

出國報告（出國類別：實習）

赴美國普渡大學複合材料實驗室國外 公差報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：蘇煒年 助理工程師

派赴國家：美國

出國期間：100年7月10日~100年8月17日

報告日期：100年9月16日

摘要

位於美國印第安納州的 Purdue University 工學院在全美排名第 11 名，而航太系在全美排名第 6 名。本次實習研究於 Purdue University 航太系的 Composite Materials Lab 執行，由實驗室創辦人 Prof. Chin-Teh Sun 從旁指導。Prof. Sun 現為 Purdue University 航太系 Neil A. Armstrong Distinguished Professor，專長於複合材料、破壞力學、結構動力學、智慧型材料與結構、奈米材料等。本次國外公差在 Purdue University 期間，針對玻璃纖維複合材料特性，以及複合材料各種失效模式如 Fiber、Matrix、及 Laminate 破壞等的判定模式與分析方法進行研究，以期能在將來進行風力發電機葉片設計過程中，除了考慮氣動力效率之外，亦能掌握主要氣動力負載如 Flap-wise bending、Edge-wise bending、及 pitching moment 等對於葉片各疊層的影響，由此改善疊層設計，以達到提高葉片強度之目的。

目 次

摘 要.....	I
一、目的.....	1
二、過程.....	3
三、心得.....	21
四、建議事項.....	22

附 圖 目 錄

圖 1、彭科大 Wind Park 小型風機葉片斷裂	2
圖 2、彭科大 Wind Park 小型風機發電機與電控器損毀	2
圖 3、複合材料成分示意圖	4
圖 4、複合材料 element 應力示意圖.....	5
圖 5、疲勞周期測試示意圖	8
圖 6、複合材料 Viscoelastic 特性示意圖	8
圖 7、2-D 複合材料 failure criterion	9
圖 8、Wu & Scheublein Glass/Epoxy σ_{11} - σ_{22} 實驗數據比較.....	11
圖 9、 σ_{22} - τ_{12} AS4/55A 實驗數據比較	12
圖 10、 σ_{22} - τ_{12} T800 實驗數據比較.....	13
圖 11、 σ_{22} - τ_{12} Glass/Epoxy 實驗數據比較.....	14
圖 12、Direct Micromechanics Method 與其他方法之比較.....	15
圖 13、Fiber failure 示意圖.....	16
圖 14、Fiber failure stress-strain 示意圖	17
圖 15、Matrix failure stress-strain 示意圖.....	18
圖 16、Laminate ply-ply failure 示意圖	19
圖 17、De-lamination 示意圖	19
圖 18、De-lamination mode 示意圖	20

附表目錄

表 1、纖維方向符號說明表.....	3
表 2、金屬材料與 FRP 單位質量強度比較表.....	4
表 3、95%信心度 K_2 常數列表	7

一、目的

近幾年來，基於油價高漲，以及政府積極推動再生能源之使用，台灣中小企業因此積極投入小型風力發電機之研發，目前已有不少型式之水平軸風力發電機(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)，以及垂直軸風力發電機(Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)在市場上銷售。然而，小型風機品質參差不齊，藉由澎湖科技大學 Wind Park 示範場，以及台南七股風力發電測試場之資料顯示，小型風電幾個常見之損壞零組件分別為葉片、發電機、以及電控器等如圖 1與圖 2所示；此外，國際上對於中大型風機之研究亦顯示，葉片、齒輪箱、發電機、以及電控器等，在所有風機零組件中佔有相當高的損壞比例。

小型風力發電機葉片在製程與材料選用上相當多樣化，常見的有塑膠射出成形、鋁擠壓成形、玻璃纖維複合材料(Fiberglass Reinforced Plastic, FRP)、或碳纖維複合材料；而一般 kW 級以上之小型風機，或中大型風機在葉片設計上，均是採用 FRP、或 FRP 參雜碳纖維複合材料，至於完全採用碳纖維複合材料之葉片，因成本過高，除了實驗用外，並不適用於商用風機。因此，FRP 至今仍是一般風機葉片採用之主要材料。

Purdue University 工學院在全美排名第 11 名，而航太系在全美排名第 6 名。本次實習研究即是於 Purdue University 航太系的 Composite Materials Lab 執行，並由實驗室創辦人 Prof. Chin-Teh Sun 從旁指導。Prof. Sun 現為 Purdue University 航太系 Neil A. Armstrong Distinguished Professor，專長於複合材料、破壞力學、結構動力學、智慧型材料與結構、奈米材料等。本次國外公差之目的即是針對玻璃纖維複合材料特性，以及複合材料各種失效模式如 Fiber、Matrix、及 Laminate 破壞等的判定模式與分析方法進行研究，以期能在將來進行風力發電機葉片設計過程中，除了考慮氣動力效率之外，亦能掌握主要氣動力負載如 Flap-wise bending、Edge-wise bending、及 pitching moment 等對於葉片各疊層的影響，藉此確認葉片可能產生破壞的部位，以及相對應之關鍵負載，由此改善疊層設計，同時在氣動力外形設計上盡可能降低該負載值，以達到提高葉片強度之目的，以及提昇風機運轉之可靠度與穩定度。



圖 1、彭科大 Wind Park 小型風機葉片斷裂



圖 2、彭科大 Wind Park 小型風機發電機與電控器損毀

二、過程

本次實習研究經由台灣大學工科與海洋研究所之林輝政教授推薦，選擇位於美國印第安納州的 Purdue University 進行研究。此行於 100 年 7 月 10 日出發，並於 100 年 8 月 17 日返國，為期共 39 天。研究期間由該校航太系 Composite Materials Lab 創辦人 Prof. Chin-Teh Sun 從旁指導，並且由 Prof. Sun 安排於博士後研究生 Dr. Hsin-Haou Huang 之辦公室進行研究。Dr. Huang 於一年多前由 Purdue University 博士班畢業後，即留於實驗室進行博士後研究，專長於 acoustic material 與 fracture mechanics 之研究，因此，在美期間除了由 Prof. Sun 分享過去實驗室之研究結果之外，很多複合材料相關的問題更有 Dr. Huang 熱心解答。研究重點在於複合材料特性、複合材料失效之判定方法(Failure Criterion)、以及複合材料常見之破壞模式等。

(一) 複合材料特性研究

複合材料在工程應用上已被廣泛應用，主要成分可以分為纖維(Fiber)與基材(Matrix)如圖 3 所示。玻璃纖維是最常見的纖維組成，碳纖維則屬於高強度材料常用於航太工業，而 polymer 如 epoxy 等是最常見的 Matrix 材料。如圖 3 所示，纖維在編織上可依用途之需求而採用不同排列方向，常見的代表符號如表 1 所示，以核研所 150 kW 風機(INER-P150)與 25 kW 風機(INER-C25A)葉片為例，採用的幾種玻纖布為 L900 與 DBLT800 (後面號碼代表每平方公尺之質量，如 800 表示 800 g/m²)，而複合材料最大的優點即為單位質量的強度非常高如表 2 所示，經常用於輕量化需求較高的結構件。

表 1、纖維方向符號說明表

L	0 degree
DB	±45 degree
LT	0 degree/90 degree
DBL	±45 degree/0 degree
DBLT	0/45/-45/90 degree

表 2、金屬材料與 FRP 單位質量強度比較表

Material	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Specific Strength (MPa/[g/cm ³])
6061T6 Aluminum	310	69	114.4
4340 Steel	1030	200	131.5
AZ80 Magnesium	345	45	191.7
Glass fiber E-glass	3448	72	1357.5
Glass fiber S-2 glass	4830	87	1939.8

