

半正弦波產生器之機械材料性質測定

王栢村¹, 胡惠文², 李沛緯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究發展處處長

摘要

本文針對衝擊試驗機之半正弦波產生器進行材料拉伸試驗，依據美國材料試驗協會(ASTM)訂定之規範，製作材料之拉伸試片，並應用應變規作為感測器，對試片進行拉伸試驗，由量測結果可試片之負載、位移與應變等參數，將此實驗結果進行運算分析，可求得半正弦波產生器之材料機械性能參數包括：楊氏係數、蒲松比、降伏強度、切線模數。此實驗所求得之雙線性材料模型參數後續將套用於有限元素軟體軟體 LS-DYNA 之衝擊模擬分析，並可應用探討符合衝擊規範之半正弦波產生器幾何尺寸與位置之研究。

關鍵字：衝擊試驗機，半正弦波產生器，拉伸試驗、雙線性材料模型

1. 前言

由於衝擊試驗有著不同需求之衝擊時間與加速度值，而基座的半正弦波產生器更是產生目標波形的重要零件，目前業界針對不同的衝擊波形採用試誤的方式，浪費金錢與時間成本，本文主針對半正弦波產生器之膠塊進行一套理論預測分析，用以預測衝擊平台落下高度與膠塊種類、擺放位置，但未知膠塊之材料參數使得分析結果不甚理想，因此進行本次拉伸試驗，以求得材料之參數進而輸入有限元素分析軟體進行分析。本文主要利用拉伸試驗機，對半正弦波產生器之試片進行材料參數之擷取。由於使用有限元素分析軟體 LS-DYNA，對衝擊平台與半正弦波產生器進行模擬衝擊分析。其中，針對半正弦波產生器之材料模型選用為 Bilinear Isotropic，需要輸入的材料參數為：密度、楊氏係數、蒲松比、降伏強度、切線模數，上述五種參數中唯有密度是確定的，楊氏係數與蒲松比則是依據文獻提供之數值，而降伏強度與切線模數為假設值，因而進行拉伸試驗，求得除密度外之上述材料參數。為使有限元素分析結果更加的準確，並且減少未知材料參數導致分析結果的不確定性，因而進行此次的材料參數擷取試驗，最後求得材料參數，後續將利用此參數進行有限元素分析，以求更佳之分析結果。

隨 IC 產業蓬勃發展，電子產品銷量日益居多，品質要求也愈來愈高。產品出廠前須經過環境試驗以確保其可靠度。相關產品環境試驗研究方面林[1]指出振動及衝擊測試是電子連接器與線纜組之環境試驗項目

中的一環。楊[2]也由電機產品製造商的品質觀點探討：振動測試、衝擊測試、落下測試，以考驗產品品質。由於產品在使用、搬運及運輸過程中皆會遭遇衝擊所累積之損害，因此衝擊試驗為環境試驗中重要的一環。ASTM[3]提出薄型塑膠板件之材料測試方式，對試片幾何尺寸，拉伸速率等進行定義。胡[4]針對大客車結構之材料進行拉伸試驗，求得楊氏係數、蒲松比、抗拉強度與降伏強度，並將此拉伸結果輸入有限元素軟體進行模擬分析，並與實驗結果進行比對，得到良好驗證結果。

本文將引用美國材料試驗協會(ASTM)訂定之規範，針對半正弦波產生器之材料，製作試片，利用實驗結果，進行運算後得到以下之材料參數：楊氏係數(E_x)、蒲松比(ν_{xy})、降伏強度(S_y)、切線模數(E_t)，進而進入有限元素軟體分析，得到預測之膠塊種類與位置結果。第 2 節將介紹實驗設備、步驟與原理，第 3 節為結果與討論，第 4 節為結論。

2. 實驗設備、步驟及原理

本文使用材料試驗機 SHIMADZU (AGI-100KN) 進行拉伸試驗，試片兩端以楔形夾具固定，透過位移控制移動上夾具將拉力施加在試片上，施加在試片上之負載由 load cell 記錄輸入電腦。材料變形產生之應變由應變規 (strain gage) 量測，規格如表 1 所示。應變規量得之訊號經惠氏登電橋，將量測之應變轉為類比電壓訊號，經由資料擷取系統轉為數位訊號輸入電腦。

表 2 為實驗之儀器明細表，本次實驗所採用之應變規為 KYOWA--KFG-5-120-C1-11，此款為通用型應變規，最末碼 11 表示適合鋼性測試物，但此次試片之物理性質偏向於鋁，而此差異為溫度之熱膨脹影響，但實驗進行時位於恆溫之實驗室中，故可忽略此差異。

圖 1 為試片之尺寸示意圖，表 3 為試片之尺寸表，本實驗測試材料為工程塑膠 (塑鋼)，以試片 A 為例，長、寬、厚度分別為 300 mm、25 mm、2 mm，試片兩端用 AB 膠貼上 4 片襯墊(endtap)，如圖 2 所示。本實驗所製作之試片尺寸與拉伸試驗均依據 ASTM 規範 D882-02 所要求之內容，而拉伸速率的定義可由以下方程式求得，其中，A 為拉伸速率，L0 為兩襯墊間試片長度，C 為初始應變率。

$$A = L_0 \times C \quad (1)$$

表 1、應變規規格

Gauge type	KFG-5-120-C1-11
Temperature compensation for	Steel
Gage length	5 mm
Gage resistance (24°C, 50%RH)	120.2±0.2 Ω
Gage factor (24°C, 50%RH)	2.11±1.0 %
Adoptable thermal expansion	11.7 PPM/°C
transverse sensitivity (24°C, 50%RH)	0.40 %
Applicable gage cement	CC-33A, PC-6

表 2、實驗儀器清明細表

拉伸試驗機 SHIMUDIZ--AGI-100KN	1 台
應變規 KYOWA--KFG-5-120-C1-11	2 片/每試片
材料試片	5 片
惠氏頓電橋	1 台
楔形夾具	1 對
AB 膠	
應變規專用導線	
應變規專用膠 CC-33A	

