

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

鋼柱與鋼梁腹板開孔位處塑性區

梁柱接頭之耐震行為

**Seismic Behavior of Steel Connections between  
Columns and Beams with Web Openings  
in Plastic Zone**

研究生：陳紀勛

指導教授：陳誠直博士

林克強博士

中華民國九十七年五月

鋼柱與鋼梁腹板開孔位處塑性區

梁柱接頭之耐震行為

**Seismic Behavior of Steel Connections between  
Columns and Beams with Web Openings  
in Plastic Zone**

研 究 生：陳 紀 勛

Student：Chi-Hsun Chen

指導老師：陳 誠 直 博士

Adviser：Dr. Cheng-Chih Chen

林 克 強 博士

Dr. Ker-Chun Lin



A Thesis

Submitted Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

May 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年五月

# 鋼柱與鋼梁腹板開孔位處塑性區

## 梁柱接頭之耐震行為

研究生：陳紀勛

指導教授：陳誠直 博士

林克強 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

### 摘 要

鋼梁腹板開孔位處塑性區域將影響鋼梁的塑性變形能力與鋼梁的撓曲與剪力強度。本研究針對鋼梁接 H 型鋼柱於鋼梁塑性區開圓形孔之梁柱子結構以實尺寸實驗方式探討其耐震行為。五組試體包含一組未補強之梁柱接頭試體，與四組以剪力板或垂直加勁板補強梁柱接頭處之試體。試驗結果顯示五組試體在剛進入非彈性行為時，在鋼梁腹板開孔處皆可達彎矩與剪力互制之強度，且於極限狀態試體皆能達鋼梁之標稱塑性彎矩強度。試體於鋼梁塑性區腹板開孔，其塑性變形能力則有賴梁柱接頭之補強，未補強之試體無法發展出足夠之韌性，惟以剪力板或垂直加勁板補強之試體則可發展出令人滿意的韌性行為。

關鍵字：腹板開孔、梁柱接頭、塑性變形能力、彎矩與剪力互制作用

# **Seismic Behavior of Steel Connections between Columns and Beams with Web Openings in Plastic Zone**

Student: Chi-Hsun Chen

Adviser: Dr. Cheng-Chih Chen

Dr. Ker-Chun Lin

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## **ABSTRACT**

Steel beams with web openings in plastic zone will affect the plastic deformation capacity and bending and shear strength of the steel beams. This research was conducted to experimentally investigate the seismic behavior of beam-to-column subassemblages, consisting of H-shaped steel columns and steel beams with circular web openings in the plastic zone. Five full-scale specimens were tested in this study. One is unreinforced beam-to-column connection, and the other four specimens are reinforced with either shear tab or vertical stiffener at beam-to-column connection. Test results indicated that all five specimens can develop strengths based on the interaction between bending and shear when the specimens just underwent the inelastic behavior, and all specimens can achieve the nominal plastic flexural strength of the steel beams at ultimate states. The plastic deformation capacity of the specimens having web openings in plastic zone of the steel beam depends on the reinforcement at beam-to-column connection. The unreinforced specimen could not develop enough ductility, while the specimens reinforced with shear tab or vertical stiffener can achieve satisfactory ductile behavior.

Keywords: web opening, beam-to-column connection, plastic deformation capacity, interaction between bending and shear.

## 誌謝

本論文得以完成，由衷感謝恩師 陳誠直博士與林克強博士於碩士班兩年來的指導與提攜，讓學生能以嚴謹的態度面對求學與為人處世上的種種難題受益非淺。對於觀念之啟發、論文之匡正並充分提供研究所需資源與環境，恩師專業理論與實務學識豐富，使愚生受益良多，師恩浩大無邊，弟子銘記在心，並致上最誠摯的感謝。

論文口試期間，承蒙本校 翁正強以及台灣大學 蔡克銓對於論文撥冗審閱，於論文中疏漏之處提出相當多寶貴建議與指導，使得論文更臻完備，僅此特表謝忱。

本論文得以順利付梓，不諱言需感謝 群洲學長、南交學長、智民學長以及勝智學長於實驗與分析提供諸多寶貴經驗與提攜；同窗好友 明昌、建霖、政甯、昭賢、鼎林、德宏、家源相互扶持；學弟妹 璿至、俞燐、煒銘及佳儀於實驗期間給於極大的協助；大學同窗、高職好友以及台北護專好友為我打氣與加油；財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心技術人員以及鴻舜機械 周仁財先生在實驗期間對於試體製作、吊裝與實驗給予極大的協助，在此誠心的祝福大家，願你們前途無量。

最後，僅將本論文獻給我最摯愛的父母、家人及親戚們，感謝你們一直以來的支持與體諒，在精神上給予許多關懷與鼓勵，願與你們一起分享我獲得碩士學位的喜悅與驕傲。

紀勛 九十七年五月

# 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.....	viii
照片目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究方法.....	3
1.4 論文內容.....	4
第二章 梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式之梁柱接頭 .....	5
2.1 文獻回顧.....	5
2.2 接頭區內梁腹板開孔之形狀、大小與位置 .....	10
2.3 接頭區內之補強型式.....	13
2.4 梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式之梁柱接頭細部設計公 式.....	16

2.5 梁柱接頭各變形分量計算 .....	18
<b>第三章 實尺寸梁柱接頭試驗 .....</b>	<b>28</b>
3.1 引言 .....	28
3.2 試體規劃及製作 .....	28
3.3 試驗裝置 .....	31
3.4 量測系統 .....	31
3.5 試驗程序 .....	32
<b>第四章 實驗結果與討論 .....</b>	<b>33</b>
4.1 試體行為 .....	33
4.2 試體破壞模式 .....	40
4.3 韌性能力 .....	42
4.4 極限彎矩強度 .....	46
4.5 試體局部行為討論 .....	48
4.6 彎矩-剪力交互作用 .....	52
<b>第五章 結論與建議 .....</b>	<b>54</b>
5.1 結論 .....	54
5.2 建議 .....	55
<b>符號索引 .....</b>	<b>56</b>
<b>參考文獻 .....</b>	<b>62</b>

表.....	67
圖.....	76
照片.....	135





## 表目錄

表 2.1 層間變位角 0.5% 弧度時梁各段之撓角與剪力變形以及梁端位 移量理論值與分析值之誤差百分比 .....	67
表 2.2 層間變位角 4% 弧度時梁各段之撓角與剪力變形以及梁端位 移量理論值與分析值之誤差百分比 .....	67
表 3.1 試體規格.....	68
表 3.2 試體設計參數 .....	69
表 3.3 試體鋼板拉力試片試驗強度 .....	69
表 4.1 試體破壞模式之最大塑性總轉角與層間變位角.....	70
表 4.2 試體梁腹板開孔所造成梁端之轉角 .....	71
表 4.3 試體各項彎矩與剪力之強度 .....	72
表 4.4 試體各項彎矩之比值 .....	73
表 4.5 在層間變位角 1.5% 弧度與極限載重下之剪力與彎矩強度...	74
表 4.6 在層間變位角 1.5% 弧度與極限載重下之彎矩與剪力互制作用 .....	75

## 圖目錄

圖 2.1 圓弧切削式接頭示意圖 .....	76
圖 2.2 梁翼內側加勁板補強之梁柱接頭示意圖 .....	76
圖 2.3 梁翼內側加勁板補強之梁柱接頭示意圖 .....	77
圖 2.4 梁柱交接面之梁上下翼板增加具延長段之單肋板補強之梁柱 接頭示意圖 .....	78
圖 2.5 梁柱交接面之梁上下翼板增加具延長段之單肋板補強之梁柱接 頭示意圖 .....	79
圖 2.6 蓋板與肋板式接頭示意圖 .....	80
圖 2.7 蓋板與肋板式接頭示意圖 .....	81
圖 2.8 梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式梁柱接頭梁彎矩強度與外 力需求彎矩圖 .....	82
圖 2.9 補強型式一之示意圖 .....	83
圖 2.10 補強型式二之示意圖 .....	84
圖 2.11 梁腹板開孔後之斷面圖 .....	85
圖 2.12 梁端變形分量示 .....	85
圖 2.13 鋼骨梁柱交會區對角線相對位移與剪力變形關係示意圖 ....	86
圖 2.14 鋼骨梁柱交會區剪力變形所造成之梁端變形分量示意圖 ....	86
圖 2.15 剛體運動之旋轉角之示意圖 .....	87

圖 2.16 梁柱交會區變形含剛體運動後所造成之梁端變形分量示意圖 .....	87
圖 2.17 柱變形所引致之梁端變形分量示意圖 .....	88
圖 2.18 傾斜儀讀數量測示意圖 .....	89
圖 2.19 公式推導中所用之梁桿件各段範圍示意圖 .....	90
圖 2.20 梁第二段(開孔區)受剪力及撓曲作用之變形示意圖 .....	91
圖 2.21 梁桿件腹板開孔模型之網格化圖 .....	93
圖 2.22 梁桿件腹板開孔之 Von Miss 應力分佈圖 .....	93
圖 3.1 柱之尺寸圖 .....	94
圖 3.2 梁之尺寸圖 .....	95
圖 3.3 試體WOC65 之接合細節 .....	95
圖 3.4 試體WOC65R1 之接合細節 .....	96
圖 3.5 試體WOC50R1 之接合細節 .....	96
圖 3.6 試體WOC65R2 之接合細節 .....	97
圖 3.7 試體WOC65R3 之接合細節 .....	98
圖 3.8 試驗設置 .....	99
圖 3.9 量測儀器配置圖 .....	100
圖 3.10 試體WOC65 應變計位置圖 .....	101
圖 3.11 試體WOC65R2 應變計位置圖 .....	102
圖 3.12 梁柱接頭子結構層間變位角定義 .....	103

圖 3.13 位移控制歷程度 .....	103
圖 4.1 試體WOC65 之遲滯迴圈圖 .....	104
圖 4.2 試體WOC65R1 之遲滯迴圈圖 .....	108
圖 4.3 試體WOC50R1 之遲滯迴圈圖 .....	112
圖 4.4 試體WOC65R2 之遲滯迴圈圖 .....	116
圖 4.5 試體WOC65R3 之遲滯迴圈圖 .....	120
圖 4.6 試體WOC65 之梁翼應變比較圖 .....	124
圖 4.7 試體WOC65 之梁腹剪應變比較圖 .....	125
圖 4.8 試體WOC65R1 之梁翼應變比較圖 .....	126
圖 4.9 試體WOC65R1 之梁腹剪應變比較圖 .....	127
圖 4.10 試體WOC50R1 之梁翼應變比較圖 .....	128
圖 4.11 試體WOC50R1 之梁腹剪應變比較圖 .....	129
圖 4.12 試體WOC65R2 之梁翼應變比較圖 .....	130
圖 4.13 試體WOC65R2 之梁腹剪應變比較圖 .....	131
圖 4.14 鋼骨開孔梁之彎矩-剪力交互作用關係 .....	132
圖 4.15 在層間變位角 1.5% 弧度五組試體之彎矩-剪力互制作用圖 .....	133
圖 4.16 在極限載重下五組試體之彎矩-剪力互制作用圖 .....	134

## 照片目錄

照片 3.1 梁腹板開一個直徑為 0.65 倍梁深的圓孔 .....	135
照片 3.2 梁腹板開一個直徑為 0.65 倍梁深的圓孔(續) .....	135
照片 3.3 柱翼板與剪力板開槽鉚加填角鉚，梁腹與剪力板填角鉚	136
照片 3.4 柱翼板與剪力板開槽鉚加填角鉚，梁腹與剪力板填角鉚(續) .....	136
照片 3.5 柱翼板與剪力板開槽鉚加填角鉚，梁腹與剪力板填角鉚(續) .....	137
照片 3.6 梁腹板與柱翼板採用 30 度全滲透開槽鉚結合 .....	137
照片 3.7 梁翼內側且兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板	138
照片 3.8 梁翼內側且兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板(續) .....	138
照片 3.9 梁翼內側且在兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板 .....	139
照片 3.10 梁翼內側且在兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板 .....	139
照片 3.11 加勁板僅在梁上翼處預留切角 .....	140
照片 3.12 上下翼板背墊板未移除，並在背墊板下方再增加填角鉚 .....	140
照片 3.13 上下翼板背墊板未移除，並在背墊板下方再增加填角鉚(續) .....	141
照片 3.14 試驗裝置 .....	142

照片 3.15 傾斜儀、LVDT、 $\pi$ -gauge架設位置 .....	143
照片 4.1 試體WOC65 接近梁上翼全滲透鐸道之梁腹扇形開孔處開始 降伏，呈交叉狀斑紋剝落 (1% drift).....	143
照片 4.2 試體WOC65 下翼板表面石灰呈放射狀斑紋剝落 (1% drift) .....	144
照片 4.3 試體WOC65 梁腹板開孔周圍發現交叉狀斑紋石灰剝落 (1% drift).....	145
照片 4.4 試體WOC65 上翼板距柱面約 250 mm處開始出現與翼寬平 行之橫向斑紋剝落 (1.5% drift) .....	146
照片 4.5 試體WOC65 梁下翼板之放射狀斑紋石灰剝落增加並往梁端 的方向延伸 (1.5% drift) .....	146
照片 4.6 試體WOC65 梁翼板於扇形開孔處產生開裂並向兩側延伸導 致整個上翼板斷裂 (1.5% drift) .....	147
照片 4.7 試體WOC65R1 梁腹板開孔周圍有些許的石灰剝落的現象發 生，其發展方向與梁腹縱方向呈 45 度 (0.5% drift) .....	148
照片 4.8 試體WOC65R1 下翼板於柱面背墊板處出現類似V字型的斑 紋石灰剝落 (0.75% drift) .....	149
照片 4.9 試體WOC65R1 上翼板邊緣平行翼寬之橫向斑紋石灰剝落開 始往內側增加 (1% drift) .....	149
照片 4.10 試體WOC65R1 下翼板在上翼板相同位置處也開始出現橫	

向斑紋石灰剝落 (1% drift) .....	150
照片 4.11 試體WOC65R1 梁腹板開孔周圍並以開孔圓心為基準的對角線上，石灰也已大量剝落並往兩翼方向延伸 (1.5% drift) .....	151
照片 4.12 試體WOC65R1 上翼板開始出現輕微的挫屈 (2% drift) .	152
照片 4.13 試體WOC65R1 上翼板挫屈更加嚴重 (3% drift) .....	152
照片 4.14 試體WOC65R1 梁腹板開孔成橢圓形狀，並出現嚴重的面外挫屈 (4% drift).....	153
照片 4.15 試體WOC65R1 梁腹板開孔周圍對角線之鋼材突然發生撕裂破壞的現象 (5% drift) .....	153
照片 4.16 試體WOC50R1 下翼板中間處出現V字型橫紋石灰剝落的現象發生 (0.75% drift) .....	154
照片 4.17 試體WOC50R1 梁腹板開孔周圍處出現與梁腹縱方向呈 45 度的少許石灰剝落 (0.75% drift) .....	155
照片 4.18 試體WOC50R1 梁上翼板出現石灰剝落的現象且剝落的方向平行於翼寬並由翼板邊緣往中心延伸 (1% drift) .....	156
照片 4.19 試體WOC50R1 下翼板邊緣處開始有橫向斑紋石灰剝落且在翼板中心處有斜向石灰剝落的現象產生 (1.5% drift) ...	156
照片 4.20 試體WOC50R1 梁腹板開孔周圍石灰剝落的情況持續以開孔圓心為基準的對角線方向往梁腹板開孔兩側向翼板延伸	



(類似交叉狀) (1.5% drift).....	157
照片 4.21 試體WOC50R1 上、下翼板挫屈已非常明顯 (4% drift) .	158
照片 4.22 試體WOC50R1 梁腹板開孔中心周圍的石灰已幾乎完全掉 落並出現嚴重面外挫屈的現象 (4% drift) .....	159
照片 4.23 試體WOC65R2 梁上翼板邊緣處有與梁翼縱向呈 45 度石灰 剝落現象發生 (0.75% drift) .....	160
照片 4.24 試體WOC65R2 下翼板近柱面處出現V字型斑紋，且與上翼 板相同範圍處有放射狀的斑紋剝落 (0.75% drift) .....	160
照片 4.25 試體WOC65R2 梁腹板開孔周圍，其方向也是與梁腹縱向 呈 45 度 (0.75% drift) .....	161
照片 4.26 試體WOC65R2 加勁板與梁上翼板全滲透銲接處開始有石 灰剝落 (2% drift).....	162
照片 4.27 試體WOC65R2 腹板開孔周圍石灰剝落，石灰剝落的情況 不會大量的往梁腹板開孔的左右兩側擴大 (2% drift) .....	163
照片 4.28 試體WOC65R2 上、下翼板開始出現挫屈現象 (3% drift) .....	164
照片 4.29 試體WOC65R2 加勁板靠近梁腹板開孔的邊緣處也開始有 少許的石灰剝落 (3% drift) .....	165
照片 4.30 試體WOC65R2 梁翼板於扇形開孔處產生開裂並向兩側延 伸導致整個下翼板斷裂 (3% drift) .....	165



照片 4.31 試體WOC65R3 下翼板在靠近柱面處的石灰剝落的情況沒有像WOC65R2 如此嚴重 (0.75% drift) .....	166
照片 4.32 試體WOC65R3 梁翼板石灰剝落增加，並以輻射狀斑紋逐漸往柱面剝落 (1.5% drift) .....	166
照片 4.33 試體WOC65R3 上、下翼板開始有輕微的挫屈的現象發生 (2% drift).....	167
照片 4.34 試體WOC65R3 加勁板開始有些許的石灰剝落 (2% drift) .....	168
照片 4.35 試體WOC65R3 上、下翼板石灰剝落的情況由局部演變為大範圍剝落 (3% drift) .....	169
照片 4.36 試體WOC65R3 下翼板邊緣之全滲透鐸道處出現很小的裂縫 (4% drift).....	170
照片 4.37 試體WOC65R3 梁腹板開孔周圍開始出現明顯的面外挫屈現象 (4% drift).....	171
照片 4.38 試體WOC65R3 加勁板石灰剝落的情形已由柱翼及梁翼之全滲透鐸道處往加勁板內延伸，且出現輕微的面外挫屈 (4% drift).....	172
照片 4.39 試體WOC65R3 梁腹開孔周圍的右上角已出現很大的裂縫 (5% drift).....	172
照片 4.40 試體WOC65R3 加勁板與梁上翼板全滲透鐸接的端部(開孔中心)發現有裂開的情況發生 (5% drift).....	173

照片 4.41 試體WOC65R3 加勁板與梁下翼板全滲透銲接的端部(開孔 中心)往梁端方向之下翼板發生撕裂並延伸到梁腹板開孔 (5% drift).....	173
---	-----



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，屬地質年輕之島嶼，地震發生的機率頻繁，因此耐震設計為建築結構中相當重要的一環。鋼骨抗彎構架具有高強度與高韌性的特性，目前被視為耐震能力極佳的結構系統，因此鋼骨抗彎構架經常的使用於建築設計中。

1994 年與 1995 年相繼發生美國北嶺與日本神戶大地震後，許多鋼骨構造建築發生嚴重損壞，造成嚴重的傷亡，震驚了整個工程界及學術界，為此相關單位莫不投注大量心力研究破壞原因。研究顯示破壞的原因為梁柱接頭在梁端、柱翼板、梁柱腹板交會區、鉚道及剪力板等區域因鉚接熱影響、鉚接瑕疵或幾何不連續等因素造成梁翼板接柱翼板之鉚道撕裂、梁翼板與腹板撕裂以及剪力連接板斷裂等，使得鋼骨抗彎構架未發揮塑性消能即已發生脆性破壞。由上述研究可知鋼骨抗彎構架之強度與韌性能否充分發揮，取決於梁柱接頭是否能提供足夠之強度與韌性，因此發展高韌性與高強度之梁柱接頭以提升鋼骨抗彎構架之耐震能力為目前之迫切需要。從過去的實驗研究可歸納兩種方法以改善上述梁柱接頭破壞之原因，第一種方法是減弱式，此方法是在遠離梁柱交接面之梁桿件上使其斷面積減少，使塑鉸形成於梁上而遠離梁柱交界面；第二種方法是補強式，此方法是將梁柱交接面之梁斷面之斷面積增加，提高梁柱交接面彎矩容量，使塑鉸遠離梁柱交界面。這兩種方式於工程界已被大量使用。但兩種方法各有優缺點，減弱式接頭其優點為切割工作於工廠完成、施工容易、鉚接量較少、工程費用較低及設計簡單等；缺點為側向扭轉挫屈提早發生、彎

矩強度會稍微折減以及整體結構之勁度會略為降低等。補強式接頭其優點為整體結構勁度增加且梁柱交接面梁之斷面積增加使得應力分佈可較為平均，缺點為需於工地作大量之銲接，工地銲接品質參差不齊且銲接易造成熱影響的問題，另外補強式接頭需在梁柱交接面增加子構件，而子構件的增加易使柱與梁構件交接處產生應力集中之現象，相較於減弱式接頭的設計複雜許多，同時工程費用也相對提高。

在工程上常遇到管線配置須通過梁之情形，此時需把管線由梁下繞過，管線由梁下通過，則必須加裝天花板以遮蔽管線，而使各樓層之淨高度降低，故現在的建築物會在梁腹板開孔以便管線通過，如此可增加樓層的使用效率。

對於梁腹板開孔在 AISC 規範裡有詳細規定，開孔的深度不可超過 0.7 倍的梁深，開孔的形狀在規範裡面並無嚴格的規定，但規範中將常用的矩形與圓形孔詳細的規定，並且說明圓形開孔優於矩形。當梁腹板開孔受到彎矩及剪力交互作用時，其強度會比單獨受到彎矩或剪力作用時還低，因此 AISC 規範另提供了一方程式以及設計彎矩-剪力交互作用圖用以檢核梁腹板開孔彎矩與剪力之設計強度是否安全，若不符合此方程式之條件表示彎矩及剪力之設計強度不夠需做補強，目前常用的補強方式有，於開孔區上下方以縱向加勁板於腹板銲接補強、於開孔區以一適當的開孔鋼板銲於開孔區腹板上加勁補強以及於開孔區以直徑稍大於開孔之鋼管銲於開孔區腹板上加勁補強，其中在開孔區上下方以縱向加勁板於腹板銲接之補強方式最常被使用。

鋼構造建築物鋼結構設計技術規範之鋼結構容許應力設計法以及極限設計法規範及解說兩者中都有明確的規定韌性抗彎矩構架之梁柱接頭於塑性區之梁腹板不可隨意開孔，其原因為梁在塑性區斷面

之變化會影響其塑性變形能力，若在適當的設計下斷面變化可提高塑性變形能力，反之，不當的斷面變化則會嚴重減損梁之塑性變形能力。因此除非有明確的試驗數據為依據，否則梁斷面形狀在塑性區不可隨意改變。綜合上述，梁腹板於塑性區開孔是否可以達到消能效果以及其行為是否良好，值得工程研究人員做進一步之探討。

## 1.2 研究目的

本研究之目的為發展實用性與良好韌性之抗彎接頭，而改良抗彎接頭的方式有兩種，一種是減弱式接頭，另一種為補強式接頭，因此本研究採用減弱的方式在塑性區之梁腹板開孔，而以補強的方式在梁柱交接面以適當的方式給予補強。由於鋼結構容許應力設計法以及極限設計法規範及解說兩者都有明確規定梁腹板在塑性區不可隨意開孔，以及梁腹板開孔若受到彎矩-剪力交互作用下強度會再折減，恐會造成梁之塑性變形能力嚴重折損，因此本研究除了發展優良的抗彎接頭之外，也針對塑性區之梁腹板開孔行為詳細探討。

## 1.3 研究方法

本研究參考以往梁腹板開孔之文獻及規範，定出開孔之形狀及大小，並參考切削式梁柱接頭(FEMA 350, 2000)之設計參數，定出開孔位置。開孔形狀，大小以及位置決定之後，以適當的補強方式提升梁腹開孔式接頭梁柱交接處之彎矩容量，再以實尺寸之試體進行梁柱接頭反覆載重試驗以驗證其耐震行為，期望發展具良好耐震能力之梁柱接頭。

## 1.4 論文內容

本研究為探討梁柱接頭區梁腹板開孔之耐震行為及改良方式，其研究內容如下：

第一章：敘述本研究的背景、目的及方法。

第二章：文獻回顧，再依材料力學行為及文獻定出開孔形狀、大小、位置、補強的型式及梁腹板開孔所提供的梁端位移量。

第三章：依照開孔形狀、大小、位置及補強型式規劃試體並進行梁柱接頭實尺寸實驗。

第四章：對實驗過程詳加描述並對實驗結果進行討論。

第五章：本研究的結論及建議。





## 第二章 梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式之梁柱接頭

### 2.1 文獻回顧

美國北嶺與日本神戶大地震之後，國內外對於提高鋼結構梁柱接頭之韌性研究已有一段時間，主要研究方向為確保梁柱接頭能產生塑性變形以消散地震力，其作法是將塑鉸發生位置遠離梁柱交接面，目前對於韌性抗彎矩梁柱接頭之改良，主要有減弱式與補強式兩種，一般之減弱式接頭都是在遠離柱面之梁翼板進行削弱，其翼板削弱的方式有剃度切削(Iwankiw and Charles (1996)；Chen et al. (1996))、平行切削(Engelhardt et al. (1996)；Plumier (1997)；Engelhardt et al. (1998))、圓弧切削(Engelhardt et al. (1996)；Engelhardt et al. (1998)；FEMA (2000)；陳宣維 (1999))與鑽孔式(林昆德 (1996))。而補強式接頭則是在梁柱交接面處之梁斷面上使其段面積增加，其增加梁之斷面積的方式有蓋板式(Engelhardt et al. (1995)；SAC Jiont Venture (1996)；Goel et al. (1997)；Engelhardt et al. (1998)；Goel et al. (2000)；林克強 (1992)；陳嘉有 (1995))、水平擴座式(楊榮坤 (1990)；陳嘉有 (1995))、托肩式(SAC Jiont Venture (1996)；Civjan et al. (2000)；Uang et al. (2000))、擴翼式(林群洲 (2006)；李智民 (2006))、梁翼板內側加勁式(饒智凱 (2007))與肋板補強式(Popov and Tsai (1989)；Engelhardt et al. (1995)；Zekioglu et al. (1996)；Goel et al. (1997)；Anderson and Duan (1998)；Goel et al. (2000)；Chen et al. (2004)；林昆德 (1996)；呂正安 (2001)；蔡佳良 (2002))。另外學術界對於梁腹板開孔剪力與彎矩之設計與計算方式以及剪力與彎矩之互制作用已有廣泛研究(文獻 Darwin (1990)；Chung et al. (2000)；Chung et al

(2003)；Aglan and Qaqish (1982)；Kussman and Cooper (1976)；Bower (1966)；Bower (1996)；葉木中 (1996))。因此本研究期望能夠參考國內外對於減弱式與補強式梁柱接頭以及梁桿件在腹板開孔之相關文獻，提供適合在梁腹板進行削弱之方法。

## 減弱式接頭

FEMA-350 (2000) Reduced Beam Section Connection 說明在梁末端附近處(靠近柱面)之上下翼板利用切削的方式，對梁進行減弱，而梁之上下翼板與柱翼板使用全滲透開槽銲連接，如圖 2.1 所示。此種方式之接頭不需任何補強，而梁腹板與柱翼板連接可利用全滲透開槽銲，或是傳統之剪力板螺栓接合，也可以用剪力板與梁腹板銲接接合，這些方式配合圓弧切削之接頭皆可使用在特殊或普通之抗彎構架。此文獻建議剪力板與柱翼板連接時可使用全滲透開槽銲或是填角銲，雖剪力板使用銲接接合會使得工程成本增加，但此方式能夠改善接頭之韌性能力，並可使部分作用力經由剪力板及腹板傳入柱中，降低上下翼板與柱翼板之全滲透開槽銲及扇形開孔之破壞。另外此文獻提供了圓弧切削式接頭之完整設計流程，而圖 2.1 中各符號之決定由以下方式決定之。

$$a \cong (0.5 \sim 0.75)b_{bf}$$

$$b \cong (0.65 \sim 0.85)d_b$$

c 之決定要先假設為 0.2 倍之梁翼寬，再計算出圓弧切削最深處之梁塑性斷面模數，之後利用此 FEMA-350 (2000)之 3.2.4 節與 3.2.6 節之方法計算出柱面之外力彎矩  $M_f$ ，計算  $M_f$  時會使用到  $C_{pr}$ ，這邊  $C_{pr}$  使用 1.15，最後如果  $M_f < C_{pr}R_yZ_bF_y$ ，c 值須重新假設，而 c



值不可超過 0.25 倍之梁翼寬。

## 補強式接頭

饒智凱 (2007) 於梁翼左右兩邊之內側各加鋼板，其補強型式有兩種，一種是梁上翼板及下翼板內側與腹板之相對邊各放置一片加勁板，將加勁板兩側分別與梁翼板內側及柱銲接接合，如圖 2.2 所示，另外一種是在梁翼板內側近柱邊加置全梁深之加勁板，如圖 2.3 所示。目的為改善箱型柱因梁腹對應之柱內並無直接傳遞應力之柱腹板所造成梁翼板接柱板之兩側全滲透銲接處之較大應力，並提高梁柱接頭區之彎矩容量，使塑鉸移至加勁板端部附近。結論歸納兩種加勁板設計均先假設塑鉸發生離加勁板端部四分之一梁深處，且加勁板長度建議大於梁翼板寬度，而利用梁之彎矩容量與柱面外力彎矩需求之比值  $\alpha$ ，推算出加勁板之厚度，文中建議在前述第一種加勁板補強型式之  $\alpha$  值需大於 1.03，第二種加勁板補強型式之  $\alpha$  需大於 1.07。

呂正安 (2001) 具延長段之單肋板補強，是在梁柱交接面之梁上下翼板增加單肋板補強，使梁柱交接面之彎矩容量增加，使塑鉸形成遠離柱面，梁柱均採用 H 型鋼，如圖 2.4 所示。多數單肋板研究均指出經由單肋板補強可使梁柱交接面應力有效地降低，但臨界斷面轉移至肋板末端使該處產生應力集中之現象卻無法改善，直到肋板尾端延長才解決此一難題。然而該研究僅證實此種型式接頭之可行性與功效，並未明確訂出相關之設計參數與設計流程。此研究目的希望藉由有限元素分析進行參數研究，其後依據分析結果來設計試體並進行實驗，訂出可靠之設計參數與合理、簡潔之設計流程。結果顯示參數  $\alpha$  使用 1.05、 $\eta$  使用 1.05 以及  $\gamma$  使用 1.1，較為適當。其中  $\alpha$  定義為經肋板補強後梁柱交接面塑性彎矩與該處外力彎矩之比值， $\eta$  為塑鉸形

成區之塑性彎矩與梁塑性彎矩之比值， $\gamma$ 則是梁塑性彎矩與肋板末端之外力彎矩之比值。

蔡佳良 (2002) 於梁柱交接面之梁上下翼板增加具延長段之單肋板補強，使梁柱交接面之彎矩容量增加，使塑鉸形成遠離柱面，而梁採用 H 型，柱採箱型，如圖 2.5 所示。其研究目的為探討單肋板補強應用在箱型柱接 H 型梁之行為。藉由實尺寸梁柱接頭試驗與有限元素分析，均驗證肋板補強針對箱型柱梁柱接頭，塑鉸可於肋板圓弧末端形成，而且補強段具有全段降伏之特性。另外此研究 $\alpha$ 定義為經肋板補強後梁柱交接面塑性彎矩與該處外力彎矩之比值，建議採 1.05 至 1.15 之間行為較為穩定。

Goel et al. (1997) 有限元素研究結果顯示，在抗彎接頭區的鄰近處，其應力分佈徹底與標準梁理論所假定模式下之應力分佈不同。造成此原因可能是邊界條件所假設的條件一致之影響下，出現著名的聖維南定理。透過有限元素之研究，顯示在接頭區之重要且直接之主應力分佈情形較類似於桁架中拉壓桿模式而非標準之梁理論。因此彎矩及剪力於接頭區之梁翼板附近之傳遞模式就如對角線的形式以傳遞該力量。由上述可得知接頭區之梁彎矩是透過梁翼板傳遞有如拉壓桿上下弦桿之模式；剪力之傳遞則像是對角線之拉壓桿模式。很顯然的可看出力都被導引至接頭區上下翼板，故此區域之上下翼板必須能夠抵抗彎矩及剪力之作用。而此區域之彎矩及剪力可藉由拉壓桿理論轉換成水平及垂直反作用力，再針對此反作用力在接頭區之上下翼板設計出適合的蓋板及肋板，由於力量都被導引至接頭區之上下翼板處，而柱面之梁腹板中間處並無力量往此傳遞，因此在設計上梁腹板無需與柱連接。本文獻期望藉由有限元素之分析以及拉壓桿理論於接頭區

範圍內建立出較好之實際載重路徑，以設計出適合的蓋板及肋板以抵抗地震力。結果藉由分析所得之拉壓桿形式之載重路徑，設計出適合之蓋板及肋板，其形式為在接頭區之上下翼板各用一片鋼板用填角銲與之連接，並在此鋼板上及上下翼板內側各加四塊三角形之肋板以填角銲連接，如圖 2.6 所示，並進行反覆載重實驗，實驗結果顯示層間變位角可超過 4% 弧度，塑性轉角可大於 0.04 rad.。

Goel et al. (2000) 依照 Goel et al. (1997) 拉壓桿理論，對於抗彎接頭歸納出可供工程師使用之設計流程，並對 Goel et al. (1997) 所設計之試體進行改良，將肋板由八塊改成四塊，而利用一塊 C 形狀之剪力板以填角銲的方式與梁腹板與柱翼板連接，如圖 2.7 所示，並進行反覆載重實驗，實驗結果顯示層間變位角達到 4% 弧度，可在 4% 弧度下維持四個迴圈，並且強度並無明顯折減的情況出現，滿足 AISC 所規定之特殊抗彎構架。



### 梁腹板開孔

Darwin (1990) 明確的規定出梁腹板開孔形狀、大小範圍及補強方式，並提供剪力及彎矩強度之計算方式。另外對於剪力-彎矩互制效應也有明確的說明。本文獻提出之梁腹板相關規定其鋼材都必須限制於降伏強度不大於 65 ksi 以及滿足 AISC 所規定之結實斷面。

Chung et al. (2001) 指出近年來對於 H 型梁梁腹板開圓孔之載重容量設計法都假設其塑鉸發生於梁腹板開孔後所剩之上 T 型斷面處且在受低彎矩作用下的一側。依此假設所設計的載重容量會過於保守，原因為 H 型梁梁腹板開圓孔受到破壞的地方，不一定都在上述所假設之位置。另外當載重容量增加到四個塑鉸在梁腹板開孔周圍之上、下兩 T 型斷面產生時，會出現 Vierendeel 效應，使得梁腹板開孔

後所剩 T 型斷面之彎矩容量比我們所預期的還要少。故本此文獻建立梁腹板開圓孔之有限元素模型，藉由有限元素分析以探討塑鉸發生在不同位置處對於載重容量的影響以及 Vierendeel 效應對梁腹板開圓孔之影響。從有限元素模型發現，若假設塑鉸發生於梁腹板開孔後所剩兩上、下 T 型斷面之上 T 型斷面處且在受低彎矩作用下的一側，其載重容量會比有限元素模型所分析之載重容量少百分之 5 到 10，如果假設塑鉸形成在高彎矩作用下的一側，其載重容量會比有限元素模型所分析之載重容量高百分之 10 到 15。

Chung et al. (2003) 說明 Vierendeel 效應嚴重的影響著梁腹板有單獨且較大開孔之梁桿件。梁腹板開孔的開孔深度會影響開孔部分的剪力與彎矩破壞，而開孔的範圍會影響著 Vierendeel 效應，除此之外局部的剪力及 T 型斷面的彎矩容量也會影響 Vierendeel 效應，故已經有許多有限元素的研究分析梁腹板開孔之形狀及大小對於梁桿件的影響程度。另外藉由許多有限元素的分析以比較梁腹板開孔之形狀及大小所產生各種整體的剪力-彎矩交互作用曲線，發現各種開孔形狀及大小之整體的剪力-彎矩交互作用曲線差異並不大。如此可將這些整體的剪力-彎矩交互作用曲線統整出各種開孔形狀及大小皆可用的參考曲線。此文獻目的是為了建立 Vierendeel 之參數用以評估 Vierendeel 效應在梁腹板開孔之行為。並利用彎矩及剪力之比率與 Vierendeel 之參數，在這三者之間相互比較之下能立即建立出在不同剪力-彎矩比值之下梁腹板開孔破壞模式之方法。

## 2.2 接頭區內梁腹板開孔之形狀、大小與位置

在鋼構造建築物鋼結構設計技術規範之鋼結構容許應力設計法以及極限設計法規範及解說兩者中都有明確的規定梁腹板在塑性區



不可隨意開孔，是因為梁在塑性區斷面之變化會影響其塑性變形能力，但在適當的設計下斷面變化可能提高塑性變形能力，因此本節將藉由減弱式接頭與梁腹板開孔之規範及文獻歸納出在塑性區梁腹板開孔形狀、大小與位置之可行範圍。

### 開孔形狀

依 AISC 規範所建議以及施工的便利性，開孔的形狀採用矩形與圓形為最佳，但若開孔的深度以及範圍都相同，矩形開孔在相同的範圍內所損失的面積較圓形多，因此對於試體所承受的強度以及整體勁度都比圓形來的小，並且梁腹板圓形開孔周圍的受力比矩形開孔均勻較不會有應力集中的問題且受力後的行為也較為良好，因此本研究建議開孔形狀選擇圓形較為理想。

### 開孔大小

根據文獻 Chung et al. (2001) 所規定梁腹板開圓孔的直徑範圍為 0.5 倍梁深到 0.75 倍梁深，原因為參考實際建築物上常用的尺寸大小而定，但又依據 AISC 規範所建議，圓形開孔的直徑不能超過 0.7 倍的梁深，為確保梁局部不產生不穩定的現象，若開孔深度太大易造成剩餘之上下兩 T 型斷面發生挫屈，故圓形開孔的直徑大小，建議在 0.5 倍的梁深到 0.7 倍的梁深。

### 開孔中心距柱面的距離

切削式梁柱接頭(FEMA 350, 2000)之設計參數如下：

$$a \cong (0.5 \sim 0.75)b_{bf}$$

$$b \cong (0.65 \sim 0.85)d_b$$

上述公式中之符號意義如圖 2.1 所示，如此我們參考切削式梁柱接頭 (FEMA 350, 2000) 之設計參數且根據常用之 H 型鋼尺寸，計算出開孔中心距柱面距離之範圍，再配合剪力板之寬度以及彎矩梯度之觀念，從此範圍取出更為適當之開孔中心距柱面距離之範圍。

常用 H 型鋼尺寸之梁深最大為 912 mm，最小為 496 mm，另外梁寬常用的兩種尺寸為 200 mm 與 300 mm，將這些尺寸代入切削式梁柱接頭之設計參數公式中，計算開孔中心距柱面距離之範圍，計算式如下：

$$\text{開孔中心距柱面距離之極大值：} 0.75 \times 300 + \frac{(0.85 \times 912)}{2} = 612.6 \text{ mm}$$

$$\text{開孔中心距柱面距離之極小值：} 0.5 \times 200 + \frac{(0.65 \times 496)}{2} = 261.2 \text{ mm}$$

因此開孔距柱面之距離為 261.2 mm~612.6 mm 大約為 1.1 倍之梁寬至 2.5 倍之梁寬，由於 H 型斷面的幾何形狀關係，翼板主要承受大部分的彎矩，而腹板主要承受剪力，因此在梁腹板開孔對於彎矩容量的折減其實效果不大，如圖 2.8 所示，則開孔位置須儘可能靠近柱面，才能使外力彎矩達到梁腹板開孔斷面的彎矩容量，因此開孔中心距柱面距離之最大值建議取 1.75 倍之梁寬。另外剪力板寬度大約為 90 mm 到 150 mm 之間，為了不使梁腹板開孔的位置距離剪力板太近而影響剪力板之功用，此時開孔中心距柱面距離之最小值建議取 1.45 倍之梁寬。由以上敘述可得之梁腹板開孔中心距柱面距離之範圍為 1.45 倍梁寬至 1.75 倍梁寬。

## 2.3 接頭區內之補強型式

### 補強理念

因為 H 型斷面的幾何形狀關係，翼板主要承受大部分的彎矩，而腹板主要承受剪力，因此梁腹板開孔對於彎矩容量的折減其實效果不大，對梁柱交接面的高應力集中的現象亦無法得到有效的改善，因此必須控制梁柱交接面的外力彎矩需求，雖然需控制梁柱交接面的外力彎矩需求不要高過梁斷面的彎矩容量，但因為梁腹板開孔對於彎矩容量的折減效果很小，當外力彎矩達到梁腹板開孔的彎矩容量時，梁柱交接面的外力彎矩終究超過梁斷面的彎矩容量，如圖 2.8 所示。則易會造成梁柱交接面梁翼全滲透銲接處、扇形開孔處及梁翼兩側邊緣因外力彎矩超過梁斷面的彎矩容量而產生初始裂縫導致結構體破壞。為解決此問題除了在梁腹板開孔之外，還必須在接頭區內補強，而接頭區補強則是透過剪力板或加勁板以提高梁柱交接面之彎矩容量，使得梁柱交接面的彎矩容量高於外力彎矩需求。

### 補強型式一

此一型式的補強是利用剪力板與梁柱交接面完全銲接，以提高柱面的彎矩容量，剪力板上的兩顆螺栓是為了安裝性而使用，如圖 2.9 所示。剪力板補強之設計參數分別有高度、寬度及厚度，解說如下：

高度( $h_s$ )：

基於剪力板周圍以填角銲與梁腹板相連，為了銲接的便利性，以及填角銲的腳長有足夠的空間可以連接剪力板與梁腹板，剪力板的長度建議在兩扇形開孔之間，因高度為塑性模數  $Z$  的參數之一，進而關

係斷面之彎矩容量，使剪力板厚度之決定亦受到其影響。對此剪力板的高度盡量能在兩扇形開孔之間取適當的最大值，以符合施工的便利性之外，亦同時增加彎矩容量，降低剪力板的厚度。

寬度( $b_s$ )：

依照鋼結構設計規範中的螺栓孔承壓強度規定，螺栓孔之間的間距以及與連接物周圍的距離都有相關規定，雖剪力板補強的螺栓只是為了方便安裝所使用，但本研究還是依照此規範及為了使塑鉸遠離柱面作保守的考量，因此建議剪力板寬度使用 150 mm。

厚度( $t_s$ )：

首先計算梁柱交接面的外力彎矩需求，接下來計算補強後之梁柱交接面彎矩容量，在此補強的型式是剪力強補強的型式，計算補強後之彎矩容量必須知道剪力板的長度及厚度，因此剪力板之長度，可由前述先決定之，而厚度先當未知數。最後再考慮補強後之梁柱交接面彎矩容量需提升多少倍梁柱交接面之外力彎矩需求，決定好提升多少倍之後即可推算出剪力板之厚度，詳細計算方式會在 2.4 節說明。

## 補強型式二

對於補強型式二的補強方式則是在梁上下翼板外側之間銲兩塊加勁板。加勁板三邊使用全滲透銲分別與梁上下兩翼及柱翼板連接，如圖 2.10 所示。加勁板的補強方式在高度之設計上，即為梁翼板間之距離，但因梁柱交接面梁上下翼板需跟柱翼板用全滲透開槽銲連接，必須使用背墊板，若加勁板近梁上下翼板處不預留切角，恐背墊板無法通過，如圖 2.10 所示，因此加勁板在設計上主要針對切角長度、寬度及厚度作為設計參數，決定了切角長度、寬度及厚度之後，



再考慮以何種形狀補強以對整體的行為可以有所提升。為了使加勁板不擋住開孔，以便管線能順利通過開孔，且本研究期望力的傳遞為梁傳入兩塊加勁板內，並同時達到補強的效果，因此作為加勁板形狀之主要依據。以下即是各參數的說明：

切角長度( $l_s$ )：

因加勁板三邊其中一邊會與柱翼板相連接，而梁柱交接面梁上下翼板需跟柱翼板用全滲透開槽銲連接，因此必須使用背墊板，此時如果加勁板與柱翼板連接的一邊如果高度太高會擋到背墊板，在此須特別注意切角的長度是否可讓背墊板通過。

寬度( $b_s$ )：

基於塑鉸發生的位置盡可能地遠離柱面為原則與期望柱面到開孔之間的範圍可以藉由加勁版的補強以分擔梁所承受之部分彎矩，故加勁板的寬度需配合開孔的位置設計。本研究加勁板的寬度，從柱面到開孔中心，除了讓加勁板有足夠的空間讓梁所受的彎矩導入之外，也期望塑鉸發生的位置能夠在開孔中心往梁端方向的一側發展。

厚度( $t_s$ )：

加勁板的厚度跟補強型式一剪力板的厚度所決定的方式相同，先決定加勁板切角之長度，而厚度當作未知數，利用補強後之梁柱交接面彎矩容量需提升多少倍梁柱交接面的外力彎矩需求，進而推算加勁板之厚度。

## 2.4 梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式之梁柱接頭細部設計公式

設計公式說明如下：

1. 根據基本材料力學公式以及 2.2 節得知開孔大小可得：

$$M_{p,op}'' = C_{pr} R_y Z_{b,op} F_y \quad (2.1)$$

2. 由 2.2 節得知開孔中心距柱面距離可推算梁柱交接面之外力彎矩需求：

$$V_{p,op} = \frac{M_{p,op}''}{L_b - L_{op}} \quad (2.2)$$

$$M_{p,dem} = V_{p,op} L_b \quad (2.3)$$

3. 檢核梁腹板開孔後之剪力標稱強度( $V_{n,op}$ )是否能夠承受當梁腹板開孔中心位置之梁斷面達到標稱彎矩容量( $M_{p,op}''$ )時所需之剪力( $V_{p,op}$ )，即為：

$$V_{n,op} \geq V_{p,op} \quad (2.4)$$

其中剪力標稱強度( $V_{n,op}$ )依照文獻 AISC 所提供之計算公式計算之：

$$\alpha_v = \frac{\sqrt{6}}{v + \sqrt{3}} \leq 1 \quad (2.5)$$

$$V_{n,t} = \alpha_v \frac{F_y t_{bw} s}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

$$V_{n,op} = 2V_{n,t} \quad (2.7)$$

公式 2.5 中  $v = \frac{a_0}{s}$ ，且  $a_0 = 0.45D_0$ 。其中梁腹板開孔後所剩兩 T 型斷面之深度，如圖 2.11

此外當梁腹板開孔中心位置之梁斷面達到標稱彎矩強度( $M_{p,op}''$ )時所需之剪力  $V_{p,op}$  之計算如公式 2.2 所示。最後設計結果發現  $V_{n,op} < V_{p,op}$ ，則必須對鋼梁腹板開孔之大小及位置重新選取，以鋼梁腹板開孔之大小與位置互配合使  $V_{n,op} \geq V_{p,op}$ 。

#### 4. 剪力板或加勁板厚度 $t_s$ ：

因梁腹板開孔無法有效的降低彎矩容量使的當外力彎矩達到梁腹板開孔斷面的彎矩容量時，梁柱交接面的外力彎矩會高過梁的彎矩容量，因此需提高梁柱交接面的彎矩容量，由此可得知：

$$\frac{M_{capacity}}{M_{p,dem}} = \alpha \quad (2.8)$$

$\alpha$  值參考饒智凱 (2007)與呂正安 (2006)以及蔡佳良 (2002)，最小值建議使用 1.05。再依下面公式可得知剪力板或加勁板於梁柱交接面之梁斷面塑性斷面模數  $Z_s$ ：

$$M_{capacity} = M_p'' + M_{p,s} \quad (2.9)$$

$$M_p'' = R_y Z_b F_y \quad (2.10)$$

$$M_{p,s} = R_y Z_s F_{ys} \quad (2.11)$$

$$Z_s = \frac{\alpha M_{p,dem} - M_p''}{R_y F_{ys}} \quad (2.12)$$

依 2.3 節的敘述，先決定出剪力板或加勁板的高度，再使用剪力板或加勁板於梁柱交接面之梁斷面塑性斷面模數  $Z_s$ ，推算出剪力板或加勁板的厚度。

## 2.5 梁柱接頭各變形分量計算

本研究在梁腹板開孔使得梁端總變位  $\Delta_T$  增加，因此梁端總變位  $\Delta_T$  由梁柱交會區剪力變形所造成的梁端變形分量  $\Delta_{pz}$ 、柱變形所引致梁端變形分量  $\Delta_c$ 、梁的變形分量  $\Delta_b$  以及梁腹板開孔段的變形分量  $\Delta_{op}$  所組成，如圖 2.12 其關係如下：

$$\Delta_T = \Delta_{pz} + \Delta_c + \Delta_b + \Delta_{op} \quad (2.13)$$

梁端總變位因梁腹板開孔所造成之梁端位移量還無法從梁端總變位中分離出來，因此本研究為了能夠使梁腹板開孔所造成的梁端位移量分離出來，利用力學理論之推導建立其分離公式，且公式所需之資料可藉由量測儀器量得，並同時利用有限元素軟體 ANSYS 建立適當的模型，從 ANSYS 分析所得結果驗證公式是否合理。

### 梁柱交會區變形所引致之梁端變形量

藉由配置於梁柱交會區對角線上的位移計( $\pi$ -gauge)，量得對角線上之伸長與縮短量，經幾何關係換算而得梁柱交會區剪力變形量  $\gamma_{pz}$  的量測，如圖 3.9 所示，其中假設在柱兩側承受兩反向梁端彎矩後，梁柱交會區剪力變形成為一個平行四邊形，而此平行四邊形的對

角線伸長量或縮短量相等，如圖 2.13，則經由簡化之幾何關係得：

$$\left[ (d_c + \gamma_{pz} d_b)^2 + d_b^2 \right]^{1/2} = (d_c^2 + d_b^2)^{1/2} + \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2} \quad (2.14)$$

將式 2.14 之高次項忽略不計可得：

$$\gamma_{pz} = \frac{\sqrt{d_c^2 + d_b^2}}{2d_c d_b} (\Delta_1 - \Delta_2) \quad (2.15)$$

梁柱交會區剪力變形所造成之梁端位移量為  $\gamma_{pz} L_b$ ，如圖 2.14 所示。於實際實驗過程中，A 點與 B 點為鉸接均不可位移，因此實際試體中由梁柱交會區剪力變形所引致的梁端變形分量並非如圖 2.14 所示之結果則必須加以修正。因此將圖 2.14 所示試體，以梁柱交會區中心為圓心的剛體運動，逆時針旋轉回 A、B 點鉸接位置，其旋轉角度之計算如圖 2.15 所示，A 點位置不變，當梁柱交會區受到剪力作用變形時，B 點的位置移動至 B' 點，其移動距離為  $\gamma_{pz} d_b$ ，但實際上 A 點與 B 點位置均不能移動，因此整體梁柱接頭必須做剛體運動將 B' 點迴轉回原來的 B 點，此時所迴轉之角度為  $\beta$ ， $\beta$  表示為：

$$\beta = \frac{\gamma_{pz} d_b}{H} \quad (2.16)$$

而因剛體運動會造成梁端位移量減少，其減少之位移量為  $\frac{\gamma_{pz} d_b}{H} (L_b + \frac{d_c}{2})$ ，因此可將交會區剪力變形導致梁端位移與剛體運動所導致之梁端位移疊加，如圖 2.16 所示。即可得到梁柱交會區變形所引致的梁端變形分量，如下式所示：

$$\Delta_{pz} = \gamma_{pz} L_b - \frac{\gamma_{pz} d_b}{H} (L_b + \frac{d_c}{2}) \quad (2.17)$$

## 柱變形所引致之梁端變形分量

柱變形所引致的梁端變形分量，在本研究中是以置於交會區之連續板與柱翼板的傾斜儀所量測。在只考慮柱體變形所引致之梁端變位，不考慮其他桿件之變形時，變形圖如 2.17 所示。假設在連續板與柱翼板上傾斜儀所量測到的讀數為  $T_H$  與  $T_V$ ，而此兩者讀數並非單純的柱變形，而從圖 2.18 (a)可知道當梁柱交會區未受變形時，傾斜儀  $T_H$  與  $T_V$  所量測到的讀數皆為零，再從圖 2.14 與 2.18 (b)可得知梁柱交會區受到剪力變形時傾斜儀  $T_H$  所量測到的讀數還為零，但傾斜儀  $T_V$  所量測到的讀數為  $\gamma_{pz}$ ，在此假設順時針角度為正，逆時針角度為負。之後當梁柱交會區受到剛體運動時如圖 2.15、2.16 與 2.18 (c)所示，此時梁柱交會區會逆時針旋轉一個  $\beta$  角，這時傾斜儀  $T_H$  所量測到的讀數為  $-\frac{\gamma_{pz}d_b}{H}$ ，傾斜儀  $T_V$  所量測到的讀數為  $\gamma_{pz} - \frac{\gamma_{pz}d_b}{H}$ ，最後由圖 2.17 與 2.18 (d)可知道梁柱交會區會受到柱變形而會順時針旋轉一個  $\theta_c$  角，此時傾斜儀所量測到的讀數  $T_H$  為  $\theta_c - \gamma_{pz} \frac{d_b}{H}$ ，傾斜儀  $T_V$  所量測之讀數為  $\theta_c + \gamma_{pz} - \frac{\gamma_{pz}d_b}{H}$ ，經由整理以下兩式表示之：

$$\text{連續板上的水平傾斜儀： } T_H = \theta_c - \gamma_{pz} \frac{d_b}{H} \quad (2.18)$$

$$\text{柱翼板上的垂直傾斜儀： } T_V = \theta_c + \gamma_{pz} \left(1 - \frac{d_b}{H}\right) \quad (2.19)$$

因此，柱的變形量是由傾斜儀所量測而得之數據扣除受交會區剪力影



響之數值，可由以下兩式得知：

$$\text{連續板上的水平傾斜儀：}\theta_c = T_H + \gamma_{pz} \frac{d_b}{H} \quad (2.20)$$

$$\text{柱翼板上的垂直傾斜儀：}\theta_c = T_V - \gamma_{pz} \left(1 - \frac{d_b}{H}\right) \quad (2.21)$$

