

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

經使用劣化後 Gr/PEEK 複材之修補(3/3)—子計劃四

纖維強化複合材料損傷及修補之模擬

Simulation of Damage and Repair of Fiber-Reinforced Composite Materials

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-126

執行期限：2000 年 08 月 01 日至 2001 年 07 月 31 日

計畫主持人：鄭榮和 國立台灣大學機械工程學系

總計畫主持人：葉銘泉 國立清華大學機械工程學系

計畫參與人員：林松濤 國立台灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本研究之目的在建立單側外補片式修補的脫膠破壞模型，以預測修補之結構受拉應力時的脫膠破壞行為。

將體積加權的概念應用於單側外補片式修補之脫膠現象，提出一套脫膠破壞模型。模型中，膠層破壞應力係由實驗與有限元素分析混合的方式求出，再利用一修補試片實驗與有限元素分析結果建立完整的破壞模型。

關鍵詞：脫膠、膠合修補、複合材料、有限元素法、工程評估法、平均應力準則

Abstract

The purpose of this research is to build a de-bond model of the single external patch of composite repair which can predict the fracture of the repaired specimen in tension..

The concept of the volumetric weighted average method is applied to predict de-bond of the single external patch of composite repair. In this de-bond model, the fracture stress of the adhesive is determined by experiment and finite element method. Then, one repair case and the result of the finite element analysis are used to construct a fracture model.

Keywords: de-bond, bonding repair, composite, finite element method, engineering evaluation, average stress criterion

二、前言

本報告為「經使用劣化後 Gr/PEEK 複材之修補—子計劃四：纖維強化複合材料損傷及修補之模擬」之期末精簡報告，主要討論複合材料的修補。

2.1 修補方式簡介

一般從事修補工作主要可分機械式和非機械式修補，機械式最具代表性的是螺栓鎖合方式，非機械式的是膠合修補。

膠合修補可分為兩種，一為嵌接式修補(scarf

repair)。外補式所使用的方式和螺栓鎖合外補片方式相似，差別僅在於利用膠料(adhesives)的黏結力取代螺栓傳遞力量至補片，使用外補片式的修補可使力量較螺栓為平緩地傳遞至補片，而非利用螺栓將力量局部地加載於補片上，且亦不需對母材鑽孔產生額外的應力集中。

膠合修補的最大好處是不需對母材做機械式的加工產生多餘的應力集中，並且修補過後的母材表面仍然保持相當的平順，而且同時做到密閉的目的，對於修補工程構件的表殼相當地有效且方便。

2.2 研究動機與目的

由於修補並非對所有機械性質都有正面的效用，因此，評估其修補效益便成為相當重要的工作。本研究目的即是了解單側外補片修補複合材料後受拉應力時的脫膠(debond)現象，並嘗試建立一套有效評估脫膠強度的方法，以供補強程序中模擬其修補成效。

三、理論背景及破壞評估法

3.1 理論背景

3.1.1 破壞準則

1. 最大應力或最大應變準則

最大主應力準則為對於具有均質性且等向性的脆性材料所適用的破壞準則，當材料受到多軸荷載時，只要其最大主應力 f_1 滿足材料所可以承受的拉伸強度 f_0 即破壞。

2. Tsai-Hill 準則

Tsai-Hill 準則為在平面應力之下，當下式成立時，材料便即破壞。

$$\frac{f_1^2}{X_{(t,c)}^2} - \frac{f_1 f_2}{X_{(t,c)}^2} + \frac{f_2^2}{Y_{(t,c)}^2} + \frac{f_{12}^2}{T^2} = 1 \quad (3.1)$$

3. Hashin 準則

Hashin 由材料破壞的微觀機制出發，針對複合材料微觀破壞的機制提供材料損傷的程度，進而更準確的預估其壽命。

3.1.2 工程評估法

1. 點應力準則

垂直外力方向沿著裂縫的特定距離，其上一點的應力值達到該材料之拉伸強度時，破壞即發生。

2. 平均應力準則

垂直外力方向沿著裂縫的特定距離，此段距離上所有垂直方向的應力值加以平均，當此平均值達到該材料的拉伸強度時，材料即破壞。

3. 加權平均準則

Milan 針對裂縫和圓孔的問題利用加權的方式修正平均應力準則。

4. 損傷勁度衰減模型

在有限元素分析中，材料的破壞以元素為單位，但對於強度的預測便相當地保守，因為真實材料在達到破壞準則後仍可提供部分的勁度和強度而非完全失去作用，且最後的斷裂多為裂縫的迅速成長，而非損傷勁度衰減模型的逐一破壞模式，因此必須加以修正方可正確地模擬。

