

衝擊試驗後緣鋸齒波之撞擊模擬分析

王栢村¹ 胡惠文² 黃宗淇³ 李昆達⁴

¹國立屏東科技大學機械工程系教授

²國立屏東科技大學車輛工程系副教授

³國立屏東科技大學機械工程系研究生

⁴金頓科技股份有限公司 研發處處長

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

國科會計劃編號: NSC-94-2622-E-020-002-CC3

摘要

本文主要以有限元素分析軟體模擬自由落下式衝擊試驗機於撞擊後產生之鋸齒波的模擬分析,探討衝擊平台頂面之衝擊時間與加速度之關係。首先以有限元素分析軟體 LS-DYNA 建立整體結構,包含衝擊平台及鉛錐,再分別以不同衝擊高度及不同鉛錐幾何尺寸進行衝擊模擬分析,以得知衝擊平台頂面之衝擊時間與加速度關係,並由衝擊結果波型與規範要求之波形進行比較。模擬結果與規範要求之鋸齒波型相當吻合,故以軟體分析有其可行性,未來可更進一步了解其各項參數對衝擊時間與加速度之關係,用以設計特定形狀及大小之鉛錐,符合於各種試驗條件及規格之衝擊試驗規範。

關鍵詞: 衝擊試驗機、衝擊平台、鉛錐、有限元素分析、LS-DYNA、環境衝擊試驗。

1. 前言

隨著生活品質的提升,市面上各種家電、電子產品等不斷的推陳出新,為現代生活帶來不少便利。然而各種產品在製造、運送與使用過程中常遭受振動、衝擊與掉落等其他外力作用,導致產品損壞,故市面上各項產品在研發製造過程中,為確保產品具有承受環境應力之能力,皆需執行環境應力試驗,以驗證產品品質性能及承受衝擊環境之能力。假使能利用電腦軟體模擬分析產品受振動、衝擊與掉落之響應,可使設計者於開發初期預估產品品質性能與發掘及改善問題,如此可減少實驗次數及縮短開發時間與成本,以爭加市場競爭力。

本文主要參考美國軍方 MIL-STD-810F[1]規範,規範中說明衝擊試驗結果必須為鋸齒波波型,並規定鋸齒波各項參數之容許誤差等。楊[2]說明機電產品的品質與可靠度的測試,主要為振動測試、衝擊測試、落下測試,並對振動測試種類與其適用波形、振動試驗系統包含組件、振動試驗常見問題等詳述。王[3]介紹有限元素分析基本原理及概念,並說明使用有限元素軟體操作手法等。Low *et al.*[4]使用有限元素分析軟體 PAM-CRASH 對結構進行落下衝擊分析,進一步改變結構之材料參數與厚度,觀察軟體模擬分析衝擊之結果,以得知結構最佳設計。Aslan *et al.*[5]說明一塊纖維強化並由薄片組成的複合小平板,利用有限元素分析軟體 3DIMPACT 進行暫態動態分析及與實際衝擊實驗相互比較,評估其在

低速衝擊下的衝擊力時間域之響應。Wang *et al.*[6]以有限元素分析軟體模擬落下衝擊測試,主要探討電子產品在掉落衝擊下之可靠度分析。Li and Shemansky[7]由理論推導與數值分析軟體對微小機電轉換器結構及表面的掉落衝擊結果進行分析比較。許等人[8]探討掉落衝擊測試實驗與數值軟體模擬於不同衝擊速度下,加速度與衝擊波長關係,以得知是否滿足 JEDEC 規範中衝擊條件的要求。Zeng *et al.*[9]應用有限元素軟體 LS-DYNA 對複合管進行碰撞分析,並與實驗數據比較,且研究改變複合管之幾何參數,觀察對複合管的影響。Jayson *et al.*[10]應用有限元素分析軟體 LS-DYNA 對硬碟進行衝擊分析,並分為垂直衝擊與傾斜衝擊進行探討。

