

鋼骨斜撐構架系統之接合板壓力強度參數研究與設計方法

Parametric Study and Design of Steel Gusset Connections in  
Compression

研究生：陳沛均

Student : P. J. Chen

指導教授：周中哲 博士

Advisor : Dr. C. C. Chou

國立交通大學

土木工程學系碩士班



A Thesis

Submitted Institute of Civil Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Science

in

Civil Engineering

November 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年十一月

# 鋼骨斜撐構架系統之接合板壓力強度參數研究與設計方法

研究生：陳沛均

指導教授：周中哲 博士

國立交通大學土木工程學系

## 摘 要

鋼骨消能斜撐因受軸壓時不會產生挫屈，故在受壓及受拉時有相近的力學行為，在近年來已被廣泛研究，但是在國內外的實驗中均有發現接合板在消能斜撐達其極限強度前即發生挫屈。因此本研究將著重在研究鋼骨消能斜撐系統之接合板受軸壓力下之力學行為，以有限元素分析程式 ABAQUS 分析含挫屈束制鋼骨消能斜撐之一層樓構架之強度及行為，並針對其加勁板進行有限元素分析之參數研究，藉由改變其加勁板的尺寸與後度來探討對接合板強度之影響。本研究結果顯示：(1) 含挫屈束制消能斜撐之接合板在受軸壓作用下，將產生的挫屈模式為 Fixed-Free、(2) 接合板在 Fixed-Free 模式下之挫屈強度預測及(3) 如何加勁接合板使其強度能達到降伏後之非彈性挫屈行為。

# Parametric Study and Design of Steel Gusset Plate Connections in Compression

Student : P. J. Chen

Advisor : Dr. C. C. Chou

Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

Buckling-restrained brace (BRB) was widely used and studied because of high levels of energy dissipation in seismic loading. Gusset plates, which connect the BRB to other structural members, experienced unexpected buckling before reaching the ultimate capacity of the BRB. The research, therefore, aimed to investigate buckling strength and inelastic compressive behavior of the gusset plate with various geometry, edge stiffeners, and boundary conditions. A parametric study was performed by the general purpose nonlinear finite element computer program ABAQUS. The research results showed that (1) inelastic compressive behavior of the gusset plate was similar to a cantilever plate in compression load, (2) buckling strength was reasonably predicted based on an inelastic plate buckling equation and buckling coefficient, and (3) design guidelines of the gusset plate in compression were proposed with inclusions of edge stiffeners.

## 誌 謝

在經過兩年多的努力，本研究論文終於順利完成，在這兩年的時間是我求學以來最充實的兩年，感謝老師在這段論文研究期間不時的教導我何謂做研究的方法與態度，嚴謹的思維、追根究底的態度，此外更改正我做人處事的道理，磨練我的心智，令我經得起更大的考驗，在此獻上最真誠的敬意。同時在論文口試期間，承蒙國家地震工程研究中心 林敏郎博士、中央大學 許協隆教授、交通大學 劉俊秀教授及翁正強教授的蒞臨指導，以專業的知識為正本研究不足之處提供寶貴的意見，讓本研究論文更趨完善，再次感謝各位教授的指教。

感謝同學陳鈺智，學弟俊翰、家慶，在這兩年中共同努力，以及郁仁、昱棋、智堡，在我論文撰寫的階段給我不少鼓勵與協助。沒有你們的幫助，論文的完成或許還是未定數。

最後僅將本文獻給我最親愛的家人，感謝你們在我求學期間給我的支持與鼓勵，希望我的成就能成為你們的驕傲，這個碩士學位不只是我的也是你們的。



# 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究內容與目的.....	1
1.3 論文架構.....	2
第二章 文獻回顧與研究計畫.....	3
2.1 前言.....	3
2.2 文獻回顧.....	3
2.2.1 Whitmore( 1952 ).....	3
2.2.2 AISC-LRFD( 2002 ).....	4
2.2.3 Thornton ( 1984 ) .....	5
2.2.4 Astaneh ( 1998 ) .....	6
2.2.5 Yam and Cheng ( 2002 ) .....	7
2.2.6 Sheng et al. ( 2002 ) .....	8
2.2.7 Brown( 1988 ).....	9
2.2.8 Tsai et al.( 2004 ).....	10
2.2.9 Yamamoto et al. ( 1988 ) .....	10
2.2.10 Dowswell and Barber ( 2004 ) .....	11
2.3 檢核接合板.....	12

2.4 研究計畫.....	15
第三章 接合板有限元素分析.....	17
3.1 前言.....	17
3.2 整體構架模型.....	17
3.2.1 構架模型介紹.....	17
3.2.1 構架分析結果.....	18
3.3 接合板局部模型.....	20
3.3.1 接合板挫屈模態.....	21
3.3.2 局部模型分析.....	22
3.3.3 加勁板對於強度之影響.....	23
3.4 接合板加大尺寸.....	25
3.4.1 無加勁分析.....	25
3.4.2 加勁板對於強度之影響.....	26
3.5 接合板接合區在接合板彎折線上.....	27
3.5.1 無加勁分析.....	27
3.5.2 加勁板對於強度之影響.....	28
3.6 接合板接合區短於接合板彎折線.....	29
3.6.1 無加勁分析.....	30
3.6.2 加勁板對於強度之影響.....	30
3.7 分析結果討論.....	31
3.7.1 未加勁接合板強度與行為探討.....	32
3.7.3 面外挫屈強度之計算.....	34
3.7.2 接合板降伏力之探討.....	35
3.7.4 接合板加勁方式之探討.....	36
3.7.5 接合板設計流程.....	38

第四章 對角型斜撐構架系統接合板分析.....	39
4.1 前言.....	39
4.2 構架模型建立與設計.....	39
4.3 接合板強度檢核.....	41
4.4 無加勁分析.....	43
4.4.1 無梁柱效應.....	44
4.4.2 梁柱效應對強度之影響.....	45
4.5 加勁板對強度之影響.....	46
4.6 分析結果討論.....	47
4.6.1 無加勁下強度與預測強度之比較.....	47
4.6.2 接合板加勁方式之探討.....	49
第五章 結論.....	50
5.1 結論.....	50
參考文獻.....	53
符號表.....	56



## 表目錄

表 2.1 以Whitmore Section及Thornton法計算降伏強度.....	57
表 2.2 以AISC-LRFD法計算接合板挫屈強度.....	57
表 2.3 以Thornton法計算接合板挫屈強度.....	58
表 2.4 以Modified Thornton法計算接合板挫屈強度.....	58
表 2.5 以Astaneh法計算接合板挫屈強度.....	59
表 2.6 以Tsai法計算接合板挫屈強度.....	59
表 2.7 以Dowswell法計算接合板挫屈強度.....	60
表 2.8 以Sheng法計算接合板挫屈強度.....	60
表 2.9 以Brown法計算接合板挫屈強度.....	61
表 2.10 各接合板厚度檢核.....	61
表 3.1 材料性質.....	62
表 3.2 各尺寸接合板(含一樓構架)未加勁下強度之比較.....	62
表 3.3 加勁板尺寸及加勁後接合板強度.....	63
表 3.4 加勁板尺寸及加勁後強度(加大尺寸接合板).....	66
表 3.5 加勁板尺寸及加勁後強度(SL在彎折線上).....	69
表 3.6 加勁板尺寸及加勁後強度(SL在彎折線外).....	72
表 3.7 接合板在三種挫屈模式下之強度.....	75
表 3.8 Fixed-Free模式下挫屈強度與各公式比值.....	75
表 3.9 直接施力分析下極限強度與各公式比值.....	76
表 3.10 旋轉束制分析(Full Restraint)下極限強度與各公式比值 (0.6 mm初始面外變位).....	76
表 3.11 不同尺寸接合板面外挫屈強度與預測強度比較.....	77
表 4.1 檢核接合板降伏強度.....	78
表 4.2 比較計算接合板挫屈強度各方法之係數及強度.....	78

表 4.3 接合板厚度檢核.....	79
表 4.4 接合板未加勁強度.....	79
表 4.5 加勁板尺寸及加勁後強度.....	80
表 4.6 Fixed-Free面外變位下極限強度與各公式比值.....	82
表 4.7 直接施力下極限強度與各公式比值.....	83
表 4.8 旋轉束制 (Full restraint) 下極限強度與各公式比值.....	84



## 圖目錄

圖 1.1 鋼梁挫屈(Chou & Uang 2002) .....	85
圖 1.2 RCS 接合細節(Courtesy : Deierlein 1997) .....	85
圖 1.3 梁柱接頭區形式 .....	85
圖 1.4 一層樓斜撐構架尺寸示意圖.....	86
圖 1.5 接合板局部模型尺寸示意圖.....	86
圖 2.1 Whitmore Section與L1、L2、L3 及Lmax示意圖.....	87
圖 2.2 平均力法 (Uniform Force Method) 觀念示意圖 .....	87
圖 2.3 接合板降伏力計算自由體圖(Thornton 1984).....	88
圖 2.4 Chevron –Brace(雙斜撐式)接合板示意圖.....	88
圖 2.5 Modified Thornton Method.....	89
圖 2.6 Sheng's Concept (2002) .....	89
圖 2.7 $K_g$ 參數示意圖[From Sheng et al. (2002)].....	91
圖 2.8 接合板尺寸(用來計算局部挫屈).....	92
圖 2.9 斜撐與接合板接合情形與接合板挫屈行為示意圖.....	92
圖 2.10 接合板結實斷面之定義 .....	93
圖 2.11 原尺寸接合板示意圖.....	94
圖 2.12 加大尺寸接合板示意圖.....	95
圖 2.13 接合板接合長度在接合板彎折線上之示意圖.....	96
圖 2.14 接合板接合長度在接合板彎折線外之示意圖.....	97
圖 3.1 一層樓構架及 BRB 細節.....	98
圖 3.2 材料性質應力與應變關係曲線.....	99
圖 3.3 一層樓構架挫屈模態.....	101
圖 3.4 軸力與軸位移及力量位移計算圖.....	102
圖 3.5 整體構架挫屈變形及挫屈應力圖 (WG16I0TB32) .....	103

圖 3.6 整體構架挫屈變形及挫屈應力圖(WG16I2TB16).....	104
圖 3.7 接合板模型示意圖.....	105
圖 3.8 接合板加勁示意圖.....	105
圖 3.9 接合板模型挫屈模態.....	106
圖 3.10 接合板在各種束制情形下面外位移與挫屈形式之比較.....	107
圖 3.11 接合板在各種束制情形下之軸力與軸位移圖.....	107
圖 3.12 挫屈時(極限強度)時接合板面外變位分布.....	108
圖 3.13 接合板局部模型之軸力與軸位移圖.....	109
圖 3.14 接合板破壞時應力示意圖.....	111
圖 3.15 加勁後接合板力量與位移關係圖( $t_g = 8 \text{ mm}$ ).....	112
圖 3.16 加勁後接合板力量與位移關係圖( $t_g = 16\text{mm}$ ).....	113
圖 3.17 加勁後接合板力量與位移關係圖( $t_g = 25\text{mm}$ ).....	114
圖 3.18 加勁後接合板破壞應力圖.....	116
圖 3.19 加大尺寸接合板示意圖.....	117
圖 3.20 加大尺寸接合板挫屈模態.....	117
圖 3.21 接合板之力量與位移關係圖(加大尺寸).....	118
圖 3.22 接合板應力圖(加大尺寸).....	120
圖 3.23 接合板之力量與位移關係圖(比較 L1 與 MGL1).....	121
圖 3.24 加勁後力量與位移關係圖(加大尺寸, $t_g = 8 \text{ mm}$ ).....	122
圖 3.25 加勁後接合板力量與位移關係圖(加大尺寸, $t_g = 16\text{mm}$ ).....	123
圖 3.26 加勁後接合板力量與位移關係圖(加大尺寸, $t_g = 25\text{mm}$ ).....	124
圖 3.27 加勁後接合板應力圖.....	126
圖 3.28 接合板示意圖(接合板接合區長度在彎折線上).....	127
圖 3.29 接合板挫屈模態(接合板接合區長度在彎折線上).....	127
圖 3.30 力量與位移關係圖(GL1、GL2、GL3 三種接合區長度比較).....	128

圖 3.31 接合板挫屈時與應力與變形示意圖 (接合板接合長度在彎折線上)	129
圖 3.32 加勁後力量與位移關係關係 (GL1、GL2、GL3 三種接合區長度在 $t_g = 8 \text{ mm}$ 之比較)	130
圖 3.33 加勁後力量與位移關係關係 (GL1、GL2、GL3 三種接合區長度在 $t_g = 16 \text{ mm}$ 之比較)	131
圖 3.34 加勁後力量與位移關係關係 (GL1、GL2、GL3 三種接合區長度在 $t_g = 25 \text{ mm}$ 之比較)	132
圖 3.35 加勁後接合板挫屈應力與變形示意圖 (接合板接合長度在彎折線上)	134
圖 3.36 接合板示意圖(接合板接合區長度短於彎折線)	135
圖 3.37 接合板挫屈模態(接合板接合區長度短於彎折線)	135
圖 3.38 接合板應力圖與變形示意圖	136
圖 3.39 加勁後接合板應力圖與變形示意圖 (接合板接合區長度短於接合板彎折線)	138
圖 3.40 不同形式接合板之尺寸與面外挫屈	139
圖 3.41 $K_g$ 預測值	140
圖 3.42 接合板挫屈強度與預測強度之比較	141
圖 3.43 其他形式接合板挫屈強度與預測強度之比較	142
圖 3.44 降伏力與 $P_w$ 之比較	143
圖 3.45 降伏力與 $P_T$ 之比較	143
圖 3.46 接合板強度與 $\beta_2$ 及 $\beta_3$ 之關係(原尺寸)	144
圖 3.47 接合板強度與 $\beta_2$ 及 $\beta_3$ 之關係(接合區長度在彎折線上)	144
圖 3.48 接合板強度與 $\beta_2$ 及 $\beta_3$ 之關係(接合區長度在彎折線外)	145
圖 3.49 接合板強度與 $\beta_2$ 及 $\beta_3$ 之關係(加大尺寸接合板)	145

圖 3.50 接合板強度與 $\beta_1$ 之關係 (原尺寸, $\beta_2 = 10$ ) .....	146
圖 3.51 接合板強度與 $\beta_1$ 之關係 (接合區長度在彎折線上, $\beta_2 = 10$ ) .....	146
圖 3.52 接合板強度與 $\beta_1$ 之關係 (接合區長度在彎折線外, $\beta_2 = 10$ ) .....	147
圖 3.53 接合板強度與 $\beta_1$ 之關係 (加大尺寸接合板, $\beta_2 = 10$ ) .....	147
圖 3.54 接合板強度與 $t_g$ 及尺寸之關係 .....	148
圖 3.55 接合板強度與 $t_g$ 及尺寸之關係 ( $\beta_1 = 0.9, \beta_3 = 0.75$ ) .....	149
圖 4.1 單斜撐系統一層樓構架 .....	150
圖 4.2 接合板設計 .....	150
圖 4.3 接合板設計 (非符合 Uniform force Method) .....	151
圖 4.4 Thornton (1984) 法之接合板降伏強度計算 .....	152
圖 4.5 接合板有效長度示意圖 .....	153
圖 4.6 接合板非彈性挫屈強度預測 .....	154
圖 4.7 長端局部挫屈強度計算 .....	154
圖 4.8 接合板厚度檢核 (Out of Plane Check) .....	154
圖 4.9 挫屈模態 .....	156
圖 4.10 力量與位移關係 (0.8 mm 及 0 mm 初始面外變位) .....	157
圖 4.11 接合板應力圖 (FG16I08) .....	158
圖 4.12 接合板應力圖 (0FG16I0) .....	160
圖 4.13 力量與位移關係 (比較側推與無側推後施力分析) .....	161
圖 4.14 接合板應力圖 (FG16I08D1) .....	162
圖 4.15 軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線 (8 mm) .....	163
圖 4.16 軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線 (16 mm) .....	164
圖 4.17 軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線 (25 mm) .....	165
圖 4.18 加勁後接合板應力圖 .....	167
圖 4.19 接合板強度 $\beta_2$ 與 $\beta_3$ 之關係 .....	168

圖 4.20 接合板強度與  $t_g$  之關係之關係.....168

圖 4.21  $\beta_2$  建議值 ( $\beta_1=0.9, \beta_3=1, P_u > P_T$ ).....169



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

斜撐構架系統及抗彎矩構架系統為鋼結構廣泛使用的耐震系統。相較傳統的抗彎矩構架系統，斜撐系統能提供較高的勁度以控制構架的變形。根據 AISC-LRFD (2002)，斜撐構架系統可分為同心斜撐 (CBF) 及偏心斜撐 (EBF)。在同心斜撐系統中能量的消散是主要是藉由斜撐的拉力降伏及壓力挫屈的行為模式而達成，由於塑鉸會在斜撐兩端形成，斜撐與梁柱的接合板則會發生面內或面外的變形甚至挫屈。因為斜撐挫屈並不是良好的耐震消能機制，因此近年來日本，美國以及台灣的學者投入相當的精力研究新型鋼骨消能斜撐 (Buckling-Restrained Brace)，簡稱 BRB。此種斜撐在受軸壓時並不會發生挫屈，因此此構件在受拉及受壓時能有約略相似之力學行為。Aiken and Lopez (2002) 在加州大學柏克萊分校所進行的實尺寸含鋼骨消能斜撐構架實驗中包含了一個如圖 1.1 所示的實驗樓層構架(含梁、柱、鋼骨消能斜撐)，卻發現接合板 (Gusset Plate) 在消能斜撐達到預期強度前發生降伏及挫屈 (圖 1.2)。同樣的情形也發生在由國立台灣大學蔡克銓教授所主導的三層樓構架實驗 (Tsai et al. 2003) 發生，如圖 1.3 所示的接合板挫屈。這些破壞模式並不是研究人員預先期待的，因此有必要進一步地研究接合板在此系統中的受力行為，強度評估方式，及設計準則。

## 1.2 研究內容與目的

收集國內外相關文獻及利用有限元素分析程式 ABAQUS 建立三維的一層樓斜撐鋼構架，(圖 1.4)。此構架含柱、梁、斜撐及接合板，其中各結構桿件及接合板均依 AISC-LRFD (2002) 為標準設計。為了研究接合板的行為，並建立一個接合板的局部模型 (圖 1.5)。預計進行接合板在受壓時的強度及力學行為探討，並研究不同接合板厚、形狀、加勁板設計對其降

伏強度及挫屈強度的影響，再提出適當的接合板強度設計流程，以考慮上述之參數。

### 1.3 論文架構

第二章：介紹規範及先前學者對於接合板的研究，主要以接合板的降伏強度及挫屈強度為主，並利用這些學者所提出的公式檢核接合板之強度。

第三章：利用有限元素分析程式 ABAQUS (2003) 進行接合板分析，包括比較整體構架模型 (Global Model) 與接合板局部模型 (Local Model) 中接合板的行為與挫屈模式之探討，以及四種不同形式接合板之行為及加勁後之結果。並討論各種不同的參數對於接合板強度的影響，提出對於接合板與其加勁板在未來設計與相關研究的參考。

第四章：研究構架變形對接合板之影響，並對接合板加勁後進行參數研究，提出未來設計與相關研究的參考。

第五章：結論。

## 第二章 文獻回顧與研究計劃

### 2.1 前言

接合板破壞的模式不外乎有面內挫屈、面外挫屈、自由端局部挫屈、接合板降伏、螺栓接合區塊剪破壞以及梁柱接合區之螺栓或焊道破壞。在本章中不考慮螺栓或焊接接合的破壞，只單純對接合板本身受軸力作用下產生的強度作一系列的文獻回顧並提出本論文的研究計畫。

### 2.2 文獻回顧

根據先前學者的研究，影響接合板（Gusset Plate）強度的因素，主要有接合板形狀大小、接合板厚度、與接合板連接之連接構材長度、連接構材勁度、接合形式（螺栓接合與焊接）及邊界條件等因素。其中以前三者影響較大，因此大多數研究均著重在此三個因素，茲將各學者所研究及規範規定的公式敘述如下。



#### 2.2.1 Whitmore (1952)

學者 Whitmore 於 1952 年所進行的接合板拉力試驗中，提出有效寬度 (Whitmore Section) 的概念，即接合板與聯接構材間，由第一排螺栓起以  $30^\circ$  分散角算至最後一排螺栓之寬度，如圖 2.1 所示之  $b_E$ ，此寬度稱為 Whitmore Section。接合板之降伏強度則以此寬度乘上接合板厚度及降伏應力，如式 (2.1) 所示。此方法所定義的降伏強度亦為現今 AISC-LRFD (2002) 第 13 章所規定的接合板降伏強度。

$$P_w = (b_E t_g) F_y = A_g F_y \quad (2.1)$$

其中  $t_g$  為接合板厚， $A_g$  為 Whitmore Section 之面積

## 2.2.2 AISC-LRFD (2002)

AISC-LRFD (2002) 中有關斜撐接合板的降伏強度與挫屈強度設計規範以 Whitmore (1952) 及 Gross and Cheok (1990) 所提的方法利用柱子的觀念去計算接合板降伏強度及挫屈強度，並未考慮板的效應及加勁板作用下之強度提升。AISC-LRFD (2002) 提出如式 (2.2) 所示之柱強度公式來計算接合板的面外挫屈強度：

$$P_{cr} = (0.658)^{\lambda_c^2} A_g F_y, \lambda_c \leq 1.5 \quad (2.2)$$

$$P_{cr} = \left( \frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) A_g F_y, \lambda_c > 1.5$$

$$\text{其中 } \lambda_c = \frac{KL_c}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (2.3)$$

$$L_c = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (2.4)$$

$r = t_g / \sqrt{12}$  為迴轉半徑， $A_g$  為 Whitmore Section 之面積， $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  如圖 2.1 所示。此公式並未考慮接合板在有加勁或本身偏心對挫屈強度的影響，故挫屈有效長度係數  $K$  採用 0.65；柱長  $L_c$  則採用 Whitmore Section 兩端與中間依照斜撐軸方向延伸至梁柱邊緣之三個長度平均，如圖 2.1 所示、若  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  其中有負值，即 Whitmore Section 之部分超過接合板區域，依照 AISC-LRFD (2002) 之規定，此部份之長度直接以負值計算。若接合板可發生面外挫屈，則  $K$  值將提升為 1.2。

對於接合板與梁柱之間的力量傳遞，則以 Thornton (1991) 所提出的 Uniform Force Method 來計算接合板與梁、柱接合區之力量。Uniform Force Method 主要為假設接合板之工作點 (Working Point, w.p.) 在梁柱中心線交點，如圖 2.2(a)，欲始接合板與梁、柱接合區之受彎矩為零，如圖 2.2(b) 所示，即上述之兩個接合區僅受到剪力及軸向力作用，在假設接合區上之所

有力均平均分配下，作用力通過接合區之中心，接合板與梁及接合板與柱接合區中心之交點  $o$  必在接合板之軸力方向上，故符合其尺寸關係必為

$\frac{\alpha + e_c}{\beta + e_b} = \tan \theta$ 。其中  $\alpha$  代表接合板與梁之接合中心與柱之距離， $\beta$  代表接合板與柱之接合與梁之距離， $e_b$  代表梁之一半深度， $e_c$  代表柱之半徑（CFT 柱）或柱一半深度。依照此原則，接合板尺寸必須設計如式 (2.5) 所示

$$\alpha - \beta \tan \theta = e_b \tan \theta - e_c \quad (2.5)$$

若接合板設計符合式 (2.5)，代表接合板與梁接合區上之軸力（垂直力  $V_b$ ）與柱接合區上之軸力（水平力  $H_c$ ）及軸力  $P$  三力相交於點  $o$  [圖 2.2(b)]。對水平力、垂直力取力平衡、以及對  $o$  點及 w.p. 兩點取彎矩平衡可得到如式 (2.6) 至式 (2.9) 之關係式

$$H_b + H_c = H = P \sin \theta \quad (\Sigma F_x = 0) \quad (2.6)$$

$$V_b + V_c = V = P \cos \theta \quad (\Sigma F_y = 0) \quad (2.7)$$

$$V_c \alpha - H_b \beta = 0 \quad (\Sigma M_o = 0) \quad (2.8)$$

$$V_c e_c + V_b (\alpha + e_c) - H_b e_b - H_c (e_b + \beta) = 0 \quad (\Sigma M_{w.p.} = 0) \quad (2.9)$$

解聯立方程式可得接合板與梁接合區之水平力  $H_b = \frac{\alpha}{r} P$ 。垂直力

$V_b = \frac{e_b}{r} P$ ，接合板與柱接合區水平力  $H_c = \frac{e_c}{r} P$ 、垂直力  $V_c = \frac{\beta}{r} P$ ，其中

$$r = \sqrt{(e_c + \alpha)^2 + (e_b + \beta)^2}$$

### 2.2.3 Thornton (1984)

Thornton (1984) 對接合板進行試驗，其中最大的貢獻在找出接合板的降伏強度及挫屈強度。降伏力之計算考慮接合板受複合力如軸力  $N$ 、剪力  $V$ 、彎矩  $M$  聯合作用下之強度，可以如式 (2.10) 所示之公式來計算接合板在某一特定斷面（Critical Section）下是否有降伏應力出現，如圖 2.3(a)所

示的雙軸式 (Chevron-Brace) 接合板之 A-A 斷面。

$$\left(\frac{N}{\phi N_y}\right)^2 + \frac{M}{\phi M_p} + \left(\frac{V}{\phi V_y}\right)^4 = 1.0 \quad (2.10)$$

其中所有的折減係數  $\phi=0.9$ ， $N_y = F_y t_g H$  為斷面降伏軸力， $M_p = F_y t_g H^2 / 4$  為斷面塑性力矩， $V_y = F_y t_g H / \sqrt{3}$  為斷面降伏剪力， $t_g$  為接合板厚

取接合板最後一排螺栓中心連線的斷面 A-A[圖 2.3(a)]，繪製 A-A 下之自由體圖 [圖 2.3(b)]，利用力平衡可計算出斷面上的軸力  $N = P \cos \theta - P \cos \theta = 0$ 、斷面上彎矩  $M = P \cos \theta \times d = P d \cos \theta$  與剪力  $V = P \sin \theta - (-P \sin \theta) = 2P \sin \theta$ 。將  $N$ 、 $M$ 、 $V$  代入式 (2.10) 可得

$$\frac{P d \cos \theta}{\frac{1}{4} \times 0.9 \times F_y t_g H^2} + \left( \frac{2P \sin \theta}{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.9 \times F_y t_g H} \right)^4 = 1 \quad (2.11)$$

利用試誤法 (Try and Error) 可求得 P 之值。

挫屈強度之預測，則以式 (2.2) 之柱公式預測，以  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  之最大者為有效長度 (圖 2.1)，有效長度係數  $K$  值為 0.65。

## 2.2.4 Astaneh (1998)

Astaneh (1998) 以實驗方式對圖 2.4 所示之 Chevron-Brace 接合板進行試驗 (含斜撐)，其中對於接合板的挫屈強度，Astaneh (1998) 以柱公式的概念(2.2 式)計算接合板強度，其中柱長  $L_c$  為如圖 2.1 所示之 Whitmore Section 兩端依照斜撐軸方向延伸至梁柱邊緣之最大長度  $L_{max}$ 。考慮斜撐構材可產生面外位移而導致接合板可能發生面外挫屈 (Out of Plane Buckling)，有效挫屈長度係數  $K$  值則建議 1.2。

對於 Chevron-Brace 式接合板，為防止其在長端  $L'$  如圖 2.4 所示，產生

局部挫屈破壞 (Edge Buckling of Gusset Plate)，Astaneh (1998) 建議規定接合板之長厚比

$$\frac{L'}{t_g} \leq 0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.12)$$

$$t_g \geq \frac{L'}{0.75} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (2.13)$$

其中  $L'$  為長自由端長度， $t_g$  為接合板厚， $E$  為接合板彈性模數， $F_y$  為接合板降伏強度。

### 2.2.5 Yam and Cheng (2002)

Yam and Cheng (2002) 所進行的研究中考慮接合板在改變大小、形狀與厚度下進行試驗所得到之挫屈強度與行為。其中的挫屈形式為斜撐與接合板可允許面外變位，得到實驗挫屈強度 ( $P_u$ ) 與 Thornton (1984) 法計算的挫屈強度  $P_{cr,T}$  比值介於 1.51 與 1.87 間，平均 1.67，即利用 Thornton (1984) 法所計算出來的強度過於保守；而挫屈強度與 Whitmore Load ( $P_w$ ) 之比值在結實斷面下比值為 1.30 - 1.61 (結實斷面之長寬為 500 mm × 400 mm)，對於非結實斷面之比值則為 0.71-0.87 (非結實斷面之長寬為 850 mm × 700 mm)。因此以  $P_{cr,T}$  及  $P_w$  顯然不是有效預測接合板強度的方法，因此提出修正的強度公式，仍然採用 Thornton (1984) 之概念，利用柱子的公式去計算接合板強度。將原本的有效斷面積 Whitmore Section 之 30° 分散角改成 45° 分散角計算挫屈強度的有效斷面 (圖 2.5)；有效長度係數  $K$  仍然保持 0.65；有效柱長  $L_c$  則取  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之最長者，與 Thornton (1984) 相同，此法稱為 Modified Thornton Method，接合板挫屈強度與 Modified Thornton Method 所計算的強度  $P_{cr,MT}$  比值介於 0.92 - 1.19，平均為 1.06，與實驗之挫屈強度結果相近。

## 2.2.6 Sheng et al. 2002

Sheng et al. (2004) 針對 Yam and Cheng (2002) 的接合板，以有限元素程式 ABAQUS 對接合板大小尺寸、板厚及接合區長度等參數做進一步的參數研究，斜撐則斷在接合板外端 (圖 2.6)，分析時則直接在其斜撐外端上施力，對於此施力端採用允許面外位移但束制旋轉之邊界條件，接合板與梁柱之邊界則採用全剛性邊界。發現以  $P_w$ 、 $P_{cr,T}$  及  $P_{cr,MT}$  對於接合板之強度預測並不準確，例如以 Whitmore Section 計算的強度在長寬為 500 × 400 mm 時會低估接合板強度，在長寬為 1000 × 1000 mm 時則高估接合板強度。而 Thornton Method [Thornton (1984)] 與 Modified Thornton Method [Yam and Cheng (2002)] 以柱公式預估接合板的強度均嫌保守。故 Sheng et al. (2002) 利用有限元素分析程式 ABAQUS 之結果，提出預估接合板在非彈性挫屈下的挫屈方程式

$$\sigma_u = \frac{K_g \pi^2 E \sqrt{E_t / E}}{12(1 - \nu^2)(b_0 / t_g)^2} = \frac{P_{ABAQUS}}{b_1 t_g} \quad (2.14)$$

其中各係數均如圖 2.6 所示， $b_1$  為接合板彎折線 (Bending line) 長度， $E$  為彈性模數， $E_t$  為應變硬化模數 ( $=E/50$ )， $\nu$  為波松比， $a_0$  為接合板長邊長度， $b_0$  為接合板短邊長度， $a$  為接合板長自由端長度， $P_{ABAQUS}$  為分析所得到的挫屈強度， $\sigma_u$  為接合板彎折線上平均應力。

利用有限元素分析程式 ABAQUS 模擬接合板得到的極限強度  $P_{ABAQUS}$ ，即可求得彎折線上平均應力  $\sigma_u$ ，並以利用式 (2.15) 求得挫屈參數  $K_g$  值，再依據不同的長寬 ( $a_0$  與  $b_0$ ) 及長寬比 ( $a_0/b_0$ )、接合板與接合區之接合長度 SL 及接合板厚  $t_g$ ，可得到不同的接合板強度，及相對應的  $K_g$  值。整理各種不同尺寸、接合區長度及板厚的接合板之  $K_g$ ，可得到如圖 2.7 所示的  $K_g$  與  $a_0$ 、 $a_0/b_0$ 、接合區長度 (SL) 及  $t_g$  之關係 [Sheng et al. (2002)]:

$$k_g = \frac{12(1-\nu^2)(b_0/t)^2}{\pi^2 E \sqrt{E_t/E}} \sigma_u \quad (2.15)$$

欲計算接合板強度，只要知道接合板的長寬、SL 長度及厚度即可由圖 2.7 上找出適當之  $K_g$  值，再帶入式 (2.14) 所示之板公式，即可求得接合板之平均應力，此應力再乘上接合板彎折線上之面積即可求得接合板之挫屈強度。

除了上述的預測非彈性挫屈之板公式外，為防止接合板局部挫屈，規定接合板之自由端寬厚比  $a/t_g$  必須小於  $945/\sqrt{F_y}$ ，故接合板之臨界寬厚比  $a/t_{cr}$  為  $945/\sqrt{F_y}$ ，此時之接合板臨界厚度  $t_{cr}$  為

$$t_{cr} = a\sqrt{F_y}/945 \quad (2.16)$$

其中  $a$  為長自由端長度，如圖 2.6 所示， $F_y$  為接合板降伏應力（單位為 mm）。



### 2.2.7 Brown (1988)

對於接合板長自由端局部挫屈強度之計算，Brown 以長自由端之一半位置，取一條與力方向垂直之線到另一端作為接合板之有效長度  $b_E$  (圖 2.8) 及式 (2.17) 所示：

$$b_E = (2a_0 - a)/2\sin\theta \quad (2.17)$$

根據 Brown (1988) 的研究，接合板長端之局部挫屈強度，除了與接合板的形狀大小有關外，亦與接合板與聯接構材螺栓列數、螺栓間距以及接合板邊緣至第一排螺栓的距離有關，式 (2.18) 為計算接合板長自由端之局部挫屈公式，所有的尺寸均如圖 2.8 所示

$$P_b = \frac{F_a(2a_0 - a)t_g np}{[a\cos\theta + 2(p - e)]\sin\theta} \quad (2.18)$$

其中  $a_0$  為接合板長端長度， $a$  為長自由端長度， $p$  為螺栓間距， $e$  為接合板邊緣至第一排螺栓的距離， $t_g$  為接合板厚， $n$  則為螺栓列數。

### 2.2.8 Tsai et al. (2004)

台灣大學教授蔡克銓所主導的三層樓構架實驗中，其中的接合板以均 AISC-LRFD (2002) 規範 (2.2 式) 設計，並不考慮接合板會產生面外挫屈下，柱公式之  $K$  值採用 0.65，得到的接合板強度為 2208 kN 較 BRB 之極限強度 1653 kN 高，故以 AISC-LRFD 規範設計理應足以承受 1653 kN 以內的力量，但在試驗過程中產生了非預期的面外挫屈破壞，其挫屈強度為 805 kN。Tsai et al. (2004) 以含挫屈斜撐系統之行為 (含接合板、BRB) 來模擬接合板之挫屈行為，圖 2.9 所示為斜撐與接合板接合之側視圖，因 BRB 側撐鋼管兩端之主受力單元 (核心段) 轉換段為一 T 型斷面，抗彎能力較低，因此將此部份視為一加有彈簧之鉸接，對接合板而言，其邊界條件應為一端固接一端鉸接外加彈簧之半剛接情形，因此其有效長度應該係數  $K$  應該接近但不超過 2.0，建議含挫屈束制支撐之接合板  $K$  值應為 2.0。因此 Tsai 利用式 (2.2) 之柱公式，其中採用 Thornton 之概念取  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之最長長度 (如圖 2.1 所示) 作為有效長度  $L_c$ ，並建議  $K$  值為 2.0，與原本 Thornton 所建議假設兩端固接  $K=0.65$  之情況不同，則接合板計算出來之強度為 737 kN，與實驗值 805 kN 接近。

### 2.2.9 Yamamoto et al. (1988)

接合板板厚，主要定義為結實斷面與非結實斷面。除了前述的 Astaneh (1998) 與 Sheng et al. (2002) 所定義的臨界寬厚比 (分別為  $0.75\sqrt{E/F_y}$  與  $945/\sqrt{F_y}$ ) 為防止接合板遭到局部挫屈破壞外，Yamamoto et al. (1988) 以實驗方式對如圖 2.4 所示的 Chevron-Brace 式接合板進行壓力試驗以研究

接合板之挫屈行為，發現接合板之厚度若小於臨界厚度 ( $t_{cr}$ ) 則接合板可能在降伏前 (其降伏力為實驗所得) 發生接合板端部與梁之間發生挫屈 (如圖 2.4 所示之 A 區)，因此臨界厚度  $t_{cr}$  為：

$$t_{cr} = 1.10L_g \sqrt{\frac{F_a}{E}} \quad (2.19)$$

其中  $F_a = 0.58F_y$ ， $F_y$  為降伏應力， $L_g$  為接合板垂直向自由端長度

### 2.2.10 Dowswell and Barber (2004)

Dowswell and Barber (2004) 則以接合板受壓時是否產生面外變位 (Sway Mode & Nonsway Mode) 作為判斷接合板挫屈形式之標準，如圖 2.10 所示，取 Whitmore Section 下得到的三長度之  $L_l$  與螺栓與梁柱間最短的距離  $c'$ ，假設接合板不產生面外位移 (Nonsway) 下，可以 L 型模型來模擬接合板。L 型模型中，接合板之面外變位勁度由水平段提供，若欲使接合板不發生面外挫區，則 L 型模型中的水平段勁度必須大於垂直段勁度。垂直段勁度根據 AISC-LRFD (2002) Section C3.3 規定如下所示：

$$\beta_v = \frac{2P_u}{\phi L_1} \quad (2.20)$$

其中  $P_u = 0.85(1''F_y t_g)$  ( $t_g$  為接合板厚)， $\phi$  為 0.75

$$\text{故 } \beta_v = \frac{2.27F_y t}{L_1} \quad (2.21)$$

水平段勁度  $\beta_h$  則如下所示：

$$\beta_h = \frac{12EI}{c'^3} \quad (2.22)$$

其中  $I = t_g^3 / 12$ ，故 (2.23)

臨界狀態下  $\beta_v = \beta_h$ ，可求得接合板不發生面外變位下之臨界厚度

$$t_{cr} = 1.5 \sqrt{\frac{F_y c^3}{EL_1}} \quad (2.24)$$

其中  $t_{cr}$  為臨界接合板厚，若接合板厚超過  $t_{cr}$  則定義此接合板為結實 (compact)，接合板不會產生面外挫屈，反之若接合板厚度小於  $t_{cr}$  則定義為非結實，接合板會產生面外挫屈。在接合板強度預測方面，Dowswell and Barber (2004) 採用柱公式的方法預測強度 (圖 2.1)。對於 Dowswell and Barber (2004) 所定義之結實斷面，可利用 AISC-LRFD 計算接合板強度之方法預測接合板強度 [ $L_c = (L_1 + L_2 + L_3)/3$ ， $K = 0.5$ ]。對於非結實斷面強度計算則建議 [ $L_c = L_1 + L_2 + L_3/3$ ， $K = 1.0$ ]。對於 Chevron-Brace 式接合板，則建議採 [ $L_c = L_1$ ， $K = 0.65$ ]。

### 2.3 檢核接合板

本研究將分析 Tsai et al. (2004) 實驗的三層樓構架中的一樓上方接合板 (圖 1.4)，其接合板形式為一雙斜撐式 (Chevron Brace) 接合板，在接合板 (圖 1.5) 中央增加一個 8 mm 厚之加勁板以防止局部挫屈之產生，接合板長邊長度  $a_0$  為 637 mm、短邊長度  $b_0$  為 461 mm，長自由端長度  $a$  為 504 mm、寬  $L_s$  為 339 mm，厚度  $t_g$  為 16 mm、彎折線  $b_1$  長度 789 mm，斜撐軸力之方向與垂直線間之角度為  $42.5^\circ$ 。接合板接合區之長度為 370 mm，接合區超過接合板之彎折線約一個螺拴間距的距離 (每顆螺拴之間距為 70 mm)。

圖 2.11 為接合板依 Whitmore Section 原則下  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之值分別為 217 mm、289 mm、21 mm，Whitmore Section 與軸力垂直方向之最長長度  $L_{max}$  為 359 mm。依 Modified Thornton 原則下有效斷面之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  長度分別為 217 mm、143 mm、-57 mm。

實驗中一樓上方接合板之試體編號為 G16L1，降伏強度經由 Whitmore

Section( $b_E=414$  mm)計算出來之 $P_w$ 為 2287 kN,圖 2.3 所示為使用 Thornton (1984) 法計算降伏力 $P_T$ ,其中 $H$ 為 1282 mm、 $d$ 為 656 mm、 $t_g$ 為 16 mm 之 Chevron-Brace 式接合板,利用接合板斷面尺寸可計算出降伏軸力 $N_y=7056$  (kN),塑性彎矩 $M_p=2260$  (kN-m),降伏剪力 $V_y=4138$  kN。

利用力平衡可計算出此斷面上的軸力 $N$ 、剪力 $V$ 與彎矩 $M$

$$N = P \cos \theta - P \cos \theta = 0$$

$$M = P \cos \theta \times d = Pd \cos \theta = 0.485P$$

$$V = P \sin \theta - (-P \sin \theta) = 2P \sin \theta = 1.36P$$

將上述之各值,代入式(2.10)可得與軸力值 $P$ 有關之一元四次方程式:

$$\frac{0.485P}{0.9 \times 2260} + 0 + \left( \frac{1.36P}{0.9 \times 4138} \right)^4 = 1.0 \quad (2.25)$$

利用試誤法(Try and Error)可求出接合板在降伏時之降伏力 $P_T$ 為 2260 kN,大於實驗時之挫屈力 805 kN。

表 2.1-表 2.9 為根據 2.2 節文獻回顧中所介紹的公式,對各種不同接合板,包括原尺寸(G8L1、G16L1、G25L1)、加大尺寸(MG8L1、MG16L1、MG25L1)、接合區長度在接合板彎折線上(G8L2、G16L2、G25L2)、接合板接合長度短於接合板彎折長度(G8L3、G16L3、G25L3)四種形式之接合板,預測其強度(包括降伏強度與挫屈強度),而數字 8、16 及 25 分別代表接合板之厚度,L1、L2 及 L3 則分別代表接合區長為 370 mm、300mm 及 230 mm。

表 2.2 之 GL1 為一樓上方接合板根據 AISC-LRFD (2002) 所計算出來的挫屈強度 $P_{cr}$ 為 1987 kN (接合板可產生面外變位下, $K$ 值建議 1.2),其中有效長度 $L_c$ 為 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 三個長度之平均 $L_{avg}=176$  mm。表 2.3 為使用 Thornton (1984) 法計算 G16L1 之挫屈強度( $P_{cr,T}$ )為 2027 kN,有效長度 $L_c$ 為 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 之最大者 $L_2$ 為 289 mm。表 2.4 為使用 Modified Thornton 法計算 G16L1 之挫屈強度( $P_{cr,MT}$ )為 3350 kN,其中之 $L_c$ 為如圖 2.12 所

示之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之最大值  $L_1=217$  mm。表 2.5 為使用 Astaneh(1998) 法計算試驗 G16L1 之挫屈強度 ( $P_{cr,As}$ ) 為 1214 kN，其中之  $L_c$  如圖 2.11 所示，為接合板在 Whitmore Section 中沿著軸方向至梁柱邊界間最長長度  $L_{max}=357$  mm。表 2.6 為使用 Tsai (2004) 法計算 G16L1 之挫屈強度 ( $P_{cr,Ts}$ ) 為 737 kN，有效長度  $L_c$  之選擇同 Thornton 法。表 2.7 為使用 Doeswell(2004) 法計算 G16L1 之挫屈強度 ( $P_{cr,Do}$ ) 為 2132 kN，因其為雙斜撐式接合板，因此  $L_c$  如圖 2.11 所示之  $L_1$  為 217 mm 且有效長度係數  $K$  為 0.65。這些由柱公式所計算的接合板強度除了  $P_{cr,Ts}$  之外，其他強度均遠高於實驗時接合板挫屈強度  $P_u=805$  kN。在這些公式中，Thornton (1984) 與 Yam and Cheng (2002) 為不考慮面外挫屈的情況，有效係數  $K$  值均建議 0.65；AISC、Astaneh (1998) 有考慮板產生面外挫屈，其有效係數  $K$  值則建議，相對此建議  $K$  值之破壞模式為 Fixed-Guide；而 Tsai et al. (2004) 考慮的破壞模式為允許面外挫屈下，以 Fixed-Free 模式挫屈，使用的柱公式有效係數  $K$  值為 2。

表 2.8 所示，G16L1 為利用 Sheng et al. (2002) 之板公式計算三層樓試驗之一樓上方接合板非彈性挫屈強度，長端長度  $a_0$  為 637 mm，短端長度  $b_0$  為 461 mm， $a_0/b_0$  比值 1.38，與斜撐之接合區長度 SL 為 370 mm，依照圖 2.7 可找出接  $k_g$  值為 9.2，故挫屈強度  $P_{cr,S}$  為 3545 kN，大於試驗時之面外挫屈力 805 kN。

表 2.9 所示，為利用 Brown 所提出的長端局部挫屈公式，其中長端長度  $a_0$  為 637 mm，長自由端長  $a$  為 504 mm，第一牌螺栓與接合板端部距離  $e$  為 45 mm，螺栓間距  $P=70$  mm，共兩列螺栓，依照式 (2.18) 計算接合板局部挫屈強度  $P_{cr,B}$  為 2084 kN，較面外挫屈力量 805 kN 大，顯示面外挫屈發生在長端局部挫屈前。

表 2.10 為利用各個公式檢核接合板之臨界厚度。以 Astaneh (1998) 的

公式預測接合板是否長自由端局部挫屈，其中因中間有加勁板，故  $L'$  為 504 mm，利用式 (2.13) 預測長端局部挫屈之臨界厚度為 28.16 mm。Sheng et al. (2002) 的公式檢核接合板長端挫屈，其中的長自由端長度為 504 mm，以式 (2.16) 計算則臨界厚度為 10 mm。Yamamoto et al. (1988) 預測接合板端邊是否產生挫屈，其中短自由端  $L_g$  之長度為 339 mm，以式 (2.19) 計算之臨界厚度為 11.8 mm。以 Dowswell and Barber (2004) 的方法檢核接合板是否產生面外挫屈，其中螺栓與梁柱最近的距離  $c$  為 129 mm， $L_1$  為 217 mm，以式 (2.21) 所計算之臨界厚度為 6.2 mm。原設計之接合板厚度為 16 mm，接合板原則上以上述通是檢核，不會出現面外挫屈但可能會出現長端局部挫屈，因其厚度 16 mm 小於 Astaneh (1998 計算出的厚度 28.16 mm)。

## 2.4 研究計畫



本研究使用有限元素分析程式 ABAQUS，分析接合板在受面外挫屈下強度，首先需克服的問題為破壞模式對強度的影響，以釐清接合板在受到在實際構架行為中會有什麼挫屈行為，並設計如何加勁接合板，使接合板能夠在加勁之後達到非彈性挫屈，且挫屈強度在降伏強度之上。為了研究接合板挫屈形式，建立一實尺寸一樓構架 (圖 1.4)，包含梁、CFT 柱、接合板及挫屈束制消能斜撐 (BRB)。

除了分析實驗構架接合板外，另外再建立一接合板之局部模型，含梁及接合板及接合板與 BRB 之接合構材 (圖 1.5)，以研究接合板在不同厚度、尺寸、及接合長度下，接合板挫屈行為及強度，並以不同方式加勁這些接合板，求出使接合板挫屈強度大於降伏力的加勁方式，圖 2.12 所示為接合板加大 1.5 倍 (接合區長度向後延伸五顆螺栓的距離)，接合區之深度仍保持與一樓上方接合板相同，故螺栓排數由原本的五排增加為十排。如圖 2.13

所示，為將接合板螺拴排數減少一排，使接合板接合區長度在接合板彎折線上，接合區長度為 30 cm。如圖 2.14 所示，為將接合板螺拴排數減少兩排，使接合板接合長度短於接合板彎折長度。

圖 2.12(a)為加大尺寸接合板，依 Whitmore Section 下之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三長度之值分別為 217 mm、63 mm、-155 mm，平均長度  $L_{avg}$  為 42 mm，依 Whitmore Section 與軸力垂直方向之最長長度  $L_{max}$  為 359 mm。圖 2.12(b)所示，為接合板依 Modified Thornton 法（45° 分散角）下所定義的有效斷面之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  長度分別為 217 mm、-231 mm、-396 mm。

圖 2.13(a)為接合板接合區長度在接合板彎折線上之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三長度之值分別為 287 mm、402 mm、134 mm，平均長度  $L_{avg}$  為 274 mm，依 Whitmore Section 與軸力垂直方向最長長度  $L_{max}$  為 359 mm。[圖 2.13(b)] 為接合板依 Modified Thornton 法（45° 分散角）下所定義的有效斷面之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  長度分別為 287 mm、305 mm、53 mm。

圖 2.14(a)為接合板接合區長度短於接合板彎折線下，依 Whitmore Section 之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三長度之值分別為 357 mm、473 mm、246 mm，平均長度  $L_{avg}$  為 357 mm，其 Whitmore Section 與軸力垂直方向之最長長度  $L_{max}$  為 473 mm。圖 2.14(b)所示，為接合板依 Modified Thornton 法（45° 分散角）下定義的有效斷面之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  長度分別為 357 mm、452 mm、187 mm。

表 2.1-表 2.9 所示為各接合板以 2.2 節所述之公式計算接合板的降伏強度、挫屈強度（面外與非面外挫屈）及局部挫屈強度。各尺寸接合板之臨界厚度之檢合則如表 2.10 所示。

## 第三章 接合板有限元素分析

### 3.1 前言

在第一階段分析中，研究三層樓構架試驗一樓上方接合板在 805 kN 下之挫屈行為，並建立接合板局部模型進行參數研究，本章之 3.2 節建立一實尺寸之一樓構架模型，並分析之。3.3 節則建立一局部接合板模型，3.4 節則對於局部接合板模型加勁並探討其極限強度。3.5 節則探討接合板之尺寸效應對接合板之強度影響，並討論其加勁後行為。3.6 節則將接合板之接合區長度縮短至接合板彎折線 (Bending Line) 上，分析其未加勁與加勁後行為與強度。3.7 節針對接合板之接合區長度在彎折線外之加勁與未加勁行為及強度比較，並歸納整理本章之研究數據，提出接合板之設計建議。

### 3.2 整體構架模型

#### 3.2.1 構架模型介紹



實尺寸構架模型之尺寸為跨長 7 公尺，高 3.62 公尺之一層樓構架[圖 3.1(a)]。CFT 柱以 C3D8R 固體元素模擬，並利用分割 (Partition) 方式將每支柱子分成鋼柱與核心混凝土部份。梁、接合板與 BRB 部分則以 S4R 板元素模擬。BRB 核心段部分，由於使用板元素模擬，使得核心段與圍束鋼管之間的空隙由原本的 1 mm 增加為 11 mm，如圖 3.1(b)所示之斷面 C-C，為了讓束制鋼管 (80 × 80 × 4 mm) 產生應有的壓力效果，核心段與束制鋼管間介面採用 Exponential-Frictionless 之介面性質，使束制鋼管能在核心段一接近時即產生束制效果。接合板接合區則以 Cheng et al. (1998) 所建議的 Rigid Link 方式模擬接合板與 BRB 之間的螺栓，以 Constraint-Equation 連接一端 BRB 與接合板之兩點，並分別對 X、Y、Z 三個方向做三組 Rigid Link，使這兩點分別在 X、Y、Z 三個方向能夠一起移動；在 BRB 與接合板接合之整片地區，亦採用 Cheng et al. (1998) 的建議，將接合區之每一

相對點位對 Y 方向（面外方向）作一組 Rigid Link，提供完全面外區域之束制於此區域。使 BRB 端部與接合板之接合區在面外位移方向可一起移動。梁與 CFT 柱間因為只傳遞剪力，故梁與柱間之接合僅以腹板與鋼柱接合，翼板則與鋼柱沒有任何接觸。梁、接合板、加勁板及 BRB 等鋼材的材料性質則如表 3.1 所示，所有鋼材的材料性質之應力應變曲線設定如圖 3.2 所示。

構架分析方式則以在梁中央沿水平方向進行側推分析，並導入挫屈束制斜撐初始面外變位（Initial Imperfection），以求出接合板在受壓力下挫屈時之行為。

### 3.2.2 構架分析結果

在進行分析前先分析一層樓構架模型之振態，以檢視整個構架系統之挫屈模式。構架分析先在無任何初始面外變位下進行直接側推分析，然後再依照其變形模式施加初始面外變位進行側推分析。圖 3.3 (a)為第一振態模式因接合板產生面外挫屈而導致整個 BRB 受壓端產生面外位移；圖 3.3(b)為第二模態，斜撐仍然沒有挫屈而在接合板長端產生局部挫屈。

#### 無初始面外變位

首先對接合板不施以初始面外變位下直接進行分析，即於梁中心施一漸增位移，分析結果如表 3.2 所示，其中 WG16I0TB16 為接合板厚 16 mm（WG16），I0 代表 BRB 中心之初始面外變位為 0 mm，TB16 則代表 BRB 厚度 16 mm。接合板之軸力與軸位移關係示於圖 3.4(a)，其中軸力之計算，由於最小主應力（Min-Principal）方向與 BRB 核心段軸方向平行[圖 3.4(b)]，將 BRB 上同一斷面各元素之最小主應力值乘上元素面積即為通過此元素之力量，再將斷面上各元素所得的軸力相加即為通過此斷面之軸力。軸位

移之計算則如圖 3.4(c)所示，接合板上在梁端及最後一排螺栓中心通過 BRB 軸線相交之兩點 A、B，兩點間原始長度為  $L$ ，若 A、B 分別產生位移至新的座標  $A'$  及  $B'$ ，且經過計算  $A'$  及  $B'$  兩點間的長度  $L'$ ，則軸向位移為  $\Delta L = L' - L$ 。

試體 WG16I0TB16 表示原接合板厚度 (16 mm) 及 BRB 核心段厚 (16 mm) 不施加初始面外變位直接側推分析，可發現壓力端之 BRB 先行發生挫屈。接合板在 BRB 挫屈後方產生挫屈，BRB 挫屈時力量大小為 1230 kN。將 BRB 厚度加至 32 mm (WG16I0TB32)，發現接合板在 BRB 挫屈前先發生挫屈[圖 3.5(a)]，挫屈應力及變形如圖 3.5(b)及(c)所示，接合板挫屈時，壓應力 (Min-Principal) 降伏區域為接合區端部與梁中間的區域至 BRB 端部附近之接合板區域，此時 BRB 仍未出現降伏，接合板挫屈形狀則類似一端固定一端自由 (稱為 Fixed-Free) 之形式，破壞形式與如圖 3.3(a)所示之第一模態相同，接合板挫屈時力量大小為 1492 kN。此力量雖然較實驗所得到的 805 kN 大一倍，但較規範 AISC-LRFD (2002) 規定的挫屈強度  $P_{cr} = 1987$  kN (允許面外位移， $K=1.2$ ) 及以 Whitmore Section 所定義之降伏強度  $P_w$  為 2287 kN (表 2.1) 為小。

### 施加初始面外變位

根據 AWS D1.5 (2004) 所規定之桿件平整度為最大長度之 1/1000，在構架分析中，接合板長端長 641 mm，在分析中施加如圖 3.3(a)所示之第一模態之初始變形模式，接合板之面外變位分別為 0.06 mm (WG16I006TB16)、0.6 mm (WG16I06TB16) 及 3 mm (WG16I3TB16)。接合板會先於接合區端部與梁之間產生局部降伏，隨著力量增加降伏區域增大而導致接合板挫屈，其挫屈情形與不施加初始面外變位情形 (WG16I0TB32) 相同。三種初始面外變位分析得到的最大強度分別為 828

kN、812 kN 及 770 kN。其中以 0.6 mm 初始面外變位所得到挫屈強度 812 kN 最接近實驗值 805 kN，其構架變形及接合板應力如圖 3.6(a)所示，為類似受壓之簡支梁，接合板之應力及變形如圖 3.6(b)及(c)所示，挫屈模式為 Fixed-Free。其強度亦較不施加初始面外變位直接進行側推分析之強度（1492 kN）更接近實驗值，根據本節之研究，可得到斜撐構架系統（含 BRB 與接合板）在受壓時將依循第一模態挫屈模式變形，且包含初始面外變位，在此情況下，因接合板挫屈強度只有 805 kN，遠小於 BRB 之極限強度 1653 kN，故破壞模式為接合板挫屈。

### 3.3 接合板局部模型

在構架分析中可以發現接合板在 805 kN 下挫屈破壞模式如圖 3.6 所示。然而因為整個構架行為複雜，但一樓構架中 BRB 所能提供之極限強度僅 1653 kN (Tsai et al. 2004)，根據第二章的文獻回顧，AISC-LRFD (2002) 規定接合板挫屈強度 1987 kN (表 2.2)，依 Whitmore Section (414 mm)，降伏強度為 2287 kN (表 2.1)，對於接合板之分析上有所限制；且考慮研究接合板改變大小、接合長度 (SL) 等不同狀況、故簡化接合板分析模型是有其必要性。

局部接合板模型如圖 3.7 所示，保留了整支梁、接合板以及接合板接合區之 T 型鋼部分。並全部以板元素 S4R 模擬，螺栓接合部分仍採用 Rigid Link 模擬，接合板其 T 型鋼之接合區亦採用全面外挫屈束制。梁上端與梁接觸之樓版部分，則在其邊界條件的設定中，將梁上端面外變位 (U2) 及三個旋轉方向 (R1、R2、R3) 束制，原本腹板兩端與 CFT 柱剪力接合接之部分則採用位移全束制 (U1、U2、U3)。分析方式在接合區外端與 BRB 漸變段切斷處施力並討論其挫屈強度與行為，同時並討論加勁板對於接合板的強度及行為之影響。加勁板如圖 3.8 所示，加勁板的設計主要以加勁

板長為接合板自由端長度之 0.9 倍（即  $L_{s1}=0.9L'$  與  $L_{s2}=0.9b$ ）或 0.6 倍，加勁板寬  $b_s$  分別為 5、10、15 及 20 倍接合板厚，加勁板厚  $t_s$  則設計為 0.5、0.75、1 及 1.5 倍接合板厚。

### 3.3.1 接合板挫屈模態

未加勁下接合板第一及第二挫屈模態如圖 3.9 所示，第一模態之挫屈模式為類似受壓構件兩端為 Fixed-Free 之形式如圖 3.9(a)所示，此模態與上一節一樓構架分析得到之接合板挫屈變形[圖 3.3(a)]相近。第二模態則為接合板在長端處產生局部挫屈，如圖 3.9(b)所示。因此接合板分析中將針對第一模態進行分析，其中因接合板長端長度為 637 mm，以桿件平整度為最大長度千分之一的規定為 0.6 mm，因此分別對接合板施以 0.06 mm、0.6 mm 及 3 mm 之初始面外變位，分析局部模型接合板。因為局部模型並未考慮到 BRB 對於接合板束制的影響，因此將施加 0.6 mm 之初始面外位移，並將連接板端部設置旋轉彈簧或邊界條件束制其旋轉，觀察強度、破壞行為及軸力-軸位移曲線。圖 3.10 為比較接合板在端部旋轉勁度分別為 20 kN-m/rad、100 kN-m/rad、400 kN-m/rad 及 2000 kN-m/rad、接合板端部不施以任何旋轉束制（No Restraint）、以及完全束制（Full Resraint）及先前分析的整體構架模型（WG16I06TB16）七個例子在到達極限強度時，沿著軸力方向之面外挫屈位移，可發現接合板以彈簧提供旋轉束制（100、400、2000 kN-m/rad）下，與 No Restraint 及 WG16I06TB16 的情形相近，挫屈形式均為 Fixed-Free 之面外挫屈；而 Full Restraint 則因為 T 型鋼端部束制旋轉，使挫屈形式變成固定端與施力端均無旋轉。但允許施力端面外變位之情形。達最大力量挫屈時之面外位移以 No Restraint 之情形最大，施力端之旋轉束制分別為 20、100、400 及 2000 kN-m / rad 時，其挫屈時面外位移分別為 16.67 mm、15.52 mm、14.12 mm 及 12.61 mm，而在端部全束制下，

挫屈時面外位移僅有 4.97 mm，此即說明為何完全束制其旋轉下強度較高。圖 3.11 為七組分析的軸力與軸位移關係，當接合板對其端部施加旋轉束制，即可使其強度增加，當施力端旋轉束制為 20 kN-m / rad、100 kN-m/rad、400 kN-m/rad、2000 kN-m/rad 之旋轉彈簧束制下所得到的強度分別為 888 kN、1181 kN、1462 kN、1868 kN，接合板端部沒有束制 (No Restraint) 與構架分析中的 WG16I06TB16 強度分別為 826 kN 與 809 kN，在接合板端部有束制 (Full Restraint) 之強度則為 2473 kN。圖 3.12 為將接合板挫屈時之面外變位正規化為 1，繪製 Fixed-Free (No Restraint) 及 Fixed-Guided (Full Restraint) 兩種面外挫屈模式之面外變形圖，可發現接合板面外位移均由接合區之端部開始沿著其之軸方向增加，Fixed-Guided 之面外位移在接近接合區外側時增加速度減緩。此現象亦可以解釋為何 Full Restraint 接合板因面外位移受到旋轉束制而減小，故 Fixed-Guided 模式下挫屈之接合板強度較 Fixed-Free 模式下挫屈之接合板強度大。而考慮到斜撐系統中的桿件不平整下，BRB 對於接合板沒有旋轉束制的效果，因此在接合局部模型中不需考慮旋轉束制之情形。

### 3.3.2 局部模型分析

對接合板施加如圖 3.9(a)所示的第一模態面外變位，同時在施力端不增加任何旋轉束制進行分析，最大之初始變位值 (於接合板端部) 分別為 0.06 mm、0.6 mm 及 3 mm。分析結果如表 3.2 所示，其中 G16I06L1 則表示為接合板厚 16 mm (G16)，無使用加勁板 (S0)，最大之初始面外位移為 0.6 mm (I06)，接合板接合區長度 370 mm (L1)。軸力與軸位移曲線如圖 3.13 所示，比較接合板在不同初始面外變位下之行為，可發現接合板初始面外變位越大強度越低，在 0.06 mm、0.6 mm 及 3 mm 三種初始面外變位下強度分別為 894 kN、826 kN、711 kN，且挫屈形式均為類似 Fixed-Free 之第

一模式挫屈。其中 0.6 mm 初始面外變位強度 826 kN 與實驗值 805 kN 及構架分析值為 812 kN 最接近。挫屈時應力分佈如圖 3.14(a)及(b)所示之降伏區域，隨即開始強度下降，挫屈模式為 Fixed-Free 與如圖 3.5(a)所示的一層樓構架之接合板變形挫屈情形相同。

不施以初始面外變位直接施力 (G16S0I0L1) 的軸力與軸位移曲線，強度上升至軸力達 2350 kN 後，接合板兩端接合區間出現明顯的降伏[圖 3.14(c)及(d)]，使得軸力在到達 2350 kN 之後強度曲線呈雙線性行為緩慢上升，至接合板長端出現如圖 3.14(e)及(f)所示的長端局部挫屈，與圖 3.9(b)之第二模式挫屈模式相同。挫屈強度 3220kN，大於 AISC-LRFD 之  $P_{cr}=1987$  kN，及 Brown (1988) 的長端局部挫屈強度  $P_{cr,B}=2052$  kN。

圖 3.13(b)之軸力與軸位移關係為比較接合板模型與整體構架行為中接合板之強度與行為比較。在接合板出始面外變位皆為 0.6 mm(WG16I2TB16 與 G16S0I06L1) 下，可發現在接合板挫屈前兩者之行為相當接近，但挫屈後一層樓構架之力量急速下降，此現象為整體構架之 BRB 在接合板挫屈後面外變位產生挫屈所造成，但因最大強度與勁度皆相似，故可利用接合板局部模型來代替一層樓構架模型來研究，在初始面外變位方面則採用 0.6 mm。

### 3.3.3 加勁版對於強度的影響

接合板的加勁板長度為 0.9 倍及 0.6 倍接合板自由端邊長，搭配 5、10、15、20 倍接合板厚 ( $t_g$ ) 之四種不同的加勁板寬度  $b_s$ ，加勁板厚則採用 0.5、0.75、1、及 1.5 倍接合板厚。測試接合板在 8 mm、16 mm 及 25 mm 三種厚度下的強度及行為。總共進行 96 組接合板補強分析，各加勁板之規格及強度如表 3.3 所示，以 G8S6A1L1 為例，表示接合板厚 8 mm (G8)、加勁板厚 6 mm (S6)，A 代表加勁板長度為 0.9 倍接合板自由端邊長；B 代表

加勁板長度為 0.6 倍接合板自由端邊長，其後的數字 1-4 為加勁板寬各為 5、10、15、20 倍接合板厚。L1 則代表接合板接合區長度 370 mm。而 L2 代表接合板接合區長度 300 mm，L3 代表接合板接合區長度 230 mm。表中  $t_s$  代表加勁板厚、 $b_s$  代表加勁板寬度，所有的分析初始面外最大變位為 0.6 mm。

圖 3.15-圖 3.17 所示，為三種厚度的接合板在加勁後的軸力與軸位移及軸力與面外位移的關係圖，其中加勁板厚度均與接合板相同。由軸力與軸位移曲線可以發現加勁板除了可使接合板發揮更大的強度外並提供更好的穩定性。以圖 3.16 的 16 mm 厚接合板厚為例，加勁後接合板破壞情形可分為兩種，接合板挫屈強度若在 2400 kN 以下，以 G16S16A1L1 為例，其軸力與軸位移曲線在達到挫屈強度後即馬上下降[圖 3.16(a)]，在達到挫屈強度時已有明顯的面外位移，如圖 3.18(a)及(b)所示，此時的降伏應力發生在接合板端部至梁附近之接合板區域，且破壞模式為 Fixed-Free 模式之面外挫屈與未加勁之情形相同。若挫屈強度大於 2400 kN，以 G16S16A2L1 為例，軸力超過 2400 kN 後，強度以雙線性形式緩慢上升至挫屈破壞，軸力達 2400 kN 之應力圖如圖 3.18(c)及(d)所示，在拉力與壓力兩接合區之間的區域有明顯的降伏，此情形與不施加初始變位直接進行直接施力分析（在軸力到達 2350kN 時之降伏情況相同，而過了 2400 kN 後達最大強度時挫屈之應變及變型如圖 3.18(e)及(f)，接合板降伏之區域在接合區端部附近，且此時接合板仍沒有明顯的面外變位。接合板加勁後之軸力與軸位移關係分成兩種形式，因此定義軸力與軸位移曲線上發生轉折點之強度為接合板的降伏強度  $P_y$ ，所有的接合板加勁後之挫屈強度 ( $P_u$ ) 如表 3.3 所示。同樣的情況亦發生在 8 mm 與 25 mm 厚之接合板上，開始產生雙線性時軸力分別為 1200 kN 與 3700 kN，若挫屈強度低於降伏強度，則定義為彈性挫屈，反之則為非彈性挫屈，挫屈時已有明顯的面外位移，反之則為非彈性挫屈，

挫屈時接合板沒有明顯的面外位移直到軸力與軸位移曲線開始下降之後才開始有面外位移。降伏力與經由 Whitmore Section 所算出來的降伏強度  $P_w$  (1143 kN、2287 kN、3573 kN 對應接合板厚  $t_g$  為 8 mm、16 mm 及 25 mm) 及 Thornton (1984) 法所計算出來的降伏強度  $P_T$  (1130 kN、2260 kN、3531 kN 對應接合板厚  $t_g$  為 8 mm、16 mm 及 25 mm) 接近， $P_w$  與  $P_T$  之結果如表 3.3 所示。

### 3.4 接合板加大尺寸

將原尺寸之接合板往外擴充 5 排螺栓的距離，使接合板與 T 型鋼之間的螺栓排數由五排增加到十排，接合板與接合之 T 型鋼仍保持原本的深度 [圖 3.19]。同樣先分析未加勁下接合板的強度及行為，並以與上一節相同的方式加勁此接合板，並觀察其強度與行為。因為接合板有十排螺栓，故接合板之 Whitmore Section 有效寬度達 819 mm，以 Whitmore Section 計算出來的降伏強度  $P_w$  達 4518 kN；以 Thornton 的降伏公式計算如圖 3.19 之斷面 A-A 所示之降伏強度  $P_T$  為 3350 kN。

#### 3.4.1 無加勁分析

無加勁下，接合板的挫屈模態如圖 3.20 所示，第一模態為接合板整體面外挫屈呈 Fixed-Free 形式，第二模態則為由長端發生局部挫屈。不施加初始面外變位直接分析及施以第一模態之初始面外變位在接合板端部邊 0.06 mm、0.6 mm 及 3 mm 之軸力與軸位移與軸力與面外位移圖形。分析結果如表 3.2 所示，其中以 MG16I06L1 為例，MG 為加大尺寸之接合板，其後數字 16 表示接合板厚 16 mm，S0 為加勁板厚 0 mm，I06 為初始面外變位 0.6 mm，L1 代表接合區深度與原尺寸之接合板相同，接合區都在彎折線裡面。接合板軸力與軸位移與軸力及面外位移之關係如圖 3.21 所示。接合

