

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

冷軋不鏽鋼帽型斷面腹板之皺曲強度

Web Crippling Strength of
Cold-Formed Stainless Steel Hats



研究生：王士庭

指導教授：陳誠直博士

中華民國

冷軋不鏽鋼帽型斷面腹板之皺曲強度

研究生：王士庭

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

本研究旨在探討冷軋不鏽鋼帽型斷面於試體內部雙翼(Interior Two-Flange, ITF)受集中荷載之腹板皺曲強度與行為，共進行 12 支採用不同不鏽鋼板厚度及不同支承墊寬度之試體，試體均採用 SUS 304 型沃斯田不鏽鋼製作。試驗完成後進一步進行有限元素驗證分析，並與實驗結果互相比對以驗證分析之可靠度。最後進行參數研究，以 54 組不同條件之模型分析探討各參數對腹板皺曲強度的影響。實驗結果顯示，不鏽鋼板厚度及支承墊寬度的增加能有效的提升試體腹板皺曲強度。實驗結果與規範計算值比較，發現北美洲規範(NAS)與美國土木工程協會(ASCE)規範於腹板皺曲強度的計算上吻合實驗結果，然而歐洲規範(EC3)則偏向保守。有限元素分析結果能有效模擬試驗結果與行為。參數研究發現除了增加不鏽鋼板厚度及支承墊寬度外，腹板平坦段高度的減少亦能提高腹板皺曲強度；此外，腹板皺曲強度受到腹板平坦段高度的影響程度會隨著支承墊寬度的減小而降低。

關鍵詞：冷軋不鏽鋼、帽型斷面、腹板皺曲強度

Web Crippling Strength of Cold-Formed Stainless Steel Hats

Student: Shih-Ting Wang

Adviser: Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

This study aims to investigate web crippling strength of single hat sections of stainless steel under the interior two-flange (ITF) loading condition. Twelve specimens, made of austenitic type 304 stainless steel, were designed to have different web thickness and support width. Finite element analysis was further performed to validate the analytic model by comparing the analysis results with test data. Furthermore, parametric study was conducted to study the effect of parameters on the web crippling strength. Test results demonstrated that increasing the thickness and support width resulted in increase of the web crippling strength. In addition, the comparison of the test results with various codes indicated the codes of North American Specification and American Society of Civil Engineering calculated well the web crippling strength except that Eurocode highly overestimated. Results of finite element analysis showed that either the web crippling strength or crippling behavior of the analysis agreed well with test results. Parametric study indicated that decreasing the flat height of the web can also increase the web crippling strength, in

addition to the increase of the thickness and support width. Moreover, the effect of flat height of the web on the web crippling strength will be reduced when the support width decrease.

Keyword: cold-formed stainless steel, hat section, web crippling strength



誌謝

承蒙恩師 陳誠直教授於學生在修讀研究所期間給予的指導與鼓勵，讓學生能以嚴謹的態度面對在研究上遇到的種種困難，並一一突破完成論文。恩師專業理論與實務經驗豐富，愚生受益匪淺，學生銘記在心。此外，於論文口試期間承蒙本校 劉俊秀、明新科技大學 林新華及台灣大學 周中哲教授撥冗審閱並給予許多寶貴建議與指導，使得論文內容更為完善，在此敬上萬分感謝。

在學期間，特別感謝學長 政億在實驗過程與分析上不厭其煩的指導及提供寶貴的經驗與提攜，學長 南交在分析上的幫助，與學長 祖涵在各方面給予的寶貴意見；深深感謝同窗好友偉乾、易宸，以及學弟政哲、家毅、凡皓、政勳、桓緯、耀光、榮軒、宗滕，與大學床窗好友們在研究所生活的照顧和幫助，在此獻上最大的祝福與感謝。

最後，由衷的感謝我摯愛的父母親、弟弟與親戚們，感謝你們一直以來的支持與體諒，提供我完善的求學環境以及精神上的關懷與鼓勵，讓我得以克服求學上的各種困難。在此僅以獲得碩士學位的這份榮耀與喜悅與你們一起分享。

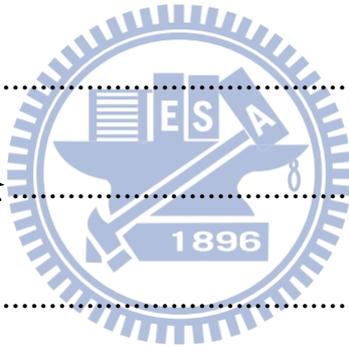
士庭 二零一年四月

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
符號說明.....	xv
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 研究方法.....	2
1.4 論文內容.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 國外腹板皺曲強度相關規範.....	4
2.1.1 北美洲規範(NAS).....	5
2.1.2 美國土木工程協會(ASCE).....	6



2.1.3 歐洲規範(EC3)	8
2.2 我國規範	9
2.3 國內外相關文獻回顧	10
2.4 可靠度分析	13
第三章 冷軋不鏽鋼帽型斷面受 ITF 載重試驗.....	16
3.1 實驗規劃	16
3.1.1 試體設計	16
3.1.2 試體編號	17
3.1.3 材料性質試驗	17
3.2 實驗儀器	17
3.3 實驗流程	18
3.4 實驗結果與討論	19
3.4.1 試體行為	19
3.4.2 試體載重-腹板變形曲線.....	23
3.4.3 實驗結果與規範設計強度之比較.....	24
3.4.4 結語	26



第四章 有限元素分析.....	27
4.1 概述	27
4.2 非線性有限元素分析	27
4.2.1 軟體介紹與操作	28
4.2.2 基本假設	29
4.2.3 材料性質與元素介紹	30
4.2.4 分析模型網格	31
4.2.5 分析模型與分析程序建立	31
4.2.6 行為指標	33
4.3 分析結果與討論	34
4.3.1 分析與實驗結果比較	34
4.3.2 局部行為	35
4.4 參數研究	35
4.4.1 各參數對腹板皺曲強度之影響	36
4.4.2 分析結果與規範值比較	38
第五章 結論與建議.....	40
5.1 結論	40



5.2 建議	41
參考文獻.....	43



表目錄

表 2.1 北美洲 NAS 規範：單一帽型斷面公式係數.....	47
表 2.2 ASCE 所建議之標稱腹板皺曲強度公式.....	47
表 3.1 實驗試體尺寸與支承墊寬度.....	48
表 3.2 試體腹板皺曲強度實驗值與規範設計強度之比值.....	49
表 4.1 分析結果與實驗之腹板皺曲強度比較.....	50
表 4.2 實驗及規範與分析結果之腹板皺曲強度比較.....	51
表 4.3 參數分析之模型尺寸.....	52
表 4.3 參數分析之模型尺寸(續).....	53



圖目錄

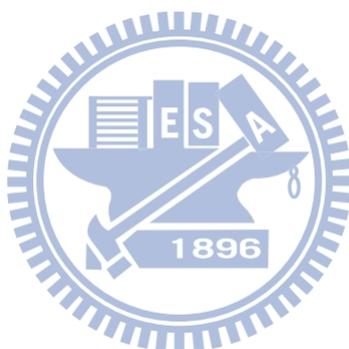
圖 2.1	腹板皺曲試驗之載重型式 (內政部營建署 2004)	54
圖 2.2	冷軋鋼梁構件之腹板皺曲示意圖 (內政部營建署 2004)	54
圖 2.3	冷軋鋼梁構件於內部雙翼承受載重 (內政部營建署 2004) ..	55
圖 3.1	試體示意圖	56
圖 3.2	拉力試片厚度 1.0 mm 之載重-應變曲線	57
圖 3.3	拉力試片厚度 1.5 mm 之載重-應變曲線	57
圖 3.4	拉力試片厚度 2.0 mm 之載重-應變曲線	57
圖 3.5	實驗之指針式位移計架設位置	58
圖 3.6	應變計位置示意圖	58
圖 3.7	資料擷取轉換器	59
圖 3.8	試體 A-1.0-1 變形.....	60
圖 3.9	試體 A-1.0-2 變形.....	60
圖 3.10	試體 A-1.5-1 變形.....	61
圖 3.11	試體 A-1.5-2 變形.....	61
圖 3.12	試體 A-2.0-1 變形.....	62
圖 3.13	試體 A-2.0-2 變形.....	62
圖 3.14	試體 B-1.0-1 變形	63
圖 3.15	試體 B-1.0-2 變形	63

圖 3.16 試體 B-1.5-1 變形	64
圖 3.17 試體 B-1.5-2 變形	64
圖 3.18 試體 B-2.0-1 變形	65
圖 3.19 試體 B-2.0-2 變形	65
圖 3.20 試體厚度 1.0 mm 之載重-腹板變形曲線	66
圖 3.21 試體厚度 1.5 mm 之載重-腹板變形曲線	66
圖 3.22 試體厚度 2.0 mm 之載重-腹板變形曲線	67
圖 3.23 支承墊寬度 A 之載重-腹板變形曲線.....	68
圖 3.24 支承墊寬度 B 之載重-腹板變形曲線.....	68
圖 3.25 h/t 與 P_{Test}/P_{NAS} 關係圖	69
圖 3.26 N/t 與 P_{Test}/P_{NAS} 關係圖	69
圖 3.27 h/t 與 P_{Test}/P_{ASCE} 關係圖	70
圖 3.28 N/t 與 P_{Test}/P_{ASCE} 關係圖	70
圖 3.29 h/t 與 P_{Test}/P_{EC3} 關係圖	71
圖 3.30 N/t 與 P_{Test}/P_{EC3} 關係圖	71
圖 4.1 不鏽鋼材之三線性應力-應變關係.....	72
圖 4.3 ABAQUS 建立之模型網格.....	73
圖 4.4 ABAQUS 建立之模型部件.....	73
圖 4.5 試體之三維有限元素模型	74

圖 4.6	非線性分析—帽型斷面冷軋不鏽鋼之變形模式	74
圖 4.7	A-1.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線	75
圖 4.8	A-1.5-1 分析與實驗之載重-應變曲線	75
圖 4.9	A-1.5-2 分析與實驗之載重-應變曲線	76
圖 4.10	A-2.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線	76
圖 4.11	A-2.0-2 分析與實驗之載重-應變曲線	77
圖 4.12	B-1.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線	78
圖 4.13	B-1.0-2 分析與實驗之載重-應變曲線	78
圖 4.15	B-1.5-2 分析與實驗之載重-應變曲線	79
圖 4.16	B-2.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線	80
圖 4.17	B-2.0-2 分析與實驗之載重-應變曲線	80
圖 4.18	A-1.0 之分析模型與試體實驗變形圖	81
圖 4.19	A-1.5 之分析模型與試體實驗變形圖	81
圖 4.20	A-2.0 之分析模型與試體實驗變形圖	82
圖 4.21	B-1.0 之分析模型與試體實驗變形圖	82
圖 4.22	B-1.5 之分析模型與試體實驗變形圖	83
圖 4.23	B-2.0 之分析模型與試體實驗變形圖	83
圖 4.24	試體 A-1.0 分析模型之等值應力分佈圖	84
圖 4.25	試體 A-1.5 分析模型之等值應力分佈圖	84

圖 4.26	試體 A-2.0 分析模型之等值應力分佈圖	84
圖 4.27	試體 B-1.0 分析模型之等值應力分佈圖	85
圖 4.28	試體 B-1.5 分析模型之等值應力分佈圖	85
圖 4.29	試體 B-2.0 分析模型之等值應力分佈圖	86
圖 4.30	試體 A-1.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖	86
圖 4.31	試體 A-1.5 分析模型之等值塑性應變分佈圖	86
圖 4.32	試體 A-2.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖	86
圖 4.33	試體 B-1.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖	87
圖 4.34	試體 B-1.5 分析模型之等值塑性應變分佈圖	87
圖 4.35	試體 B-2.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖	87
圖 4.36	分析模型厚度 1.0 mm 之力量—支承墊寬度分佈圖	88
圖 4.37	分析模型厚度 1.5 mm 之力量—支承墊寬度分佈圖	88
圖 4.38	分析模型厚度 2.0 mm 之力量—支承墊寬度分佈圖	89
圖 4.40	力量—變位曲線圖	90
圖 4.41	力量—變位曲線圖	90
圖 4.42	分析模型厚度 1.0 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖	91
圖 4.43	分析模型厚度 1.5 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖	91
圖 4.44	分析模型厚度 2.0 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖	92
圖 4.45	分析模型厚度 4.0 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖	92

圖 4.46 參數研究模型之腹板皺曲強度值	93
圖 4.47 有限元素分析結果與各規範建議值之比值	93
圖 4.48 P_{FEM}/P_{NAS} 與腹板長細比分佈圖	94
圖 4.49 P_{FEM}/P_{ASCE} 與腹板長細比分佈圖	94
圖 4.50 P_{FEM}/P_{EC3} 與腹板長細比分佈圖	95



符號說明

C : NAS 規範之係數

C_1 : ASCE 規範之係數

C_2 : ASCE 規範之係數

C_3 : ASCE 規範之係數

C_4 : ASCE 規範之係數

C_0 : ASCE 規範之係數

C_h : 腹板細長係數

C_N : 支承墊寬度係數

C_R : 內側彎曲半徑係數

C_t : ASCE 規範之係數

E : 材料彈性模數

F_m : 製造因素平均值

F_y : 材料降伏強度

h : 腹板平坦段高度

k : ASCE 規範之係數

l_a : 有效支承寬度

M_m : 材料因素平均值



- N : 支承墊寬度
- P_m : 載重比的總平均值
- P_n : 標稱腹板皺曲強度
- R : NAS 及 ASCE 規範之試體內側彎曲半徑
- r : EC3 規範之試體內轉角半徑
- t : 試體厚度
- 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
- Y : 實驗應變計黏貼位置
- α : EC3 規範之相關係數
- β : 可靠度指數
- γ_{M1} : 整體挫屈破壞處的構件或薄片之折減係數
- \emptyset : 腹板與翼板之間的傾斜角度
- Φ_w : 強度折減因子



第一章 緒論

1.1 前言

近年來，冷軋型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。冷軋型鋼是由薄鋼捲或鋼板經機械壓製而成，經由成型機壓製後具有足夠的承載力，成形厚度介於 0.378 mm 至 6.35 mm 之間，故重量也較一般熱軋型鋼為輕，因此冷軋型鋼之強度對重量比相對較高，使其成本有效降低。

但因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。

1.2 研究目的

本研究主要目的是探討冷軋不鏽鋼帽型(Hat)斷面於試體內部上、下翼板(Interior Two-Flange , ITF)受集中載重下的腹板皺曲強度值與

試體之行為。研究中採用相同的載重條件下，探討在不同的試體厚度與不同的支承墊寬度之變數，藉此了解對腹板皺曲強度的影響，以做為設計腹板皺曲強度公式之參考。

1.3 研究方法

本研究設置了 3 種試體厚度及 2 種支承墊寬度之條件，進行試體內部上下翼板受集中載重之試驗，藉以觀察不同的試體厚度或不同的支承墊寬度對試體腹板皺曲強度之影響，並比較實驗結果與各規範建議之設計強度。另外，本研究以 ABAQUS 有限元素分析軟體做為分析工具，參考實驗試體之尺寸數據，建立有限元素分析模型，將分析結果與試驗結果相互比較，驗證分析之準確性。確認分析準確性後，進行參數研究，利用 ABAQUS 分析軟體建立相同材料性質、不同試體厚度、高度、支承墊寬度等等不同參數模型，探討參數之影響與各規範對於冷軋不鏽鋼單一帽型斷面於 ITF 載重條件下腹板皺曲強度之準確度及可靠性。

1.4 論文內容

本論文共分為五個章節，第一章節為前言、研究目的、方法及內容；第二章為文獻回顧，介紹國內外規範所建議之腹板皺曲強度及國內學者對於冷軋不鏽鋼及冷軋型鋼之腹板皺曲相關之研究；第三章為

實驗概述、說明試體設計、實驗設置、實驗結果與討論，以及實驗結果與規範建議之設計強度比較；第四章利用 ABAQUS 有限元素分析軟體驗證實驗之準確性並進行參數研究；第五章為結論與建議，綜合實驗與分析結果。



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於局部受集中載重及反力作用時的腹板皺曲行為。

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, AISI) 之委託，從事冷軋型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)。國內冷軋型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。

冷軋型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，冷軋型鋼構材的使用大都為次結構構材或為非結構購材，其應用之部位有結構構材、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。

2.1 國外腹板皺曲強度相關規範

參考國外在冷軋型鋼結構相關規範之發展，由於冷軋鋼撓曲構材之腹板皺曲現象，受許多因素影響，因此有關腹板皺曲之理論值分析

相當複雜，故目前規範所建議腹板皺曲強度設計公式主要是由一系列之實驗結果所決定出來的。如圖 2.1，腹板皺曲行為之試驗分為四種載重型式，分別為(a)端點單翼承受載重，(b)內部單翼承受載重，(c)端點雙翼承受載重，(d)內部雙翼承受載重，主要區別為以下規定：

(1) 對於反力與集中載重至梁邊的距離，以 e_1 代表之。

(2) 對於反力與集中載重間距離，以 e_2 代表之。

2.1.1 北美洲規範(NAS)

北美洲規範(North American Specification, NAS)－冷軋鋼構件設計使用單一個公式(2.1)來計算四種載重情況下無開孔之標稱腹板皺曲強度，且其係數隨著有無與支承墊固定而不同。

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

其中：

P_n : 標稱腹板皺曲強度

C : 係數(表 2.1)

C_h : 腹板細長係數(表 2.1)

C_N : 支承墊寬度係數(表 2.1)

C_R : 內側彎曲半徑係數(表 2.1)

F_y : 內側彎曲半徑係數(表 2.1)

h : 平坦腹板段之高度

N : 支承墊寬度

R : 內側彎曲半徑

t : 腹板厚度

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

P_n 代表一連接上、下翼板之腹板其標稱皺曲強度，如果腹板是由兩片或兩片以上組成，則 P_n 須計算各腹板皺曲強度並相加得到全斷面之標稱強度。

本研究是針對表 2.1 中的試體內部承受雙翼載重且試體與支承墊間固定之載重條件進行實驗，故使用 NAS 所提供之係數分別為 10、0.14、0.22、0.0252。

2.1.2 美國土木工程協會(ASCE)

美國土木工程協會(American Society of Civil Engineers, ASCE)所提供之冷軋不鏽鋼腹板標稱皺曲強度 P_n 分為單一腹板有加勁或部分加勁、單一腹板未加勁，及 I 型斷面或相似斷面三種段面情況，並依據四種不同的載重條件有不同的公式來計算其腹板標稱皺曲強度。如表 2.2 所示，單一腹板(翼板未加勁)之斷面於各種載重條件下 ASCE 所建議之公式。

本研究分析及實驗之載重情況與公式(2.9)相同，皆為試體內部上、下翼板受載，故本文中所述 ASCE 規範所提供之設計強度即指公式(2.9)之計算值。

$$P_n = t^2 C_3 C_4 C_0 \left[217 - 0.28 \left(\frac{h}{t} \right) \right] \times \left[1 + 0.01 \left(\frac{N}{t} \right) \right] \times C_t \quad (2.6)$$

當 $\frac{N}{t} < 60$ ，此項 $\left[1 + 0.01 \left(\frac{N}{t} \right) \right]$ 需要變為 $\left[0.71 + 0.015 \left(\frac{N}{t} \right) \right]$

$$P_n = t^2 C_1 C_2 C_0 \left[538 - 0.74 \left(\frac{h}{t} \right) \right] \times \left[1 + 0.07 \left(\frac{N}{t} \right) \right] \times C_t \quad (2.7)$$

當 $\frac{N}{t} > 60$ ，此項 $\left[1 + 0.07 \left(\frac{N}{t} \right) \right]$ 需要變為 $\left[0.75 + 0.011 \left(\frac{N}{t} \right) \right]$

$$P_n = t^2 C_3 C_4 C_0 \left[244 - 0.57 \left(\frac{h}{t} \right) \right] \times \left[1 + 0.01 \left(\frac{N}{t} \right) \right] \times C_t \quad (2.8)$$

$$P_n = t^2 C_1 C_2 C_0 \left[771 - 2.26 \left(\frac{h}{t} \right) \right] \times \left[1 + 0.0013 \left(\frac{N}{t} \right) \right] \times C_t \quad (2.9)$$

其中：

$$C_t = 6.9 \text{ (SI 單位)}$$

$$C_1 = (1.22 - 0.22k)k, \text{ 當 } F_y / (91.5C_t) \leq 1.0$$

$$= 1.69, \text{ 當 } F_y / (91.5C_t) > 1.0$$

$$C_2 = \left(1.06 - \frac{0.06R}{t} \right) \leq 1.0$$

$$C_3 = (1.33 - 0.33k)k, \text{ 當 } F_y / 66.5C_t \leq 1.0$$

$$= 1.34, \text{ 當 } F_y / 66.5C_t > 1.0$$

$$C_4 = (1.15 - 0.15R/t) \leq 1.0 \text{ 但不小於 } 0.50$$

$$C_0 = 0.7 + 0.3 \left(\frac{\theta}{90} \right)^2$$

$$F_y = \text{降伏強度 (MPa)}$$

h = 腹板平坦段高度

$$k = \frac{F_y}{33C_t}$$

t = 腹板厚度

N = 支承墊寬度 (mm)，兩個相同大小且方向相反的集中載重分佈在不同長度的支承墊時，較小值的為 N 值。

R = 內側彎曲半徑

θ = 支承墊表面與腹板平面之夾角 $\geq 45^\circ$ ，但不超過 90°

2.1.3 歐洲規範(EC3)

歐洲規範(Eurocode 3, EC3)－鋼結構設計，建議了冷軋不鏽鋼構件其斷面有兩個或兩個以上未加勁腹板之設計強度公式(2.10)如下：

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0.1 \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left(0.5 + \sqrt{0.02 \frac{l_a}{t}} \right) \left(2.4 + \left(\frac{\theta}{90} \right)^2 \right) / \gamma_{M1} \quad (2.10)$$

其中，

$R_{w,Rd}$ = 腹板局部橫向抵抗力

α = 相關係數

f_{yb} = 降伏強度

E = 材料彈性模數

r = 轉角的內半徑

t = 試體厚度

l_a = 有效支承長度

\emptyset = 腹板與翼板之間的傾斜角度

γ_{M1} = 整體挫屈破壞處的構件或薄片之折減係數

參考歐洲規範所建議 l_a 最大設計值為 200 mm，規範建議於 ITF 載重條件下之 l_a 值應採用 10 mm。規範建議帽形斷面於 ITF 載重條件下之 α 值應採用 0.057。EN1993-1-4 建議 γ_{M1} 值為 1.10。

2.2 我國規範

本研究主要參考之國內現行規範為「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，第 6.5 節主要內容為腹板皺曲強度，文中提到適用於撓曲構材之腹板受集中載重或反力，或者載重於腹板平面方向且垂直構材縱軸之分軸造成腹板受壓力之情況。撓曲構材腹板之深厚比 h/t 大於 200 者，應有適當之傳力路徑將集中載重及或反力傳至腹板中。規範所建議單一腹板(未加勁)之腹板皺曲強度公式及所需滿足條件皆與 ASCE 規範相同。

若冷軋鋼梁未使用橫向及剪力加勁肢材，當局部受到極高載重或反力時，則可能造成如圖 2.2 所示之腹板皺曲之現象。由於冷軋鋼撓曲構材之腹板皺曲現象，受下列七項因素影響，因此有關腹板皺曲之理論值分析相當複雜。

1. 作用力下腹板鄰近區域應力非均勻分佈。

2. 腹板單元彈性與非彈性之穩定性。
3. 作用力施力區域之局部降伏現象。
4. 作用力(或反力)偏心作用於假定之承載翼板受力範圍之外時所產生之彎曲。
5. 板單元具初始不平整。
6. 梁翼板之邊緣束制和翼、腹單元間之交互作用。
7. 非鉛直腹板之影響。

因此，規範所建議冷軋鋼梁腹板皺曲強度公式是由一系列的實驗結果所決定出來的。關於一系列實驗的載重情況有四種，其中試體內部雙翼(ITF)承受載重為本研究所探討重點，ITF 載重型式如圖 2.3 所示，其載重與反力分佈如圖 2.4 所示。

2.3 國內外相關文獻回顧

Zhou and Young (2005a)，使用正方形與矩形中空斷面之冷軋不鏽鋼梁進行了一系列的彎曲構件試驗。試體之材料使用沃斯田不鏽鋼 304 型、高強度沃斯田(High strength austenitic, HAS)與雙相不鏽鋼(Duplex stainless steel sheets)。試體段面尺寸分為 15 種，標稱厚度(t)為 1.5 到 6 mm，標稱腹板深度(d)為 40 到 200 mm，標稱翼板寬(b_f)為 40 到 150 mm。經實驗，結果顯示理論彎矩值通常是較實驗值保守的，ASCE 與 NAS 規範對於正常及高強度不鏽鋼管狀斷面之設計強

度是可靠且保守。AS/NZS 規範對正常強度不鏽鋼管狀斷面之設計強度是可靠且保守，但對於高強度不鏽鋼管狀斷面之設計強度保守但可靠度指數稍小於 3.0。

Zhou and Young (2005b)，針對於內部雙翼載重(ITF)、端部雙翼載重(End Two-Flange, ETF)與端部載重(End Load, EL)之載重條件情況下，使用降伏線機制分析正方形與矩形中空斷面冷軋不鏽鋼之腹板皺曲行為。

Zhou and Young (2006)，規劃了冷軋不鏽鋼在 ITF 載種情況下之實驗試體 16 支，試體斷面為中空矩形及中空正方形，支承墊寬度(N)分別為 25、50 及 75 mm，其 h/t 、 r/t 、 N/t 、 N/h 之比值範圍分別為：6.2 到 61.3、1.02 到 2.11、6.4 到 41.3、0.27 到 2.06，彈性模數(E)範圍 194 到 201 GPa，降伏應力為 320 到 565 MPa，實驗進行中試體翼板與支承墊之間無固定。實驗結果顯示，NAS、ASCE 及 EC3 規範所建議 ITF 載種條件下之腹板皺曲強度不是不保守就是太保守。根據實驗結果，提出新的 NAS 公式之係數，以使設計強度更為準確。

Zhou and Young (2007a)，以實驗和數值分析，模擬矩形中空斷面冷軋不鏽鋼為樓板托梁時受集中載重之力學行為，其中實驗數據有 64 筆，數值分析數據有 60 筆。試體材料使用沃斯田不鏽鋼 304 型；支承墊降伏強度為 800 MPa，厚度 50 mm，寬度採用二分之一或一倍

的翼板寬，實驗過程試體翼板與支承墊間無固定。

Zhou and Young (2007b)分析軟體使用 ABAQUS 有限元素軟體，試體採用 S4R 殼元素，翼板與腹板有限元素網格尺寸範圍從 2 mm×2 mm 到 10 mm×10 mm，斷面轉角使用 6 個元素的網格。冷軋不鏽鋼與支承墊支之接觸面使用接觸對，支承墊為主元素，冷軋不鏽鋼為從屬元素，並且不允許元素間互相穿透。有限元素分析軟體 ABAQUS 可將材料應力應變曲線設為多線性段。作者針對正常強度及高強度不鏽鋼試體於內部及端部載重下之 NAS 腹板皺曲強度公式，提出修正之係數。

Ren 等人(2006) 採用 Young 與 Hancock (1999, 2001) 所提供之實驗資料，利用 ANSYS 有限元素軟體，使用薄殼元素(Shell 181)模擬 C 形斷面冷軋鋼梁試體，並於內部單翼(Interior One-Flange, IOF)及端部單翼(End One-Flange, EOF)載重條件下以位移控制模擬實驗載重。翼板及腹板網格大小採用 15 mm×15 mm 或 10 mm×10 mm，轉角之網格數量採用 3 個。下支承墊僅有一個旋轉自由度，其餘自由度皆束制。分析結果顯示非線性有限元素分析採用大應變分析腹板皺曲行為較小應變分析為準確。

Korvink 等人於 1995 年進行了一系列冷軋不鏽鋼梁腹板皺曲之試驗，140 組試體之實驗，實驗試體由兩個 C 型不鏽鋼組合而成，載

重條件為內部單翼受載(Interior One-flange)。結果顯示，較小斷面且較小腹板高度的試體，因在翼板與支承處破壞，所以破壞處通常在腹板較高的地方；而較高腹板的斷面，破壞傾向於腹板挫曲，因為整體的不穩定所以破壞時腹板有大變形。

Young and Lui (2006)，使用雙相不鏽鋼材之冷軋柱規劃了一系列受壓桿件實驗，其降伏強度與拉伸強度高達 750 與 850 MPa。當前規範雖然都是針對正常強度材料所提供柱之設計強度，如沃斯田不鏽鋼 304 型，但實驗結果顯示也適用於高強度的材料。

Young 於 2008 年進行了高強度冷軋不鏽鋼構件的實驗與數值分析，內容範圍包括了梁、柱及混凝土填充柱。將實驗結果及分析結果與各規範比較，並修正了規範所建議之設計強度公式。

