

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 複材之修補之纖維強化複合材料損傷及修補之模擬(I)

計畫編號：NSC 88-2212-E-002-040

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：鄭榮和 國立臺灣大學機械工程研究所

一、 中文摘要

本文以複合材料主軸損傷觀點，處理積層板複合材料中纖維斷裂、基材裂紋與界面脫膠等三種損傷機制，在研究過程中以連續損傷力學(Continuum damage mechanics, CDM) 來描述三種損傷機制，經由微觀損傷機制觀測與巨觀內變量的選擇，發展損傷演化方程式來描述主軸方向損傷起始與損傷發展。經由實驗獲取複合材料主軸損傷變數後，將含有損傷內變量的材料模型引入有限元素程式中，以驗證不同層層複合材料的整體力學行為，並與單軸拉伸實驗結果相互比較，在經過拉伸曲線與強度的驗證後，證實本研究能夠掌握積層板複合材料的損傷行為。

關鍵詞 主軸損傷 積層板複合材料 連續損傷力學 損傷內變量 損傷演化方程式 有限元素法 破壞強度

Abstract

This paper deals with principal damage in laminated composite materials. The concept of continuum damage mechanics, based on thermodynamics, is adopted to describe the nonlinearity in the material principal directions. By investigating micro damage mechanism and choosing macro internal damage variables, we develop damage evolution laws to describe damage initiation and propagation. Finally, the model is implemented in a finite element software which is used to simulate the tensile process of two composite laminates. The predicted stress-strain curves and strength are compared favorably with experimental results.

Keywords: Principal damage; Laminated composite materials; Continuum damage mechanics; Internal variables; Damage evolution laws; FEA; Failure strength;

二、 計畫緣由與目的

本計畫為群體計畫「熱塑性與熱固性複合材料組件疲勞及破壞之分析與評估」之第四子計畫。本研究的目標是希望能提出完整且簡易使用的模式或判準，

將之加入有限元素軟體中以供設計工程師採用於預測複合材料的損傷與破壞行為。過去兩年的研究已完成以位移為變數之破壞判準以及含異向性損傷變數之複合材料本構行為模式，經由有限元素分析與實驗結果相驗證已證實所提理論模式之正確與優異。

第三年的規劃原預定將以上之模式與軟體應用於大型複合材料組件之疲勞及破壞分析，惟初步試作組件的實驗發現相當多的成形缺陷，如脫層，局部挫曲等，如此之成品恐難有一定的起始比較點；因此本子計畫第三年的工作重點除了繼續支援其他子計畫之實驗模擬之外，主要的方向稍作修改為推導基層板複合材料受加載過程各主軸方向損傷行為，首先探討纖維斷裂、基材裂紋與界面脫膠等三個損傷機制的微觀機制觀測，而後定義損傷內變量，發展損傷演化律，希望藉由研究損傷演化對於複合材料損傷本質能有更深刻的認識。一旦各損傷交互關係能一一掌握，對於初始損傷影響與受加載後損傷評估，甚至損傷修補判準也能有更深入的瞭解。

三、 研究流程

複合材料具有許多優良性質[1]，使其在航空太空工業或一般民生工業漸漸扮演重要的角色，但由於其組成材料與性質複雜，在設計上仍趨於保守，而未能充分利用其優點。

複合材料損傷的力學研究中，分別有從巨觀與微觀觀點著手：巨觀方面主要以破壞力學(fracture mechanics) 與損傷力學(damage mechanics) 為主 [2][3][4][5]，這些研究中以巨觀裂紋或巨觀內變量方法來描述損傷缺陷，並不去探討個別微損傷區或微裂紋之間的交互關係，其優點為較易應用於實際構件中，缺點是無法瞭解損傷機制交互作用情形。微觀角度將複合材料組成：纖維、基材與界面獨立考慮，並用自洽法(self-consistent method) 變分法等來考慮其組合後整體性質，其優點是可瞭解各組成成分的角色與作用，有助於整體材料性質的改良，缺點是應用於結構件中仍需要進一步的推演[6][7]。