板在三種初始面外變位（0.06 mm、0.6 mm 及 3 mm）下，強度依序為 794 kN、782kN 及 750kN[圖 3.21(a)]，其中 MG16I06L1 之接合板應力及變形則如圖 3.22(a)及(b)所示，接合板之降伏集中在接合區端部與梁附近之接合板區域，其挫屈模式為 Fixed-Free，與第一模態之挫屈形式相同。不施以初始面外變位直接施力分析下，接合板則以第二模態之模式變形在長端產生局部挫屈，軸力與軸位移曲線則在軸力達 3530 kN 後降伏並呈雙線性緩慢增加[圖 3.22(c)及(d)]，直到接合板出現如圖 3.22(e)及(f)所示的長端局部挫屈產生，強度方下降，挫屈強度為 4366 KN。

比較 3.3 節所分析的原尺寸接合板在不加勁下挫屈強度與軸位移及面外位移之關係（圖 3.23），原尺寸接合板為 826 kN；加大尺寸但仍保持原本接合區深度下，強度為 782 kN，較原尺寸低 5%，而挫屈模式均為第一模態之 Fixed-Free 模式，顯示增加接合板尺寸下，接合板強度將微幅減小。在不施加面外變位下，兩種接合板尺寸均達降伏後產生長端局部挫屈，原尺寸接合板極限強度為 3200 kN 大於 AISC-LRFD 公式計算的  $P_{cr}=1987$  kN，而加大尺寸後接合板挫屈強度 4366 kN 卻小於  $P_{cr}=4484$  kN。

### 3.4.2 加勁板對強度的影響

大尺寸接合板之加勁板為加勁板長度為 0.9 倍及 0.6 倍接合板自由端邊長與原尺寸之接合板相同，搭配 5、10、15、 $20t_g$  四種不同的加勁板寬度  $b_s$ ，加勁板厚則採用 0.5、0.75、1、及 1.5 倍接合板厚。測試接合板在 8 mm、16 mm、25 mm 三種厚度下的強度及行為。總共進行 96 組接合板補強分析，各加勁板之規格及強度如表 3.4 所示，MG8S6A1L1 為接合板厚 8 mm（MG8）、S6 為加勁板厚 6 mm，A 代表加勁板長 0.9 倍接合板自由端邊長；B 代表加勁板長 0.6 倍接合板自由端邊長，其後的數字 1-4 代表加勁板寬各為 5、10、15、20 倍接合板厚。

圖 3.24-3.26 所示，為三種厚度的接合板在加勁後的軸力與軸位移及軸力與面外位移的關係，其中加勁板厚度均與接合板相同，且初始面外位移均為 0.6 mm。以圖 3.25 所示的 16 mm 厚接合板，加勁後接合板破壞情形可分為兩種，接合板之挫屈強度若低於 3400 kN，試體 MG16S16A1L1 其軸力與軸位移曲線在到達挫屈後即下降[圖 3.27(a)及(b)]為降伏應力分布則與未加勁之接合板(MG16I06L1)相近[圖 3.27(c)及(d)]，破壞模式為 Fixed-Free 式面外挫屈，降伏區域在接合板端部與梁端間。若挫屈強度大於 3400 kN，以 MG16S16A2 為例，在軸力超過 2400 kN 後，強度以雙線性形式緩慢上升至挫屈破壞[圖 3.27(e)及(f)]，接合板降伏區域發生在接合區端部附近。同樣的情況亦發生在板厚 8 mm 與 25 mm 之接合板上，開始產生雙線性時軸力分別為 1700 kN 與 5200 kN，此行為強度與先前不施加面外變位直接分析所得到在強度超過 3530 kN 後呈雙線性緩慢上升後達最大強度挫屈有同樣趨勢[圖 3.21(a)]。

上一節定義接合板軸力與軸位移行為在產生雙線性下，轉折點為降伏力  $P_y$ ，以同樣的概念定義接合板在加大尺寸在三種厚度下之降伏力  $P_y$  分別為 1700 kN、3400 kN、5200kN，挫屈強度小於  $P_y$  者為彈性挫屈，挫屈強度大於  $P_y$  者為非彈性挫屈。比較  $P_y$  與經由 Whitmore Section 所算出來的降伏強度  $P_w$  (三種厚度下  $P_w$  分別為 2259 kN、4518 kN、7059 kN) 及與 Thornton (1984) 的方法所計算出來的降伏強度  $P_T$  (三種厚度下  $P_T$  分別為 1675 kN、3350 kN、5200 kN)，可發現  $P_y$  仍與  $P_T$  接近，但與  $P_w$  則相差甚多。因此，接合板加大尺寸後，若接合板加勁使其能達到降伏後非彈性挫屈，降伏力以 Thornton 法計算出來的降伏強度  $P_T$ ，較接近實際的降伏強度。

### 3.5 接合板接合區長度在接合板彎折線上

本節之分析則將接合板保持原尺寸，但將接合板與 T 型鋼的接合長度

(SL)縮短一顆的距離使其接合處端部正好位在彎折線(Bending Line)上。螺栓則由原本的五排變成四排螺栓，接合板接合區長度也由 370 mm 變成 300 mm，如圖 3.28 所示。本節分析未加勁下接合板施加初始面外變位後的強度及行為，並與前面相同的條件加勁接合板並觀察強度及行為。

### 3.5.1 無加勁分析

無加勁下，接合板的挫屈模態如圖 3.29 所示，第一模態為接合板整體面外挫屈呈 Fixed-Free 形式，第二模態則為由長端發生局部挫屈。表 3.2 為分別對接合板板厚 8 mm、16 mm、25 mm 施以 0.6 mm 之初始面外變位後進行壓力試驗所得的結果，以 G16I0S06L2 為例，接合板厚 16 mm(G16)，無使用加勁板(S0)，初始面外變位 0.6 mm (I06)，且接合板接合區長度為 300 mm (L2)；圖 3.30 為接合板軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線（其中 L1 代表原尺寸接合板，L2 代表接合板接合區在彎折線上，L3 則代表接合板接合區短於其彎折線），在 L2 中三種厚度下接合板強度各為 143 kN (G8I06L2)、663 kN (G16I06L2)、2082kN (G25I06L2)。三種厚度之接合板挫屈強度均較原接合區長度之情況(L1)小，顯示使用短的接合板區域導致較低的挫屈軸力。而 G16I06L2 之挫屈模式為 Fixed-Free[圖 3.3]。

### 3.5.2 加勁板對強度的影響

加勁方式與原尺寸之接合板相同，加勁板長度  $L_s$  加勁板長度為 0.9 倍及 0.6 倍接合板自由端邊長，搭配 5、10、15、 $20t_g$  四種不同的加勁板寬度  $b_s$ ，加勁板厚則採用 0.5、0.75、1、及 1.5 倍板厚。測試接合板在 8 mm、16 mm、25 mm 三種厚度下的強度及行為。總共進行 96 組接合板補強分析，各加勁板之規格及強度如表 3.5 所示，G16S16A1L2 為接合板厚 16 mm (G16)、加勁板厚 16 mm (S16)，A 代表加勁板長度  $L_s = 0.9L_g$ ；B 代表

$L_s = 0.6L_g$ ，其後的數字 1-4 為加勁板寬各為 5、10、15、20 倍接合板厚，L2 則為接合板接合區長度 300 mm，其接合區在接合板之彎折線上。

軸力與軸位移及軸力與面外位移圖形如圖 3.32-圖 3.34 所示，其中並將其結果（L2：接合區長度在接合板彎折線上）與原尺寸（L1）及接合板接合區長度短於其彎折線（L2），與前兩節的研究一樣，接合板加勁後可分彈性挫屈與非彈性挫屈兩種情形。其中 G8S8A1L2、G16S16A1L2 為彈性挫屈，軸力與軸位移曲線在達最大強度後直接下降；而非彈性挫屈例子為 G8S8A2L2、G16S16A2L2、G25S25A1L2、G25S25A2L2。圖 3.35(a) 及圖 3.35(b) 為 G16S16A1L2 在彈性挫屈下應力及變形圖，接合板降伏區域集中在接合區端部與梁附近，其挫屈形式為 Fixed-Free 模式；若加勁足以使接合板到達降伏力，則接合板在 Section A-A 降伏時之應力圖如圖 3.3(c)及(d)所示，圖 3.35(e)及(f)為 G16S16A2L2 達最大力時之應力及變形曲線，顯示加勁後因提供足夠的面外挫屈束制，因此挫屈時無明顯的面外變形，只有在接合區端部附近出現降伏區域，由軸力與面外位移之關係可發現達最大力之後面外位移才開始明顯增加[圖 3.33(b)]。GL2 之接合板在相同的條件加勁下，強度較 GL1 小。

三種厚度接合板（G8S8A2L2、G16S16A2L2、G25S25A2L2）在軸力與軸位移圖形上所得之降伏力  $P_y$  分別為 1084 kN、2163 kN、3581kN。比較  $P_y$  與經由 Whitmore Section 所算出來的降伏強度  $P_w$ （920 kN、1840 kN、2875 kN，相對於接合板厚  $t_g$  為 8 mm、16 mm 及 25 mm）相差甚多，但與 Thornton（1984）法所計算出來的降伏強度  $P_T$ （1070 kN、2140 kN、3481 kN，相對於接合板厚  $t_g$  為 8 mm、16 mm 及 25 mm）接近， $P_w$  與  $P_T$  之結果如表 3.5 所示。因此，接合板接合長度在其彎折線上，若接合板有效加勁使其能達到降伏後非彈性挫屈，降伏力以 Thornton（1984）法計算出來的降伏強度  $P_T$ ，較接近實際的降伏強度。

### 3.6 接合板接合區長度小於接合板彎折線

本節之分析則將接合板保持原尺寸，但將接合板與 T 型鋼的接合長度 (SL) 縮短兩顆的距離，使其接合處長度小於接合板彎折線。螺栓則由原本的五排便成三排螺栓，接合板接合區長度 (SL) 也由 370 mm 變成 230 mm，如圖 3.36 所示。本節分析未加勁下施加初始面外變位後的強度及行為，並以與前三節相同的條件加勁接合板並觀察其強度及行為。

#### 3.6.1 無加勁分析

無加勁下，接合板的挫屈模態如圖 3.37 所示，第一模態為接合板整體面外挫屈呈 Fixed-Free 形式，第二模態則為由長端發生局部挫屈。表 3.1 為對板厚 8 mm、16 mm、25 mm 直接施以 0.6 mm 之第一模態初始面外變位，G16I0S06L3 為接合板厚 16 mm，無使用加勁板 (S0)，初始最大面外變位 0.6 mm (I06)、接合區長度 230 mm (L3)。如圖 3.30 所示，為三種厚度下之軸力與軸位移及軸力與面外位移之關係，接合板強度各為 111 kN、560 kN、1815 kN，其接合板挫屈強度較原尺寸 (GL1) 及接合長度在彎折線上 (GL2) 小。應力及變形如圖 3.38 所示，挫屈模式 Fixed-Free，挫屈時降伏區域集中在接合區端部與梁之間。

#### 3.6.2 加勁板對強度之影響

加勁方式與原尺寸之接合板相同，加勁板長度  $L_s$  為 0.9 倍及 0.6 倍接合板自由端長度，搭配 5、10、15、 $20t_g$  四種不同的加勁板寬度  $b_s$ ，加勁板厚則採用 0.5、0.75、1、及 1.5 倍板厚。測試接合板在 8 mm、16 mm、25 mm 三種厚度下的強度及行為。總共進行 96 組接合板補強分析，各加勁板之規格及強度如表 3.6 所示，G16S16A1L3 接合板厚 16 mm (G16)、加勁板厚 16 mm (S16)，A 代表加勁板長度  $L_s$  為 0.9 倍接合板長度；B 代表  $L_s$  為 0.6 倍接合板長度，其後數字 1-4 為加勁板寬各為 5、10、15、20 倍接合板厚，

而 L3 則為接合板接合區長度 230 mm。

軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線如圖 3.32-圖 3.34 所示，接合板加勁後同樣可分彈性挫屈與非彈性挫屈兩種情形。其中 G8S8A1L3、G16S16A1L3、G25S25A1L3 為彈性挫屈；而非彈性挫屈例子為 G8S8A4L3、G16S16A2L3、G25S25A2L3。以 G16S16A1 為例，接合板彈性挫屈下，應力及變形如圖 3.39(a)及(b)所示，接合板降伏區域集中在接合區端部與梁附近，其挫屈形式為 Fixed-Free 模式；若加勁足以使接合板到達降伏後之非彈性挫屈，則出現如圖 3.38(c)及(d)，則接合板在 Section A-A 降伏。圖 3.39(e)及(f)為接合板達最大力挫屈時應力及變形圖，顯示加勁後因提供足夠的面外挫屈束制，因此挫屈時無明顯的面外變形，只有在接合區端部附近出現降伏區域，由軸力與面外位移之關係可發現達最大力之後面外位移才開始明顯增加[圖 3.39(b)]。接合板在相同的條件加勁下，強度較 L1 及 L2 之情形小，顯示接合區之長度仍對接合板強度有所影響。

依照軸力與軸位移曲線之彎折點找出三種厚度接合板之降伏軸力  $P_y$  分別為 965 kN、1946 kN、3045 kN。比較  $P_y$  與經由 Whitmore Section 所算出來的降伏強度  $P_w$ （三種厚度下  $P_w$  分別為 697 kN、1394 kN、2188 kN）不同，但與 Thornton(1984)之方法所計算出來的降伏強度  $P_T$  (1016 kN、2032 kN、3175 kN，相對於接合板厚  $t_g$  為 8 mm、16 mm 及 25 mm) 接近， $P_w$  與  $P_T$  之結果如表 3.6 所示。因此，接合板接合長度在其彎折線上，若接合板有效加勁使其能達到降伏後非彈性挫屈，降伏力以 Thornton 法計算出來的降伏強度  $P_T$ ，較接近實際的降伏強度。

### 3.7 分析結果討論

在前幾節的分析中，可發現構架系統中的接合板發生非預期挫屈破壞，其模式為 Fixed-Free，此模式與學者 Tsai et al. (2004) 所預測的接合板

挫屈模式相同（利用柱公式計算強度且其有效長度係數  $K$  值建議為 2）。針對此破壞模式加勁接合板可發現接合板之強度可分為彈性挫屈與非彈性挫屈兩種。以下將針對接合板之挫屈強度、降伏強度及接合板之加勁方式作一系列整理。

### 3.7.1 未加勁接合板強度與行為之探討

經由本章的分析接合板產生預期外的面外挫屈，其強度為遠低於 AISC-LRFD 所規定之面外挫屈強度下之行為以 Fixed-Free 模式挫屈，而先前學者研究的接合板挫屈形式主要有 Brown（1988）所研究的長端局部挫屈及 Yam and Cheng（2002）及 Sheng et al.（2002）研究的旋轉束制下之面外挫屈行為。本節將第二章經由規範及先前學者所研究之公式所計算之接合板強度與第三章對於接合板之分析進行探討。表 3.7 為接合板分別在 0.6 mm 之初始面外變位、直接施力強度及接合板施力端旋轉束制下之有限元素分析挫屈強度。表 3.8、表 3.9 及表 3.10 為分別對三種邊界條件下分析之強度與表 2.1 至表 2.9 之各公式所計算強度之比值。其中的 G16L1 代表原尺寸接合板厚度 16 mm，MG16L1 則代表加大尺寸接合板厚 16 mm，G16L2 代表接合區尺寸在接合板彎折線上下接合板厚 16 mm，G16L3 則代表接合區短於接合板彎折線下接合板厚 16 mm。

#### 0.6 mm 初始面外變位

表 3.8 為接合板在受 0.6 mm 初始面外變位下施力分析，以 Fixed-Free 模式面外挫屈之強度與與第二章公式計算之強度比值。其中利用 Astaneh（1998）法所得到的強度比值平均為 1.01，除了 Astaneh 法外，其他方法所得到的強度容量均與分析強度相差甚多，而  $P_u/P_{cr,As}$  之標準差為 0.46，則顯示雖然以 Astaneh 法得到的強度平均值接近實際強度，但不同接合板間

之比值落差極大，其中以預測 25 mm 板厚之情況較準。而接合板強度與  $P_{cr}$  (AISC-LRFD,  $K=1.2$ ) 公式計算之比值平均為 0.57，標準差為 0.32，其中以預測接合板厚為 8 mm 之情況較準，其他方法以  $P_{cr,T}$ 、 $P_{cr,MT}$ 、 $P_{cr,D}$ 、 $P_{cr,S}$  及  $P_{cr,B}$  均高估接合板強度，而  $P_{cr,Ts}$  則僅有 G16L1 及 G25L1 較接近分析強度，在加大尺寸下高估接合板強度，但在其他型式及厚度接合板則低估強度。與接合板降伏強度 ( $P_T$ ) 之比值均小於 1.0，顯示這些面外挫屈之例子均為彈性挫屈。而  $P_T$  之計算為圖 3.7、圖 3.19、圖 3.28、圖 3.36 之 Section A-A 依照 Thornton (1984) 法[式 (2.10)]所計算的降伏強度。

### 直接施力分析

表 3.9 為直接施力分析所得的強度與第二章公式之預測強度比值 ( $P_u/P_T$ ) 接合板均以長端局部挫屈之形式破壞。在這些接合板強度比值中，以與 Sheng et. al. (2002) 之板公式平均強度比值為 1.16，標準差為 0.25 最接近。以  $P_{cr}$  (AISC-LRFD,  $K=1.2$ ) 所計算的  $P_u/P_{cr}$  比值平均為 2.48，標準差為 1.73。因此以 Sheng et. al (2002) 之板公式預測接合板面內挫屈及長端局部挫屈可得到精準的結果，而其他公式所計算的落差均大，例如以  $P_{cr,T}$  及  $P_{cr,D}$  計算的比值在 MGL1 較接近 1，以  $P_{cr,MT}$  計算之比值則在 GL1 及 GL2 較接近 1。以  $P_{cr,As}$  及  $P_{cr,Ts}$  則均低估強度。計算的比值則在 GL1 之長端挫屈強度預測稍嫌保守，其他的情況均接近 1。

### 旋轉束制下面外挫屈

表 3.10 為接合板在受 0.6 mm 初始面外變位下，接合區施力端旋轉束制之情形所計算之強度與預測強度比值，以  $P_{cr,S}$  之平均值 0.95 最接近 1.0，而其標準差 0.18。其他方法中，以  $P_{cr,MT}$  計算出來的平均比值為 1.07， $P_{cr,B}$  所計算的平均比值為 1.15 均接近 1，標準差分別為 0.58 與 0.28 則較  $P_{cr,S}$  所計算的結果差。以  $P_{cr}$  (AISC-LRFD,  $K=1.2$ ) 所計算之比值平均為 2.15，

標準差 1.75。因此接合板在施力端旋轉束制下，以 Sheng et al. (2002) 之板公式可準確預測接合板強度，其他公式中以  $P_{cr,B}$  預測結果亦不錯，而以  $P_{cr,T}$ 、 $P_{cr,MT}$  及  $P_{cr,D}$  計算之比值僅在 GL1 之情況比值較接近 1，以  $P_{cr,T}$  計算之比值僅在 MGL1 接近 1，以  $P_{cr,MT}$  計算之比值在 GL1 及 GL2 接近 1，而以  $P_{cr,As}$  及  $P_{cr,ts}$  則均低估強度，其中在 G8L2 及 G8L3 因其預測強度均小於 100 kN，故分析強度與預估強度之比值偏大。

綜觀以上之比較，可得到接合板之長端局部挫屈預測以及接合板旋轉束制下面外挫屈以 Sheng et al. (2002) 法預測其強度均可合理預測強度。但這些方法仍無法預測接合板在 Fixed-Free 模式下挫屈之強度。

### 3.7.2 面外挫屈強度之計算

由於經過先前學者所研究的公式之預測強度均無法準確預測接合板在 Fixed-Free 挫屈模式下之挫屈強度，故需研擬出能預測接合板強度之公式。利用板公式：

$$\sigma_u = \frac{K_g \pi^2 E \sqrt{E_t / E}}{12(1-\nu^2)(b_0 / t_g)^2} = \frac{P_{ABAQUS}}{b_E t_g} \quad (3.1)$$

$$k_g = \frac{12(1-\nu^2)(b_0 / t)^2}{\pi^2 E \sqrt{E_t / E}} \sigma_u \quad (3.2)$$

其中以 Whitmore Section 有效寬度  $b_E$  代替接合板彎折線長度  $b_1$ ， $a_0$  為接合板長、 $b_0$  為接合板寬、 $t_g$  為接合板厚。圖 3.40(a)與圖 3.40(b)為分別對長寬比( $a_0 / b_0$ )1.4 及 1.0 之接合板，及其 Fixed-Free 挫屈模式下之應力及變形。圖 3.41 為兩種尺寸之接合板相對不同接合區長度 (SL=370,  $b_0 / c=1.75$ ; SL=300,  $b_0 / c=1.6$ ; SL=230,  $b_0 / c=1.45$ ) 根據 Fixed-Free 挫屈模式下之強度 (表 3.11)，所繪出的  $K_g$  值關係圖，設計接合板未加勁下之強度可以圖 3.41 為標準。

圖 3.42(a)及(b)分別為長寬比( $a_0 / b_0$ ) 1.4 及 1.0 之接合板在不同板厚及

接合區長度共 18 組分析中，與無旋轉束制與旋轉束制下面外挫屈強度與預測強度之比值。其中圖 3.42(a)  $P_{cr,CC}$  為根據圖 3.41 之  $K_g$  值求得， $K_g$  為經由 ABAQUS 所得到的強度所求得，故  $P_u / P_{cr,CC}$  之比值恆為 1，而其他的公式中， $P_u / P_{cr}$ 、 $P_u / P_{cr,T}$ 、 $P_u / P_{cr,MT}$  及  $P_u / P_{cr,S}$  均高估接合板之強度，而  $P_{cr} / P_{cr,As}$  雖然平均值分別為 1.03，但標準差 0.35， $P_u / P_{cr,Ts}$  之比值平均值 1.83 則低估接合板強度。而在圖 3.42(b) 比較旋轉束制下挫屈強度與預測強度下，則僅有  $P_u / P_{cr,S}$  之預測最精準（平均值及標準差分別為 1.06 及 0.18），其餘預測方法大多低估接合板在旋轉束制下面外挫屈之強度。

圖 3.43 為長寬比 ( $a_0 / b_0$ ) 為 1.4 及 1.0 之接合板在板厚 12 mm 及 20 mm 下 ( $b_0 / c = 1.75$  和 1.45)、長寬比 ( $a_0 / b_0$ ) 為 1.2，板厚 12 mm 及 20 mm 下 ( $b_0 / c = 1.7$  和 1.5) 及長寬比 ( $a_0 / b_0$ ) 為 1.4 但加大接合板尺寸，板厚 8 mm、16 mm 及 25 mm 下 ( $b_0 / c = 1.6$ ) 之改變各種不同參數之接合板共 15 組分析在 Fixed-Free 挫屈模式下強度與預測強度之比值，其中  $P_u / P_{cr,CC}$  之比值最接近 1，而其他公式之比值則與圖 3.42(a) 相近。因此以板公式預測接合板在 Fixed-Free 下挫屈強度 ( $K$  值參照圖 3.41) 可得到精準的結果。

### 3.7.3 降伏力之探討

在前幾節的分析中，定義接合板之降伏力  $P_y$ ，若加勁後接合板強度強度低於  $P_y$ ，則此接合板為彈性挫屈；反之若接合板加勁後強度高於  $P_y$ ，則定義此接合板為非彈性挫屈。圖 3.44 為在前幾節的研究中接合板強度達降伏力之情況下，降伏力  $P_y$  與經由 Whitmore Section 計算的降伏力  $P_w$  之比較，其中原尺寸 (GL1) 接合板  $P_y / P_w$  之比值平均為 1.05，標準差 0.025；加大尺寸 (MGL1) 接合板  $P_y / P_w$  比值平均為 0.76，標準差 0.009；接合板接合區在接合板彎折線上 (GL2)， $P_y / P_w$  比值平均為 1.18，標準差 0.037；接合板接合區短於彎折線 (GL3) 時， $P_y / P_w$  比值平均為 1.46，標準差 0.015。

$P_y/P_w$  中只有原尺寸 (GL1) 之接合板共 49 組降伏力平均比值 1.05 接近 1。故以 Whitmore Section 無法準確計算計算接合板的降伏強度  $P_y$ 。圖 3.45 為接合板降伏力  $P_y$  與經由 Thornton (1984) 法所計算的降伏力  $P_T$  比較，原尺寸接合板 (GL1) 之  $P_y/P_T$  比值平均為 1.06，標準差 0.025；加大尺寸接合板 (MGL1)  $P_y/P_T$  比值平均為 1.01，標準差 0.014；接合板接合區在接合板彎折線上時 (GL2)， $P_y/P_T$  比值平均為 1.01，標準差 0.03；接合板接合區短於彎折線時 (GL3)， $P_y/P_T$  比值均小於 1，平均比值 0.96，標準差 0.01。經由 ABAQUS 分析所得到的降伏強度  $P_y$  與  $P_T$  比值在任何條件下均接近 1，因此以 Thornton (1984) 的方法可以準確計算計算接合板的降伏強度。

### 3.7.4 接合板加勁方式之探討

在前幾節的分析研究中，加勁接合板對於強度將有所提升，其中若加勁板對接合板能提供有效的面外束制，則接合板達降伏強度仍可繼續上升直到發生非彈性挫屈。

研究加勁板的長寬厚尺寸對於接合板強度的影響，定義  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  三個參數簡化接合板的研究。其中  $\beta_1$  為加勁板長度與接合板短邊長度的比值 ( $L_s/L_g$ )， $\beta_2$  為加勁板寬度與接合板厚度的比值 ( $b_s/t_g$ )， $\beta_3$  為加勁板厚度與接合板厚度之比值 ( $t_s/t_g$ )。除了上述三個參數外，亦針對接合板之厚度及尺寸進行討論。圖 3.46 至圖 3.50 為討論各參數和接合板強度  $P_u$  與 Thornton 降伏力  $P_T$  之比值 ( $P_u/P_T$ ) 關係，其中原尺寸為 GL1，GL2 為接合區長度在接合板彎折線上，以及接合板接合區長度短於其彎折線 (GL3)，加大尺寸接合板則為 MGL1。

圖 3.46 至圖 3.49 為比較加勁板之參數  $\beta_2$  與  $\beta_3$  對接合板強度的影響 ( $\beta_1 = 0.9$ )，可發現在  $\beta_3$  大於 0.75 之後 (即加勁板厚為 0.75 倍接合板厚) 相對於接合板強度之改變則較小，在 16 mm 厚及 25 mm 厚接合板亦可發現此趨

勢，且從圖 3.46 可發現，若欲使接合板  $P_u/P_T$  比值大於 1，則在  $t_g$  為 8 mm 下， $\beta_2$  與  $\beta_3$  分別須大於 20 及 1；而在  $t_g$  為 16 mm 下， $\beta_2$  與  $\beta_3$  分別須大於 10 及 0.75；在  $t_g$  為 25 mm 下， $\beta_2$  與  $\beta_3$  則只須大於 5 及 0.5 即可使比值大於 1。在接合板接合區長度在彎折線上（圖 3.47），接合板接合區在彎折線外（圖 3.48），及加大尺寸下之接合板（圖 3.49）均發現如圖 3.41 所示之趨勢。

圖 3.50 至圖 3.53 為四種接合板形式下，比較加勁板長度效應（ $\beta_1$ ）與接合板強度之關係（ $\beta_2$  固定為 10），以圖 3.50 之原尺寸為例，在任何接合板厚下（8 mm、16 mm 及 25 mm） $\beta_1=0.9$  與  $\beta_1=0.6$  之差距均很明顯，尤其在板厚 8 mm 下，更隨著  $\beta_3$  之增加而加大其差距。在接合板接合區長度在彎折線上（圖 3.51），接合板接合區在彎折線外（圖 3.52），及加大尺寸下之接合板（圖 3.53）均發現如圖 3.50 所示之趨勢。

圖 3.54 為比較接合板在不同接合板厚  $t_g$  下與比較不同尺寸下強度之效應，其中每張圖各代表  $\beta_1 (=0.9)$  與  $\beta_3$  固定時改變不同的  $\beta_2$  值。以  $\beta_3=1$  為例[圖 3.54(c)]，在  $\beta_2=5$  時，接合板不同尺寸下相對於  $t_g$  之強度，可發現接合板厚度  $t_g$  越厚，則強度與降伏力  $P_T$  之比值越高，亦即越大之接合板厚加勁板越厚越容易達到降伏力  $P_T$ ，在這四條不同尺寸之曲線下，GL1 與 GL2 及 GL3 之  $P_u/P_T$  與厚度  $t_g$  關係之趨勢接近，此時的接合板厚在 16 mm 以上可達降伏力  $P_T$ ；而 MGL1 則偏低，且只有在  $t_g$  為 25 mm 時，強度方能達降伏力，且與其他三種情形相差甚多。在  $\beta_2=10$  下，加大尺寸接合板之  $P_u/P_T$  比值在  $t_g=16$  mm 及 25 mm 下與其他三種尺寸接近，但是在  $t_g=8$  mm 時仍偏低，加勁板寬為 10 倍接合板厚下，大多數的接合板強度均可大於  $P_T$ ，但 MGL1 在  $t_g=8$  mm 時仍與其他三者相差較多。在  $\beta_2=20$  下，加大尺寸接合板之  $P_u/P_T$  比值則與其它三種尺寸接近。

因此，影響接合板加勁後之強度，加勁板之長度參數（ $\beta_1$ ）、接合板厚

度、加勁板寬度參數 ( $\beta_2$ ) 對接合板強度影響較大，接合板尺寸效應之影響則視加勁板之寬度 ( $\beta_2$ ) 而改變，若加勁板寬度足以提供接合板抵抗面外及局部挫屈強度，則影響較小，反之則會大大降低其強度。

對於接合板加勁板之設計，若使接合板能承受降伏強度 ( $P_T$ ) 以上之強度，且能提供有效之面外挫屈束制，加勁板長度應盡量與接合板自由端長度接近，因此本研究建議長度參數  $\beta_1$  與其自由端長度 ( $L_g$ ) 比值應大於 0.9。寬度與厚度參數  $\beta_2$  及  $\beta_3$  則如圖 3.55 所示，其中的 GL1 為原尺寸，GL2 為接合板接合區長度在彎折線上，兩種一般工程師較常設計的情形下，相對不同的  $\beta_3$  所需要的  $\beta_2$  值，若符合圖 3.54 之加勁板設計則接合板之強度將可達到降伏強度  $P_T$  之上才產生非彈性挫屈破壞。

### 3.7.5 結論

經過本章之研究，對於接合板之設計提出下列結論

1. 接合板之降伏強度以 Thornton 法計算可得到準確的預測，以本章所研究的 Chevron-Brace 雙斜撐式接合板，自由體斷面宜取在螺栓接合區端部抵水平位置，亦即兩螺栓端部中心相連之區域。
2. 若未加勁接合板無法符合強度需求，則先利用 Thornton (1984) 法算出接合板降伏力  $P_T$ ，加勁板參數之設計建議最小值  $\beta_1 = 0.9$  及  $\beta_3 = 1$  下， $\beta_2$  須符合圖 3.55 之規定。

## 第四章 對角型斜撐構架系統接合板分析

### 4.1 前言

在上一章的研究中，發現接合板無法發揮預期強度下而之面外挫屈為 Fixed-Free 模式，本章將 Tsai et al. (2004) 研究的三層樓試驗中的一樓之雙斜撐式構架改為單斜撐式構架，一樓上方接合板由接合區僅與梁接之雙軸式 (Chevron-Brace) 接合板變成接合區與梁柱接合之單軸式 (Single-Brace) 接合板，研究接合板在 Fixed-Free 模式下之挫屈行為。4.2 節為接合板設計及模型建立；4.3 節則利用第二章的文獻回顧中的壓力強度計算公式計算接合板強度；4.4 節分析未加勁下接合板強度；4.5 節為接合板加勁後之強度探討。4.6 節為本章分析結果的討論。

### 4.2 構架模型建立與設計

圖 4.1 為一跨長 7 公尺，高 3.62 公尺之構架，CFT 柱以 C3D8R 固體元素模擬，並利用分割 (Partition) 方式將每支柱子分成鋼柱與核心混凝土部份。梁、接合板則以 S4R 板元素模擬，而接合板接合區之螺栓則利用 Rigid Link 模擬。本章之分析直接採用局部模型 (即拿掉 BRB，改用直接在接合區之 T 型鋼上施力) 進行分析，局部模型為構架中梁、柱、上方接合板以及接合板接合區之 T 型鋼部分，局部模型之材料性質與第三章同 (表 3.1)。

使用 AISC-LRFD (2002) 之 Uniform Force Method 設計接合板，依照接合板尺寸設計原則，若接合板與梁柱接合區上沒有彎矩，接合板與梁柱接合中心之交點必通過軸力方向，如圖 4.2(a) 所示，因此設計梁接合區中心與柱之距離 ( $\alpha$ ) 為 398 mm，柱接合區中心與梁距離 ( $\beta$ ) 為 98 mm，則接合板與梁接合長度為  $2\alpha$  (796 mm)，與柱接合之長度為  $2\beta$  (197 mm)，接合板與 T 型鋼接合之螺栓仍維持五排。接合板與梁柱間的作用力，依照

Uniform Force Method 定義為：

$$H_b = \frac{\alpha}{r} P = 0.59P \quad (4.1)$$

$$V_b = \frac{e_b}{r} P = 0.34P \quad (4.2)$$

$$H_c = \frac{e_c}{r} P = 0.29P \quad (4.3)$$

$$V_c = \frac{\beta}{r} P = 0.14P \quad (4.4)$$

其中  $\alpha$  為接合板與梁接合區中心至柱的距離， $\beta$  為接合板與柱接合區中心至梁的距離， $e_b$  為梁之一半深度， $e_c$  為 CFT 柱之半徑，而

$$r = \sqrt{(e_c + \alpha)^2 + (e_b + \beta)^2} \text{。}$$

檢核接合板挫屈強度，使用式 (2.2) 所示柱公式，有效柱長度  $L_c$  以  $L_1$  (302 mm)、 $L_2$  (420 mm)、 $L_3$  (-81 mm)，如圖 4.2(b) 所示，三個長度之平均值之 214 mm，有效長度係數  $K$  值則因考慮面外挫屈，故使用 1.2。而 Whitmore Section 有效長度  $b_E$  因超過實際結構部份，故僅計算 375 mm，接合板厚 16 mm 代入式 (2.2)，得到接合板之強度為 1621 kN，較 BRB 強度 1653 kN 低，為使接合板強度符合規範強度，將接合板長自由端方向改為水平[圖 4.3(a)]，接合板與柱接合之中心長度  $\beta$  也由 98 mm 增加為 189 mm ( $\beta'$ )，接合板與梁接合之中心長度  $\alpha$  沒有改變，依照 AISC-LRFD (2002) 之規定，接合板與接合區力量不變，改變柱接合區之長度，接合板與柱之間將產生彎矩[圖 4.3(a)]，如下所示

$$M_c = H_c(\beta' - \beta) = 0.29P(189 - 98) = 26.4P \quad (4.5)$$

改良後 Whitmore Section 之有效寬度為 414 mm [圖 4.3(b)]，挫屈強度使用 AISC-LRFD(2002) 柱公式計算，強度為 1824 kN，較 BRB 之極限強度 1653 kN 高。

### 4.3 接合板強度簡核

#### 降伏強度檢核

在上一章的研究中，定義接合板的挫屈可分為強度小於降伏強度的彈性挫屈及強度大於降伏強度的非彈性挫屈，而降伏力之定義則以 Thornton (1984) 法計算，此方法考慮了軸力、剪力及彎矩對接合板降伏強度的影響。在第三章中，雙斜撐式 (Chevron-Brace) 接合板之降伏力的臨界斷面為如圖 3.7 之 Section A-A，計算斷面上之力量及彎矩可直接由力平衡即可求得。在本章中，單軸式接合板的臨界斷面上之力量必須先以 Uniform Force Method 求得接合板與梁柱接合區之力量，再依不同的斷面取自由體，力平衡計算即可求得此斷面上之軸力  $N$ 、彎矩  $M$ 、剪力  $V$ 。以圖 4.4(b) 之 Section A-A 所切出來的自由體為例，在上一節中已求得接合板與梁接合區的力量  $H_b$  與  $V_b$ ，依照 Uniform Force Method 作用力平均分布在接合區上之概念，可求得自由體與梁接合區之水平力 ( $H_b'$ ) 及垂直力 ( $V_b'$ )、如圖 4.4(b)，其作用力分別為：

$$H_b' = \frac{249}{796} H_c = 0.18P \quad (4.6)$$

$$V_b' = \frac{249}{796} V_c = 0.1P \quad (4.7)$$

利用力平衡，A-A 斷面上的軸力與水平力

$$\sum F_x = 0 \quad N \sin \theta + V \cos \theta + 0.18P - P \sin \theta = 0 \quad (4.8)$$

$$\sum F_y = 0 \quad N \cos \theta - V \sin \theta + 0.1P - P \cos \theta = 0 \quad (4.9)$$

解式(4.8)與式(4.9)可得  $N=0.8P$ ， $V=0.01P$ 。再利用彎矩平衡，可求出斷面上之彎矩。

$$\sum M_o = 0 \quad M + 57N - 229N - 249V_b' = 0 \quad M = 26.4P \quad (4.10)$$

依照式 (2.11)、式 (2.12)、式 (2.13) 及表 4.1 之尺寸可求得 A-A 斷面在 16 mm 厚接合板下之降伏剪力 1374 kN、降伏軸力 2379 kN、塑性彎矩 256350 kN-mm。將  $V$ 、 $N$ 、 $M$  代入式 (2.10) 中，可得到如式 (4.11) 所示之關係式。

$$\left(\frac{0.8P}{0.9 \times 2379}\right)^2 + \left(\frac{18.4P}{0.9 \times 256350}\right) + \left(\frac{0.1P}{0.9 \times 1374}\right)^4 = 1 \quad (4.11)$$

利用試誤法可得到接合板在 B-B 斷面下降伏軸力為 2420 kN；而以 B-B 斷面所計算出來的降伏力為 2587 kN。因此，以不同的斷面計算為會得到不同的降伏力，而本章的單斜撐式接合板最小降伏力之臨界斷面為接合板與 BRB 接合區之最後一排螺栓中心上與軸力方向垂直之斷面 (Section A-A)。  $t_g$  為 8 mm 及 25 mm 時，降伏強度計算如表 4.1 所示，分別為 1210 kN 及 3781 kN。



### 挫屈強度檢核

圖 4.5(a) 為依 Whitmore Section 下，利用柱子公式所定出的長度  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  及  $L_{max}$ ，其中 AISC-LRFD 法所使用的有效長度  $L_c$  為  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之平均，有效長度係數  $K$  為 1.2；使用 Thornton (1984) 法計算接合板強度之  $L_c$  為  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之最大值  $L_2=420$  mm，有效長度係數為 0.65；使用 Astanteh 法所定義的  $L_c$  為 Whitmore Section 在沿著軸方向與梁柱之最長距離  $L_{max}=480$  mm；以 Dowswell 法則因定義單軸式接合板臨界厚度為 3.8 mm 小於接合板厚度，故接合板之有效柱長  $L_c$  為  $L_c$  為  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之平均  $L_{avg}=480$  mm，且有效長度係數  $K$  為 0.5。圖 4.5(b) 為使用 Modified Thornton 法，其  $L_c$  為  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三個長度之最長者  $L_2=356$  mm，依 45° 分散角所定出的斷面因超出接合板範圍，故有效寬度  $b_E$  僅計算 594 kN，有效長度係數為 0.65。表 4.2 為接合板分別使用各種柱公式檢核的接合板之挫

屈強度。

圖 4.6 為使用 Sheng et al. (2002) 之板公式[式 (2.14)]所得到的挫屈強度之所需尺寸示意圖，接合板厚 8 mm、16 mm 及 25 mm 下所得到的  $K_g$  值分別為 13.7、5.8 及 2.8，挫屈強度分別為 1123 kN、3545 kN 及 6189 kN。圖 4.7 為使用 Brown (1988) 之方法所預測的長端局部挫屈之尺寸示意圖，三種板厚根據式 (2.18) 下之強度分別為 1125 kN、2250 kN 及 3516 kN。

### 接合板厚檢核

在上一章的分析中，接合板不論多厚均會產生面外挫屈，局部挫屈則視接合板尺寸與厚度決定是否會產生，本章將持續觀察接合板厚之效應。表 4.3 為使用式 (2.16)、式 (2.19)、式 (2.24) 所計算之接合板臨界厚度值，其中以 Sheng et al. (2002) 之公式，利用臨界自由端長厚比 (2.16) 檢核接合板長自由端是否發生局部挫屈之臨界厚度為 14 mm；以 Yamamoto et al. (1988) 之方法 (2.19) 檢核接合板在短邊產生挫屈之臨界厚度為 7.65 mm；以 Dowswell and Barber (2004) 之方法 (圖 4.8) 檢核接合板是否產生面外挫屈之臨界厚度為 3.8 mm。欲分析的板厚分別為 8 mm、16 mm 及 25 mm。

## 4.4 未加勁分析

本節對接合板進行未加勁之分析，其中包括不施加初始面外變位直接對接合板施力下檢核其挫屈強度；施加第一模態 (Fixed-Free) 之初始面外變位下接合板之挫屈強度；以及施以初始面外變位再對構架側推一位置後對接合板施力分析。圖 4.9(a) 為接合板之第一挫屈模態；圖 4.9(b) 為接合板之第二挫屈模態。表 4.4 則為各試體分析結果，其中 FG16I08D1 代表接合板厚 16 mm，I08 則為初始面外變位 0.8 mm，D1 則為接合板在施加初始面

外變位後沿著 x 方向側推柱長 1% 距離，因柱高 3.62 m，故 1% 側推量為 3.62 cm。

#### 4.4.1 無樑柱效應

##### 初始面外變位分析

接合板長端長度為 796 mm，依照受壓桿件不平整度為桿件長度之千分之一的原則，其容許最大不平整度為 0.8 mm，因此對接合板施加第一模態初始面外變位後，對於接合板各施加 0.08 mm (FG16I008)、0.8 mm (FG16I08)、4 mm (FG16I4)，進行壓力分析，力量作用在接合區之 T 型鋼上，可得到挫屈強度分別為 1065 kN、1050 kN、935 kN (表 4.4)，三種初始面外變位下接合板挫屈強度均小於降伏力  $P_T=2420$  kN (表 4.1)。圖 4.10 為 8mm、16 mm 及 25 mm 三種厚度之接合板厚分別在 0 mm 及 0.8 mm 初始面外變位下之軸力與軸位移及軸力與面外位移之關係。施加初始面外變位之接合板挫屈形式均為 Fixed-Free，降伏區域由梁端至接合區端部，以 FG16I08 為例，挫屈時之應力如圖 4.11(a) 所示，接合板降伏區分佈在接合區端部與梁之間 [圖 4.11(b)]。8 mm 及 25 mm 厚之接合板在強度分別為 316 kN 及 2872 kN，強度均小於降伏力  $P_T$  (三種厚度之降伏強度分別為 1210 kN、2420 kN 及 3781 kN) 及 AISC-LRFD 所規定的強度  $P_{cr}$  (三種厚度之挫屈強度分別為 463 kN、1830 kN 及 3257 kN)，依上一章的定義強度在  $P_T$  下，則接合板為彈性挫屈。

##### 無初始面外變位分析

接合板在板厚 8 mm、16 mm 及 25 mm 下不施加初始面外變位直接施壓力之接合板強度分別為 1056 kN (FG8I0)、2907 kN (FG16I0)、4902 kN (FG25I0)，如表 4.5 所示。軸力與軸位移及軸力與面外位移之關係如圖

4.10 所示，其中 FG8I0 則在達降伏力 ( $P_T=1210$  kN) 之前即產生挫屈破壞，故軸力與軸位移關係在挫屈後力量即馬上下降，而 FG16I0 及 FG25I0 在到達降伏後軸力與軸位移呈雙線性行為上升直到產生挫屈破壞為止。FG16I0 及 FG25I0 降伏情形如圖 4.12(a)及(b)所示。長端挫屈之降伏應力主要分佈在接合區端部與梁及長自由端間[圖 4.12(c)及(d)]。

#### 4.4.2 梁柱效應的影響

先對接合板施加第一模態之初始面外變位 0.8 mm 後再進行側推，側推距離  $D_x$  分別為梁中心移動距離為柱高之 0.5%、1%、2%，然後再對接合板施加壓力進行分析，構架分別側推 0.5%、1%及 2%下施加壓力分析得到之挫屈強度分別為 1135 kN (FG16I08D05)、1154 kN (FG16I08D1)、1212 kN (FG16I08D2)，圖 4.13(a)為 FG16I08D1 軸力與軸位移曲線，因挫屈強度均為小於接合板降伏力  $P_T=2420$  kN，因此所有曲線均在達最大值（彈性挫屈）後直接下降，故均為彈性挫屈，且降伏應力之分布情形[圖 4.14(b)及(c)]，與不進行側推之分析 (FG16I08) 相同，均分佈在梁端至接合板接合區端部，此情形在板厚 8 mm 及 25 mm 下亦如此。梁柱作用對接合板在施加初始面外變位下，挫屈模式仍保持 Fixed-Free。8 mm 厚之接合板強度增加為 3% (FG8I08D05)、9% (FG8I08D1) 及 11% (FG8I08D2)；16 mm 之板厚強度為 8% (FG16I08D05)、10% (FG16I08D1) 及 15% (FG16I08D2)，25 mm 厚之接合板為 1.3% (FG25I08D05)、2.3% (FG25I08D1) 及 6.3% (FG25I08D2)。造成強度增加之原因主要在構架側推後，接合板之初始面外變位因梁柱間角度增加之效應[圖 4.14(a)]造成初始面外變位值降低，而導致接合板受壓強度上升。

## 4.5 加勁後分析

在上一章的研究中，發現接合板在 Fixed-Free 之挫屈模式下，梁柱效應將對接合板強度有少許提升，故在本節對加勁版的研究分析中，將不考慮梁柱效應之影響（即無側推位移），在施以 0.8 mm 之第一模態初始面外位移進行有限元素分析。

接合板的加勁板長均為 0.9 倍的接合板自由端長度，搭配 5、10、15、20 倍接合板厚 ( $t_g$ ) 共四種不同的加勁板寬度  $b_s$ ，加勁板厚則採用 0.5、0.75、1、及 1.5 倍接合板厚。測試接合板在 8 mm、16 mm、25 mm 三種厚度下接合板依 Fixed-Free 挫屈模態下的強度及行為。各加勁板之規格及強度如表 4.5 所示，以 FG16S16A1 為例，表示接合板厚 16 mm (FG16)、加勁板厚 16 mm (S16)，A 代表加勁板長度  $L_s = 0.9L_g$ ；1-4 為加勁板寬各為 5、10、15、20 倍接合板厚。

圖 4.15-圖 4.17 分別為接合板厚 8 mm、16 mm 及 25 mm 時軸力與軸位移及軸力與面外位移關係，接合板加勁後可分彈性挫屈與非彈性挫屈兩種情形。其中 FG8S8A1 及 FG16S8A1 為彈性挫屈，強度分別為 1057 kN 及 2237 kN；非彈性挫屈例子為 FG8S8A4、FG16S16A2、FG25S12A1 及 G25S25A2，強度分別為 1319 kN、3252 kN、4488 kN 及 6032 kN，其中接合板厚為 25 mm 者，在 16 組加勁分析中均可達到降伏力  $P_T = 3781$  kN 後才挫屈（圖 4.17）。圖 4.18(a) 為 FG16S8A1 之應力及變形，接合板降伏區域佈 [圖 4.18(b)] 集中在接合區端部與梁附近；反之，若加勁足以使接合板到達降伏後才發生非彈性挫屈，以 FG16S16A2 為例，接合板會先產生如圖 4.18(c) 及 (d) 所示之降伏區域，之後方強度持續增加至產生非彈性挫屈 [圖 4.18(e) 及 (f)]；而其中 FG8S8A4、FG16S16A2、G25S25A2 之接合板降伏力  $P_y$  分別為 1263 kN、2579 kN、4109 kN，降伏力與 4.2 節利用 B-B 斷面計算出來的最降伏力  $P_T$  (為 1210 kN、2420 kN 及 3781 kN，分別對應到 8 mm、16 mm

及 25 mm 三種接合板厚) 接近, 顯示計算接合板之降伏力, 應找出計算接合板最小降伏力斷面, 可準確估計出接合板之降伏力  $P_T$ 。

## 4.6 分析結果討論

本節將本章之構架分析結果整合第三章之分析, 其中包括未加勁與加勁接合板之強度之分析及比較。表 4.6 至表 4.8 為接合板在面外挫屈、長端局部挫屈及旋轉束制下面外挫屈強度與 Whitmore 降伏力 ( $P_w$ )、Thornton 降伏力 ( $P_T$ )、及 AISC-LRFD ( $P_{cr}$ )、Thornton ( $P_{cr,T}$ )、Modified Thornton ( $P_{cr,MT}$ )、Astaneh ( $P_{cr,As}$ )、Tsai ( $P_{cr,Ts}$ )、Dowswell ( $P_{cr,Do}$ )、Sheng ( $P_{cr,S}$ ) 及 Brown ( $P_{cr,B}$ ) 等各方法所計算的挫屈強度之比值。其中 G16L1、G16L2、G16L3、MG16L1 分別代表雙斜撐式接合板中的原尺寸、接合區在接合板之彎折線上、接合區在接合板之彎折線外及加大尺寸等情形在接合板厚 16 mm 下之情形。而 FG16 則為單斜撐式接合板之情形。

### 4.6.1 無加勁下強度與預測強度之比較

#### 面外挫屈強度與預測強度之比較

在上一章中比較 AISC 規範及先前學者之研究, 可發現利用這些公式無法準確預測接合板在 Fixed-Free 模式下挫屈強度。若接合板破壞模式為長端局部挫屈或施加施力端之 T 型鋼旋轉束制下, 使用 Sheng et al. (2002) 之板公式可得到不錯的結果。

表 4.6 為所有未加勁下接合板在受初始面外變位下以 Fixed-Free 模式面外挫屈之強度與各公式預測強度之比值。這些比值中, 其中以 Astaneh (1998) 的方法所得到的平均值為 1.22, 而  $P_u/P_{cr,As}$  之標準差為 0.74, 其中在板厚 8 mm 之情形誤差較大較容易低估接合板的強度。而與 AISC-LRFD (2002) 預估強度之比值  $P_u/P_{cr}$  平均比值為 0.6, 標準差 0.29,

僅在 GL3 之預測值較接近 1，其他挫屈公式所得到的比值中，除了  $P_{cr,Ts}$  之外均高估接合板在 Fixed-Free 挫屈模式下的強度。而所有強度均小於  $P_T$ ，顯示這些形式之接合板在 Fixed-Free 挫屈模式下均為彈性挫屈。而其強度與  $P_w$  之比值  $P_u/P_w$  亦均小於 1。

### 直接施力強度之比較

表 4.7 為直接施力下造成的長端局部挫屈下強度與各公式預測強度之比值。這些比值中以 Sheng et al. (2002) 板公式強度比值 ( $P_u/P_{cr,S}$ ) 為 1.11，標準差為 0.25。故以板公式預測接合板長端局部挫屈可得到精準的結果。挫屈強度與規範 AISC-LRFD 之強度比值 ( $P_u/P_{cr}$ ) 平均為 2.38，標準差 1.55，與  $P_u/P_{cr,T}$  比值均在 MG16L1 及 MG25L1 接近 1，但大多低估長端挫屈強度。其他的挫屈公式的比值中，以  $P_u/P_{cr,MT}$  及  $P_u/P_{cr,MT}$  之預估較準確，但會出現誤差較大的情況，例如  $P_u/P_{cr,MT}$  在 G8L3 及 G25L3 會出現過於低估的情形導致偏差值較大。而以  $P_u/P_{cr,As}$  及  $P_u/P_{cr,Ts}$  則會對接合板造成強度過於低估的結果，尤其在板厚 8 mm 之情況因預測強度過小造成比值過大。而  $P_u/P_{cr,D}$  則普遍低估接合板強度。因此除了以 Sheng et al. (2002) 之板公式預測強度可得到較精確的結果之外，其他方法所預測的結果均不佳。

### 旋轉束制下面外挫屈

表 4.8 為所有接合板在接合區施力端受初始面外變位下，施加第一模態初始面外變位（千分之一長端長度）下，接合板強度與預測強度之強度比值，其中以 Sheng et al. (2002) 之比值 ( $P_u/P_{cr,S}$ ) 平均 0.94 最接近 1.0，而其標準差亦僅有 0.16。其他方法中，以 Modified Thornton 法計算出來的強度比值 ( $P_u/P_{cr,M}$ ) 平均為 1.12，以及 Brown (1988) 的方法所計算的強度比值 ( $P_u/P_{cr,B}$ ) 平均為 1.21 均接近挫屈強度，標準差分別為 0.54 與 0.29，其中  $P_u/P_{cr,MT}$  在 G8L3 有較明顯的低估情形。而以 AISC-LRFD (2001) 之計

算之強度比值 ( $P_u/P_{cr}$ ) 平均為 2.13，標準差 1.57。其他的挫屈公式中均有對接合板在旋轉束制下面外挫屈強度低估的情形。故若接合板有良好的旋轉束制，以 Sheng et al. (2002) 之板公式可準確預測接合板強度。

經過本章之分析結果，在接合板破壞模式為旋轉束制下面外挫屈及長端局部挫屈下，以 Sheng et al. (2002) 所提的板公式可得到相當好的結果，與第三章相同，但是在 Fixed-Free 挫屈模式下以這些公式仍無法準確預測接合板之強度，而且沒有一個公式可以在不同情況下皆可準確預測接合板在 Fixed-Free 挫屈模式下的強度。

#### 4.6.2 接合板加勁方式之探討

為了研究加勁板的長寬厚尺寸對於接合板強度的影響，定義  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  三個參數簡化接合板的的研究。其中  $\beta_1$  為加勁板長度與接合板短邊長度的比值 ( $L_s/L_g$ )， $\beta_2$  為加勁板寬度與接合板厚度的比值 ( $b_s/t_g$ )， $\beta_3$  為加勁板厚度與接合板厚度之比值。而在本章研究中， $\beta_1$  皆為 0.9，

圖 4.19 為接合板強度與加勁板寬度及厚度參數  $\beta_2$  與  $\beta_3$  之關係，加勁板之厚度越大 ( $\beta_3$  越大) 接合板強度越高，其中在  $\beta_3$  大於 0.75 時，接合板強度增加之趨勢相對減小，而欲使接合板之強度能在降伏強度  $P_T$  以上， $t_g$  為 8 mm 時， $\beta_2$  需達 20， $t_g$  為 16 mm 時， $\beta_2$  需為 10， $t_g$  為 25 mm 時， $\beta_2$  之值則只要 5 即可。圖 4.20 為接合板強度與接合板厚  $t_g$  之關係，當  $t_g$  越大，且其  $P_u/P_T$  之比值強度與  $t_g$  之關係呈線性，當  $\beta_2 \geq 10$ 、 $\beta_3 \geq 1$  時， $P_u/P_T$  之比值與  $t_g$  呈線性關係。

圖 4.21 為根據不同的  $t_g$  及  $\beta_3$  下及三種一般工程師較常設計之接合板形式下，欲始接合板強度分別達到  $P_T$  與  $P_w$  的所需的  $\beta_2$  值，其中的  $\beta_1$  均為 0.9，GL1 代表原尺寸接合板，GL2 代表接合區尺寸在接合板彎折線上，而 FGL1 則代表本章研究的單斜撐式接合板。圖 4.21(a) 為分別使此三種接合板形式

達到  $P_T$  所需要的  $\beta_2$ ，圖 4.21(b) 為確保接合板達  $P_T$  所建議之  $\beta_2$  值，需求值由相同的  $t_g$  及  $\beta_3$  下內插所得，建議值為取三種接合板形式下所需的  $\beta_2$  中較大值。



## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本研究共分析一組含挫屈束制斜撐構架系統及五組不同形式的接合板局部模型，其中的構架分析找出接合板在產生面外挫屈時整個系統及接合板的行為。而接合板局部模型則對於未加勁以及加勁的接合板做一系列的參數研究，未加勁之接合板分別討論在不同尺寸、形狀、接合區長度及厚度下面外挫屈之強度；而加勁板的設計上則分別給予長度  $0.6L_g$  與  $0.9L_g$ 、寬度  $5-20t_g$  及  $0.5-1.5t_g$  之厚度，以找出使接合板強度能達到降伏後挫屈之加勁方式。

針對三層樓構架的實驗現象及上述的分析與研究，可以歸納出以下幾點結論：

1. 在三層樓構架試驗中，當接合板產生面外挫屈時 BRB 仍然保持彈性行為，且整個 BRB 斜撐壓力端的面外變形模式與 Tsai et al. (2004) 的研究相同。使接合板發生此預期外的面外挫屈，強度無法達到 AISC-LRFD 規範之規定，其挫屈行為是 Fixed-Free 模式。在接合板局部模型中可驗證不須對接合板施加旋轉束制即可使接合板的面外挫屈行為 Fixed-Free 模式，且強度與挫屈時面外位移相近。
2. 以 AISC-LRFD、Thornton、Astaneh、Tsai 及 Dowswell 等研究之柱公式無法有效預測接合板在受 Fixed-Free 模式下面外挫屈下之強度。若接合板挫屈模式為長端挫屈或完全旋轉束制下面外挫屈（一端固定一端旋轉束制但可產生面外位移），則接合板之強度預測以 Sheng et al. (2002) 可得到精確的結果。接合板挫屈模式為 Fixed-Free 面外挫屈時，以板公式 [式 (3.1) 與 (3.2)] 及圖 3.41 對於接合板長寬比 1.0-1.4 可得到精確的強度預測結果，其中板公式之有效寬度以 Whitmore Section 代替接合板之彎折線（即對角線）長度。

3. 接合板之軸力與軸位移關係曲線，若強度超過其降伏力曲線將呈雙線性增加直到接合板產生挫屈，降伏強度  $P_T$  以 Thornton (1984) 所建議的方法來計算，其中臨界斷面 (Critical Section) 之選定，雙軸式接合板 (Chevron-Brace) 為最後一排螺栓中心之連線，影響降伏強度之因素為剪力與彎矩。若為單軸式接合板則以通過最後一排螺栓中心，且與軸力方向垂直之斷面為其臨界斷面。一般而言若加勁足以使接合板達降伏後才挫屈，接合板直到力量位移曲線開始下降 (達極限力) 後才開始產生面外變位；反之若無法達降伏強度，在挫屈時即產生面外變位。
4. 接合板設計步驟：利用板公式之概念，並以接合板接合區中心至梁柱之最短距離  $c$  與接合板垂直端長度之比值 ( $b_o/c$ )、接合板尺寸及厚度為參數，繪出如圖 3.41 之值  $K_g$  預測圖，找出符合尺寸下的接合板未加勁的強度，若未滿足強度需求，可利用 Thornton (1984) 法求出接合板之降伏強度  $P_T$  後，再利用圖 3.55 或 4.21 及來找出接合板加勁後依照不同的厚度所需要的  $\beta_2$ 。



## 參考文獻

1. AISC (2002), Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design, Third Edition, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, Illinois.
2. Bjorhovde, R. and Chakrebari, S. k. (1985), "Tests of Full-Size Gusset Plate Connection," *Journal of Structural Engineering*, ASCE , Vol. 111, NO. 3, March, pp. 63-84.
3. Bjorhovde, R. (1988), "Limit State design Consideration for Gusset Plate," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 9, No. 1, 1988, pp. 61-63.
4. Bleich, F. (1952), "Buckling Strength of Metal Structures." New York: McGraw Hill, 1952.
5. Brown , V. L., (1988), "Stability of Gusseted Connentions in Steel Structures," Ph.D. Dissertation, University of Delaware.
6. Chakrebari, S. k. and Richard, R. M. (1990), "Inelastic Buckling of Gusset Plates," *Structure Engineering Review*, Vol. 2, pp. 13-29.
7. Cheng, J.J.R., and Hu, S.Z. (1994), "Compressive Test of Gusset Plate Connections," *Proceedings, 1987 Annual Technical Session*, Structural Stability Research Council, pp. 191-205.
8. Yam M. C. H. and Cheng, J. J. R. (2002), "Behavior and Design of Gusset Plate Connections in Compression." *Journal of Structural Engineering*, ASCE , , Vol. 58, pp. 1143-1159.
9. Dowswell, B. and Barber, S. (2004), "Buckling of Gusset Plate : Acomparison of Design Equations to Test Data," *Proceeding, 2004 Annual Stability Conference*, March, 2004, Long Beach, California.
10. Thornton, W. A. (1984), "Bracing Connections for Heavy Constructions," *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Third Quarter, pp. 139-148.
11. Thornton, W.A. (1995), "Connections-Art,, Science and Information in the Quest for Economy and Safety," *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.

32, No.4, 4<sup>th</sup> Quarter, pp. 132-144.

12. Gross J.L. and Cheok, G. (1990), "Experimental Study of Gusseted Connection." *Engineering Journal AISC NO. 27 3rd Quater*1990, p.p.89-97.
13. Rabinovitach J.S., Cheng J.J.R. (1993), "Cyclic Behavior of Steel Gusset Plate Connection," *Structure Engineering Report NO. 191* University of Alberta.
14. Richard, Ralph, "Analysis Large Bracing Connection Designs for Heavy Connection," *Proceedings of the 1986 National Engineering Conference*, AISC, Nashville, June 12-14, 1986.
15. Sheng, N., Yam, C. H., and lu, V. P. (2002), "Analytical Investigation and the Design of the Compressive Strength of Steel Gusset Plate Connections," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp. 1473-1493.
16. Vasarhelyi, Desi D., "Test of Gusset Plate Models," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 97, No. ST2, February 1971, pp. 665-678.
17. Walbridge, S. S., Grondin, G. Y., and Cheng, J. J. R. (1998), "An Analysis of the Cyclic Behavior of Steel Gusset Plate Connections," University of Alberta Department of Civil and Environmental Engineering Sructural Engineering Report No. 225, September.
18. Whitmore R. E. (1952), "Experimental investigation of Stresses in Gusset Plate," University of Tennessee Engineering Experiment Station Bulletin No. 16, May.
19. Yam M. C. H., Cheng, J.J.R., and Hu, S.Z (1987), "Elastic Buckling Strength of Gusset Plate Connection." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, NO. 2, Feb 1994, p.p. 538-559.
20. Yam M. C. H., and Cheng J. J. R., (1993), "Experimental Investigation of the Compressive Behavior of Gusset Plate Connections." *Structural Engineering Report NO 194*, University of Alberta.
21. Yamamoto, K., Akiyama, N., and Okumura, T. (1988), "Buckling Strengths of Gusseted Tuss joints," *Jounal of Structrual Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 3, March, pp. 575-591.

