

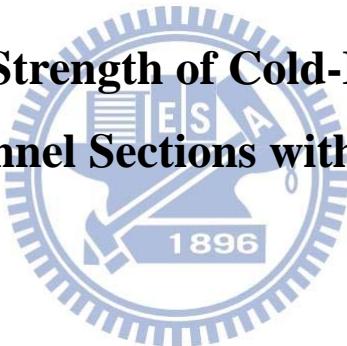
國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

腹板開孔之冷軋不鏽鋼槽型斷面腹板皺曲強度

Web Crippling Strength of Cold-Formed Stainless  
Steel Channel Sections with Web Hole



研究生：吳政哲

指導教授：陳誠直博士

中華民國一百零二年十月

腹板開孔之冷軋不鏽鋼槽型斷面腹板皺曲強度  
**Web Crippling Strength of Cold-Formed Stainless  
Steel Chanel Sections with Web Hole**

研究 生：吳 政 哲

Student : Cheng-Che Wu

指導 教授：陳 誠 直 博士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Civil Engineering

October 2013  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年十月

# 腹板開孔之冷軋不鏽鋼槽型斷面腹板皺曲強度

研究生：吳政哲

指導教授：陳誠直 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘要

本研究以實驗方式探討在端點雙翼板(End Two-Flange, ETF)受集中載重下之具腹板開孔冷軋不鏽鋼槽型斷面之腹板皺曲強度及行為，材料選用 SUS 304 型沃斯田不鏽鋼，開孔為圓形孔位於腹板正中央，上下支承墊與試體翼板間無固定，以 48 支不同腹板細長比、不同開孔直徑、不同開孔位置的試體實驗。本研究並以有限元素分析試體，與實驗結果互相驗證。實驗結果顯示在不同試體條件下腹板開孔強度折減係數皆不相同。本研究根據實驗結果提出了在載重條件為 ETF 下折減係數建議值公式。根據提出之折減係數，影響具腹板開孔之冷軋不鏽鋼腹板皺曲強度的主要因素為開孔大小，其次為開孔距離。建議值與實驗結果比較顯示，開孔直徑越大與開孔位置距離支承墊越接近，折減係數越難預測。有限元素分析結果顯示可以有效地模擬試體破壞行為和腹板皺曲強度。

關鍵字:腹板開孔、腹板皺曲強度、冷軋不鏽鋼、槽型斷面、端點雙翼受載

# **Web Crippling Strength of Cold-Formed Stainless Steel Chanel Sections with Web Hole**

Student: Cheng-Che Wu

Advisor: Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**

This study experimentally investigates the web crippling strength of cold-formed stainless steel channel sections with hole on the web under the end two-flange (ETF) loading condition. The channels were austenitic type 304 stainless steel. The holes were located at mid-depth of the webs. Flanges of the channel sections were not fastened to the supports. This experiment included 48 test specimens with different web slenderness ratio, hole diameter, and hole location. Finite element analyses were further conducted and the results were compared with test data. Test results demonstrated that the web crippling strength reduction factors were different for various specimens. According to the test results, strength reduction factors were proposed for the ETF loading conditions. Based on the strength reduction factors, the major factors influencing the web crippling strength of the cold-formed stainless steel with web hole was the hole size and, the next, the distance between the hole and the edge of the bearing. Both the proposed strength reduction factors and the test results showed that the larger the hole diameter and closer the hole to the bearing resulted in the more difficult to predict the strength reduction factor. The finite element analysis can effectively predict the specimen behavior and web crippling strength.

Keywords: web hole, web crippling strength, cold-formed stainless steel, channel section, End Two-flange loading condition.

## 誌謝

感謝父母的養育之恩與辛苦的栽培，讓我得以無後顧之憂的學習，使我可以順利的完成碩士論文，希望這小小的成就，可以讓你們感到光榮。未來必定竭盡所能努力，回報父母養育之恩。

感謝恩師 陳誠直教授在研究所時期專業的指導與諄諄教誨，恩師待人真誠與行事正直令學生萬分欽佩，並教導學生正確地待人處事，學生受益良多，銘記在心。未來出社會工作和生活，肯定受用無窮，在此獻上最誠摯的感謝之意。

論文口試期間承蒙本校 郭心怡教授、明新科技大學 林新華教授撥冗審閱，針對論文內容疏漏之處給予寶貴的建議與指導，使論文更臻完善，僅此特致謝忱。

研究所期間，感謝學長 政億在研究及論文撰寫階段給予指導與建議；感謝學長 士庭、偉乾、易宸在學業和生活上給予協助；感謝同窗好友政勳、家毅、凡皓以及學弟宗勝、桓緯、榮軒、耀光、哲民、承剛、信貿，與大學同窗好友在研究所生活的照顧與幫助，分享生活上的喜怒哀樂。

謹將此論文獻給曾為我加油或打氣的師長或朋友，感謝你們的支持與鼓勵，願和你們一起分享我獲得碩士論文的喜悅與榮耀。

政哲

一零二年十月

# 目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄 .....	VI
圖目錄 .....	VII
符號說明 .....	XIII
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究方法 .....	3
1.4 論文內容 .....	3
第二章 文獻回顧 .....	5
2.1 國外相關規範 .....	5
2.2 國內外相關文獻回顧 .....	7
2.3 可靠度分析 .....	8
第三章 實驗規劃與設置 .....	10
3.1 實驗規劃 .....	10
3.1.1 試體設計 .....	10
3.1.2 試體編號 .....	10
3.1.3 材料性質試驗 .....	11
3.2 實驗儀器 .....	12
3.3 實驗流程 .....	12
第四章 實驗結果與討論 .....	14
4.1 實驗結果 .....	14
4.1.1 試體行為 .....	14
4.1.2 試體載重-腹板變形曲線 .....	17

4.1.3 參數 $a/h$ 與 $x/h$ 對折減係數實驗值之影響 .....	17
4.2 實驗結果與規範及參考文獻之比較 .....	18
4.3 折減係數建議值 .....	19
4.4 折減係數建議值與實驗值之比較 .....	20
4.5 結語 .....	20
<b>第五章 有限元素分析 .....</b>	<b>21</b>
5.1 前言 .....	21
5.2 有限元素分析程序與步驟 .....	21
5.3 有限元素分析 .....	22
5.3.1 分析基本假設 .....	22
5.3.2 分析模型與分析元素性質 .....	22
5.3.3 材料性質 .....	23
5.3.4 接觸條件與邊界條件 .....	23
5.3.5 模型網格 .....	24
5.4 行為指標 .....	24
5.4.1 Von Mises 應力 .....	24
5.4.2 等值塑性應變指數(PEEQ) .....	24
5.5 分析結果與討論 .....	25
5.5.1 分析與實驗結果比較 .....	25
5.5.2 分析結果 .....	25
5.5.3 試體不平整性之影響 .....	26
<b>第六章 結論與建議 .....</b>	<b>27</b>
6.1 結論 .....	27
6.2 建議 .....	28
<b>參考文獻 .....</b>	<b>29</b>
<b>附錄 A 實驗終止時試體變形情況 .....</b>	<b>85</b>

## 表目錄

表 3.1 實驗試體尺寸.....	32
表 3.1 實驗試體尺寸(續).....	33
表 4.1 試體 ETF-A 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數 .....	34
表 4.2 試體 ETF-B 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數 .....	34
表 4.3 試體 ETF-C 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數 .....	35
表 4.4 試體 ETF-D 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數 .....	35
表 4.5 $R_{test}$ 與 $R_{EOF}$ 比值 .....	36
表 4.6 $R_{test}$ 與 $R_{IOF}$ 比值 .....	36
表 4.7 $R_{test}$ 與 $R_{ITF}$ 比值 .....	37
表 4.8 $R_{test}$ 與 $R_p$ 比值 .....	37
表 4.9 $R_{test}/R_p$ 可靠度分析 .....	38
表 5.1 試體 ETF-A 系列分析結果與實驗之腹板皺曲強度比較 .....	39



## 圖 目 錄

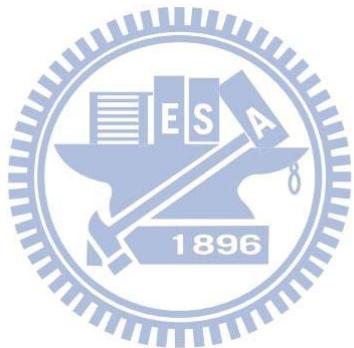
圖 1.1 斷面腹板皺曲現象示意圖(內政部營建署 2004).....	40
圖 1.2 腹板皺曲強度試驗之四種載重條件(內政部營建署 2004).....	40
圖 3.1 試體斷面示意圖.....	41
圖 3.2 實驗設置示意圖.....	42
圖 3.3 拉力試片設計圖.....	43
圖 3.4 拉力試片厚度 1.0 mm 之載重-應變曲線 .....	44
圖 3.5 拉力試片厚度 1.5 mm 之載重-應變曲線 .....	44
圖 3.6 拉力試片厚度 2.0 mm 之載重-應變曲線 .....	44
圖 3.7 實驗位移計設置圖.....	45
圖 4.1 試體 ETF-A-a0.2 載重-腹板變形曲線.....	46
圖 4.2 試體 ETF-A-a0.4 載重-腹板變形曲線.....	46
圖 4.3 試體 ETF-A-a0.6 載重-腹板變形曲線.....	47
圖 4.4 試體 ETF-B-a0.2 載重-腹板變形曲線 .....	47
圖 4.5 試體 ETF-B-a0.4 載重-腹板變形曲線 .....	48
圖 4.6 試體 ETF-B-a0.6 載重-腹板變形曲線 .....	48
圖 4.7 試體 ETF-C-a0.2 載重-腹板變形曲線 .....	49
圖 4.8 試體 ETF-C-a0.4 載重-腹板變形曲線 .....	49
圖 4.9 試體 ETF-C-a0.6 載重-腹板變形曲線 .....	50
圖 4.10 試體 ETF-D-a0.2 載重-腹板變形曲線 .....	50
圖 4.11 試體 ETF-D-a0.4 載重-腹板變形曲線 .....	51
圖 4.12 試體 ETF-D-a0.6 載重-腹板變形曲線 .....	51
圖 4.13 試體 ETF-A 系列 $R_{test}$ 與 $a/h$ 關係圖 .....	52

圖 4.14 試體 ETF-B 系列 $R_{test}$ 與 $a/h$ 關係圖 .....	52
圖 4.15 試體 ETF-C 系列 $R_{test}$ 與 $a/h$ 關係圖 .....	53
圖 4.16 試體 ETF-D 系列 $R_{test}$ 與 $a/h$ 關係圖 .....	53
圖 4.17 試體 ETF-A 系列 $R_{test}$ 與 $x/h$ 關係圖 .....	54
圖 4.18 試體 ETF-B 系列 $R_{test}$ 與 $x/h$ 關係圖 .....	54
圖 4.19 試體 ETF-C 系列 $R_{test}$ 與 $x/h$ 關係圖 .....	55
圖 4.20 試體 ETF-D 系列 $R_{test}$ 與 $x/h$ 關係圖 .....	55
圖 4.21 $R_{test}/R_{ITF}$ 與 $x/h$ 關係圖 .....	56
圖 4.22 $R_{test}/R_p$ 與 $x/h$ 關係圖 .....	56
圖 4.23 $R_{test}/R_p$ 與 $a/h$ 關係圖 .....	57
圖 4.24 $R_{test}/R_p$ 與 $h/t$ 關係圖 .....	57
	
圖 5.1 有限元素分析結構體轉置殼元素建模示意圖 .....	58
圖 5.2 有限元素分析建立之分析模型構件 .....	58
圖 5.3 腹板表面不平整性示意圖 .....	59
圖 5.4 不鏽鋼材之應力-應變關係示意圖 .....	59
圖 5.5 有限元素分析模型之邊界條件設定 .....	60
圖 5.6 有限元素分析建立之分析模型網格 .....	60
圖 5.7 試體 ETF-A-a0x0 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	61
圖 5.8 試體 ETF-A-a0.2x0 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	61
圖 5.9 試體 ETF-A-a0.2x0.2 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	62
圖 5.10 試體 ETF-A-a0.2x0.4 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	62
圖 5.11 試體 ETF-A-a0.2x0.6 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	63
圖 5.12 試體 ETF-A-a0.4x0 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	63
圖 5.13 試體 ETF-A-a0.4x0.2 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	64

圖 5.14 試體 ETF-A-a0.4x0.4 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	64
圖 5.15 試體 ETF-A-a0.4x0.6 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	65
圖 5.16 試體 ETF-A-a0.6x0 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	65
圖 5.17 試體 ETF-A-a0.6x0.2 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	66
圖 5.18 試體 ETF-A-a0.6x0.4 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	66
圖 5.19 試體 ETF-A-a0.6x0.6 分析與實驗之載重-位移曲線 .....	67
圖 5.20 ETF-A-a0x0 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	68
圖 5.21 ETF-A-a0.2x0 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	68
圖 5.22 ETF-A-a0.2x0.2 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	69
圖 5.23 ETF-A-a0.2x0.4 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	69
圖 5.24 ETF-A-a0.2x0.6 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	70
圖 5.25 ETF-A-a0.4x0 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	70
圖 5.26 ETF-A-a0.4x0.2 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	71
圖 5.27 ETF-A-a0.4x0.4 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	71
圖 5.28 ETF-A-a0.4x0.6 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	72
圖 5.29 ETF-A-a0.6x0 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	72
圖 5.30 ETF-A-a0.6x0.2 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	73
圖 5.31 ETF-A-a0.6x0.4 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	73
圖 5.32 ETF-A-a0.6x0.6 之分析模型與實驗試體變形圖 .....	74
圖 5.33 試體 ETF-A-a0x0 分析模型之應力分佈圖 .....	75
圖 5.34 試體 ETF-A-a0.2x0 分析模型之應力分佈圖 .....	75
圖 5.35 試體 ETF-A-a0.2x0.2 分析模型之應力分佈圖 .....	75
圖 5.36 試體 ETF-A-a0.2x0.4 分析模型之應力分佈圖 .....	76
圖 5.37 試體 ETF-A-a0.2x0.6 分析模型之應力分佈圖 .....	76

圖 5.38 試體 ETF-A-a0.4x0 分析模型之應力分佈圖 .....	76
圖 5.39 試體 ETF-A-a0.4x0.2 分析模型之應力分佈圖 .....	77
圖 5.40 試體 ETF-A-a0.4x0.4 分析模型之應力分佈圖 .....	77
圖 5.41 試體 ETF-A-a0.4x0.6 分析模型之應力分佈圖 .....	77
圖 5.42 試體 ETF-A-a0.6x0 分析模型之應力分佈圖 .....	78
圖 5.43 試體 ETF-A-a0.6x0.2 分析模型之應力分佈圖 .....	78
圖 5.44 試體 ETF-A-a0.6x0.4 分析模型之應力分佈圖 .....	78
圖 5.45 試體 ETF-A-a0.6x0.6 分析模型之應力分佈圖 .....	79
圖 5.46 試體 ETF-A-a0x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	80
圖 5.47 試體 ETF-A-a0.2x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	80
圖 5.48 試體 ETF-A-a0.2x0.2 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	80
圖 5.49 試體 ETF-A-a0.2x0.4 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	81
圖 5.50 試體 ETF-A-a0.2x0.6 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	81
圖 5.51 試體 ETF-A-a0.4x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	81
圖 5.52 試體 ETF-A-a0.4x0.2 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	82
圖 5.53 試體 ETF-A-a0.4x0.4 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	82
圖 5.54 試體 ETF-A-a0.4x0.6 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	82
圖 5.55 試體 ETF-A-a0.6x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	83
圖 5.56 試體 ETF-A-a0.6x0.2 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	83
圖 5.57 試體 ETF-A-a0.6x0.4 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	83
圖 5.58 試體 ETF-A-a0.6x0.6 分析模型之等值塑性應變分佈圖 .....	84
A.1 試體 ETF-A-a0x0 變形 .....	85
A.2 試體 ETF-A-a0.2x0 變形 .....	85
A.3 試體 ETF-A-a0.2x0.6 變形 .....	86

A.4	試體 ETF-A-a0.4x0 變形 .....	86
A.5	試體 ETF-A-a0.4x0.6 變形 .....	87
A.6	試體 ETF-A-a0.6x0 變形 .....	87
A.7	試體 ETF-A-a0.6x0.6 變形 .....	88
A.8	試體 ETF-B-a0x0 變形 .....	89
A.9	試體 ETF-B-a0.2x0 變形 .....	89
A.10	試體 ETF-B-a0.2x0.6 變形 .....	90
A.11	試體 ETF-B-a0.4x0 變形 .....	90
A.12	試體 ETF-B-a0.4x0.6 變形 .....	91
A.13	試體 ETF-B-a0.6x0 變形 .....	91
A.14	試體 ETF-B-a0.6x0.6 變形 .....	92
A.15	試體 ETF-C-a0x0 變形 .....	93
A.16	試體 ETF-C-a0.2x0 變形 .....	93
A.17	試體 ETF-C-a0.2x0.6 變形 .....	94
A.18	試體 ETF-C-a0.4x0 變形 .....	94
A.19	試體 ETF-C-a0.4x0.6 變形 .....	95
A.20	試體 ETF-C-a0.6x0 變形 .....	95
A.21	試體 ETF-C-a0.6x0.6 變形 .....	96
A.22	試體 ETF-D-a0x0 變形 .....	97
A.23	試體 ETF-D-a0.2x0 變形 .....	97
A.24	試體 ETF-D-a0.2x0.6 變形 .....	98
A.25	試體 ETF-D-a0.4x0 變形 .....	98
A.26	試體 ETF-D-a0.4x0.6 變形 .....	99
A.27	試體 ETF-D-a0.6x0 變形 .....	99



## 符號說明

- a 腹板開孔直徑大小 (mm)。
- bl 斷面加勁肢材長度 (mm)。
- bf 斷面翼板長度 (mm)。
- C NAS 規範係數。
- $C_h$  規範 NAS 腹板細長係數。
- $C_N$  規範 NAS 支承墊寬度係數。
- $C_R$  規範 NAS 內側彎曲半徑係數。
- d 試體深度。
- $d_h$  NAS 規範開孔深度。
- E 材料彈性模數。
- e 腹板中心水平偏移程度。
- EOF 載重條件 End One-Flange 簡稱。
- ETF 載重條件 End Two-Flange 簡稱。
- $F_m$  製造因素平均值。
- $F_y$  材料降伏強度。
- h 腹板平坦部分長度。
- I 腹板表面不平整性指數。
- IOF 載重條件 Interior One-Flange 簡稱。
- ITF 載重條件 Interior Two-Flange 簡稱。
- L 試體長度。
- $M_m$  材料因素平均值。
- N 支承墊寬度 (mm)。

$P_m$	載重比平均值。
$P_n$	標稱腹板皺曲強度。
R	規範 NAS 之內側彎曲半徑 (mm)。
$R_{EOF}$	規範 NAS 提出之載重條件 EOF 下折減係數。
$R_{FEM}$	有限元素分析之腹板皺曲強度折減係數。
$R_{IOF}$	規範 NAS 提出之載重條件 IOF 下折減係數。
$R_{ITF}$	參考文獻 Uzzaman 等人(2011)提出之強度折減係數。
$R_p$	本研究提出之強度折減係數。
$\theta$	腹板平面與支承面之角度， $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 。
t	試體厚度 (mm)。
$V_F$	製造因素的變異係數。
$V_M$	材料因素的變異係數。
$V_P$	載重比的變異係數。
$\beta$	可靠度指數。
x	腹板開孔邊緣與支承墊邊緣之距離 (mm)。



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

近年來，冷軋鋼結構因可提供足夠的強度及簡化配件製造及組裝的複雜性，並且有更低的自重可減輕結構物的負擔及減少建築物的自重，以及可在室溫下針對使用者需求快速且大量的生產製造，加上便於組裝成建築物或設備，所以在許多國家已被廣泛地使用。

冷軋型鋼相較於常見之熱軋型鋼擁有以下幾個特點。

- (1) 因為製作方式的不同，冷軋型鋼無熱軋型鋼在熱軋後(hot rolling)，因經由不均勻的冷卻(uneven cooling)，而造成殘餘應力(residual stress)。
- (2) 冷軋鋼構材在冷軋加工過程中會造成冷軋殘留應力，即是在斷面轉角處及其週邊的材料機械性質，如降伏應力與抗拉強度將明顯的增強，相反地延展度亦相對降低。
- (3) 由於厚度薄，冷軋鋼構材內之肢材擁有較大之寬厚比(width-to-thickness ratio)，也因此在受到壓力之下極容易產生局部挫屈(local buckling)。
- (4) 冷軋鋼材的應力與應變關係，可為尖銳降伏型式(sharp-yielding type)或平緩降伏型式(gradual-yielding type)。
- (5) 冷軋型鋼構材轉角處為圓弧形(corner)，冷軋型鋼構材無填角焊縫(corner fillet)。

冷軋鋼構材可適用的範圍相當廣，其使用於建築方面亦相當的普及。在目前的建築構材考量上，除非為低層住宅建築物，一般而言，冷軋鋼構材的使用大都為次結構構材或為非結構構材，其應用之部位有屋頂桁條與橫桿、隔間牆、板托梁、門或窗之過梁、牆板、屋頂板、樓承板、桁架等次要結構。。

### 腹板皺曲強度(web crippling)

與熱軋型鋼構材不同，冷軋型鋼載重梁鮮少在承載處加入橫向加勁物

(stiffener)，以抵抗集中的荷重與支撐。因此在梁腹板處易產生摺曲變形。在理論分析上，冷軋型鋼載重梁發生摺曲變形的因素可分為：

- (1) 施力處過於集中，應力分佈不均勻。
- (2) 腹板本體的彈性與非彈性穩定能力。
- (3) 在施力處，發生局部區域降伏。
- (4) 擊曲力所造成之偏心荷重。
- (5) 腹板本體的面外之不平整。
- (6) 腹板與翼板的相互束縛情形。
- (7) 考量承接屋頂板，所造成載重梁腹板的傾斜。

因此，冷軋鋼構材設計規範內，一般對於此類問題，皆有計算公式以確保載重梁腹板免於摺曲，圖 1.1 為腹板皺曲現象示意圖。

## 1.2 研究目的



考量鋼材容易受腐蝕而影響結構物的安全，故必須進行防腐蝕處理因而有增加材料成本及抗腐蝕品質之疑慮，因此若將冷軋鋼材替換成擁有上述鋼材之大部分優點同時具有高抗腐蝕性的不鏽鋼材料，將使得冷軋型不鏽鋼建築物較冷軋型鋼建築物擁有更長的使用壽命及更高的居住安全品質。故本研究以不鏽鋼為材料，針對具腹板開孔之冷軋不鏽鋼槽型斷面之腹板皺曲強度進行探討，本研究之目的主要為以下：

- (1) 將槽型斷面冷軋不鏽鋼之腹板開設圓形孔，載重條件為端點雙翼承受載重(End Two-Flange, ETF)，研究開孔直徑大小與開孔位置對腹板皺曲強度之影響。
- (2) 因現行規範對於具腹板開孔冷軋鋼之腹板皺曲強度並不完整，但考量有其必要性，故本實驗根據實驗結果探討具腹板開孔之冷軋不鏽鋼受載後試體行為，提出具腹板開孔冷軋不鏽鋼之腹板皺曲強度折減係數。

### 1.3 研究方法

本次實驗是針對腹板開孔之冷軋不鏽鋼槽型斷面受到端點雙翼承受載重(End Two-Flange, ETF)下之力學行為進行研究，並規劃 49 支試體進行試驗。且依照 ASTM 之規定規劃實驗材料之試片進行不鏽鋼材料拉力試驗求得各材料之實際強度。此試驗目的在於量測試體於 ETF 載重條件下之腹板皺曲強度，探討具腹板開孔之槽型斷面冷軋不鏽鋼之腹板皺曲強度之計算。

本實驗以不同之腹板長細比( $h/t$ )、不同孔徑之開孔大小( $a$ )、開孔與支承墊距離之不同( $x$ )，探討不同參數下，具腹板開孔之皺曲強度。本實驗之試體採用 SUS 304 型冷軋不鏽鋼材，試體斷面選用槽型斷面。

根據我國之冷軋鋼構造建築物結構設計規範及解說，如圖 1.2，腹板皺曲行為之試驗分為四種載重型式，分別為以下所列：

- 
- (1) 端點單翼承受載重(End One-Flange, EOF)
  - (2) 內部單翼承受載重(Interior One-Flange, IOF)
  - (3) 端點雙翼承受載重(End Two-Flange, ETF)
  - (4) 內部雙翼承受載重(Interior Two-Flange, ITF)

本研究採用之載重型式，為上述(3)，探討槽型斷面冷軋不鏽鋼梁於端點上下翼板受載重之腹板皺曲強度。

另外，以有限元素分析軟體，建立實尺寸分析模型，再以分析結果與實驗結果相互佐證，驗證實驗之準確性。

### 1.4 論文內容

本研究論文內容主要分為五個章節，各章節之主題說明如下：

第一章 緒論：

本章節主要說明前言、研究方法、研究目的、論文架構。

第二章 國內外相關規範及文獻回顧：

本章節主要敘述具腹板開孔冷軋鋼之腹板皺曲強度(Web Crippling)國內外相關理

論研究及國內外現行規範介紹等內容。

### 第三章 實驗配置與步驟：

本章節主要內容為實驗概述、試體設計、實驗儀器、實驗設置，詳述實驗之前置作業。

### 第四章 實驗結果與討論：

實驗試體行為，強度與變形曲線，及根據實驗結果與規範及參考文獻比較，並提出腹板開孔冷軋不鏽鋼皺曲強度折減係數。

### 第五章 有限元素分析

建立與實驗試體相同之分析模型，利用有限元素分析，驗證實驗之準確性。

### 第六章 結論與建議：

本章主要內容為統合實驗結果，做出實驗之結論並提出相關之建議。



## 第二章 文獻回顧

本章主要針對所收集之相關研究文獻資料，藉由早期學者所提供之理論及實驗成果，探討不常使用橫向及剪力加勁肢材之冷軋鋼梁，受到集中載重及反力時，可能造成腹板皺曲之現象。

1939 年美國康乃爾大學教授 George Winter 接受美國鋼鐵協會(American Iron and Steel Institute—簡稱 AISI)之委託，從事冷軋鋼構件強度及設計公式的相關研究，而於 1946 年完成第一份冷軋型鋼構件設計規範(Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members)。國內冷軋鋼構材之研究資料尚不齊全，故國內冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說主要是參考此規範所訂定的。

### 2.1 國外相關規範

#### 北美洲相關規範(NAS)



北美洲冷軋鋼規範中，目前針對具腹板開孔之冷軋鋼作相關的規範，只侷限在端點單翼(End One-Flange, EOF)及內部單翼(Interior One-Flange, IOF)兩種載重型式，對於端點雙翼承受載重(End Two-Flange, ETF)及內部雙翼承受載重(Interior Two-Flange, ITF)目前還沒有相關規範。

對於具腹板開孔之冷軋鋼斷面，北美洲規範有以下幾項規定限制：

- (1) 開孔深度與腹板平坦部份長度比值( $d_h/h$ )不得大於 0.7。
- (2) 腹板長細比( $h/t$ )不得大於 200。
- (3) 開孔之圓心需位於腹板正中央。
- (4) 每個開孔間之淨間距需大於 18 in. (457 mm)。
- (5) 開孔邊緣至試體邊緣之距離不得小於腹板深度( $h$ )。
- (6) 如開孔非圓形孔，則試體轉角半徑需大於 2 倍試體厚度。
- (7) 如開孔非圓形孔，開孔深度不得大於 2.5 in.(64 mm) and 開孔長度不得大於 4.5 in. (114 mm)。

(8) 如開孔為圓形孔，開孔直徑不得大於 6 in.(152 mm)且需大於 9/16 in.(14 mm)  
 關於北美規範中，對於具腹板開孔之冷軋鋼皺曲強度之計算，首先計算未開孔時之腹板皺曲強度，再以一折減係數修正之。

未開孔之冷軋鋼之腹板皺曲強度計算公式：

$$P_n = C_t^2 F_y \sin \theta \left( 1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \times \left( 1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \times \left( 1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \quad (2.1)$$

具開孔，載重型式 EOF 之折減係數：

$$R_{EOF} = 1.01 - 0.325 \frac{d_h}{h} + 0.083 \frac{x}{h} \leq 1.0 \quad (2.2)$$

具開孔，載重型式 IOF 之折減係數：

$$R_{IOF} = 0.90 - 0.047 \frac{d_h}{h} + 0.053 \frac{x}{h} \leq 1.0 \quad (2.3)$$

其中：

$P_n$ ：標稱腹板皺曲強度。

$C$ ：規範 NAS 係數。

$C_h$ ：規範 NAS 腹板細長係數。

$C_N$ ：規範 NAS 支承墊寬度係數。

$C_R$ ：規範 NAS 內側彎曲半徑係數。

$F_y$ ：材料降伏強度。

$h$ ：腹板平坦部份長度。

$N$ ：支承墊寬度。

$R$ ：斷面內側彎曲半徑。

$t$ ：腹板厚度。

$\theta$ ：腹板平面與支承面之角度， $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

$d_h$ ：腹板開孔直徑。

$x$ ：腹板開孔邊緣與支承墊之淨間距

## 2.2 國內外相關文獻回顧

國內外目前對於具腹板開孔之冷軋鋼腹板皺曲強度的研究相當有限，國內外之相關規範，也甚少將此列入其中，目前只有北美洲規範(NAS)有相關的規範，但也侷限於內部單翼(Interior One-Flange, IOF)和端點單翼(End One-Flange, EOF)兩種載重型式。

對於具腹板開孔之冷軋鋼腹板皺曲強度之相關研究，主要研究者有 Yu (1973)、Korvink (1995)、Lagan (1994)、LaBoube (1999)、Young (2003-2011)、Uzzaman (2011)。

重要之文獻回顧如下：

Yu and Davis (1973)針對開孔斷面之冷軋鋼進行研究，斷面採用兩個槽形斷面組合合成(back-to-back channel)，載重條件為內部單翼(Interior One-Flange, IOF)，於腹板中心開設圓形孔及方形孔。實驗了 20 支試體，並根據實驗結果提出腹板皺曲強度折減係數。

Sivakumaran and Zielonka (1989)採用具有加勁肢材之槽型斷面(single lipped channel section)，載重條件為內部單翼(Interior One-Flange, IOF)，並於腹板中心開設圓形孔，實驗了 103 支試體，並根據實驗結果腹板皺曲強度折減係數。

Lagan et al. (1994)採用具有加勁肢材之槽形斷面，載重條件為內部單翼(Interior One-Flange, IOF)和端點單翼(End One-Flange, EOF)，並在支承墊之兩側腹板開設方形孔。根據實驗結果做出結論，影響具腹板開孔之冷軋鋼皺曲強度之主要因素為開孔直徑大小( $a$ )與腹板平坦部分長度( $h$ )之比值。

Korvink et al. (1995)以冷軋不鏽鋼為材料，斷面為兩個槽型斷面組合而成，不鏽鋼分為 SUS 304、SUS 430、修正形式 409、3CR12 四種，載重條件為內部單翼受載(Interior One-Flange, IOF)，共 140 支試體，實驗各種參數對冷軋型不鏽鋼之腹板皺曲強度的影響。實驗結果指出，腹板高度較小的試體，因在翼板和支承處破壞，故破壞處在腹板較高處。腹板高度較大的試體，破壞大多為腹板挫曲。

LaBoube et al. (1999)採用具有加勁肢材之槽型斷面(single lipped channel section)，採用內部單翼(Interior One-Flange, IOF)和端點單翼(End One-Flange,

EOF)載重型式，腹板細長比( $h/t$ )範圍為 98 到 224，開孔直徑大小與腹板平坦部分長度之比值( $a/h$ )範圍為 0.27 到 0.81，試體轉角內半徑與試體厚度比值( $R/t$ )範圍為 3.2 到 5.2，並於支承墊兩側腹板開設圓形孔。其中載重條件 IOF 實驗 56 支試體，載重條件 EOF 實驗 52 支試體，並根據實驗結果提出載重條件 IOF 和 EOF 下具腹板開孔冷軋鋼腹板皺曲強度之折減係數，此折減係數亦為目前 NAS 規範中採用之折減係數。

Zhou and Young (2010)以冷軋型不鏽鋼為材料，斷面採用方形中空封閉斷面，採用端點雙翼(End Two-Flange, ETF) 及內部雙翼(Interior Two-Flange, ITF) 載重型式。其中載重型式 ETF 實驗了 40 組試體，載重型式 ITF 實驗了 45 組試體，以實驗結果與現行規範進行比較，提出了規範修正之建議。

Zhou and Young (2010)以金屬鋁為材料，斷面採用方形中空封閉斷面，並在腹板中心開圓形孔，採用 end-two-flange (ETF) 及 interior-two-flange (ITF) 載重型式，腹板細長比為 6.2 到 131.3，開孔直徑大小與腹板平坦部分長度之比值( $a/h$ )為 0、0.2、0.4、0.6、0.8，試體翼板與支承墊間無固定。結果顯示影響具腹板開孔之皺曲強度的主要原因有二，一為開孔直徑大小與腹板平坦部份長度的比值( $a/h$ )，二為支承墊寬度與腹板平坦部份長度的比值( $N/h$ )，並根據實驗結果提出腹板皺曲強度折減係數。

Uzzaman et al. (2011)以冷軋型鋼為材料，斷面採用具有加勁肢材之槽型斷面，以實驗和有限元素分析的方式進行研究。其中載重型式 ITF 實驗了 37 組試體，當中 19 組試體翼板與上下支承墊以自攻螺絲固定，其他 18 組則試體翼板與支承墊無固定，實驗中  $a/h$  為 0.4。有限元素分析中，分析了 117 組試體，其中 37 組試體與實驗結果進行比較，其餘 80 組試體加入了參數  $x/h$ ， $x/h$  範圍為 0、0.2、0.4、0.6、0.8。依據實驗結果，提出了具腹板開孔之冷軋鋼在載重條件 ITF 下之腹板皺曲強度折減係數。

## 2.3 可靠度分析

利用可靠度分析，可以評估本研究提出之折減係數建議值是否可靠，對於預測皺曲強度是否可靠。可靠度分析主要是參考 NAS 北美冷軋鋼規範解說，可靠度指數(Reliability index,  $\beta$ )與所設計的安全因素有關，可靠度因數計算公式如

以下所列：

$$\beta = \frac{\ln \frac{R_m}{Q_m}}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}}$$

$$R_m = M_m \times (F_m \times P_m \times R_n)$$

$$V_R = \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + V_P^2}$$

其中，

$R_m$ ：標稱腹板皺曲強度(Mean resistance)。

$V_R$ ：標稱抵抗之變異係數(Coefficient of variation of R)。

$R_n$ ：標稱抵抗係數(Nominal resistance)

$Q_m$ ：平均載重影響(Mean load effect)。

$V_Q$ ：載重影響之變異係數(Coefficient of variation of load effect)。

其中，規範 NAS Table F1 中腹板皺曲強度統計參數：

$M_m$ : 材料因素平均值 =1.10。

$F_m$ : 製造因素平均值 =1.00。

$V_M$ : 材料因素的變異係數 =0.10。

$V_F$ : 製造因素的變異係數 =0.05。

$P_m$ : 載重比的平均值。

$V_p$ : 載重比的變異係數。

在規範 NAS 北美冷軋鋼解說(2007)建議可靠度指數( $\beta$ )最低限制值為 2.5，即當可靠度指數不小於 2.5 時，其設計規則是可以被信賴的。在美國土木協會規範採用的載重組合為 1.2DL+1.6LL。其中 DL 為靜載重，LL 為活載重。

## 第三章 實驗規劃與設置

### 3.1 實驗規劃

本實驗是針對冷軋不鏽鋼槽型斷面受到端點雙翼(End Two-Flange ,ETF)載重條件下之力學行為進行研究，材料採用 SUS 304 型冷軋不鏽鋼材，其試體斷面選用槽型斷面，共規劃 49 支試體進行試驗。並依照 CNS 之規定規劃實驗材料之試片進行不鏽鋼材料拉力試驗求得各材料之實際強度。此試驗目的在於量測試體於 ETF 載重條件下之腹板皺曲強度，探討具腹板開孔冷軋不鏽鋼槽型斷面之腹板皺曲強度及強度折減係數。圖 3.1 為試體斷面示意圖，圖 3.2 為實驗設置示意圖。

不具開孔之試體，其軸向承載能力與試體腹板之平坦部分的長度( $h$ )、支承墊寬度( $N$ )、轉角內半徑( $R$ )及試體厚度( $t$ )有關。具腹板開孔之試體，其腹板皺曲強度和開孔直徑大小( $a$ )與腹板平坦部分長度( $h$ )之比值( $a/h$ )及開孔邊緣與支承墊邊緣距離( $x$ )與腹板平坦部分長度( $h$ )之比值( $x/h$ )有關。理論上，開孔直徑越大，強度越小，開孔位置距離支承墊越近，強度越小。故本實驗以  $a/h$  及  $x/h$  值，這兩個影響腹板皺曲強度之主要因素為參數設計試體，探討這兩個參數互相影響具腹板開孔之冷軋鋼皺曲強度的關係。

#### 3.1.1 試體設計

本實驗依四組不一樣腹板平坦部分長度( $h$ )與厚度( $t$ )之試體，分成四個試體系列，每一支試體在腹板中央分別開設圓形孔，圓形開孔直徑大小( $a$ )與腹板平坦部分長度( $h$ )之比值( $a/h$ )分別為 0.2、0.4、0.6，圓形開孔邊緣與支承墊邊緣距離( $x$ )與腹板平坦部分長度( $h$ )之比值( $x/h$ )分別為 0、0.2、0.4、0.6。每一個試體系列中，皆含有一支未開孔之試體，作為計算折減係數之用。

