

第四章 結果與討論

4-1 靜態拉伸試驗

對於八類試片做靜態拉伸試驗，可得到各類試片的靜態拉伸強度(如圖 4-1)，取其平均值以作為拉伸疲勞試驗中施加應力等級的基準，並且瞭解修補對材料強度的影響，觀察是否達到修補的實際效益。

4-1.1 原始試片

實驗中以 $[0/+45/90/-45]_{2S}$ 擬均向性疊層板，任取七根做靜態軸向拉伸試驗，所得之原始試片的靜態強度平均值為 781.33 MPa(如表 4-1)，此數據主要是作為張力疲勞試驗中，施加應力等級 $UTS(\sigma_0)$ 之依據，並判斷此批製造試片中，機械性質是否有所差異。

4-1.2 開孔試片

同樣以 $[0/+45/90/-45]_{2S}$ 擬均向性疊層板，以沿著試片橫向開兩個直徑 3mm 的孔，開孔直徑選用 3mm 的原因為—兩孔直徑合 6mm 依據設計標準以不超過試片截面積 1/4 為原則(試片寬度為 25mm)，以孔距間隔分別為 6 mm、8 mm 以及 10 mm 分別探討此三類試片的靜態強度，任取七根做靜態軸向拉伸試驗，其平均值分別為 602.09 MPa、621.29 MPa 以及 634.70 MPa(如表 4-2)，相對而言比原始試片的靜態強度低很多，可見圓孔所造成的應力集中對材料產生顯著的影響，而孔距越近應力振幅越大，交錯的區塊越密集，造成圓孔間窄小的面積不足以承受負荷，而使試片損壞(如圖 4-2)。由實驗發現孔距越窄影響越明顯，因此孔距間隔拉大導致應力集中效應減低，靜態強度而有所提升；而孔中心距離 6 mm、8 mm 以及 10 mm 都距離試片

的邊緣有一段距離，因此模擬成無限寬平板而忽略邊緣效應的問題。推斷強度降低是由圓孔周圍的應力集中問題，加上纖維束的切斷造成承受的應力等級降低所引起，因此對試片的強度降低問作檢討，提出以 CN 膠黏貼修補片來對必須開孔的試片做一個預先修補的動作，來做為局部的支撐強化。

4-1.3 單邊貼片修補後開孔試片

同樣以 $[0/+45/90/-45]_{2S}$ 擬均向性疊層板，先以 CN 膠黏貼單片 $[0]_4$ 疊層的正方形修補片於欲開孔的位置，接著同樣沿著試片橫向開兩個直徑 3mm 的孔，以孔距間隔分別為 6 mm、8 mm 以及 10 mm 分別探討此三類試片的靜態強度，任取七根做靜態軸向拉伸試驗，其平均值分別為 599.47 MPa、614.95 MPa 以及 660.29 MPa(如表 4-3)，雖然仍較原始試片的靜態強度 781.33 MPa 為低，但是相較於修補前的開孔損傷試片，可以發現除了孔距 10mm 的修補試片較原先開孔試片的 634.70 MPa 數值為高，修補過後孔距 6mm 的試片 599.47 MPa 的靜態強度與原先開孔而未修補的 602.09 MPa 值，所呈現的數據顯示靜態強度差異不大，另外修補過後孔距 8mm 的試片 614.95 MPa 的靜態強度較原先開孔而未修補的 621.29 MPa 為低，甚至達不到修補的效果，原因為單邊貼片修補會導致試片的中立軸偏移，使得試片產生彎曲力矩，而使未貼修補片的另一面更容易產生脫層損傷，折損了修補效益，且脫層損傷的效應大於修補的效應，加上中立軸偏移的結果，補片必須承受部分的應力，若是 CN 膠黏貼性不高，造成抗拉期間應力已經造成轉移，但是應力施加中途由於黏性問題造成貼片和試片突然脫離，導致應力來不及重新分配，反而會因為補片脫落，抗壓面積變小卻突然拉高所受應力值，而加速損壞，因此修補片不但沒有補強