3.2 脫膠評估

脫膠的破壞成因是由於膠料的破壞或其接合界面的剝離，所以決定造成破壞的準則便成為本研究最重要的參數。

3.2.1 破壞準則選擇

本研究所使用的材料環氧樹脂為脆性材料，經由實驗結果觀察屬於膠層破壞誘發剝離應力劈裂，因此針對膠層的強度使用最大主應力準則。

由於母材為複合材料，其強度當相高，不易產生破壞，所以不需考慮其破壞準則。

3.2.2 體積加權平均準則

為了解決補片所造成幾何不連續而產生的奇異性問題，本研究修正 Milan 所提出的加權平均準則。Milan 修正 Nuismer 的平均應力準則，其所選擇的積分位置為沿裂縫或圓孔前的一維特徵距離 (a_0) 內的值；因此修正 Milan 的準則，將之擴展為三維的特徵區(characteristic zone)，特徵區內的應力乘以一權重函數得到一加權應力值。

以平面問題而言其概念正如將特徵區內的力總合後再除以特徵區的面積，得到平均的應力值。加權平均準則和 Nuismer 的準則最大的差異是可以大量地減少有限元素格網格疏密所造成的應力提昇效應，對於破壞判準的使用有相當大的幫助。

四、材料常數

4.1 複合材料材料常數

要描述複合材料平板在平面應力狀態下所需的材料常數有四個，分別為 E_{11} 、 E_{22} 、 G_{12} 及 ϵ_{12} ，可經由實驗求得：

由於在複合材料修補時必須再經過一次的高溫加熱，因此必須再求取加熱完成後的材料性質，結果列於表 4.1 中

表 4.1 複合材料的各個材料性質

材料性質	E_{11} (Gpa)	E_{22}	G_{12}	ϵ_{12}	X_f	Y_f	T
修補前	144.49	8.72	5.65	0.28	1.92	55.8	124.56
修補後	145.05	7.97	4.41	0.28	2.02	65.75	82.92

4.2 膠料之楊氏係數與強度

本研究則是利用實驗和分析混合的方式求取膠料強度，應用第二章所提及的體積加權準則求取平均破壞應力，並藉由分析的方式討論勁度的影響。

對於外補片的修補方式主要是運用膠料的剪力強度，故材料測試方式根據 ASTM 規範測試剪力強度的雙面搭接，在完成搭接的試片，以每分鐘 1.24mm 的拉伸速率測試強度，實驗結果於表 4.2。

表 4.2 雙面搭接實驗數據

性質	負載(KN)	平均剪力強度(MPa)
數值	9.46	13.22

雙面搭接時外力經由剪力傳至膠層，再由膠層傳遞至其它材料，當試片脫膠時量得外力再除以接合面積可以得到平均的剪力強度，但搭接的應力分佈並非均勻的，所以剪力強度並沒有作用，故配合有限元素分析來估計強度。

4.3 有限元素分析：邊界條件與元素選擇

材料經由拉伸試驗機測試時，受到油壓夾頭夾持，所以將有限元素模型中試片端點的自由度完全固定，以位移控制單層端的端點向右移動 0.8mm。選用 20 節點連續體減少積分點元素 (C3D20R)。

由母料傳遞而來的剪應力 f_{13} 於單層端的應力集中點為最大並向右遞減至甚低的值，於接近疊接端時再度上升。再觀察母材接觸的三個應力值 (f_{33} 、 f_{13} 、 f_{23})，由表 4.3 可以看出三個應力值以 f_{13} 最大，而 f_{23} 最小，而 f_{33} 次之，在接近單層端的 f_{33} 應力較大之外，其於應力皆相當地小。

樹脂的楊氏係數根據文獻查得介於 2.4GPa 至 3.5GPa 之間，因此本研究選擇使用 3GPa。

表 4.3 雙面搭接各個應力之最大值

應力	f_{11}	f_{22}	f_{33}	f_{12}	f_{13}	f_{23}
數值	40.53	30.64	62.74	0.3372	114.8	3.381

因為破壞時的最大主應力存在幾何奇異性，所以必須應用第二章所提及的體積加權準則求取。本研究使用的楊氏係數為 3GPa，故平均最大主應力為 89.72MPa，以此二數據作為有限元素分析中之膠料材料性質。

五、脫膠破壞模型建立

5.1 實驗

試片母材為 $[0/90]_{2,5}$ 的疊層，長度 120mm，補片使用 $[0]_4$ 的疊層，長度 L 為 50mm，經 MTS 拉伸測試後得到破壞應力如表 5.1 所示。

而修補試片經由拉伸測試得到負載對位移曲線，可以看出外力因為脫膠而下降，若將試片拉伸至此下降點後隨即取下可看到脫膠現象。因此設定此下降點為脫膠應力。

表 5.1 修補材料之拉伸測試結果

	脫膠應力(MPa)	破壞應力(MPa)
完美試片	——	1082.53
有裂縫試片	——	576.23
50mm 補片試片	400.99	593.61.

