

# 纖維纏繞複材壓力容器於液壓試驗的音洩研究

研究生：蔡旻軒

指導教授：尹慶中博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

纖維纏繞壓力容器於液壓試驗時，以音洩技術監測材料破壞瞬間釋放的聲波訊號，有助於了解結構的破壞強度。本文研究的複材壓力容器係依據 ASTM D-2585 規範製作，纖維纏繞角度由內而外為 $[\pm 15.92^\circ]_2$ ，直筒段外圍增設 4 層周向纏繞的纖維。音洩量測以首次出現明顯能量及累計振盪計數曲線斜率轉折點設為壓力容器的指標性破壞，兩者的指標破壞壓力平均值為 1,239 及 1,038psi。當壓力超過 1,000psi，反覆加壓的壓力未達前次最大壓力，累計振盪計數曲線即出現斜率轉折點。證實複材結構破損的音洩具有費樂希帝效應，費樂希帝比值介於 0.825~0.935 之間。

本文以有限元素分析計算首層破壞發生時的壓力及破壞位置，首層破壞壓力比較接近累計振盪計數曲線斜率轉折獲得的指標性破壞壓力，惟破壞位置有差異。八具爆破的複材壓力容器中，有四具發生貫穿壁厚的破壞，一具發生  $45^\circ$  斜角破壞，三具於第 4、5 層間發生脫層，直筒段周向排列纖維斷裂，推測脫層肇因於基材裂縫的延伸。數值模擬結果顯示，直筒段第 4、5 層間之脫層會造成周向纏繞纖維的應力大幅增加，與實驗觀察吻合。

關鍵字：纖維纏繞壓力容器、音洩、液壓試驗、首層破壞

# Acoustic Emission in Filament Wound Composite Pressure Vessels under Hydraulic Test

Student: Ming-Shan Tsai

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

Monitoring acoustic emission (AE) suddenly released from fractures in filament wound composite pressure vessels (FWCPV) under hydraulic proof test benefits understanding structural failure strength. The specimens studied are carbon/epoxy FWCPV manufactured in accordance with ASTM D-2585 standard. Four inner layers of the pressure vessel were helically wound at  $\pm 15.92^\circ$  helix angles and then reinforced by four hoop wound filaments in the cylindrical hollow portion. The first significant AE energy and slope variation in the cumulative AE count curves are set to be an indication for failure of the pressure vessel. Both average indicative failure pressures are 1,239 and 1,038 psi, respectively. Beyond 1,000 psi in the cyclic pressurization, the cumulative AE count curve had a steep slope variation in the range of internal pressure inferior to the previous maximum value. The Felicity effect for composite structures was discovered, and the average Felicity ratio was between 0.825 and 0.935.

Finite element analysis was used to determine the first-ply failure pressure and its position. The value of calculated first-ply failure pressure is close to the indicative failure pressure based on steep slope variation of

cumulative AE counts. However, there remains an inconsistency between the real failure location and prediction. In the eight exploded FWCPV specimens, four were exploded with a penetration through the thickness; one had a clear cutting with the edge  $45^\circ$  inclined to the axis; three failed in fiber breakages in hoop wound filaments and delamination. The latter is suspected to be caused by matrix crack extension. Simulated results manifest that the normal stress along the fiber orientation increases if delamination occurs between the fourth and fifth ply. Both numerical results and experimental evidence are in good agreement.

Keywords: filament wound composite pressure vessels, acoustic emission, hydraulic test, first-ply failure



## 誌謝

在此感謝我的指導教授 尹慶中博士，在我求學這段期間給予我最大的教導與教誨，讓旻軒的論文能夠順利完成。您對研究的嚴謹態度令人感到敬佩，同時也是旻軒值得學習的地方，再次由衷感謝。同時感謝金大仁、蕭國模與蔡佳霖老師撥冗擔任口試委員，給予指教與建議，使論文能更完整的呈現，對此深感謝意。感謝學長游泰和、王多聞、許世明、溫子達、鄭博毅、賴佑年、學姐吳昱瑾提供學習上的寶貴意見與生活經驗。同學蔡慶芳、鄭智遠、吳家宇、湯士杰、王裕太、黃室維於修課與研究上的協助與琢磨，讓我們彼此間更加成長及認識，學弟妹吳旻修、李劭遠、梁均帆、郇心慧在這短暫一年相處中的幫助與分享，在此也祝福你們研究順利。此外特別感謝學長楊欣翰教導許多實驗的細節，黃處明先生不辭辛勞的幫助完成實驗架構，同學高菁穗給予研究上的幫助與建議，使得旻軒論文順利完成。

最後，特別要將此刻的心情與感動獻給我最敬愛的雙親，在我求學的過程給我最大的支持，讓我能夠專心完成學業。最後感謝所有曾關心我的人，在此祝你們一切順利！

僅以此論文

獻給父母、家人及所有關愛我的人

# 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究目的.....	5
1.4 內容簡介.....	5
第二章 理論介紹.....	6
2.1 音洩參數介紹.....	6
2.1.1 振盪計數.....	6
2.1.2 音洩能量.....	7
2.1.3 音洩振幅.....	8
2.2 複材層板分析.....	9
2.2.1 古典層板分析.....	9
2.2.2 薄殼假設.....	14
2.2.3 破壞準則.....	15
第三章 實驗與結果討論.....	16
3.1 實驗裝置與架構.....	16
3.2 實驗方法.....	17

3.3 實驗結果與討論.....	19
3.3.1 音洩參數討論.....	19
3.3.2 壓力容器破損討論.....	25
3.3.3 小結.....	25
第四章 模擬分析與討論.....	27
4.1 有限元素分析.....	27
4.2 完整複材壓力容器模擬結果.....	29
4.3 含脫層壓力容器模擬結果.....	30
4.3.1 平板結構的脫層模擬.....	30
4.3.2 壓力容器有脫層之模擬.....	31
4.4 模擬分析結果討論.....	33
第五章 結論與展望.....	34
5.1 結論.....	34
5.2 未來展望.....	35
參考文獻.....	36
附錄 A 壓力容器端蓋座標、纖維纏繞角度、厚度.....	38
附表.....	41
附圖.....	52



## 表目錄

表 2.1 壓力容器疊層角度與幾何尺寸.....	41
表 2.2 薄殼假設採用的壓力容器材料係數.....	41
表 2.3 薄殼假設計算之首層破壞壓力值.....	42
表 3.1 AE-FRP -06 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值.....	42
表 3.2 AE-FRP -11 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值.....	43
表 3.3 AE-FRP -13 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值.....	44
表 3.4 AE-FRP -14 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值.....	45
表 3.5 不同判斷方式所得指標破壞壓力.....	46
表 3.6 指標破壞壓力與爆破壓力之平均值與標準差.....	46
表 3.7 壓力容器爆破結果統計.....	46
表 4.1 數值計算採用的複材材料係數.....	47
表 4.2 數值計算採用的金屬接頭材料係數.....	47
表 4.3 數值計算採用的平板材料係數.....	48
表 4.4 平板力平衡驗證.....	48
表 4.5a 第一類脫層的 1-4 層應力統計比較.....	49
表 4.5b 第一類脫層的 5-8 層應力統計比較.....	49
表 4.6a 第二類脫層的 1-4 層應力統計比較.....	50
表 4.6b 第二類脫層的 5-8 層應力統計比較.....	50
表 4.7 全尺寸分析與實驗結果比較.....	51

## 圖目錄

圖 2.1 複材層板的全域座標與局部座標.....	52
圖 3.1 依據 ASTM D-2585 製作複材壓力容器的幾何尺寸圖[13] .....	52
圖 3.2 油壓裝置及夾具示意圖.....	53
圖 3.3 音洩量測系統架構圖.....	53
圖 3.4 液壓實驗裝置實體照片.....	54
圖 3.5 音洩量測系統 Vallen AMS3 實體照片.....	54
圖 3.6 壓力容器疊層順序.....	55
圖 3.7 (a)ASTM E2191-02 所建議分段加壓歷時曲線，(b)本實驗所採用反 覆加壓歷時曲線圖.....	56
圖 3.8 (a)ASTM E2191-02 所建議連續加壓歷時曲線，(b)本實驗所採用連 覆加壓歷時曲線圖.....	57
圖 3.9 探頭擺放位置示意圖，2 號探頭位於 1 號探頭背面.....	58
圖 3.10 AE-FRP-06 負載歷時曲線.....	58
圖 3.11 AE-FRP-06 累計振盪計數曲線.....	59
圖 3.12 局部放大 AE-FRP-06 第二次加壓累計振盪計數曲線.....	59
圖 3.13 AE-FRP-11 負載歷時曲線.....	60
圖 3.14 AE-FRP-11 累計振盪計數曲線.....	60
圖 3.15 局部放大 AE-FRP-11 第二次加壓累計振盪計數曲線.....	61
圖 3.16 局部放大 AE-FRP-11 第三次加壓累計振盪計數曲線.....	61
圖 3.17 局部放大 AE-FRP-11 第四次加壓累計振盪計數曲線.....	62
圖 3.18 局部放大 AE-FRP-11 第五次加壓累計振盪計數曲線.....	62
圖 3.19 AE-FRP-13 負載歷時曲線.....	63
圖 3.20 AE-FRP-13 累計振盪計數曲線.....	63

圖 3.21 局部放大 AE-FRP-13 第二次加壓累計振盪計數曲線 .....	64
圖 3.22 局部放大 AE-FRP-13 第三次加壓累計振盪計數曲線 .....	64
圖 3.23 局部放大 AE-FRP-13 第四次加壓累計振盪計數曲線 .....	65
圖 3.24 局部放大 AE-FRP-13 第五次加壓累計振盪計數曲線 .....	65
圖 3.25 AE-FRP-14 負載歷時曲線.....	66
圖 3.26 AE-FRP-14 累計振盪計數曲線.....	66
圖 3.27 局部放大 AE-FRP-14 第二次加壓累計振盪計數曲線 .....	67
圖 3.28 局部放大 AE-FRP-14 第三次加壓累計振盪計數曲線 .....	67
圖 3.29 局部放大 AE-FRP-14 第四次加壓累計振盪計數曲線 .....	68
圖 3.30 局部放大 AE-FRP-14 第五次加壓累計振盪計數曲線 .....	68
圖 3.31 AE-FRP-05 壓力容器的(a)負載歷時曲線、(b)能量、(c)振盪計數、 (d)振幅分佈 .....	69
圖 3.32 AE-FRP-09 壓力容器的(a)負載歷時曲線、(b)能量、(c)振盪計數、 (d)振幅分佈 .....	70
圖 3.33 AE-FRP-15 壓力容器的(a)負載歷時曲線、(b)能量、(c)振盪計數、 (d)振幅分佈 .....	71
圖 3.34 AE-FRP-05 累計振盪計數曲線.....	72
圖 3.35 AE-FRP-09 累計振盪計數曲線.....	72
圖 3.36 AE-FRP-15 累計振盪計數曲線.....	73
圖 3.37 AE-FRP-05 在不同壓力區間下的振盪計數與振幅分佈.....	73
圖 3.38 AE-FRP-09 在不同壓力區間下的振盪計數與振幅分佈.....	74
圖 3.39 AE-FRP-15 在不同壓力區間下的振盪計數與振幅分佈.....	74
圖 3.40 AE-FRP-12 爆破後照片 .....	75
圖 3.41 AE-FRP-14 爆破後照片 .....	75
圖 3.42 AE-FRP-15 爆破後照片 .....	76

圖 3.43 AE-FRP-06 爆破後照片 .....	76
圖 3.44 AE-FRP-09 爆破後照片 .....	77
圖 3.45 AE-FRP-11 爆破後照片 .....	77
圖 3.46 AE-FRP-13 爆破後照片 .....	78
圖 3.47 AE-FRP-05 爆破後照片 .....	78
圖 4.1 直筒段與端蓋處線段 .....	79
圖 4.2 將圖 4.1 之線段繞 x 軸旋轉所得壓力容器外殼 .....	79
圖 4.3 對 y-z 平面鏡射後所得完整實體模型 .....	80
圖 4.4 元素 Shell91[17] .....	80
圖 4.5 網格後有限元素模型剖面圖 .....	81
圖 4.6 擷取紅色線段上的節點應力值 .....	81
圖 4.7 在壓力 1,026psi 作用下，1-2 層 $\sigma_{11}$ 分佈 .....	82
圖 4.8 在壓力 1,026psi 作用下，3-4 層 $\sigma_{11}$ 分佈 .....	82
圖 4.9 在壓力 1,026psi 作用下，5-6 層 $\sigma_{11}$ 分佈 .....	83
圖 4.10 在壓力 1,026psi 作用下，7-8 層 $\sigma_{11}$ 分佈 .....	83
圖 4.11 在壓力 1,026psi 作用下，1-2 層 $\sigma_{22}$ 分佈 .....	84
圖 4.12 在壓力 1,026psi 作用下，3-4 層 $\sigma_{22}$ 分佈 .....	84
圖 4.13 在壓力 1,026psi 作用下，5-6 層 $\sigma_{22}$ 分佈 .....	85
圖 4.14 在壓力 1,026psi 作用下，7-8 層 $\sigma_{22}$ 分佈 .....	85
圖 4.15 在壓力 1,026psi 作用下，1-2 層失效指數分佈 .....	86
圖 4.16 在壓力 1,026psi 作用下，3-4 層失效指數分佈 .....	86
圖 4.17 在壓力 1,026psi 作用下，5-6 層失效指數分佈 .....	87
圖 4.18 在壓力 1,026psi 作用下，7-8 層失效指數分佈 .....	87
圖 4.19 壓力容器在 $\pm 52.8\text{mm}$ 處，不同壓力之失效指數，(a)Hill-Tsai 破壞準則，(b)Tsai-Wu 破壞準則 .....	88

圖 4.20 平板有限元素及負載邊界.....	89
圖 4.21 (a)平板第 1、2 層應力分佈，(b)平板第 3、4 層應力分佈 .....	89
圖 4.22 第一類脫層網格加密有限元素模型.....	90
圖 4.23 第二類脫層網格加密有限元素模型.....	90
圖 4.24 第一類脫層於第 1 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	91
圖 4.25 第一類脫層於第 2 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	92
圖 4.26 第一類脫層於第 3 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	93
圖 4.27 第一類脫層於第 4 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	94
圖 4.28 第一類脫層於第 5 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	95
圖 4.29 第一類脫層於第 6 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	96
圖 4.30 第一類脫層於第 7 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	97
圖 4.31 第一類脫層於第 8 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	98
圖 4.32 第二類脫層於第 1 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	99
圖 4.33 第二類脫層於第 2 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	100
圖 4.34 第二類脫層於第 3 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	101
圖 4.35 第二類脫層於第 4 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	102
圖 4.36 第二類脫層於第 5 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	103
圖 4.37 第二類脫層於第 6 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	104
圖 4.38 第二類脫層於第 7 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	105
圖 4.39 第二類脫層於第 8 層，(a) $\sigma_{11}$ 分佈，(b) $\sigma_{22}$ 分佈 .....	106

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

隨著科技的快速進步，傳統金屬材料在許多特殊的應用上，已經無法滿足人類的需求。複合材料具有質量輕、強度高、耐蝕性佳等特性，近年來在航太、核能、石化、汽車等工業已被廣泛的利用。複合材料可分為分散增強型、顆粒補強型、纖維補強型三種。纖維補強型複合材料在纖維方向可承受較大的負載，在設計與製作上，可針對不同受力方向安排適當的疊層角度以符合結構強度需求。然而高分子樹脂基材(matrix)的強度較差，受到負載容易產生裂縫，造成結構強度及壽命的減少。幸運的是，這些裂縫、損傷大都是屬於漸進式(progressive)破壞，而不是災難型(catastrophic)破壞。

複材繞線成形技術具有一體成型的優點，常見於壓力容器與發動機結構的製造。複材壓力容器在工業上被廣泛應用，例如：石油槽、滅火器、鍋爐等。這些商業產品都具有共同點，可以在合適的安全係數下，承受較高的工作壓力。複材壓力容器的最佳化設計是近年來許多研究的主題，在此主題中，所關心的是複材結構破壞過程的預測，計算複材結構破壞前所能承受的最大負載，通常是以首層破壞作為複材壓力容器的設計的參考依據。

音洩(acoustic emission, 簡稱 AE)源自於材料或結構體內部的破壞，當材料內部的應變能超過臨界值發生破壞時，應變能瞬間釋放，以聲波或超音波的形式向四周擴散，故又稱為聲發射(或聲射)。音洩法屬於非破壞檢測技術，訊號源自於缺陷本身，應用於金屬、複材結構的破損與測漏研究已有多數年，對於破裂延展的裂縫偵測，具有可靠的偵測能力。

音洩量測通常以音洩事件(events)為單位，累計事件訊號的振幅、振盪時間、次數或能量，作為辨識音洩訊號的特徵。

在 1953 年，凱瑟(Kaiser)發現材料受拉伸的過程中，內部瑕疵或裂縫周圍的應變能增加，隨著破壞裂縫的延展，會陸續發生音洩事件。若卸載後再施予負載，新的負載未超過前次音洩生成時的負載，不會有新的音洩事件發生，後來的學者稱此現象為凱瑟效應(Kaiser effect)，相當於破壞力學中提到的穩定裂縫成長(stable crack growth)，此現象僅適用於金屬材料。這個觀念影響後來的壓力容器液壓試驗規範，測試壓力(proof pressure)通常訂定為設計壓力的 1.1 倍。正常的操作壓力不超過設計壓力，倘若壓力容器的殼體通過液壓試驗，新的損傷「似乎」就不會再度產生。

複合材料受到負載作用，內部的微小缺陷(如：橫向基材裂縫、纖維與基材界面的剝離等)經常隨機地伴隨著主要缺陷(如：脫層、纖維斷裂等)同時出現，每次的損傷都會造成內部應力的重新分配，新的損傷不只是舊損傷的成長，因此凱瑟效應不適用於複材結構。在複材結構上，重新施加負載到前次最大負載之前仍會有音洩事件產生，此現象又稱費樂希帝效應(Felicity effect)。發生費樂希帝效應的負載與前次最大負載的比值，稱做費樂希帝比值(Felicity ratio，簡稱 FR)。

在複材結構中，脫層(delamination)的發生屬於嚴重的破壞行為。在複材結構的製作過程中，若疊層間黏合不完全，層與層之間會有微小裂紋存在；複材結構內的橫向裂縫延展至層與層之間，也會形成脫層。

複材壓力容器在液壓試驗過程中，通常都會搭配音洩量測系統進行損傷的音洩監測，隨著內部壓力的增加，早期出現的損傷通常是平行於纖維方向的橫向基材裂縫，繼而產生纖維與基材界面的剝離、脫層或纖

維斷裂，後兩者的應變能釋放率較大，生成的音洩訊號振幅也較大。許多橫向基材裂縫的陸續發生會造成積層的橫向強度銳減，造成嚴重損傷使音洩事件累計數目增加率變快，該轉折點對應的試驗液壓  $P_i$  與殼體爆破壓力強度(burst pressure)  $P_b$  存有一定的比例關係[1]。

複材損傷產生的音洩波是寬頻之異向性聲波(anisotropic acoustic waves)，低頻的音洩聲波具有較長的波長，訊號衰減值(attenuation)較小，傳遞至感測器的訊號強度明顯，倘若不同頻率的聲波具有不同的波速，則稱頻散(dispersion)，缺陷產生的音洩訊號與波傳距離相關，致使音洩特徵難以辨識。實驗室階段的試片通常尺寸有限，音洩訊號在試片邊緣的反射會造成觀察結果不具有一般性。

## 1.2 文獻回顧

Kam 等人[1]於 1997 年研究積層複材(laminated composite)壓力容器直筒段的首層破壞，比較理論值與實驗結果。理論值是依據一階剪變形板理論與古典板理論，求出首層破壞壓力。並以音洩系統(Vallen AMS3)量測加壓過程中，音洩能量遽增時的壓力，推測為首層破壞壓力的實驗值。此外，統計不同疊層角度之首層破壞壓力與爆破壓力的比值，發現 6 疊層以下結構，數值解與實驗值極為接近，8 疊層的積層結構則有高達 20% 的誤差，研究結論認為若要得到較精確的結果，必須以高階剪變形理論進行分析。

類似的研究是 Chang[2]在 2000 年根據薄殼假設，計算壓力容器各積層的應力，以不同的破壞準則與實驗值比較。同樣採用 AMS3 系統進行量測，實驗結果說明複材壓力容器之首層破壞強度預測是有效的。

Dong 及 Mistry[3]在 1998 年以聚偏氟乙烯(PVDF)壓電薄膜作為音洩

感測器，對受到外在壓力及軸向壓縮的複材圓管進行監測。由不同受力狀態造成的周向(hoop)與軸向(axial)應力比值探討音洩波的衰減，實驗結果發現音洩振幅與波傳距離的關係可以雙曲線函數(hyperbolic function)描述。並比較不同破壞過程的振盪計數及應力對應變的關係，判斷破壞模式。1998年，Dong 及 Mistry[4]採用應變規及音洩量測系統對複材圓管的漸進式破壞進行監測，以 Tsai-Wu 應變準則及最大應變準則計算值與實驗值比較，實驗發現圓管的兩種破壞模式分別為剪裂縫(shear cracks)與縱向裂縫(longitudinal cracks)，由破壞負載曲線比較首層破壞與末層破壞理論。

Surgeon 及 Weversy[5]在 1998 年以音洩模態的觀念分析音洩量測結果，對碳纖強化複材的層板(CFRP laminate)進行拉伸與彎曲試驗，發現產生的音洩波包含了板波的基本模態。他們觀察不同疊層方向的音洩訊號，包含延性位移模態(extensional mode)與彎曲模態(flexural mode)，由音洩的波傳行為可區別出所屬的缺陷，其中，基材破壞是屬於延性位移模態，脫層則是屬於彎曲模態。

Mirmiran 等人[6]曾對 FRP 水泥柱進行音洩研究，討論不同幾何尺寸變化對音洩振盪計數及能量的影響。由累計振盪計數相對於負載的曲線，判斷破壞的大小。周期性負載實驗證實複材結構不滿足凱瑟效應，卸載後再次施加負載造成的音洩振盪計數與能量的增加，代表結構存在非單一的破壞，FR 值愈小代表破壞越嚴重。

Rippert 等人[7]，曾以音洩技術偵測受到拉伸的碳纖強化複材層板，採用光纖感測器接收音洩訊號，實驗結果可區別受到負載的層板應力變化。此外，配合 AMS3 音洩量測系統，對音洩訊號進行後處理，可成功的辨識破壞特性

### 1.3 研究目的

纖維纏繞複材壓力容器的破損屬於漸進式的破壞，在加壓過程中，會不斷有許多微小缺陷出現，這些缺陷造成了結構應力與剩餘強度重新分配，以致凱瑟效應無法適用。本研究將探討纖維纏繞複材壓力容器的費樂希帝效應，並由實驗所得的音洩參數找出 FR 值。

本研將望藉助音洩量測找出複材壓力容器的指標性破壞壓力  $P_i$ ，討論其與爆破壓力  $P_b$  之間是否存在一定比例關係。

$$P_i = \lambda P_b \quad (1.1)$$

另外，以有限元素分析軟體，計算壓力容器達到首層破壞時的壓力，並且預測可能發生破壞的位置。

### 1.4 內容簡介

本研究對複材壓力容器進行液壓試驗，同時以音洩系統監測結構的破損，並將結果記錄在電腦。對量測到的音洩參數進行分析及處理，找出複材壓力容器具指標破壞意義的壓力。最後，對複材壓力容器進行全尺寸的數值分析。

本文共分五章。第一章介紹研究背景及文獻回顧，第二章解釋音洩參數名詞，介紹古典層板分析，配合薄殼假設，推導出壓力容器各積層的應力，求出首層破壞壓力。第三章說明實驗採用的設備及進行方式，最後再討論實驗結果；第四章說明全尺寸複材壓力容器的數值分析結果與討論；第五章是本文結論及展望。

## 第二章 理論介紹

本章內容分為兩個部分，參考文獻[11]、[12]，介紹本實驗量測的音洩參數，包含音洩的振盪計數(count)、能量、振幅。另以古典層板分析，推導出正交複材板全域的應力應變關係，根據薄殼理論的假設，推導出不同角度疊層的應力，代入破壞準則，求出首層破壞的壓力。

### 2.1 音洩參數介紹

#### 2.1.1 振盪計數

振盪計數是由探頭所收到的音洩訊號振幅超過閾值(threshold)的次數。音洩訊號為一暫態訊號，會有接近指數形式的衰減，通常將探頭的輸出電壓假設為

$$V(t) = V_0 e^{-\gamma t} \sin \omega t \quad (2.1)$$

其中， $V_0$ 為初始訊號的振幅， $\gamma$ 為衰減常數， $\omega$ 為頻率， $t$ 為時間。通常而言，音洩訊號的振盪計數都是計算電壓值超過閾值的次數。在此，將閾值假設為一定值，其值為

$$V^* = V_0 e^{-\gamma t^*}$$

(2.1)式表示的是一個理想訊號，其振盪計數最接近的整數為

$$N = \frac{t^*}{2\pi/\omega} = \frac{\omega}{2\pi\gamma} \ln \frac{V_0}{V^*} \quad (2.2)$$

其中，

$$t^* = \frac{1}{\gamma} \ln \frac{V_0}{V^*} \quad (2.3)$$

振盪計數對於放大器增益值(gain)、閾值的變化非常敏感，如果將振盪計數當成一個音洩參數，將會與音洩事件所量測到的能量相關。在暫態訊號中，能量的定義如下：

$$E = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} V^2(t) dt \quad (2.4)$$

其中，R 為電阻。假設經過時間  $t^*$ ，訊號衰減到閾值電壓  $V^*$ ，將(2.1)式代入(2.4)式可得

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{R} \int_0^{\infty} V_0^2 e^{-2\gamma t} \sin^2 \omega t dt \\ &= \frac{V_0^2}{4R(\omega^2 + \gamma^2)} \left[ \frac{\omega^2}{\gamma} (1 - e^{-2\gamma t^*}) - 2e^{-2\gamma t^*} \sin \omega t^* (\gamma \sin \omega t^* + \omega \cos \omega t^*) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

若  $e^{-2\gamma t^*} \ll 1$ ，則(2.5)式可簡化成

$$E = \frac{V_0^2 \omega^2}{4R\gamma(\omega^2 + \gamma^2)} \quad (2.6)$$

由(2.1.2)可知

$$V_0 = V^* e^{2\pi\gamma N/\omega} \quad (2.7)$$

則(2.1.6)式可改為

$$E = \frac{V^{*2} \omega^2}{4R\gamma(\omega^2 + \gamma^2)} e^{4\pi\gamma N/\omega} \quad (2.8)$$

若頻率為常數，則振盪計數與能量之間存在一個指數關係。

### 2.1.2 音洩能量

音洩被認為是材料內部應力狀態改變瞬間釋放的能量，量測訊號包含的能量是一種指標性的方法。能量分析通常有兩種方法，一種是根據

(2.4)式做積分，另外一種則是以電路去積分。能量分析與物理參數有比較直接的關係，其結果與振盪計數接近。如果因洩換能器的響應正比於音洩波的質點速度，則探頭輸出的電能會正比於音洩事件中的機械能量。

窄頻(narrow band)訊號的能量分析結果在本質上與振盪計數相同，然而若訊號的頻寬變動，則能量與振盪計數之間就會存在差異。能量量測通常藉由數位積分器，其原理是將一訊號訊號電壓值平方後，其包絡線(envelope)底下的面積。另一種在能量分析中常使用的是量測振幅的均方根(root mean square，簡稱 RMS)，對平均音洩能量而言，均方根紀錄比即時量測更具有指標性。均方根量測適合連續訊號，在有雜訊的量測環境下，均方根維持一定值，當有任何變化值超過此定值，則會被視為材料內部的音洩。本研究採用的 Vallen AMS3 系統，其能量的定義為

$$Energy = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2 du}{T}} \quad (2.9)$$

其中， $u$  為探頭輸出的電壓訊號， $T$  為音洩訊號的持續時間。

### 2.1.3 音洩振幅

音洩訊號的振幅是材料內部破損的指標，然而振幅大小會受到探頭與音洩源距離長短的影響及探頭本身響應。音洩波會受到傳遞介質的影響，試片幾何形狀會影響探頭收到的訊號。影響訊號的因素還包含探頭本身的頻率響應函數(frequency response function)，共振式探頭及寬頻探頭都有不同的頻率響應函數。

## 2.2 複材層板分析

### 2.2.1 古典層板分析

在應變能密度存在下，三維非等向性材料的獨立彈性常數可由 36 個簡化成 21 個。正交性材料(orthotropic material)具有三個正交的對稱面，因此 21 個獨立材料常數可再簡化成 9 個，其本構方程式表示如下：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

假若材料有三個對稱面及一對稱軸，稱為橫向等向性材(transversely isotropic material)。若複材各疊層的纖維排列角度均同向，則可將之視為橫向等向性材料。橫向等向性材料具有 5 個獨立材料常數，若纖維方向與  $x_1$  軸同向，則  $C_{22} = C_{33}$ ， $C_{12} = C_{13}$ ， $C_{55} = C_{66}$ ，且  $C_{44} = (C_{22} - C_{23})/2$ 。

考慮一單軸拉伸試驗，一正向應力  $\sigma_{11}$  沿纖維方向作用，可得各正向應變與剪應變分量如下：

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \sigma_{11} / E_1 \\ \varepsilon_{22} &= -\nu_{12} \varepsilon_{11} = -\nu_{12} \sigma_{11} / E_1 \\ \varepsilon_{33} &= -\nu_{13} \varepsilon_{11} = -\nu_{13} \sigma_{11} / E_1 \\ \gamma_{12} &= \gamma_{23} = \gamma_{13} = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

其中， $E_1$  為 1 方向的彈性常數； $\nu_{ij} = -\varepsilon_j / \varepsilon_i$  為柏松比。

同理，考慮一剪應力  $\sigma_{12}$  作用在 12 平面，可得

$$\gamma_{12} = \sigma_{12} / G_{12}$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \gamma_{13} = \gamma_{23} = 0$$

其中， $G_{12}$  為 12 平面的剪力常數。

考慮三維的應力狀態，則可得到應力與應變的關係為

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

若將三維應力狀態簡化成平面應力(plane stress)，則

$$\sigma_{33} = \sigma_{23} = \sigma_{13} = 0$$

因此，(2.12)式可化簡為

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

若對上式逆轉換，可得應力與應變的關係式為

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

其中， $\mathbf{Q}$  為複材層板的勁度矩陣。

考慮一疊層角度為  $\theta$  的複材層板，如圖 2.1 所示。 $\theta$  為全域座標系統(global coordinate system)  $(x, y)$  與局部座標系統(local coordinate system)  $(x_1, x_2)$  的夾角。全域座標與局部座標之二維應力轉換為

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

其中， $c$ 、 $s$  代表  $\cos\theta$ 、 $\sin\theta$ 。二維應變轉換為

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

令

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_\varepsilon = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

由(2.15)式可得

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{Q} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{T}_\varepsilon \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

其中， $\mathbf{T}_\sigma^{-1} = \mathbf{T}_\varepsilon^T$ 。因此(2.17)式可改寫為

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \bar{\mathbf{Q}} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.18a)$$

上式為全域座標下，應力與應變的關係，其中， $\bar{\mathbf{Q}}$  為勁度轉換矩陣 (transformed stiffness matrix)。若考慮不同層之應力與應變關係，則上式可寫為

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k = \bar{\mathbf{Q}}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (2.18b)$$

其中，下標  $k$  代表第  $k$  層。

考慮複材層板中，應變與位移之關係。 $u$ 、 $v$ 、 $w$  分別為  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向之位移，其中  $z$  方向為厚度方向，假設  $u$ 、 $v$  為  $z$  的線性函數，且厚度遠小於長度與寬度，故  $\varepsilon_{zz} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ ，則位移可表示成

$$\begin{aligned} u &= u^\circ(x, y) + zF_1(x, y) \\ v &= v^\circ(x, y) + zF_2(x, y) \\ w &= w^\circ(x, y) = w(x, y) \end{aligned} \quad (2.19)$$

其中  $u^\circ$ 、 $v^\circ$ 、 $w^\circ$  為中平面之位移。

由應變與位移之關係可知

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u^\circ}{\partial x} + z \frac{\partial F_1(x, y)}{\partial x} \quad (2.20)$$

且

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = F_1(x, y) + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (2.21)$$

由上式可得

$$F_1(x, y) = -\frac{\partial w}{\partial x}$$

代入(2.20)可得

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_x^\circ + z\left(-\frac{\partial^2 w}{\partial^2 x}\right) = \varepsilon_x^\circ + zK_x^\circ \quad (2.22a)$$

同理可得

$$\begin{aligned} \varepsilon_{yy} &= \varepsilon_y^\circ + zK_y^\circ \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^\circ + zK_{xy}^\circ \end{aligned} \quad (2.22b)$$

