

第一章、序言

1-1 研究背景

複合材料的應用已有數十年的歷史，人們利用不同的材料特性組合，希望達到一些單一材料無法達到的性質或功用：如鋼筋混凝土的組合就是結合混凝土的超高耐壓性及鋼筋良好的抗拉性，而達到支撐強大的建築物結構重量並提供地震等天災時抗震韌性的要求。

隨著各種需求不斷增加，一種既強韌又輕巧的複合材料的需求便顯得非常殷切。利用環氧樹脂（Epoxy）為基材與碳纖維（Carbon Fiber）為加強材的組合在諸多的複合材料中受到了相當程度的重視與應用，舉凡航空、太空、交通、結構等都會發現它的存在，近年更發展於運動用品如球桿、球拍、腳踏車等民生休閒產業中。

複合材料的定義依據藤井太一[1]等人的說法是「將兩種以上的材料組合成形，有別於單獨素材所不能發揮性質的材料」。甚至具體而言，「隔離素材而具有明瞭的介面，至少兩種不同化學物質所組合成之物」。

根據國內學者蘇品書[2]對複合材料所下的定義為「組合兩種以上的材料，作成有用的新材料或特殊的材料特性」。在其書中更將複合材料依形式分成纖維複合材料、粒子複合材料、積層複合材料、片狀複合材料及充填/骨架複合材料，其中應用最多最廣、也最重要的是纖維複合材料。

根據 Gibson[3]的專書上的說法，複合材料與單一材料最大的不同處是

單一材料為均質性的，基本上可視為無方向性，理論上無論由那一個方向施作用力都可得到相同的機械性質（如應力、應變等）；而複合材料因基材與加強材的強度與機械性皆有很大的差異，故其方向性是非常明顯的，亦即其為非等向性材料。利用複合材料的非等向性的特性，我們可以設計層板不同角度的堆疊以產生不同的機械性來達到各種強度的需求，複合材料強度的計算與各層板間應力的預測就成為非常重要的課題。

複合材料的層板一旦熱壓成型後即很難對各層的破壞形式及破壞強度作直接的觀察，只能靠預測的方式來推論其強度，所以許多研究複合材料的專家學者一直致力於找到一種最佳方式或模組來準確的計算或預測層板的力學性質，在諸多的實驗法中，利用缺口來進行分析是相當有效且方便的作法，因為諸多的研究發現複合材料對缺口的敏感度非常高，故本論文將利用此種方式針對不同疊層的複合材料板進行機械性質分析，配合 Hill-Tsai[4]等經典的複合材料理論進行層板計算與預測，並比較缺口有無對層板各種機械性質的影響。終結言之，本實驗將針對下列幾個方向切入研究：

首先將比較不同疊層形態及堆疊方法所製成層板拉伸強度的不同。其次、利用試片上裂紋缺口之有無作層板拉伸強度上的探討。接著、用 Hill-Tsai 等經典的破壞理論計算各種疊層的破壞強度，並與實驗數值作比較。再則、計算出各疊層複材板的破壞韌度 K_Q 值及 0 度板上的破壞韌度 K_Q^0 ，作為預測

含 0 度板之疊層板破壞強度的工具。最後、藉由 X 光顯相攝影圖來觀察分析破壞區在不同層板上的影響。

複合材料的分類根據加強材的不同可以簡單分成粒子分散形與纖維形兩大類，纖維形又可成長纖與短纖兩種，本實驗將採用長纖碳纖維複合材料板作為實驗與研究的對象。

1-2 文獻回顧

根據國內學者許明發等人[5]的專書提到，碳纖維具有良好的勁度與強度、其膨脹係數低、對應力腐蝕的抵抗性亦佳，故結合環氧樹脂製作成複合材料可以得到高穩定性、高強度、高抗疲勞性的材料，加上其重量遠低於相同體積的金屬材料，故碳纖維/環氧樹脂複合材料便成為廣被使用的複合材料。

在藤井太一[1]及小林英男[6]的專書上提到了破壞力學上的一些機制。破壞是在材料本身具有缺陷的地方發生應力集中，而由此處發展而致斷裂，這樣的線性破壞力學（Linear Fracture Mechanics）是以 Griffith 的脆性破壞理論為出發點的。

新裂紋表面被形成時，物體所儲存的應變能中被釋放的能量若比表面能量（為形成新裂紋所需的能量）還大時，則裂紋即會發展，若以 G 來表示能量釋放率（Energy Release Rate）、 r 來表示每單位面積的表面能、 a 為裂紋長度的一半、 σ 為遠端應力、 E 為材料的楊氏係數，則 Griffith 的破壞

方程式即可表現成

$$G = \frac{\pi a \sigma^2}{E} > 2r \quad (1-1)$$

，依據以上方程式的考量來說脆性破壞。

書中亦提到應力強度因子K的應用，基於線性彈性理論，定義裂紋前端的應力場以K來表示，當有限寬度試片的 K_I 值被定義為：

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1-2)$$

其中 σ 表示遠距應力、 a 表示裂紋長度之半、 w 表有限寬度試片的寬、 $F(a/w)$ 為形狀修正係數，若假設破壞時的應力強度因子為 K_C ，凡是符合

$$K \geq K_C \quad (1-3)$$

即表示材料破壞，且並力強度因子 K 與能量釋放率 G 之間被證明有 1 對 1 的對應關係，表示 (1-1) 與 (1-3) 的破壞條件是等價的。

另外，對於非線性彈性體與延性材料，目前以採用 J 積分的方式來分析最為常用，J 積分根據 Rice 的定義為

$$J = \int_T \left(W dy - \vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds \right) \quad (1-4)$$

其中 W 是某點 (x, y) 的應變能密度、 \vec{T} 是路徑上外法線上的表面力向量、 \vec{u} 是位移向量。若假設破壞時的 J 積分以 J_C 表示，凡是符合

$$J \geq J_C \quad (1-5)$$

即可表示破壞。經過驗證，對於線性彈性體而言， J 積分與應力強度 K 之間亦存在有1對1的對應關係。

在Vaidya等人[7]、M. T. Kortschot等人[8, 9, 10]及Madhukar等人 [11]的論文中提到複合材料對於缺口是相當敏感的，利用缺口造成層板破壞區的大小可以決定層板強度與應力大小。諸如 $[90_n/0_n/90_n/0_n/90_n]$ 這一類的十字層疊法疊層，因為0度層被拘束在90度層之內，比0度層在外面的層板提供了更多的拘束。破壞區發生在0度與90度中各自沿纖維方向的基材破壞，最後的破壞是因為0度纖維被拉斷所形成的。當 $n=1, 2$ 這種較小厚度時，層板的破壞是因為裂紋尖端應力集中造成0度層纖維破壞所致；而當 $n=3, 4, \dots$ 這種厚度較大的疊層時，層板的破壞則是由於自由端引起纖維破壞所致，此時的破壞是由於離軸向基材破裂、裂紋尖端破裂及軸向剝離等因素造成。兩種破壞發生時的破壞區都非常的明顯。對於無裂紋的層板來說，無裂紋的層板厚度對於試片的強度並無明顯的影響；但是對於有裂紋的層板來說，厚度愈厚則其強度會愈增加，其破壞的模式也會隨著厚度的增加由裂紋集中破壞轉變成自由邊破壞，顯見層板的厚度效應對此

種十字形疊層強度影響是很大的。

在 $[0_n/90_n]_S$ 的層板中，0度層在試片的外面，由於較缺乏拘束效應，致使0度層的基材更容易沿著纖維方向發生破壞或剝離。當n的值愈大，即同一層反覆的次數愈多，則0度層沿纖維方向發生剝離的長度愈大，此時層板的強度也愈接近它的淨截面強度。最後的破壞是由靠近裂紋尖端的0度層纖維破壞開始的。這種疊層的破壞會因為0度與90度界面的脫層發生而誘生（即自由端破壞），這與n值小時是截然不同的。

若針對具有裂紋的 $[0_2/90_2]_S$ 及 $[0_2/90_2]_{2S}$ 兩種疊層作比較， $[0_2/90_2]_S$ 比 $[0_2/90_2]_{2S}$ 具有更大的韌性，其強度也愈接近淨截面強度。解釋這種現象我們可以歸因為靠近90度層的內部0度層受到90度層拘束效應的作用而抑制了這些內部0度層沿纖維方向剝離發生的可能，致使大量的應力集中於內部0度層，造成內外0度層受力不均勻的現象，與單純0度層在表面上的層板比較起來，這種內部具有0度層的層板在破壞強度上是較弱的。

根據 Vaidya 等人[12]論文中提到，對於破壞區成長的描繪以及裂紋尖端破壞力學的研究是非常重要的課題，在複合材料的拉伸試驗中負荷與應變是線性關係，這是傳統纖維支配複材層板強度的關係。

根據論文中的結論我們會發現幾個現象。首先，當負載很小時試片因為會彈性變形而無破壞發生，但是當到達臨界負荷時，每一層在缺口末端會沿纖維方向產生破壞，隨著負荷的增加，破壞會發展成層間的破壞，最

後是 0° 方向的纖維被拉斷破壞，代表試片完全破壞，故定義最終破壞為 0° 方向纖維破壞。

其次，層板的厚度在無缺口的條件下對於強度影響不大；但對於有缺口的層板強度影響就很大，通常層板的厚度增加其強度會增加。Cross-Ply 層板的淨截面應力 (Net-section strength) 根據 Vaidya 等人[7]的論文中提到：

$$\sigma_N^\infty = \sigma_{UTS} [1 - (2a/w)] \quad (1-6)$$

其中 σ_{UTS} 表示最大應力 (Ultimate Strength)、 $2a$ 表示裂縫的長度、 w 表示試片的寬度。根據上式及參考可知 $(2a/w)$ 愈大則 σ_N^∞ 愈小。

準等向性疊層板 (Quasi-Isotropic) 的強度受到層板破裂強度 (Laminate fracture toughness) K_Q 影響最大。有關層板破裂強度 K_Q 在 Vaidya 等人[7]、Raiesh 等人[12]及 Sankar[13]的論文中討論甚多，對於 K_Q 的定義為

$$K_Q = Y\sigma_f\sqrt{\pi a} \quad (1-7)$$

其中 σ_f 為遠距實際破壞應力 (Remote applied stress)、 a 為裂口長度的一半、 $Y = 1 + 0.1282(2a/W) - 0.2881(2a/W)^2 + 1.5254(2a/W)^3$ 稱為試片有限寬度的修正計算係數 (Correction factor to account for the finite width of the specimen)。要注意這個 K_Q 值在等向材料中並不適用，僅適用於如複合材料這種非等向性材料；又 K_Q 值受到 0-deg 層板纖維破壞的影響最大。

根據層理論簡單的應力分析可以定義兩個破壞應力之相關係數 (Factor relating the two stress)

$$\eta = \frac{\sigma_f^0}{\sigma_f} \quad (1-8)$$

其中 σ_f 為遠距實際破壞應力 (Remote applied stress)、 σ_f^0 為 0 度板的遠距實際破壞應力 (Remote applied stress in the 0-deg ply)。將 (1-8) 式代入 (1-7) 式中可得

$$\sigma_f^0 = \eta \left(\frac{K_Q}{Y\sqrt{\pi a}} \right), \text{ 則 } Y\sigma_f^0\sqrt{\pi a} = \eta K_Q, \text{ 故可以定義出}$$

$$K_Q^0 = \eta K_Q \quad (1-9)$$

根據上式的結果知道若 0 度層板的負荷持續加到臨界值 K_Q^0 時則複材板即發生破壞。

在 Wisnom 等人 [14] 的論文中主要是利用不同層板的堆疊出不同厚度，研究拉伸試驗後斷裂面上的破壞形式。此試驗的試片的材質是利用 Hexcel IM7/8552 預浸材，厚度為 0.125mm，試片受力方向為 0° 方向的拉力。若中央孔洞的直徑為 d ，則試片尺寸寬度 $w/d=5$ 、試片長度 $l/d=20$ ，最基本的試片尺寸為 1mm 厚、16mm 寬、測試長度為 64mm、孔的直徑為 3.175mm，每次以 2 倍的倍率放大，直到最大 8 倍為止。

拉伸試驗機測試的位移速度在孔徑分別為 3.175mm、6.35mm、12.7mm 及 25.4mm 時分別為 0.5、1、2 及 4mm/min。

本論文所呈現的重要結論如下。首先，層板的堆疊形式可以分成 sublaminates 及 ply-level 兩種，用來作為層板堆疊的模式是 $[45_m/90_m/-45_m/0_m]_{ns}$ 。增加 m 即為增加每個方向薄板重覆的數目，即稱為 ply-level；增加 n 是增加層板對稱次數、而層板皆只堆一次，即為 sublaminates-level，兩種方法皆能造成複材板厚度增加。

缺口拉伸試驗是在研究複合材料中非常重要的一項實驗，其中孔洞的直徑與層板的厚度對於應力強度的影響最為明顯。與有裂紋的層板相同，破壞順序為 90° 板先破壞，而後是 45° 板沿三角形區域破壞，最後是 0° 板的破壞。

其次，試驗結果發現在 sublaminates-level 板中厚度的增加使強度變低 ($570 > 476$ MPa，減少 17%)，相同厚度之下孔徑愈大則強度也是變得愈小 ($478 > 331$ ，降低 31%)。在 ply-level 板中厚度的增加使得強度明顯變低 ($570 > 202$ ，降低 65%)，相同厚度下孔徑愈大則強度反而愈增 ($275 > 417$ ，上升 52%)。

為何在 ply-level 板中孔徑愈小反而複材板的強度愈小？根據 Salpekar 等人[15]論文中的說明為小孔的三角形區域容易形成、破裂面容易開始成長，而大孔的三角形區域發展完成較費時、破裂面的成長較為延緩。

在Daniel等人[16]的專書中清楚的說明複合材料板上開有圓孔或裂紋時的應力集中情形在裂紋與圓孔的尖端處最為明顯，並延續公式(1-2)對 K_Q 的研究而定義出 K_σ ，使得

$$K_Q = \frac{\bar{\sigma}_{\max}}{\bar{\sigma}_0} = 1 + \sqrt{2\left[\frac{\bar{E}_X}{\bar{E}_Y} - \bar{\nu}_{12}\right] + \frac{\bar{E}_X}{\bar{G}_{XY}}} \quad (1-10)$$

其中 $\bar{\sigma}_0$ 是實際遠距平均應力 (applied far-field average stress)、 $\bar{\sigma}_{\max}$ 是圓孔範圍最大周邊應力 (maximum circumferential stress on hole boundary)、 \bar{E}_X, \bar{E}_Y 是X軸及Y軸的平均楊氏係數 (average Young's moduli in the x- and y-directions)、 \bar{G}_{XY} 是平均剪割係數 (average shear modulus)、 $\bar{\nu}_{XY}$ 則是平均普松比 (average Poisson's ratio)。 K_σ 愈大則複材板因圓孔或裂紋所生的應力集中則愈明顯。

圓孔所造成的應力集中效應分佈及裂紋所造成的應力集中效應分佈請見圖 1.1。

在 Soriano 等人[17]的論文中採用了平均應力理論 (Average Stress Criterion)、馬林理論 (Mar-Lin Criterion) 及修正馬林理論 (Modify Mar-Lin Criterion) 三種方法來對不同直徑的圓孔進行破壞強度的預測，發現實測值與預測的結果相近，隨著孔徑的增加，[0n/45n]m 的層板之破壞強度亦隨之降低。

Lagace 等人[18]認為，藉由各層的破壞模式的分析與瞭解，是研究複合

材料層板強度與機械性質最佳的方法，這也正是本論文研究的主要動機來源。



第二章、複合材料層板的製程與測試

2-1 複合材料層板製作程序

本次實驗所用的預浸材是高雄明安國際企業有限公司提供的 CFA-05624E19，在此先行感謝。

為保持預浸材的品質，平時必須將其存放於冷凍櫃中保持約零下 10°C 的低溫，取出裁切完後應即立刻放回冷棟櫃。備料尺寸為 30cm×30cm。預浸材的背面有一層保護紙，待各層貼合後才將保護紙撕掉，每貼完一層必須先用滾輪滾平將氣泡滾出，滾輪的滾動方向為沿纖維方向，而後才撕開保護紙繼續貼合直到全部完成。

預浸材依所需角度依序疊好後即應再準備小棉布、離形布等吸收多餘樹脂或排膠用的材料。

小棉布為白色，主要功能是吸膠，它的數量與預浸材層板層數相同，均分成兩半放在疊好層板的兩側，備料尺寸為 320mm×320mm。離形布為土黃色，型號為 T1040，功能為使膠均勻滲出，備料尺寸為 320mm×320mm。真空袋為 PET 膠膜，蓋在最上層並以矽膠帶密封確保加熱過程維持真空，備料尺寸為 460mm×360mm。透明玻璃紙鋪在烤盤最底面以防漏膠，備料尺寸為 400mm×340mm。

烤盤配置時將以上各種備料由最上方開始算起依序（以 8 層複材板為例）為真空袋 1 層、鐵製蓋板、小棉布 4 層、離形布 1 層、預浸材層板 8

層、離形布 1 層、小棉布 4 層、玻璃紙 1 層、最下面是烤盤，最上層的真
空袋應使用矽膠帶將所有備料密封於烤盤上，鎖上真空嘴後進行測試以防
漏氣，真空嘴下方應加墊一塊小棉布以吸收多餘的膠而不致堵塞真空嘴。

烤盤封好真空袋並作過漏氣測試後即可將烤盤送上加熱平台，熱壓過
程中必須配合抽真空以維持品質。熱壓機壓力設定為 13.6kg/cm^2 (16Psi)。

機台壓穩後先行加熱到 100°C 恆溫 40 分鐘，再升溫至 150°C 恆溫 50 分
鐘，而後在定壓下使其逐漸冷卻到常溫以去除殘留熱應力，最後完成複材
板的熱壓製程。熱壓機設備圖如圖 2.1 所示；複合材料板加熱流程如圖 2.2
所示。

2-2 基本數據測試用試片的製備

將製備好的複合材料層板先利用切割機裁出試片，試片之尺寸為
 $200\text{mm}\times 15\text{mm}$ ，扣除兩端 End-Tape 的長度後之長度為 120mm，若有需要測
量應變則必須黏貼應變規，若只測破壞應力則可直接夾上拉伸試驗機作測
試。

本研究所用的應變規是 VISHAY 公司的產品，型號為 EA-13-240LZ
-120/E 單軸式應變規，電阻值為 $120\Omega\pm 0.3\%$ ，放大因子為 $2.1\pm 0.5\%$ ，而用
以黏結應變規的黏著劑亦為 VISHAY 公司生產的 M-Bond 200 型。應變規黏
貼前應先於試片上求出中心位置，再在應變規背面塗上催化劑，等待 1 分
鐘乾燥後塗上 M-Bond 200 黏著劑後以手指推平約等 5 分鐘始可牢固於試片

上，而後以焊槍焊上電線，始完成試片的製備。試片規格如圖 2.4 所示。

拉伸試驗機為 MTS-810 System，測試時的相關諸元為：拉伸速率為 0.012mm/sec (每秒 10^{-4} 的應變量 $\times 120\text{mm}$)，讀取點數為 1point/sec (試片強度較弱、如 90 度方向的測試時取 10point/sec)，夾頭夾持力為 900KN (試片強度較弱、如 90 度方向的測試時取 500KN)，最大拉伸力取 100KN (試片較弱、如 90 度方向的測試時取 10KN)。

若只測量破壞應力，可以直接由 MTS-810 System 的電腦中讀得數據，即可算得破壞應力。若必須測應變，則必須將試片上應變規的電線接在惠斯同電橋上，惠斯同電橋接到信號放大器 VISHAY 2210B 上，一方面輸入 3 伏特的電壓進入惠斯同電橋、一方面接收輸出電壓，根據輸出電壓值即可代下列公式算得應變值。

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{out}}}{4V_{\text{in}} \times g_S \times G_{\text{ain}}} \quad (2-1)$$

其中 V_{out} 是電腦得到的電壓值、假設是 10 伏特， V_{in} 是輸入惠斯同電橋的電壓、固定為 3 伏特， g_S 是應變規上給的常數、包裝上設定為 2.1105， G_{ain} 是放大器的放大率、定為 100，故可算得應變值為 0.00395。拉伸試驗機的工作示意圖如圖 2.3 所示。

為避免試片被 MTS 夾頭強大的夾持力夾傷或破壞，試片的兩端正反面皆應貼上 End-Tape 作為保護。黏貼前應將 End-Tape 前緣磨出一約 30 度的

斜面，使拉伸時力量仍能順利作用在試片上，而不致於集中在 N-Tape 與試片黏貼的界面處產生應力集中。作為黏貼劑的是以環氧樹脂為主要成份的 A、B 膠，黏合後必須加壓保持約 8 小時以確保其完全黏合不致脫落。

2-3 具缺口試片的製備

將熱壓好的各種不同疊層複合材料板裁切成 254mm×38.1mm (10"×1.5") 的試片，兩端 End-Tape 的長度亦為 40mm，扣除 End-Tape 後的試片長為 174mm。缺口的製作先在試片中心點鑽出一直徑 3mm 的小圓孔，根據郭文雄等人[19]所著的專書提到，複合材料板在做鑽孔加工時會因進刀速度、刀具轉速及進刀施力等因素造成脫層現象，故於鑽孔時應注意進刀慢、轉速不可過快及進刀施力小等幾個條件。鑽孔完成後利用美國 OMAX-2652 水刀加工機(感謝台北祥焜工業公司代工)切割出一長 14mm、寬度 1mm 的槽，而後利用德國 C & J 公司出品的 00 號線鋸在槽兩端加工出寬 0.2mm、長 0.5mm 的小缺口，即完成試片的備料。具缺口試片規格如圖 2.5 所示；水刀加工機如圖 2.6 所示；水刀水柱切削複合材料板如圖 2.7 所示。

拉伸試驗用的設備與作法與求作基本數據實驗時相同，拉伸速率改為 0.0254mm/sec (每秒 10^{-4} 的應變量×254mm)，讀取點數為 1point/sec，夾頭夾持力為 900KN，最大拉伸力取 100KN。

第三章、實驗數據成果呈現

3-1 CFA-05624E19 基本機械性質

本實驗利用MTS810 拉伸試驗機作拉伸試驗到破壞，將製備好的 $[0]_8$ 及 $[45/-45]_s$ 兩塊複材板進行拉伸實驗後得到的相關基本數據。

試片 $[0]_8$ 的應力應變圖如圖 3.1 所示，應力時間圖如圖 3.2 所示，應變時間圖如圖 3.3 所示。試片 $[90]_8$ 的應力應變圖如圖 3.4 所示，應力時間圖如圖 3.5 所示。試片 $[45/-45]_s$ 的應力應變圖如圖 3.6 所示，應力時間圖如圖 3.7 所示，應變時間圖如圖 3.8 所示。根據上列試片的拉伸試驗結果可以得到本次實驗所用的碳纖維/環氧樹脂CFA-05624E19 的相關機械性質如表 3.1 所示。