5.1.1 模型

因母材為 $[0/90]_{2,5}$ 的疊層，補片為 $[0]_4$ 的疊層，所以試片不但具有幾何形狀的對稱性亦有材料性質上的對稱，故僅分析二分之一的實體模型。

5.1.2 使用者副程式

ABAQUS 在進行每個時間增量的分析前會先由使用者副程式 USDFLD 中取得的場變數，判斷其相對應的材料常數，在每個位置的材料常數均被確定之後再進行分析。藉由此功能，在 USDFLD 中撰寫程式來模擬勁度衰減的情形。

5.1.3 分析討論

分析結果，裂縫尖端的脫膠現象於起始時快速地成長，之後由於裂縫尖端鈍化，應力集中的情形不再如此嚴重，所以脫膠成長的速度大為減慢，相反的接近自由端的膠料從脫膠之後迅速向裂縫端成長，因此推論脫膠是由於自由端的膠料破壞所造成的。

在裂縫周圍有膠料的破裂和界面剝離的現象，而分析的結果亦指出，由於裂縫所產生的應力集中會使得膠料破壞。

5.2 建立準則

5.2.1 有限元素分析

使用 4.1 節所建立的有限元素模型，去除損傷勁度衰減模型的部分重新分析得到膠層內的最大主應力分佈圖，可以看出自由端邊緣最大主應力分佈相當均勻，惟獨角落處的應力集中特別嚴重，加權最大主應力對下角落處相對位置的關係圖，可以很明顯的看出角落處主應力值高出其它位置的值甚多。觀察模擬變形圖可知，變造成角落處主應力值較高是因為母材 度超出補片部分的變形所造成的，因此準則必考量到此變形的影響。

5.2.2 準則建立

取出角落處主應力和膠層中央主應力的值來預測破壞，並和實驗值比較，列於表 5.2。

由表之數據可以了解雖然角落處會產生很大的應力集中現象，但是此應力集中造成的脫膠不會迅速地成長，而會鈍化為一圓弧狀，使應力集中現

象減緩，因此當自由端邊緣(非角落處)的膠層破壞產生後補片才發生脫膠。

表 5.2 補片修補脫膠預測和實驗結果比較

	實驗	膠層邊緣中央之最大主應力值預測	膠層邊緣角落處之最大主應力值預測
脫膠應力(MPa)	400.99	383.28	287.82
誤差(%)	——	4.42	28.22

5.3 結論

藉由損傷勁度衰減模型的分析結果可以知道，脫膠破壞起始於補片的邊界，因為剝離應力而導致補片的快速脫膠。之後，結合實驗和分析，提出形狀修正因子，使模擬的結果可以更接近真實的物理現象。

六、有限元素模擬與驗證

6.1 不同補片長度之脫膠預測

文獻中指出使用較長的補片可以大量地減少應力強度因子。

6.1.1 實驗結果

改變不同的補片接著長度，分別做拉伸試驗得到結果，如表 6.1 所示。由於單側外補片式修補會使母材產生彎曲的效應，進而導致脫膠的產生當接著長度愈長彎曲的效應愈大，使之愈容易脫膠。

表 6.1 不同的補片接著長度之破壞應力

接著長度	脫膠應力(MPa)	破壞應力(MPa)
30mm	452.24	566.45
50mm	400.99	593.61
70mm	355.25	580.36.

6.1.2 有限元素分析結果

可以看出補片長度較短時，主應力分佈易受到裂縫應力集中的影響，導致介於邊緣和裂縫間的主應力值較大，由此可以推論補片長度較短時，彎曲效應較小，可以提高脫膠應力，但長度過短時會受到裂縫產生的應力集中影響，反而容易脫膠。

除了接近兩端角落處的主應力值較大外，其餘的主應力值變化不大，故形狀修正因子 β 為 0.72。

表 6.2 預測不同補片長度之脫膠應力

補片長度	30mm	50mm	70mm
實驗脫膠應力	452.24	400.99	355.25
預測脫膠應力	461.62	400.06	375.78
誤差	2.07	0.23	5.78

6.2 不同補片疊層之脫膠預測

在執行修補前，補片的勁度為重要的考量因素。本小節則是以不同的補片疊層造成的勁度的改

變，比較結果。

6.2.1 實驗

由表 6.3 發現勁度較高的補片比勁度低的補片易產生脫膠，脫膠之後由於修補沒有修補效果，所以 $[0]_4$ 、 $[0/90/\mp 45]$ 二種疊層方式的破壞應力沒有增加，但 $[\pm 45]_5$ 的補片於母材破壞前沒有脫膠產生，所以可以提昇破壞應力值達 12.28%，破壞形式和 $[0]_4$ 疊層的補片相似，可以看出母材的表面纖維被剝離以及補片邊緣膠層破裂的情況。

