

複合材料自由振動與衝擊實驗

國立勤益工商專科學校 機械科
陳永銓

摘要

複合材料質量輕而強度大，耐腐蝕，機械性質優良，日常器具、運動器材、交通器材等已相當普及，近來更引用於船舶、飛機、航空太空飛行器，其重要性，已由次結構件逐漸邁向主結構件之地位。飛行機具鼻錐、衛星本體結構、碟形雷達天線、上下淺帽形飛碟等殼狀，亦或平板規則狀結構，唯其遭受外物衝擊，每每造成脫層、裂開、斷纖等局部損壞，故任何複材結構設計，除理論與數值應力分析外，必須通過衝擊試驗，以策安全，並作破壞評估，及動態訊號量測系統。因此，本研究乃針對平板、雙曲殼、淺帽殼形狀結構之試片進行實驗研究。實驗研究項目含衝擊實驗系統、動態訊號量測系統、超音波非破壞檢測系統。

一、實驗設備規劃與執行

• 低速衝擊系統

低速衝擊系統，採用自由擺錘衝擊，設備包括靶架、彈架、衝擊彈體及計力轉換器(Force Transducer)。彈體重量可由配重調整，最小重量為179gw，配重有14gw，18gw，22gw等多種。首先，將衝擊體以牽引線拉至預定高度後釋放，使彈體依自由擺落，衝擊靶架上之待測試片。此系統設計之高度範圍為0 - 100 cm，衝擊瞬時速度在4.5 m/s以下。其衝擊彈體為可調整重量式，可因應不同衝擊力。表4.，表5.，表6.為方板、雙曲殼、淺帽殼等試片，在簡支/固定邊界條件以不同衝擊速度垂直撞擊之，最大衝擊力與衝擊速度之關係。

• 中速衝擊系統

中速衝擊系統，包括供氣空壓機、高壓氣室、電子氣閥、衝擊彈頭、及靶箱。首先由空壓機將高壓氣室充入適當壓力氣體，透過電子氣閥控制氣室開閉，以高壓氣體推動槍管內衝擊彈頭，使其以高速衝擊靶箱內之待測試片。高壓氣室內氣體壓力範圍為0.2 - 5.0 kg/cm²，可推動直徑20 mm，長50 mm，重量125 gw彈頭，衝擊瞬時速度為7 - 50 m/s。

此外，有關高速衝擊方面，供氣空壓機所提供之壓力已不敷使用，可使用高壓氦(He)氣做為壓力源，1991 謝忠佑(Auburn U.)之博士論文以6000psi壓力源，衝擊彈頭之速度高達500m/sec。

前述人造衛星在太空飛行中與隕石撞擊，國防工業防彈裝甲等，其速度相當高，破壞模式已非平常之彈塑性行為，衝擊速度高時，破壞

能量由高分子基材所吸收已達百分之三十。是故，高分子基複合材料為高速衝擊提供甚為優良之防護素材，而高速衝擊為未來重要之課題。

• 動態訊號量測系統

此系統為處理試片上的應變計及 Force Transducer 之動態訊號為主。其裝置儀器包括 Kyowa 訊號放大器，Kawasaki 暫態記憶儲存儀，Philips 示波器及 ProWave 訊號分析儀及軟體。當試片受撞擊後產生變形，試片上的應變計產生訊號經過訊號放大器放大其訊號，由 Philips PM3394 示波器監控，以 Kawasaki 暫態記憶系統將訊號儲存於記憶體內，再透過 GPIB 卡將資料傳輸至電腦加以處理之。另外 Force Transducer 於撞擊後，其訊號以 ProWave 分析儀接收，再透過協同軟體 Signal Doctor 加以計算處理，經由處理後之數據資料可以 HP LaserJet 或 Roland Plotter 繪圖輸出，衝擊實驗系統、動態訊號量測系統及其相關週邊設備之流程表如表 3。

由 ProWave 訊號分析儀，輔以 PCB 敲擊錘模態分析(加速規：Pcb.309A)，可得表 7。各試片在簡支/固定邊界條件之自由振動頻率，圖 1. 至圖 9. 為各試片在簡支/固定邊界條件之最大衝擊力與衝擊速度之關係。圖 10. 至圖 14. 由 ProWave 訊號分析儀將受衝擊試片衝擊力歷時繪圖表示之。

• 超音波非破壞檢測系統

本系統主要目的在檢測試片之完整性，試片之製造品質，衝擊受力後破裂脫層情況等。系統主要由超音波探頭移動機構、步進馬達控制箱、超音波分析儀、示波器及電腦控制的軟體程式所組成。

使用時先將水箱裝水至溢過探頭，將欲檢查物體置入水箱中平台，並移至探頭下方。打開分析儀及步進馬達控制器的電源後，再打開電

腦並啟動超音波掃描程式 SC.EXE。則主螢幕會顯示電腦控制選擇功能鍵(包括一般的檔案管理、資料存取、圖型資料的轉換及重現)，而副螢幕則出現掃描畫面和顏色指標。

進入主功能表並控制探頭的上下移動，直到探頭焦距對準材料；此時波形振幅最大。再調整分析儀上的 Energy, Gain, 等鈕，直到最佳波形。然後設定掃描的範圍、厚度等，即可進行超音波非破壞性探傷檢測。同時可由副螢幕上看出顏色的分佈狀況。顏色指標由所接受訊號的強弱依次為最弱的藍色而綠、青、黃、橘、紅、到最強的破壞訊號粉紅。當掃描完畢時，則將螢幕上所出現的最大及最低破壞顯示的顏色分別用顏色指標中的最大值(粉紅色)及最小值(藍色)等比例替代。以達到每次掃描均可充份使用最多色系的目的，亦使畫面強弱分明。接著只要按下印出鈕即可將螢幕上的畫面印出。並將檔案存入電腦中。離開超音波掃描程式，並將電腦，分析儀及示波器、步進馬達控制器等電源開關關閉。同時要將水箱中的水漏光，以保持探頭的正常使用。為檢查本實驗試件製作品質，將平板、雙曲殼試片掃描於圖 15.，圖 16.，而非平面之雙曲殼試片掃描於頂點 50 * 50mm 面積處。

• 試片製作

表 1. 材料性質表(石墨纖維/環氧樹脂)

彈性模數、抗拉(壓)強度 單位：GPa		
$E_1 = 128$	$E_2 = E_3 = 8$	$G_{12} = G_{13} = 4.5$
$G_{23} = 1.6$	$\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{13} = 0.28$	$\rho = 1515 \text{ kg/m}^3$
$X = 1.908$	$X' = -1.908$	$S_{12} = S_{13} = 0.070$
$Y = Z = 0.032$	$Y' = Z' = -0.200$	$S_{23} = 0.025$

常見之衛星結構物外觀形狀，不外乎平板狀、淺帽狀、雙曲殼狀或圓柱筒狀等。首先研製試片，以環氧樹脂/碳纖維熱壓成型。採用之環氧樹脂玻璃轉移溫度約 130 °C，最大流動點約在熱壓 150 °C，先以無加壓接觸加熱 5 分

鐘後，即在使多餘樹脂流出，俾便增加纖維之體積率，再以2200 psi 之壓力加壓，樹脂完全硬化時間約為35分鐘。有關熱壓成型模之設計，其材料必備有良好之導熱性及高剛性，故選用S45C高碳素鋼。所完成之試片碳纖維/環氧樹脂(Gr/Ep)其機械性質如表1.所列。

• 各式成型熱壓模

(1)平板模：155 ×155 mm 完成之方形平板試片，有1.8 mm和2.8 mm，或板框厚度利用磨床研磨，可得任意厚度。(2)淺帽殼模：厚度有3.5 mm和10.0 mm，外半徑80 mm，緯度張角45°。(3)雙曲殼模：厚度有3.5 mm和10.0 mm，雙曲殼兩曲率半徑分別為240 mm、315mm，取兩弦皆為160mm，對應之張角分別為38.2°，8.4°。

• 夾具部份，固定用之夾模、夾環、夾條：

(1)平板試片夾具組：平板之夾定採用滾柱對邊夾定之簡支邊界，可允許轉動，即無彎矩，無橫位移。若將半圓槽內之滾柱置換以滾珠，其邊界處增加橫切線向自由度。(2)淺帽殼試片夾具組：淺帽試件之夾具係由夾模及夾環組合成簡支邊界條件，由3R圓角即為模擬簡支邊之線接觸夾定。固定邊界由週邊處與帽殼曲面相同之圓環內外夾定。(3)雙曲殼試片夾具組：固定用內外夾模，而不同邊界條件使用不同夾條配合之。

• 各式邊界條件

(1)滾珠簡支邊界：平板四週兩面以可轉動之滾珠相對夾持，鋼珠直徑9.53mm，適用於平板。(2)滾柱簡支邊界：平板以滾柱夾持，滾柱直徑10mm，適用於平板。(3)固定邊界：各試片以面接觸式夾持，自由度最少，適用於各試片。(4)銷簡支邊界：平板四週以銷鉸接夾持，適用於平板之理論分析值。(5)雙曲殼S1簡支邊界：適用於雙曲殼之理論分析值

，Vinson⁽⁹⁾.所列。(6) 3R外緣圓角簡支邊界：雙曲殼、淺帽殼週圍夾持處以3R外緣圓角相對夾持，邊界處可產生轉角自由度，適用於淺帽殼、雙曲殼，位移情形與滾柱簡支邊界相同。

表2. 各式邊界條件位移與合應力

滾珠	滾柱	固定	銷簡支	S1簡支
$u_n \neq 0$	$u_n \neq 0$	$u_n = 0$	$u_n = 0$	$u_n = 0$
$u_{nt} \neq 0$	$u_{nt} = 0$	$u_{nt} = 0$	$u_{nt} \neq 0$	$u_{nt} \neq 0$
$\theta_n \neq 0$	$\theta_n \neq 0$	$\theta_n = 0$	$\theta_n \neq 0$	$\theta_n \neq 0$
$w_n = 0$	$w_n = 0$	$w_n = 0$	$w_n = 0$	$w_n = 0$

上列表2.為各式邊界條件位移與合應力之約束條件， u_n 為平面(中位面)週界之法向位移， u_{nt} 為平面週界之切線向位移， θ_n 為平面週界截面之轉角， w_n 為週界之橫向位移， N 為週界之法向合應力(力/單位長)， M 為週界之合力矩(力矩/單位長)， Q 為週界之橫向剪合應力(力/單位長)。

進行實驗時，試片置於夾模內之夾環、夾條中，夾模再以螺栓適度旋緊，旋緊力須適當，固定邊界無任何自由度，施以較大之旋緊力；而滾珠邊界、滾柱邊界須具有滾動、滑動之自由度，旋緊力須適當即可。

二、實驗結果與討論

• 自由振動頻率

表7.所列為本實驗使用試片在不同邊界條件下之最低自由振動頻率值。依實驗邊界條件自由度之減少，而所得之自由振頻值亦隨之增加，以方板(0°₆/90°₆/0°₆)之三種邊界條件為例，其自由振頻值依滾珠邊界、滾柱邊界、固定邊界之順序分別為 433、482、643 Hz。

兩相同之淺帽殼試片(一)、(二)，其自由振頻在簡支邊界下，一為1550Hz、一為1500Hz，而在固定邊界下兩者皆為2400Hz。比較相同厚度不同疊序之雙曲殼，在固定邊界下三疊序

($0^0_9/90^0_9/0^0_9$) 為 1500Hz、四疊序($0^0_7/90^0_7$)_{AS} 為 1900Hz。得知，疊序愈多，則剛性愈強，自由振頻也愈大。而雙曲殼($0^0_2/90^0_2$)₂₂，厚度為 10mm 者，在固定邊界下，則高達 4000Hz。

表 7. 並列有自由振動頻率理論值，由 Rayleigh-Ritz 能量法計算所得，所使用之邊界條件與本實驗使用者相似，可供參考比較。而自由振動頻率之實驗值，於實驗進行中係採多點之值平均而得。

• 衝擊力

衝擊實驗中，以配重可調整衝頭(彈體)之重量，以擺動高度控制衝頭速度，衝頭上裝置力傳感器。撞擊試片時，由 ProWave 分析儀接收，Signal Doctor 加以計算處理，可得衝頭衝擊速度與撞擊過程中，最大接觸力之關係。

比較圖 2. 之上下兩圖。上圖試片方板為 [$0^0_{12}/90^0_{12}$]，下圖為 [$0^0_6/90^0_{12}/0^0_6$]。兩試片外觀尺寸及邊界條件完全相同，唯疊序不同，後者三疊序之衝擊力較前者兩疊序者大。例如用 223g 衝頭，以 4.0m/s 速度撞擊，其衝擊力分別為 1018Nt、756Nt。因此，疊序變化多，試片將提高其剛性致使其容易產生較大之衝擊力。