的作用，反而造成降低強度的反效果，加上試片黏貼部分，應力無法順利傳遞，造成層間剪應力變弱而使補強效果有所打折；反觀孔距間隔 10mm 的試片組，由於應力集中問題相對而言較為和緩，雖然中性軸所產生的偏心問題依然存在，但是相對於應力集中問題產生的影響較為輕微，也就可以達到補片對於實際上局部支撐強化的效果。

因此對於中立軸偏移所形成的彎曲效應，另外作一組雙邊貼片修補的試片，來克服此偏心問題，看是否對損傷之開孔試片的靜態強度有改善的效果。

4-1.4 雙邊貼片修補後開孔試片

同樣以 $[0/+45/90/-45]_{2S}$ 擬均向性疊層板，先以 CN 膠黏貼兩片 $[0]_2$ 疊層的正方形修補片於欲開孔的兩側位置，接著同樣沿著試片橫向開兩個直徑 3mm 的孔，以孔距間隔為 6 mm 來對照相同孔距間隔的單邊修補，任取七根做靜態軸向拉伸試驗，得雙邊貼片修補試片的靜態強度為 642.31 MPa(如表 5-4)，與原先孔距間隔 6mm 的損傷試片 602.09 MPa 靜態強度以及單邊貼片修補後再開孔(孔距間隔 6mm)的損傷試片之靜態強度 599.47 MPa 比較，都有明顯的改善，證實單邊貼片修補造成中立軸偏移的效應確實存在，若是能以雙邊貼片修補來避免中立軸偏移問題的產生，試片背面也不至於因為產生脫層損傷而折損了修補效應，局部應力集中效應不僅能較為平均的分散到雙邊補片，而由於修補片有平行施力方向的連續纖維束，對試片的分離產生拘束其開放位移的效果，有效提高開孔損傷試片之抗拉強度。

4-2 拉伸疲勞試驗

軸向拉伸疲勞試驗的結果如表 4-5~表 4-12 所示，並將數據繪成應力等級與疲勞壽命的關係圖，如圖 4-3~圖 4-24 所示。

4-2.1 原始試片

取原始試片的靜態拉伸試驗平均值 781.33 MPa 之 75%、70%、65%、60%、57.5%及 55%此六個應力等級進行拉伸疲勞試驗，每個應力等級做一到五根不等的試片，得到表 4-5 的結果，將其數據繪成應力等級與疲勞壽命的關係圖(圖 4-3)-以 OR 代表原始試片，並以最小平方法求得特徵曲線方程式

$$S=108.69-9.76 \log N_f \quad (4-1)$$

其中 S：應力等級(MPa)， N_f ：破壞週次數(Cycles)

由圖 4-3 觀察得知，其最大應力與破壞週次在半對數座標大致呈線性關係，當最大作用力增加時，疲勞破壞週次會相對的下降。又由圖中觀察得之，在較高的應力等級下，數據的散佈範圍較低應力等級寬，原因為高應力等級的破壞情況相似於靜態強度測試，試片本身的缺陷和瑕疵將主導整個壽命，在此情況下，勁度的損失較為不穩定而使破壞週次數的分佈較廣，造成高應力等級時的數據散佈性較大。

在低應力等級實驗中，試片的疲勞壽命與勁度損失主要是由基材裂縫損傷所主導，破壞模式主要是由試片外圍產生脫層，逐漸向試片中心處延伸，直到試片的淨面積無法承受疲勞負荷時，勁度急趨下降至破壞，過程中由於勁度的損失較穩定且為漸進式破壞，使得在低應力等級時，破壞延伸量較為穩定，數據的散佈性也較窄。

隨著應力等級提升，疲勞壽命與勁度損失的主導模式由基材逐漸轉化成纖維，此時會因為試片邊緣的不平整而造成缺陷，試片的損傷往往就由此缺陷處開始先產生裂縫，進而由裂縫來截斷纖維，最後因為試片本身無法承受疲勞負荷而破壞。