而由柱變形所引致所引致的梁端變形分量則可表示為：

$$\Delta_c = \theta_c \times \left(L_b + \frac{d_c}{2}\right) \quad (2.22)$$

### 梁腹板開孔所引致之梁端變形分量

如圖 2.19 所示，把梁柱接頭柱與梁柱腹板交會區所造成的梁端位移量先忽略掉，剩下梁及梁腹板開孔所造成的梁端位移量並將梁分成三段  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ，並在右端施加一作用力，此時梁每段都因剪力與彎矩作用而產生剪力與撓曲變形，因此梁及梁腹板開孔所造成的梁端位移量是由各段的剪力、撓曲變形所產生的位移量以及因撓曲變形產生的撓角引致梁端的位移量三者所組成的。因此可知第二段( $L_2$ )所提供的梁端位移量即為梁腹板開孔所提供，取第二段開孔區段( $L_2$ )利用力學理論推算出剪力、撓曲變形以及撓角所引致的梁端位移量。

剪力作用下之梁端位移量  $\delta_2'$ ：

梁第二段( $L_2$ )剪力變形量  $\gamma_{b,2}$  與梁柱交會區剪力變形量的求法相同，是藉由配置於梁第二段( $L_2$ )對角線上的位移計(LVDT)，量得對角線上之伸長與縮短量，經幾何關係換算而得如圖 3.9 所示，梁第二段

剪力變形成為一個平行四邊形，而此平行四邊形的對角線伸長量或縮短量相等，如圖 2.20 (b)，則經由簡化之幾何關係得：

$$\left[ (d_b + \gamma_{b,2} L_2)^2 + L_2^2 \right]^{1/2} = (d_b^2 + L_2^2)^{1/2} + \frac{\Delta_e - \Delta_s}{2} \quad (2.23)$$

將式 2.23 之高次項忽略不計可得：

$$\gamma_{b,2} = \frac{\sqrt{d_b^2 + L_2^2}}{2d_b L_2} (\Delta_e - \Delta_s) \quad (2.24)$$

如此  $\delta_2'$  即為：

$$\delta_2' = \gamma_{b,2} \times L_2 \quad (2.25)$$

撓曲作用下之梁端位移量  $\delta_2''$ ：

梁第二段( $L_2$ )撓曲變形角  $\theta_2$ ，是藉由配置於梁第二段( $L_2$ )梁腹板開孔左右兩側的傾斜儀所量而得，如圖 3.9 所示。假設在梁腹板開孔左側與右側所量測到的讀數為  $\theta'$  與  $\theta''$ ，其並非梁第一段( $L_1$ )撓曲變形角  $\theta_1$  與梁第二段( $L_2$ )撓曲變形角  $\theta_2$ ，而從圖 2.14、2.16、2.17 與 2.20 (a)可知梁第二段撓曲變形角  $\theta_2$  必須加上剛體運動再扣除受交會區剪力變形量、柱的變形量以及梁第一段撓曲變形角  $\theta_1$ ，以下式表示之：

$$\theta_1 = (\theta' - \gamma_{pz} - \theta_c + \beta) \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \theta_2 &= (\theta'' - \gamma_{pz} - \theta_c + \beta) - \theta_1 \\ &= (\theta'' - \gamma_{pz} - \theta_c + \beta) - (\theta' - \gamma_{pz} - \theta_c + \beta) \\ &= \theta'' - \theta' \end{aligned} \quad (2.27)$$



圖 2.20 (c)是梁受到撓曲作用之變形圖，中性面長度( $L_2$ )保持不變，因彎矩曲率 $k$ 等於彎矩 $M$ 與楊氏模數 $E$ 及慣性矩 $I$ 乘積之比值，即 $k = \frac{M}{EI}$ ，而曲率半徑 $\rho$ 等於彎矩曲率 $k$ 之倒數，假設梁第二段兩側所承受之彎矩相同，而梁第二段兩側之 $E$ 、 $I$ 值相同，則梁第二段兩側之曲率半徑 $\rho$ 亦相同，由圖 2.20 (c)中之幾何關係可得知兩個撓曲變形量 $\lambda_2$ 是相等的，因此：

$$\theta_2 = 2\lambda_2 \quad (2.28)$$

$$\lambda_2 = \frac{\theta_2}{2} \quad (2.29)$$

撓曲變形量 $\lambda_2$ 求得後可求出梁第二段因撓曲作用所導致之梁端位移量：



$$\delta_2'' = \lambda_2 L_2 = \frac{\theta_2 L_2}{2} \quad (2.30)$$

撓曲變形產生之撓角引致梁端之位移量(如圖 2.20 (a)所示) $\delta_2'''$ ：

$$\delta_2''' = \theta_2 L_3 \quad (2.31)$$

梁第二段( $L_2$ )即梁腹板開孔造成的梁端位移量 $\delta_2(\Delta_{op})$ ：

$$\begin{aligned} \delta_2(\Delta_{op}) &= \delta_2' + \delta_2'' + \delta_2''' \\ &= \gamma_{b,2} L_2 + \frac{\theta_2 L_2}{2} + \theta_2 L_3 \end{aligned} \quad (2.32)$$

另外兩段( $L_1$ 、 $L_3$ )所造成的梁端位移量跟開孔區段( $L_2$ )形式相同，則其他兩段所造成的梁端位移量如下式：

第一段( $L_1$ )

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \delta_1' + \delta_1'' + \delta_1''' \\ &= \gamma_{b,1}L_1 + \frac{\theta_1 L_1}{2} + \theta_1(L_2 + L_3)\end{aligned}\quad (2.33)$$

第三段( $L_3$ )

$$\begin{aligned}\delta_3 &= \delta_3' + \delta_3'' \\ &= \gamma_{b,3}L_3 + \frac{\theta_3 L_3}{2}\end{aligned}\quad (2.34)$$

因此梁及梁腹板開孔所造成的梁端位移量，即為三段位移量疊加，公式如下：

$$\begin{aligned}\Delta_b + \Delta_{op} &= \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \\ &= \gamma_{b,1}L_1 + \frac{\theta_1 L_1}{2} + \theta_1(L_2 + L_3) + \gamma_{b,2}L_2 + \frac{\theta_2 L_2}{2} + \theta_2 L_3 \\ &\quad + \gamma_{b,3}L_3 + \frac{\theta_3 L_3}{2}\end{aligned}\quad (2.35)$$

梁變形所引致之梁端變形分量

梁變形所造成的梁端變形分量，即可利用梁端總位移扣除梁柱交會區剪力變形、柱變形以及梁腹開孔變形分別引致的梁端變形分量而得到。可由下式表示：

$$\Delta_b = \Delta_T - \Delta_{pz} - \Delta_c - \Delta_{op}\quad (2.36)$$

## 以有限元素分析驗證梁腹板開孔所引致之梁端變形分量推導之公式

模型採用 H 型梁結構構件進行模擬。模型建立的細節及假設如下：

1. 基本假設：建立的模型不考慮實際試體存在之殘留應力、熱影響區及背墊板效應之影響；其次，模型中亦不考慮挫屈及開裂破壞的情形。
2. 建立梁模型：梁斷面分別是 H700×300×13×24，梁長為 3700 mm。
3. 鋼材的選擇：梁採用 A572 Gr. 50，其降伏強度為 345 MPa。鋼材之應力-應變曲線簡化為二線段。材料在彈性範圍時，彈性模數 E 採用 200000 MPa；進入降伏及應變硬化階段後，鋼材之應變硬化模數分別使用 0.04E。波松比則採用 0.3。
4. 材料性質：鋼材元素採用三維結構固體元素 Soild45(3-D Structural Solid)進行模擬，每個元素有 8 個節點，每個節點有 3 個平移自由度。
5. 邊界條件之假設：分析模型之邊界條件束制條件模擬實際實驗情況並予以簡化，梁之一端模擬為固定端。
6. 施加载重：載重模擬的方式為在梁端施加單向荷重，以位移控制方式進行加載。

圖 2.21 至 2.22 為以有限元素軟體 ANSYS 所建立梁桿件腹板開孔模型之網格化圖及 Von Miss 應力分佈圖。利用軟體 ANSYS 工作面體積切割功能，將 H 型梁腹板開孔之模型分成三段以符合前述所推導

之公式。由公式 (2.35)可知，計算每段因受剪力及彎矩作用下所引致梁端之位移量前，必須先得知每段之剪力變形及撓角，則建立有限元素模型並進行分析，再由分析之結果，擷取其資料，進而推算出各段之剪力變形及撓角，再配合公式 (2.35)將剪力變形及撓角代入即可計算出梁及梁腹板開孔所造成之梁端位移量。將上述所計算出之梁端位移量再與有限元素梁腹板開孔之模型所分析之梁端位移量作比較，以驗證公式 (2.35)之正確性。如此將第二段( $L_2$ )梁腹板開孔區所造成之梁端位移量計算出來，即可分離出梁腹板開孔提供之梁端位移量。

有限元素梁腹板開孔模型之各段剪力變形量及撓角之獲得，說明如下：

### 撓角

有限元素梁腹板開孔模型之每段撓角計算均相同，而本模型為對梁端施加一向下之單向載重，因此上翼板會受到拉力而伸長，下翼板會受到壓力而縮短，對於各段之撓角計算是將各段之上翼板之伸長量減掉下翼板之縮短量再除以梁深而得。然而各段上翼板之伸長量及下翼板之縮短量可由有限元素梁腹板開孔之分析結果所得。

### 剪力變形

有限元素梁腹板開孔模型之每段剪力變形計算均相同，將各段視成一平行四邊形(如梁柱腹板交會區)，當梁端受一向下之單向載重時，平行四邊形會因受力變形，其對角線會出現伸長及縮短量，將對角線之伸長及縮短量絕對值平均之後乘上未變形之對角線長度，最後再除於各段長度與梁深之乘積，即可得到各段之剪力變形。然而各段平行四邊形對角線之伸長及縮短量可由有限元素梁腹板開孔之分析

結果所得。

表 2.1 與 2.2 是由有限元素梁腹板開孔之模型在不同層間變位角下各段之剪力變形及撓角。另外表 2.1 與 2.2 也顯示出將各段剪力變形量及撓角代入公式 (2.35) 所計算出之梁端位移量與有限元素梁腹板開孔模型所分析之梁端位移量此兩者之誤差百分比，從表 2.1、2.2 與公式 (2.35) 比較結果可知，公式 (2.35) 之推導有高度之正確性，亦說明梁腹板開孔所提供之梁端位移量是可被分離的。



## 第三章 實尺寸梁柱接頭試驗

### 3.1 引言

目前許多梁柱接頭之研究主要針對在不同柱斷面型式與梁柱接合之方式下，對於梁柱接頭之韌性與消能能力是否有所提升，因此柱斷面型式與梁柱接合之方式相形重要。本研究提出在接頭區梁腹開孔並在梁柱交接面以剪力板或加勁板補強型式接頭之相關設計，並在本章以接頭區梁腹板開孔及梁柱交接面補強之梁柱接頭型式之各項參數範圍規劃五組實尺寸梁柱接頭試驗，驗證在接頭區以梁腹板開孔及梁柱交接面補強之梁柱接頭型式是否能藉此達到消能的效果以改善傳統接頭的缺點。另外希望藉由實驗探討接頭區梁腹板開孔之行為及驗證第二章所建議之梁柱交接面之設計彎矩容量與梁柱交接面之需求彎矩之比值 $\alpha$ ，是否適用。

### 3.2 試體規劃及製作

#### 試體規劃

本研究規劃五組試體，試體規格與設計參數如表 3.1 及 3.2 所示。五組試體的尺寸、材質、開孔形狀及距離皆相同，開孔直徑選取 0.5 倍梁深及 0.65 倍梁深兩種，開孔中心到柱面之距離採取 1.59 倍梁寬。試體名稱皆以 WOC (Web Opening-Circular) 命名，數字 50 以及 65 的意思指梁腹板的圓形開孔直徑占梁深百分之 50 及 65 的意思。另外試體名稱後面英文字 R 代表的意義為補強的意思 Reinforce，數字 1, 2, 3 為補強型式。試體 WOC65 為接頭區梁腹板開孔，以梁柱交接面未補強且為傳統梁翼銲接梁腹鎖螺栓之梁柱接頭作為對照組。試體



WOC65R1 及 WOC50R1 均採用補強型式一之梁柱交接面剪力板補強方式，唯一相異處為開孔大小，改變開孔大小是為了觀察梁柱交接面受力之後應變的情況及梁斷面因開孔後承受剪力強度之程度。試體 WOC65R2 及 WOC65R3 均採用補強型式二之梁柱交接面加勁板補強方式，其中相異處為加勁板之切角大小，主要觀察加勁板切角大小不同是否會影響梁柱交接面補強之效果。另藉由試體實際行為，以了解這兩種之補強型式能否提升梁柱交接面之彎矩容量，另外透過實驗以驗證第二章所提供開孔大小及位置之參數範圍可信度。對於剪力板或加勁板於梁柱交接面之梁斷面標稱彎矩容量與梁柱交接面之需求彎矩之比值 $\alpha$ ，均採用 1.05。

### 試體製作

本實驗的梁柱接頭試體之梁與柱構件皆採用 A572 Gr. 50 鋼材，柱斷面尺寸皆為 H600×500×22×36 之熱軋型鋼。柱支承點間距離為 4000 mm，為節省材料以及配合柱支承點間距離及場地的配置，柱的總長為 5789 mm 共兩支，每支可以重複利用四次，如圖 3.1 所示。梁斷面尺寸皆為 H700×300×13×24 之熱軋型鋼，如圖 3.2 所示，而上述構件部分之實際強度由梁與柱裁取試片進行拉力試驗所得，由表 3.3 所示。梁從油壓致動器中心至柱面總長為 3700 mm。

試體 WOC65 梁腹板與剪力板採用 8 顆 FT 10 M 24 高強度螺栓結合，剪力板與梁腹板厚度均為 13 mm，高為 585 mm，寬為 110 mm，且在距離柱面約 1.59 倍梁寬(477.5 mm)處的梁腹板開一個直徑為 0.65 倍梁深的圓孔，如照片 3.1 及 3.2 所示。

試體 WOC65R1 柱翼板與剪力板的接合方式是採用開槽銲配合 9mm 的填角銲，此外梁腹板與剪力板周圍採用一個 18mm 的填角銲

接合，而剪力板的高為 550 mm，寬為 150 mm，厚度為 18 mm。剪力板上使用兩顆 FT10M24 高強度螺栓是為了梁柱接合時假固定用，如照片 3.3、3.4 及 3.5 所示。另外梁腹板與柱翼板採用 30 度全滲透開槽銲結合如照片 3.6 所示。在距離柱面約 1.59 倍梁寬(477.5)處的梁腹板開一個直徑為 0.65 倍梁深的圓孔。

試體 WOC50R1 與試體 WOC65R1 的製作大致相同，唯一相異處開孔直徑從前者的 0.65 倍梁深縮小至後者的 0.5 倍梁深。

試體 WOC65R2 柱翼板與剪力板採用 3 顆 FT 10 M 24 高強度螺栓結合，剪力板尺寸與試體 WOC65 相同，另外在梁上、下翼之間且兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板，加勁板的厚度使用 10 mm，為了使梁翼背墊板順利通過加勁板切角長度使用 45mm，寬度則是柱面到開孔中心 477.5 mm，如照片 3.7、3.8、3.9 及 3.10 所示。加勁板與兩翼板及柱翼板之間使用開槽角度為 30 度的開槽全滲透的銲接方式，並在在距離柱面約 1.59 倍梁寬(477.5)處的梁腹板開一個直徑為 0.65 倍梁深的圓孔。

試體 WOC65R3 與試體 WOC65R2 的製作方式大致相同，不同處為剪力板螺栓接合的螺栓使用數量為 8 顆，且加勁板僅在梁上翼處預留切角，如照片 3.11 所示。其長度為 22mm。

五組試體的結合細節如圖 3.3 至圖 3.7 所示。五組試體的梁與柱均於工廠進行組裝，完成之梁與柱再運至現地進行接合，於接合前梁之連續板在現地以雙開槽全滲透銲接方式與柱上、下翼板及腹板連接。為模擬工地現場銲接之情形，五組試體的梁在與柱接合時，會先以天車把試體梁吊成水平並垂直於柱面，之後在接續處之梁翼採用開槽角度為 30 度的開槽全滲透的銲接方式，且上、下翼板的背墊板均

未移除，並在背墊板下方再增加一個 8 mm 的填角鐸，如照片 3.12 及 3.13 所示。以上鐸接都遵循 AWS 的鐸接程序，鐸材均採用直徑 1.2 mm 並以 CO<sub>2</sub> 半自動化的方式進行鐸接。

### 3.3 試驗裝置

當發生地震時，結構體會受到地震的側向作用力而變形，因此在梁及柱中點形成反曲點，本研究之實尺寸梁柱外部子結構試體取梁及柱撓曲反曲點，即梁全跨之半而柱為相鄰兩樓層柱高之半，且兩端模擬成簡支承，並在梁自由端施以反覆荷重來模擬實際構架之梁柱接頭受地震側向力的情況。此外實際結構中的梁有樓板等側向束制條件而較無側向扭轉的產生，所以在實驗時為避免發生平面外變形，在試體適當的位置架設側向支撐，如圖 3.8 與照片 3.14 所示。

### 3.4 量測系統

為量測柱、梁、梁腹板開孔及梁柱腹板交會區的變位，需在柱的上連續板以及柱翼板架設兩個傾斜儀，量測因柱變形而產生的轉角  $\theta_c$ ，此外在梁柱腹板交會區的對角線上架設兩個  $\pi$ -gauge 藉以計算出梁柱腹板交會區的剪力變形  $\gamma_{pz}$ 。另外在距開孔邊緣兩側 10 mm 的地方上下梁翼板各焊 4 根螺桿用以裝設鋁板以便兩個傾斜儀的架設，此時的傾斜儀是用來量測梁第一段及第二段因各種變形所產生的角度  $\theta'$ 、 $\theta''$ ，但此時所量測的角度  $\theta'$  及  $\theta''$  均包含柱之轉角  $\theta_c$ 、剛體運動所產生之  $\beta$  及梁柱腹板交會區之剪力變形  $\gamma_{pz}$ ，而由第二章第五節得知，梁腹板開孔區所造成的梁端位移量，要使之分離時需要第二段 ( $L_2$ ) 的撓角  $\theta_2$ ，這時可從量測系統所量得的  $\theta_c$ 、 $\theta'$ 、 $\theta''$ 、 $\gamma_{pz}$  及  $\beta$  去

推算出  $\theta_2$ ，即  $\theta_2 = (\theta'' - \theta_c - \gamma_{pz} + \beta) - (\theta' - \theta_c - \gamma_{pz} + \beta)$ ，再由第二章第五節得知，梁腹板開孔區所造成的梁端位移量，要使之分離還須知剪力變形量  $\gamma_{b,2}$ ，所以在梁腹板開孔區對角上架設兩支 LVDT 位移計以得梁腹板開孔區的剪力變  $\gamma_{b,2}$ ，如此得知撓角與剪力變形即可帶入公式 (2.32) 計算出梁腹板開孔所佔梁端位移量的百分比。此外，為了瞭解試體受力時的行為，再梁上下翼板貼單軸應變計，在梁腹板開孔周圍貼三軸應變計，各量測儀器之架設位置如圖 3.9、3.10、3.11 及照片 3.15 所示。

### 3.5 試驗程序

試體以油壓致動器於懸臂梁自由端施加反覆載重，其層間變位角位移行程則依照 AISC (2002) 所規定。抗彎矩構架受側向力作用時之層間變位角，如圖 3.12 所示。取子結構並順時鐘旋轉即可得到圖 3.12，由幾何關係可之圖 3.12 之層間變位角  $\theta$  為梁端總變位  $\Delta_{CL}$  除以梁端至柱中心之長度  $L_{CL}$ 。試體於位移歷程為 0.375%、0.5%、0.75% 弧度之下依序加載六個迴圈，接下來四個迴圈為 1% 弧度，而 1.5%、2%、3%、4%、5% 弧度則為兩個迴圈，往後的增量為每增加 1% 弧度施載兩個迴圈，至試體破壞為止，如圖 3.13 所示。

## 第四章 實驗結果與討論

### 4.1 試體行為

#### 試體 WOC65

試體 WOC65 為梁腹板開孔孔徑為 455 mm 且腹板與剪力板採螺栓接合的梁柱接頭，試體於層間變位角 0.375% 至 0.75% 弧度前皆為線性階段，觀察試體未發現明顯的變化。

位移歷時至層間變位角 1% 弧度時，載重-位移曲線圖 4.1 (a)開始彎折，試體行為進入塑性階段，於接近梁上翼全滲透銲道之梁腹扇形開孔處開始降伏，呈交叉狀斑紋剝落(如照片 4.1)，其發展方向與梁翼縱方向呈 45 度，此一區域為梁腹扇形開孔相交的幾何不連續處，可能有局部應力集中的現象；下翼板在近全滲透銲道的梁翼邊緣處開始降伏，下翼板表面石灰呈放射狀斑紋剝落(如照片 4.2)；梁腹板開孔周圍發現交叉狀斑紋石灰剝落(如照片 4.3)，其發展方向與梁腹縱方向呈 45 度，顯示梁腹板開孔會在開孔的對角線處產生拉壓力場。

進入 1.5% 弧度後，上翼板距柱面約 250 mm 處開始出現與翼寬平行之橫向斑紋剝落(如照片 4.4)，表示此一區域開始進入降伏。梁下翼板之放射狀斑紋石灰剝落增加並往梁端的方向延伸(如照片 4.5)。梁腹板開孔周圍交叉狀斑紋石灰剝落的現象持續增加並往梁翼方向延伸。最後在 1.5% 第一迴圈負位移時，上翼板發生突然性斷裂，此時載重劇降於是實驗終止。試驗結束後，觀察上翼板撕裂狀態，發現梁翼板於扇形開孔處產生開裂並向兩側延伸導致整個上翼板斷裂(如照片 4.6)。至於下翼板與梁腹板開孔只見石灰的剝落範圍擴大。



## 試體 WOC65R1

試體於層間變位角 0.5% 弧度時，觀察到試體在梁腹板開孔周圍有些許的石灰剝落的現象發生，其發展方向與梁腹縱方向呈 45 度(如照片 4.7)，表示此處在初始狀態下有應力集中的現象。

進入 0.75% 至 1% 弧度之間仍處於線性階段，但在 0.75% 弧度時，距柱面約 200 mm 之梁上翼板邊緣處有少許的橫向斑紋石灰剝落且有往內延伸的趨勢。下翼板於柱面背墊板處出現類似 V 字型的斑紋石灰剝落(如照片 4.8)，推測梁翼-梁腹之扇形開孔造成應力集中的現象。位移行程增至 1% 弧度時，試體的載重-位移曲線圖 4.2 (a)開始彎折，即進入塑性階段，此時梁上翼板邊緣平行翼寬之橫向斑紋石灰剝落開始往內側增加(如照片 4.9)，顯示此處開始進入降伏狀態。下翼板出現斜向石灰剝落由扇形開孔處往梁腹板開孔方向，呈放射狀延伸擴張，其範圍距柱面約 150 mm~200 mm 之間，除此之外與上翼板相同位置處也開始出現橫向斑紋石灰剝落(如照片 4.10)。

完成 1.5% 弧度時，上、下翼板石灰剝落已呈大範圍分佈，顯示降伏狀態以由局部位置擴展至全區域降伏。梁腹板開孔周圍並以開孔圓心為基準的對角線上，石灰也已大量剝落並往兩翼方向延伸(如照片 4.11)，顯示梁腹板開孔周圍受到拉壓力場作用。

實驗進行至 2% 弧度時，上翼板開始出現輕微的挫屈(如照片 4.12)，此時上、下翼板石灰已大量剝落，表示塑鉸的機制已產生。經歷到 3% 弧度時，上翼板挫屈更加嚴重，下翼板也開始出現挫屈，而梁腹板開孔由圓形變形成橢圓形(如照片 4.13)且稍微出現面外挫屈的現象。



當位移達到 4% 弧度時，載重-位移曲線圖顯示此時力量遞減，上、下翼板已嚴重挫屈，石灰剝落的範圍更延伸到梁腹板開孔與梁端之間。梁腹板開孔周圍的石灰已大量剝落且以梁腹板開孔的圓心為基準的對角線方向往兩翼擴張，表示受到極大的拉壓力場作用，造成梁腹板開孔成橢圓形狀，並出現嚴重的面外挫屈(如照片 4.14)

最後層間變位角到達 5% 弧度第一迴圈時，因上、下翼板挫屈及梁腹板開孔面外挫屈已非常嚴重，因此載重劇降，此時正負方向最大載重分別為+277kN 與-211kN。第二迴圈負位移時，試體發出巨大的撕裂聲，觀察得知梁腹板開孔周圍對角線之鋼材突然發生撕裂破壞的現象(如照片 4.15)，此時載重迅速下降，因而實驗終止。

### 試體 WOC50R1

試體 WOC50R1 於層間變位角 0.75% 之前還保持在彈性範圍內，此時試體並無明顯變化。進入 0.75% 弧度時，下翼板梁柱交接處之背墊板附近發生石灰剝落的現象發生，剝落的方向與下翼板寬平行，且下翼板中間處出現 V 字型橫紋石灰剝落的現象發生(如照片 4.16)，推測 V 字型尖頭處為梁腹扇形開孔相交的幾何不連續處，可能有局部應力集中的現象。梁腹板開孔周圍處出現與梁腹縱方向呈 45 度的少許石灰剝落(如照片 4.17)，可能是梁腹板主要承受剪力所造成。

位移行程走至 1% 時，由載重-位移曲線圖 4.3 (a)可看出試體於此時進入塑性階段，在梁柱交接面及距柱面約 300 mm 之梁上翼板出現石灰剝落的現象且剝落的方向平行於翼寬並由翼板邊緣往中心延伸(如照片 4.18)。下翼板除了梁柱交接面有石灰剝落外，與上翼板相同的位置開始出現橫向斑紋剝落，顯示上、下兩翼此時此處已進入降伏狀態。

層間變位角達到 1.5% 弧度時，上翼板石灰剝落的情況持續往柱面方向擴大。下翼板距離柱面 300 mm (直角尺黑色膠帶所標定位置) 翼板邊緣處開始有橫向斑紋石灰剝落且在翼板中心處有斜向石灰剝落的現象產生(如照片 4.19)，與梁翼縱向呈 45 度，推測可能此處是梁翼板與梁腹板的交接處，而因梁腹板開孔承受剪力的能力下降，因此剪力傳入梁翼板所造成。

經歷 2% 弧度時，隨著位移行程增加上、下翼板石灰剝落的現象逐漸延伸擴大。梁腹板開孔周圍石灰剝落的情況持續以開孔圓心為基準的對角線方向往梁腹板開孔兩側向翼板延伸(類似交叉狀)(如照片 4.20)，顯示出梁腹板開孔周圍承受相當大的拉壓力。

完成 3% 弧度時，上、下翼板距柱面 200 mm~400 mm 石灰剝落的現象已變成大範圍，表示此區段以全段降伏並且開始出現輕微的挫屈現象，顯示塑鉸機制已在此處發生。到了 4% 弧度時，上、下翼板挫屈已非常明顯(如照片 4.21)，石灰剝落的範圍也擴大至梁腹板開孔與梁端之間。此時梁腹板開孔中心周圍的石灰已幾乎完全掉落並出現嚴重面外挫屈的現象(如照片 4.22)。梁腹板開孔雖出現面外挫屈，但梁腹板開孔縮小的原因所承受拉壓力增大，因此還未出現梁腹板開孔成橢圓形狀。

反覆加載達到層間變位角 5% 時，上、下翼板挫屈已非常明顯，載重-位移曲線顯示此時力量有些許的衰減。梁腹板開孔周圍的面外挫屈非常嚴重。最後到了 5% 弧度第二迴圈時，因試體嚴重挫屈，載重下降太多，此時正負方向載重最大值為 +600kN 與 -551kN，因此實驗終止。

## 試體 WOC65R2

試體 WOC65R2 試體於層間變位角 0.75% 時，梁上翼板距柱面大約 250 mm(直角尺黑色膠帶所標定處)之左右兩側翼板邊緣處有與梁翼縱向呈 45 度石灰剝落現象發生(如照片 4.23)。下翼板近柱面處出現與試體 WOC65R1 及 WOC50R1 一樣的 V 字型斑紋，石灰剝落的現象也較為嚴重，由此可知此處有較高應力集中，可能為試體最終破壞之處，除了柱面有石灰剝落之外與上翼板相同範圍處有放射狀的斑紋由翼緣逐漸往翼中心剝落(如照片 4.24)。梁腹板開孔周圍的情況都與前幾組類似，有些許的石灰剝落，其方向也是與梁腹縱向呈 45 度(如照片 4.25)。上述的這些區域顯示都開始進入降伏的狀態。

層間變位角 0.75% 弧度之前，試體還保持在線性狀態，在進入 1% 弧度時，試體已進入塑性階段。在梁上、下翼板的石灰剝落的情形逐漸增多並往柱面的方向擴大。梁腹板開孔周圍此時並無太大的變化。達到 1.5% 弧度時，石灰剝落的情況大致與 1% 弧度時相同，都以放射狀的斑紋持續增加。

經歷 2% 弧度時，加勁板與梁上翼板全滲透銲接處開始有石灰剝落(如照片 4.26)，表示此處銲道承受相當大的應力，由此可看出加勁板開始進入降伏狀態。腹板開孔周圍石灰剝落的情況雖持續擴大，但比起前幾組試體，石灰剝落的情況不會大量的往梁腹板開孔的左右兩側擴大(如照片 4.27)，可能因為加勁板補強的原因，幫助梁腹板所承受之剪力部分由加勁板承受。

完成 3% 弧度，上、下翼板距柱面到梁腹板開孔中心之間的石灰已大量剝落，可見降伏的範圍由局部擴大到全段降伏，並且開始出現挫屈現象(如照片 4.28)，這也表示塑鉸的機制在此處產生。加勁板除

了與梁翼之全滲透鐸道處有石灰剝落之外，在加勁板靠近梁腹板開孔的邊緣處也開始有少許的石灰剝落(如照片 4.29)。最後實驗來到 3% 弧度第二迴圈正位移時，突然一聲巨響，發現下翼板發生突然性斷裂，此時載重劇降於是實驗終止。試驗結束後，觀察上翼板撕裂狀態，發現梁翼板於扇形開孔處產生開裂並向兩側延伸導致整個下翼板斷裂(如照片 4.30)。

### 試體 WOC65R3

試體 WOC65R3 與試體 WOC65R2 改良型式上大致上相同，不同的地方是加勁板在與柱翼-梁翼相交接的角落所預留洞的大小不同，如圖 3.7 所示。試體於層間變位角 0.375% 至 1% 弧度之試體行為與試體 WOC65R2 相似，只是試體 WOC65R3 之上、下翼板在靠近柱面處的石灰剝落的情況沒有像 WOC65R2 如此嚴重，尤其是下翼板(如照片 4.31)，推測是加勁板與柱翼-梁翼相交接的角落完全接合，因此梁下翼板在靠近柱面處的應力部分由加勁板承受。進入 1% 弧度，載重-位移曲線圖如圖 4.5 (a)開始曲折，表示試體已進入塑性階段。來到 1.5% 弧度時，梁翼板石灰剝落增加，並以輻射狀斑紋逐漸往柱面剝落，除了有輻射狀斑紋之外，在柱翼全滲透鐸道-扇形開孔處出現與翼寬平行之橫向斑紋。(如照片 4.32)

經歷 2% 弧度時，石灰剝落的情形更加嚴重，在加勁板端部(開孔中心)附近之上、下翼板開始有輕微的挫屈的現象發生(如照片 4.33)。此時加勁板開始有些許的石灰剝落(如照片 4.34)，由此可知加勁板開始進入降伏狀態。梁腹板開孔周圍的石灰剝落也持續的往開孔兩側擴大，但比起試體前三組來看，石灰剝落的現象沒有之前的試體所來的嚴重，推測可能為加勁板補強的關係，幫助梁腹板所受的力部分由加



勁板承受。

完成 3% 弧度時，上、下翼板石灰剝落的情況由局部演變為大範圍剝落，顯示此區域的降伏以達全區段降伏，並由照片 4.35 可看出剝落的範圍大部分集中在距柱面 300 mm~500 mm 之間，挫屈的現象也非常明顯的在此區間發生，表示此區段是發生塑鉸機制的地方。

到了 4% 弧度時，上、下翼板挫屈更加明顯，此時下翼板邊緣之全滲透銲道處出現很小的裂縫(如照片 4.36)，表示梁翼-柱面全滲透銲道處還是承受相當大的應力。梁腹板開孔周圍開始出現明顯的面外挫屈現象(如照片 4.37)，但與前三組比較，面外挫屈的情形較為輕微且開孔形狀尚未變形成橢圓形，表示梁腹板開孔直徑雖大，但經過加勁板的補強可有效的幫忙承受梁腹板的拉壓力作用。此外加勁板石灰剝落的情形已由柱翼及梁翼之全滲透銲道處往加勁板內延伸，且出現輕微的面外挫屈(如照片 4.38)。來到了 4% 弧度第二迴圈，載重-位移曲線已經開始有些許的遞減。

反覆加載達到層間變位角 5% 第一迴圈弧度時，上、下翼板嚴重的挫屈，梁下翼-柱面全滲透銲道背墊板邊緣處的裂縫並未持續擴大，表示加勁板的補強還是有改善柱面高應力的現象。梁腹板開孔周圍及加勁板面外挫屈更加明顯，另外梁腹開孔周圍的右上角已出現很大的裂縫(如照片 4.39)，載重也明顯的降低，走完第一迴圈時，正負方向的最大載重分別為+528 kN 與-353kN。最後位移走到 5% 弧度第二迴圈正位移時，加勁板與梁上翼板全滲透銲接的端部(開孔中心)發現有裂開的情況發生(如照 4.40)，且加勁板與梁下翼板全滲透銲接的端部(開孔中心)往梁端方向之下翼板突然發生嚴重的撕裂情況並延伸到梁腹板開孔(如照片 4.41)，表示加勁板端部會造成翼板局部應

力集中的現象，此時載重劇降於是實驗終止。

## 4.2 試體破壞模式

本研究所使用之各試體由於設計參數不盡相同，因此最終實驗結束時各試體亦有不同之破壞模式，其破壞模式簡列於表 4.1 並列述如下：

### 試體 WOC65

試體 WOC65 的破壞模式為梁上翼板於柱面處延梁翼寬度方向斷裂，其撕裂的情形是由扇形開孔處向翼板兩側伸展，由此可知試體 WOC65 在未發揮鋼結構之韌性能力前就發生破壞，表示傳統的剪力板螺栓接合配合梁腹板開孔還是因為應力最大值發生於柱面，而此處因銲接熱影響及幾何形狀不連續等因素影響，最終造成翼板產生脆性破壞而無法發揮其應有的韌性行為，如此必須配合補強的方式加以改善。

### 試體 WOC65R1 與 WOC50R1

試體 WOC65R1 破壞模式為梁翼及梁腹相繼在層間變位角 2% 弧度時產生輕微挫屈，在強度未下降之下，又經過三個位移行程，達到 5% 弧度時挫屈變的非常嚴重，此時突然發生一聲巨響，發現梁腹板開孔周圍以開孔圓心為基準的對角線上四個角隅出現嚴重的撕裂情形，其撕裂的方向是往柱面以及梁端延伸，最終破壞的模式為梁腹板開孔四個角隅往柱面及梁端的方向撕裂。在試體儀器全部拆除後，觀察試體發現，梁翼全滲透銲與腹板、剪力板-柱翼板間全滲透銲表現良好，未發現任何裂縫。試體 WOC50R1 因在 5% 弧度時翼板及梁腹



開孔周圍的挫屈及面外挫屈相當嚴重，此時載重遞減甚多，因此判定為試體最終破壞。觀察試體並未有任何地方出現裂縫，整體勁度表現良好。與試體 WOC65 比較，此兩組經補強後行程位移皆可走到 5% 弧度，且此型式的補強可有效的改善梁柱交接面高應力的現象。另外梁腹板開孔的直徑由此兩組試體可顯示直徑如果越大對整體的載重行為越差，且梁腹板開孔周圍容易因剪力作用而造成撕裂破壞。

### 試體 WOC65R2 與 WOC65R3

試體 WOC65R2 破壞模式為梁下翼板及在層間變位角 3% 弧度時試體發出巨響，下翼板於柱面處延梁翼寬度方向斷裂，其撕裂的情形是由扇形開孔處向翼板兩側伸展，原因是此處為梁腹扇形開孔相交的幾何不連續處，會有局部的應力集中現象，導致此處突然性的撕裂。試體 WOC65R3 破壞模式為梁翼板於層間變位角 2% 弧度時產生輕微挫屈，在強度未下降的情況下來到 4% 弧度，發現在下翼板-柱面全滲透鐸道背墊板邊緣處發現有微小的裂縫產生以及梁腹板開孔周圍出現明顯的面外挫屈。試體在產生裂縫後能仍維持一個位移行程到 5% 弧度，此時發現梁腹板開孔周圍的右上角出現很大的裂縫，裂縫往梁端的方向延伸，之後到了 5% 弧度第二圈時，試體突然發生巨響，發現加勁板與梁下翼板全滲透鐸接的端部(開孔中心)往梁端方向之下翼板發生撕裂的情形，且撕裂的範圍從下翼板到梁腹板，載重瞬間驟降，因而判定此為試體最終破壞。此兩組試體與試體 WOC65 比較發現，若加勁板與柱翼-梁翼相交接角落的切角預留過大，還是無法改善柱面高應力的現象，因此儘可能的把此處填滿，只需剛好讓上翼板全滲透鐸道下之背墊板通過即可。

實驗結果顯示，兩種補強型式皆可改善柱面高應力現象。若以相

同的梁腹板開孔直徑(0.65 倍梁深)相比，試體 WOC65R1 與試體 WOC65R2 梁腹板開孔直徑相同並分別代表著本研究兩種不同的補強方式，以穩定度來看試體 WOC65R1 優於試體 WOC65R2，但在承載能力方面試體 WOC65R2 優於試體 WOC65R1。若梁腹板開孔直徑減小至 0.5 倍梁深，試體 WOC50R1 即可穩定的走位全部行程且載重能力提高，此外本實驗雖未對梁腹板開孔直徑為 0.5 倍梁深以加勁板加以補強之型式作實尺寸實驗，但可從試體 WOC65R3 可觀察出此試體在 4% 弧度時，在下翼板邊緣之全滲透鐸道處出現很微小的裂縫，雖走至 5% 弧度時裂縫並未增大，但顯示出翼板全滲透鐸道處仍承受相當大的應力，若梁腹板開孔直徑縮小，由彎矩梯度的觀念得知，柱面所承受的應力會比梁腹板開孔直徑較大的還要高，如此若以試體 WOC65R3 的加勁板補強方式相同，可能在發揮消能行為之前試體已發生破壞。綜合上述觀點，剪力板與梁腹板完全鐸接及梁腹板-柱翼板採用全滲透鐸之補強型式(試體 WOC65R1 與 WOC50R1)，使梁柱接頭可發展較為穩定之韌性行為。

### 4.3 韌性能力

以塑性轉角大小來判定評斷梁柱接頭韌性能力是現行規範中所採用的標準。國內規範(內政部營建署 1999)的標準是以塑性轉角的大小來判斷梁柱接頭之韌性能力，並規定韌性抗彎構架之梁柱接頭塑性轉角  $\theta_p$  應以下述三規定之一決定之：

1. 3% 弧度。
2. 非線性動力分析所得之最大塑性轉角加上 0.005 弧度。
3.  $\theta_p = 1.1(R - 1.0)\theta_E$

其中： $R$  = 結構系統韌性容量

$\theta_E$  = 在設計定震力  $E$  作用下之最大層間變位角。

AISC (2005)之相關規定為：測試試體之層間變位角需達到 4% 弧度，且於柱面之彎矩強度必須大於 80% 之標稱彎矩強度。層間變位角(單位：弧度)乃定義為層間變位除以樓層高度。

本研究五組試體之塑性轉角、層間變位角及梁腹板開孔所造成梁端之轉角列於表 4.1 與 4.2，表中可看出試體 WOC65 及試體 WOC65R2 無法達到 AISC 要求達層間變位角 4% 弧度的標準。其餘的三組試體梁腹板開孔經補強皆符合上述之相關規定，顯示梁腹板開孔經補強接頭之韌性行為優良。各試體之遲滯迴圈分別為圖 4.1 至圖 4.5 所示，其中圖 (a)至圖 (h)分別代表試體之載重-位移圖(彎矩-層間變位角圖)、彎矩-塑性轉角圖、彎矩-接頭梁腹板區轉角、彎矩-柱轉角圖、彎矩-梁腹板開孔區剪力作用造成梁端之轉角、彎矩-梁腹板開孔區撓曲作用造成梁端之轉角，彎矩-梁腹板開孔區之梁端總轉角，彎矩-梁扣除梁腹板開孔區之梁端總轉角。彎矩-層間變位角圖中虛線為梁之標稱彎矩強度及 80% 梁之標稱彎矩強度，以下由各試體之遲滯迴圈分述各試體之韌性行為：

試體 WOC65 之遲滯迴圈如圖 4.1 所示，其中圖 4.1 (a)至 (h)分別代表試體之。由圖 4.1 (a)可看出，試體未完成 3% 弧度行程就產生翼板撕裂破壞，顯示傳統接頭只在梁腹板開孔其韌性能力不足；圖 4.1 (b)顯示塑性總轉角僅達+0.4% 及-0.2% 弧度，未符合規範要求；圖 4.1 (c)與圖 4.1 (d)顯示柱處於彈性階段而接頭腹板區已有部分進入降伏狀態；圖 4.1 (e)顯示梁腹板開孔因剪力作用造成梁端變位之轉角可達+0.1% 及-0.09% 弧度；圖 4.1 (f)顯示梁腹板開孔因撓曲作用造成梁

端變位之轉角可達+0.2% 及-0.2% 弧度；圖 4.1 (g)顯示梁腹板開孔之總轉角可達+0.3% 及-0.3% 弧度；圖 4.1 (h)顯示梁扣除梁腹板開孔之總轉角可達+0.72% 及-0.70% 弧度。

試體 WOC65R1 與 WOC50R1 之遲滯迴圈如圖 4.2 與 4.3 所示。由圖 4.2 (a)顯示試體挫屈後強度出現衰減，在 4% 與 5% 弧度衰減強度比  $M_p$  低，且層間變位角可達+4% 及-4% 弧度，而圖 4.3 (a)顯示試體 WOC50R1 挫屈後強度雖有衰減現象，但下降後的強度仍較  $M_p$  高，且層間變位角可達+5% 及-5% 弧度；圖 4.2 (b)與圖 4.3 (b)顯示試體 WOC65R1 塑性總轉角可達+3.1% 及-3.2% 弧度，試體 WOC50R1 顯示塑性總轉角可達+3.9% 及-4% 弧度；圖 4.2 (c)與圖 4.2 (d)以及圖 4.3 (c)與圖 4.3 (d)都顯示試體 WOC65R1 與 WOC50R1 之柱處於彈性階段而接頭腹板區已有部分進入降伏狀態；圖 4.2 (e)與圖 4.3 (e)顯示試體 WOC65R1 之梁腹板開孔因剪力作用造成梁端變位之轉角可達+1.7% 及-1.7% 弧度，而試體 WOC50R1 可達+0.9% 及-0.6% 弧度；圖 4.2 (f)與圖 4.3 (f)顯示 WOC65R1 之梁腹板開孔因撓曲作用造成梁端變位之轉角可達+2.7% 及-2.8% 弧度而試體 WOC50R1 可達+1.9% 及-1.7% 弧度；圖 4.2 (g)與圖 4.3 (g)顯示試體 WOC65R1 之梁腹板開孔之總轉角可達+4.4% 及-4.5% 弧度，而試體 WOC50R1 可達+2.7% 及-2.1% 弧度。由此可見梁腹板開孔愈大所提供的梁端位移量愈多；圖 4.2 (h)與圖 4.3 (h)顯示試體 WOC65R1 之梁扣除梁腹板開孔之總轉角可達+1.2% 及-1.0% 弧度，而試體 WOC50R1 可達+2.1% 及-2.6% 弧度。

試體 WOC65R2 與 WOC65R3 之遲滯迴圈如圖 4.4 與 4.5 所示。由圖 4.4 (a)可看出，試體 WOC65R2 在 3% 弧度第二迴圈正位移就產



生翼板撕裂破壞，顯示此試體梁腹板開孔經補強後之接頭其韌性能力不足，圖 4.5 (a)顯示試體 WOC65R3 試體挫屈後強度出現衰減，在 5% 弧度第一迴圈衰減強度比  $M_p$  低，且層間變位角可達+5% 及-5% 弧度；圖 4.4 (b)顯示試體 WOC65R2 塑性總轉角僅達+1.7% 及-1.7% 弧度，未符合規範要求，圖 4.5 (b)顯示試體 WOC65R3 塑性總轉角可達+4% 及-4.3% 弧度；圖 4.4 (c)與圖 4.4 (d)以及圖 4.5 (c)與圖 4.5 (d)都顯示試體 WOC65R2 與 WOC65R3 之柱處於線性狀態而接頭腹板區已有部分進入降伏狀態；圖 4.4 (e)顯示試體 WOC65R2 梁腹板開孔因剪力作用造成梁端變位之轉角可達+0.2% 及-0.2% 弧度，而圖 4.5 (e)顯示試體 WOC65R3 可達+1.1% 及-1.7% 弧度；圖 4.4 (f)顯示試體 WOC65R2 梁腹板開孔因撓曲作用造成梁端變位之轉角可達+0.8 % 及-0.7% 弧度，而圖 4.5 (f)顯示試體 WOC65R3 可達+2.1% 及-2.8% 弧度；圖 4.4 (g)與圖 4.5 (g)顯示試體 WOC65R2 與試體 WOC65R3 之梁腹板開之總轉角分別可達+1.0% 及-0.9% 弧度以及+3.2% 及-4.5% 弧度；圖 4.4 (h)與圖 4.5 (h)顯示試體 WOC65R2 之梁扣除梁腹板開孔之總轉角可達+1.1% 及-1.1% 弧度，而試體 WOC65R3 可達+1.1% 及-1.4% 弧度。

由遲滯迴圈圖及表 4.3 可看出試體 WOC65R1、WOC50R1 及 WOC65R3 層間變位角均達到 4% 弧度，於柱面之彎矩強度均大於 80% 之標稱彎矩強度，且最大彎矩強度均大於梁之標稱彎矩強度，表示此三組試體可完全達到規範要求。本研究梁腹板開孔的補強型式有兩種，先觀察相同型式的補強方式再將此兩種補強型式相互比較，可發現試體 WOC65R1 與 WOC50R1 這兩種相同補強的方式皆可達到 5% 弧度位移行程，若開孔直徑愈大發現載重能力愈差及強度衰減愈多且梁腹板開孔所提供之梁端位移量愈多。另外試體 WOC65R2 與

WOC65R3 這兩種相同補強的方式無法完成 5% 弧度位移行程，由位移行程的穩定度看來補強型式 R1 優於補強型式 R2 及 R3，但在相同的開孔直徑下，試體的整體勁度補強型式 R3 優於補強型式 R1 且強度衰減的程度補強型式 R1 會大於補強型式 R3。

## 4.4 極限彎矩強度

表 4.4 為試體之彎矩強度表。 $M_{test,j}/M_p$  為柱面在極限狀態下之彎矩強度與梁標稱彎矩強度之比值，由表 4.4 可得知除了試體 WOC65 之外，其餘四支試體之  $M_{test,j}/M_p$  比值均大於 1，表示梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式之接頭，其極限彎矩強度可達到梁之標稱彎矩強度，符合規範要求。

$M_{test,j}/M_J'$  代表柱面於極限載重作用下之降伏狀態，比值若大於 1 代表柱面產生塑鉸後應變硬化之程度，值愈大則應變硬化程度愈高；若值小於 1，表示梁柱面尚未達全斷面降伏。由表 4.4 可看出五組試體之  $M_{test,j}/M_J'$  比值皆小於 1，表示梁於柱面處尚未達全斷面降伏。試體 WOC65 之接頭採傳統式接頭，另外在梁腹板開孔，此型式接頭還未達到極限彎矩強度，就因扇形開孔之應力集中現象，造成梁翼-柱翼之全滲透開槽銲發生撕裂破壞，因此  $M_{test,j}/M_J'$  比值小於 1，如此表示此一型式之接頭，無法改善接頭區高應力之現象。試體 WOC65R1 與 WOC50R1 是梁腹板開孔且接頭處採用剪力板補強型式，兩組試體不同的地方是開孔之大小，此兩組由  $M_{test,j}/M_J'$  比值可看出外力彎矩均未達到梁柱交接面實際之塑性彎矩強度，且兩組試體之層間變位角皆可達 5% 弧度，顯示出剪力板補強型式可改善扇形開孔處應力集中，並降低接頭區之高應力現象，另外開孔愈小對於梁柱



面愈可達到全斷面降伏，且接頭區之高應力現象愈不容易改善。試體 WOC65R2 與 WOC65R3 為梁腹板開孔且接頭區採加勁板補強型式，兩組試體不同的地方是加勁板的型式，由  $M_{test,j}/M'_j$  比值可看出此兩組試體外力彎矩均未達到梁柱交接面之實際塑性彎矩強度，但試體 WOC65R2 仍因扇形開孔之應力集中現象，導致梁翼-柱翼之全滲透開槽鉸發生撕裂破壞，顯示此型式之加勁板補強未能改善扇形開孔應力集中之問題及梁柱面高應力之現象，但試體 WOC65R3 之層間變位角可達 5% 弧度，而兩組試體加勁板補強的差異在於切角之大小，表示加勁板補強若使切角之大小縮小，還是可以改善扇形開孔應力集中之問題及梁柱面高應力之現象。由開孔大小相同且能走完 5% 弧度但補強型式不同之兩組試體 WOC65R1 與 WOC65R3 做比較，可看出剪力板補強型式之接頭比較能降低扇形開孔之應力集中現象，並對於梁柱面高應力之現象較能得到良好之改善。最後由試體 WOC65R1、WOC50R1 及 WOC65R3 可驗證第二章在設計梁柱交接面補強時所用之參數  $\alpha$ ，其值取 1.05 的確可降低梁柱交接面因受高應力所造成之各種破壞。

$M_{test,op}/M'_{p,op}$  表示塑鉸產生處(開孔中心處)達到全斷面降伏後之應變硬化程度，如其值大於 1，表示預期塑鉸處達到全斷面降伏並有應變硬化行為發生。試體 WOC65 之接頭採傳統式接頭，另外在梁腹板開孔，此型式之接頭因無法改善接頭區高應力之現象，導致承載能力還未使預期塑鉸產生處達到全斷面降伏就已破壞，因此  $M_{test,op}/M'_{p,op}$  之比值小於 1。試體 WOC65R1 與 WOC50R1 為梁腹板開孔且接頭處採用剪力板補強型式，兩組試體不同的地方是開孔之大小，由  $M_{test,op}/M'_{p,op}$  之比值觀察可得知，開孔直徑若過大，會導致整

體勁度大量折減，使的整體之承載能力無法使預期塑鉸處達到全斷面降伏，另外鋼梁腹板開孔會受到彎矩與剪力互制作用，使得彎矩強度折減而無法達到第二章所設計鋼梁腹板開孔後之彎矩標稱強度  $M_{p,op}''$  (即無法達到塑鉸處全斷面降伏後應變硬化之效果)。試體 WOC65R2 與 WOC65R3 是梁腹板開孔且接頭區採加勁板補強型式，兩組試體不同的地方是加勁板的型式，此兩組試體  $M_{test,op} / M_p'$  之比值皆大於 1，表示預期塑鉸處達到全斷面降伏，但由於鋼梁腹板開孔會受到彎矩與剪力互制作用，使得彎矩強度折減而無法達到第二章所設計鋼梁腹板開孔後之彎矩標稱強度  $M_{p,op}''$ ，(即達無法達到塑鉸處全斷面降伏後應變硬化之效果)。由開孔大小相同且能走完 5% 弧度但補強型式不同之兩組試體 WOC65R1 與 WOC65R3 做比較，可看出試體 WOC65R3 因加勁板補強使整體勁度提高，雖梁腹板開孔直徑超過梁深之半，但整體之承載能力能夠使預期塑鉸處達到全斷面降伏，表示加勁板補強型式可幫助增加鋼梁腹板開孔處之彎矩強度。

#### 4.5 試體局部行為討論

本研究於各組試體之適當位置黏貼應變計(如圖 3.10 與 3.11)，試體 WOC65R3 因實驗過程中，資料擷取器設定疏忽，導致應變計讀數無法擷取。此外藉由讀取各試體在層間變位角 0.5%、1%、2% 與 3% 弧度時之應變資料，來探討試體局部位置之應變分佈及趨勢。此取法乃考慮 0.5% 弧度時試體尚在彈性階段，1% 弧度時試體進入非彈性階段，2% 弧度之後試體達塑性階段，而 3% 弧度以後試體已發生明顯的局部挫屈，過大的變形降低應變計之可信度。

各應變計為看出各區段在各層間變位角的趨勢都予以編號(如圖

4.6 至 4.13)。應變計 F1 用以瞭解試體於梁翼銲道處之應變分佈。於梁腹板開孔兩側邊緣所對應之梁翼板相同位置貼有應變計 F2 與 F4，以了解梁翼板在梁腹板開孔與未受開孔交接處之應變趨勢。在梁腹板開孔中心所對應之梁翼板相同位置處貼有應變計 F3，觀察梁腹板因開孔而減少腹板面積最大處之翼板應變趨勢。另外想得知梁腹板開孔之後，剪力傳遞的走向所以在梁腹板開孔周圍黏貼 8 個三軸應變計，編號為 W1 至 W8。

### 梁翼板應變分佈

圖 4.6 為試體 WOC65 之梁翼應變比較圖，由圖可看出應變計 F1 在 0.5% 弧度時應變量很小，到了 1% 弧度時，應變量大幅增加。顯示傳統型式接頭於梁腹板開孔，並未改善梁翼全滲透銲之高應變需求，導致試體 WOC65 未達 2% 弧度行程時，梁翼與此處發生撕裂破壞。梁腹板開孔兩側邊緣(應變計 F2 與 F4)及中心(應變計 F3)在 0.5% 至 1% 弧度內應變量都很小且平均分佈。