3-2 各種疊層無裂紋試片拉伸試驗數據的比較

本實驗雖主要研究裂紋對複材層板的應力及破壞影響，但針對不同疊層方式的複材層板亦將加以比較分析，期望可以得到更廣泛的實驗結果。我們將利用兩種基本疊層形式、包含十字疊法（Cross-ply）與準等向性疊法（Quasi-isotropic）各四種不同疊層、共八種不同的層板，分別是 $[0/90]_{2s}$ 、 $[0_2/90_2]_s$ 、 $[90/0]_{2s}$ 、 $[90_2/0_2]_s$ 、 $[0/\pm 45/90]_{2s}$ 、 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 、 $[90/\pm 45/0]_{2s}$ 及 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$ 來作比較。

在無裂紋的情形下 $[0/90]_{2s}$ 的應力時間圖如圖 3.9 所示， $[0_2/90_2]_s$ 的應力

時間圖如圖 3.10 所示， $[90/0]_{2S}$ 的應力時間圖如圖 3.11 所示， $[90_2/0_2]_S$ 的應力時間圖如圖 3.12 所示， $[0/\pm 45/90]_{2S}$ 的應力時間圖如圖 3.13 所示， $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 的應力時間圖如圖 3.14 所示， $[90/\pm 45/0]_{2S}$ 的應力時間圖如圖 3.15 所示， $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 的應力時間圖如圖 3.16 所示。

我們將這八種不同疊層的破壞應力值列表如表 3.2。依照破壞強度值的比較可以得到兩個的結論：

第一、明顯的看出來，十字形疊法層板之破壞強度是高出準等向性疊法層板許多的，若將兩種不同堆疊形式破壞應力平均值作比較，十字疊的平均破壞應力是 1220MPa、準等向性疊層的平均值為 676MPa，二者相比會發現十字疊層的破壞強度約為準等向性疊層的 1.8 倍。

第二、在沒有裂紋的試片中，同一種堆疊形式下不同堆疊方法所得到的破壞強度並無太大的不同。以十字形疊法來說，將 0 度層放在最外面（如 $[0/90]_{2S}$ ）跟將 0 度層放在最裡面（如 $[90/0]_{2S}$ ）的破壞強度相差不大；又不同角度層板依序疊（如 $[0/90]_{2S}$ ）與同一角度連續疊兩次（如 $[0_2/90_2]_S$ ）所得的強度也相差不大。這在準等向性層板中也可以得到相同的結果。

3-3 利用 Hill-Tsai 破壞理論進行層板破壞應力之預測

在諸多層板破壞理論中，Hill-Tsai 是最常用的預測方式之一，在 Gibson[20]的專書與 Sun[21]的論文中對 Hill-Tsai 破壞理論的求作有詳細的介紹。本研究將針對上述兩種疊層之複材層板進行各層破壞應力的預測，

並將與實際破壞應力作比較。

其次針對 $[0/\pm 45/90]_{2S}$ 等四個準等向性層板進行分析。首先將 $E_1 = 138\text{GPa}$ 、 $E_2 = 8.5\text{GPa}$ 、 $G_{12} = 7.3\text{GPa}$ 、 $\nu_{12} = 0.44$ 、 $X = 1530\text{MPa}$ 、 $Y = 20\text{MPa}$ 、 $S = 53\text{MPa}$ 代入Hill-Tsai公式：

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)\left(\frac{\sigma_{22}}{X}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (3-1)$$

計算得各層破壞應力 σ_X 值分別為 $\sigma_{X90} = 298\text{MPa}$ 、 $\sigma_{X\pm 45} = 388\text{MPa}$ 、 $\sigma_{X0} = 758\text{MPa}$ 。

由以上數據可得知 90° 的層板是第一層破壞，其破壞應力為 298MPa ； $\pm 45^\circ$ 的層板是第二層破壞，其破壞應力為 388MPa ；最後破壞是 0° 的層板，其破壞應力為 758MPa 。 90 及 ± 45 層板的破壞是肇因於基材環氧樹脂的破壞，而 0 層板的最終破壞則為纖維拉斷的破壞，故 758MPa 即可視為此試片的破壞強度。

分別將各個準等向性疊層板的實際拉伸強度與利用Hill-Tsai破壞理論所計算出的預測值加以比較，其結果如表3.3所示。

最後針對 $[0/90]_{2S}$ 等四個十字形疊層板進行Hill-Tsai的預測，分別算得各層破壞強度 σ_X 值分別為 $\sigma_{X90} = 179\text{MPa}$ 、 $\sigma_{X0} = 834\text{MPa}$ 。將四種十字形疊層板的實際破壞應力與預測值相比如表3.4所示。

八種層板的實際破壞應力與利用Hill-Tsai破壞理論預測的表較如圖

3.17 所示。

3-4 利用 Tsai-Wu 破壞理論進行層板破壞應力之預測

Tsai-Wu 破壞理論是預測層板破壞時另一個常用的方法，在 Gibson[20] 的專書與 Sun[21]的論文中對 Tsai-Wu 破壞理論的求作亦有詳細的介紹。其計算公式為

$$\sigma_1 \left(\frac{1}{X} + \frac{1}{X'} \right) + \sigma_2 \left(\frac{1}{Y} + \frac{1}{Y'} \right) + \left(-\frac{1}{XX'} \right) \sigma_1^2 + \left(-\frac{1}{YY'} \right) \sigma_2^2 + \left(\frac{1}{XX'} \right) \sigma_1 \sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (3-2)$$

我們將各種基本數據代入 Tsai-Wu 破壞公式中進行計算，首先對準等向性層板進行分析。計算得各層破壞應力 σ_X 值分別為 $\sigma_{X90} = 291\text{MPa}$ 、 $\sigma_{X\pm 45} = 366\text{MPa}$ 、 $\sigma_{X0} = 508\text{MPa}$ 。準等向性層板的 Tsai-Wu 預測值與實測值的比較如表 3.5 所示。

接著利用 Tsai-Wu 對十字形疊層板進行計算，得到 $\sigma_{X90} = 182\text{MPa}$ 、 $\sigma_{X0} = 921\text{MPa}$ 。十字形疊層板的 Tsai-Wu 預測值與實測值的比較如表 3.6 所示。

八種層板的實際破壞應力與利用 Tsai-Wu 破壞理論預測的表較如圖 3.18 所示。

3-5 各種疊層有裂紋試片拉伸試驗數據的成果

將八種不同疊層的試片加工出裂紋後在MTS進行拉伸試驗，在有裂紋的情形下 $[0/90]_{2S}$ 的應力時間圖如圖 3.19 所示， $[0_2/90_2]_S$ 的應力時間圖如圖 3.20 所示， $[90/0]_{2S}$ 的應力時間圖如圖 3.21 所示， $[90_2/0_2]_S$ 的應力時間圖如圖 3.22 所示， $[0/\pm 45/90]_{2S}$ 的應力時間圖如圖 3.23 所示， $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 的應力時間圖如圖 3.24 所示， $[90/\pm 45/0]_{2S}$ 的應力時間圖如圖 3.25 所示， $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 的應力時間圖如圖 3.26 所示。

而此八種不同疊層的具裂紋破壞形式，十字疊法的四種疊層如圖 3.27~圖 3.30 所示，準等向性的四種疊層如圖 3.31~圖 3.34 所示。其破壞強度的比較可以由表 3.7 中看出。

3-6 各種疊層有裂紋試片 X 光顯像圖試驗

將各種疊層的試片利用MTS拉伸試驗機拉到最大破壞應力的 90%後，先在試片裂紋周圍塗上 1,1,2,2-四溴乙烷 ($C_2H_2Br_4$ ，1,1,2,2-Tetrabromoethane) 作為顯影劑，放置約 15 分鐘後，放在X光機下作顯影，其輻射強度用 25KV、照射時間約 1 分 10 秒左右，可得各試片的破壞區影像顯影圖。 $[0/90]_{2S}$ 的破壞區X光顯像圖如圖 3.35 所示、 $[0_2/90_2]_S$ 的破壞區X光顯像圖如圖 3.36 所示、 $[90/0]_{2S}$ 的破壞區X光顯像圖如圖 3.37 所示、 $[90_2/0_2]_S$ 的破壞區X光顯像圖如圖 3.38 所示、 $[0/\pm 45/90]_{2S}$ 的破壞區X光顯像圖如圖 3.39 所示、 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 的破壞區X光顯像圖如圖 3.40 所示、 $[90/\pm 45/0]_{2S}$ 的破壞區X光顯像圖如圖 3.41 所示、 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 的破壞區X光顯像圖如圖

3.42 所示及 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 破壞應力 98%的破壞區X光顯像圖如圖 3.43 所示。

因為準等向性層板破壞區不明顯，為求清楚表現，將其各圖作放阿詳圖來表現。圖 3.44 為 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 破壞應力 98%的破壞區X光顯像放大圖，圖 3.45 為 $[0/\pm 45/90]_{2S}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像放大圖，圖 3.46 為 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 破壞應力 95%的破壞區X光顯像放大圖，圖 3.47 為 $[90/\pm 45/0]_{2S}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像放大圖，圖 3.48 為 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 破壞應力 95%的破壞區X光顯像放大圖。

。



第四章、實驗數據的討論與分析

本次實驗共利用八種不同疊層製作出不同複材層板，每種層板製成八支試片，分別進行無裂紋及有裂紋時的拉伸，包含試片寬度、試片厚度、裂紋長度、破壞強度、破壞韌度等相關數據如表 4.1 所示。

4-1 層板破壞的基本研究

具有裂紋的複合材料疊層板在受到拉伸負荷時，由裂紋的尖端會發展出破壞區，破壞區是由於非負荷軸向上的基材裂紋、軸向的脫層及剝離等因素所致。根據 Sun 等人[7]、Vaijesh 等人[12]以及 Lee 等人[13]的論文提到，破壞區的大小對於層板的強度具有非常關鍵的影響，因為破壞區代表的是應力釋放的程度，當破壞區愈大表示裂紋尖端的應力集中得到較多的緩解，而使層板 0 度軸上纖維因應力集中破壞的可能降低，致使層板的破壞強度會提高，故層板破壞區的 X 光顯像圖中即可清楚的看出不同疊層破壞區分佈的不同。另外，由 Marissen 等人[22]的論文中可看出，複合材料板的裂紋破壞中纖維強度是主宰強度的主要因素，但破壞區的形式亦是影響層板破壞強度的另一個重要因素。破壞區代表的是缺口層板破壞時能量於缺口尖端釋放的程度，能量釋放的愈大則層板的強度愈高，這與上述的結果都是相符合的。破壞區成長的機制是由於纖維與層板間應力的轉移是由作為基底材的樹脂來負責傳遞的，裂紋端的應力在傳遞到層板時會轉化成剪

應力，相較於纖維，作為基底材的樹脂之抗剪強度是相對低很多的，故這些剪力會集中在基底，而加速基底發生剝離或裂紋破壞，終而產生破壞區。

由第三章的實驗數據中得知，試片有裂紋時破壞強度十字形疊層板比準等向性層板的強度高，針對這個現象我們可以引用上述的結論來作說明。由 X 顯像圖可以看出十字形疊層板的裂紋尖端破壞區範圍比準等向性層板的破壞區明顯大很多，可以說明十字形疊層板裂紋尖端的應力集中因破壞區得到的緩解比準等向性層板多，故表現在破壞強度上可以看出十字形疊層板較高。

利用複合材料應力分析中最重要的[A]、[B]、[D]三個矩陣來作計算，在 Gibson[23]的專書以及 Adams [24]的論文中有詳細的說明其計算方法。各軸向的合成應力 N、合成彎矩 M 與中立面 (mid-plane) 上的應變 ε 及彎曲率 k 之間的關係如下所示：

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (4-1)$$

此次實驗只單純在沿 0 度纖維方向 (X 方向) 上施加拉力，並無彎矩的作用、將各軸向的 M 皆設為 0，故可以得知中立面上的彎曲率 k 為 0，且層板皆為對稱、故[B]=0，公式 (4-1) 即可以寫成

$$\begin{Bmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ 0 & 0 & 0 & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4-2-1)$$

或直接寫成

$$\begin{Bmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{Bmatrix} \quad (4-2-2)$$

轉置矩陣後得到

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \end{Bmatrix} \quad (4-3)$$

利用公式 (4-3) 求得的應變矩陣 $\{\varepsilon\}_{XY}$ 可以求出平面應力矩陣 $\{\sigma\}_{XY}$ 。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{Bmatrix} \quad (4-4)$$

再將 X-Y 平面上的應力轉換成 1-2 向上的應力，可得

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T\sigma] \begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{Bmatrix} \quad [T\sigma] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin 2\theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

在繼續討論有裂紋試片的強度前，我們必須要再確認一個現象，那就是層板的最後破壞是 0 度層纖維的破壞所致，此次實驗用的是同一種預浸材，假設預浸材的品質一致的前提下，兩種疊層的 0 度層板遠距破壞強度 σ_f^0 應該是相同的，即 $\sigma_f^0 |_{cross-ply} = \sigma_f^0 |_{quasi-isotropic}$ 。根據公式 (1-8)

$$\eta = \frac{\sigma_f^0}{\sigma_f}$$

可以將算式寫成

$$\sigma_f = \frac{\sigma_f^0}{\eta} \quad (4-6)$$

由 Vaidya 等人[12]的論文中可以得知，準等向性層板的應力比 η 為 2.58、十字形疊層的 η 為 1.87；在此次實驗中我們算得的數值準等向性層板

的應力比 η 為 2.48、十字形疊層的 η 為 1.86。依此可以推論出十字形疊層的應力比 η 會大於準等向性層板的 η ，將兩種疊層的應力比代入 (4-6) 式

$$\text{後得 } \sigma_f \Big|_{\text{cross-ply}} = \frac{\sigma_f^0}{1.86} > \sigma_f \Big|_{\text{quasi-isotropic}} = \frac{\sigma_f^0}{2.48}, \text{ 即可推論出在具有裂紋}$$

的試片中十字形疊層的破壞強度高於準等向性層板。相關數據可以由表 3.7 及圖 4.10 具裂紋各種層板破壞強度比較圖中看出。

4-2 具裂紋準等向性層板的破壞應力比較分析

在討論準等向性層板強度前先定義比例效應 (Scale Effect)，比例效應亦可稱為規模效應。在 Wisnom[25] 等人的論文中提到比例效應是藉由試片尺度 (寬度、厚度...) 或具影響強度的條件 (缺口尺度) 一定比例連續的變化，討論出試片破壞強度改變的效應。若由土木工程實例來描述，一個土木工程中所含的弱面愈多、愈靠近則表示強度愈低，斷層愈破碎，整體強度愈差；但若是縮小工程的規模，則包含的弱面將相對減少，整體的強度將會提高，這在國內學者徐景祥[26]的論文中可以看到。

在 Wisnom 等人[14]的論文中將準等向性層板的堆疊法分成層板等級 (ply-level) 及次層板等級 (sublaminates-level) 兩種。以 $[0_m/\pm 45_m/90_m]_{ns}$ 的堆疊模式來說，增加 m 的數字、即同一角度層板重覆堆疊，如 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 、 $[0_3/\pm 45_3/90_3]_s$ 、 $[0_4/\pm 45_4/90_4]_s$ 等皆為層板等級的例子；若增加 n 的數字、即增加對稱的次數，如 $[0/\pm 45/90]_{2s}$ 、 $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 、 $[0/\pm 45/90]_{4s}$ 等

即為次層板等級的例子。這兩種堆疊層板的方式皆可增加總厚度。

當準等向性層板的厚度大時缺口強度受到比例效應影響最大，無論是層板等級的層板或次層板等級的層板，當厚度增大其破壞強度都是降低的，又當裂紋的尺度增加破壞強度亦是降低的。這是因為較薄的準等向性層板的破壞區原本不明顯，當層板的厚度逐漸增加時破壞區會轉趨明顯，而這些破壞區是由於 0 度、 θ 度與 90 度界面上的脫層而產生，與單純由於纖維斷裂的機制不同，其破壞應力也比單純纖維的破壞應力小很多。

但是，當層板的厚度不厚時，裂紋尖端出現的破壞區並不明顯，但當負荷逐漸接近破壞應力時即會發生明顯變化。當準等向性層板受拉伸負荷而逐漸接近破壞強度時，在 ± 45 度與 90 度層板間因交互作用的關係，會首先發生破壞裂紋，而後穿透到位於 ± 45 度與 90 度層板外的 0 度層板產生長的劈裂，由裂紋尖端會出現一個三角形的破壞區域，這個三角形破壞區域可以由圖 31~34 的準等向性層板的破壞形式中看出，而後這個三角形破壞區主宰了層板的破壞。

層板等級的層板因每一個角度重覆堆疊，故裂紋尖端的三角形破壞區發展非常容易，當拉伸到非常接近破壞應力時層板會由這個三角破壞區快速發展成層破壞（delamination）而使層板破壞，如圖 3.43 即可看到非常明顯的層破壞區分佈；但若是次層板等級的疊層，每一角度只有一層，因厚度太薄，無法提供足夠的能量發展出完整的三角形破壞區、0 度層發生劈裂

的長度也較短，故次層板等級的層板最後的破壞是因為 0 度層纖維破壞所致，其強度比因三角形破壞區造成層破壞的層板等級要高。由表 3.7 中可以看出破壞強度 $[0/\pm 45/90]_{2S} > [0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 、 $[90/\pm 45/0]_{2S} > [90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 即符合上述所言。相關各疊層 X 光顯像圖的放大詳圖如圖 3.44~3.48 所示。

對於同為層板等級或同為次層板等級的疊法，無論是 0 度層在最外面或 90 度層在最外面，中間仍同樣隔著 ± 45 度的層板，故造成如十字形疊層板中 90 度板對 0 度板造成的拘束效應並不會發生在準等向性層板中，故四種疊層的破壞強度無明顯的不同。

根據實驗數據知不同疊層的破壞強度 $[0/\pm 45/90]_{2S} \doteq [90/\pm 45/0]_{2S}$ 、 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S \doteq ([90_2/\pm 45_2/0_2]_S)$ 。

以上相關數據可由表 3.7 及圖 4.10 中看出。

4-3 具裂紋十字形疊層板的破壞應力比較分析

十字形疊層板的強度受到層板厚度效應 (Effect of Ply Thickness) 及拘束效應 (Constraint Effect) 二者的影響最大，這在 Vaidya 等人[12]的論文中有許多相關的探討。

在討論十字形疊層板裂紋強度前我們先來定義「拘束效應」與「層板厚效應」兩個效應。Pardoen 等人[27]的論文對拘束效應有下了一個定義，此效應是因為粘合層寬度、厚度或疊合順序的變化，影響整個層板應力與應變的效應。Harris 等人[28]的論文對層板厚度效應則有說明，此效應是複

合材料疊層板因堆疊的次數增加而使厚度增加時，造成層板破壞應力等機械性質改變的效應。

首先，我們由厚度效應的影響來討論具裂紋十字形疊層板強度的變化。若將十字形疊的模式設定為 $[90_n/0_n]_S$ 這樣的疊法，當 n 的值由 1 增大到 2 時，亦即同一角度重覆疊 2 次，裂紋端的破壞區會明顯擴大，亦即會有更多的應力集中可以被破壞區釋放。當 n 值更大（如 $n=3、4\dots$ ）則層板的破壞機制將會由裂紋尖端應力集中造成 0 度層纖維拉斷逐漸轉變成自由端層板破壞。自由端的破壞機制不單純由纖維的破壞所造成，是由於大破壞區的形成（而非應力集中於裂紋尖端處）造成纖維與基材間因能量大量釋放的綜合破壞（包含纖維與基材的破壞、以及脫層），故其強度會比單純纖維破壞來的高，亦即當 n 的值愈大、表示疊層的厚度愈厚實破壞強度將會愈高。

在本實驗中疊層的厚度並不厚（ $n=1、2$ ），故受厚度效應影響並不大，反倒是受到破壞區大小、應力釋放效果的影響較大，實驗數據中 $[0_2/90_2]_S$ 高於 $[0/90]_{2S}$ 、及 $[90_2/0_2]_S$ 高於 $[90/0]_{2S}$ 的結果與上述的說明是吻合的。相關數據可由表 3.7 及圖 4.10 中得到。

另外，由於拘束效應的作用，0 度層板是否夾在 90 度層板間對於具裂紋試片的破壞強度亦會產生影響。舉 $[0_2/90_2]_S$ 與 $[0/90]_{2S}$ 來作比較。 $[0_2/90_2]_S$ 的疊層順序是 $[0/0/90/90/90/90/0/0]$ ，0 度層全部皆包在最外面，受拉伸負荷時就由這最外面的四層 0 度層纖維來平均承擔； $[0/90]_{2S}$ 的疊層順序是

[0/90/0/90/90/0/90/0]，內部的 0 度層皆被兩層 90 度層包圍，在受負荷時，內部的 0 度層受到 90 度層拘束效應的影響（90 度層的基材破壞釋放了局部的能量）而抑制了層剝離的成長，致使所有應力大量集中於內部的兩層 0 度層上，造成內外 0 度層板受力不均勻、集中於內部層的現象，故知 $[0_2/90_2]_S$ 比 $[0/90]_{2S}$ 的破壞強度大是可以預知的了。這在 $[90_2/0_2]_S$ 與 $[90/0]_{2S}$ 兩種疊層中亦可同樣的成立。實驗數據 $[0_2/90_2]_S$ 高於 $[0/90]_{2S}$ ，及 $[90_2/0_2]_S$ 高於 $[90/0]_{2S}$ 與上面的敘述完全吻合。相關數據可由表 3.7 及圖 4.10 中得到。

最後針對 0 度層在外（如 $[0/90]_{2S}$ ）與 90 度層在外（如 $[90/0]_{2S}$ ）兩種不同十字形疊層法進行研究。如 $[0/90]_{2S}$ 這種 0 度層在外面的層板受到較少的拘束效應作用，容易產生基材的裂紋與軸向剝離，隨著負荷的增加這些裂紋與軸向剝離會呈倍數明顯的成長，破壞時的強度會接近淨截面應力；而 90 度層在外面的層板提供了較多的拘束效應，破壞區的成長較不明顯。依此可以說明 0 度層在外的十字形層板的強度應該比 90 度層在外的十字形層板強度高。但是本實驗四種試片的厚度並不大，且十字形疊層的主要破壞仍為 0 度層上的纖維，90 度方向的基材的強度與纖維比較起來是弱很多的，故此效應並不明顯，可由表 3.7 中看出，四種不同疊層的具裂紋十字形疊層板實測得到之破壞強度分別為 $[0/90]_{2S}=833\pm 3.7\%$ 、 $[0_2/90_2]_S=1070\pm 5.7\%$ 、 $[90/0]_{2S}=828\pm 7.7\%$ 及 $[90_2/0_2]_S=1166\pm 1.7\%$ ，若考量實驗的誤差值後可以說 $[0/90]_{2S}\doteq [90/0]_{2S}$ 、 $[0_2/90_2]_S\doteq [90_2/0_2]_S$ ，其實並無明顯的差異。

