

國立交通大學  
土木工程學系碩士班  
碩士論文

鋼骨箱型柱內橫隔板電熱熔渣鍛接  
之有限元素分析

Finite Element Analysis of Electro-Slag Welding  
for Diaphragms in Steel Box Column

研究生：賴建霖

指導教授：陳誠直博士

中華民國九十六年九月

# 鋼骨箱型柱內橫隔板電熱熔渣鍔接 之有限元素分析

**Finite Element Analysis of Electro-Slag Welding  
for Diaphragms in Steel Box Column**

研究 生：賴 建 霖

Student : Chien-Ling Lai

指導 教授：陳 誠 直 博 士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

September 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年九月

# 鋼骨箱型柱內橫隔板電熱熔渣鍛接 之有限元素分析

研究生：賴建霖

指導教授：陳誠直 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘要

鋼骨箱型柱具有雙強軸的優點，其內橫隔板電熱熔渣鍛接為組合箱型柱必要的一道鍛接程序，該鍛道緊鄰梁與柱交接面，細微的鍛接瑕疵可能導致梁柱接頭於發展出韌性行為前之脆性破壞。本文採用有限元素分析，以裂縫尖端開口位移、應力三軸度與破裂指數行為指標討論電熱熔渣鍛接對於梁柱接頭行為之影響。有限元素分析模型分析結果顯示，側墊板間隙、電熱熔渣鍛接之熔入半徑與鋼梁相對於電熱熔渣鍛之偏心等參數並非影響梁柱接頭行為之關鍵因素；而電熱熔渣鍛道偏心若使側墊板間隙尖端距離橫隔板邊緣越近，將使得裂縫尖端開口位移越大而不利於梁柱接頭之行為。美國北嶺地震後的改良型式梁柱接頭，如梁翼切削、肋板與擴翼型式接頭，均能有效改善電熱熔渣鍛接之行為指標。

關鍵字：電熱熔渣鍛接、有限元素分析、箱型柱、裂縫尖端開口位移

# **Finite Element Analysis of Electro-Slag Welding for Diaphragms in Steel Box Column**

Student : Chien-Ling Lai

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## **ABSTRACT**

Electro-slag welding for diaphragms is the necessary welding procedure to build-up a steel box column which can resist bending in both axes of the cross section. Electro-slag welding (ESW) locates nearby the beam-to-column interface, and minor defect in the ESW could result in a brittle failure before plastic behavior is developed in the connection. Finite element analysis was conducted to study the effects of the ESW on the behavior of the connection through the investigation of performance indices, such as crack tip opening displacement (CTOD), stress triaxility, and rupture index. The results of the finite element analysis show that the parameters of the slit of the backing bars, melted radius of the ESW, and the eccentricity of the beam flange with respect to the ESW have little effect on connection behavior. However, a smaller distance between slit tip and the edge of the diaphragm due to the eccentricity of the ESW results in a larger CTOD that could be detrimental to connection behavior. The improved connections proposed after the Northridge earthquake, e.g., reduced beam section, rib-reinforced and widened flange connections, can be beneficial for enhancing the performance indices of the ESW.

Key words: Electro-Slag Welding, FEA, Box column, CTOD

## 誌謝

父母的養育與栽培，提供無後顧之憂的求學環境，使我得以順利完成碩士論文，希望我在學業上的小成就能讓家人感到光榮，也期望父親在世界的另一端仍會為我豎起大拇指，給我未來持續奮鬥下去的力量。

恩師 陳誠直教授專業理論與實務兼具，待人真誠與行事正直使學生深感欽佩，兩年來恩師悉心指導與教誨，受益良多，謹此致上最誠摯的感謝。

研究階段感謝國家地震中心 林克強博士提供相關資料與圖片；論文口試期間承蒙林克強博士與本校 鄭復平教授、周中哲教授撥冗審閱，於論文中疏漏之處給予寶貴建議與指導，使得論文能更臻完備，謹此深表謝忱。

感謝學長 群洲在論文撰寫階段耐心地給予指導與建議；學長南交、崇豪、潔祥、智民、仁甫、文銘在學業上給予協助；研究室伙伴俞燦、煒銘、璿至、紀勛、明昌、政甯、嘉儀更是生活中相互砥礪、同甘共苦的好夥伴。最後，謝謝所有曾為我加油打氣的家人與朋友，願你們能一起分享我獲得碩士學位的喜悅與榮耀。

建霖

2007 年 9 月於新竹交大

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vii
圖目錄 .....	viii
照片目錄 .....	xii
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究方法 .....	2
1.4 論文內容 .....	2
<b>第二章 文獻回顧 .....</b>	<b>4</b>
2.1 電熱熔渣鋸接 .....	4
2.2 數值模擬分析文獻 .....	5
2.3 實尺寸試驗文獻 .....	7
2.4 電熱熔渣鋸接破壞案例 .....	9
<b>第三章 分析模型之行為驗證 .....</b>	<b>12</b>

3.1 前言 .....	12
3.2 分析模型介紹 .....	12
3.3 行為指標 .....	15
3.4 歷程與位置之選取 .....	17
3.5 分析模型行為 .....	18
3.6 討論 .....	19
<b>第四章 模型細節研究 .....</b>	<b>21</b>
4.1 前言 .....	21
4.2 材料性質影響 .....	21
4.3 元素尺寸影響 .....	22
4.4 加載模式影響 .....	22
4.5 剪力板影響 .....	23
4.6 討論 .....	26
<b>第五章 電熱熔渣鍚接參數研究 .....</b>	<b>27</b>
5.1 前言 .....	27
5.2 行為指標之臨界值 .....	27
5.3 參數模型 .....	28
5.4 參數模型分析結果 .....	30
5.5 討論 .....	32
<b>第六章 接合細節與接合型式 .....</b>	<b>33</b>
6.1 前言 .....	33
6.2 梁柱接合細部對電熱熔渣鍚接之影響 .....	33
6.2.1 具背墊板模型 .....	33

6.2.2 無扇形開口之托梁接頭 .....	34
6.2.3 側墊板施以填角鋸接 .....	34
6.3 梁柱接頭形式對電熱熔渣鋸接之影響 .....	35
6.3.1 切削式接頭 .....	35
6.3.2 延長式肋板接頭 .....	36
6.3.3 擴翼式接頭 .....	37
6.4 討論 .....	38
<b>第七章 結論與建議 .....</b>	<b>39</b>
7.1 結論 .....	39
7.2 建議 .....	40
<b>參考文獻 .....</b>	<b>41</b>



# 表目錄

表 3.1 試體 BUN 鋼板拉力試驗強度 .....	43
表 4.1 分析模型編號表 .....	43
表 5.1 行為指標臨界值 .....	44
表 5.2 熔入半徑系列尺寸表 .....	45
表 5.3 側墊板間隙系列尺寸表 .....	45
表 5.4 水平偏心系列尺寸表 .....	46
表 5.5 垂直偏心系列尺寸表 .....	46
表 5.6 梁偏心系列尺寸表 .....	47
表 5.7 熔入半徑系列分析結果表 .....	48
表 5.8 側墊板間隙系列分析結果表 .....	49
表 5.9 水平偏心系列分析結果表 .....	50
表 5.10 垂直偏心系列分析結果表 .....	51
表 5.11 梁偏心系列分析結果表 .....	52
表 6.1 接合細節與接合型式模型編號 .....	53
表 6.2 接合細節與接合型式模型分析結果表 .....	54

## 圖目錄

圖 2.1 電熱熔渣鋸接預留位置尺寸圖 .....	55
圖 2.2 組合箱型柱之製作流程 .....	56
圖 2.3 梁翼全滲透鋸道之縱向殘留應力 .....	57
圖 2.4 試體 BR115CB 之彎矩與總塑性轉角關係圖 .....	57
圖 2.5 試體 SR-SP1R 之彎矩與總塑性轉角關係圖 .....	58
圖 2.6 試體 CT 之彎矩與總塑性轉角關係圖 .....	58
圖 3.1 試體 BUN 梁柱接合細節 .....	59
圖 3.2 試體 BUN 之柱接合細部 .....	60
圖 3.2 試體 BUN 之柱接合細部 (續) .....	61
圖 3.3 電熱熔渣鋸接之接合細節 .....	62
圖 3.4 模型 BUN 網格與邊界條件示意圖 .....	63
圖 3.5 梁柱接頭子結構層間變位角定義 .....	64
圖 3.6 CTOD 直接量測法 .....	64
圖 3.7 梁翼全滲透鋸道之指標量測線 .....	65
圖 3.8 扇形開口根部之指標量測線 .....	65
圖 3.9 電熱熔渣鋸指標接量測線 .....	66
圖 3.10 模型 BUN 之梁端載重-位移包絡線 .....	67
圖 3.11 模型 BUN 之梁翼板縱向應變 .....	67
圖 3.12 模型 BUN 之 Von Mises 應力圖 (4.0% rad) .....	68
圖 3.13 模型 BUN 電熱熔渣處之 Von Mises 應力圖(4.0% rad) .....	68
圖 3.14 模型 BUN 電熱熔渣鋸接之應力三軸度 (4.0% rad) .....	69
圖 3.15 模型 BUN 電熱熔渣鋸接之 CTOD 值(4.0% rad) .....	70

圖 3.16 模型 BUN 於 A_a 間隙之 CTOD 歷程圖 .....	70
圖 4.1 材料性質模型之梁翼板應力-應變曲線.....	71
圖 4.2 材料性質模型之梁端載重-位移包絡線.....	71
圖 4.3 材料性質模型之梁翼板縱向應變 (2.3% rad).....	72
圖 4.4 材料性質模型之 CTOD 歷程圖 .....	72
圖 4.5 模型局部元素尺寸與 CTOD 關係圖 .....	73
圖 4.6 模型局部元素數量與 CTOD 關係圖 .....	73
圖 4.7 模型 BUN-CY 與試體 BUN 之遲滯迴圈 .....	74
圖 4.8 加載模式影響之 CTOD 歷程圖 .....	74
圖 4.9 模型 BUN-S 之 Von Mises 應力圖 (4.0% rad).....	75
圖 4.10 模型 BUN-B 之 Von Mises 應力圖 (4.0% rad).....	75
圖 4.11 模型 BUN-B 之 X-Y 剪應力圖 (4.0% rad).....	76
圖 4.12 模型 BUN-B 之 X-Y 剪應力圖 (4.0% rad) .....	76
圖 4.13 剪力板模型之梁端載重-位移包絡線.....	77
圖 4.14 剪力板模型之縱向應變圖 (2.3% rad) .....	77
圖 4.15 剪力板模型之 CTOD 歷程圖 .....	78
圖 5.1 熔入半徑系列模型示意圖 .....	79
圖 5.2 側墊板間隙系列模型示意圖 .....	80
圖 5.3 水平偏心系列模型示意圖 .....	81
圖 5.4 垂直偏心系列模型示意圖 .....	82
圖 5.5 梁偏心系列模型示意圖 .....	83
圖 5.6 熔入半徑系列之 CTOD 比較圖 .....	84
圖 5.7 熔入半徑系列之應力三軸度比較圖 .....	84
圖 5.8 熔入半徑系列之破裂指數比較圖 .....	85

圖 5.9 側墊板間隙系列之 CTOD 比較圖 .....	85
圖 5.10 側墊板間隙系列之應力三軸度比較圖 .....	86
圖 5.11 側墊板間隙系列之破裂指數比較圖 .....	86
圖 5.12 水平偏心系列 CTOD 比較圖 .....	87
圖 5.13 水平偏心系列應力三軸度比較圖 .....	87
圖 5.14 水平偏心系列破裂指數比較圖 .....	88
圖 5.15 垂直偏心系列 CTOD 比較圖 .....	88
圖 5.16 垂直偏心系列應力三軸度比較圖 .....	89
圖 5.17 垂直偏心系列破裂指數比較圖 .....	89
圖 5.18 梁偏心系列模型 CTOD 比較圖 .....	90
圖 5.19 梁偏心系列模型應力三軸度比較圖 .....	90
圖 5.20 梁偏心系列模型破裂指數比較圖 .....	91
圖 5.21 裂縫尖端與橫隔板邊緣距離 $d_{tip}$ 示意圖 .....	92
圖 5.22 參數模型之 $d_{tip}$ 與 CTOD 關係圖 .....	92
圖 5.23 參數模型之 $d_{tip}$ 與應力三軸度關係圖 .....	93
圖 5.24 參數模型之 $d_{tip}$ 與破裂指數關係圖 .....	93
圖 6.1 BA 模型背墊板示意圖 .....	94
圖 6.2 模型 BA 之 CTOD 歷程圖 .....	94
圖 6.3 模型 BA 之電熱熔渣鋸接 Von Mises 應力圖 (4.0% rad) ..	95
圖 6.4 模型 NAH 之 CTOD 位移歷程圖 .....	95
圖 6.5 模型 BUN-F 電熱熔渣鋸接處示意圖 .....	96
圖 6.6 模型 NAH 之 CTOD 位移歷程圖 .....	96
圖 6.7 模型 BUN 尺寸圖 .....	97
圖 6.8 模型 BUN 彎矩梯度圖 .....	97

圖 6.9 模型 RBS 尺寸圖 .....	98
圖 6.10 模型 RBS 尺寸圖 .....	98
圖 6.11 模型 RBS 之塑性應變圖 .....	99
圖 6.12 模型 RBS 之 CTOD 歷程圖 .....	99
圖 6.13 模型 ER 尺寸圖 .....	100
圖 6.14 模型 ER 彎矩梯度圖 .....	100
圖 6.15 模型 ER 塑性應變圖 .....	101
圖 6.16 模型 ER 之 CTOD 歷程圖 .....	101
圖 6.17 模型 ER 電熱熔渣鍛接 Von Mises 應力圖 (4.0% rad)....	102
圖 6.18 模型 WF 尺寸圖 .....	103
圖 6.19 模型 WF 彎矩梯度圖 .....	103
圖 6.20 模型 WF 塑性應變圖 .....	104
圖 6.21 模型 WF 之 CTOD 歷程圖 .....	104
圖 6.22 特殊抗彎接頭模型之梁端載重-位移包絡線.....	105



## 照片目錄

照片 2.1	電熱熔渣鋸接 .....	106
照片 2.2	試體 BUN 梁翼全滲透鋸道撕裂破壞 (2.3% rad) .....	106
照片 2.3	試體 BUN 扇形開口根部撕裂破壞 (4.0% rad) .....	107
照片 2.4	試體 BR115CB 鋸道裂縫深入柱翼板 (1.7% rad) .....	107
照片 2.5	試體 BR115CB 電熱熔渣鋸接瑕疪.....	108
照片 2.6	試體 SR-SP1R 柱翼板隆起 (1.5% rad).....	108
照片 2.7	試體 SR-SP1R 柱翼板拉裂 (2.0% rad).....	109
照片 2.8	試體 CT 柱翼板隆起 (4.0% rad) .....	109
照片 2.9	試體 TG2c 電熱熔渣鋸接破壞案例 (1.0% rad).....	110
照片 3.1	電熱熔渣鋸接切片照片 .....	110



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

台灣位處環太平洋地震帶，土木建築工程需考量耐震設計，鋼結構具有施工快速、質量輕、韌性能力佳等優點，在地狹人稠的台灣廣泛地被運用於高樓建築中。然而 1994 年美國北嶺地震 (Northridge Earthquake) 造成鋼骨特殊彎矩構架 (Special Moment Frames, SMF) 梁柱接合處嚴重破壞，此種破壞模式引起工程與學術界的震撼，經廣泛的研究發現，梁柱接頭之破壞位置主要位於梁翼板與柱翼板之全滲透開槽鋸道與扇形開口根部位置的撕裂。國內外學者藉由有限元素分析與實尺寸試體之往覆載重實驗，近年來接合細節與鋼骨抗彎接頭的改良，如扇形開口型式、托梁系統、減弱式接頭、補強式接頭等，皆能有效避免梁柱接頭於韌性行為發展前產生非預期之脆性破壞。

國內的鋼構造設計原理大多承襲美國的設計規範，於遭受強烈地震侵襲時，結構之安全仍堪慮。國內鋼結構建築之設計亦有部分異於美國，由於 H 型鋼柱之幾何形狀無法提供雙強軸之需求，工程師大多以箱型鋼柱為設計的首要選擇。箱型鋼柱內設置有內橫隔板，其目的在於使鋼梁力量平順傳入鋼柱，能有效避免於鋼梁受壓時柱翼板受壓挫屈與鋼梁受拉時柱翼板拉拔隆起破壞。箱型鋼柱於製作程序中，內橫隔板與柱翼板之鋸道需採用電熱熔渣鋸接 (Electro-Slag Welding, ESW)，該鋸接深入箱型柱內，品質難以掌握，即使採用超音波檢測亦難以保證鋸道沒有存在初始瑕疵。

## 1.2 研究目的

近年來許多梁柱接頭試驗案例中，彎矩接頭無法發展預期的塑性消能行為，除了梁翼全滲透鋸道、扇形開口根部之撕裂破壞外，尚有箱型柱內橫隔板電熱熔渣鋸接瑕疵所導致的脆性破壞。為使梁柱接合能符合規範對於耐震設計的要求，乃著手研究電熱熔渣鋸接對梁柱接頭力傳遞機制之影響，尋找電熱熔渣鋸接缺陷之破壞關鍵參數與位置。

## 1.3 研究方法

為瞭解電熱熔渣鋸接之局部行為與破壞模式，先行廣泛蒐集國內外相關文獻，討論鋸道殘留應力、鋸道初始瑕疵與幾何形狀不連續對於電熱熔渣鋸接之影響，並藉著國內實尺寸試體之電熱熔渣鋸接破壞案例，取試體電熱熔渣鋸接切片，觀察其鋸道瑕疵與破壞路徑，而後採用實尺寸試體之實驗數據，建立有限元素分析模型，以鋸道幾何形狀的參數分析研究其行為指標。

## 1.4 論文內容

本論文於第一章闡述研究背景與目的；第二章探討國內外學者對於鋸道與梁柱接頭試驗之文獻，並說明組合箱型柱之電熱熔渣鋸接，討論國內實尺寸試體之破壞案例；第三章以實尺寸試體之實驗數據驗證分析模型之可信度；第四章則討論簡化模型之相關細節假設是否影

響分析結果的正確性；第五章進行電熱熔渣鍛接之參數研究；第六章為討論接合細節與接合型式對於電熱熔渣鍛接的影響；第七章為綜合前述研究之結論與建議。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 電熱熔渣鍔接

電熱熔渣鍔接俗稱釣魚鍔，常用於箱型柱之內橫隔板最後一道鍔接。電弧僅在鍔接開始產生電弧熱用以使鍔材熔化，待熔渣形成隨即熄滅，由熔渣中電流產生電阻熱熔化鍔材與母材，具導力的熔渣保護已完成的鍔道且將鍔材與母材熔接在一起。電熱熔渣鍔接是低速鍔接，相較之下鍔道會有較粗的紋路與較低的刻痕強度。為避免熔渣與鍔道流出，須在母材兩側使用側墊板固定鍔道位置。電熱熔渣鍔接幾乎能允許任何厚度的鍔接需求，當鍔接厚度越大時電熱溶渣鍔接更顯得經濟。(徐慶昌 1989)



組合箱型柱由四片鋼板組合而成，柱內需設置內橫隔版用以平順傳遞鋼梁翼板的應力，內橫隔板需預留電熱熔渣鍔接之施工鍔道，斷面通常為等同於內橫隔板厚度之正方形，如圖 2.1。施工程序先以點鍔假固定側墊板與內橫隔板，將其與下翼板假固定，而後與左右兩側柱板鍔接完成 U 型柱體，接著以點鍔假固定 U 型柱體與上柱板完成箱型柱之組立，而後進行四道柱翼板之全滲透開槽鍔接，柱翼板與全滲透開槽鍔道於電熱熔渣鍔道上方須預留鍔接施工孔，最後進行組合箱型柱的最後一道鍔道：電熱熔渣鍔接，如照片 2.1。施工流程如圖 2.2。

## 2.2 數值模擬分析文獻

為瞭解梁柱接面處複雜的應力傳遞與梁翼全滲透鋸道殘留應力和熱影響是否降低梁柱接頭之韌性容量，先行廣泛的蒐集相關行為指標與分析模型研究，其文獻如下：

El-Tawil et al. (2000) 以有限元素分析軟體 ABAQUS 建立分析模型，研究接合細節與應力降伏極限比 (Yield to ultimate stress ratio, YUSR) 對北嶺地震前傳統鋼結構梁柱接頭之影響。以 Popov et al. (1996) 於 Berkeley 進行之實尺寸試體驗證分析模型之可靠性，利用塑性應變指標 (Plastic equivalent strain index, PEEQ Index) 為局部行為之比較依據。文中指出 YUSR 為 95% 之模型其塑性區域長度將只有 YUSR 為 80% 的一半，而較高的應力降伏極限比會導致局部應變的上升，提早局部挫屈的可能性，因此選擇較低的應力降伏極限比較能發展大範圍的塑性區域。試體接合細節部分，增大扇形開口雖然有利於鋸接程序以提升鋸接品質，然而有限元素分析顯示，較大的扇形開口將有較大的塑性應變需求。

Zhang and Dong (1999) 以有限元素分析描繪出抗彎矩構架中梁翼全滲透鋸道之縱向殘留應力分布，如圖 2.3。文中顯示梁翼全滲透鋸道上部與根部存在著非常高的殘留張應力，而鋸道中央區域存在壓應力。透過平板拉力試驗，在束制作用下的熱影響區塑性變形容量將降低 30%，鋸道附近的應力三軸度 (Stress triaxility, ST) 也相當高，將會降低鋸道的塑性變形容量。鋸道根部處之裂面驅使力 (Fracture driving force) 對於殘留應力極度敏感，高的殘留張應力將提高裂面驅

使力。文中曾提到移除梁翼全滲透鋸接之背墊板能有效提高梁柱接頭之韌性容量。

Chi and Deierlein (2000) 研究梁翼全滲透鋸道韌性需求，分別使用有限元素分析軟體 FRANC2D/L，ABAQUS 建立 2D 與 3D 模型，詳細的討論梁翼全滲透鋸接於背墊板尺寸、全滲透鋸道瑕疵、以及鋸接殘留應力對於梁柱接頭的影響。該研究以裂縫尖端開口位移 (Crack Tip Opening Displacement, CTOD) 與強度因子 (Intensity Factor, KI) 作為韌性需求的行為指標，用以分析北嶺地震前腹板鎖螺栓翼板鋸接 (Bolted Web and Welded Flange, BWWF) 之梁柱接合破壞行為。該研究以 Zhang and Dong (1999) 研究之梁翼全滲透鋸道殘留應力數據，探討殘留應力與 CTOD 的關係，結果顯示鋸道急速冷卻所導致的殘留應力將增加鋸接缺陷處之 CTOD 值，提高局部韌性破壞的可能性。鋸道根部缺陷尺寸由應力強度因子能夠指出其正相關性，而和背墊板的厚度無關。研究建議，為提高接頭韌性能力，不宜使鋸道和母材有過大的強度差異、梁翼全滲透鋸道殘留應力的預防、提高交會區強度限制其剪力變形，皆能有效避免鋼梁於塑性行為發展之前產生非預期的脆性破壞；而移除背墊板後施以填角鋸填補初始鋸道缺陷，更能有效降低應力強度因子 50-70%，降低 CTOD 90-95%，能有效改善梁柱接合之韌性行為。

東 清三郎 (2003) 利用有限元素分析軟體 MAEC2000 建立 3D 模型，研究電熱熔渣鋸接之非線性行為。該研究以  $45^\circ$  法之裂縫尖端開口位移 (CTOD) 作為行為指標，採用梁柱接合作用力除以梁端接合部的降伏耐力 ( $Q / jQ_y$ ) 為比較階段，討論設計尺寸與施工因子的

影響。研究指出在梁先行降伏模型裡，最大的電熱熔渣鋸接 CTOD 值發生於交會區內側對應於梁翼中心處；於交會區先行降伏模型，最大的電熱熔渣鋸接 CTOD 值則發生於交會區外側對應於梁翼中心處。斷面尺寸部分，梁長度、翼板厚度、橫隔板厚度對 CTOD 值的影響甚小，惟橫隔版厚度不得小於設計規範；內部接頭比起外部接頭之 CTOD 值於  $1.3 jQ_y$  時大 16%；電熱熔渣鋸接的熔入量越大則能夠抑制 CTOD 值，熔入量增加 3 mm 與 6 mm 於梁翼板厚度 25 mm，橫隔板厚度 28 mm 的比較模型中，分別較正常的電熱熔渣鋸接熔入量減少 CTOD 值 30%與 50%。電熱熔渣鋸接向交會區外偏心較為不利，偏心 4 mm 模型之 CTOD 值較未偏心模型大約 10%。而具有扇形開口形式之模型 CTOD 值較無扇形開口的模型於  $1.3jQ_y$  階段時大 40%。

## 2.3 實尺寸試驗文獻



北嶺地震後的彎矩接頭發展迅速，經實尺寸試驗後之各式特殊抗彎接頭透過補強或減弱式斷面，強迫塑性鉸發展於梁柱接面外，皆能有效提升梁柱接頭之韌性能力，以下為台灣常見特殊抗彎接頭型式之相關文獻：

### a. 切削式接頭

切削式接頭由比利時 Plumier 於 1988 年提出，國內台灣科技大學陳生金教授亦提出梯度切削之高韌性接頭（王存偉 1999），已廣泛使用於國內外之結構工程，其原理乃透過減弱式斷面，迫使塑性鉸發展於切削區域，切削式接頭之優點為設計簡單與施工簡易，然而斷面

的減弱造成結構物勁度衰減，並降低鋼梁迴轉半徑，需預防鋼梁之側向扭轉挫屈。陳誠直等 (1999) 於鋼構造梁柱接頭耐震行為研究的資料蒐集歸納出，設計良好的切削式接頭，其梁端塑角均在 3.0% rad 左右，顯示切削式接頭為有效且經濟之特殊抗彎矩接頭。

### b. 延長式肋板補強

Chen et al. (2004) 研究延長式肋板補強接頭之耐震行為，試體包含一組北嶺地震前腹版螺栓翼板鋸接之未補強式接頭與五組肋板補強 (Rib Reinforced) 接頭。肋板補強段能有效提高靠近柱面之鋼梁彎矩容量，降低梁翼全滲透鋸道之韌性需求，並使塑性鉸發展於圓弧段末端，透過肋板延長段避免塑性區域內之幾何形狀不連續而產生初始裂縫，能有效發揮塑性區域之消能行為。經實尺寸試驗之肋板補強接頭，除試體 BR115CB 因箱型柱內橫隔板完全未與柱翼板熔接，導致柱翼板產生平面外變形而無法發揮肋板補強接頭之韌性行為外，其餘肋板補強試體的塑性轉角均大於 3.2% rad、層間變位角均大於 4.0% rad，符合國內外規範對於抗彎矩梁柱接頭的要求。該研究中之未補強試體 BUN 進行至  $4.0\Delta_y$  (約 2.27% rad,  $\Delta_y$  為梁翼板邊界達到降伏時梁端所需位移量) 第二迴圈正方向時，梁下翼板全滲透鋸接產生撕裂破壞，如照片 2.2，驗證傳統未補強梁柱接頭其韌性行為不佳的論點。BUN 試體破壞後，油壓致動器隨即反向進行負方向位移行程，直至  $7.0\Delta_y$  (約 4.0% rad)，鋼梁上翼板扇形開口根部處向翼板兩側撕裂方停止試驗程序，如照片 2.3。

### c. 擴翼式接頭

陳誠直等 (2004) 研究擴翼式托梁鋼骨抗彎接頭之耐震行為，以有限元素軟體 ANSYS 進行參數研究，並進行三組實尺寸擴翼式托梁接頭試驗。托梁系統梁翼全滲透鍛道能先行於工廠鍛接，避免鍛接瑕疵影響韌性行為，無扇形開口更可避免因幾何形狀不連續所引起之應力集中，輔以擴翼式鋼梁提高梁柱接面之彎矩容量，塑性鉸發展於圓弧末端處，避免梁翼全滲透鍛接承受極高的塑性應變而導致撕裂破壞。三組實尺寸試體最大總塑性轉角分別為 4.01%、4.76%、4.87% rad，且礙於實驗設備限制，三組試體最終並未達破壞，顯示擴翼式托梁接頭能發揮穩定且有效率之塑性消能行為。

## 2.4 電熱熔渣鍛接破壞案例

案例一



林群洲 (2002) 進行之單片延長式肋板補強接頭實尺寸試驗，試體 BR115CB 於層間變位角 1.7% rad 正方向第一迴圈時，梁上翼板全滲透鍛道起弧處發現裂縫，於負方向時發現下翼板全滲透鍛道起弧處之裂縫並發現柱翼板隆起。進入 1.7% rad 第二迴圈正方向時，梁上翼板全滲透鍛道之裂縫向鍛道延伸，並撕裂入柱翼板母材 (照片 2.4)。位移行程於層間變位角 2.3% rad 時，肋板與柱面之鍛道產生初始裂縫，並往梁翼方向延伸。進入層間變位角 2.9% rad 時因梁上翼板與肋板鍛道撕裂，載重迅速下降因而終止實驗，試體之彎矩與總塑性轉角如圖 2.4。實驗結束後切開柱翼板檢查電熱熔渣鍛接，發現柱翼板完全未與內橫隔板熔接 (照片 2.5)。

## 案例二

陳誠直等 (2004) 於中華民國第七屆結構工程研討會所發表的鋼骨箱型柱梁柱偏心接合研究，單肋板搭配側板之偏心接合試體 SR-SP1R，於層間變位角  $1.5\% \text{ rad}$  負方向時柱翼板發現平面外變形 (照片 2.6)，於  $2.0\% \text{ rad}$  時柱翼板被拉裂 (照片 2.7)，接頭之強度與勁度迅速下降，經檢視為內橫隔板電熱熔渣鍛接瑕疵，導致內橫隔板無法傳遞梁翼之拉應力，力量轉由側板與肋板承受，使側板鍛道與肋板鍛道上緣相繼開裂。圖 2.5 為試體 SR-SP1 之彎矩與總塑性轉角關係圖。試體於負方向撕裂破壞後隨即進行正方向之單向往覆載重試驗，試體於正方向可達  $4.0\% \text{ rad}$  層間變位角，塑性轉角  $2.32\% \text{ rad}$ 。

