

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

學生：賴彥錕

指導教授：蔡佳霖

國立交通大學機械工程系碩士班

摘要



本研究主要目的在於探討具表層與芯材間脫層之複合材料三明治結構 (Sandwich structure) 的挫屈模式及破壞強度。當脫層長度大於臨界脫層長度時，三明治結構具有局部挫屈的破壞模式，相反地，則為總體挫屈的破壞模式。表層厚度對臨界脫層長度的影響將是本研究討論的重點。三明治結構試片主要由碳纖維複合材料表層及 Polymethacrylimide(PMI)發泡芯材所黏合而成，為了製作脫層區域，在表層與芯材間埋入離型布。本研究分別選用 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複合材料疊層板做為複材三明治結構試片的表層。根據壓縮實驗結果觀察，當脫層長度較短時，主要的挫屈模式為總體挫屈(Global buckling)，挫屈發生後結構迅速破壞。相反地，當脫層長度較長時，主要的挫屈模式為局部挫屈(Local buckling)，結構發生挫屈後仍可

承受一定的負載，直到表層與芯材分離，而總體挫屈的挫屈負載與破壞強度比局部挫屈的還要高。此外，挫屈負載與破壞強度將隨著脫層長度越長而降低。

為了分析含脫層之複材三明治結構的挫屈模式與破壞機制，使用有限元素分析(Finite element analysis)進行模擬。藉由線性挫屈分析得到挫屈模態，並以此模態當作初始缺陷(imperfection)進行非線性分析。將分析結果和實驗的數據進行比較，可以預估含脫層複材三明治結構試片存在的缺陷大小。分析結果顯示，當表層較厚或脫層長度較短時，對應的缺陷將較小。此外，根據最大應力準則，從非線性分析可以得到三明治結構的破壞負載。經由有限元素分析得到的破壞應力及挫屈行為與實驗的觀察相吻合。最後，藉由各種脫層長度下的非線性分析結果，得到 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構的臨界脫層長度。

Investigating Fracture Behaviors of Debonded Composite Sandwich Structure – Experiment and Simulation

Student : Yen-Kun Lai

Advisor : Jia-Lin Tsai

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This research aims to investigate the buckling behaviors and failure strength of the composite sandwich structure with a local debonded interface between face-sheet and core. When debonding length is longer than critical debonding length, the composite sandwich would fail in local buckling, on the other hand, it would fail in global buckling. The effect of the face-sheet thickness on critical debonding length would be of concern in this study. The composite sandwich samples were fabricated by adhering the composite face-sheet to the Polymethacrylimide(PMI) foam core, while for the generation of the debonded interface, the release fabric film was inserted between face-sheets and foam core. The $[(0/90)_2]_s$ and $[(0/90)_3]_s$ composite laminates were considered respectively as the face-sheet in the composite sandwich samples. Experimental results indicated that for the short debonding length, the failure is dominated by global buckling, while, for long debonding length, the failure is initiated by local buckling. Once global buckling occurs, the structure fails rapidly. On a contrary, after local buckling, the sandwich

structure can sustain for a while until the face-sheet and core completely separates. It is noted that the sandwich structures with global failure exhibit higher strength than those with local buckling. Moreover, the buckling load and failure strength in sandwich structures decreases with the increment of the debonding length.

In order to characterize the buckling behaviors as well as the failure mechanisms, the finite element analysis (FEM) was performed on the sandwich structures with debonding defect. The buckling mode obtained from the linear analysis was regarded as the initial imperfection in the nonlinear analysis. By comparing the numerical analysis with the experimental data, the size of initial imperfection associated with different debonding length in the FEM model was estimated. It was found that when the face-sheet is thick or the debonding length is short, the corresponding imperfection is relatively small. In addition, based on the maximum principal stress criterion, the failure load in the sandwich structures was predicted from the nonlinear FEM analysis. Both failure stress and buckling behaviors obtained from FEM analysis is coincided with the experimental observations. Finally, by FEM analysis of different debonding length, the critical debonding lengths of $[(0/90)_2]_s$ and $[(0/90)_3]_s$ composite sandwich structure are obtained.

致謝

轉眼間已到了口試結束，碩士論文完稿的時候。在此特別感謝指導教授 蔡佳霖博士這兩年來不遺餘力的諄諄教誨，並在研究上給予許多指導與協助，並給予許多學習的機會，得到許多收穫與心得。同時感謝清華大學動機系葉孟考教授及交通大學機械系鄭文雅老師撥冗擔任學生口試委員，並給予寶貴建議，使得本論文的內容更為精進與豐富。接著，感謝蔡佳霖實驗室的盧廷鉅學長、莊文彥學長、王泰元學長、黃健洋學長、徐政文學長、洪健峰學長、黃奕嘉學長及高菁穗學姊這兩年來研究的建議與協助，使我備感窩心，收穫良多。此外，感謝許崧群同學、劉少琪同學、林子晨學弟、李佳旻學弟、聶奕心學妹，陪伴我這兩年來的實驗室生活，渡過充滿歡笑與辛勞的兩年，大家一起出遊、一起運動的日子非常開心。

在漫長的求學生涯中，更要感謝我親愛的家人在背後的支持與鼓勵，讓我無後顧之憂的在這兩年盡情的學習，順利完成碩士學位。還有感謝一路支持我走到今日的朋友們，使我倍感衝勁。

賴彥鋇 謹誌

中華民國一百零一年七月

目錄

摘要	i
英文摘要	iii
致謝	v
目錄	vi
表目錄	viii
圖目錄	ix
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	6
第二章 含脫層三明治結構壓縮實驗	7
2.1 含脫層三明治結構試片的製備	7
2.2 三明治結構壓縮實驗	9
2.3 實驗結果	10
2.3.1 含脫層 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片	10
2.3.1.1 脫層長度對挫屈行為的影響	10
2.3.1.2 脫層長度對破壞裂紋的影響	13
2.3.2 含脫層 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片	14
2.3.2.1 脫層長度對挫屈行為的影響	14
2.3.2.2 脫層長度對破壞裂紋的影響	16

2.3.3 表層厚度對破壞行為的影響	17
第三章 有限元素分析	19
3.1 挫屈分析方法	19
3.1.1 線性挫屈分析	20
3.1.2 非線性分析	22
3.2 建立有限元素模型	25
3.3 線性挫屈分析結果	26
3.4 實驗與非線性分析結果之比較	27
3.4.1 具 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片	28
3.4.2 具 30 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片	30
3.4.3 具 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片	31
3.4.4 具 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片	32
3.4.5 具 50 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片	34
3.5 決定臨界脫層長度	35
3.5.1 各種脫層長度下的分析結果	35
3.5.2 表層厚度對臨界脫層長度的影響	39
第四章 結論與未來展望	40
4.1 結論	40
4.2 未來展望	41
參考文獻	43

表目錄

表 2.1 單方向碳纖維複合材料之材料性質.....	46
表 2.2 ROHACELL [®] - 51WF 發泡材材料性質[17].....	46
表 2.3 含脫層之三明治結構尺寸.....	47
表 2.4 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果.....	47
表 2.5 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果.....	48
表 2.6 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果.....	48
表 2.7 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果.....	49
表 2.8 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果.....	49
表 2.9 含脫層三明治結構試片在不同脫層長度下的破壞情形.....	50
表 3.1 元素收斂性(具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構).....	50
表 3.2 實驗與有限元素分析之比較.....	51
表 3.3 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的分析結果.....	52
表 3.4 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的分析結果.....	52
表 3.5 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的分析結果.....	53

圖目錄

圖 2.1 複合材料疊層板之製作疊層順序.....	54
圖 2.2 應變規位置與試片基本尺寸示意圖.....	54
圖 2.3 壓縮實驗夾置具示意圖.....	55
圖 2.4 壓縮實驗測試照片.....	55
圖 2.5 負載與應變響應圖(具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片)	56
圖 2.6 總體挫屈的破壞行為((a)芯材破壞情形 (b)斜裂紋 (c)脫層區域之破壞裂紋).....	56
圖 2.7 負載與應變響應圖(具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片)	57
圖 2.8 局部挫屈的破壞行為 ((a)破壞前的局部挫屈行為 (b)表層與芯材分離).....	57
圖 2.9 負載與應變響應圖 (具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片).....	58
圖 2.10 局部挫屈的破壞行為((a)破壞前的局部挫屈行為 (b)表層與芯材分離).....	58
圖 2.11 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)總體挫屈的破壞裂紋 (b)斜裂紋).....	59
圖 2.12 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)局部挫屈的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點)....	60
圖 2.13 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)局部挫屈的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點)....	61
圖 2.14 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構分離後的表層與芯材..	62

圖 2.15 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構分離後的表層與芯材 ..	63
圖 2.16 負載與應變響應圖(具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片)	63
圖 2.17 總體挫屈的破壞行為((a)破壞前的總體挫屈行為 (b)芯材破壞)....	64
圖 2.18 負載與應變響應圖(具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片)	64
圖 2.19 局部挫屈的破壞行為((a)破壞前的局部挫屈行為 (b)表層與芯材分 離).....	64
圖 2.20 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)挫屈 的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點).....	65
圖 2.21 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)局部 挫屈的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點)....	66
圖 2.22 疊層順序對挫屈及破壞負載的影響.....	67
圖 3.1 挫屈的負載與位移關係.....	68
圖 3.2 非線性分析流程.....	68
圖 3.3 結構的缺陷定義.....	69
圖 3.4 脫層區域網格模型示意圖((a)接觸元素示意圖 (b)表層與芯材之間 的節點黏合).....	69
圖 3.5 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的有限元素模型示意 圖.....	70
圖 3.6 有限元素模型與纖維方向定義.....	70
圖 3.7 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈模態變形((a)脫層長度為 10 mm (b)脫層長度為 30 mm (c)脫層長度為 50 mm)	71
圖 3.8 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈模態變形 ((a)脫層長度為 30	

mm (b)脫層長度為 50 mm)	71
圖 3.9 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應.....	72
圖 3.10 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的有限元素分析結果 ((a) 缺陷為 0.05%~5%的變形結果 (b)缺陷為-0.05%的變形結果).....	72
圖 3.11 當壓縮負載為 17.6 kN，具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的最大主應力分布結果(缺陷為-0.05%)	73
圖 3.12 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構之破壞分析與實驗比較結果 ((a)破壞裂紋照片 (b)當壓縮負載為 17.6 kN 的最大主應力分布圖(σ_1) (c)主應力方向及破壞點位置)	73
圖 3.13 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的有限元素分析結果 ((a)脫層長度為 30mm 的變形結果 (b)脫層長度為 50mm 的變形結果).....	74
圖 3.14 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應.....	74
圖 3.15 當壓縮負載為 13.0 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的應力分布結果(缺陷值為 3%) ((a)第一個主應力分布圖 (σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較)	75
圖 3.16 當壓縮負載為 13.0 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的主應力方向結果(缺陷值為 3%).....	75
圖 3.17 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應.....	76
圖 3.18 當壓縮負載為 9.3 kN，具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的應力分布結果(缺陷為 5%) ((a)第一個主應力分布圖(σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較).....	76
圖 3.19 當壓縮負載為 9.3 kN，具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的主應力方向結果(缺陷為 5%).....	77
圖 3.20 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構的有限元素分析結果 ((a)脫層長度為 30mm 的變形結果 (b)脫層長度為 50mm 的變形結果).....	77

圖 3.21 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應.....	78
圖 3.22 當壓縮負載為 21.8 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構 芯材部分的應力分布結果(缺陷為 0.5%) ((a)第一個主應力分布圖 (σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較).....	78
圖 3.23 當壓縮負載為 21.8 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構 芯材部分的應力方向結果(缺陷為 0.5%).....	79
圖 3.24 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應.....	79
圖 3.25 當壓縮負載為 16.6 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構 芯材部分的應力分布結果(缺陷為 1%) ((a)第一個主應力分布圖(σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較).....	80
圖 3.26 當壓縮負載為 16.6 kN，具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構 之芯材部分的應力方向結果(缺陷為 1%).....	80
圖 3.27 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的缺陷.....	81
圖 3.28 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的變形結果((a)脫層長度為 20 mm (b) 脫層長度為 40 mm (c)脫層長度為 60 mm (d)脫層長度為 70 mm) .	81
圖 3.29 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 20 mm (b)脫層長度為 40 mm (c)脫層長度為 60 mm (d)脫層長度為 70 mm)	82
圖 3.30 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 12 mm (b)脫層長度為 14 mm (c)脫層長度為 16 mm (d)脫層長度為 18 mm)	83
圖 3.31 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的挫屈負載.....	84
圖 3.32 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的缺陷.....	84
圖 3.33 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的變形結果((a)脫層長度為 10 mm (b) 脫層長度為 20 mm (c)脫層長度為 40 mm (d)脫層長度為 60 mm (e) 脫層長度為 70 mm)	85

- 圖 3.34 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 10 mm (b)脫層長度為 20 mm (c)脫層長度為 30 mm (d)脫層長度為 40 mm (e)脫層長度為 60 mm (f)脫層長度為 70 mm)..... 86
- 圖 3.35 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 16 mm (b)脫層長度為 18 mm (c)脫層長度為 22 mm (d)脫層長度為 24 mm) 87
- 圖 3.36 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的挫屈負載 88



第一章 緒論

1.1 研究動機與文獻回顧

近年來隨著世界節能減碳的潮流，複合材料三明治結構(Composite sandwich structures)因具有輕量化、高彎矩強度與高彎矩剛性，廣泛地被應用於汽車、風能及相關民生產業，因此對於複合材料三明治結構的機械特性及其破壞模式，在複合材料研究領域引起廣大的重視。藉由完整的了解相關機制，以期能有效的預估三明治結構的破壞強度。複合材料三明治結構主要由上下兩片高強度與高剛度的表面板材(face-sheet)與中間夾層的低密度芯材(core)所組成，其中常見的表面板材為碳纖維或玻璃纖維疊層板，用於承受軸向力與彎矩負載；而常用的芯材為蜂巢板、PMI 發泡材、PVC 發泡材或巴沙木等，用於承受剪力負載。

以大型風力發電葉片為例，主要由複合材料三明治結構及疊層板所組合而成。大型葉片在承受彎矩時，其受壓端將產生局部挫屈破壞(Local buckling)，而此局部挫屈為風力葉片主要的破壞模式[1]。局部挫屈常由結構的幾何缺陷或脫層缺陷(debonded defect)所引起，而當局部挫屈發生時往往伴隨著裂紋的成長，因而降低整體結構的機械特性。因此了解局部挫屈的發生對複合材料三明治結構的影響是一個很重要的課題。含有脫層缺陷的三明治結構可能由以下原因所造成：製程的疏失、衝擊、機械運作中的

熱機械負載及結構疲勞等等[2]。當壓縮負載或彎矩力[3]作用於具脫層缺陷的三明治結構時，將容易導致局部挫屈的現象。

過去，學者們對於含脫層缺陷的三明治結構強度有諸多的探討[3-6]。Mouritz 及 Thomson[3]針對含脫層缺陷之三明治結構，進行單軸壓縮實驗及四點彎矩實驗，並比較缺陷對三明治結構強度的影響。結果顯示，只要脫層長度大於 30 mm，壓縮強度會急遽的降低，破壞模式則從芯材剪力破壞轉變為表層局部挫屈。

Avery III 及 Sankar[4]探討疊層數、芯材厚度、芯材密度及脫層大小對含脫層之蜂巢板三明治結構板強度之影響。當表面複合材料只有 1~3 層時，主要的破壞模式為局部挫屈(Local buckling)，然而當表面複合材料達 5~7 層時，主要的破壞模式則為總體挫屈(Global buckling)。此外當脫層長度越長時，壓縮強度逐漸降低，但到達一定的長度，強度則不再下降。

Vadakke 及 Carlsson[5]進行含脫層發泡芯材三明治結構壓縮實驗，觀察脫層長度及不同密度的芯材對壓縮強度的影響。為了避免總體挫屈的發生，使用長度較短且芯材較厚的試片(長度為 100 mm，總厚度為 54 mm)進行實驗。實驗結果發現，未含脫層區域的試片，其壓縮破壞模式為表層壓縮破壞，然而當脫層區域越大，壓縮強度越小，其破壞模式則為局部挫屈。

Avilés 及 Carlsson [6]進行含脫層三明治結構板的壓縮實驗，其預埋之脫

層形狀為圓形或方形，討論不同的脫層形狀、芯材密度及脫層面積對挫屈負載的影響。結果發現，當局部挫屈發生時，脫層之裂紋沿著垂直受力方向迅速成長至兩端，最後導致板的芯材破壞或表層壓縮破壞。

由以上文獻[3-6]可說明局部挫屈將使結構進一步產生裂紋成長因而導致整體壓縮強度降低。除了壓縮實驗外，部分學者亦探討三明治結構受彎矩力作用的破壞模式。Southward 等人[7]進行含脫層蜂巢板三明治結構的四點彎矩實驗，發現局部挫屈為導致破壞的主要模式。接下來 Southward 等人[8]以含圓型脫層三明治結構板進行四點彎矩實驗，設計局部位移計來量測局部挫屈的側向位移量，並利用音洩感測器(AE sensor)來量測裂紋的初成長。

除了實驗的觀察，部分學者亦利用有限元素法(Finite element analysis)對含脫層三明治結構進行分析。Sleight 及 Wang[9]採用三種不同的數值方法，能量法(Rayleigh-Ritz method)、有限差分法(Finite difference method)及有限元素法，藉由特徵值的求解來預估含雙表層脫層缺陷三明治結構的挫屈壓縮負載。

El-Sayed 及 Sridharan [10]以二維平面應變元素模擬含脫層三明治結構梁的壓縮行為，表面材料與芯材之間使用具有厚度的黏膠模型(Cohesive zone model)來模擬裂縫成長的破壞行為。Veedu 及 Carlsson [11]以有限元素模擬估算文獻[5]的實驗挫屈強度，同時利用線性特徵值求解及非線性(幾何

大變形)分析來計算三明治結構壓縮的挫屈負載及最大負載。分析結果顯示最大負載與挫屈負載相近，並與實驗量測值相吻合。

Avilés 及 Carlsson [12]亦針對含脫層的三明治結構板進行有限元素分析。結果發現，當脫層面積小(圓形脫層直徑為 50 mm)時，挫屈負載強度隨著芯材剛性的降低而減少；然而，當脫層面積大(圓形脫層直徑為 100 mm)時，挫屈負載強度幾乎不受芯材剛性影響。

Øtergaard[13]以有限元素法討論局部缺陷(Local imperfection)及整體缺陷(Global imperfection)對三明治結構壓縮行為的影響，並利用黏膠模型(Cohesive zone model)來模擬表層材料與芯材間裂紋的成長。結果顯示當含脫層三明治結構增加微量的局部缺陷時，將使結構的強度明顯下降。

Yeh 及 Chiu [14]以三種不同的有限元素建模方式來模擬三明治結構表層與芯材間黏膠的形狀，並以最大應力準則判斷脫層區域的裂紋是否成長。

Sayyidmousavi 等人[15]介紹新的有限元素建模方法。使用殼元素來模擬三明治結構的表層，實體元素則用來模擬芯材，並利用拘束方程式來結合殼元素與實體元素，脫層區域則移除拘束方程式，並在脫層的上下面設定接觸元素。雖然預測的總體挫屈負載與文獻壓縮實驗結果[16]吻合，但含有脫層缺陷的三明治結構，其預估之局部挫屈負載卻比文獻實驗[12]量測的負載低。

從上述文獻整理，含脫層的三明治結構有多種不同的破壞模式，包括總

體挫屈、局部挫屈、芯材的破壞及表面複合材料的微挫屈破壞模式等，而這些破壞模式，往往受到表層的厚度、複合材料堆疊角度、芯材密度、芯材厚度及脫層大小等因素的影響，因此含脫層複合材料的三明治結構的破壞分析是一個極複雜的議題。基本上，不同的破壞模式將有不同的分析方法及模型加以描述，而在文獻中對於每一種破壞模式，尚無法提供有效完整的資訊。在本研究中，我們主要針對局部挫屈(Local buckling)及總體挫屈(Global buckling)的挫屈模式，有系統地加以深入探討，並定義出臨界脫層長度(當脫層長度大於臨界長度時，局部挫屈將會發生)，以了解臨界脫層長度和表層厚度的關係，藉由實驗的量測及有限元素法的模擬分析(線性及非線性分析)，有效地預估因局部挫屈而導致破壞的三明治複合材料之挫屈行為。



1.2 研究目標與方法

本研究主要以 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材表層的三明治結構試片進行討論，藉由壓縮實驗，觀察這兩種三明治結構的挫屈模式及破壞行為。接著根據試片的幾何大小及材料特性，我們建立了一套非線性的有限元素分析模型，分成三個部分做討論。首先，將實驗的結果和有限元素分析比較，得到試片存在的缺陷，討論缺陷與脫層長度的關係。接著，經由分析得到的應力分布，找到芯材破壞的位置。最後，根據缺陷與脫層長度的關係，模擬 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材表層的三明治結構試片在各種脫層長度下的挫屈行為，討論表層厚度對臨界脫層長度的影響。



第二章 含脫層三明治結構壓縮實驗

2.1 含脫層三明治結構試片的製備

本研究主要探討含脫層複合材料三明治結構在單軸壓縮下的挫屈行為及破壞強度，含脫層複合材料三明治結構具備以下基本材料。表層(face-sheet)使用碳纖維複合材料疊層板，選用的疊層順序為 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ ，單層厚度約 0.14 mm，基本材料為單方向碳纖維預浸材(Unidirectional carbon fiber prepreg)，其碳纖維預浸材由福懋興業提供。經本實驗室測量之材料性質如表 2.1 所示，其中， E_{33} 假設與測量到的 E_{22} 之材料性質相同，此外假設波松比與剪力模數在三個方向均相同(僅測量 12 方向的材料性質)。芯材(core)選用閉孔剛性發泡材 ROHACELL[®]，型號為 51WF，原料為聚甲基丙烯酸酰胺(Polymethacrylimide, PMI)，其廠商提供的材料性質如表 2.2[17]。表層與芯材間的黏合使用 FM[®] 73 片膠，主要成分為環氧樹脂。脫層區域則使用離型布(Release fabrics)，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可分為兩個部分，複合材料疊層板(用於表層)及含脫層的三明治結構試片。

複合材料疊層板使用真空封裝製作方法。首先，將單方向碳纖維預浸

材裁切成適當的大小，依據實驗所需的角與疊層次序堆疊。將堆疊後的成品表面依序鋪上離型布及吸膠棉布以吸附多餘排出的樹脂基材，再將整體放置於已鋪好離型布的鐵板上並覆上真空袋，使用矽膠條封裝並利用真空幫浦抽氣達到真空狀態，其製程堆疊順序如圖 2.1，然後整體放進熱壓機，給定壓力 13.6 kg/cm^2 ，將溫度升到 100°C 維持 40 分鐘，再調至 150°C 維持 100 分鐘，然後關閉加溫器，使之自然冷卻至常溫即可得到碳纖維複合材料疊層板，最後再經過水刀裁切出三明治結構試片所需的大小。

含脫層三明治結構試片主要分為複合材料疊層板、發泡芯材、片膠及離型布，使用片膠黏合疊層板與芯材。為了產生脫層，在疊層板及芯材之間不使用片膠，並且額外使用一片相同面積的離型布，來防止左右兩端的樹脂流入脫層區域。片膠固化的方法則依據廠商提供的製作條件[18]，將試片放置熱壓機，以墊塊頂住上下熱壓板，墊塊高度為表層與芯材的總厚度，將溫度在 30 分鐘內升至 120°C ，並保持 120°C 的溫度共 60 分鐘。然後把加溫器關閉，冷卻至常溫即可得含脫層缺陷的複合材料三明治結構試片。

本研究的試片尺寸如圖 2.2 所示，圖中試片測試長度(gauge length)為 120 mm，左右預留的夾持深度為 10 mm， L_d 為預脫層的長度， t_c 為芯材厚度， t_f 為表層複合材料的厚度，應變規-A 貼於預埋脫層缺陷的表層 (Debonded face-sheet)，應變規-B 貼於完好的表層 (Bonded face-sheet)。此

外，脫層區域位於試片正中間位置且穿過整個試片的寬度。

為了觀察含脫層三明治結構的局部挫屈行為，本研究設計兩種不同疊層層數的試片，複材疊層順序為 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ ，分別為 8 層及 12 層，其中，複材疊層順序為 $[(0/90)_2]_s$ 的試片以脫層長度為 10 mm、30 mm 及 50 mm 的試片進行實驗，而複材疊層順序為 $[(0/90)_3]_s$ 的試片則以脫層長度為 30 mm 及 50 mm 的試片進行實驗，每種試片至少重覆製作三支。整體試片尺寸規格如表 2.3 所示，芯材厚度(t_c)統一訂為 14 mm，而試片寬度則訂為 40 mm。各種尺寸的試片將經由實驗觀察不同脫層長度下的挫屈模式與破壞行為，最後再藉由有限元素模擬估算試片的臨界脫層長度。

2.2 三明治結構壓縮實驗

本研究為了探討含脫層三明治結構受單軸壓縮的局部挫屈破壞模式，因此參考美國材料試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)的 ASTM C 364/C 364M – 07 三明治結構的側向壓縮強度之標準測試方法(Standard Test Method for Edgewise compressive Strength of Sandwich Constructions)[19]，從中可以得到完整的試片規格及實驗操作方法。本試驗使用萬能材料試驗機(Material Test System, MTS)進行測試，並使用位移控制，夾頭位移速度為 0.002 mm/sec。夾置具則根據測試規範訂做，夾持端之夾持深度為 10 mm，可夾持寬度為 7 ~ 35 mm，夾置具示意圖如圖 2.3

所示，試驗機夾頭夾緊夾置具時，應使用水平儀測量夾具的測試面是否水平，以避免受力不對稱導致其他破壞模式的發生。為了測量挫屈負載，在三明治試片的兩面二分之一長度處黏貼應變規。其應變規位置如圖 2.2 所示，應變規-A 貼於含脫層的表層，而應變規-B 貼於完好的表層，壓縮實驗的測試照片如圖 2.4 所示。

2.3 實驗結果

2.3.1 含脫層 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片

2.3.1.1 脫層長度對挫屈行為的影響

為了觀察 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞行為，本研究選用脫層長度為 10 mm、30 mm 及 50 mm 的試片進行壓縮測試實驗。

首先是脫層長度為 10 mm 的試片，實驗將藉由應變規-A 及應變規-B 所測得的負載與應變關係來觀察試片的挫屈行為及破壞行為，代表的試片結果如圖 2.5 所示。起初(o-a)，三明治結構承受單軸壓縮，兩端的應變規承受壓應變(負值)，負載與應變呈現固定的斜率。然而，當負載接近最大負載時，應變規-A 測量的壓縮量更大，相對地，應變規-B 到達最大壓應變(a 點)後，開始由壓縮應變轉換成拉伸應變。依據文獻[6]指出，此應變的反折點(最大壓應變值)為挫屈開始發生的負載，因此本研究將最大壓應

變值的負載定義為挫屈負載 (Buckling load)，代表三明治結構開始發生挫屈行為。

試片到達最大負載(b 點)後，迅速產生破壞，取最大值為破壞負載 (Failure load)。破壞後兩面的應變值分別為壓縮及拉伸(c 點)，顯示主要的破壞模式為總體挫屈(Global buckling)，如圖 2.6 所示，試片朝完好的表層方向翹屈。試片發生總體挫屈後，承受極大的彎曲，芯材因而產生破裂。從破壞的結果可以發現，試片在接近夾持端的區域存在明顯的斜裂紋(圖 2.6(b))，而裂紋延伸至脫層區域(如圖 2.6(c))。

