头下降给予坚强的支持,而第1,5跖骨主要维持侧方的平衡。第1跖骨头的跖面常有并行排列的两籽骨,其功能为:保护第1跖骨头,分担第1跖骨头负重,减少其单位面积的负荷;抬高第1跖骨头,增加前足横弓的弧度;保护踇长屈肌,在跖趾关节运动中充当滑车,从而增加踇长屈肌腱的力臂。而籽骨切除后会损坏跖腱膜远侧附着点,引起横弓塌陷,使前足负重点向第2跖骨头转移,造成第2跖骨头下的疼痛和胼胝。

### 2.2 维持横弓的关节及韧带

**2.2.1 跖跗关节** 跖跗关节由跖跗背侧韧带、跖跗跖侧韧带及楔跖骨间韧带维持。尤其是连接内侧楔骨外侧面与第2跖骨基底内侧面的Lisfranc韧带对跖跗关节及足横弓的维持起重要作用<sup>[7-8]</sup>。Cassan-

dra等<sup>[9]</sup>指出跖跗关节对中足的稳定性起重要作用,特别是在行走过程中。它是由骨和韧带结构组成的一个联系中前足的关节,又是横弓的重要组成部分。

**2.2.2 跖骨间关节** 跖骨间关节有3个,位于第2~5跖骨基底之间,无独立的关节囊和腔,只能作轻微的滑动,主要由底背韧带、底跖侧韧带和底骨间韧带维持。

**2.2.3 跖趾关节** 其关节囊松弛,上薄下厚,关节周围有副韧带、横韧带及跖侧副韧带保护,其中跖骨横韧带对维持足横弓的功能起重要作用。以第1跖趾关节的活动度最大,结构最复杂。第1跖骨或第1跖趾关节发生病变(如踇外翻),会对前足横弓的稳定性造成严重的影响<sup>[10]</sup>。

**2.2.4 跖腱膜** 众多试验研究指出跖腱膜在维持动态和静态足弓稳定性上起重要的作用。跖腱膜的力学机制被比作“绞盘机制”,足弓的骨性结构作为衍架的两个臂,跖腱膜视为衍架的绞盘,防止弓臂分离。跖腱膜途径跖骨区向前进入足趾,当足趾在跖骨头上牵引跖腱膜时,可引起大量应力通过足趾作用于地面,反过来也使跖骨头贴紧地面,而且提升纵弓稳定全足。而临床研究的长期随访也发现当对跖腱膜进行切断或松解时不仅会引起纵弓的变平,也会导致横弓的塌陷,从而引起前跖痛、足趾畸形及跖骨的应力骨折<sup>[11]</sup>。Waldecker等<sup>[12]</sup>通过对6例新鲜足标本进行跖腱膜的连续切断来观察前足宽度的变化。切跖腱膜时按从内向外分3步,第1步先切1/3,第2步切1/2,第3步完全切断。在轴向900N的载荷下分别通过正侧位X线片对前足的变化进行评估。结果发现跖间角明显增大,具有显著的统计学意义,从而可以看出跖腱膜对于维持第1跖列的稳定起重要作用。而切断跖腱膜后前足结构的整体变化并不显著,从而作者指出临床上切断跖腱膜后应作长期随访来评判其对前足结构和功能的影响。

### 2.3 维持横弓的肌肉组织

**2.3.1 胫骨后肌** 胫骨后肌腱向下呈分叉状,其中2/3的纤维止于舟骨粗隆,另外1/3的纤维止于距骨以外的其它跗骨及中间3个跖骨的基底,而这恰恰是中足横弓的部位。它是最强的足内翻肌及内收肌,并通过控制中足的跗骨使前、中、后足相协调<sup>[13]</sup>。胫骨后肌腱对纵弓的维持已被多数学者认

可:它可使前足内收,使舟骨紧抱距骨头,抬高内侧纵弓,从而构成维持足弓的重要动力稳定装置<sup>[14]</sup>。Imhauser等<sup>[15]</sup>通过标本的生物力学研究发现当胫骨后肌腱功能不全时前足应力的中心向内侧转移,大约在第1跖骨基底的应力显著增加。这种异常应力作用于中足,使构成足弓的结构更为伸展,从而使足弓变平。

