

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

模擬含脫層複合材料三明治結構之破壞強度

Modeling the Failure Strength of Debonded Composite
Sandwich Structure

研究生：聶奕心

指導教授：蔡佳霖 博士

中華民國一〇二年七月

模擬含脫層複合材料三明治結構之破壞強度

Modeling the Failure Strength of Debonded Composite
Sandwich Structure

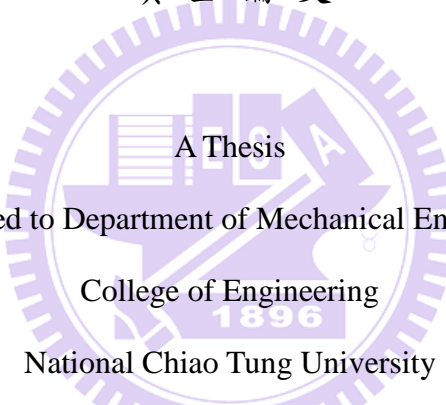
研究生：聶奕心

Student : Yi-Hsin Nieh

指導教授：蔡佳霖

Advisor : Jia-Lin Tsai

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like border. Inside the circle, there is a stylized building and the year '1896'. The text 'A Thesis' is written across the center of the logo.

A Thesis
Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Mechanical Engineering
July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

模擬含脫層複合材料三明治結構之破壞強度

學生：聶奕心

指導教授：蔡佳霖

國立交通大學機械工程系碩士班

摘要

本研究主要目的為探討含脫層缺陷之複合材料三明治結構在承受軸向壓縮負載時的破壞行為。藉由實驗觀察與數值模擬了解表層厚度與脫層長度對三明治結構破壞強度的影響。透過實驗結果發現，當表層較厚或是脫層長度較短時，三明治結構具有較高的挫屈負載與破壞強度。此外，脫層較短的試片趨向總體挫屈導致的破壞，而脫層較長的試片則趨向局部挫屈導致的破壞且造成裂紋由脫層邊緣向外延伸。為了更進一步了解其破壞機制，本研究以有限元素法模擬三明治結構模型，其中，考慮結構存在之缺陷，並藉由最大主應變準則或破壞區域方法預估含脫層三明治結構的破壞強度。結果發現由總體挫屈導致破壞的試片，其破壞位置主要位於上下兩段芯材的中間部位，且可利用最大主應變準則預估結構之破壞強度；另一方面，當破壞是由局部挫屈導致時，初始破壞位置位於脫層兩側的尖端，且其破壞強度可利用破壞區域法進行預估。

Modeling the Failure Strength of Debonded Composite Sandwich Structure

Student : Yi-Hsin Nieh

Advisor : Jia-Lin Tsai

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The research aims to investigate the failure behaviors of the composite sandwich structures with debond defect subjected to compression loading. Both experimental observations and numerical simulation were conducted to understand the effect of face-sheet thickness as well as the debond length on the strength of the composites sandwich structures. Experimental results revealed that the sandwich structures with either thick face-sheet or short debond length exhibit higher buckling load and failure strength. Moreover, as the debond length is short, the failure is dominated by global buckling, however, when the debond length is long, the failure mechanism becomes the local buckling in conjunction with the crack extension from the debond edge. In order to characterize the failure mechanism, the nonlinear finite element (FEM) simulation was implemented on the sandwich samples with imperfection. In addition, the failure load was predicted based on either the maximum principal strain criterion or the damage zone method. It was found that when the failure is dominated by the global buckling, it occurs at intermediate portion of the foam core and the strength can be obtained from the maximum principal strain

criterion. On the other hand, when the failure mode is local buckling, the failure initiates from the debond tip and the strength can be predicted using the damage zone method.



致謝

轉眼間碩士生涯將要結束，在此感謝指導教授 蔡佳霖博士在這兩年的指導，並在研究過程中給予諸多的建議與協助，使得論文可以順利完成，且從中不僅獲得專業知識，也學習到待人處事應有的態度。同時感謝交通大學蕭國模老師與鄭文雅老師撥冗擔任學生的口試委員，並給予寶貴意見，使得本論文的內容更加完善。此外，感謝學長莊文彥、黃健洋、王泰元、林奕安、賴彥錕、劉少淇與許嵩群在研究上給予的指導與協助，感謝同屆夥伴李佳旻與林子晨不時的砥礪及幫助，同時也感謝羅品冠、李脩毓、唐光樾與卓星伯在碩士生涯中的陪伴，使研究生活更加豐富精彩。另外，感謝我的室友以及新竹幫的各位，因為你們的支持與鼓勵，使我可以度過每一個難關，接著，感謝交大機械的籃球女孩們，因為你們的熱情與信任，使我在碩士生涯中能再有機會站在球場上打球，與你們一同打球真的十分開心。

此外，感謝我的父母與家人在背後默默的支持與鼓勵，使我能無後顧之憂的專心於研究，順利完成學業。最後，感謝求學生涯一路上曾經幫助過我的人，祝你們未來一切順利。

聶奕心 謹誌

中華民國 102 年 8 月

目錄

摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iv
目錄	v
表目錄	viii
圖目錄	x
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與文獻回顧	1
1.2 研究目標與方法	7
第二章 含脫層之三明治結構壓縮實驗	8
2.1 含脫層之三明治結構試片的製備	8
2.2 三明治結構壓縮實驗	10
2.3 實驗結果	10
2.3.1 [(0/90) ₂] _s 複合材料三明治結構壓縮實驗結果	11
2.3.2 [(0/90) ₃] _s 複合材料三明治結構壓縮實驗結果	14
2.3.3 [(0/90) ₂] _s 與[(0/90) ₃] _s 三明治結構壓縮實驗結果比較	17

第三章 有限元素分析	20
3.1 挫屈分析方法	20
3.1.1 線性挫屈分析	21
3.1.2 非線性分析	23
3.2 有限元素模型之建立	24
3.3 線性挫屈分析結果	25
3.4 非線性分析結果與挫屈實驗之比較	26
3.4.1 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片	26
3.4.2 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片	27
3.4.3 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片	28
3.4.4 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治結構試片	29
3.4.5 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治結構試片	29
3.4.6 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治結構試片	31
3.4.7 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治結構試片	31
3.4.8 表層厚度與脫層長度對缺陷值的影響	32
3.5 破壞分析方法	33
3.5.1 破壞區域方法	33
3.5.2 破壞區域臨界值之選擇	34
3.6 破壞強度之預估	35

3.6.1 [(0/90) ₂] _s 三明治結構破壞強度預估結果.....	35
3.6.2 [(0/90) ₃] _s 三明治結構破壞強度預估結果.....	38
第四章 結論與未來展望.....	42
4.1 結論.....	42
4.2 未來展望.....	44
參考文獻.....	45
附表.....	48
附圖.....	58



表目錄

表 2.1 單軸向碳纖維複合材料之材料性質	48
表 2.2 ROHACELL [®] - 51WF 發泡材材料性質[18]	48
表 2.3 含脫層之三明治結構實驗試片規格	49
表 2.4 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片實驗結果	49
表 2.5 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片實驗結果	50
表 2.6 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片實驗結果	50
表 2.7 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片之實驗結果	51
表 2.8 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片實驗結果	51
表 2.9 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片實驗結果	52
表 2.10 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片實驗結果	52
表 2.11 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片實驗結果	53
表 2.12 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片之實驗結果	53
表 2.13 不同脫層長度之 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片實驗結果	54
表 3.1 線性挫屈分析與實驗結果之比較	54
表 3.2 挫屈分析與實驗結果之比較	55
表 3.3 網格收斂性	55
表 3.4 分析步數收斂性	56
表 3.5 含 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞區域臨界值	56

表 3.6 [(0/90)₂]_s 三明治試片破壞強度預估結果.....57

表 3.7 [(0/90)₃]_s 三明治試片破壞強度預估結果.....57



圖目錄

圖 2.1 試片基本尺寸示意圖	58
圖 2.2 三明治結構壓縮實驗架設圖	58
圖 2.3 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖	59
圖 2.4 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與壓縮位移響應圖	59
圖 2.5 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞行為	60
圖 2.6 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑	60
圖 2.7 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形	61
圖 2.8 含 60mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖	61
圖 2.9 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞行為((a)局部挫屈 (b)試片 一端先行破壞 (c)試片完全破壞).....	62
圖 2.10 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與壓縮位移響應圖	62
圖 2.11 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路 徑 (b)脫層尖端裂紋路徑).....	63
圖 2.12 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形	63
圖 2.13 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖	64
圖 2.14 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路 徑 (b)脫層尖端裂紋路徑).....	64
圖 2.15 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖	65

圖 2.16	無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為.....	65
圖 2.17	無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑.....	66
圖 2.18	含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖	66
圖 2.19	含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為	67
圖 2.20	含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑	67
圖 2.21	含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖	68
圖 2.22	含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為((a)局部挫屈 (b)表 層與芯材分離).....	68
圖 2.23	含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路 徑 (b)脫層尖端裂紋路徑).....	69
圖 2.24	含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞情形	69
圖 2.25	含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖	70
圖 2.26	含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為((a)局部挫屈 (b)表 層與芯材分離).....	70
圖 2.27	含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路 徑 (b)脫層尖端裂紋路徑).....	71
圖 2.28	不同表層厚度對挫屈及破壞負載之影響.....	71
圖 3.1	挫屈之負載與位移關係圖	72
圖 3.2	非線性分析流程圖	72

圖 3.3 缺陷定義示意圖.....	73
圖 3.4 有限元素模型網格示意圖((a)模型整體網格示意圖 (b)脫層尖端網格 局部放大圖).....	73
圖 3.5 邊界條件示意圖.....	74
圖 3.6 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構第一挫屈模態變形圖.....	74
圖 3.7 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構第一挫屈模態變形圖	75
圖 3.8 不同缺陷之負載與應變響應圖(無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片).....	75
圖 3.9 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片變形圖.....	76
圖 3.10 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試 片).....	76
圖 3.11 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片變形圖.....	77
圖 3.12 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試 片).....	77
圖 3.13 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片變形圖	78
圖 3.14 不同缺陷之負載與應變響應圖(無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片)....	78
圖 3.15 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖.....	79
圖 3.16 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試 片，缺陷值為正值).....	79
圖 3.17 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖(缺陷值為 0.3%)	80

圖 3.18 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片，缺陷值為負值).....	80
圖 3.19 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖(缺陷值為-0.3%).....	81
圖 3.20 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片).....	81
圖 3.21 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖.....	82
圖 3.22 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片).....	82
圖 3.23 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖.....	83
圖 3.24 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 表層疊層三明治在不同脫層長度之缺陷值....	83
圖 3.25 破壞強度預估流程圖.....	84
圖 3.26 含 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片主應變分布圖((a)整體試片 (b) 脫層尖端區域).....	84
圖 3.27 含 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形[20].....	85
圖 3.28 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片預估結果((a)主應變分布圖 (b)主應變方向分布圖).....	85
圖 3.29 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形[20].....	86
圖 3.30 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片主應變分布圖(模型朝含脫層側表層翹屈)((a)整體試片 (b)脫層尖端區域).....	86

圖 3.31 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治試片預估結果(朝無脫層方向翹屈) (a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖 (c)主應變方向分布圖)	87
圖 3.32 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治試片預估結果((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖)	88
圖 3.33 無脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片預估結果((a)主應變分布圖 (b)主應變方向分布圖)	88
圖 3.34 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片主應變分布圖(模型朝含脫層側表層翹屈)	89
圖 3.35 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片預估結果(朝無脫層方向翹屈) (a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖 (c)主應變方向分布圖)	90
圖 3.36 含 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片破壞裂紋路徑[20].....	91
圖 3.37 含 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片預估結果((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖)	91
圖 3.38 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片預估結果((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖)	92

第一章 緒論

1.1 研究動機與文獻回顧

近年來科技不斷進步，許多材料得以應用於日常生活中，三明治結構(Sandwich structures)具有高強度、質量輕的特性，因此廣泛地運用在造船業、汽車工業等領域。三明治結構是由高剛性的表面板材(Face-sheet)及中間低密度的芯材(Core)所組成，主要由表層承受軸向負載及彎矩負載，並利用芯材提高三明治結構的抗彎矩能力。由於此結構是由兩種材料性質差異極大的表層與芯材所組成，在兩者的界面常存在結構上的脫層缺陷(Debond defect)，造成缺陷的原因可能為製造過程的疏失、衝擊，疲勞等等，大幅影響三明治結構的整體強度。而當含有界面脫層的三明治結構受到壓縮負載或彎矩力時，易產生挫屈現象或芯材的破壞[1]。

在過去有諸多學者對於三明治結構的破壞強度及破壞模式進行探討。Vadakke 與 Carlsson[2]進行無脫層三明治結構的軸向壓縮實驗，透過改變不同類型三明治結構的試片長度，觀察對試片最大負載與破壞模式的影響。實驗發現，當試片的測試長度由短逐漸變長時，破壞強度趨向逐漸變小，而隨著試片的測試長度變長，破壞模式則由表層的壓縮破壞轉變為表層起皺摺(Wrinkling)，再轉變為趨向總體挫屈的破壞。

針對在表層與芯材界面上含有脫層的三明治結構，也有眾多學者對其

進行研究。Avery III 及 Sankar[3]針對含界面脫層之蜂巢板三明治結構進行軸向壓縮實驗，藉由改變芯材厚度、芯材密度、表層厚度與脫層長度觀察其對三明治結構強度及破壞模式的影響。根據實驗觀察，含脫層三明治結構發生的破壞模式可歸類為五種，分別為對稱或反對稱的局部挫屈(Local buckling)造成的破壞、對稱或反對稱的總體挫屈造成的破壞(Global buckling)以及表層的破壞。當表層厚度較薄(1~3層)，主要為局部挫屈導致結構的破壞；而當表層較厚時(5~7層)，其主要破壞模式轉變為總體挫屈所導致。藉由觀察發現，當芯材厚度較薄時，較容易發生反對稱的挫屈模式；而當試片擁有較厚的表層與芯材及較短的脫層時，其破壞模式則易出現表層的破壞。在破壞強度方面，增加表層厚度將大幅提升三明治結構整體強度；而隨著脫層長度的增加，壓縮強度逐漸降低，但當脫層增加至一定長度後，脫層長度的改變對壓縮強度影響極小。

Avilés 及 Carlsson[4]以軸向壓縮實驗探討當三明治結構之脫層形狀為方形或圓形時，對其破壞行為的影響。實驗結果指出當三明治結構發生局部挫屈後將先造成裂紋沿垂直負載方向迅速成長，最後造成表層與芯材的分離、芯材破裂或是表層的壓縮破壞，而此破壞模式取決於芯材的剛性，芯材的剛性越高，其結構破壞強度也隨之增加。從觀察破壞後的試片發現，當芯材的密度越高，試片趨向於芯材與膠界面的破壞。另外，在相同面積的圓形及方形脫層三明治結構中，圓形脫層因形狀圓滑，使其最大壓縮強

度比方形脫層試片高。

除了軸向壓縮的探討，亦有學者針對彎矩力的影響進行深入研究。Southward 等人[5]以含圓形脫層之蜂巢板三明治結構進行四點彎矩實驗，探討不同脫層大小以及表層剛性的影響，研究發現在含脫層側的表層發生挫屈現象，挫屈負載與破壞強度隨脫層區域的變大而逐漸降低；其中，結構的破壞強度與表層的彎矩剛性呈線性的比例關係。另外，透過音洩感測器 (Acoustic emission sensors) 的使用可以判斷裂紋的成長，得知裂紋成長所需之最小負載。

由上述文獻[1-5]得知，含脫層三明治結構在承受負載時易發生總體挫屈、局部挫屈或表層的壓縮破壞等等現象，造成脫層區域的裂紋迅速延伸至試片兩端導致試片的破壞，而其破壞模式與破壞強度不僅取決於負載型態，同時也受到結構脫層大小與材料特性的影響。

除了實驗的觀察，亦有學者利用有限元素法(Finite element analysis)針對含脫層三明治結構受力後產生之挫屈行為與破壞模式進行探討。Veedu 與 Carlsson[6]利用二維平面應變元素模擬含脫層三明治結構的軸向壓縮實驗，並利用線性特徵求解與非線性分析方法預測結構之挫屈負載與壓縮強度，結果顯示線性特徵求得之挫屈負載皆高於非線性分析與實驗結果，而非線性分析結果與實驗結果較為吻合。此外在研究結果中發現挫屈負載與最大負載值相近，顯示一旦產生挫屈行為將造成結構迅速破壞。

Sankar 與 Narayanan[7]同樣利用二維平面應變模型，針對含脫層之蜂巢板三明治結構挫屈後的破壞行為進行非線性的分析。研究結果顯示，當脫層長度較長時，其破壞強度與實驗相近，而在脫層長度較短時則發現，當結構尚未到達最大壓縮負載前，芯材部分的壓縮應力已超過芯材的最大壓縮強度，表示當脫層長度較短時，是由芯材的破裂導致結構的破壞。

Sayidmousavi 等人[8]發展新的三維有限元素建模方法，利用殼元素模擬表層板材，以實體元素模擬芯材，藉由拘束方程式使兩種元素結合，在脫層區域則只設置接觸元素防止穿透現象發生，藉此模型模擬三明治結構的挫屈行為。分析顯示此模型在脫層區域較小時，其挫屈負載與實驗值接近，但當脫層區域較大時，分析結果則遠低於實驗所量測之挫屈負載。

從上述文獻中提到，裂紋的增長導致三明治結構強度的降低而造成破壞，因此，亦有學者以破壞力學的觀點預估含脫層三明治結構的裂紋成長與破壞強度。藉由判斷脫層尖端的應變能釋放率(Strain energy release rate)是否高於材料之破壞韌性(Fracture toughness)做為裂紋是否成長之依據。

Avilés 及 Carlsson[9]建立含圓形脫層的三維非線性有限元素三明治結構模型，藉由應力強度因子(Stress intensity factor)與應變能釋放率預估裂紋增長時所需之外力。結果發現當局部挫屈發生後，脫層尖端的應力強度因子與應變能釋放率將快速增加，且在垂直於施力方向上的應力強度因子與應變能釋放率皆比平行於施力方向的高，顯示裂紋易於朝垂直於力的方向延伸，

而裂紋增長主要是由開裂模式(Open mode)主導。模擬分析與實驗結果的比較則發現在脫層範圍較小時，模擬結果與實驗相符合，當脫層區域較大時，裂紋增長所需負載則小於實驗量測之值。

Moslemian 等人[10]以傾斜三明治結構脫層實驗(Tilted sandwich debond test)測量表層與芯材間之破壞韌性，並利用三維有限元素模型計算脫層尖端的應變能釋放率，預估裂紋成長所需負載。研究指出模擬結果與實驗結果相符合。從中發現，隨芯材密度的提高，裂紋增長臨界負載也隨之提高；在破壞模式中，隨著負載越大，剪裂模式(In-plane shear mode)的比例也隨之增加。

Carlsson 與 Prasad[11]則以最大主應力準則判斷表層與芯材界面脫層破壞時裂紋的成長方向，結果發現結構若受單獨開裂模式(Open mode)之負載時，裂紋趨向沿著表層與芯材界面成長；而受剪裂模式之負載時，裂紋趨向朝芯材方向延伸。

Pan 等人[12]以黏膠模型(Cohesive zone model)模擬含脫層三明治結構的界面裂紋增長行為，探討試片發生挫屈現象至破壞的完整過程，並利用 Tsai-Hill 破壞準則判斷表層的破壞。結果發現含有黏膠模型之挫屈負載與實驗結果相近，但破壞強度高於實驗測量值約 17%。

El-Sayed 與 Sridharan[13]同樣利用黏膠模型以二維平面應變元素模擬含脫層三明治結構受軸向壓縮的破壞過程，並比較不同黏膠厚度與黏膠性

質的影響。分析結果指出在不改變黏膠臨界應變能釋放率的狀況下，較薄(0.5 mm)與較厚(1 mm)的黏膠厚度對結構之破壞負載影響極小；而當黏膠材料性質接近芯材之材料性質時，適度改變黏膠的楊氏模數不影響結構之破壞負載。

Yeh 與 Chiu[14]則以有限元素法探討三種表層與芯材間不同黏膠形狀的影響，同時比較黏膠為線性材料與非線性材料時的差異，並以最大應力準則作為破壞之依據。結果發現當黏膠形狀為 V 字形且同時考慮黏膠的非線性性質時，其結果與實驗相近。

除了上述文獻提及之預估三明治破壞強度的方法，Sheppard 等人[15]以不同觀點進行破壞強度的預估，其觀點為破壞的發生不是由於某個特定點產生裂紋，而是在某個區域中皆達到破壞的臨界值。Sheppard 等人以此觀點建立二維的破壞區域模型(Damage zone model)，以特定的破壞面積作為基準，預估接合結構(Joint)之破壞強度，分析結果與實驗相符。

Park 等人[16]以三維的破壞區域模型預估不同黏膠長度與黏膠厚度之接合結構的破壞強度，分析結果與實驗誤差不超過 16.3%，研究指出破壞區域中建立多層的元素較單層元素較為準確。

由以上文獻可知含脫層三明治結構在承受負載後易造成結構的局部挫屈、總體挫屈、表層斷裂或芯材破裂等現象，促使裂紋成長，最後導致整體結構的破壞。其中，破壞模式與破壞強度受表層與芯材的材料性質、厚

度、脫層形狀與脫層大小等因素影響，整體破壞行為極為複雜。然而，上述文獻對三明治結構的破壞強度預估尚未有有效準確的預估方法，因此，本研究將以破壞區域方法 (Damage zone method) 或最大主應變準則 (Maximum principal strain criterion) 預估含脫層三明治結構的破壞強度。在本研究中，將針對含脫層之三明治結構在承受軸向壓縮負載時產生之挫屈現象與破壞行為進行深入探討，討論不同表層厚度與脫層長度對挫屈負載與破壞強度的影響，並藉由有限元素法的分析與實驗的量測預估含脫層三明治結構的初始破壞位置與破壞強度。

1.2 研究目標與方法

本研究以碳纖維複合材料為表層、發泡材為芯材的三明治結構進行討論。表層主要疊層順序為 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 兩種，藉由軸向壓縮實驗觀察此兩種三明治結構在不同脫層長度下的挫屈模式與破壞行為，並以有限元素套裝軟體 ANSYS[17]進行模擬分析。有限元素的分析主要分為兩個部分，第一個部分為含脫層三明治模型的挫屈分析，透過模擬與實驗的比較得知試片中存在之缺陷(Imperfection)，藉此探討脫層長度與缺陷間的關係以及脫層長度對挫屈負載的影響。第二部分為挫屈後的破壞強度探討，本研究將依據挫屈模型之分析結果，以最大主應變準則或破壞區域方法預估含脫層三明治結構的破壞強度，並藉由分析結果探討其初始破壞位置，最後與實驗做比較。

第二章 含脫層之三明治結構壓縮實驗

本研究主要探討含脫層之三明治結構在承受單軸向壓縮負載時，結構的挫屈行為及破壞強度，並針對改變表層厚度與脫層長度對整體結構的影響進行深入的討論。

2.1 含脫層之三明治結構試片的製備

含脫層三明治結構試片主要由上下兩片碳纖維複合材料的表層與中間之發泡芯材組合而成。表層主要材料為單方向碳纖維預浸材，由福懋興業所製造，其材料性質經由本實驗室測量得知，如表 2.1 所示，其中 E_{33} 假設與 E_{22} 相同，波松比與剪力模數則假設為三個方向皆相同。本研究所選用的表層疊層順序分別為 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ ，單層厚度約為 0.14 mm。芯材部分則使用閉孔剛性發泡材 ROHACELL[®]，型號為 51WF，原料為聚甲基丙烯酸酰胺(Polymethacrylimide, PMI)，其材料性質由廠商提供，如表 2.2 所示[18]。表層與芯材之黏合使用 FM[®] 73 片膠，其主要成分為環氧樹脂。另外，為了在表層與芯材間製造脫層，在脫層區域則使用離型布，由 Richmond Aerovac 公司提供，型號為 200TFP-1，厚度約為 0.06 mm，為輕量化鐵氟龍(PTFE)塗佈之玻璃纖維布。

含脫層三明治結構試片的製作流程主要分為兩部分：表層疊層板的製作與三明治結構的疊合。在表層的部分，首先將單方向預浸材裁成 310 mm × 280 mm 的大小，長邊為欲堆疊之纖維角度。將預浸材依照疊層順序疊製後，

依序在成品外再疊上離型布及小棉布，並包上真空袋，使之抽至真空狀態並同時進行熱壓。熱壓機壓力設定為 13.6 kg/cm^2 ，升溫流程為將溫度升至 100°C 後維持 40 分鐘，再升溫至 150°C 維持 100 分鐘，接著關閉加熱器，使其自然冷卻至室溫，即完成碳纖維複合材料疊層板。最後將疊層板依據試片所需大小經由水刀切割，得到三明治結構的表層。

接著將表層與裁切好的芯材藉由 FM[®] 73 片膠黏合，脫層區域設計在試片的正中間並穿越試片的寬度方向，此區域不含片膠，改使用離型布防止左右兩側片膠流入脫層區域。組合完成之三明治結構試片為了使片膠固化，試片需再次進行熱壓，升溫流程依據廠商提供之條件[19]，溫度在 30 分鐘內升至 120°C ，並維持 60 分鐘。此外，為了防止發泡材在熱壓過程中因壓力過大而造成損毀，本研究在上下熱壓板中間加入墊塊，墊塊高度為上下兩部分碳纖維表層加芯材的總厚度。最後，將加熱完成的試片自然冷卻至室溫，即得到含脫層之複合材料三明治結構試片。

完成後之實驗試片尺寸如圖 2.1 所示，測試長度(Gauge length)為 120 mm，左右夾持深度各為 10 mm，試片寬度為 40 mm， t_f 代表表層複合材料的厚度， $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 的疊層厚度分別約為 1.1 mm 與 1.6 mm；芯材厚度為 14 mm； L_d 則代表脫層區域的長度，本研究討論之脫層長度分別為 10、30、50、60、70 mm 及無脫層長度，但在兩種不同表層疊層試片中，有五組試片參考賴[20]之研究結果，分別是當表層為 $[(0/90)_2]_s$ 疊層順序時，

脫層長度為 10、30 與 50 mm 之實驗結果，以及當表層為 $[(0/90)_3]_s$ 疊層順序時，脫層長度為 30 與 50 mm 之實驗結果。完整實驗試片規格如表 2.3 所示。

2.2 三明治結構壓縮實驗

三明治結構壓縮實驗參考美國材料試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)的 ASTM C 364/C 364M – 07 三明治結構側向壓縮強度標準測試方法(Standard Test Method for Edgewise compressive Strength of Sandwich Constructions)[21]進行測試。實驗使用萬能材料測試機提供壓縮負載，夾頭設定為位移控制，速度為 0.002 mm/sec，試片上下兩端夾持深度各為 10 mm。另外，為了量測試片的挫屈負載及壓縮強度，在試片表層的中心位置黏貼應變規，含脫層側的應變規稱為應變規-A，完好無脫層側的稱為應變規-B，每組實驗至少做三次，整體實驗架設如圖 2.2 所示。

2.3 實驗結果

本研究之含脫層複合材料三明治結構壓縮實驗結果共有七組，其中，以 $[(0/90)_2]_s$ 為表層疊層順序的試片有三組，分別是當脫層長度為 60、70 mm 及無脫層長度試片；以 $[(0/90)_3]_s$ 為表層疊層順序的試片包含四組，分別是當脫層長度為 10、60、70 mm 及無脫層長度試片。此七組實驗結果將在以下章節進行深入探討。

