

# 自由落體式衝擊機及定容壓力測試罐之瞬發衝擊響應試驗 與特性研究

葛揚雄<sup>1\*</sup> 何思宜<sup>2</sup> 葉日洋<sup>2</sup> 葉早發<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國防大學理工學院動力及系統工程學系

<sup>2</sup>國防部軍備局中山科學研究院

<sup>3</sup>國防大學理工學院化學及材料工程學系

## 摘 要

飛彈或火箭均藉由瞬發裝置(火工品)來執行部分特定的功能,但火工品作用時產生之高頻響應環境對電子元件或結構脆弱的材料影響甚大。本文利用自由落體式衝擊機及 10 cm<sup>3</sup> 定容壓力測試罐等二階段進行試驗。第一階段由衝擊機產生可控制且穩定之低頻信號波,以瞭解衝擊響應頻譜之基本定義與曲線特性;第二階段由自製引燃器結合定容壓力測試罐發火瞬間產生之高速暫態結構響應,訂為真實火工品衝擊響應頻譜之參考標準,研究成果將有助於國軍在火工衝擊模擬技術上的強化。

**關鍵詞:** 火工品, 衝擊響應頻譜, 火工衝擊

## Test and Characteristic Study on the Instantaneous Shock Response at a Free-fall Shock Machine and a Closed Vessel

Yang-Hsiung Ko<sup>1\*</sup>, Sai-Yi Hei<sup>2</sup>, Jih-Yang Yeh<sup>2</sup>, and Tsao-Fa Yeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Power Vehicle and Systems Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

<sup>2</sup>*Chung-Shan Institute of Science and Technology*

<sup>3</sup>*Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

## ABSTRACT

Missiles or exploding projectiles all use the instantaneous device (fireworks) to execute some particular functions, but the action from fireworks will produce simultaneously high frequency response environment to influence the electronic elements or fragile structure. We carry out this study into the two phases including a free-fall shock machine and a 10 cm<sup>3</sup> closed vessel. Firstly, we investigate the fundamental definition of shock response spectrum and the characteristics of controllable and stable low frequency signal produced from the free-fall shock machine. Secondly, we establish the structural response of igniter and closed vessel from firing as reference standard for the high-speed transient shock response spectrum of real fireworks. The results will contribute to strengthen the pyroshock simulated technique.

**Keywords:** fireworks, shock response spectrum, pyroshock

## 一、緒 論

衝擊是快速的機械能量傳遞現象，其環境的來源包括碰撞與跌落、發射與爆炸。衝擊環境試驗方法一般分為古典衝擊(Classical Shock)及衝擊響應頻譜(Shock Response Spectrum, SRS)兩種。古典衝擊經由機械的控制，可調整其衝擊波形，如方波、半正弦波與後緣鋸齒波等，它只控制對試件的輸入，不考慮試件產生的響應。

火工衝擊通常意指火工裝置所引致之衝擊，其頻率範圍約介於 100 Hz 至 1M Hz 之間，而作用時間則為 50  $\mu$ s 至 20 ms，加速度響應振幅範圍可達 300 g 至 300,000 g 之間。其加速度響應在時間歷程上一般呈現劇烈振盪，且具有一個接近 10  $\mu$ s 的快速爬升時間 [1]。

根據爆炸源的空間分佈可分為：點源、線源及點與線複合源；而依照爆炸源的強度、傳遞形式及距爆炸源的距離可分為近域、中域和遠域等三類。目前模擬火工衝擊環境的方法主要有火工品爆炸方式、機械撞擊方式及振動機台模擬方式等三類 [2]。利用衝擊機台進行機械衝擊方式，藉由調整適當參數來表現古典衝擊波形，以求實現對火工衝擊環境的模擬；而以火工品作為爆炸源來模擬火工衝擊環境，最大的優點是能有效模擬出真實情況，重現時域特性，缺點是較危險且所需經費龐大，同時對於衝擊響應頻譜也較難以掌握。

衝擊的破壞力取決於結構對於衝擊波的響應大小，衝擊響應頻譜(SRS)通常以系統的加速度響應的觀點來定義火工衝擊環境。這個觀念最早由 Biot 於 1963 年提出，當時是為了評估建築物對地震的耐震程度，他認為與其研究地震波複雜的外形，不如瞭解它可能造成的影響。他將全系統看做是由許多各自獨立的單自由度(Single Degree-of-Freedom, SDOF)系統所組成，這些子系統擁有一個別的質量、阻尼及彈性係數。

當激振作用輸入系統後，各個獨立的 SDOF 均會有不同的響應，以每間隔一個倍頻 (Octave) 的倒數之指數的頻率來獲得各 SDOF 中的最大響應；以自然頻率為橫軸，最大響應為縱軸就構成了衝擊響應頻譜 [3]。

單一單自由度質塊—彈簧(SDOF)系統的受力分析如圖 1，當外殼受到向上  $F(t)$  的外力

時，由於慣性的緣故，質塊受到一向下的力，其中  $m$  為質塊的質量，定義質塊相對於外殼的位移為  $x(t)$ ，向下為正。

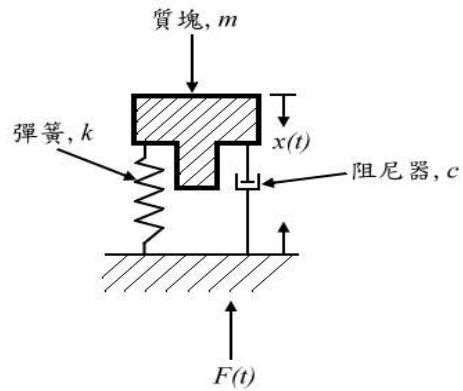


圖 1. 單自由度系統受力分析圖

質塊的運動方程式

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

其中  $c$  是阻尼係數、 $k$  是彈簧的彈性係數。

又  $\zeta$  是阻尼比， $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  是該質塊—彈簧系統的自然頻率。

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \Rightarrow c = 2\zeta\sqrt{km}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow k = \omega_0^2 m$$

代入上式，可得  $c = 2\zeta\sqrt{\omega_0^2 m^2} = 2\zeta\omega_0 m$

重新整理(1)式可得

$$m\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_0 m\dot{x}(t) + \omega_0^2 m x(t) = F(t),$$

同除以  $m$  後

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (2)$$

假設  $F(t)$  是個週期函數  $F(t) = F_0 \sin \omega t$ ，這是個強制振動 (Forced Vibration) 現象，將之代入 (2) 式，並取拉式轉換 (Laplace Transform)，且假設初始條件為  $x(0) = \dot{x}(0) = 0$ ，則

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \frac{F_0}{m} \sin \omega t,$$

取 Laplace Transform

$$\begin{aligned} L\{\ddot{x}(t)\} + 2\zeta\omega_0 L\{\dot{x}(t)\} + \omega_0^2 L\{x(t)\} &= \frac{F_0}{m} L\{\sin\omega t\} \\ s^2 L\{x(t)\} - sx(0) - \dot{x}(0) + 2\zeta\omega_0 (sL\{x(t)\} - x(0)) &+ \omega_0^2 L\{x(t)\} \\ &= \frac{F_0}{m} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \\ \therefore L\{x(t)\} &= X(s) \\ \therefore s^2 X(s) + 2\zeta\omega_0 sX(s) + \omega_0^2 X(s) &= \frac{F_0}{m} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \\ X(s)(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2) &= \frac{F_0}{m} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \\ \Rightarrow X(s) &= \left( \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \right) \left( \frac{F_0}{m} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