其中  $K_x^\circ$ 、 $K_y^\circ$  分別為  $xz$ 、 $yz$  平面上，中平面的曲率， $K_{xy}^\circ$  為  $xy$  平面上，中平面的扭轉曲率。

將(2.22a)、(2.22b)代入(2.18a)式可得

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \bar{\mathbf{Q}} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x^\circ \\ \kappa_y^\circ \\ \kappa_{xy}^\circ \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

考慮作用在  $n$  層疊層複材板上單位長度的力  $N_x$ 、 $N_y$ 、及單位常度的剪力  $N_{xy}$ ，可表示成下列積分式：

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz = \int_{-t/2}^{t/2} \bar{\mathbf{Q}}_k dz \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{Bmatrix} + \int_{-t/2}^{t/2} \bar{\mathbf{Q}}_k z dz \begin{Bmatrix} \kappa_x^\circ \\ \kappa_y^\circ \\ \kappa_{xy}^\circ \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

其中， $t$  為複材層板整體厚度。上式中

$$\begin{aligned} \int_{-t/2}^{t/2} \bar{\mathbf{Q}}_k dz &= \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \bar{\mathbf{Q}}_k dz \\ &= \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k (z_k - z_{k-1}) = \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k h_k = \mathbf{A} \end{aligned} \quad (2.25)$$

同理可得

$$\int_{-t/2}^{t/2} \bar{\mathbf{Q}}_k z dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) = \mathbf{B} \quad (2.26)$$

其中， $h_k$  為第  $k$  層厚度， $\mathbf{A}$  為軸向勁度矩陣(extensional stiffness matrix)，

$\mathbf{B}$  為耦合勁度矩陣(coupling stiffness matrix)。

將(2.25)及(2.26)代入(2.24)式，可得

$$\{N\} = \mathbf{A} \{\varepsilon^\circ\} + \mathbf{B} \{\kappa\} \quad (2.27)$$

本研究僅考慮面內負載  $\{N\}$ 。

## 2.2.2 薄殼假設

本節以薄殼假設，推導出各層板應力與壓力之關係。為簡化分析，將複材壓力容器視為一薄殼壓力容器，在此假設下忽略彎曲強度。且因厚度極小，假設各疊層之應變均為定值，換句話說，中平面上的應變即為該層之應變，因此 (2.22) 式的  $zk^\circ$  可忽略不計。在此假設下，(2.27) 式可簡化為

$$\{N\} = \mathbf{A}\{\varepsilon^0\} \quad (2.28)$$

薄殼壓力容器在壓力  $p$  的作用下，殼的軸向應力  $\sigma_a = \frac{pr}{2t}$  及周向應力  $\sigma_h = \frac{pr}{t}$  可分別視為  $x$  方向與  $y$  方向的平均應力，其中  $r$  為壓力容器之半徑。將  $\sigma_a$ 、 $\sigma_h$  乘上厚度  $t$ ，可得

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} pr/2 \\ pr \\ 0 \end{Bmatrix}$$



代入(2.28)式，兩邊同乘  $\mathbf{A}^{-1}$  可得

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{Bmatrix} pr/2 \\ pr \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

代入(2.18a)可得

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k = \bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{A}^{-1} \begin{Bmatrix} pr/2 \\ pr \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

本研究所使用壓力容器之疊層角度、幾合尺寸、材料性質如表 2.1、2.2 所列，可求得在全域座標下，應力與壓力的關係。

### 2.2.3 破壞準則

本研究所使用之破壞準則為 Hill-Tsai 破壞準則與 Tsai-Wu 破壞準則，分別算出發生首層破壞時的壓力值。Hill-Tsai 破壞準則的表示式為

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (2.31)$$

Tsai-Wu 的表示式為

$$-\frac{\sigma_{11}^2}{XX'} - \frac{\sigma_{22}^2}{YY'} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} + \left(\frac{1}{X} + \frac{1}{X'}\right)\sigma_{11} + \left(\frac{1}{Y} + \frac{1}{Y'}\right)\sigma_{22} + \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{XX'} \geq 1 \quad (2.32)$$

其中， $X, X'$  分別為  $x_1$  方向抗拉、抗壓強度， $Y, Y'$  分別為  $x_2$  方向抗拉、抗壓強度， $S$  為抗剪強度。

若計算所得之應力分量滿足(2.31)及(2.32)式，代表首層破壞發生。以薄殼假設計算首層破壞壓力時，必須先將(2.30)式之應力分量由全域座標轉為局部座標應力分量  $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$  及  $\sigma_{12}$ ，再代入(2.31)及(2.32)式，即可求出首層破壞壓力  $p$ 。計算結果如表 2.3 所列。本研究另外對複材壓力容器進行全尺寸應力分析，將於第四章詳細介紹。

## 第三章 實驗與結果討論

### 3.1 實驗裝置與架構

本研究的實驗裝置可分為兩個部分。第一部分是油壓泵浦及相關的夾治具，第二部分是音洩量測系統。待測物為根據 ASTM D-2585 規範[3]製作的碳纖維繞線複材壓力容器，幾何尺寸如圖 3.1 所示。

圖 3.2 所示為油壓裝置及夾具示意圖，油壓系統包含油壓泵浦、油壓缸、水缸、底座、防護架，並在油壓泵浦出口處設一節流閥，調節流速(即增壓速率)。本實驗採用的油壓泵浦是台震油壓公司的 CTE-25AD 雙迴路電動式泵浦，最大輸出壓力可達 10,000psi。油壓缸的推桿與水缸的推桿連接在一起，為了使讓油壓缸及水缸中心軸能夠保持對中，在油壓缸及水缸下方鉸上一塊厚 50mm 的底座，在加壓過程中，底座提供活塞桿推進的支撐效果。防護架可避免爆破後壓力容器的金屬接頭噴出。加壓方式是由泵浦加壓，推動油壓缸，壓力上升過程中，油壓缸內的活塞桿會推擠水缸，水缸內的水經由高壓軟管流入壓力容器中，為了避免水缸生鏽，還添加了 10% 的切削液體。在壓力容器入口的 T 型轉接頭上，設置一 Futek-PMP300 壓力感測器。壓力感測器將量到的壓力轉為電壓訊號，傳入音洩量測系統，即時監測、紀錄加壓速率。

音洩量測儀器採用德國 Vallen 的 AMS3 系統，音洩實驗架構如圖 3.3 所示。該系統具有 5 個音洩頻道，可同時擷取數位暫態訊號及類比的音洩參數，配合音洩訊號處理的軟體，可對於音洩訊號進行不同的分析。本實驗使用 5 個前級放大器(pre-amplifier)、5 個音洩探頭及一部個人電腦。除了音洩量測之外，在壓力容器的端蓋距離直筒段 13.5mm 處(約端蓋高度 1/3)，黏貼一個三軸應變規，0 度方向平行纖維方向。應變規連

接惠斯同電橋(Wheatstone bridge)，將量測的應變值轉為電壓訊號，傳至動態應變放大器(strain indicator)，再傳送至 Vallen 系統。液壓實驗裝置及音洩量測系統的實物照片如圖 3.4、圖 3.5 所示。

暫態音洩訊號之取樣頻率固定為 5MHz，為了避免處理太多數據，每筆訊號的取樣數(sample/event)設為 4,000 點。在 AMS3 中，閾值等於背景雜訊的大小乘上波峰因子(crest factor)，會依照使用者輸入的波峰因子改變，當背景雜訊超過閾值，系統也會自動增加閾值的大小。在本研究中波峰因子採用系統的建議值，設為 6。所測試的壓力容器比較小，音洩波的衰減也相對減少，因此暫態訊號的增益值設為 34dB。觸發方式採用首次閾值跨越(first threshold crossing)，前級放大器之高通及低通濾波器分別為 20kHz 及 1,000kHz。



## 3.2 實驗方法

本實驗採用的壓力容器是以纖維繞線成型技術製作，其設計壓力 3,000psi 即為爆破壓力。壓力容器的外觀可分成直筒段、半圓形端蓋及金屬接頭三部分，直筒段的纖維繞線角度由內而外依序為  $[\pm 15.92^\circ_2/90^\circ_4]$ ，共 8 層，端蓋處的纖維呈輻射狀，纏繞角度隨著位置而改變，疊層順序如圖 3.6 所示。

測試的複材壓力容器共有 10 個，其中有一個壓力容器的金屬接頭螺牙不正確，無法與液壓管線鎖緊，其餘 9 具複材壓力容器分別依據 ASTM E2191-02 規範，進行試驗。其中的 4 具採用連續加壓方式填充壓力，分別為編號 AE-FRP-05、AE-FRP-09、AE-FRP-04、AE-FRP-15，另外 5 具複材壓力容器採用反覆加壓，分別為編號 AE-FRP-12、AE-FRP-06、AE-FRP-11、AE-FRP-13、AE-FRP-14。壓力容器 AE-FRP-12

做為系統測試練習之用。

加壓方式參考 ASTM 規範 E2191-02[14]及 ASME 規範 Article 11[16]的建議，並做一些修改，分別為連續加壓及反覆加壓。考慮接受測試的壓力容器尺寸較小，為避免音洩訊號衰減不夠快，容易超過 Vallen AMS3 系統的振幅限制，除了 AE-FRP-12 的實驗外，在探頭與容器之間加一層鋁箔，並分別塗上壓力波耦合劑，降低音洩訊號的振幅。

ASTM 規範 E2191-02 規定的分段加壓負載試驗是以低於 200 psi/min 的速率填充，加壓曲線如圖 3.7a 所示。先將壓力容器的壓力維持在爆破壓力的 50% 以下，維持 2 分鐘，稱為階段 a；繼而增至爆破壓力的 50%，維持 2 分鐘，稱為階段 b；再將壓力升至爆破壓力的 75%，維持 2 分鐘，稱為階段 c；接著將壓力升至爆破壓力的 87.5%，再維持 2 分鐘，稱為階段 d；最後一個階段稱為階段 e，將壓力升至爆波壓力的 100%，維持 10 分鐘。為了觀察壓力容器的費樂希帝效應，本研究將上述增壓方式改為反復加壓實驗，採取加壓、持壓、洩壓、再加壓的方式，加壓曲線圖如圖 3.7b 所示。

另一種負載方式為連續加壓，加壓曲線如圖 3.8a 所示，填充過程緩慢，不允許產生流體流動的雜訊。先將壓力容器的壓力設在基準壓力的 50% 以下，維持 2 分鐘，稱為階段 a；繼而連續加壓，此階段稱為階段 b；當壓力增至基準壓力的 100%，維持 10 分鐘，稱為階段 c。本實驗連續加壓方式的加壓曲線如圖 3.8b 所示。階段 a 的主要目的是將夾治具與待測壓力容器之間摩擦產生的雜訊消除。然而，在本研究的實驗中，僅其中兩具壓力容器曾執行雜訊消除的程序，分別為 AE-FRP-14 與 AE-FRP-15，雜訊消除則是參考 ASME Article 11 中所建議，先加壓到設計爆破壓力的 20%，持續 30 分鐘。

本實驗使用 5 個音洩探頭，4 個 Vallen SE-150M 共振式探頭及 1 個 SE-1000 寬頻探頭，前者的中心頻率為 150kHz，編號為 1-4，後者的頻率範圍較寬，有助於不同破壞之音洩訊號分類，編號為 5。探頭擺設位置如圖 3.9 所示，將 1-4 號探頭置於壓力容器兩端直筒段與端蓋交界處，1 號及 2 號置於交界處圓周角  $0^{\circ}$  及  $180^{\circ}$  位置上，3 號及 4 號探頭置於另一側交界處圓周角  $90^{\circ}$  及  $270^{\circ}$  位置上，5 號探頭則置於直筒段中心處與 4 號探頭同一圓周角度，以膠帶黏貼固定。

在前置作業架設完成後，先對加壓系統及音洩量測系統進行測試。首先以一耐高壓之圓柱鋼桶測試壓力上升曲線，最後再於複材壓力容器上，以折鉛筆方式，對音洩量測系統測試。確認各頻道可順利擷取音洩訊號之後，依上述之加壓方式進行實驗。

### 3.3 實驗結果與討論

本節依據實驗結果，以音洩參數判斷液壓試驗前期發生具有指標破壞意義之壓力，其與爆破壓力是否具有一定的比例關係。並討論反覆加壓之複材壓力容器的費樂希帝效應。

在加壓過程的初期，會有極小的音洩振盪計數、能量、振幅出現，但這些並非主要的破壞所產生，有可能是夾治具與壓力容器間摩擦產生的雜訊。

#### 3.3.1 音洩參數討論

編號 AE-FRP-10 壓力容器的金屬接頭螺牙不正確，無法與液壓管線鎖緊，壓力尚未達到 3,000psi 壓力容器就開始漏水。AE-FRP-12 壓力容器提供系統測試使用，經過多次反覆操作。AE-FRP-04 因製作過程瑕疵，

爆破壓力僅有 552psi，與設計之爆破壓力相差甚遠。此三具壓力容器無法提供有效數據，故僅就其餘七具壓力容器的有效數據討論。

### (1)反覆加壓結果討論

為了討論壓力容器的費樂希帝效應，將反覆加壓量測的累計振盪計數對壓力作圖。並將累計振盪計數曲線局部放大，以便觀察兩者的變化。

編號 AE-FRP-06 的壓力容器在加壓過程中曾發生電腦當機，故將結果歸類為反覆加壓。負載歷時曲線如圖 3.10 所示，最後的爆破壓力為 3,042psi，其累計振盪計數曲線如圖 3.11 所示。圖 3.12 為第二次加壓之局部放大圖，圖中右邊的虛線為前次加壓的最大壓力 1,440psi。在第二次加壓剛開始時，累計振盪計數緩慢增加，當壓力達到 1,346psi 時，上升速率急遽增加，此壓力與前次最大壓力的比值設為 FR。推測達到此壓力之前，並無明顯的破壞。表 3.1 所列為 AE-FRP-06 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值。

編號 AE-FRP-11 壓力容器的負載歷時曲線如圖 3.13 所示，爆破壓力為 3,087psi，其累計振盪計數曲線如圖 3.14 所示。圖 3.15 所示為第二次加壓之局部放大圖，圖中左邊虛線為前次加壓的最大壓力 736.5psi。在第二次加壓開始時，累計振盪計數先是緩慢增加，當壓力達到 736.5psi 之後，累計振盪計數才急遽上升。在圖 3.15 中，選定前次最大壓力作為參考壓力，標示為右邊的虛線。圖 3.16 所示為第三次加壓之局部放大圖，右邊虛線為前次加壓的最大壓力 1,493psi。在第三次加壓過程中，當壓力達到 1,332psi 時，累計振盪計數急遽增加。圖 3.17 所示為第四次加壓之局部放大圖，右邊虛線為前次加壓的最大壓力 2,251psi。在第四次加

壓過程中，累計振盪計數上升速率先緩慢增加，當壓力達到 2,013psi 時，上升速率才急遽增加。圖 3.18 所示則為第五次加壓之局部放大圖，右邊虛線為前次加壓的最大壓力 2,623psi。當壓力達到 2,341psi 時，上升速率就急遽增加。表 3.2 所列为編號 AE-FRP -11 壓力容器在各階段振盪計數急遽增加前後的斜率及壓力值。

編號 AE-FRP-13 壓力容器的負載歷時曲線如圖 3.19 所示，爆破壓力為 2,940psi，其累計振盪圖如圖 3.20 所示。圖 3.21 為第二次加壓之局部放大圖，前次加壓的最大壓力為 736.5psi，在第二次加壓過程中，累計振盪計數先緩慢增加，當壓力超過前次最大壓力，達到 773psi 時，累計振盪計數才急遽上升。圖 3.22 所示為第三次加壓之局部放大圖，前次加壓的最大壓力為 1,486psi，當壓力達到 1,303psi 時，累計振盪計數的增加斜率就急遽上升。圖 3.23 所示則為第四次加壓之局部放大圖，右邊虛線為前次加壓的最大壓力 2,237psi。當壓力達到 1,930psi 時，斜率急遽增加。圖 3.24 所示為第五次加壓之局部放大圖，前次加壓的最大壓力為 2,616psi，當壓力達到 2,210psi 時，斜率急遽增加。表 3.3 所列为 AE-FRP -13 在各階段振盪計數急遽增加前後的斜率及壓力值。

編號 AE-FRP-14 壓力容器的負載歷時曲線如圖 3.25 所示，爆破壓力為 3,056psi，其累計振盪圖如圖 3.26 所示。圖 3.27 為第二次加壓之局部放大圖，圖中右邊虛線為前次加壓的最大壓力 1,020psi，當壓力達到 950psi 時，上升斜率急遽增加。圖 3.28、3.29 及 3.30 所示分別為為第三、四、五次加壓之局部放大圖，各圖的右邊虛線為前次加壓的最大壓力，累計振盪計數斜率急遽增加的壓力值分別為 1,350psi、1,844psi 及 2,623psi。表 3.4 所列为 AE-FRP -14 在各階段累計振盪計數急遽增加前後的斜率及壓力值。

反覆加壓的累計振盪計數曲線顯示，洩壓後再次加壓到前次最大壓力的過程中振盪計數皆有上升，振盪計數的緩慢上升代表複材結構受到負載作用後，結構應力與剩餘強度會重新分配，由各壓力容器的累計振盪計數得知，當壓力超過 1,000psi 或明顯破壞指標壓力時，就發生費樂希帝效應，且 FR 值介於 0.825~0.935 之間。這時會有大量振盪計數產生，代表壓力容器產生新的漸進式破壞。

## (2) 連續加壓結果討論

本研究以兩種方式判斷指標破壞性壓力，第一種是連續加壓過程首次出現明顯能量值的壓力，第二種是累計振盪計數曲線第一次斜率明顯發生轉折處之壓力。以下先討論出現明顯能量值之壓力。

編號 AE-FRP-05 壓力容器的負載歷時曲線如圖 3.31a 所示，爆破壓力為 2,601psi，圖 3.31b 至圖 3.31d 分別為加壓過程中能量、瞬間振盪計數、振幅的變化圖，第一次明顯能量值為 80.4 百萬 e.u，所對應的壓力容器壓力為 1,141psi。此時瞬間振盪計數為 210，振幅為 77.6mV。

編號 AE-FRP-09 壓力容器的負載歷時曲線如圖 3.32a 所示，爆破壓力為 3,088psi，圖 3.32b 至圖 3.32d 依序為加壓過程中能量、瞬間振盪計數、振幅的變化圖，當壓力達 1,476psi 時，發生第一次明顯的能量值 52.8 百萬 e.u，此時時瞬間振盪計數為 122，振幅卻只有 6.3mV。

壓力容器 AE-FRP-15 的負載歷時曲線如圖 3.33a 所示，爆破壓力為 2,960psi，圖 3.33b 至圖 3.33d 分別為加壓過程中能量、瞬間振盪計數、振幅的變化圖，第一次出現明顯較高的能量值為 24.5 百萬 e.u，此時的壓力為 1,100psi，瞬間振盪計數為 266，振幅只有 5.1mV。

在複材結構中，累計振盪計數之於負載的曲線可供判斷複材結構是

否產生顯著破壞。本研究整理連續加壓過程中累計振盪計數與壓力的曲線，當切線斜率發生明顯改變時，這些轉折點代表複材壓力容器產生新階段的破壞，致使破壞釋放的音洩事件增多，因此本研究以首次出現斜率改變當作第二種判斷指標破壞壓力的方式。

圖 3.34 所示為編號 AE-FRP-05 壓力容器的累計振盪計數曲線，第一次出現斜率顯著改變的壓力為 900psi，依序在 1,343psi、1,980psi 出現第二、三次斜率變化顯著的狀況。圖 3.35 所示則為編號 AE-FRP-09 壓力容器的累計振盪計數曲線，在 760psi 之前，斜率變化是遞減的，也就是說在此階段振盪計數是由急速增加到漸緩增加，有可能造成此現象的原因是液壓系統夾治具的雜訊或是壓力容器內產生微小破壞。壓力超過 760psi 後，依序出現斜率顯著改變的壓力為 1,185psi、1,580psi、2,140psi。圖 3.36 所示則為編號 AE-FRP-15 壓力容器的累計振盪計數曲線，由於本次實驗曾在低壓階段，將壓力容器釋放歸零後，在加壓以消除音洩雜訊，因此在 600psi 以下，振盪計數曲線的上升速率是很慢的，AE-FRP-15 壓力容器第一次出現斜率顯著改變的壓力為 1,030psi。

為探討指標破壞壓力與爆破壓力是否存在比例關係，本研究以指標破壞壓力及爆破壓力之比值做為指標破壞壓力比  $\lambda$ ，且考慮到複材壓力容器在製作過程中的變異性， $\lambda$  的範圍可表示如下：

$$\lambda_{avg} - \mu_{\lambda} \leq \lambda \leq \lambda_{avg} + \mu_{\lambda} \quad (3.1)$$

其中， $\lambda_{avg}$  為  $\lambda$  的平均值， $\mu_{\lambda}$  為標準差。表 3.5 所列為不同判斷方式下，各容器之指標破壞壓力平均值及標準差。壓力容器編號 05、09 及 15 以第一次出現明顯能量值的壓力為指標破壞壓力則分別為 1,141、1,476 及 1,100psi， $\lambda$  介於 0.376~0.484 之間；若以第一次累計振盪計數曲線斜率轉折點之壓力為指標破壞壓力，則分別為 900、1,185、1,030，且  $\lambda$  介於

0.338~0.380 之間。

本研究也整理連續加壓之壓力容器的振盪計數與振幅關係。將 AE-FRP-05、AE-FRP-09、AE-FRP-15 的實驗量測結果，依照不同壓力區間下，以橫軸為振幅，縱軸為振盪計數作圖。第一個壓力區間為 0-600psi，之後每 400psi 為一個區間，直到爆破壓力為止。

圖 3.37 所示為編號 AE-FRP-05 壓力容器在不同壓力區間下，音洩事件的振盪計數與振幅分佈圖。由圖可看出在低壓時的音洩事件較少，振盪計數與振幅之分佈也不高，當壓力達 1,000psi 後，則開始出現大量音洩事件，且也有一些音洩事件的振幅達到飽和。接近爆破壓力時，音洩事件更是密集的產生。

圖 3.38 所示為編號 AE-FRP-09 壓力容器在不同壓力區間下，音洩事件的振盪計數與振幅分佈圖。AE-FRP-09 在 0-600psi 時所產生的音洩事件較 600-1,000psi 多，此原因可能是未在加壓初期將壓力釋放歸零，消除音洩雜訊，當壓力大於 1,400psi 才可明顯看出音洩事件大量產生。

圖 3.39 所示則為編號 AE-FRP-15 壓力容器在不同壓力區間下，音洩事件的振盪計數與振幅分佈圖。AE-FRP-15 在低壓時，曾消除音洩雜訊，因此在 0-600psi 時所產生的音洩事件明顯較較 AE-FRP-05、09 少。AE-FRP-15 在 1,000psi 就可明顯看出音洩事件大量產生。

由以上的結果可看出各壓力區間之音洩振盪計數與振幅並無絕對關係，振盪計數小，振幅有可能較大，同理，振盪計數大，振幅也有可能較小。同一個壓力區間的音洩事件比較集中在振盪計數較少的區間，若以振幅的角度來看，音洩事件的分佈則較為平均。振盪計數較少的音洩事件代表壓力容器產生微小的缺陷，振盪計數較多的音洩事件則是較嚴重或密集發生的破壞。低壓區間音洩事件產生的也較少，振幅變動範圍

也較小，可說明壓力容器在低壓時沒有發生明顯的破壞。

### 3.3.2 壓力容器破損討論

壓力容器爆破後的樣貌有助於了解中壓力容器的破壞行為，各壓力容器的爆破後結果大致可分為三類，第一類為 AE-FRP-12、AE-FRP-14、AE-FRP-15，爆破後照片分別如圖 3.40、3.41 及 3.42 所示。此類爆破在最外層直筒段處纖維發生斷裂，露出內部的脫層，可看出在未破壞的內層是  $15.92^\circ$  的疊層，因此可判斷此三具容器曾在第 4-5 層之間產生脫層，並造成最外圍四層纖維斷裂。

第二類為 AE-FRP-06、AE-FRP-09、AE-FRP-11、AE-FRP-13，爆破後照片分別如圖 3.43、3.44、3.45 及 3.46 所示。此類爆破在每一疊層都有纖維斷裂，由照片可明顯看出這 4 具壓力容器斷裂面發生在直筒段且貫穿所有疊層，其中 11 與 13 號壓力容器在端蓋也有明顯的纖維斷裂。

第三類為 AE-FRP-05，其爆破後照片如圖 3.47 所示。AE-FRP-05 在直筒段的斷裂面與軸向夾  $45^\circ$  角，斷裂面也延伸到端蓋，但是斷裂方向與纖維纏繞的角度不一致。

### 3.3.3 小結

本實驗使用 Vallen AMS3 音洩量測系統，對液壓試驗下的壓力容器進行音洩量測。在反覆加壓實驗過程中，再次加壓也會造成音洩振盪計數增加，其原因是漸進式破壞的複材結構再次受到負載作用後，結構應力與剩餘強度會重新分配，在重新加壓的過程中，仍會有音洩產生。此外，由實驗結果可知壓力超過 1,000psi 時，雖然再次加壓尚未達到前次最大壓力，仍會有大量振盪計數產生，此時發生了嚴重破壞，由實驗結

果可算出 FR 值介於 0.825~0.931 之間。由振盪計數增加速率之比值可看出 11、13 號容器在第 5 階段之比值為最大，14 號則最小。14 號容器在第四次加壓時，達到 3,087psi 尚未爆破，洩壓後重新加壓至 3,056psi 才爆破，可推測在第四次加壓達到 3,087psi 時，結構內部已有多處損壞，因此在第五次加壓時，振盪計數曲線斜率的增加才沒像 11、13 號明顯。

表 3.6 所列為指標破壞壓力與爆破壓力之平均值與標準差，爆破壓力平均值為扣除編號 05 號之結果。無論以何種判斷方式，指標破壞壓力之標準差均大於爆破壓力，此結果可說明指標破壞壓力的變異性較大。

表 3.7 所列為液壓實驗中，8 具壓力容器的爆破特徵，分為連續加壓、反覆加壓及一個供測試用的壓力容器。由爆破結果可看出三類主要破壞行為，第一類是在 4-5 疊層之間出現明顯脫層，會造成最外四層 90° 疊層的纖維斷裂，在本實驗中順利爆破之容器中編號為 12、14 及 15 容器屬於此類。第二種是無法直接觀察到明顯脫層的現象，其特徵為所有角度疊層的纖維均會斷裂，且斷裂面貫穿所有疊層，在本實驗中順利爆破之編號 06、09、11 及 13 壓力容器屬於此類。第三類則是在直筒段沿著與軸向夾 45° 方向產生斷裂，在本實驗中僅有編號 05 的容器屬於此類。脫層的產生與加壓方式沒有關係，似乎不會影響爆破強度。

## 第四章 模擬分析與討論

相對於第二章所採用的薄殼假設，本研究另外將對壓力容器進行全尺寸應力分析，使用套裝軟體 ANSYS 12.0 對壓力容器進行數值計算，計算出壓力容器在各積層的應力及破壞位置，並模擬脫層存在對於各積層應力的影響。本章分為三部分，第一部分先介紹 ANSYS 的分析過程；第二部分針對沒有脫層的複材壓力容器進行首層破壞的模擬分析；第三部分針對有脫層的複材壓力容器在同樣壓力下的模擬結果，最後再做討論與比較。

### 4.1 有限元素分析

以 ANSYS 進行有限元素的模擬分析可分為三個程序，依序為前處理(preprocess)、求解(solution)、後處理(postprocessor)。前處理主要是輸入幾何尺寸建立實體模型、選定元素種類、輸入材料參數，之後再對實體模型建立網格(mesh)，產生有限元素模型。完成前處理之後，即可開始求解，求解必須設定邊界條件，並且對有限元素模型施加負載，開始求解後，ANSYS 就會依照先前的設定計算結果。求解完之後進入後處理，後處理主要處理分析結果的數據、圖表等。

本研究的複材壓力容器在端蓋的部份，纖維角度及厚度會隨著位置而變化，因此幾何尺寸的建立採用輸入點座標的方式。端蓋部分各點座標如附錄 A 所列，輸入點座標後的輪廓如圖 4.1 所列。為了讓模擬與實驗狀況一致，在兩端金屬接頭開口處加入了一個材料性質與金屬接頭相同的封口，使其成為個密閉的空間，金屬接頭幾何尺寸建立也是採用輸入座標的方式。在座標輸入後將各點連接起來，直筒段與端蓋的部份為

一線段，金屬接頭的部份則為一面積，繞 x 軸旋轉後，原本線段則繞成一曲面，面積則繞成一體積，至此已完成壓力容器實體模型的一半，如圖 4.2 所示。再將此一半的實體模型對 yz 平面鏡射，鏡射後模型如圖 4.3 所示。

元素種類選擇上，直筒段及端蓋的部份是選用殼元素 Shell91，Shell91 是由 8 個節點、疊層厚度、疊層角度及正交材料性質所定義，適合做疊層的分析，其特性如圖 4.4 所示。而在元素特性參數(real constant)的設定上，ANSYS 資料庫可以讓使用者自己輸入所需的層數、疊層角度、厚度。金屬接頭設定為等向性材料，選用實體元素 Solid95。本研究數值計算採用的材料係數除了複材之外，都是以全域座標為準，複材的方向 1 為纖維補強方向，2、3 為垂直纖維方向，複材及金屬接頭的材料係數如表 4.1 至表 4.2 所列。最後對實體模型建立網格，網格的方式是採用規則網格(mapped mesh)，圖 4.5 為網格化有限元素模型之剖面圖。網格化結束後，前處理的工作就已完成，接著進行邊界條件的設定與求解。在本研究中的邊界條件是將壓力容器左端封口最外面中心處的節點自由度完全拘束住，右端封口中心節點的 y、z 自由度拘束，然後在壓力容器內施加定壓。本研究採用的壓力容器模型內部是一個封閉空間，因此將壓力施加於壓力容器內部的面上，即可開始求解。

求解計算結束後，進入後處理。在後處理中，先將結果顯示由全域座標轉為局部座標。再將各疊層直筒段及端蓋處的節點應力值列出來，由於所建立的是一對稱模型，節點應力只會因 x 座標不同而改變，因此在本研究中，僅列出從左端蓋到右端蓋最上方線段的節點應力值(圖 4.6)。求出應力值後，代入破壞準則可計算在該壓力下的失效指數，若失效指數大於 1，則代表壓力容器達到首層破壞，欲找出首層破壞之壓

力，可將給定的內壓力降低，反之若失效指數小於 1，則將給定的內壓力調高，搜尋失效指數達到 1 或是允許誤差範圍內的壓力值。

## 4.2 完整複材壓力容器模擬結果

完整複材壓力容器有限元素模型使用的節點數量為 254,991，元素數量為 95,133。本節將呈現在 4.1 節描述所得到的結果，包含直筒段及端蓋在各疊層的應力值，並討論在這些壓力值下的 Hill-Tsai 與 Tsai-Wu 破壞準則的失效指數。

若以 Hill-Tsai 破壞準則計算，模擬結果在壓力為 1,026psi 時，壓力容器即達到首層破壞； Tsai-Wu 破壞準則的首層破壞計算值則大約在 1,044psi。兩者均在第 1 層產生首層破壞，發生位置是在端蓋與直筒段交界之  $x=\pm 52.8\text{mm}$  處。本節以 1,026psi，探討各疊層之應力與失效指數分佈情況。此外，將於 4.4 節彙整比較薄殼分析、全尺寸分析及音洩實驗數據。

圖 4.7、圖 4.8 所示為 1-4 層在纖維方向應力( $\sigma_{11}$ )分佈，圖 4.9、圖 4.10 所示則為 5-8 層在纖維方向應力( $\sigma_{11}$ )分佈，可看出在 1-4 層的應力分佈趨勢具有一致性，在直筒段的應力較兩邊端蓋大，應力值在直筒段到端蓋交界處則有明顯的下降。5-8 層的應力分佈在靠近直筒段部分差異較大，5、6 層之應力值在此處有明顯下降，7、8 層則明顯上升。整體而言 5-8 層  $\sigma_{11}$  較 1-4 層低。

圖 4.11、圖 4.12 所示為 1-4 層在纖維垂直方向應力( $\sigma_{22}$ )分佈，圖 4.13、圖 4.14 所示為為 5-8 層在纖維垂直方向應力( $\sigma_{22}$ )分佈。 $\sigma_{22}$  在 1-4 層的整體分佈也具有一致性，在左右兩側端蓋部各出現一個峰值，發生在  $\pm 52.8\text{mm}$  處。 $\sigma_{22}$  在 5-8 層的整體分佈也具有一致性，接近端蓋處的  $\sigma_{22}$