圖 4.8 與 4.10 為試體 WOC65R1 與 WOC50R1 之梁翼應變比較圖，此兩支試體補強的型式相同，開孔的中心位置也相同，唯有開孔大小不同，如此從應變圖可看出兩支試體之局部應變趨勢大致相同。應變計 F1 在 1% 弧度內大致平均分布且應變量不大，進入 2% 弧度後成長幅度增大，顯示進入塑性階段。另外由此處可看出兩支試體之開孔大小對柱面的應變量會有所不同，梁腹板開孔直徑大對柱面高應變現象的改善愈好。再來比較經過補強型式之兩支試體 WOC65R1 與 WOC50R1 和未補強試體 WOC65 相比較，可明顯看出經過補強之試體可有效幫助梁翼全滲透銲道之高應變現象。應變計 F2 在 1% 弧度內大致與 F1 相同，但到了 2% 弧度時，應變量遽增，且出現翼板中

心及翼板邊緣有較高的趨勢，可見此一型式的補強雖降低梁翼全滲透銲道處的應變量，但大約在柱面三分之一倍梁深之翼板出現很高的應變量，表示力量都集中於此處且在翼板中心與邊緣。應變計 F3 的應變量明顯比 F2 低，但在 3% 弧度時，應變量突然增大，推測可能受到挫屈的影響導致應變計受到很大的拉扯。由應變計 F2 與 F3 可見應力都集中在梁腹板開孔中心與靠進柱面之梁腹板開孔與未開孔交接處之翼板附近，表示此處會最先進入降伏與塑鉸產生處，與實驗中石灰剝落的情形相同。應變計 F4 雖然也是梁腹開孔邊緣，但以距柱面相當遠且以彎矩梯度的觀念得知，此處的應變量不大，因此由圖中可見在 3% 弧度時應變量都不大且非常平均。

圖 4.12 為試體 WOC65R2 之梁翼應變比較圖，應變計 F1 在 1% 弧度內應變量不大，進入 2% 至 3% 弧度時，應變量增加。試體 WOC65R2 的補強型式與 WOC65R1 及 WOC50R1 不同，但此一補強型式與未補強型式 WOC65 在梁翼全滲透銲道處比較，可發現此一型式補強也可改善梁翼全滲透銲道處之高應變需求。應變計 F2 與 F3，可看出梁腹板開孔中心之翼板應變量比靠近柱面梁腹板開孔邊緣之翼板還高，尤其是應變計 F3 在翼緣的應變量非常的高，顯示在梁腹板開孔中心之加勁板端部會造成應力集中的現象，而應變計 F2 與 F3 在 3% 弧度時應變量都大幅度增加且值非常大，推測此時應受到挫屈的影響，導致應變計嚴重的拉扯。應變計 F4 的應變量趨勢大致與前四組試體相似。

綜合以上敘述，可知兩種補強型式皆可改善梁翼全滲透銲道處之高應變量需求。另外以剪力板補強型式之試體 WOC65R1 及 WOC50R1 可發現靠近柱面梁腹板開孔邊緣與未開孔交接處之翼板的應變量最大，而加勁板補強型式之試體 WOC65R2 的應變量最大值是



發生在梁腹板開孔中心之翼板，可見兩種補強型式所產生塑鉸的位置也會有些許的不同。

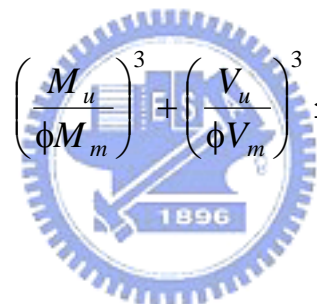
### 梁腹板剪應變分佈

由圖 4.7、4.9、4.11、4.13 可看出四組試體梁腹板開孔周圍的剪應變趨勢大致相同。在應變計 W1 與 W5 位置處因梁腹板面積減少造成所承受的剪應變增加。應變計 W2、W4、W6、W8 承受相當大的剪應變，可能因梁腹板開孔導致此四個位置受到極大的拉壓力作用，使得這幾處承受極大的剪力，從石灰剝落的程度來看以上所述敘的位置的確有大量的石灰剝落。至於應變計 W3 與 W7 的剪應變非常小，推測是剪力路徑由梁端往柱面的方向，在經過梁腹板開孔時，會往 W1、W2、W8 及 W4、W5、W6 的方向傳遞，而剪力路徑經過梁腹板開孔後，因梁腹板開孔邊緣位置距柱面太近，造成剪力路徑還未往梁腹中心傳遞，其路徑就已接觸到柱面，形成柱面至梁腹板開孔邊緣段梁腹板石灰剝落情形為靠近翼板處石灰剝落較嚴重，近腹板中心處石灰剝落極少。

試體 WOC50R1 之剪應變較試體 WOC65R1 小，表示開孔直徑愈小，較不會遭受剪力破壞。而試體 WOC65R2 其補強型式為加勁板補強，與試體 WOC65R1 之剪力板型式補強相比較之下，相同的開孔直徑，但梁腹板開孔周圍所受的剪應變大小卻比試體 WOC65R1 小，表示加勁板會幫助梁腹板承受部分的剪力，且 W6、W8 這兩處位置，因加勁板幫忙承受剪力，石灰剝落的情形較 W2、W4 此兩處位置未受加勁板補強之下還少，整體來看試體 WOC65R2 梁腹板開孔周圍石灰剝落的情形比試體 WOC65R1 輕微。

## 4.6 彎矩-剪力交互作用

根據文獻 Darwin (1990) 中，對於鋼骨梁腹板開孔之研究已發展出一套完整分析及補強設計準則，鋼骨梁腹板開孔主要是分析開孔處之彎矩強度及剪力強度，並以彎矩與剪力交互作用之關係檢核開孔梁之安全性。Darwin 在文中提到鋼骨開孔梁會受到彎矩及剪力交互作用，使得鋼骨開孔梁之強度會比單獨受到彎矩作用或剪力作用之強度還要低的多，因彎矩與剪力之互制作用，使得開孔斷面之彎矩及剪力標稱強度隨之減弱。因此 Darwin 提出一條鋼骨梁腹開孔在彈性行為下受到彎矩及剪力互制作用之公式，用以檢核鋼骨梁腹開孔之設計是否安全。公式如下：


$$\left( \frac{M_u}{\phi M_m} \right)^3 + \left( \frac{V_u}{\phi V_m} \right)^3 \leq 1 \quad (4.1)$$

其中

$$\phi = 0.9$$

$M_u$ ：開孔中點因數化之彎矩強度

$M_m$ ：未考慮材料變異係數，梁腹板開孔斷面之標稱彎矩強度

$V_u$ ：開孔中點因數化之剪力強度

$V_m$ ：未考慮材料變異係數，梁腹板開孔之剪力標稱強度

將上述鋼骨梁腹開孔各項強度帶入公式 4.1，若其值大於 1 則鋼骨梁腹開孔之設計不安全必須補強。另外圖 4.14 是由公式 4.1 所繪製出三次方曲線圖，因此也可由圖 4.14 來判斷鋼骨梁腹開孔之設計是



否安全。首先先計算公式 4.1 中之各項強度，再將彎矩與剪力之比值計算出之後查圖 4.14，若彎矩與剪力之比值落於三次方曲線為 1 之曲線外，則鋼骨梁腹開孔設計不安全必須補強，反之，若彎矩與剪力之比值落於三次方曲線為 1 之曲線內或曲線上，則鋼骨梁腹開孔設計安全。

為探討本實驗五組試體在彎矩與剪力同作用下之互制行為，由各試體之遲滯迴圈所顯示之非彈性行為，選取 1.5% 弧度之層間變位角，以計算各試體之彎矩與剪力實驗值，如表 4.5 與 4.6 所示。在層間變位角 1.5% 弧度時，各試體皆剛進入非彈性行為(此時各試體梁之層間變位角約為 1% 弧度，表示梁也剛進入非彈性行為)，於此檢核鋼骨梁腹板開孔之強度互制關係方可被接受。圖 4.15 所示為在 1.5% 弧度層間變位角時各試體之彎矩與剪力互制關係，除試體 WOC50R1 外，其餘試體皆位於 Darwin 提出之三次方互制公式之附近。明顯透露各試體於梁腹板開孔處，其強度可以公式 4.1 檢核。各試體於達極限強度處之韌性行為則因各試體之細部設計而有所不同。

表 4.5 與 4.6 以及圖 4.16 為五組試體在極限載重下，鋼梁腹板開孔處之彎矩與剪力互制關係，由圖顯示五組試體除試體 WOC65 在 Darwin 提出之三次方互制公式之附近外，其餘試體皆超出 Darwin 提出之三次方互制公式，但此時五組試體之鋼梁腹板開孔處並未出現任何破壞現象，表示材料有應變硬化的效果出現。

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

綜合前述對接頭區梁腹板開孔及梁柱交接面以剪力板或加勁板補強之理論、分析及實尺寸接頭試驗的觀察與試體行為的探討，提出以下結論：

1. 試體 WOC65 在梁腹板開孔而全無補強之情況下，試體能達開孔處彎矩與剪力互制作用之極限強度，其破壞模式則導因於梁翼全滲透開槽銲接處之扇形開孔，而導致梁翼板靠近柱面處之斷裂，無法發展出韌性行為。
2. 其餘試體在以剪力板補強或垂直加勁板補強之方式，各試體亦可達彎矩與剪力互制作用之極限強度，除試體 WOC65R2 外，各試體亦能發展出可觀之韌性行為，而無脆性破壞之發生。良好之遲滯迴圈主要歸因於剪力板或加勁板之補強，防止梁柱接頭於梁柱交接面處之破壞。
3. Darwin 針對鋼梁腹板開孔所提之三次方彎矩與剪力互制作用能準確預測本實驗各試體剛達非彈性行為時之彎矩與剪力強度。惟各試體之韌性行為則有賴補強之細部設計。
4. 本實驗經補強設計之各試體，縱然於梁腹板開孔，亦能達鋼梁之標稱塑性彎矩強度，惟其彎矩與剪力強度受鋼梁腹板開孔後之互制行為影響，故補強後之試體強度仍須檢核彎矩與剪力之互制作用。

## 5.2 建議

根據梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式梁柱接頭之實驗研究結果，提出下列建議。

1. 本研究採梁、柱皆為 H 型鋼，故研究成果僅適用於同型式之梁、柱組合而成之鋼結構建築。但近年來國內鋼結構設計之習慣大都使用 H 型梁接箱型柱之型式，故梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式用於箱型柱之效果仍具探討價值。
2. 鋼梁腹板開孔之大小會影響彎矩與剪力互制作用之強度，且若鋼梁腹板開孔之位置在梁柱接頭之塑性區內，對其行為之影響甚大，因此鋼梁腹板開孔之大小仍具探討價值。另外本研究建議鋼梁腹板開孔之形狀採用圓形較佳，但方形或矩形等形狀之開孔，對於梁柱接頭之整體行為，仍可做深入研究。

## 符號索引

$C_{pr}$ ：應變硬化係數(依據 FEMA350 對切削式接頭設計之建議及實驗

結果，設定為 1.15)

$D_0$ ：圓形開孔大小即直徑

$E$ ：鋼材之楊氏模數

$F_y$ ：梁之標稱降伏強度

$F_{ys}$ ：剪力板或加勁板之標稱降伏強度

$H$ ：柱高

$I$ ：H 型斷面之慣性矩

$L_{CL}$ ：梁端至柱中心之長度

$L_b$ ：梁長

$L_n$ ：梁第  $n$  段的長度

$L_{op}$ ：開孔中心距柱面之距離

$M_{capacity}$ ：梁柱交界面之設計彎矩容量

$M_f$ ：梁柱交接面之彎矩需求

$M_j$ ：未考慮材料變異係數，梁於柱面之塑性彎矩強度

$M_j'$ ：拉力試驗所求得梁於柱面之塑性彎矩強度



$M_j''$ ：考慮材料變異係，梁於柱面之塑性彎矩強度

$M_m$ ：未考慮材料變異係數，梁腹板開孔斷面之標稱彎矩強度

$M_p$ ：未考慮材料變異係數，梁預期之標稱彎矩強度

$M_p'$ ：拉力試驗所求得梁之塑性彎矩強度

$M_p''$ ：考慮材料變異係數，梁預期之標稱彎矩強度

$M_{p,op}$ ：未考慮材料變異係數，梁腹板開孔斷面之標稱彎矩強度

$M_{p,op}'$ ：拉力試驗所求得梁腹板開孔斷面之塑性彎矩強度

$M_{p,op}''$ ：考慮材料變異係數，梁腹板開孔斷面之標稱彎矩強度

$M_{p,dem}$ ：梁柱交接面之彎矩需求

$M_{p,s}$ ：考慮材料變異係數，梁柱交接面剪力板或加勁板斷面之標稱彎

矩強度

$M_{test,j}$ ：實驗所得柱面之最大彎矩強度

$M_{test,op}$ ：實驗所得梁腹板開孔處之最大彎矩強度

$M_u$ ：開孔中點因數化之彎矩強度

$T_H$ ：連續板上的水平傾斜儀所量測之讀數

$T_V$ ：柱翼板上的垂直傾斜儀所量測之讀數

$V_m$ ：未考慮材料變異係數，梁腹板開孔之剪力標稱強度

$V_{n,op}$ ：未考慮材料變異係數，梁腹板開孔之剪力標稱強度

$V'_{n,op}$ ：拉力試驗所求得梁腹板開孔之剪力標稱強度

$V''_{n,op}$ ：考慮材料變異係數，梁腹板開孔之剪力標稱強度

$V_{n,t}$ ：梁腹板開孔所剩兩 T 型斷面之單一 T 型斷面之標稱剪力強度

$V_{p,op}$ ：當外力彎矩達梁腹板開孔的彎矩容量所需之剪力強度

$V_{test,op}$ ：實驗所得梁腹板開孔處之最大剪力強度

$V_u$ ：開孔中點因數化之剪力強度

$R$ ：結構系統韌性容量

$R_y$ ：材料變異係數

$Z_b$ ：梁斷面之塑性斷面模數

$Z_{b,op}$ ：梁腹板開孔斷面之塑性斷面模數

$Z_s$ ：剪力板或加勁板於梁柱交接面之梁斷面塑性斷面模數

$b_{bf}$ ：梁寬

$b_s$ ：剪力板或加勁板之寬度

$d_b$ ：梁深

$d_c$ ：柱深





$h_s$ ：剪力板之高度

$k$ ：彎矩曲率

$l_s$ ：加勁板切角之長度

$s$ ：梁腹板開孔所剩兩 T 型斷面之深度

$t_{bw}$ ：梁腹板之厚度

$t_s$ ：剪力板或加勁板之厚度

$\Delta_{CL}$ ：梁端總變位

$\Delta_T$ ：梁端總變位

$\Delta_b$ ：梁的變形分量

$\Delta_c$ ：柱變形所引致梁端變形分量

$\Delta_e$ ：梁第二段( $L_2$ )對角線伸長量

$\Delta_{op}$ ：梁腹板開孔的變形分量

$\Delta_{pz}$ ：梁柱交會區剪力變形所造成的梁端變形分量

$\Delta_s$ ：梁第二段( $L_2$ )對角線縮短量

$\Delta_1$ ：梁柱交會區對角線伸長量

$\Delta_2$ ：梁柱交會區對角線縮短量

$\alpha$ ：梁柱交接面之設計彎矩容量與梁柱交接面之需求彎矩之比值，建



議使用 1.05。

$\alpha_v$ ：未考慮材料變異係數，梁腹板開孔剪力標稱強度之折減係數

$\beta$ ：剛體運動所造成之旋轉角度

$\gamma$ ：梁塑性彎矩與肋板末端之外力彎矩之比值。

$\gamma_{b,n}$ ：梁第  $n$  段因剪力變形所造成的變形量

$\gamma_{pz}$ ：梁柱交會區剪力變形量

$\delta_n$ ：梁第  $n$  段因剪力變形與撓曲變形所造成之梁端位移量

$\delta'_n$ ：梁第  $n$  段因剪力變形所造成之梁端位移量

$\delta''_n$ ：梁第  $n$  段因撓曲變形所造成之梁端位移量

$\delta'''_n$ ：梁第  $n$  段因撓角所引至的梁端位移量

$\eta$ ：塑鉸形成區之塑性彎矩與梁塑性彎矩之比值

$\theta$ ：抗彎矩構架受側向力作用時之層間變位角

$\theta'$ ：梁腹板開孔左側傾斜儀所量測之讀數

$\theta''$ ：梁腹板開孔右側傾斜儀所量測之讀數

$\theta_E$ ：在設計定震力  $E$  作用下之最大層間變位角

$\theta_c$ ：柱轉角

$\theta_n$ ：梁第  $n$  段因撓曲變形所造成的撓角

$\theta_p$ ：韌性抗彎構架之梁柱接頭塑性轉角

$\lambda_n$ ：梁第 n 段因撓曲變形所造成的變形量

$v$ ：梁腹板開孔之長度與梁腹板開孔所剩兩 T 型斷面之深度之比值

$\rho$ ：曲率半徑

$\phi$ ：安全係數，使用 0.9



## 參考文獻

- Aglan, A. A., and Qaqish, S., “Plastic Behavior of Beams with Mid-Depth Web Opening,” Engineering Journal, AISC, Vol. 19 No. 1, pp. 20-26, 1982.
- Anderson, J. C., and Duan, X., “Repair/Upgrade Procedures for Welded Beam to Column Connection,” PEER98-03, University of Southern California, 1998.
- AISC, “Seismic Provisions for Structural Steel Building,” American Institute of Steel Construction, 2005
- Bower, J. E., “Elastic Stress Around Holes in Wide-Flange Beams,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 92 No. ST2, pp. 85-101, 1966.
- Bower, J. E., “Experimental Stress in Wide-Flange Beams with Holes ,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 92 No. ST5, pp. 167-186, 1966.
- Chen, S. J., Yeh, C. H., and Chu, J. M., “Ductile Steel Beam-to-Column Connections for Seismic Design,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 11, pp. 1292-1299, 1996.
- Civjan, S. A., Yeh, Engelhardt, M. D., and Gross, J. L., “Retrofit of Pre-Northridge Moment-Resisting Connections,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 445-452, 2000.
- Chung, K. F., Liu, T. C. H., and Ko, A. C. H., “Investigation on Vierendeel Mechanism in Steel Beams with Circular Web Opening,”

- Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57 pp. 467-490, 2001.
- Chung, K. F., Liu, T. C. H., and Ko, A. C. H., “Steel Beams with Large Web Opening of Various Shapes and Sizes: An Empirical Design Method Using a Generalised Moment-Shear Interaction Curve,” Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59 pp. 1177-1200, 2003.
- Chen, C. C., Lin, C. C., and Tsai, C. L., “Evaluation of Reinforced Connections between Steel Beams and Box Columns,” Engineering Structures, Vol. 27, No. 13, pp. 1889-1904, 2004.
- Darwin, D., “Steel and Composite Beams with Web Opening,” American Institute Construction, 1990
- Engelhardt, M. D., Sabol, T. A., Aboutaha, R. S. and Frank, K. H., “Testing Connections,” Modern Steel Constructions, AISC, Vol. 35, No. 5, pp. 36-44, 1995.
- Engelhardt, M. D., Winnerberger, T. Zekany. A. J., and Potyraj, T. J., “The Dogbone Connection: Part 2,” Modern Steel Constructions, AISC, Vol. 36, No. 8, pp. 46-55, 1996.
- Engelhardt, M. D., Winnerberger, T. Zekany. A. J., and Potyraj, T. J., “Experimental Investigation Dogbone Moment Connections,” Engineering Journal, AISC, pp. 128-139, 1998.
- Engelhardt, M. D., and Sabol, T. A., “Reinforcing of Steel Moment Connections with Cover Plates: Benefits and Limitations,” Engineering Structures, Vol. 20, Nos. 4-6, pp. 510-520, 1998.
- FEMA, “Recommended Seismic Design Criteria for New Steel



Moment-Frame Building, ” Report No. FEMA-350, Federal Emergency Management Agency, 2000

Goel, S. C., Stojadinovic, B., and Lee, K. H., “Truss Analogy for Steel Moment Connection,” Engineering Journal, AISC, 2<sup>st</sup> Qtr., pp. 43-53, 1997.

Goel, S. C., Lee, K. H., and Stojadinovic, B., “Designing of Welded Steel Moment Connection Using Truss Analogy,” Engineering Journal, AISC, 1<sup>st</sup> Qtr., pp. 31-40, 2000.

Iwankiw, N. R., and Charles, J. C., “The Dogbone: A New Idea To Chew On,” Modern Steel Constructions, AISC, Vol. 36, No. 4, pp. 18-23, 1996.

Kussman, R. L., and Cooper, P. B., “Design Example for Beams with Web Opening,” Engineering Journal, AISC, Vol. 13 No. 2, pp. 48-56, 1976.

Popov, E. G., and Tsai, K. C., “Performance of Large Seismic Steel Moment Connections under Cyclic Loading,” Engineering Journal, 2<sup>nd</sup> Qtr., pp. 51-60, 1989.

Plumier, A., “The Dogbone: Back to the Future,” Engineering Journal, AISC, 2<sup>nd</sup> Qtr., pp. 61-67, 1997.

SAC Jiont Venture, “Connection Test Summaries,” SAC 96-02, Sacramento California, 1996.

Uang, C. M., Yu, Q. S., Noel, S. and Gross, J., “Cyclic Testing of Steel Connections Rehabilitated with RBS or Welded Haunch,” Journal of

Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 57-68, 2000.

Zekioglu, A., Mozaffarian, H., Chang, K. L., and Uang, C. M., "Design After Northridge," Modern Steel Constructions, AISC, Vol. 36, No. 3, pp. 36-42, 1996.

楊榮坤，「箱型柱與梁柱接頭耐震行為之研究」，防災科技研究報告 78-61 號，1990

林克強，「鋼骨梁與箱型柱接頭耐震補強研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，1992

陳嘉有，「韌性鋼骨梁柱接頭行為研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，1995

林昆德，「抗彎鋼骨梁柱接頭之行為」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，1996

葉木中，「腹板開孔鋼梁在單向及反復荷重下之行為」，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，1996

陳宣維，「鋼骨圓弧切削梁柱接頭之耐震行為研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，1999

呂正安，「具延長段之單肋板補強鋼骨抗彎接頭耐震行為與設計」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2001

蔡佳良，「鋼骨箱型柱補強式梁柱接頭之耐震行為」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2002

林群洲，「鋼骨托梁抗彎接頭含梯度漸擴式梁翼板之耐震行為」，國立

交通大學土木工程學系博士論文，2006

李智民，「H型鋼柱接擴翼鋼梁抗彎接頭之耐震行為與設計」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2006

饒智凱，「鋼骨梁柱梁翼內側加勁補強接頭之耐震行為研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2007



表 2.1 層間變位角 0.5% 弧度時梁各段之撓角與剪力變形以及梁端位移量理論值與分析值之誤差百分比

第一段( $L_1$ )		第二段( $L_2$ )		第三段( $L_3$ )		梁端位移量(mm)		誤差百分比(%)
撓角 ( $\theta_1$ ) (rad.)	剪力變形 ( $\gamma_{b,1}$ ) (rad.)	撓角 ( $\theta_2$ ) (rad.)	剪力變形 ( $\gamma_{b,2}$ ) (rad.)	撓角 ( $\theta_3$ ) (rad.)	剪力變形 ( $\gamma_{b,3}$ ) (rad.)	計算值 (式 2.35)	分析值 (ANSYS)	0.15
0.000733	0.000645	0.00135	0.00256	0.00392	0.00117	17.7	17.7	

表 2.2 層間變位角 4% 弧度時梁各段之撓角與剪力變形以及梁端位移量理論值與分析值之誤差百分比

第一段( $L_1$ )		第二段( $L_2$ )		第三段( $L_3$ )		梁端位移量(mm)		誤差百分比(%)
撓角 ( $\theta_1$ ) (rad.)	剪力變形 ( $\gamma_{b,1}$ ) (rad.)	撓角 ( $\theta_2$ ) (rad.)	剪力變形 ( $\gamma_{b,2}$ ) (rad.)	撓角 ( $\theta_3$ ) (rad.)	剪力變形 ( $\gamma_{b,3}$ ) (rad.)	計算值 (式 2.35)	分析值 (ANSYS)	1.18
0.01053	0.00084	0.0172	0.04925	0.01017	0.00312	141.2	142.9	

表 3.1 試體規格

試體 編號	梁柱尺寸 (mm)	材料性質	開孔直徑 $D_0$ (mm)	開孔位置 $L_{op}$ (mm)	剪力板或加勁板厚度 $t_s$ (mm)
WOC65	梁 H700×300×13×24 柱 H600×500×22×36	A572 Gr. 50	455	477.5	13
WOC65R1			455		18
WOC5OR1			350		18
WOC65R2			455		10
WOC65R3			455		10



表 3.2 試體設計參數

試體 編號	補強 型式	開孔直徑 $D_0$ (mm)	開孔位置 $L_{op}$ (mm)
WOC65	未補強	$0.65d_b = 455$	477.5
WOC65R1	剪力板	$0.65d_b = 455$	
WOC5OR1		$0.5d_b = 350$	
WOC65R2	加勁板	$0.65d_b = 455$	
WOC65R3		$0.65d_b = 455$	

註： $d_b$  為梁深， $b_{bf}$  為梁寬

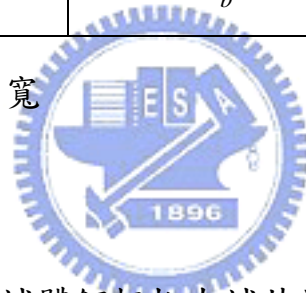


表 3.3 試體鋼板拉力試片試驗強度

位置 名稱	材料 性質	降伏強度 $F_y$ (MPa)	極限強度 $F_u$ (MPa)
柱翼板	A572 Gr. 50	393	523
柱腹板		398	510
梁翼板		386	507
梁腹板		448	531

表 4.1 試體破壞模式之最大塑性總轉角與層間變位角

試體 編號	層間變位角		塑性總轉角		破壞模式
	$\theta$ (% rad.)		$\theta_p$ (% rad.)		
WOC65	+1.5	-1.0	+0.4	-0.2	梁上翼板扇形開孔沿翼板寬度方向向兩端撕裂
WOC65R1	+4.0	-4.0	+3.1	-3.2	梁翼與梁腹產生局部挫屈；梁腹板開孔中心左右的四個角隅往柱面及梁端的方向撕裂
WOC50R1	+5.0	-5.0	+3.9	-4.0	梁翼板挫屈及梁腹板開孔中心左右四個角隅面外挫屈
WOC65R2	+3.0	-3.0	+1.7	-1.7	梁下翼板扇形開孔沿翼板寬度方向向兩端撕裂
WOC65R3	+5.0	-5.0	+4.0	-4.3	梁翼與梁腹產生局部挫屈；下翼板在加勁板端部(開孔中心)右側及梁腹板出現嚴重的撕裂

表 4.2 試體梁腹板開孔所造成梁端之轉角

試體 編號	梁腹板開孔剪力 作用造成梁端之 轉角		梁腹板開孔撓曲 作用造成梁端之 轉角		梁腹板開孔造成 梁端之總轉角	
	$\theta_s$ (% rad.)		$\theta_f$ (% rad.)		$\theta_{op}$ (% rad.)	
WOC65	+0.1	-0.09	+0.2	-0.2	+0.3	-0.3
WOC65R1	+1.7	-1.7	+2.7	-2.8	+4.4	-4.5
WOC50R1	+0.9	-0.6	+1.9	-1.7	+2.7	-2.1
WOC65R2	+0.2	-0.2	+0.8	-0.7	+1	-0.9
WOC65R3	+1.1	-1.7	+2.1	-2.8	+3.2	-4.5

表 4.3 試體各項彎矩與剪力之強度

試體	$M_p$	at opening			at joint					at opening			$V_{test,op}$
		$M_{p,op}$	$M'_{p,op}$	$M''_{p,op}$	$M_j$	$M'_j$	$M''_j$	$M_{test,op}$	$M_{test,j}$	$V_{n,op}$	$V'_{n,op}$	$V''_{n,op}$	
WOC65	2156	1924	2196	2434	2156	2498	2372	1844	2117	587	762	646	572
								-1809	-2077				-561
WOC65R1	2156	1924	2196	2434	2626	3010	2889	2012	2310	587	762	646	624
								-1964	-2255				-609
WOC50R1	2156	2018	2319	2553	2626	3010	2889	2388	2742	958	1243	1054	741
								-2306	-2648				-716
WOC65R2	2156	1924	2196	2434	2701	3091	2971	2201	2527	587	762	646	683
								-2210	-2538				-686
WOC65R3	2156	1924	2196	2434	2841	3245	3125	2280	2617	587	762	646	707
								-2280	-2617				707

單位：彎矩 kN-m 剪力 kN

表 4.4 試體各項彎矩之比值

試體	$M_{test,j} / M_p$	$M_{test,j} / M'_j$	$M_{test,op} / M'_{p,op}$
WOC65	0.98	0.85	0.84
	0.96	0.83	0.82
WOC65R1	1.07	0.77	0.92
	1.05	0.75	0.89
WOC50R1	1.27	0.91	1.03
	1.23	0.88	0.99
WOC65R2	1.17	0.82	1.00
	1.18	0.82	1.01
WOC65R3	1.21	0.81	1.04
	1.21	0.81	1.04

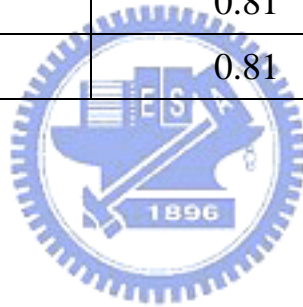


表 4.5 在層間變位角 1.5% 弧度與極限載重下之剪力與彎矩強度

試體	$V_{test,op}$ (kN) Drift 1.5%	$M_{test,op}$ (kN-m) Drift 1.5%	$V_{test,op}$ (kN) 極限載重	$M_{test,op}$ (kN-m) 極限載重
WOC65	572	1844	572	1844
	-561	-1809	-561	-1809
WOC65R1	571	1840	634	2012
	-550	-1772	-609	-1964
WOC50R1	613	1974	741	2388
	-585	-1884	-716	-2306
WOC65R2	605	1948	683	2201
	-588	-1894	-686	-2210
WOC65R3	583	1879	707	2280
	-616	-1986	-707	-2280



表 4.6 在層間變位角 1.5% 弧度與極限載重下之彎矩與剪力互制作用

試體	$M_{test,op} / M'_{p,op}$ Drift 1.5%	$V_{test,op} / V'_{n,op}$ Drift 1.5%	$\left(\frac{M_{test,op}}{M'_{test,op}}\right)^3 + \left(\frac{V_{test,op}}{V'_{n,op}}\right)^3$ Drift 1.5%	$M_{test,op} / M'_{p,op}$ 極限載重	$V_{test,op} / V'_{n,op}$ 極限載重	$\left(\frac{M_{test,op}}{M'_{test,op}}\right)^3 + \left(\frac{V_{test,op}}{V'_{n,op}}\right)^3$ 極限載重
WOC65	0.84	0.75	1.01	0.84	0.75	1.02
	0.82	0.74	0.96	0.82	0.74	0.96
WOC65R1	0.84	0.75	1.01	0.92	0.82	1.32
	0.81	0.72	0.90	0.89	0.80	1.23
WOC50R1	0.85	0.49	0.74	1.03	0.60	1.30
	0.81	0.47	0.64	0.99	0.58	1.17
WOC65R2	0.89	0.79	1.20	1.0	0.90	1.73
	0.86	0.77	1.10	1.01	0.90	1.75
WOC65R3	0.86	0.77	1.08	1.04	0.93	1.92
	0.90	0.81	1.27	1.04	0.93	1.92

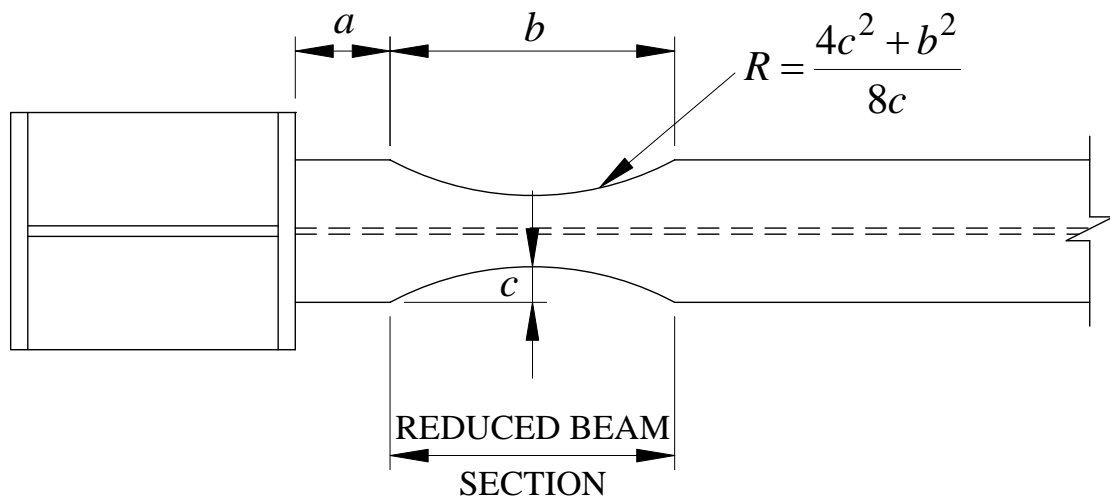


圖 2.1 圓弧切削式接頭示意圖

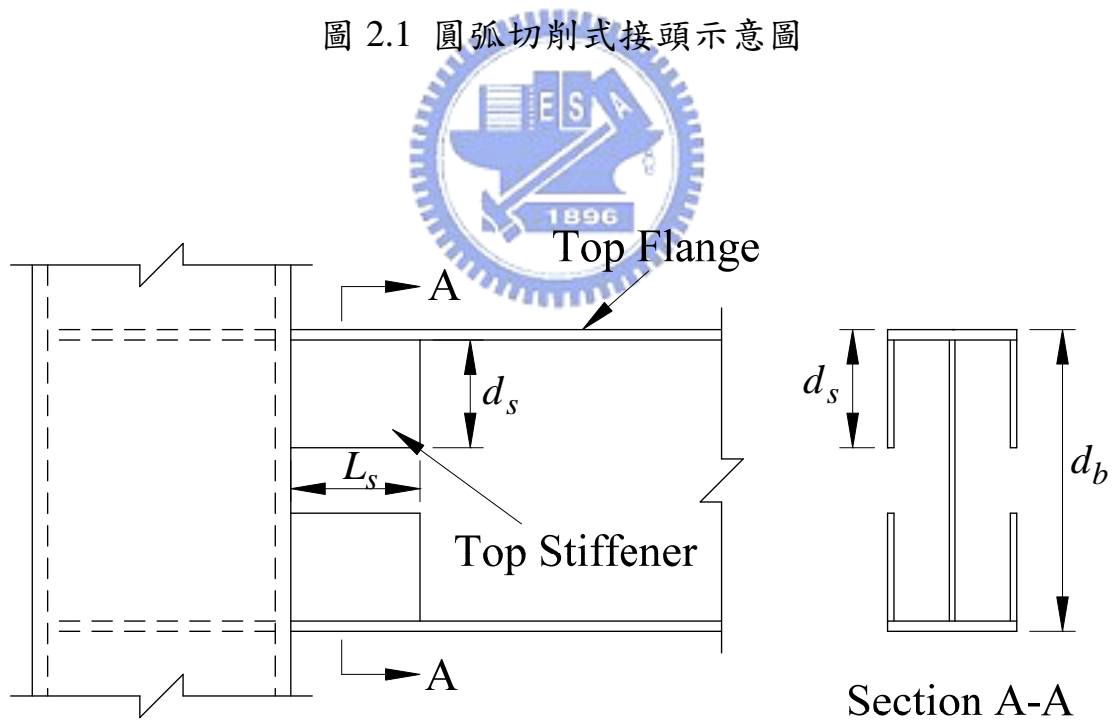


圖 2.2 梁翼內側加勁板補強之梁柱接頭示意圖

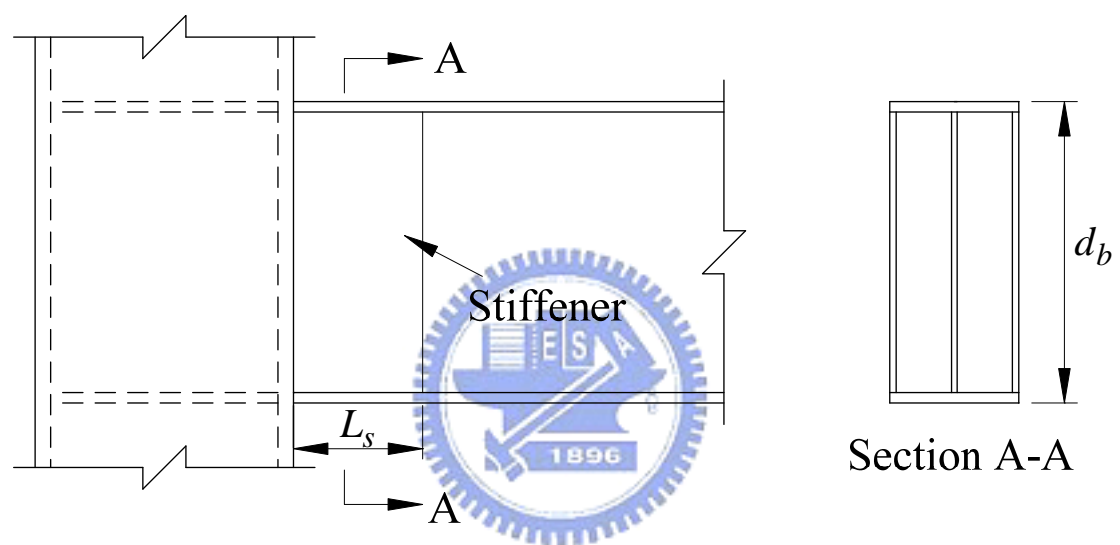


圖 2.3 梁翼內側加勁板補強之梁柱接頭示意圖

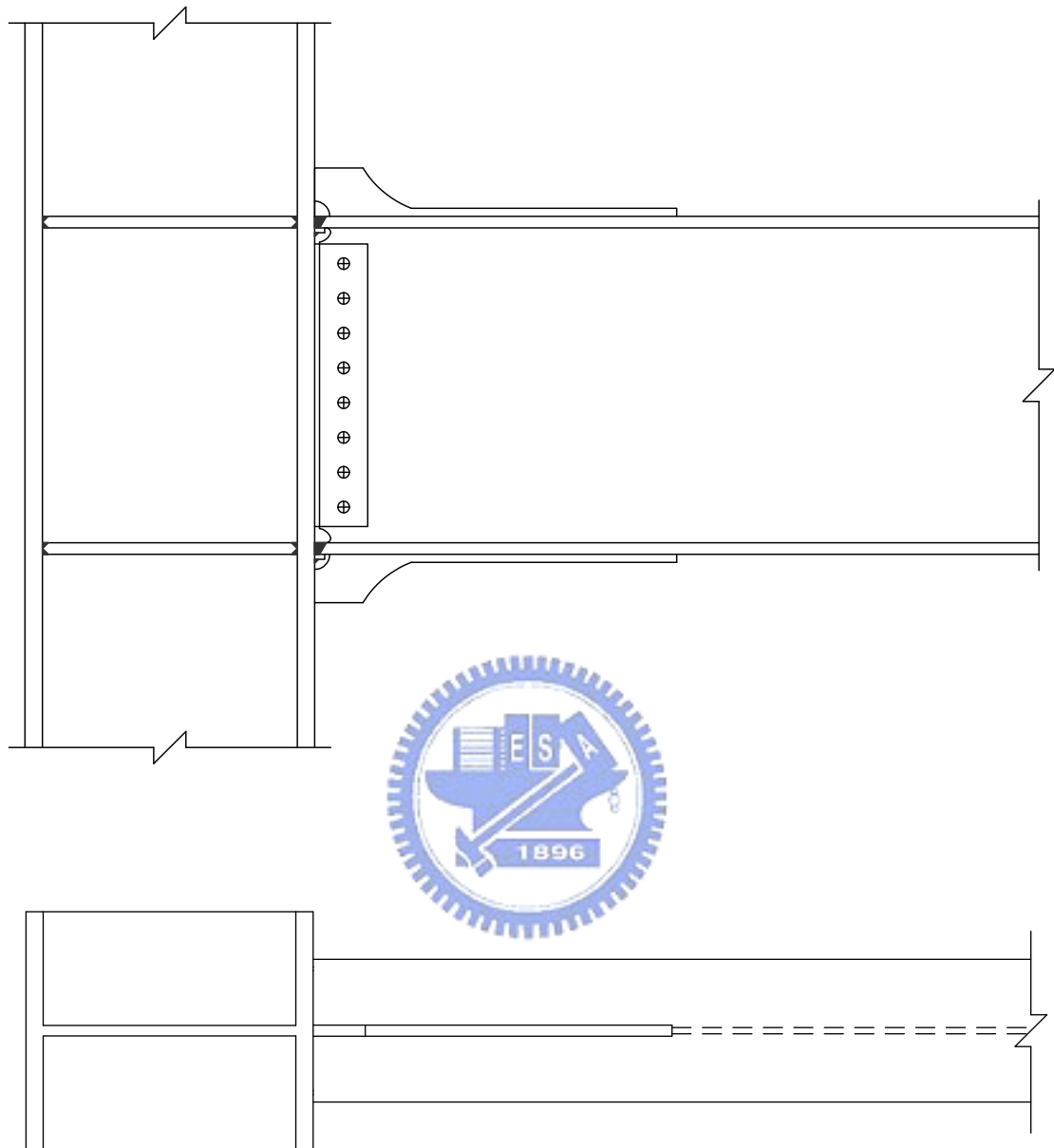


圖 2.4 梁柱交接面之梁上下翼板增加具延長段之單肋板補強之梁柱  
接頭示意圖

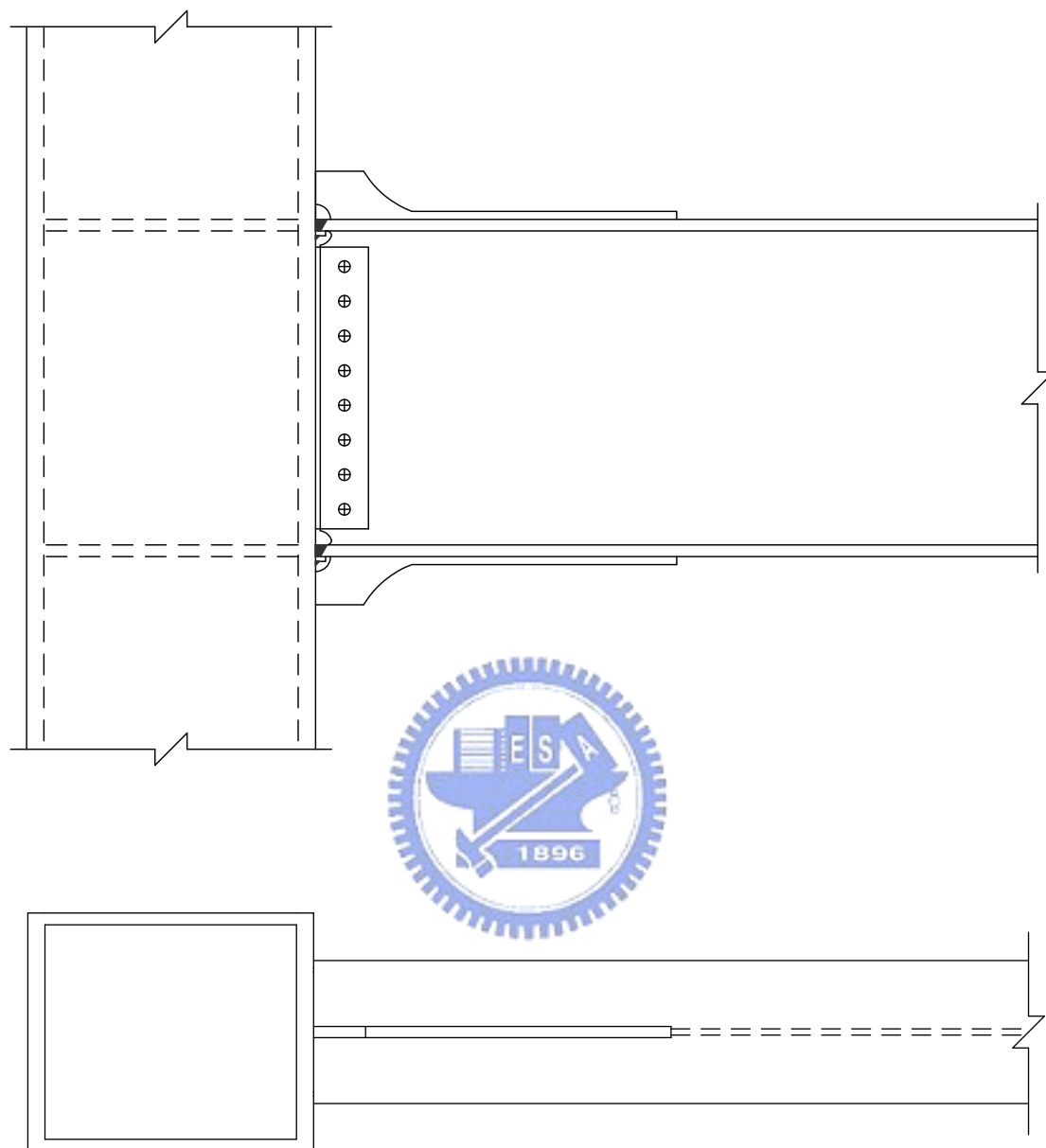
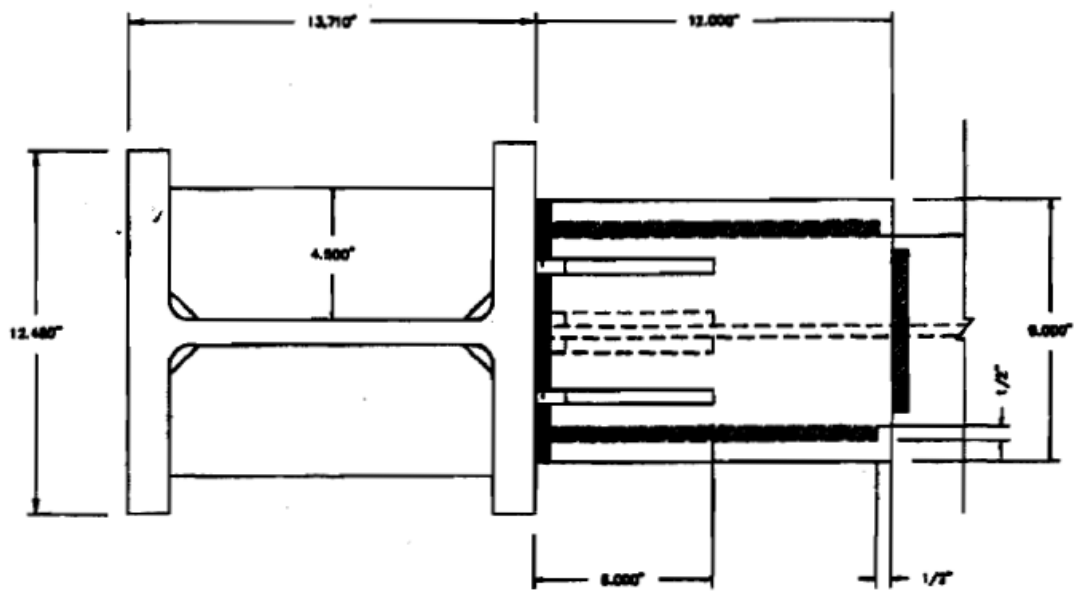
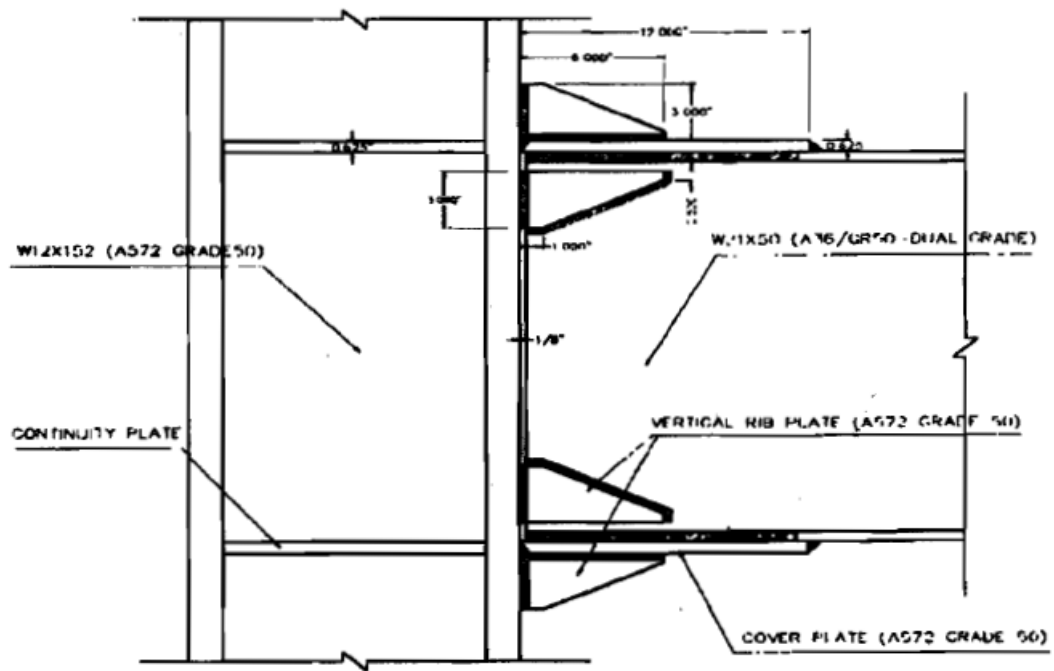


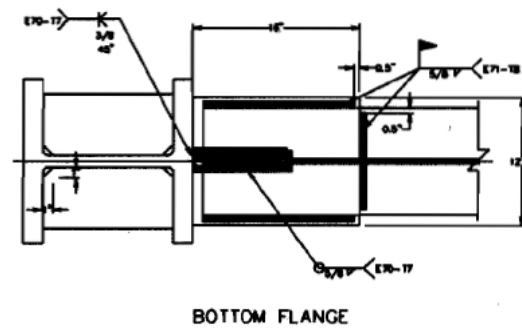
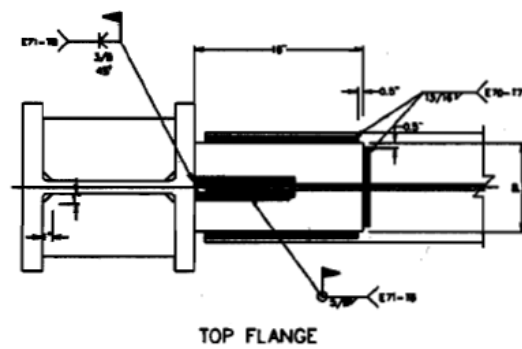
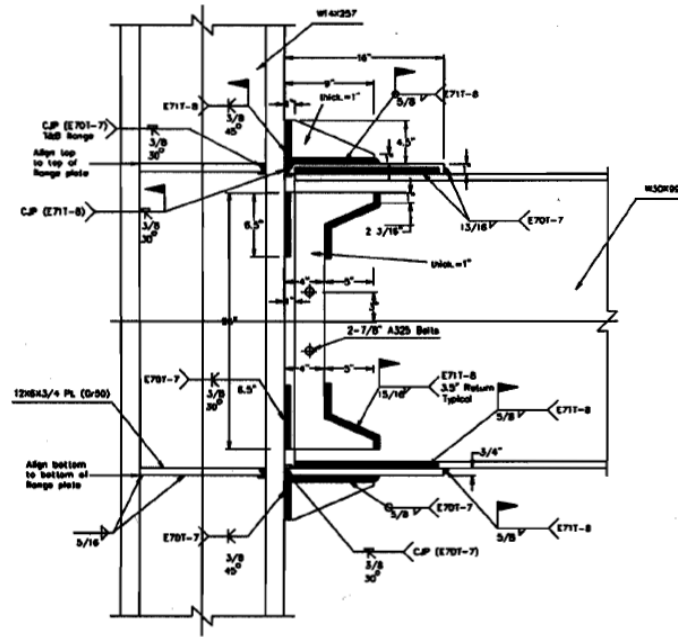
圖 2.5 梁柱交接面之梁上下翼板增加具延長段之單肋板補強之梁柱接頭示意圖



Goel et al. (1997)

圖 2.6 蓋板與肋板式接頭示意圖





Goel et al. (2000)

