

## 電動車複合材料車體可量產性研究

鄭榮和<sup>1</sup>、林俊志<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 台灣大學機械系教授

<sup>2</sup> 台灣大學機械系研究生

### 摘要

本研究以提高複合材料三明治結構產量為主要目標，傳統的複材車體結構大都以單體式結構為主，其製作流程繁瑣，無法導入自動化生產，因此本研究採用最普遍的素車體結構(body in white)並且針對複材的可製造性以及受力型式作為分件設計的依據。

本研究首先探討自動化製程對複材結構件成型上的限制，再利用 FEM 計算車體結構在靜態剛性模擬、強度模擬，並且以最大主軸應力分析其應力的向量方向，藉此判斷其纖維結構件是否需要連續，避免在實際受力時的應力集中。在估算結構件間的接合強度，其破壞模式因較為複雜，因此採用 ABAQUS Cohesive Element 模擬膠層破壞，並且提出“接合強度判斷流程”，簡化其複雜的分析模型，以實驗驗證流程及分析的準確性，接續利用此套方法計算 T-Joint、Lap-Joint 幾何參數對負載強度的影響。最後將其接合型式對負載強度的影響，帶入全車的簡化模型，確認其初步的設計是否可以達到要求。

關鍵字：素車體結構、膠合元素、膠層破壞模擬、T 型接合、可製造性設計

### 1 前言

車體減重設計也是節省車輛能源消耗的重大課題。在鋼材的車體結構上，車體重量的減輕已發展到瓶頸。因此在 F1 賽車場擁有非常久歷史的碳纖維複合材料，將可能取代鋼材成為車體材料的主流。在 F1 賽車中，因需達到極高的強度需求以及輕量化的極致，所以往往都採取用單體式結構來打造賽車的車體結構，然而這樣的單體式結構設計，應用於一般房車上，對於整體的成本會大大的提升，主要因為材料單價太高、產量無法提高。

在複材三明治結構產量的問題，近幾年來，日本 TORAY 公司的技術發展，對於連續纖維的自動化製程也逐漸成熟[1]。但是這類的自動化製程大都對於成品的幾何形狀有些限制，因此這類的自動化製程不適用於傳統的單體式車體結構。

#### 1.1 文獻回顧

##### (1) 接合型式探討

Kildegarrd[2]比較一些不同形式之 T 型接頭，以直接拉伸垂直板實驗(tension pull-out)比較其強度，發現破壞裂縫皆開始於受正向應力(peel stress)之膠合面，即填料上纖維與水

平板接合處。此處在施工時亦容易留有空孔無法去除，但一般而言填料 R 角愈大愈好，以順利將垂直拉力藉纖維順傳遞之水平膠合面。Turaga 等[3][4]亦研究數種傳統膠合 T 型接頭破壞模式，與螺栓接合比較，總結一般主要破壞模式為水平膠合面拉力斷裂或下方心材剪斷兩種，並發現圓弧形填料強度高於三角形，開發新型接合方式減少進一步減少傳統圓弧形填料應力集中，能達到較高的抗拉及彎矩強度。Theotokoglou [5]對於常見 T 型接頭，以實驗及細部有限元素分析，探討裂縫發生成長及決定破壞強度的關鍵因素，然其結論說明實際施工可能造成的許多微小缺陷非常難以模擬方式估算，卻主導接合強度表現。

膠合搭接(Bonded Joint)是從 1938 年開始，經由一堆學者將近半多世紀的研究，其中單邊重疊接合(Single lap-Joint), Hart-Smith [6]-[8] 及 Grant[9][10] 探索了不同重疊長度(overlap length)對強度及應力分佈的影響。然而單邊重疊接合的拉伸試驗，因膠合界面上下的施力中心並沒有落在膠合中心線上，因此膠合界面上除了承受剪切的力量外，還有存在一力矩，而在邊緣產生正向力效應。隨著重疊長度的增加，在邊緣的正向力效應的影響也逐漸增加，而中間區段的應力分佈會趨於平緩，其向應力往往大於剪切應力，造成初始破壞的發生，因此在接合面的設計，短搭接長度的結果也不能等比例放大至長搭接設計中。

#### (4) 膠合的破壞模擬

依照膠合層因受力而造成裂縫行為可分為三種型態，如圖 1 所示，Mode I 屬於上下拉開之張裂型(Opening mode)，Mode II 屬於面內前後剪切之滑裂型(Sliding mode)，Mode III 是面內左右剪切之撕裂型(tearing mode)。Cohesive element 就是根據上面三種裂縫型態所開發出之特殊元素 [11]~[14]，適合用來模擬材料接合元素之破壞行為。

