



不同步态在足跟着地时下肢运动学与撞击能量之关系

¹梁日蕾 ¹邱宏达*

¹成功大学体育健康与休闲研究所

投稿日:2011/03/31; 审查通过:2011/08/17

摘要

前言：本研究在预估不同步态下，人体足部与地面撞击能量的大小，并探讨下肢运动学与撞击能量的相关性。

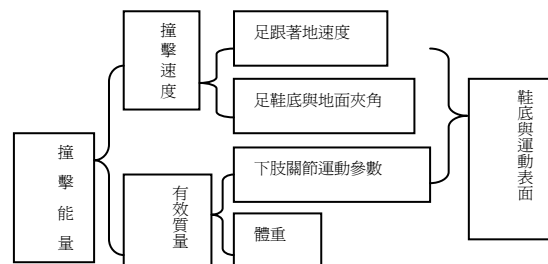
方法：以不同的撞击能量撞击受测鞋，计算撞击能量与地面反作用力之最大负荷率的线性回归关系。另招募 14 名男性受试者，穿着与材料测试相同之慢跑鞋，进行快走、慢跑及快跑的动作，以 visualeyex 动作捕捉系统拍摄并计算下肢的运动学参数，经由比较材料与人体测试的地面反作用力，以预估撞击能量大小。结果：快走、慢跑及快跑着地时的撞击能量分别为 0.81 ± 0.45 焦耳(0.45~1.85 焦耳)、 1.55 ± 0.56 焦耳(1.07~2.08 焦耳)、 2.97 ± 1.39 焦耳(2.06~4.00 焦耳)。快跑着地瞬间的足跟速度最快，踝关节角度最大，膝关节角度最小，依序是慢跑及快走。撞击能量与足跟速度($r=0.647, p<0.01$)、踝关节角度($r=0.396, p<0.01$) 呈现显著的正相关，而与膝关节角度($r=-0.478, p<0.01$)呈显著的负相关。结论与建议：未来如欲以材料测试评估慢跑鞋在不同步态下的避震效应，所采用的撞击能量应设定在 0.45~4 焦耳。人体在不同速度下的运动，为减少冲击下肢会采取运动学上的调整，但着地时的撞击能量仍会随运动速度增加而增加。导致撞击能量增加的原因，相较于有效质量，撞击速度的影响似乎更为主要。

关键词：撞击测试、着地策略、最大负荷率、有效质量

壹、绪论

过去关于不同慢跑鞋的避震功能评估或仿真长时间使用慢跑鞋的研究中，为控制实验的条件，常以单一撞击能量的撞击器来冲击试验鞋底 (Frederick, Clarke & Hamill, 1984; Henning & Lafortune, 1991; Henning, Milani & Lafortune, 1993; McNair & Marshall, 1994; Verdejo & Mills, 2004; Wilson, 2007)，然而人体穿鞋跑时，施予地面的撞击能量，包含撞击的有效质量 (effective mass)、足跟撞击速度等，可能会因为不同的着地策略而改变，且是因人而异的 (邱宏达, 2002; Chi & Schmitt, 2005; Lieberman et al., 2010)；此外，不同的鞋底与运动表面特性也可能会影响人体调整着地时的撞击能量 (邱宏达, 2002) (如图一)。因此，以单一撞击能量来冲击试验鞋底，似乎无法有效地评估运动鞋的避震效应。

由于人体与地面的撞击能量无法直接的测量，因此需以间接的方式来预估。邱宏达、相子元与林德嘉 (2002) 经由材料与人体测试的地面反作用力，估算出受试者以 3 公尺/秒穿鞋跑时，撞击能量约在 3-7 焦耳；Chi and Schmitt (2005) 利用冲量 - 动量方法 (impulse-momentum method) 计算赤脚跑走时，足部撞



图一、影响足部着地撞击能量的因素关系图

击地面的有效质量与撞击能量，结果显示快走时足部撞击地面的有效质量为 $6.34 \pm 1.65\% BW$ (2.58~10.13% BW)、慢跑时为 $5.30 \pm 1.75\% BW$ (2.62~7.81% BW)，其中 BW 为身体总质量；而足部撞击地面的能量，快