表 5. 之平板試片在各衝擊速度下，衝擊力隨不同邊界條件而變化，例如 223gw 之衝頭在 4.0m/sec 速度撞擊，衝擊力依滾珠邊界、滾柱邊界、固定邊界之順序分別為 781Nt、832 Nt、1018Nt。再比較圖 8. 之雙曲殼試在簡支/固定邊界條件之最大衝擊力與衝擊速度之關係。上圖為簡支邊界，下圖為固定邊界，固定邊界之衝擊力均甚大於簡支邊界者。衝頭重 223g，以 4.0m/s 速度撞擊之，兩衝擊力分別為 1650Nt、1100Nt。

傳統板殼理論大都僅限於薄板殼情形，董春鵬⁽¹⁰⁾曾對較厚之雙曲殼作深入之研究，理論分析模式中，六個應力值均可完全求得，以 [$0^0/90^0/0^0/90^0$] 150 * 150 * 15 mm 為例，其衝

擊破壞之衝頭速度為 7.48m/s。本實驗以 160 * 160 * 10mm [$0^0_2/90^0_2$]₂₂ 為例，以 223g 衝頭，4.0m/s 速度撞擊固定邊界之雙曲殼產生 4070Nt 之衝擊力。

圖 10. 至圖 14. 為各試片在簡支，固定邊界條件下以 179g，223g 衝頭撞擊，衝擊力之歷時變化。圖 10、11. 係平板試片之滾珠簡支邊界，衝頭與試片接觸作用之加力、卸力可產生三次循環，此現象較諸於滾柱簡支或固定邊界明顯。比較圖 12.、13. 之兩雙曲殼試片，在固定邊界，衝頭 223g，以 2.0(3.0)m/s 速度撞擊。圖 12. 係較薄殼 (3.5mm)，衝頭與試片接觸時間約為 1.9msec；而圖 13. 之厚殼 (10mm) 試片與衝頭接觸時間只有 0.6msec。

限於經費短絀，實驗之試片、模夾具均為自行研製，若能將試片製作品值改進，提高模夾具之精密度，實驗之可靠性與精確度必可更為增加。

三、結 論

- 有關自由振動部份：由動態訊號量測系統，輔以敲擊鏈模態分析，各試片在不同條件邊界條件下，其各模態自由振動頻率均可求得。
- 有關衝擊實驗部份：衝(彈)頭速度或重量可任意調整，以測得速度、重量對衝擊力接觸時間之影響。受外物衝擊的反應，衝擊力，衝擊物速度，衝擊物位置，利用本實驗可預測厚板殼結構遭外物衝擊的結構振動型態，提供積層複材厚板殼結構防撞避震、鑽孔加工、衝擊破壞之參考。

四、參考文獻

1. Chao, C. C., and Chern, Y. C., 1988. "Axisymmetric Free Vibration of Orthotropic Complete Spherical Shells," *J. Composite Mat'ls.*, Vol. 22, No. 12, pp. 1116-1130.
2. Chao, C. C., T. P. Tung and Chern, Y. C., 1991. "Axisymmetric Free Vibration of Orthotropic Hemispherical Shells under Various

- Edge Conditions," *ASME J. of Vibration and Acoustics*, 113 (2), 152-159.
3. Ewins, D. J., 1984, *Modal Testing: Theory and Practice*, John Wiley, New York, pp. 1-85.
 4. Houlston, R., Slater, J. E., Pegg, N., and Des Rochers, C. G., 1985, "On the Analysis of Structural Response of Ship Panels Subjected to Air Blast Loading," *Comput. Struct.*, Vol. 21, pp. 273-289.
 5. Librescu, L., Khdeir, A. A. and Frederick, D., 1989, "A Shear Deformable Theory of Laminated Composite Shallow Shell-Type Panels and Their Response Analysis I : Free Vibration and Buckling', *Acta Mechanica*, Vol. 76, pp. 1-33.
 6. Rath, B. K., and Das, Y. C., 1974, "Axisymmetric Vibration of Closed Layered Spherical Shells," *J. Sound Vib.*, Vol. 37, pp. 123-136.
 7. Reddy, J. N. 1984, "Exact solutions of moderately thick laminated shells,' *J. Engng Mech. Div. ASCE*, Vol. 110, pp. 794-809.
 8. Soedel, W., 1981, *Vibration of Shells and Plates*, Marcel Dekker, New York, pp. 124-132.
 9. Vinson, J. R., and Sierkowski, R. L., 1986, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Martinus Nijhoff, pp. 178-184.
 10. 董春鵬, "積層厚殼三維高階理論及其衝擊動態反應之研究," 博士論文, 清華大學動力機械研究所, 1993, 元月。

表 3. 衝擊實驗與動態訊號處理系統示意流程表

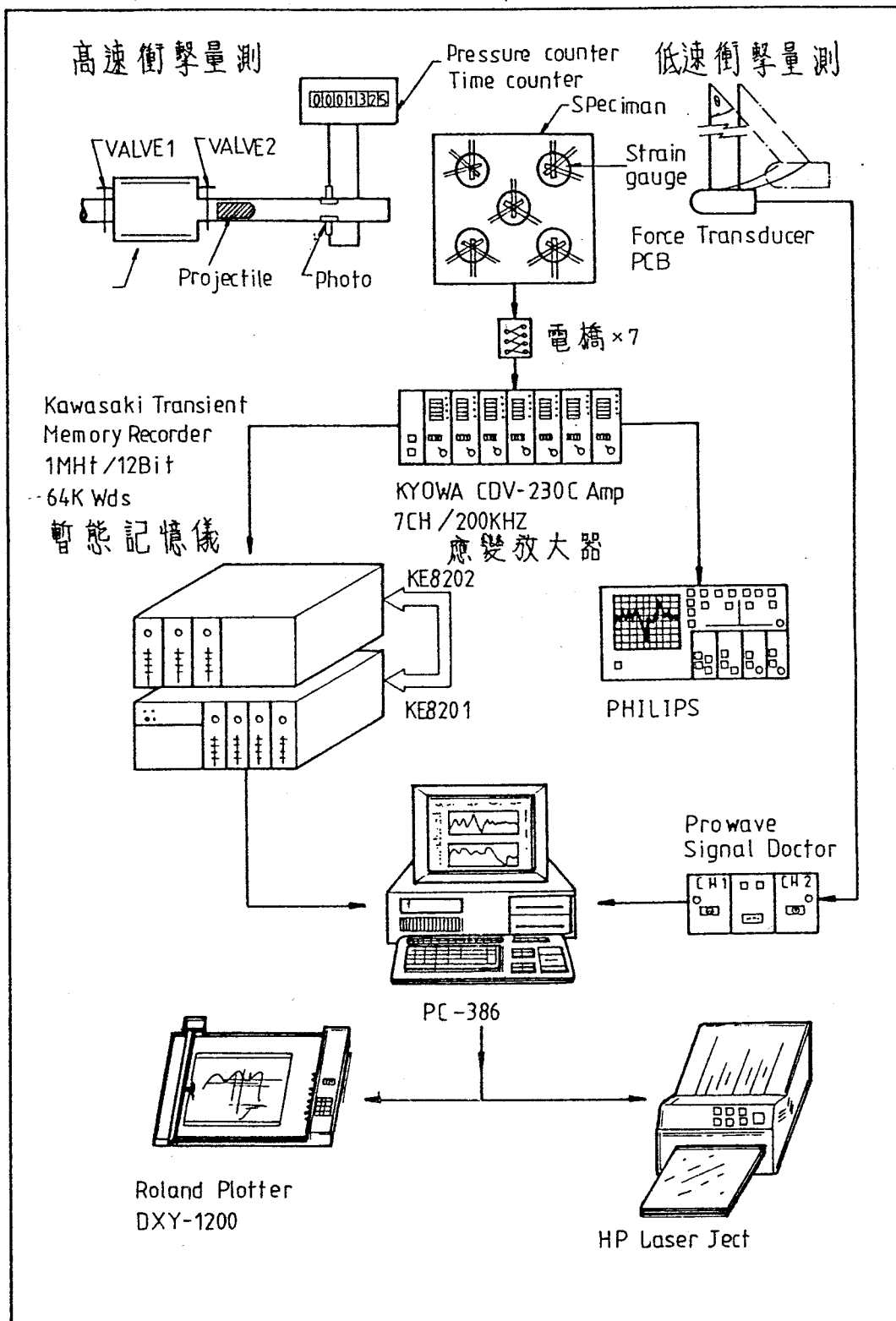


表 4. 雙曲殼與淺帽殼試片衝擊速度與最大衝擊力關係

衝擊速度 (m/sec)	衝擊力 (Newtons)							
	固定邊界(1)		固定邊界(2)		簡支邊界(3)		固定邊界(3)	
	179gw	223gw	179gw	223gw	179gw	223gw	179gw	223gw
0.5	250	260	294	313	120	129	173	222
1.0	347	380	406	493	154	176	189	305
1.5	515	570	615	700	212	257	277	449
2.0	653	760	815	932	295	350	381	564
2.5	794	966	1033	1155	364	420	494	721
3.0	976	1151	1241	1393	476	528	578	876
3.5	1180	1314	1351	1651	593	710	726	1062
4.0	1310	1408	1559	1764	775	1044	913	1180

(1) : 雙曲殼 ($0^0_7 / 90^0_7 / 0^0_7 / 90^0_7$) (2) : 雙曲殼 ($30^0 / -30^0$)₁₄ (3) : 淺帽殼

表 5. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

衝擊速度 (m/sec)	衝擊力 (Newtons)						試片 : 平板 ($0^0_6 / 90^0_{12} / 0^0_6$)	
	滾珠簡支邊界		滾柱簡支邊界		固定邊界			
	179gw	223gw	179gw	223gw	179gw	223gw		
0.5	84	91	92	107	95	111		
1.0	138	150	143	165	155	180		
1.5	214	241	219	254	229	267		
2.0	273	325	292	353	312	398		
2.5	364	424	374	445	428	553		
3.0	449	548	461	598	560	714		
3.5	572	647	597	759	692	873		
4.0	711	781	730	832	842	1018		

表 6. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

衝擊速度 (m/sec)	衝擊力 (Newtons)		試片：方板(45 ⁰ ₁₂ / ⁰ ₋₄₅) _{AS}			
	滾珠簡支邊界		滾柱簡支邊界		固定邊界	
	179gw, 223gw		179gw, 223gw		179gw, 223gw	
0.5	78	103	143	152	140	149
1.0	116	136	224	231	213	227
1.5	175	228	329	352	322	330
2.0	246	287	452	475	473	480
2.5	331	408	511	604	538	601
3.0	406	508	636	727	664	749
3.5	512	620	730	814	792	911
4.0	594	754	928	982	922	1020

表 7. 各試片在簡支/固定邊界條件之自由振動頻率

自由振動頻率 (Hz)	滾柱簡支	滾珠簡支	理論值	固定邊界
方板(0 ⁰ ₆ /90 ⁰ ₆ /0 ⁰ ₆)	482	433	371	643
方板(0 ⁰ ₅ /90 ⁰ ₅) _{AS}	517	370	346	622
方板(0 ⁰ ₃ /90 ⁰ ₂) ₄	530	475	365	670
方板(0 ⁰ ₁₂ /90 ⁰ ₁₂)	480	467	400	975
方板(0 ⁰ ₆ /90 ⁰ ₁₂ /0 ⁰ ₆)	542	488	575	945
方板(30 ⁰ ₁₂ / ⁰ ₋₃₀) _{AS}	682	745	938	1650
方板(45 ⁰ ₁₂ / ⁰ ₋₄₅) _{AS}	671	770	989	1630
淺帽殼(一), 正交層	1500	-	-	2400
淺帽殼(二), 正交層	1550	-	-	2400
雙曲殼(0 ⁰ /90 ⁰) ₁₄	1020	-	-	1100
雙曲殼(0 ⁰ ₉ /90 ⁰ ₉ /0 ⁰ ₉)	1100	-	1922	1500
雙曲殼(0 ⁰ ₇ /90 ⁰ ₇) _{AS}	1150	-	1925	1900
雙曲殼(30 ⁰ / ⁰ ₋₃₀) ₁₄	1410	-	-	2400
雙曲殼(0 ⁰ ₂ /90 ⁰ ₂) ₂₂	2400	-	-	4000

