

不同製程懸臂複合材料板層之裂縫延展釋放能量

賴峯民 陳裕偉 薛鈞騰
大葉大學工業工程與科技管理學系
51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘 要

本研究主要是採用玻璃纖維布以及環氧樹脂利用手積法製作出薄懸臂複合材料板，經過拉伸實驗測試，找出力量以及裂縫延展位移值，再經由這些數據計算出複合材料板的 Model 能量釋放率。而在 ANSYS 理論分析部分將板層分成三部份上下兩層為板層，中間層為膠層，板層採用 SOLID191 元素建模，膠層採用 PLANE42 元素建模讓 ANSYS 模擬出變形量，最後我們把實驗所計算的數據和 ANSYS 分析數據做比對，證實我們的 ANSYS 建模可以準確的模擬出實驗的數據，這樣一來就可以減少實驗的時間，直接以 ANSYS 建模就可以模擬出實驗數據。最後本研究還使用了玻璃纖維預浸材以及碳纖維預浸材兩種不同的材料做測試，實驗出數據來跟手積法的玻璃纖維作比較，並探討這三種材料對於該實驗的可行性。

關鍵詞：懸臂複合材料板，能量釋放率，手積法，玻璃纖維預浸材，碳纖維預浸材

Energy Release Rates of Cantilever Composite Laminate Plates by Differential Manufacturing

FENG-MIN LAI, YU-WEI CHEN and CHUN-TENG HSUEH

*Department of Industrial Engineering & Technology Management, Da-Yeh University
No. 168, University Rd., Dacun, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.*

ABSTRACT

The purpose of this study was to use glass fiber and epoxy resin to make thin cantilever composite plates by a hand lay-up technique. A tensile test was performed to identify and determine the extension force displacement values. The data obtained were used to derive the Model I energy release rate of the laminate plates. In the software program ANSYS, a SOLID191 model divided the plates into their composite laminates, the middle resin layer being a PLANE42 model, used to simulate the deformation. Finally, the experimental data obtained were used to confirm that our model can accurately perform simulations. Thus, this experiment enabled a reduction in the time required for direct ANSYS modeling in simulation. Furthermore, two different sheet materials, consisting of both glass and carbon fiber prepregs, were tested with the experimental data to design a hand-plot method for comparison and exploration of three materials to demonstrate the feasibility of the experiment.

Key Words: cantilever composite plates, energy release rates, hand lay-up technique, glass fiber prepreg material, carbon fiber prepreg material

一、概論

在本文中，我們在實驗數據上使用了能量計算公式，而公式來源主要來自於古典板和 von Karman 理論，實驗的公式包含了力量、位移、楊氏係數等，將數據紀錄並畫出該板層的能量曲線圖；在 ANSYS 方面，我們使用複材疊層建模，模擬實驗相近的實體，再將實驗的力量數據代入 ANSYS 分析，而 ANSYS 的公式，包含力量值、位移、寬度等，計算分析數據與實驗數據相比對，看看模擬與實驗數據是否趨於一致。

在裂縫的相關文獻探討方面，由余海豐教授和金大仁教授所發表的薄懸臂複合材料層板之 Mode I 能量釋放率 [3] 這篇論文裡，在實驗過程中測量出數據並藉由此數據計算出裂縫的能量釋放率，並將此數據利用其他的線性方式或非線性方式求出結果並探討各種方法的適用性 [5]；本文再藉由此篇論文使用其公式，並模擬出不同的疊層角度以及疊層數來分析，證實 ANSYS 模擬數據與實驗相吻合。

二、研究方法

本研究首先利用 ANSYS 套裝軟體進行複合材料試片裂縫能量分析並與文獻 [3] 進行比對。實驗採用預浸複合材料及手積法複合材料試片進行裂縫延遲拉伸實驗，並與理論分析比較。

(一) 能量理論分析

1. 實驗能量公式

$$G_{IC} = \frac{\Delta A}{b\Delta a} (KJ/m^2) \quad (1)$$

b 的值代表實驗試片的寬度， Δa 表示第一點裂縫到第二點裂縫之間的距離，以上的長度單位都是以 m 為單位、力量以 N 為單位，能量產生的單位為千焦耳。此公式裡，主要是用來計算出實驗所產生的能量釋放率， ΔA 表示在裂縫產生下，所圍成的面積如圖 1 所示。

舉例來說：在裂縫第 30 mm 處開始延展到第 40 mm 處，在延展過程中，我們能知道第 30 mm 處與第 40 mm 處的裂縫位移和力量，因此利用 Solid Works 繪出圖形，以原點、第 30 mm 處的力量、位移當第二點，第 40 mm 處的力量、位移當第三點，此三點圍成一塊三角形面積，即為 ΔA ，而 $\Delta a=0.01$ m， b 是試片寬度，此三項數據便可計算該能量。

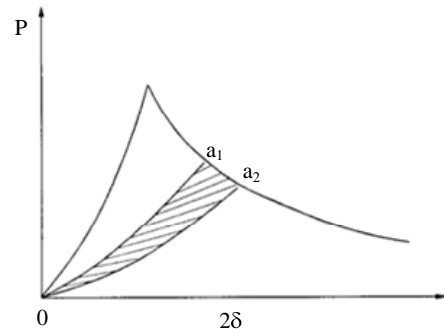


圖 1. 裂縫下的面積

2. 裂縫延遲的能量公式

本研究中的 ANSYS 套裝軟體之分析能量公式採用文獻 [3] 所提的 G_{IC1} 公式，如下：

$$G_{IC1} = \frac{P_C^2 a^2}{bEI} (KJ/m^2) \quad (2)$$

其中， P_C 是實驗及分析所測得的力量值，單位是牛頓 (N)， a 是尖端點裂縫的位置 (m)， b 是試片的寬度 (m)， E 是長度方向楊氏係數 (GP_a)，方形的慣性矩 I 是 $\frac{bh^3}{12}$ ， b 一樣是寬度， h 是試片厚度，如圖 2、3 所示，能量的單位也是千焦耳 (KJ/m^2)。

