

不同躍起方向對高臺著地反彈 跳躍動作下肢著地負荷之影響

王思宜¹、許年瑩²¹臺灣 臺北市 國立政治大學體育室²臺灣 高雄市 大寮國中學務處

摘要

結論：高臺著地反彈跳是最常見的下肢增強式訓練動作，訓練中常同時涵蓋有著地後向上跳與向前跳兩種跳躍型態。過去研究指出，此類的高強度運動訓練對下肢具有潛在性的傷害風險；然而改變反彈跳躍方向對下肢著地負荷產生之影響仍屬未知。本研究旨在探討進行高臺著地反彈跳訓練時，著地後銜接垂直跳與水平跳兩種反彈跳躍方向對下肢著地負荷產生之影響。**方法：**以 12 位健康的大學體育系男生為受試對象，利用七台光學攝影機 (200Hz) 與兩塊測力板 (1000Hz) 同步蒐集運動學與動力學資料。每位受試者從 40 公分高臺著地後須進行高臺著地垂直跳與高臺著地水平跳動作。以 Motion Monitor 軟體進行所有資料處理。利用 SPSS14.0 統計軟體進行相依樣本 *t* 檢定，顯著水準訂為 $\alpha = .05$ 。**結果：**相較於高臺著地水平跳，高臺著地垂直跳動作在觸地瞬間髖關節與踝關節屈曲角度較小，著地期間髖關節與膝關節的角位移量亦較小。其次，高臺著地垂直跳在垂直地面反作用力峰值、朝後的水平地面反作用力峰值與膝關節近脛骨前剪力峰值上皆顯著高於高臺著地水平跳動作。在勁度調節上，高臺著地垂直跳動作有較大的腿部勁度與膝關節角勁度。**結論：**進行高臺著地反彈跳躍訓練時，著地後銜接垂直上跳的跳躍型態有較高的下肢傷害風險，尤其是前十字韌帶。

關鍵詞：地面反作用力、剪力、前十字韌帶、傷害

壹、緒論

增強式訓練 (plyometric training) 是一種普遍被用以增進肌力與爆發力的訓練方式，此訓練方式是利用肌肉產生預先牽張再快速收縮 (stretch-shortening-cycle) 的型態，來提升運動過程中肌肉參與的程度，進而提升訓練的效果 (王宇涵、彭賢德，2014；Komi, 1984；Norman &

Komi, 1979)。過去研究證實，下肢的增強式訓練可以提升垂直跳的表現 (Kotzamanidis, 2006；Markovic, Jukic, & Milanovic, 2007)。而高臺著地反彈跳 (drop jump) 是最常見的下肢增強式訓練動作之一，在動作上包含從一個已知的高度落下、著地，並在著地後迅速做出一個最大努力的跳躍動作。而正因運動中包含許多向上與向前的跳躍型態，例如：籃球搶籃板球時的垂直躍起、排球後排扣球時的朝前上躍起，所

以在高臺著地反彈跳的訓練處方中，也常見兩種不同反彈跳躍方向，亦即著地後銜接向上跳躍的高臺著地垂直跳 (vertical drop jump) 與著地後銜接向前跳躍的高臺著地水平跳 (horizontal drop jump) 兩種型態。

然而，在高臺著地反彈跳此類高強度的運動訓練中對下肢具有潛在性的傷害 (Blattner & Noble, 1979)，因此，關於高臺著地反彈跳著地階段對下肢的負荷與傷害的風險一直是被重視的議題。高臺著地垂直跳在過往研究上常被用以評估訓練效益 (林政東、陳全壽、劉宇、趙峻郁, 2000) 與傷害的風險，然高臺著地水平跳的相關研究卻並不多見。Ball 與 Zanetti (2012) 的研究指出，高臺著地垂直跳較高臺著地水平跳動作有較少的著地反彈時間。而以單腳進行高臺著地水平跳的研究指出，單腳著地後水平向前跳躍的距離與短距離衝刺 (< 25m) 的表現有顯著的相關性，故運動訓練者應考慮多採用水平跳的訓練與測驗模式於訓練中 (Holm, Stalbm, Keogh, & Cronin, 2008)。此外，Wakai 與 Linthorne (2005) 在垂直跳與立定跳遠 (standing long jump) 的研究發現，相較於垂直跳動作，立定跳遠為更複雜的動作，因為腿部在著地過程中需要考慮身體較佳的拋射角度。水平方向的跳躍型態在姿勢上更強調髖關節的彎曲與伸展動作，故其動作技術需求與協調性與垂直跳動作有所不同 (Nagano, Komura, & Fukashiro, 2007)。綜合上述，高臺著地水平跳的訓練具有其重要性，而不同的躍起方向或許會影響著地時的身體姿勢，進而對著地時下肢的負荷形成影響，然而現有的文獻並無相關的探討。

過去研究證實，著地期間的地面反作用力特性與下肢負荷極具關聯，著地期間較大的地面反作用力將會增加下肢骨骼肌肉的負荷與膝關節傷害的風險 (Hewett, Myer, & Ford, 2005; Williams, McClay, Scholz, Hamill, & Buchanan, 2004)，尤其是前十字韌帶的負荷 (Shelburne, Pandey, & Torry, 2004)。近年來有關急停跳著地