頻率理論值：方板為銷簡支邊界；雙曲殼為S1之簡支邊界

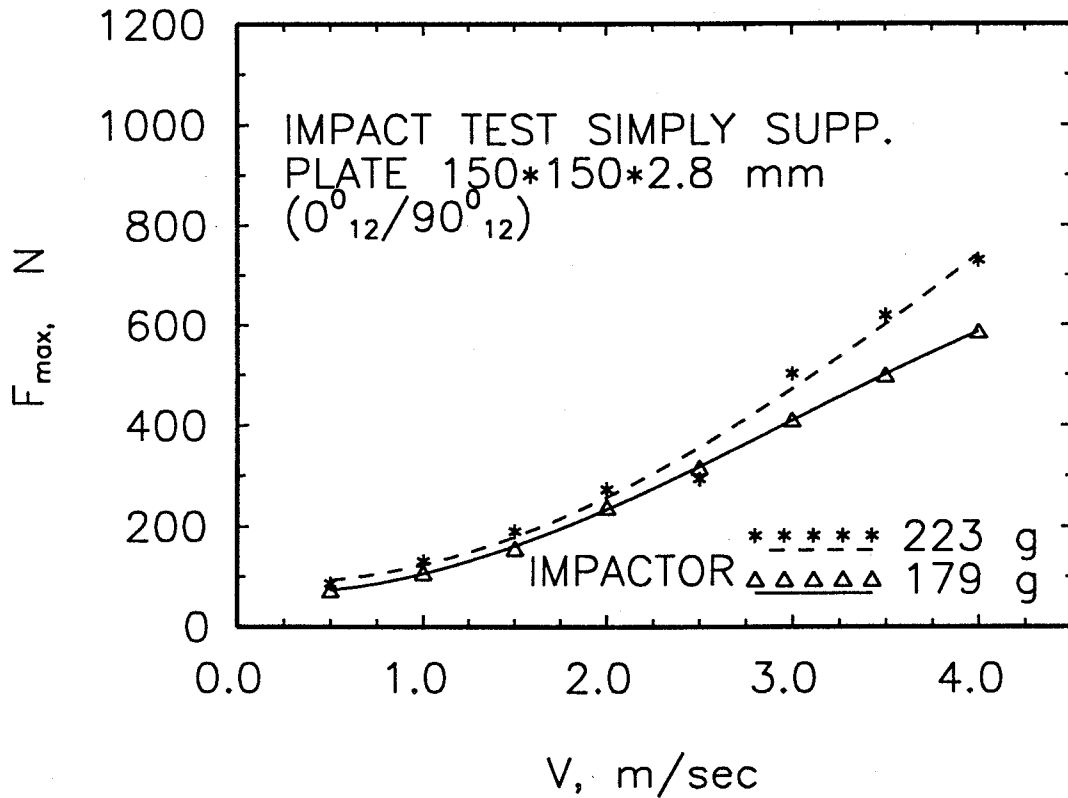
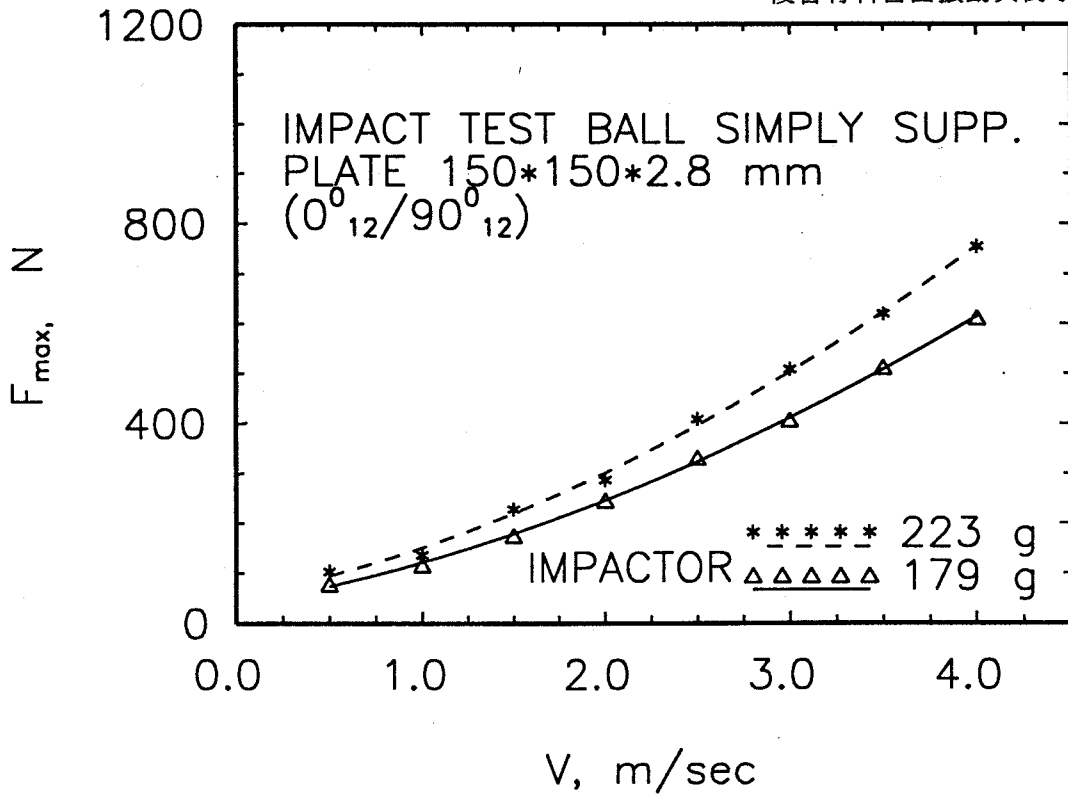


圖1. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

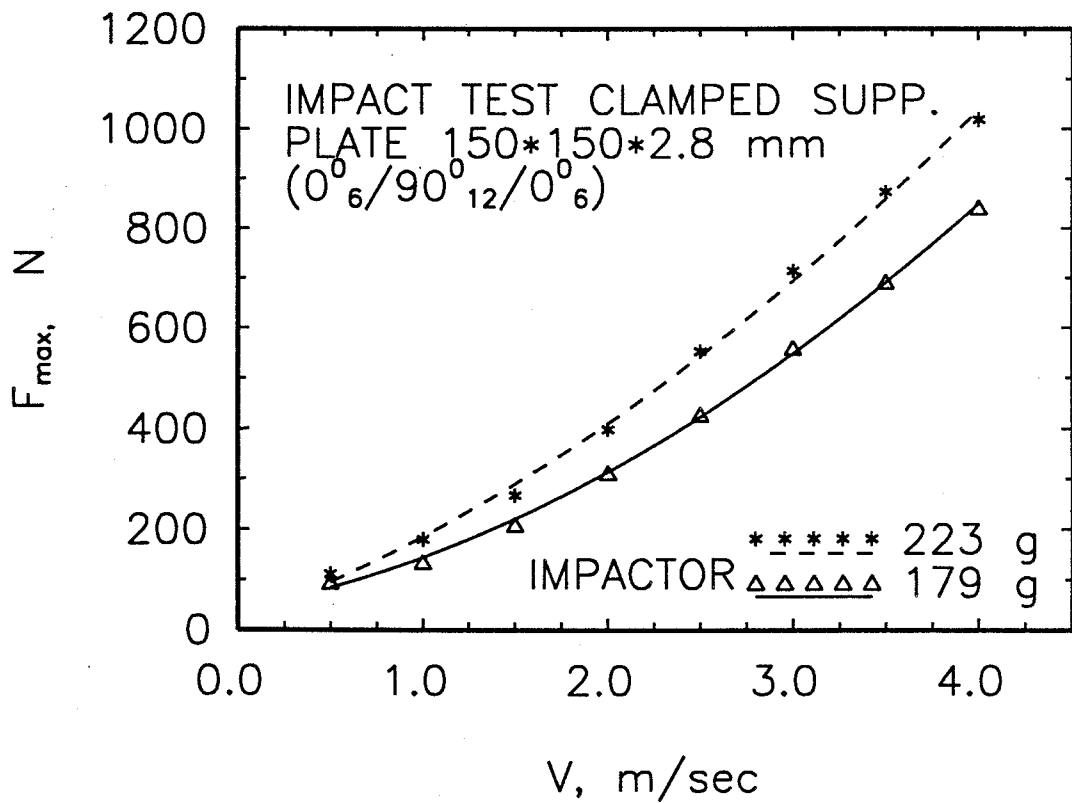
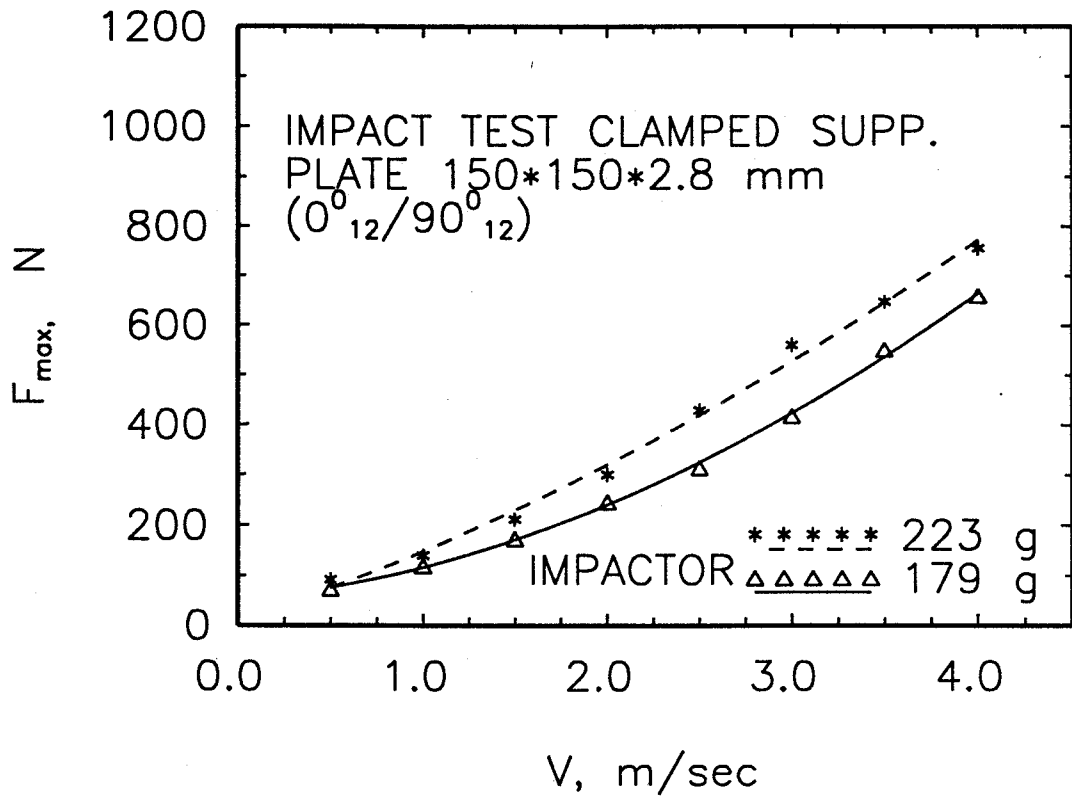