以往學者處理複合材料損傷，經由上述方法已經可以描述單種損傷機制(例如基材裂紋與脫層)，對積層板勁度的影響，但對於損傷後的行為，以及主導損

傷發展的物理量討論不多。本文首先從連體損傷力學觀點重新建構整個理論，從複合材料主軸方向來區分不同的損傷機制，以巨觀內變量來描述纖維破壞、基材裂紋與界面脫膠三種機制，並推導主導損傷機制的物理量。最後將含有損傷的材料模型，引入有限元素商用軟體 ABAQUS 中，進行模擬分析並與實驗比較。

四、主軸損傷

4.1 材料主軸方向

積層板複合材料主軸方向（以下稱主軸方向）如圖 1，從主軸與微觀損傷機制的觀點，可將損傷區分於下面三種：

4.2 1-方向行為

1-方向為纖維主導，由於此方向破壞機制主要為纖維斷裂，因此假設 1-方向為完全脆性破壞，也就是當材料達到其斷裂應變時便失穩斷裂。

4.3 2-方向與 3-方向

2-方向與 3-方向行為基材主導的破壞模式，在此假設其行為相同。Talreja[7]研究 $[0/90]_n$ 積層板因基材裂紋造成勁度衰減的現象，並於研究中指出，由於內部 90° 層受到其鄰近不同方向疊層的約束作用，受到加載後並非立即破壞，而是隨著 2-方向應變的增加， 90° 單層基材裂紋與基材裂紋密度逐漸增加，最後達到一個飽和值稱為特徵損傷狀態（characteristic damage state, CDS），並且認為勁度開始降低的應變為 $[90]_n$ 斷裂應變值。

由本研究所做實驗結果如圖 2，虛線為 $[90]_{8S}$ 單向積層板應力應變曲線。實線為將 $[0_2/90_6]_{1S}$ 的拉伸曲線，扣去 0° 疊層影響後的 90° 層拉伸曲線，稱為「淨 90° 拉伸曲線」。比較兩曲線，發現在曲線前段其行為相同，但在應變值接近 $[90]_{8S}$ 斷裂應變後，淨 90° 拉伸曲線應力並未立即降至零，而是應力緩慢的減少，也就是 90° 層仍然可以承受部分應力，此現象本文作者認為即是文獻中所討論為裂紋成長的行為。

4.4 12-方向、13-方向與 23-方向

12,13,23-方向為剪切主導的破壞模式，主要損傷機制為纖維與基材的界面脫離。這個機制作用下，使得纖維與基材發生永久性界面脫膠，這與金屬材料中由於偏差應力造成的塑性行為相似，都有明顯永久應變的產生，圖 3 為 $[\pm 45]_{4S}$ 加載—卸載的軸向應力—應變曲線，可由圖中觀測明顯永久應變的產生。23-方向與 13-方向由於實驗較困難，一般假設與 12-方向行為相同。

由以上之討論我們討論不同主軸損傷行為，這些損傷有不同成因與現象，也受到不同物理量的影響，由上述討論將複合材料主軸行為概念圖整理於圖 4。

五、損傷理論

本研究以連體損傷力學為基本架構，探討材料基本行為，並建構這些損傷耗散機制的作用與發展。連體損傷力學是 1958 年 Kachanov[8]在研究金屬潛變現象後提出，認為材料在加載過程中會因為內部微孔洞與微缺陷的增加，使得其抵抗外力的能力逐漸減小，並引入「連續因子」這巨觀內變量來描述材料劣化行為。這個觀念是對從前力學研究中「完美」與「破壞」兩個極端行為的一種挑戰，並認為材料是「逐漸損壞的」。基於這理論所推論的結果，便可以定義出損傷變量

式中 E^0 為完美材料勁度， E 為損傷後材料勁度，且 $0 \leq d \leq 1$ 。本文所採用之損傷變量便是依據這個定義所

$$d = \frac{E^0 - E}{E^0}$$

發展。

由上區分不同損傷機制後，便假設存在 Gibbs 自由能，其中包括補彈性應變能，塑性硬化應變能與損傷硬化應變能，並假設 1-方向與 2-方向存在獨立的損傷耗散勢，而將 12-方向假設成等向塑性硬化，而存在塑性耗散勢，最後推導損傷變量與剪切塑性應變的增量關係，詳細討論見[9]。