4-4 0 度層板破壞韌度 K_Q^0 的探討

在Vaidya等人[12]論文中提到，凡是具有 0 度層的層板可以利用 0 度層板破壞韌度 K_Q^0 這個數值來描述整個疊層板的強度，凡破壞韌度超過了這個 K_Q^0 值即可定義其發生破壞。根據公式知道

$$K_Q^0 = \eta K_Q \quad (1-8)$$

又根據公式知道破壞韌度與缺口之半及試片有限寬度的比 a/W 以及破壞應力 σ_f 有關，即

$$K_Q = Y \sigma_f \sqrt{\pi a} \quad (1-7)$$

經過實驗後即可計算得各試片的 K_Q 值，進而計算出 K_Q^0 值。本次實驗的 K_Q^0 值詳見表 4.1 及圖 4.3。

先前在 4-1 節中曾提及我們分別計算出十字形疊層板與準等向性疊層的 0 度板遠距應力與實際破壞應力的比 η ，其中十字形疊層板的 $\eta=1.86$ 、準等向性層板的 $\eta=2.48$ 。根據先前的討論可以知道，十字形疊層板中的四種試片的強度都高於準等向性疊層的四種不同疊法試片，故我們首先可以推論 η 的值愈小即表示層板的強度愈大，即層板的應力比 η 與破壞強度是成反比的。

又根據公式(1-2)及(1-4)知 0 度層板的破壞韌度 K_Q^0 與破壞韌度 K_Q 成

正比，而在修正係數 Y 及缺口之半與有限寬度比 a/W 皆為定值的情況下，我們得知影響 K_Q 值的因素即為各個疊層所測得的破壞應力。由表 4.1 中可以得到 $[0/90]_{2S}$ 、 $[90/0]_{2S}$ 、 $[0/\pm 45/90]_{2S}$ 、 $[90/\pm 45/0]_{2S}$ 等四種每種角度皆只堆疊一次的層板其 K_Q^0 值分別為 $248\text{MPa}\sqrt{m}$ 、 $246\text{MPa}\sqrt{m}$ 、 $242\text{MPa}\sqrt{m}$ 、 $237\text{MPa}\sqrt{m}$ ，四個數值都非常相近，最大誤差約為 4.4%，故我們可以推論平均值 $243\text{MPa}\sqrt{m}$ 是一個可以用以推論含 0 度層疊層板破壞強度的機械性質。

但若是研究每一層反覆堆疊層板的 K_Q^0 值，如 $[0_2/90_2]_S$ 、 $[90_2/0_2]_S$ 、 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 及 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 四種疊層板則會發現它們的值並不是落在 $243\text{MPa}\sqrt{m}$ 這個區間。 $[0_2/90_2]_S=321\text{MPa}\sqrt{m}$ 、 $[90_2/0_2]_S=347\text{MPa}\sqrt{m}$ ，二者的值皆偏高許多； $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S=174\text{MPa}\sqrt{m}$ 、 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S=194\text{MPa}\sqrt{m}$ ，二者的值則是偏低。

前面提到本實驗得到一個 K_Q^0 平均值 $243\text{MPa}\sqrt{m}$ ，根據公式 (1-8) 可以推得一個十字形疊層的平均的 K_Q 值為 $131\text{MPa}\sqrt{m}$ ，再代回公式 (1-7) 即可得一個預測的破壞強度 809MPa 。圖4.4為預測的破壞強度與實驗值的比較表，可以看出 $[0/90]_{2S}$ 及 $[90/0]_{2S}$ 兩種層板的實驗值與預測值非常接近，但是 $[0_2/90_2]_S$ 及 $[90_2/0_2]_S$ 兩種層板的實驗值卻高出預測值許多。因為 $[0/90]_{2S}$ 及 $[90/0]_{2S}$ 兩種層板的破壞區很小，破壞機制主要是因為裂紋尖端0度層板上纖維的破壞所造成，故可以符合層板破壞理論的預測。 $[0_2/90_2]_S$ 及 $[90_2/0_2]_S$ 兩種

層板的破壞區非常大，表示有大量的應力被釋放，0度層上的纖維應力集中得到緩解而致使破壞強度提高。

在四種含裂紋準等向性疊層試片中若將 K_Q^0 平均值 $243\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 代入公式 (1-8) 可以推得一個平均的 K_Q 值為 $98\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，再代回公式 (1-7) 即可得一個預測的破壞強度 605MPa 。由圖 4.5 中可以看出 $[0/\pm 45/90]_{2S}$ 與 $[90/\pm 45/00]_{2S}$ 兩種疊層的實驗值與預測值非常接近，因為其破壞區非常小，主要的破壞機制仍為裂紋尖端 0 度層上纖維因應力集中產生破壞來支配的，所以符合層板破壞理論的預測。 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 與 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 兩種層板的破壞機制是脫層，其破壞強度低於纖維破壞強度，故其實驗值會比預測值低。



第五章、總結與未來研究發展

5-1 總結

經由前面幾個章節的實驗數據可知，對於不同層板的基本數據與機械性質已有一個清楚的結論。

首先，同一種疊層方法（十字疊法或準等向性疊法）在未有裂紋的情形下強度並沒有太大的差別，但是若針對兩種不同的疊法作比較會發現十字疊層法的破壞強度是高於準等向性疊法的層板許多的，約為 1.8 倍。

其次，裂紋缺口的有無對於試片的拉伸強度有相當明顯的影響，無論是十字形疊法層板或是準等向性疊層層板都是，在裂紋的試片中，其破壞應力都是降低的。

接著，經由數次的實驗可以證實書本或論文上所提及層板破壞的順序是 90° 層的 Epoxy 最先破壞、其次是有斜角的 θ° 板、最後才是 0° 層的 Fiber 被拉斷而導致完全破壞，這與各種破壞理論的預測是符合的。

再者，在試片厚度不大的情形下，各種不同疊層的破壞大多取決於破壞區的破壞模式及面積的大小。破壞區大表示能量得以釋放，裂紋尖端纖維的應力集中得以降低，故強破壞強度即可提高。部份試片破壞區脫層嚴重，與單純纖維支配層板破壞強度不同，則會造成層板強度降低。當然，比例效應、層板厚度效應及拘束效應仍會發生影響，尤其當層板厚度增加時影響將更為明顯。

最後，無論是十字形疊層板或準等向性層板，若每一個角度的層板只順序堆疊一次時，其 0 度層板的破壞韌度 K_Q^0 基本上是保持一個定值或在一定的範圍內；但若每一角度層板重覆堆疊時，受到層板厚度效應、拘束效應及比例效應的多重影響而致使破壞強度變化下，其 K_Q^0 則會發生較大的變化而不是一個定值。

5-2 未來研究方向

此次研究是針對兩種不同疊層方法的八種試片進行實驗，主要是以拉伸試驗為主，未來將持續藉由壓縮試驗、剪力破壞、衝擊破壞或扭力破壞等不同破壞模式來研究複合材料層板的相關機械性質。

另外，此次實驗並未針對溫度、濕度等外在條件加以控制，且材質是預浸材、並未參與改質。未來持續的研究中將加入以上條件，針對高溫或低溫、乾燥或潮濕不同的環境研究對試片強度的影響，並配合加入如奈米碳管等改質的方法對基材進行改變，期望能更廣泛完整的建立複合材料層板在各種不同條件下的相關性質與數據。

其次，在 Wisnom 等人[14]、Dharani 等人[29]以及 Harris 等人[30]的論文中都提到缺口的研究不單只限於細長裂縫，圓孔形的裂紋也是一個非常重要的向度，其表現在強度上的性質與細長形裂縫是不相同的，故將來亦準備將圓孔形裂縫列入重要的研究主題，以使複合材料缺口強度研究這個主題更形完備。

接著，有關同一角度層板反覆堆疊後對 K_Q^0 值的影響將持續探討，以確定層板厚度效應、拘束效應及比例效應等是否真是造成 K_Q^0 值變化的主要原因，亦或仍有其他尚未確知的因素等待發掘。

最後，利用有限元素法進行實驗模型的建置與預測已經是一個很方便亦很準確的研究方法，有限元素法不僅可以減少實驗時間與成本上的耗費，更可以同時考量多種因素對實驗數據的影響，利用模擬預測的結果配合實驗實測值做分析將可以達到更好的研究效果，故將來的研究將配合有限元素法輔助相關實驗的進行。



參考文獻

- [1] 藤井太一、座古勝，“複合材料的破壞與力學”，五南圖書公司，民國九十三年。
- [2] 蘇品書、賴耿陽，“複合材料科學”，復漢出版社，民國七十七年。
- [3] Gibson, R. F., “Principle of Composite Material mechanics”, McGraw-Hill, Inc. 1994, ch.1, pp.1-33.
- [4] Azzi, V. D. and Tsai, S. W., “Experimental Mechanics”, 1965, 5, 283-288.
- [5] 許明發、郭文雄，“複合材料纖維學”，全威圖書有限公司，民國九十三年。
- [6] 小林英男，“破壞力學”，龍環文化，民國九十五年。
- [7] Vaidya, R. S., Klug, J. C. and Sun, C. T. 1998. “Effect of Ply Thickness on Fracture of Notched Composite Laminates”, *AIAA Journal*, 36(1): No. 1, January 1998, pp.81-88.
- [8] Kortschot, M. T., Beaumont, P. W. R., 1990, “Damage Mechanics of Composite Materials: I-Measurements of Damage and Strength,” *Composite Science and Technology*, 9, pp.289-301.
- [9] Kortschot, M. T., Beaumont, P. W. R., 1990, “Damage Mechanics of Composite Materials: II-A Damage Based Notched Strength Model,” *Composite Science and Technology*, 39, pp.303-326.
- [10] Kortschot, M. T., Beaumont, P. W. R., 1990, “Damage Mechanics of Composite Materials: III-Prediction of Damage Growth and Notched Strength,” *Composite Science and Technology*, 40, pp.303-326.
- [11] Madhukar, A. J., 1985, “Notched Strength of Composites: Prediction and Experiment – a Review.” *J Reinf Plast Compos* 4, 3-159.
- [12] Vaidya R. S., Sun, C. T., 1997, “Fracture Criterion for Notched Thin

- Composite Laminates”, *AIAA Journal* 35(2), pp.311-316.
- [13] Sankar, B. V., Lee, B., 2006, “Lay-up Independent Fracture Criterion for Notched Laminated Composite,” *Composite Science and Technology*, pp. 2491-2499.
- [14] Wisnom, M. R., Green, B., Jiang, W. and Hallett, S. R., 2004, “Scaling Effects in Notched Composites Loaded in Tension”, *2nd International Conference on Composites Testing and Modelling Identification (CompTest), Bristol*.
- [15] Salpekar, S. A., O’Brien, T. K., 1993, “Analysis of matrix cracking and local delamination in $(0/\theta/-\theta)_s$ graphite epoxy laminates under load,” *J. Comp. Tech. & Res.*, 15:2:9, pp5-100.
- [16] Daniel I. M., Ishai, O. 2006, “Engineering Mechanics of Composite Materials”, *Oxford University Press, USA, 2nd edition*.
- [17] Eugênio de Azevedo Soriano, Sérgio Frascino Müller de Almeida, 1999, “Notch sensitivity of carbon/epoxy fabric laminates“, *Composite Science and Technology*, 59, pp.1143-1151.
- [18] Lagace, P. A., Bhat, N. V. and Gundoglu, A., 1993, “Response of Notched Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK System,” *Composite Materials: Fatigue and Fracture, 4, ASTM STP 1156, American Society of Test and Materials*, pp.55-71.
- [19] 郭文雄、許明發, “複合材料”, 高立圖書有限公司, 民國九十五年, p407-427.
- [20] Gibson, R. F. 1994, “Principles of Composite Material Mechanics”, *McGraw-Hill, Inc.*
- [21] Sun, C. T., 2000, “Strength Analysis of Unidirectional Composites and Laminates”, ed. by Kelly, A., Zweben, C. ch. 1.20, *Elsevier, Ltd. Oxford, UK*,

p.641-666.

- [22] Marissen, R., Westphal, T. and Sterk, J. C. 2006, "Fracture of quasi-isotropic composite sheets with sharp notches," *Composite Science Technology*, 66, pp.1803-1812.
- [23] Gibson, R. F. 1994, "Principle of Composite Material mechanics", *McGraw-Hill, Inc.* ch.7, pp.190-269.
- [24] Adams, D. F., Carlsson, L. A. and Pipes, R. B. 2003, "Experimental Characterization of Advanced Composite Materials," *CRC Press*, ch.2, pp.11-36.
- [25] Wisnom, M. R., Khan, Jiang, B. W., and Hallet, S. R. 2005, "Specimens Size Effects on Tensile Strength and Failure Mechanisms of Carbon/Epoxy Composites," *JNC14, Compiègne, France*.
- [26] 徐景祥, "淺談岩石基礎之承載能力," 台灣公路工程, 第31卷第9期, 民國九十六年.
- [27] Pardoën, T., Ferracin, T. C., Landis, M. and Delannay, F., 2005, "Constraint Effect in Adhesive Joint Fracture," *Journal of Mechanics and Physics of Solid*, 53, pp.1951-1983.
- [28] Harris, C. E., Morris, D. H., 1986, "Effect of Laminate Thickness and Specimen Configuration on the Fracture of Laminate Composite," *Composite Materials: Testing and Design (Seven Conference), ASTM STP 893, American Society for Testing and Materials*, pp. 177-195.
- [29] Dharani, L. R., Recker, R. L., 1991, "Growth of Longitudinal Matrix Damage in Unidirection Composite." *Engineering Fracture Mechanics*, 38,(2/3), p.185-195.
- [30] Harris C. E., Morris, D. H., 1985, "Role of Delamination and Damage Development on Thick Notched Laminates," *Delamination and Debonding*

of Materials, ASTM STP876, American Society for Testing and Materials, p.424-447.

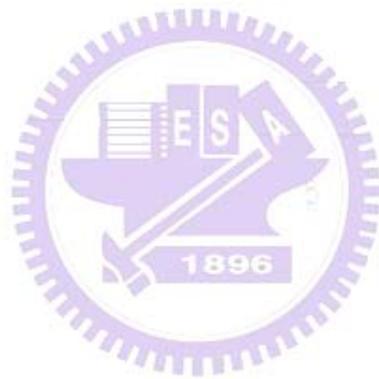


表 3.1 CFA-05624E19 各項機械性質一覽表

各項機械性質	數 值
E_1 (GPa)	138
E_2 (GPa)	8.5
ν_{12}	0.44
G_{12} (GPa)	7.3
X (MPa)	1530
Y (MPa)	20
S (MPa)	53



表 3.2 各種層板破壞應力比較表

疊層形式	疊層方法	破壞應力 MPa
十字疊法	$[0/90]_{2s}$	1201±3.0%
	$[0_2/90_2]_s$	1249±2.8%
	$[90/0]_{2s}$	1240±2.1%
	$[90_2/0_2]_s$	1188±6.9%
準等向性 疊法	$[0/±45/90]_{2s}$	665±0.2%
	$[0_2/±45_2/90_2]_s$	673±0.5%
	$[90/±45/0]_{2s}$	726±1.4%
	$[90_2/±45_2/0_2]_s$	638±2.7%

表 3.3 準等向性層板破壞應力實測值與

Hill-Tsai 破壞理論預測值之比較表

疊層	$[0/\pm 45/90]_{2s}$		$[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$		$[90/\pm 45/0]_{2s}$		$[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$	
數值	實測	預測	實測	預測	實測	預測	實測	預測
	值	值	值	值	值	值	值	值
	665	758	673	758	726	758	638	758
誤差	13.98%		12.63%		4.41%		18.81%	

單位：MPa

表 3.4 十字形疊層板破壞應力實測值與

Hill-Tsai 破壞理論預測值之比較表

疊層	$[0/90]_{2s}$		$[0_2/90_2]_s$		$[90/0]_{2s}$		$[90_2/0_2]_s$	
數值	實測	預測	實測	預測	實測	預測	實測	預測
	值	值	值	值	值	值	值	值
	1201	834	1249	834	1240	834	1148	834
誤差	30.56%		33.23%		32.74%		27.35%	

單位：MPa

表 3.5 準等向性層板破壞應力實測值與

Tsai-Wu 破壞理論預測值之比較表

疊層	$[0/\pm 45/90]_{2S}$		$[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$		$[90/\pm 45/0]_{2S}$		$[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$	
數值	實測	預測	實測	預測	實測	預測	實測	預測
	值	值	值	值	值	值	值	值
	665	508	673	508	726	508	638	508
誤差	23.61%		24.52%		30.03%		20.38%	

單位：MPa

表 3.6 十字形疊層板破壞應力實測值與

Tsai-Wu 破壞理論預測值之比較表

疊層	$[0/90]_{2S}$		$[0_2/90_2]_S$		$[90/0]_{2S}$		$[90_2/0_2]_S$	
數值	實測	預測	實測	預測	實測	預測	實測	預測
	值	值	值	值	值	值	值	值
	1201	921	1294	921	1240	921	1148	921
誤差	23.31%		28.83%		25.73%		24.65%	

單位：MPa

表 3.7 各種層板具裂紋時的破壞應力比較表

疊層形式	疊層方法	破壞應力 MPa
十字疊法	$[0/90]_{2s}$	833±3.7%
	$[0_2/90_2]_s$	1070±5.7%
	$[90/0]_{2s}$	828±7.7%
	$[90_2/0_2]_s$	1166±1.7%
準等向性 疊法	$[0/\pm 45/90]_{2s}$	606±6.8%
	$[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$	431±7.2%
	$[90/\pm 45/0]_{2s}$	593±5.6%
	$[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$	487±1.9%

表 4.1 各種層板試片相關實驗數據一覽表

試片 編號	疊 層	破壞 強度 (MPa)	裂紋長 之半 a (mm)	試片厚 t (mm)	試片寬 W (mm)	有限寬 度修正 係數 Y	破壞韌 度K _Q (MPa √m)	應力比 η	K _Q ⁰ (MPa √m)
1-1	[90/±45/0] _{2S}	614	7.805	2.17	3.786	1.028	98.79	2.48	245
1-2	[90/±45/0] _{2S}	583	7.91	2.17	3.788	1.028	94.49	2.48	234
1-3	[90/±45/0] _{2S}	553	7.93	2.17	3.789	1.028	89.75	2.48	223
1-4	[90/±45/0] _{2S}	620	7.795	2.17	3.787	1.027	99.69	2.48	247
1-7	[90/±45/0] _{2S}	736	no crack	2.17	14.84				
1-8	[90/±45/0] _{2S}	716	no crack	2.17	15.07				
2-1	[90 ₂ /±45 ₂ /0 ₂] _S	495	7.865	2.16	3.793	1.028	79.97	2.48	198
2-2	[90 ₂ /±45 ₂ /0 ₂] _S	488	7.84	2.16	3.785	1.028	78.71	2.48	195
2-3	[90 ₂ /±45 ₂ /0 ₂] _S	477	7.81	2.16	3.788	1.028	76.78	2.48	190
2-4	[90 ₂ /±45 ₂ /0 ₂] _S	486	7.775	2.16	3.79	1.027	78.03	2.48	194
2-7	[90 ₂ /±45 ₂ /0 ₂] _S	621	no crack	2.16	14.84				
2-8	[90 ₂ /±45 ₂ /0 ₂] _S	655	no crack	2.16	15.01				
3-1	[0 ₂ /±45 ₂ /90 ₂] _S	438	7.955	2.18	3.814	1.028	71.18	2.48	177
3-2	[0 ₂ /±45 ₂ /90 ₂] _S	429	8.00	2.18	3.814	1.028	69.93	2.48	173
3-3	[0 ₂ /±45 ₂ /90 ₂] _S	460	7.935	2.18	3.811	1.028	74.66	2.48	185
3-4	[0 ₂ /±45 ₂ /90 ₂] _S	398	7.91	2.18	3.809	1.028	64.49	2.48	160
3-7	[0 ₂ /±45 ₂ /90 ₂] _S	676	no crack	2.18	15.05				
3-8	[0 ₂ /±45 ₂ /90 ₂] _S	669	no crack	2.18	15.57				
4-1	[0/±45/90] _{2SS}	602	7.88	2.17	3.802	1.028	97.35	2.48	241
4-2	[0/±45/90] _{2S}	565	7.86	2.17	3.805	1.028	91.24	2.48	226
4-3	[0/±45/90] _{2S}	610	7.825	2.17	3.788	1.028	98.28	2.48	244
4-4	[0/±45/90] _{2S}	647	7.795	2.17	3.791	1.027	104.03	2.48	258
4-7	[0/±45/90] _{2S}	671	no crack	2.17	15.42				
4-8	[0/±45/90] _{2S}	670	no crack	2.17	14.91				

表 4.1 各種層板試片相關實驗數據一覽表 (續)