圖2. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

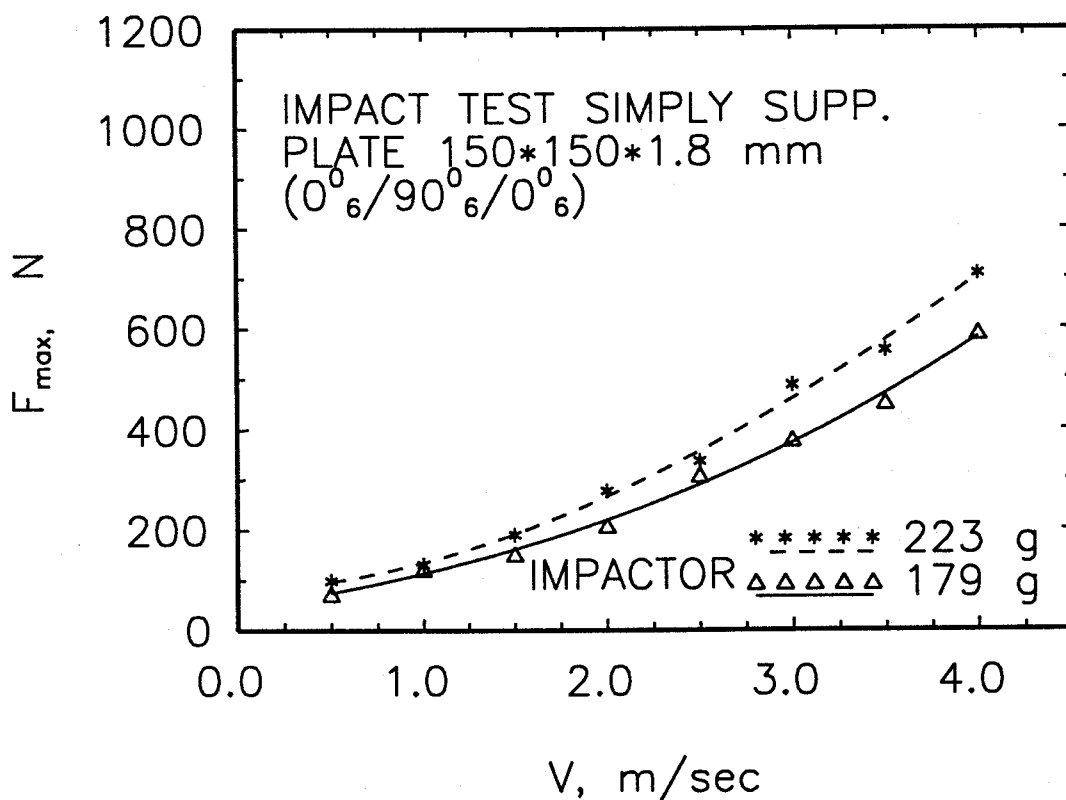
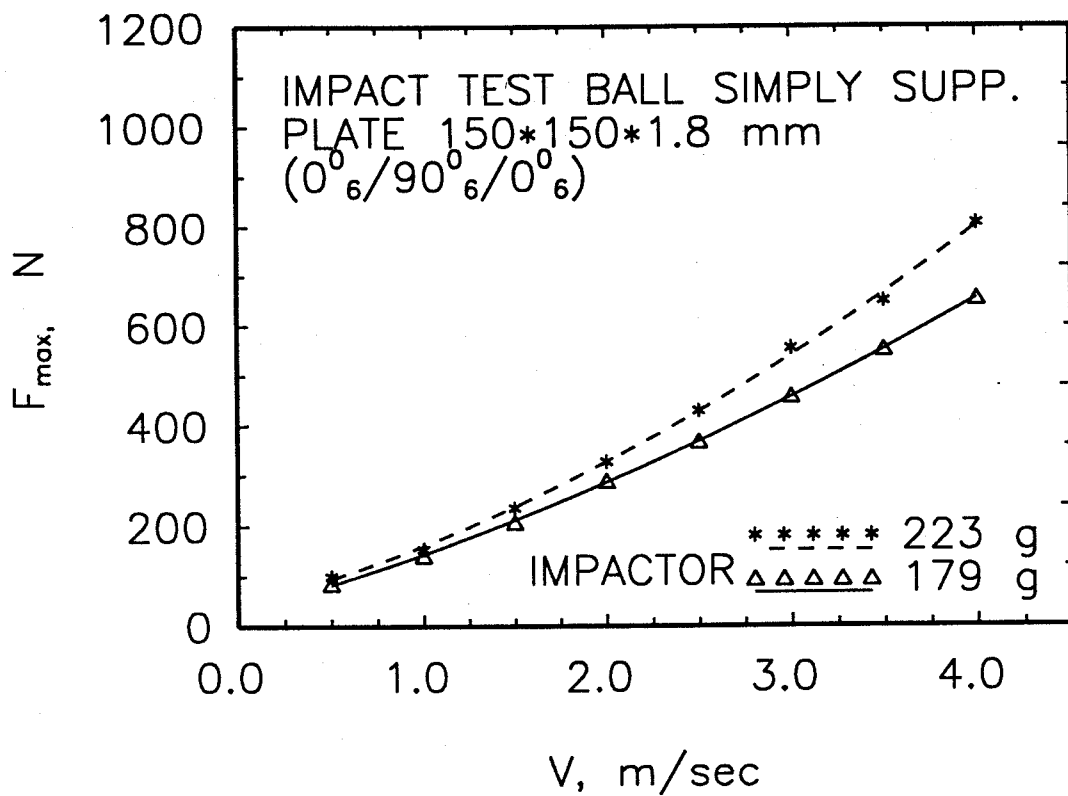


圖3. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

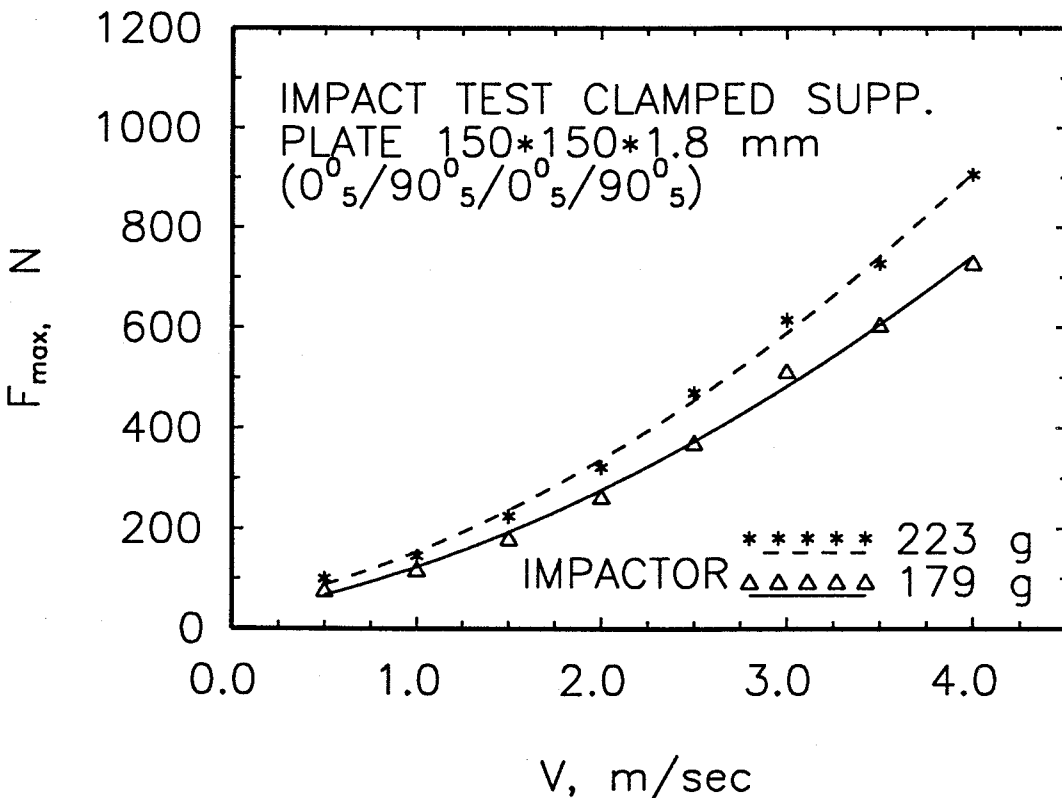
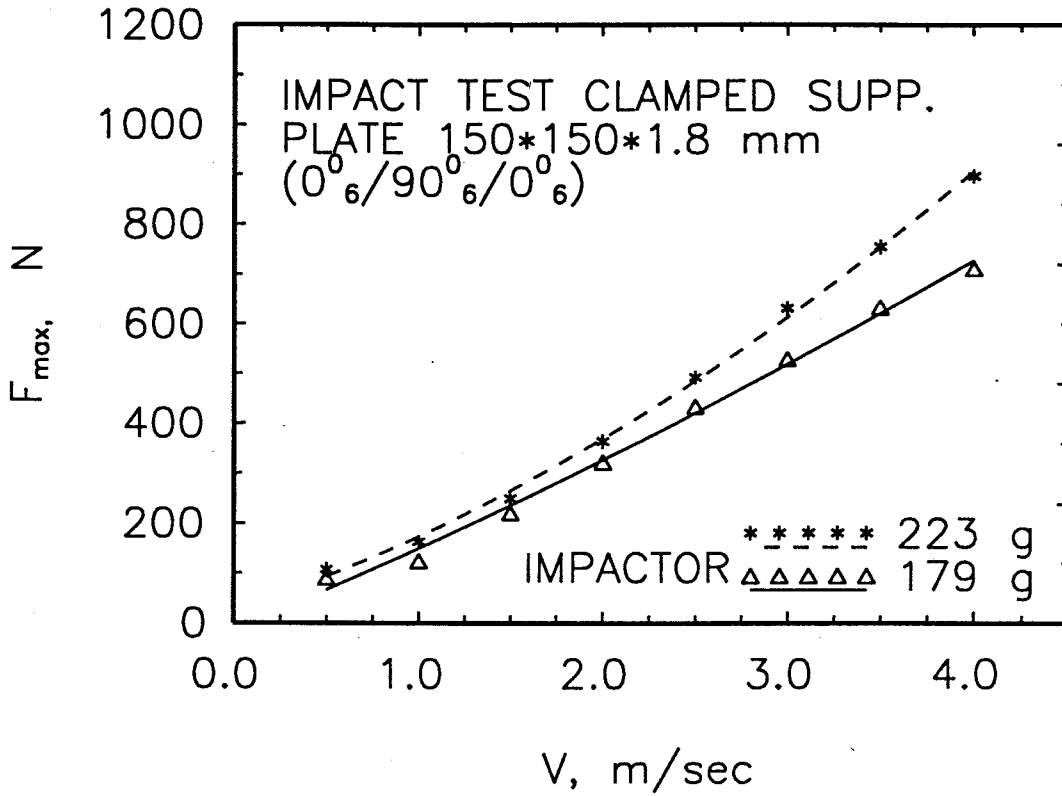


圖4. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

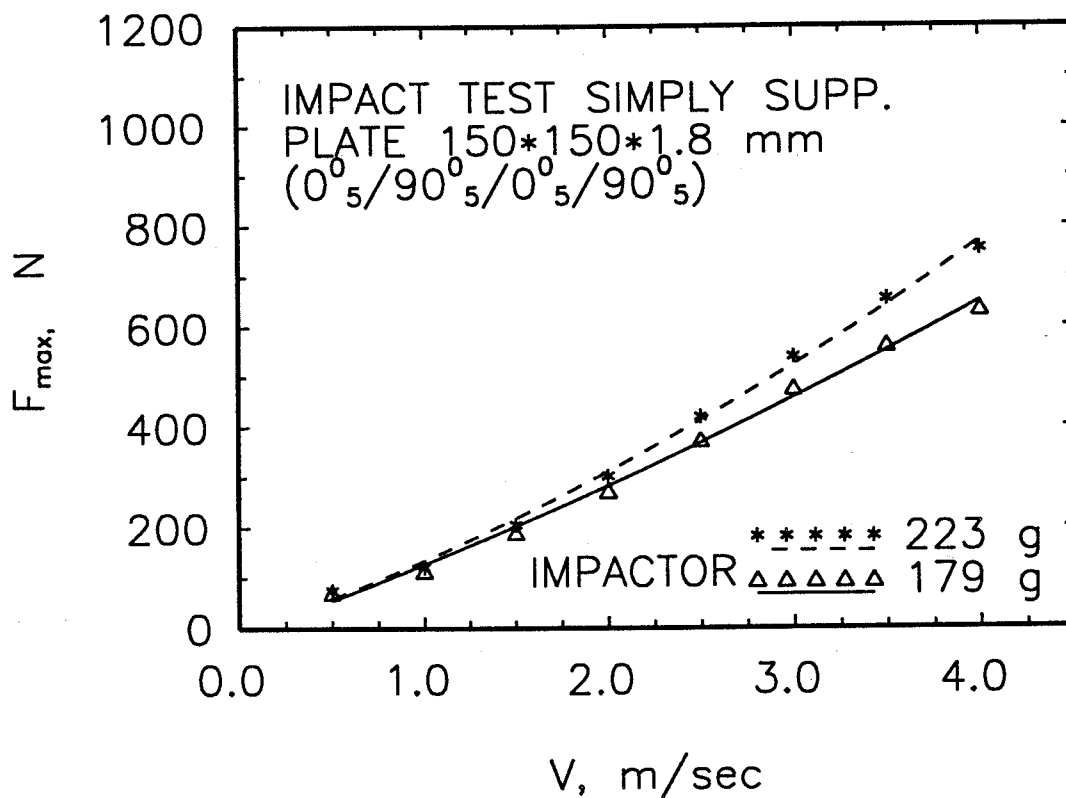
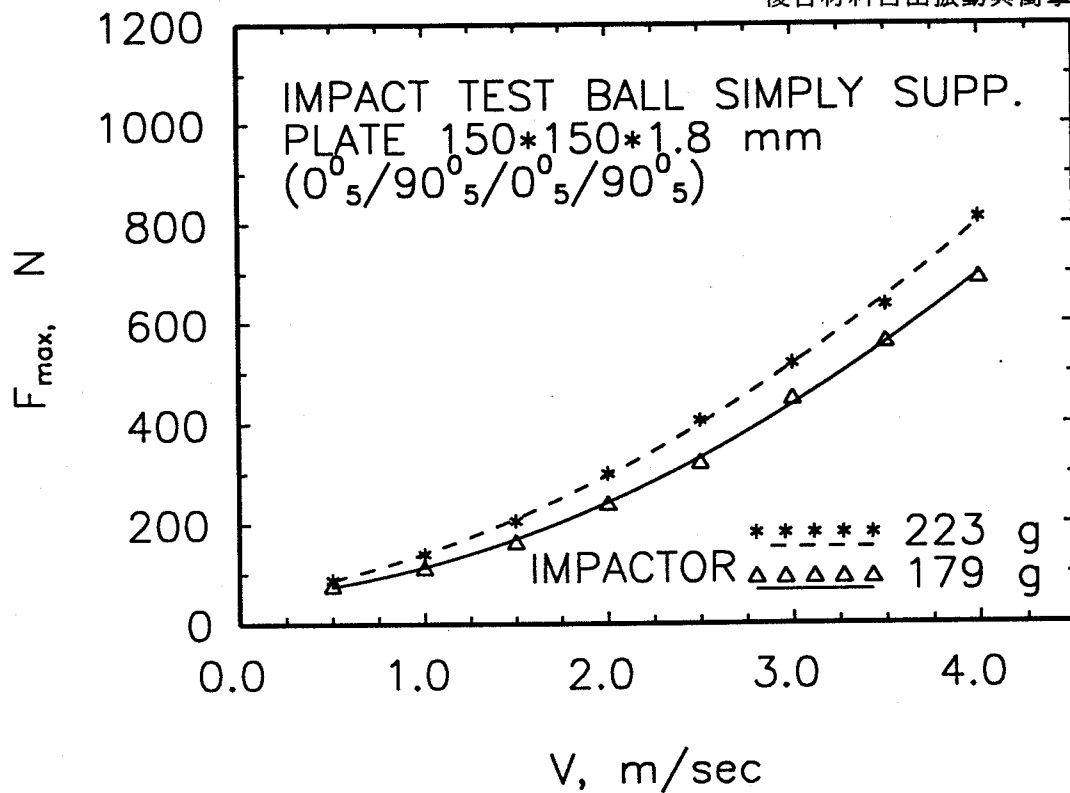