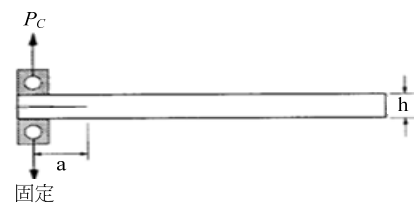


圖 2. 力量位置與厚度

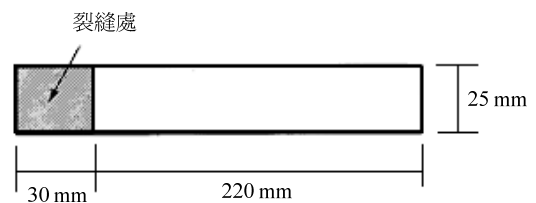


圖 3. 裂縫處與寬度

範例：當裂縫延展至 50 mm 處時，所產生的力量為 P_C ， P_C 會隨著裂縫延展產生不同值，而試片的寬度為 25 mm，厚度為 1.205 mm，楊氏係數為 124.2 GPa，除了 P_C 需要實驗測量外，其他數據都可以在試片完成時得知。

將上述的數值代入能量公式，即可求出該點在 ANSYS 分析所產生的能量。

(二) ANSYS 分析介紹

在 CAD 裡，共分成四大問題層面，從最初的相關蒐集資料、決定分析項目、選擇 2D 或 3D、材料性質及邊界條件設定，到前處理器，定義元素種類、材料性質，開始建模及網格化接著進行分析，定義分析的種類和邊界條件設定及施力點，最後由後處理器，分析結果，找出所需求的答案，經由分析的數據做探討，決策出良好的方案。

本文 ANSYS 理論分析建模，元素使用 SOLID191，按照實驗角度依序疊層，上下層分別為手積法及預浸材複合材料疊層，中間膠層複合材料，我們採用 PLANE42 的膠層建模而我們使用不同厚度的疊層，分別有 8 層、6 層兩種，再來設定玻璃纖維材料的楊氏係數，給定數據然後建立體積模型，上、下半層分別為手積法玻璃纖維或玻纖預浸材或碳纖預浸材堆疊而成，中間膠層，共三層，如圖 4、5 所示。

完成建模便開始網格化，我們將網格大小設定為 0.5，如圖 5 所示，如此一來可讓我們的數值達到收斂；邊界條件設定為底層面積完全固定，再上層前端 300 mm 乘上 25 mm 的面上施一均勻拉力，經過求解執行，最後我們找出在延展

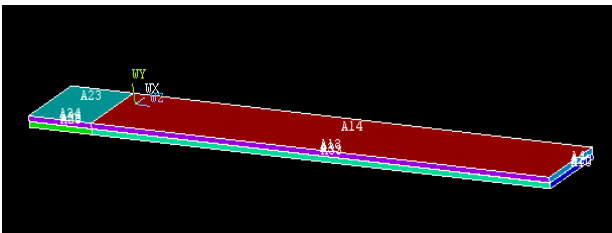


圖 4. 試片模型

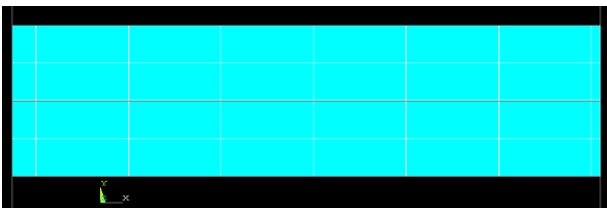


圖 5. 分上中下三層，中間細小厚度為膠層

瞬間的 NODE 座標以及位移並紀錄下來就可以與理論值或者是實驗值來互相比對，如圖 6 所示。表 1 為建模時所需要用的各種材料性質。實驗與分析時所需用到的各種材料單層厚度以及總厚度，如表 2 所示。

三、研究步驟

(一) 試片的製作

試片的製作方法，本研究分別使用三種不同材料做實驗，一種是碳纖維預浸材，另一種是玻璃纖維預浸材，最後一種是將環氧樹脂與硬化劑再加上玻璃纖維布製作而成，以下為各材料的製作過程。

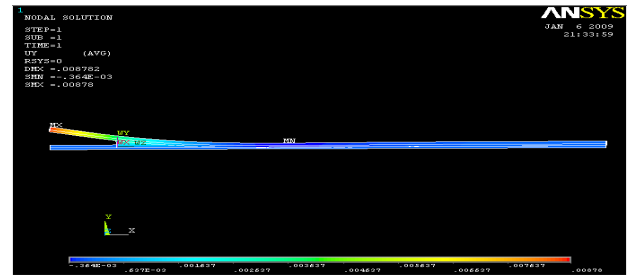


圖 6. 分析示意圖

表 1. 各種材料的楊氏係數與浦益松比

製程 材料性質	A	B	C	D
	現行 手積法	玻纖 預浸材	碳纖 預浸材	膠層
E_1 (GPa)	23.5	36.54	124.2	0.0003
$E_2=E_3$		8.65	8.53	
$V_{12}=V_{13}$	0.3	0.31	0.27	0.28
V_{23}		0.31	0.25	
$G_{12}=G_{13}$		2.89	4.11	
G_{23}		0.72	1.04	