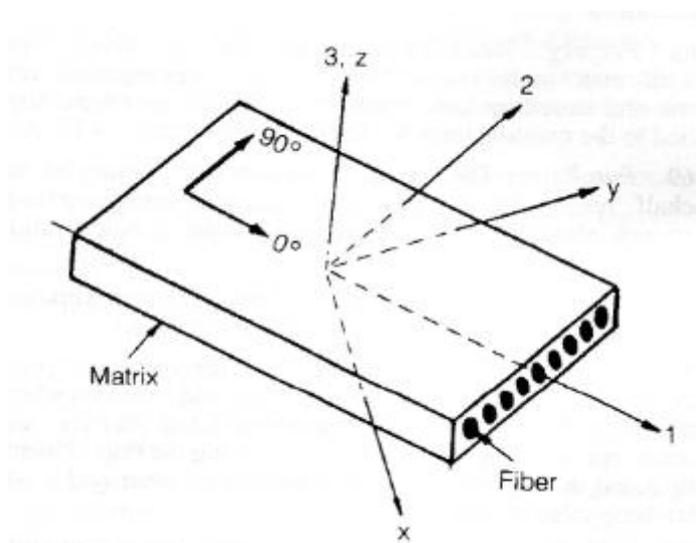


圖 3、複合材料成分示意圖

如以上所述，複合材料在材料特性上與一般金屬材料最大不同在於複合材料 Anisotropic 的特性，而金屬材料一般可以視為 Isotropic。若以圖 3 材料主座標系統定義(1-2-3 系統)，則材料應力可以如圖 4 所示，由 Hook's Law，應力與應變間的關係可由式 1 表示，式中之 C 矩陣為 Stiffness Matrix，由於應力及應變對稱性之關係(如 $\sigma_{12}=\sigma_{21}$ ， $\epsilon_{12}=\epsilon_{21}$ ， $C_{12}=C_{21}$ 等)，完整的 Anisotropic 材料 Stiffness Matrix 如式 2，式 2 的 inverse matrix 則稱為 Compliance Matrix。將材料參數代入 Compliance Matrix，則 Anisotropic 中一個特別的案例為 Orthotropic，應變與應力值間之關係如式 3 所示。式

3 顯示主應力(σ)與剪應力(τ)間並無耦合，因此大幅降低應力計算的複雜性，也同時減少所需之材料參數。

$$\sigma_{ij} = C_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (\text{式 1})$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{式 2})$$

SYM

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{式 3})$$

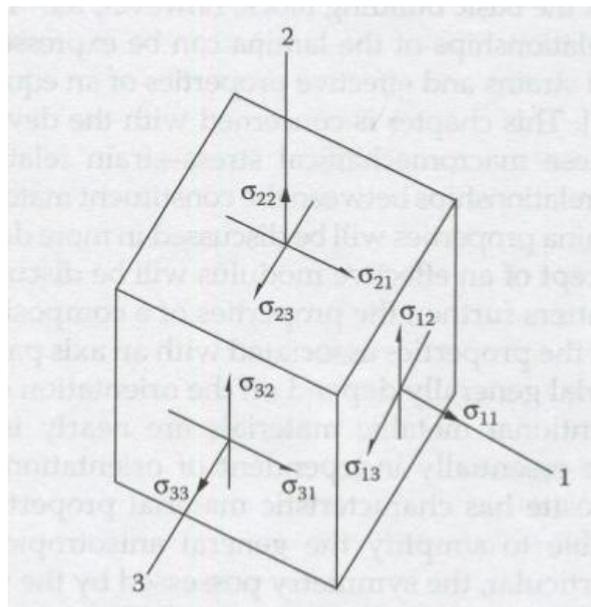


圖 4、複合材料 element 應力示意圖

一般材料參數均是要經由測試取得，複合材料最常採用 coupon test，試片通常是單一疊層如僅有 0° 玻纖或 90° 玻纖等，但實際上，因應設計需求，不同方向之疊層穿插是常見的應用，因此，若想省略針對不同疊層設計再進行參數量測之步驟，則可以採用比例方式，計算等效參數。以 INER-C25A 之葉片尖端疊層為例，採用 DBLT-800(簡

寫 D)與 L-900(簡寫 L)交互相疊，DBLT-800 拉伸強度為 266.93 MPa，而 L-900 拉伸強度為 504.32 MPa，疊層順序為 D/L2/D/L2/D，其中 L2 表示 L-900 兩層，因此，L-900 共有 4 層(厚度為 3.6 mm)，而 DBLT-800 共有 3 層(厚度為 2.4 mm)，疊層總厚度為 6 mm，依照各別疊層之強度，以及厚度比例可以估算等效拉伸強度如下所示。

$$(S_t)_{equivalent} = \left[\frac{3.6}{6.0} \times 504.32 + \frac{2.4}{6.0} \times 266.93 \right] = 406.36 \text{ MPa} \quad (\text{式 4})$$

由此可見，疊層設計與分析的準確性依賴正確的材料參數。金屬材料由於 Isotropic 的特性， $E_1 = E_2 = E_3 = E$ ， $G_{23} = G_{31} = G_{12} = G$ ，反觀複合材料，由於 Anisotropic 的特性，每個方向的材料參數都不同，Prof. Sun 依據過往經驗與研究結果，建議至少需量測 1-2 方向的參數，而且採用 90-95% 信心度原則(confidence level)，與 IEC 標準建議的 95% confidence 雷同。量測上建議採用統計方式，亦即取樣平均值(式 5)與取樣標準差(式 6)，樣品數 n 至少為 5，則 95% 信心度之特性參數 R_k 可由式 7 獲得，式中的常數 k_2 如表 3 所示。假設量測值 x 為拉伸強度，由式 7 與表 3 可看出，當測試樣品數越多，而且取樣標準差越小，則平均值的修正越小，此外，表 3 中的 n 值是從 5 開始，也代表至少要測試 5 個樣品。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{式 5})$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{式 6})$$

$$R_k = \bar{x} - k_2 s \quad (\text{式 7})$$

表 3、95%信心度 k_2 常數列表

No. of Samples (n)	k_2
5	4.21
6	3.71
7	3.4
8	3.19
9	3.03
10	2.91
11	2.82
12	2.74
13	2.67
14	2.61
15	2.57
20	2.4
50	2.07
100	1.93
> 100	1.645

複合材料在疲勞量測上常會只測試 $R = -1$ 之疲勞曲線， R 代表最小值與最大值之比如式 8 所示，不同 R 值的周期示意圖如圖 5 所示。Prof. Sun 建議除了 $R = -1$ 之外，盡可能也能涵蓋 $R = 0.1, 0.5, 2$, 及 10 ，如此在計算葉片疲勞強度時的誤差較小。

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (\text{式 8})$$

最後，複合材料屬於 Viscoelastic 材料，其特性如圖 6 所示，(a) 在固定 Stress 下，Strain 值會隨時間變化 (creep phenomena)，(b) 在固定 Strain 下，Stress 值會隨時間變化 (relaxation phenomena)，(c) 具有記憶特性，亦即 Strain 值會因先前的 Stress 軌跡不同而異，(d) Stress 值會因 Strain rate 的不同而異。