22. 蔡克銓、蕭博謙(2004), ”實尺寸三層樓挫屈束制支撐 CFT 柱構架擬動態試驗行為與分析”, 國立台灣大學碩士論文。



## 符號表

$a$	= Long Free Edge of Gusset Plate
$b$	= Short Free Edge of Gusset Plate
$a_0$	= Long Edge of Gusset Plate
$b_0$	= Short Edge of Gusset Plate
$c$	= Distance From the Center of Connection to Beam Boundary
$c'$	= Distance From the Connection to Beam Boundary
$e_b$	= Half Depth of Beam
$e_c$	= the Radius of Column
$F_y$	= the Yielding Stress
$H$	= the Length of Chevron Gusset Plate
$K$	= the Length of Chevron Gusset Plate
$K_g$	= the Length of Chevron Gusset Plate
$L'$	= Free Edge of Chevron Gusset Plate
$L_g$	= Short Edge of Chevron Gusset Plate
$P_T$	= Thornton Yielding Load
$P_w$	= Whitmore Yielding Load
$P_y$	= Yielding Load
$t_g$	= Thickness of Gusset Plate
$t_s$	= Thickness of Stiffener
$\alpha$	= Half of Beam Boundary
$\beta$	= Half of Column Boundary
$\beta_1$	= the Ratio of Stiffener Length and Free Edge
$\beta_2$	= the Ratio of Stiffener Width and Thickness of Gusset Plate
$\beta_3$	= the Ratio of Stiffener Thickness and Thickness of Gusset Plate

表 2.1 以 Whitmore Section 及 Thornton 法計算降伏強度

	$\phi$	$H$ (mm)	$t_g$ (mm)	$D$ (mm)	$b_E$ (mm)	$P_w$ (kN)	$P_T$ (kN)
G8L1	0.9	1281	8	657	414	1143	1130
G16L1	0.9	1281	16	657	414	2287	2260
G25L1	0.9	1281	25	657	414	3573	3531
MG8L1	0.9	1484	8	657	819	2259	1675
MG16L1	0.9	1484	16	657	819	4518	3350
MG25L1	0.9	1484	25	657	819	7059	5200
G8L2	0.9	1281	8	752	334	920	1070
G16L2	0.9	1281	16	752	334	1840	2140
G25L2	0.9	1281	25	752	334	2944	3345
G8L3	0.9	1281	8	848	253	697	1016
G16L3	0.9	1281	16	848	253	1394	2032
G25L3	0.9	1281	25	848	253	2178	3045

表 2.2 以 AISC-LRFD 法計算接合板挫屈強度

Column Equation	$K$	$L_c$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_E$ (mm)	$\lambda_c$	$P_{cr}$ (kN)
G8L1	1.2	176	8	414	1.16	652
G16L1	1.2	176	16	414	0.58	1987
G25L1	1.2	176	25	414	0.37	3374
MG8L1	1.2	42	8	819	0.28	2187
MG16L1	1.2	42	16	819	0.14	4484
MG25L1	1.2	42	25	819	0.09	7040
G8L2	1.2	274	8	334	1.81	247
G16L2	1.2	274	16	334	0.9	1313
G25L2	1.2	274	25	334	0.56	2526
G8L3	1.2	357	8	253	2.35	110
G16L3	1.2	357	16	253	1.18	780
G25L3	1.2	357	25	253	0.74	1735

表 2.3 以 Thornton 法計算接合板挫屈強度

Column Equation	$K$	$L_c$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_E$ (mm)	$\lambda_c$	$P_{cr,T}$ (kN)
G8L1	0.65	289	8	414	1.08	706
G16L1	0.65	289	16	414	0.54	2027
G25L1	0.65	289	25	414	0.34	3401
MG8L1	0.65	217	8	819	0.81	1721
MG16L1	0.65	217	16	819	0.41	4221
MG25L1	0.65	217	25	819	0.25	6865
G8L2	0.65	402	8	334	1.50	359
G16L2	0.65	402	16	334	0.75	1457
G25L2	0.65	402	25	334	0.48	2616
G8L3	0.65	473	8	253	1.76	191
G16L3	0.65	473	16	253	0.88	1010
G25L3	0.65	473	25	253	0.57	1945

表 2.4 以 Modified Thornton 法計算接合板挫屈強度

Column Equation	$K$	$L_c$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_E$ (mm)	$\lambda_c$	$P_{cr,MT}$ (kN)
G8L1	0.65	217	8	651	0.81	1369
G16L1	0.65	217	16	651	0.41	3350
G25L1	0.65	217	25	651	0.25	5461
MG8L1	0.65	217	8	1315	0.81	2757
MG16L1	0.65	217	16	1315	0.41	6767
MG25L1	0.65	217	25	1315	0.25	11049
G8L2	0.65	305	8	511	1.14	819
G16L2	0.65	305	16	511	0.57	2462
G25L2	0.65	305	25	511	0.36	4175
G8L3	0.65	452	8	371	1.69	314
G16L3	0.65	452	16	371	0.85	1513
G25L3	0.65	473	25	253	0.57	1945

表 2.5 以 Astaneh 法計算接合板挫屈強度

Column Equation	$K$	$L_c$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_E$ (mm)	$\lambda_c$	$P_{cr,As}$ (kN)
G8L1	1.2	357	8	414	2.46	166
G16L1	1.2	357	16	414	1.23	1214
G25L1	1.2	357	25	414	0.79	2757
MG8L1	1.2	357	8	819	2.46	327
MG16L1	1.2	357	16	819	1.23	2398
MG25L1	1.2	357	25	819	0.79	5446
G8L2	1.2	423	8	334	2.91	95
G16L2	1.2	423	16	334	1.46	755
G25L2	1.2	423	25	334	0.91	2037
G8L3	1.2	473	8	253	3.25	58
G16L3	1.2	473	16	253	1.63	461
G25L3	1.2	473	25	253	1.02	1412

表 2.6 以 Tsai 法計算接合板挫屈強度

Column Equation	$K$	$L_c$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_E$ (mm)	$\lambda_c$	$P_{cr,Ts}$ (kN)
G8L1	2.0	289	8	414	3.32	92
G16L1	2.0	289	16	414	1.66	737
G25L1	2.0	289	25	414	1.05	2290
MG8L1	2.0	217	8	819	2.49	322
MG16L1	2.0	217	16	819	1.26	2324
MG25L1	2.0	217	25	819	0.77	6086
G8L2	2.0	402	8	334	4.62	47
G16L2	2.0	402	16	334	2.31	376
G25L2	2.0	402	25	334	1.44	1511
G8L3	2.0	473	8	253	5.43	34
G16L3	2.0	473	16	253	2.72	275
G25L3	2.0	473	25	253	1.7	1084

表 2.7 以 Dowswell 法計算接合板挫屈強度

Column Equation	$K$	$L_c$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_E$ (mm)	$\lambda_c$	$P_{cr,Do}$ (kN)
G8L1	0.65	217	8	414	0.81	869
G16L1	0.65	217	16	414	0.41	2132
G25L1	0.65	217	25	414	0.25	3481
MG8L1	0.65	217	8	819	0.81	1717
MG16L1	0.65	217	16	819	0.41	4213
MG25L1	0.65	217	25	819	0.25	6881
G8L2	0.65	287	8	334	1.08	566
G16L2	0.65	287	16	334	0.54	1632
G25L2	0.65	287	25	334	0.34	2745
G8L3	0.65	357	8	253	1.33	333
G16L3	0.65	357	16	253	0.67	1157
G25L3	0.65	357	25	253	0.43	2020

表 2.8 以 Sheng 法計算接合板挫屈強度

	$a_0$ (mm)	$b_0$ (mm)	$L_g$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_l$ (mm)	$K_g$	$\sigma_u$ (MPa)	$P_{cr,S}$ (kN)
G8L1	637	461	339	8	786	23.2	179	1123
G16L1	637	461	339	16	786	9.2	282	3545
G25L1	637	461	339	25	786	3.7	282	5539
MG8L1	871	720	598	8	1130	32.1	101	916
MG16L1	871	720	598	16	1130	18.5	233	4212
MG25L1	871	720	598	25	1130	8.2	252	7122
G8L2	637	461	339	8	786	17.2	132	833
G16L2	637	461	339	16	786	8.1	248	3121
G25L2	637	461	339	25	786	3.3	248	4877
G8L3	637	461	339	8	786	12.6	97	611
G16L3	637	461	339	16	786	6.5	202	2536
G25L3	637	461	339	25	786	2.7	202	3963

表 2.9 以 Brown 法計算接合板挫屈強度

	$a_0$ (mm)	$a$ (mm)	$t_g$ (mm)	$e$ (mm)	$N$	$p$ (mm)	$\theta$ ( $^\circ$ )	$P_{cr,B}$ (kN)
G8L1	637	504	8	45	2	70	42.5	1042
G16L1	637	504	16	45	2	70	42.5	2084
G25L1	637	504	25	45	2	70	42.5	3256
MG8L1	871	738	8	45	2	70	42.5	1344
MG16L1	871	738	16	45	2	70	42.5	2684
MG25L1	871	738	25	45	2	70	42.5	4199
G8L2	637	504	8	45	2	70	42.5	1042
G16L2	637	504	16	45	2	70	42.5	2084
G25L2	637	504	25	45	2	70	42.5	3256
G8L3	637	504	8	45	2	70	42.5	1042
G16L3	637	504	16	45	2	70	42.5	2084
G25L3	637	504	25	45	2	70	42.5	3256

表 2.10 各接合板厚度檢核

	GL1	MG	GL2	GL3
$L'$ (mm)	505	739	505	505
$L_g$ (mm)	339	598	339	339
$a$ (mm)	505	739	505	505
$c$ (mm)	129	129	181	233
$L_1$ (mm)	217	217	287	357
$t_{cr}$ (Astaneh)	28.2	41.2	28.2	41.2
$t_{cr}$ (Sheng)	10	14.6	10	10
$t_{cr}$ (Yamamoto)	11.8	17.3	11.8	11.8
$t_{cr}$ (Dowswell)	6.2	6.2	9	11.7

表 3.1 材料性質

	Grade	$F_y$ (Mpa)	$F_u$ (Mpa)
Flange	GR. 50	370	486
Web	GR. 50	354	485
Stiffner	GR. 50	345	450
Gusset	GR. 50	345	450
BRB core	GR. 50	421	534

表 3.2 各尺寸接合板（含一樓構架）未加勁下強度之比較

Specimen	Imperfection (mm)	$P_u$ (kN)	Failure Mode
WG16I0TB32	0	1498	Gusset buckling
WG16I006TB16	0.06	828	Gusset buckling
WG16I06TB16	0.6	812	Gusset buckling
WG16I3TB16	3	770	Gusset buckling
G16I0L1	0	3220	Local buckling
G16I006L1	0.06	711	Gusset buckling
G16I06L1	0.6	826	Gusset buckling
G16I3L1	3	894	Gusset buckling
G8I06L1	0.6	205	Gusset buckling
G25I06L1	0.6	2773	Gusset buckling
MG16I0L1	0	4366	Local buckling
MG16I006L1	0.06	794	Gusset buckling
MG16I06L1	0.6	782	Gusset buckling
MG16I3L1	3	750	Gusset buckling
MG8I06L1	0.6	244	Gusset buckling
MG25I06L1	0.6	2034	Gusset buckling
G16I06L2	0.6	663	Gusset buckling
G8I06L2	0.6	143	Gusset buckling
G25I06L2	0.6	2052	Gusset buckling
G16I06L3	0.6	560	Gusset buckling
G8I06L3	0.6	111	Gusset buckling
G25I06L3	0.6	1815	Gusset buckling

表 3.3 加勁板尺寸及加勁後接合板強度

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (mm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_u/P_T$
G8S4A1L	4	4	0.9	5	0.5	1130	1143	-	642	0.568
G8S6A1L1	4	6	0.9	5	0.75	1130	1143	-	779	0.689
G8S8A1L1	4	8	0.9	5	1	1130	1143	-	918	0.812
G8S12A1L1	4	12	0.9	5	1.5	1130	1143	-	961	0.85
G8S4A2L1	8	4	0.9	10	0.5	1130	1143	-	747	0.661
G8S6A2L1	8	6	0.9	10	0.75	1130	1143	-	932	0.825
G8S8A2L1	8	8	0.9	10	1	1130	1143	-	1087	0.962
G8S12A2L1	8	12	0.9	10	1.5	1130	1143	1143	1245	1.102
G8S4A3L1	12	4	0.9	15	0.5	1130	1143	-	814	0.72
G8S6A3L1	12	6	0.9	15	0.75	1130	1143	1197	1164	1.03
G8S8A3L1	12	8	0.9	15	1	1130	1143	1200	1198	1.06
G8S12A3L1	12	12	0.9	15	1.5	1130	1143	1198	1257	1.112
G8S4L4L1	16	4	0.9	20	0.5	1130	1143	-	922	0.816
G8S6A4L1	16	6	0.9	20	0.75	1130	1143	1175	1244	1.101
G8S8A4L1	16	8	0.9	20	1	1130	1143	1167	1250	1.106
G8S12A4L1	16	12	0.9	20	1.5	1130	1143	1170	1268	1.122
G8S4B1L1	4	4	0.6	5	0.5	1130	1143	-	384	0.34
G8S6B1L1	4	6	0.6	5	0.75	1130	1143	-	481	0.425
G8S8B1L1	4	8	0.6	5	1	1130	1143	-	561	0.496
G8S12B1L1	4	12	0.6	5	1.5	1130	1143	-	638	0.565
G8S4B2L1	8	4	0.6	10	0.5	1130	1143	-	472	0.418
G8S6B2L1	8	6	0.6	10	0.75	1130	1143	-	619	0.548
G8S8B2L1	8	8	0.6	10	1	1130	1143	-	668	0.591
G8S12B2L1	8	12	0.6	10	1.5	1130	1143	-	743	0.657
G8S4B3L1	12	4	0.6	15	0.5	1130	1143	-	569	0.504
G8S6B3L1	12	6	0.6	15	0.75	1130	1143	-	664	0.588
G8S8B3L1	12	8	0.6	15	1	1130	1143	-	710	0.629
G8S12B3L1	12	12	0.6	15	1.5	1130	1143	-	776	0.687
G8S4B4L1	16	4	0.6	20	0.5	1130	1143	-	666	0.59
G8S6B4L1	16	6	0.6	20	0.75	1130	1143	-	709	0.628
G8S8B4L1	16	8	0.6	20	1	1130	1143	-	752	0.666
G8S12B4L1	16	12	0.6	20	1.5	1130	1143	-	809	0.716

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_w/P_T$
G16S8A1L1	8	8	0.9	5	0.5	2260	2287	-	1835	0.812
G16S12A1L1	8	12	0.9	5	0.75	2260	2287	-	2179	0.964
G16S16A1L1	8	16	0.9	5	1	2260	2287	2267	2418	1.07
G16S24A1L1	8	24	0.9	5	1.5	2260	2287	2212	2636	1.167
G16S8A2L1	16	8	0.9	10	0.5	2260	2287	-	2179	0.964
G16S12A2L1	16	12	0.9	10	0.75	2260	2287	2418	2781	1.231
G16S16A2L1	16	16	0.9	10	1	2260	2287	2400	2938	1.3
G16S24A2L1	16	24	0.9	10	1.5	2260	2287	2402	2956	1.308
G16S8A3L1	24	8	0.9	15	0.5	2260	2287	2445	2419	1.071
G16S12A3L1	24	12	0.9	15	0.75	2260	2287	2444	2825	1.25
G16S16A3L1	24	16	0.9	15	1	2260	2287	2445	3006	1.33
G16S24A3L1	24	24	0.9	15	1.5	2260	2287	2445	3013	1.333
G16S8A4 L1	32	8	0.9	20	0.5	2260	2287	2350	2636	1.167
G16S12A4L1	32	12	0.9	20	0.75	2260	2287	2367	2915	1.29
G16S16A4L1	32	16	0.9	20	1	2260	2287	2357	3086	1.365
G16S24A4L1	32	24	0.9	20	1.5	2260	2287	2358	3091	1.367
G16S8B1L1	8	8	0.6	5	0.5	2260	2287	-	1646	0.728
G16S12B1L1	8	12	0.6	5	0.75	2260	2287	-	1849	0.818
G16S16B1L1	8	16	0.6	5	1	2260	2287	-	1988	0.88
G16S24B1L1	8	24	0.6	5	1.5	2260	2287	-	2175	0.963
G16S8B2L1	16	8	0.6	10	0.5	2260	2287	-	1996	0.883
G16S12B2L1	16	12	0.6	10	0.75	2260	2287	-	2236	0.99
G16S16B2L1	16	16	0.6	10	1	2260	2287	-	2322	1.028
G16S24B2L1	16	24	0.6	10	1.5	2260	2287	-	2413	1.068
G16S8B3L1	24	8	0.6	15	0.5	2260	2287	-	2162	0.957
G16S12B3L1	24	12	0.6	15	0.75	2260	2287	-	2279	1.009
G16S16B3L1	24	16	0.6	15	1	2260	2287	-	2360	1.044
G16S24B3L1	24	24	0.6	15	1.5	2260	2287	-	2445	1.082
G16S8B4L1	32	8	0.6	20	0.5	2260	2287	-	2166	0.959
G16S12B4L1	32	12	0.6	20	0.75	2260	2287	-	2282	1.01
G16S16B4L1	32	16	0.6	20	1	2260	2287	2344	2363	1.046
G16S24B4L1	32	24	0.6	20	1.5	2260	2287	2345	2444	1.082

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_w/P_T$
G25S12A1L1	12	12	0.9	5	0.5	3531	3573	-	3838	1.087
G25S18A1L1	12	18	0.9	5	0.75	3531	3573	3601	4103	1.162
G25S25A1L1	12	25	0.9	5	1	3531	3573	3612	4258	1.206
G25S36A1L1	12	36	0.9	5	1.5	3531	3573	3622	4283	1.213
G25S12A2L1	24	12	0.9	10	0.5	3531	3573	3914	4417	1.251
G25S18A2L1	24	18	0.9	10	0.75	3531	3573	3925	4717	1.336
G25S25A2L1	24	25	0.9	10	1	3531	3573	3923	4852	1.374
G25S36A2L1	24	36	0.9	10	1.5	3531	3573	3917	4869	1.379
G25S12A3L1	36	12	0.9	15	0.5	3531	3573	3704	5007	1.418
G25S18A3L1	36	18	0.9	15	0.75	3531	3573	3701	5219	1.478
G25S25A3L1	36	25	0.9	15	1	3531	3573	3700	5357	1.517
G25S36A3L1	36	36	0.9	15	1.5	3531	3573	3713	5371	1.521
G25S12A4L1	48	12	0.9	20	0.5	3531	3573	3652	5014	1.42
G25S18A4L1	48	18	0.9	20	0.75	3531	3573	3650	5162	1.462
G25S25A4L1	48	25	0.9	20	1	3531	3573	3643	5378	1.523
G25S36A4L1	48	36	0.9	20	1.5	3531	3573	3647	5392	1.527
G25S12B1L1	12	12	0.6	5	0.5	3531	3573	-	3602	1.02
G25S18B1L1	12	18	0.6	5	0.75	3531	3573	3657	3782	1.071
G25S25B1L1	12	25	0.6	5	1	3531	3573	3660	3955	1.12
G25S36B1L1	12	36	0.6	5	1.5	3531	3573	3655	3969	1.124
G25S12B2L1	24	12	0.6	10	0.5	3531	3573	3712	4004	1.134
G25S18B2L1	24	18	0.6	10	0.75	3531	3573	3711	4110	1.164
G25S25B2L1	24	25	0.6	10	1	3531	3573	3715	4195	1.188
G25S36B2L1	24	36	0.6	10	1.5	3531	3573	3713	4191	1.187
G25S12B1L1	36	12	0.6	15	0.5	3531	3573	3687	4025	1.14
G25S18B1L1	36	18	0.6	15	0.75	3531	3573	3672	4124	1.168
G25S25B1L1	36	25	0.6	15	1	3531	3573	3674	4262	1.207
G25S36B1L1	36	36	0.6	15	1.5	3531	3573	3697	4258	1.206
G25S12B1L1	48	12	0.6	20	0.5	3531	3573	3737	4029	1.141
G25S18B1L1	48	18	0.6	20	0.75	3531	3573	3722	4145	1.174
G25S25B1L1	48	25	0.6	20	1	3531	3573	3725	4283	1.213
G25S36B1L1	48	36	0.6	20	1.5	3531	3573	3744	4301	1.218

表 3.4 加勁板尺寸及加勁後強度 (加大尺寸接合板)

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_u/P_T$
MG8S4A1L1	4	4	0.9	5	0.5	1675	2259	-	447	0.267
MG8S6A1L1	4	6	0.9	5	0.75	1675	2259	-	527	0.315
MG8S8A1L1	4	8	0.9	5	1	1675	2259	-	595	0.355
MG8S12A1L1	4	12	0.9	5	1.5	1675	2259	-	722	0.431
MG8S4A2L1	8	4	0.9	10	0.5	1675	2259	-	471	0.281
MG8S6A2L1	8	6	0.9	10	0.75	1675	2259	-	607	0.362
MG8S8A2L1	8	8	0.9	10	1	1675	2259	-	677	0.404
MG8S12A2L1	8	12	0.9	10	1.5	1675	2259	-	882	0.526
MG8S4A3L1	12	4	0.9	15	0.5	1675	2259	-	872	0.521
MG8S6A3L1	12	6	0.9	15	0.75	1675	2259	-	1107	0.661
MG8S8A3L1	12	8	0.9	15	1	1675	2259	-	1210	0.723
MG8S12A3L1	12	12	0.9	15	1.5	1675	2259	-	1385	0.827
MG8S4A4L1	16	4	0.9	20	0.5	1675	2259	-	1274	0.761
MG8S6A4L1	16	6	0.9	20	0.75	1675	2259	-	1608	0.96
MG8S8A4L1	16	8	0.9	20	1	1675	2259	1700	1744	1.041
MG8S12A4L1	16	12	0.9	20	1.5	1675	2259	1695	1889	1.128
MG8S4B1L1	4	4	0.6	5	0.5	1675	2259	-	382	0.228
MG8S6B1L1	4	6	0.6	5	0.75	1675	2259	-	439	0.262
MG8S8B1L1	4	8	0.6	5	1	1675	2259	-	487	0.291
MG8S12B1L1	4	12	0.6	5	1.5	1675	2259	-	581	0.347
MG8S4B2L1	8	4	0.6	10	0.5	1675	2259	-	390	0.233
MG8S6B2L1	8	6	0.6	10	0.75	1675	2259	-	455	0.272
MG8S8B2L1	8	8	0.6	10	1	1675	2259	-	508	0.304
MG8S12B2L1	8	12	0.6	10	1.5	1675	2259	-	595	0.355
MG8S4B3L1	12	4	0.6	15	0.5	1675	2259	-	722	0.431
MG8S6B3L1	12	6	0.6	15	0.75	1675	2259	-	801	0.478
MG8S8B3L1	12	8	0.6	15	1	1675	2259	-	860	0.514
MG8S12B3L1	12	12	0.6	15	1.5	1675	2259	-	954	0.569
MG8S4B4L1	16	4	0.6	20	0.5	1675	2259	-	1054	0.629
MG8S6B4L1	16	6	0.6	20	0.75	1675	2259	-	1147	0.685
MG8S8B4L1	16	8	0.6	20	1	1675	2259	-	1212	0.724
MG8S12B4L1	16	12	0.6	20	1.5	1675	2259	-	1312	0.784

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_u/P_T$
MG16S8A1L1	4	4	0.9	5	0.5	3350	4518	-	1495	0.446
MG16S12A1L1	4	6	0.9	5	0.75	3350	4518	-	1741	0.52
MG16S16A1L1	4	8	0.9	5	1	3350	4518	-	1974	0.589
MG16S24A1L1	4	12	0.9	5	1.5	3350	4518	-	2412	0.72
MG16S8A2L1	8	4	0.9	10	0.5	3350	4518	-	3116	0.93
MG16S12A2L1	8	6	0.9	10	0.75	3350	4518	3387	3691	1.102
MG16S16A2L1	8	8	0.9	10	1	3350	4518	3389	4006	1.196
MG16S24A2L1	8	12	0.9	10	1.5	3350	4518	3394	4220	1.26
MG16S8A3L1	12	4	0.9	15	0.5	3350	4518	3397	3623	1.082
MG16S12A3L1	12	6	0.9	15	0.75	3350	4518	3400	3957	1.181
MG16S16A3L1	12	8	0.9	15	1	3350	4518	3400	4098	1.223
MG16S24A3L1	12	12	0.9	15	1.5	3350	4518	3423	4288	1.28
MG16S8A4L1	16	4	0.9	20	0.5	3350	4518	3412	4124	1.231
MG16S12A4L1	16	6	0.9	20	0.75	3350	4518	3429	4287	1.28
MG16S16A4L1	16	8	0.9	20	1	3350	4518	3420	4416	1.318
MG16S24A4L1	16	12	0.9	20	1.5	3350	4518	3420	4585	1.369
MG16S8B1L1	4	4	0.6	5	0.5	3350	4518	-	1433	0.428
MG16S12B1L1	4	6	0.6	5	0.75	3350	4518	-	1625	0.485
MG16S16B1L1	4	8	0.6	5	1	3350	4518	-	1791	0.535
MG16S24B1L1	4	12	0.6	5	1.5	3350	4518	-	2095	0.625
MG16S8B2L1	8	4	0.6	10	0.5	3350	4518	-	2093	0.625
MG16S12B2L1	8	6	0.6	10	0.75	3350	4518	-	2305	0.688
MG16S16B2L1	8	8	0.6	10	1	3350	4518	-	2477	0.739
MG16S24B2L1	8	12	0.6	10	1.5	3350	4518	-	2746	0.82
MG16S8B3L1	12	4	0.6	15	0.5	3350	4518	-	2199	0.656
MG16S12B3L1	12	6	0.6	15	0.75	3350	4518	-	2395	0.715
MG16S16B3L1	12	8	0.6	15	1	3350	4518	-	2502	0.747
MG16S24B3L1	12	12	0.6	15	1.5	3350	4518	-	2813	0.84
MG16S8B4L1	16	4	0.6	20	0.5	3350	4518	-	2237	0.668
MG16S12B4L1	16	6	0.6	20	0.75	3350	4518	-	2431	0.726
MG16S16B4L1	16	8	0.6	20	1	3350	4518	-	2596	0.775
MG16S24B4L1	16	12	0.6	20	1.5	3350	4518	-	2844	0.849

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_u/P_T$
MG25S12A1L1	4	4	0.9	5	0.5	5250	7059	-	3995	0.761
MG25S18A1L1	4	6	0.9	5	0.75	5250	7059	-	4793	0.913
MG25S25A1L1	4	8	0.9	5	1	5250	7059	-	5225	0.995
MG25S36A1L1	4	12	0.9	5	1.5	5250	7059	5220	5663	1.079
MG25S12A2L1	8	4	0.9	10	0.5	5250	7059	5214	5824	1.109
MG25S18A2L1	8	6	0.9	10	0.75	5250	7059	5202	6283	1.197
MG25S25A2L1	8	8	0.9	10	1	5250	7059	5200	6557	1.249
MG25S36A2L1	8	12	0.9	10	1.5	5250	7059	5167	6826	1.3
MG25S12A3L1	12	4	0.9	15	0.5	5250	7059	5188	7327	1.396
MG25S18A3L1	12	6	0.9	15	0.75	5250	7059	5187	7688	1.464
MG25S25A3L1	12	8	0.9	15	1	5250	7059	5188	8016	1.527
MG25S36A3L1	12	12	0.9	15	1.5	5250	7059	5184	8176	1.557
MG25S12A4L1	16	4	0.9	20	0.5	5250	7059	5183	7865	1.498
MG25S18A4L1	16	6	0.9	20	0.75	5250	7059	5222	7891	1.503
MG25S25A4L1	16	8	0.9	20	1	5250	7059	5207	8042	1.532
MG25S36A4L1	16	12	0.9	20	1.5	5250	7059	5239	8181	1.558
MG25S12B1L1	4	4	0.9	5	0.5	5250	7059	-	3751	0.714
MG25S18B1L1	4	6	0.9	5	0.75	5250	7059	-	4154	0.791
MG25S25B1L1	4	8	0.9	5	1	5250	7059	-	4530	0.863
MG25S36B1L1	4	12	0.9	5	1.5	5250	7059	-	4955	0.944
MG25S12B2L1	8	4	0.9	10	0.5	5250	7059	-	4790	0.912
MG25S18B2L1	8	6	0.9	10	0.75	5250	7059	-	5343	1.018
MG25S25B2L1	8	8	0.9	10	1	5250	7059	5211	5588	1.064
MG25S36B2L1	8	12	0.9	10	1.5	5250	7059	5200	5754	1.096
MG25S12B3L1	12	4	0.9	15	0.5	5250	7059	5201	5161	0.983
MG25S18B3L1	12	6	0.9	15	0.75	5250	7059	5147	5549	1.057
MG25S25B3L1	12	8	0.9	15	1	5250	7059	5162	5686	1.083
MG25S36B3L1	12	12	0.9	15	1.5	5250	7059	5163	5807	1.106
MG25S12B4L1	16	4	0.9	20	0.5	5250	7059	5211	5176	0.986
MG25S18B4L1	16	6	0.9	20	0.75	5250	7059	5198	5565	1.06
MG25S25B4L1	16	8	0.9	20	1	5250	7059	5222	5702	1.086
MG25S36B4L1	16	12	0.9	20	1.5	5250	7059	5219	5824	1.109

表 3.5 加勁板尺寸及加勁後強度 (SL 在彎折線上)

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_u/P_T$
G8S4A1L2	4	4	0.9	5	0.5	1070	920	-	481	0.45
G8S6A1L2	4	6	0.9	5	0.75	1070	920	-	737	0.689
G8S8A1L2	4	8	0.9	5	1	1070	920	-	835	0.78
G8S12A1L2	4	12	0.9	5	1.5	1070	920	-	850	0.794
G8S4A2L2	8	4	0.9	10	0.5	1070	920	-	632	0.591
G8S6A2L2	8	6	0.9	10	0.75	1070	920	-	834	0.779
G8S8A2L2	8	8	0.9	10	1	1070	920	-	1049	0.98
G8S12A2L2	8	12	0.9	10	1.5	1070	920	1067	1097	1.025
G8S4A3L2	12	4	0.9	15	0.5	1070	920	-	1073	1.003
G8S6A3L2	12	6	0.9	15	0.75	1070	920	1082	1121	1.048
G8S8A3L2	12	8	0.9	15	1	1070	920	1080	1138	1.064
G8S12A3L2	12	12	0.9	15	1.5	1070	920	1082	1139	1.064
G8S4A4L2	16	4	0.9	20	0.5	1070	920	-	878	0.821
G8S6A4L2	16	6	0.9	20	0.75	1070	920	-	1041	0.973
G8S8A4L2	16	8	0.9	20	1	1070	920	1067	1132	1.058
G8S12A4L2	16	12	0.9	20	1.5	1070	920	1070	1147	1.072
G8S4B1L2	4	4	0.6	5	0.5	1070	920	-	330	0.308
G8S6B1L2	4	3	0.6	5	0.75	1070	920	-	442	0.413
G8S8B1L2	4	8	0.6	5	1	1070	920	-	542	0.507
G8S12B1L2	4	12	0.6	5	1.5	1070	920	-	592	0.553
G8S4B2L2	8	4	0.6	10	0.5	1070	920	-	397	0.371
G8S6B2L2	8	6	0.6	10	0.75	1070	920	-	555	0.518
G8S8B2L2	8	8	0.6	10	1	1070	920	-	618	0.578
G8S12B2L2	8	12	0.6	10	1.5	1070	920	-	631	0.59
G8S4B3L2	12	4	0.6	15	0.5	1070	920	-	518	0.484
G8S6B3L2	12	6	0.6	15	0.75	1070	920	-	611	0.571
G8S8B3L2	12	8	0.6	15	1	1070	920	-	639	0.597
G8S12B3L2	12	12	0.6	15	1.5	1070	920	-	648	0.606
G8S4B4L2	16	4	0.6	20	0.5	1070	920	-	528	0.493
G8S6B4L2	16	6	0.6	20	0.75	1070	920	-	642	0.6
G8S8B4L2	16	8	0.6	20	1	1070	920	-	644	0.602
G8S12B4L2	16	12	0.6	20	1.5	1070	920	-	649	0.607

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_w/P_T$
G16S8A1L2	4	8	0.9	5	0.5	2140	1840	-	1720	0.843
G16S12A1L2	4	12	0.9	5	0.75	2140	1840	-	2020	0.99
G16S16A1L2	4	16	0.9	5	1	2140	1840	-	2252	1.104
G16S24A1L2	4	24	0.9	5	1.5	2140	1840	2217	2318	1.136
G16S8A2L2	8	8	0.9	10	0.5	2140	1840	-	2052	1.006
G16S12A2L2	8	12	0.9	10	0.75	2140	1840	2220	2496	1.224
G16S16A2L2	8	16	0.9	10	1	2140	1840	2218	2658	1.303
G16S24A2L2	8	24	0.9	10	1.5	2140	1840	2220	2669	1.308
G16S8A3L2	12	8	0.9	15	0.5	2140	1840	-	2261	1.108
G16S12A3L2	12	12	0.9	15	0.75	2140	1840	2207	2490	1.221
G16S16A3L2	12	16	0.9	15	1	2140	1840	2205	2782	1.364
G16S24A3L2	12	24	0.9	15	1.5	2140	1840	2267	2823	1.384
G16S8A4L2	16	8	0.9	20	0.5	2140	1840	2158	2459	1.205
G16S12A4L2	16	12	0.9	20	0.75	2140	1840	2170	2712	1.329
G16S16A4L2	16	16	0.9	20	1	2140	1840	2166	2826	1.385
G16S24A4L2	16	24	0.9	20	1.5	2140	1840	2167	2829	1.387
G16S8B1L2	4	8	0.6	5	0.5	2140	1840	-	1220	0.598
G16S12B1L2	4	12	0.6	5	0.75	2140	1840	-	1348	0.661
G16S16B1L2	4	16	0.6	5	1	2140	1840	-	1529	0.75
G16S24B1L2	4	24	0.6	5	1.5	2140	1840	-	1445	0.708
G16S8B2L2	8	8	0.6	10	0.5	2140	1840	-	1423	0.698
G16S12B2L2	8	12	0.6	10	0.75	2140	1840	-	1744	0.855
G16S16B2L2	8	16	0.6	10	1	2140	1840	-	1866	0.915
G16S24B2L2	8	24	0.6	10	1.5	2140	1840	-	1884	0.924
G16S8B3L2	12	8	0.6	15	0.5	2140	1840	-	1769	0.867
G16S12B3L2	12	12	0.6	15	0.75	2140	1840	-	1872	0.918
G16S16B3L2	12	16	0.6	15	1	2140	1840	-	1913	0.938
G16S24B3L2	12	24	0.6	15	1.5	2140	1840	-	1914	0.938
G16S8B4L2	16	8	0.6	20	0.5	2140	1840	-	1827	0.896
G16S12B4L2	16	12	0.6	20	0.75	2140	1840	-	1920	0.941
G16S16B4L2	16	16	0.6	20	1	2140	1840	-	1947	0.954
G16S24B4L2	16	24	0.6	20	1.5	2140	1840	-	1949	0.955

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_w/P_T$
G25S12A1L2	4	12	0.9	5	0.5	3481	2876	-	3170	0.911
G25S18A1L2	4	18	0.9	5	0.75	3481	2876	-	3673	1.055
G25S25A1L2	4	25	0.9	5	1	3481	2876	3625	4076	1.171
G25S36A1L2	4	36	0.9	5	1.5	3481	2876	3622	4107	1.18
G25S12A2L2	8	12	0.9	10	0.5	3481	2876	3522	4218	1.212
G25S18A2L2	8	18	0.9	10	0.75	3481	2876	3520	4662	1.339
G25S25A2L2	8	25	0.9	10	1	3481	2876	3518	4810	1.382
G25S36A2L2	8	36	0.9	10	1.5	3481	2876	3523	4847	1.392
G25S12A3L2	12	12	0.9	15	0.5	3481	2876	3569	4514	1.297
G25S18A3L2	12	18	0.9	15	0.75	3481	2876	3567	4958	1.424
G25S25A3L2	12	25	0.9	15	1	3481	2876	3573	5124	1.472
G25S36A3L2	12	36	0.9	15	1.5	3481	2876	3567	5119	1.471
G25S12A4L2	16	12	0.9	20	0.5	3481	2876	3682	4652	1.336
G25S18A4L2	16	18	0.9	20	0.75	3481	2876	3675	5032	1.446
G25S25A4L2	16	25	0.9	20	1	3481	2876	3655	5243	1.506
G25S36A4L2	16	36	0.9	20	1.5	3481	2876	3650	5254	1.509
G25S12B1L2	4	12	0.6	5	0.5	3481	2876	-	2651	0.762
G25S18B1L2	4	18	0.6	5	0.75	3481	2876	-	3082	0.885
G25S25B1L2	4	25	0.6	5	1	3481	2876	-	3423	0.983
G25S36B1L2	4	36	0.6	5	1.5	3481	2876	-	3452	0.992
G25S12B2L2	8	12	0.6	10	0.5	3481	2876	-	3552	1.02
G25S18B2L2	8	18	0.6	10	0.75	3481	2876	3670	3811	1.095
G25S25B2L2	8	25	0.6	10	1	3481	2876	3672	3890	1.117
G25S36B2L2	8	36	0.6	10	1.5	3481	2876	3665	3903	1.121
G25S12B3L2	12	12	0.6	15	0.5	3481	2876	3527	3578	1.028
G25S18B3L2	12	18	0.6	15	0.75	3481	2876	3528	4018	1.154
G25S25B3L2	12	25	0.6	15	1	3481	2876	3525	4053	1.164
G25S36B3L2	12	36	0.6	15	1.5	3481	2876	3514	4052	1.164
G25S12B4L2	16	12	0.6	20	0.5	3481	2876	3600	3578	1.028
G25S18B4L2	16	18	0.6	20	0.75	3481	2876	3591	4022	1.155
G25S25B4L2	16	25	0.6	20	1	3481	2876	3601	4088	1.174
G25S36B4L2	16	36	0.6	20	1.5	3481	2876	3612	4114	1.182

表 3.6 加勁板尺寸及加勁後強度 (SL 在彎折線外)

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_u/P_T$
G8S4A1L3	4	4	0.9	5	0.5	1016	697	-	494	0.486
G8S6A1L3	4	3	0.9	5	0.75	1016	697	-	500	0.492
G8S8A1L3	4	8	0.9	5	1	1016	697	-	682	0.671
G8S12A1L3	4	12	0.9	5	1.5	1016	697	-	685	0.674
G8S4A2L3	8	4	0.9	10	0.5	1016	697	-	704	0.693
G8S6A2L3	8	3	0.9	10	0.75	1016	697	-	827	0.814
G8S8A2L3	8	8	0.9	10	1	1016	697	-	862	0.848
G8S12A2L3	8	12	0.9	10	1.5	1016	697	-	878	0.864
G8S4A3L3	12	4	0.9	15	0.5	1016	697	-	734	0.722
G8S6A3L3	12	3	0.9	15	0.75	1016	697	-	834	0.821
G8S8A3L3	12	8	0.9	15	1	1016	697	-	897	0.883
G8S12A3L3	12	12	0.9	15	1.5	1016	697	-	909	0.895
G8S4A4L3	16	4	0.9	20	0.5	1016	697	-	752	0.74
G8S6A4L3	16	3	0.9	20	0.75	1016	697	-	853	0.84
G8S8A4L3	16	8	0.9	20	1	1016	697	-	915	0.901
G8S12A4L3	16	12	0.9	20	1.5	1016	697	-	916	0.902
G8S4B1L3	4	4	0.6	5	0.5	1016	697	-	283	0.278
G8S6B1L3	4	3	0.6	5	0.75	1016	697	-	317	0.312
G8S8B1L3	4	8	0.6	5	1	1016	697	-	327	0.322
G8S12B1L3	4	12	0.6	5	1.5	1016	697	-	336	0.331
G8S4B2L3	8	4	0.6	10	0.5	1016	697	-	322	0.317
G8S6B2L3	8	3	0.6	10	0.75	1016	697	-	441	0.434
G8S8B2L3	8	8	0.6	10	1	1016	697	-	493	0.485
G8S12B2L3	8	12	0.6	10	1.5	1016	697	-	531	0.523
G8S4B3L3	12	4	0.6	15	0.5	1016	697	-	487	0.479
G8S6B3L3	12	3	0.6	15	0.75	1016	697	-	543	0.534
G8S8B3L3	12	8	0.6	15	1	1016	697	-	577	0.568
G8S12B3L3	12	12	0.6	15	1.5	1016	697	-	584	0.575
G8S4B4L3	16	4	0.6	20	0.5	1016	697	-	469	0.462
G8S6B4L3	16	3	0.6	20	0.75	1016	697	-	549	0.54
G8S8B4L3	16	8	0.6	20	1	1016	697	-	591	0.582
G8S8B4L3	16	12	0.6	20	1.5	1016	697	-	602	0.593

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_w/P_T$
G16S8A1L3	4	8	0.9	5	0.5	2032	1394	-	1579	0.777
G16S12A1L3	4	12	0.9	5	0.75	2032	1394	-	1742	0.857
G16S16A1L3	4	16	0.9	5	1	2032	1394	-	1823	0.897
G16S24A1L3	4	24	0.9	5	1.5	2032	1394	-	1841	0.906
G16S8A2L3	8	8	0.9	10	0.5	2032	1394	-	1902	0.936
G16S12A2L3	8	12	0.9	10	0.75	2032	1394	1974	2119	1.043
G16S16A2L3	8	16	0.9	10	1	2032	1394	1974	2199	1.082
G16S24A2L3	8	24	0.9	10	1.5	2032	1394	1971	2233	1.099
G16S8A3L3	12	8	0.9	15	0.5	2032	1394	-	1850	0.91
G16S12A3L3	12	12	0.9	15	0.75	2032	1394	1946	2165	1.065
G16S16A3L3	12	16	0.9	15	1	2032	1394	1956	2312	1.138
G16S25A3L3	12	24	0.9	15	1.5	2032	1394	1957	2352	1.157
G16S8A4L3	16	8	0.9	20	0.5	2032	1394	-	1927	0.948
G16S12A4L3	16	12	0.9	20	0.75	2032	1394	1973	2174	1.07
G16S16A4L3	16	16	0.9	20	1	2032	1394	1977	2376	1.169
G16S24A4L3	16	24	0.9	20	1.5	2032	1394	1977	2381	1.172
G16S8B1L3	4	8	0.6	5	0.5	2032	1394	-	940	0.463
G16S12B1L3	4	12	0.6	5	0.75	2032	1394	-	1005	0.495
G16S16B1L3	4	16	0.6	5	1	2032	1394	-	1030	0.507
G16S24B1L3	4	24	0.6	5	1.5	2032	1394	-	1042	0.513
G16S8B2L3	8	8	0.6	10	0.5	2032	1394	-	1366	0.672
G16S12B2L3	8	12	0.6	10	0.75	2032	1394	-	1476	0.726
G16S16B2L3	8	16	0.6	10	1	2032	1394	-	1528	0.752
G16S24B2L3	8	24	0.6	10	1.5	2032	1394	-	1547	0.761
G16S8B3L3	12	8	0.6	15	0.5	2032	1394	-	1685	0.829
G16S12B3L3	12	12	0.6	15	0.75	2032	1394	-	1766	0.869
G16S16B3L3	12	16	0.6	15	1	2032	1394	-	1803	0.887
G16S24B3L3	12	24	0.6	15	1.5	2032	1394	-	1834	0.903
G16S8B4L3	16	8	0.6	20	0.5	2032	1394	-	1687	0.83
G16S12B4L3	16	12	0.6	20	0.75	2032	1394	-	1776	0.874
G16S16B4L3	16	16	0.6	20	1	2032	1394	-	1861	0.916
G16S24B4L3	16	24	0.6	20	1.5	2032	1394	-	1872	0.921

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_u/P_T$
G25S12A1L3	4	12	0.9	5	0.5	3175	2179	-	2888	0.91
G25S18A1L3	4	18	0.9	5	0.75	3175	2179	-	3236	1.019
G25S25A1L3	4	25	0.9	5	1	3175	2179	3104	3393	1.069
G25S36A1L3	4	36	0.9	5	1.5	3175	2179	3122	3428	1.08
G25S12A2L3	8	12	0.9	10	0.5	3175	2179	2997	3478	1.095
G25S18A2L3	8	18	0.9	10	0.75	3175	2179	3023	4033	1.27
G25S25A2L3	8	25	0.9	10	1	3175	2179	3044	4379	1.379
G25S36A2L3	8	36	0.9	10	1.5	3175	2179	3045	4403	1.387
G25S12A3L3	12	12	0.9	15	0.5	3175	2179	3066	3922	1.235
G25S18A3L3	12	18	0.9	15	0.75	3175	2179	3073	4144	1.305
G25S25A3L3	12	25	0.9	15	1	3175	2179	3067	4299	1.354
G25S36A3L3	12	36	0.9	15	1.5	3175	2179	3061	4329	1.363
G25S12A4L3	16	12	0.9	20	0.5	3175	2179	3023	3626	1.142
G25S18A4L3	16	18	0.9	20	0.75	3175	2179	3019	4218	1.329
G25S25A4L3	16	25	0.9	20	1	3175	2179	3010	4348	1.369
G25S36A4L3	16	36	0.9	20	1.5	3175	2179	3019	4351	1.37
G25S12B1L3	4	12	0.6	5	0.5	3175	2179	-	2278	0.717
G25S18B1L3	4	18	0.6	5	0.75	3175	2179	-	2415	0.761
G25S25B1L3	4	25	0.6	5	1	3175	2179	-	2481	0.781
G25S36B1L3	4	36	0.6	5	1.5	3175	2179	-	2513	0.791
G25S12B2L3	8	12	0.6	10	0.5	3175	2179	-	2982	0.939
G25S18B2L3	8	18	0.6	10	0.75	3175	2179	-	3023	0.952
G25S25B2L3	8	25	0.6	10	1	3175	2179	-	3101	0.977
G25S36B2L3	8	36	0.6	10	1.5	3175	2179	-	3115	0.981
G25S12B3L3	12	12	0.6	15	0.5	3175	2179	-	3059	0.963
G25S18B3L3	12	18	0.6	15	0.75	3175	2179	-	3217	1.013
G25S25B3L3	12	25	0.6	15	1	3175	2179	-	3321	1.046
G25S36B3L3	12	36	0.6	15	1.5	3175	2179	-	3346	1.054
G25S12B4L3	16	12	0.6	20	0.5	3175	2179	-	3075	0.969
G25S18B4L3	16	18	0.6	20	0.75	3175	2179	-	3273	1.031
G25S25B4L3	16	25	0.6	20	1	3175	2179	-	3400	1.071
G25S36B4L3	16	36	0.6	20	1.5	3175	2179	-	3474	1.094

表 3.7 接合板在三種挫屈模式下之強度

	$P_u$ (0.6 mm imperfection)	$P_u$ (0 mm imperfection)	$P_u$ (0.6 mm imperfection &Rotational Restraint)
G8L1	205	1587	1156
G16L1	826	3220	2418
G25L1	2773	6657	4695
MG8	244	1560	1050
MG16	782	4366	3788
MG25	2034	8065	6973
G8L2	143	1004	1012
G16L2	663	2609	2235
G25L2	2052	6320	4425
G8L3	111	785	753
G16L3	560	2235	1974
G25L3	1315	4026	3732

表 3.8 Fixed-Free 模式下挫屈強度與各公式比值

	$P_u/P_w$	$P_u/P_T$	$P_u/P_{cr}$	$P_u/P_{cr,T}$	$P_u/P_{cr,MT}$	$P_u/P_{cr,As}$	$P_u/P_{cr,Ts}$	$P_u/P_{cr,D}$	$P_u/P_{cr,S}$	$P_u/P_{cr,B}$
G8L1	0.18	0.18	0.31	0.29	0.15	1.23	2.23	0.24	0.18	0.20
G16L1	0.36	0.37	0.42	0.41	0.25	0.68	1.12	0.39	0.23	0.40
G25L1	0.78	0.79	0.82	0.82	0.51	1.01	1.21	0.80	0.50	0.85
MG8	0.11	0.15	0.11	0.14	0.09	0.75	0.76	0.14	0.27	0.18
MG16	0.17	0.23	0.17	0.19	0.12	0.33	0.34	0.19	0.19	0.29
MG25	0.29	0.39	0.29	0.30	0.18	0.37	0.33	0.30	0.29	0.48
G8L2	0.16	0.13	0.58	0.40	0.17	1.51	3.04	0.25	0.17	0.14
G16L2	0.36	0.31	0.50	0.46	0.27	0.88	1.76	0.41	0.21	0.32
G25L2	0.70	0.61	0.81	0.78	0.49	1.01	1.36	0.75	0.42	0.63
G8L3	0.16	0.11	1.01	0.58	0.35	1.91	3.26	0.33	0.18	0.11
G16L3	0.40	0.28	0.72	0.55	0.37	1.21	2.04	0.48	0.22	0.27
G25L3	0.83	0.60	1.05	0.93	0.93	1.29	1.67	0.90	0.46	0.56
AVG	0.37	0.35	0.57	0.49	0.32	1.01	2.11	0.43	0.28	0.37
STDEVA	0.26	0.22	0.32	0.25	0.24	0.46	1.72	0.25	0.12	0.22

表 3.9 直接施力分析下極限強度與各公式比值

	$P_u/P_w$	$P_u/P_T$	$P_u/P_{cr}$	$P_u/P_{cr,T}$	$P_u/P_{cr,MT}$	$P_u/P_{cr,AS}$	$P_u/P_{cr,Ts}$	$P_u/P_{cr,D}$	$P_u/P_{cr,S}$	$P_u/P_{cr,B}$
G8L1	1.39	1.40	2.43	2.25	1.16	9.56	17.25	1.83	1.41	1.52
G16L1	1.41	1.42	1.62	1.59	0.96	2.65	4.37	1.51	0.91	1.55
G25L1	1.84	1.86	1.94	1.93	1.20	2.38	2.86	1.88	1.18	2.01
MG8	0.69	0.93	0.71	0.91	0.57	4.77	4.84	0.91	1.70	1.16
MG16	0.97	1.30	0.97	1.03	0.65	1.82	1.88	1.04	1.04	1.63
MG25	1.14	1.55	1.15	1.17	0.73	1.48	1.33	1.17	1.13	1.92
G8L2	1.09	0.94	4.06	2.80	1.23	10.57	21.36	1.77	1.21	0.96
G16L2	1.42	1.22	1.99	1.79	1.06	3.46	6.94	1.60	0.84	1.25
G25L2	2.15	1.89	2.50	2.42	1.51	3.10	4.18	2.30	1.30	1.94
G8L3	1.13	0.77	7.14	4.11	2.50	13.53	23.09	2.36	1.28	0.75
G16L3	1.60	1.10	2.87	2.21	1.48	4.85	8.13	1.93	0.88	1.07
G25L3	1.85	1.32	2.32	2.07	2.07	2.85	3.71	1.99	1.02	1.24
AVG	1.39	1.31	2.48	2.02	1.26	5.09	8.33	1.69	1.16	1.42
STDEVA	0.42	0.35	1.73	0.87	0.57	3.93	7.22	0.47	0.25	0.41

表 3.10 旋轉束制分析 (Full Restraint) 下極限強度與各公式比值  
(0.6 mm 初始面外變位)

	$P_u/P_w$	$P_u/P_T$	$P_u/P_{cr}$	$P_u/P_{cr,T}$	$P_u/P_{cr,MT}$	$P_u/P_{cr,AS}$	$P_u/P_{cr,Ts}$	$P_u/P_{cr,D}$	$P_u/P_{cr,S}$	$P_u/P_{cr,B}$
G8L1	1.01	1.02	1.77	1.64	0.84	6.96	12.57	1.33	1.03	1.11
G16L1	1.06	1.07	1.22	1.19	0.72	1.99	3.28	1.13	0.68	1.16
G25L1	1.31	1.33	1.39	1.38	0.86	1.70	2.05	1.35	0.85	1.44
MG8	0.46	0.63	0.48	0.61	0.38	3.21	3.26	0.61	1.15	0.78
MG16	0.84	1.13	0.84	0.90	0.56	1.58	1.63	0.90	0.90	1.41
MG25	0.99	1.34	0.99	1.02	0.63	1.28	1.15	1.01	0.98	1.66
G8L2	1.10	0.95	4.10	2.82	1.24	10.65	21.53	1.79	1.21	0.97
G16L2	1.21	1.04	1.70	1.53	0.91	2.96	5.94	1.37	0.72	1.07
G25L2	1.50	1.32	1.75	1.69	1.06	2.17	2.93	1.61	0.91	1.36
G8L3	1.08	0.74	6.85	3.94	2.40	12.98	22.15	2.26	1.23	0.72
G16L3	1.42	0.97	2.53	1.95	1.30	4.28	7.18	1.71	0.78	0.95
G25L3	1.71	1.23	2.15	1.92	1.92	2.64	5.64	1.85	0.94	1.15
AVG	1.14	1.06	2.15	1.72	1.07	4.37	7.26	1.41	0.95	1.15
STDEVA	0.33	0.23	1.75	0.91	0.58	3.83	7.48	0.46	0.18	0.28

表 3.11 不同尺寸接合板面外挫屈強度與預測強度比較

b <sub>0</sub> /c	Gusset Shape (mm×mm×mm)	$P_w$ (kN)	$P_T$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_{cr}$ (kN)	$P_{cr,T}$ (kN)	$P_{cr,MT}$ (kN)	$P_{cr,As}$ (kN)	$P_{cr,Ts}$ (kN)	$P_{cr,S}$ (kN)	$P_{cr,CC}$ (kN)
1.75	641×461×8	1143	1130	205	652	706	1369	166	92	1123	205
	641×461×16	2287	2260	826	1987	2027	3350	1214	737	3545	826
	641×461×25	3573	3531	2773	3374	3401	5461	2757	2290	5539	2773
1.6	641×461×8	920	1070	143	247	359	819	95	47	833	143
	641×461×16	1840	2140	663	1313	1457	2462	755	376	3121	663
	641×461×25	2944	3345	2052	2526	2616	4175	2037	1511	4877	2052
1.45	641×461×8	697	1016	111	110	191	314	58	34	611	111
	641×461×16	1394	2032	560	780	1010	1513	461	275	2536	560
	641×461×25	2178	3045	1815	1735	1945	1945	1412	1084	3963	1815
1.75	461×461×8	1143	970	270	1028	870	1368	451	162	1172	270
	461×461×16	2287	1940	1075	2227	2136	3359	1813	1199	2407	1075
	461×461×25	3573	3031	2519	3534	3475	5454	3248	2743	5008	2519
1.6	460×460×8	920	960	189	570	571	873	208	75	912	189
	461×461×16	1840	1920	855	1633	1633	2498	1225	598	1688	855
	461×461×25	2944	3000	2153	2803	2804	4289	2492	1853	3696	2153
1.45	461×461×8	697	950	139	165	333	488	102	37	670	139
	461×461×16	1394	1900	709	972	1159	1700	743	293	1469	709
	461×461×25	2178	2967	1923	1879	2019	2961	1683	1064	3100	1923
1.6	805×575×8	1367	1610	138	180	379	905	95	41	682	167
	805×575×16	2733	3220	692	1553	1871	3302	747	322	1981	756
	805×575×25	4271	5031	2004	3246	3503	5808	2381	1227	4078	1903
1.7	555×461×12	1715	1590	516	1421	1502	2362	766	501	1870	589
	555×461×20	2859	2650	1697	2672	2726	4286	2139	1819	3948	1667
1.5	555×461×12	1046	1530	318	697	1175	1126	395	176	1257	340
	555×461×20	1742	2550	1191	2067	2495	2290	1611	815	3532	1061
1.75	641×461×12	1715	1695	490	1308	1383	4286	553	224	2010	520
	641×461×20	2859	2825	1698	2593	2646	4286	1903	1373	4435	1532
1.45	641×461×12	1046	1524	263	798	844	4286	337	136	1302	305
	641×461×20	1742	2540	831	1580	1612	4286	1159	837	3277	967
1.75	461×461×12	1715	1455	593	1636	1519	4286	1134	544	1806	702
	461×461×20	2859	2425	1722	2811	2737	4286	2464	1891	3846	1837
1.45	461×461×12	1046	1425	359	998	927	4286	692	332	819	384
	461×461×20	1742	2375	1270	1713	1668	4286	1501	1152	2319	1209

表 4.1 檢核接合板降伏強度

	$\phi$	H (mm)	$t_g$ (mm)	d (mm)	$b_E$ (mm)	$P_w$ (kN)	$P_T$ (kN)
G8L1(A-A)	0.9	796	8	276	414	1143	1210
G16L1(A-A)	0.9	796	16	276	414	2287	2420
G25L1(A-A)	0.9	796	25	276	414	3573	4042
G8L1(B-B)	0.9	431	8	57	414	1143	1294
G16L1(B-B)	0.9	431	16	57	414	2287	2587
G25L1(B-B)	0.9	431	25	57	414	3573	4042

表 4.2 比較計算接合板挫屈強度各方法之係數及強度

Column Equation	K	$L_c$ (mm)	$t_g$ (mm)	$b_E$ (mm)	$\lambda_c$	$P_{cr}$ (kN)
AISC-LRFD ( $P_{cr}$ )						
FG8	1.2	214	8	414	1.47	463
FG16	1.2	214	16	414	0.74	1830
FG25	1.2	214	25	414	0.47	3257
Thornton ( $P_{cr,T}$ )						
FG8	0.65	420	8	414	1.56	412
FG16	0.65	420	16	414	0.78	1771
FG25	0.65	420	25	414	0.5	3218
Modified Thornton ( $P_{cr,MT}$ )						
FG8	0.65	356	8	594	1.32	790
FG16	0.65	356	16	594	0.66	2733
FG25	0.65	356	25	594	0.42	4758
Astaneh ( $P_{cr,As}$ )						
FG8	1.2	480	8	414	3.3	92
FG16	1.2	480	16	414	1.65	738
FG25	1.2	480	25	414	1.06	2242
Tsai ( $P_{cr,Ts}$ )						
FG8	2	420	8	414	4.8	43
FG16	2	420	16	414	2.4	347
FG25	2	420	25	414	1.54	1323
Dowswell ( $P_{cr,D}$ )						
FG8	0.5	214	8	414	0.61	977
FG16	0.5	214	16	414	0.31	2199
FG25	0.5	214	25	414	0.20	3516

表 4.3 接合板厚度檢核

	FG
$L_g$ (mm)	220
$a$ (mm)	710
$c$ (mm)	104
$L_1$ (mm)	302
$t_{cr}$ (Sheng)	14
$t_{cr}$ (Yamamoto)	7.65
$t_{cr}$ (Dowswell)	3.8

表 4.4 接合板未加勁強度

Specimen	Imperfection (mm)	$P_u$ (kN)	Failure Mode
FG16I0	0	2907	Local Buckling
FG16I008	0.08	1065	Gusset buckling
FG16I08	0.8	1050	Gusset buckling
FG16I4	4	935	Gusset buckling
FG8I0	0	1056	Local Buckling
FG8I08	0.8	316	Gusset buckling
FG25I0	0	4902	Local Buckling
FG25I08	0.8	2872	Gusset buckling
FG8D05	0.8	326	Gusset buckling
FG8D1	0.8	346	Gusset buckling
FG8D2	0.8	350	Gusset buckling
FG16I08D05	0.8	1135	Gusset buckling
FG16I08D1	0.8	1154	Gusset buckling
FG16I08D2	0.8	1212	Gusset buckling
FG25I08D05	0.8	2910	Gusset buckling
FG25I08D1	0.8	2938	Gusset buckling
FG25I08D2	0.8	3054	Gusset buckling

表 4.5 加勁板尺寸及加勁後強度

Specimen	$b_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$P_T$ (kN)	$P_w$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_w/P_T$
FG8S4A1	4	4	0.9	5	0.5	1210	1143	-	717	0.59
FG8S6A1	4	6	0.9	5	0.75	1210	1143	-	980	0.81
FG8S8A1	4	8	0.9	5	1	1210	1143	-	1057	0.87
FG8S12A1	4	12	0.9	5	1.5	1210	1143	-	1134	0.94
FG8S4A2	8	4	0.9	10	0.5	1210	1143	-	941	0.78
FG8S6A2	8	6	0.9	10	0.75	1210	1143	-	1112	0.92
FG8S8A2	8	8	0.9	10	1	1210	1143	-	1211	1
FG8S12A2	8	12	0.9	10	1.5	1210	1143	1233	1294	1.07
FG8S4A3	12	4	0.9	15	0.5	1210	1143	-	1135	0.94
FG8S6A3	12	6	0.9	15	0.75	1210	1143	-	1214	1
FG8S8A3	12	8	0.9	15	1	1210	1143	1237	1265	1.05
FG8S12A3	12	12	0.9	15	1.5	1210	1143	1251	1320	1.09
FG8S4L4	16	4	0.9	20	0.5	1210	1143	-	1249	1.03
FG8S6A4	16	6	0.9	20	0.75	1210	1143	1258	1295	1.07
FG8S8A4	16	8	0.9	20	1	1210	1143	1263	1319	1.09
FG8S12A4	16	12	0.9	20	1.5	1210	1143	1267	1345	1.11
FG16S8A1	8	8	0.6	5	0.5	2420	2287	-	2237	0.92
FG16S12A1	8	12	0.6	5	0.75	2420	2287	-	2547	1.05
FG16S16A1	8	16	0.6	5	1	2420	2287	2548	2692	1.11
FG16S24A1	8	24	0.6	5	1.5	2420	2287	2550	2862	1.18
FG16S8A2	16	8	0.6	10	0.5	2420	2287	2581	3050	1.26
FG16S12A2	16	12	0.6	10	0.75	2420	2287	2579	3178	1.31
FG16S16A2	16	16	0.6	10	1	2420	2287	2578	3252	1.34
FG16S24A2	16	24	0.6	10	1.5	2420	2287	2579	3338	1.38
FG16S8A3	24	8	0.6	15	0.5	2420	2287	2531	3090	1.28
FG16S12A3	24	12	0.6	15	0.75	2420	2287	2533	3188	1.32
FG16S16A3	24	16	0.6	15	1	2420	2287	2530	3273	1.35
FG16S24A3	24	24	0.6	15	1.5	2420	2287	2527	3361	1.39
FG16S8L4	32	8	0.6	20	0.5	2420	2287	2527	3091	1.28
FG16S12A4	32	12	0.6	20	0.75	2420	2287	2529	3196	1.32
FG16S16A4	32	16	0.6	20	1	2420	2287	2535	3281	1.36
FG16S24A4	32	24	0.6	20	1.5	2420	2287	2530	3368	1.39

FG25S12A1	12	12	0.9	5	0.5	3781	3573	3951	4488	1.19
FG25S18A1	12	18	0.9	5	0.75	3781	3573	3922	4839	1.28
FG25S125A1	12	25	0.9	5	1	3781	3573	3956	5070	1.34
FG25S36A1	12	36	0.9	5	1.5	3781	3573	3960	5298	1.4
FG25S12A2	24	12	0.9	10	0.5	3781	3573	4100	5431	1.44
FG25S18A2	24	18	0.9	10	0.75	3781	3573	4113	5780	1.53
FG25S25A2	24	25	0.9	10	1	3781	3573	4109	6032	1.6
FG25S36A2	24	36	0.9	10	1.5	3781	3573	3994	6297	1.67
FG25S12A3	36	12	0.9	15	0.5	3781	3573	3979	5456	1.44
FG25S18A3	36	18	0.9	15	0.75	3781	3573	3982	5807	1.54
FG25S25A3	36	25	0.9	15	1	3781	3573	3972	6196	1.64
FG25S36A3	36	36	0.9	15	1.5	3781	3573	3987	6323	1.67
FG25S12L4	48	12	0.9	20	0.5	3781	3573	3954	5570	1.47
FG25S18A4	48	18	0.9	20	0.75	3781	3573	3967	6025	1.59
FG25S25A4	48	25	0.9	20	1	3781	3573	3955	6227	1.65
FG25S36A4	48	36	0.9	20	1.5	3781	3573	3962	6333	1.67

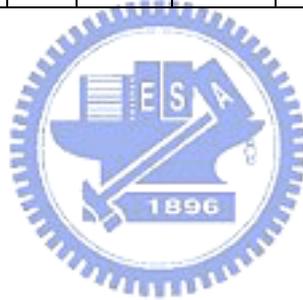


表 4.6 Fixed-Free 面外變位下極限強度與各公式比值

	$P_u/P_w$	$P_u/P_T$	$P_u/P_{cr}$	$P_u/P_{cr,T}$	$P_u/P_{cr,MT}$	$P_u/P_{cr,As}$	$P_u/P_{cr,Ts}$	$P_u/P_{cr,D}$	$P_u/P_{cr,S}$	$P_u/P_{cr,B}$
G8L1	0.18	0.18	0.31	0.29	0.15	1.23	2.23	0.24	0.18	0.20
G16L1	0.36	0.37	0.42	0.41	0.25	0.68	1.12	0.39	0.23	0.40
G25L1	0.78	0.79	0.82	0.82	0.51	1.01	1.21	0.80	0.50	0.85
MG8	0.11	0.15	0.11	0.14	0.09	0.75	0.76	0.14	0.27	0.18
MG16	0.17	0.23	0.17	0.19	0.12	0.33	0.34	0.19	0.19	0.29
MG25	0.29	0.39	0.29	0.30	0.18	0.37	0.33	0.30	0.29	0.48
G8L2	0.16	0.13	0.58	0.40	0.17	1.51	3.04	0.25	0.17	0.14
G16L2	0.36	0.31	0.50	0.46	0.27	0.88	1.76	0.41	0.21	0.32
G25L2	0.70	0.61	0.81	0.78	0.49	1.01	1.36	0.75	0.42	0.63
G8L3	0.16	0.11	1.01	0.58	0.35	1.91	3.26	0.33	0.18	0.11
G16L3	0.40	0.28	0.72	0.55	0.37	1.21	2.04	0.48	0.22	0.27
G25L3	0.83	0.60	1.05	0.93	0.93	1.29	1.67	0.90	0.46	0.56
FG8L1	0.28	0.26	0.68	0.77	0.40	3.43	7.35	0.32	0.23	0.30
FG16L1	0.46	0.43	0.57	0.59	0.38	1.42	3.03	0.48	0.34	0.50
FG25L1	0.80	0.76	0.88	0.89	0.60	1.28	2.17	0.82	0.44	0.87
AVG	0.40	0.37	0.60	0.54	0.35	1.22	2.11	0.45	0.29	0.41
STD	0.26	0.22	0.29	0.26	0.22	0.74	1.72	0.25	0.11	0.24

表 4.7 直接施力下極限強度與各公式比值

	$P_u/P_w$	$P_u/P_T$	$P_u/P_{cr}$	$P_u/P_{cr,T}$	$P_u/P_{cr,MT}$	$P_u/P_{cr,As}$	$P_u/P_{cr,Ts}$	$P_u/P_{cr,D}$	$P_u/P_{cr,S}$	$P_u/P_{cr,B}$
G8L1	1.39	1.40	2.43	2.25	1.16	9.56	17.25	1.83	1.41	1.52
G16L1	1.41	1.42	1.62	1.59	0.96	2.65	4.37	1.51	0.91	1.55
G25L1	1.84	1.86	1.94	1.93	1.20	2.38	2.86	1.88	1.18	2.01
MG8	0.69	0.93	0.71	0.91	0.57	4.77	4.84	0.91	1.70	1.16
MG16	0.97	1.30	0.97	1.03	0.65	1.82	1.88	1.04	1.04	1.63
MG25	1.14	1.55	1.15	1.17	0.73	1.48	1.33	1.17	1.13	1.92
G8L2	1.09	0.94	4.06	2.80	1.23	10.57	21.36	1.77	1.21	0.96
G16L2	1.42	1.22	1.99	1.79	1.06	3.46	6.94	1.60	0.84	1.25
G25L2	2.15	1.89	2.50	2.42	1.51	3.10	4.18	2.30	1.30	1.94
G8L3	1.13	0.77	7.14	4.11	2.50	13.53	23.09	2.36	1.28	0.75
G16L3	1.60	1.10	2.87	2.21	1.48	4.85	8.13	1.93	0.88	1.07
G25L3	1.85	1.32	2.32	2.07	2.07	2.85	3.71	1.99	1.02	1.24
FG8L1	0.92	0.87	2.28	2.56	1.34	11.48	24.56	1.08	0.78	1.00
FG16L1	1.27	1.20	1.59	1.64	1.06	3.94	8.38	1.32	0.93	1.38
FG25L1	1.98	1.87	2.17	2.20	1.49	3.16	5.35	2.01	1.09	2.15
AVG	1.39	1.31	2.38	2.05	1.27	5.31	11.41	1.65	1.11	1.44
STD	0.42	0.36	1.55	0.80	0.51	3.92	10.56	0.46	0.25	0.43

表 4.8 旋轉束制 (Full restraint) 下極限強度與各公式比值

	$P_u/P_w$	$P_u/P_T$	$P_u/P_{cr}$	$P_u/P_{cr,T}$	$P_u/P_{cr,MT}$	$P_u/P_{cr,As}$	$P_u/P_{cr,Ts}$	$P_u/P_{cr,D}$	$P_u/P_{cr,S}$	$P_u/P_{cr,B}$
G8L1	1.01	1.02	1.77	1.64	0.84	6.96	12.57	1.33	1.03	1.11
G16L1	1.06	1.07	1.22	1.19	0.72	1.99	3.28	1.13	0.68	1.16
G25L1	1.31	1.33	1.39	1.38	0.86	1.70	2.05	1.35	0.85	1.44
MG8	0.46	0.63	0.48	0.61	0.38	3.21	3.26	0.61	1.15	0.78
MG16	0.84	1.13	0.84	0.90	0.56	1.58	1.63	0.90	0.90	1.41
MG25	0.99	1.34	0.99	1.02	0.63	1.28	1.15	1.01	0.98	1.66
G8L2	1.10	0.95	4.10	2.82	1.24	10.65	21.53	1.79	1.21	0.97
G16L2	1.21	1.04	1.70	1.53	0.91	2.96	5.94	1.37	0.72	1.07
G25L2	1.50	1.32	1.75	1.69	1.06	2.17	2.93	1.61	0.91	1.36
G8L3	1.08	0.74	6.85	3.94	2.40	12.98	22.15	2.26	1.23	0.72
G16L3	1.42	0.97	2.53	1.95	1.30	4.28	7.18	1.71	0.78	0.95
G25L3	1.71	1.23	2.15	1.92	1.92	2.64	3.44	1.85	0.94	1.15
FG8L1	1.12	1.05	2.76	3.10	1.62	13.87	29.67	1.31	0.94	1.21
FG16L1	1.35	1.27	1.69	1.74	1.13	4.18	8.89	1.40	0.99	1.47
FG25L1	1.57	1.48	1.72	1.74	1.18	2.50	4.23	1.59	0.86	1.70
AVG	1.18	1.11	2.13	1.81	1.12	4.86	8.66	1.41	0.94	1.21
STD	0.31	0.23	1.57	0.88	0.54	4.24	8.87	0.41	0.16	0.29

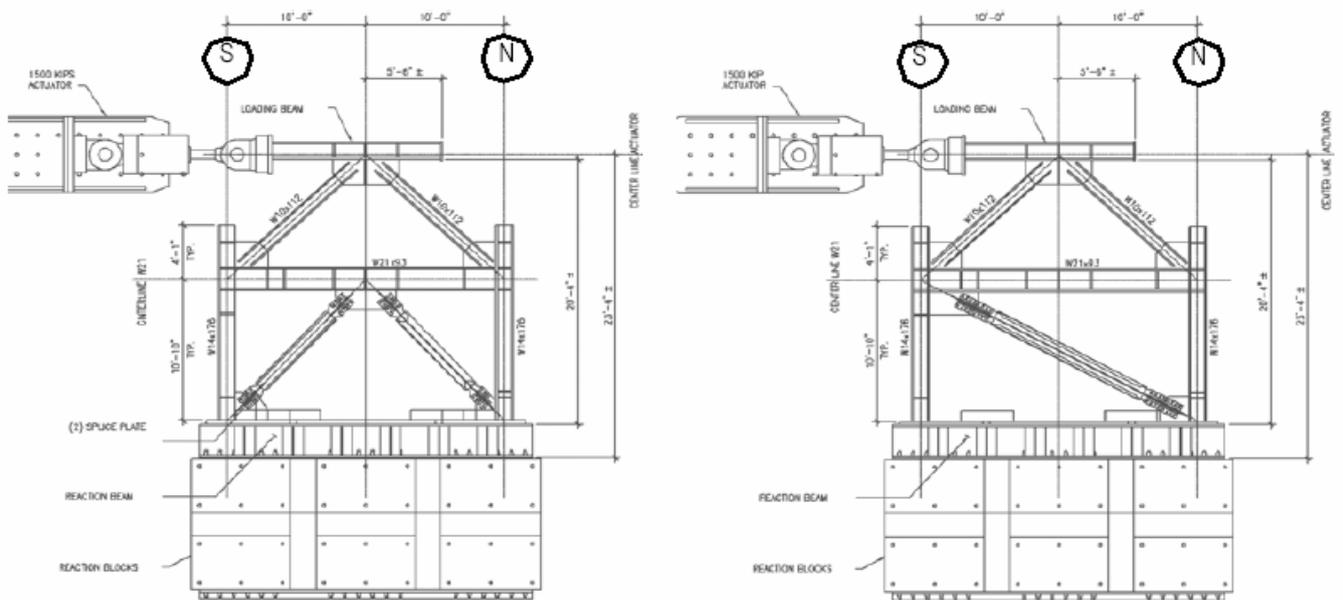


圖 1.1 UBC 試驗構架[Lo'pez and Aiken (2002)]



圖 1.2 UBC 接合板破壞[ (Lo'pez and Aiken 2002)]



圖 1.3 接合板挫屈[Tsai et al. (2004)]