表 2. 各種材料的單層厚度及總厚度

材料	6 層 (mm)		8 層 (mm)	
	單層	總厚	單層	總厚
碳纖	單層	0.184	單層	0.150
	總厚	1.105	總厚	1.205
玻纖	單層	0.190	單層	0.150
	總厚	1.145	總厚	1.205
手積法	單層	0.416	單層	0.522
	總厚	2.500	總厚	4.200
膠	0.005			

1. 手積法

首先要準備的是環氧樹脂、硬化劑、玻璃纖維布三種，依照我們疊層的數量和角度以及大小將玻璃纖維布裁到該數量以及所需的角和長寬，長是 300 mm 寬是 200 mm(圖 7)，再來調配環氧樹脂和硬化劑以 1:0.5 的比例，將樹脂依適當劑量均勻塗布在每一層玻璃纖維布上，中間層尖端夾一片 200 mm × 300 mm 的塑膠墊片當作預留裂縫(圖 8)，完成疊層後再裁一片玻璃紙覆蓋上去，使用滾輪將裡面的氣泡再次擠出，放置一天即可完成，再將整大片的試片裁成所需的試片規格，最後將先前的塑膠墊片抽出，在 30 mm 上下處，黏上拉伸鐵片(圖 9)，此鐵片為拉伸機夾持的地方。

2. 碳纖維與玻璃纖維預浸材試片製作

將所需的疊層數、角度及尺寸大小裁好，然後依照角度疊層，而中間層尖端一樣夾 200 mm × 300 mm 的塑膠墊片，



圖 7. 玻纖布的長和寬



圖 8. 預留裂縫的長度



圖 9. 完成的試片

最後在下層和上層處各貼一片離形紙，再放進烤箱烘烤(圖 10)，烘烤溫度與時間分別為 120 度、120 分鐘，等冷卻後裁切成標準試片，並抽出塑膠墊片及貼上拉伸鐵片。

(二) 實驗過程

1. 控制介紹

本實驗所使用的機器為萬能材料試驗機，本實驗儀器主要是用來測試材料之應力-應變圖，它可以依所繪的圖來分析材料之相關機械性質(圖 11、12)，最大力量為 25 噸，最小單位力量為 600 g。

2. 裂縫延展的實驗步驟

一開始先將試片依照各種不同材料做出各種試片，然後在試片側邊塗上立可白，用黑筆依序從 30 mm 開始每隔

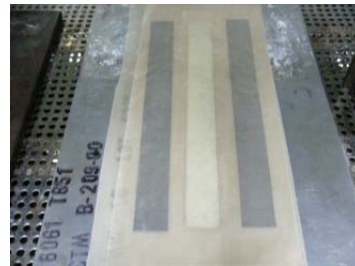


圖 10. 烤箱烘烤試片



圖 11. 拉伸實驗機與操作平台



圖 12. 拉伸實驗控制機及取值系統

10 mm 標示一次，直到 120 mm 為止，如圖 13、14 所示。

標示完成，再將鐵片稍微磨粗糙，主要是讓夾在拉伸機上更有摩擦力才不會滑動或者脫落，接著開啓萬能材料試驗機，將試片夾在夾頭上，如圖 15 所示。

設定位移大小並將位移和力量歸零，位移的大小可分成每分鐘多少移動量，本文所採用拉伸速率分別為 1 mm/min 設定，接著開始觀察裂縫延展，每到一個刻度時（圖 16），即停止機台並記錄位移量和力量值，然後將降回密合原狀，回歸後再將控制台的位移量和力量值歸零，然後再繼續啟動拉伸機進行拉伸，如此反覆動作直到裂縫延展到 120 mm 為止，如圖 17。



圖 13. 上視—刻度標示



圖 14. 側視—標刻線



圖 15. 夾持試片示意圖

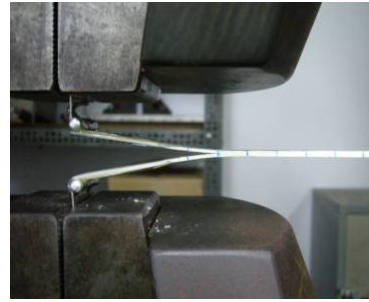


圖 16. 裂縫延展到 50 mm 處示意圖



圖 17. 裂縫延展到 120 mm 處示意圖

四、結果與討論

經由 ANSYS 分析以及實驗的測量後，我們可以收集到非常多的資料，我們可以藉由這些資料探討能量與疊層數、角度、材料等 [1]，讓我們從中證實本研究分析的數據和理論值是吻合的。

（一）分析與理論值的比對

本文利用 ANSYS 軟體的 SOLID191 及 Plane42 元素建立模型，網格大小為 0.5 mm 的，建模完成後代入預設的力量值使每階段延展量增加 10 mm 位移的收斂力量，其結果如圖 18 所示，並將各點上的最佳值依序與文獻 [3] 實驗比對，發現 ANSYS 分析的數值與文獻的實驗值誤差大約在 10% 左右，而且本文計算的能量與文獻的能量值相差約 10% 至 20% 左右，顯示本文 ANSYS 分析方法在模擬裂縫延展的力量與能量值是可行的。

（二）試片測試力量與分析之比較數據

本文的試驗利用與手積法不同的材質做測試，採用玻璃纖維預浸材的疊層試片進行拉伸，玻纖厚度是 1.205 mm，膠層為 0.005 mm 並採用位移控制方式做裂縫延展實驗圖 19-22 分別為玻璃纖維預浸材，[0/90/0/90] s、[0/90/0] s、

