

三维有限元在下胫腓损伤中的研究进展

丁军稳¹, 李钊伟^{2*}

¹青海大学研究生院, 青海 西宁

²青海大学附属医院, 青海 西宁

Email: *cgf13180162259@126.com

收稿日期: 2021年7月2日; 录用日期: 2021年7月27日; 发布日期: 2021年8月4日

摘要

当下胫腓损伤不适当治疗时, 会导致踝关节疼痛及功能障碍。早期准确的诊断对其治疗和预后很重要, 但许多关于下胫腓的生物力学及损伤机制仍有争议, 传统研究下胫腓的生物力学方法非常局限, 随着三维有限元技术在数字骨科的不断应用, 有限元也被引入下胫腓联合的研究。本文从下胫腓损伤的受力机制, 生物力学, 下胫腓损伤诊断和目前存在的争议, 有限元在数字骨科中的应用和其在下胫腓损伤中的研究进展方面做出下列综述。

关键词

下胫腓损伤, 有限元, 踝关节

Research Progress of Three-Dimensional Finite Element in Distal Tibiofibular Injury

Junwen Ding¹, Zhaowei Li^{2*}

¹Graduate School of Qinghai University, Xining Qinghai

²Affiliated Hospital of Qinghai University, Xining Qinghai

Email: *cgf13180162259@126.com

Received: Jul. 2nd, 2021; accepted: Jul. 27th, 2021; published: Aug. 4th, 2021

Abstract

When lower tibiofibular injuries are not treated appropriately, they can lead to ankle pain and functional disability. Early and accurate diagnosis is important for its treatment and prognosis,

*通讯作者。

but many studies on the biomechanics of the inferior tibia and fibula and the mechanism of injury are still controversial, and the traditional method of studying the biomechanics of the inferior tibia and fibula is very limited, with the continuous application of 3D FE techniques in digital orthopedics, Fe has also been introduced into the study of the inferior tibiofibular Union. This article makes the following review from the force bearing mechanism, biomechanics, diagnosis of lower tibiofibular injuries and current controversies, application of finite element in digital orthopedics and its research progress in lower tibiofibular injuries.

Keywords

Lower Tibiofibular Injury, Finite Element, Ankle Joint

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

踝关节损伤是运动人群中最常见的损伤, 在 1% 到 20% 之间, 其中 2%~7% 的损伤涉及下胫腓关节或下胫腓联合韧带[1]。普通人群的真实发病率高于报道的发病率, 因为韧带损伤可能在日常临床中诊断不足。若不及时处理, 有可能形成踝关节不稳定及慢性疼痛, 随着三维有限元的快速发展, 有限元的方法用于骨骼与韧带损伤的生物力学研究越广泛, 其具备传统研究方法不具备的优势, 可以为下胫腓损伤机制研究提供新的思路。本文对其损伤机制和三维有限元在其研究的进展进行概述, 以期对下胫腓的临床研究有所帮助。

2. 损伤机制

下胫腓联合的主要作用是防止远端胫腓出现分离, 四条下胫腓韧带中的任何一条断裂都会导致踝关节的不稳定和紊乱的轴向运动[2]。目前已经报道了几种损伤机制; 然而, 背屈和外旋是最常见的报道。背屈在胫骨和腓骨之间产生轻微的变宽, 由于距骨体侧面的倾斜度不同, 腓骨会发生少量的侧向旋转。当脚外旋时, 当外旋力传递到下胫腓韧带联合时, 韧带联合分离的风险增加, 尤其是当踝关节轴处于中立位置时。正常情况下距骨在踝关节内的运动最小。然而, 当施加外部旋转力时, 距骨会与所施加的力相似的比例旋转。作用在它上面的力将导致腓骨的横向位移。反作用力会导致下胫腓联合出现分离, 一般情况下胫腓前韧带会首先断裂, 因为它是下胫腓 4 条韧带中最薄弱的一个[3] [4]。除了会导致下胫腓联合韧带出现撕裂外, 当一个更大的暴力会传导至到踝关节内侧的三角韧带上时, 会使三角韧带发生完全撕裂或者内踝发生撕脱骨折, 联合韧带在外部旋转力的作用下完全断裂与韦伯 B 型或 C 型骨折和 Maisonneuve 骨折有关[5] [6]。其他报道的导致这些韧带损伤的机制有踝关节的旋前、内旋和跖屈。