## 案例三



林潔祥 (2005) 於擴翼式鋼骨托梁抗彎接頭之實尺寸試驗中，進行一組未擴翼之無扇形開口托梁接頭試體之試驗，其試體編號為 CT (Column tree)，該試體並未發表於其碩士論文。陳誠直等 (2005) 國科會研究計畫成果報告中未擴翼式接頭試體編號 UW，為試體 CT 發現電熱熔渣鍛接破壞後，將箱型柱之電熱熔渣鍛接瑕疵修復後所施作之試體，其餘試體條件均與 CT 相同。試體 CT 之鋼梁尺寸為 H $588 \times 300 \times 12 \times 20 \text{ mm}$  熱軋型鋼，鋼柱為  $\square 550 \times 550 \times 27 \times 27 \text{ mm}$  箱型組合斷面。

試體 CT 之彎矩與總塑性轉角關係如圖 2.6。試體於  $0.375\% \text{ rad}$  及  $0.5\% \text{ rad}$  之層間變位角位移下皆保持線彈性行為。行程進入  $2.0\%$

rad 負方向最大值時，梁上翼板有輕微局部挫屈的現象。反覆加載至 3.0% rad 梁上翼板與全滲透鋸道交接處之兩側發現裂縫；至 3.0% 負方向最大值時，上翼板發生局部挫屈，而下翼板與全滲透鋸道交接處亦發現裂縫，且腹板降伏的範圍有擴大趨勢。行程進行至 4.0% rad 第一迴圈正方向時，梁下翼板發生局部挫屈，梁腹板之石灰剝落從兩側向中心貫穿，表示此處已發生全斷面降伏，塑鉸於梁腹距離柱面約 200 mm (約三分之一倍的梁深) 處產生，梁上翼板已嚴重挫屈；當載重達 -592 kN (負方向最大載重) 時，力量突然緩慢下降至 -525 kN，此時發出轟然巨響，觀察試體發現箱型柱翼板在梁下翼板附近有突起 (照片 2.8)，研判為箱型柱內橫隔板之電熱熔渣鋸接發生破壞，造成強度急遽下降，於是終止實驗。

#### 案例四



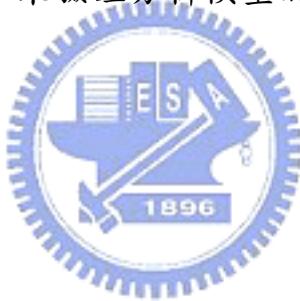
試體 TG2c 為箱型柱接梁翼切削式鋼梁，試體破壞於層間變位角 1.0% rad。照片 2.9 為林克強博士提供之電熱熔渣鋸接破壞案例試體切片。

## 第三章 分析模型之行為驗證

### 3.1 前言

電腦科技發展迅速，電腦輔助設計軟體與有限元素分析軟體不斷演進，提供研究人員與設計者經濟且有效率的分析工具。本研究以 Swanson Analysis System 公司所研發之有限元素分析軟體 ANSYS 建立梁柱子結構模型，以實尺寸試體為分析模型依據，藉著相同條件下的分析結果，以適合的行為指標與試體實驗數據驗證其整體與局部行為，並觀察塑性區域的發展與關鍵位置，參照試體實驗的破壞關鍵位置與相對應之位移歷程，來驗證分析模型的可信度。

### 3.2 分析模型介紹



#### 基本假設

基於軟體分析上限制，模型由以下假設分析之：

1. 鋼材與電熱熔渣鋸道為均質材料，鋼材應力-應變曲線簡化為雙線性。
2. 分析模型不考慮實際試體鋼材與鋸道施工導致之殘留應力、鋸道熱影響；分析模型不考慮局部挫屈行為，亦不考慮鋼材開裂行為。
3. 以梁腹板厚度方向中心線為對稱平面，採用半對稱模型，模型忽略剪力板與剪力螺栓，將梁腹板連接於柱翼板上，因此未考慮剪

力板與梁腹板間之相對滑移。

4. 模型於電熱熔渣鍚接處忽略施工程序中之點鍚；於梁翼全滲透開槽鍚接處忽略背墊板。

## 模型尺寸

分析模型參考 Chen et al. (2004) 之未補強試體 BUN，梁尺寸為 H700×300×13×24 mm，柱尺寸為 □550×550×35×35 mm，箱型柱內橫隔板厚度簡化為 24 mm (試體 BUN 之橫隔板厚度為 25 mm)，以電熱熔渣鍚接相接於柱翼板。BUN 試體接合細節如圖 3.1，組合箱型柱接合細節如圖 3.2。

由於梁柱接合之力學行為在交會區與梁柱接面處，組合箱型柱之四道全滲透鍚接並非塑性區域之關鍵位置，相關梁柱接頭試驗也未有該鍚道破壞的案例，因此 BUN 模型忽略四塊柱板間的全滲透開槽鍚道，僅模擬四道位於箱型柱內橫隔板兩側的電熱熔渣鍚接，鋼梁接於電熱熔渣鍚接側。電熱熔渣鍚道兩側為鍚接側墊板，其斷面尺寸為 50 mm × 25 mm，模型之電熱熔渣鍚接細節參考林克強博士提供之電熱熔渣鍚道切片，如照片 3.1，模擬鍚道為半徑 24 mm 之圓形，該鍚道熔入柱翼板、內橫隔版與側墊板，側墊板與柱板、橫隔板間假設有 1 mm 之初始間隙。鍚道圓心位於內橫隔板厚度中心，距離柱板內側邊緣 12 mm 處，即為鍚道預留位置之正中心。模型 BUN 於電熱熔渣鍚接處之接合細節如圖 3.3。

## 材料性質與模型網格

模型母材與鍛道之材料性質均模擬為雙線性，於線性階段採用 Linear Isotropic 材料模型，彈性模數 (Elastic Modulus, E) 設定為 200,000 MPa，波松比 (Poisson Ration) 為 0.3。塑性階段採用 Multi-linear Kinematic 材料模型，材料降伏強度與極限強度以 BUN 試體的拉力試片強度設定之，如表 3.1。鍛道的降伏強度設定為 480 MPa、極限強度 552 MPa (Chao et al. 2006)。

模型分析元素採用三維固體元素 Solid45 (3-D Structural Solid) 元素，每個元素具有 8 節點，每個節點有三個平移自由度。模型網格化以四方體元素為主，僅形狀不規則處採用三角體，元素之長寬比以不超過 20 倍為原則。BUN 模型共計有 58,005 個元素 (Elements)，76,098 個節點 (Nodes)。整體模型之網格與局部位置之網格如圖 3.4，於梁柱接合塑性區域網格較小，網格逐漸往外側放大。

## 邊界條件與位移歷程

箱型柱頂端束制節點 UX、UY 自由度模擬實驗之鉸支承，箱型柱底端束制節點 UX 自由度模擬實驗時之輥支承，並於距離鋼梁兩端 600 mm 處束制梁翼板邊緣節點 UZ 自由度，模擬實驗時為防止側向扭轉挫屈所設置之側向支撐。模型進行負方向單向加載，加載步驟依據 BUN 試體試驗程序 (AISC 1997 規定)，以試體梁翼板邊界達到降伏時梁端所需位移量  $\Delta_y$  為位移歷程單位，由  $1\Delta_y$  逐漸加載至  $7\Delta_y$ ，位移增量  $1\Delta_y$ ，本分析模型相對應之  $\Delta_y$  為 22 mm。

### 3.3 行為指標

#### a. 層間變位角

FEMA350 (2000) 定義層間變位角為梁端位移除以梁端至柱中心線之距離，如圖 3.5。耐震設計規範則規定特殊抗彎矩構架之層間變位角最小須達到 4.0% rad，而國內鋼構造結構物設計技術規範則規定，梁柱接頭所需塑性轉角  $\theta_p$  應以下述三規定之一決定之：

1. 0.03 rad
2. 非線性動力分析之最大塑性轉角加 0.005 rad
3.  $\theta_p = 1.1(R - 1.0)\theta_E$

其中 R 為結構系統韌性容量； $\theta_E$  為在設計地震力 E 作用下之最大層間變位角。



#### b. Von Mises 應力

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

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.1)$$

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

### c. 塑性應變指數

塑性應變指數 PEEQ Index 為塑性等量應變除以降伏應變，用以評估模型局部位置之塑性應變需求 (El-Tawil et al. 2000)，能藉此發現試體可能脆性破壞的關鍵位置，塑性應變指數定義如下：

$$\text{PEEQ Index} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}}}{\varepsilon_y} \quad (3.2)$$

- $\varepsilon_{ij}$ ：特定點 i 與 j 方向的塑性應變分量
- $\varepsilon_y$ ：單向材料降伏應變

### d. 裂縫尖端開口位移

裂縫尖端開口位移 CTOD 為量測裂縫受力時裂縫尖端變位之試驗 (ASTM)，能有效評估間隙、鋸道缺陷於受力時是否發展初始裂縫，進而導致撕裂破壞。Chi et al. (2000) 使用 CTOD 討論北嶺地震前，腹板鎖螺栓翼板鋸接之梁柱接面全滲透鋸道，其背墊板尺寸以及鋸接缺陷對接合韌性行為的影響。本研究採用直接量測間隙尖端兩點之相對位移作為評估指標，如圖 3.6。

### e. 應力三軸度

應力三軸度 (Stress Triaxility, ST) 為 Hydrostatic Stress  $\sigma_m$  與 Von Mises Stress  $\bar{\sigma}$  的比值，為考量韌性能力之重要指標。高的應力三軸度 ( $0.75 < ST < 1.5$ ) 將大量折減材料韌性能力，而極高的應力三軸度

( $ST > 1.5$ ) 將導致脆性破壞 (El-Tawil et al. 1999) :

$$\text{Stress Triaxility (ST)} = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (3.3)$$

#### f. 破裂指數

破裂指數 (Rupture Index, RI) 結合塑性應變指標與應力三軸度，能夠發現潛在的韌性破壞關鍵位置(El-Tawil et al. 1999)，破裂指數之定義如下：

$$\text{Rupture Index (RI)} = \frac{\text{PEEQ Index}}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}})} \quad (3.4)$$

### 3.4 歷程與位置之選取

#### 歷程之選取



模型分析共計有 7 個位移歷程，以 BUN 試體梁翼板邊界達到降伏時梁端所需位移量  $\Delta_y$  為位移歷程單位。 $2\Delta_y$  (1.1% rad) 為鋼梁由線性轉為塑性行為的轉折點； $4\Delta_y$  (2.3% rad) 為 BUN 試體實驗時產生梁下翼板脆性破壞的位移歷程； $7\Delta_y$  (4.0% rad) 則為規範所建議之梁柱接頭層間變位角。因此模型分別擷取位移歷程  $1\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $4\Delta_y$ 、 $7\Delta_y$  時之行為指標作為比較之依據。

#### 位置之選取

梁柱接頭之破壞行為集中於梁翼全滲透鋸道與扇形開口根部，為瞭解鋼梁局部行為，分別設置沿梁寬方向之量測線 CJP 與 RWAH，

兩線之起點為對稱面終點為梁翼板邊緣，如圖 3.7 與圖 3.8。

電熱熔渣鋸接於箱型柱內共計有四處，本文研究外部接頭之力學行為，而外部接頭之力量傳遞集中於梁柱接面側，未接鋼梁側則因尚處線性階段故不在討論範圍內。由於實驗破壞案例均為電熱熔渣鋸接受拉撕裂破壞，若交會區設計強度符合規範要求，受壓側之電熱熔渣鋸接並沒有破壞案例，因此量測線僅設置於受拉側之電熱熔渣鋸接間隙，取其四個間隙位置沿 Z 方向之量測線，共計八處，如圖 3.9。

### 3.5 分析模型行為

#### 整體行為

試體 BUN 實驗為往覆加載，將實驗數據各迴圈於各位移歷程之梁端載重取平均，與模型 BUN 單向加載所得之位移包絡線比較，如圖 3.10。實驗數據與分析結果大致符合，證明有限元素分析確實能夠有效模擬實尺寸試驗的整體行為。

#### 局部行為

為驗證有限元素分析局部行為並討論其破壞細節，本文以有限元素分析所得之縱向應變 (X- direction Strain) 與實驗所設置之單軸應變計數據比較，如圖 3.11。於線性階段  $1\Delta_y$  (0.57% rad) 實驗與分析值完全符合；於  $2\Delta_y$  (約 1.17% rad) 時翼板兩側分析值稍低於實驗值；於  $4\Delta_y$  (約 2.23% rad) 時由於實驗於正方向第二迴圈於梁下翼板全滲透鋸道處發生撕裂破壞，實驗數據僅能擷取出一組數據，未能取其平

均數據，且分析模型未考慮梁翼全滲透鉗道的殘留應力，因此分析值略小於實驗數據，然而分析值之趨勢仍相當符合實驗數據。

圖 3.12 為 BUN 模型之 Von Mises 應力圖，顯示未補強接頭之塑性區域發展於梁翼全滲透鉗接處，而後逐漸向柱面外擴散，梁翼全滲透鉗道兩側與扇形開口根部有較大的應力，對照 BUN 試體之破壞模式為  $4\Delta_y$  時梁下翼板全滲透鉗道撕裂， $7\Delta_y$  於梁上翼板附近之扇形開口根部脆性破壞，和分析結果所指出之關鍵位置符合，驗證行為指標能夠指出試體可能之破壞位置。圖 3.13 為模型 BUN 於電熱熔渣鉗接處之應力圖。

圖 3.14 為各量測線於位移歷程 4.0% rad 的應力三軸度，交會區內側間隙 A\_a、C\_c 之應力三軸度均相當大。圖 3.15 為各間隙於 4.0% rad 時的 CTOD 值，各量測線之最大 CTOD 值均存在於對稱面處（梁腹板位置附近），最大之 CTOD 發生於 A\_a 間隙，可認定 A\_a 間隙乃為最可能發生初始裂縫處。圖 3.16 為間隙 A\_a 之 CTOD 歷程圖，CTOD 值於層間變位角 1.0%~2.0% rad 時快速增加，對照梁柱子結構之位移包絡線，該階段為梁柱子結構由線性行為轉入塑性行為的階段，為鋼梁於梁柱接面發展塑性鉗之同時，待塑性區域逐漸往柱面外擴散，CTOD 增加速度即趨緩。

### 3.6 討論

分析模型 BUN 無論在整體行為的勁度和強度均符合試體實驗行為，局部位置也能透過分析指標觀察出可能破壞位置與位移歷程，驗

證出在適當的簡化模型條件，有限元素分析的確能夠經濟且有效率的分析研究梁柱接頭行為。由標準組的分析數據能夠發現，模型於電熱熔渣錐接處的塑性行為並不顯著，左右該處力學行為之指標為應力三軸度與裂縫尖端開口位移，而破裂指數為結合塑性應變指數與應力三軸度的指標，不失為一種可靠的行为指標。在各行為指標擷取位置中均於 A\_a 間隙為最大，因此往後章節之研究僅比較各分析模型之 A\_a 間隙於 1.1%、2.3%、4.0% rad 位移歷程下，其應力三軸度、破裂指數與裂縫尖端開口位移。



## 第四章 模型細節研究

### 4.1 前言

梁柱接面複雜的應力傳遞已非傳統力學能夠討論其局部行為，藉著有限元素分析，研究人員能夠有效率且簡易的分析之，雖然第三章的分析模型能夠準確模擬實驗狀況，然而該簡化模型細節對分析結果的正確性影響程度仍是未知，於是本章將討論材料性質、局部位置網格元素大小、單向加載與往覆加載、剪力板與螺栓接合對模型整體行為與電熱熔渣鍛接的影響，各分析模型之編號方式如表 4.1。

### 4.2 材料性質影響



為瞭解材料性質設定之影響性，建立一組 BUN-Q (Quadrilinear)，BUN-Q 模型除材料性質不同外，其餘分析條件均與 BUN 模型相同。BUN-Q 模型之材料應力-應變曲線為更符合拉力試片試驗數據，將曲線簡化為四線性。降伏應變前為線性階段，彈性模數與波松比和 BUN 模型相同，分別為 200,000 MPa 和 0.3；應變於降伏點至 0.02 時設定為降伏平台，應變 0.05 時其應力達極限應力之 95%，並於應變 0.1 時達到其極限應力。模型 BUN 與 BUN-Q 之梁翼板材料應力-應變曲線比較如圖 4.1。

#### 分析結果

試體實驗數據與材料雙線性模型 BUN、材料四線性模型

BUN-Q，其線性階段由於勁度相同，因此位移包絡線（圖 4.2）與梁翼全滲透鋸道之縱向應變（圖 4.3）並無差異。圖 4.4 為模型 BUN 與 BUN-Q 之 CTOD 歷程比較圖，四線性模型之 CTOD 值於各歷程均小於標準組模型。由模型梁端位移-載重圖、梁翼縱向應變與電熱熔渣鋸接之局部行為比較，其結果仍在誤差可接受範圍內，說明材料性質簡化為雙線性仍能有效分析其行為。

### 4.3 元素尺寸影響

第三章之基本模型於電熱熔渣鋸接處側墊板間隙為 1 mm，因此設定電熱熔渣鋸接附近區域之元素尺寸約 5 mm，而梁柱交會區外則適度放大網格，以節省分析時間。有限元素分析之元素網格優劣對於分析結果影響甚大，不良的元素網格有可能導致奇異解或無法求得收斂解，因此以電熱熔渣鋸接處附近之元素尺寸建立 BUN-2~BUN-8 模型，討論元素大小對於 CTOD 值之收斂性。

#### 分析結果

圖 4.5 為電熱熔渣鋸接之元素大小與 CTOD 值之關係圖。統計電熱熔渣鋸接附近之網格元素量，與分析結果之 CTOD 值繪製其關係圖，如圖 4.6，由趨勢線能夠看出越小的網格劃分，將能夠得到越趨近於穩定之 CTOD 值。

### 4.4 加載模式影響

為了解位移行程對於模型之影響，乃建立一往覆載重之模型 BUN-CY (Cyclic)。模型以試體位移歷程為依據，由  $1\Delta_y$  至  $7\Delta_y$  施以往覆載重，位移增量為  $1\Delta_y$ 。分析模型僅於每個位移階段進行一迴圈，比起試體於各方向施以 2~5 回圈較為簡化。

## 分析結果

圖 4.7 為模型 BUN-CY 與實驗之遲滯迴圈圖，其結果並無差異。CTOD 歷程圖之比較如圖 4.8，其值相當吻合。然而往覆載重之分析模式相當耗時且數據結果龐大，單向加載乃為較有效率且可行之分析模型。

## 4.5 剪力板影響



過去使用有限元素法分析梁柱子結構均忽略剪力板與螺栓，而使梁腹板直接和柱翼板相連，然而梁柱接面存在複雜的軸力、剪力與彎矩傳遞，模型細微的模擬方式即可能影響局部行為。本文以簡化模型 (BUN)、滑移模型 (BUN-S)、螺栓模型 (BUN-B) 研究接合細節對分析結果之影響，三組模型除下列敘述有所差異外，其材料性質與加載模式均與模型 BUN 相同，模型敘述如下：

### a. 簡化模型 BUN

簡化模型忽略剪力板與螺栓接合，將梁腹版和柱翼板合為一體，不考慮螺栓接合與剪力板，為第三章深入討論與驗證之模型。

### b. 滑移模型 BUN-S (Slide)

考慮剪力板與螺栓，建立二分之一厚度的剪力板，模擬半對稱模型下剪力板均勻分佈於對稱平面兩側。螺栓以 BUN 試體之尺寸設計，設置七組 M24 摩阻型螺栓，剪力板與梁腹板分別和剪力螺栓假設為一體，不考慮螺栓孔直徑大於螺栓直徑之問題，剪力版與梁腹版之交界面不共用節點，於加載時兩者能自由錯動，僅藉由螺栓傳力。由於剪力板、梁腹板與螺栓接觸面之 Z 方向力學行為較不明顯，因此不考慮三者於 XY 平面的接觸面。

### c. 螺栓模型 BUN-B (Bolted)

考慮螺栓接合介面間之接觸，模型和滑移模型一般，僅模擬二分之一厚度之剪力板，並忽略螺栓、剪力板與梁腹板於 XY 平面之接觸。剪力板和梁腹板開孔直徑為 25.5 mm，設置 7 組 M24 (直徑 24 mm) 螺栓。螺栓與剪力板、梁腹板接觸面使用接觸元素 CONTA 173 與目標元素 TARGET170。螺栓接合細節採用變形體對變形體 (Flexible-to-Flexible) 之面對面接觸元素，一組接觸對 (Contact Pairs) 由一組實常數 (Real Constant) 所連結，包含一接觸元素和一目標元素。接觸元素是附著於變形體上，於本模型中之接觸對皆為面元素，附著於三維元素 SOLID45 上。

## 分析結果

接觸元素實常數中的接觸剛度 (FKN, Contact Stiffness) 與貫穿公差 (FTOLN, Penetration Tolerance) 對分析結果影響甚大。接觸剛度

越大則兩物體接觸時的穿透量會越小，而兩物體接觸貫穿量需小於貫穿公差才視為接觸。然而使用過大的接觸剛度或過小的貫穿公差將造成收斂困難。

圖 4.9 與圖 4.10 為模型 BUN-S 與 BUN-B 之 Von Mises 應力等高線圖，由於 BUN 假設梁腹板直接與柱板相接，其局部勁度最大，BUN-S 次之，而 BUN-B 僅靠著螺栓傳遞力量而有較小的局部勁度，因此模型 BUN 之柱翼板有大範圍的應力降伏，於梁腹板與梁翼板降伏區域也較大，使得梁翼全滲透鋸道處之局部極高應力區域較小。BUN-S 模型與 BUN-B 模型則僅僅靠著螺栓來傳遞梁腹板少部分的彎矩，柱翼板僅於靠近剪力板邊緣兩側降伏，其餘部分保持著線性行為，BUN-B 在扇形開口分佈附近有極高的應力值，其高應力區域也較大。



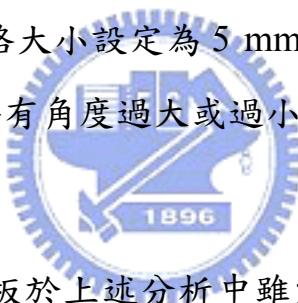
圖 4.11 與圖 4.12 為模型 BUN-S 與 BUN-B 之 XY 平面之剪應力等高線圖，BUN-B 模型之剪應力傳遞僅依靠梁腹板之螺栓接合，而剪應力擴散趨勢為向腹板上下兩側，顯示扇型開口根部不但承受著彎矩所引起之高正向應力，也承受著極高的剪應力。圖 4.13 為剪力板模型之梁端載重-位移包絡線。圖 4.14 為剪力板模型之梁翼板縱向應變比較圖，於各階段的縱向應變差距並不大，顯示出是否有模擬剪力板僅對於剪應力的傳遞有明顯的路徑改變，對於彎矩所造成的正向應力傳遞路徑影響並不顯著。

由於 BUN-B 模型於剪力板與螺栓之間有較明顯的應力集中，造成局部消能，其梁端載重-位移包絡線之強度與勁度均較 BUN 模型為

低，差距約 6%。圖 4.15 為剪力板模型之 CTOD 歷程圖，由於 BUN-B 模型明顯的降低柱翼板的應力而減少交會區的塑性行為，因此模型 BUN-B 的 CTOD 值較標準組模型為低，差距約 60%。

## 4.6 討論

網格元素需考量分析運算時間與分析結果之正確性，越大的網格元素容易產生不良網格因而產生誤差較大的分析結果甚至無法收斂；過小的網格元素雖能精確求解，然而將使得分析變得較沒有效率，在網格化過程中不宜有過大的元素長寬比與不合理的網格形狀，於非韌性行為之關鍵區域也能夠適當的放大網格。往後之參數研究將以電熱熔渣鍛接細部網格大小設定為 5 mm，其餘網格以相鄰網格長寬比不超過 20 倍且不得有角度過大或過小之元素為原則，進行模型的網格化。



模型是否分析剪力板於上述分析中雖能明顯看出其力學傳遞的不同，然而接觸分析乃為高度非線性分析，其參數設定對於求解收斂性與求解正確性甚為敏感，不利於廣泛且簡易的使用於梁柱接頭分析，而上述相關行為指標於三組不同剪力板模型中並無太大差異，因此簡化剪力板的模型仍為有效率且正確的分析方法。

由分析結果顯示，簡化模型雖未能完全符合試體條件，然而仍不失為一有效率且準確之分析方法。下列章節之分析模型，將採用 BUN 模型之尺寸，以雙線性材料、忽略剪力板影響、單向加載之原則分析之。

## 第五章 電熱熔渣鍚接參數研究

### 5.1 前言

電熱熔渣鍚接位於箱型柱內，鍚接品質難以控制，破壞案例中甚至有完全未與柱翼板熔接的例子。本章節使用簡化模型為基礎，設定鍚接缺陷進行參數研究，共建立五種研究參數，包含電熱溶渣鍚接熔入半徑、側墊板間隙、鍚道水平偏心、鍚道垂直偏心、鋼梁定位偏心，討論其破壞關鍵位置與行為指標值。

### 5.2 行為指標之臨界值

為瞭解分析模型局部位置於破壞階段的臨界指標值，乃參考林潔祥 (2005) 的電熱熔渣鍚接破壞案例：試體 CT 建立分析模型。由於該試體為破壞案例中，唯一遲滯迴圈飽滿且韌性能力達到規範要求者，相較於其他兩組破壞案例因電熱熔渣鍚接缺陷而導致試體接頭的韌性消能行為不佳，而該兩組試體之電熱熔渣缺陷狀況未知，於是採用試體 CT 之尺寸建立未有電熱熔渣鍚接初始缺陷之分析模型，於破壞階段的行為指標臨界值。

CT 模型於層間變位角 3.0% rad 時於梁翼全滲透鍚道發現裂縫，檢視該位移歷程下的分析模型，梁翼全滲透鍚道處之應力三軸度為 0.54、塑性應變指數為 17.5，破裂指數為 39.3。而試體於 4.0% rad 時發現電熱熔渣鍚接破壞，檢視模型 CT 於該位移歷程之電熱熔渣鍚接 CTOD 值為 0.027 mm、應力三軸度 1.46、破裂指數 5.48。對照實驗

數據與分析結果，可推論分析模型局部位置之破裂指數若超過 39.3 即有可能發展出初始裂縫，而電熱熔渣鋸接之 CTOD 若大於 0.027 mm，即可能於電熱熔渣鋸接處產生脆性破壞。

BUN 模型最終破壞模式並非位於電熱熔渣鋸接處，因此第三章所分析於破壞階段之行為指標也能成為局部位置之指標臨界值參考。BUN 試體初始破壞於正方向  $4\Delta_y$  (約 2.3% rad) 第二迴圈，為下翼板全滲透鋸道兩側撕裂破壞，試體破壞後隨即反向進行負方向之位移歷程，最終破壞於負方向  $7\Delta_y$  (約 4.0% rad)，為上翼板扇形開口根部往翼板兩側擴散之撕裂破壞，而電熱熔渣鋸接處直至實驗結束仍未有明顯之破壞，因此該試體於  $7\Delta_y$  時的電熱熔渣鋸接行為指標可作為臨界值的參考；BUN 分析模型於  $7\Delta_y$  位移歷程時，電熱熔渣鋸接之 CTOD 值為 0.017 mm、應力三軸度為 1.55、破裂指數為 12.7。

由上述兩模型的行為指標發現，電熱熔渣鋸接之 CTOD 值在超過 0.027 mm 時電熱熔渣鋸接即有破壞的疑慮；兩模型應力三軸度皆相當接近，則無法明顯判別臨界指標值；破壞指數若大於 39.3 則有發展初始裂縫的可能性，如表 5.1。

### 5.3 參數模型

參數研究所採用的模型梁柱尺寸和標準組模型 BUN 相同，使用材料雙線性、單向加載、忽略剪力板影響之半對稱簡化模型，以標準組模型 BUN 為對照組，建立 5 種參數，共計 20 組模型進行參數研究。M 系列探討電熱熔渣鋸接熔入半徑的影響；S 系列探討電熱熔渣鋸接

側墊板間隙的影響；VE 系列探討電熱熔渣鍛接垂直偏心的影響；HE 系列探討電熱熔渣鍛接水平偏心的影響；BE 系列探討鋼梁定位誤差所造成的鋼梁偏心。參數模型編號如表 5.2。

#### a. 熔入半徑系列

熔入半徑模型如圖 5.1，圓形鍛道中心均位於鍛道預留位置中央，包含標準組 M24 (即為 BUN) 共計五組鍛道為同心圓，其鍛道半徑分別為 20 mm、22 mm、24 mm、26 mm、28 mm。

#### b. 側墊板間隙系列

側墊板間隙模型如圖 5.2，標準組模型 S10 (即為 BUN)。五組模型之側墊板間隙為 0 mm、0.5mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm。



#### c. 水平偏心系列

水平偏心模型如圖 5.3，以模型 X 軸方向為依據，向右熔入柱板方向為正，向左熔入橫隔板方向為負，模型編號為 HE-6、HE-3、HE、HE+3、HE+6。

#### d. 垂直偏心系列

垂直偏心模型如圖 5.4，以模型 Y 軸方向為依據，向上偏移為正，向下偏移為負。模型分別為 VE-6、VE-3、VE、VE+3、VE+6。

#### e. 梁偏心系列

鋼梁於現地施工階段常存在定位誤差，如圖 5.5，梁偏心系列模型以 Y 軸方向為正負方向依據，參數模型分別為 BE-6、BE-3、BE、BE+3、BE+6。

## 5.4 參數模型分析結果

### a. 熔入半徑系列 (M Series)

分析結果顯示越大的熔入半徑會有越小的 CTOD 值，M20 模型於層間變位角 4.0% rad 時之 CTOD 超過破壞臨界值 0.027 約 4.0%，有撕裂破壞的可能。圖 5.6 為熔入半徑系列之 CTOD 比較圖。圖 5.7 為熔入半徑系列之應力三軸度比較圖，5 組模型均於 2.3% rad 時接近應力三軸度極高之危險階段。直至 4.0% rad 應力三軸度並沒有明顯增加。圖 5.8 為熔入半徑系列之破裂指數比較圖，熔入半徑較大之模型破裂指數會越低，然而各模型之破裂指數均低於臨界指標。由三種分析指標可以發現，較大的電熱熔渣熔入半徑能夠降低 CTOD 值，減少電熱熔渣鋌接開裂的可能性，然而對於應力集中的現象並沒有明顯改善。