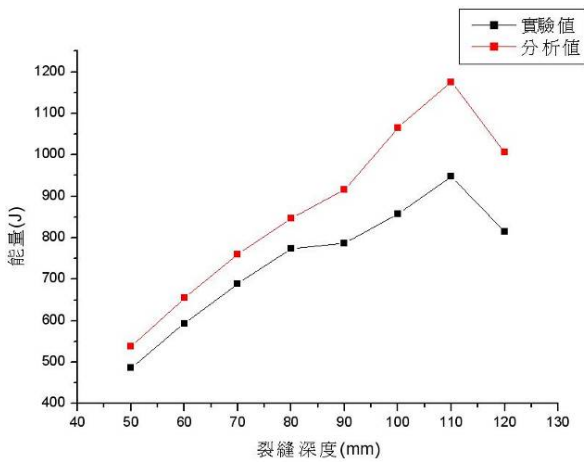


圖 18. 實驗值與理論分析之比較

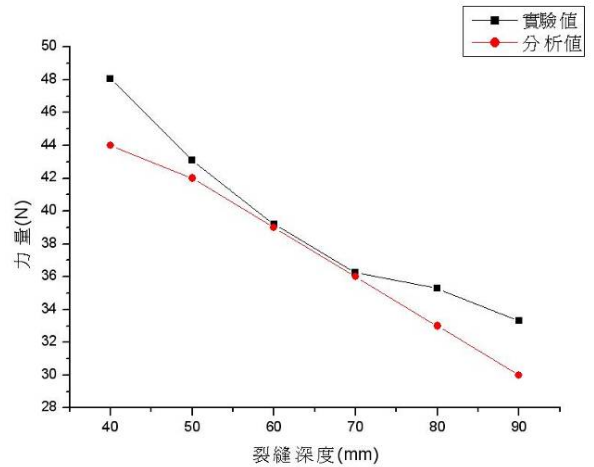


圖 21. 玻纖 [0/0/0/0] s 實驗與分析之力量數據比較

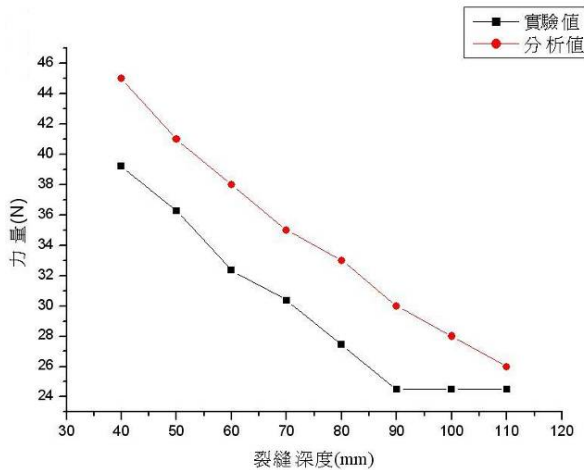


圖 19. 玻纖 [0/90/0/90] s 實驗與分析之力量數據比較

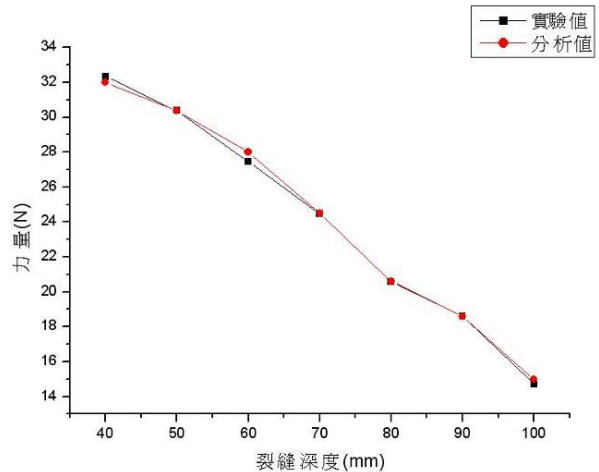


圖 22. 玻纖 [0/0/0] s 實驗與分析之力量數據比較

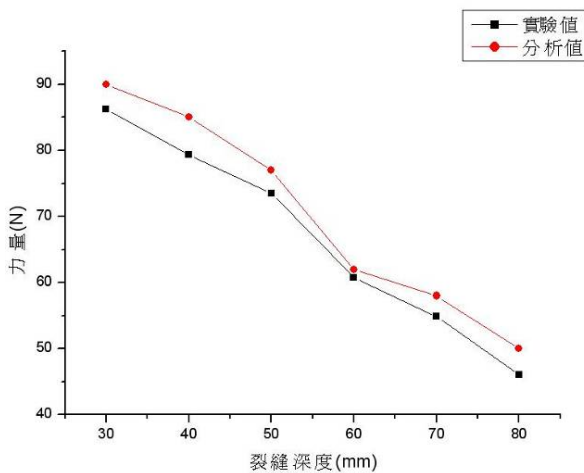


圖 20. 玻纖 [0/90/0] s 實驗與分析之力量數據比較

[0/0/0/0] s、[0/0/0] s 試片各裂縫伸度之實驗力量值與理論值力量之比較，其最大誤差 22%，最小誤差 0%。

而在圖 23-26 分別為碳纖維預浸材 [0/90/0/90] s、[0/90/0] s、[0/0/0/0] s、[0/0/0] s 試片各裂縫深度之實驗力量值與理論力量之比較最大誤差 6%，最小為 0%。