表 3、試片幾何尺寸表

	長(L) (mm)	長(L ₀) (mm)	寬(W) (mm)	厚(t) (mm)
試片 A	300	238	25	2
試片 B	300	239	25	2
試片 C	300	239	25	2
試片 D	300	238	25	2
試片 E	300	250	25	2

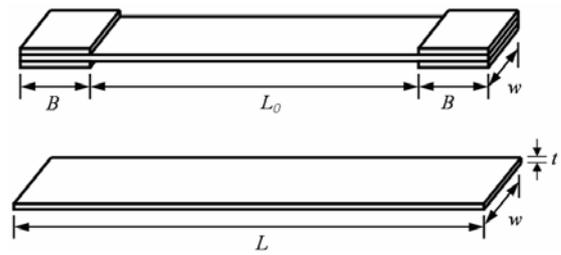


圖 1、試片之尺寸示意圖

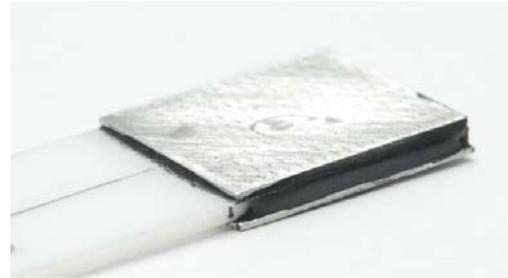


圖 2、黏接襯片(endtap)之試片圖

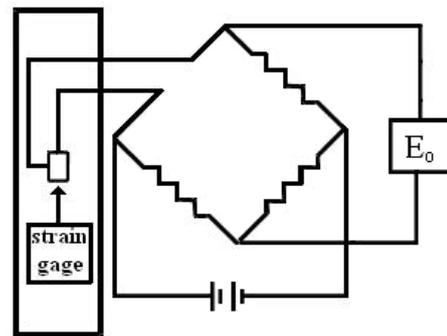


圖 3、電橋與應變規之連接示意圖



圖 4、黏貼應變規與接上導線之試片圖

實驗步驟如下：

試片貼上應變規前應以丙酮清潔試片表面。試片中央分別貼上縱向及側向應變規，將應變規導線一端焊接到應變規的接點上，如圖 3 與圖 4 所示，而另一端則接到電橋，檢測應變規的電阻值是否在規範內 (120Ω)，若電阻值太大，檢查導線是否焊接好。

將試片固定於材料試驗機的楔形夾具上。楔形夾具的原理是試片越拉伸夾具力量就越緊。

表 4、各試片之拉伸速率表

試片	L_0 (mm)	規範要求之拉 伸速率 (mm/min)	實際試驗之拉 伸速率 (mm/min)
A	238	119	119
B	239	119.5	60
C	239	119.5	30
D	238	119	60
E	250	125	30

表 3 為各試片拉伸速率表，負載條件為設定試驗機上夾具的拉伸速率可由式(1)求得，而初始應變則假設為 0.5，由規範推得之拉伸速率相當接近於 120(mm/min)，但試片 A 以規範要求之拉伸速率進行試驗時，拉伸試驗機與應變規皆無法量得數據，故後續僅針對試片 B~E 進行討論。而本試驗屬於靜態拉伸，拉伸速率應對拉伸結果並無太大差異，因此降低拉伸速率進行實驗，並觀察拉伸速率對試片是否有影響。

試片的拉伸率設定分為 60 mm/s 與 30mm/s。材料試驗機會自動紀錄位移—時間以及負載—時間圖，擷取頻率為 100 sample/sec。應變規量得之應變訊號則透過資料擷取系統紀錄，其擷取頻率為 100 sample/sec。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\varepsilon_x^\delta = \frac{\delta}{L_0} \quad (3)$$

圖 5(a)為實際量測應力-應變曲線圖，由拉伸試驗可得負載(F)與位移(δ)，式(2)與(3)可由 F 與 δ 求得應力(σ)與應變(ε_x^δ)，因此可畫出力與位移之應力-應變曲線($\sigma/\varepsilon_x^\delta$)，其中， A 為截面積，由於拉伸時橫向緊縮之結果不明顯，因此假設節面積為固定。另外，試片有兩片應變規進行縱向與橫向之應變量測，故可得到縱向與橫向之應變($\varepsilon_x^s, \varepsilon_y^s$)，亦可畫出此材料力予應變之應力-應變曲線圖(σ/ε_x^s)。

圖 5(a)中，橫軸為應變，縱軸為應力，如 \overline{AB} 線段所示，在拉伸試驗的初期，可得到一段曲線，而此線段之斜率即為楊氏係數(E_x)若此線為線性，表示拉伸試驗初期應力與應變間維持比例關係，而 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 應力-應變曲線所得之楊氏係數以 E_x^δ 表示；由 σ/ε_x^s 應力-應變曲線所得之楊氏係數以 E_x^s 表示。

降伏強度(S_y)指在線性區內應力-應變曲線平移

0.2%之應變，延伸此曲線並交於原始應力-應變曲線之交點，此交點所對之應力值即為材料之降伏強度。而 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 應力-應變曲線所得之楊氏係數以 S_y^δ 表示；由 σ/ε_x^s 應力-應變曲線所得之楊氏係數以 S_y^s 表示。

切線模數(E_t)則指於降伏點後，應力-應變曲線之斜率。

本次實驗的目標為取得楊氏係數(E_x)、蒲松比(ν_{xy})、降伏強度(S_y)、切線模數(E_t)，[5]依據虎克定律，材料在彈性限度內可由應力與應變之比值得到材料之楊氏係數，其式如下：

$$E_x = \frac{\sigma}{\varepsilon_x} \quad (4)$$

蒲松比(ν_{xy})則可由橫向與縱向之應變比值取得，其式如下：

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (5)$$

圖 5(b)為進行有限元素分析時假設之雙線性材料模型 (Bilinear)，圖五亦為應力-應變曲線圖，其中差異為假設圖 5(a)之 \overline{AB} 線段與降伏點後之曲線為線性，即為假設楊氏係數(E_x)與切線模數(E_t)皆為定值。