### b. 側墊板間隙系列 (S Series)

S00 模型由於模型建立之影響，其端點僅有一點，無法用直接量測法擷取 CTOD 值，其餘四組模型之 CTOD 值於各位移歷程下均相當接近，顯示側墊板初始間隙對於電熱熔渣鋌接之行為並沒有直接關係。圖 5.9 為側墊板間隙系列之 CTOD 比較圖。圖 5.10 與圖 5.11 為

側墊板間隙系列之應力三軸度比較圖與破裂指數比較圖，其分析結果和標準組模型 BUN 並沒有太大差距，僅於破裂指數部分 S05 模型因間隙過小產生較大的塑性應變而使得破裂指數提高，然而整體而言側墊板間隙並非影響電熱熔渣鋸接力傳遞機制的關鍵因素。

### c. 水平偏心系列 (HE Series)

模型 HE-6 於 4.0% rad 值之 CTOD 值超過臨界指標達 26%。圖 5.12 為水平偏心系列 CTOD 比較圖，能夠看出越往交會區外水平偏心，則 CTOD 值會越小。HE 系列各組應力三軸度均為極高（圖 5.13），然而破裂指數均未超過臨界指標（圖 5.14）。由分析結果顯示，若電熱熔渣鋸接熔入柱翼板之深度不足，將使得側板間隙產生開裂的可能性增加。



### d. 垂直偏心系列 (VE Series)

分析結果顯示若越往交會區外側垂直偏心，則 CTOD 值越大；模型 VE+6 於層間變位角 4.0% rad 時之  $A_a$  間隙 CTOD 值達到 0.031，超過 CTOD 臨界指標 0.027 達 15%。圖 5.15 為垂直偏心系列 CTOD 比較圖。值得關注的是模型 VE+6 其應力三軸度相當高（圖 5.16），於 4.0% rad 階段超過 BUN 模型 50%，而破裂指數達 53.5（圖 5.27），由臨界指標判斷極有可能發展初始裂縫。綜合三種分析指標 VE+6 模型 CTOD 值與應力三軸度皆非常高，將有可能導致電熱熔渣鋸接之破壞。

### e. 梁偏心系列 (BE Series)

圖 5.18 為梁偏心系列之 CTOD 比較圖、圖 5.19 為梁偏心系列應力三軸度比較圖、圖 5.20 為梁偏心系列破裂指數比較圖，由三圖能夠發現梁偏心對於電熱熔渣鍛接的影響甚小。

## 5.5 討論

基於強柱弱梁原則，結構設計均希望韌性消能行為能夠集中於鋼梁，而鋼柱在地震力作用下仍然能夠保持線彈性行為。由於破裂指數考量了塑性應變指數，而電熱熔渣鍛接位於組合箱型柱內，其塑性行為並不像梁翼全滲透鍛道或扇形開口根部明顯，因此在參數研究中，僅有一組分析模型 VE+6 之破裂指數稍大；而應力三軸度則因為鍛道與母材之材料變異與電熱熔渣鍛接處之幾何形狀不連續，所有參數模型之應力三軸度均在可能導致脆性破壞的極高以上。

觀察電熱熔渣鍛接與行為指標之關係，能夠發現 CTOD 為參數研究中最具代表性的行為指標，能夠顯著反應參數對於電熱熔渣鍛接力傳遞機制的影響。由上述的參數研究資料統計，歸納出關鍵參數為側墊板間隙尖端與內橫隔板邊緣的距離，將其定義為  $d_{tip}$ ，如圖 5.21。將參數模型之  $d_{tip}$  與 CTOD、應力三軸度與破裂指數指標繪製成分佈關係圖，能夠發現  $d_{tip}$  對行為指標的相關性（圖 5.22、圖 5.23、圖 5.24），可以明顯觀察出  $d_{tip}$  越小會有越大的行為指標值。

# 第六章 接合細節與接合型式

## 6.1 前言

為瞭解梁柱接合細節與接合型式對電熱熔渣鍔接之影響，本章節依照前述章節之假設建立分析模型，採用相同之梁柱尺寸、材料性質、邊界條件，參考前人研究成果建立模型尺寸，由前述之行為指標討論其局部行為，尋找對於電熱熔渣鍔接有利的梁柱接合型式。

## 6.2 梁柱接合細部對電熱熔渣鍔接之影響

### 6.2.1 具背墊板模型



梁柱接頭若具有梁翼全滲透鍔道背墊板，其彎矩最大處位於下翼板之背墊板外側，Chi and Deierlein (2000) 認為背墊板之移除有助於改善韌性行為，能避免梁翼全滲透鍔道之鍔接缺陷發展初始裂縫影響整體行為。模型 BA 將梁翼全滲透鍔接之背墊板建入模型內，背墊板尺寸為 25×12 mm，材料性質設定同梁腹板。由於背墊板和 CJP 鍔道僅僅於交界面處接合，因此在背墊板和梁翼板、柱翼板間模擬 1 mm 之間隙，如圖 6.1。

### 分析結果

圖 6.2 為模型 BA 之 CTOD 位移歷程圖，全滲透鍔道初始間隙的 CTOD 值達到臨界指標，驗證背墊板對梁柱接頭韌性行為的不利結

果。圖 6.3 為模型 BA 於電熱熔渣鋸接處的 Von Mises 應力圖。

### 6.2.2 無扇形開口之托梁接頭

NAH 為無扇形開口之托梁接合，其接合形式同前章節之 CT 模型，但因為尺寸不同為區隔兩者，因此使用不同代號。NAH 模型將梁腹板與梁翼板之雙邊開槽鋸接，簡化為 10 mm 之方形鋸道，除梁柱接面鋸道與扇形開口外，其餘條件均和 BUN 模型相同，目的在觀察扇形開口因幾何形狀不連續所造成的應力集中，是否影響電熱熔渣鋸接的力傳遞機制。

#### 分析結果

圖 6.4 為模型 NAH 之 CTOD 位移歷程圖，較標準組模型低約 10%，分析結果之應力三軸度低約 15%，顯示扇形開口造成幾何形狀不連續，不但降低扇形開口根部的韌性容量，對於附近的電熱熔渣鋸接也會改變其行為指標值。

### 6.2.3 側墊板施以填角鋸接

Chi et al. (2000) 指出，梁翼全滲透鋸道之背墊板間隙雖然對於梁柱接頭韌性行為有不良影響，然而於間隙外側施以填角鋸接能夠有效抑制其間隙尖端之 CTOD 值，防止裂縫發展初始裂縫。模型 BUN-F 參考其原理，於側墊板與柱翼板間隙外側施以 10 mm 之填角鋸接，如圖 6.5，建立 BUN-F 之分析模型。

## 分析結果

圖 6.6 為模型 BUN-F 之 CTOD 比較圖，顯示於側墊板間隙外側施以填角鋸接能夠降低間隙之 CTOD 值，結果僅為標準組模型 5%。然而填角鋸接外側有明顯的應力集中，為該模型可能之破壞位置。礙於施工程序，於側墊板與柱翼板間施以填角鋸接，仍待施工程序上的改良。

### 6.3 梁柱接頭形式對電熱熔渣鋸接之影響

傳統未補強模型如本文 BUN 模型（圖 6.7），其彎矩需求最大處位於梁柱接面，如圖 6.8 之模型 BUN 彎矩梯度圖，該處為梁翼全滲透鋸道，鋸接施作之熱影響與殘留應力以及因扇形開口幾何形狀不連續所造成的應力集中，是傳統未補強接頭韌性能力不佳的主要因素。以下就台灣常見的特殊抗彎矩接頭建立有限元素分析模型：

#### 6.3.1 切削式接頭

切削式模型 RBS (Reduced Beam Section) 採用圓弧切削設計，依 FEMA350 建議之設計流程如下：

1. 選定切削起始段長度  $L_a$  為  $0.5 \sim 0.75$  梁寬，取  $150\text{ mm}$ ；切削段長度  $L_b$  為  $0.65 \sim 0.85$  梁深，取  $500\text{ mm}$ 。
2. 選擇切削深度  $c$  為  $0.2$  倍梁寬，取  $60\text{ mm}$ ，依幾何形狀計算切削半徑  $R$  為  $550\text{ mm}$ 。

3. 計算切削段之彎矩容量  $M_{pr}$  為  $1623 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。
4. 計算柱面之彎矩需求  $M_d$  為  $1693 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，柱面之彎矩容量  $M_s$  為  $2358 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。梁柱接面設計彎矩容量與彎矩需求之比值  $\alpha = 1.39$ 。

模型 RBS 尺寸如圖 6.9，彎矩梯度圖如 6.10。

## 分析結果

切削式模型 RBS 之 CTOD 值均小於標準組模型，破裂指數也較小，特別的是由於切削式模型之塑性鉸位置較遠離柱面，如圖 6.11，塑性鉸發展於圓弧切削段。圖 6.12 為模型 RBS 之 CTOD 歷程圖。

### 6.3.2 延長式肋板接頭



延長式肋板模型 ER (Extensional Rib)，尺寸設計採用林群洲 (2002) 之延長式單肋板試體 BR115SB，肋板厚度  $22 \text{ mm}$ ，圓弧半徑為  $235 \text{ mm}$ ，柱面至圓弧段末端之長度  $L_p$  為  $235 \text{ mm}$ 。肋板之塑性段面模數為梁之  $0.32$  倍，肋板延長段則為  $0.046$  倍，試體梁柱接面經肋板補強後之塑性彎矩容量與彎矩需求比為  $1.15$ 。延長式肋板模型 ER 之尺寸設計與彎矩梯度如圖 6.13 與圖 6.14。

試體之 SB (Steel Backing) 表示梁翼全滲透鉸道之鋼材背墊板，由於本章節尚有討論梁翼全滲透鉸道背墊板對於電熱熔渣鉸接細節的影響，為了單純的比較 ER 模型和標準模型 BUN 的差異，因此 ER 模型僅參考肋板尺寸而假設於梁翼全滲透鉸道施作完成後，背墊板將

會移除。

## 分析結果

延長式肋板模型 ER 之彎矩最大處為梁柱接面的肋板上緣，由塑性應變圖 6.15 發現，該處為應變需求極高處，有撕裂破壞之虞。圖 6.16 為模型 ER 之 CTOD 歷程圖。ER 模型電熱熔渣鍛接 CTOD 值最大處為  $B_b$  間隙（橫隔板上側靠近梁柱接面處），由電熱熔渣鍛接應力圖 6.17 觀察其力傳遞機制和其他組模型不同。

### 6.3.3 擴翼式接頭

擴翼式接合 (Widened Flange) 參考林潔祥 (2005) 經有限元素分析與實尺寸試驗後所建議之設計流程，以 BUN 之梁柱尺寸為設計依據，其設計流程如下：



1. 擴翼寬與柱寬比  $W$  經文獻建議為 1.0，可求得擴翼寬度  $b_{wf}$  為 550 mm。乃進一步求得梁柱接面彎矩容量  $M_s$  為 3888 kN-m。
2. 選取擴翼段長度  $L_p$  為  $1/3 \sim 2/3$  梁深，取 300 mm。由擴翼段圓弧末端達到降伏之塑性彎矩容量  $M_{pr}$ ，可求得梁柱接面需求彎矩  $M_d$  為 2573 kN-m。
3. 翼板最大寬度之補強段  $L_{wf}$  為  $1/6$  梁深，約取 100 mm，計算擴翼段半徑  $R$  為 222.5，取 250mm。

4. 設計流程建議  $\alpha$  需大於 1.28，而上述設計尺寸之梁柱接面設計彎矩容量與彎矩需求之比值  $\alpha = 1.51$ ，符合文獻之建議。

擴翼式模型 WF 之尺寸設計與彎矩梯度如圖 6.18 與圖 6.19。

## 分析結果

擴翼式模型 WF 之梁柱接面設計彎矩容量與彎矩需求之比值  $\alpha$  是三組模型中最大者，達到 1.51。分析結果顯示，WF 模型不僅 CTOD 值在所有模型中為最小，各破壞指標也相當低。圖 6.20 為 WF 模型塑性應變等高線圖，塑性區域發展於擴翼圓弧段，柱面之應變需求仍小。圖 6.21 為模型 WF 之 CTOD 歷程圖。

## 6.4 討論



模型 RBS、ER、WF 之量端載重位移包絡線如圖 6.22，擴翼式接合與延長式肋板之載重位移包絡線非常相似，兩者之勁度則因為斷面補強提高斷面模數，其強度均大於對照組模型 BUN。切削式模型因為斷面減弱，勁度與強度均低於其他三組模型。

經由分析結果發現，除了延長式肋板模型 ER 因加勁於電熱熔渣鍛接應力集中處（梁柱接面與梁腹板交接處附近），CTOD 值改善狀況並不明顯，其餘特殊抗彎接頭均能有效改善電熱熔渣鍛接的行為指標。三組模型於 4.0% rad 時應力三軸度均低於 1.5，相較於 BUN 模型之 1.55，降低幅度達 10%~25%，指標由可能破壞階段，降至可能降低韌性能力的階段，三組模型之破裂指數更低於 10。

## 第七章 結論與建議

### 7.1 結論

綜合上述各章節的研究資料，對於電熱熔渣鍚接之力傳遞機制提出具體的研究結論。

1. 箱型柱內橫隔板之電熱熔渣鍚接有限元素分析使用半對稱模型、材料雙線性、忽略剪力板影響、使用單向加載之簡化模型，能有效率且正確地模擬實尺寸試驗結果。
2. 行為指標如裂縫尖端開口位移 (CTOD)、應力三軸度與破裂指數能夠明確指出電熱熔渣鍚接缺陷所引起可能的破壞位置。由實尺寸試體實驗對照分析模型下所得之 CTOD 臨界值為 0.027 mm、應力三軸度臨界值為 1.55、破裂指數臨界值為 39。
3. 電熱熔渣鍚接之熔入半徑減少 15%，將使 CTOD 值增加 70%；加大電熱熔渣鍚接之熔入半徑雖然降低 CTOD 值，然而增加電壓需考慮大量之入熱對於熱影響區的不利影響。
4. 側墊板間隙與鋼梁定位偏心之參數模型，其行為指標值和標準組模型差距不大，對於電熱熔渣鍚接力傳遞機制並沒有太大的影響。
5. 電熱熔渣鍚接之鍚道偏心為影響其力傳遞機制之關鍵參數，間隙尖端距離橫隔板邊緣之距離  $d_{tip}$  若小於 5 mm，將導致電熱熔渣鍚接於交會區內之間隙尖端發展初始裂縫。

6. 梁翼全滲透鋸道之施工背墊板存在初始間隙，其 CTOD 值大於臨界值 40%，於電熱熔渣鋸接處之 CTOD 值則提高 20%，證明梁翼全滲透鋸道之背墊版不但對於梁翼全滲透鋸道有不良影響，亦可能導致電熱熔渣鋸接之破壞。
7. 塑性鉸遠離梁柱接面之梁柱接頭設計能夠有效改善電熱熔渣鋸接的力傳遞機制，CTOD 值能降低 40%以上。唯有單肋板補強接頭由於補強位置為電熱熔渣鋸接附近，肋板的加勁使得力學行為更加集中於熱電熔渣鋸接處，對於其局部行為並無改善效果。

## 7.2 建議

1. 鋸接熱影響所造成的母材脆化與鋸道殘留應力將會減弱鋸道周遭材料之韌性能力，往後研究可著重於鋸道熱影響與殘留應力對於電熱熔渣鋸接之影響。
2. 本研究以有限元素分析討論電熱熔渣鋸接之幾何形狀所導致之可能破壞關鍵位置，然而其破壞路徑與極限強度仍須進一步的實尺寸試驗佐證之。

## 參考文獻

AISC (1997), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction.

AISC (2005), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction.

ANSYS (2005), *ANSYS Contact Technology Guide*, SAS, Inc.

Azuma, K., Suzuki, T., Kanno, R., and Shimanuki, H. (2003), “Slit tip opening behavior of electro-slag weld zone between interior diaphragm and box column on steel moment frame.” *Japanese Structural Construction Engineering*, AIJ, No.573, pp 161-168.

Chao, S. H., Khandelwal, K., El-Tawil, S., “Ductile web fracture initiation in steel shear links” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 8, pp 1192-1200.

Chen, C. C., Lin, C. C., and Tsai, C. L. (2004), “Evaluation of reinforced connections between steel beams and columns.” *Engineering Structures*, Vol. 26, pp 1889-1904.

Chi, W. M., and Deierlein, G. G. (2000), “Fracture toughness demands in welded beam-column moment connections.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp 88-97.

El-Tawil, S., Mikesell, T., and Kunnath, S. K. (2000), “Effect of local details and yield ratio on behavior of FR steel connections.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp 79-87.

FEMA (2000), *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*, FEMA-350, Federal Emergency Management Agency.

Zhang, J., and Dong, P. (2000), "Residual stresses in welded moment frames and implications for structure performance." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 3, pp 306-315.

徐慶昌 (1989), 「電鋸工作法」, 三民書局。

內政部營建署 (1999), 「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」。

陳誠直、陳生金、陳宣維、鍾明達 (1999), 「鋼構造梁柱接頭耐震行為研究 (一)」, 財團法人中興工程顧問社。

王存偉 (1999), 「切削式鋼構梁柱接頭行為之比較」, 碩士論文。國立台灣科技大學。

林群洲 (2002), 「肋板補強鋼骨箱型柱梁柱接頭之耐震行為」, 碩士論文。國立交通大學土木工程學系。

陳誠直、林群洲、陳澤許、張新梓 (2004), 「鋼骨箱型柱梁柱偏心接合試驗研究」, 第七屆結構工程學術研討會, 台灣中壢。

林潔祥 (2005), 「擴翼式鋼骨托梁抗彎接頭之耐震行為」, 碩士論文。國立交通大學土木工程學系。

張新梓 (2004), 「鋼骨箱型柱偏心接合之接頭耐震行為」, 碩士論文。國立交通大學土木工程學系。

表 3.1 試體 BUN 鋼板拉力試驗強度

	降伏強度 (MPa)	極限強度 (MPa)
柱板	412	562
梁翼板	396	516
梁腹板	422	529

表 4.1 分析模型編號表

編號	說明	討論類型
BUN	-	標準組模型
BUN-Q	Quadrilateral	材料性質影響
BUN-2 ~BUN-8	ESW Mesh Size	元素大小影響
BUN-CY	Cyclic loading	位移歷程影響
BUN-S	Slide	剪力板影響
BUN-B	Bolted	剪力板影響

表 5.1 行為指標臨界值

模型	破壞歷程	破壞模式	指標位置	ST	RI	CTOD (mm)
CT	-3.0% rad	CJP 初始裂縫	CJP	0.54	39.3	-
	-4.0% rad	ESW 隆起	ESW	1.46	5.5	0.027
BUN	+1.7% rad	CJP 撕裂	CJP	0.27	29.8	-
	-4.0% rad	WAH 撕裂	ESW	1.55	12.7	0.017

表 5.2 熔入半徑系列尺寸表

	熔入半徑	原始間隙	垂直偏心	水平偏心	梁偏心
<b>M20</b>	20	1	0	0	0
<b>M22</b>	22	1	0	0	0
<b>M24</b>	24	1	0	0	0
<b>M26</b>	26	1	0	0	0
<b>M28</b>	28	1	0	0	0

Unit : (mm)

表 5.3 側墊板間隙系列尺寸表

	熔入半徑	原始間隙	垂直偏心	水平偏心	梁偏心
<b>S00</b>	24	0	0	0	0
<b>S05</b>	24	0.5	0	0	0
<b>S10</b>	24	1.0	0	0	0
<b>S15</b>	24	1.5	0	0	0
<b>S20</b>	24	2.0	0	0	0

Unit : (mm)

表 5.4 水平偏心系列尺寸表

	熔入半徑	原始間隙	垂直偏心	水平偏心	梁偏心
<b>HE-6</b>	24	1	0	-6	0
<b>HE-3</b>	24	1	0	-3	0
<b>HE</b>	24	1	0	0	0
<b>HE+3</b>	24	1	0	+3	0
<b>HE+6</b>	24	1	0	+6	0

Unit : (mm)

表 5.5 垂直偏心系列尺寸表

	融入半徑	原始間隙	垂直偏心	水平偏心	梁偏心
<b>VE-6</b>	24	1	-6	0	0
<b>VE-3</b>	24	1	-3	0	0
<b>VE</b>	24	1	0	0	0
<b>VE+3</b>	24	1	+3	0	0
<b>VE+6</b>	24	1	+6	0	0

表 5.6 梁偏心系列尺寸表

	融入半徑	原始間隙	垂直偏心	水平偏心	梁偏心
<b>BE-6</b>	24	1	0	0	-6
<b>BE-3</b>	24	1	0	0	-3
<b>BE</b>	24	1	0	0	0
<b>BE+3</b>	24	1	0	0	3
<b>BE+6</b>	24	1	0	0	6

Unit : (mm)



表 5.7 熔入半徑系列分析結果表

	Triaxility			Rupture Index			CTOD (mm)		
	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%
<b>M20</b>	0.94	1.49	1.60	0.1	11.1	19.5	0.009	0.023	0.028
<b>M22</b>	0.93	1.48	1.57	0	9.7	17.1	0.007	0.020	0.025
<b>M24</b>	1.05	1.46	1.55	0	7.7	12.7	0.005	0.014	0.017
<b>M26</b>	1.03	1.47	1.55	0	7.8	14.3	0.004	0.013	0.015
<b>M28</b>	1.00	1.45	1.52	0	10.7	11.9	0.003	0.010	0.013

表 5.8 側墊板間隙系列分析結果表

	Triaxility			Rupture Index			CTOD (mm)		
	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%
S00	0.84	1.62	1.67	0	5.5	10.0	-	-	-
S05	1.06	1.53	1.60	0	14.1	22.0	0.004	0.015	0.018
S10	1.06	1.46	1.55	0	7.7	12.7	0.005	0.014	0.017
S15	1.07	1.48	1.58	0	3.4	6.9	0.006	0.014	0.016
S20	1.01	1.44	1.54	0	3.6	7.5	0.007	0.014	0.015

表 5.9 水平偏心系列分析結果表

	Triaxility			Rupture Index			CTOD (mm)		
	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%
<b>HE-6</b>	0.96	1.60	1.63	0.1	11.7	18.9	0.005	0.027	0.034
<b>HE-3</b>	1.05	1.60	1.69	0.4	13.9	22.9	0.003	0.022	0.027
<b>HE</b>	1.06	1.46	1.55	0	7.7	12.7	0.002	0.014	0.017
<b>HE+3</b>	1.06	1.57	1.66	0	11.5	18.8	0.001	0.012	0.014
<b>HE+6</b>	1.19	1.40	1.54	0	1.8	4.5	0.001	0.010	0.012

表 5.10 垂直偏心系列分析結果表

	Triaxility			Rupture Index			CTOD (mm)		
	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%
VE-6	0.97	1.26	1.35	0	2.2	5.6	0.002	0.006	0.007
VE-3	0.98	1.43	1.43	0	7.3	7.3	0.003	0.007	0.010
VE	1.06	1.46	1.55	0	7.7	12.7	0.005	0.014	0.017
VE+3	1.04	1.52	1.61	0.5	10.9	17.7	0.009	0.020	0.024
VE+6	1.29	2.07	2.27	3.3	29.6	53.5	0.011	0.025	0.031

表 5.11 梁偏心系列分析結果表

	Triaxility			Rupture Index			CTOD (mm)		
	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%
<b>BE-6</b>	1.06	1.45	1.55	0	6.7	12.5	0.005	0.013	0.017
<b>BE-3</b>	1.06	1.50	1.59	0	11.3	13.0	0.005	0.014	0.017
<b>BE</b>	1.06	1.46	1.55	0	7.7	12.7	0.005	0.014	0.017
<b>BE+3</b>	1.06	1.46	1.55	0	11.5	13.2	0.005	0.015	0.017
<b>BE+6</b>	1.06	1.46	1.53	0	9.0	13.6	0.006	0.015	0.017

表 6.1 接合細節與接合型式模型編號

編號	說明
<b>BA</b>	具梁翼全滲透鋸道背墊板
<b>NAH</b>	托梁無扇形開口
<b>BUN-F</b>	側墊板施以填角鋸接
<b>RBS</b>	圓弧切削
<b>ER</b>	延長式肋板
<b>WF</b>	圓弧擴翼



表 6.2 接合細節與接合型式模型分析結果表

	$L_p$	$\alpha$	Triaxility			Rupture Index			CTOD (mm)		
			mm	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%	4.0%	1.1%	2.3%
<b>BUN</b>	0	1.00	1.05	1.46	1.55	0	7.7	12.7	0.005	0.014	0.017
<b>BA</b>	0	1.00	0.98	1.39	1.43	0	10.2	15.6	0.005	0.017	0.020
<b>NAH</b>	0	1.00	0.62	1.22	1.32	0	4.3	7.3	0.002	0.013	0.015
<b>BUN-F</b>	0	1.00	0.88	0.95	0.89	0	0	0	0.002	0.001	0.001
<b>RBS</b>	400	1.39	0.97	1.18	1.40	0	0	4.8	0.002	0.005	0.010
<b>ER</b>	235	1.15	1.02	1.32	1.39	0.2	7.8	8.7	0.007	0.013	0.015
<b>WF</b>	300	1.51	0.77	1.05	1.17	0	0.2	1.5	0.001	0.006	0.008

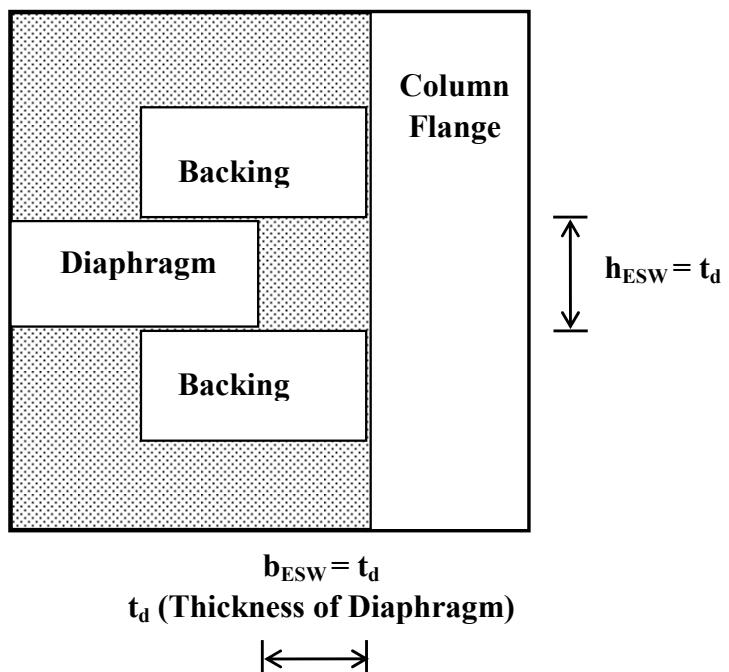


圖 2.1 電熱熔渣鋸接預留位置尺寸圖



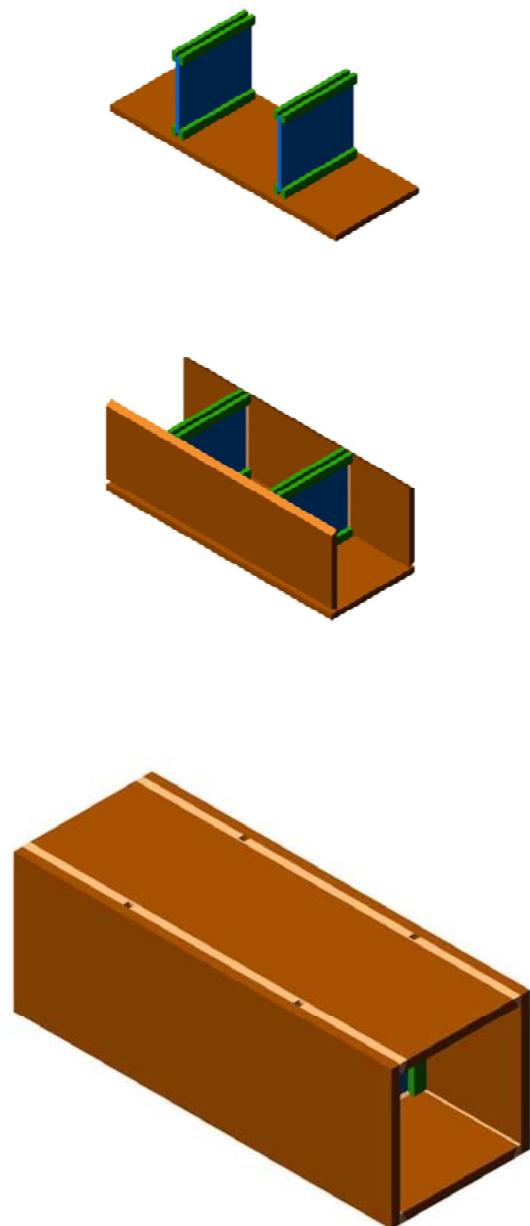
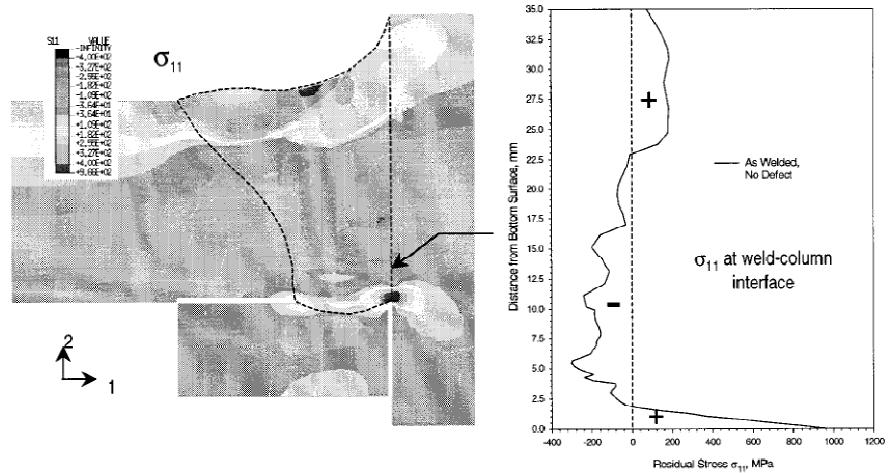
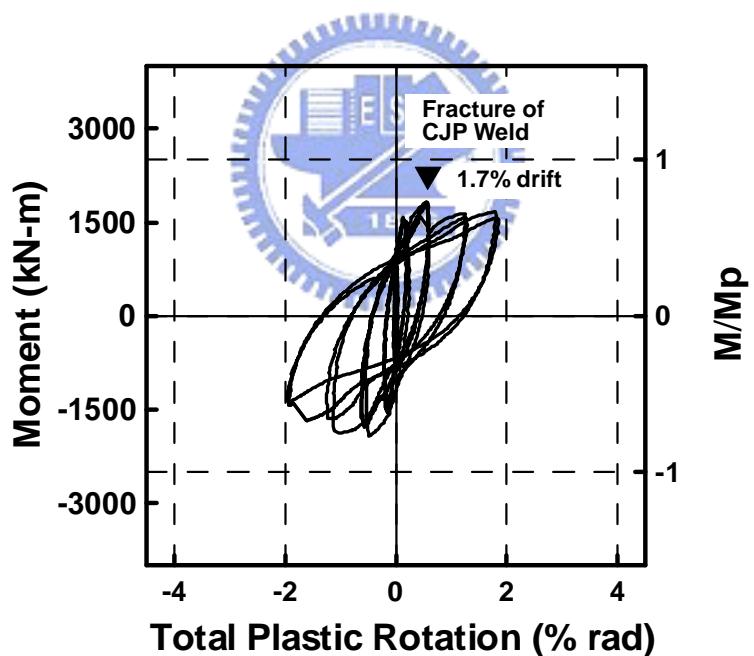