#### 3.1.2 試體編號

本研究之實驗試體於試體端點上下雙翼板承受集中載重，載重條件之英文名稱為 End Two-Flange, ETF 為試體載重條件之簡稱，腹板標稱深度( $d$ )為 100、120、150 mm，試體標稱厚度( $t$ )為 1.0、1.5 及 2.0 mm，開孔直徑大小( $a$ )與腹板平坦部

分長度(h)之比值(a/h)為 0、0.2、0.4、0.6，開孔邊緣與支承墊邊緣距離(x)與腹板平坦部分長度(h)之比值(x/h)為 0、0.2、0.4、0.6，以上述參數作為試體編號之命名。試體編號，以四組不同的腹板標稱深度(d)與試體厚度(t)命名，分成試體 ETF-A、ETF-B、ETF-C、ETF-D 四個系列，再加上參數 a/h 及 x/h 之數值，完成試體編號命名。以下為四個不同試體系列之尺寸：

- (1) 試體 ETF-A 系列：腹板標稱深度(d)為 120 mm，試體厚度為 1.0 mm，開孔直徑大小(a)與腹板平坦部分長度(h)之比值(a/h)為 0.2、0.4、0.6，開孔邊緣與支承墊邊緣距離(x)與腹板平坦部分長度(h)之比值(x/h)為 0、0.2、0.4、0.6，共 13 支試體。
- (2) 試體 ETF-B 系列：腹板標稱深度(d)為 150 mm，試體厚度為 1.0 mm 開孔直徑大小與腹板平坦部分長度之比值(a/h)為 0.2、0.4、0.6，開孔邊緣與支承墊邊緣距離(x)與腹板平坦部分長度(h)之比值(x/h)為 0、0.4、0.6，共 10 支試體。
- (3) 試體 ETF-C 系列：腹板標稱深度(d)為 100 mm，試體厚度為 2.0 mm，開孔直徑大小(a)與腹板平坦部分長度(h)之比值(a/h)為 0.2、0.4、0.6，開孔邊緣與支承墊邊緣距離(x)與腹板平坦部分長度(h)之比值(x/h)為 0、0.2、0.4、0.6，共 13 支試體。
- (4) 試體 ETF-D 系列：腹板標稱深度(d)為 100 mm，試體厚度為 1.5 mm，開孔直徑大小(a)與腹板平坦部分長度(h)之比值(a/h)為 0.2、0.4、0.6，開孔邊緣與支承墊邊緣距離(x)與腹板平坦部分長度(h)之比值(x/h)為 0、0.2、0.4、0.6，共 13 支試體。

試體編號舉例，如：「ETF-A-a0.2x0.4」，表示腹板深度為 120mm、試體厚度為 1.0mm、開孔直徑大小與腹板平坦部分長度之比值(a/h)為 0.2、開孔邊緣距支承墊邊緣之距離與腹板平坦部分長度之比值(x/h)為 0.4。詳細各試體之尺寸如表 3.1 所示。

### 3.1.3 材料性質試驗

實驗試體之材料採用 SUS 304 型不鏽鋼，為沃斯田鐵系不鏽鋼(austenitic stainless steels)中的一種，是市面上最廣泛使用的不鏽鋼，耐腐蝕性和成型性佳，

無磁性， $870^{\circ}\text{C}$  以下可反覆加熱，廣泛的運用在日常生活中。

本實驗材料之降伏強度根據不同厚度試體並依照 CNS 規範設計拉力試片(1.0、1.5 及 2.0 mm)，降伏強度使用橫距法(offset method)取 0.2% offset 分別為 320.0、295.5、289.0 MPa，彈性模數( $E_s$ )分別為 160、130、144 GPa。圖 3.3 為拉力試片之設計圖，材料性質如圖 3.4 至圖 3.6 所示。

### 3.2 實驗儀器

為了研究試體腹板於集中載重下之變形量，故於上支承墊對角線兩端與荷重元等距離處架設兩支指針式位移計。指針式位移計總行程為 20 mm，位移計架設圖如圖 3.7 所示。

本實驗於明新科技大學土木實驗室進行，使用手動式油壓千斤頂控制荷載，並架設兩支指針式位移計於載重元兩側以量測載重元之位移。實驗進行中，載重行程進行至位移計行程之極限。在試體之斷面腹板外部之最有可能發生皺曲處，貼上單軸應變計，量測試體在實驗中之應變。

### 3.3 實驗流程

本實驗之試驗流程如下所述：

#### 1. 黏貼應變計於試體上：

在試體需黏貼應變計處畫上十字標記，先使用粗磨砂紙在十字中心磨出足夠黏貼應變計之面積，再使用細磨砂紙將此面積磨至平坦光滑，然後使用棉花棒沾少許丙酮將此處擦拭乾淨，等待丙酮揮發後將單軸應變計背面塗上 CYN 後準確黏貼於十字中心，並隔著玻璃紙輕壓應變計，等待約 20 秒後應變計固定於試體上即可放開，最後將應變計與快速接頭鋸接在一起，並等待鋸錫冷卻後以三用電表量測其電阻值到達應變計原廠規定值 120 歐姆即完成。

#### 2. 試體架設：

將下支承墊以兩支五吋 C 型夾固定在下方鋼梁上，再將試體依事前量測之位置擺置在下支承墊上，其後再將上支承墊置於試體之正上方，並找出試體與載重元之相對位置，使載重元平均施重在試體之上。

### **3. 架設位移計：**

將磁力座架設於適當位置，後將固定位移計於磁力座上。因試體左右不對稱，推測試體受載後會有輕微的旋轉，故選定上支承墊對角線位置，架設兩支指針式位移計，量取試體之腹板垂直變形，並將位移計與資料擷取器連接，擷取位移計資料。

### **4. 確認資料擷取：**

將應變計與位移計連接上資料擷取器後，在電腦上將每條對應的線路輸入對應的編號校對。調整各儀器的校正係數，再從電腦螢幕觀察資料擷取是否正常，最後將電腦讀數歸零即完成確認程序。

### **5. 試體加載：**

進行實驗前，按下程式命令鈕[REC]使電腦開始記錄實驗數值，然後以手動控制 20 頃荷重元稍微接觸至上支承墊，等待電腦開始擷取到載重值時，應力均勻分配至試體後，開始進行試體載重試驗。

### **6. 實驗終止條件：**

實驗將進行至位移計之極限行程(20 mm)，此時已經超過腹板皺曲強度最大值，且試體也已經降伏。

## 第四章 實驗結果與討論

### 4.1 實驗結果

本研究針對槽型斷面之冷軋不鏽鋼構件端點上下翼板承載的載重條件下，以四組不同的試體腹板高度與三組不同的試體厚度做組合，在相同的載重形式下進行實驗。本研究將對 49 支試體進行端點雙翼受載(End Two-Flange, ETF)載重條件之試體受載實驗，當得到試體之極限強度後，持續增加載重至位移計行程之極限(20 mm)後方才停止試驗。本實驗原規畫 49 支試體，但因廠商在試體加工中發生失誤，導致試體 ETF-C-a0.2x0.4 製作錯誤，故實驗實際上共進行 48 支試體。

觀察試體在受載過程中之整體行為及每支試體之腹板皺曲強度，了解冷軋不鏽鋼之腹板皺曲強度受設計參數  $a/h$ 、 $x/h$  之影響。

#### 4.1.1 試體行為



具腹板開孔之冷軋不鏽鋼皺曲強度主要由開孔直徑大小與腹板平坦部分長度之比值( $a/h$ )及開孔邊緣與支承墊之距離與腹板平坦部分長度之比值( $x/h$ )控制。 $a/h$  值越大，則皺曲強度越小。 $x/h$  值越大，則皺曲強度越大。

試體在受載其間，因上下翼板與支承墊間無固定關係，故上下加勁肢材會隨著載重增加而互相靠近，有部分試體之加勁肢材邊緣因而接觸，導致皺曲強度有短暫增加的狀況。試體最大皺摺多發生在腹板中央附近，並因試體斷面左右不對稱且上下翼板與支承墊無固定，故試體受載後會發生輕微旋轉的狀況。

#### 試體 ETF-A 系列

由表 4.1 可得知試體 ETF-A 系列之腹板皺曲強度及折減係數。實驗結果顯示，未開孔之試體 ETF-A-a0x0，腹板皺曲強度為 1.68 kN。

試體 ETF-A-a0.2x0、ETF-A-a0.2x0.2、ETF-A-a0.2x0.4、ETF-A-a0.2x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.2 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 1.28 kN、1.46 kN、1.49 kN、1.52 kN。

試體 ETF-A-a0.4x0、ETF-A-a0.4x0.2、ETF-A-a0.4x0.4、ETF-A-a0.4x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.4 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 1.20 kN、1.27 kN、1.27 kN、1.41 kN。

試體 ETF-A-a0.6x0、ETF-A-a0.6x0.2、ETF-A-a0.6x0.4、ETF-A-a0.6x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.6 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 0.974kN、1.00 kN、1.09 kN、1.24 kN。

其中，試體 ETF-A-a0x0 在加載過程中，因腹板變形量增加，上下加勁肢材會互相靠近進而接觸，導致腹板皺曲強度短暫增加，直到上下加勁肢材互相分離，腹板皺曲強度會因而驟降。

附錄 A 中圖 A.1 至圖 A.7 為試體 ETF-A 系列實驗終止後試體變形的情況。

### 試體 ETF-B 系列

由表 4.2 可得知試體 ETF-B 系列之腹板皺曲強度及折減係數。實驗結果顯示，未開孔之試體 ETF-B-a0x0，腹板皺曲強度為 1.54 kN。

試體 ETF-B-a0.2x0、ETF-B-a0.2x0.4、ETF-B-a0.2x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.2 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 1.31 kN、1.41 kN、1.43 kN。

試體 ETF-B-a0.4x0、ETF-B-a0.4x0.4、ETF-B-a0.4x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.4 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 1.08 kN、1.28 kN、1.32 kN。

試體 ETF-B-a0.6x0、ETF-B-a0.6x0.4、ETF-B-a0.6x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.6 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 0.91 kN、1.07 kN、1.23 kN。

附錄 A 中圖 A.8 至圖 A.14 為試體 ETF-B 系列實驗終止後試體變形的情況。

### 試體 ETF-C 系列

由表 4.3 可得知試體 ETF-C 系列之腹板皺曲強度及折減係數。實驗結果顯示，未開孔之試體 ETF-C-a0x0，腹板皺曲強度為 10.76 kN。

試體 ETF-C-a0.2x0、ETF-C-a0.2x0.2、ETF-C-a0.2x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.2

的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 9.61 kN、9.91 kN、10.36 kN。

試體 ETF-C-a0.4x0、ETF-C-a0.4x0.2、ETF-C-a0.4x0.4、ETF-C-a0.4x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.4 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 8.59 kN、9.11 kN、9.24 kN、9.54 kN。

試體 ETF-C-a0.6x0、ETF-C-a0.6x0.2、ETF-C-a0.6x0.4、ETF-C-a0.6x0.6 在參數  $a/h$  同為 0.6 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 7.45 kN、8.04 kN、8.57 kN、9.01 kN。

其中，試體 ETF-C-a0.2x0、ETF-C-a0.2x0.6、ETF-C-a0.4x0、ETF-C-a0.4x0.4、ETF-C-a0.6x0、ETF-C-a0.6x0.4、ETF-C-a0.6x0.6 這 7 支試體在加載過程中，因腹板變形量增加，上下加勁肢材會互相靠近進而接觸，導致腹板皺曲強度短暫增加，直到上下加勁肢材互相分離，腹板皺曲強度會因而驟降。而試體 ETF-C-a0.4x0 上下加勁肢材接觸後，在實驗結束前都無互相分離的情形。

附錄 A 圖 A.15 至圖 A.21 為試體 ETF-C 系列實驗終止後試體變形的情況。

#### 試體 ETF-D 系列



由表 4.4 可得知試體 ETF-D 系列之腹板皺曲強度及折減係數。實驗結果顯示，未開孔之試體 ETF-D-a0x0 時，腹板皺曲強度為 5.95 kN。

試體 ETF-D-a0.2x0、ETF-D-a0.2x0.2、ETF-D-a0.2x0.4、ETF-D-a0.2x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.2 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 5.42 kN、5.47 kN、5.64 kN、5.26 kN。其中，試體 ETF-D-a0.2x0.6 之腹板皺曲強度，明顯是不合理論的，推測是因為實驗中架設時位置不準確，導致誤差較大。

試體 ETF-D-a0.4x0、ETF-D-a0.4x0.2、ETF-D-a0.4x0.4、ETF-D-a0.4x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.4 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度分別為 4.80 kN、4.86 kN、5.08 kN、5.27 kN。

試體 ETF-D-a0.4x0、ETF-D-a0.4x0.2、ETF-D-a0.4x0.4、ETF-D-a0.4x0.6，在參數  $a/h$  同為 0.6 的狀況下，參數  $x/h$  分別為 0、0.2、0.4、0.6 時，腹板皺曲強度

分別為 4.16 kN、4.42 kN、4.79 kN、5.04 kN。

其中，試體 ETF-D-a0.2x0、ETF-D-a0.2x0.2、ETF-D-a0.2x0.4、ETF-D-a0.2x0.6、ETF-D-a0.4x0.6、ETF-D-a0.6x0、ETF-D-a0.6x0.2、ETF-D-a0.6x0.4 這 8 支試體在加載過程中，因腹板變形量增加，上下加勁肢材會互相靠近進而接觸，導致腹板皺曲強度短暫增加，直到上下加勁肢材互相分離，腹板皺曲強度會因而驟降。而試體 ETF-D-a0.2x0、ETF-D-a0.2x0.2 上下加勁肢材接觸後，在實驗結束前都無互相分離。

附錄 A 圖 A.22 至圖 A.28 為試體 ETF-D 系列實驗終止後試體變形的情況。

#### 4.1.2 試體載重-腹板變形曲線

圖 4.1 至圖 4.12 為試體載重-腹板變形關係圖，X 軸為腹板變形量，Y 軸為腹板載重。腹板變形量為兩支呈對角線架設之位移計資料平均值，腹板載重為荷重元所得之資料。

在載重-腹板變形關係圖中，可觀察到在載重施加的過程裡，一開始載重與變形呈現等比例的增加，當試體到達最大皺曲強度之後，試體強度會隨著腹板變形量增加而下降，而當腹板變形量達到約 10 mm-12 mm 時，腹板強度即維持在一個定值，直到實驗結束。

當腹板強度在下降的過程裡，有一些試體會有強度再增加的現象，主要原因為本實驗上下翼板與支承墊間無固定關係，故上下加勁肢材會因腹板變形量增加而互相靠近，進而有一些試體會有接觸的情形，導致腹板強度的增加，而當接觸的上下加勁肢材再因腹板變形量增加而互相分離時，腹板強度則會驟降。

#### 4.1.3 參數 $a/h$ 與 $x/h$ 對折減係數實驗值之影響

折減係數實驗值( $R_{test}$ )之計算為具腹板開孔的試體之實驗強度除以未開孔之試體強度。表 4.4 至表 4.7 為腹板皺曲強度實驗值與折減係數。

$$R_{test} = \frac{\text{具腹板開孔之試體皺曲強度}}{\text{未開孔之試體皺曲強度}} \quad (4.1)$$

本研究討論參數  $a/h$  與  $x/h$  對腹板皺曲強度的影響，參數  $a/h$  範圍為 0 至 0.6，參數  $x/h$  範圍為 0 至 0.6。圖 4.13 至圖 4.16 為各個試體  $R_{test}$  與參數  $a/h$  的關係圖，

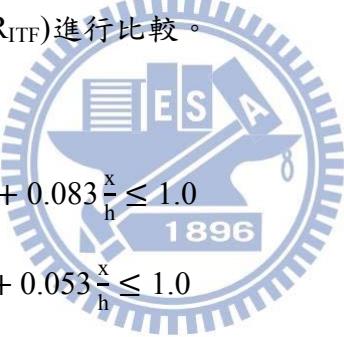
可以觀察出如預期的當參數  $x/h$  相同之下， $a/h$  愈大其皺曲強度是愈小的，符合實驗前之預測。圖 4.17 至圖 4.20 為各個試體  $R_{test}$  與參數  $x/h$  的關係圖，可以觀察出當參數  $a/h$  相同之下， $x/h$  愈大其皺曲強度是愈大的，符合實驗前之預測。

## 4.2 實驗結果與規範及參考文獻之比較

本節將就本實驗在載重條件為 ETF 下得出之各試體折減係數值與其他三種載重條件 EOF、IOF、ITF 之折減係數值進行比較。

因目前國內外相關規範僅規範 NAS 北美冷軋鋼解說有就具腹板開孔之冷軋鋼皺曲強度折減係數進行規範，但目前也只侷限於載重條件為 EOF 和 IOF，載重條件為 ETF 及 ITF 目前沒有相關的規範。故本實驗將以實驗結果在 ETF 載重條件下之腹板皺曲強度折減係數( $R_{test}$ )與規範 NAS 北美冷軋鋼解說在載重條件為 EOF 和 IOF 之折減係數( $R_{EOF}$ 、 $R_{IOF}$ )及參考文獻 Uzzaman et al. (2011)在 ITF 輽重下所提出之強度折減係數( $R_{ITF}$ )進行比較。

規範 NAS



$$R_{EOF} = 1.01 - 0.325 \frac{d_h}{h} + 0.083 \frac{x}{h} \leq 1.0 \quad (4.1)$$

$$R_{IOF} = 0.90 - 0.047 \frac{d_h}{h} + 0.053 \frac{x}{h} \leq 1.0 \quad (4.2)$$

公式 4.1、公式 4.2 分別為規範 NAS 對於載重條件為 EOF 及 IOF 具腹板開孔冷軋鋼皺曲強度折減係數之公式，由此兩公式可觀察出在載重條件為 EOF 時，參數  $d_h/h$  影響折減係數較  $x/h$  大，而在載重條件為 IOF 時，則是參數  $x/h$  影響折減係數較  $d_h/h$  大。

表 4.5 為本實驗之腹板皺曲強度折減係數( $R_{test}$ )與規範 NAS 之載重條件為 EOF 時之具腹板開孔之腹板皺曲強度折減係數( $R_{EOF}$ )的比值( $R_{test}/R_{EOF}$ )。其中平均值為 0.89，標準差為 0.07。可觀察出在規範 NAS 裡，載重條件 EOF 時之折減係數皆比本實驗之折減係數來的大，且在腹板細長比( $h/t$ )較大的試體 ETF-A 系列與試體 ETF-B 系列中，當  $a/h$  為 0.6， $x/h$  為 0 時，誤差高達 32%，故此折減係數  $R_{EOF}$  與本實驗結果不相符。

表 4.6 為本實驗之腹板皺曲強度折減係數( $R_{test}$ )與規範 NAS 之載重條件為

IOF 時之具腹板開孔腹板皺曲強度折減係數( $R_{IOF}$ )的比值( $R_{test}/R_{IOF}$ )。其中平均值為 0.90，標準差為 0.10。可觀察出在規範 NAS 中載重條件為 IOF 時之折減係數大多較本實驗之折減係數來的大，且同樣在腹板細長比( $h/t$ )較大的試體 ETF-A 系列與試體 ETF-B 系列中，當  $a/h$  為 0.6， $x/h$  為 0 時，誤差高達 37%，故此折減係數  $R_{IOF}$  與本實驗結果不相符。

**參考文獻** Uzzaman et al. (2011)

$$R_{ITF} = 1.04 - 0.68 \frac{a}{h} + 0.021 \frac{x}{h} \leq 1 \quad (4.3)$$

公式 4.1 為參考文獻 Uzzaman et al. (2011)，在載重條件為 ITF 下，且斷面翼板與支承墊無固定關係，所提出之具腹板開孔冷軋不鏽鋼腹板皺曲強度折減係數公式。由公式 4.1 中可發現影響折減係數最大的原因為參數  $a/h$ ，其次為參數  $x/h$ 。

表 4.7 為本實驗之腹板皺曲強度折減係數實驗值( $R_{test}$ )與參考文獻 Uzzaman et al. (2011)提出之折減係數( $R_{ITF}$ )之比值。其中平均值為 1.05，標準差為 0.11。

圖 4.21 為  $R_{test}/R_{ITF}$  與參數  $x/h$  關係圖，可以觀察出在  $x/h$  為 0.4、0.6 時，本實驗之折減係數實驗值大多是較參考文獻提出之折減係數來的大，且誤差是明顯過大的，故參考文獻 Uzzaman et al. (2011)提出之折減係數與本實驗是不相符的。

### 4.3 折減係數建議值

與規範及參考文獻比較之後，可以發現具開孔之冷軋鋼之腹板皺曲強度折減係數與載重條件有很大的關係。根據實驗結果，如預期的當腹板開孔直徑減小、腹板開孔與支承墊距離增大時，腹板皺曲強度將會增大。因此本研究依據實驗之結果以多元線性迴歸分析之方法，提出在載重條件為 ETF 下之腹板皺曲強度折減係數建議值( $R_p$ )：

$$R_p = 0.93 - 0.44 \frac{a}{h} + 0.19 \frac{x}{h} \leq 1 \quad (4.4)$$

此折減係數公式限制條件為載重條件為 ETF，腹板細長比  $h/t$  範圍 50 到 150， $a/h$  範圍為 0 到 0.6， $x/h$  範圍為 0 到 0.6，斷面上下翼板與支承墊間無固定。

由本實驗提出之折減係數建議值公式中，可以發現在本研究中參數  $a/h$  對折減係數的影響是最大的，其次為參數  $x/h$ 。

#### 4.4 折減係數建議值與實驗值之比較

表 4.8 為本實驗各試體折減係數實驗值( $R_{test}$ )與根據實驗結果提出之折減係數( $R_p$ )之比值。圖 4.22 為  $R_{test}/R_p$  與參數( $x/h$ )之關係圖，可以觀察到當  $x/h$  越大，即開孔與支承墊越遠時，實驗值與建議值之誤差會越小，誤差值約 10% 以內。反之，開孔與支承墊距離越接近時，實驗值與建議值之誤差越大。

圖 4.23 為  $R_{test}/R_p$  與參數( $a/h$ )之關係圖，可以觀察到當  $a/h$  為 0.2、0.4 時，折減係數實驗值與建議值之誤差約在 8% 以內。反之，開孔直徑大小  $a/h$  為 0.6 時，實驗值與建議值之誤差則較大。

圖 4.24 為  $R_{test}/R_p$  與腹板長細比( $h/t$ )之關係圖，可以觀察到當腹板長細比( $h/t$ )越小，即腹板深度越小或是試體厚度越大時，折減係數實驗值與建議值之誤差會越小。另外在腹板細長比為 50 和 66.7 的兩組試體中，腹板皺曲強度的實驗值大多比提出係數之建議值來的大。

表 4.9 為折減係數實驗值與建議值之比值( $R_{test}/R_p$ )的可靠度分析，由可靠度分析結果可以觀察到，本研究  $R_{test}/R_p$  可靠度指數為 2.72，符合規範 NAS 可靠度指數的建議( $\beta \geq 2.5$ )，顯示本研究提出之折減係數建議值是值得信賴的。

#### 4.5 結語

觀察本實驗 48 支試體之實驗結果，並與規範和參考文獻比較之後，可以發現具腹板開孔之冷軋不鏽鋼皺曲強度，在四個不同載重下皆有不同的折減係數，本實驗提出的折減係數可預測出具腹板開孔冷軋不鏽鋼在 ETF 載重下之皺曲強度折減係數。

依據本實驗之實驗直與提出之折減係數比較之後，可發現當腹板開孔距離支承墊越接近時，其腹板皺曲強度是較難預測的，反之，開孔距離支承墊越遠，其腹板皺曲強度是容易預測的。而當腹板細長比較大時，其腹板皺曲強度是相較容易預測的。而當腹板開孔越小，其腹板皺曲強度是越容易預測的。故當冷軋不鏽鋼必需進行開孔時，開孔位置避免過於靠近載重端，開孔直徑大小避免過大，斷面腹板避免過深或厚度避免過小。

# 第五章 有限元素分析

## 5.1 前言

有限元素分析軟體不斷演進，提供研究人員有效率的分析工具。有限元素分析方法在現今各個領域中被廣泛使用，包含土木工程、汽車工業、船舶工業、航空航天、電子領域、醫療領域……等領域，透過一些假設條件模擬現實的物質屬性，使得分析結果將變得更加真實，因此本研究將以有限元素分析方法相互驗證實驗試體之行為。

有限元素分析模型選擇實驗試體中 ETF-A 系列之 13 組試體進行分析，建立試體實尺寸模型，材料性質採用試體進行之拉力試驗的結果，並將其分析結果與試體實驗結果進行比較，相互驗證準確性。

## 5.2 有限元素分析程序與步驟

1. 創建三維模型：有限元素分析模型的建立，依照試體實尺寸建立。利用分析軟體之[Part]功能模組，建立各個試體分析模型及上、下支承墊，。
2. 定義裝配件：接著利用分析軟體中之[Assembly]功能模組，將各個構件(槽型不鏽鋼試體、上、下支承墊)進行組裝，上支承墊和下支承墊分別對齊試體上、下翼板之中心。
3. 設置分析步：各部件經組裝完成模型後，接續進行分析軟體之[Step]功能模組，於此階段定義分析類型，並考慮幾何非線性，並選擇欲擷取之分析輸出資料。
4. 定義接觸關係：在分析軟體之[Interaction]功能模組中，設定分析模型與上、下支承墊的接觸關係，本實驗試體與上、下支承墊無固定關係，故僅設定試體槽型斷面與上、下支承墊接觸的部分以面面接觸(Surface-to-surface contact)將接觸部分設定為硬接觸關係，主要接觸面選擇較硬的面，即為上、下支承墊，可防止從屬接觸面(試體)穿透主要接觸面(支承墊)。

5. 定義荷載與邊界條件：在分析軟體之[Load]功能模組中，依照實驗設置建立分析模型之邊界條件，本實驗試體於端點受上、下翼板受到集中載重作用，故以位移控制上支承墊之行程來模擬試體受載方式。
6. 建立網格：在分析軟體中之[Mesh]功能模組中，依照參考文獻建議之網格大小劃分各個分析構件之網格。
7. 提交分析作業：在分析軟體中之[Job]功能模組中，選擇全分析(Full analysis)，即可提交分析作業。
8. 後處理：完成分析後，在分析軟體之[Visualization]功能模組中，可擷取模型分析完成後之輸出資料，並了解分析模型變形、應力、應變之狀況。

### 5.3 有限元素分析

#### 5.3.1 分析基本假設

基於分析軟體功能及計算上的限制，分析模型由以下假設分析之：

1. 上支承墊在加載過程中，完全對稱於試體中心。
2. 分析模型與支承墊間無滑動關係。
3. 冷軋不鏽鋼成型後無殘留應力。
4. 試體上下對稱，厚度與各轉角半徑皆相同。

#### 5.3.2 分析模型與分析元素性質

分析模型主要以實際結構體之外觀形狀，建立實尺寸之模型。分析軟體模擬物理結構是根據節點和有限元素而定義的。每一個元素都代表結構體中的離散部份，聚集許多相鄰元素即成一結構體，元素間由共同節點相互連結，故所屬元素和節點坐標即構成幾何形狀。

本研究槽型斷面試體之分析模型元素採用三維結構物殼元素(S4R)模擬實驗不鏽鋼試體，殼元素中每元素有 4 個節點，每節點中共有 6 個自由度，為 3 個移動自由度(UX、UY、UZ)與 3 個轉動自由度(URX、URY、URZ)，並利用減積分運算法則，圖 5.1 為分析模型殼元素示意圖。上、下之支承墊之分析模型元素採

三維實體元素(Solid)模擬，圖 5.2 為分析模型各構件示意圖。

考慮實驗試體在製作時，因為切割、彎折、腹板開孔等製造誤差，故在分析時將實驗試體之腹板表面不平整性(Imperfection)列入考慮。本研究實驗試體腹板表面不平整指數( $I$ )定義為腹板中心水平偏移程度( $e$ )與腹板深度( $d$ )之比值，圖 5.3 為腹板表面不平整性示意圖。各個分析模型腹板表面不平整性指數，依照腹板開孔直徑大小設定；開孔越大，腹板表面不平整指數則越大。

### 5.3.3 材料性質

分析模型之材料性質與實驗試體相同，降伏強度依據實驗試體拉力試片結果設定：

1. 第一階段：在分析模型彈性範圍內，彈性模數(Elastic Modulus,  $E_S$ )依據實驗試體進行之拉力試驗的實際數據。
2. 第二階段：依照拉力試驗的實際數據設定材料降伏和應變硬化的情形。
3. 第三階段：完全塑性行為。

分析模型之不鏽鋼材應力-應變曲線三階段示意圖如圖 5.4 所示。



### 5.3.4 接觸條件與邊界條件

模擬實驗試體與上下支承墊接觸行為，於分析中採用面面接觸(Surface to surface contact)方法，分析中為了防止分析模型於變形後互相穿透而造成誤差，此接觸行為需定義主要接觸面(Master surface)與附屬接觸面(Slave surface)之關係，主要接觸面應選擇材料性質較硬或網格密度較低的面，附屬接觸面則應選擇材料性質較軟或網格密度較高的面。本研究分析模型設定上、下支承墊接觸面為主要接觸面，不鏽鋼試體分析模型上、下翼板接觸面為附屬接觸面。接觸面間，假設試體分析模型不發生滑動。

分析模型邊界條件設定中，上支承墊以位移控制的方式，進行向下單方向加載於試體，下支承墊以束制節點的方式，限制 X、Y、Z 三個方向的位移和轉動。圖 5.5 為分析模型邊界條件設定示意圖。

### 5.3.5 模型網格

分析中選擇適當的網格尺寸，將使分析結果更為準確。本研究分析模型網格的建立，參考文獻 Ren 等人(2006)建議試體平坦部分之網格尺寸為  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  至  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ，斷面角隅處之網格數目為 3 個元素網格及文獻 Zhou and Young (2006)建議試體平坦部分之網格尺寸為  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  至  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ，斷面角隅處之網格數目為 6 個元素網格。考慮分析之時間與準確度，本研究分析模型平坦部分採用網格尺寸大小為  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ；斷面角隅處之網格劃分依照收斂性分析之結果，當網格數目大於 16 時，分析結果會趨於一致，故本研究分析模型斷面角隅處劃分為 16 個網格，圖 5.6 為本研究有限元素分析之模型網格。

## 5.4 行為指標

### 5.4.1 Von Mises 應力

Von Mises 應力是由最大扭曲能量準則(Distortional Energy Density Criterion)推倒而來，藉由 Von Mises 降伏準則能夠瞭解局部位置的應力降伏狀況與降伏區域的發展，在多軸應力下 Von Mises 應力定義為：

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5.1)$$

其中， $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 為主軸應力(Principal stress)。

### 5.4.2 等值塑性應變指數(PEEQ)

當分析模型在非線性階段或塑性階段時，僅以 Von Mises 應力恐怕無法有效表示分析模型之降伏情形與變異處，故本研究採用等值塑性應變(Plastic Equivalent Strain, PEEQ)評估分析模型在非線性階段時之應變需求。

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}} \quad (5.2)$$

其中， $\varepsilon_{ij}$ 為 i 與 j 方向之塑性應變；當 PEEQ 越大時，表示該處有較大塑性應變需求。

## 5.5 分析結果與討論

圖 5.7 至圖 5.19 分別為分析與實驗之載重-位移曲線，圖 5.20 至圖 5.32 分別為模型分析變形與試體實驗變形，圖 5.33 到圖 5.45 分別為分析模型於位移控制 10 mm 時之應力分佈圖，圖 5.46 至圖 5.58 分別為分析模型於位移控制 10 mm 時之等值塑性應變分佈圖，表 5.1 為實驗與分析之腹板皺曲強度比較表。

### 5.5.1 分析與實驗結果比較

試體之整體反應乃以具冷軋不鏽鋼槽型斷面分析模型之載重一位移關係圖來表示。觀察圖 5.7 至圖 5.19，可以發現分析與實驗結果之載重一位移曲線，趨勢上大致可以吻合，惟有勁度和皺曲強度最大值較實驗值來的略大，推測其原因為分析模型中假設分析試體與上、下翼板接觸面，不產生滑動，但在實際實驗過程中，因上、下支承墊與實驗試體翼板間無固定關係，故在加載過程中實驗試體可能會有輕微的滑動與轉動。另外，因為試體槽型斷面可能有左右不對稱的情況，且上支承墊與實驗試體翼板間無固定，故上支承墊在實驗加載過程中，推測會發生輕微旋轉。觀察表 5.1 實驗與分析之腹板皺曲強度，可以得知皺曲強度分析結果與實驗值之間誤差約在 5% 以內，由圖 5.20 至圖 5.32 分析模型與試體實驗變形圖，可觀察到分析模型與實驗試體之腹板皺曲位置、腹板皺曲變形程度、腹板皺曲範圍皆十分相似。

經由上述各結果顯示，採有限元素所建立之分析模型於試體腹板、試體變形程度及腹板皺曲位置可有效模擬，在皺曲極限強度中，當  $a/h$  為 0.2、0.4、0.6 亦可準確預測。

### 5.5.2 分析結果

觀察圖 5.33 到圖 5.45 分別為分析結果之應力分佈圖，可以得知在腹板皺曲程度最大的位置，也就是腹板中央處，有最明顯的應力分佈，因試體上下對稱的關係，大致呈現上下對稱的應力分佈關係。而具腹板開孔的分析模型，其應力分佈亦以腹板中央處最明顯，且圓形開孔周圍有較明顯的應力分佈。

觀察圖 5.46 至圖 5.58 分別為分析結果之等值塑性應變分佈圖，可以得知上支承墊下方的腹板中央處有最大的等值塑性應變(PEEQ)，與支承墊的距離越遠，

其 PEEQ 值越不明顯。

由上述應力分佈和等值塑性應變分佈之行為，可驗證有限元素分析對於試體破壞模式可有效率的預測。

### 5.5.3 試體不平整性之影響

本研究有限元素分析模型，將實驗試體製作時因切割、開孔.....等製造誤差所造成之試體腹板不平整性(Imperfection)列入考慮。分析結果顯示，針對不同的開孔直徑大小分別設定不同的試體不平整性指數，將準確的預測具腹板開孔之冷軋不鏽鋼槽型斷面之強度與行為。本研究分析模型之試體不平整性指數設定值如下所述：

- (1) 當腹板開孔直徑大小(a)與腹板平坦部分長度(h)的比值( $a/h$ )為 0.2 時，將試體不平整性指數設定為 0.01，分析結果與實驗結果將最為接近。
- (2) 當腹板開孔直徑大小(a)與腹板平坦部分長度(h)的比值( $a/h$ )為 0.4 時，將試體不平整性指數設定為 0.013，分析結果與實驗結果將最為接近。
- (3) 當腹板開孔直徑大小(a)與腹板平坦部分長度(h)的比值( $a/h$ )為 0.6 時，將試體不平整性指數設定為 0.02，分析結果與實驗結果將最為接近。

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

本研究探討具腹板開孔之冷軋不鏽鋼槽型斷面在載重條件 ETF 下之腹板皺曲強度，共進行 48 支試體載重試驗，並以有限元素分析互相驗證實驗之行為。開孔直徑大小分別為 0.2、0.4、0.6 倍腹板平坦部分長度，開孔位置分別距離支承墊邊緣 0、0.2、0.4、0.6 倍腹板平坦部分長度。實驗結果與北美洲 NAS 設計規範及參考文獻 Uzzaman et al. (2011) 之折減係數比較，且依據實驗結果提出具腹板開孔冷軋不鏽鋼之腹板皺曲強度折減係數，綜合以上各章節的資料，提出以下研究結論：

1. 載重條件影響具腹板開孔之冷軋不鏽鋼皺曲強度折減係數甚大，故不同載重條件下之折減係數是有相當程度的差異。
2. 實驗結果顯示，腹板細長比越小之試體，其皺曲強度折減係數是可以準確預測的。當試體腹板細長比小於 66.7，本實驗之折減係數預測公式，可較準確的預測其折減係數，誤差在 8% 以內。
3. 實驗結果發現，冷軋不鏽鋼因使用需要欲進行腹板開孔時，建議盡可能避免開孔距離支承墊過於接近，因開孔與支承墊越接近，其折減係數與預測值誤差愈大。尤其在腹板細長比大於 120 的試體中，開孔愈接近支承墊，其折減係數是較難預測的。
4. 槽型斷面之試體，部分試體之加勁肢材會在受載後，互相接觸造成皺曲強度短暫增加的現象，此現象是無法預測的。故此短暫增加之皺曲強度，不應列入冷軋不鏽鋼之設計強度。
5. 有限元素分析可準確預測實驗試體破壞行為和皺曲強度，當試體因製作造成試體不平整性之誤差，需將其誤差列入考慮，方能準確預測。

## 6.2 建議

根據本實驗之實驗過程與結果，提出下列幾點建議未來可研究之方向，使皺曲強度折減係數更趨完善。建議如下所示：

1. 本研究 48 支試體之腹板細長比( $h/t$ )分別為 50、66.7、120、150，未來可試著以不同腹板細長比之研究，使折減係數預測公式更為準確。
2. 本研究試體受載時，上下翼板與支承墊間無固定，未來可研究受載重時上下翼板與支承墊間有固定之試體行為，與本研究比較其中差異。
3. 本研究採用具腹板開孔冷軋不鏽鋼槽型斷面在載重條件 ETF 下之試體行為，未來可以不同之載重條件、非圓形孔之開孔、不同型式斷面進行研究，探討其試體行為。
4. 目前國內外研究具腹板開孔之冷軋鋼腹板皺曲強度，所有的開孔皆位於腹板高度正中央，未來可研究非腹板正中央之開孔，探討其試體行為。



## 參考文獻

- ASCE. (2002). "Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members." American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE-8-02, Reston, Va.
- ASCE, (2005). "Minimum design loads for buildings and other structures." New York: American Society of Civil Engineers Standard.
- Avci, O., Easterling, W. S. (2004). "Web crippling strength of steel deck subjected to end one flange loading." Journal of Structural Engineering, 130(5), 697-707.
- Carden, P. L., Pekcan, G., Itani, A. M. (2007). "Web yielding, crippling, and lateral buckling under post loading." Journal of Structural Engineering, 133(5), 665-673.
- Korvink, S. A., and van den Berg, G. J. (1994). "Web crippling of stainless steel cold-formed beams." Proc., 12th Int. Specialty Conf. on Cold-Formed Steel Structures, University of Missouri-Rolla, St. Louis, 551–569.
- Korvink, S. A., van den Berg, G. J., van der Merwe, P. (1995). "Web crippling of stainless steel cold-formed beams." Journal Constructional Steel Research, 34(2-3), 225–248.
- LaBoube RA., Yu WW., Deshmukh SU., Uphoff CA. (1999). "Crippling capacity of web elements with openings." Journal of Structural Engineering., 125:137–41.
- Langan JE., LaBoube RA., Yu WW. (1994). "Structural behavior of perforated web elements of cold-formed steel flexural members subjected to web crippling and a combination of web crippling and bending." Final report, Civil Engineering Series 94-3, Cold-Formed Steel Series, Rolla, MO: University of Missouri- Rolla., 1994.
- Macdonald, M., Heiyantuduwa Don, M.A., Kotelko, M., Rhodes., J. (2011) "Web crippling behaviour of thin-walled lipped channel beams." Thin-Walled Structures, 49, 682-690.
- NAS. (2001). Commentary on North American Specification for the design of cold-formed steel structural members, North American Cold-Formed Steel Specification, American Iron and Steel Institute, Washington, D.C.