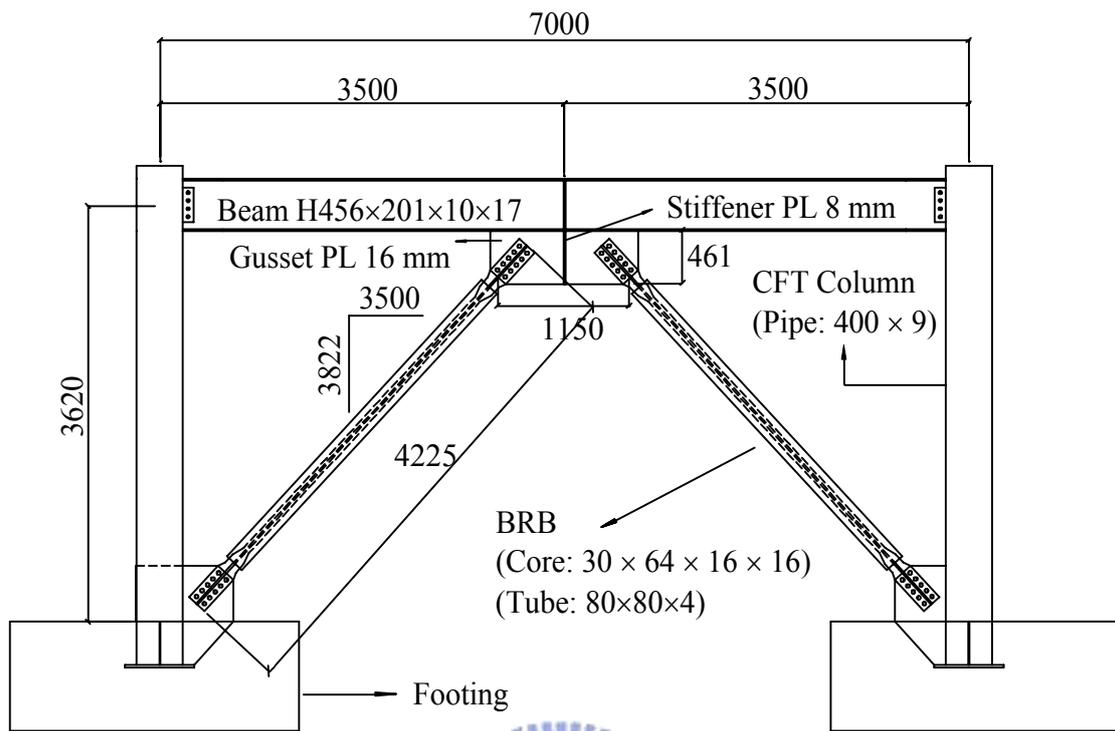


圖 1.4 一層樓斜撐構架尺寸示意圖

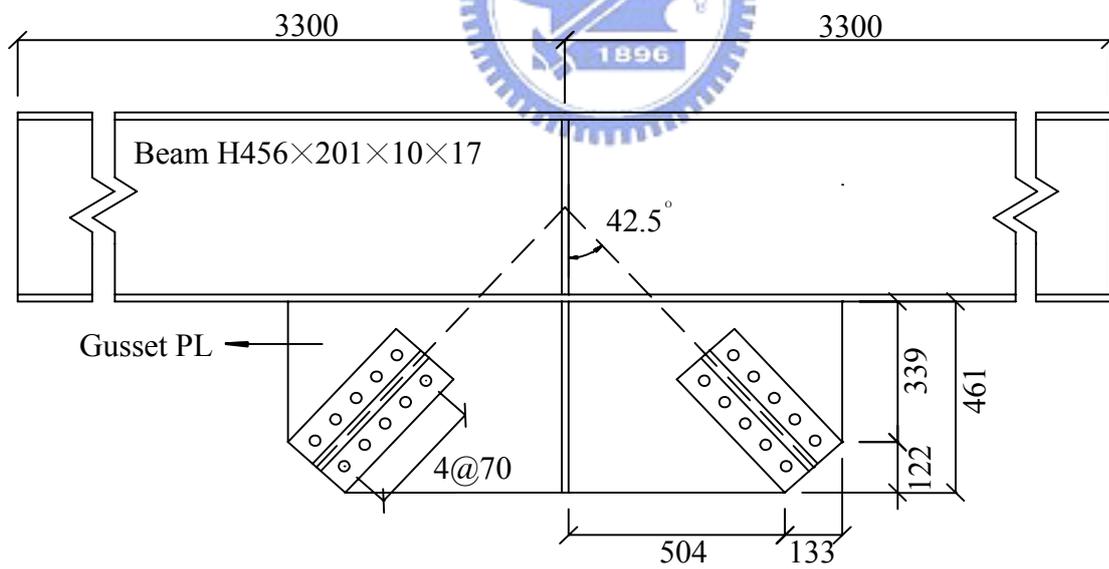


圖 1.5 接合板局部模型尺寸示意圖

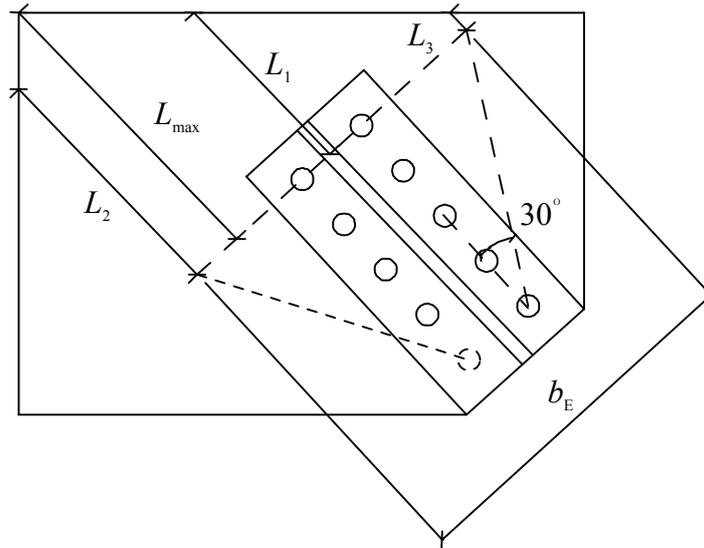
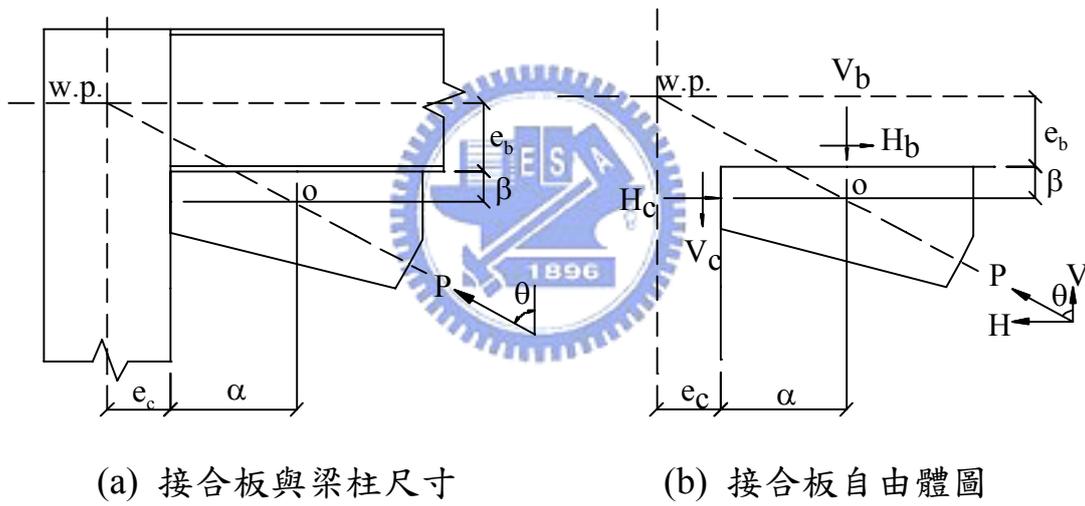


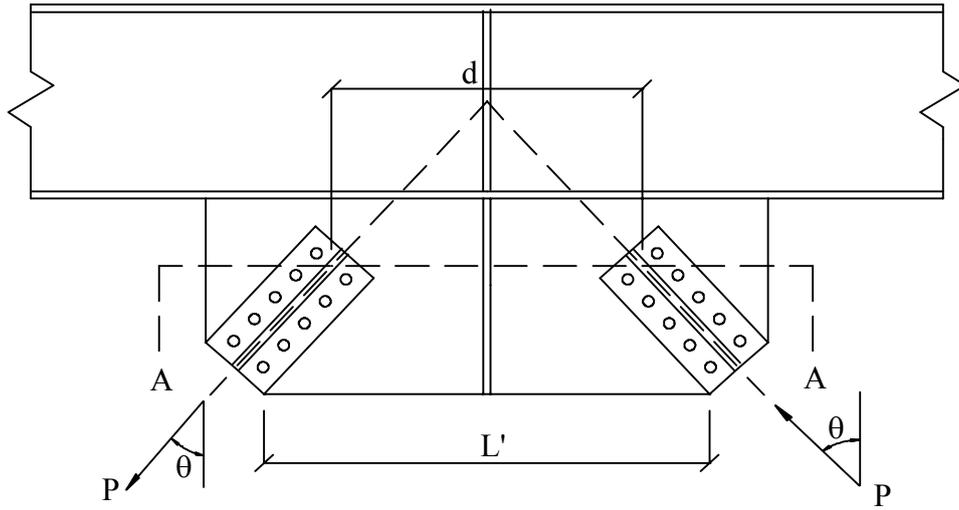
圖 2.1 Whitmore Section 與  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  及  $L_{max}$  示意圖



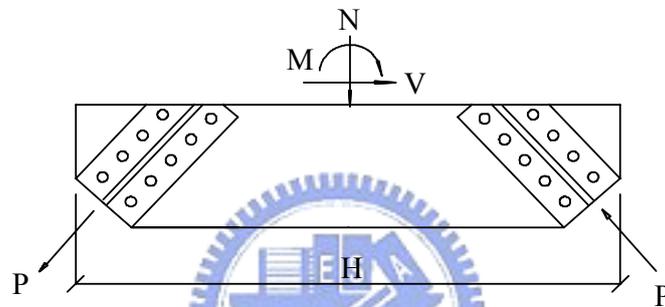
(a) 接合板與梁柱尺寸

(b) 接合板自由體圖

圖 2.2 平均力法 (Uniform Force Method) 觀念示意圖



(a) Gusset Plate Subjected to Force P



(b) Free Body Diagram

圖 2.3 接合板降伏力計算自由體圖 (Thornton 1984)

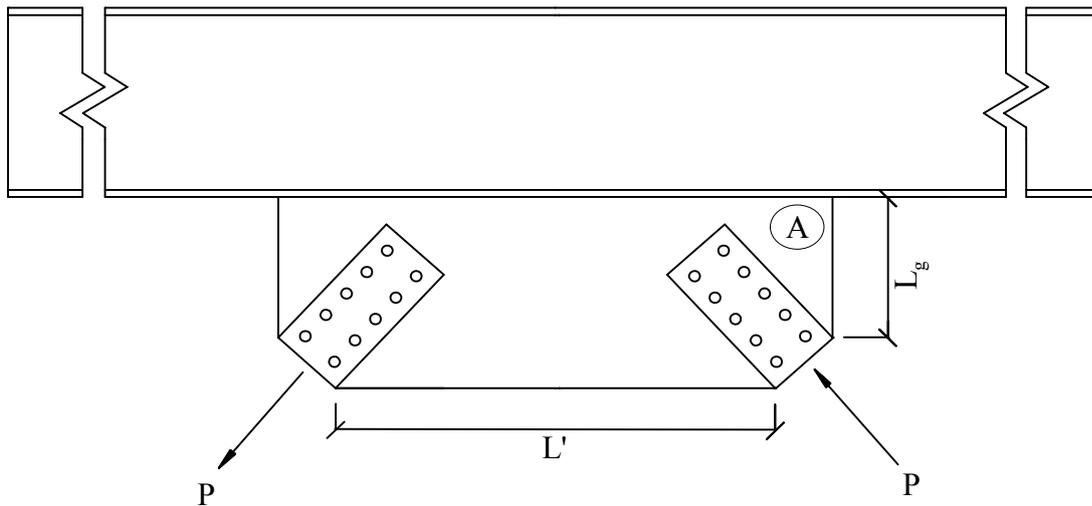


圖 2.4 Chevron-Brace (雙斜撐式) 接合板示意圖

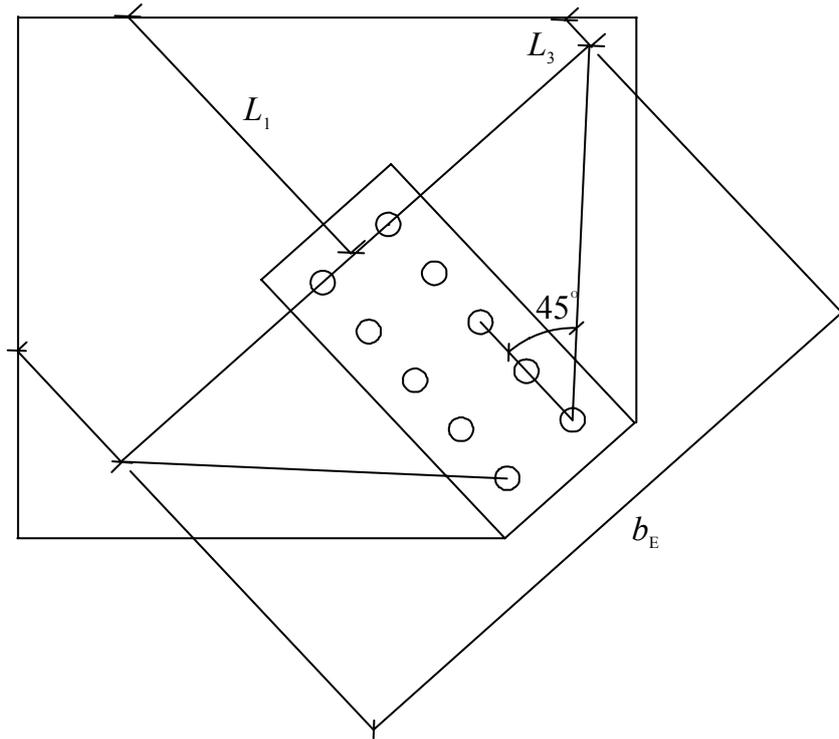


圖 2.5 Modified Thornton Method (2002)

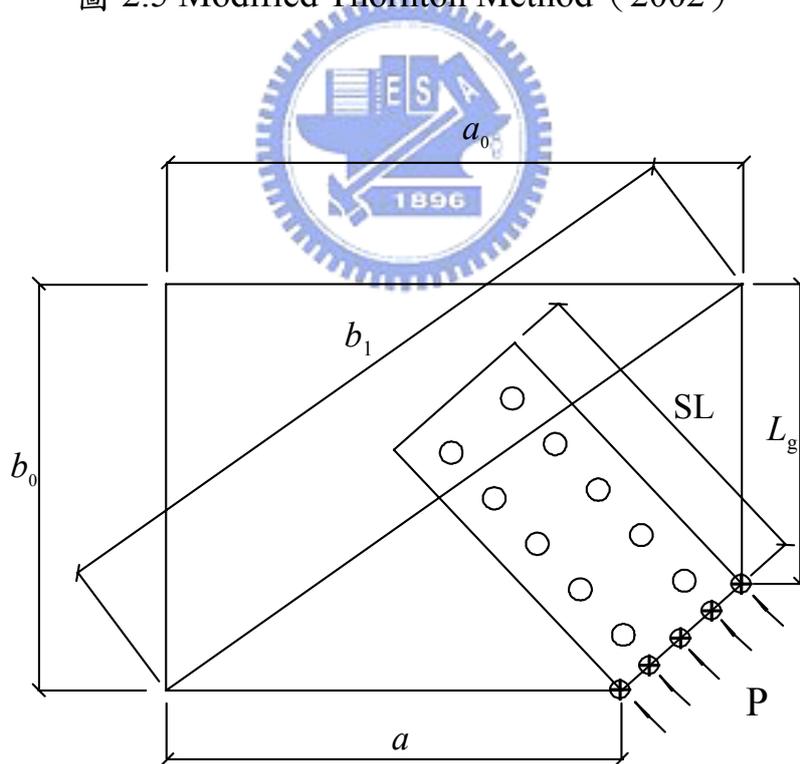


圖 2.6 Sheng's Concept (2002)

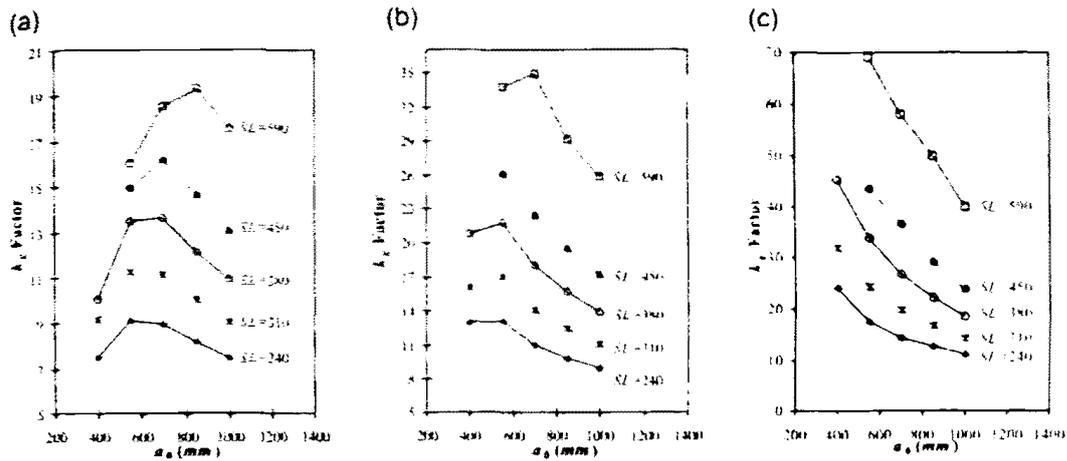


Fig. 7. (a)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.00$ ,  $t=13.3$  mm,  $E_f=E/50$ . (b)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.00$ ,  $t=9.87$  mm,  $E_f=E/50$ . (c)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.00$ ,  $t=6.5$  mm,  $E_f=E/50$ .

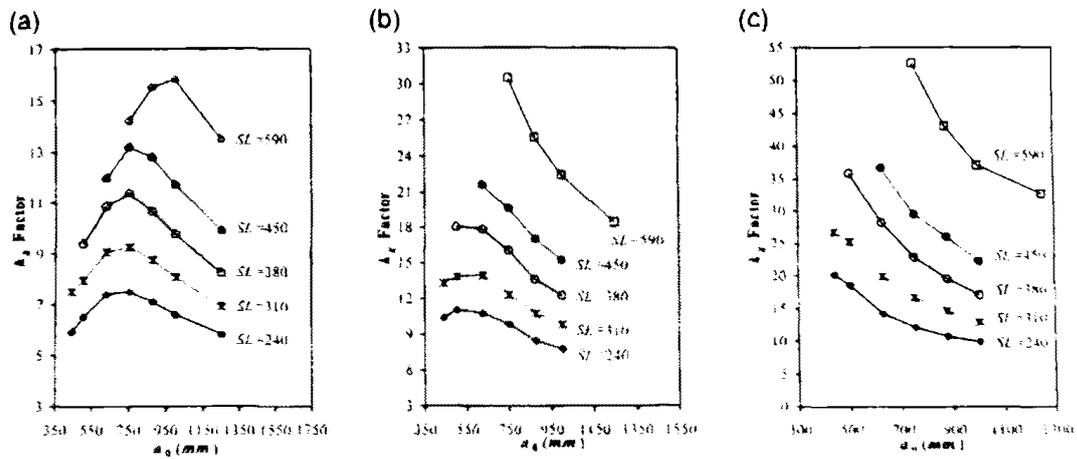


Fig. 8. (a)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.25$ ,  $t=13.3$  mm,  $E_f=E/50$ . (b)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.25$ ,  $t=9.87$  mm,  $E_f=E/50$ . (c)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.25$ ,  $t=6.5$  mm,  $E_f=E/50$ .

(a)橫軸為接合板長端( $a_0$ )長度，縱軸為  $K_g$  值。 $a_0/b_0$  之比值各為 1.00 與 1.25。

圖 2.7  $K_g$  參數示意圖 [From Sheng et al. (2002)](續)

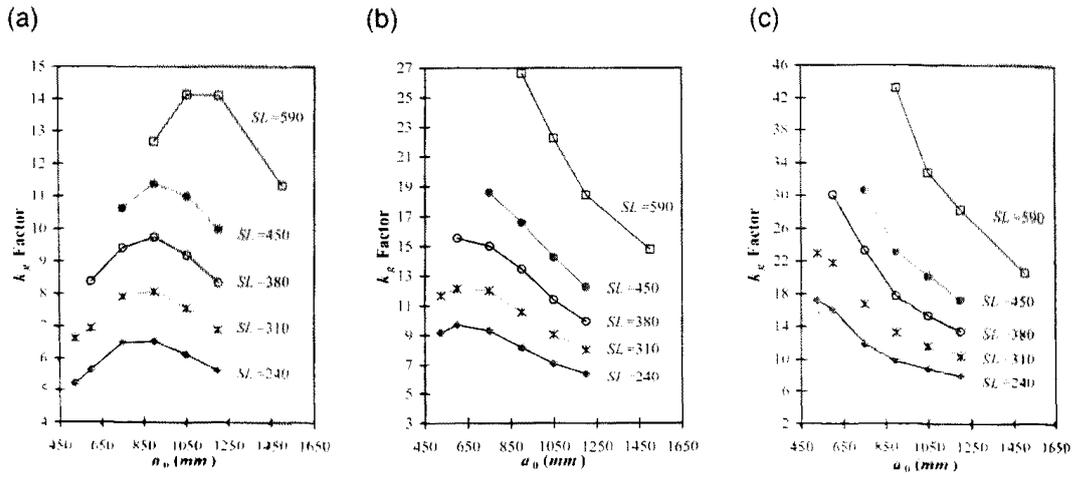


Fig. 9. (a)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.50$ ,  $t=13.3$  mm,  $E_f=E/50$ . (b)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.50$ ,  $t=9.87$  mm,  $E_f=E/50$ . (c)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=1.50$ ,  $t=6.5$  mm,  $E_f=E/50$ .

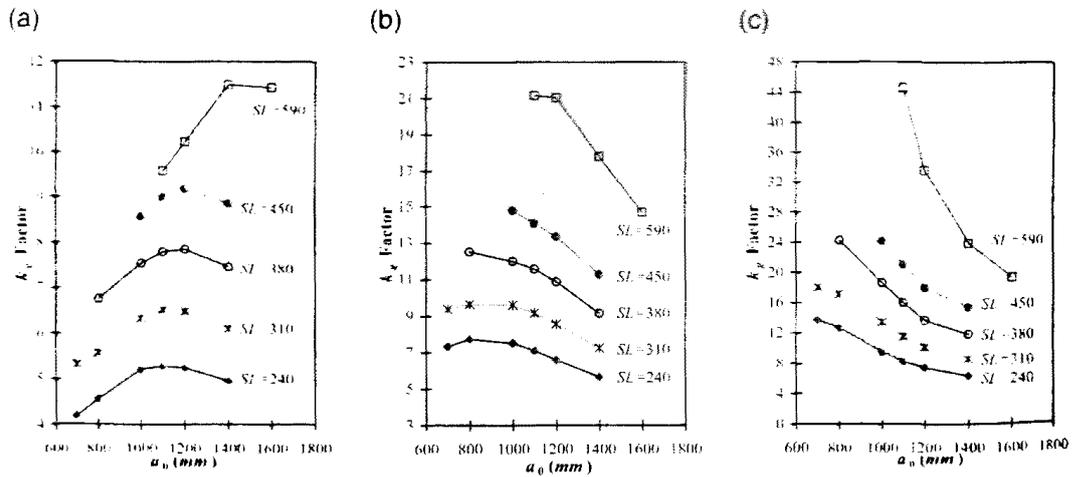


Fig. 10. (a)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=2.00$ ,  $t=13.3$  mm,  $E_f=E/50$ . (b)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=2.00$ ,  $t=9.87$  mm,  $E_f=E/50$ . (c)  $k_g$  factors for specimens with  $a_0/b_0=2.00$ ,  $t=6.5$  mm,  $E_f=E/50$ .

(b) 橫軸為接合板長端( $a_0$ )長度，縱軸為  $K_g$  值。 $a_0/b_0$  之比值各為 1.50 與 2.00。

圖 2.7  $K_g$  參數示意圖 [From Sheng et al. (2002)]

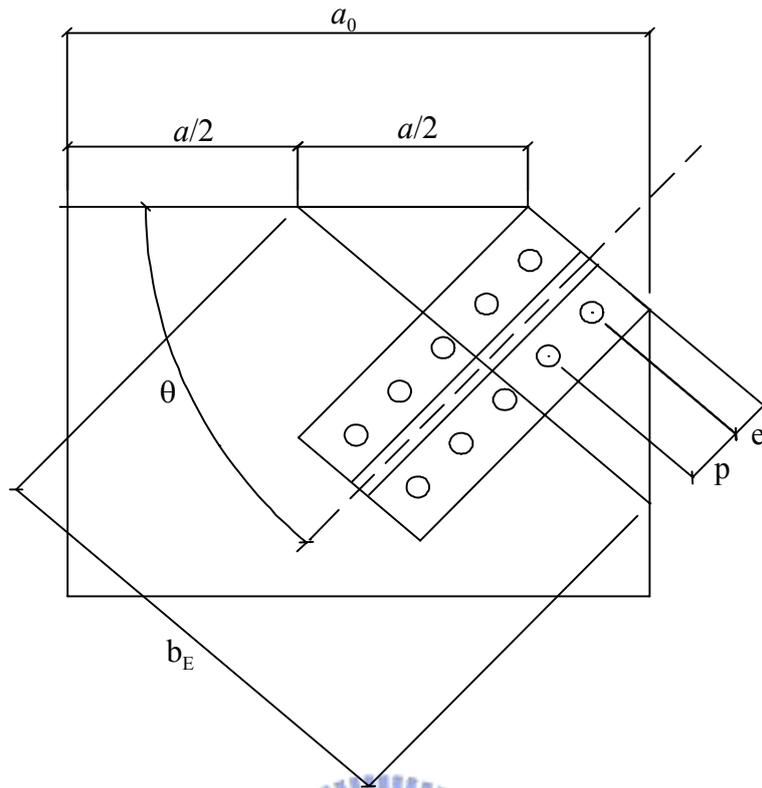


圖 2.8 接合板尺寸 (用來計算局部挫屈)

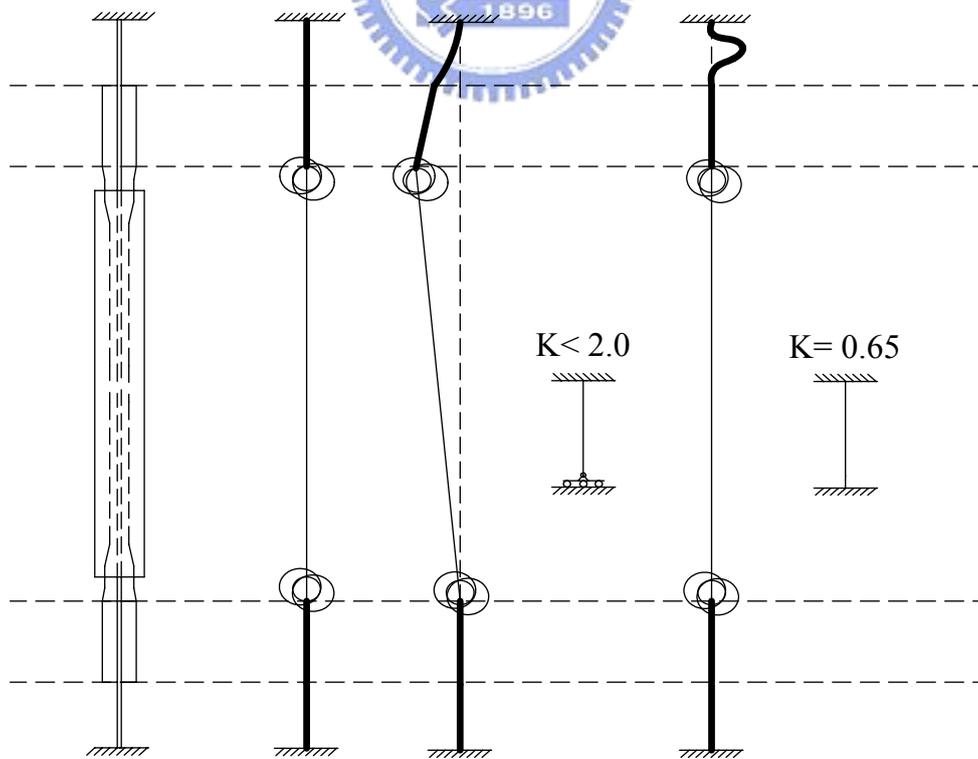


圖 2.9 斜撐與接合板接合情形與接合板挫屈行為示意圖

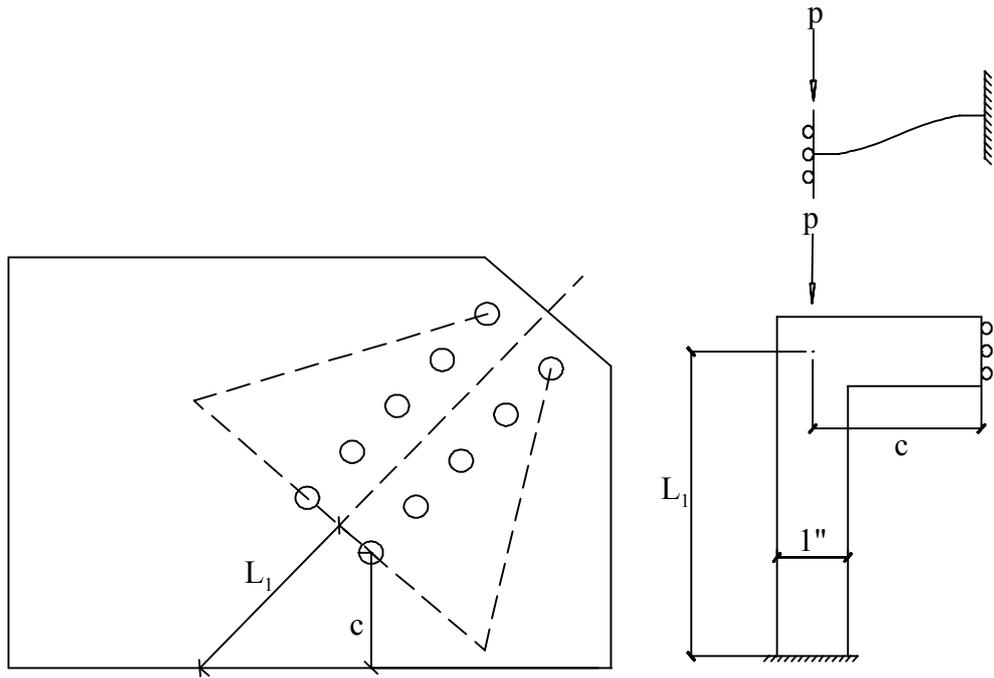
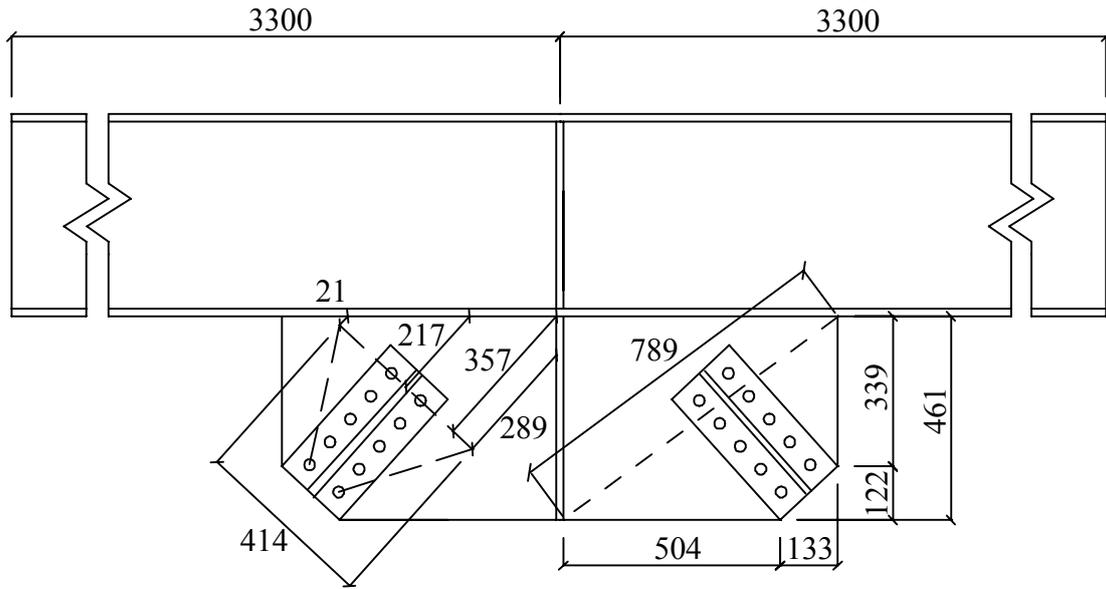
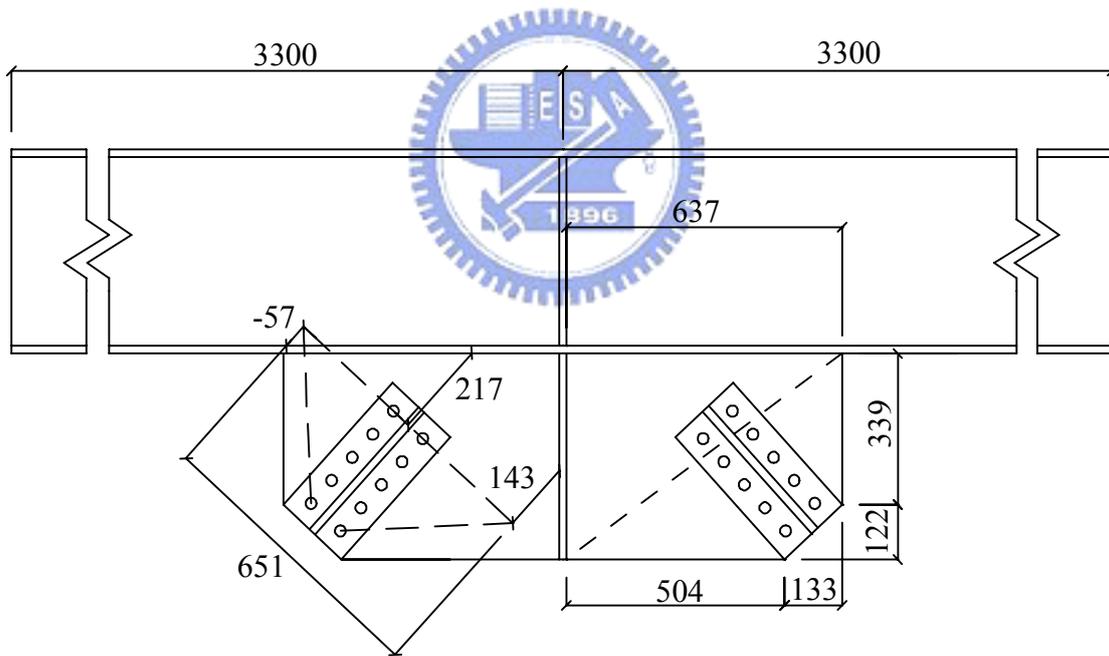


圖 2.10 接合板結實斷面之定義



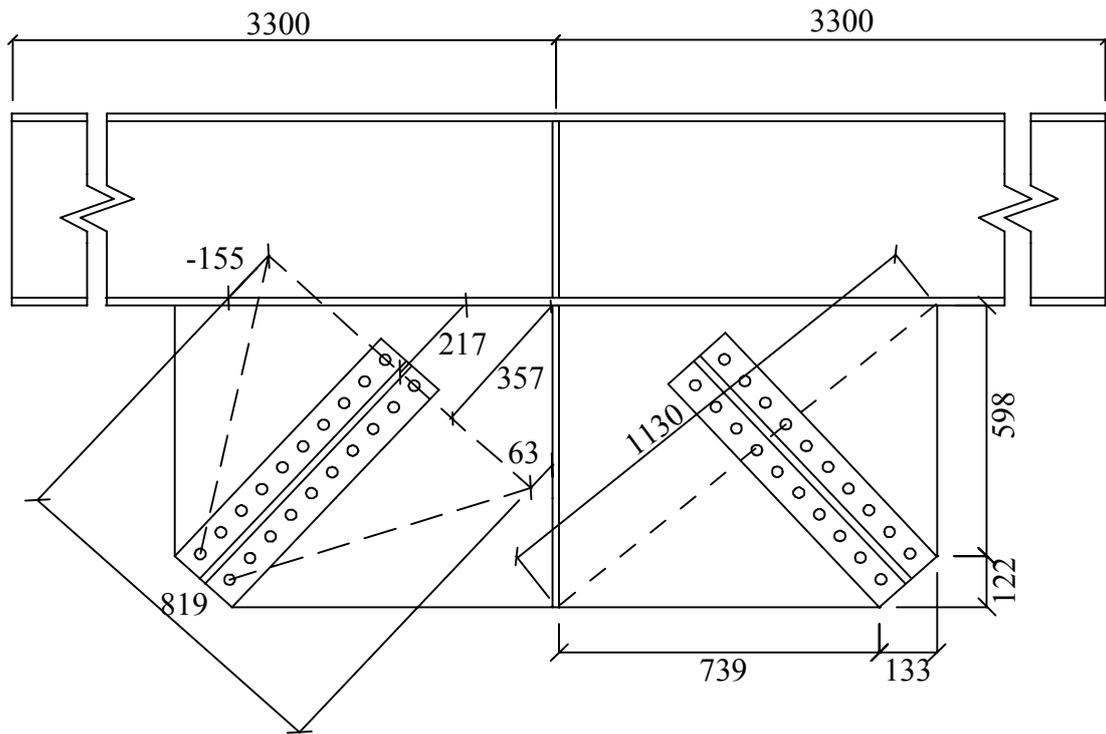


(a) Whitmore Section 下有效長度示意圖

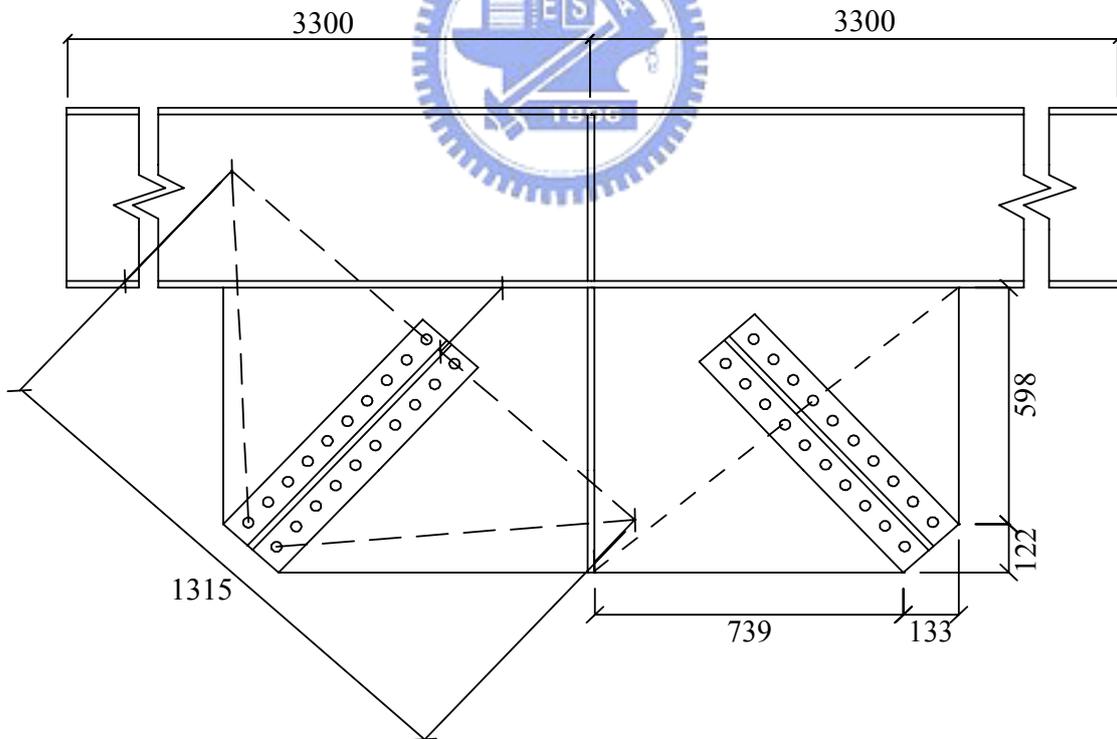


(b) Modified Thornton 法有效長度示意圖

圖 2.11 原尺寸接合板示意圖

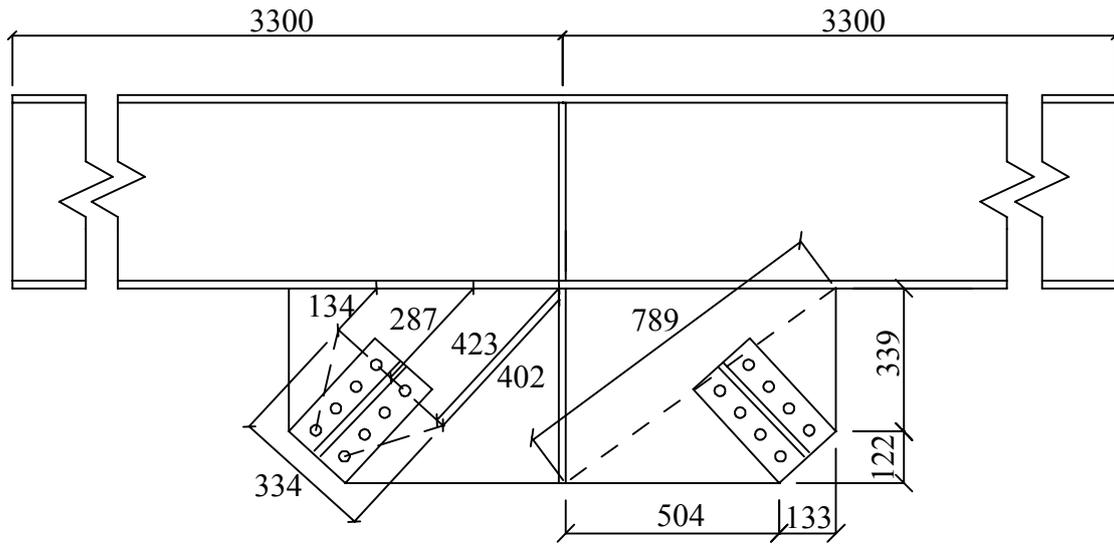


(a) Whitmore Section 下有效長度示意圖

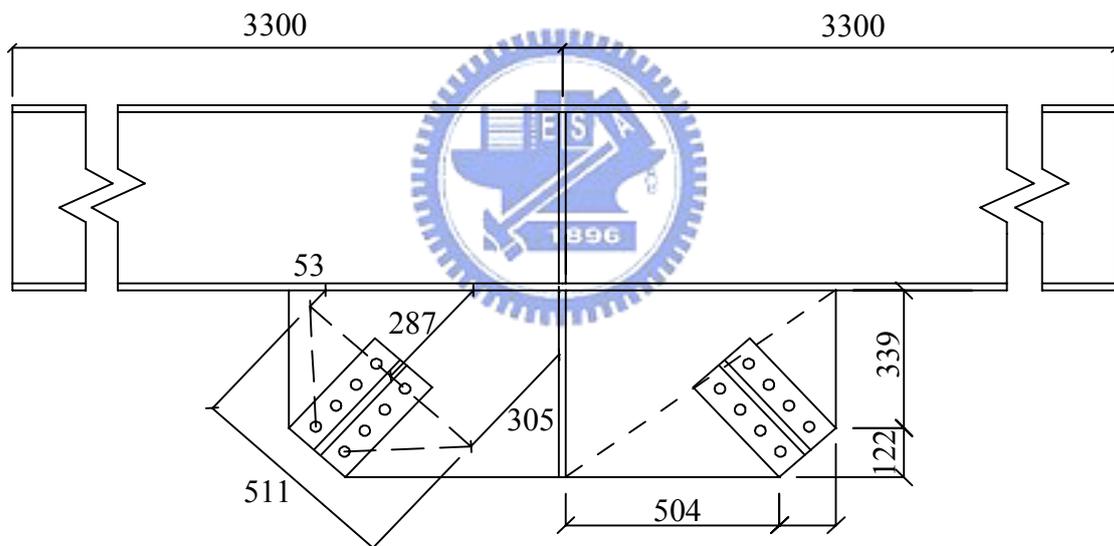


(b) Modified Thornton 法有效長度示意圖

圖 2.12 加大尺寸接合板示意圖

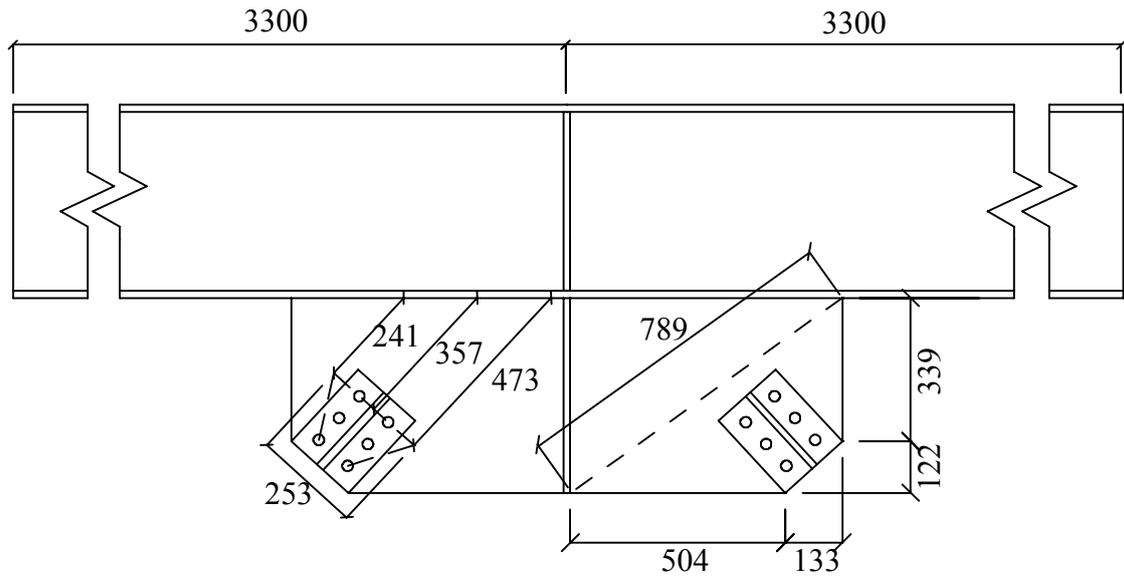


(a) Whitmore Section 下有效長度示意圖

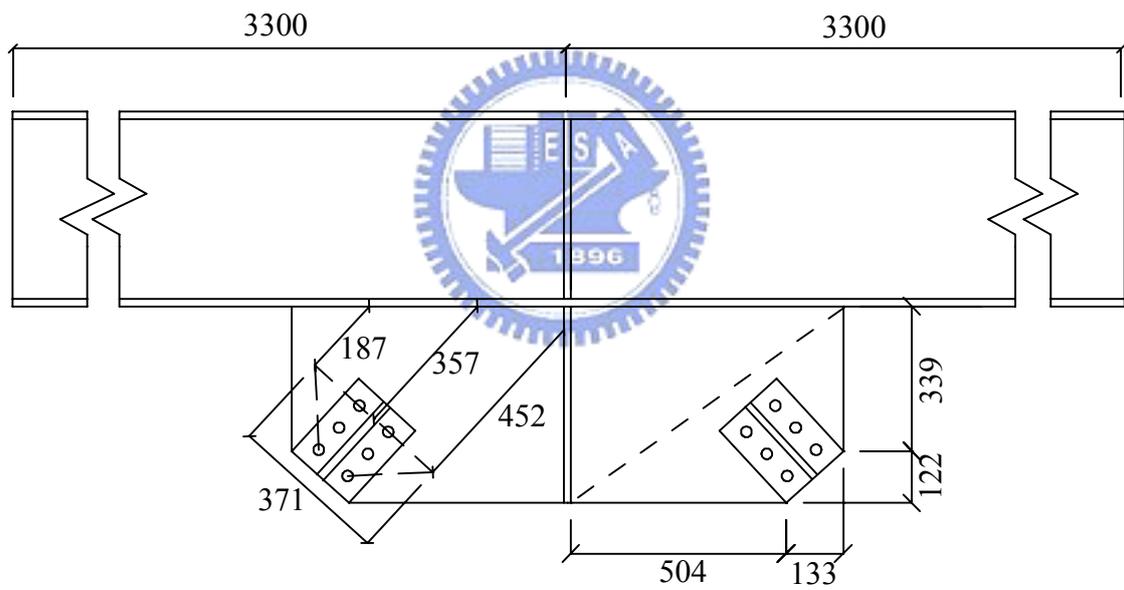


(b) Modified Thornton 法有效長度示意圖

圖 2.13 接合板接合長度在接合板彎折線上之示意圖

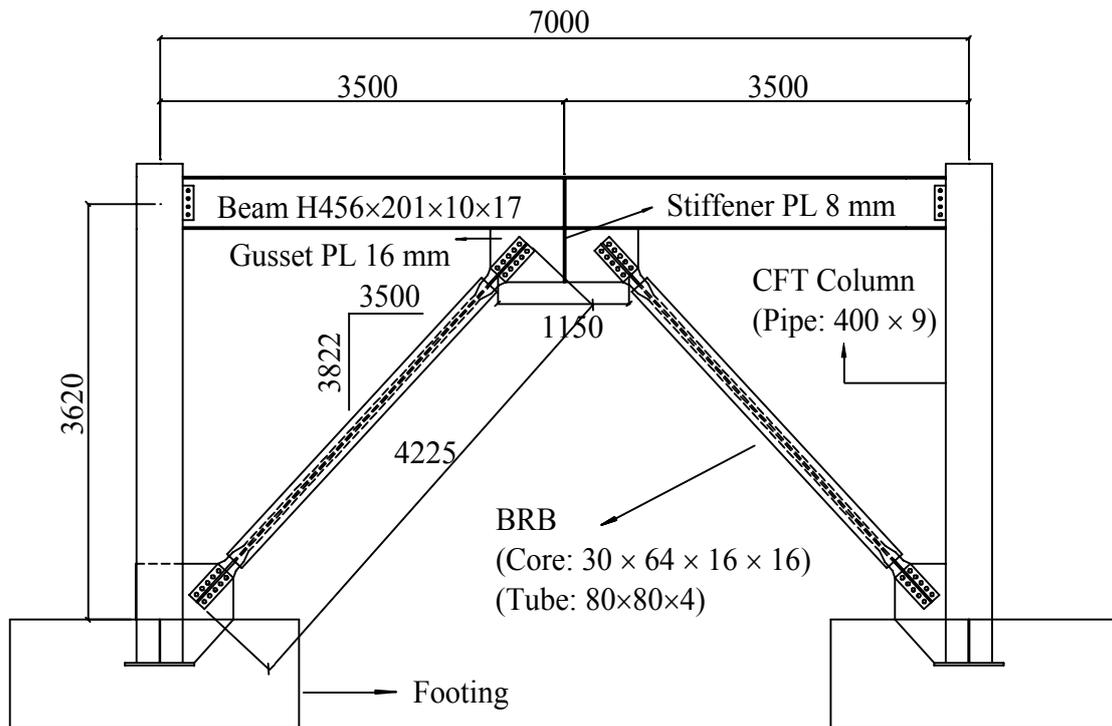


(a) Whitmore Section 下有效長度示意圖

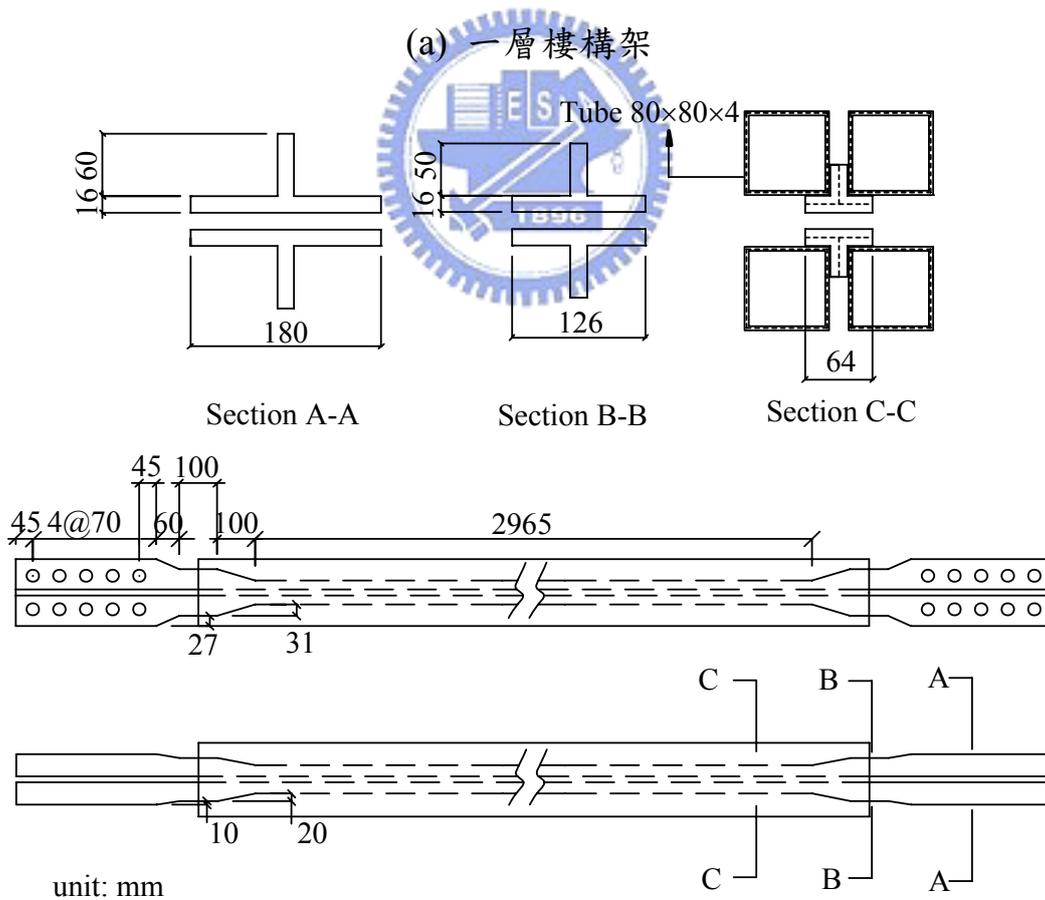


(b) Modified Thornton 法有效長度示意圖

圖 2.14 接合板接合長度在接合板彎折線外之示意圖



(a) 一層樓構架



(b) BRB 細節

圖 3.1 一層樓構架及 BRB 細節

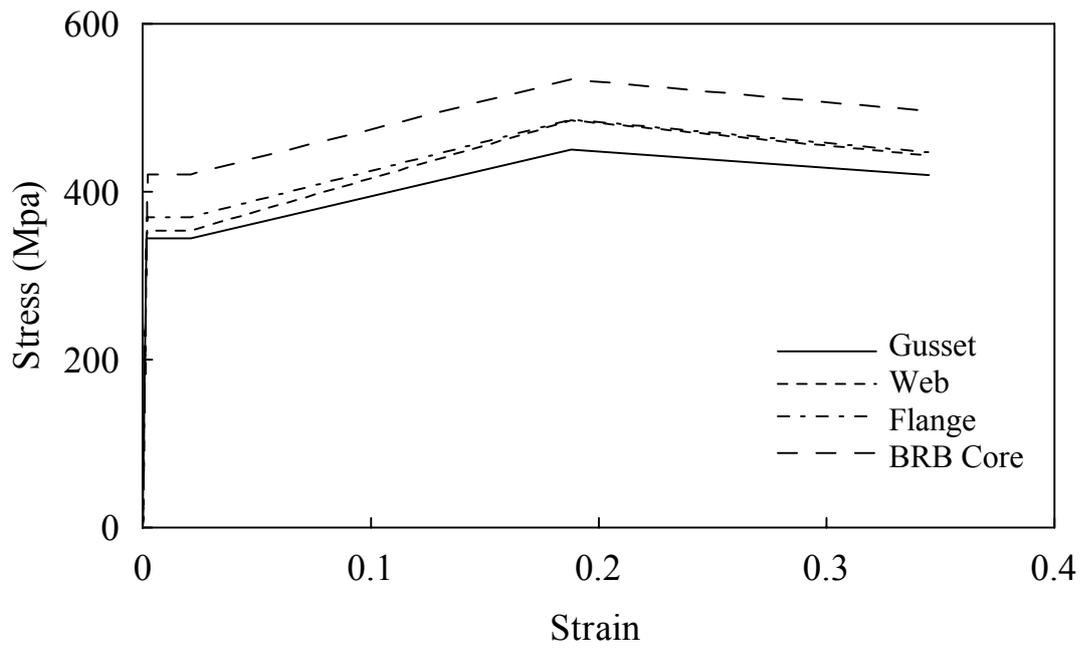
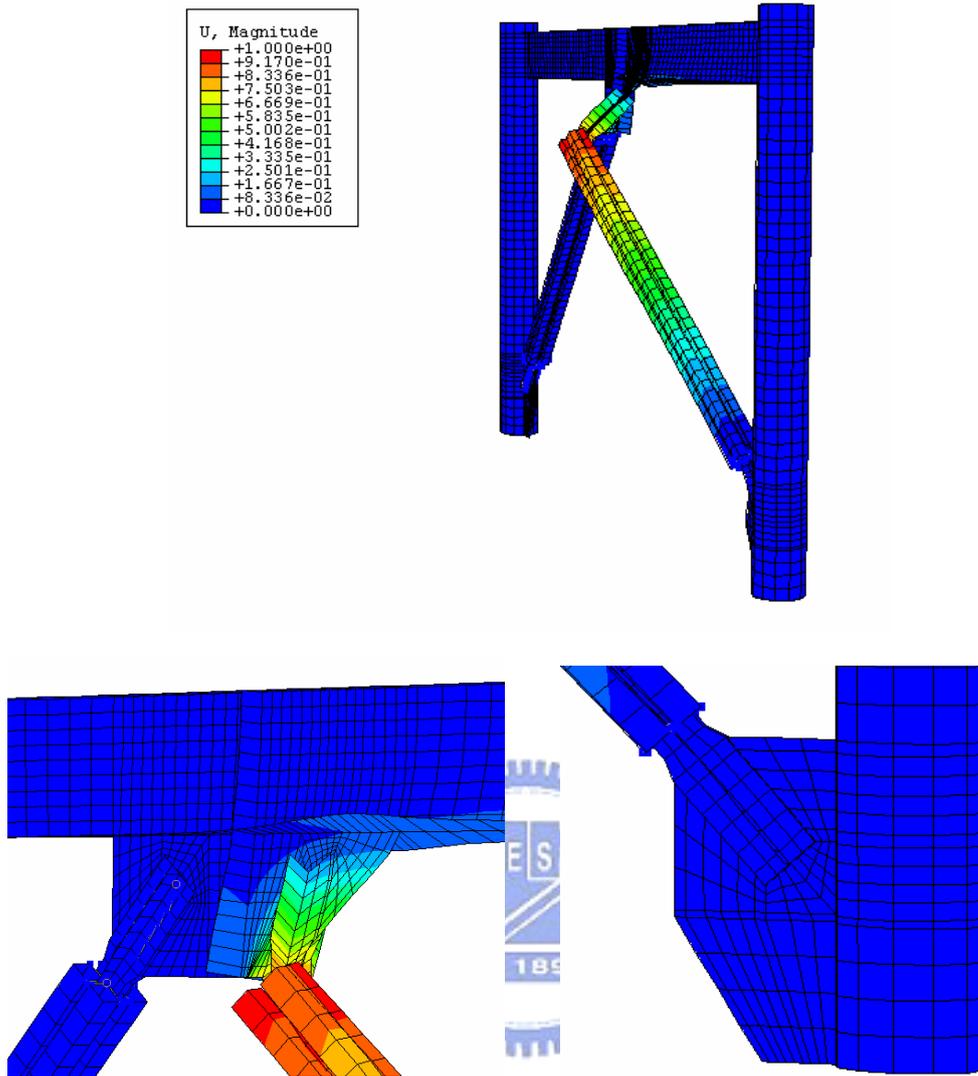


圖 3.2 材料性質應力與應變關係曲線





(a) 第一模態挫屈

圖 3.3 一層樓構架挫屈模態(續)

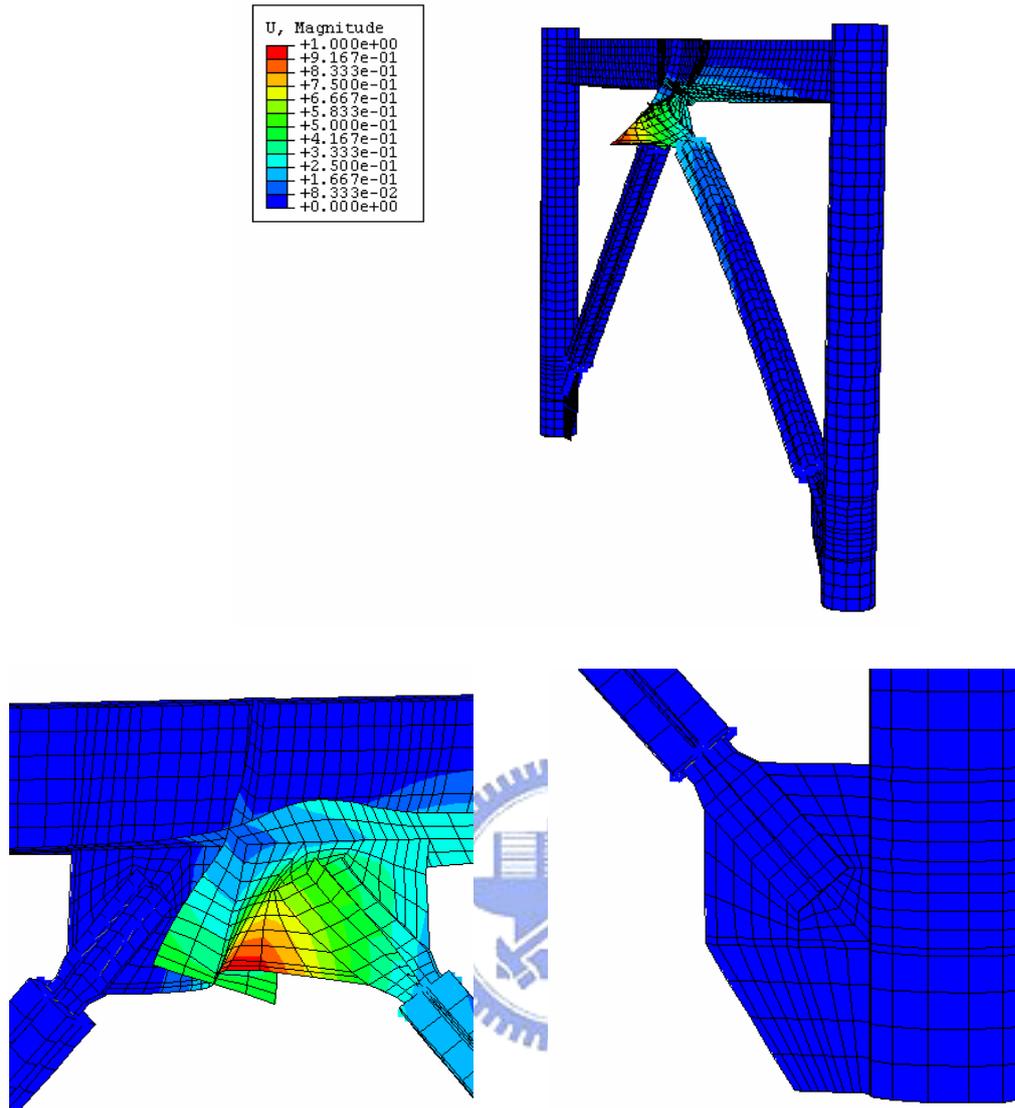
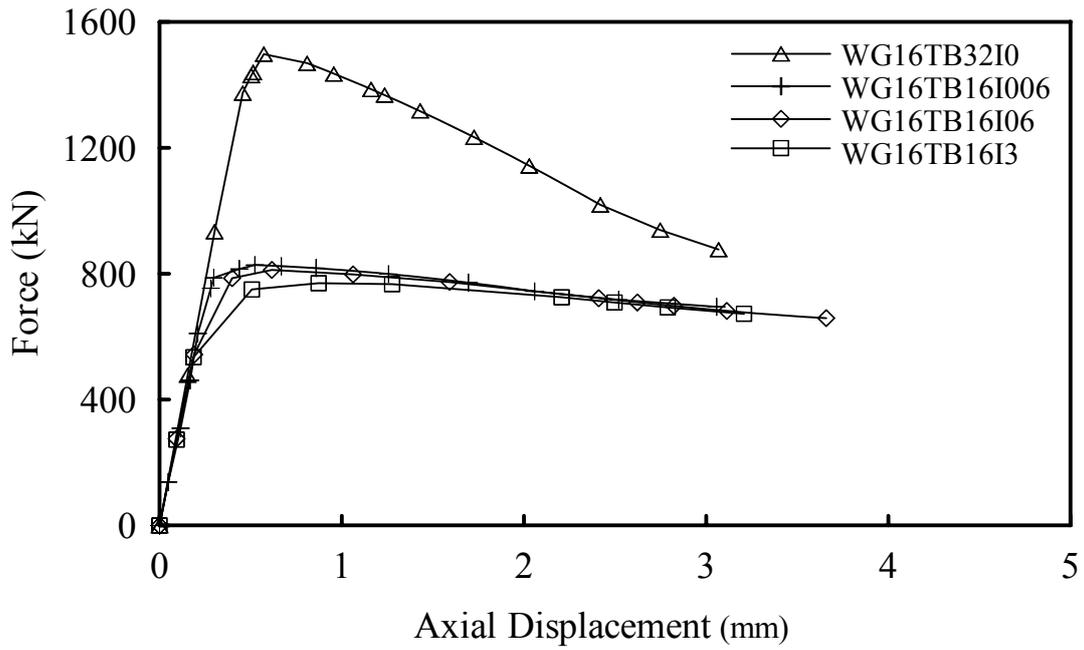
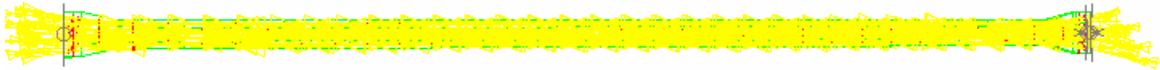
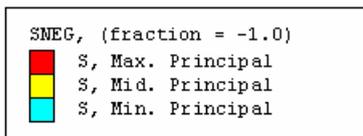


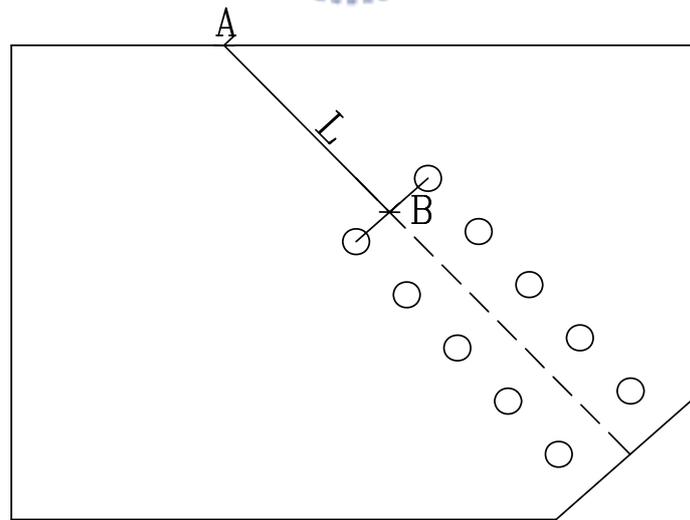
圖 3.3 一層樓構架挫屈模態



(a) 軸力與軸位移關係

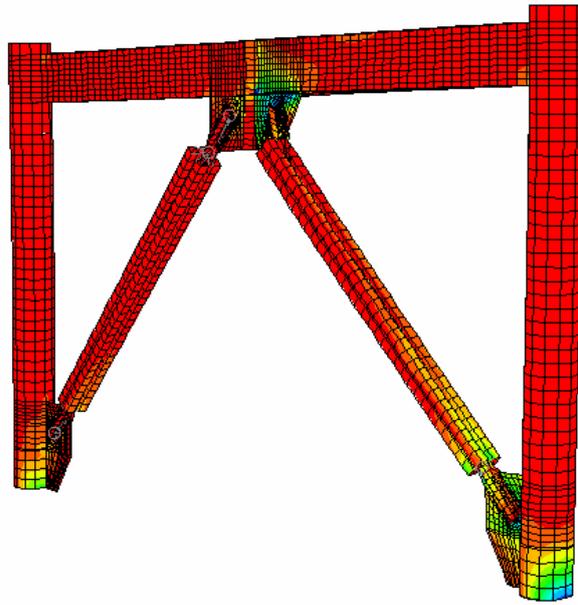
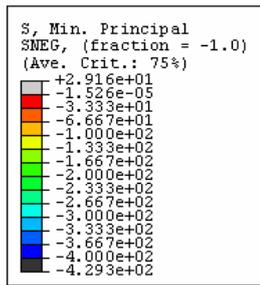