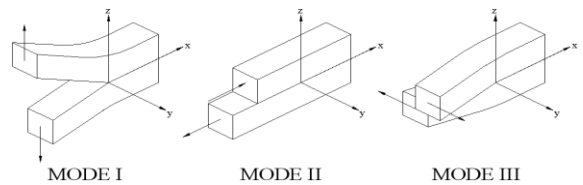


圖 1 裂縫成長之三種破壞模式[11]

馮瑞裕[15]提出一膠合介面性質的方法，並且以實驗驗證其材料常數的準確性，將 Cohesive-element 應用於三明治結構的金屬補強件分析模型，利用其分析模型預測各種破壞模式的負載強度，並且提出補強應對的對策，最後利用實驗驗證此種分析方法的可信度。

彭聖倫[16]利用其瞭解風機葉片在不同的補強設計，觀察在不同的接合方式的接合強度與破壞行為，並且以實驗驗證其結果。

### 1.2 研究方法

本研究將分成三個階段來進行

第一階段：考慮 RTM 自動化製程以及根據車體結構在受外力時的主應力方向分佈，將車體結構分件。

第二階段：針對所分件的零組件，整理出所需要的接合面形式，利用 ABAQUS -Cohesive element 模

擬接合面之間的破壞行為，進而建立起接合形式的幾何尺寸與最大線性負載強度的關係。

第三階段：將第二階段求取到的最大線性負載強度套用於簡化的 3D-Shell Model，然後判讀在接合處的 TSAIH 值，進而探討全車 model 在強度模擬的負載條件下，各個接合處的 TSAIH 值，驗證其是否達到一定的安全係數，若在設計要求內，則完成初步的接合設計，若無法達到需求，則回到接合設計以及分件設計進行設計變更。

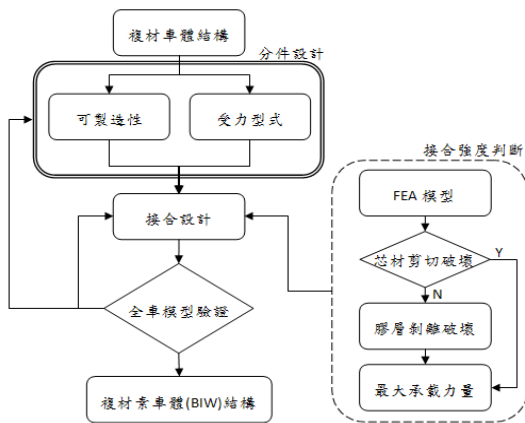


圖 2 研究流程圖

## 2 結構分件設計

### 2.1 Green Jumper 結構設計流程

本章節後續相關探討所採用的範例車體結構 Green Jumper 車體結構是依循張智凱[17]所提出的「系統化複材結構設計及最佳化方法」所設計。



圖 3 Green Jumper 車體結構  
系統化複材結構設計及最佳化

方法分為初步設計、最佳化及細部設計三個主要階段。初步設計始於車輛功能性、基本型態之概念設計，及重量、行車負載、尺寸等規格之訂定。由外型設計及電腦輔助計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析降低外型空阻，兼顧美觀、空阻降低、內部空間需求及車輛功能等需求，確定外型設計。

結構最佳化第一階段拓撲設計，目的在以初始空間為基礎，決定材料的最佳分佈位置，第二階段參數最佳化在於確定結構形狀後，以剛性或強度條件為準則，進行材料構成如纖維面材及芯材厚度、芯材密度及種類之最佳組成搭配。

最佳化階段完成車體大部份結構形狀、材料厚度、種類等參數之決定，第三階段細部設計則以實體模型，對於結構接合方式進行設計及結構局部集中受力處，例如懸吊桿件與車體接合處，設計面及芯材補強方法以達到足夠之強度或剛性。

然而這樣的設計結果是針對剛性強度重量的最佳化結果，往往不利於量產製造，因此在後續會利用可製造性及受力形式，做為結構分件的設計依據。

### 2.2 可製造性設計(Design for manufacture)

可製造性設計-主要是研究產品本身的幾何外型特徵與製造組裝系統各部分之間的相互關係，並將其運用於產品設計中，以便降低成本，縮短生產時間，提高產品可製

造性和工作效率。可製造性設計主要是在設計階段導入製程上的一些對成品的限制，針對這些限制進行設計，因此了解複材自動化製程，對成品之限制，並且將其限制導入設計階段，會大幅縮短試產的時間。