*通讯作者：邱宏達 Email: htchiu@mail.ncku.edu.tw
地址：成功大學體育健康與休閒研究所，臺灣(701)台南市大學路 1 號

走时为 0.80 ± 0.48 焦耳 (0.24~2.90 焦耳)、慢跑时为 1.29 ± 0.85 焦耳 (0.44~3.99 焦耳)。Lieberman et al. (2010) 以同样方法计算出赤脚跑者的有效质量, 以足跟着地者(rear-foot striker)为 $6.8 \pm 3.0\%BW$, 以足尖着地者(foreshoet striker)为 $1.7 \pm 0.4\%BW$, 以中足着地者(mid-foot striker)则介于两者之间。虽然在 Lieberman et al. 的研究中没有计算撞击能量, 但有效质量愈大, 撞击能量应会愈大。此外, 以上研究皆发现以足跟着地的跑步, 着地瞬间膝关节角度会影响有效质量大小, 愈弯曲有效质量愈小。

过去材料测试结果显示, 慢跑鞋鞋底的避震能力会因不同的撞击能量改变。邱宏达(2004)以 3.19~6.67 焦耳的撞击能量, 冲击不同慢跑鞋与运动表面的组合, 结果发现在较低撞击能量下, 只要鞋底或运动表面其中之一具有较佳的避震能力, 便能保有整体较佳的避震效果; 而在较高撞击能量下(>5 焦耳), 则必须鞋底与运动表面都具有较佳的避震能力, 才能呈现出较好的避震效果。Chiu and Shiang (2007)以 1.82~6.08 焦耳的撞击能量, 冲击三双含不同鞋垫的运动鞋, 结果显示鞋垫在低撞击能量下(<2 焦耳)约可吸收掉 24-32% 的能量, 显示鞋垫在低撞击能量下, 对于整体运动鞋的避震效果扮演重要的角色。由以上研究可以得知, 运动鞋在不同撞击能量下会表现出不同的避震特性, 因此材料测试部分若能设定在适当的撞击能量范围, 便能有效地评估运动鞋穿在人体上的避震效应。

过去关于撞击能量的预估, 多仅适用于赤脚跑走, 或是穿鞋以固定速度跑的情况, 对于以不同速度穿鞋跑或走, 着地时人体对地面的撞击能量, 则至今没有相关的研究成果。本研究拟由材料与人体测试, 藉由比较地面反作用力的结果, 预估在快走、慢跑及快跑的情况下, 人体足部与地面撞击能量的大小。并观察不同的步态时, 下肢运动学参数的变化, 探讨着地瞬间人体运动学参数与足部施予地面撞击能量之关系。

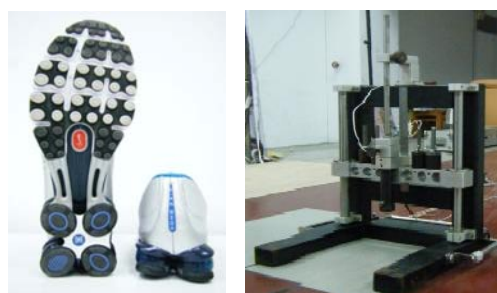
贰、研究方法

一、材料测试

本研究所使用之受测鞋为一款市售慢跑鞋(Nike, air shox 318684 -142), 大小型号为美规 9 号(图二左)。将受测鞋的右脚鞋置于 AMTI (BP400600) 测力板上, 以可携式避震反弹测试仪(图二右, 相子元, 1998)撞击鞋底足跟部份, 并改变撞击器的撞击高度(重量: 6.2 公斤; 高度: 1 到 10 公分, 每次增加 1 公分), 撞击的高度是以撞击器的撞击头表面与鞋底接触时设定为