明顯下降。

圖 4.15、圖 4.16 所示為 1-4 層的失效指數分佈，圖 4.17、圖 4.18 所示則為 5-8 層的失效指數分佈。可看出在此應力狀態下，僅第 1 層會發生首層破壞，發生的位置是在  $x=\pm 52.8\text{mm}$  處。失效指數分佈與  $\sigma_{22}$  分佈極為相似，可看出首層破壞受到垂直纖維方向應力  $\sigma_{22}$  之影響較大。本研究也探討壓力容器在  $\pm 52.8\text{mm}$  處，不同壓力下的失效指數，其結果如圖 4.19 所示。當壓力遠大於首層破壞壓力時，Hill-Tsai 與 Tsai-Wu 失效指數相差很大。但是兩者評估首層破壞壓力的差距不大。

### 4.3 含脫層壓力容器模擬結果

為了進一步觀察解脫層的出現對壓力容器在各疊層的應力分佈影響，本節依照第三章的實驗結果，在 4-5 層之間假設存有脫層，進行模擬分析，討論不同  $x$  位置脫層造成的應力分佈。

#### 4.3.1 平板結構的脫層模擬

為了確認此方法是否可行，本研究在進行壓力容器模擬之前先建立了一個具有脫層的平板結構，考慮此平板在受到外力作用下的應力分佈。參考圖 4.20 所示，首先在  $x-z$  平面上建立一個大小為  $50\text{mm}\times 50\text{mm}$  的面積，並以平板正中心為座標原點，之後在平板正中央切割出  $10\text{mm}\times 10\text{mm}$  的面積，接著在同樣位置建立同樣大小的面積，此時就有兩塊  $10\text{mm}\times 10\text{mm}$  的平面，在網格化之後，可以將此兩塊面積做為脫層的上下裂縫面。將平板層數設為 4 層，每層厚度為  $0.3\text{mm}$ ，脫層假設在 1-2 層之間，因此正中央的面積在元素特性參數上，分別設為 3 層及 1 層。平板選用元素為 Shell91，材料參數如表 4.3 所列。在平板的一邊施

以淨力為 1,200(N)的均佈力，另一邊則給滾輪(roller)拘束，限制平板 x 方向位移，脫層上下面於脫層邊緣交接處的節點重和，ANSYS 套裝軟體稱之為耦合(couple)，即位移相等。

求解後平板於  $z=0$  線段上的應力分佈如圖 4.21 所示，各層應力在脫層邊緣都有突起點，此為脫層造成的奇異值。為確認分析的正確性，本研究檢查平板中間與施力方向垂直的淨力是否維持力平衡，計算結果列於表 4.4，平板整體的淨力為 1,200.36(N)，滿足力平衡關係，以此分析步驟建立脫層是可行的。

#### 4.3.2 壓力容器的脫層模擬

本研究在模擬脫層時，依照脫層的位置分為兩類。第一類脫層在第 4-5 層疊層之間，涵蓋範圍為直筒段-25.4~25.4mm，且軸對稱環繞直筒段分佈。第二類脫層在第 4-5 層疊層之間，涵蓋範圍是在直筒段 25.4~50.8mm，同樣也環繞直筒段分佈。

在壓力容器上建立脫層之方法，與平板類似，在脫層位置建立兩個面積，分別代表發生脫層的上下面，即第 4 層與第 5 層。為了得到較精確分析結果，將脫層位置的網格加密，增加有限元素數量，第一類脫層的有限元素實體模型如圖 4.22 所示。使用節點數量為 324,548，元素數量為 121,569。第二類脫層的有限元素實體模型如圖 4.23 所示。使用節點數量為 295,108，元素數量為 111,969。為了與完整複材壓力容器比較，本節均以相同壓力值，1,026psi 設為壓力容器的內壓。

##### (1)第一類脫層模擬結果

圖 4.24 至圖 4.27 所示為第 1 層到第 4 層纖維方向應力( $\sigma_{11}$ )分佈與垂直纖維方向應力( $\sigma_{22}$ )分佈。在直筒段及端蓋處均產生極值，直筒段的極

值是因為脫層造成的奇異性，脫層位置的應力變化較少。

圖 4.28 至圖 4.31 所示為第 5 層到第 8 層纖維方向應力( $\sigma_{11}$ )的分佈，與垂直纖維方向應力( $\sigma_{22}$ )之分佈，可明顯看出在第 5 層到第 8 層  $\sigma_{11}$  有明顯變大的趨勢。

表 4.5 所列為扣除具奇異值的應力後，第一類脫層造成各積層應力平均值的改變。脫層會造成複材壓力容器內 4 層與外 4 層纖維負載分配的改變，內 4 層的  $\sigma_{11}$  變小， $\sigma_{22}$  變大；外 4 層的  $\sigma_{11}$  變大， $\sigma_{22}$  則會隨著層數變大而變大。故可定性預測達到爆破時，外 4 層較有可能產生纖維斷裂。

## (2) 第二類脫層模擬結果

圖 4.32 至圖 4.35 所示為第 1 層到第 4 層纖維方向應力( $\sigma_{11}$ )分佈，與垂直纖維方向應力( $\sigma_{22}$ )分佈。在直筒段及端蓋處均有產生極值，直筒段的極值是因為脫層造成的奇異性，在脫層位置纖維方向應力變化受到奇異點及端蓋交界處的影響，1、2 層在脫層位置的應力  $\sigma_{11}$  會隨著 x 座標增加而遞增；3、4 層則呈現遞減。

圖 4.36 至圖 4.39 所示為第 5 層到第 8 層纖維方向應力( $\sigma_{11}$ )分佈，與垂直纖維方向應力( $\sigma_{22}$ )分佈，在假設脫層的情況下，第 5-8 層的  $\sigma_{11}$  有明顯變大的趨勢。當脫層發生在端蓋交界處，第 5-8 層的軸向沒有拘束，但是在靠近端蓋交界處的  $\sigma_{22}$  值有增大的趨勢，此點與力學分析的自由曳力條件不一致，有待進一步確認。

表 4.6 所列為扣除奇異值的應力後，第二類脫層造成各積層應力平均值的改變。脫層會造成複材壓力容器內 4 層與外 4 層纖維負載分配的改變，內 4 層的  $\sigma_{11}$  變小， $\sigma_{22}$  變大，外 4 層的  $\sigma_{11}$  變大， $\sigma_{22}$  則會隨著層數增加而變大，此結果與第一類脫層相近。故可定性預測含有脫層之壓

力容器達到爆破時，外 4 層較有可能產生纖維斷裂。

#### 4.4 模擬分析結果討論

由完整複材壓力容器的模擬結果，比較各疊層的應力及失效指數的分佈，可預測壓力容器可能破壞的疊層及位置。表 4.7 比較全尺寸壓力容器與薄殼的應力分析及實驗結果，顯示累計振盪計數曲線所獲得的指標破壞壓力與數值模擬結果較為接近。

從含有脫層的全尺寸壓力容器之模擬結果可發現，若脫層在 4-5 層產生，造成內 4 層與外 4 層積層的應力重新分配；脫層的位置不同也會有不同的影響，當脫層發生在端蓋交界處，造成外 4 層垂直纖維方向的應力  $\sigma_{22}$  在端蓋處變大。對於外 4 層的纖維方向應力  $\sigma_{11}$  而言，不論脫層發生在直筒段中間段或端蓋處，均會造成明顯的變大。



## 第五章 結論與展望

本研究依照不同加壓方式，對纖維纏繞複材壓力容器進行液壓試驗及音洩量測，由音洩參數判斷初期具有指標破壞意義的壓力，探討複材結構的費樂希帝效應。本文採用 ANSYS 套裝軟體進行數值分析，計算全尺寸複材壓力容器的首層破壞壓力，評估可能破壞的位置及脫層缺陷對應力分佈的影響。

### 5.1 結論

本研究驗證了複材結構的費樂希帝效應，由實驗結果發現當壓力超過 1,000psi 時，即出現費樂希帝效應，FR 值介於 0.825~0.935 之間。由累計振盪計數曲線可定性瞭解複材結構受到大於首層破壞之負載後，會造成內部應力、材料剩餘強度重新分配。

本研究以連續加壓試驗結果，評估壓力容器指標性破壞參數  $\lambda$ ，由首次出現明顯能量值與累計振盪計數斜率變化處之壓力為判斷依據。前者得到的  $\lambda$  值介於 0.376~0.484 之間，後者介於 0.338~0.380 之間。比較指標破壞壓力標準差與爆破壓力標準差，可看出複材壓力容器的指標破壞壓力變異性較大。

本研究順利爆破之壓力容器共有 8 具，爆破結果可分為三類，其中 AE-FRP-12、14 及 15 屬於第一類，在第 4-5 層之間有產生明顯的脫層，由爆破後壓力容器外觀得知最外四層 90° 方向產生纖維斷裂，脫層的產生與加壓方式及爆破壓力無關。AE-FRP-06、09、11 及 13 屬於第二類，無法直接觀察到明顯脫層，其特徵是爆破後所有角度疊層的纖維均會斷裂，破壞後可明顯看出纖維斷裂產生的缺口落在直筒段，偏向一側之端

蓋。AE-FRP-05 則屬於第三類，沿著與壓力容器軸向夾  $45^\circ$  方向的纖維斷裂，此結果與壓力容器設計不符，猜測是製作過程的瑕疵。

本研究以 ANSYS 對壓力容器進行首層破壞強度的模擬，其壓力值與累計振盪計數曲線斜率轉折處的指標破壞壓力接近，若與液壓試驗實驗結果比較，則僅有 11 號與 13 號兩具壓力容器的破壞位置落在直筒段及端蓋處，與模擬結果可能符合，其餘的壓力容器破壞點與預測有較大的出入。

本研究以 ANSYS 進行脫層造成的應力重新分配之模擬，將脫層假設在壓力容器直筒段 4-5 層之間的不同位置，均可看出脫層對於應力分佈的改變，其中最明顯的是外 4 層纖維方向的應力明顯變大，比內 4 層應力大，此結果可定性說明在爆破時，脫層的產生會造成外 4 層的纖維斷裂。



## 5.2 未來展望

本研究以音洩參數判斷複材壓力容器的指標破壞壓力，但對於缺陷的辨識及缺陷的生成機制瞭解尚有不足，判斷脫層的生成位置僅以爆破後的外觀判斷。將來可配合相關非破壞檢測技術，探討壓力容器的缺陷形成及破壞機制。

本研究採用的壓力容器端蓋之幾何尺寸較為複雜，若以殼元素在端蓋假設脫層會使得有限元素模型更為複雜，日後可嘗試以三維實體元素對含有脫層的壓力容器進行模擬，使結果更接近真實狀況。

## 參考文獻

- [1] T. Y. Kam, Y. W. Liu, and E. T. Lee, 1997, "First-ply failure strength of laminated composite pressure vessels," *Composite Structures*, **38**, 65-70.
- [2] R.R. Chang, 2000, "Experimental and theoretical analyses of first-ply failure of laminated composite pressure vessels," *Composite Structures*, **49**, 237-243.
- [3] L. Dong and J. Mistry, 1998, "Acoustic emission monitoring of composite cylinders," *Composite Structures*, **40**, 149-158.
- [4] L. Dong and J. Mistry, 1998, "An experimental study of the failure of composite cylinders subjected to combined external pressure and axial compression," *Composite Structures*, **40**, 81-94.
- [5] M. Surgeon and M. Wevers, 1998, "Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates," *NDT&E International*, **32**, 311-322.
- [6] A. Mirmiran, M. Shahawy, and H. E. Echary, 1999, "Acoustic emission monitoring of hybrid FRP-concrete columns," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, **125**(8), 899-905.
- [7] L. Rippert, M. Wevers, and S. Van Huffel, 2000, "Optical and acoustic detection in laminated CFRP composite materials," *Composite Science and Technology*, **60**, 2713-2724.
- [8] 王忠成，2000，"複合材料壓力容器音洩量測技術"，新新季刊，第三十八卷，第三期，46-59。
- [9] 尹慶中、蔡佳霖、高菁穗、蔡旻軒、黃室維，2010，"複材繞線成型技術-非破壞性複材壓力容器強度預估模式技術"，第19屆國防科技學術研討會論文集，483-488，桃園，台灣。
- [10] R. F. Gibson, 1994, *Principles of composite material mechanics*,

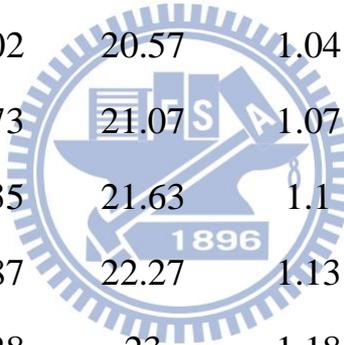
McGraw-Hill, Inc, New York, USA.

- [11] M. N. Bassim and M. Houssny-Emam, 1983, *Time and frequency Analysis of Acoustic Emission Signals*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA.
- [12] R. A. Kline, 1983, *Acoustic Emission Signal Characterization*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA.
- [13] ASTM D 2585-68, 1990, *Test Method for Preparation and Tension Testing of Filament Wound Pressure Vessels* , American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [14] ASTM E 2191-02, 2002, *Standard Test Method for Examination of Gas-filled Filament Wound Composite Pressure Vessels using Acoustic Emission*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [15] ASTM E 1316-06a, 2006, *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [16] ASME Article 11, 2007, *Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels*, American Society for Testing and Materials, New York, USA.
- [17] ANSYS, *Release 12.0 Documentation for ANSYS: Element Library*. SAS IP, Inc., USA, 2009.

## 附錄 A 壓力容器端蓋座標、纖維纏繞角度、厚度

X(mm)	Y(mm)	Angle	Thick(mm)	附註
50.8	73.03	15.92	0.79	
51.8	73.02	15.93	0.79	
52.8	72.98	15.93	0.79	
53.8	72.92	15.95	0.79	
54.8	72.83	15.97	0.79	
55.8	72.71	15.99	0.79	
56.8	72.57	16.03	0.8	
57.8	72.4	16.06	0.8	
58.8	72.2	16.11	0.8	
59.8	71.98	16.16	0.8	
60.8	71.73	16.22	0.81	
61.8	71.45	16.29	0.81	
62.8	71.13	16.36	0.81	
63.8	70.79	16.44	0.82	
64.8	70.42	16.53	0.82	
65.8	70.02	16.63	0.83	
66.8	69.59	16.73	0.83	
67.8	69.12	16.85	0.84	
68.8	68.62	16.98	0.85	
69.8	68.09	17.11	0.85	
70.8	67.51	17.26	0.86	
71.8	66.9	17.43	0.87	

72.8	66.25	17.6	0.88
73.8	65.56	17.79	0.89
74.8	64.83	18	0.9
75.8	64.05	18.23	0.91
76.8	63.22	18.48	0.93
77.8	62.34	18.75	0.94
78.8	61.4	19.04	0.96
79.8	60.41	19.37	0.97
80.8	59.35	19.73	0.99
81.8	58.22	20.13	1.01
82.8	57.02	20.57	1.04
83.8	55.73	21.07	1.07
84.8	54.35	21.63	1.1
85.8	52.87	22.27	1.13
86.8	51.28	23	1.18
87.8	49.55	23.85	1.22
88.8	47.67	24.85	1.28
89.8	45.6	26.06	1.35
90.8	43.32	27.55	1.44
91.8	40.76	29.44	1.56
92.8	37.87	31.95	1.73
93.8	34.51	35.49	1.97
94.8	30.54	41	2.41
95.8	25.74	51.1	3.43



96.05	24.41	55.18	3.98	(反曲點)
96.3	23.36	60.98	4.15	
96.55	22.23	66.78	4.33	
96.8	21.02	72.58	4.54	
97.05	19.68	78.38	4.63	
97.3	18.2	84.18	4.09	
97.48	17	90	3.89	



## 附表

表 2.1 壓力容器疊層角度與幾何尺寸

直筒段直徑	146.05(mm)
開口直徑	34(mm)
直筒段長度	101.6(mm)
螺旋繞線厚度	0.79(mm)
周向繞線厚度	0.99(mm)
直筒段繞線順序	[±15.92° <sub>2</sub> /90° <sub>4</sub> ]

表 2.2 薄殼假設採用的壓力容器材料係數

複材彈性常數(GPa)	
$E_1$	143.96
$E_2$	6.067
$G_{12}$	8.412
柏松比	
$\nu_1$	0.33
複材強度(MPa)	
X	2,047.8
Y	26.2
S	31.3
X'	1623
Y'	143.63

表 2.3 薄殼假設計算之首層破壞壓力值

Hill-Tsai	Tsai-Wu
1,085.3(psi)	1,098(psi)

表 3.1 AE-FRP -06 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值

AE-FRP-06			
	前次最大壓力(psi)	振盪計數急遽增加之壓力(psi)	FR
第二次加壓	1,440	1,346	0.935
	急遽增加前斜率 (counts/psi)(a)	急遽增加後斜率 (counts/psi)(b)	$\frac{(b)}{(a)}$ 比值
第二次加壓	3.35	47	14.03

表 3.2 AE-FRP -11 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值

AE-FRP-11			
	前次最大壓力(psi)	振盪計數急遽增加之壓力(psi)	FR
第二次加壓	736.5	736.5	1
第三次加壓	1,493	1,332	0.892
第四次加壓	2,251	2,013	0.894
第五次加壓	2,623	2,341	0.892
	急遽增加前斜率 (counts/psi)(a)	急遽增加後斜率 (counts/psi)(b)	$\frac{(b)}{(a)}$ 比值
第二次加壓	9.2	50	5.43
第三次加壓	17.4	94	5.4
第四次加壓	12.2	47	3.85
第五次加壓	8.3	67.1	8.08

表 3.3 AE-FRP -13 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值

AE-FRP-13			
	前次最大壓力(psi)	振盪計數急遽增加之壓力(psi)	FR
第二次加壓	736.5	773	1.05
第三次加壓	1,485.5	1,303	0.877
第四次加壓	2,237	1,930	0.863
第五次加壓	2,616	2,210	0.845
	急遽增加前斜率 (counts/psi)(a)	急遽增加後斜率 (counts/psi)(b)	$\frac{(b)}{(a)}$ 比值
第二次加壓	11.5	80.9	7.03
第三次加壓	10.1	120.9	11.97
第四次加壓	7.28	57.3	7.87
第五次加壓	6.1	86.8	14.22

表 3.4 AE-FRP -14 振盪計數急遽增加前後的斜率變化及壓力值

AE-FRP-14			
	前次最大壓力(psi)	振盪計數急遽增加之壓力(psi)	所佔比例
第二次加壓	1,020	950	0.931
第三次加壓	1,488.5	1,350	0.907
第四次加壓	2,234.4	1844	0.825
第五次加壓	3,087	2,623	0.85
	急遽增加前斜率 (counts/psi)(a)	急遽增加後斜率 (counts/psi)(b)	$\frac{(b)}{(a)}$ 比值
第二次加壓	11.73	93.98	8.01
第三次加壓	12.42	55.73	4.49
第四次加壓	11.89	46.95	3.94
第五次加壓	12.4	36.3	2.93

表 3.5 不同判斷方式所得指標破壞壓力

	首次出現明顯能量值之壓力	首次斜率明顯改變之壓力
05	1,141	900
09	1,476	1,185
15	1,100	1,030
平均	1,239	1,038
$\lambda$ 標準差	0.054	0.021
$\lambda$ 範圍	0.376~0.484	0.338~0.380

表 3.6 指標破壞壓力與爆破壓力之平均值與標準差

	指標破壞壓力(psi)		爆破壓力(psi)
	首次出現明顯能量值	首次斜率明顯改變	-
平均值	1,239	1,038	3,029
標準差	206.3	142.7	63.9

表 3.7 壓力容器爆破結果統計

加壓方式	連續加壓				反覆加壓		測試用	
	05	09	15	06	11	13	14	12
容器編號	05	09	15	06	11	13	14	12
脫層	X	X	4-5	X	X	X	4-5	4-5
90° 纖維斷裂	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
±15.92° 纖維斷裂	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X
是否漏水	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X
端蓋斷裂	✓	X	X	X	✓	✓	X	X
直筒段斷裂	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
沿 45° 方向斷裂	✓	X	X	X	X	X	X	X
爆破壓力(psi)	2,601	3,088	2,963	3,042	3,087	2,940	3,056	2,958

表 4.1 數值計算採用的複材材料係數

彈性常數(GPa)	
$E_1$	143.96
$E_2$	6.067
$E_3$	6.067
$G_{12}$	8.412
$G_{13}$	8.412
$G_{23}$	8.412
柏松比	
$\nu_1$	0.33
$\nu_2$	0.33
$\nu_3$	0.33

表 4.2 數值計算採用的金屬接頭材料係數

彈性常數(GPa)	
$E_1$	205
柏松比	
$\nu_1$	0.29

表 4.3 數值計算採用的平板材料係數

彈性常數(GPa)	
$E_1$	200
柏松比	
$\nu_1$	0.3

表 4.4 平板力平衡驗證

	脫層處平均應力(MPa)	無脫層處平均應力(MPa)	脫層處合力(N)	非脫層處合力(N)
Layer1	9.08	10.35	54.48	248.4
Layer2	8.06	10.44	48.36	250.56
Layer3	8.1	10.44	48.6	250.56
Layer4	8.14	10.44	48.84	250.56

表 4.5a 第一類脫層的 1-4 層應力統計比較

	LAYER1		LAYER2		LAYER3		LAYER4	
	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$
有脫層平均 應力(MPa)	468	19.6	467	19.6	465	19.7	463	19.7
無脫層平均 應力(MPa)	467.6	19	468.4	19	469.2	19	470	19

表 4.5b 第一類脫層的 5-8 層應力統計比較

	LAYER5		LAYER6		LAYER7		LAYER8	
	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$
有脫層平均 應力(MPa)	509	24.2	506	23.8	502	23.6	499	23.3
無脫層平均 應力(MPa)	317.3	23.6	317.9	23.6	317.7	23.7	318.1	23.7

表 4.6a 第二類脫層的 1-4 層應力統計比較

	LAYER1		LAYER2		LAYER3		LAYER4	
	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$
有脫層平均 應力(MPa)	410	26.5	375	25	318	24.6	305	24
無脫層平均 應力(MPa)	467.6	19	468.4	19	469.2	19	470	19

表 4.6b 第二類脫層的 5-8 層應力統計比較

	LAYER5		LAYER6		LAYER7		LAYER8	
	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$	$\sigma_{11}$	$\sigma_{22}$
有脫層平均 應力(MPa)	505	24.2	504	25.9	504	27.6	503	29.3
無脫層平均 應力(MPa)	317.3	23.6	317.9	23.6	317.7	23.7	318.1	23.7

表 4.7 全尺寸分析與實驗結果比較

		首層破壞壓力	指標性破壞壓力
薄殼應力分析	Hill-Tsai 破壞準則	1,085	-
薄殼應力分析	Tsai-Wu 破壞準則	1,098	-
全尺寸應力分析	Hill-Tsai 破壞準則	1,026	-
全尺寸應力分析	Tsai-Wu 破壞準則	1,044	-
明顯能量峰值所得指標性破壞壓力		-	1,239
累計振盪計數所得指標性破壞壓力		-	1,038





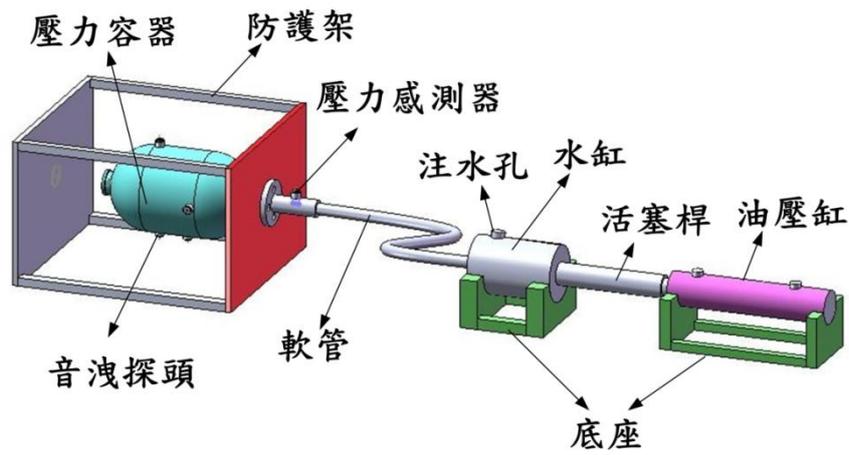


圖 3.2 油壓裝置及夾具示意圖

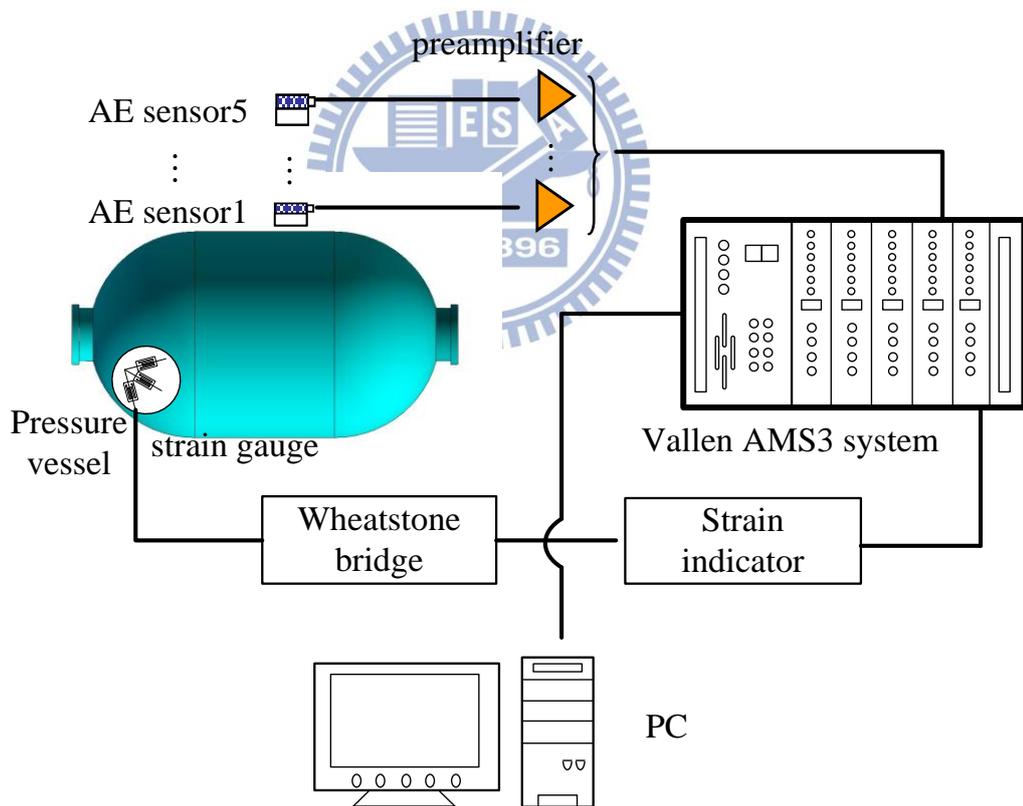


圖 3.3 音洩量測系統架構圖



圖 3.4 液壓實驗裝置實體照片

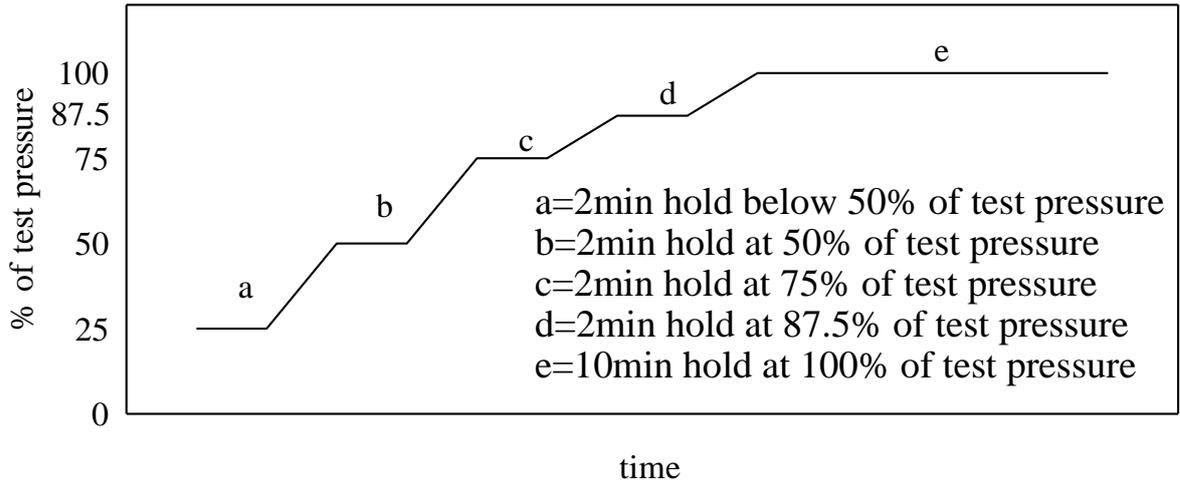


圖 3.5 音洩量測系統 Vallen AMS3 實體照片

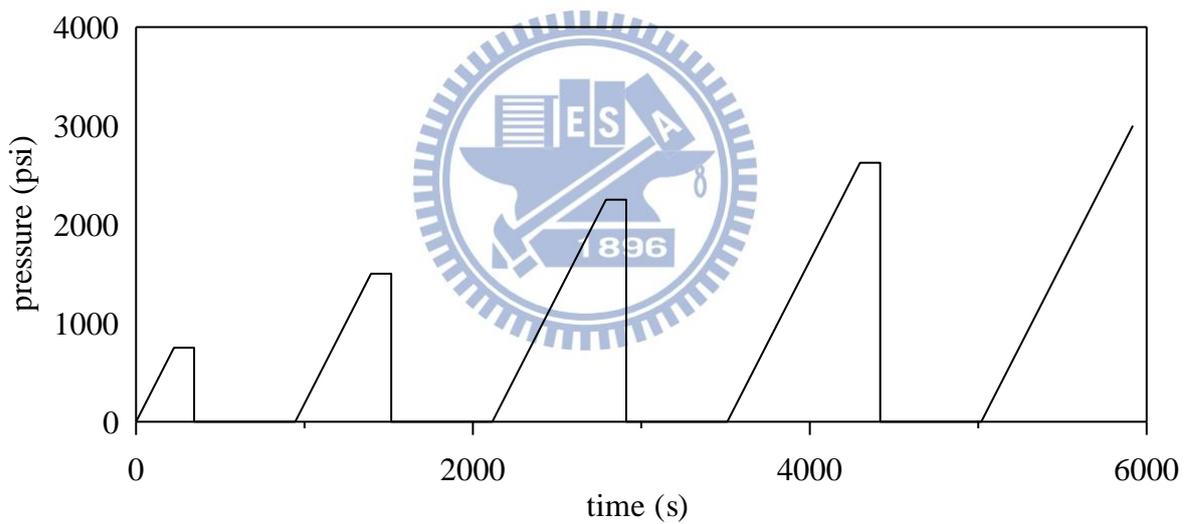


圖 3.6 壓力容器疊層順序



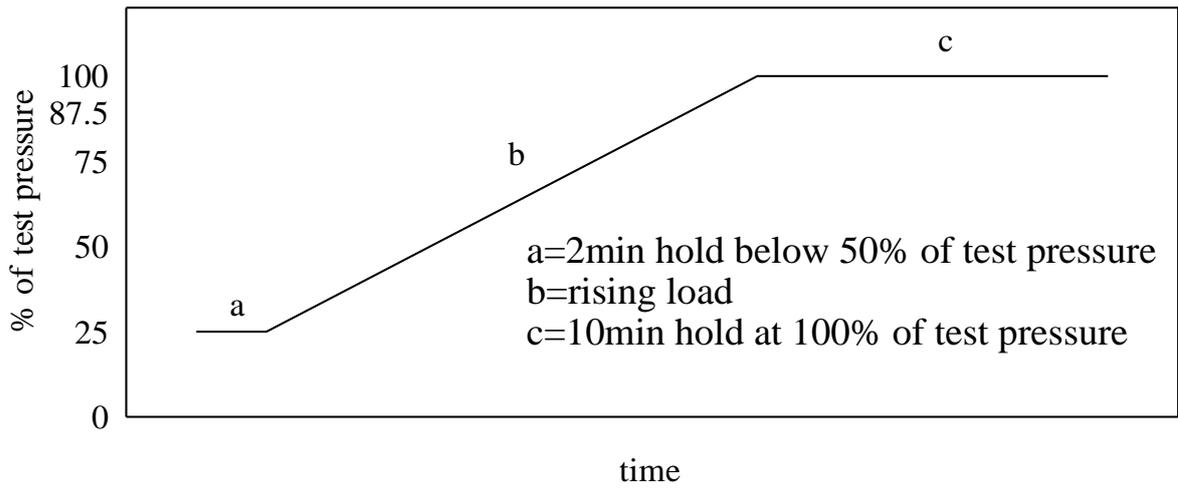


(a)