2.4 可靠度分析

利用可靠度分析來評估各種建議腹板設計強度值之可靠程度，可靠度指數(Reliability Index, β)與所設計的安全因素有關。可靠度指數公式如下：

$$\beta = \frac{\ln \frac{R_m}{Q_m}}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}}$$
$$R_m = M_m \cdot F_m \cdot P_m \cdot R_n$$
$$V_R = \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + V_P^2}$$

其中，

R_m = 平均構件抵抗(Mean member resistance)

V_R = 標稱抵抗之變異係數

R_n = 標稱抵抗(The 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)

Q_m 及 V_Q 值是根據靜載重與活載重比值計算。

ASCE 冷軋不鏽鋼構件解說(2002)提出冷軋不鏽鋼構件之可靠度指數最低限度為 3.0。當可靠度指數大於 3.0 時，那麼設計準則可被視為可信賴的。美國土木協會(ASCE)、歐洲規範(EC3)及北美洲規範(NAS)都分別建議了腹板皺曲強度之折減因子(Resistance factor, ϕ)。在可靠度分析中，美國土木協會規範所採用載重組合為 1.2DL+1.6LL，歐洲規範載重組合為 1.35DL+1.5LL，其中 DL 代表靜載重，LL 代表活載重。腹板皺曲強度由 NAS 規範 Table F1 得到統計參數如下：

M_m =材料因素平均值 = 1.10

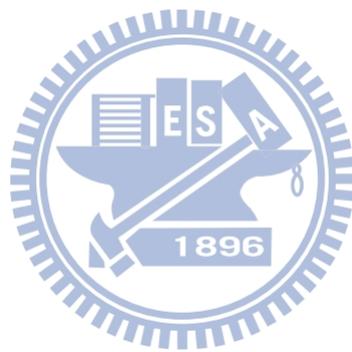
F_m =製造因素平均值 = 1.00

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 = 載重比的總平均值。

V_P = 載重比的變異係數。

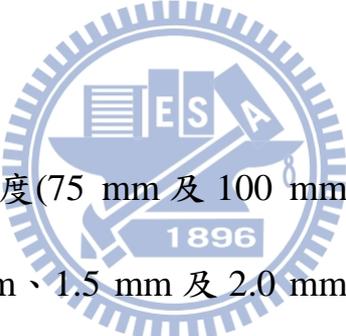


第三章 冷軋不鏽鋼帽型斷面受 ITF 載重試驗

3.1 實驗規劃

本實驗是針對冷軋不鏽鋼帽型斷面於試體內部上、下翼板受到集中載重條件下之力學行為進行研究，並規劃了 12 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 ITF 載重條件下之腹板皺曲強度，並與現行規範比較。

3.1.1 試體設計



本實驗以支承墊寬度(75 mm 及 100 mm)分為兩組，每組有 3 種不同厚度之試體(1.0 mm、1.5 mm 及 2.0 mm)，每種厚度之試體皆有兩支，故每組有六支試體，兩組共 12 支試體。本實驗之試體皆採用 SUS 304 型冷軋不鏽鋼材，試體斷面選用帽型斷面。

如本文第 2.1 節所述，本研究為探討冷軋不鏽鋼帽型斷面在內部於上下翼板受載重之腹板皺曲強度，故 e_1 在此研究中代表支承墊兩邊至梁兩端之距離， e_2 即為零。腹板皺曲強度與試體腹板之平坦段高度(h)、支承墊寬度(N)、轉角內半徑(R)及試體厚度(t)有關。根據 NAS 所提建議公式(2.1)限制了 h/t 、 N/t 、 N/h 及 θ 的值，故本實驗針對這四種可能影響實驗結果的因素來設計試體尺寸，試體之尺寸、支承墊

寬度如表 3.1 及圖 3.1 所示。

3.1.2 試體編號

本研究試體編號以 A、B 代表承墊寬度為 75 或 100 mm，試體標稱厚度為 1.0、1.5 及 2.0 mm，並以 1 與 2 區分同樣尺寸試體，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，降伏強度根據不同厚度試體之拉力試片(1.0、1.5 及 2.0 mm)所得分別為 320.0、295.5、289.0 MPa，彈性模數(E_s)分別為 160,000、130,000、144,000 MPa，如圖 3.2 至圖 3.4 所示。



3.2 實驗儀器

為了探討試體於集中載重下之腹板變形量，故於與荷重元水平且離載重中心等距之兩側架設指針式位移計，本實驗使用之指針式位移計之總行程為 30 mm，指針式位移計現場架設如圖 3.5 所示。

為了研究試體受載時的整體力學行為，在進行實驗前先經由有限元素分析軟體 ABAQUS 模擬相同尺寸之試體在相同條件下受載之力學行為，並根據有限元素分析結果，在試體之斷面兩側腹板內部及外部之最有可能發生皺曲處分別貼上單軸應變計，故每支試體共四個應

變計，可藉此了解腹板皺曲處之應變情形，圖 3.6 為應變計位置示意圖，圖中 Y 為上翼板最外緣至腹板皺曲處，經由有限元素分析所決定之距離。

資料的擷取系統是使用電腦搭配命令軟體執行，應變計及指針式位移計經由快速接頭與資料擷取轉換器連接後傳達至電腦，圖 3.7 為資料擷取轉換器。

3.3 實驗流程

本研究之試驗流程如下述：

1. 於試驗前將應變計貼於試體指定位位置上。
2. 將支承墊與試體準確放置於事前量測的點位上，並使用 5 吋 C 型夾於試體兩側下翼板之中心鎖緊來固定試體。
3. 將兩支指針式位移計分別架設於荷重元兩側，爾後將指針式位移計及應變計與資料擷取器連結，並確認資料擷取正常。
4. 試驗開始前，作業員需按下資料擷取系統中之 REC 鍵，使系統能開始記錄資料擷取器之數據，若無此步驟會造成資料無法記錄。
5. 開始進行軸壓負載，並擷取應變計、指針式位移計及載重資料。
6. 觀察並記錄試體加載情形，直至載重值低於極限強度之 85%

即可終止試驗，或持續加載至指針式位移計行程之限制，可供日後探討試體韌性行為。

3.4 實驗結果與討論

3.4.1 試體行為

試體 A-1.0 系列

測得試體 A-1.0-1 極限強度達 12.0 kN 時於斷面兩側腹板產生明顯皺曲破壞，此時指針式位移計測得載重位移為 3.2 mm，最大皺曲發生在受載後的試體梁中之腹板 70% 高度處。試體上翼板有明顯受到上支承墊加載的角隅痕跡，下翼板與支承墊接觸的面因受 C 型夾固定，故受載後此面積保持平坦，其餘沒有與下支承墊接觸部分有明顯皺摺，圖 3.8 為試體變形情況。

測得試體 A-1.0-2 極限強度達 12.4 kN，但因作業疏失而無法記錄到此試體的其他力量與相對應之指針式位移計資料。試體受載後，腹板最大皺曲發生在受壓後的試體梁中腹板 85% 高度處。上翼板有受到上支承墊加載的角隅壓痕，且靠近角隅處的腹板因皺摺而也有受到上支承墊加載的情形，下翼板情況與上述試體 A-1.0-1 雷同，圖 3.9 為試體變形情況。

試體 A-1.5 系列

測得試體 A-1.5-1 極限強度達 26.1 kN 時，此時指針式位移計測得載重位移為 6.4 mm，腹板最大皺曲發生受壓後的試體腹板 80% 高度。試體上翼板之皺摺情況與試體 A-1.0-2 相似，下翼板與支承墊接觸的面因有受 C 型夾固定，所以受載後此面積保持平坦，其餘與支承墊無接觸的部分有些微皺摺，圖 3.10 為試體變形情況。

測得試體 A-1.5-2 極限強度達 25.0 kN，此時指針式位移計測得載重位移為 4.9 mm，腹板最大皺曲發生在受壓後的試體腹板 83% 高度。試體上、下翼板之皺摺情況與上述試體 A-1.5-1 十分相似，圖 3.11 為試體變形情況。



試體 A-2.0 系列

測得試體 A-2.0-1 極限強度達 46.8 kN 時，此時指針式位移計測得載重位移為 7.1 mm，腹板最大皺曲發生在受壓後的試體腹板 81% 高度。試體上翼板受到上支承墊加載而產生角隅壓痕，且靠近角隅處之腹板也有受到上支承墊加載的痕跡。下翼板與下支承墊接觸面因有 C 型夾固定，故受載後此面積保持平坦，其他與下支承墊無接觸部分則稍微有些皺摺，圖 3.12 為試體變形情況。

測得試體 A-2.0-2 極限強度達 46.2 kN，此時指針式位移計測得載重位移為 6.9 mm，腹板最大皺摺發生在受壓後的腹板高度 82%，其他部位之變形情形與試體 A-2.0-1 雷同，圖 3.13 為試體變形情況。

試體 B-1.0 系列

測得試體 B-1.0-1 極限強度達 13.2 kN，此時指針式位移計測得載重位移為 2.5 mm，腹板最大皺摺發生在受壓後的試體腹板 61% 高度，試體上翼板受到上支承墊加載後有明顯的角隅壓痕，下翼板皺褶與試體 A-1.0-1 相似，圖 3.14 為試體變形情況。

測得試體 B-1.0-2 極限強度達 13.1kN，此時指針式位移計測得載重位移為 3.5 mm，腹板最大皺摺發生在受壓後的試體腹板 58% 高度，其他部份之變形情形與上述試體 B-1.0 相近，圖 3.15 為試體變形情況。

試體 B-1.5 系列

測得試體 B-1.5-1 極限強度達 27.4 kN，此時指針式位移計測得載重位移為 4.9 mm，腹板最大皺摺發生在受壓後的試體腹板 78% 高度。試體上翼板除了上支承墊加載後的角隅痕跡外，靠近角隅的腹板也受到支承墊加載的痕跡，下翼板與下支承墊接觸面因有 C 型夾固定，

故受載後仍然保持平坦，其餘與下支承墊無接觸之部分則有輕微的皺摺，圖 3.16 為試體變形情況。

測得試體 1.5-2 極限強度達 27.2 kN，此時指針式位移計測得載重位移為 4.6 mm，腹板最大皺摺發生在受壓後的試體腹板 79% 高度，試體上、下翼板與上述試體 B-15-1 情況相似，圖 3.17 為試體變形情況。

試體 B-2.0 系列

測得試體 B-2.0-1 極限強度達 46.8 kN，此時指針式位移計測得載重位移為 6.3 mm，腹板最大皺摺發生在受壓後的試體腹板 78% 高度。試體上翼板除了上支承墊加載後的角隅痕跡外，靠近角隅的腹板也有受到支承墊加載的痕跡，下翼板與下支承墊接觸面因有 C 型夾固定，故受載後仍然保持平坦，其餘與下支承墊無接觸之部分則有輕微的皺摺，圖 3.18 為試體變形情況。

測得試體 B-2.0-1 極限強度達 52.9 kN，此時指針式位移計測得載重位移為 5.3 mm，腹板最大皺摺發生在受壓後的試體腹板 79% 高度，試體上翼板及下翼板皺摺情況與上述試體 B-2.0-1 相似，圖 3.19 為試體變形情況。

3.4.2 試體載重-腹板變形曲線

圖 3.20 至圖 3.24 皆為試體載重與腹板變形之關係圖，X 軸為腹板變形量，Y 軸為試體載重值。腹板變形量資料來源於實驗時架設 2 支指針式位移計所得資料之平均值。藉此觀察帽型冷軋不鏽鋼於內部上下翼板受載下之極限強度與腹板變形之現象。

支承墊寬度之差異性

圖 3.20、圖 3.21 及圖 3.22 為相同厚度下之試體載重與腹板變形之關係圖，由圖中觀察到當試體厚度相同時，支承墊寬度 100 mm 之試體(B-1.0、B-1.5、B-2.0)極限強度皆較支承墊寬度 75 mm 之試體(A-1.0、A-1.5、A-2.0)的極限強度大，且極限強度對應之腹板變形量十分相近。試體 B-1.0 較試體 A-1.0 之平均極限強度高出 7.8%，試體 B-1.5 較試體 A-1.5 之平均極限強度高出 6.9%，B-2.0 較 A-2.0 試體之平均極限強度高出 7.2%。

試體厚度之差異性

圖 3.23 及圖 3.24 為相同支承墊寬度之試體載重值與腹板變形之關係圖，可觀察到當支承墊寬度相同，隨著試體厚度越大，極限載重值就越大，極限強度所對應的腹板變形量也較大。可以觀察到除了試體厚度 1.0 mm 外，其他厚度之試體當腹板變形至 15 mm 以後，其腹

板皺曲強度會稍微的提高。

3.4.3 實驗結果與規範設計強度之比較

將實驗所獲得的 ITF 載重條件下之試體皺曲強度(P_{Test})與北美冷軋鋼解說、美國鋼鐵協會冷軋鋼解說、美國土木工程學會冷軋不鏽鋼結構構件及歐洲規範這四種規範對於冷軋材料腹板皺曲設計強度(P_{NAS} 、 P_{ASCE} 、 P_{EC3})進行比較。

NAS

表 3.2 為試體之腹板皺曲強度實驗值與規範設計強度之比值，腹板皺曲強度實驗值與 NAS 規範之比值(P_{Test}/P_{NAS})之平均值(Mean)為 1.066，標準差(COV)為 0.07，採用 NAS 所建議之強度折減係數 0.85，計算可靠度指數為 3.00。

圖 3.25 為腹板細長比與腹板皺曲強度比值(P_{Test}/P_{NAS})之關係圖，可觀察到相同之腹板細長比時隨著 h/t 值越大，腹板皺曲強度比值就越小。圖 3.26 為支承墊寬度與厚度之比值及腹板皺曲強度比值(P_{Test}/P_{NAS})之關係圖，可觀察到當支承墊寬度相同時， N/t 值越大其腹板皺曲強度比值越小。

結果顯示，相較於試體實際強度，當試體厚度減少或試體腹板平坦段高度與支承墊寬度增加將使得利用 NAS 建議公式於預測 ITF 冷軋不鏽鋼帽型斷面之腹板皺曲強度值時趨於不保守。

ASCE

如表 3.3 所示，試體腹板皺曲強度實驗值與 ASCE 規範之比值 ($P_{\text{Test}}/P_{\text{ASCE}}$) 介於 0.999 與 1.259 之間，平均值(Mean)為 1.105，變異數 (COV)為 0.089，採用 ASCE 所建議之強度折減係數 0.90，計算可靠度指數為 3.826。

由圖 3.27，可以看出腹板細長比相同時，隨著 h/t 值越大，腹板皺曲強度比值就越大。由圖 3.28 可觀察到當支承墊寬度相同時， N/t 值越大其腹板皺曲強度比值越大。

結果顯示，相較於試體實際強度，當試體厚度增加或試體腹板平坦段高度與支承墊寬度降低將使得利用 ASCE 建議公式於預測 ITF 冷軋不鏽鋼帽型斷面之腹板皺曲強度值時趨於不保守。

Eurocode 3

如表 3.3 所示，試體腹板皺曲強度實驗值與 EC3 規範之比值 ($P_{\text{Test}}/P_{\text{EC3}}$) 介於 5.326 與 7.188 之間，平均值(Mean)為 6.183，變異數為 (COV)為 0.084，採用 EC3 所建議之強度折減係數 0.91，計算可靠度指數為 9.634。

由圖 3.29，可以觀察到腹板細長比相同時，支承墊寬度 100 mm 與支承墊寬度 75 mm 之腹板皺曲強度比值相近，且隨著 h/t 值越大，腹板皺曲強度比值越小。由圖 3.30 可觀察到當支承墊寬度相同時，

N/t 值越大其腹板皺曲強度比值越小。

結果顯示，相較於試體實際強度，當試體厚度增加或試體腹板平坦段高度與支承墊寬度降低將使得利用 EC3 建議公式於預測 ITF 冷軋不鏽鋼帽型斷面之腹板皺曲強度值時會更保守。

3.4.4 結語

觀察執行完成 12 支試體之試驗結果，當增加支承墊寬度會造成試體腹板發生皺曲的位置遠離上翼板；若當試體厚度增加則會造成腹板發生皺曲的位置接近上翼板。

比較實驗數據可觀察到 NAS 及 ASCE 規範對於 ITF 載重條件下冷軋不鏽鋼帽型斷面之腹板皺曲強度預測是保守且可信賴的($\beta \geq 3.0$)，EC3 則是太過於保守。

第四章 有限元素分析

4.1 概述

研究以有限元素分析軟體 ABAQUS 為分析工具，透過試體拉力試驗所得之材料強度，以及實驗試體之相同尺寸及邊界條件，建置分析模型進行非線性模擬分析，並進行了一系列模擬冷軋不鏽鋼單一帽型斷面於梁內部上下翼板受載之力學行為，將分析結果與試驗結果相互佐證，以了解冷軋不鏽鋼梁帽型斷面試體分析模型之可信賴程度。進而利用 ABAQUS 有限元素分析軟體分析不同條件之 54 組模型，探討各參數於皺曲強度之影響，並將其結果與現今規範建議之設計強度比較，探討規範對於冷軋不鏽鋼單一帽型斷面於 ITF 載重條件下之腹板皺曲強度計算公式是否適用。

4.2 非線性有限元素分析

有限元素分析方法目前不僅在航空結構上被廣泛使用，亦被用於機械和土木工程之結構分析，透過一些假設的與現實的物質屬性和驗證分析模型，使得分析結果將變得更加真實。以下將敘述本研究採用之分析軟體、分析方法與模型及基本假設。

4.2.1 軟體介紹與操作

本研究所採用之泛用型有限元素分析軟體 ABAQUS/CAE(Complete ABAQUS Environment) 乃由美國公司 ABAQUS 所發展，為一套功能強大之有限元素分析方法之工程分析軟體，可解決由簡單之線性分析至極富挑戰性之非線性分析等各種問題，亦在全球工程界被認定是功能多樣化與分析結果最可靠之分析軟體，其中包括了前處理、建立模型、運算求解以及後處理之能力。ABAQUS/CAE 本身是由 10 個功能模組所組成，以下針對本研究所使用之模組進行敘述。

- 部件 [Part]：為建立各獨立部件之功能模組，可直接於 ABAQUS/CAE 使用者介面下直接繪製圖形，亦可由支援的圖形軟體導入部件之幾何形狀。
- 性質 [Property]：各部件之材料屬性與尺寸設置之模組，並在此模組定義各部件之材料性質，例如：材料之彈性、塑性、多彈性... 等。
- 組裝 [Assembly]：為整合聯結各部件之模組。將 Part 模組下建立的獨立部件在此模組組裝成一個模型，此模型亦是欲執行分析之模型。
- 分析步 [Step]：用以產生與構成分析步驟之模組，並且可針對所需

要的輸出結果之細節進行個人化的設定，並定義分析之類型。

- 交互作用[Interaction]：使用此模組來設定模型中各部件之間熱學及力學上的交互作用影響，亦有賦予模型束制與接觸的特性。
- 負載[Load]：於此模組下可依照實際的實驗情況賦予模型各種邊界條件、載重型式與對稱條件。
- 網格[Mesh]：為建立有限元素模型之網格分割工具，並於此模組下設定模型之元素類型，以及分析模組之選定。
- 作業[Job]：當上述幾項工作完成後，可利用此模組建立所需要的分析工作，並具有監控模式可觀看分析過程。
- 視覺化[Visualization]：此模組為提供分析完成後的處理界面，進行有限元素模型及分析結果的圖型顯示，並將分析結果文字化輸出，且有即時的曲線繪製功能。
- 草圖[Sketch]：應用此模組建立 2-D 圖形，再利用拉伸、旋轉等方式形成 3-D 部件。

4.2.2 基本假設

本研究利用有限元素軟體模擬冷軋不鏽鋼梁帽型斷面內部受上下翼板集中載重之分析，基本假設如下：

- A. 析模型不考慮不鏽鋼冷軋成型後所造成的殘留應力。
- B. 忽略上支承墊重量對於試體造成的影響。

- C. 假設試體幾何對稱，亦即厚度均勻、轉角半徑一致。
- D. 假設載重面積完全對稱於試體中心。
- E. 假設試體受 C 型夾固定，受壓面積完全固接於下支承墊上。

4.2.3 材料性質與元素介紹

模型材料性質同實驗試體之材料採用 SUS304 型不鏽鋼，降伏強度根據不同厚度試體之拉力試片設定。考慮程式分析時間與收斂性的問題，冷軋不鏽鋼之應力應變曲線簡化成三線性段，於第一階段模擬材料彈性範圍，採用 Linear Isotropic 模型，分析模型之彈性模數 (Elastic Modulus, E_S) 依據各試體之實際數據，第二階段模擬材料降伏和應變硬化的情形，不鏽鋼材之應變硬化模數 (E_{sh}) 使用 1% E_S ，而第三階段為等值延伸第二階段之性質，如圖 4.1 所示。模擬不鏽鋼之分析元素採用三維結構物殼元素 (S4R)，殼元素之編號中 S 是 Shell Element，4 之定義為每元素有 4 個節點，其中每節點有 6 個自由度，即 3 個平移自由度與 3 個旋轉自由度，R 代表採用減積分運算法則。如圖 4.2 所示。這樣的模擬方式去除了不鏽鋼厚度方向之運算，若與採用固體元素比較，其運算時間較為節省。

模擬實驗試體與上下支承墊接觸行為，於分析中採用 Surface-to-surface contact 方法，此方法需決定主要面與從屬面之關係，主要面建議選擇材料性質較硬或網格密度較低的面，反之從屬面則應

選擇材料性質較軟或網格密度較高的面，此乃防止分析模型於變形後互相穿透而造成分析誤差。

4.2.4 分析模型網格

Ren 等人(2006)建議試體平坦部分之網格尺寸為 10 mm×10 mm 至 15 mm×15 mm，斷面角隅處之網格數目為 3 個元素網格；Zhou and Young (2006)建議試體平坦部分之網格尺寸為 2 mm×2 mm 至 10 mm×10 mm，斷面角隅處之網格數目為 6 個元素網格。經由不同網格大小之分析結果比較後，發現當模型平坦部分之網格尺寸小於 10×10 mm，且斷面角隅網格數多於 10 個元素網格後，將使得分析結果差異甚小，圖 4.3 為本研究分析之模型網格，本研究將分析模型之平坦部份(翼板與腹板)規畫網格尺寸大小為 5×5 mm(長×寬)至 10×10 mm，並將模型斷面之轉角部份劃分成 20 至 25 個網格數目。

4.2.5 分析模型與分析程序建立

如圖 4.4 所示，利用 ABAQUS 有限元素分析軟體裡的 [Part] 功能模組，建立起與實驗試體相同尺寸的分析模型，並依照支承墊寬度，模型分別為 A 及 B 兩組，A 代表支承墊寬度為 75 mm，B 代表支承墊寬度為 100 mm，並在 A 或 B 後面標上試體厚度。試體尺寸之詳細細節如下：

1. 試體 A-1.0、A-1.5 及 A-2.0 厚度分別為 1.0、1.5 及 2.0 mm，
每根試體長度(L)為 390 mm，上下支承墊寬度皆為 75 mm。
2. 試體 B-1.0、B-1.5 及 B-2.0 厚度分別為 1.0、1.5 及 2.0 mm，
每根試體長度為 420 mm，上下支承墊寬度皆為 100 mm。

接著利用 ABAQUS 有限元素分析軟體裡的[Assembly]功能模組，將 Part 模組下建立的各獨立部件(支承墊與試體)進行組裝，爾後將對此組裝完成的模型執行分析。各部件經組裝完成模型後，接續進行分析步(Step)之設定，本研究採用靜力之單向位移加載，故於分析之類型選取靜力(Static)，並於此階段設定欲輸出文字檔(分析資料)之設定。

在 Interaction 模組下設定分析模型與上、下支承墊的關係，其中帽型斷面試體於實驗中受 C 型夾固定，故於分析中將模型下翼板與下支承墊接觸部分以模組功能 Tie 將此部分束制，並使帽型斷面與上下支承墊有接觸的部分以模組功能 Surface-to-surface contact 將接觸部分設定為硬接觸關係，主要面選擇較硬的面(支承墊)，可防止從屬面(試體)穿透主要面(支承墊)。爾後依照實驗情形，使用此 Load 模組建立模型之邊界條件，本實驗試體於內部之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，並將下支承墊底部模擬為滾支承，如圖 4.5 試體之三維有限元素模型所示。

在網格模組下，進行分析模型之網格化，以結構的網格切割技術 (Structured Technique) 進行之，因四方形網格於分析運算中較不易出現發散步收斂之情形，故網格類型為四方形控制 (Quad-dominated)。當上述工作完成後，於 Job 模組選擇全分析 (Full analysis)，建立完成後，即可提交非線性運算分析作業，分析結束後以視覺化模組進行後處理，圖 4.6 為位移控制下的冷軋不鏽鋼帽型斷面分析模型之變形模式。

4.2.6 行為指標

Mises 等值應力

關於模型行為評估，將利用 Von-Mises 降伏準則下之等值應力分佈描述冷軋不鏽鋼帽型斷面分析模型之降伏情況，其定義如公式

(4.1)：

$$\sigma_{\text{eqv}} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (4.1)$$

其中 $S_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij}$ ， $p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk}$ ， S_{ij} 為應力張量 (Deviatoric Stress Tensor)， σ_{ij} 是各應力分量， p 是等效應力， δ_{ij} 為克羅內克函數 (Kronecker delta)，是一單位矩陣。

等值塑性應變 (PEEQ)

由於將不鏽鋼材之材料性質簡化成三線性段，當模型進入非線性

行為或塑性階段時，僅以應力之方式評估冷軋不鏽鋼模型帽型斷面之行為將有可能無法完全表示降伏情形或變異處。因此本研究採用等效塑性應變(Plastic Equivalent Strain, PEEQ)以評估模型在非線性階段時某特定位置之應變需求，其表示 $PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}}$ ，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。

4.3 分析結果與討論

圖 4.7 至圖 4.17 為分析與實驗之載重-應變曲線，圖 4.18 至圖 4.23 為模型分析與試體實驗變形，模擬方式以單向位移加載與實驗做比較。表 4.1 為實驗及規範與分析之腹板皺曲強度比較。

4.3.1 分析與實驗結果比較

試體之整體反應乃以具冷軋不鏽鋼帽型斷面分析模型之載重-應變關係圖來表示。觀察圖 4.7 至圖 4.17 分析與實驗之載重-應變曲線，可觀察到分析模型達降伏時，載重值上升趨緩後之試體行為與試驗有所偏差，推測之原因可能於分析模型所採用材料應變硬化曲線與簡化三線性段行為所導致，此外皆實驗與分析結果之重-應變行為十分相近。由圖 4.18 至圖 4.23 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、腹板皺曲範圍及上翼板因受支承墊加載而產生之四個角隅壓痕皆十分相似。由

表 4.1，可得到分析與實驗皺曲強度比之平均值為 0.98、變異係數 (COV) 為 0.05。

經由上述各結果顯示，採 ABAQUS 所建立之分析模型於試體腹板皺曲極限強度、試體變形程度及腹板皺曲位至皆可有效模擬。

4.3.2 局部行為

圖 4.24 至圖 4.29 為分析模型於位移控制至 5 mm 時之等值應力分佈圖，可以很明顯的觀察到所有分析模型皆於上翼板與上支承墊接觸的四個角隅處有最明顯的應力分佈。當支承墊寬度相同時，模型等值應力最大值隨著厚度增加而提。然而當試體厚度相同時，模型等值應力最大值隨著支承墊寬度增加而降低。亦即試體厚度的減少與支承墊寬度的提升皆能有效降低角隅處之應力集中現象。

圖 4.30 至圖 4.35 為分析模型於位移控制至 5 mm 等值塑性應變分佈圖，可以看出試體因上支承墊加載而產生四個角隅處有最大的 PEEQ 值，在腹板皺曲發生處也有次低的 PEEQ 值。由上述之情形，可驗證分析對於試體破壞行為能有效的預測。

4.4 參數研究

本研究利用有限元素分析軟體 ABAQUS 建立 54 組模型，依據分析結果探討各種參數對冷軋不鏽鋼單一帽型斷面於 ITF 載重條件下

腹板皺曲強度之影響，分析模型之厚度範圍為 1.0 至 4.0 mm，腹板長細比(h/t)介於 20.5 至 144.0，支承墊與試體厚度比(N/t)界於 12.5 至 150.0，試體內轉角半徑與試體厚度比(R/t)，支承墊寬度與試體腹板平坦段高度比(N/h)介於 0.3 至 1.8 之間，詳細之模型尺寸、支承墊寬度及分析結果與規範比較值如表 4.3 所示，參數研究分析模型之材料性質採用實驗試體拉伸試片數據經由 Ramberg-Osgood function 後所得結果，彈性模數為 200,000 MPa、波松比為 0.3、降伏應力為 413.6 MPa。

4.4.1 各參數對腹板皺曲強度之影響

支承墊寬度(N)