將(3)式右邊部分分式可得

$$\begin{aligned} X(s) &= \frac{F_0}{m} \left( \frac{As+B}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} + \frac{Cs+D}{s^2 + \omega^2} \right) \\ &= \frac{F_0}{m} \left[ \frac{A(s+\zeta\omega_0)}{(s+\zeta\omega_0)^2 + \omega_d^2} + \frac{B-A\zeta\omega_0}{\omega_d^2} \cdot \frac{\omega_d}{(s+\zeta\omega_0)^2 + \omega_d^2} + \frac{Cs}{s^2 + \omega^2} + \frac{D}{\omega} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \frac{2\zeta\omega_0\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ B &= -\frac{4\zeta^2\omega_0^2\omega^3 + (\omega^2 - \omega_0^2)\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ C &= -\frac{2\zeta\omega_0\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ D &= -\frac{(\omega^2 - \omega_0^2)\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ \omega_d &= \omega_0\sqrt{1-\zeta^2} \end{aligned}$$

再由反拉式轉換後，可得

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{F_0\omega_0^2}{k} \left[ e^{-\zeta\omega_0 t} \left( A\cos\omega_d t + \frac{B-A\zeta\omega_0}{\omega_d} \sin\omega_d t \right) + C\cos\omega t + \frac{D}{\omega} \sin\omega t \right] \\ &= \frac{F_0}{k} H\left(\frac{\omega}{\omega_0}, \zeta\right) \left[ -\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) e^{-\zeta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t - \phi_1) + \sin(\omega t - \phi_2) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H\left(\frac{\omega}{\omega_0}, \zeta\right) &= \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \\ \tan\phi_1 &= \frac{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}{1 - 2\zeta^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \\ \tan\phi_2 &= \frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \end{aligned}$$

若(2)式中， $F(t)=0$ ，可得(2)式的齊次解，即系統處於自由振動狀態。設初始條件為  $x(0)=x_0$ ， $\dot{x}(0)=\dot{x}_0$ ，則齊次式的解析解為

$$\chi(\tau) = \frac{e^{-\zeta\tau}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \left[ \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\tau - \phi_3) + \dot{\chi}(0)\sin\sqrt{1-\zeta^2}\tau \right] \quad (6)$$

當(2)式中之  $F(t)$  為非 0 時，其解為暫態激發(Transient Excitation)系統之響應。假設激發函數是半正弦波，其最大值為  $P$ ，作用時間

$$t_0，也就是 \frac{F(t)}{m} = P \sin \frac{\pi}{t_0} t, \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (\text{當 } t >$$

$t_0$  時，激發函數為 0)。設定初始條件為  $x(0)=\dot{x}(0)=0$ 。在  $t > t_0$  時，系統呈現自由振動狀態，所以  $t > t_0$  這部分的解為

$$x(t) = \frac{e^{-\zeta\omega_d t'}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \left[ x_{t_0} \cos(\omega_d t' - \phi_3) + \frac{\dot{x}_{t_0}}{\omega_0} \sin\omega_d t' \right]$$

其中  $t' = t - t_0$ ， $x_{t_0} = x(t_0)$ ， $\dot{x}(t_0) = \dot{x}_{t_0}$ ，

設定無因次變數  $\chi = \frac{x}{Pt_0^2}$ ， $\tau = \frac{t}{t_0}$ ， $\Omega = \omega_0 t_0$

則

$$\begin{aligned} \ddot{\chi}(\tau) + 2\zeta\Omega\dot{\chi}(\tau) + \Omega^2\chi(\tau) &= \alpha(\tau) \\ \chi(0) &= 0 \\ \dot{\chi}(0) &= 0 \\ \alpha(\tau) &= \sin\pi\tau \end{aligned}$$

新的無因次變數使得

$$\chi(t) = \frac{e^{-\alpha\lambda(\tau-1)}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \left\{ \chi(\tau-1) \cos \left[ \Omega \sqrt{1-\zeta^2} (\tau-1) - \phi_3 \right] \right\} + \frac{\dot{\chi}(\tau-1)}{\Omega} \sin \left[ \Omega \sqrt{1-\zeta^2} (\tau-1) \right]$$

觀察系統在  $0 \leq t \leq t_0$  內的響應，由(5)式可得

$$x(t) = \frac{P}{\omega_0^2} H \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \left[ \sin(\omega t - \phi_2) - \frac{\left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d - \phi_1) \right]$$

$\omega = \frac{\pi}{t_0}$ ，將無因次變數代入上式可得非齊次解為

$$\chi(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 \right]^2 + \left( 2\zeta \frac{\pi}{\Omega} \right)^2}} \left[ \sin(\pi\tau - \phi_2) - \frac{\frac{\pi}{\Omega} e^{-\zeta\pi\tau}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left( \Omega \sqrt{1-\zeta^2} \tau - \phi_1 \right) \right]$$

$$\tan \phi_1 = \frac{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}}{1 - 2\zeta^2 - \left( \frac{\pi}{\Omega} \right)^2}$$

$$\tan \phi_2 = \frac{2\zeta \frac{\pi}{\Omega}}{1 - \left( \frac{\pi}{\Omega} \right)^2} \quad (7)$$

張建華簡要歸納火工衝擊的環境特點，是由火工品爆炸在結構上產生高能量、高頻響應力波在結構中傳遞，幾乎是所有的航空器經歷中最嚴酷的力學環境之一[4]。IES-RP-DTE012.1 Appendix A 探討火工衝擊量測獲得的時域信號圖中，可能發生量測誤差的原因包括零位飄移或加速儀的安裝方式等，其中造成零位飄移現象包括加速儀過飽和及訊號調節器過飽和兩方面[5]。

火工衝擊可能造成的問題包括[6]：

- (1) 微電子晶片結構完整性的破壞。
- (2) 繼電器顫動。
- (3) 電路卡故障、損傷及電子接頭失效，有時更可能引起短路的電路卡污染物，在火工衝擊之下形成移位。
- (4) 晶體、陶瓷、樹脂或玻璃外罩等裂縫及斷

裂。

這些問題將導致嚴重的軍品失效，從而延遲任務的遂行甚至危及人員性命。國外已對火工衝擊進行多年研究，並建立完整的規範，如 MIL-STD-810F、NASA-HDBK-7005 及 NASA Technical Memorandum 110172 等，而執行火工衝擊試驗主要目的為[1]：

- (1) 提供軍品裝備在結構及能力上可承受結構形態內之火工裝置爆炸所產生之衝擊效應的信賴程度；
- (2) 利用試驗來估計軍品裝備相對於火工衝擊之脆弱性程度，以便採取降低衝擊的步驟以保護軍品結構及功能的完整性。

本文分為二個階段進行研究，第一階段使用自由落體式衝擊機，輸出穩定、可控制的低頻衝擊信號源，目的在瞭解信號的呈現方式、量測裝備的性能、參數設定及操作流程；第二階段採用引燃器結合  $10 \text{ cm}^3$  容壓力測試罐，目的是建立一真實火工品的衝擊響應頻譜參考標準。