試片編號	疊層	破壞強度 (MPa)	裂紋長之半 a (m)	試片厚 t (mm)	試片寬 W (m)	有限寬度修正係數 Y	破壞韌度 K_Q (MPa \sqrt{m})	應力比 η	K_Q^0 (MPa \sqrt{m})
5-1	[90 ₂ /0 ₂] _s	1171	7.825	1.11	3.772	1.028	188.71	1.864	350
5-2	[90 ₂ /0 ₂] _s	1188	7.70	1.11	3.757	1.027	189.82	1.864	352
5-3	[90 ₂ /0 ₂] _s	1157	7.67	1.11	3.751	1.027	184.49	1.864	343
5-4	[90 ₂ /0 ₂] _s	1148	7.825	1.11	3.767	1.028	185.01	1.864	343
5-7	[90 ₂ /0 ₂] _s	1227	no crack	1.1	14.61				
5-8	[90 ₂ /0 ₂] _s	1069	no crack	1.1	14.92				
6-1	[0 ₂ /90 ₂] _s	1127	7.825	1.1	3.785	1.028	181.59	1.864	337
6-2	[0 ₂ /90 ₂] _s	1005	7.91	1.1	3.785	1.028	162.88	1.864	302
6-3	[0 ₂ /90 ₂] _s	1104	7.855	1.1	3.778	1.028	178.27	1.864	331
6-4	[0 ₂ /90 ₂] _s	1045	7.955	1.1	3.78	1.028	169.90	1.864	315
6-7	[0 ₂ /90 ₂] _s	1213	no crack	1.1	15.2				
6-8	[0 ₂ /90 ₂] _s	1284	no crack	1.1	14.81				
7-1	[0/90] _{2s}	801	7.66	1.1	3.746	1.027	127.64	1.864	237
7-2	[0/90] _{2s}	806	7.76	1.1	3.768	1.028	129.31	1.864	240
7-3	[0/90] _{2s}	864	7.765	1.1	3.764	1.028	138.67	1.864	257
7-4	[0/90] _{2s}	860	7.795	1.1	3.764	1.028	138.31	1.864	257
7-7	[0/90] _{2s}	1237	no crack	1.1	14.7				
7-8	[0/90] _{2s}	1165	no crack	1.1	15.34				
8-1	[90/0] _{2s}	781	7.755	1.11	3.753	1.028	125.27	1.864	233
8-2	[90/0] _{2s}	809	7.715	1.11	3.751	1.027	129.41	1.864	240
8-3	[90/0] _{2s}	908	7.765	1.11	3.754	1.028	145.75	1.864	271
8-4	[90/0] _{2s}	813	7.71	1.11	3.754	1.027	129.99	1.864	241
8-7	[90/0] _{2s}	1214	no crack	1.11	15.15				
8-8	[90/0] _{2s}	1266	no crack	1.11	14.56				

表 4.2 各種層板具裂紋時的 0 度層板破壞韌度比較表

疊層形式	疊層方法	K_Q^0 (MPa√m)
十字疊法	$[0/90]_{2s}$	248±3.6%
	$[0_2/90_2]_s$	321±5.5%
	$[90/0]_{2s}$	246±7.7%
	$[90_2/0_2]_s$	347±1.2%
準等向性 疊法	$[0/±45/90]_{2s}$	242±6.6%
	$[0_2/±45_2/90_2]_s$	174±7.2%
	$[90/±45/0]_{2s}$	237±5.1%
	$[90_2/±45_2/0_2]_s$	194±2.1%

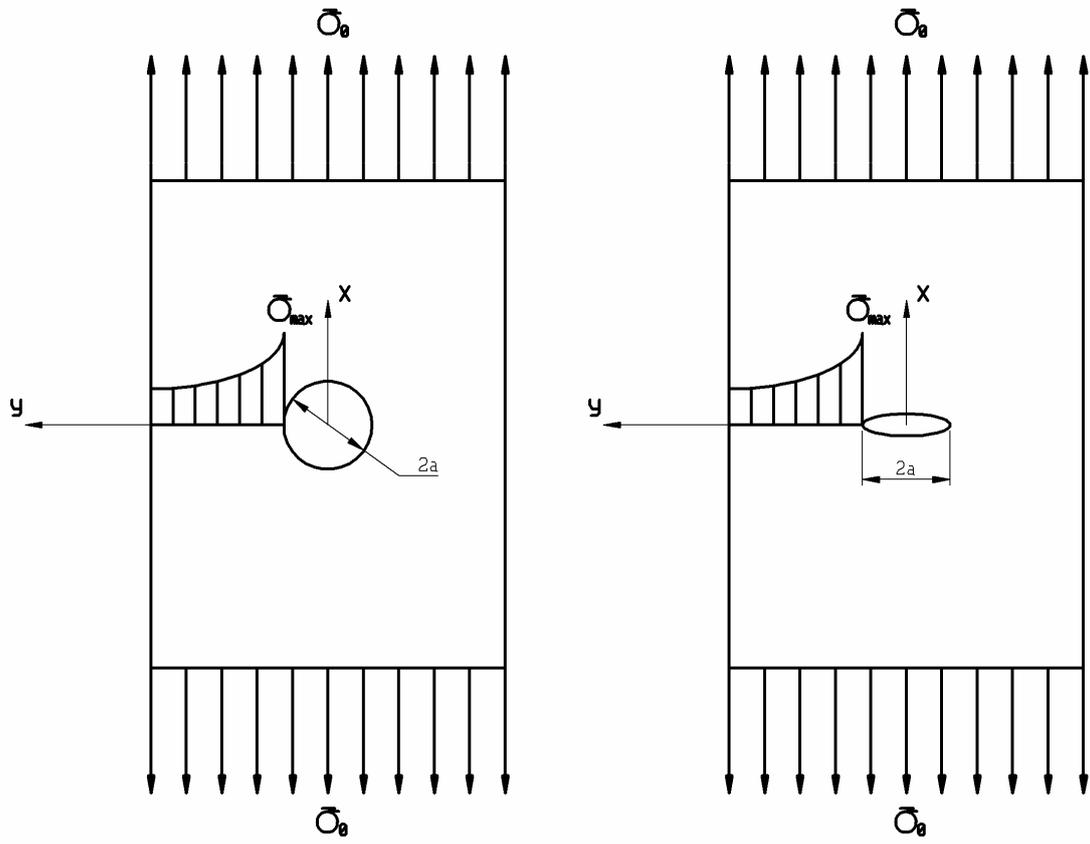


圖 1.1 圓孔及裂紋應力集中分佈圖



圖 2.1 熱壓機設備圖

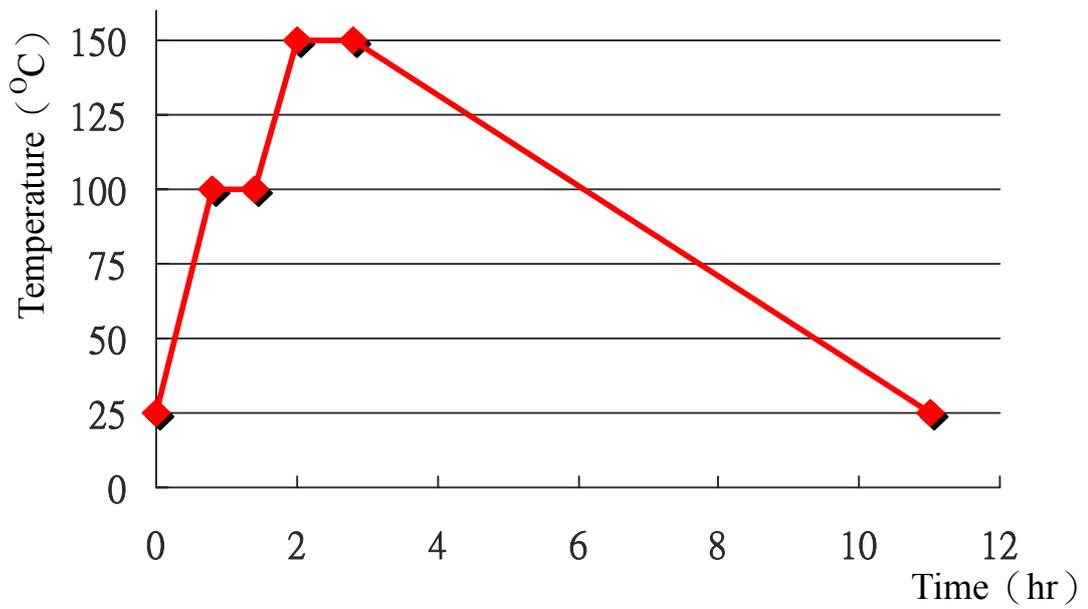


圖 2.2 複合材料層板加熱流程圖

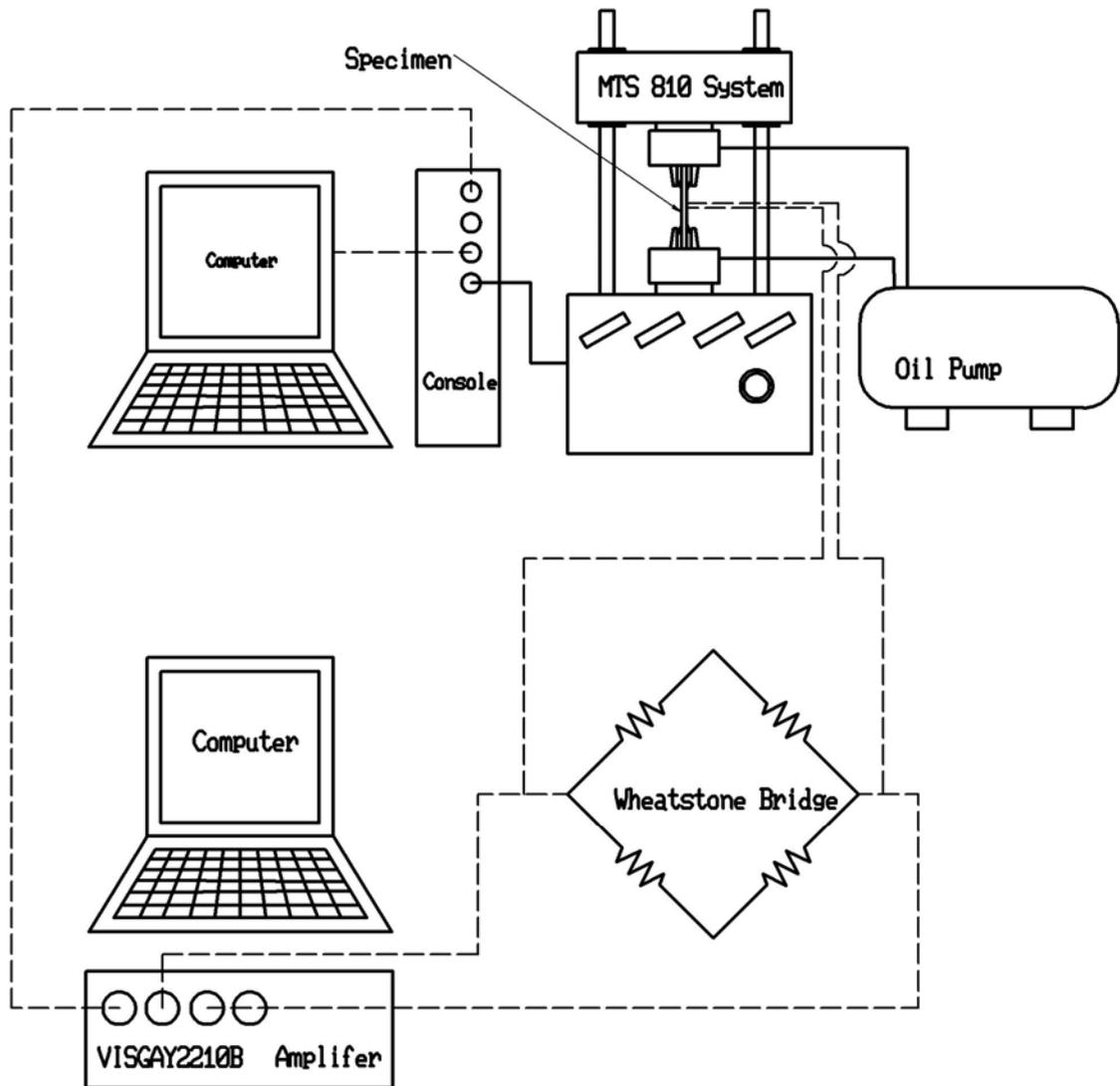


圖 2.3 MTS810 System 工作示意圖

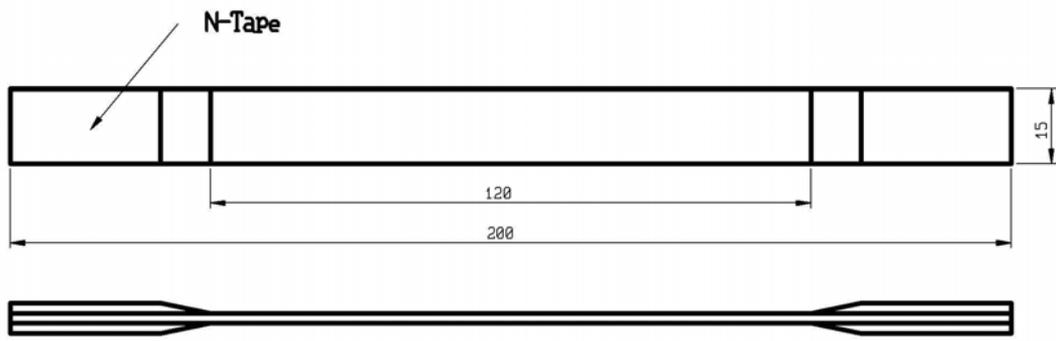


圖 2.4 基本數據拉伸試驗試片規格圖（單位 mm）

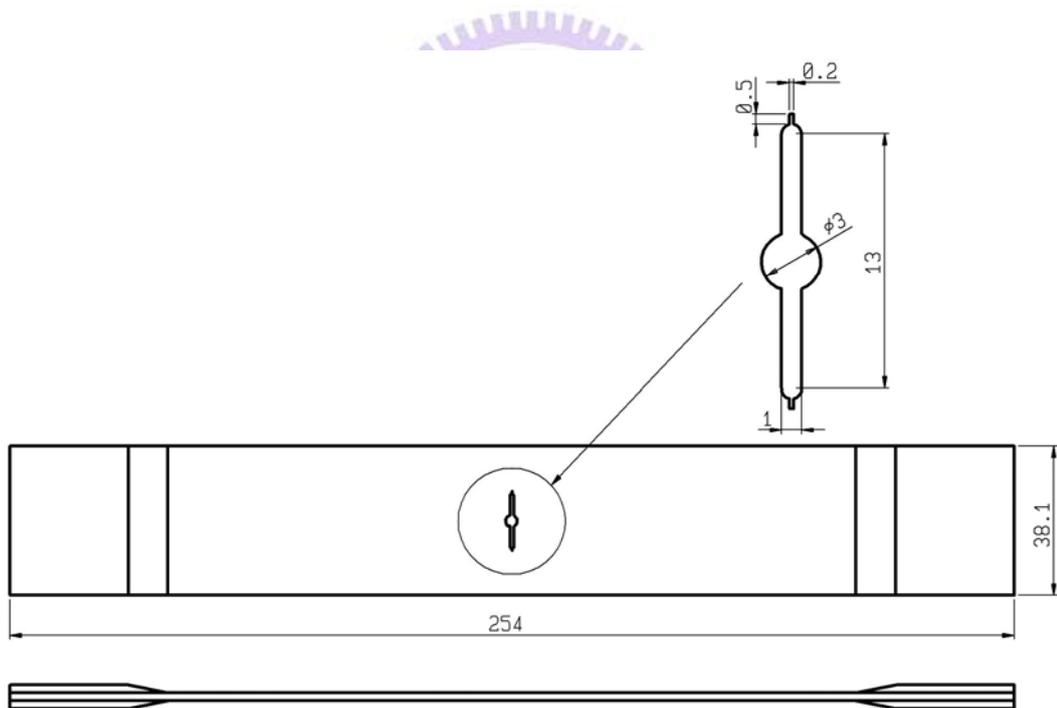


圖 2.5 具有缺口之拉伸試驗試片規格圖（單位 mm）



圖 2.6 美國 OMAX-2652 水刀加工機 (拍自台北祥焜工業公司)



圖 2.7 水刀水柱切削複合材料板圖 (拍自台北祥焜工業公司)