圖 2.7 蓋板與肋板式接頭示意圖

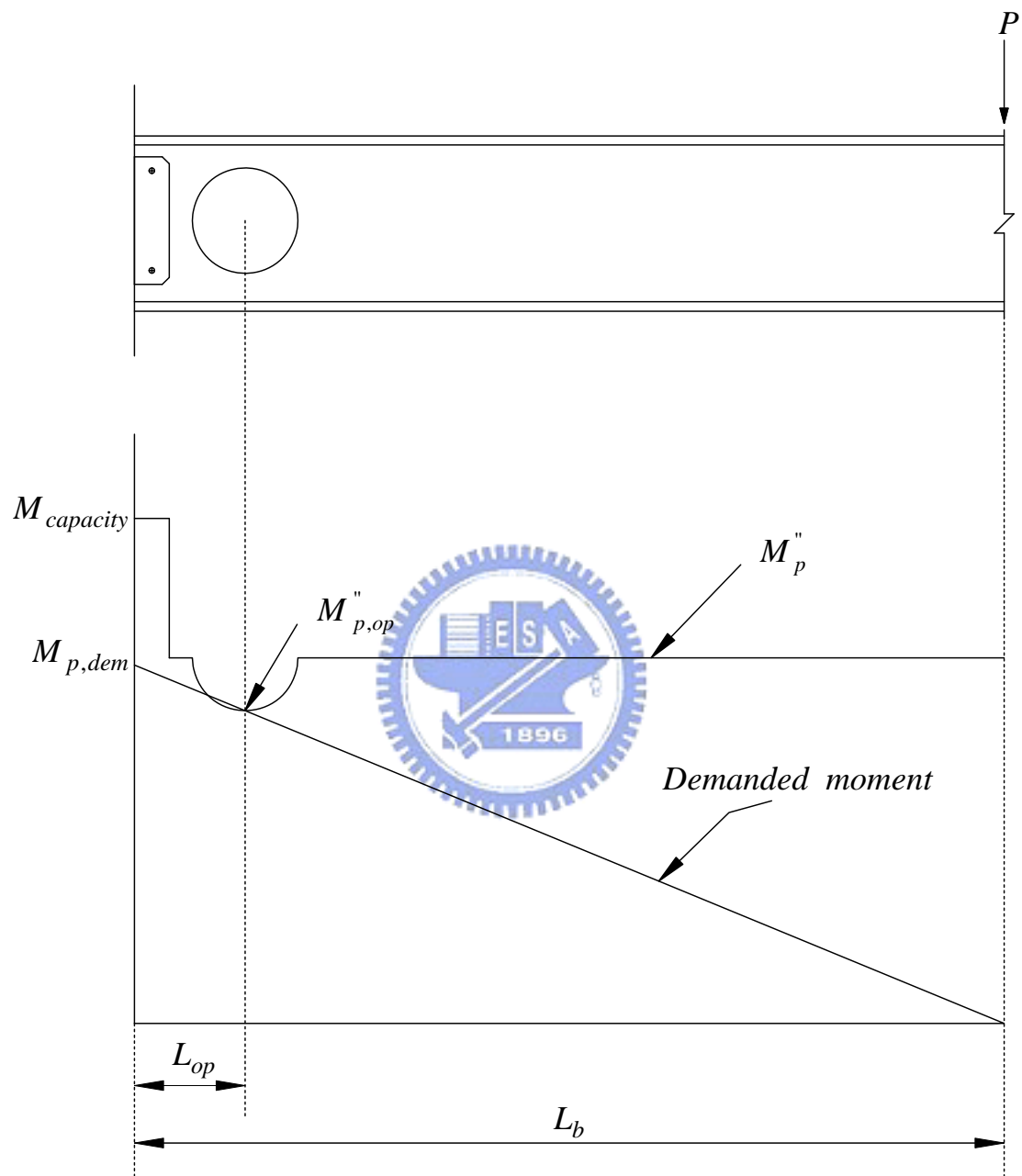


圖 2.8 梁腹板開孔及梁柱交接面補強型式梁柱接頭梁彎矩強度與外力需求彎矩圖

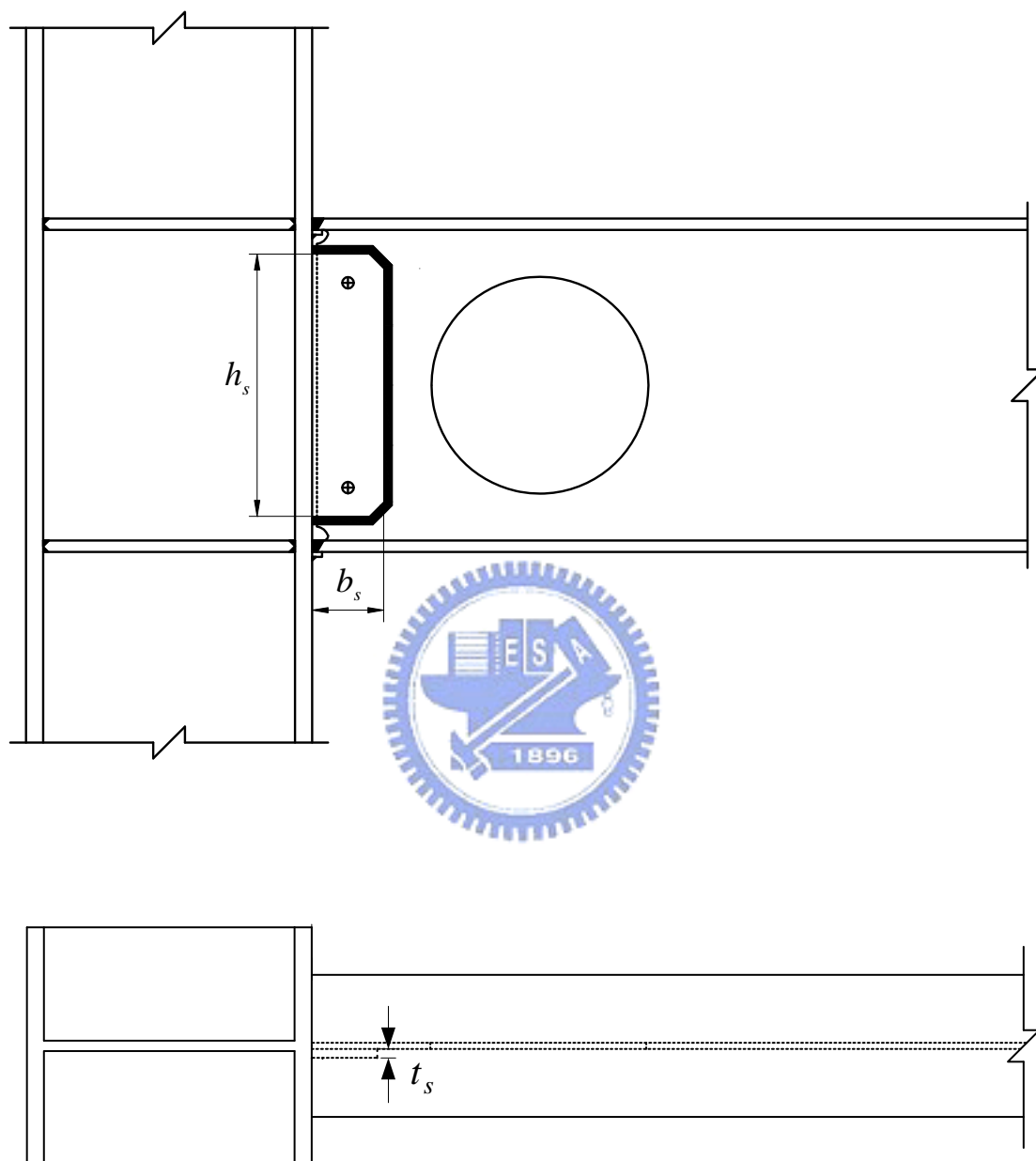


圖 2.9 補強型式一之示意圖

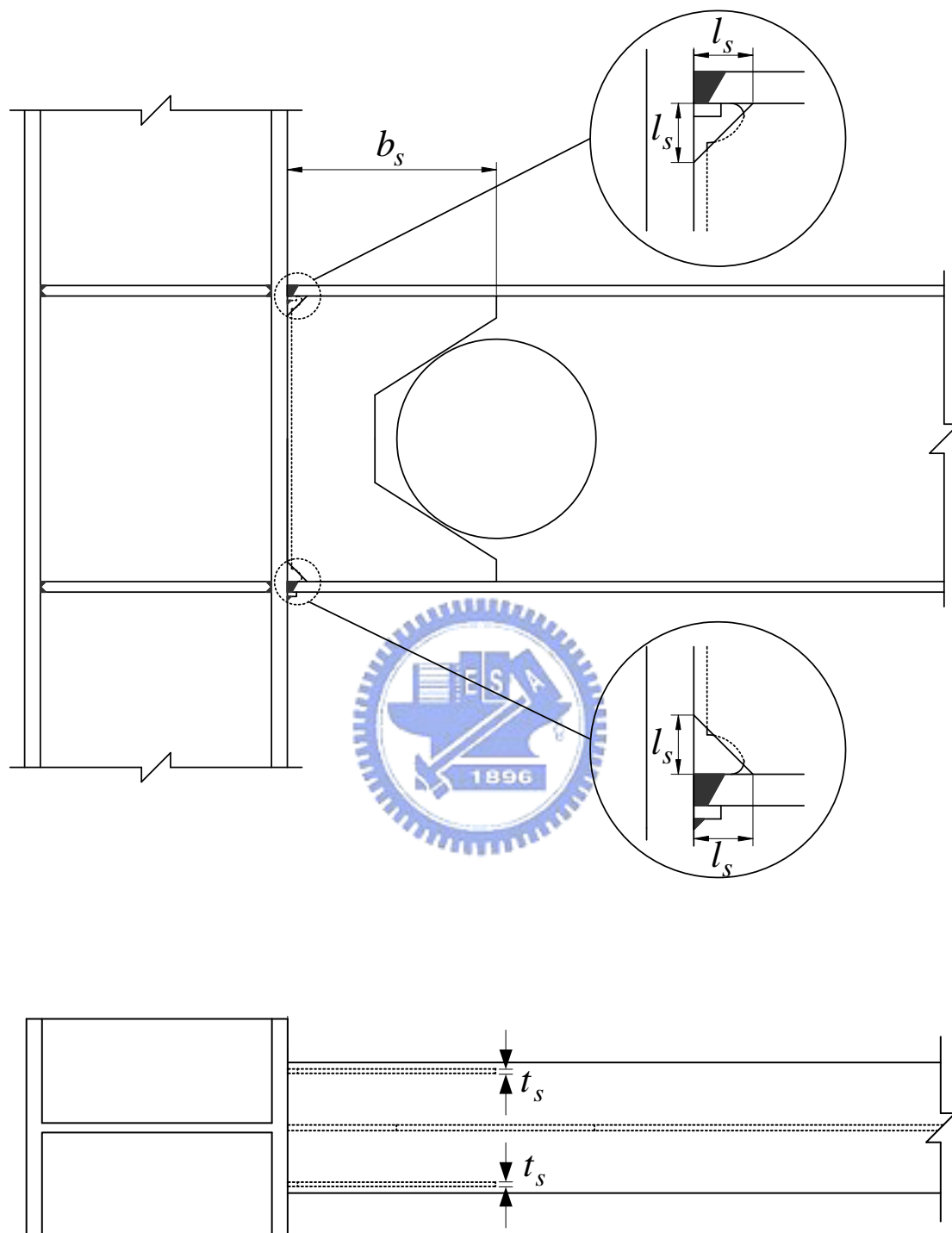


圖 2.10 補強型式二之示意圖

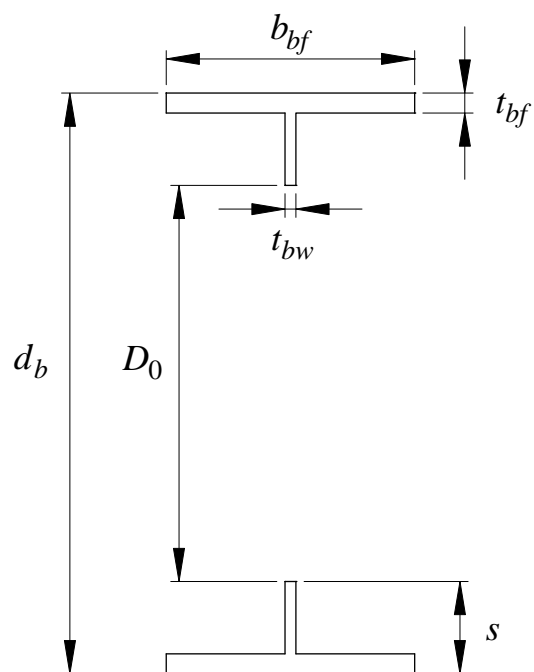


圖 2.11 梁腹板開孔後之斷面圖

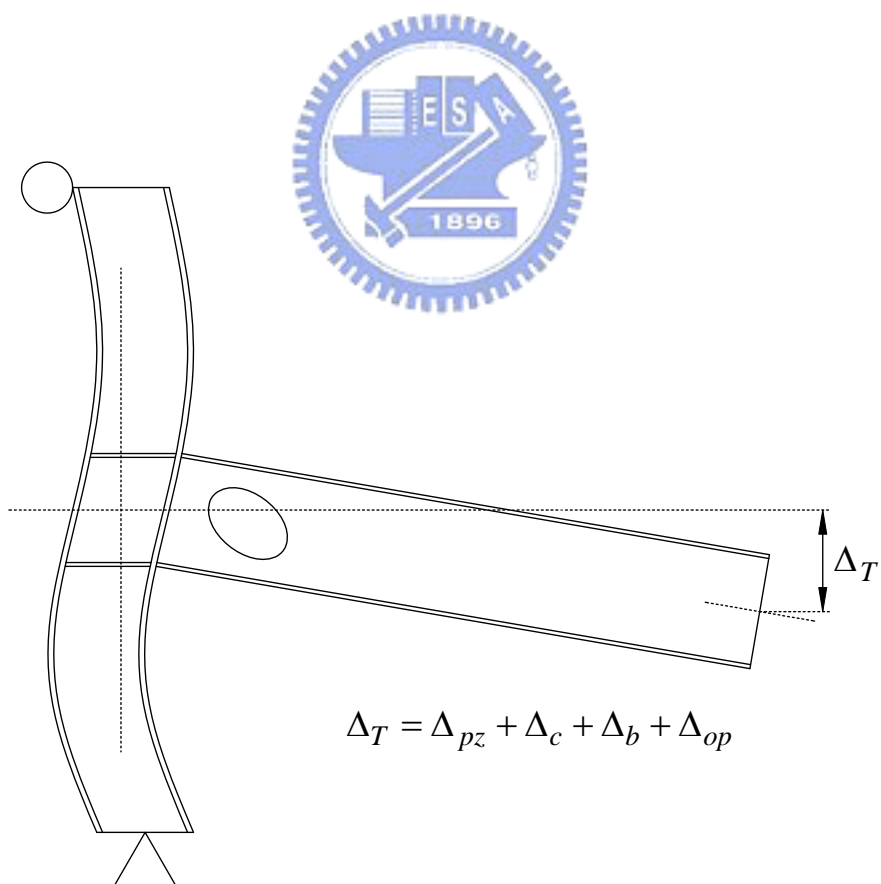


圖 2.12 梁端變形分量示

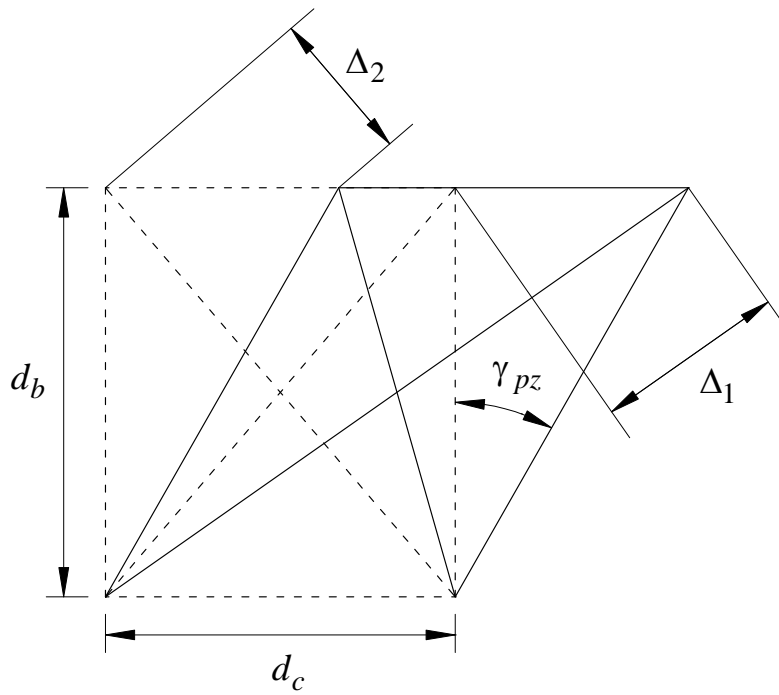


圖 2.13 鋼骨梁柱交會區對角線相對位移與剪力變形關係示意圖

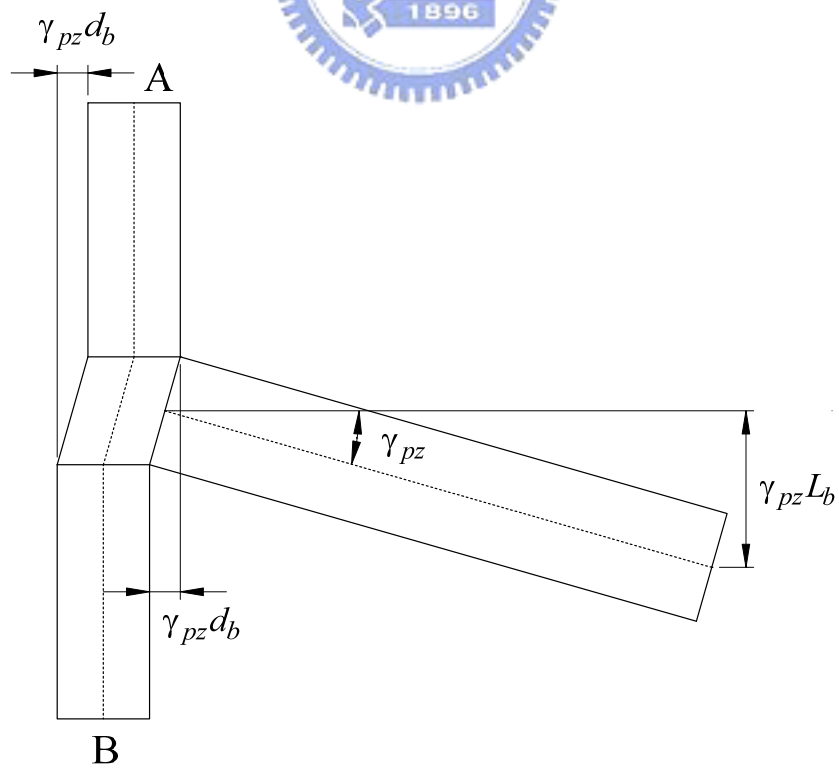


圖 2.14 鋼骨梁柱交會區剪力變形所造成之梁端變形分量示意圖



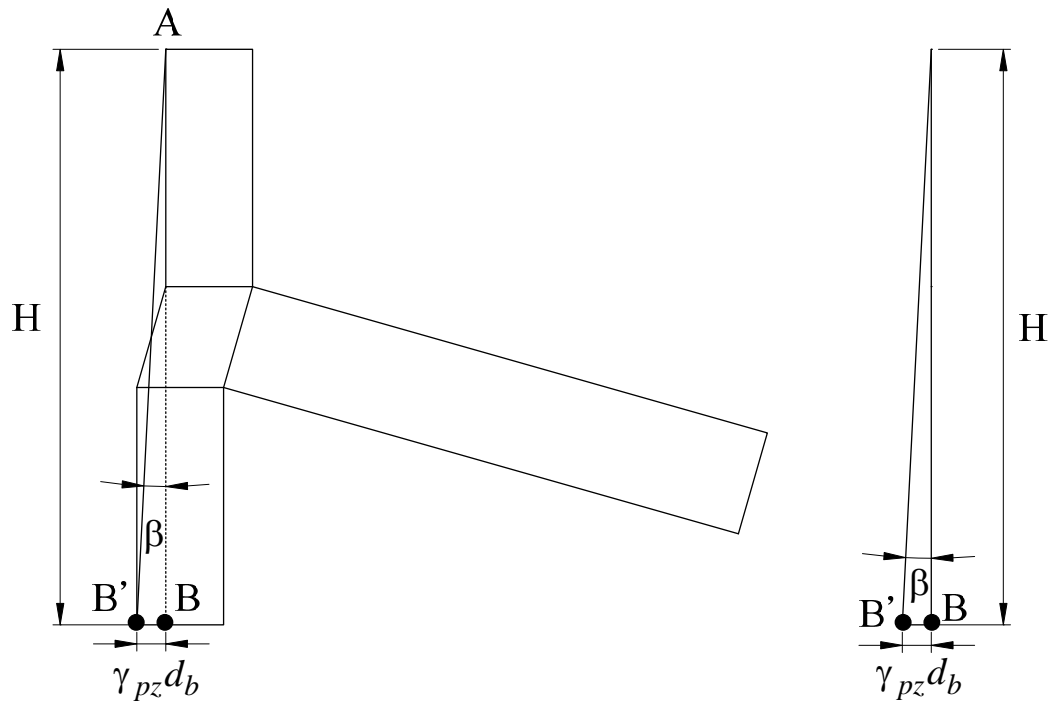


圖 2.15 剛體運動之旋轉角之示意圖

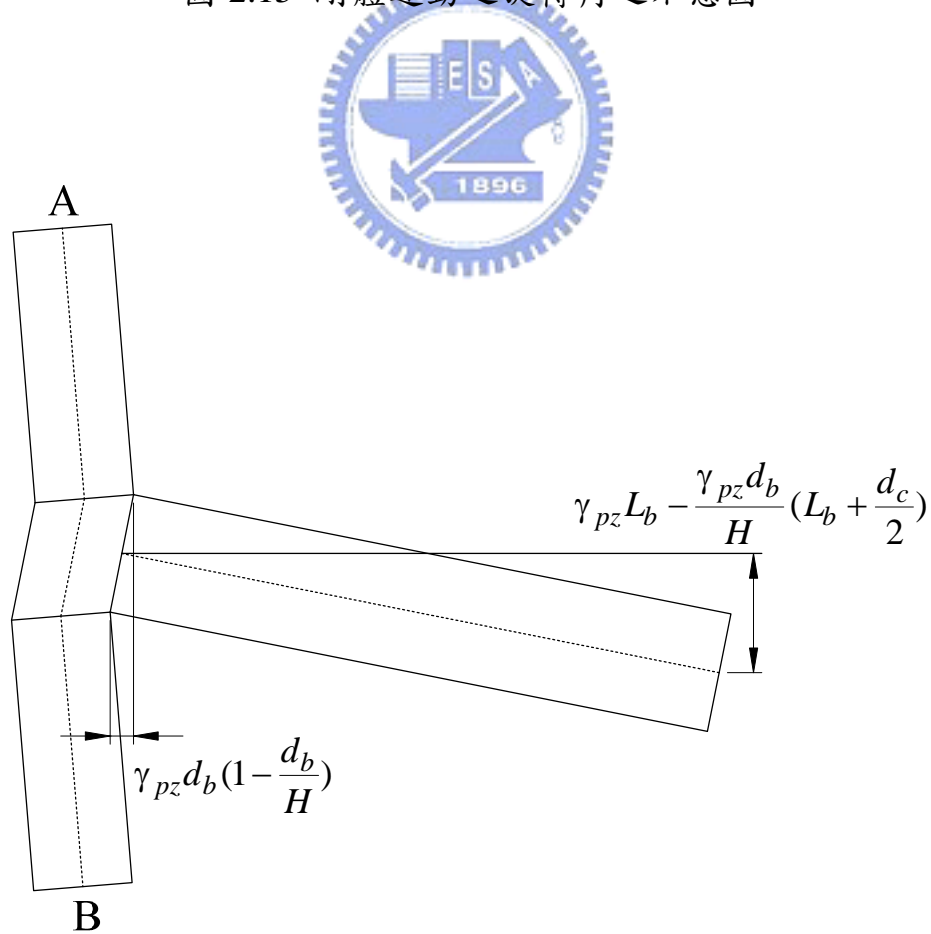


圖 2.16 梁柱交會區變形含剛體運動後所造成之梁端變形分量示意圖

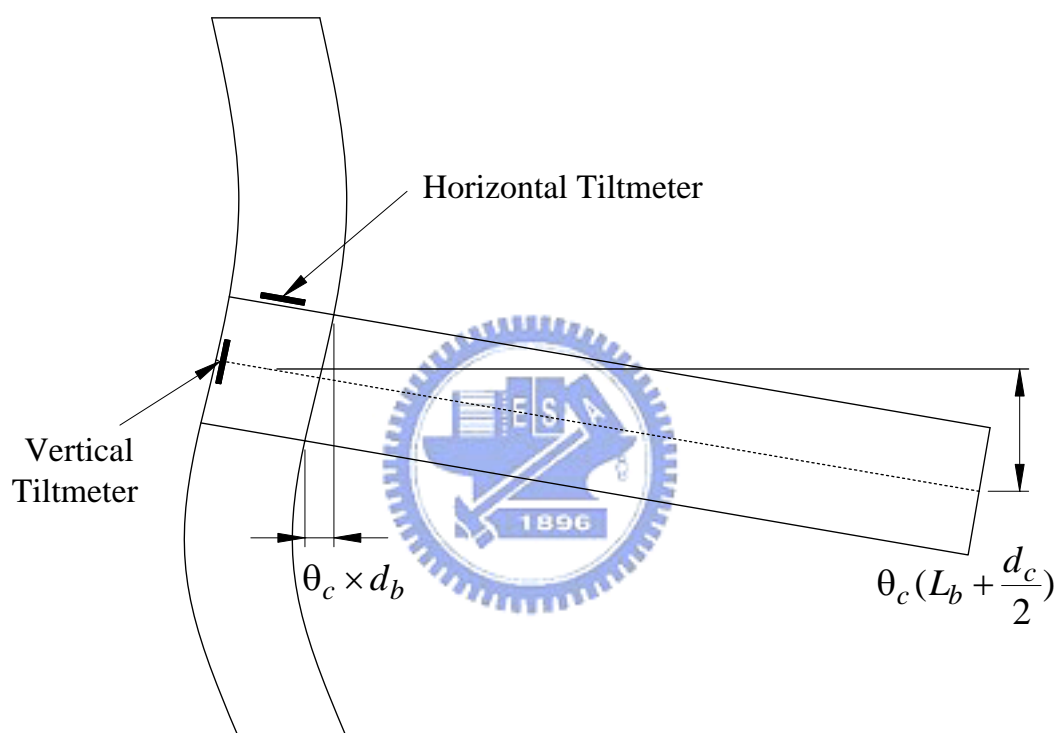
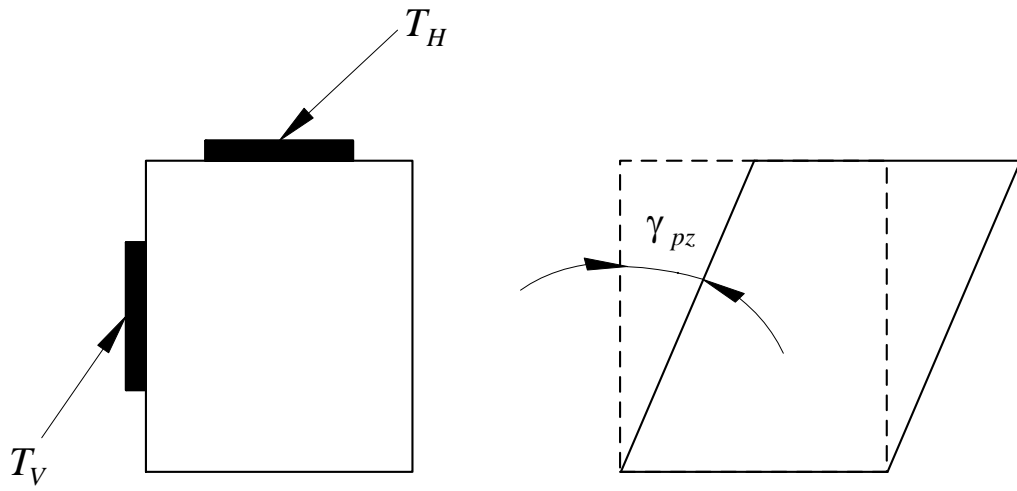
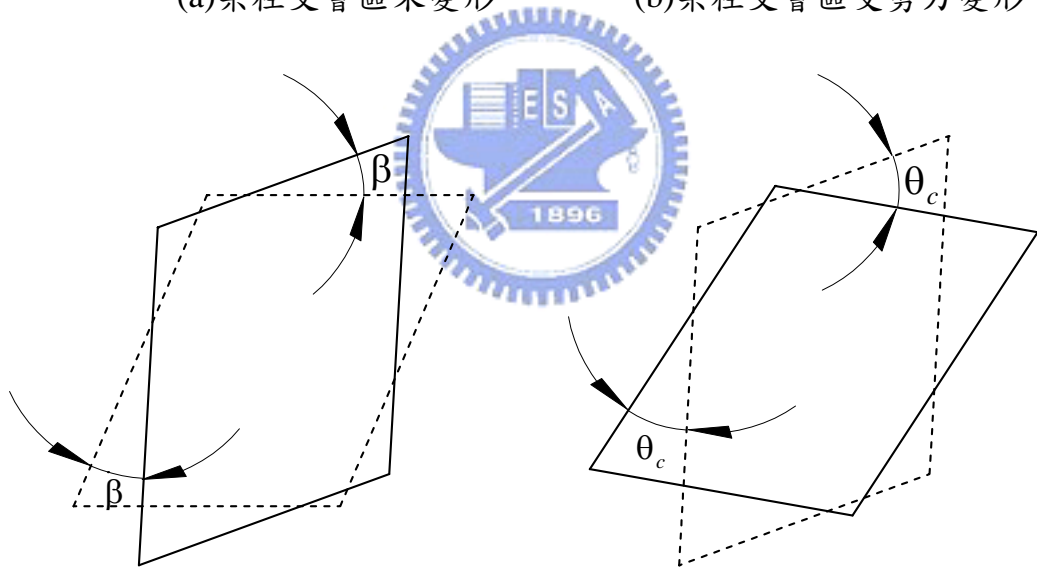


圖 2.17 柱變形所引致之梁端變形分量示意圖



(a) 梁柱交會區未變形

(b) 梁柱交會區受剪力變形



(c) 梁柱交會區受剪力變形  
及剛體運動

(d) 梁柱交會區受剪力變形、  
剛體運動及柱變形

圖 2.18 傾斜儀讀數量測示意圖

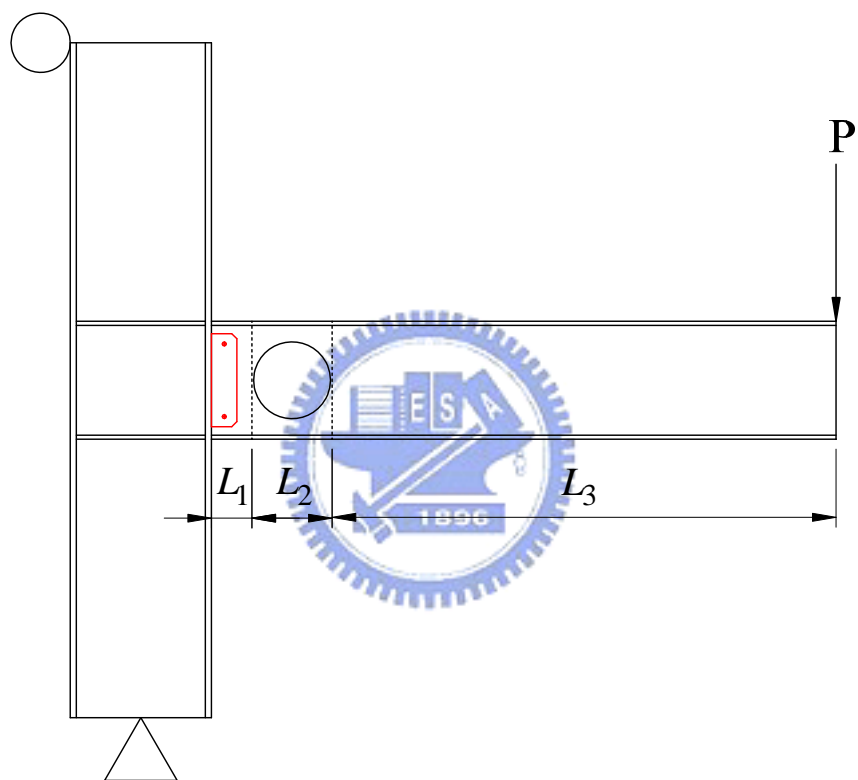
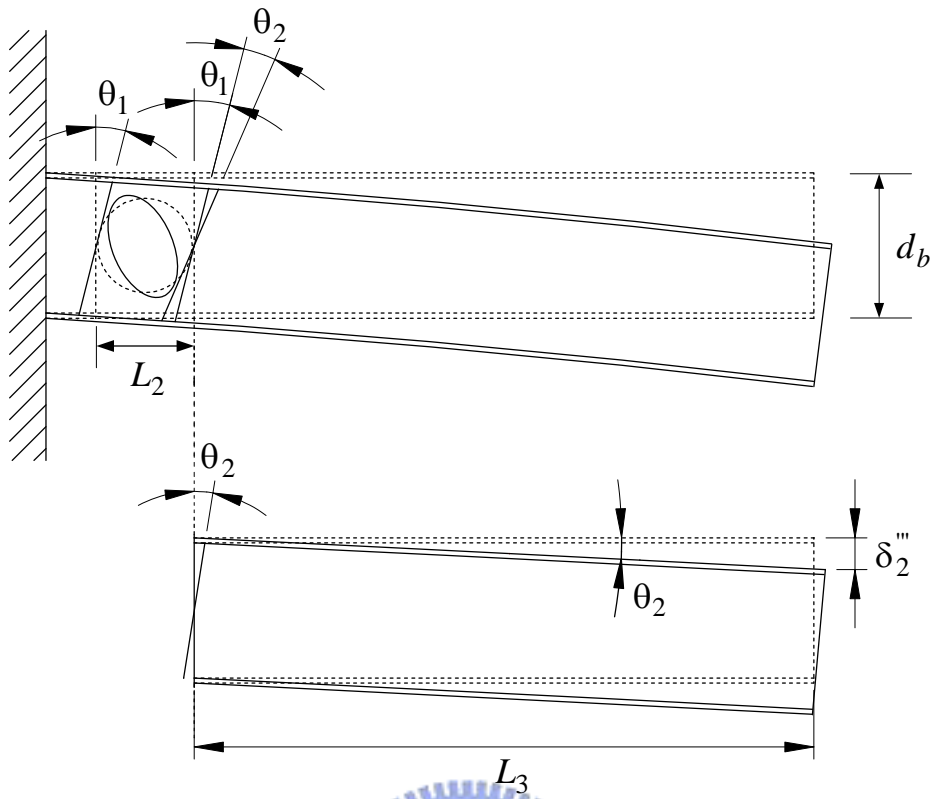
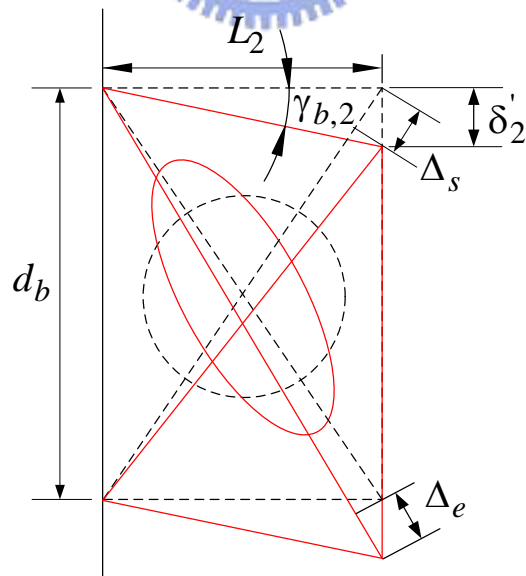


圖 2.19 公式推導中所用之梁桿件各段範圍示意圖

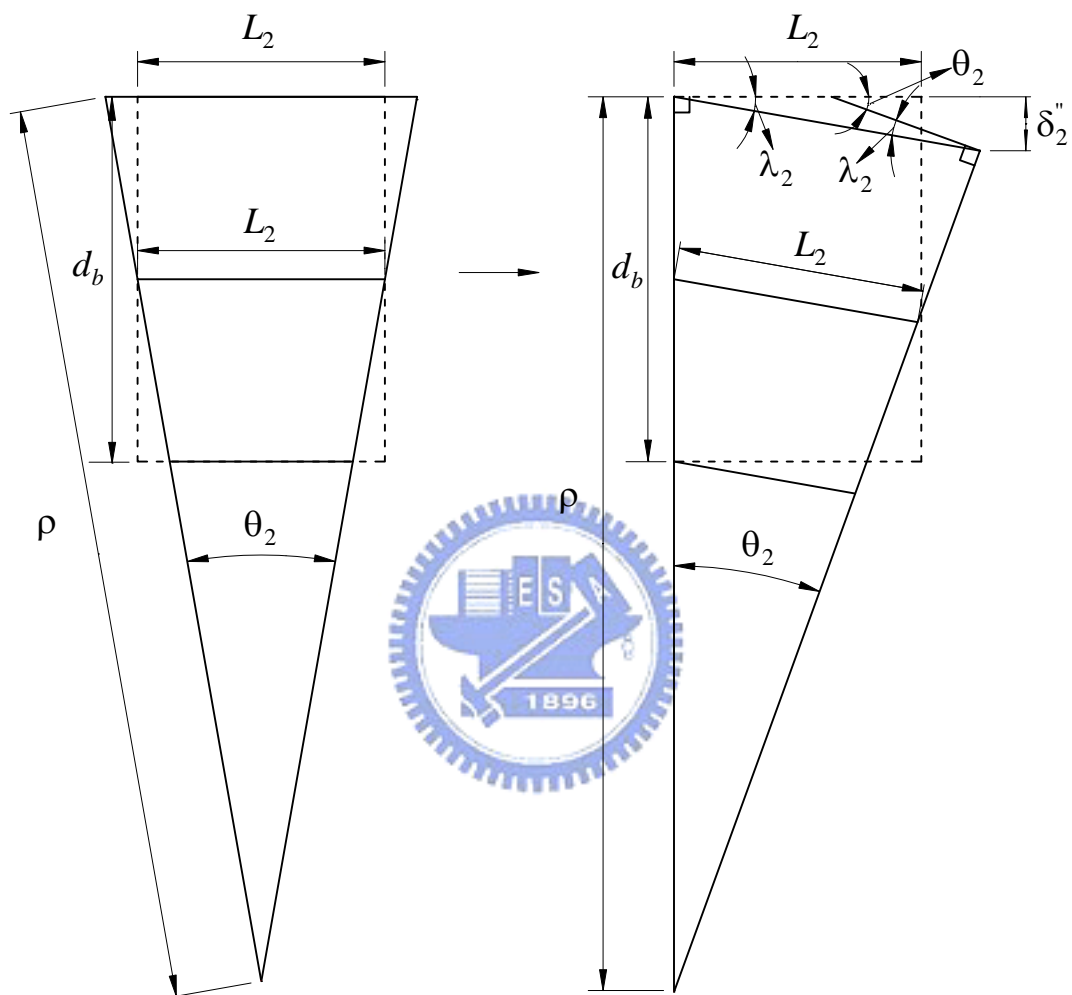


(a) 梁第二段(開孔區)之撓角所引至梁端位移量



(b) 梁第二段(開孔區)因剪力作用所產生之梁端位移量

圖 2.20 梁第二段(開孔區)受剪力及撓曲作用之變形示意圖



(c) 梁第二段(開孔區)因撓曲作用所產生之梁端位移量

圖 2.20 梁第二段(開孔區)受剪力及撓曲作用之變形示意圖(續)