相同的試片結果整理如表 2.4 所示，挫屈負載值約為 17.7 kN，而破壞負載值約為 18.3 kN。根據圖 2.5 的負載與應變響應關係可以發現，含脫層的面(應變規-A)，在整個過程中皆為壓縮應變，顯示脫層區域並沒有產生挫屈的行為，主要的破壞模式為總體挫屈導致的芯材破裂，而破壞產生的機制將由第三章的有限元素分析進行確認。

接下來討論脫層長度為 30mm 之試片的實驗結果，其代表的負載與應變響應關係如圖 2.7 所示。當負載抵達圖中 a 點(挫屈負載)後，應變規-A 的應變值從壓縮應變轉變成拉伸應變，而應變規-B 則維持壓縮應變，此時，試片的脫層區域開始產生局部挫屈(Local buckling)的現象，如圖 2.8(a) 所示。

當負載抵達最大負載後(b 點)，靠近界面的芯材發生破壞，片膠下方的

芯材破壞迅速延伸到兩端，抵達 c 點。表層與芯材分離的照片如圖 2.8(b) 所示，圖中可發現，完好的表層在破壞後朝另一側翹曲，應變規-B 測得的應變值在此階段中由負值(壓縮)轉變成正值(拉伸)。相對地，含脫層的表層則因局部挫屈，破壞後朝外翹曲，應變值(應變規-A)仍為拉伸應變，顯示試片因芯材破壞而導致試片裂開。

根據上述結果，當試片的脫層長度為 30mm 時，主要的破壞模式為局部挫屈所引起的表層與芯材分離，而挫屈負載值約為 10.8 kN 及破壞負載值約為 12.7 kN。相同試片的實驗結果整理如表 2.5 所示。

接下來討論脫層長度為 50 mm 之試片的實驗結果，代表的負載與應變響應關係如圖 2.9 所示。其破壞的情形與 30 mm 脫層長度的試片類似，主要的破壞模式為局部挫屈所引起的表層下方芯材破壞。由於本試片脫層長度較長，使得局部挫屈的情形較 30 mm 的脫層長度更為明顯，如圖 2.10(a) 所示，破壞發生前，脫層區域出現明顯的局部挫屈行為。相同試片的實驗結果整理如表 2.6 所示，挫屈負載值約為 4.6 kN 及破壞負載值約為 8.0 kN。

表 2.9 統整了所有實驗的挫屈負載值、破壞負載值及破壞行為。首先討論含脫層 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果。就挫屈行為而言，10 mm 脫層長度之試片的破壞模式為總體挫屈，脫層區域對於挫屈行為沒有影響，相對地，脫層長度為 30 mm 及 50 mm 之試片，因脫層區域產生局部挫屈而導致表層與芯材分離，顯示結構的脫層長度在 10 mm 到 30 mm

的範圍之間，產生破壞模式的轉換，因此可以推測的臨界脫層長度位於 10 mm 到 30 mm 的範圍之間。而脫層長度對應於挫屈負載及破壞負載關係圖則如圖 2.22 所示，圖中可明顯發現，當脫層長度越小時，挫屈負載值與破壞負載值相當接近，結構在挫屈發生後很快地就發生破壞。反之，脫層長度越長，局部挫屈發生後，結構還可以承受部分的強度直到芯材發生破壞。

2.3.1.2 脫層長度對破壞裂紋的影響

本節將介紹含脫層 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞行為。本實驗所有的破壞行為皆為挫屈所引起的芯材破裂，而破裂的情形可分為兩種：

第一種，總體挫屈而導致的芯材破裂，試片於靠近兩端處發生明顯的斜裂紋。代表的破壞試片如圖 2.11 所示，圖中為 10 mm 脫層長度的試片，斜裂紋與表層的夾角約為 41° (如圖 2.11(b))。從破壞的結果可以推測，結構發生總體挫屈後，因承受彎矩而導致夾持端與脫層區域中間(約總長的 1/4 位置)的芯材發生破壞，破壞後裂紋通過脫層區域。

第二種，局部挫屈而導致脫層兩側發生芯材破裂，裂紋延伸至兩端而導致複材表層與芯材分離。圖 2.12(a)為 30 mm 脫層長度之試片的破壞裂紋照片，照片中可以發現主要的破壞行為是複材表層與芯材分離。此外，從圖 2.12(b)可以發現在片膠下方仍殘有部分芯材，顯示裂紋由芯材的部分

開始發生。圖 2.13(a)及(b)為 50 mm 脫層長度之試片的破壞裂紋照片，其破壞裂紋與 30 mm 脫層長度的試片接近，皆為複材表層與芯材分離的破壞模式。為了記錄裂紋的確切位置，將 30 mm 及 50 mm 脫層長度的試片裂紋結果加以描繪(描繪座標點)，得到的破壞裂紋示意圖如圖 2.12(c)及圖 2.13(c)所示。

由 30 mm 及 50 mm 脫層的試片可以發現分離後的表層，如圖 2.14 及圖 2.15 所示，從分離的表層可觀察到脫層區域兩側仍有許多芯材附著在黏膠上面，厚度約 0.3 mm ~ 2.0 mm，顯示表層與芯材接合良好。由於實驗中破壞過程非常迅速，難以捕捉破壞發生的確切位置，因此三組試片的破壞裂紋路徑將於第三章使用有限元素法進行驗證，確認其破壞機制及裂紋的破壞方向。



2.3.2 含脫層 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片

2.3.2.1 脫層長度對挫屈行為的影響

為了比較不同疊層層數對破壞行為的影響，本節將討論 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈行為，選用兩種脫層長度(30 mm 及 50 mm)的試片進行壓縮測試實驗。

首先，觀察脫層長度為 30 mm 的試片，經由應變規-A 及應變規-B 所測得的負載與應變響應關係如圖 2.16 所示。起初(o-a)，三明治結構承受單

軸壓縮，兩端的應變規承受壓應變(負值)。然而，當負載接近挫屈負載(a點)後，應變規-A 開始由壓縮應變轉換成拉伸，而應變規-B 測量的壓縮量更大，在破壞發生之前可以發現整支試片朝向脫層面翹屈，如圖 2.17(a)所示。試片到達最大負載(b點)後，試片迅速產生破壞(到達c點)，主要的破壞模式為總體挫屈(Global buckling)導致的芯材破裂，如圖 2.17(b)所示，試片朝含脫層的表層方向翹曲，芯材發生破壞，與 2.3.1.1 節的具 10mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的破壞方向相反(破壞模式同樣為總體挫屈)。相同試片的實驗結果整理如表 2.7 所示，挫屈負載約為 20.5 kN 及最大負載約為 21.7 kN。

接下來是 50 mm 脫層長度的實驗結果，基本的應變規-A 及應變規-B 所測得的負載與應變響應關係如圖 2.18 所示。當結構承受壓縮抵達挫屈負載(圖中 a 點)後，應變規-A 的應變值從壓縮應變轉變成拉伸應變，而應變規-B 則維持壓縮的應變量，此時，試片的脫層區域開始產生局部挫屈(Local buckling)的現象，如圖 2.19(a)所示。

當負載抵達最大負載後(b點)，靠近界面的芯材發生破壞，脫層區域兩端之裂縫迅速延伸至夾持端，抵達 c 點。裂縫延伸至夾持端的照片如圖 2.19(b)所示，圖中可發現，完好的表層在破壞後朝另一側翹曲，應變規-B 測得的應變值在此階段中由負值(壓縮)轉變成正值(拉伸)。相對地，含脫層的表層則因局部挫屈，破壞後朝外翹曲，應變值(應變規-A)仍為拉伸應變，

顯示試片因芯材破壞而導致試片裂開。此外，從圖 2.19(b)可推測破壞的初始點發生於脫層區域兩側，片膠上仍殘留破壞的芯材，因此本試片主要的破壞模式為局部挫屈所引起的芯材破壞。相同試片的實驗結果整理如表 2.8 所示，挫屈負載約為 13.7 kN 及最大負載約為 16.2 kN。

統整上一小節所有實驗的結果，脫層長度對應於挫屈負載、破壞負載及破壞行為的表格如表 2.9 所示。就含脫層 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈行為而言，30 mm 脫層長度之試片的破壞模式為總體挫屈，脫層區域對於挫屈行為影響很小，相反地，脫層長度為 50 mm 之試片，因脫層區域產生局部挫屈而導致表層與芯材分離，顯示結構的脫層長度在 30 mm 到 50 mm 的範圍之間，產生破壞模式的轉換。而脫層長度對應於挫屈負載及破壞負載關係圖則如圖 2.22 所示，圖中可發現，越短的脫層長度，挫屈負載與破壞負載相差越小。雖然脫層長度為 30 mm 的試片為總體挫屈的破壞行為，但可以發現挫屈後仍可以承受 1~2 kN 的負載才發生破壞，因此脫層區域可能對結構的承載能力產生影響。本實驗結果將於第三章的有限元素分析進行驗證，並預估其臨界脫層長度。

2.3.2.2 脫層長度對破壞裂紋的影響

本節將統整 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的破壞行為。同樣的，本實驗與 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形類似，為挫屈所引起的芯材

破裂，而基本的破壞情形可分為總體挫屈及局部挫屈兩種：

第一種，總體挫屈而導致的芯材破裂，如圖 2.20(a)及(b)所示，圖中的試片其脫層長度為 30 mm，芯材在脫層區域的其中一側產生破裂，與 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片之總體挫屈破壞模式不同的是， $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片並沒有明顯的斜裂紋發生，破壞的發生點可能與局部挫屈的破壞模式(發生於脫層區域兩側下方芯材)相同。而圖 2.20(c)是將同樣的試片裂紋結果加以描繪(描繪座標點)得到的破壞裂紋示意圖。

第二種，局部挫屈而導致脫層兩側發生芯材破裂，裂紋延伸至兩端而導致複材表層與芯材分離。圖 2.21(a)及(b)為試片脫層長度為 50 mm 試片的破壞裂紋照片，主要的破壞模式為複材表層與芯材分離，而圖 2.21(c)是將同樣的試片裂紋結果加以描繪(描繪座標點)得到的破壞裂紋示意圖。

同樣地， $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片破壞點皆發生於芯材，顯示表層與芯材接合良好。兩組試片破壞的發生位置將於第三章使用有限元素法進行驗證，確認其破壞機制及裂紋破壞方向。

2.3.3 表層厚度對破壞行為的影響

統整前兩節的 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片之挫屈及破壞行為，如表 2.9 所示，對應的挫屈負載及破壞負載則如圖 2.22 所示。從表中可以清楚發現，同樣在脫層長度為 30 mm 的情況下，表層厚度越厚者，

總體挫屈的破壞模式會先發生，相反地，較薄的表層，主要的為局部挫屈的挫屈行為，這個現象與文獻中[4]的觀察類似，較薄的表層主要的破壞行為為局部挫屈。

就總體挫屈的破壞行為而言， $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片發生於脫層長度為 10 mm，破壞後存在明顯的斜裂紋，如圖 2.11(b)； $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片發生於脫層長度為 30 mm，破壞後的結果如圖 2.20(a)，推測其總體挫屈的行為可能伴隨著脫層區域的局部挫屈行為，而裂紋的發生位置將由第三章進行驗證。

就局部挫屈的破壞行為而言，同樣在脫層長度為 50 mm 的情況下，兩種試片的挫屈及破壞模式一致，皆為表層與芯材分離。

最後，從圖 2.22 可以清楚的發現，具 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片與具 50 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的破壞負載相當接近，顯示當結構存在較大的脫層時，即使表層厚度提升，其強度仍會明顯降低。

第三章 有限元素分析

本章將依據上一章的實驗結果，以有限元素法(Finite element analysis)模擬含脫層三明治結構的挫屈行為。首先，將簡述挫屈(Buckling)在有限元素法的理論與分析方法，並推導線性挫屈方程式的基本型式。依據實驗試片的基本尺寸建立有限元素模型，進行線性挫屈分析(Linear buckling analysis)及非線性分析(Nonlinear analysis)。經由線性挫屈分析可以預估挫屈的變形模態(Buckling mode)，接著將挫屈的模態當作缺陷(imperfection)進行非線性分析，與實驗結果進行比較，得到每個試片中存在的缺陷。最後，討論各種脫層長度下的破壞行為，得到 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度。



3.1 挫屈分析方法

挫屈(Buckling)為平衡的結構在未發生破壞或材料分離之前，產生結構不穩定(Structural instability)的情形[20]。而不穩定的情形常發生於細桿(Slender)結構、平板(Plate)結構或殼(Shell)結構受平面內作用力的過程中，當到達一定的外力時產生側向位移(Lateral deflection)。

在有限元素法中，挫屈的分析可分為線性挫屈分析及非線性分析[21]，典型的負載與位移關係如圖 3.1 所示。圖中橘色的線表示線性挫屈分析的

負載與位移曲線，呈線性關係，藉由特徵值問題(Eigenvalue problem)可計算得臨界挫屈負載(Critical buckling load)，此臨界挫屈負載的位置即為分歧點(Bifurcation point)，意義為平衡路徑發生分歧的位置；而圖中藍色的線為非線性分析，考慮幾何大變形，逐步地模擬挫屈發生的過程，負載在發生挫屈時可能存在最大值，稱為極限點(Limit point)，有文獻[11, 22]以此最大負載值與實驗的最大負載值進行比較。接下來兩小節將介紹線性挫屈分析及非線性的分析方法。

3.1.1 線性挫屈分析

在有限元素分析中，線性挫屈假設結構發生挫屈之前，其變形為線性行為，並經由求解特徵值問題(eigenvalue problem)計算臨界挫屈負載及挫屈變形形狀。本小節將從有限元素法的切線剛度矩陣(Tangential stiffness, $[K_T]$)開始，根據線性挫屈的基本假設，推導線性挫屈公式。

切線剛度矩陣($[K_T]$)描述結構隨著變形所產生的剛度變化，用於處理幾何非線性(大變形)的問題，其中包含三個部分[24]：

$$[K_T] = [K_L] + [K_N] + [K_\sigma] \quad (3.1)$$

其中， $[K_L]$ 為線性(小變形)剛度矩陣(Linear stiffness matrix)， $[K_N]$ 為非線性(幾何大變形)剛度矩陣(Nonlinear stiffness matrix)，而 $[K_\sigma]$ 為應力剛度矩陣(Stress stiffness matrix)或稱幾何剛度矩陣(Geometric stiffness matrix)。線性

剛度矩陣描述元素的結構剛度，其剛度與結構的位移場與應力場無關，而非線性剛度矩陣亦描述元素的結構剛度，且與位移場有關，隨著結構變形量越大，非線性剛度矩陣的影響越大，反之，若結構為小變形，非線性剛度矩陣可忽略。應力剛度矩陣則與元素的位移場與應力場有關，描述平面內應力對側向位移的影響[20]。

切線剛度矩陣主要描述負載增量與位移增量的關係，方程式如下：

$$[K_T][dQ] = [df] \quad (3.2)$$

$$([K_L] + [K_N] + [K_\sigma])[dQ] = [df] \quad (3.3)$$

其中， $[df]$ 為負載增量，而 $[dQ]$ 為位移增量。根據線性挫屈的假設，結構在挫屈之前為線性行為，因此不考慮非線性剛度矩陣。此外，當負載到達臨界值且不再增加，而結構仍具有位移時，表示結構發生挫屈。根據挫屈發生的條件，負載增量為零，而位移增量仍存在：

$$([K_L] + [K_\sigma])[dQ] = [0] \quad (3.4)$$

施加一個參考負載(Reference load, $[f]_{ref}$)於結構中，並進行線性靜態分析。在此使用 λ 當作參考負載的乘積，表示負載的大小($\lambda[f]_{ref}$)。結構的應力值可由負載計算而得，而應力剛度矩陣與結構的應力狀態有關，因此在任何負載下的應力剛度矩陣可表示成：

$$[K_\sigma] = \lambda[K_\sigma]_{ref} \quad (3.5)$$

而將(3.5)式代入(3.4)式即可寫成：

$$([\mathbf{K}_L] + \lambda[\mathbf{K}_{\sigma_{ref}}])[\mathbf{dQ}] = [\mathbf{0}] \quad (3.6)$$

為了計算節點位移變化的非零解，(3.6)式以特徵值問題(Eigenvalue problem)求解，讓 $[\mathbf{dQ}] = [\Phi]$ ，得到線性挫屈方程式的基本型式如下：

$$([\mathbf{K}_L] + \lambda_{cr}[\mathbf{K}_{\sigma_{ref}}])[\Phi] = [\mathbf{0}] \quad (3.7)$$

其中， λ_{cr} 為特徵值，而 $[\Phi]$ 為位移的特徵向量，此外，特徵值(Eigenvalue)代表臨界負載係數(Critical load factor)，而特徵向量(Eigenvector)代表挫屈模態(buckling mode)。臨界負載係數乘上參考負載即可得到臨界挫屈負載(Critical buckling load, $[f]_{cr}$)：

$$[f]_{cr} = \lambda_{cr} [f]_{ref} \quad (3.8)$$

經由以上有限元素法的線性挫屈分析，可快速地估算結構的挫屈負載及挫屈的變形形狀，因此可初步的估算含脫層三明治結構不同芯材厚度、表層厚度及脫層長度對挫屈負載及挫屈模態的影響[22]。然而，為了更進一步模擬結構挫屈時的應力、應變及變形過程，則必須進行非線性分析。

3.1.2 非線性分析

一般而言，在有限元素法中，由於線性挫屈假設結構為線性且僅能求解挫屈負載及挫屈模態，因此，為了觀察挫屈的變形及應力應變變化的過程[22]，必須導入非線性求解(假設幾何大變形)，逐步地進行非線性分析(Nonlinear analysis)。

線性挫屈分析可藉由特徵值問題，由完美的結構直接計算挫屈負載，而為了計算非線性的挫屈行為，結構模型必須導入缺陷(imperfection)，或稱擾動(perturbation)，逐步的進行幾何大變形的求解，使結構發生挫屈的行為，此方法又稱為非線性後挫屈分析 (Nonlinear Post-buckling analysis)[22]。

從過去的文獻整理，在非線性分析中要觸發挫屈行為有以下幾種方法。

第一種，施加微小的擾動力(Perturbation)在脫層區域[23]，來觸發三明治結構的局部挫屈行為。

第二種則假設結構本身的不完美，而導致挫屈的發生。如 Øtergaard[13] 為了探討缺陷(imperfection)對三明治結構之挫屈行為的影響，藉由 sin 函數定義脫層區域的局部缺陷(local imperfection)及整體結構的總體缺陷(global imperfection)進行非線性分析。此外，Sankar 及 Narayanan [22]藉由非線性分析模擬含脫層三明治結構的負載與位移曲線及應力。首先藉由線性挫屈分析得到挫屈模態形狀(Buckling mode shape)，將挫屈模態當作少許的偏移量加到完好的結構中，使結構具有初始的缺陷(imperfection)。而在 Sankar 及 Narayanan 的非線性分析中，挫屈模態形狀乘上 10%的表層厚度作為結構初始的偏移量。

本研究主要採用 Sankar 及 Narayanan 的方法，基本的非線性分析流程如圖 3.2 所示。首先，進行線性挫屈分析，得到結構的第一個挫屈模態形

狀(Buckling mode shape)，代表結構的挫屈行為。接著，為了進行非線性分析，將第一個挫屈模態當作整體結構的初始偏移量，能觸發這個挫屈模態的變形行為。本文定義的缺陷(r)如下：

$$r = \frac{e_{\max}}{t_f} \quad (3.9)$$

其中， r 為缺陷(imperfection)，代表表層厚度的百分比。而 t_f 則為表層厚度， e_{\max} 則代表結構初始偏移量的最大振幅。當結構初始偏移量的最大振幅 (e_{\max}) 為 0.01 mm 時，而表層厚度(t_f)為 1 mm，則代表模態的缺陷(r)為 1%。此外，初始偏移量的示意圖如圖 3.3 所示，以結構的第一挫屈模態當作缺陷(可能為總體挫屈模態或局部挫屈模態)，而最大的振幅為 e_{\max} 。

本研究所使用的有限元素分析套裝軟體(ANSYS) [21]，可將挫屈模態的形狀導入有限元素模型中，其模態振幅大小則依據所需的缺陷量輸入至軟體中即可，使模型具有微小的擾動位移。

第三步，設定幾何大變形，使用位移控制的方式進行求解。為了求解幾何非線性的問題，本研究使用的求解方法為牛頓拉扶森法(Newton - Raphson approach)，將位移分隔成有限的步數，計算每一步的負載值，而每一次分析都必須確定求解的結果能夠收斂。

最後，經由非線性分析的結果可以得到壓縮過程中的負載、應力以及應變，因此可以將負載與應變關係和實驗結果進行比較。藉由分析得到的挫屈負載，其定義與實驗的定義相同，為三明治結構到達最大壓應變時的

負載。此外，經由分析得到芯材的應力分佈，可以計算結構的破壞負載及破壞位置。

3.2 建立有限元素模型

本研究建立參數化的有限元素模型，以參數化控制長度(L)、寬度、表層厚度(t_f)及脫層長度(L_d)，如此便可有效率地針對不同尺寸的試片進行模擬。有限元素模型主要使用的元素為 SOLID45，為三維的實體元素，共有 8 個節點，每個節點有三個方向的自由度，支援幾何大變形及應力剛化效應。

首先，建立表層複合材料疊層板的部分，定義纖維 0° 方向沿著主軸方向。根據疊層板不同的角度堆疊次序，分層建立有限元素模型，再建立芯材的部分，即可對表層與芯材的體積做黏合(merge)(假設黏膠無厚度，且表層與芯材完美接合)。此外，脫層區域的元素不做黏合，使表層與芯材的節點在脫層區域重疊，並建立接觸元素(TARGE170 及 CONTA173)以防止表層穿透至芯材，如圖 3.4(a)及圖 3.4(b)所示。根據實驗觀察，試片主要的破壞位置靠近脫層區域兩端，為了計算該區的應力值，在此區域使用較細的網格，如圖 3.5 所示。圖 3.6 描述有限元素模型的座標定義及疊層角度定義，總體座標(Global coordinate)的 Z 方向為三明治結構的厚度方向，而 X 方向為長度方向，元素座標系統的 x 方向與總體座標系統的 X 方向相同，此外

疊層的角度由元素座標系統的 x 方向轉向 y 方向作為定義。邊界條件的部分，本模型參考實驗中的拘束條件，上下端給予固定的邊界條件，並藉由位移控制的方式進行分析。

3.3 線性挫屈分析結果

根據文獻[15]，有限元素模型可藉由臨界挫屈負載驗證元素的收斂性，本分析之元素收斂性如表 3.1 所示。以脫層長度為 50 mm， $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的試片為例，當最小元素邊長小於約 0.2 mm 時，臨界挫屈負載幾乎達到收斂，因此得到線性挫屈分析的挫屈負載為 7.24 kN。依據第二章所選用的試片尺寸， $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的線性分析結果如圖 3.7 所示，從各脫層長度下的挫屈模態可以清楚的發現，脫層長度為 10 mm 的結構，主導的挫屈模態為總體挫屈(Global buckling)；脫層長度為 30 mm 及 50 mm 的結構，主導的挫屈模態為局部挫屈(Local buckling)。此外， $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的線性分析結果如圖 3.8，同樣地，當脫層長度為 30 mm 的結構時，主導的挫屈模態為總體挫屈(Global buckling)，但局部脫層仍有翹屈的現象；當脫層長度為 50 mm 時，主導的挫屈模態為局部挫屈(Local buckling)。

根據上述線性分析的結果，五種試片的挫屈模態與實驗觀察的行為一致，顯示本試片可藉由線性挫屈分析有效的預估挫屈形狀。為了計算負載

與應變關係及破壞負載，將線性挫屈分析的挫屈模態做為微小的缺陷，進行非線性分析。

接下來的非線性分析將分成三個部分，首先，將有限元素分析的結果與實驗進行比較，得到五種實驗試片的缺陷，並討論各個試片的破壞原因。第二部分，依據實驗比較得來的缺陷，推估各種脫層長度(脫層長度為 10 mm 至 70 mm)下的缺陷，以此缺陷進行 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的非線性分析，討論各種脫層長度下的挫屈負載。最後，從不同脫層長度下的結果，決定 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度。



3.4 實驗與非線性分析結果之比較

本節之目的在於決定實驗的缺陷及討論芯材的破壞原因，基本的步驟如下：

第一，根據試片尺寸進行各種缺陷下的分析，觀察負載與應變曲線隨著缺陷的變化，並找出與實驗值最接近的曲線，得到結構的缺陷。

第二，得到試片的缺陷後，檢查每個負載下，芯材的主應力值，與實驗的裂紋路徑進行比對，找出實驗的破壞發生負載及位置。

接下來五小節將依序說明五種試片的有限元素分析結果。

3.4.1 具 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片

為了得到試片存在的缺陷大小，本節將針對 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片尺寸以-0.05%至 5%的表層厚度當作缺陷進行分析，缺陷為-0.05%至 5%的負載與應變響應如圖 3.9 所示，將實驗中脫層面的應變與各種缺陷下的模擬進行比較。而從圖 3.9 中可以發現，當結構發生總體挫屈後(其中一邊的應變量到達最大壓應變後)，負載值幾乎沒有增加，可以說明結構發生總體挫屈之後將失去整體的穩定性，無法承受更多的負載。

此外，當結構的缺陷為 0.05%至 5%時，應變到達挫屈負載後，隨著缺陷越大，應變值越早到達最大壓縮應變，然後應變量由負轉正。

結構的缺陷為 0.05%至 5%的變形結果如圖 3.10(a)所示，朝著脫層區域的方向翹屈。與實驗的結果恰好相反，因此模擬的部分本研究給一個反方向的微量缺陷。缺陷為-0.05%的負載與應變關係則如圖 3.9 所示，實驗的結果與有限元素模擬的曲線朝向同一個方向。從各種缺陷下的模擬與實驗比較，缺陷為-0.05%的分析結果與實驗結果最符合。此外，缺陷為-0.05%的變形結果如圖 3.10(b)，朝向完好的表層方向總體挫屈，而脫層區域的表層頂住芯材(表層與芯材接觸)，與第二章的實驗變形結果吻合，說明本試片存在的缺陷約為-0.05%。

接著將依據-0.05% 缺陷的分析結果，找出破壞發生時的負載及位置。

根據文獻指出[25]，閉孔剛性發泡材(ROHACELL[®])的拉伸破壞模式為脆性，因此可藉由最大主應力準則(Maximum principal stress criterion)判斷材料是否發生破壞。此外，從文獻[26]中的純剪力測試(Pure shear test)顯示，閉孔剛性發泡材 ROHACELL[®] 主要的剪力破壞角度為 45°，顯示破壞由最大拉伸應力主導。因此本文將藉由最大主應力準則來預估芯材的破壞。

當壓縮負載到達 17.6 kN 時，芯材的最大主應力輪廓圖如圖 3.11 所示，從圖中可以發現，應力分布沿著寬度方向幾乎一致，此外，在脫層區域與夾持端間存在最大的主應力值，約為 1.67 MPa，並超過芯材的拉伸破壞強度($s^{(+)}$)。最後，將主應力輪廓圖及主應力方向與實驗測量到的裂紋進行比較，如圖 3.12(a)及圖 3.12(b)所示，最大主應力發生的位置與斜裂紋的位置接近。而從主應力方向圖(如圖 3.12(c))可以發現，主應力方向近乎垂直於裂紋路徑。