## 二、實 驗

在實驗流程規劃中，試驗的主題分為二個階段：衝擊機及  $10 \text{ cm}^3$  定容壓力測試罐；以第一階段的衝擊訊號基礎量測分析之確認為始，輔以第二階段的真實火工品作用之量測分析。

### 2.1 衝擊機

- (1) 衝擊機：自由落體式衝擊機，廠牌為 MTS，如圖 2；能力範圍：衝擊峰值 100 至 5,000 G，酬載 20 lbm。



圖 2. 自由落體式衝擊機

- (2) 波形程式器(Programmer)：由改變台面落下的高度可以獲得各種不同的  $G$  值，所以只要是彈性體都可以加以運用；本試驗採用兩種厚度不同的橡皮墊片、羊毛氈與牛皮紙，如圖 3。

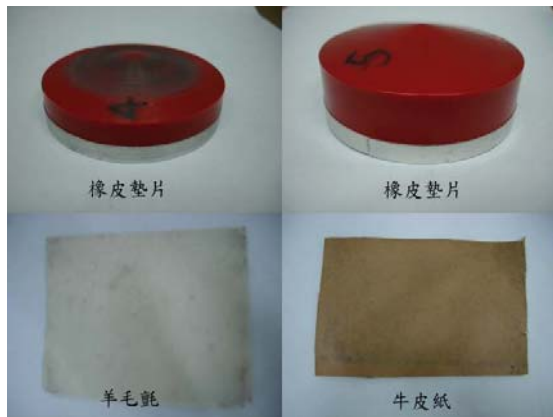


圖 3. 各類型波形程式器

- (3) 加速儀：廠牌為 ENDEVCO，型號 7270 A 系列的壓電阻式 (Piezo-Resistive) 加速儀，全試驗使用 7270A-20k (可用範圍  $\pm 20,000 G$ )、7270A-60k (可用範圍  $\pm 60,000 G$ ) 和 7270A-200k (可用範圍  $\pm 200,000 G$ ) 三種頻寬範圍；及 7255A-01 系列的 ICP 式的加速儀，可用範圍  $\pm 50,000 G$  且內建機械濾波 (Built-in Mechanical Filter) 功能。
- (4) 扭力扳手：搭配(3)使用，功用為依照各種型號加速儀出廠規定，設定需求扭力磅數後旋緊加速儀於待測物上；7270A 系列設定扭力磅數為  $8 lb_f-in$ ，7255A-01 系列為  $30 lb_f-in$ 。
- (5) 訊號調節器：廠牌為 ENDEVCO，型號 106，含電源供應器，型號 109；搭配(3)使用，功用是訊號放大、提供加速儀工作電壓、電流等。
- (6) 訊號擷取系統：廠牌為 Nicolet，型號 OD 200，輸入能力為每頻道  $10 MS/s$ ，解析度  $14 bit$ ，可以連續擷取資料，可自由選擇擷取參數 Sample Rate、Span 及 Trigger Level。
- (7) 示波器：廠牌為 Tektronix，型號 TDS 5054，最大頻寬  $500 MHz$ ，可自由選擇擷取參數 Vertical：Scale、Horizontal：Sample Rate、Duration 及 Trigger Level。
- (8) 矽油 (Silicone)：型號為 S-1000，將加速儀

與待測物結合面，塗上薄薄的一層，用以增加加速儀與待測物間的貼合度。

## 2.2 $10 cm^3$ 定容壓力測試罐

- (1) 定容壓力測試罐：材質為不鏽鋼，內容積約為  $10 cm^3$ ，如圖 4，結合自製引燃器與 PCB 廠牌的壓力感測器，功用是測試引燃器點炸後，內部含藥產生的氣體壓力的峰值與延遲時間。

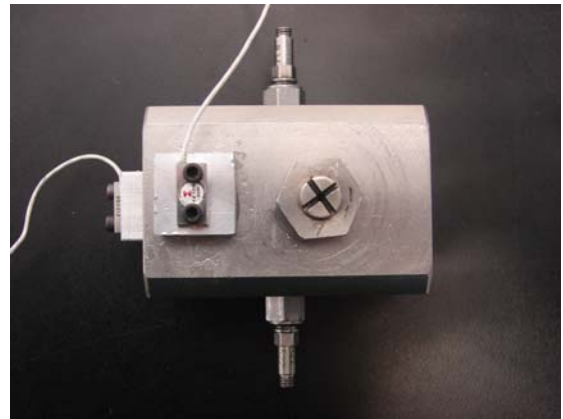


圖 4.  $10 cm^3$  定容壓力測試罐

- (2) 鋁塊轉承座：將加速儀先行鎖上轉承座後，再將轉承座與測壓罐以快乾膠黏合，轉承座的尺寸有二：
- A.  $9.4cm(L) \times 2.5cm(W) \times 2.6cm(H)$ ，如圖 5 上；
- B.  $1.9cm(L) \times 1.9cm(W) \times 0.9cm(H)$ ，如圖 5 下。

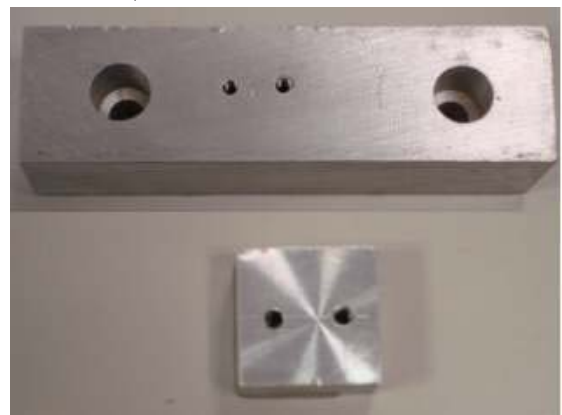


圖 5. 不同尺寸的鋁塊轉接承座

## 2.3 試驗步驟

### 2.3.1 衝擊機

將加速儀塗上薄薄一層 S-1000 矽油，以扭力扳手施加 8 lbf-in 鎖於衝擊機平台，確認訊號調節器、資料擷取系統及示波器的參數設定，將平台拉升至預定高度，放置波形程式器於底部平台，進入備便狀態，落下後確認是否擷取成功，存檔。

### 2.3.2 10 cm<sup>3</sup> 定容壓力測試罐

取引燃器及壓力感測器與 10 cm<sup>3</sup> 地容壓力測試罐結合，確認加速儀與測壓罐本體的結合方式，將加速儀塗上薄薄一層 S-1000 矽油，以扭力扳手施加 8 lbf-in 鎖於測試罐，待進入備便狀態後，輸出發火電流將引燃器點炸後，確認數據是否擷取成功，存檔。

## 三、結果與討論

### 3.1 低頻段的模擬

真實的火工衝擊為複雜且變化因素大，量測失敗的風險也就相對地提高，為了避免這樣的狀況，選擇衝擊機進行第一階段試驗；因為衝擊機可以調整適當參數來模擬火工衝擊環境，且能夠重複產生相同的波形，試驗再現性高，使用的試驗裝備為衝擊機，平台高度、波形程式器種類等試驗條件如表 1。