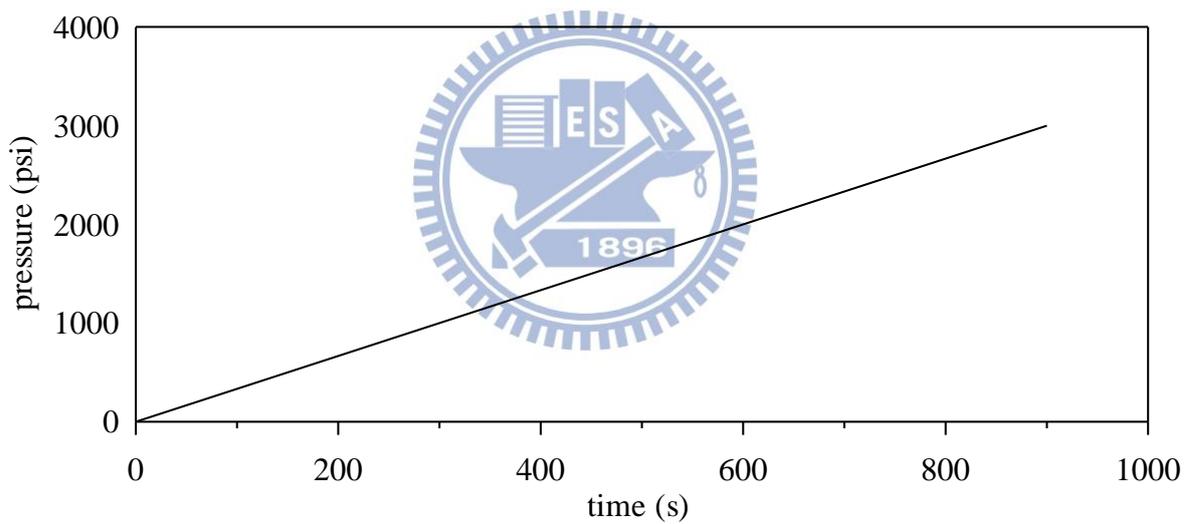


(b)

圖 3.7 (a)ASTM E2191-02 所建議分段加壓歷時曲線，(b)本實驗所採用反覆加壓歷時曲線圖



(a)



(b)