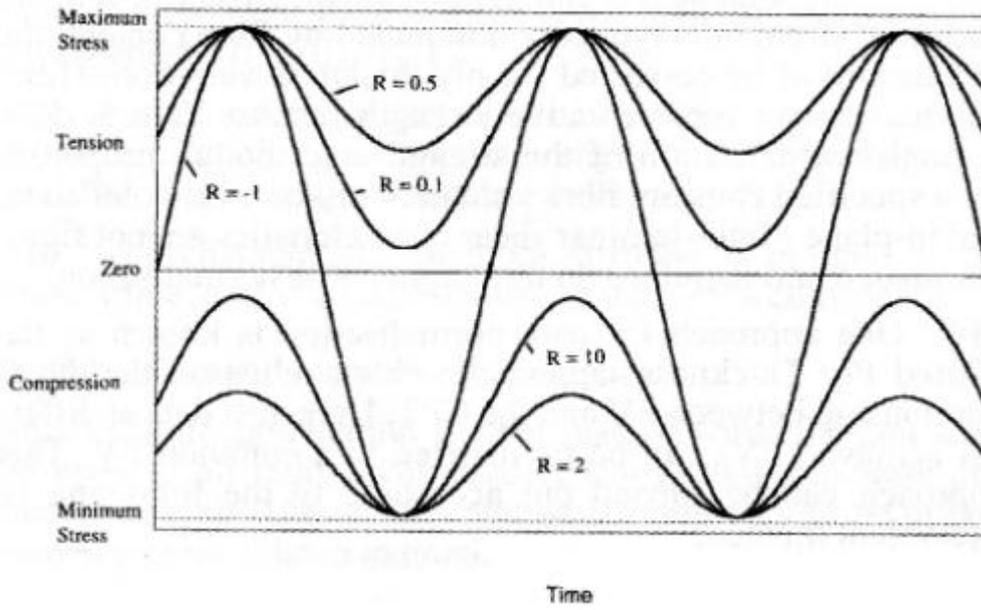


圖 5、疲勞周期測試示意圖

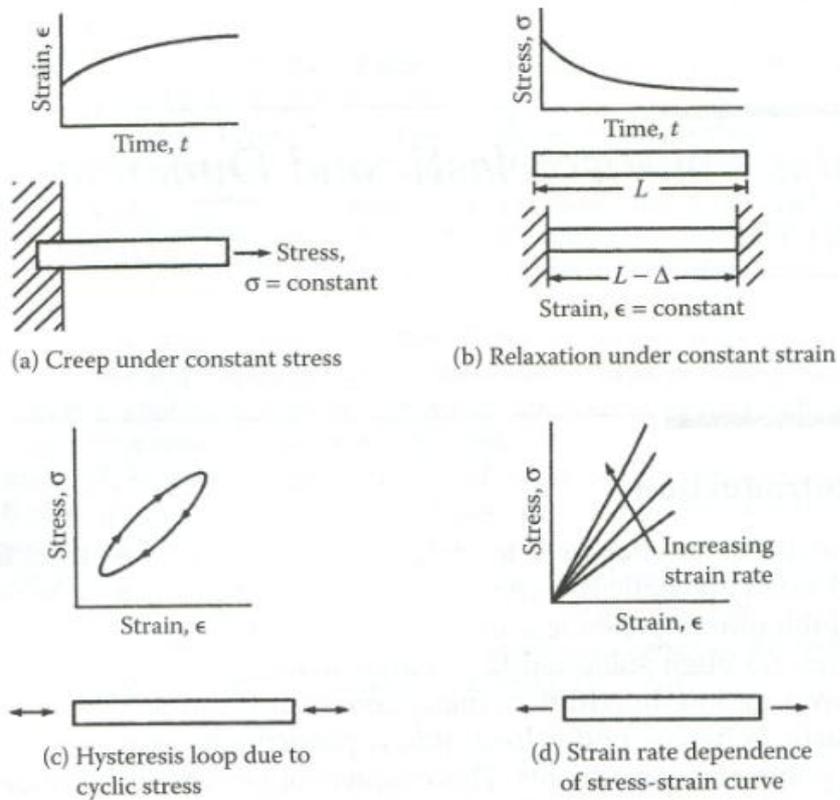


圖 6、複合材料 Viscoelastic 特性示意圖

(二) 複合材料失效判定方法

一般 Isotropic 材料在破壞判定上常見的是 Maximum principle stress 與 von Mises stress (或 equivalent stress) (式 9)。相同地，針對複合材料，專家學者至今也提出多種強度判斷的分析方法。本次研究主要針對用於連續纖維材料 (Continuous Fiber-Reinforced) 的方法，常見於工程應用上的有：Maximum stress criterion、Maximum strain criterion、Tsai-Hill criterion、以及 Tsai-Wu criterion 等如圖 7 所示。

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2)}{2}} \quad (\text{式 9})$$

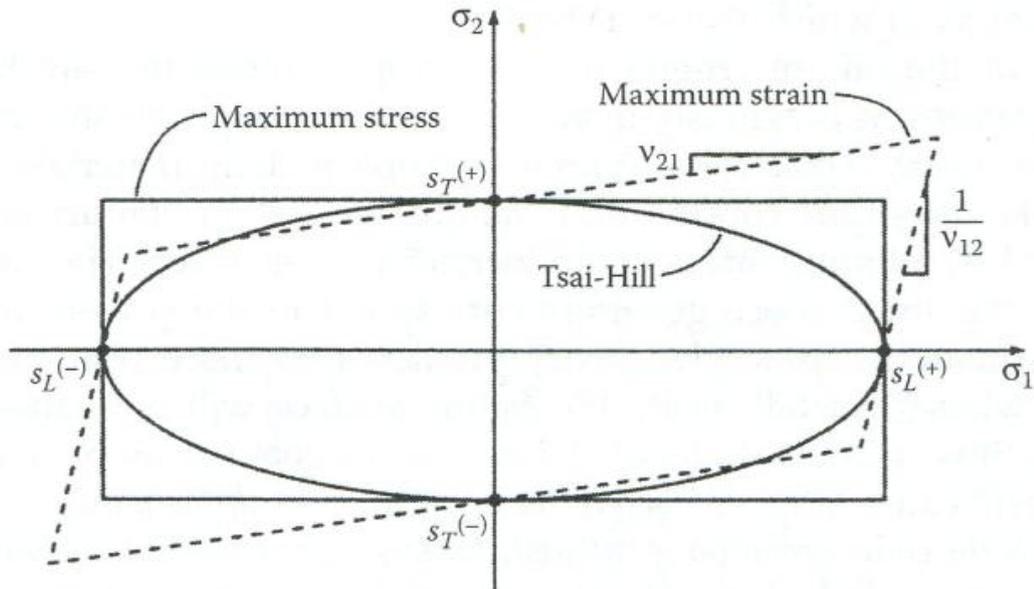


圖 7、2-D 複合材料 failure criterion

Maximum stress criterion (式 10) 主要是針對 Orthotropic 材料，相似於 Isotropic 材料所使用的 Maximum Normal Stress Theory。如圖 7 所示， S_L 為主應力方向的拉伸強度(+)與壓縮強度(-)，而 S_T 為剪切強度，由這些材料參數在 1-2 平面定義矩形的 Failure Surface，當材料應力落於 Failure Surface 以外，則判定材料失效。

$$-S_L^{(-)} < \sigma_1 < S_L^{(+)}$$

$$-S_T^{(-)} < \sigma_2 < S_T^{(+)}$$

$$|\tau_{12}| < S_{LT} \quad (\text{式 10})$$

Maximum strain criterion (式 11)主要也是針對 Orthotropic 材料，相似於 Isotropic 材料所使用的 Maximum Normal Strain Theory。由式 12 在 1-2 平面上的交點為(+S_L,0)，以及由式 13 在 1-2 平面上的交點為(0,+S_T)，因此，Maximum strain criterion 在 1-2 平面定義平行四邊形的 Failure Surface，當材料應力落 e 於 Failure Surface 以外，則判定材料失效。

$$\begin{aligned} -e_L^{(-)} < \varepsilon_1 < e_L^{(+)} \\ -e_T^{(-)} < \varepsilon_2 < e_T^{(+)} \\ |\gamma_{12}| < e_{LT} \end{aligned} \quad (\text{式 11})$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 - S_L^{(+)}}{\nu_{12}} \quad (\text{式 12})$$