### 2.2.1 R.T.M 製程介紹

RTM 樹脂轉注成型，是一種以低壓、密閉容器製造的複合材料製成方法，先把纖維、基材放入於模具中，密閉之後以低壓灌入樹脂，等到樹脂反應硬化之後，打開模具將成品拿出。而成品的幾何形狀大小較不受限制，但仍須顧慮成品可開模性(有無負角)、拔模角度、成品厚度(厚度不足是否會造成成品脫模缺陷)、注口分佈 等...

### 2.2.2 小結

由 DFM 的設計需求，了解其設計限制主要都來自於製造的製程。然而複合材料成型限制遠遠低於金屬的板金成型，自然而然在設計上所考慮的設計限制就相對的少。根據 LCM 的製程限制，歸納出兩項最主要的設計限制(1)成品的可開模性，(2)拔模角。

將 DFM 的設計需求導入 Green Jumper 車體結構，可以將車體結構，粗略分成如下，而這初步的結果則會在後續章節亦會將其劃分成更細。

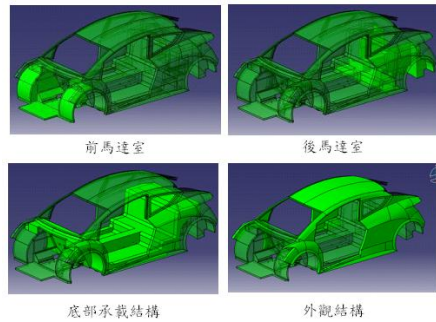


圖 4 Green Jumper 車體結構初步分件

## 2.3 結構受力形式探討

### 2.3.1 靜態負載

本文所採用車體剛性測試之邊界，參考國際鋼鐵協會提出的超輕量鋼材車體(ULSAB)-Ultra Light Steel Auto Body 的測試規範[18]。車體靜態剛性測試分為兩種：(1) 靜態扭轉剛性測試 (2) 靜態彎曲剛性測試，而其基本架設方式是相同的。

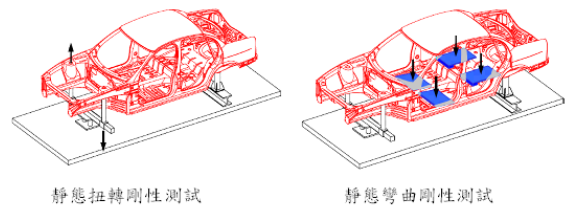


圖 5 ULSAB 剛性測試示意圖

### 2.3.2 強度模擬

剛性測試係對單純車體結構於測試架上進行測試，一般車體結構強度常以三種極限行車狀態進行分析：3 G 垂直顛簸、1 G 轉向及 1 G 煞車，主要針對車上負載元件如動力傳動、懸吊轉向、駕駛等皆需模擬。

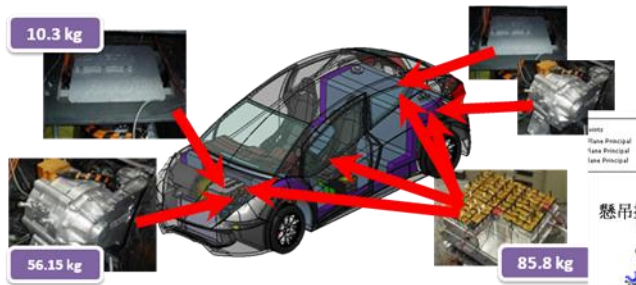


圖 6 車體元件分佈圖

### 2.3.3 負載模擬結果

由於複合材料是屬於非等向性的材料性質，所以在設計時可以根據主力應軌跡線做為纖維鋪放的判斷依據。主應力軌跡線主要是外力施載在結構上，結構的內力分佈，故本研究將利用主應力軌跡線的分佈來判斷纖維連續的必要性，接續初步結構分件，將其四個區域：前後馬達室、底部承載結構、外觀結構，根據主應力分佈的方向性，將其做更細部的劃分。

這邊以外觀結構做為範例如圖 7，分別判斷彎曲剛性、扭轉剛性、3G 垂直加載、1G 轉向、1G 煞車，由模擬結果得知在 AC 柱的前後連結需求較強，而在左右側板與頂部結構的連結需求性較低，因此可以判斷可分為左側側板、右側側板、頂部。