圖 6(a)~(d)為試片 B-E 四支試片拉伸斷裂實體照片，由圖可知，四支試片皆為拉伸斷裂而除試片 D 外之三之試片皆從試片約中央處斷裂。而試片 D 雖然從接近 endtap 端斷裂，但可看出有明顯之塑性彎曲變形。

3. 結果與討論

圖 7 與圖 8 分別為拉伸試驗機之負載(F)與時間曲線圖及拉伸位移(δ)與時間曲線圖，圖 10 為 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 之應力-應變曲線圖，其綜合討論如下：

1. 圖 7 之橫軸與縱軸分別代表時間與拉伸試驗機之負載(F)，圖 7 (a)與 7(c)分別為試片 B 與 D，且於相同拉伸速率下之結果(60 mm/min)；圖 7 (b)與 7(d)則為試片 C 與 E，而拉伸速率為同為 30 mm/min。由圖可知拉伸速率的不同，對試片拉伸斷裂時之負載並無明顯影響。
2. 圖 8(a)、(c)與(b)、(d)有著不同拉伸速率因此有不同位移率，試片 B、D 之拉伸速率為 60 mm/min；試片 C、E 之拉伸速率為 30 mm/min，試片 B、D 拉伸速率較試片 C、E 大，因此斜率較大。
3. 圖 8 之橫軸與縱軸分別代表時間與拉伸試驗機之位移(δ)，由於進行拉伸試驗時，拉伸速率為控制每分鐘拉伸之位移量，因此可發現位移與時間成一正比關係。
4. 圖 9 之橫軸與縱軸分別代表應力(σ)與應變(ε)，圖中顏色較淡之曲線為 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 應力-應變曲線，由式(2)及(3)，截面積與試片初始長度為已



圖 6、試片拉伸斷裂實體照片

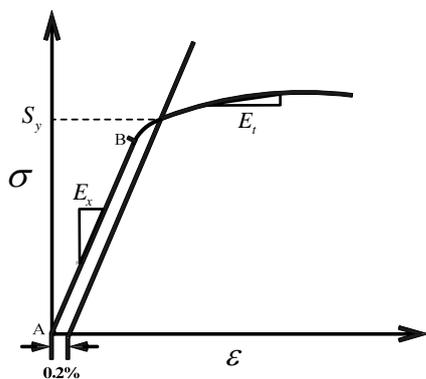


圖 5(a)、實際量測應力-應變曲線圖

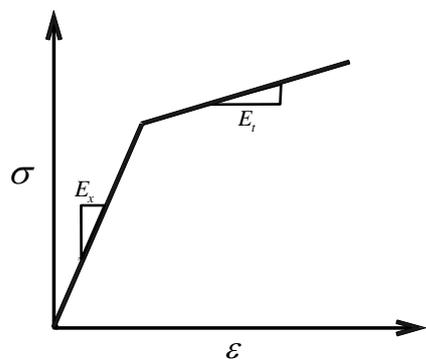


圖 5(b)、雙線性材料模型之應力-應變曲線圖

知，故可將力與位移轉為應力與應變，以畫出 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 應力-應變曲線。

5. 如圖 9(a) 為例，應力-應變曲線特性可分為四部分，第 I 部份為近似線性之線性段，表示隨負載增加，應力與應變之比例為定值，而此段斜率則為楊氏係數 (E_x^δ)。線段 II 為過降伏點後，應力與應變為一曲線，此時隨著應力增加，應變也開始有較大幅度的變化。線段 III 為一斜率為負值之線段，隨著應力的漸減，應變仍然急遽的增加，此斜率則為切線模數 (E_t)。點 IV 則為試片斷裂。

6. 表 5 為材料參數總表，(E_x^δ) 為針對淺色之應力-應變曲線 ($\sigma/\varepsilon_x^\delta$) 第 I 部份進行曲線嵌合各試片之楊氏係數，其平均值為 2.415GPa。

圖 10 為縱向 (ε_x^s) 與橫向 (ε_y^s) 應變對時間變化曲線圖，討論如下：

1. 圖 10 橫軸與縱軸分別代表時間與應變，試片 B 與試片 D 之斜率極相近，試片 C 與試片 E 也有著相同狀況，這兩組曲線圖有著不同的斜率是由於拉伸的速率不同所造成。
2. 由於拉伸時，橫向為頸縮，應變為負值，因此負斜率表橫向之應變；反之，正斜率則為縱向之應變。
3. 若針對橫向與縱向之應變皆取絕對值，則可發現縱向之應變率較大，這是由於縱向為拉伸之方向，在相同時間下，縱向之變形量會較橫向大，因此縱向應變有著較大應變率。也由於縱向變形較大，因此縱向之應變規較橫向應變規提早失效。
4. 圖中亦可發現，不同拉伸速率對試片之應變並無明顯影響。

圖 11 為縱向與橫向應變曲線圖，橫軸與縱軸分別代表縱向與橫向應變 ($\varepsilon_x^s, \varepsilon_y^s$)，而兩軸向之應變比值代表之物理意義為蒲松比，如式(5)所示。依據試片 B~E 之應變所計算之蒲松比如表 5 所示，其平均值為 0.375。