圖 2.2 組合箱型柱之製作流程



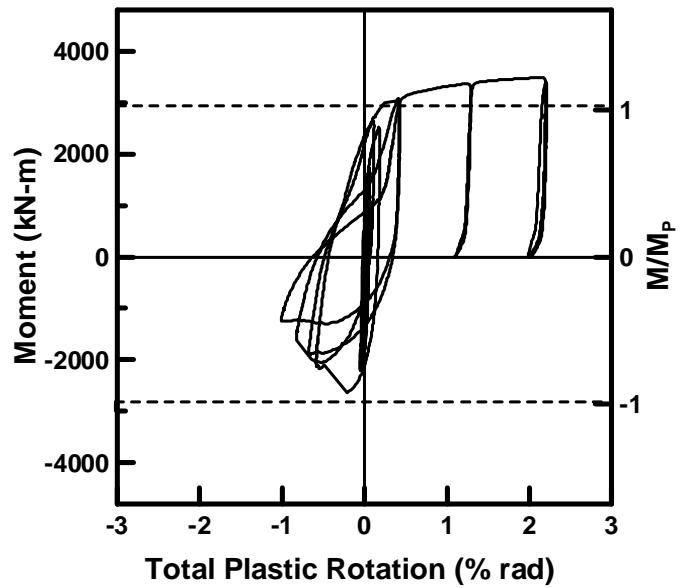
(Zhang and Dong 2000)

圖 2.3 梁翼全滲透鋸道之縱向殘留應力



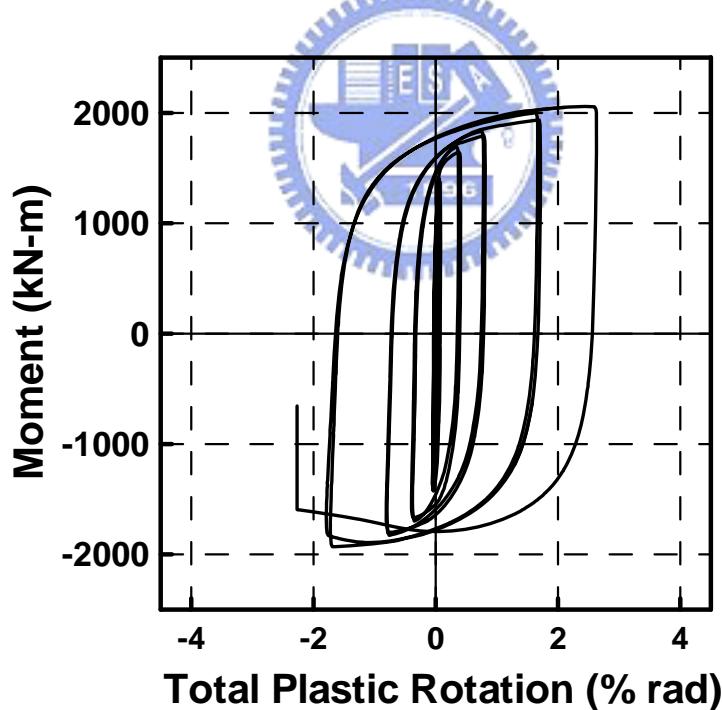
(Chen et al. 2004)

圖 2.4 試體 BR115CB 之彎矩與總塑性轉角關係圖



(張新梓 2004)

圖 2.5 試體 SR-SP1R 之彎矩與總塑性轉角關係圖



(林潔祥 2005)

圖 2.6 試體 CT 之彎矩與總塑性轉角關係圖

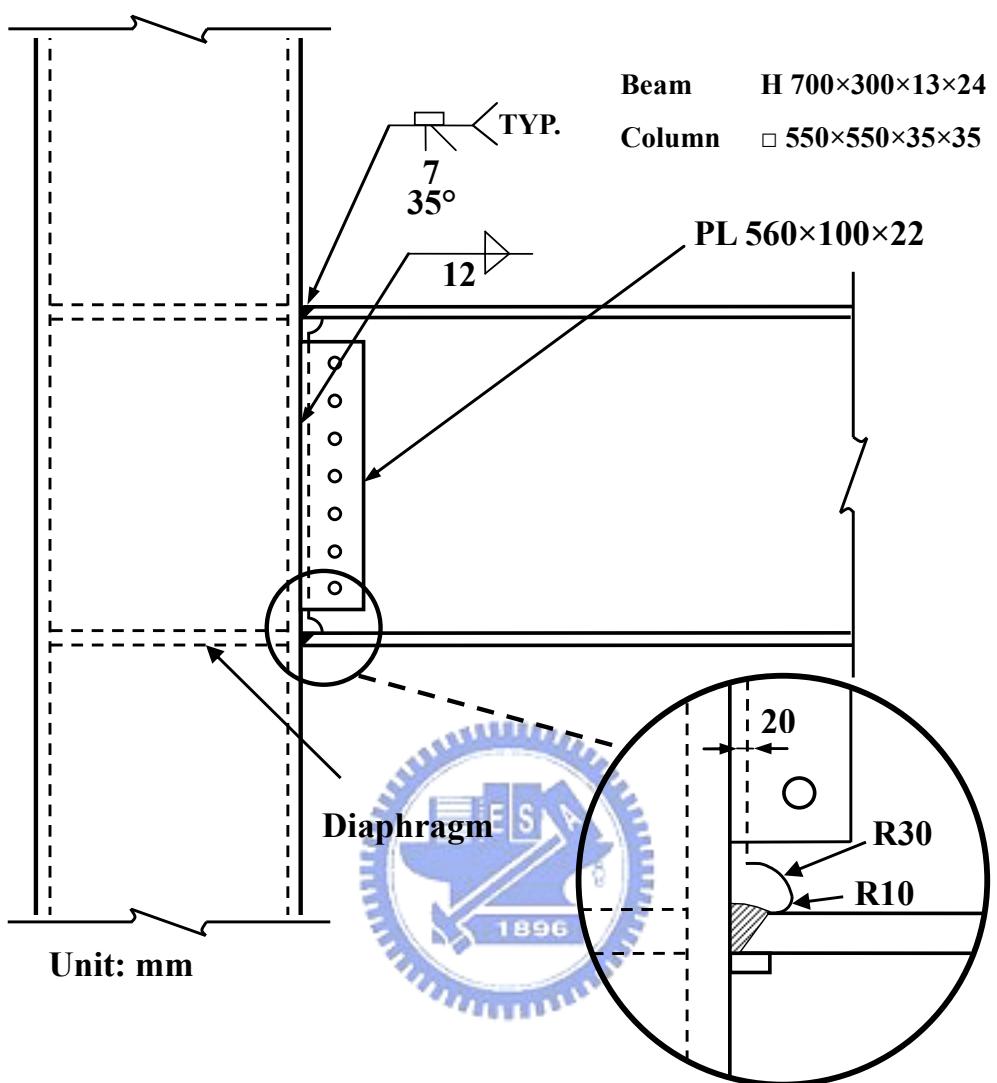
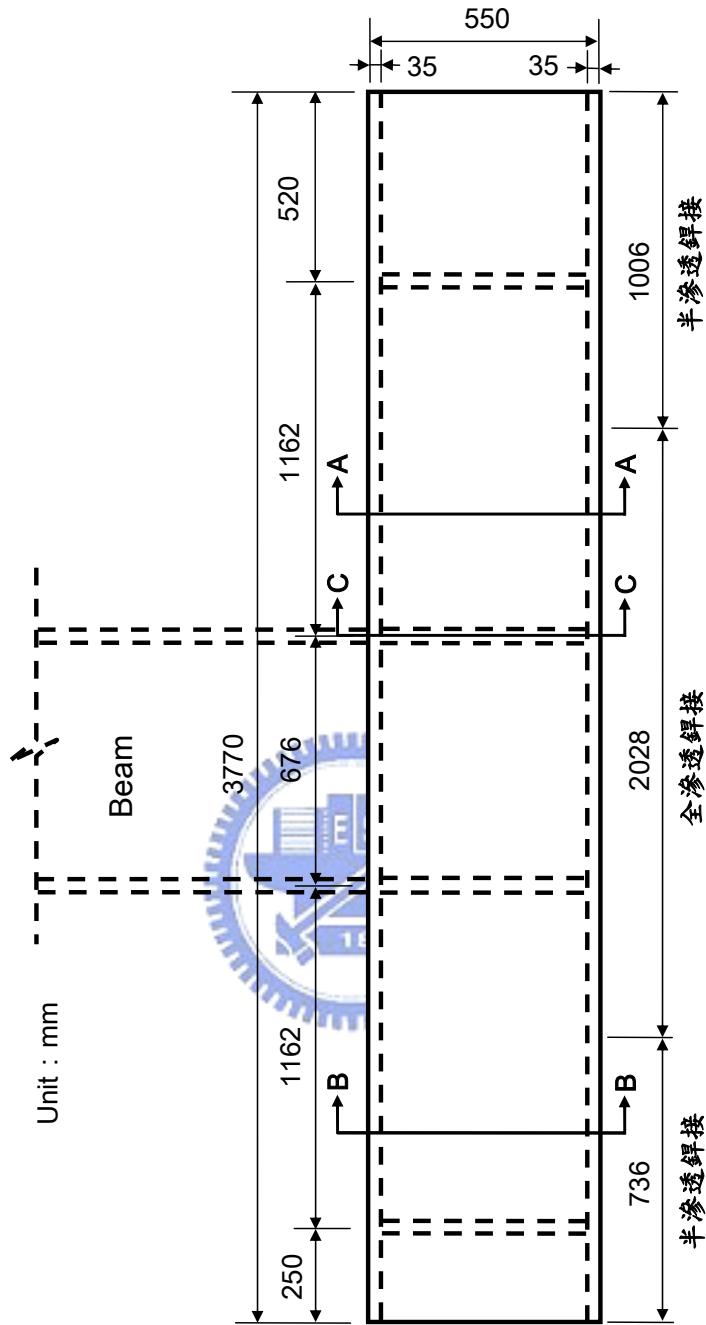
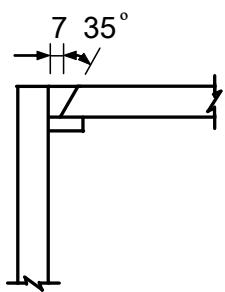
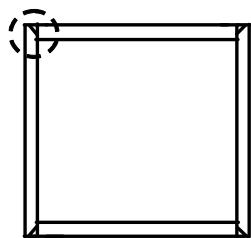
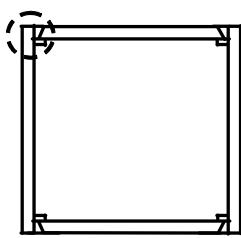


圖 3.1 試體 BUN 梁柱接合細節

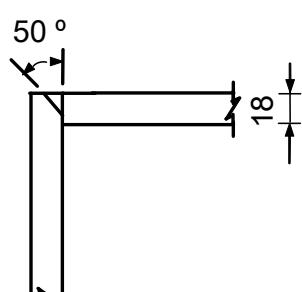


(林群洲 2002)

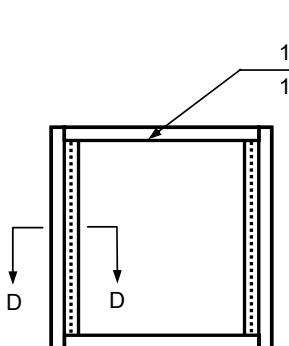
圖 3.2 試體 BUN 之柱接合細部



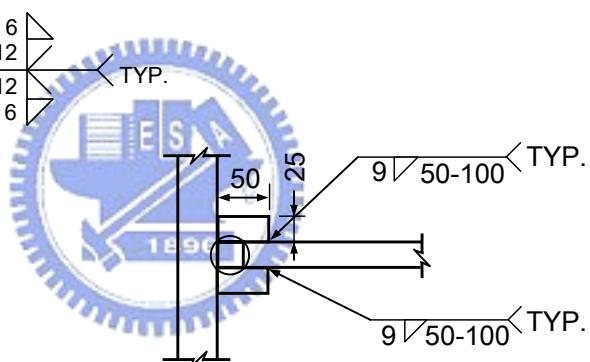
Section A-A



Section B-B



Section C-C



Section D-D

(林群洲 2002)

圖 3.2 試體 BUN 之柱接合細部 (續)

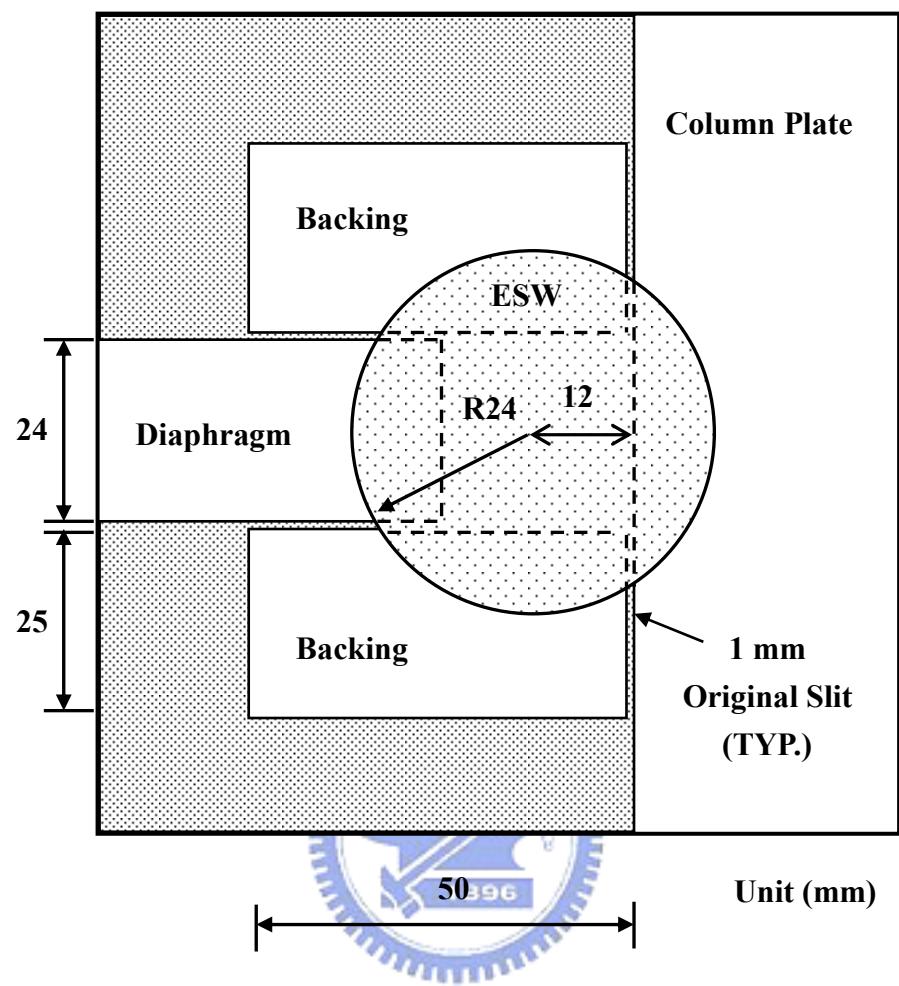


圖 3.3 電熱熔渣鍛接之接合細節

Pin Support



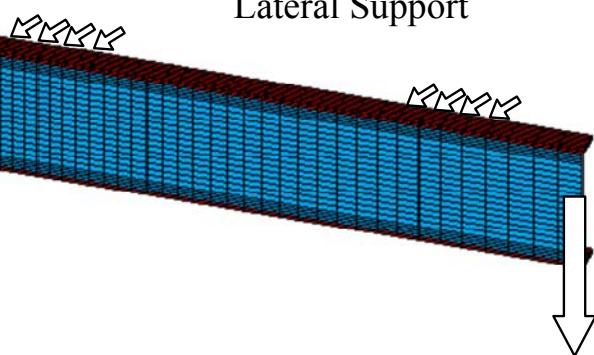
Column

$\square 550 \times 550 \times 35 \times 35 \text{ mm}$

Beam

H  $700 \times 300 \times 13 \times 24 \text{ mm}$

Lateral Support



Roller Support

Beam Tip Displacement

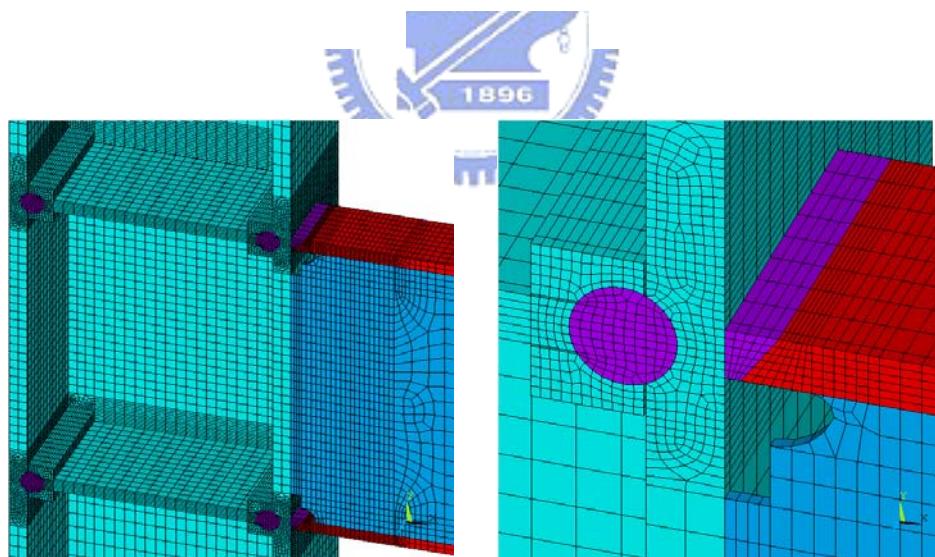
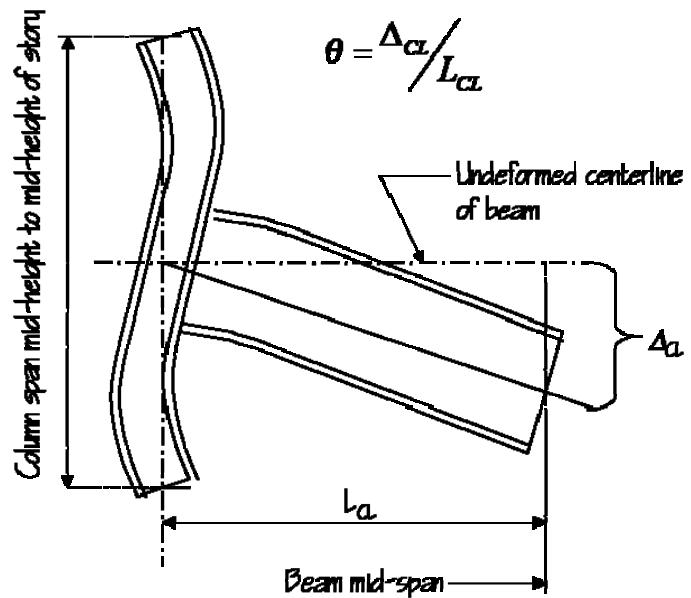


圖 3.4 模型 BUN 網格與邊界條件示意圖



(FEMA 350)