(1) 定速響應(Constant Velocity Response)的斜率在衝擊響應頻譜的定速響應段的斜率應為 6 dB/octave [7]；因為  $V = \frac{A}{2\pi f_n}$  (V 是速度、A 是加速度、 $f_n$  為自然頻率)

$$\Rightarrow \frac{f_{n_2}}{f_{n_1}} = \frac{A_2}{A_1}, \text{ 左右同時取對數且同乘 } 20$$

$$\Rightarrow 20 \cdot \log(f_{n_2}/f_{n_1}) = 20 \cdot \log(A_2/A_1) \quad (8)$$

$$\therefore dB = 20 \cdot \log(V/V_0) = 20 \cdot \log(A_2/A_1) \quad (9)$$

$$octave = \log_2(f_{n_2}/f_{n_1}) = \frac{\log(f_{n_2}/f_{n_1})}{\log 2}$$

$$\Rightarrow \log(f_{n_2}/f_{n_1}) = \log 2 \cdot \log_2(f_{n_2}/f_{n_1}) \quad (10)$$

將(9)、(10)式代入(8)

$$\Rightarrow 20 \cdot \log 2 \cdot \log_2(f_{n_2}/f_{n_1}) = 20 \cdot \log(A_2/A_1) \quad (11)$$

由(11)式可得

$$\frac{20 \cdot \log(A_2/A_1)}{\log_2(f_{n_2}/f_{n_1})} = 20 \cdot \log 2 = \frac{dB}{octave} = 20 \cdot 0.3 = 6$$

以古典衝擊波而言，如半正弦(Half-Sine)波的衝擊響應頻譜圖為圖 6，在兩游標線之間的曲線斜率為  $\frac{dy}{dx} = \frac{19.1dB}{3.2oct} = 6 \text{ dB/oct}$ ，符合上述斜率要求。

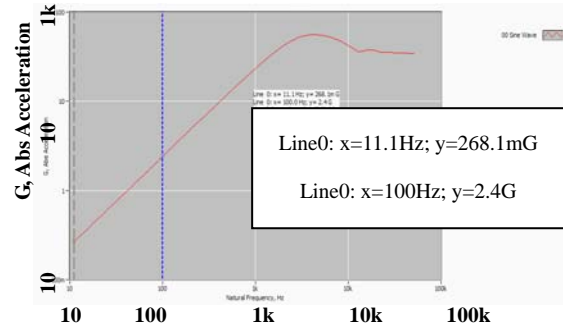


圖 6. 古典衝擊半正弦波之衝擊響應頻譜圖

若利用橡皮墊片獲得的波形也為半正弦波，故使用 4 號橡皮墊片，在衝擊平台高度 100 公分（試驗編號 0122-2）時可以得到的衝擊響應時域圖為圖 7、頻譜圖為圖 8，在兩游標線之間的曲線斜率為  $\frac{dy}{dx} = \frac{18.4dB}{3.2oct} = 5.8 \text{ dB/oct}$ ，近似於要求的斜率 6 dB/oct。

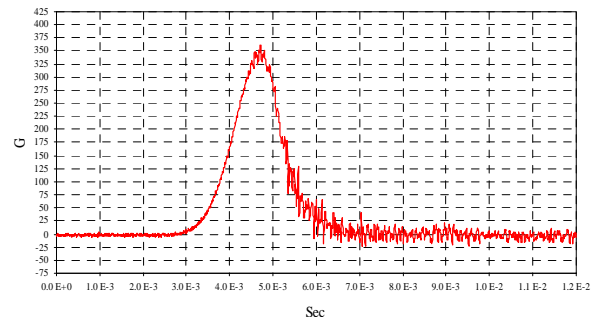


圖 7.4 號橡皮墊片模擬出半正弦波時域圖



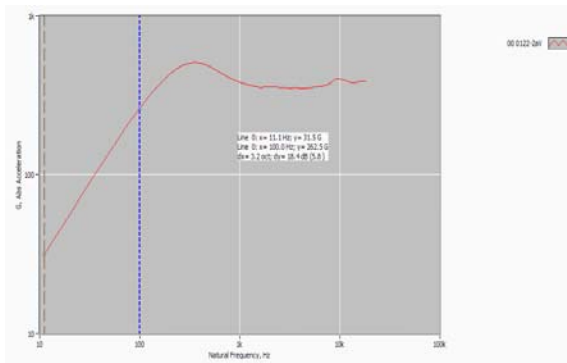


圖 8.4 號橡皮墊片模擬出半正弦波  
 衝擊響應頻譜圖

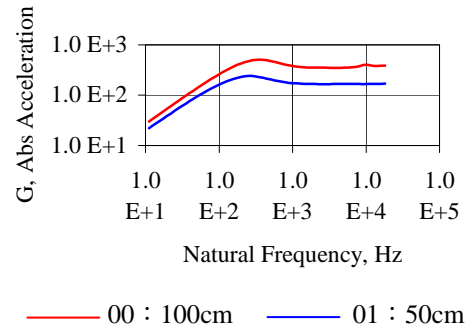


圖 9.4 號橡皮墊片在不同高度下的  
 衝擊響應頻譜圖

表 1. 衝擊機試驗參數表

試驗 編號	條件描述				
	加速儀		衝擊機		OD200
	型號	序號	衝擊機 平台高度(cm)	波形程式器	取樣頻率(1/s)
0122-2	7270A-20k	#14649	100	#4 橡皮墊片	200k
0122-3			100	#5 橡皮墊片	200k
0122-4			100	羊毛氈	200k
0122-5			50	#4 橡皮墊片	200k
0122-6			50	#5 橡皮墊片	200k
0122-7			50	羊毛氈	200k
0122-8			50	薄牛皮紙	200k
0122-9			50	薄牛皮紙	100k
0122-10			50	羊毛氈	100k
0122-11			50	#5 橡皮墊片	100k
0122-12			7270A-20k	#14649	50
0122-13	50	#5 橡皮墊片			10k
0122-14	50	#4 橡皮墊片			10k
0122-15	50	羊毛氈			10k
0122-16	50	薄牛皮紙			10k
0122-17	50	薄牛皮紙			20k
0122-18	50	羊毛氈			20k
0122-19	50	#4 橡皮墊片			20k
0122-20	50	#4 橡皮墊片			200k
0122-21	50	#5 橡皮墊片			100k
0122-22	50	#5 橡皮墊片			100k

備註

1. 加速儀 7270A-20k #14649 的轉換因子為 613 G/V。
2. 試驗編號 0122-19：發生螺絲鬆動，Time Domain 表現異常。
3. 試驗編號 0122-22：頻道 1 設定 Span=200 mV、頻道 2 設定 Span=400 mV、頻道 3 設定 Span=1 V、頻道 4 設定 Span=2 V。

- (2) 衝擊機平台高度調整：以 4 號橡皮墊片為基礎，分別調整衝擊機平台高度為 100 公分（試驗編號 0122-2）及 50 公分（試驗編號 0122-5），得到的響應頻譜為圖 9。在定速響應段呈現上下分層分佈。以古典衝擊波形而言，如圖 10 上，在加速度都相同的情況下，時間域曲線下涵蓋的面積為 Trapezoid > Half Sine > Triangle > Haver Sine > Sawtooth，因此圖 10 下，各種古典衝擊波形在衝擊響應頻譜圖的定速響應段的分佈就會因涵蓋面積大小呈現上下分層，而高頻響應段的上下分佈則是與加速度值大小有關，即加速度值越大，高頻響應段值亦越大；因此，當衝擊機平台高度改變，產生的時間域曲線其涵蓋的面積與加速度值，會決定衝擊響應頻譜的上下分佈。
- (3) 波形程式器類型：波形程式器的種類如圖 3，衝擊機平台高度設定為 50 公分，比較的試驗編號為 0122-5 至 0122-8，所得的衝擊響應頻譜如圖 11；基本上，橡皮墊片、羊毛氈和薄牛皮紙這幾類的波形程式器都可以產生出半正弦波，但因為材質不同或厚度的差異（如 4、5 號橡皮墊片），造成衝擊響應頻譜的曲線趨勢不同，尤其在高頻段更為明顯。