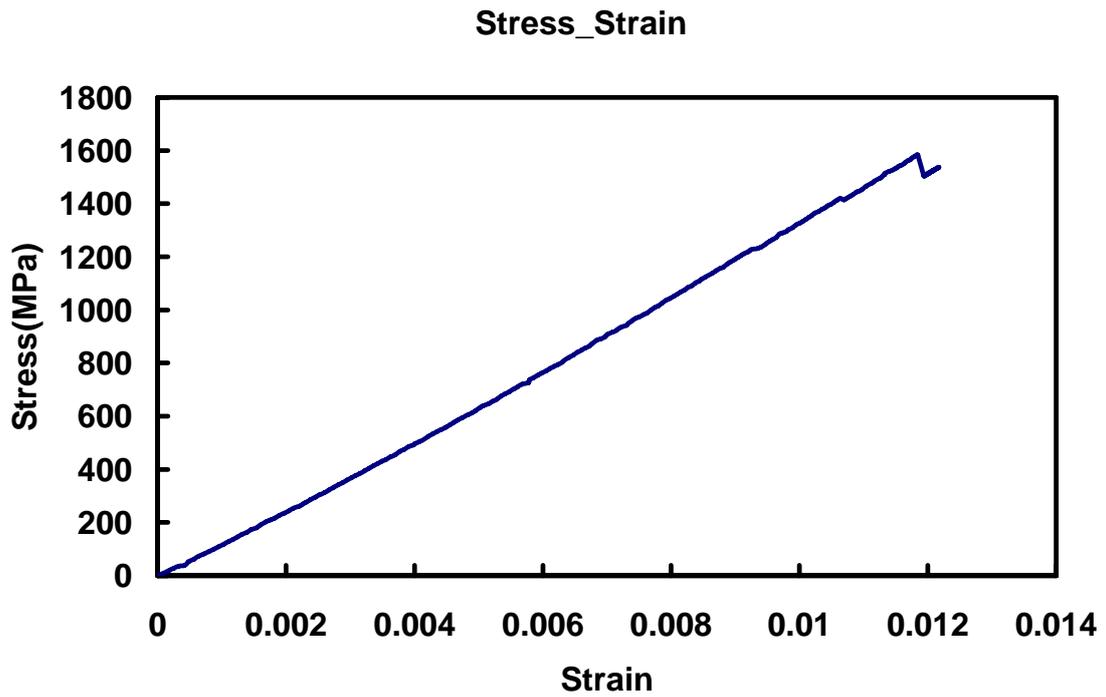


圖 3.1 $[0]_8$ 拉伸試驗所得之應力應變圖

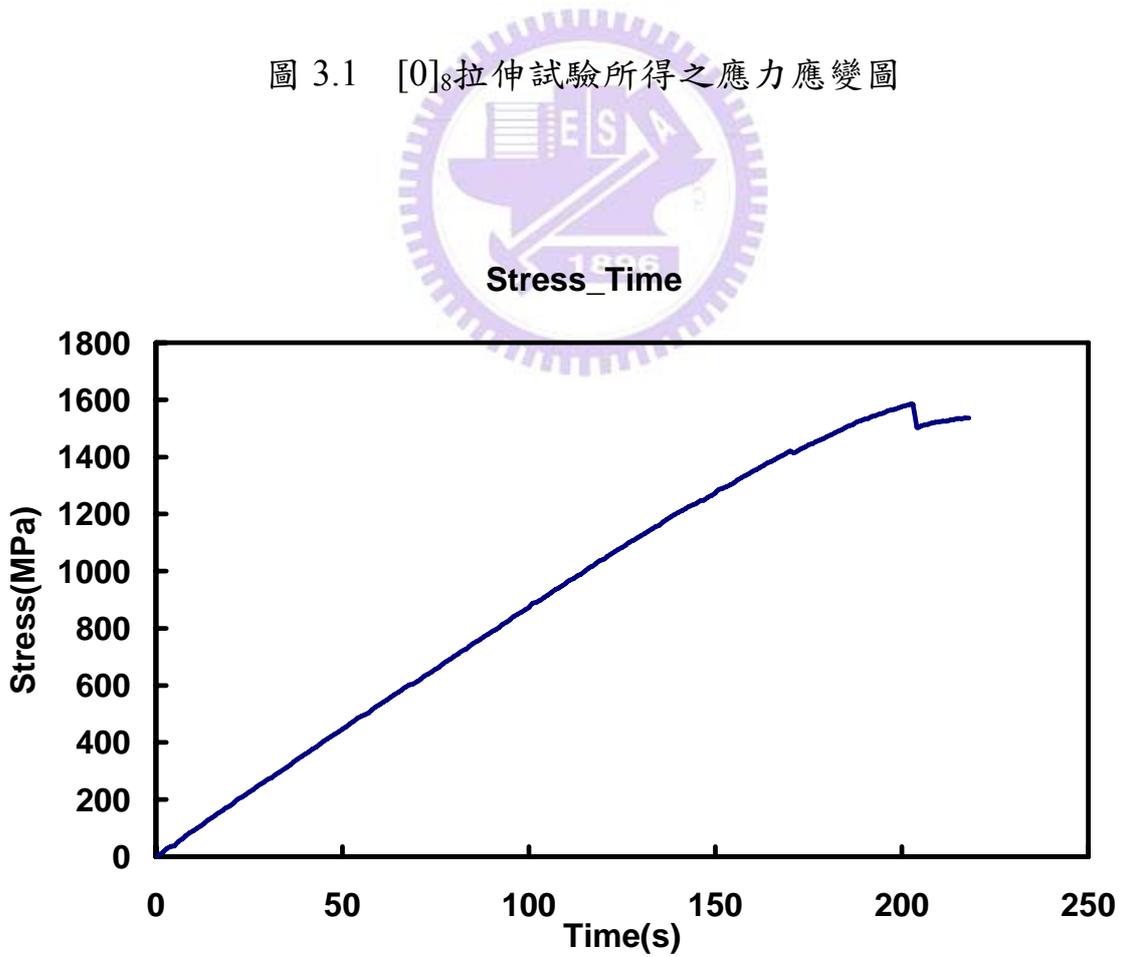


圖 3.2 $[0]_8$ 拉伸試驗所得之應力時間圖

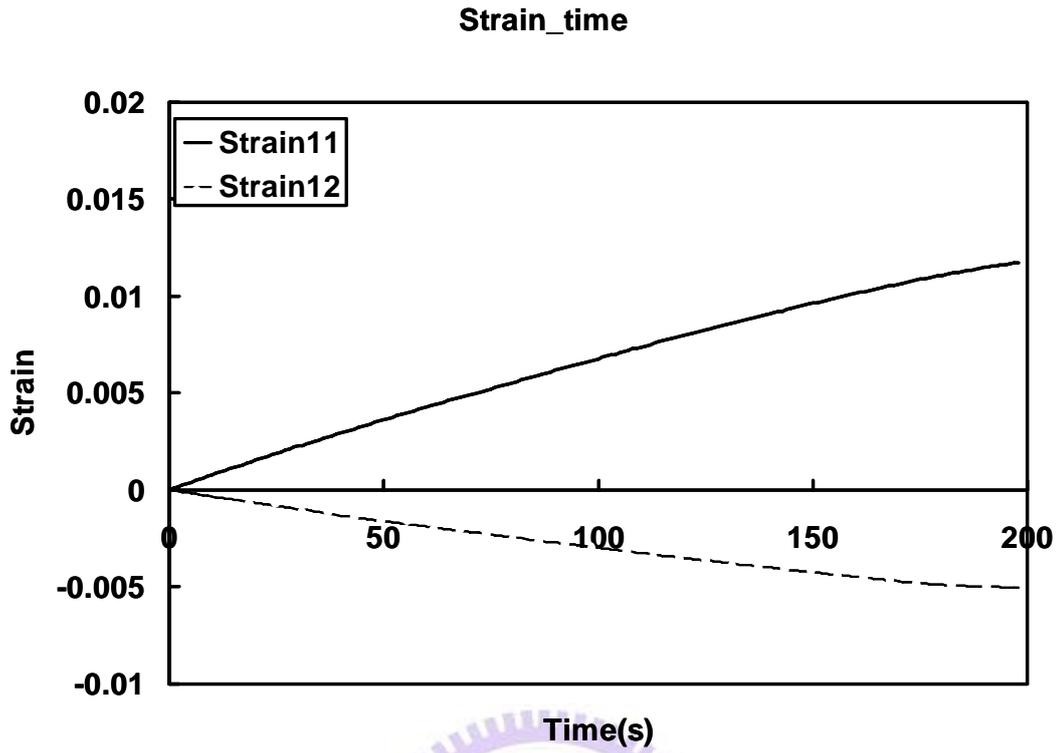


圖 3.3 $[0]_8$ 拉伸試驗所得之應變時間圖

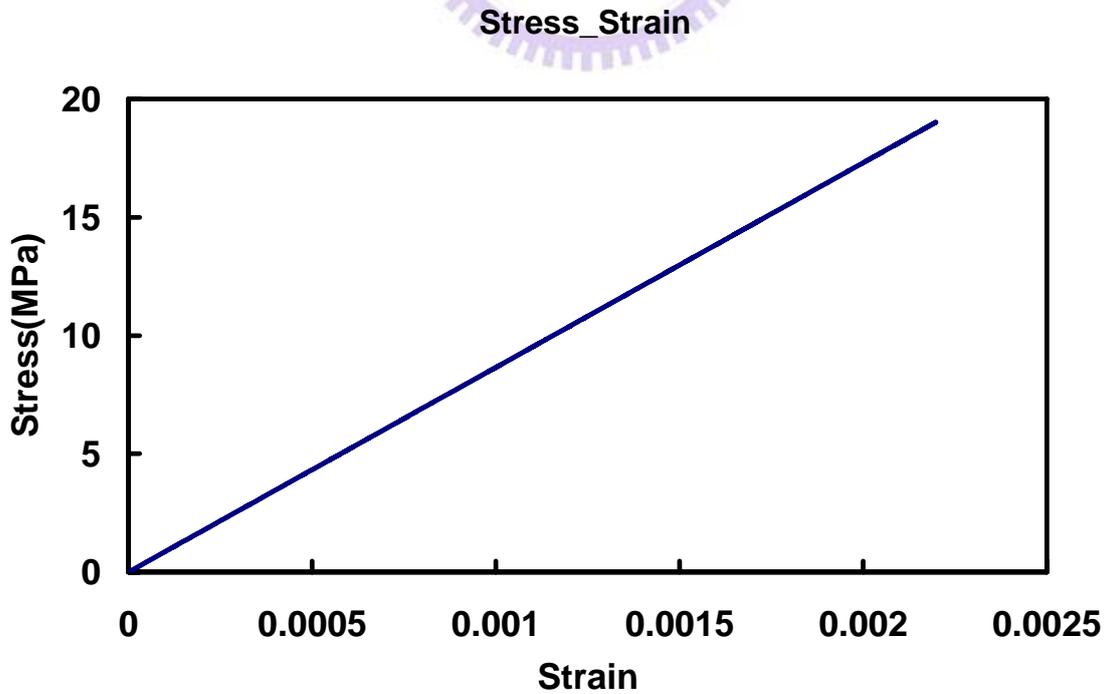


圖 3.4 $[90]_8$ 拉伸試驗所得之應力應變圖

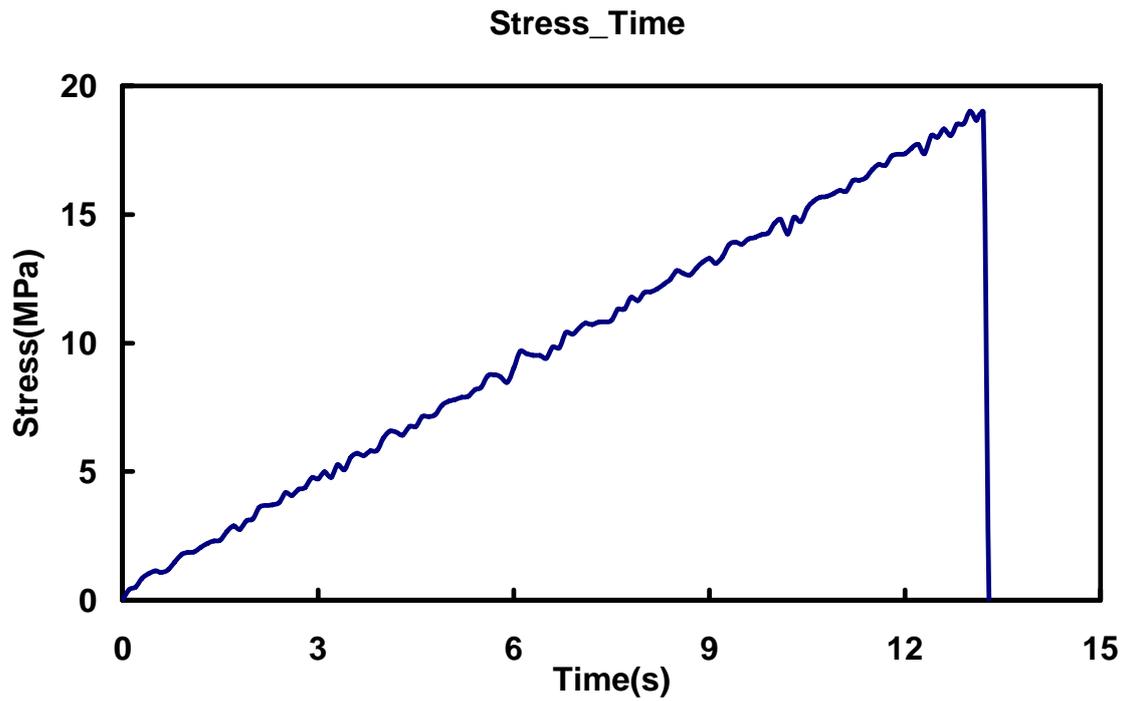


圖 3.5 $[90]_8$ 拉伸試驗所得之應力時間圖

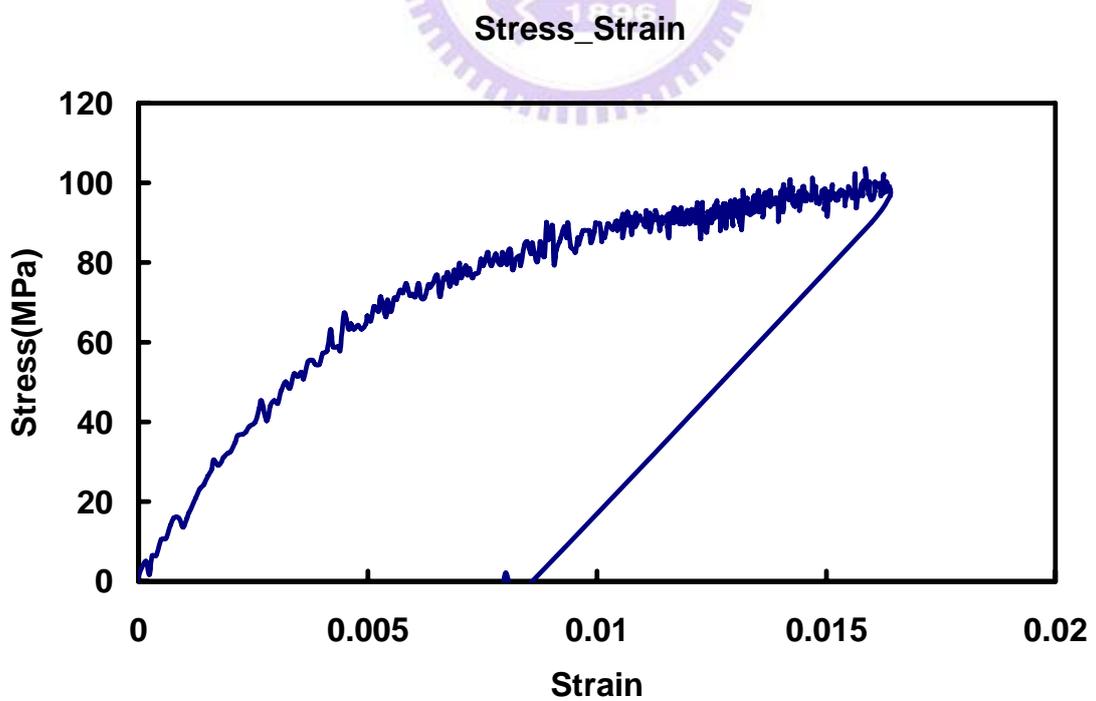


圖 3.6 $[45/-45]_s$ 拉伸試驗所得應力應變圖

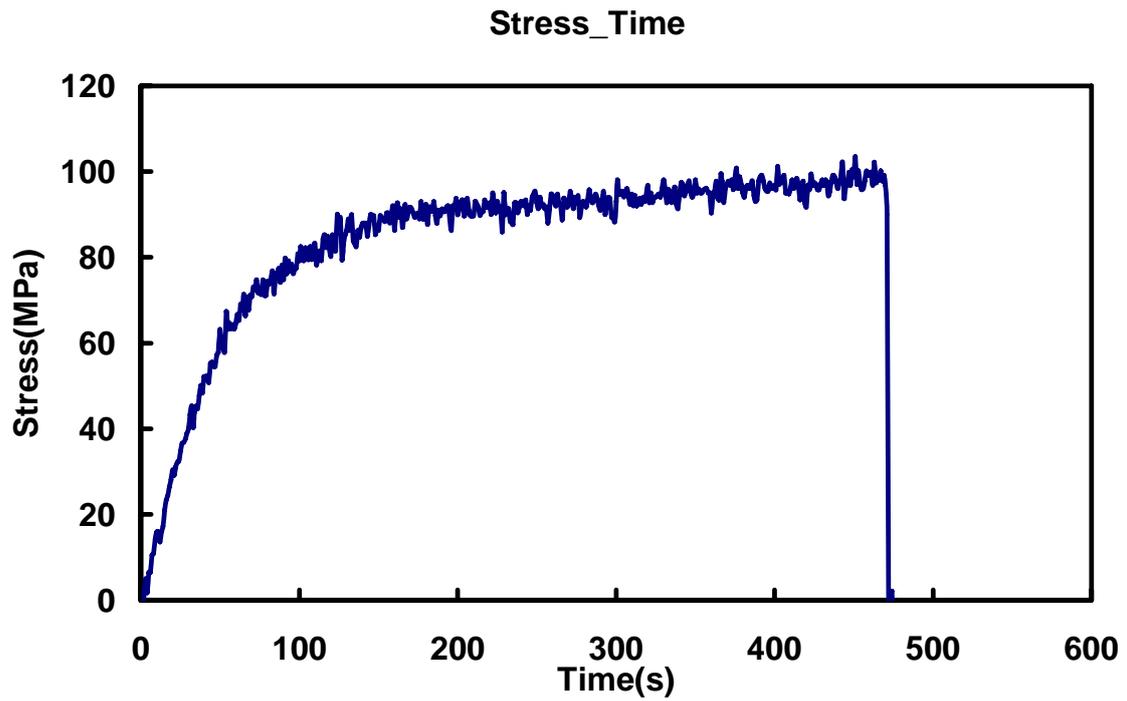


圖 3.7 [45/-45]_s拉伸試驗所得應力時間圖

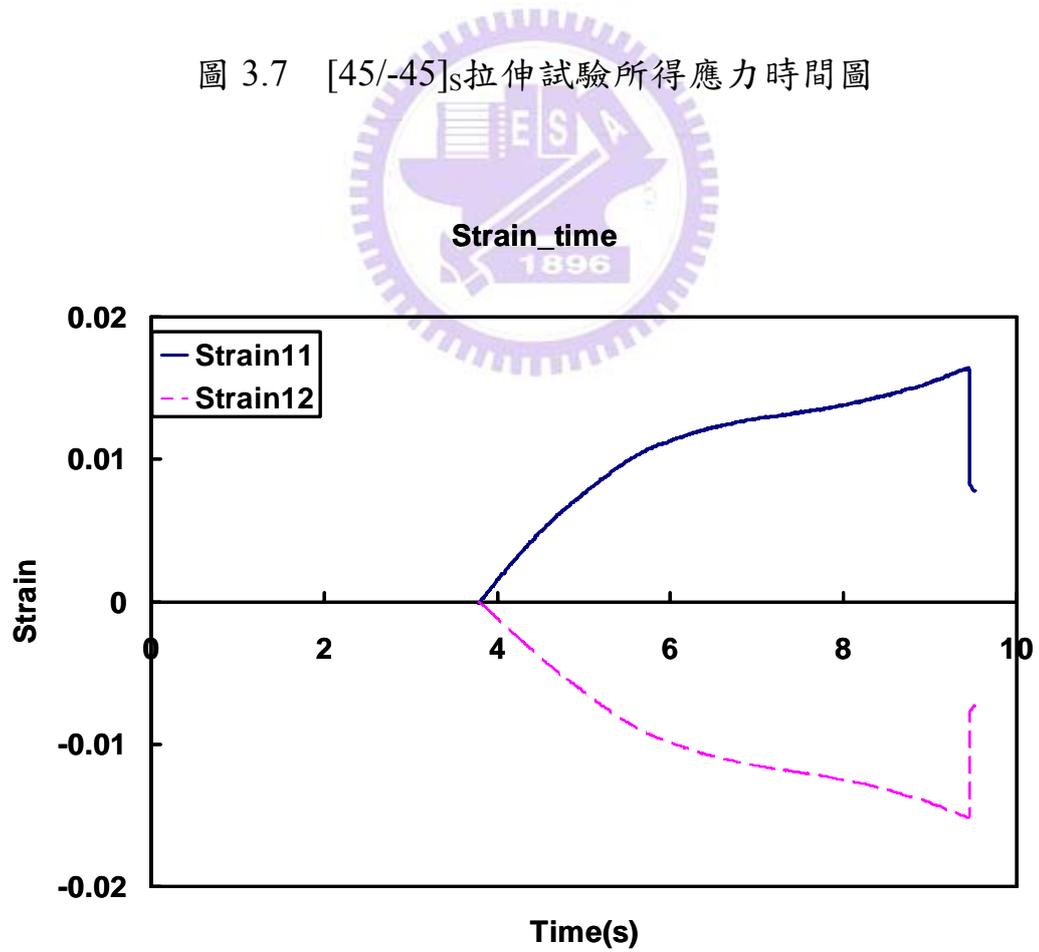


圖 3.8 [45/-45]_s拉伸試驗所得應變時間圖

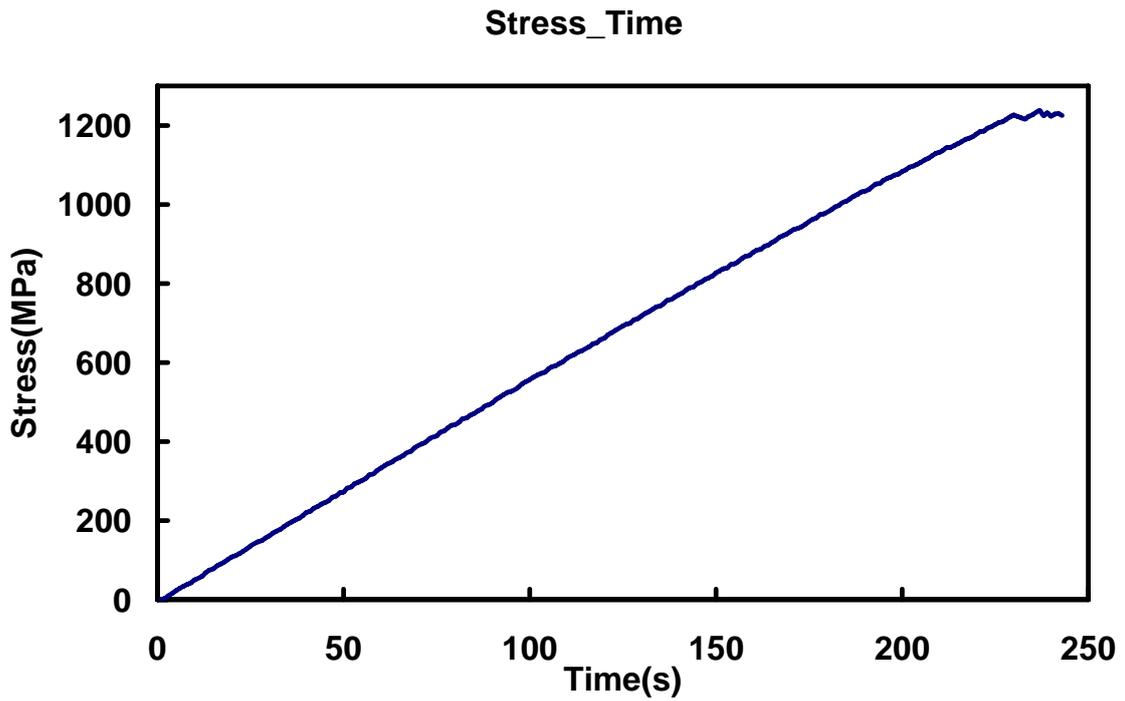


圖 3.9 $[0/90]_{2s}$ 層板無裂紋試片應力時間圖

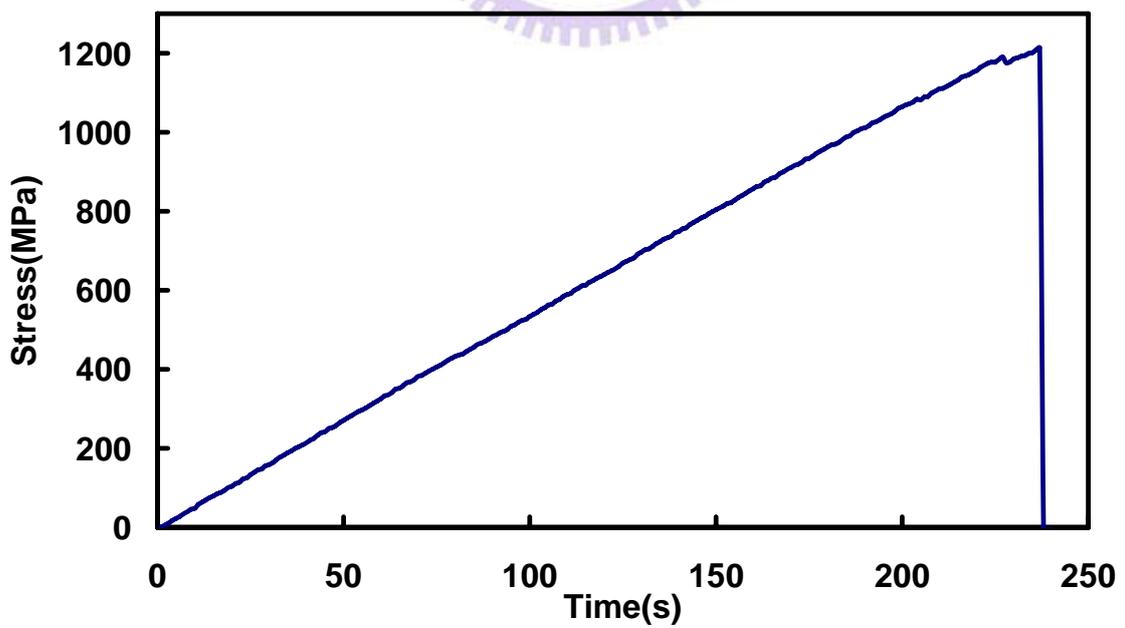


圖 3.10 $[0_2/90_2]_s$ 層板無裂紋試片應力時間圖

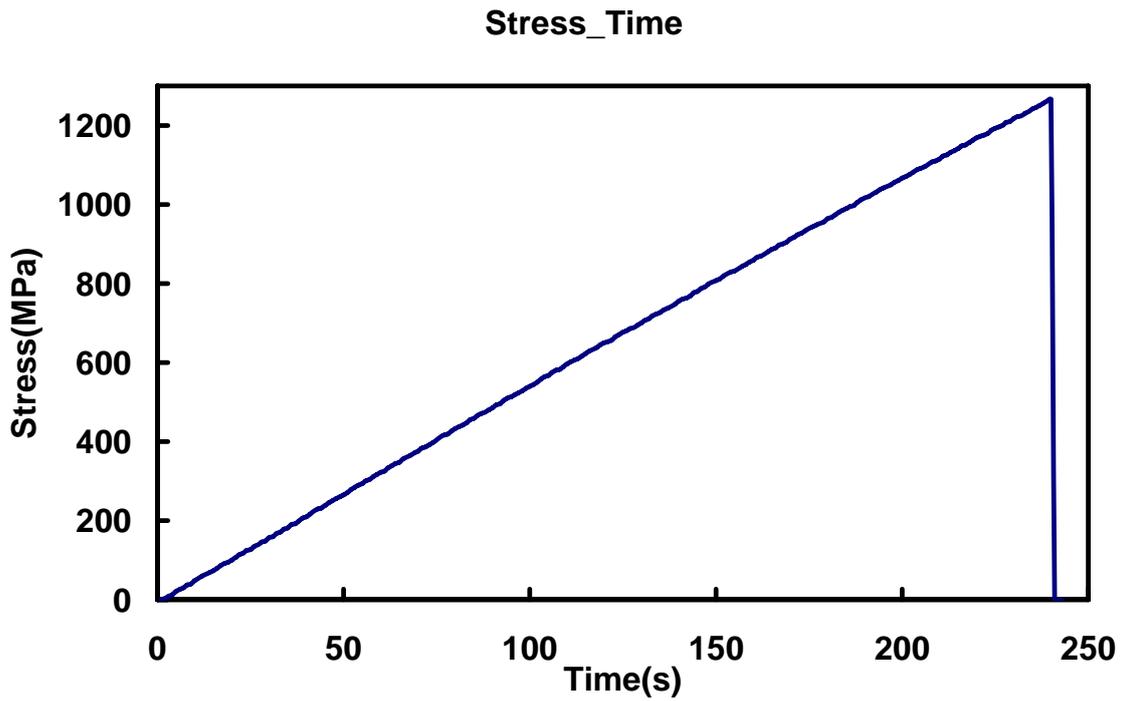


圖 3.11 $[90/0]_{2s}$ 層板無裂紋試片應力時間圖

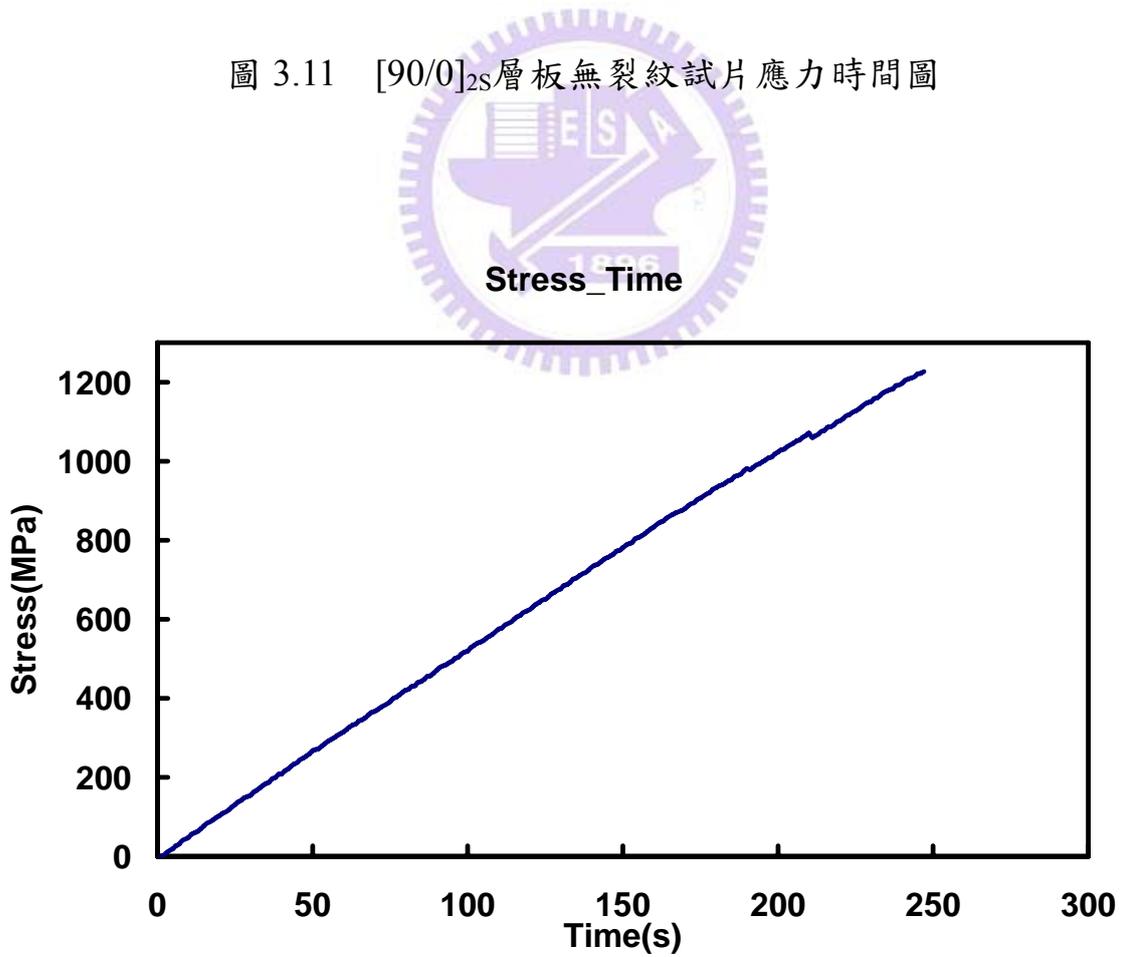


圖 3.12 $[90_2/0_2]_s$ 層板無裂紋試片應力時間圖

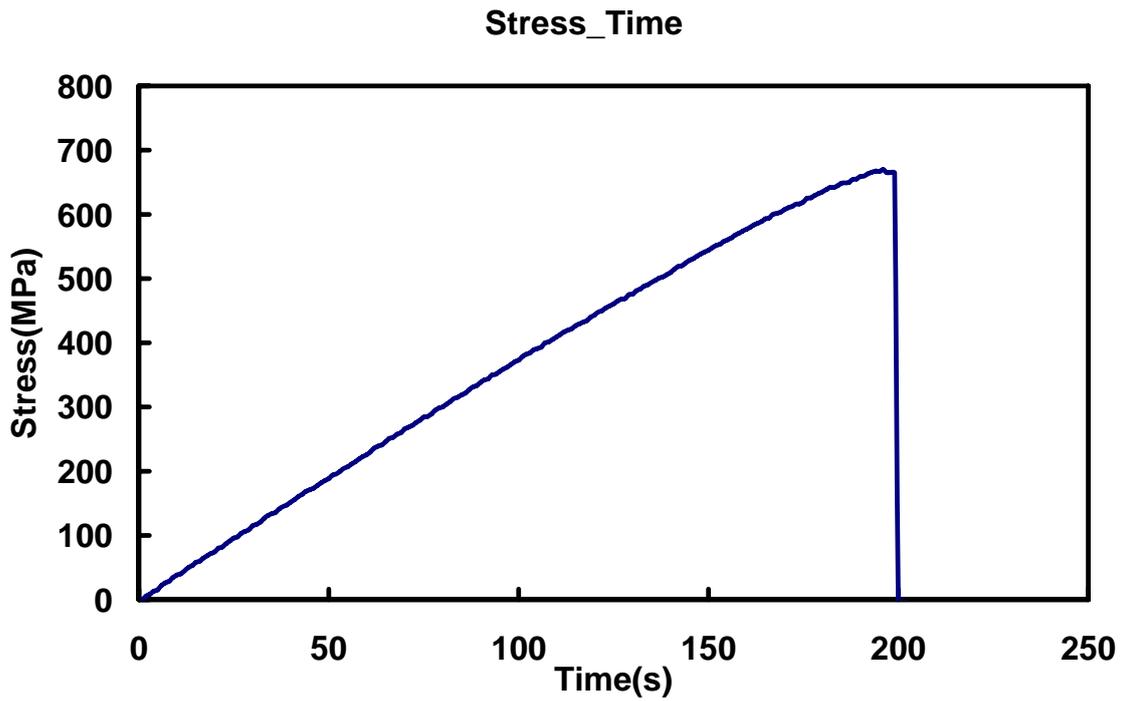


圖 3.13 $[0/\pm 45/90]_2s$ 層板無裂紋試片應力時間圖

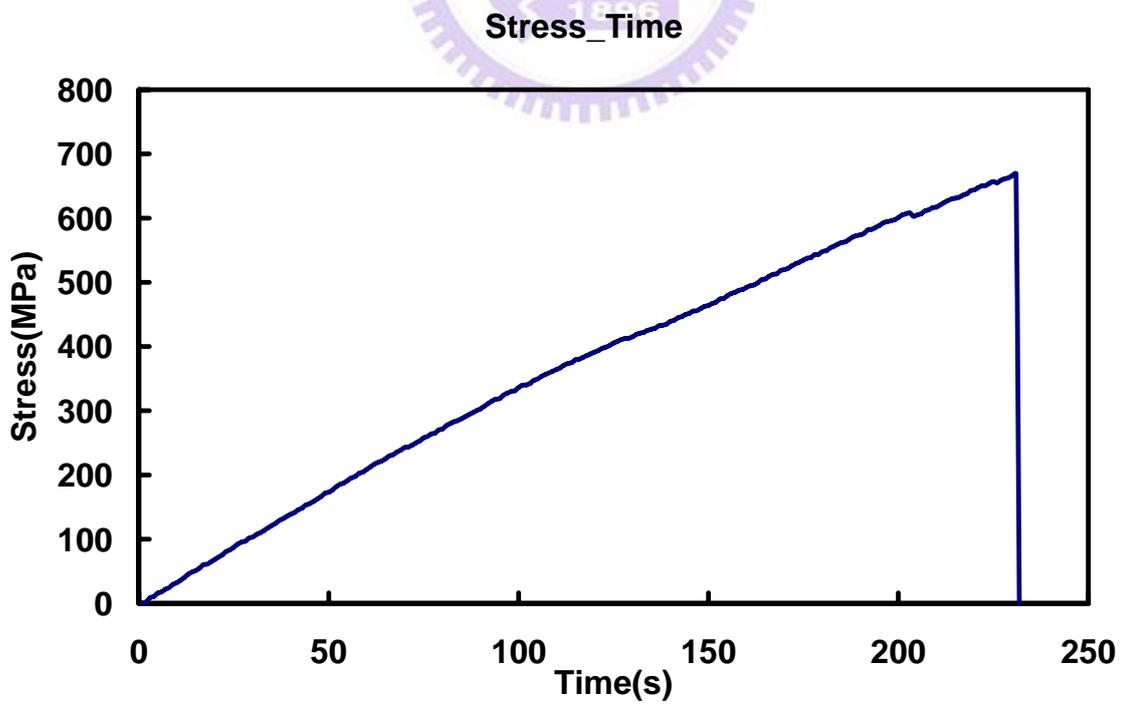


圖 3.14 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 層板無裂紋試片應力時間圖