(三) ANSYS 分析數據與實驗比對

在碳纖維試片實驗完成後，我們量測各點的力量以及計算能量 G_{IC} ，計算方式為 $G_{IC} = \frac{\Delta A}{b\Delta a} (KJ/m^2)$ ，ANSYS 分析完

成後利用 $G_{IC1} = \frac{P_C^2 a^2}{bEI} (KJ/m^2)$ 公式計算能量互相比對各點

能量差異性，在力量的比對下實驗與分析大約只差了 3 N 到 5 N 左右，差異性相對的也很小。

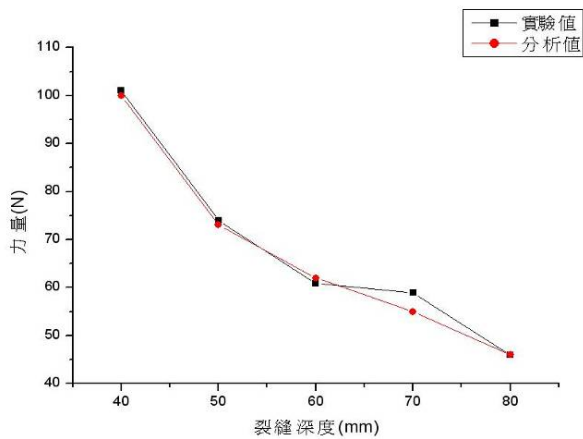


圖 23. 碳纖 [0/90/0/90] s 實驗與分析之力量數據比較

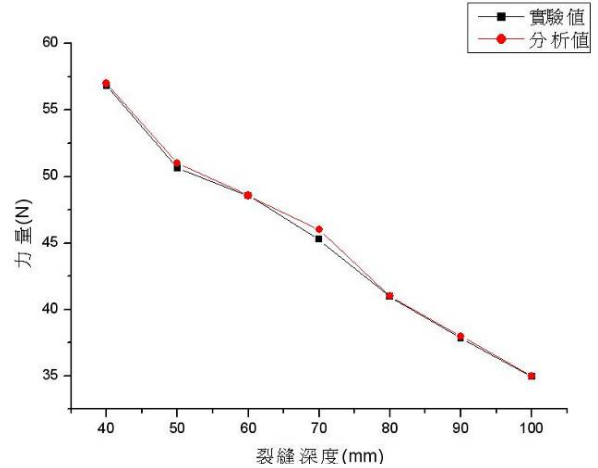


圖 26. 碳纖 [0/0/0] s 實驗與分析之力量數據比較

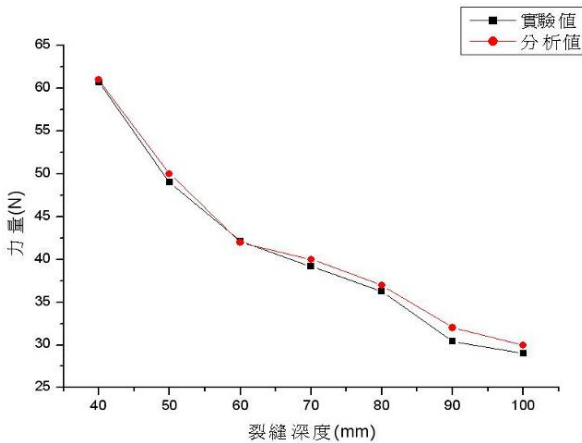


圖 24. 碳纖 [0/90/0] s 實驗與分析之力量數據比較

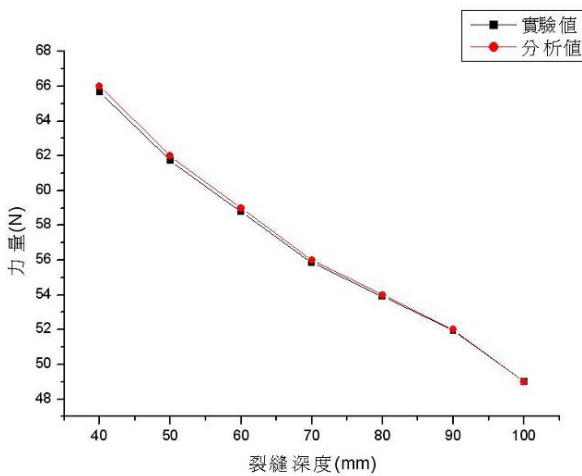


圖 25. 碳纖 [0/0/0/0] s 實驗與分析之力量數據比較

圖 27、28 分別為碳纖維預浸材 [0/90/0] s、[0/90/0/90] s 只差在於角度上，計算的方式跟上述一樣，因此再分析後所產生的力量以及位移會有不同。最大能量值為 984.13 J，與實驗值的最大及最小差異分別為 47.47% 及 1.22%。

(四) 同角度疊層分析與實驗比對

本文探討不同材質（玻璃纖維與碳纖維預浸材）相同的 0 度疊層方式實驗與 ANSYS 分析之比較。在圖 29、30 分別使用玻璃纖維預浸材 8 層與 6 層試片的實驗與分析之結果；在圖 29 中，延展越久所分析出來的數值越接近實驗，而圖 30 中，在 8 層試片的實驗，與分析比較下發現後面的數據差異較大，反而前幾點的數據差異較小。造成這兩項實驗的差異性，可能的原因應該是 6 層的厚度比較薄所以在前幾點的數據產生的差異會比較大，因為厚度薄可能在實驗過程中造成裂縫超過了預定點。