## 2.4 小結

由可製造性設計瞭解到，因製程的關係必須將車體結構拆成：前後馬達室、底部承載結構、外觀結構 4 大區域，然後經由靜態剛性負載模擬及強度模擬的結果可以將其整理成幾個重點：

- (1) 頂部結構可以自成一體
- (2) 側邊外觀結構，因 AC 柱必

須成為一體，故不再細分。

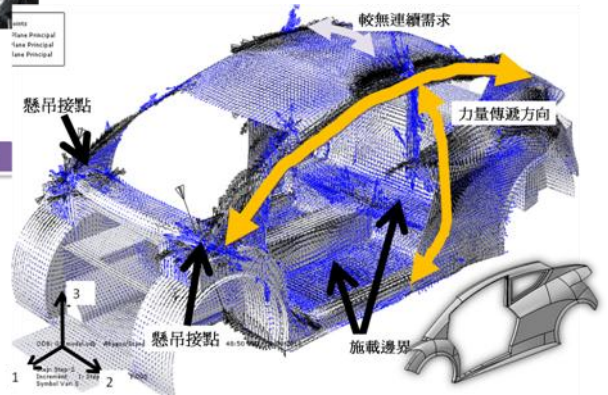


圖 7 結構分件判斷範例

- (3) 前後馬達室，主要承受區域在於底部平板，且底部平板在左右方向連結需求性較高。
- (4) 底部承載結構前後連結需求性較高，在左右側樑亦是如此，然而在左右方向的連結需求一樣較低，因此將左右側樑與底部承載結構劃分開來。

將其重點整理歸納後，可以將原本的結構分件成如圖 10。

## 3 接合強度判斷

經由文獻探討後，可以得知接合的破壞模式常發生於膠合層剝離破壞以及芯材局部挫屈、芯材剪切破壞，因此本文採用

ABAQUS-Cohesive element 探討複材結構的接合形式對於負載強度的影響。因複合材料三明治結構的破壞模式往往都很複雜，要將其材料特性都在分析模型中顯現出來，往往耗費大量的運算資源，故本研究

提出一簡易快速的接合強度判斷如圖 9。

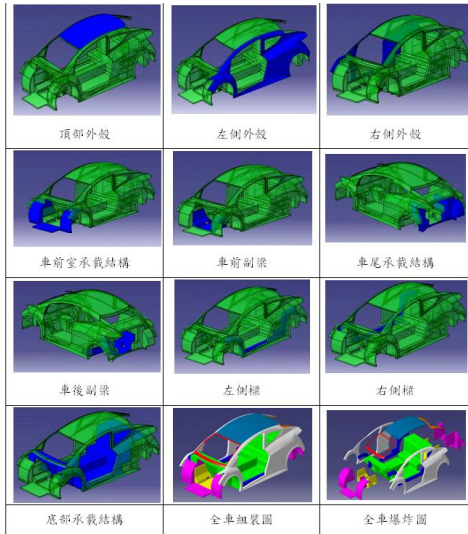


圖 8 Green Jumper 結構分件

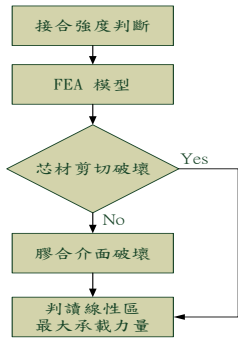


圖 9 接合強度判斷流程

### 3.1 接合強度判斷流程驗證

實驗驗證的目的在於驗證本研究所提出的“接合強度判斷流程”的準確性。在做驗證接合強度判斷流程前，需先驗證芯材剪切破壞的判斷是否正確，其主要是因為蜂巢的破壞模式往往會隨著其密度、剛性來做變更。經由文獻得知 T 型接合的破壞模式較為複雜且較難以解析或有限元素法準確的預測其破壞行為，因此本研究將利用 T-Joint 驗

證其“接合強度判斷流程”線性區最大負載強度的準確性。

#### 3.1.1 芯材破壞判斷

實驗採用 ASTM C393 四點彎區，試片規格 CFRP 編織布 4 層，低密度芯材 nomax honeycomb 17.53 mm；模擬採用平面 2D shell model，其比對結果如圖，由圖 10 中可以得知，低密度芯材破壞由最大主軸應力判斷，結果較為準確，並且安全。