圖5. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

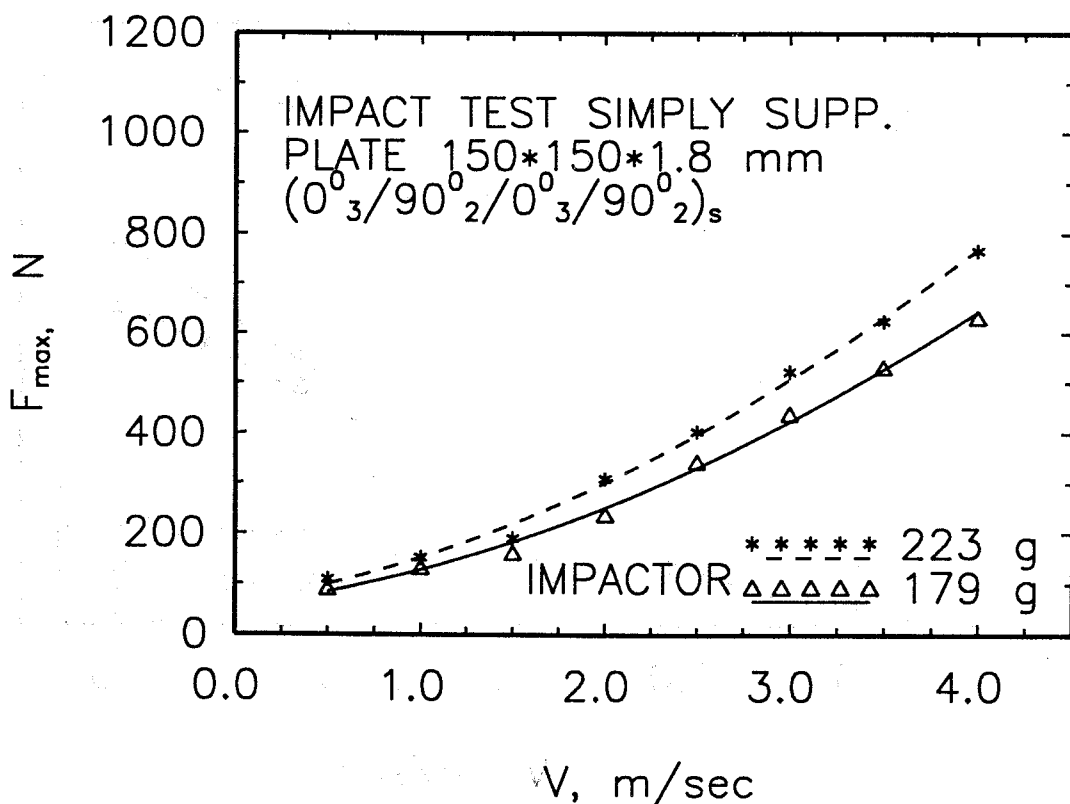
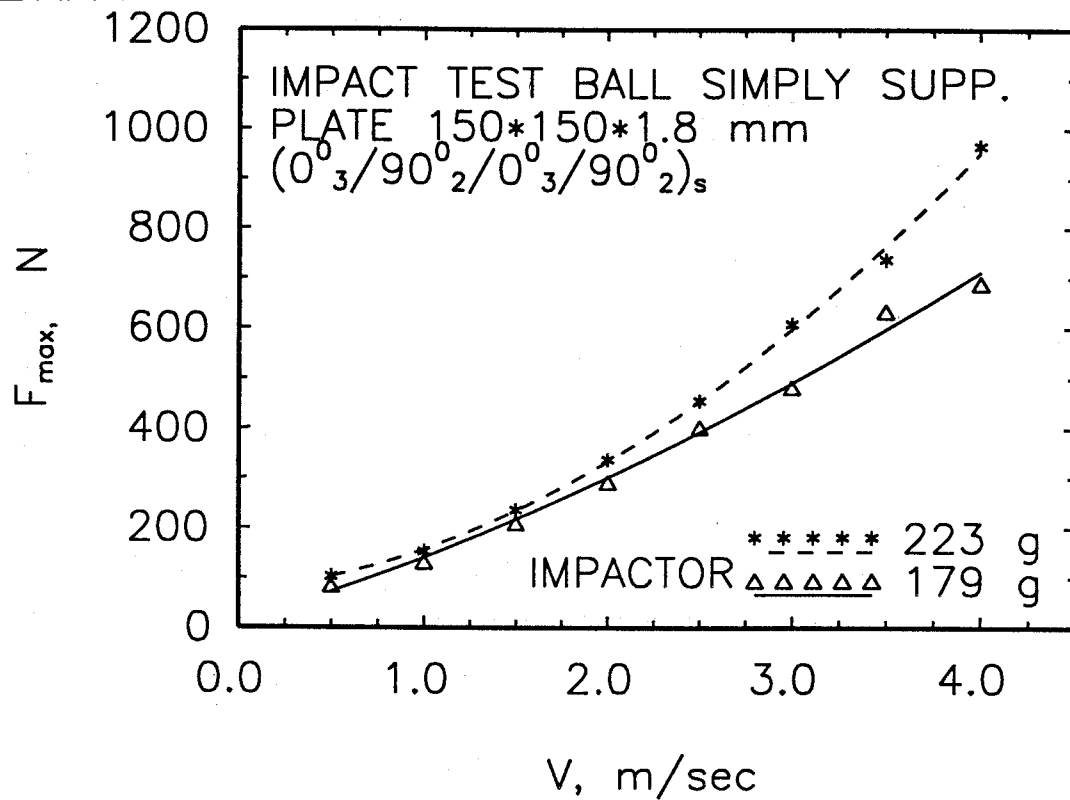


圖6. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

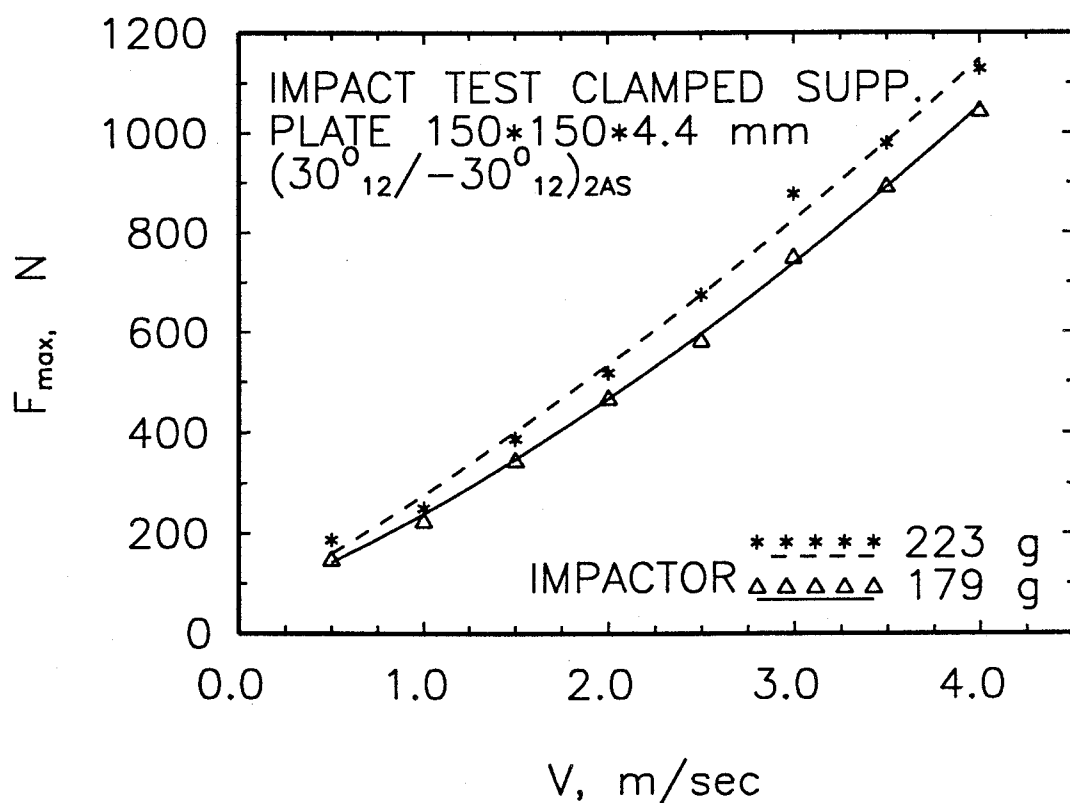
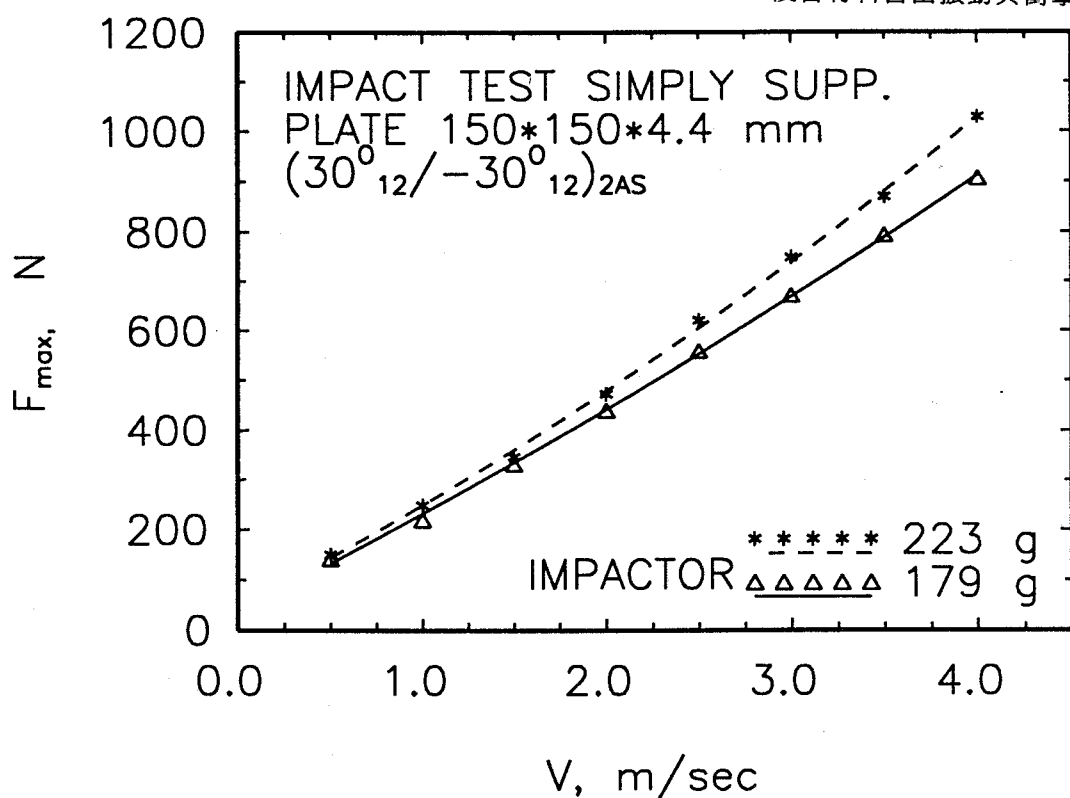