進行環境應力試驗時,首先必須選擇參考規範,進而依據規範所要求之波型進行試驗,以得知產品承受環境應力能力。而影響試驗波型主要原因包含衝擊試驗機之衝擊平台與鉛錐,故本文以有限元素軟體模擬分析衝擊平台與鉛錐撞擊對波型之影響。

本文主要為模擬衝擊平台在不同高度下撞擊鉛錐,及固定高度對不同幾何大小鉛錐進行撞擊,以得知其衝擊平台頂面之衝擊時間與加速度關係,並由模擬與環境應力試驗規範之鋸齒波波型比較,發現結果有一致性,未來可應用於鉛錐設計及衝擊試驗之相關研究,使符合於各種試驗條件及規格之衝擊試驗規範。

2. 問題定義與分析目標

市面上產品進行衝擊試驗時常採用自由落下式之衝擊試驗機,因測試之產品不同,所以質量也有所不同,因此為適應不同的測試物之重量,則必須選擇適用之鉛錐 (Pad),以符合環境衝擊試驗規範之鋸齒波規定。故如何設計選擇鉛錐為進行衝擊試驗之主要工作,圖 1 為 MIL-STD-810F 規範之理想鋸齒波波型,其中 P 為加速度大小、 T_d 為衝擊時間。圖 2 為衝擊平台、測試物與鉛錐示意圖。對鉛錐結構變形影響原因,包含衝擊高度、衝擊時間、衝擊平台、測試物質量及鉛錐材料特性、尺寸等,皆會影響衝擊平台頂面之波型輸出,因此本文以一質塊模擬衝擊平台及其測試物,再分別以不同衝擊高度及固定高度分別改變鉛錐底面積直徑、頂面積直徑與高度大小進行撞擊模擬,以了解衝擊平台頂面受衝擊後產生後緣鋸齒波之機制與影響。

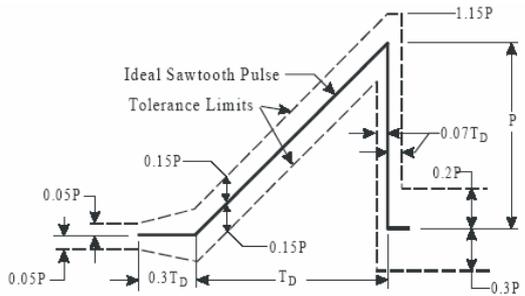


圖 1 MIL-STD-810F 規範之理想鋸齒波波型[1]

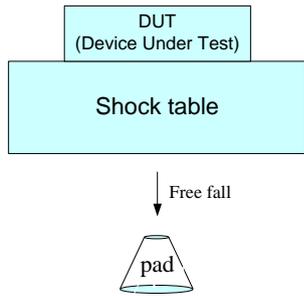


圖 2 衝擊平台、測試物與鉛錐示意圖

圖 3 為鉛錐實際結構及數學模型，本文主要分析目標為得知衝擊平台頂面受衝擊時間與加速度之關係，並以不同衝擊高度 350 mm、650 mm、950 mm、1250 mm 對鉛錐撞擊，以及固定高度分別改變鉛錐之底面積直徑 (D_1)、頂面積直徑 (D_2) 與高度大小 (H) 進行撞擊模擬。表 1 為衝擊平台與鉛錐材料常數。

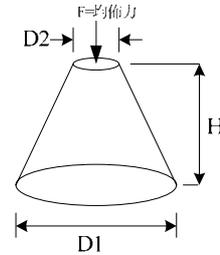
3. 有限元素分析

本文主要使用有限元素分析軟體 LS-DYNA 對此系統進行非線性之動態模擬分析，其中衝擊平台有限元素模型與實際平台大小相等，但實際衝擊平台結構較為複雜，故簡化為一長方體，鉛錐則依實際幾何大小繪製。並假設平台為一剛體，故需設定楊氏係數 (Young's modulus)、浦松比 (Poisson ratio) 與密度 (Density)，而鉛錐非剛體，故須另外設定 yield stress 與 tangent modulus，其有限元素模型架構說明如下：