根據本節缺陷為-0.05%的非線性分析結果，挫屈負載約為 17.4 kN，而破壞負載為 17.6 kN。經實驗測量的挫屈負載為 17.7 kN，而破壞負載為 18.3 kN，非線性分析結果在實驗誤差範圍內，顯示缺陷為-0.05%的分析結果可以代表 10 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈行為及破壞結果。

3.4.2 具 30 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片

本節將討論 30 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的非線性分析結果。基本的變形為脫層區域產生局部挫屈(如圖 3.13(a)所示)，為了觀察缺陷對挫屈行為的影響，缺陷為 0.25%、1%、3%及 10%的負載及應變響應如圖 3.14 所示。同樣地，越大的缺陷將使挫屈行為提早發生。與脫層 10 mm 的試片結果不同的是，脫層面應變發生轉折後，負載仍會繼續提升，顯示結構發生局部挫屈後，整體的剛性仍存在。從圖中可以清楚的發現，3%的缺陷與實驗的結果相符合，顯示實驗試片存在的缺陷約為 3%。

最後，以缺陷為 3%的分析結果進行破壞裂紋與主應力的比較，負載值到達 13.0 kN 時的主應力分布圖如圖 3.15 所示。圖 3.15(a)可以清楚地發現，由於脫層區域產生局部挫屈，使得主要的主應力分布發生於脫層區域兩側，局部的放大圖與實驗測量的裂紋路徑如圖 3.15(b)所示，圖中的各個三角形點為此點上取得的元素主應力值。位於脫層區域旁的裂紋點之主應力已超過芯材的拉伸強度($s^{(+)}$)，約為 1.64 MPa，主應力方向及實驗裂紋路徑的比較如圖 3.16 所示，圖中可以發現位於脫層區域旁的裂紋點之主應力方向與裂紋路徑方向近乎垂直，顯示此點為破壞的發生位置。

根據本節缺陷為 3%的非線性分析結果，挫屈負載約為 10.6 kN，而破壞負載為 13.0 kN。經實驗測量的挫屈負載約為 10.8 kN，而破壞負載約為 12.7 kN，非線性分析結果在實驗誤差範圍內，顯示缺陷為 3%的分析結果

可以代表 30 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈行為及破壞結果。

3.4.3 具 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片

本節將討論 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的非線性分析結果。挫屈模式為局部挫屈，基本的變形結果如圖 3.13(b)所示，為了觀察缺陷對挫屈行為的影響，缺陷為 0.1%、1%、5% 及 10% 的負載及應變響應如圖 3.17 所示。同樣地，越大的缺陷將使得挫屈提早發生。此外，圖中可以清楚的發現，當結構挫屈開始發生時(脫層面的應變值到達最大壓應變)，負載持續增加，比脫層長度為 30 mm 的試片更為明顯(如圖 3.14)，顯示脫層長度越大，結構挫屈後可以承受更多的負載。圖 3.17 中，當缺陷為 5% 時，有限元素分析的曲線與實驗的結果最吻合，說明本實驗的試片存在的缺陷約為 5%。

最後，以缺陷為 5% 的分析結果進行破壞裂紋與主應力的比較，負載值到達 9.3 kN 時的主應力分布圖如圖 3.18 所示。從圖 3.18(a)可以發現主應力分布發生於脫層區域兩側。局部的放大圖與實驗測量的裂紋路徑如圖 3.18(b)所示，圖中的各個三角形點為此點上取得的元素主應力值。位於脫層區域下方的裂紋點之主應力已超過芯材的拉伸強度($s^{(+)}$)，約為 1.63 MPa，主應力方向及實驗裂紋路徑的比較如圖 3.19 所示，圖中可以發現位

於脫層區域下方的裂紋點之主應力方向與裂紋路徑方向近乎垂直，顯示此點為破壞的發生位置。

根據本節缺陷為 5% 的非線性分析結果，挫屈負載約為 5.1 kN，而破壞負載為 9.3 kN。經實驗測量的挫屈負載約為 4.6 kN，而破壞負載約為 8.0 kN，非線性分析結果在實驗誤差範圍內，顯示缺陷為 5% 的分析結果可以代表 50 mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈行為及破壞結果。

3.4.4 具 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片

本節將討論 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的非線性分析結果。本試片主要的挫屈模式為總體挫屈，如圖 3.20(a) 變形結果圖所示，可發現脫層區域仍有輕微的翹屈。為了觀察缺陷對挫屈行為的影響，缺陷為 0.05%、0.5% 及 3% 的應變及負載響應如圖 3.21 所示。由於本試片的主要破壞行為為總體挫屈破壞，因此結構於挫屈發生後，負載增加量比較少。同樣地，越大的缺陷將會使挫屈提早發生。當缺陷為 0.5% 時，可以得到與實驗非常相符的結果。根據本試片的負載與應變行為，主要的挫屈行為為總體挫屈，從脫層面的應變值由壓縮轉為拉伸可以推論，本試片主要朝向脫層面的方向挫屈。

接著，將依據缺陷為 0.5% 的結果進行破壞裂紋與主應力的比較。當負載到達 21.8 kN 時的最大主應力分布如圖 3.22 所示，從實驗的裂紋位置上

發現這個壓縮負載下的最大主應力值已超過芯材的拉伸破壞強度。圖 3.22(a)為整個芯材部分的最大主應力分布圖，雖然本結構的破壞行為為總體挫屈，但主要的應力值仍先發生於脫層區域兩側。將實驗測量得到的裂紋點與最大主應力分布圖進行比較(如圖 3.22(b)所示)，圖中各點旁的數值為該點的最大主應力值，破壞位置為脫層區域兩側的芯材(如圖中已超過芯材的拉伸破壞強度的位置點)。最後，從這個負載下的主應力方向圖(如圖 3.23 所示)可以發現，該點的主應力方向幾乎與實驗的裂紋方向垂直。顯示本結構雖然為總體挫屈的破壞模式，但往外挫屈的脫層仍會對芯材的產生拉伸的行為，而導致破壞由脫層區域兩側開始，因此本試片的破壞行為為局部挫屈引起的總體挫屈破壞。

經由有限元素法的確認，具 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片主要的挫屈行為為總體挫屈，朝脫層面方向翹屈，而破壞行為主要由脫層區域主導，破壞發生點位於脫層區域兩側的芯材。根據本節的分析，挫屈負載為 19.7 kN，而破壞負載為 21.8 kN。經實驗測量的挫屈負載約為 20.5 kN，而破壞負載約為 21.7 kN，非線性分析結果在實驗誤差範圍內，顯示缺陷為 0.5%的分析結果可以代表 30 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈行為及破壞結果。

3.4.5 具 50 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片

本節將討論 50 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的非線性分析結果。變形結果如圖 3.20(b)所示，為局部挫屈的挫屈模式。為了觀察缺陷對挫屈行為的影響，缺陷為 0.1%、1% 及 10% 的應變及負載響應如圖 3.24 所示。本結構主要的挫屈行為為局部挫屈，因此脫層區域的應變值由壓縮應變轉成拉伸應變。同樣地，越大的缺陷將會使挫屈提早發生。從圖中可以發現，缺陷為 1% 的分析結果與實驗非常接近，說明本實驗的試片存在的缺陷約為 1%。

接著以缺陷為 1% 的分析結果進行實驗裂紋與應力值得比較，當壓縮負載值到達 16.6 kN 時的最大主應力分布圖如圖 3.25 所示。圖 3.25(a) 可以清楚地發現，由於局部挫屈的發生，應力值主要集中於脫層區域兩側。局部的放大圖與實驗測量的裂紋路徑如圖 3.25(b) 所示，圖中的各個三角形點為此點上取得的元素主應力值，由於本分析模型在脫層區域兩側為裂縫的形狀，在有限元素分析中會產生應力集中的現象，因此判讀破壞時的應力值不考慮裂縫尖端的元素應力值。而位於脫層區域旁的裂紋點之主應力已超過芯材的拉伸強度($s^{(+)}$)，約為 1.60 MPa，主應力方向及實驗裂紋路徑的比較如圖 3.26 所示，圖中可以發現位於脫層區域旁的裂紋點之主應力方向與裂紋路徑方向有些許的誤差，但沿著裂紋路徑上仍有部分位置的主應力方向與裂紋路徑方向垂直。

根據本節缺陷為 1% 的非線性分析結果，挫屈負載約為 13.6 kN，而破壞負載為 16.6 kN。經實驗測量的挫屈負載約為 13.7 kN，而破壞負載約為 16.2 kN，非線性分析結果在實驗誤差範圍內，顯示缺陷為 1% 的分析結果可以代表 50 mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈行為及破壞結果。本節所有試片之非線性分析結果與實驗結果的比較如表 3.2 所示。

3.5 決定臨界脫層長度

3.5.1 各種脫層長度下的分析結果

藉由實驗及非線性分析，本研究已經了解 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片在 10 mm、30 mm 及 50 mm 脫層長度下的挫屈及破壞行為。然而，其他脫層長度下的挫屈行為仍有待驗證，因此本節將藉由 3.4.1 至 3.4.3 節得到的缺陷，來推估其他脫層長度下的缺陷，以此缺陷進行分析。各種脫層長度下的缺陷如圖 3.27 所示，紅色的方型表示藉由分析及實驗得到的缺陷，從圖中可以發現脫層長度與缺陷呈現非線性的趨勢，脫層長度越長，缺陷則越大。藍色三角形表示推估的缺陷，假設脫層長度與缺陷呈現雙線性的趨勢，可以得到如圖中脫層長度為 20 mm、40 mm、60 mm 及 70 mm 的缺陷，分別為 1.475%、4%、6% 及 7%。此外，為了更進一步找到臨界脫層長度，脫層長度為 12 mm、14 mm、16 mm 及 18 mm 的試片亦需要進行分析，所代表的缺陷分別為 0.255%、0.56%、0.865% 及 1.17%

藉由非線性分析，可以得到各種脫層長度下的變形結果，如圖 3.28，脫層長度為 20 mm、40 mm、60 mm 及 70 mm 變形結果，從圖中四種變形圖可以清楚的發現，主要的變形行為為局部挫屈，而隨著脫層長度越長，局部挫屈的行為越明顯。接著各種脫層長度下的負載與應變響應如圖 3.29 所示，圖 3.29(a)、圖 3.29(b)、圖 3.29(c)及圖 3.29(d)代表的脫層長度分別為 20 mm、40 mm、60 mm 及 70 mm。從這四張圖可以發現，當脫層長度越長，挫屈發生後的斜率越大。此外，含脫層面的應變在壓縮過程中皆提早到達最大壓應變，然後由負轉正，因此這四種試片主要的挫屈行為為局部挫屈。從上述分析結果，可以推測臨界脫層長度應在 10 mm 至 20 mm 之間。圖 3.30 代表脫層長度為 12 mm、14 mm、16 mm 及 18 mm 的負載與應變關係。從這四種脫層長度下的結果可以發現，脫層長度為 12 mm 時，兩個表層面的應變量明顯的分歧，然而脫層長度為 14 mm 時，含脫層面的應變提早開始由負轉正，代表局部挫屈的發生。因此可以推論 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度約為 14 mm。

圖 3.31 則表示 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的挫屈負載，圖中可以發現當脫層長度大於 50 mm 以後，隨著脫層長度越長，挫屈負載則變化越少。當脫層長度介於 10 mm 及 20 mm 之間時，試片的挫屈行為由總體挫屈轉換成局部挫屈，而 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度約為 14 mm。而表 3.3 整理 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片在各

種脫層長度下的缺陷量及挫屈負載。

$[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的部分，本研究已探討脫層長度為 30 mm 及 50 mm 的挫屈及破壞行為。根據 3.4.4 及 3.4.5 節得到的缺陷，預估其他脫層長度下的缺陷，如圖 3.32 所示。同樣的，紅色的方型表示藉由分析及實驗得到的缺陷，假設缺陷與脫層長度關係為線性，得到推估的缺陷(藍色三角形)。圖中脫層長度為 10 mm、20 mm、40 mm、60 mm 及 70 mm 的缺陷，分別為 0.05%、0.25%、0.75%、1.25% 及 1.5%。其中，當 10 mm 脫層長度三明治結構給予 0.05% 的缺陷時，恰好可以觸發總體挫屈行為(朝向脫層區域的那一面翹屈)，因此這邊選用 0.05% 代表脫層長度為 10 mm 的缺陷。此外，為了更進一步找到臨界脫層長度，脫層長度為 16 mm、18 mm、22 mm 及 24 mm 的試片亦需要進行分析，所代表的缺陷分別為 0.15%、0.2%、0.3% 及 0.35%

藉由非線性分析，可以得到各種脫層長度下的變形結果，如圖 3.33，脫層長度為 10 mm、20 mm、40 mm、60 mm 及 70 mm 變形結果，從圖中五種變形圖可以清楚的發現，脫層長度為 10 mm 及 20 mm 主要的變形行為為總體挫屈，而脫層長度為 40 mm、60 mm 及 70 mm 主要的變形行為為局部挫屈，隨著脫層長度越長，局部挫屈的行為越明顯。接著各種脫層長度下的負載與應變響應如圖 3.34 所示，圖 3.34(a)代表的脫層長度為 10 mm，圖中可以清楚的發現，挫屈後的斜率接近零，且脫層面及完好面的

應變增加量在挫屈後幾乎相同，代表結構主要的挫屈行為是總體挫屈。圖 3.34(a)代表的脫層長度為 20 mm，當脫層長度大於 20 mm 以後，挫屈後負載仍會增加，而且脫層面的應變提早開始由負值(壓應變)轉成正值(拉應變)，因此當脫層長度為 20mm 時，結構主要的挫屈行為為總體挫屈，然而局部脫層的挫屈行為可能同時發生。圖 3.34(c)代表的脫層長度為 30 mm，其分析結果已由 3.4.4 節驗證，主要為局部挫屈引起的總體挫屈破壞，因此本節將此試片視為局部挫屈行為。圖 3.34(d)、圖 3.34(e)及圖 3.34(f) 代表的脫層長度分別為 40 mm、60 mm 及 70 mm，主要的挫屈行為為局部挫屈，挫屈後仍存在一定斜率，且脫層長度越長，斜率越大，顯示結構發生局部挫屈後可以承受一定的負載。

為了更進一步找出臨界脫層長度，脫層長度為 16 mm、18 mm、22 mm 及 24 mm 的分析結果如圖 3.35 所示。從圖 3.35(a)及圖 3.35(b)可以發現，脫層長度為 16 mm 及 18 mm 的試片，兩面的應變量一正一負幾乎同時增加，然而當脫層長度為 22 mm 及 24 mm 時(如圖 3.35(c)及圖 3.35(d)所示)，含脫層面的應變在挫屈後變化較大，因此本試片的臨界脫層長度約為 20 mm。圖 3.36 則表示 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的挫屈負載，圖中可以清楚的發現隨著脫層長度越長，挫屈負載越低。此外，當脫層長度小於 20 mm 時，隨著脫層長度越短，挫屈負載提升較少，顯示在總體挫屈的挫屈行為下，脫層長度的影響較小。表 3.4 整理 $[(0/90)_3]_s$ 複

材三明治結構試片在各種脫層長度下的缺陷量及挫屈負載。

3.5.2 表層厚度對臨界脫層長度的影響

將分析中提供的缺陷量(缺陷與表層厚度相乘)做整理，表 3.5 統整複材三明治結構在各種脫層長度下的缺陷(r)、缺陷量及挫屈模式，表中可以清楚的發現，同樣的脫層長度下， $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的缺陷量比 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的缺陷量高，顯示較厚的表層具有較小的缺陷量。此外，當脫層長度越長時，結構存在的缺陷量則越大。

根據 3.5.1 節的結果， $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度約為 14 mm； $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度約為 20 mm。因此，當表層層數越厚時，結構的臨界脫層長度越長，越不易產生局部挫屈的破壞模式。根據文獻[4]的結果顯示，當表面複材只有 1~3 層時，主要的破壞模式為局部挫屈(Local buckling)，然而當表面複合材料達 5~7 層時，主要的破壞模式則為總體挫屈(Global buckling)。因此，同樣的脫層長度下，當表層越厚時，結構具有總體挫屈的破壞模式，當表層越薄時，結構在脫層區域具有局部挫屈的破壞模式，本研究的結果與文獻中的觀察相符。

第四章 結論與未來展望

4.1 結論

本研究經由實驗及有限元素法探討含脫層之複合材料三明治結構的挫屈模式、結構強度及缺陷，可歸納出以下結論：

1. 根據含脫層三明治結構的壓縮實驗，主要的破壞模式有兩種，總體挫屈及局部挫屈，而挫屈負載與破壞強度隨著脫層長度越長而降低。
2. 當三明治結構的破壞模式為總體挫屈時，結構的挫屈負載與破壞負載接近，結構一旦挫屈就無法再承受任何負載，而破壞主要發生於芯材，接著裂紋通過脫層區域。此外，根據實驗的觀察，總體挫屈的變形不一定朝向三明治結構的脫層面方向。
3. 當三明治結構的破壞模式為局部挫屈時，結構的挫屈負載與破壞負載差距較大，結構挫屈後仍可以承受一定的負載，而破壞主要發生於脫層區域兩側，導致表層與芯材的分離。
4. 根據有限元素分析，將缺陷導入有限元素模型中，得到的挫屈負載值與實驗值相符合。此外，在相同的脫層長度下，較厚的表層具有較小的缺陷。
5. 將分析得到的主應力分布與實驗的裂紋進行比較，依據最大主應力準則，隨著負載的提升，在裂紋路徑上，可以找出芯材的破壞位置，而此時的破壞負載與實驗結果相符。

6. 經由有限元素分析的評估結果， $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度約為 14 mm，而 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的臨界脫層長度約為 20 mm。因此，隨著三明治結構的表層越厚，臨界脫層長度則越長。

4.2 未來展望

本研究已透過實驗與有限元素模擬，觀察含脫層三明治結構的挫屈行為及破壞強度，初步地建立含脫層三明治結構的分析方法，接下來的工作如下：

1. 本研究尚未討論完好的三明治結構之挫屈及破壞行為，因此在後續將針對完好的 $[(0/90)_2]_s$ 及 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片進行測試。
2. 在本文的第三章中，經由實驗的裂紋找出破壞位置及破壞負載。由於裂紋尖端產生應力集中，因此在未來將裂紋尖端的區域省略，藉由最大主應力準則，預估試片的破壞負載，建立含脫層三明治結構的破壞分析方法。
3. 根據 3.5 節預估之各種脫層長度的分析結果，其他脫層長度的破壞結果仍有待實驗驗證，以確認本文所建立的有限元素分析方法及預估之缺陷可以有效預測各種脫層長度下的挫屈及破壞行為。
4. 本研究已初步的區分局部挫屈及總體挫屈的變形行為，然而，經由

實驗與模擬的觀察，含脫層三明治結構存在著局部挫屈與總體挫屈的混合模態(Mixed mode)，其過渡的行為仍有待進一步討論。

5. 由於本文所使用的非線性分析方法僅將結構的第一挫屈模態當作缺陷，而其他挫屈模態亦可能對結構的挫屈行為產生影響，因此在未來將以第一挫屈模態及第二挫屈模態當作缺陷，進行非線性分析。
6. 從過去的文獻中，芯材厚度對破壞模式的影響尚未有系統的討論。因此，在未來將以本研究的實驗與分析方法，使用各種不同芯材厚度的三明治結構進行實驗，並藉由有限元素分析預估三明治結構的臨界脫層長度。最後探討臨界脫層長度對三明治結構之芯材厚度的影響。



参考文献

- [1] O. T. Thomsen, "Sandwich Materials for Wind Turbine Blades - Present and Future," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 11, pp. 7-26, 2009.
- [2] L. A. Carlsson and G. A. Kardomateas, *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*: Springer Netherlands, 2011.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] T. Southward, G. D. Mallinson, K. Jayaraman, and D. Horrigan, "Buckling of Disbonds in Honeycomb-Core Sandwich Beams," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 10, pp. 195-216, 2008.
- [8] T. Southward, D. P. W. Horrigan, G. D. Mallinson, and K. Jayaraman, "Failure of Sandwich Composite Structure Containing Face-Sheet/Core Disbonds – an Experimental Study," in *5th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM 2007)*, 2007, pp. 375-380.
- [9] D. W. Sleight and J. T. Wang, "Buckling Analysis of Debonded Sandwich Panel Under Compression," National Aeronautics and Space

Administration. Langley Research Center, Hampton, VA. 1995.

- [10] 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. 31-48, 2002.
- [11] 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.
- [12] F. Aviles and L. A. Carlsson, "Three-dimensional Finite Element Buckling Analysis of Debonded Sandwich Panels," *Journal of Composite Materials*, vol. 40, pp. 993-1008, 2006.
- [13] R. C. Øtergaard, "Buckling Driven Debonding in Sandwich Columns," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, pp. 1264-1282, 2008.
- [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. 335-336, pp. 351-354, 2011.
- [15] A. Sayyidmousavi, K. Malekzadeh, and H. Bougherara, "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.
- [16] H. Mahfuz, S. Islam, M. Saha, L. Carlsson, and S. Jeelani, "Buckling of Sandwich Composites; Effects of Core–Skin Debonding and Core Density," *Applied Composite Materials*, vol. 12, pp. 73-91, 2005.
- [17] EVONIK, "ROHACELL WF Product Information," Website: <http://www.rohacell.com/product/rohacell/en/Pages/default.aspx>.
- [18] Cytec, "FM[®] 73 Toughened Epoxy Film datasheet," Website: <https://www.cytec.com/engineered-materials/products/FM%2073.htm>.

- [19] "ASTM C364 / C364M - 07 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions," 2007.
- [20] R. D. Cook, *Concepts and applications of finite element analysis*: New York, John Wiley and Sons, Inc., 2001.
- [21] "ANSYS[®] Academic Research, Release 13.0, Help system," 2010.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] O. C. Zienkiewicz and P. B. Morice, *The finite element method in engineering science*: McGraw-Hill London, 1971.
- [25] I. M. Daniel, E. E. Gdoutos and Y. D. S. Rajapakse, *Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures*: Springer Netherlands, 2009.
- [26] Q. M. Li, R. A. W. Mines and R. S. Birch, "The Crush Behaviour of Rohacell-51WF Structural Foam," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, pp. 6321-6341, 2000.

表 2.1 單方向碳纖維複合材料之材料性質

楊氏係數			波松比			剪力模數		
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*

*假設的材料性質

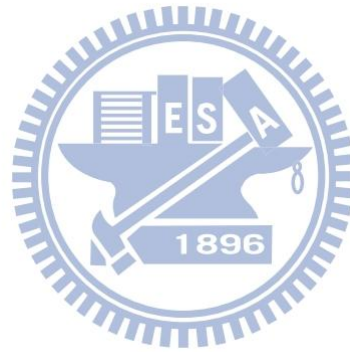


表 2.2 ROHACELL[®] - 51WF 發泡材材料性質[17]

密度	拉伸模數	壓縮模數	剪力模數	波松比	拉伸強度	壓縮強度	剪力強度
ρ (kg/m ³)	E_t (MPa)	E_c (MPa)	G (MPa)	ν	$s^{(+)}$ (MPa)	$s^{(-)}$ (MPa)	s_{12} (MPa)
52	75	22	24	0.38	1.6	0.8	0.8

表 2.3 含脫層之三明治結構尺寸

表層疊層順序	表層疊層層數	表層厚度 (t_f , mm)	脫層長度 (L_d , mm)
$[(0/90)_2]_s$	8	1.1	10
$[(0/90)_2]_s$	8	1.1	30
$[(0/90)_2]_s$	8	1.1	50
$[(0/90)_3]_s$	12	1.6	30
$[(0/90)_3]_s$	12	1.6	50



表 2.4 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果

	挫屈負載值 (kN)	破壞負載值 (kN)
Specimen – 1	19.6	19.9
Specimen – 2	18.0	18.6
Specimen – 3	16.0	16.8
Specimen – 4	17.2	17.8
平均與誤差	17.7 ± 1.9	18.3 ± 1.6

表 2.5 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果

	挫屈負載值 (kN)	破壞負載值 (kN)
Specimen – 1	10.7	13.0
Specimen – 2	10.6	13.1
Specimen – 3	11.2	12.0
平均與誤差	10.8 ± 0.4	12.7 ± 0.7



表 2.6 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果

	挫屈負載值 (kN)	破壞負載值 (kN)
Specimen – 1	4.3	7.7
Specimen – 2	5.3	9.6
Specimen – 3	4.4	7.0
Specimen – 4	4.3	7.7
平均與誤差	4.6 ± 0.8	8.0 ± 1.7

表 2.7 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果

	挫屈負載值 (kN)	破壞負載值 (kN)
Specimen – 1	21.4	21.8
Specimen – 2	20.2	21.5
Specimen – 3	19.8	21.6
平均與誤差	20.5 ± 0.9	21.7 ± 0.2



表 2.8 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的實驗結果

	挫屈負載值 (kN)	破壞負載值 (kN)
Specimen – 1	13.3	16.1
Specimen – 2	13.5	16.0
Specimen – 3	13.9	16.7
Specimen – 4	14.1	16.1
平均與誤差	13.7 ± 0.4	16.2 ± 0.5

表 2.9 含脫層三明治結構試片在不同脫層長度下的破壞情形

複材疊層順序	脫層長度 (mm)	挫屈負載值 (kN)	破壞負載值 (kN)	挫屈行為	破壞行為
[(0/90) ₂] _s	10	17.7 ± 1.9	18.3 ± 1.6	總體挫屈	芯材破裂，斜裂紋 通過脫層區域
	30	10.8 ± 0.4	12.7 ± 0.7	局部挫屈	表層與芯材分離
	50	4.6 ± 0.8	8.0 ± 1.7	局部挫屈	表層與芯材分離
[(0/90) ₃] _s	30	20.5 ± 0.9	21.7 ± 0.2	總體挫屈	芯材破裂，裂紋通 過脫層區域
	50	13.7 ± 0.4	16.2 ± 0.5	局部挫屈	表層與芯材分離

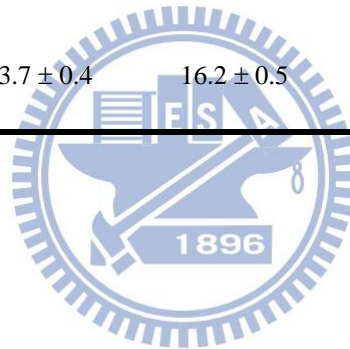


表 3.1 元素收斂性(具 50mm 脫層之[(0/90)₂]_s 複材三明治結構)

最小元素邊長 (mm)	臨界挫屈負載 (kN)
0.5	7.40
0.4	7.33
0.3	7.29
0.2	7.25
0.175	7.24
0.15	7.24

表 3.2 實驗與有限元素分析之比較

複材疊層 順序	脫層長度 (mm)	缺陷(r)	挫屈負載值(實驗) (kN)	挫屈負載值(分析) (kN)	破壞負載值(實驗) (kN)	破壞負載值(分析) (kN)	破壞發生位置 (分析)
[(0/90) ₂] _s	10	-0.05%	17.7 ± 1.9	17.4	18.3 ± 1.6	17.6	上下距離 全長 1/4 處
	30	3%	10.8 ± 0.4	10.6	12.7 ± 0.7	13.0	脫層區域 兩側芯材
	50	5%	4.6 ± 0.8	5.1	8.0 ± 1.7	9.3	脫層區域 兩側芯材
[(0/90) ₃] _s	30	0.5%	20.5 ± 0.9	19.7	21.7 ± 0.2	21.8	脫層區域 兩側芯材
	50	1%	13.7 ± 0.4	13.6	16.2 ± 0.5	16.6	脫層區域 兩側芯材