由圖 10 之應變結果與前述之應力結果，可畫出 σ/ε_x^s 應力-應變曲線，亦為顏色較深之曲線，討論如下：

1. 由於應變規進行應變量測時，在試片斷裂前已經失效，故 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 應力-應變曲線較 σ/ε_x^s 曲線長。
2. 圖中可發現 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 與 σ/ε_x^s 應力-應變曲線有著極佳的重疊性，由於應變規無法量測完整應變數據，因此 σ/ε_x^s 曲線無法如 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 曲線完整，因此在後續求取切線模數時，將採用 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 應力-應變曲線進行計算。
3. σ/ε_x^s 曲線所得到之平均楊氏係數大於 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 曲線所得之結果。由於進行拉伸試驗時，夾具對於試片會產生滑移的現象，量測到較實際結果大之位移值，而應變規是專針對特定面積進行應變量測，因此由拉伸試驗所得之應變會較大，由式(4)可知，楊氏係數與應變成反比關係，因此 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 曲線所得之楊氏係數值會小於 σ/ε_x^s 之量測結果。
4. 表 5 為材料參數總表，(E_x^s) 為針對淺色之應力-應變曲線 (σ/ε_x^s) 第 I 部份進行曲線嵌合各試片之楊氏係數，其平均值為 2.43GPa。

圖 12、圖 13 中曲線分別代表為 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 與 σ/ε_x^s 應力-應變曲線，如圖 12(a) 為例，直線代表楊氏係數之

線性段，偏移 0.2% 應變後所繪出，此線段與曲線之交點之對應應變值即為降伏強度(S_y)。表 5 為材料參數綜合表，由 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 與 σ/ε_x^s 曲線所得之 S_y 分別以 S_y^δ 與 S_y^s 表示其平均值分 34.6 MPa 與 39.5 MPa。

圖 14 為求取切線模數之 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 應力-應變曲線圖，由於 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 與 σ/ε_x^s 應力-應變曲線圖有著良好的重合性，故採用 σ/ε_x^s 應力-應變曲線進行切線模數之計算。如圖 5(a) 為例，首先針對降伏點後之曲線段進行曲線嵌合，求得此嵌合線段之斜率，此斜率即為切線模數(E_t)。表 5 為材料參數總表，此四試片之切線模數數值 E_t 皆為 -10 MPa。

表 5 為拉伸試驗所得之材料參數總表，由於 σ/ε_x^s 曲線所得之楊氏係數較 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 曲線所得為高，原因為 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 量測時包含試片之滑移，故後續所採用之材料參數應用於有限元素分析時，將採用 σ/ε_x^s 量測所得之楊氏係數與降伏強度，其值分別為 2.43 GPa 與 39.5 MPa，而蒲松比與切線模數分別為 0.375 與 -10.0 MPa。

本拉伸試驗屬於靜態拉伸，雖然設定不同的拉伸速率進行實驗，但由結果觀察此差異甚小，而拉伸速率雖與規範設定不同，但結果仍為可靠。

進行實驗時，試片加上襯墊會與楔形治夾具產生滑動，造成應變規量測到的彈性係數比位移應變量測到的彈性係數更準確，但應變規有一定的量測範圍，無法量測材料完整的變形過程。

4、結論

本文依據美國材料試驗協會 (ASTM) 訂定之規範，對衝擊試驗機之半正弦波產生器進行材料拉伸試驗，將實驗所得結果進行分析運算可得到下列材料機械性能參數：楊氏係數(E_x)、蒲松比(ν_{xy})、降伏強度(S_y)、切線模數(E_t)，其中 E_x 與 S_y 將以 $\sigma/\varepsilon_x^\delta$ 曲線所得為依據。上述各參數將套用於雙線性材料模型參數以有限元素軟體軟體 LS-DYNA 進行衝擊模擬分析，並可應用探討符合衝擊規範之半正弦波產生器幾何尺寸與位置之研究。

5、參考文獻

1. 林明儀，「電子連接器與線纜組測試分析概要」，電子檢測與品管，第 49 期，第 39~41 頁，2002。
2. 楊長江，「以使用者的品質觀點談振動測試」，電子檢測與品管季刊，第四十五期，第 58~59 頁，2001。
3. D882-02, "Standard Test Method for Tensile Properties of thin Plastic Sheetings," American Society for Testing and Materials, 2002.
4. 胡惠文，楊忠霖，「大客車結構之實驗模態分析與結構剛性分析」，國立屏東科技大學車輛工程系碩士論文，第 25-29 頁，2006。
5. Gere, J. M., "Mechanics of Materials," Thomson, sixth edition, pp., 3-26., 2004.

表 5、拉伸試驗所得之材料參數總表

試片	E_x^δ (GPa) ($\sigma/\varepsilon_x^\delta$)	E_x^s (GPa) (σ/ε_x^s)	ν_{xy}	S_y^δ (MPa) ($\sigma/\varepsilon_x^\delta$)	S_y^s (MPa) (σ/ε_x^s)	E_t (MPa)
A						
B	2.42	2.42	0.374	35.4	39.6	-10.0
C	2.41	2.43	0.355	33.7	40.0	-10.0
D	2.41	2.48	0.389	35.2	39.8	-10.0
E	2.42	2.40	0.381	34.1	38.7	-10.0
平均	2.415	2.43	0.375	34.6	39.5	-10.0