圖7. 平板試片衝擊速度與最大衝擊力關係

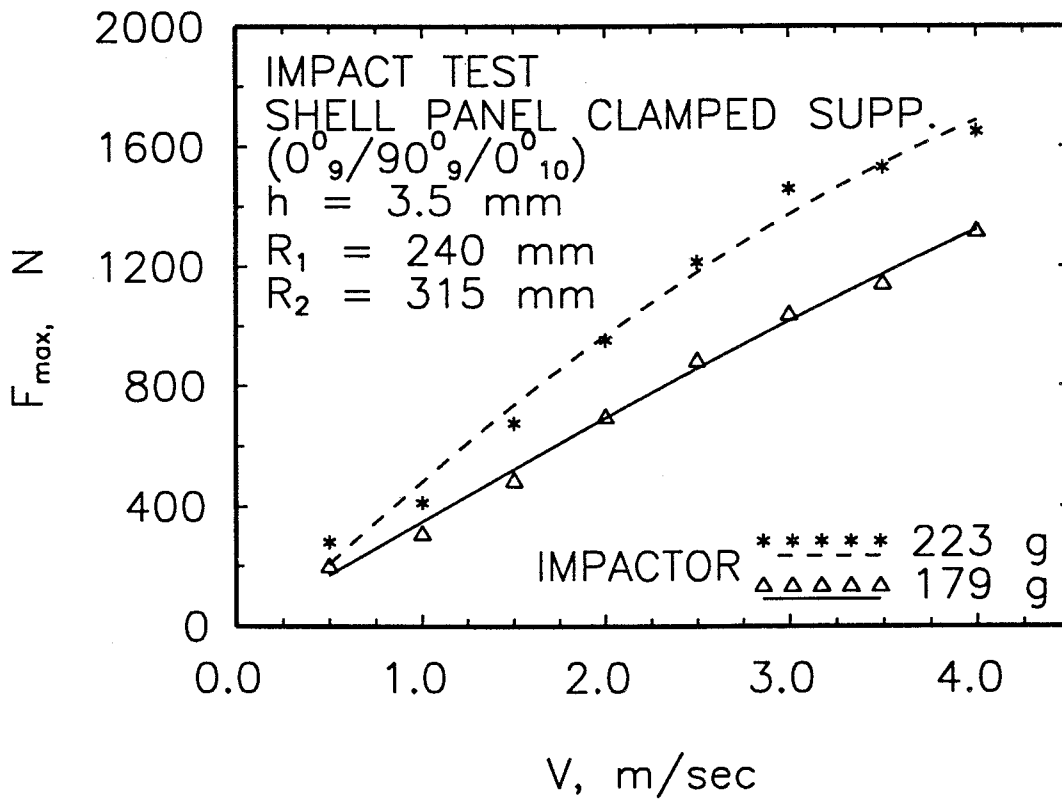
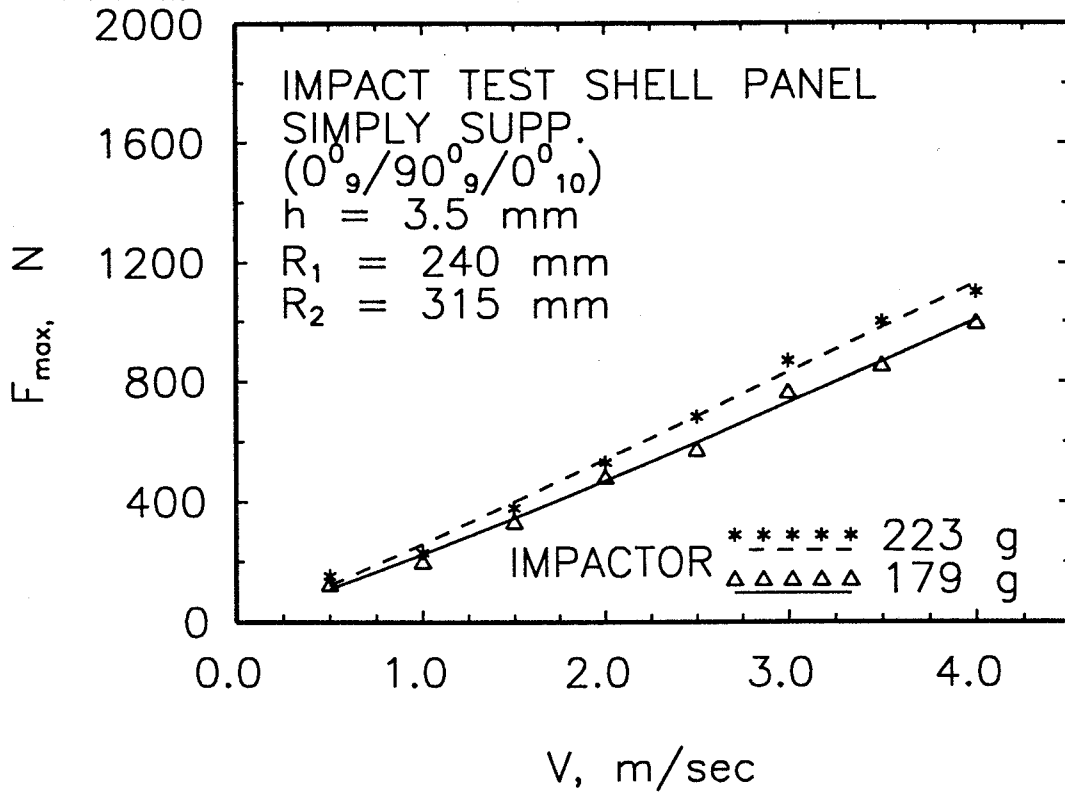


圖8. 雙曲殼試片衝擊速度與最大衝擊力關係

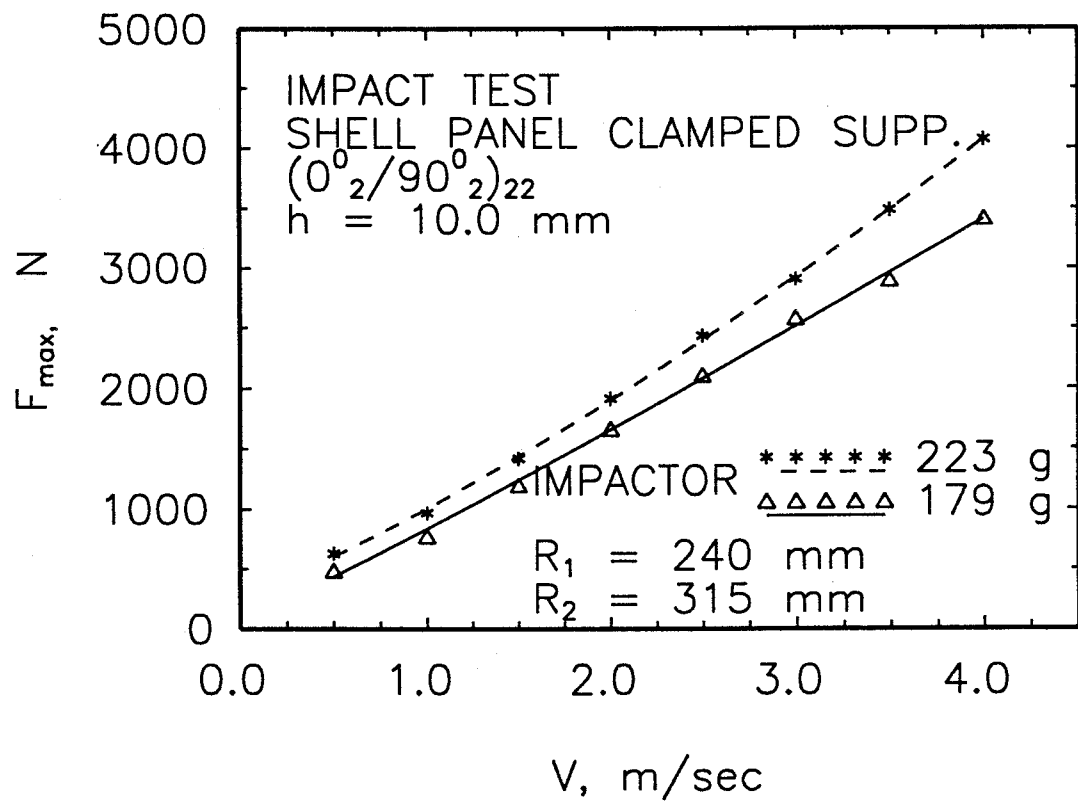
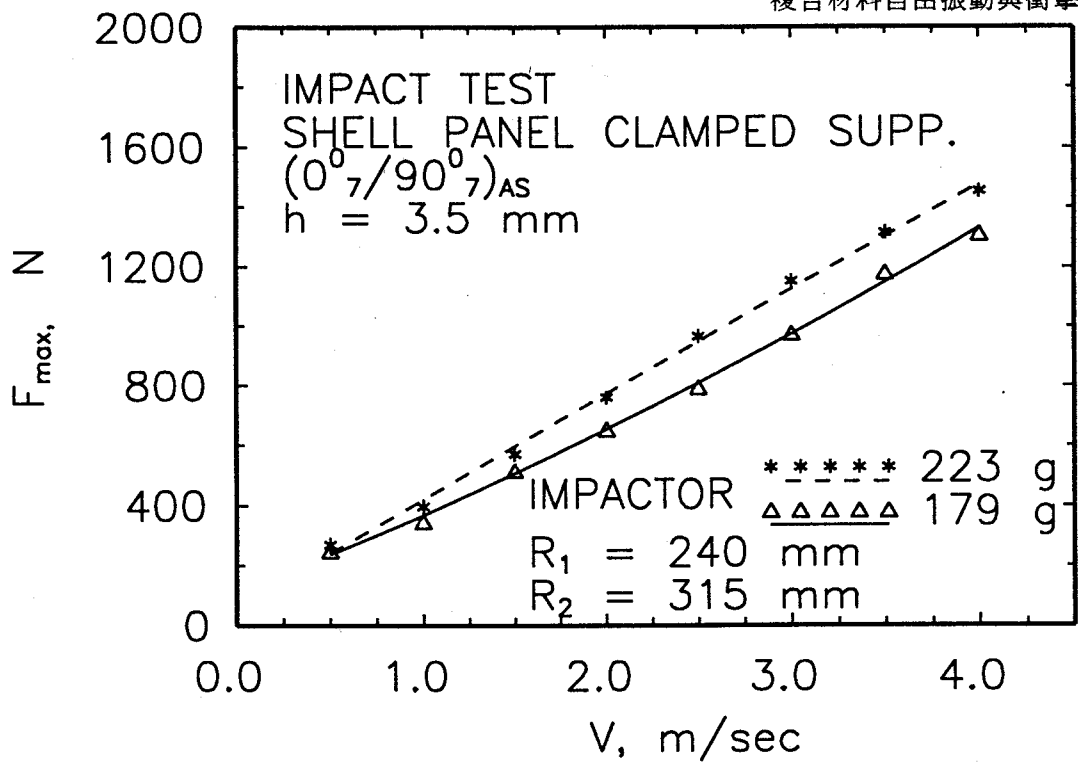
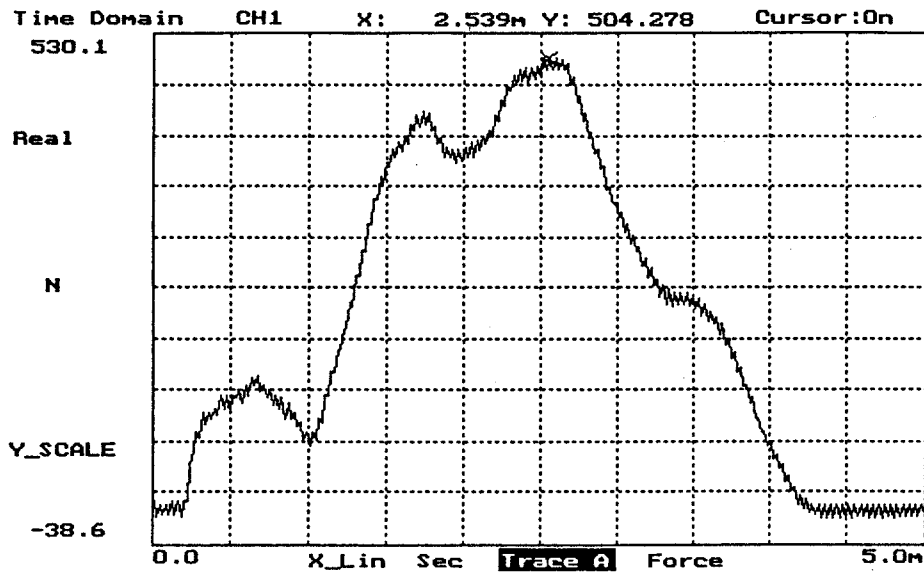
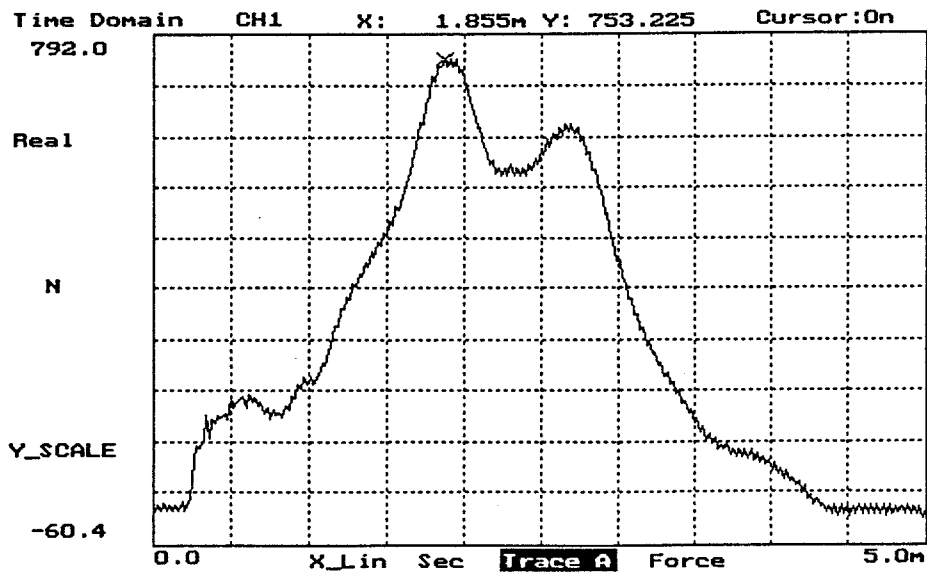