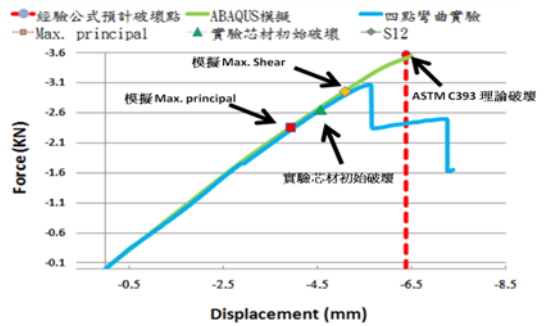


圖 10 芯材破壞判斷實驗與分析比較

#### 3.1.2 T 型接合實驗

因本研究的驗證實驗，希望得到芯材剪切破壞以及補強層剝離破壞，所以設計兩種不同型式的 T 型接合如圖 11 進行實驗驗證，以期待與“接合強度判斷流程”所得到的線性區最大負載強度有相近的趨勢，試片規格 CFRP 編織布 4 層，低密度芯材 nomax honeycomb 17.53 mm。

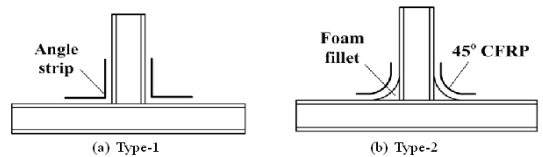


圖 11 T 型接合

(a) Type-1

此分析模擬結果，雖然在模擬初始破壞的情況相當的準確，其結果誤差約為 1.15% 內，但是在於描述初始破壞後的破壞行為，其結果卻沒有預期中的準確，但因本研究所提出的接合強度判斷流程重點在於求取線彈區的最大負載強度，因此只要在初始破壞前的受力情況與實驗相符，即可證明此判斷流程的可行性，由實驗以及分析中觀察初始的破壞行為，初始破壞是由兩側的補強片開始變形造成剝離，而此現象 FEA model 模擬結果有準確模擬出其趨勢。

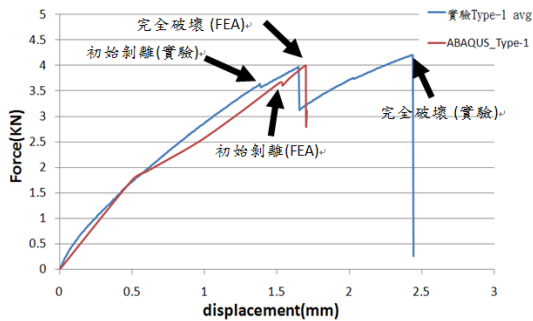


圖 12 T 型接合 Type-1 實驗與分析比較

(b) Type-2

雖然由文獻得知填料的倒角越大越好，以順利將垂直拉力藉由纖維順利傳遞之水平膠合面，但是其破壞的發生往往都是因為芯材產生降服，造成局部的壓潰、挫屈，然而因為蜂巢結構之破壞模式為非脆性、壓潰型式，在發生壓潰後還能擁有一定得負載能力，所以造成承載的力量-位移產生非線性的關係，且力量的承載可以持續至完全剝離破壞。但是在持續往復受力的情況，這種局部壓潰、挫屈的情況，會使得結構的使用壽命大大的降

低，因此在設計時一般都是考慮在線彈區的施載情況，由實驗結果與 ABAQUS 分析的結果比對其線性度，可以發現實驗曲線在線性區段與 ABAQUS 的分析曲線大致接近圖 13。且可以得知其模擬結果在線性區與實驗結果的誤差只有 1.1%，因此判定 ABAQUS 的分析結果有相當的準確性。

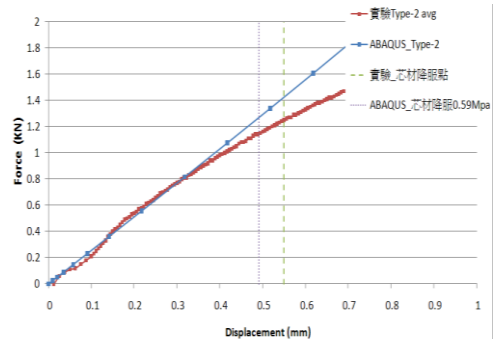


圖 13 T 型接合 Type-2 實驗與分析線性區比較

3.2 小結

本節利用實驗驗證本研究所提出的“接合強度判斷流程”的準確性，然而因為牽扯到流程中所需要不同的破壞模式，因此需要設計兩種不同的破壞型式，由文獻回顧中得知，Type-1 與 Type-2 屬於這兩種不同的破壞模式，因此採用這樣的設計，來驗證此接合強度判斷流程。