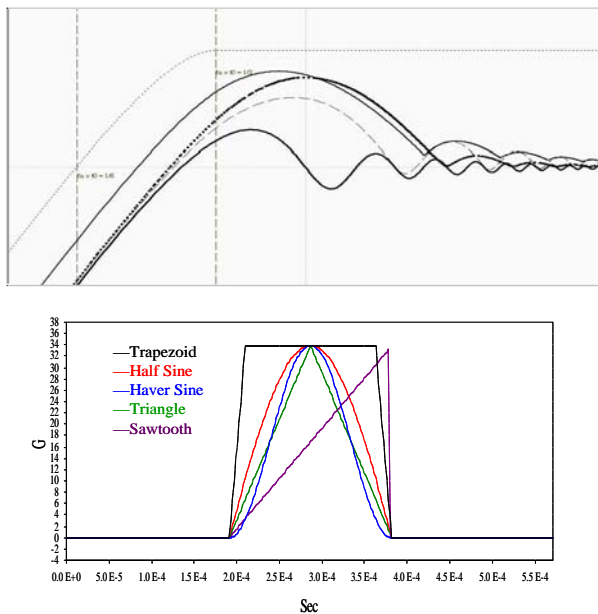


圖 10. 古典衝擊波在加速度相同的衝擊響應頻譜圖

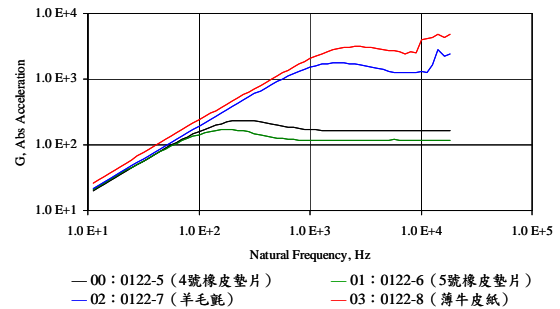


圖 11. 相同高度，但不同波形式器的衝擊響應頻譜圖

- (4) 量測範圍：本文量測範圍係指資料擷取系統中在螢幕畫面縱軸的可視電壓幅值，其設定將關係到可視最大電壓幅值是否滿足真實環境產生出來的電壓值；以 5 號橡皮墊片，固定衝擊機平台高度及取樣頻率來比較，試驗編號為 0122-22，其中包括四個頻道各自設定不同的解析度，因為使用的資料擷取系統是 Nicolet OD200，設定頻道 1 的 Span 為 200 mV、頻道 2 的 Span 為 400 mV、頻道 3 的 Span 為 1 V 與頻道 4 的 Span 為 2 V，其衝擊響應頻譜時域為圖 12、衝擊響應頻譜為圖 13。在圖 12 中可以看到擷取到的訊號已經超過頻道 1(200 mV)的量測範圍，因此大於量測範圍的數據被截去，而其他頻道則可以完整量測訊號，因此三條曲線為完全重疊；在圖 13.中頻道 1 (標示為 00) 便出現與其他頻道趨勢相同但曲線向下平行位移 (G 值變小) 的狀況，因此選擇適當的量測範圍將會關係到是否能擷取完整的訊號，過大導致不良的解析度，反之就會使訊號過大的部分被截斷。

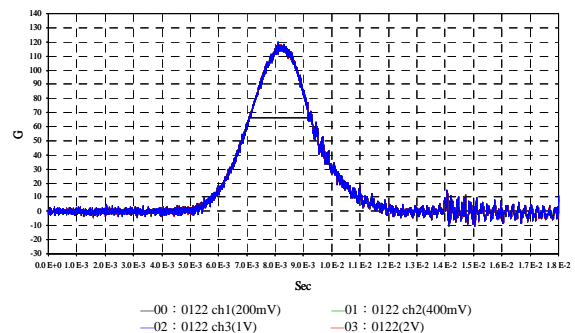


圖 12. 5 號橡皮墊片在不同解析度下的衝擊響應時域圖



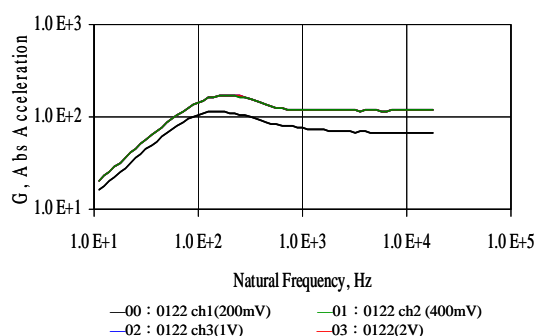


圖 13. 5 號橡皮墊片在不同解析度下的衝擊響應頻譜圖

(5) 濾波功能：利用濾波功能可以將一些負載於真實訊號中的雜訊除去，選擇濾波功能時應考慮範圍頻率，此以 5 號橡皮墊片，固定衝擊機平台高度 100 公分及取樣頻率 200k S/sec 為例，擷取得到的原始頻率利用分析軟體進行軟體濾波功能，衝擊響應時域如圖 14、衝擊響應頻譜如圖 15 (曲線 00 為原始訊號、曲線 01 為經過 10k Hz 濾波、曲線 02 為經過 1k Hz 濾波)；經過濾波後，過濾掉環境雜訊後，真實加速度值較負載雜訊時為小，故在圖 15 中，10k Hz 處表現出原始波形及兩種不同濾波功能時的差異，在選擇濾波的功能時，應先瞭解環境的背景雜訊以及考慮真實訊號兩者的頻率範圍，以免過或不及都是不恰當的濾波。

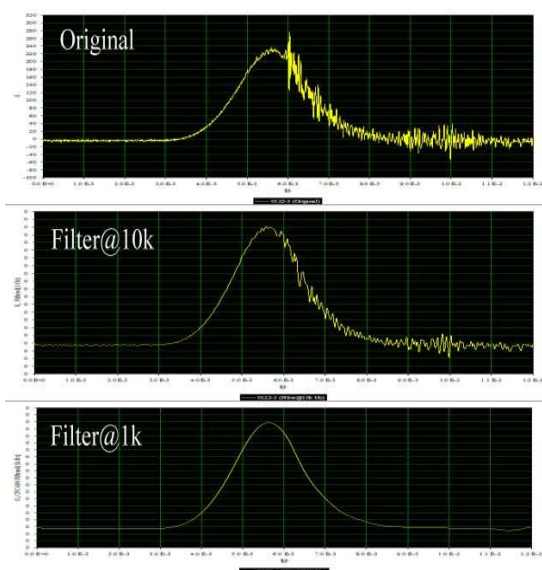


圖 14. 5 號墊片在不同濾波功能下的衝擊響應時域圖

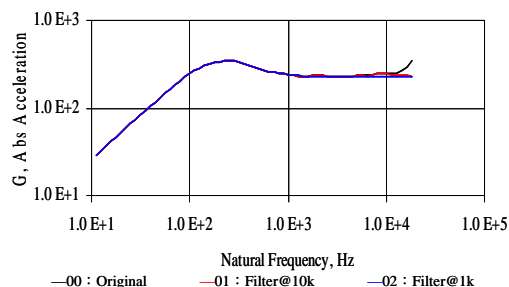


圖 15. 5 號墊片在不同濾波功能下的衝擊響應時域圖

(6) 狀況記錄：在試驗期間發生了加速儀鬆動 (標示為 01) 的情形，此時的時域圖與頻譜圖就與鎖緊 (標示為 00) 時不同，分別為圖 16 和圖 17；所以試驗當中應每次都要注意硬體裝置或設定是否有問題，方可避免如上述的狀況發生而影響資料分析。