- NAS. (2007). "North American Specification for the design of cold-formed steel structural members." AISI S100-2007, AISI Standard. American Iron and Steel Institute.
- Ren, W. X., Fang, S. E., Young, B. (2006). "Finite-element simulation and design of cold-formed steel channels subjected to web crippling." *Journal of Structural Engineering*, 132(12), 1967-1975.
- Santaputra, C., Parks, M. B., Yu, W. W. (1989). "Web-crippling strength of cold-formed steel beams." *Journal of Structural Engineering*, 115(10), 2511-2527.
- Sivakumaran, KS., Zielonka, KM. (1989). "Web crippling strength of thin-walled steel members with web opening." *Thin-Walled Structures.*, 8:295–319.
- Uzzaman, A., Lim, J., Nash, D., Rhodes, J., Young, B. (2012). "Web crippling behaviour of cold-formed steel channel sections with offset web holes subjected to interior-two-flange loading." *Thin-walled Structures.*, 50, 76-86.
- Young, B., Hancock, G. J. (1999). "Design of cold-formed unlipped channels subjected to web crippling." Research Rep. No. R794, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sydney, Sydney, Australia.
- Young, B., Hancock, G. J. (2001). "Design of cold-formed channels subjected to web crippling." *Journal of Structural Engineering*, 127(10), 1137-1144.
- Young, B., Lui, W. M. (2006). "Tests of cold-formed high strength stainless steel compression members." *Thin-Walled Structures*, 44(2), 224-234.
- Young, B. (2008). "Experimental and numerical investigation of high strength stainless steel structures." *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1225-1230.
- Yu, WW., Davis, CS. (1973). "Cold-formed steel members with perforated elements." *Journal of the Structural Division.*, 99:2061–77.
- Zhou, F., Young, B. (2005). "Tests of cold-formed stainless steel tubular flexural members." *Thin-Walled Structures*, 43(9), 1325-1332.
- Zhou, F., Young, B. (2005). "Yield line mechanism analysis on web crippling of cold-formed stainless steel tubular sections under two-flange loading." *Engineering Structures*, 28(6), 880-892.

- Zhou, F., Young, B. (2006). "Cold-formed stainless steel sections subjected to web crippling." *Journal of Structural Engineering*, 132(1), 134-144.
- Zhou, F., Young, B. (2007). "Experimental and numerical investigations of cold-formed stainless steel tubular sections subjected to concentrated bearing load." *Journal of Constructional Steel Research*, 63(11), 1452-1466.
- Zhou, F., Young, B. (2010). "Web crippling of aluminium tubes with perforated webs." *Engineering Structures*, 32(5), 1397-1410.
- 內政部營建署(2004)，「冷軋型剛構造建築物結構設計規範及解說」。
- 顏嘉德(2011)，「冷軋型不鏽鋼梁腹板皺曲強度分析-以 EOF 載重為例」。明新科  
技大學營建工程與管理研究所論文，林新華指導。
- 王士庭(2012)，「冷軋不鏽鋼帽型斷面腹板之皺曲強度」。國立交通大學土木工程  
學系碩士班論文，陳誠直指導。

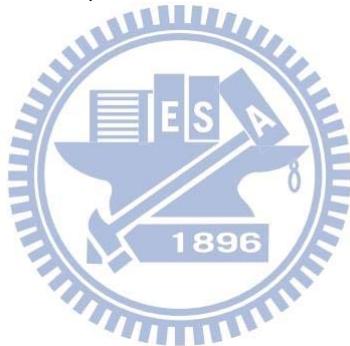


表 3.1 實驗試體尺寸

試體編號	厚度 t	轉角 R	腹板	腹板平坦部份	a/h	x/h	試體 長度 L
			高度 d	高度 h			
ETF-A-a0x0	1	2	120	114	0	0	230
ETF-A-a0.2x0	1	2	120	114	0.2	0	230
ETF-A-a0.2x0.2	1	2	120	114	0.2	0.2	230
ETF-A-a0.2x0.4	1	2	120	114	0.2	0.4	230
ETF-A-a0.2x0.6	1	2	120	114	0.2	0.6	230
ETF-A-a0.4x0	1	2	120	114	0.4	0	230
ETF-A-a0.4x0.2	1	2	120	114	0.4	0.2	230
ETF-A-a0.4x0.4	1	2	120	114	0.4	0.4	230
ETF-A-a0.4x0.6	1	2	120	114	0.4	0.6	230
ETF-A-a0.6x0	1	2	120	114	0.4	0	230
ETF-A-a0.6x0.2	1	2	120	114	0.4	0.2	230
ETF-A-a0.6x0.4	1	2	120	114	0.4	0.4	230
ETF-A-a0.6x0.6	1	2	120	114	0.4	0.6	230
ETF-B-a0x0	1	2	150	144	0	0	275
ETF-B-a0.2x0	1	2	150	144	0.2	0	275
ETF-B-a0.2x0.4	1	2	150	144	0.2	0.4	275
ETF-B-a0.2x0.6	1	2	150	144	0.2	0.6	275
ETF-B-a0.4x0	1	2	150	144	0.4	0	275
ETF-B-a0.4x0.4	1	2	150	144	0.4	0.4	275
ETF-B-a0.4x0.6	1	2	150	144	0.4	0.6	275
ETF-B-a0.6x0	1	2	150	144	0.6	0	275
ETF-B-a0.6x0.4	1	2	150	144	0.6	0.4	275
ETF-B-a0.6x0.6	1	2	150	144	0.6	0.6	275

單位:mm

表 3.1 實驗試體尺寸(續)

試體編號	厚度	轉角	腹板	腹板平坦部份	a/h	x/h	試體 長度
			d	高度			
ETF-C-a0x0	2	2	100	92	0	0	200
ETF-C-a0.2x0	2	2	100	92	0.2	0	200
ETF-C-a0.2x0.2	2	2	100	92	0.2	0.2	200
ETF-C-a0.2x0.4	2	2	100	92	0.2	0.4	200
ETF-C-a0.2x0.6	2	2	100	92	0.2	0.6	200
ETF-C-a0.4x0	2	2	100	92	0.4	0	200
ETF-C-a0.4x0.2	2	2	100	92	0.4	0.2	200
ETF-C-a0.4x0.4	2	2	100	92	0.4	0.4	200
ETF-C-a0.4x0.6	2	2	100	92	0.4	0.6	200
ETF-C-a0.6x0	2	2	100	92	0.6	0	200
ETF-C-a0.6x0.2	2	2	100	92	0.6	0.2	200
ETF-C-a0.6x0.4	2	2	100	92	0.6	0.4	200
ETF-C-a0.6x0.6	2	2	100	92	0.6	0.6	200
ETF-D-a0x0	1.5	2	100	93	0	0	200
ETF-D-a0.2x0	1.5	2	100	93	0.2	0	200
ETF-D-a0.2x0.2	1.5	2	100	93	0.2	0.2	200
ETF-D-a0.2x0.4	1.5	2	100	93	0.2	0.4	200
ETF-D-a0.2x0.6	1.5	2	100	93	0.2	0.6	200
ETF-D-a0.4x0	1.5	2	100	93	0.4	0	200
ETF-D-a0.4x0.2	1.5	2	100	93	0.4	0.2	200
ETF-D-a0.4x0.4	1.5	2	100	93	0.4	0.4	200
ETF-D-a0.4x0.6	1.5	2	100	93	0.4	0.6	200
ETF-D-a0.6x0	1.5	2	100	93	0.6	0	200
ETF-D-a0.6x0.2	1.5	2	100	93	0.6	0.2	200
ETF-D-a0.6x0.4	1.5	2	100	93	0.6	0.4	200
ETF-D-a0.6x0.6	1.5	2	100	93	0.6	0.6	200

單位:mm

表 4.1 試體 ETF-A 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數

試體編號	試體腹板皺曲強度(kN)	折減係數
ETF-A-a0x0	1.68	—
ETF-A-a0.2x0	1.28	0.76
ETF-A-a0.2x0.2	1.46	0.87
ETF-A-a0.2x0.4	1.49	0.89
ETF-A-a0.2x0.6	1.52	0.90
ETF-A-a0.4x0	1.20	0.71
ETF-A-a0.4x0.2	1.27	0.76
ETF-A-a0.4x0.4	1.27	0.76
ETF-A-a0.4x0.6	1.41	0.84
ETF-A-a0.6x0	0.94	0.56
ETF-A-a0.6x0.2	1.00	0.60
ETF-A-a0.6x0.4	1.09	0.65
ETF-A-a0.6x0.6	1.24	0.74

表 4.2 試體 ETF-B 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數

試體編號	試體腹板皺曲強度(kN)	折減係數
ETF-B-a0x0	1.54	—
ETF-B-a0.2x0	1.31	0.85
ETF-B-a0.2x0.4	1.41	0.92
ETF-B-a0.2x0.6	1.43	0.93
ETF-B-a0.4x0	1.08	0.70
ETF-B-a0.4x0.4	1.28	0.83
ETF-B-a0.4x0.6	1.32	0.86
ETF-B-a0.6x0	0.91	0.59
ETF-B-a0.6x0.4	1.07	0.69
ETF-B-a0.6x0.6	1.23	0.80

表 4.3 試體 ETF-C 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數

試體編號	試體腹板皺曲強度(kN)	折減係數
ETF-C-a0x0	10.76	—
ETF-C-a0.2x0	9.61	0.89
ETF-C-a0.2x0.2	9.91	0.92
ETF-C-a0.2x0.4	—	—
ETF-C-a0.2x0.6	10.36	0.96
ETF-C-a0.4x0	8.59	0.80
ETF-C-a0.4x0.2	9.11	0.85
ETF-C-a0.4x0.4	9.24	0.86
ETF-C-a0.4x0.6	9.54	0.89
ETF-C-a0.6x0	7.45	0.69
ETF-C-a0.6x0.2	8.04	0.75
ETF-C-a0.6x0.4	8.57	0.80
ETF-C-a0.6x0.6	9.01	0.84

表 4.4 試體 ETF-D 系列腹板皺曲強度實驗值與折減係數

試體編號	試體腹板皺曲強度(kN)	折減係數
ETF-D-a0x0	5.95	—
ETF-D-a0.2x0	5.42	0.91
ETF-D-a0.2x0.2	5.47	0.92
ETF-D-a0.2x0.4	5.64	0.95
ETF-D-a0.2x0.6	5.26	0.88
ETF-D-a0.4x0	4.80	0.81
ETF-D-a0.4x0.2	4.86	0.82
ETF-D-a0.4x0.4	5.08	0.85
ETF-D-a0.4x0.6	5.27	0.89
ETF-D-a0.6x0	4.16	0.70
ETF-D-a0.6x0.2	4.42	0.74
ETF-D-a0.6x0.4	4.79	0.81
ETF-D-a0.6x0.6	5.04	0.85

表 4.5  $R_{\text{test}}$  與  $R_{\text{EOF}}$  比值

$a/h$	$x/h$	$R_{\text{EOF}}$	$R_{\text{test}}/R_{\text{EOF}}$			
			ETF-A	ETF-B	ETF-C	ETF-D
0.2	0	0.95	0.80	0.90	0.95	0.96
0.2	0.2	0.96	0.91	—	0.96	0.96
0.2	0.4	0.98	0.91	0.94	—	0.97
0.2	0.6	0.99	0.91	0.93	0.97	0.89
0.4	0	0.88	0.81	0.80	0.91	0.92
0.4	0.2	0.90	0.84	—	0.94	0.91
0.4	0.4	0.91	0.83	0.91	0.94	0.93
0.4	0.6	0.93	0.90	0.92	0.95	0.95
0.6	0	0.82	0.68	0.73	0.85	0.86
0.6	0.2	0.83	0.72	—	0.90	0.89
0.6	0.4	0.85	0.76	0.82	0.94	0.95
0.6	0.6	0.86	0.86	0.92	0.97	0.98

 $R_{\text{test}}/R_{\text{EOF}}$  標準差=0.07，平均數 0.89表 4.6  $R_{\text{test}}$  與  $R_{\text{IOF}}$  比值

$a/h$	$x/h$	$R_{\text{IOF}}$	$R_{\text{test}}/R_{\text{IOF}}$			
			ETF-A	ETF-B	ETF-C	ETF-D
0.2	0	0.89	0.86	0.96	1.00	1.02
0.2	0.2	0.90	0.97	—	1.02	1.02
0.2	0.4	0.91	0.97	1.00	—	1.04
0.2	0.6	0.92	0.98	1.01	1.04	0.96
0.4	0	0.88	0.81	0.80	0.91	0.92
0.4	0.2	0.89	0.85	—	0.95	0.92
0.4	0.4	0.90	0.84	0.92	0.95	0.95
0.4	0.6	0.91	0.92	0.94	0.97	0.97
0.6	0	0.87	0.64	0.68	0.79	0.80
0.6	0.2	0.88	0.68	—	0.85	0.84
0.6	0.4	0.89	0.73	0.78	0.89	0.90
0.6	0.6	0.90	0.82	0.88	0.93	0.94

 $R_{\text{test}}/R_{\text{IOF}}$  標準差=0.10，平均數 0.90

表 4.7  $R_{\text{test}}$  與  $R_{\text{ITF}}$  比值

$a/h$	$x/h$	$R_{\text{ITF}}$	$R_{\text{test}}/R_{\text{ITF}}$			
			ETF-A	ETF-B	ETF-C	ETF-D
0.2	0	0.90	0.85	0.94	0.99	1.01
0.2	0.2	0.91	0.95	—	1.01	1.01
0.2	0.4	0.91	0.97	1.00	—	1.04
0.2	0.6	0.92	0.98	1.01	1.05	0.96
0.4	0	0.77	0.93	0.91	1.04	1.05
0.4	0.2	0.77	0.98	—	1.10	1.06
0.4	0.4	0.78	0.97	1.07	1.10	1.10
0.4	0.6	0.78	1.08	1.10	1.13	1.13
0.6	0	0.63	0.89	0.93	1.10	1.11
0.6	0.2	0.64	0.93	—	1.17	1.17
0.6	0.4	0.64	1.01	1.08	1.24	1.26
0.6	0.6	0.65	1.14	1.24	1.30	1.31

$R_{\text{test}}/R_{\text{ITF}}$  標準差 = 0.11, 平均數 1.0

表 4.8  $R_{\text{test}}$  與  $R_p$  比值

$a/h$	$x/h$	$R_p$	$R_{\text{test}}/R_p$			
			ETF-A	ETF-B	ETF-C	ETF-D
0.2	0	0.84	0.90	1.01	1.06	1.08
0.2	0.2	0.88	0.99	—	1.05	1.05
0.2	0.4	0.92	0.97	1.00	—	1.03
0.2	0.6	0.96	0.94	0.97	1.00	0.92
0.4	0	0.75	0.94	0.93	1.06	1.07
0.4	0.2	0.79	0.96	—	1.07	1.04
0.4	0.4	0.83	0.92	1.00	1.04	1.02
0.4	0.6	0.87	0.97	0.99	1.03	1.03
0.6	0	0.67	0.84	0.89	1.04	1.05
0.6	0.2	0.70	0.85	—	1.07	1.05
0.6	0.4	0.74	0.88	0.93	1.08	1.09
0.6	0.6	0.78	0.95	1.03	1.08	1.09

表 4.9  $R_{\text{test}}/R_p$  可靠度分析

統計參數		$R_{\text{test}}/R_p$
載重的平均值	$P_m$	1.00
載重比變異係數	$V_p$	0.07
可靠度指數	$\beta$	2.72
Resistance factor	$\phi$	0.85

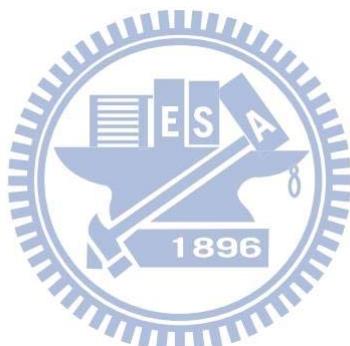
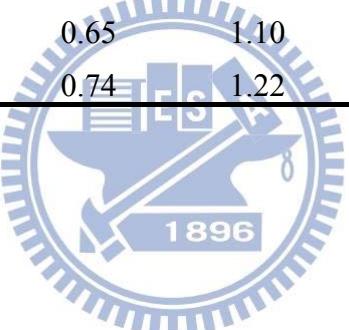
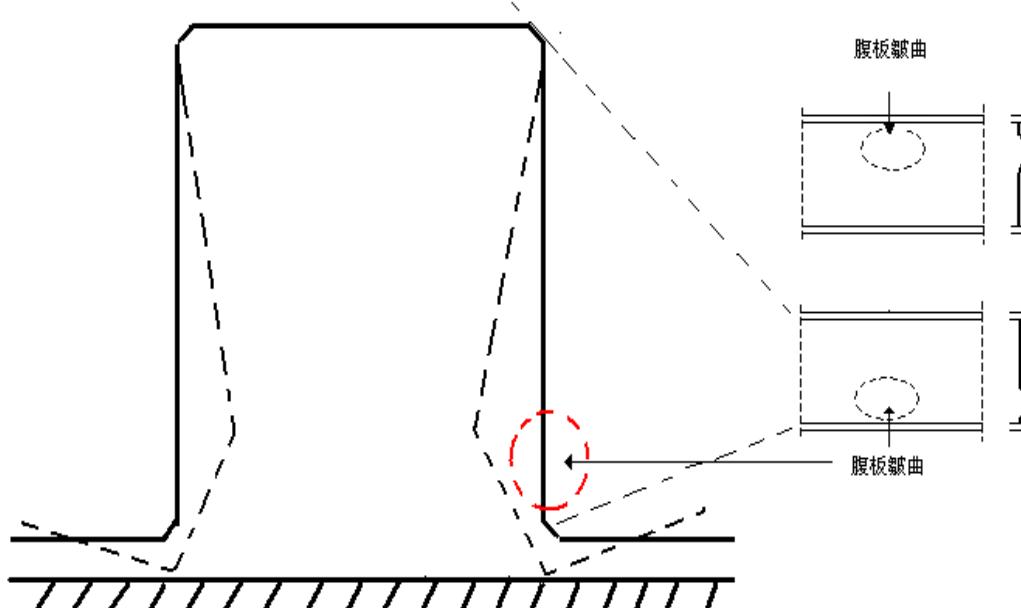


表 5.1 試體 ETF-A 系列分析結果與實驗之腹板皺曲強度比較

試體編號	Test (kN)	折減係數 (R <sub>test</sub> )	FEM (kN)	折減係數 (R <sub>FEM</sub> )	Test/ FEM	R <sub>test</sub> / R <sub>FEM</sub>
ETF-A-a0x0	1.68	—	1.68	—	1.00	—
ETF-A-a0.2x0	1.28	0.76	1.29	0.77	0.99	0.99
ETF-A-a0.2x0.2	1.46	0.87	1.47	0.88	0.99	0.99
ETF-A-a0.2x0.4	1.49	0.89	1.49	0.89	1.00	1.00
ETF-A-a0.2x0.6	1.52	0.90	1.51	0.90	1.01	1.01
ETF-A-a0.4x0	1.20	0.71	1.21	0.72	0.99	0.99
ETF-A-a0.4x0.2	1.27	0.76	1.22	0.73	1.04	1.04
ETF-A-a0.4x0.4	1.27	0.76	1.27	0.76	1.00	1.00
ETF-A-a0.4x0.6	1.41	0.84	1.35	0.80	1.04	1.04
ETF-A-a0.6x0	0.94	0.56	0.92	0.55	1.02	1.02
ETF-A-a0.6x0.2	1.00	0.60	1.02	0.61	0.98	0.98
ETF-A-a0.6x0.4	1.09	0.65	1.10	0.65	0.99	0.99
ETF-A-a0.6x0.6	1.24	0.74	1.22	0.73	1.02	1.02





腹板以局部挫曲的形式出現皺曲，靠近翼板的腹板產生壓碎，翼板並同時出現塑性變形。

圖 1.1 斷面腹板皺曲現象示意圖(內政部營建署 2004)

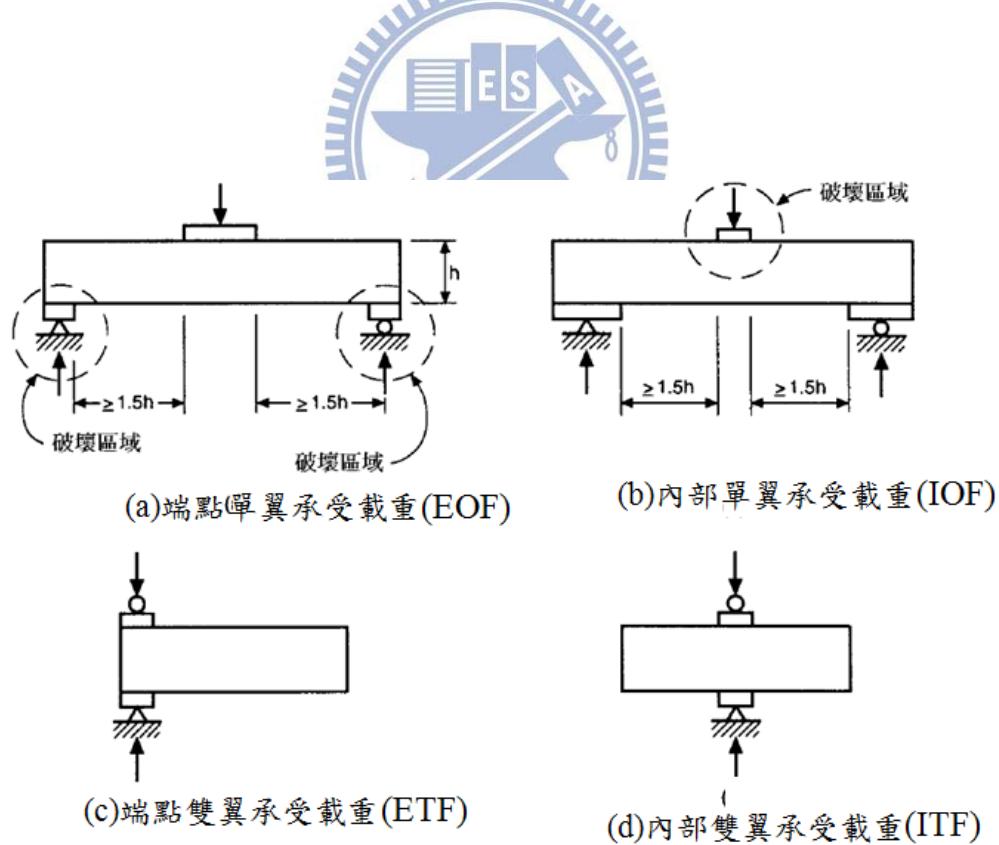


圖 1.2 腹板皺曲強度試驗之四種載重條件(內政部營建署 2004)

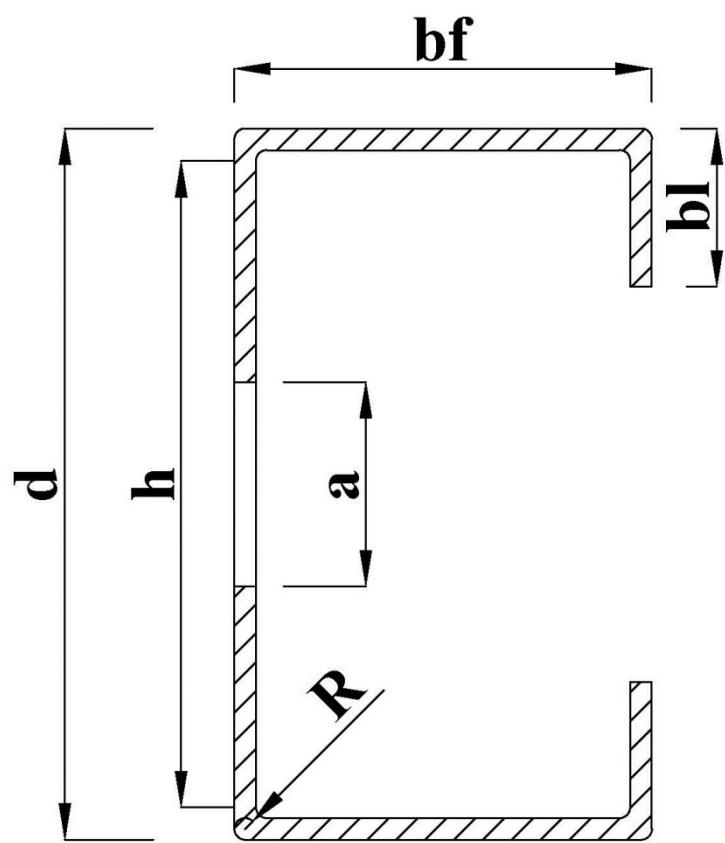


圖 3.1 試體斷面示意圖

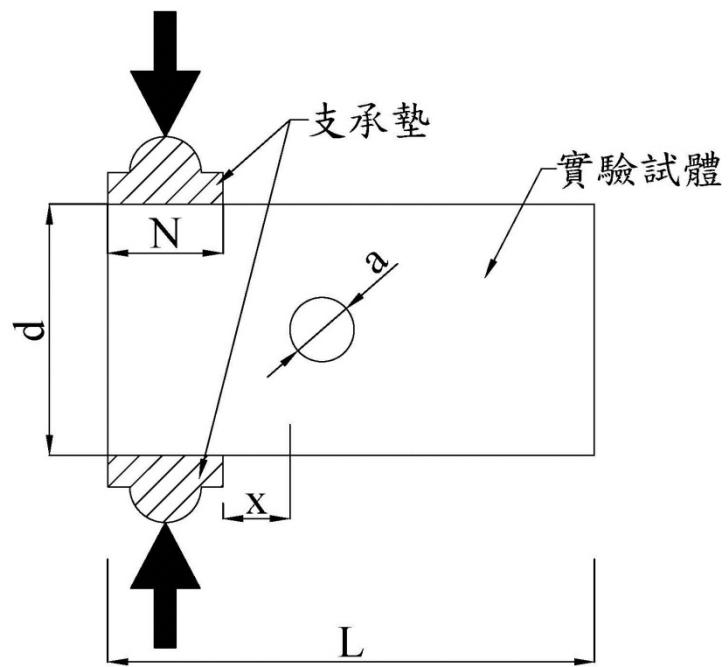
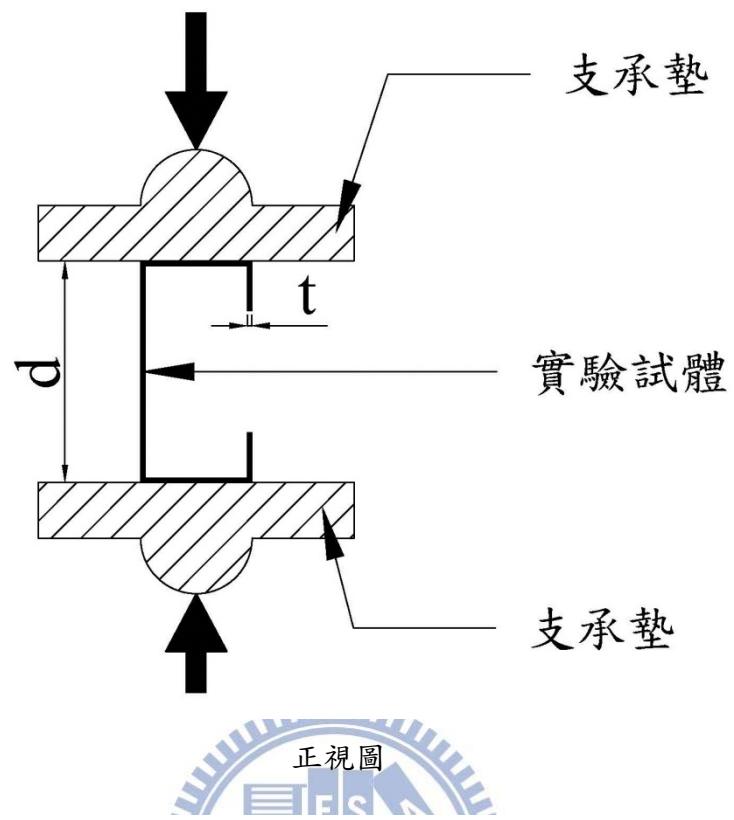
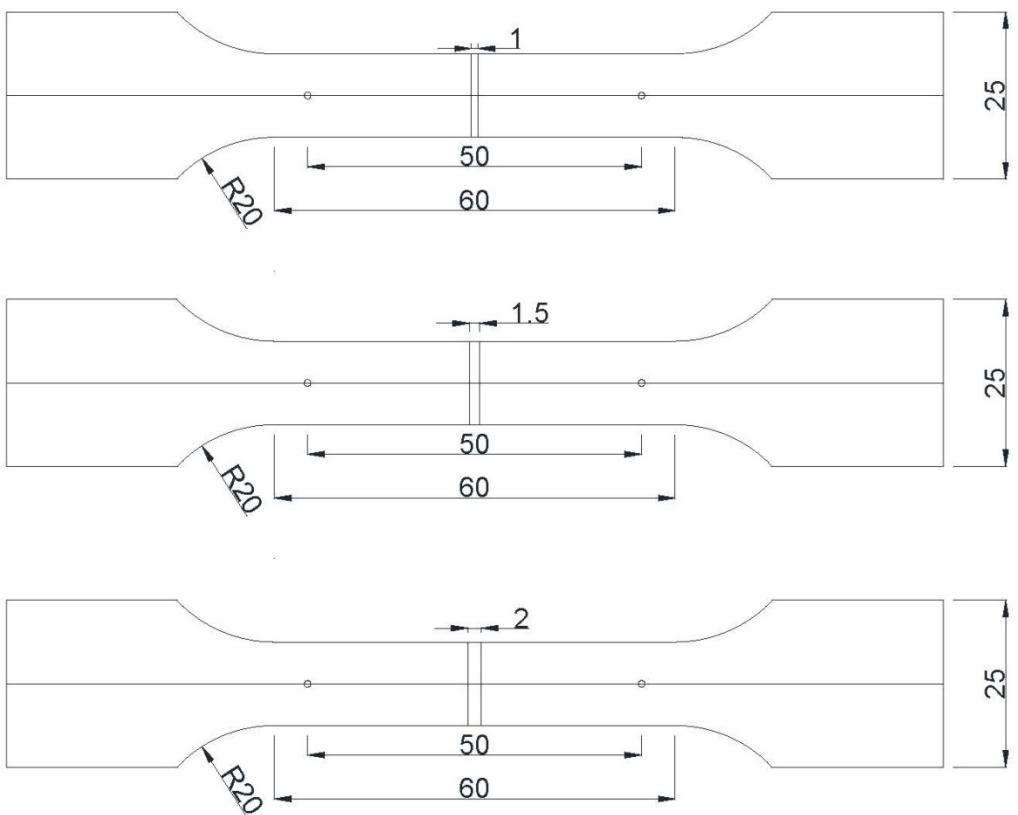