圖 3.5 梁柱接頭子結構層間變位角定義

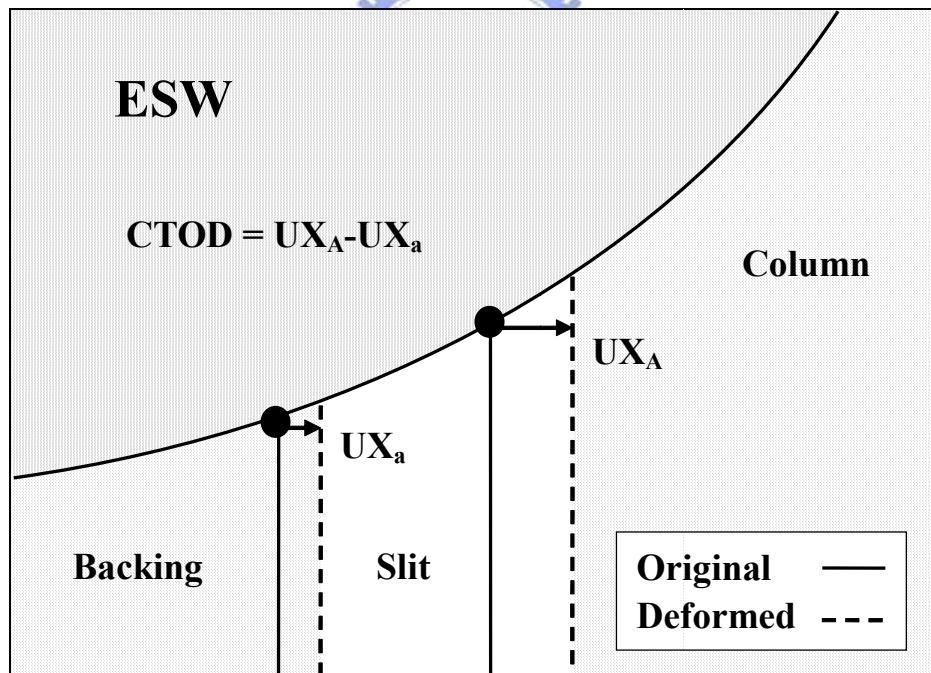


圖 3.6 CTOD 直接量測法

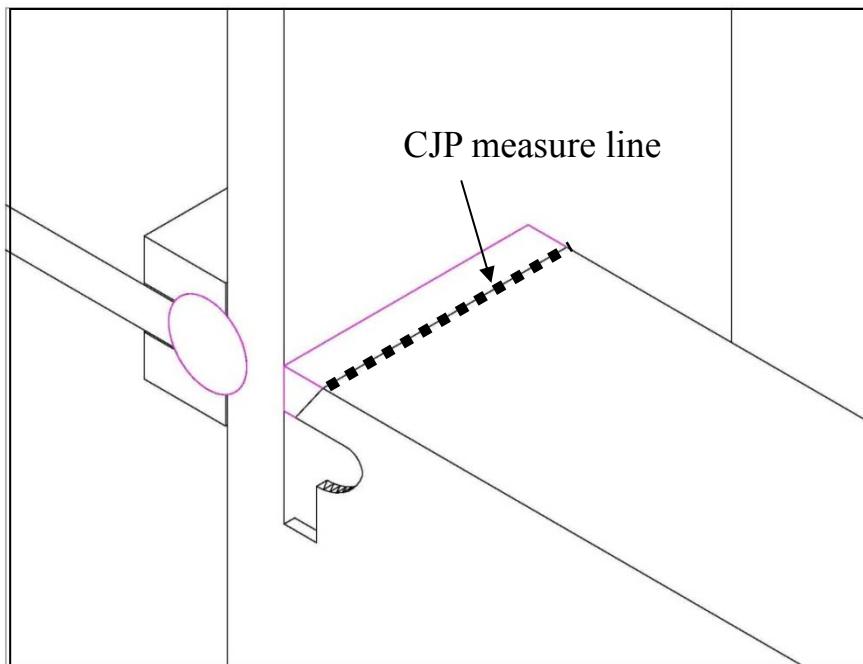


圖 3.7 梁翼全滲透鋸道之指標量測線

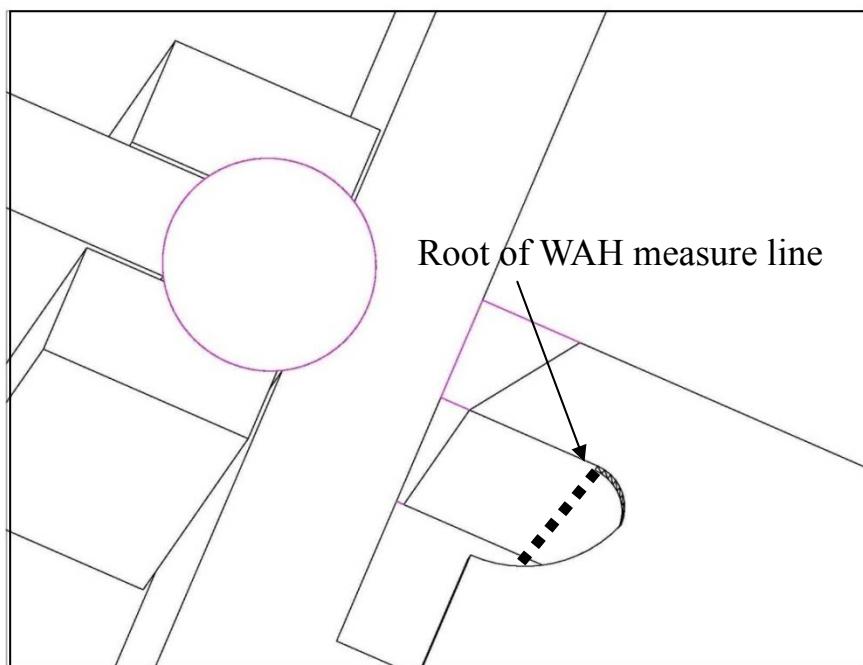


圖 3.8 扇形開口根部之指標量測線

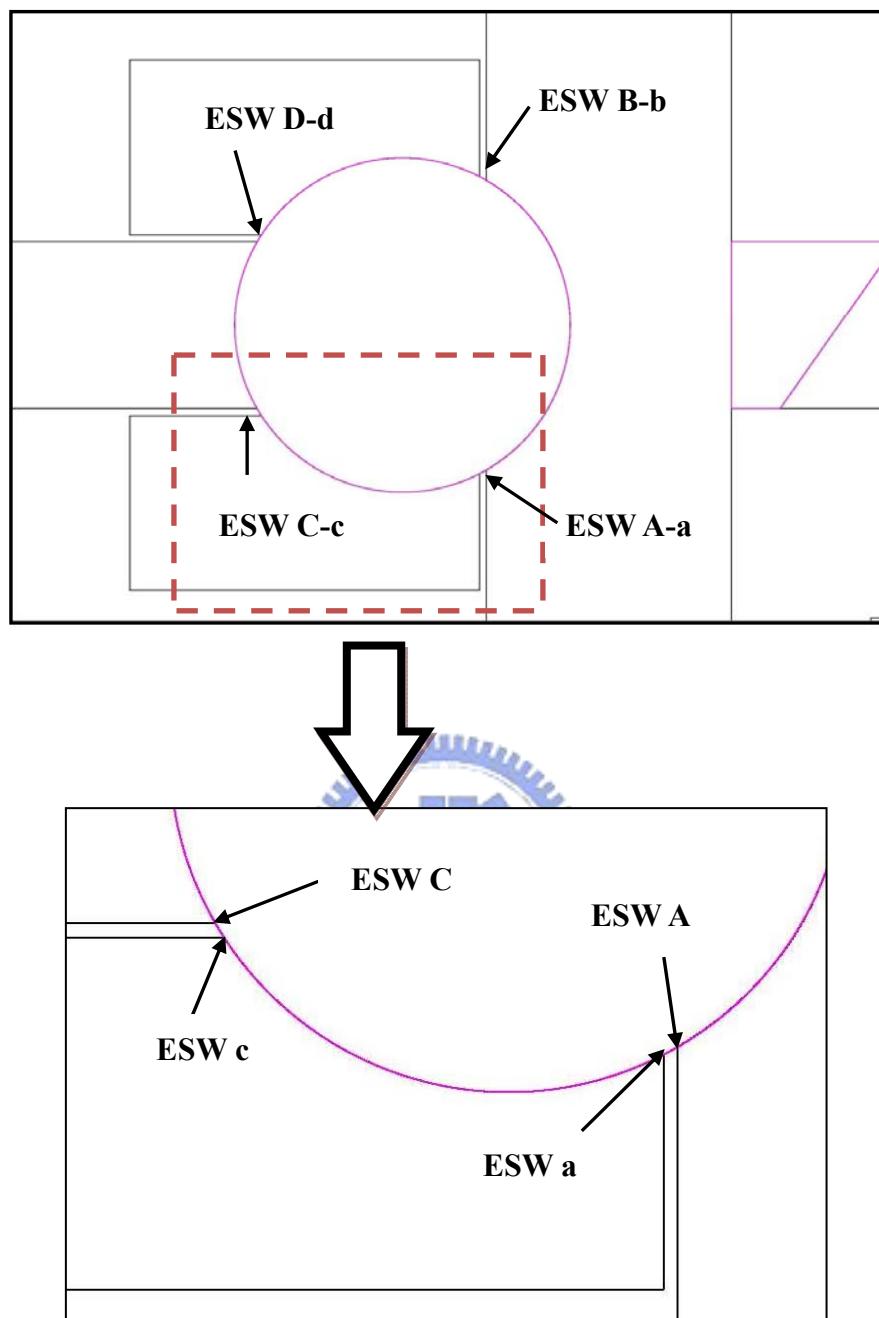


圖 3.9 電熱熔渣鋸指標接量測線

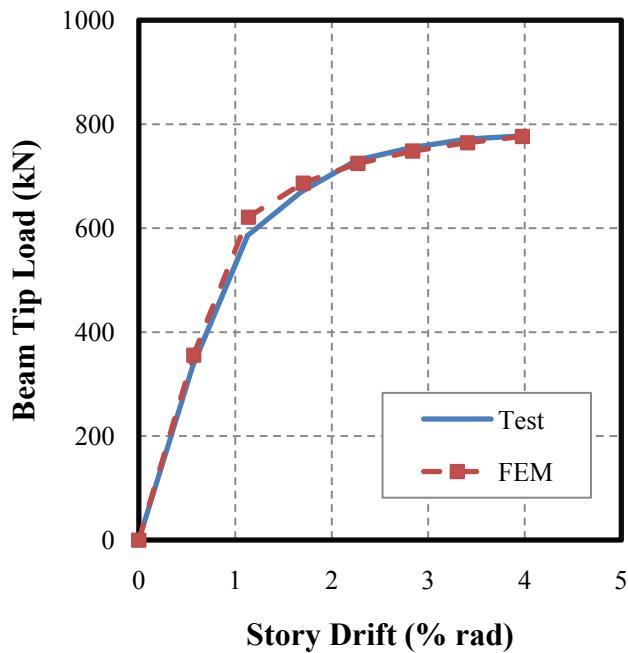


圖 3.10 模型 BUN 之梁端載重-位移包絡線

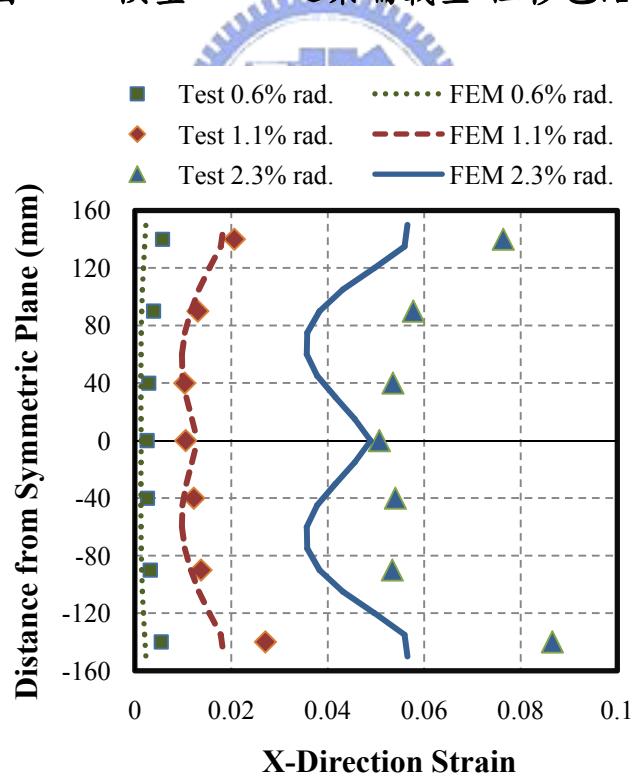


圖 3.11 模型 BUN 之梁翼板縱向應變

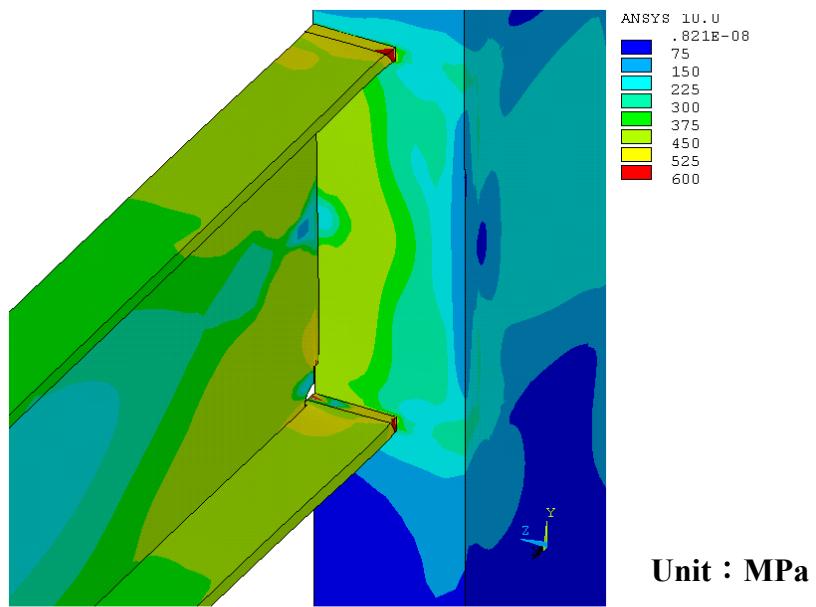


圖 3.12 模型 BUN 之 Von Mises 應力圖 (4.0% rad)

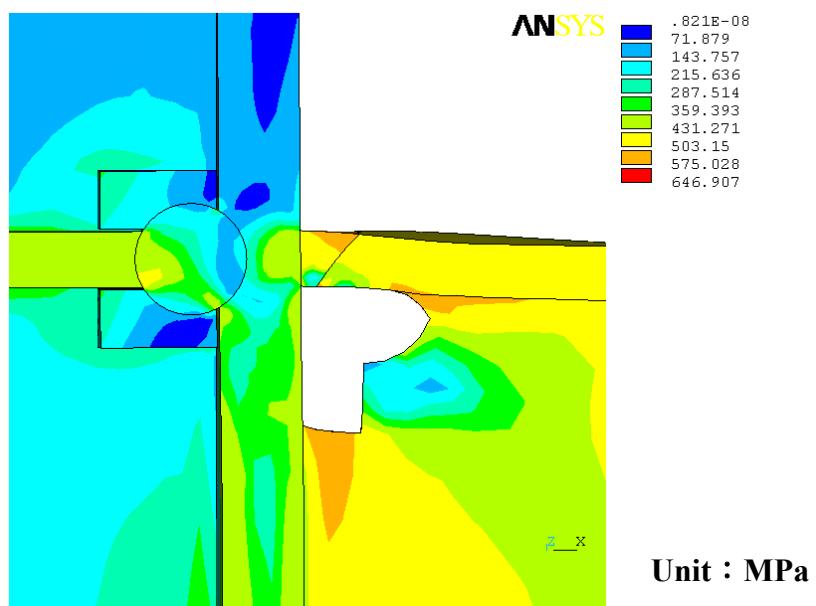


圖 3.13 模型 BUN 電熱熔渣處之 Von Mises 應力圖(4.0% rad)

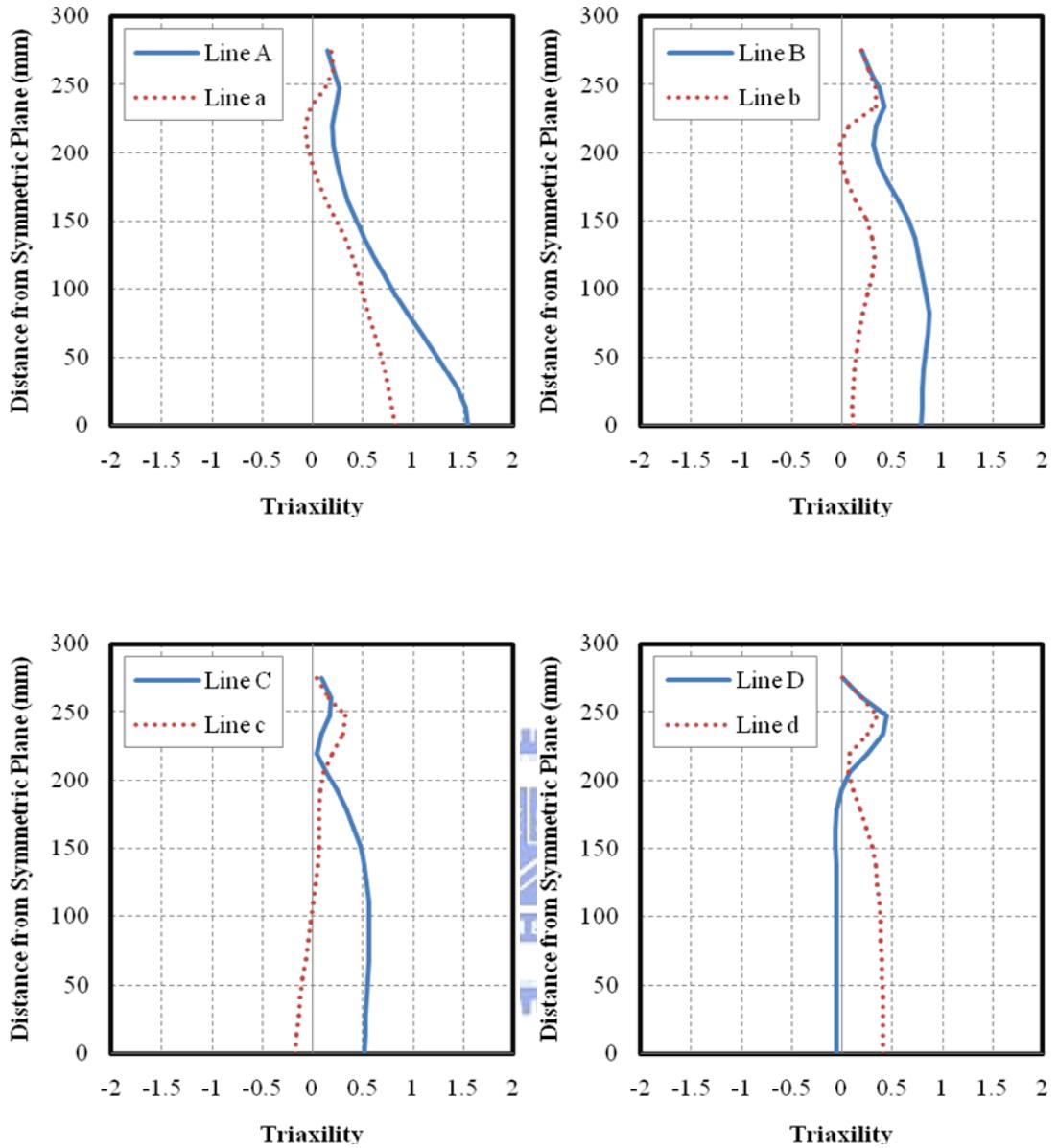


圖 3.14 模型 BUN 電熱熔渣鍛接之應力三軸度 (4.0% rad)

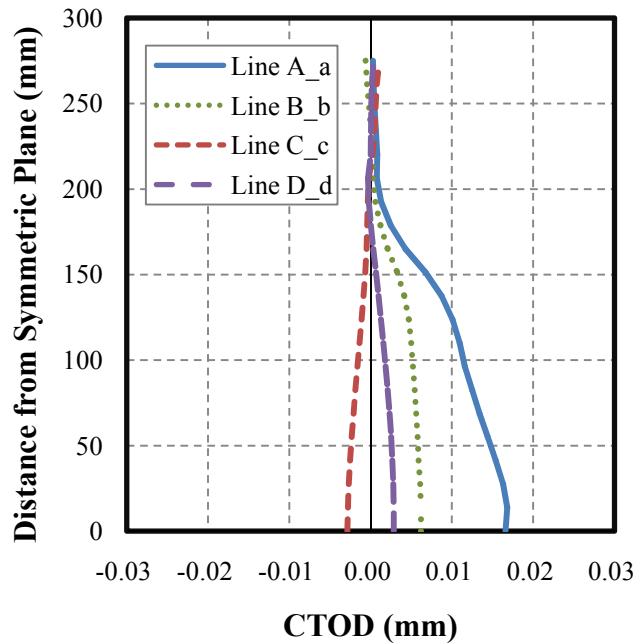


圖 3.15 模型 BUN 電熱熔渣鋸接之 CTOD 值(4.0% rad)

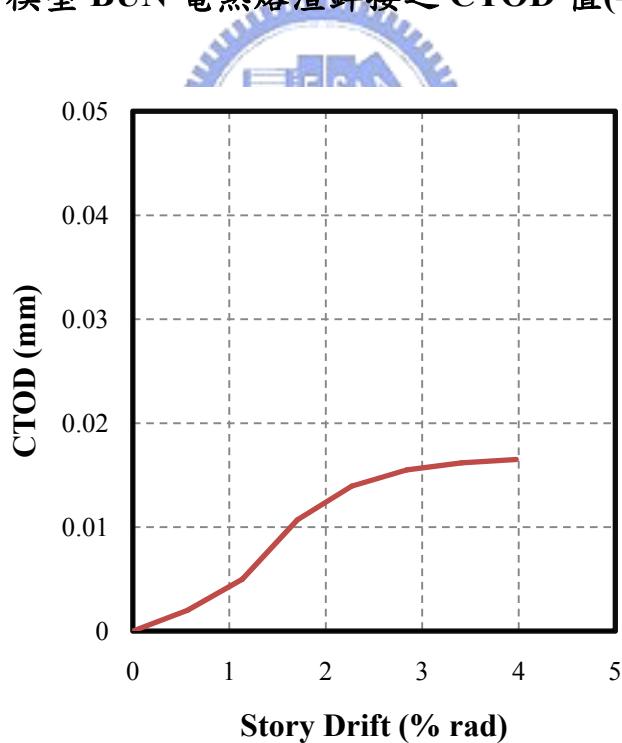


圖 3.16 模型 BUN 於 A\_a 間隙之 CTOD 歷程圖

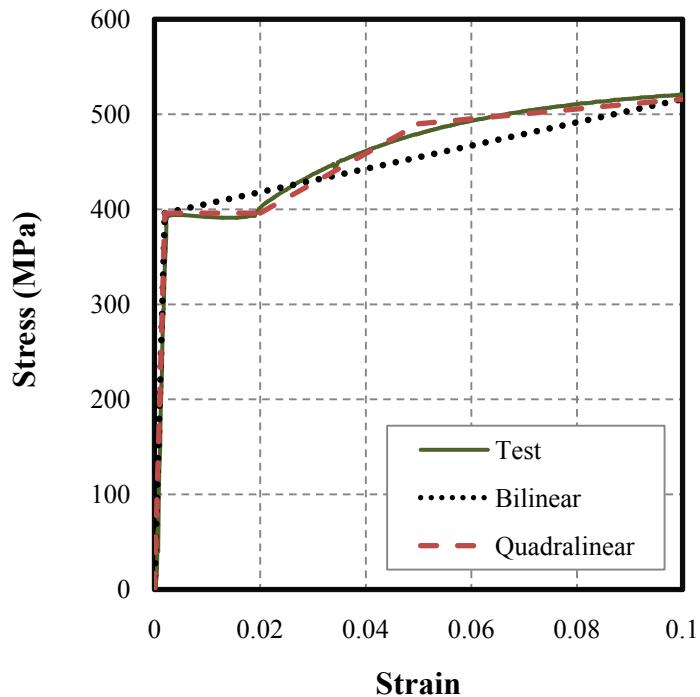


圖 4.1 材料性質模型之梁翼板應力-應變曲線

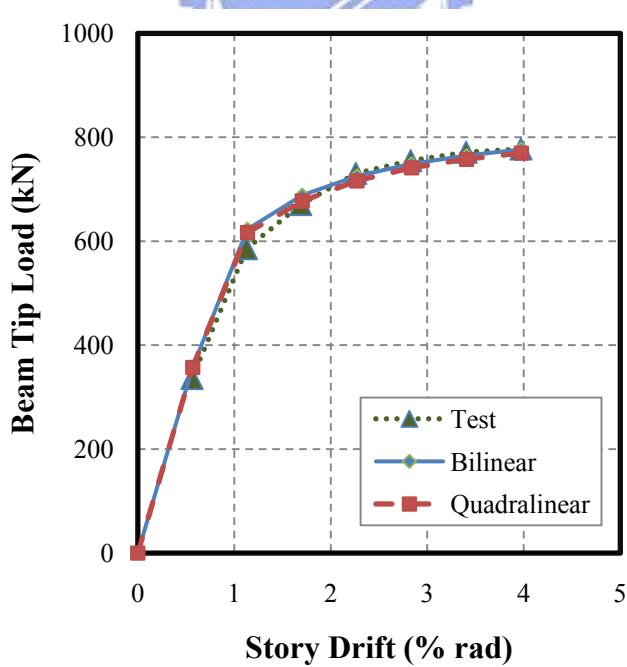


圖 4.2 材料性質模型之梁端載重-位移包絡線

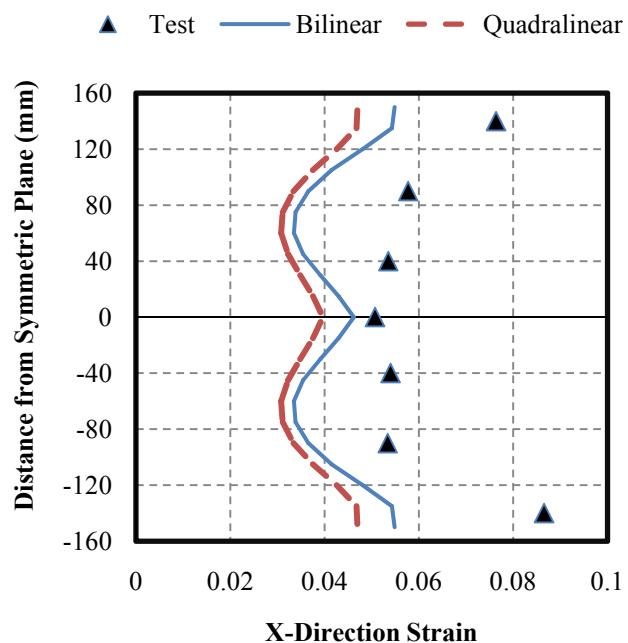


圖 4.3 材料性質模型之梁翼板縱向應變 (2.3% rad)

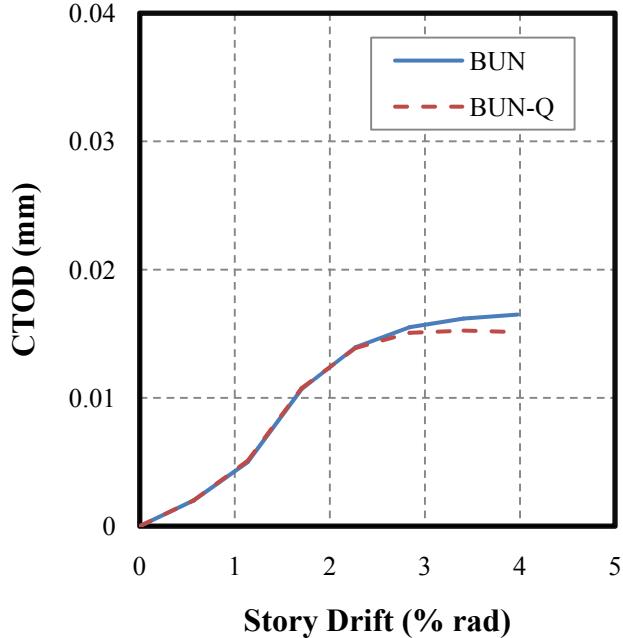


圖 4.4 材料性質模型之 CTOD 歷程圖

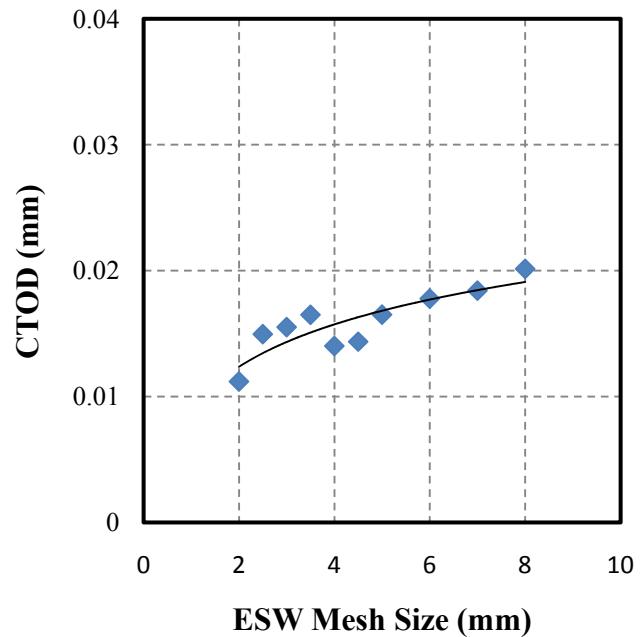


圖 4.5 模型局部元素尺寸與 CTOD 關係圖

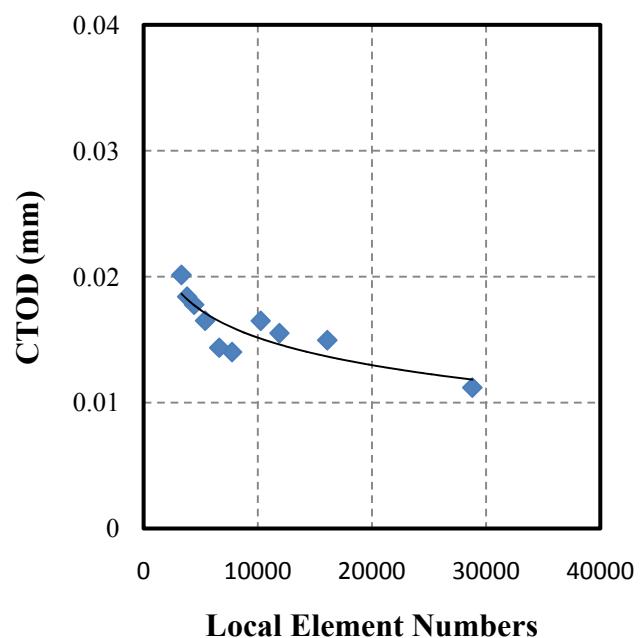


圖 4.6 模型局部元素數量與 CTOD 關係圖

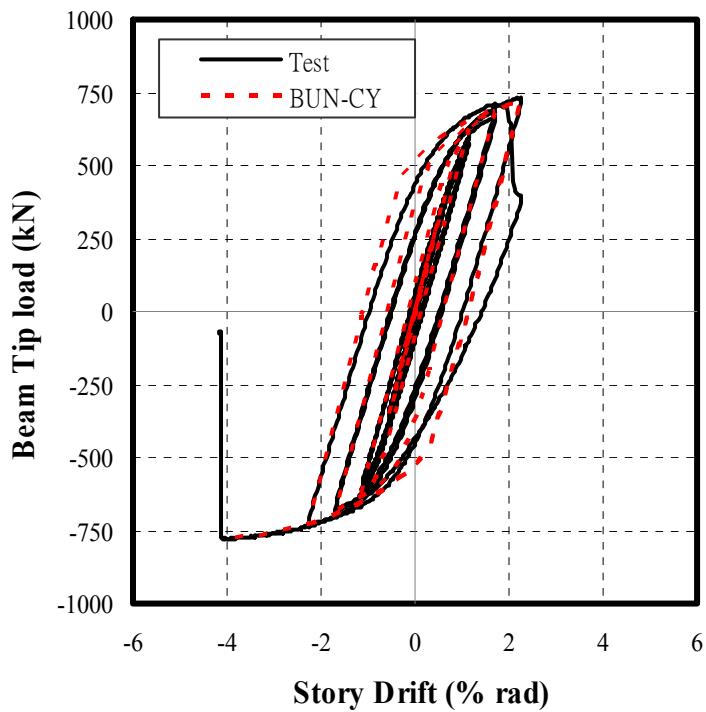


圖 4.7 模型 BUN-CY 與試體 BUN 之遲滯迴圈

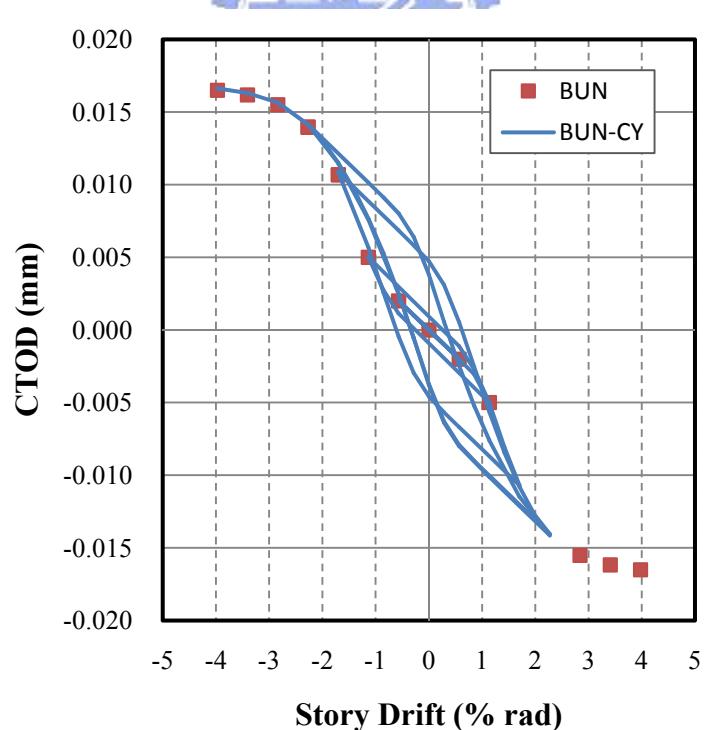


圖 4.8 加載模式影響之 CTOD 歷程圖

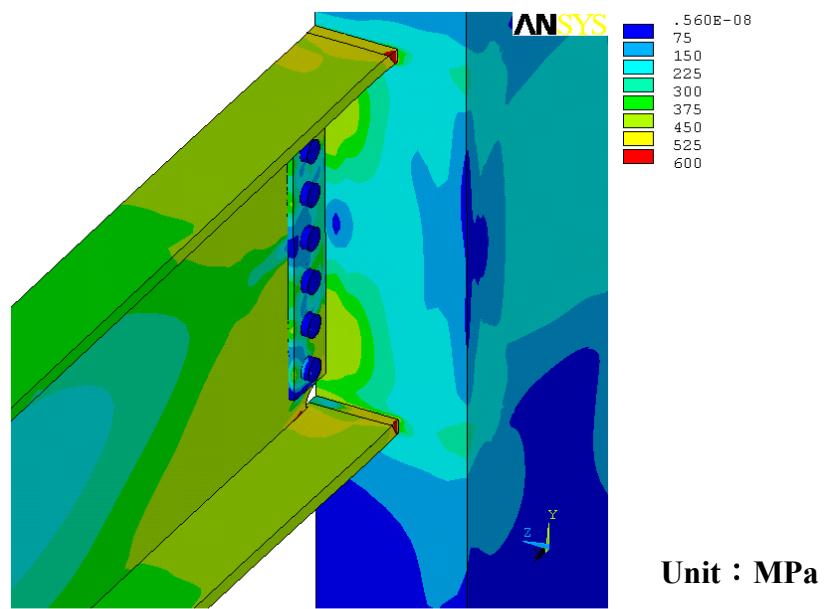


圖 4.9 模型 BUN-S 之 Von Mises 應力圖 (4.0% rad)

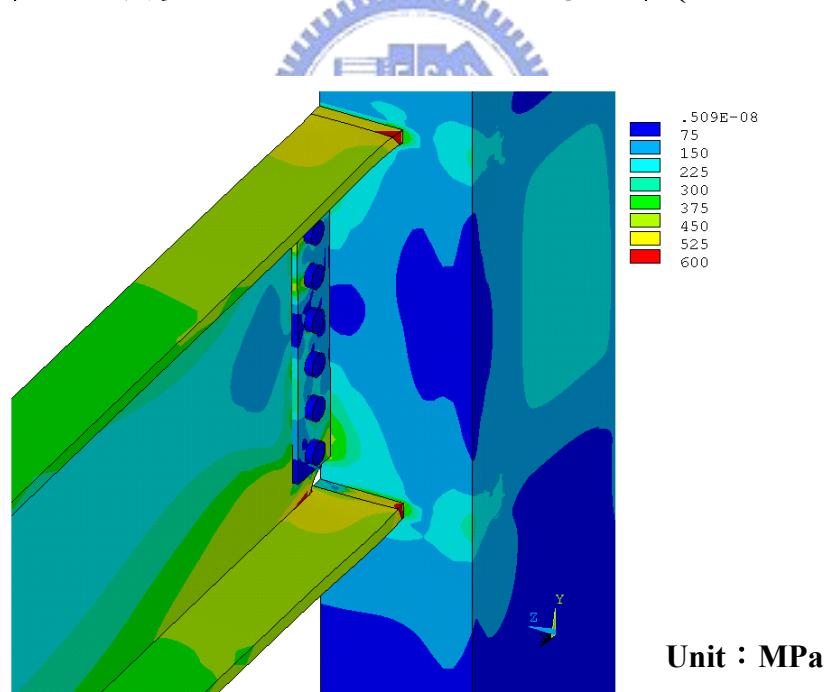


圖 4.10 模型 BUN-B 之 Von Mises 應力圖 (4.0% rad)

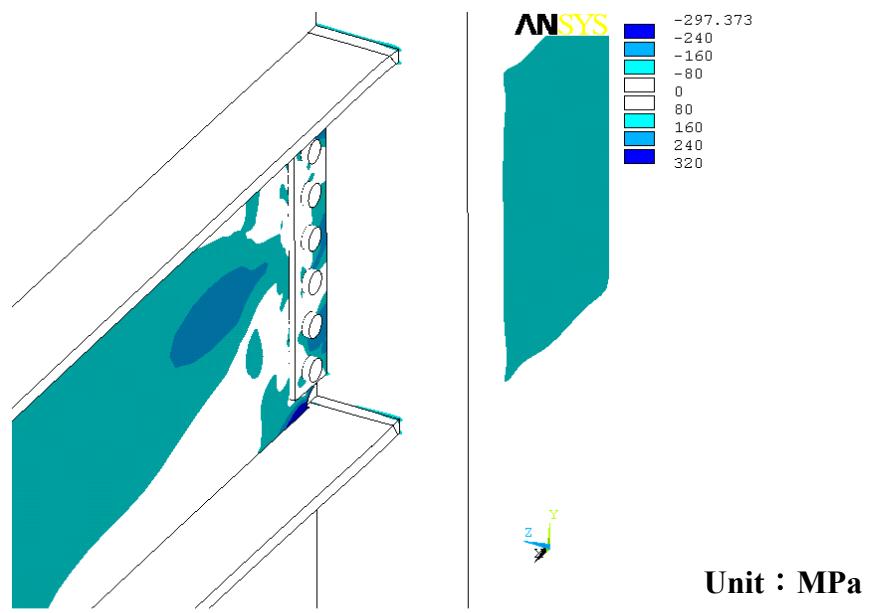


圖 4.11 模型 BUN-B 之 X-Y 剪應力圖 (4.0% rad)