圖9. 雙曲殼試片衝擊速度與最大衝擊力關係

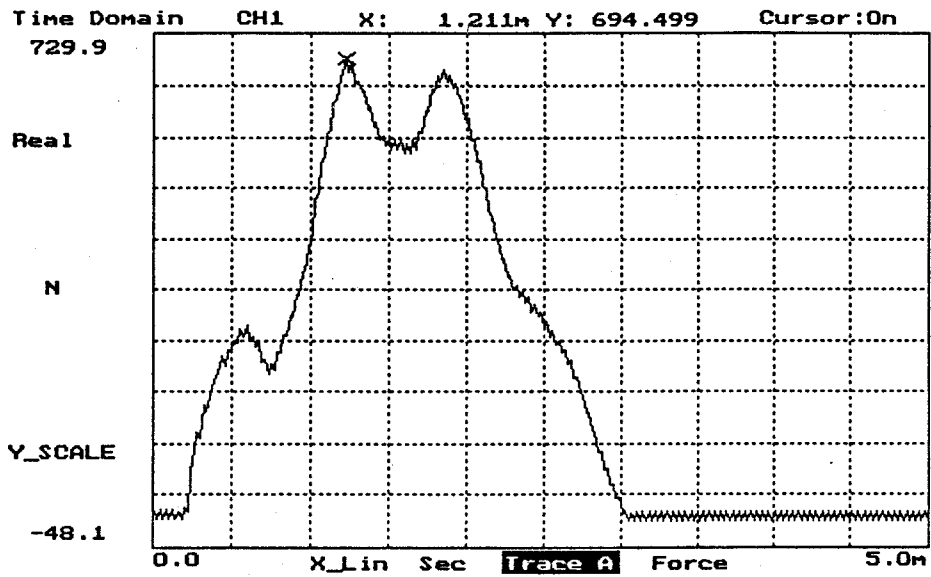


(一)、衝頭223gw；衝頭速度3.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

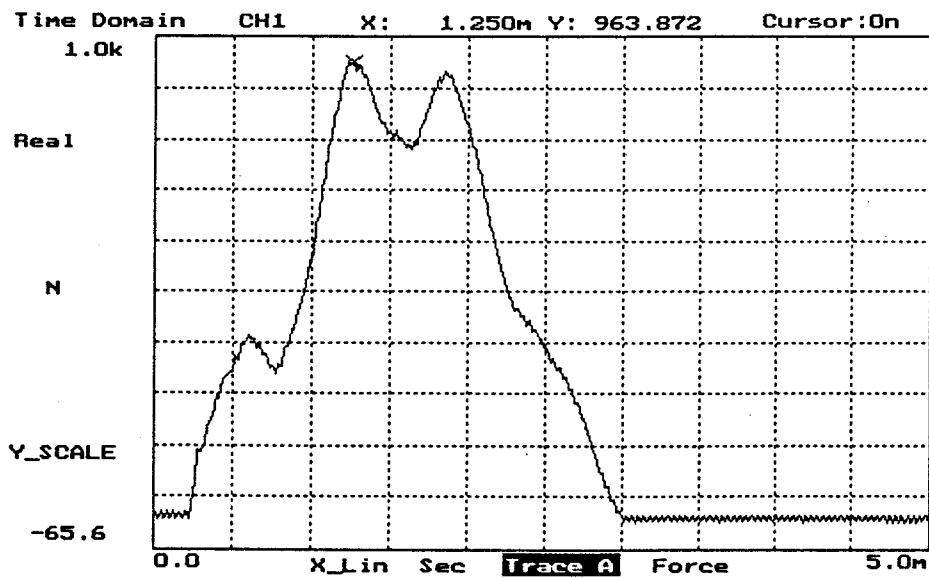


(二)、衝頭223gw；衝頭速度4.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

圖10. 平板試片($0^0_{12} / 90^0_{12}$)滾珠簡支邊界衝擊實驗衝擊力歷時圖

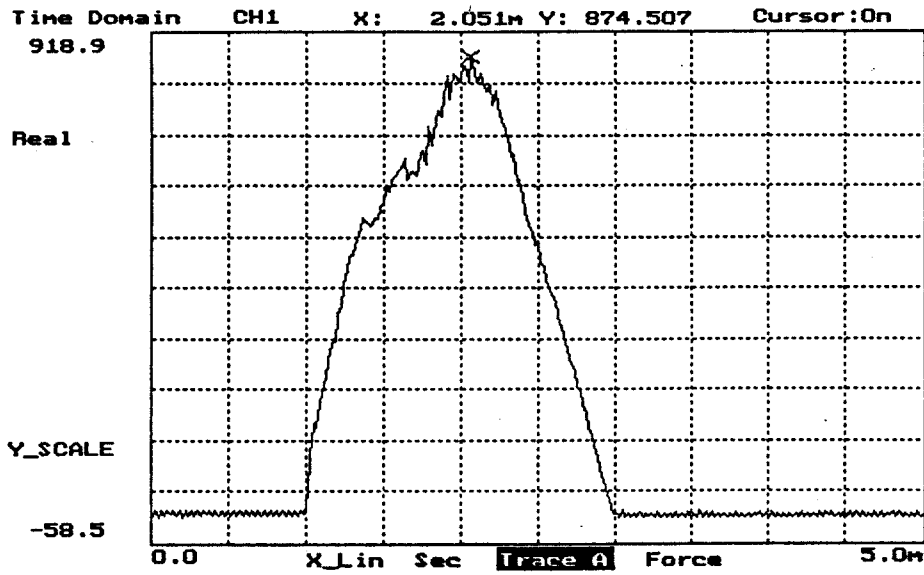


(一)、衝頭223gw；衝頭速度3.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

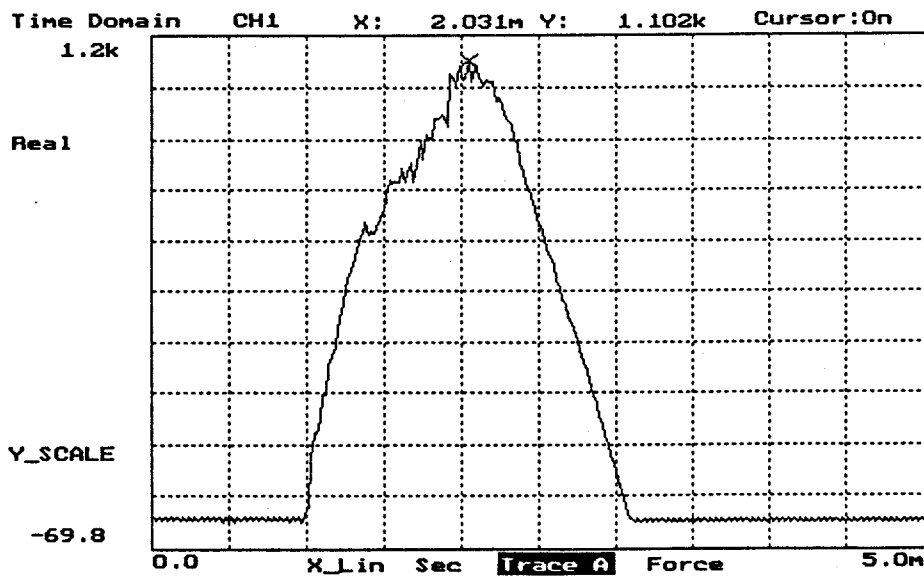


(二)、衝頭223gw；衝頭速度4.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

圖 11. 平板試片 ($45^0_{12}/-45^0_{12}$)_{AS} 滾珠簡支邊界衝擊實驗衝擊力歷時圖

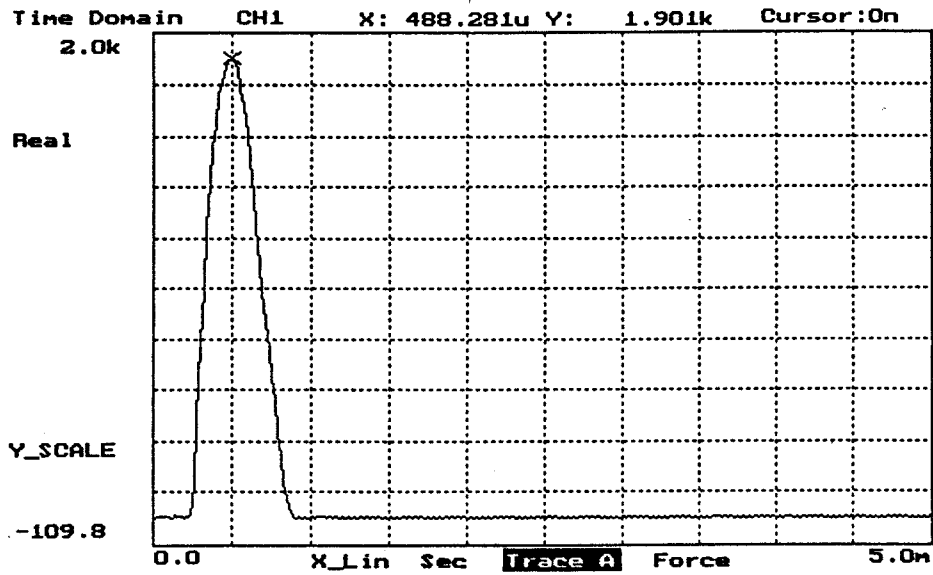


(一)、衝頭223gw；衝頭速度3.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

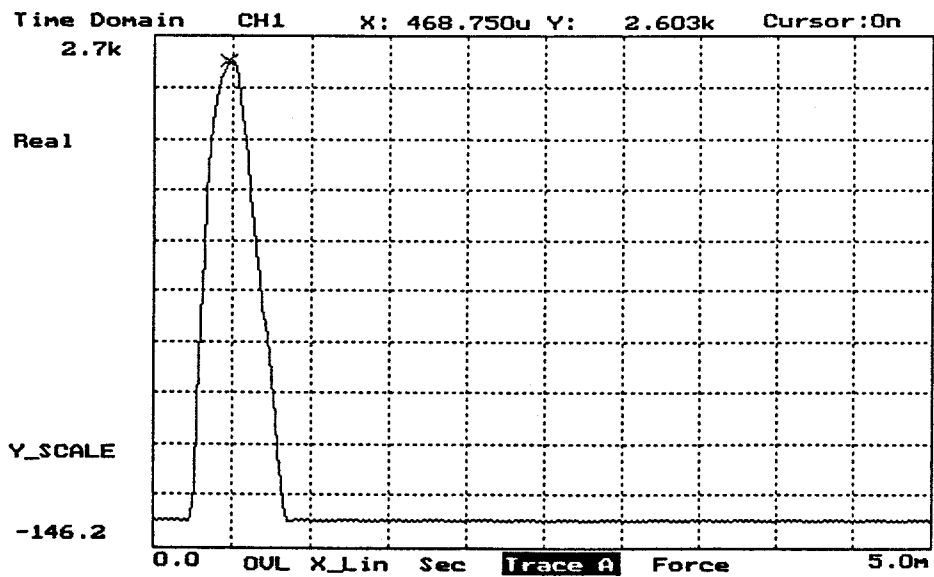


(二)、衝頭223gw；衝頭速度4.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