4-2.2 開孔試片

就開孔試片的孔距間隔 6mm、8mm 以及 10mm 的三組試片，分別取其靜態拉伸試驗平均值 602.09 MPa 621.29 MPa 以及 634.70 MPa 之 70%、65%、60% 以及 57.5% 四個應力等級進行拉伸疲勞試驗，每個應力等級做五根試片，得到表 4-6 至 4-8 的數據。將此數據繪成應力等級與疲勞壽命的關係圖(圖 4-4 及 4-6) - 以 HD 6mm HD 8mm 以及 HD 10mm 分別代表不同孔距寬度的開孔試片，並以最小平方法在半對數座標圖中個別求得其特徵曲線方程式

$$\text{孔距 6mm 之開孔試片} \quad S=107.60- 9.89 \log N_f \quad (4-2)$$

$$\text{孔距 8mm 之開孔試片} \quad S=128.34-14.14 \log N_f \quad (4-3)$$

$$\text{孔距 10mm 之開孔試片} \quad S=119.92-13.62 \log N_f \quad (4-4)$$

其中 S：應力等級(MPa)， N_f ：破壞週次數(Cycles)

由圖 4-7 中得知在高應力等級時破壞主要由纖維所主導，破壞情況類似於靜態強度測試，孔距 6mm 有最小的疲勞壽命，接著依序為孔距 10mm 以及孔距 8mm 之開孔試片；而在低應力等級時，孔距 6mm 反而相對而言，有較高的疲勞壽命，接著依序為孔距 8mm 以及孔距 10mm 之開孔試片。以相同負荷應力作比較(如圖 4-8)，具圓孔試片於製作過程中容易產生缺陷，缺陷容易和圓孔串連造成破壞，突顯試片本身缺陷對疲勞的影響，孔距寬度 6mm 的開孔試片無論在高低應力等級，反映出的疲勞壽命都是最差的情況，原因為圓孔周圍的應力集中效應極大，造成在圓孔周圍無法承受負載而強度急速下降，而使試片損壞；而孔距寬度 8mm 與孔距寬度 10mm 的疲勞壽命曲線幾乎重合，這可支持孔距寬度極限值的說法，若是孔距寬度在 8mm 以上，即使避免邊界效應的影響，圓孔間的應力振幅仍無法大幅的下降，導

致即使增加孔距寬度，疲勞壽命仍無法大幅增加，也因此在此實際使用時必須考慮孔距寬度極限值的存在，以免認為增加孔距同時可以增加疲勞壽命，造成過度使用產生無法負荷的疲勞極限而導致危險。

圖 4-10 類似典型的潛變曲線，在高負載時隨著頻率的增加，由於局部的熱及應力的存在，使得週期性的潛變增加。隨著疲勞週次數以及疲勞壽命的增加而趨於明顯，由於平行於基材的纖維裂縫以及脫層造成疊層的損壞發生，造成正規化的勁度模數斜率由高而迅速降低，逐漸趨於一穩定值(如圖 4-9)，而初使模數的迅速降低符合週期性的潛變階段。也因此疲勞負載所造成的週期性潛變現象，在高頻率作用下以及週次數較高的情況下，都並需列入考慮，因為它可能使原來脆性的材料呈現黏彈行為而增加應變量，而延緩破壞發生的時間 [11]，從孔距 8mm 在承受高頻且周期數長的情況，使得原本的材料性質因為熱及應力而產生變異(如圖 4-9 所示)，勁度和其於兩者比較起來有明顯且提早的降級，顯示已經因為黏彈行為使得材料延後破壞的時間，而增加疲勞壽命。

圖 4-11 中開孔試片的疲勞壽命曲線都分佈在左下方，顯示其強度明顯的較原始試片的疲勞強度為低。另外針對穿孔之損傷試片，設計單邊黏貼補片修補再開孔，期許對試片之疲勞壽命有所改善。

4-2.3 單邊貼片修補後開孔試片

就單邊貼片修補再開孔試片，以孔距間隔為 6mm、8mm 以及 10mm 的三組試片，分別取其靜態拉伸試驗平均值 599.47 MPa 614.95 MPa 以及 660.29 MPa 之 70%、65%、60%以及 57.5%四個應力等級進行拉伸疲勞試驗，每個應力等級做五根試片，得到表 4-9 至 4-11 的數據。將此數據繪成應力等級與疲勞壽命的關係圖(圖 4-12 及 4-14) - 以