表 3.3 [(0/90)₂]_s 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的分析結果

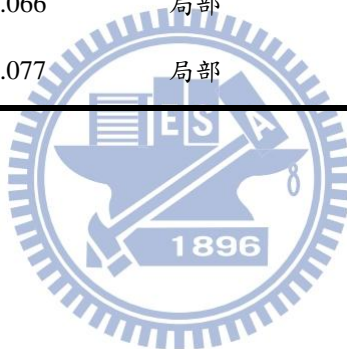
脫層長度 (mm)	缺陷 (%)	缺陷量(mm)	挫屈負載值 (分析)	挫屈負載值 (實驗)	挫屈模態
10	-0.05%	-5.5×10^{-4}	17.4	17.7 ± 1.9	總體
12	0.255%	0.003	16.8	-	總體
14	0.56%	0.006	16.2	-	局部
16	0.865%	0.010	15.7	-	局部
18	1.17%	0.013	15.1	-	局部
20	1.475%	0.016	14.5	-	局部
30	3%	0.033	10.3	10.8 ± 0.4	局部
40	4%	0.044	7.0	-	局部
50	5%	0.055	5.1	4.6 ± 0.8	局部
60	6%	0.066	3.8	-	局部
70	7%	0.077	2.9	-	局部

表 3.4 [(0/90)₂]_s 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的分析結果

脫層長度 (mm)	缺陷 (%)	缺陷量(mm)	挫屈負載值 (分析)	挫屈負載值 (實驗)	挫屈模態
10	0.05%	0.001	23.2	-	總體
16	0.15%	0.002	22.5	-	總體
18	0.2%	0.003	22.2	-	總體
20	0.25%	0.004	21.8	-	局部
22	0.3%	0.005	21.5	-	局部
24	0.35%	0.006	21.2	-	局部
30	0.5%	0.008	19.7	20.5 ± 0.9	局部
40	0.75%	0.012	16.7	-	局部
50	1%	0.016	13.6	13.7 ± 0.4	局部
60	1.25%	0.020	11.0	-	局部
70	1.5%	0.024	9.1	-	局部

表 3.5 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的分析結果

[(0/90) ₂] _s 複材三明治結構試片				[(0/90) ₃] _s 複材三明治結構試片		
脫層長度 (mm)	缺陷(%)	缺陷量 (mm)	挫屈模式	缺陷(%)	缺陷量 (mm)	挫屈模式
10	-0.05%	-5.5×10^{-4}	總體	0.05%	0.001	總體
20	1.53%	0.016	局部	0.25%	0.004	局部
30	3%	0.033	局部	0.5%	0.008	局部
40	4%	0.044	局部	0.75%	0.012	局部
50	5%	0.055	局部	1%	0.016	局部
60	6%	0.066	局部	1.25%	0.020	局部
70	7%	0.077	局部	1.5%	0.024	局部



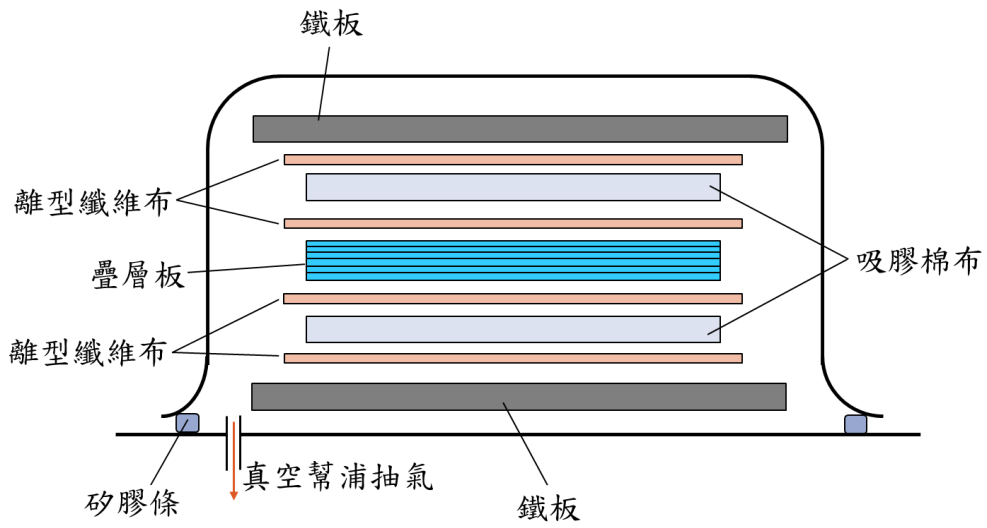


圖 2.1 複合材料疊層板之製作疊層順序

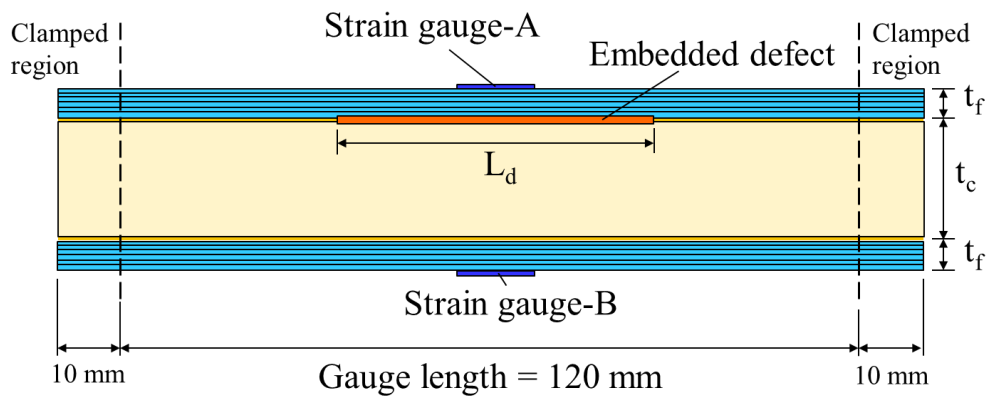


圖 2.2 應變規位置與試片基本尺寸示意圖

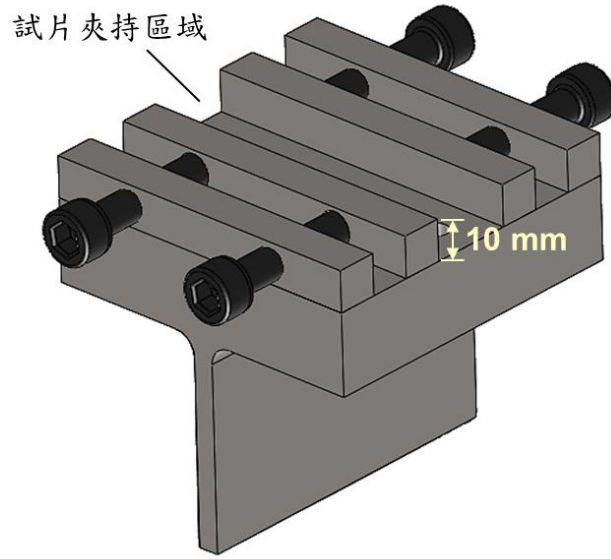


圖 2.3 壓縮實驗夾置具示意圖

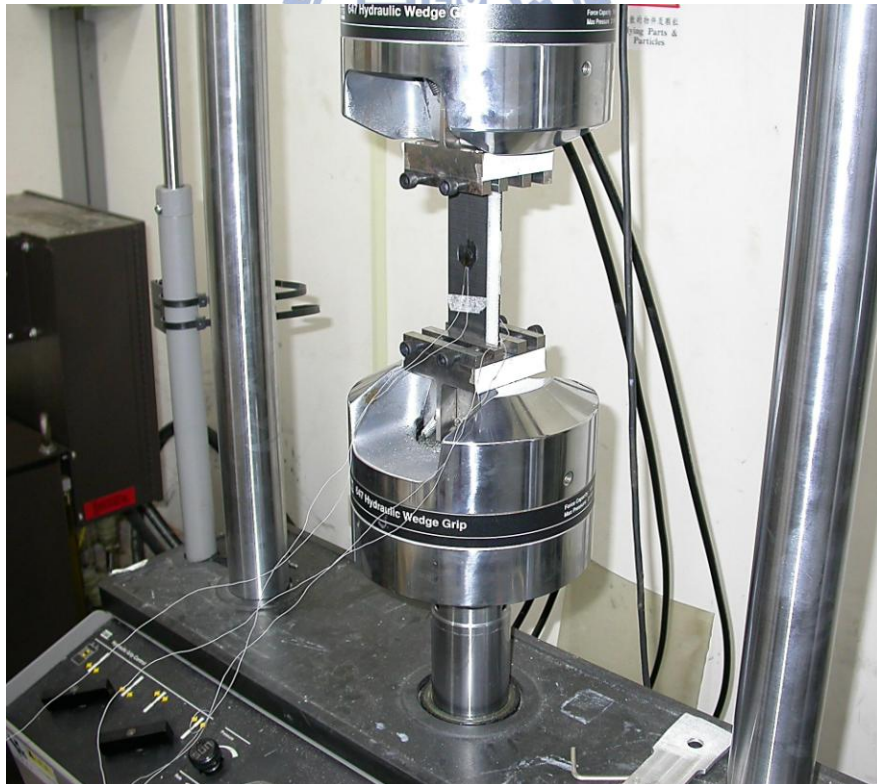


圖 2.4 壓縮實驗測試照片

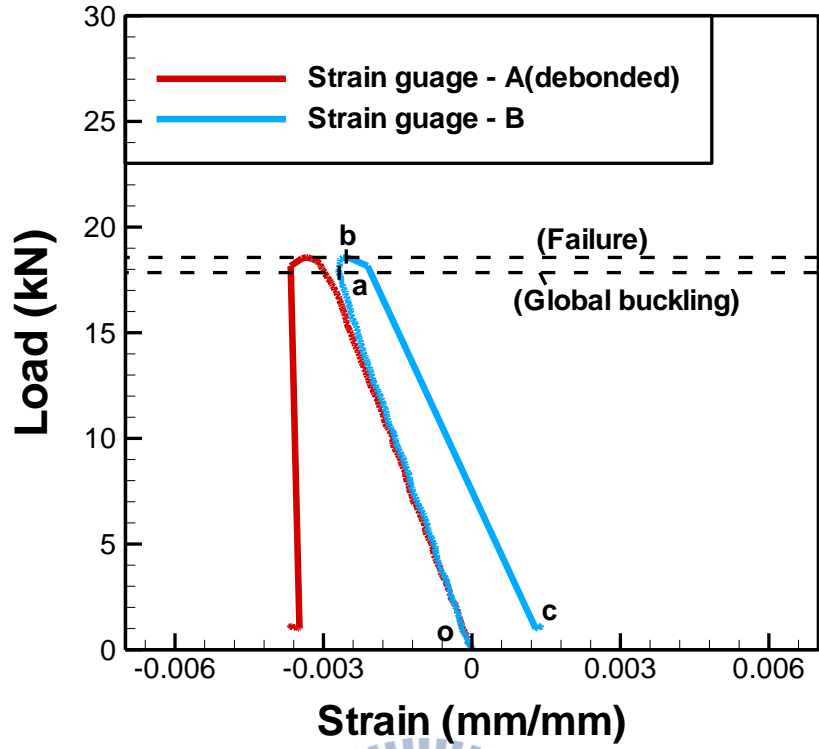


圖 2.5 負載與應變響應圖(具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片)

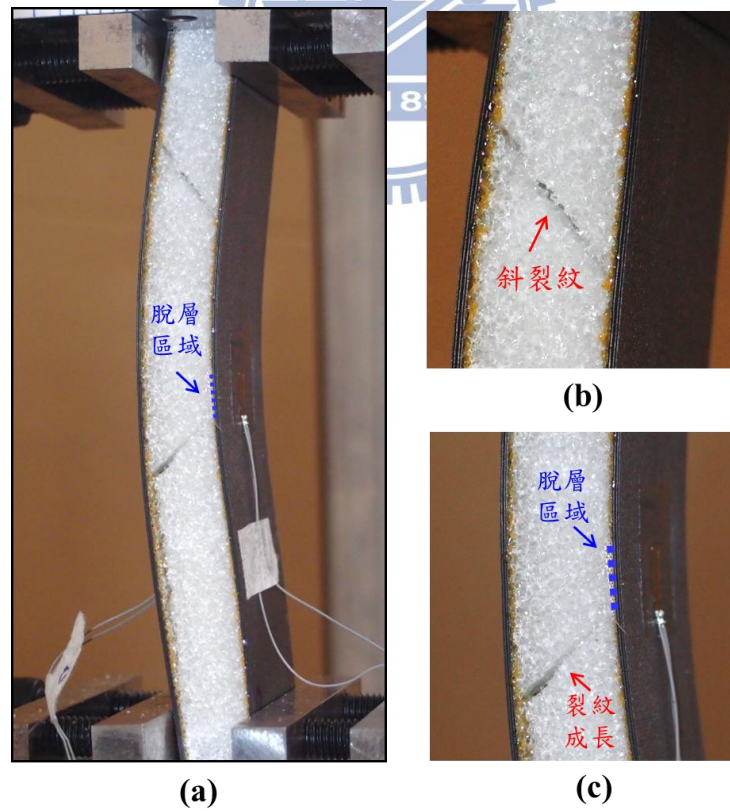


圖 2.6 總體挫屈的破壞行為((a)芯材破壞情形 (b)斜裂紋 (c)脫層區域之破壞裂紋)

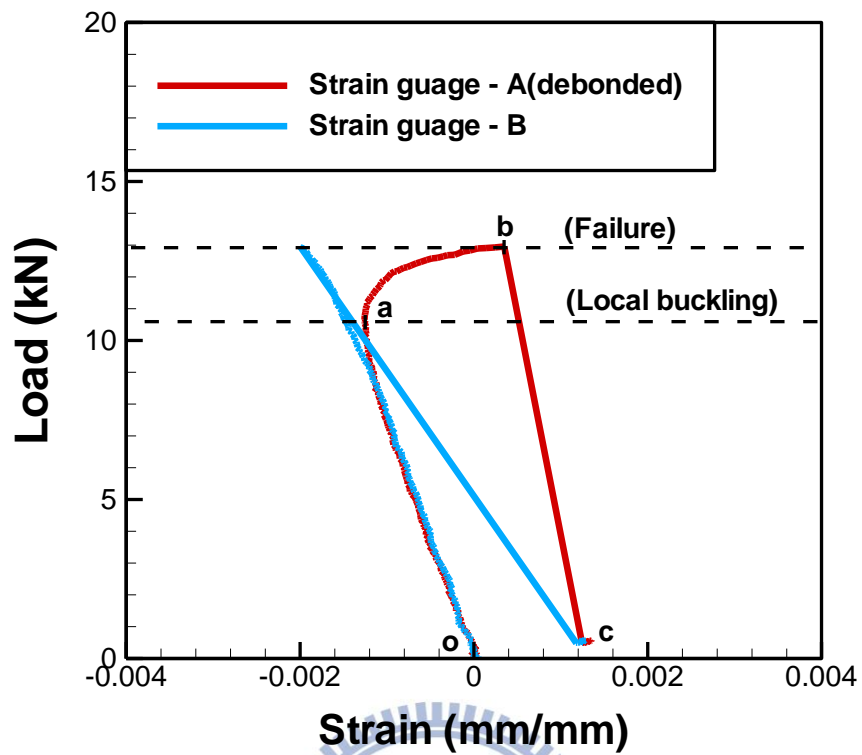


圖 2.7 負載與應變響應圖(具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片)

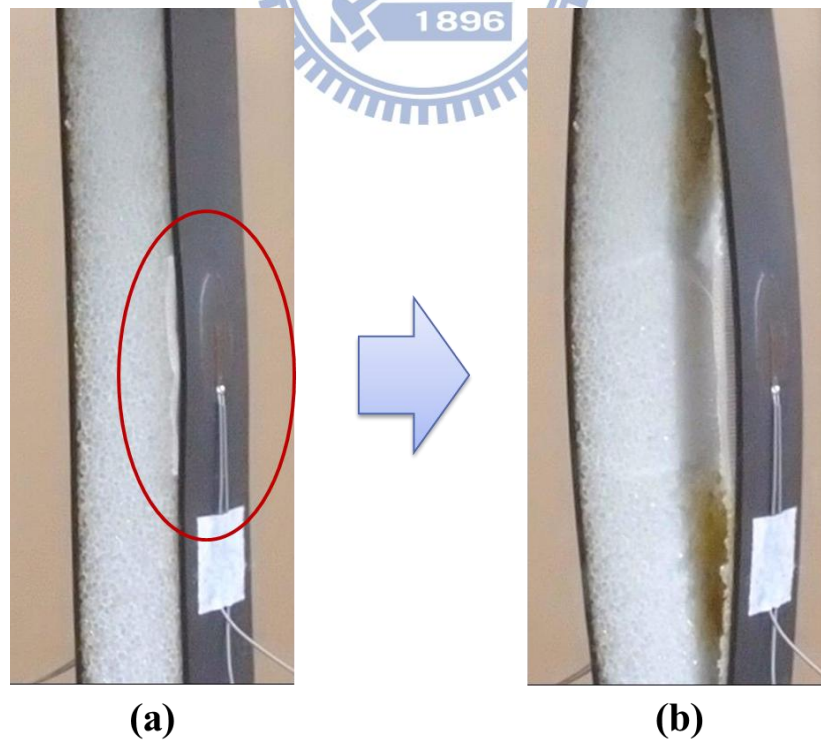


圖 2.8 局部挫屈的破壞行為((a)破壞前的局部挫屈行為 (b)表層與芯材分離)

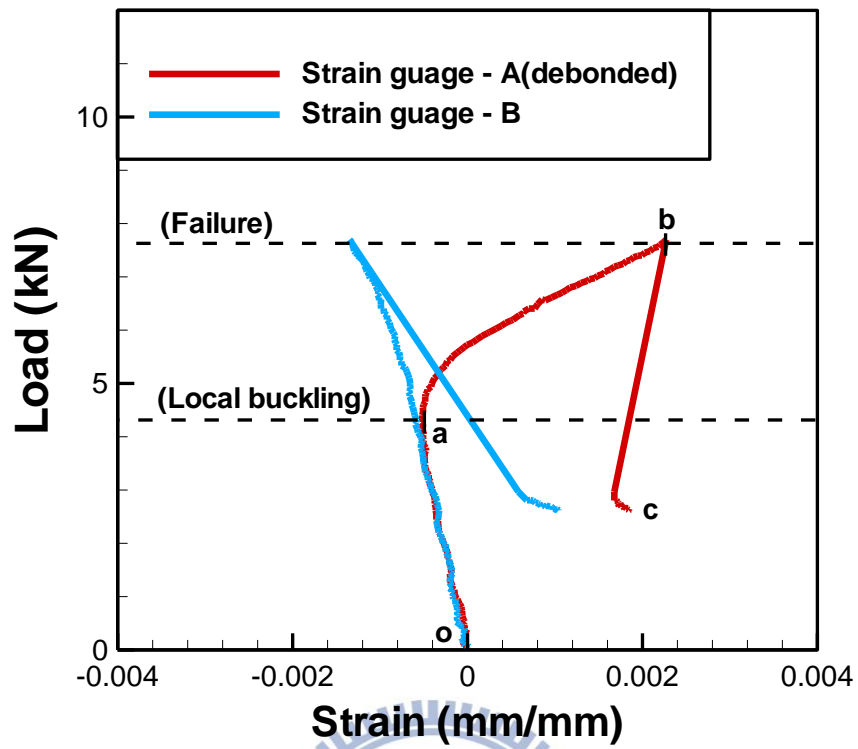


圖 2.9 負載與應變響應圖(具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片)

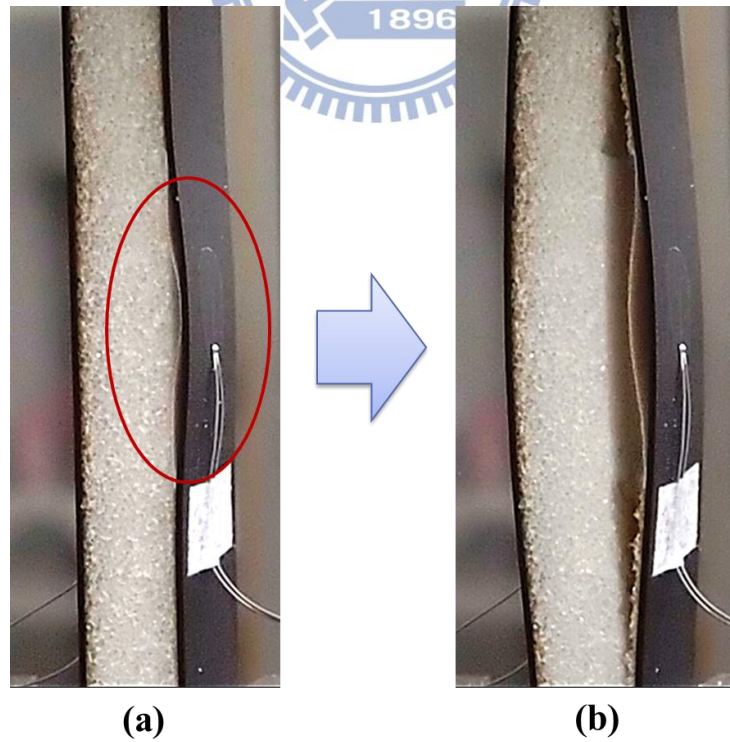


圖 2.10 局部挫屈的破壞行為((a)破壞前的局部挫屈行為 (b)表層與芯材分離)

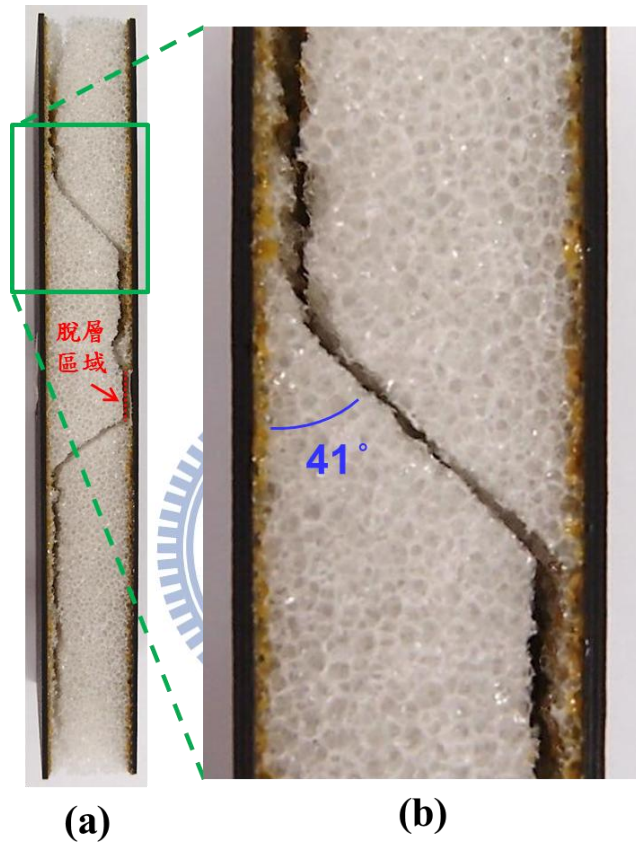


圖 2.11 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)總體挫屈的破壞裂紋 (b)斜裂紋)

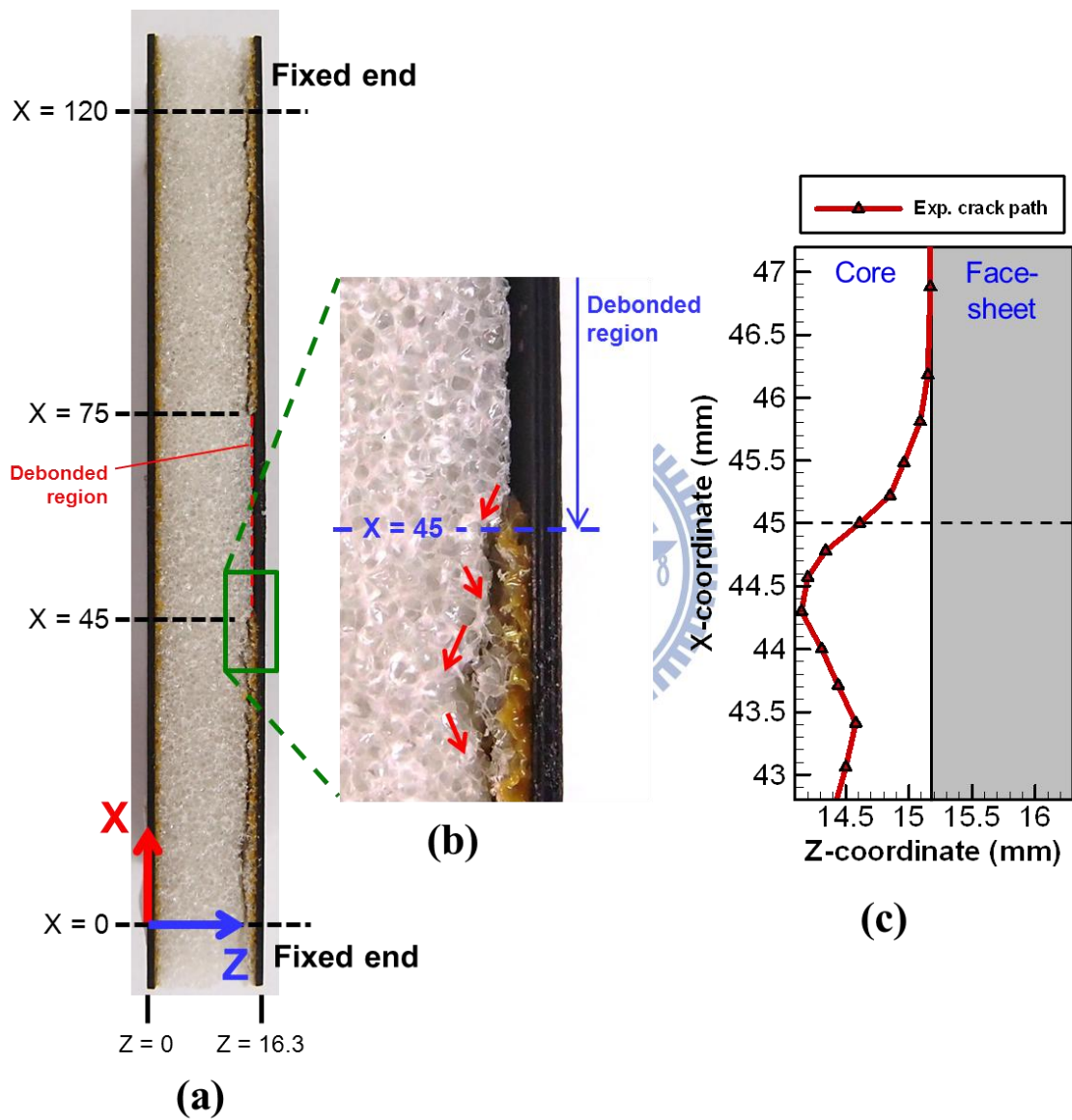


圖 2.12 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)局部挫屈的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點)