圖12. 雙曲殼(0°, /90°, /0°)簡支邊界衝擊實驗衝擊力歷時圖

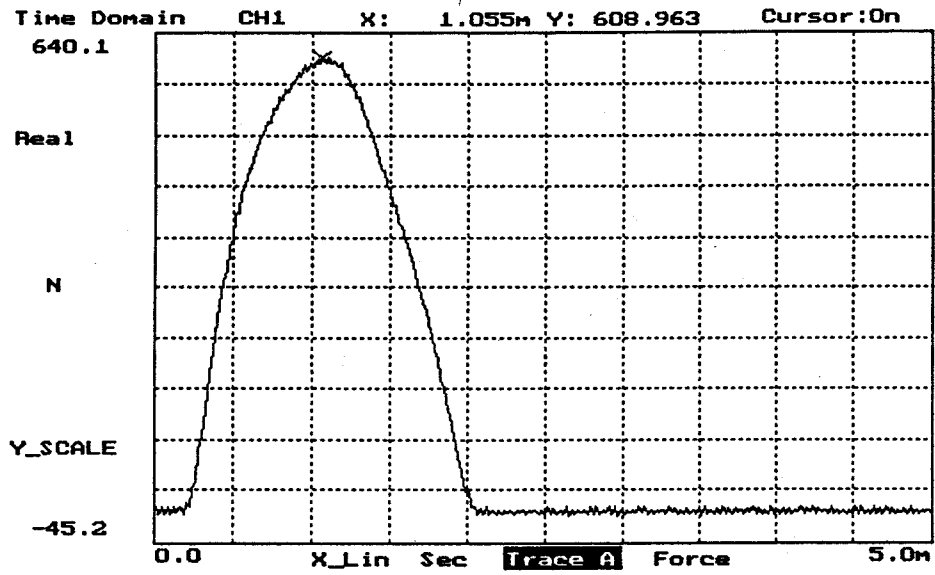


(一)、衝頭223gw；衝頭速度2.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

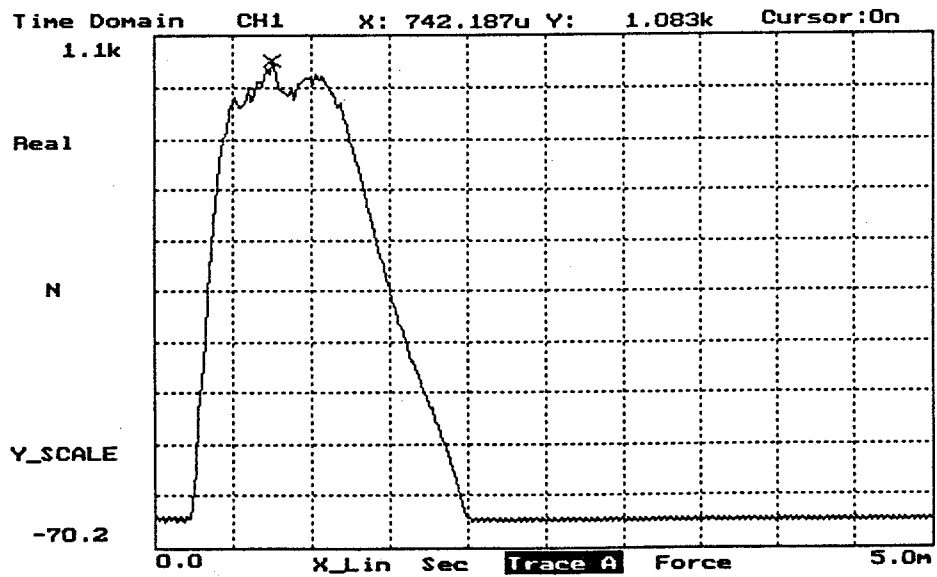


(二)、衝頭223gw；衝頭速度3.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

圖 13. 雙曲殼(0⁰₂ / 90⁰₂)₂₂ 簡支邊界衝擊實驗衝擊力歷時圖

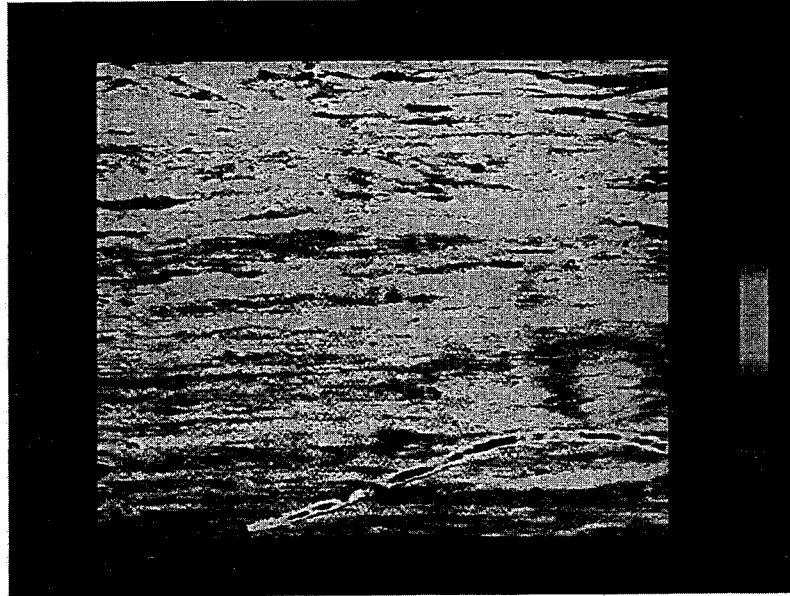


(一)、衝頭223gw；衝頭速度2.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

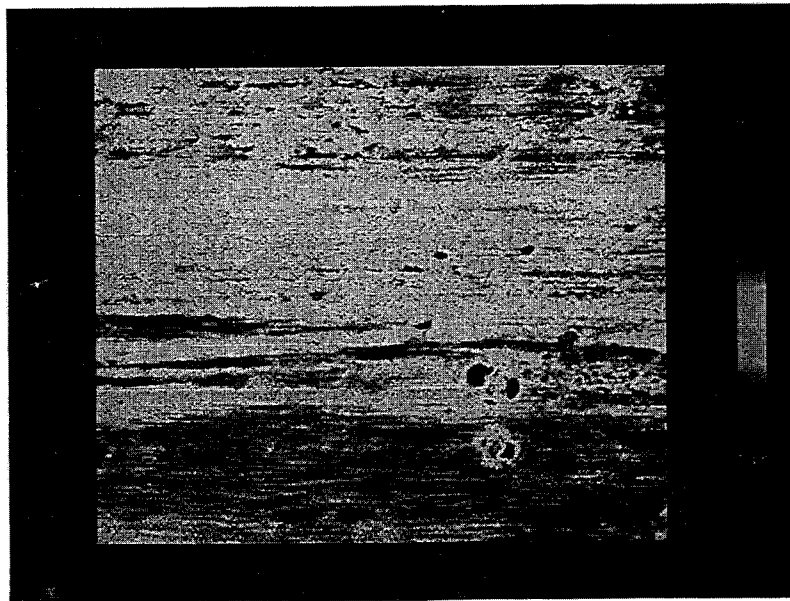


(二)、衝頭223gw；衝頭速度4.0 m /sec；衝擊力(牛頓)

圖14. 淺帽殼固定邊界衝擊實驗衝擊力歷時圖

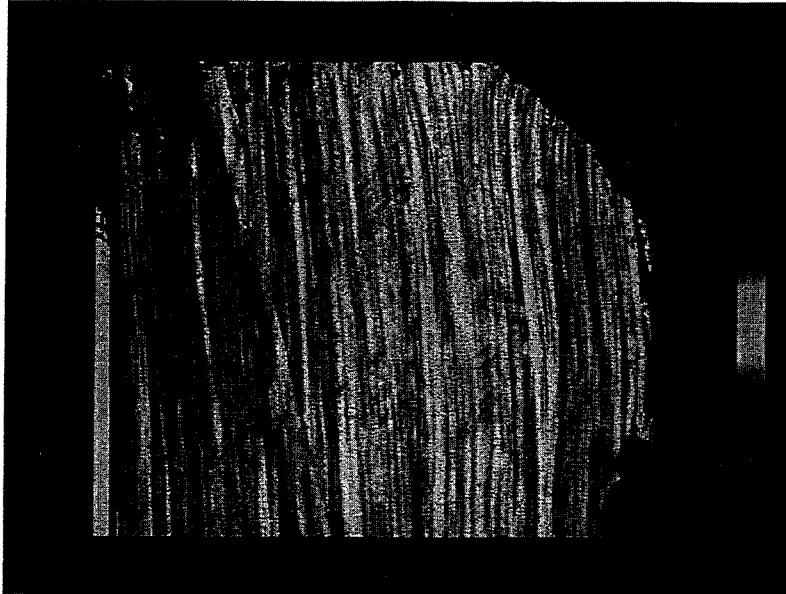


方板($0^0_6 / 90^0_6 / 0^0_6$)

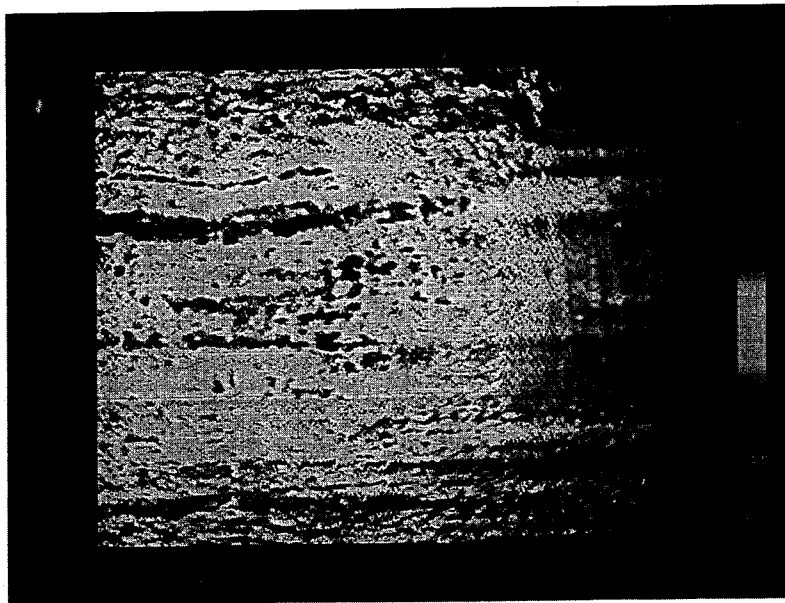


方板($0^0_3 / 90^0_2 / 0^0_3 / 90^0_2$)_{AS}

圖 15. 平板試片超音波描檢測情形(一)



方板($0^0_2 / 45^0_3 / 0^0_2 / -45^0_3 / 0^0_2$)_S



雙曲殼($0^0_9 / 90^0_9 / 0^0_9$)

圖 16. 板與殼試片超音波描檢情形(二)