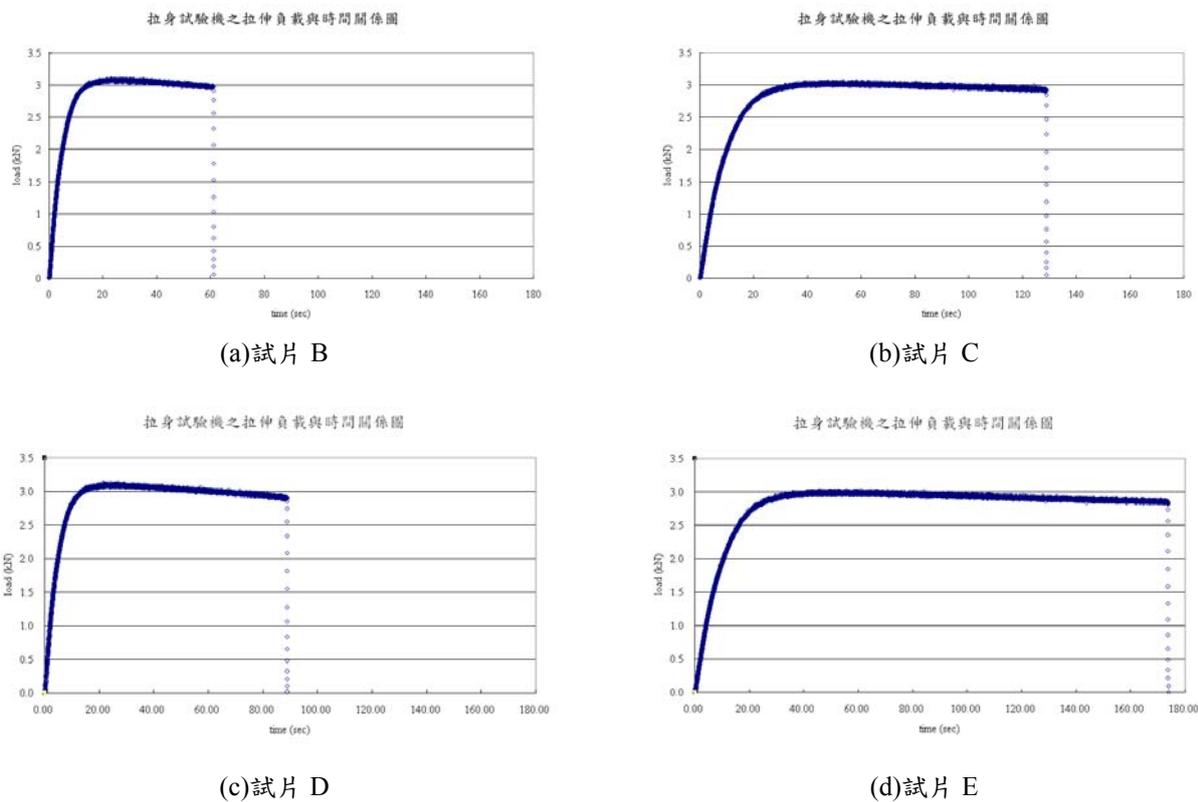


圖 7、拉伸試驗機拉伸力與時間曲線圖

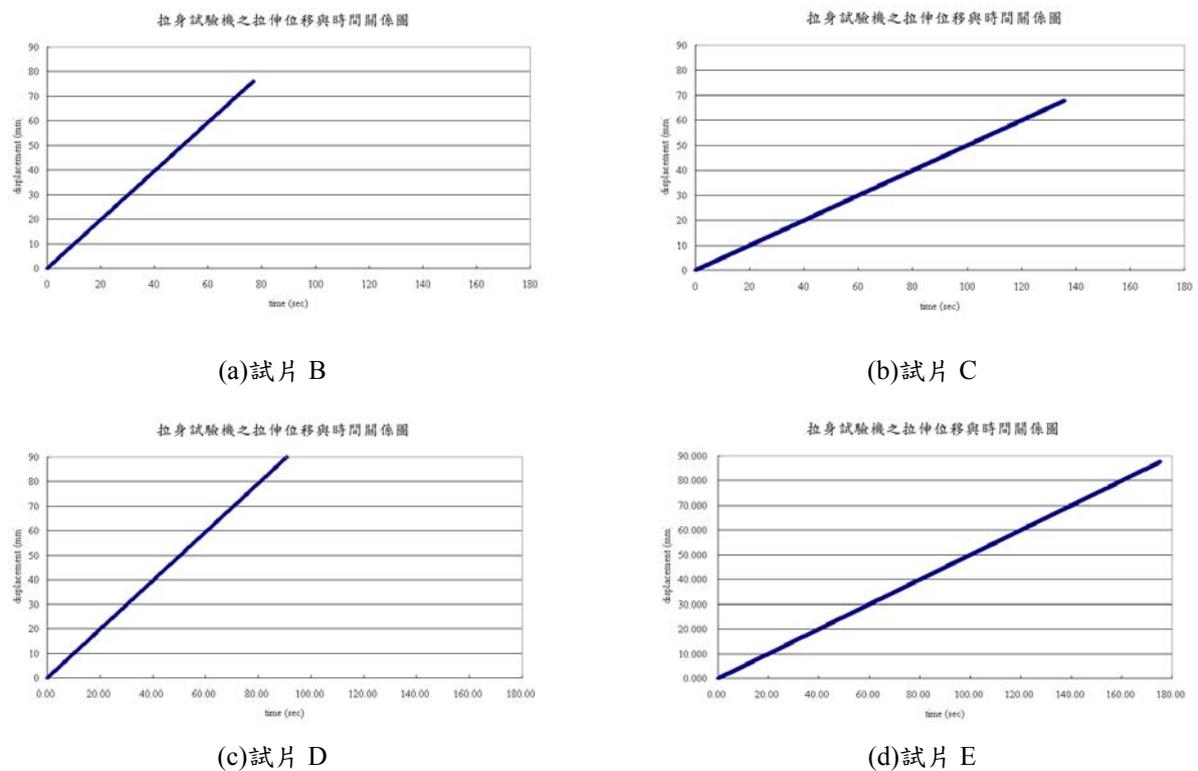


圖 8、拉伸試驗機拉伸位移與時間曲線圖

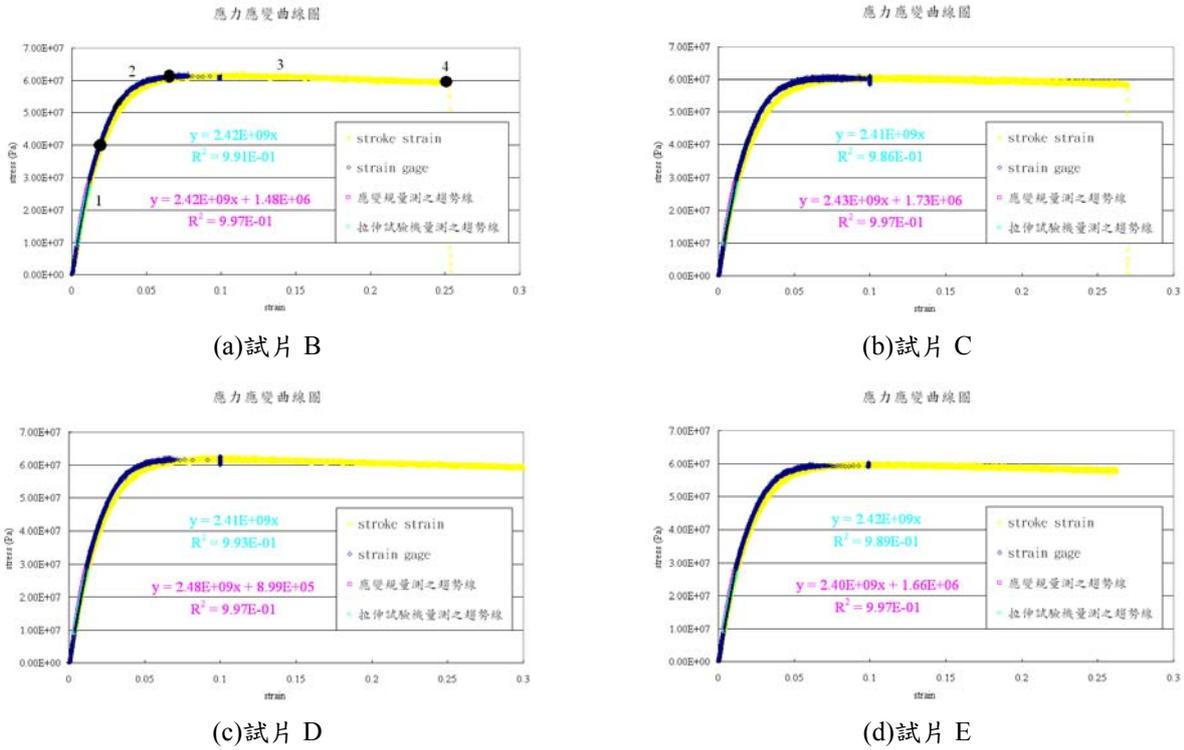