圖 4.36 至圖 4.39 為分析模型之腹板皺曲強度分佈圖，將分析結果分為 16 組相同之試體厚度、腹板平坦段高度及轉角半徑下，比較不同支承墊寬度對腹板皺曲強度的影響。如模型 No. 1、No. 5 及 No. 9 此組模型之 t 、 h 及 R 均相同，當支承墊寬度由 50 mm 增加至 100 mm 時，腹板皺曲強度增加了 20.8%；支承墊寬度由 50 mm 增加至 150 mm 時，腹板皺曲強度增加了 38.2%，亦可由力量—變位曲線圖(圖 4.40)觀察到此一結果，其他組模型之分析結果趨勢亦是如此；因此，增加支承墊的寬度可有效的增加腹板皺曲強度。

腹板平坦段高度(h)

將相同的試體厚度、支承墊寬度及轉角半徑之模型分析結果分為 24 組，觀察腹板平坦段高度對腹板皺曲強度的影響。圖 4.41 為模型 No. 1 及 No. 2 的力量—變位圖，可觀察到這組試體擁有相同之 t 、 N 及 R ，當腹板平坦段高度由 94 mm 增加至 144 mm 時，腹板皺曲強度明顯下降了 4.3%；亦可由腹板皺曲強度分佈圖(圖 4.42 至圖 4.45)觀察到當試體尺寸(t 、 N 及 R)相同時，增加腹板平坦段高度會使其腹板皺曲強度下降；另外，也觀察到支承墊寬度越小的組別，其因腹板平坦段高度的增加而減少的腹板皺曲強度百分比也較少，亦即腹板平坦段高度之增加對於支承墊寬度較小的試體其腹板皺曲強度影響較小。

轉角半徑(R)

已知腹板平坦段高度的增加會導致腹板皺曲強度下降的情況下，觀察圖 4.42 至圖 4.45，如模型 No. 11 與 No. 12 之 t 、 R 及 N 皆相同，當 h 由 88 mm(模型 No. 11)增加至 138 mm(模型 No. 12)時，腹板皺曲強度下降了 10.3%；但當 h 由 138 mm(模型 No.12)增加至 144 mm(模型 No. 10)且 R 由 5 mm(No. 12)降低至 2 mm(No. 10)時，腹板皺曲強度卻不減反增了 12.3%。由此可知， R 的下降能大幅提升試體的腹板皺曲強度。

試體厚度(t)

如圖 4.46，將參數研究分析模型根據試體厚度 1.0、1.5、2.0 及 4.0 mm 分為四組比較，其中每組的支承墊寬度及轉角半徑範圍皆一致，忽略各組腹板平坦段高度之間的些微差異；觀察後發現，試體厚度的增加能有效的提升腹板皺曲強度，其腹板皺曲強度平均值依序為 14.9、34.8、61.7 及 229.1kN，強度增加的比例近似於試體厚度的平方。

4.4.2 分析結果與規範值比較

NAS

透過有限元素分析軟體分析得到的結果(P_{FEM})與規範 NAS(2001a)、ASCE(2002b)及 EC3(1996a)比較冷軋不鏽鋼單一帽型斷面腹板皺曲強度預測之準確性。

分析結果與規範 NAS 比較(P_{FEM}/P_{NAS})之平均值為 1.08，可靠度指數為 2.99，變異係數(COV)為 0.08，從以上數據及圖 4.47 與圖 4.48 可以證明 NAS 規範所建議冷軋鋼單一帽型斷面於 ITF 載重條件下之設計強度公式用於預測材質為冷軋不鏽鋼時是趨於準確及可靠的。

ASCE

分析結果與規範 ASCE 比較(P_{FEM}/P_{ASCE})之平均值為 1.25，可靠度指數為 3.42，變異係數(COV)為 0.21，由上述數據及圖 4.47 與圖 4.49

可知 ASCE 之冷軋不鏽鋼構件設計規範對於冷軋不鏽鋼單一帽型斷面於 ITF 載重條件下之腹板皺曲強度預測是準確且可靠的。

EC3

分析結果與規範 EC3 比較(P_{FEM}/P_{EC3})之平均值為 5.88，可靠度指數為 7.97，變異係數(COV)為 0.18，觀察圖 4.47 與圖 4.50 及上述數據相較於規範 NAS 及 ASCE 之結果明顯地太過於保守，推測原因可能是歐洲規範所建議之設計公式中沒有考慮到腹板長細比(h/t)，並且其公式建議使用相同的支承墊寬度($l_a=10$ mm)計算腹板皺曲強度，故因此忽略了不同支承墊寬度下對整體的影響。



第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究為探討於 ITF 載重條件下冷軋不鏽鋼帽型斷面腹板之皺曲強度與行為，故進行 12 支試體之載重試驗，試體厚度為 1.0、1.5 及 2.0 mm，支承墊寬度分別為 75 及 100 mm。使用有限元素分析程式 ABAQUS 建立與實驗相同尺寸及材料性質之分析模型，由分析結果之載重—腹板變形曲線及載重—應變曲與實驗數據驗證分析結果之準確性，並以等值應力分佈及等值塑性應變分佈與實驗試體破壞模式比較，證明分析結果之有效性。在此提出以下結論：

1. 綜合各規範於計算 ITF 載重條件冷軋不鏽鋼帽型斷面之計算值與本研究實驗及分析之結果，北美洲規範(NAS)建議公式為保守且可靠的；美國土木工程協會(ASCE)建議公式為保守且可靠的；由於歐洲規範(EC3)公式建議支承墊寬度建議於 ITF 載重條件下使用相同的支承墊寬度($l_a=10$ mm)，忽略了支承墊寬度對整體行為的影響，以及未考慮試體腹板長細比(h/t)，而導致使用 EC3 公式計算結果過於保守。
2. 實驗發現，增加試體厚度或支承墊寬度，都可以提高試體腹板皺曲強度。另外，相同的試體厚度下，支承墊寬度的提升能有效的

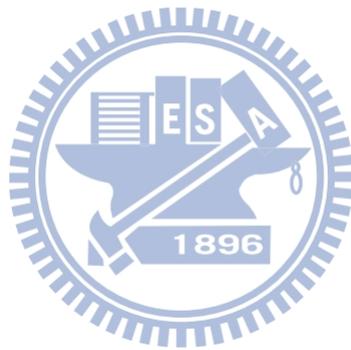
減少上翼板於受載處角隅之應力集中；而相同支承墊寬度下，厚度的增加將使得角隅處的應力集中現象更明顯。

3. 採用有限元素分析軟體 ABAQUS 建立分析模型，在適當的假設下進行運算分析，分析結果與實際試驗比較，確實能準確模擬試驗行為與結果，進而以分析模型做為參數分析之用。
4. 參數研究顯示，支承墊寬度及試體厚度之提升能有效增加腹板皺曲強度，此一結果與前述實驗及分析之結論相互呼應；且腹板皺曲強度隨著腹板平坦段高度或轉角半徑的減少而上升；同時也發現腹板平坦段高度的增減對支承墊寬度較小的試體之腹板皺曲強度影響也較小。
5. 不同試體尺寸之 12 支試驗及 54 組有限元素分析結果顯示，NAS 所建議之冷軋鋼材單一帽型斷面於 ITF 載重條件下之腹板強度皺曲公式亦可適用於計算試體材料為冷軋不鏽鋼材時的腹板皺曲強度。

5.2 建議

1. 本研究採用試體厚度僅介於 1.0 至 2.0 mm，試體高度皆為 100 mm，且試體長度為支承墊寬度加上 1.5 倍支承墊邊緣至試體端部之淨距($N+2e_1$)，未來研究可使用不同的試體尺寸與本研究比較，如試體厚度、試體高度及試體長度的相關參數研究。

2. 本研究僅探討冷軋不鏽鋼帽型斷面於 ITF 載重條件下之行為，未來研究可以此為基礎，進而探討於其他載重條件下之試體行為。
3. 本研究試體於受載時試體下翼板與下支承墊間給予束制，未來可探討與支承墊有無束制之差異性。



参考文献

- ABAQUS. (2008). ABAQUS analysis user`s manual. ABAQUS Inc., Version 6.8.
- AISI. (1986). Specification for the design of cold-formed steel structural members, American Iron and Steel Institute, Washington, D.C.
- ASCE. (2002b). “Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members.” American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE-8-02, Reston, Va.
- 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.
- Eurocode 3. (1992). “Design of steel structures, Part 1.1, General structural rules.” European Committee for Standardization (EC3), ENV 1993-1-1, CEN, Brussels, Belgium.
- Eurocode 3. (1996a). “Design of steel structures, Part 1.3, General rules supplementary rules for cold-formed members and sheeting.” European Committee for Standardization (EC3), ENV 1993-1-3, CEN, Brussels.

Eurocode 3. (1996b). “Design of steel structures, Part 1.4, General rules-supplementary rules for stainless steels.” European Committee for Standardization (EC3), ENV 1993-1-4, CEN, Brussels, Belgium.

Korvink, S. A., G. J. van den Berg, P. van der Merwe (1995). “Web crippling of stainless steel cold-formed beams.” *Journal of Constructional Steel Research*, 34(2-3), 225-248.

NAS. (2001a). *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.

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.

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.
- 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. (2007). "Experimental Investigation of cold-formed high-strength stainless steel tubular members subjected to combined bending and web crippling." *Journal of Structural Engineering*, 133(7), 1027-1034.
- 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」。

龔世恩(2007)，「冷軋型鋼梁腹板皺曲破壞分析」。明新科技大學營建工程與管理研究所論文，林新華指導。

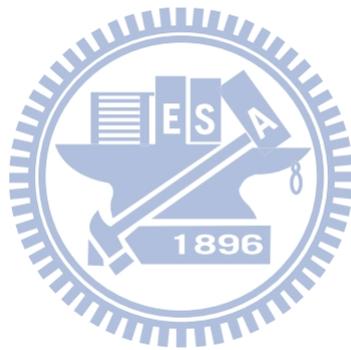


表 2.1 北美洲 NAS 規範：單一帽型斷面公式係數

支承條件	載重條件		C	C _R	C _N	C _h
與支承固定	單翼載重	端點	4	0.25	0.68	0.04
		內部	17	0.13	0.13	0.04
	雙翼載重	端點	9	0.1	0.07	0.03
		內部	10	0.14	0.22	0.02

備註：上述係數需符合 $h/t \leq 200$ 、 $N/t \leq 200$ 、 $N/h \leq 2$ 與 $\theta = 90^\circ$ 條件。

表 2.2 ASCE 所建議之標稱腹板皺曲強度公式

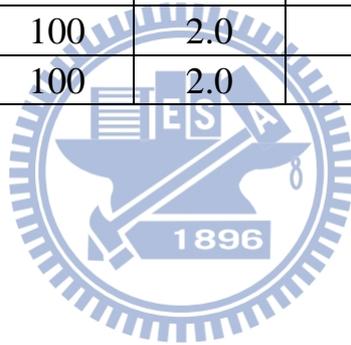
載重情況		單一腹板 (翼板無加勁)
對向載重間距 $e_2 > 1.5h$	端部反力 (EOF)	公式(2.6)
	內部反力 (IOF)	公式(2.7)
對向載重間距 $e_2 \leq 1.5h$	端部反力 (ETF)	公式(2.8)
	內部反力 (ITF)	公式(2.9)

備註：需符合 $h/t \leq 200$ 、 $R/t \leq 6$ 、 $N/t \leq 210$ 及 $N/h \leq 3.5$ 。

表 3.1 實驗試體尺寸與支承墊寬度

試體編號	支承墊 N1	支承墊 N2	厚度 t	腹板高度 h	試體長度 L	e_1
A-1.0-1	75	75	1.0	94	390	157.5
A-1.0-2	75	75	1.0	94	390	157.5
A-1.5-1	75	75	1.5	93	390	157.5
A-1.5-2	75	75	1.5	93	390	157.5
A-2.0-1	75	75	2.0	92	390	157.5
A-2.0-2	75	75	2.0	92	390	157.5
B-1.0-1	100	100	1.0	94	420	160
B-1.0-2	100	100	1.0	94	420	160
B-1.5-1	100	100	1.5	93	420	160
B-1.5-2	100	100	1.5	93	420	160
B-2.0-1	100	100	2.0	92	420	160
B-2.0-2	100	100	2.0	92	420	160

備註：單位：mm



→ 實驗次數：第 1、2 次

→ 試體厚度(t)：1.0、1.5、2.0 (mm)

→ 支承墊寬度(N)：A=75、B=100 (mm)

表 3.2 試體腹板皺曲強度實驗值與規範設計強度之比值

試體名稱	Test(kN)	Test/NAS	Test/ASCE	Test/EC3
A-1.0-1	12.01	1.00	1.18	5.33
A-1.0-2	12.36	1.03	1.21	6.32
A-1.5-1	26.14	1.09	1.05	6.36
A-1.5-2	24.97	1.04	1.01	5.85
A-2.0-1	46.75	1.16	1.01	6.63
A-2.0-2	46.17	1.14	1.00	6.36
B-1.0-1	13.19	1.00	1.26	5.48
B-1.0-2	13.07	0.99	1.25	6.04
B-1.5-1	27.44	1.05	1.09	6.28
B-1.5-2	27.21	1.04	1.08	5.8
B-2.0-1	46.75	1.07	1.00	6.58
B-2.0-2	52.88	1.20	1.13	7.19
Mean(P_m)		1.07	1.11	6.18
COV(V_P)		0.07	0.09	0.08
Reliability index(β)		3.00	3.83	9.63
Resistance factor (Φ_w)		0.85	0.70	0.91

表 4.1 分析結果與實驗之腹板皺曲強度比較

試體名稱	FEM (kN)	Test (kN)	FEM/Test
A-1.0-1	12.29	12.01	1.02
A-1.0-2		12.36	0.99
A-1.5-1	24.39	26.14	0.93
A-1.5-2		24.97	0.98
A-2.0-1	42.53	46.75	0.91
A-2.0-2		46.17	0.92
B-1.0-1	13.38	13.19	1.01
B-1.0-2		13.07	1.02
B-1.5-1	27.35	27.44	1.00
B-1.5-2		27.21	1.01
B-2.0-1	49.83	46.75	1.07
B-2.0-2		52.88	0.94
Mean(P_m)			0.98
COV(V_P)			0.05

表 4.2 實驗及規範與分析結果之腹板皺曲強度比較

試體名稱	FEM (kN)	FEM/Test	FEM/NAS	FEM/ASCE	FEM/EC3
A-1.0-1	12.29	1.02	1.02	1.21	5.45
A-1.0-2		0.99	1.02	1.21	5.45
A-1.5-1	24.39	0.93	1.02	0.98	5.90
A-1.5-2		0.98	1.02	0.98	5.90
A-2.0-1	42.53	0.91	1.05	0.92	5.78
A-2.0-2		0.92	1.05	0.92	5.78
B-1.0-1	13.38	1.01	1.01	1.28	5.93
B-1.0-2		1.02	1.01	1.28	5.93
B-1.5-1	27.35	1.00	1.04	1.08	6.61
B-1.5-2		1.01	1.04	1.08	6.61
B-2.0-1	49.83	1.07	1.13	1.06	6.77
B-2.0-2		0.94	1.13	1.06	6.77
Mean(P_m)		0.98	1.05	1.09	6.07
COV(V_p)		0.50	0.04	0.12	0.08
Reliability index(β)			2.99	3.61	9.61
Resistance factor (Φ_w)			0.85	0.70	0.91

表 4.3 參數分析之模型尺寸

No.	Specimen(H*t*R)	支撐墊寬度 腹板平坦段 試體厚度 試體長度				Ratio					Comparison		
		N (mm)	h (mm)	t (mm)	L (mm)	h/t	N/t	R/t	N/h	P _{FEM} (kN)	P _{FEM} /P _{NAS}	P _{FEM} /P _{ASCE}	P _{FEM} /P _{EC3}
1	100*1*2	50	94	1	470	94.0	50.0	2.0	0.5	14365.0	1.12	1.25	5.01
2	150*1*2	50	144	1	720	144.0	50.0	2.0	0.3	13795.6	1.17	1.50	4.81
3	100*1*5	50	88	1	440	88.0	50.0	5.0	0.6	12550.9	1.13	1.32	4.84
4	150*1*5	50	138	1	690	138.0	50.0	5.0	0.4	11764.4	1.15	1.54	4.54
5	100*1*2	100	94	1	470	94.0	100.0	2.0	1.1	17409.2	1.09	1.43	6.07
6	150*1*2	100	144	1	720	144.0	100.0	2.0	0.7	15326.3	1.03	1.57	5.35
7	100*1*5	100	88	1	440	88.0	100.0	5.0	1.1	13843.5	1.00	1.37	5.34
8	150*1*5	100	138	1	690	138.0	100.0	5.0	0.7	13031.5	1.02	1.61	5.03
9	100*1*2	150	94	1	470	94.0	150.0	2.0	1.6	19925.1	1.08	1.54	6.95
10	150*1*2	150	144	1	720	144.0	150.0	2.0	1.0	16375.3	0.96	1.59	5.71
11	100*1*5	150	88	1	440	88.0	150.0	5.0	1.7	16298.3	1.02	1.53	6.29
12	150*1*5	150	138	1	690	138.0	150.0	5.0	1.1	14615.7	0.99	1.70	5.64
13	100*1.5*2	50	93	1.5	465	62.0	33.3	1.3	0.5	33146.9	1.10	1.04	5.13
14	150*1.5*2	50	143	1.5	715	95.3	33.3	1.3	0.3	30382.9	1.14	1.16	5.01
15	100*1.5*5	50	87	1.5	435	58.0	33.3	3.3	0.6	27999.9	1.10	1.05	4.99
16	150*1.5*5	50	137	1.5	685	91.3	33.3	3.3	0.4	26192.3	1.10	1.12	4.67
17	100*1.5*2	100	93	1.5	465	62.0	66.7	1.3	1.1	40261.9	1.15	1.30	6.63
18	150*1.5*2	100	143	1.5	715	95.3	66.7	1.3	0.7	37439.3	1.14	1.37	6.17
19	100*1.5*5	100	87	1.5	435	58.0	66.7	3.3	1.1	31183.6	1.00	1.13	5.56
20	150*1.5*5	100	137	1.5	685	91.3	66.7	3.3	0.7	29583.0	1.01	1.21	5.27
21	100*1.5*2	150	93	1.5	465	62.0	100.0	1.3	1.6	48881.1	1.22	1.51	8.05
22	150*1.5*2	150	143	1.5	715	95.3	100.0	1.3	1.0	41494.2	1.10	1.46	6.84
23	100*1.5*5	150	87	1.5	435	58.0	100.0	3.3	1.7	37954.7	1.06	1.32	6.77
24	150*1.5*5	150	137	1.5	685	91.3	100.0	3.3	1.1	34667.4	1.03	1.37	6.18
25	100*2*2	50	92	2	460	46.0	25.0	1.0	0.5	52811.5	1.07	0.93	5.10
26	150*2*2	50	142	2	710	71.0	25.0	1.0	0.4	51393.1	1.09	0.99	4.96
27	100*2*5	50	86	2	430	43.0	25.0	2.5	0.6	48376.9	1.07	0.93	4.99
28	150*2*5	50	136	2	680	68.0	25.0	2.5	0.4	45478.5	1.06	0.95	4.69
29	100*2*2	100	92	2	460	46.0	50.0	1.0	1.1	71219.4	1.18	1.22	6.88
30	150*2*2	100	142	2	710	71.0	50.0	1.0	0.7	66785.5	1.17	1.25	6.45
31	100*2*5	100	86	2	430	43.0	50.0	2.5	1.2	54863.1	1.00	1.02	5.66
32	150*2*5	100	136	2	680	68.0	50.0	2.5	0.7	51845.3	0.99	1.05	5.35
33	100*2*2	150	92	2	460	46.0	75.0	1.0	1.6	90571.2	1.32	1.50	8.74

表 4.3 參數分析之模型尺寸(續)

34	150*2*2	150	142	2	710	71.0	75.0	1.0	1.1	77171.1	1.19	1.40	7.45
35	100*2*5	150	86	2	430	43.0	75.0	2.5	1.7	68464.1	1.10	1.24	7.07
36	150*2*5	150	136	2	680	68.0	75.0	2.5	1.1	61902.3	1.04	1.22	6.39
37	100*4*2	50	88	4	440	22.0	12.5	0.5	0.6	186354.0	1.00	0.77	4.91
38	150*4*2	50	138	4	690	34.5	12.5	0.5	0.4	183004.0	1.01	0.79	4.82
39	100*4*5	50	82	4	410	20.5	12.5	1.3	0.6	171409.0	0.97	0.72	4.73
40	150*4*5	50	132	4	660	33.0	12.5	1.3	0.4	160871.0	0.95	0.70	4.44
41	100*4*2	100	88	4	440	22.0	25.0	0.5	1.1	257798.0	1.17	1.05	6.80
42	150*4*2	100	138	4	690	34.5	25.0	0.5	0.7	242023.0	1.13	1.03	6.38
43	100*4*5	100	82	4	410	20.5	25.0	1.3	1.2	210523.0	1.01	0.87	5.81
44	150*4*5	100	132	4	660	33.0	25.0	1.3	0.8	196018.0	0.98	0.84	5.41
45	100*4*2	150	88	4	440	22.0	37.5	0.5	1.7	334007.0	1.35	1.34	8.81
46	150*4*2	150	138	4	690	34.5	37.5	0.5	1.1	305681.0	1.28	1.28	8.06
47	100*4*5	150	82	4	410	20.5	37.5	1.3	1.8	262948.0	1.13	1.07	7.25
48	150*4*5	150	132	4	660	33.0	37.5	1.3	1.1	238345.0	1.06	1.01	6.57
49	120*1*4	110	110	1	550	110.0	110.0	4.0	1.0	14849.4	1.02	1.47	5.56
50	125*1*4	120	115	1	575	115.0	120.0	4.0	1.0	15040.3	1.01	1.51	5.63
51	130*1*4	130	120	1	600	120.0	130.0	4.0	1.1	15237.2	1.01	1.55	5.70
52	120*1*6	110	106	1	530	106.0	110.0	6.0	1.0	13176.6	0.99	1.51	5.23
53	125*1*6	120	111	1	555	111.0	120.0	6.0	1.1	13491.3	0.99	1.56	5.35
54	130*1*6	130	116	1	580	116.0	130.0	6.0	1.1	13777.2	0.99	1.61	5.46
Mean, Pm											1.08	1.25	5.88
COV, Vp											0.08	0.21	0.18
Reliability index,β											2.99	3.42	7.97
Resistance factor,Φ_w											0.85	0.7	0.91
Standard deviation											0.09	0.27	1.06

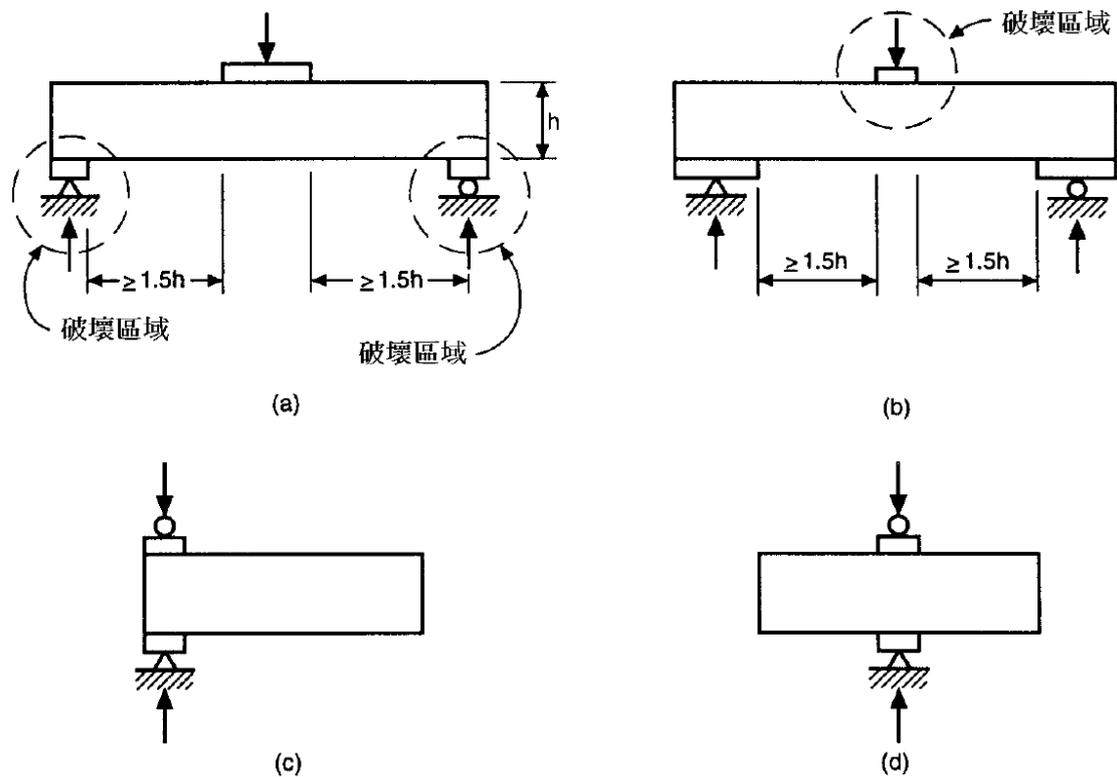
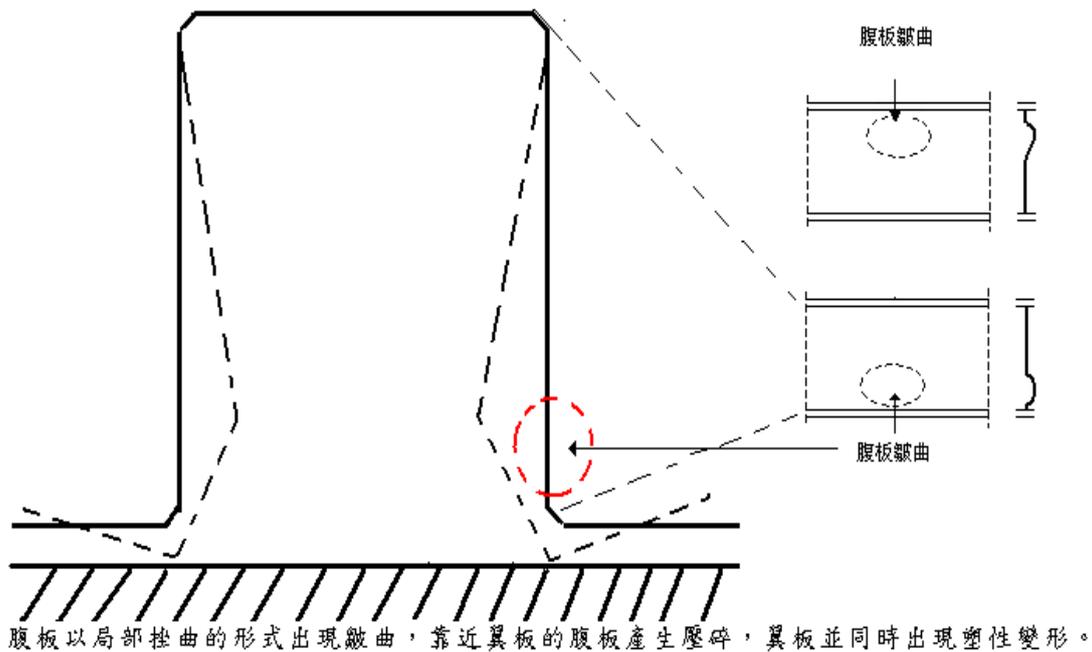


圖 2.1 腹板皺曲試驗之載重型式 (內政部營建署 2004)



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 2.2 冷軋鋼梁構件之腹板皺曲示意圖 (內政部營建署 2004)

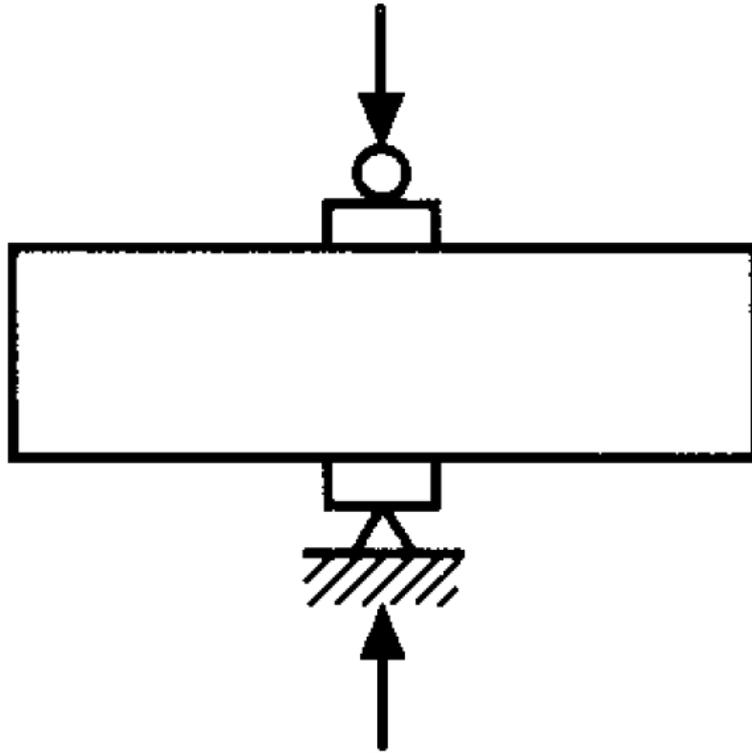


圖 2.3 冷軋鋼梁構件於內部雙翼承受載重 (內政部營建署 2004)