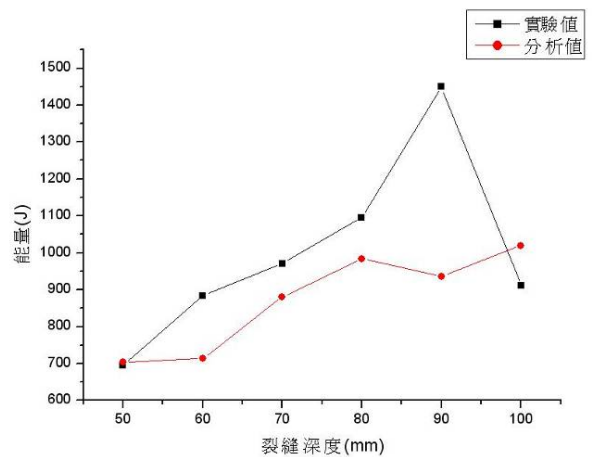


圖 27. 碳纖 [0/90/0] s 實驗與分析之能量數據比較

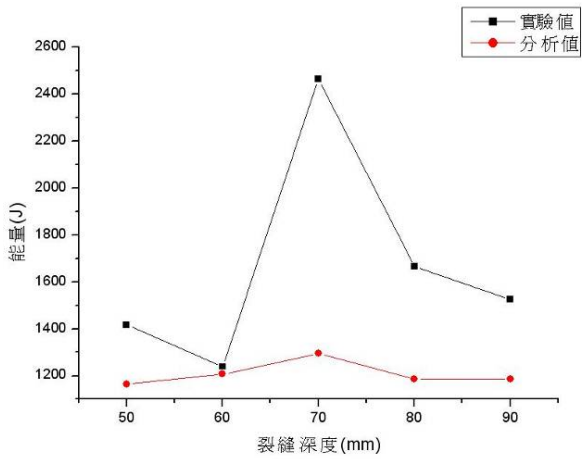


圖 28. 碳纖 [0/90/0/90] s 實驗與分析之能量數據比較

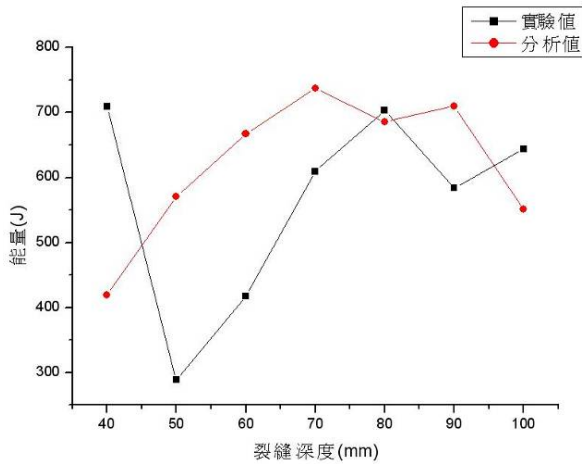


圖 29. 玻纖 [0/0/0] s 實驗與分析之能量數據比較

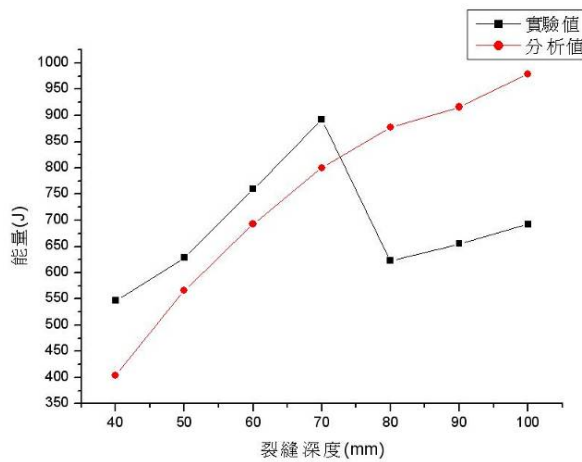


圖 30. 玻纖 [0/0/0/0] s 實驗與分析之能量數據比較

圖 31、32 分別是碳纖維預浸材 [0₆] 及 [0₈] 試片的 ANSYS 分析與實驗之能量釋放表，在這兩張表格初始延展的能量差異性較大，但到了後面的延展能量差異性漸漸精準，或許由於碳纖的材質有脆性、延展性差，一開始的力量是最大，因此容易造成延展能量累積，突然間撕裂開來，造成取值上的錯誤。

由上述得知，由於玻纖與碳纖兩種預浸材料的比較，玻纖材料因為具有延展性，所以在裂縫的延展比碳纖材料來的好，實驗與 ANSYS 分析的數據差異性比較小。

(五) 討論 RTM 及手積法之實驗

在手積法的測試數據中，在表 3 中我們發現 8 層 B 試片，一開始的 4 cm 能量比 5 cm 的能量來的更高，正常來說，後面的點會慢慢的往上升，結果卻不是如此，這個原因在於