- (1) 元素選用：鉛錐及衝擊平台皆採用線性立方體元素，在 LS-DYNA 裡元素編號為 Solid 164，而平台與鉛錐材料常數設定如表一，鉛錐 yield stress 與 tangent modulus 設定為 70MPa 及 120MPa。
- (2) 元素分割：鉛錐及衝擊平台皆採用全模型分割，且皆以 5 等份分割，分割圖形如圖 4 所示。
- (3) 位移限制條件：為模擬實際情況，故鉛錐底面之 y 方向設定為固定端 ($U_y=0$)，平台則設定只能上下移動 (y 方向)。
- (4) 負荷條件：給予相同之重力加速度 9.807m/s^2 ，依不同情況施與衝擊平台不同初始速度。



(a) 鉛錐實際結構

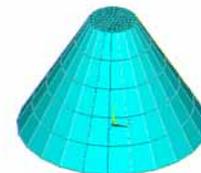


(b) 鉛錐數學模型

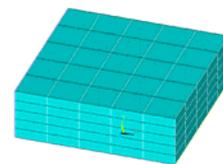
圖 3 鉛錐之實際結構與數學模型

表 1 衝擊平台與鉛錐之材料常數

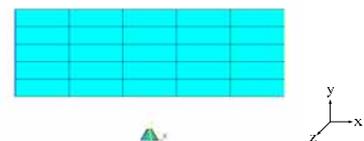
	Shock table	Pad
Young's modulus (N/mm^2)	45000	16000
Poisson ratio	0.49	0.44
Density (kg/mm^3)	1.79×10^{-6}	1.13×10^{-6}
Mass (g)	2×10^5	97



(a) 鉛錐模型



(b) 衝擊平台模型



(c) 整體模型

圖 4 鉛錐及平台之有限元素模型

分別以不同衝擊高度 350 mm、650 mm、950 mm、1250 mm 對鉛錐撞擊，因衝擊平台與鉛錐之間距離對求解時間有相當大的影響，固為了節省有限元素分析軟 LS-DYNA 求解時間，將衝擊平台與鉛錐之距離接設定為 54 (mm)，利用位能與動能轉換之公式，如下所示；

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

進而將四種衝擊高度換算為初始速度，其換算後之初始速度如表 2。

為探討鉛錐幾何參數變異影響，分別改變鉛錐之底面積直徑(D_1)、頂面積直徑(D_2)與高度大小(H)，以得知改變參數後之鉛錐受衝擊時間與加速度之關係，其原始幾何尺寸及改變後幾何尺寸如表 3。

4. 有限元素分析結果與討論

本節以不同衝擊高度及不同鉛錐幾何大小之衝擊模擬結果做比較分析。圖 5 為衝擊平台頂面最接近中心兩個節點 (ML, MR) 及最外側四個角落之節點 (LT, LB, RB, RT) 衝擊波型，將由衝擊平台中間及四周區域觀察衝擊時間與加速度之關係及變形情況。

4.1 不同衝擊高度之衝擊模擬

對不同衝擊高度進行模擬分析，衝擊高度包含 350 mm、650 mm、950 mm、1250 mm，以得知衝擊時間與加速度大小結果。圖 6 為高度 350mm 時衝擊平台頂面中心與四周節點之衝擊波型，可觀察得知平台頂面中間區域節點 (ML, MR) 衝擊時間與加速度之波型皆相同，而且平台頂面外側四個節點 (LT, RT, RB, LB) 衝擊時間與加速度之波形也皆相同，此乃因為分析假設為對稱模型之故。又平台頂面中間與四周之鋸齒波幾乎相同，表示此理想平台模型有足夠剛性，傳遞衝擊波形。圖 7 為不同衝擊高度衝擊模擬後鋸齒波衝擊，平台頂面中心 ML 點之衝擊波型，表 4 則為其衝擊時間 T_d 與衝擊加速度峰值 P 之數值結果。