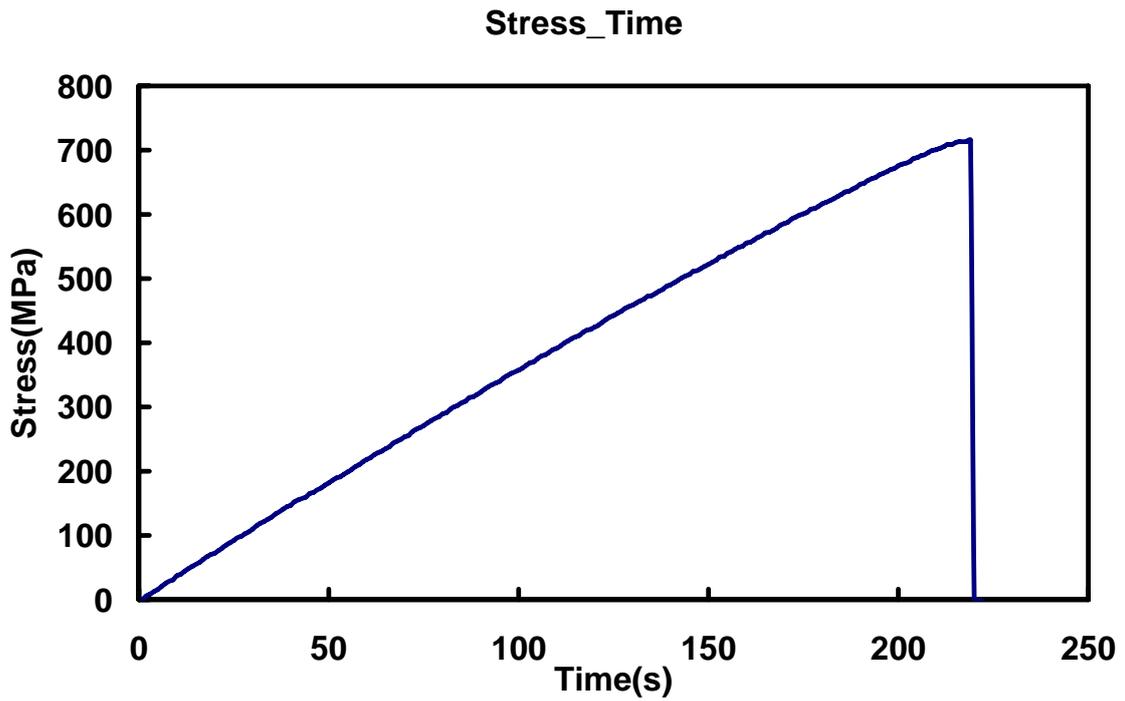


圖 3.15 $[90/\pm 45/0]_{2s}$ 層板無裂紋試片應力時間圖

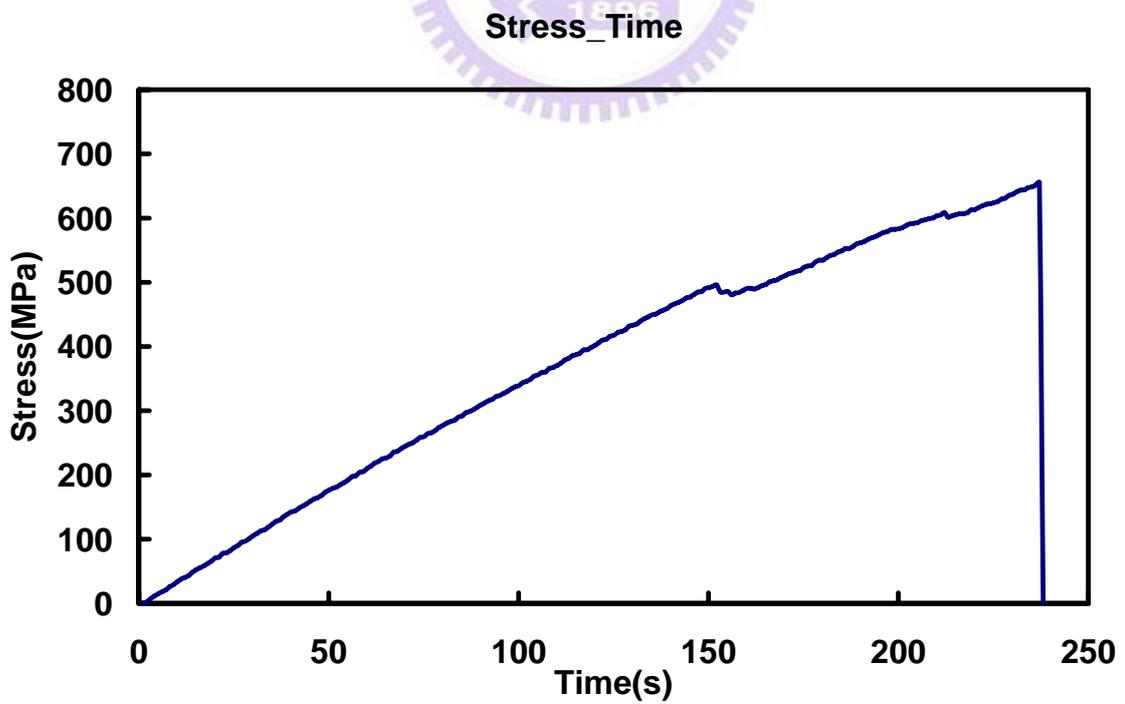


圖 3.16 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$ 層板無裂紋試片應力時間圖

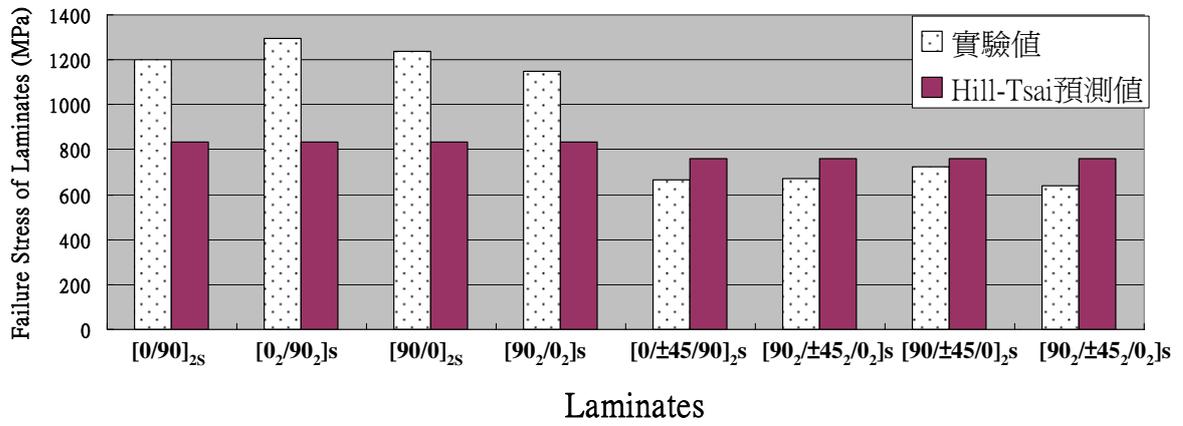


圖 3.17 各種層板實際破壞應力與 Hill-Tsai 預測值比較圖

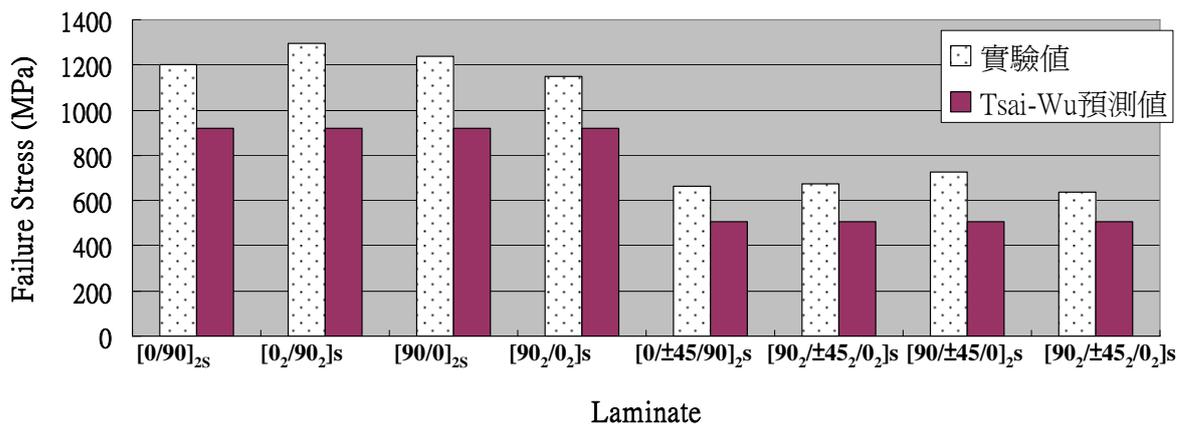


圖 3.18 各種層板實際破壞應力與 Tsai-Wu 預測值比較圖

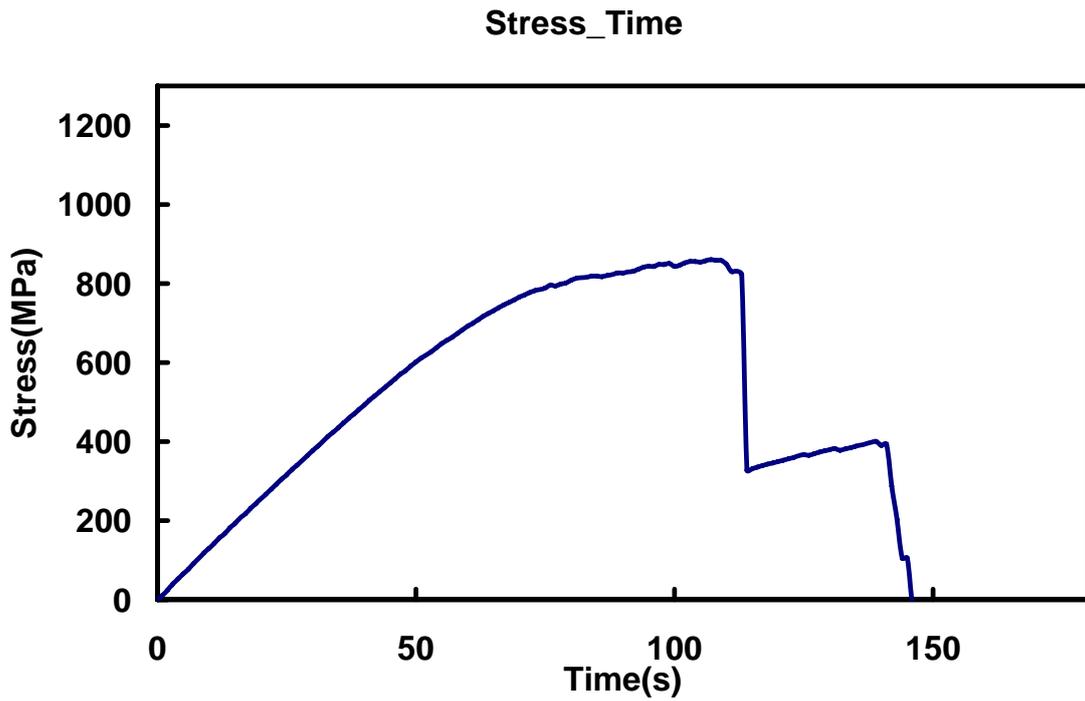


圖 3.19 $[0/90]_{2s}$ 層板有裂紋試片應力時間圖

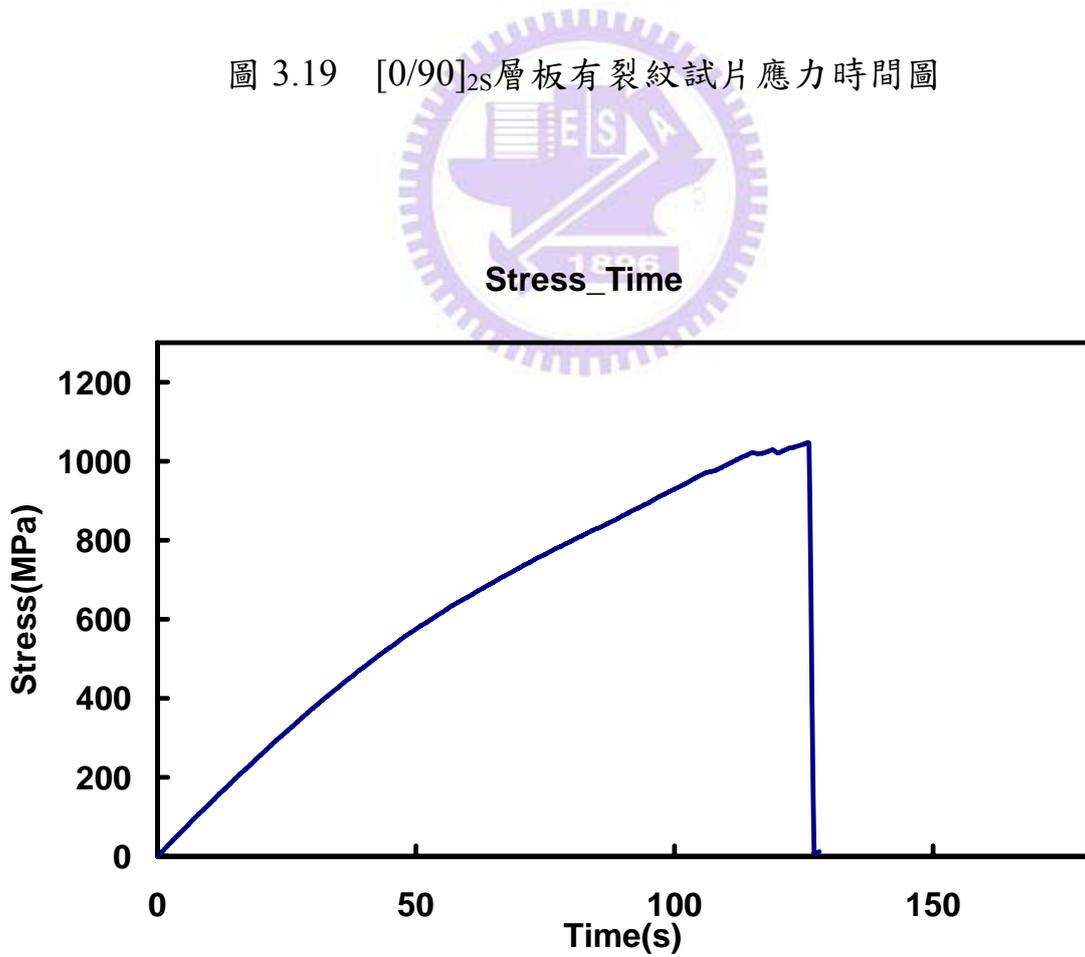


圖 3.20 $[0_2/90_2]_s$ 層板有裂紋試片應力時間圖

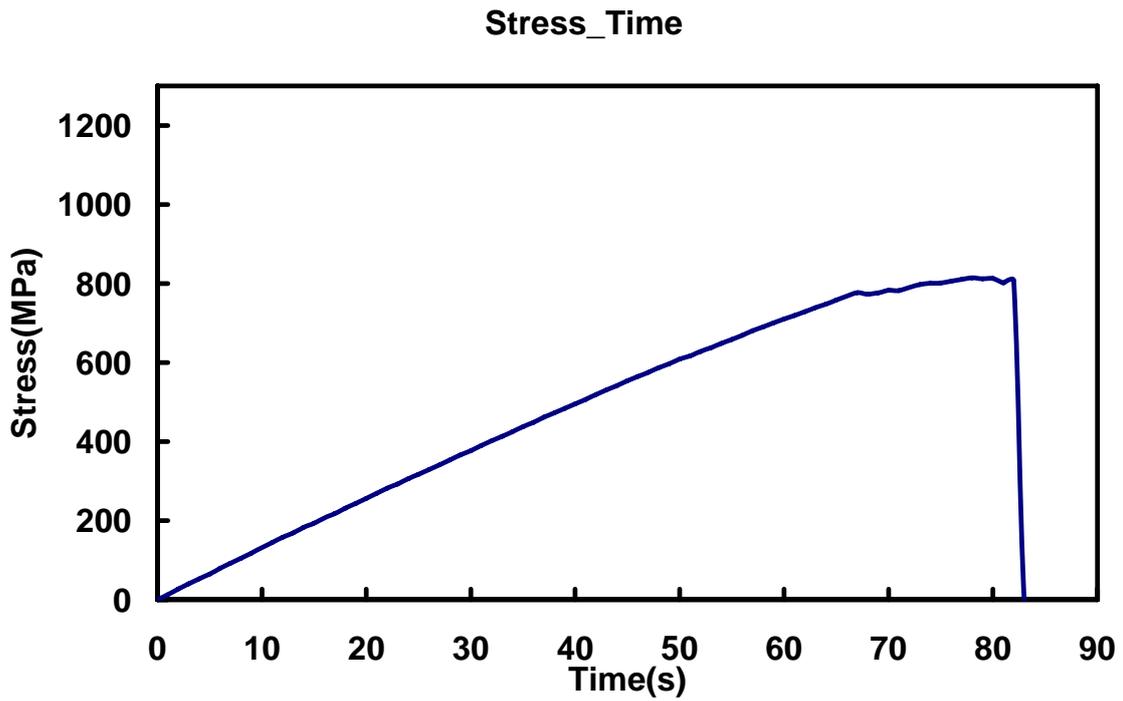


圖 3.21 $[90/0]_{2s}$ 層板有裂紋試片應力時間圖

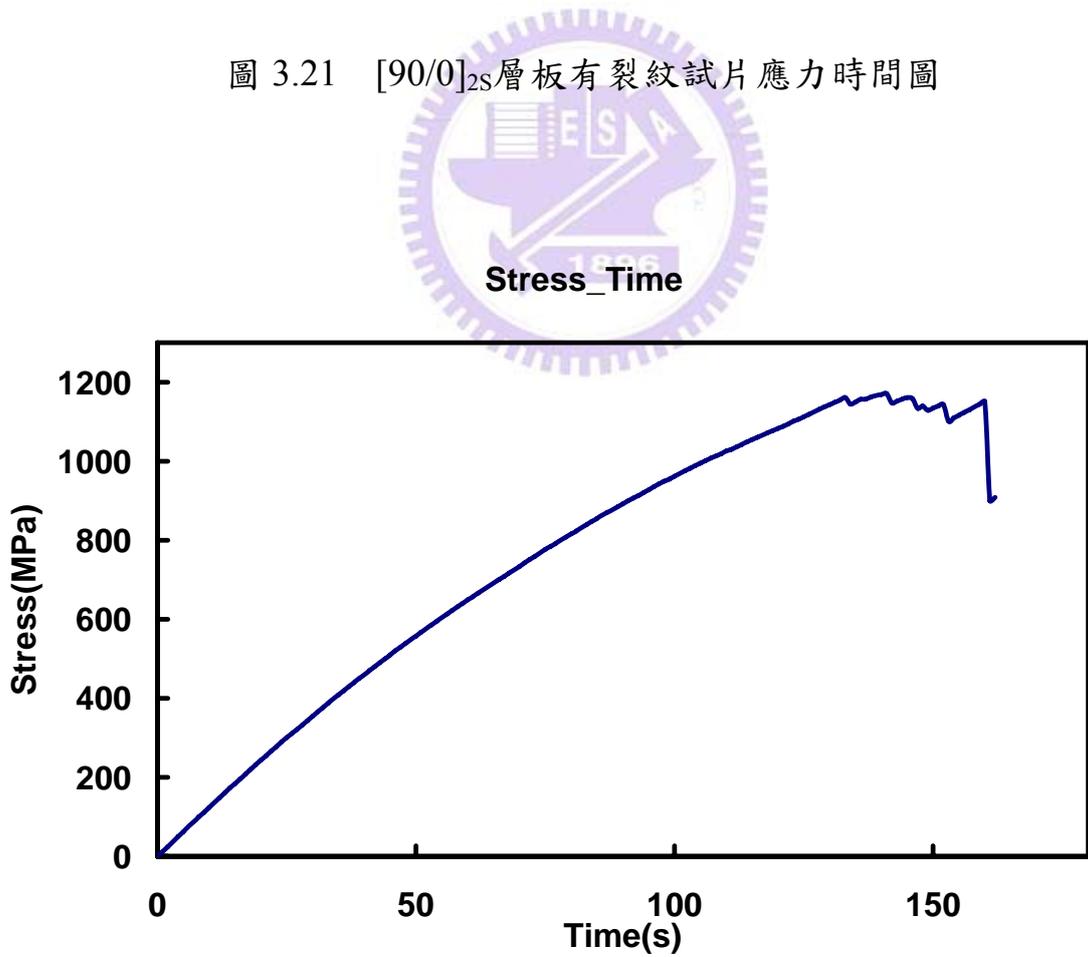


圖 3.22 $[90_2/0_2]_s$ 層板有裂紋試片應力時間圖

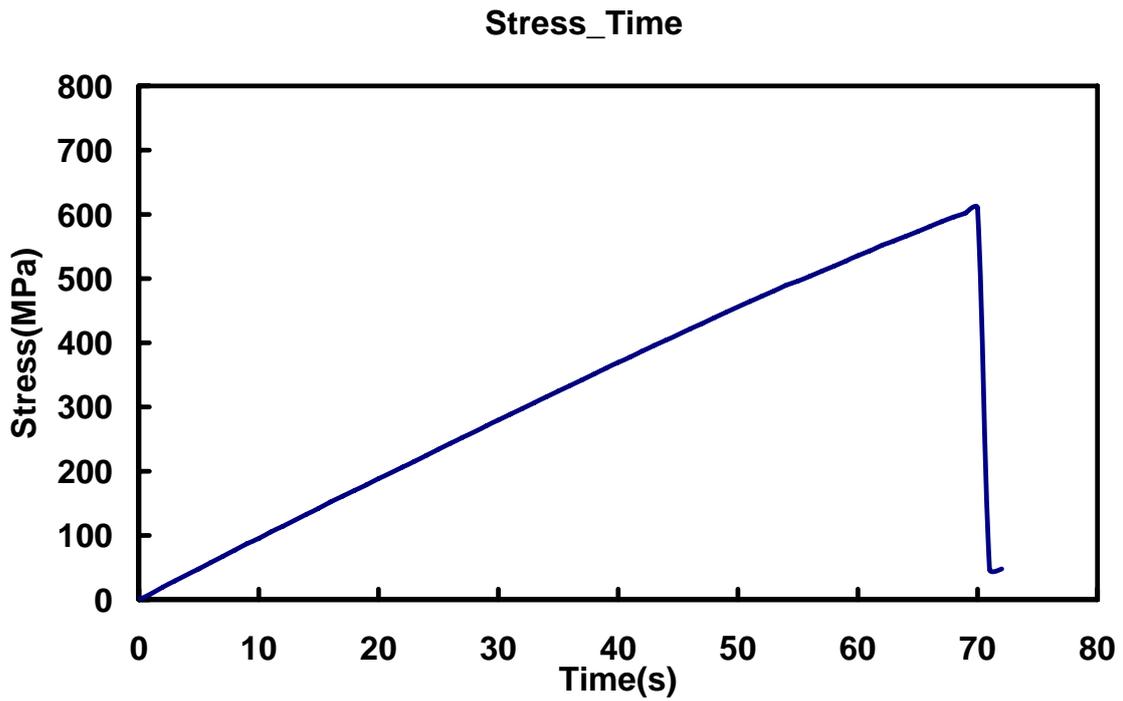


圖 3.23 $[0/\pm 45/90]_2s$ 層板有裂紋試片應力時間圖

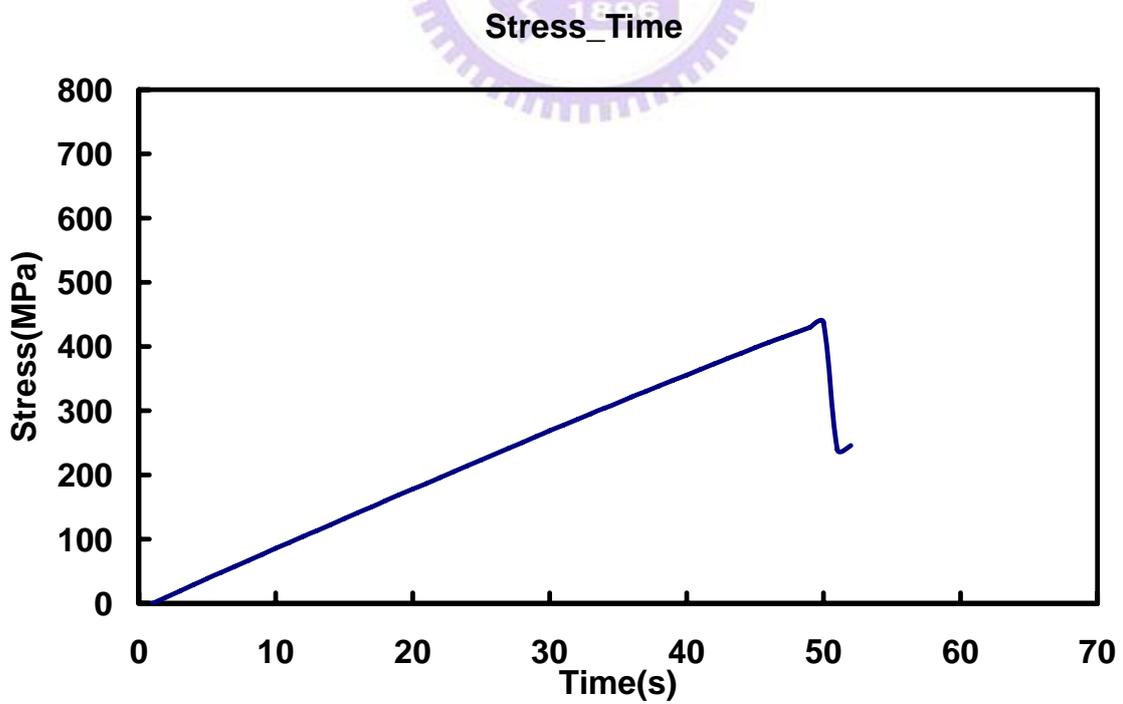


圖 3.24 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 層板有裂紋試片應力時間圖

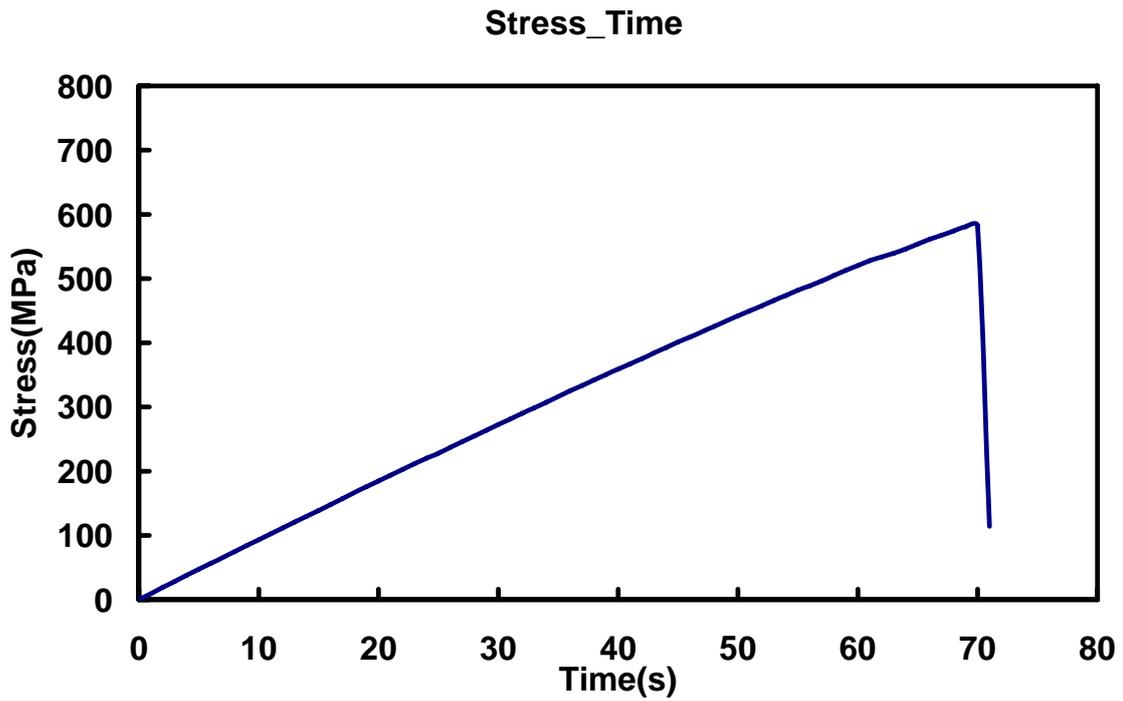


圖 3.25 $[90/\pm 45/0]_{2s}$ 層板有裂紋試片應力時間圖

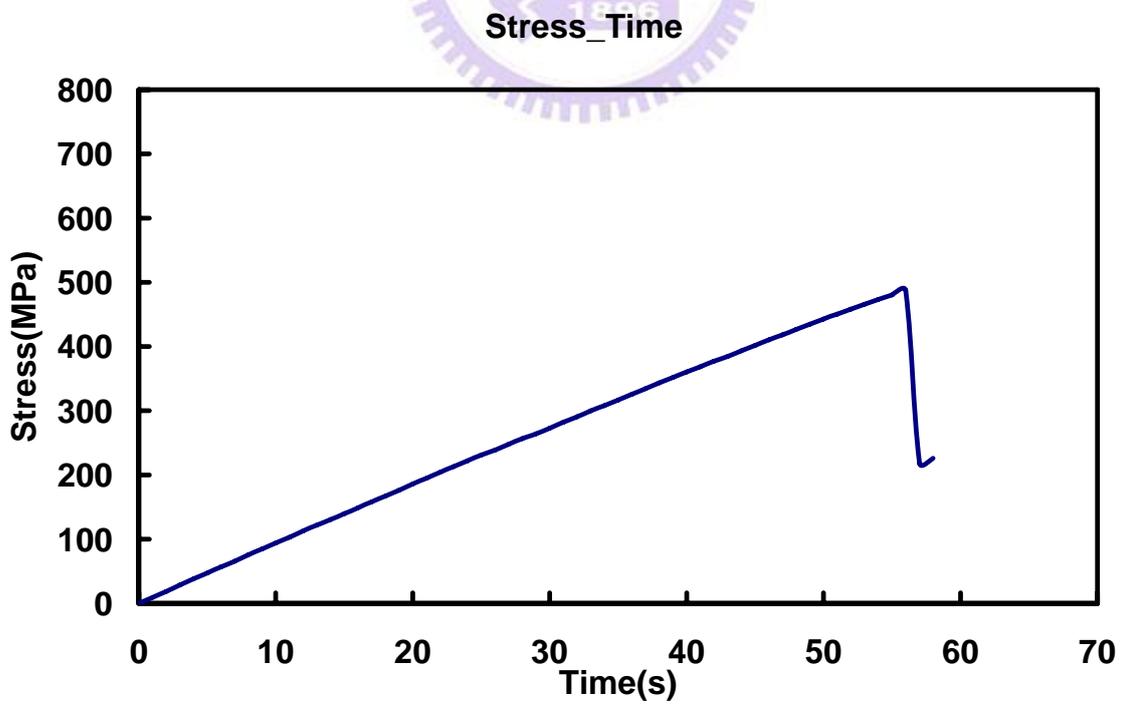


圖 3.26 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$ 層板有裂紋試片應力時間圖