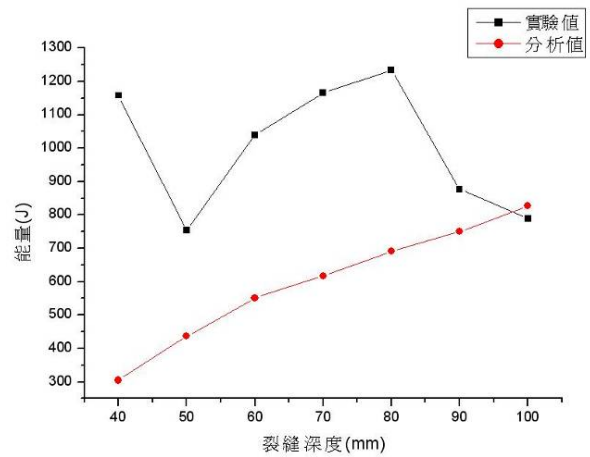


圖 31. 碳纖 [0/0/0] s 實驗與分析之能量數據比較

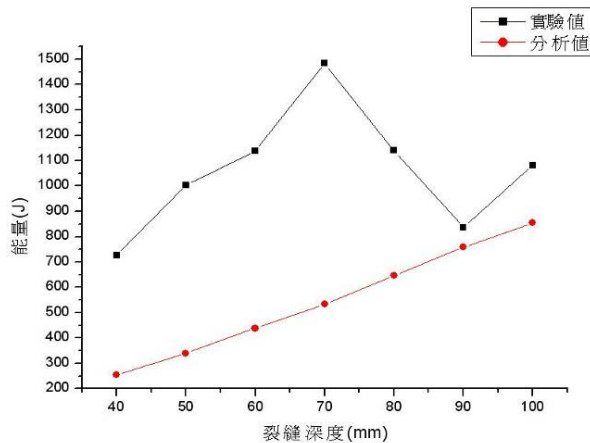


圖 32. 碳纖 [0/0/0/0] s 實驗與分析之能量數據比較

表 3. 控制「力量」拉伸手積法試片

試片規格	[0/90/0/90]-s A		[0/90/0/90]-s B	
裂縫深度 (m)	0.04	0.05	0.04	0.05
位移 (mm)	6.04	10.045	4.10	5.62
力量 (N)	47.72	47.726	62.81	64.58
能量 (J)	81.9	382.2	180.5	176.0

手積法試片裂縫在延展時，不具有延展性，往往不會延展裂縫方向移動，原先應該控制在 4 cm 處的裂縫深度，但因為機器位移加上一點點時，則裂縫將延展到 4 點多公分而造成此錯誤；而在手積法的數據中，我們也發現到手積法的測試裂縫只能到達 4 cm 或 5 cm，這因素是在於手積法所塗用的膠層，黏性太強造成拉伸機在拉伸的過程中，並沒有如預期一樣的均勻延展，延展方式幾乎是硬拉，在施力的過程中，只會尋找在疊層中最脆弱得一層來分裂，如圖 33 所示，不管是幾層或者是疊層角度不同，都沒有多大的改變。表 4 亦可看出不同角度疊層之試片均在裂縫 5 mm 處就斷裂或往下層移動而產生不連續的裂縫延展。

圖 33-37 均可看出玻璃布用手積法製作試片其延展方向不易控制及評估，而延展到 5-6 mm 便直接斷裂。

因此在 RTM (resin transfer molding) 手積法的破壞模式常會有無預警的破裂或斷裂且延展方向不易控制或評



圖 33. [0/90/0/90] s 的疊層

表 4. 控制「位移」拉伸手積法試片

試片規格	[45/-45/45] s			[0/90/0] s	
裂縫深度 (m)	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05
位移 (mm)	13.52	18.09	26.86	10.63	13.75
力量 (N)	58.8	60.76	60.76	64.2	72.814
能量 (J)	-	484.5	965.8	-	219.9

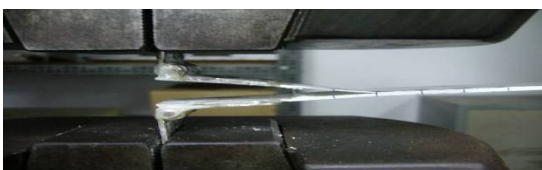


圖 34. [45/-45/45/-45] s 的疊層

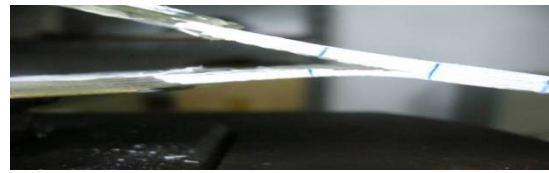


圖 35. [0/90/0] s 的疊層

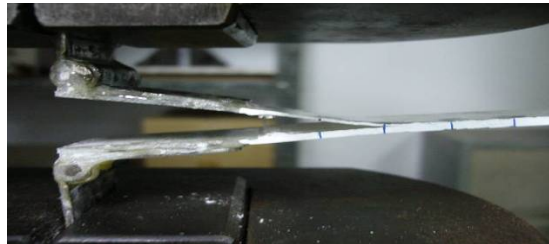


圖 36. [45/-45/45] s 度的疊層



圖 37. [0/90] s 的疊層

估。未來玻璃纖維布利用手積法或 RTM 等製程的產品應該更加注意裂縫產生，結構一旦產生後就極有可能在極短的時間內斷裂。

在碳纖的實驗數據方面，整體來說，撕裂的程度雖然沒有像玻纖那麼漂亮，因為碳纖比較不具延展性，在拉伸的過程當中，常一不小心就會裂過頭甚至斷裂，不過在數據看來碳纖的數據是比玻纖來的好，可是以角度來說，碳纖 45 和 (-45) 的疊層方式就出了很大的問題，在能量與實驗的比對上誤差非常大，這包刮了在黏貼時的角度關係，可能因為沒貼好就造成沒達到角度要求或者是楊氏係數的取值，不同疊層角度的層次，可能也需要楊氏係數的調整才有辦法達到更精準的數值，這幾個原因都有可能造成在實驗上的誤差，圖 38-39 為碳纖裂開的情況。