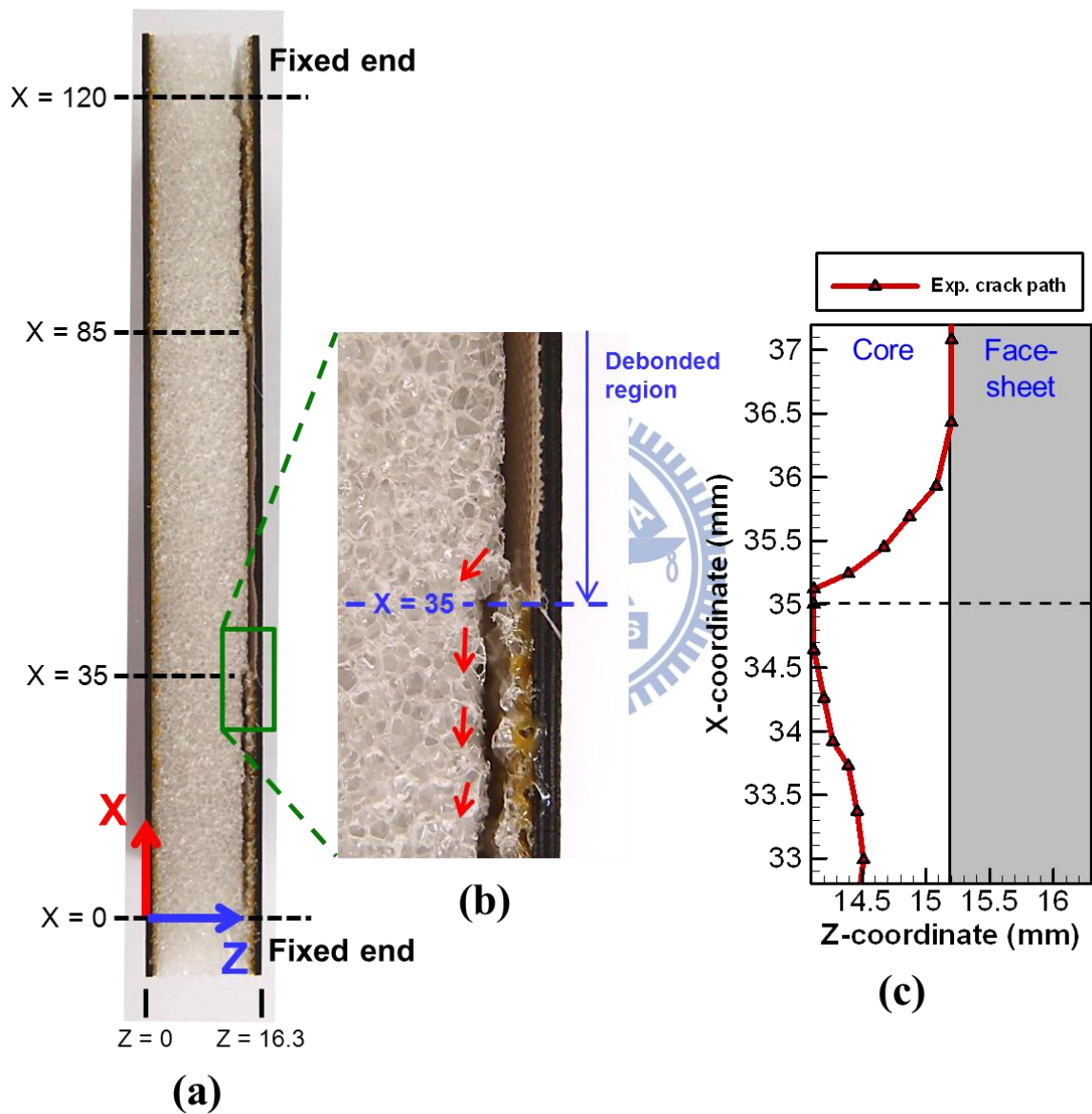


圖 2.13 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)局部挫屈的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點)



圖 2.14 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構分離後的表層與芯材

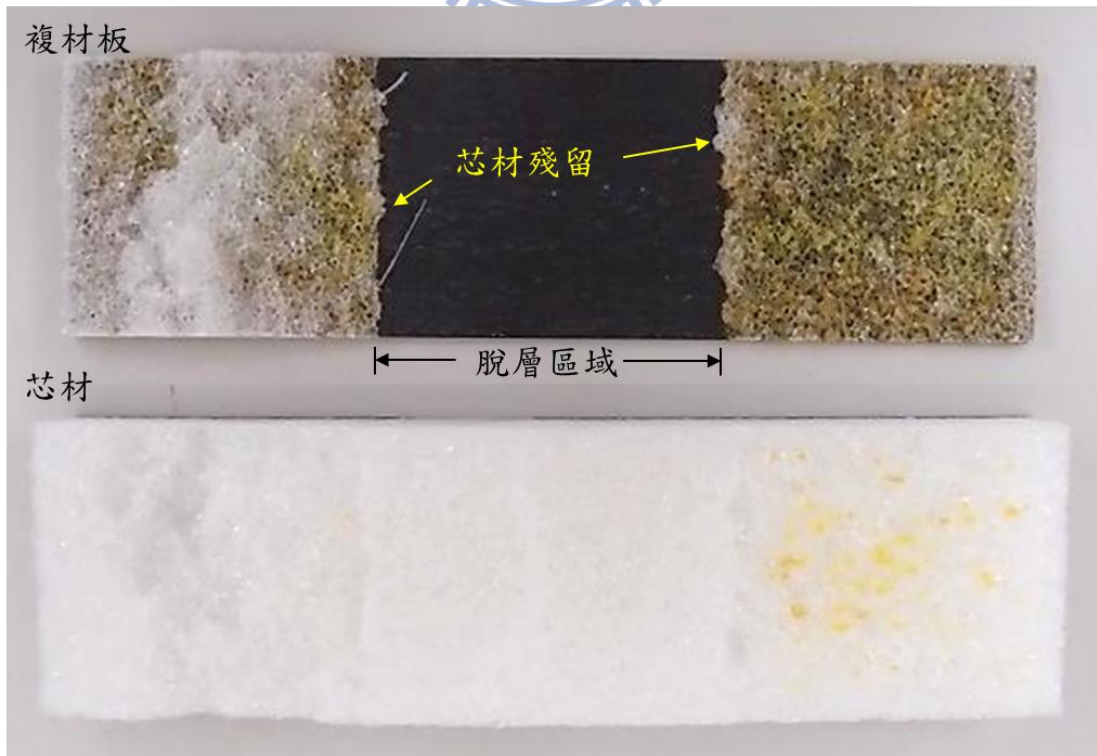


圖 2.15 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構分離後的表層與芯材

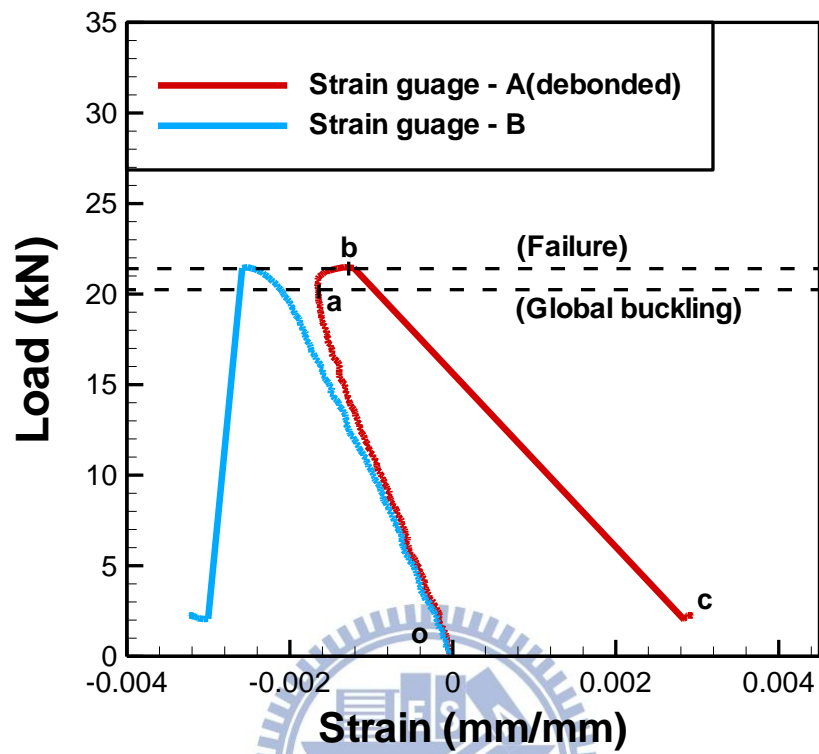


圖 2.16 負載與應變響應圖(具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片)

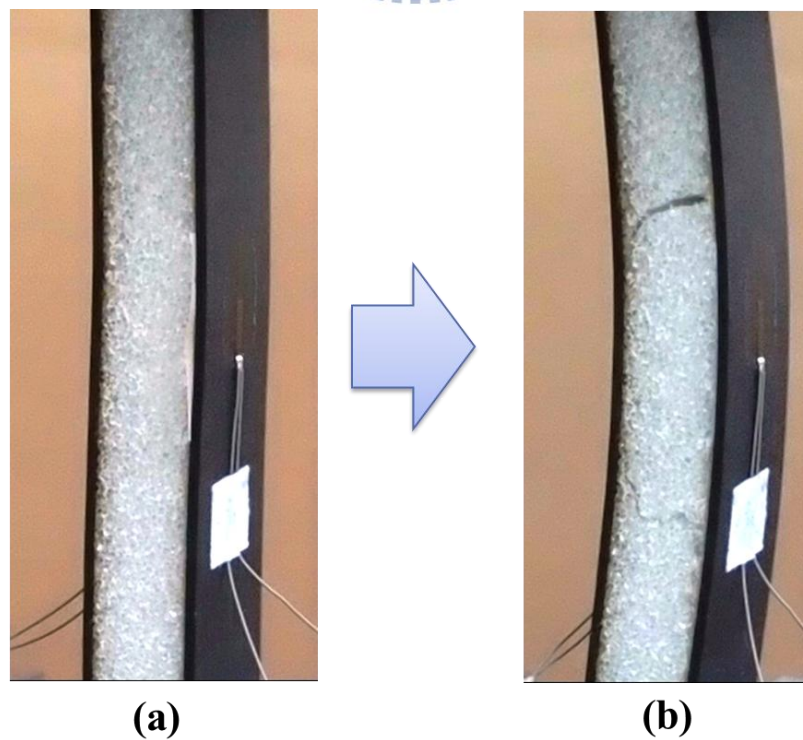


圖 2.17 總體挫屈的破壞行為((a)破壞前的總體挫屈行為 (b)芯材破壞)

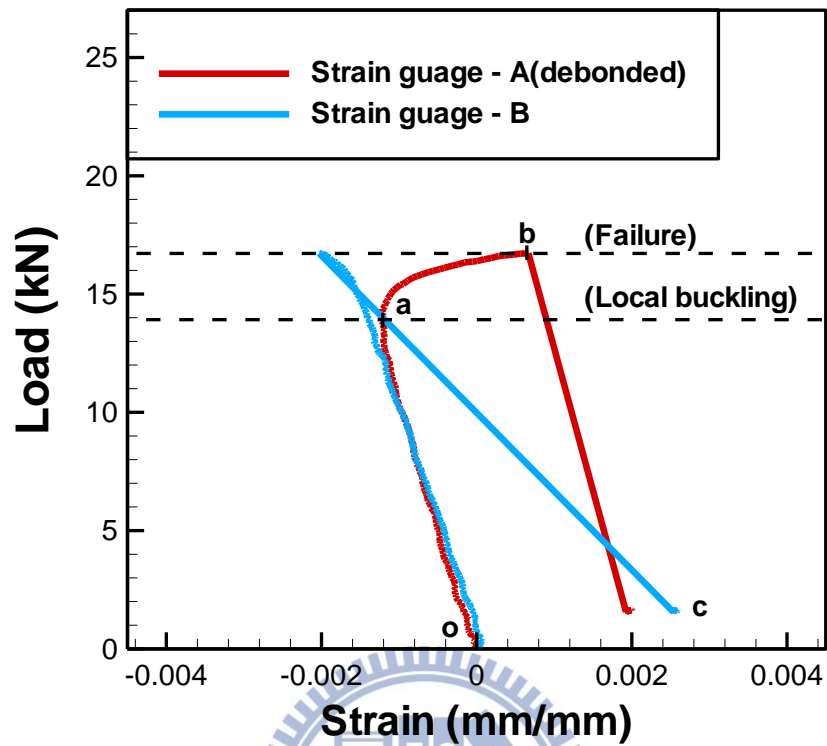


圖 2.18 負載與應變響應圖(具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片)

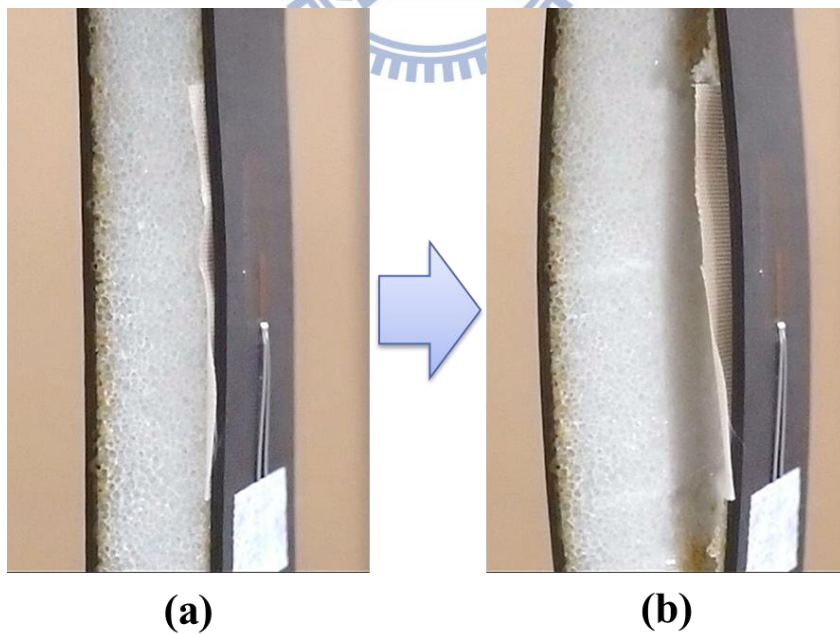


圖 2.19 局部挫屈的破壞行為((a)破壞前的局部挫屈行為 (b)表層與芯材分離)

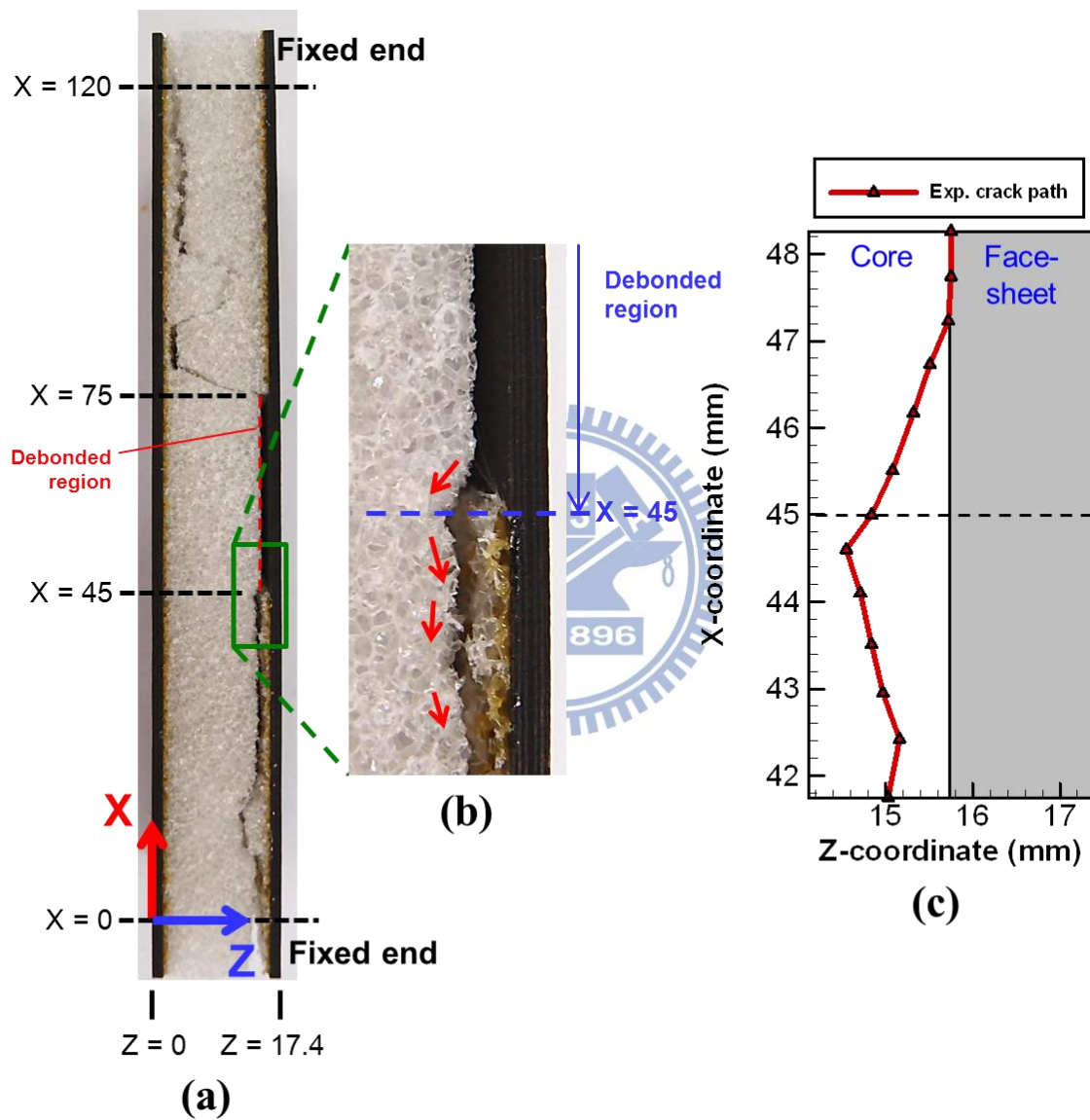


圖 2.20 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)挫屈的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點)

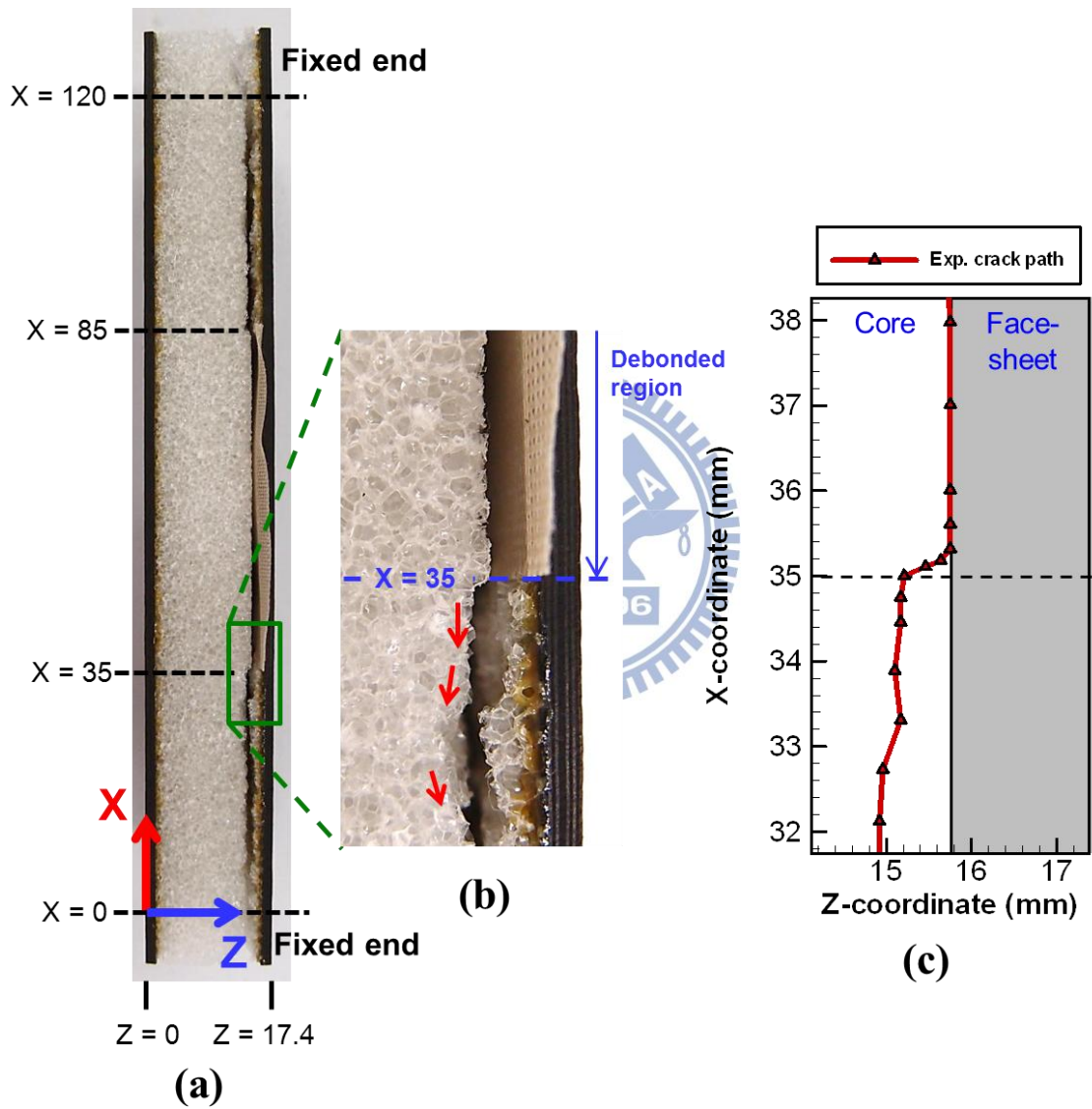


圖 2.21 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的破壞情形((a)局部挫屈的破壞裂紋 (b)脫層區域旁的裂紋 (c)裂紋路徑的座標點)