而由實驗與分析結果得知，在剝離破壞先發生的情況，在分析模型中導入 ABAQUS Cohesive-element 則有效且準確的求得膠層初始剝離時的力量負載強度；在芯材剪切破壞先發生的情況，在 ABAQUS 的模型中，判定蜂巢的初始破壞發生點，不管在力量還是位移結果都較為保守，因此判定在此種膠合的情

況，在細部模型導入 ABAQUS Cohesive-element 其分析結果有相當的準確性。

藉由此兩種實驗證明，本研究所提出的“接合強度判斷流程”求取出來的線性區最大負載強度，不管是在膠層剝離還是芯材剪切破壞都是有相當的準確度，且是較為保守安全的。

#### 4 接合設計

經由分件設計的結果整理後，發現主要的接合形式以 T 型接合、L 型接合以及 Lap-Joint 為主，但是因為二次搭接的 L 型接合一般而言視為 T 型接合的另一種型式，因此本章將針對 T 型接合以及 Lap-Joint 訂定其幾何參數，探討這些幾何參數與負載強度的關係，而在邊界條件設定上，由於一般車輛在設計的考量大都以承受正向彎曲為主，因此本章節分析所採用的邊界條件為：T 型接合正向拉伸、Lap-Joint 正向拉伸。

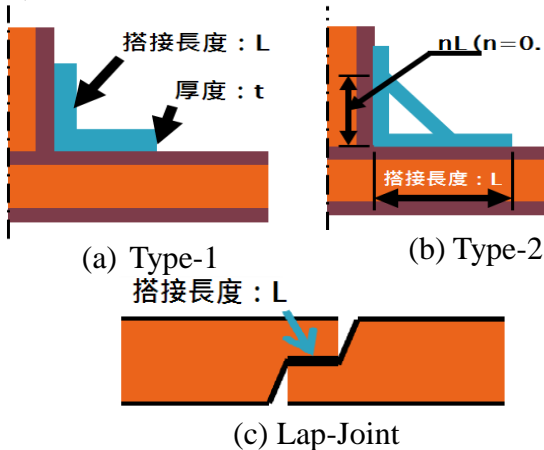


圖 14 接合型式

#### 4.1 T 型接合

本節主要探討 T-Joint 的補強型

式的幾何變化，對於負載強度的影響。

利用泡棉作為倒角的填料，但是其製作流程必須為二次成型(接合處的纖維要再次成型)，此種形式雖然由實驗結果與文獻回顧中都可知，可以有效的提供破壞後的承載能力，但是此製程無法提供足夠的生產速度，考慮到實際的自動化製程，因此在倒角的補強情況，本節是利用金屬擠壓成型(鋁擠型)或者是補強材預先成型作為倒角的材料。

- (a) Type-1: L 為搭接長度，t 為補強片的厚度。
- (b) Type-2: L1、L2 分別為補強的外伸面長度及三角形的邊長長度，而 L1 與 L2 的合為 L，而設一參數 X 為 L1/L 的比值，厚度 t 為定值 1mm，L 為 20mm~40mm。觀察這些參數對負載強度的影響。

##### 4.1.1 Type-1

對負載強度而言，搭接長度在 L=20 到 L=30 之間更好的趨勢，但是這個趨勢只有在厚度 3mm 以下，然而在厚度 3mm 以上時，可以觀察到其趨勢更接近於線性，但在此種情況下搭接長度的增加，對負載強度的影響趨勢就較為減緩。代表說其增加補強片的厚度(亦可說為剛性)，對於負載強度的影響是有正向的幫助。