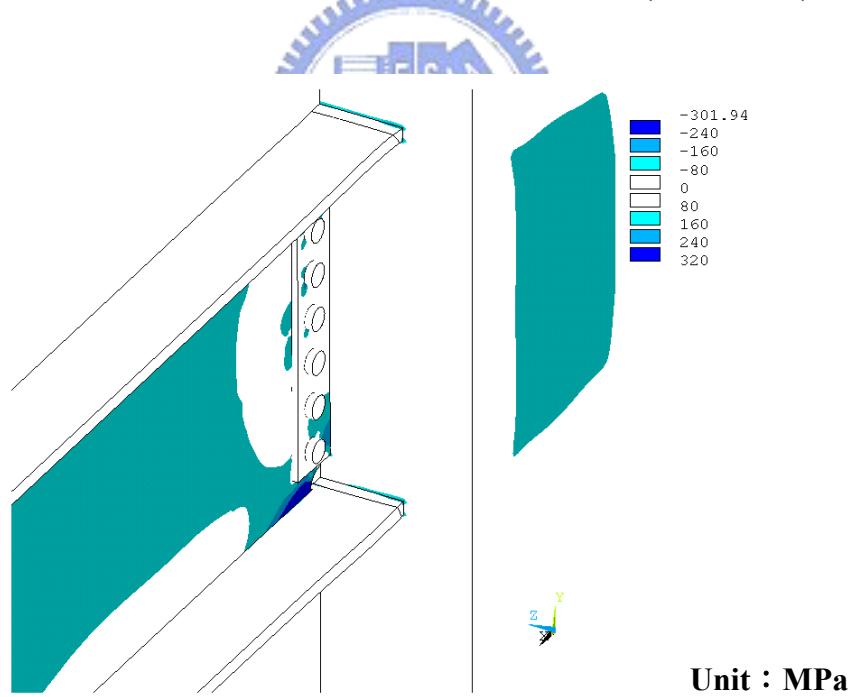


圖 4.12 模型 BUN-B 之 X-Y 剪應力圖 (4.0% rad)

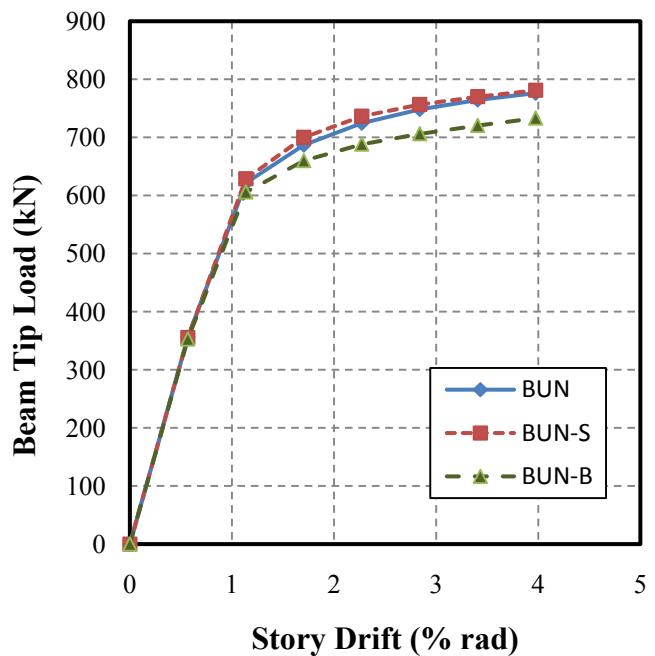


圖 4.13 剪力板模型之梁端載重-位移包絡線

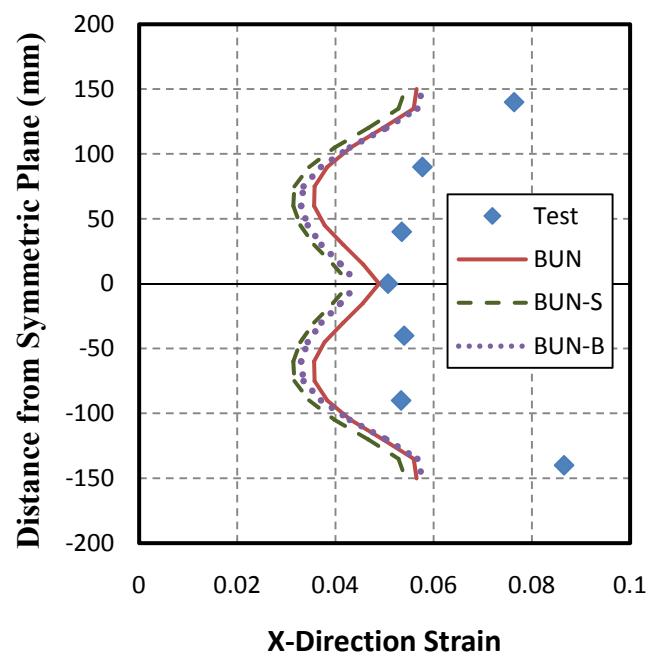


圖 4.14 剪力板模型之縱向應變圖 (2.3% rad)

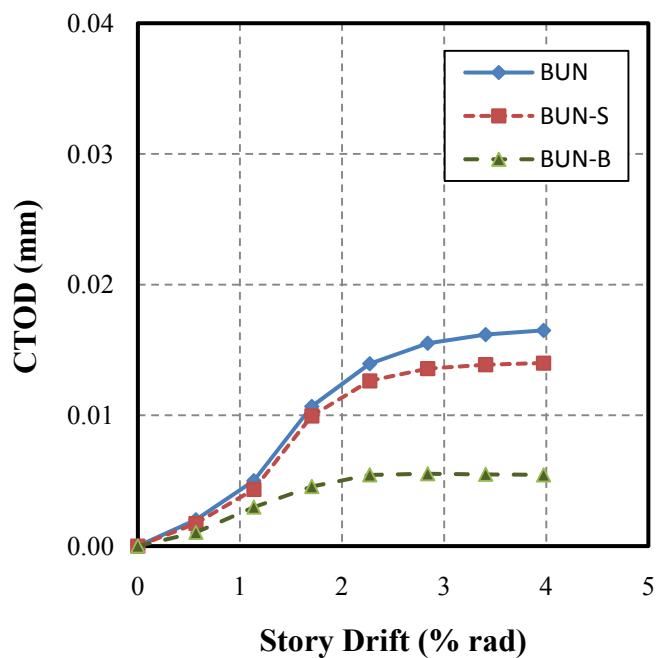
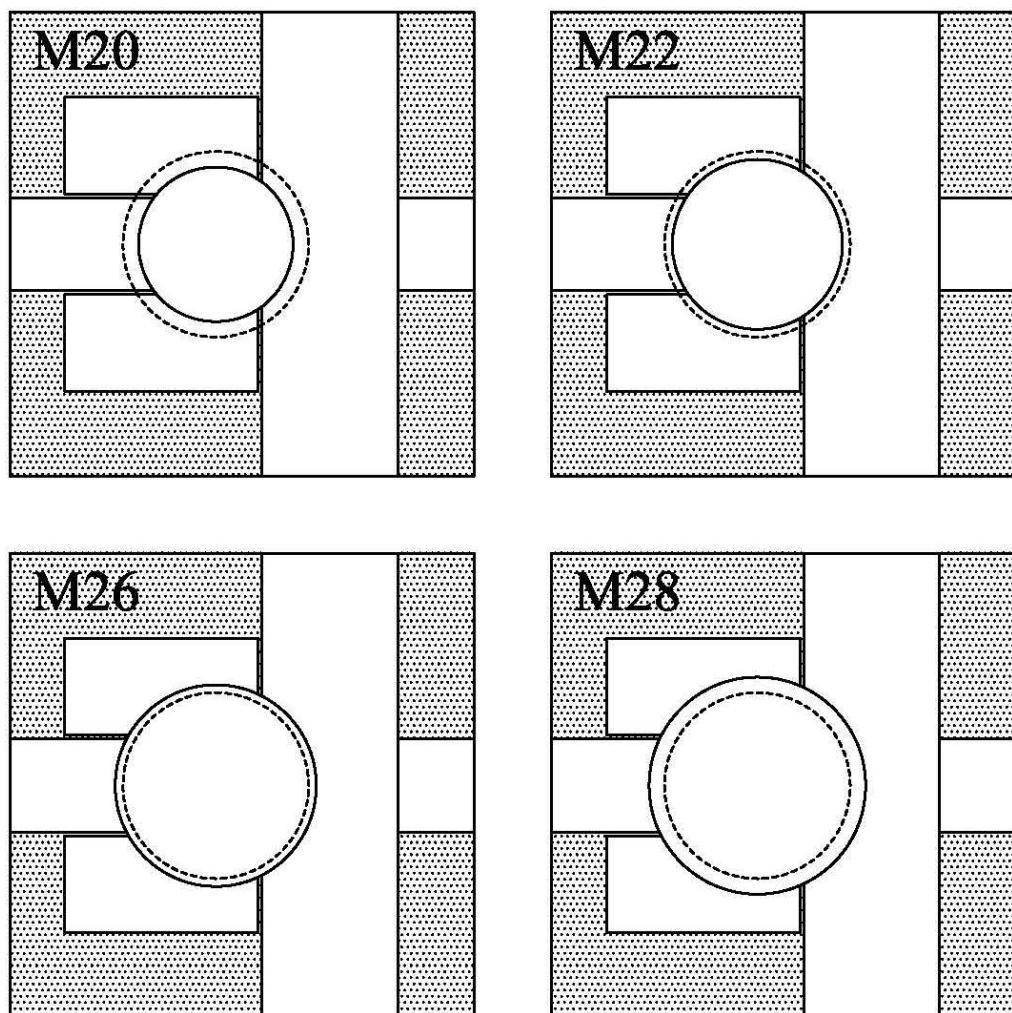