$$\sigma_2 = \nu_{12} \sigma_1 + S_T^{(+)} \quad (\text{式 13})$$

Tsai-Hill criterion (式 14)屬於 Quadratic Interaction Criterion，並且是由 von Mises criterion 所衍生而來。不像 Maximum stress 與 Maximum strain criteria，Tsai-Hill 考慮各方向應力間的交互作用，式中的 A~F 均為常數，必須由各方向之 yielding strength (Y) 計算而來 (式 15 至式 17)，因此，在應用上需要投入較多之量測。Tsai-Hill criterion 在 1-2 平面橢圓形的 Failure Surface，當式 14 大於 1 時，則判定材料失效。

$$A(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + B(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(D\tau_{23}^2 + E\tau_{31}^2 + F\tau_{12}^2) = 1 \quad (\text{式 14})$$

$$B + C = \frac{1}{Y_1^2}, A + C = \frac{1}{Y_2^2}, A + B = \frac{1}{Y_3^2} \quad (\text{式 15})$$

$$2A = \frac{1}{Y_2^2} + \frac{1}{Y_3^2} - \frac{1}{Y_1^2}, 2B = \frac{1}{Y_3^2} + \frac{1}{Y_1^2} - \frac{1}{Y_2^2}, 2C = \frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} - \frac{1}{Y_3^2} \quad (\text{式 16})$$

$$2D = \frac{1}{Y_{23}^2}, 2E = \frac{1}{Y_{31}^2}, 2F = \frac{1}{Y_{12}^2} \quad (\text{式 17})$$

相似於 Tsai-Hill criterion，Tsai-Wu criterion (式 18)亦屬於 Quadratic Interaction Criterion。式 18 一般可以簡化為平面應力如式 19 所示，式中常數也必須由測試計算而來(式 20 與 21)。

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1, i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{式 18})$$

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 = 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (\text{式 19})$$

$$F_{11} = \frac{1}{S_L^{(+)} S_L^{(-)}}, F_1 = \frac{1}{S_L^{(+)}} - \frac{1}{S_L^{(-)}} \quad (\text{式 } 20)$$

$$F_{22} = \frac{1}{S_T^{(+)} S_T^{(-)}}, F_2 = \frac{1}{S_T^{(+)}} - \frac{1}{S_T^{(-)}}, F_{66} = \frac{1}{S_{LT}^2} \quad (\text{式 } 21)$$

應用以上所討論之 criteria，比較 Prof. Sun 所提供之實驗數據(圖 8至圖 11)，可以得到以下幾個初步結論：(1) 如果主要是因為 Fiber 失效，則 Maximum stress 與 Maximum strain criteria 有較準確之預測結果，而且這兩種 criteria 對於 matrix 強度的變化並不敏感，(2) 當 σ_{11} 存在時，Maximum strain criterion 不適合用來預測 transverse matrix cracking，(3) 如果材料強度是由 matrix 強度所主導，則 Tsai-Hill 與 Tsai-Wu 這兩種 quadratic criteria 的預測結果之準確性必須仰賴準確的材料量測強度，(4)材料的 transverse 參數，以及剪切參數對於準確預測失效相當關鍵。