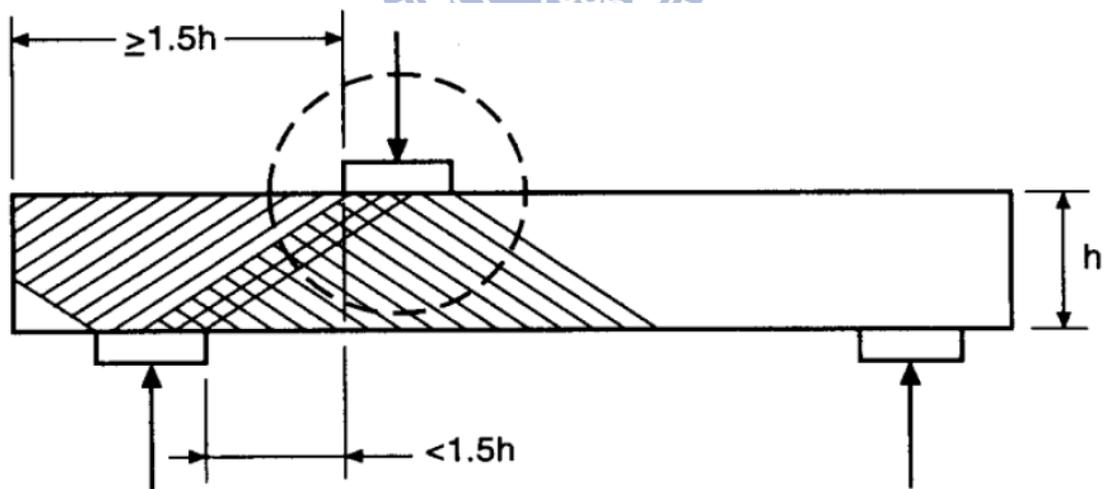


圖 2.4 冷軋鋼梁構件內部上、下翼板受載下之載重與反力 (內政部營建署 2004)

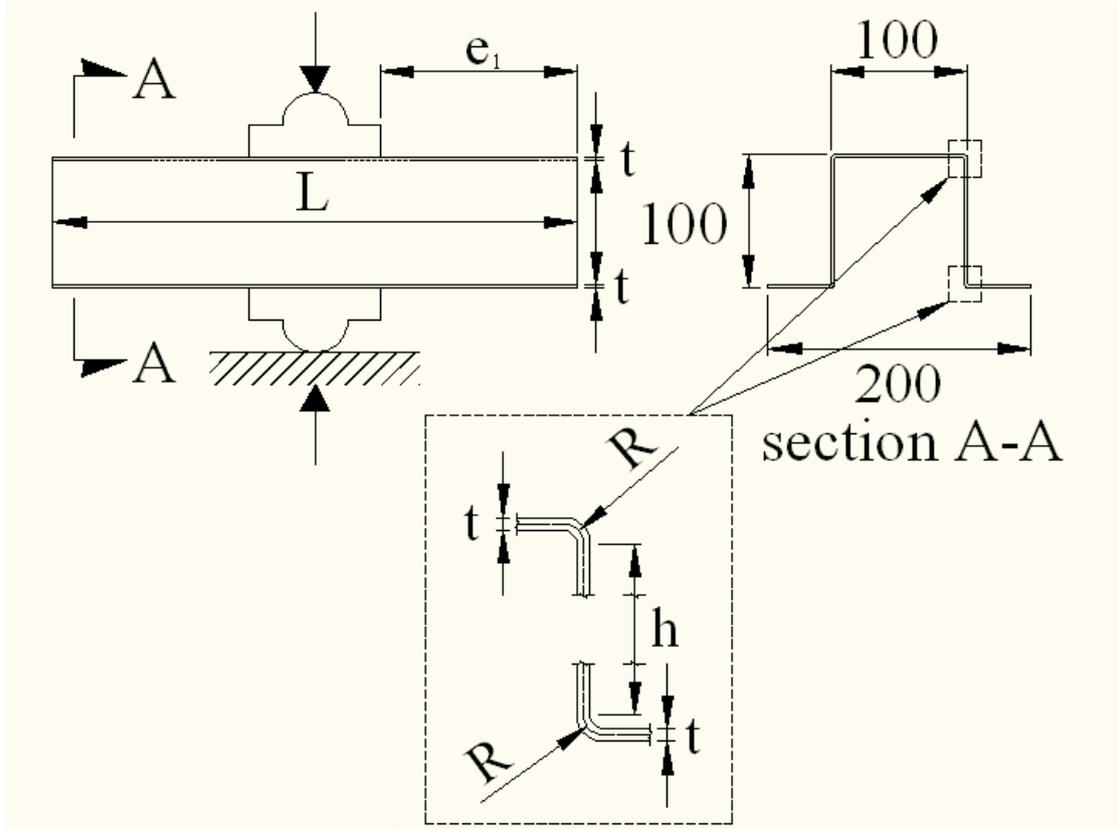


圖 3.1 試體示意圖



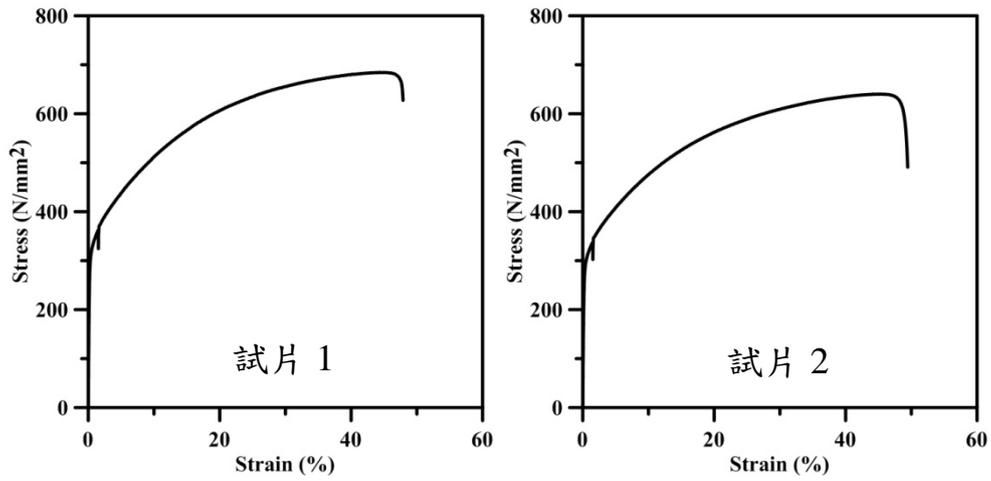


圖 3.2 拉力試片厚度 1.0 mm 之載重-應變曲線

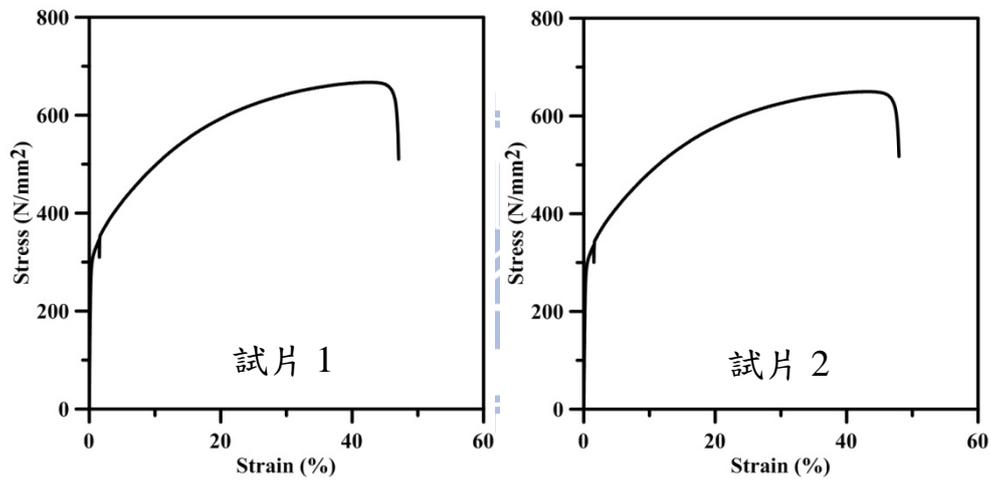


圖 3.3 拉力試片厚度 1.5 mm 之載重-應變曲線

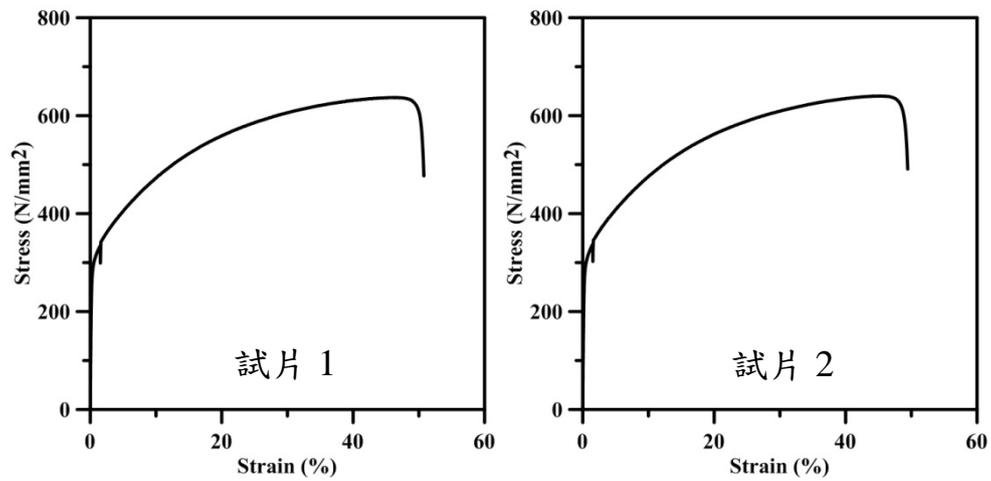
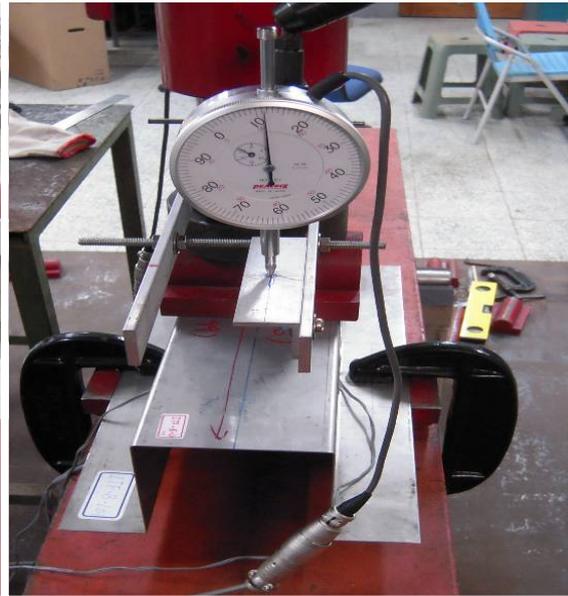