(b) BRB 核心段之 Min-Principal 方向

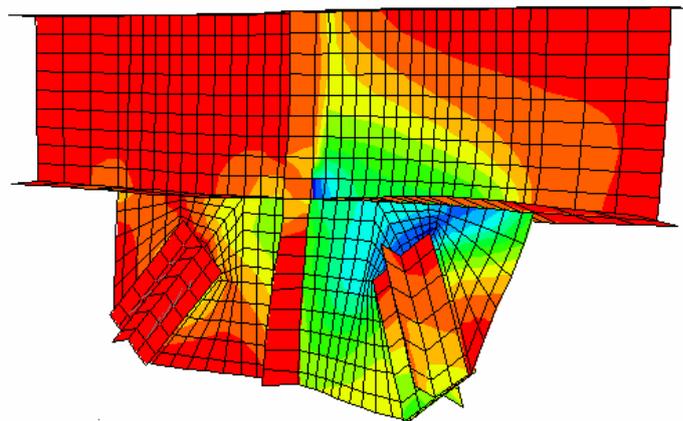
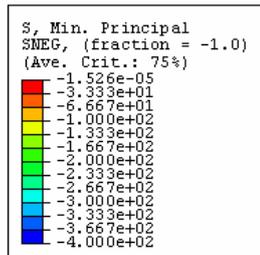


(c) 軸位移計算示意圖

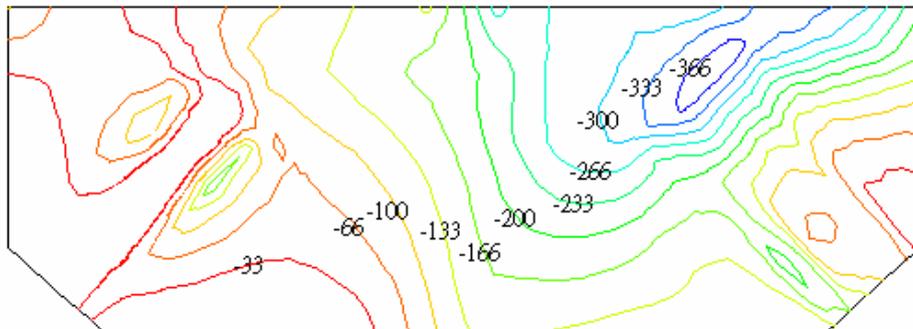
圖 3.4 軸力與軸位移及力量位移計算圖 (一層樓構架)



(a) 整體構架挫屈變形

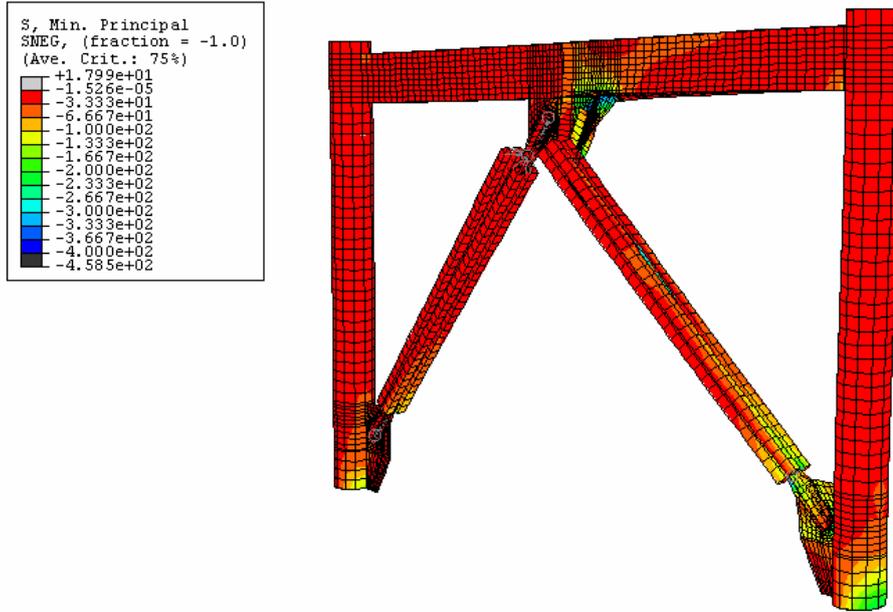


(b) 接合板挫屈應力圖

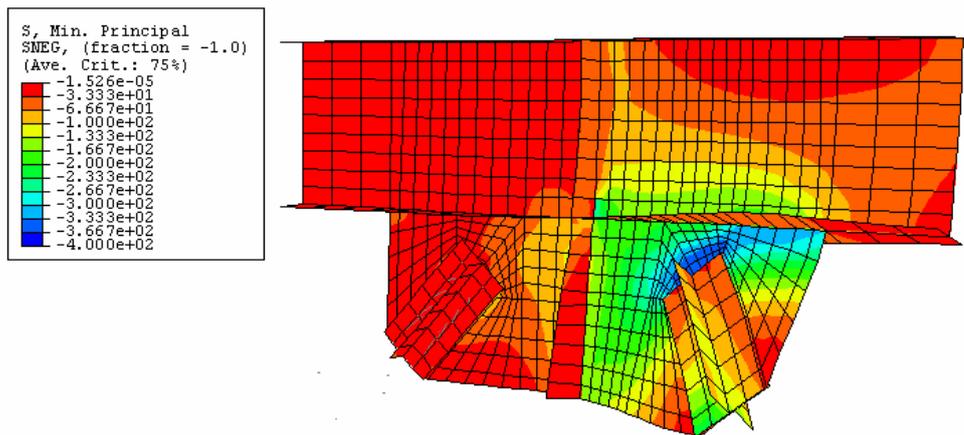


(c) 最小主應力分布圖 (Min-Principal)

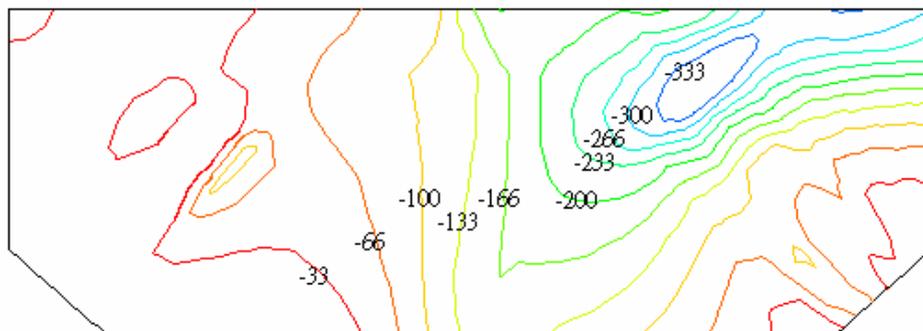
圖 3.5 整體構架挫屈變形及挫屈應力圖 (WG16I0TB32)



(a) 整體構架挫屈變形



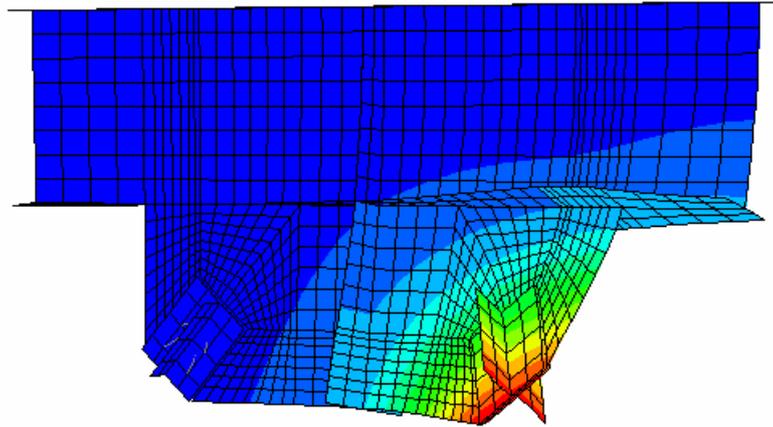
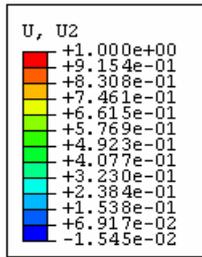
(b) 接合板挫屈應力圖



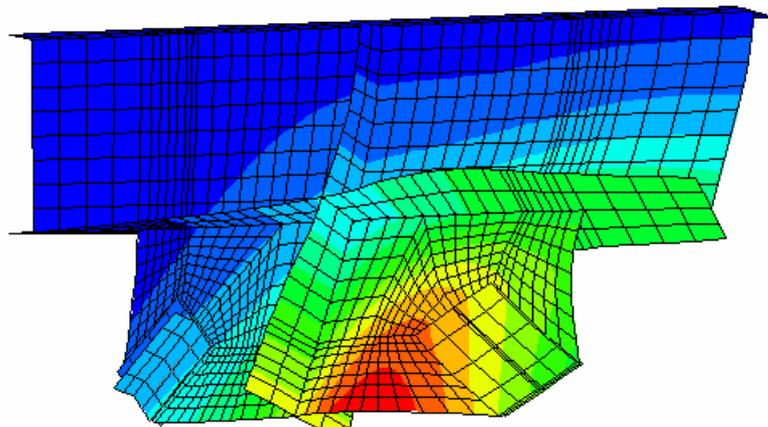
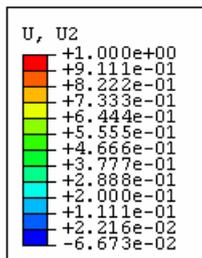
(c) 最小主應力分布圖 (Min-Principal)

圖 3.6 整體構架挫屈變形及挫屈應力圖 (WG16I2TB16)





(a) 第一模態



(b) 第二模態

圖 3.9 接合板模型挫屈模態

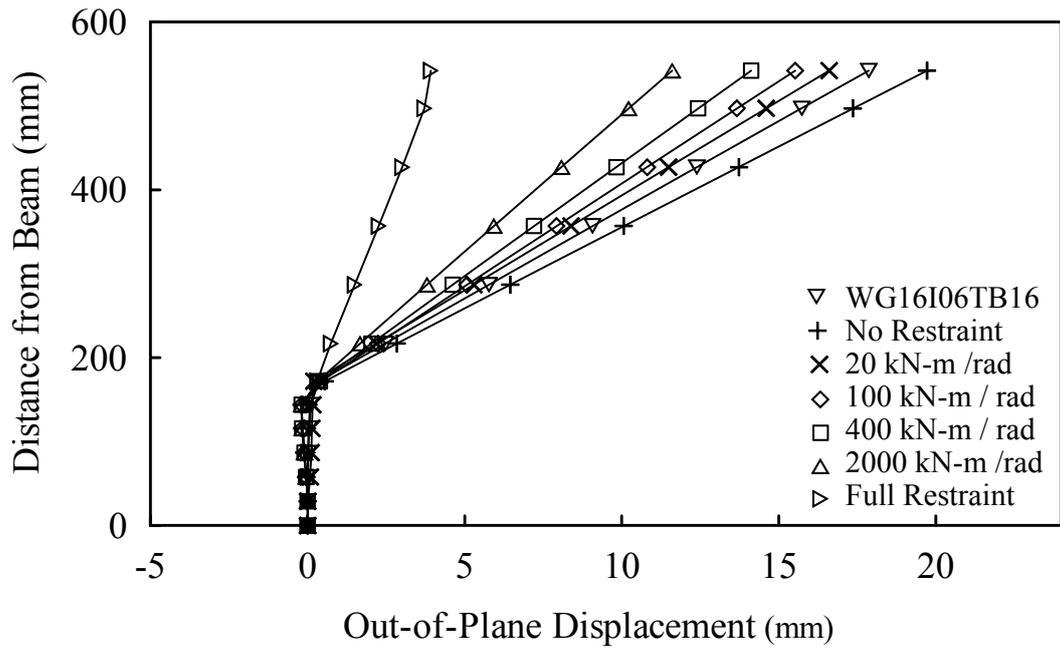


圖 3.10 接合板在各種束制情形下面外位移與挫屈形式之比較

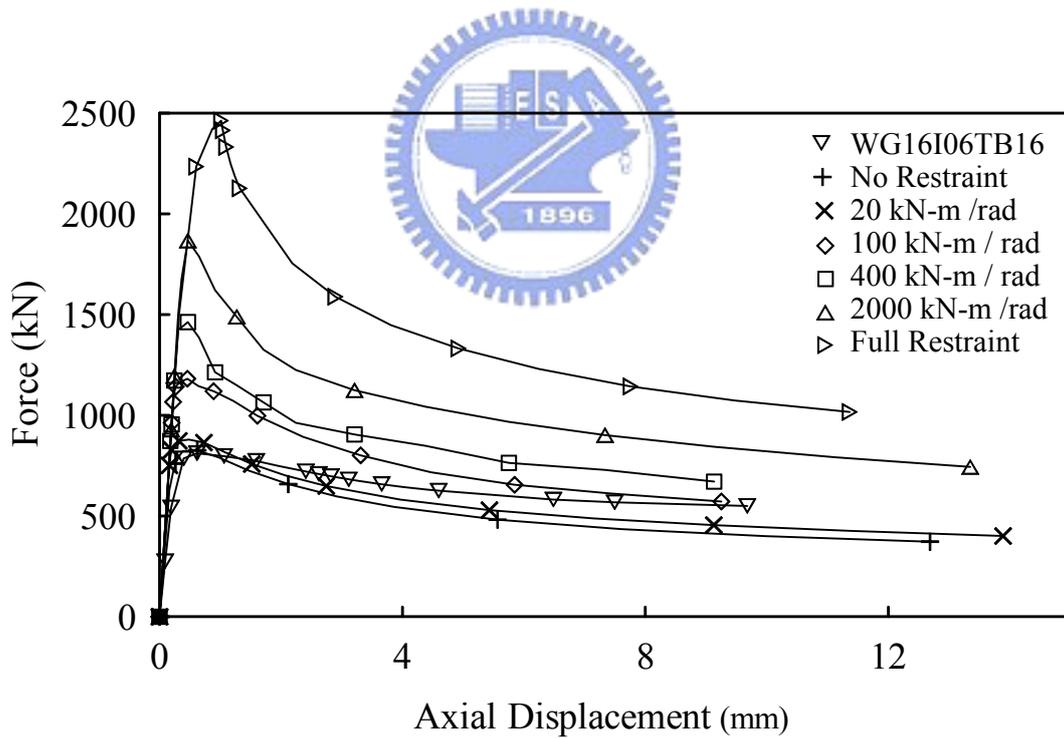
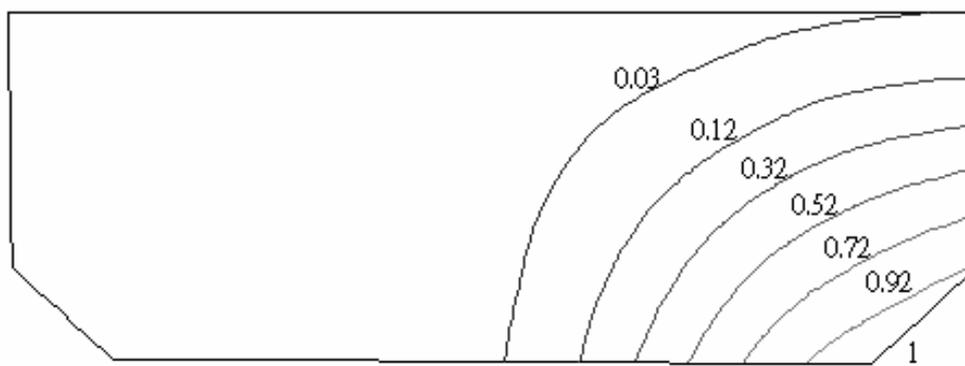
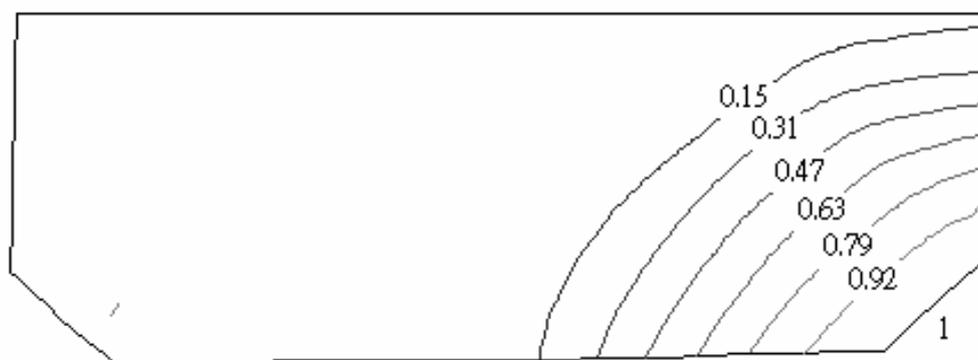


圖 3.11 接合板在各種束制下之軸力與軸位移圖

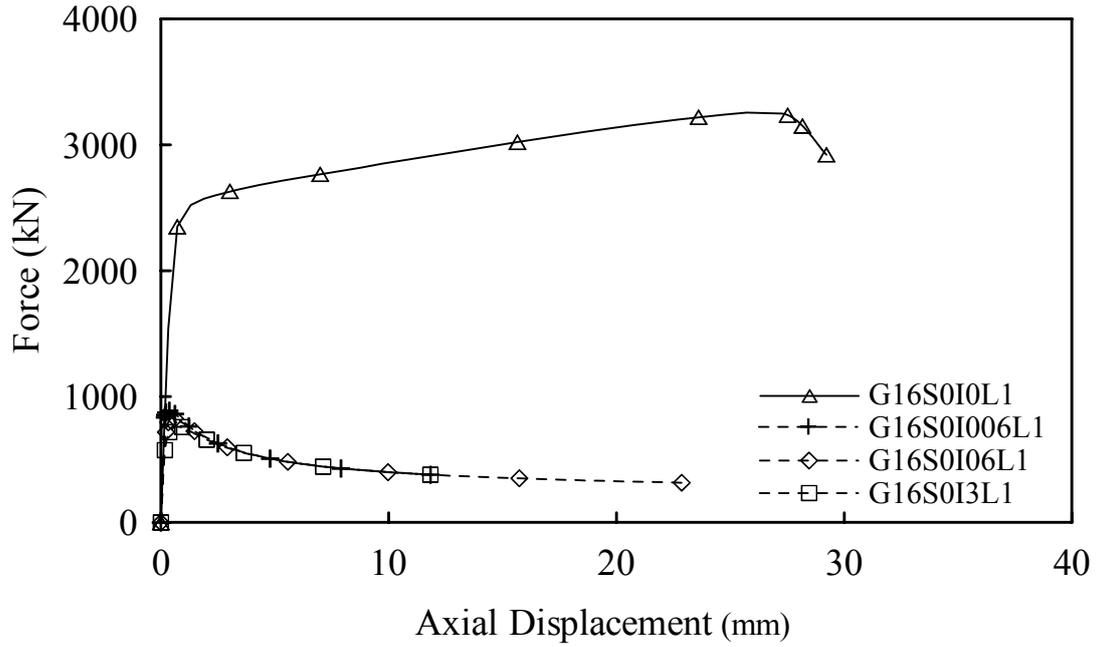


(a) Fixed-Free Mode

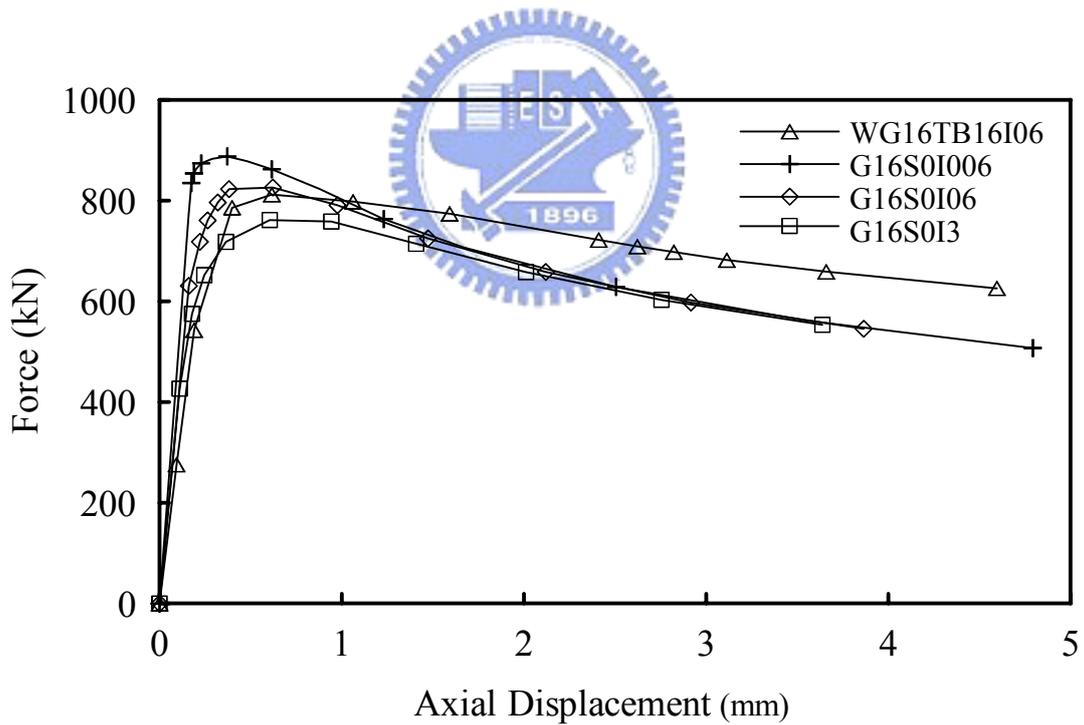


(b) Fixed-Guided Mode

圖 3.12 挫屈時（極限強度）時接合板面外變位分布

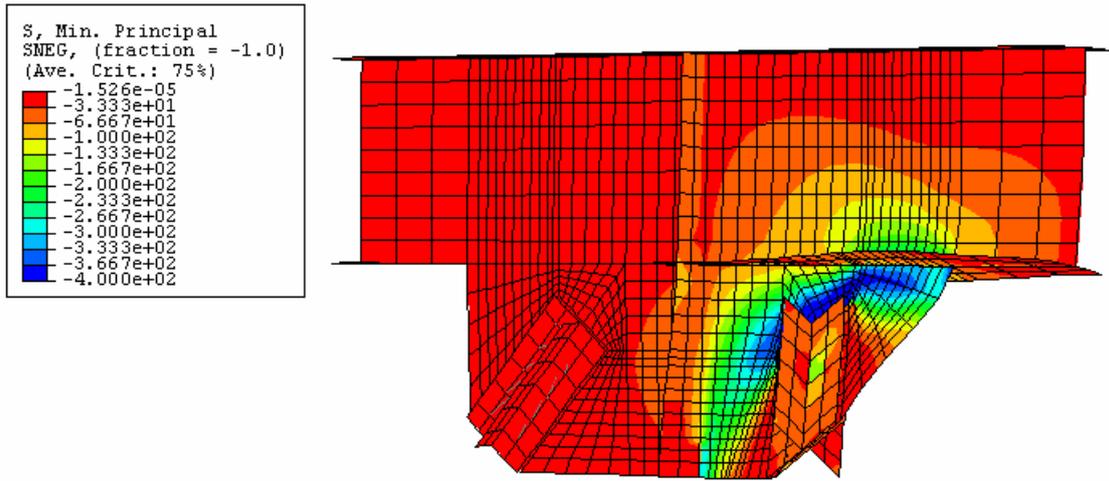


(a) 比較施加初始面外變位與直接側推分析

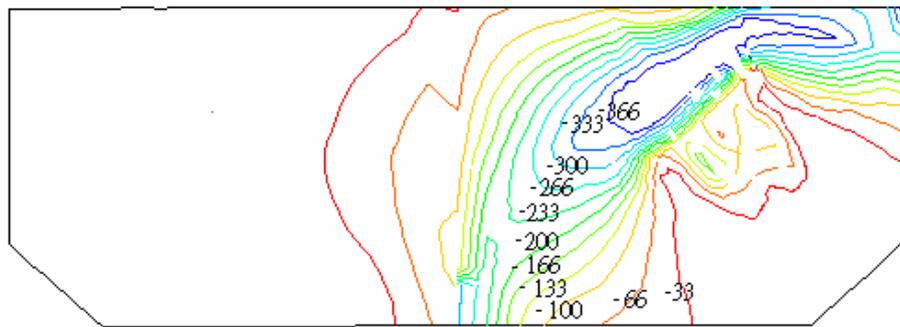


(b) 比較局部模型與構架模型之軸力與軸位移關係

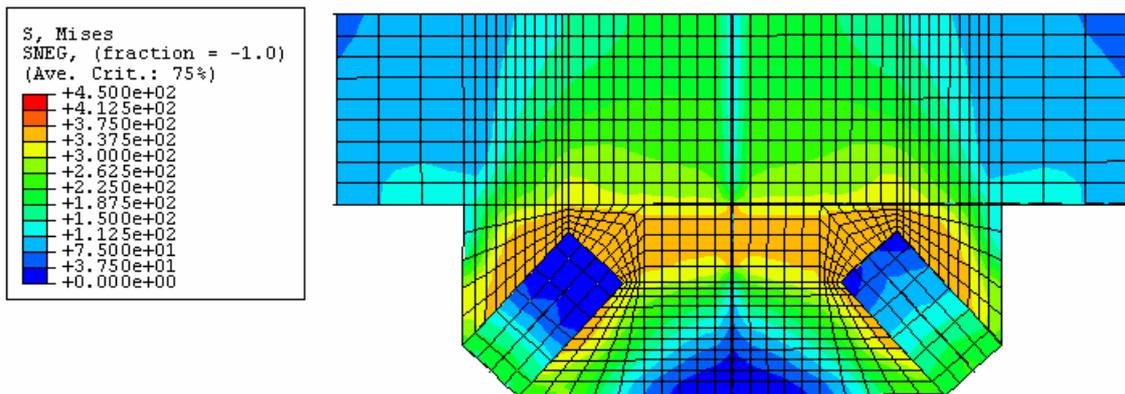
圖 3.13 接合板局部模型之軸力與軸位移圖



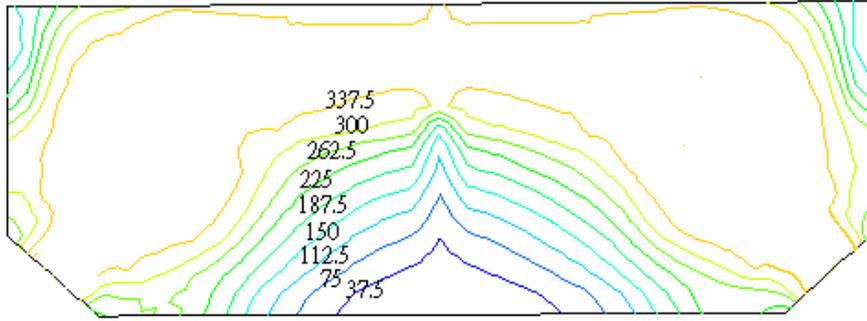
(a) 接合板挫屈之 Min-Principal 應力圖 (G16S0I06L1)



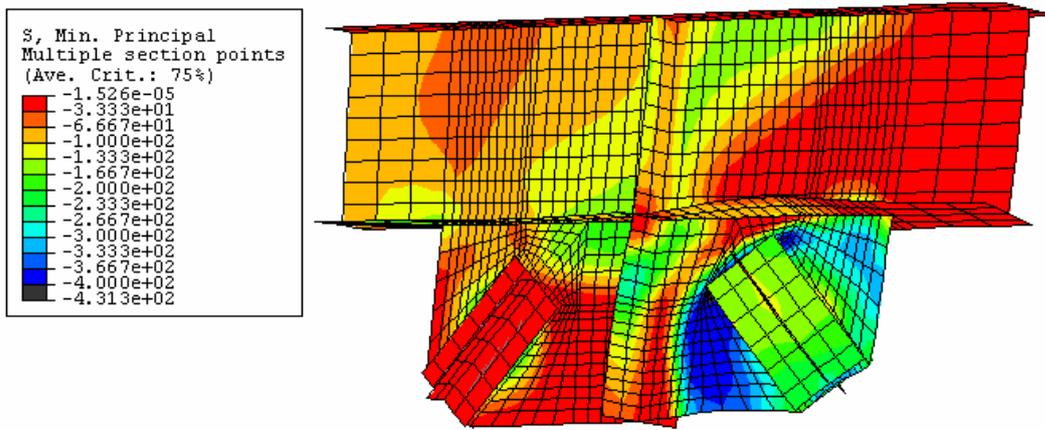
(b) Min-Principal 挫屈應力分佈圖 (G16S0I06L1)



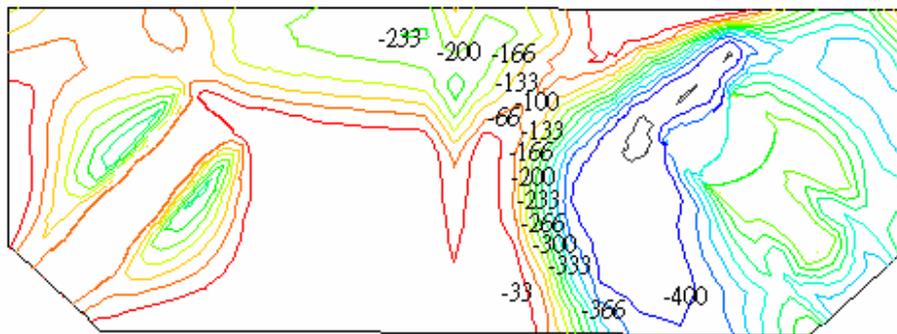
(c) Von-Mises 降伏應力圖 (G16S0I0L1)



(d) Von-Mise 降伏應力分佈圖 (G16S0I0L1)

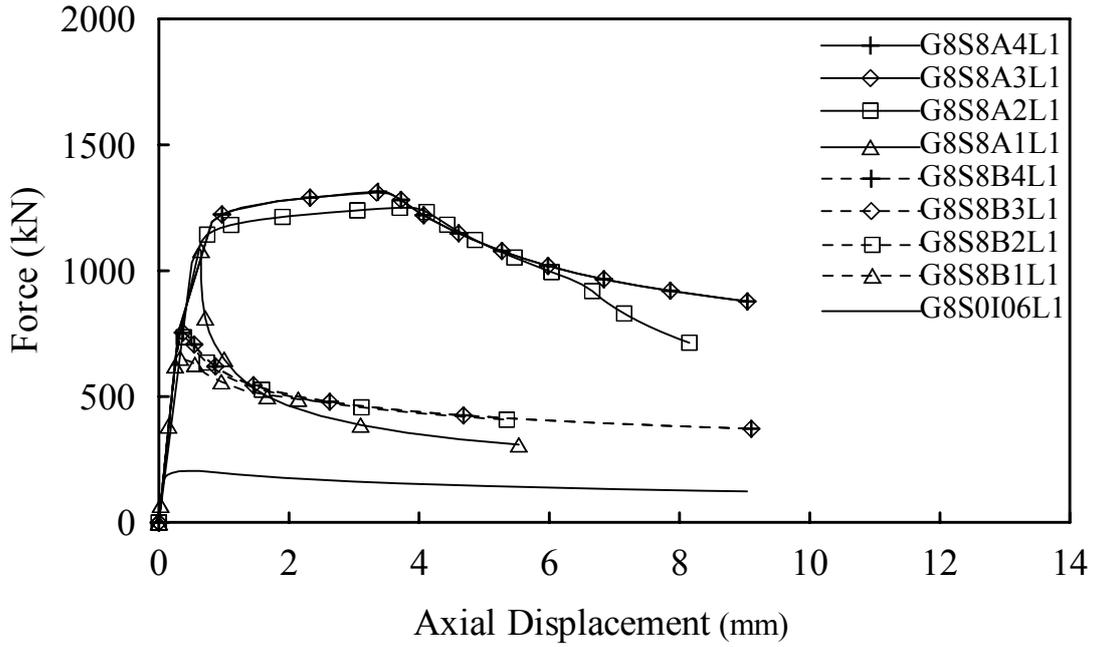


(e) Min-Principal 長端局部挫屈應力圖 (G16S0I0L1)

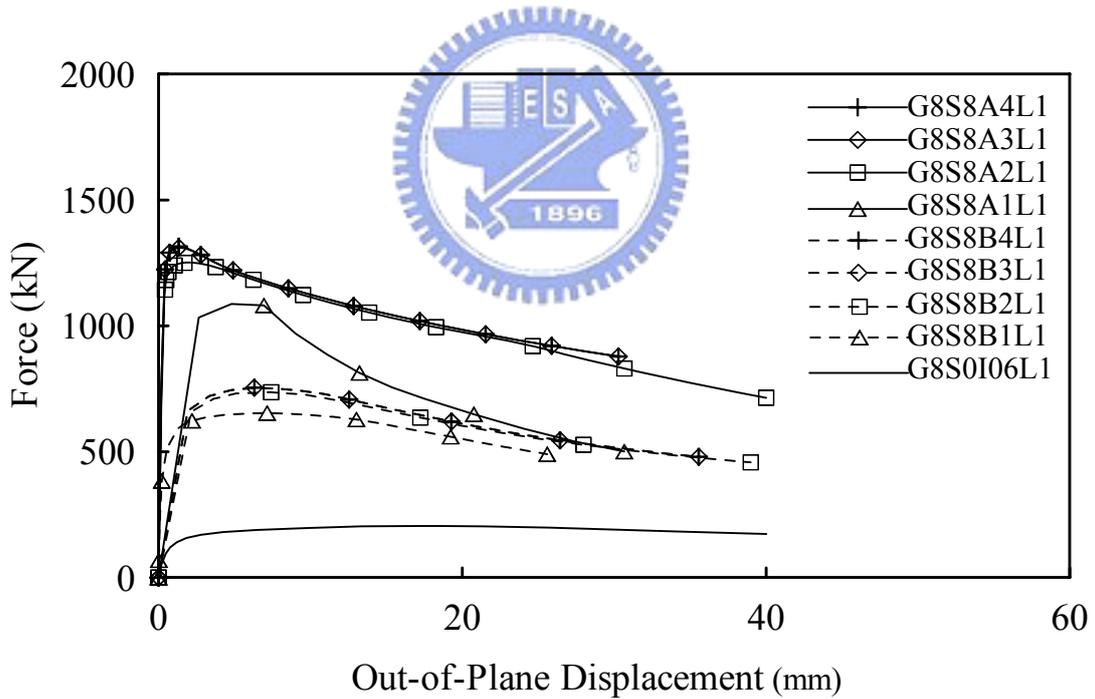


(f) Min-Principal 長端挫屈應力分佈圖 (G16S0I0L1)

圖 3.14 接合板破壞時應力示意圖

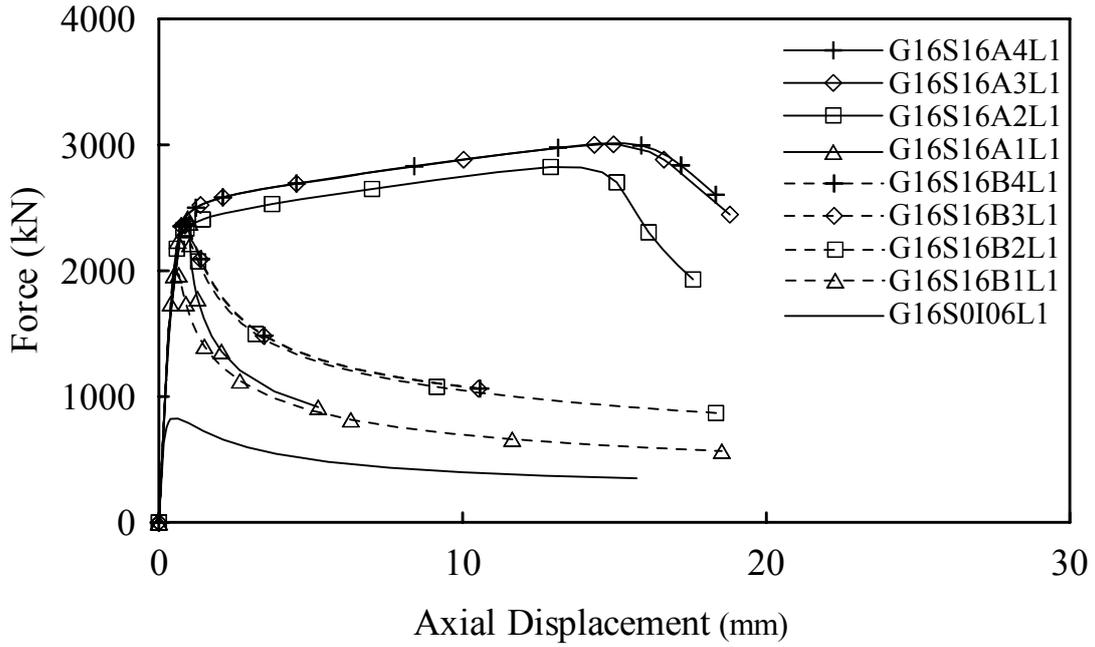


(a) 軸力與軸位移關係

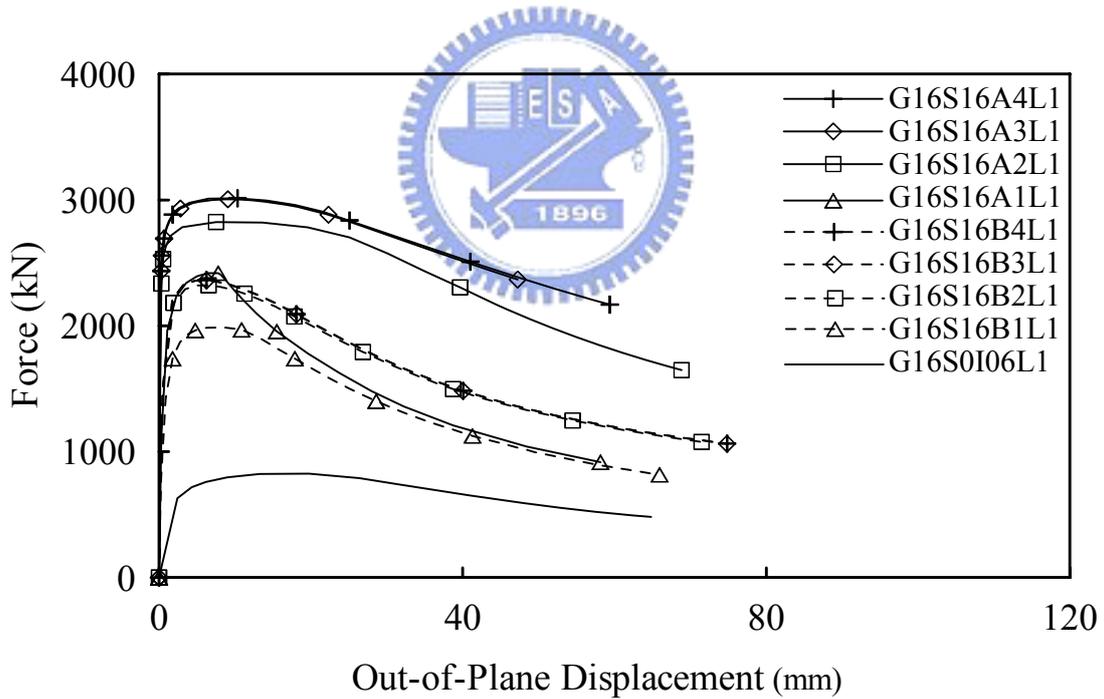


(b) 軸力與面外位移關係

圖 3.15 加勁後接合板力量與位移關係圖 ( $t_g = 8 \text{ mm}$ )

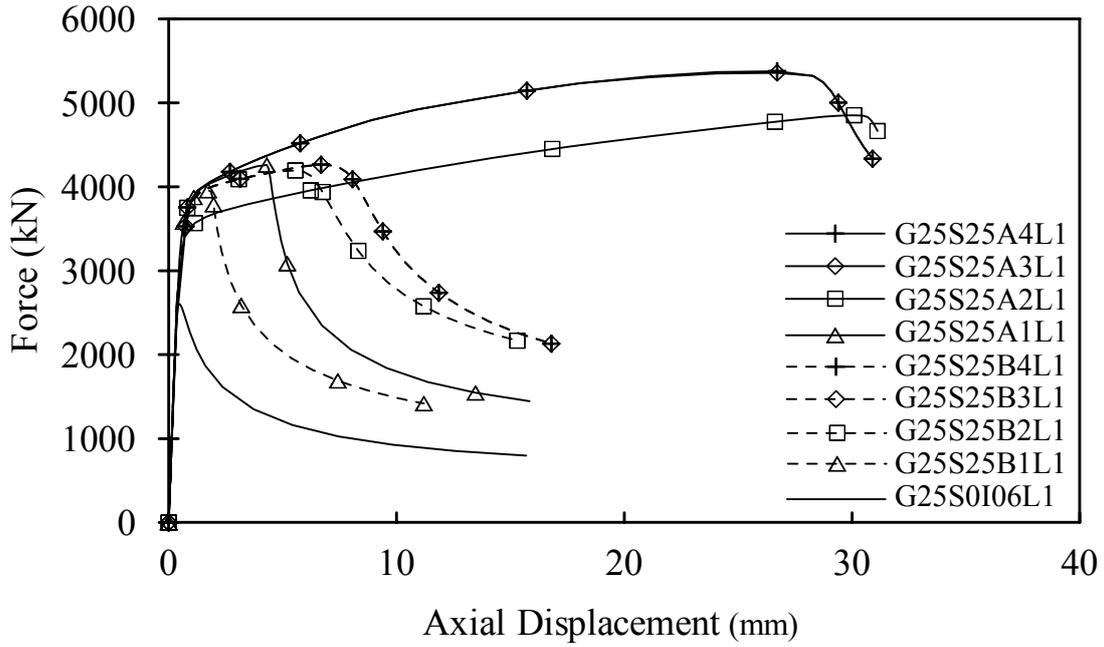


(a) 軸力與軸位移關係

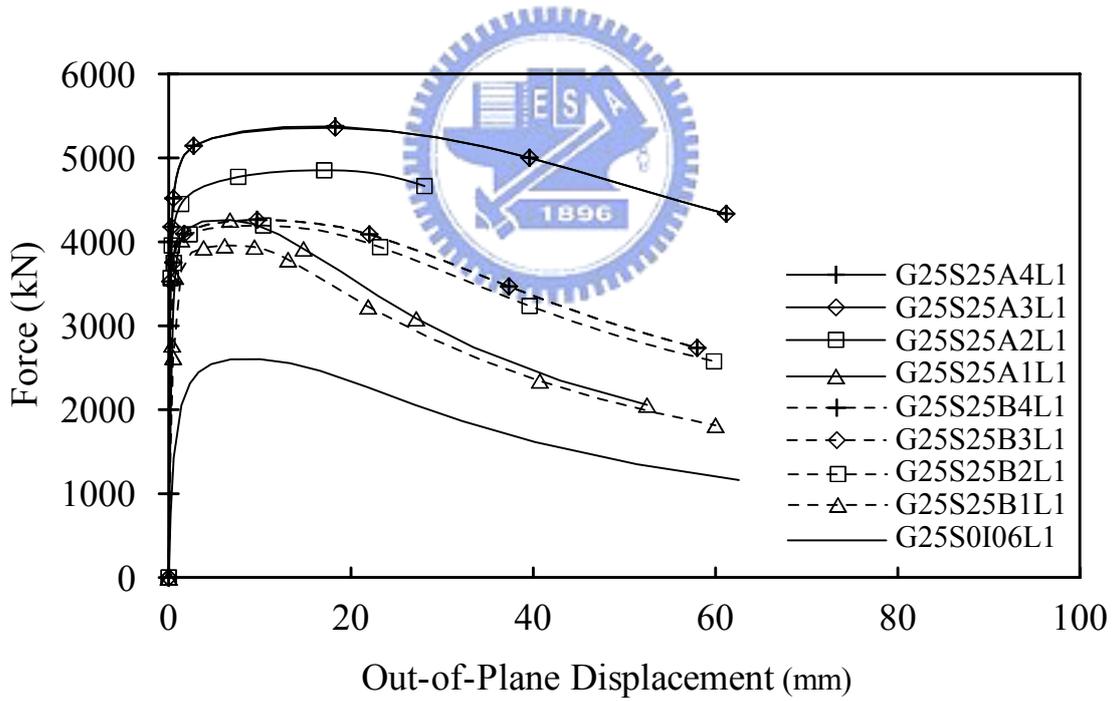


(b) 軸力與面外位移關係

圖 3.16 加勁後接合板力量與位移關係圖 ( $t_g=16\text{mm}$ ) 內側應變關係

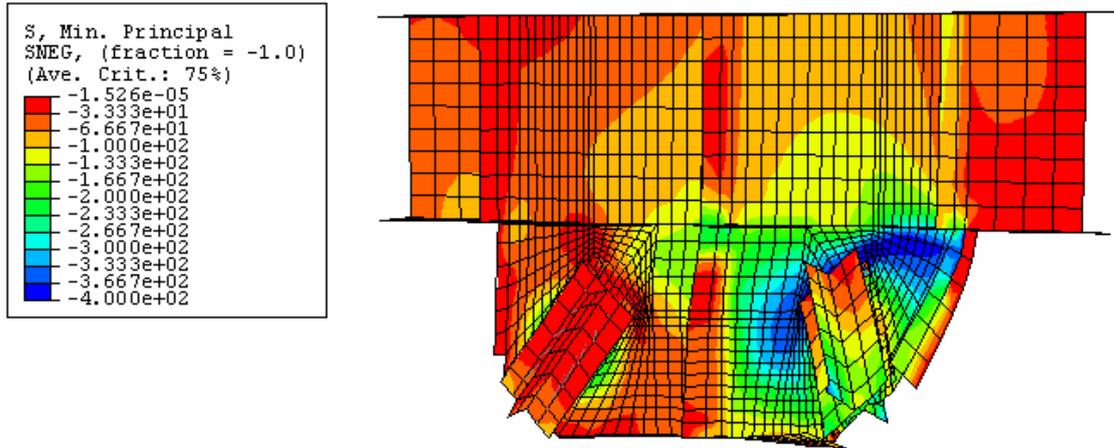


(a) 軸力與軸位移關係

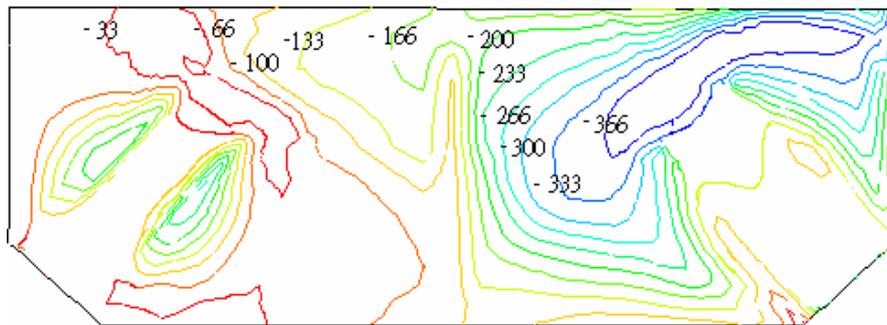


(b) 軸力與面外位移關係

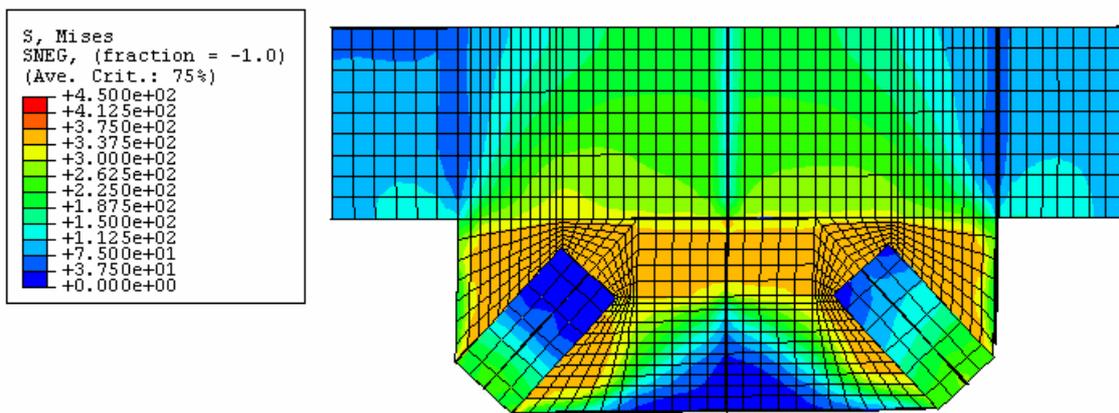
圖 3.17 加勁後接合板力量與位移關係圖 ( $t_g=25\text{mm}$ )



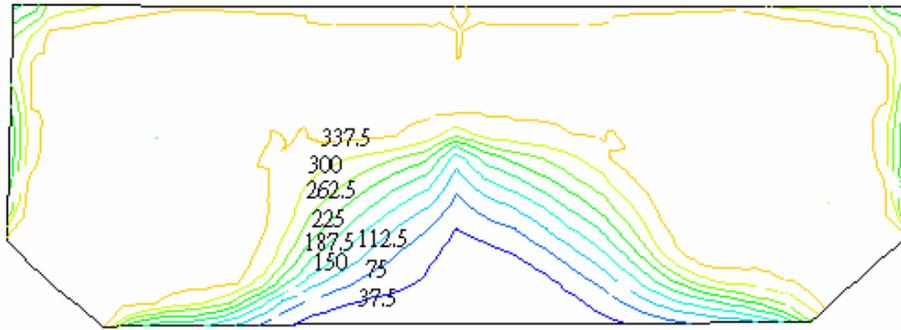
(a) 加勁後接合板 Min-Principal 挫屈應力圖 (G16S16A1L1)



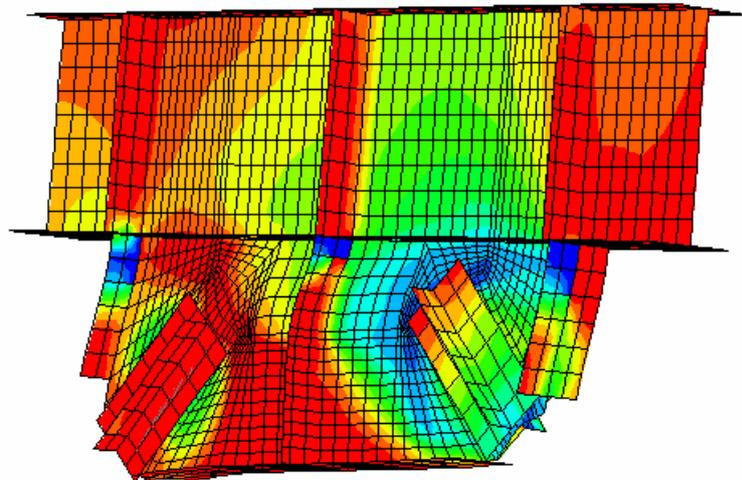
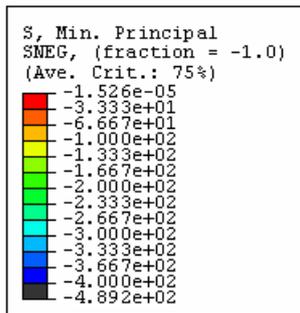
(b) 加勁後接合板 Min-Principal 應力分佈圖 (G16S16A1L1)



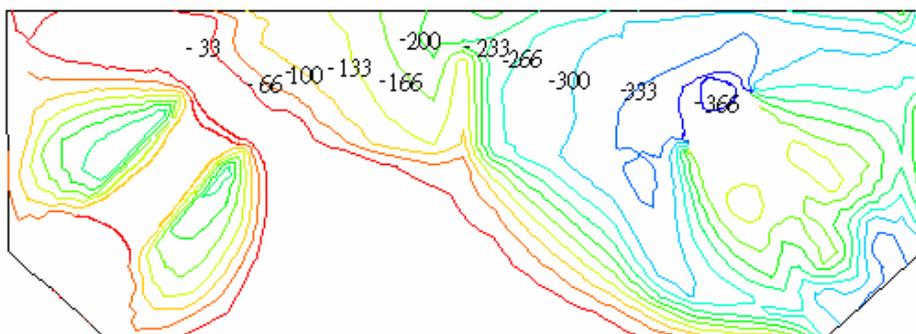
(c) 接合板降伏 Von-Mises 降伏應力圖 (G16S16A2L1)



(d) Von-Mises 降伏應力分佈圖 (G16S16A2L1)



(e) 接合板挫屈 Min-Principal 挫屈應力圖 (G16S16A2L1)



(f) Min-Principal 挫屈應力分佈圖 (G16S16A2L1)

圖 3.18 加勁後接合板破壞應力圖

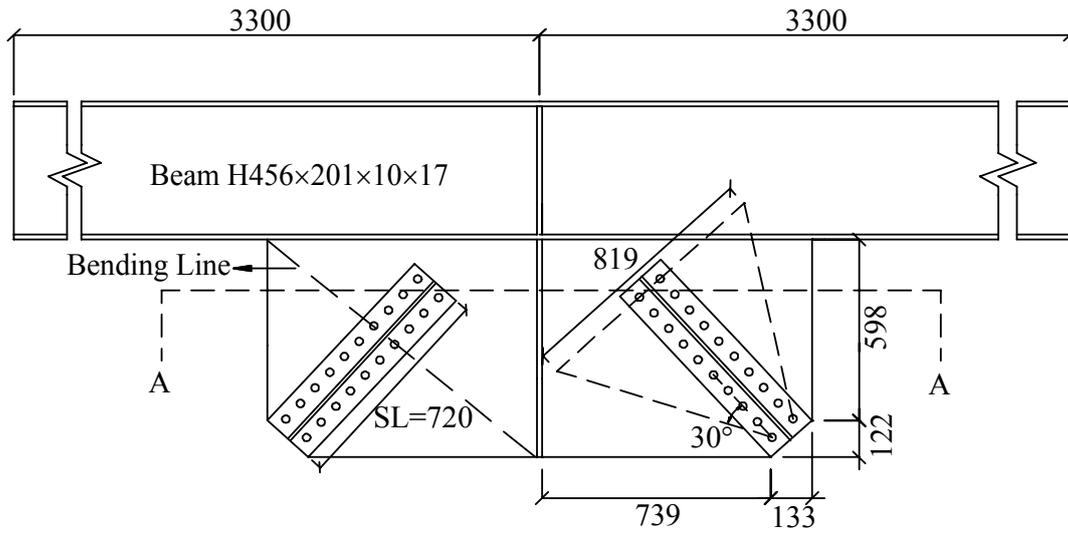
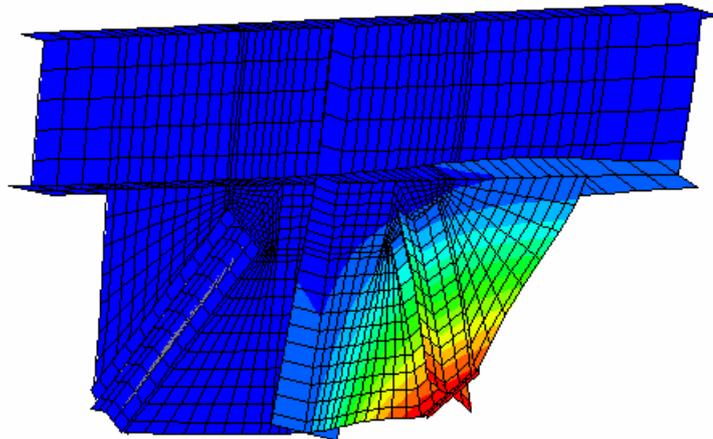
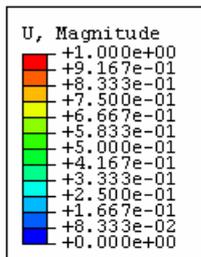
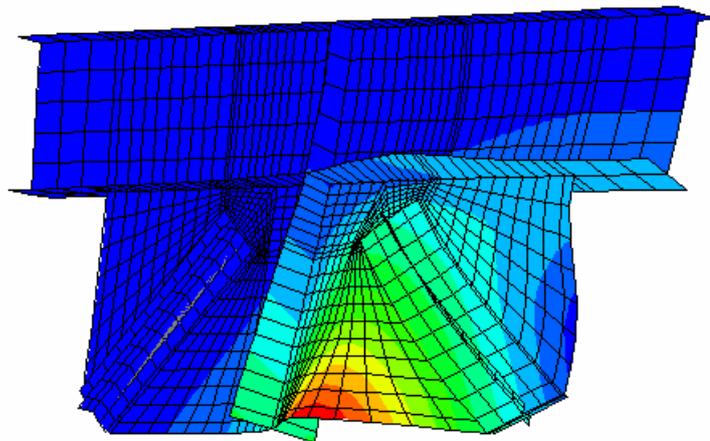
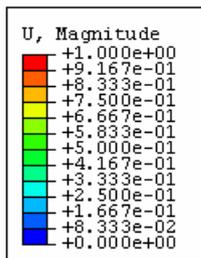


圖 3.19 加大尺寸接合板示意圖

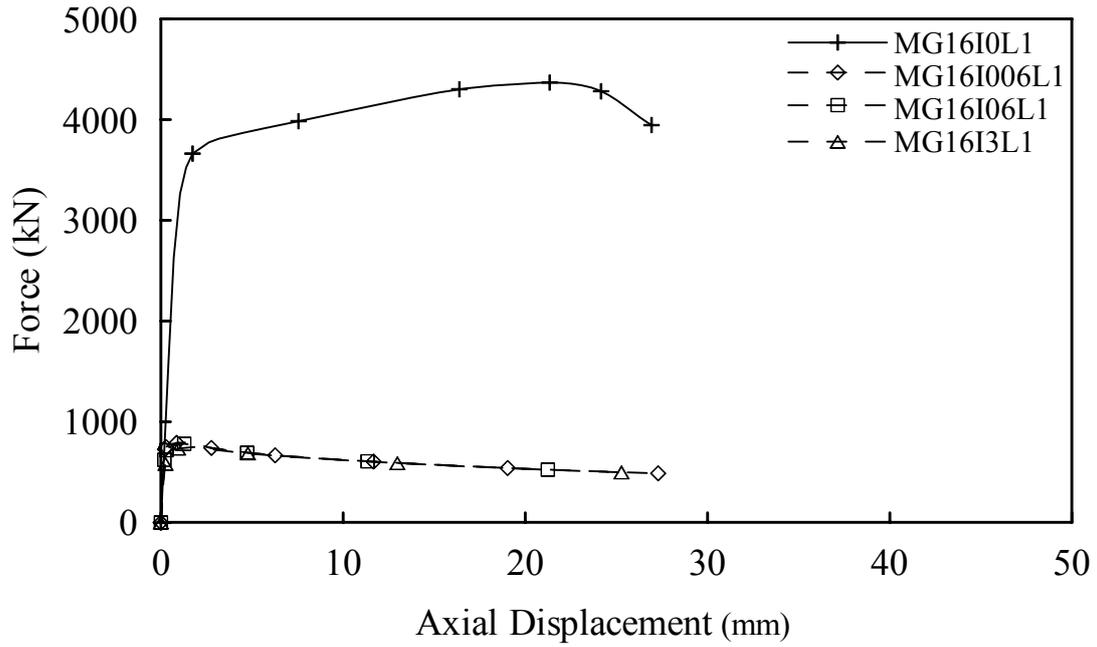


(a) 第一模態

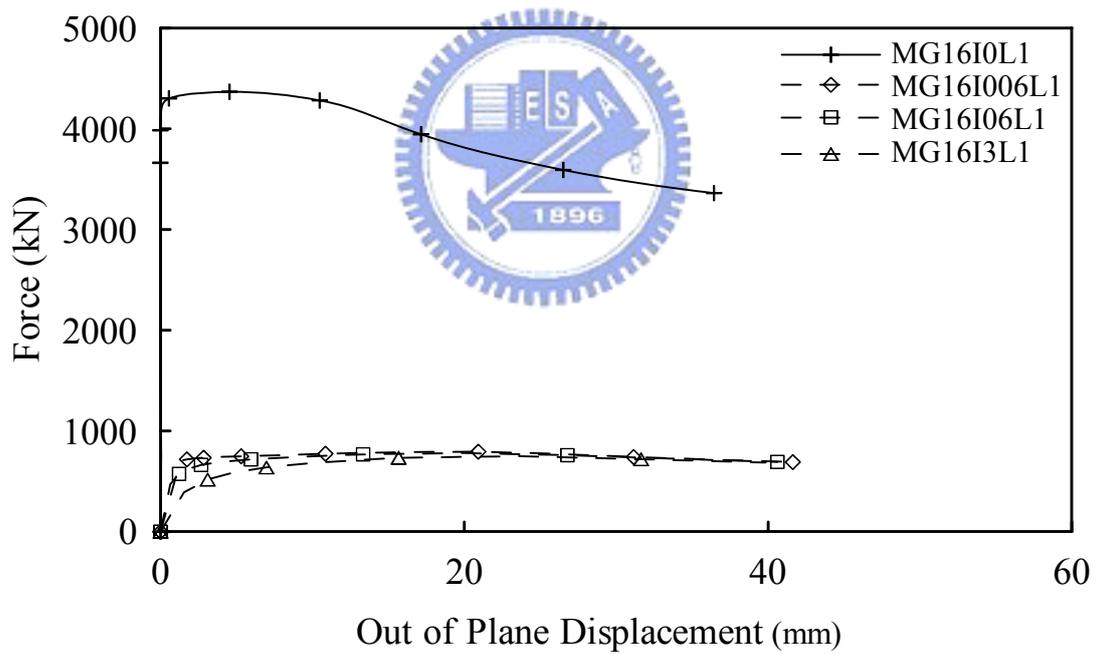


(b) 第二模態

圖 3.20 加大尺寸接合板挫屈模態

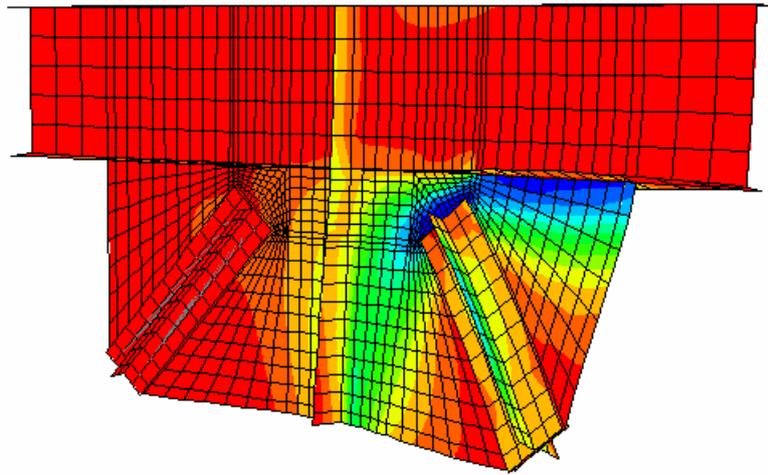
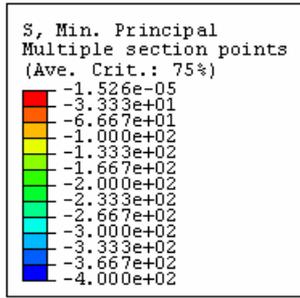


(a) 軸力與軸位移關係

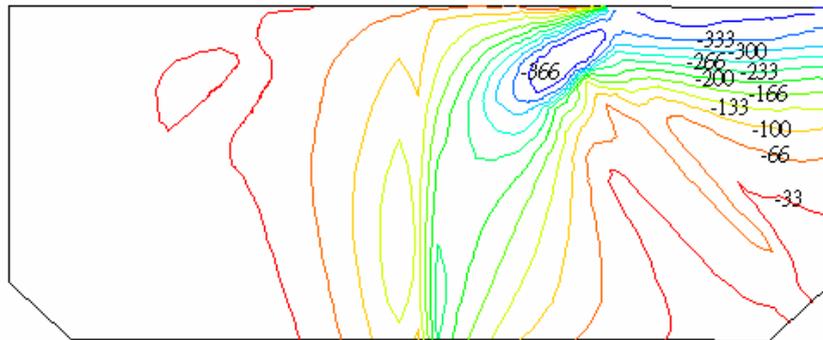


(b) 軸力與面外位移關係

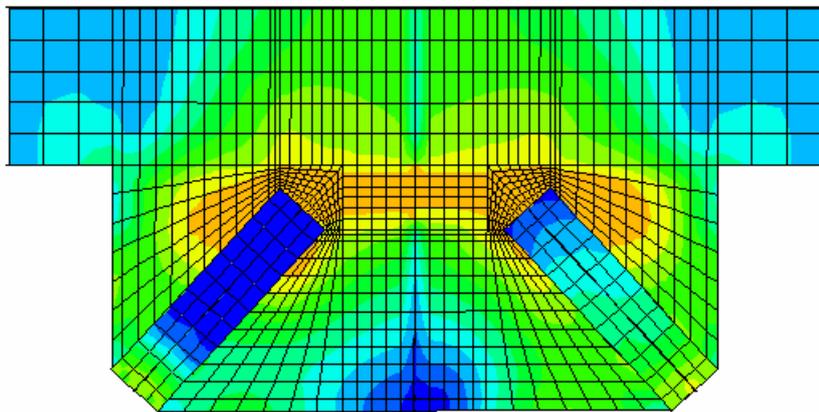
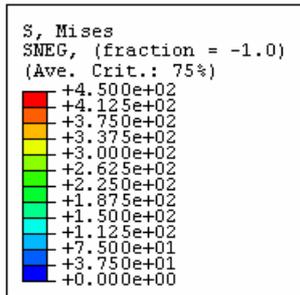
圖 3.21 接合板之力量與位移關係圖 (加大尺寸)



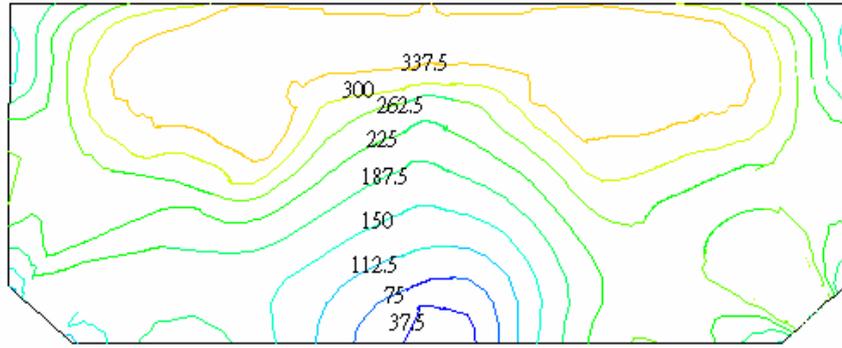
(a) Min-Principal 挫屈應力圖 (MG16I06L1)



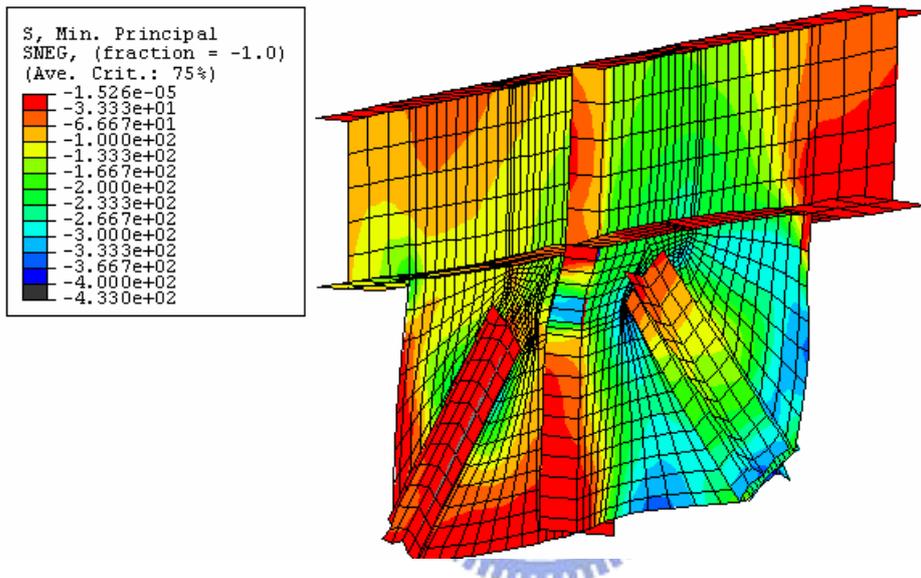
(b) Min-Principal 挫屈應力分布圖 (MG16I06L1)



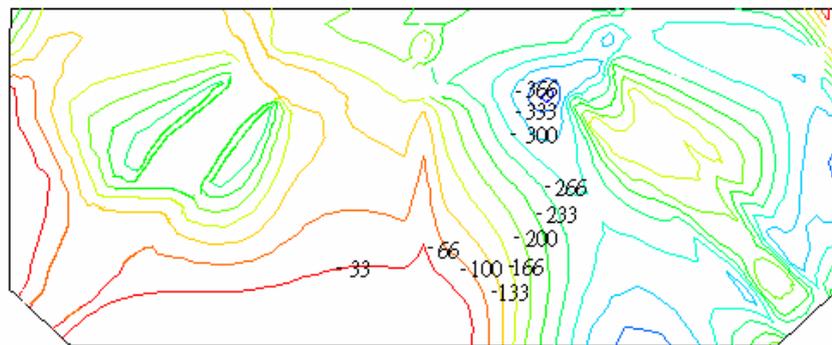
(c) 接合板 Von-Mises 降伏應力圖 (MG16S0I0L1)