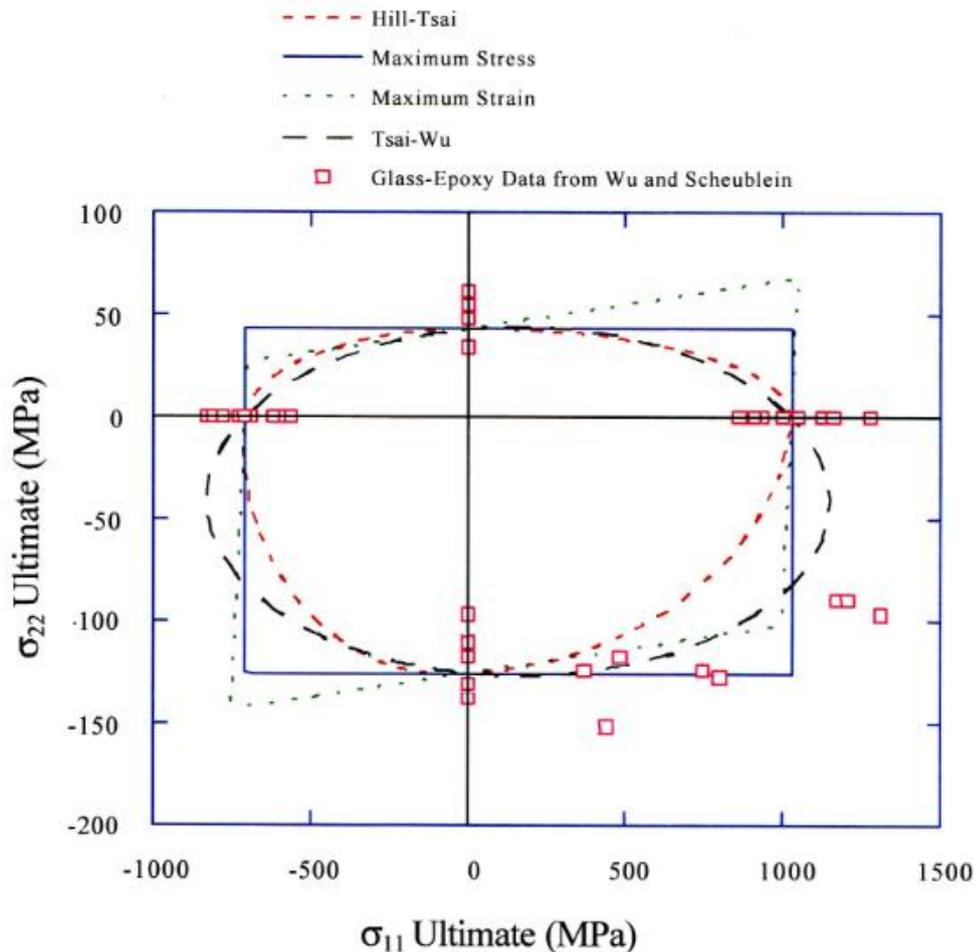


圖 8、Wu & Scheublein Glass/Epoxy σ_{11} - σ_{22} 實驗數據比較

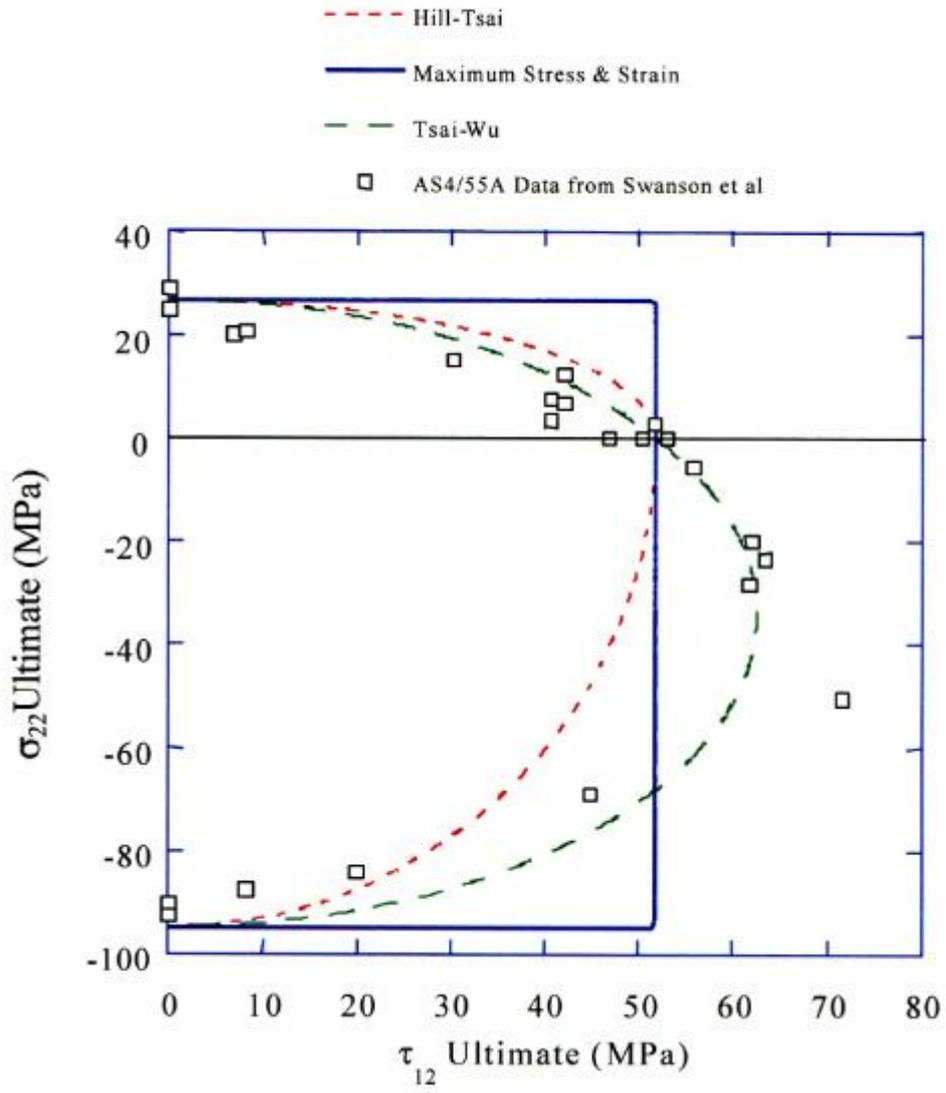


圖 9、 σ_{22} - τ_{12} AS4/55A 實驗數據比較

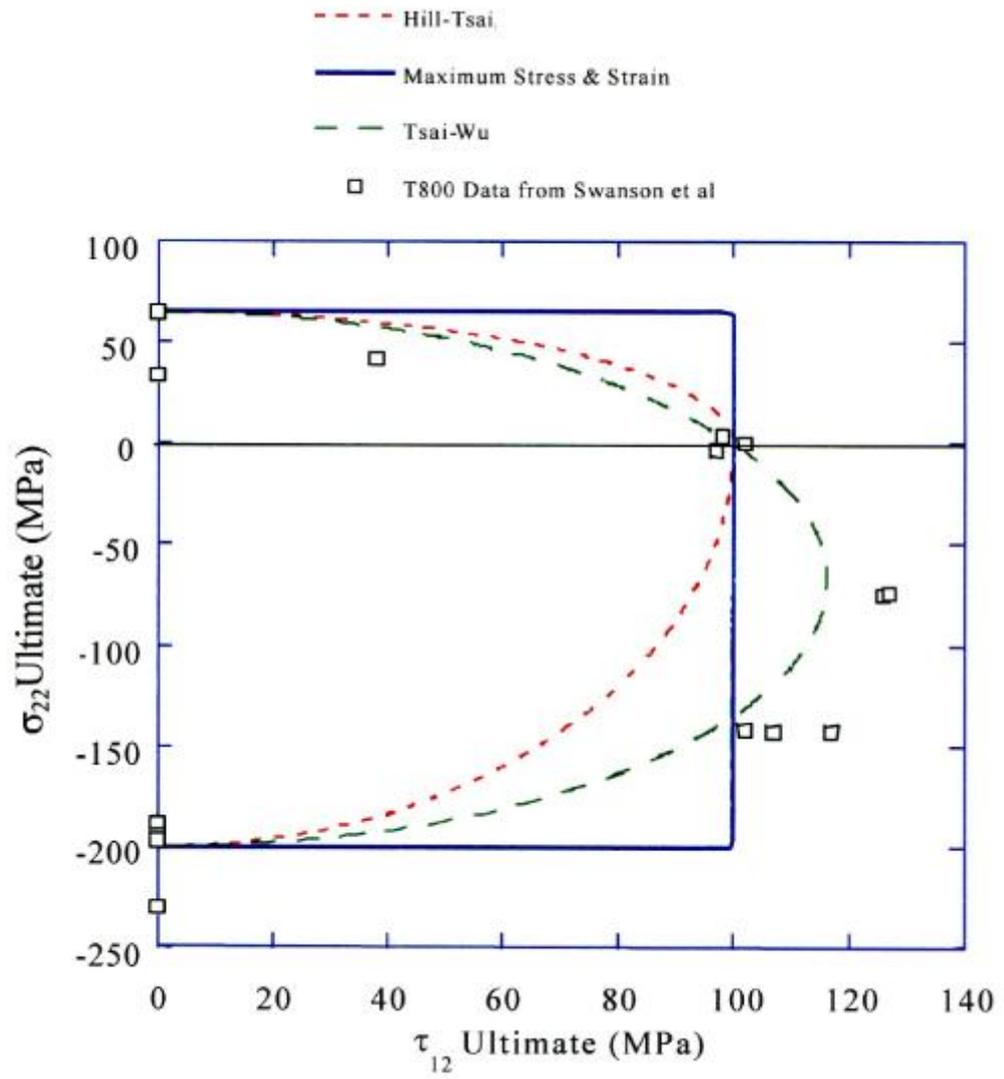


圖 10、 σ_{22} - τ_{12} T800 實驗數據比較

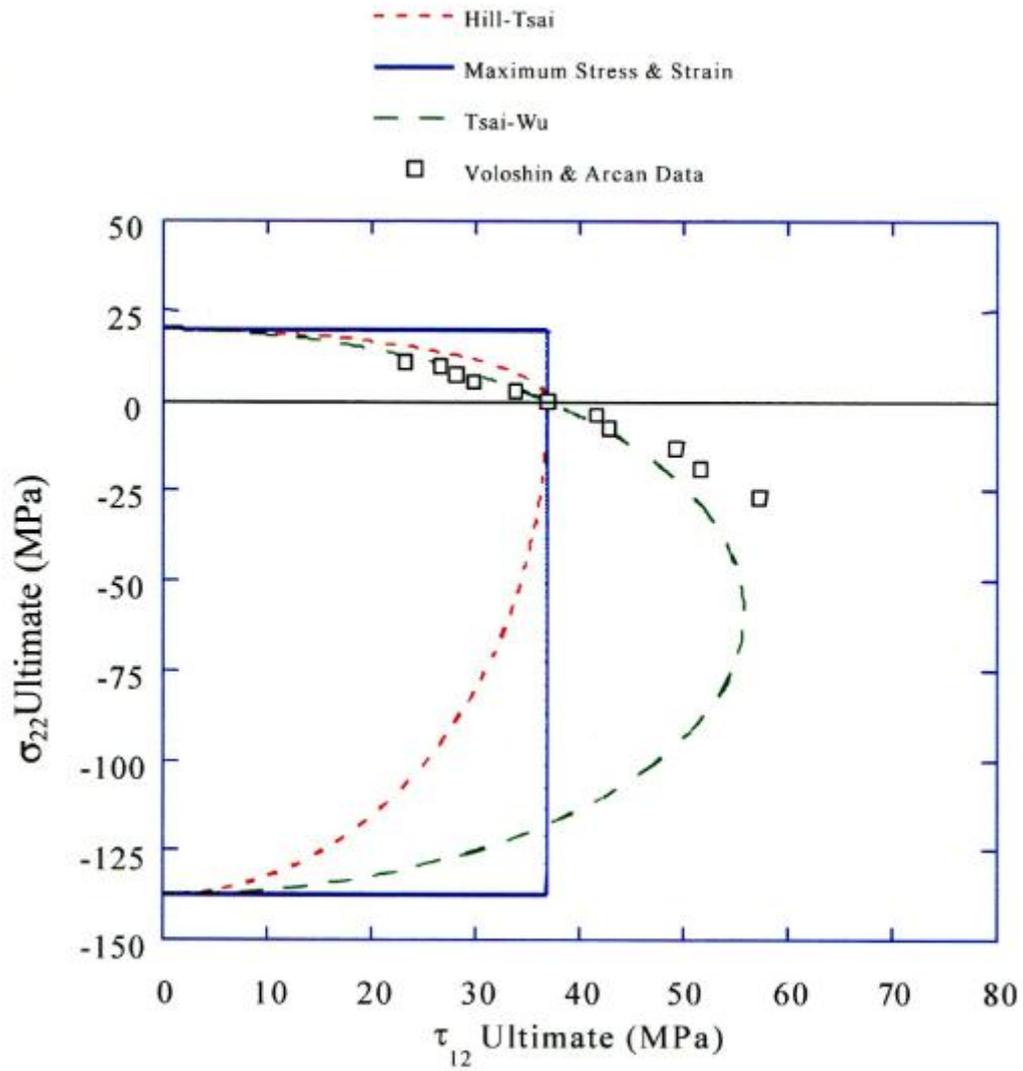


圖 11、 σ_{22} - τ_{12} Glass/Epoxy 實驗數據比較

如以上所述，Maximum stress、Maximum strain、Tsai-Hill、以及 Tsai-Wu 等為常應用在預測失效的判定方法，然而除此之外，尚有如 Puke's criteria、Hashin-Rotem、modified Tsai-Wu criteria 等方法，而更複雜的方式則是應用 Direct Micromechanics Method 如圖 12 比較圖所示。由於時間有限，無法完全加以了解，只能由 Prof. Sun 簡略介紹。