圖 3.2 實驗設置示意圖



單位 : mm

圖 3.3 拉力試片設計圖

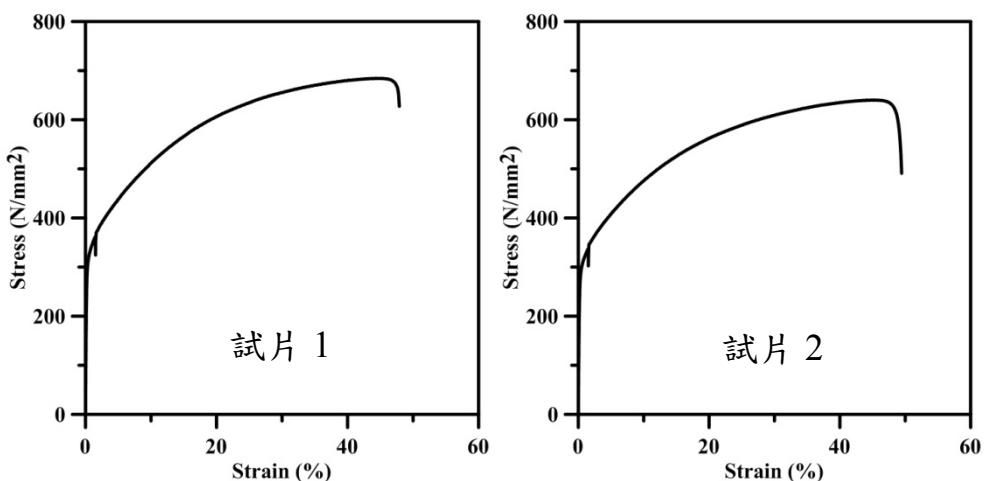


圖 3.4 拉力試片厚度 1.0 mm 之應力-應變曲線

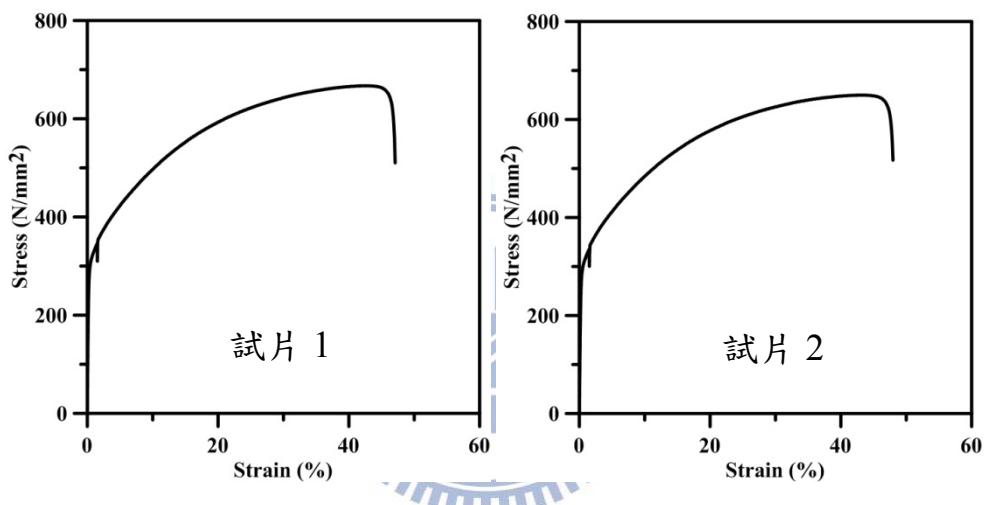


圖 3.5 拉力試片厚度 1.5 mm 之應力-應變曲線

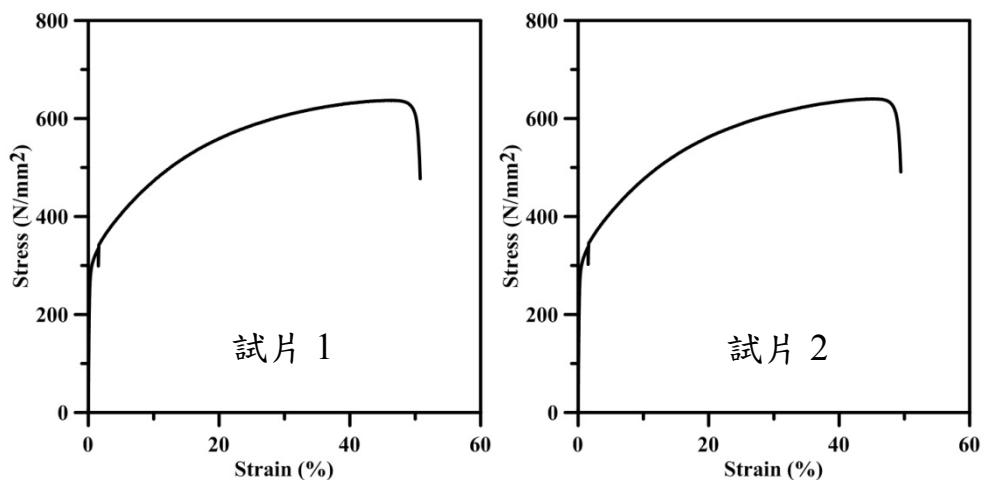


圖 3.6 拉力試片厚度 2.0 mm 之應力-應變曲線

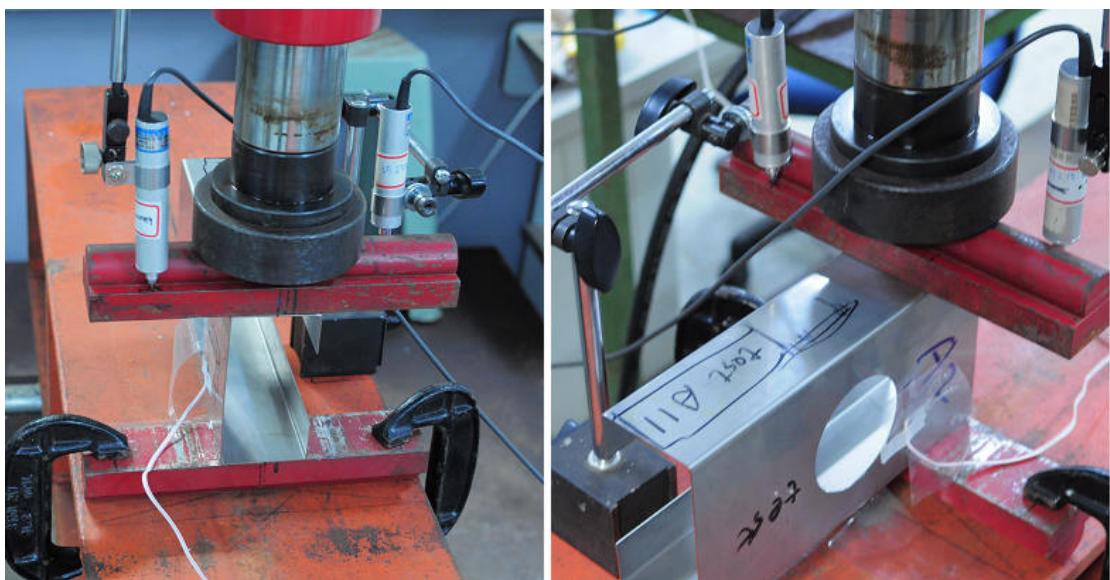


圖 3.7 實驗位移計設置圖



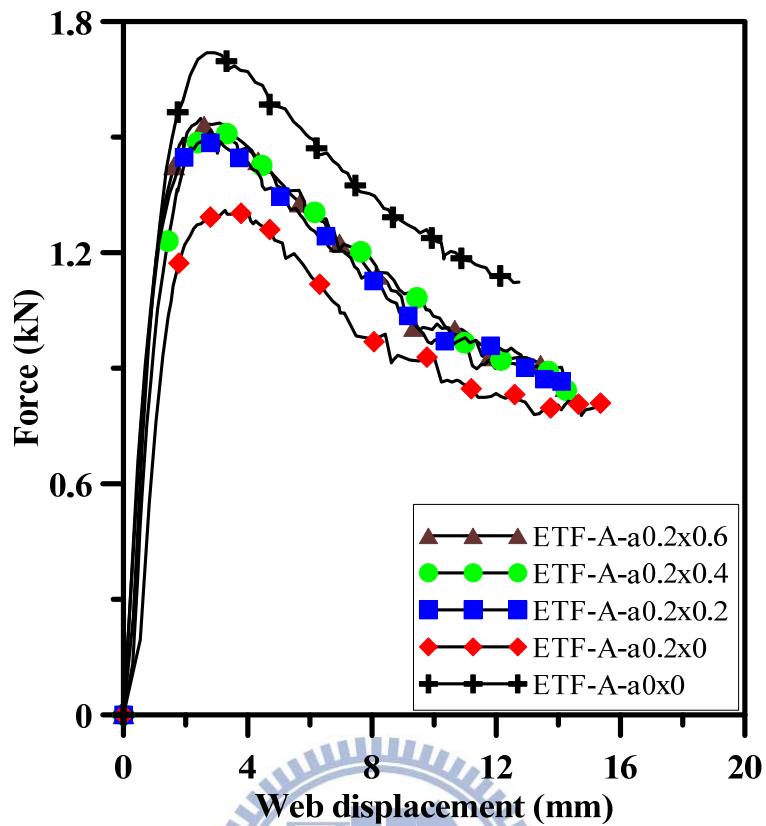


圖 4.1 試體 ETF-A-a0.2 載重-腹板變形曲線

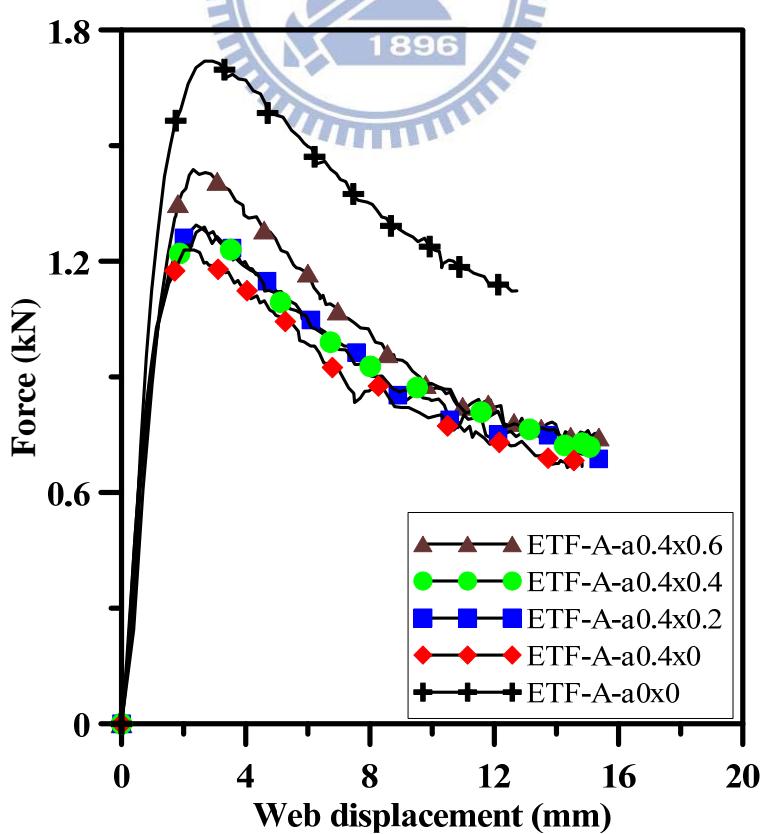


圖 4.2 試體 ETF-A-a0.4 載重-腹板變形曲線

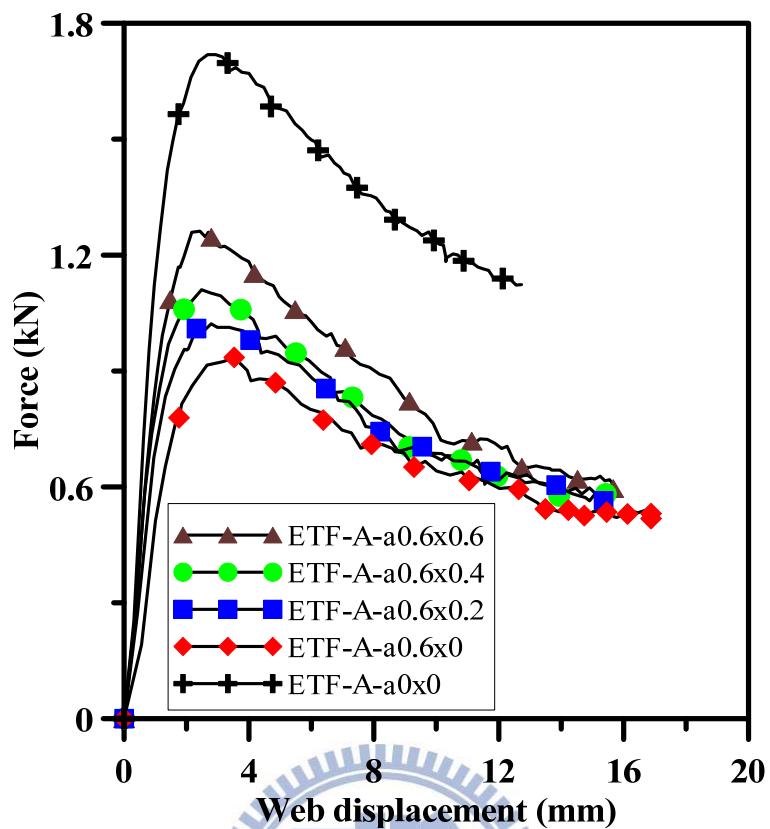


圖 4.3 試體 ETF-A-a0.6 載重-腹板變形曲線

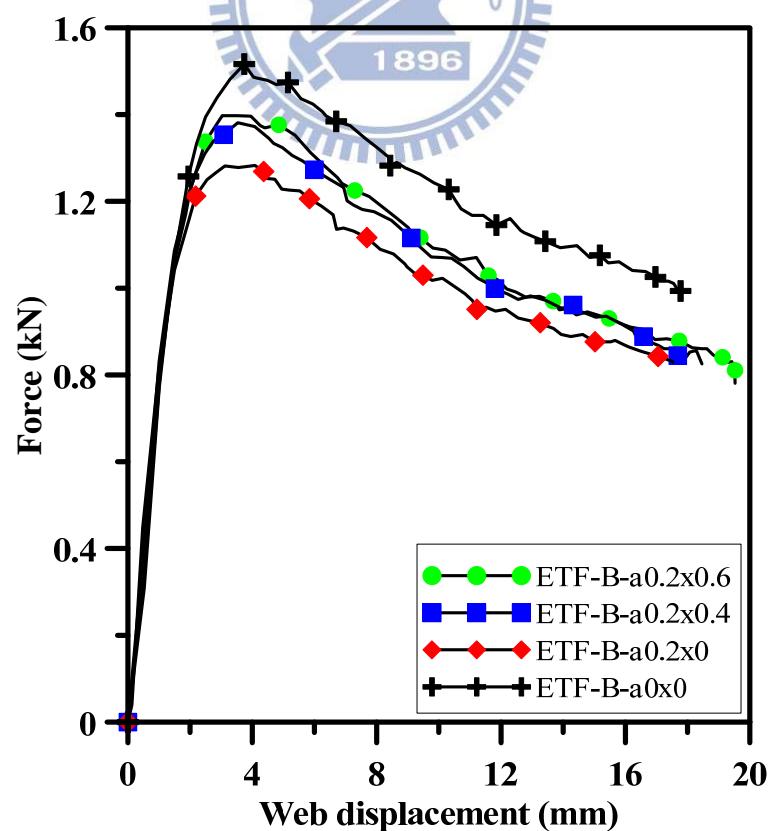


圖 4.4 試體 ETF-B-a0.2 載重-腹板變形曲線

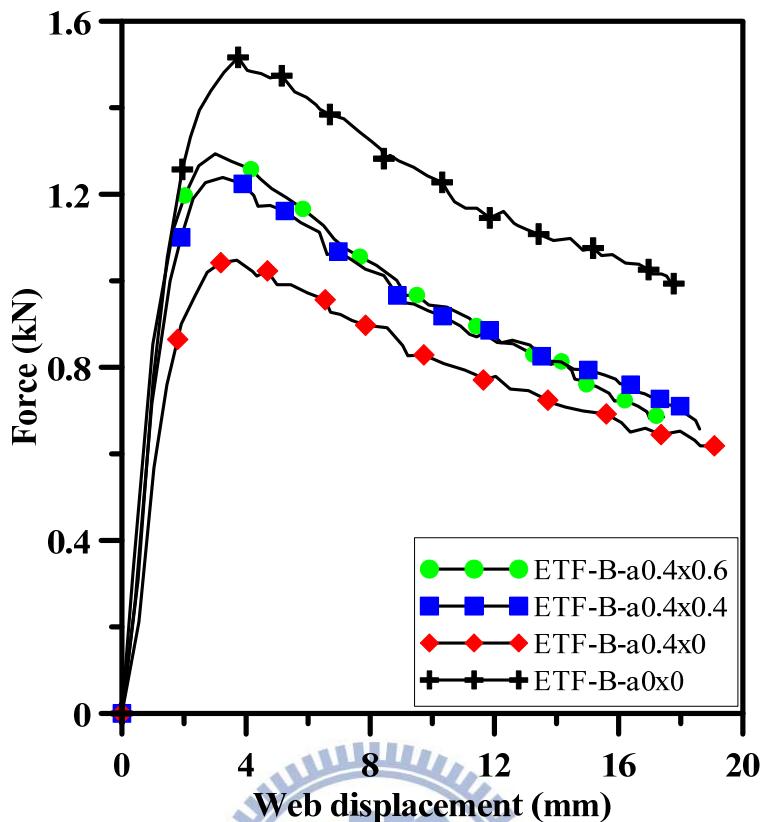


圖 4.5 試體 ETF-B-a0.4 載重-腹板變形曲線

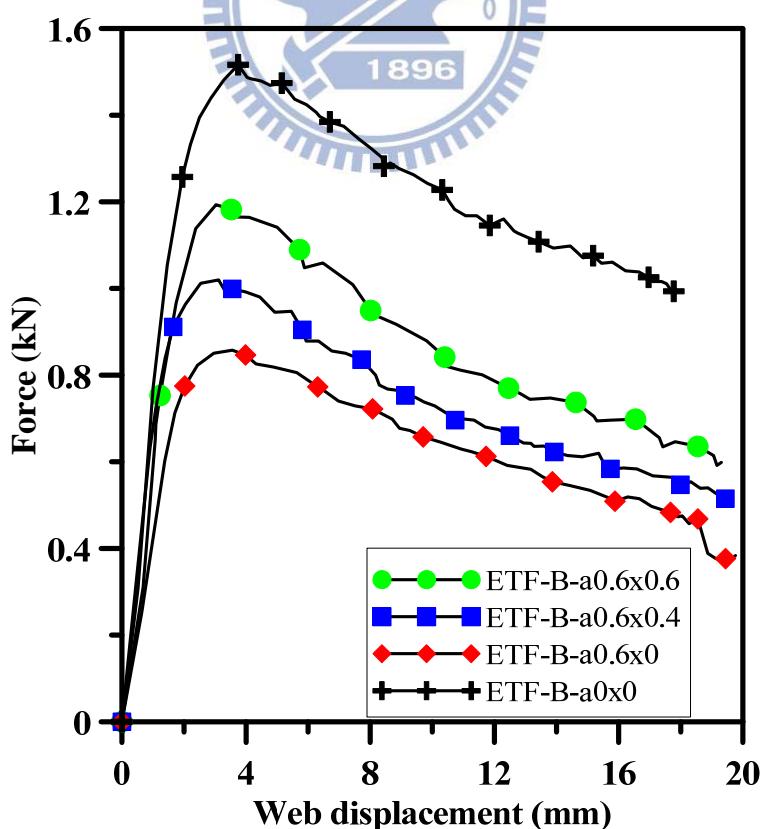


圖 4.6 試體 ETF-B-a0.6 載重-腹板變形曲線

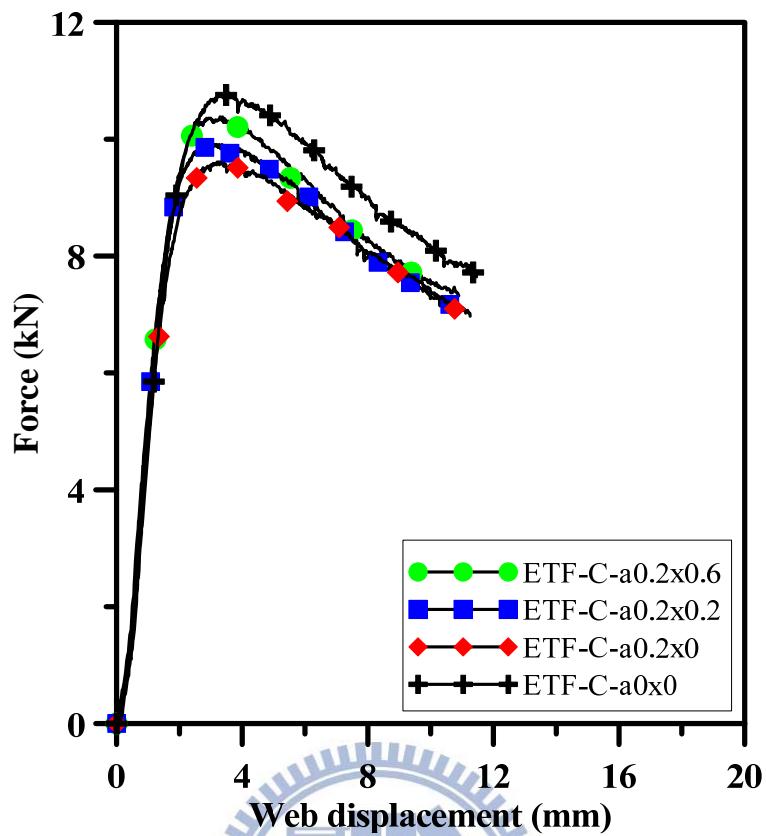


圖 4.7 試體 ETF-C-a0.2 載重-腹板變形曲線

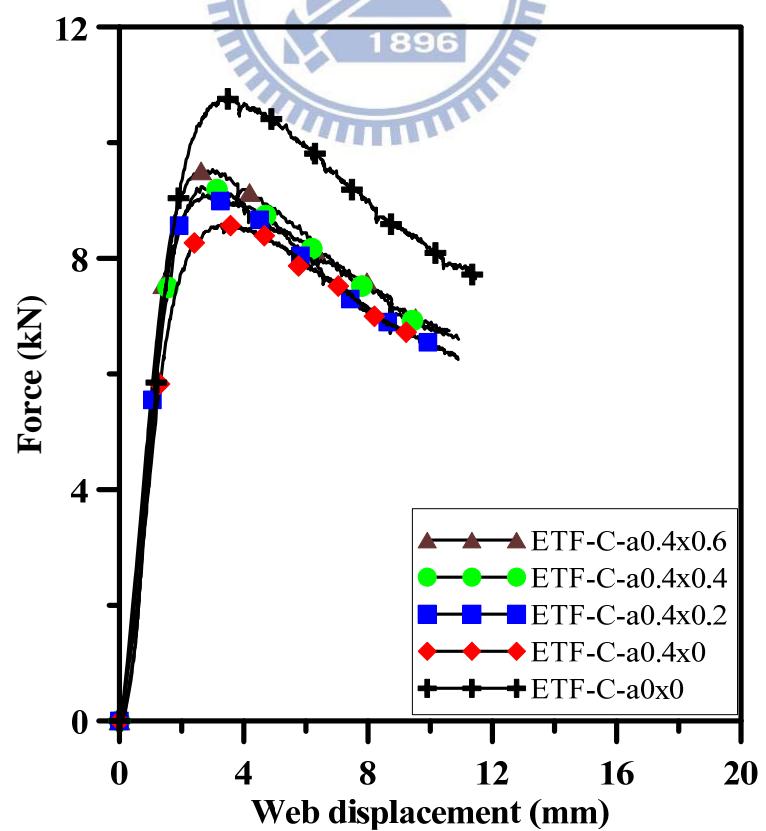


圖 4.8 試體 ETF-C-a0.4 載重-腹板變形曲線

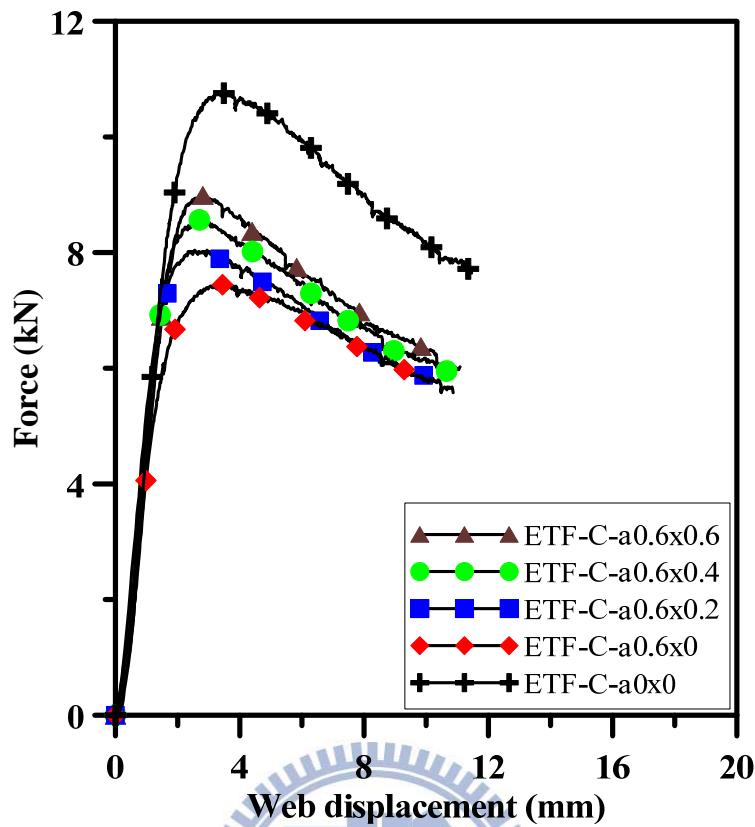


圖 4.9 試體 ETF-C-a0.6 載重-腹板變形曲線

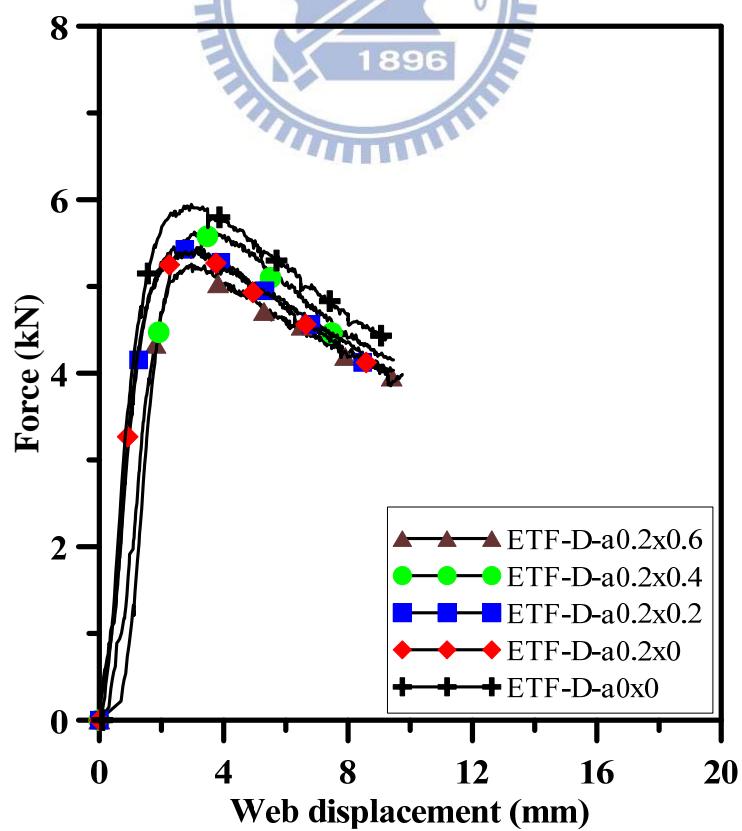


圖 4.10 試體 ETF-D-a0.2 載重-腹板變形曲線

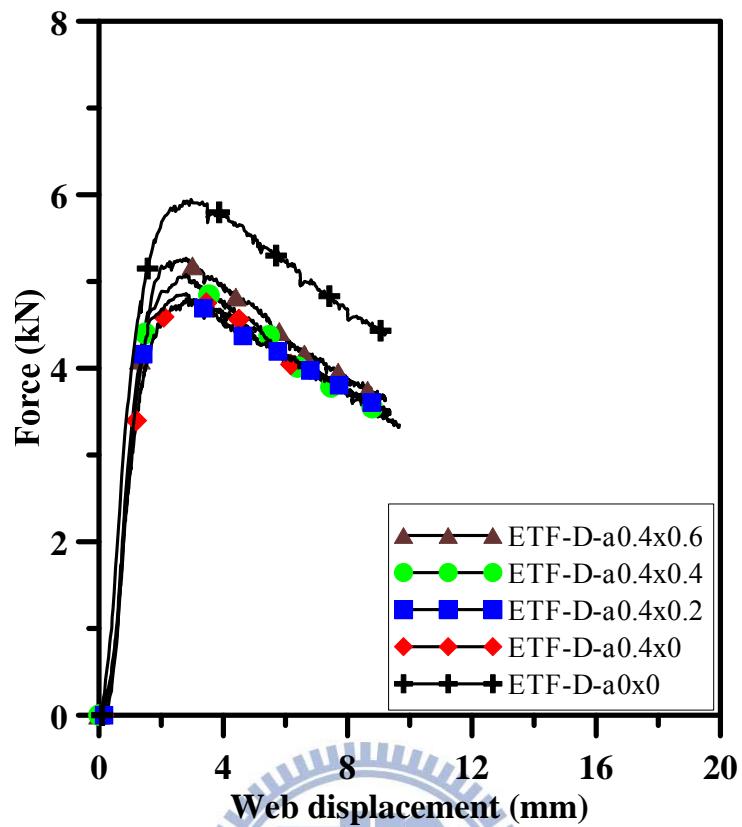


圖 4.11 試體 ETF-D-a0.4 載重-腹板變形曲線

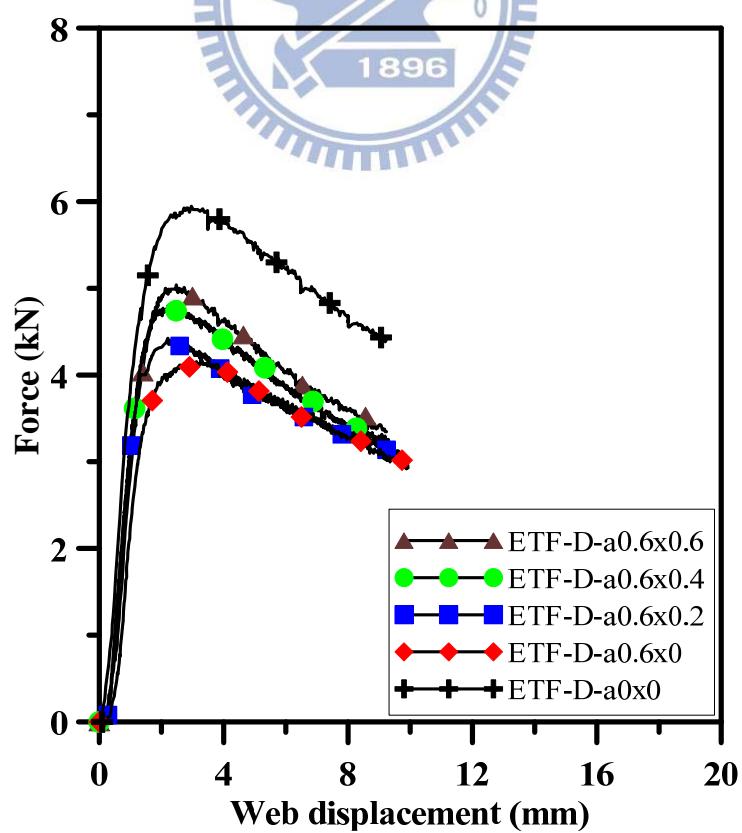


圖 4.12 試體 ETF-D-a0.6 載重-腹板變形曲線

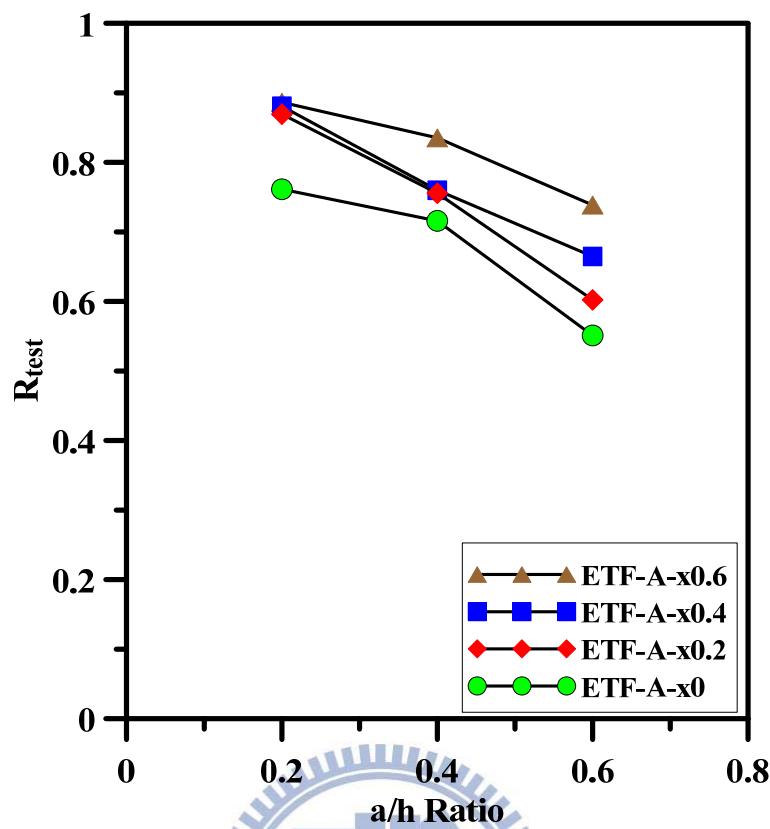


圖 4.13 試體 ETF-A 系列  $R_{\text{test}}$  與  $a/h$  關係圖

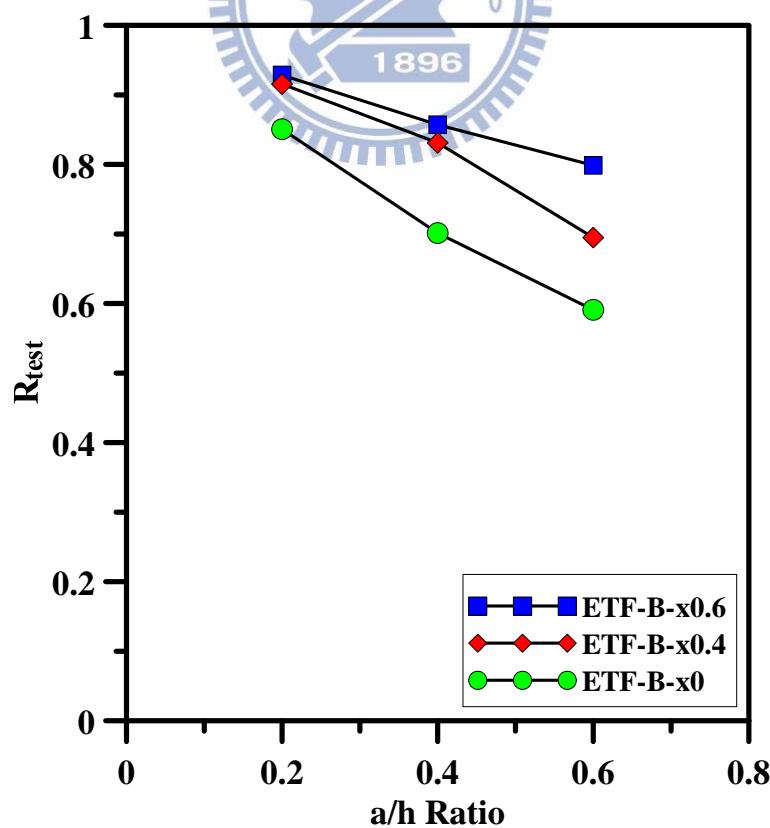


圖 4.14 試體 ETF-B 系列  $R_{\text{test}}$  與  $a/h$  關係圖