高度 0, 并以测力板测量地面反作用力。在不考虑能量消耗的情况下(如摩擦力、空气阻力等), 由力学能的转换 $E = 0.5mv^2 = mgh$ 可推算出给与鞋底的撞击能量约在 0.61~6.08 焦耳, 共 10 种不同的撞击能量。测力板的讯号以 AMTI NetForce 软件搜集, 所有讯号的取样频率皆设定为 1000 Hz。以 MatLab7.0(MathWorks, Massachusetts, USA)撰写截取频率为 100 Hz 的低通滤波器以去除噪声, 并计算其最大负荷率值(maximum loading rate)。负荷率指的是垂直方向地面反作用力的变化率, 最大负荷率会发生在撞击力峰值之前(邱宏达等人, 2002)。撞击测试中, 每个撞击能量撞击五次, 去除两个极端值后取平均值。不选择撞击力峰值为分析的参数, 是因为材料与人体测试中产生撞击力峰值的机制不同, 无法比较(邱宏达等人, 2002)。由每个撞击能量下所计算得之平均最大负荷率, 求得撞击能量与最大负荷率的回归方程式, 以了解撞击能量与最大负荷率的关系。

图二、受测鞋(左)与可携式避震测试仪(右)



二、人体测试

本研究共招募 14 名以右脚为惯用脚的男性受试者, 半年内无下肢运动伤害, 且有慢跑习惯, 受试者资料如表一。本研究已由成功大学附设医院人体试验委员会核准通过, 每位受试者在正式试验前需填写基本资料及试验同意书。

受试者须穿着与材料测试相同之慢跑鞋, 进行快走、慢跑及快跑的动作。过去研究发现, 即使控制受试者的跑步速度, 受试者间的撞击能量仍有很大的差异(邱宏达等人, 2002)。因此, 本研究并不控制

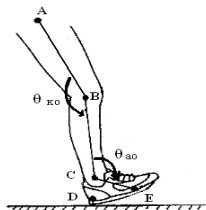
表一、受试者基本数据

受试者(n=14)	身高(公分)	体重(公斤)	年龄(岁)
平均±标准差	171.3±6	63.7±7	20±2.2

受试者的速度，受试者皆是以自然的速度(preferred speed)在约 10 公尺长的跑道，进行快走、慢跑及快跑，但受试者快跑的速度必须大于慢跑，慢跑的速度必须大于快走。由于要和右脚鞋撞击测试的结果比较，受试者必须以右脚足跟着地(heel strike)，踏在置于跑道中央的测力板上。测力板右侧约三公尺处摆设一台动作捕捉系统 (Visualeyez motion tracking system, Phoenix Technolog -ies Inc., Canada)，摄取频率设为 200Hz，拍摄下肢运动学参数(图三)，此动作捕捉系统包含三个感测眼(sensing eyes)，捕捉来自目标上的点光源(point-light source)，并计算在空间内的三维坐标。可捕捉的范围为 8 公尺(高度) * 7 公尺(宽度) * 4 公尺(深度)。LED 光标黏贴于以下五个解剖标志点(anatomic landmark)：A：右脚股骨大转子 (Greater trochanter, GT)、B：腓骨头(Head of fibula)、C：外踝(Lateral malleolus)、D：鞋面上足跟(heel)的相对位置与 E：鞋面上第五跖趾关节 (Fifth metatarso-phalangeal joint)的相对位置(如图四)。在每次测试前，受试者必须练习数次直到动作熟悉为止，每种情况必须完成 10 次有效的测试。因此，每位受试者须完成 3 (motion types) * 10 (trials) = 30 次的有效测试，且每位受试者的所有测试都必须在同一天完成。



图三、动作捕捉系统与力板配置



图四、人体肢段示意图

三、撞击能量预估

由材料测试所测得受测鞋，其撞击能量(Ei)与最大负荷率(Gzi)的线性回归关系式如下：

$$G_{zi} = a * E_i + b \quad (1)$$

将每一次人体测试穿鞋时所测得的最大负荷率值(Gs)代入关系式(1)，得到以下方程：

$$G_s - (a * E_i + b) = 0 \quad (2)$$

解出方程式(2)，即可推算出每位受试者每一次测试时，足部对鞋底的撞击能量 Ei。由计算结果，比较快走、慢跑与快跑的撞击能量范围。

四、数据处理

资料搜集与分析以 MatLab7.0(MathWorks, Massachusetts, USA)计算不同运动模式下的平均速度、步长、步频及着地瞬间的足跟速度、踝关节、膝关节角度。平均速度计算方式如下：