**2.3.2 腓骨长肌** 腓骨长肌腱下行由足的外侧缘斜行跨过足底,止于内侧楔骨内侧面及第1跖骨底跖侧面的外侧。它可使足外翻,发挥维持足横弓的作用,同时也可使第1跖列跖屈来维持内侧纵弓。

**2.3.3 踇收肌** 踇收肌位于足底中部,分横头和斜头。踇收肌特别是横头对维持跖骨头水平的足横弓起重要作用。

### 3 足横弓的生物力学

近年来对于足横弓的生物力学研究相对较少,且多集中在前足横弓,即跖骨头水平。另外也有少数学者对第1横弓,即跖跗关节的生物力学进行了探索。

#### 3.1 前足横弓的生物力学

是否存在前足横弓是足踝外科争论的热点之一,从而引起了不少学者的兴趣,他们分别通过临床和基础研究来证实自己的观点。早在1895年,Goldthwait认为前足横弓消失,不能提供相应的缓冲支持可能是许多足部病症发生的直接原因。事实上,在临床中横弓塌陷远比纵弓变平更为多见,只是与纵弓变平相比很少有人因横弓的塌陷而出现明显的不适。并指出前足横弓塌陷后最易发生的两个症状是无规律的前跖痛和前足中部疼痛性胼胝的出现。Daentaer等<sup>[2]</sup>通过超声检测发现非负重时第2跖骨头稍微向背侧突起,第1、3、4、5跖骨头约在同一水平面上;负重时第3跖骨头最低,第2、4跖骨头次之,第1、5跖骨头最高。因而他们认为跖骨头水平没有解剖性的横弓。Luger等<sup>[16]</sup>对66例正常人和294例有足部疾患的患者进行足底压力测试。发现仅3%的足在行走站立期跖骨头处出现动态性横弓,且这3%的人群均有足部疾患,也指出正常情况下在站立期不存在前足横弓。Suzuki等<sup>[10]</sup>对51例正常足和59例踇外翻足的前足横弓进行了轴向摄片检查。发现正常足负重时第5跖骨头最高,第1

跖骨头次之,第2、3、4跖骨头基本在同一水平面上,胫侧籽骨位置最低。与正常足相比踇外翻足负重时有以下几点显著变化:第1跖骨头向内向下移位,第2、3跖骨头向下移位,胫侧籽骨向外侧移位,腓侧籽骨向上移位。负重时足底压力从第1跖骨头转移至第2、3跖骨头。Kanatli等<sup>[17]</sup>通过步态分析发现站立相中期平均应力最大的区域在第2、3跖骨头下为79.6 kPa,第二大应力区为足跟部65.5 kPa,而第1跖骨头下应力为48.6 kPa,第4、5跖骨头下应力为62.6 kPa。从而指出负重位时前足横弓消失。Weishaupt等<sup>[18]</sup>通过MRI对32例健康人前足的神经血管束及跖骨头的位置进行检测,发现从非负重到负重位,82%的足神经血管束的位置从跖骨头跖侧骨皮质连线的下方转为上方;5个跖骨头均有下降,但第2、3、4跖骨头下降具有统计学意义,分别为4.5、4.4、3.7 mm。而第1、5跖骨头下降无统计学意义,分别为0.5、0.9 mm。最终指出负重时跖骨头处无横弓存在,从而不支持三点负重理论。诸位学者通过各自的研究证实非负重时前足存在较低的横弓,当站立负重位时横弓消失。由此可见,在行走过程中,前足横弓的主要作用在于负荷增加时的变形,暂时储存能量,负荷降低时复原,将能量释放,以吸收震荡,缓冲足底压力。因此,前足横弓随步态周期动态变化,在人体应力缓冲、震荡吸收方面起重要作用。

#### 3.2 第1横弓的生物力学

第1横弓位于跖跗关节水平,为足部固有的解剖横弓。Solan等<sup>[7]</sup>对连接内侧楔骨和第2跖骨的韧带进行了生物力学研究,将该处的韧带分为背侧韧带、跖侧韧带及骨间韧带(Lisfranc韧带)。将20对新鲜冰冻足标本跖跗关节处除这3条韧带外的其余韧带都切断,并随机分为两组(第1组:7对足标本,第2组:14对足标本),第1组足标本将骨间韧带和跖侧韧带视为一个整体,检测该整体与背侧韧带强度的差异,结果显示该整体的极限强度( $704 \pm 93$ )N远比背侧韧带的极限强度( $170 \pm 33$ )N大。且单纯背侧韧带切断时关节稳定性与完整时差别无统计学意义,而骨间韧带和跖侧韧带复合体切断时关节稳定性遭到严重破坏。第2组的标本先将背侧韧带切断,从而比较Lisfranc韧带和跖侧韧带的强度,结果显示Lisfranc韧带的极限强度( $449 \pm 58$ )N