3. 生物力学

关于下胫腓联合韧带的生物力学分析, 有不同的文献报道。Ogilvie-Harris 等对 8 例尸体的踝关节下胫腓联合进行下胫腓的分离加载试验, 最后的得到的数据显示在下胫腓对抗 2 mm 的分离暴力时, 其中下胫腓前韧带作用占比为百分之三十五, 骨间韧带作用占比为百分之二十二, 后韧带浅层作用占比为百分之九, 横韧带作用占比为百分之三十三。最后得出的结论为当下胫腓遭受分离暴力时, 下胫腓前韧带、下胫腓横韧带和骨间韧带三者的在维持下胫腓的稳定性作用超过百分之九十, 这三条韧带是维持下胫腓

联合稳定的主要结构[7]。然而 Snedden 等学者研究报道显示在维持下胫腓的稳定性上, 下胫腓后韧带作用不是非常重要, 但是下胫腓前韧带, 骨间韧带对维持下胫腓联合的稳定性上却至关重要[8]。另外 Gardner 等一些学者对 10 例尸体标本的下胫腓韧带生物力学研究显示当踝关节旋转时候, 在维持下胫腓的稳定性时候, 下胫腓后韧带起到 70% 的作用[9]。

4. 诊断

4.1. 查体

临床检查包括胫腓骨韧带触诊、外旋应力测试、挤压、Cotton、腓骨平移、背屈运动范围(ROM)和前抽屉测试。统计结果外旋试验、Cotton 试验、腓骨横移试验、挤压试验在临床在较为敏感。尽管这些试验的有效性还没有得到充分的研究。但是这些临床实验已经成为临床诊断踝关节韧带损伤必不可少的查体之一[10]。下胫腓位置处的皮肤疼痛、淤青、肿胀或踝关节主动背屈活动度降低, 也常常提示下胫腓损伤。但是对于急性下胫腓联合损伤, 上述查体试验敏感性不高且容易加重局部肿胀及疼痛。

4.2. 医学影像学检查

4.2.1. X 线

下胫腓联合损伤的影像学诊断常用的三个 X 线参数, ① 远端胫腓骨重叠, ② 远端胫腓骨间隙, ③ 内踝距骨间隙[11]。远端的胫腓骨重叠在踝关节前后位 X 线片上通常大于六毫米, 而在踝关节面上方一厘米处测量时, 间隙应大于一毫米。同样在踝关节面上一厘米处测量远端胫腓骨间隙应小于六毫米。在对比负重和非负重 X 光片上胫腓骨重叠减少, 胫腓骨间隙距离增加, 内侧间隙增加, 表明下胫腓联合韧带断裂。重力或外旋应力片可以区分明显的损伤(静态片明显)和潜在的损伤(仅应力片明显) [3]。如果对是否存在潜在的损伤有疑问, 与对侧肢体的 x 光片进行比较是有帮助的。虽然 X 线评估对中度至重度下胫腓损伤有效, 但 X 线评估通常无法发现细微的韧带联合损伤[11] [12]。在踝关节旋转时候亦很难区分有无下胫腓损伤。

4.2.2. 计算机断层扫描(CT)

近年来 CT 在临床用于检查胫腓损伤较多, 它可以发现在 X 光片上不明显的的小的韧带撕裂, 相比 X 线更加精确可靠。特别是随着 CT 三维重建技术在骨科领域的越来越广泛应用, 越来越多学者呼吁采用该方法辅助诊断下胫腓损伤[13]。

4.2.3. MRI

目前认为 MRI 具有非常高的准确度, 已经开始逐步取代 CT 用于下胫腓损伤的诊断辅助检查, Oae 等[14]学者研究指出核磁共振(MRI)对于下胫腓前韧带损伤诊断的敏感性已达到百分之百, 特异性达到百分之九十三。然而 MRI 因其价格较高, 目前还不作为下胫腓韧带损伤的常规性检查, 只对一些诊断困难而又高度怀疑的患者给予检查, 没有作为常规应用于临床。

4.2.4. 踝关节镜

踝关节镜的优势在于可以在直视观察下胫腓韧带有无损伤, 踝关节镜为下胫腓韧带损伤的诊断和治疗增加了一个重要的工具, 目前被认为是评估下胫腓韧带有无损伤的“金标准” [15]。它被认为是一个非常有价值的工具, 以准确诊断踝关节韧带损伤。然而在临床中踝关节镜技术性对操作者要求较高, 在进行具体操作时难以直视下全面观察下胫腓联合韧带有无损伤, 其临床应用受到限制[16]。