六、材料常數與有限元素模型

6.1 材料實驗與材料常數

本研究採用 ICI 公司生產的熱塑性複合材料預浸材（APC-2A），基材為熱塑性樹脂 PEEK，補強材為碳纖維。以熱壓成型方法製作，成型條件依 ICI 公司提供的成型條件。當試片成型後以鑽石切割將試片裁剪成：200mm x 20mm x 2mm 之試片，並於兩端黏貼玻璃纖維板墊片，以進行拉伸試驗，並自製 100 mm 長之延伸計（clipper gage）量取拉伸過程試片變形量。材料常數求取部分，製作 $[0]_{8S}$ 、 $[0_2/90_6]_{1S}$ 與 $[\pm 45]_{4S}$ 依 ASTM D3039 與 ASTM D3518 並依[9]所述方法求取材料常數，材料常數整理於表 1 與表 2。

6.2 有限元素模型

為將本材料模型應用於複雜幾何外形與外力情形，將含有內變量的材料本構方程式，引入商用有限元素分析軟體 ABAQUS 進行分析與驗證，並使用使用者副程式 USDFLD 引入材料損傷關係，分析流程圖見圖 6。

七、模型驗證與結果

7-1 有限元素模型

為了驗證模型，我們製作 $[0/90]_{4S}$ 與 $[0/45/90/-45]_{2S}$ 兩種不同疊層積層板，將試片裁剪成 200mm x 20mm x 2mm 之尺寸，以進行拉伸試驗。同時建構有限元素模型，在模型中使用八點縮減積分板殼元素，並以位移

控制方式進行模擬拉伸，因本研究僅建立二維狀態，對於 $[0/90]_{4S}$ 僅將其視為 0° 與 90° 兩種疊層，而非建構全部的16層，對於 $[0/45/90/-45]_{2S}$ ，則將其視為四層不同方向單層。並記錄模擬過程中應力應變與拉力位移關係。

7-2 拉伸模擬與實驗比較

圖7為 $[0/90]_{4S}$ 的拉伸應力應變曲線，可以發現模擬拉伸曲線與實際拉伸實驗非常吻合，除了在模擬曲線上有應力掉落現象，這乃是本研究將 $[0/90]_{4S}$ 與 $[0_2/90_6]_S$ 中 90° 層假設成有相同的行為，這一個論點在二維分析中是合理的，但在實際三維構件中，需要考慮尺寸效應(size effect)，與三維應力影響。此外為了瞭解拉伸過程中基材裂紋損傷情形，分別於軸向應變值0.86、0.9、1.04與1.2%（在圖中分別代表A、B、C與D點）狀態下取出模型中 90° 單層，並將代表基材裂紋損傷參數(d_{22})標示於圖上，結果顯示於圖8。其中A為無損傷，B在四個角落有損傷起始，這是因為兩端固定端的束縛作用，在點C時損傷開始累積其平均值約為0.55，而D點顯示損傷飽和，損傷值為1，代表 90° 層已經不能再承受外力，也就是基材裂紋損傷以達到飽和。

圖9為 $[0/45/90/-45]_{2S}$ 的實驗與模擬拉伸曲線的比較圖，從拉伸曲線上發現拉伸曲線有一轉折點，並未有應力類似 $[0/90]_{4S}$ 應力掉落現象，這一來是因為 90° 層所佔的比例較少，分散了損傷所造成的影響，二來因為 90° 層所處的應力狀態受到 $+45^\circ$ 與 -45° 層的影響，而使得損傷的發展不再是那麼平均，反而有將損傷分散的效應。這一點可由圖10中看出，圖中代表了不同應變狀態下 90° 層的基材裂紋損傷，可以發現B、C圖損傷的不均勻性。