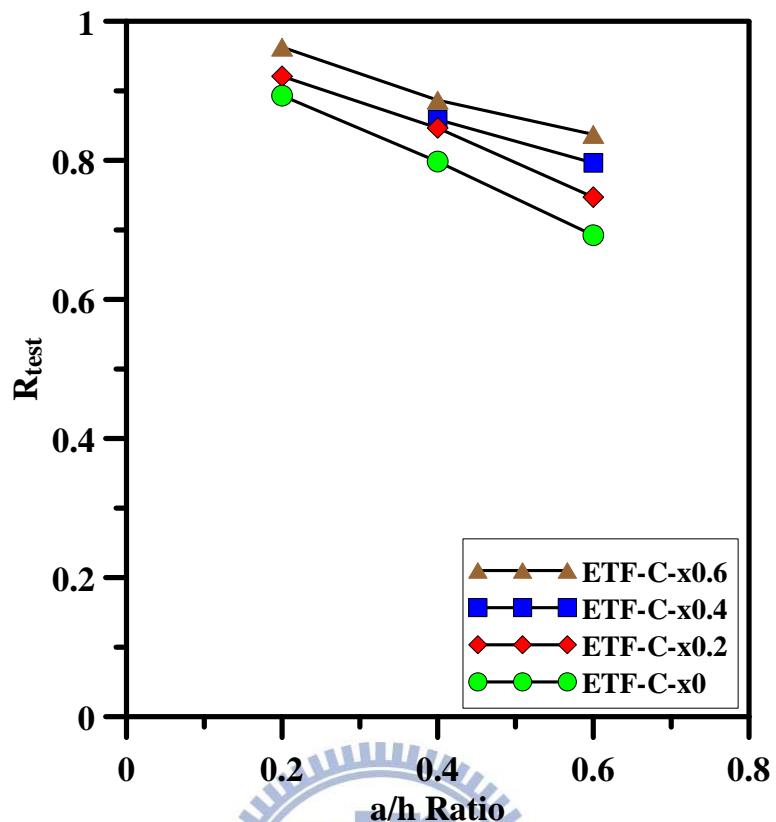


圖 4.15 試體 ETF-C 系列  $R_{\text{test}}$  與  $a/h$  關係圖

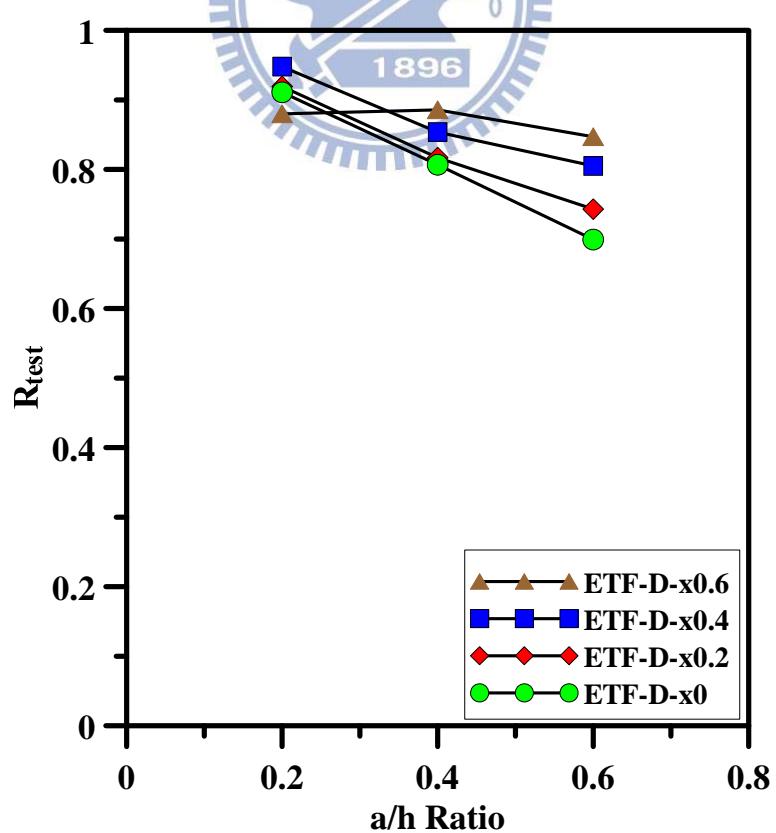


圖 4.16 試體 ETF-D 系列  $R_{\text{test}}$  與  $a/h$  關係圖

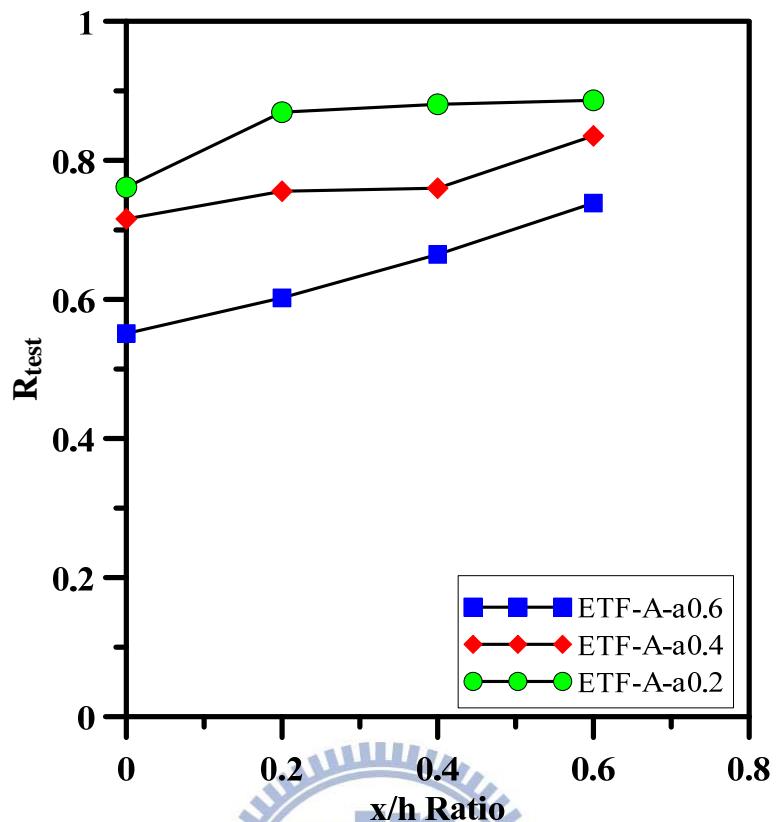


圖 4.17 試體 ETF-A 系列  $R_{test}$  與  $x/h$  關係圖

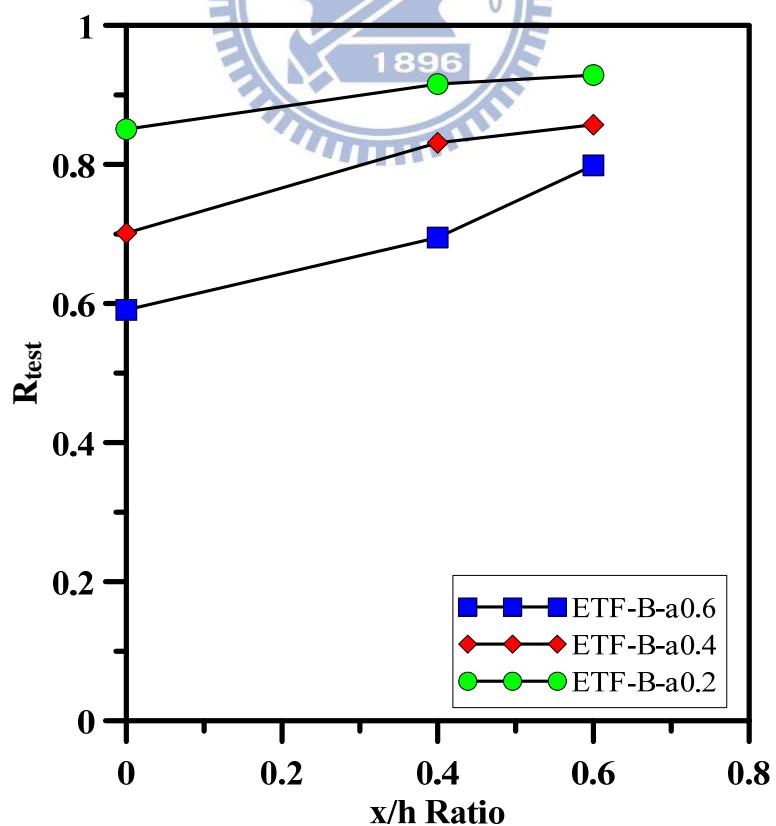


圖 4.18 試體 ETF-B 系列  $R_{test}$  與  $x/h$  關係圖

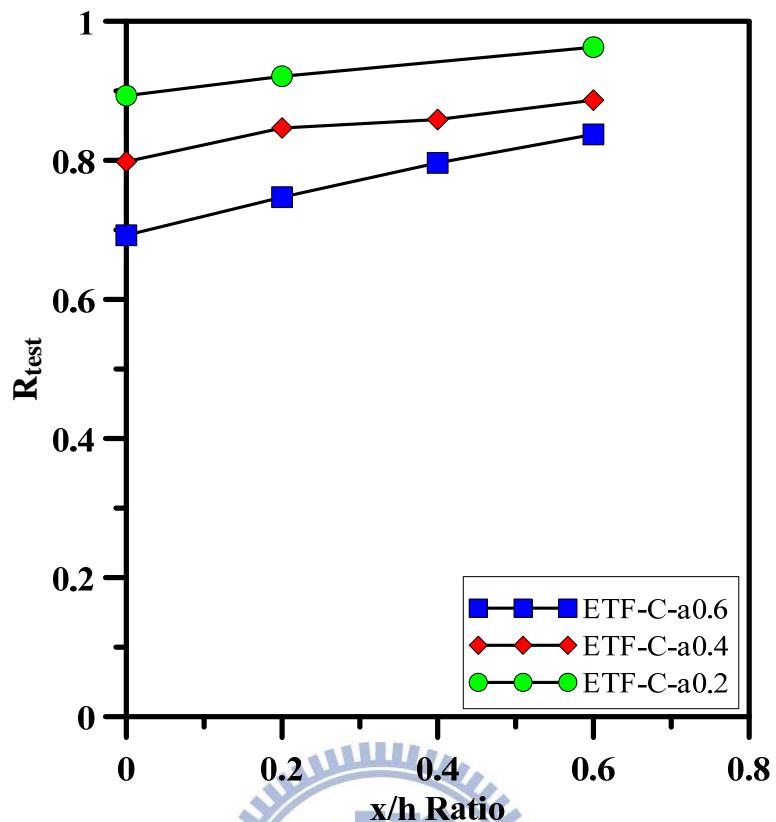


圖 4.19 試體 ETF-C 系列  $R_{test}$  與  $x/h$  關係圖

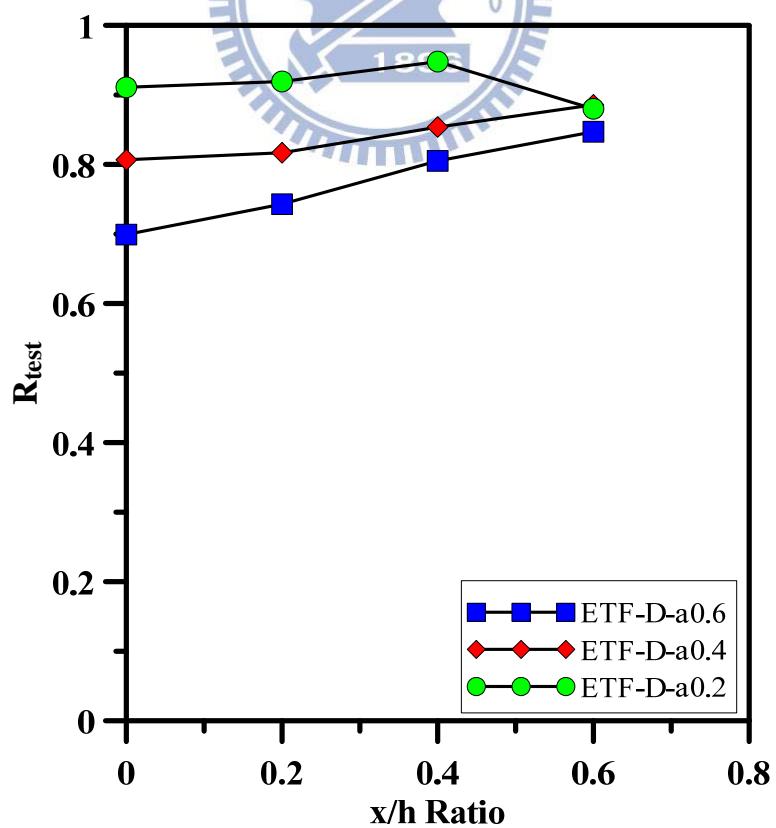


圖 4.20 試體 ETF-D 系列  $R_{test}$  與  $x/h$  關係圖

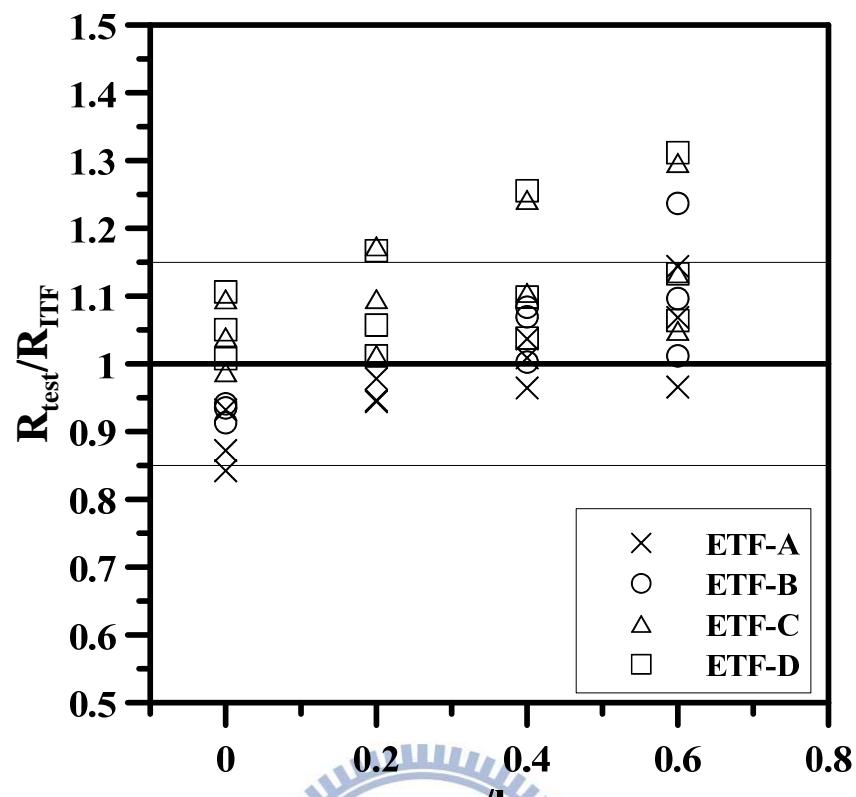


圖 4.21  $R_{\text{test}}/R_{\text{ITF}}$  與  $x/h$  關係圖

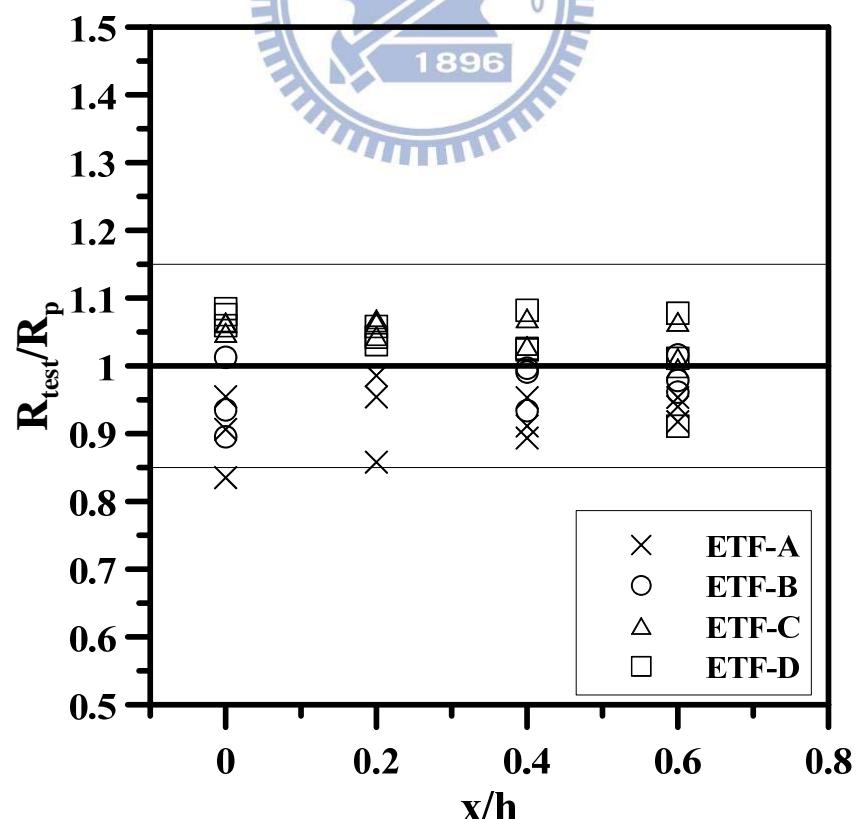


圖 4.22  $R_{\text{test}}/R_p$  與  $x/h$  關係圖

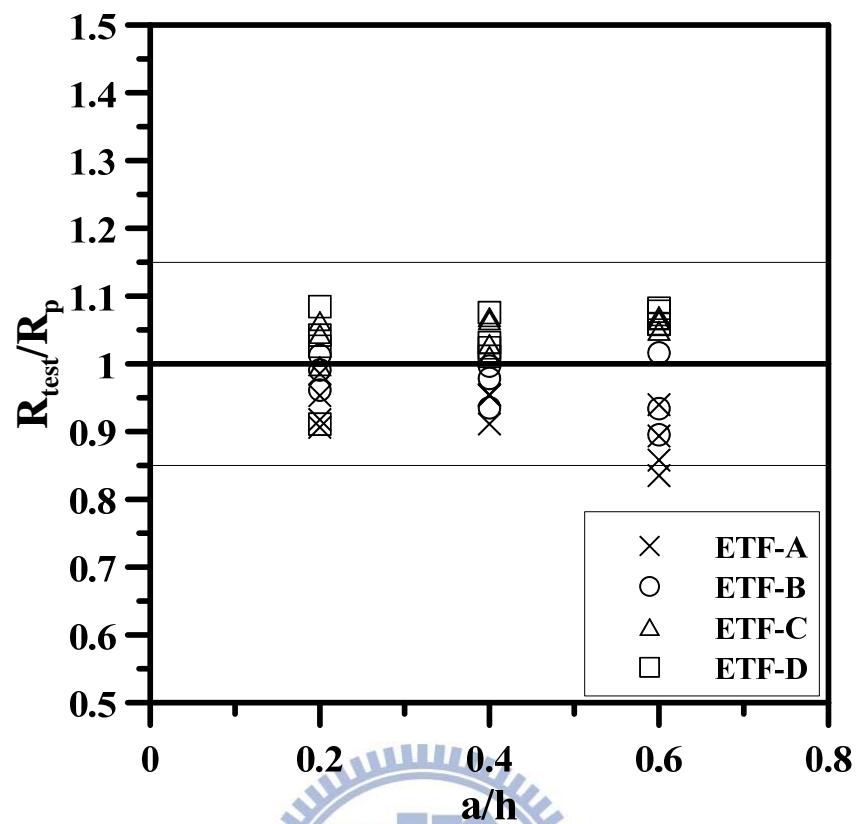


圖 4.23  $R_{\text{test}}/R_p$  與  $a/h$  關係圖

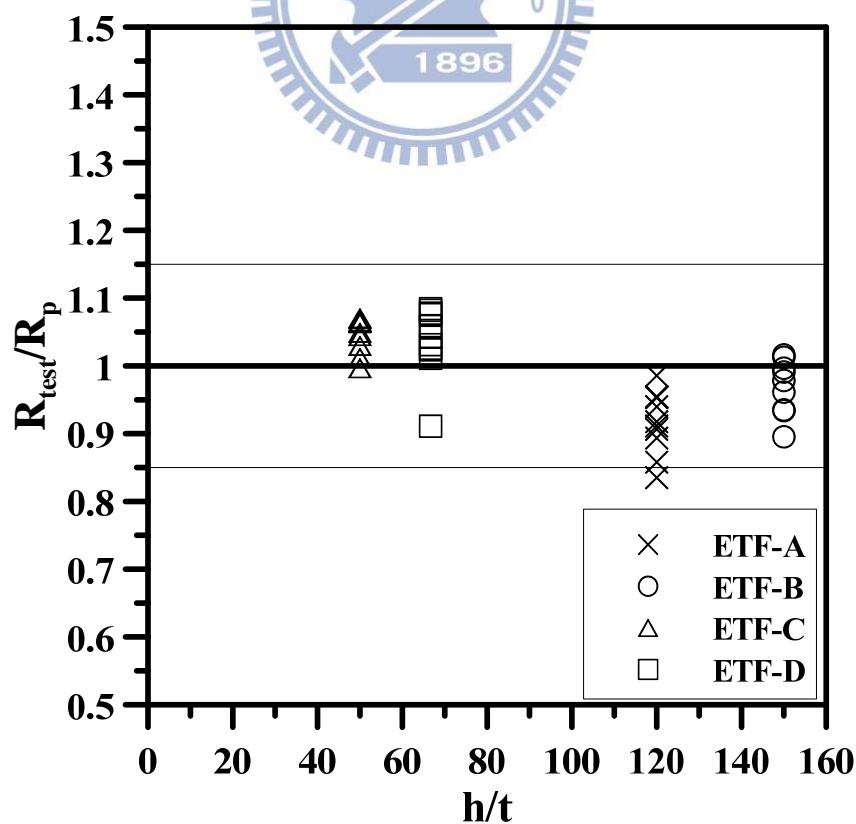


圖 4.24  $R_{\text{test}}/R_p$  與  $h/t$  關係圖

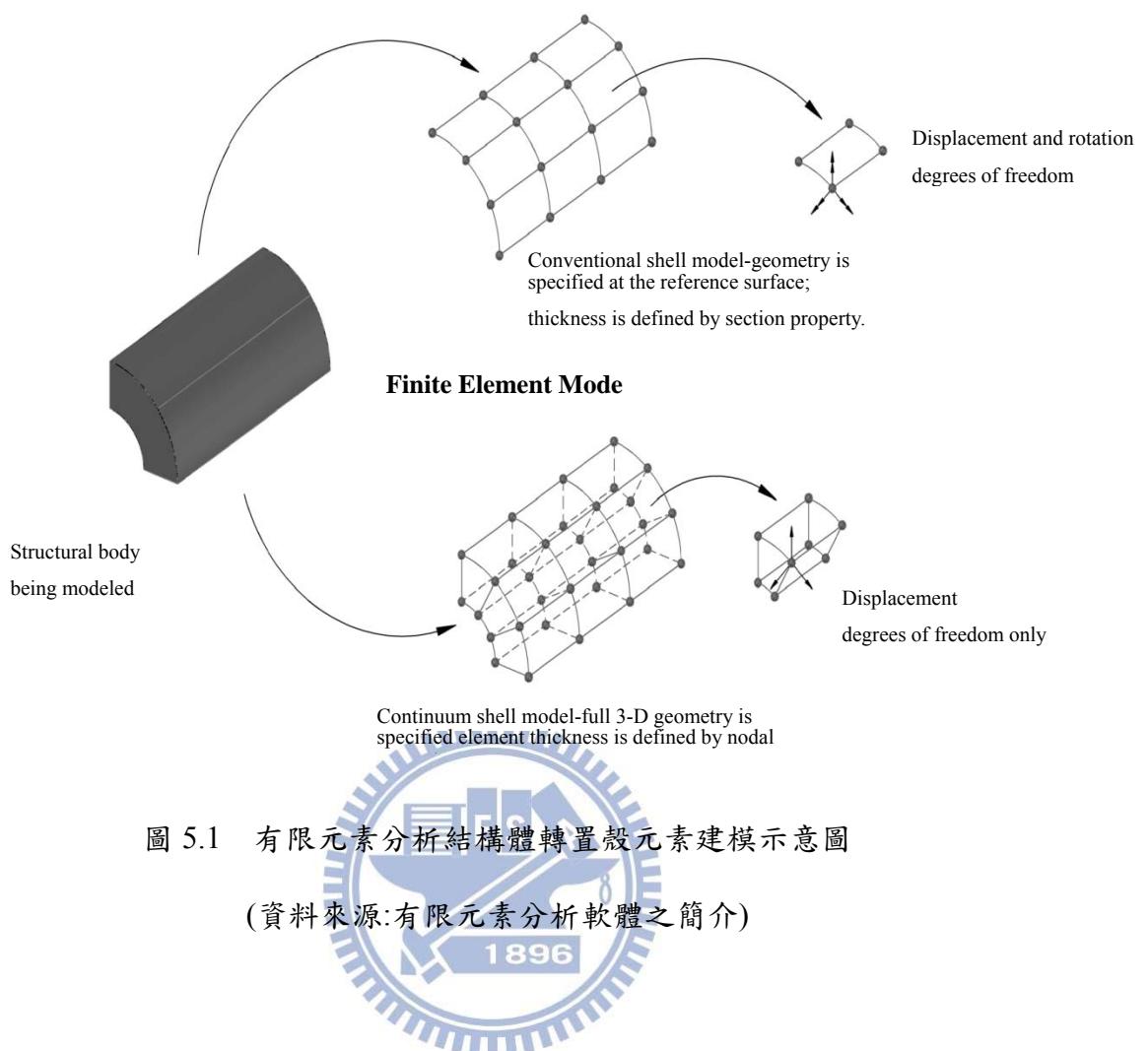


圖 5.1 有限元素分析結構體轉置殼元素建模示意圖

(資料來源:有限元素分析軟體之簡介)

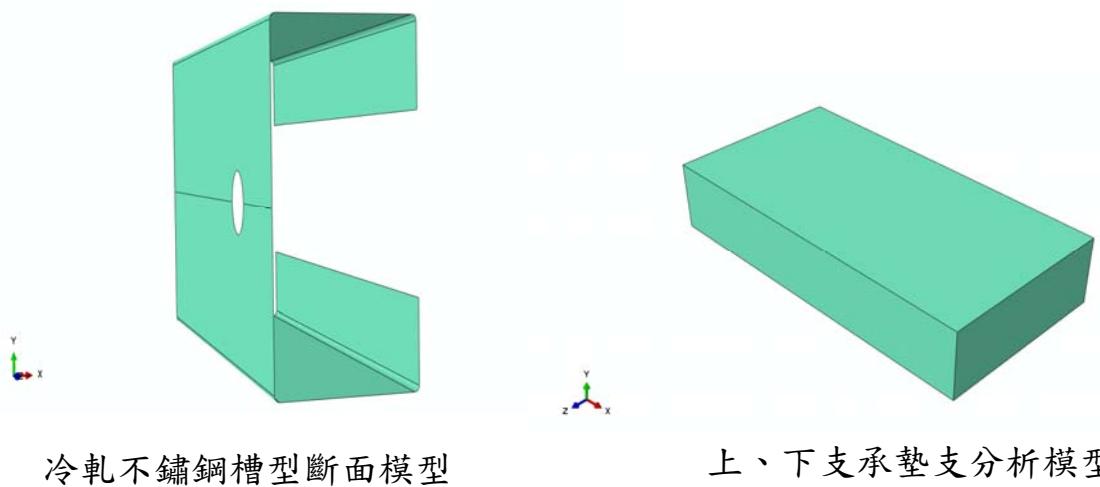


圖 5.2 有限元素分析建立之分析模型構件

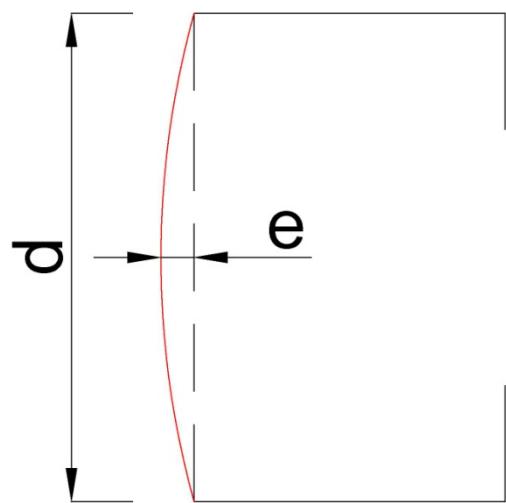


圖 5.3 腹板表面不平整性示意圖

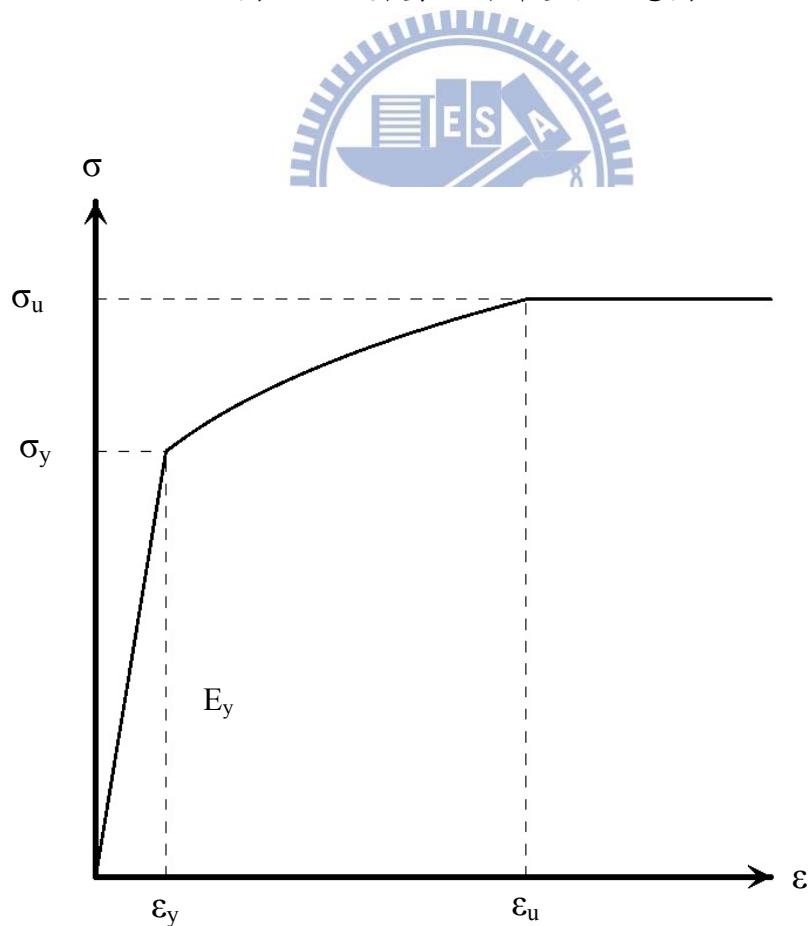


圖 5.4 不鏽鋼材之應力-應變關係示意圖

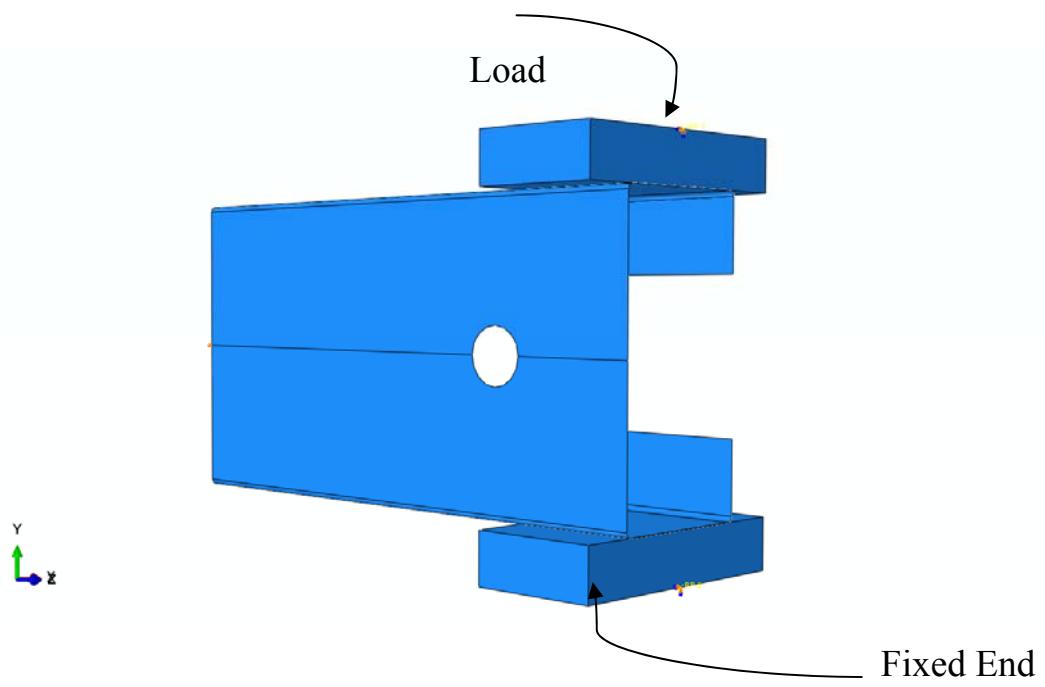


圖 5.5 有限元素分析模型之邊界條件設定

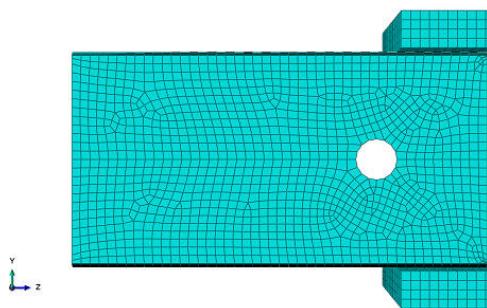
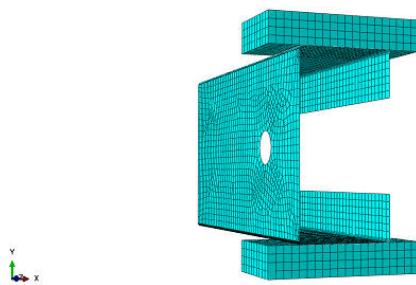