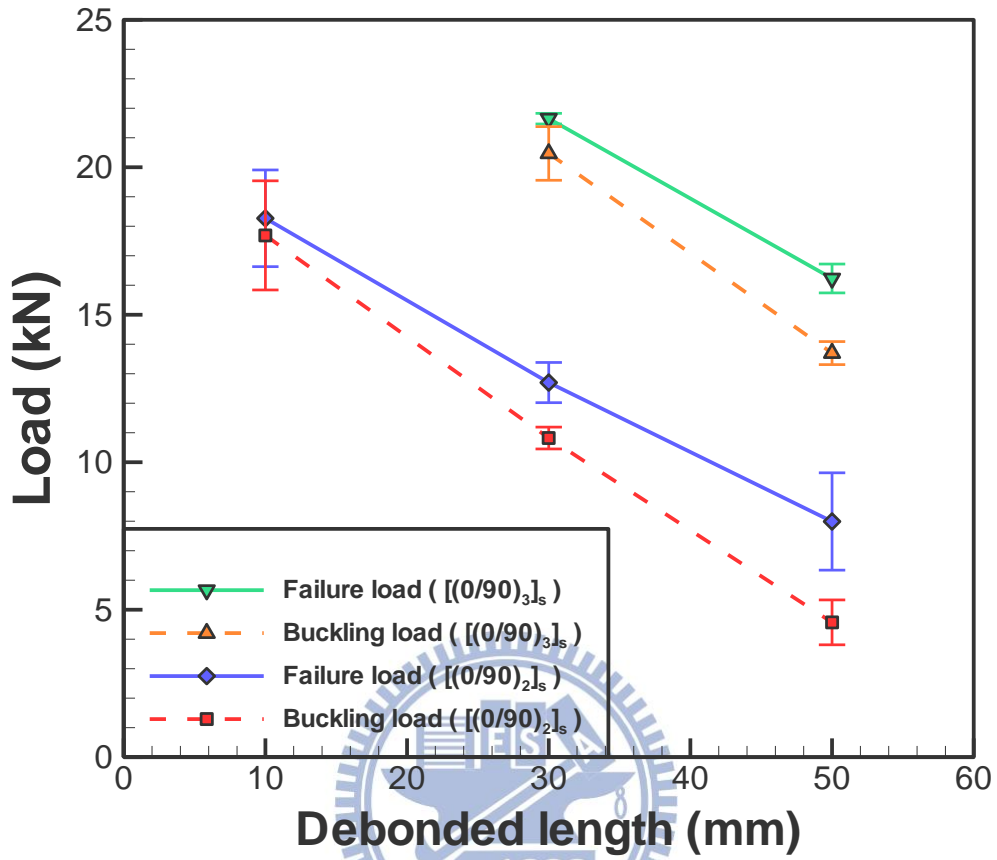


圖 2.22 疊層順序對挫屈及破壞負載的影響

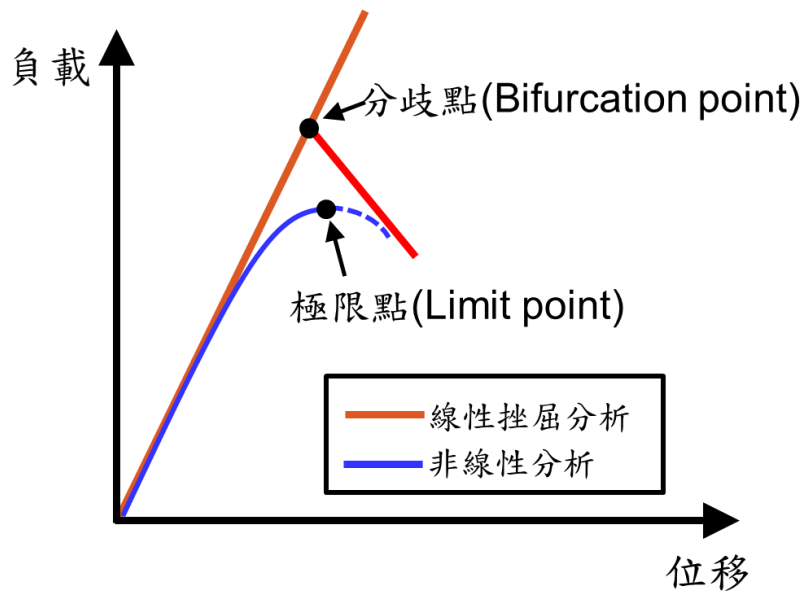


圖 3.1 挫屈的負載與位移關係

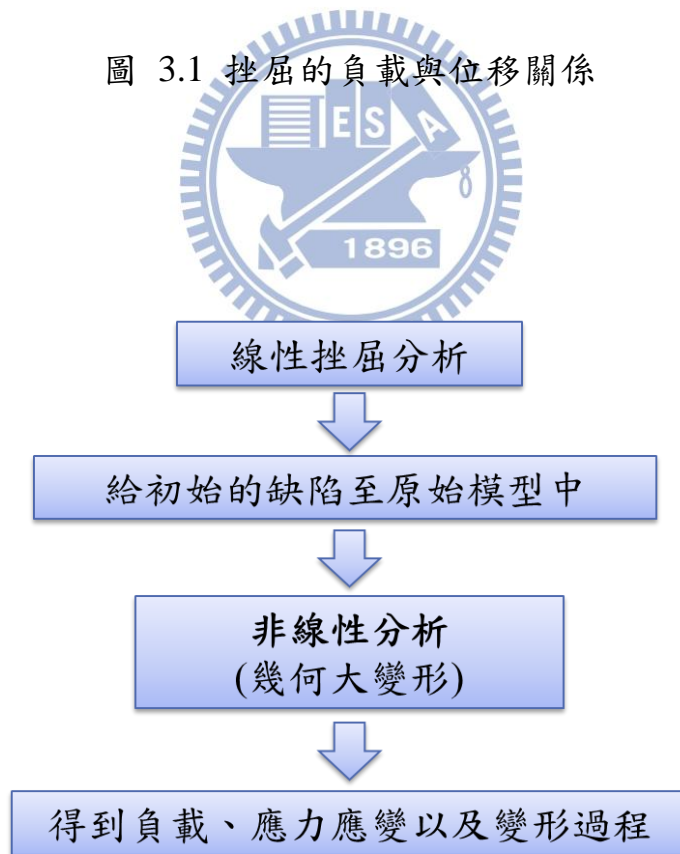


圖 3.2 非線性分析流程

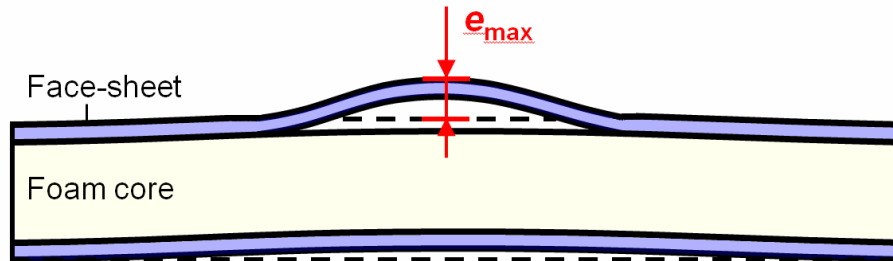


圖 3.3 結構的缺陷定義

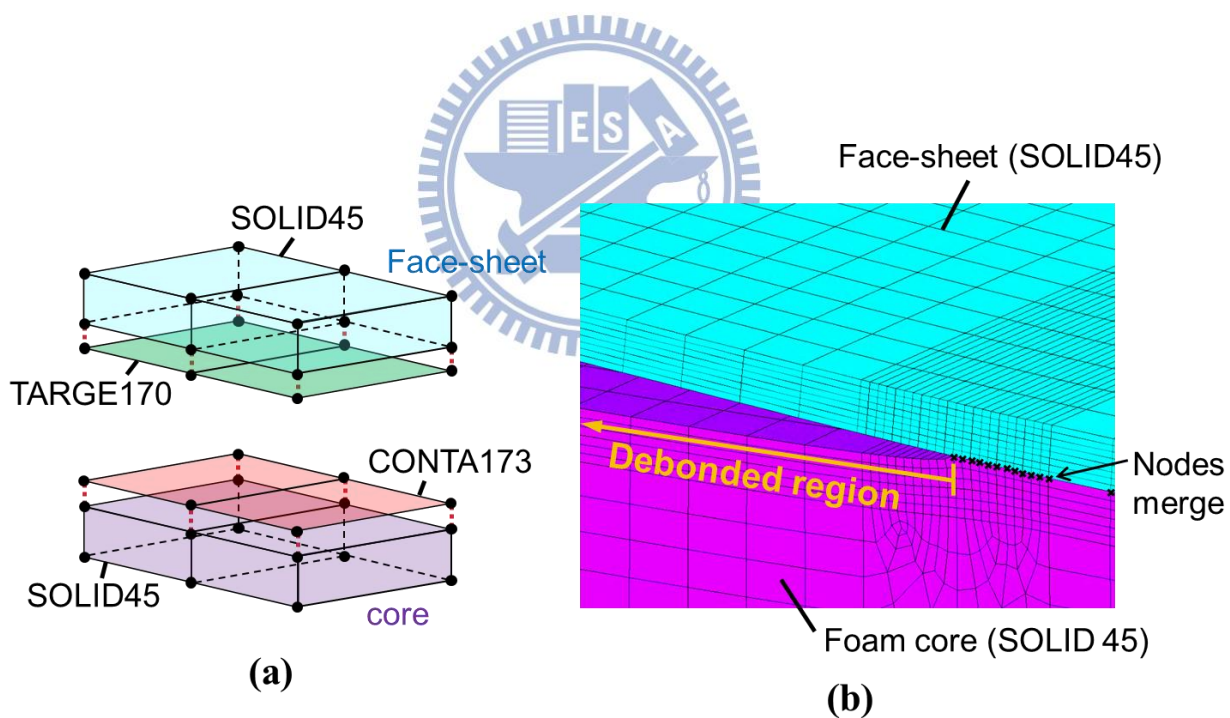


圖 3.4 脫層區域網格模型示意圖((a)接觸元素示意圖 (b)表層與芯材之間的節點黏合)

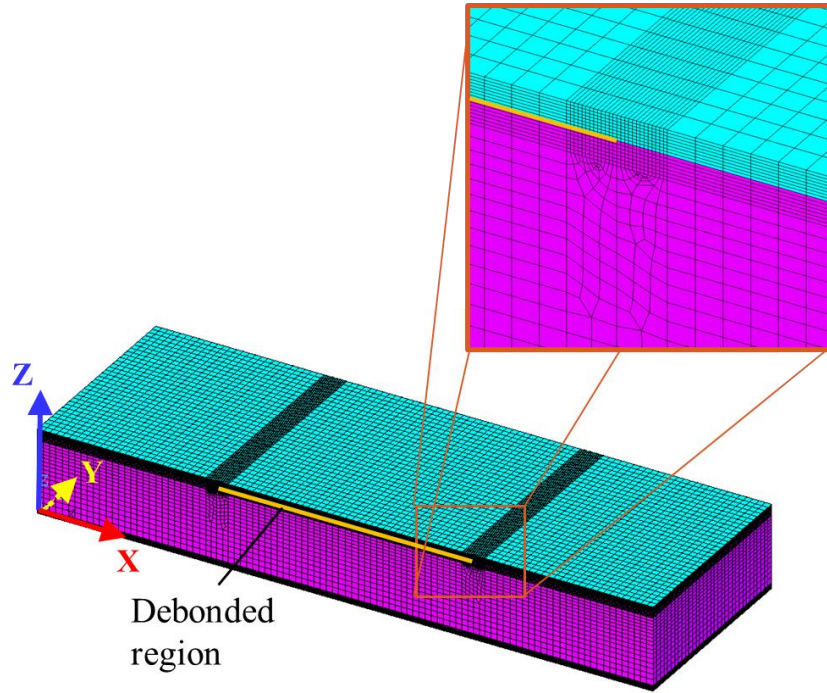


圖 3.5 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的有限元素模型示意

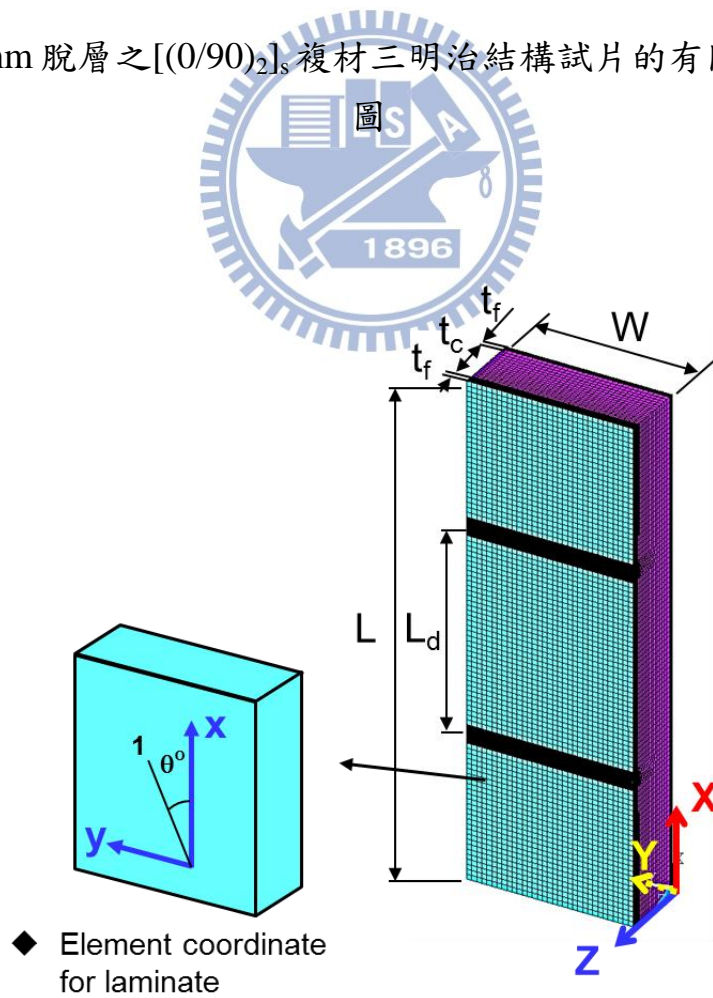


圖 3.6 有限元素模型與纖維方向定義

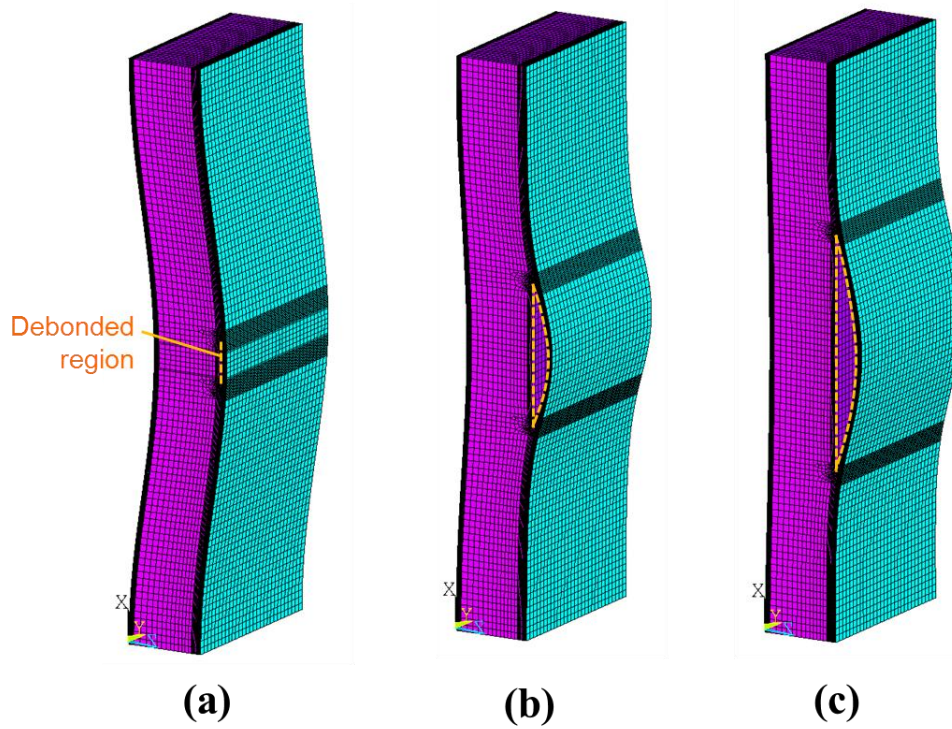


圖 3.7 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈模態變形((a)脫層長度為 10 mm (b)脫層長度為 30 mm (c)脫層長度為 50 mm)

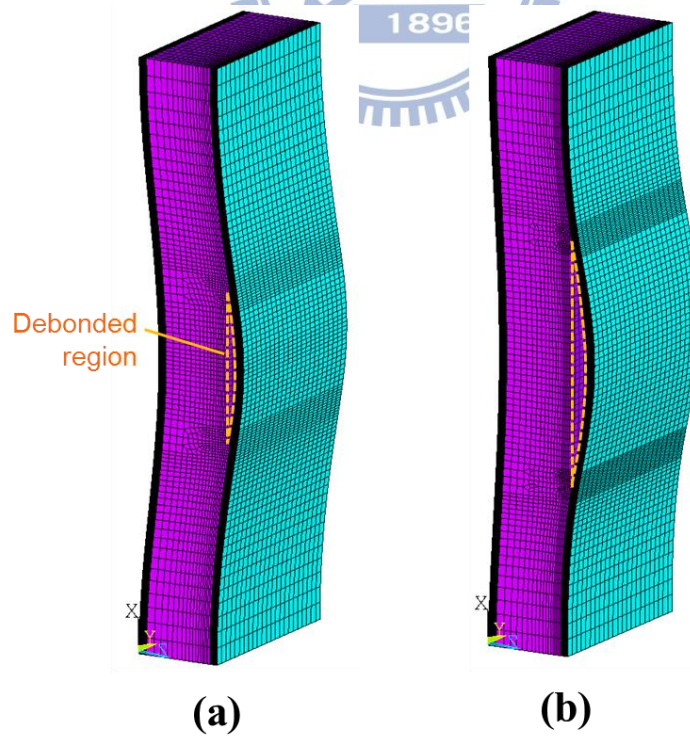


圖 3.8 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的挫屈模態變形 ((a)脫層長度為 30 mm (b)脫層長度為 50 mm)

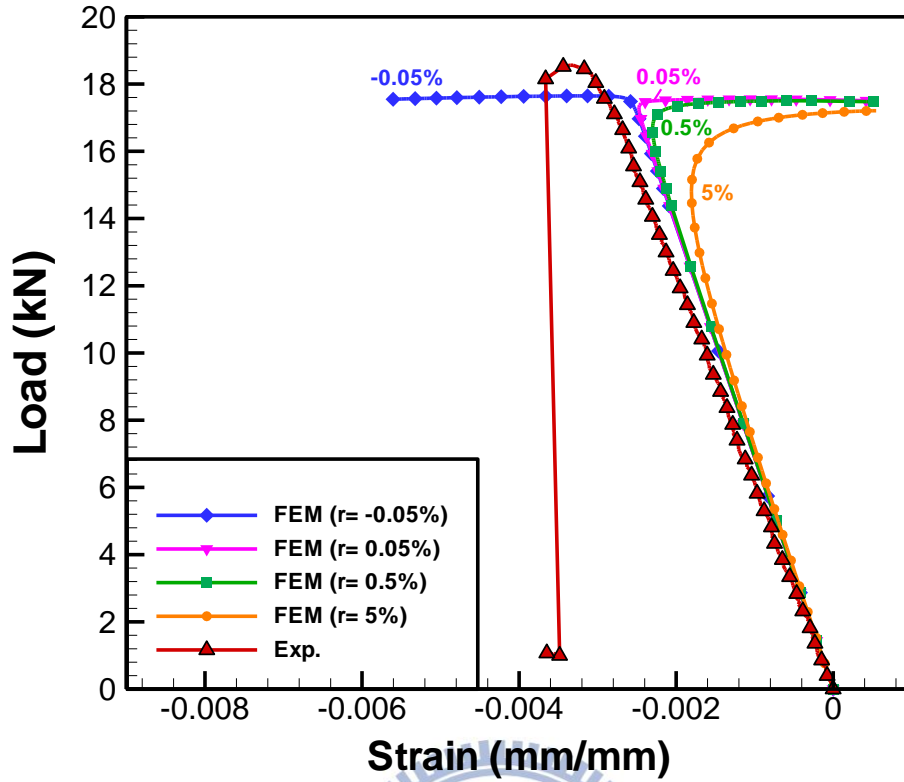


圖 3.9 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應

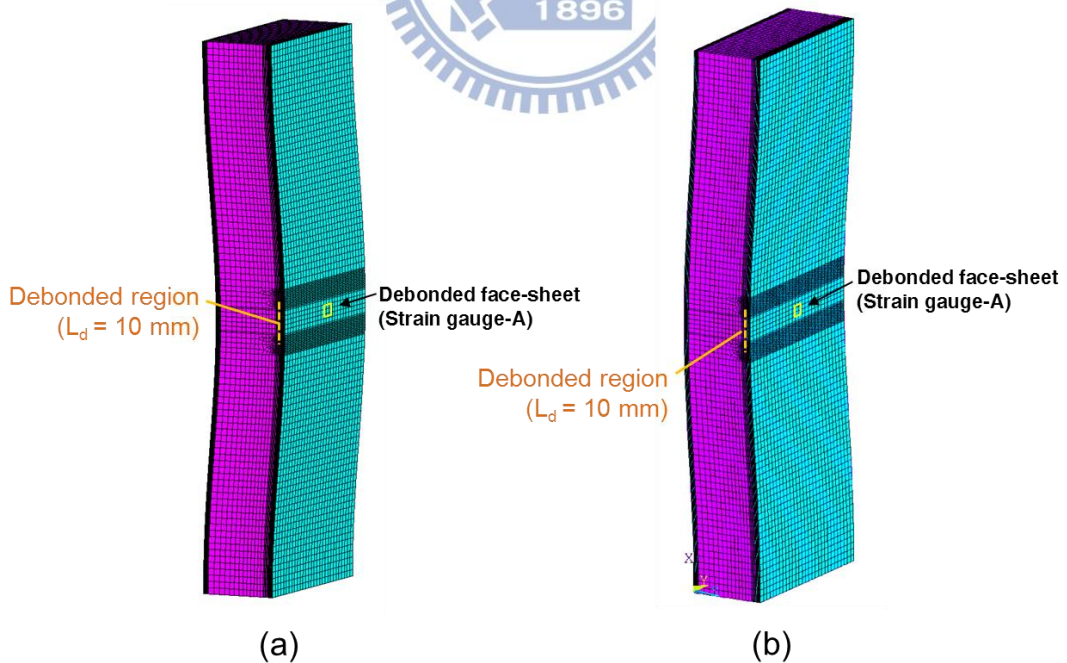


圖 3.10 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的有限元素分析結果 ((a) 缺陷為 0.05%~5%的變形結果 (b)缺陷為-0.05%的變形結果)

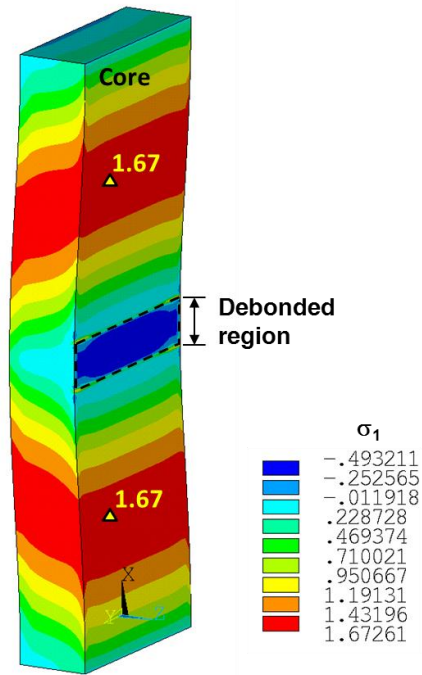


圖 3.11 當壓縮負載為 17.6 kN，具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構 芯材部分的最大主應力分布結果(缺陷為-0.05%)

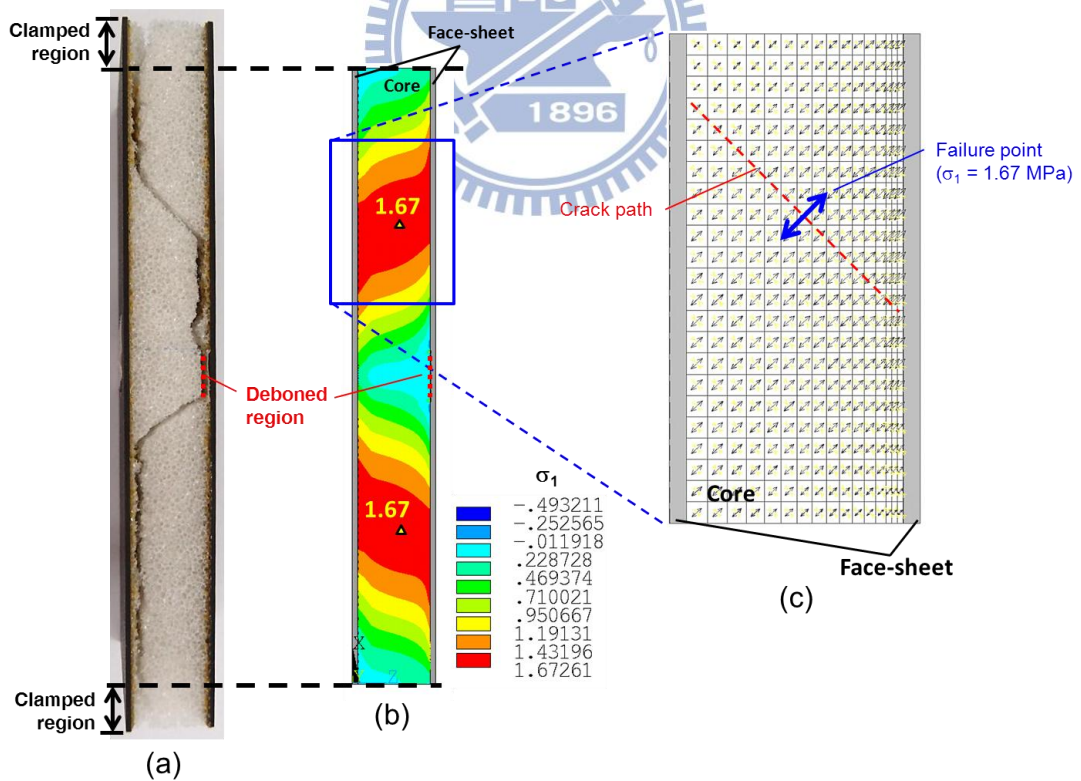


圖 3.12 具 10mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構之破壞分析與實驗比較 結果 ((a)破壞裂紋照片 (b)當壓縮負載為 17.6 kN 的最大主應力分布圖(σ_1) (c)主應力方向及破壞點位置)

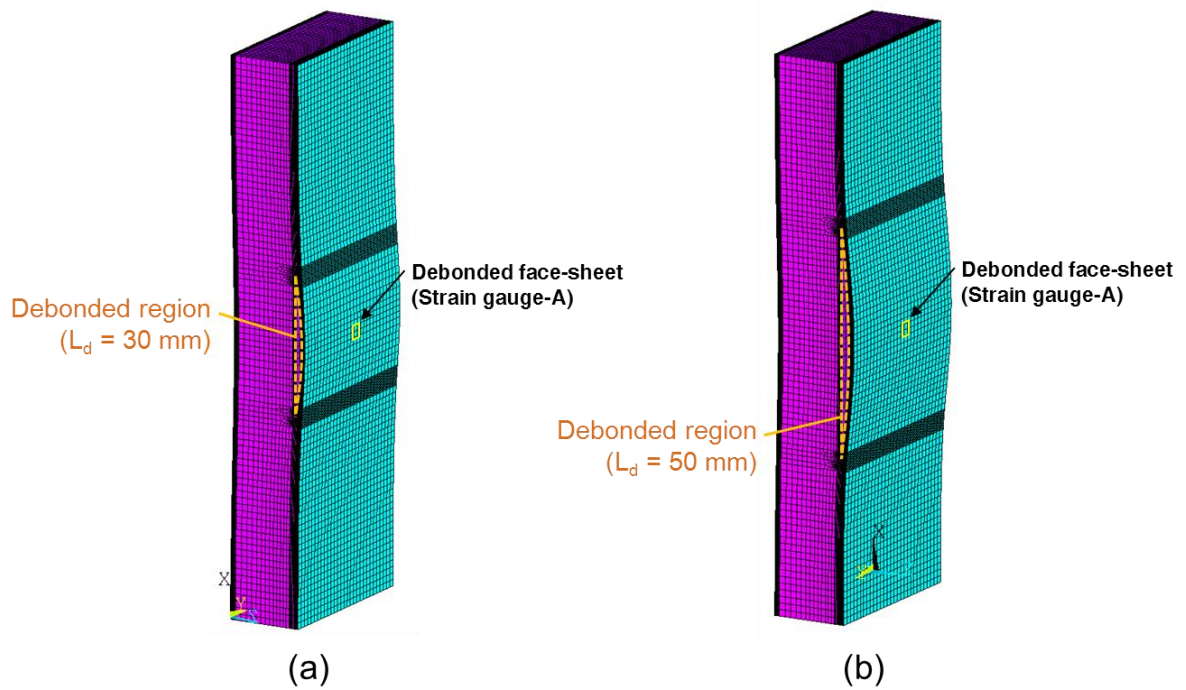


圖 3.13 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的有限元素分析結果 ((a)脫層長度為 30mm 的變形結果 (b)脫層長度為 50mm 的變形結果)

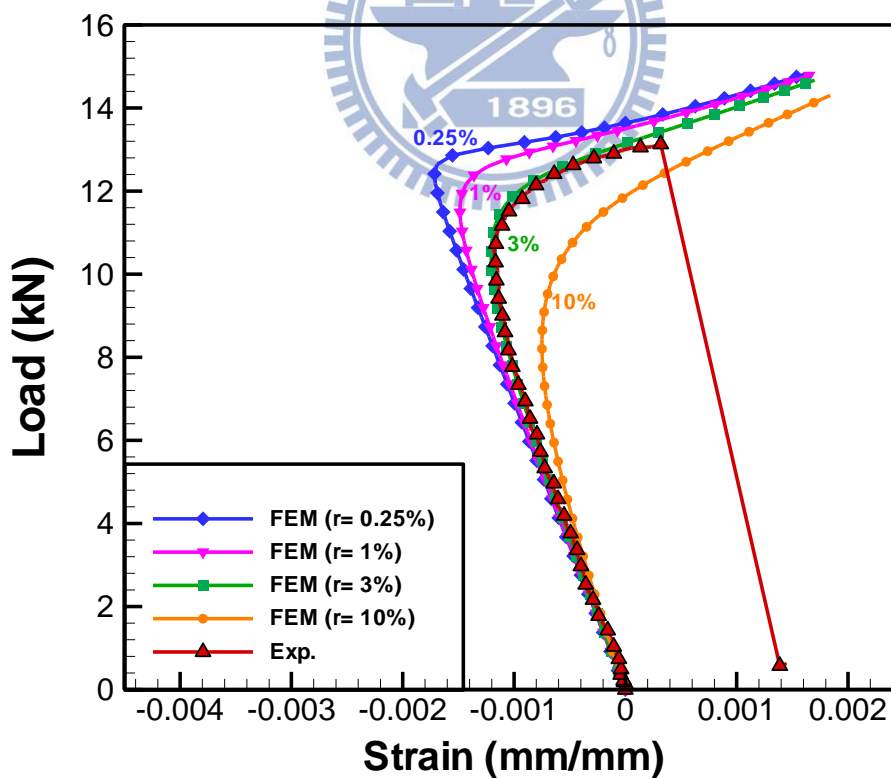


圖 3.14 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應

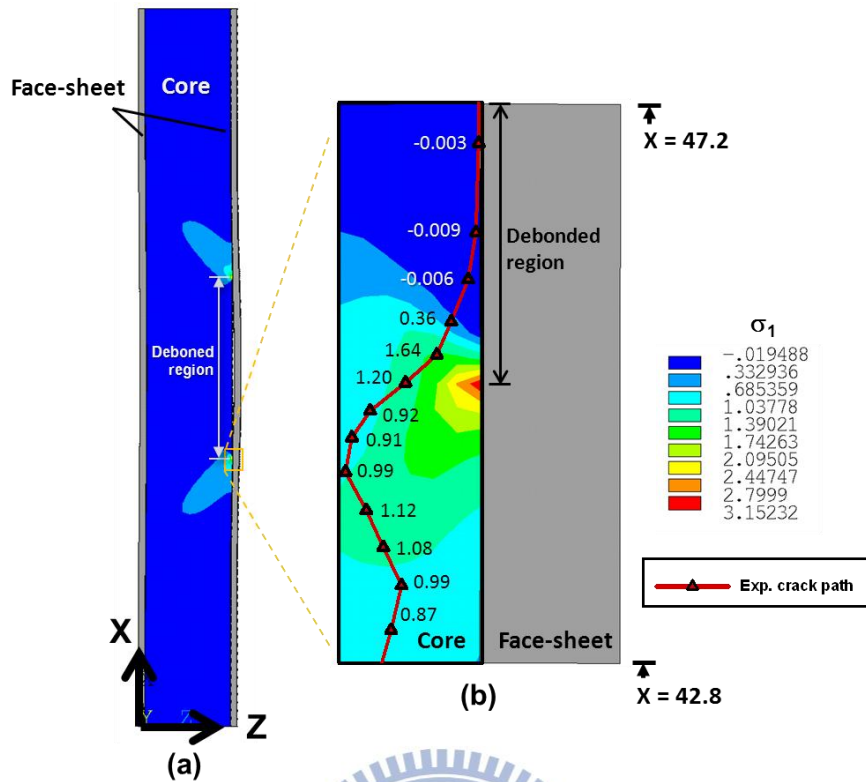


圖 3.15 當壓縮負載為 13.0 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的應力分布結果(缺陷值為 3%) ((a)第一個主應力分布圖(σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較)