5. 三维有限元在数字骨科中的应用

有限元法(FEM)是一种数值工具, 用于寻找给定偏微分方程的近似解。应用有限数量的自由度表示,

其特征是未知函数值。有限元法的基本概念是将模型细分为由节点连接的简单几何形状的较小有限元。有限元和节点的集合称为网格[17]。由于强大的计算机和复杂的建模和计算机模拟技术,有可能创建复杂的模型,并以准确、快速、安全的方式虚拟分析各种配置,而成果是真实原型无法实现的。事实上,不需要真正原型的研究是生物领域的一大进步。特别是在有限元法中进行虚拟分析以预测。今年来随着计算机数字技术的快速发展,也推动数字骨科学技术的不断更新,计算机数字化技术在骨科领域的应用也变得越发广泛,随着骨科现代化诊疗技术的不断更新进步,计算机技术与临床骨科的关系日益密切。而以三维有限元技术为代表的生物力学分析技术在骨科中应用更加广泛,并深受到骨科医生欢迎[18]。有限元建模被认为是评估关节接触应力的参考标准。有限元法的本质是将一个受力或变形作用的连续实体理想化为一个独立的区域或元素的集合。这些被认为是在它们共同边界上的特定点(或节点)相互连接的。有限元假设,如果每个单元内的应力和应变之间存在某种相关联系,可以推导出一组将节点力与节点位移关系联系起来的方程式。长期以来,有限元建模一直被认为是定量评估组织、器官和关节生物力学性能的可靠工具。它被接受为评估关节接触应力的参考标准[14],为了更好地理解移位的关节内骨折,它们对关节力学的影响,以及改变的力学和骨关节炎之间的关系可以有助于治疗方法的开发或改进。并可用于使用表面接触力学数据评估因损伤导致骨关节炎的风险。

6. 三维有限元在下肢腓损伤研究中的进展

下肢腓韧带其解剖结构极其不规则,涉及多个关节面,生物力学结构极为复杂,以往仅依靠尸体标本来进行生物力学研究,认识非常有限。三维有限元分析技术是模拟仿真人体真实下肢腓解剖结构生物力学功能的有效实验方法,其建立的三维有限元模型具有可重建复杂材料特性和结构的能力,也可模拟复杂关节韧带在静止或不同应力状态下的受力研究[19] [20] [21],在下肢腓生物力学研究中具有独到优势。很多学者用三维有限元方法构建踝关节下肢腓韧带模型,分析下其生物力学特性,方法是使用计算机断层扫描仪扫描踝部,并将 DICOM 格式的图像导入 Mimics,通过蒙版处理进行处理,然后以 STL 格式导出。将 STL 文件传输到 Geomagic,然后进行逆向工程重构。经过图像处理,建立了踝关节的三维模型。执行布尔运算,分配材料参数,建立接触,然后将图像划分为网格。软骨和韧带模型建立在上述模型的基础上。软骨建模采用壳单元划分,踝关节周围主要韧带的单元划分采用 Combin 39,然后赋予非线性超弹性性质[22]。构建模型后可以模拟不同受力机制下下肢腓韧带的受力分析,在以往的下肢腓韧带受力在实验测量中是极其困难的,三维有限元的应用具有传统研究不具备的优势,杨云峰等依据计算机断层扫描(CT)建立了正常踝关节主要骨-韧带结构的三维有限元模型。Chune 等[23]根据足踝 MRI 扫描数据重建了三维解剖学足踝部数字模型,模型中不只是还原了骨骼的解剖学形态,并在足踝模型中建立了主要韧带、肌腱膜、关节囊等软组织,材料属性也进行了非线性特性研究,骨骼间的互相作用力也采用了接触定义,并用选取正常志愿者及尸体标本 F-scan 测量的足底的生物应力分析结果对该模型进行验证。Imhauser C. W.等[24]建立的后足踝部骨-韧带三维有限元模型对踝关节内外踝韧带及距跟骨韧带描述比较形象合理,但是没有完整构建下肢腓联合韧带部分。柏广富等[25]构建下肢腓的有限元仿真模型,为下肢腓韧带的人生物力学研究提供方便快捷的数字化平台。经过其加载力后与原有理论数据进行相应验证,实验结果具有一致性。能较客观地反映了下肢腓解剖结构和力学特性。但是还无法完全真实地复制人体结构与其个体力学特性之间的关系,该模型中忽略了肌肉、肌腱等其他动力性组织结构。