(d) Von-Mises 降伏應力分布圖 (MG16S0I0L1)

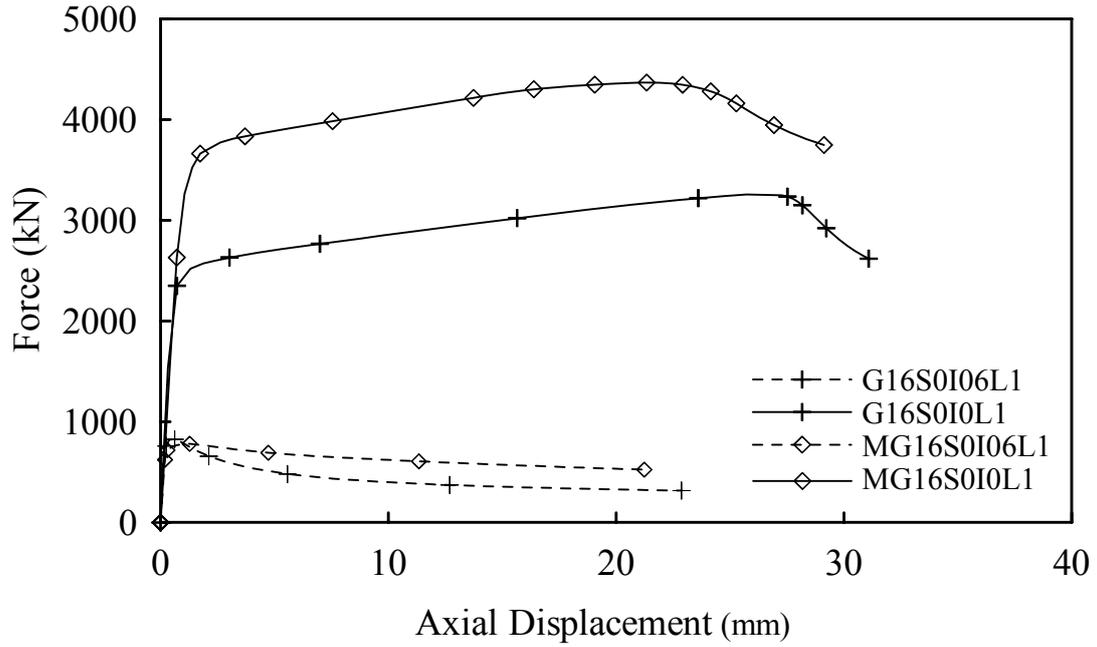


(e) 接合板自由端挫屈挫屈應力及變形圖 (MG16S0I0L1)

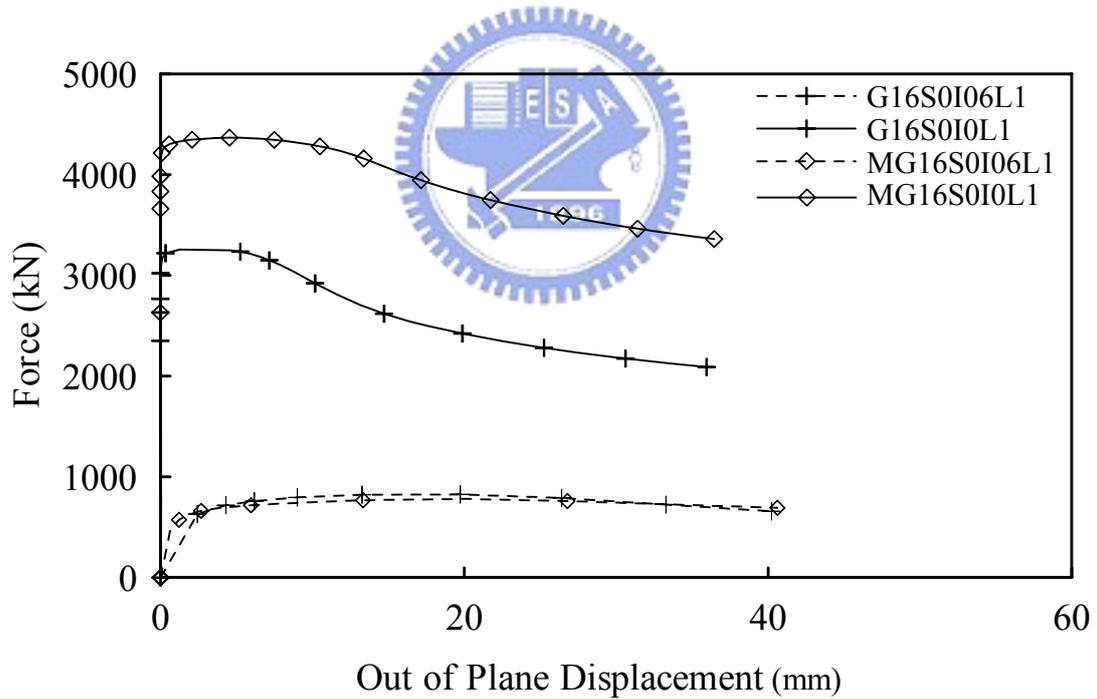


(f) Min-Principal 自由端挫屈應力分布圖 (MG16S0I0L1)

圖 3.22 接合板應力圖 (加大尺寸)

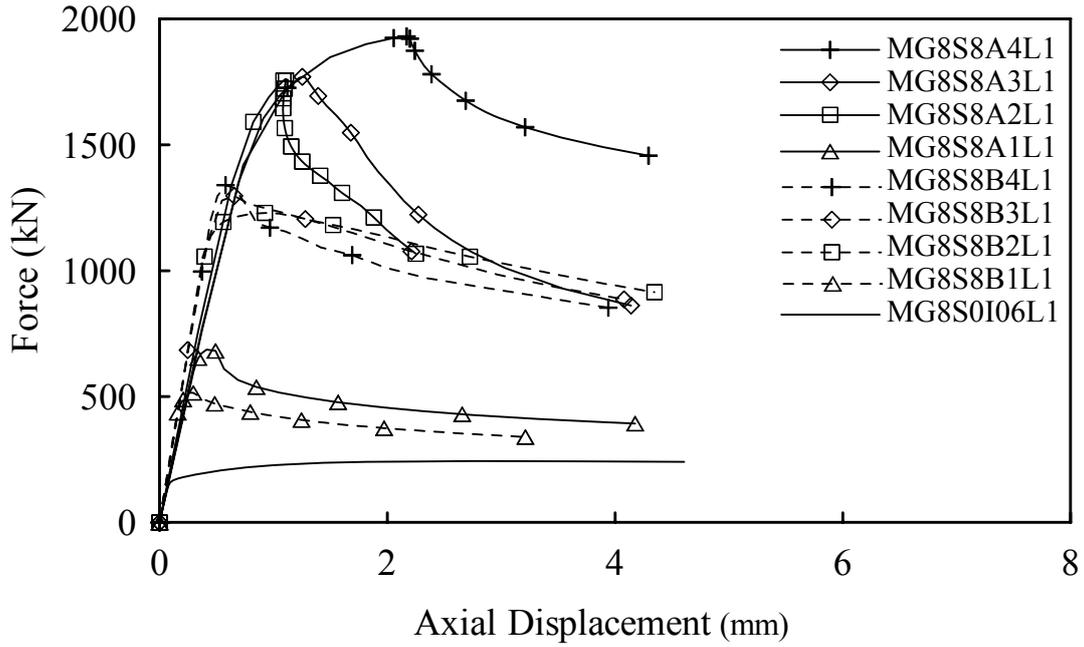


(a) 軸力與軸位移關係

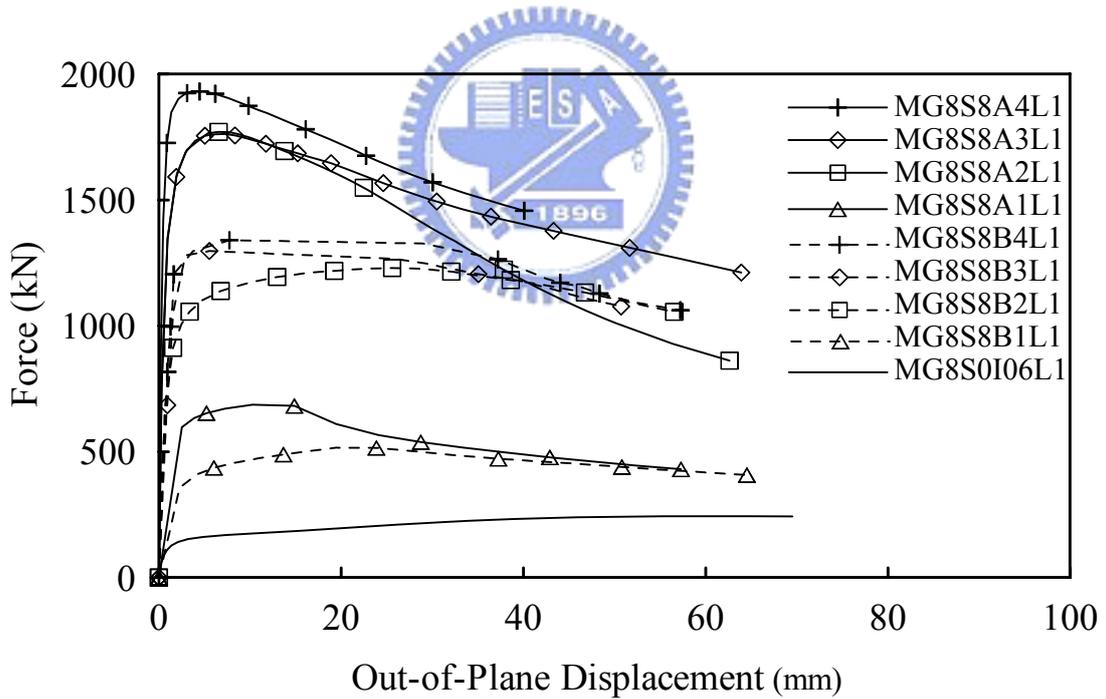


(b) 軸力與面外位移關係

圖 3.23 接合板之力量與位移關係圖 (比較 L1 與 ML1)

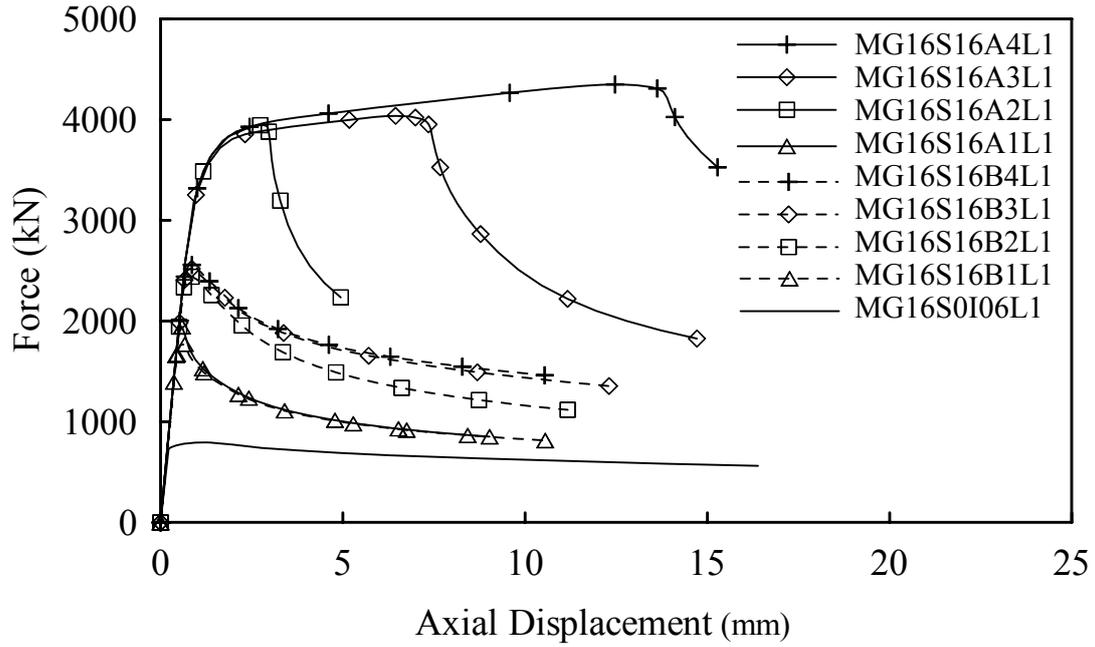


(a) 軸力與軸位移關係

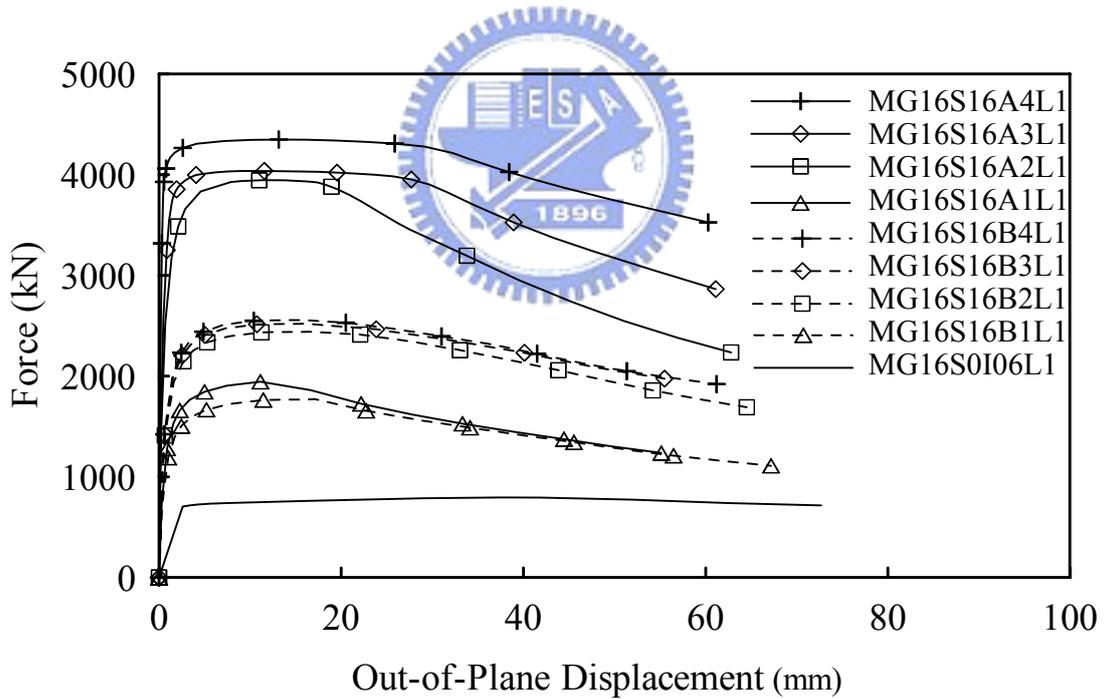


(b) 軸力與面外位關係

圖 3.24 加勁後力量與位移關係圖 (加大尺寸,  $t_g=8$  mm)

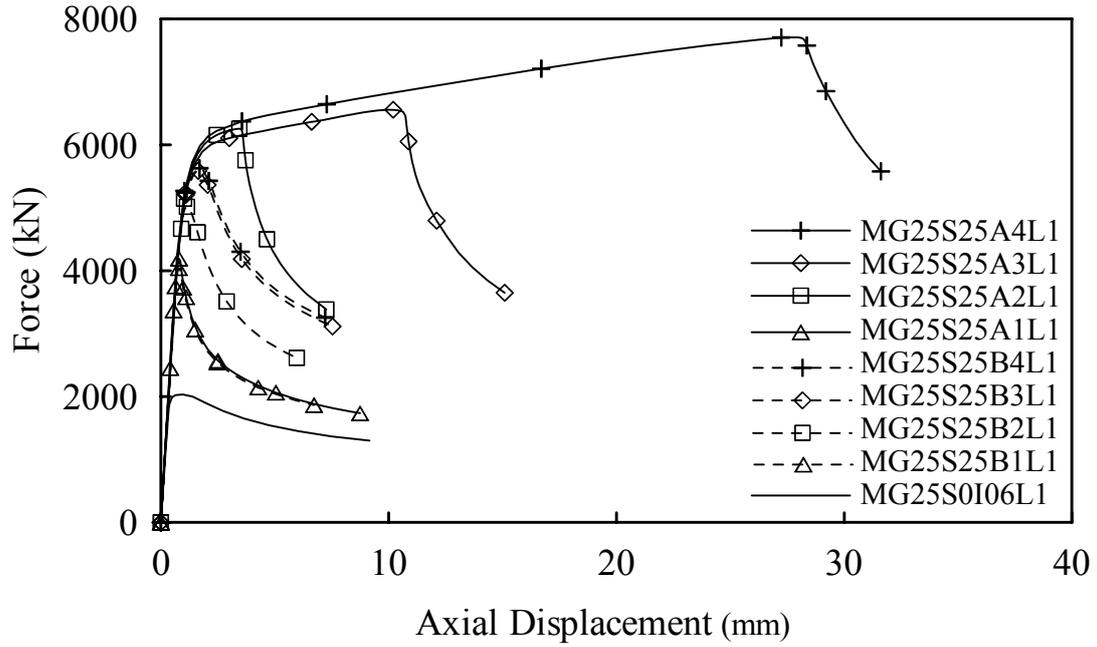


(a) 軸力與軸位移關係

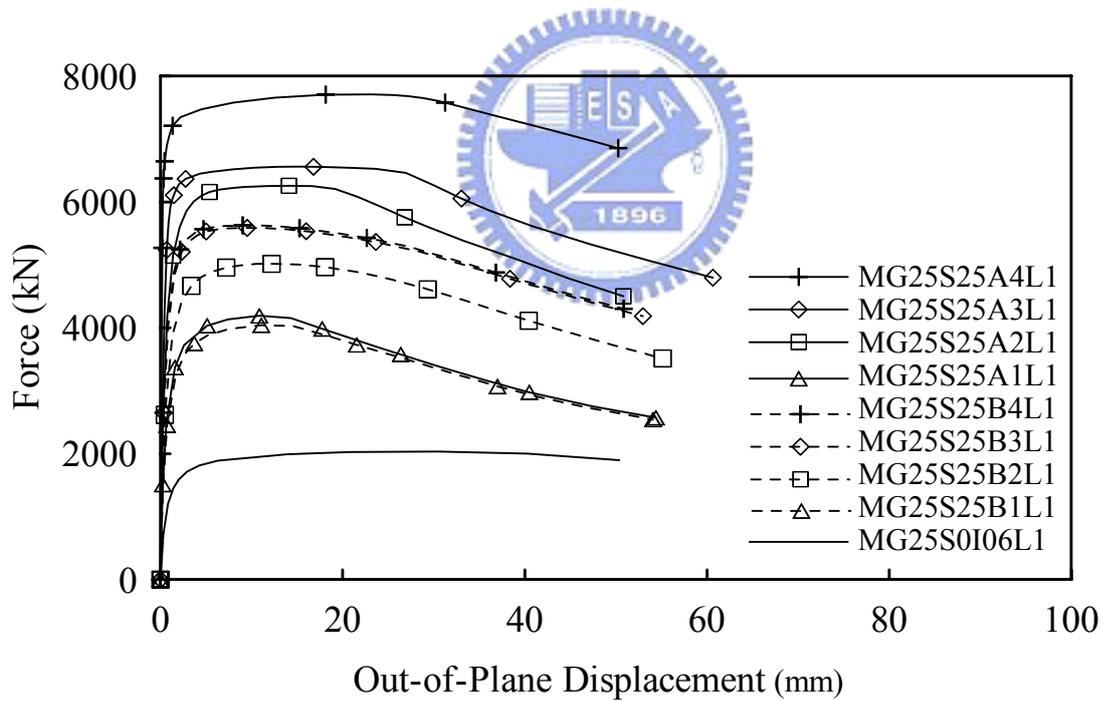


(b) 軸力與面外位移關係

圖 3.25 加勁後接合板力量與位移關係圖 (加大尺寸,  $t_g = 16\text{mm}$ )

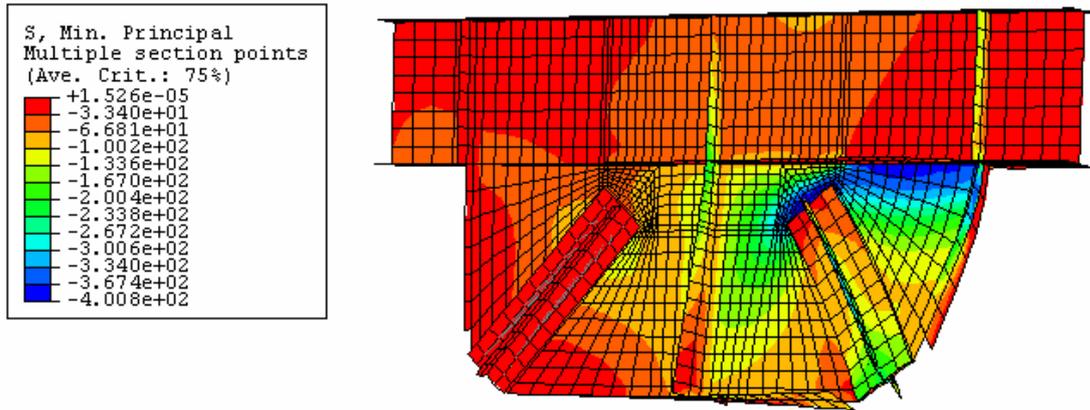


(a) 軸力與軸位移關係

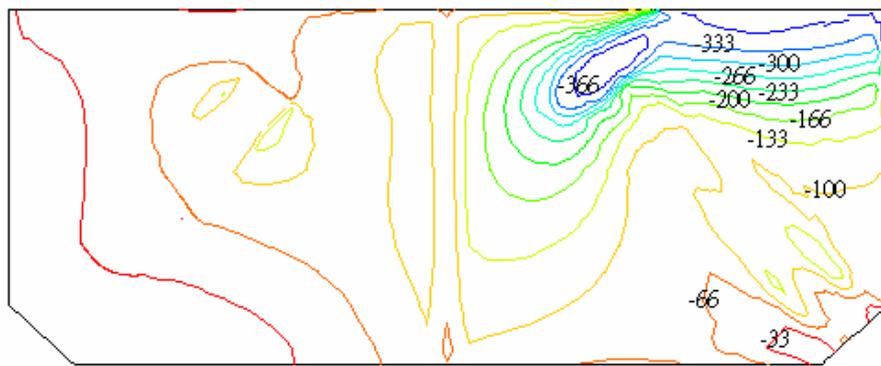


(b) 軸力與面外位移關係

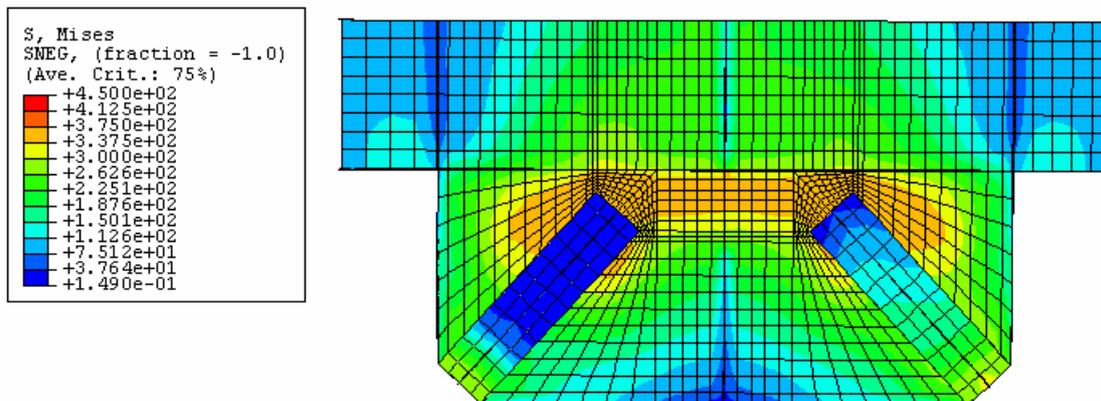
圖 3.26 加勁後接合板力量與位移關係圖 (加大尺寸,  $t_g=25\text{mm}$ )



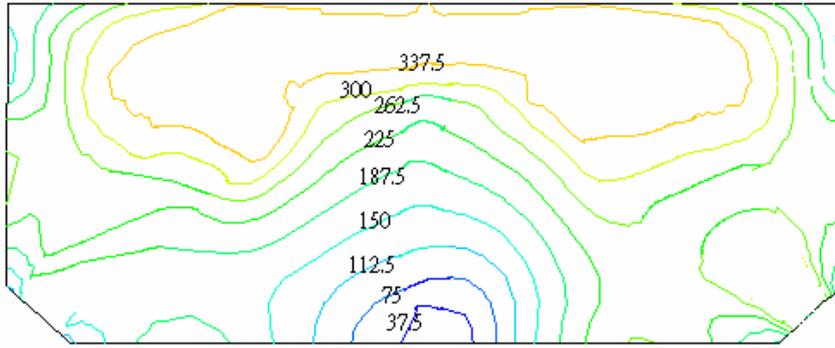
(a) 接合板 Min-Principal 挫屈應力圖 (MG16S16A1L1)



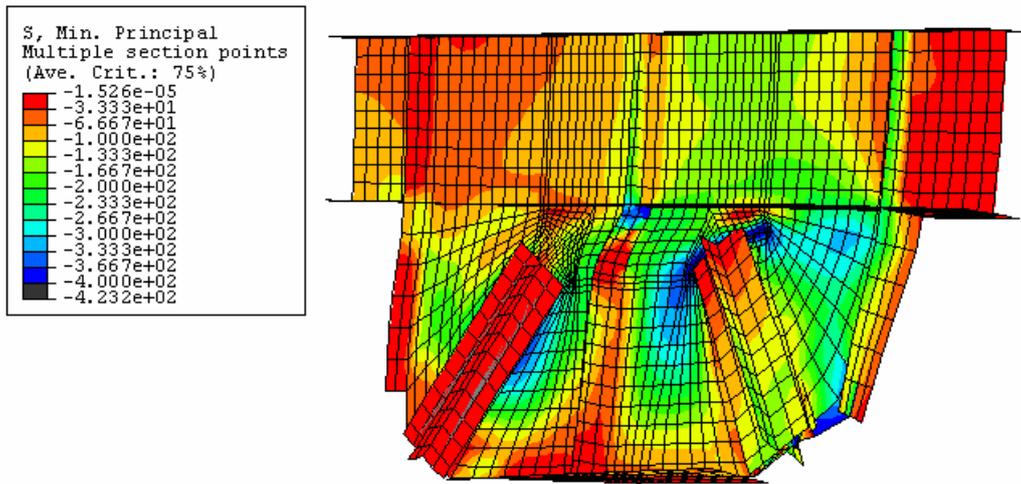
(b) Min-Principal 挫屈應力分布圖 (MG16S16A1L1)



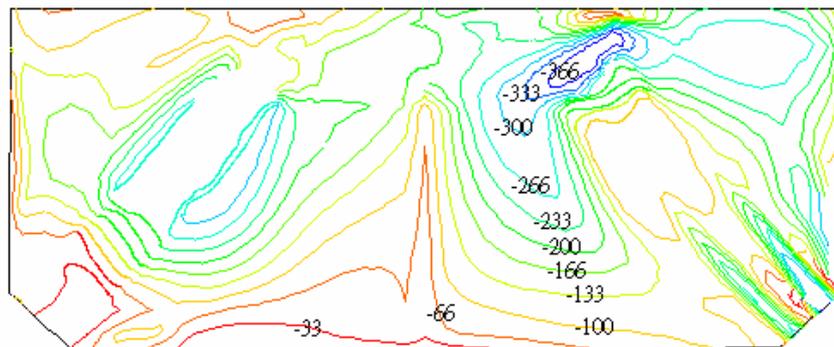
(c) 接合板 Von-Mises 降伏應力 (MG16S16A2L1)



(d) Von-Mises 降伏應力分布圖



(e) 接合板 Min-Principal 非彈性挫屈應力及變形圖 (MG16S16A2L4)



(f) Min-Principal 挫屈應力分布圖 (MG16S16A2L4)

圖 3.27 加勁後接合板應力圖

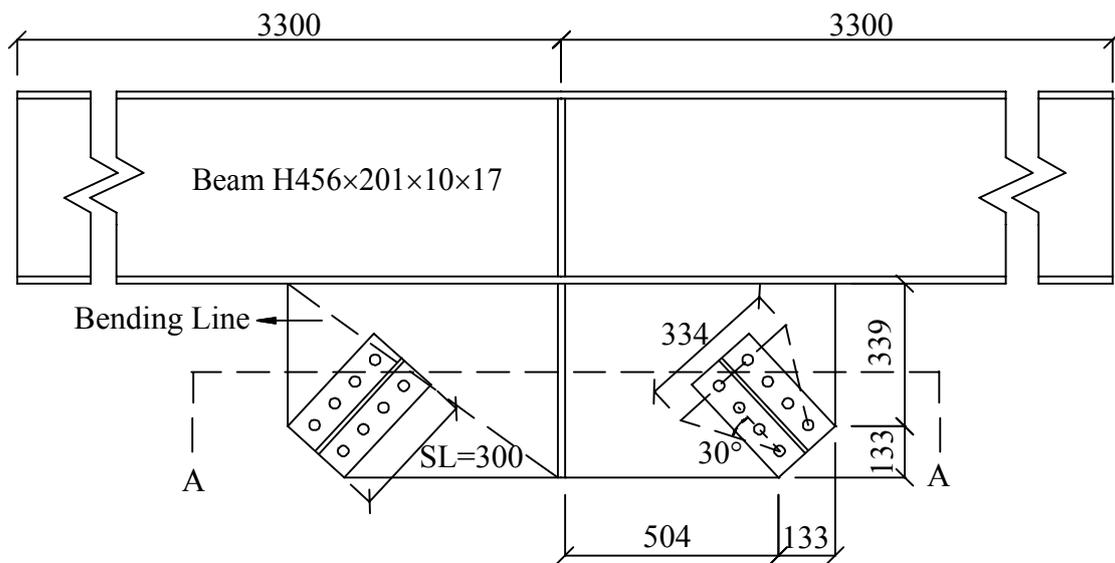
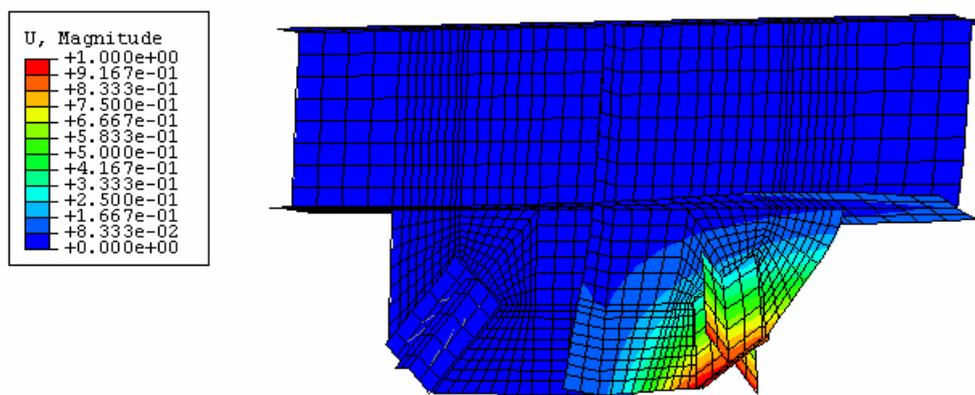
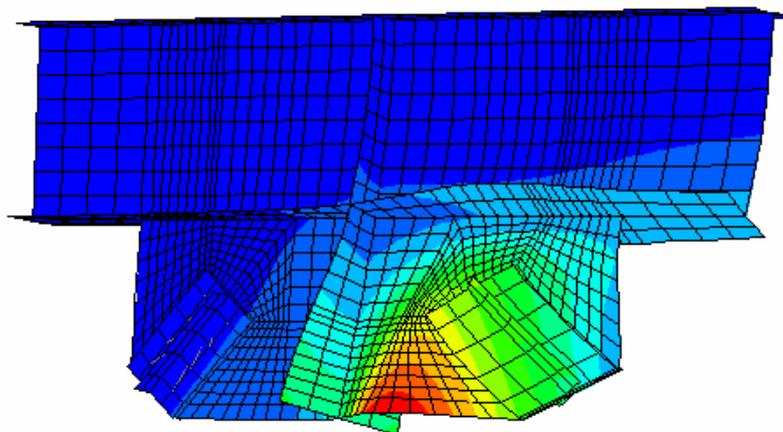


圖 3.28 接合板示意圖（接合板接合區長度在彎折線上）

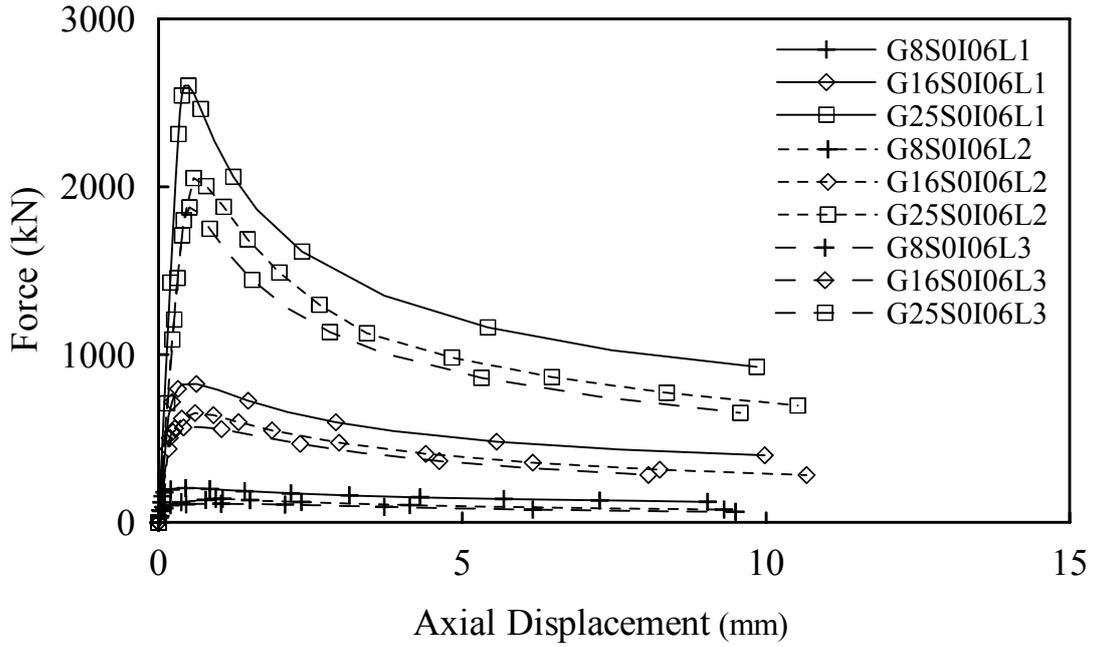


(a) 第一模態 (Mode 1)

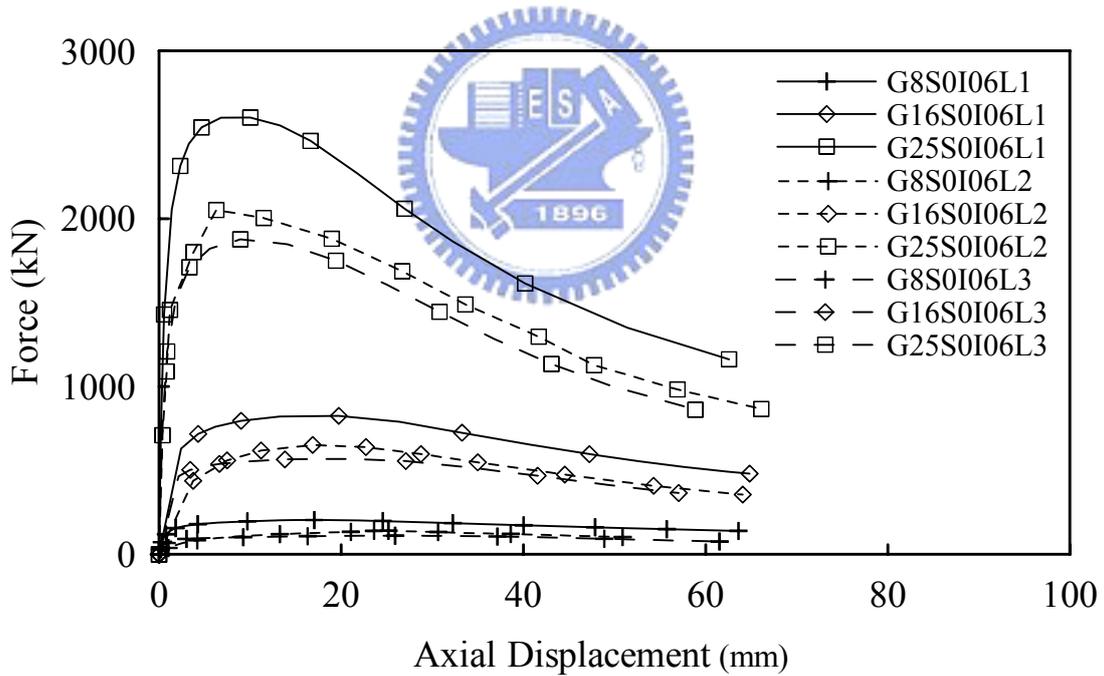


(b) 第二模態 (Mode 2)

圖 3.29 接合板挫屈模態（接合板接合區長度在彎折線上）

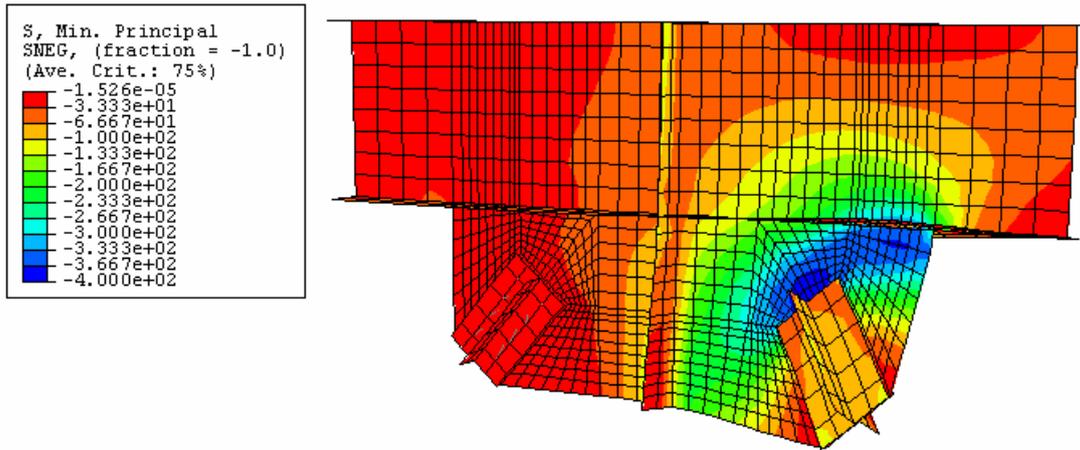


(a) 軸力與軸位移關係

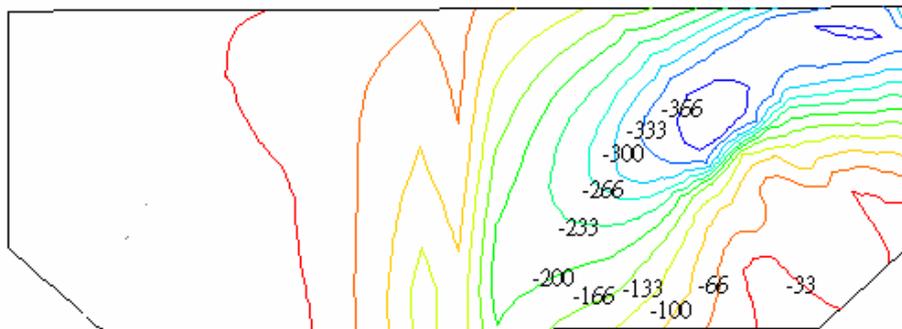


(b) 軸力與面外位移關係

圖 3.30 力量與位移關係圖 (L1、L2、L3 三種接合區長度比較)



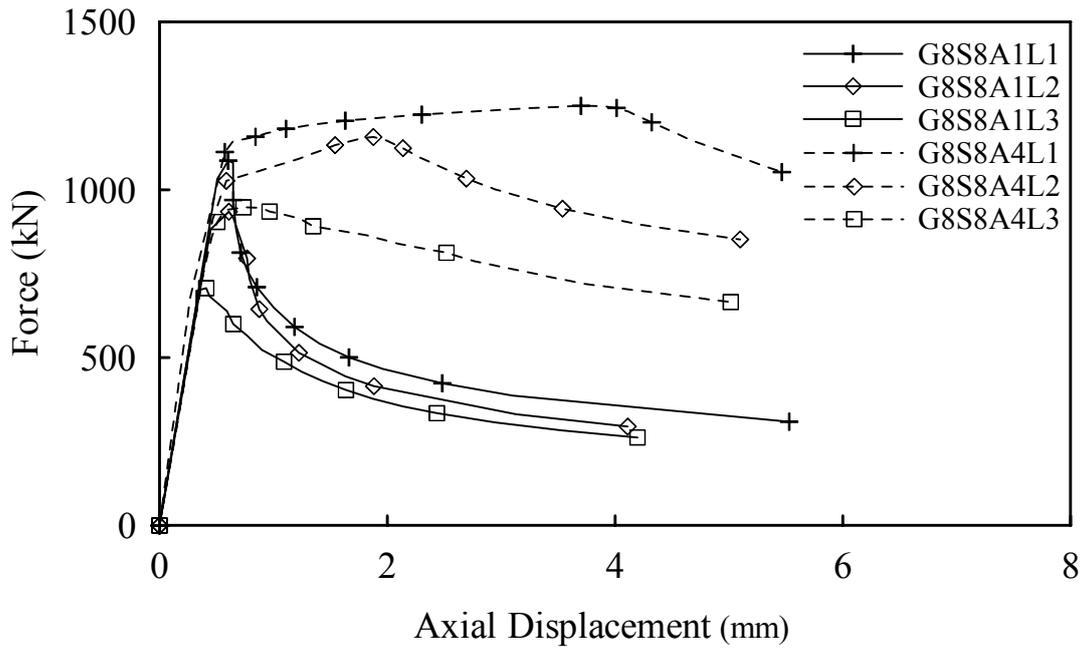
(a) 接合板挫屈之 Min-Principal 挫屈應力圖 (G16I06L2)



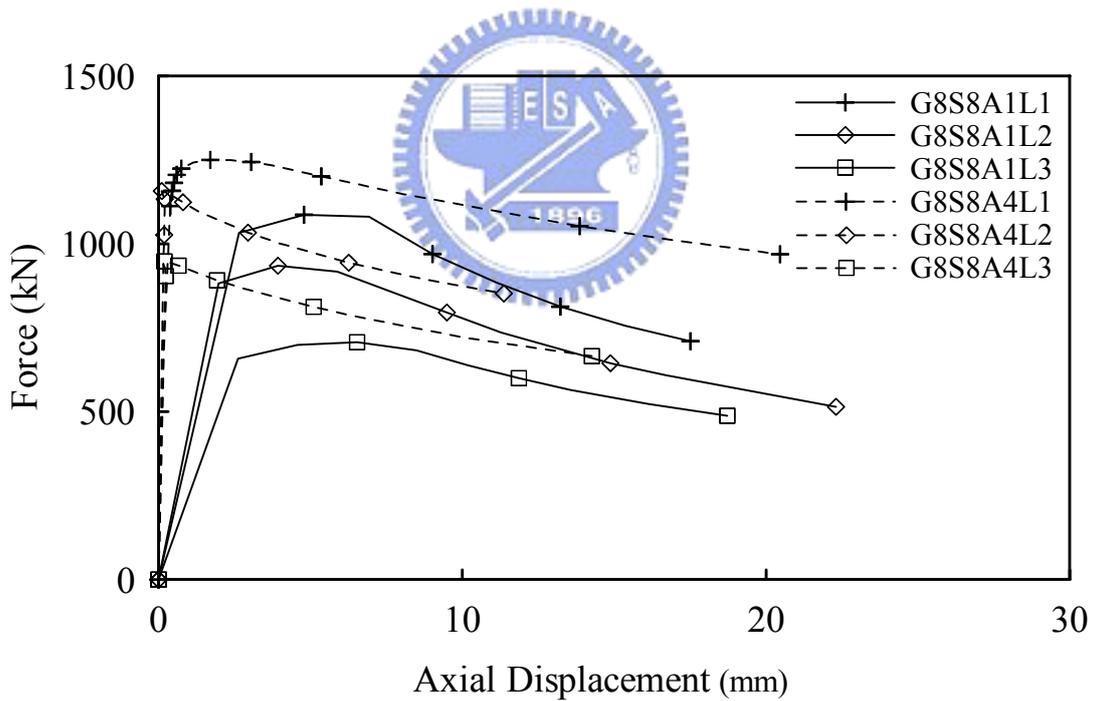
(b) 接合板 Min-Principal 挫屈應力分布圖 (G16I06L2)

圖 3.31 接合板挫屈時與應力與面外位移示意圖

(接合板接合長度在彎折線上)



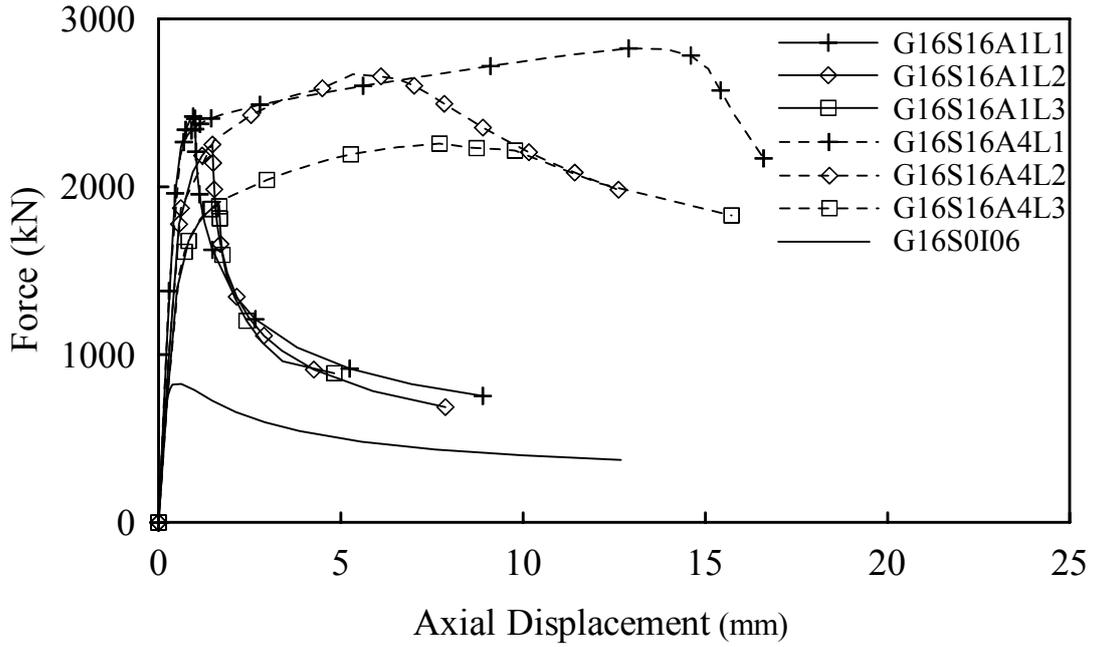
(a) 軸力與軸位移關係



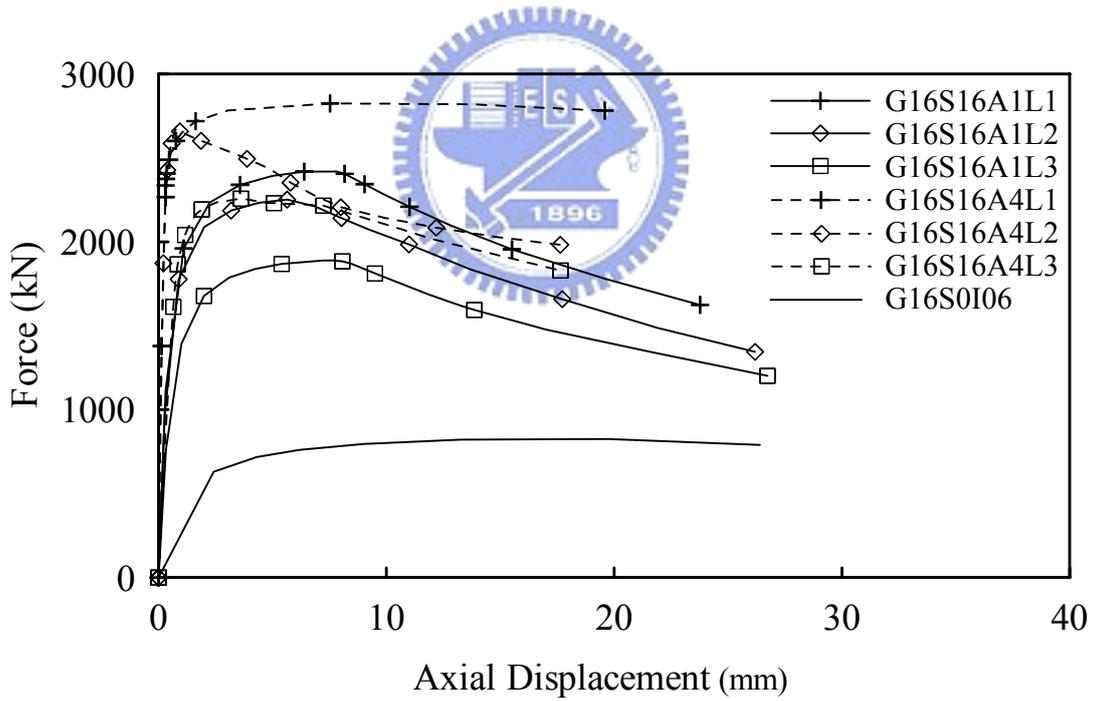
(b) 軸力與面外位移關係

圖 3.32 加勁後力量與位移關係關係

(L1、L2、L3 三種接合區長度在  $t_g=8\text{ mm}$  之比較)



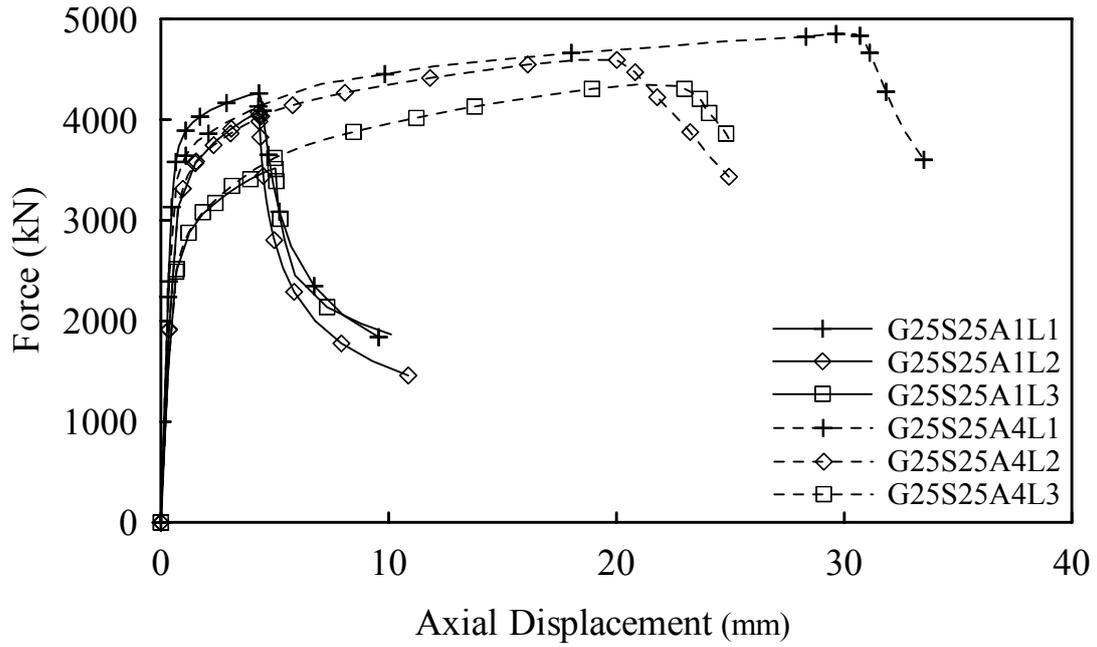
(a) 軸力與軸位移關係



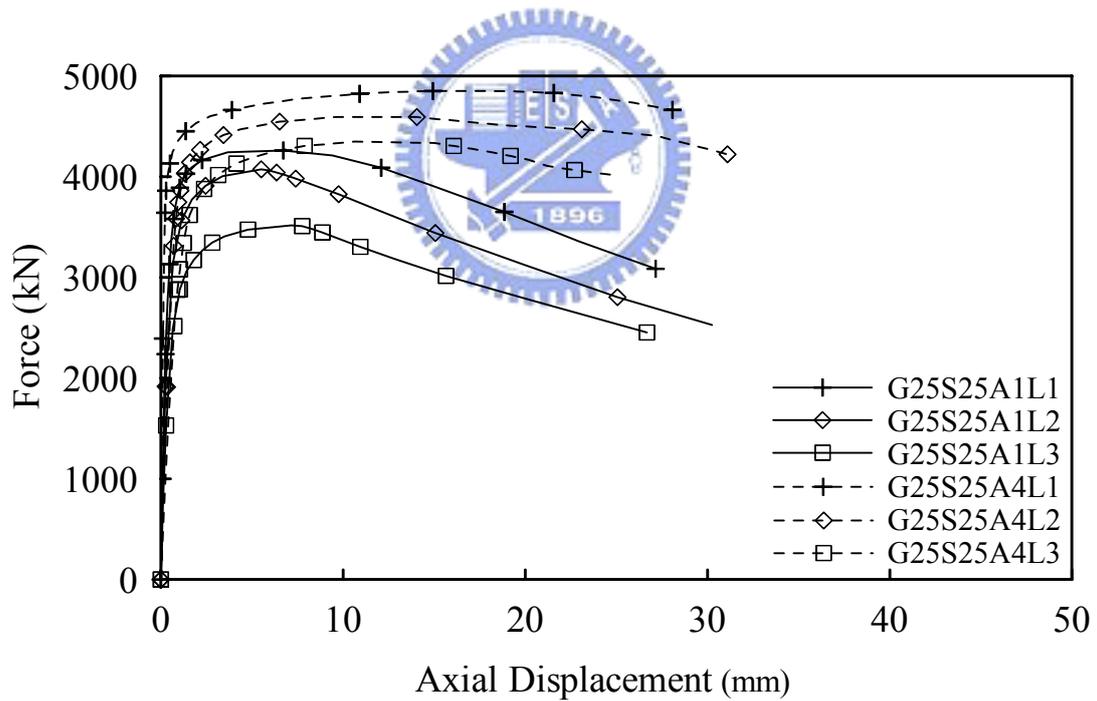
(b) 軸力與面外位移關係

圖 3.33 加勁後力量與位移關係關係

(L1、L2、L3 三種接合區長度在  $t_g = 16 \text{ mm}$  之比較)

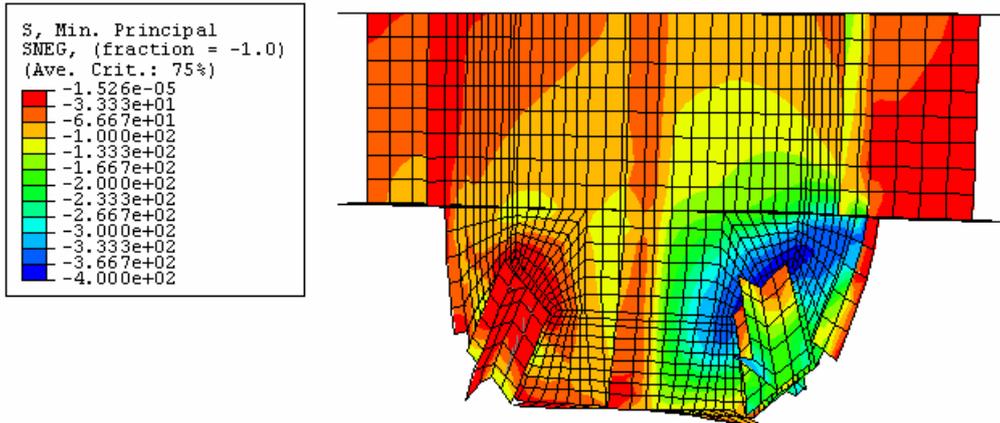


(a) 軸力與軸位移關係

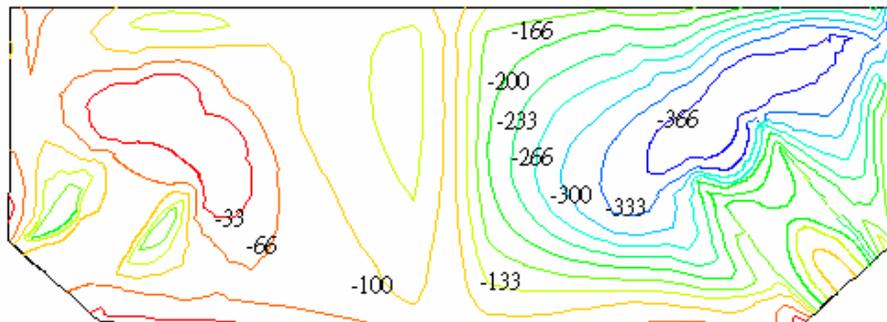


(b) 軸力與面外位移關係

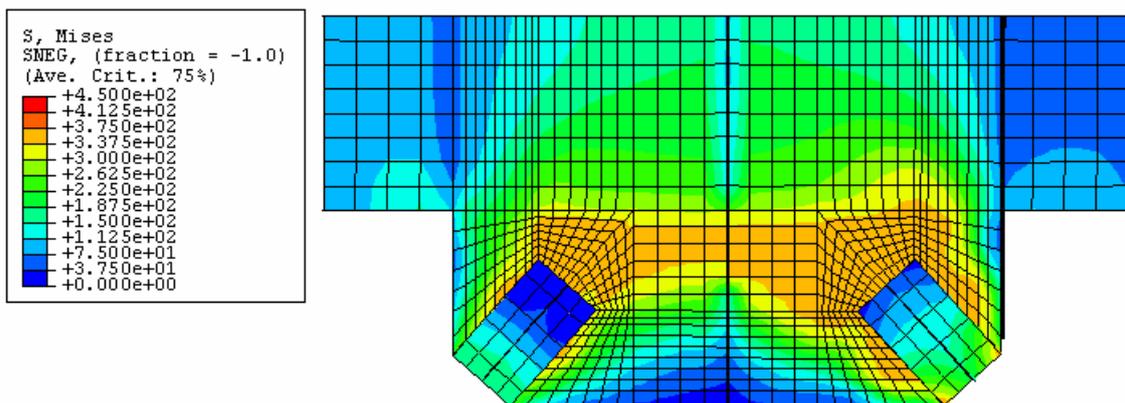
圖 3.34 加勁後力量與位移關係關係



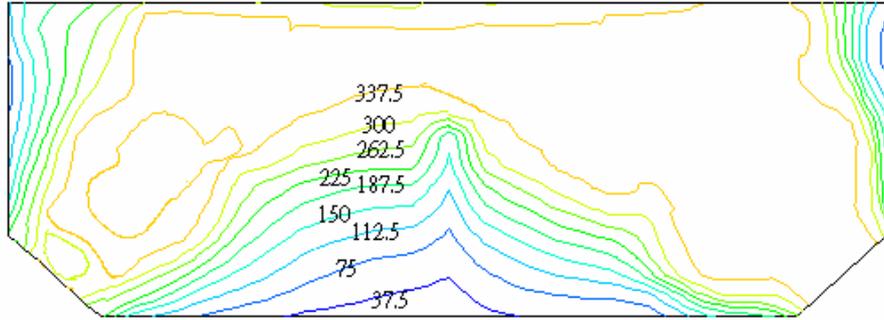
(a) 接合板 Min-Principal 挫屈應力圖 (G16S16A1L2)



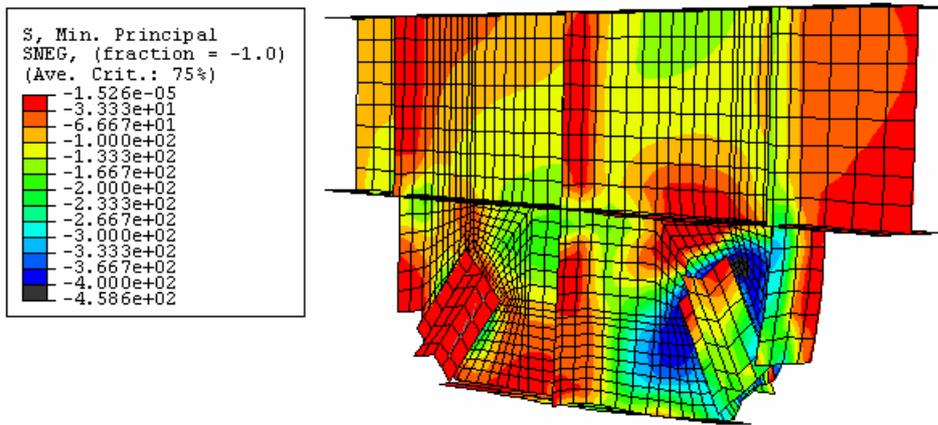
(b) Min-Principal 挫屈應力分布圖 (G16S16A1L2)



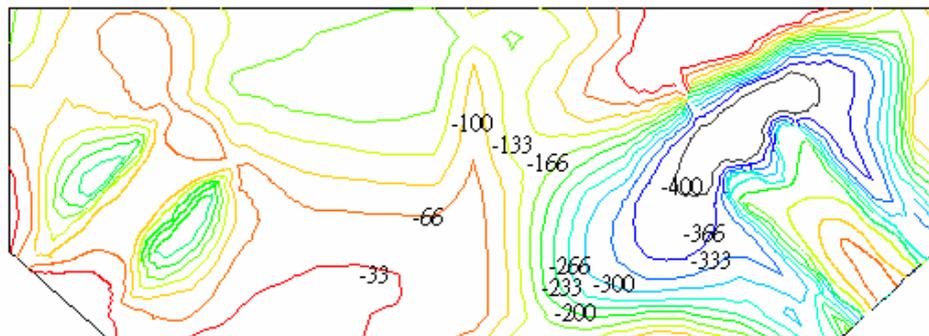
(c) 接合板 Von-Mises 降伏應力圖 (G16S16A2L2)



(d) Von-Mises 降伏應力分布圖 (G16S16A2L2)



(e) 接合板 Min-Principal 非彈性挫屈應力圖 (G16S16A2L2)



(f) Min-Principal 非彈性挫屈應力分布圖 (G16S16A2L2)

圖 3.35 加勁後接合板挫屈時與應力與變形示意圖

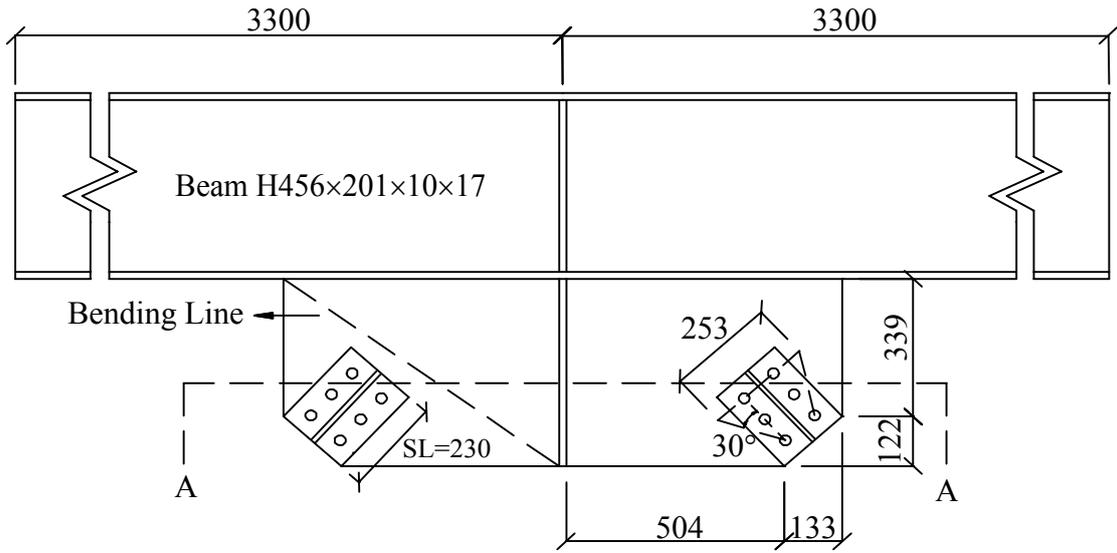
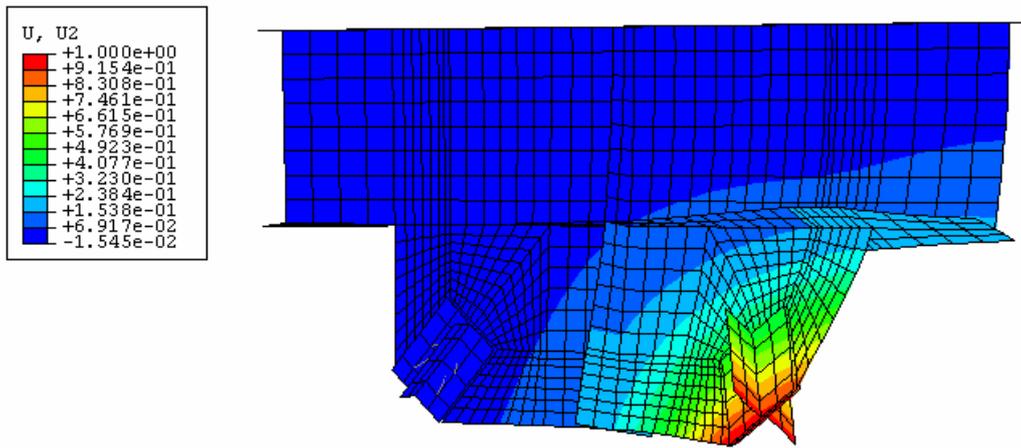
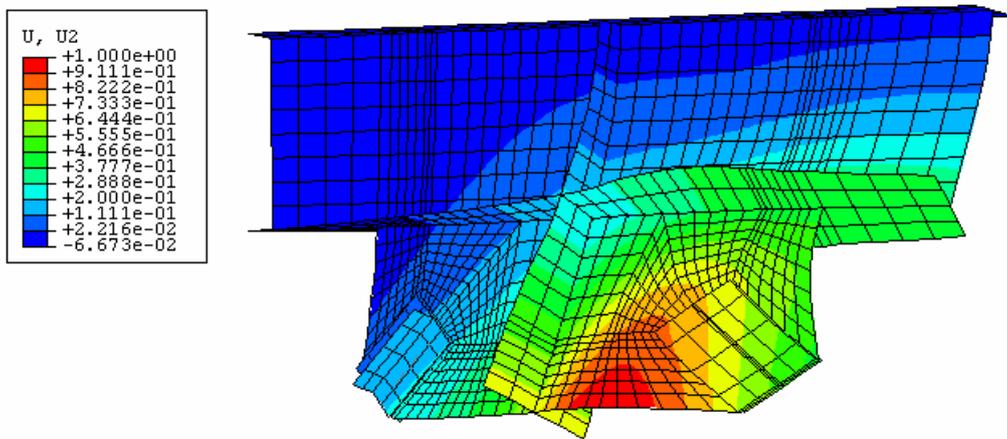


圖 3.36 接合板示意圖（接合板接合長度短於彎折線）

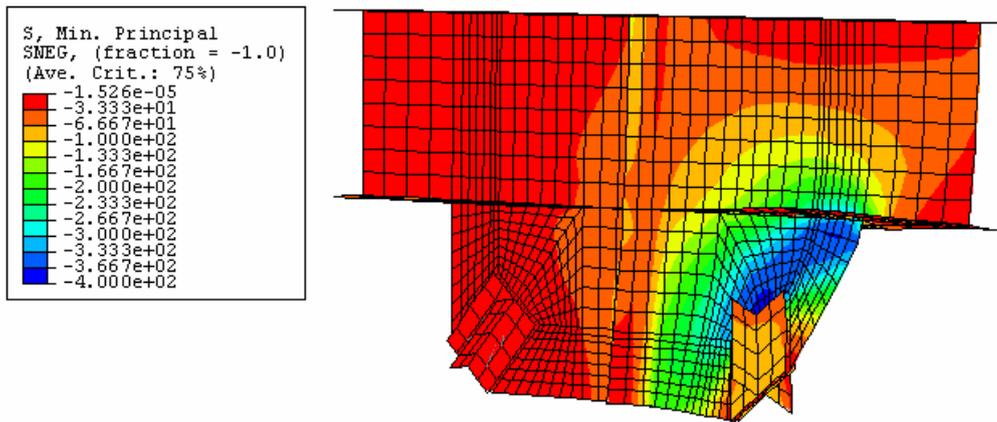


(a) 第一模態 (Mode 1)