2.3.1 [(0/90)₂]_s 複合材料三明治結構壓縮實驗結果

首先探討無脫層三明治結構試片，試片在壓縮過程中，其壓縮負載與應變曲線如圖 2.3 所示。由於此組試片無脫層區域，因此應變規-A 與應變規-B 只分別代表三明治結構兩側所量測之結果。從圖中可發現，由於試片左右兩側表層承受相同壓縮負載，因此曲線一開始呈線性上升(o-a 段)，應變規-A 及應變規-B 之曲線完全貼合，接著兩條曲線逐漸岔開，應變規-A 之應變持續為負值(壓應變)，應變規-B 之曲線至最大壓縮應變(a 點)後則逐漸由負值轉為正值(拉應變)，根據文獻[4]指出，應變規-B 之曲線的反折點(最大壓應變值)即代表挫屈行為之開始，因此本研究即以最大壓縮應變值作為判斷試片挫屈行為產生與挫屈負載(Buckling load)之依據。挫屈行為發生後，曲線微微上升至最大壓縮負載(b 點)之後迅速發生破壞，導致試片喪失承受負載的能力(c 點)。

試片的壓縮負載與壓縮位移的響應圖如圖 2.4 所示。從圖中發現曲線在壓縮過程中斜率固定，但當曲線接近最大壓縮強度時，有極小一段的曲線斜率發生改變，其斜率低於前段曲線的斜率，此即挫屈現象造成的影響，使得試片承受負載能力降低，接著，隨著壓縮位移持續增加，結構迅速發生破壞。

從負載與應變的曲線中得知，試片一側恆為壓應變，另一側則由壓應變轉為拉應變，因此判斷試片的挫屈模式為總體挫屈(Global buckling)。試

片的破壞情形如圖 2.5 所示，芯材上有明顯的兩條斜裂紋，裂紋與表層的夾角平均約為 43.2 度，從破壞結果中推測破壞模式是因試片承受極大的彎曲導致芯材的破壞。將實驗完成之試片以美工刀切開夾持兩端的芯材，可完整窺視試片的裂紋路徑，如圖 2.6 所示，在試片中心軸之上下兩側各存在斜裂紋，且斜裂紋路徑延伸至夾持兩端，試片內部破壞情形如圖 2.7 所示，從分離的試片得知斜裂紋橫越試片的厚度與寬度方向。相同無脫層長度試片重複四次實驗之結果如表 2.4 所示，挫屈負載平均值約為 18.0 kN，破壞負載平均值約為 18.3 kN。

接著探討脫層長度為 60 mm 的實驗結果，其負載與應變曲線如圖 2.8 所示。一開始曲線斜率為定值，應變規-A 與應變規-B 在此段(o-a 段)不吻合之原因可能為在架設試片時，因試片底部不平整造成試片略為傾斜，導致試片與負載方向不平行，使得三明治結構一側承受較大壓應力所導致。曲線至 a 點後，應變規-A 曲線開始轉向，逐漸朝正應變方向發展，三明治結構發生局部挫屈現象，如圖 2.9(a)所示。挫屈行為產生後，試片可繼續再承受負載，最後到達最大壓縮負載(b 點)後，試片一端裂紋先行成長造成破壞(c 點)，如圖 2.9(b)所示。當夾頭位移持續增加，造成脫層區域另一端的裂紋成長，導致試片完全破壞失效(d 點)，如圖 2.9(c)所示。其中，破壞後的應變規-A 與應變規-B 兩條曲線最後皆為正應變，顯示兩側破壞後皆朝外翹曲，導致表層與芯材的分離。

60 mm 脫層長度試片的負載與壓縮位移響應圖如圖 2.10 所示。從圖中可明顯看出前半段曲線與後半段曲線的斜率不同，此即代表由於結構產生局部挫屈的現象，使得結構轉變成不穩定的狀態，導致承受負載的能力降低，最後隨著壓縮位移的增加，試片完全破壞。

圖 2.11(a)為脫層長度為 60 mm 時，整體試片的破壞路徑圖，從圖中可發現破壞的裂紋從脫層區域延伸至夾持端兩端，造成表層與芯材的分離；圖 2.11(b)的脫層尖端局部放大圖中，裂紋的路徑方向為繞過片膠朝剛性較弱的芯材延伸，造成芯材先行破裂，從圖 2.12 中可明顯看出片膠上還殘留著部份芯材且表層並無毀壞，表示裂紋路徑主要分布在芯材與片膠交界處附近。相同脫層長度試片重複四次實驗之結果如表 2.5 所示，挫屈負載平均值約為 3.6 kN，破壞負載平均值約為 8.0 kN，試片的主要挫屈模式為局部挫屈。

當脫層長度為 70 mm 時，其負載與應變關係如圖 2.13 所示。試片整體壓縮行為與 60 mm 脫層長度試片大致相同。主要挫屈模式為含脫層側的局部挫屈，導致在脫層區域尖端處的芯材先行破壞，最後造成裂紋向夾持兩端延伸，使得表層與芯材的分離，試片整體裂紋路徑如圖 2.14(a)所示，圖 2.14(b)為脫層尖端之局部放大圖，從圖中同樣可發現，脫層尖端之裂紋會略為先向芯材方向破裂，之後再回到芯材與表層的交界處。相同脫層長度試片重複八次實驗之結果如表 2.6 所示，挫屈負載平均值約為 2.9 kN，破壞

負載平均值約為 7.7 kN。

統整以上三組結果以及結合賴[20]之實驗結果，脫層長度對試片的挫屈負載以及最大壓縮負載關係如表 2.7 所示。無脫層試片與 10 mm 脫層試片挫屈模式皆為總體挫屈，10 mm 脫層試片之挫屈負載較無脫層試片略小，但兩者最大壓縮負載相同，表示當脫層長度較小時，對其整體結構承受負載能力並無影響。兩者破壞模式皆為因總體挫屈使結構承受過大的彎曲，造成芯材發生破壞，且芯材部分會有明顯的斜裂紋存在；反觀 30、50、60 及 70 mm 的脫層長度試片，實驗結果顯示四組試片的挫屈模式皆為結構的局部挫屈，且當脫層長度越長，其挫屈負載值與破壞負載值隨之下降，其中 50、60 與 70 mm 之最大壓縮負載值相近，顯示當脫層長度長至一定範圍後，壓縮強度則不再下降，與文獻[3]的趨勢相吻合，且破壞模式皆由於脫層區域裂紋的成長造成表層與芯材的分離。

2.3.2 [(0/90)₃]_s 複合材料三明治結構壓縮實驗結果

為了比較不同表層厚度造成的影響，本研究選用[(0/90)₃]_s 的疊層順序做為複合材料三明治結構的表層，並以無脫層長度、10、60 及 70 mm 脫層長度之試片進行三明治結構壓縮實驗。

首先，探討無脫層長度之試片結果，無脫層長度試片之負載與應變響應圖如圖 2.15 所示，一開始試片尚未發生挫屈，o-a 段負載與應變呈線性關係，接著應變規-A 側發生挫屈現象，其應變逐漸轉為拉伸應變，另一側則持續

為壓縮應變，挫屈產生後，試片大約能再承受 1 kN 的負載，即到達所能承受的最大壓縮強度(b 點)，接著發生破壞(c 點)。從曲線中得知，試片一側是拉伸應變，一側是壓縮應變，代表破壞之試片左右兩側皆向同方向彎曲，因此判斷其挫屈模式為總體挫屈，且造成芯材因承受過大彎矩而破裂，圖 2.16 中可看出芯材部分有明顯的兩條斜裂紋，裂紋與表層的夾角平均約為 43.8 度。試片整體裂紋破壞路徑如圖 2.17 所示，圖中可發現芯材的斜裂紋朝試片兩端延伸導致試片的完全破壞。相同脫層長度試片重複三次實驗之結果如表 2.8 所示，挫屈負載平均值約為 21.6 kN，破壞負載平均值約為 22.4 kN。

當脫層長度為 10 mm 時，應變規-A 與應變規-B 測得的負載與應變響應圖如圖 2.18 所示。實驗曲線在 a 點時，代表應變規-B 到達最大壓縮應變值，之後曲線產生轉折且逐漸朝正應變方向發展，其為無脫層側的表層發生挫屈之現象，然而，應變規-A 之曲線則保持為壓縮應變。當曲線到達最大壓縮負載(b 點)之後試片會迅速發生破壞(c 點)。試片發生破壞後，應變規-A 為壓縮應變，應變規-B 為拉伸應變，顯示主要挫屈模式為總體挫屈且試片朝完好的表層方向翹曲，且芯材同樣有明顯的斜裂紋，其與表層之夾角平均約為 47 度，如圖 2.19 所示。試片在發生總體挫屈後，因為承受彎矩造成芯材破裂，裂紋路徑延伸通過脫層區域，如圖 2.20 所示。相同脫層長度試片重複四次實驗之結果如表 2.9 所示，挫屈負載平均值約為 21.4 kN，破壞

負載平均值約為 22.3 kN。

接著，探討 60 mm 脫層長度實驗結果，其負載與應變關係如圖 2.21 所示。當結構到達最大壓縮應變值(a 點)時，應變規-A 之曲線發生轉折，應變值朝拉應變(正應變)方向發展，代表應變規-A 側開始發生局部挫屈現象，如圖 2.22(a)所示；然而，應變規-B 則持續維持壓應變狀態。當曲線到達最大壓縮負載後(b 點)，試片發生破壞，造成裂紋迅速成長至試片兩端(c 點)。從圖中可發現，應變規-A 與應變規-B 曲線最後皆為拉伸應變，表示破壞後的試片各自向外翹曲，造成脫層區域的裂紋成長，導致表層與芯材的分離，如圖 2.22(b)所示。

試片整體破壞路徑如圖 2.23(a)所示，裂紋路徑通過脫層區域，於靠近芯材與片膠交界面向夾持兩端延伸，從圖 2.23(b)的局部放大圖中可發現，在脫層尖端之裂紋繞過剛性較強之片膠，朝剛性較低之芯材延伸一小段距離，之後，裂紋回到靠近芯材與片膠之交界面處。由圖 2.24 中觀察發現，靠近脫層區域兩端之片膠上殘留破壞的芯材，但在遠離脫層區則較無芯材殘留，再次顯示裂紋繞過片膠後回到靠近芯材與片膠交界面持續延伸。相同脫層長度試片重複四次實驗之結果如表 2.10 所示，挫屈負載平均值約為 9.6 kN，破壞負載平均值約為 13.8 kN。

最後，探討 70 mm 脫層長度之實驗結果，其負載與應變圖如圖 2.25 所示。曲線之趨勢與 60 mm 脫層長度之曲線相似，應變規-A 之曲線在到達最

大壓縮應變點(a 點)後發生轉折，代表含脫層側的表層產生挫屈現象，如圖 2.26(a)所示；之後，隨著壓縮位移的增加，曲線到達最大壓縮強度(b 點)後迅速發生破壞，從圖中可發現，應變規-A 與應變規-B 之曲線最後皆為拉伸應變(c 點)，代表破壞後的試片兩側表層皆各自向外翹屈，如圖 2.26(b)所示。

試片之裂紋路徑如圖 2.27(a)所示，破壞之裂紋通過脫層區域並向試片兩端延伸，導致表層與芯材的分離，脫層尖端的局部放大圖如圖 2.27(b)所示，從圖中發現尖端之裂紋同樣有先朝芯材裂進一小段距離的現象產生。相同脫層長度試片重複四次實驗之結果如表 2.11 所示，挫屈負載平均值約為 8.0 kN，破壞負載平均值約為 11.7 kN。

綜合以上四組 $[(0/90)_3]_s$ 複合材料三明治結構實驗以及結合賴[20]之實驗結果，如表 2.12 所示。隨著脫層長度的增加，挫屈負載與最大壓縮強度隨之降低，其中，無脫層試片與 10、30 mm 脫層長度試片的挫屈模態為總體挫屈，破壞模式是由於總體挫屈使得結構承受過大彎曲，造成芯材的破壞；另外，在 50、60 及 70 mm 脫層長度試片的部分，其挫屈模式為含脫層側的表層發生局部挫屈，破壞模式為脫層尖端的裂紋成長造成芯材與表層的分離。

2.3.3 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 三明治結構壓縮實驗結果比較

綜合以上所述之 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 三明治結構壓縮實驗結果整理如表 2.13 所示。其中，有五組實驗數據為賴[20]之實驗結果，分別是在當表

層為 $[(0/90)_2]_s$ 疊層順序時，脫層長度為 10、30 與 50 mm 之實驗結果，以及當表層為 $[(0/90)_3]_s$ 疊層順序時，脫層長度為 30 與 50 mm 之實驗結果。從表中可發現，因為 $[(0/90)_3]_s$ 疊層順序的表層較厚且不易彎曲，所以當同為 30 mm 脫層長度時，以 $[(0/90)_3]_s$ 為表層的試片，其挫屈模態為總體挫屈，反觀 $[(0/90)_2]_s$ 為表層的試片，其挫屈模態則為局部挫屈。從中得知，較厚的表層趨向於總體挫屈的挫屈模態，而較薄的表層趨向於局部挫屈的挫屈模態。

表 2.13 中，不同表層疊層順序的挫屈負載與最大壓縮強度對應圖，如圖 2.22 所示。由於三明治結構主要由表層承受負載，因此 $[(0/90)_3]_s$ 疊層順序之三明治結構的挫屈負載與壓縮強度皆比 $[(0/90)_2]_s$ 疊層順序之三明治結構高。在同樣為較短脫層長度時(10 mm 以下)， $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片一旦發生挫屈之現象，即會造成結構迅速的破壞；而當在脫層長度較長時，發生挫屈現象的試片可再承受些微負載，最後因裂紋的成長導致結構的破壞。

另外，在總體挫屈導致的破壞模式中， $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 的破壞情形相同，在芯材部分皆有明顯的斜裂紋存在。當脫層長度為 10 mm 時， $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 的挫屈負載與壓縮強度皆與各自無脫層長度試片的實驗結果相近，顯示較小的脫層對整體結構並無明顯的影響。

在局部挫屈導致的破壞模式中， $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 的破壞模式主要

為裂紋沿著芯材與片膠交界面延伸至試片兩端，導致表層與芯材的分離。隨著脫層長度的增加，挫屈負載與壓縮強度間的差異逐漸變大，且以 $[(0/90)_2]_s$ 的試片較為明顯，顯示表層厚度較薄之三明治結構較易受脫層長度大小的影響。



第三章 有限元素分析

本章將依據上一章之含脫層三明治結構壓縮實驗結果，以有限元素法模擬含脫層三明治結構之挫屈行為，並預估不同脫層長度之三明治結構的壓縮強度。分析過程主要分為兩個部分，第一部分為三明治結構的挫屈分析，第二部分為三明治結構破壞強度的預估。首先，在挫屈分析中可分為線性挫屈分析(Linear buckling analysis)與非線性分析(Nonlinear analysis)。本研究利用線性挫屈分析求得結構之挫屈模態(Buckling mode)，以此挫屈模態作為一種微小的缺陷(Imperfection)加入原始的模型中，接著，進行非線性分析求解並與實驗曲線做比較。從中獲得符合不同脫層長度之三明治結構的缺陷，並以此分析結果探討結構之挫屈行為。在預估三明治結構強度的部分，本研究利用第一部分之挫屈分析結果，並配合最大主應變準則或破壞區域方法，預估不同脫層長度之三明治結構的破壞強度與破壞發生的位置。

3.1 挫屈分析方法

挫屈為當一個結構承受負載時，由平衡狀態轉至不平衡狀態的過程，此時結構的負載增量為零，但卻存在位移量。若負載持續增加，最終將導致結構的破壞。

挫屈分析流程主要可分為兩個步驟，第一步為線性挫屈分析，第二步

為非線性分析。圖 3.1 為線性挫屈分析與非線性分析的示意圖，其中，線性挫屈分析主要假設結構中不存在缺陷，在挫屈發生之前，負載與位移呈線性關係，藉由特徵值問題(Eigenvalue problem)計算結構的臨界挫屈負載(Critical buckling load)與挫屈變形模態(Buckling mode shape)。圖中之分歧點所對應之負載即為臨界挫屈負載，此點代表的意義為曲線平衡路徑的分歧位置。由於曲線只考慮為線性關係，因此臨界挫屈負載通常高於實際情況的挫屈負載值。在非線性分析的部分，分析中考慮結構的幾何大變形與結構本身存在之缺陷，因此所得之挫屈負載值會低於線性挫屈分析之結果。圖中之極限點即代表在非線性分析過程中存在之最大負載。

3.1.1 線性挫屈分析

本小節將簡單介紹線性挫屈分析的原理與計算過程。線性挫屈分析的假設為在挫屈發生前結構的負載與位移呈線性關係。在有限元素法中，結構的剛度矩陣包含兩個部份，如(3.1)式所示

$$[K] = [K_0] + [K_\sigma] \quad (3.1)$$

其中， $[K]$ 為結構的剛度矩陣， $[K_0]$ 為結構的線性剛度矩陣， $[K_\sigma]$ 為應力剛度矩陣。線性剛度矩陣描述元素的剛度，但不受位移場與應力場的影響；而應力剛度矩陣則與位移場與應力場有關。

此外，挫屈的定義為當結構到達臨界負載，此時負載不再增加，但結

構卻有微小的位移量 $[dU]$ ，即表示結構發生挫屈行為。根據定義的描述，在有限元素法中可表示為

$$([K_0] + [K_\sigma])[dU] = 0 \quad (3.2)$$

接著，對結構施加一個參考負載 $[F]_{ref}$ 有其對應之應力剛度矩陣，在此將它稱為參考應力剛度矩陣 $[K_\sigma]_{ref}$ 。因此依據負載的不同，(3.2)式中的應力剛度矩陣與參考應力剛度矩陣存在以下的關係

$$[K_\sigma] = \lambda [K_\sigma]_{ref} \quad (3.3)$$

將(3.3)式代入(3.2)式中，可得

$$([K_0] + \lambda [K_\sigma]_{ref})[dU] = 0 \quad (3.4)$$

(3.4)式即為標準的特徵值問題，其中 $[dU]$ 為特徵向量，代表挫屈後的挫屈模態； λ 為特徵值，代表臨界負載係數。透過臨界負載係數乘上參考負載即可求得臨界挫屈負載

$$[F]_{cr} = \lambda [F]_{ref} \quad (3.5)$$

藉由線性挫屈分析可快速求得結構之挫屈負載與挫屈模態，但由於不考慮結構本身存在之缺陷，因此所得之臨界挫屈負載與實際情形有較大的

誤差，且線性挫屈分析無法求得結構挫屈時的應力或應變狀態，因此需再進一步進行非線性分析。

3.1.2 非線性分析

為了得到準確的挫屈負載以及完整的挫屈發生過程，需透過非線性分析逐步求解。在非線性分析中，將同時考慮結構的幾何大變形與結構本身之缺陷，並使用牛頓拉福森法(Newton-Raphson approach)，經由逐步疊代收斂結果得到挫屈發生過程中應力與應變狀態的改變。

本研究使用有限元素套裝軟體 ANSYS 進行模擬分析，非線性分析流程圖如圖 3.2 所示。其中，由於完美的結構不會發生挫屈，需藉由微小的缺陷觸發其挫屈行為，而在模型中加入缺陷的方法為利用線性挫屈分析中求得之挫屈模態，導入至原始的模型中，依據挫屈模態形狀的不同，模型節點將產生一個微小的偏移量，藉以觸發挫屈行為的產生。在有限元素套裝軟體 ANSYS 中，求取結構挫屈模態的方法為 Block Lanczos 特徵演算法。本研究將以挫屈的第一變形模態作為缺陷之依據，缺陷(r)的定義為

$$r = \frac{e_{\max}}{t_f} \quad (3.6)$$

其中， e_{\max} 為模型中節點的最大偏移量， t_f 為表層之厚度， r 為缺陷，代表表層厚度的百分比， r 為正值時，表示結構朝含脫層側的表層方向翹屈；反之為負值時，則表示結構朝無脫層表層方向翹屈。結構初始偏移量的示意

圖如圖 3.3 所示。接著，以含有缺陷之模型進行非線性分析，分析過程中考慮結構的幾何大變形，以位移控制的方式，將位移切割為有限步數循序增加，經由逐步疊代收斂後完成求解過程。

藉由非線性的分析結果，可得到模型挫屈負載與應變關係，而挫屈負載的判斷則與實驗之方法相同，為當表層表面中心區域的應變值從原本的壓縮應變發生轉折，朝拉伸應變方向發展時，此時最大壓縮應變值發生時刻即為結構發生挫屈行為，並定義此時負載為挫屈負載。透過改變導入模型中的缺陷量，將改變模型之負載與應變關係曲線，本研究將以分析結果之負載與應變曲線和實驗結果進行比較，得到 $[(0/90)_2]_S$ 和 $[(0/90)_3]_S$ 之三明治結構中不同脫層長度所對應之缺陷大小。因此，不同脫層長度的模型將有其特定之缺陷大小，接著，將以此缺陷所得之分析結果進行破壞強度的預估。

3.2 有限元素模型之建立

本研究根據實驗試片之幾何形狀建立有限元素模型，由於只考慮試片的測試長度(Gauge length)，所以模型總長為 120 mm。分析模型中，元素使用二維平面應變元素 PLANE183，此元素為高階八節點元素，每個節點有兩個方向的自由度。三明治試片材料性質如表 2.1 與表 2.2 所示。

表層的建立是根據實際試片的疊層順序分層建立，定義纖維 0° 方向為試片長度方向，與總體座標(Global coordinate)的 X 方向同向， 90° 為出紙面

方向。此外，模型中不考慮黏膠厚度，表層與芯材的結合透過對面積的黏合建立。在脫層區域的部分，表層與芯材界面並無接合，兩者的元素節點在位置上重疊但各自獨立，並在脫層區域鋪設接觸元素(CONTA172 與 TARGE169)防止表層元素穿透芯材。在靠近脫層兩端的區域，由於結構的挫屈行為將造成此處元素有較大的扭曲變形，以及透過對破壞試片的觀察發現，此區域為裂紋通過之處，極可能為試片的最初破壞位置，因此在脫層尖端上下各 5 mm 以及厚度方向 3 mm 的區域內做元素的局部細化處理，元素網格皆為均勻正方形，元素邊長約為 0.1 mm，模型網格示意圖如圖 3.4(a) 所示，網格局部細化示意圖如圖 3.4(b)所示。

模型的邊界條件設定依據實驗架設，如圖 3.5 所示。在模型下端因試片受夾置具固定，因此將節點各方向自由度設為零；在模型的上端，則給定負 X 方向的壓縮位移，以位移控制的方式施加負載，同樣因有夾置具夾持的緣故，定義節點 Y 方向位移為零。接著，依據上述提及之分析方法進行非線性分析求解。

3.3 線性挫屈分析結果

依據 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 兩種表層疊層，其不同脫層長度模型之臨界挫屈負載整理如表 3.1 所示。從表中可發現，由於線性分析不考慮結構含有缺陷的情況，因此臨界挫屈負載值皆比實驗值高，與文獻[6]之分析結果相同。在挫屈模態的形狀中，以無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片與 60 mm

脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片作為代表。圖 3.6 為無脫層試片的第一挫屈模態變形圖，兩側表層皆往相同方向翹屈，為總體挫屈的挫屈模態；圖 3.7 為 60 mm 脫層之第一挫屈模態變形圖，含脫層側的表層明顯向外翹屈，模型為局部挫屈的挫屈模態，兩者挫屈模態皆與實驗觀察相符，如圖 2.5 與圖 2.9(a)所示。因此，將以結構之第一挫屈模態作為缺陷之參考，進行非線性分析求解，有關挫屈分析之收斂性探討將在 3.5.2 節詳細說明。

3.4 非線性分析結果與挫屈實驗之比較

本節主要目的在於以不同表層疊層為分類，決定不同脫層長度試片所對應之缺陷，並探討脫層長度對缺陷大小的影響。

3.4.1 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片

本小節將探討無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片的非線性分析結果。以 0.01%、0.1% 及 0.5% 的缺陷量分析結果與實驗曲線進行比較，圖 3.8 即為不同缺陷大小分析結果和實驗的負載與應變曲線圖。從圖中可明顯發現，分析曲線在前半段(直線的部分)與實驗相吻合，表示分析模型與實驗試片的剛性相同。當缺陷值越大，分析曲線提早發生彎曲偏離的現象，代表越大的缺陷將使結構越早發生挫屈行為。而當分析曲線到達最大壓縮應變，結構產生挫屈行為後，可發現負載值幾乎無再增加之趨勢，表示挫屈後的結構因失去其穩定性而無法再承受更多負載。另外，從圖中可得知，0.01% 的缺陷與實驗結果較為符合，因此選用此缺陷大小作為無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三

明治結構試片所對應之缺陷，經由 0.01% 缺陷量的模型所得之挫屈負載為 17.6 kN。

在結構的變形形狀方面，三明治結構分析模型的兩側表層皆往相同方向翹屈，代表整體結構的挫屈模態為總體挫屈，如圖 3.9 所示。經由與實驗結果比照，發現其變形形狀與實驗結果相同，如圖 2.5 所示，代表實驗之挫屈模態為第一挫屈模態。

3.4.2 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片

接下來，探討 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片的分析結果。圖 3.10 為不同缺陷大小的分析結果與實驗之比較圖。從圖中同樣可以發現，當缺陷大小越大時，曲線將越快到達最大壓縮應變，之後，曲線轉為朝拉伸應變的方向延伸。轉向後的曲線隨著拉伸應變的增加，負載也隨之增加。然而，60 mm 的脫層長度試片因其脫層長度較長，在實驗的壓縮過程中，試片會發生脫層區域一端的裂紋先行成長，待壓縮位移再持續增加至一定量後，結構才發生完全破壞的現象。反觀，在目前的有限元素模型中，共節點的元素彼此間不會因為負載的增加而分離，因此無法有效模擬脫層一端先行成長之現象。從圖中可明顯看出，當缺陷大小大於 1% 後，挫屈負載值急速下降。其中，實驗曲線與缺陷大小為 5% 的分析曲線相互重疊，表示 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構試片所對應之缺陷大小為 5%，此模型所得之挫屈負載為 3.9 kN。

圖 3.11 為缺陷大小為 5% 時，結構受軸向壓縮下的結構變形圖。模型在含脫層側的表層部份發生向外翹屈的現象，而另一側的表層則幾乎維持不變，因此判斷結構挫屈模態為脫層側表層的局部挫屈，此與實驗觀察之結果相似，如圖 2.9(a) 所示。

3.4.3 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構試片

為了得知 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構試片的缺陷大小，本研究以 0.5%、1%、5% 及 12% 缺陷量的分析結果與實驗相互比較，如圖 3.12 所示。從圖中得知，當缺陷量越大時，曲線越早偏離曲線的初始斜率，同時也越早開始發生轉折的現象，此即代表較大的缺陷量將提早發生挫屈行為，挫屈負載也相對於較小缺陷量的挫屈負載低。同樣地，其曲線與 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構試片的負載應變曲線趨勢相近，曲線在發生挫屈現象後，負載持續上升，代表在脫層長度較長的試片中，即使結構發生挫屈行為，但還是可以再承受少量的負載。從圖中可明顯發現，實驗的曲線與 5% 缺陷量的分析結果相近，因此，以 5% 的缺陷量當作是 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構試片的缺陷大小，經由此模型的分析結果所得之挫屈負載為 3.2 kN。