7-3 結果討論

- (1) 由拉伸曲線 $[0/90]_{4S}$ 可以確認基材裂紋損傷(d_{22})的起始與損傷累積情形，這損傷關係使得積層板複合材料，在加載過程中伴隨損傷成長勁度逐漸衰減，直到損傷累積到無法再承受任何外力為止。至於如何將 d_{22} 與基材裂紋密度（例如使用顯微鏡觀測）建立一對應關係，需要再從微觀力學與實驗觀測方法上著手。
- (2) 模擬與實驗所獲得積層板拉伸破壞強度列於表3，實驗所得數據，乃是由由三片試片強度平均的結果。相較於複合材料本身具有的變異性，結果已經相當吻合。由於 $[0/90]_{4S}$ 與 $[0/45/90/-45]_{2S}$ 含有 0° 層，因此在受外力狀態下，最終的破壞均由 0° 層主導。而 Y_{111} 乃是影響1-方向完全脆性損傷的最重要參數，亦是影響積層板拉伸破壞強度的主要因素，因此在模型中我們更改 Y_{111} 的值做參數研究，這個參數研究是為了顯示積層板在製作過程中，因為基材流動造成纖維成波浪狀的，而引起「初始損傷」的影響。

將結果顯示於表4，從表中可以發現 Y_{111} 對基層板拉伸破壞強度有非常大影響。如果要更深入不同損傷的影響，就必須更精確掌握這項效應。

八、結論

- (1) 以往文獻中對於複合材料損傷機制有非常豐富的定性描述，但對於損傷的起始與發展討論不多，對於主軸損傷觀念也未見提出。本研究首度提出複合材料主軸方向損傷模型，一來可以同時考慮了三種微觀機制的影響，二來在處理上大大降低了建構模型的複雜性。
- (2) 本文根據微觀損傷機制的觀察，並在熱力學架構下建立巨觀損傷內變量與發展損傷演化方程式。經實驗驗證拉伸曲線與破壞強度後，已初步證實可描述不同損傷的發展。由於複合材料非線性行為可歸類為損傷與塑性兩種不同耗散機制的影響，而這些機制又分別受到不同廣義對偶力的作用，因此本研究從連體損傷力學出發，能彌補長久以來巨觀力學的缺失，並可描述在多軸應力狀態下材料的力學行為。
- (3) 由本損傷模型所建立的材料模型，可當成古典積層板理論(classical lamination theory, CLT)的推廣，更能彌補古典積層板理論中，無法描述材料受損傷後，損傷發展的缺失。之後將含有內變量的材料模型引入有限元素商用軟體ABAQUS，並以使用者副程式USDFLD來描述材料劣化過程，如此便能在加載過程中，根據模型更改每一個時間增量的材料模型，能夠精確掌握材料劣化行為。在強度研究中，經由這些以上討論，證實傳統強度理論例如Tsai-Wu模型，均假設材料為完美或破壞兩種極端是有缺憾的，因此應該加上損傷的影響，也就是損傷後行為。
- (4) 本研究以單層損傷機制探討出發，同時考慮纖維斷裂，基材裂紋與介面脫膠等三種層內損傷機制，得到優良結果後，對於脫層這層間損傷的加入，也可依此方法假設存在介面層，並給予一個損傷判準來判定脫層與否，若脫層發生，則進行材料常數的衰減。由於脫層損傷可區分為自由端引起脫層、橫向裂紋引起脫層與彎曲引起脫層等，這些脫層的產生形式與種類都相當複雜，需要用多少個損傷變數需要進一步研究。

九、參考文獻

- [1] C. T. Herakovich, *Mechanics of Fibrous Composite*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.13-27 (1998).
- [2] K.L. Reifsnider, *Fatigue of Composite Materials*, Elsevier Science Publishers B.V., pp.11-77 (1991).