由圖 7 可看出衝擊波型相當接近後鋸齒波形，推測衝擊高度愈高， P 值愈高，以 1250mm 高度為例， $P=193.09g$ ， P/H 值介於 0.1544~0.1848 之間，呈現非線性效應，衝擊時間 T_d 介於 12~17ms，亦呈現非線性現象。因此對於衝擊試驗之目標後鋸齒波之 P 及 T_d 要求，必需適當選擇鉛錐幾何尺寸，使能依平台與測試物質量等因素，適當調整之。

表 2 衝擊高度換算初始速度表

衝擊高度 (mm)	初始速度 (mm/s)
350	2409
650	3418
950	4191
1250	4842

表 3 原始幾何尺寸及改變後幾何尺寸表

Case	說明	底面積	頂面積	高度
A	原始尺寸	20	10	23
B	增加鉛錐底面積直徑 (mm)	23	10	23
C	減少鉛錐頂面積直徑 (mm)	20	8	23
D	增加鉛錐高度 (mm)	20	10	26

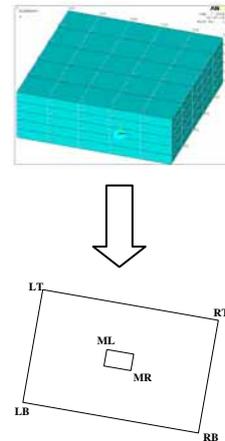


圖 5 衝擊平台頂面節點示意圖

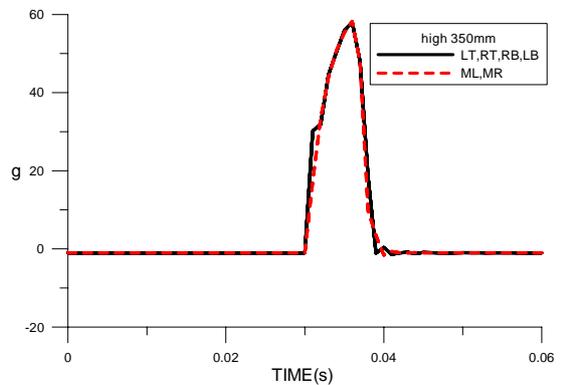


圖 6 衝擊平台頂面中心與四周節點之衝擊波型

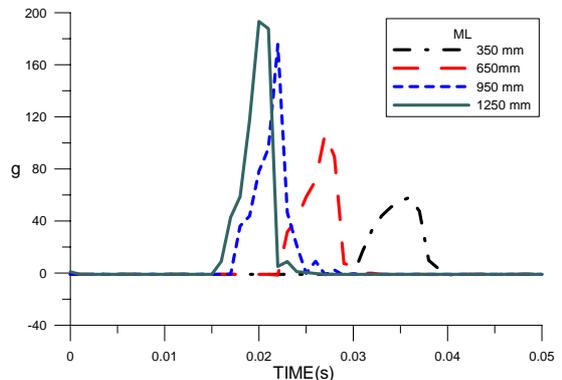
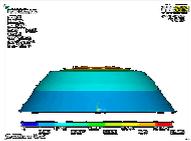
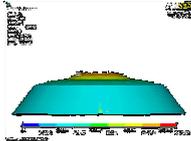
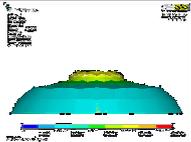
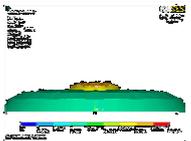