圖 3.4 拉力試片厚度 2.0 mm 之載重-應變曲線



正視圖



側視圖

圖 3.5 實驗之指針式位移計架設位置

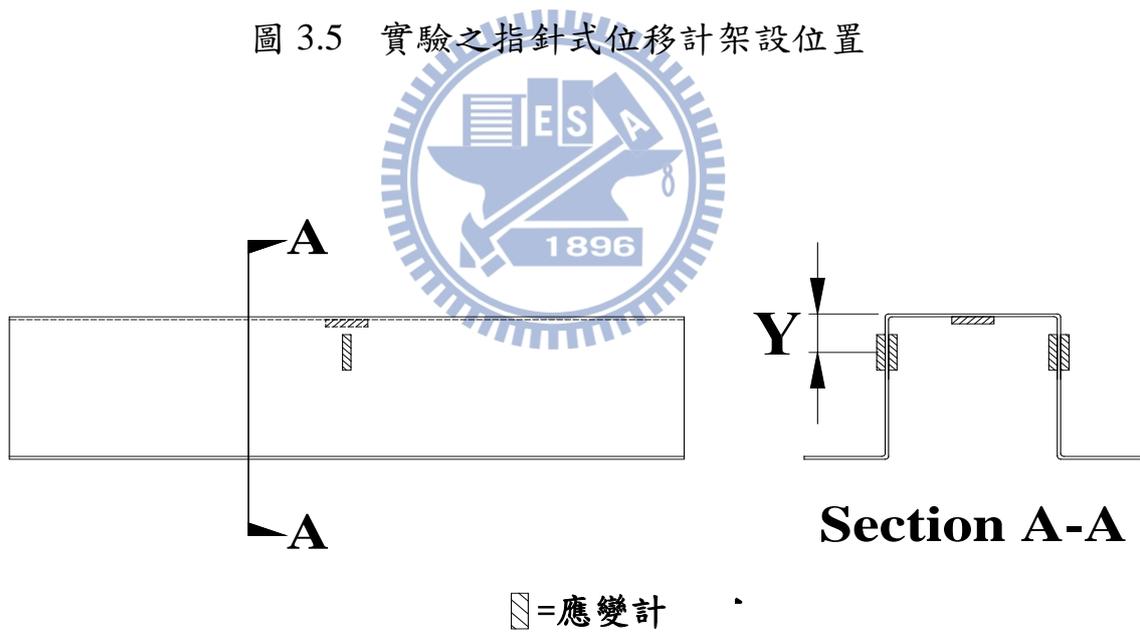


圖 3.6 應變計位置示意圖



圖 3.7 資料擷取轉換器

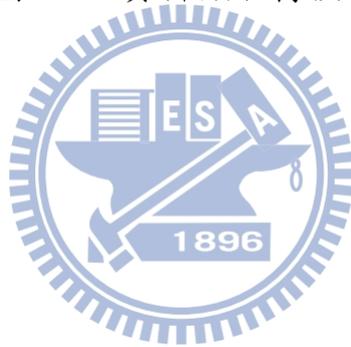




圖 3.8 試體 A-1.0-1 變形

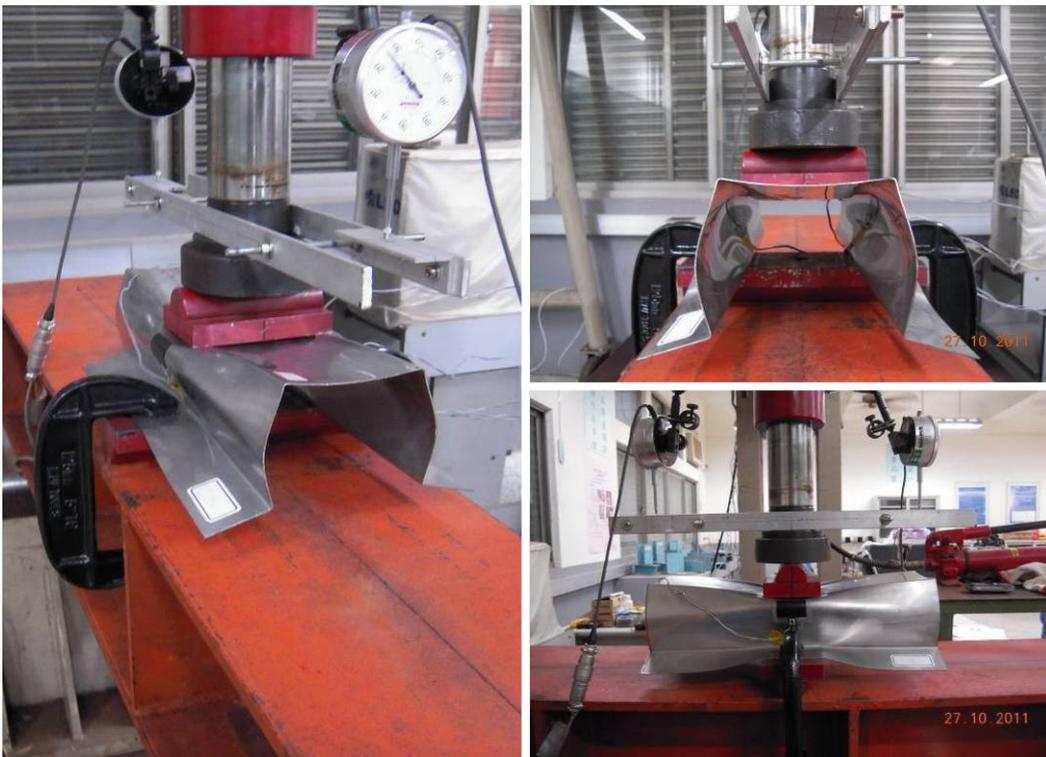


圖 3.9 試體 A-1.0-2 變形

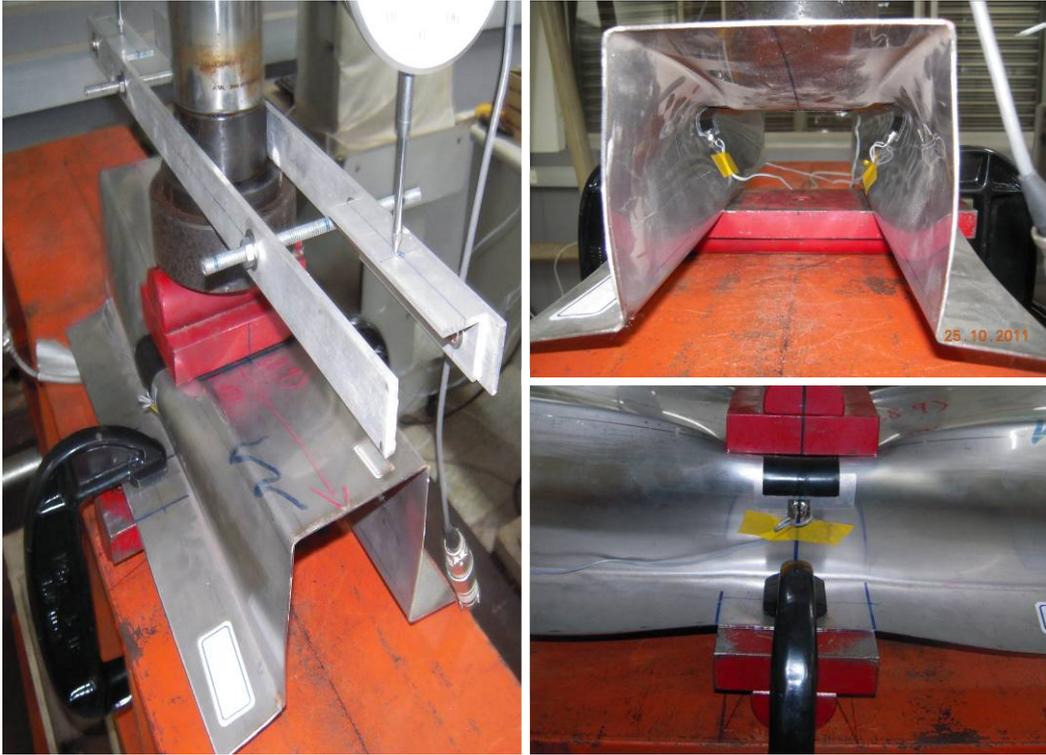


圖 3.10 試體 A-1.5-1 變形



圖 3.11 試體 A-1.5-2 變形

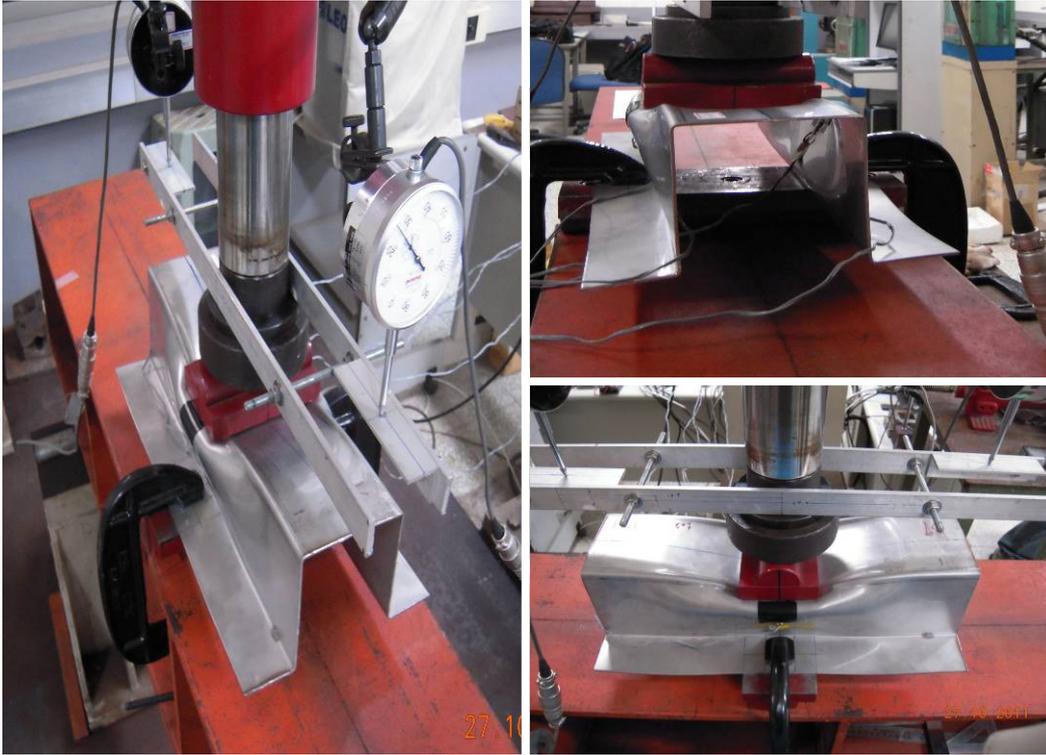


圖 3.12 試體 A-2.0-1 變形

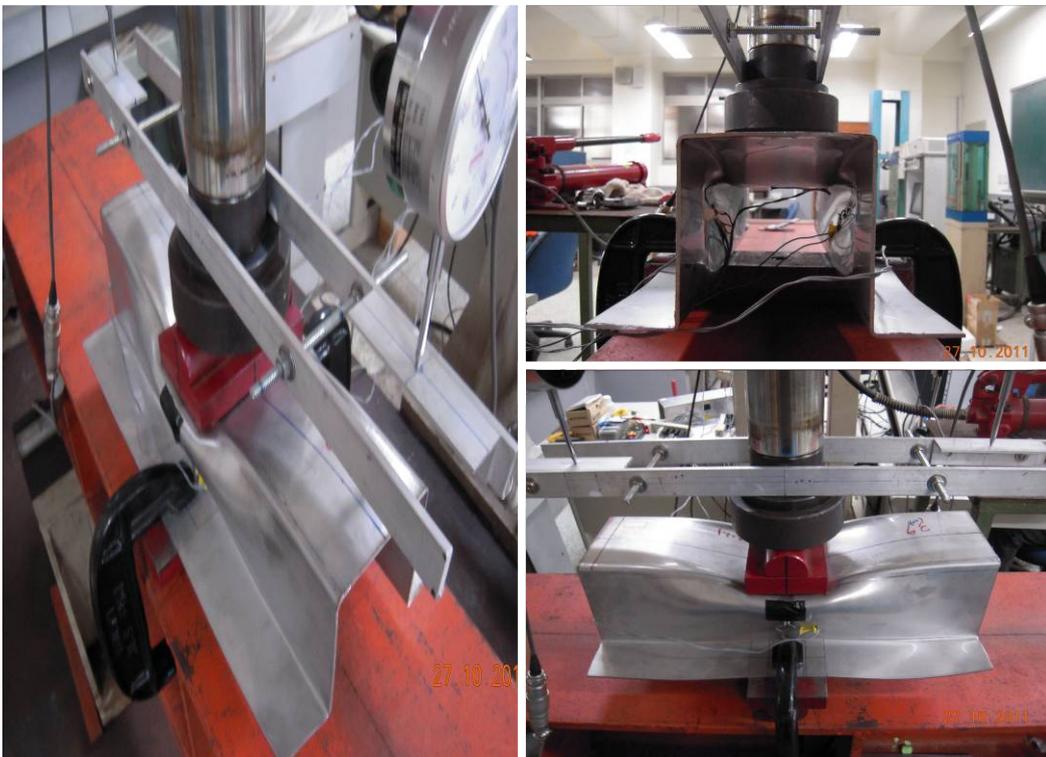


圖 3.13 試體 A-2.0-2 變形

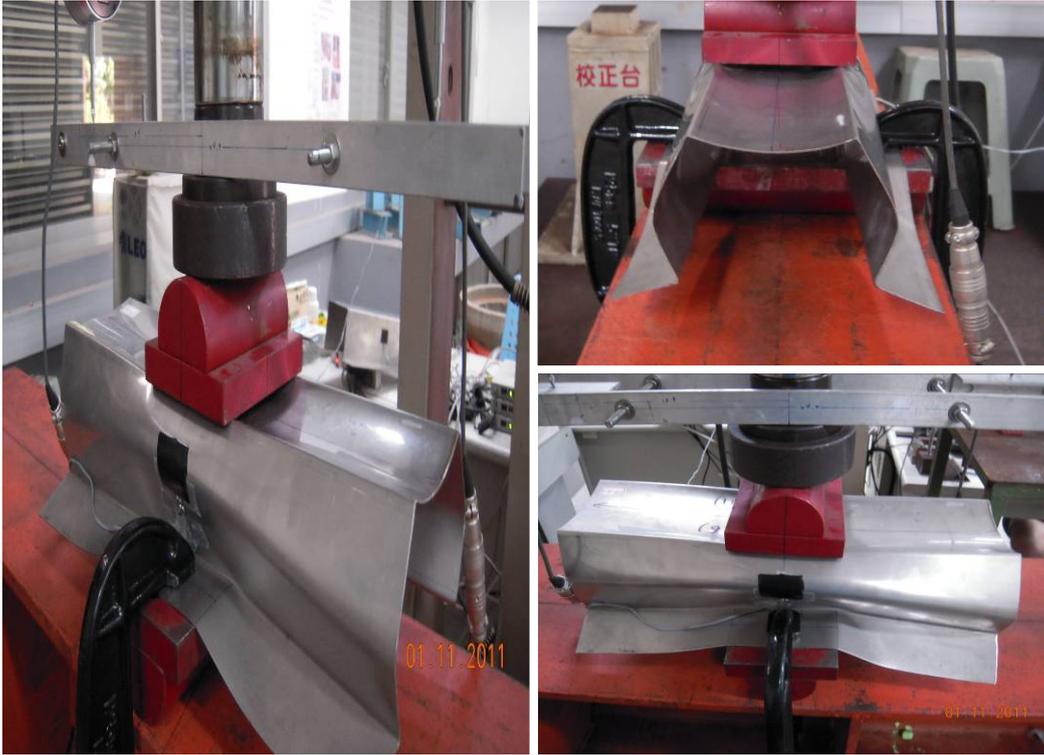


圖 3.14 試體 B-1.0-1 變形



圖 3.15 試體 B-1.0-2 變形



圖 3.16 試體 B-1.5-1 變形



圖 3.17 試體 B-1.5-2 變形



圖 3.18 試體 B-2.0-1 變形

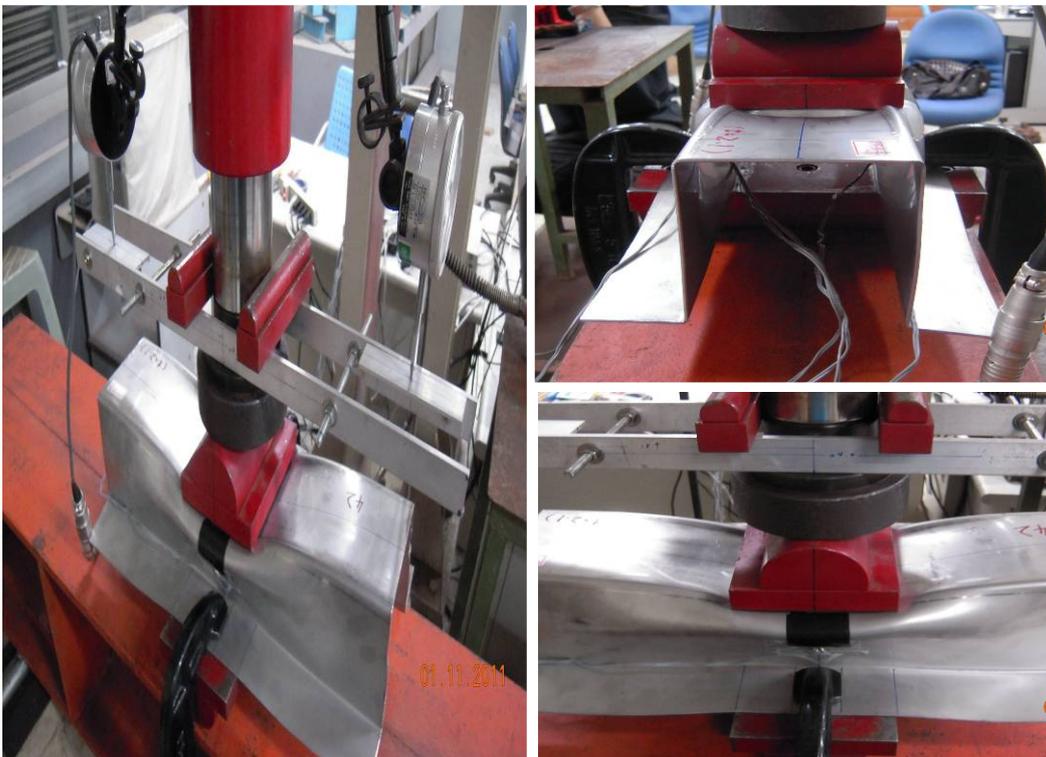


圖 3.19 試體 B-2.0-2 變形

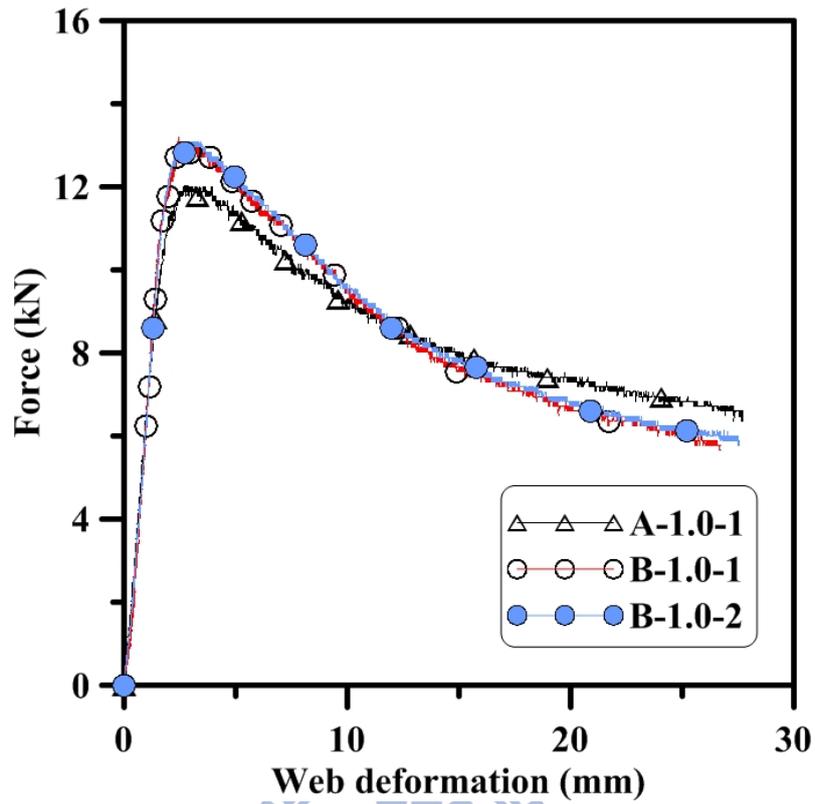


圖 3.20 試體厚度 1.0 mm 之載重-腹板變形曲線

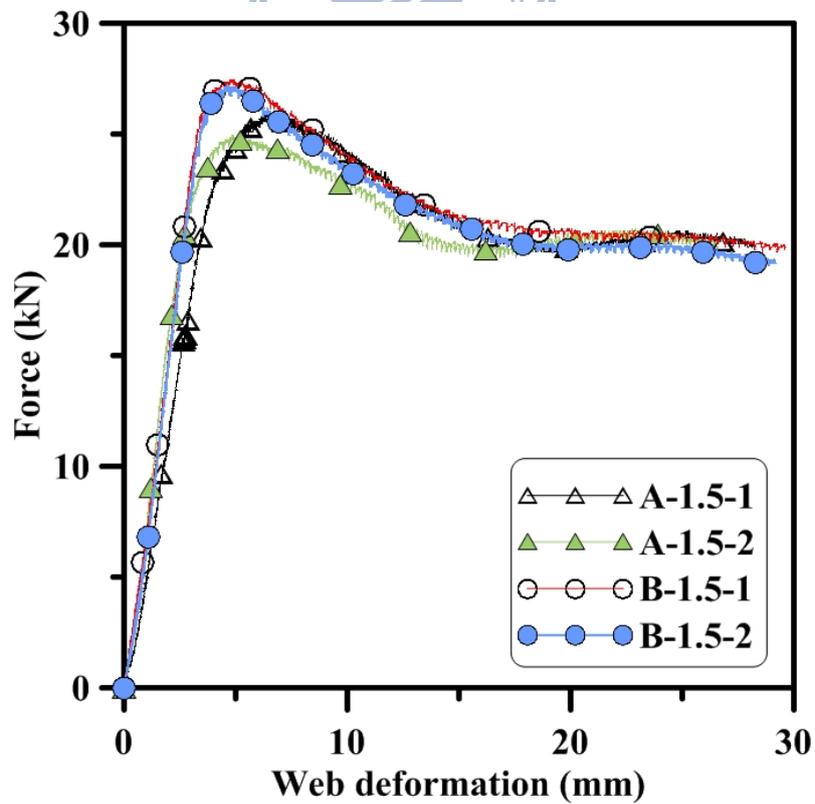


圖 3.21 試體厚度 1.5 mm 之載重-腹板變形曲線