觀察 5% 缺陷量模型的變形圖，如圖 3.13 所示。從圖中可看出脫層側的表層朝外發生翹屈，結構呈現類似 sin 函數的形狀，代表在壓縮過程中脫層側的表層發生局部挫屈的現象。

3.4.4 無脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構試片

接下來，探討表層疊層順序為 $[(0/90)_3]_S$ 的三明治結構試片，以兩側表層與芯材間皆無脫層的試片開始討論。與前述的做法相同，以 0.3%、1% 和 5% 缺陷量的分析結果與實驗曲線進行比較，圖 3.14 為不同缺陷大小下的分析曲線與實驗的負載與應變比較圖。從圖中可發現，其分析曲線的趨勢與表層疊層順序為 $[(0/90)_2]_S$ 的三明治結構試片相同，當缺陷量越大，將使得結構提早產生挫屈行為，挫屈負載也相較於缺陷量小的分析結果低。另外，結構在發生挫屈行為後，其負載值只略微增加，最後將維持定值，表示挫屈後的結構失去自身的穩定性，已無法再承受更多負載。透過比較得知，0.3% 為缺陷量的分析結果與實驗相近，因此以 0.3% 的缺陷量做為此組試片的缺陷代表，經由分析結果得到無脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治模型的挫屈負載值為 22.7 kN。

藉由觀察模型的變形形狀，如圖 3.15 所示。從中發現三明治結構兩側的表層皆往相同方向翹曲，整體結構呈現總體挫屈的挫屈變形，且形狀與實驗觀察之結果相同，如圖 2.16 所示，表示實驗得到之挫屈模態為結構的第一挫屈模態。

3.4.5 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構試片

接著，探討 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構試片的缺陷大小。藉由實驗的觀察得知試片之挫屈模態為總體挫屈且朝完好無脫層側表層發生翹

屈，代表較短的脫層不足以影響總體挫屈時的挫屈方向。因此，本研究將以正負兩組缺陷量探討試片在不同挫屈方向下對挫屈負載的影響。首先，以 0.3%、1% 及 5% 缺陷量的分析結果與實驗相互比較，如圖 3.16 所示。圖中的分析曲線為含脫層側表層的應變與負載曲線，而實驗曲線為應變規-B(無脫層側)之曲線，從圖中可明顯發現，分析曲線在前半段(直線的部分)與實驗相吻合，當缺陷值越大，分析曲線提早發生彎曲偏離的現象，代表越大的缺陷將使結構越早發生挫屈現象。而當分析曲線到達最大壓縮應變，結構產生挫屈行為後，負載值將趨於定值，表示挫屈後的結構因失去其穩定性而無法再承受更多負載。另外，從圖中可得知，0.3% 缺陷的分析結果與實驗結果較為符合，分析結果所得之挫屈負載為 22.7 kN。在模型的變形形狀部份，如圖 3.17 所示。三明治結構兩側的表層皆往含脫層側表層翹屈，整體結構呈現總體挫屈的挫屈變形，此變形形狀與實驗之挫屈方向相反，如圖 2.19 所示。

而以 -0.3%、-1% 及 -5% 缺陷量的分析結果與實驗比較，如圖 3.18 所示。分析曲線與實驗曲線皆為無脫層側之應變與負載結果，從圖中發現 -0.3% 的缺陷量與實驗結果最為符合，且分析之挫屈負載也為 23.7 kN。圖 3.19 為模型之變形圖，兩側表層皆往無脫層側翹屈，與實驗觀察相符，如圖 2.19 所示。從中得知，當在脫層較短時，總體挫屈之方向不影響結構之挫屈負載，試片有可能朝無脫層方向翹屈。

3.4.6 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構試片

接著，探討 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構試片的缺陷大小，以 1%、3%、5% 和 10% 缺陷量的分析結果與實驗做比較。圖 3.20 即為分析結果與實驗結果之負載與應變響應圖。缺陷量大小和挫屈行為間的關係與前述結果之趨勢相同，當缺陷量越大，將使得結構提早發生挫屈現象，其挫屈負載也相較於缺陷量較小之結構低。同樣於 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構試片，當脫層長度較長時，結構發生挫屈現象後，負載曲線仍持續上升，表示結構仍可再承受些許負載。從圖中清楚得知，實驗曲線和 3% 缺陷量的負載與應變曲線相互重疊，因此將以 3% 的缺陷量作為 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構試片所對應的缺陷大小，藉由此缺陷量的分析結果得知模型之挫屈負載值為 10.0 kN。

觀察模型的變形形狀，如圖 3.21 所示。從圖中發現，模型在含脫層側的表層部份發生向外翹屈的現象，而另一側的表層只略微彎曲，根據其變形形狀顯示結構的挫屈模態為含脫層側表層的局部挫屈，此與實驗觀察之情形類似，如圖 2.22(a)所示。

3.4.7 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構試片

最後，探討 70 mm 脫層長度的缺陷大小。以 0.1%、1%、3% 及 10% 缺陷量的分析結果與實驗做比較，如圖 3.22 所示。從圖中可得知 3% 缺陷量的曲線與實驗最為接近，因此將以 3% 的缺陷量作為 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$

三明治結構試片的缺陷大小，而從中得知模型之挫屈負載值為 8.3 kN。

模型之變形圖如圖 3.23 所示。含脫層側的表層向外翹屈，另一側的表層僅些微彎曲，表示結構之挫屈模態為含脫層側表層的局部挫屈，與實驗觀察情形相同，如圖 2.26(a)所示。

其餘脫層長度試片皆以相同分析方法獲得試片對應之缺陷值，並從分析結果中得到挫屈負載，整理如表 3.2 所示。從表中可發現分析所得之挫屈負載皆與實驗值接近。

3.4.8 表層厚度與脫層長度對缺陷值的影響

經由上述非線性分析結果與實驗曲線之比對而獲得不同種類試片所對應的缺陷值，依照表層疊層的不同，其與脫層長度的關係如圖 3.24 所示。從圖中可發現，隨著脫層長度的增加，其缺陷值也隨之增加。其中，以 $[(0/90)_2]_s$ 為表層疊層順序之三明治結構的缺陷值改變的幅度較廣，從 0.01% 增加至 5%；而以 $[(0/90)_3]_s$ 為表層疊層順序之三明治結構的缺陷值則從 0.3% 增加至 3%。造成此分布情形的原因可能為由於挫屈行為本身即為結構發生不穩定的現象，而 $[(0/90)_2]_s$ 的表層較 $[(0/90)_3]_s$ 的表層薄，因此一旦當結構的脫層長度較長，不穩定的現象將較明顯，使得缺陷值快速增加。另外，從圖中發現，在 $[(0/90)_2]_s$ 的表層疊層中，當脫層長度為 50、60 及 70 mm 時的缺陷值皆為 5%，而在 $[(0/90)_3]_s$ 的表層疊層中，脫層長度為 60 與 70 mm 的缺陷值皆為 3%，表示當脫層達到一定長度時，結構之缺陷值將趨近於定值。

另一方面，藉由觀察兩條曲線之趨勢發現，以 $[(0/90)_2]_s$ 為表層的無脫層試片與10 mm脫層試片的缺陷值相近；而以 $[(0/90)_3]_s$ 為表層的無脫層、10 mm與30 mm脫層試片之間的缺陷值相近，其中的共通點為五組試片的挫屈模態皆為總體挫屈，代表發生總體挫屈的試片，其缺陷值增加幅度較小，但當挫屈模式轉為局部挫屈後，試片的缺陷值將快速增加。

3.5 破壞分析方法

本研究將以最大主應變準則或 Sheppard 等人[15]提出之破壞區域方法進行三明治結構的破壞強度預估。根據實驗的觀察，本研究發現試片的破壞模式主要可歸類為兩種，一種為在芯材上下兩段斜裂紋的破壞，一種為裂紋沿著脫層側的表層延伸，最後導致芯材與表層的分離。而由於在脫層兩端有應力集中之現象，無法藉由最大主應變準則判斷試片的破壞強度，因此在靠近脫層尖端的區域將使用破壞區域方法進行預估，而遠離脫層尖端處則使用最大主應變準則判斷破壞強度，在兩種準則的預估結果下取最低的破壞強度值作為試片的預估破壞強度。

3.5.1 破壞區域方法

在破壞區域方法中，Sheppard 等人的觀點為當結構發生破壞時，是由於結構上超過破壞參考值的區域大小達到一定的範圍。以此觀點為基礎，Sheppard 等人提出可以運用特定大小的體積或面積當作破壞時的依據，並稱此特定範圍的大小為破壞區域臨界值(Critical damage zone size)，對結構

進行破壞強度的預估，其優點在於透過此方法可避免脫層尖端的應力集中現象。其中，破壞區域臨界值的決定主要可分為以下三個步驟：

- (1) 首先，任選一種試片模型，根據實驗的結果，將分析模型施加實驗測量所得之破壞負載。
- (2) 選擇適當的破壞準則，其可為最大應力破壞準則、最大應變破壞準則或 Von Mises 破壞準則等。計算模型在實驗的破壞負載時，元素超過破壞準則的數量，所得之元素的總體積或總面積即定義為破壞區域臨界值。
- (3) 利用此破壞區域臨界值即可預估其他相同模型之破壞強度。

3.5.2 破壞區域臨界值之選擇

本研究選用 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 試片作為決定破壞區域臨界值之基準，依據上述之方法計算破壞區域臨界值，流程圖如圖 3.25 所示。

根據賴[20]的實驗結果得知，50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構試片的破壞強度為 8.0 kN，因此在非線性分析中，當模型結構負載為 8.0 kN 時，決定其破壞區域臨界值的大小。本研究以最大主應變準則作為判斷破壞區域臨界值之標準，藉由實驗的觀察得知，在壓縮實驗的過程中，試片破壞位置皆位於芯材，表層並無發生破壞現象，而芯材之拉伸破壞應變為 0.03[18]。圖 3.26(a)為三明治模型的主應變分布圖，從圖 3.26(b)的局部放大圖中明顯得知破壞區域出現在靠近脫層尖端的芯材部份，此即代表試片最

初是由脫層尖端發生破壞，破壞後的裂紋向試片兩端延伸，導致表層與芯材的分離，如圖 3.27 所示。此時模型的破壞元素有 242 個，破壞面積約為 2.47 mm^2 。然而，脫層尖端的元素大小將影響破壞面積，因此本研究將脫層尖端上下各 5 mm，試片厚度方向 3 mm 的區域做網格的局部細化，如圖 3.4(b) 所示。在此區域以 0.05、0.1、0.2 以及 0.4 mm 的元素邊長進行網格收斂性分析，如表 3.3 所示。從中得知，當元素邊長為 0.1 mm 時，臨界挫屈負載與破壞面積皆已達收斂；而在非線性分析中，求解的步數會影響分析的結果，本研究以最小邊長為 0.1 mm 之模型，探討當步數分別為 70、100 及 200 步時的結果，如表 3.4 所示。從表中得知，當步數為 100 步時已達收斂結果。因此，50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構試片的破壞區域臨界值為 2.47 mm^2 ，整理如表 3.5 所示。

本研究將以此破壞區域臨界值作為判斷脫層尖端處是否破壞的基準，而在遠離尖端的部分則使用最大主應變準則作為破壞的依據，藉此預估不同表層疊層順序或是不同脫層長度三明治結構試片的破壞強度。

3.6 破壞強度之預估

3.6.1 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構破壞強度預估結果

本研究以破壞區域法或最大主應變準則預估 $[(0/90)_2]_S$ 三明治結構在不同脫層長度下的破壞強度，並探討其初始破壞位置。其中，無脫層試片由於沒有應力集中現象，因此只用最大主應變準則進行預估。圖 3.28(a)為無

脫層試片的主應變分布圖，從圖中發現在芯材上下兩段的中心位置有明顯的破壞區域，表示其為試片最初的破壞位置，而主應變的方向沿著試片厚度方向幾乎一致，裂紋破裂方向垂直於主應變方向，與表層夾角約為 39 度，如圖 3.28(b)所示，與實驗觀察到的斜裂紋破壞方向相吻合，如圖 2.5 所示，驗證無脫層長度試片的破壞是由於總體挫屈導致試片承受過大彎矩，造成芯材的破裂。此時的預估破壞強度為 17.6 kN。

在脫層長度為 10 mm 的試片中，根據賴[20]的實驗結果，試片朝完好無脫層的表層方向翹屈，如圖 3.29 所示，其破壞機制可能與朝含脫層方向翹屈之試片的破壞形式不同。因此，本研究將針對兩種不同的挫屈方向分別作探討。圖 3.30(a)為當模型朝含脫層側表層翹屈時的主應變分布圖，藉由觀察得知，破壞位置出現在脫層兩側的尖端，且已超過破壞區域臨界值，如圖 3.30(b)所示，顯示初始破壞的發生位置位在脫層尖端部位，預估之破壞強度為 17.6 kN。圖 3.31(a)為當 10 mm 脫層長度的試片朝完好無脫層的表層方向翹屈時的主應變分布圖。從圖中可看出試片在上下兩段中間處的芯材有明顯的破壞區域，而在脫層尖端雖有元素已達芯材的最大破壞應變，如圖 3.31(b)所示，但其破壞面積尚未到達破壞區域臨界值，表示試片主要的破壞位置在於試片上下兩段的芯材。觀察主應變方向發現其沿試片厚度方向的分布幾乎一致，如圖 3.31(c)所示，裂紋破壞方向垂直於主應變方向，與表層夾角約為 40 度，相近於實驗觀察之結果，如圖 3.29 所示，表示試片

是因總體挫屈導致上下芯材產生斜裂紋的破壞。預估所得之破壞強度同樣為 17.6 kN，顯示雖然試片的挫屈方向不同，但脫層較短的試片，總體挫屈的方向不影響其破壞強度的大小。

接著，在脫層長度較長的 30、60 與 70 mm 脫層長度試片中，初始破壞發生位置皆位於試片脫層的兩端，本研究以 60 mm 脫層長度試片作為以下討論之代表。60 mm 脫層長度之主應變分布圖如圖 3.32(a)所示，從圖中明顯得知初始破壞位置位於脫層兩側的尖端部位，且破壞面積已超過破壞區域臨界值，如圖 3.32(b)所示。而此時在最大主應變準則下，試片在遠離脫層尖端區域並無破壞的元素產生，此即表示試片的破壞是由於局部挫屈造成脫層側表層的翹屈，裂紋由脫層兩端延伸，最後導致試片的破壞，如圖 2.9(c)所示。預估之破壞強度為 6.9 kN。

表 3.6 為不同脫層長度下 $[(0/90)_2]_S$ 三明治試片破壞強度預估結果，無脫層與 10 mm 的預估結果同為 17.6 kN，與實驗的誤差大約為 3.8%。30 mm 的預估破壞強度為 13.0 kN，與實驗誤差大約為 2.4%。但當脫層長度到達試片測試長度一半以上時，其分析所得之破壞強度低於實驗之值。在 60 mm 脫層的試片中，預估強度為 6.9 kN，與實驗的誤差值約為 13.8%，而在 70 mm 脫層的試片中，分析的預估結果為 6.4 kN，與實驗誤差約為 16.9%。從中得知在脫層較長的情況下，其預估結果與實驗落差較大。

3.6.2 [(0/90)₃]_s 三明治結構破壞強度預估結果

接著，以相同方法預估[(0/90)₃]_s 三明治結構的破壞強度。首先，無脫層長度由於無應力集中的現象，因此只以最大主應變破壞準則預估其破壞強度，無脫層試片的主應變分布圖如圖 3.33(a)所示。由圖中觀察發現其分布情形與無脫層之[(0/90)₂]_s 三明治結構的分布情形類似，於芯材上下兩段的中間位置處有明顯的破壞產生；而主應變方向分布圖如圖 3.33(b)所示，從中發現裂紋方向與表層夾角約為 40 度，與實驗破壞試片觀察之角度相近，如圖 2.16 所示，表示試片的破壞是由於總體挫屈使得結構承受極大彎矩，造成斜裂紋的產生，最後導致結構的破壞。破壞預估強度為 23.7 kN。

在脫層長度為 10 mm 的試片中，與[(0/90)₂]_s 表層疊層情況相同，試片朝完好無脫層側的表層翹屈。因此，本研究將分別探討模型朝有脫層及無脫層方向翹屈時的破壞情形。圖 3.34 為模型朝含脫層側翹屈時的主應變分布圖，從圖中發現其脫層兩側尖端的破壞面積超過破壞區域臨界值，且於芯材上下兩段中間位置也同時發生破壞，因此從中無法明顯判斷模型破壞的初始發生位置，而此時預估之破壞強度為 23.6 kN。另外，模型朝完好無脫層側表層翹屈的破壞情形如圖 3.35(a)所示。從圖中得知芯材上下兩段中間處有明顯的破壞範圍，而其脫層尖端處雖有發生破壞，但卻尚未超過破壞區域臨界值，如圖 3.35(b)所示。模型的主應變方向分布圖如圖 3.35(c)所示，裂紋方向垂直於主應變方向，與表層夾角約為 40 度，相似於破壞試片

之觀察結果，如圖 2.19 所示。所以判斷試片的初始破壞位置位於芯材的上下兩段中間處，且預估之破壞強度為 23.7 kN，與朝含脫層側翹屈之模型的預估破壞強度值相近。

在 30 mm 脫層長度試片中，根據賴[20]的實驗結果，其破壞模式為結構的總體挫屈所導致的破壞，但裂紋路徑在試片的上半部為斜裂紋，下半部卻轉為沿著脫層側表層延伸，如圖 3.36 所示。藉由觀察試片的主應變分布圖，如圖 3.37(a)所示，試片的初始破壞位置不在於上下兩段的芯材位置，而是位於脫層兩側的尖端位置，且破壞面積超過破壞區域臨界值，如圖 3.37(b)所示；而在最大主應變準則下，並無發現其他區域的破壞。表示結構在壓縮過程中，因為脫層的存在而產生表層的局部挫屈現象，但由於表層厚度較厚不易翹屈，導致最後轉變為總體挫屈的破壞模式，因此判斷 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治結構的挫屈模態為介於總體挫屈與局部挫屈之間。模型預估之破壞強度為 21.6 kN。

脫層長度較長的試片以 60 mm 脫層長度為例。圖 3.38(a)為試片的主應變分布圖，從圖中發現最初的破壞位置位於脫層兩側的尖端，且破壞的面積超過破壞區域臨界值，如圖 3.38(b)所示。表示試片是由於脫層尖端的裂紋先行成長，最後延伸至試片兩端，導致表層與芯材的分離，如圖 2.22(b)所示。預估之破壞強度為 13.6 kN。

表 3.7 為不同脫層長度下 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片破壞強度預估結果，無脫

層試片的預估破壞強度為 23.7 kN，與實驗值的誤差大約為 5.8%；在 10 mm 的脫層長度中，朝完好無脫層方向翹屈試片的預估破壞強度為 23.7 kN，而朝含脫層側翹屈的預估強度則為 23.6 kN，兩者之預估強度值接近，與實驗值的最大誤差約為 6.3%。從表中發現，無脫層與 10 mm 脫層試片的預估結果皆略大於實驗測量之值。另外，30、50 與 60 mm 脫層長度的預估破壞強度分別為 21.6、16.3 與 13.6 kN，三種試片預估結果皆與實驗值接近，而當脫層長度為 70 mm 時，其與實驗間誤差略增為 2.5%。

綜合以上預估強度的結果發現，當試片的脫層長度小於測試長度的一半時，預估之破壞強度與實驗間誤差小於 6.3%；而當脫層長度到達測試長度的一半(60 mm)時，以 $[(0/90)_2]_s$ 為表層疊層之三明治結構比 $[(0/90)_3]_s$ 為表層疊層之三明治結構有較大的誤差，最大誤差達 16.9%，推測其中原因可能為 $[(0/90)_2]_s$ 的表層較 $[(0/90)_3]_s$ 的表層薄，使得發生挫屈時，含脫層側的表層翹屈較為明顯，同時造成脫層尖端有較嚴重的應力集中現象，導致無法準確地預估破壞強度。

在破壞位置的預估方面，當試片的挫屈模態為局部挫屈時，含有脫層側的表層發生翹屈，呈現略為弧形的形狀，試片最初的破壞位置發生於靠近脫層尖端的芯材部分，表示裂紋由脫層兩端向外延伸；而當試片無脫層長度，亦或是含有較短脫層但試片朝無脫層方向翹屈時，此時初始破壞發生的位置轉變為約位於試片的對稱軸與夾持端中間的芯材部位，表示此類

試片的破壞是由於總體挫屈造成試片承受極大的彎矩，導致芯材產生斜裂紋的破壞。



第四章 結論與未來展望

4.1 結論

本研究以實驗與模擬探討含脫層之複合材料三明治結構的軸向壓縮破壞行為，主要針對三明治結構的挫屈負載、挫屈模態、破壞強度與初始破壞位置進行深入討論，從中得到以下七點結論：

1. 根據三明治壓縮實驗的結果發現，隨著脫層長度逐漸變長，三明治結構的挫屈負載與破壞強度逐漸下降，但當脫層增加至特定長度後，破壞強度則趨於定值。其中，較短脫層三明治結構的挫屈模態為結構的總體挫屈，而脫層長度較長之三明治結構的挫屈模態則為含脫層側表層的局部挫屈。
2. 藉由實驗的量測，當在相同脫層長度時，由於 $[(0/90)_3]_S$ 表層的厚度較厚，因此以 $[(0/90)_3]_S$ 為表層疊層之三明治結構的挫屈負載與破壞強度皆高於以 $[(0/90)_2]_S$ 為表層疊層之三明治結構。
3. 經由實驗的觀察，挫屈模態為總體挫屈的試片在產生挫屈行為後，試片迅速發生破壞，破壞強度與挫屈負載值接近，破壞後的試片在芯材部分將有明顯的斜裂紋存在。由於為結構的總體挫屈，因此試片有可能朝無脫層方向發生翹屈。
4. 當試片的挫屈模態為局部挫屈時，試片在發生挫屈現象後，結構還

可再承受少量負載，接著發生破壞。破壞後的試片裂紋通過脫層區域且沿著芯材與片膠的交界面附近延伸，造成表層與芯材的分離。

5. 經由有限元素非線性分析方法模擬三明治結構的挫屈行為，其挫屈負載與實驗結果相符。藉由與實驗曲線的比對獲得試片所對應之缺陷。當脫層長度越長，缺陷值隨之增加。其中，以 $[(0/90)_2]_S$ 為表層疊層試片的缺陷值有較大幅度的改變。藉由觀察發現，當試片的挫屈模態為總體挫屈時，其缺陷值相近，但轉為局部挫屈時，缺陷值將大幅增加。
6. 本研究透過破壞區域法或最大主應變準則預估三明治結構的破壞強度。當脫層長度小於測試長度的一半時，預估的破壞強度值與實驗結果間誤差小於 6.3%；而當脫層長度超過測試長度的一半時，以 $[(0/90)_2]_S$ 為表層疊層試片的預估強度相較於 $[(0/90)_3]_S$ 為表層疊層試片有較大的誤差，其與實驗的最大誤差達 16.9%。
7. 藉由主應變分布圖得知結構初始破壞位置，其中，經由局部挫屈導致破壞的試片，其初始破壞位置位於脫層區域兩端的芯材部位，表示裂紋將由此向外延伸；而在總體挫屈導致的破壞模式中，其初始破壞位置主要位於對稱軸與夾持端中間的芯材部位，表示試片是由於承受極大的彎矩，導致芯材產生斜裂紋的破壞。

4.2 未來展望

本研究以實驗與模擬探討含脫層三明治結構的挫屈行為，並對含脫層三明治結構的破壞強度預估已有一套初步的方法，接下來可再進一步討論的議題如下：

1. 本研究目前只探討不同表層厚度以及改變脫層長度對三明治結構試片在軸向壓縮實驗時的影響，對於芯材厚度的改變尚未有深入探討。因此，往後可延續本研究提出之實驗與分析方法，討論不同厚度的芯材對含脫層三明治結構的挫屈行為、破壞強度與破壞初始發生位置的影響。
2. 藉由觀察因局部挫屈所導致破壞的試片裂紋發現，在靠近脫層尖端的裂紋會繞過剛性較強之片膠，以某個特定角度朝芯材方向延伸。在未來可嘗試利用破壞力學之觀點，預估脫層尖端的裂紋延伸角度。

參考文獻

- [1] A. P. Mouritz and R. S. Thomson, "Compression, flexure and shear properties of a sandwich composite containing defects," *Composite Structures*, vol. 44, pp. 263-278, 1999.
- [2] V. Vadakke and L. A. Carlsson, "Experimental investigation of compression failure of sandwich specimens with face/core debond," *Composites Part B: Engineering*, vol. 35, pp. 583-590, 2004.
- [3] J. L. Avery III and B. V. Sankar, "Compressive failure of sandwich beams with debonded face-sheets," *Journal of composite materials*, vol. 34, pp. 1176-1199, 2000.
- [4] F. Avilés and L. A. Carlsson, "Experimental study of debonded sandwich panels under compressive loading," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 8, pp. 7-31, 2006.
- [5] T. Southward, D. Horrigan, G. D. Mallinson, and K. Jayaraman, "Failure of Sandwich Composite Structure Containing Face-sheet/Core Disbonds-an Experimental Study," in *Proceedings of the 5th Australasian Congress on Applied Mechanics*, pp. 375-380, 2007.
- [6] V. P. Veedu and L. A. Carlsson, "Finite-element buckling analysis of sandwich columns containing a face/core debond," *Composite Structures*, vol. 69, pp. 143-148, 2005.
- [7] B. V. Sankar and M. Narayanan, "Finite element analysis of debonded sandwich beams under axial compression," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 3, pp. 197-219, 2001.
- [8] A. Sayyidmousavi, K. Malekzadeh, and H. Bougharara, "Finite element buckling analysis of laminated composite sandwich panels with transversely flexible core containing a face/core debond," *Journal of composite materials*, vol. 46, pp. 193-202, 2012.

- [9] F. Avilés and L. A. Carlsson, "Post-buckling and debond propagation in sandwich panels subject to in-plane compression," *Engineering fracture mechanics*, vol. 74, pp. 794-806, 2007.
- [10] R. Moslemian, C. Berggreen, L. A. Carlsson, and F. Aviles, "Failure investigation of debonded sandwich columns: An experimental and numerical study," *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 4, pp. 1469-1487, 2009.
- [11] L. A. Carlsson and S. Prasad, "Interfacial fracture of sandwich beams," *Engineering fracture mechanics*, vol. 44, pp. 581-590, 1993.
- [12] S. Pan, L. Z. Wu, and S. Y. Du, "Investigation of failure behavior in honeycomb sandwich panel containing interfacial debonding," *16th international conference on composite materials*, 2007.
- [13] S. El-Sayed and S. Sridharan, "Performance of a cohesive layer model in the prediction of interfacial crack growth in sandwich beams," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 4, pp. 31-47, 2002.
- [14] M. K. Yeh and Y. W. Chiu, "Finite Element Analysis of Centrally-Debonded Composite Sandwich Beam under Four Point Bending," *Advanced Materials Research*, vol. 335, pp. 351-354, 2011.
- [15] A. Sheppard, D. Kelly, and L. Tong, "A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints," *International journal of adhesion and adhesives*, vol. 18, pp. 385-400, 1998.
- [16] J.-H. Park, J.-H. Choi, and J.-H. Kweon, "Evaluating the strengths of thick aluminum-to-aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses," *Composite Structures*, vol. 92, pp. 2226-2235, 2010.
- [17] "ANSYS® Academic Research, Release 13.0, Help system," 2010.
- [18] EVONIK, "ROHACELL WF Product Information,"
Website:<http://www.rohacell.com/product/rohacell/en/products-services/rohacell-wf/pages/default.aspx>.