圖 3.8 (a)ASTM E2191-02 所建議連續加壓歷時曲線，(b)本實驗所採用連續加壓歷時曲線圖

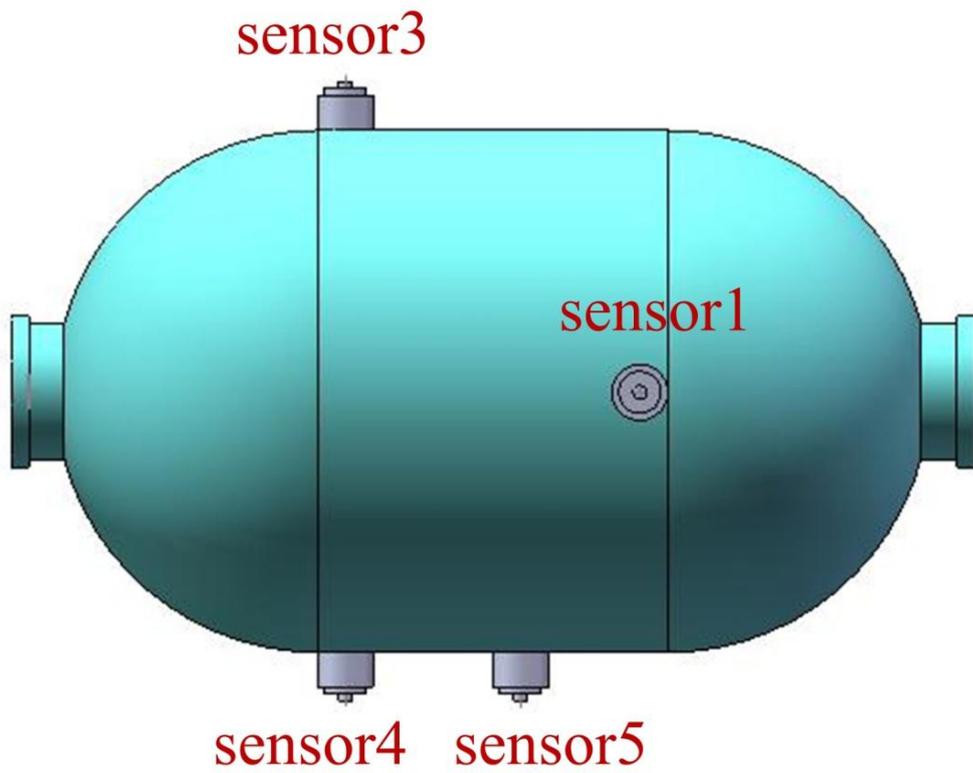


圖 3.9 探頭擺放位置示意圖，2 號探頭位於 1 號探頭背面

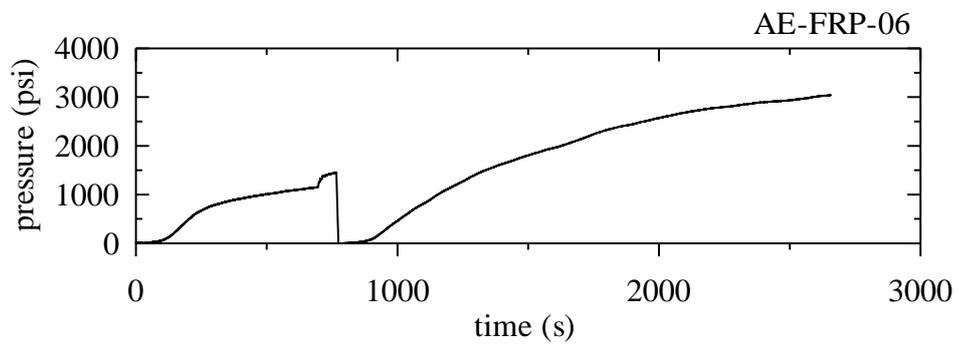


圖 3.10 AE-FRP-06 負載歷時曲線

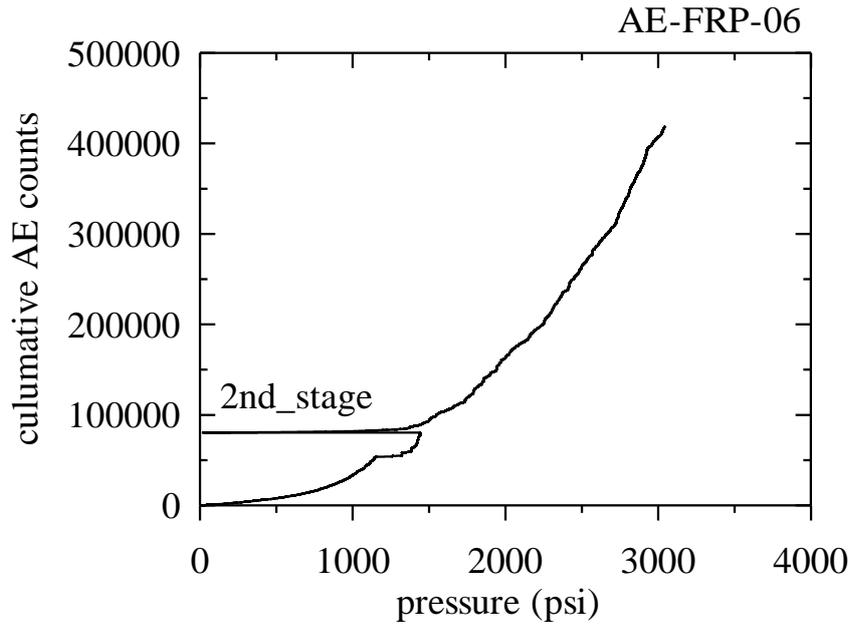


圖 3.11 AE-FRP-06 累計振盪計數曲線

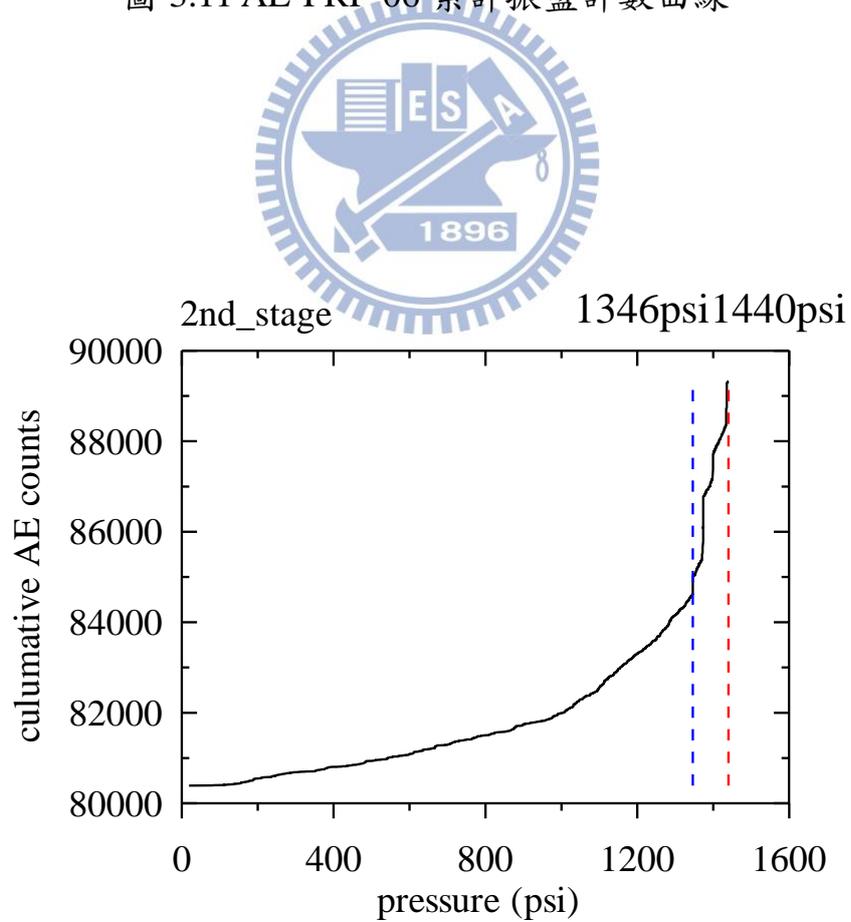


圖 3.12 局部放大 AE-FRP-06 第二次加壓累計振盪計數曲線

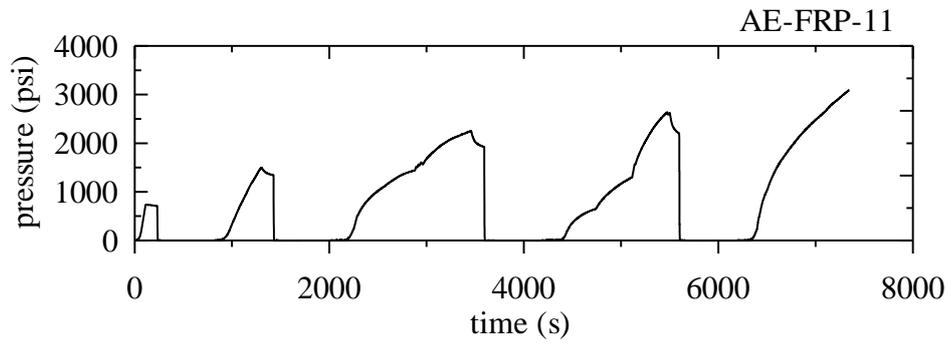


圖 3.13 AE-FRP-11 負載歷時曲線

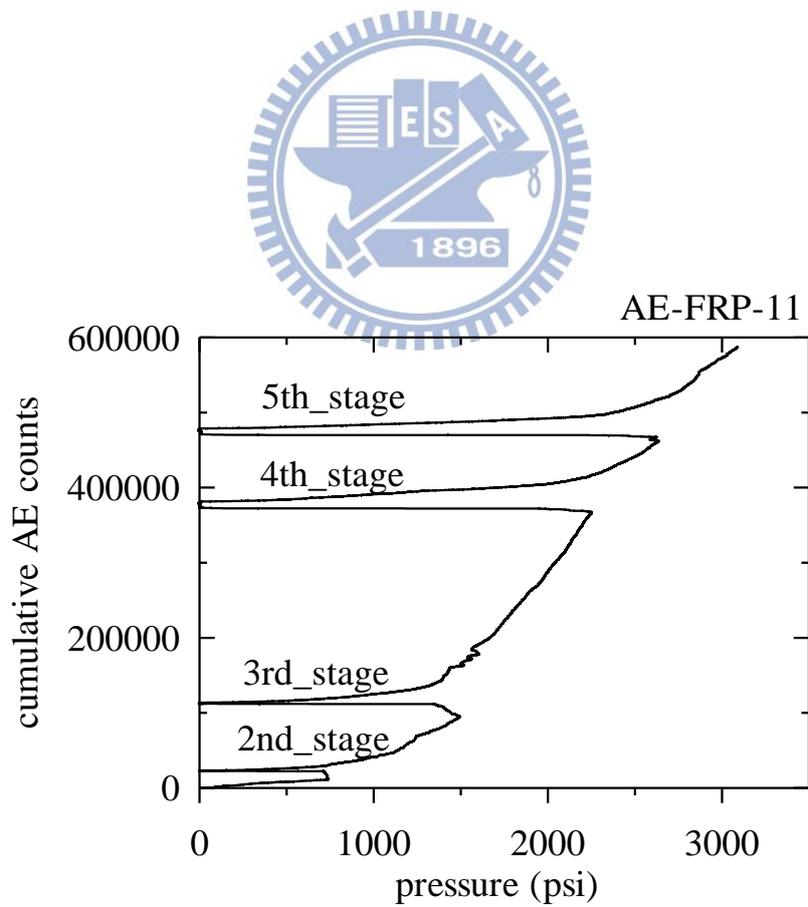


圖 3.14 AE-FRP-11 累計振盪計數曲線

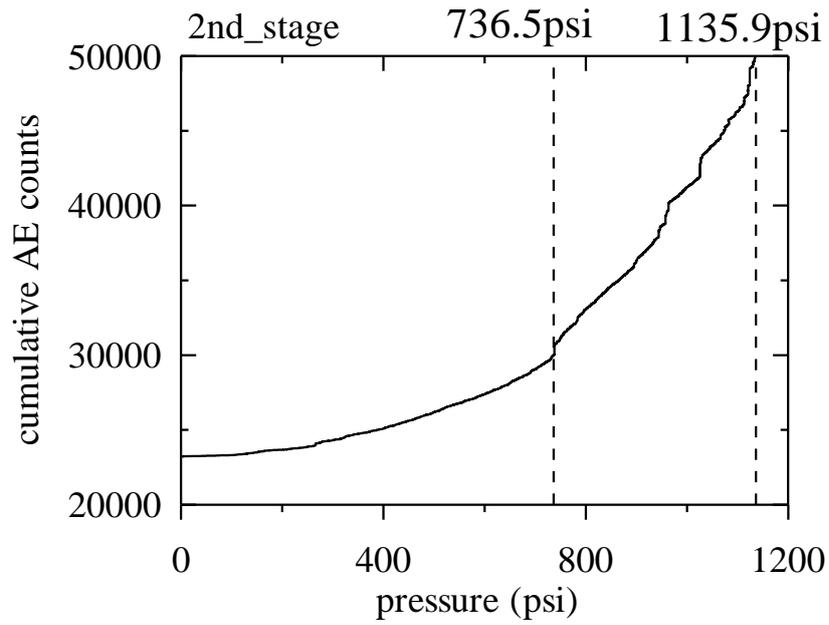


圖 3.15 局部放大 AE-FRP-11 第二次加壓累計振盪計數曲線

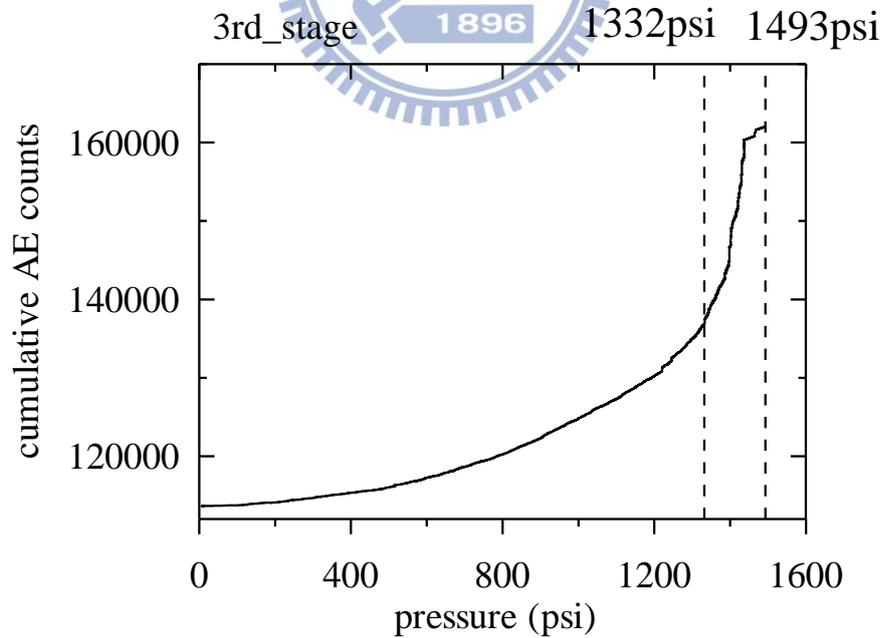


圖 3.16 局部放大 AE-FRP-11 第三次加壓累計振盪計數曲線

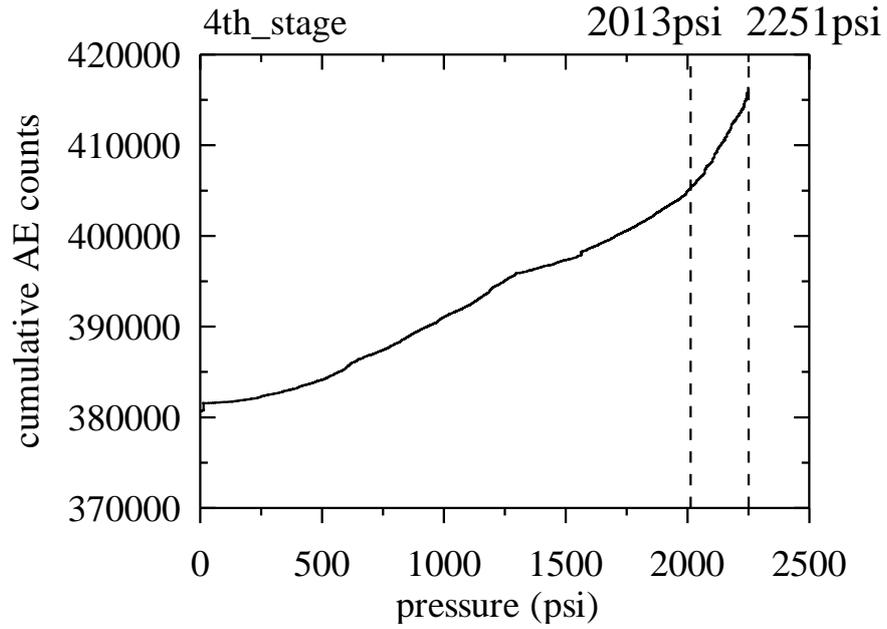


圖 3.17 局部放大 AE-FRP-11 第四次加壓累計振盪計數曲線

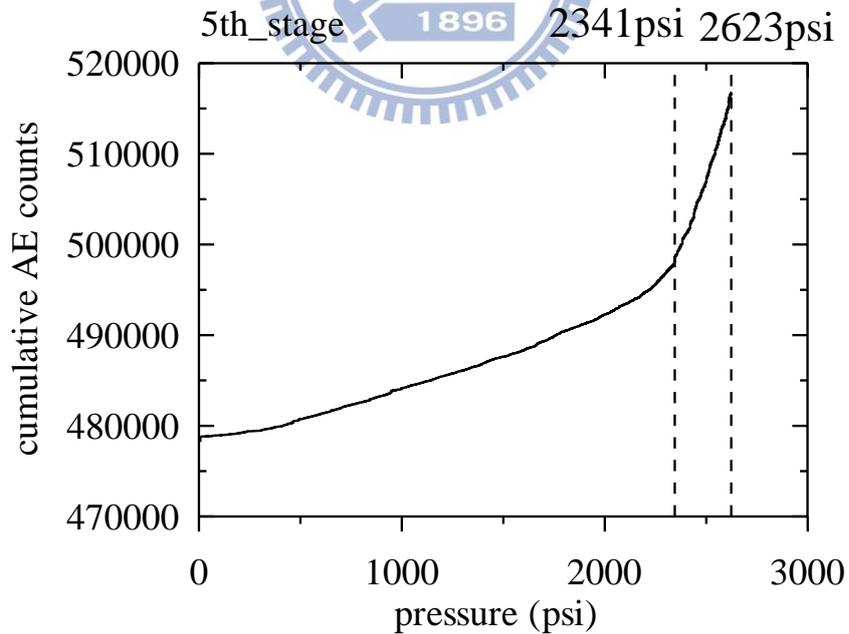


圖 3.18 局部放大 AE-FRP-11 第五次加壓累計振盪計數曲線

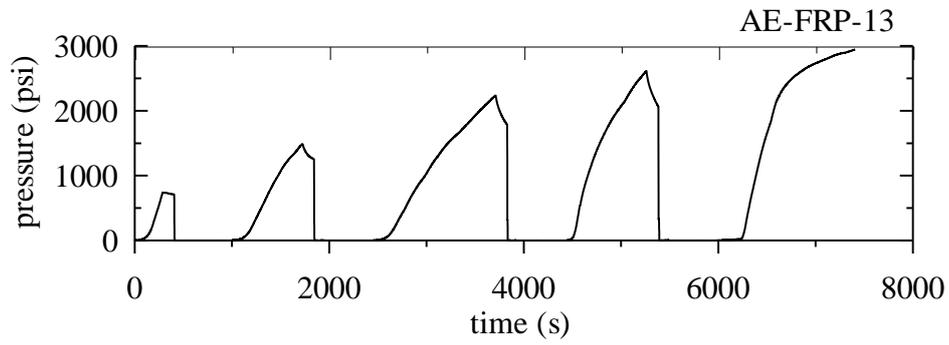


圖 3.19 AE-FRP-13 負載歷時曲線

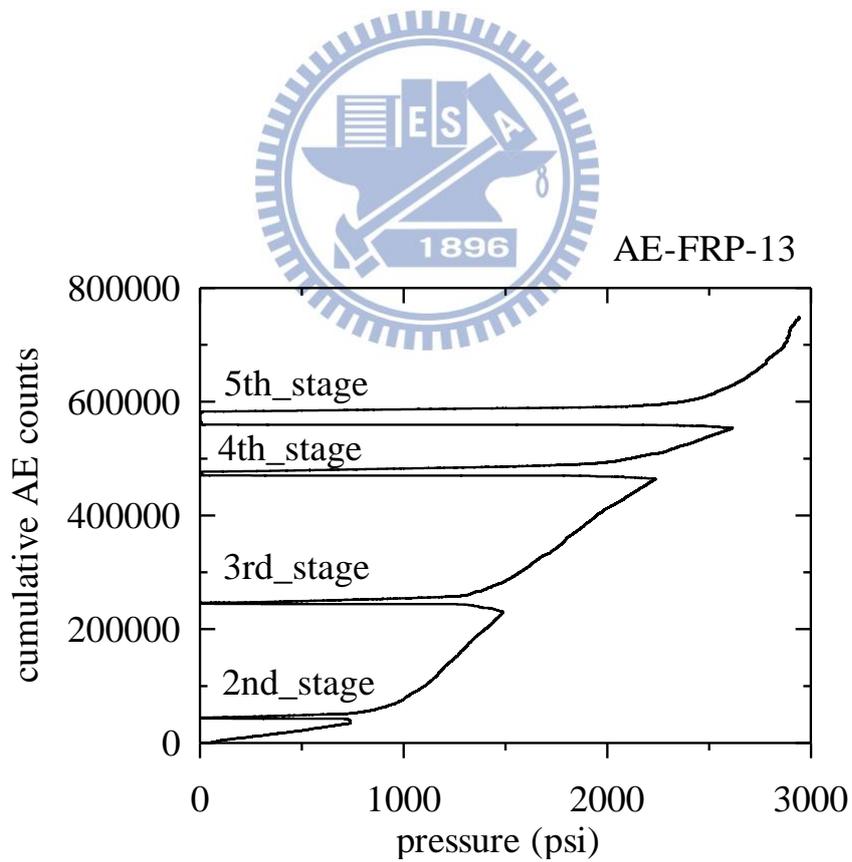


圖 3.20 AE-FRP-13 累計振盪計數曲線

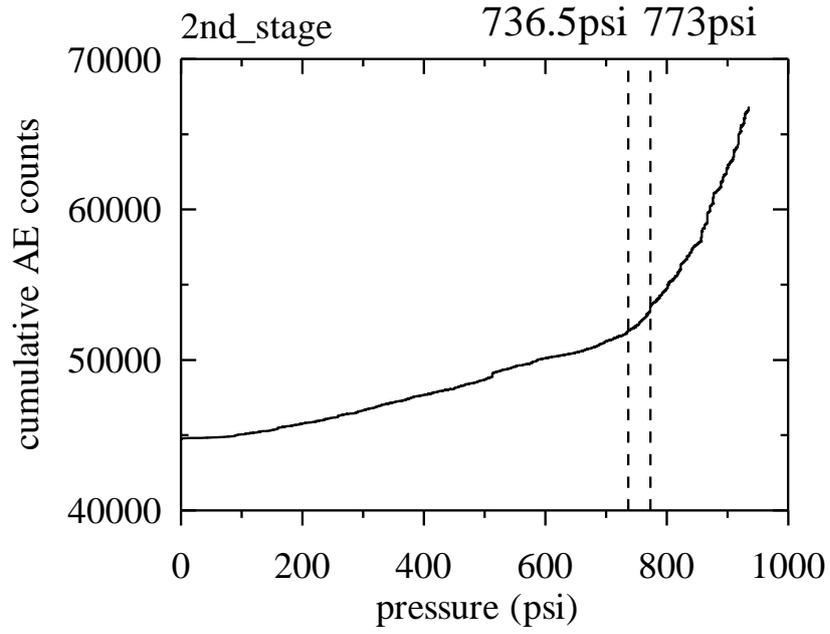


圖 3.21 局部放大 AE-FRP-13 第二次加壓累計振盪計數曲線

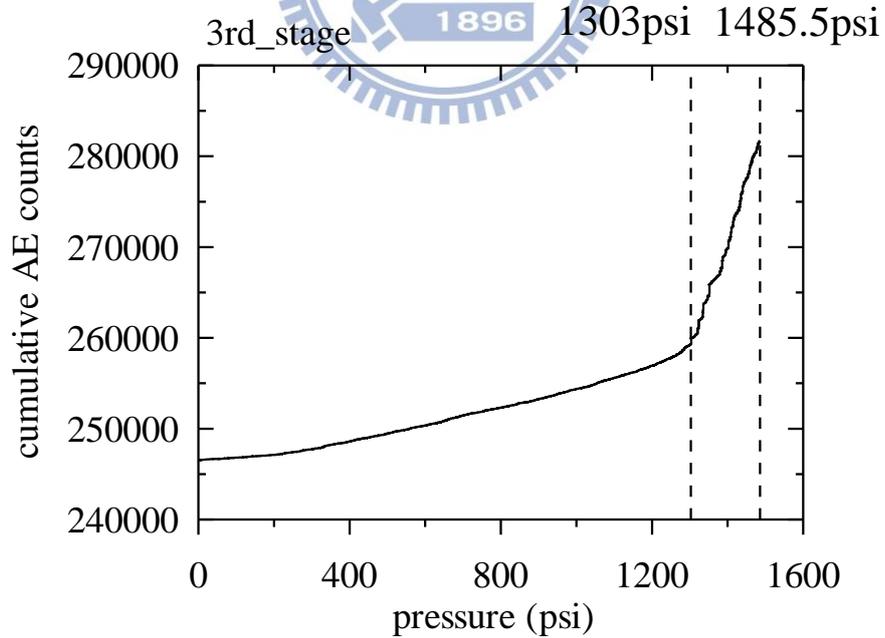


圖 3.22 局部放大 AE-FRP-13 第三次加壓累計振盪計數曲線

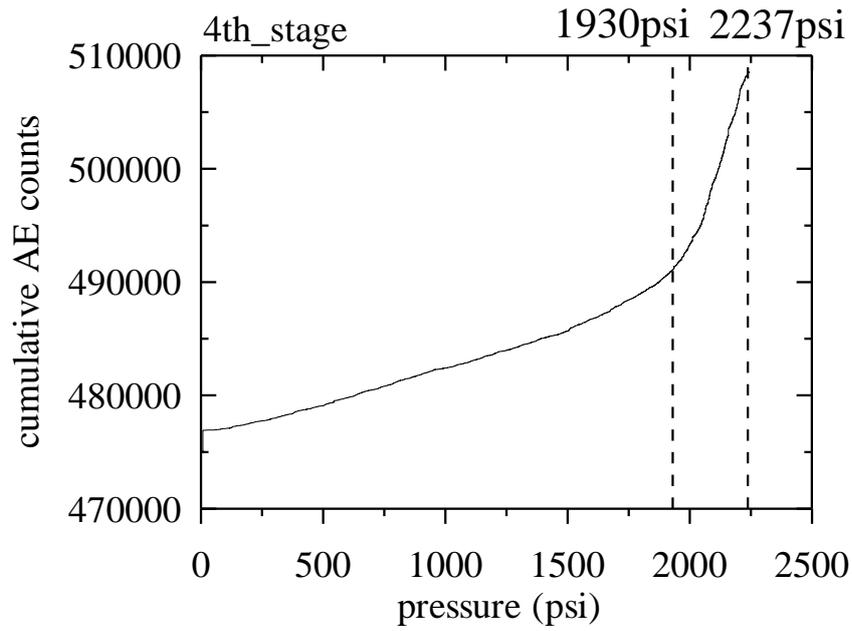


圖 3.23 局部放大 AE-FRP-13 第四次加壓累計振盪計數曲線

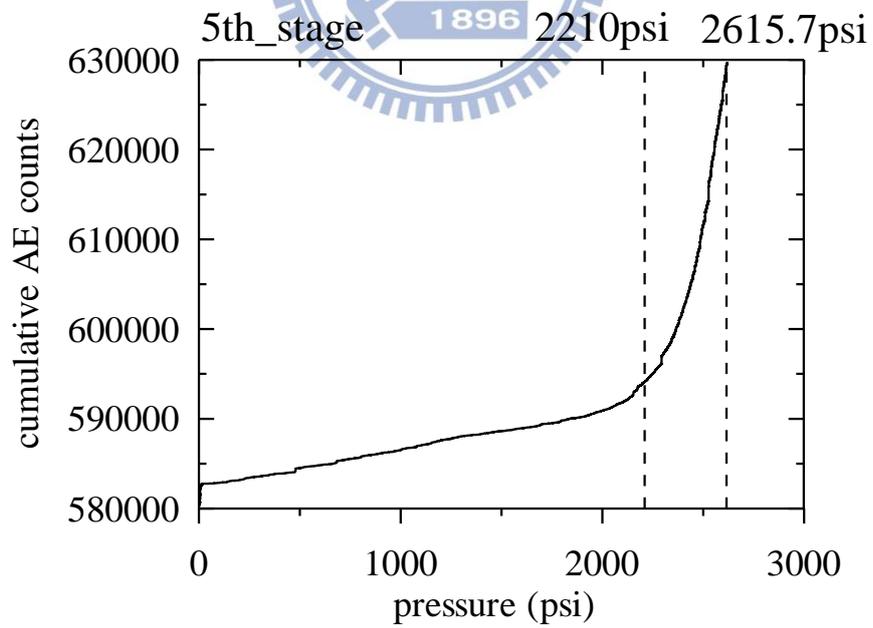


圖 3.24 局部放大 AE-FRP-13 第五次加壓累計振盪計數曲線

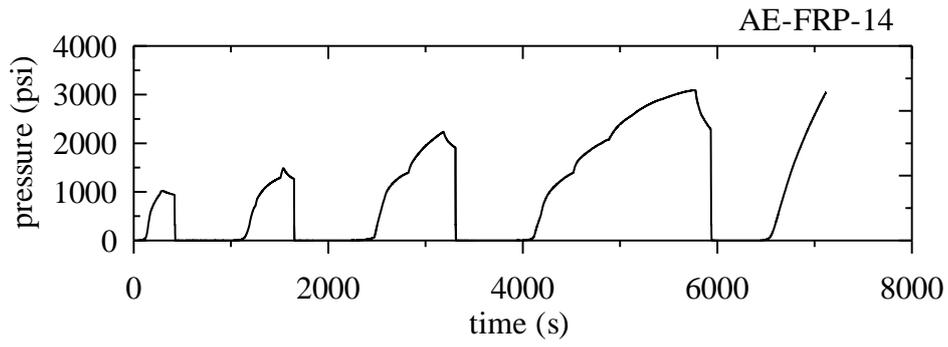


圖 3.25 AE-FRP-14 負載歷時曲線

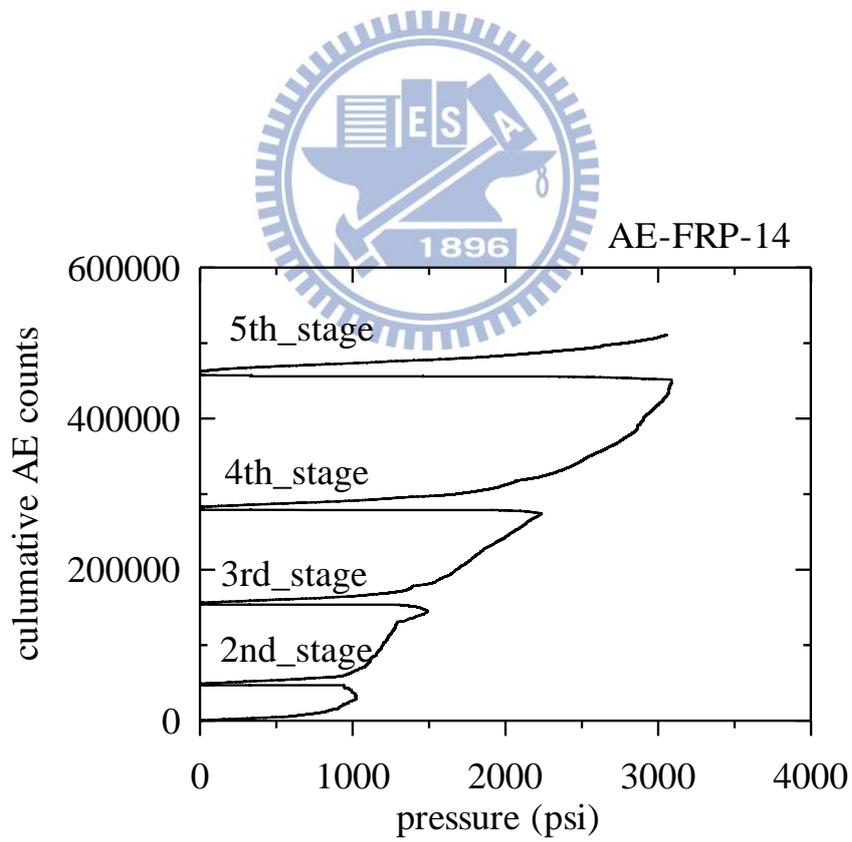


圖 3.26 AE-FRP-14 累計振盪計數曲線

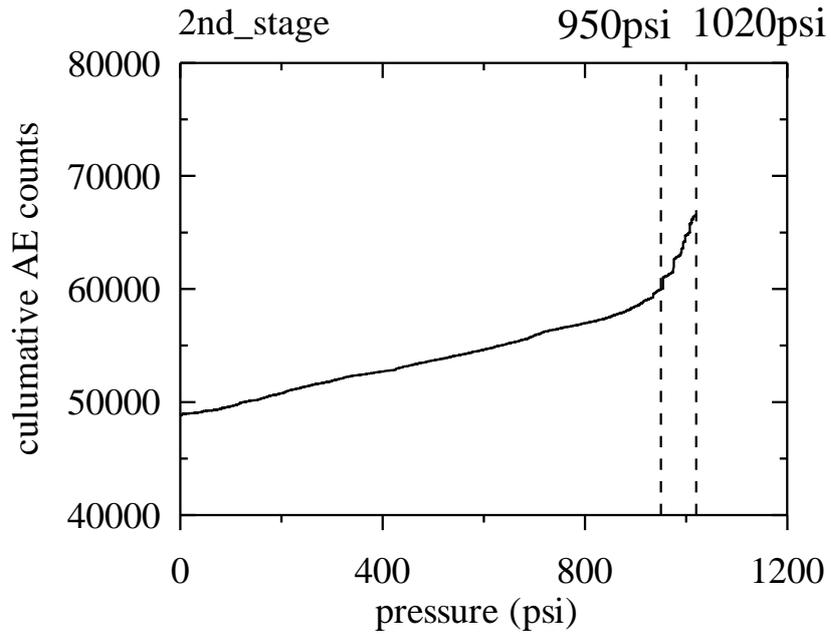


圖 3.27 局部放大 AE-FRP-14 第二次加壓累計振盪計數曲線

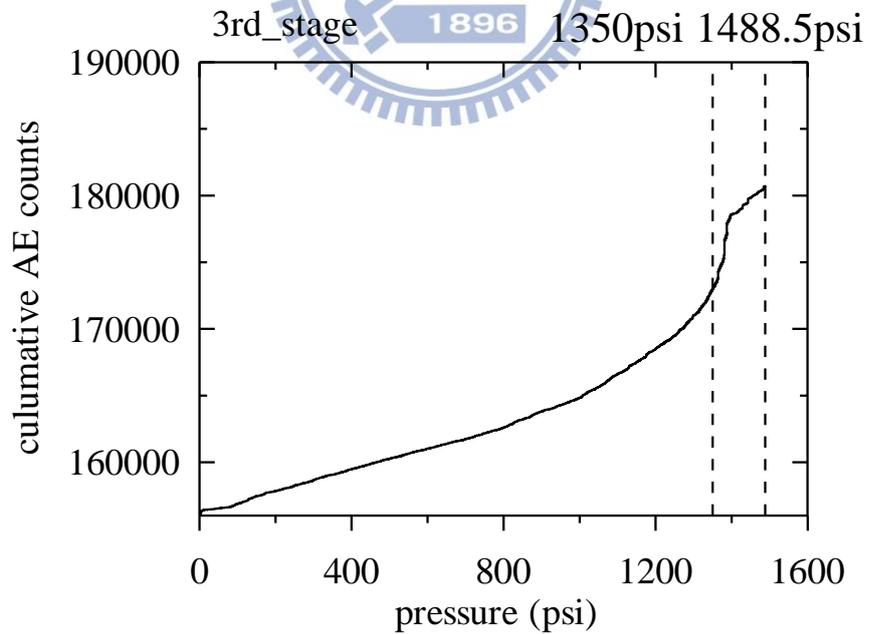


圖 3.28 局部放大 AE-FRP-14 第三次加壓累計振盪計數曲線

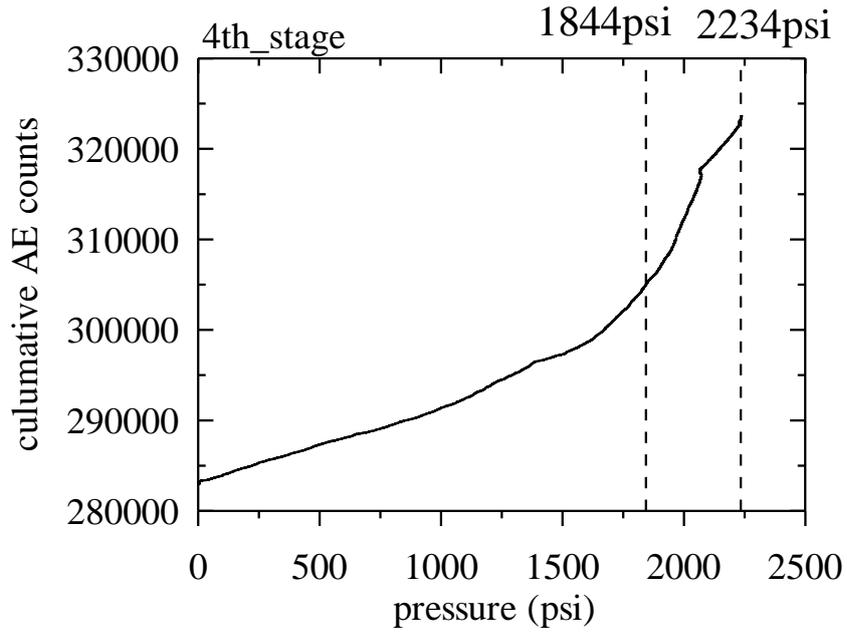


圖 3.29 局部放大 AE-FRP-14 第四次加壓累計振盪計數曲線

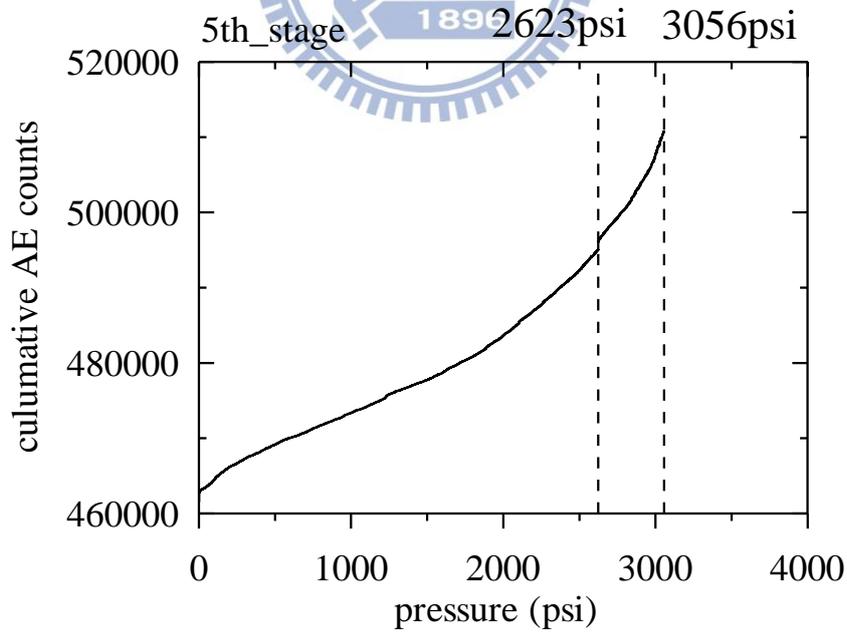
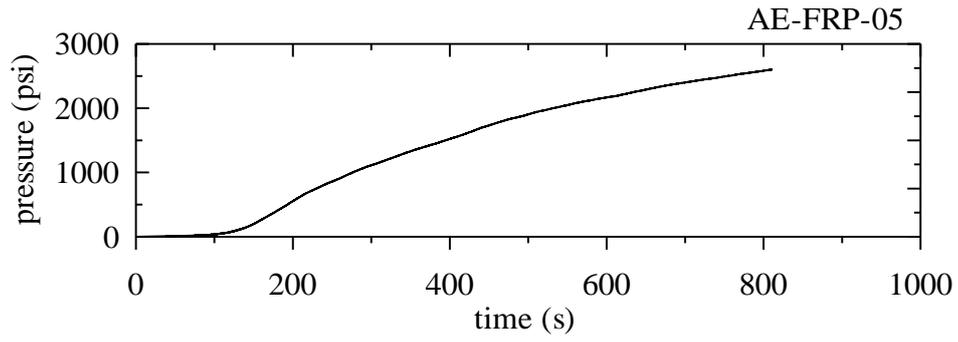
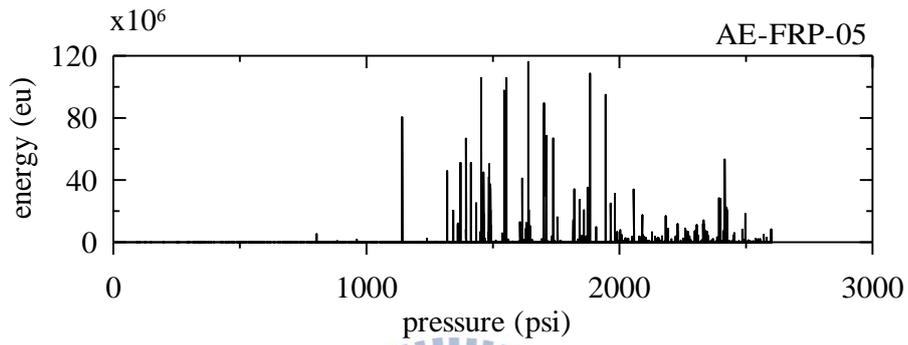


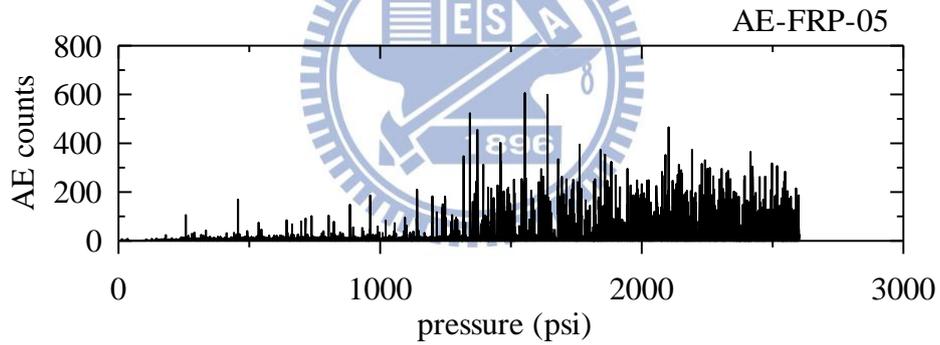
圖 3.30 局部放大 AE-FRP-14 第五次加壓累計振盪計數曲線



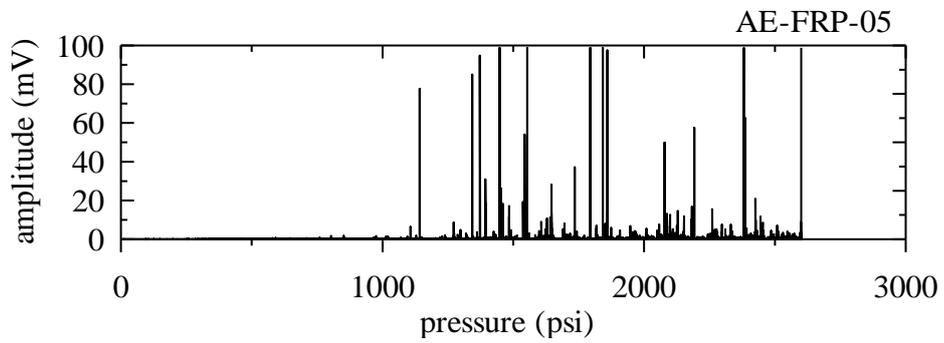
(a)



(b)

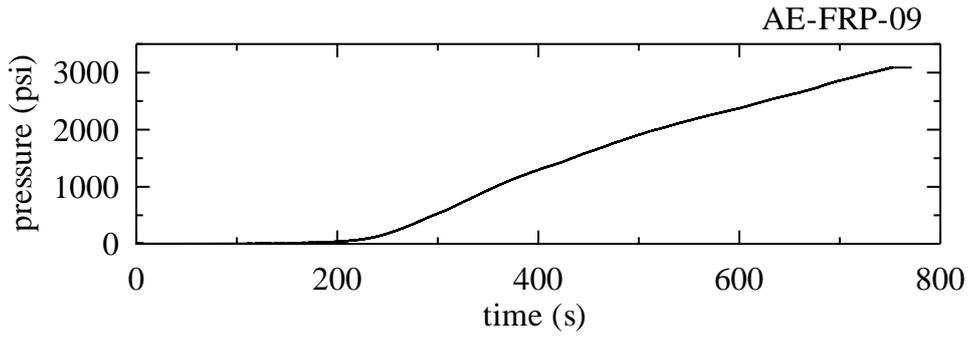


(c)

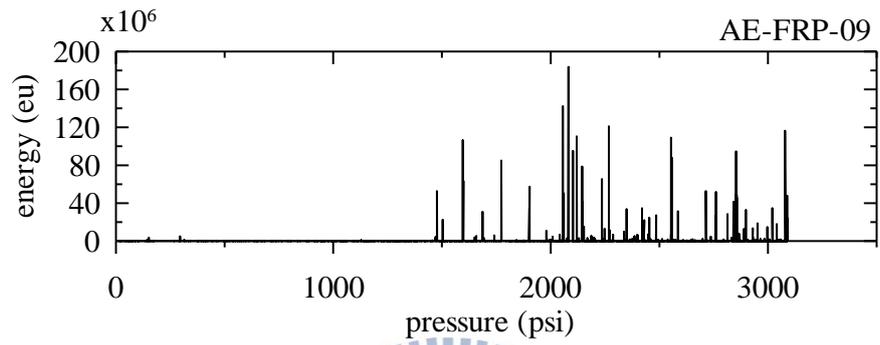


(d)

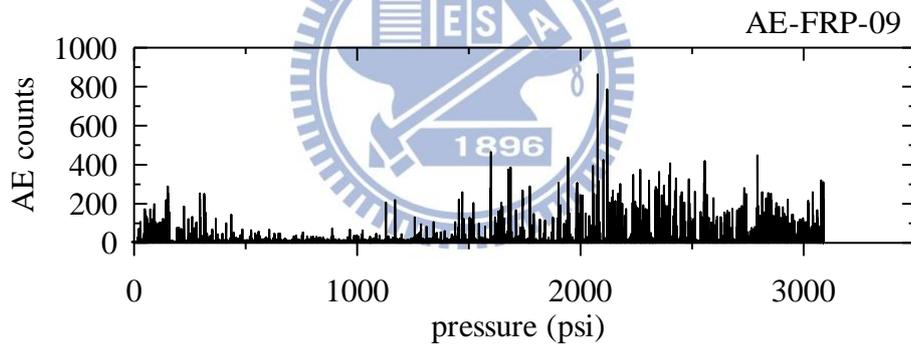
圖 3.31 AE-FRP-05 壓力容器的(a)負載歷時曲線、(b)能量、(c)振盪計數、(d)振幅分佈



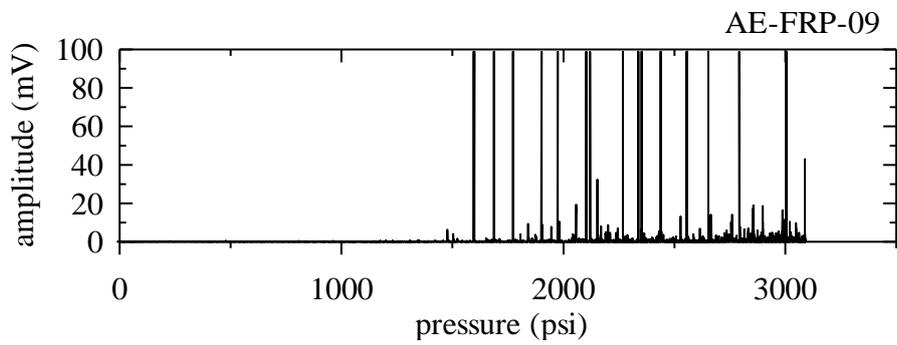
(a)



(b)

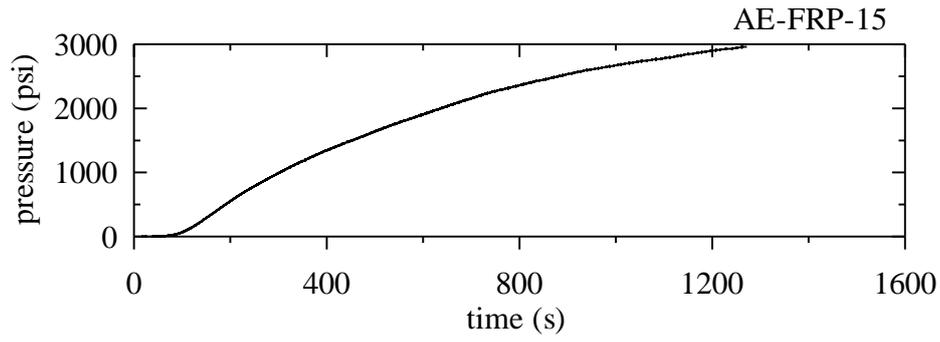


(c)

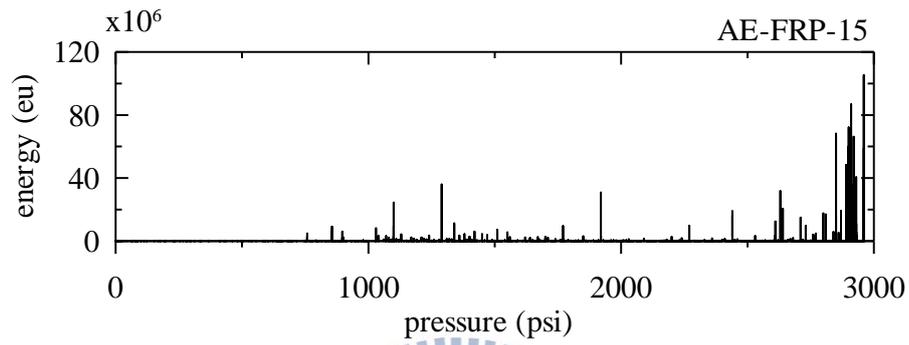


(d)

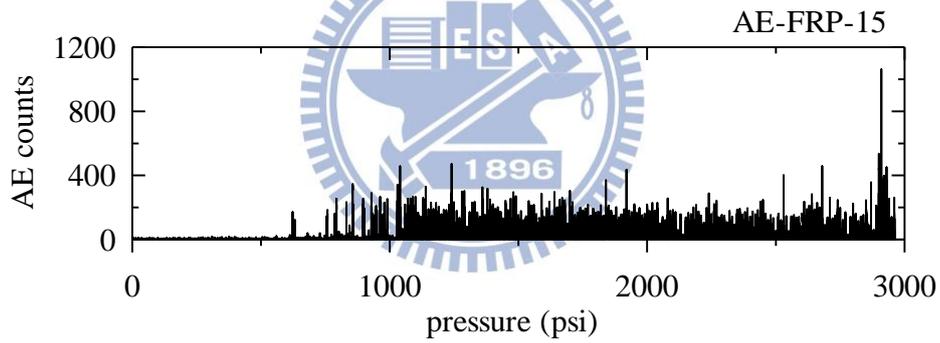
圖 3.32 AE-FRP-09 壓力容器的(a)負載歷時曲線、(b)能量、(c)振盪計數、(d)振幅分佈



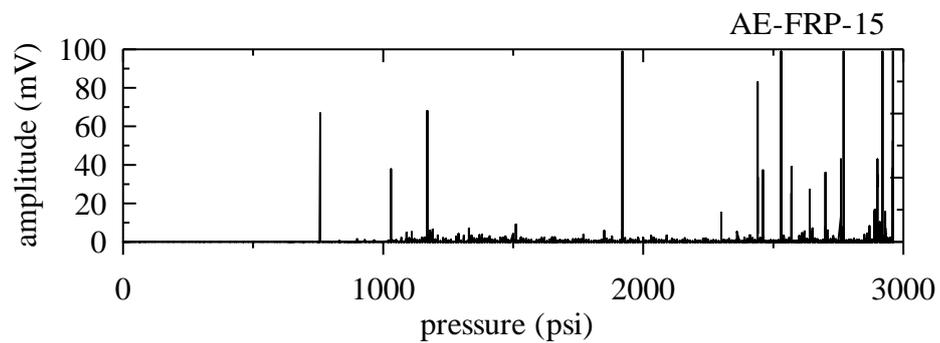
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3.33 AE-FRP-15 壓力容器的(a)負載歷時曲線、(b)能量、(c)振盪計數、(d)振幅分佈