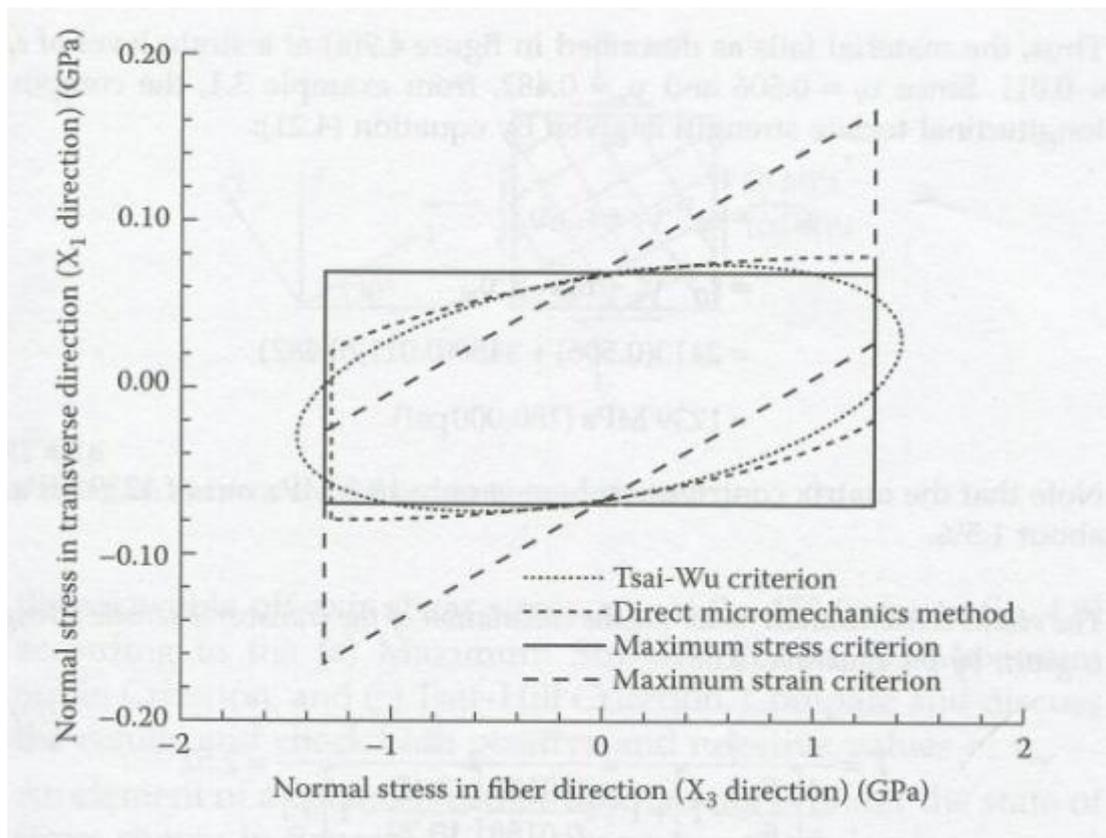


圖 12、Direct Micromechanics Method 與其他方法之比較

(三) 複合材料失效模式

Fiber failure 在保守的定義上是指第一根 Fiber 斷掉的情況發生，然而在實際應用上則相當的難以判定，因為，疊層在鋪疊與製造過程中，纖維難免受損或已斷裂，如圖 13所示，疊層受力時，每一纖維產生變形，因此，可以將纖維以彈簧表示，用以計算各自受力，當纖維斷裂數達到 critical fraction 時，此時，若疊層為 fiber dominant，則疊層就會斷裂，若疊層為 Matrix dominant，則最後便由 Matrix 決定斷裂時機如圖 14所示。如前所述，Maximum strain 是常被用來判斷 Fiber failure 的 criterion，其他如 Tsai-Hill 與 Tsai-Wu 等 criterion，若 Matrix 的量測參數不確定性低，則這兩種 criteria 也是常用來判定 Fiber failure 之方式。