表 6.3 不同補片疊層實驗結果

補片疊層	脫膠應力(MPa)	破壞應力(MPa)
$[0]_4$	400.99	593.61
$[0/90/\mp 45]$	491.78	559.90
$[\pm 45]_5$	—	649.62

6.2.2 分析討論

針對不同的補片勁度修補分析比較如下：

$[\pm 45]_5$ 補片可以使應力均勻散佈於膠層之內， $[0/90/\mp 45]$ 補片次之，而 $[0]_4$ 補片則最差。 $[\pm 45]_5$ 補片藉由應力的均勻分散和本身勁度較小，產生的彎曲量小，使之不易產生脫膠破壞的現象，因而提高試片的破壞強度。

$[\pm 45]_5$ 補片的膠層不但左右邊緣有應力集中，上下邊緣亦有應力集中現象，這是因為 $[\pm 45]_5$ 補片的纖維強化方向使應力集中分散至補片四周，所以對膠層而言正如受到一合力由角落向外的力。

主應力最大值位於下角處， β 為 0.72，預測結果於表 6.4 中。

表 6.4 預測不同補片疊層之脫膠應力

	$[0]_4$	$[0/90/\mp 45]$	$[\pm 45]_5$
實驗脫膠應力	400.99	503.78	649.62
預測脫膠應力	400.06	558.53	647.05
誤差	0.23	10.87	0.40

6.3.1 有限元素分析討論

造成 $[\pm 45]_5$ 的誤差較大的原因是由於本模型針對複合材料的剪力模數設為一定值，然而事實上複合材料的剪力模數為非線性的曲線，因而導致在模擬時母材的勁度較高，產生脫膠應力較小的現象。

由於最大主應力的是有方向性，而應用加權平均時並沒有考慮此因素的影響，使得在預測不同的母材和幾何形狀相異的補片時，會與材料測試時的應力狀態不同，因而產生誤差。

6.3.2 結果與討論

母材的疊層會因為橫向的勁度減少，使得於角落處的應力集中現象趨緩，導致破壞產生於非角落處。而本模型亦可以預測此種脫膠現象，惟獨預測

$[\pm 45]_{2,5}$ 的母材時會有較為保守的情形發生。

表 6.5 預測不同母材之脫膠應力

	$[0]_4$	$[\pm 30]_{2,5}$	$[\pm 45]_{2,5}$
實驗脫膠應力	400.99	225.23	135.14
預測脫膠應力	400.06	236.86	90.54
誤差	0.23	5.16	33.00

6.4 斜補片之脫膠預測

在實際使用補片修補時，補片長度方向和並不和受力方向平行，而是一個混合的應力狀態，因此本小節針對斜補片進行分析與實驗驗證。

6.4.1 實驗

斜補片實驗使用 $[0/90]_{2,5}$ 的母材，其中的裂縫由 0° 方向向左傾斜 45° ，補片則與裂縫成 $[\pm 45]_5$ 。經由 MTS 拉伸測試所得到的破壞應力和脫膠應力列於表 6.6，觀察破壞斷面，發現下方有相當大的區域有膠層破裂的現象。

表 6.6 斜補片實驗結果與脫膠預測

	脫膠應力(MPa)	破壞應力(MPa)
實驗	488.55	589.41
分析預測	532.91	—
誤差	7.23	—

6.4.2 分析結果

首先利用損傷勁度衰減模型觀察破壞歷程，得知脫膠成長的方式和一般補片有相同的趨勢，位於裂縫處的脫膠成長較補片邊緣慢，因此判斷破壞亦是由補片邊緣所引起。

藉由應力分析得到膠層最大主應力分佈圖，可以很明顯的看出來應力集中位於軸向的二端點 AB 而且斜裂縫的所產生的應力集會和端點 AB 的應力集中相連接的現象。

6.5 結論

經由分析與實驗，可得以下結論：

1. 補片愈長，因產生的彎曲量大，所以易產生脫膠。
2. 補片疊層的勁度較弱會使得材料受力後的彎曲變形量小，因而使力量得以均勻分散於補片之內而不易產生脫膠的問題。
3. 剛性較強的母材會使應力集中產生於補片角落處，對於剛性較弱的母材則會產生於補片內部，因此分析破壞時必須考慮此因素的影響。
4. 對於非軸向修補的斜補片，亦可以使用本研究的模型分析的脫膠應力。
5. 脫膠破壞模型針對脫膠破壞具有相當不錯的預測能力，而且實際使用時亦有的簡易與快速的優點。