

運動狀態下的勁度作用意義

林建志 陳重佑

國立臺灣體育運動大學體育研究所

摘要

人體下肢著地碰撞長久以來均是熱門的研究方向，而著地或離地工作在跳躍型態中亦是必備的動作技術，對於著地工作的碰撞傷害與運動表現，經常與勁度作連結。而人體下肢隨著外在環境的影響將不斷的改變適應能力，進而有流暢的運動表現，其主要因素屏除關節的支持作用與肌肉工作效益外，關鍵為勁度的動態調控，說明勁度概念已逐漸受到重視。因此，本研究針對彈簧質量模型與勁度相關研究課題，以運動生物力學的觀點，闡述勁度概念與相關研究發展的應用。提供往後運動科學人員在實務應用與理論整合有更深層的思維。

關鍵詞：著地、彈簧質量模型、虎克定律、運動生物力學

通訊作者：陳重佑，國立臺灣體育運動大學體育研究所

E-mail：chung-yu@yahoo.com.tw

壹、前言

動物為一種天生具有跳躍於各種環境，且能優雅維持肢體動作之本能，相對於人體運動而言，跳躍亦是不可或缺的運動技術，如籃球的搶籃板球、羽球的跳躍殺球、排球的封網、急行跳遠或跳高的起跳工作等，說明跳躍能力是運動場上影響勝負關鍵的因素，更是肢體動作中最基本的運動本能，因此，人體無論跳躍於何種環境或表面，將不斷的改變適應能力，以反應外在環境所造成的影響，其主要因素屏除關節的支持作用與肌肉工作效益外，關鍵為勁度（stiffness）的動態調控（Günther & Blickhan, 2002）。

勁度一詞早在 1989 年 Blickhan 以彈簧質量模型（spring - mass model）將下肢比擬為一個相對簡單的彈簧結構，以探討下肢動態過程的生物力學特徵，而彈簧質量模型，係通過人體骨骼肌肉系統的韌帶、肌腱、肌肉、軟骨與骨骼的相互作用形成一種彈簧結構，並輔以虎克定律（Hooke's law）概念，將物體或肢體受外力影響，抵抗外力所產生的力量長度比，建構出簡單的線性彈簧特徵（Butler, Crowell, & Davis, 2003），而彈簧質量模型中的彈性係數則以勁度表示，以描述地面反作用力或力矩作用，對於抵抗位移改變的能力（Brughelli & Cronin, 2008）。回顧過去（Hobara, Kimura, Omuro, Gomi, Muraoko, Iso, & Kanosue, 2008）以線性彈簧質量模型定義勁度的計算方式，包括垂直彈簧質量模型（vertical spring - mass model）與腿部彈簧質量模型（leg spring - mass model），而垂直彈簧質量模型主要計算為下肢著地過程的垂直勁度（vertical stiffness），以剖析連續直膝跳（hop）與跳深（drop jump）單一垂直方向的線性運動計算方式，常見的計算方式為 McMahon 與 Cheng（1990）所提出 $K_{\text{vert}} = F_{\text{max}} / \Delta y$ ，其內容為垂直地面反作用力峰值（ F_{max} ）除以下肢與地面接觸時的重心改變距離（ Δy ）；而腿部彈簧質量模型則以步態過程的水平與垂直方向探討腿部勁度（leg stiffness），因平面動作被定義為反彈向前的速度，主要的計算是以 $K_{\text{leg}} = F_{\text{max}} / \Delta L$ 表示之， F_{max} 為垂直力量最大峰值除以下肢腿部長度壓縮量（McMahon & Cheng, 1990）；而轉動彈簧質量模型（torsional spring - mass model）是以線性彈簧質量模型的基礎下，結合角動力學所延伸出的關節勁度（joint stiffness），主要是透過 $K_{\text{joint}} = \Delta M / \Delta \theta$ 淨關節肌肉力矩（ ΔM ）與關節角度變化量（ $\Delta \theta$ ）

所獲得 (Farley, Houdijk, Van Strien, & Louie, 1998)，由於垂直勁度與下肢勁度為線性的測量，而關節勁度則與旋轉有關，因此，從關節勁度可進一步了解各關節勁度與肌肉工作間的相互作用 (Butler et al., 2003)。