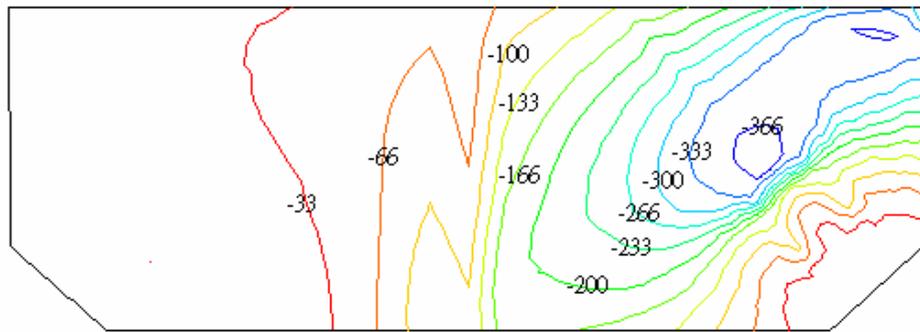


(b) 第二模態 (Mode 2)

圖 3.37 接合板挫屈模態（接合板接合長度短於彎折線）



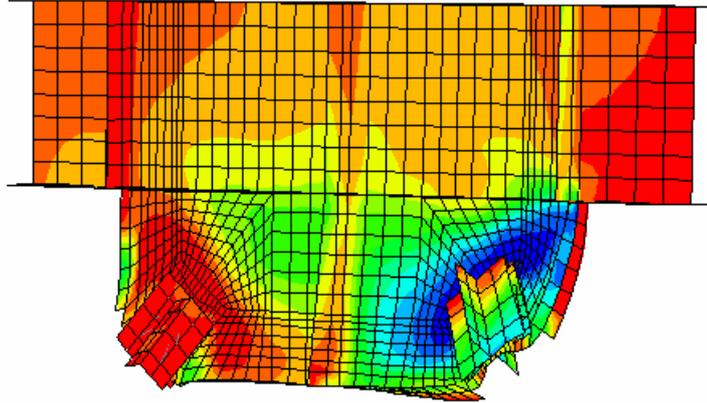
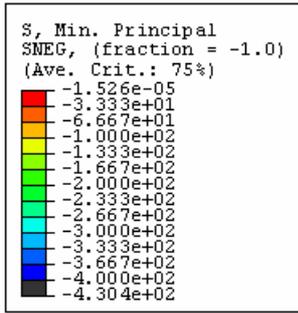
(a) 接合板 Min-Principal 挫屈應力圖 (G16S0I06L3)



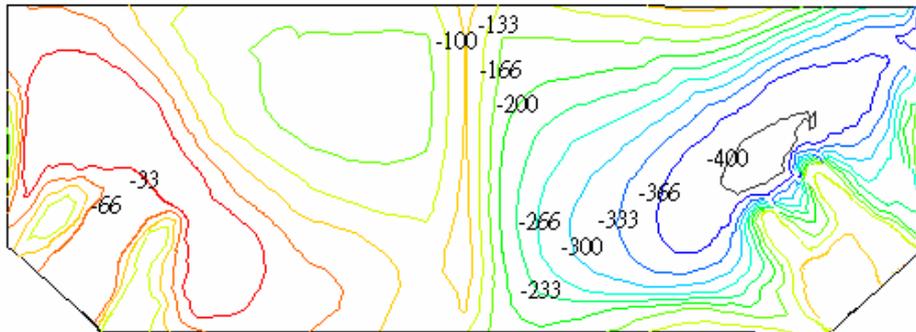
(b) Min-Principal 挫屈應力分布圖 (G16S0I06L3)

圖 3.38 接合板應力圖與變形示意圖

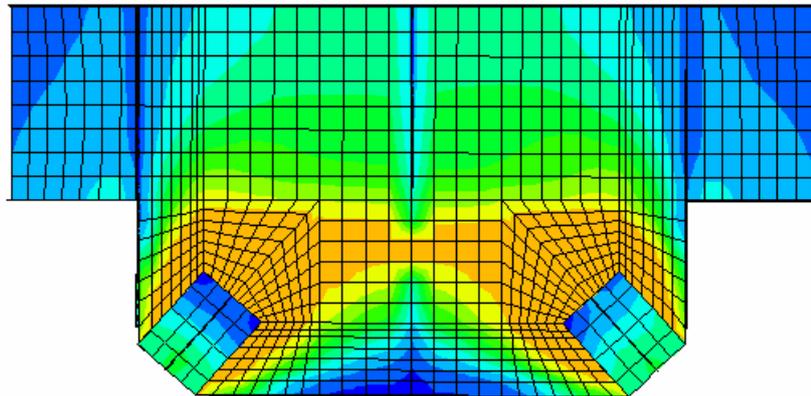
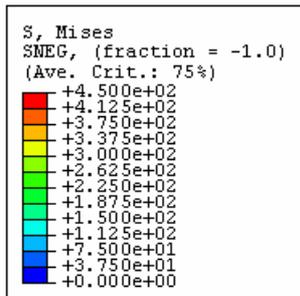
(接合板接合長度短於彎折線)



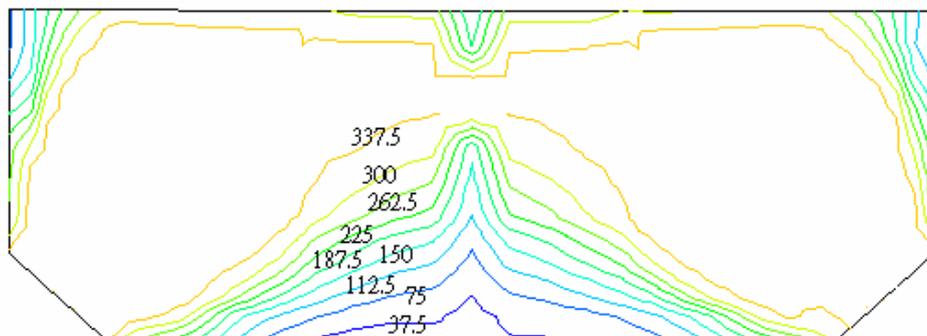
(a) 接合板 Min-Principal 挫屈應力圖 (G16S16A1L3)



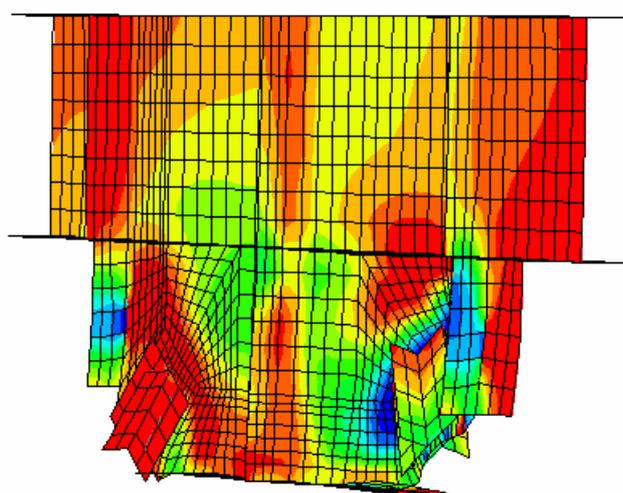
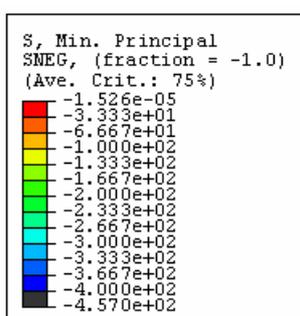
(a) Min-Principal 挫屈應力分布圖 (G16S16A1L3)



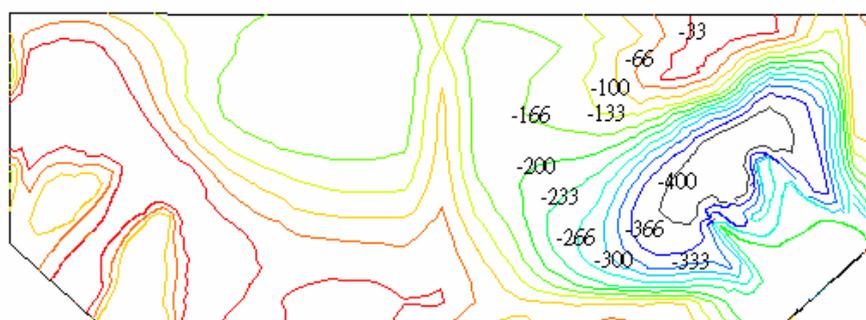
(c) 接合板 Von-Mises 挫屈應力圖 (G16S16A2L3)



(d) Von-Mises 挫屈應力分布圖 (G16S16A2L3)



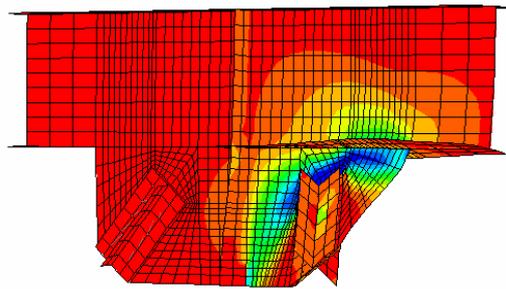
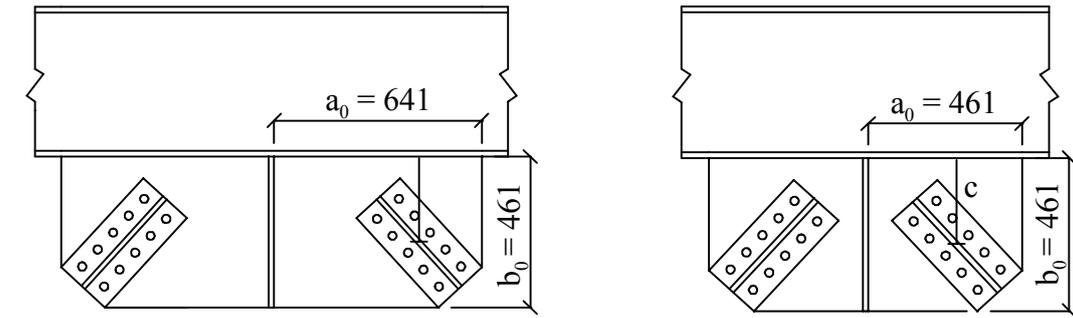
(e) 接合板 Min-Principal 非彈性挫屈應力圖 (G16S16A2L3)



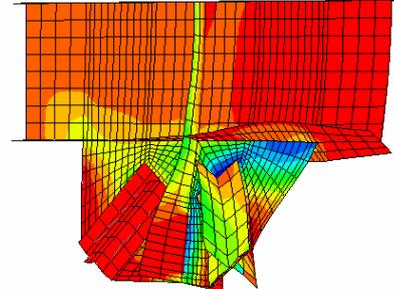
(f) 接合板 Min-Principal 非彈性挫屈應力圖 (G16S16A2L3)

圖 3.39 加勁後接合板應力圖與變形示意圖

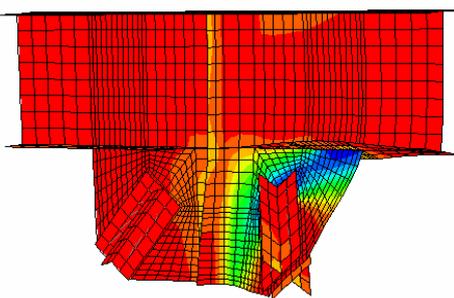
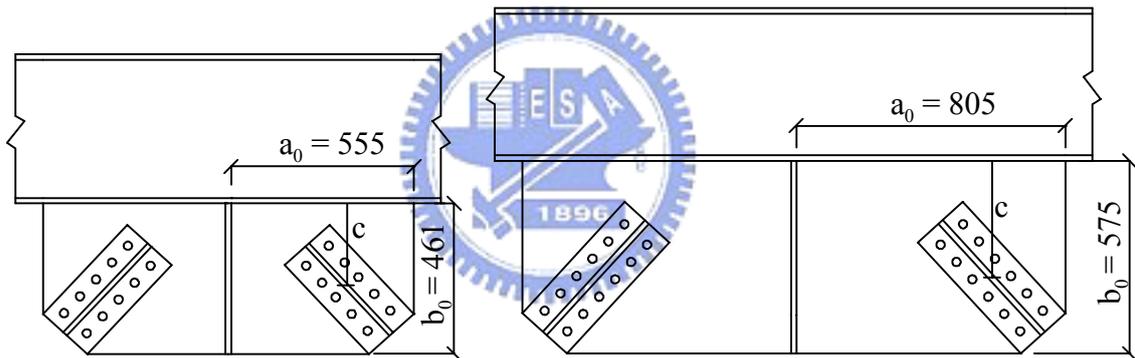
(接合板接合長度短於接合板彎折線)



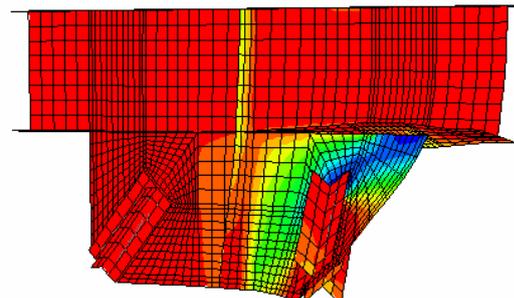
(a) 641×461



(b) 461×461



(c) 555×461



(d) 805×575

圖 3.40 不同形式接合板之尺寸與面外挫屈

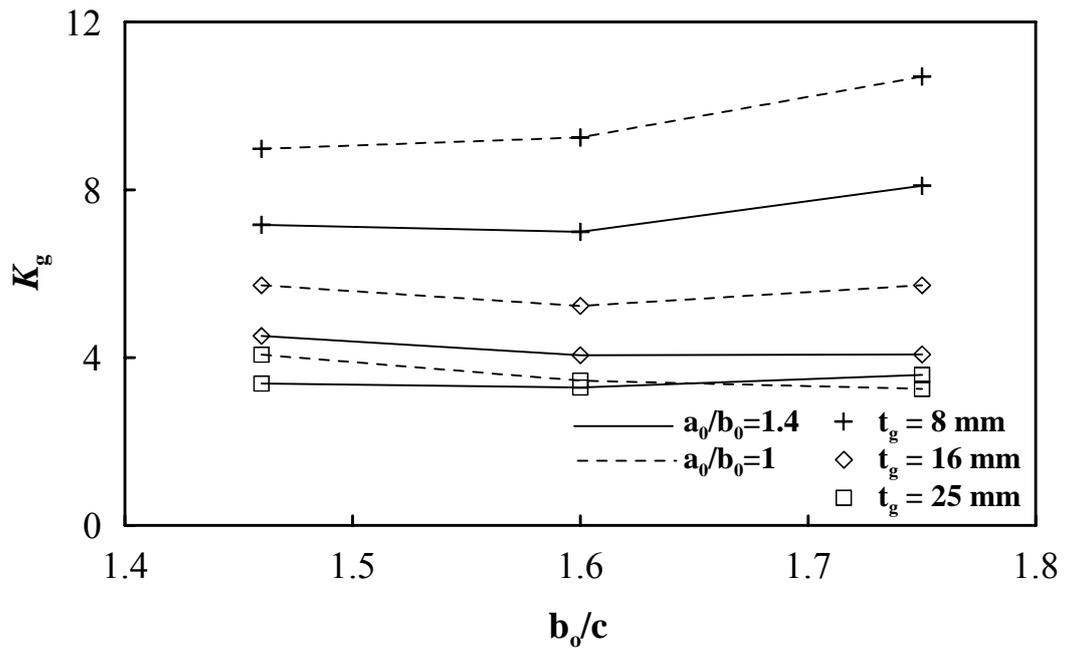


圖 3.41  $K_g$  預測值





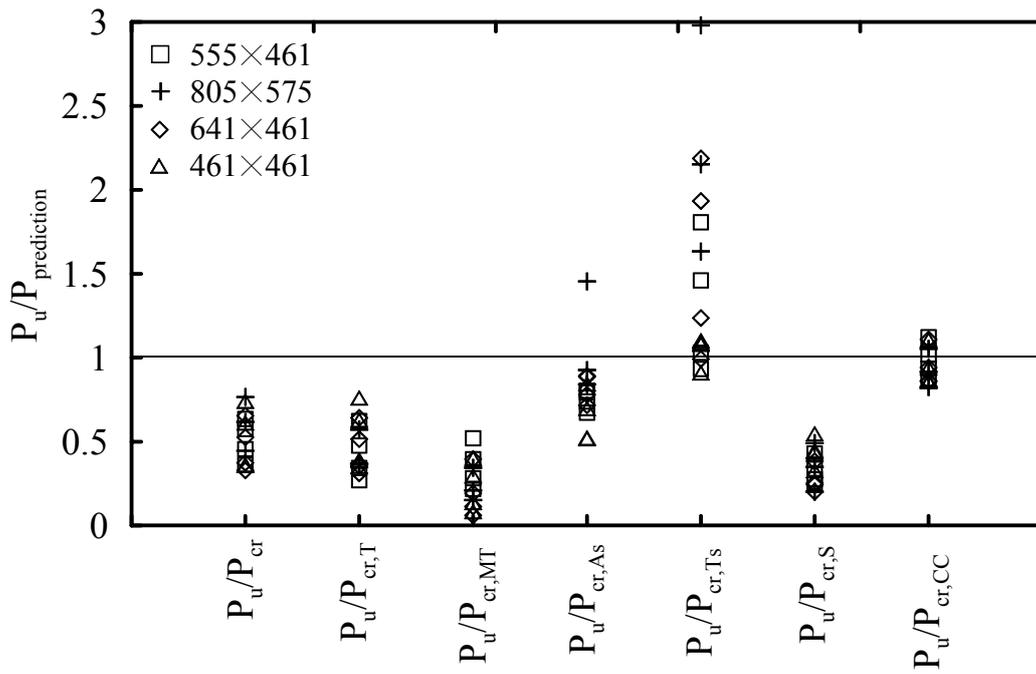


圖 3.43 其他形式接合板挫屈強度與預測強度之比較



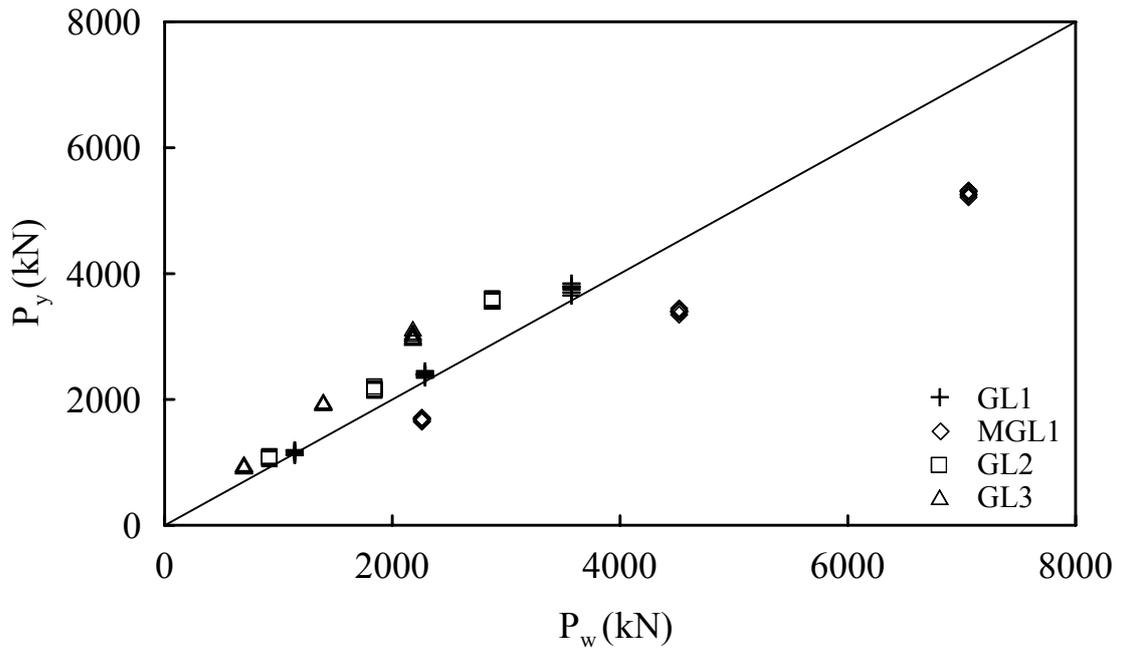


圖 3.44 降伏力與  $P_w$  之比較

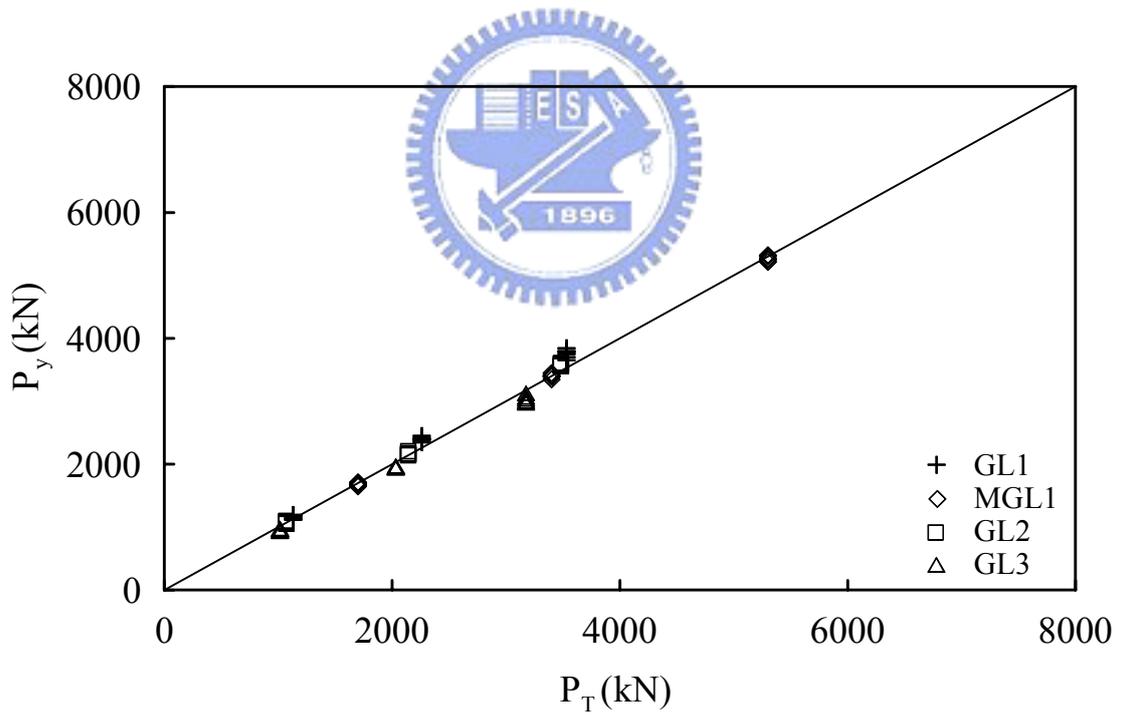


圖 3.45 降伏力與  $P_T$  之比較

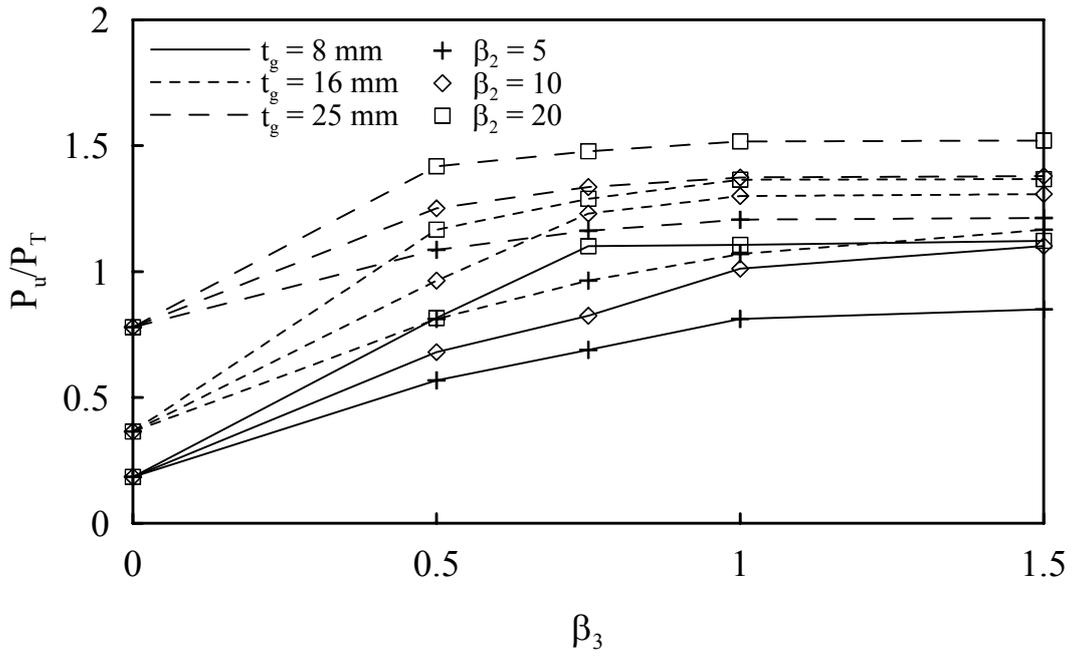


圖 3.46 接合板強度與  $\beta_2$  及  $\beta_3$  之關係 (原尺寸)

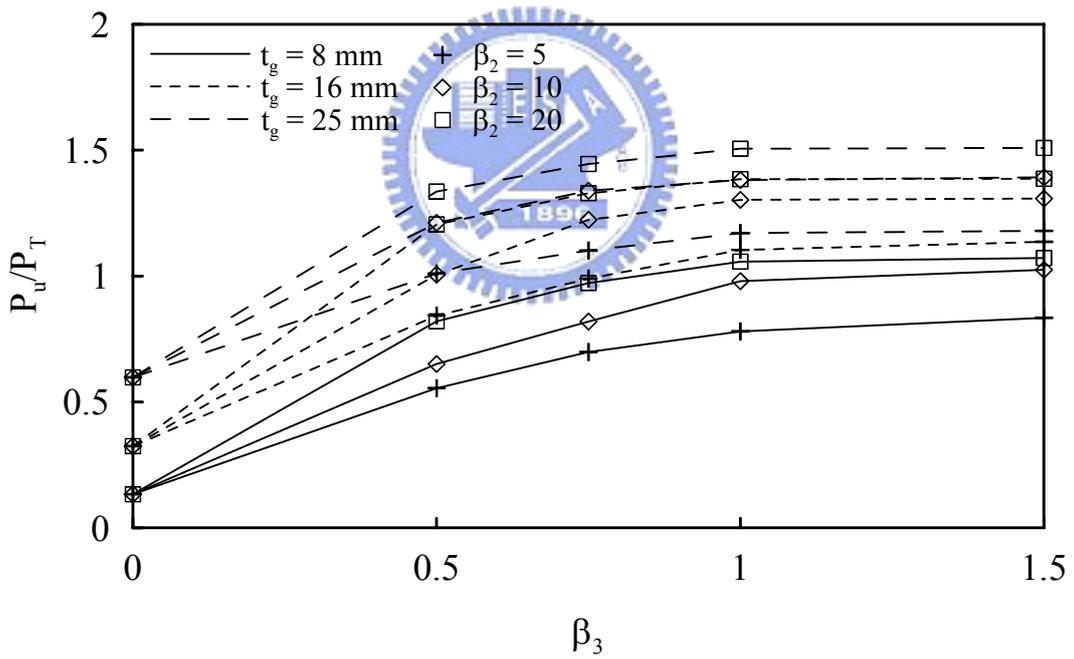


圖 3.47 接合板強度與  $\beta_2$  及  $\beta_3$  之關係 (接合區長度在彎折線上)

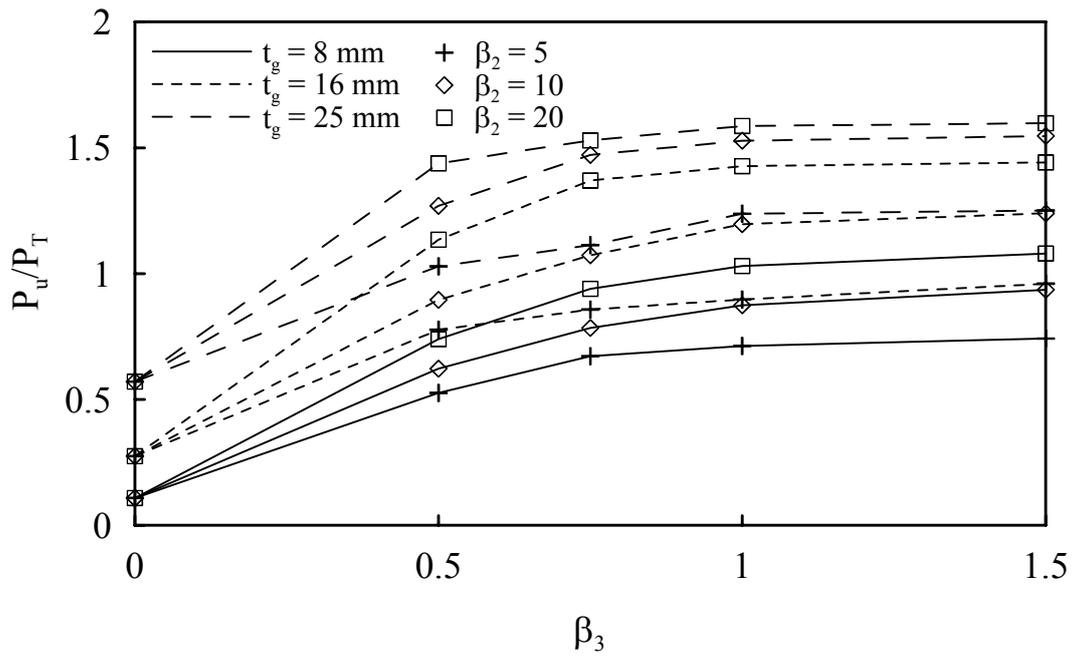


圖 3.48 接合板強度與  $\beta_2$  及  $\beta_3$  之關係 (接合區長度在彎折線外)

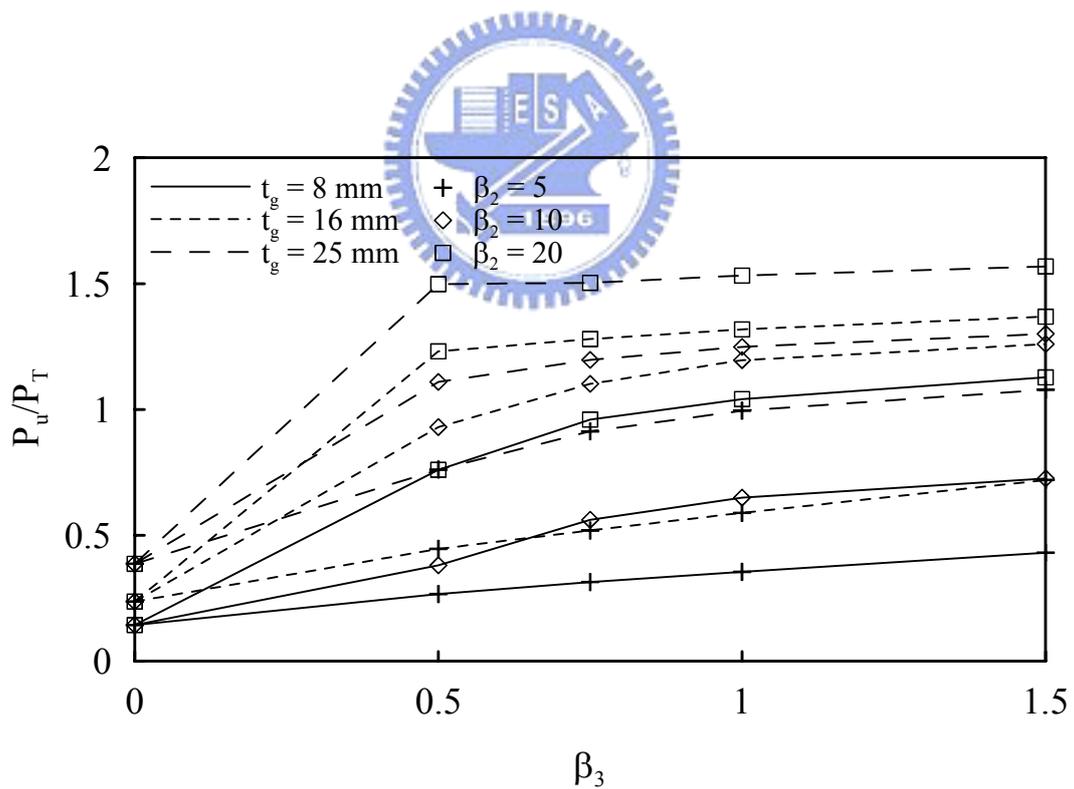


圖 3.49 接合板強度與  $\beta_2$  及  $\beta_3$  之關係 (加大尺寸接合板)

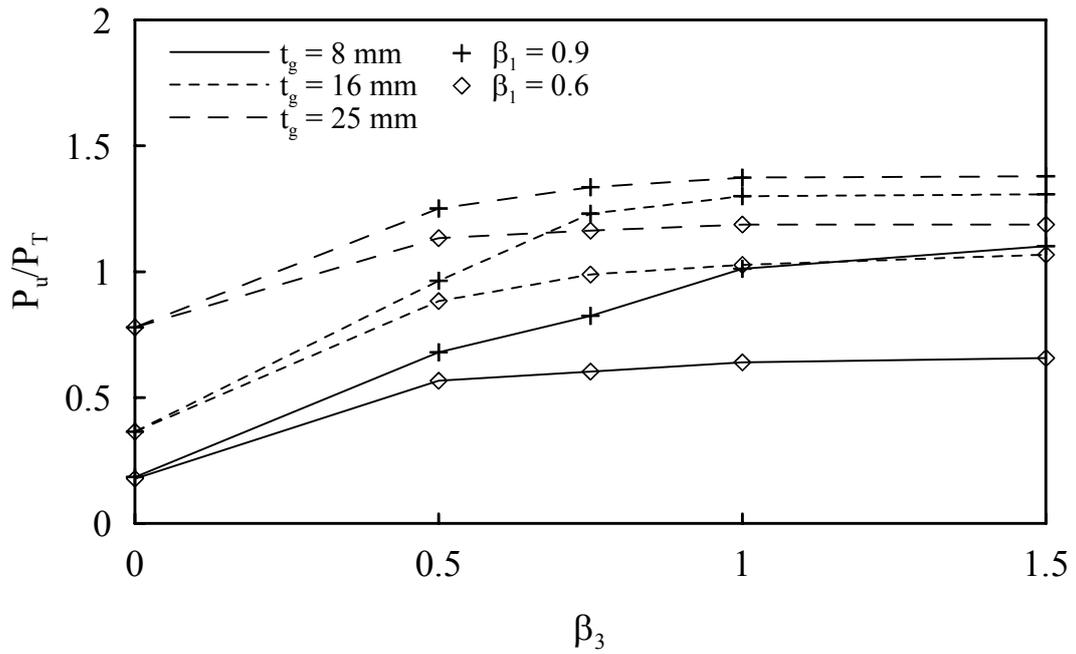


圖 3.50 接合板強度與  $\beta_1$  之關係 (原尺寸,  $\beta_2 = 10$ )

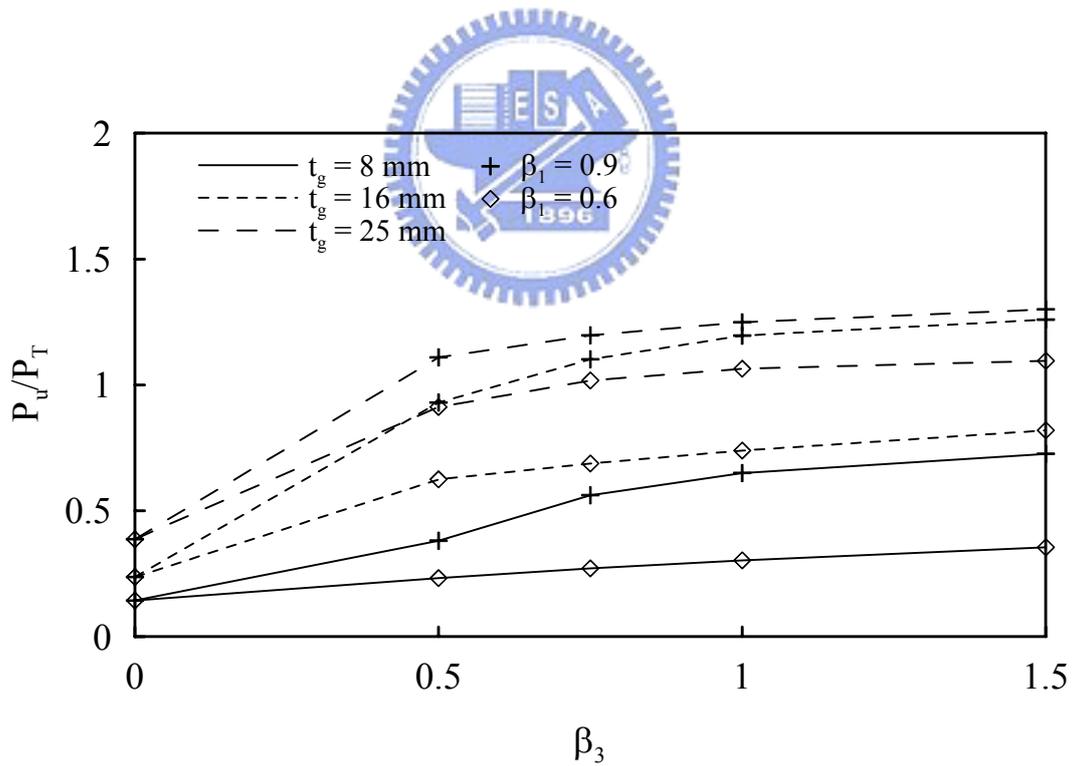


圖 3.51 接合板強度與  $\beta_1$  之關係 (接合區長度在彎折線上,  $\beta_2 = 10$ )

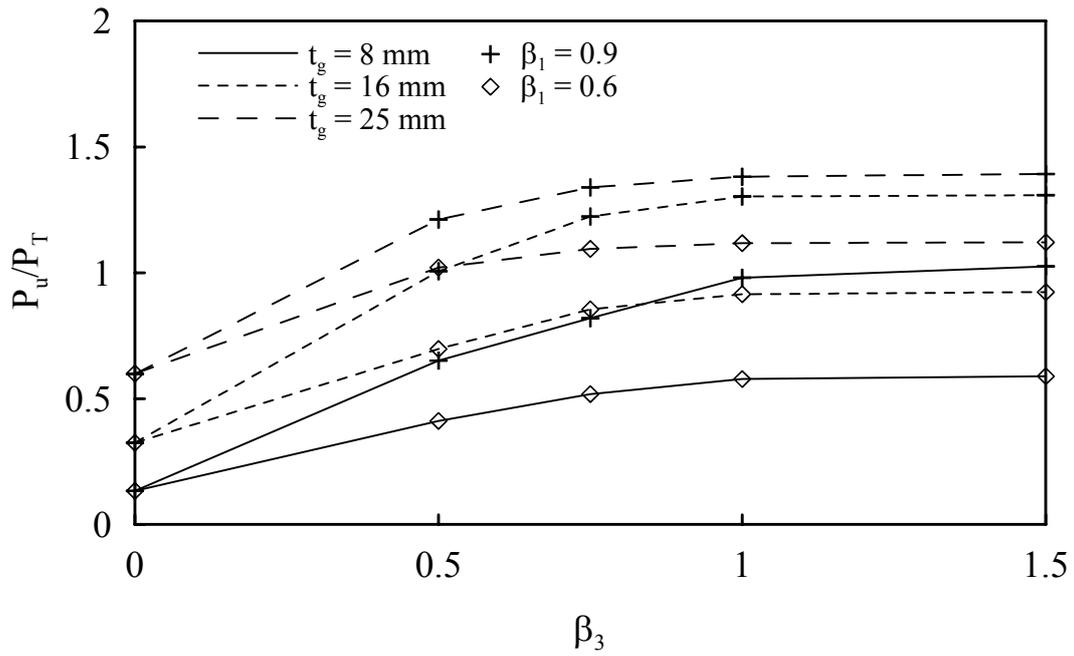


圖 3.52 接合板強度與  $\beta_1$  之關係 (接合區長度在彎折線外,  $\beta_2 = 10$ )

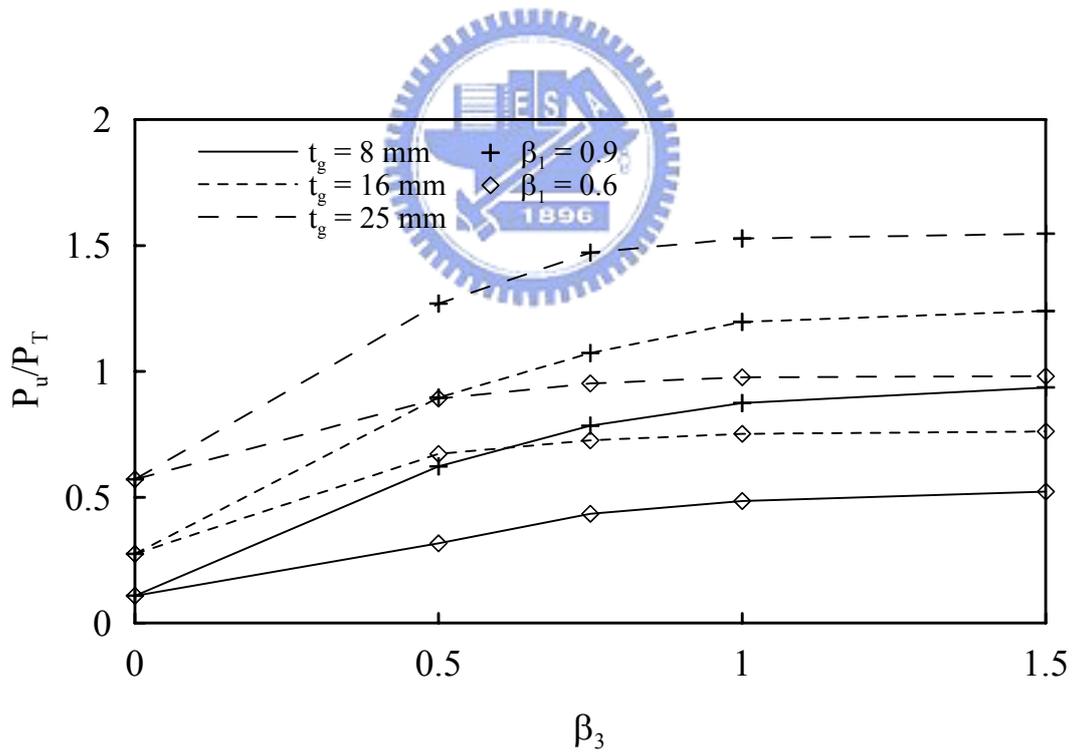
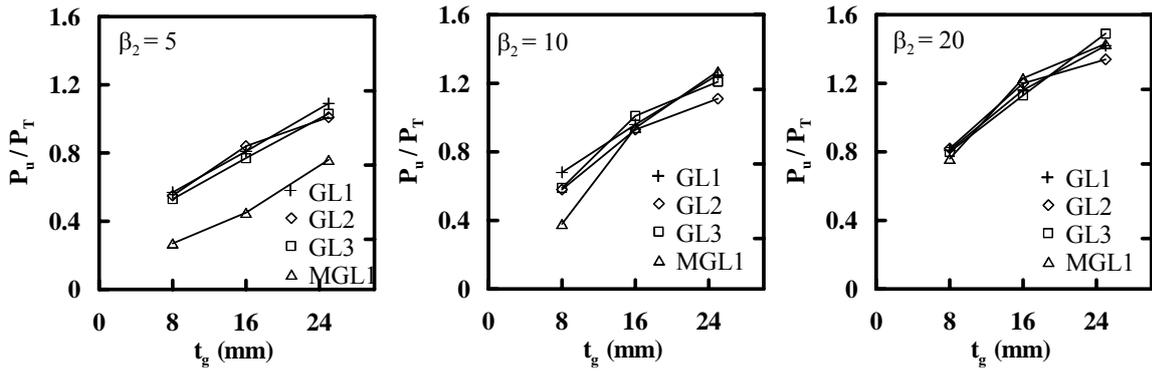
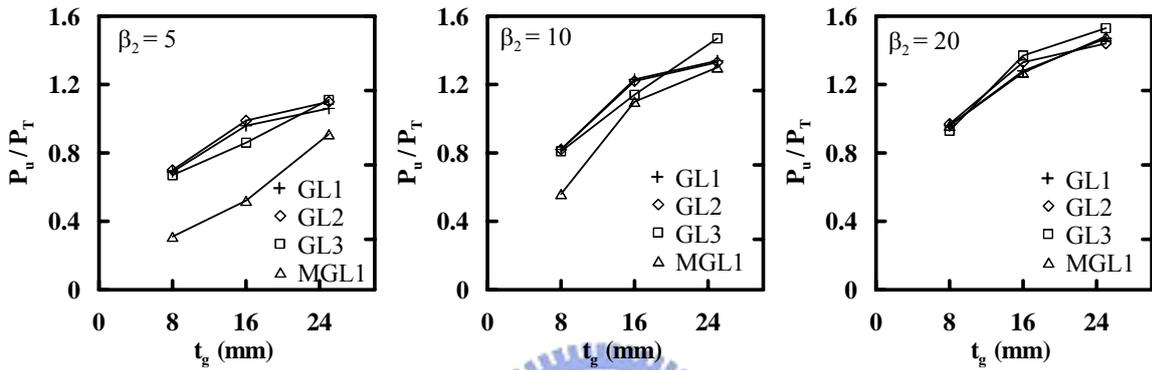


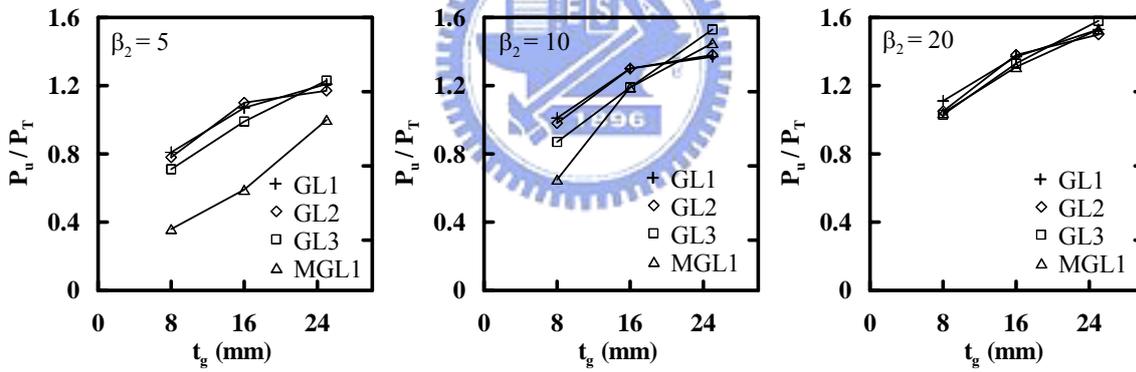
圖 3.53 接合板強度與  $\beta_1$  之關係 (加大尺寸接合板,  $\beta_2 = 10$ )



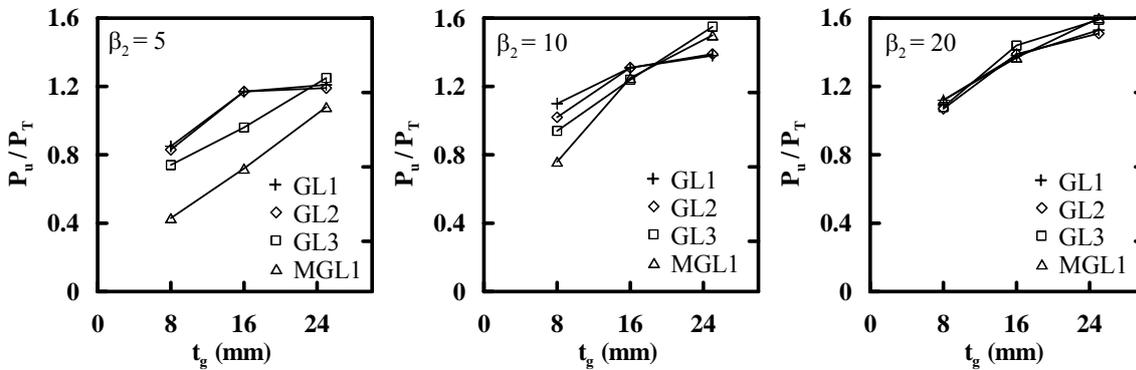
(a)  $\beta_3=0.5$



(b)  $\beta_3=0.75$

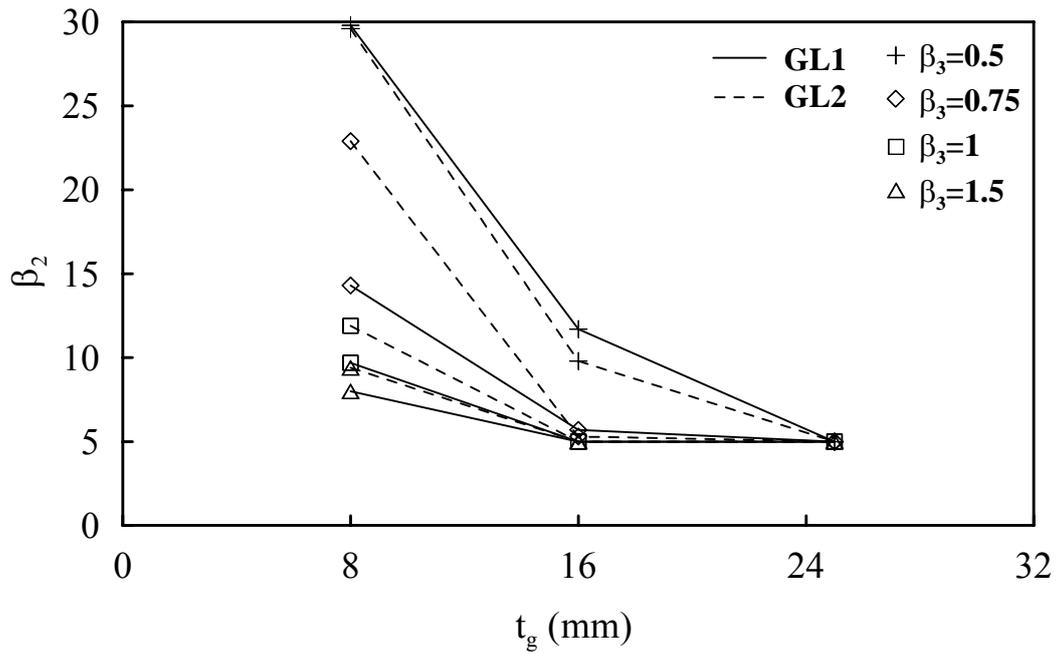


(c)  $\beta_3=1$

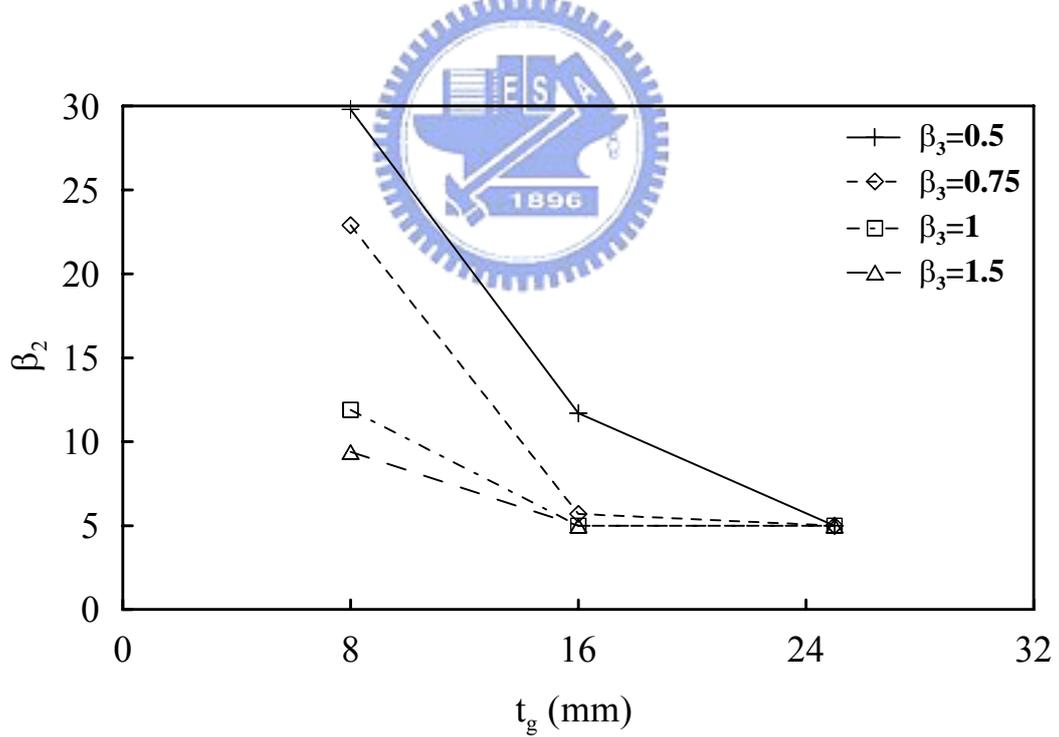


(d)  $\beta_3=1.5$

圖 3.54 接合板強度與  $t_g$  及尺寸之關係 ( $\beta_1=0.9$ 、 $\beta_3=1.5$ )



(a)  $\beta_2$  需求值



(b)  $\beta_2$  建議值

圖 3.55  $\beta_2$  設計值 ( $\beta_1=0.9$ , 使  $P_u > P_T$ )

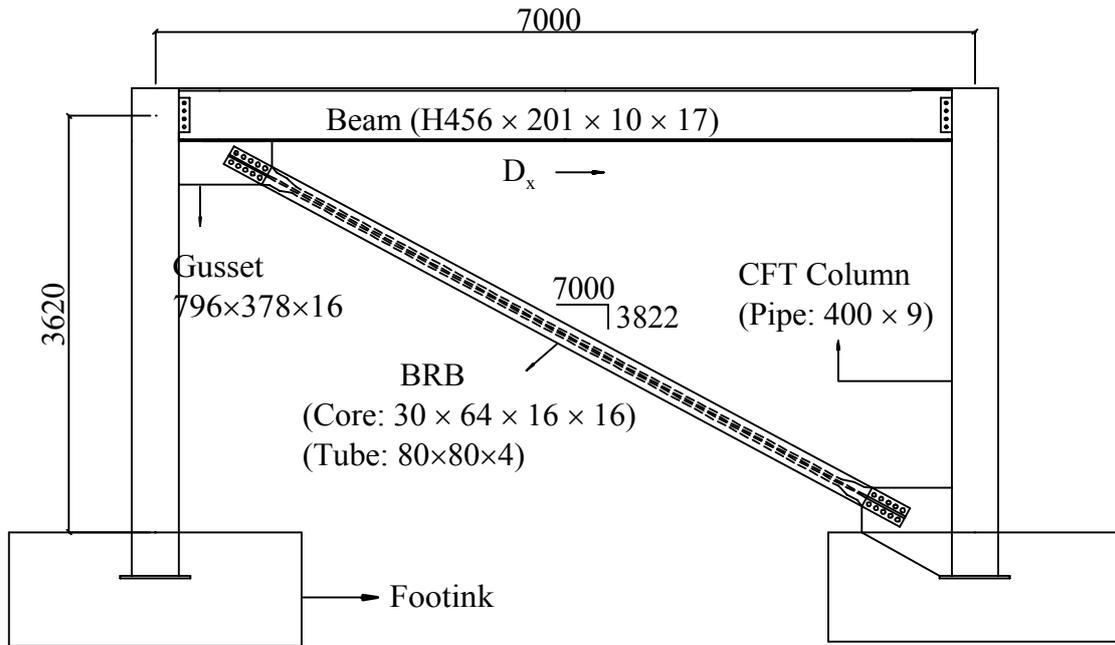
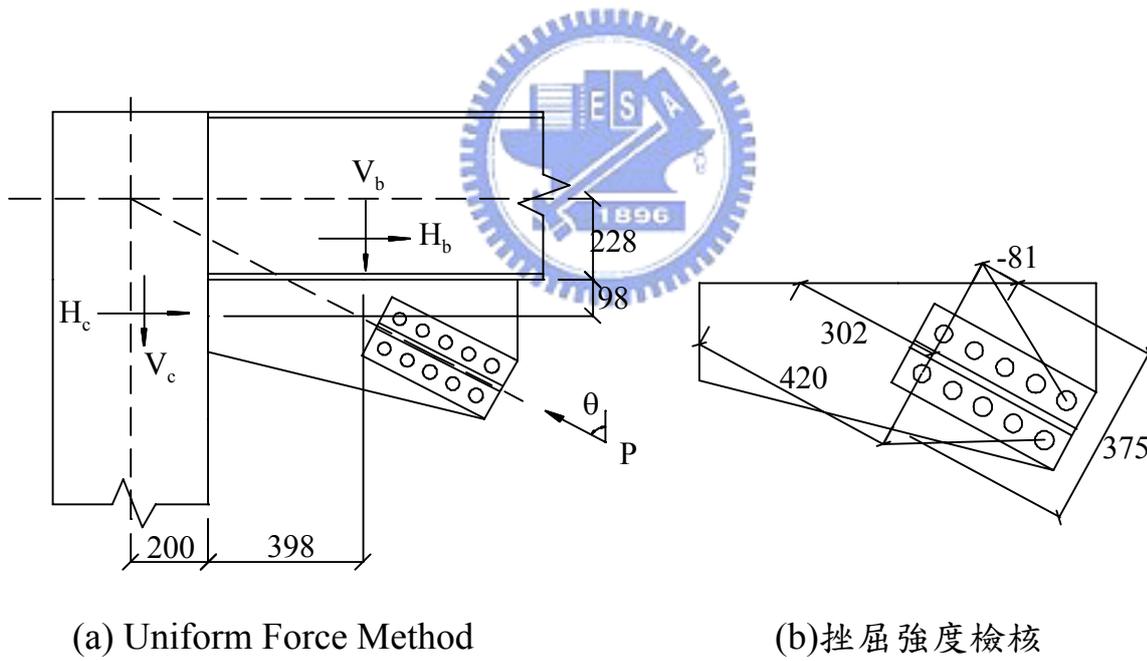


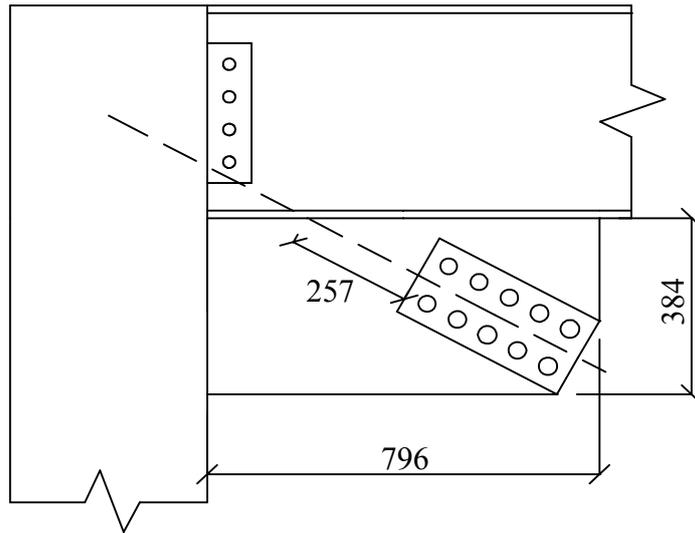
圖 4.1 單斜撐系統一層樓構架



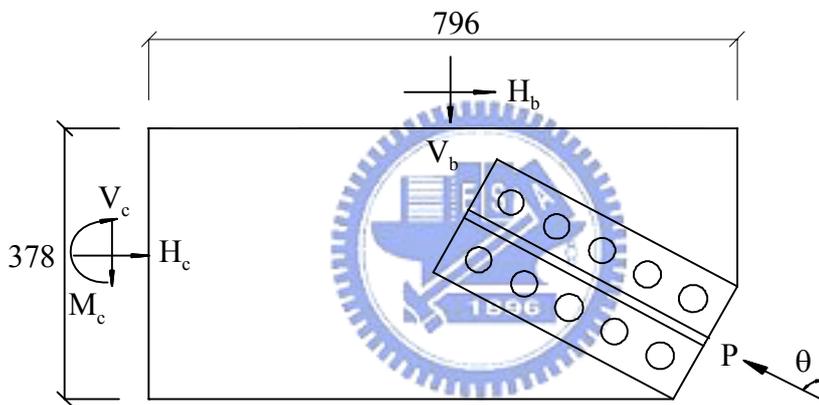
(a) Uniform Force Method

(b) 挫屈強度檢核

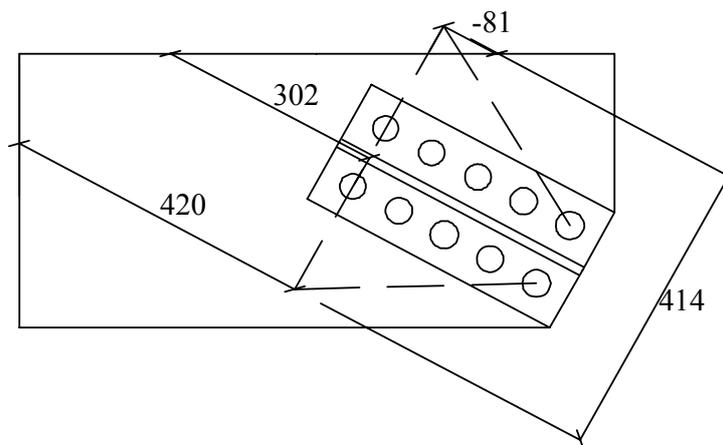
圖 4.2 接合板設計



(a) 改良後尺寸示意圖

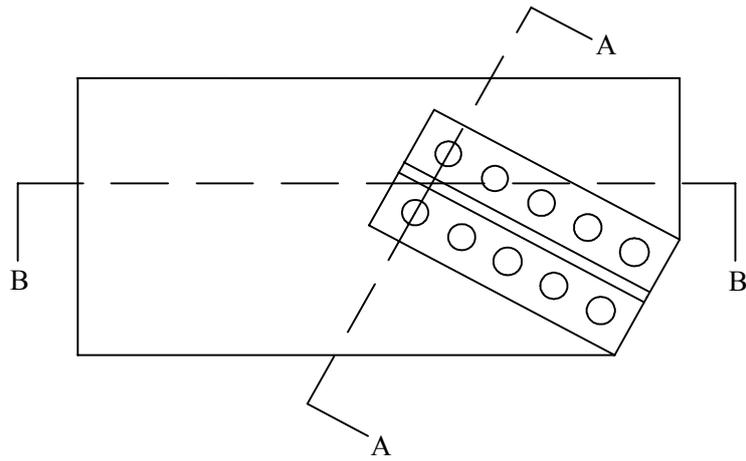


(b) Uniform Force Method ( $\alpha=\alpha'$ ,  $\beta\neq\beta'$ )

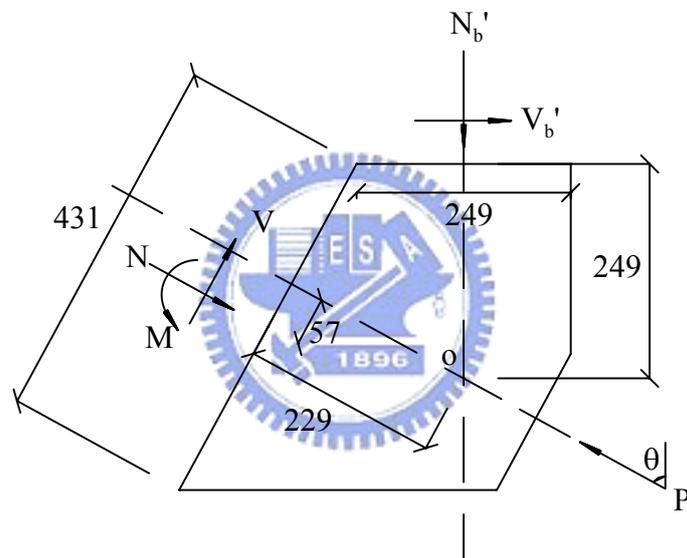


(c) 接合板尺寸圖及挫屈強度檢核

圖 4.3 接合板設計 (非符合 Uniform force Method)

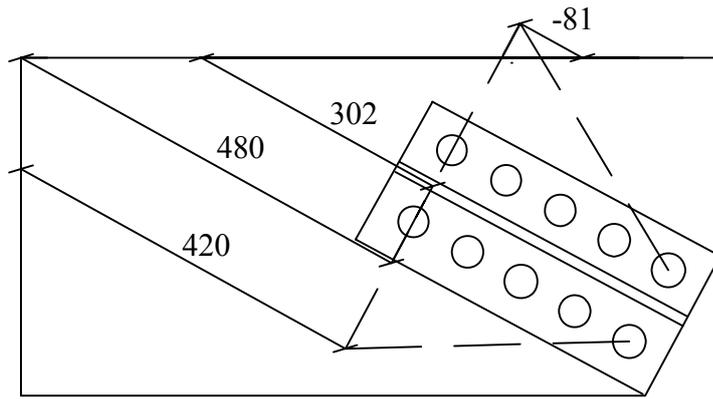


(a) 臨界斷面選定示意圖

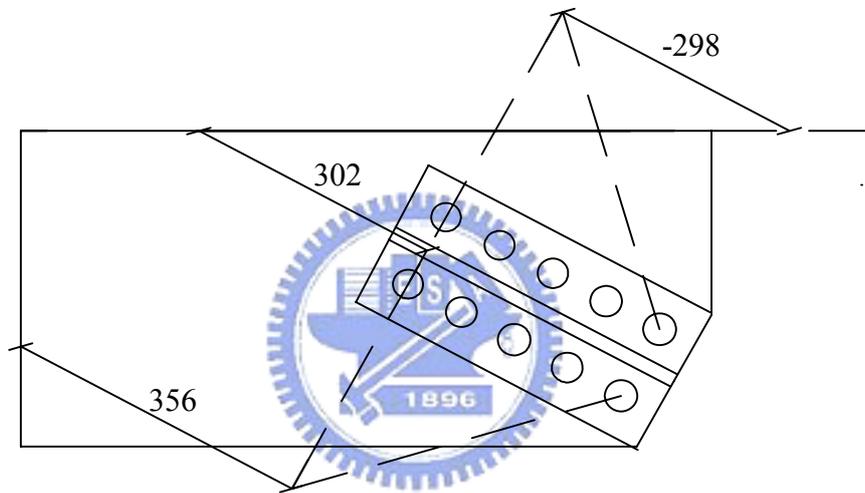


(b) A-A 斷面自由體圖

圖 4.4 Thornton (1984) 法之接合板降伏強度計算



(a)  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  及  $L_{\max}$  示意圖



(b) Modified Thornton 之  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  示意圖