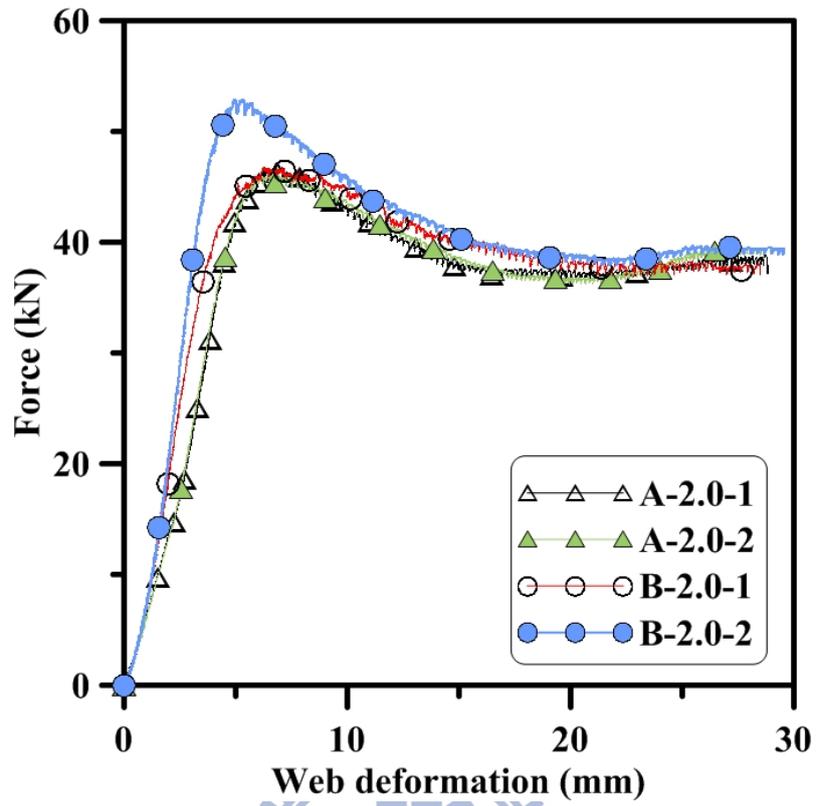


圖 3.22 試體厚度 2.0 mm 之載重-腹板變形曲線



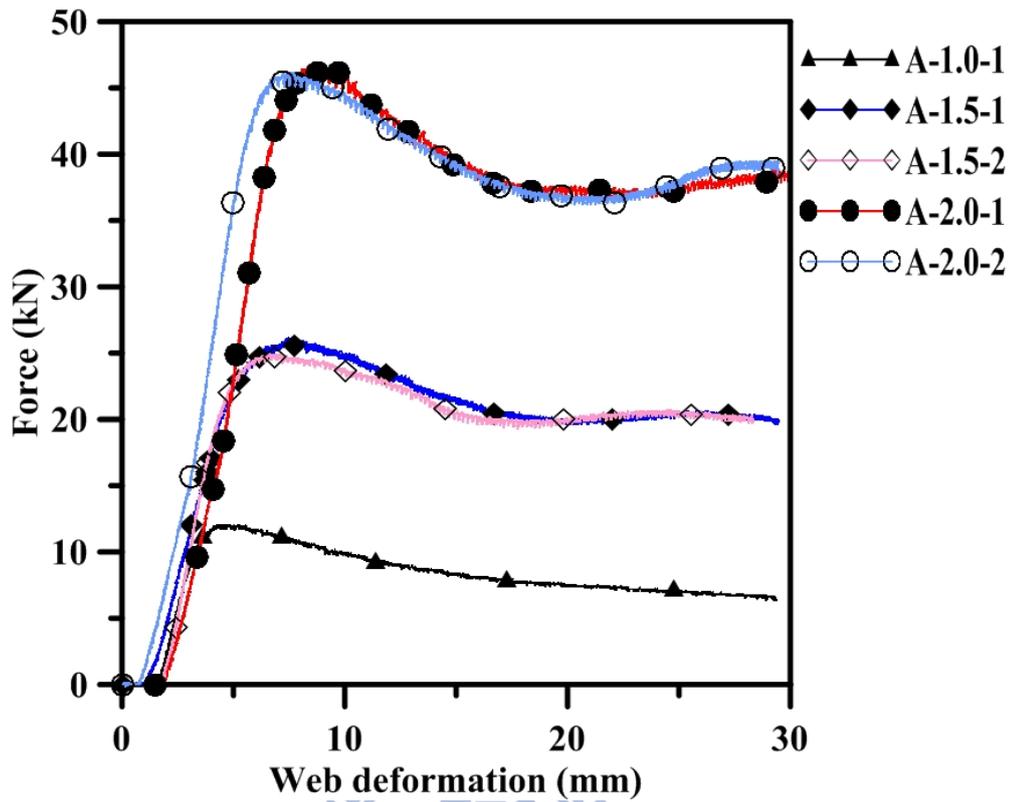


圖 3.23 支承墊寬度 A 之載重-腹板變形曲線

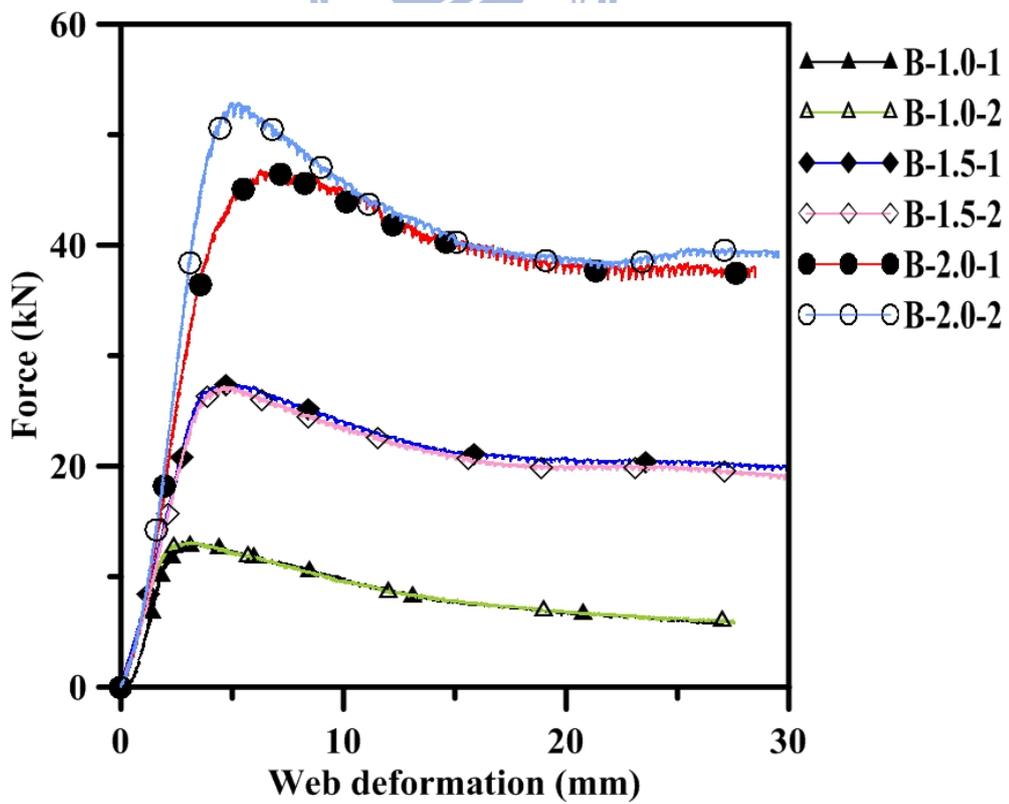


圖 3.24 支承墊寬度 B 之載重-腹板變形曲線

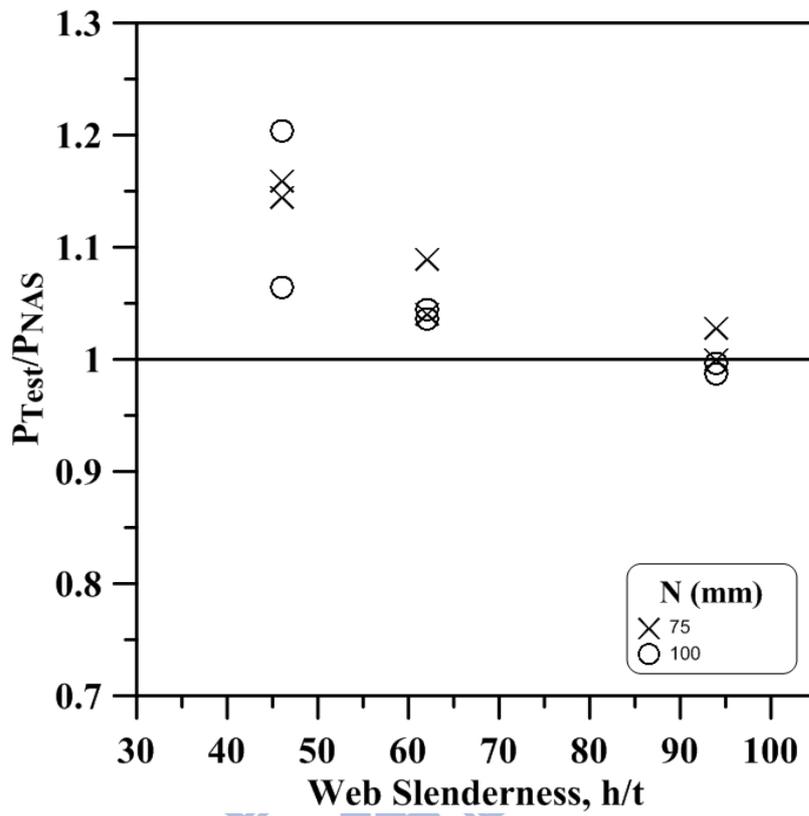


圖 3.25 h/t 與 P_{Test}/P_{NAS} 關係圖

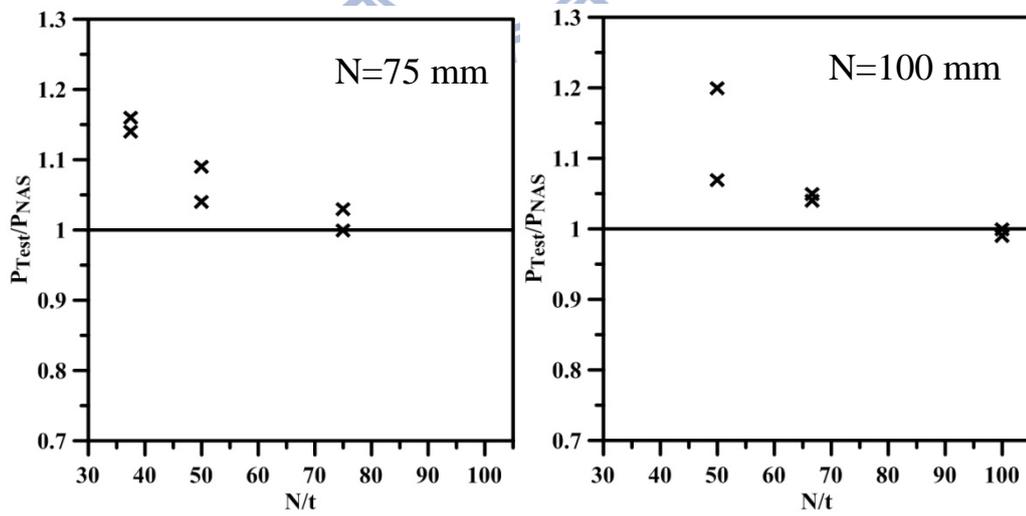


圖 3.26 N/t 與 P_{Test}/P_{NAS} 關係圖

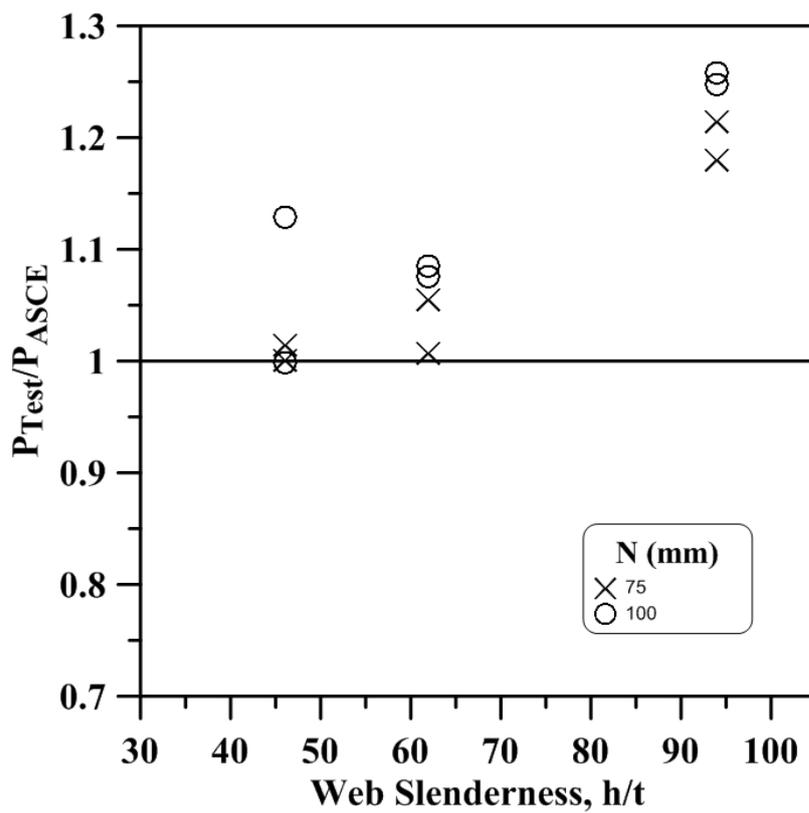


圖 3.27 h/t 與 P_{Test}/P_{ASCE} 關係圖

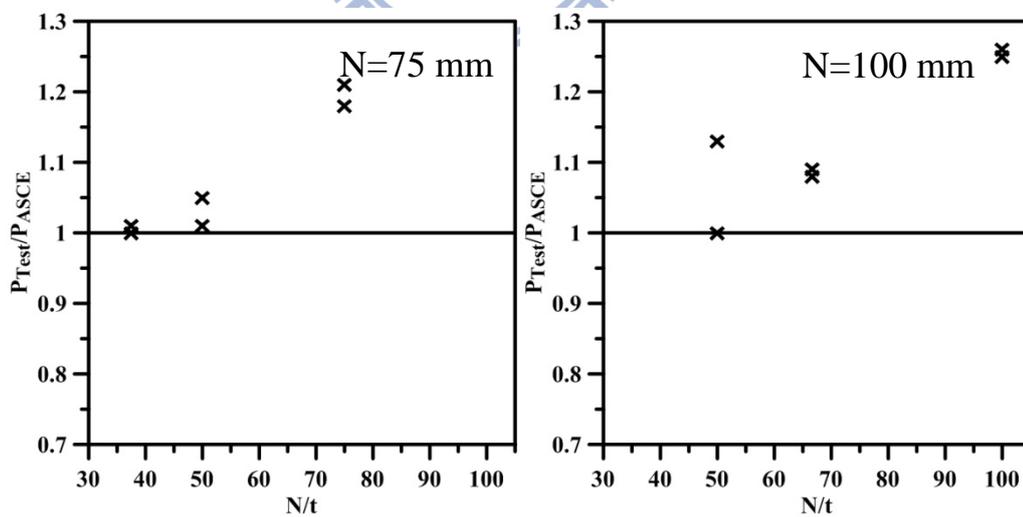


圖 3.28 N/t 與 P_{Test}/P_{ASCE} 關係圖

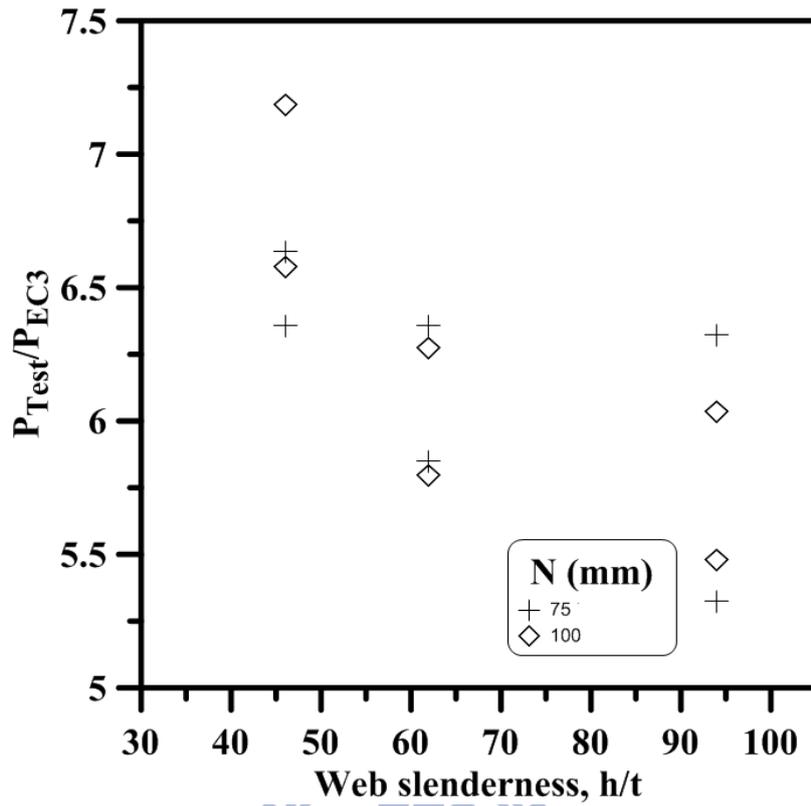


圖 3.29 h/t 與 P_{Test}/P_{EC3} 關係圖

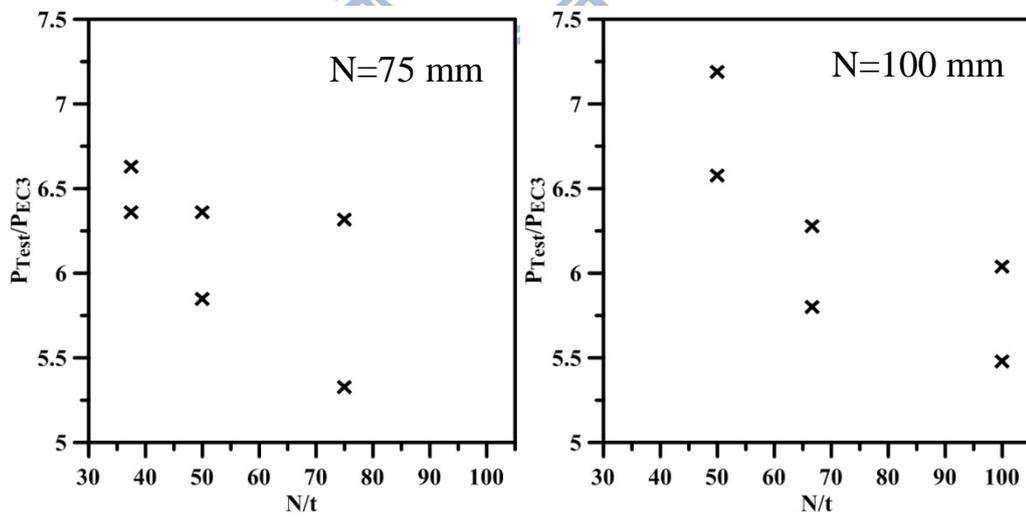


圖 3.30 N/t 與 P_{Test}/P_{EC3} 關係圖

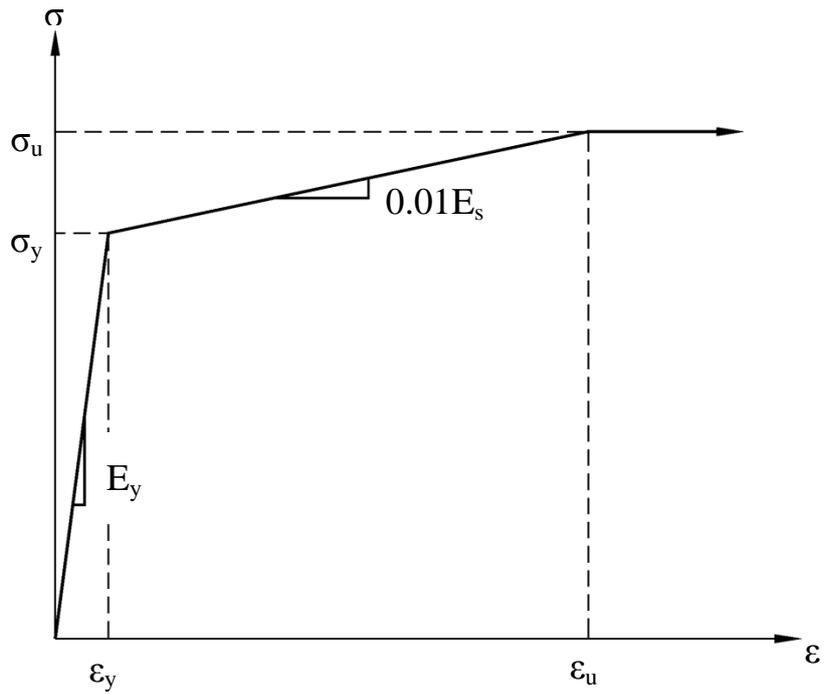


圖 4.1 不鏽鋼材之三線性應力-應變關係

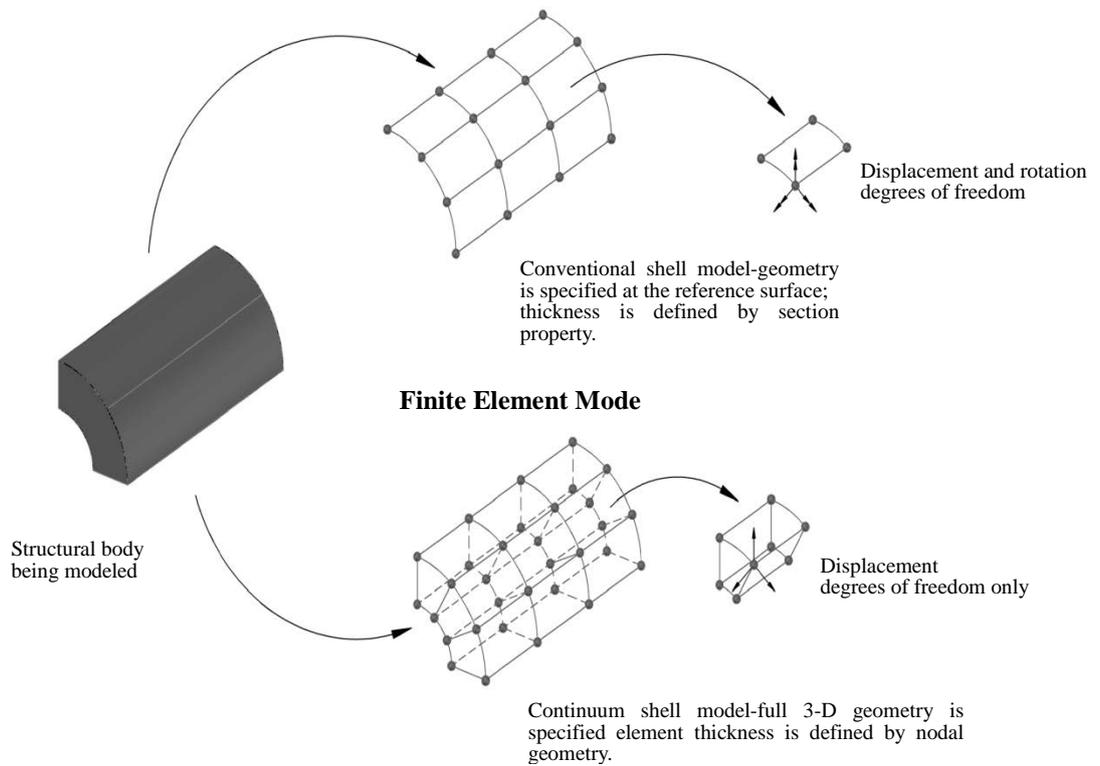


圖 4.2 ABAQUS 結構體轉置殼元素建模示意圖

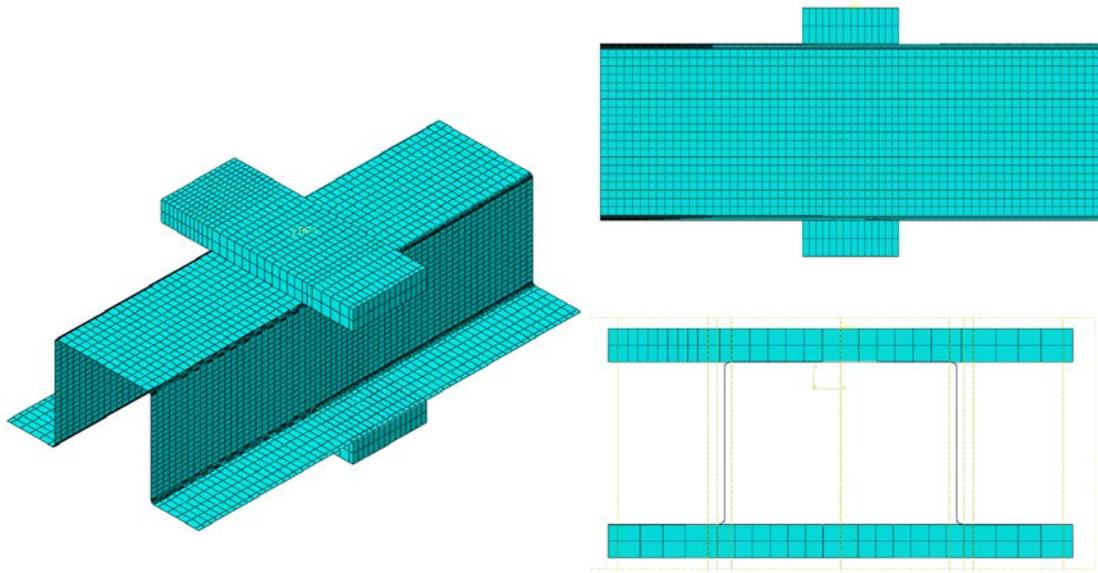
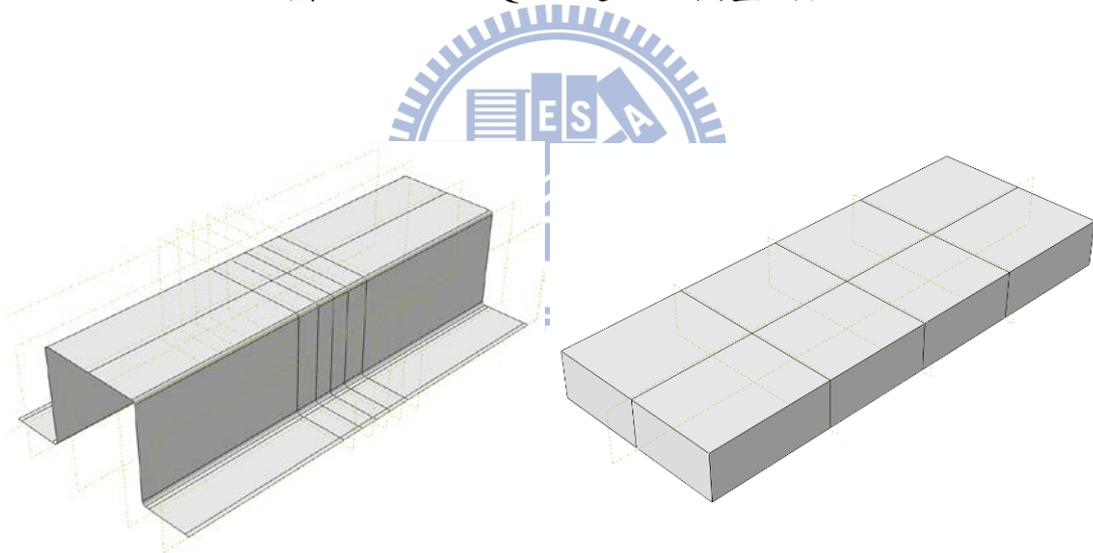