綜合以上論述，以彈簧質量模型來描述勁度作用意義，可剖析生物活體系統的功能與結構，而勁度大小與強度可準確預測許多力學參數的相互關係，因此，人體下肢的相關研究能有更進一步的深度與精度 (Brughelli & Cronin, 2008)。研究以短跑選手最大速度的 70%、80%、90%與 100%速度通過測力板，結果顯示隨著跑速的增加膝關節勁度隨之提高 (17 - 24 Nm / deg)，說明隨著速度的增加，著地作用時間縮短，關節活動量變小，垂直作用力量則越大，由此，可推估勁度與力學參數之間的作用影響 (Kuitunen, Avela, Kyröläinen, Nicol, & Komi, 2007)。勁度概念逐漸成為運動生物力學相關研究的熱門課題 (Brughelli & Cronin, 2008)，而勁度大小的調控係經由肌肉特性與神經調節機制所衍生而出，在運動狀態下有外力或內在因素影響，肢體的穩定機制如受到干擾或失衡時，神經肌肉是主導協調與穩定控制的主要系統，會在第一時間啟動介入以維持肢體穩定平衡，而勁度則是動作調節的第一個穩定機制 (許太彥, 2003)，如勁度無法有效的調整運動狀態所產生的衝擊與影響，將降低運動表現甚至運動傷害的發生 (Flanagan & Harrison, 2007)，因此，勁度作用意義逐漸成為探討動作調節機制與運動傷害產生的實質意義 (Williams, Davis, Scholz, Hamill, & Buchanan, 2004)。本研究針對彈簧質量模型與勁度相關研究課題，彙整過去與現今的勁度研究內容與方向，以運動生物力學觀點，了解勁度作為探討人體運動特徵的力學參數，以評估肌肉骨骼系統所產生的勁度調控機制，剖析人體動作表現的效益，闡述勁度的概念特徵以及對於研究發展應用，提供往後運動科學人員，在實務應用與理論的整合有更深層的思維。

貳、不同工作特性的勁度作用

從個體中的相關勁度可區分為韌帶勁度 (tendon stiffness)、肌腱勁度 (ligament stiffness)、骨骼勁度 (bone stiffness)、肌肉勁度 (muscular stiffness)，以及其他肌肉與骨骼所組成的彈簧結構模型 (Blickhan, 1989)，而垂直勁度、下肢勁度與關節勁度是人體跳躍條件中可直接被計算的勁度模式，而跑走或跳躍的相關勁度計算，隨著實驗設計與儀器的不同其計算方式也有所差異，有關勁度測量研究中垂直勁度是普遍採用的方法 (Morin, Dalleau, Kyröläinen, Jeannin, & Belli, 2005)，垂直勁度應用於測量肢體垂直位移對於地面反作用力的影響 (Brughelli & Cronin, 2008)，而下肢勁度則為評估腿部長度改變，對於肢段內部或外部力量關係，作為抵抗關節角位移的屈伸作用與關節旋轉力矩應用而來 (Butler et al., 2003)。研究指出下肢髖、膝與踝關節勁度會隨著動作型態的不同而受到影響，說明運動過程中的動作技術改變，促使勁度有效調控以利較佳的運動表現 (Kuitunen, Kyröläinen, Avela, & Komi, 2007)。以跑步而言，動作速度與勁度調控有關，研究發現跑速逐漸提升腿部勁度與膝關節勁度將增加，因此，跑者如具有適度的下肢勁度則有利於跑速的提升 (Clark, 2009)。研究以 100 公尺衝刺跑的前、中與後期各階段速度的不同，下肢勁度將隨之改變 (Avogadro, Kyröläinen, & Belli, 2004)，運動員跑速從慢至快的速度增加時，期間動作速度越快，作用時間則越短，垂直勁度與關節勁度有提升趨勢 (Farley, Glasheen, & McMahon, 1993)，其勁度增加的因素為因應著地後向心收縮階段的推蹬動作，抵抗地面所給予的反向作用力 (Cavagna, Heglund, & Willems, 2005)。

在跳躍與勁度的相關研究中，Fukashiro 與 Komi (1987) 認為踝關節對於跳躍表現產生垂直推進扮演重要角色，以跳深的動作特性是從高臺垂直落下，著地後立即執行反彈跳，此時膝關節的屈伸作用具有控制跳躍表現優劣的關鍵之一，因著地的關節角度位移量，具有影響力矩臂的距離與地面反作用力參數改變 (Farley et al., 1998)，致使關節勁度得以適時調控。著地時間與頻率亦是勁度調控的另一個要素，以 20 cm、40 cm 與 60 cm 不同高度跳深的著地時間，研究指出隨著著地時間減少垂直勁度與踝關節勁度則