- [19] Cytec, "FM[®] 73 Toughened Epoxy Film datasheet,"
Website:<https://www.cytec.com/engineered-materials/products/FM%2073.htm>.
- [20] 賴彥錕, "以實驗與模擬探討含脫層之複合材料三明治結構破壞行為,"
交通大學機械工程研究所論文, 2012.
- [21] "ASTM C364 / C364M - 07 Standard Test Method for Edgewise
Compressive Strength of Sandwich Constructions," 2007.



附表

表 2.1 單軸向碳纖維複合材料之材料性質

Young's modulus			Poisson's ratio			Shear modulus		
E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{33} (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)	G_{13} (GPa)
145.9	9.7	9.7	0.3	0.3	0.3	5.6	5.6	5.6

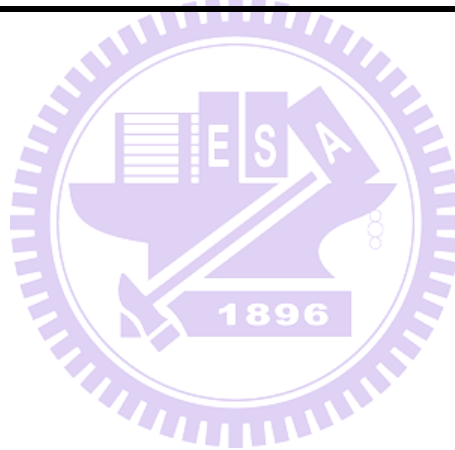


表 2.2 ROHACELL[®] - 51WF 發泡材材料性質 [18]

Density	Elastic modulus	Compression modulus	Shear modulus	Poisson's ratio	Tensile strength	Compressive strength	Shear strength	Strain at break
ρ (kg/m ³)	E_t (MPa)	E_c (MPa)	G (MPa)	ν	$s^{(+)}$ (MPa)	$s^{(-)}$ (MPa)	s_{12} (MPa)	ϵ
52	75	22	24	0.38	1.6	0.8	0.8	0.03

表 2.3 含脫層之三明治結構實驗試片規格

Face-sheet laminate	Face-sheet thickness (t_f , mm)	Debond length (L_d , mm)
[(0/90) ₂] _s	1.1	0
		10*
		30*
		50*
		60
		70
[(0/90) ₃] _s	1.6	0
		10
		30*
		50*
		60
		70

*[20] 賴彥銳, "以實驗與模擬探討含脫層之複合材料三明治結構破壞行為," 交通大學機械工程研究所論文, 2012.

表 2.4 無脫層之[(0/90)₂]_s 三明治試片實驗結果

Specimen	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Failure mode
Specimen - 1	17.8	18.1	"Global buckling" induce foam core failure
Specimen - 2	18.1	18.5	
Specimen - 3	18.1	18.4	
Specimen - 4	17.8	18.1	
Average	18.0 ± 0.2	18.3 ± 0.2	

表 2.5 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片實驗結果

Specimen	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Failure mode
Specimen - 1	3.4	8.0	
Specimen - 2	3.6	7.4	“Local buckling” induce face-sheet and core separation
Specimen - 3	3.5	8.0	
Specimen - 4	3.7	8.5	
Average	3.6 ± 0.2	8.0 ± 0.6	

表 2.6 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片實驗結果

Specimen	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Failure mode
Specimen - 1	3.4	7.7	
Specimen - 2	2.7	7.6	“Local buckling” induce face-sheet and core separation
Specimen - 3	3.3	7.9	
Specimen - 4	3.1	7.5	
Specimen - 5	2.9	7.9	
Specimen - 6	3.2	7.3	
Specimen - 7	2.6	8.6	
Specimen - 8	2.3	7.3	
Average	2.9 ± 0.6	7.7 ± 0.9	

表 2.7 [(0/90)₂]_s 三明治試片之實驗結果

Debond length(mm)	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Buckling mode	Failure mode
0	18.0 ± 0.2	18.3 ± 0.2	Global	Foam core failure
10*	17.7 ± 1.9	18.3 ± 1.6	Global	
30*	10.8 ± 0.4	12.7 ± 0.7	Local	Face-sheet and core separation
50*	4.6 ± 0.8	8.0 ± 1.7	Local	
60	3.6 ± 0.2	8.0 ± 0.6	Local	
70	2.9 ± 0.6	7.7 ± 0.9	Local	

*[20] 賴彥錕, "以實驗與模擬探討含脫層之複合材料三明治結構破壞行為," 交通大學機械工程研究所論文, 2012.



表 2.8 無脫層之[(0/90)₃]_s 三明治試片實驗結果

Specimen	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Failure mode
Specimen - 1	21.8	22.5	“Global buckling” induce foam core failure
Specimen - 2	21.4	22.2	
Specimen - 3	21.7	22.6	
Average	21.6 ± 0.2	22.4 ± 0.2	

表 2.9 含 10 mm 脫層之[(0/90)₃]_s 三明治試片實驗結果

Specimen	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Failure mode
Specimen - 1	20.9	22.3	“Global buckling” induce foam core failure
Specimen - 2	21.0	21.8	
Specimen - 3	21.4	22.4	
Specimen - 4	22.1	22.7	
Average	21.4 ± 0.7	22.3 ± 0.5	

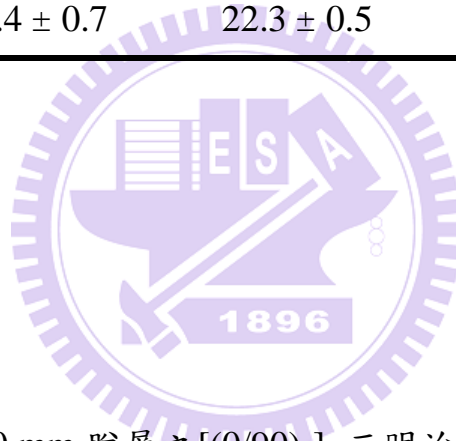


表 2.10 含 60 mm 脫層之[(0/90)₃]_s 三明治試片實驗結果

Specimen	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Failure mode
Specimen - 1	8.8	13.4	“Local buckling” induce face-sheet and core separation
Specimen - 2	9.6	13.6	
Specimen - 3	9.7	14.0	
Specimen - 4	10.4	14.2	
Average	9.6 ± 0.8	13.8 ± 0.4	

表 2.11 含 70 mm 脫層之[(0/90)₃]_s 三明治試片實驗結果

Specimen	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Failure mode
Specimen - 1	8.7	12.1	
Specimen - 2	7.7	11.2	“Local buckling” induce face-sheet and core separation
Specimen - 3	8.0	11.5	
Specimen - 4	7.4	11.8	
Average	8.0 ± 0.7	11.7 ± 0.5	

表 2.12 [(0/90)₃]_s 三明治試片之實驗結果

Debond length(mm)	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Buckling mode	Failure mode
0	21.6 ± 0.2	22.4 ± 0.2	Global	Foam core failure
10	21.4 ± 0.7	22.3 ± 0.5	Global	
30*	20.5 ± 0.9	21.7 ± 0.2	Global	
50*	13.7 ± 0.4	16.2 ± 0.5	Local	Face-sheet and core separation
60	9.6 ± 0.8	13.8 ± 0.4	Local	
70	8.0 ± 0.7	11.7 ± 0.5	Local	

*[20] 賴彥鋇, "以實驗與模擬探討含脫層之複合材料三明治結構破壞行為," 交通大學機械工程研究所論文, 2012.

表 2.13 不同脫層長度之 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片實驗結果

Face-sheet laminate	Debond length(mm)	Buckling load (kN)	Failure load (kN)	Buckling mode	Failure mode
$[(0/90)_2]_s$	0	18.0 ± 0.2	18.3 ± 0.2	Global	Foam core failure
	10*	17.7 ± 1.9	18.3 ± 1.6	Global	
	30*	10.8 ± 0.4	12.7 ± 0.7	Local	Face-sheet and core separation
	50*	4.6 ± 0.8	8.0 ± 1.7	Local	
	60	3.6 ± 0.2	8.0 ± 0.6	Local	
	70	2.9 ± 0.6	7.7 ± 0.9	Local	
$[(0/90)_3]_s$	0	21.6 ± 0.2	22.4 ± 0.2	Global	Foam core failure
	10	21.4 ± 0.7	22.3 ± 0.5	Global	
	30*	20.5 ± 0.9	21.7 ± 0.2	Global	
	50*	13.7 ± 0.4	16.2 ± 0.5	Local	Face-sheet and core separation
	60	9.6 ± 0.8	13.8 ± 0.4	Local	
	70	8.0 ± 0.7	11.7 ± 0.5	Local	

*[20] 賴彥鈺, "以實驗與模擬探討含脫層之複合材料三明治結構破壞行為," 交通大學機械工程研究所論文, 2012.

表 3.1 線性挫屈分析與實驗結果之比較

Face-sheet laminate	Debond length(mm)	Critical buckling load (kN)	Buckling load (Exp.) (kN)
$[(0/90)_2]_s$	0	17.7	18.0 ± 0.2
	10	17.5	17.7 ± 1.9
	30	12.9	10.8 ± 0.4
	50	7.3	4.6 ± 0.8
	60	5.7	3.6 ± 0.2
	70	4.5	2.9 ± 0.6
$[(0/90)_3]_s$	0	23.8	21.6 ± 0.2
	10	23.6	21.4 ± 0.7
	30	21.5	20.5 ± 0.9
	50	16.0	13.7 ± 0.4
	60	13.3	9.6 ± 0.8
	70	11.2	8.0 ± 0.7

表 3.2 挫屈分析與實驗結果之比較

Face-sheet laminate	Debond length(mm)	Imperfection	Buckling load (kN)	
			Analysis	Exp.
[(0/90) ₂] _s	0	0.01 %	17.6	18.0 ± 0.2
	10	±0.1 %	17.4	17.7 ± 1.9
	30	3 %	10.2	10.8 ± 0.4
	50	5 %	5.1	4.6 ± 0.8
	60	5 %	3.9	3.6 ± 0.2
	70	5 %	3.2	2.9 ± 0.6
[(0/90) ₃] _s	0	0.3 %	22.7	21.6 ± 0.2
	10	±0.3 %	22.7	21.4 ± 0.7
	30	0.5 %	19.9	20.5 ± 0.9
	50	1 %	13.6	13.7 ± 0.4
	60	3 %	10.0	9.6 ± 0.8
	70	3 %	8.3	8.0 ± 0.7

表 3.3 網格收斂性

Element size (mm)	Critical buckling load (kN)	Failure area (mm ²)
0.4	7.28	2.65
0.2	7.27	2.45
0.1	7.26	2.47
0.05	7.26	2.47

表 3.4 分析步數收斂性

Step number	Buckling load (kN)
70	5.09
100	5.06
200	5.06

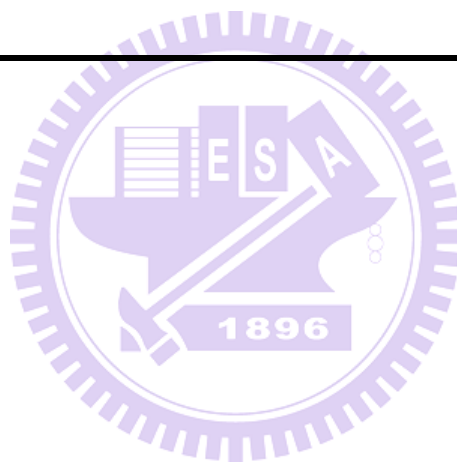


表 3.5 含 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞區域臨界值

Face-sheet laminate	Debond length (mm)	Failure load (Exp.) (kN)	Critical damage zone size	
			Element amount	Area (mm ²)
$[(0/90)_2]_s$	50	8.0 ± 1.7	242	2.47

表 3.6 [(0/90)₂]_s 三明治試片破壞強度預估結果

Debond length (mm)	Imperfection	Failure load (kN)		Buckling mode	Initial failure position
		Analysis	Exp.		
0	0.01 %	17.6(39°)	18.3 ± 0.2(43.2°)	Global	Intermediate of upper and lower half core
10	0.1 %	17.6(-)	18.3 ± 1.6(47.5°)	Global	
10	-0.1 %	17.6(40°)	18.3 ± 1.6(47.5°)	Global	
30	3 %	13.0	12.7 ± 0.7	Local	Core failure near the debond tip
50	5 %	8.0	8.0 ± 1.7	Local	
60	5 %	6.9	8.0 ± 0.6	Local	
70	5 %	6.4	7.7 ± 0.9	Local	

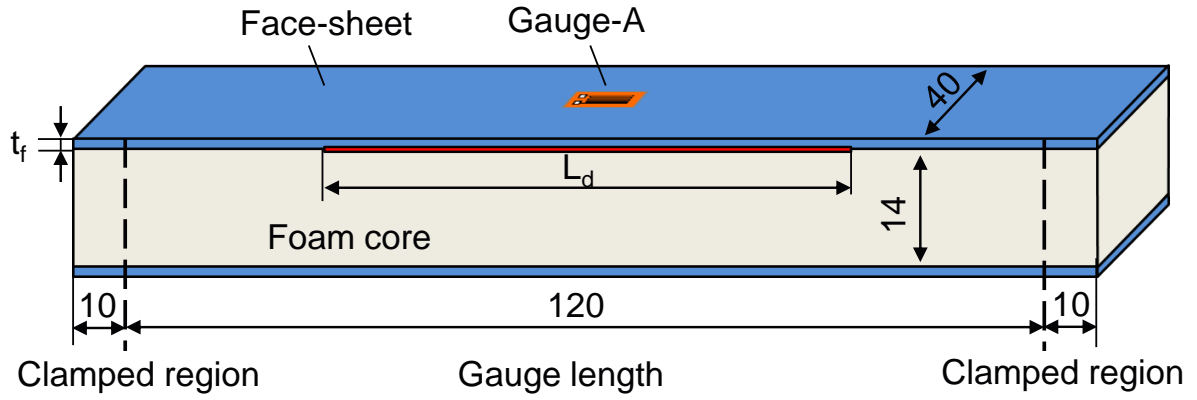
(°)內代表斜裂紋方向與表層之夾角

表 3.7 [(0/90)₃]_s 三明治試片破壞強度預估結果

Debond length (mm)	Imperfection	Failure load (kN)		Buckling mode	Initial failure position
		Analysis	Exp.		
0	0.3 %	23.7(40°)	22.4 ± 0.2(43.8°)	Global	Intermediate of upper and lower half core
10	0.3 %	23.6(-)	22.3 ± 0.5(47°)	Global	
10	-0.3 %	23.7(40°)	22.3 ± 0.5(47°)	Global	
30	0.5 %	21.6	21.7 ± 0.2	Global	Core failure near the debond tip
50	1 %	16.3	16.2 ± 0.5	Local	
60	3 %	13.6	13.8 ± 0.4	Local	
70	3 %	12.0	11.7 ± 0.5	Local	

(°)內代表斜裂紋方向與表層之夾角

附圖



Unit:mm

圖 2.1 試片基本尺寸示意圖

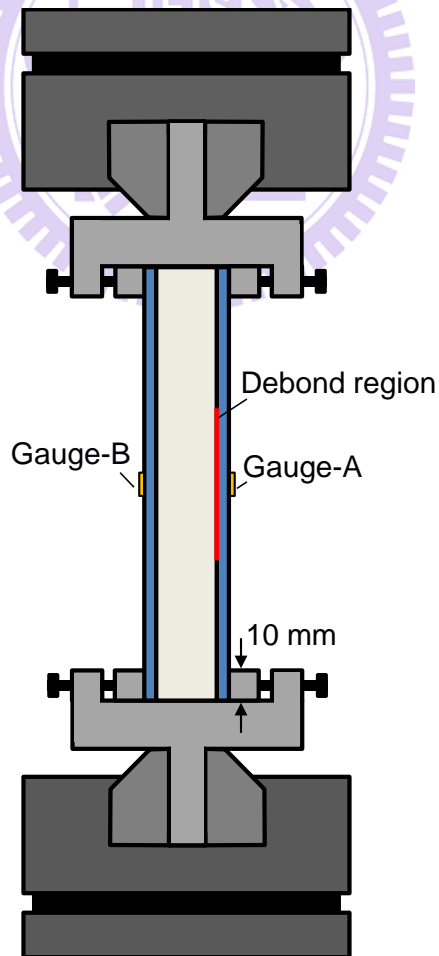


圖 2.2 三明治結構壓縮實驗架設圖

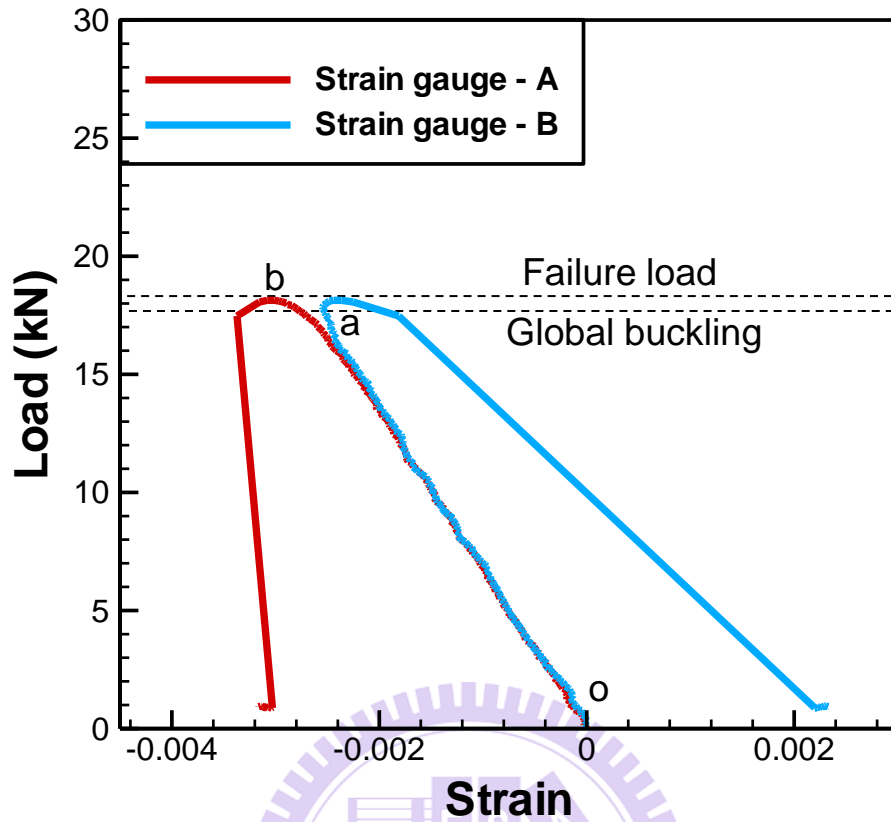


圖 2.3 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖

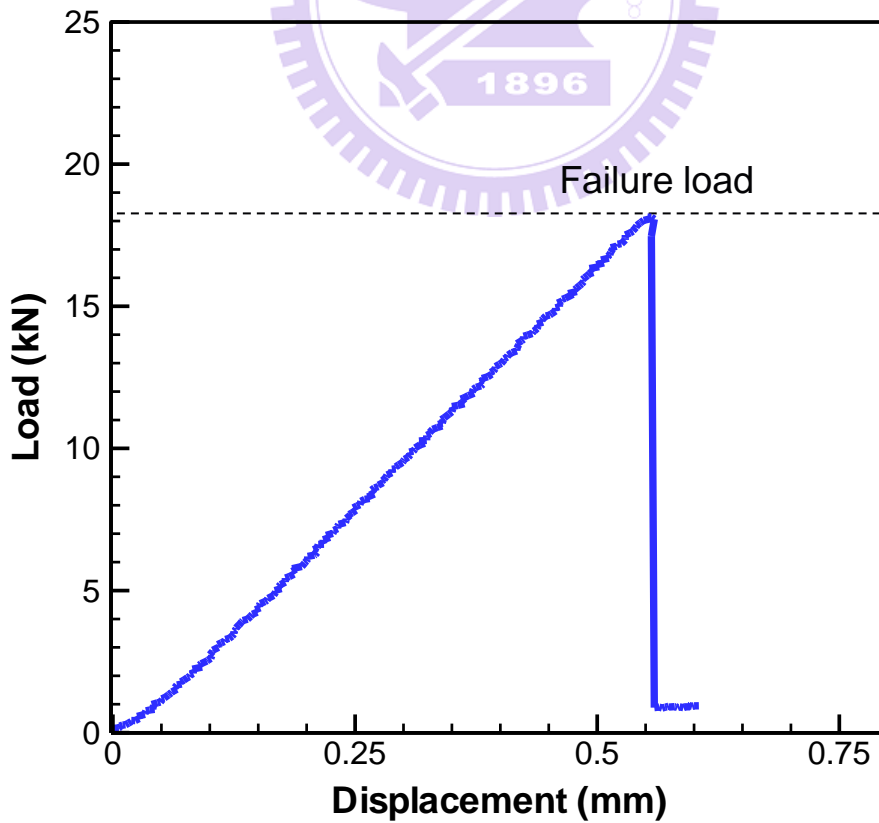


圖 2.4 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與壓縮位移響應圖

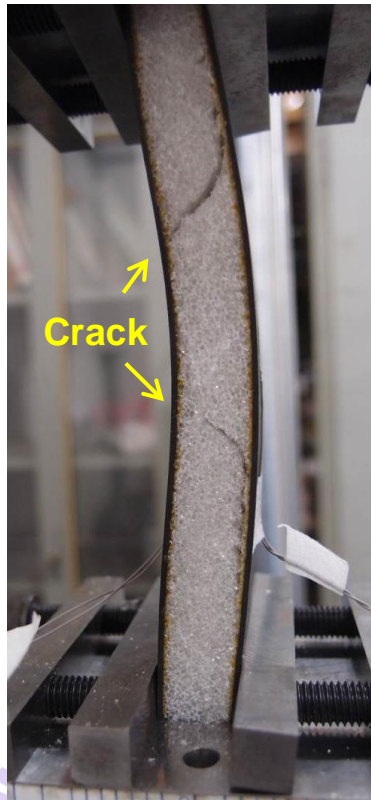


圖 2.5 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞行為

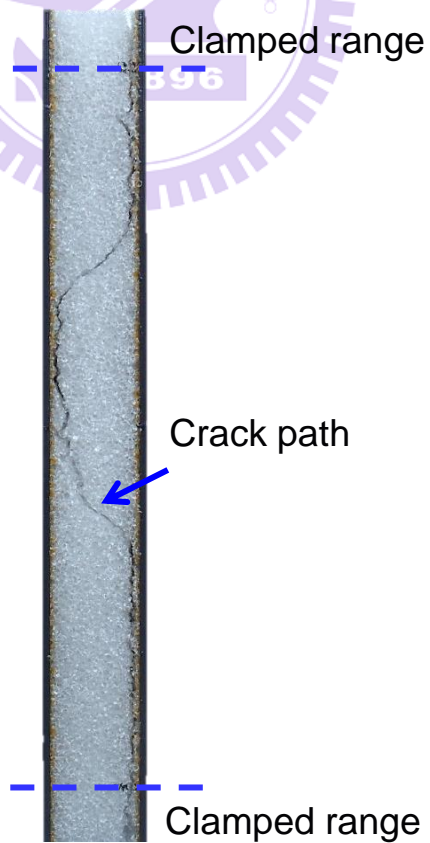


圖 2.6 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑

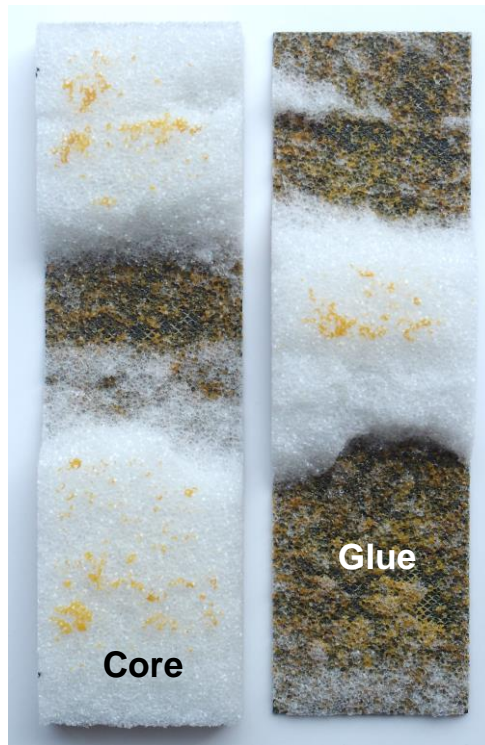


圖 2.7 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形

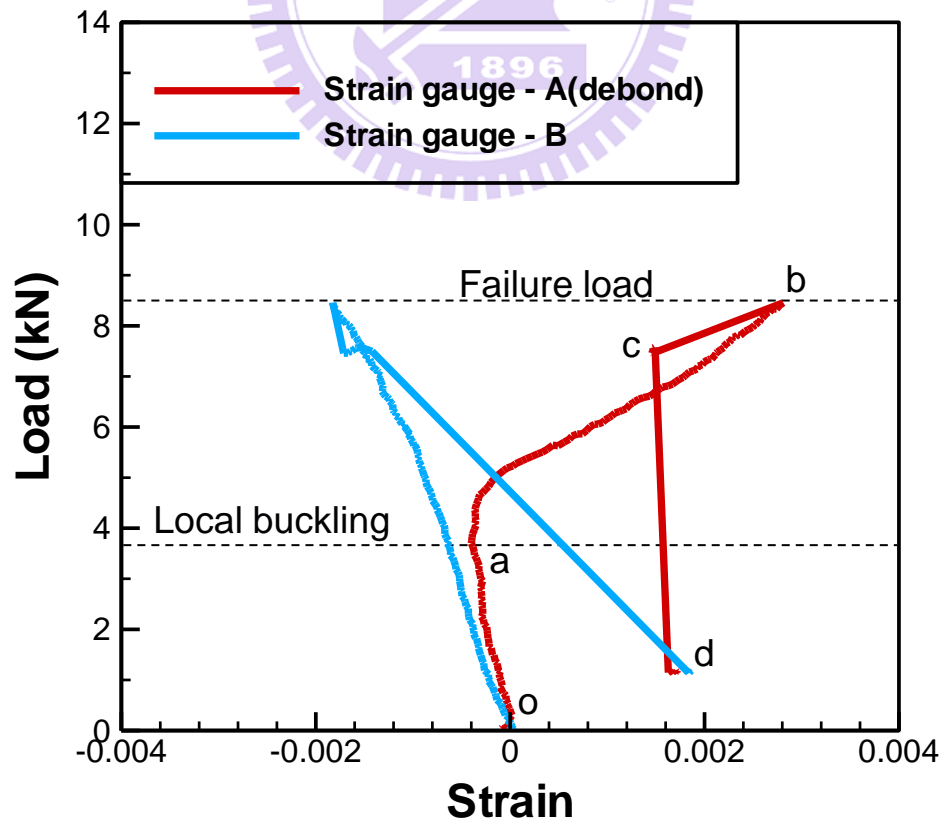


圖 2.8 含 60mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖

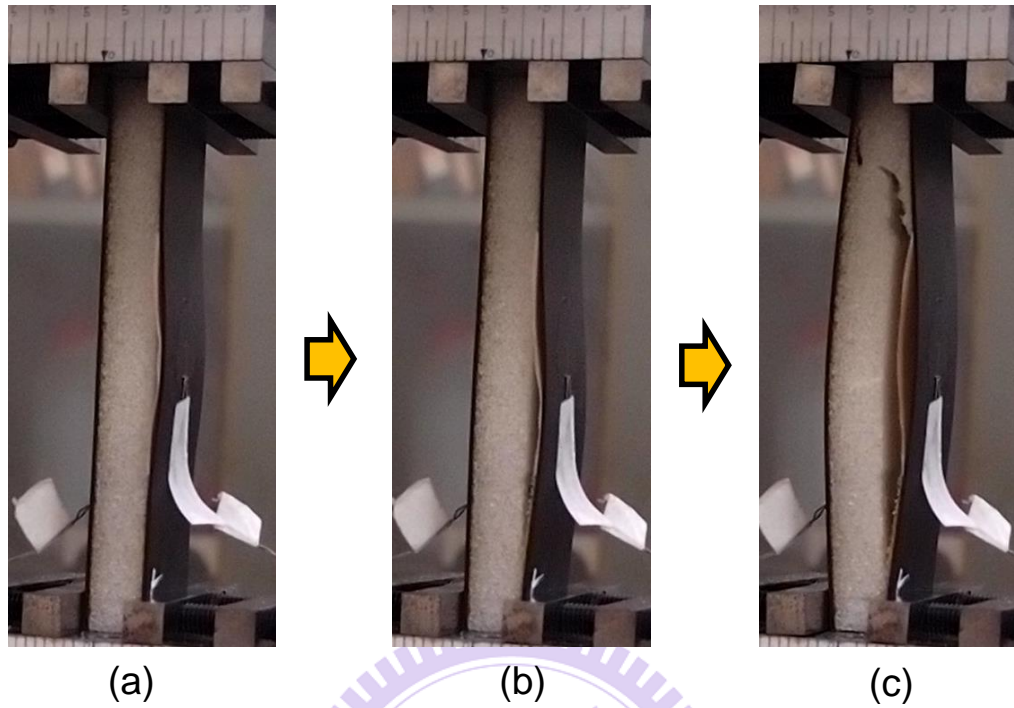


圖 2.9 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞行為((a)局部挫屈 (b)試片一端先行破壞 (c)試片完全破壞)