RHD 6mm、RHD 8mm 以及 RHD 10mm 分別代表單邊貼片修補後，開孔不同孔距寬度的試片，並以最小平方法在半對數座標圖中個別求得其特徵曲線方程式

$$\text{RHD } 6\text{mm} \quad S=111.10-10.62 \log N_f \quad (4-5)$$

$$\text{RHD } 8\text{mm} \quad S=118.92-11.88 \log N_f \quad (4-6)$$

$$\text{RHD } 10\text{mm} \quad S=106.15-9.71 \log N_f \quad (4-7)$$

其中 S ：應力等級(MPa)， N_f ：破壞週次數(cycles)

由圖 4-15 得知整體的疲勞壽命仍是從高應力等級到低應力等級在半對數座標中呈現線性關係，應力等級越高疲勞週次數越低，而以應力等級的曲線分佈位置來看，單邊貼片修補後孔距 10mm 之開孔試片的壽命等級比率最低，原因為其擁有較高的靜態強度，所以就相同應力等級而言，疲勞壽命反而不如單邊貼片修補試片後孔距 6mm 與 8mm 之開孔試片。若是從圖 4-16 以相同負荷應力作比較，則可明白發現修補過後的開孔試片，孔距寬度越寬則疲勞壽命越長，但是經由單邊貼片修補會產生中立軸偏移的現象，除了考慮到開孔試片所造成應力集中的問題，加上頻率高且週期數高時，所產生黏彈行為而造成勁度的下降；另外必須將 C-N 膠的黏著性考量進來，比較未修補前的試片，看是否能拘束住疲勞循環時所產生的開放位移，進而達到修補的目的。

由圖 4-17 單邊貼片修補孔距 8mm 與 10mm 的開孔試片，在達到疲勞損壞之前，勁度有稍微提早的緩慢下降趨勢，與圖 4-18 比較可知在高頻率作用下，疲勞週次數越高，週期性的潛變增加，使原來脆性的材料呈現黏彈行為而增加應變量，而延緩破壞發生的時間，使得依照疲勞週次數的高低來區分，單邊修補孔距 10mm 的開孔試片仍然

有最高的疲勞壽命。圖 4-19 與原始試片做一個綜合比較，可以發現受損試片的疲勞壽命，都分佈在左下方而較原始試片低。

比較單邊修補前後的開孔試片，在圖 4-20 以及圖 4-21 發現在高應力等級時，孔距 6mm 以及孔距 8mm 之修補試片如同靜態強度，並沒有多大的提升，甚至孔距 8mm 的試片在高應力等級時仍如同靜態測試時，強度還不如為修補的開孔試片，因為高應力等級時疲勞破壞由纖維所主導，此時纖維束的斷裂造成應力傳遞不連續，加上中立軸的偏移效應，都會造成疲勞壽命的下降，也就使得修補的效果不如預期。

圖 4-22 顯示單邊修補後孔距 10mm 之開孔試片，在修補後疲勞壽命有明顯的改善，因為孔距寬度增加造成應力集中現象較不明顯，因此修補片扣除中立軸偏移所造成的負面效應後，仍然可以靠著 C-N 膠的黏性而有效拘束住疲勞所造成的開放位移，尤其在較低應力之下更能發揮修補片的效果。

有鑑於單邊修補在孔距寬度 6mm 時，由於中立軸的偏心效應，完全達不到修補後疲勞壽命提升的結果，因此再做一組雙邊修補的試片做對照，預期在扣除中立軸偏心效應之後，能確實達到修補的效果。

4-2.4 雙邊貼片修補後開孔試片

就雙邊貼片修補再開孔，孔距間隔為 6mm 的試片，取其靜態拉伸試驗平均值 642.31 MPa 之 70%、65%、60% 以及 57.5% 的四個應力等級進行拉伸疲勞試驗，每個應力等級做五根試片，得到表 4-12 的數據。將此數據繪成應力等級與疲勞壽命的關係圖(圖 4-23) - 以 D-RHD 6mm 代表雙邊貼片修補後，孔距寬度 6mm 之開孔試片，並以最小平方法在半對數座標圖中求得其特徵曲線方程式

$$D\text{-RHD } 6\text{mm} \quad S=115.70-12.08 \log N_f \quad (4-8)$$

其中 S ：應力等級(MPa)， N_f ：破壞週次數(Cycles)