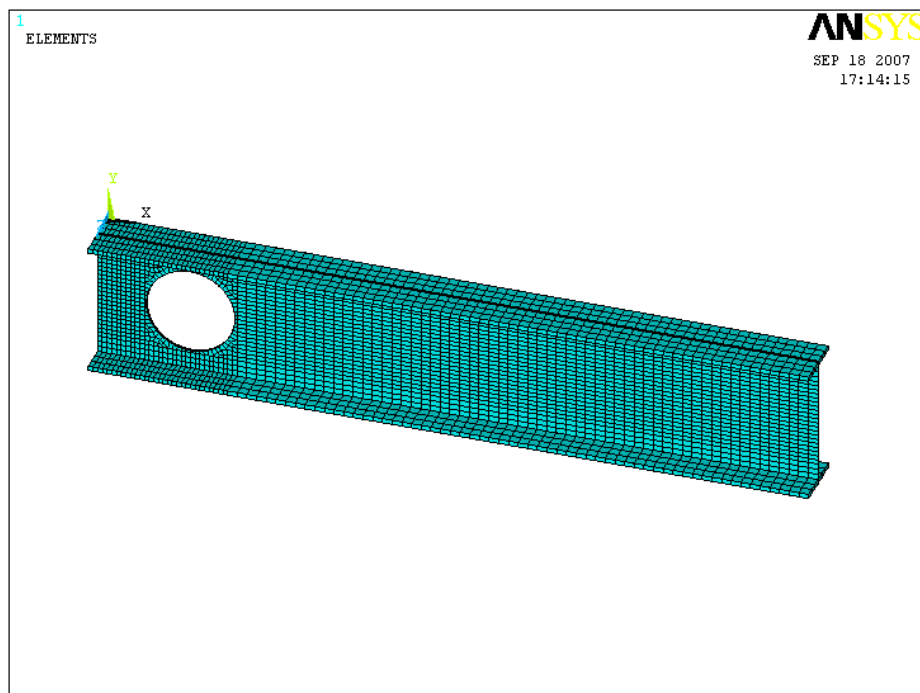


圖 2.21 梁桿件腹板開孔模型之網格化圖

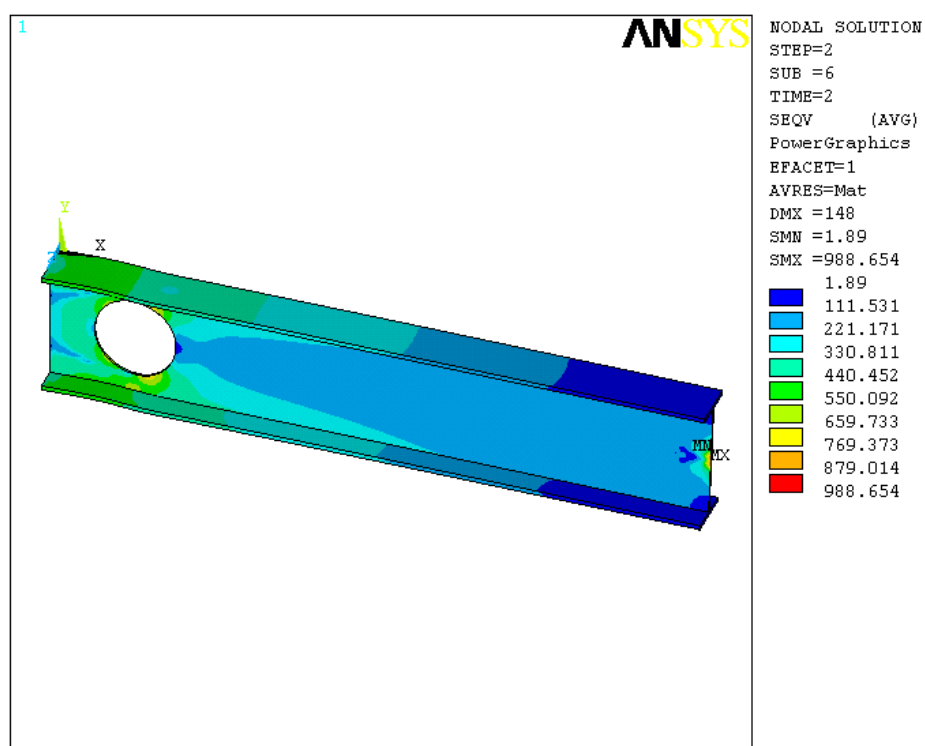


圖 2.22 梁桿件腹板開孔之 Von Miss 應力分佈圖

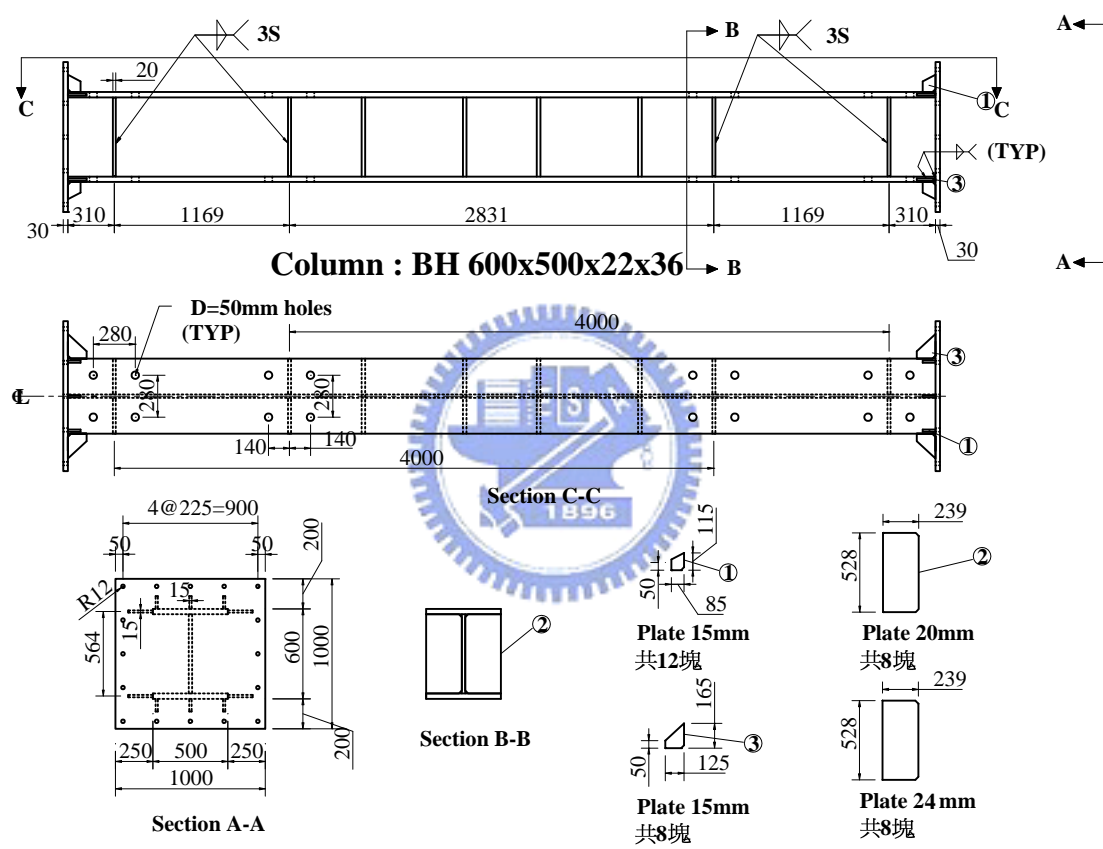


圖 3.1 柱之尺寸圖

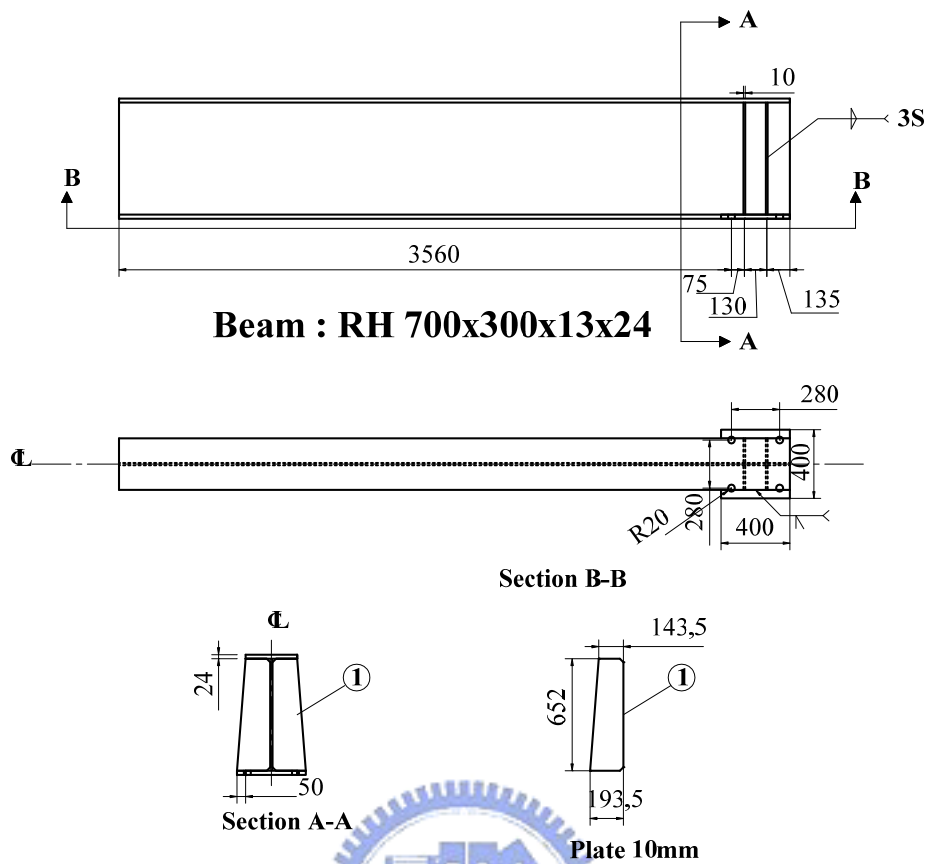


圖 3.2 梁之尺寸圖

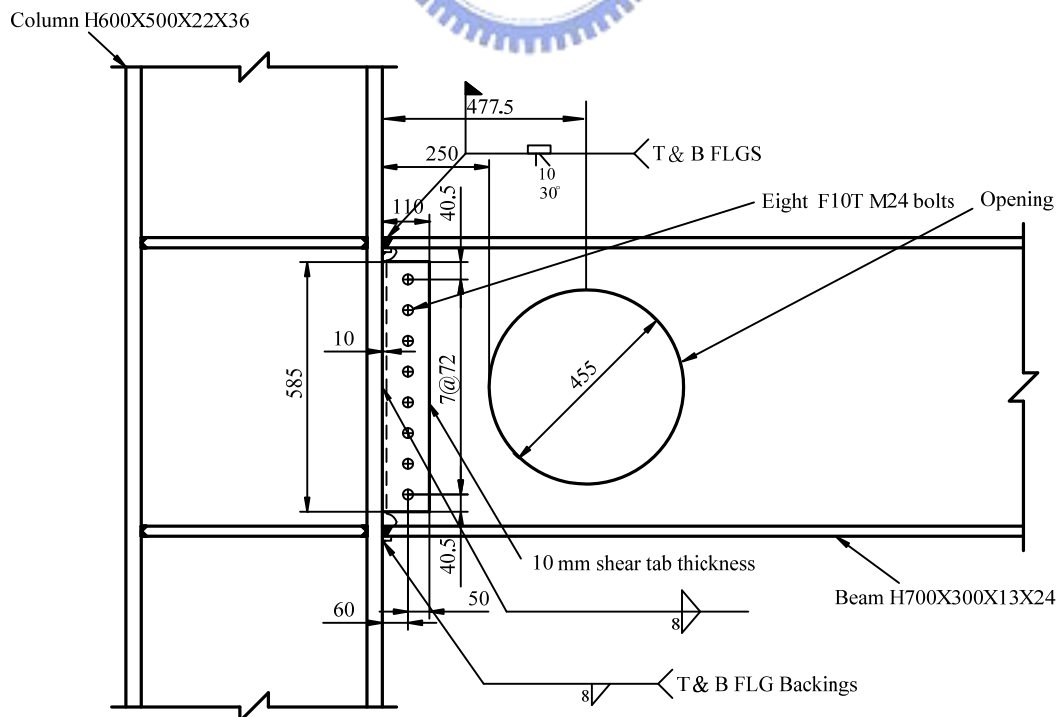


圖 3.3 試體 WOC65 之接合細節

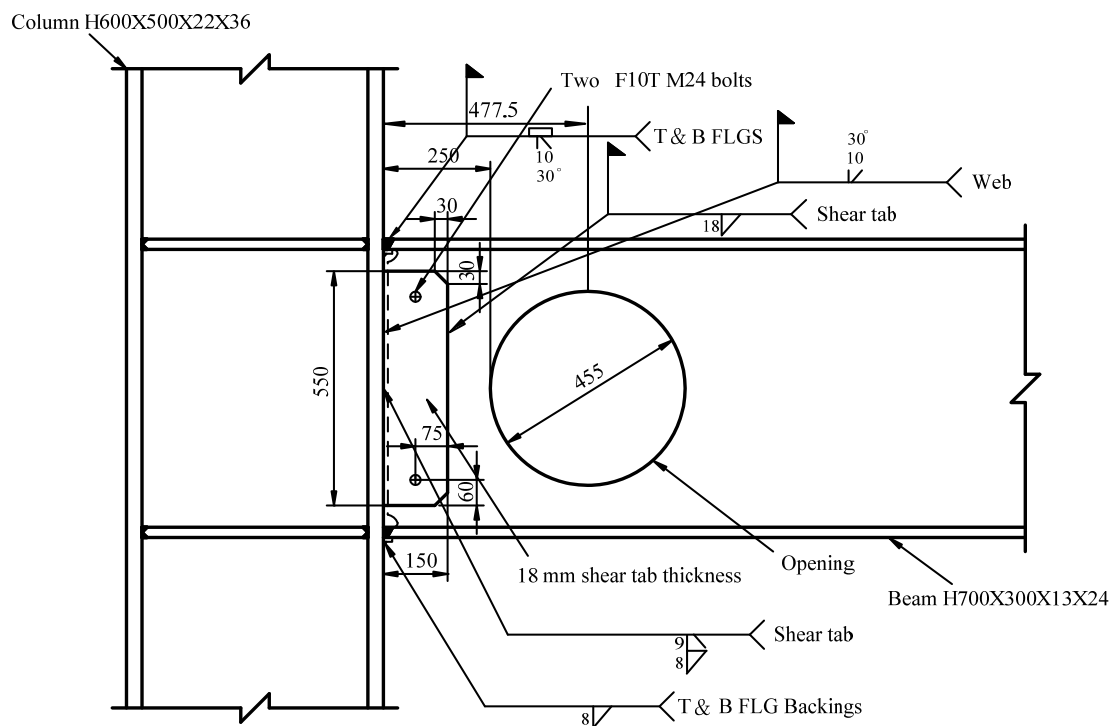


圖 3.4 試體 WOC65R1 之接合細節

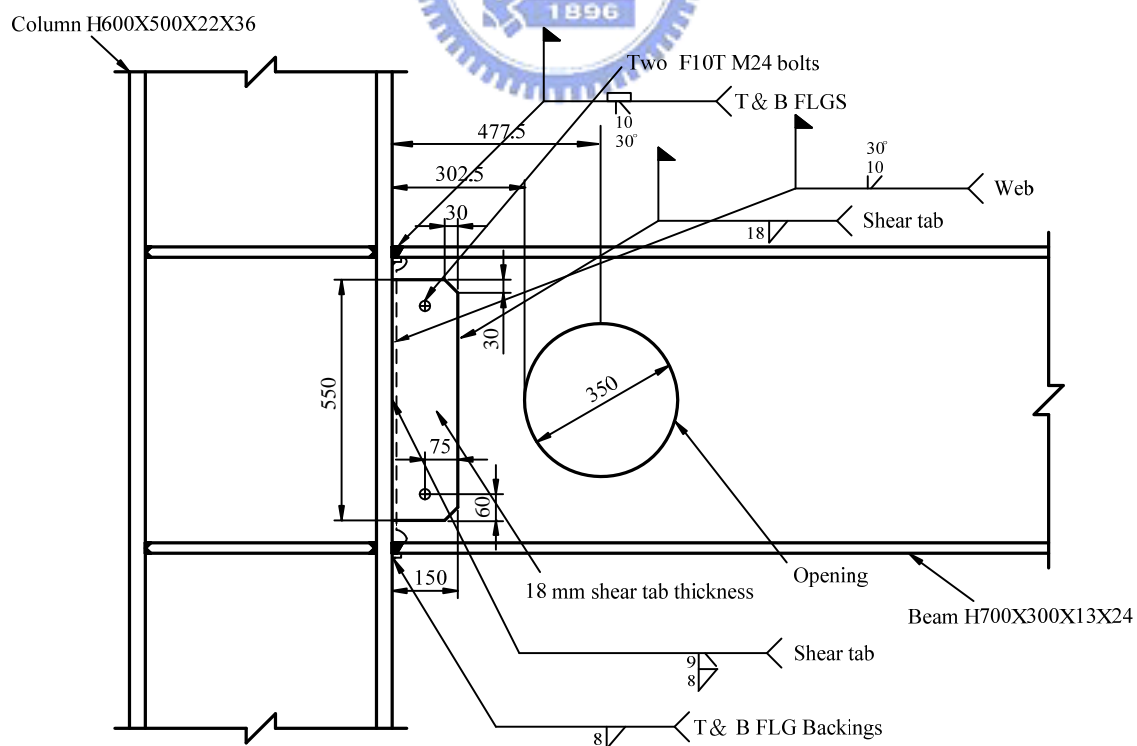


圖 3.5 試體 WOC50R1 之接合細節

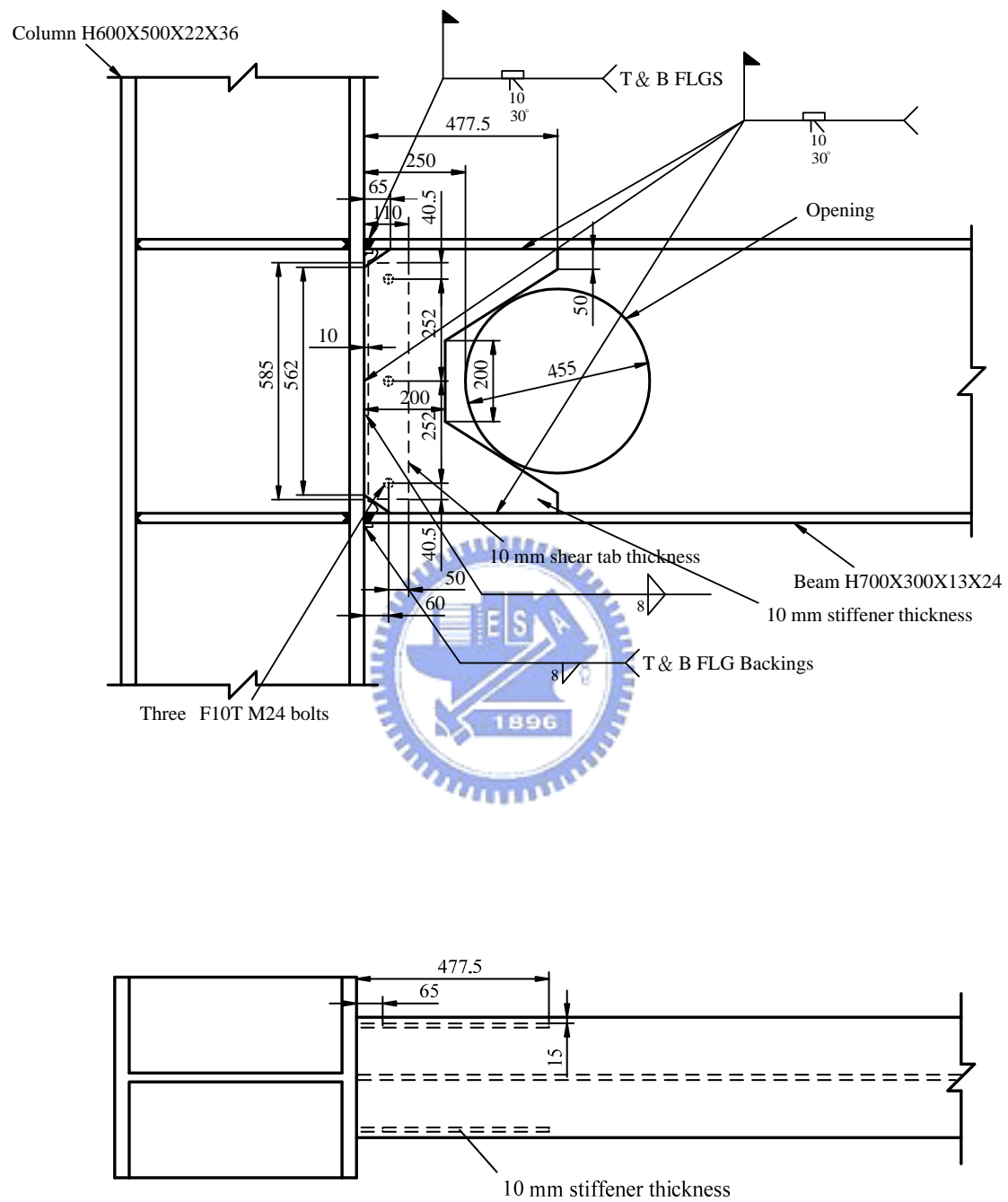


圖 3.6 試體 WOC65R2 之接合細節

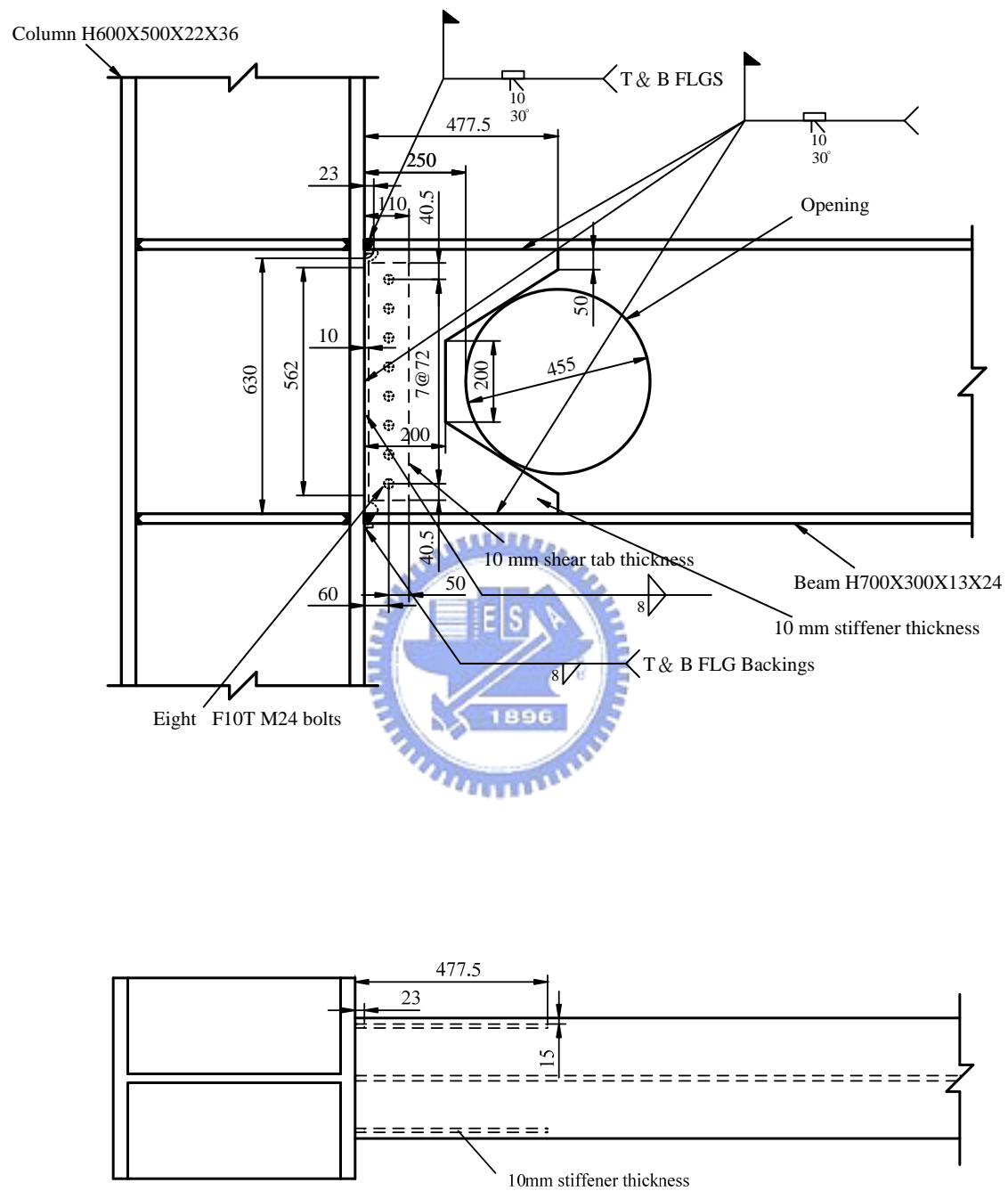


圖 3.7 試體 WOC65R3 之接合細節

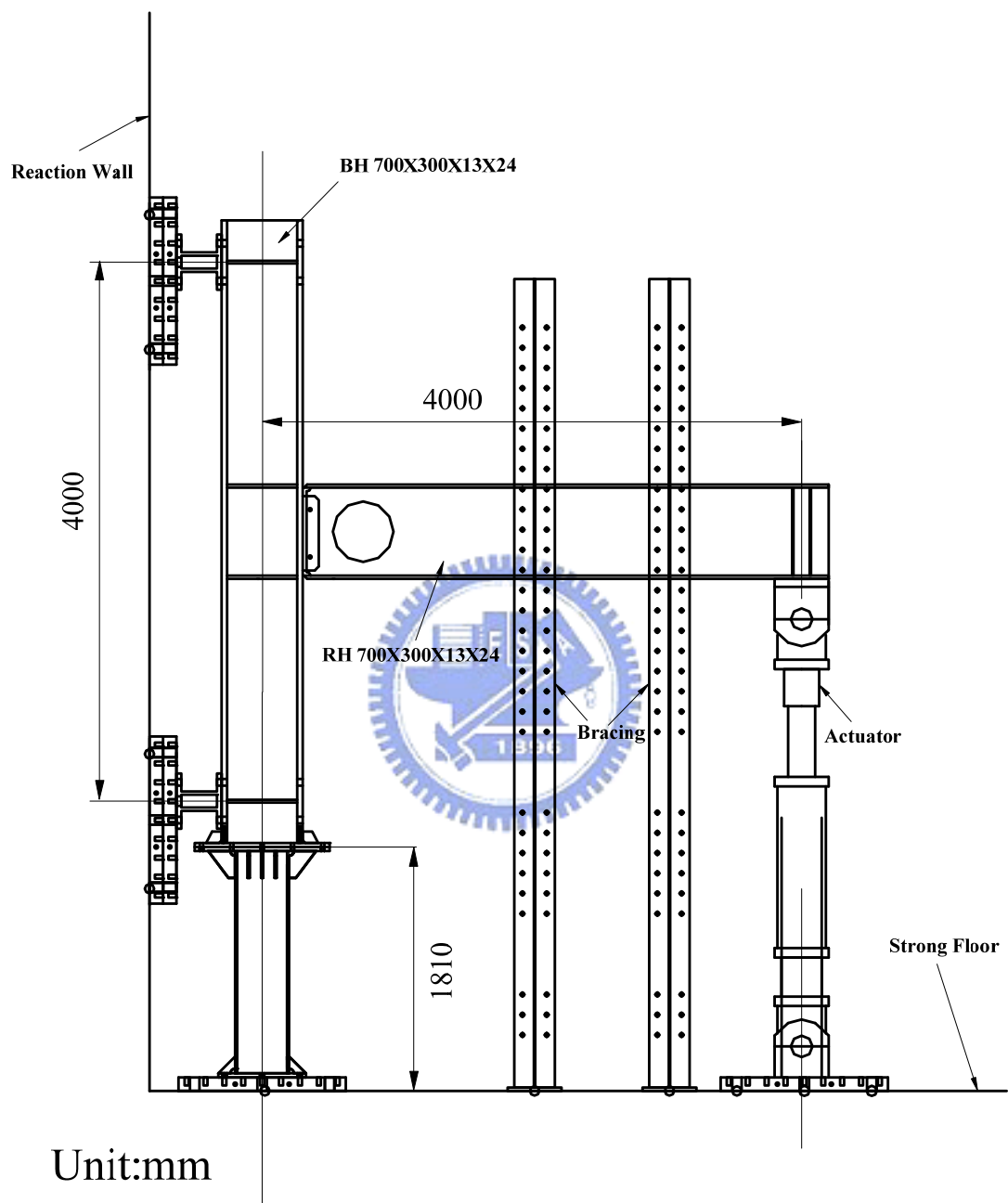
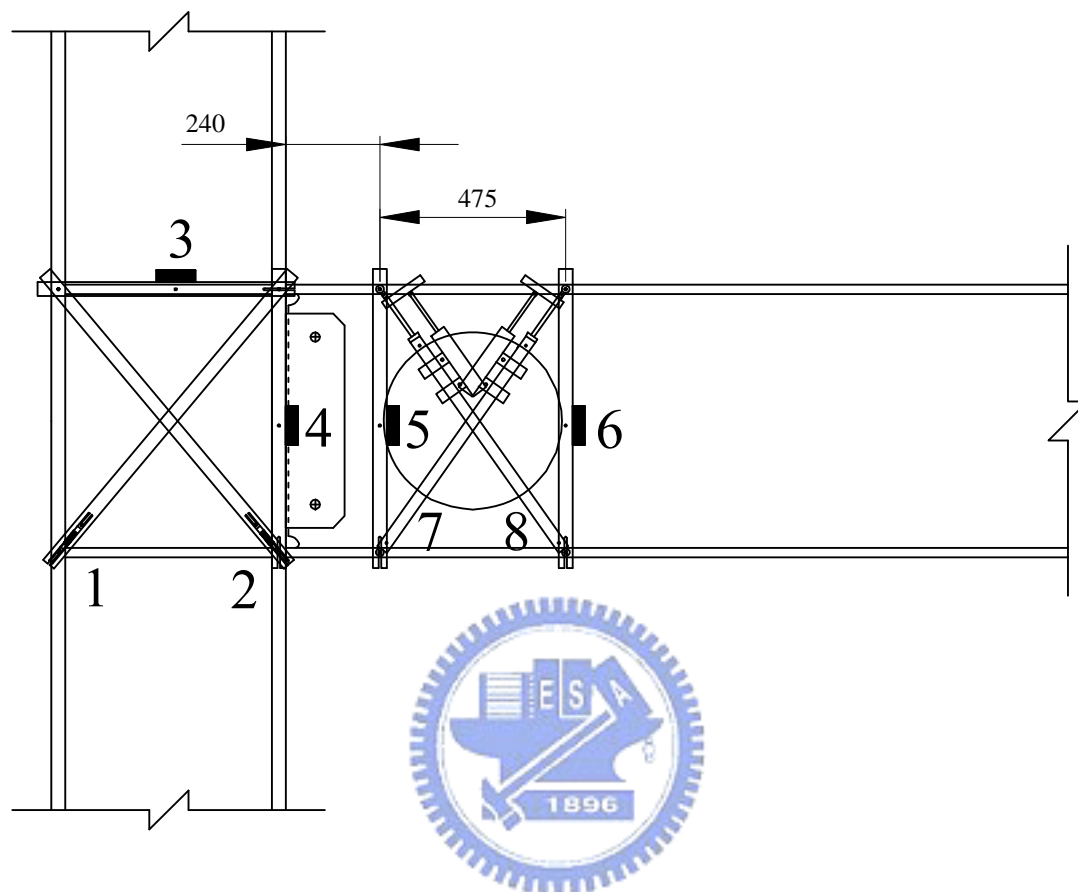


圖 3.8 試驗設置





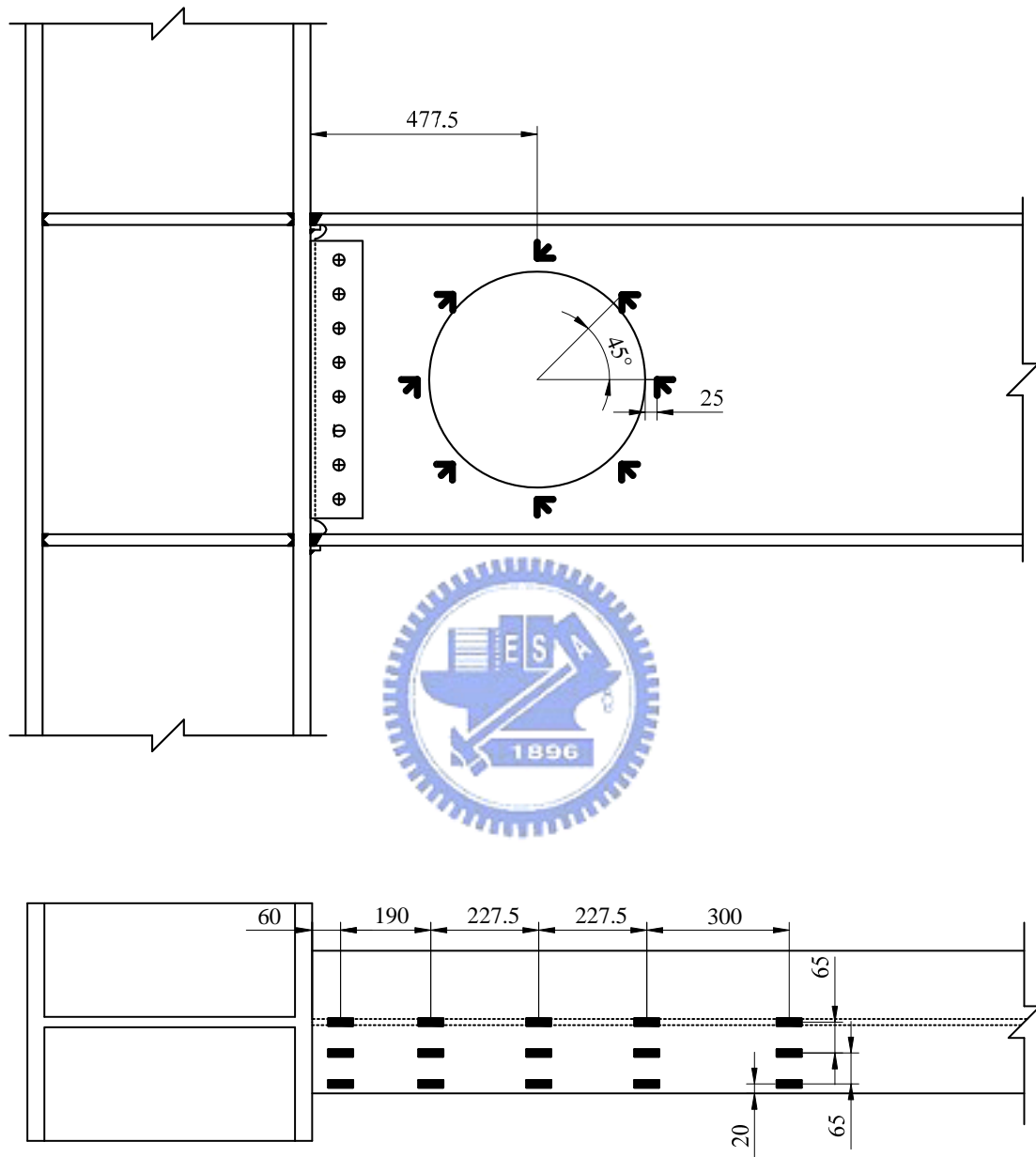
1, 2 :  $\pi$ -Gage , 量測接頭腹板區變形量

3, 4 : Tiltmeter , 量測柱變形量

5, 6 : Tiltmeter , 量測梁腹板開孔區的撓曲變形角

7, 8 : LVDT , 量測梁腹板開孔的剪力變形量

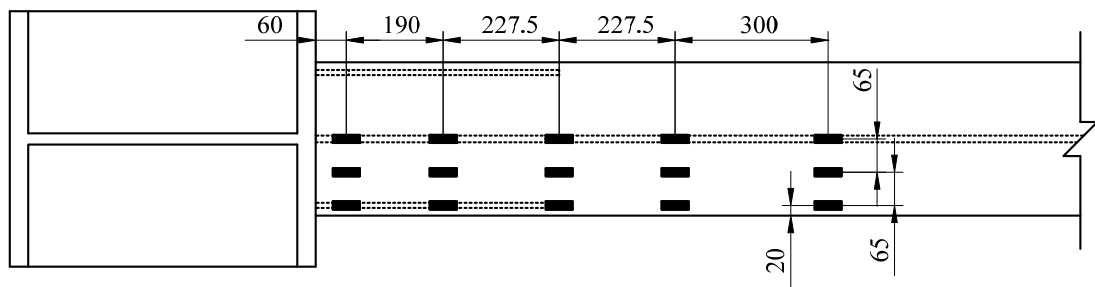
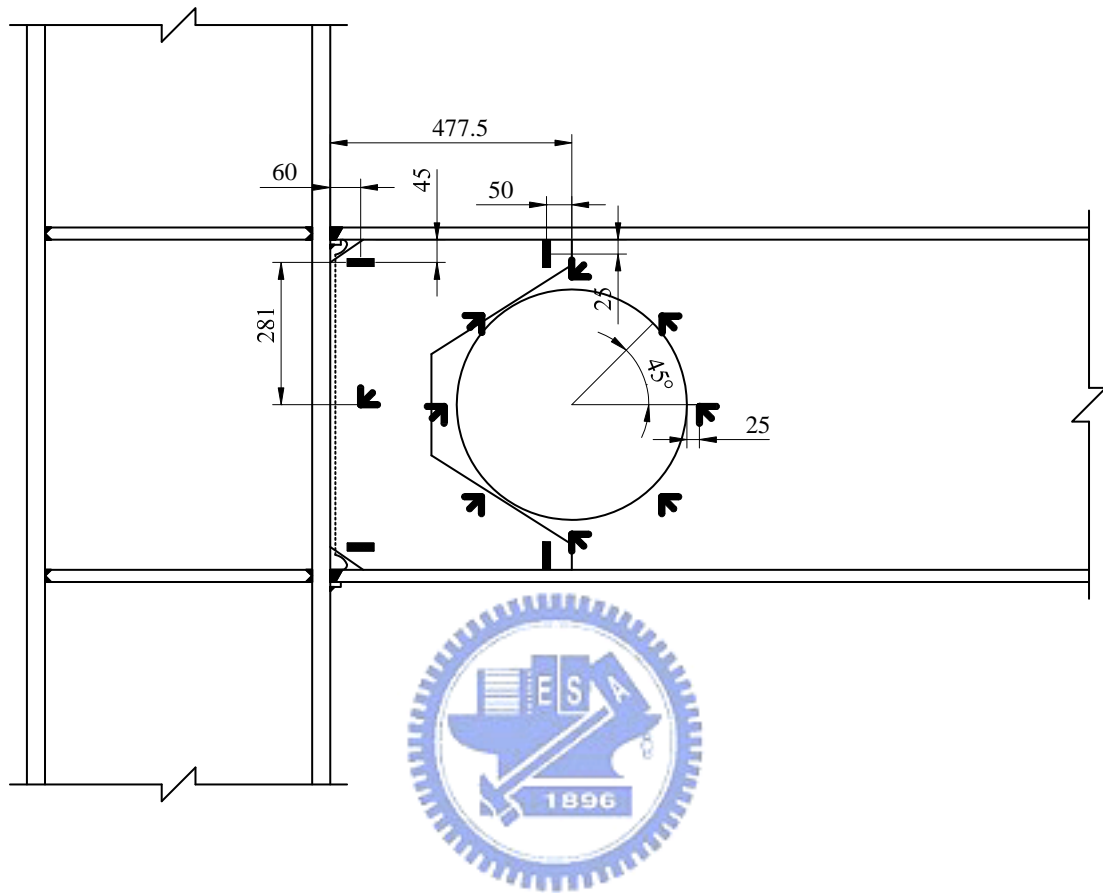
圖 3.9 量測儀器配置圖



Unit:mm

註：試體 WOC65、WOC65R1、WOC50R1 應變計位置相同。

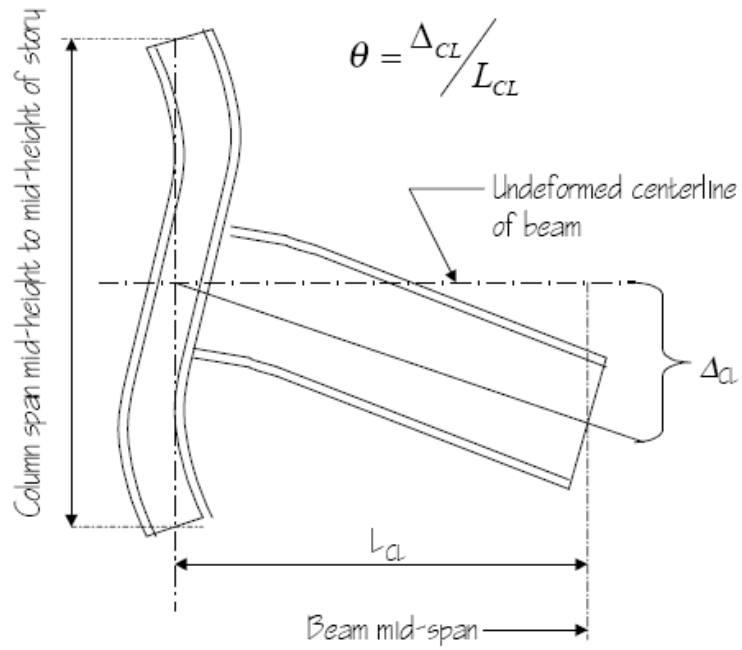
圖 3.10 試體 WOC65 應變計位置圖



Unit:mm

註：試體 WOC65R2、WOC65R3 應變計位置相同。

圖 3.11 試體 WOC65R2 應變計位置圖



FEMA-350 (2000)

圖 3.12 梁柱接頭子結構層間變位角定義

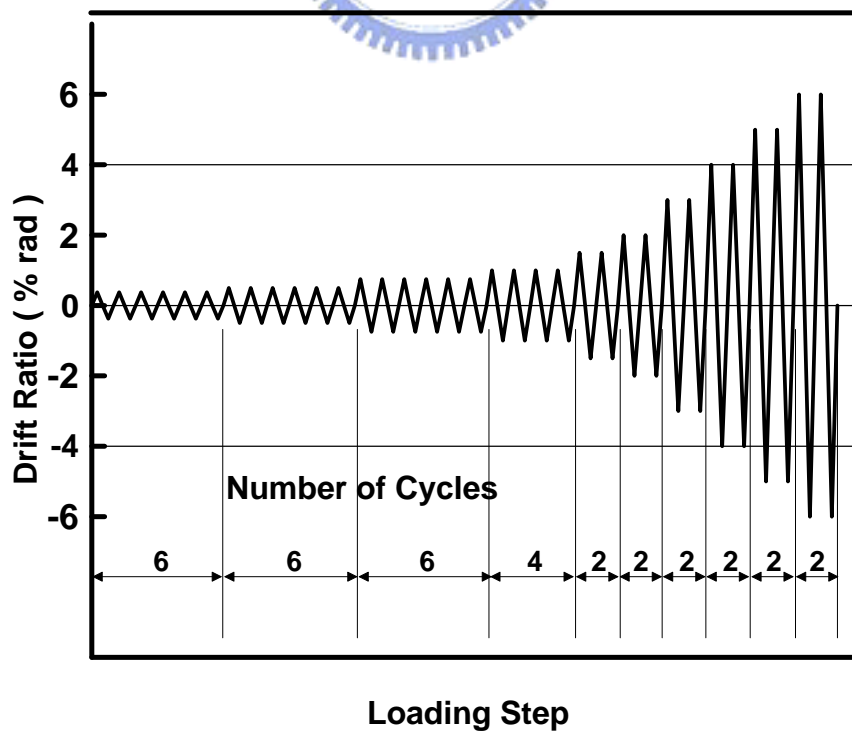
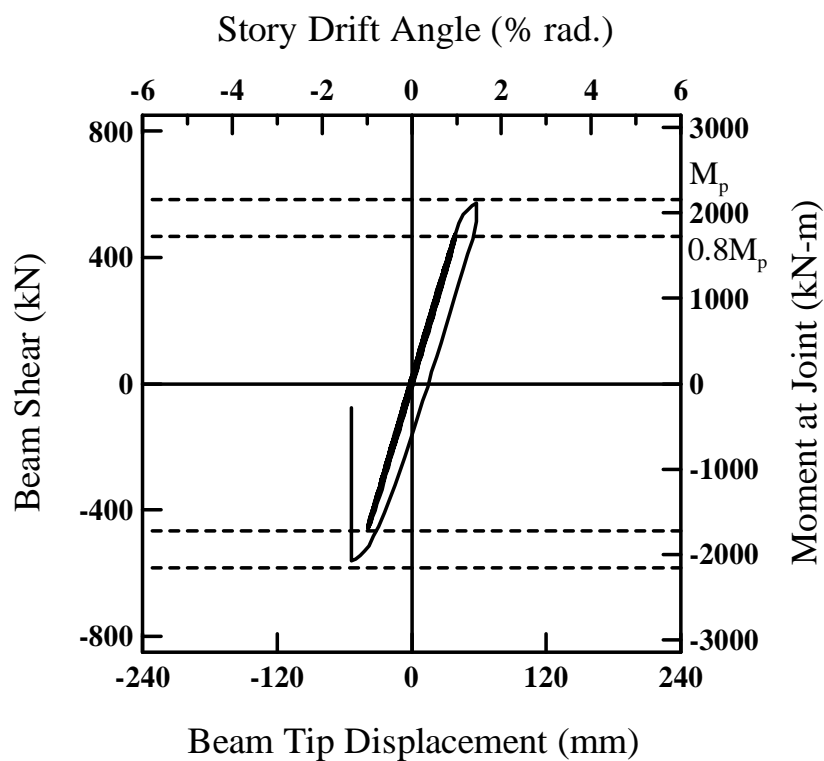
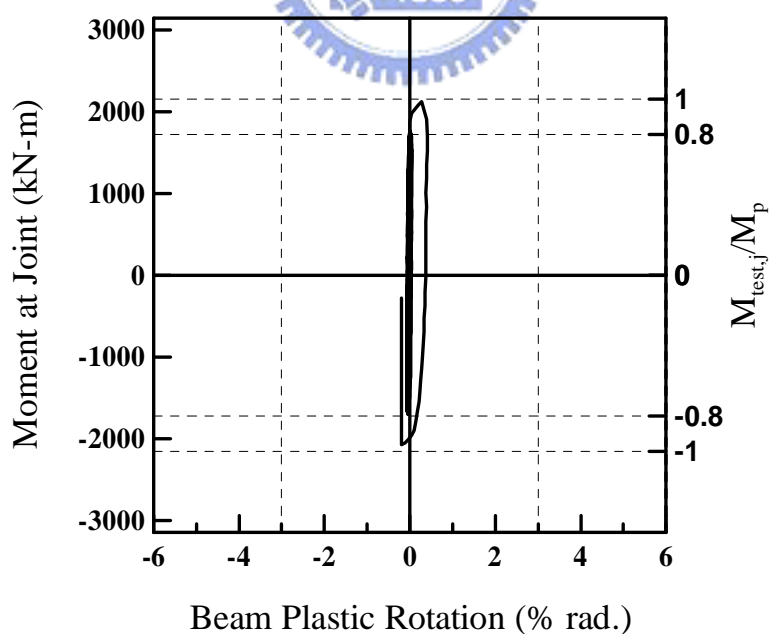


圖 3.13 位移控制歷程度

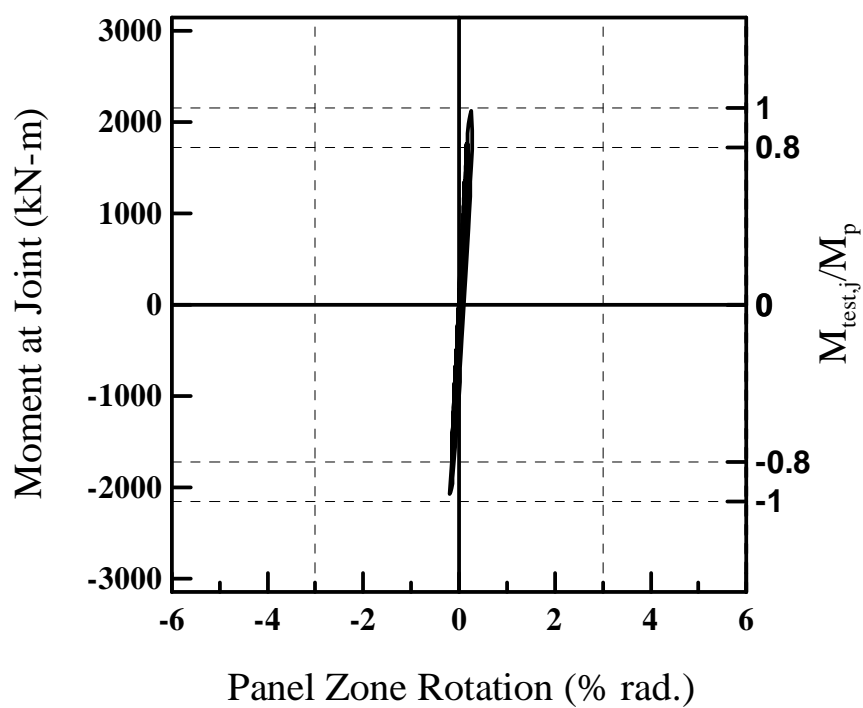


(a) 試體 WOC65 之載重與位移關係圖

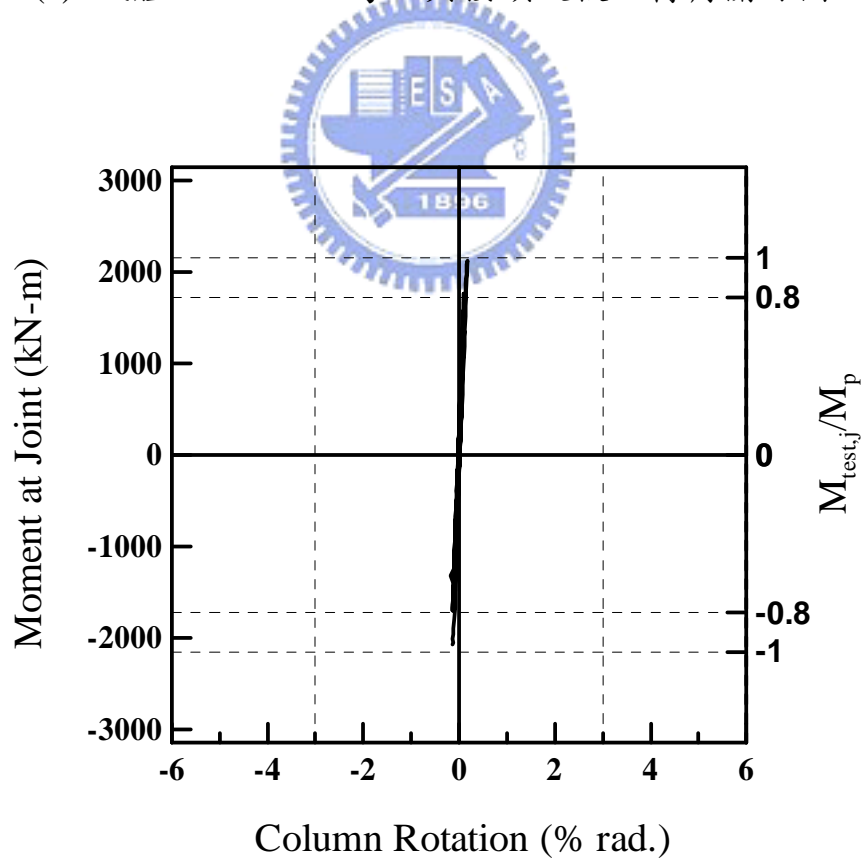


(b) 試體 WOC65 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.1 試體 WOC65 之遲滯迴圈圖

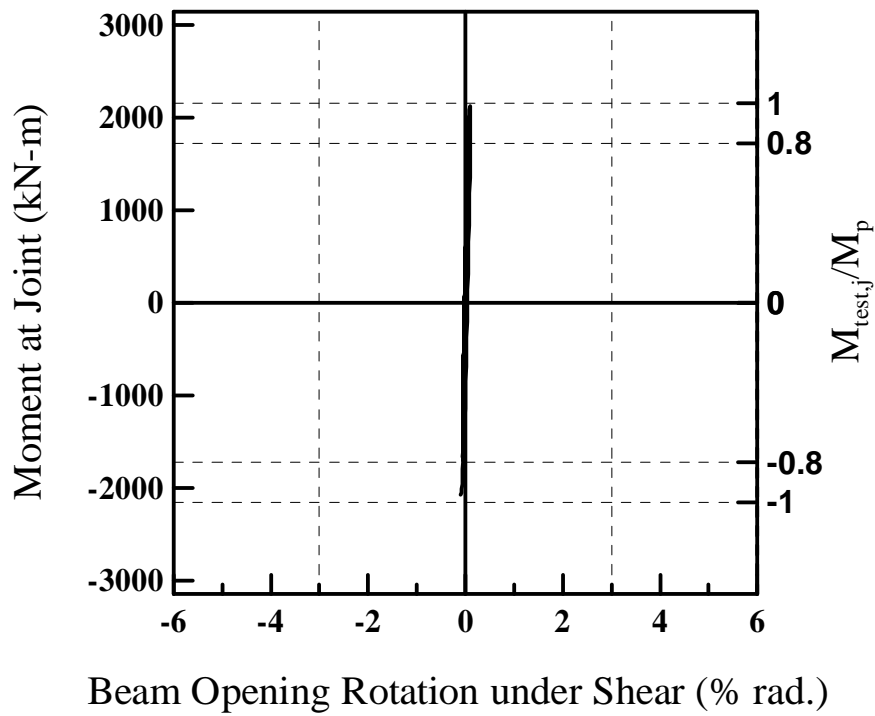


(c) 試體 WOC65 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

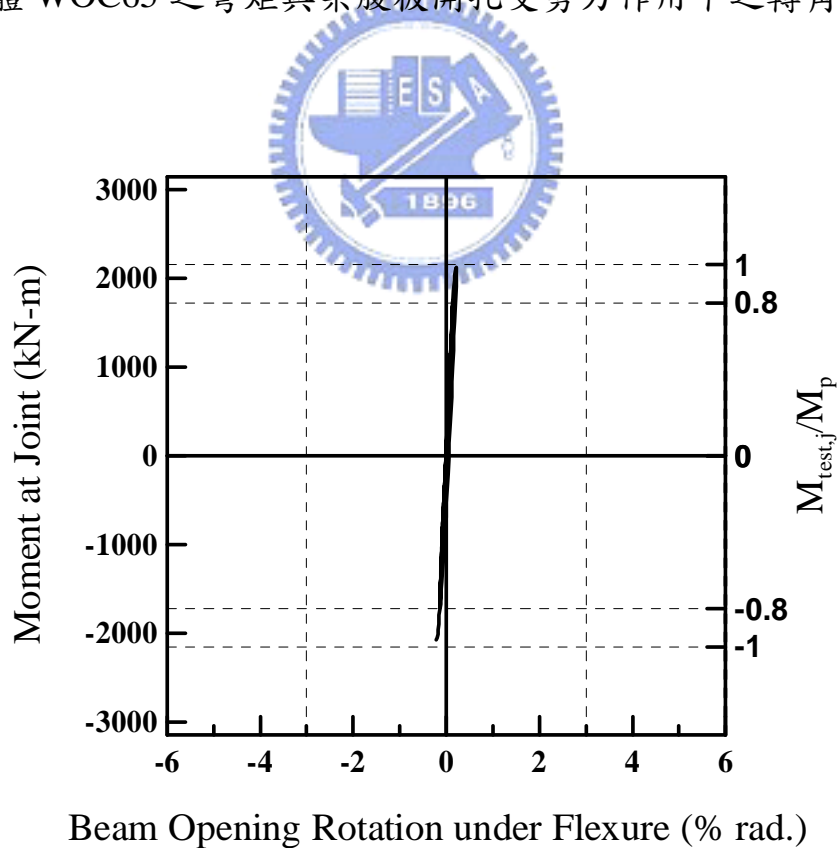


(d) 試體 WOC65 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.1 試體 WOC65 之遲滯迴圈圖(續)



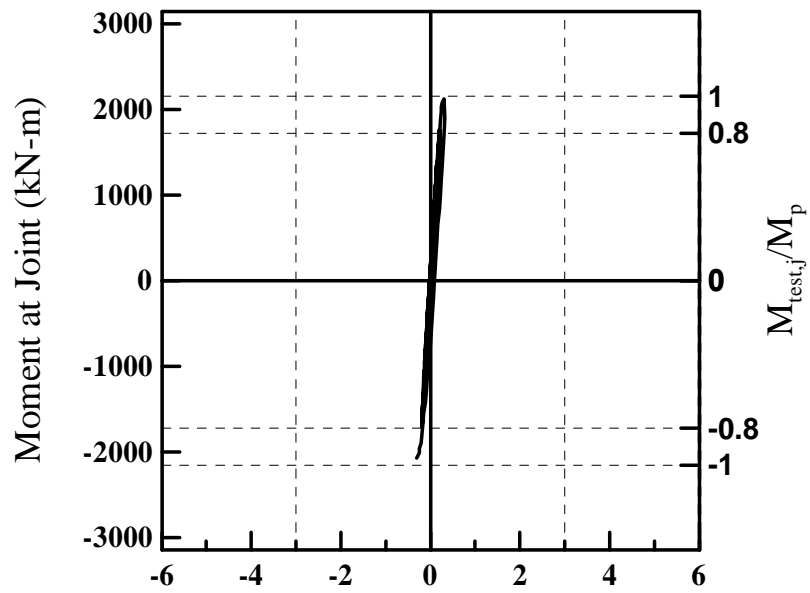
(e) 試體 WOC65 之彎矩與梁腹板開孔受剪力作用下之轉角關係圖



(f) 試體 WOC65 之彎矩與梁腹板開孔受撓曲作用下之轉角關係圖

圖 4.1 試體 WOC65 之遲滯迴圈圖(續)

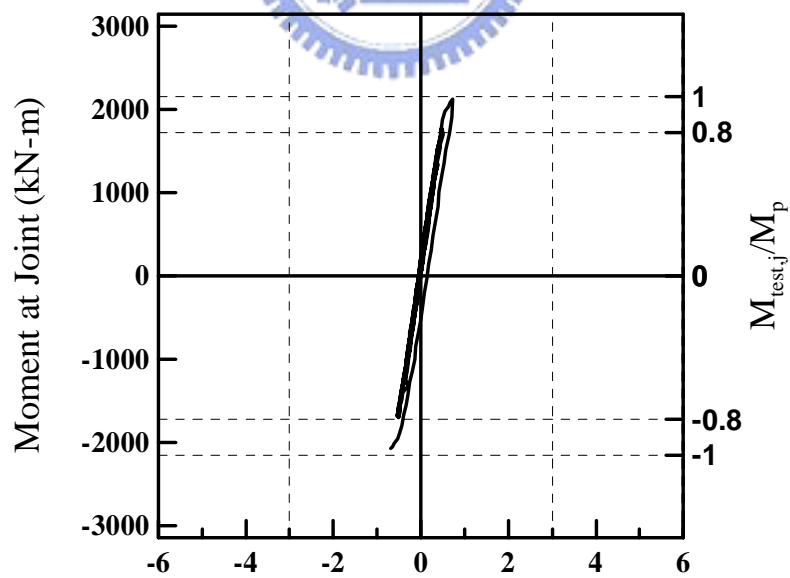




Beam Opening Rotation under Shear and Flexure (% rad.)

(g) 試體 WOC65 之彎矩與梁腹板開孔轉角關係圖

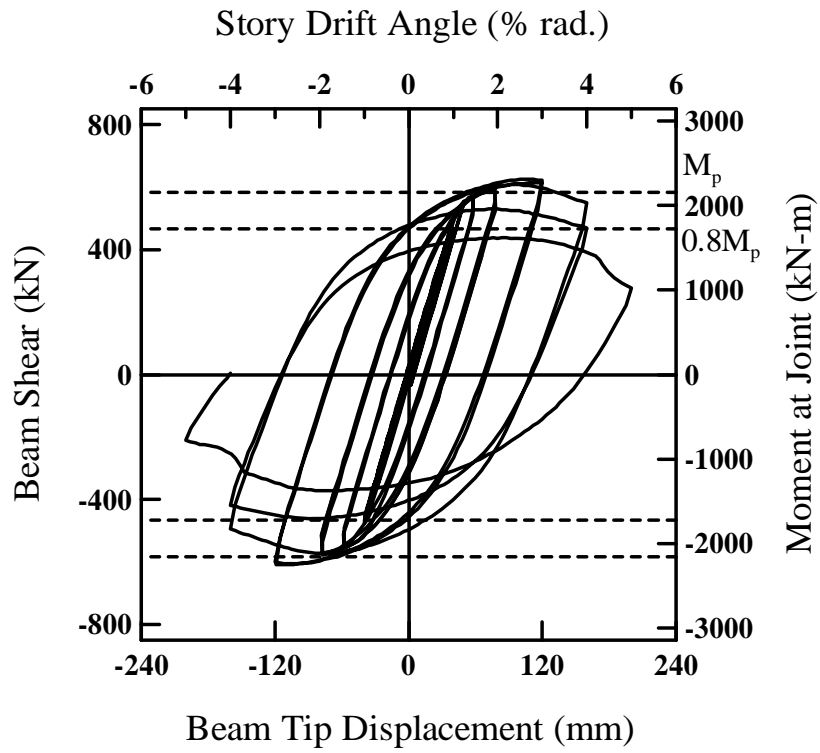
圖 4.1 試體 WOC65 之遲滯迴圈圖(續)



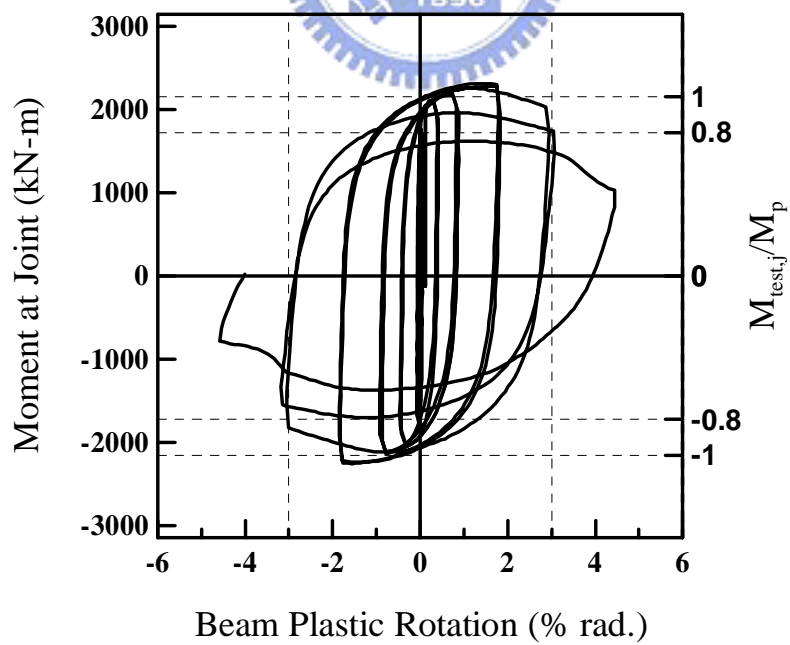
Rotation of Beam outside Opening (% rad.)

(h) 試體 WOC65 之彎矩與梁扣除梁腹板開孔轉角關係圖

圖 4.1 試體 WOC65 之遲滯迴圈圖(續)

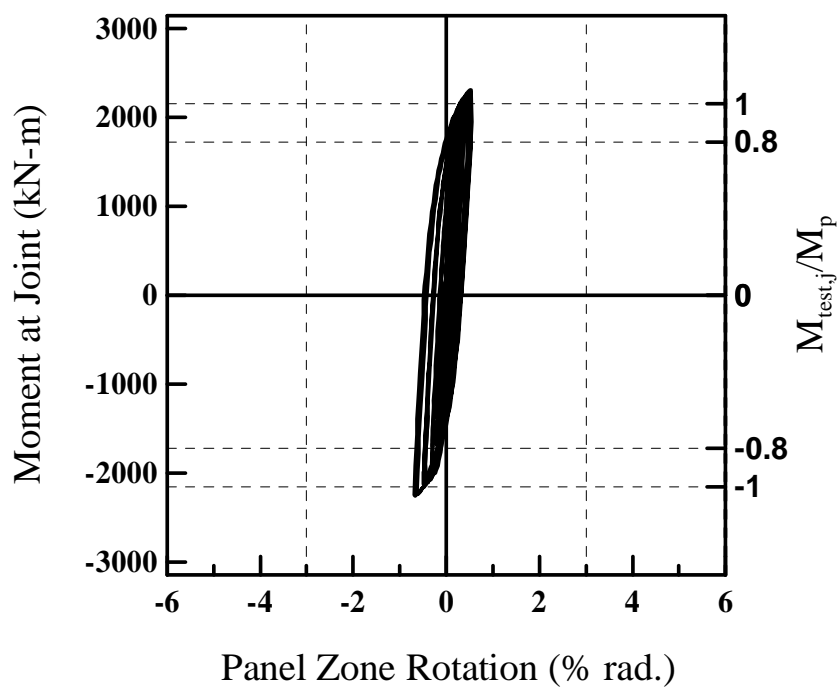


(a) 試體 WOC65R1 之載重與位移關係圖

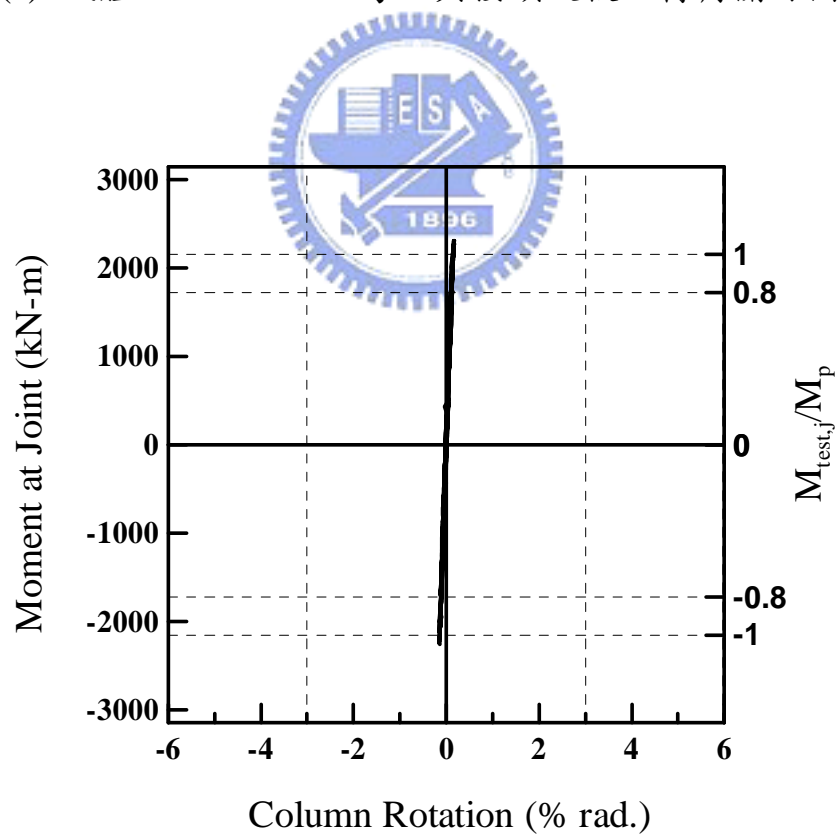


(b) 試體 WOC65R1 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.2 試體 WOC65R1 之遲滯迴圈圖

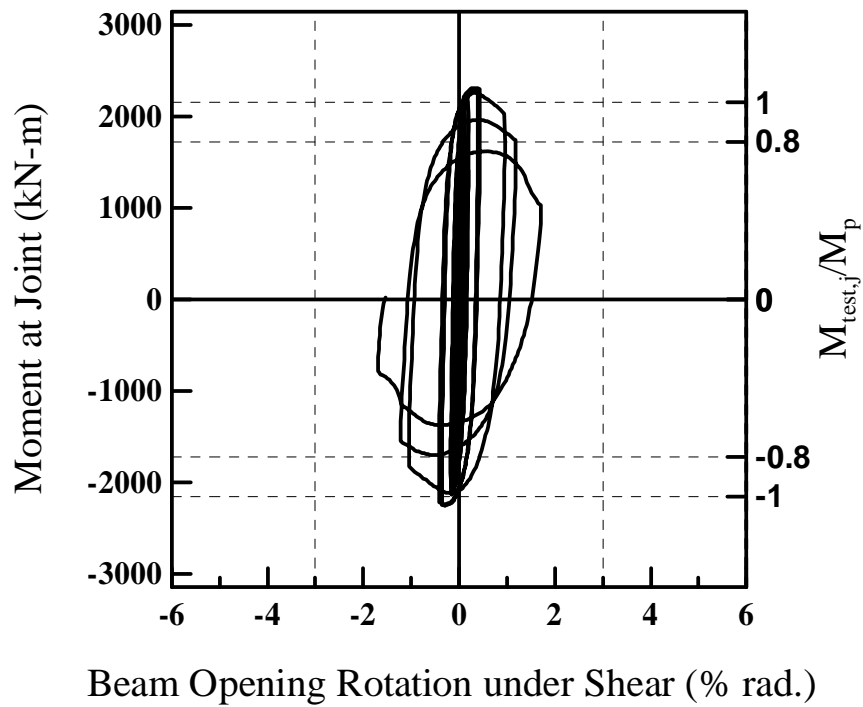


(c) 試體 WOC65R1 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

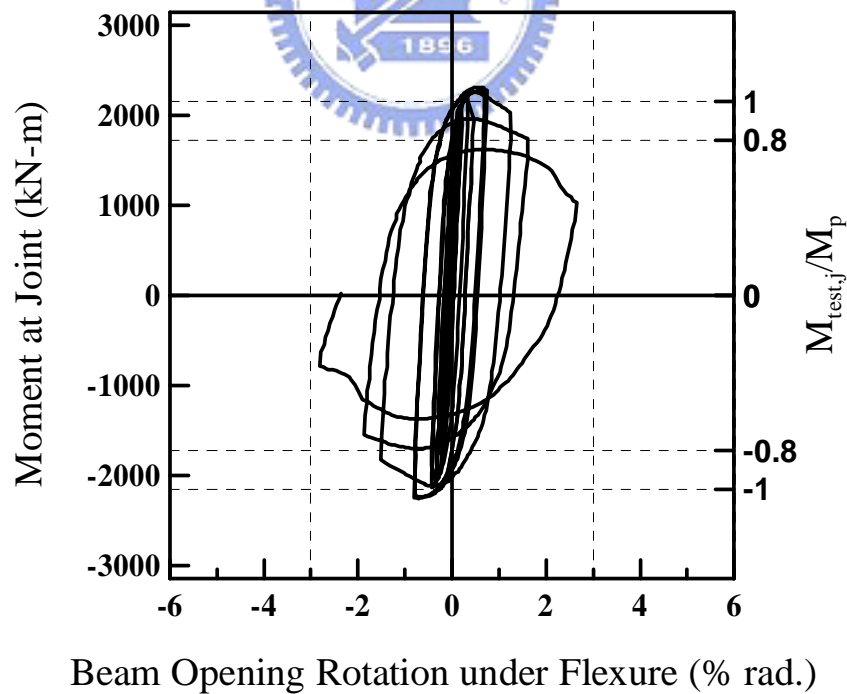


(d) 試體 WOC65R1 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.2 試體 WOC65R1 之遲滯迴圈圖(續)

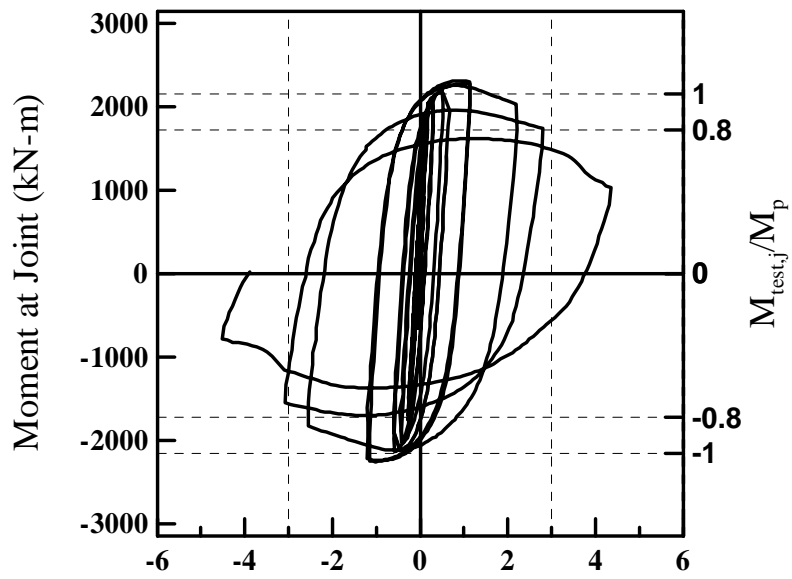


(e) 試體 WOC65R1 之彎矩與梁腹板開孔受剪力作用下之轉角關係圖



(f) 試體 WOC65R1 之彎矩與梁腹板開孔受撓曲作用下之轉角關係圖

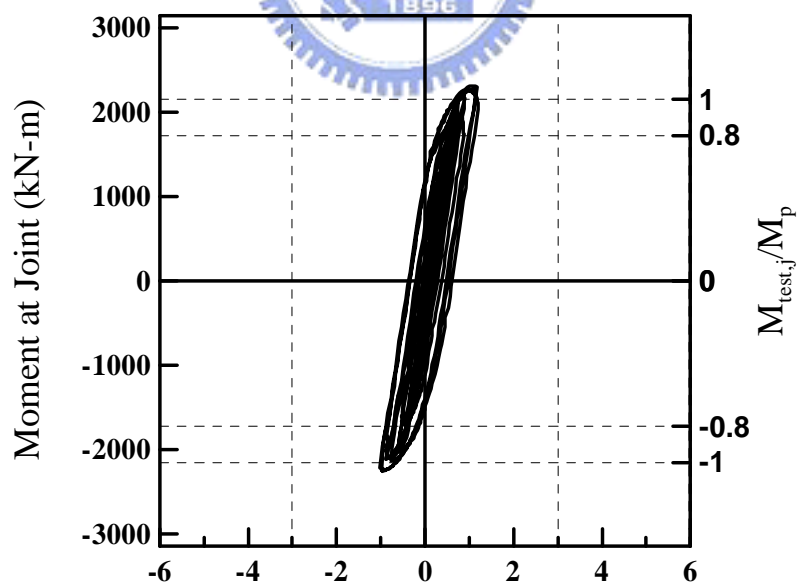
圖 4.2 試體 WOC65R1 之遲滯迴圈圖(續)



Beam Opening Rotation under Shear and Flexure (% rad.)