- [3] W. F. Li and S. Y. Du, "Modeling of Anisotropic Damage at a Crack Tip in Composite Laminates," *Engineering Fracture Mechanics* Vol.45, No.3, pp.381-385 (1993).
- [4] J. W. Lee, D. H. Allens, and C. E. Harris, "Internal State Variable Approach for Predicting Stiffness Reductions in Fibrous Laminated Composites with Matrix Cracks," *Journal of Composite Materials*, Vol.23, pp.1273-1291 (1989).
- [5] O. Allix and P. Ladeveze, "Damage Analysis of Interlaminar Fracture Specimens," *Composite Structures*, Vol.31, pp.61-74 (1995).
- [6] T. E. Tay and E. H. Lim, "Analysis of Composite Laminates with Transverse Cracks," *Composite Structures*, Vol.34, No.4, pp.419-426 (1996).
- [7] R. Talreja, *Fatigue of Composite Materials*, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA (1987).
- [8] L. M. Kachanov, *Introduction to Continuum Damage Mechanics*, Martinus Nijhoff Dordrecht, The Netherlands (1986).
- [9] 馬仁宏 鄭榮和, 基層板複合材料主軸損傷分析, 中華民國力學學會第二十三屆全國力學會議, 1999。

疊層種類	拉伸破壞強度 (MPa)	有限元素結果 (MPa)
$[0/90]_{4S}$	906	883
$[0/45/90/-45]_{2S}$	731	620

表 4 1-方向損傷起始值 Y_{11t} 對積層板拉伸破壞強度的影響

拉伸破壞強度 (MPa)	$[0/90]_{4S}$	$[0/45/90/-45]_{2S}$
$Y_{11t} = 5.86$	667	530
$Y_{11t} = 10.86$	883	620
$Y_{11t} = 15.86$	1072	707

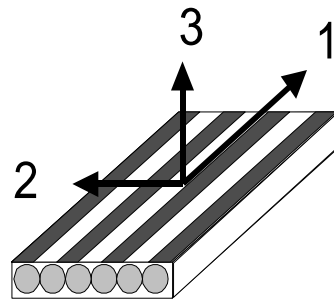


圖 1 積層板複合材料主軸方向

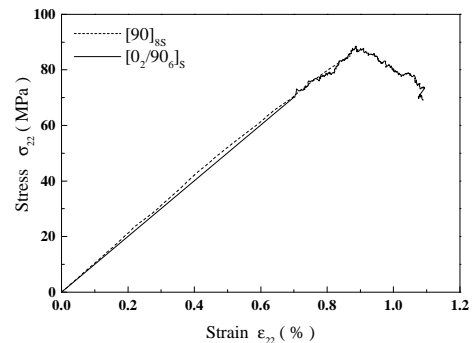


圖 2 淨 90° 拉伸應力應變曲線

表 1 積層板複合材料 (APC-2A) 材料常數

E_{11}^0 (GPa)	E_{22}^0 (GPa)	ϵ_{12}^0	G_{12}^0 (GPa)	G_{23}^0 (GPa)	G_{13}^0 (GPa)
139	10.2	0.30	5.95	5.95	5.95

表 2 積層板複合材料 (APC-2A) 損傷變量材料常數

Y_{11t} (MPa)	Y_{22t} (MPa)	Y_{22c} (MPa)	K	n	p
10.86	0.385	0.995	0.61	1	5.0×10^{-7}