7. 小结

综上所述,下肢腓是维持踝关节稳定的重要结构,目前对下肢腓韧带的生物力学分析仍存在争议,对下肢腓的放射性诊断缺乏标准的量化参数,体格检查对下肢腓损伤的敏感性较低,核磁共振结合体格

检查对诊断下胫腓损伤具有非常重要意义。尽管广泛查找了相关文献, 但没有发现任何使用磁共振成像作为参考标准诊断的相关研究, 尽管磁共振成像准确检测下韧带损伤的能力几乎与关节镜相同, 准确性达到百分之百[15]。这可能是因为大多数学者对下胫腓损伤诊断研究是在了解磁共振成像杰出的诊断准确性之前做出的。本人建议将来使用磁共振成像作为下胫腓损伤诊断的参考标准之一。传统用于下胫腓韧带的生物力学研究方法存在较多局限性, 仅依靠尸体标本来进行下胫腓的生物力学研究, 认识非常有限。随着数字骨科的迅速发展, 三维有限元技术是模拟人体下胫腓真实解剖结构以及生物力学功能的有效实验手段, 具有传统方法所没有的优势, 其所建立的有限元模型具有可重复性, 具有构建不规则复杂韧带骨骼结构的能力, 以及易于模拟下胫腓结构在不同受力机制下的生物力学分析, 在下胫腓生物力学研究中具有独到优势, 为下胫腓损伤的研究提供新的思路, 但三维有限元不能完全模拟临床, 仍有一定局限性。

参考文献

- [1] Gerber, J.P., Williams, G.N., Scoville, C.R., Arciero, R.A. and Taylor, D.C. (1998) Persistent Disability Associated with Ankle Sprains: A Prospective Examination of an Athletic Population. *Foot & Ankle International*, **19**, 653-660. <https://doi.org/10.1177%2F107110079801901002>
- [2] Ogilvie-Harris, B.M. and Reed, S.C. (1994) Disruption of the Ankle Syndesmosis: Diagnosis and Treatment by Arthroscopic Surgery. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **10**, 561-568. [https://doi.org/10.1016/S0749-8063\(05\)80015-5](https://doi.org/10.1016/S0749-8063(05)80015-5)
- [3] Wuest, T.K. (1997) Injuries to the Distal Lower Extremity Syndesmosis. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **5**, 172-181. <https://doi.org/10.5435/00124635-199705000-00006>
- [4] Klieger, P.A., Haase, R.B. and Dressler, S.H. (1956) Rehabilitation of the Tuberculous-Modern Concepts Put to Work. *Journal of Rehabilitation*, **22**, 6-8.
- [5] Pankovich, A.M. (1976) Maisonneuve Fracture of the Fibula. *Journal of Bone & Joint Surgery*, **58**, 337-342. <https://doi.org/10.2106/00004623-197658030-00007>
- [6] Lauge-Hansen, N. (1950) Fractures of the Ankle. II. Combined Experimental-Surgical and Experimental-Roentgenologic Investigations. *Archives of Surgery*, **60**, 957-985. <https://doi.org/10.1001/archsurg.1950.01250010980011>
- [7] Ogilvie-Harris, D.J., Reed, S.C. and Hedman, T.P. (1994) Disruption of the Ankle Syndesmosis: Biomechanical study of the Ligamentous Restraints. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **10**, 558-560. [https://doi.org/10.1016/S0749-8063\(05\)80014-3](https://doi.org/10.1016/S0749-8063(05)80014-3)
- [8] Snedden, M.H. and Shea, J.P. (2001) Diastasis with Low Distal Fibula Fractures: An Anatomic Rationale. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **382**, 197-205. <https://doi.org/10.1097/00003086-200101000-00027>
- [9] Gardner, M.J., Brodsky, A., Briggs, S.M., Nielson, J.H. and Lorch, D.G. (2006) Fixation of Posterior Malleolar Fractures Provides Greater Syndesmotom Stability. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **447**, 165-171. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000203489.21206.a9>
- [10] Sman, A.D., Hiller, C.E. and Refshauge, K.M. (2013) Diagnostic Accuracy of Clinical Tests for Diagnosis of Ankle Syndesmosis Injury: A Systematic Review. *British Journal of Sports Medicine*, **47**, 620-628. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091702>
- [11] Beumer, A., Hemert, V., Niesing, R., Entius, C.A.C., Ginai, A.Z., Mulder, P.G.H., et al. (2004) Radiographic Measurement of the Distal Tibiofibular Syndesmosis Has Limited Use. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **423**, 227-234. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000129152.81015.ad>
- [12] Pneumatics, S.G., Noble, P.C., Chatziioannou, S.N. and Trevino, S.G. (2002) The Effects of Rotation on Radiographic Evaluation of the Tibiofibular Syndesmosis. *Foot & Ankle International*, **23**, 107-111. <https://doi.org/10.1177%2F107110070202300205>
- [13] Taser, F., Shafiq, Q. and Ebraheim, N.A. (2006) Three-Dimensional Volume Rendering of Tibiofibular Joint Space and Quantitative Analysis of Change in Volume Due to Tibiofibular Syndesmosis Diastases. *Skeletal Radiology*, **35**, 935-941. <https://doi.org/10.1007/s00256-006-0101-9>
- [14] Johnson, J.E., Lee, P., McIff, T.E., Toby, E.B. and Fischer, K.J. (2014) Computationally Efficient Magnetic Resonance Imaging Based Surface Contact Modeling as a Tool to Evaluate Joint Injuries and Outcomes of Surgical Interventions Compared to Finite Element Modeling. *Journal of Biomechanical Engineering*, **136**, Article ID: 0410021. <https://doi.org/10.1115/1.4026485>