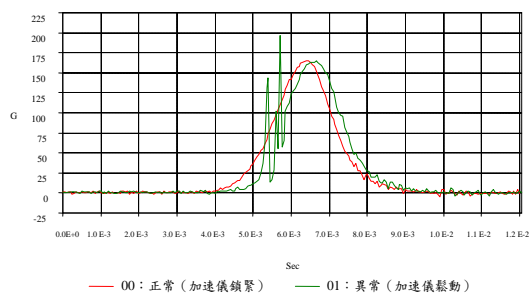


圖 16. 發生加速儀螺絲鬆動時的加速儀響應時域圖

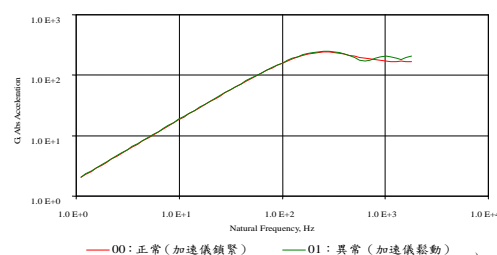


圖 17. 發生加速儀螺絲鬆動時的加速儀響應頻譜圖

### 3.2 引燃器用於 10 cm<sup>3</sup> 定容壓力測試罐

完成第一階段的衝擊機試驗後，後續進行第二階段的 10 cm<sup>3</sup> 定容壓力測試罐試驗。加速儀使用型號為 7270A 系列，擺放位置分別在圖 18 的與壓力傳輸方向垂直的位置 1、3 (距離引燃器爆炸源遠近不同) 與壓力直接衝擊面

的位置 2 等三處，廠牌為 PCB 的壓力感測器分別裝於兩側的對應位置，使用的火工品為國內自製引燃器，壓力範圍約為 1400 至 2100 psi，以 2.2 的量測設備與步驟 2.3.2，一共執行十三次試驗，試驗條件整理如表 2。

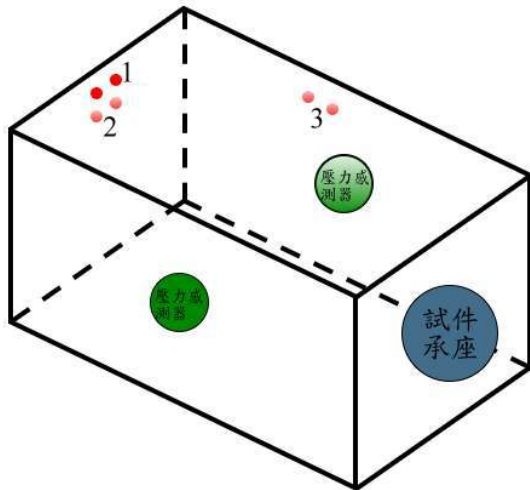


圖 18. 加速儀組裝位置

(1) 時間域零準位歸零：以加速儀直接安裝於位置 1 的試驗編號：0212-1、0212-2，搭配 Nicolet OD200 資料擷取系統獲得的數據直接加以分析後的衝擊響應頻譜如圖 19，兩曲線在常速度響應段呈現分歧的狀態，觀察時域圖，發現兩曲線的零準位基準線並未歸零（如圖 20），觀察基準線歸零前後的衝擊響應頻譜差異如圖 21，因此，零準位基準線是否歸零將會影響由時域圖轉換為衝擊響應頻譜圖時的資料分析，須特別注意在資料處理前的基準線歸零。

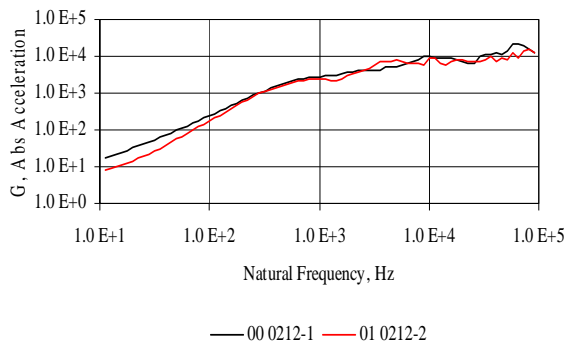


圖 19. 常速度響應段差異的衝擊響應頻譜圖

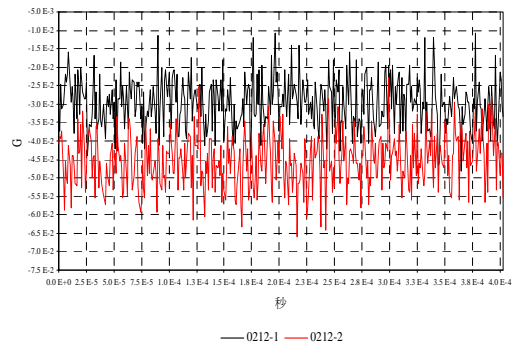


圖 20. 時域圖的零準位基準線未歸零

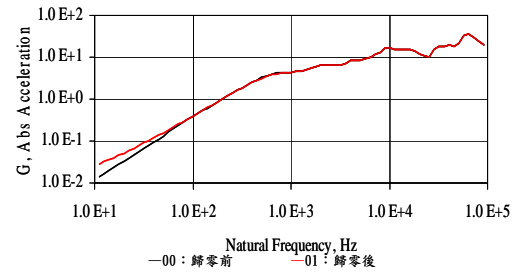


圖 21. 試驗編號 0212-1 於位置 1 基準線歸零前後的差異圖

(2) 加速儀安裝方式：參照表 2，選擇資料擷取器 Nicolet OD 200 中：位置 1、加速儀以直接方式安裝的試驗編號為 0212-1、0212-2；相同位置，使用小鋁塊轉接承座的試驗編號為 0212-3、0212-4 及 0212-5，如圖 22；相同位置，使用大鋁塊轉接承座的試驗編號為 0212-6、0212-7 及 0212-9，如圖 23。獲得的數據，轉換為衝擊響應頻譜如圖 24 至圖 26。再將以上三組數據加以積分得到速度信號圖，分別為圖 27 至圖 29。標準火工衝擊的速度信號圖應為圖 30[8]，信號漸趨穩定的曲線（時間在約 4 ms 後）雖然上下微幅振盪，但基準線都保持在“0”的位置沒有偏移；而以引燃器結合 10 cm<sup>3</sup> 定容壓力測試罐獲得的真實火工衝擊模擬數據，分析處理得到的速度信號，圖 27 穩定後的曲線持續一“正”值的速度，圖 28 穩定後的曲線幾乎歸零（除 0212-5 外），圖 29 穩定後的曲線則持續一“負”值的速度；圖 28 較合乎標準，因此，在選擇加速儀的組裝方式上以小鋁塊轉接承座為佳。