傷害的研究則透過逆向動力學所求得的膝關節近脛骨前剪力 (proximal tibia anterior shear force) 與膝關節伸肌力矩 (knee extension moment) 來探討前十字韌帶傷害的風險 (Chappell, Yu, Kirkendall, & Garrett, 2002; Sell et al., 2007; Yu, Lin, & Garrett, 2006)。Sell 等 (2007) 及 Yu 等 (2006) 的研究也證實，著地期間增加膝關節近脛骨前剪力與膝關節伸肌力矩將會增加非接觸性運動前十字韌帶傷害的風險。此外，地面反作用力與膝關節近脛骨前剪力有關，著地期間較大的朝後的水平地面反作用力將會增加近脛骨前剪力與膝關節伸肌力矩 (Sell et al., 2007; Yu & Garrett, 2007; Yu et al., 2006)。在著地動作的研究發現，增加觸地瞬間髖關節與膝關節屈曲角度，有助於降低著地時的地面反作用力峰值 (Blackburn & Padua, 2008; Yu et al., 2006)。李育銘與李恆儒 (2013) 研究指出，進行單腳的躍起著地動作，主要是藉膝關節的伸展肌群與踝關節的蹠屈肌群來吸收著地時的撞擊能量。此外，著地時的下肢勁度與關節角勁度在近幾年來也被應用於下肢傷害議題的探討。因此，透過上述運動生物力學參數的分析可對下肢與前十字韌帶傷害的潛在風險進行評估。

長期且重複性撞擊所累積的運動傷害是不容忽視的，評估不同訓練動作對人體著地時的動作策略、勁度調節與下肢負荷產生之影響將有助於傷害的預防。本研究旨在探討運用高臺著地反彈跳動作來進行下肢增強式訓練時，著地後銜接垂直跳與水平跳兩種不同反彈跳躍方向對下肢著地負荷產生之影響，以期對此類增強式訓練中下肢傷害的風險有更清楚的認知，並提供運動教練與選手參考。

貳、方法

一、研究對象

本研究是以大學體育系非運動代表隊的 12 名男性為受試對象 (年齡 19.0 ± 1.5 歲, 身高 172.7 ± 4.5 公分, 體重 64.6 ± 5.3 公斤), 受試者在實驗前六個月內並無下肢部位的傷害。實驗前先向受試者說明整個實驗目的與流程, 並讓受試者簽署同意書。

二、儀器架設與實驗流程

使用七台 Qualisys (Oqus 100, Gothenburg, Sweden) 光學攝影機 (200Hz) 與兩塊 AMTI (BP600900, AMTI Inc., Watertown, MA, USA) 三軸測力板 (1000Hz) 所建構的 Qualisys 資料捕捉系統, 同步擷取受試者進行高臺著地垂直跳與高臺著地水平跳兩種動作過程中反光球之三維空間座標軌跡與雙腳著地階段之地面反作用力資料。

實驗開始前讓每位受試者穿著相同規格且符合其尺寸的實驗用鞋來進行統一的熱身活動, 而後參照 Helen Hayes 之標記設置 (Helen Hayes marker set) 在受試者身上左右側腸骨前上棘、股骨大轉子、大腿外側、股骨外側踝、股骨內側踝、小腿外側、脛骨內側踝、腓骨外側踝、第二跗骨粗隆、腳後跟與薦骨岬等處共黏貼 21 個反光球。在跳台高度部分, 本研究採用 40 公分高臺作為實驗跳台高度, 除了此高度普遍被用於實際訓練與科學研究外, 先前研究指出 40 公分高臺為高臺著地反彈跳的最適高度 (Peng, 2011; Walsh, Arampatzis, Schade, & Bruggemann, 2004)。實驗時讓受試者雙手叉腰站於 40 公分高臺邊緣, 以自然前傾方式落下, 著地時雙腳分別落於兩塊測力板上。進行高臺著地垂直跳動作時, 受試者在著地後須迅速銜接垂直向上躍起的動作, 並盡力跳到最高; 在高臺著地水平跳動作時, 受試者著地後同樣須迅速接續水平向前跳躍的動作, 並盡力跳到最遠距離。每位受試者須完成兩種不同方向的高臺著地反彈跳躍動作, 每種動作各成功三次, 每次測試間休息一分鐘, 在更

換動作前亦會給予練習, 並以平衡次序法讓受試者交替兩種跳躍方向的動作順序。

三、資料處理

將 Qualisys 軟體所擷取的反光球軌跡與地面反作用資料傳入 The Motion Monitor (Motion Monitor TM, innovative sports training) 動作分析軟體進行運動學、地面反作用力與動力學逆過程的運算。本研究以著地階段的運動生物力學參數進行分析, 而著地階段之定義為: 受試者觸地瞬間 (測力板垂直地面反作用力大於 10 牛頓) 至薦骨反光球之垂直高度達最低點瞬間之期間。