圖 4.3 ABAQUS 建立之模型網格



帽型斷面冷軋不鏽鋼模型

上、下支承墊支分析模型

圖 4.4 ABAQUS 建立之模型部件

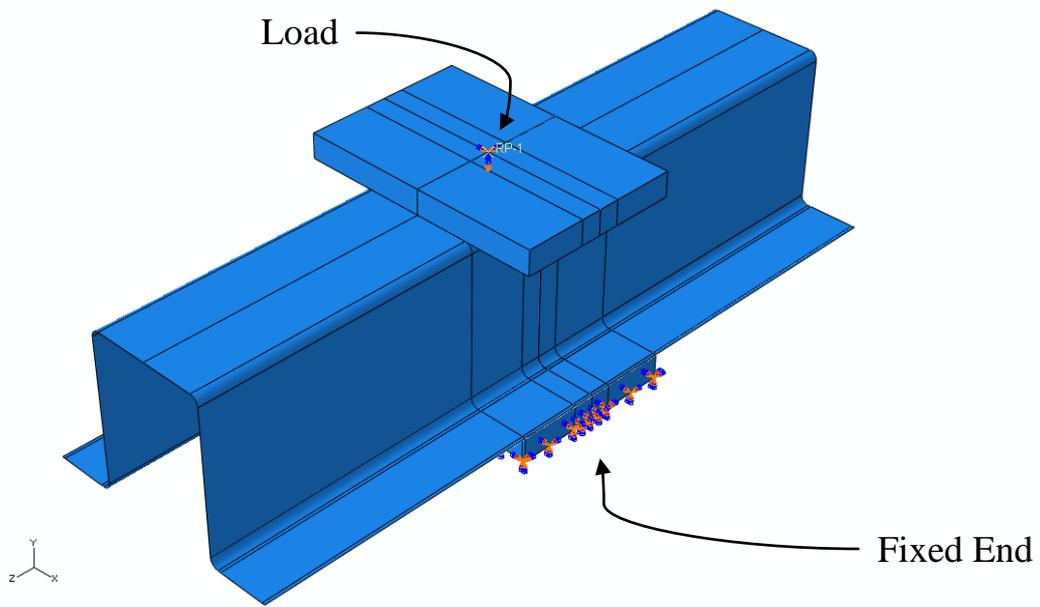


圖 4.5 試體之三維有限元素模型

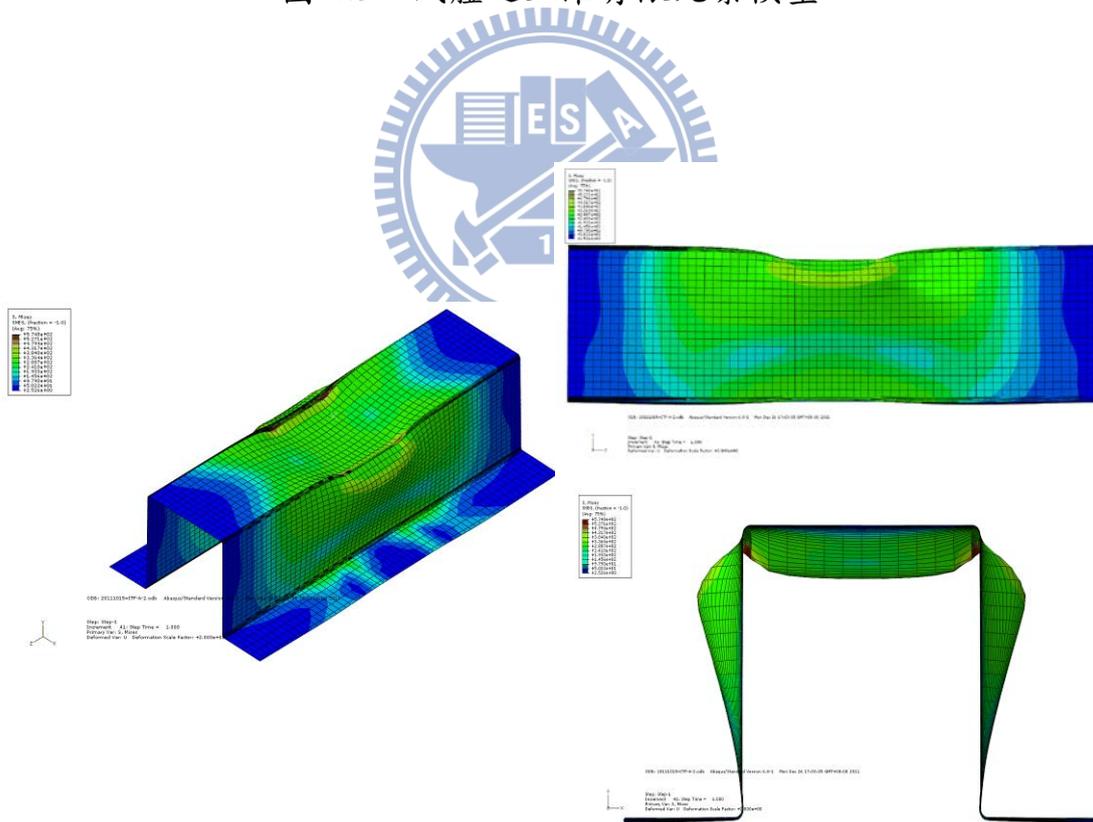


圖 4.6 非線性分析—帽型斷面冷軋不鏽鋼之變形模式

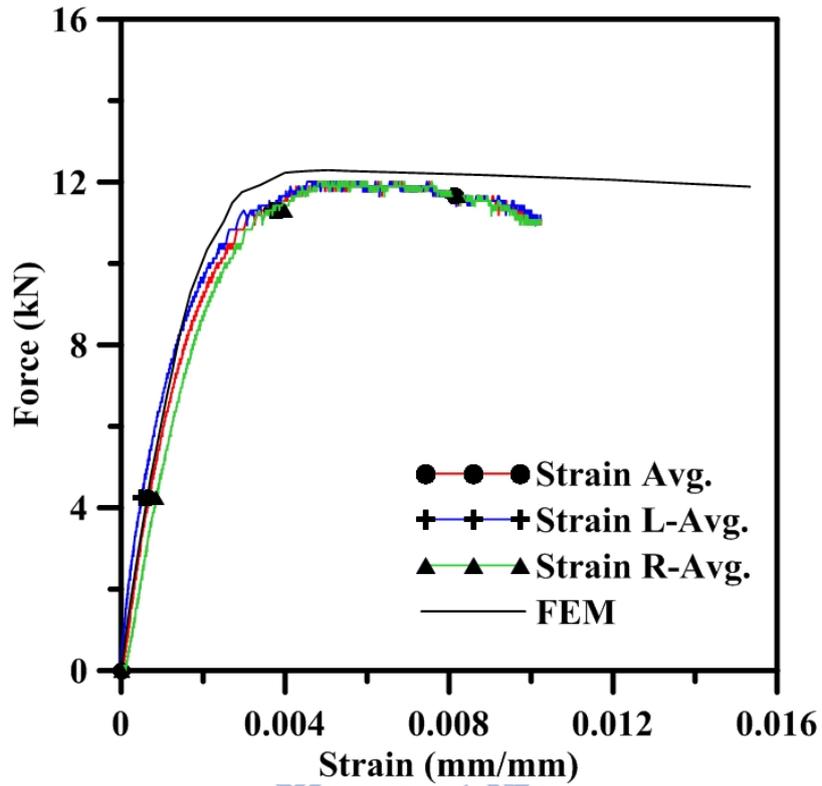


圖 4.7 A-1.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線

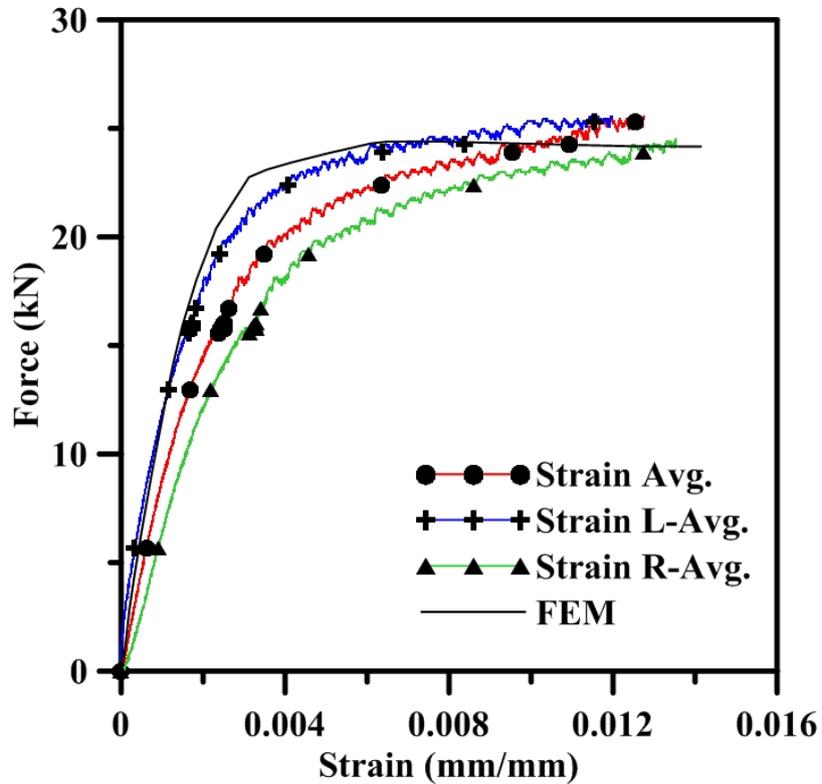


圖 4.8 A-1.5-1 分析與實驗之載重-應變曲線

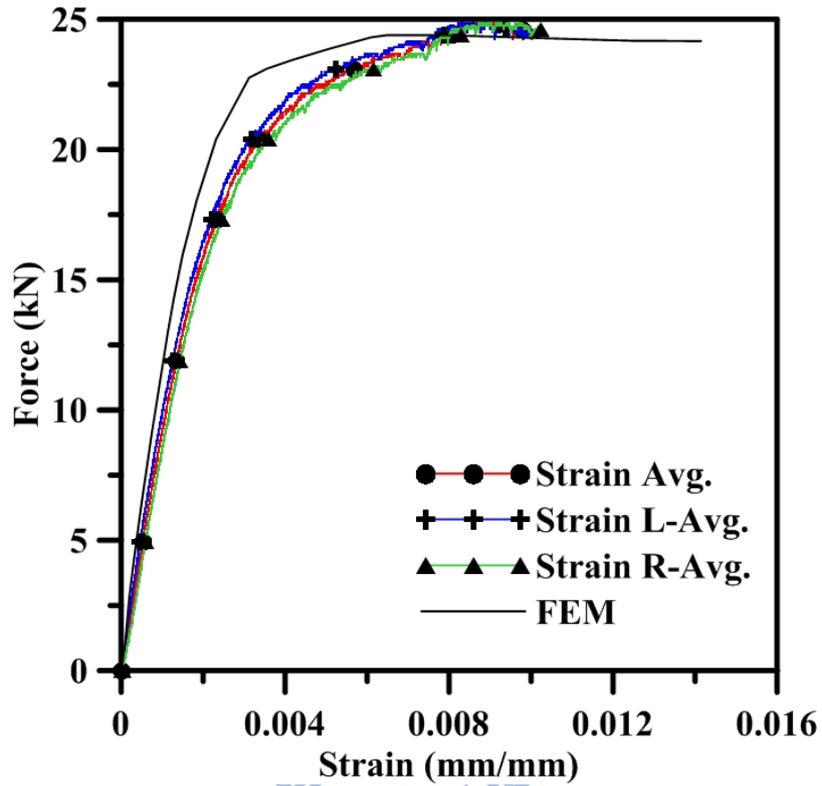


圖 4.9 A-1.5-2 分析與實驗之載重-應變曲線

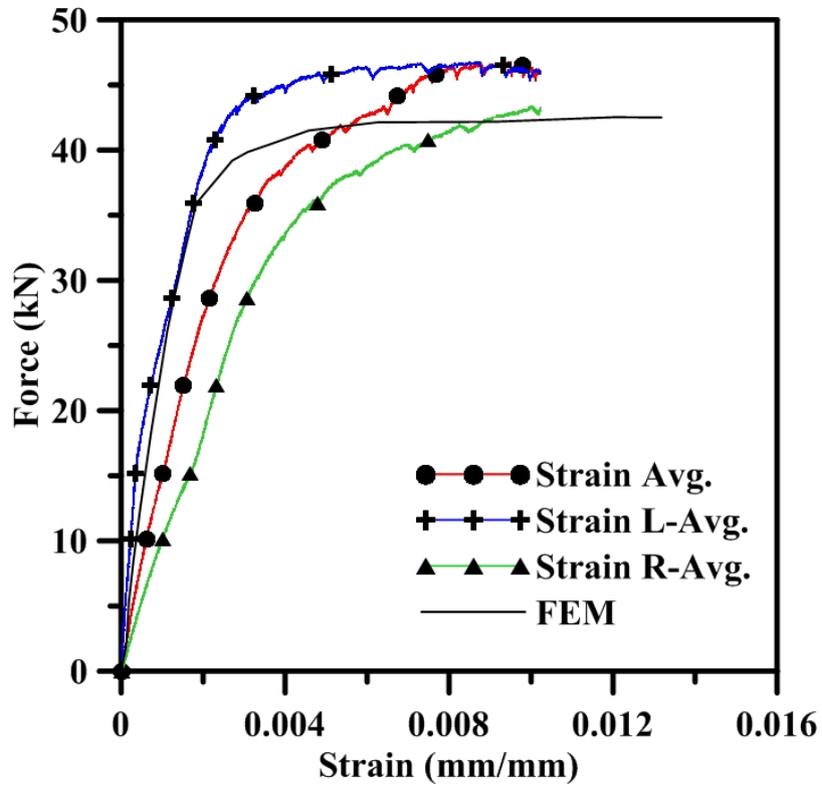


圖 4.10 A-2.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線

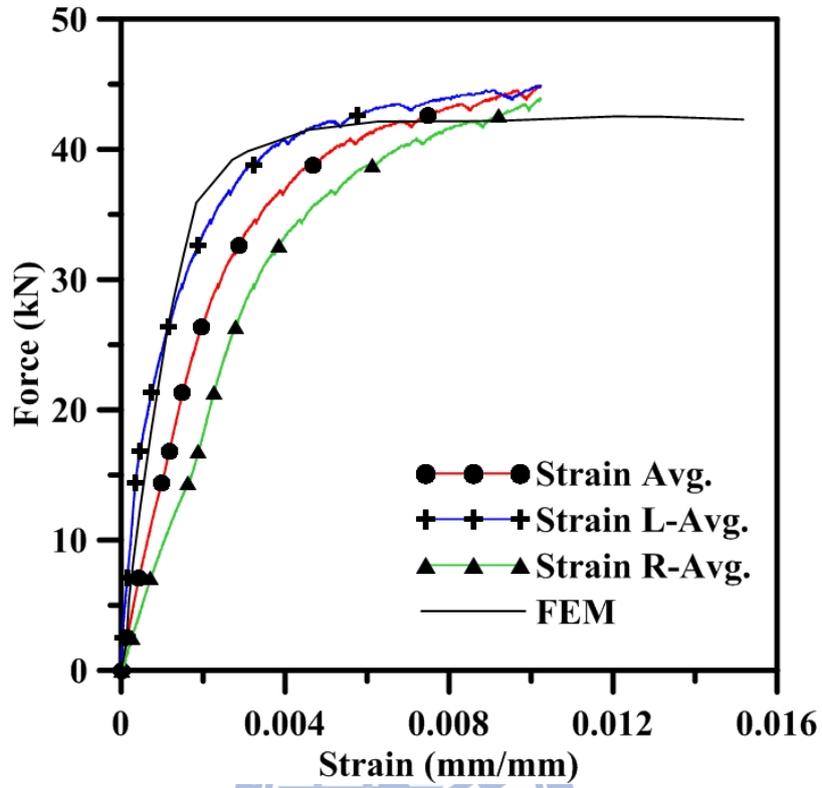


圖 4.11 A-2.0-2 分析與實驗之載重-應變曲線

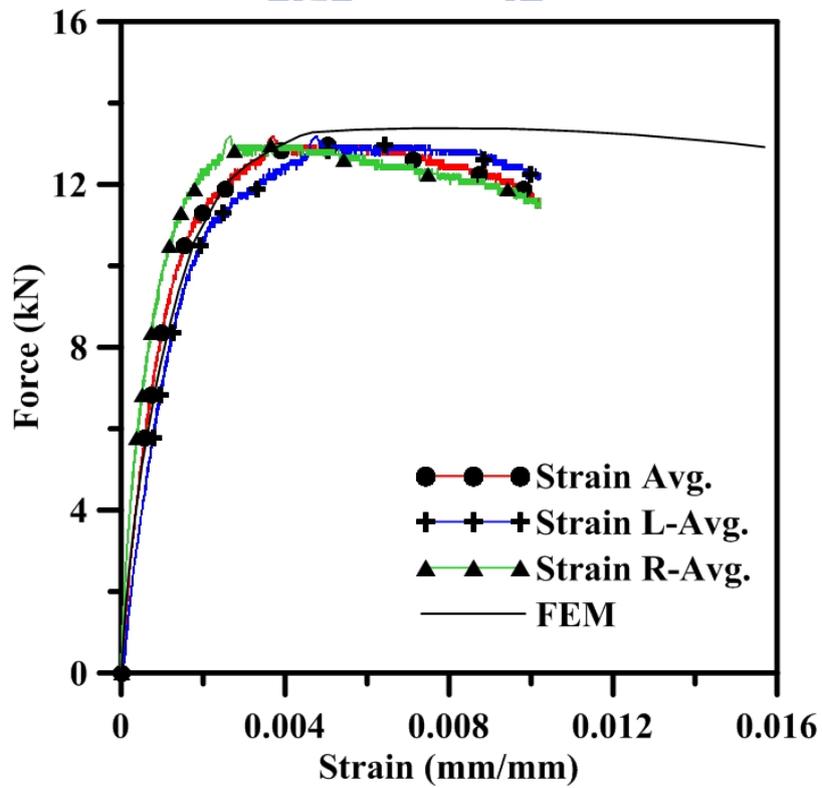


圖 4.12 B-1.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線

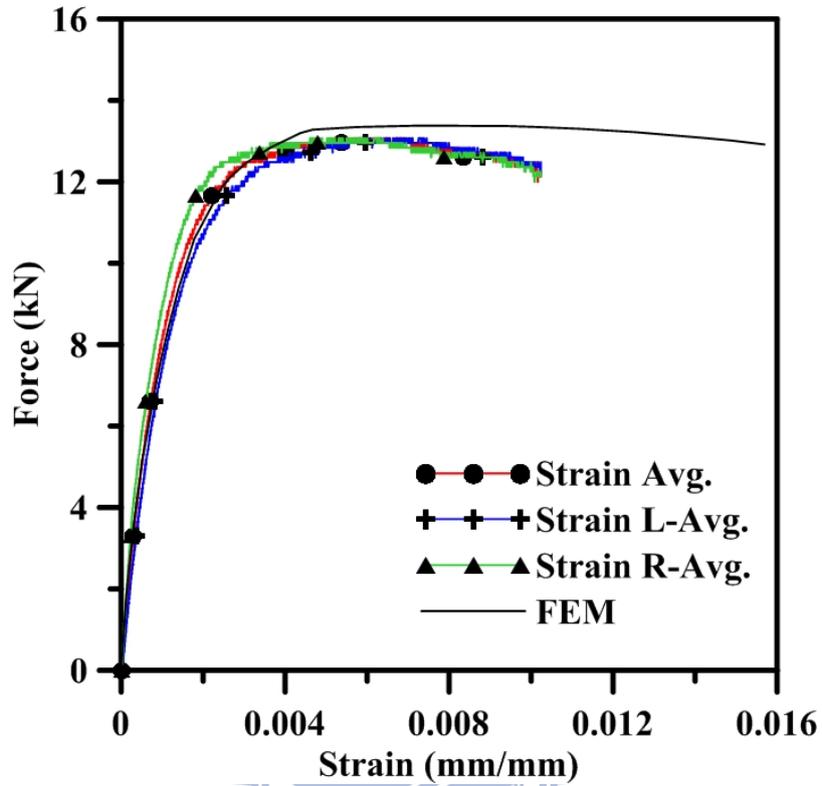


圖 4.13 B-1.0-2 分析與實驗之載重-應變曲線

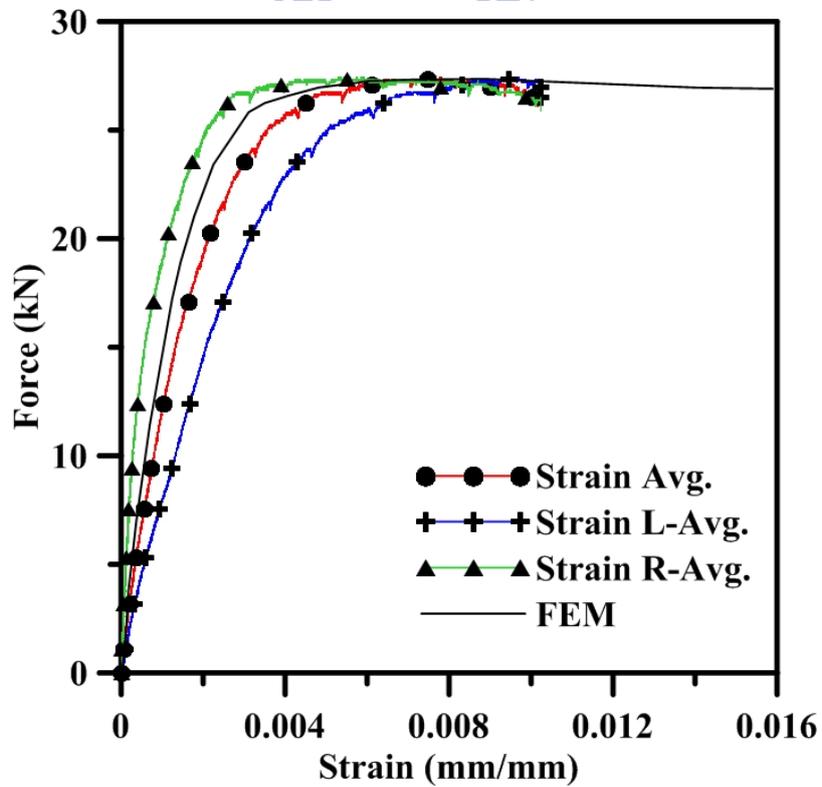


圖 4.14 B-1.5-1 分析與實驗之載重-應變曲線

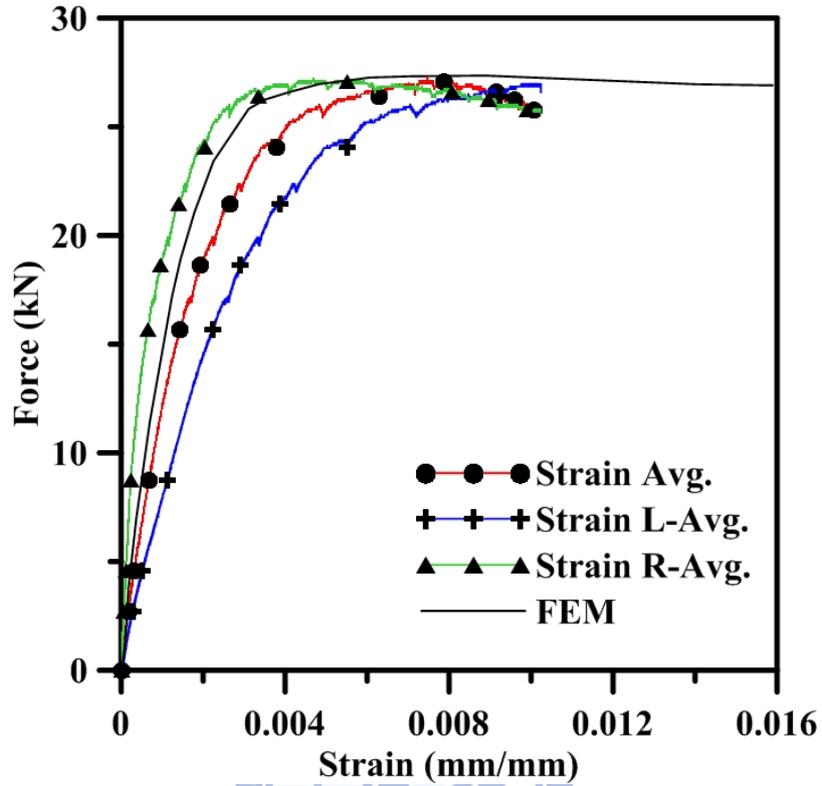


圖 4.15 B-1.5-2 分析與實驗之載重-應變曲線

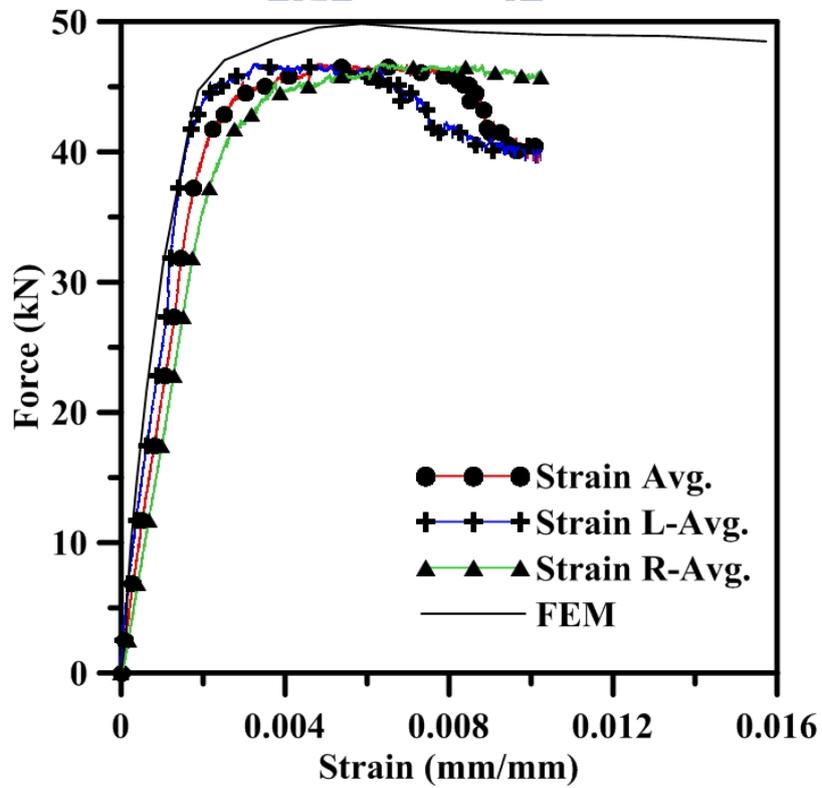


圖 4.16 B-2.0-1 分析與實驗之載重-應變曲線

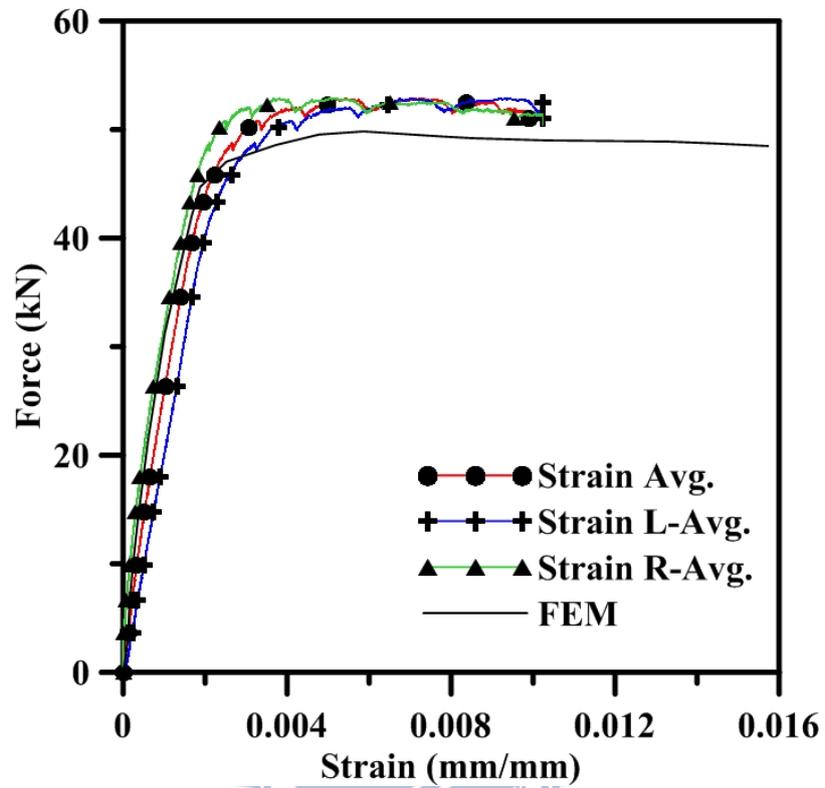


圖 4.17 B-2.0-2 分析與實驗之載重-應變曲線

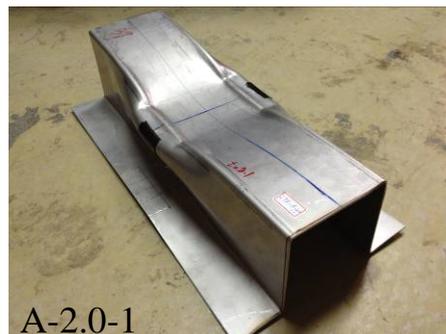
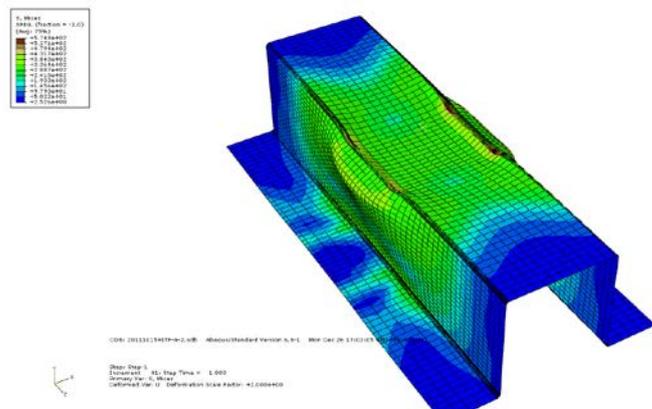


圖 4.20 A-2.0 之分析模型與試體實驗變形圖

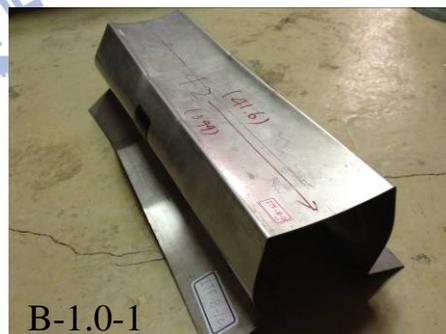
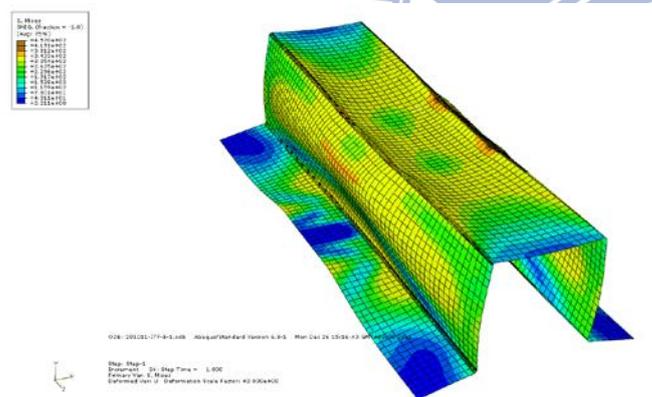
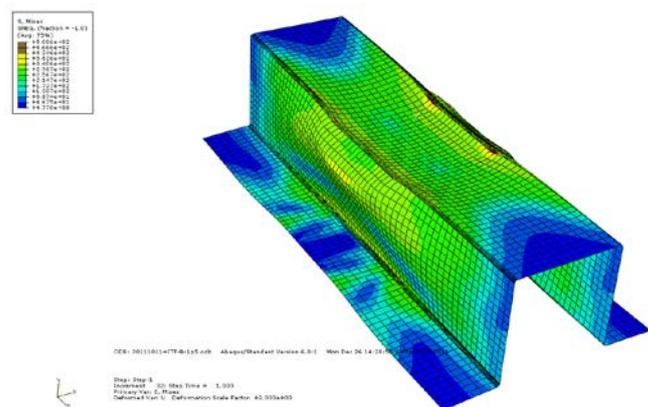