$$v = (D_1 - D_2) / \Delta t$$

其中，D₂为右脚踏入力板着地瞬间足跟的位置，D₁为右脚踏入力板前一步的着地瞬间足跟位置，Δt为两个着地瞬间的时间差；步长(stride length)：λ=D₂-D₁；步频(cadence)：f=v/λ=1/Δt。着地瞬间的判断是以着地时，足跟速度达最小时的瞬间。足跟速度的计算方式为：足跟位置光标点(D)在一个单位时间(0.005 秒)的位置变化量。踝关节角度(θ_{ao})为计算 CE 向量和 CB 向量间的夹角；膝关节角度(θ_{ko})则为计算 BC 向量和 BA 向量间的夹角(如图四；邱宏达，2002)。

统计分析观察受试者在三种不同步态下，速度、地面反作用力参数、撞击能量及下肢运动学参数是否有差异，利用 SPSS17.0 软件(SPSS Inc., Chicago, USA)进行单因子重复量数变异数分析(one-way repeated measures ANOVA)，以 Bonferroni 做事后多重比较。并以皮尔森相关系数(Pearson correlation coefficients)观察撞击能量与着地时足跟速度、膝关节角度、踝关节角度之相关性，显著水平皆定在 p < 0.05，为去除受试者体重对撞击能量的影响，撞击能量皆对体重做标准化。

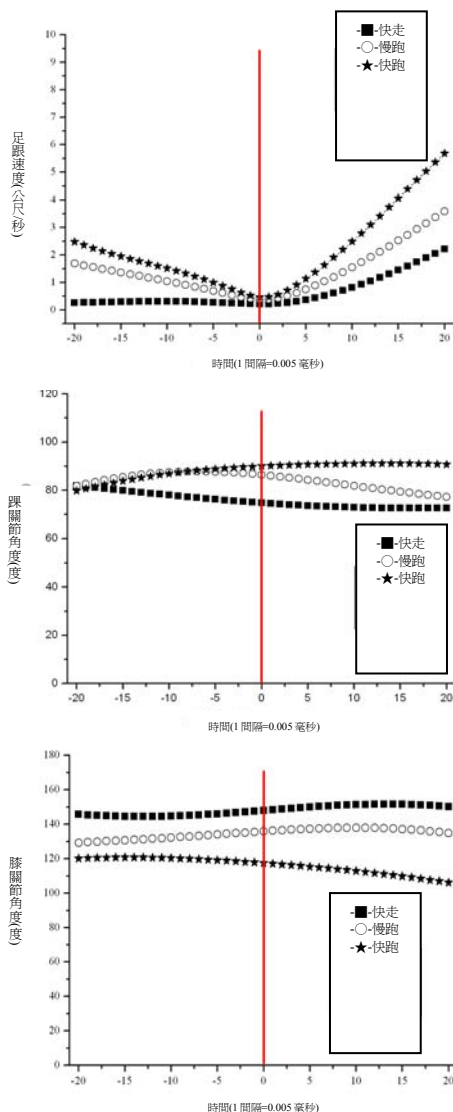
参、结果与讨论

最大负荷率和撞击能量的线性回归方程式为 Gi = 21472 Ei + 7258.9 (r² = 0.9763)，其中 Gi 是最大负荷率(牛顿/秒)，Ei 是撞击能量(焦耳)。由结果可知，当撞击能量愈大时，所测得最大负荷率就愈大，此与过去的研究结果相同(邱宏达等人，2002)，以加速规测量的研究也得到同样的结果(邱宏达，2004；Chiu & Shiang, 2007)。表二为三种不同步态下测试的结果，平均速度有