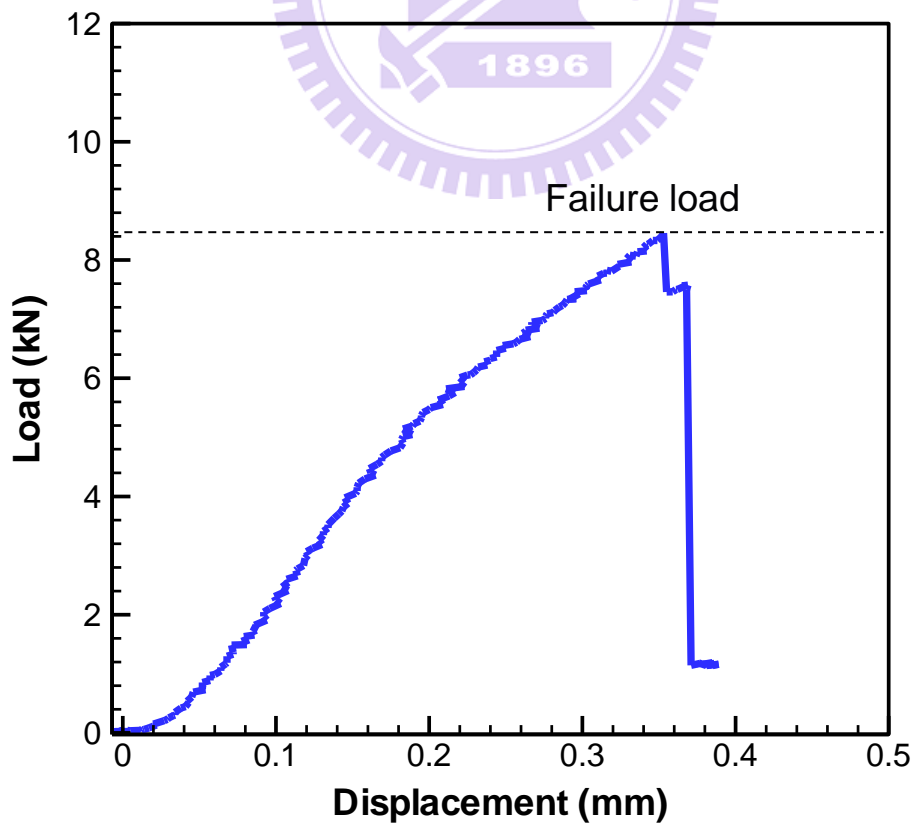


圖 2.10 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與壓縮位移響應圖

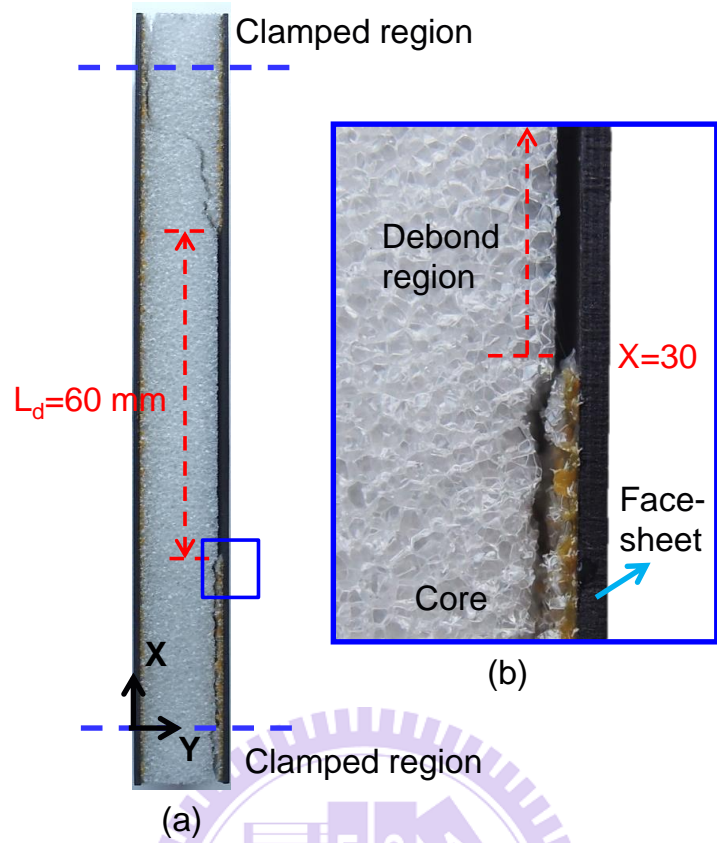


圖 2.11 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路徑 (b)脫層尖端裂紋路徑)

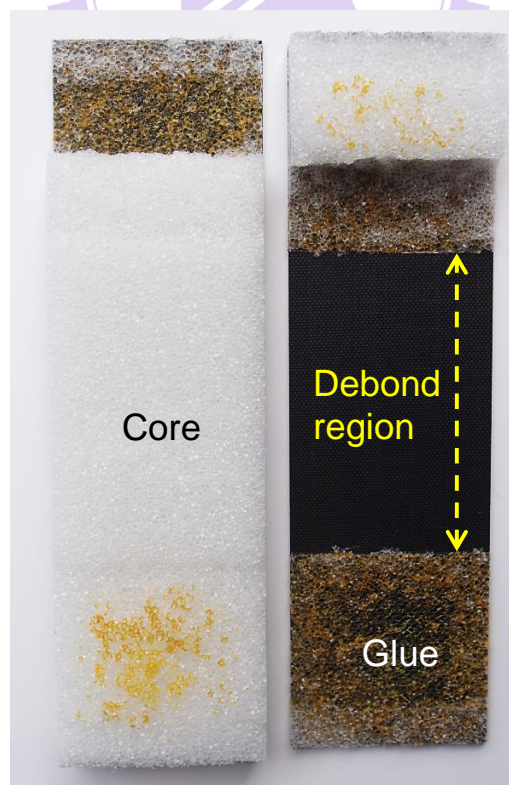


圖 2.12 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形

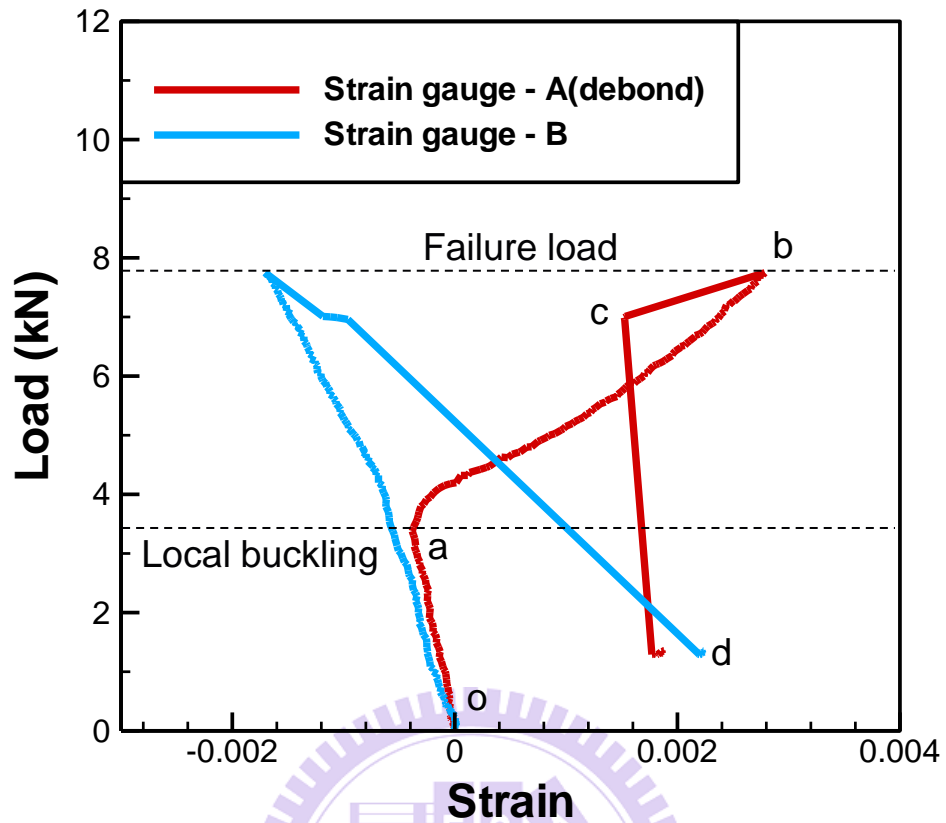


圖 2.13 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖

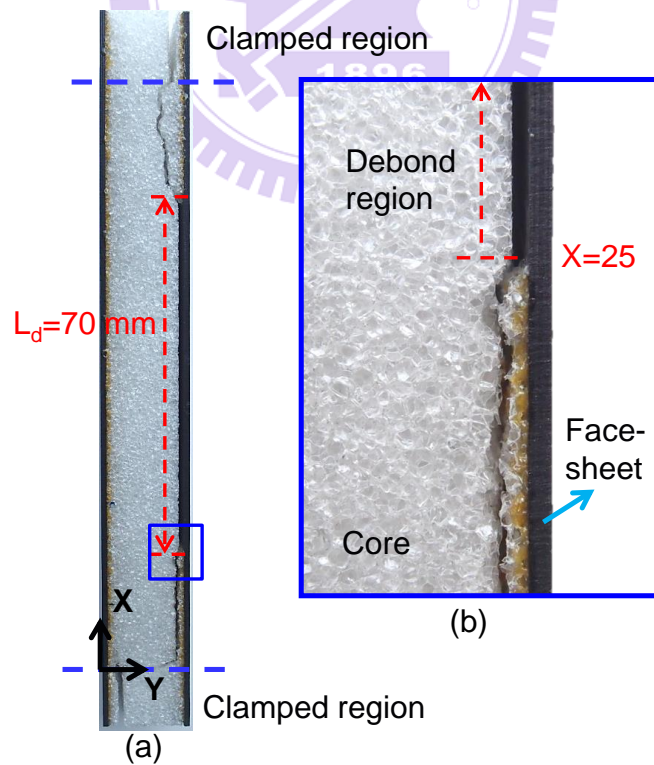


圖 2.14 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路徑 (b)脫層尖端裂紋路徑)

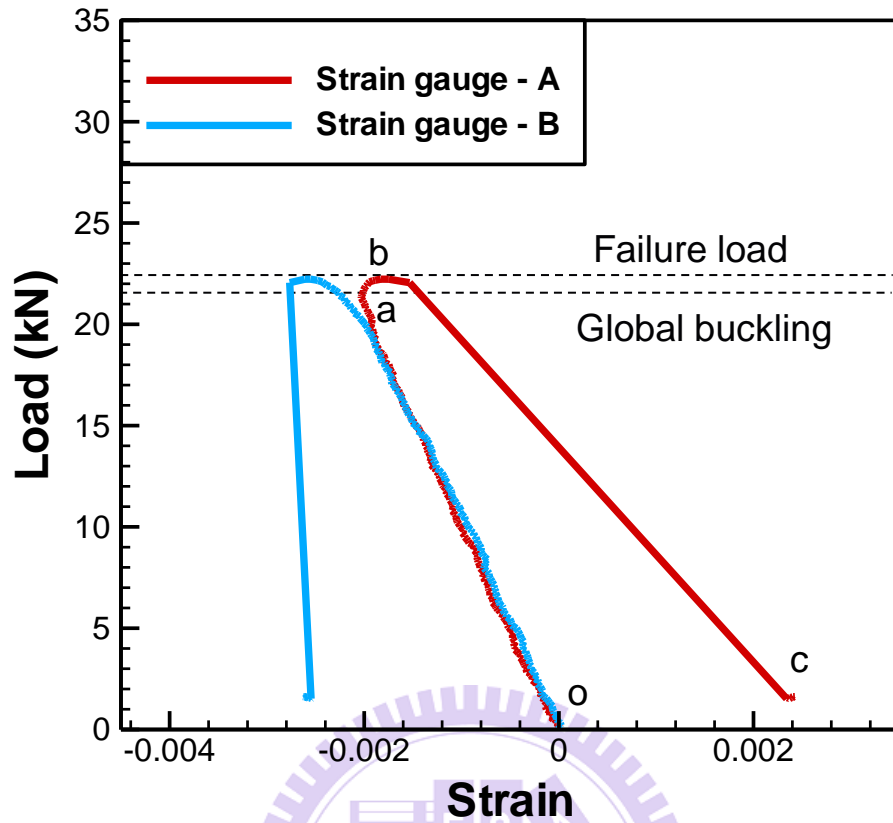


圖 2.15 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖

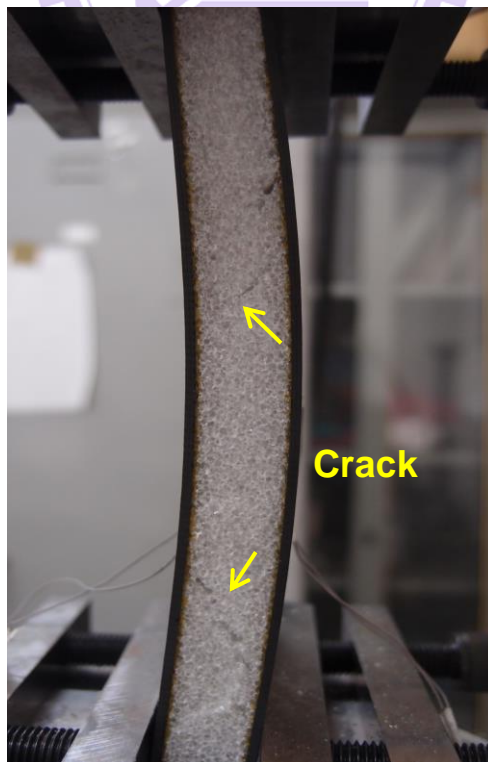


圖 2.16 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為

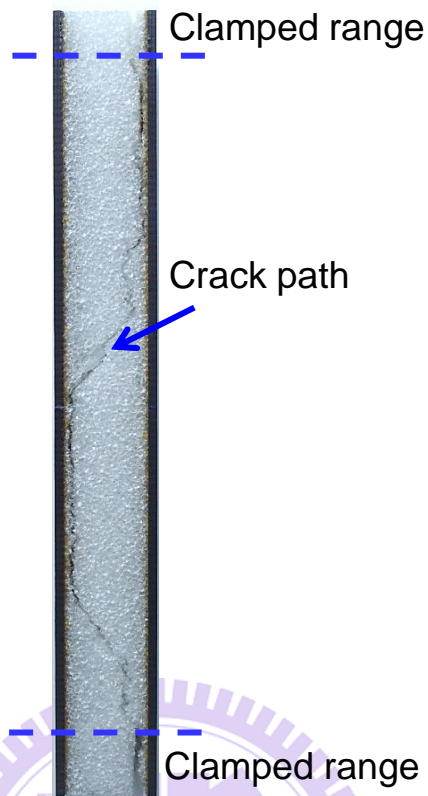


圖 2.17 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑

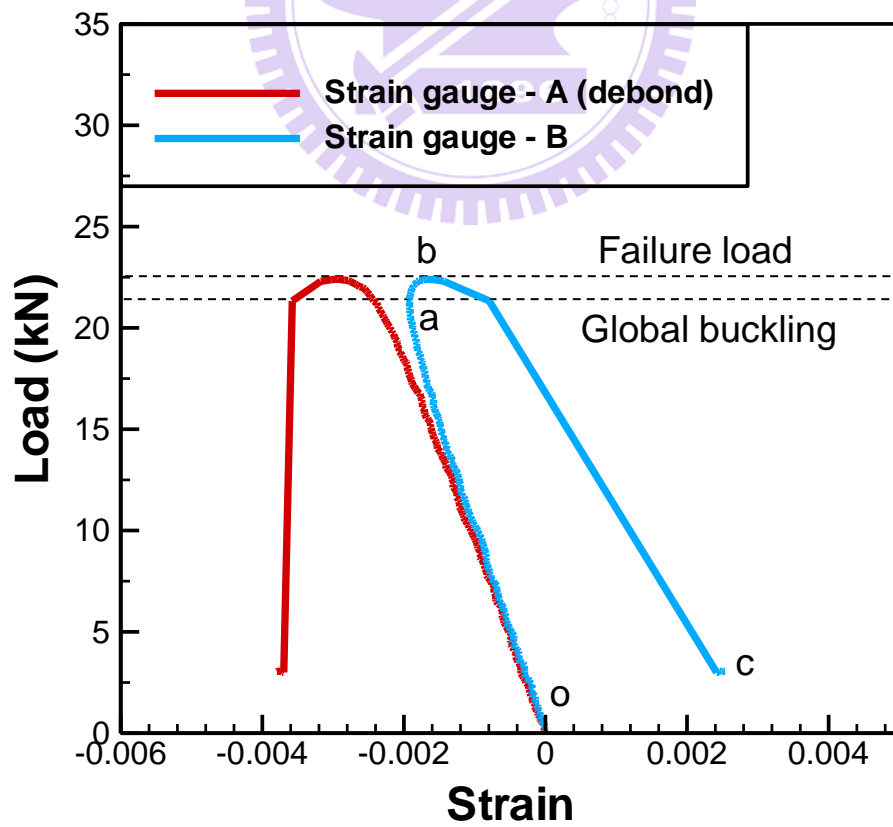


圖 2.18 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖

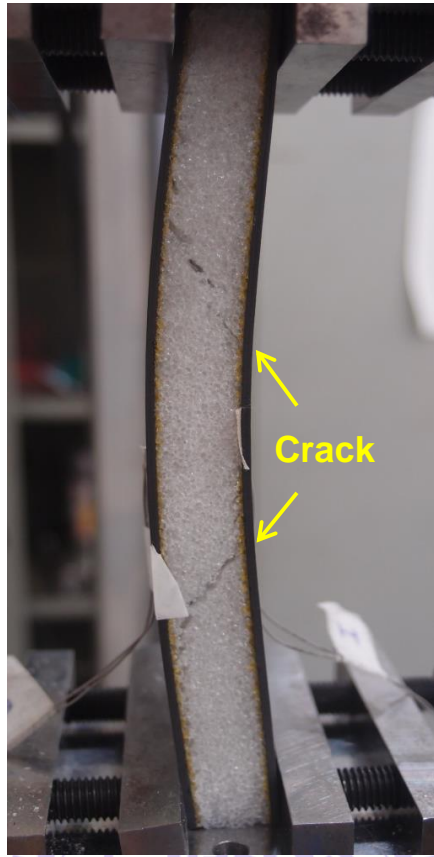


圖 2.19 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為

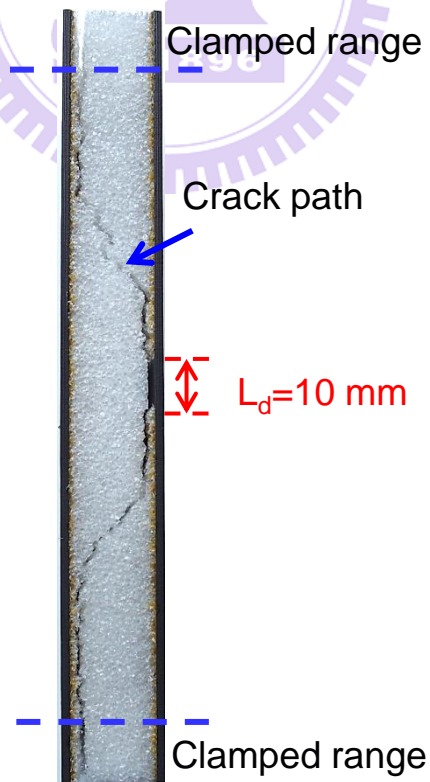


圖 2.20 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑

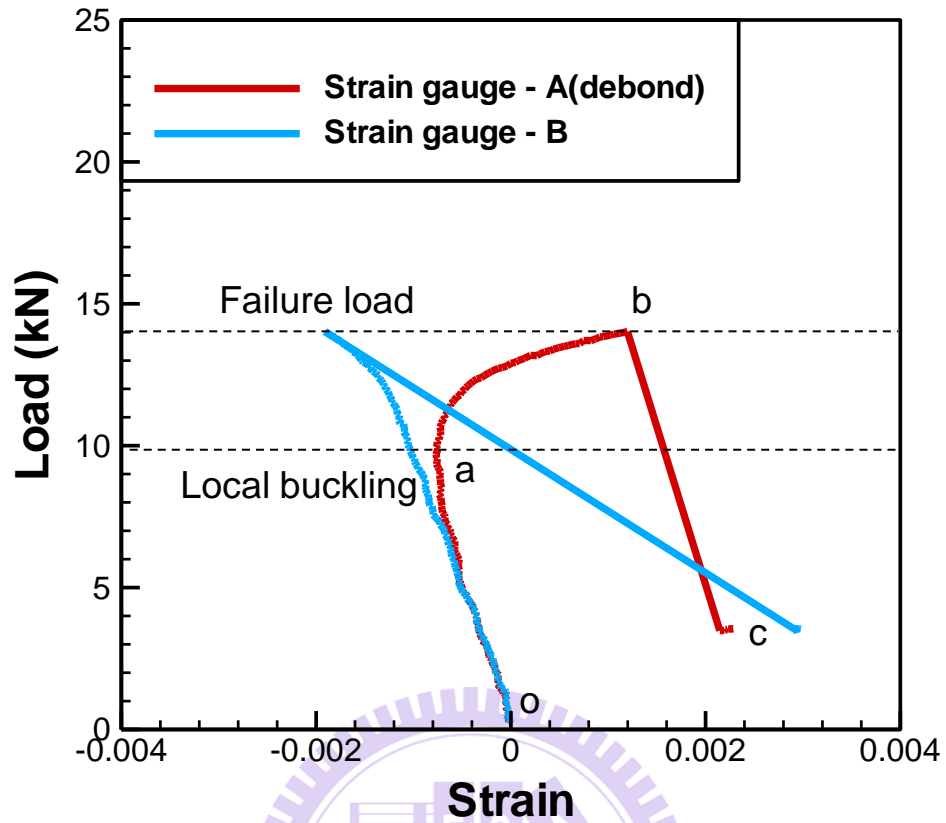


圖 2.21 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖

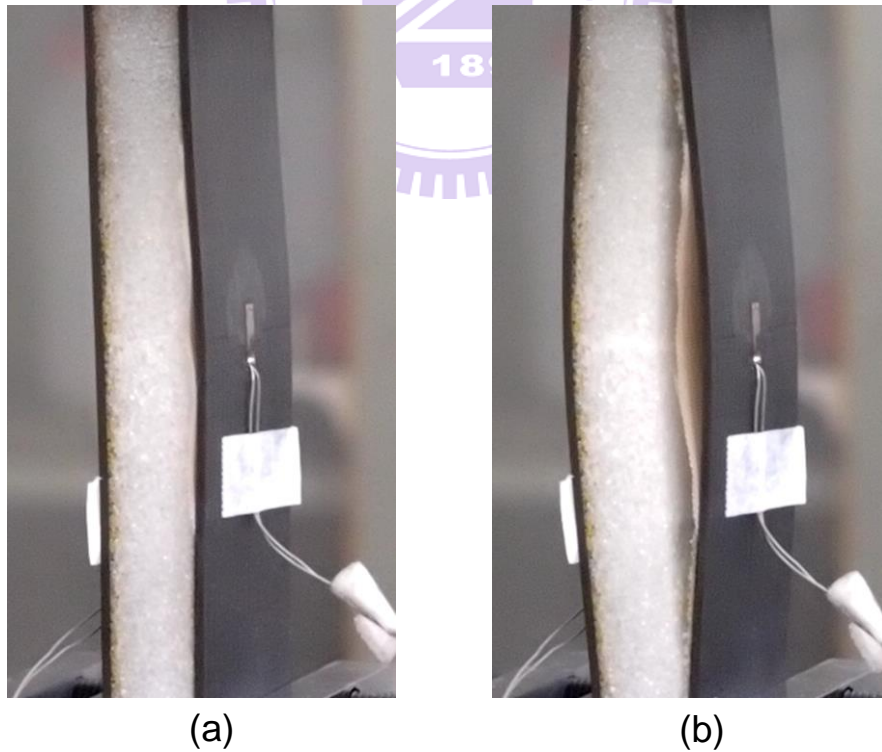


圖 2.22 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為((a)局部挫屈 (b)表層與芯材分離)

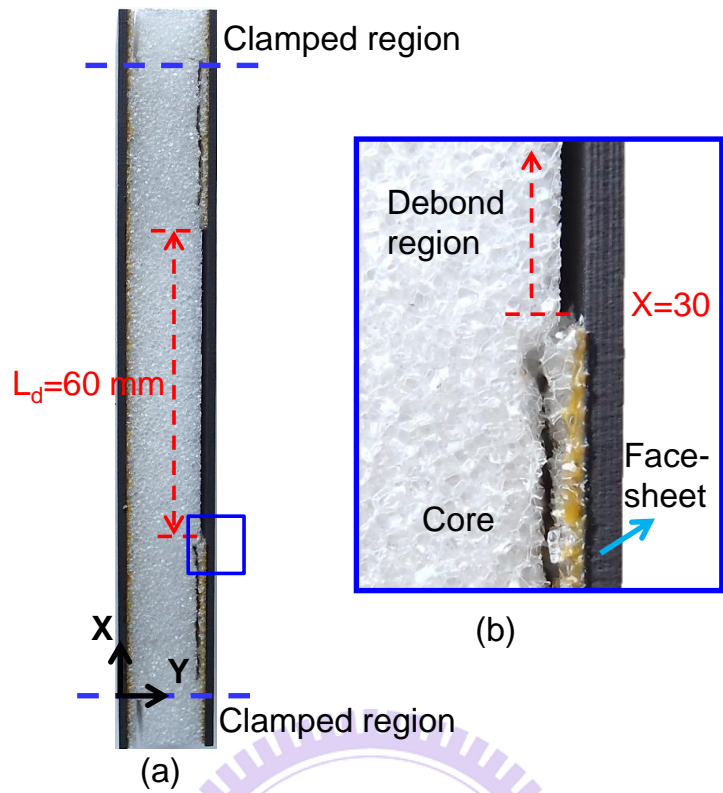


圖 2.23 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路徑 (b)脫層尖端裂紋路徑)