圖 4.5 接合板有效長度示意圖

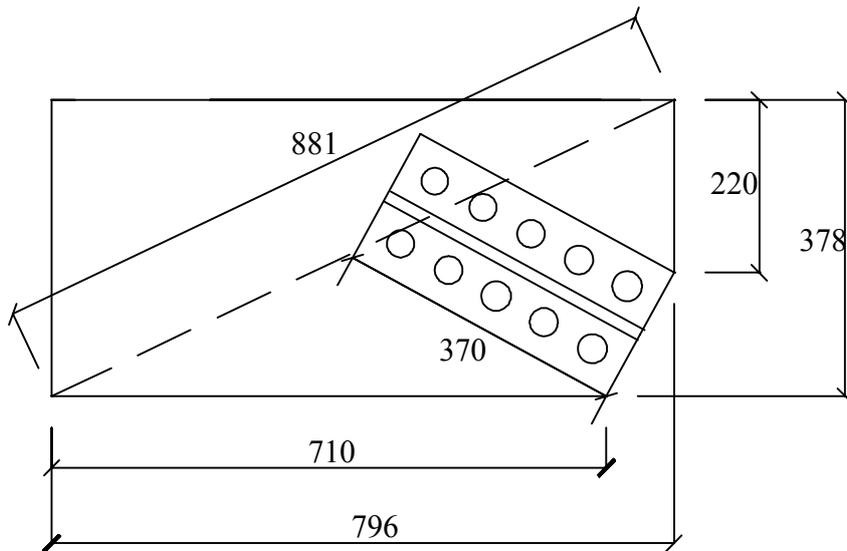


圖 4.6 接合板非彈性挫屈強度預測

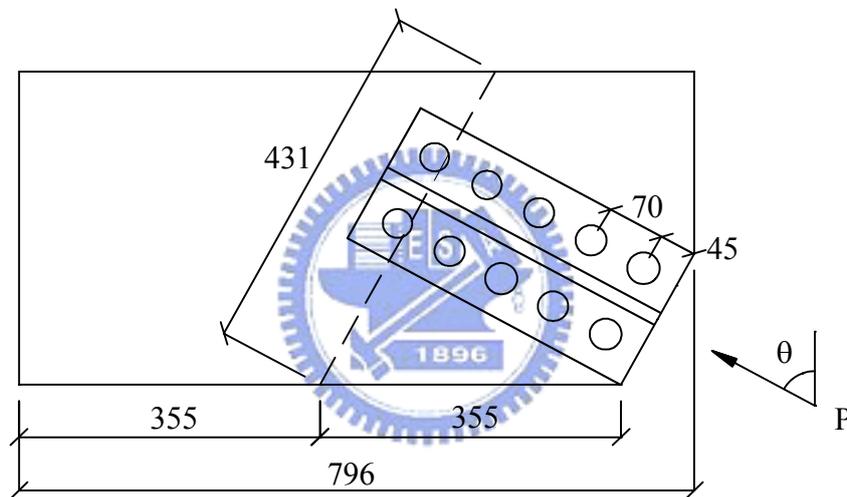


圖 4.7 長端局部挫屈強度計算

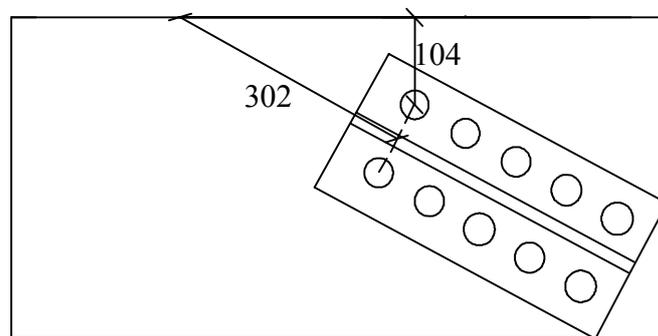
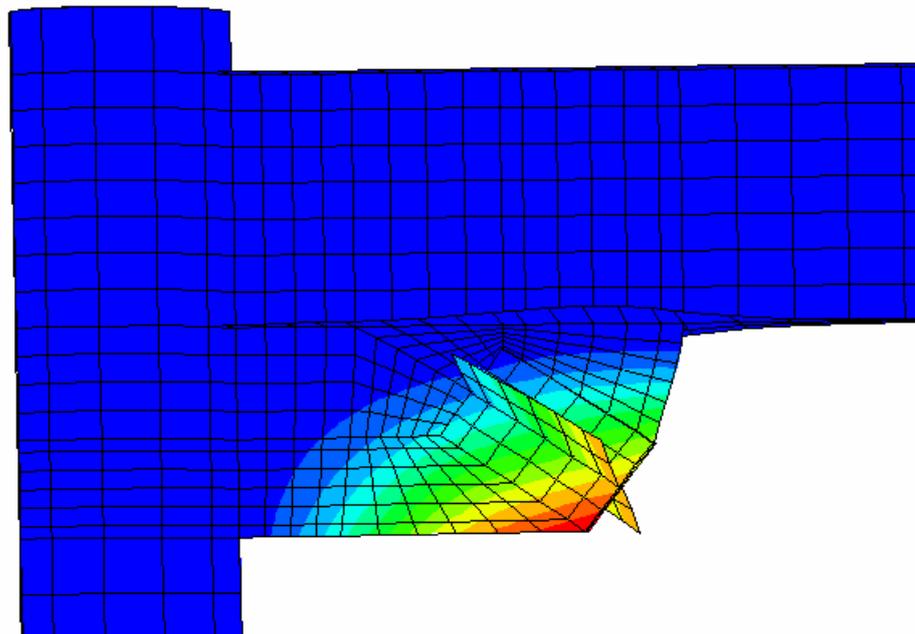
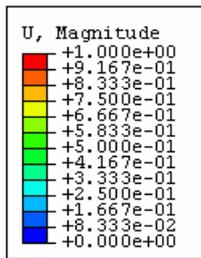
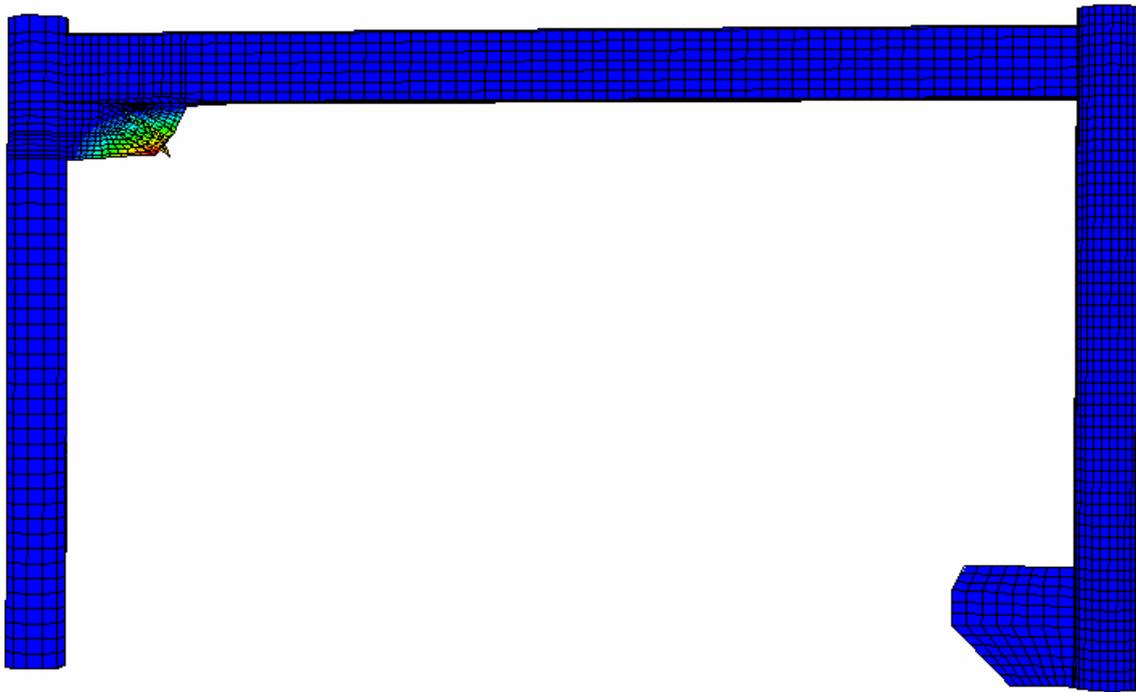
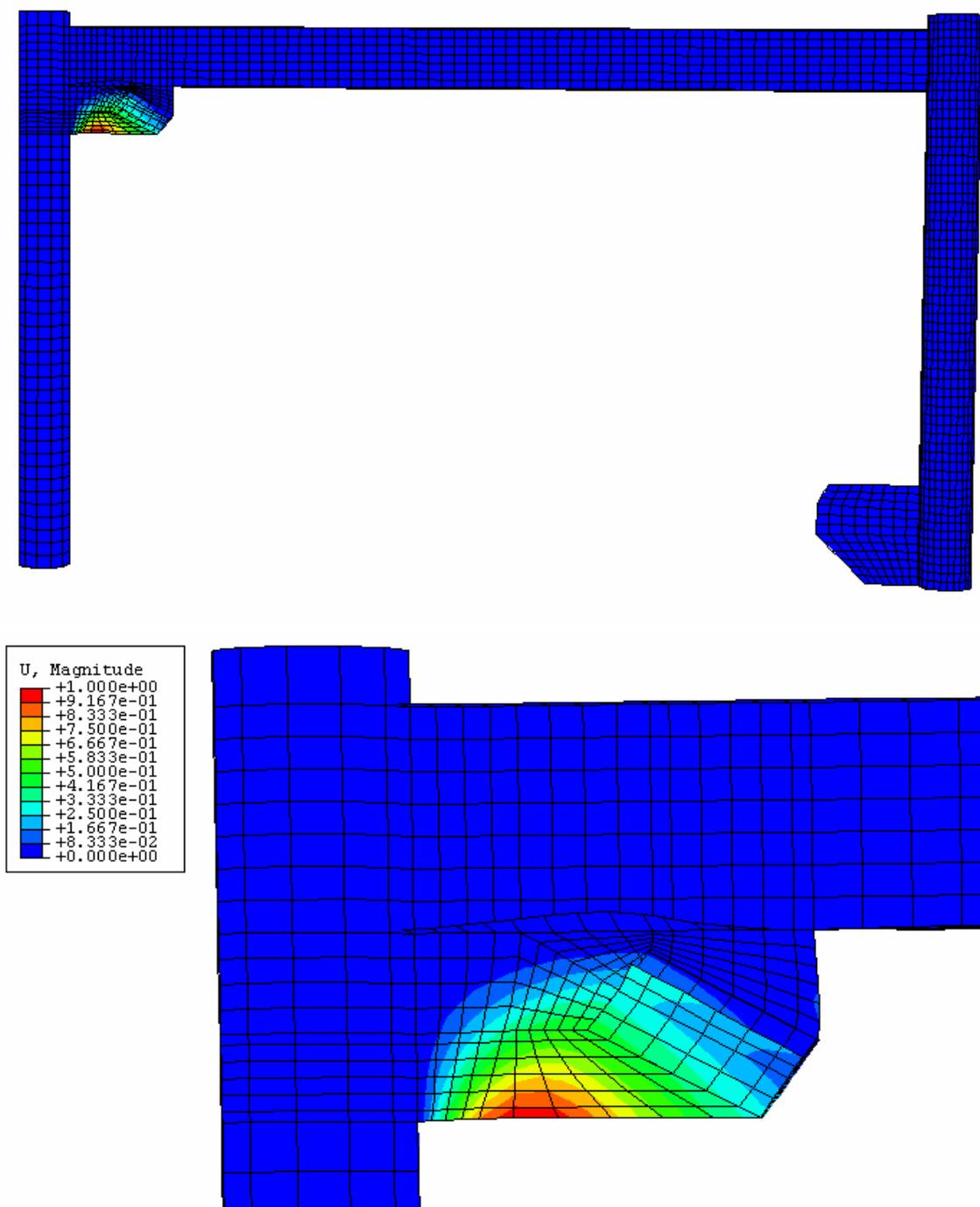


圖 4.8 接合板厚度檢核 (Out of Plane Check)

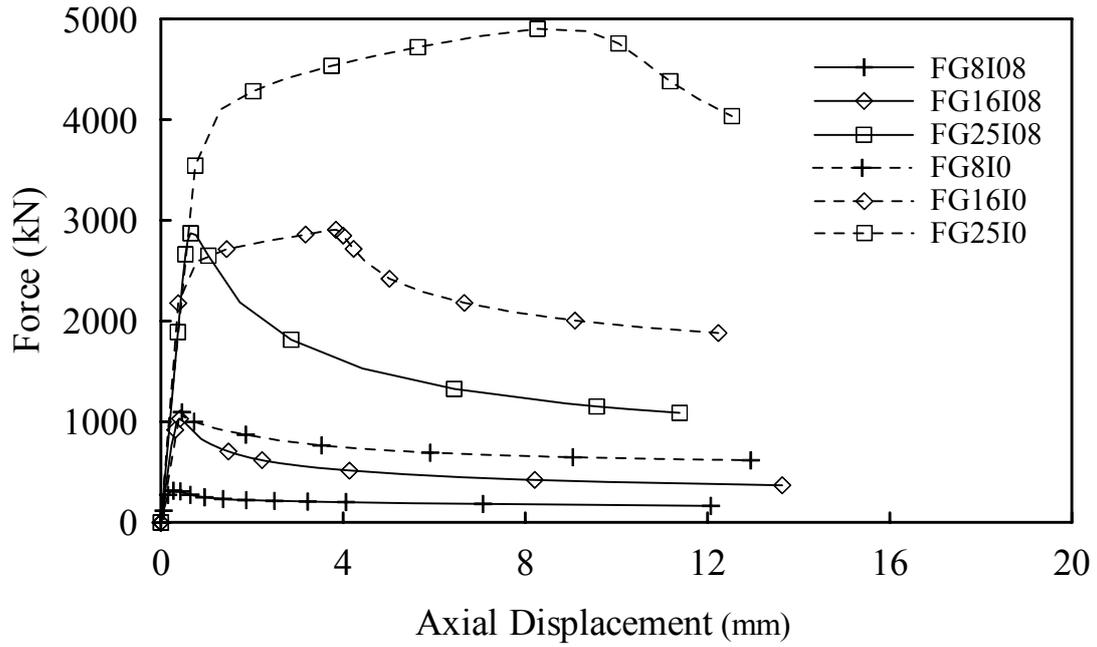


(a) 第一模態

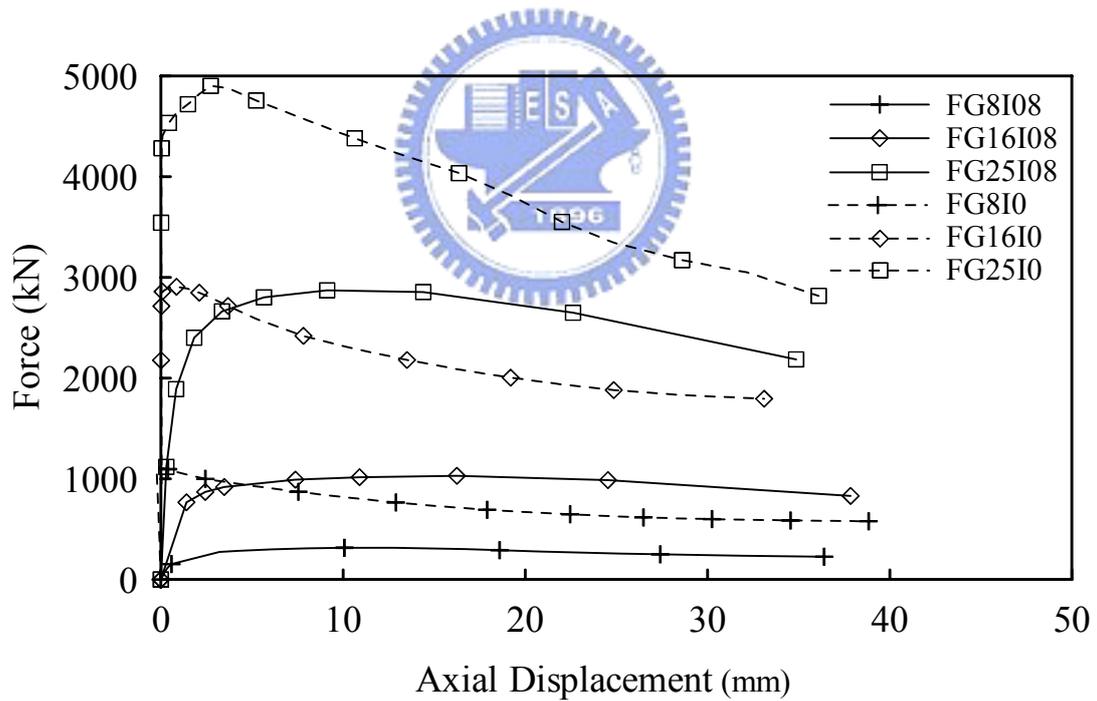


(b) 第二模態

圖 4.9 挫屈模態

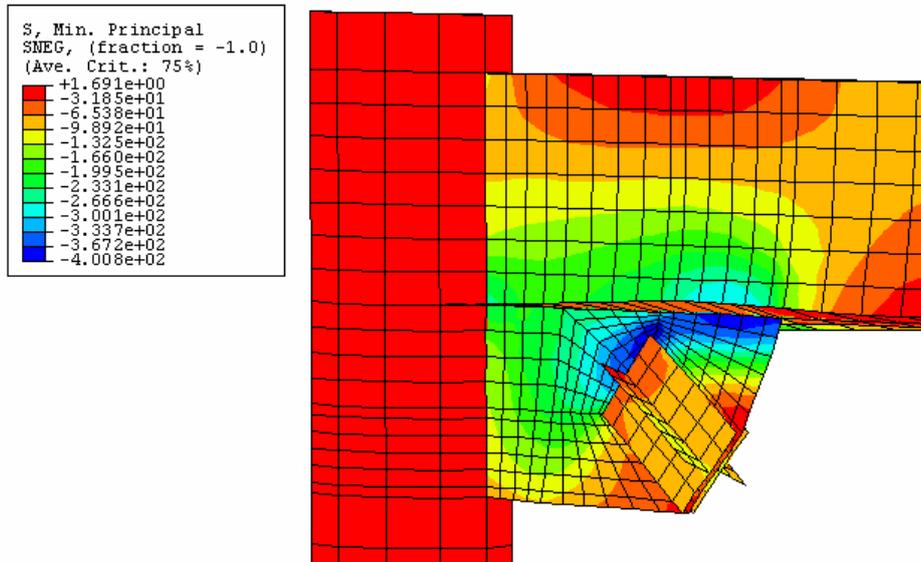
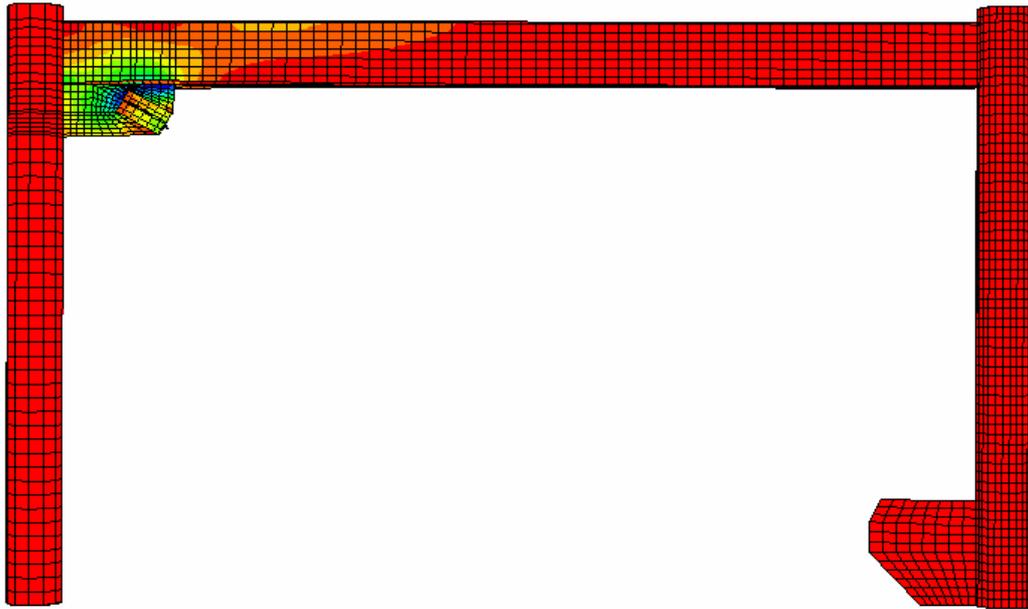


(a) 軸力與軸位移關係

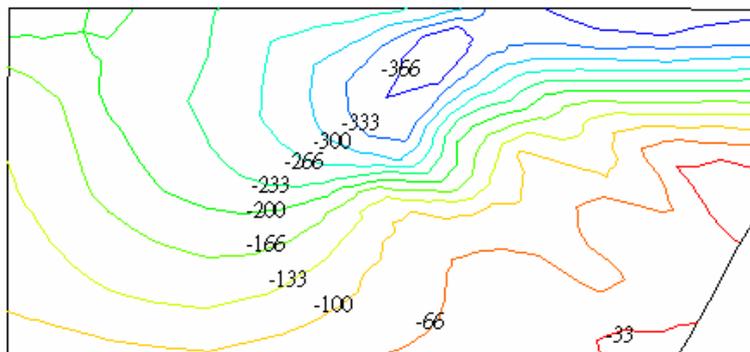


(b) 軸力與面外位移關係

圖 4.10 力量與位移關係 (0.8 mm 及 0 mm 初始面外變位)

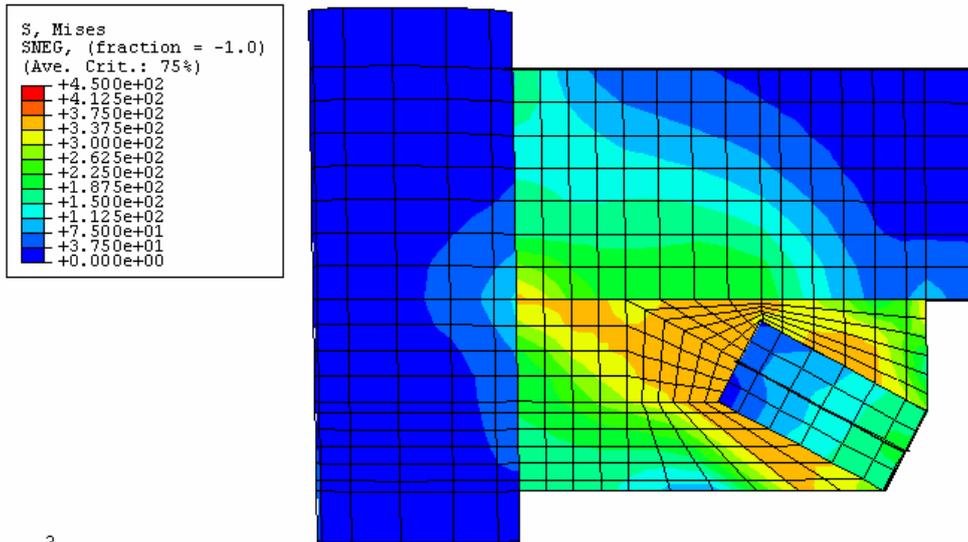


(a) 挫屈應力及變形 (Min-Principal)

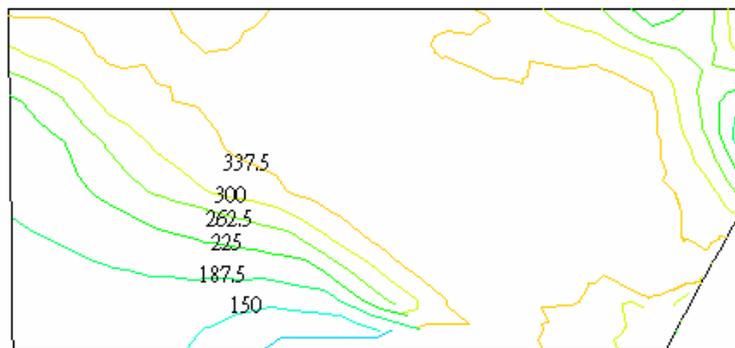


(b) 接合板 Min-Principal 應力分布圖

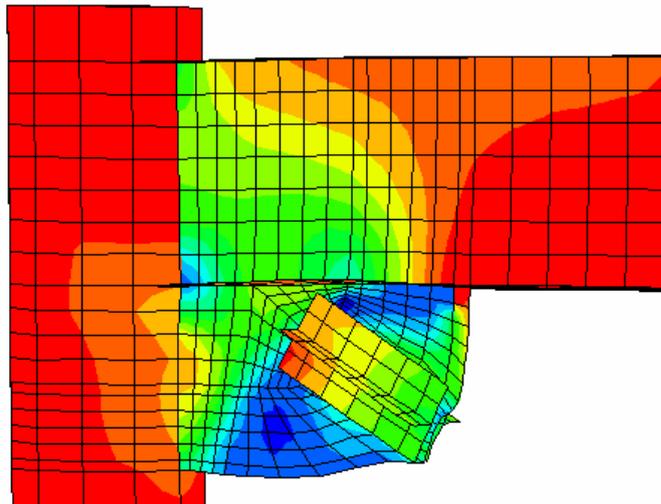
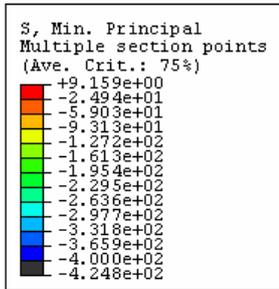
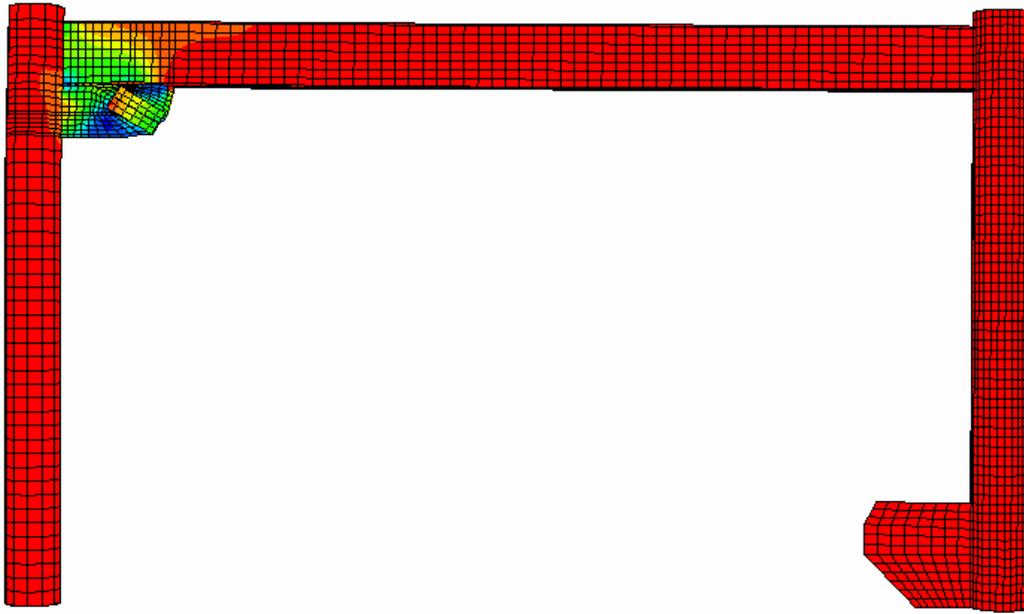
圖 4.11 接合板應力圖 (FG16I08)



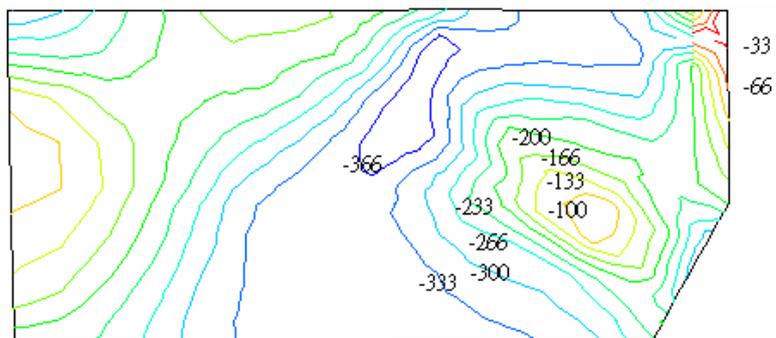
(a) 降伏應力 (Mises)



(b) 降伏應力分布圖 (Mises)

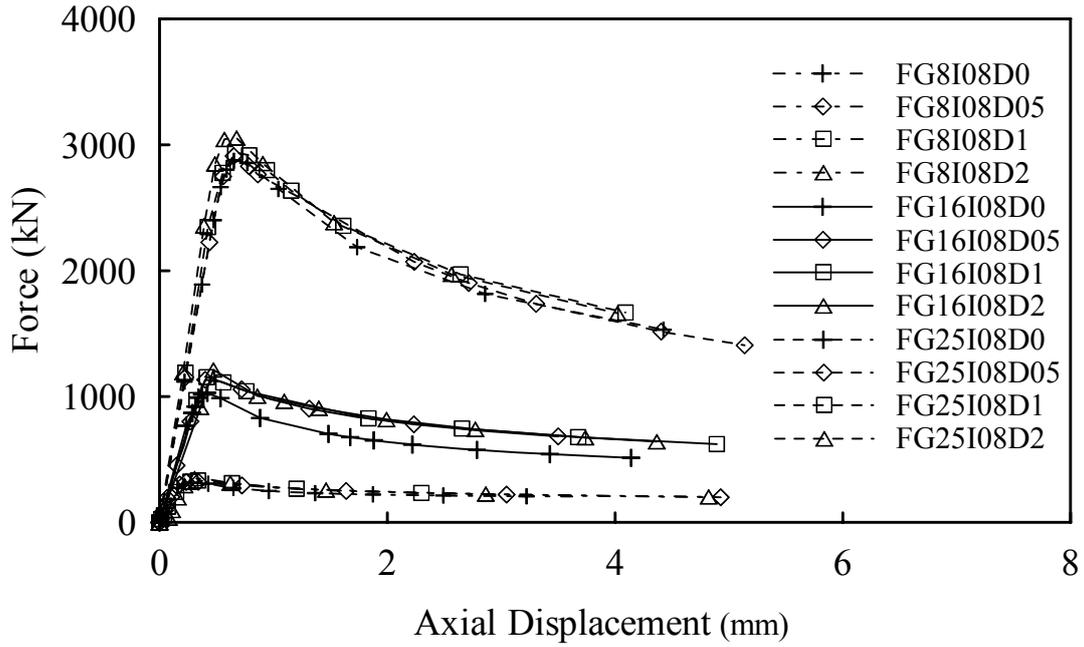


(c) 挫屈應力及變形 (Min-Principal)

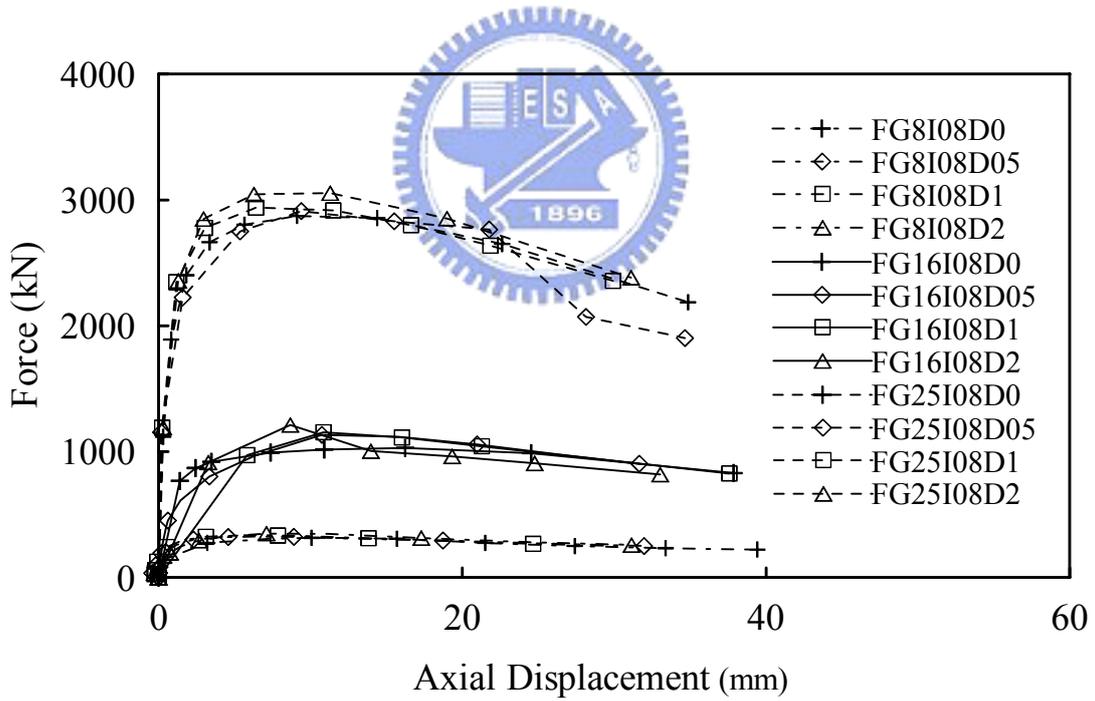


(d) Min-Principal 挫屈應力分佈圖

圖 4.12 接合板應力圖 (0FG16I0)

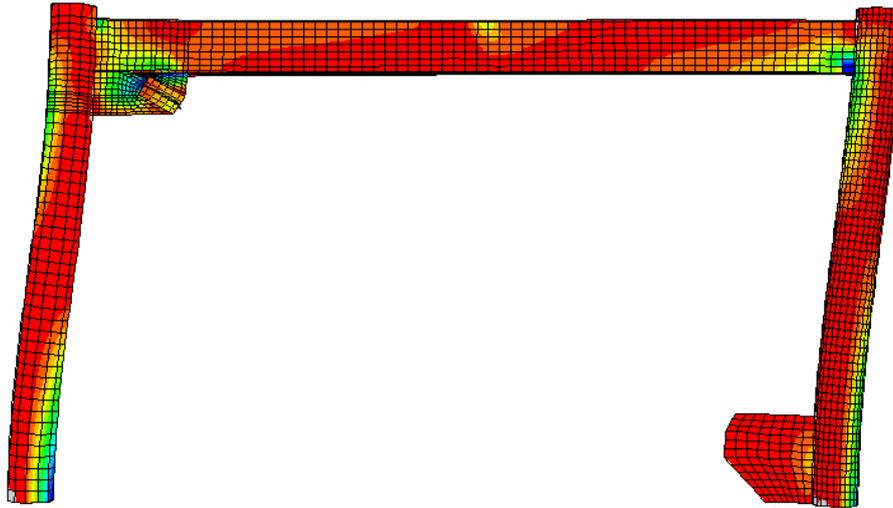


(a) 軸力與軸位移關係

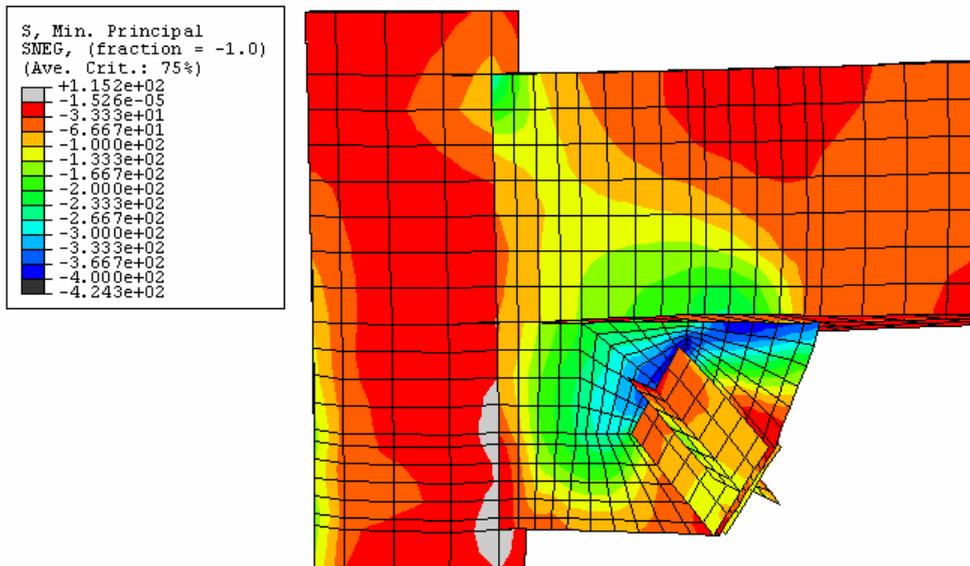


(b) 軸力與面外位移關係

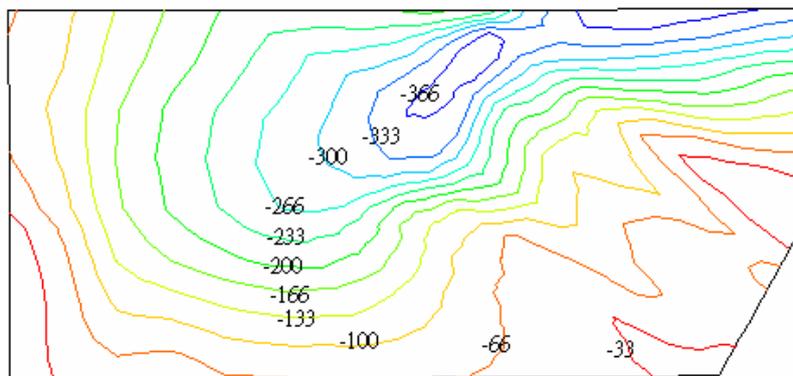
圖 4.13 力量與位移關係 (比較側推與無側推後施力分析)



(a) 構架側推示意圖

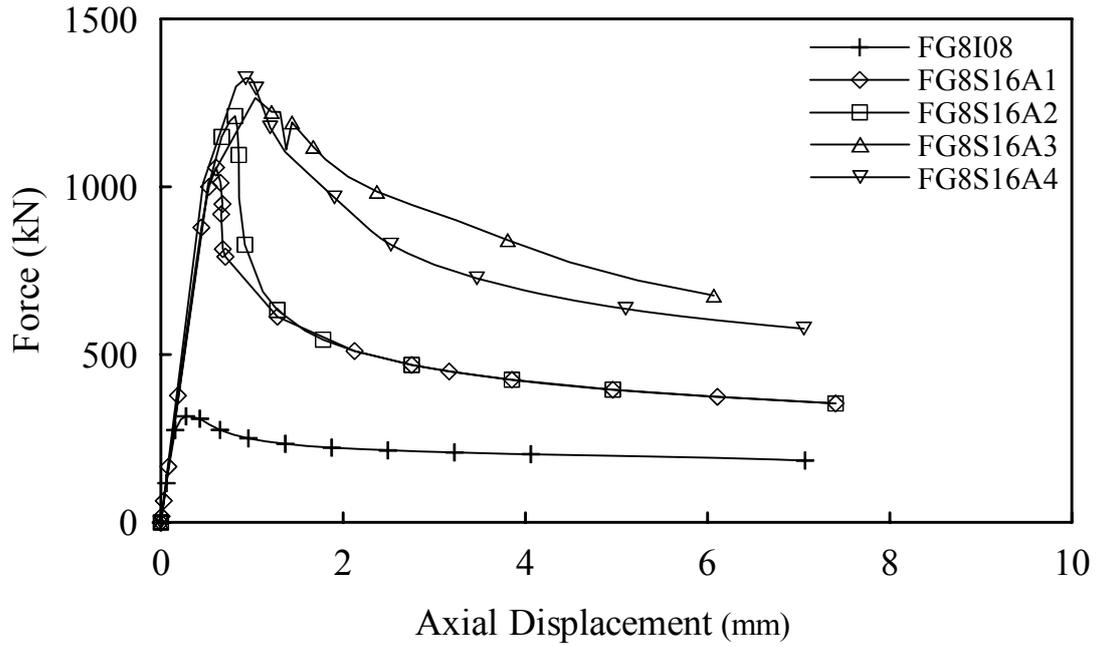


(b) 接合板應力與變形圖

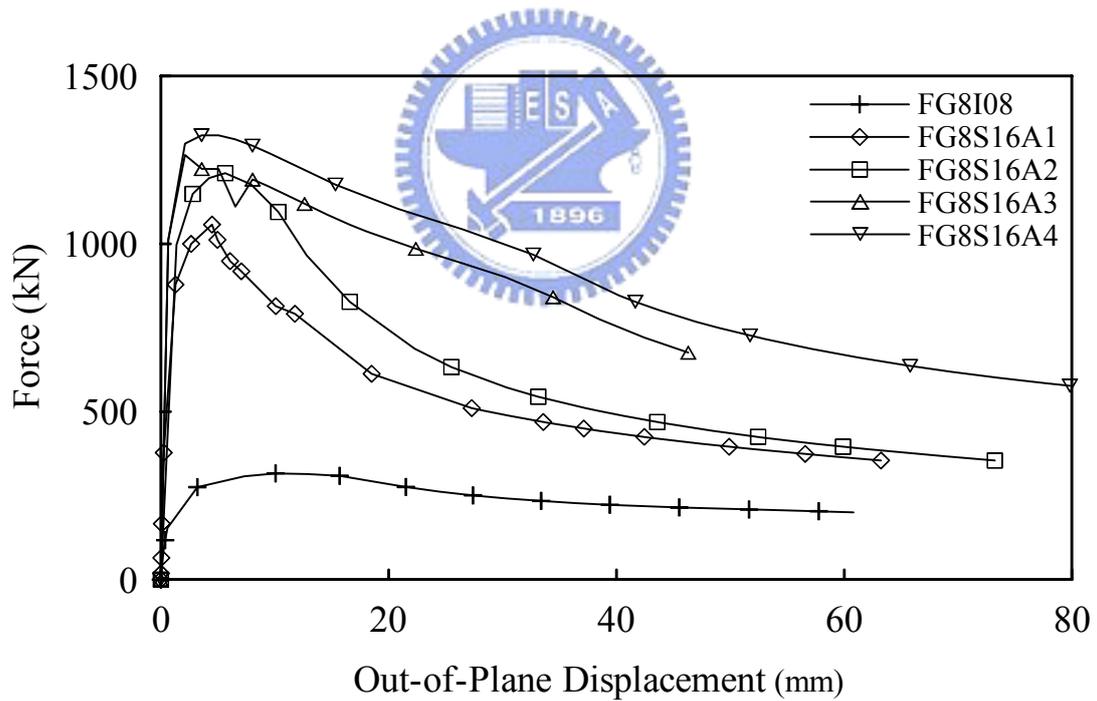


(c) Min-Principal 應力分布圖

圖 4.14 接合板應力圖 (FG16I08D1)

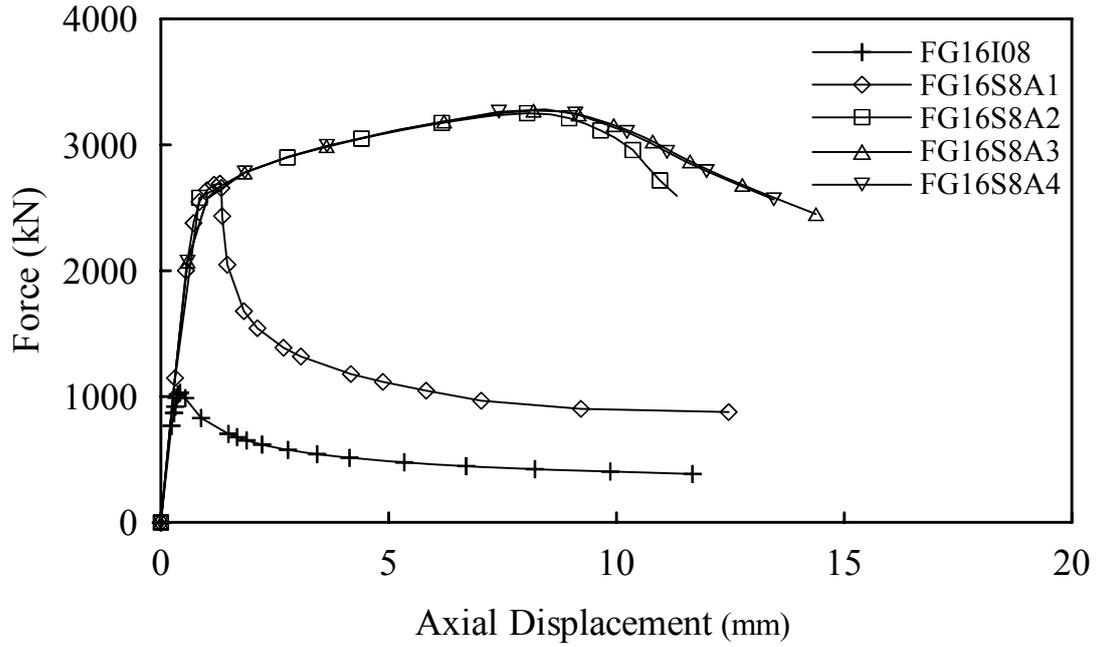


(a) 軸力與軸位移關

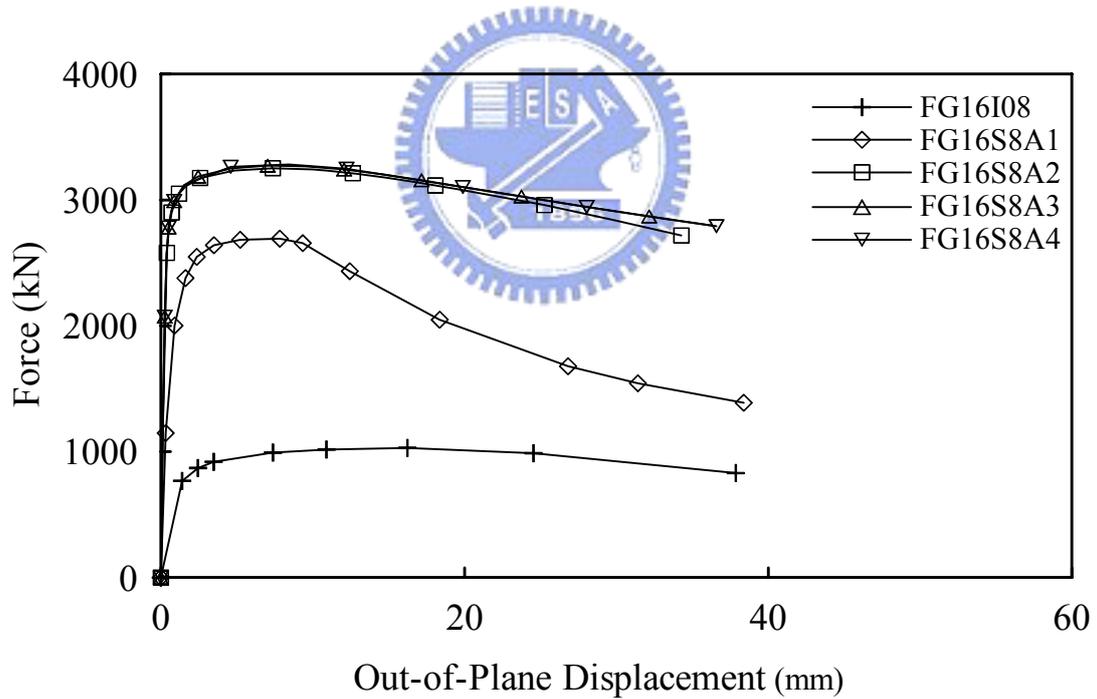


(b) 軸力與面外位移關

圖 4.15 軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線 (8 mm)

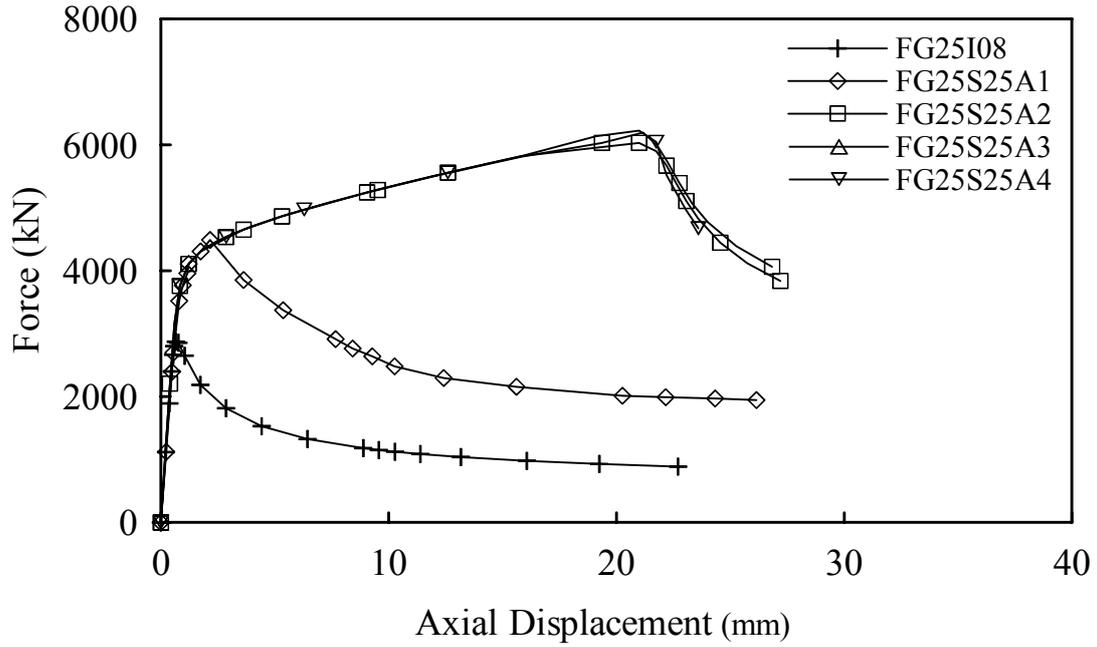


(a) 軸力與軸位移關

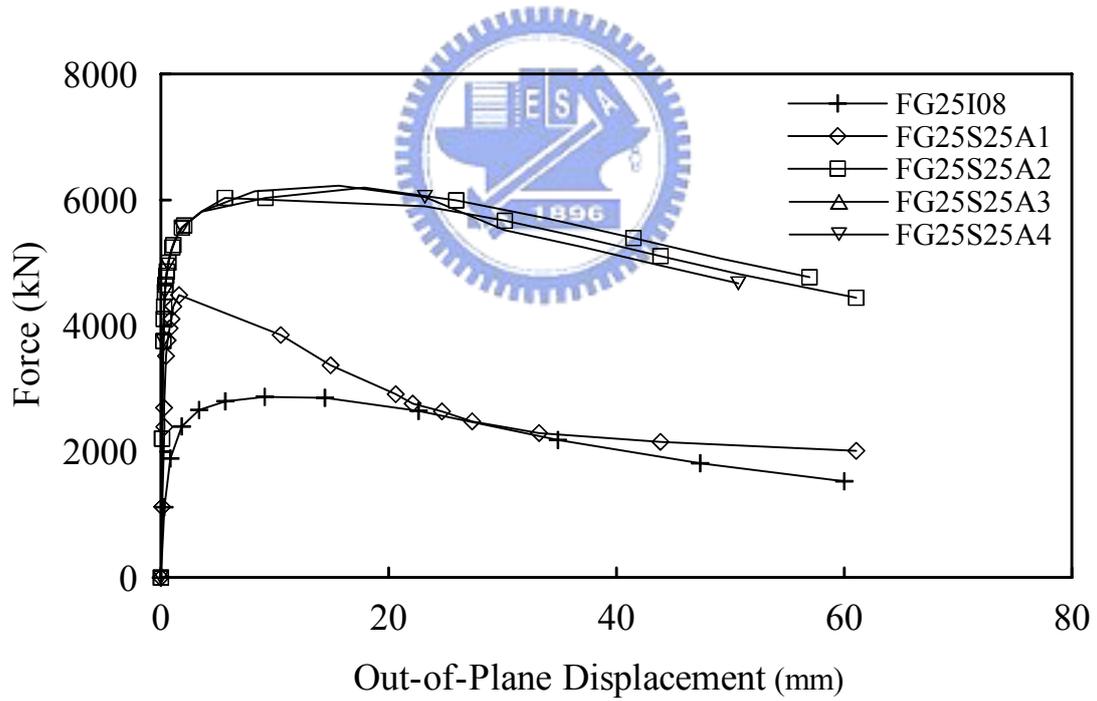


(b) 軸力與面外位移關

圖 4.16 軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線 (16 mm)

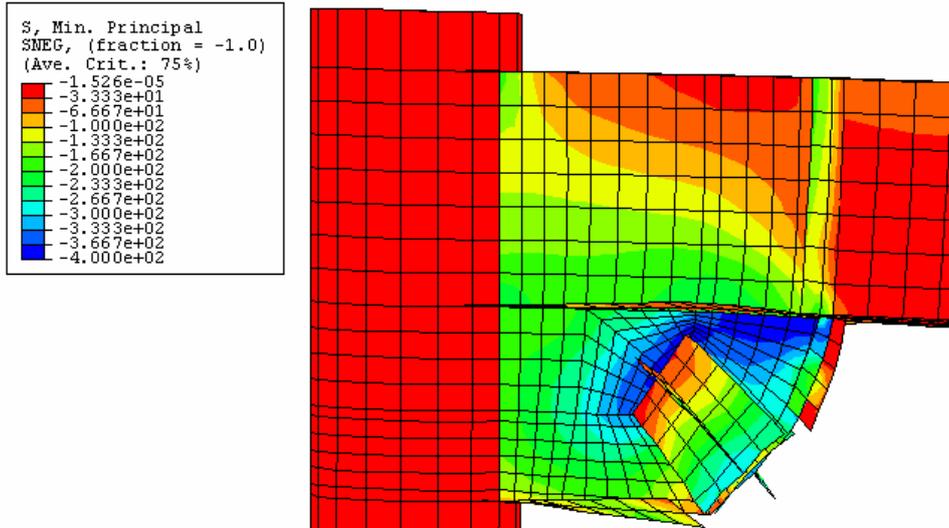


(a) 軸力與軸位移關

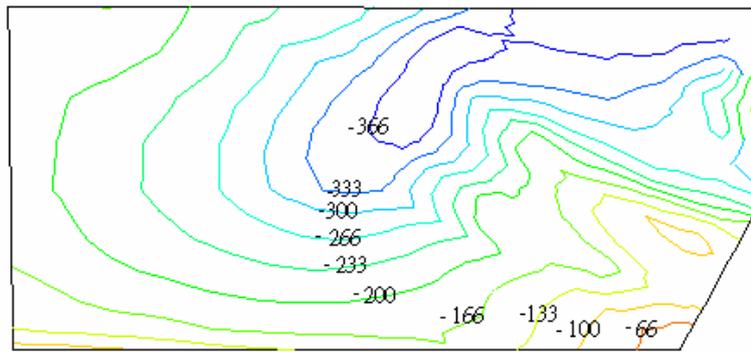


(b) 軸力與面外位移關

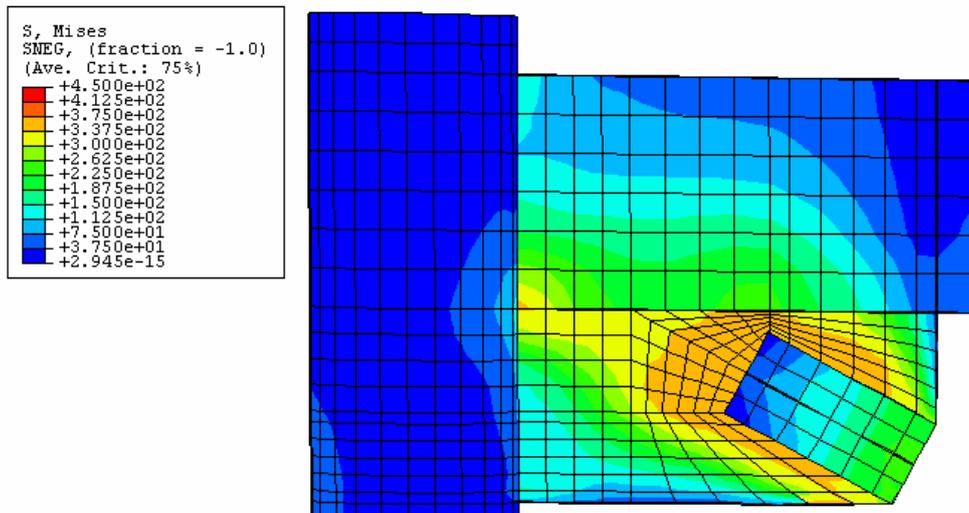
圖 4.17 軸力與軸位移及軸力與面外位移曲線 (25 mm)



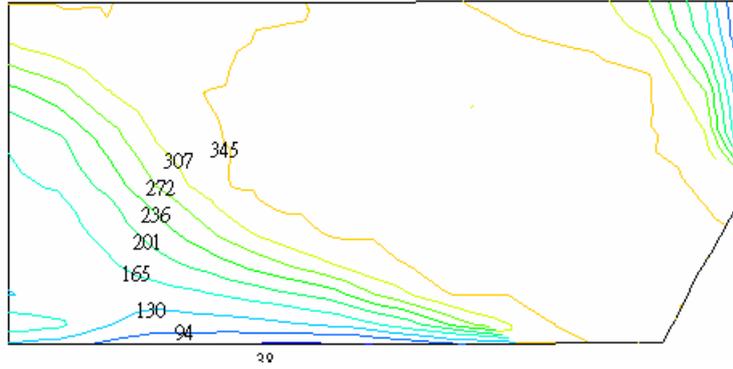
(a) Min-Principal 挫屈應力圖 (FG8S8A1)



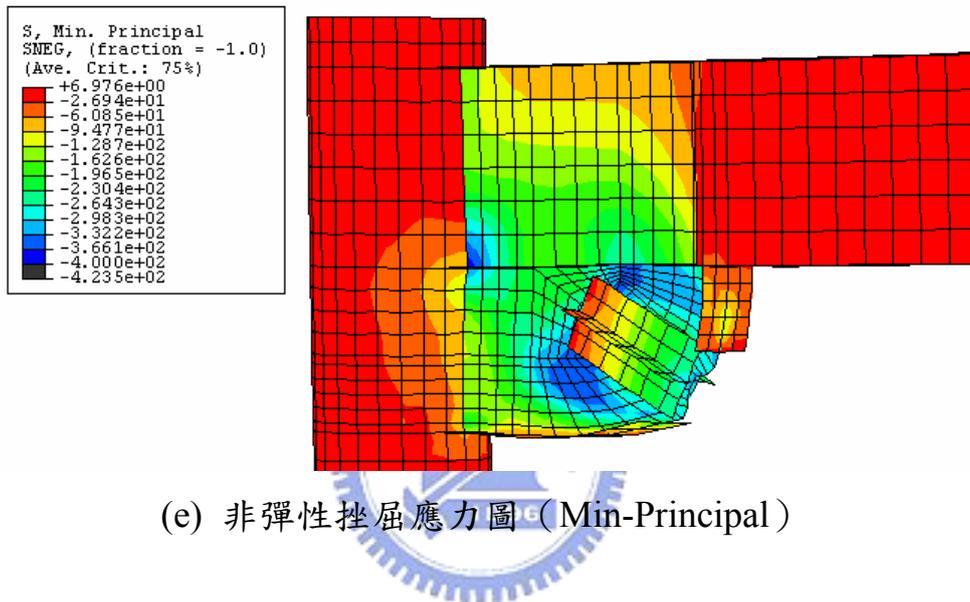
(b) 局部挫屈應力 Min-Principal 之分布圖 (FG16S16A1)



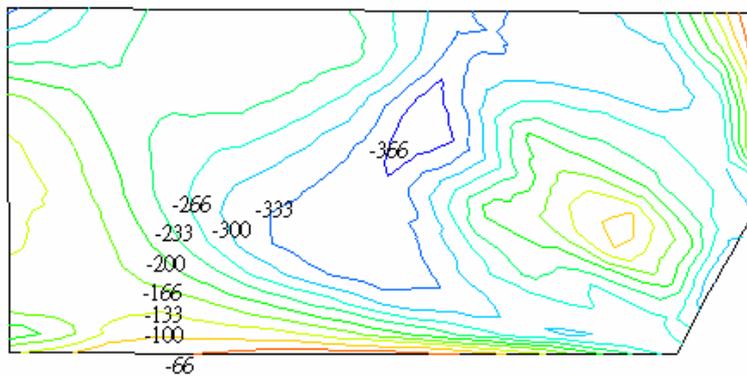
(c) 局部挫屈應力圖 (Von-Mises)



(d) 接合板降伏應力 Von-Mises 分布圖 (FG16S16A2)



(e) 非彈性挫屈應力圖 (Min-Principal)



(f) 接合板非彈性挫屈應力 Min-Principal 分布圖 (FG16S16A2)

圖 4.18 加勁後接合板應力圖

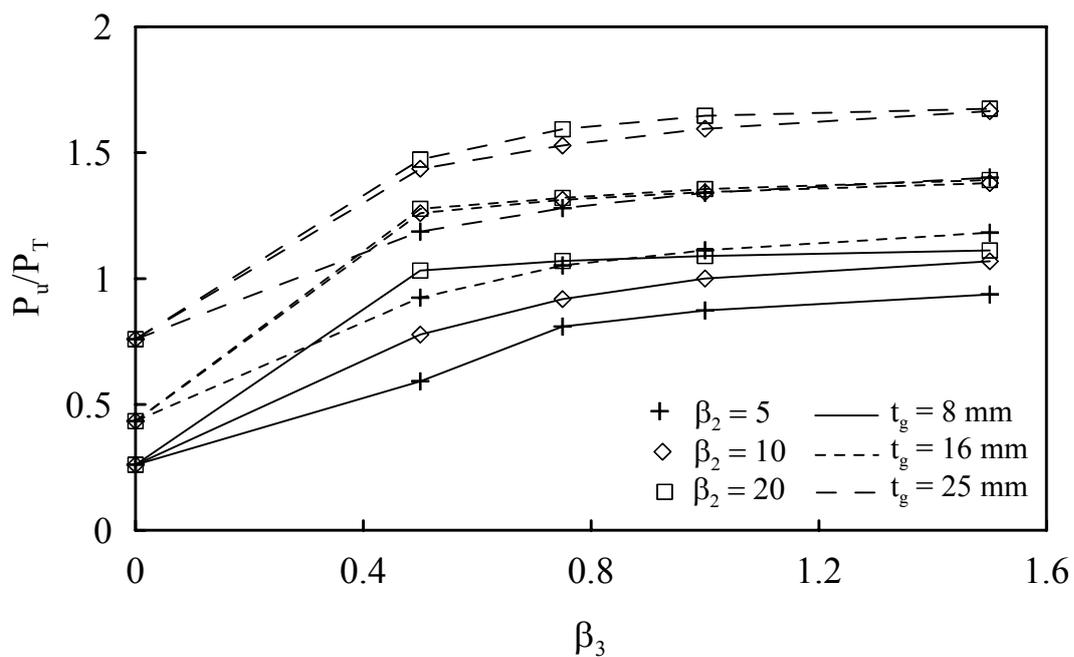


圖 4.19 接合板強度  $\beta_2$  與  $\beta_3$  之關係

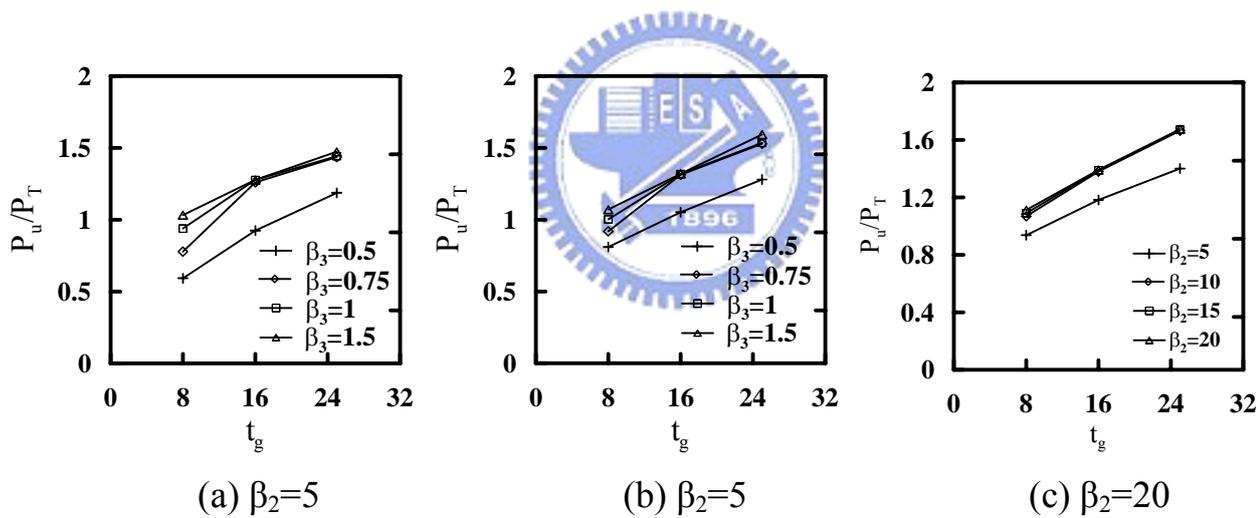
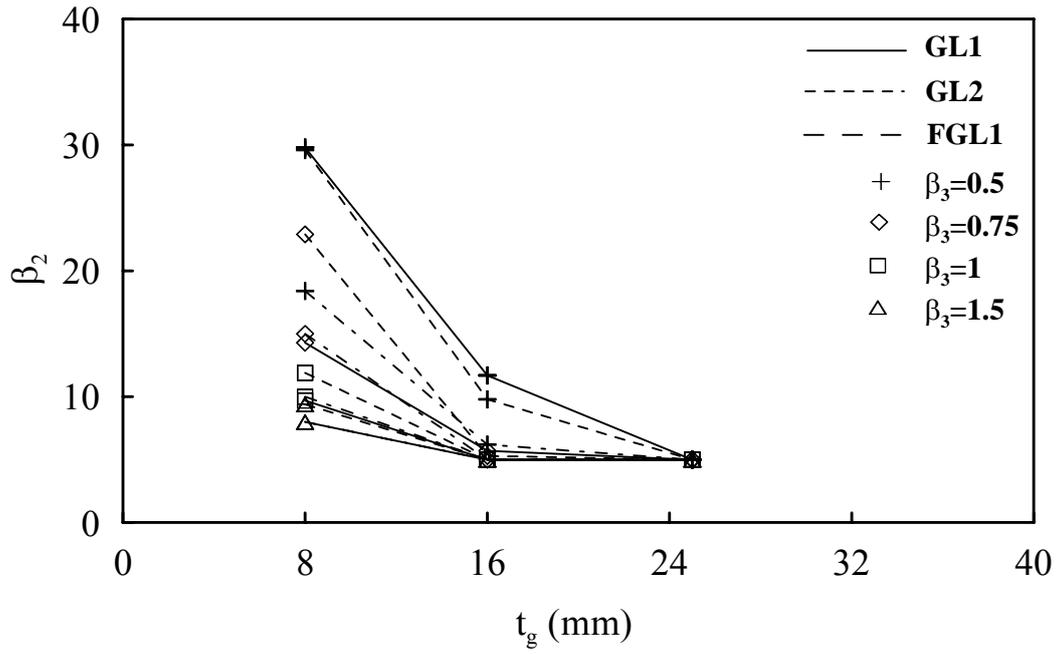
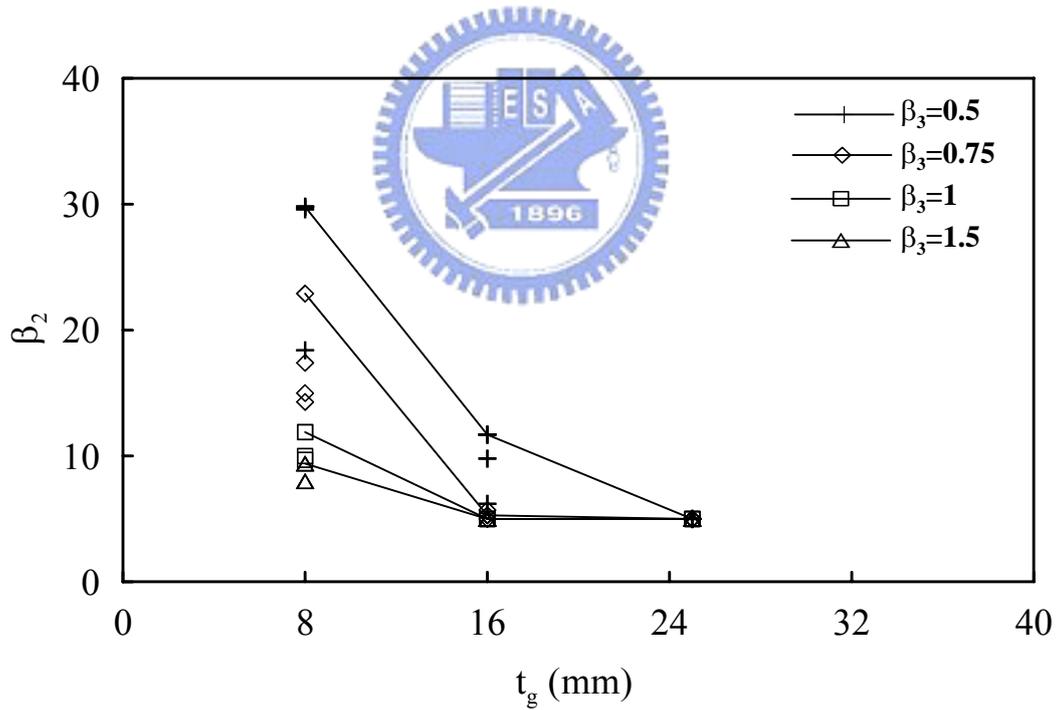


圖 4.20 接合板強度與  $t_g$  之關係之關係



(a)  $\beta_2$  需求值



(b)  $\beta_2$  建議值

圖 4.21  $\beta_2$  建議值 ( $\beta_1=0.9$ , 使  $P_u > P_T$ )