增加，說明隨著高度逐漸，將產生高水平的肌肉預收縮（muscle pre-stretch），使下肢肌肉累積相當張力，在著地時的重心垂直下降位移量較小導致腿部勁度較高（Arampatzis, Schade, Walsh, & Brüggemann, 2001），因此，著地接觸時間的長短與勁度調控有關。Hobara 等人（2008）進一步比較耐力型運動員與爆發力型運動員，在不同頻率連續直膝跳測量下肢勁度差異，研究指出下肢勁度隨著頻率的增加有增加趨勢，在兩種運動員勁度比較中，顯示爆發力型運動員垂直勁度高於耐力型運動員，但不同類型的運動員關節勁度差異可能因素為肌纖維比例不同，顯示肌肉工作對於勁度影響具有重要關係。

從肌肉工作效益與勁度調節的關係中，Moritz 與 Farley（2005）認為肌肉的被動工作對於勁度改變有直接影響，以肌肉力量輸出以及彈性能的儲存與利用有助於下肢勁度提升，如著地後的踝關節勁度控制是由著地前的肌肉活動與著地後的肌肉活動影響（Komi, 1992），說明著地時腿後肌群的牽張反射工作，對於踝關節勁度與下肢勁度有著直接關係（Hobara, Kanosue, & Suzuki, 2007）。綜合以上論述，勁度是可直接量化的參數以解釋力量與彈簧長度的改變，進而連結力量與下肢長度改變關係，對於整個肢體模型的質量或彈簧結構而言，通過垂直勁度與下肢勁度的大小與強度，可推估作用力量對於著地工作的相互關係，以了解人體下肢的彈簧結構不同於機械彈簧結構特徵。

參、運動條件下的勁度應用

人體運動為一個多面向且複雜的機械工作，因此，須透過彈簧質量模型，將下肢工作簡化為一個相對簡單的彈簧結構，方可從中剖析運動狀態下的動作表現影響，由勁度的作用意義中，了解勁度對於人體下肢的相關研究結果後，須進一步探討運動過程中勁度的實質應用，以如何幫助運動員能有更好的運動表現。從常見的運動訓練方法包括奧林匹克式舉重、阻抗式訓練、增強式訓練（跳深、著地反跳）、爆發力訓練（垂直跳）、肌力訓練（蹲踞、硬舉），每一種訓練目的均是為了提升運動表現，而訓練前的暖身準備（warm up）工作，包括跑步、馬克操、靜態伸展與動態伸展等方法，對於骨骼肌肉系統的活化與準備也具有重要意義，因勁度的主要調控是通過骨骼肌肉系統作用而來，

因此，運動前的熱身工作可確認所有關節與肌腱組織的充分放鬆，以利勁度作用有更好的效益。

研究顯示過高的下肢勁度可能導致骨骼受到傷害；過低的下肢勁度可能造成關節連結軟組織受傷 (Granata, Padua, & Wilson, 2002)，因此，若下肢勁度調控不理想，可能造成身體處於運動傷害的潛在風險中，Self 與 Paine (2001) 利用 30.48 cm 高臺讓實驗參與者以自然著地、直膝著地、直膝腳尖著地與直膝腳跟著地等四種不同著地技術落下，結果顯示直膝腳尖著地造成阿基里斯腱力量峰值最大，而直膝腳跟著地則導致垂直力量與脛骨加速度峰值最高，研究更進一步指出四種不同著地技術的下肢勁度，均高於垂直跳與跳深等條件的勁度三倍之多，從研究中了解直膝著地的下肢衝擊與影響甚大，對於下肢骨骼傷害的機率增加，為避免外在衝擊力所產生過高勁度，建議盡量勿以直膝方式著地，以及著地階段應盡可能運用下肢髖、膝與踝關節的活動度，藉由運用關節改變量與增加作用時間來降低垂直地面反作用力衝擊。