圖 5.6 有限元素分析建立之分析模型網格

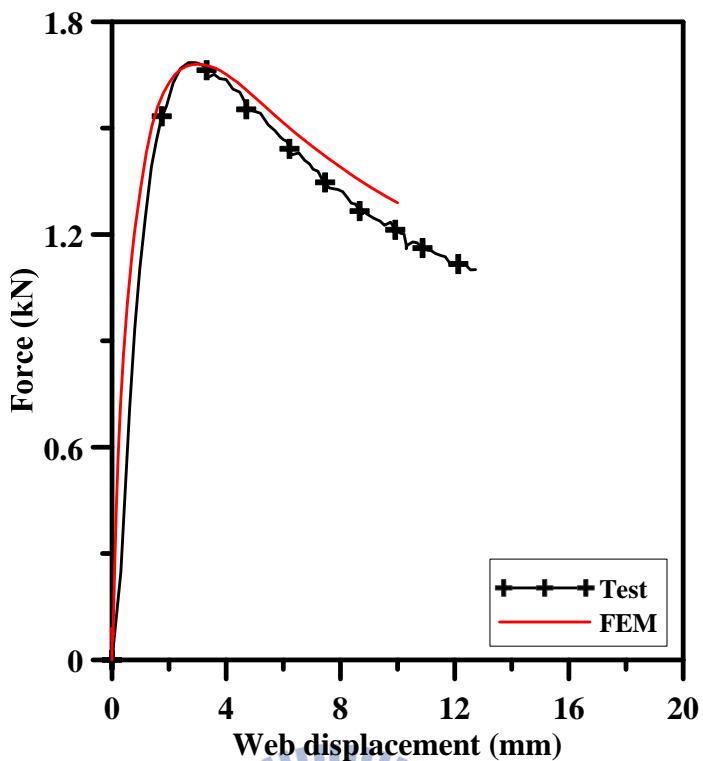


圖 5.7 試體 ETF-A-a0x0 分析與實驗之載重-位移曲線

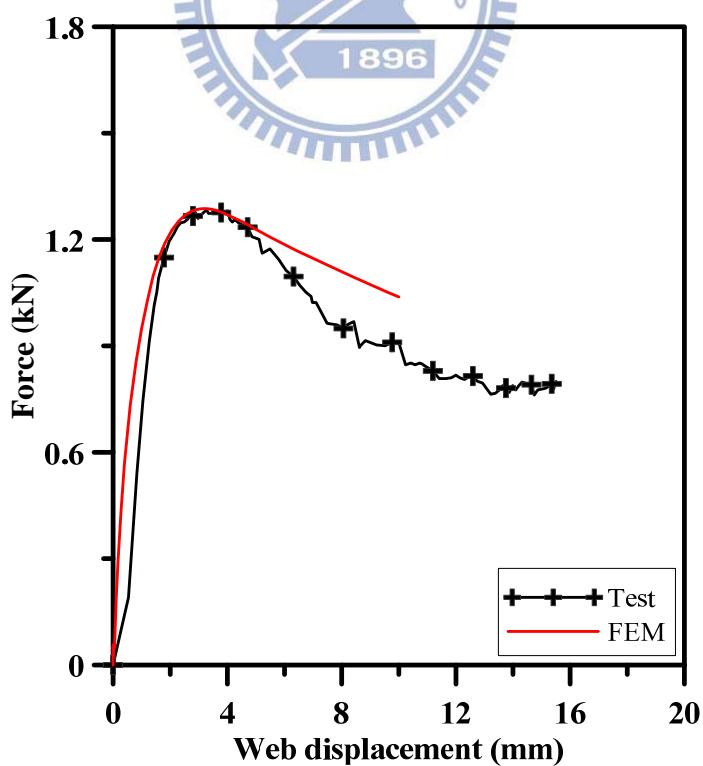


圖 5.8 試體 ETF-A-a0.2x0 分析與實驗之載重-位移曲線

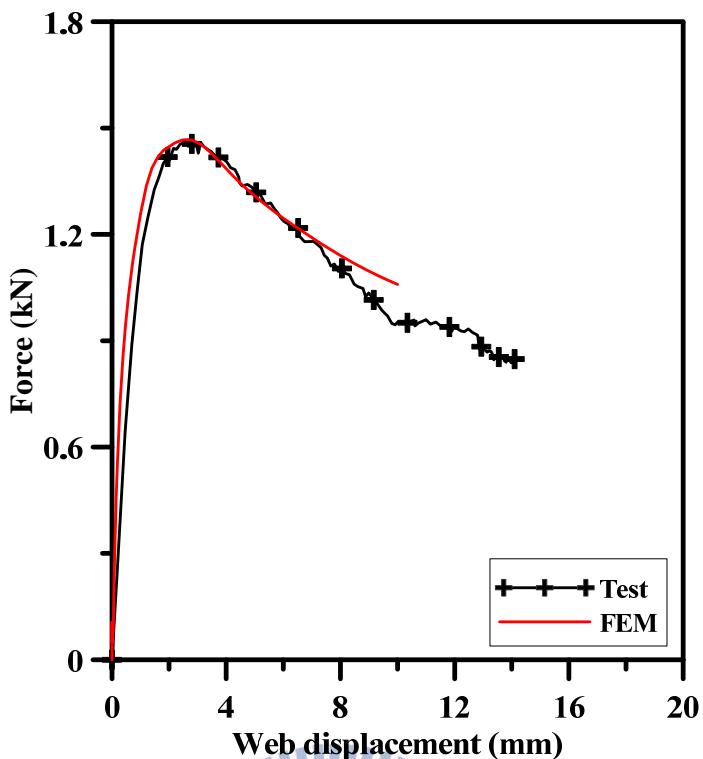


圖 5.9 試體 ETF-A-a0.2x0.2 分析與實驗之載重-位移曲線

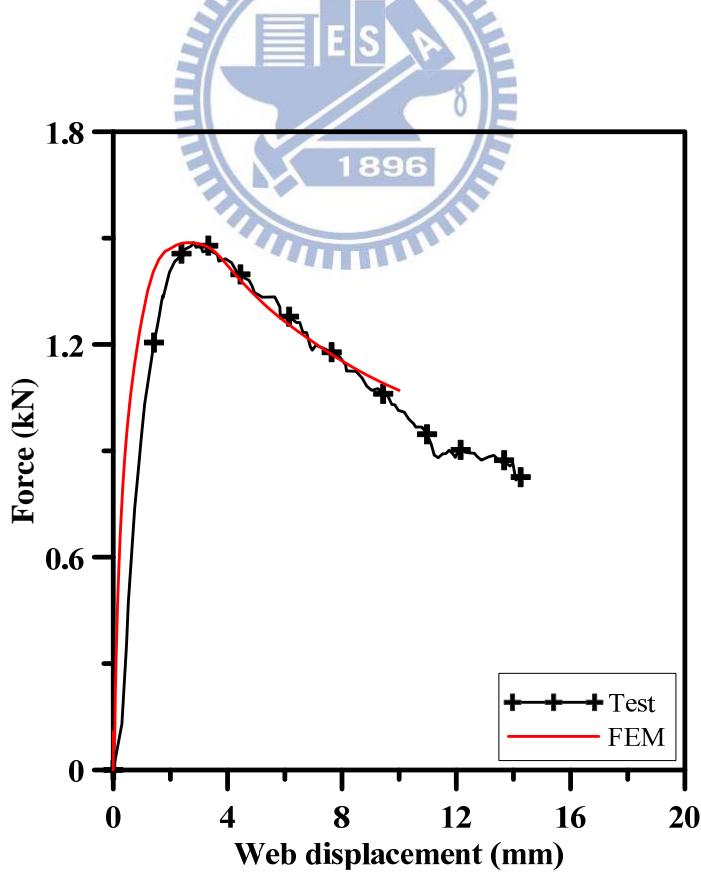


圖 5.10 試體 ETF-A-a0.2x0.4 分析與實驗之載重-位移曲線

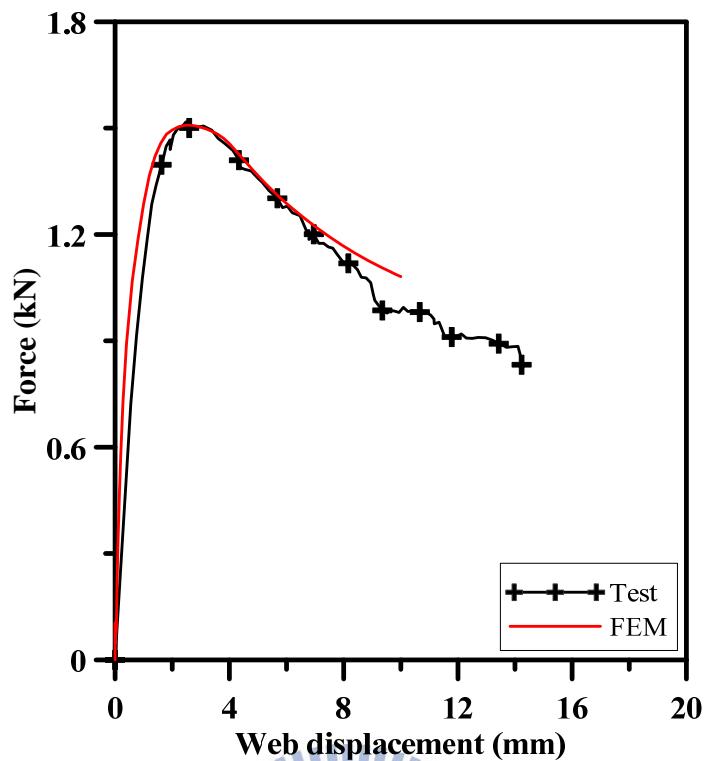


圖 5.11 試體 ETF-A-a0.2x0.6 分析與實驗之載重-位移曲線

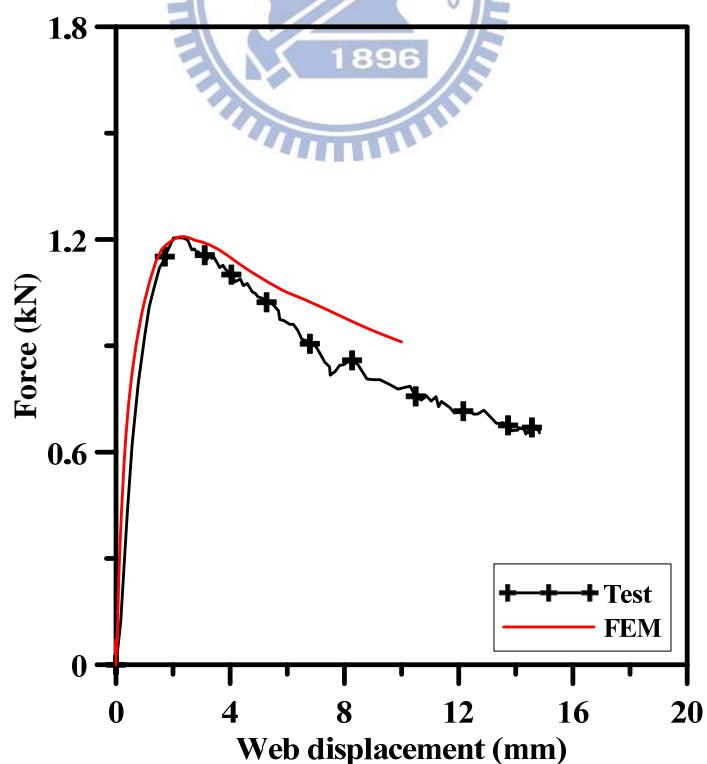


圖 5.12 試體 ETF-A-a0.4x0 分析與實驗之載重-位移曲線

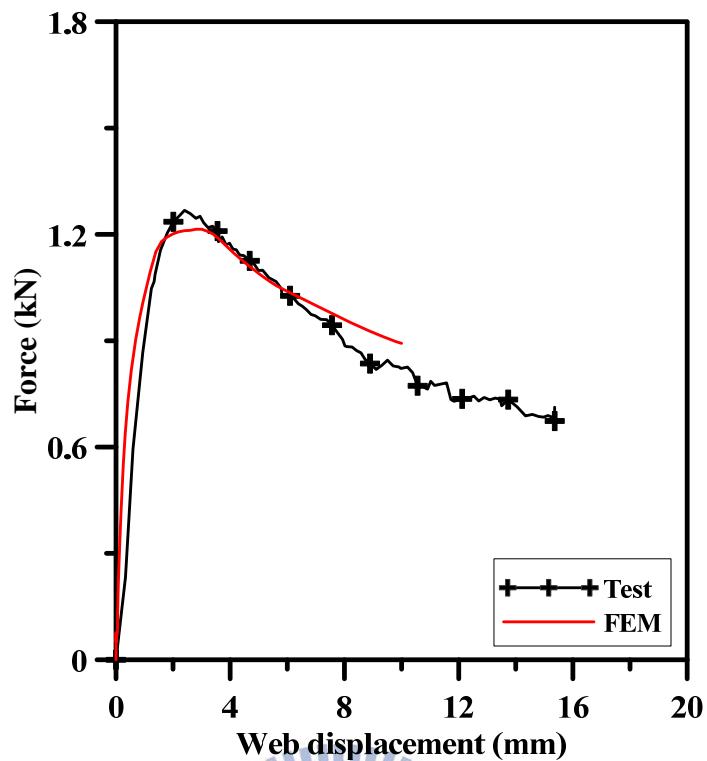


圖 5.13 試體 ETF-A-a0.4x0.2 分析與實驗之載重-位移曲線

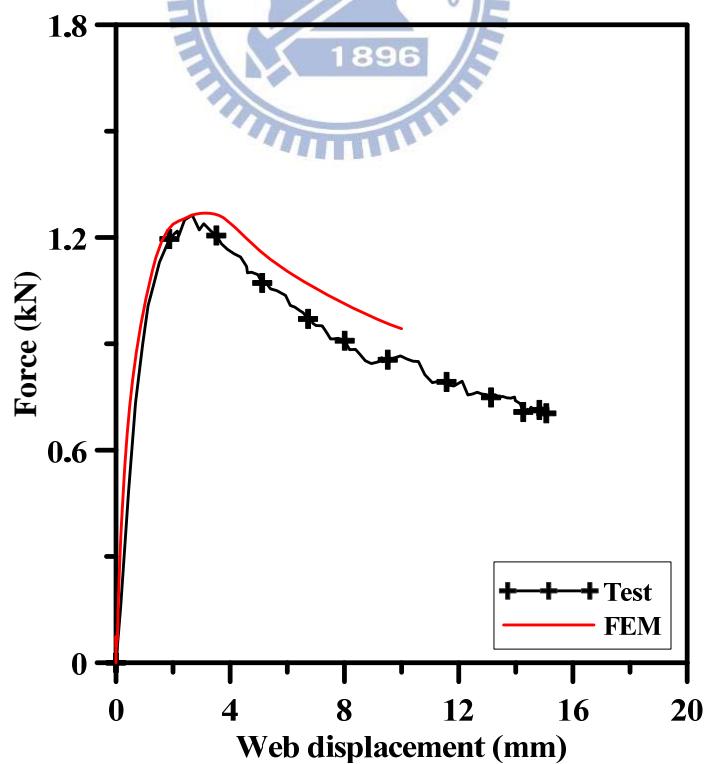


圖 5.14 試體 ETF-A-a0.4x0.4 分析與實驗之載重-位移曲線

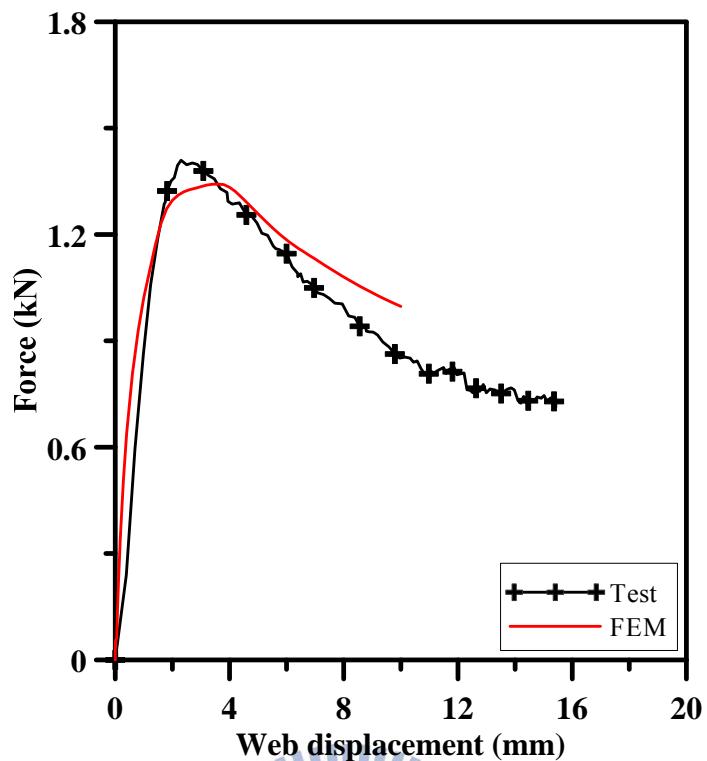


圖 5.15 試體 ETF-A-a0.4x0.6 分析與實驗之載重-位移曲線

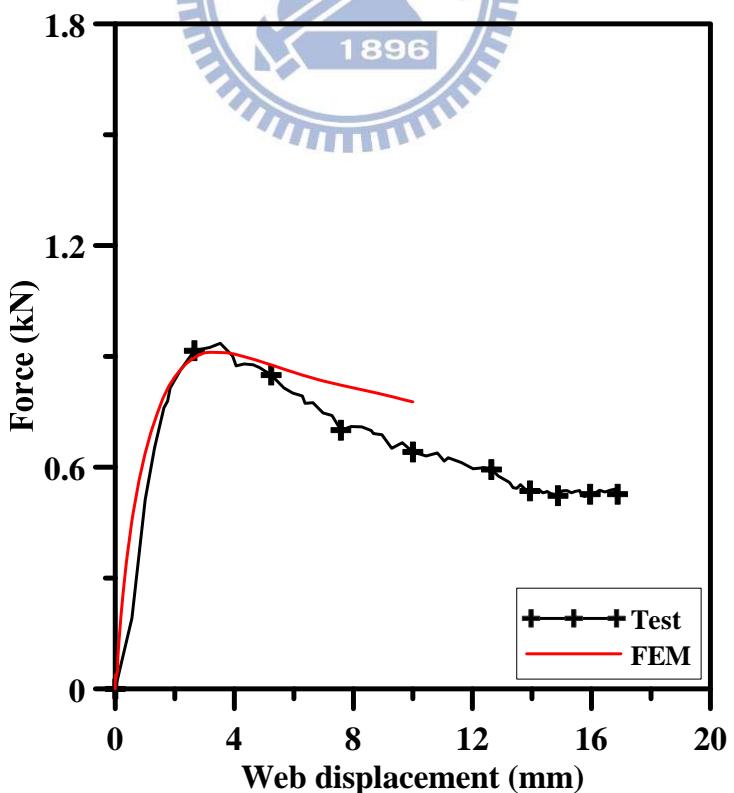


圖 5.16 試體 ETF-A-a0.6x0 分析與實驗之載重-位移曲線

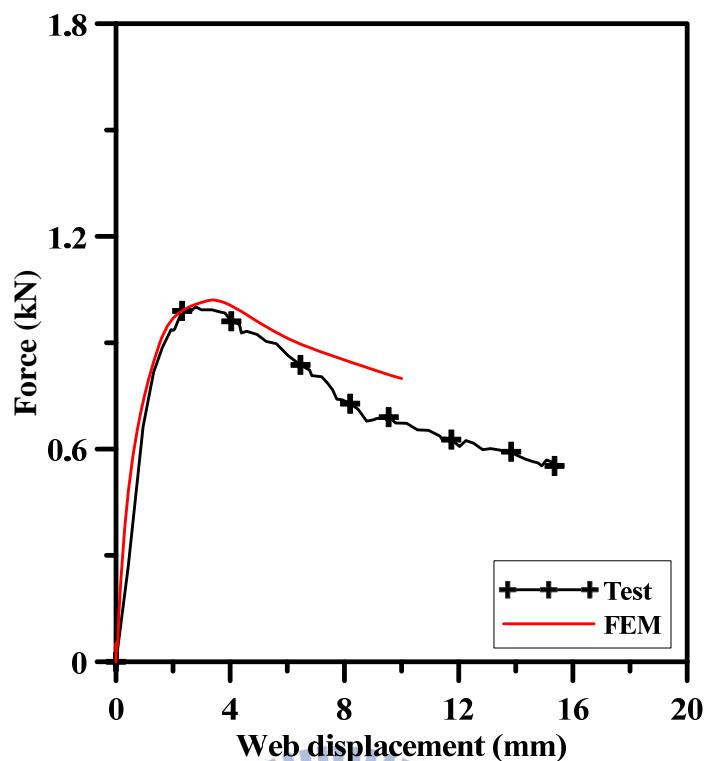


圖 5.17 試體 ETF-A-a0.6x0.2 分析與實驗之載重-位移曲線

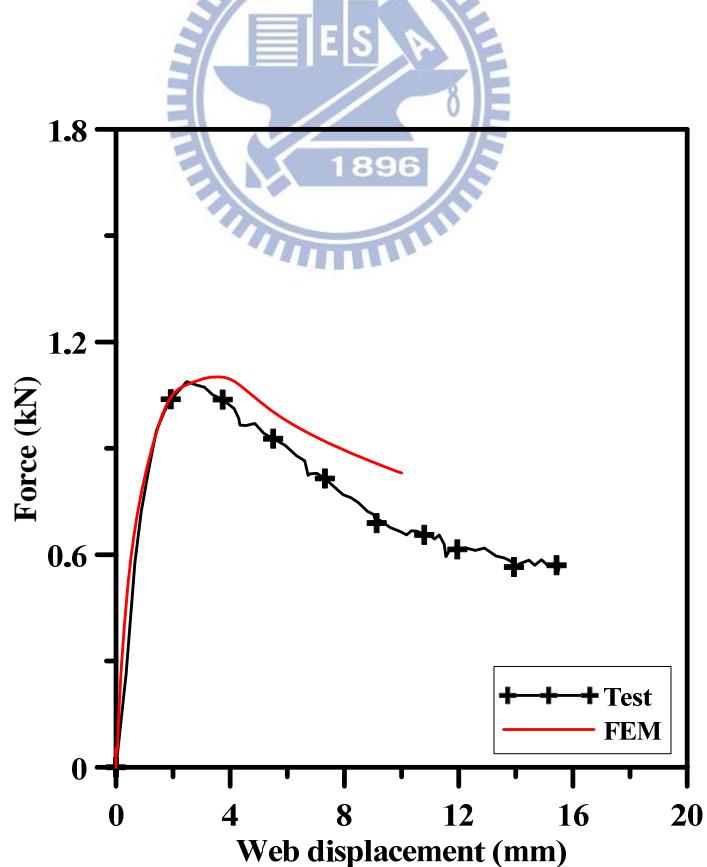


圖 5.18 試體 ETF-A-a0.6x0.4 分析與實驗之載重-位移曲線

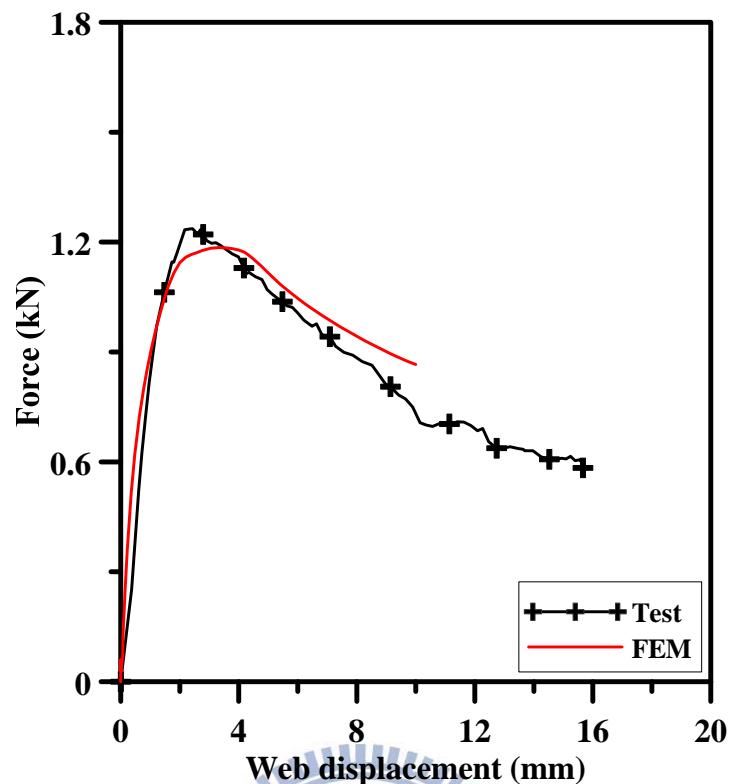


圖 5.19 試體 ETF-A-a0.6x0.6 分析與實驗之載重-位移曲線



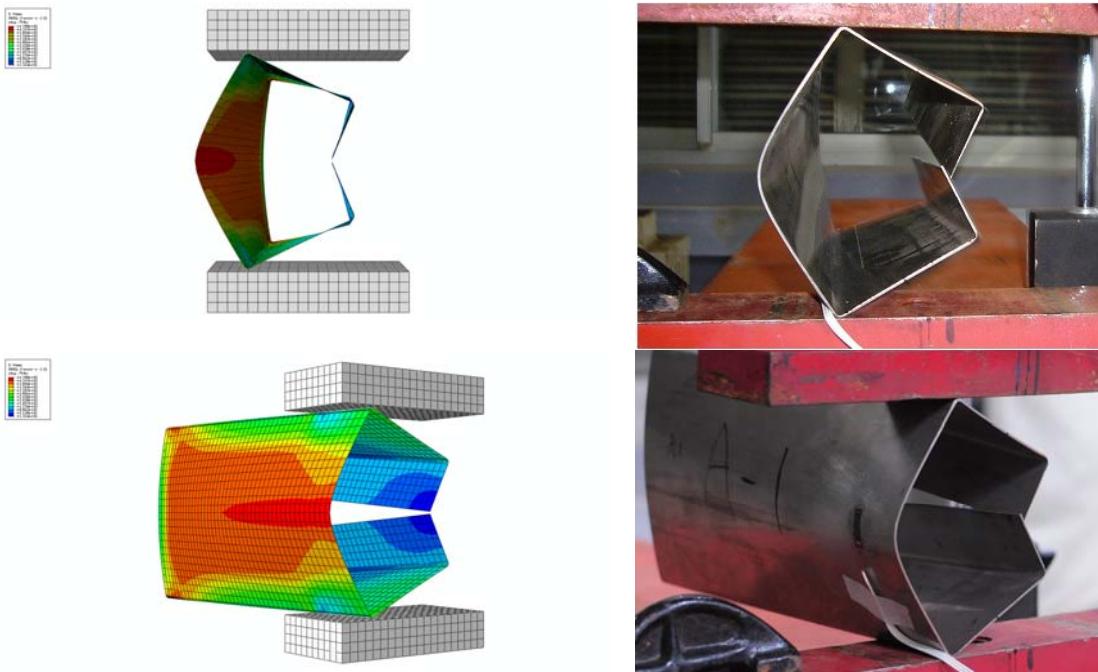


圖 5.20 ETF-A-a0x0 之分析模型與實驗試體變形圖

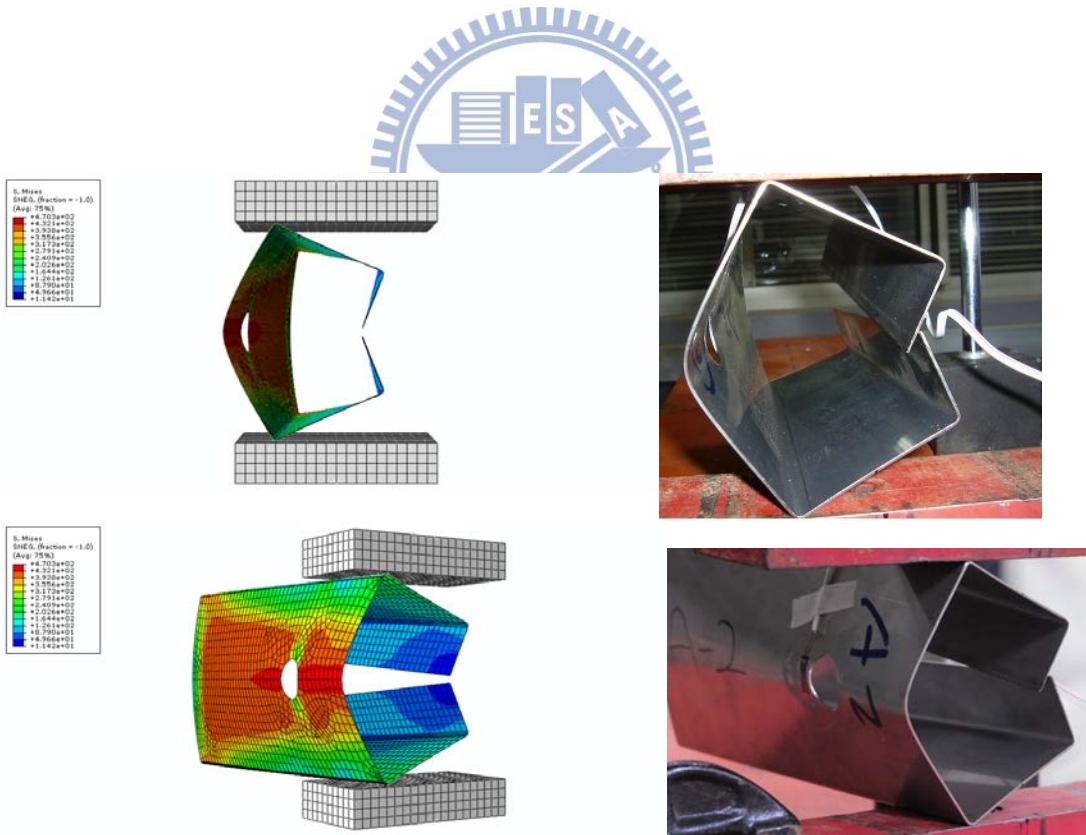


圖 5.21 ETF-A-a0.2x0 之分析模型與實驗試體變形圖

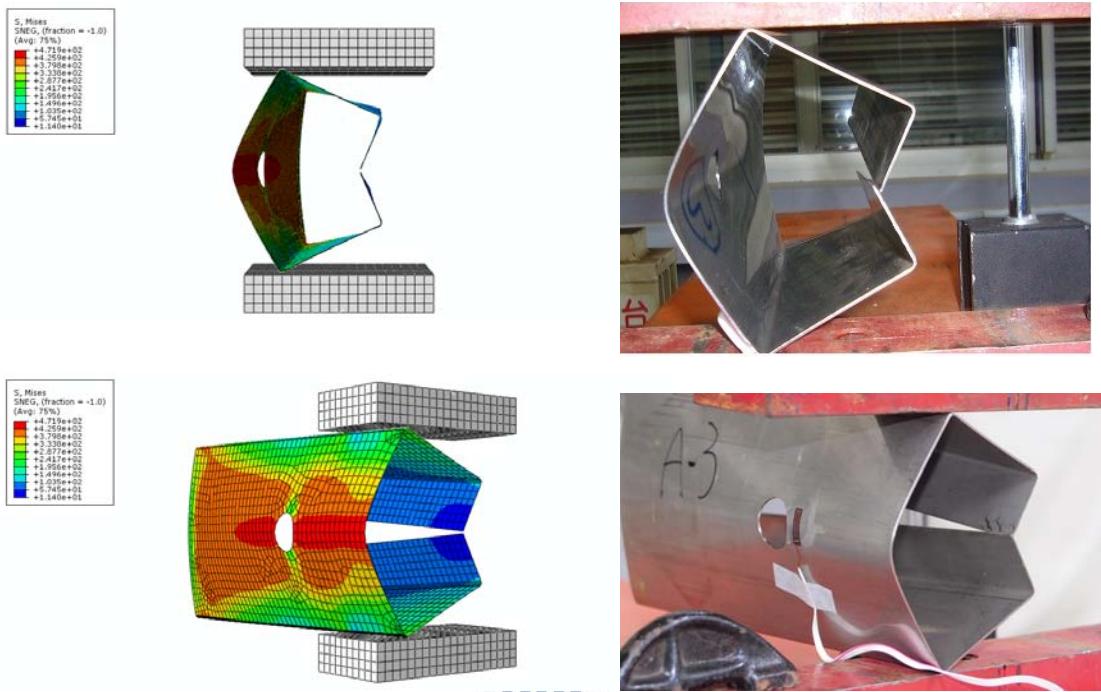


圖 5.22 ETF-A-a0.2x0.2 之分析模型與實驗試體變形圖

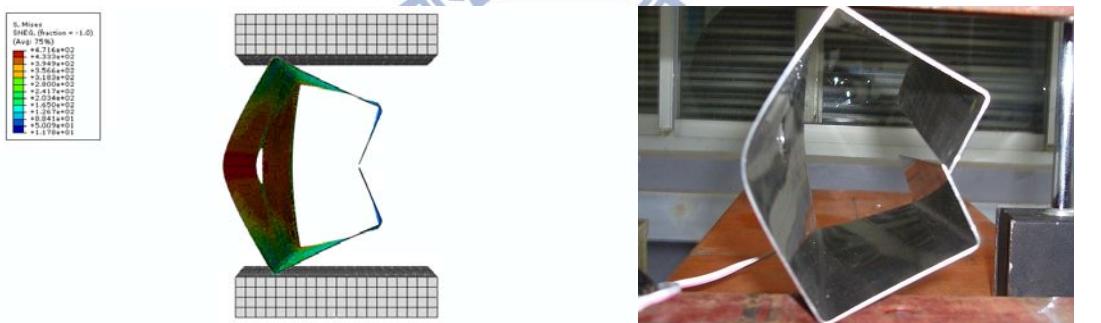


圖 5.23 ETF-A-a0.2x0.4 之分析模型與實驗試體變形圖

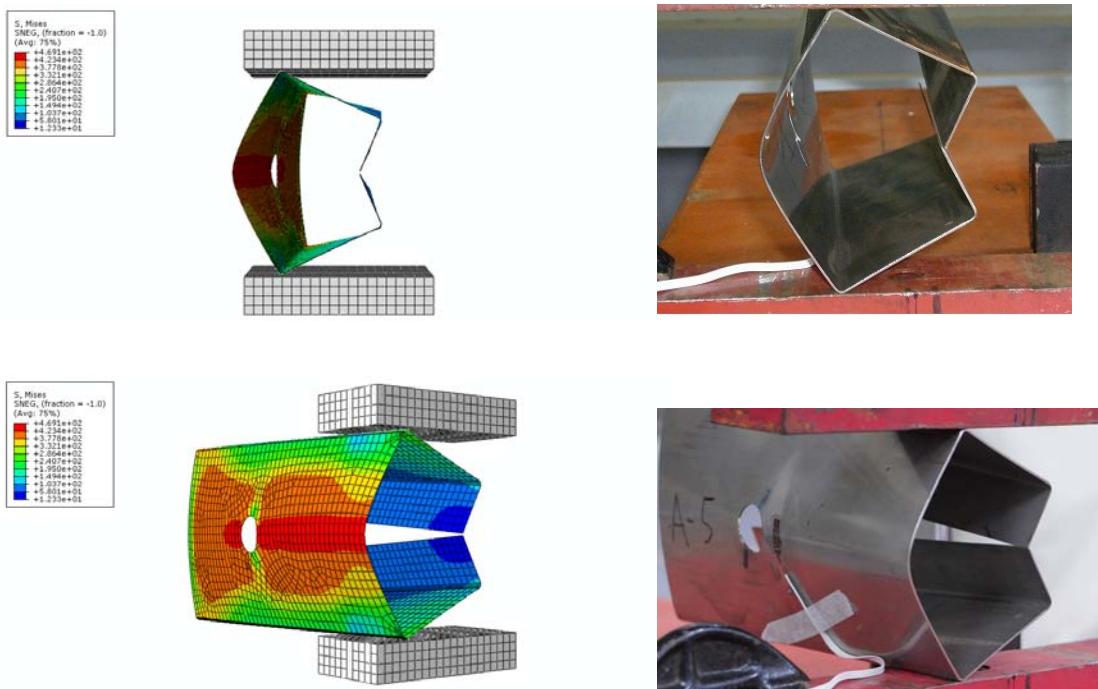


圖 5.24 ETF-A-a0.2x0.6 之分析模型與實驗試體變形圖

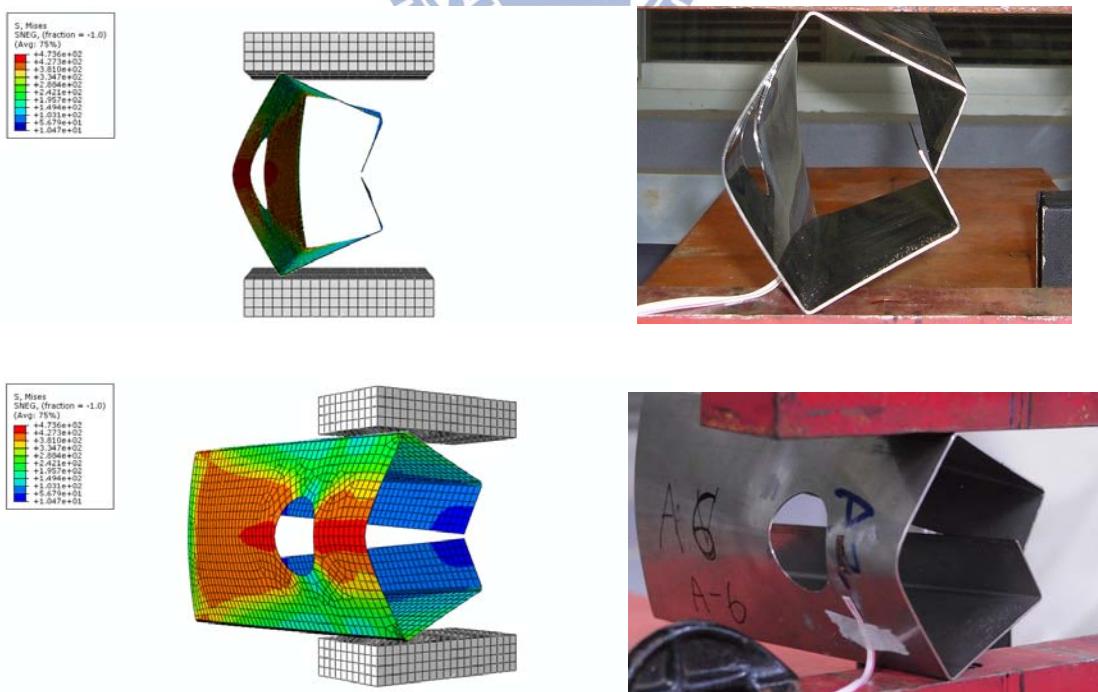


圖 5.25 ETF-A-a0.4x0 之分析模型與實驗試體變形圖