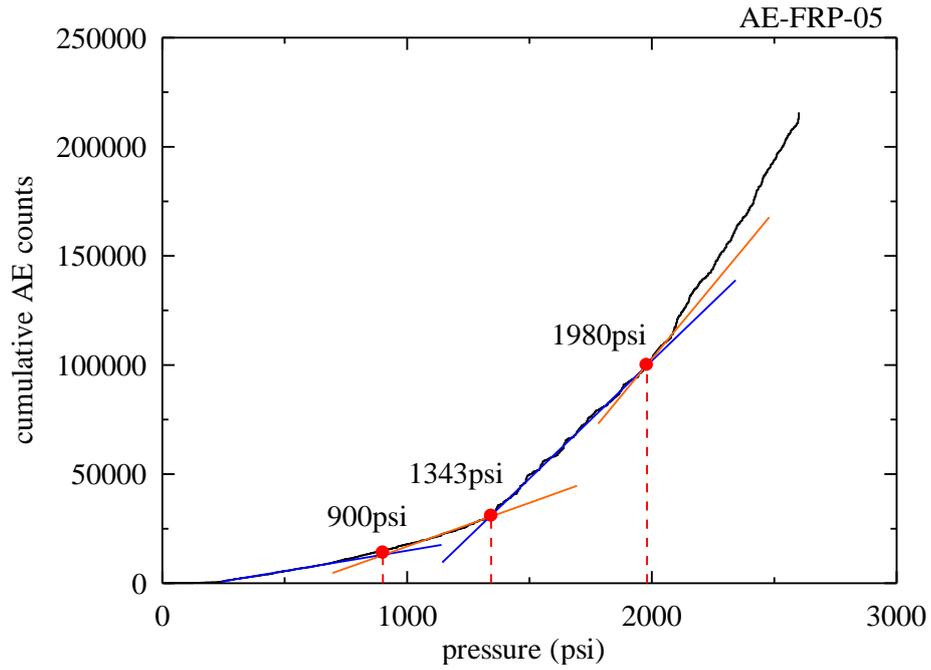


圖 3.34 AE-FRP-05 累計振盪計數曲線

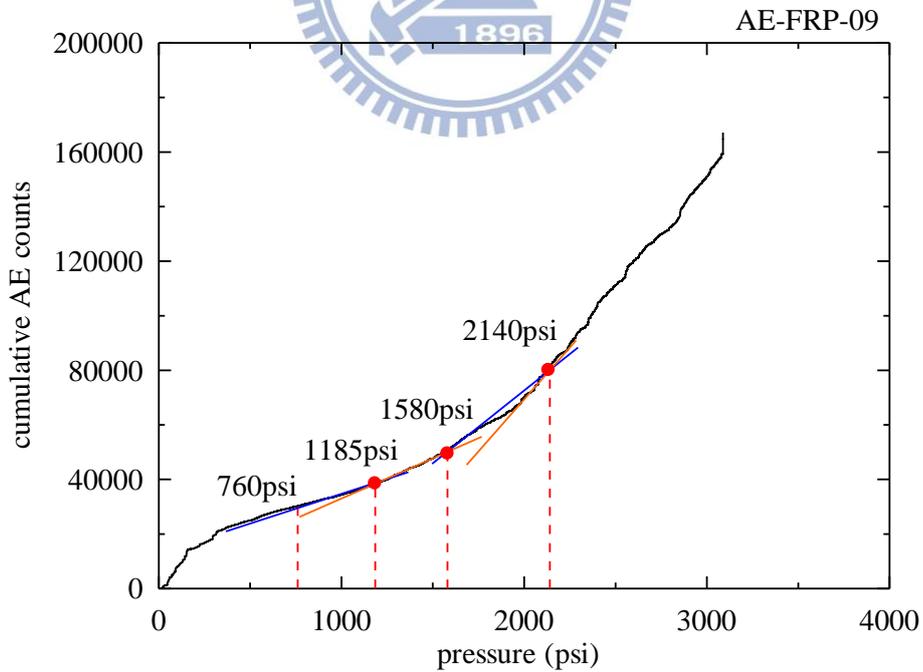


圖 3.35 AE-FRP-09 累計振盪計數曲線

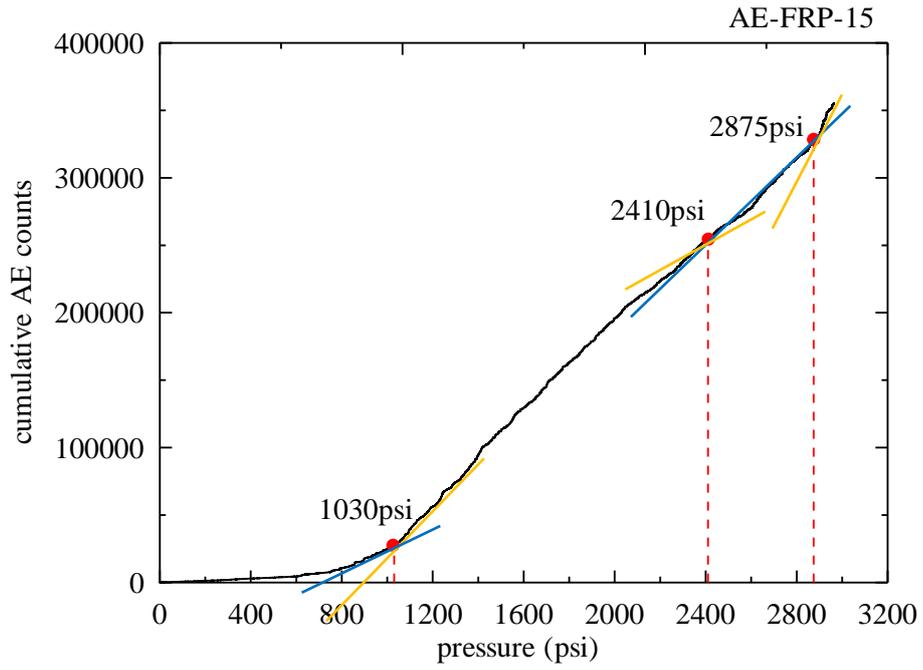


圖 3.36 AE-FRP-15 累計振盪計數曲線

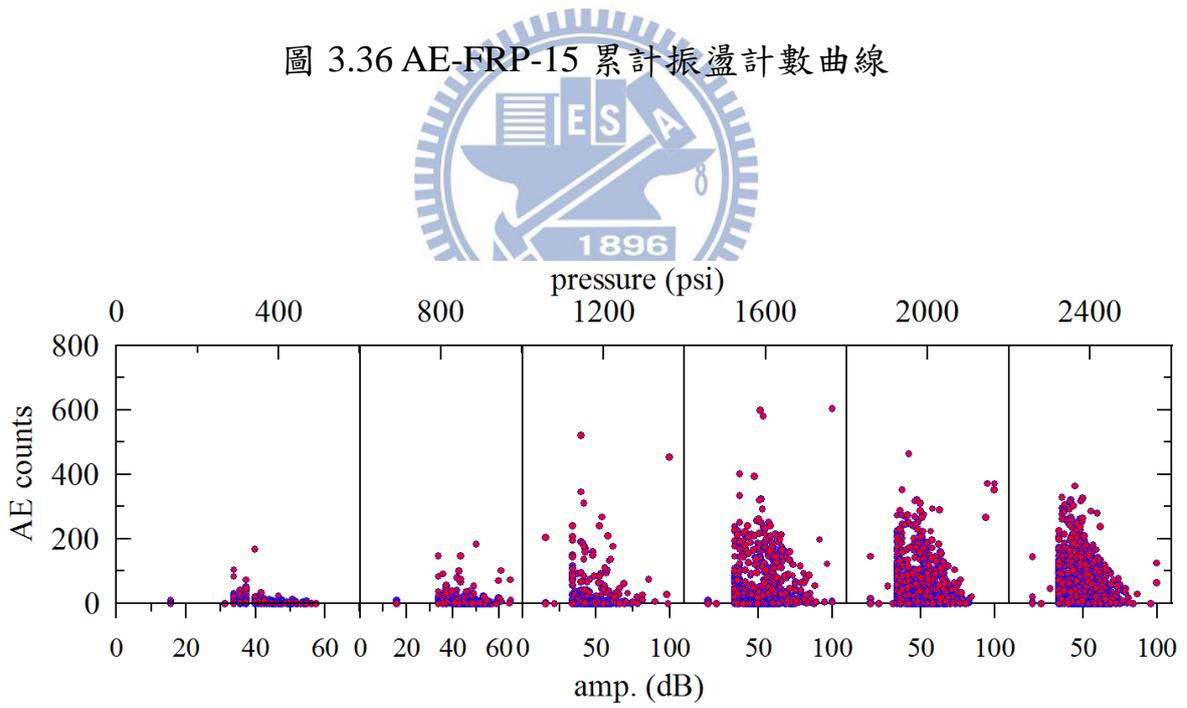


圖 3.37 AE-FRP-05 在不同壓力區間下的振盪計數與振幅分佈

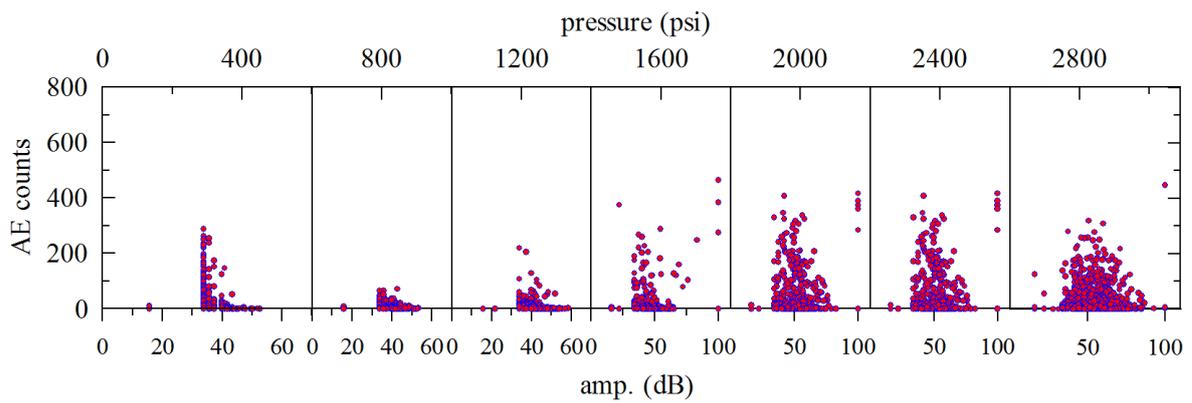


圖 3.38 AE-FRP-09 在不同壓力區間下的振盪計數與振幅分佈

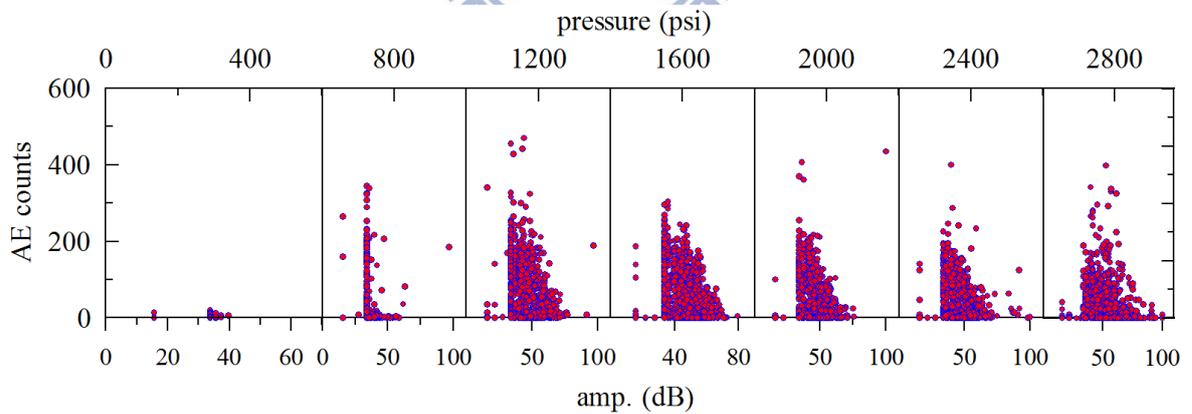


圖 3.39 AE-FRP-15 在不同壓力區間下的振盪計數與振幅分佈



圖 3.40 AE-FRP-12 爆破後照片

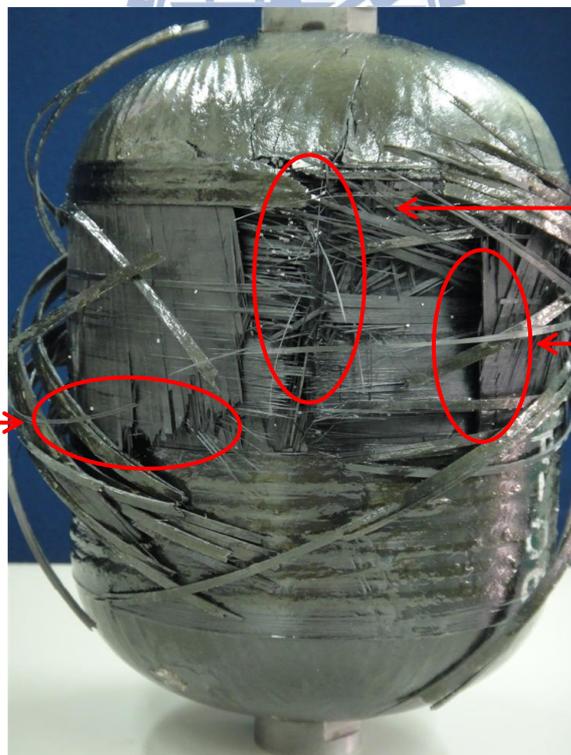


圖 3.41 AE-FRP-14 爆破後照片



90°方向斷裂

圖 3.42 AE-FRP-15 爆破後照片



90°方向斷裂

-15.92°方向斷裂

15.92°方向斷裂

圖 3.43 AE-FRP-06 爆破後照片



圖 3.44 AE-FRP-09 爆破後照片

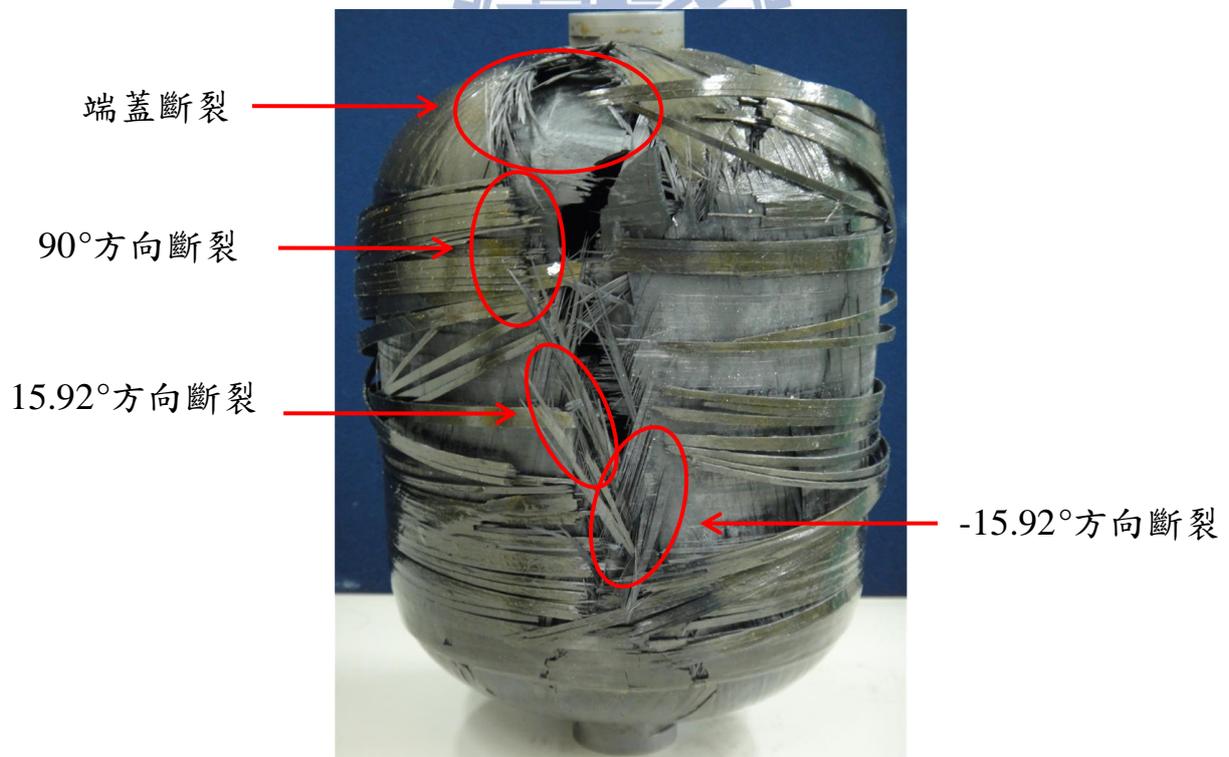


圖 3.45 AE-FRP-11 爆破後照片

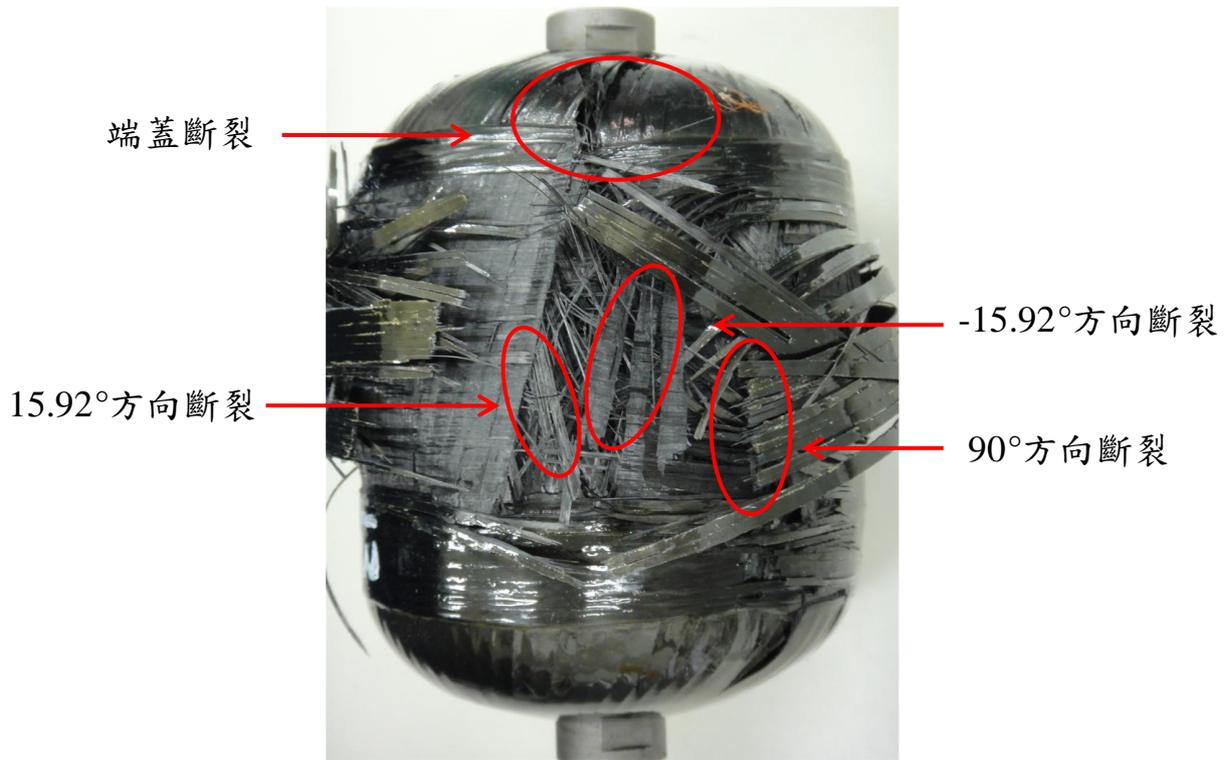


圖 3.46 AE-FRP-13 爆破後照片



圖 3.47 AE-FRP-05 爆破後照片

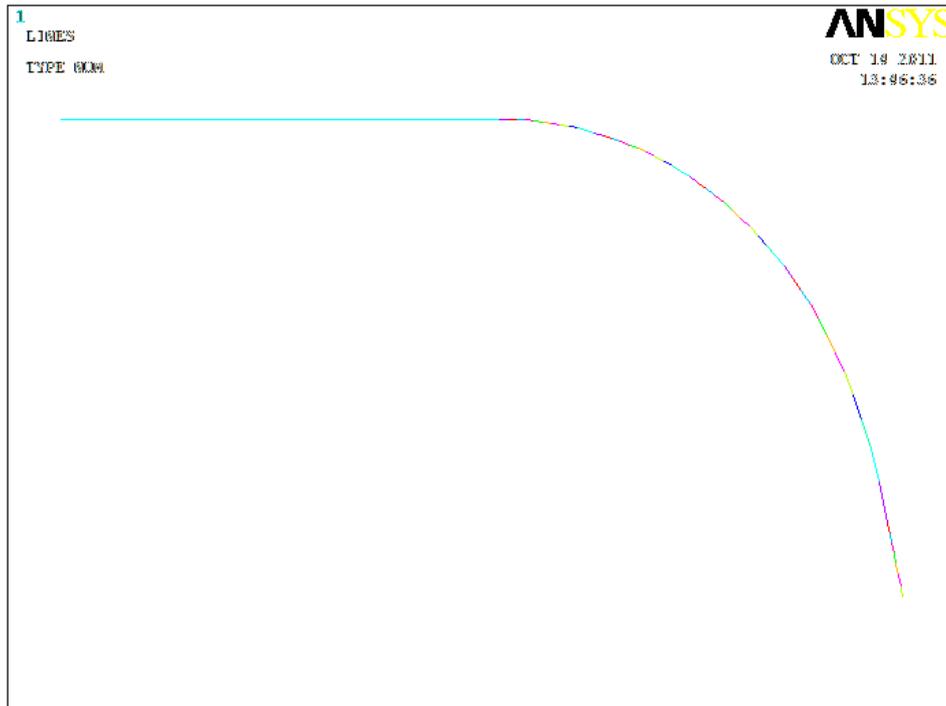


圖 4.1 直筒段與端蓋處線段

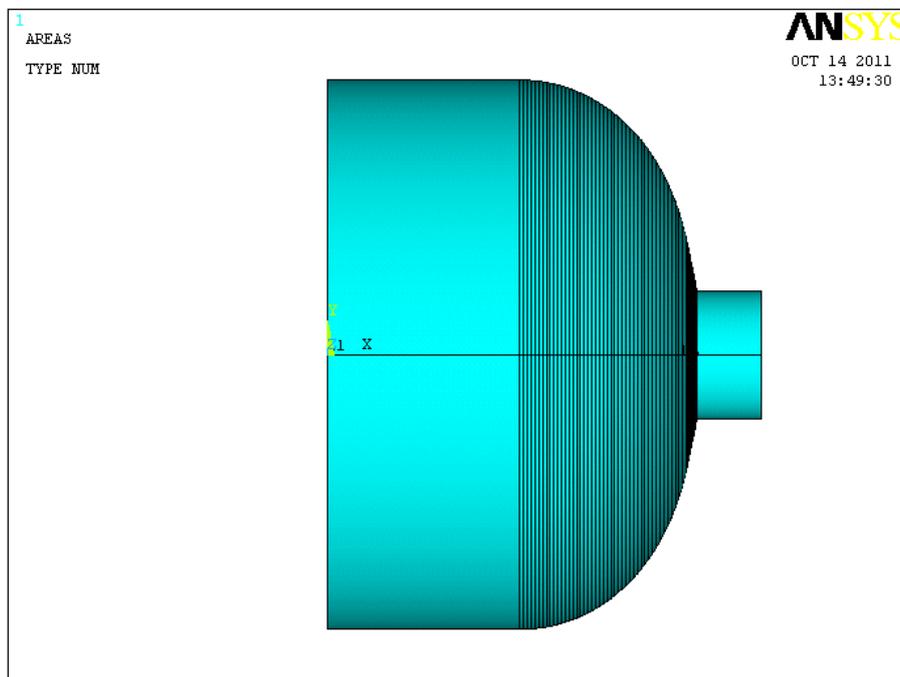


圖 4.2 將圖 4.1 之線段繞 x 軸旋轉所得壓力容器外殼

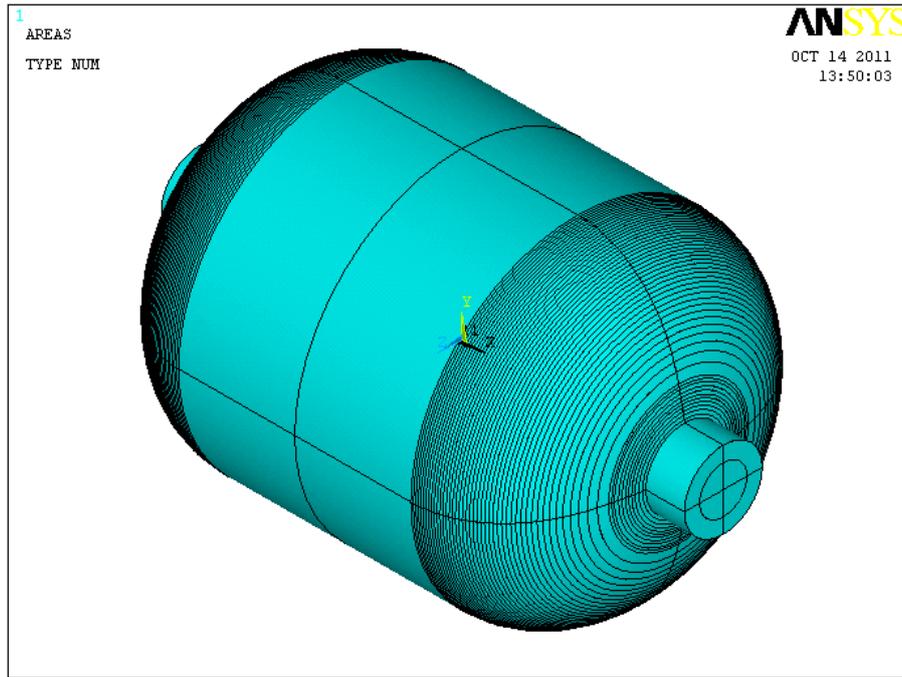


圖 4.3 對 y-z 平面鏡射後所得完整實體模型

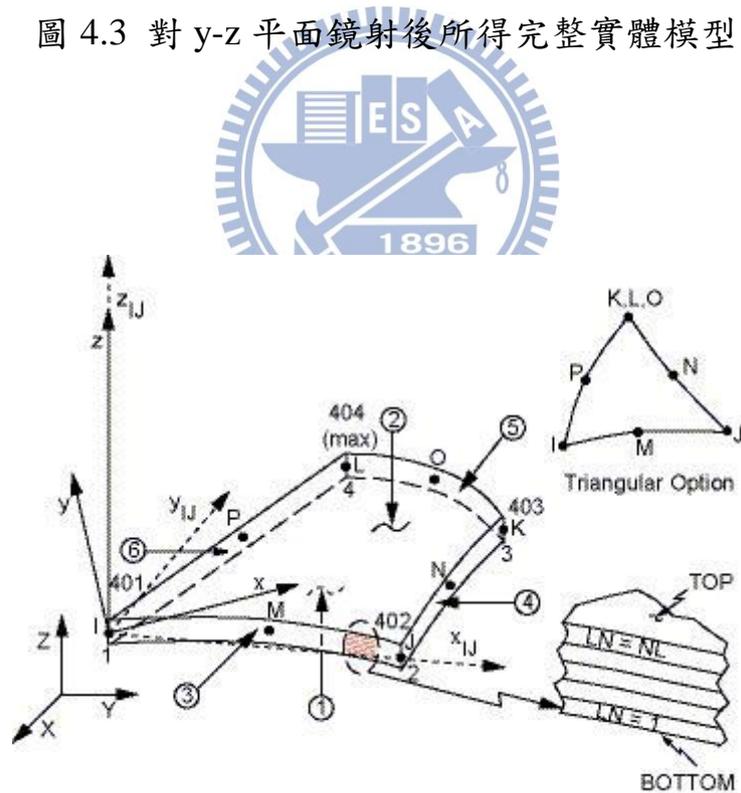


圖 4.4 元素 Shell91[17]