圖 9、應力-應變曲線圖

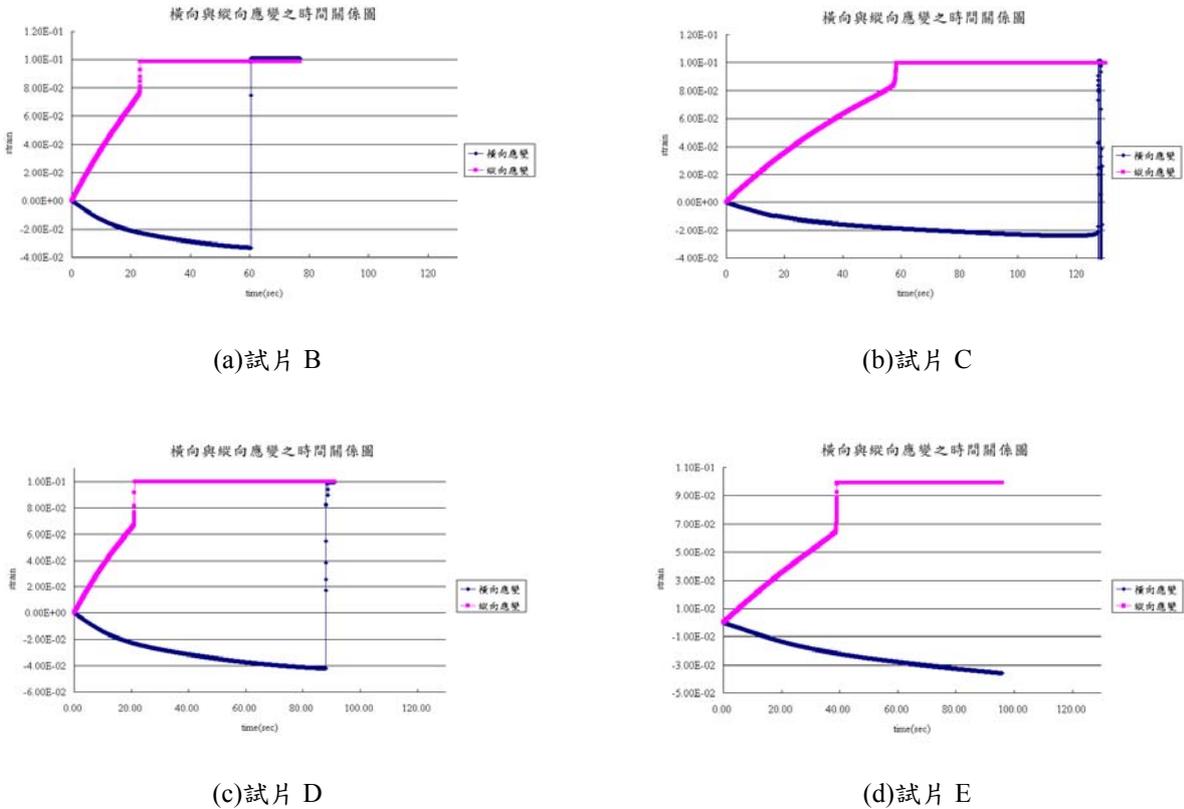
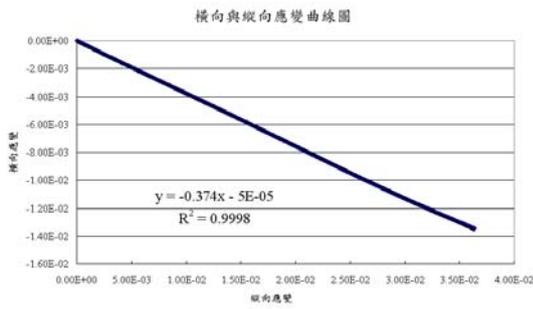
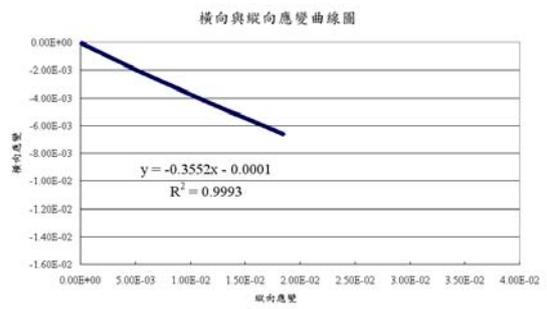