由圖 4-24 比較孔距寬度 6mm 之開孔試片與單邊修補後開孔試片(孔距寬度 6mm)以及雙邊修補後開孔試片(孔距寬度 6mm)之負荷應力與疲勞壽命圖，發現經由雙邊貼片修補後，不但靜態強度連同疲勞壽命都有顯著的提升，因為免除了中立軸偏移所造成的彎曲效應，避免試片背面因彎曲現象而產生的脫層損傷折損了修補效益，加上雙邊修補而對兩邊因為疲勞產生的開放位移有更強的束縛力量。

4.3 疲勞破壞型態

4-3.1 原始試片

從圖 4-25 可以看出原始試片不論在高低應力等級，表面的脫層情形都十分嚴重，幾乎都延伸到接近夾持板的位置，試片每一層的破壞位置都不盡相同，但主要斷裂的疊層大都是 $\pm 45^\circ$ 方向，這是由於 90 度層的抗拉強度太弱，所以連結時主要由 $\pm 45^\circ$ 層作支撐，當應力等級逐漸超越 $\pm 45^\circ$ 層的極限支撐範圍後，造成 $\pm 45^\circ$ 的纖維分離而試片進而損壞。

4-3.2 開孔試片

孔距 6 mm、8 mm 以及 10 mm 之開孔試片，其破壞型態分別如圖 4-26 至 4-28 所示，不論在高低應力等級，試片的破壞幾乎都在圓孔處，顯示圓孔周圍的應力集中、以及開孔後纖維束斷裂，就是造成疲勞壽命下降的主因，仔細觀察纖維的斷裂情形，發現仍是以 $\pm 45^\circ$ 層為主，最外圍的 0° 層到最後只剩下一部分作支撐，這是因為圓孔所造成的應力集中效應對於強度較高的 0° 層比較沒有影響，所以對 0°

層而言，未必會斷在圓孔附近，所以 0° 層常是纖維預先分離，然後才各自斷裂，對於其他強度較弱的層，尤其以 90° 層來說，一旦應力集中問題而使應力大幅提升，就會使 90° 層的纖維分離，而由 45° 層來支撐最後的疲勞壽命。另外，孔距寬度 8 mm 的開孔試片，其脫層情形最為嚴重，原因為在高頻率下，週次數越高造成局部熱及應力的存在，使得週期性的潛變增加，造成正規化的勁度模數斜率由高在經過潛變後緩慢降低。

4-3.3 單邊貼片修補後開孔試片

單邊修補後開孔-孔距寬度 6 mm、8 mm、10 mm 試片，其破壞型態分別如圖 4-29 至 4-31 所示，不論在高低應力等級，試片的破壞幾乎都在圓孔處，顯示圓孔周圍的應力集中、以及開孔後纖維束斷裂，仍是造成疲勞壽命下降的主因；以 C-N 膠黏貼的補片有些在試片斷裂時，修補片並不會像靜態拉伸試驗一樣分離飛出，有些隨著試片表面的脫層斷裂而掉落，其餘仍黏在試片 0° 層而已脫層翹曲的表面上作部分支撐，而破壞仍是以 $\pm 45^\circ$ 層為主。另外因為 C-N 膠的黏著性不如預期的強，造成應力傳遞上的斷層，而使層間剪應力導致試片的破壞，加上單邊貼片修補導致試片的中立軸偏移，試片彎曲的結果造成其背面更容易產生脫層，單邊貼片修補之孔距 6 mm 以及 8 mm 的試片損壞以纖維為主導，另外單邊貼片修補後開孔，孔距 10 mm 之損壞以脫層為主導，也因此造成正規化的勁度模數斜率在後段的降低最為明顯。

4-3.4 雙邊貼片修補後開孔試片

雙邊修補後開孔-孔距寬度 6 mm 之試片，其破壞型態如圖 4-32 所示，不論在高低應力等級，試片的破壞幾乎都在圓孔處，顯示圓孔

周圍的應力集中，以及開孔後纖維束斷裂，就是造成疲勞壽命下降的主因，仔細觀察發現經由雙邊貼片修補，拘束力較高而使脫層情形不若單邊修補以及開孔試片嚴重，限制了裂縫延伸所產生的開放位移，加上克服了中立軸偏移的問題，而能達到實際修補的效果。