下肢各關節角度的定義是以站立時定義為 0 度。髖關節、膝關節屈曲角度定義為正值, 伸展角度為負值; 踝關節背屈角度定義為正值, 蹠屈角度為負值。著地期間髖、膝與踝關節活動範圍定義為觸地瞬間 (θ_1) 至該關節達最大屈曲或背屈 (θ_2) 此期間的關節角位移: $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 。透過逆向動力學 (Newton-Euler inverse dynamic) 運算可得淨關節間作用力與淨關節肌肉力矩, 將膝關節小腿處之淨膝關節間作用力經由向量之轉換求得與小腿長軸相垂直之分力 (Sell et al., 2007; Yu et al., 2006), 即膝關節近脛骨處前剪力。腿部勁度 (K_{leg}) 定義為大轉子達最低點時之垂直地面反作用力 (F) 與受試者的腿部垂直壓縮量 (ΔL) 之比值: $K_{leg} = F/\Delta L$, 受試者的腿部垂直壓縮量定義為觸地瞬間的大轉子高度 (L_1) 與大轉子達最低點時 (L_2) 之垂直位移量: $\Delta L = L_1 - L_2$ 。關節角勁度 (K_{joint}) 是指觸地瞬間淨關節肌肉力矩 (M_1) 到關節達最大屈曲角度時的淨關節肌肉力矩 (M_2) 之改變量 ($\Delta M = M_2 - M_1$), 與此期間關節活動範圍 ($\Delta\theta$) 之比值: $K_{joint} = \Delta M/\Delta\theta$ (Farley & Morgenroth, 1999)。在資料結果呈現上, 地面反作用力與膝關節近脛骨前剪力皆以受試者體重進行標準化, 單位為 BW; 膝關節伸肌力矩以受試者的體重與身高進行標準化, 單位為 BW*BH; 腿部勁度以受試者的體重與腿長進行標準化, 單位為 BW/LH; 關節角勁度以受試者體重進行標準化, 單位為 BW*m/rad。

四、統計分析

在資料處理上，本研究以每位受試者分別於兩種跳躍方向各三次成功測試結果的平均值進行統計分析，利用 SPSS14.0 版統計軟體進行相依樣本 *t* 檢定，檢驗 40 公分高臺著地後不同反彈跳躍方向動作在著地階段其運動學、動力學與勁度調節之差異，統計顯著水準訂為 $\alpha = .05$ 。

參、結果

著地階段下肢各關節的角運動學參數如表 1 所示，結果顯示，高臺著地垂直跳較高臺著地水平跳在觸地瞬間有較小的髖關節屈曲角度與較大的踝關節蹠屈角度 ($p < .05$)，且在著地期間，高臺著地垂直跳其髖關節、膝關節與踝關節的最大屈曲角度亦明顯小於高臺著地水平跳動作 ($p < .05$)。著地期間關節活動範圍部分，高臺著地水平跳髖關節與膝關節活動範圍明顯大於高臺著地垂直跳動作 ($p < .05$)。在關節角速度方面，相較於高臺著地水平跳動作，高臺著地垂直跳動作在觸地瞬間有較大的踝關節角速度與較小的髖關節角速度 ($p < .05$)。

表 1

高臺著地不同跳躍方向著地階段關節運動學參數

	著地垂直跳	著地水平跳	<i>p</i> 值
觸地瞬間髖關節屈曲角度 (deg)	21.69 ± 8.71	27.21 ± 6.40	< .001*
膝關節屈曲角度 (deg)	24.44 ± 3.96	22.49 ± 4.31	.154
踝關節蹠屈角度 (deg)	-24.76 ± 6.06	-12.19 ± 8.28	< .001*
著地期間髖關節最大屈曲角度 (deg)	34.87 ± 12.11	44.75 ± 13.90	< .001*
膝關節最大屈曲角度 (deg)	65.40 ± 7.68	69.03 ± 10.22	.047*
踝關節最大背屈角度 (deg)	11.47 ± 2.81	23.70 ± 4.50	< .001*
著地期間髖關節活動範圍 (deg)	12.18 ± 5.80	17.54 ± 10.70	.046*
膝關節活動範圍 (deg)	40.96 ± 6.27	46.55 ± 9.69	.012*
踝關節活動範圍 (deg)	36.23 ± 5.18	35.89 ± 7.89	.864
觸地瞬間髖關節屈曲角速度 (rad/s)	1.75 ± 1.06	2.73 ± 1.51	.001*
膝關節屈曲角速度 (rad/s)	4.48 ± 1.71	4.45 ± 1.86	.523
踝關節蹠屈角速度 (rad/s)	6.33 ± 0.89	5.15 ± 1.19	.006*

註：*不同跳躍方向達顯著差異， $p < .05$

著地階段地面反作用力與下肢動力學參數如表 2 所示，結果顯示，高臺著地垂直跳較高臺著地水平跳動作產生較大的朝後水平地面反作用力峰值與垂直地面反作用力峰值 ($p < .05$)，然在垂直地面反作用力峰值出現時間上，兩種動作則無顯著的差異 ($p > .05$)。其次，相較於高臺著地水平跳動作，高臺著地垂直跳動作在著地期會產生較大的膝關節近脛骨前剪力峰值與膝關節伸肌力矩峰值 ($p < .05$)。