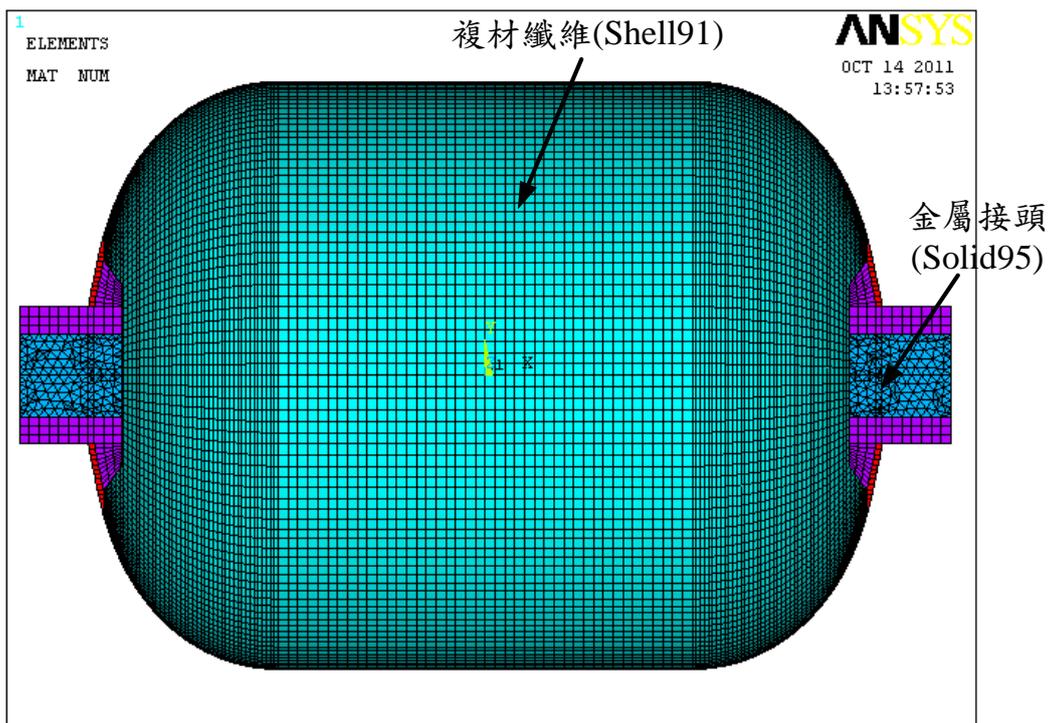


圖 4.5 網格後有限元素模型剖面圖

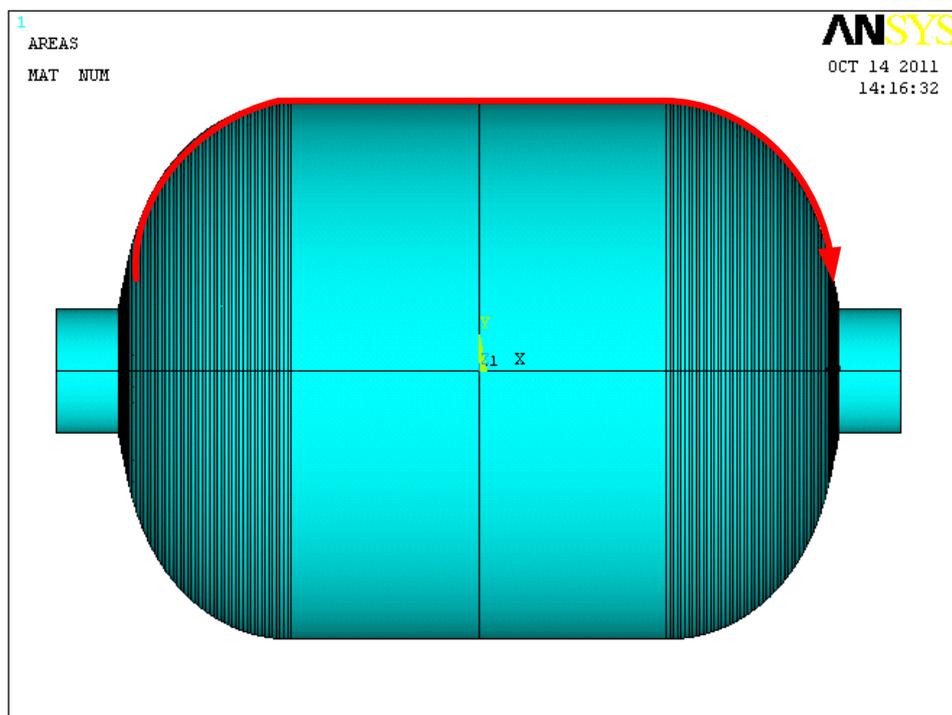


圖 4.6 擷取紅色線段上的節點應力值

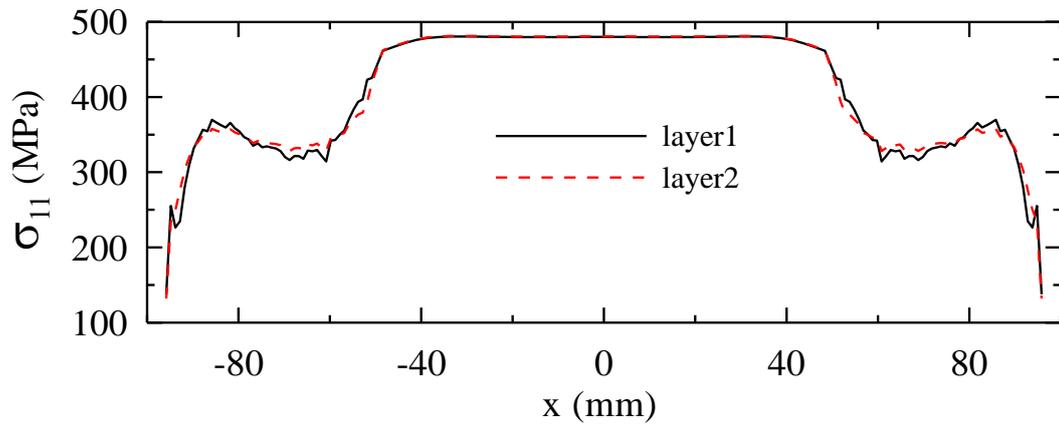


圖 4.7 在壓力 1,026psi 作用下，1-2 層  $\sigma_{11}$  分佈

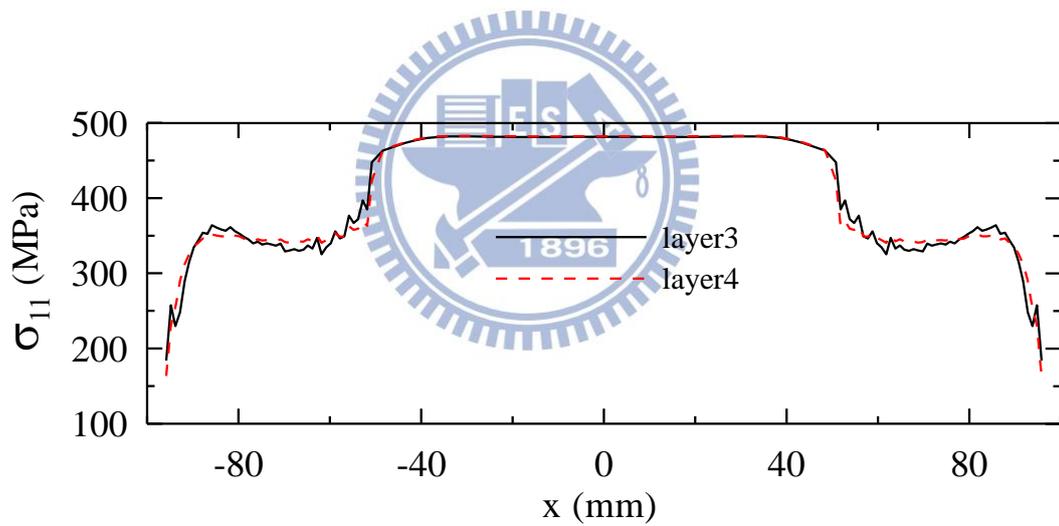


圖 4.8 在壓力 1,026psi 作用下，3-4 層  $\sigma_{11}$  分佈

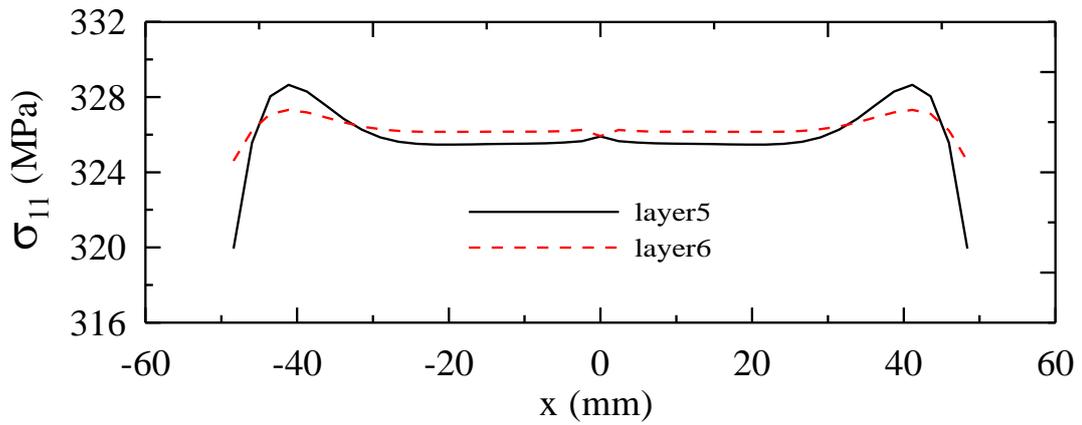


圖 4.9 在壓力 1,026psi 作用下，5-6 層  $\sigma_{11}$  分佈

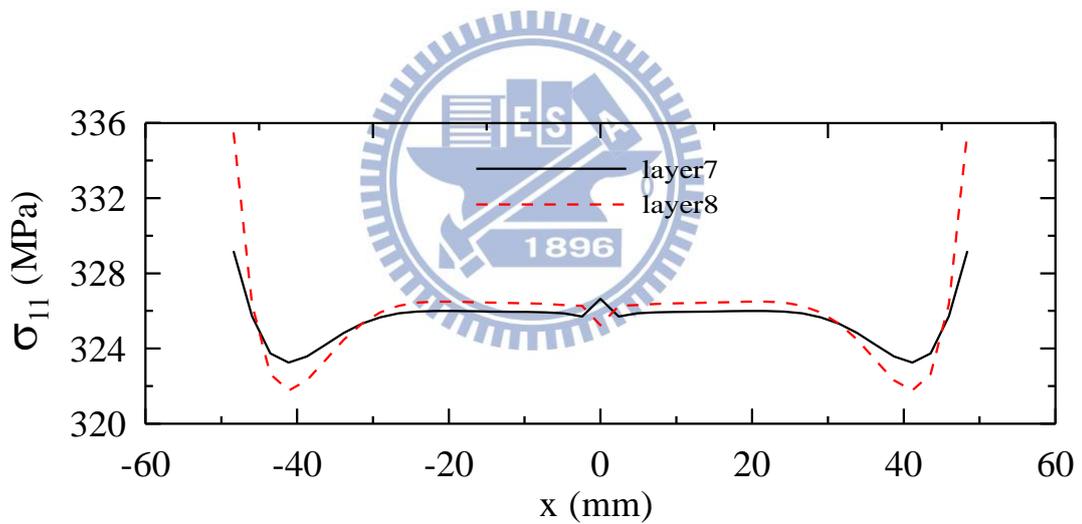


圖 4.10 在壓力 1,026psi 作用下，7-8 層  $\sigma_{11}$  分佈

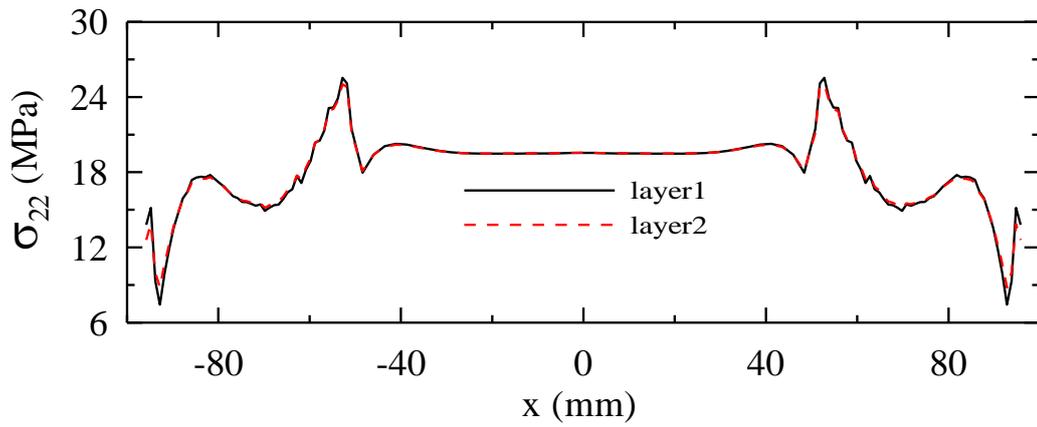


圖 4.11 在壓力 1,026psi 作用下，1-2 層  $\sigma_{22}$  分佈

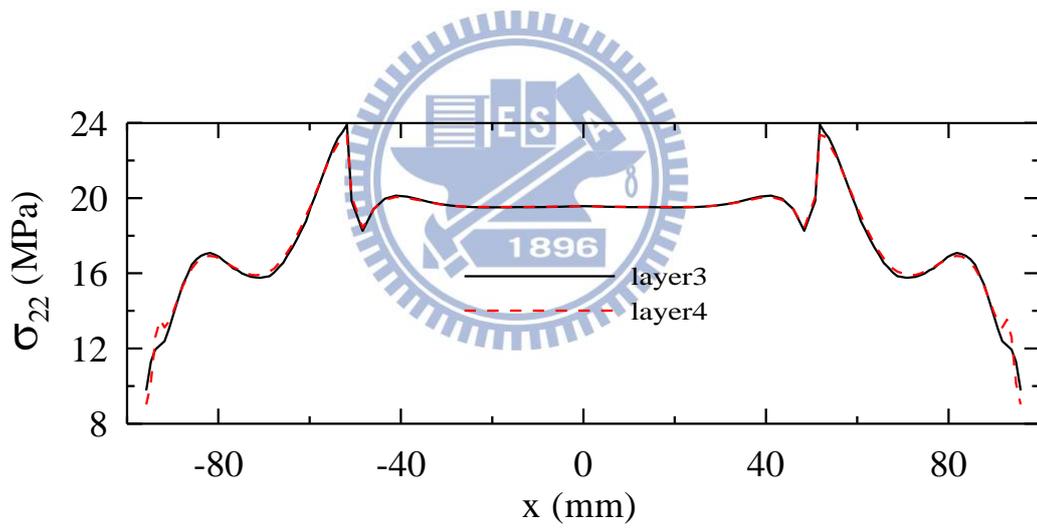


圖 4.12 在壓力 1,026psi 作用下，3-4 層  $\sigma_{22}$  分佈

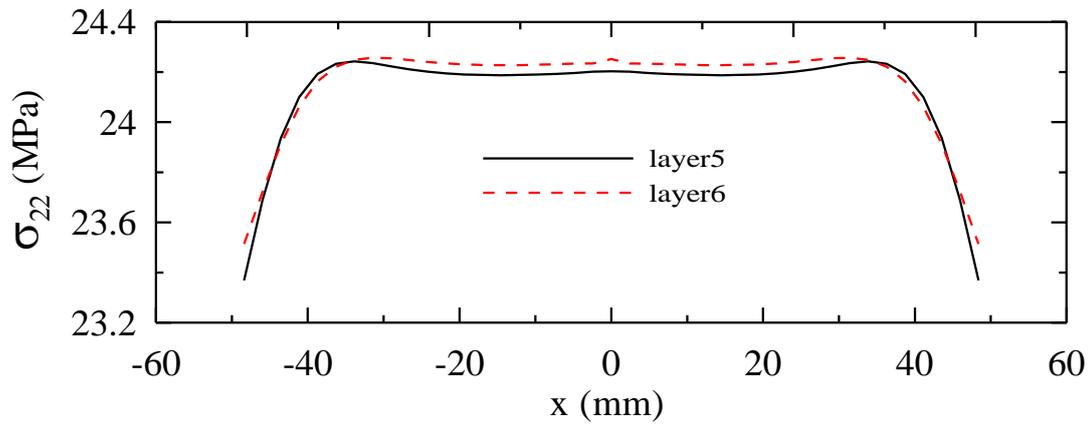


圖 4.13 在壓力 1,026psi 作用下，5-6 層  $\sigma_{22}$  分佈

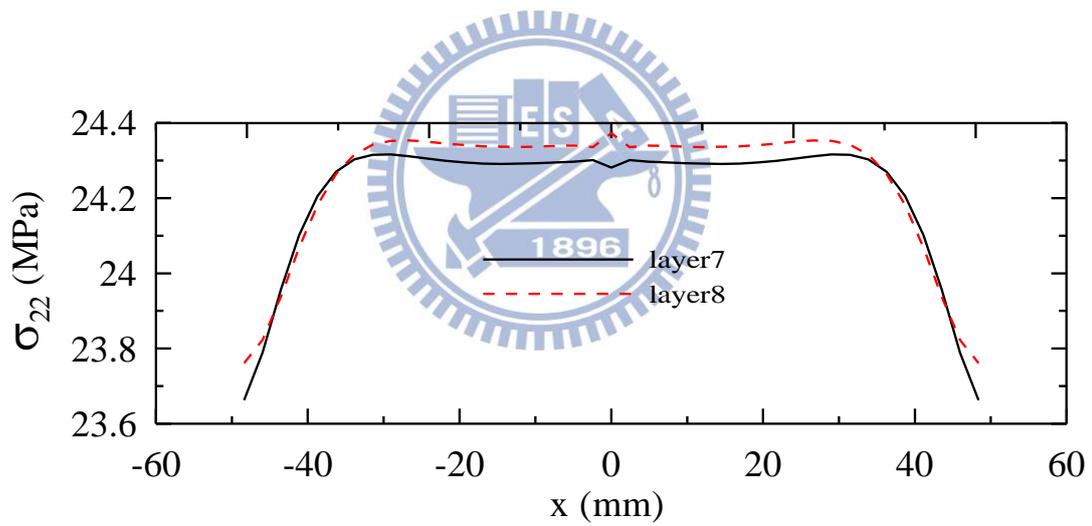


圖 4.14 在壓力 1,026psi 作用下，7-8 層  $\sigma_{22}$  分佈

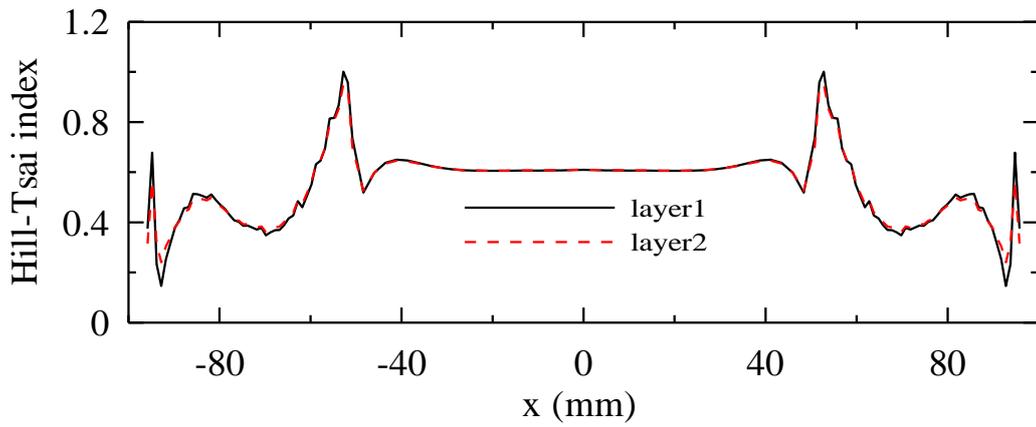


圖 4.15 在壓力 1,026psi 作用下，1-2 層失效指數分佈

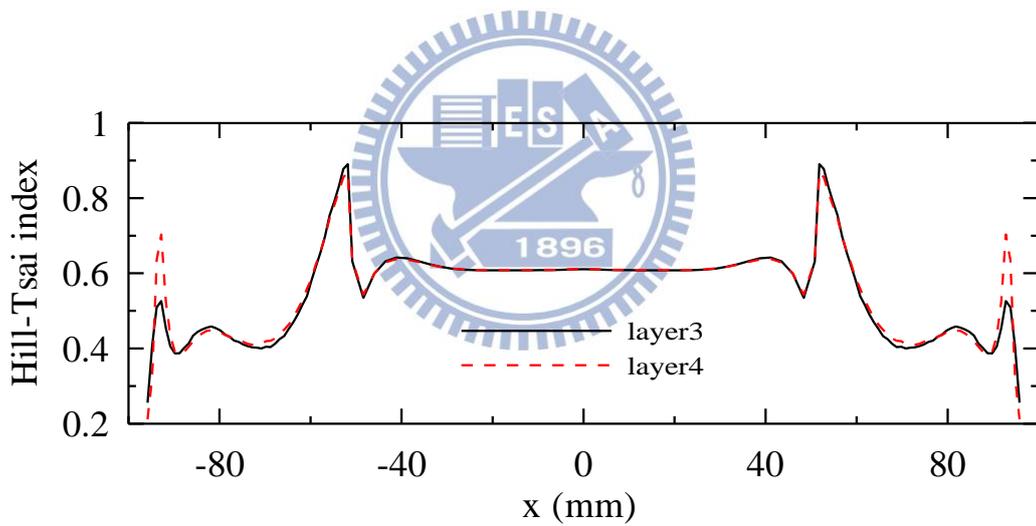


圖 4.16 在壓力 1,026psi 作用下，3-4 層失效指數分佈

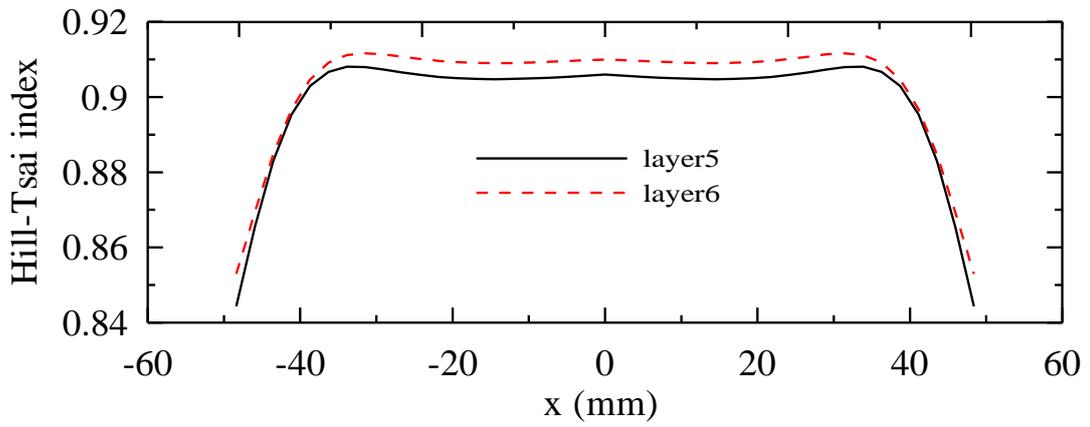


圖 4.17 在壓力 1,026psi 作用下，5-6 層失效指數分佈

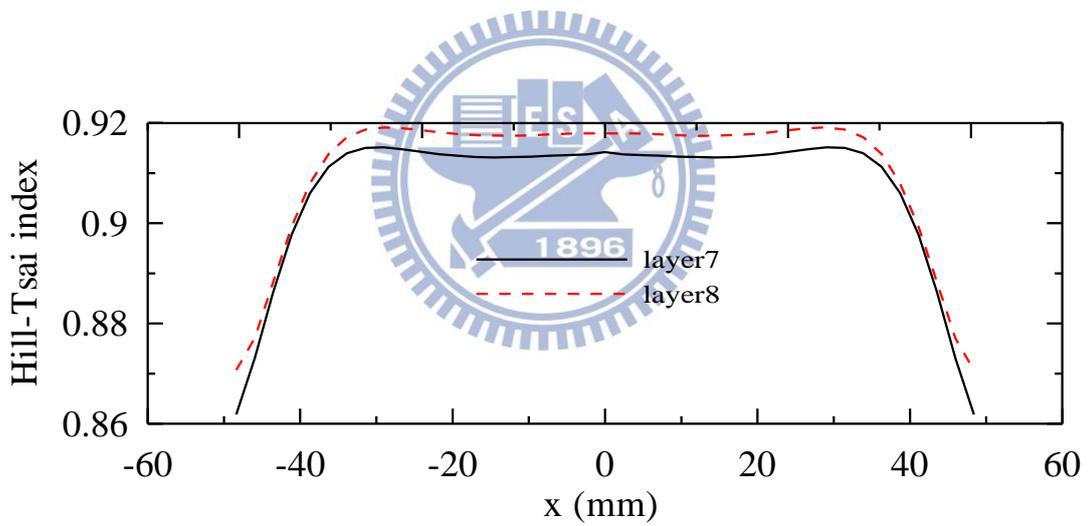
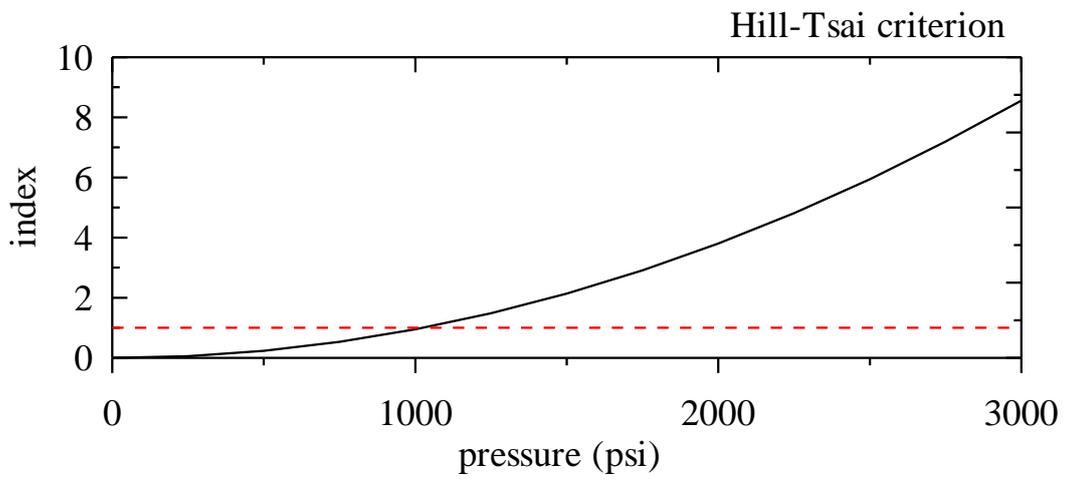
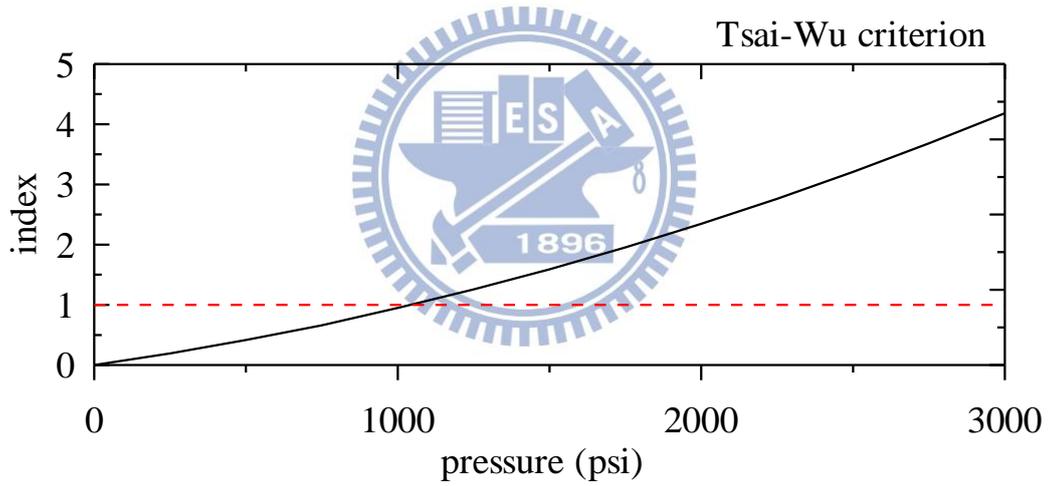


圖 4.18 在壓力 1,026psi 作用下，7-8 層失效指數分佈



(a)



(b)

圖 4.19 壓力容器在 $\pm 52.8\text{mm}$ 處，不同壓力之失效指數，(a) Hill-Tsai 破壞準則，(b) Tsai-Wu 破壞準則

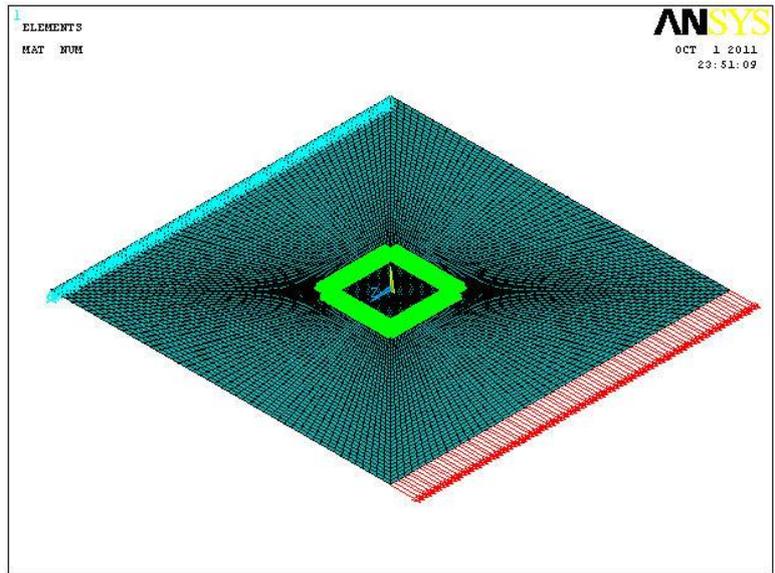
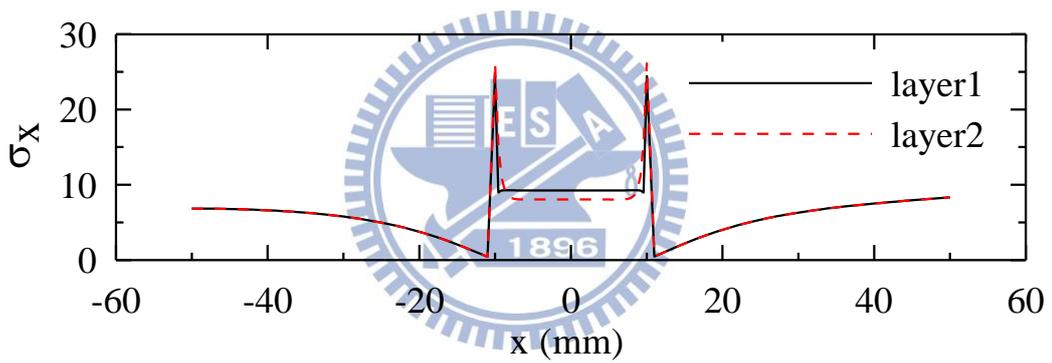
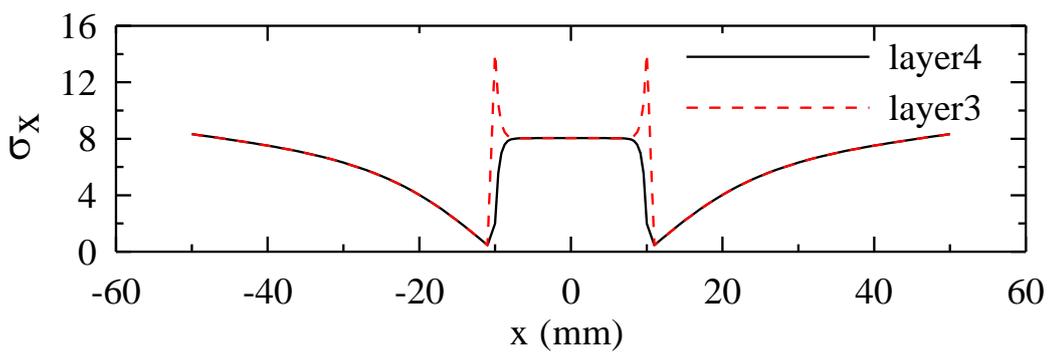


圖 4.20 平板有限元素及負載邊界



(a)



(b)

圖 4.21 (a) 平板第 1、2 層應力分佈，(b) 平板第 3、4 層應力分佈

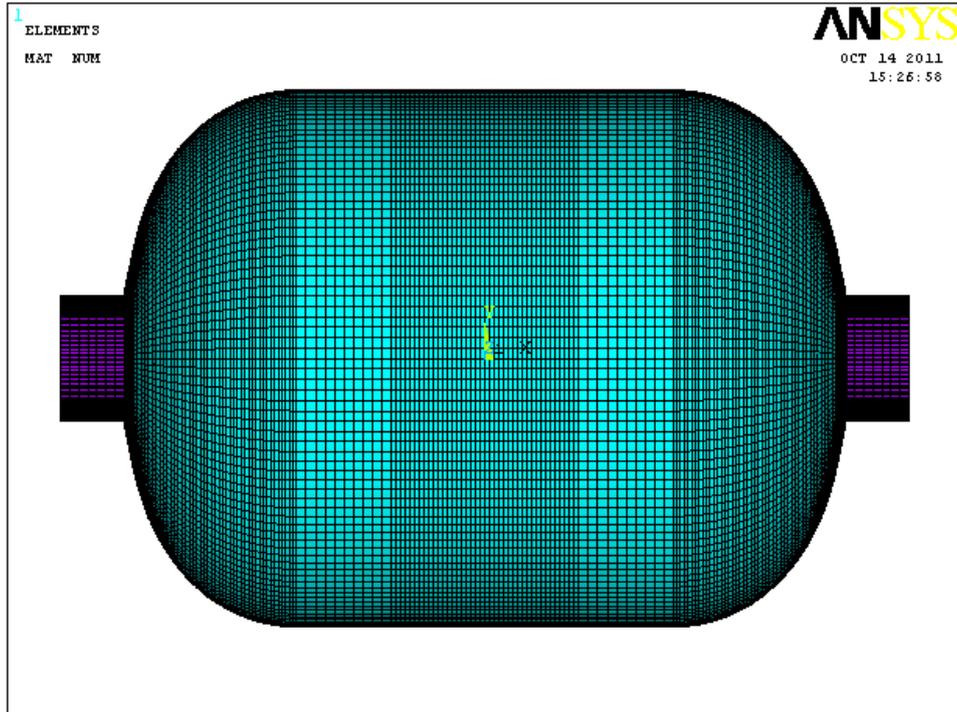


圖 4.22 第一類脫層網格加密有限元素模型

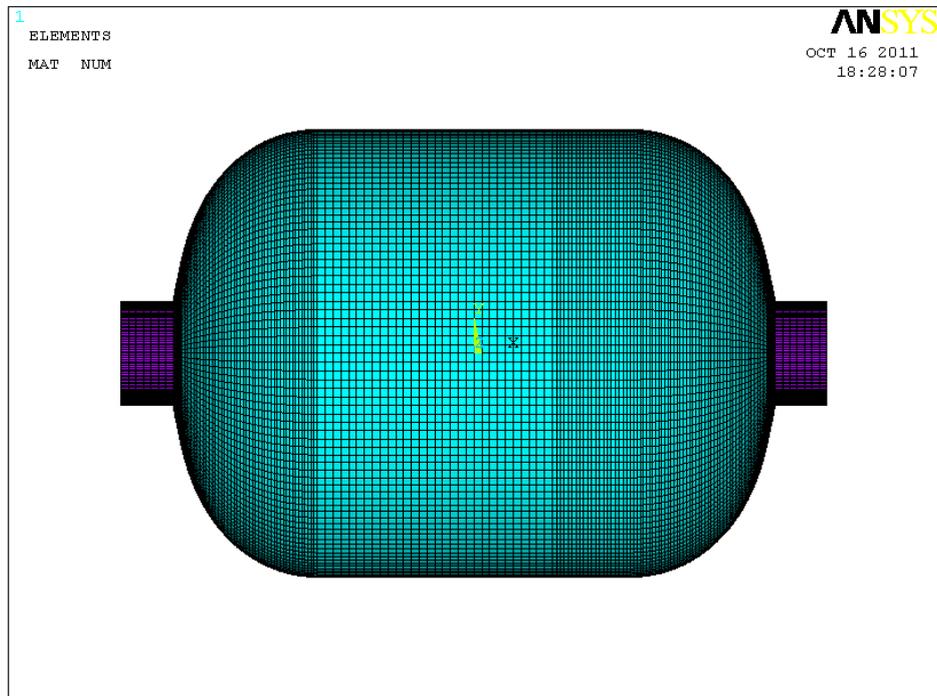
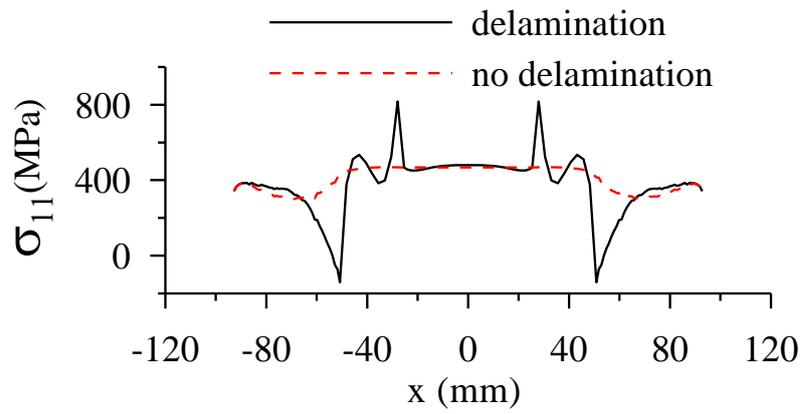
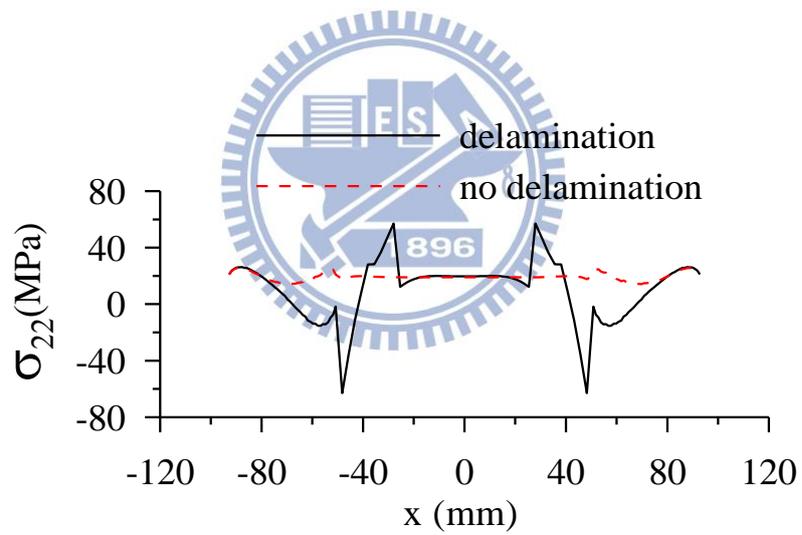


圖 4.23 第二類脫層網格加密有限元素模型

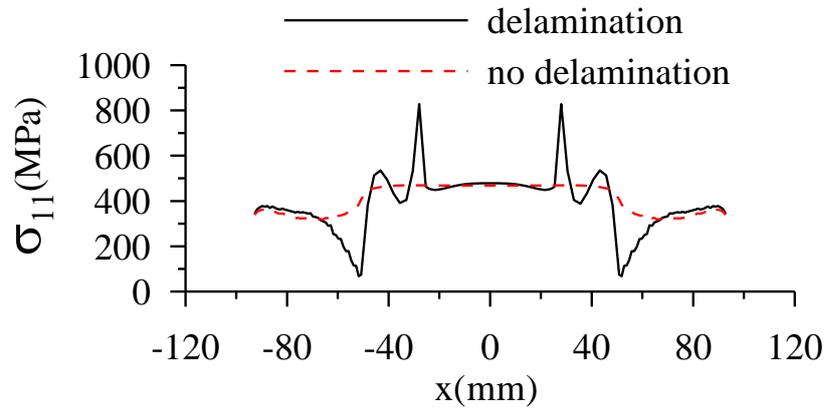


(a)

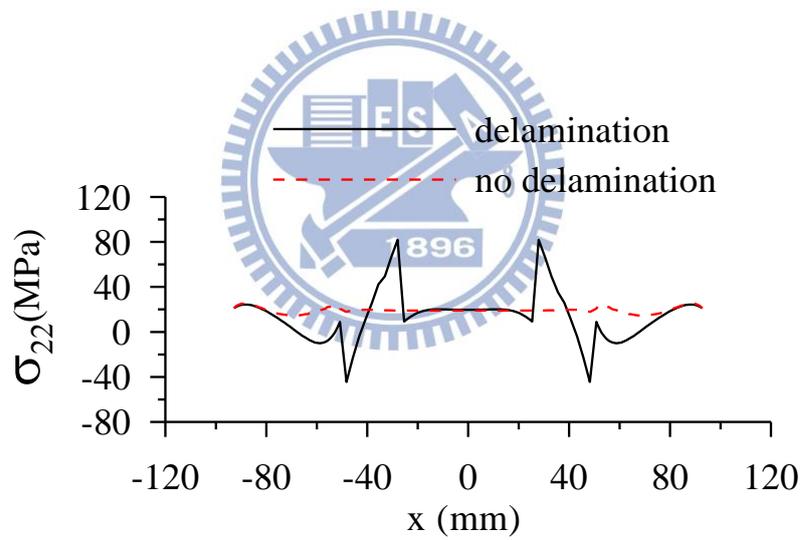


(b)

圖 4.24 第一類脫層於第 1 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

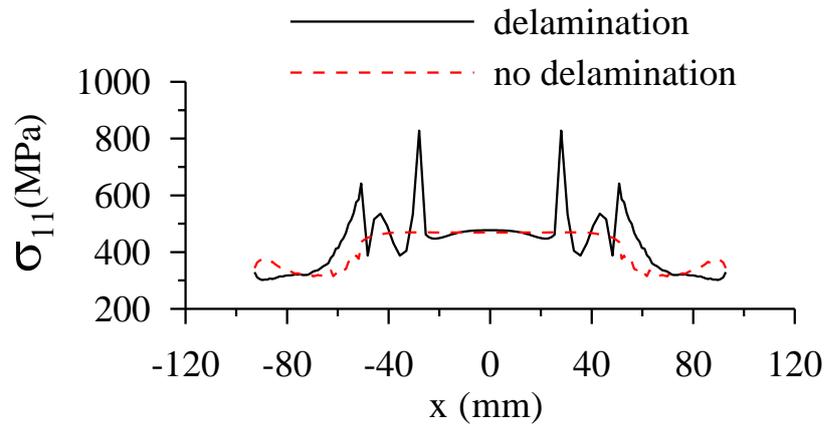


(a)

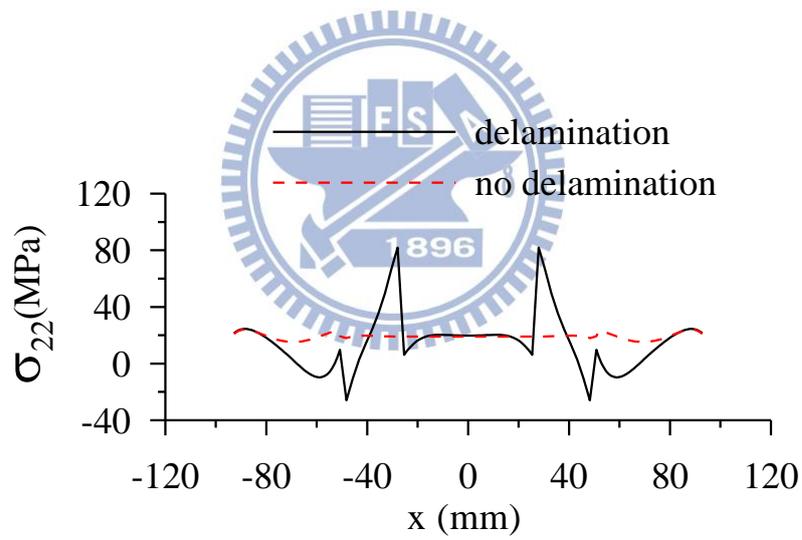


(b)

圖 4.25 第一類脫層於第 2 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

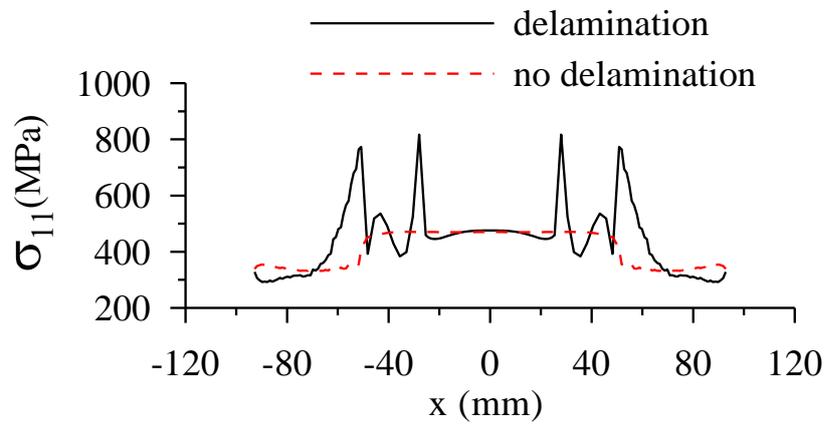


(a)