比跖侧韧带的强度( $305 \pm 38$ )N 显著增大。最后作者指出, Lisfranc 韧带对跖跗关节及横弓的稳定影响最大, 背侧韧带对稳定性影响最小, 若发生断裂时可行保守治疗。Kura 等<sup>[8]</sup>通过生物力学研究发现 Lisfranc 韧带的极限载荷( $368.8 \pm 126.8$ )N 远比背侧楔跖韧带的极限载荷( $150.7 \pm 33.1$ )N 大, 并对 Lisfranc 韧带进行测量, 得出其平均高度为 1.0 cm, 平均厚度为 0.5 cm。Peicha 等<sup>[19]</sup>指出内外侧楔骨突出, 超出中间楔骨, 从而形成一个隐窝, 将第 2 跖骨基底部锁于其中, 从而增加足横弓稳定。作者将 33 例跖跗关节受损的患者行 X 线检查, 并测量隐窝深度及第 2 跖骨长度, 同时对 84 例正常的足标本进行测量, 发现患者与正常足第 2 跖骨长度间无统计学差异, 而两者之间隐窝深度的差异有统计学意义。并指出患者的隐窝深度较正常人浅, 其对关节及横弓的稳定非常重要, 可作为跖跗关节受损的风险因子。Kaar 等<sup>[20]</sup>指出跖跗关节的不稳有横向和纵向两种趋势。其通过 10 例新鲜尸体足标本的生物力学研究发现单纯切断 Lisfranc 韧带后负重位 X 线(轴向 222.4N 的力)示跖跗关节仍然稳定。当 Lisfranc 韧带和连接内侧楔骨与第 2 跖骨基底的跖侧韧带同时切断时, 负重位 X 线片示跖跗关节出现横向不稳, 给前足施加外展应力时更为显著。而当 Lisfranc 韧带和连接内侧楔骨与中间楔骨的骨间韧带同时切断时, 会出现跖跗关节的纵向不稳, 给前足施加内收应力时纵向不稳更为明显。由此可见, 跖跗关节是由骨和韧带等结构组成的一个联系前中足的桥梁, 也是足横弓的重要组成部分。稳定的跖跗关节担负着压力缓冲, 并将负重应力从后足向前传递的重任。该处的特殊解剖结构及韧带、肌腱的支持, 使其能承受和缓冲相当大的应力。

#### 4 临床意义

临床上许多足部疾患的发生、发展均与足横弓的畸变互为因果。上述维持足横弓稳定的诸多因素, 任何一个受到损伤均会破坏足横弓的稳定性。负重时足横弓的塌陷程度主要与负重重量、稳定横弓的韧带和肌肉的强度、跖跗关节的活动度、负重前足弓的高度及足部的创伤与畸形等有关。跖外翻是最常影响足横弓的前足畸形之一。跖外翻足不仅存在第 1 跖骨外翻, 还伴有旋前角度增大, 以及存在发

育薄弱的跖浅横韧带紧张劳损, 跖内收肌紧张劳损, 这些因素均可使前足宽度增加, 第 2, 3 跖骨头向跖侧下陷, 横弓塌陷。同时, 第 1 跖骨籽骨的空间关系被破坏, 负重时第 1 跖骨不能通过其下籽骨负重, 从而负重应力向外侧的 2, 3 跖骨头移位, 致第 2, 3 跖骨负重增加, 横弓塌陷。跖骨骨折, 特别是多处骨折, 可严重破坏前足的对线排列, 并扰乱前足的负重功能。站立负重位时, 第 2, 3 跖骨较其他跖骨承担的重量多, 较小的接触面承担较集中的重量可导致较早和较严重的临床症状。而跖跗关节如坚固的、相互支撑的半圆拱。由于有韧带及更重要的骨性解剖使这一结构异常坚固。骨骼相互嵌合和跖骨基底的梯形形状, 使第 1 横弓在冠状面和水平面上都能承受相当的压力。但当跖跗关节骨折脱位时, 第 1 横弓的正常解剖关系遭到破坏, 从而发生塌陷并导致一系列的临床症状。而以足弓高度畸变为主要临床表现的扁平足和高弓足也是常见的足部畸形, 常需手术对其外形及生物力学进行矫正。由于维持足弓稳定性的因素包括骨骼、韧带、肌肉三方面, 故术前应对三方面进行综合的评估, 治疗不能针对单一因素, 应根据具体情况将骨性手术和软组织手术相结合, 旨在同时恢复三种维持足弓因素的作用。