表 2

高臺著地不同跳躍方向著地階段動力學參數

	著地垂直跳	著地水平跳	<i>p</i> 值
朝後地面反作用力峰值 (BW)	0.50 ± 0.37	0.41 ± 0.11	.005*
垂直地面反作用力峰值 (BW)	2.74 ± 0.39	2.44 ± 0.49	.014*
垂直地面反作用力峰值出現時間 (ms)	47.08 ± 9.67	43.70 ± 9.68	.346
著地期膝關節近脛骨前剪力峰值 (BW)	1.21 ± 0.21	1.08 ± 0.19	.024*
著地期膝關節伸肌力矩峰值 (BW*BH)	0.17 ± 0.02	0.13 ± 0.02	< .001*

註：*不同跳躍方向達顯著差異， $p < .05$

著地階段腿部勁度與各關節角勁度參數如表 3 所示，結果顯示，高臺著地垂直跳較高臺著地水平跳動作有較大的腿部勁度與膝關節角勁度 ($p < .05$)，然在髖關節與踝關節角勁度部分，不同反彈跳躍方向則無顯著的差異 ($p > .05$)。

表 3

高臺著地不同跳躍方向著地階段腿部勁度與各關節角勁度

	著地垂直跳	著地水平跳	<i>p</i> 值
腿部勁度 (BW/LH)	11.13 ± 2.51	8.98 ± 2.78	.002*
著地期髖關節角勁度 (BW*m/rad)	0.09 ± 0.48	0.06 ± 0.41	.910
著地期膝關節角勁度 (BW*m/rad)	0.47 ± 0.10	0.33 ± 0.11	< .001*
著地期踝關節角勁度 (BW*m/rad)	0.39 ± 0.10	0.43 ± 0.16	.305

註：*不同跳躍方向達顯著差異， $p < .05$

肆、討 論

高臺著地反彈跳是經常被使用的增強式訓練動作，其對下肢肌力與爆發力有良好的訓練成效 (Bobbert, Huijing, & van Ingen Schenau, 1987; Byrne, Moran, Rankin, & Kinsella, 2010; Peng, Kernozek, & Song, 2011)，但此類高強度的訓練同時伴隨著較大的傷害風險 (Ricard & Veatch, 1990; Wang & Peng, 2014)，因此，了解此訓練動作中對下肢著地負荷的影響是相當重要的課題。本研究透過運動生物力學的角度評估高臺著地垂直跳與高臺著地水平跳此兩種常見的增強式訓練動作，其著地階段的下肢負荷，所得的結果發現，高臺著地垂直跳比高臺著地水平跳會形成更大的著地撞擊力與前十字韌帶負荷，具有較大的下肢傷害風險。

過去研究證實，著地期間垂直地面反作用力大小與時間特性會影響著地期下肢的負荷，著地期間垂直地面反作用力峰值越高、此峰值出現的時間越早，皆會提升下肢傷害的風險 (McNitt-Gray, 1991; Williams et al., 2004)。尤其當此峰值發生在人體骨骼系統所能產生反應的 50 毫秒之前，人體將無法主動產生反應去吸收撞擊力，因而骨骼、關節與軟骨組織就要承受此撞擊的負荷 (Nigg, Denoth, & Neukomm, 1981; Ricard & Veatch, 1990)。本研究發現，雖然此兩種反彈跳躍動作在垂直地面反作用力峰值出現時間上並無差異，但高臺著地垂直跳其垂直地面反作用力峰值顯著大於高臺著地水平跳動作，顯示高臺著地垂直跳動作在著地階段下肢有較大的撞擊負荷。

近年來有關著地傷害的研究常透過逆向動力學所算得的膝關節近脛骨前剪力來探討作用在脛骨末端上的前剪力，藉以評估非接觸性運動中形成前十字韌帶負荷的力學因素 (Chappell et al., 2002; Sell et al., 2007; Wang, 2011; Wang, Gu, Chen, & Chang, 2010; Yu et al., 2006)。過去研究指出，較大的膝關節近脛骨前剪力會造成脛骨前移，並增加前十字韌帶的拉扯 (Chappell et al.,

2002)。因此，此膝關節近脛骨前剪力可作為評估前十字韌帶負荷的指標 (Sell et al., 2007; Yu et al., 2006)。本研究結果顯示，高臺著地垂直跳較高臺著地水平跳動作產生更大的膝關節近脛骨前剪力峰值，且此兩種著地的膝關節近脛骨前剪力峰值皆比過去評估急停跳動作前十字韌帶受傷風險所得之數值 (0.62 BW) 為大 (Yu, 2006)。根據上述論述與數值比較，我們推論此兩種高臺著地反彈跳皆具有高的前十字韌帶負荷，尤其是高臺著地垂直跳動作。