而各個參數對破壞模式的影響，其在補強片剛性較高時(厚度超過 3mm 後)，其破壞行為雖然是以芯材破壞先發生，但是在接下來的剝離破壞，其剝離開始發生的位置，



與較低剛性的補強片不同。

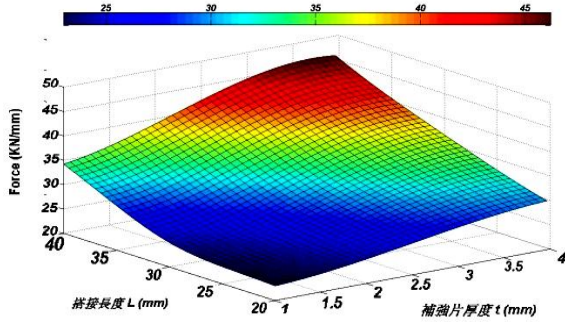


圖 15 Type-1 補強片幾何參數對負載強度的影響

#### 4.1.2 Type-2

將增加倒角的影響結果繪製如圖 16，可以發現有在倒角補強的型式，對於負載強度遠勝於 Type-1，但是其增強的邊長超過 0.1 倍時，其對整體的負載強度提升比例也逐漸降低(負載強度仍然有再提升)，而搭接長度 0.1 倍時，有最好的比強度。觀察參數變化對破壞模式的影響，在增強的邊長超過 0.2 倍時，從原本的剝離破壞，漸漸的變成芯材剪切破壞，然而其分析結果與 Typr-2 的實驗趨勢相近如圖 17 所示。

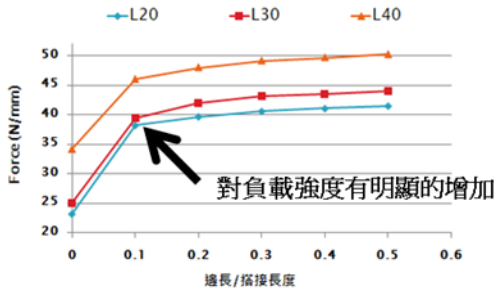


圖 16 Type-2 補強片幾何參數對負載強度的影響

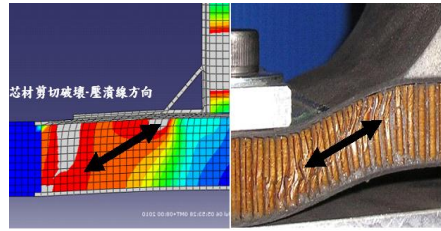


圖 17 模擬結果與實驗趨勢比對

### 4.2 板材搭接

經由 ABAQUS 模擬計算後，得到的結果如圖 18，然後從破壞模式中發現，其破壞皆從芯材剪切開始，而且其發生處皆在同一處，其主因在於在 Lap-Joint 的型式中，位於膠合層上下搭接材料的施力中心並完全沒有落在膠合中心線上，因此在此種搭接形式上在膠合邊緣，會產生一正向應力的效應。

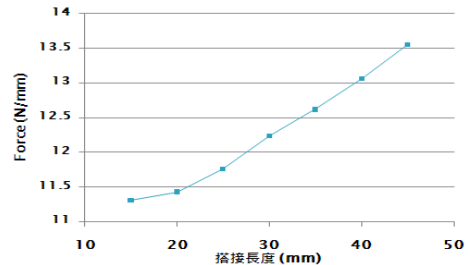


圖 18 Lap-Joint 搭接長度對負載強度的影響

### 4.3 小結

利用接合強度判斷流程及分析方法，分析計算 T-Joint 以及 Lap-Joint 的幾何參數對線性區負載強度的影響，藉此可以瞭解到其補強片、搭接長度對接合型式得負載影響，並且將其結果建立於圖，希望可以提供設計者在針對此種型式上的設計參考方向，以縮短分析實驗的時間。

### 5 全車模型驗證

利用上一節所提出來的接合強

度判斷流程，求得線彈區最大負載，將此套用於一簡化的全車 3D Shell model 判讀其在接合處的 TASH 值，將其值判斷為最大承載力的極限值(錯誤! 找不到參照來源。)，當超過其值則判斷為破壞，將其值套入於全車 Shell model 3G 加載的模擬結果 (圖 20)，判讀結構分件處強度是否有滿足需求，針對車體結構在不同的接合處需要的接合型式及強度做設計的參考依據。

本研究採用之示範車體 Green Jumper 其接合強度，皆遠低於本研究所提出的接合型式。然而一些更為細部的設計，則需設計者自行取捨(如搭接型式的空間損失，組裝流程、安全係數等...)，而本節使用的方法，為一粗略解，因此在實際製造所需要的搭接面，必須建立細部模型去做深入的驗證，確保其皆合強度的安全係數是否滿足需求。