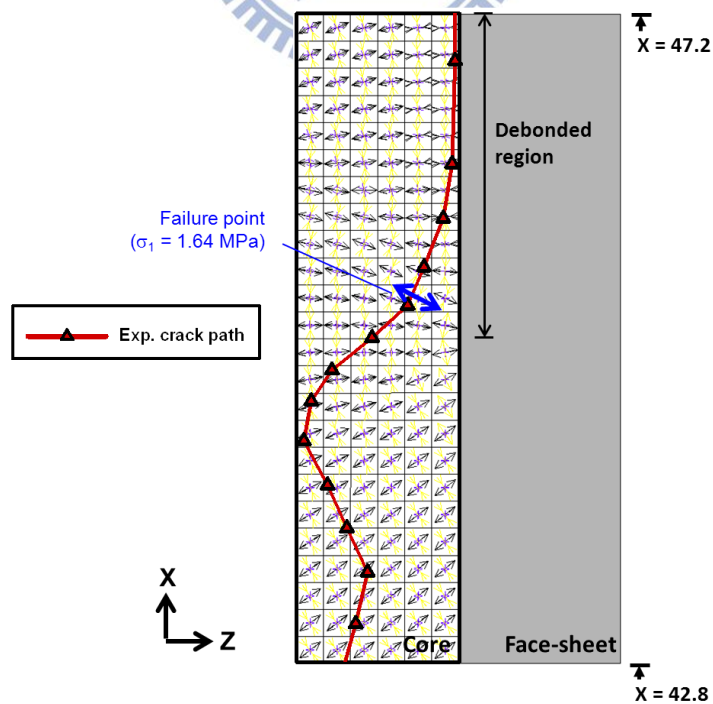


圖 3.16 當壓縮負載為 13.0 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的主應力方向結果(缺陷值為 3%)

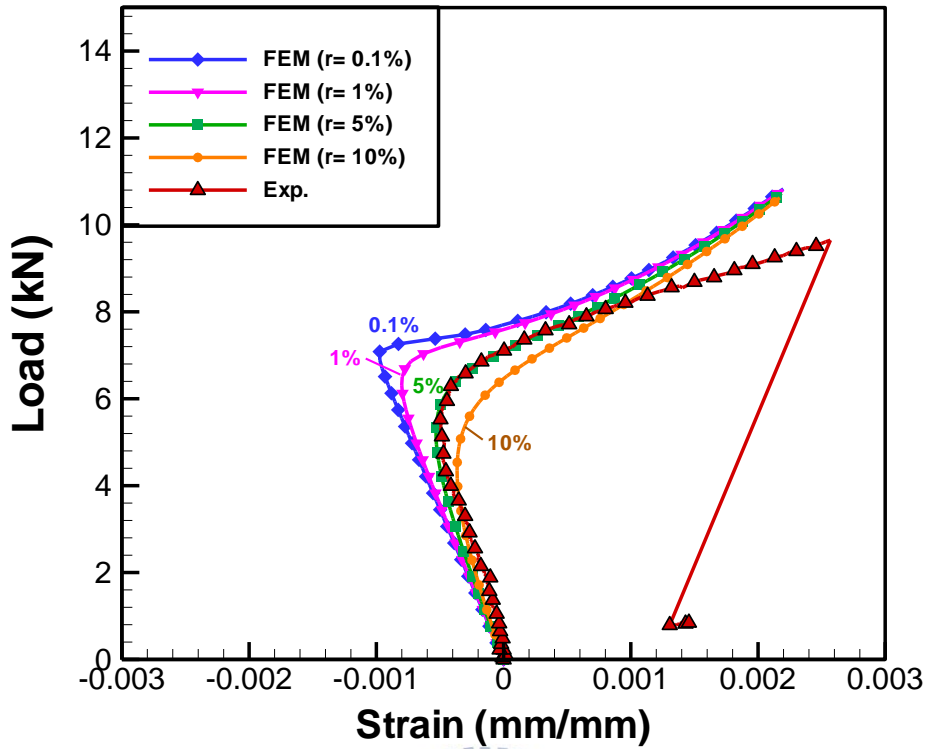


圖 3.17 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應

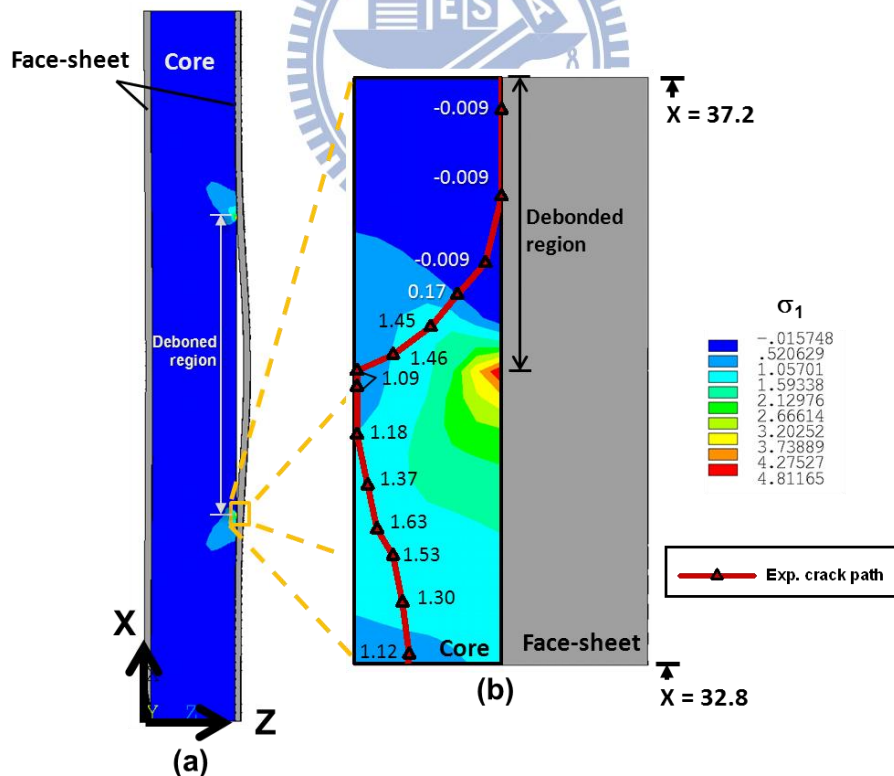


圖 3.18 當壓縮負載為 9.3 kN，具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構芯材部分的應力分布結果(缺陷為 5%) ((a)第一個主應力分布圖(σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較)

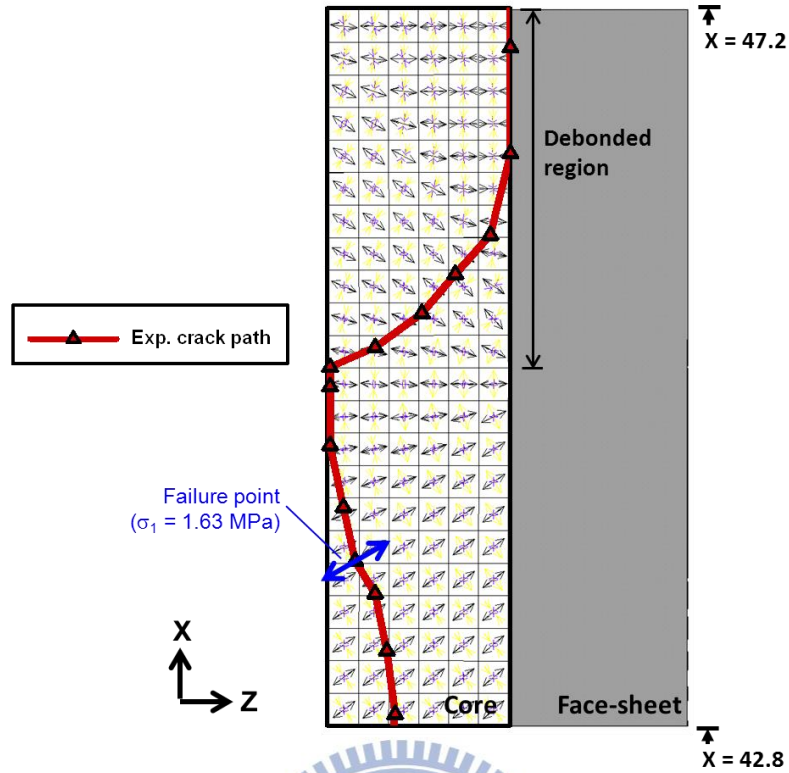


圖 3.19 當壓縮負載為 9.3 kN，具 50mm 脫層之 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構
芯材部分的主應力方向結果(缺陷為 5%)

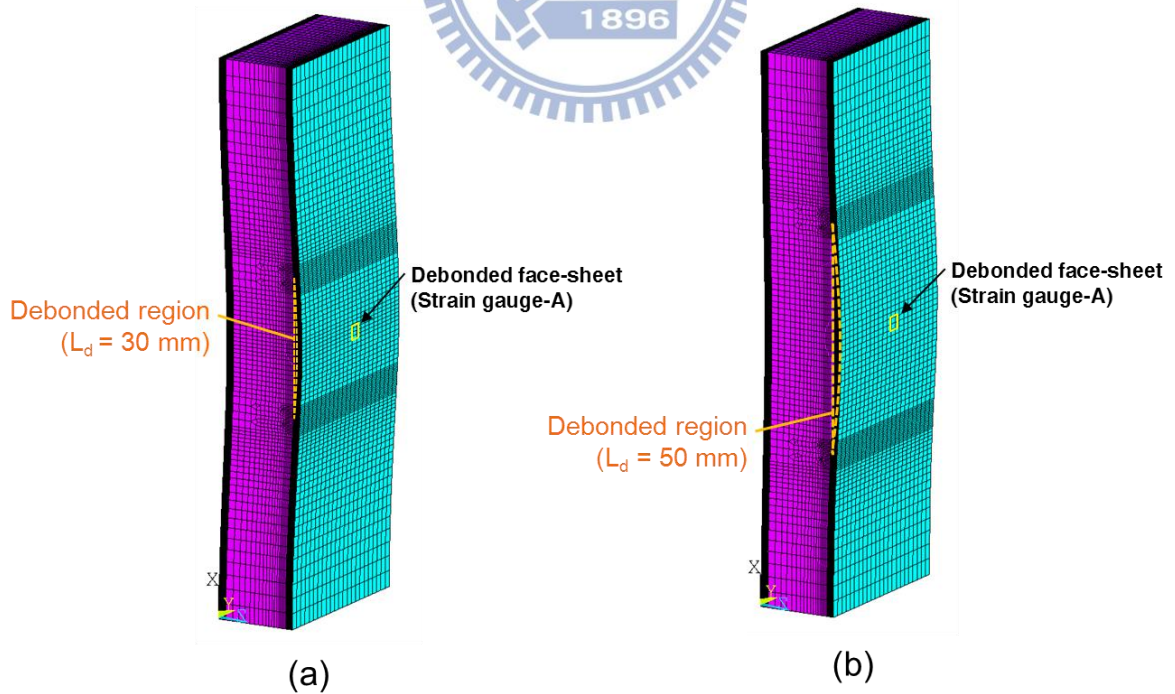


圖 3.20 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構的有限元素分析結果 ((a)脫層長度為
30mm 的變形結果 (b)脫層長度為 50mm 的變形結果)

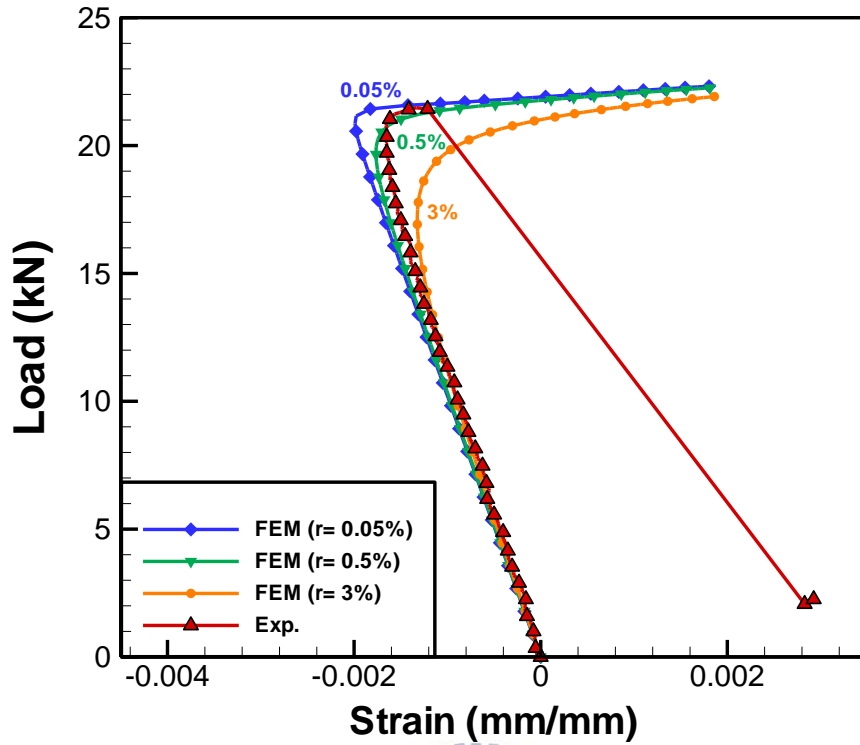


圖 3.21 具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應

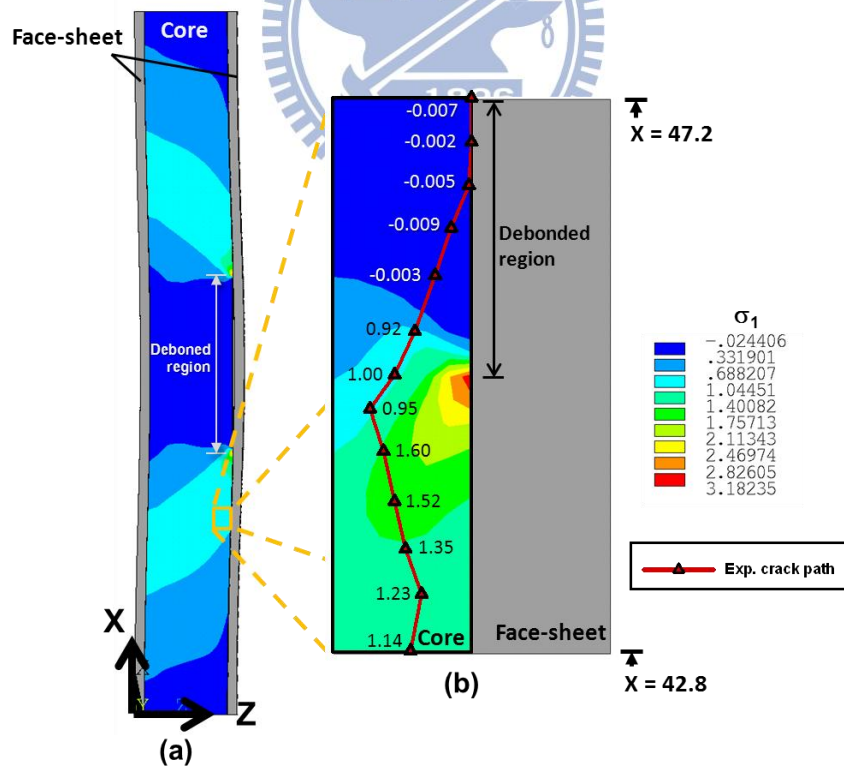


圖 3.22 當壓縮負載為 21.8 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構芯材部分的應力分布結果(缺陷為 0.5%) ((a)第一個主應力分布圖(σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較)

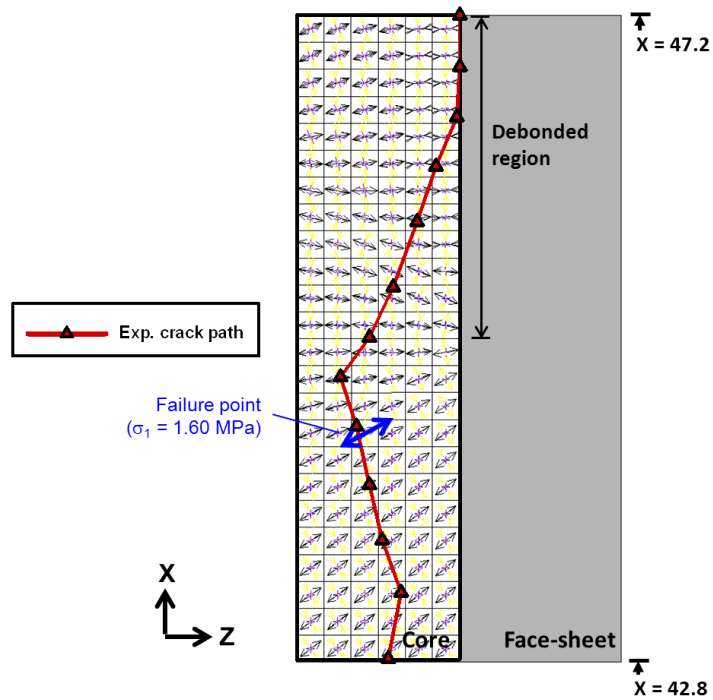


圖 3.23 當壓縮負載為 21.8 kN，具 30mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構芯材部分的應力方向結果(缺陷為 0.5%)

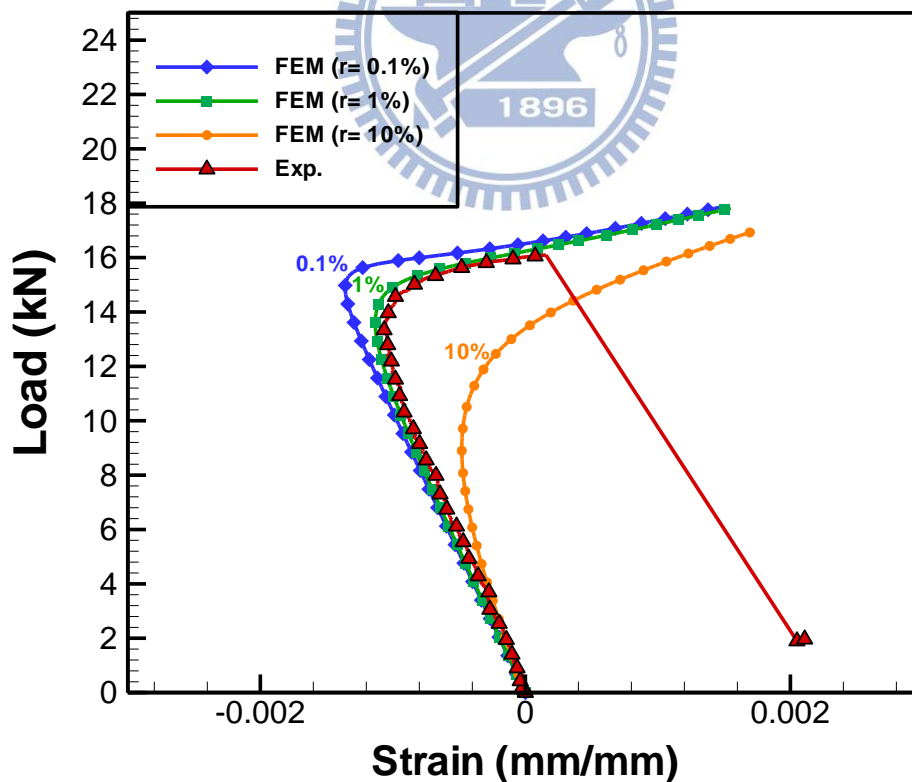


圖 3.24 具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構的負載與應變響應

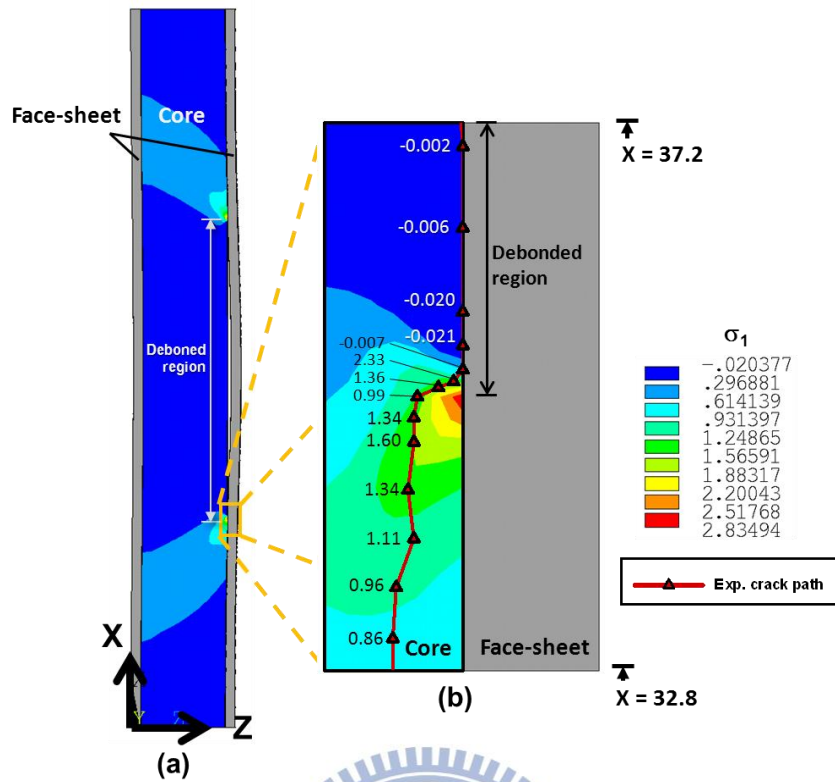


圖 3.25 當壓縮負載為 16.6 kN，具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構芯材部分的應力分布結果(缺陷為 1%) ((a)第一個主應力分布圖(σ_1) (b)主應力分布圖與實驗裂紋路徑比較)

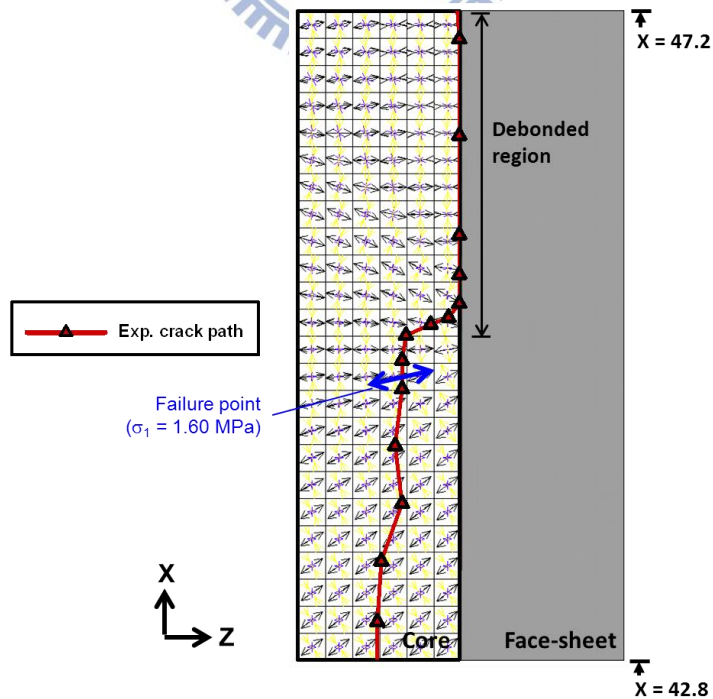


圖 3.26 當壓縮負載為 16.6 kN，具 50mm 脫層之 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構之芯材部分的應力方向結果(缺陷為 1%)