而著地階段淨膝關節伸肌力矩是一個影響膝關節近脛骨前剪力的重要因子。過去研究指出，增加大腿前方股四頭肌群收縮的力量是引發脛骨末端前剪力增加的主因 (DeMorat, Weinhold, Blackburn, Chudik, & Garrett, 2004; Markolf et al., 1995; Withrow, Huston, Wojtys, & Ashton-Miller, 2006)。Chappell 等 (2002) 指出膝關節伸肌力矩受股四頭肌與腿後肌群收縮力量比例所影響。劉智凱與王令儀 (2010) 指出透過逆向動力學所得的淨膝關節肌肉力矩可作為跨越過膝關節之腿部肌群收縮力量的指標。著地期間較大的膝關節伸肌力矩會增大近脛骨前剪力，進而提高前十字韌帶傷的風險 (Chappell et al., 2002; Wang et al., 2010; Yu et al., 2006)。此外，Yu 等 (2006) 指出，著地期間較大的水平與垂直地面反作用力峰值皆會增加近脛骨前剪力，且水平地面反作用力峰值的影響最為關鍵。Sell 等 (2007) 更直接指出，朝後的水平地面反作用力峰值是預測近脛骨前剪力的因子之一。換言之，著地期間較大的朝後水平地面反作用力將易引發膝關節伸肌力矩的增大，而產生較大的脛骨末端前剪力，進而增大前十字韌帶的張力引發傷害 (Arendt & Dick, 1995; Chappell et al., 2002; Yu et al., 2006)。本研究結果則與過去研究論述相符，膝關節近脛骨前剪力峰值較大之高臺著地垂直跳動作，其膝關節伸肌力矩峰值亦明顯的高於高臺著地水平跳，且於著地階段有較大的朝後水平地面反作用力。因此，根據上述論述，本研究推論高臺著地垂直跳於著地階段會產生較大朝後水平地面反作用

力，形成較大膝關節伸肌力矩，故會增大膝關節近脛骨前剪力對前十字韌帶所造成的威脅。

著地時的下肢運動學特性是影響著地期間地面反作用力的因素。本研究發現高臺著地垂直跳在觸地瞬間髖關節屈曲角度較小且踝關節蹠屈角度較大，顯示高臺著地垂直跳採用較為挺直的方式觸地，而此動作型態將不利於緩衝著地時的撞擊。Devita 與 Skelly (1992) 指出，著地時人體會藉由髖關節與膝關節伸肌肌群進行能量的吸收，以緩衝著地時的撞擊。在急停跳的研究指出，著地時若能增加髖關節與膝關節屈曲角度，將可降低前十字韌帶的傷害 (Blackburn & Padua, 2008)。其次，著地期間人體會藉由增加髖關節與膝關節的角位移量來降低地面反作用峰值與延緩此峰值出現的時間 (Devita & Skelly, 1992; McNitt-Gray, 1993)。本研究發現高臺著地水平跳在著地期間有較大的髖關節與膝關節活動範圍，而此較大關節活動範圍緩衝著地的撞擊，降低垂直地面反作用力峰值。從著地期間的下肢運動學特性可知，反彈跳躍方向的改變，使得此兩種動作在著地期間呈現不同的動作特性。高臺著地水平跳其髖關節在觸地瞬間呈現較大的屈曲角度，且著地期間髖、膝關節活動範圍亦較大，此現象應與水平跳動作在著地後需迅速轉換成往前跳躍所致。此結果也符合 Nagano 等 (2007) 研究，水平方向的跳躍型態在姿勢上更強調髖關節的彎曲與伸展動作，其動作技術需求與協調性與垂直跳動作有所不同。本研究認為人體為讓身體在著地後能迅速反彈前跳，人體採用了不同於垂直躍起的著地策略來因應，而此不同的著地策略則影響著地撞擊的負荷。

而觸地瞬間關節角速度與著地負荷的緩衝亦有所關聯。Yu 等 (2006) 指出觸地瞬間較大的膝關節角速度可降低垂直地面反作用力峰值，觸地瞬間較大的髖關節角速度可降低朝後的水平地面反作用力峰值。過去研究亦指出，在觸地瞬間增加髖關節角速度可降低朝後的最大地面反作用力 (Wang et al., 2010; Yu et al.,

2006)。因此，在觸地瞬間若能增加髖關節角速度，主動產生屈曲的動作，將有助於降低前十字韌帶的負荷 (Yu et al., 2006)。本研究發現相較於高臺著地垂直跳，高臺著地水平跳在觸地瞬間有較大的髖關節角速度。本結果也符合 Yu 等 (2006) 研究，證實在觸地瞬間增加髖關節角速度，可減少朝後的水平地面反作用力峰值與降低膝關節近脛骨前剪力。此外，相較於高臺著地水平跳，高臺著地垂直跳在觸地瞬間呈現較小的髖關節角速度與較大的踝關節角速度，顯示其著地策略的差異，然而，過去研究認為，此利用踝關節進行緩衝的策略對地面反作用力的吸收應會劣於利用髖關節的方式 (謝耀毅、陳柏潔、黃長福，2015)。