圖 3.27 $[0/90]_{2s}$ 層板有裂紋試片破壞形式

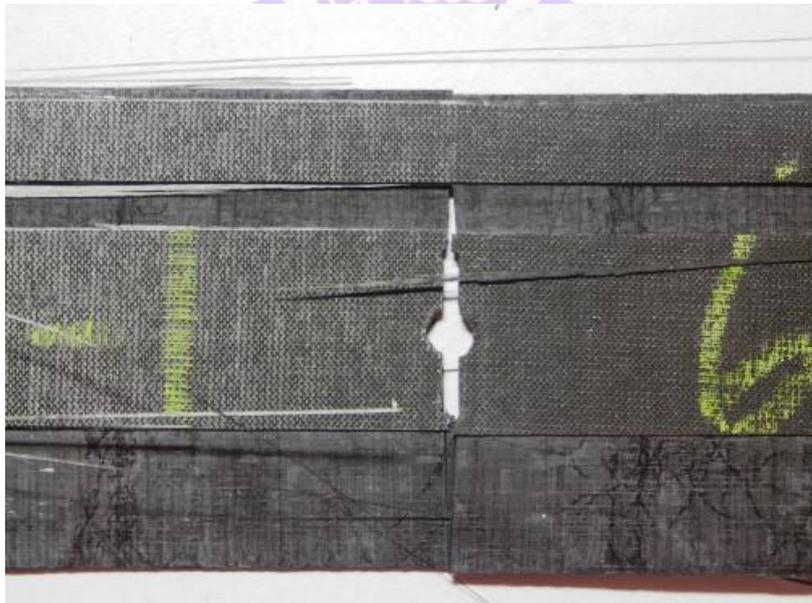


圖 3.28 $[0_2/90_2]_s$ 層板有裂紋試片破壞形式

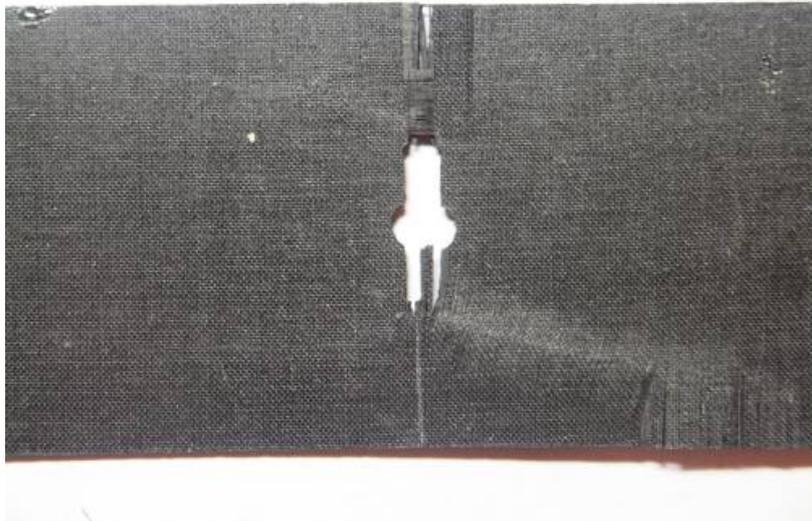


圖 3.29 $[90/0]_{2S}$ 層板有裂紋試片破壞形式



圖 3.30 $[90_2/0_2]_S$ 層板有裂紋試片破壞形式



圖 3.31 $[0/\pm 45/90]_{2s}$ 層板有裂紋試片破壞形式



圖 3.32 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 層板有裂紋試片破壞形式



圖 3.33 $[90/\pm 45/0]_{2s}$ 層板有裂紋試片破壞形式



圖 3.34 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$ 層板無有裂紋試片破壞形

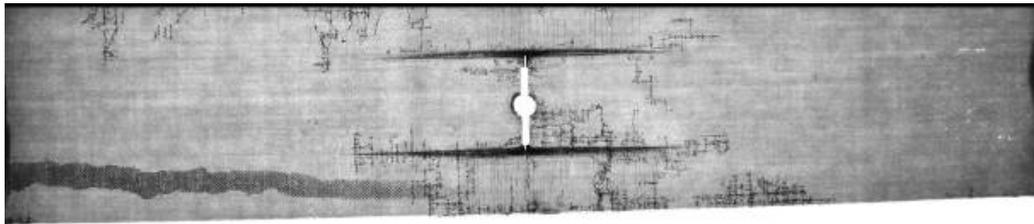


圖 3.35 $[0/90]_{2s}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像圖

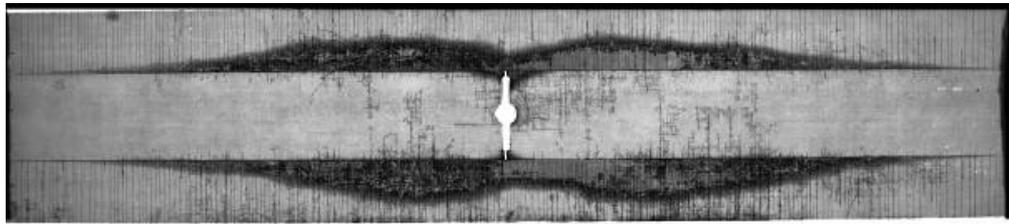


圖 3.36 $[0_2/90_2]_s$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像圖

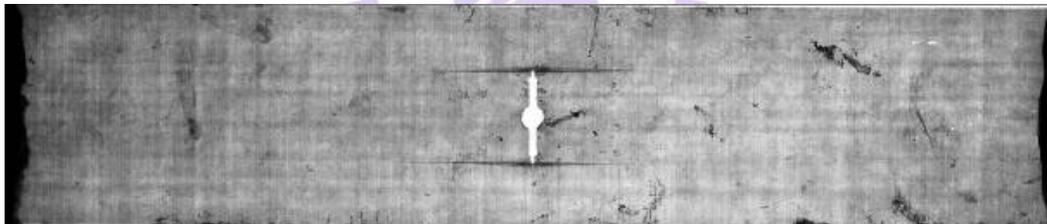


圖 3.37 $[90/0]_{2s}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像圖

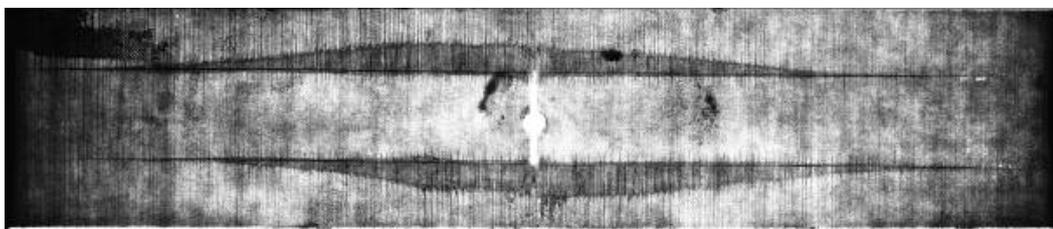


圖 3.38 $[90_2/0_2]_s$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像圖

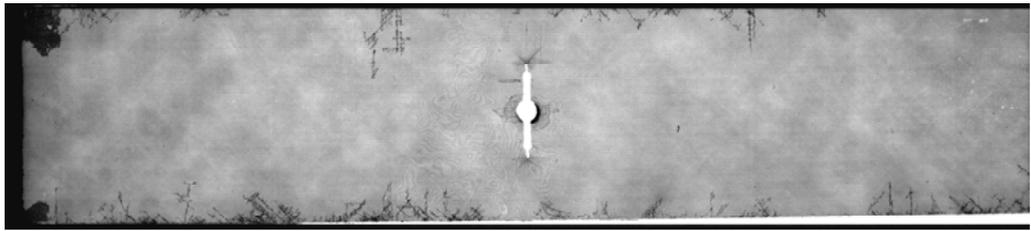


圖 3.39 $[0/\pm 45/90]_{2s}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像圖