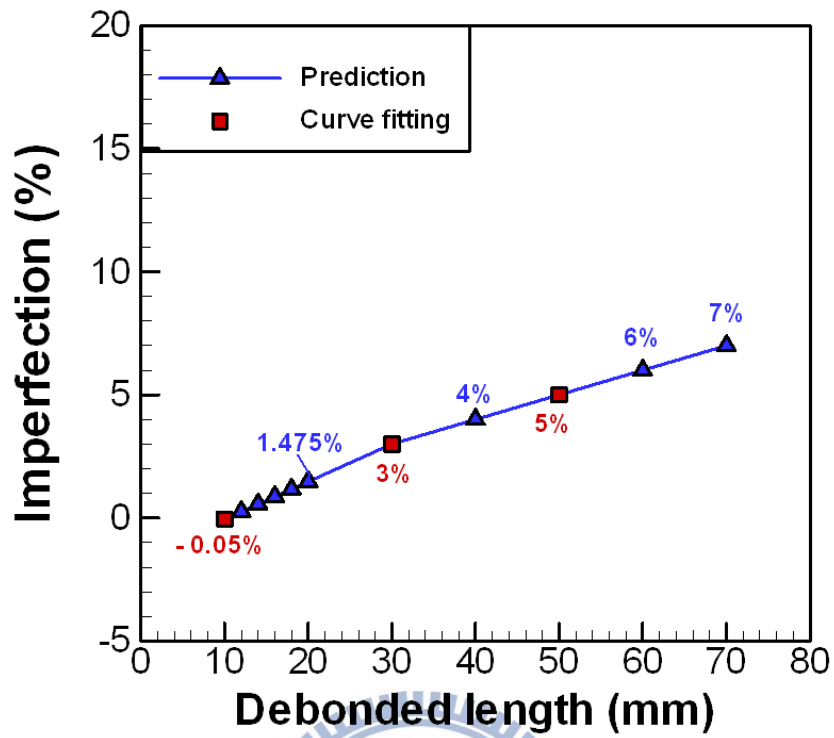


圖 3.27 [(0/90)₂]_s 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的缺陷

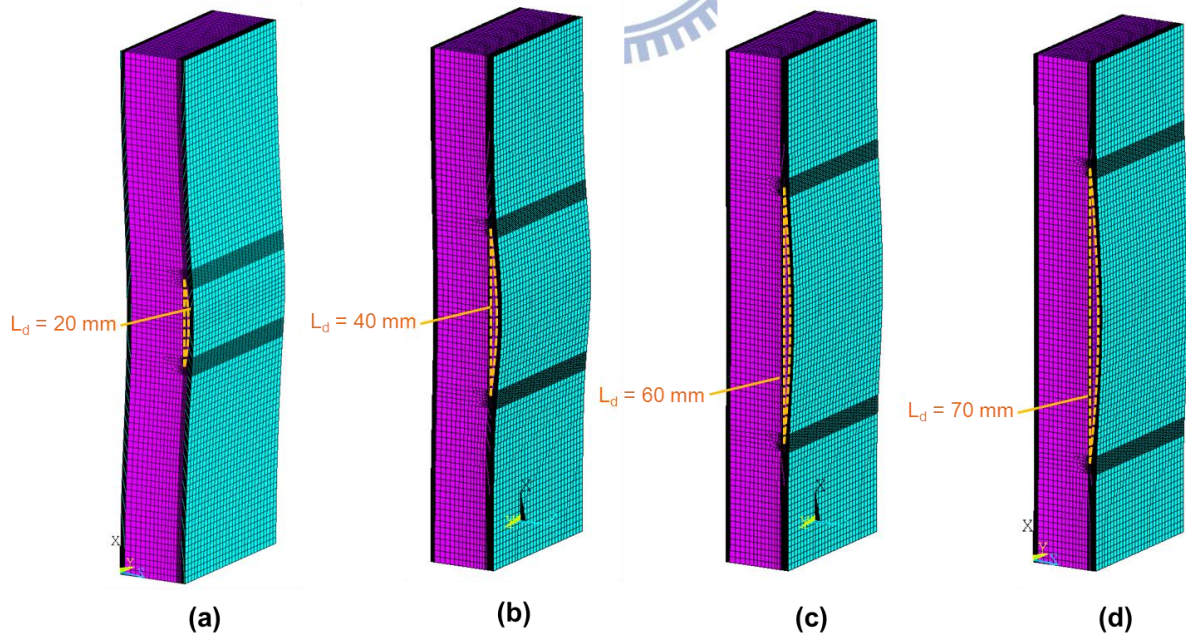
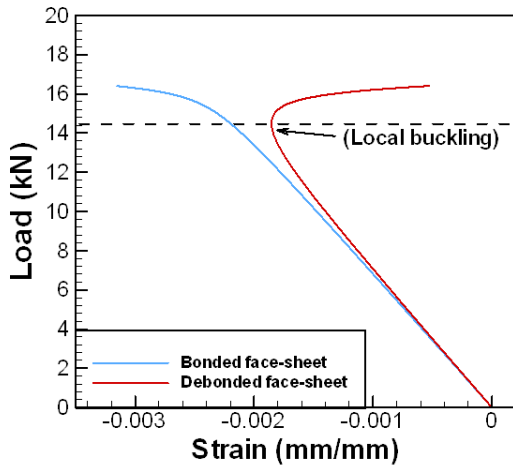
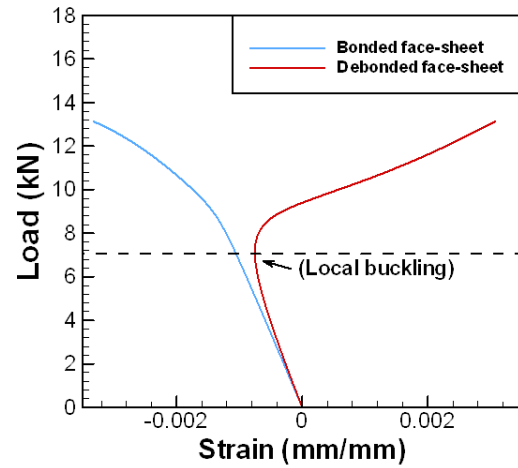


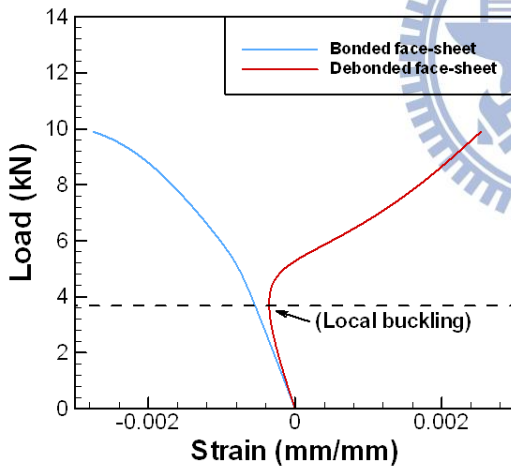
圖 3.28 [(0/90)₂]_s 複材三明治結構試片的變形結果((a)脫層長度為 20 mm (b)脫層長度為 40 mm (c)脫層長度為 60 mm (d)脫層長度為 70 mm)



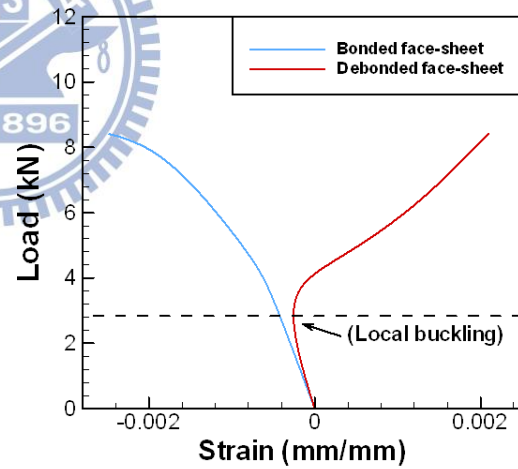
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3.29 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 20 mm (b)脫層長度為 40 mm (c)脫層長度為 60 mm (d)脫層長度為 70 mm)

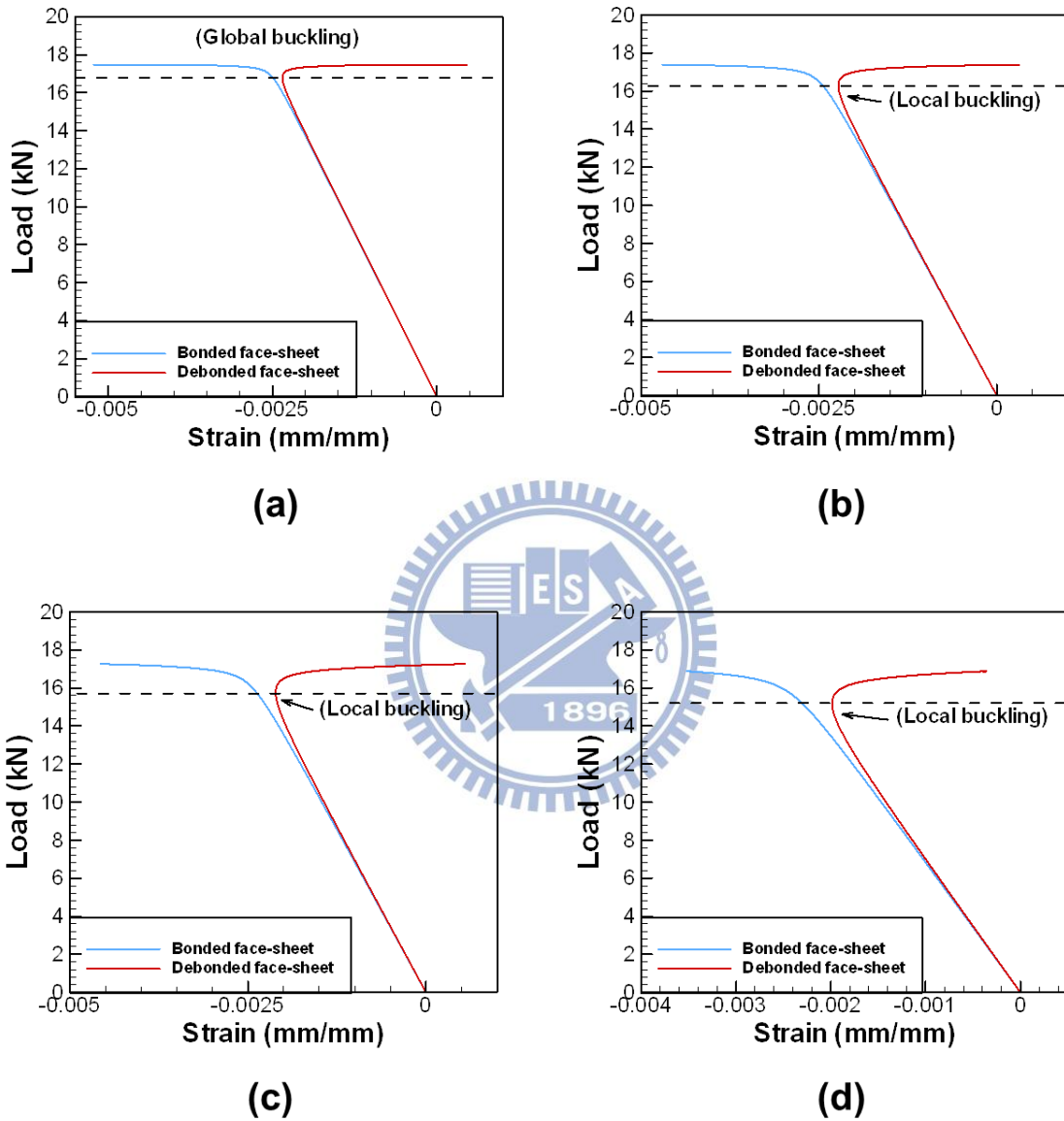


圖 3.30 $[(0/90)_2]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 12 mm (b)脫層長度為 14 mm (c)脫層長度為 16 mm (d)脫層長度為 18 mm)

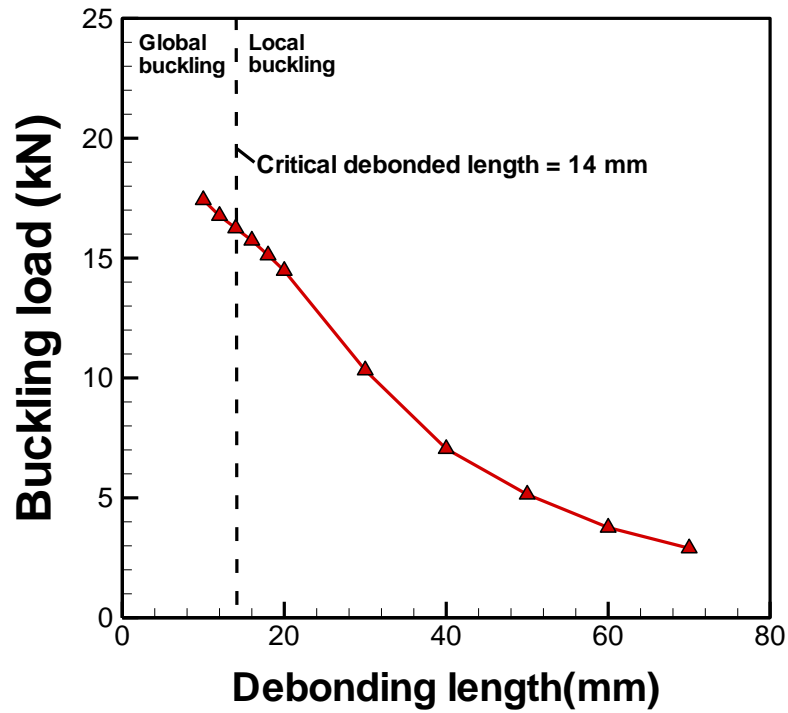


圖 3.31 [(0/90)₂]_s 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的挫屈負載

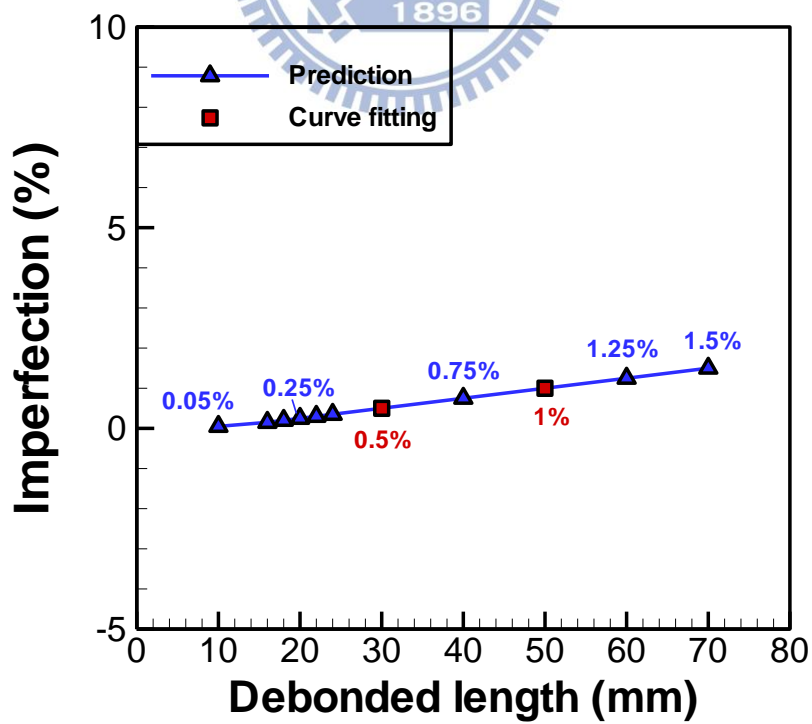


圖 3.32 [(0/90)₃]_s 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的缺陷

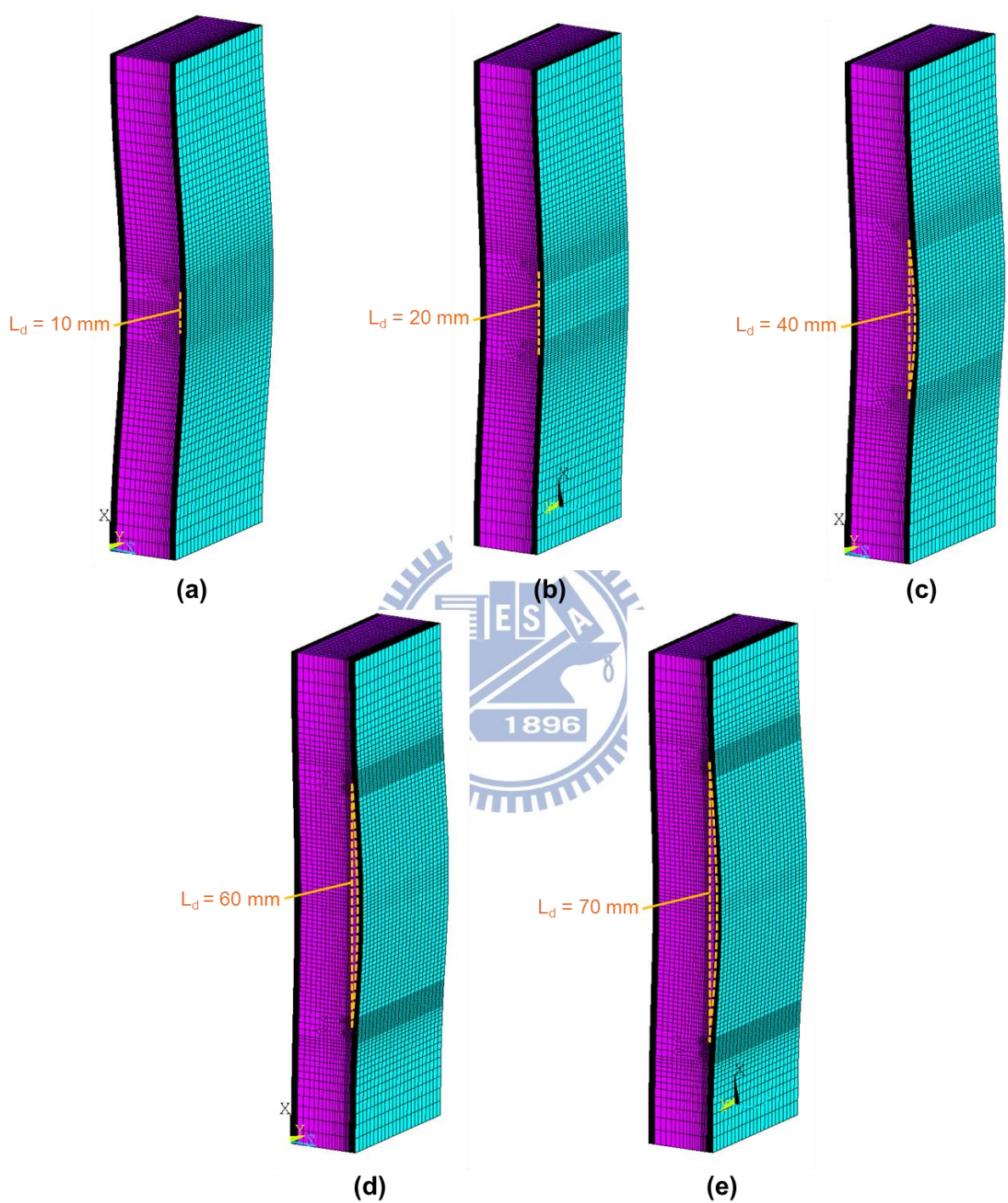


圖 3.33 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的變形結果((a)脫層長度為 10 mm (b)脫層長度為 20 mm (c)脫層長度為 40 mm (d)脫層長度為 60 mm (e)脫層長度為 70 mm)

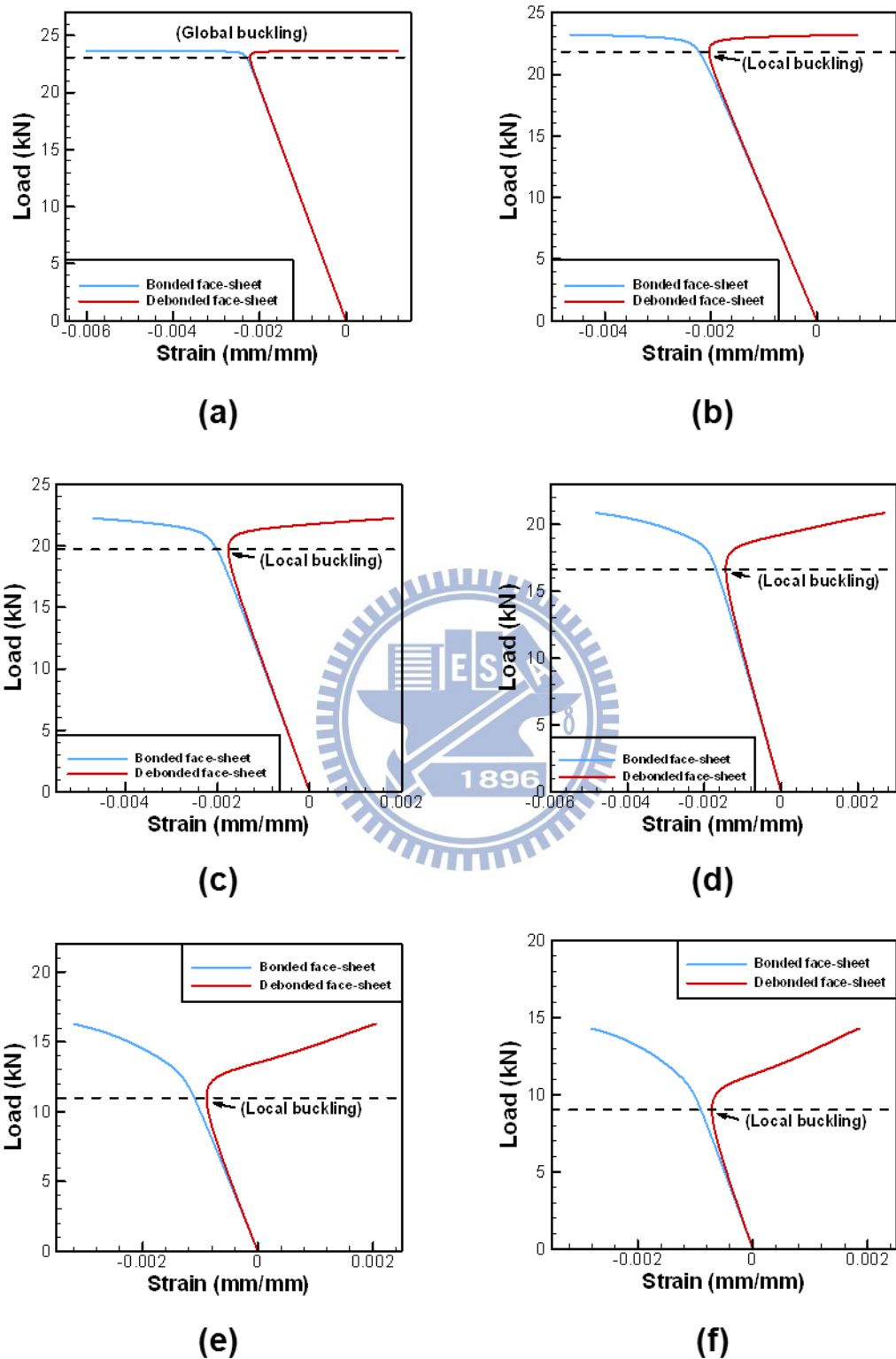


圖 3.34 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 10 mm (b)脫層長度為 20 mm (c)脫層長度為 30 mm (d)脫層長度為 40 mm (e) 脫層長度為 60 mm (f)脫層長度為 70 mm)

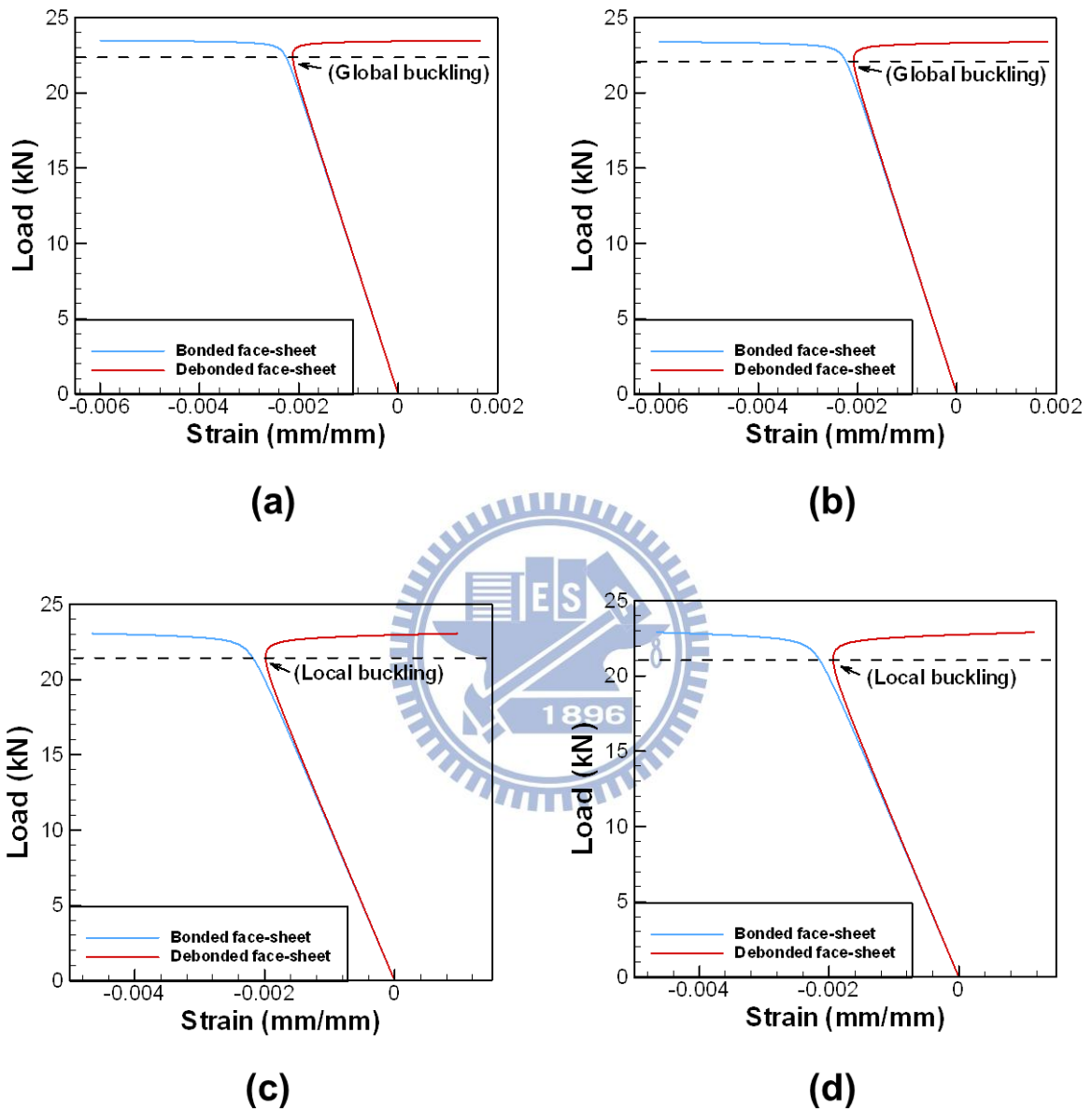


圖 3.35 $[(0/90)_3]_s$ 複材三明治結構試片的負載與應變關係((a)脫層長度為 16 mm (b)脫層長度為 18 mm (c)脫層長度為 22 mm (d)脫層長度為 24 mm)

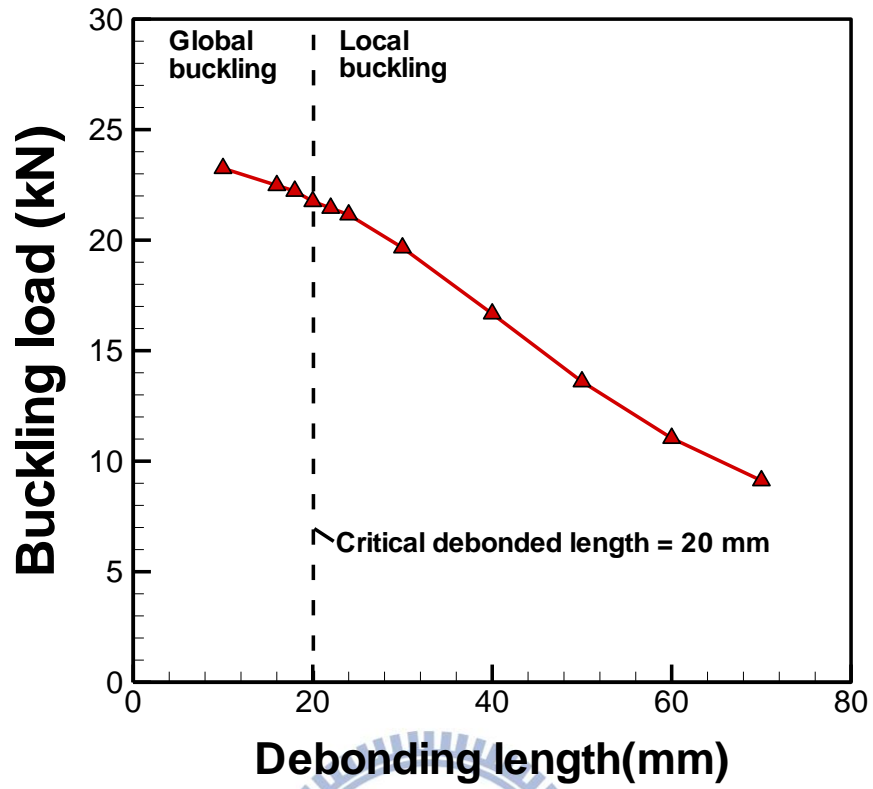


圖 3.36 [(0/90)₃]_s 複材三明治結構試片在各種脫層長度下的挫屈負載