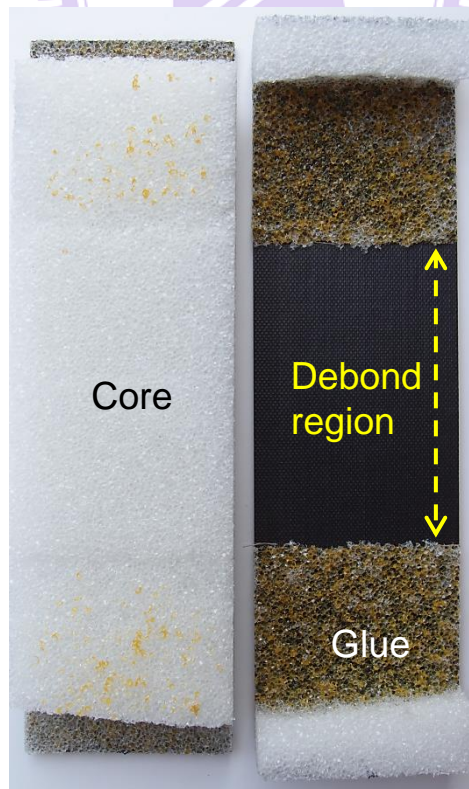


圖 2.24 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞情形

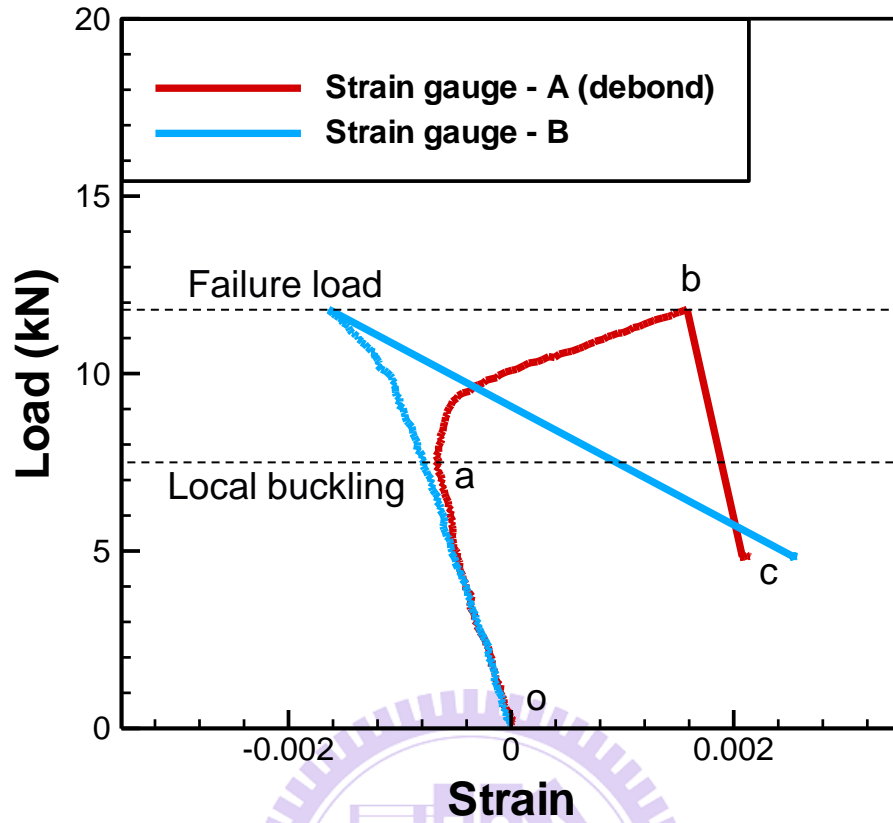


圖 2.25 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片負載與應變響應圖

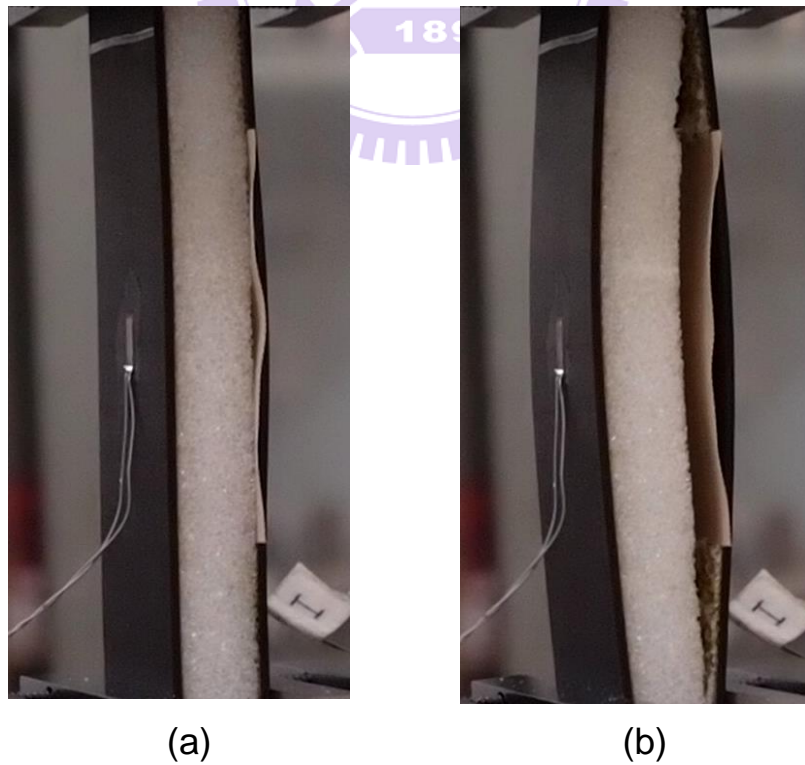


圖 2.26 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞行為((a)局部挫屈 (b)表層與芯材分離)

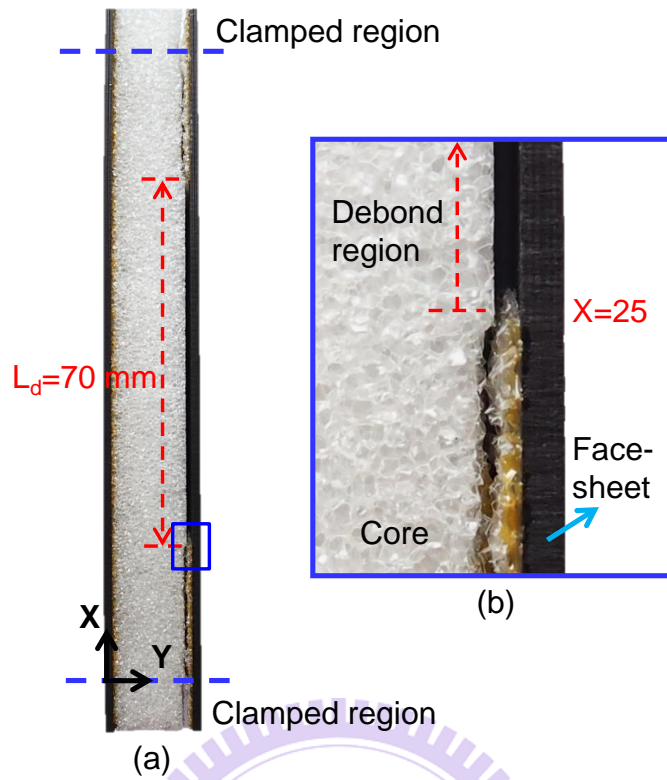


圖 2.27 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑((a)整體裂紋路徑 (b)脫層尖端裂紋路徑)

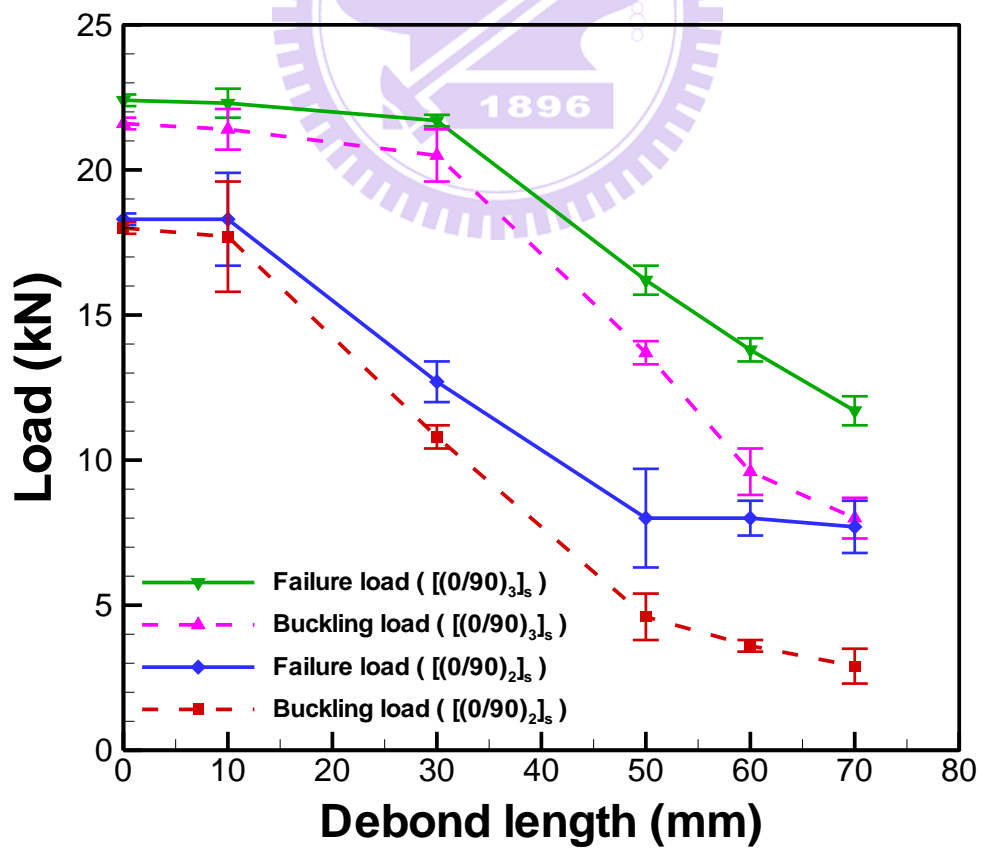


圖 2.28 不同表層厚度對挫屈及破壞負載之影響

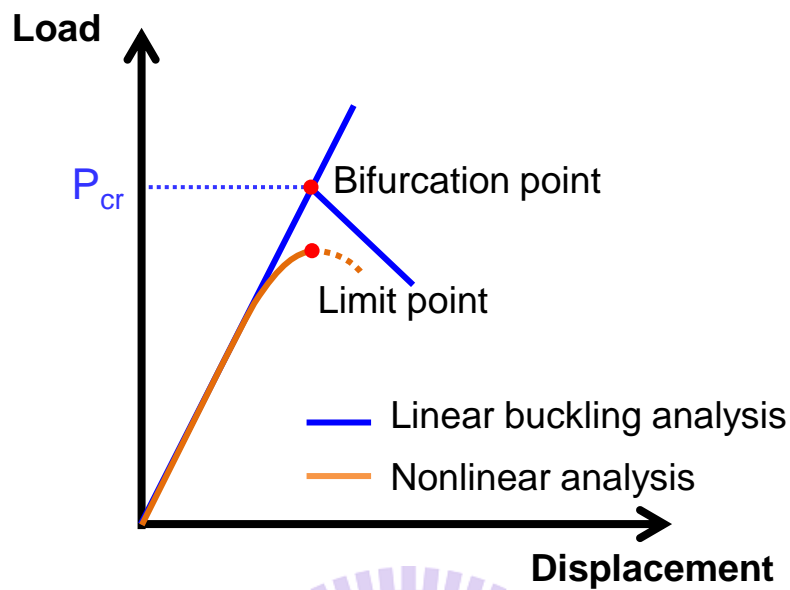


圖 3.1 挫屈之負載與位移關係圖

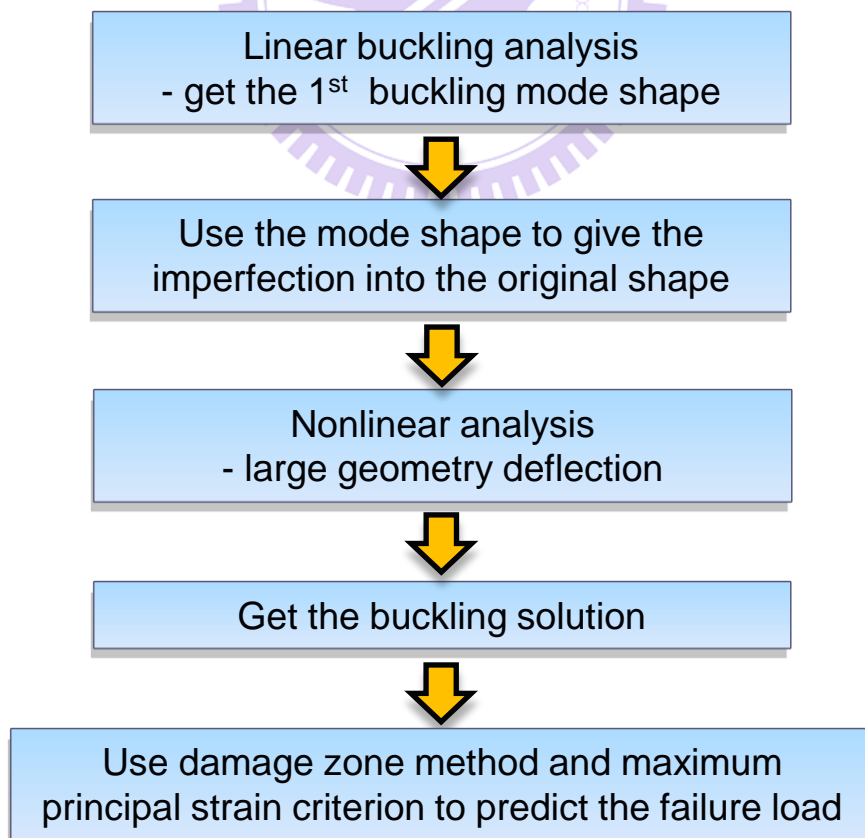


圖 3.2 非線性分析流程圖

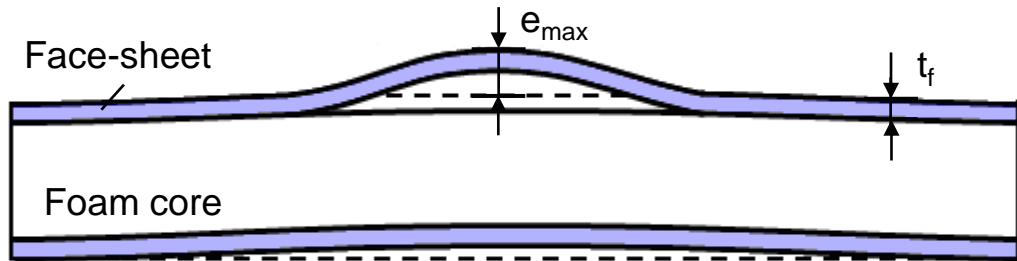


圖 3.3 缺陷定義示意圖

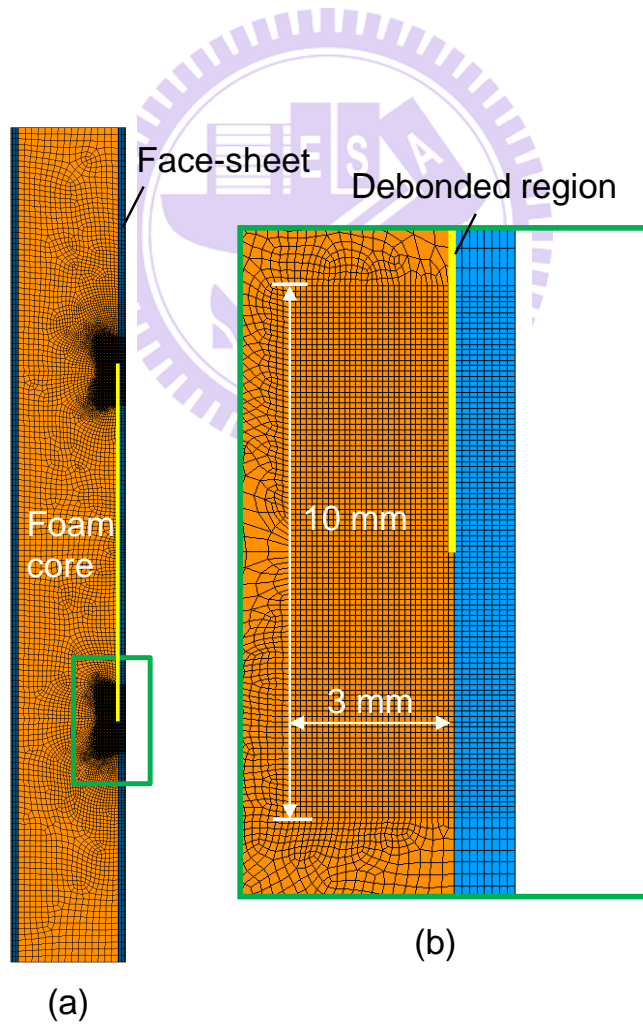


圖 3.4 有限元素模型網格示意圖((a)模型整體網格示意圖 (b)脫層尖端網格局部放大圖)

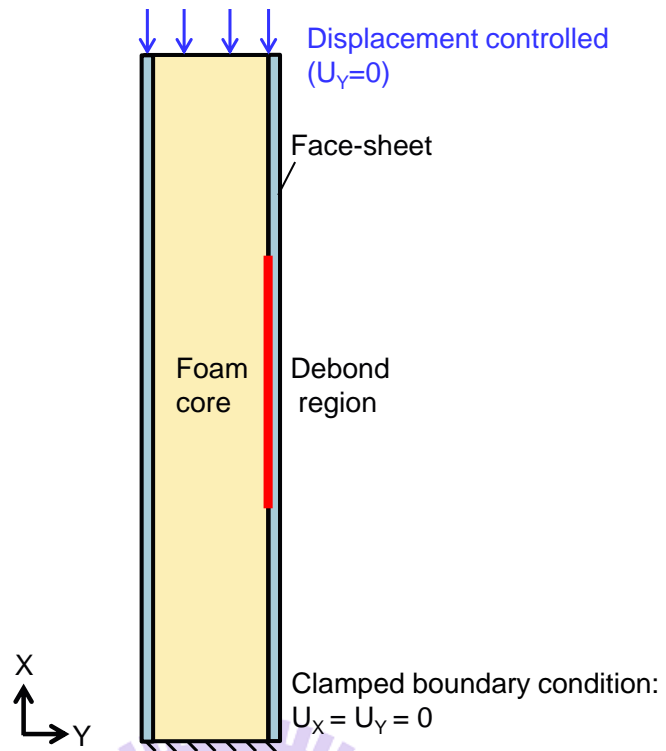


圖 3.5 邊界條件示意圖

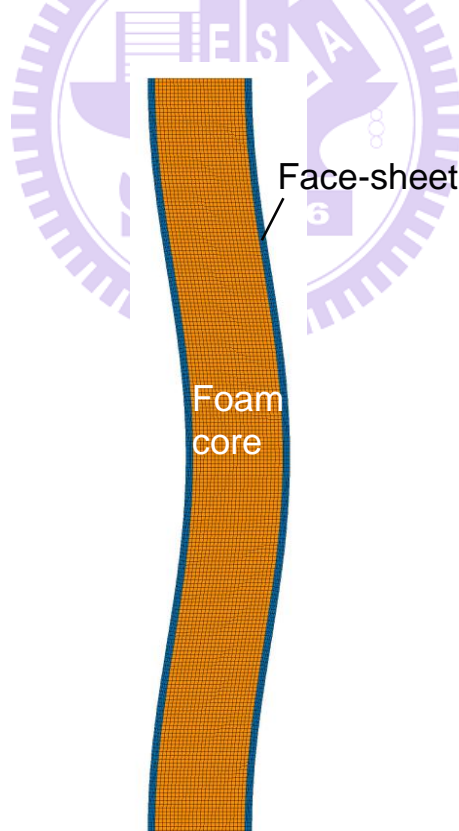


圖 3.6 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構第一挫屈模態變形圖

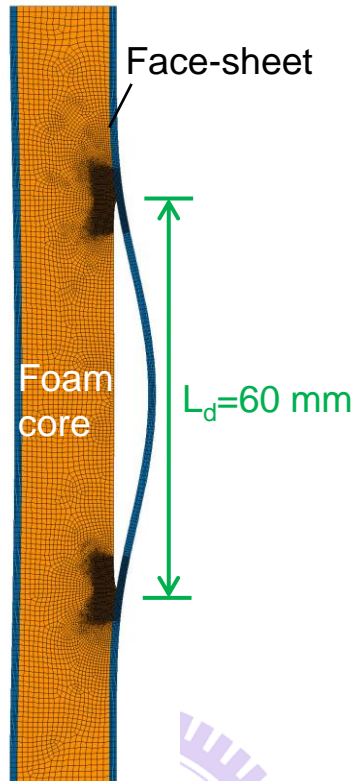


圖 3.7 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治結構第一挫屈模態變形圖

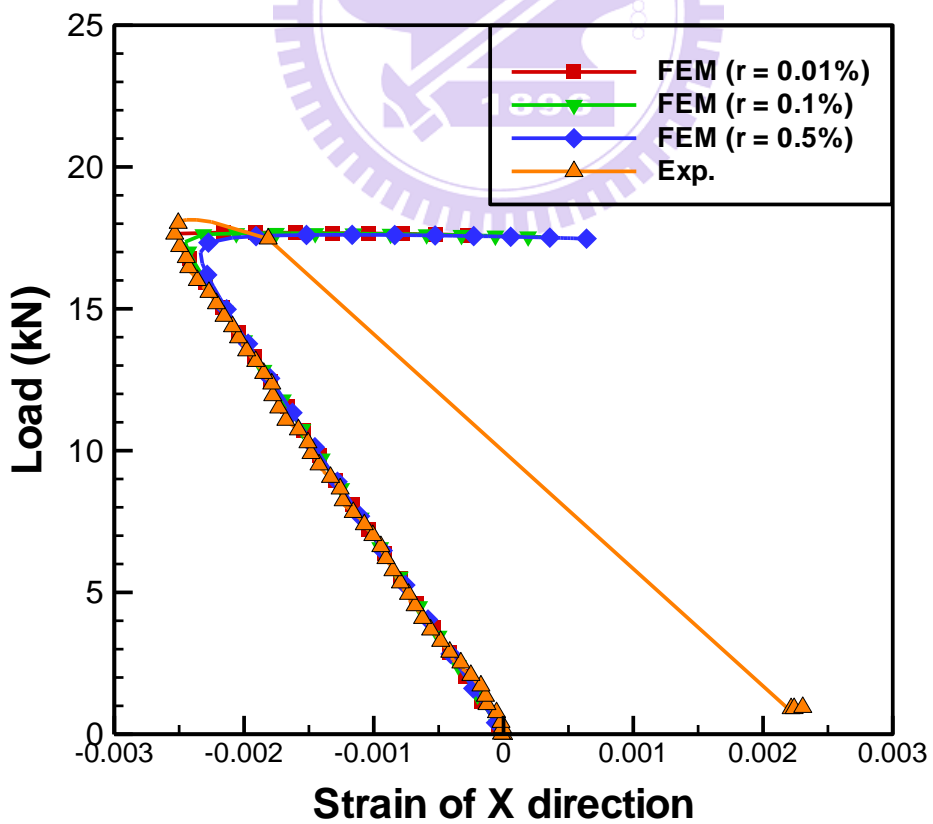


圖 3.8 不同缺陷之負載與應變響應圖(無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片)

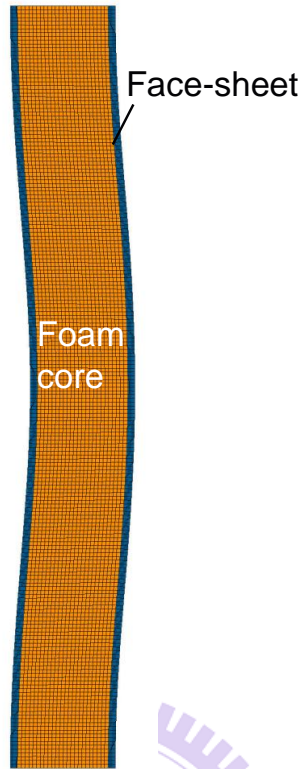


圖 3.9 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片變形圖

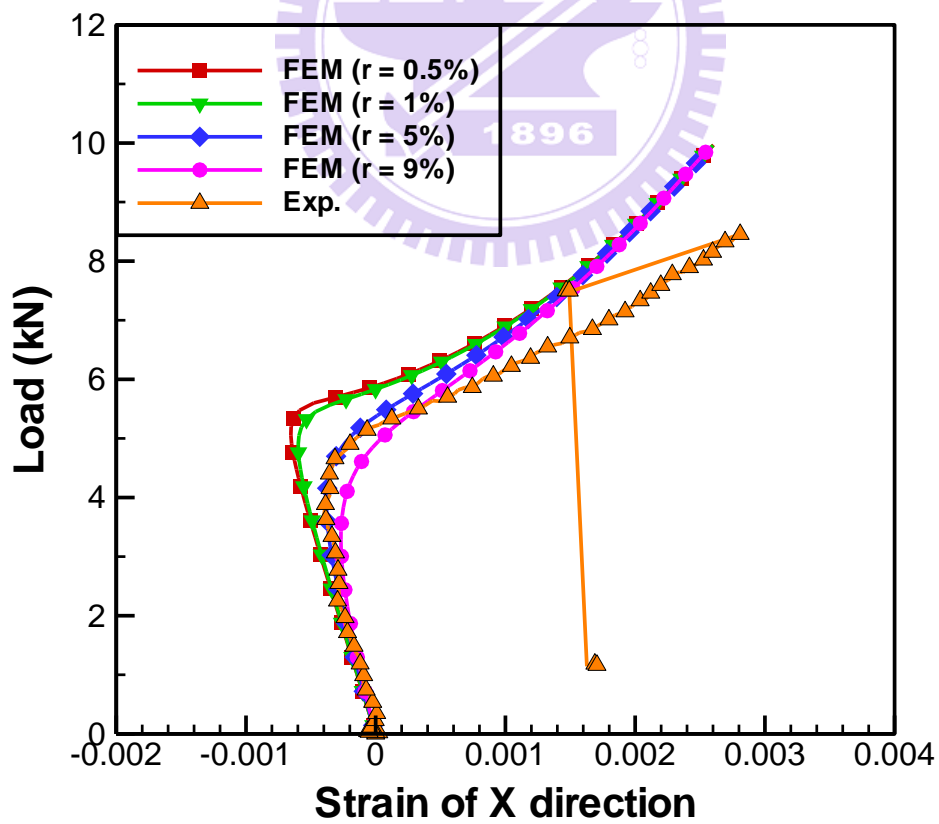


圖 3.10 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片)