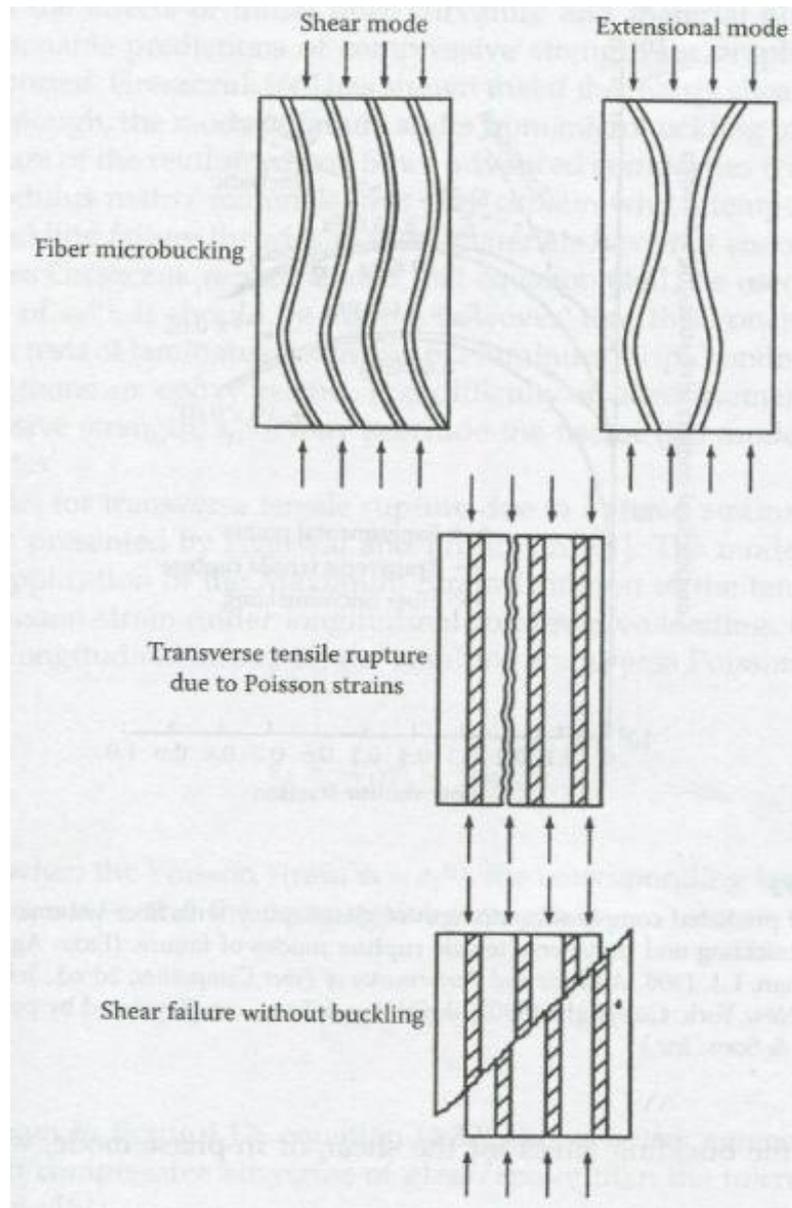


圖 13、Fiber failure 示意圖

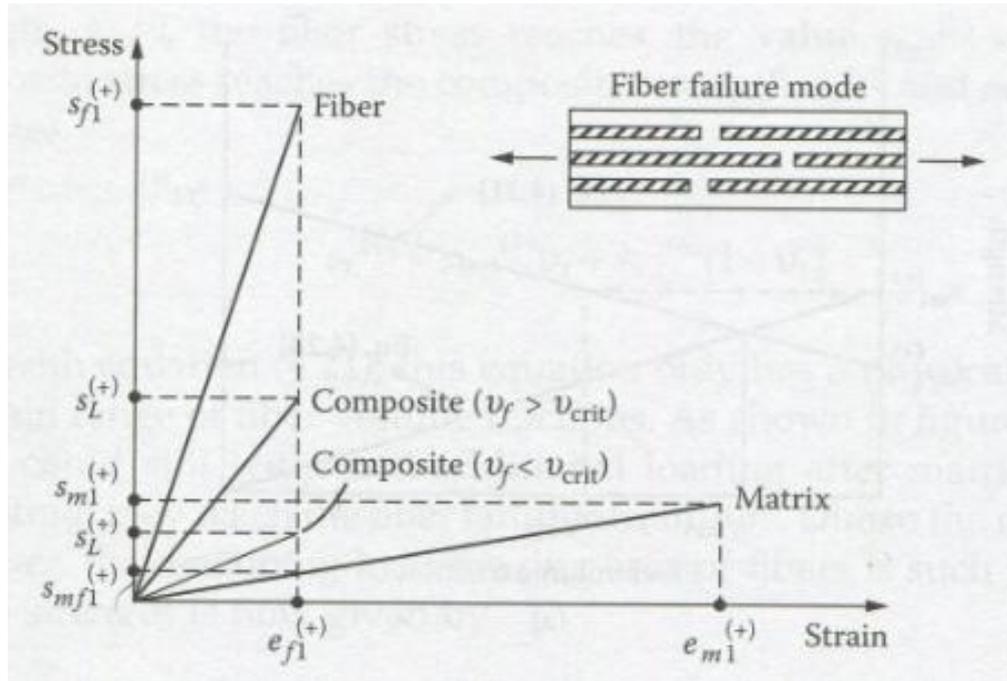


圖 14、Fiber failure stress-strain 示意圖

Matrix failure 在定義上以 Matrix 產生 crack 為準，若是 Fiber dominant 的疊層設計，在 Matrix 失效後，則由 Fiber 強度來決定疊層斷裂時機如圖 15 所示。如前所述，Tsai-Hill 與 Tsai-Wu 這兩種 quadratic criteria 對於 Matrix 的強度相當敏感，用來預測 Matrix failure 的結果不確定性較高，因此，針對 Matrix failure 的判斷，常用的方法為 Maximum stress criterion。

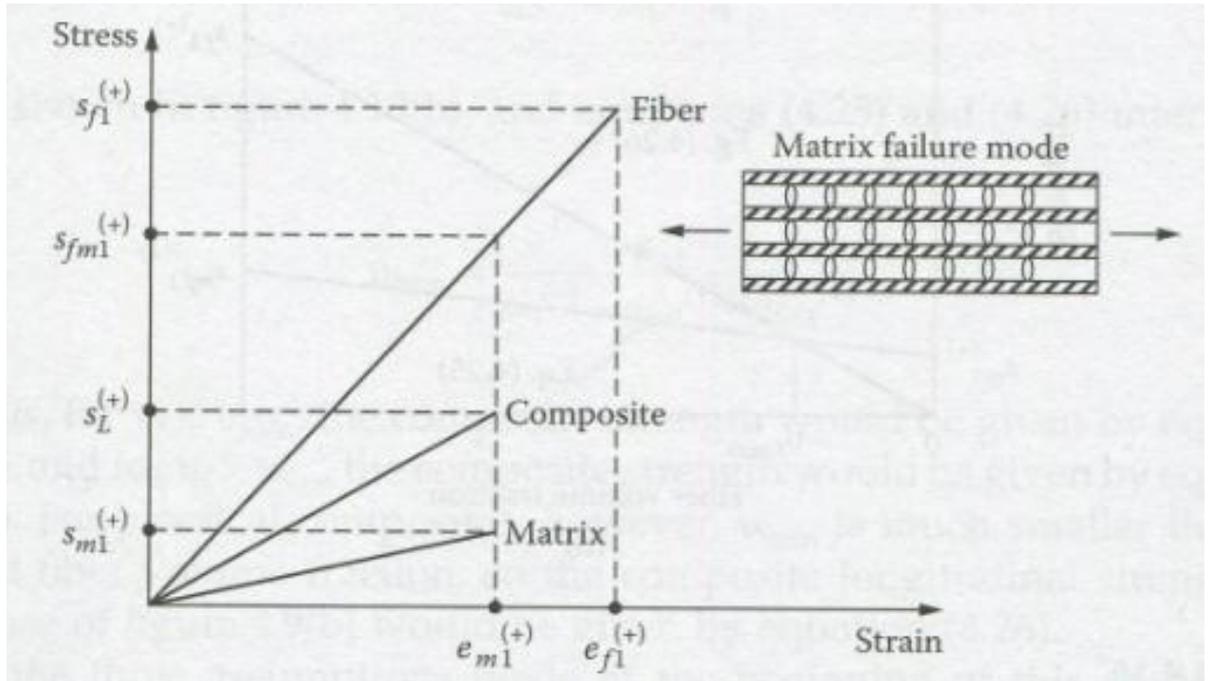


圖 15、Matrix failure stress-strain 示意圖

Laminate failure 的發生情況主要有兩種：(1) 單一疊層逐一破壞失效如圖 16所示，(2) 疊層與疊層間剪切破壞(inter-laminar failure)如圖 17所示。針對(1)的情況，每一個疊層可能因 Fiber 或 Matrix 破壞而失效，當疊層逐一破壞至整體疊層完全失效，因此，在判斷上必須應用 Fiber failure 與 Matrix failure 的 criterion 交互對照，才能準確判斷 Laminate failure。針對(2)的情況，常用的是把疊層當作 Matrix，而以 Matrix crack 的成長至 critical 比例做為失效的判斷，而破壞的模式與 Fracture Mechanics 所定義的相同如圖 18所示 Mode I、II、及 III。