显著的差异(p<.05)，快跑 > 慢跑 > 快走。快跑比慢跑、快走产生较大的撞击力峰值、较短的撞击力峰值发生时间、较大的最大负荷率、较短的最大负荷率发

表二、三种不同步态下，垂直地面反作用力参数、着地瞬间下肢运动学参数与撞击能量的结果

参数 (单位)	快走(n=14)	慢跑(n=14)	快跑(n=14)	P(快走-慢跑)	P(慢跑-快跑)	P(快走-快跑)
速度 (公尺/秒)	1.96(0.3)	3.04(0.4)	4.56(0.4)	.000	.000	.000
撞击力峰值 (倍体重)	1.3(0.1)	1.7(0.3)	1.8(0.4)	.000	.379	.000
撞击力峰值发生时间 (毫秒)	72.4(32.8)	60.6(33.1)	37.5(26.2)	.030	.000	.000
最大负荷率 (倍体重/秒)	39.3(13.5)	65.4(18.3)	115.9(53.3)	.001	.003	.000
最大负荷率发生时间 (毫秒)	27.3(20.4)	31.4(12.5)	18.8(7.1)	.067	.000	.000
足跟速度 (公尺/秒)	0.17(0.1)	0.33(0.2)	0.95(0.9)	.005	.001	.000
踝关节角度 (度)	70.5(7.2)	77.7(8.1)	83.7(9.7)	.000	.000	.000
膝关节角度 (度)	151.8(6.5)	139.7(7.0)	132.1(10.7)	.000	.000	.000
撞击能量 (焦耳)	0.81(0.45)	1.55(0.56)	2.97(1.39)	.000	.000	.003
撞击能量范围 (焦耳)	0.45~1.85	1.07~2.08	2.06~4.00			



图五、三种不同步态下，足跟着地前、后 100ms 足跟速度、膝关节角度与踝关节角度的变化情形。此图为第 11 位受试者其中一次测试的结果，垂直线代表着地瞬间

生时间。随运动速度的增加，着地瞬间的足跟速度会随着显著增加，踝关节角度同样也随着增加，膝关节角度则随着减少。快跑的撞击能量最大(2.97±1.39 焦耳，2.06~4.00 焦耳)，慢跑次之(1.55±0.56 焦耳，1.07~2.08 焦耳)，快走的撞击能量最小(0.81±0.45 焦耳，0.45~1.85 焦耳)。

过去有关慢跑鞋材料测试的研究，常使用的单一撞击能量在 0.6~4.41 焦耳之间 (Frederick et al., 1984; Henning & Lafortune, 1991; Henning et al., 1993; McNair & Marshall, 1994; Verdejo & Mills, 2004; Wilson, 2007)，撞击能量的范围与本研究跑走的撞击能量范围是相近的。但由本研究结果，使用单一撞击能量，并无法显示出鞋底在不同步态下的避震效应，譬如以较低的撞击能量(0.6 焦耳)连续冲击鞋底 (Verdejo & Mills, 2004; Wilson, 2007)，并不能反应出在长期慢跑或快跑后，鞋底避震能力的衰退情形。

由标准化后的撞击能量与着地瞬间足跟速度、踝关节角度及膝关节角度的相关系数可知 (表三)，着地瞬间的撞击能量与着地瞬间的足跟速度($r=0.647, p<0.01$)和踝关节角度($r=0.396, p<0.01$)呈显著正相关，但比起足跟速度，踝关节角度与撞击能量的相关系数较低。撞击能量与着地瞬间膝关节角度($r=-0.478, p<0.01$)则呈显著负相关。过去研究发现，着地瞬间的撞击能量与有效质量及足跟着地速度有关，而着地策略如着地瞬间膝关节角度、踝关节劲度、着地方式则会影响到有效质量的大小，着地瞬间足跟速度愈大则撞击能量愈大(邱宏达, 2002)，膝关节角度愈小或以足尖着地，则有效质量愈小(Wright, Neptune, van den Bogert & Nigg, 1998; Chi & Schmitt, 2005; Lieberman et al., 2010)。