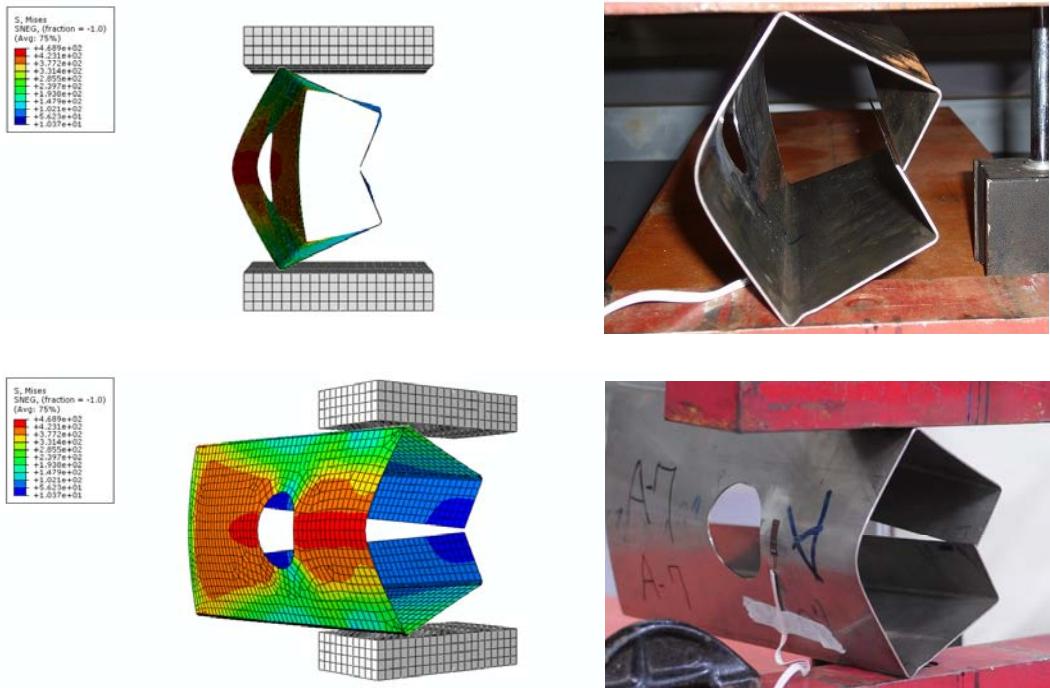


圖 5.26 ETF-A-a0.4x0.2 之分析模型與實驗試體變形圖

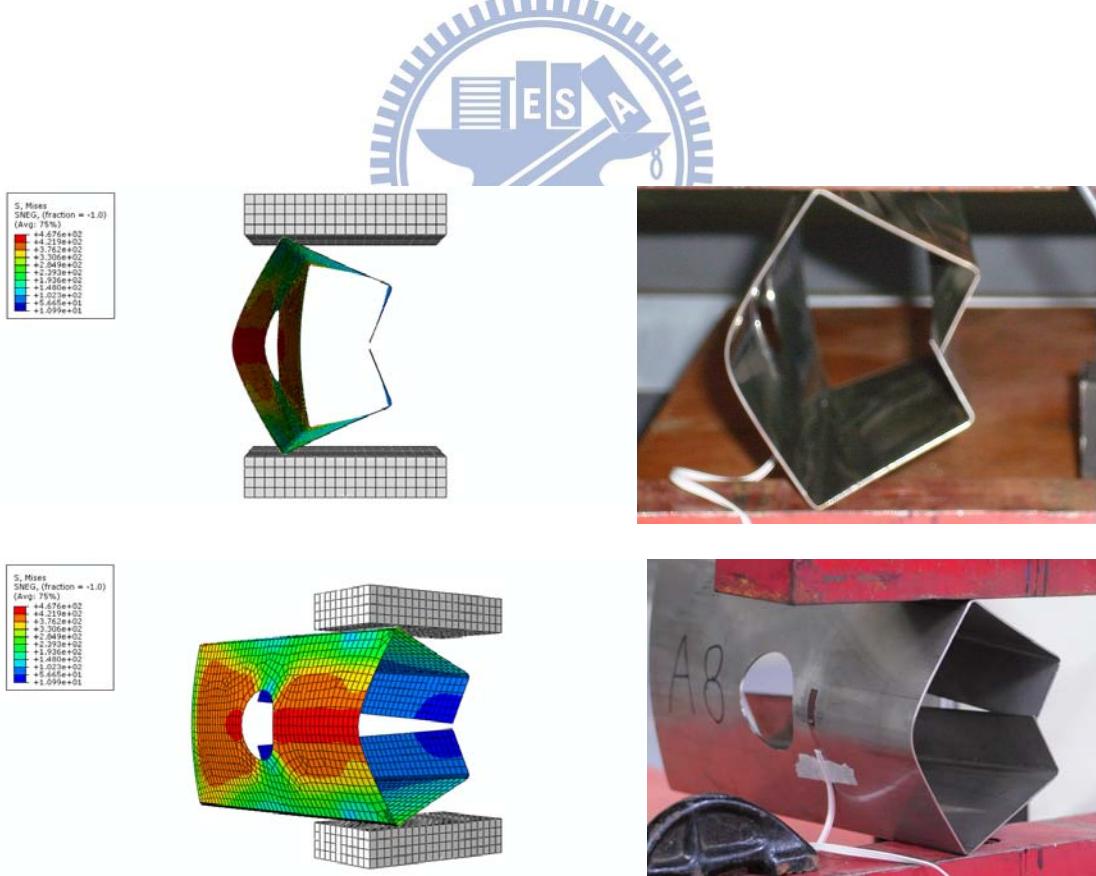


圖 5.27 ETF-A-a0.4x0.4 之分析模型與實驗試體變形圖

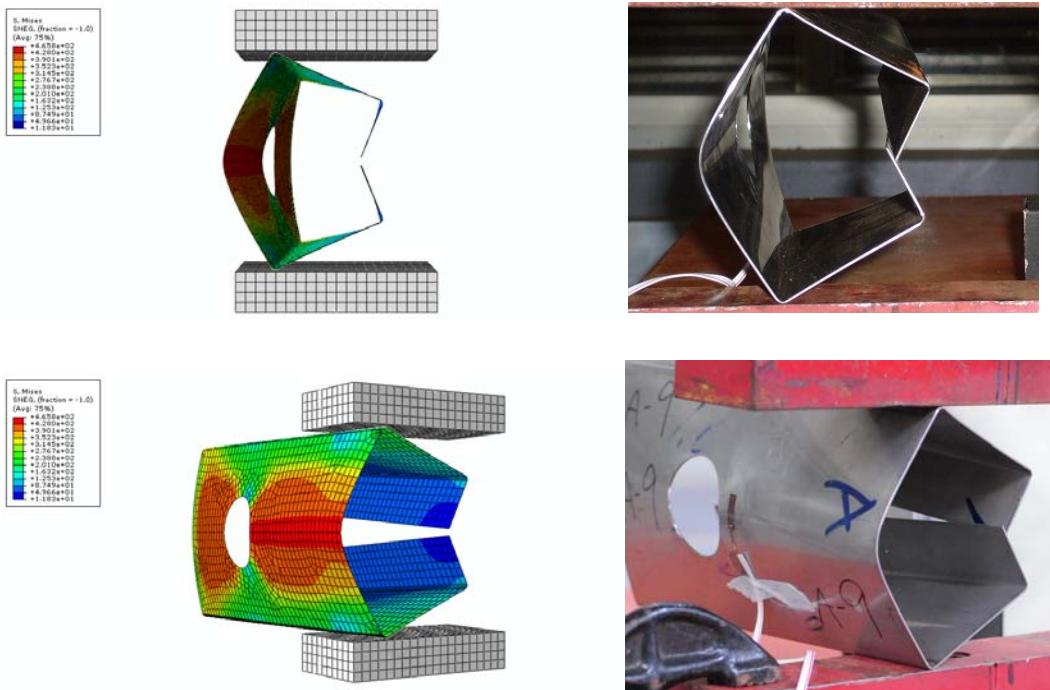


圖 5.28 ETF-A-a0.4x0.6 之分析模型與實驗試體變形圖

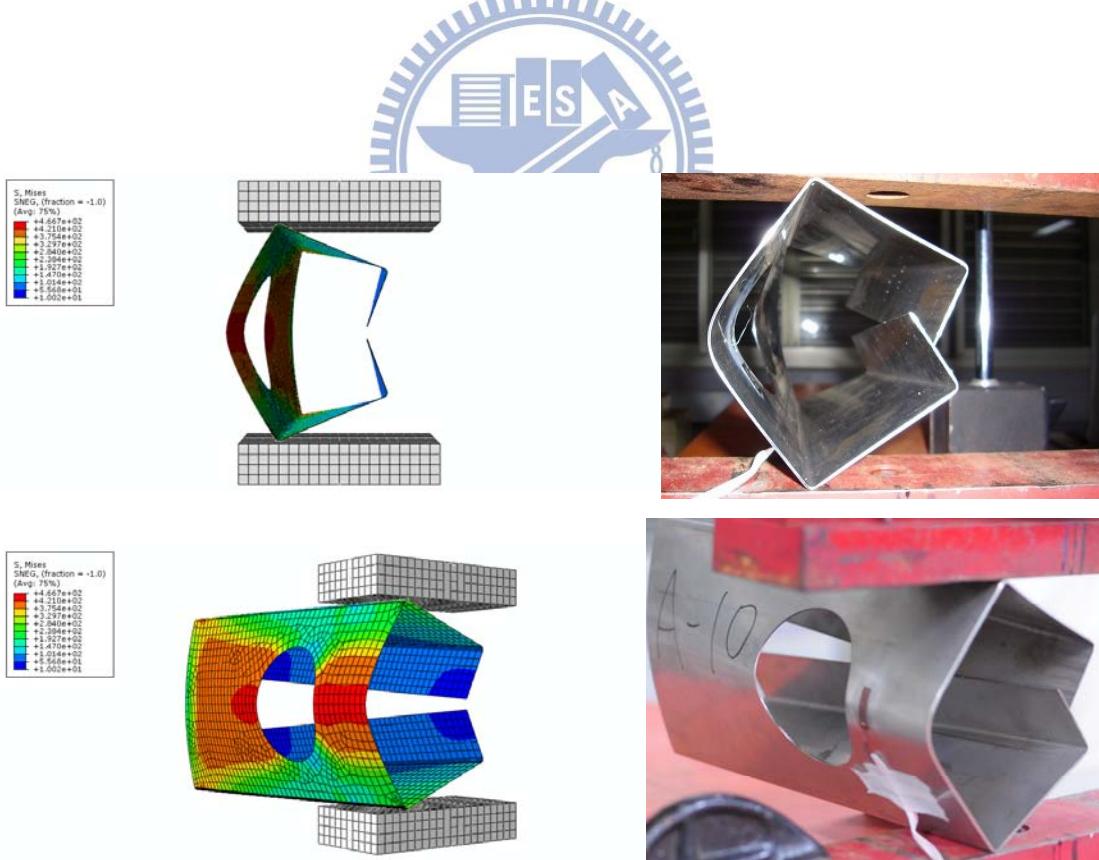


圖 5.29 ETF-A-a0.6x0 之分析模型與實驗試體變形圖

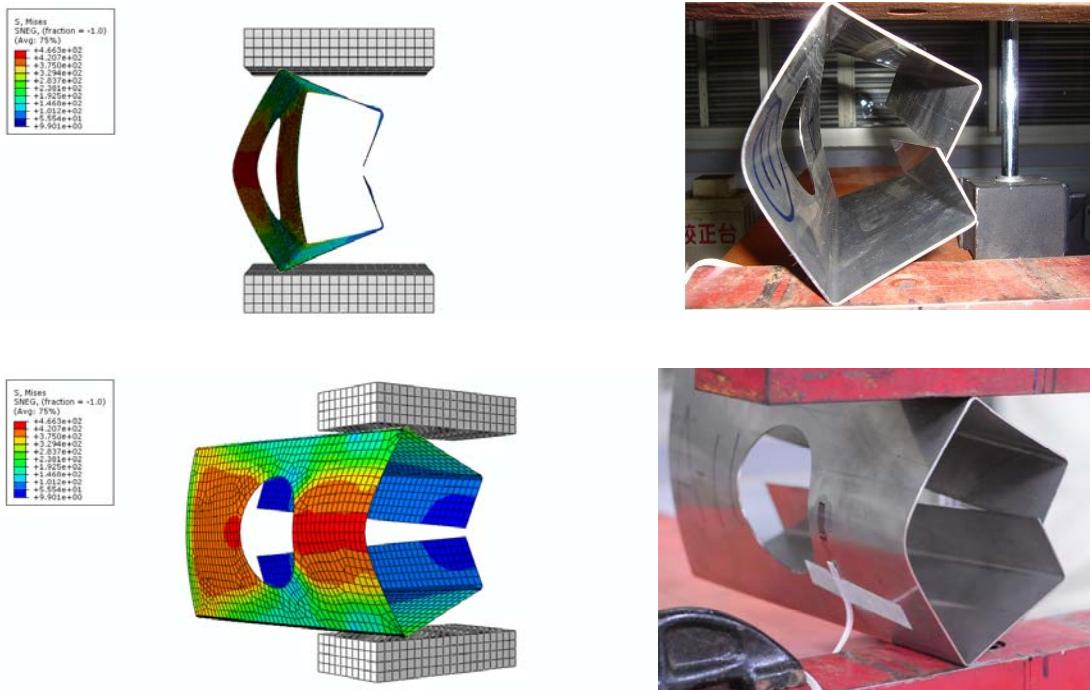


圖 5.30 ETF-A-a0.6x0.2 之分析模型與實驗試體變形圖

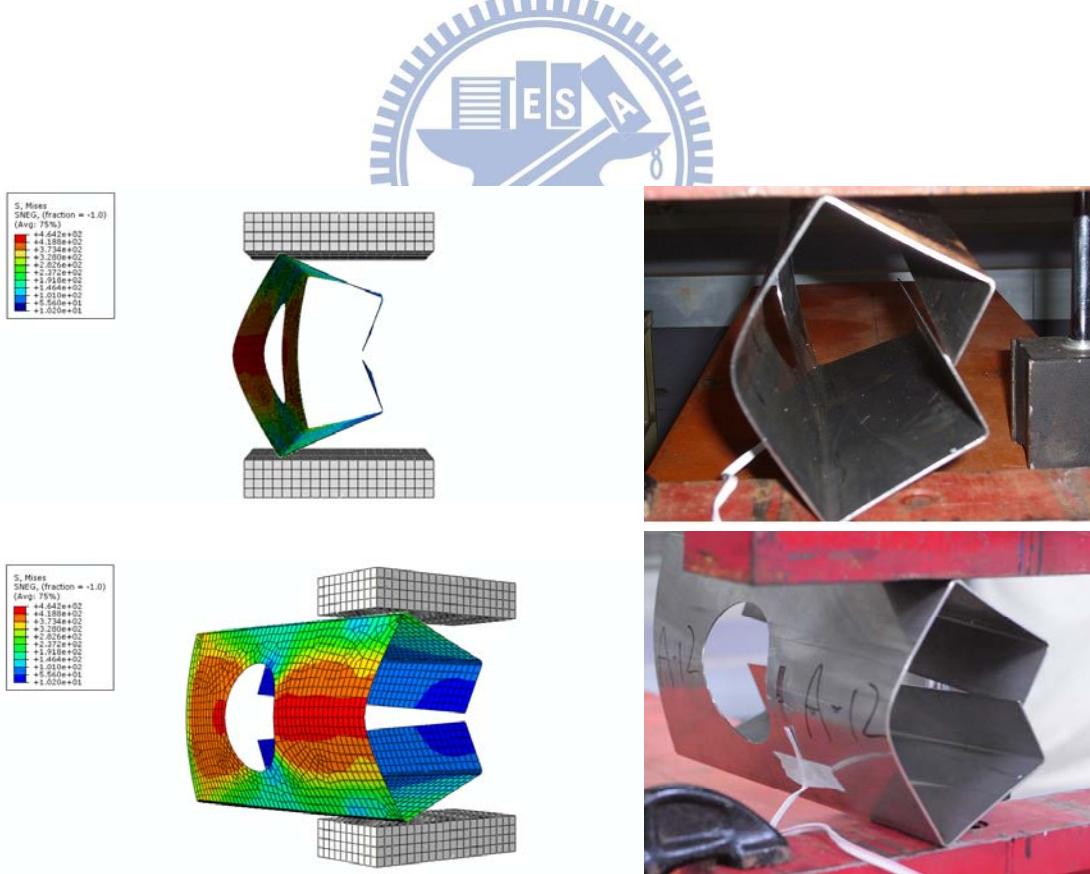


圖 5.31 ETF-A-a0.6x0.4 之分析模型與實驗試體變形圖

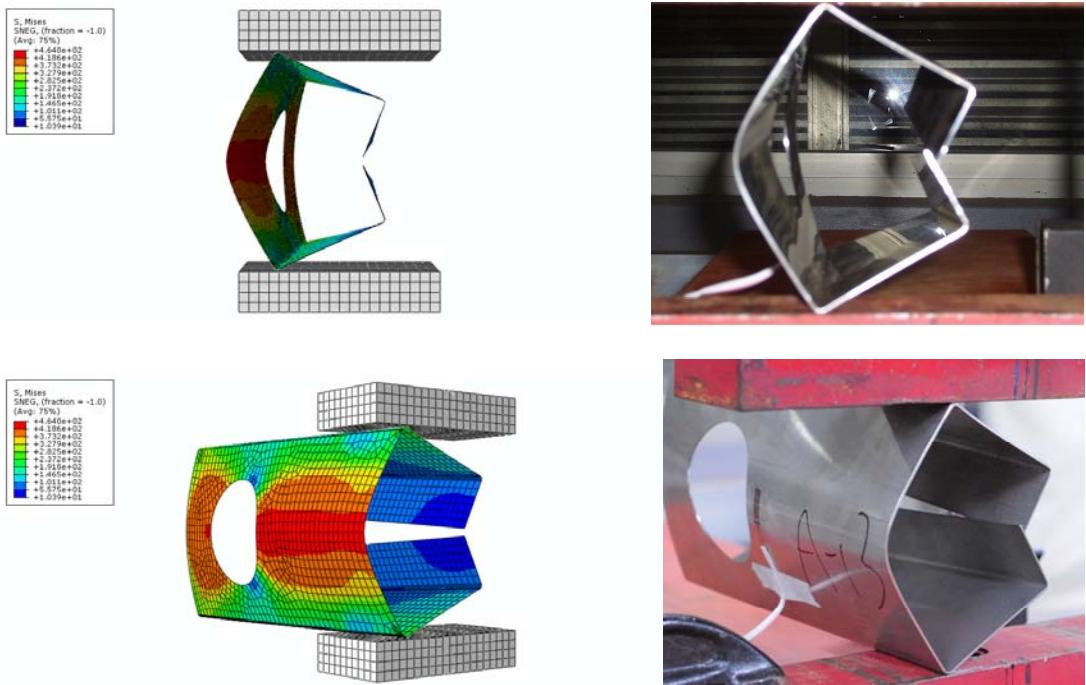


圖 5.32 ETF-A-a0.6x0.6 之分析模型與實驗試體變形圖



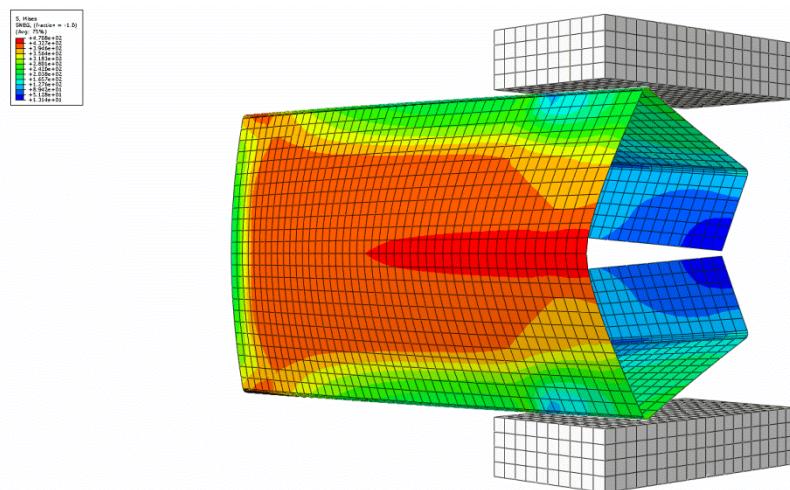


圖 5.33 試體 ETF-A-a0x0 分析模型之應力分佈圖

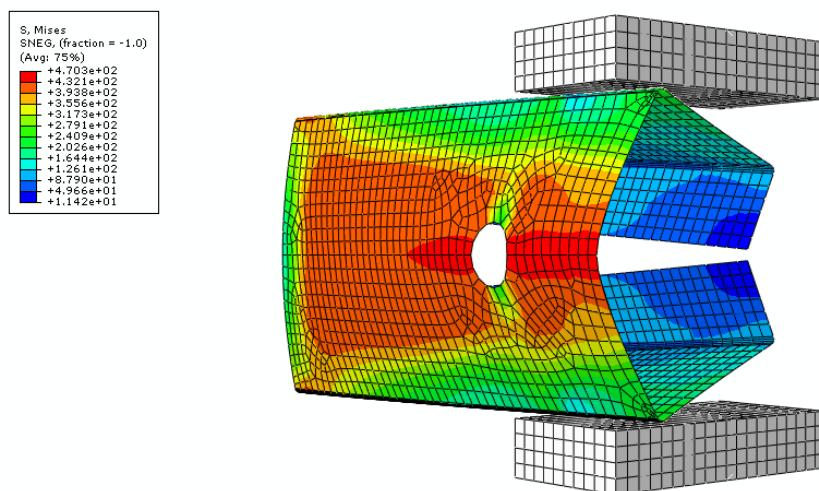


圖 5.34 試體 ETF-A-a0.2x0 分析模型之應力分佈圖

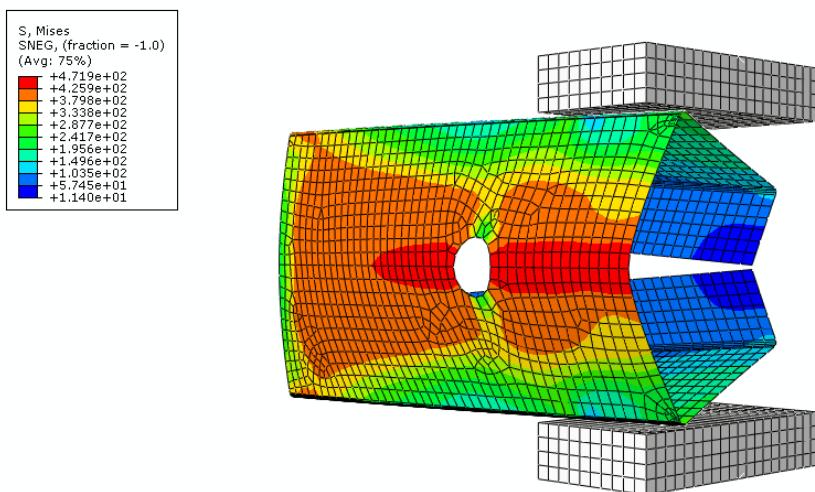


圖 5.35 試體 ETF-A-a0.2x0.2 分析模型之應力分佈圖

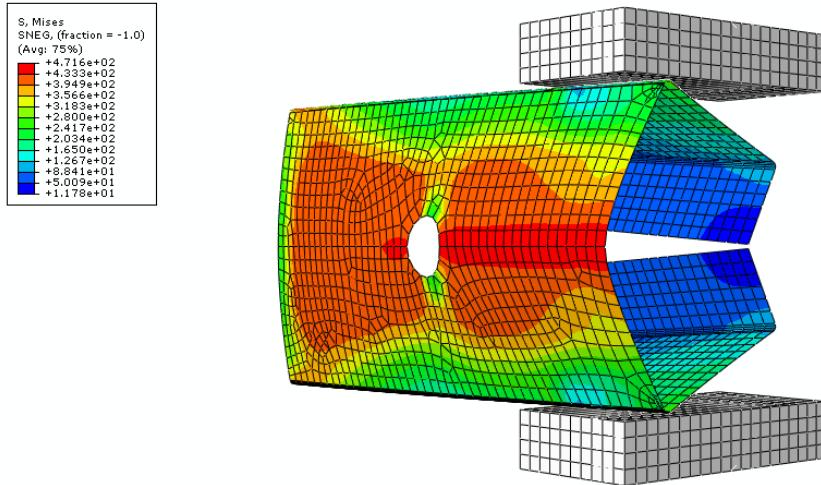


圖 5.36 試體 ETF-A-a0.2x0.4 分析模型之應力分佈圖

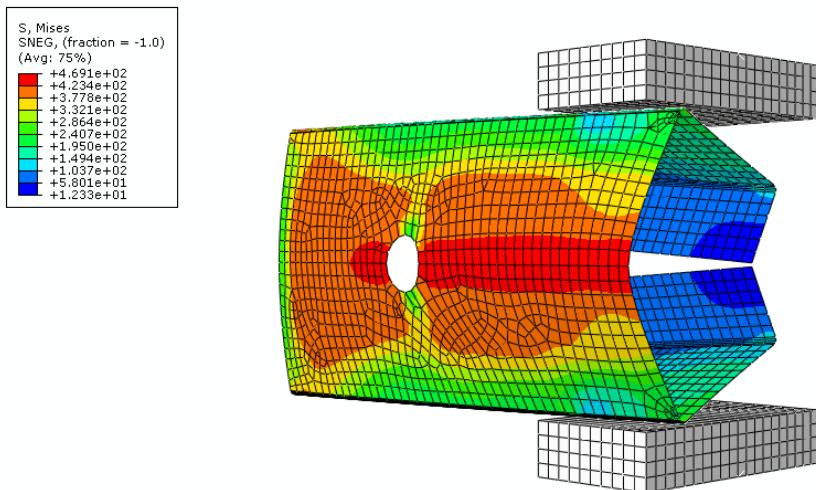


圖 5.37 試體 ETF-A-a0.2x0.6 分析模型之應力分佈圖

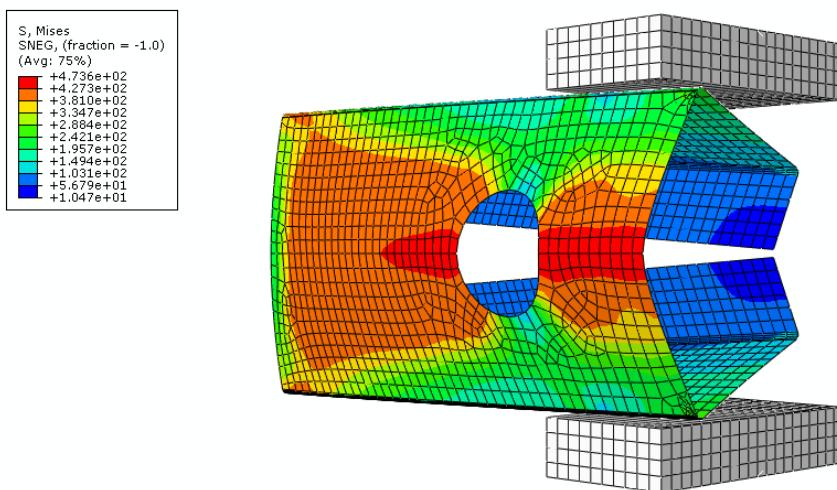


圖 5.38 試體 ETF-A-a0.4x0 分析模型之應力分佈圖

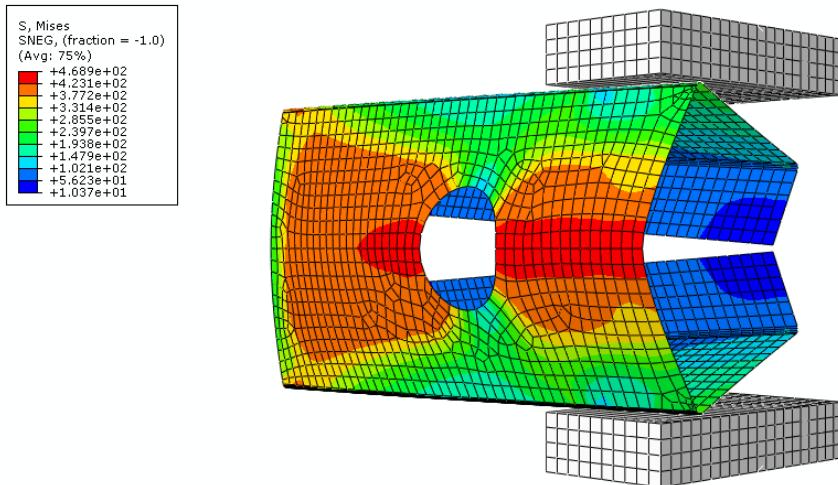


圖 5.39 試體 ETF-A-a0.4x0.2 分析模型之應力分佈圖

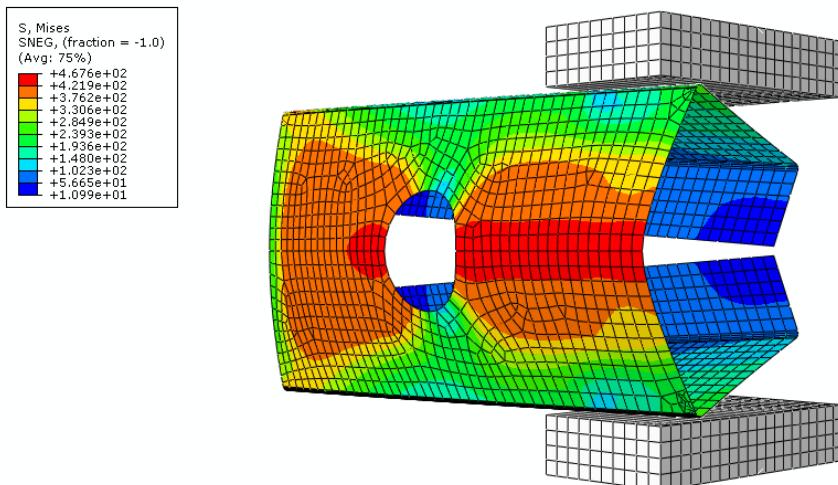


圖 5.40 試體 ETF-A-a0.4x0.4 分析模型之應力分佈圖

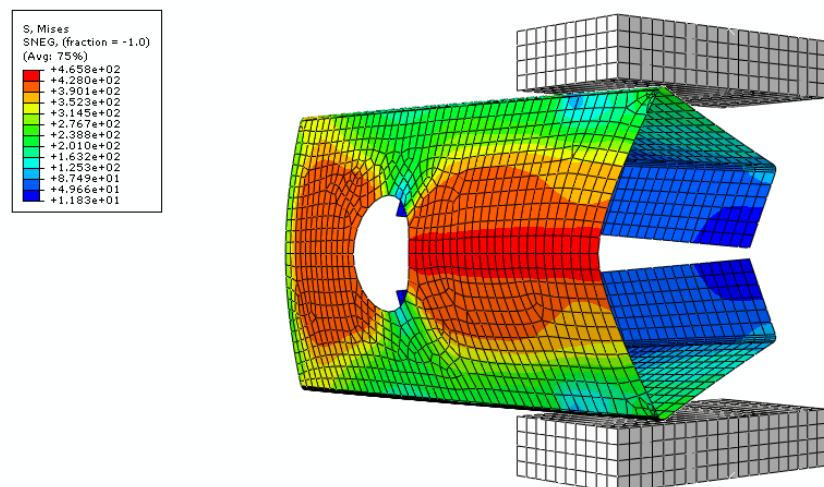


圖 5.41 試體 ETF-A-a0.4x0.6 分析模型之應力分佈圖

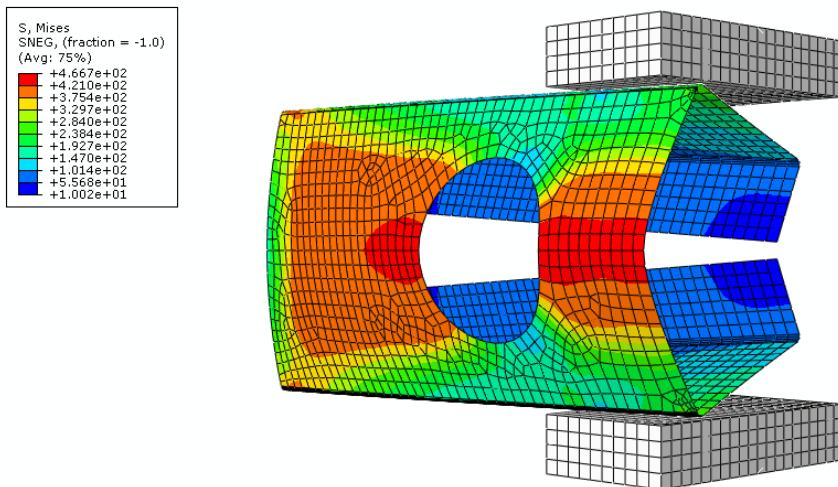


圖 5.42 試體 ETF-A-a0.6x0 分析模型之應力分佈圖

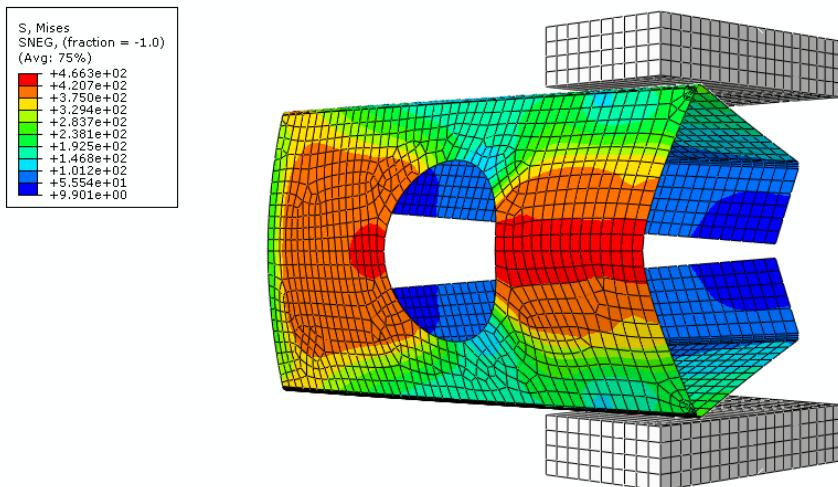


圖 5.43 試體 ETF-A-a0.6x0.2 分析模型之應力分佈圖

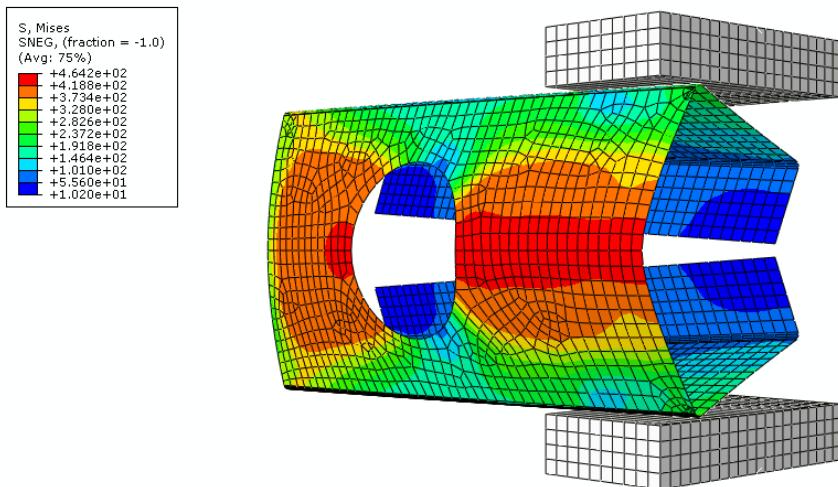


圖 5.44 試體 ETF-A-a0.6x0.4 分析模型之應力分佈圖

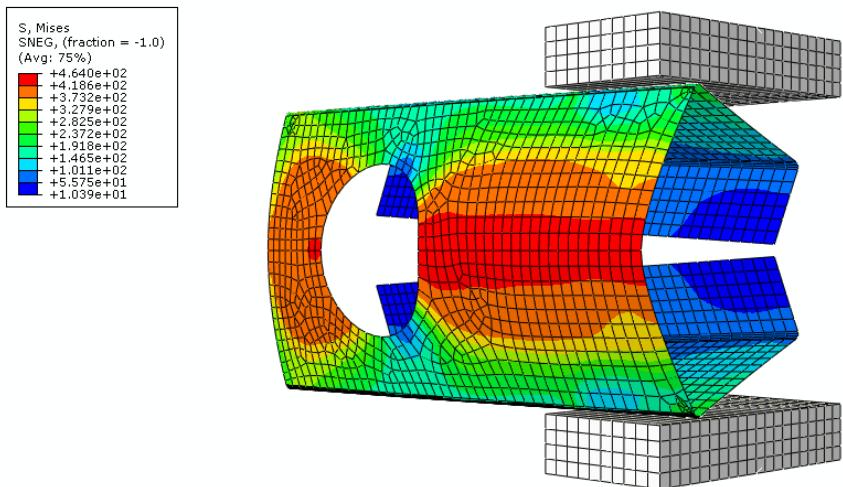
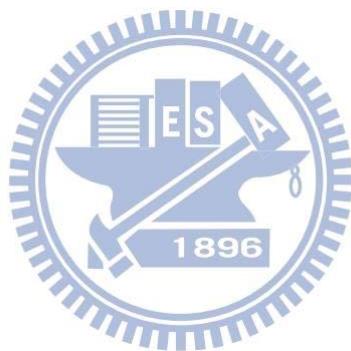