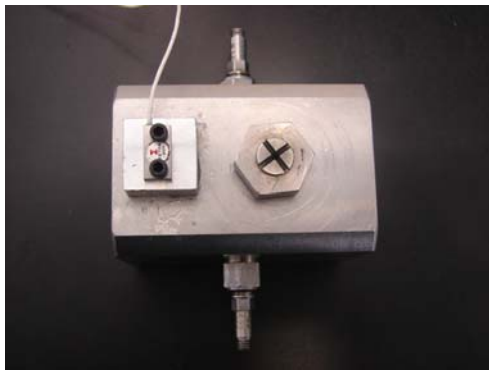


圖 22. 小鋁塊轉接承座的安裝方式

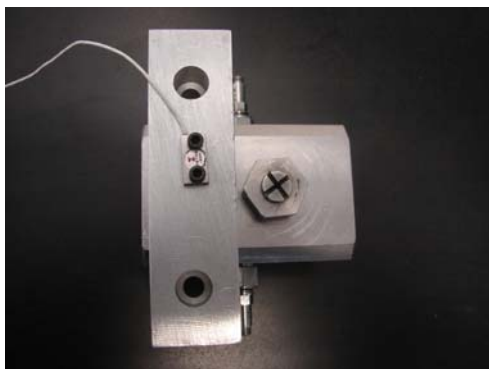


圖 23. 大鋁塊轉接承座的安裝方式

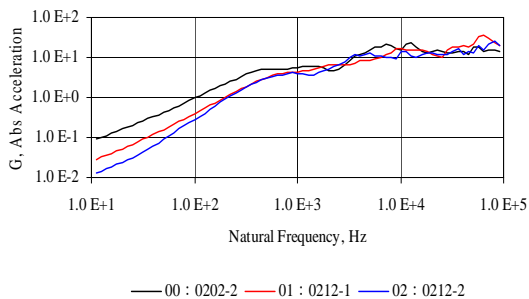


圖 24. 位置 1，直接安裝衝擊響應頻譜圖

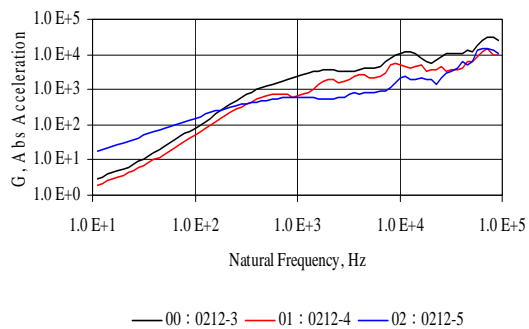


圖 25. 位置 1，小鋁塊轉接承座方式安裝的衝擊響應頻譜圖

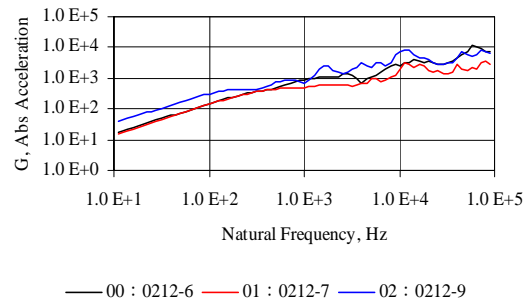


圖 26. 位置 1，大鋁塊轉接承座方式安裝的衝擊響應頻譜圖

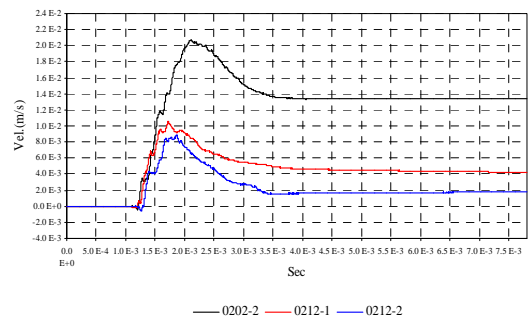


圖 27. 位置 1，直接方式安裝的速度信號圖

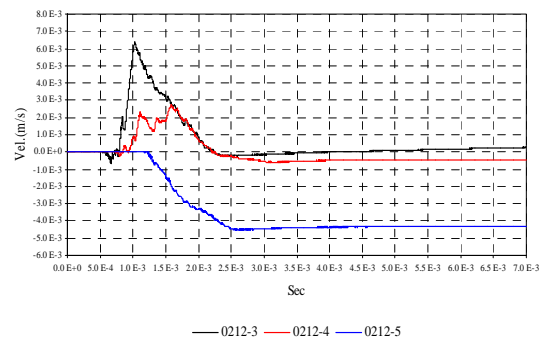


圖 28. 位置 1，小鋁塊轉接承座方式安裝的速度信號圖

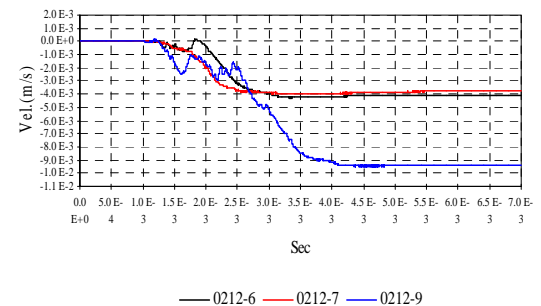


圖 29. 位置 1，大鋁塊轉接承座方式安裝的速度信號圖

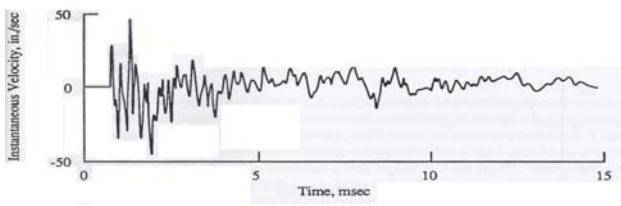


圖 30. 標準火工衝擊的速度信號圖

(3) 加速儀安裝位置：表 2 中，選擇以各位置直接安裝加速儀的數據進行比較，位置 1、2 的試驗編號同為 0202、0212-1 及 0212-2 的頻道 1、2（分別以 a、b 表示）；位置 3 的試驗編號為 0212-6、0212-7、0212-9；資料處理後的衝擊響應頻譜分別為圖 31 至圖 33。理論上，引燃器點炸時產生的結構響應，透過  $10\text{ cm}^3$  定容壓力測試罐金屬材質的傳遞，應不會發生改變，但在三個位置各進行三次試驗的衝擊響應頻譜看起來，以真實火工品進行的火工衝擊模擬試驗，雖然真實但是難以掌握信號產生的穩定性，較容易造成數據判別、取用上的困擾。