著地期間下肢勁度的調節與著地負荷有所關聯。Williams 等 (2004) 指出高足弓的跑者在跑步時有大的腿部勁度，此現象增加了著地負荷進而提升下肢傷害的風險。Wang (2009) 在高臺著地的研究發現，在不同高臺形成的著地撞擊下，人體會有不同的勁度特性，此勁度調節與撞擊的緩衝有關；當高臺高度由 40 增至 60 公分時，人體會調降腿部勁度以緩衝著地的撞擊，但當下落高度增至 80 公分時，腿部勁度不再降低，此時膝關節角勁度顯著增大，然此現象會增大膝關節傷害風險，尤其是前十字韌帶。Peng (2010) 在高臺著地反彈跳的研究指出，當跳台高度高於 40 公分時，隨著跳台高度的增加，人體會降低腿部勁度以及膝、踝關節角勁度以維持動作的穩定，此關節角勁度降低的主因是關節角位移增加所致。Butler, Crowell, 與 Davis (2003) 以及 Williams 等 (2004) 認為較大的勁度會增加著地的撞擊，提升骨骼的負荷，但較低的肌肉勁度卻又易增加軟骨組織與韌帶的傷害。本研究發現，高臺著地垂直跳著地時產生較大的腿部勁度，因不同反彈跳躍方向其腿部壓縮量並無差異，故此較大的腿部勁度應為較大的著地撞擊力量 (垂直 $2.23 \pm 0.32BW$ ；水平 $1.89 \pm 0.40BW$ ， $p = .003$) 所致。

而腿部勁度主要是依其關節角勁度來作調節 (Farley & Morgenroth, 1999; Hobara, Kimura, Omuro, Gomi, & Muranoka, 2008)。Ford, Myer, 與 Hewett (2010) 比較男女著地動作研究發現，著地期間男性與女性的膝關節角勁度雖相同，但女性用了較大的膝關節肌肉力矩與膝關節角位移來達到相同的膝關節角勁度，但此策略將使女性前十字韌帶的傷害風險增大。本研究發現，高臺著地垂直跳動作是藉增加膝關節角勁度來提升腿部勁度。相較於高臺著地水平跳，高臺著地垂直跳著地期間膝關節力矩的變化量較大 (垂直 $0.32 \pm 0.04 \text{ BW} \cdot \text{m}$; 水平 $0.25 \pm 0.04 \text{ BW} \cdot \text{m}$, $p < .001$)，且膝關節角位移量又較小 (垂直 40.96 ± 6.27 度; 水平 46.55 ± 9.69 度, $p = .012$)，因而產生較大的膝關節角勁度。Wang (2009) 研究指出，膝關節近脛骨前剪力與膝關節角勁度有顯著的正相關，其相關係數達 0.68；即膝關節角勁度愈大，近脛骨前剪力也愈大。綜合上述文獻，本研究推論此較大腿部勁度與膝關節角勁度將使高臺著地垂直跳動作有較高的下肢傷害風險。

綜合上述討論，本研究的結論為，此兩種高臺著地反彈跳動作的垂直地面反作用力峰值皆於 50 毫秒前出現，且皆有甚大的近脛骨前剪力峰值，故均屬傷害風險較高的訓練技術。而相較於高臺著地水平跳，高臺著地垂直跳動作在觸地瞬間採用較僵硬的方式著地，著地期間髕關節與膝關節的角位移量較小，且著地期間有較大的垂直地面反作用力峰值、朝後水平地面反作用力峰值與近脛骨前剪力峰值，並產生較大的腿部勁度與膝關節角勁度，因此，本研究認為高臺著地垂直跳動作在著地階段有更高的下肢傷害風險，尤其是前十字韌帶。建議初學者在進行高臺著地反彈跳的增強式訓練時，可以從向前跳躍的方向開始著手。

致謝

感謝國立東華大學運動生物力學實驗室提供場地與儀器協助，讓本研究得以順利進行。

引用文獻

- 王宇涵、彭賢德 (2014)。增強式訓練強度之生物力學量化指標。《中華體育季刊》，28(2)，109-115。doi: 10.6223/qcpe.2802.201406.1003
- [Wang, Y. H., & Peng, H. T. (2014). The quantitative index of plyometric training intensity in biomechanics. *Quarterly of Chinese Physical Education*, 28(2), 109-115.]
- 李育銘、李恆儒 (2013)。不同方向的躍起著地對下肢矢狀面關節運動學、動力學和能量學的影響。《體育學報》，46，33-44。doi: 10.6222/pej.4601.201303.0804
- [Lee, Y. M., & Lee, H. J. (2013). Effects of different jump-landing directions on sagittal plane kinematics, kinetics and energetics at lower extremity joints. *Physical Education Journal*, 46, 33-44.]
- 林政東、陳全壽、劉宇、趙峻郁 (2000)。兩種不同牽張幅度深跳練習的二階段肌電現象之比較。《體育學報》，28，329-338。doi: 10.6222/pej.0028.200003.4032
- [Lin, J. D., Chen, C. S., Liu, Y., & Chao, C. Y. (2000). The comparisons of EMG patterns between two drops jump with different stretch amplitude. *Physical Education Journal*, 28, 329-338.]
- 劉智凱、王令儀 (2010)。急停跳動作中前十字韌帶傷害風險的潛在力學因子。《中華體育季刊》，24(2)，48-55。doi: 10.6223/qcpe.2402.201006.2006
- [Liu, C. K., & Wang, L. I. (2010). Ji ting tiao dong zuo zhong qian shi zi ren dais hang hai feng xian di qian zai li xue yin zi. *Quarterly of Chinese Physical Education*, 24(2), 48-55.]
- 謝耀毅、陳柏潔、黃長福 (2015)。不同性別排球選手扣球著地下肢生物力學之差異。《體育學報》，48，195-203。doi: 10.3966/102472972015064802007