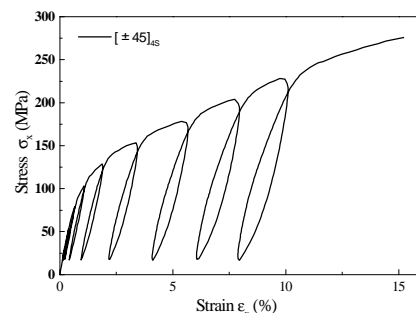


圖 3 $[\pm 45]_{4S}$ 加載—卸載應力應變曲線

表 3 積層板複合材料拉伸破壞強度與有限元素模擬結果

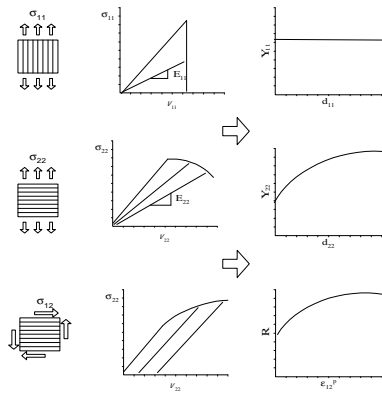


圖 4 複合材料各主軸方向材料行為示意圖

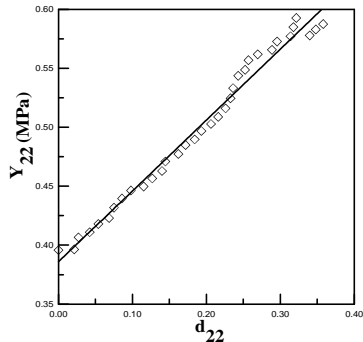


圖 5 2-方向損傷硬化關係

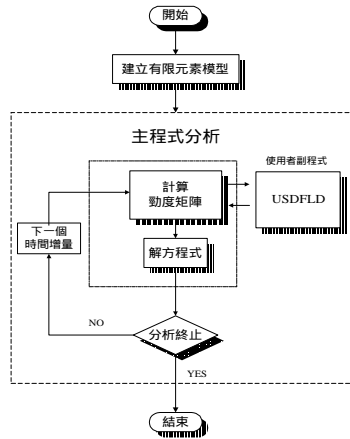


圖 6 ABAQUS 分析流程程序圖

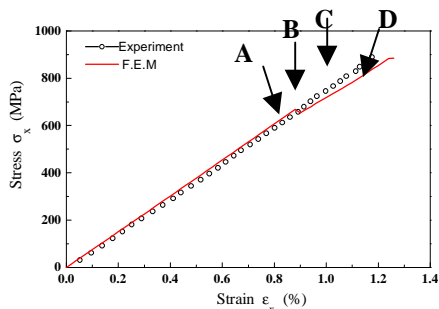


圖 7 [0/90]_{4S} 拉伸應力應變曲線

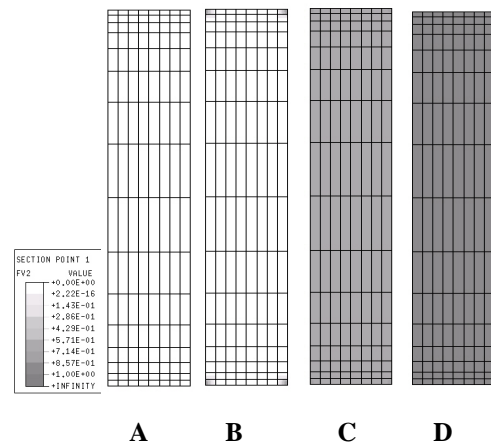


圖 8 [0/90]_{4S} 90° 單層基材裂紋損傷(d_{22})分佈圖

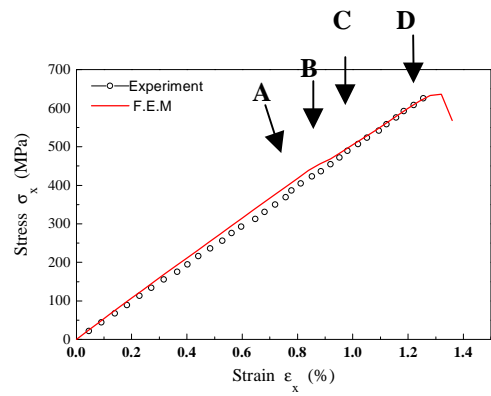


圖 9 [0/45/90/-45]_{2S} 拉伸應力應變曲線

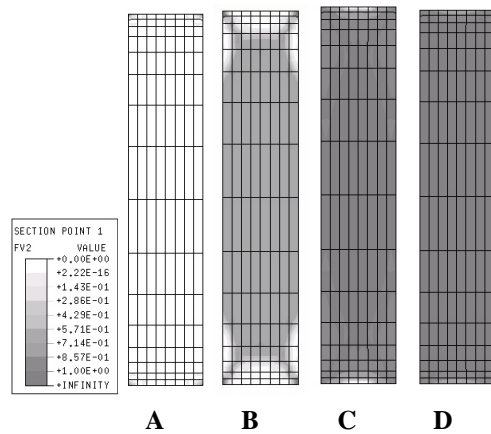


圖 10 [0/45/90/-45]_{2S} 中 90° 單層基材裂紋損傷 (d_{22})分佈圖