玻纖在實驗上來說要非常的謹慎小心，因為它具有非常好的延展性，所以在拉伸過程中常常會聽到裂開的聲音，只要一個不小心就會裂過頭，而且每到一個定點一定要回歸原



(a)



(b)

圖 38. 碳纖實驗 (a)(b) 展示圖



(a)



(b)

圖 39. 玻纖實驗 (a)(b) 展示圖

點才行，假如沒回歸原點繼續延展會造成下個定點所測到的力量值不正確，會讓實驗數據產生嚴重的誤差，圖 39 為玻纖實驗。

在 ANSYS 分析的部份，所採用的建模方式，不管是在理論值或只是在實驗值方面，正負相差不到 20%，少數幾點會差 20% 左右，但是整體的分析和理論值與實驗值相互吻合，不管是在力量或者是位移方面都是合理範圍，從圖 18-26 為各個試片分析與理論的比對數據表。

最後，將本研究的各項實驗數據資料建立表格，如表 5-18 所示。

表 5. 玻璃纖維預浸材 [0/90/0/90] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
力量 (N)	39.2	36.26	32.34	30.38	27.44	24.5	24.5	24.5	24.5
平均值	29.29								
標準差	5.617								

表 6. 玻璃纖維預浸材 [0/90/0] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	30	40	50	60	70	80
力量 (N)	86.24	79.38	73.5	60.76	54.88	46.06
平均值	66.80					
標準差	15.43					

表 7. 玻璃纖維預浸材 [0/0/0/0] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90
力量 (N)	48.08	43.12	39.2	36.26	35.28	33.32
平均值	39.21					
標準差	5.53					

表 8. 玻璃纖維預浸材 [0/0/0] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	32.34	30.38	27.44	24.5	20.58	18.62	14.7
平均值	25.64						
標準差	5.42						

表 9. 碳纖維預浸材 [0/90/0/90] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	101	73.99	60.956	59	46	36.26	14.7
平均值	62.87						
標準差	22.75						

表 10. 碳纖維預浸材 [0/90/0] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	60.76	49	42.14	39.2	36.26	30.38	29
平均值	42.96						
標準差	10.69						

表 11. 碳纖維預浸材 [0/0/0/0] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	65.66	61.74	58.8	55.86	53.9	51.94	49
平均值	57.98						
標準差	5.13						

表 12. 碳纖維預浸材 [0/0/0] s 試片 (力量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	56.84	50.66	48.56	45.27	40.96	37.84	34.96
平均值	46.69						
標準差	6.86						

表 13. 碳纖維預浸材 [0/90/0] s 試片 (能量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	----	695.08	884.04	971.12	1095	1449.72	911.4
平均值	1001.06						
標準差	255.49						

表 14. 碳纖維預浸材 [0/90/0/90] s 試片 (能量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90
力量 (N)	---	1417.08	1239.11	2464.5	1664.82	1524.09
平均值	1661.92					
標準差	474.83					

表 15. 玻璃纖維預浸材 [0/0/0] s 試片 (能量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	709.4	288.32	417.28	609.36	703.04	584.08	644.2
平均值	551.91						
標準差	167.08						

表 16. 玻璃纖維預浸材 [0/0/0/0] s 試片 (能量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	546.56	628.76	759.08	892.32	622.8	655.04	692.36
平均值	684.09						
標準差	122.93						

表 17. 碳纖維預浸材 [0/0/0] s 試片 (能量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	1158.08	753.4	1039.28	1164.76	1234	876.64	789.52
平均值	1037.69						
標準差	187.58						

表 18. 碳纖維預浸材 [0/0/0/0] s 試片 (能量)

裂縫深度 (mm)	40	50	60	70	80	90	100
力量 (N)	727.2	1002.04	1138.96	1483.52	1139.84	838	1081.96
平均值	1054.92						
標準差	266.54						

五、結論

經過各種不同材料的實驗與分析後，我們發現手積法是不可行的實驗，而碳纖維預浸材具有脆性，所以在實驗的數據讀取上會產生小誤差造成分析與實驗能量差異性變大，玻璃纖維預浸材延展性好，實驗的延展數據容易讀取，因此在三種材料的比較下，玻璃纖維預浸材能量差異性是最小的。

ANSY 分析上，我們利用 Solid191 元素建立的模型與實驗碳纖維預浸材或者是玻璃纖維預浸材所施的力量誤差最大 20% 左右，最小誤差 0%，因此我們將來可以利用此模型套用於複合材料元件的 Model 能量延展的分析上，可確保結構的安全性，也不用作太多的實驗。

參考文獻

- Davidson, B. D. and R. A. Schapery (1988) Effect of finite width on deflection and energy release rate of an orthotropic double cantilever specimen. *Journal of Composite Materials*, 22(7), 640-656.
- Devitt, D. F., R. A. Schapery and W. L. Bradley (1980) A method for determining the mode I delamination fracture toughness of elastic and viscoelastic composite materials. *Journal of Composite Materials*, 14, 270-285.
- Minguet, P. J., J. Dugundji and P. Lagace (1989) Postbuckling behavior of laminated plates using a direct energy-minimization technique. *AIAA Journal*, 27(12), 1785-1792.
- Smiley, A. J. and R. B. Pipes (1987) Rate effects on mode I interlaminar fracture toughness in composite materials. *Journal of Composite Materials*, 21(7), 670-687.
- Williams, J. G. (1987) Large displacement and end block effects in the 'DCB' interlaminar test in modes I and II. *Journal of Composite Materials*, 21(4), 330-347.

收件：98.03.05 修正：98.07.07 接受：98.09.03