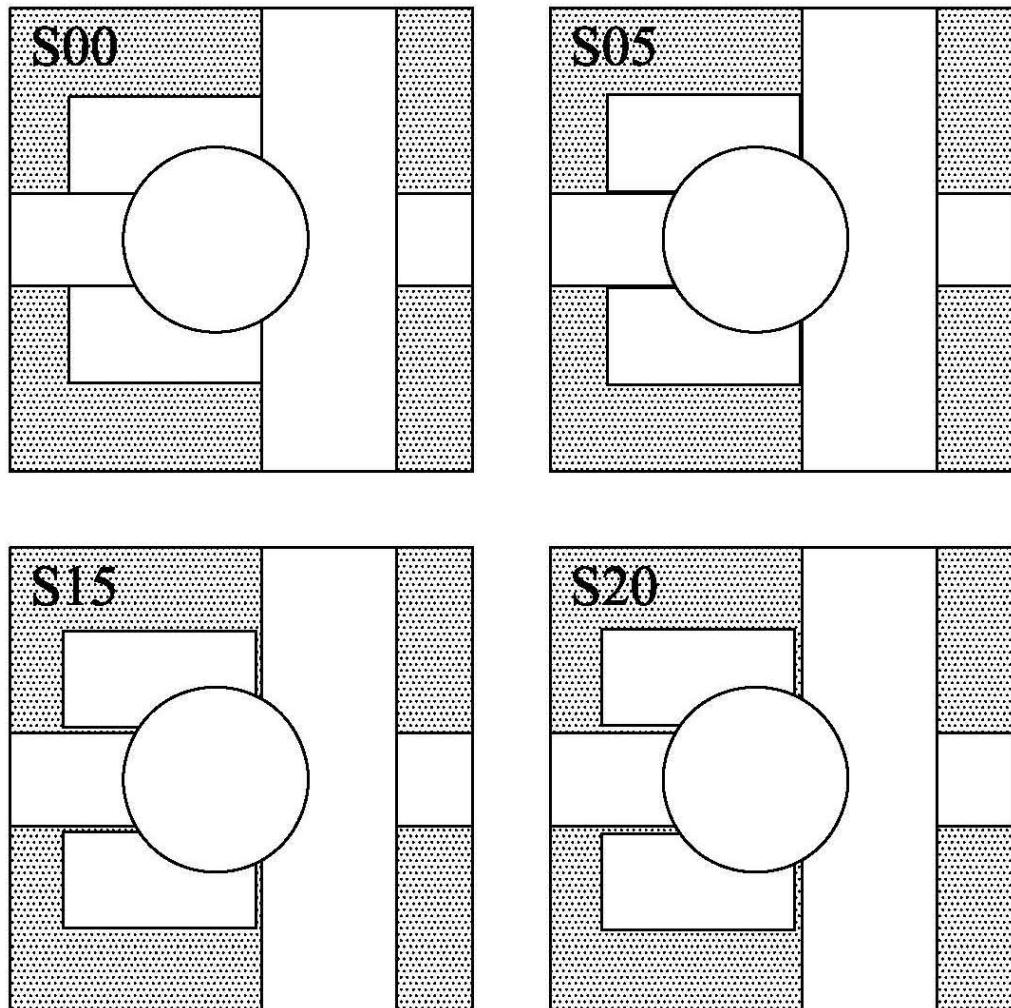
圖 4.15 剪力板模型之 CTOD 歷程圖





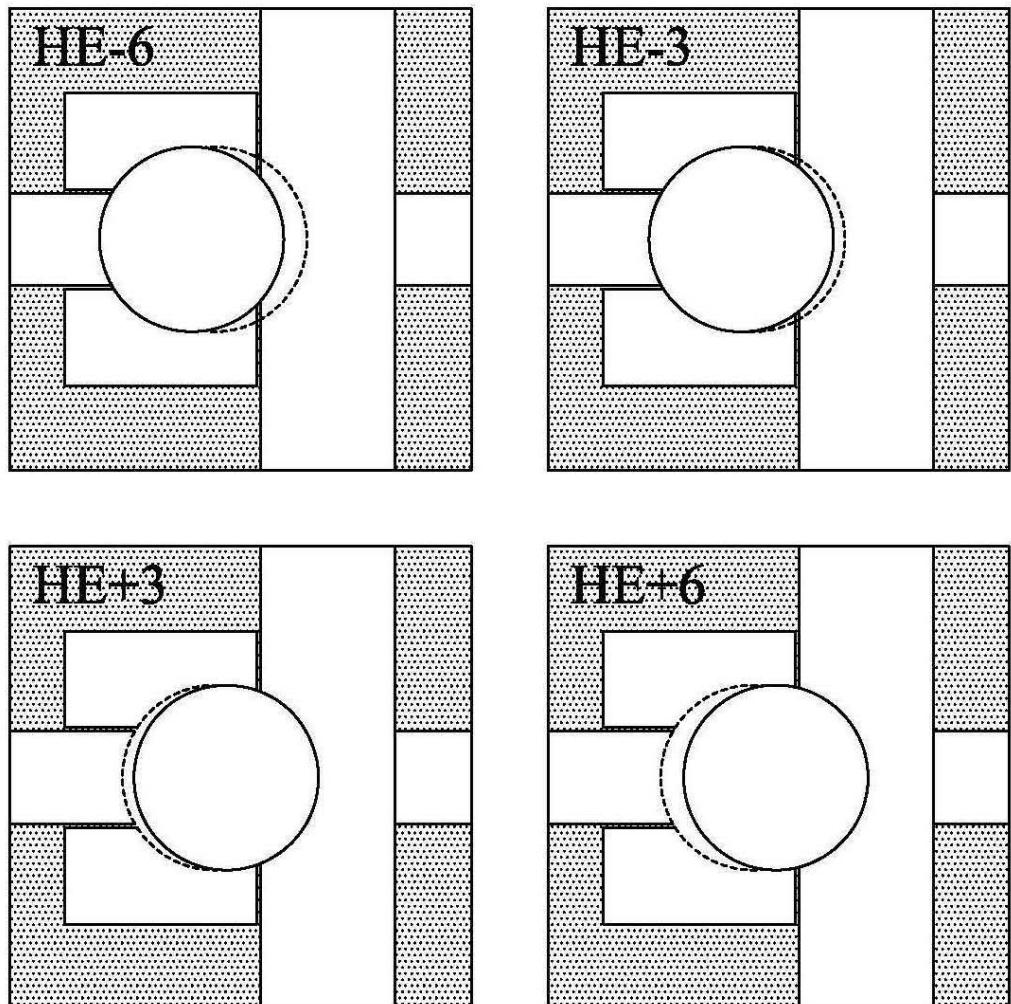
備註：虛線為標準組模型 M24

圖 5.1 熔入半徑系列模型示意圖



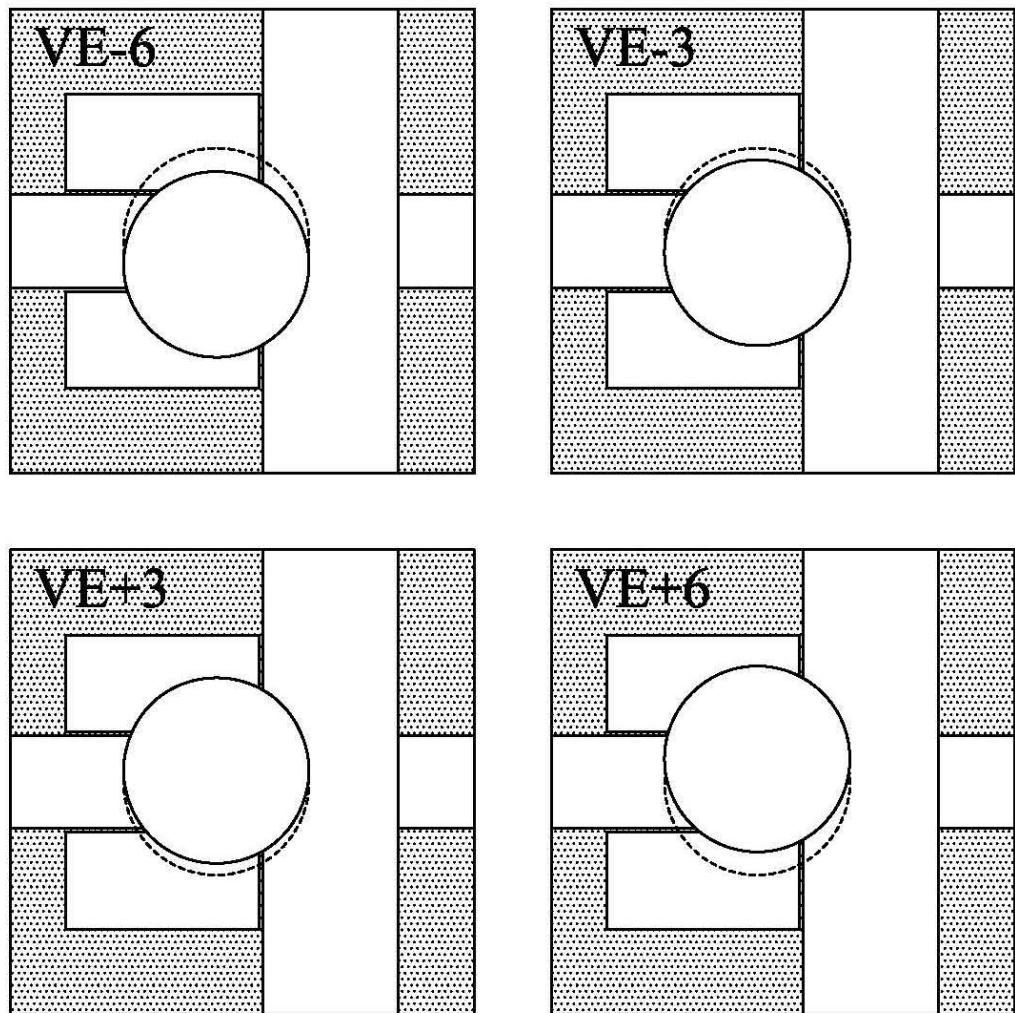
備註：虛線為標準組模型 S10

圖 5.2 側墊板間隙系列模型示意圖



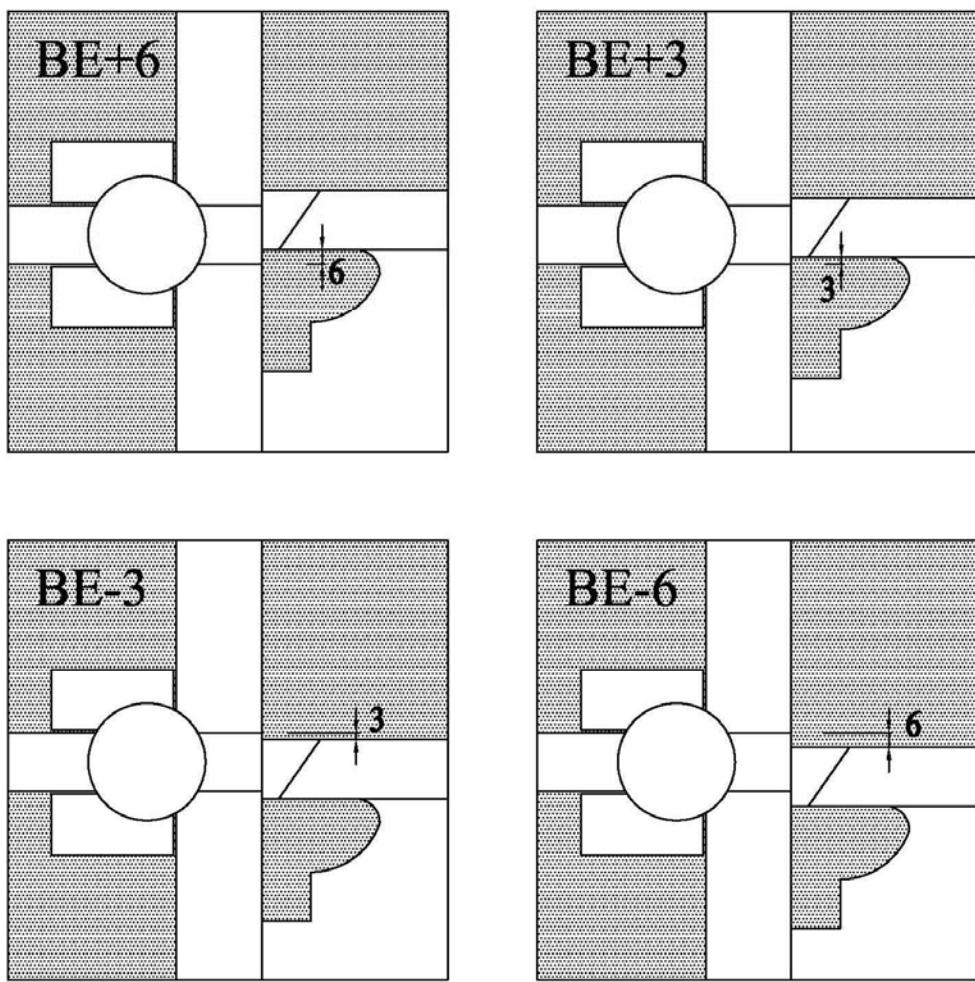
備註：虛線為標準組模型 HE

圖 5.3 水平偏心系列模型示意圖



備註：虛線為標準組模型 VE

圖 5.4 垂直偏心系列模型示意圖



備註：梁翼板未偏心位置標示於柱翼板上

圖 5.5 梁偏心系列模型示意圖

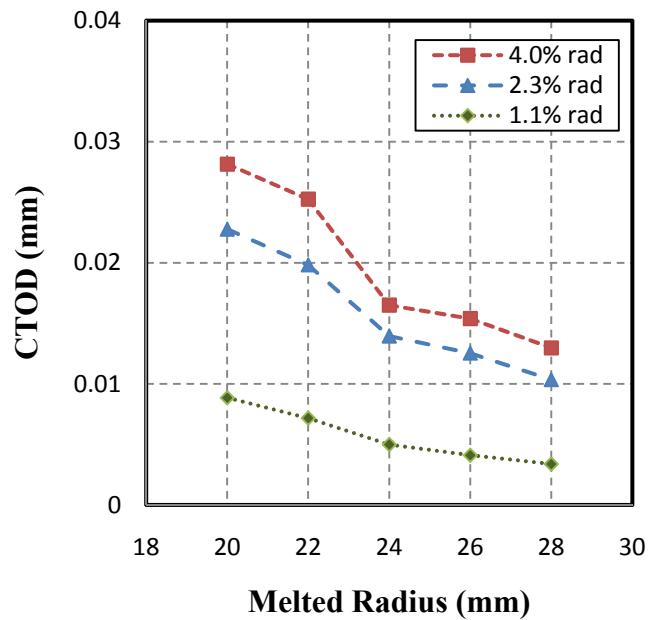


圖 5.6 熔入半徑系列之 CTOD 比較圖

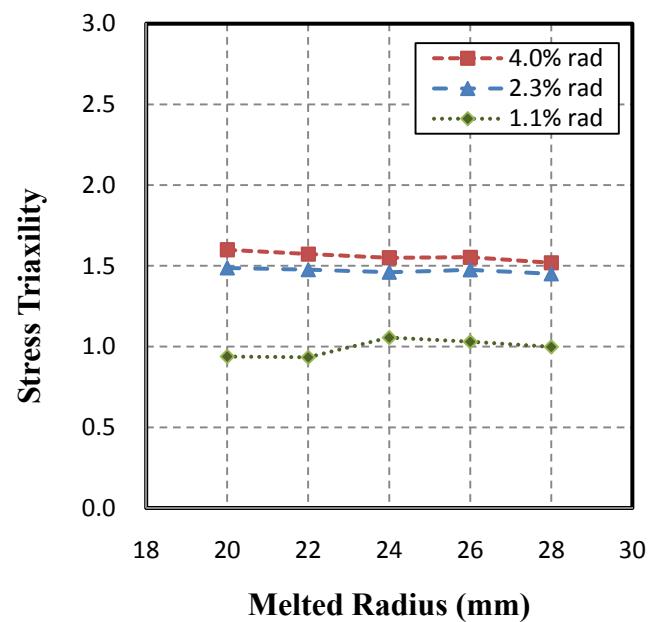


圖 5.7 熔入半徑系列之應力三軸度比較圖

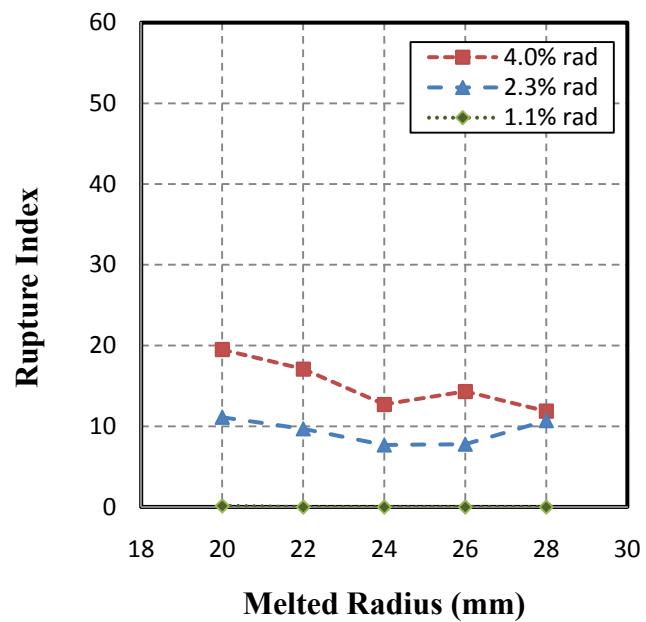


圖 5.8 熔入半徑系列之破裂指數比較圖

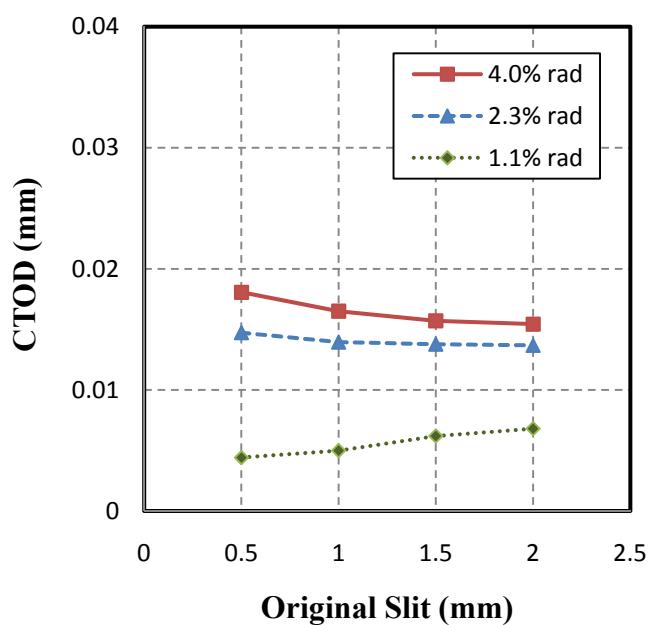


圖 5.9 側墊板間隙系列之 CTOD 比較圖

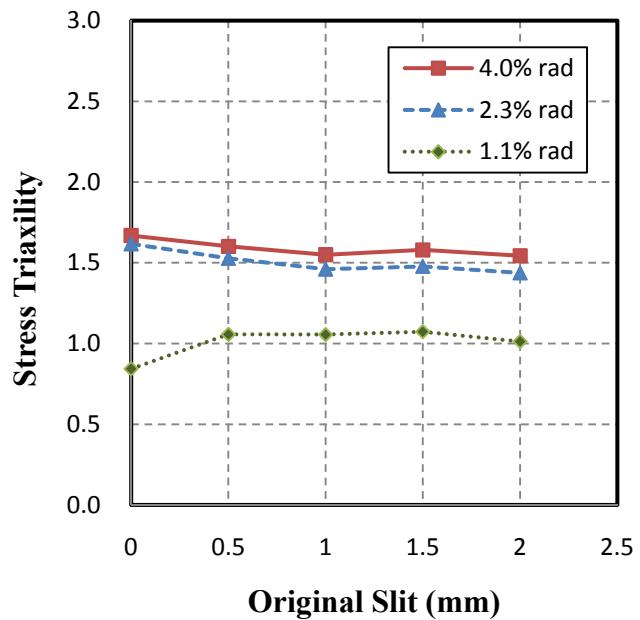


圖 5.10 側墊板間隙系列之應力三軸度比較圖

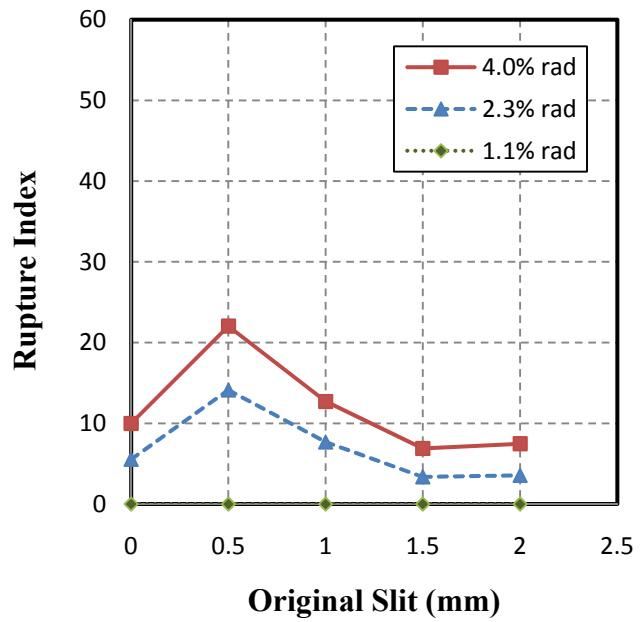


圖 5.11 側墊板間隙系列之破裂指數比較圖

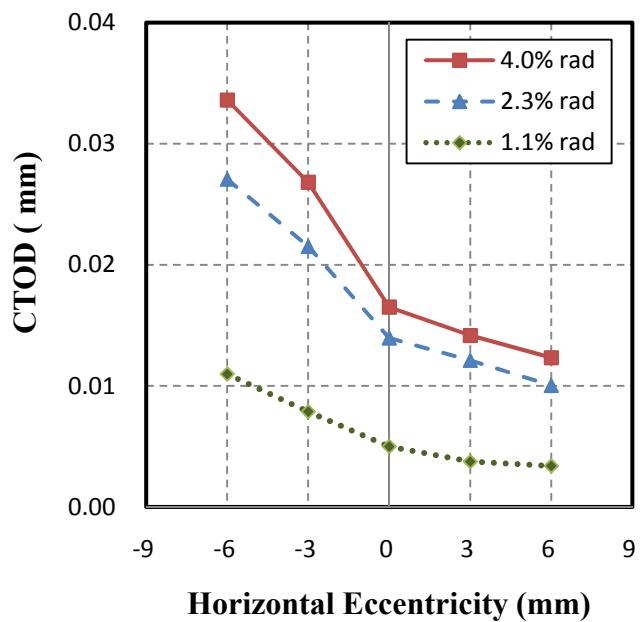


圖 5.12 水平偏心系列 CTOD 比較圖

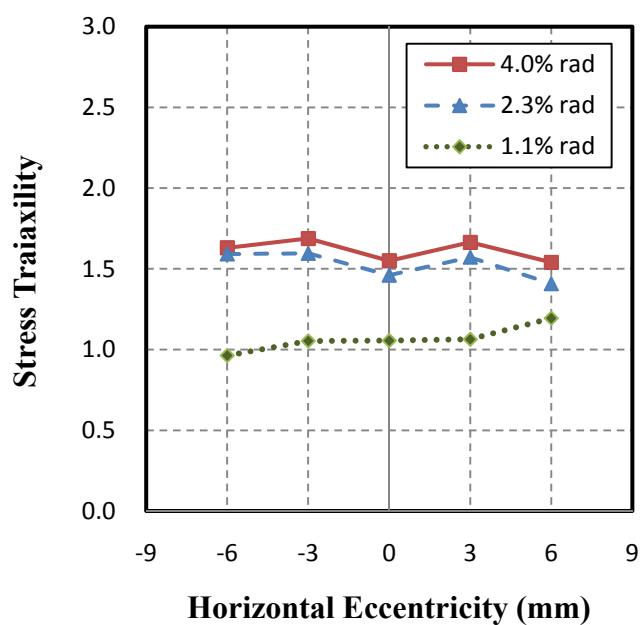


圖 5.13 水平偏心系列應力三軸度比較圖

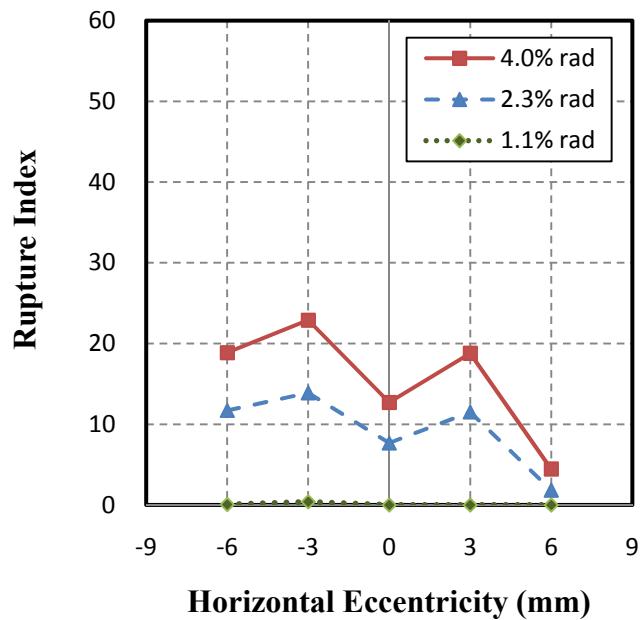


圖 5.14 水平偏心系列破裂指數比較圖

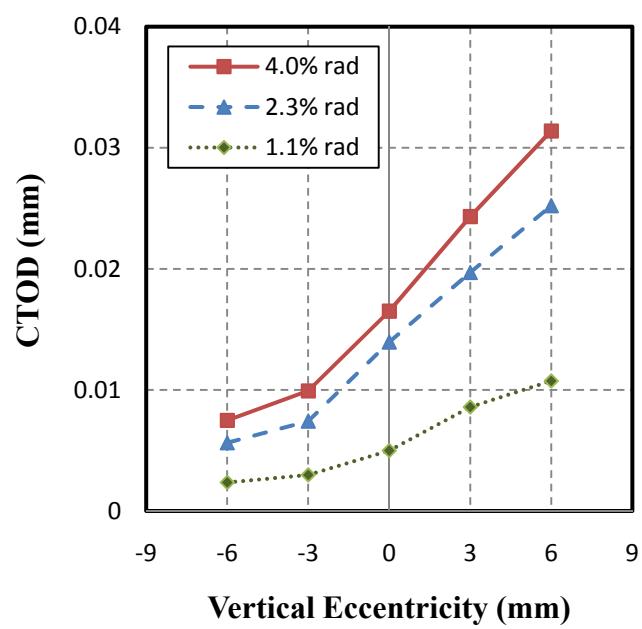


圖 5.15 垂直偏心系列 CTOD 比較圖

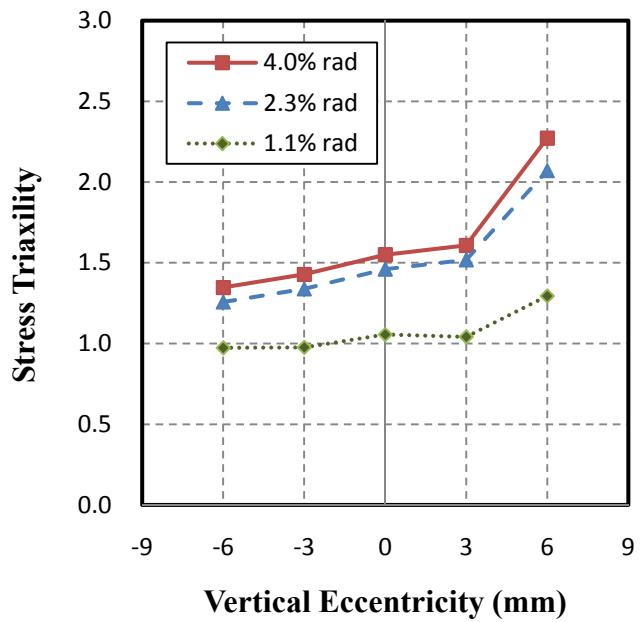


圖 5.16 垂直偏心系列應力三軸度比較圖

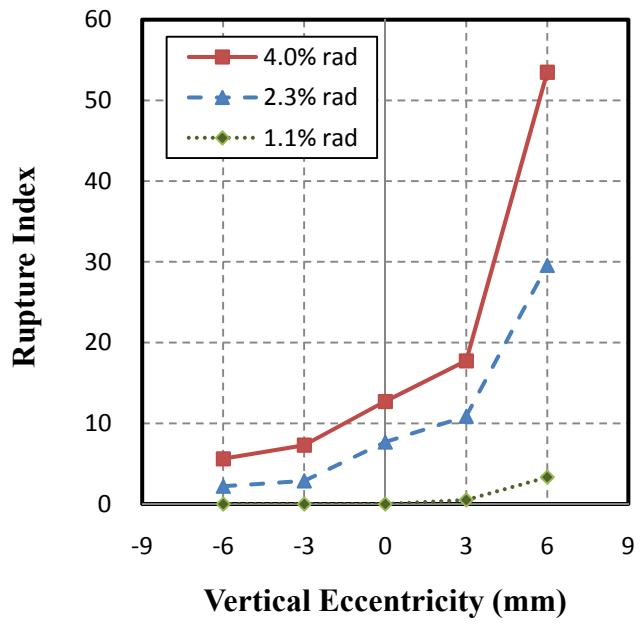


圖 5.17 垂直偏心系列破裂指數比較圖

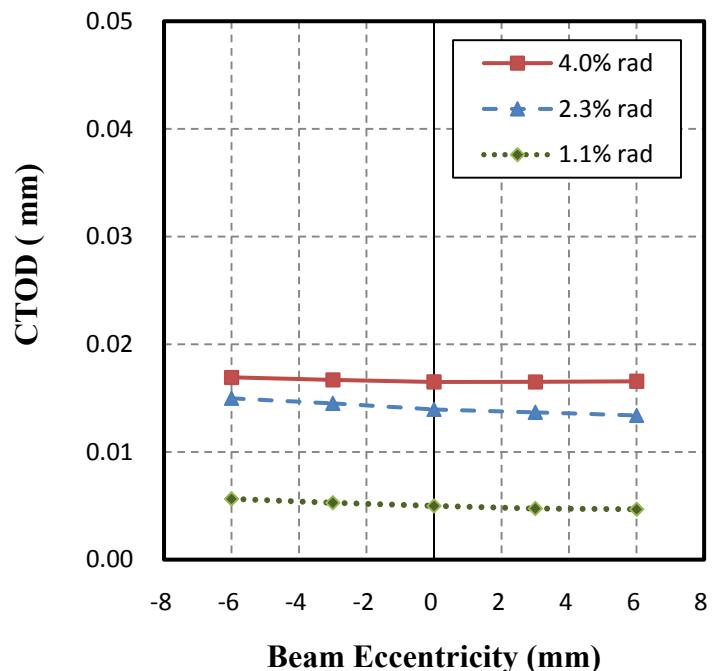


圖 5.18 梁偏心系列模型 CTOD 比較圖

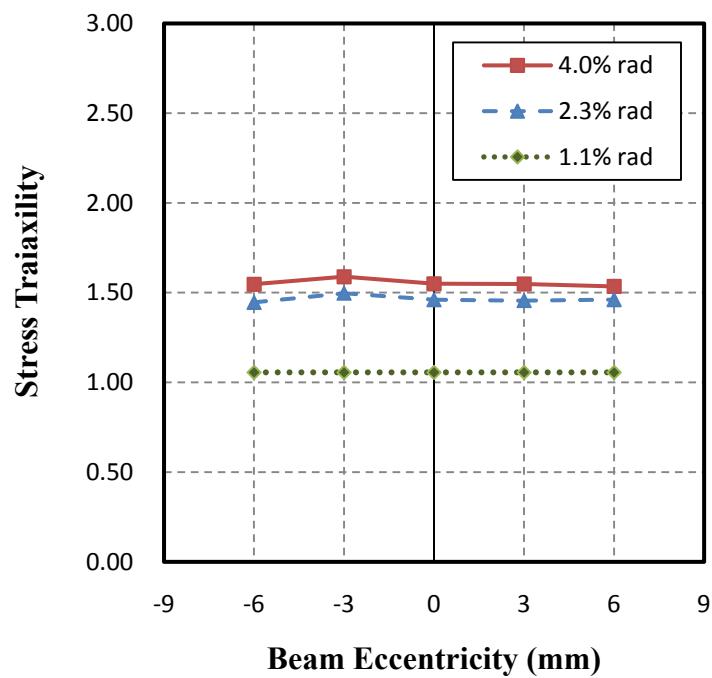


圖 5.19 梁偏心系列模型應力三軸度比較圖

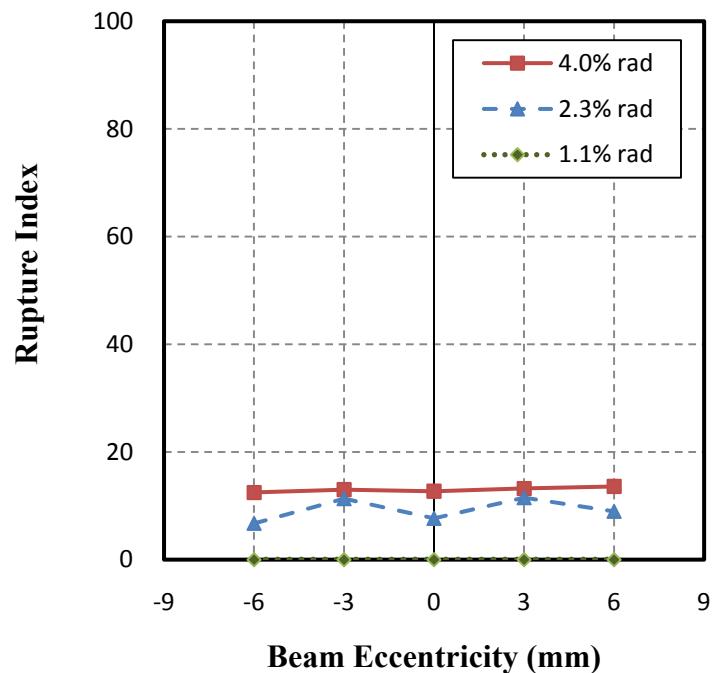


圖 5.20 梁偏心系列模型破裂指數比較圖



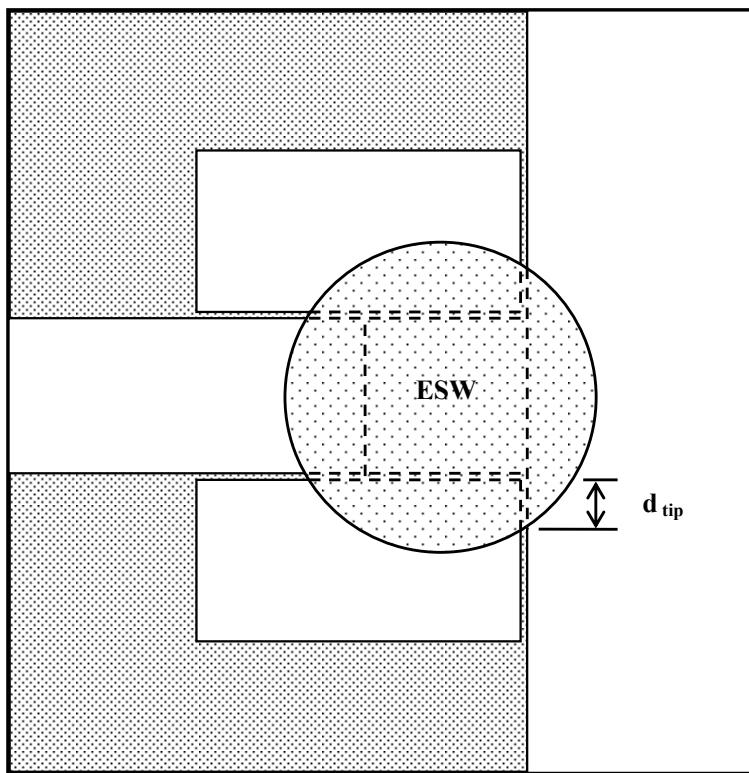


圖 5.21 裂縫尖端與橫隔板邊緣距離  $d_{tip}$  示意圖

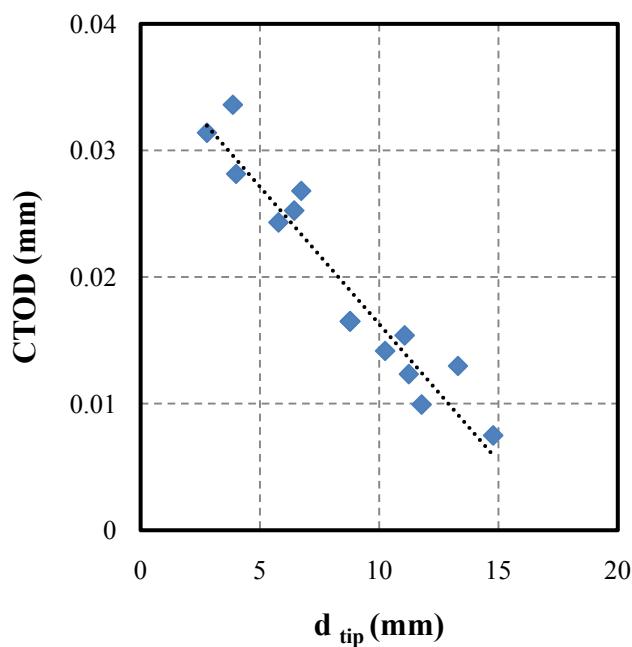


圖 5.22 參數模型之  $d_{tip}$  與 CTOD 關係圖

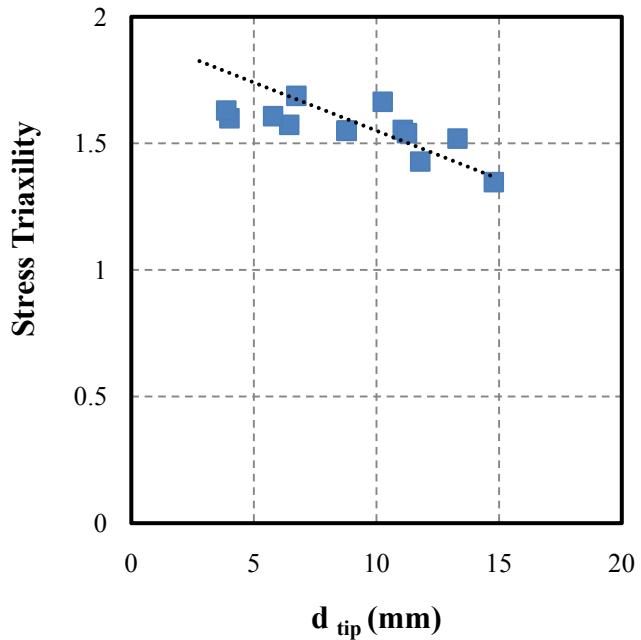


圖 5.23 參數模型之  $d_{tip}$  與應力三軸度關係圖

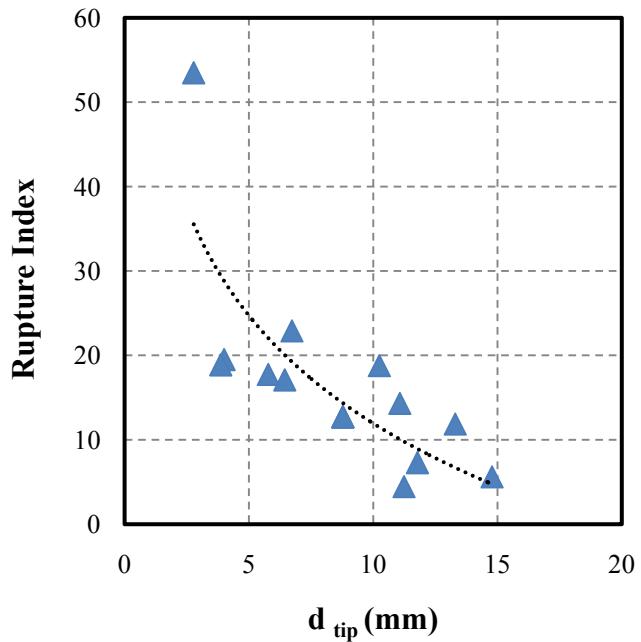


圖 5.24 參數模型之  $d_{tip}$  與破裂指數關係圖

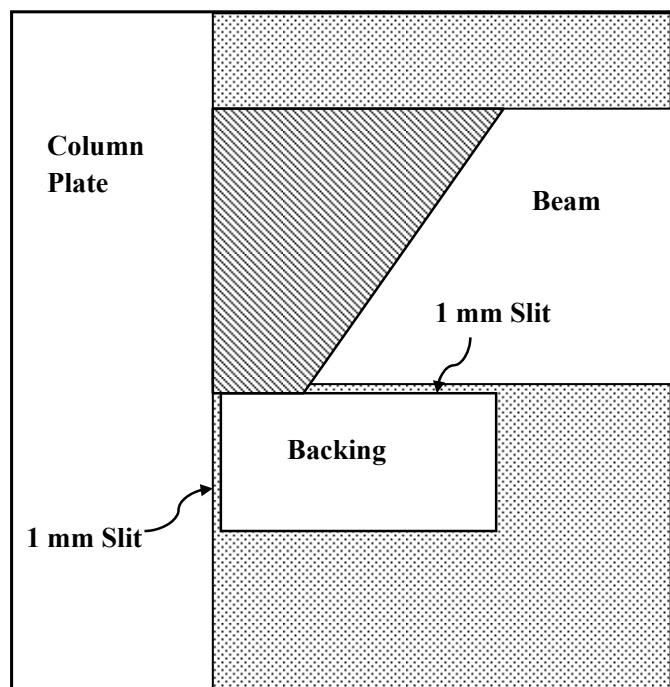


圖 6.1 BA 模型背墊板示意圖

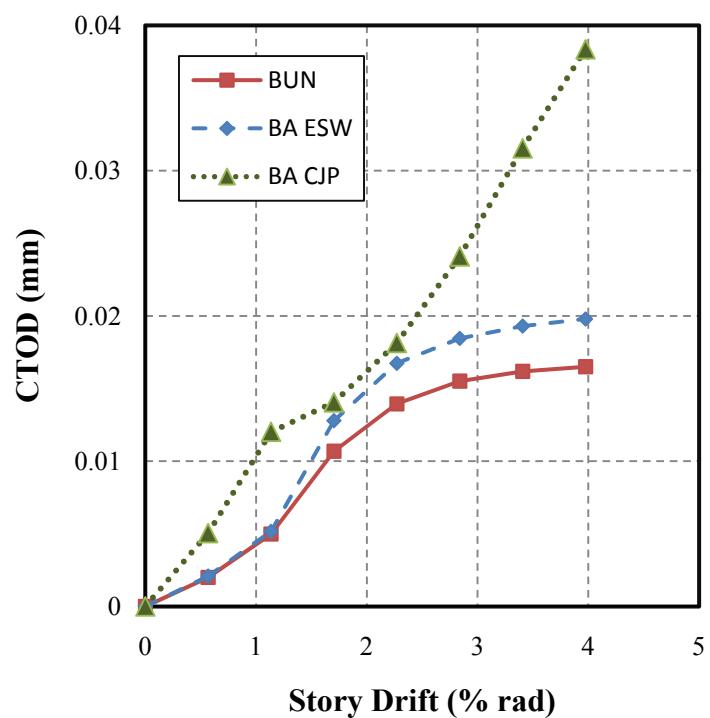


圖 6.2 模型 BA 之 CTOD 歷程圖

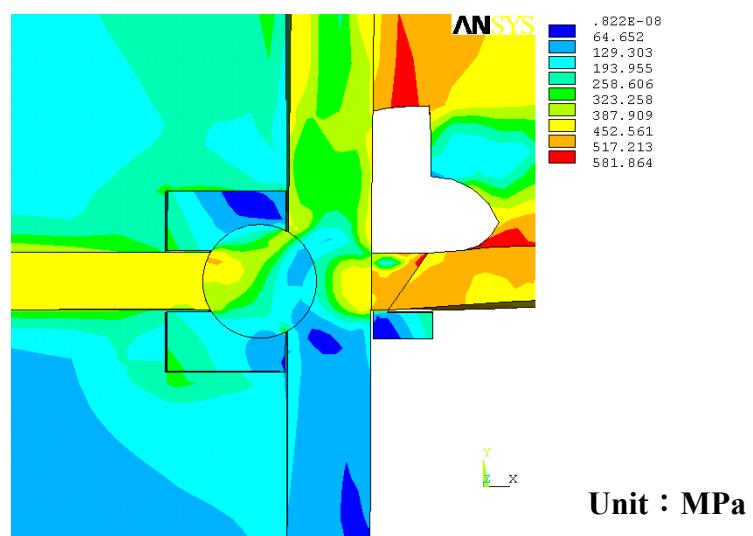


圖 6.3 模型 BA 之電熱熔渣鋸接 Von Mises 應力圖 (4.0% rad)