表三、对体重标准化后的撞击能量和下肢运动学参数的相关性

	足跟速度	踝关节角度	膝关节角度
标准化的撞击能量	0.647**	0.396**	-0.478**

**显著相关(p<0.01)*

Chiu(2003)的研究中,在跑者小腿外加重量,并观察对跑步时产生的撞击能量和撞击时有效质量的影响,结果小腿外加重量愈大,撞击能量会随着增加,当外加 1.1 公斤的重量时,足跟着地速度增加,有效质量则没有明显变化;但当外加重量达 2.05 公斤时,有效质量明显增加约 1.4 公斤,而足跟着地瞬间的水平速度则略微降低,显示当小腿外加重量增加使有效质量增加时,人体会调整着地策略,使足跟着地水平

速度降低已减缓撞击能量,此策略也发生在以赤脚跑步的受试者身上(邱宏达, 2002)。本研究同样发现,当运动速度随之增加时(由快走、慢跑至快跑),着地前足跟着地速度明显增加,为减缓撞击能量增加,人体会调整着地策略,使着地瞬间踝关节较跖屈(plantarflexion)、膝关节较弯屈,以降低有效质量大小,减缓与地面的冲击(如图五)。虽然着地策略的调整,可减小有效质量,但因为较明显增加的足跟着地速度,依旧使得撞击能量增加。Lieberman et al.(2010)的研究中指出,以足跟着地时踝关节刚度改变(stiffness)对有效质量大小并无太大影响,本研究受试者皆是以足跟着地的方式,此可能是踝关节角度与撞击能量有较小相关系数的原因。

本研究所预估穿鞋跑走,着地瞬间的撞击能量与赤脚跑走的撞击能量范围相近(Chi & Schmitt, 2005)约在 0.45~4.00 焦耳。邱宏达等人(2002)估算出受试者以 3 公尺/秒穿鞋跑时,撞击能量约在 3-7 焦耳之间,似乎比本研究慢跑的撞击能量高出许多,此可能与受试者跑步速度或受测鞋不同有关。穿不同运动鞋是否会改变撞击能量大小,或是因人而异,则需要后续的研究来证实。

肆、结论与建议

本研究撞击能量预估的结果,快走、慢跑、快跑三种步态下所产生的撞击能量约为: 0.81±0.45 焦耳(0.45~1.85 焦耳)、1.55±0.56 焦耳(1.07~2.08 焦耳), 2.97±1.39 焦耳(2.06~4.00 焦耳)。未来如欲以材料测试评估慢跑鞋穿着在人体上的避震效应,所采用的撞击能量应在此能量范围内。而随着运动速度的增加,可以发现到着地瞬间的撞击能量、撞击力峰值、最大负

荷率等都会随之增加,下肢运动学参数也会随之调整。在观察撞击速度(足跟着地速度)、有效质量(下肢运动学参数)与撞击能量之相关性时,本研究亦发现着地瞬间足跟速度、踝、膝关节角度与撞击能量呈显著相关,其中足跟速度相关性最高,膝关节角度次之,踝关节角度与撞击能量的相关性则较不明显。整体而言,对于人体跑走着地瞬间施予地面的撞击能量,撞击速度的影响似乎较有效质量的调整更为主要。未来的研究,若能探讨下肢关节的受力或是力矩,将能更清楚了解产生下肢运动学参数调适的机制。

伍、参考文献

- 邱宏达、相子元、林德嘉 (2002)。由地面反作用力评估鞋底避震能力—材料与人体测试之比较。中华民国体育学报, 32, 69-78。
- 邱宏达 (2002)。赤足与穿鞋跑之着地策略分析。大专体育学刊, 4(2), 101-108。
- 邱宏达 (2004)。不同慢跑鞋与运动表面组合之避震特性。成大体育, 37(1), 39-48。
- 相子元 (1998)。运动鞋与人体生物力学之研究计划报告书。经济部科技项目研究, 未出版。
- Chiu, H. T. (2003, November) The effect of adding mass to runner's lower legs on impact energy and effective mass during impact phase. *The 13th International Conference on Mechanics in medicine and Biology*, Tainan, Taiwan.
- Chiu, H. T. & Shiang, T. Y. (2007). Effects of insoles and additional shock absorption foam on the cushioning properties of sport shoes. *Journal of Applied Biomechanics*, 23(2), 119-127.
- Chi, K. J. & Schmitt, D. (2005). Mechanical energy and effective foot mass during impact loading of walking and running. *Journal of Biomechanics*, 38, 1387-1395.
- Frederick, E. C., Clarke, T. E. & Hamill, C. L. (1984). The effect of running shoe design on shock attenuation. In E. C. Frederick (Ed.), *Sport shoes and playing surfaces* (pp.190-198). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Henning, E. M. & Lafortune, M. A. (1991). Relationships between ground reaction force and tibial bone acceleration parameters. *International Journal of Sports Biomechanics*, 7, 303-309.