圖 7 不同衝擊高度衝擊模擬結果

表 4 衝擊時間 T_D 與衝擊加速度峰值 P 之數值結果

衝擊高度 (mm)	鉛錐衝擊結果	衝擊時間 (s)	加速度 (g)	P/H
350		0.015	58.19	0.1663
650		0.017	107.15	0.1648
950		0.013	175.56	0.1848
1250		0.012	193.09	0.1544

4.2 不同鉛錐幾何大小之衝擊模擬

為探討分析模型於不同鉛錐尺寸變異之適應性，如表 3 分別改變鉛錐幾何參數進行比較分析，並固定衝擊高度為 650mm，圖 8 為 Case C 改變鉛錐頂面積直徑之衝擊波形，同樣可發現衝擊平台中間與四周之波形僅稍許差異，其它 Cases 也有相同結果。圖 9 為 Case A~D 之衝擊波形，表 5 綜合整理其 T_D 與 P 之數值結果，以 Case A 為基準做比較探討，其探討如下：

- (1) Case B (增加鉛錐底面直徑) 相當於提高鉛錐之垂直勁度，使得 $P^B = 124.00g > P^A = 107.15g$ ， $T_D^B = 15ms < T_D^A = 17ms$ 。
- (2) Case C (減少鉛錐頂面直徑) 相當於降低鉛錐之垂直勁度，使得 $P^C = 95.68g < P^A = 107.15g$ ， $T_D^C = 0.018ms > T_D^A = 17ms$ 。
- (3) Case D (增加鉛錐高度) 可得 $P^D = 93.78g < P^A = 107.15g$ ， $T_D^D = T_D^A = 17ms$ ，由於影響之等效垂直勁度不易判定得知，因此未來對鉛錐幾何參數之系統化分析有其必要性，以期釐清與充分了解鉛錐幾何變異於衝擊試驗參數需求之配合選用。

5. 結論

本文探討應用 ANSYS/LS-DYNA 對自由落下式衝擊試驗機，以鉛錐為衝擊緩衝器，使能產生後鋸齒波之模擬分析可行性探討，結果顯示平台頂面後鋸齒波形之呈現與衝擊規範相當吻合。本文探討了不同衝擊高度，以及鉛錐幾何變異對產生後鋸齒波形之影響，大致都能

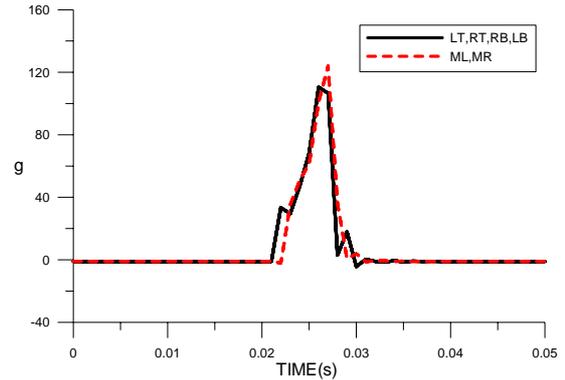


圖 8 增加頂面積平台頂面中心與四周節點之衝擊波型

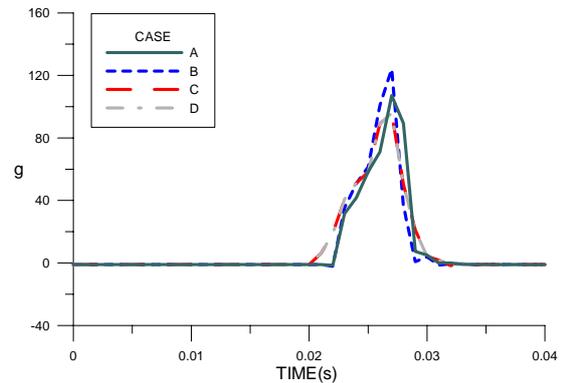
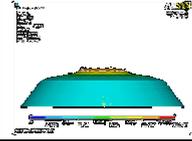
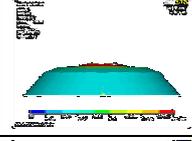
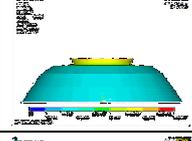
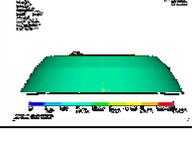