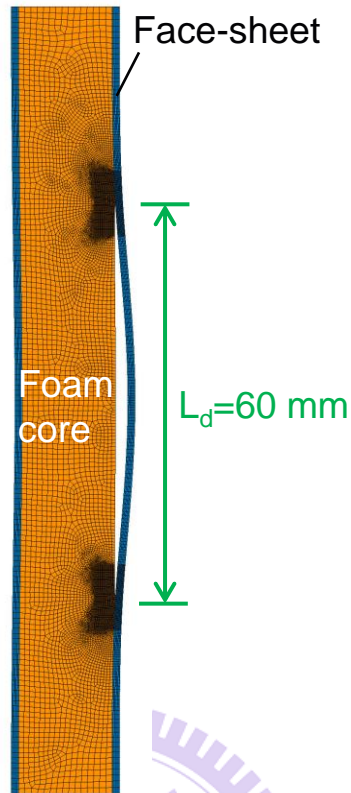


圖 3.11 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片變形圖

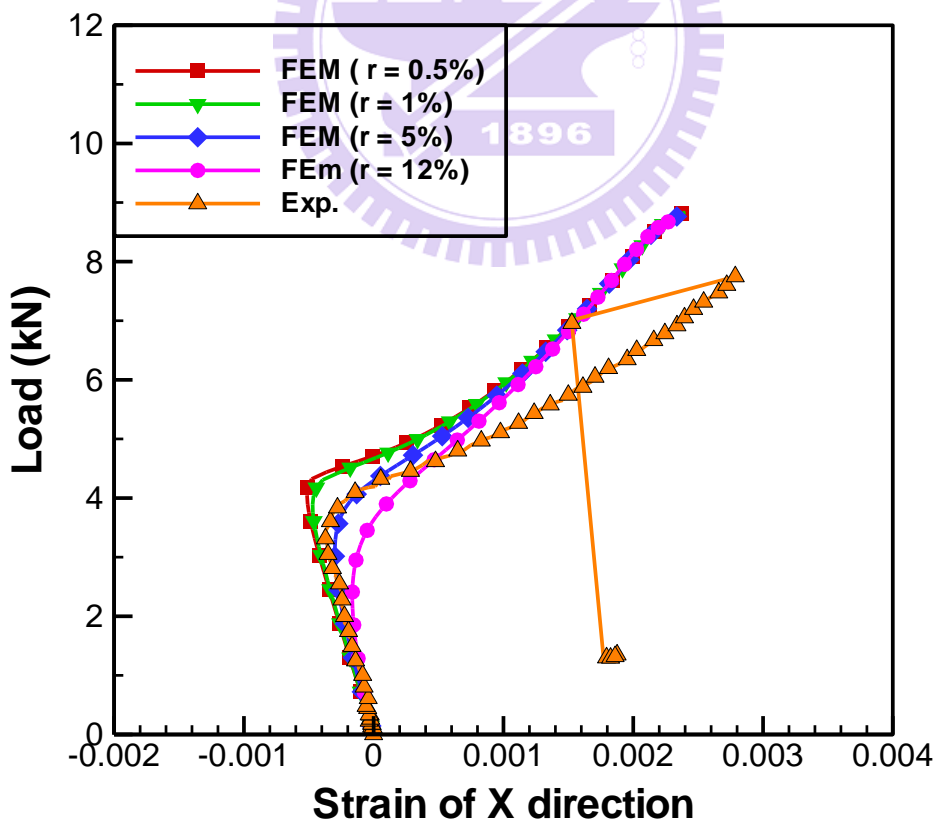


圖 3.12 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片)

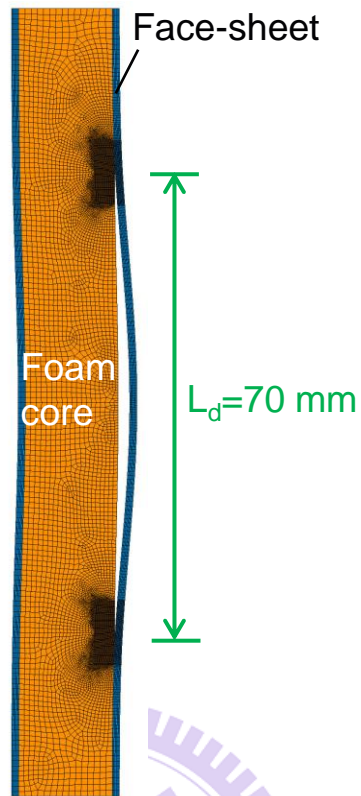


圖 3.13 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片變形圖

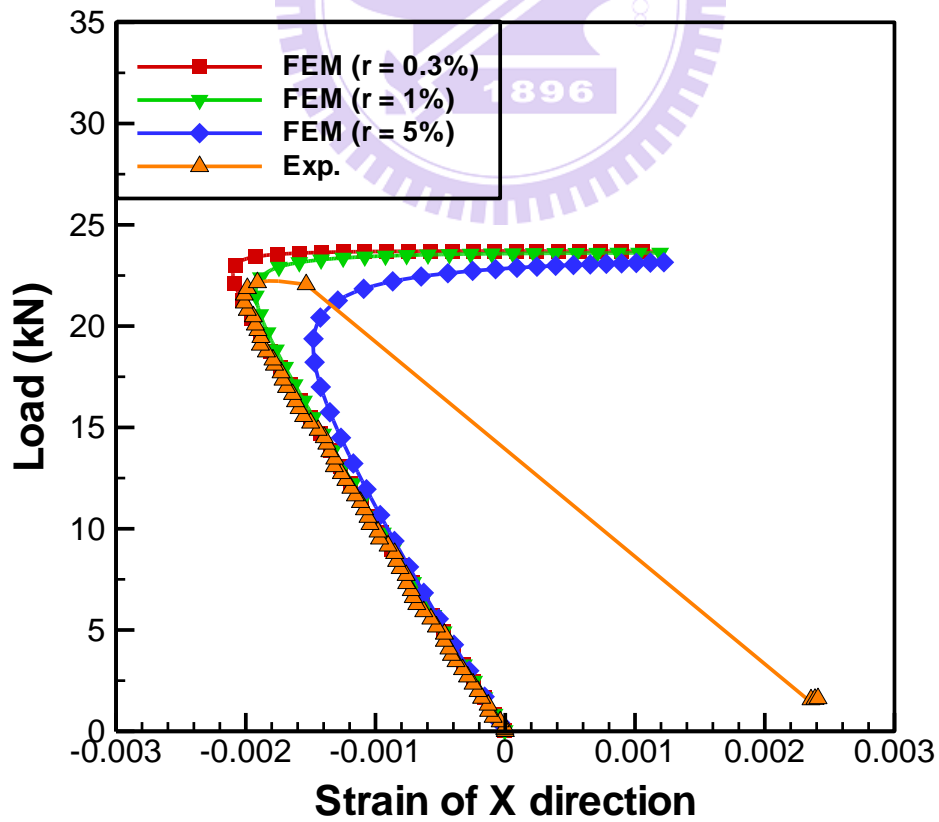


圖 3.14 不同缺陷之負載與應變響應圖(無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片)



圖 3.15 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖

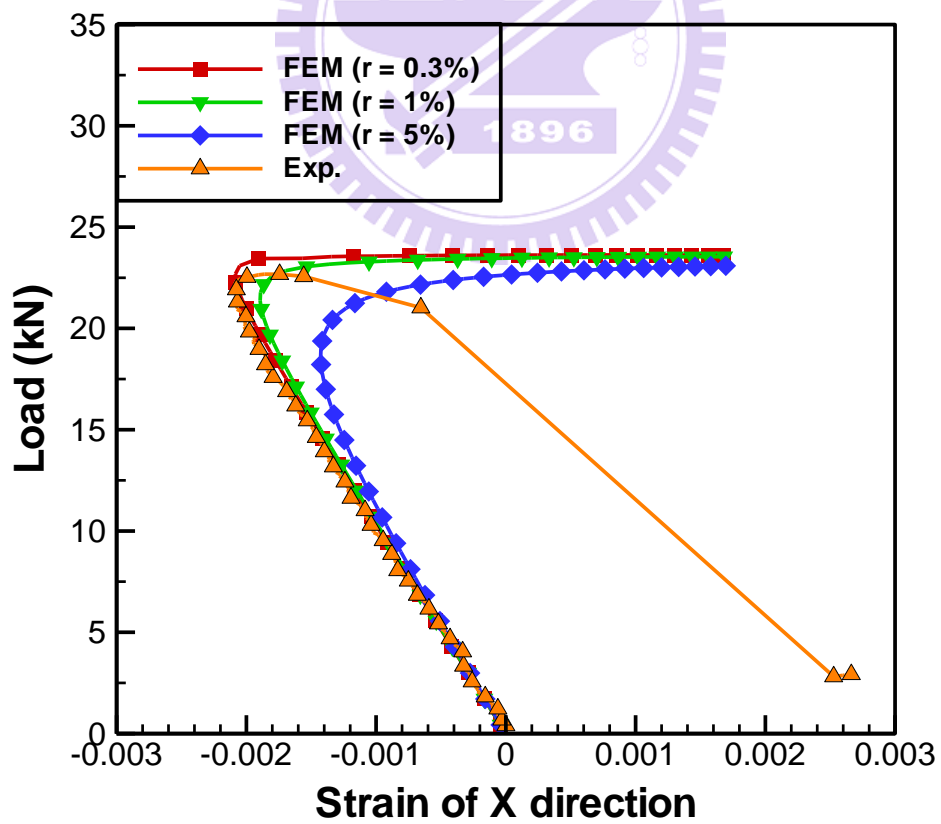


圖 3.16 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片，缺陷值為正值)

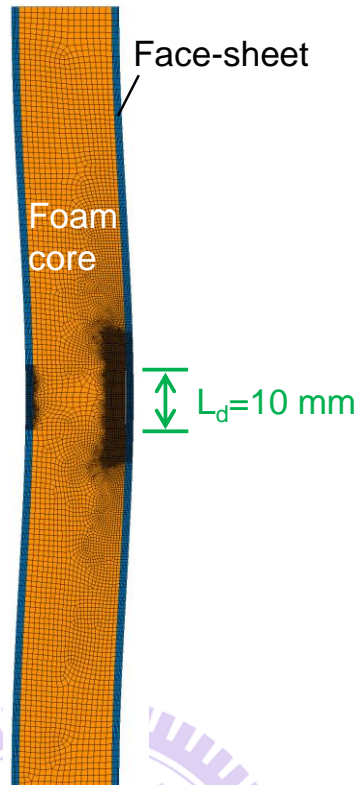


圖 3.17 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖(缺陷值為 0.3%)

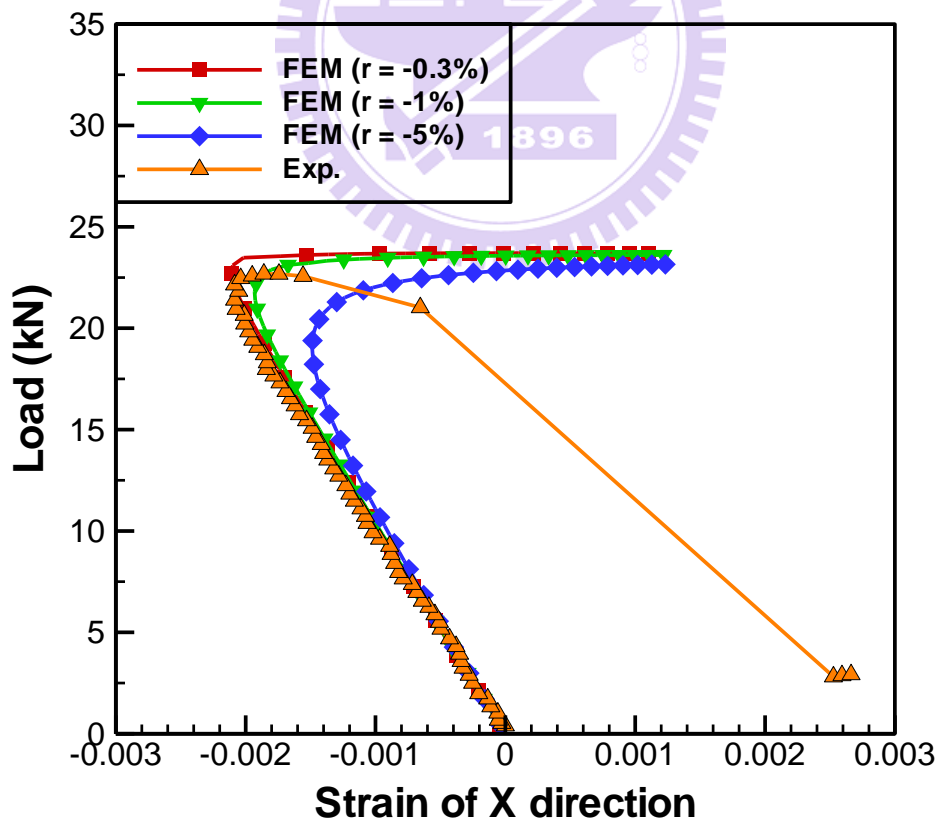


圖 3.18 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片，缺陷值為負值)

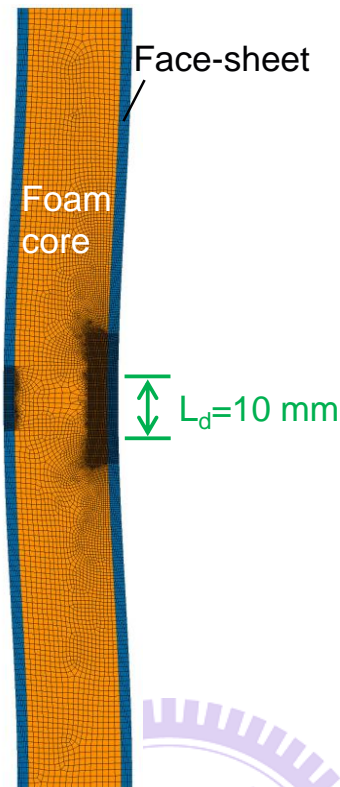


圖 3.19 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖(缺陷值为-0.3%)

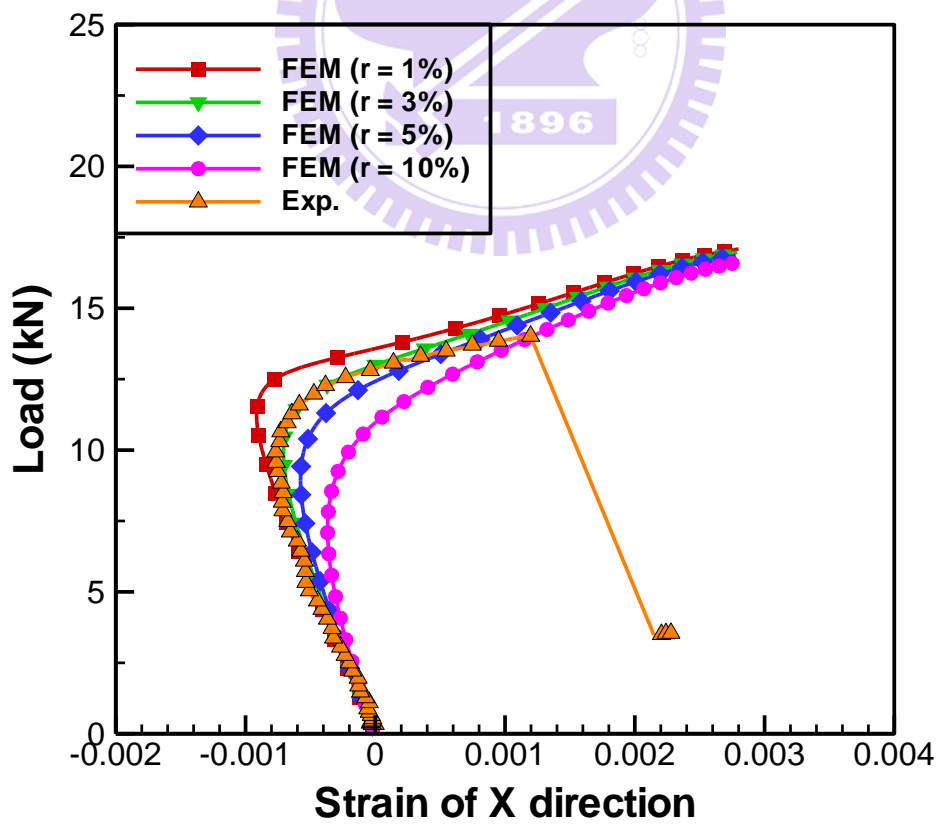


圖 3.20 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片)

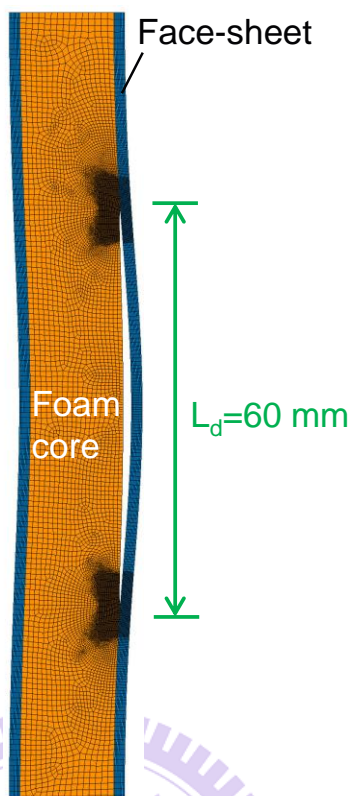


圖 3.21 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖

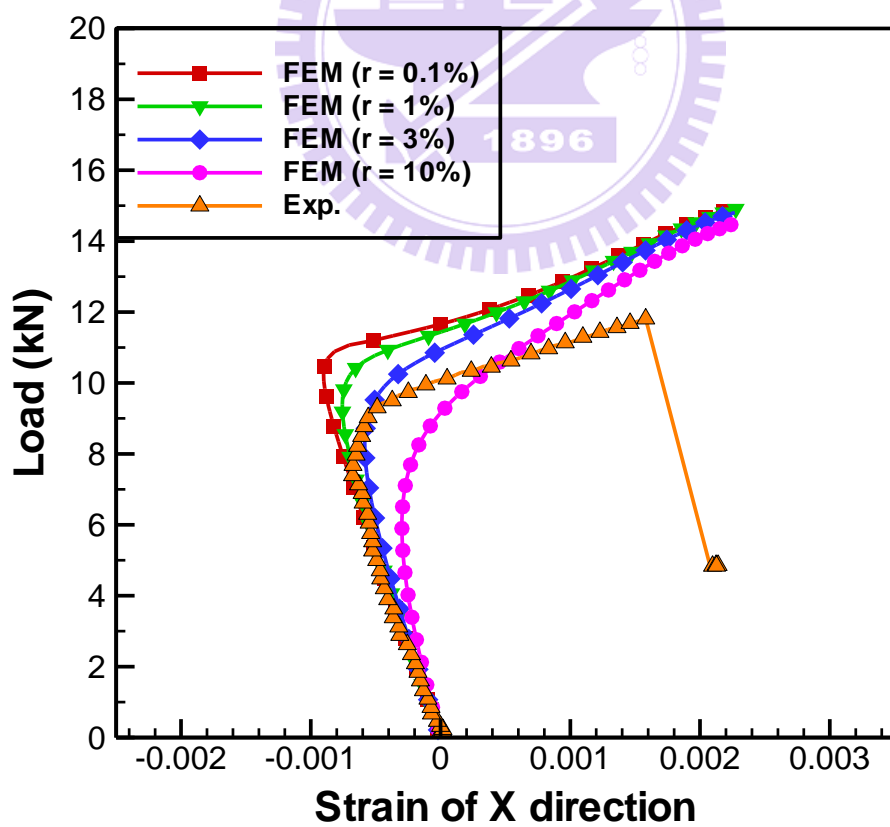


圖 3.22 不同缺陷之負載與應變響應圖(含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片)

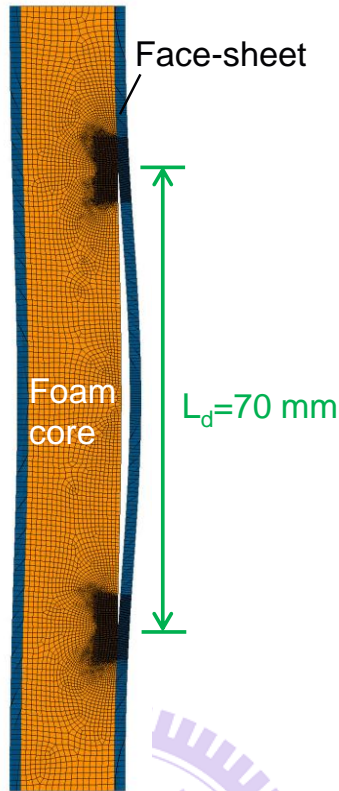


圖 3.23 含 70 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片變形圖

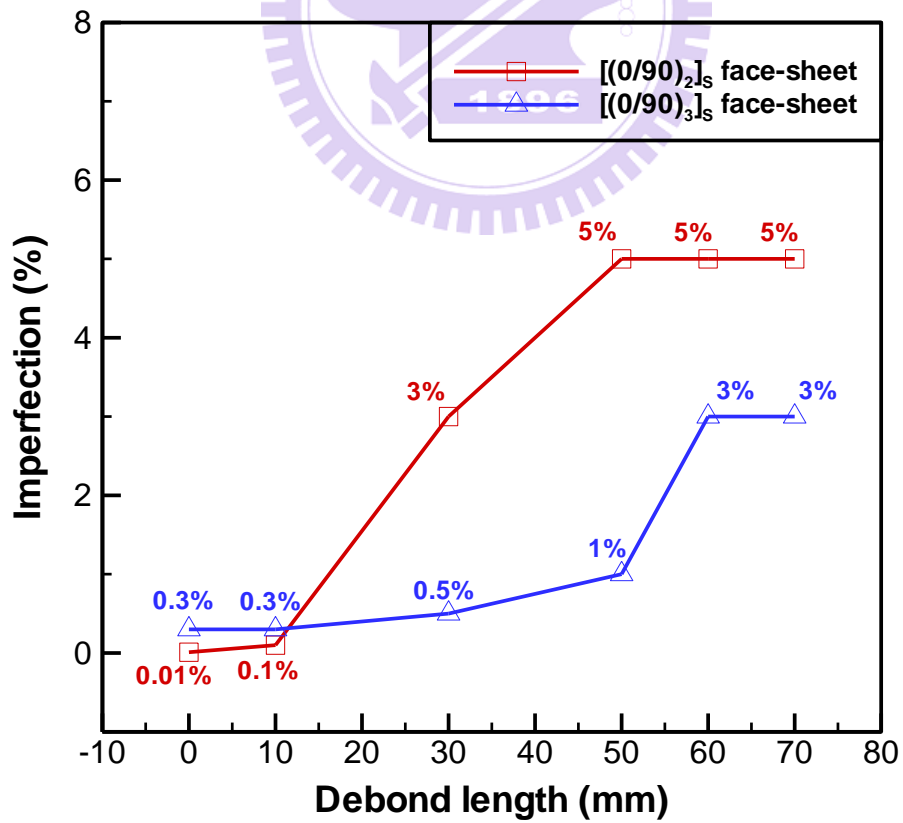


圖 3.24 $[(0/90)_2]_s$ 與 $[(0/90)_3]_s$ 表層疊層三明治在不同脫層長度之缺陷值

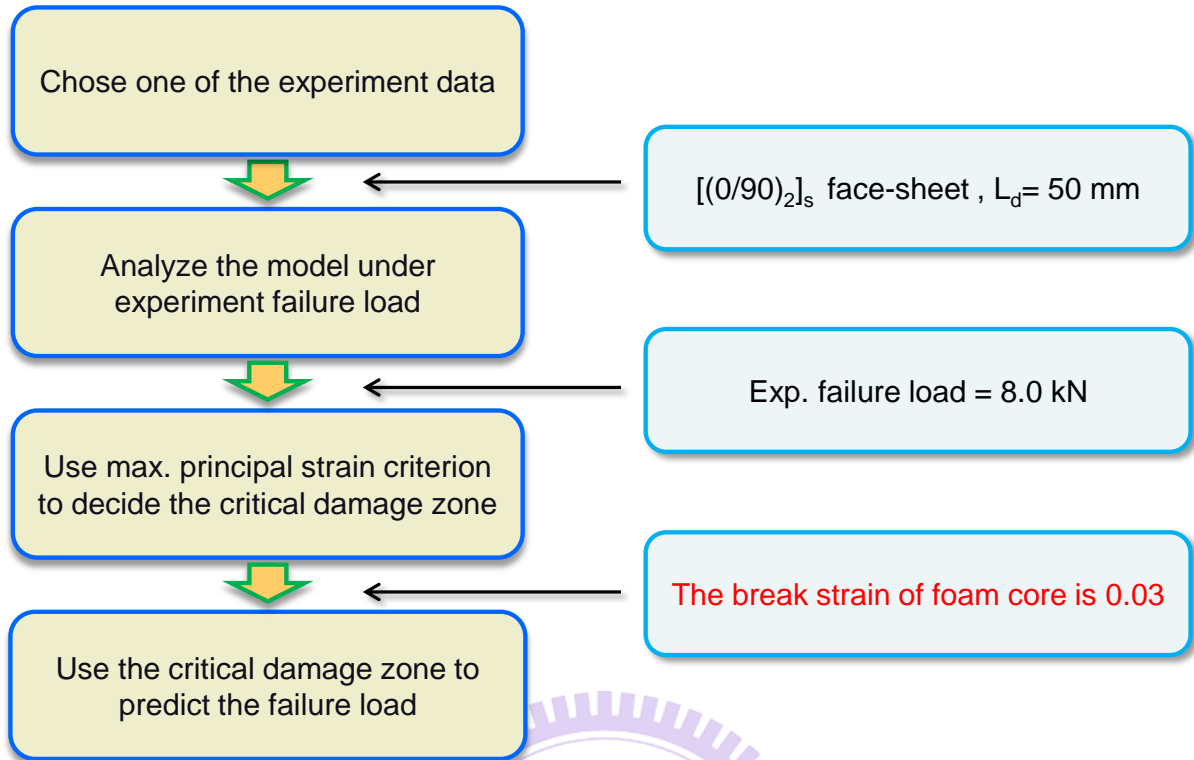


圖 3.25 破壞強度預估流程圖

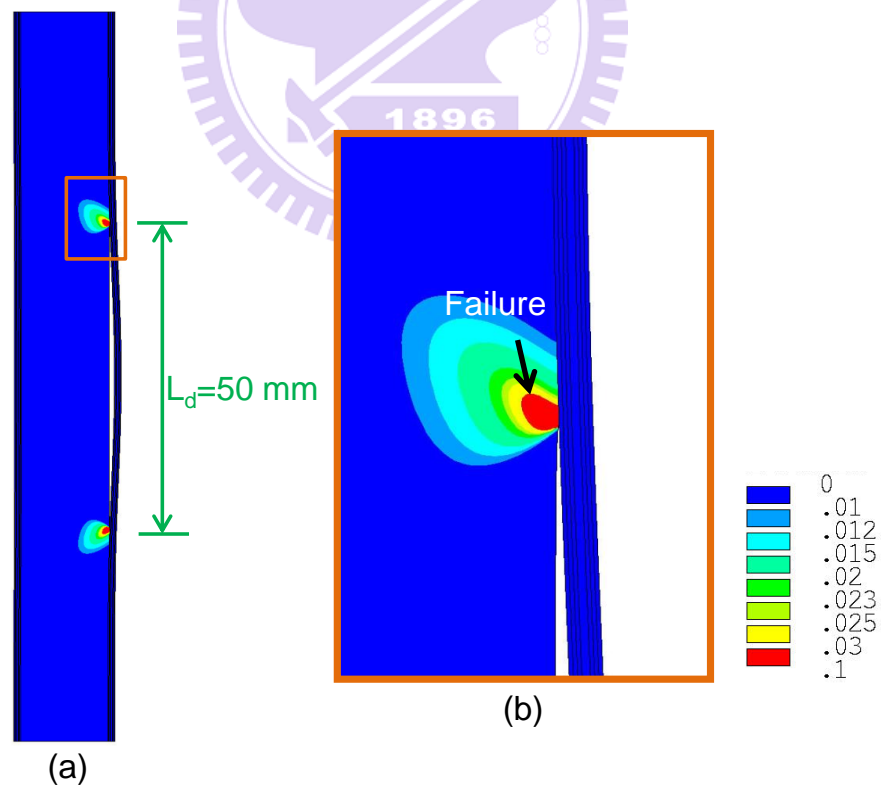


圖 3.26 含 50 mm 脫層之[(0/90)₂]_s 三明治試片主應變分布圖((a)整體試片 (b) 脫層尖端區域)