(g) 試體 WOC65R1 之彎矩與梁腹板開孔轉角關係圖

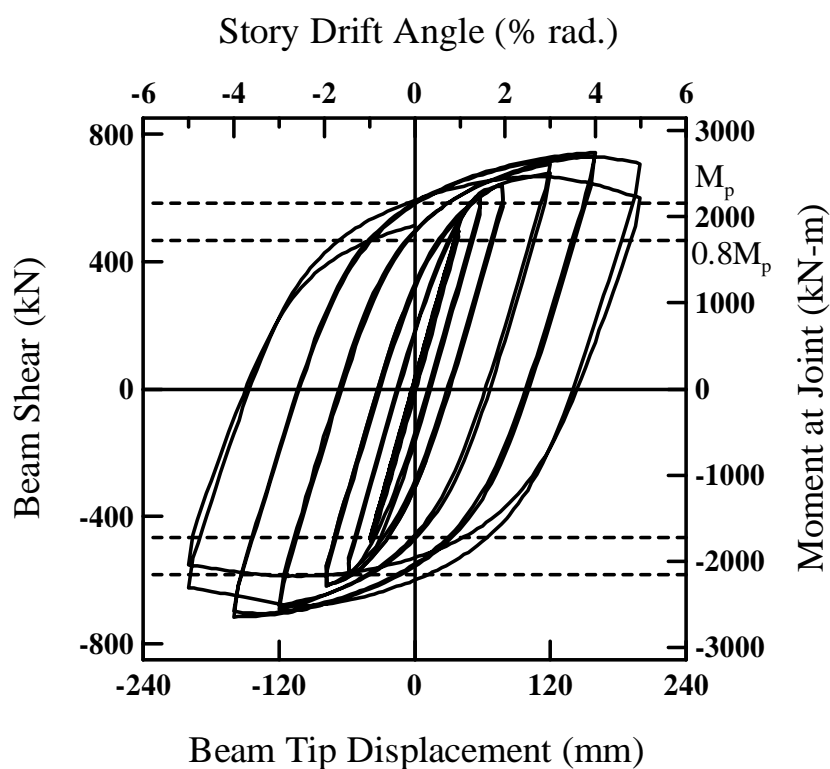
圖 4.2 試體 WOC65R1 之遲滯迴圈圖(續)



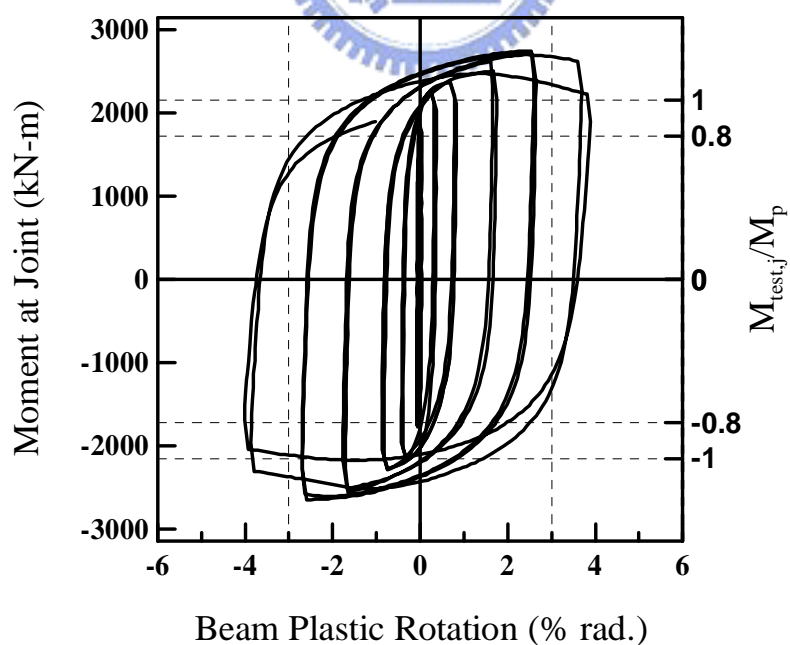
Rotation of Beam outside Opening (% rad.)

(h) 試體 WOC65R1 之彎矩與梁扣除梁腹板開孔轉角關係圖

圖 4.2 試體 WOC65R1 之遲滯迴圈圖(續)

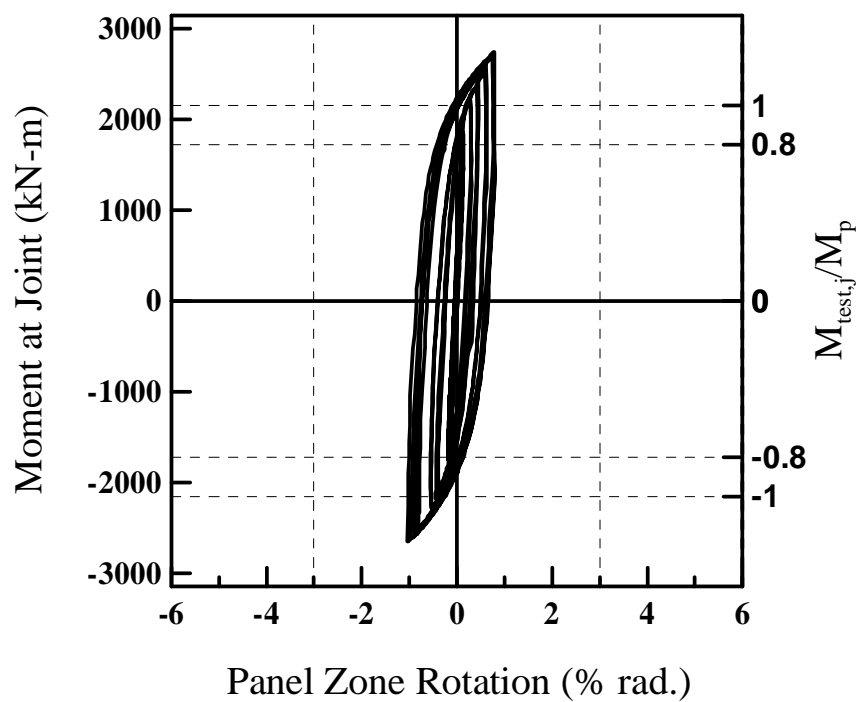


(a) 試體 WOC50R1 之載重與位移關係圖

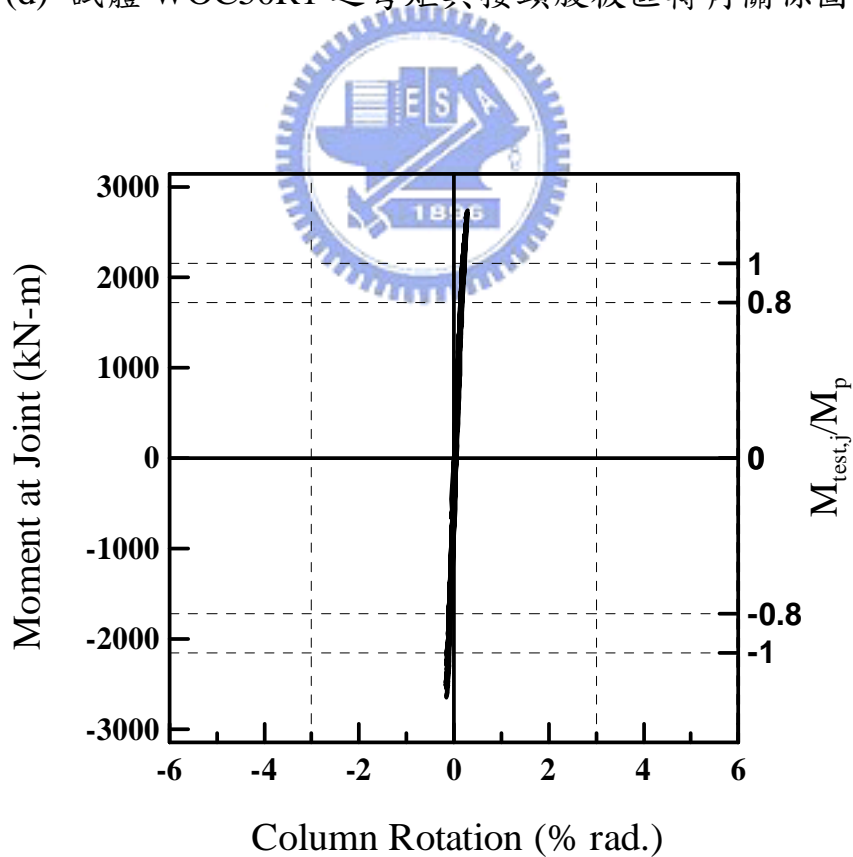


(b) 試體 WOC50R1 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.3 試體 WOC50R1 之遲滯迴圈圖



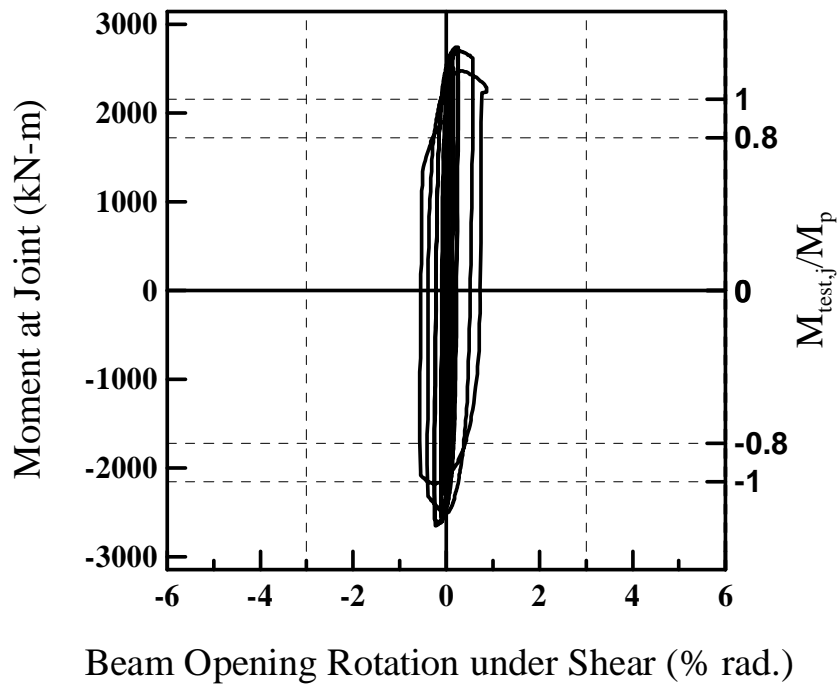
(d) 試體 WOC50R1 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖



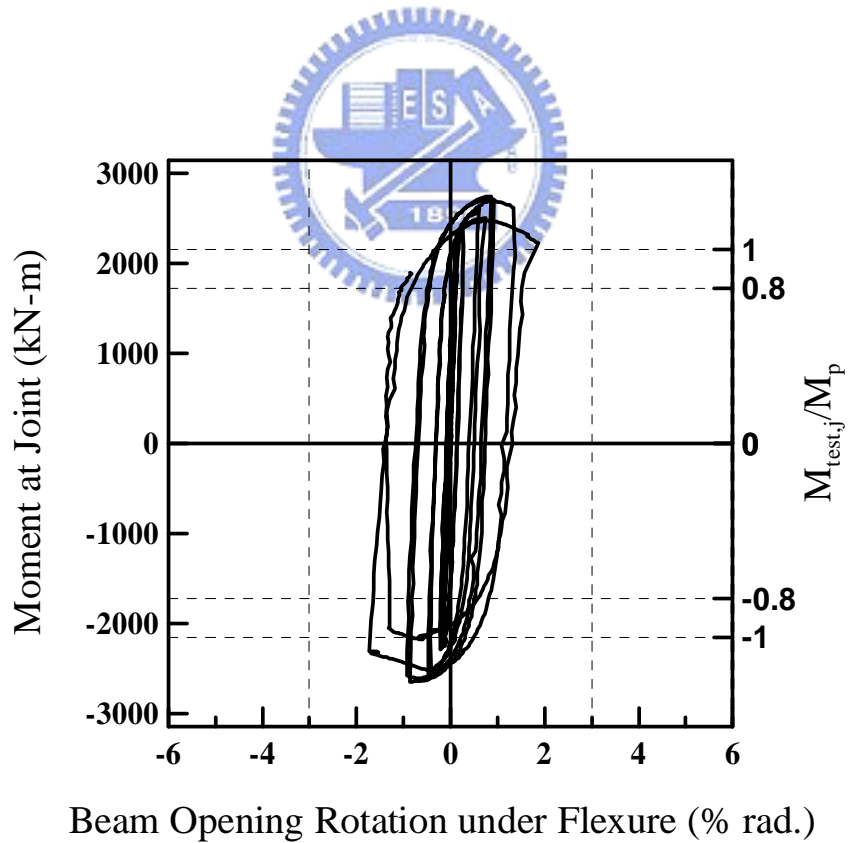
(d) 試體 WOC50R1 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.3 試體 WOC50R1 之遲滯迴圈圖(續)



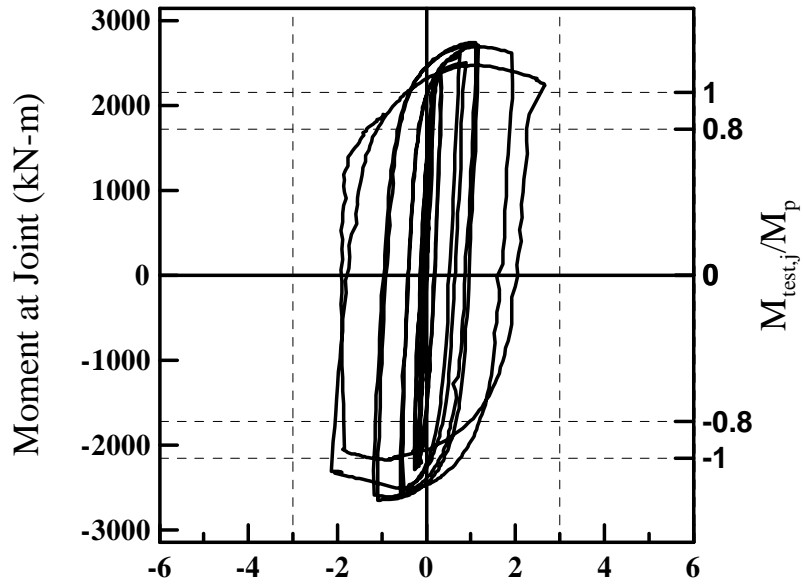


(e) 試體 WOC50R1 之彎矩與梁腹板開孔受剪力作用下之轉角關係圖



(f) 試體 WOC50R1 之彎矩與梁腹板開孔受撓曲作用下之轉角關係圖

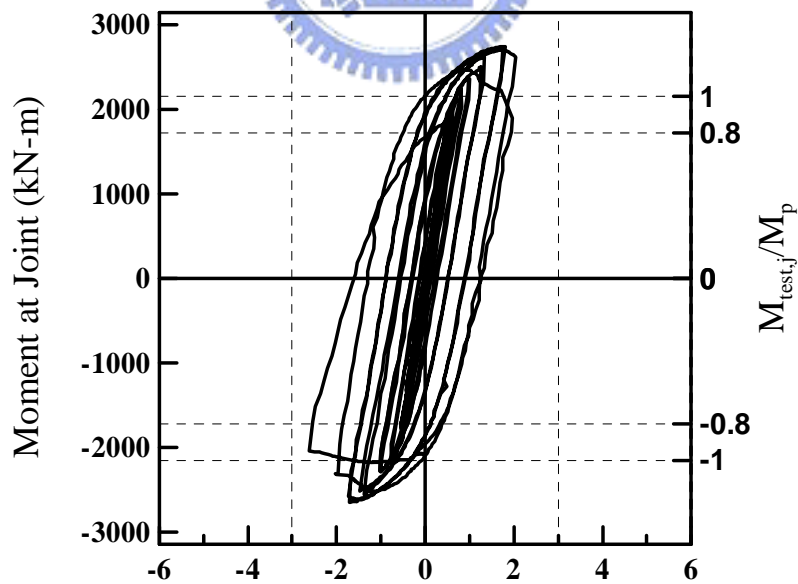
圖 4.3 試體 WOC50R1 之遲滯迴圈圖(續)



Beam Opening Rotation under Shear and Flexure (% rad.)

(g) 試體 WOC50R1 之彎矩與梁腹板開孔轉角關係圖

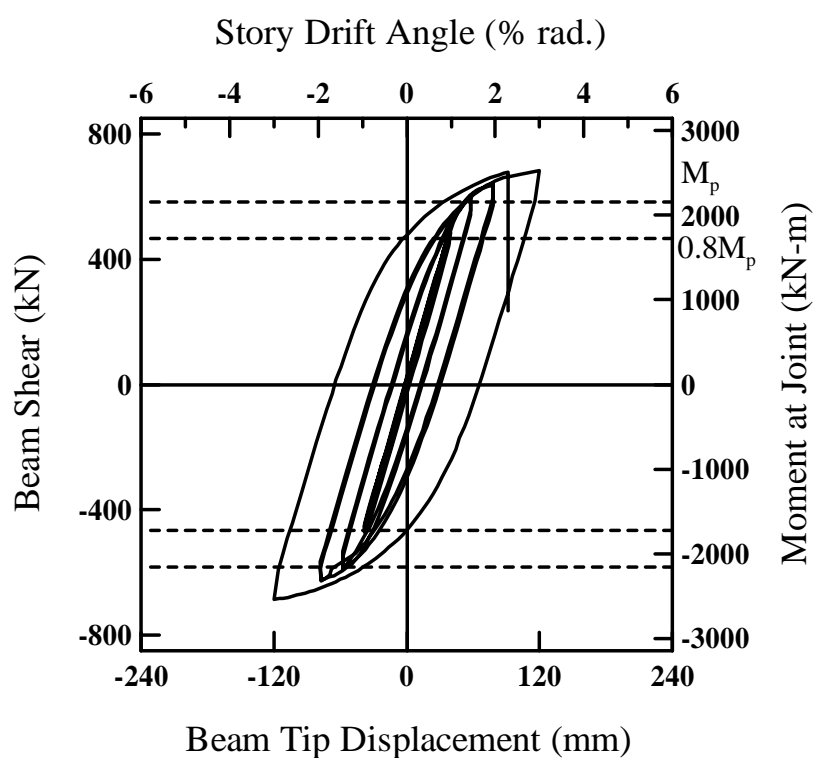
圖 4.3 試體 WOC50R1 之遲滯迴圈圖(續)



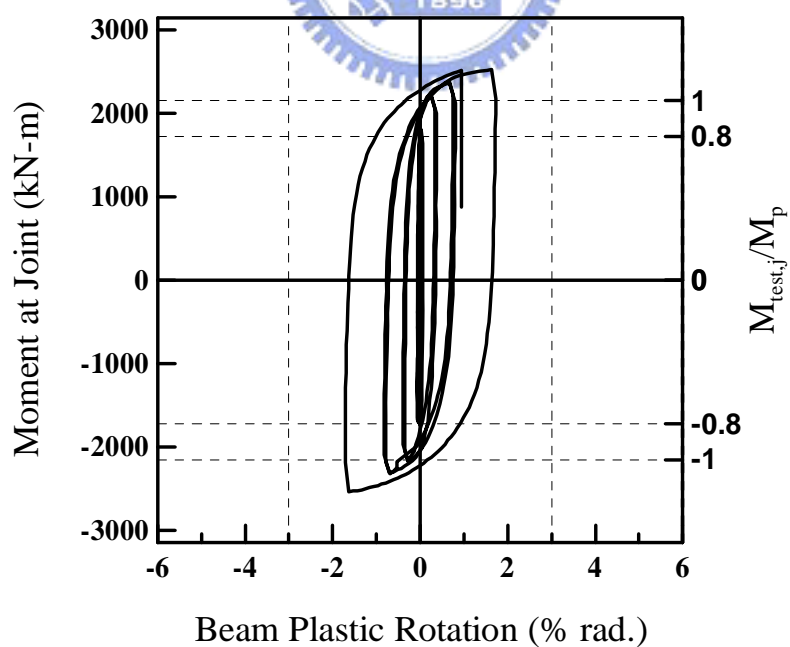
Rotation of Beam outside Opening (% rad.)

(h) 試體 WOC50R1 之彎矩與梁扣除梁腹板開孔轉角關係圖

圖 4.3 試體 WOC50R1 之遲滯迴圈圖(續)

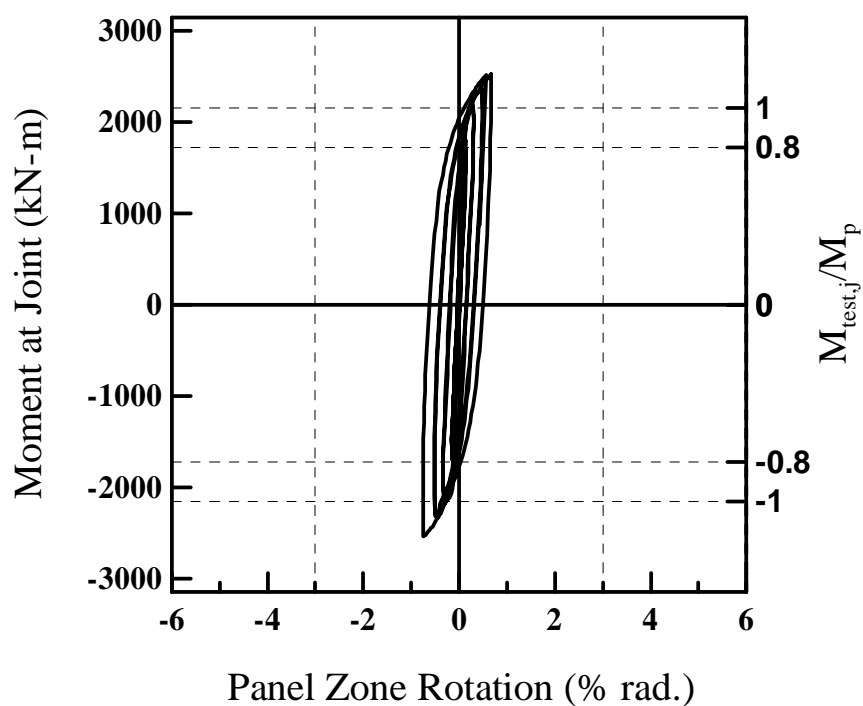


(a) 試體 WOC65R2 之載重與位移關係圖

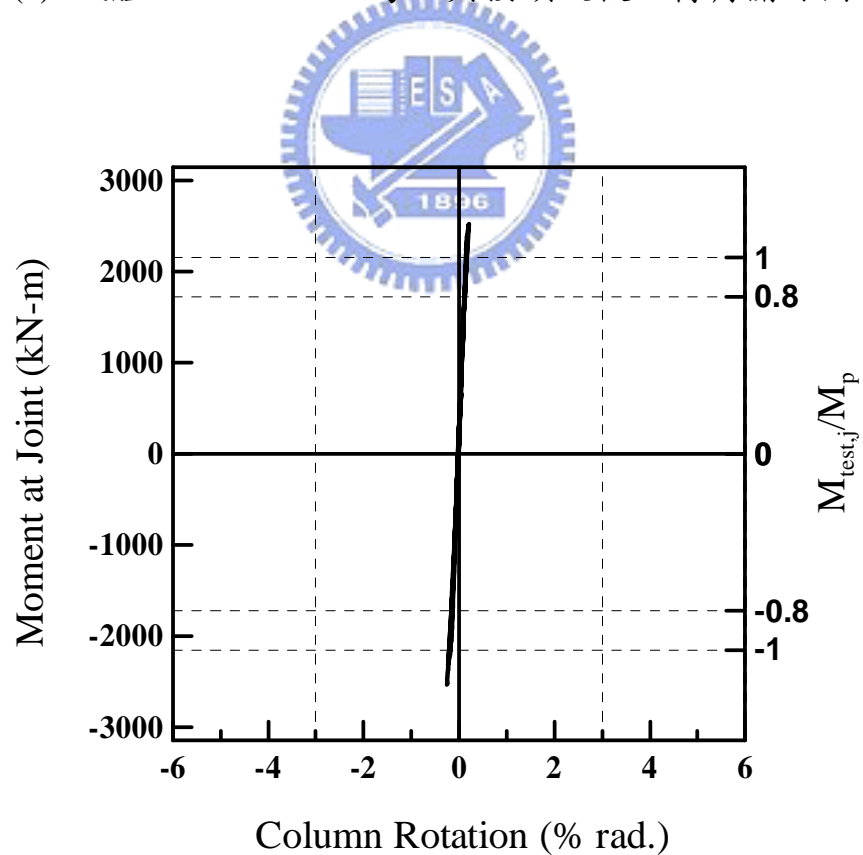


(b) 試體 WOC65R2 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.4 試體 WOC65R2 之遲滯迴圈圖

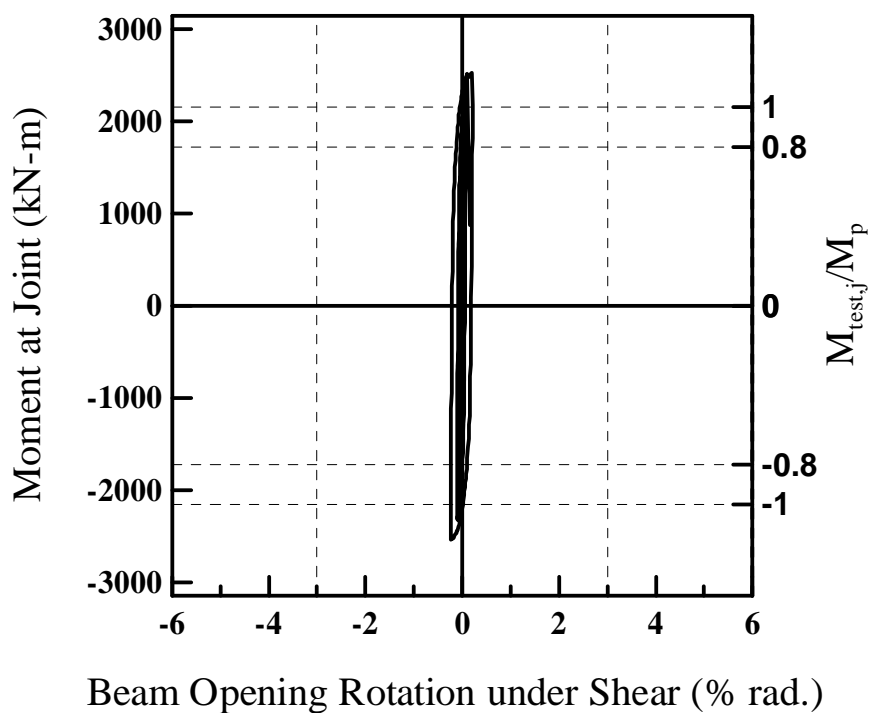


(c) 試體 WOC65R2 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

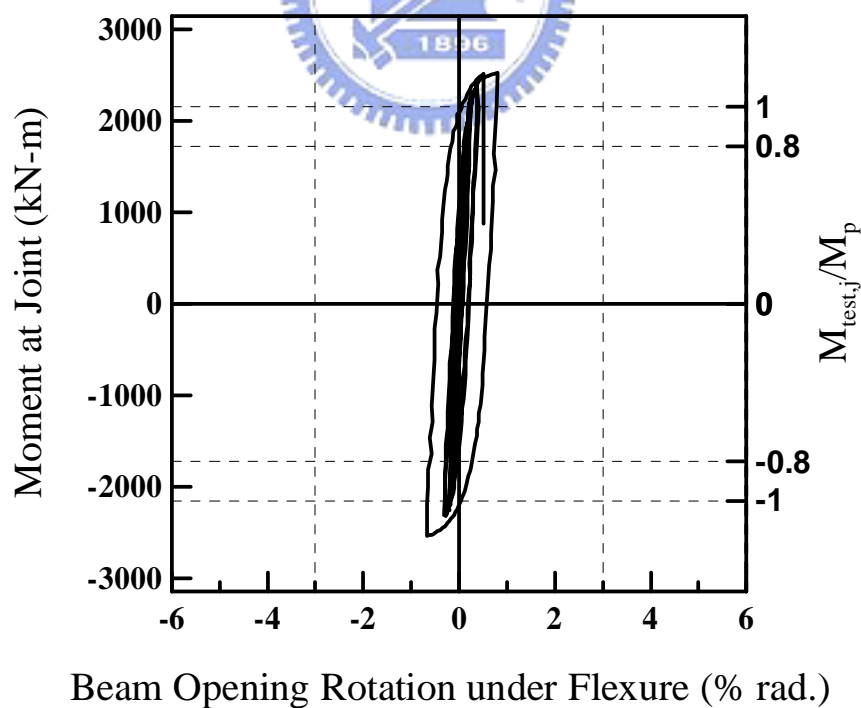


(d) 試體 WOC65R2 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.4 試體 WOC65R2 之遲滯迴圈圖(續)

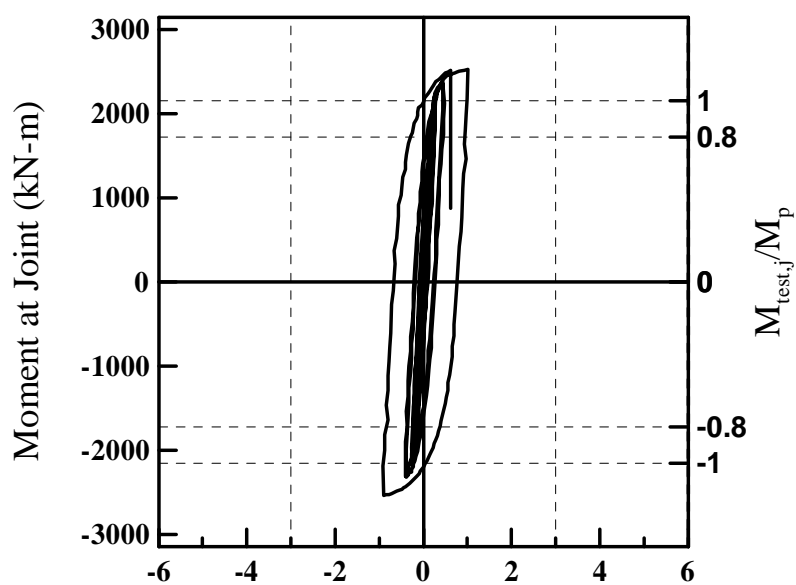


(e) 試體 WOC65R2 之彎矩與梁腹板開孔受剪力作用下之轉角關係圖



(f) 試體 WOC65R2 之彎矩與梁腹板開孔受撓曲作用下之轉角關係圖

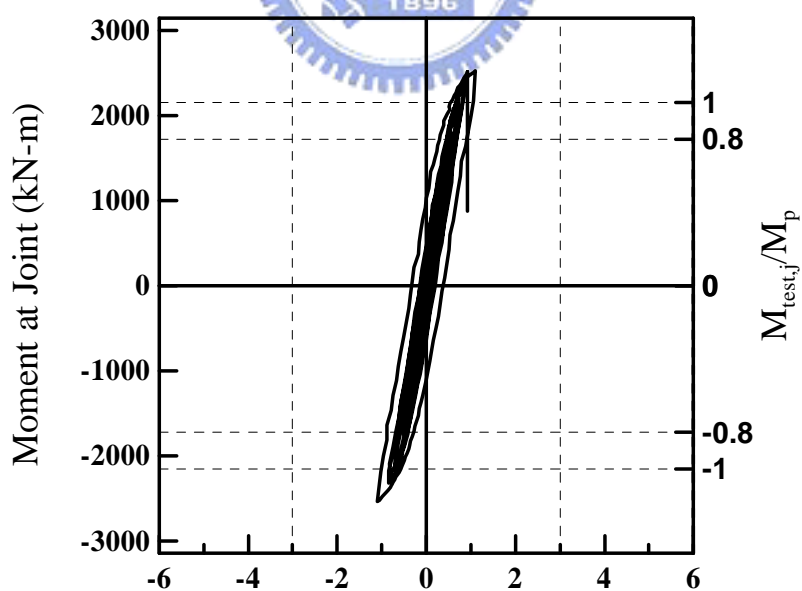
圖 4.4 試體 WOC65R2 之遲滯迴圈圖(續)



Beam Opening Rotation under Shear and Flexure (% rad.)

(g) 試體 WOC65R2 之彎矩與梁腹板開孔轉角關係圖

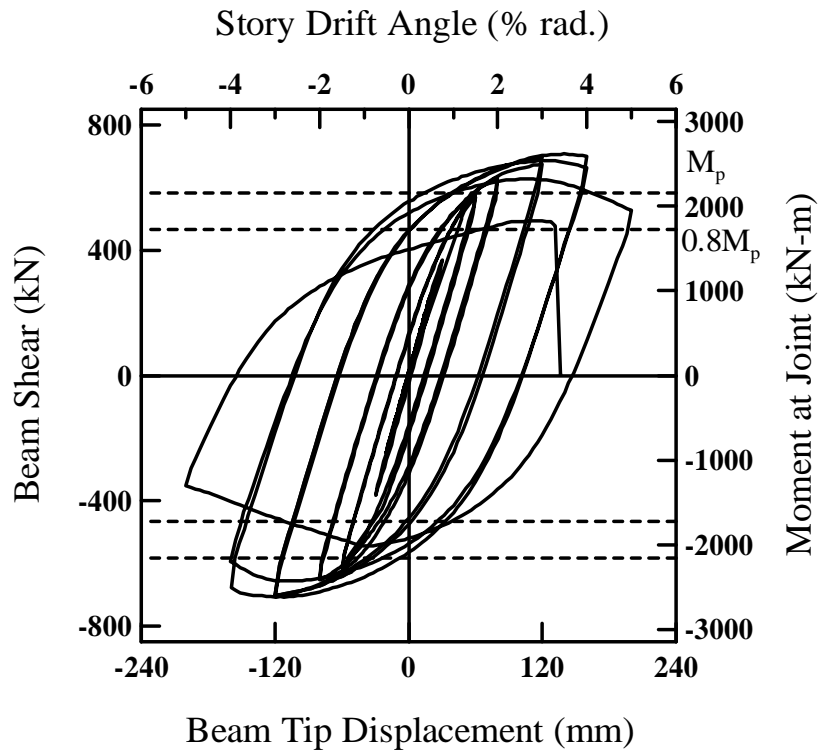
圖 4.4 試體 WOC65R2 之遲滯迴圈圖(續)



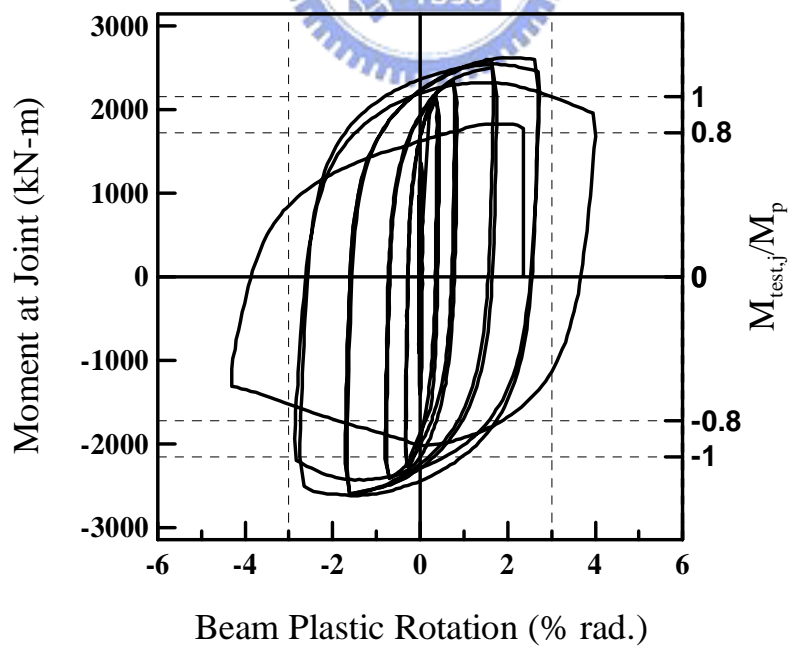
Rotation of Beam outside Opening (% rad.)

(h) 試體 WOC65R2 之彎矩與梁扣除梁腹板開孔轉角關係圖

圖 4.4 試體 WOC65R2 之遲滯迴圈圖(續)



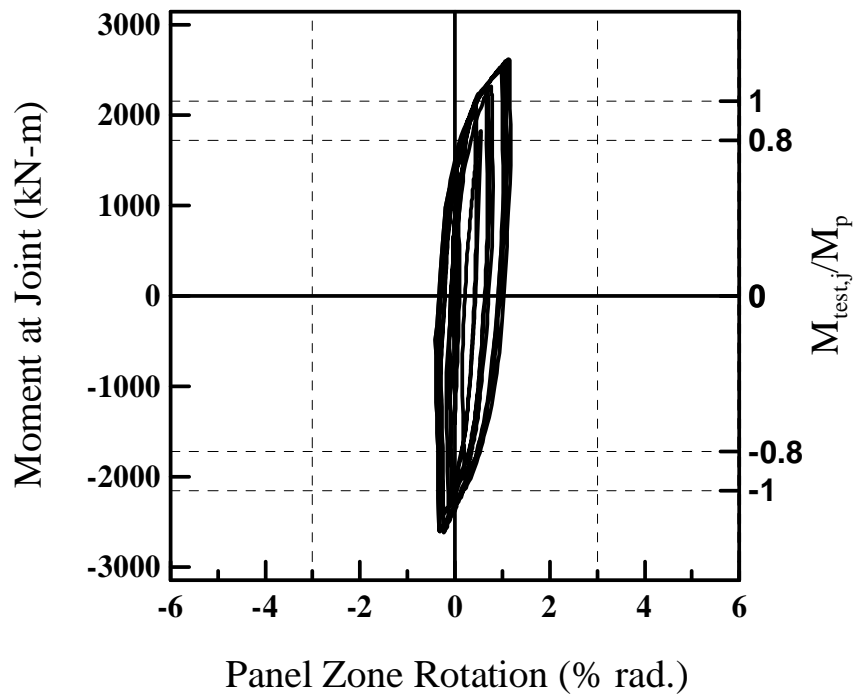
(a) 試體 WOC65R3 之載重與位移關係圖



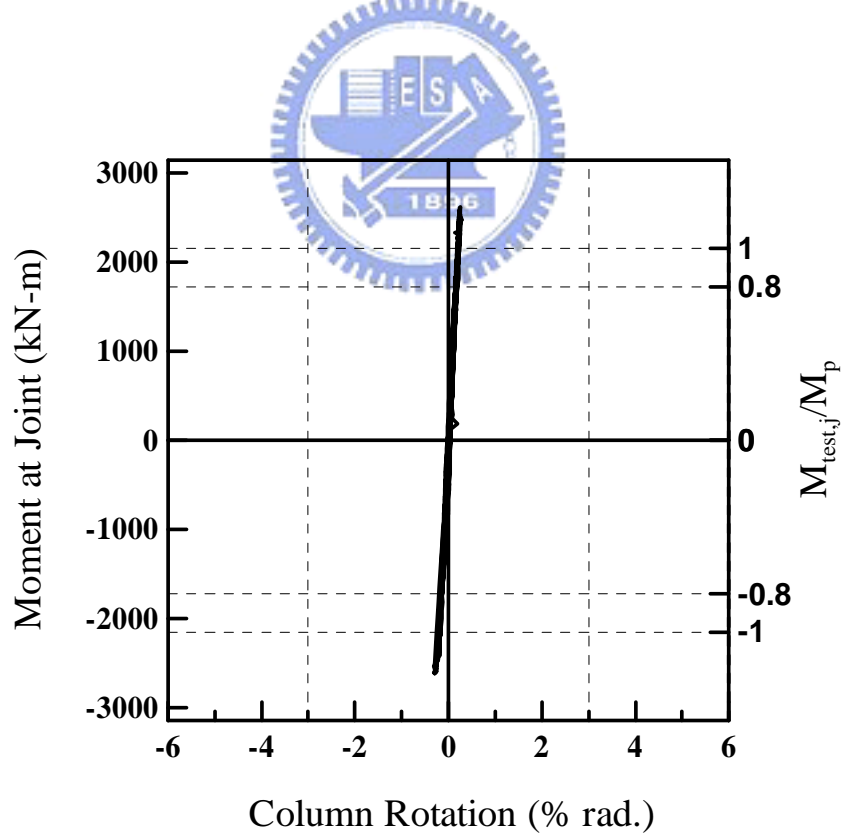
(b) 試體 WOC65R3 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.5 試體 WOC65R3 之遲滯迴圈圖



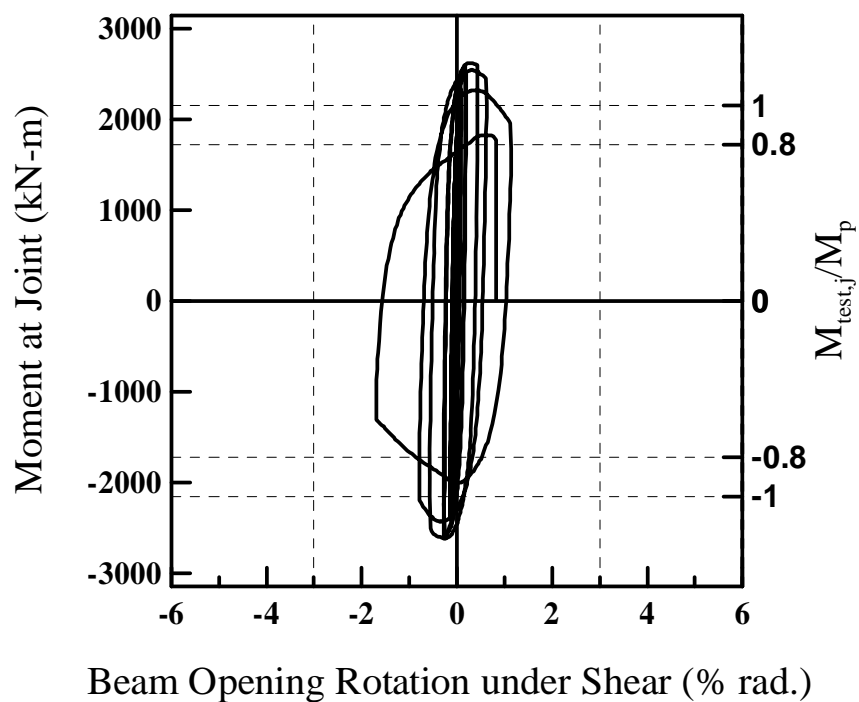


(c) 試體 WOC65R3 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

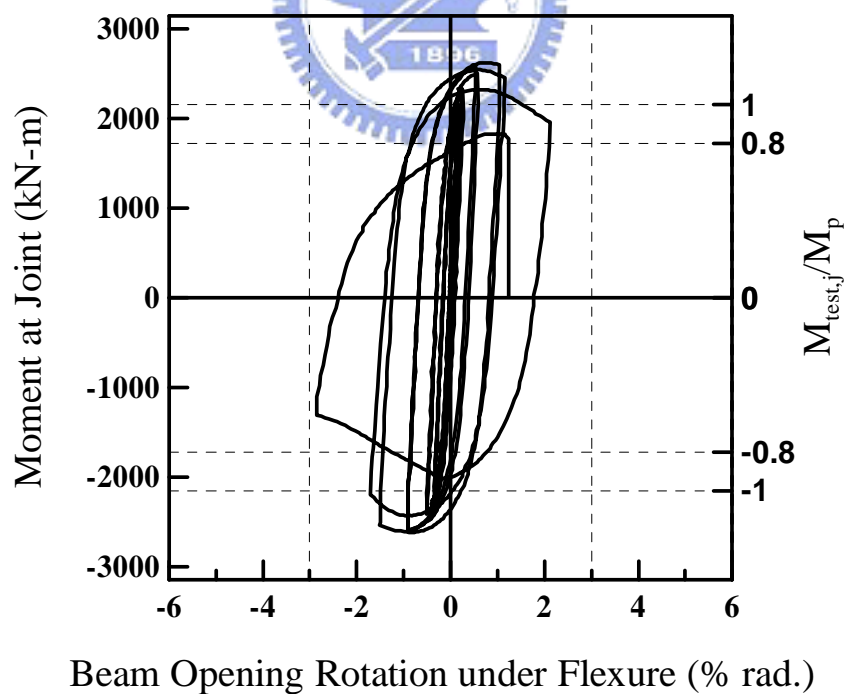


(d) 試體 WOC65R3 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.5 試體 WOC65R3 之遲滯迴圈圖(續)

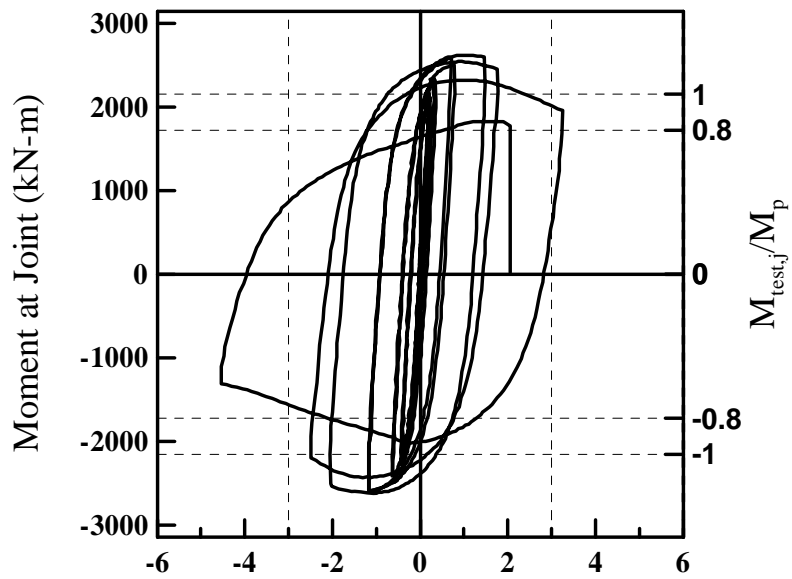


(e) 試體 WOC65R3 之彎矩與梁腹板開孔受剪力作用下之轉角關係圖



(f) 試體 WOC65R3 之彎矩與梁腹板開孔受撓曲作用下之轉角關係圖

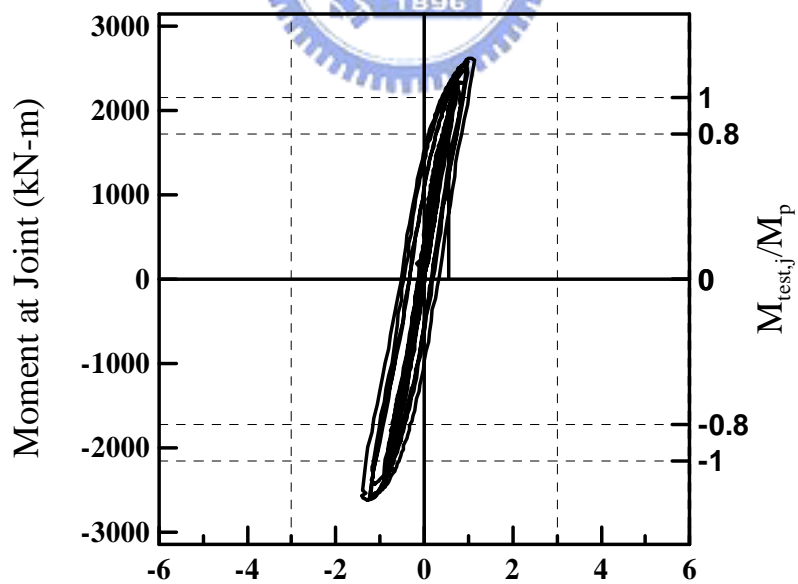
圖 4.5 試體 WOC65R3 之遲滯迴圈圖(續)



Beam Opening Rotation under Shear and Flexure (% rad.)

(g) 試體 WOC65R3 之彎矩與梁腹板開孔轉角關係圖

圖 4.5 試體 WOC65R3 之遲滯迴圈圖(續)



Rotation of Beam outside Opening (% rad.)