圖 4.21 B-1.0 之分析模型與試體實驗變形圖

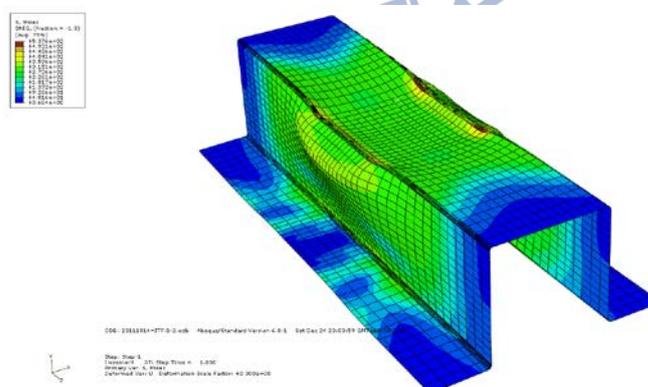


B-1.5-1



B-1.5-2

圖 4.22 B-1.5 之分析模型與試體實驗變形圖



B-2.0-1



B-2.0-2

圖 4.23 B-2.0 之分析模型與試體實驗變形圖

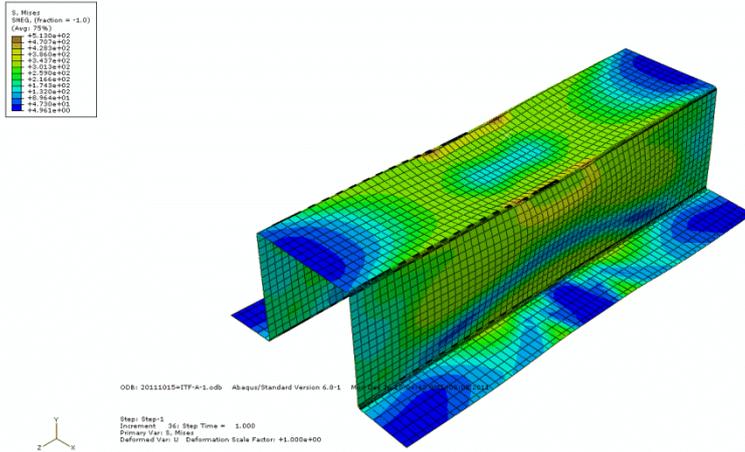


圖 4.24 試體 A-1.0 分析模型之等值應力分佈圖

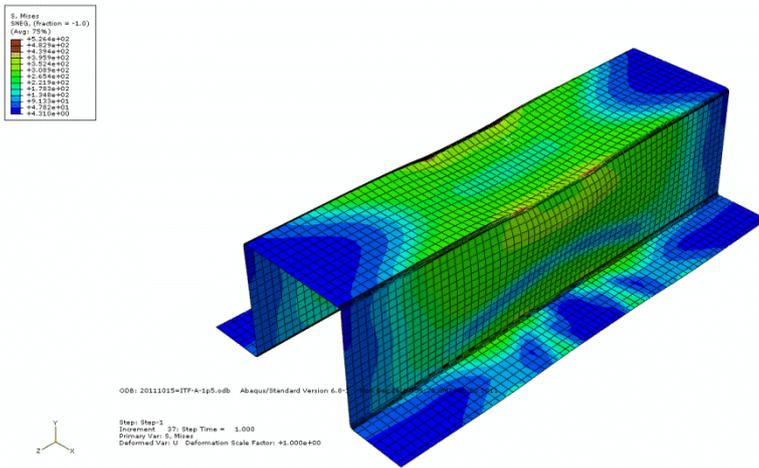


圖 4.25 試體 A-1.5 分析模型之等值應力分佈圖

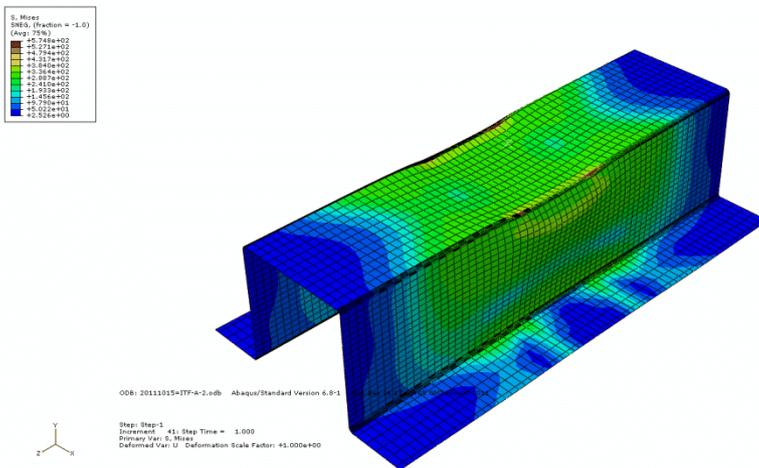


圖 4.26 試體 A-2.0 分析模型之等值應力分佈圖

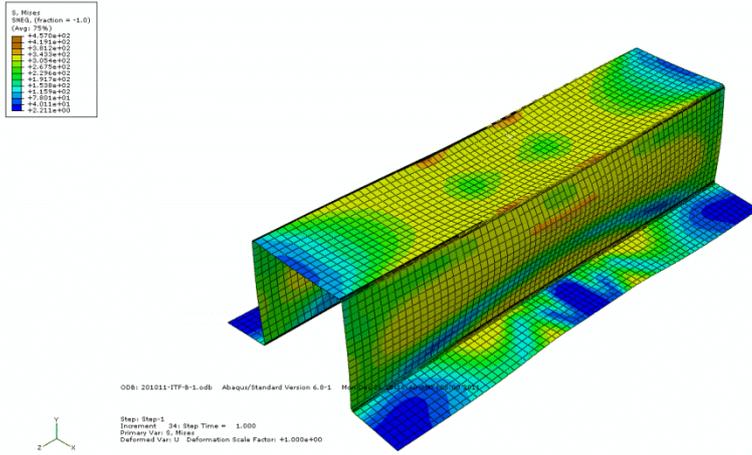


圖 4.27 試體 B-1.0 分析模型之等值應力分佈圖

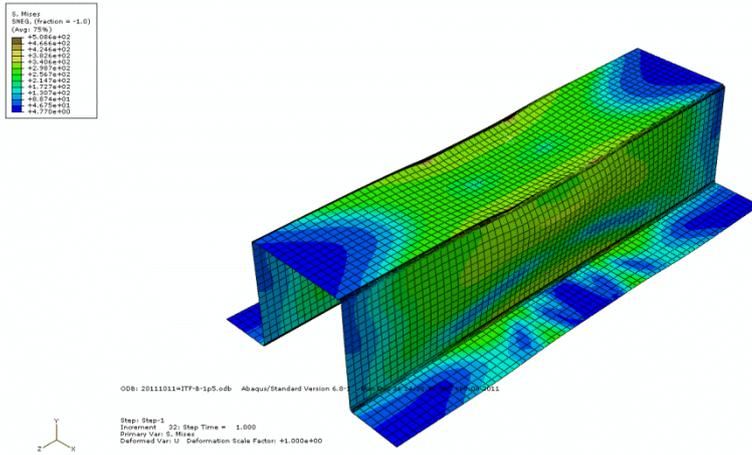


圖 4.28 試體 B-1.5 分析模型之等值應力分佈圖

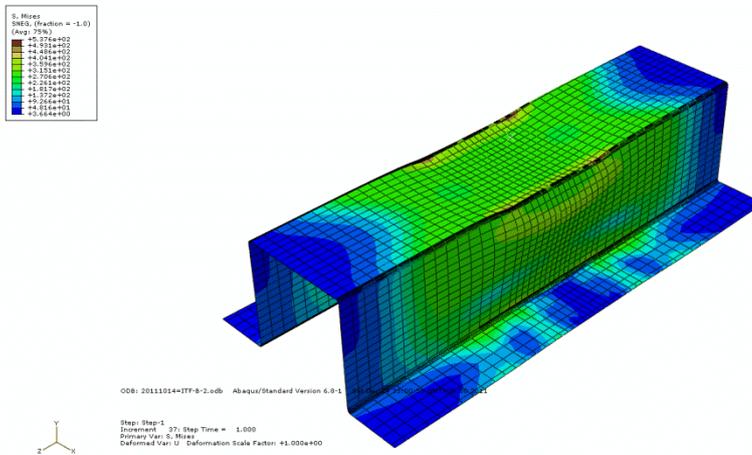


圖 4.29 試體 B-2.0 分析模型之等值應力分佈圖

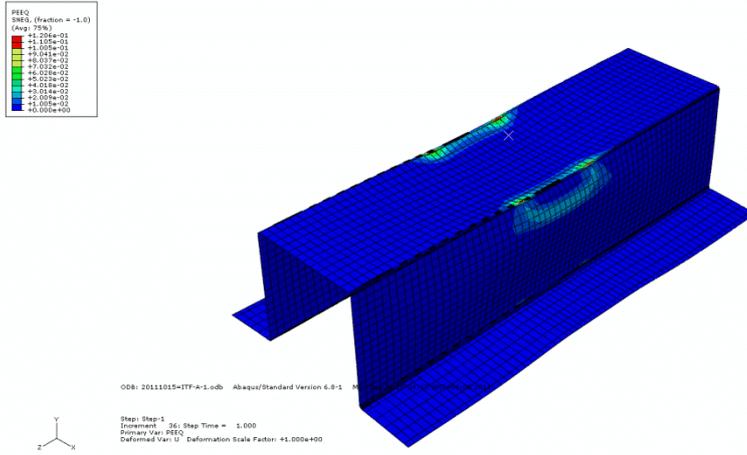


圖 4.30 試體 A-1.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

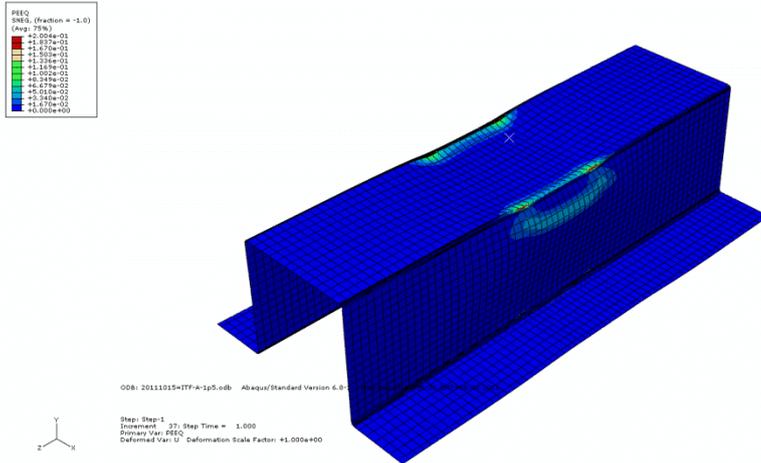


圖 4.31 試體 A-1.5 分析模型之等值塑性應變分佈圖

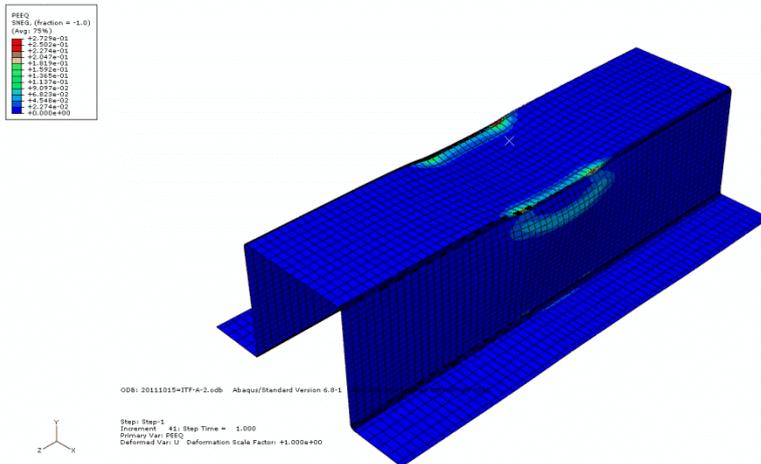


圖 4.32 試體 A-2.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

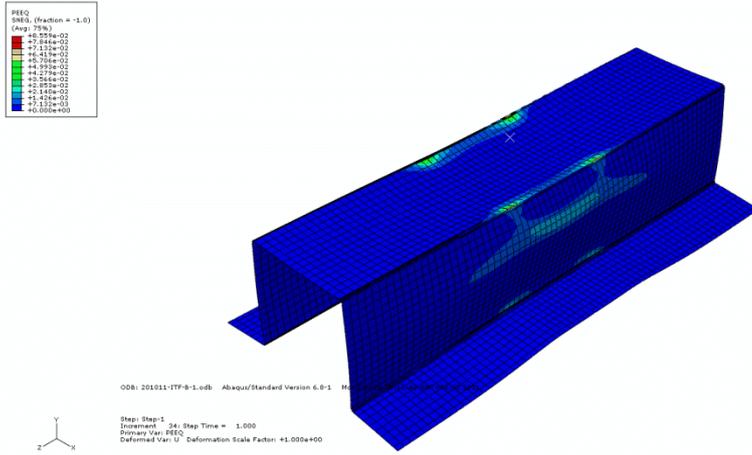


圖 4.33 試體 B-1.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

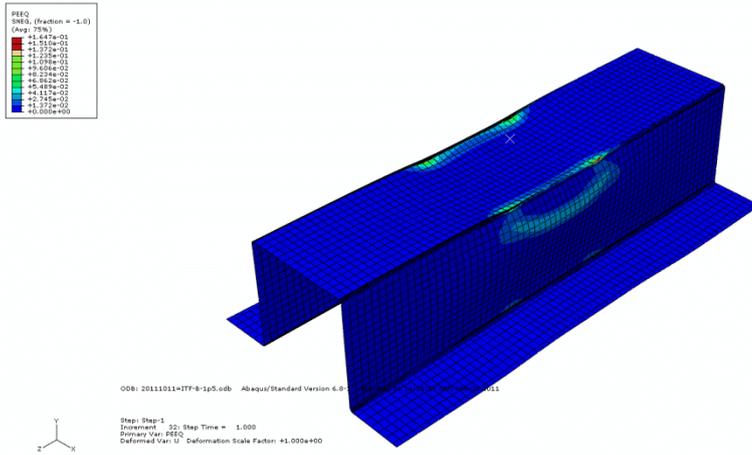


圖 4.34 試體 B-1.5 分析模型之等值塑性應變分佈圖

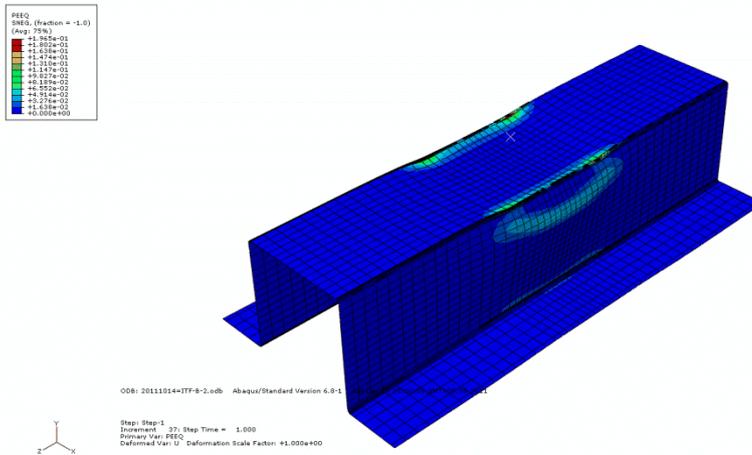


圖 4.35 試體 B-2.0 分析模型之等值塑性應變分佈圖

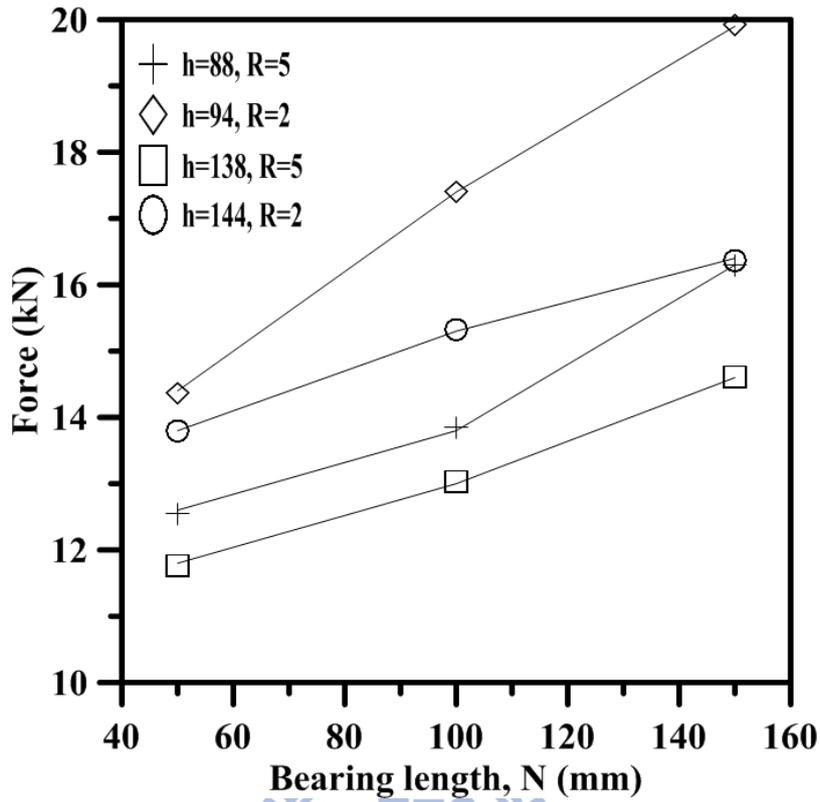


圖 4.36 分析模型厚度 1.0 mm 之力量—支承墊寬度分佈圖

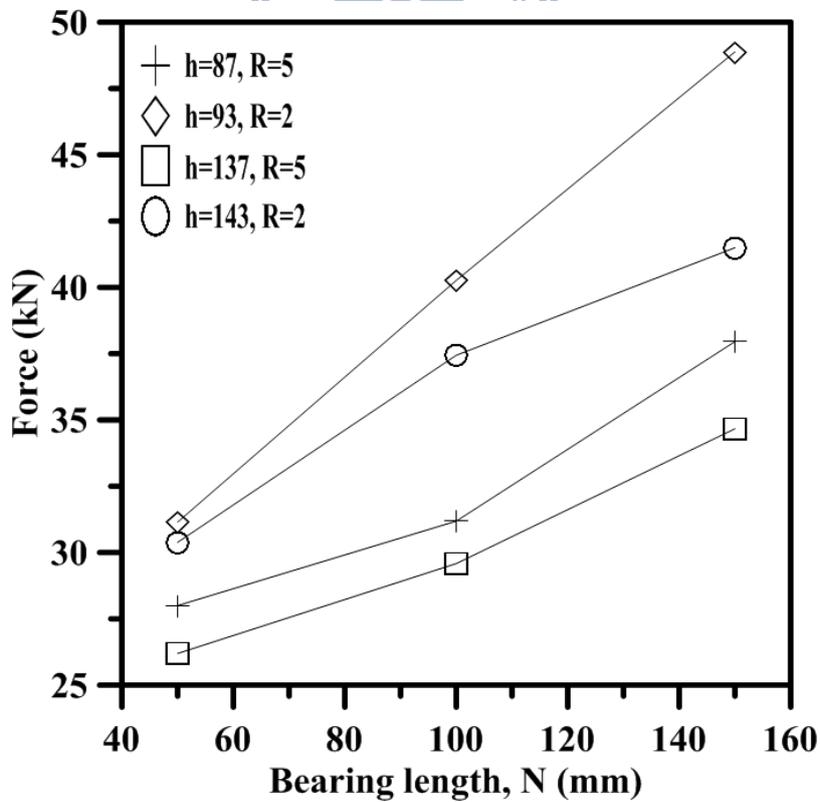


圖 4.37 分析模型厚度 1.5 mm 之力量—支承墊寬度分佈圖

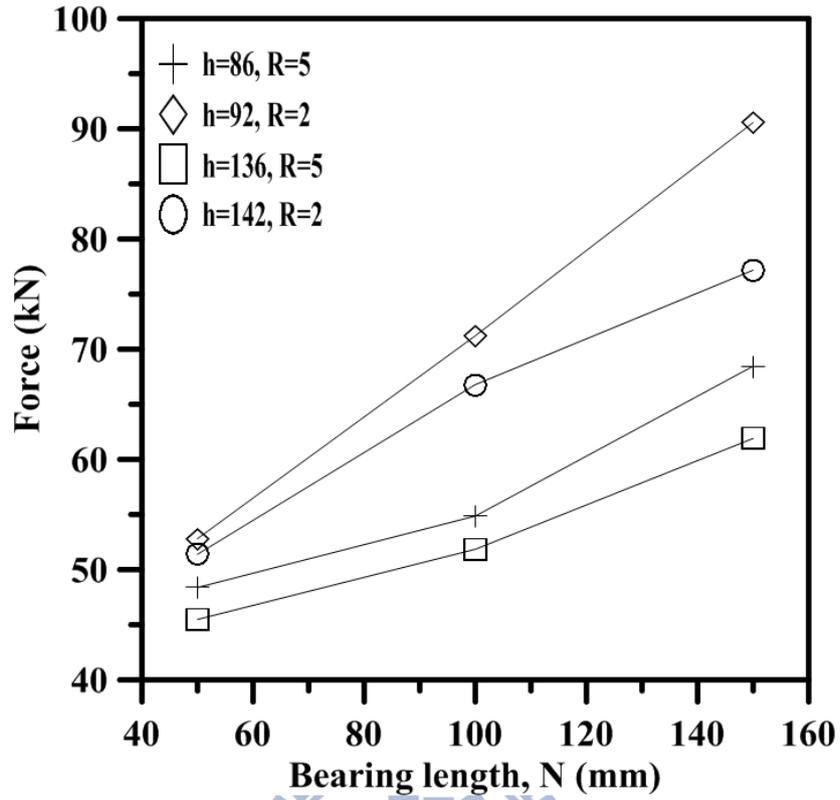


圖 4.38 分析模型厚度 2.0 mm 之力量—支承墊寬度分佈圖

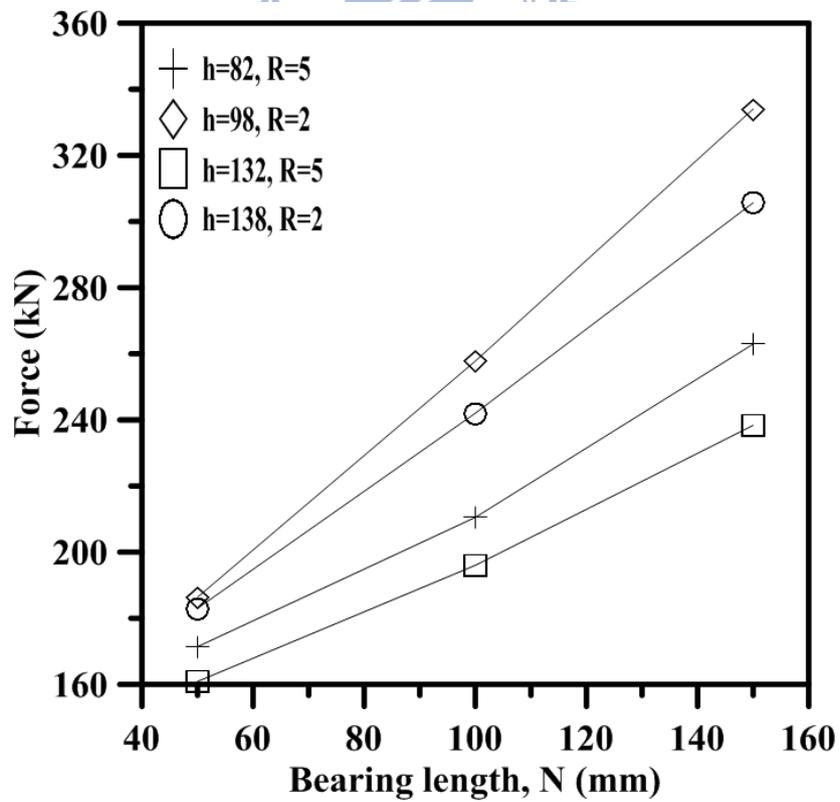


圖 4.39 分析模型厚度 4.0 mm 之力量—支承墊寬度分佈圖

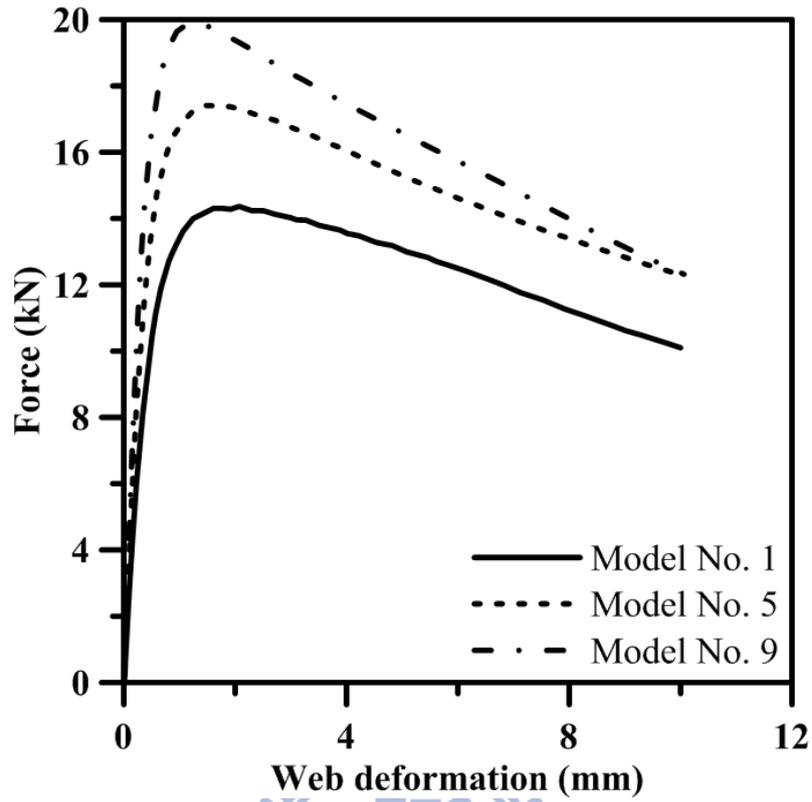


圖 4.40 力量—變位曲線圖

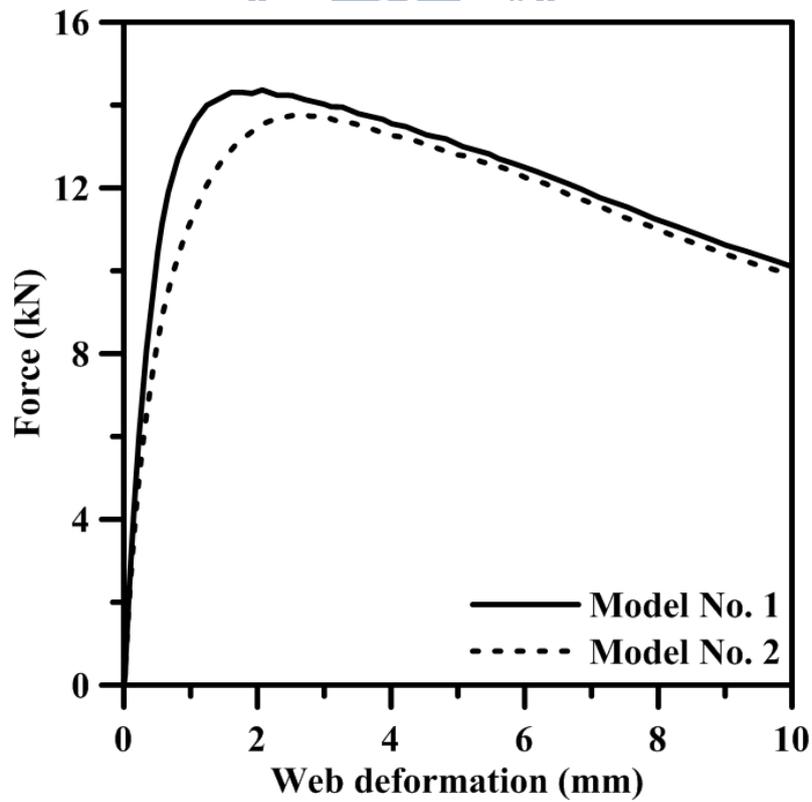


圖 4.41 力量—變位曲線圖

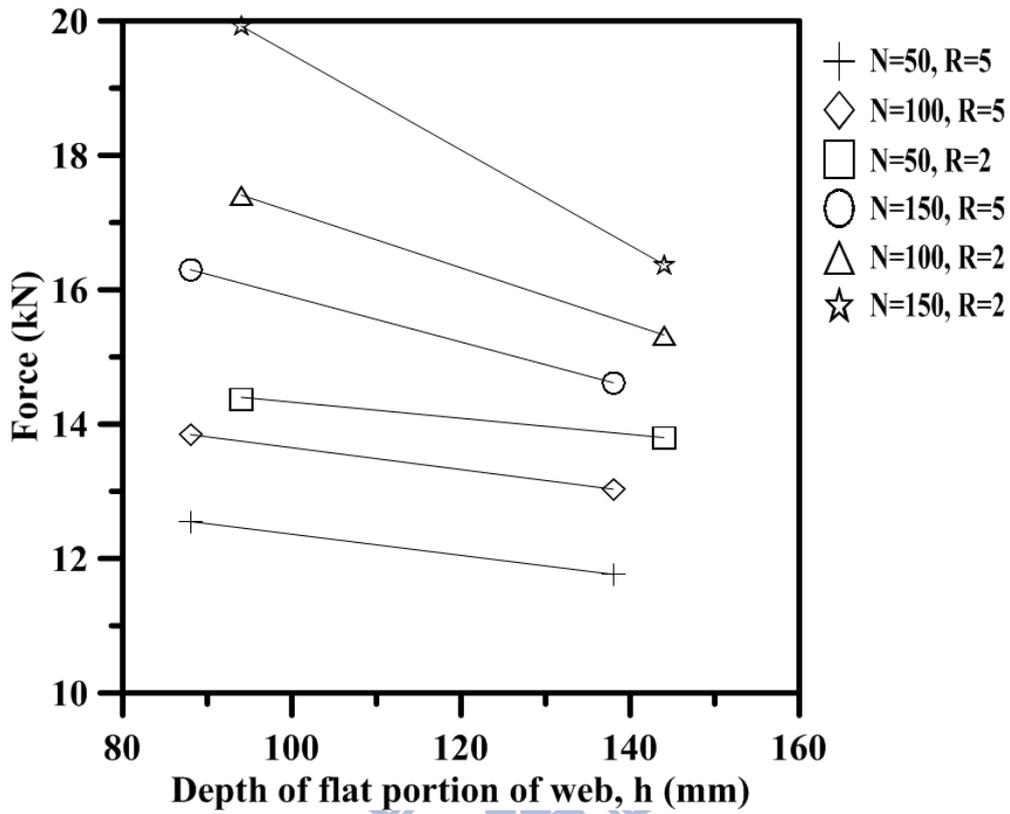


圖 4.42 分析模型厚度 1.0 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖

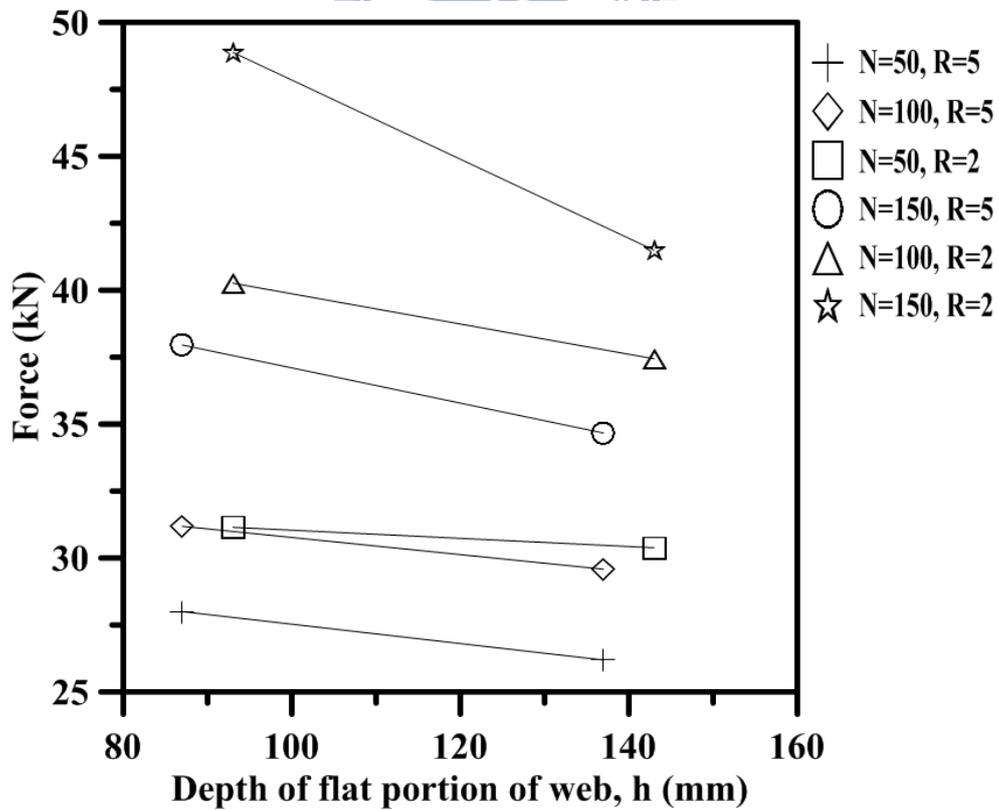


圖 4.43 分析模型厚度 1.5 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖

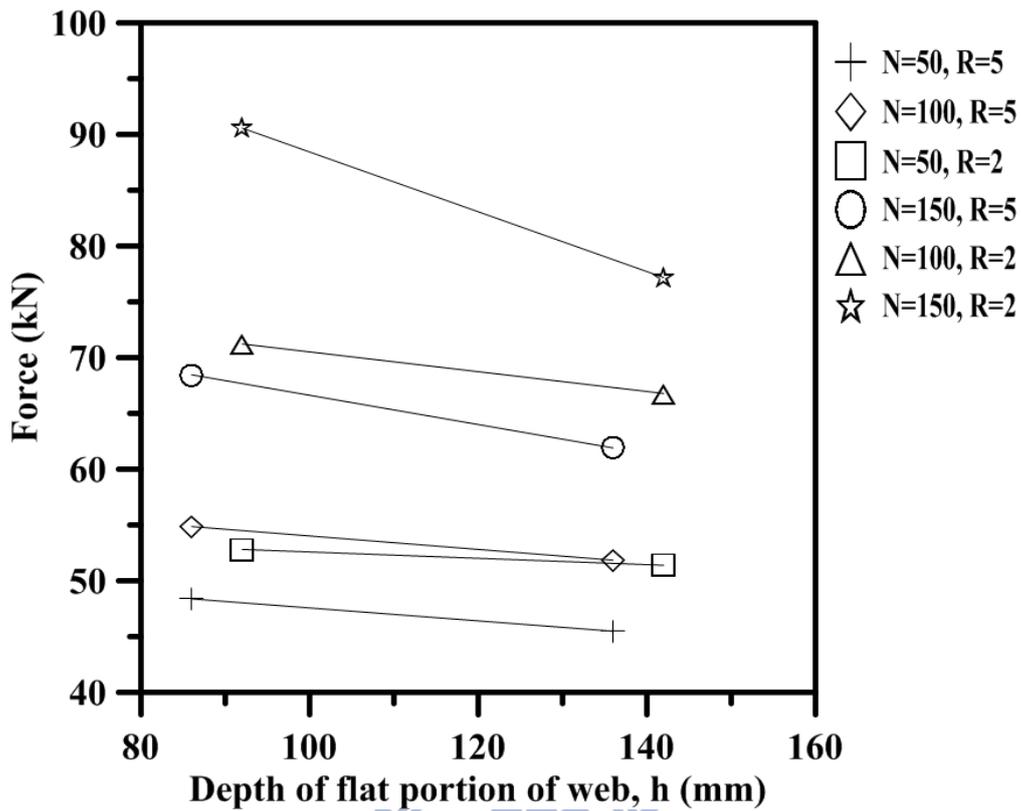


圖 4.44 分析模型厚度 2.0 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖

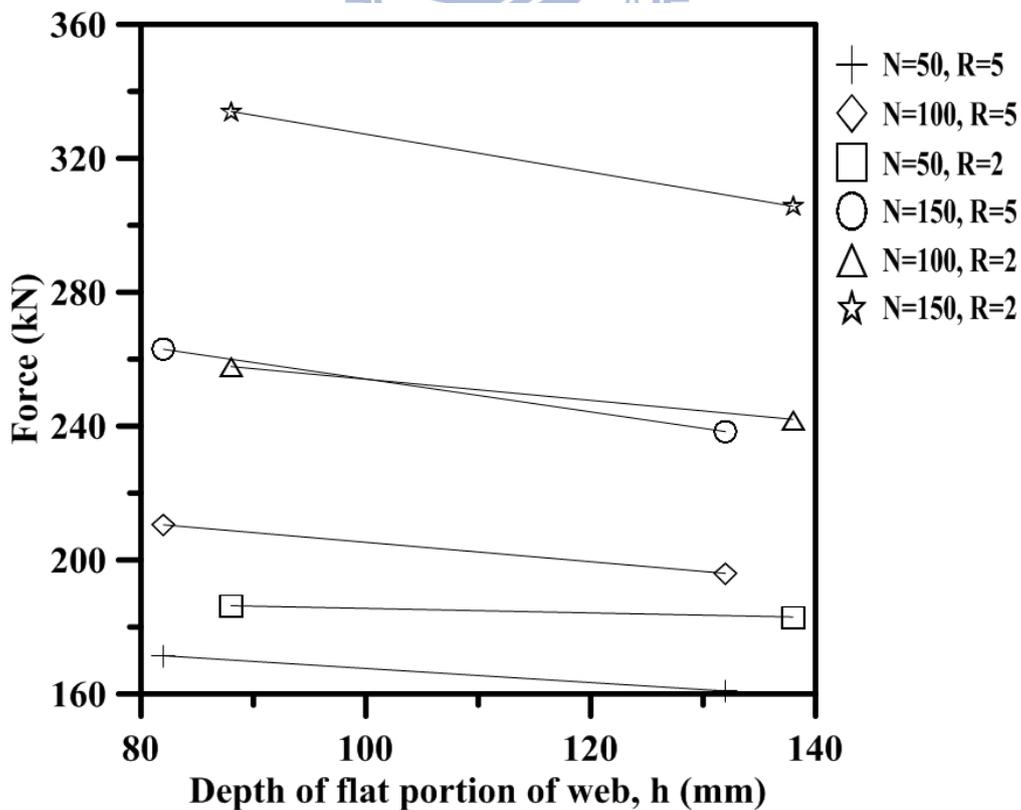


圖 4.45 分析模型厚度 4.0 mm 之力量—腹板平坦段高度分佈圖

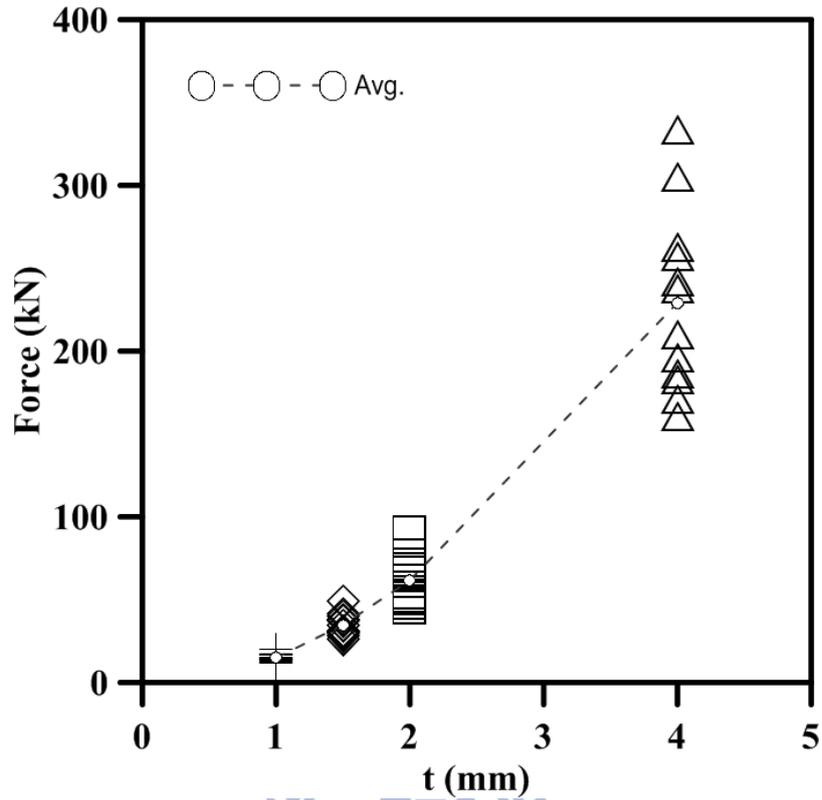


圖 4.46 參數研究模型之腹板皺曲強度值

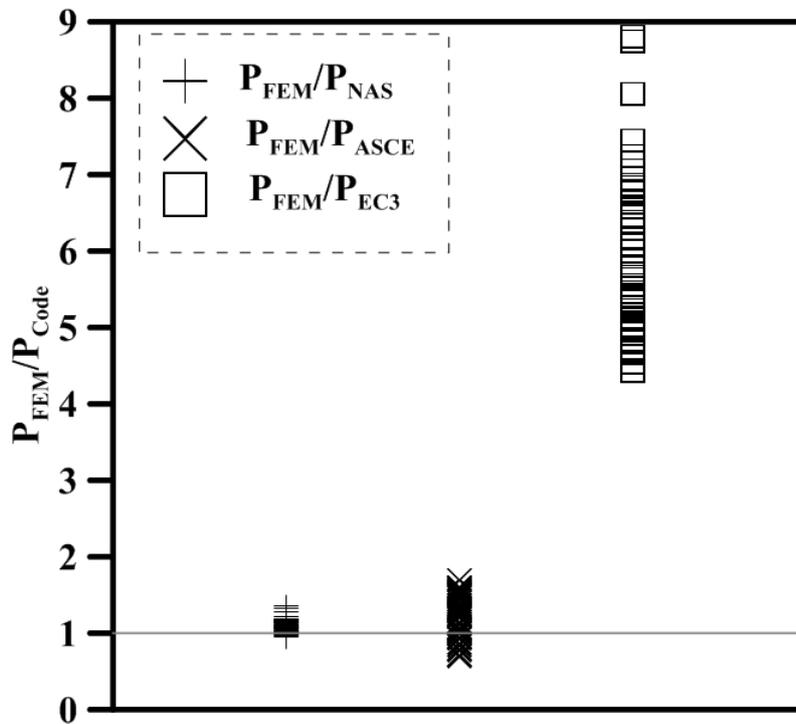


圖 4.47 有限元素分析結果與各規範建議值之比值

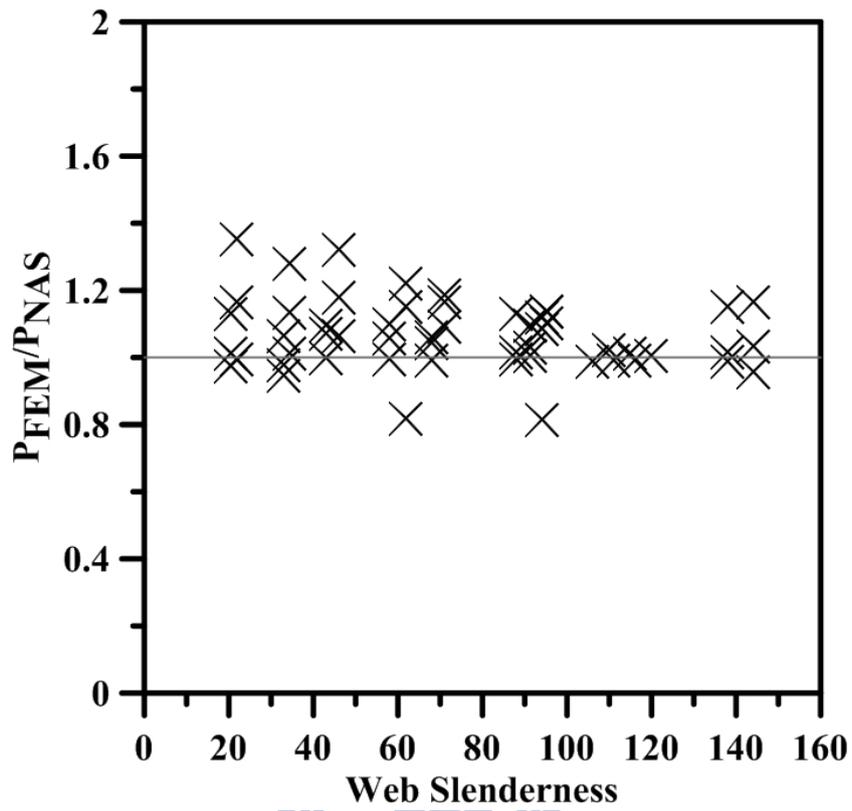


圖 4.48 P_{FEM}/P_{NAS} 與腹板長細比分佈圖

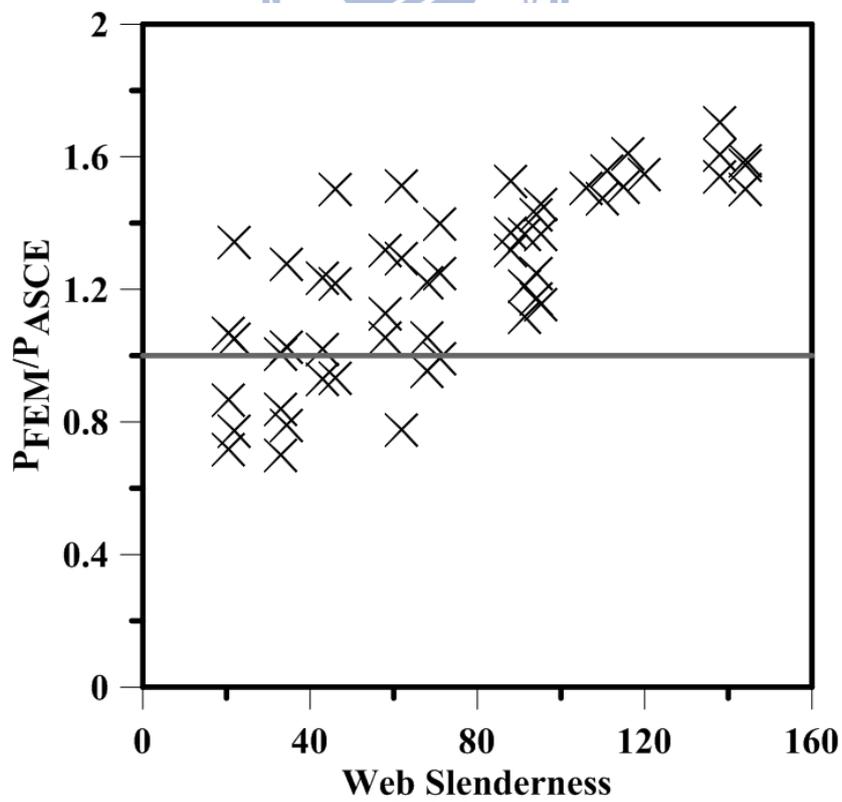


圖 4.49 P_{FEM}/P_{ASCE} 與腹板長細比分佈圖

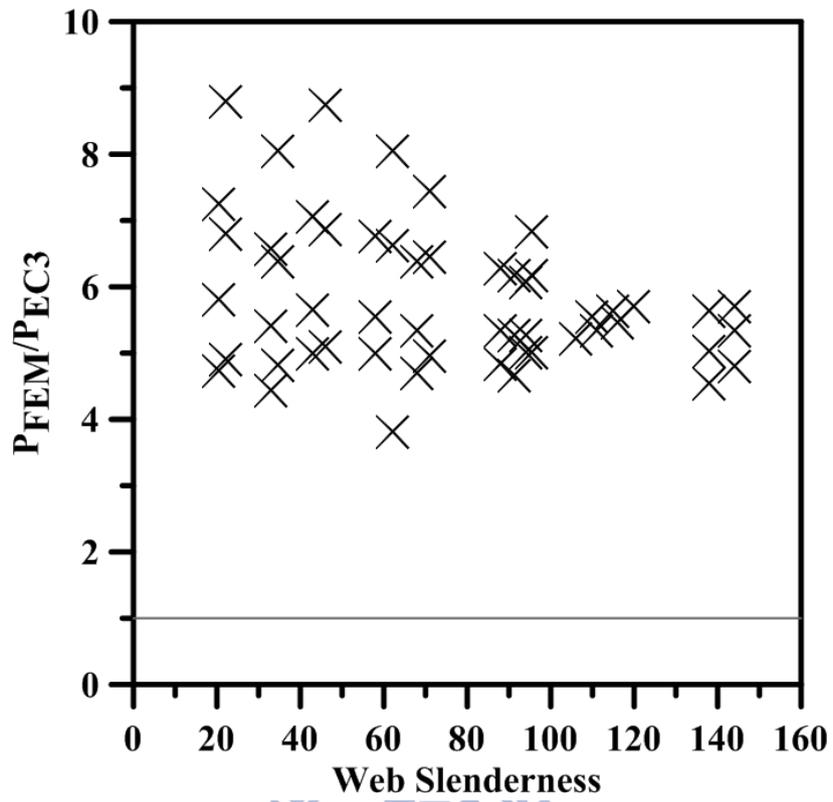


圖 4.50 P_{FEM}/P_{EC3} 與腹板長細比分佈圖