圖 3.40 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 破壞應力 95%的破壞區X光顯像圖

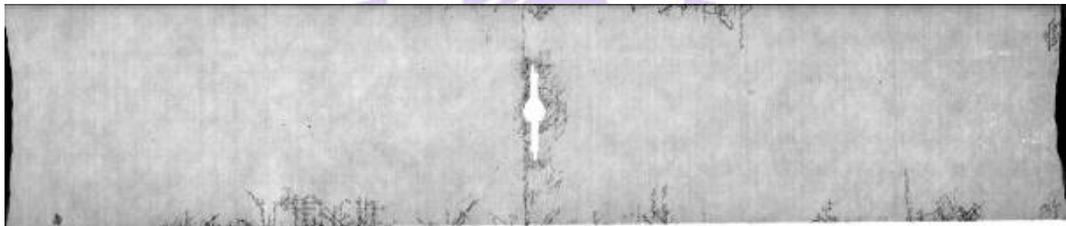


圖 3.41 $[90/\pm 45/0]_{2s}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像圖



圖 3.42 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$ 破壞應力 95%的破壞區X光顯像圖

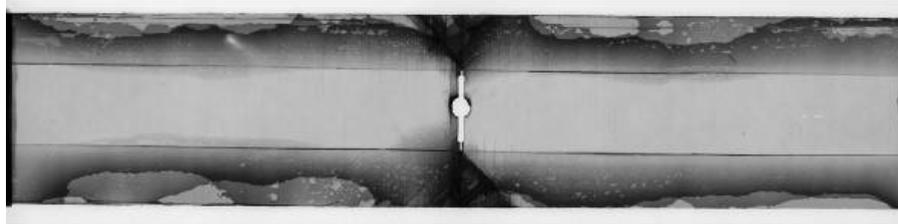


圖 3.43 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 破壞應力 98%的破壞區X光顯像圖

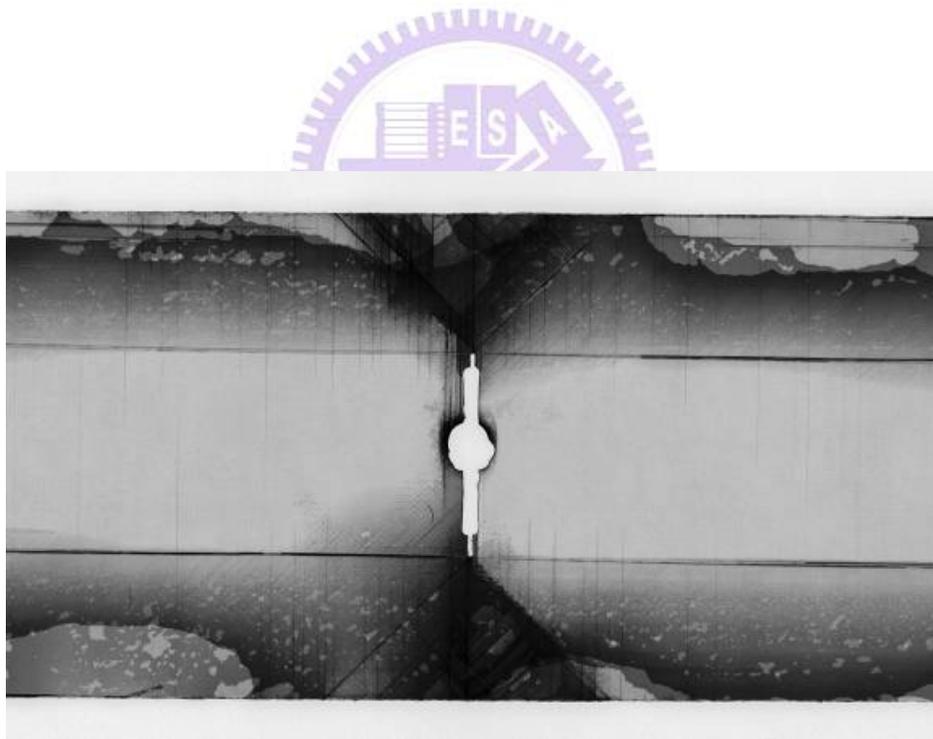


圖 3.44 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_S$ 破壞應力 98%的破壞區X光顯像放大圖

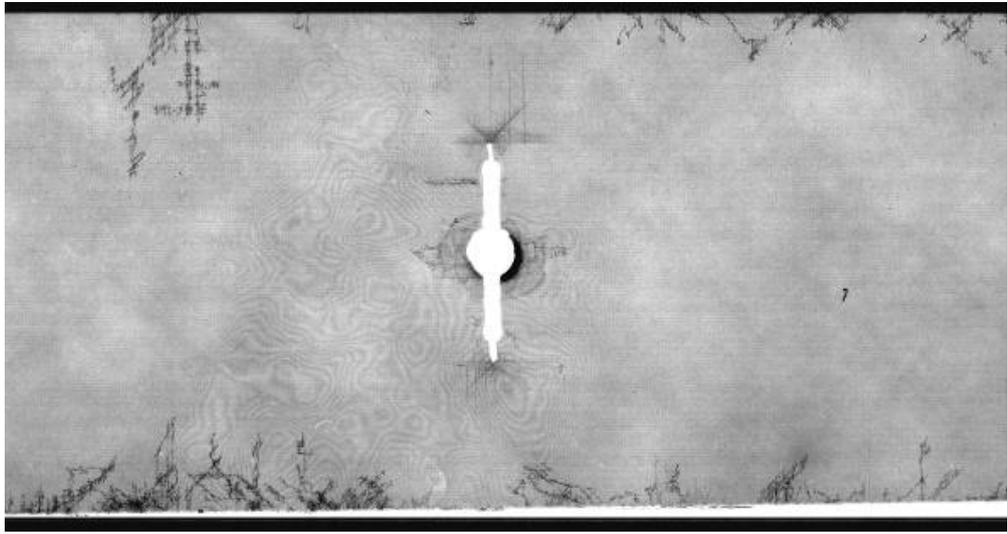


圖 3.45 $[0/\pm 45/90]_{2s}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像放大圖

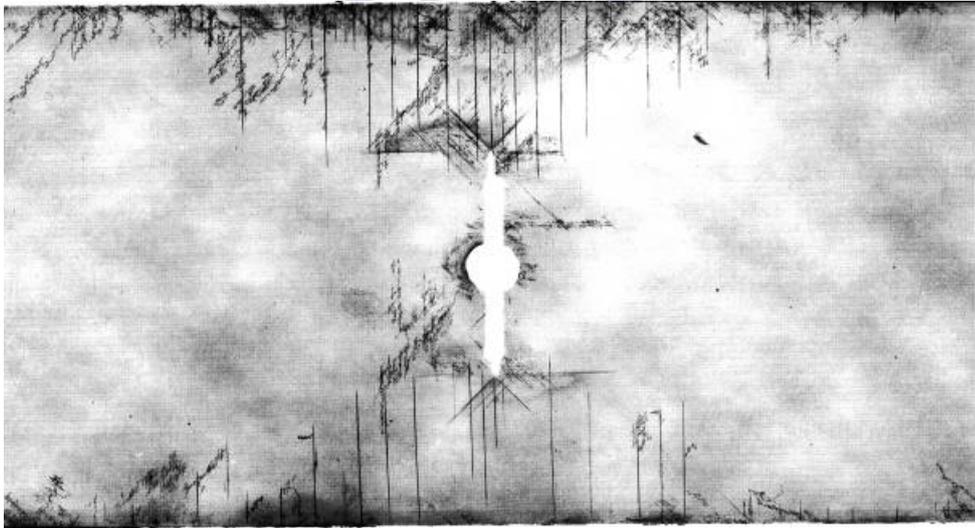


圖 3.46 $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ 破壞應力 95%的破壞區X光顯像放大圖

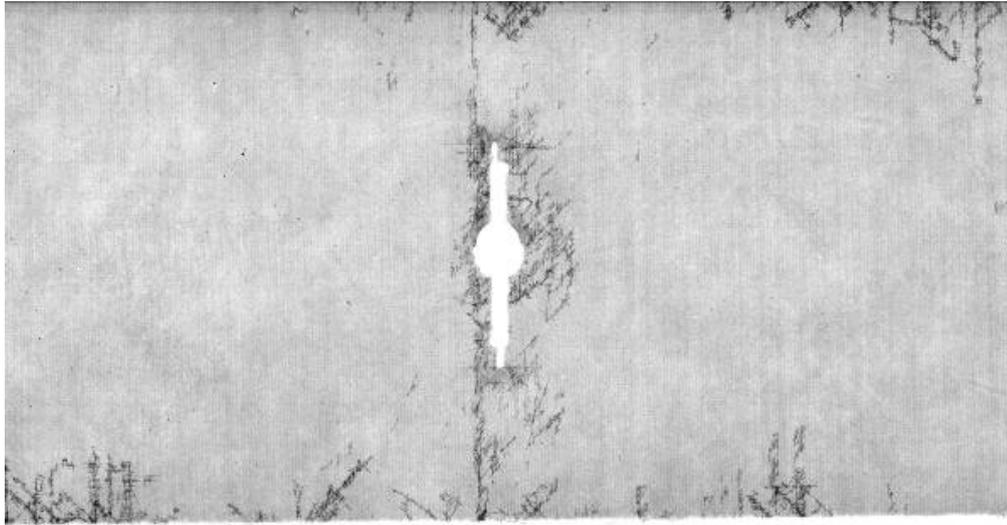


圖 3.47 $[90/\pm 45/0]_{2s}$ 破壞應力 90%的破壞區X光顯像放大圖

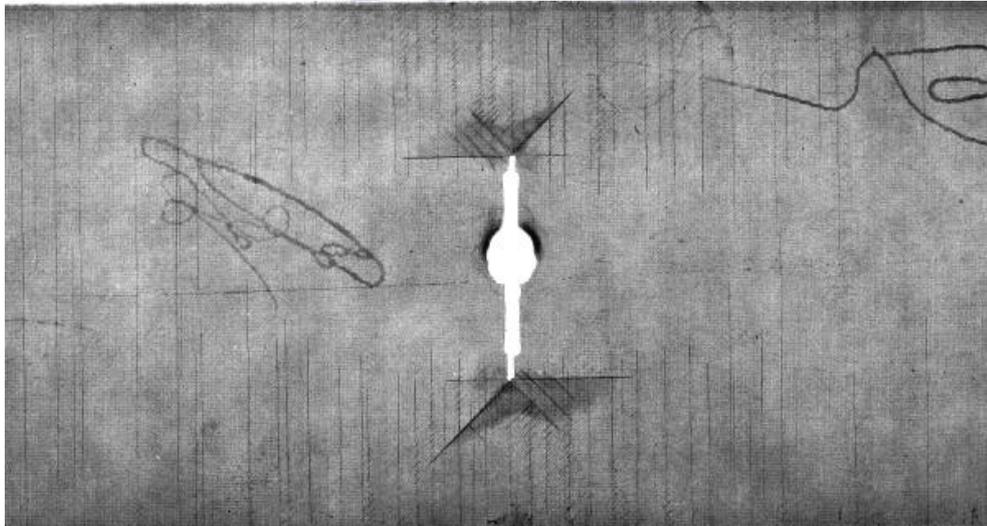


圖 3.48 $[90_2/\pm 45_2/0_2]_s$ 破壞應力 95%的破壞區X光顯像放大圖

Failure Stress of Specimens Without Crack

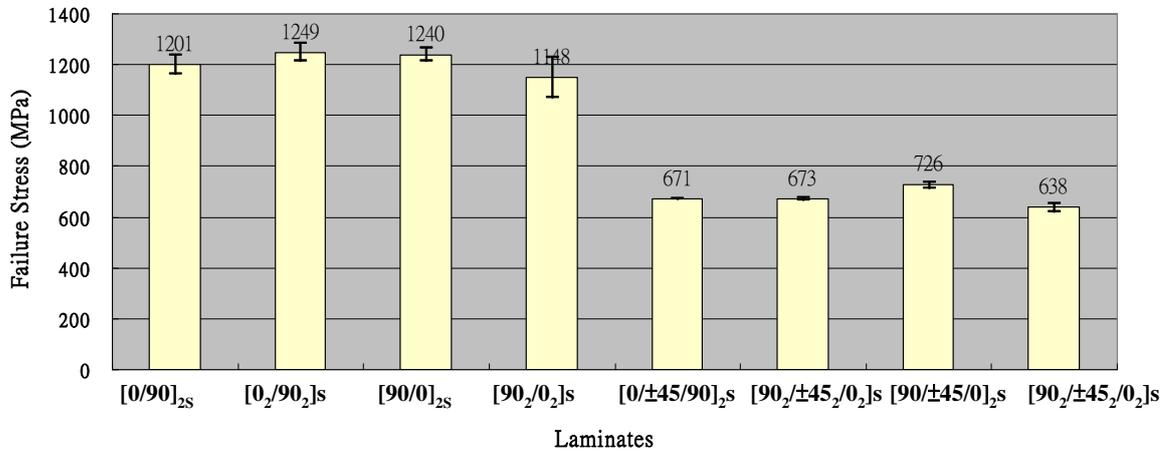


圖 4.1 無裂紋各種層板破壞應力比較圖



Failure Stress of Specimens with Crack

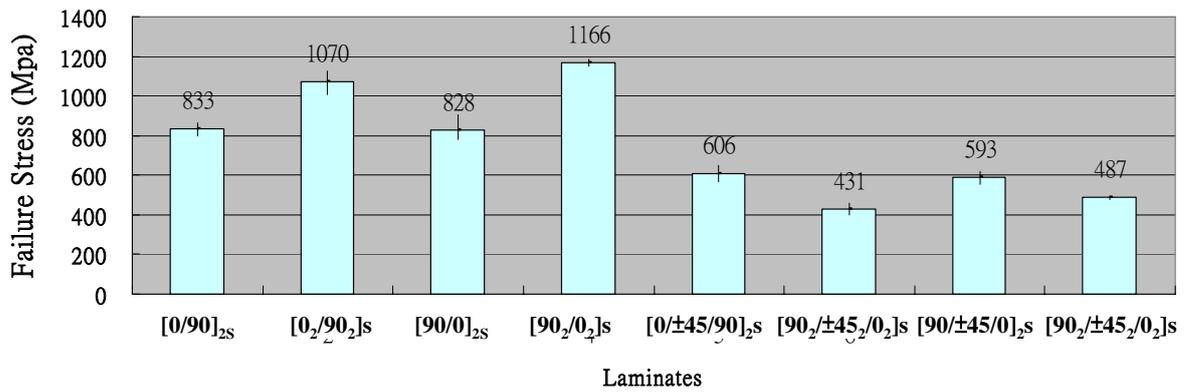


圖 4.2 具裂紋各種層板破壞應力比較圖

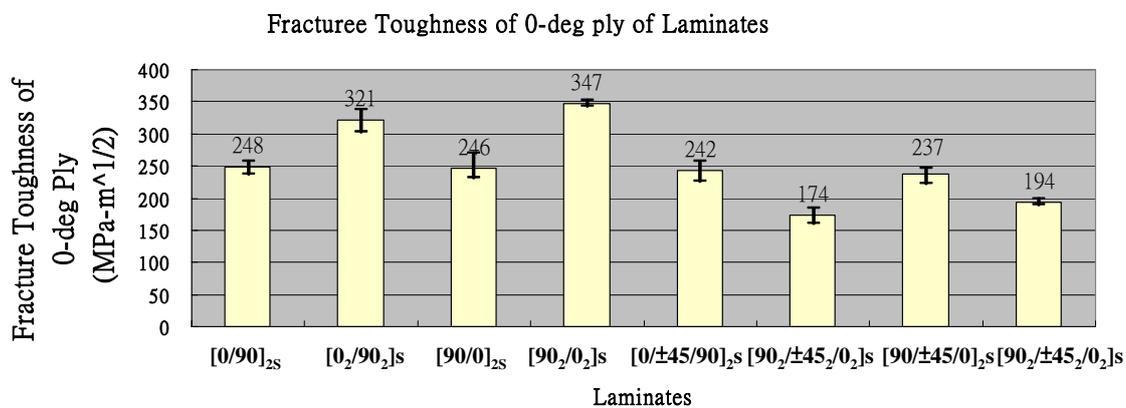


圖 4.3 各種層板 0 度層破壞韌度值 K_Q^0 比較圖

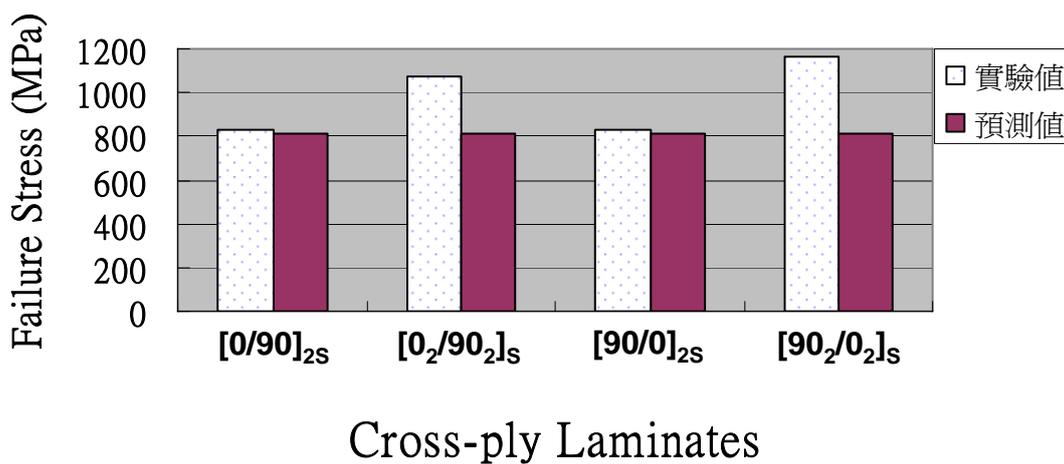


圖 4.4 利用 K_Q^0 預測十字形層板強度與實驗值的比較

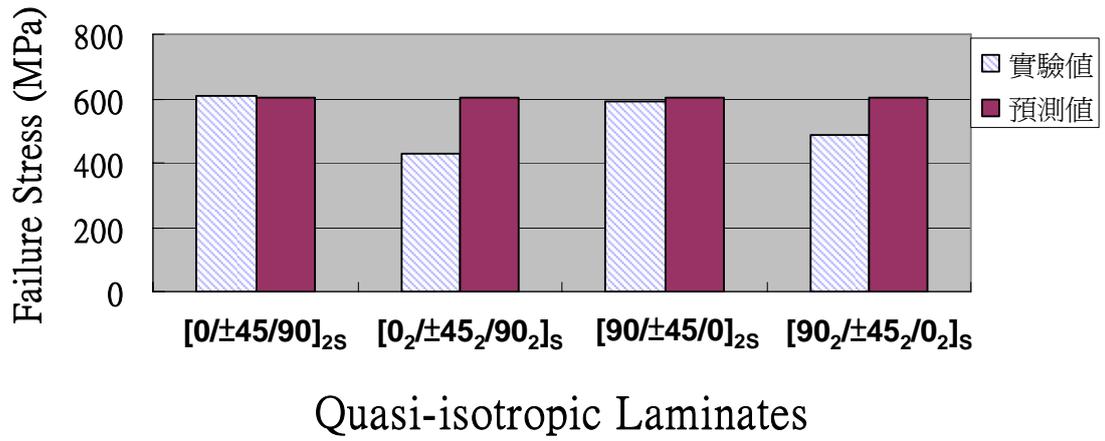


圖 4.5 利用 K_Q^0 預測準等向性層板強度與實驗值的比較