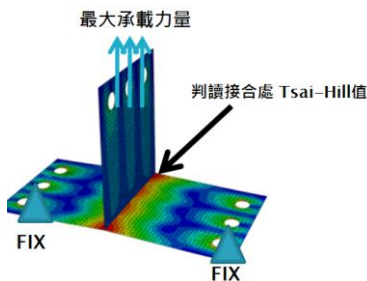


圖 19 T 型接合簡化模型

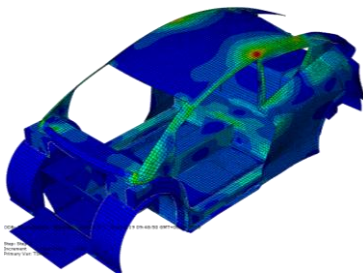


圖 20 3G 加載模擬結果

## 6 結論

本研究利用 FEA 模擬，瞭解其受力的方式，藉由觀察“最大主應力矢量圖”的方向，作為分件的判斷依據，成功的將其單體式結構劃分成可用於 RTM 生產之型式。

接續分件的設計後，其結構件間的接合強度亦要滿足需求，傳統的設計方法大都以實驗為主，其主因為複材三明治結構的破壞行為大都是複雜的，因此本研究在分析模型中導入膠合層的材料性質，並且提出一“接合強度判斷流程”利用實驗驗證其分析及流程的準確度，結果證明本研究所提出之方法在求取線性區最大承載力，有相當的準確度，且較為安全。

利用所求取到的最大承載力，套用至簡化的模型中，計算出在達到初始破壞前接合處的應力值，藉此套用於全車的簡化模型中，確保接合處的強度是否滿足需求。且此方法可以有效的降低細部模型建模及計算的時間。

## 7 致謝

感謝台達電子文教基金會的資助，使得本研究得以順利完成。

## 8 參考文獻

- [1] PDA Kitano, E Wadahara, I Taketa, The CFRP automobile body project in Japan, 2006.
- [2] C. Kildegaard, "Experimental and Numerical Fracture Mechanical Studies of FRP Sandwich T-Joints in Maritime Constructions," *Proceedings of the Second International Conference on Sandwich*

- Construction, Gainesville, Florida, USA, 1992.
- [3] U. V. R. S. Turaga and C. T. Sun, "Failure Modes and Load Transfer in Sandwich T-Joints," *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 2, No. 3, pp. 225-245, 2000.
- [4] U. V. R. S. Turaga, "A Study of Sandwich T-Joints and Composite Lap Joints," *Doctoral Dissertation*, School of Aeronautics and Astronautics, Purdue University, 2003.
- [5] E. E. Theotokoglou, "Experimental and Numerical Study of Composite T-Joints," *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 2, pp. 190-209, 1996.
- [6] L. J. Hart-Smith, "Adhesive bonded single lap joints", Technical Report CR-112236, NASA, Langley Research Center, 1973.
- [7] L. J. Hart-Smith, "Adhesive bonded double lap joints", Technical Report CR-112235, NASA, Langley Research Center, 1973.
- [8] L. J. Hart-Smith, "Adhesive bonded joints for composites phenomenological considerations", Technical Conferences Associates Conference on Advanced Composites Technology, 1978.
- [9] P. Grant, "Stress and strength analysis of bonded joints", Technical Report 50(R)P, British Aircraft Corporation, 1976.
- [10] P. Grant, "Analysis of adhesive stresses in bonded joints", Jointing in fiber reinforced plastic, IPC Science and Technology Press, 1978.
- [11] P. P. Camanho, C. G. Davila, M. F. de Moura, "Numerical Simulation of Mixed-Mode Progressive Delamination in Composite Materials", *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, pp. 1415-1438, 2003.
- [12] M. L. Benzeggagh, M. Kenane, "Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus", *Composites Science and Technology*, Vol. 56, pp. 439-449, 1996.
- [13] P. P. Camanho, "Advances in the Simulation of Damage and Fracture of Composite Structures", X Reunión de Usuarios de ABAQUS, 2005.
- [14] S. Li, M. D. Thouless, A. M. Waas, J. A. Schroeder, P. D. Zavattieri, "Competing Failure Mechanisms in Mixed-Mode Fracture of an Adhesively Bonded Polymer-Matrix Composite", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol.26, pp. 609-616, 2006.
- [15] 馮瑞裕, "三明治結構套筒之設計與破壞預測," 台灣大學機械工程學研究所碩士論文, 2009.
- [16] 彭聖倫, "FRP 風機葉片構件接合強度之探討." 台灣大學工程科學及海洋工程學研究所碩士論文, 2008.

- [17] 張智凱,“系統化複材三明治車體結構設計及最佳化方法,” 台灣大學機械工程學研究所博士論文, 2007.
- [18] “UltraLight Steel Auto Body Final Engineering Report: Testing and Results,” PORSCHE Engineering Services, Inc.