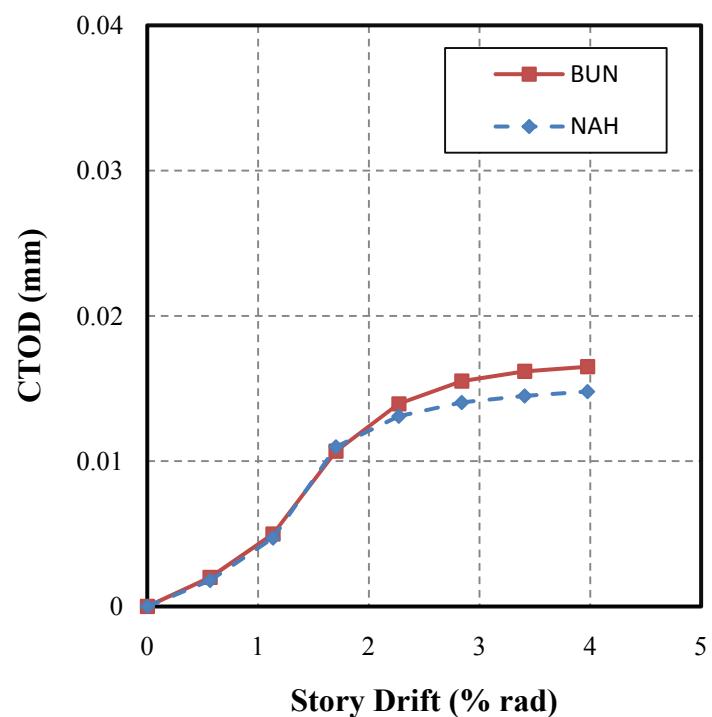


圖 6.4 模型 NAH 之 CTOD 位移歷程圖

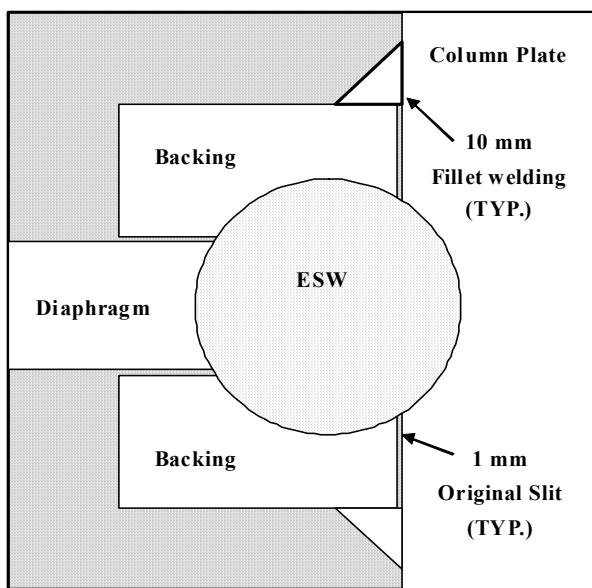


圖 6.5 模型 BUN-F 電熱熔渣鋸接處示意圖

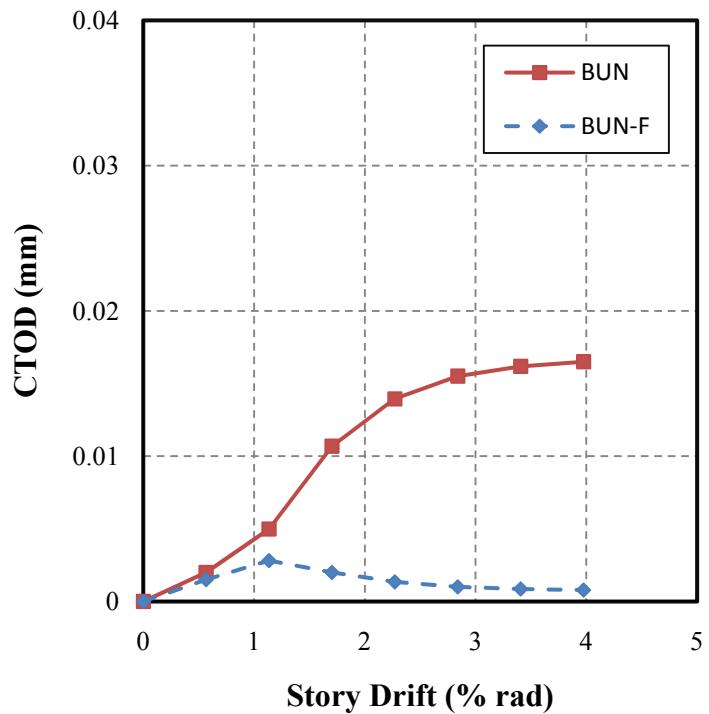


圖 6.6 模型 NAH 之 CTOD 位移歷程圖

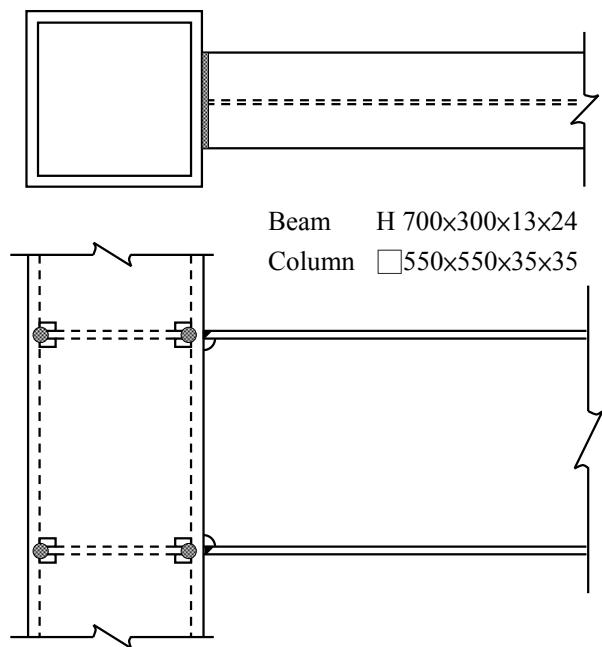


圖 6.7 模型 BUN 尺寸圖

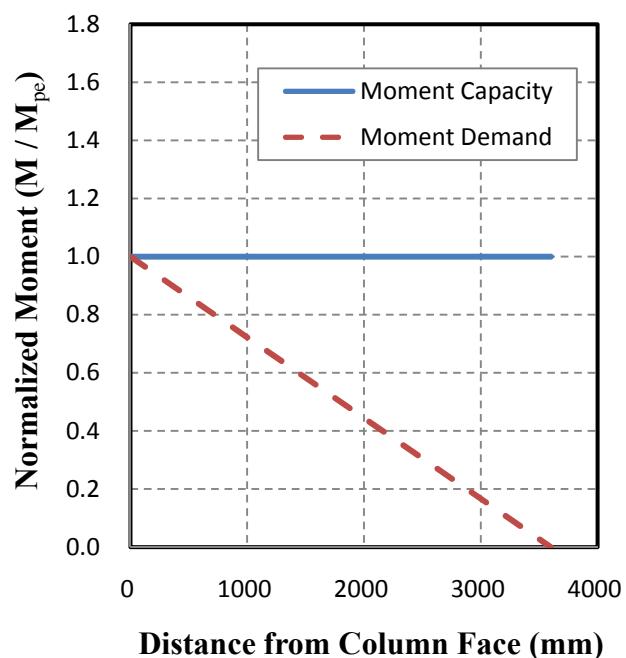


圖 6.8 模型 BUN 彎矩梯度圖

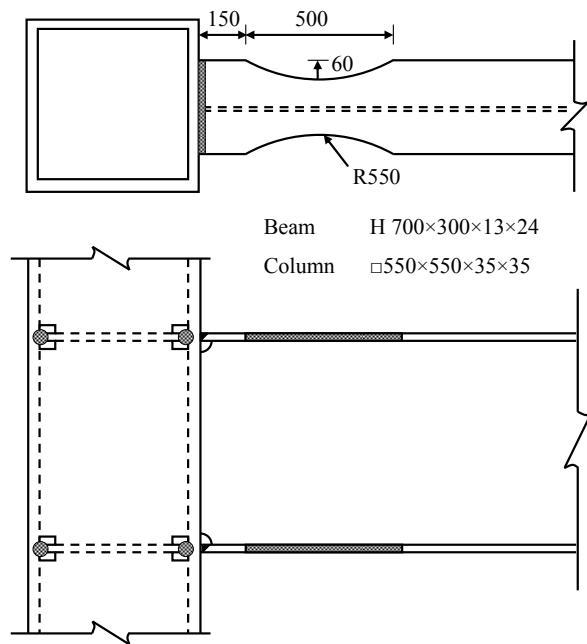


圖 6.9 模型 RBS 尺寸圖

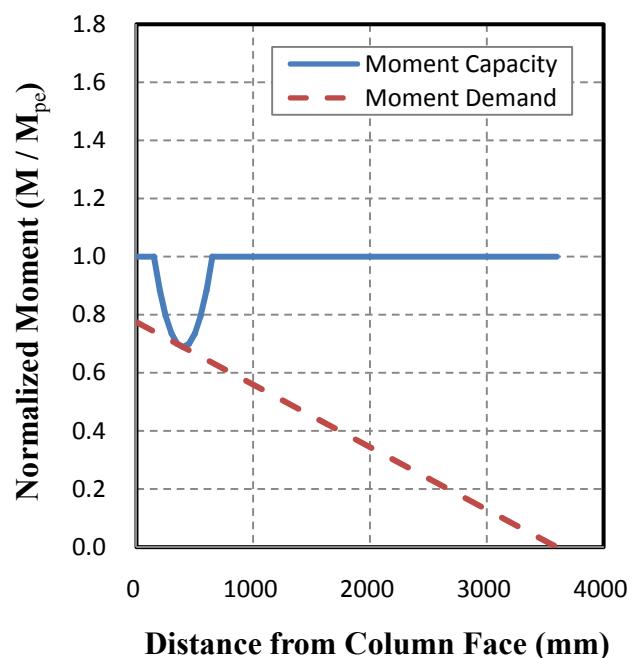


圖 6.10 模型 RBS 尺寸圖

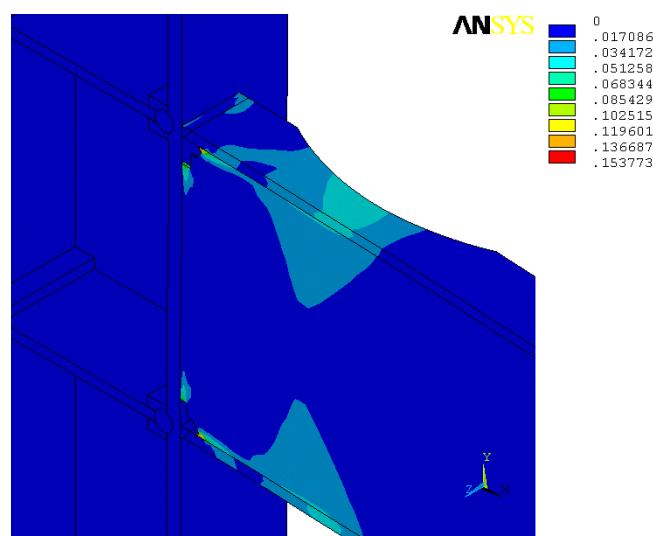


圖 6.11 模型 RBS 之塑性應變圖

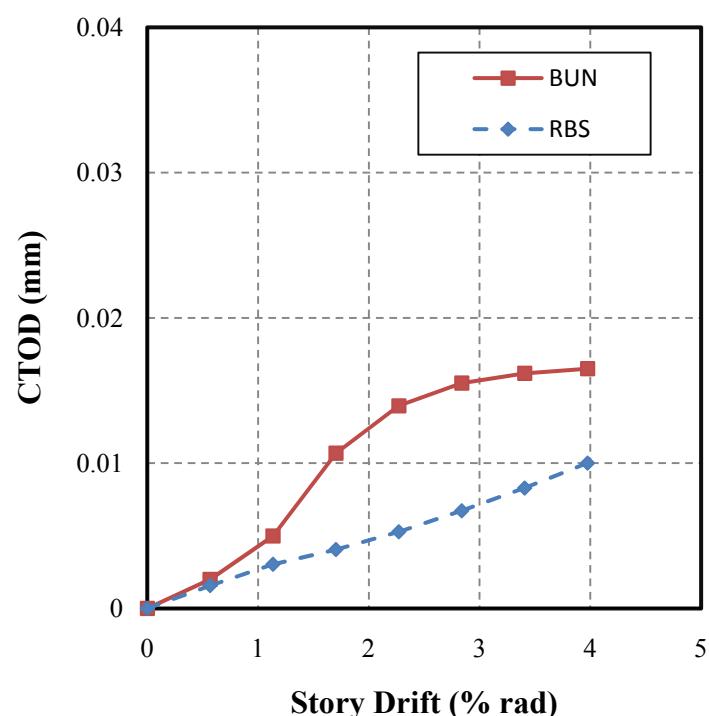


圖 6.12 模型 RBS 之 CTOD 歷程圖

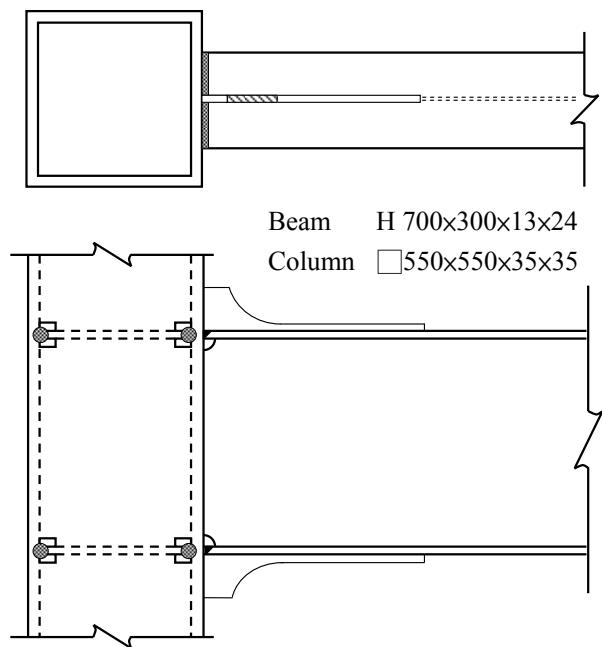


圖 6.13 模型 ER 尺寸圖

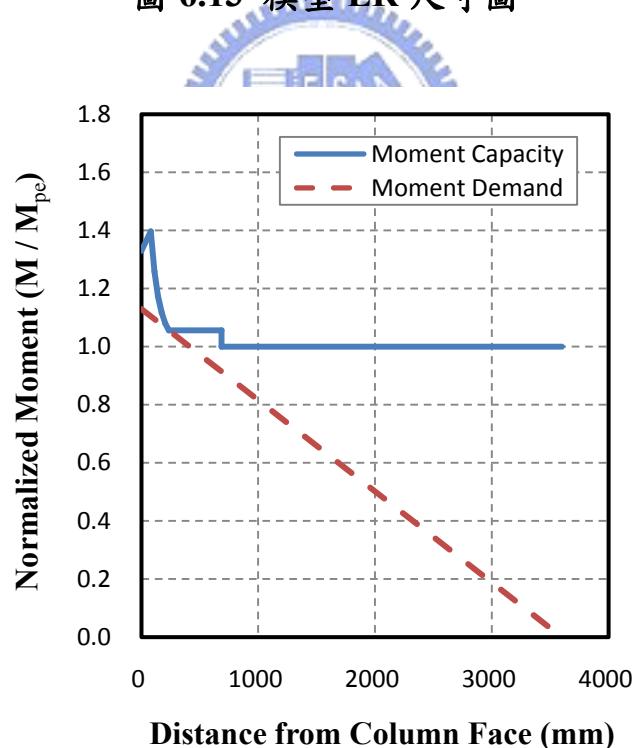


圖 6.14 模型 ER 彎矩梯度圖

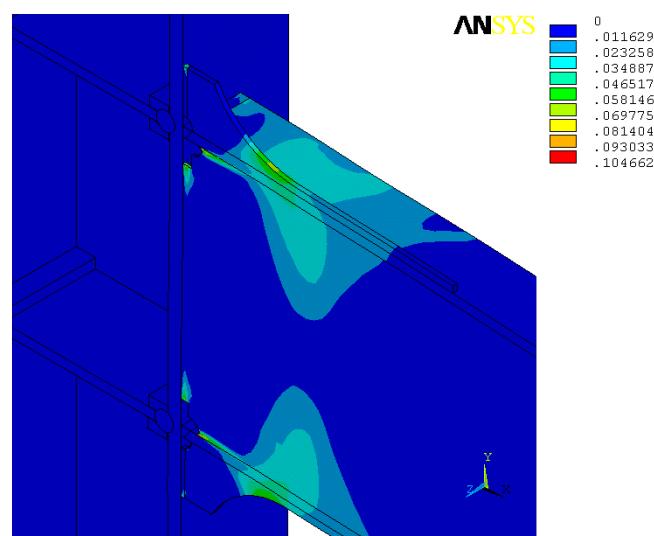


圖 6.15 模型 ER 塑性應變圖

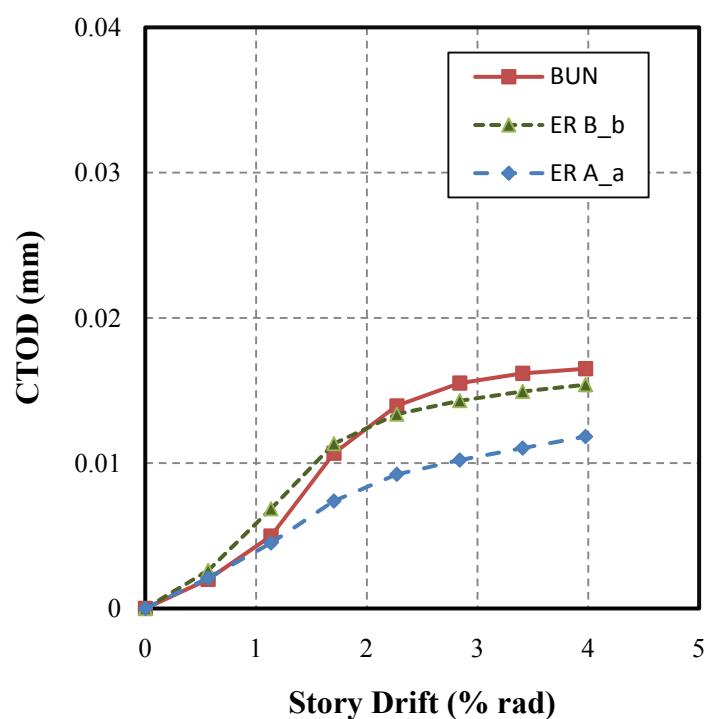


圖 6.16 模型 ER 之 CTOD 歷程圖

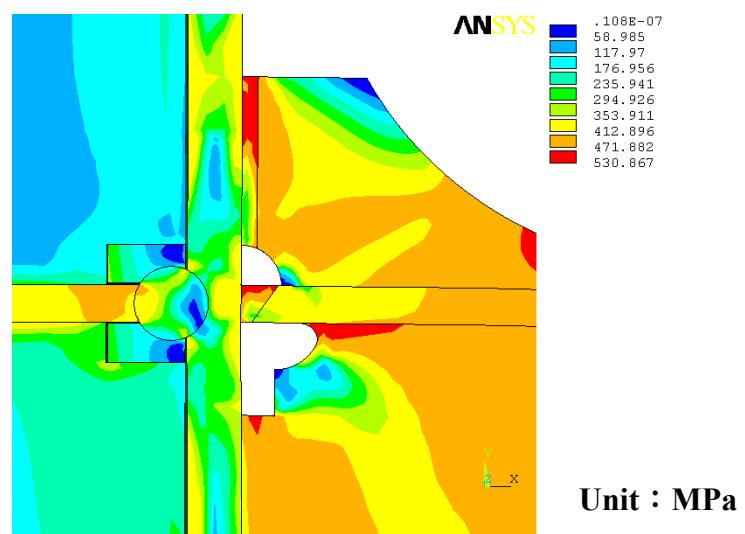


圖 6.17 模型 ER 電熱熔渣鋸接 Von Mises 應力圖 (4.0% rad)



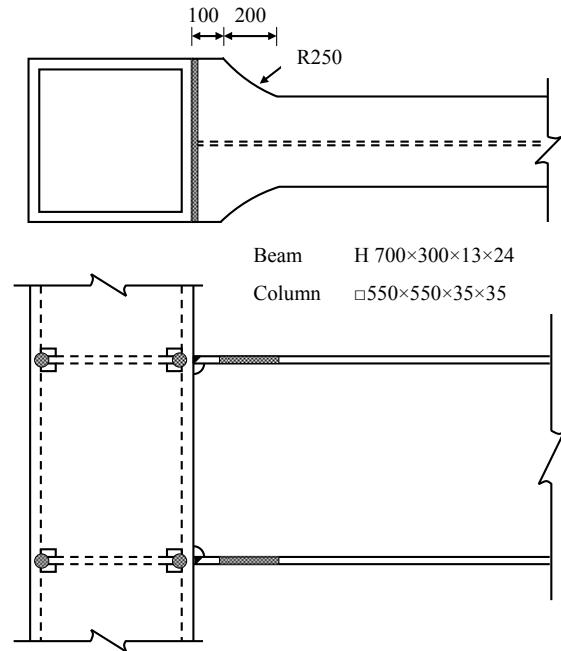


圖 6.18 模型 WF 尺寸圖

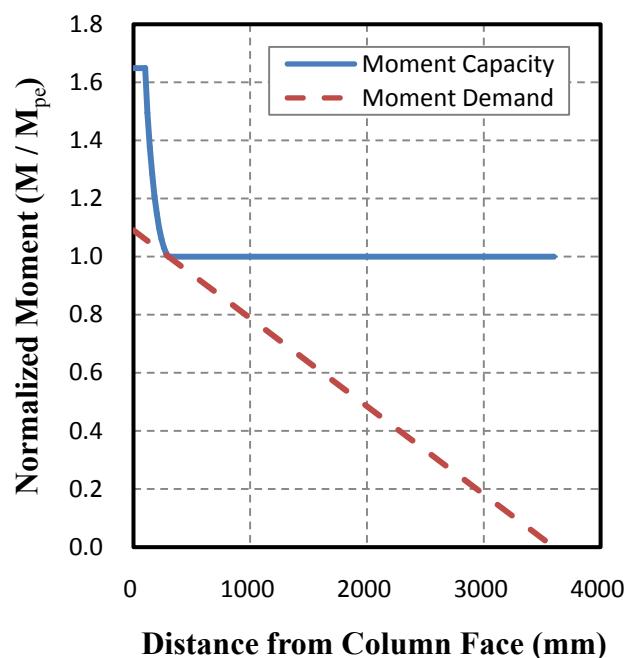


圖 6.19 模型 WF 彎矩梯度圖

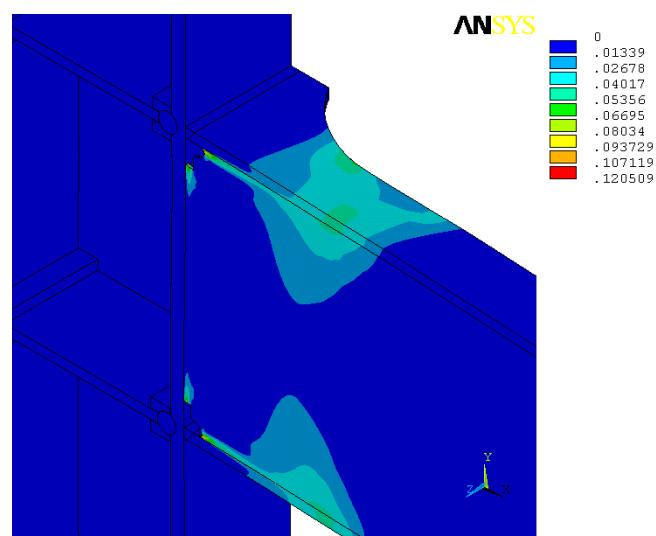


圖 6.20 模型 WF 塑性應變圖

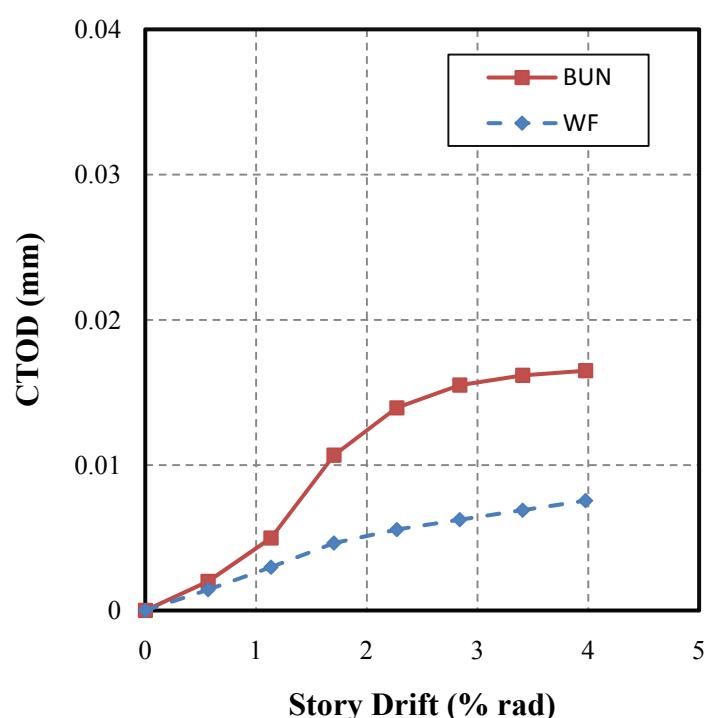


圖 6.21 模型 WF 之 CTOD 歷程圖

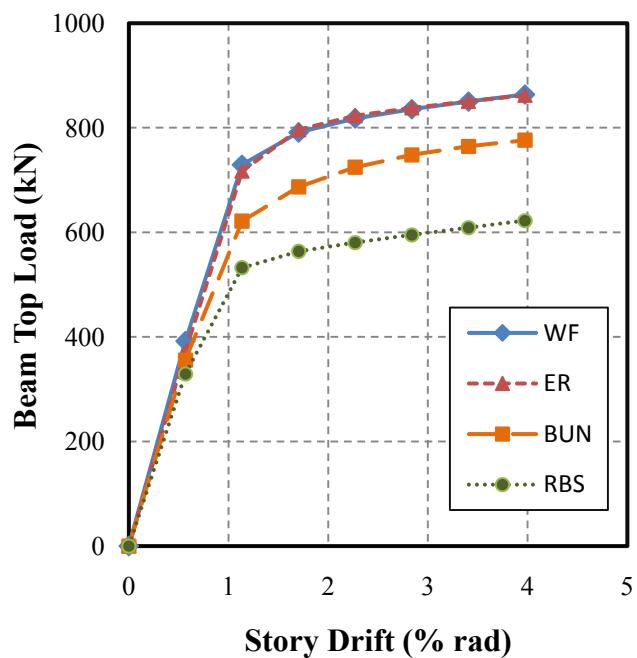
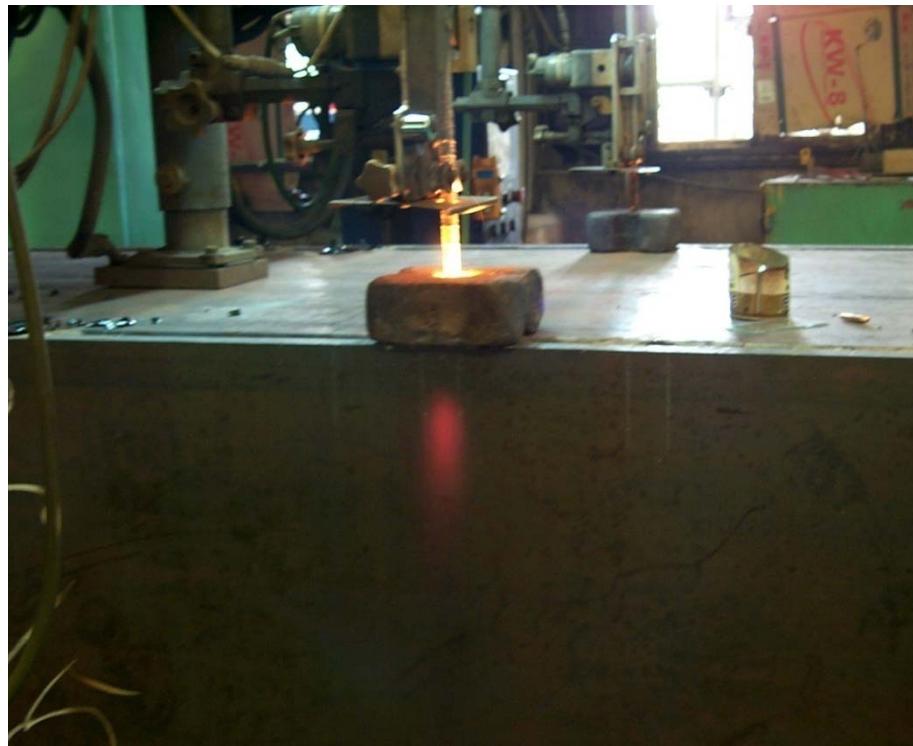
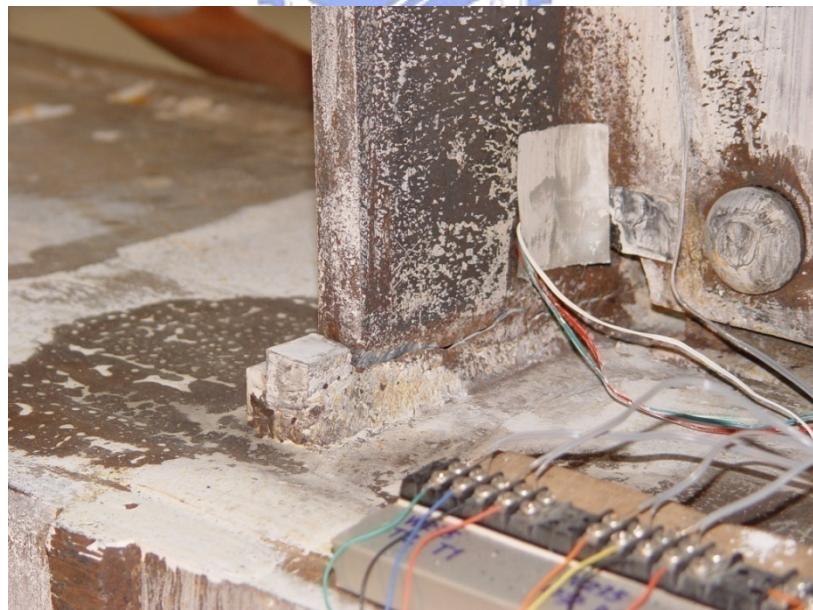


圖 6.22 特殊抗彎接頭模型之梁端載重-位移包絡線





照片 2.1 電熱熔渣鉗接



(林群洲 2002)

照片 2.2 試體 BUN 梁翼全滲透鉗道撕裂破壞 (2.3% rad)



(林群洲 2002)

照片 2.3 試體 BUN 扇形開口根部撕裂破壞 (4.0% rad)



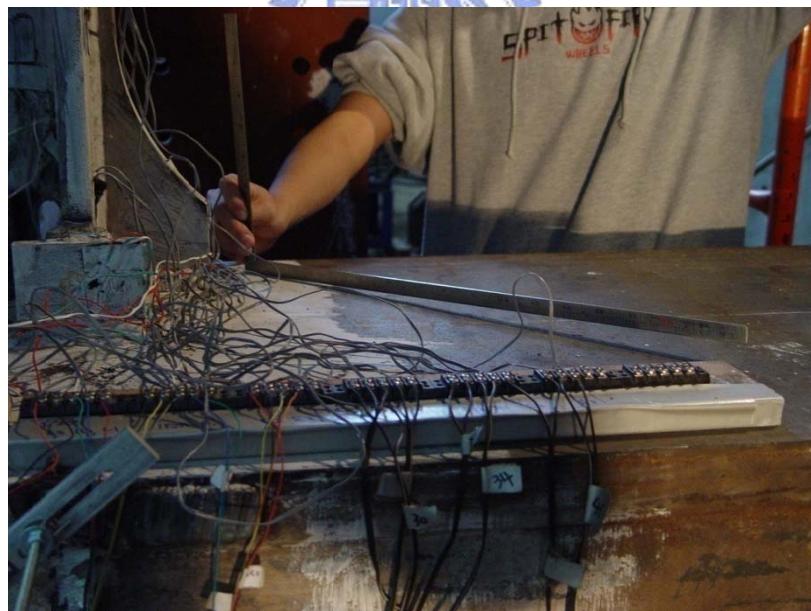
(林群洲 2002)

照片 2.4 試體 BR115CB 錛道裂縫深入柱翼板 (1.7% rad)



(林群洲 2002)

照片 2.5 試體 BR115CB 電熱熔渣鋸接瑕疵



(張新梓 2004)

照片 2.6 試體 SR-SP1R 柱翼板隆起 (1.5% rad)



(張新梓 2004)

照片 2.7 試體 SR-SP1R 柱翼板拉裂 (2.0% rad)



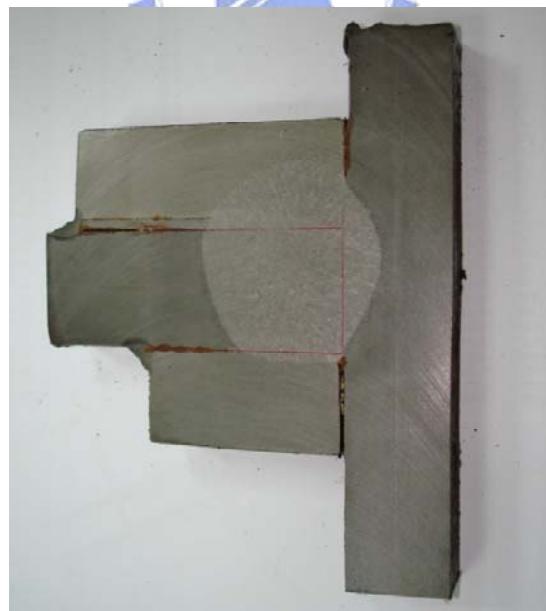
(林潔祥 2005)

照片 2.8 試體 CT 柱翼板隆起 (4.0% rad)



(林克強博士提供)

照片 2.9 試體 TG2c 電熱熔渣鋸接破壞案例 (1.0% rad)



(林克強博士提供)

照片 3.1 電熱熔渣鋸接切片照片