- [Hsieh, Y. Y., Chen, P. C., & Huang, C. F. (2015). Gender differences in lower extremity biomechanics during volleyball spike landing. *Physical Education Journal*, 48, 195-203.]
- Arendt, E., & Dick, R. (1995). Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer: NCAA data and review of literature. *The American Journal of Sports Medicine*, 23, 694-701. doi: 10.1177/036354659502300611
- Ball, N. B., & Zanetti, S. (2012). Relationship between reactive strength variables in horizontal and vertical drop jump. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26, 1407-1412. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182510870
- Blackburn, J. T., & Padua, D. A. (2008). Influence of trunk flexion on hip and knee joint kinematics during a controlled drop landing. *Clinical Biomechanics*, 23, 313-319. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2007.10.003
- Blattner, S. E., & Noble, L. (1979). Relative effects of isokinetic and plyometric training on vertical jumping performance. *Research Quarterly of the American Alliance for Health, Physical Education, Recreation and Dance*, 50, 583-588.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., & van Ingen Schenau, G. J. (1987). Drop jumping. II. The influence of jumping height on the biomechanics of jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19, 339-346.
- Butler, R. J., Crowell, H. P., & Davis, I. M. (2003). Lower extremity stiffness: Implications for performance and injury. *Clinical Biomechanics*, 18, 511-517. doi: 10.1016/S0268-0033(03)00071-8
- Byrne, P., Moran, K., Rankin, P., & Kinsella, S. (2010). A comparison of methods used to identify 'optimal' drop height for early phase adaptations in depth jump training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24, 2050-2055. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181d8eb03
- Chappell, J. D., Yu, B., Kirkendall, D. T., & Garrett, W. E. (2002). A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *The American Journal of Sports Medicine*, 30, 261-267.
- DeMorat, G., Weinhold, P., Blackburn, T., Chudik, S., & Garrett, W. (2004). Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 32, 477-483. doi: 10.1177/0363546503258928
- Devita, P., & Skelly, W. A. (1992). Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24, 108-115.
- Farley, C. T., & Morgenroth, D. C. (1999). Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of Biomechanics*, 32, 267-273. doi: 10.1016/S0021-9290(98)00170-5
- Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2010). Longitudinal effects of maturation on lower extremity joint stiffness in adolescent athletes. *The American Journal Sports Medicine*, 38, 1829-1837. doi: 10.1177/0363546510367425
- Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2005). Reducing knee and anterior cruciate ligament injuries among female athletes: A systematic review of neuromuscular training interventions. *The Journal of Knee Surgery*, 18, 82-88. doi: 10.1055/s-0030-1248163
- Holm, D. J., Stalbam, M., Keogh, J. W. L., & Cronin, J. (2008). Relationship between the kinetics and kinematics of a unilateral horizontal drop jump to sprint performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22, 1589-1596. doi: 10.1519/JSC.0b013e318181a297
- Komi, P. V. (1984). Physiological and biomechanical correlate of muscle function: Effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exercise and Sports Sciences Reviews*, 12, 81-121.

- Kotzamanidis, C. (2006). Effect of plyometric training on running performance and vertical jumping in prepubertal boys. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20, 441-445.
- Markolf, K. L., Burchfield, D. M., Shapiro, M. M., Shepard, M. F., Finerman, G. A., & Slauterbeck, J. L. (1995). Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *Journal of Orthopaedic Research*, 13, 930-935. doi: 10.1002/jor.1100130618
- Markovic, G., Jukic, I., & Milanovic, D. (2007). Effects of sprint and plyometric training on muscle function and athletic performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21, 543-549.
- McNitt-Gray, J. L. (1991). Kinematics and Impulse characteristics of drop landing from three heights. *International Journal of Sport Biomechanics*, 7, 201-224.
- McNitt-Gray, J. L. (1993). Kinetics of the lower extremities during drop landings from three heights. *Journal of Biomechanics*, 26, 1037-1046. doi: 10.1016/S0021-9290(05)80003-X
- Nagano, A., Komura, T., & Fukashiro, S. (2007). Optimal co-ordination of maximal effort horizontal and vertical jump motions: A computer simulation study. *Biomedical Engineering Online*, 6, 1-9. doi: 10.1186/1475-925X-6-20
- Nigg, B. M., Denoth, J., & Neukomm, P. A. (1981). Quantifying the load on the human body: Problems and some possible solutions. In A. Morecki, K. Fidelus, K. Kedzior, & S. Wit (Eds.), *Biomechanics* (pp.89-99). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Norman, R. W., & Komi, P. V. (1979). Electromechanical delay in skeletal muscle under normal movement conditions. *Acta Physiologica Scandinavica*, 106, 241-248. doi: 10.1111/j.1748-1716.1979.tb06394.x
- Hobara, H., Kimura, K., Omuro, K., Gomi, K., Muraoka, T., Iso, S., & Kanosue, K. (2008). Determinants of difference in leg stiffness between endurance and power-trained athletes. *Journal of Biomechanics*, 41, 506-514. doi: 10.1016/j.jbiomech.2007.10.014
- Peng, H. T. (2011). Changes in biomechanical properties during drop jumps of incremental height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25, 2510-2518. doi: 10.1519/JSC.0b013e318201bcb3
- Peng, H. T., Kernozek, T. W., & Song, C. Y. (2011). Quadriceps and hamstring activation during drop jumps with changes in drop height. *Physical Therapy in Sport*, 12, 127-132. doi: 10.1016/j.ptsp.2010.10.001
- Ricard, M. D., & Veatch, S. (1990). Comparison of impact forces in high and low impact aerobic dance movements. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6, 67-77.
- Sell, T. C., Ferris, C. M., Abt, J. P., Tsai, Y. S., Myers, J. B., Fu, F. H., & Lephart, S. M. (2007). Predictors of proximal tibia anterior shear force during a vertical stop-jump. *Journal of Orthopaedic Research*, 25, 1589-1597. doi: 10.1002/jor.20459
- Shelburne, K. B., Pandy, M. G., & Torry, M. R. (2004). Comparison of shear forces and ligament loading in the healthy and ACL-deficient knee during gait. *Journal of Biomechanics*, 37, 313-319. doi: 10.1016/j.jbiomech.2003.07.001
- Walsh, M., Arampatzis, A., Schade, F., & Bruggemann, G. (2004). The effect of drop jump starting height and contact time on power, work performed and moment of force. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18, 561-566.
- Wang, L. I. (2009). Lower extremity stiffness modulation: Effect of impact load of a landing task from different drop heights. *International Sportmed Journal*, 10, 186-193.
- Wang, L. I. (2011). The lower extremity biomechanics of single- and double-leg stop-jump task. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10, 151-156.
- Wang, L. I., Gu, C. Y., Chen, W. L., & Chang, M. S. (2010). Potential for non-contact ACL injury between step-close-jump and hop-jump task. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9, 134-139.