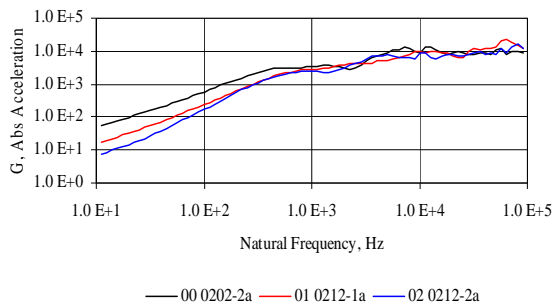


圖 31. 位置 1，直接安裝的衝擊響應頻譜圖

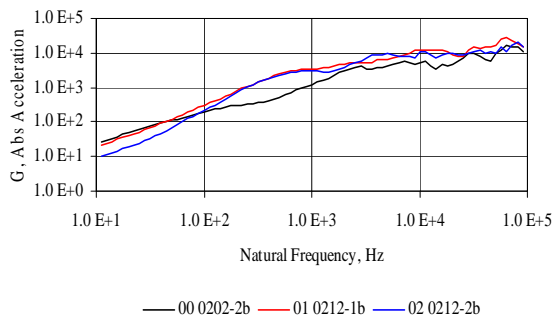


圖 32. 位置 2，直接安裝的衝擊響應頻譜圖

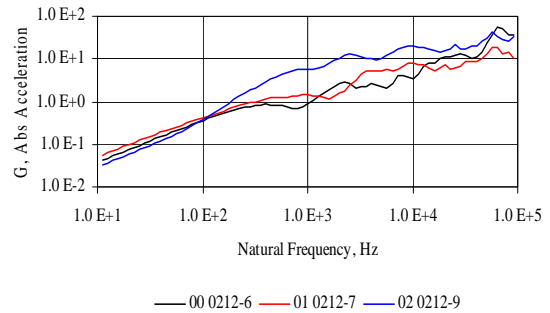


圖 33. 位置 3，直接安裝的衝擊響應頻譜圖

(4) 氣體壓力與衝擊響應頻譜的關係：試驗編號 0305-1 至 0305-4，以直接安裝加速儀方式並搭配壓力感測器（廠牌 PCB，型號 102A14，序號#24978）同時量測加速度值和壓力值。量測到的壓力數據均予以  $5\text{ kHz}$  濾波，如圖 34，曲線峰壓值為試驗編號 0305-4（約  $2110\text{ psi}$ ）> 試驗編號 0305-3（約  $1960\text{ psi}$ ）> 試驗編號 0305-1（約  $1800\text{ psi}$ ）> 試驗編號 0305-2（約  $1750\text{ psi}$ ）；觀察衝擊響應頻譜如圖 35，高頻部分的上分布確實和峰壓值大小有關，由上至下為試驗編號 0305-4、0305-3、0305-1 和 0305-2。

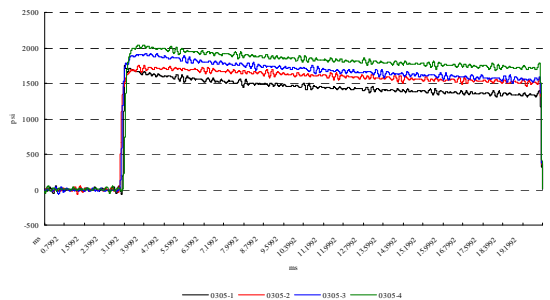


圖 34. 試驗編號 0305-1 壓力時域圖

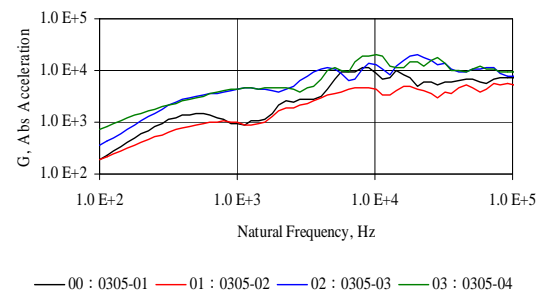


圖 35. 搭配壓力感測器量測的衝擊響應頻譜圖

表 2. 真實火工品試驗參數整理表

試驗 編號	條件描述					
	加速儀				OD200 取樣頻率 (1/s)	TDS5054 取樣頻率 (1/s)
	型號	序號	安裝方式	位置		
0202-2	7270A-20k	#14649	直接	1	1 M	1.25 M
		#12299		2		
0212-1		#14649	直接	1		
		#12299		2		
0212-2	7270A-20k	#14649	直接	1	1 M	1.25 M
		#12299		2		
0212-3		#14649	小塊	1		
		#12299		2		
0212-4		#14649	小塊	1		
		#12299		2		
0212-5		#14649	小塊	1		
		#12299		2		
0212-6		#14649	大塊	1		
		#12299	直接	3		
0212-7		#14649	大塊	1		
		#12299	直接	3		
0212-8		#14649	大塊	1		
		#12299	直接	3		
0305-1		#14649	直接	1		
0305-2		#14649	直接	1		
0305-3	#14649	直接	1			
0305-4	#14649	直接	1			
備 註	1. 7270A-20k #14649 的轉換因子為 613 G/V, #12299 為 765 G/V。 2. 試驗編號 0122-6: 清過試驗罐後才執行。 3. 試驗編號 0305-1 至 03035-4 加裝壓力感測器(廠牌:PCB, 型號:102A14 序號:#24978, 轉換因子為 1099 psi/V) 於頻道 2 量測壓力。					

#### 四、結 論

本研究分成二個階段進行試驗,分別為第一階段衝擊機的低頻段試驗、第二階段引燃器結合 10 cm<sup>3</sup> 定容壓力測試罐的真實火工品衝擊響應頻譜參考標準試驗。第一階段主要為量測設備的操作,參數設定和性能,以奠定後續試驗遂行的基礎;另由衝擊機產生可控制且再現性高的低頻古典衝擊波,藉此瞭解當改變撞擊物所產生的結構響應或撞擊能量,其相對應於衝擊響應頻譜的曲線特性。第二階段獲得引

燃器衝擊響應頻譜,可以作為真實火工品的參考標準;另外,也發現在進行時間歷程的數據處理時,如衝擊響應頻譜的轉換、速度或位移的積分等,必需先在時間域上的零準位基準線予以歸零,才不會發生分析誤差。而在安裝加速儀時,先與小型鋁塊轉接承座結合後再裝置於待測物上,此方式獲得的時間歷程數據,積分後的速度信號最符合歸零的標準。



## 參考文獻

- [1] MIL-STD-810F, pp. 517-1, 2000.
- [2] 張建華, “航天產品的爆炸衝擊環境技術綜述”, 導彈與航天運載技術, 第 3 期, 第 33 頁, 2005。
- [3] Irvine, T., “An Introduction to the Shock Response Spectrum,” Revision R, pp. 6, July 29, 2010.
- [4] 張建華, “航天產品的爆炸衝擊環境技術綜述”, 導彈與航天運載技術, 第 3 期, 第 30-32 頁, 2005。
- [5] Himelblau, H., Piersol, A. G., Wise, J. H., and Grundvig, M. R., IES Recommended Practice 012.1, Handbook for Dynamic Data Acquisition and Analysis, Institute of Environmental Sciences, pp. 262-263, 1994.
- [6] MIL-STD-810F, pp. 517-4, 2000.
- [7] Irvine, T., “An Introduction to the Shock Response Spectrum,” Revision R, pp. 17, July 29, 2010.
- [8] Himelblau, H., Piersol, A. G., Wise, J. H., and Grundvig, M. R., IES Recommended Practice 012.1, Handbook for Dynamic Data Acquisition and Analysis, Institute of Environmental Sciences, pp. 262, 1994.