圖 3.27 含 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形[20]

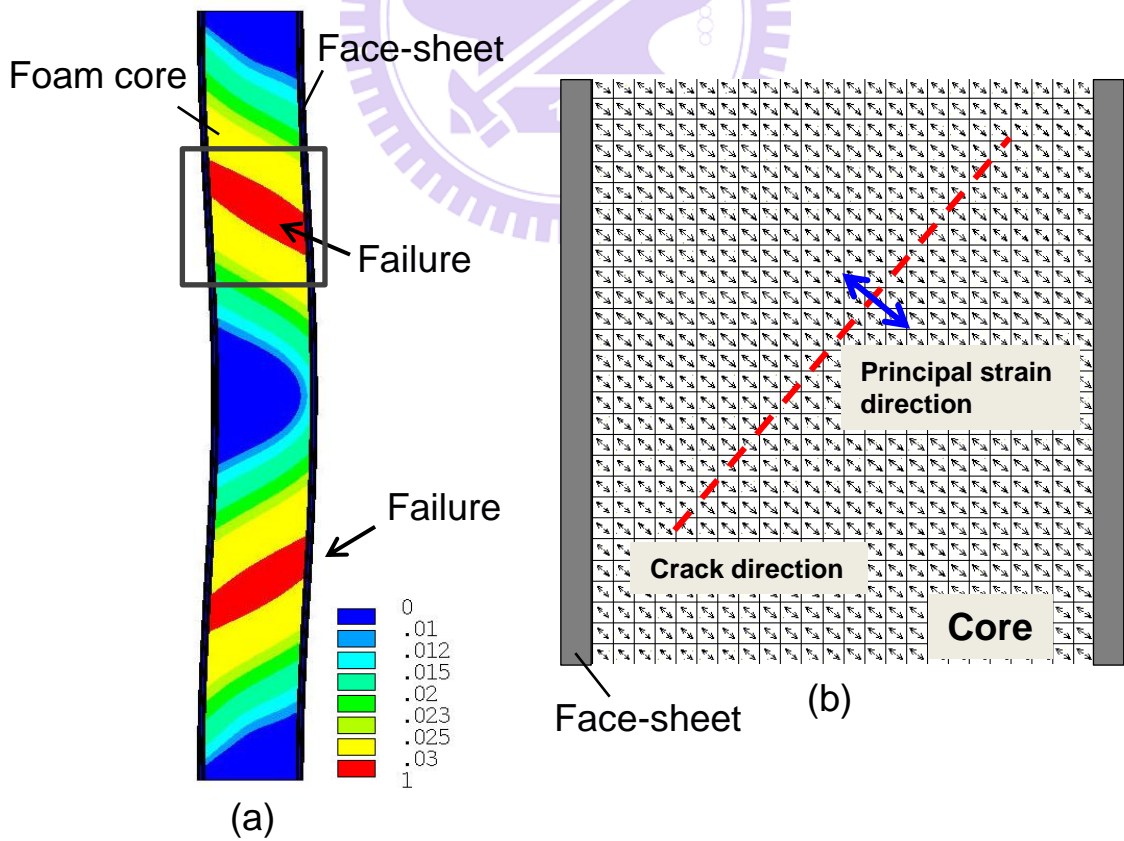


圖 3.28 無脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片預估結果((a)主應變分布圖 (b)主應變方向分布圖)

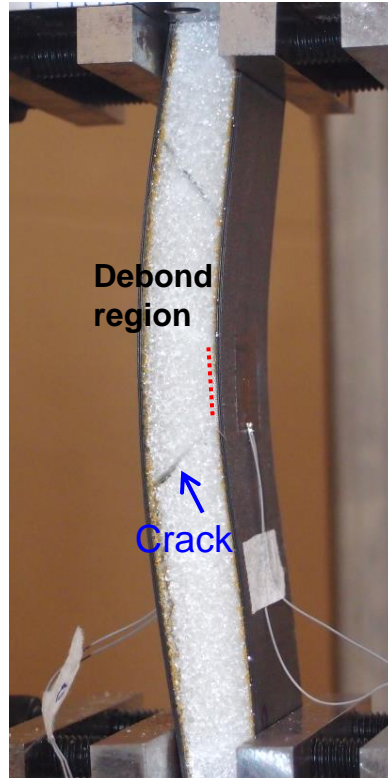


圖 3.29 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片破壞情形[20]

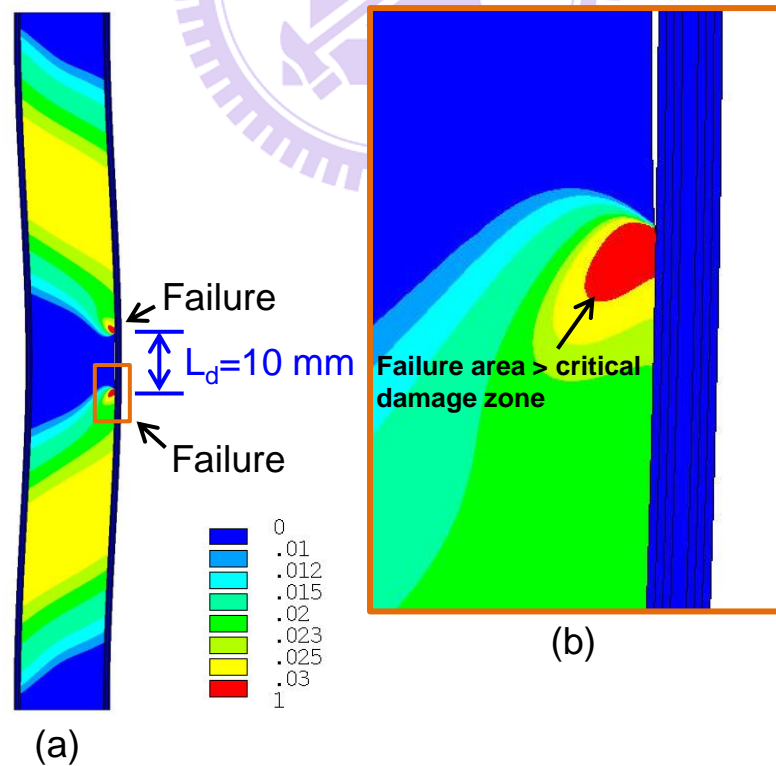


圖 3.30 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片主應變分布圖(模型朝含脫層側表層翹屈)((a)整體試片 (b)脫層尖端區域)

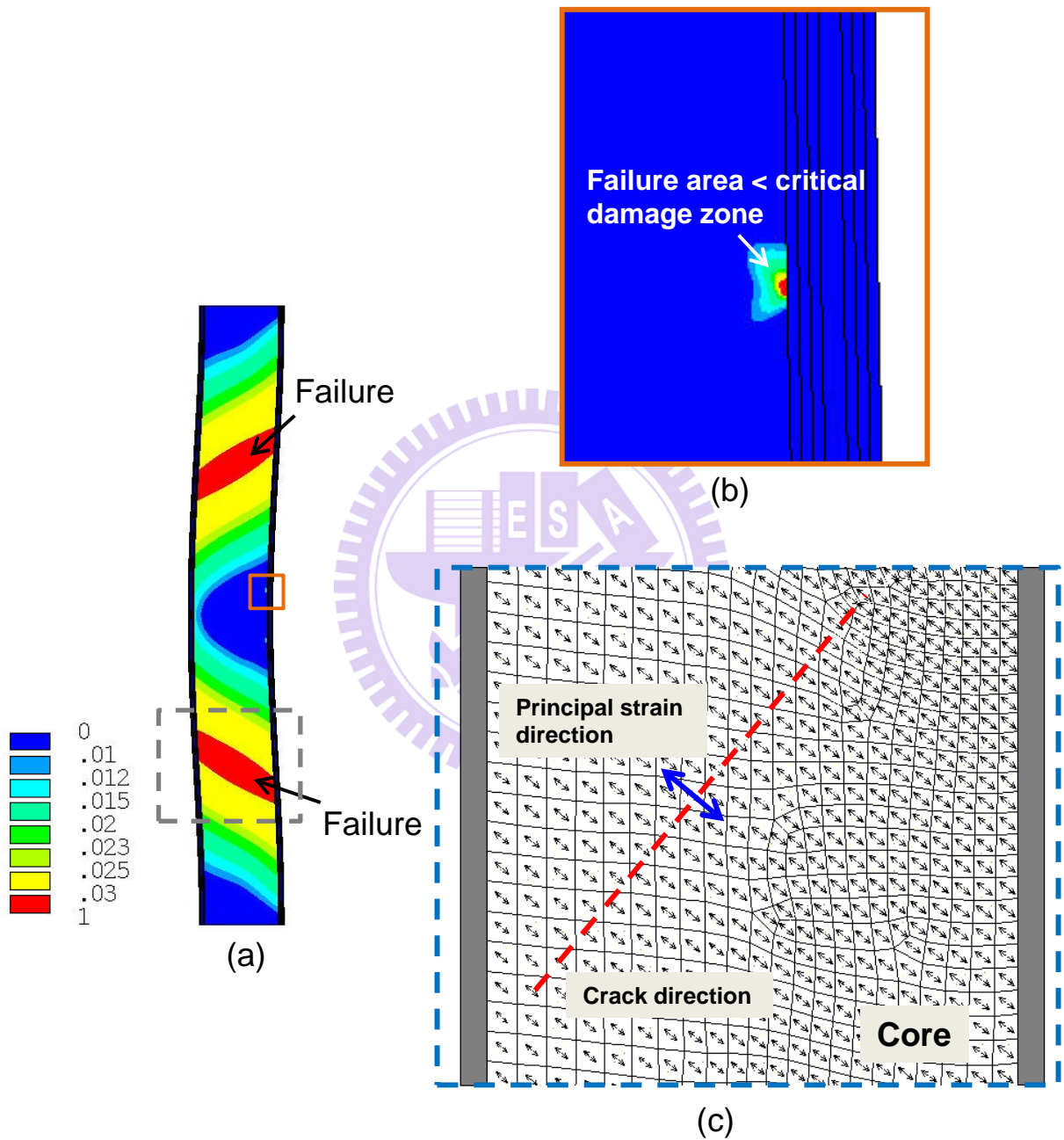


圖 3.31 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片預估結果(朝無脫層方向翹屈)
 ((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖 (c)主應變方向分布圖)

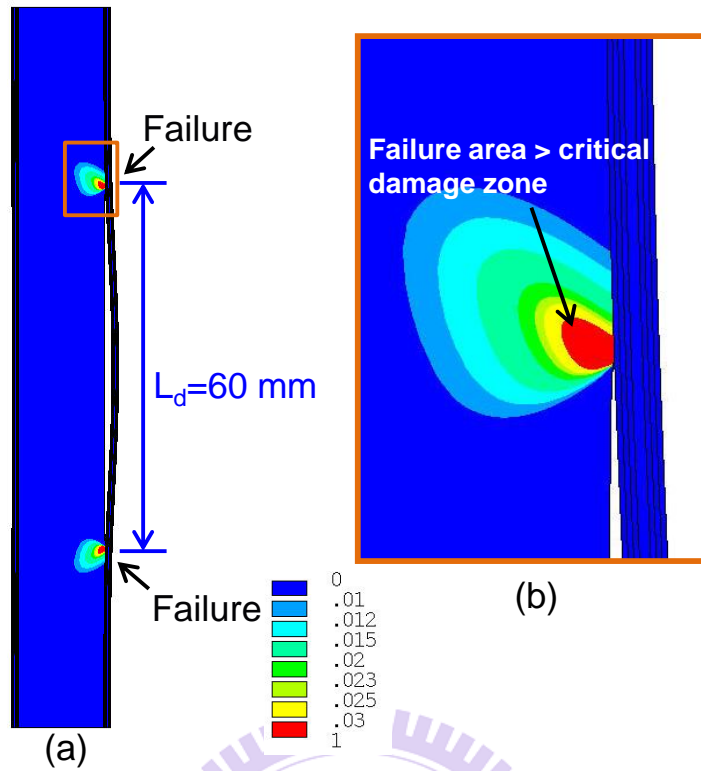


圖 3.32 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 三明治試片預估結果((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖)

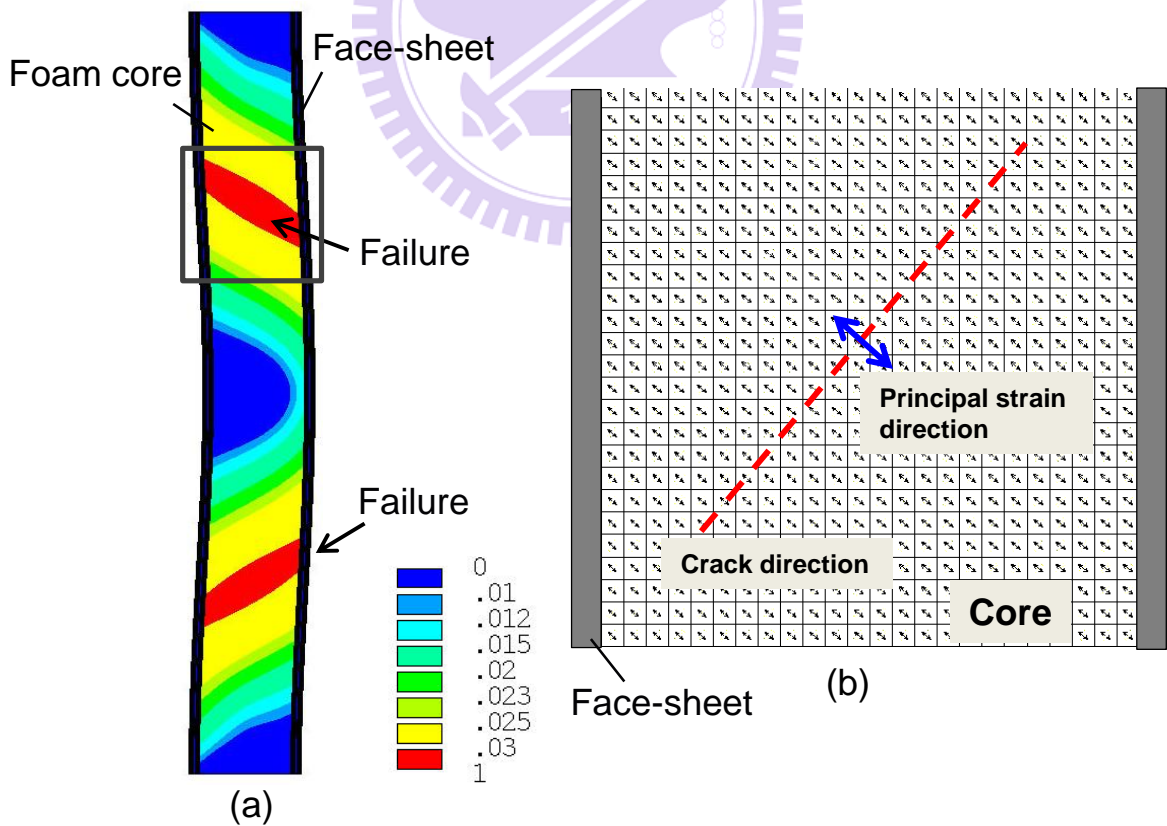


圖 3.33 無脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片預估結果((a)主應變分布圖 (b)主應變方向分布圖)

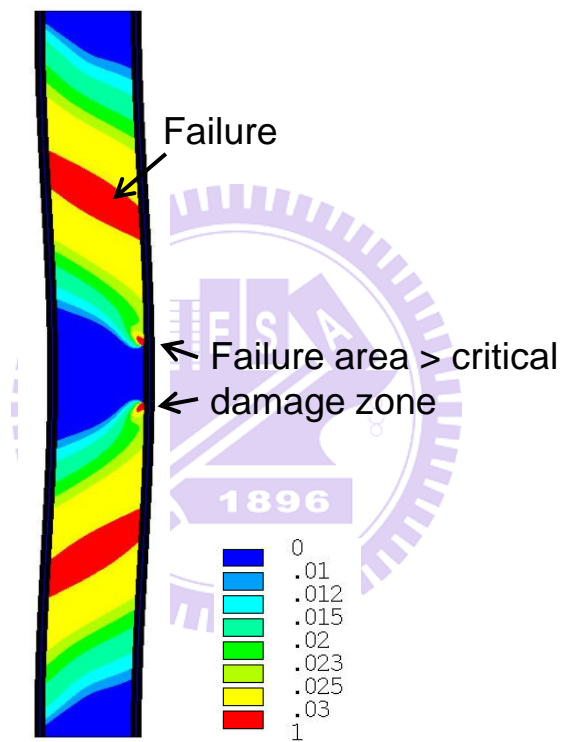


圖 3.34 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_S$ 三明治試片主應變分布圖(模型朝含脫層側表層翹屈)

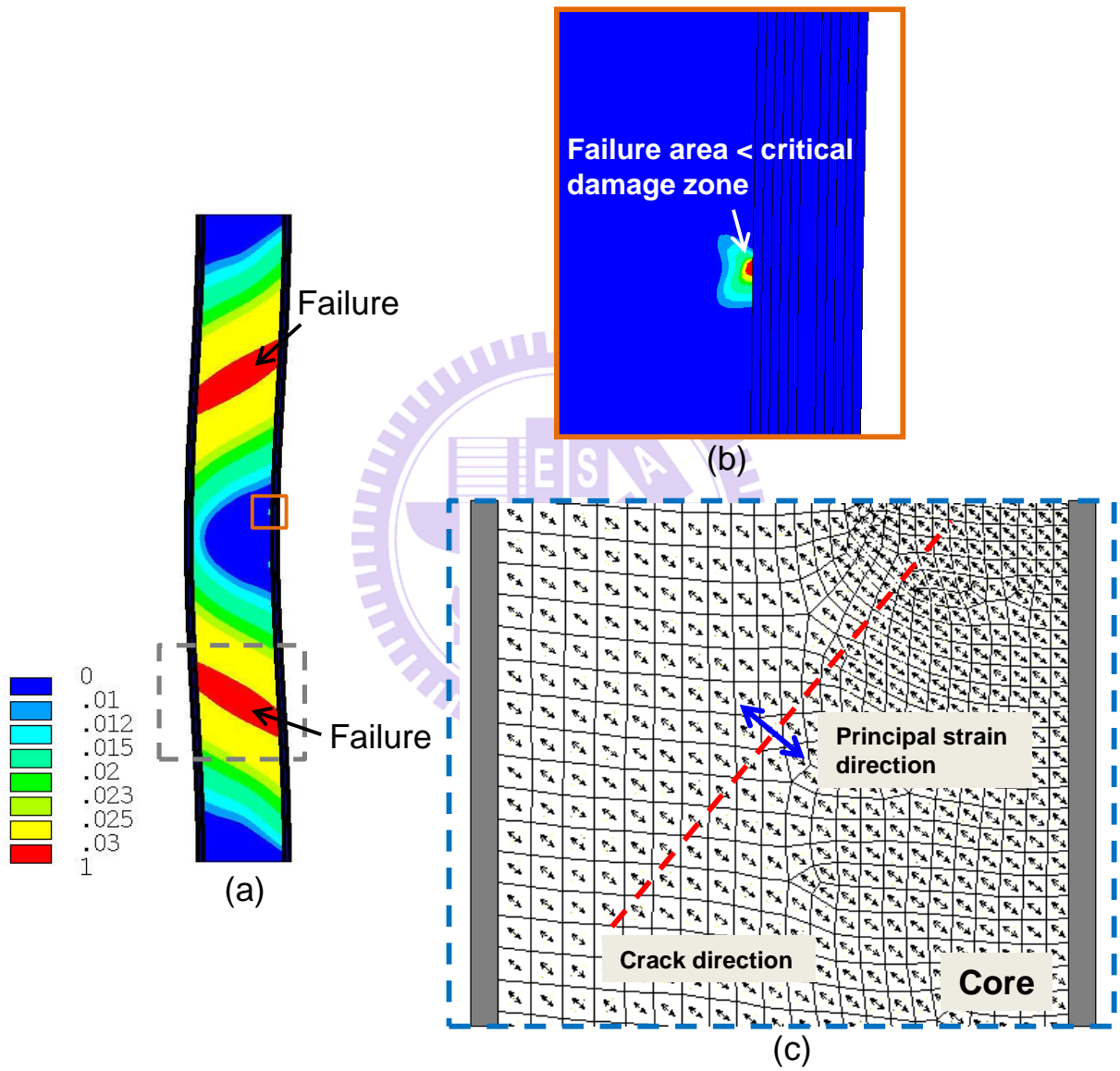


圖 3.35 含 10 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片預估結果(朝無脫層方向翹屈)
 ((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖 (c)主應變方向分布圖)

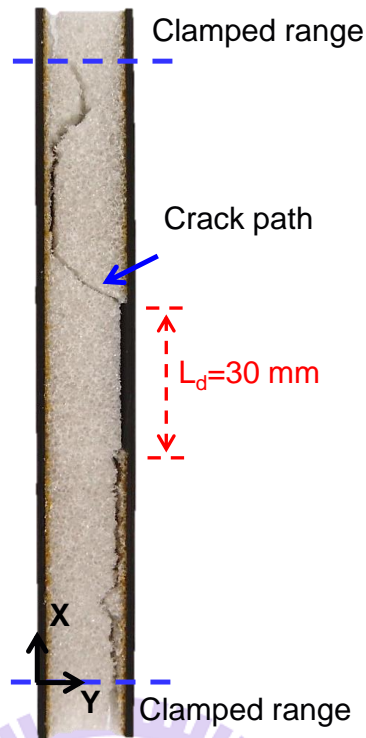


圖 3.36 含 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片破壞裂紋路徑[20]

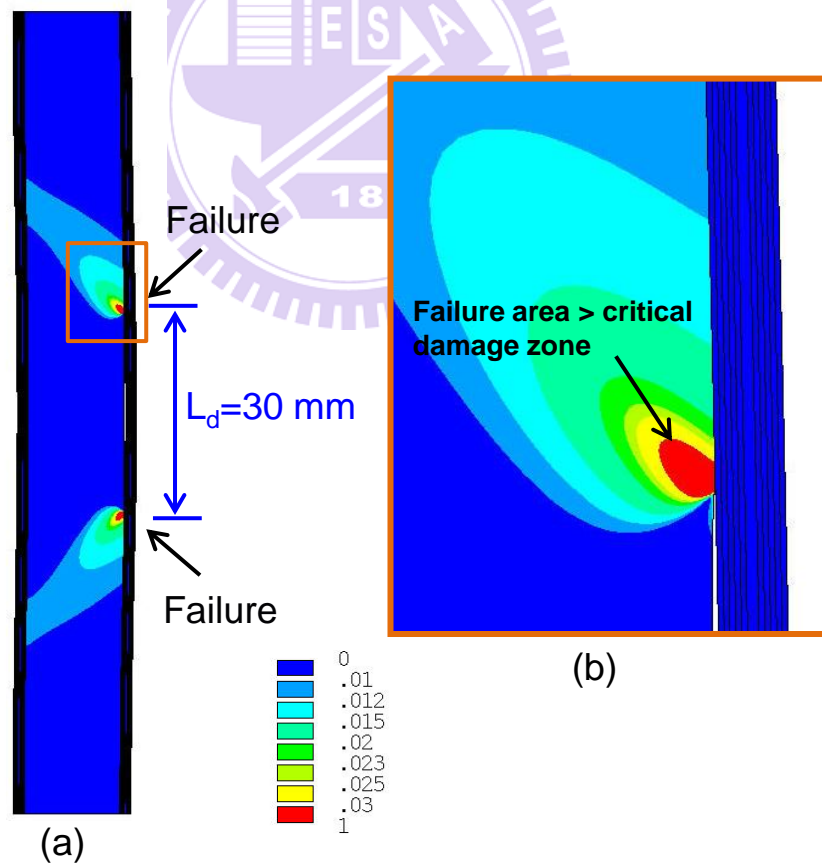


圖 3.37 含 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片預估結果((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖)

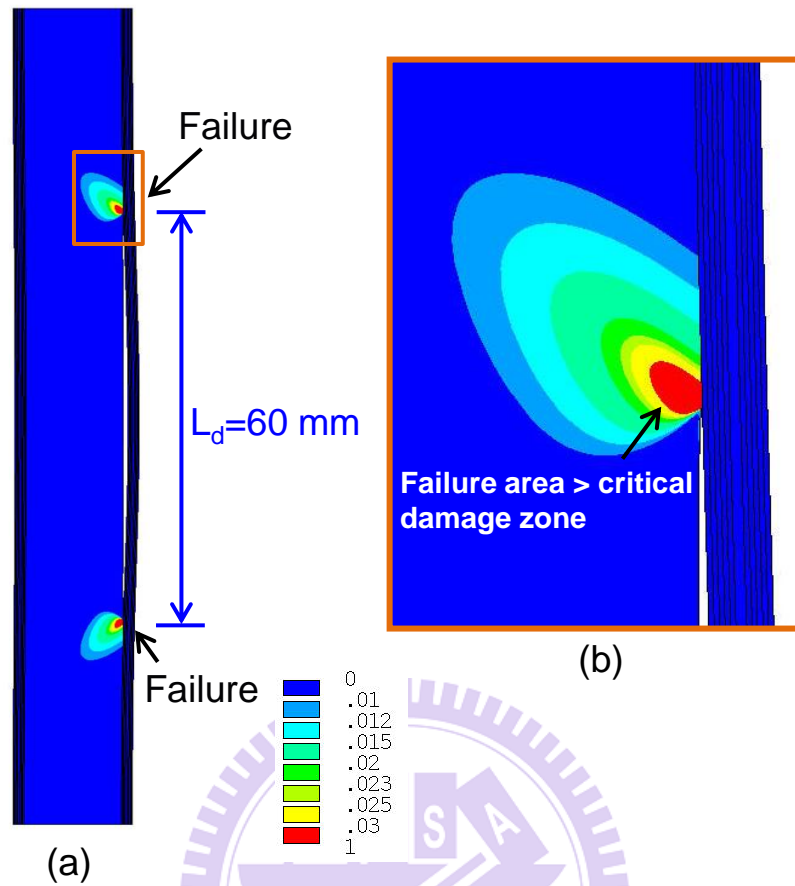


圖 3.38 含 60 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 三明治試片預估結果((a)試片主應變分布圖 (b)脫層尖端主應變分布圖)