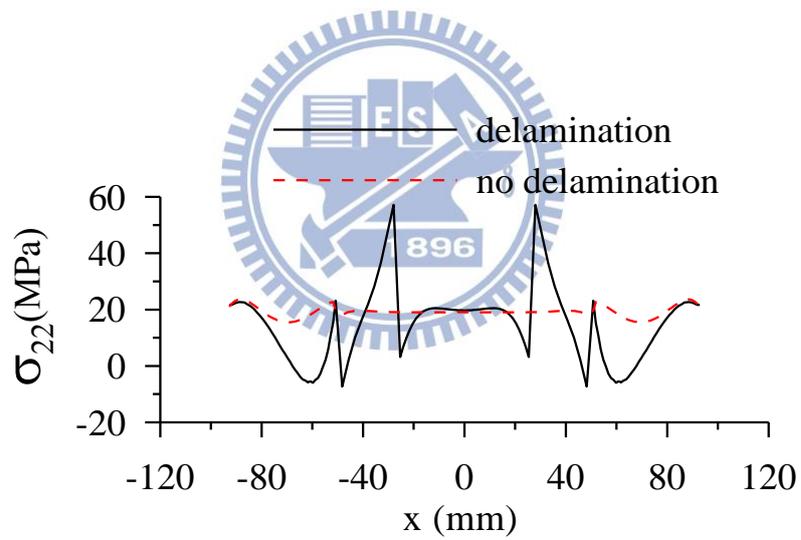


(b)

圖 4.26 第一類脫層於第 3 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

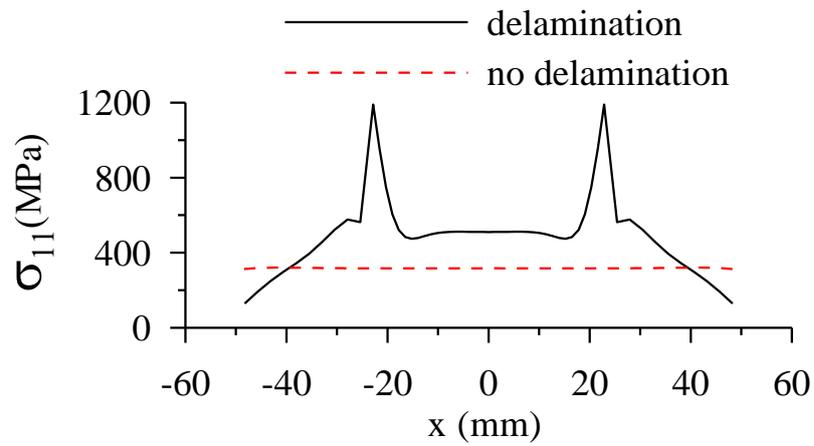


(a)

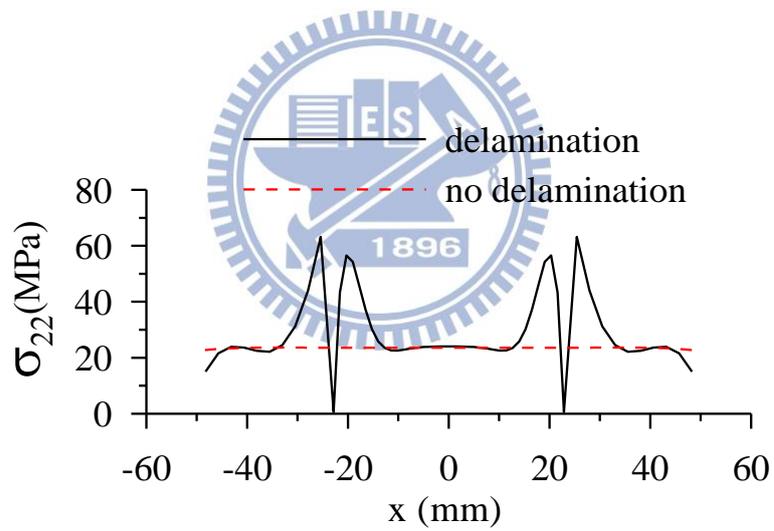


(b)

圖 4.27 第一類脫層於第 4 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

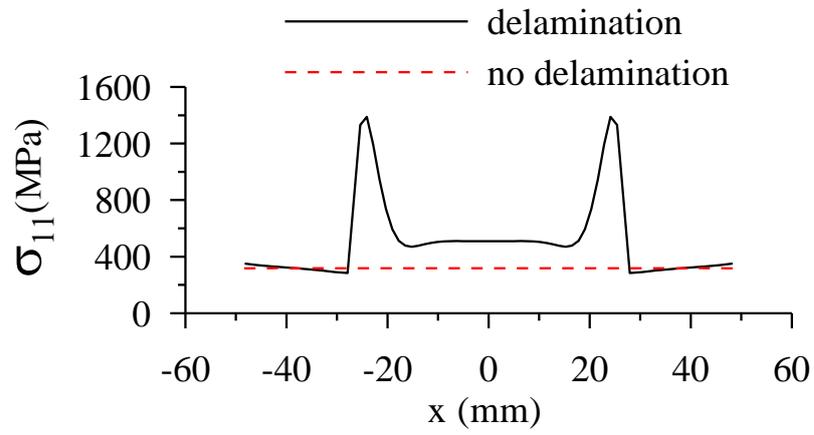


(a)

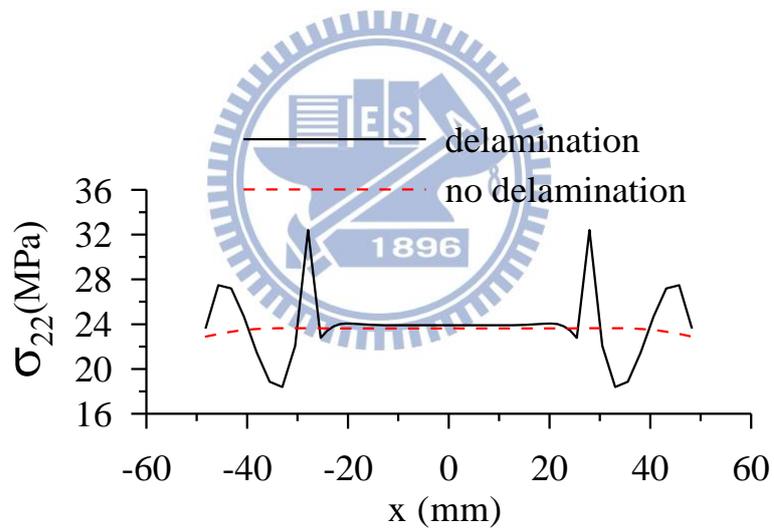


(b)

圖 4.28 第一類脫層於第 5 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

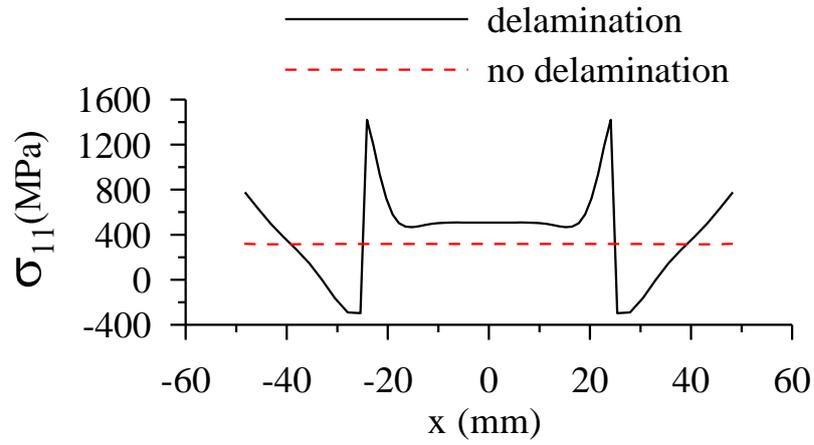


(a)

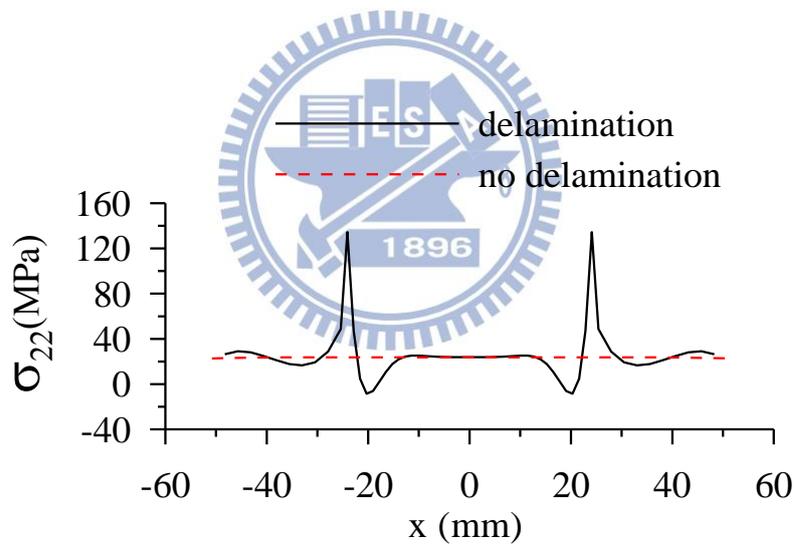


(b)

圖 4.29 第一類脫層於第 6 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

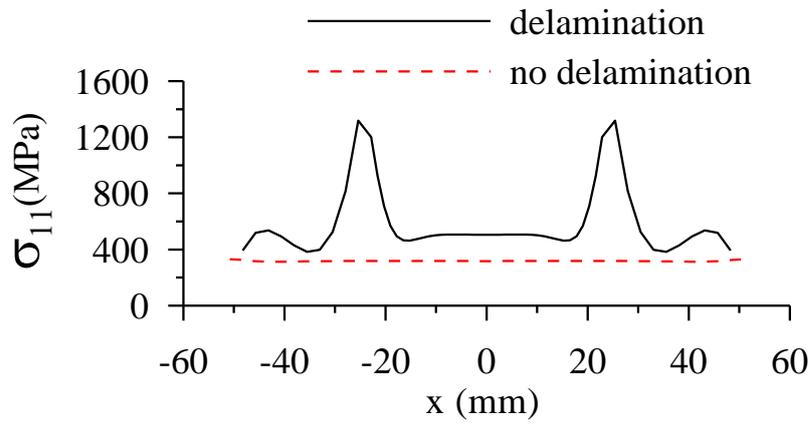


(a)

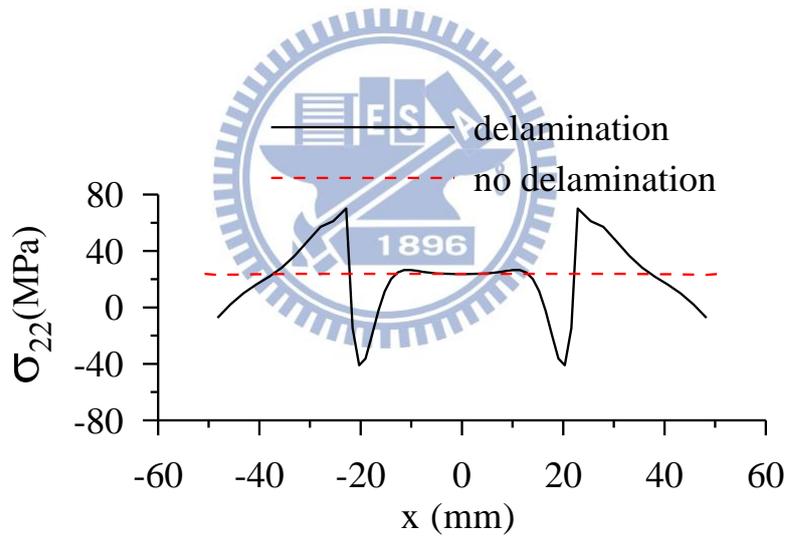


(b)

圖 4.30 第一類脫層於第 7 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

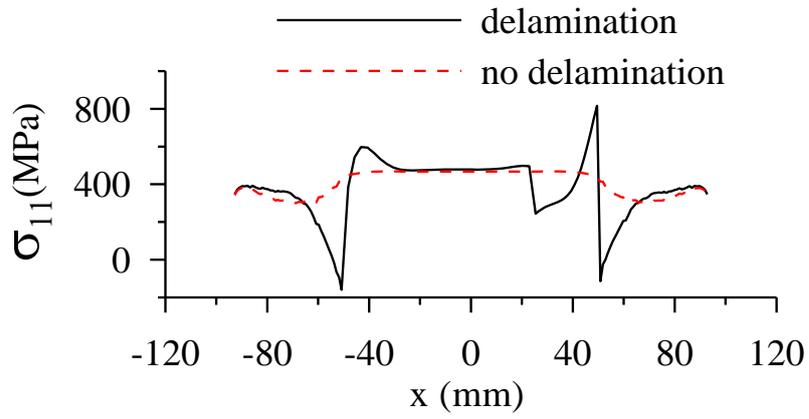


(a)

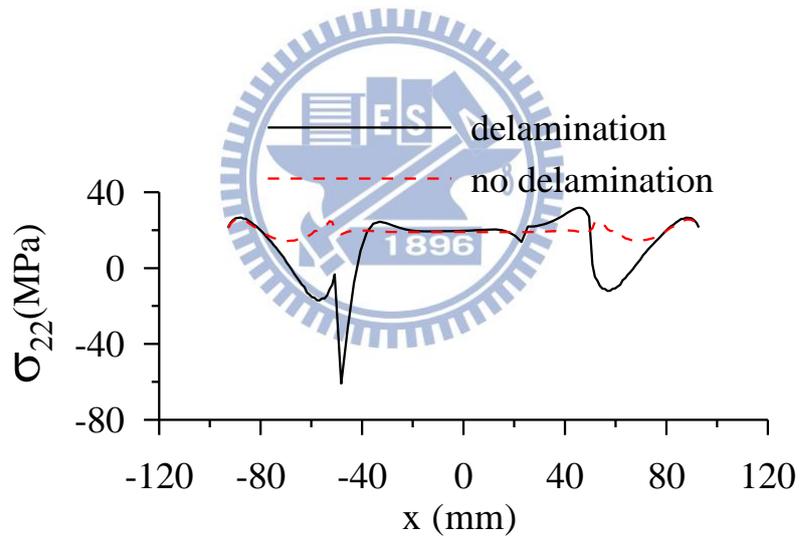


(b)

圖 4.31 第一類脫層於第 8 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

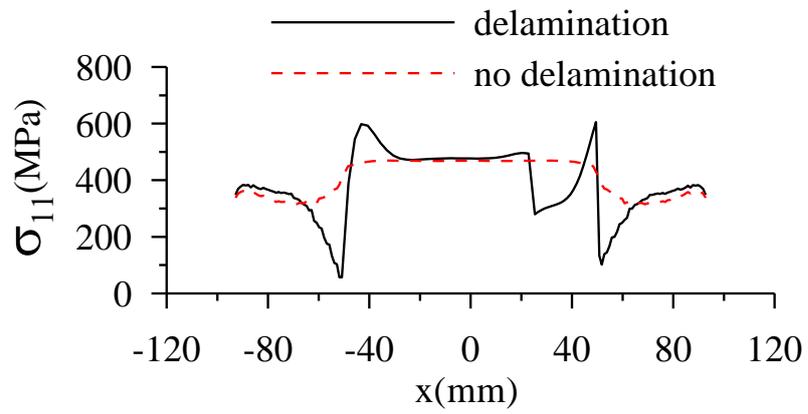


(a)

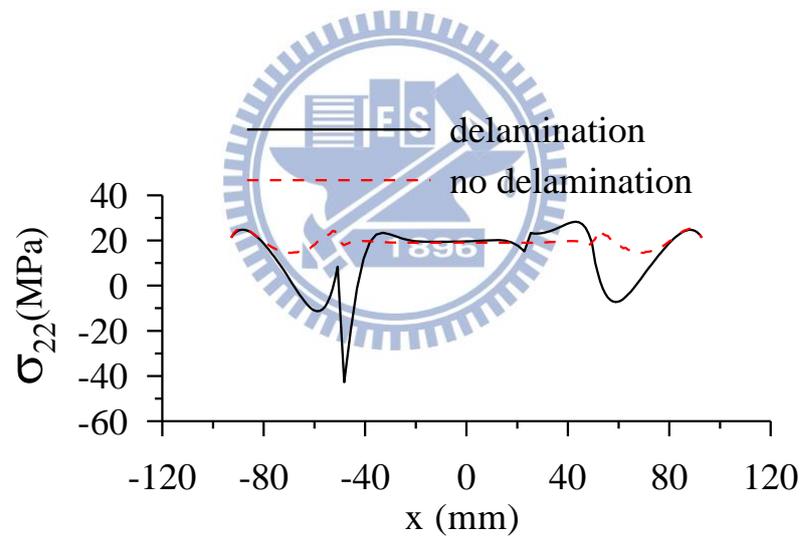


(b)

圖 4.32 第二類脫層於第 1 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

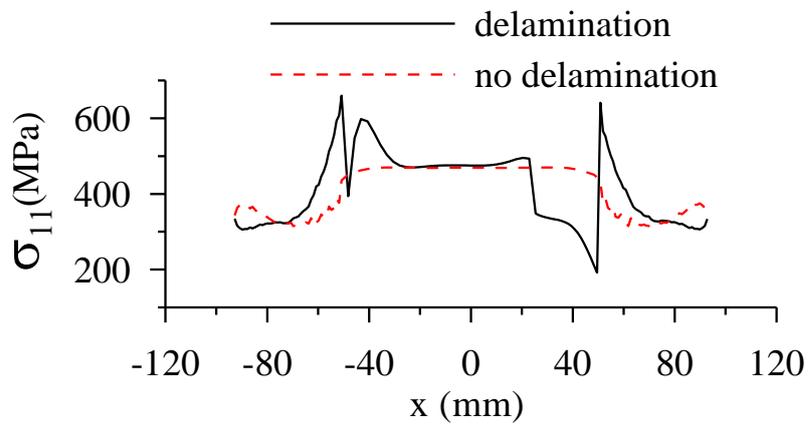


(a)

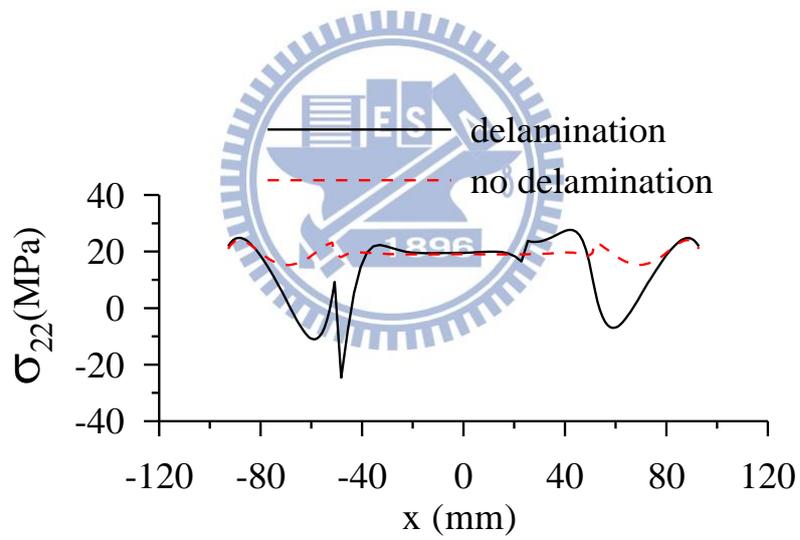


(b)

圖 4.33 第二類脫層於第 2 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

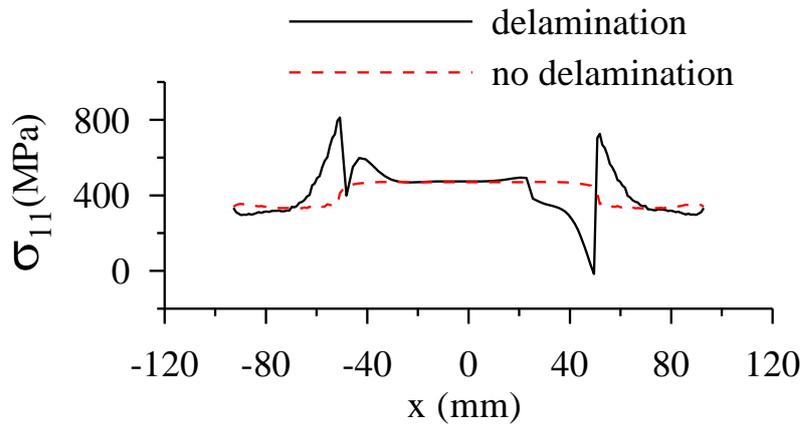


(a)

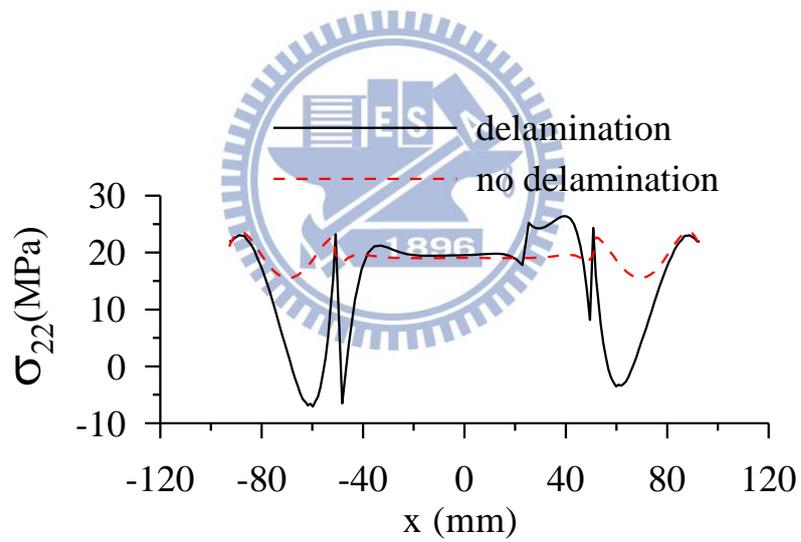


(b)

圖 4.34 第二類脫層於第 3 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

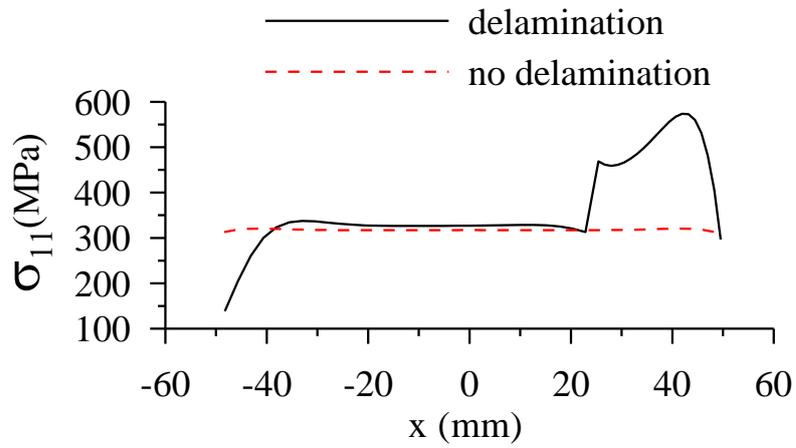


(a)

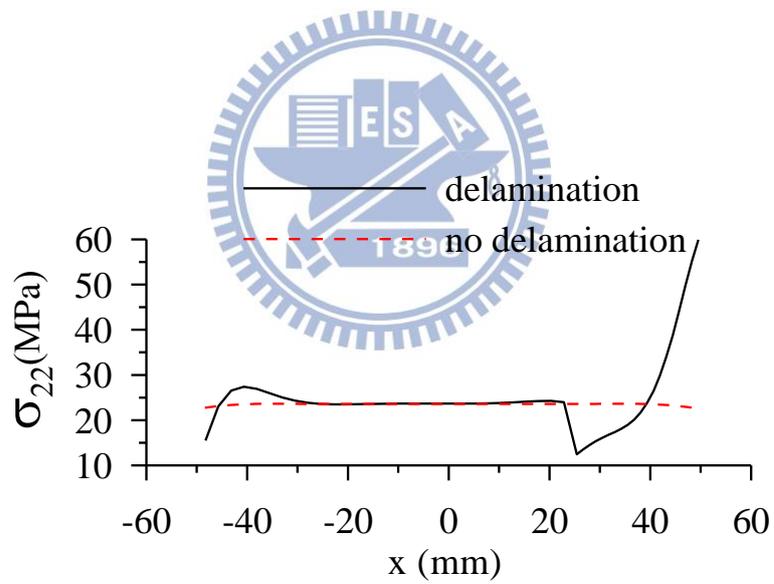


(b)

圖 4.35 第二類脫層於第 4 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

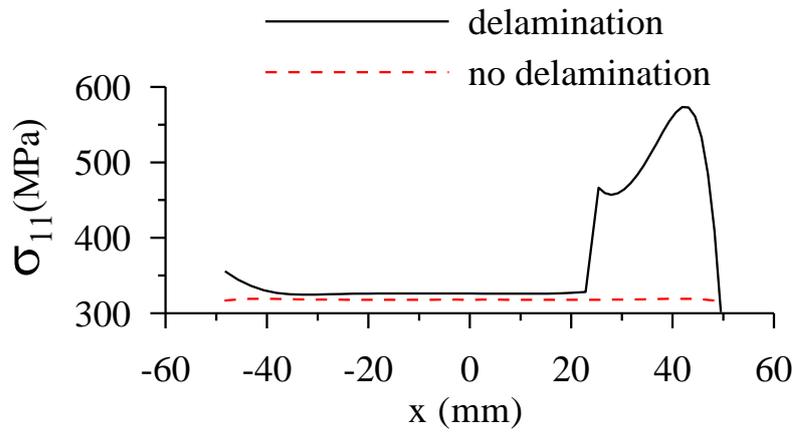


(a)

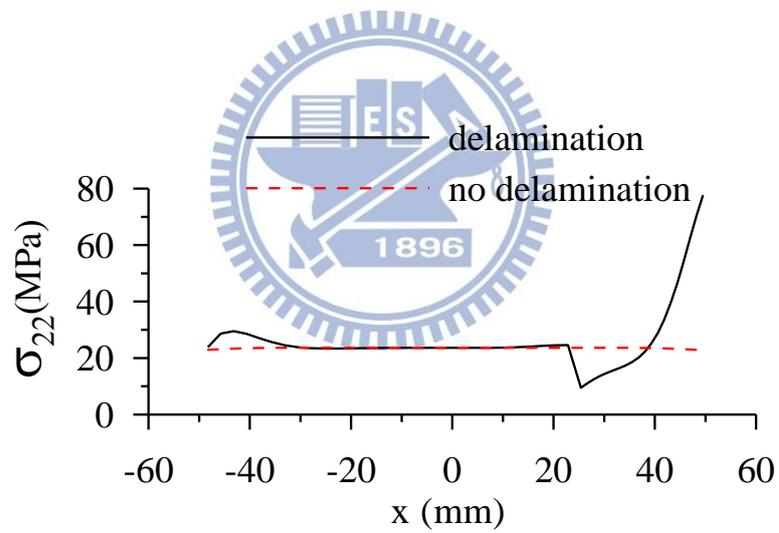


(b)

圖 4.36 第二類脫層於第 5 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

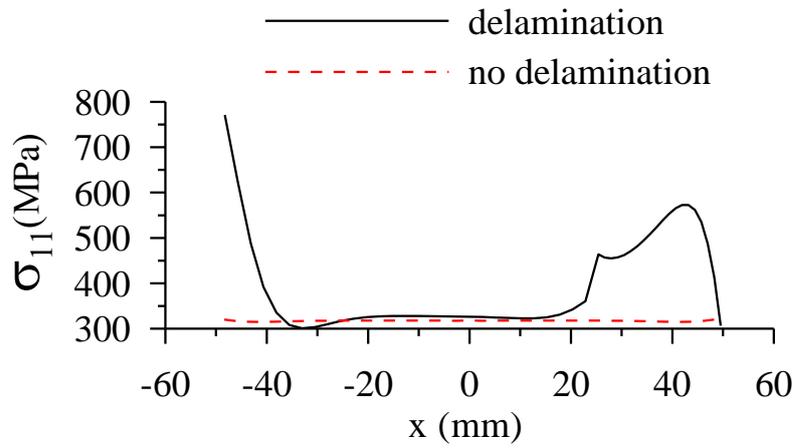


(a)

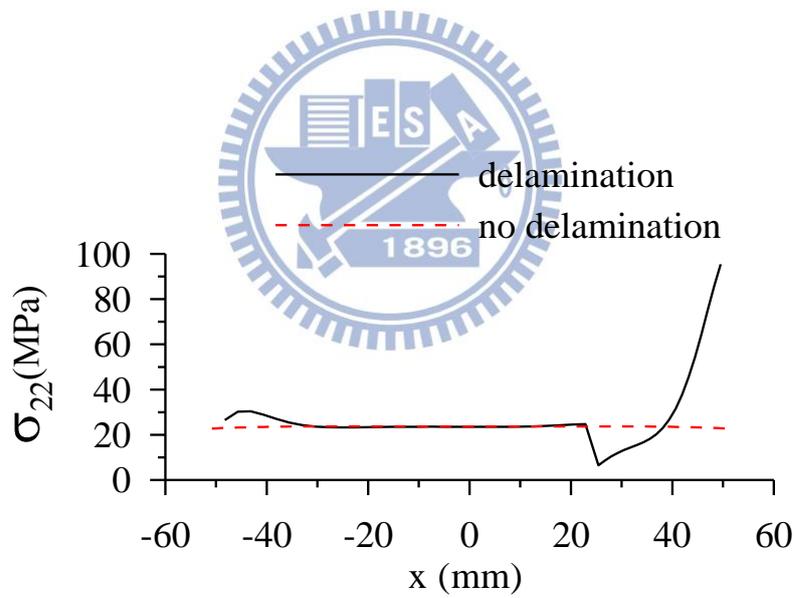


(b)

圖 4.37 第二類脫層於第 6 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈

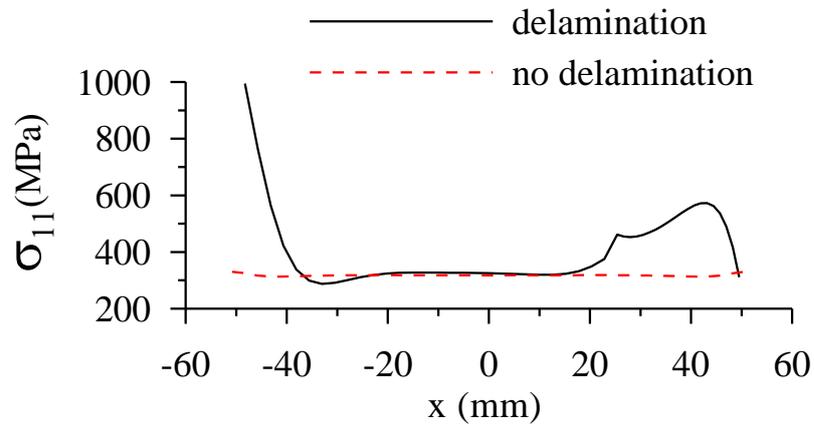


(a)

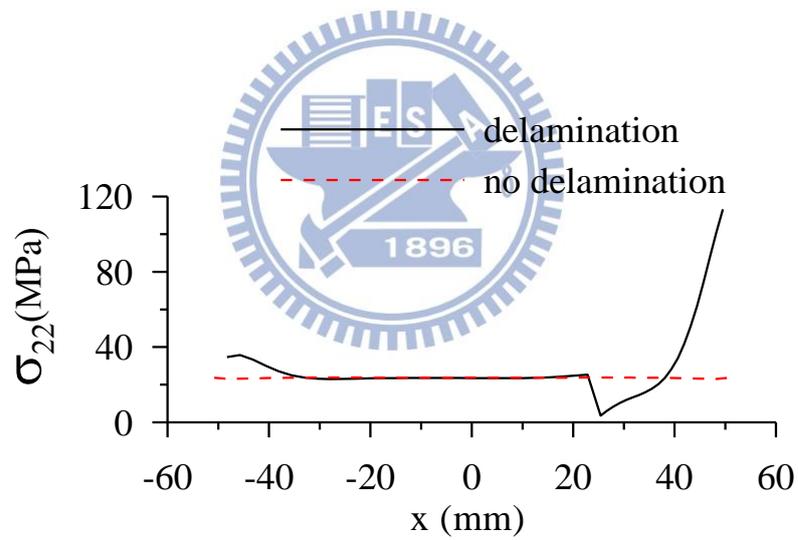


(b)

圖 4.38 第二類脫層於第 7 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈



(a)



(b)

圖 4.39 第二類脫層於第 8 層，(a) $\sigma_{11}$  分佈，(b) $\sigma_{22}$  分佈