對於短跑選手而言，在 100 公尺衝刺跑的各階段速度改變下，隨著動作速度越快，作用時間則越短，下肢勁度則越大，由研究結果得知勁度增加則能有利於跑速的提升 (Avogadro et al., 2004)，而勁度大小更需連結至關節活動度與下肢伸肌推蹬速度有關，研究顯示離心運動能提升勁度作用，進而有效增加衝刺跑與跳躍表現 (Brughelli & Cronin, 2008)，因此，建議短跑選手在日常訓練中，應練習著地反彈跳或跳深，以著地後快速反彈跳的動作特性，訓練被動肌肉工作強化伸肌工作效率，提升推蹬發力率增加向前的推進能力。從著地工作的觀點中，隨著運動速度的提升、著地高度的增加，促使地面反作用力的峰值將提早出現，因此，為了避免下肢受到著地力量的衝擊傷害，建議應增加膝關節與髖關節的屈曲角度，以增加著地作用時間減少碰撞力量 (Devita & Skelly, 1992)。在疲勞對於勁度改變的研究中，Dutto 與 Smith (2002) 以 15 名跑者於跑步機上進行 80 % 最大耗氧量 ($VO^2 \max$) 的速度持續至疲勞為止，結果顯示跑步時間增長，下肢勁度則逐漸降低 ($9.3 \rightarrow 9.0 \text{ kN/m}$)，而人體受到疲勞影響後，步頻將越來越小、步幅則越來越大，下肢勁度下降將會影響肌肉收縮強度減小，藉此降低能量的消耗，建議運動員在疲勞狀態下，通過步幅與步頻得微幅調整，可有效的降低肌肉工作強度與下

肢勁度大小，以維持運動任務的時間長度。

至今，以勁度概念為出發點，連結運動傷害與運動表現為熱門的研究課題，但多數研究只探討該項運動特性的勁度作用結果，對於結果詳加論述與評估可能產生傷害的原因，少數研究會針對勁度所作用的結果，提供實質應用性方法，以跑速與勁度關係而言，當跑速從低速至高速時，垂直勁度將大幅增加（Morin, Dalleau, Kyröläinen, Jeannin, & Belli, 2005），研究發現此結果後，卻鮮少思索如何有效探討垂直勁度、下肢勁度與關節勁度改變對於跑速效益，以及不同的訓練方法對於勁度影響，使跑速與勁度之間的關係尚未完全清晰，再者，訓練方式與勁度影響對於跑者表現也是未知，促使運動科學訓練方法中，對於勁度的具體訓練與有效應用似乎不被重視。運動生物力學是競技運動訓練的重點項目，而評量與診斷是強化訓練工作的主要目的，因此，建議往後將研究從勁度作用結果延伸至如何應用為目的，以提供往後對於肌力訓練方針或動作技術修正有更進一步的想法，進而提升運動表現與傷害預防才是運動生物力學的終極目標。

肆、結語

簡單的跳躍動作卻涵蓋著肌肉、骨骼與勁度等複雜系統的相互作用，促使個體得以有理想的著地方式，以適應外在環境改變，而體操選手般矯健與舞蹈家優雅動作，則是通過有效率的肌肉工作、適當關節角度變化與下肢勁度的有效調控而來。長久以來肌力訓練的執行與傷害預防均是熱門的研究課題，常以著地方式、著地表面、著地技巧、跳臺高度、鞋子材質等實驗操弄來分析下肢工作與地面反作用力的影響，因著地工作為跳躍能力必備的運動技術，對於理想的運動表現具有重要意義，而跳躍動作中的著地技術，提供個體對於地面反作用力具有吸收與分配身體各肢段的衝擊負荷，隨著運動技術不斷追求以更高、更快、更遠等特色，促使運動技術與訓練模式需不斷的改良與革新，對於跑走與跳躍運動型態而言，無形間產生更多下肢著地工作的碰撞與衝擊影響，因此，本研究祈以介紹著地碰撞的相關研究課題與概念，以作為往後研究提出科學訓練方式與運動傷害預防注入新的思維。

參考文獻

- 許太彥 (2003)。國小學童不同軟硬表面著地下肢勁度調節之機轉及其影響。未出版博士論文，國立臺灣師範大學，臺北市。
- Arampatzis, A., Schade, F., Walsh, M., & Brüggemann, G. P. (2001). Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11(5), 355-364.
- Avogadro, P., Kyröläinen, H., & Belli, A. (2004). Influence of mechanical and metabolic strain on the oxygen consumption slow component during forward pulled running. *European Journal of Applied Physiology*, 93(1-2), 203-209.
- Blickhan, R. (1989). The spring-mass model for running and hopping. *Journal of Biomechanics*, 22(11-12), 1217-1227.
- Brughelli, M., & Cronin, J. (2008). Influence of running velocity on vertical, leg and joint stiffness: Modeling and recommendations for future research. *Sports Medicine*, 38(8), 647-657.
- Butler, R. J., Crowell, H. P., & Davis, I. M. (2003). Lower extremity stiffness: Implications for performance and injury. *Clinical Biomechanics*, 18(6), 511-517.
- Cavagna, G. A., Heglund, N. C., & Willems, P. A. (2005). Effect of an increase in gravity on the power output and the rebound of the body in human running. *The Journal of Experimental Biology*, 208(1-2), 2333-2346.
- Clark, R., A. (2009). The effect of training status on inter-limb joint stiffness regulation during repeated maximal sprints. *Journal of Medicine and Science in Sports*, 12(3), 406-410.
- Devita, P., & Skelly, W. A. (1992). Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Medicine Science Sports Exercise*, 24(1), 108-115.
- Dutto, D. J., Smith, G. A. (2002). Changes in spring-mass characteristics during treadmill