-
- [15] Takao, M., Ochi, M., Oae, K., Naito, K. and Uchio, Y. (2003) Diagnosis of a Tear of the Tibiofibular Syndesmosis. The Role of Arthroscopy of the Ankle. *Journal of Bone & Joint Surgery-British*, **85B**, 324-329. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.85B3.13174>
- [16] Lui, T.H., Ip, K.Y. and Chow, H.T. (2005) Comparison of Radiologic and Arthroscopic Diagnoses of Distal Tibiofibular Syndesmosis Disruption in Acute Ankle Fracture. *Arthroscopy the Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **21**, 1370.e1-1370.e7. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2005.08.016>
- [17] Lotti, R.S., Wilson, M.A., Tonani, M.Ê. and Landre Júnior, J. (2006) Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. *Revista Dental Press De Ortodontia E Ortopedia Facial*, **11**, 35-43. <https://doi.org/10.1590/S1415-54192006000200006>
- [18] 姜侃, 孙荣鑫. 三维有限元技术在创伤骨科教学中的应用和优势[J]. 中国民康医学, 2013, 25(18): 100, 113.
- [19] Bevil, G. and Keaveny, T.M. (2009) Trabecular Bone Strength Predictions Using Finite Element Analysis of Micro-Scale Images at Limited Spatial Resolution. *Bone*, **44**, 579-584. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2008.11.020>
- [20] Abdul-Kadir, M.R., Hansen, U., Klabunde, R., Lucas, D. and Amis, A. (2008) Finite Element Modelling of Primary Hip Stem Stability: The Effect of Interference Fit. *Journal of Biomechanics*, **41**, 587-594. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.10.009>
- [21] Janssen, D., Aken, J.V., Scheerlinck, T. and Verdonschot, N. (2009) Finite Element Analysis of the Effect of Cementing Concepts on Implant Stability and Cement Fatigue Failure. *Acta Orthopaedica*, **80**, 319-324. <https://doi.org/10.3109/17453670902947465>
- [22] Funk, J.R., Hall, G.W., Crandall, J.R. and Pilkey, W.D. (2000) Linear and Quasi-Linear Viscoelastic Characterization of Ankle Ligaments. *Journal of Biomechanical Engineering*, **122**, 15-22. <https://doi.org/10.1115/1.429623>
- [23] Cheung, T.M., Zhang, M. and An, K.N. (2006) Effect of Achilles Tendon Loading on Plantar Fascia Tension in the Standing Foot. *Clinical Biomechanics*, **21**, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.09.016>
- [24] Imhauser, C.W., Siegler, S., Udupa, J.K. and Toy, J.R. (2008) Subject-Specific Models of the Hindfoot Reveal a Relationship between Morphology and Passive Mechanical Properties. *Journal of Biomechanics*, **41**, 1341-1349. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.12.017>
- [25] 柏广富, 张焱, 张美超, 骆宇春, 李坤, 陈斌, 等. 基于 CT 图像的下胫腓联合三维有限元模型构建[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(9): 903-907.