圖 9 不同幾何大小衝擊模擬結果

表 5 ML 之衝擊時間與加速度大小結果

Case	鉛錐衝擊結果	衝擊時間 (g)	加速度 (g)
A		0.017	107.15
B		0.015	124.00
C		0.018	95.68
D		0.017	93.78

符合力學分析之物理特性，未來對於鉛錐之幾何尺寸可再進一步做系統性之分析探討，以期能掌握鉛錐設計準則，使能順應不同測試物及不同衝擊規範之要求，以提供衝擊試驗之選用參考。

6. 參考資料

1. MIL-STD-810F, (2000) *Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, US Department of Defense.
2. 楊長江, 2001, 「以使用者的品質觀點談振動測試」, *電子檢測與品質季刊*, 第四十五期, 第58~59頁。
3. 王栢村, 2003, *電腦輔助工程分析之實務與應用*, 全華科技圖書股份有限公司, 台北。
4. Low, K. H., Yang, A., Hoon, K. H., Zhang, X., Lim, J. K. T., and Lim, K. L., 2001, "Initial study on the Drop-Impact Behavior of Mini Hi-Fi Audio Products," *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, pp. 683-693.
5. Aslan, Z., Karakuzu, R., Okutan, B., 2003, "The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading," *Composite Structures*, Vol. 59, pp. 119-127.
6. Wang, Y. Y., Lu, C., Li, J., Tan, X. M., and Tse, Y. C., 2005, "Simulation of Drop/Impact Reliability for Electronic Devices," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 667-680.
7. Li, X. G., and Shemansky Jr., F. A., 2000, "Drop Test and Analysis on Micro-Machined Structure," *Sensors and Actuators*, Vol. 85, pp.280-286.
8. 許宏旭, 鄭泗滄, 吳政達, 葉昶麟, 2004, 「含晶元封裝電路板結構承受高G值之衝擊環境建立的研究」, *中國航空太空學會第四十六屆學術研討會*, 台中, 論文編號: 5-10。
9. Zeng, T., Fang, D. N., and Lu, T. J., 2005, "Dynamic Crashing and Impact Energy Absorption of 3D Braided Composite Tubes," *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 1491-1496.
10. Jayson, E. M., Murphy, J., Smith, P. W., and Talke, F. E., 2003, "Head Slap Simulation for Linear and Rotary Shock Impulses," *Tribology International*, Vol. 36, pp.311-316.

³Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and
Technology

⁴King Design Company

NSC Project No: **NSC-94-2622-E-020-002-CC3**

ABSTRACT

This work presents finite element analysis on the free-fall shock test machine to generate the back sawtooth waveform and discusses the impact duration time and peak acceleration of the shock table after impact. ANSYS/LS-DYNA, a finite element software, is adopted to build the shock test model, including the shock table and pad that is in cone shape. The impact simulation considers different shock test conditions with different altitudes of shock table resulting in different shock wave characteristics. The geometry of cone pad also varies to study its effect on generating the back sawtooth waveform. Results show that the anticipated shock waves can be properly simulated for different test conditions. The developed simulation technique can be useful for the cone pad geometry design to generate the required shock test waveform and adopted to different test specification accordingly.

Keywords: Shock testing machine, Shock table, Pad, Finite element analysis, LS-DYNA, Shock testing equipment

Impact Simulation Analysis for Back Sawtooth Waveform Generation in Shock Test

¹Bor-Tsuen Wang, ²Huiwen Hu,

³Tsung-Chi Huang, ⁴David Lee

¹Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and
Technology

²Department of Vehicle Engineering National
Pingtung University of Science and
Technology