- Wang, L. I., & Peng, H. T. (2014). Biomechanical comparisons of single- and double-legged drop jumps with changes in drop height. *International Journal of Sports Medicine*, *35*, 522-527. doi: 10.1055/s-0033-1345133
- Wakai, M., & Linthorne, N. P. (2005). Optimum take-off angle in the standing long jump. *Human Movement Science*, *24*, 81-96. doi: 10.1016/j.humov.2004.12.001
- Williams, D. S., McClay, I. S., Scholz, J. P., Hamill, J., & Buchanan, T. S. (2004). High-arched runners exhibit increased leg stiffness compared to low-arched runners. *Gait and Posture*, *19*, 263-269. doi: 10.1016/S0966-6362(03)00087-0
- Withrow, T. J., Huston, L. J., Wojtys, E. M., & Ashton-Miller, J. A. (2006). The relationship between quadriceps muscle force, knee flexion, and anterior cruciate ligament strain in an in vitro simulated jump landing. *The American Journal of Sports Medicine*, *34*(2), 69-274. doi: 10.1177/0363546505280906
- Yu, B., Lin, C. F., & Garrett, W. E. (2006). Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clinical Biomechanics*, *21*, 297-305. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2005.11.003
- Yu, B., & Garrett, W. E. (2007). Mechanisms of non-contact ACL injuries. *British Journal of Sports Medicine*, *41*, i47-i51. doi: 10.1136/bjism.2007.037192.

投稿日期：105 年 08 月

通過日期：105 年 11 月

The effects of jumping direction on lower extremity loading during drop jump task

Shi-Yi Wang¹ and Nian-Ying Hsu²

¹Physical Education Office, National Chengchi University, Taipei City, Taiwan

²Office of Student Affairs, DaLiau Junior High School, Kaohsiung City, Taiwan

Abstract

Introduction: Drop jump (DJ) is the most common plyometric training for the lower extremity. The training often includes two types, one is jumping vertically after drop, the other is jumping horizontally after drop. Previous studies have indicated that such high intensity training might increase the potential of injuring lower extremity. However, it was unproven whether changing the directions after first drop would effect on the lower extremity injury. The purpose of this study was to investigate the influence of jumping direction on the lower extremity regarding vertical and horizontal jump. **Methods:** Twelve healthy male students from the department of Physical Education were subjects for this study. The motion capture system with seven infrared cameras (200 Hz) and two force plates (1000 Hz) were synchronized and used to collect the kinematic and kinetic data. Each subject performed both vertical DJ and horizontal DJ from 40-cm height. All data were analyzed with the MotionMonitor software. Statistical analysis was performed with SPSS 14.0 for Windows. The dependent *t*-test was used to test the differences variables between the vertical DJ and horizontal DJ. The significance level was set at $\alpha = .05$. **Results:** The vertical DJ exhibited smaller hip and ankle flexion at initial foot contact with the ground, and a smaller hip and knee angular displacement during landing in comparison to the horizontal DJ. The vertical DJ showed a greater peak vertical ground reaction force, peak posterior ground reaction force and peak knee proximal tibia anterior shear force during landing than the horizontal DJ. The vertical DJ tended to increase leg stiffness and knee joint stiffness. **Conclusion:** The vertical DJ has a higher risk of lower extremity injury, especially in anterior cruciate ligament.

Key words: ground reaction force, shear force, anterior cruciate ligament, injury