(h) 試體 WOC65R3 之彎矩與梁扣除梁腹板開孔轉角關係圖

圖 4.5 試體 WOC65R3 之遲滯迴圈圖(續)

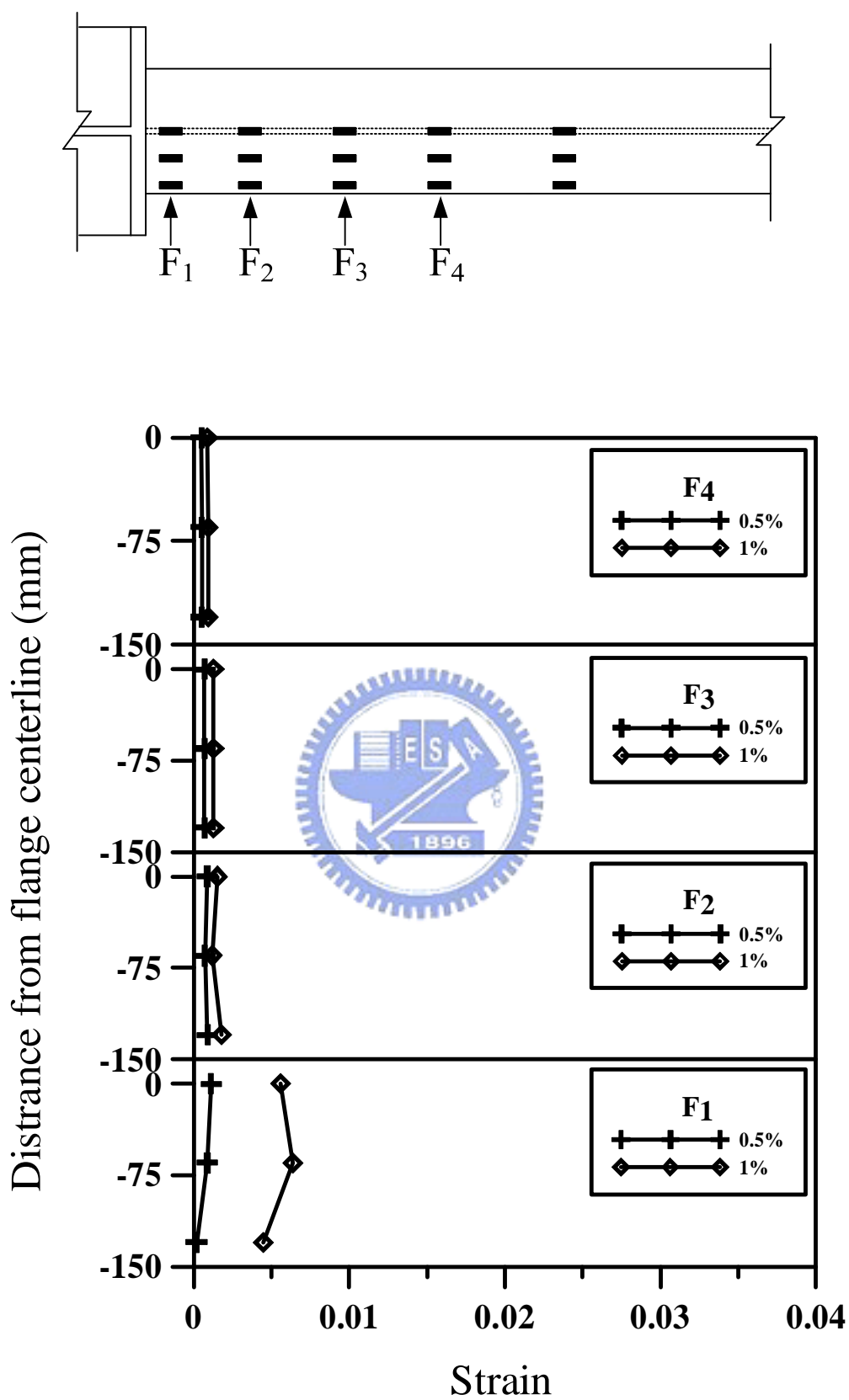
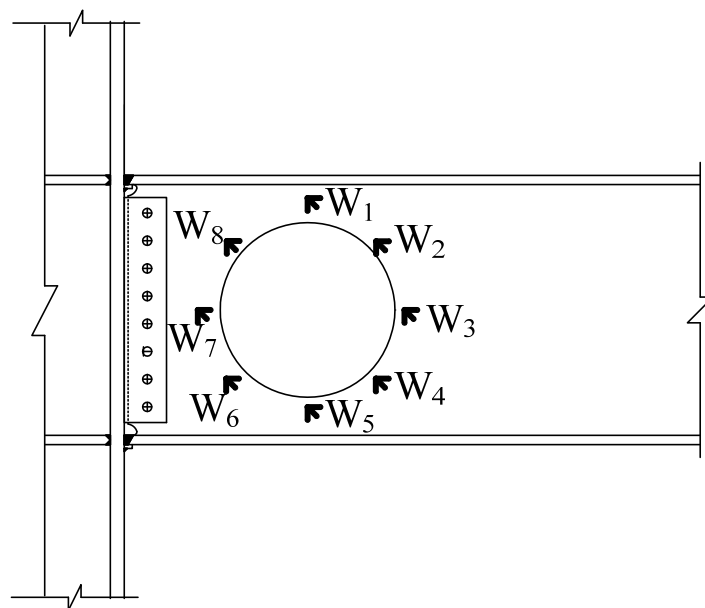


圖 4.6 試體 WOC65 之梁翼應變比較圖



應變計位置	層間變位角 0.5%	層間變位角 1%
W1	0.00082	0.0029
W2	0.000697	0.001281
W3	0.000219	0.000415
W4	0.000559	0.001182
W5	0.011632	0.010399
W6	0.000466	0.001111
W7	0.000382	0.0008
W8	0.001037	0.002501

圖 4.7 試體 WOC65 之梁腹剪應變比較圖

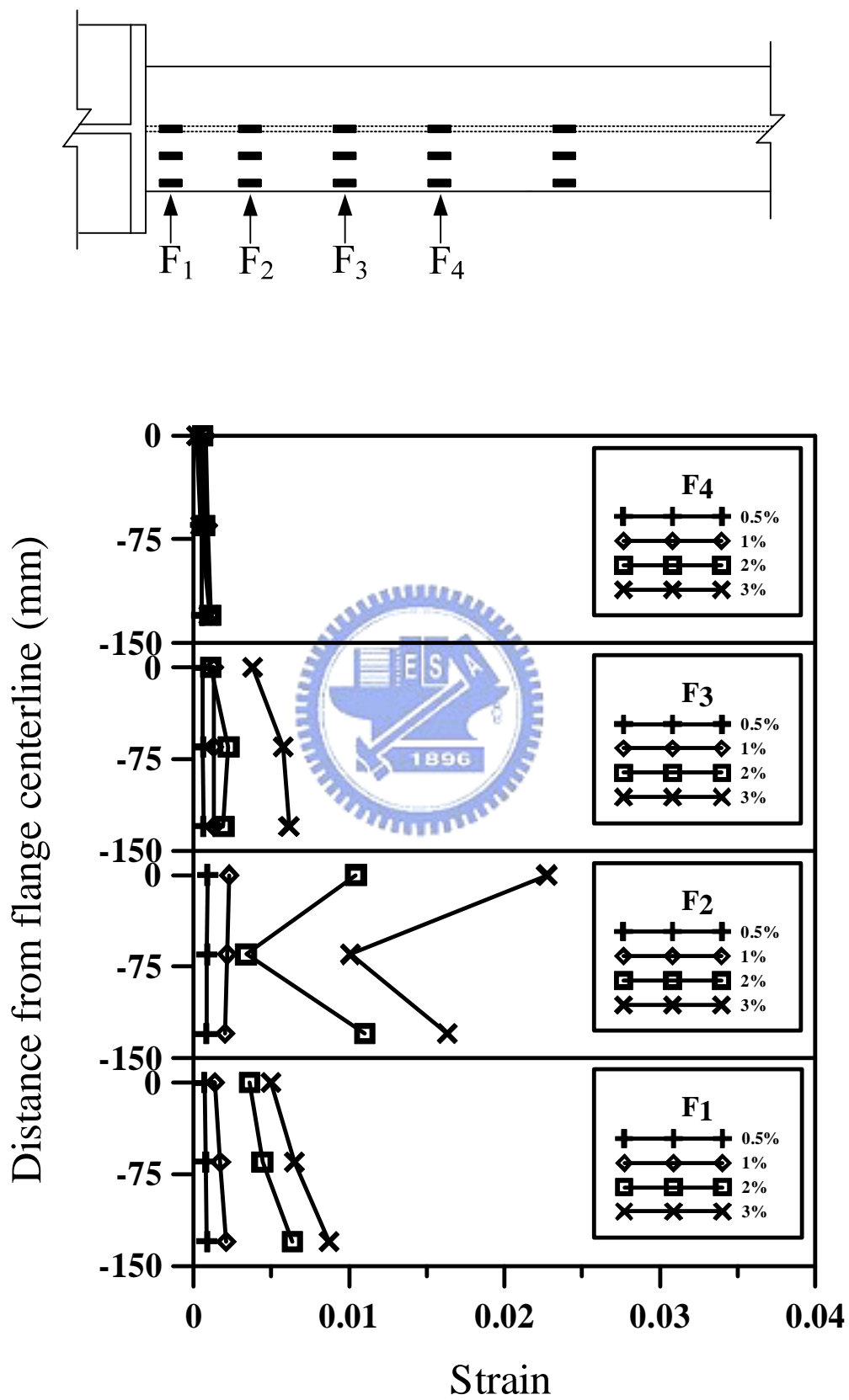
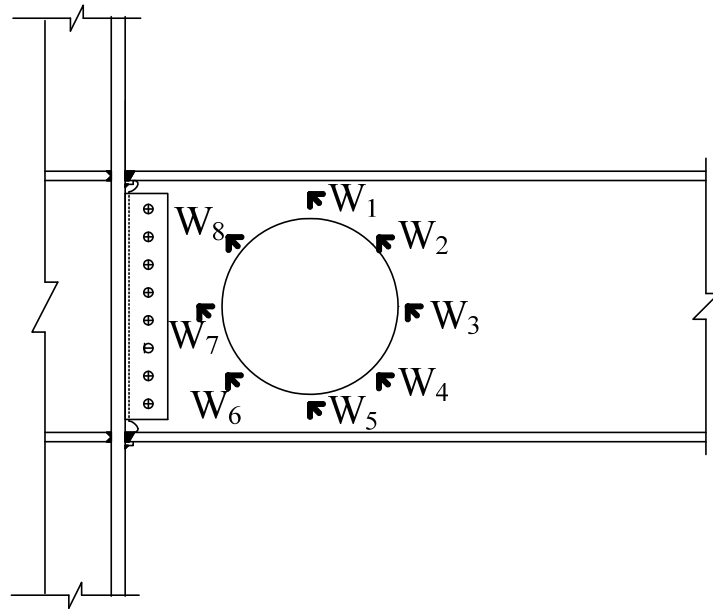


圖 4.8 試體 WOC65R1 之梁翼應變比較圖



應變計位置	層間變位角 0.5%	層間變位角 1%	層間變位角 2%	層間變位角 3%
W1	0.000516	0.001107	0.001439	0.004854
W2	0.001024	0.002538	0.015199	0.044275
W3	0.000439	0.000878	0.001189	0.001609
W4	0.000627	0.001483	0.008363	0.01627
W5	0.000941	0.002124	0.009979	0.024882
W6	0.000957	0.001839	0.002003	0.011303
W7	0.000149	0.000273	0.000304	0.000437
W8	0.001085	0.003148	0.003608	0.014631

圖 4.9 試體 WOC65R1 之梁腹剪應變比較圖



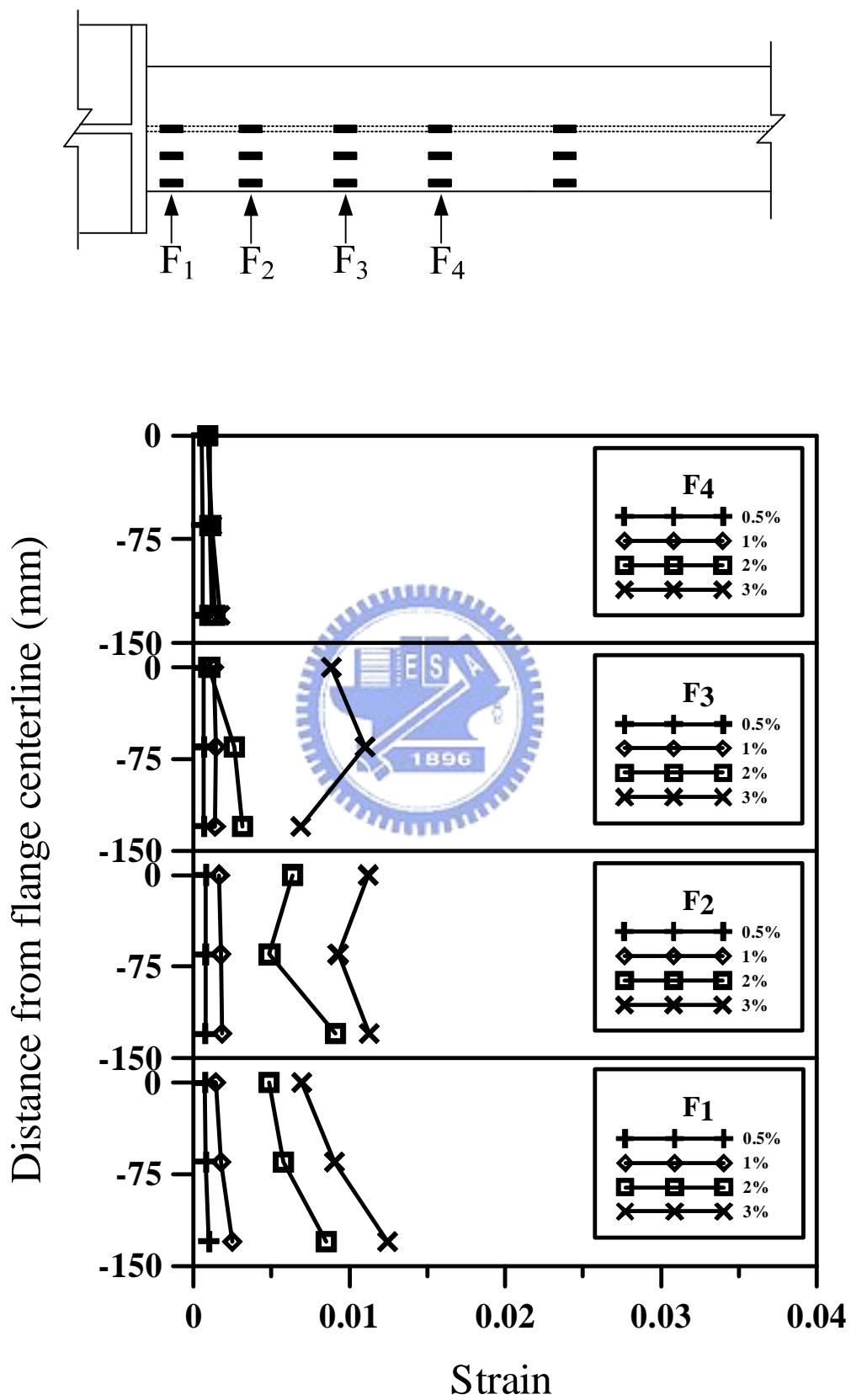
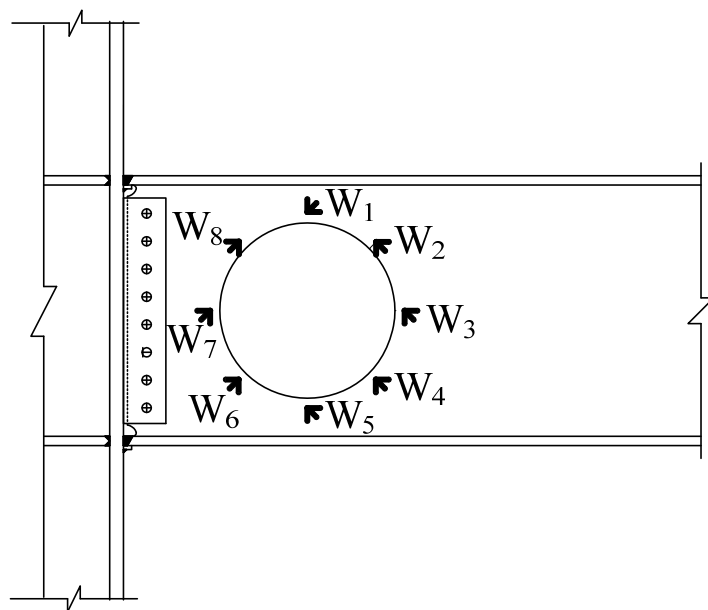


圖 4.10 試體 WOC50R1 之梁翼應變比較圖



應變計位置	層間變位角 0.5%	層間變位角 1%	層間變位角 2%	層間變位角 3%
W1	0.000492	0.00103	0.001072	0.004746
W2	0.000616	0.001314	0.003736	0.009277
W3	0.000539	0.001105	0.001527	0.001756
W4	0.000487	0.001011	0.00199	0.003946
W5	0.000528	0.001001	0.001044	0.004433
W6	0.000536	0.001088	0.001396	0.003632
W7	0.000225	0.000432	0.000638	0.00067
W8	0.000695	0.001455	0.001792	0.003455

圖 4.11 試體 WOC50R1 之梁腹剪應變比較圖

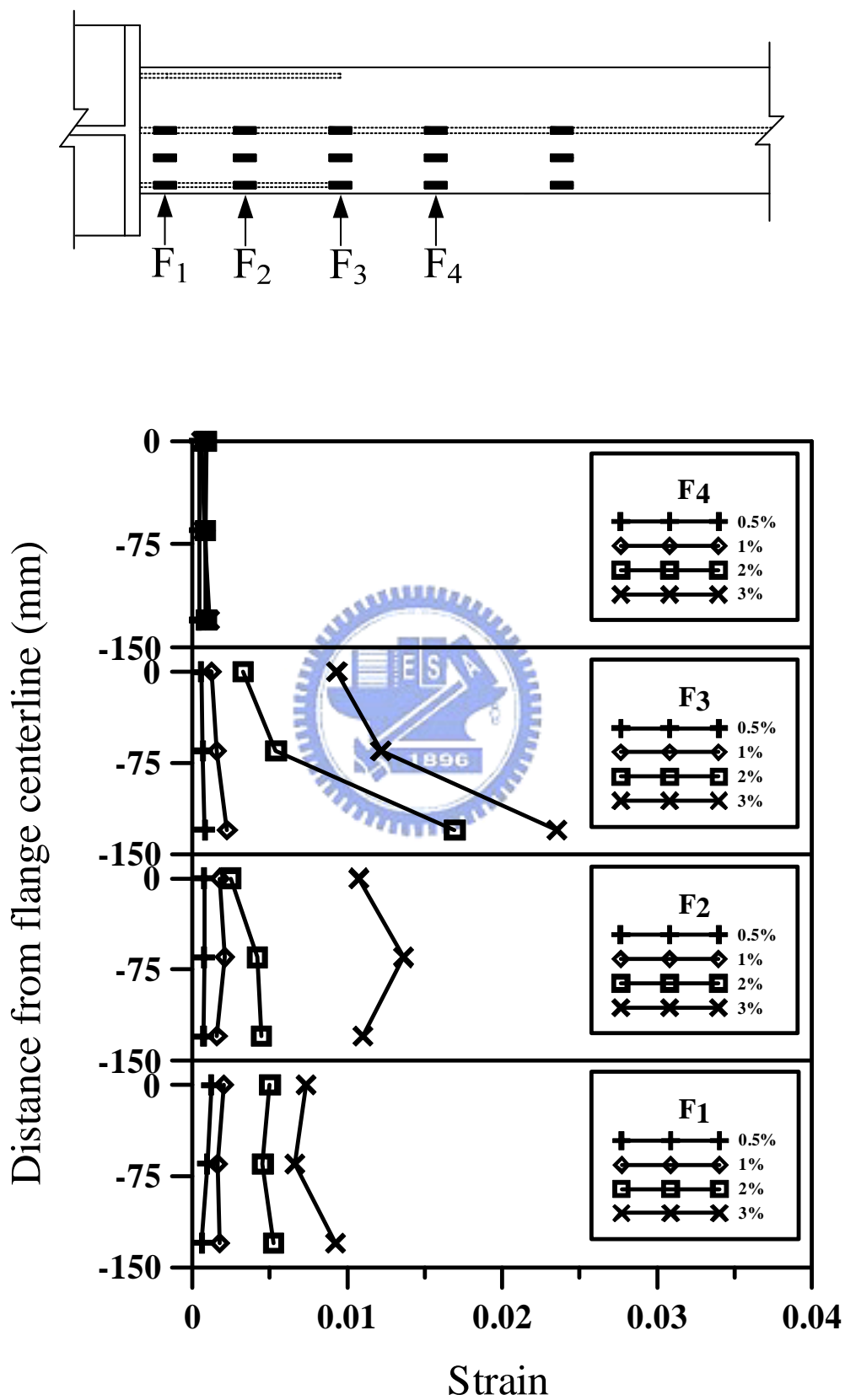
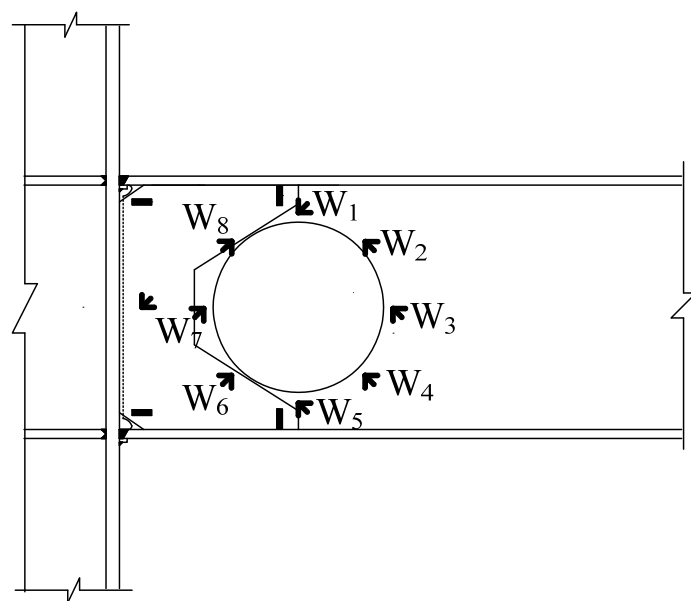
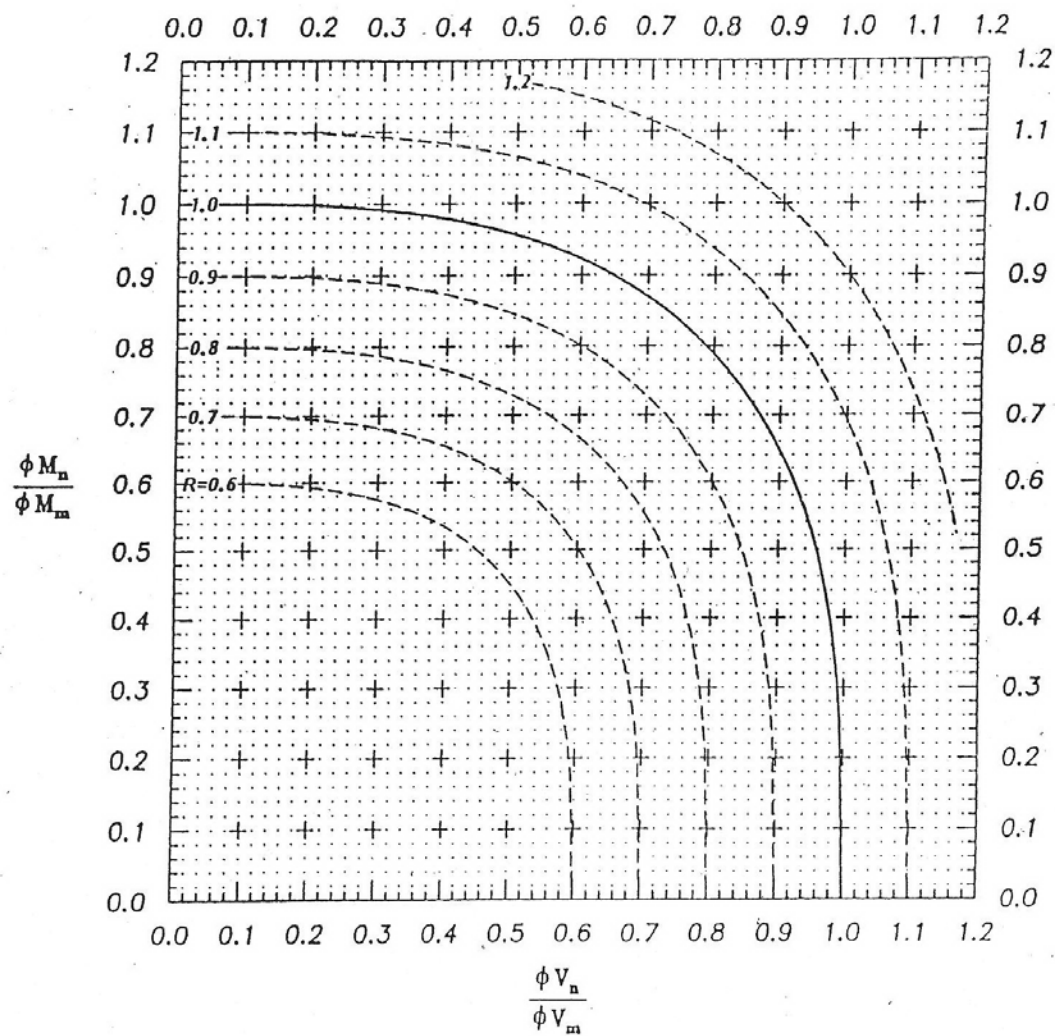


圖 4.12 試體 WOC65R2 之梁翼應變比較圖



應變計位置	層間變位角 0.5%	層間變位角 1%	層間變位角 2%	層間變位角 3%
W1	0.000605	0.001421	0.002644	0.004101
W2	0.00065	0.001528	0.001857	0.009313
W3	0.000356	0.000791	0.001151	0.001404
W4	0.000351	0.001311	0.002276	0.0062
W5	0.000713	0.001642	0.00454	0.00969
W6	0.000578	0.001288	0.001974	0.005155
W7	0.0002	0.000383	0.00045	0.000551
W8	0.000807	0.001641	0.00189	0.005356

圖 4.13 試體 WOC65R2 之梁腹剪應變比較圖



Darwin (1990)

圖 4.14 鋼骨開孔梁之彎矩-剪力交互作用關係

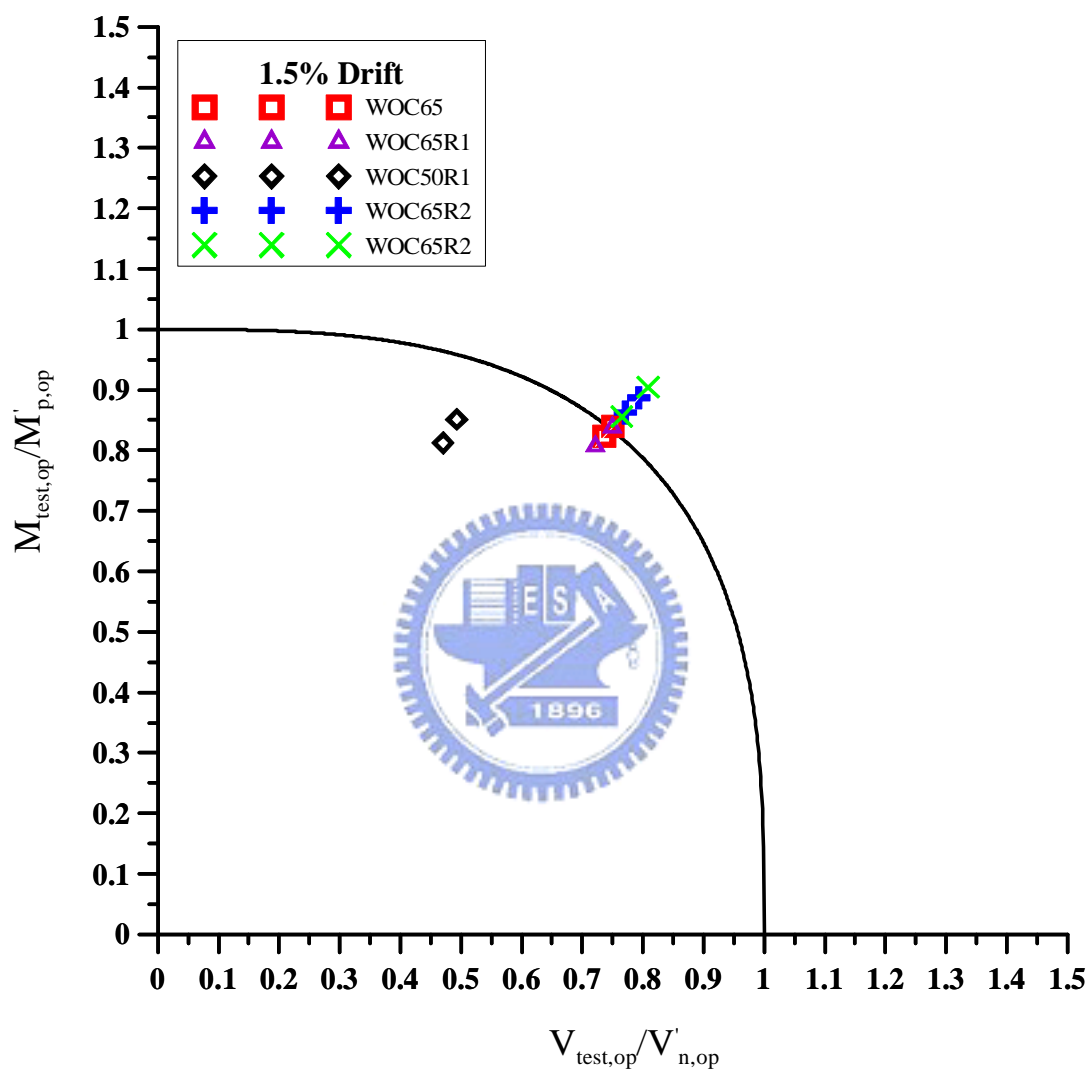


圖 4.15 在層間變位角 1.5% 弧度五組試體之彎矩-剪力互制作用圖

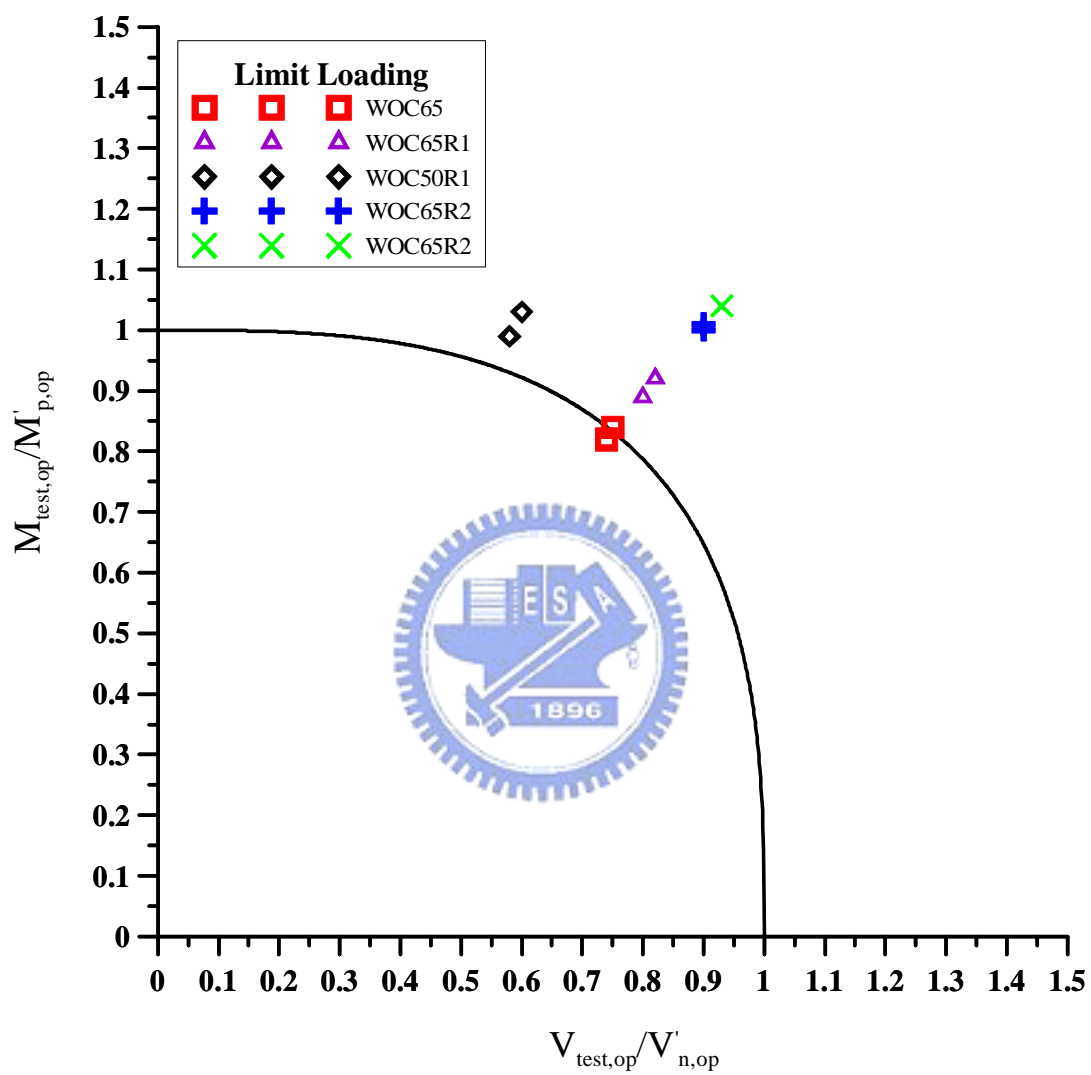


圖 4. 16 在極限載重下五組試體之彎矩-剪力互制作用圖

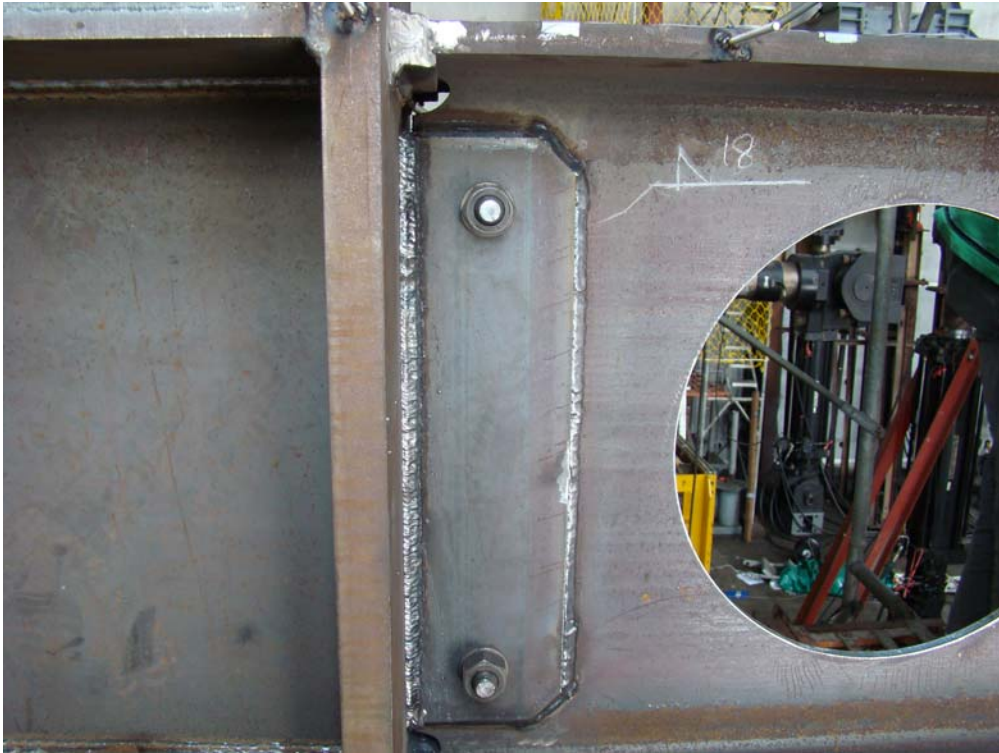




照片 3.1 梁腹板開一個直徑為 0.65 倍梁深的圓孔



照片 3.2 梁腹板開一個直徑為 0.65 倍梁深的圓孔(續)



照片 3.3 柱翼板與剪力板開槽銲加填角銲，梁腹與剪力板填角銲



照片 3.4 柱翼板與剪力板開槽銲加填角銲，梁腹與剪力板填角銲(續)

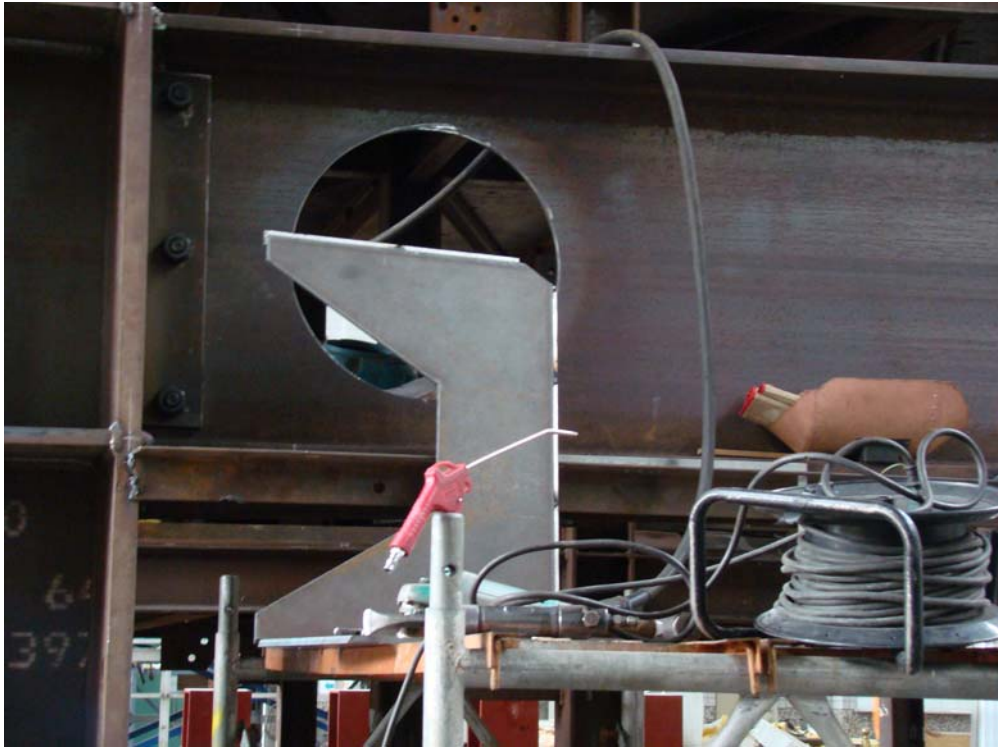




照片 3.5 柱翼板與剪力板開槽鉚加填角鉚，梁腹與剪力板填角鉚(續)



照片 3.6 梁腹板與柱翼板採用 30 度全滲透開槽鉚結合

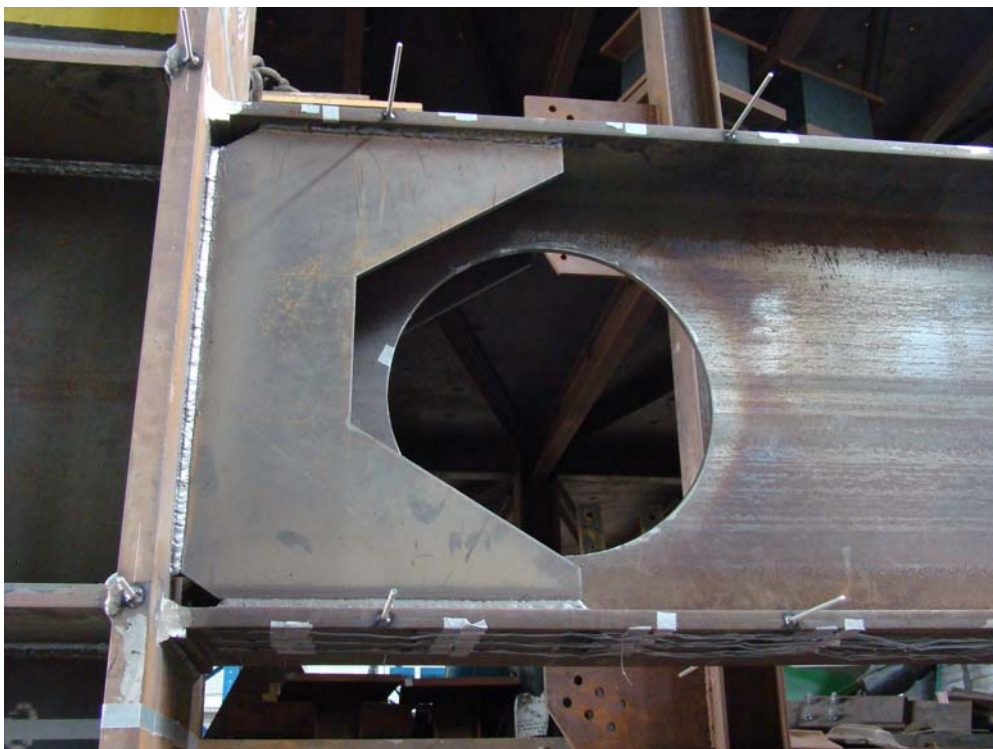


照片 3.7 梁翼內側且兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板



照片 3.8 梁翼內側且兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板(續)





照片 3.9 梁翼內側且在兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板



照片 3.10 梁翼內側且在兩翼最外側往內縮 15 mm 處加設兩塊加勁板



照片 3.11 加勁板僅在梁上翼處預留切角



照片 3.12 上下翼板背墊板未移除，並在背墊板下方再增加填角鉚



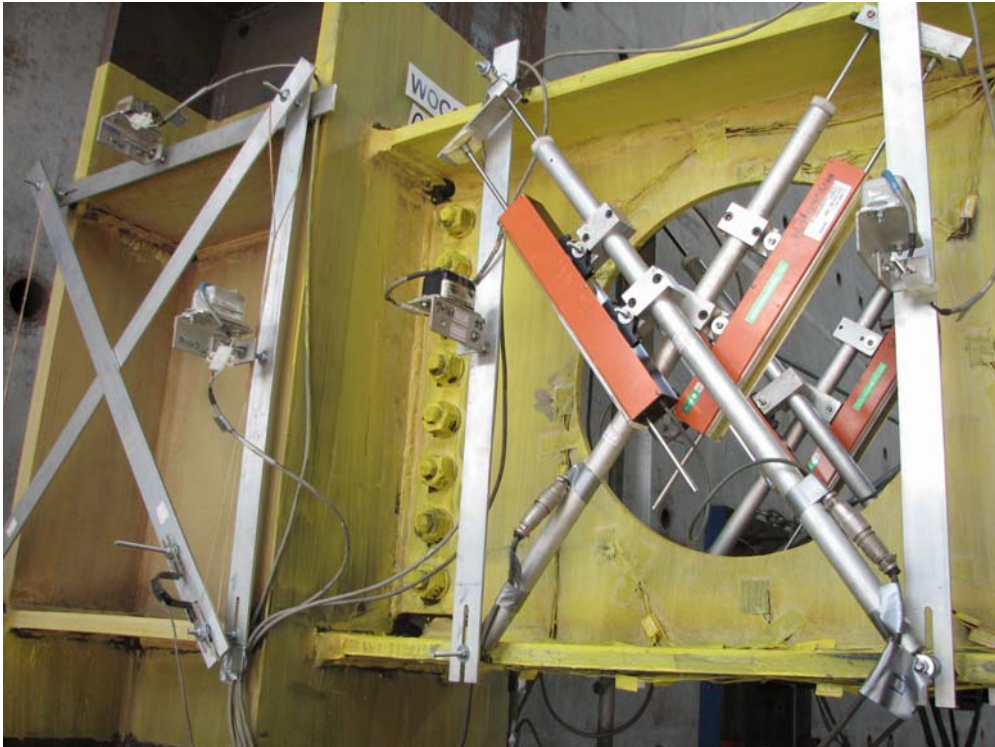


照片 3.13 上下翼板背墊板未移除，並在背墊板下方再增加填角銲(續)



照片 3.14 試驗裝置





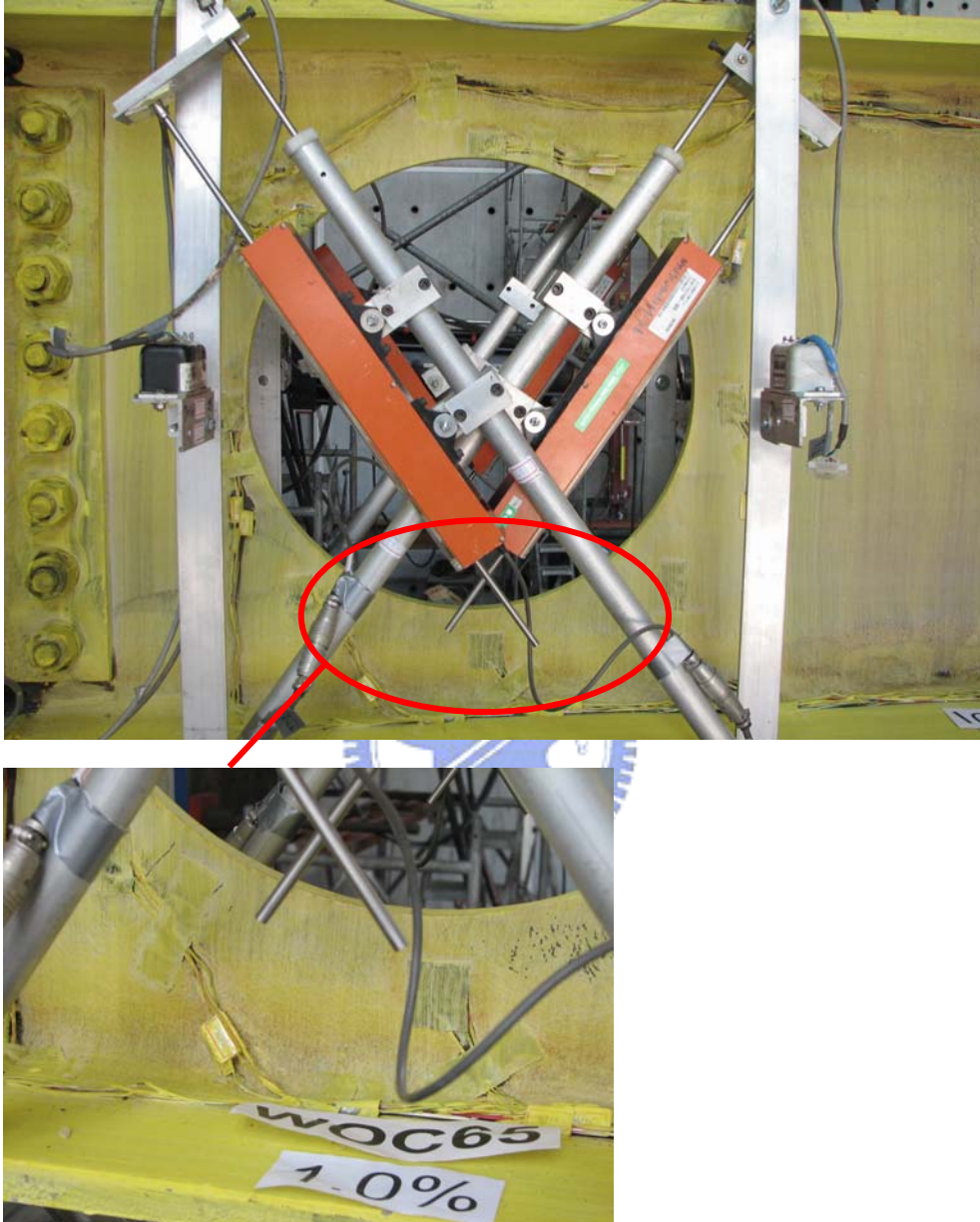
照片 3.15 傾斜儀、LVDT、 $\pi$ -gauge 架設位置



照片 4.1 試體 WOC65 接近梁上翼全滲透銲道之梁腹扇形開孔處開始  
降伏，呈交叉狀斑紋剝落 (1% drift)



照片 4.2 試體 WOC65 下翼板表面石灰呈放射狀斑紋剝落 (1% drift)



照片 4.3 試體 WOC65 梁腹板開孔周圍發現交叉狀斑紋石灰剝落  
(1% drift)





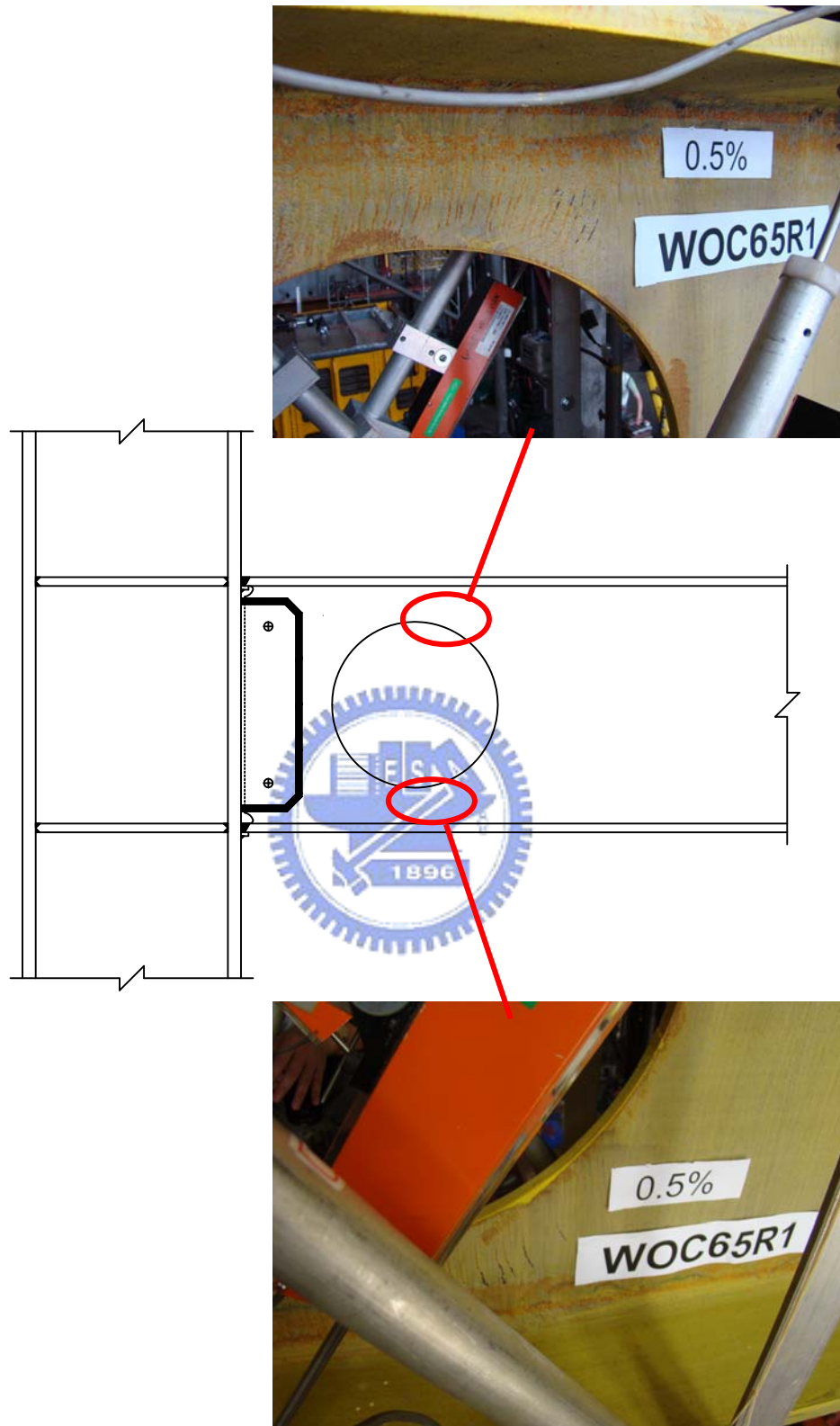
照片 4.4 試體 WOC65 上翼板距柱面約 250 mm 處開始出現與翼寬平行之橫向斑紋剝落 (1.5% drift)



照片 4.5 試體 WOC65 梁下翼板之放射狀斑紋石灰剝落增加並往梁端的方向延伸 (1.5% drift)



照片 4.6 試體 WOC65 梁翼板於扇形開孔處產生開裂並向兩側延伸導致整個上翼板斷裂 (1.5% drift)



照片 4.7 試體 WOC65R1 梁腹板開孔周圍有些許的石灰剝落的現象發生，其發展方向與梁腹縱方向呈 45 度 (0.5% drift)





照片 4.8 試體 WOC65R1 下翼板於柱面背墊板處出現類似 V 字型的  
斑紋石灰剝落 (0.75% drift)