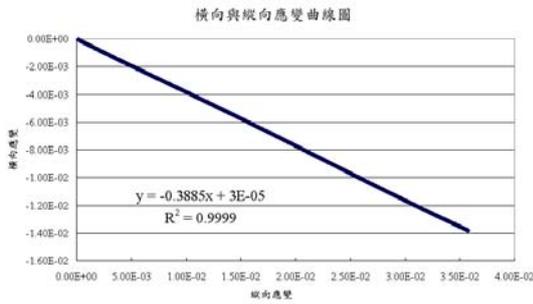
圖 10、縱向與橫向應變-時間曲線圖



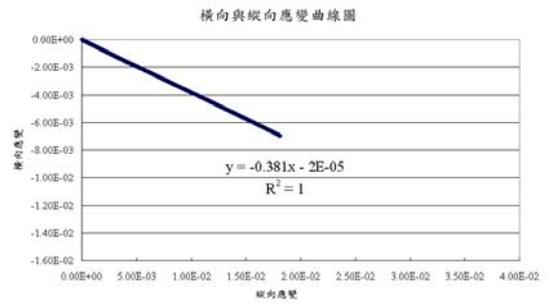
(a) 試片 B



(b) 試片 C

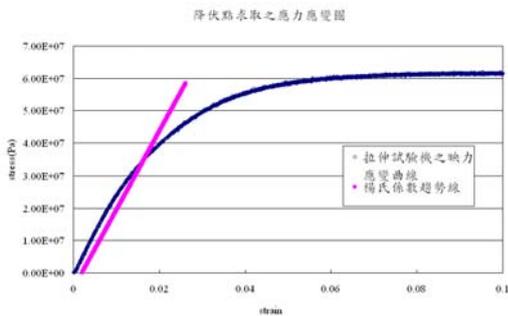


(c) 試片 D

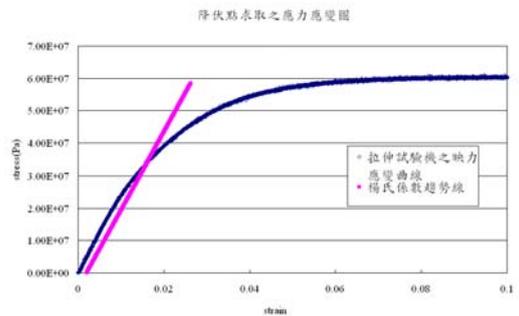


(d) 試片 E

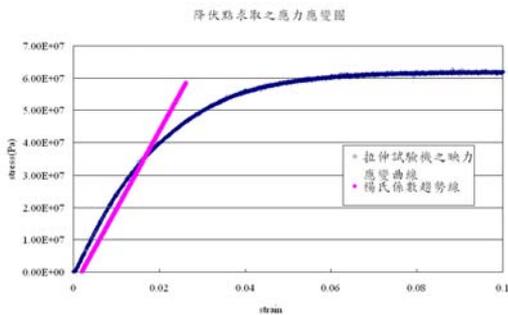
圖 11、縱向與橫向應變曲線圖



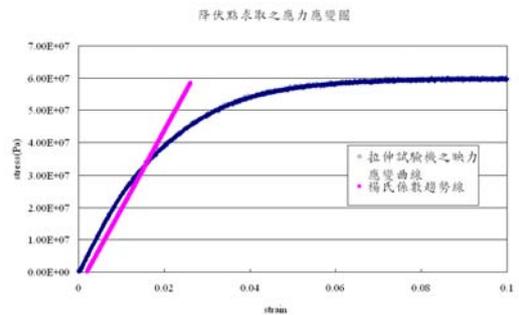
(a) 試片 B



(b) 試片 C



(c) 試片 D



(d) 試片 E

圖 12、求取降伏點之 σ/ϵ_x^δ 應力-應變曲線圖

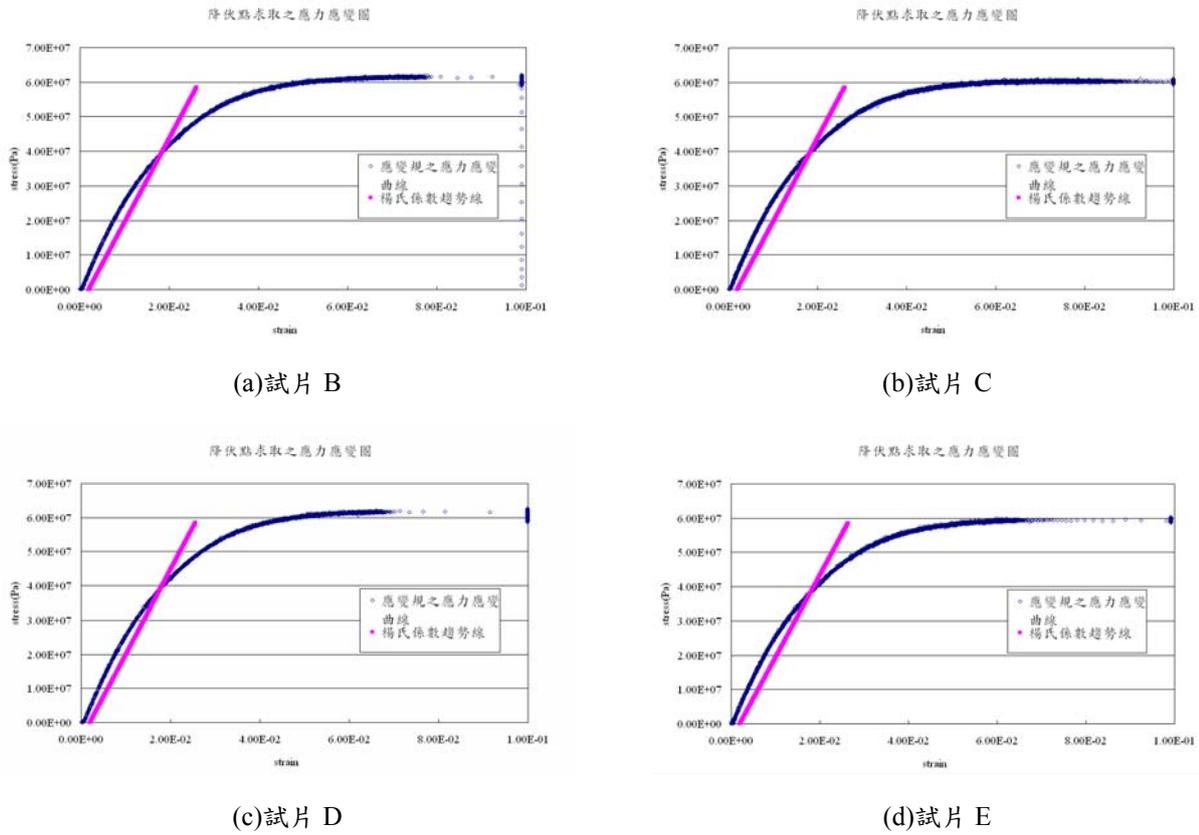


圖 13、求取降伏點之 σ/ε_x^s 應力-應變圖

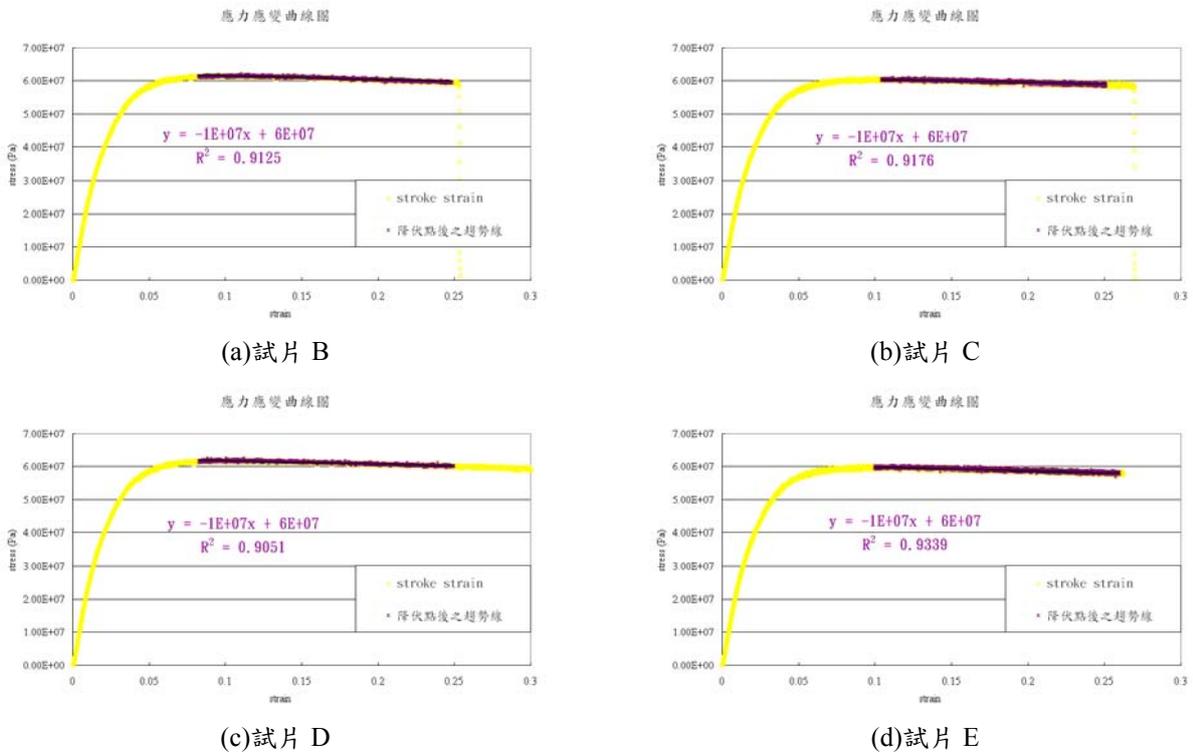


圖 14、求取切線模數之應力-應變曲線圖 ($\sigma/\varepsilon_x^\delta$)

Mechanical Property Measurement for Half-Sine Pulse Programmer Materials

Bor-Tsuen Wang¹, Hui-Wen Hu², Pei-Wei Lee³,
David Lee⁴

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

²Associate Professor, Department of Vehicle
Engineering, National Pingtung University of
Science and Technology

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

⁴King Design Company

Abstract

This paper adopts the ASTM standard to perform the extension test on the half-sine pulse programmer material. The material specimen is made accord to the standard and adhered with bi-axial strain sensors to measure the strain rate during testing. The applied loads and extrusion deformation can also be recorded and used to generate the stress-strain curves. The material mechanical properties, including the Young's modulus, Poisson's ratio, Yielding strength and Tangent modulus, can be determined. The physical parameters for the bilinear material model can be well interpreted and adopted in finite element commercial software LS-DYNA for the shock impact simulation to discuss the design and selection of half-sine pulse programmer's geometry and quantity for the specified shock test criterion.

Keywords: shock test machine, half-sine pulse programmer, extension test, bilinear material model.