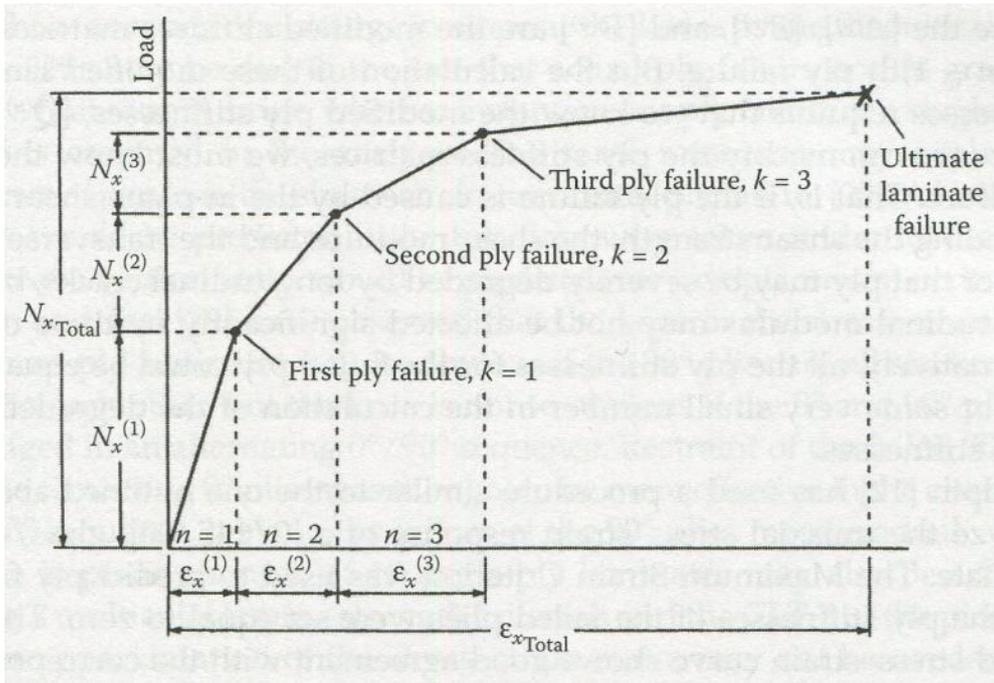


圖 16、Laminate ply-ply failure 示意圖

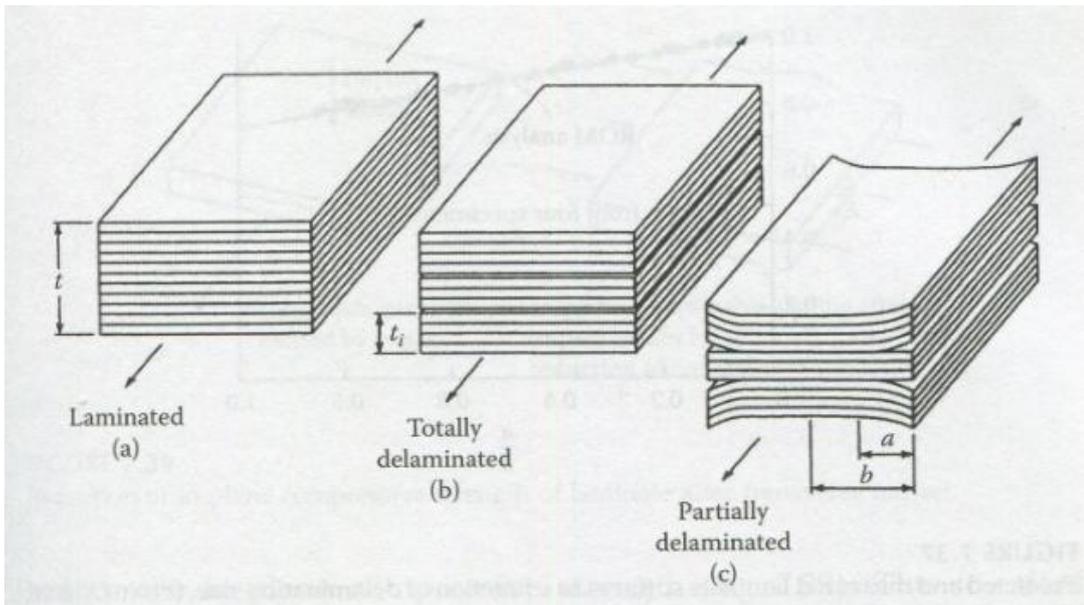


圖 17、De-lamination 示意圖

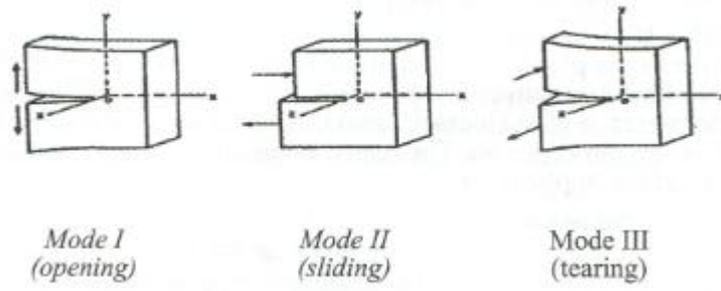


圖 18、De-lamination mode 示意圖

三、心得

本所進行風力發電相關技術之研發已有多年時間，從 25 kW 風機的研發，一直到完成 150 kW 風機的開發與架設。本人也已參與第一代至第三代 25 kW 風機葉片之設計，以及 150 kW 風機葉片之設計，過程中對於 FRP 的特性與正確的分析方式並無深入研究，更是經常以分析 Isotropic 材料的方法直接應用在複合材料上。藉由此次 Prof. Sun 與 Dr. Huang 的指導，以及實際的練習，對本人獲益良多，大致上可彙整如下：

1. 複合材料屬於 Anisotropic 材料，每一方向之材料參數均不相同，但若能在疊層設計上已對稱性設計，則可以減少 independent 參數的數量。
2. 複合材料 coupon test 是分析準確性不可或缺的資訊，在量測上應確實採用 95% 信心度原則(confidence level)，而且樣品數至少為 5。
3. 如果複合材料為 Fiber dominant，則 Maximum stress 與 Maximum strain criteria 有較準確之預測結果，而且這兩種 criteria 對於 matrix 強度的變化並不敏感，但當 σ_{11} 存在時，Maximum strain criterion 不適合用來預測 transverse matrix cracking。
4. 如果複合材料為 matrix dominant，則 Tsai-Hill 與 Tsai-Wu 這兩種 quadratic criteria 的預測結果之準確性必須仰賴準確的材料量測強度。
5. 複合材料的失效模式相當複雜，在分析上必須應用不同 criterion 交互使用，以確認 Fiber、Matrix、或 Laminate 失效的發生。

最後，經由本次的機會，能有機會深入了解複合材料的各種相關問題，更正以往錯誤的分析觀念與方式，同時對於複合材料參數的量測有更進一步的認識，並且對於材料參數在複合材料失效判斷上各種影響有深可的認知。

四、建議事項

- (一)、如報告所討論，複合材料與一般金屬材料在材質上有很大的差異性，材料參數的取得仰賴可靠的材料測試，而一般均只量測 longitudinal 的材料參數，若要獲得準確的失效預測，則材料的 transverse 參數，以及剪切參數亦是相當關鍵的量測參數，有鑑於此，建議將來在葉片設計與製作上，coupon test 應確實執行，並且依循 95% confidence 的標準，除了量測 longitudinal 的材料參數之外，若在設備條件許可下，也應盡量量測材料的 transverse 參數，以及剪切參數，而且至少進行 5 個樣品數的量測。
- (二)、如同金屬材料有 Maximum principal stress 與 von Mises stress criteria 一樣，複合材料也有各種不同的判斷 criteria，然而在實際應用上，仍必須對於每種 criteria 所適用的條件有正確的認識，最重要的是經驗的累積。風機設計團隊中相當缺乏專精複合材料的成員，因此，建議多與專家合作，不斷累積技術與經驗。