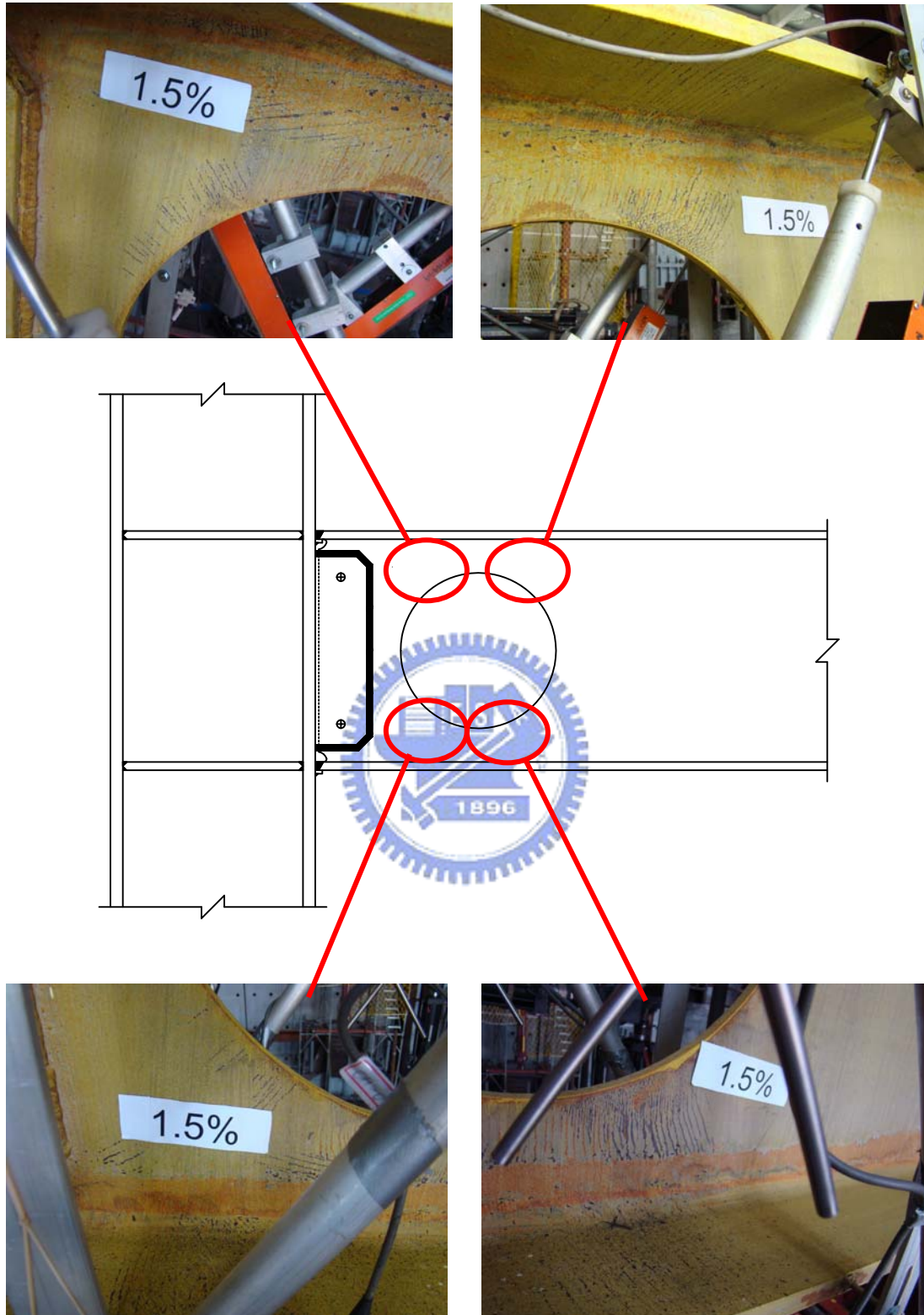


照片 4.9 試體 WOC65R1 上翼板邊緣平行翼寬之橫向斑紋石灰剝落開  
始往內側增加 (1% drift)



照片 4.10 試體 WOC65R1 下翼板在上翼板相同位置處也開始出現橫向斑紋石灰剝落 (1% drift)

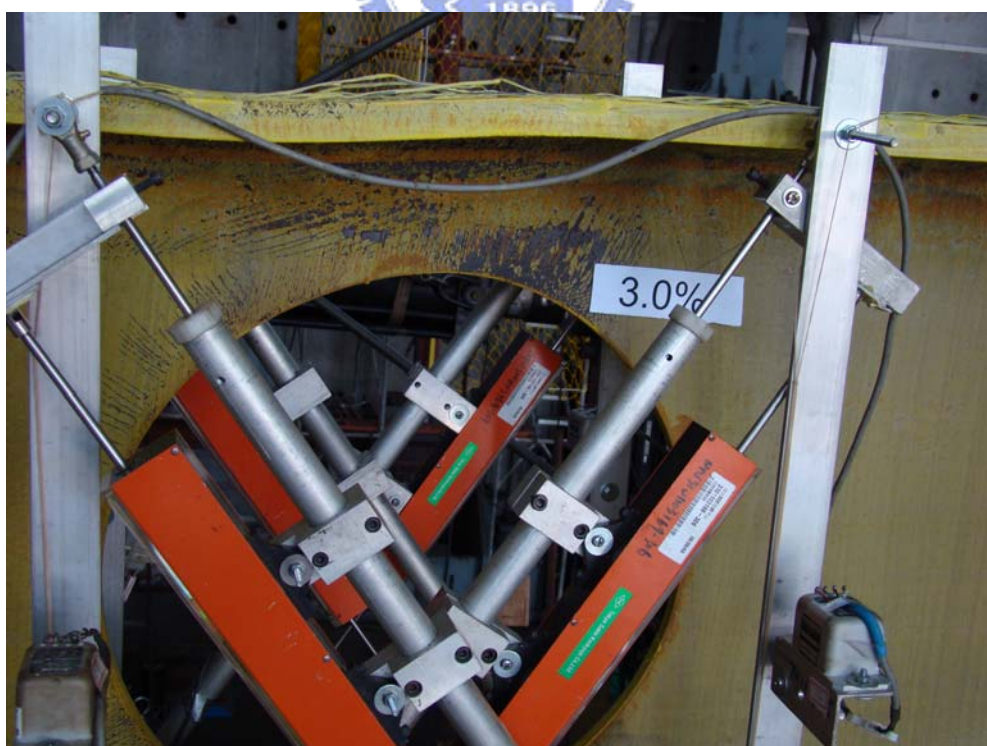




照片 4.11 試體 WOC65R1 梁腹板開孔周圍並以開孔圓心為基準的對角線上，石灰也已大量剝落並往兩翼方向延伸 (1.5% drift)



照片 4.12 試體 WOC65R1 上翼板開始出現輕微的挫屈 (2% drift)

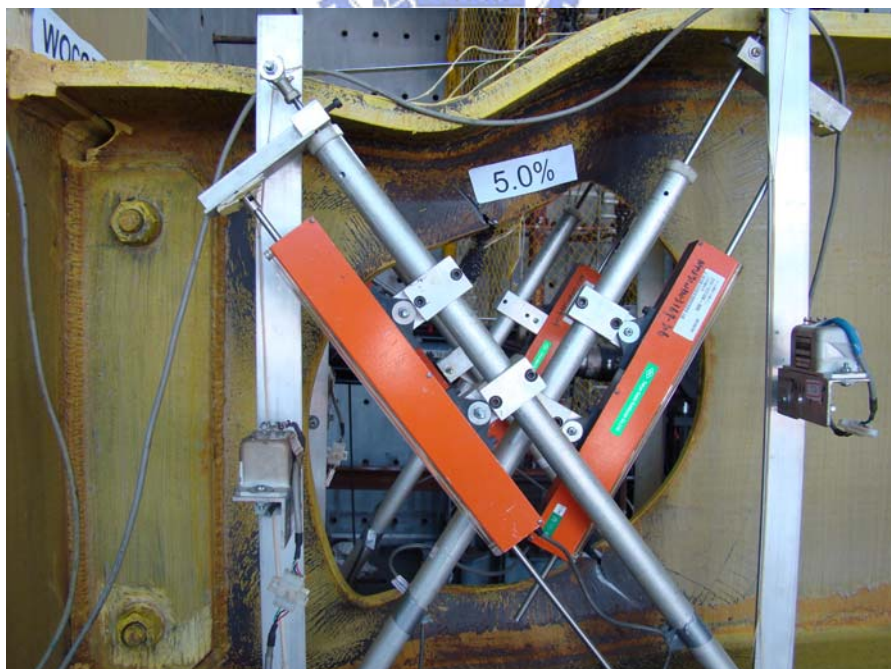


照片 4.13 試體 WOC65R1 上翼板挫屈更加嚴重 (3% drift)

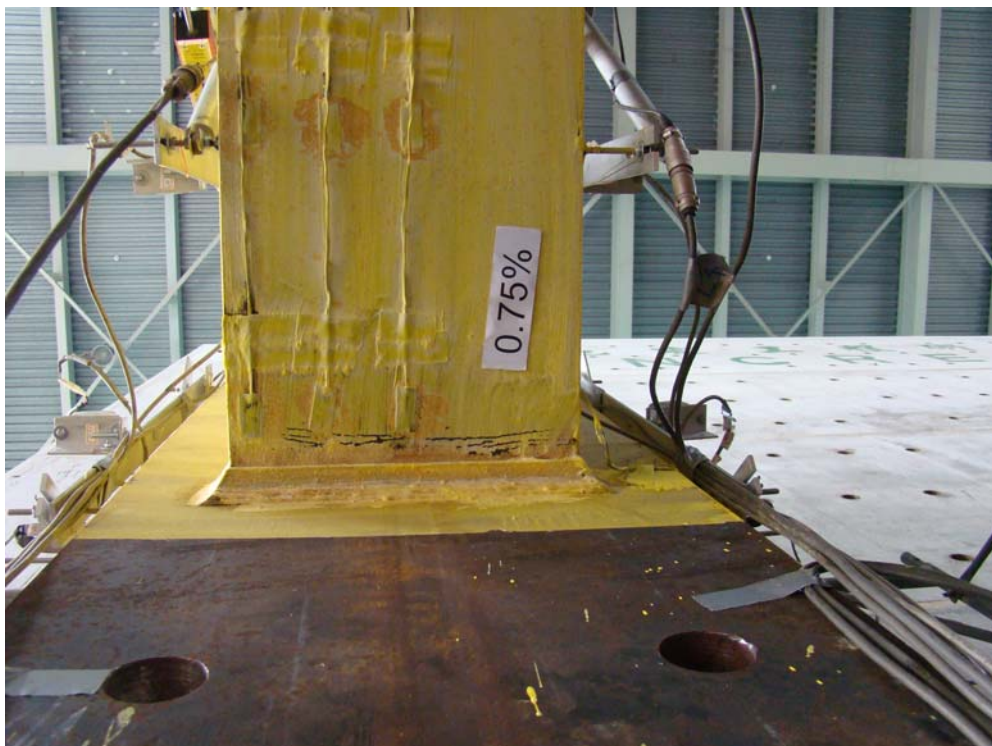




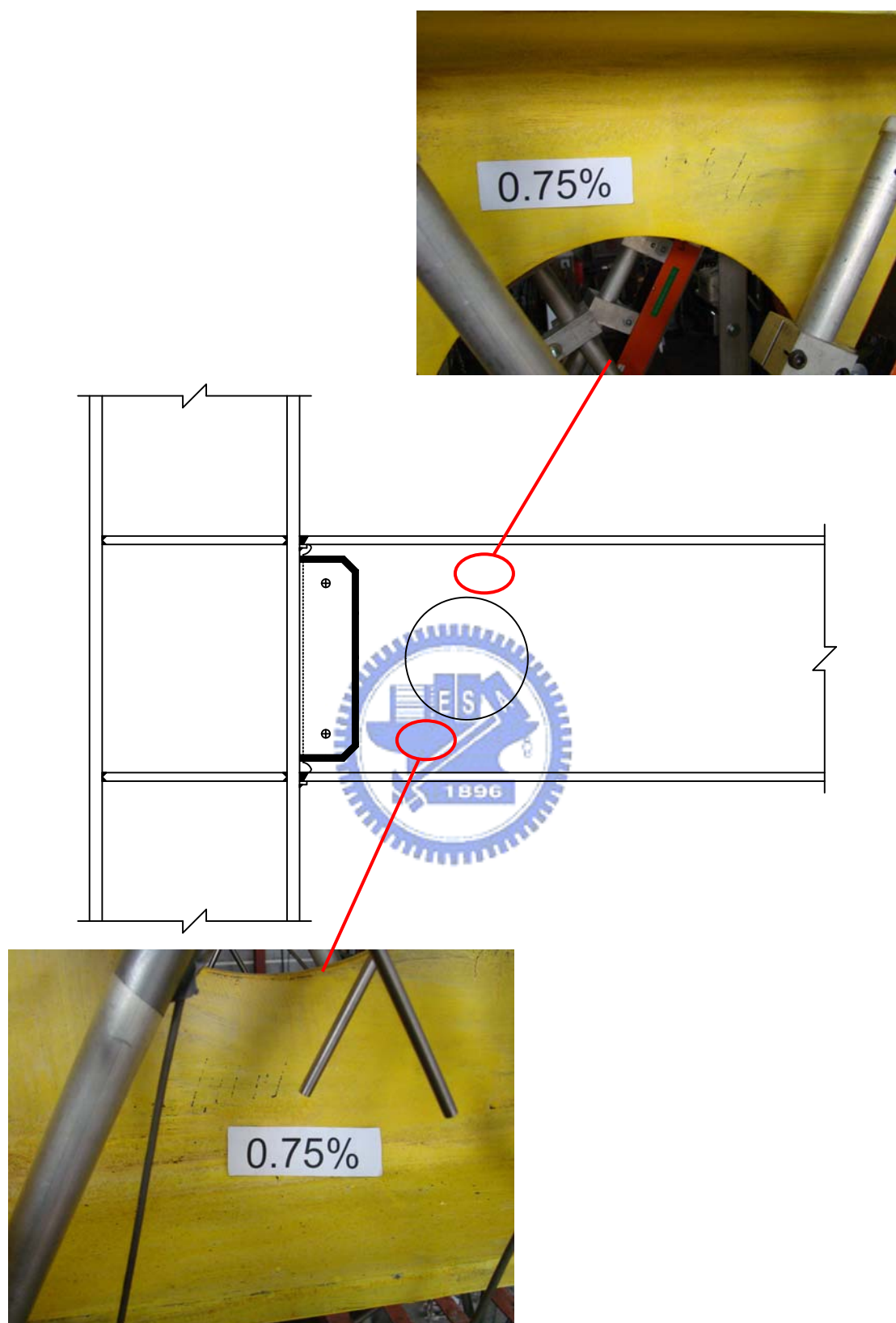
照片 4.14 試體 WOC65R1 梁腹板開孔成橢圓形狀，並出現嚴重的面  
外挫屈 (4% drift)



照片 4.15 試體 WOC65R1 梁腹板開孔周圍對角線之鋼材突然發生撕  
裂破壞的現象 (5% drift)

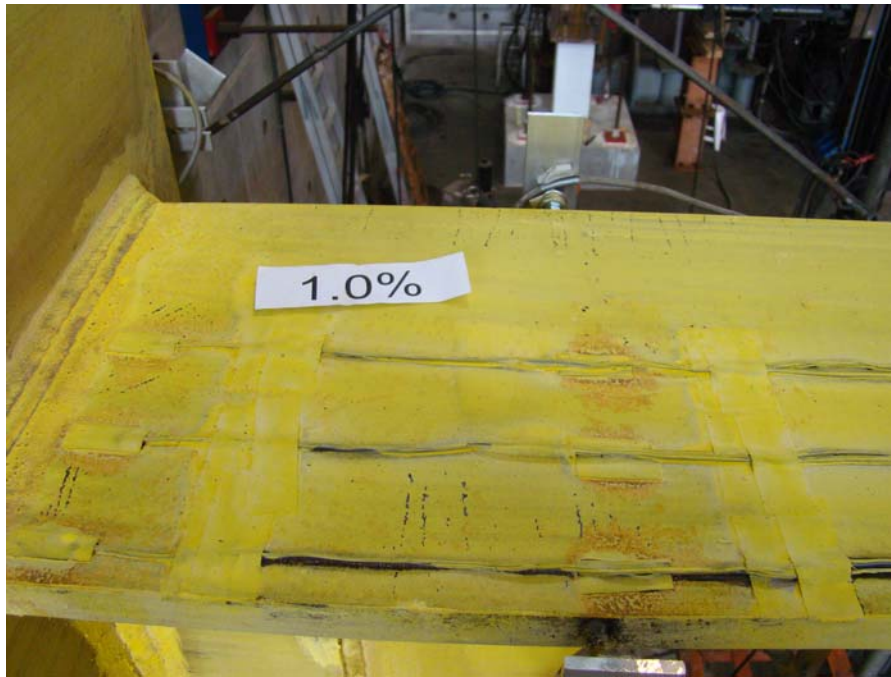


照片 4.16 試體 WOC50R1 下翼板中間處出現 V 字型橫紋石灰剝落的現象發生 (0.75% drift)



照片 4.17 試體 WOC50R1 梁腹板開孔周圍處出現與梁腹縱方向呈 45 度的少許石灰剝落 (0.75% drift)





照片 4.18 試體 WOC50R1 梁上翼板出現石灰剝落的現象且剝落的方向平行於翼寬並由翼板邊緣往中心延伸 (1% drift)

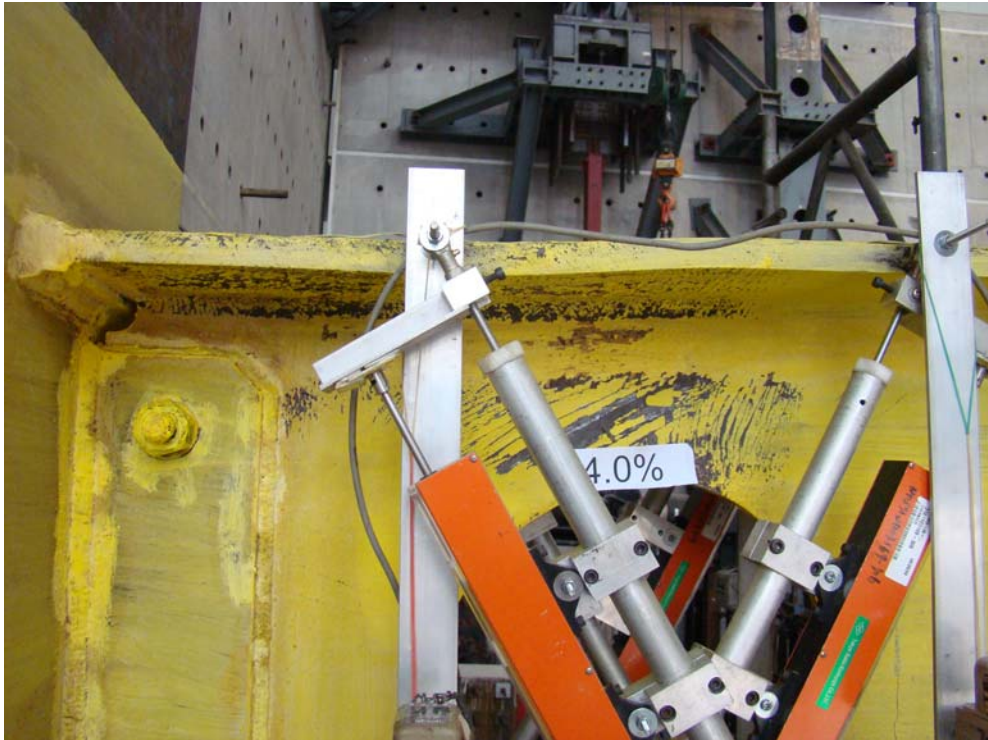


照片 4.19 試體 WOC50R1 下翼板邊緣處開始有橫向斑紋石灰剝落且在翼板中心處有斜向石灰剝落的現象產生 (1.5% drift)



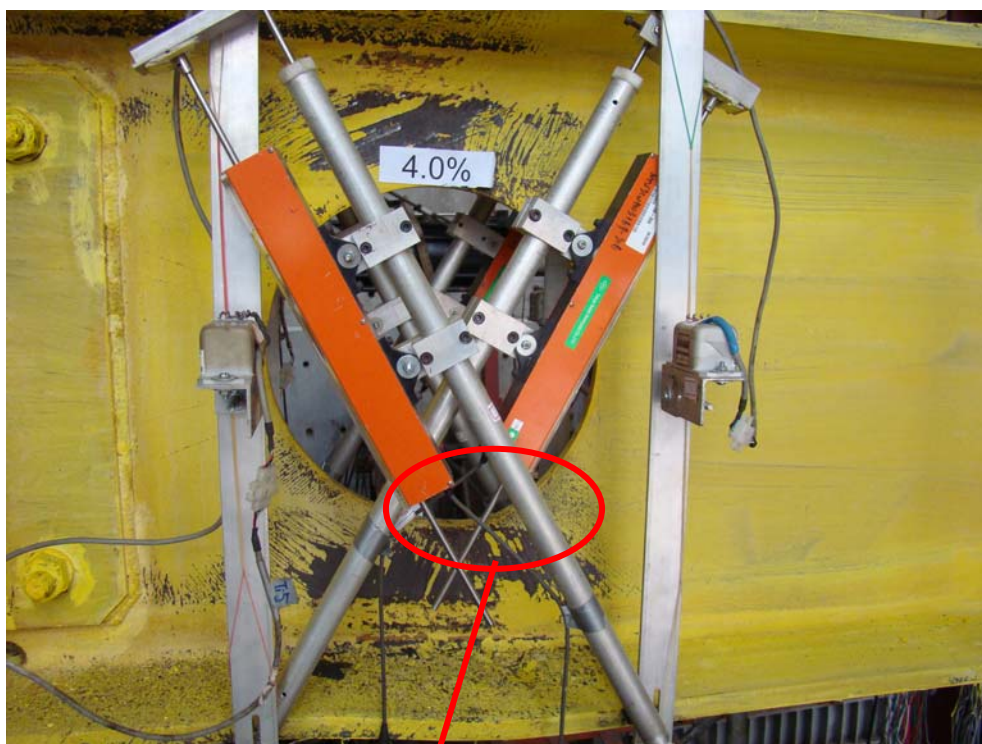
照片 4.20 試體 WOC50R1 梁腹板開孔周圍石灰剝落的情況持續以開孔圓心為基準的對角線方向往梁腹板開孔兩側向翼板延伸(類似交叉狀) (1.5% drift)





照片 4.21 試體 WOC50R1 上、下翼板挫屈已非常明顯 (4% drift)





照片 4.22 試體 WOC50R1 梁腹板開孔中心周圍的石灰已幾乎完全掉落並出現嚴重面外挫屈的現象 (4% drift)

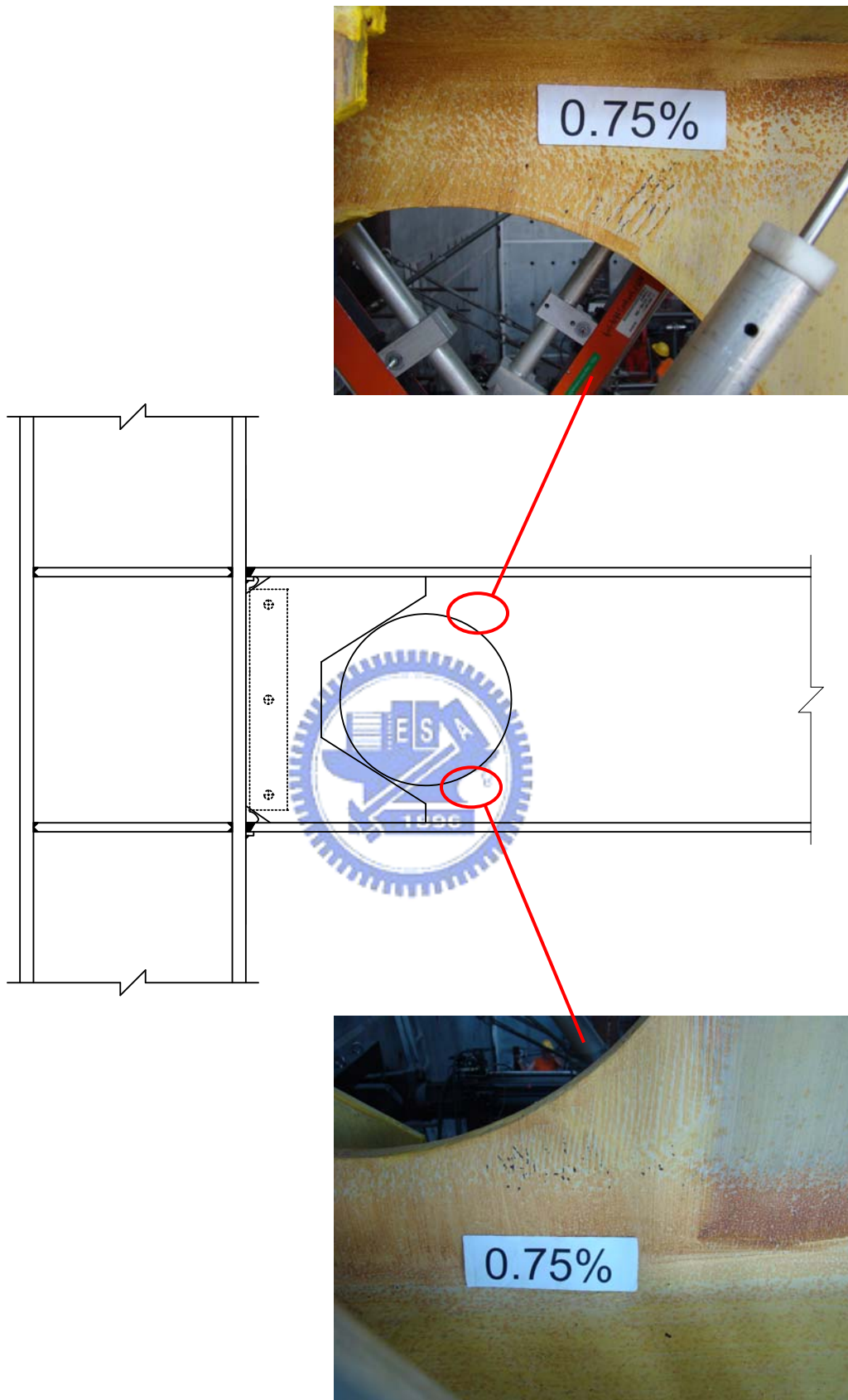


照片 4.23 試體 WOC65R2 梁上翼板邊緣處有與梁翼縱向呈 45 度石灰剝落現象發生 (0.75% drift)



照片 4.24 試體 WOC65R2 下翼板近柱面處出現 V 字型斑紋，且與上翼板相同範圍處有放射狀的斑紋剝落 (0.75% drift)

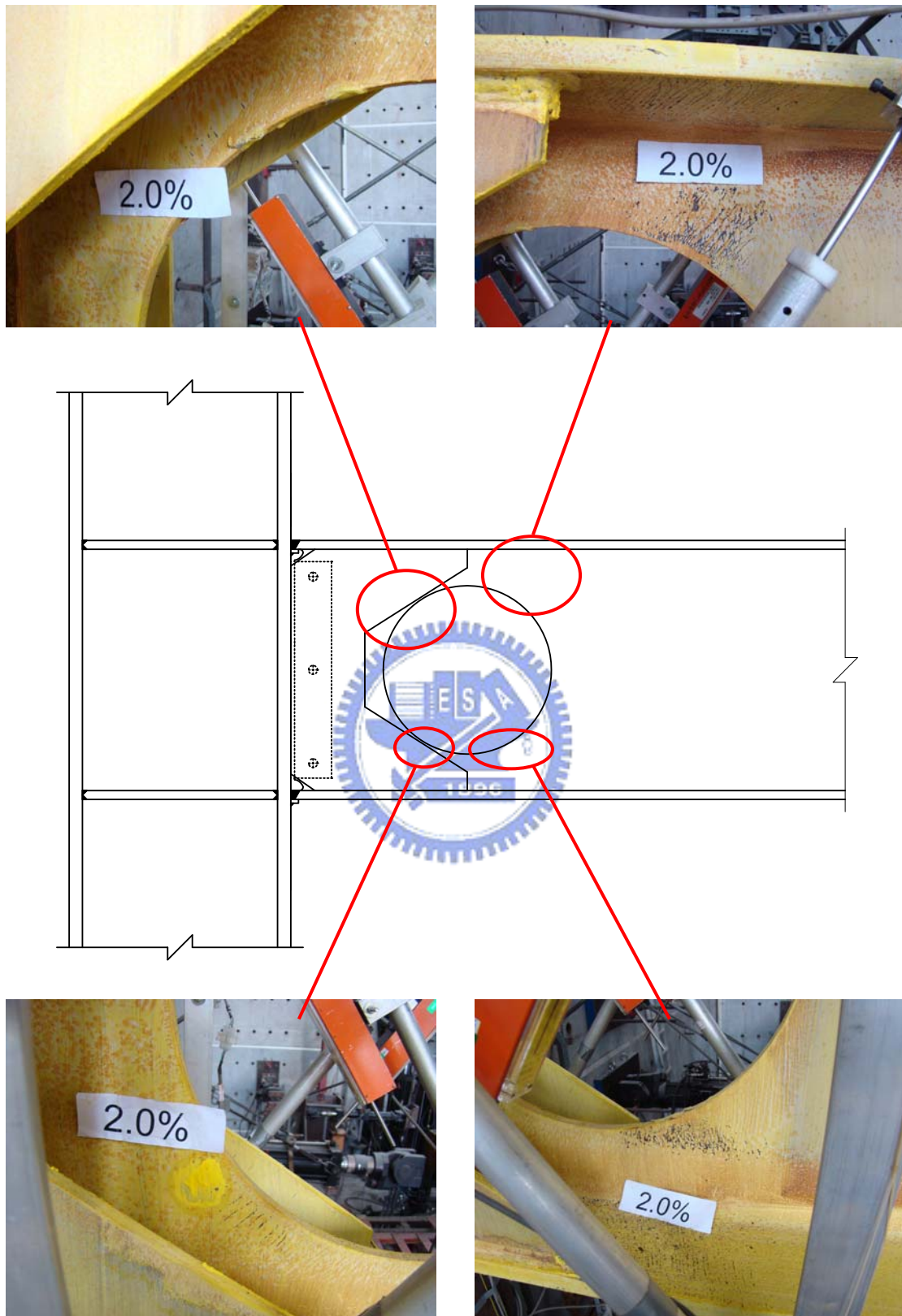




照片 4.25 試體 WOC65R2 梁腹板開孔周圍，其方向也是與梁腹縱向呈 45 度 (0.75% drift)

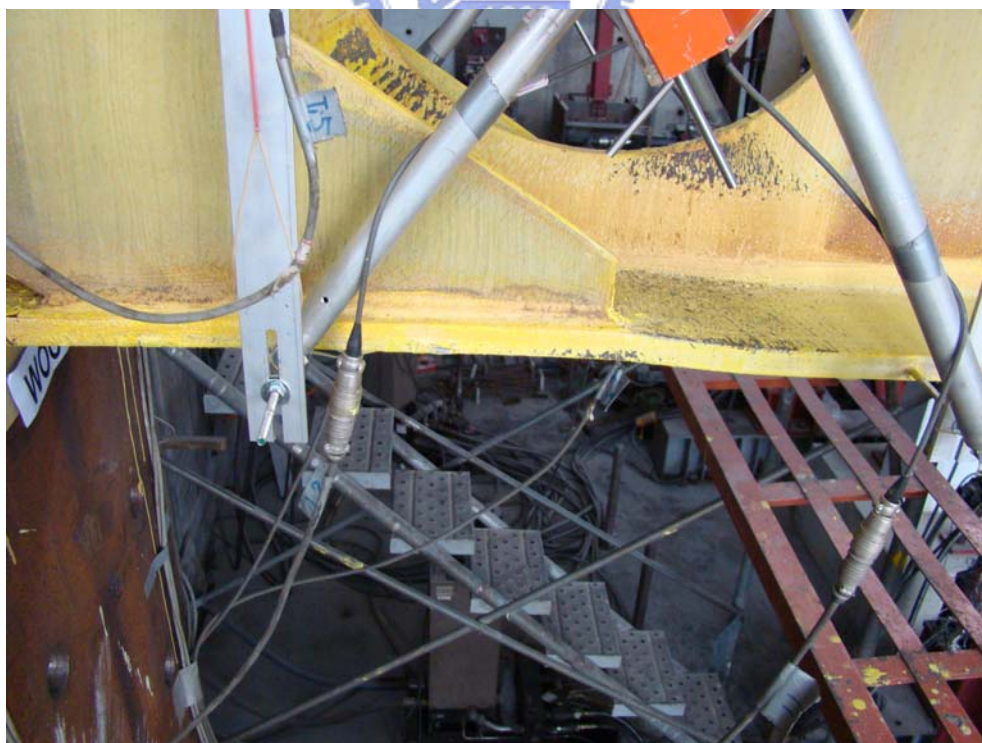
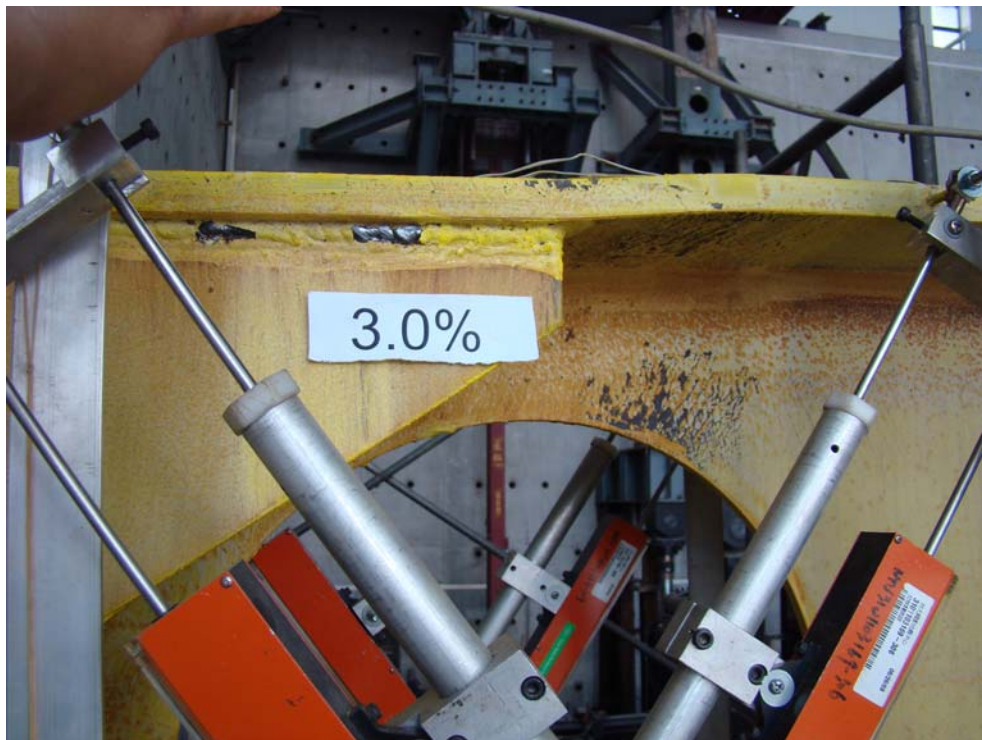


照片 4.26 試體 WOC65R2 加勁板與梁上翼板全滲透銲接處開始有石  
灰剝落 (2% drift)

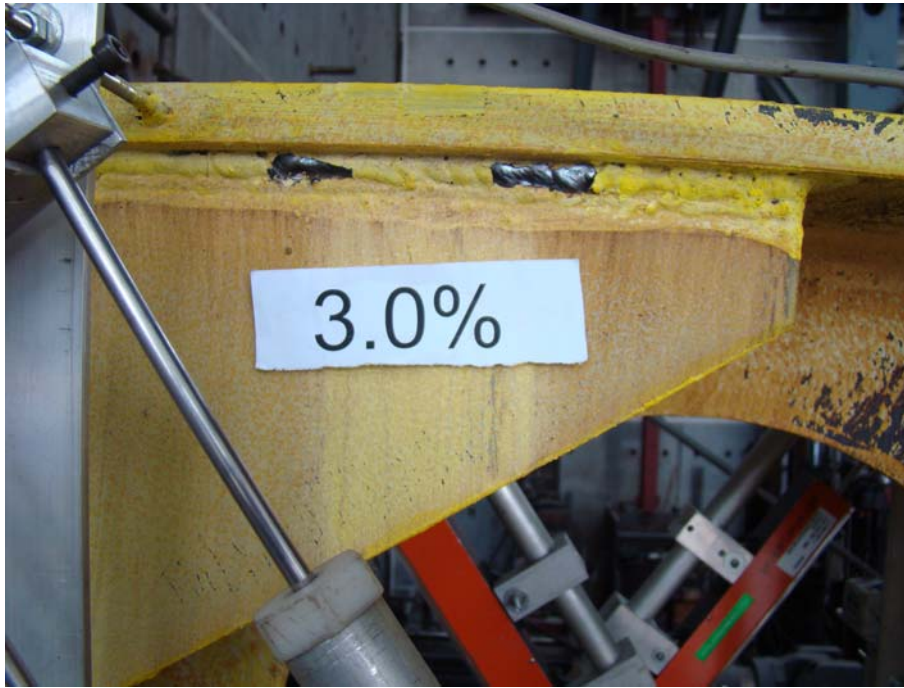


照片 4.27 試體 WOC65R2 腹板開孔周圍石灰剝落，石灰剝落的情況  
不會大量的往梁腹板開孔的左右兩側擴大 (2% drift)





照片 4.28 試體 WOC65R2 上、下翼板開始出現挫屈現象 (3% drift)



照片 4.29 試體 WOC65R2 加勁板靠近梁腹板開孔的邊緣處也開始有少許的石灰剝落 (3% drift)

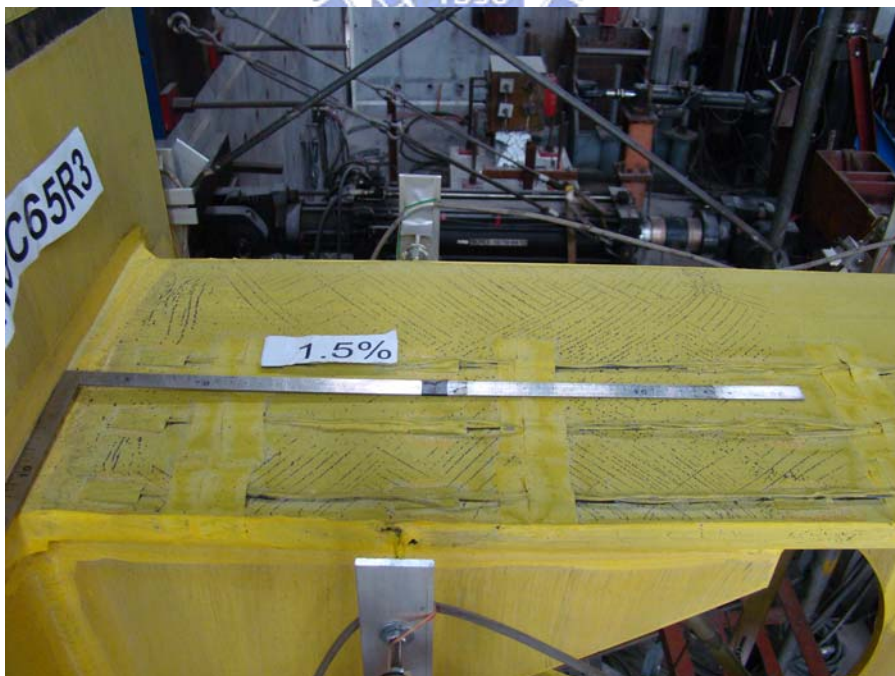


照片 4.30 試體 WOC65R2 梁翼板於扇形開孔處產生開裂並向兩側延伸導致整個下翼板斷裂 (3% drift)

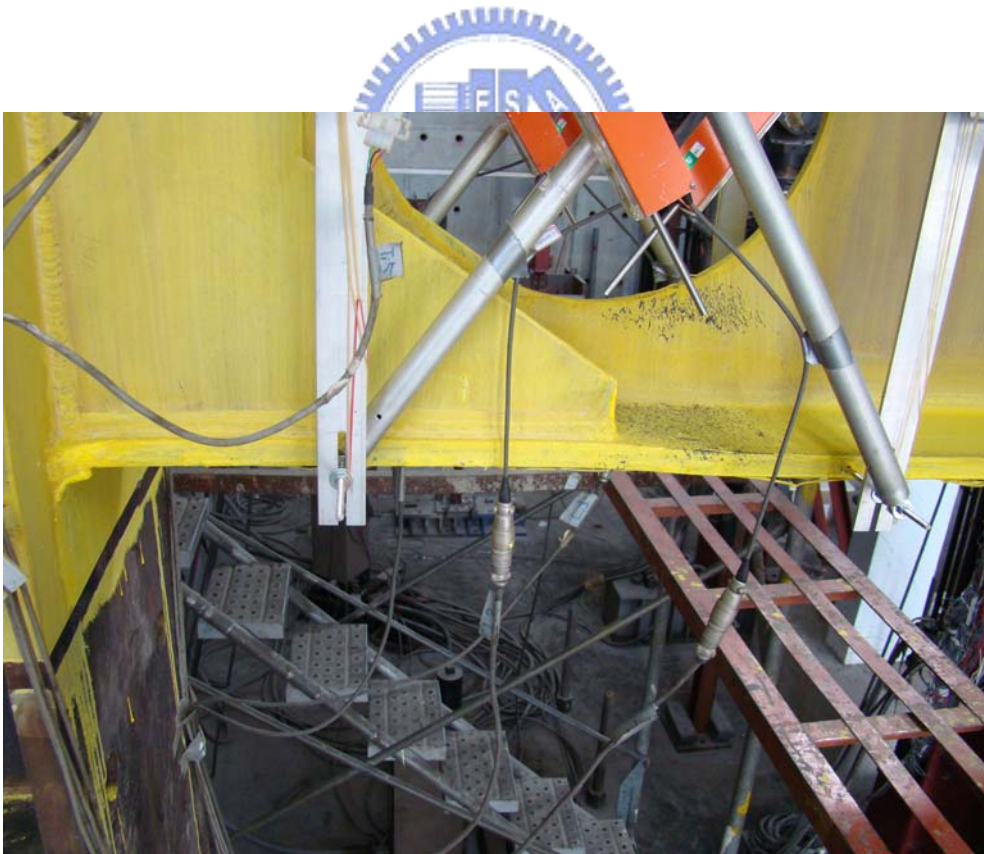
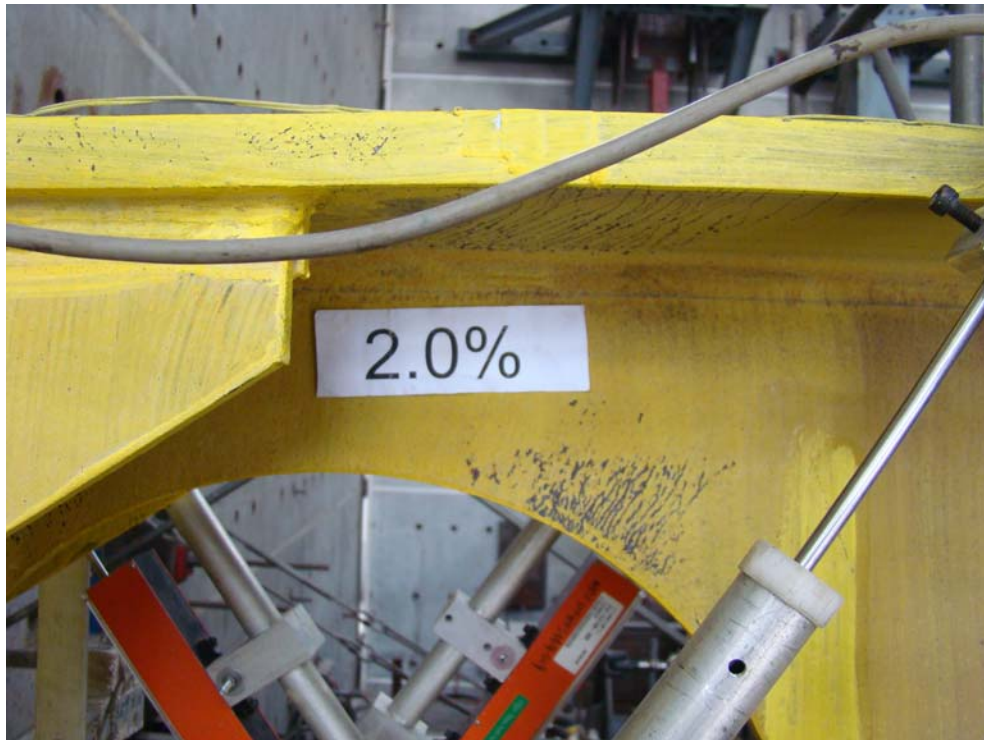




照片 4.31 試體 WOC65R3 下翼板在靠近柱面處的石灰剝落的情況沒有像 WOC65R2 如此嚴重 (0.75% drift)



照片 4.32 試體 WOC65R3 梁翼板石灰剝落增加，並以輻射狀斑紋逐漸往柱面剝落 (1.5% drift)

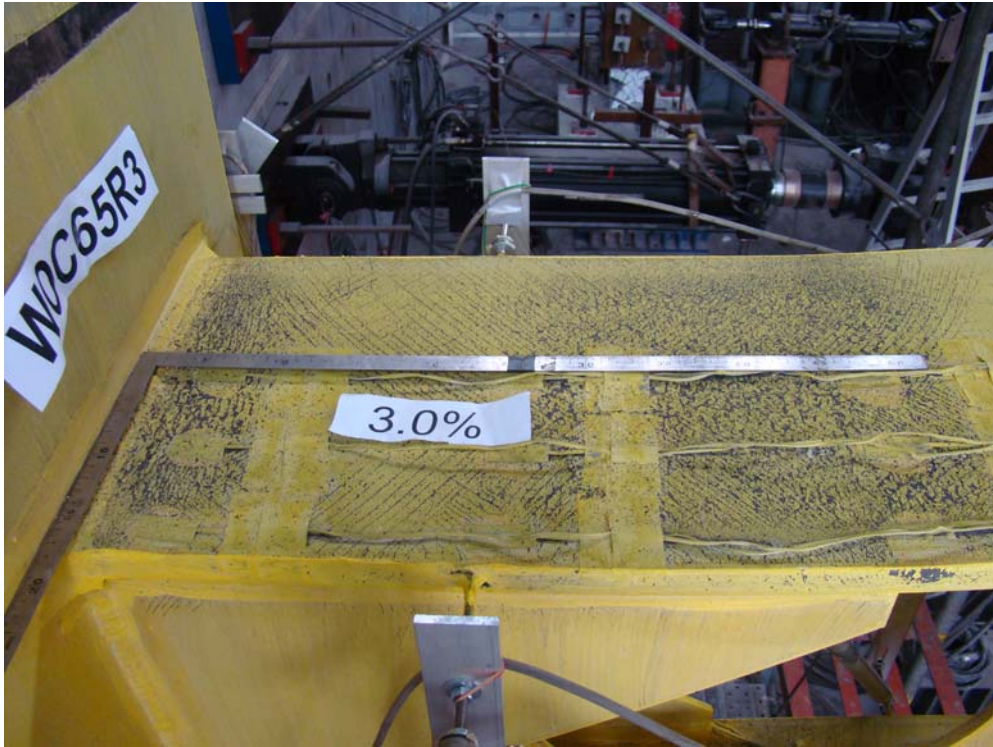


照片 4.33 試體 WOC65R3 上、下翼板開始有輕微的挫屈的現象發生  
(2% drift)





照片 4.34 試體 WOC65R3 加勁板開始有些許的石灰剝落 (2% drift)

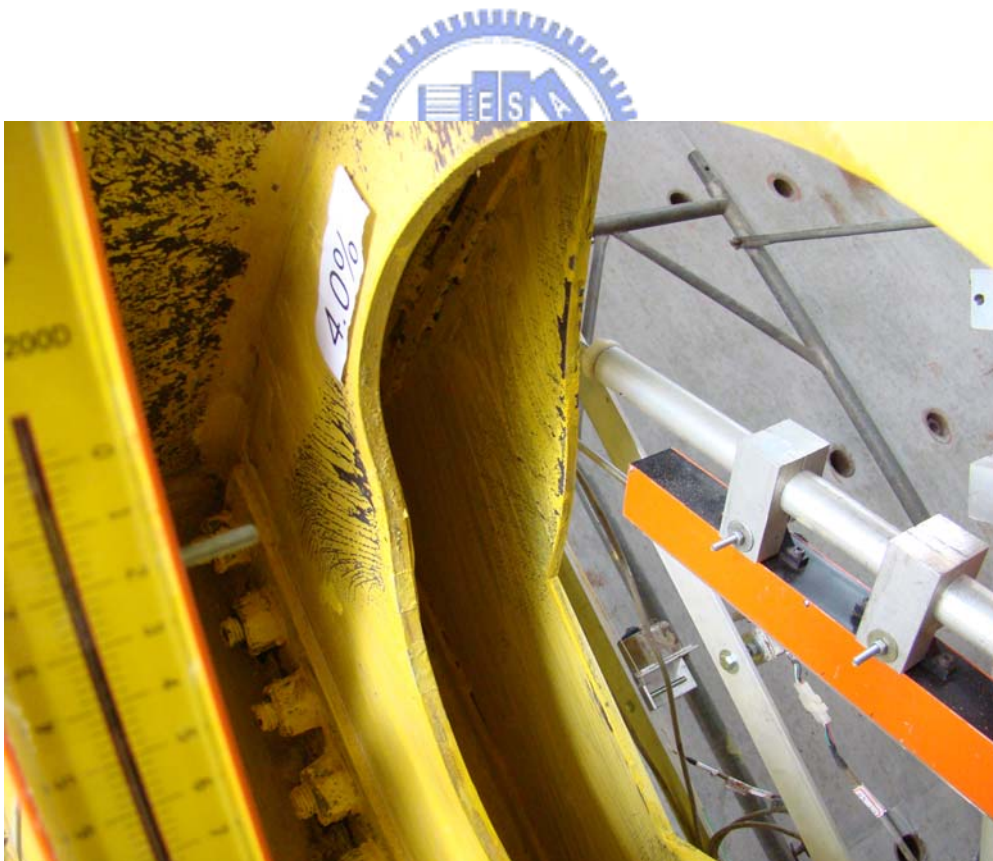


照片 4.35 試體 WOC65R3 上、下翼板石灰剝落的情況由局部演變為大範圍剝落 (3% drift)



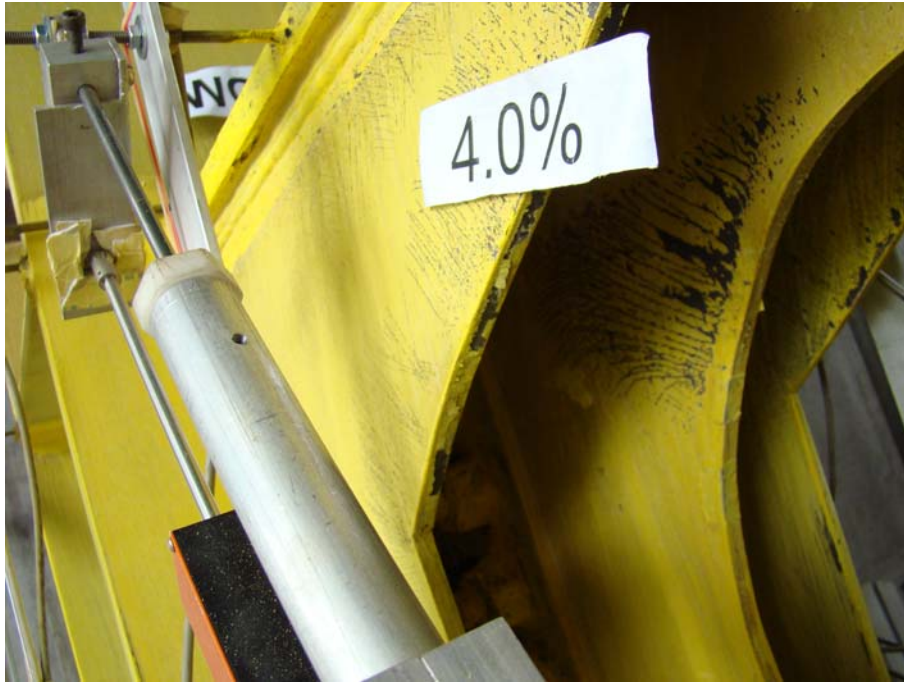
照片 4.36 試體 WOC65R3 下翼板邊緣之全滲透鉚道處出現很小的裂縫 (4% drift)





照片 4.37 試體 WOC65R3 梁腹板開孔周圍開始出現明顯的面外挫屈現象 (4% drift)

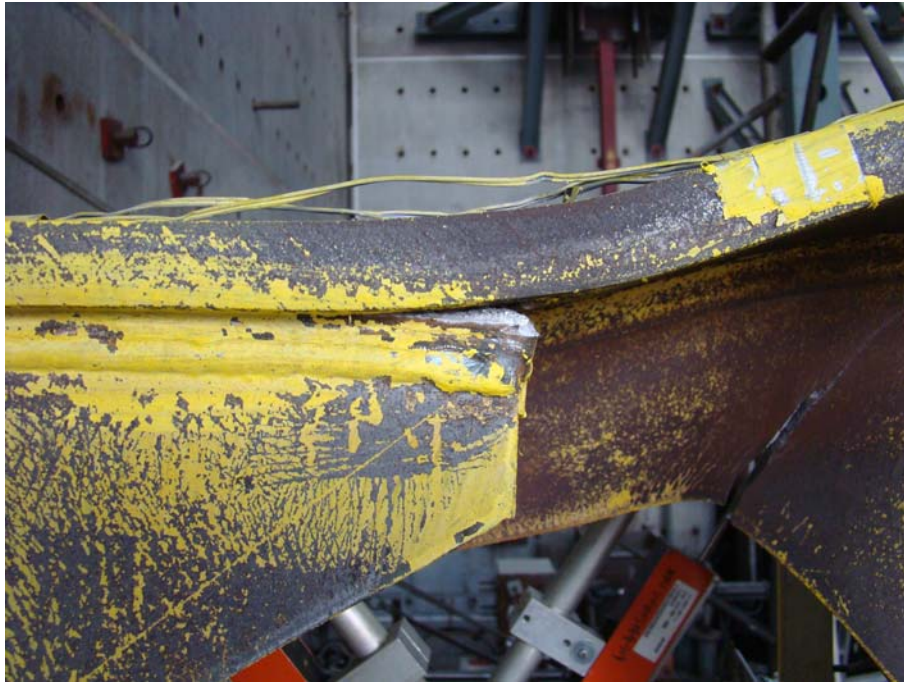




照片 4.38 試體 WOC65R3 加勁板石灰剝落的情形已由柱翼及梁翼之全滲透鐸道處往加勁板內延伸，且出現輕微的面外挫屈 (4% drift)



照片 4.39 試體 WOC65R3 梁腹開孔周圍的右上角已出現很大的裂縫 (5% drift)



照片 4.40 試體 WOC65R3 加勁板與梁上翼板全滲透銲接的端部(開孔中心)發現有裂開的情況發生 (5% drift)



照片 4.41 試體 WOC65R3 加勁板與梁下翼板全滲透銲接的端部(開孔中心)往梁端方向之下翼板發生撕裂並延伸到梁腹板開孔 (5% drift)