- Henning, E. M., Milani, T. L. & Lafortune, M. A. (1993). Use of ground reaction force parameters in predicting peak tibial acceleration in running. *Journal of Applied Biomechanics*, 9, 306-314.
- Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., Daoud, A. I., D'Andrea, S., Davis, I. S., et al. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 463, 531-535.
- McNair, P. J. & Marshall, R. N. (1994). Kinematic and kinetic parameters associated with running in different shoes. *British Journal of Sports Medicine*, 28, 256-260.
- Verdejo, R. & Mills, N. J. (2004). Simulating the effects of long distance running on shoe midsole foam. *Polymer Testing*, 23, 567-574.
- Wright, I. C., Neptune, R. R., van den Bogert, A.J. & Nigg, B. M. (1998). Passive regulation of impact forces in heel-toe running. *Clinical Biomechanics*, 13, 521-531.
- Wilson, J.F. (2007). Impact-induced fatigue of foamed polymers. *Internal Journal of Impact Engineering*, 23, 1370-1381.

致谢:

本研究承蒙 NSC-97-2410-H-006-086-经费赞助, 使本研究得以顺利完成, 特此感谢



Correlations between the kinematics of lower extremities and impact energy at heel strike for walking, jogging and running



¹Jih-Lei Liang ²Hung-Ta Chiu*

¹Cheng-Kung University, Institute of Physical Education, Health & Leisure Studies, Taiwan

Accepted : 2010/08/17

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to estimate the impact energy at the landing instant for walking, jogging and running with running shoe and to investigate the correlation between foot strike kinematic factors with impact energy. **Methods:** A portable impact tester was specifically designed to impact a running shoe (Nike air shox 318684-142) that was positioned on a force plate (AMTI BP400600) with 10 different impact energies (equally distributed from 0.61 to 6.08 joules). The linear regression equation between mean maximum loading rate and impact energy was calculated for this shoe. Fourteen male subjects wearing the same shoes of material test were asked to move across the force plate by walking, jogging and running. The heel velocity, ankle and knee angle at heel strike were measured by using 3D motion analysis system (Visualeyez™, VZ4000). The impact energies were calculated with the comparison of the ground reaction forces of impact and subject testing. **Results:** The impact energy for walking, jogging, and running was 0.81 ± 0.45 joule (0.45~1.85 joule), 1.55 ± 0.56 joule (1.07~2.08 joule) and 2.97 ± 1.39 joule (2.06~4 joule), respectively. The kinematic factors: heel velocity ($r=0.647$, $p<0.01$), ankle angle ($r=0.396$, $p<0.01$) and knee angle ($r= -0.478$, $p<0.01$) at heel strike were significantly correlated with impact energy. **Conclusions:** In future, as using impact testing method to evaluate the cushioning property of the sports shoes, the impact energies should be set at the range from 0.45 to 4.0 joule to simulate the shoe's cushioning effect under subject walking, jogging and running. Base on the results, the subjects have seemed to adjust their landing strategy to reduce the effective mass at heel strike as the motion speed increased. However, the impact energy still increased because of the greater heel striking speed. In conclusion, impact velocity seemed to have a greater contribution to the increased impact energy than effective mass.

Key words: impact testing, landing strategy, maximum loading rate, effective mass

*Corresponding author: Hung-Ta Chiu, Cheng Kung University, Institute of Physical Education, Health & Leisure Studies
Address: (701)No.1, University Road, Tainan City, Taiwan
E-mail address: htchiu@mail.ncku.edu.tw