#### 5 结语

足横弓与纵弓一样在保护足底的神经、血管免受压迫, 使足底应力均匀分布, 吸收震荡、缓冲压力方面起重要作用。近年来, 尽管对足横弓的结构组成及维持机制有了一定的研究, 但前足横弓的存在与否依然是争论的热点。目前多数研究为静态性研究, 即负重和非负重两个时间点的生物力学分析, 而连续步态周期中足横弓的变化及各组成部分的运动规律和协调机制尚未报道。故在连续步态中讨论足横弓的组成及生物力学更有意义。另外, 大多数研究都是对尸体标本进行分析, 这与具有神经支配的正常机体也有差异。并且众多足部疾患与足横弓的变形密切相关, 故应与临床疾病紧密联系, 有的放矢的对横弓的维持及生物力学进行更深的探讨, 从而为临床疾病的诊断和治疗提供相关依据。

#### 参考文献:

- [1] Ridola C, Palma A. Functional anatomy and imaging of



- the foot[J]. *Ital J Anat Embryol*, 2001, 106(2): 85-98.
- [2] Daentzer D, Wulker N, Zimmermann U. Observations concerning the transverse metatarsal arch[J]. *Foot and Ankle Surgery*, 1997, 3: 15-20.
- [3] Iaremenko DA. Methods of study of the "transverse arch" of the foot[J]. *Ortop Travmatol Protez*, 1967, 28(2): 20-24.
- [4] 鲍根喜,王旭,顾湘杰,等. 足横弓形态的动态分析与拇外翻关系研究[J]. *中华骨科杂志*, 2001, 21(3): 134-136.
- [5] Gaweda K, Tarczyska M, Modrzewski K, et al. An analysis of pathomorphic form and diagnostic difficulties in tarso-metatarsal joint injuries [J]. *Int Orthop*, 2007, 15: [Epub ahead of print].
- [6] Tschauner C, Kohlmaier W. Ultrasonographic evaluation of the transverse metatarsal arch[J]. *Foot and Ankle Surgery*, 1997, 3: 41-48.
- [7] Solan MC, Matthew CT, Miyamoto RG, et al. Ligamentous restraints of the second tarsometatarsal joint: a biomechanical evaluation[J]. *Foot Ankle Int*, 2001, 22(8): 637-641.
- [8] Kura H, Luo ZP, Kitaoka HB, et al. Mechanical behavior of the Lisfranc and dorsal cuneometatarsal ligaments: in vitro biomechanical study[J]. *J Orthop Trauma*, 2001, 15(2): 107-110.
- [9] Cassandra A, John P, Emilee A, et al. Stabilization of Lisfranc joint injuries: a biomechanical study[J]. *Foot Ankle Int*, 2004, 25(5): 365-370.
- [10] Suzuki J, Tanaka Y, Takaoka T, et al. Axial radiographic evaluation in hallux valgus: evaluation of the transverse arch in the forefoot[J]. *J Orthop Sci*, 2004, 9(5): 446-451.
- [11] Cheung J, An KN, Zhang M. Consequences of partial and total plantar fascia release: a finite element study[J]. *Foot Ankle Int*, 2006, 27(2): 125-132.
- [12] Waldecker U, Roth E, Bodem F, et al. Effect of a sequential plantar fasciotomy on the width of the forefoot[J]. *Foot and Ankle Surgery*, 2005, 11: 207-210.
- [13] John G, Anderson, Donald R, et al. Lateral column lengthening in the adult acquired flatfoot[J]. *Tech Foot Ankle Surg*, 2003, 2(2): 91-100.
- [14] Tome J, Nawoczenski DA, Flemister A, et al. Comparison of foot kinematics between subjects with posterior tibialis tendon dysfunction and healthy controls [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2006, 36(9): 635-644.
- [15] Imhauser CW, Siegler S, Abidi NA, et al. The effect of posterior tibialis tendon dysfunction on the plantar pressure characteristics and the kinematics of the arch and the hindfoot[J]. *Clin Biomech*, 2004, 19(2): 161-169.
- [16] Luger E J, Nissan M, Karpf A, et al. Patterns of weight distribution under the metatarsal heads[J]. *J Bone Joint Surg [Br]*, 1999, 81-B: 199-202.
- [17] Kanatli U, Yetkin H, Bolukbasi S. Evaluation of the transverse metatarsal arch of the foot with gait analysis [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2003, 123: 148-150.
- [18] Weishaupt D, Treiber K, Jacob HA, et al. MR imaging of the forefoot under weight-bearing conditions: position-related changes of the neurovascular bundles and the metatarsal heads in asymptomatic volunteers [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2002, 16(1): 75-84.
- [19] Peicha G, Labovitz J, Seibert FJ, et al. The anatomy of the joint as a risk factor for Lisfranc dislocation and fracture-dislocation[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2002, 84-B: 981-985.
- [20] Kaar S, Femino J, Morag Y. Lisfranc joint displacement following sequential ligament sectioning[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2007, 89(10): 2225-2232.