- running to exhaustion. *Medicine Science Sports Exercise*, 34(8), 1324-1331.
- Fukashiro, S., & Komi, P. V. (1987). Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *International Journal of Sports Medicine*, 1, 15-21.
- Farley, C. T., Glasheen, J., & McMahon, T. A. (1993). Running spring: Speed and animal size. *Journal of Experimental Biology*, 185, 71-86.
- Farley, C. T., Houdijk, H. H., Van Strien, C., & Louie, M. (1998). Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses. *Journal of Applied Physiology*, 85(3), 1044-1055.
- Flanagan, E. P., & Harrison, A. J. (2007). Muscle dynamics differences between legs in healthy adults. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(1), 67-72.
- Granata, K. P., Padua, D. A., & Wilson, S. E. (2002). Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 12(2), 127-135.
- Günther, M., & Blickhan, R. (2002). Joint stiffness of the ankle and the knee in running. *Journal of Biomechanics*, 35, 1459-1474.
- Hobara, H., Kanosue, K., & Suzuki, S. (2007). Changes in muscle activity with increase in leg stiffness during hopping. *Neuroscience Letters*, 418(1), 55-59.
- Hobara, H., Kimura, K., Omuro, K., Gomi, K., Muraoko, T., Iso, S., & Kanosue, K. (2008). Determinants of difference in leg stiffness between endurance and power-trained athletes. *Journal of Biomechanics*, 41, 506-514.
- Komi, P. V. (1992). Stretch-shortening cycle. In P. V. Komi (Ed.), *Strength and power in sport* (pp. 169-179). Oxford, England: Blackwell Scientific.
- Kuitunen, S., Avela, J., Kyröläinen, H., Nicol, C., & Komi, P. V. (2002). Acute and prolonged reduction in joint stiffness in humans after exhausting stretch – shortening cycle exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 88(1-2), 107-116.

- Kuitunen, S., Kyröläinen, H., Avela, J., & Komi, P. V. (2007). Leg stiffness modulation during exhaustive stretch-shortening cycle exercise. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 17(1), 67-75.
- McMahon, T. A., & Cheng, G. C. (1990). The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *Journal of Biomechanics*, 1, 65-78.
- Morin, J. B., Dalleau, G., Kyröläinen, H., Jeannin, T., & Belli, A. (2005). A simple method for measuring stiffness during running. *Journal of Applied Biomechanics*, 21(2), 167-180.
- Moritz, C. T., & Farley, C. T. (2005). Human hopping on very soft elastic surface: Implication for muscle pre-stretch and elastic energy storage in locomotion. *The Journal of Experimental Biology*, 208(5), 939-949.
- Self, B. P., & Paine, D. (2001). Ankle biomechanics during four landing techniques. *Medicine Science Sports Exercise*, 33(8), 1338-1344.
- Williams, D. S. III., Davis, I. M., Scholz, J. P., Hamill, J., & Buchanan, T. S. (2004). High-arched runners exhibits increased leg stiffness compared to low-arched runners. *Gait and Posture*, 19(3), 263-269.

The Stiffness Effect of Exercise State

Jian-Zhi Lin, Chung-Yu Chen

Graduate School of Physical Education, National Taiwan University of Physical
Education and Sport, Taichung, Taiwan

Abstract

The lower extremity landing impact is a popular research direction, and jumping pattern of landing or takeoff is a necessary motion technology. The collision injuries and sport performance of lower extremity is often linked with stiffness. Human limb in external environment will continue to change the ability to adapt, and then there is a perfect athletic performance. Besides the role of joint and muscle work, stiffness modulation is a key factor. Description of the stiffness concept has taken seriously. Therefore, this study was to investigate the spring-mass model and stiffness research topics, in view of biomechanics, to explain the concept of stiffness characteristics associated with research and development of applications, in order to provide better ideas to sports science application in analysis and theory of integration.

Keywords: landing, spring-mass model, Hooke's law, biomechanics