圖 5.45 試體 ETF-A-a0.6x0.6 分析模型之應力分佈圖



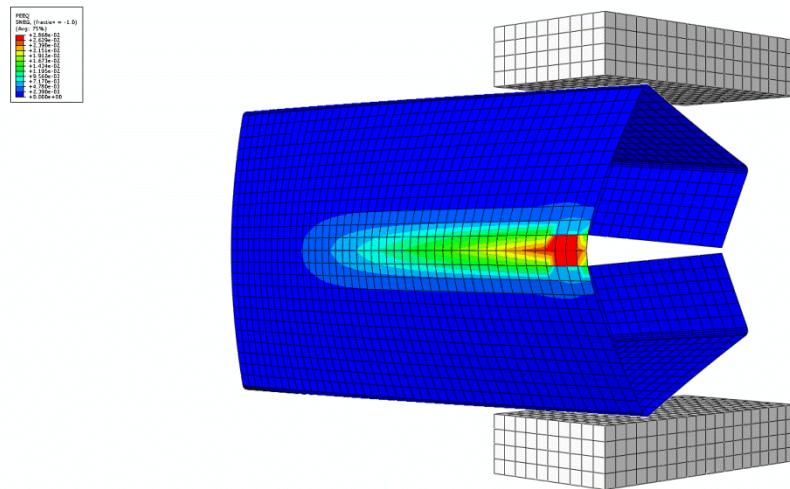


圖 5.46 試體 ETF-A-a0x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

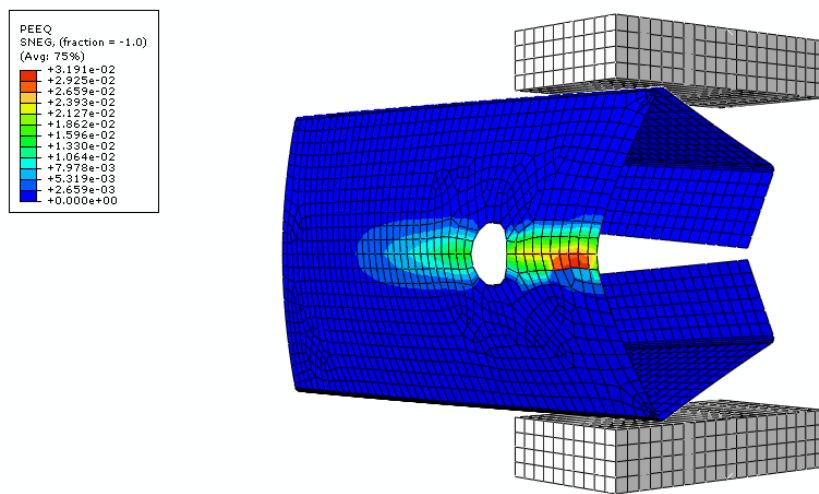


圖 5.47 試體 ETF-A-a0.2x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

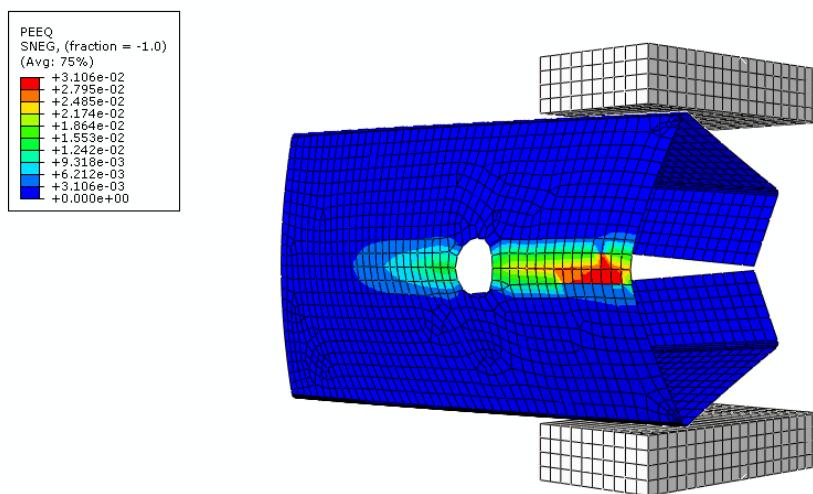


圖 5.48 試體 ETF-A-a0.2x0.2 分析模型之等值塑性應變分佈圖

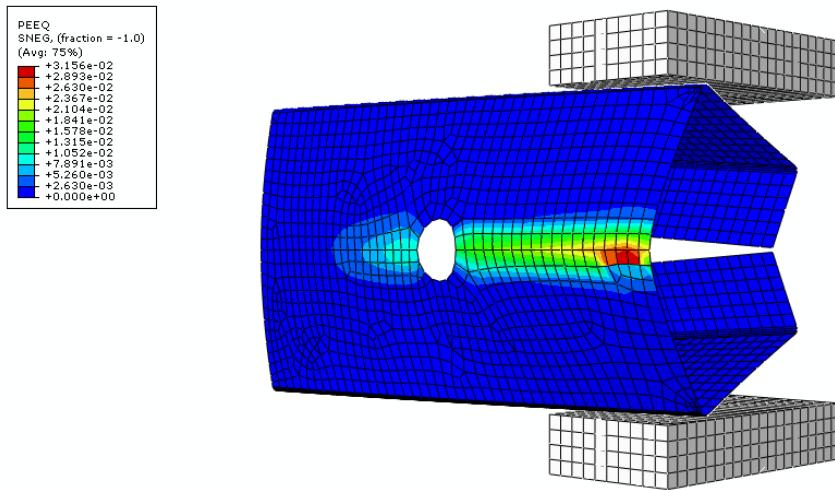


圖 5.49 試體 ETF-A-a0.2x0.4 分析模型之等值塑性應變分佈圖

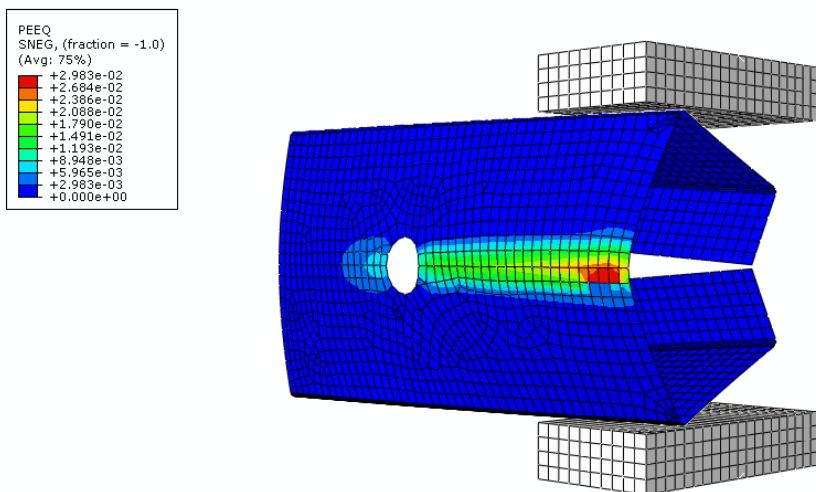


圖 5.50 試體 ETF-A-a0.2x0.6 分析模型之等值塑性應變分佈圖

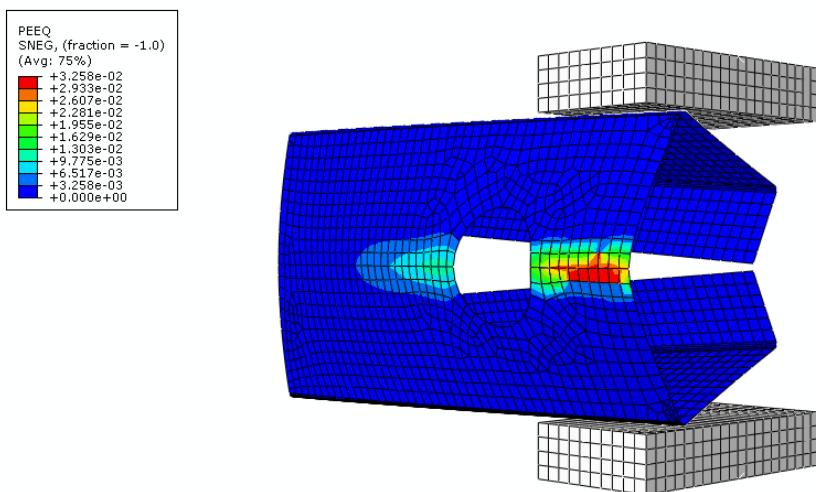


圖 5.51 試體 ETF-A-a0.4x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

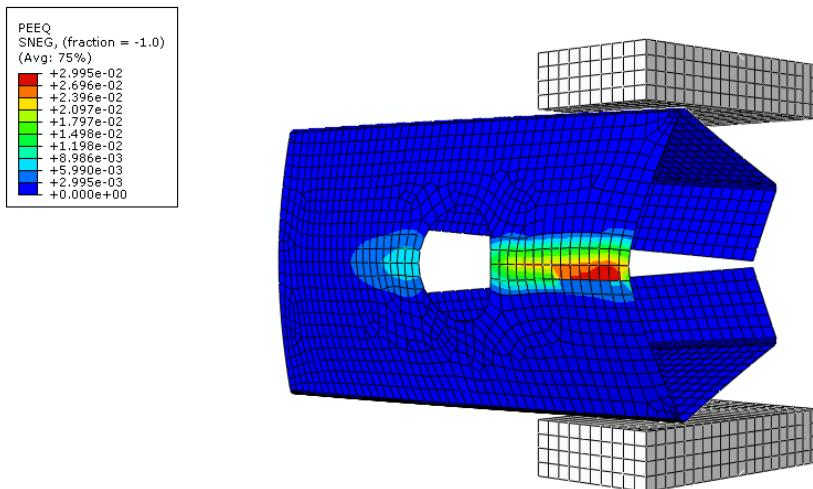


圖 5.52 試體 ETF-A-a0.4x0.2 分析模型之等值塑性應變分佈圖

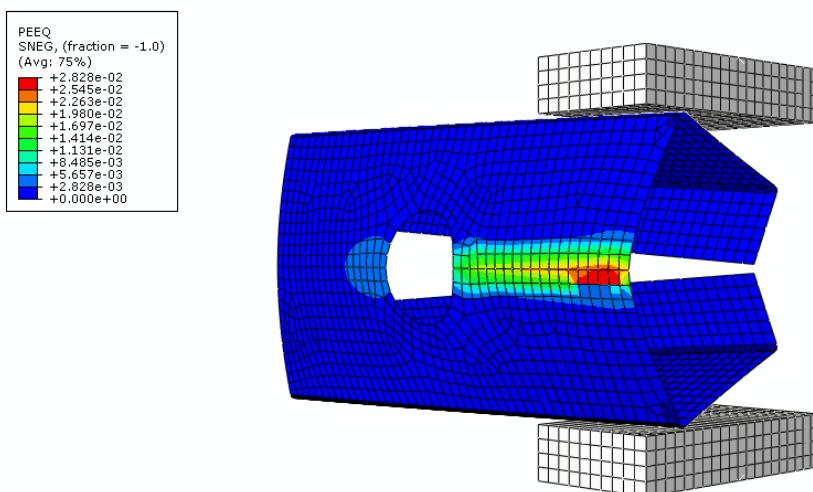


圖 5.53 試體 ETF-A-a0.4x0.4 分析模型之等值塑性應變分佈圖

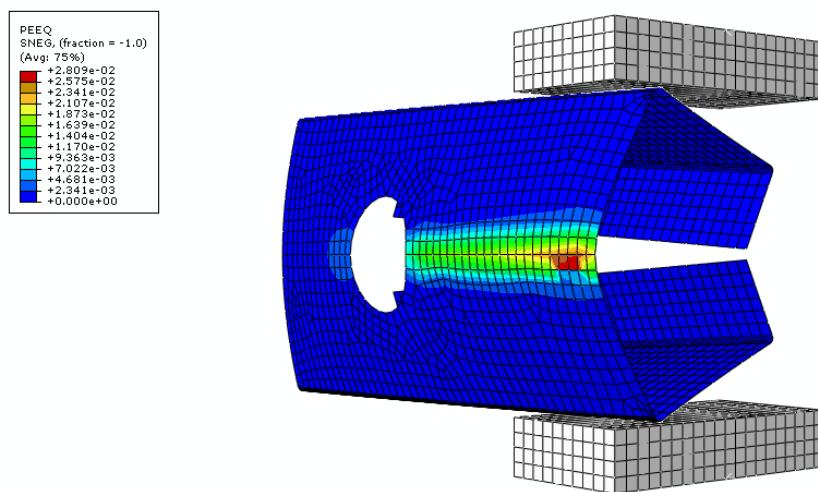


圖 5.54 試體 ETF-A-a0.4x0.6 分析模型之等值塑性應變分佈圖

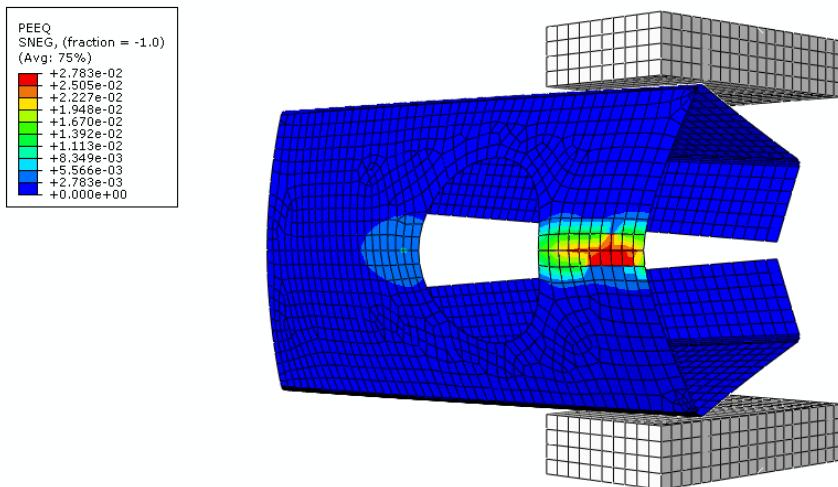


圖 5.55 試體 ETF-A-a0.6x0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

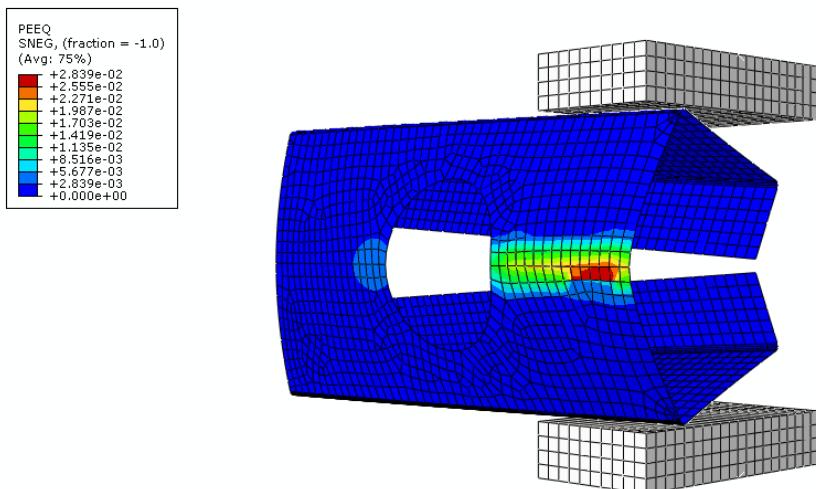


圖 5.56 試體 ETF-A-a0.6x0.2 分析模型之等值塑性應變分佈圖

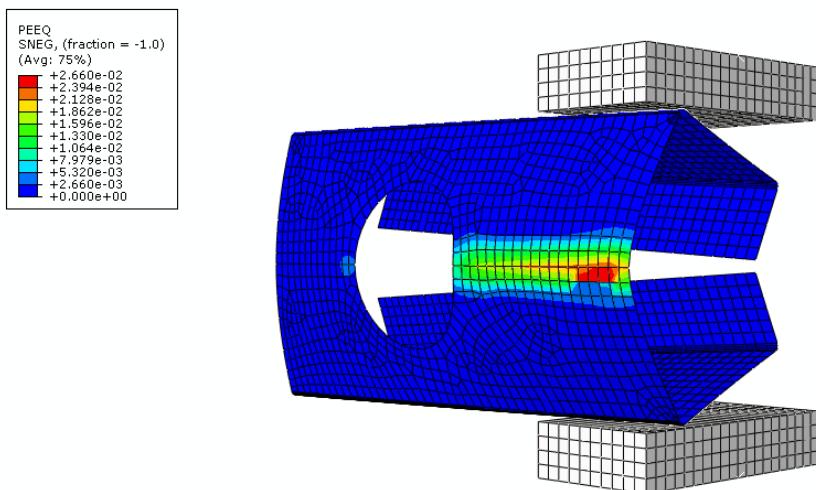


圖 5.57 試體 ETF-A-a0.6x0.4 分析模型之等值塑性應變分佈圖

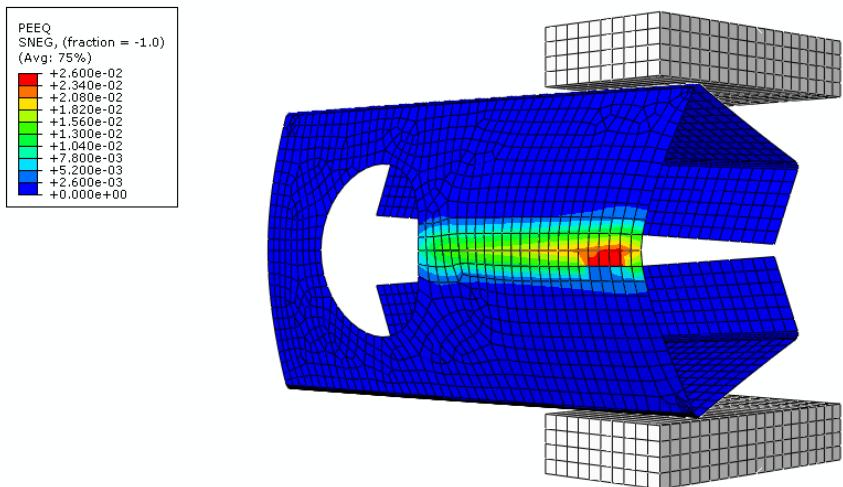
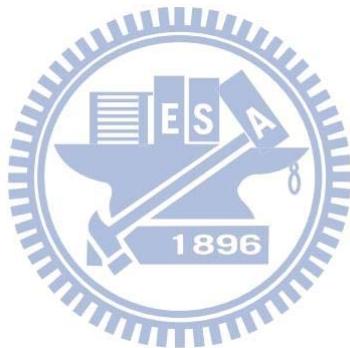


圖 5.58 試體 ETF-A-a $0.6 \times 0.6$  分析模型之等值塑性應變分佈圖



## 附錄 A 實驗終止時試體變形情況



A.1 試體 ETF-A-a0x0 變形  
1896



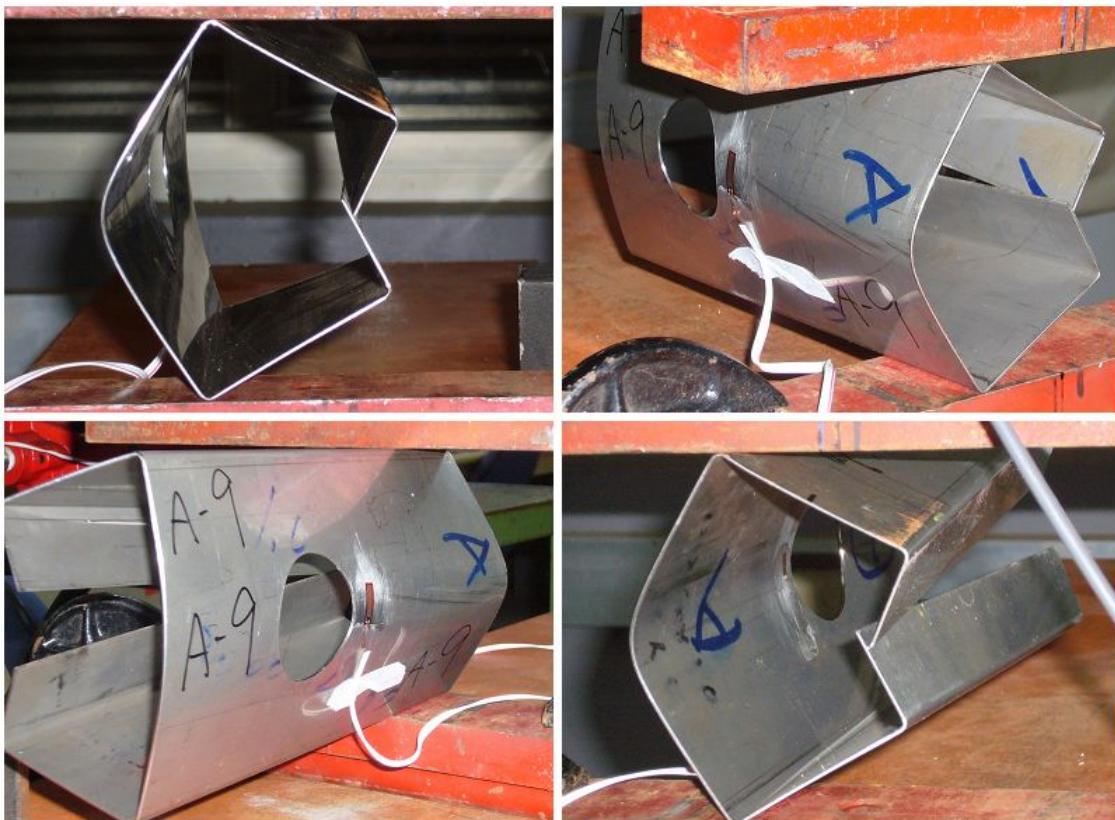
A.2 試體 ETF-A-a0.2x0 變形



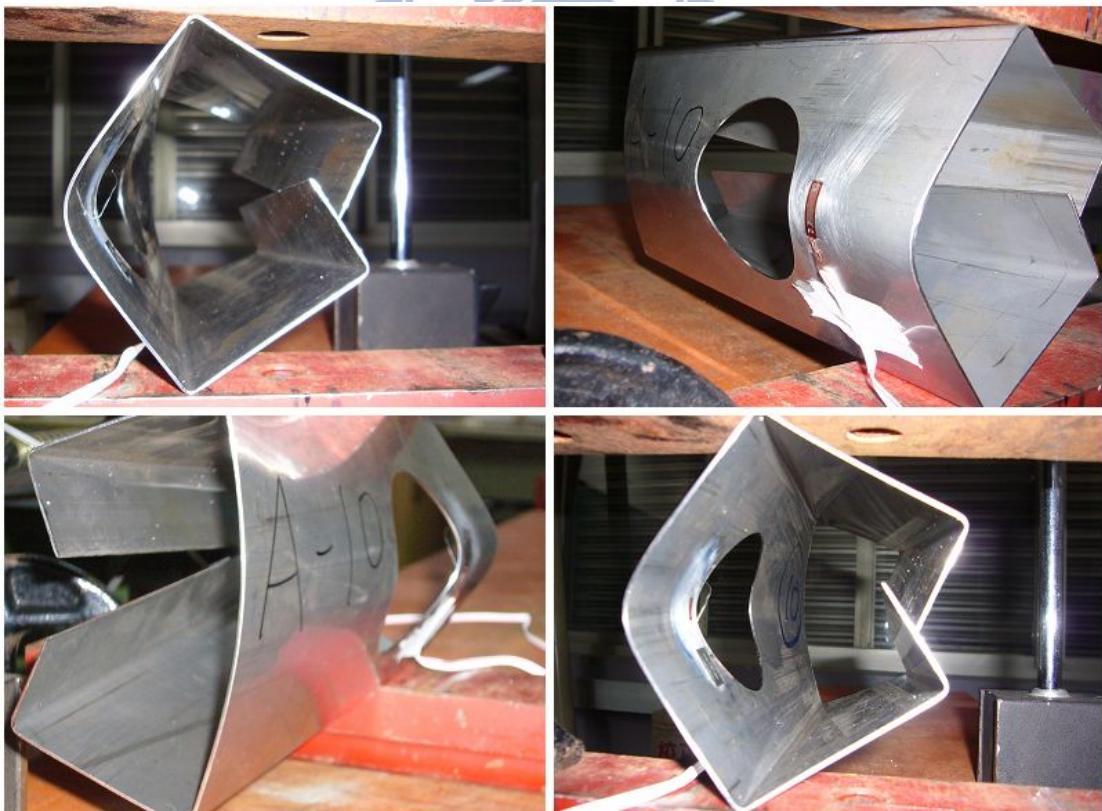
A.3 試體 ETF-A-a0.2x0.6 變形



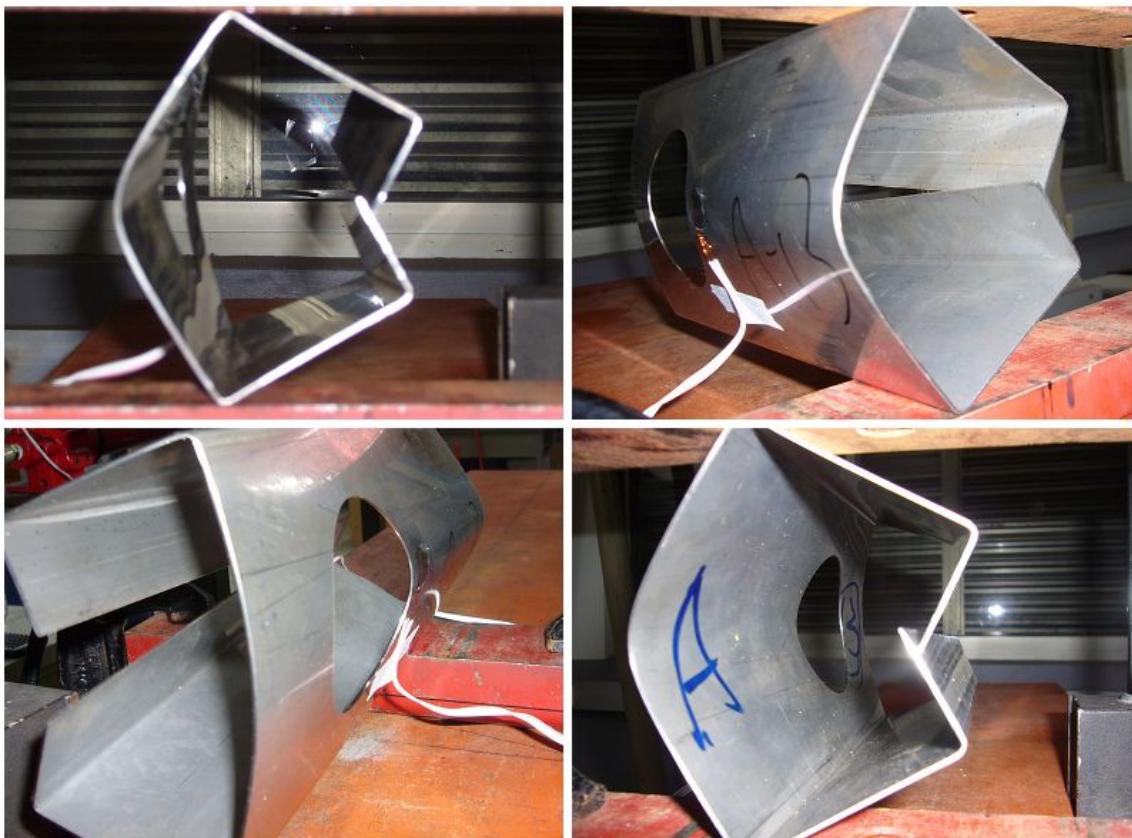
A.4 試體 ETF-A-a0.4x0 變形



A.5 試體 ETF-A-a0.4x0.6 變形

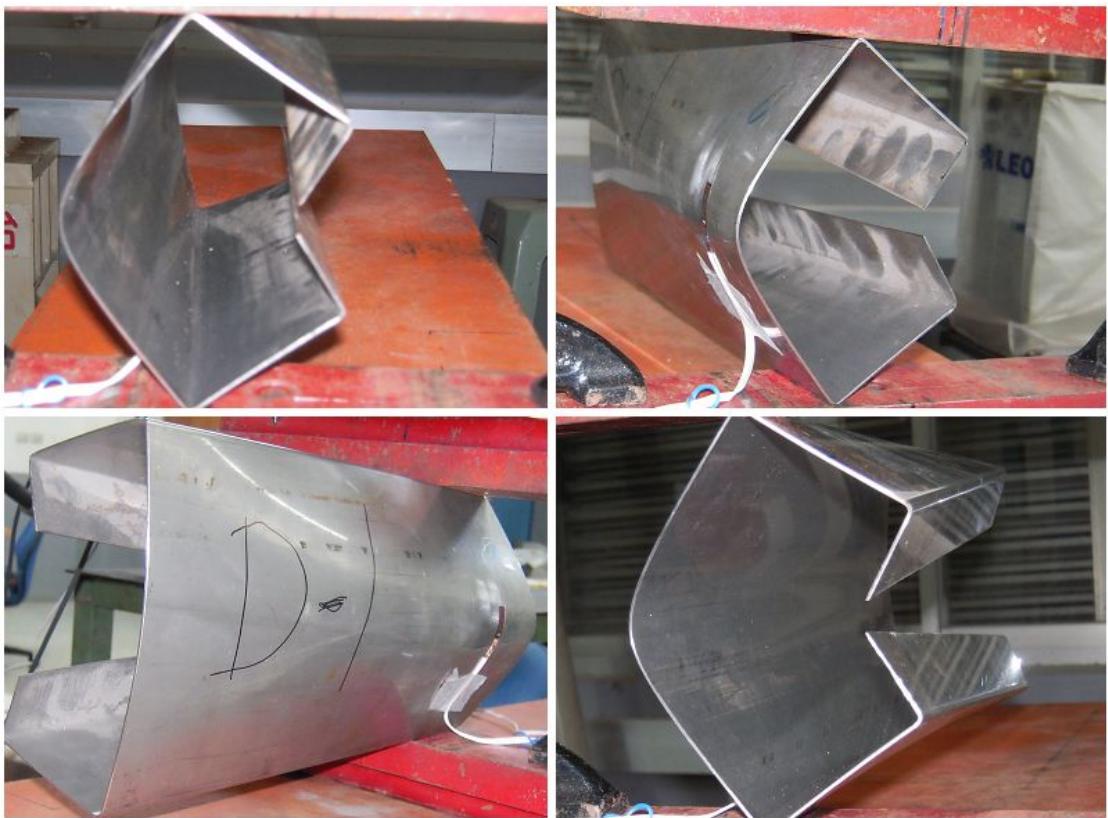


A.6 試體 ETF-A-a0.6x0 變形



A.7 試體 ETF-A-a0.6x0.6 變形





A.8 試體 ETF-B-a0x0 變形



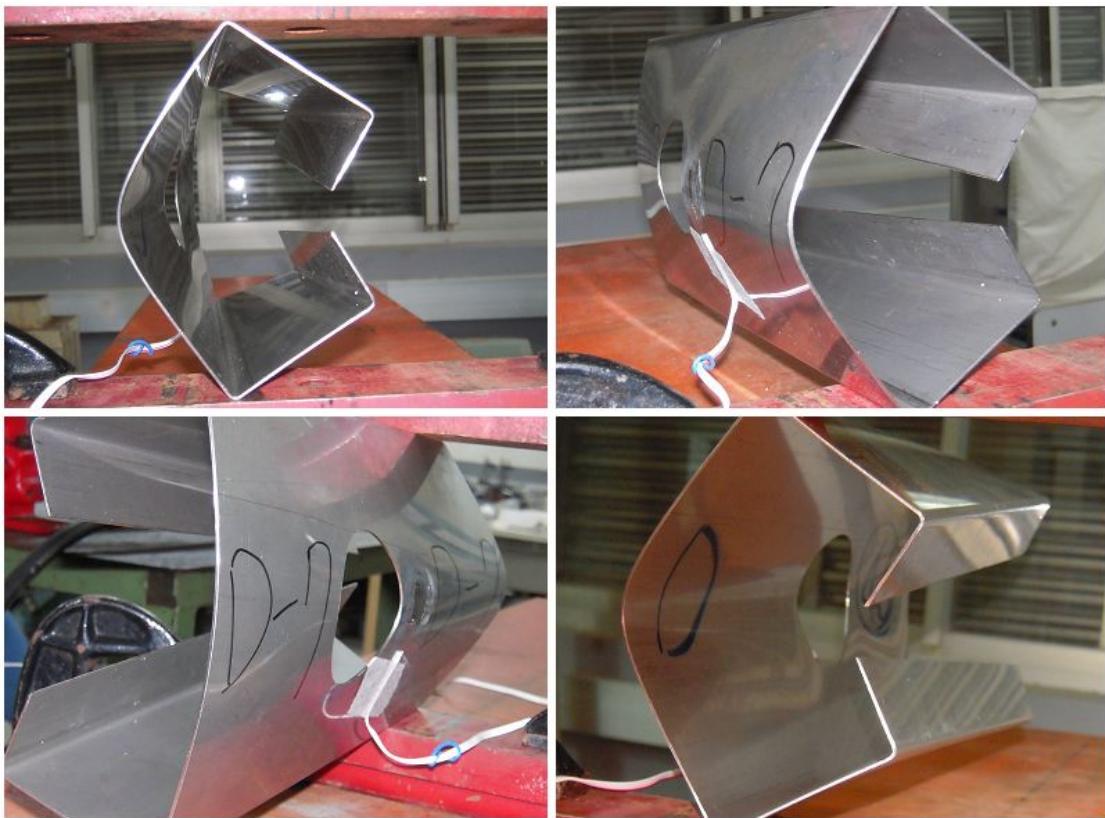
A.9 試體 ETF-B-a0.2x0 變形



A.10 試體 ETF-B-a0.2x0.6 變形



A.11 試體 ETF-B-a0.4x0 變形



A.12 試體 ETF-B-a0.4x0.6 變形



A.13 試體 ETF-B-a0.6x0 變形



A.14 試體 ETF-B-a0.6x0.6 變形





A.15 試體 ETF-C-a0x0 變形



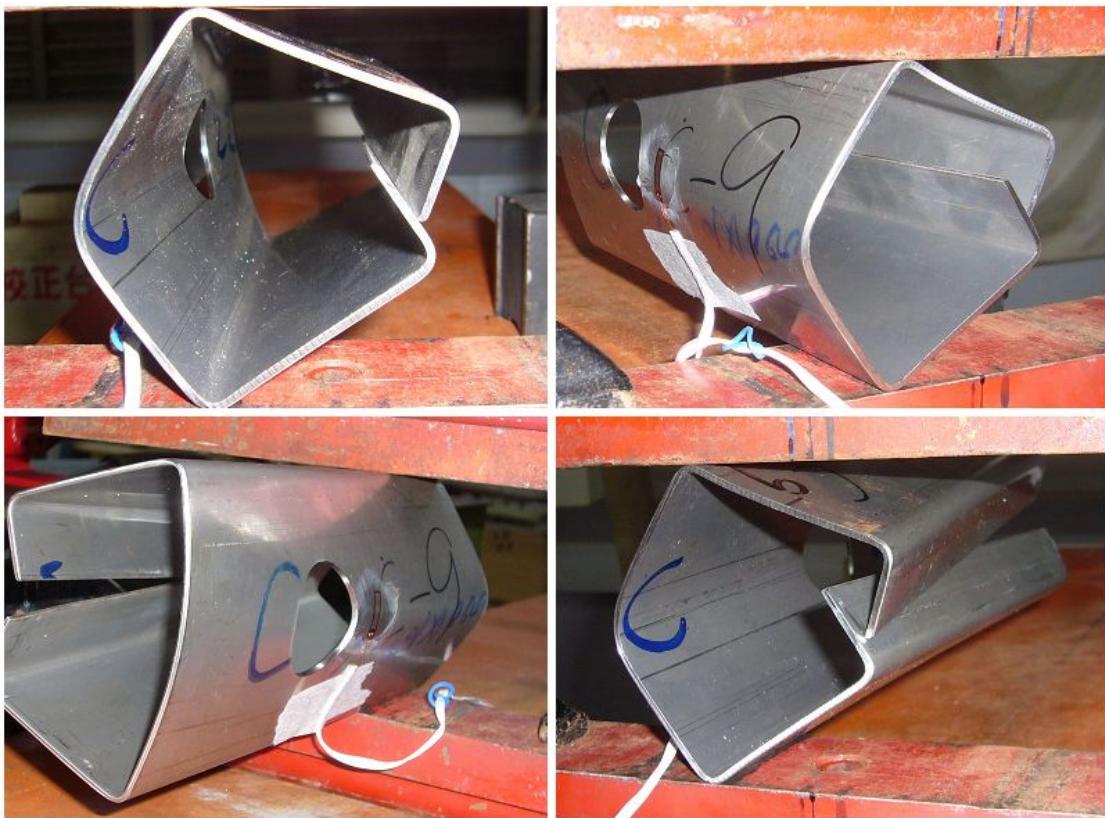
A.16 試體 ETF-C-a0.2x0 變形



A.17 試體 ETF-C-a0.2x0.6 變形



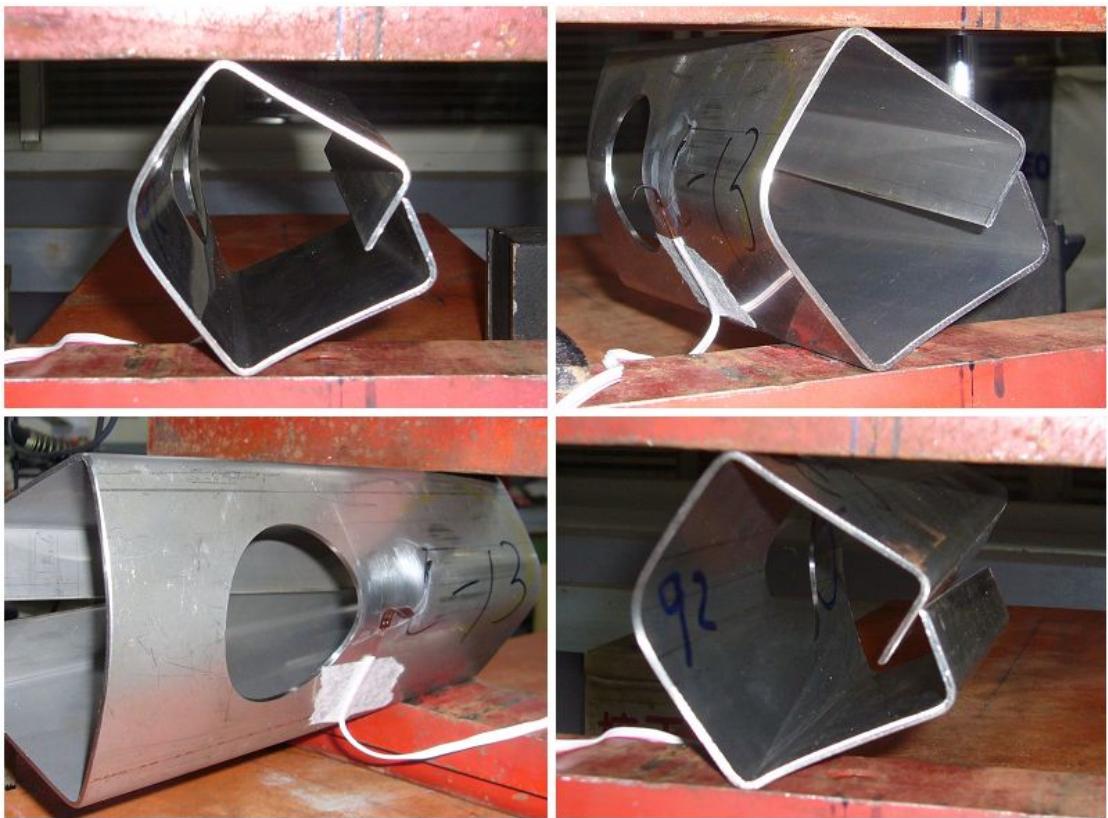
A.18 試體 ETF-C-a0.4x0 變形



A.19 試體 ETF-C-a0.4x0.6 變形

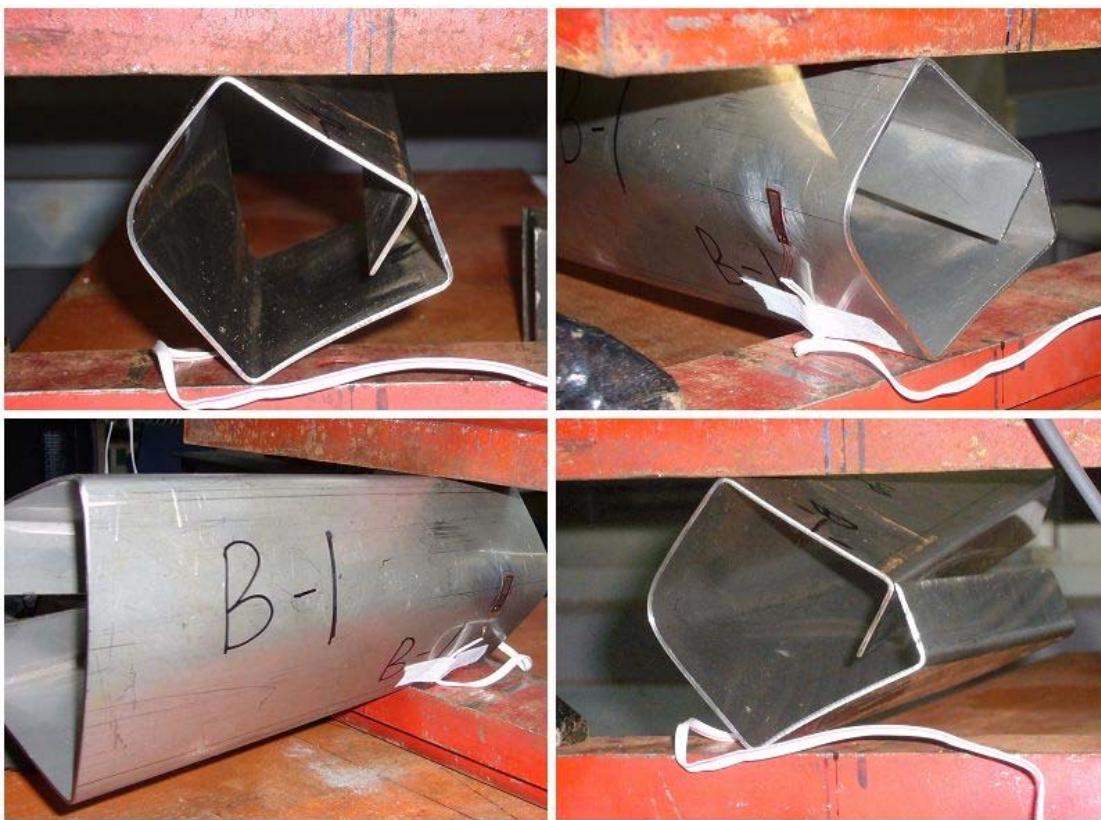


A.20 試體 ETF-C-a0.6x0 變形

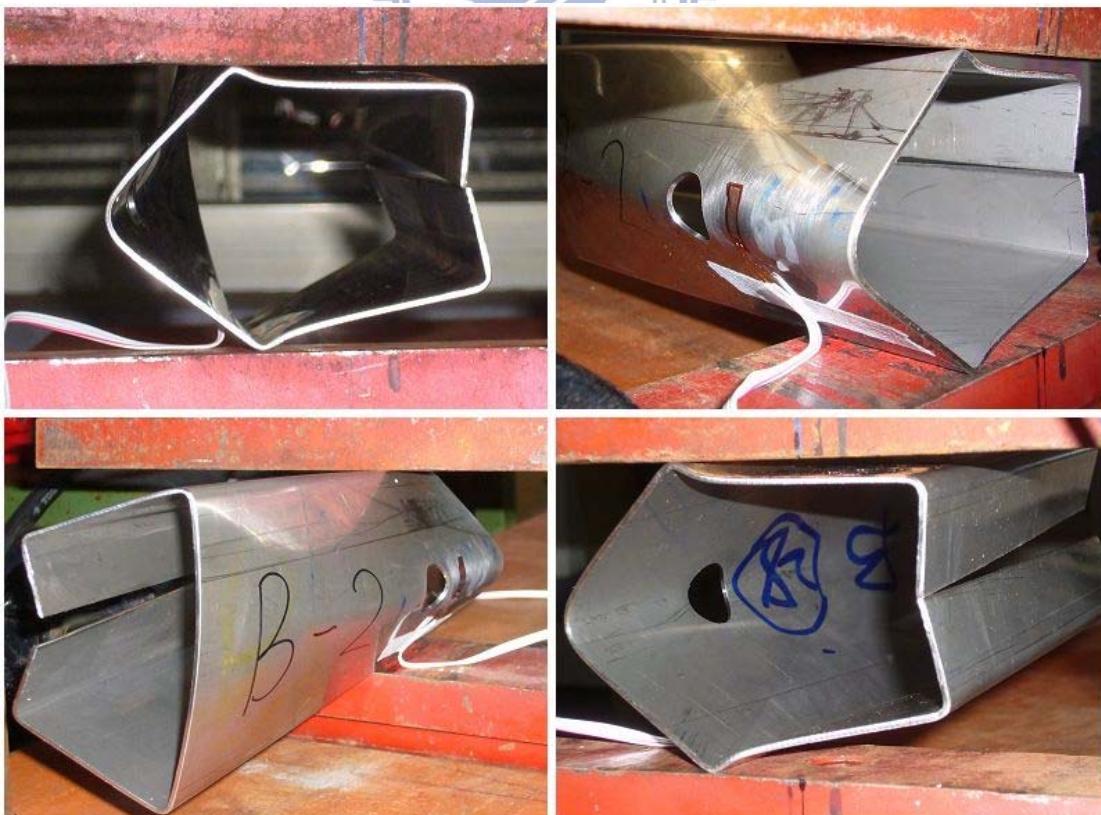


A.21 試體 ETF-C-a0.6x0.6 變形





A.22 試體 ETF-D-a0x0 變形



A.23 試體 ETF-D-a0.2x0 變形



A.24 試體 ETF-D-a0.2x0.6 變形



A.25 試體 ETF-D-a0.4x0 變形



A.26 試體 ETF-D-a0.4x0.6 變形



A.27 試體 ETF-D-a0.6x0 變形



A.28 試體 ETF-D-a0.6x0.6 變形

