

國立交通大學

土木工程學系碩士班
碩士論文

削切蓋板鋼骨梁柱接頭之
耐震行為研究

Seismic Behavior of Steel Reduced Flange Plate Moment



研究生：吳家慶

指導教授：周中哲 博士

中華民國 九十四 年 七月

削切蓋板鋼骨梁柱接頭之耐震行為研究

研究生：吳家慶

指導教授：周中哲 博士

國立交通大學土木工程學系

摘 要

本研究設計四組全尺寸削切蓋板梁柱接頭試體，以強度設計法決定削切蓋板尺寸。研究的重點著重於此種削切蓋板梁柱接頭的塑鉸位置、彈性勁度、強度、韌性行為及能量消釋能力，並藉由削切蓋板與柱、梁翼板間之各種接合設計來探討其差異性。此種新型式的接頭與傳統蓋板梁柱接頭最大的不同點在於蓋板經由削切，削減蓋板強度與勁度，迫使所有的能量消釋皆發生在此削切蓋板而非梁上，在歷經地震作用下削切蓋板達到非彈性變形階段後，鋼梁仍保持在彈性範圍，而無顯著的破壞產生。

本研究利用有限元素分析軟體 ABAQUS 進行結構試體非線性有限元素分析，以探討削切蓋板梁柱接頭之力學行為與機制，並針對單一的削切蓋板進行有限元素分析之參數研究，藉由改變其削切幾何形狀與厚度來探討壓力強度。

本研究結果顯示：(1) 削切蓋板梁柱接頭可確保塑性變形發生在削切蓋板上而非梁上，進而避免梁的挫屈發生，且四組試體在反覆載重作用下皆可達到位移角 $\theta = 0.05$ 弧度而無明顯的強度遞減，(2) 削切蓋板梁柱接頭試體的彈性勁度與傳統蓋板梁柱接頭相近，滿足剛性接頭的彈性勁度要求，(3) 接頭主要的梁端位移由梁因削切蓋板塑性變形所致之梁端位移分量所提供，柱、梁柱交會區及梁彈性變形所提供的比例較小，(4) 梁翼板最大應變發生在削切蓋板端部之梁翼板上，試驗結果顯示四組試體最大應變約等於降伏應變，(5) 在削切蓋板上加置三角型加勁板能提高試體整體強度，(6) 削切蓋板參數研究所得之非線性迴歸模型在預估削切蓋板的挫屈力量有一定的準確度。

Seismic Behavior of Steel Reduced Flange Plate Moment Connections

Student : C. C. Wu

Advisor : Dr. C. C. Chou

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The connection with flange plates to connect the steel beam flanges to the column has been recommended by FEMA 350 (2000) as a prequalified fully restrained moment connection. The flange plates are detailed to remain elastic and, therefore, force a plastic hinge forming in the beam, resulting in beam buckling at large deformation cycle. The objective of this study was to develop connection details, which limit energy dissipation in an easily repairable device instead of beam. The paper presents experimental and analytical results of the proposed moment connections utilizing steel Reduced Flange Plates (RFPs) as an energy dissipating mechanism. RFPs were welded to the Concrete-Filled-Tube (CFT) column and either bolted or fillet welded to the beam flanges. Cyclic tests were conducted on four full-scale subassemblies with a steel beam and a CFT column. The test results showed that (1) the specimens were able to develop full beam moment capacity and interstory drift angle in excess of 0.05 radians, (2) RFPs, which experienced buckling at large drift cycle, were also effective in dissipating energy, and (3) beam buckling was prevented from the test. A general-purpose nonlinear finite element analysis program (ABAQUS) was used to perform correlation study. The analysis showed that the proposed connection and the flange plate moment connection have similar force-deformation characteristics.

誌謝

經過了兩年的努力，本研究論文終於順利完成，首先感謝指導教授 周中哲博士在論文研究期間的諄諄教誨，讓我學習到嚴謹的研究精神與審慎思考的研究態度，在此獻上最誠摯的感謝。同時在論文口試期間，承蒙台灣大學 蔡克銓教授、台灣科技大學 陳正誠教授、交通大學 劉俊秀教授及陳誠直教授對本研究論文提出的寶貴意見，使本論文的內容更加充實，在此致上最由衷的謝意。

另外要感謝國家地震工程研究中心(NCREE)提供研究經費與試驗場地，使實驗能順利進行，在此致上敬意與謝意。同時也要感謝鴻舜機械公司周仁財先生在實驗試體製作與實驗過程中的協助。

感謝學長陳鈺智、陳沛均，及同學俊翰在實驗期間不辭辛苦地陪我到台北國家地震工程研究中心做實驗，由於你們所提供的協助，讓本研究實驗能順利完成。感謝學弟昱棋、郁仁及智堡在我論文撰寫階段，給予我的鼓勵與協助，沒有你們的打氣，論文的完成或許還是未知數。

感謝女友淑芬在研究所期間在各方面給予我的鼓勵，因為你的支持與體諒使我在忙碌的研究所階段得以盡情發揮。

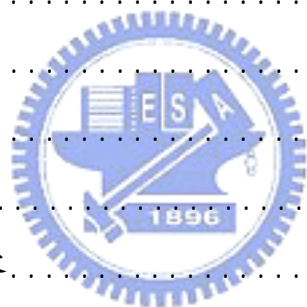
最後僅將本文獻給我摯愛的家人，感謝你們對我的支持與包容，希望與你們共同分享我獲得碩士學位的喜悅與驕傲。



目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	X
照片目錄.....	XVII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究動機.....	5
1.4 研究目的.....	6
1.5 研究內容.....	6
第二章 削切蓋板梁柱接頭試體設計.....	7
2.1 前言.....	7
2.2 強柱弱梁.....	7
2.3 蓋板梁柱接頭試體設計.....	8
2.4 削切蓋板梁柱接頭試體設計.....	10
2.4.1 削切蓋板尺寸.....	10
2.4.2 削切蓋板與鋼梁接合細節.....	12
2.4.3 削切蓋板與鋼管混凝土柱接合設計.....	18
2.4.4 梁柱交會區剪力強度檢核.....	20
2.4.5 彈性勁度.....	21
2.4.6 梁與削切蓋板剪力與彎矩分佈.....	22

2.5	材料性質.....	25
2.6	試體試驗構架與載重歷時.....	26
2.6.1	油壓制動器.....	26
2.6.2	資料擷取收集系統.....	26
2.6.3	試驗載重歷時.....	26
2.7	試驗量測規劃.....	27
第三章 試體實驗與結果分析.....		30
3.1	前言.....	30
3.2	試體製作與組裝.....	30
3.3	試體 1 試驗結果.....	31
3.3.1	試驗現象觀察.....	31
3.3.2	整體反應.....	33
3.3.4	局部反應.....	35
3.4	試體 2 試驗結果.....	39
3.4.1	試驗現象觀察.....	39
3.4.2	整體反應.....	41
3.4.3	局部反應.....	42
3.5	試體 3 試驗結果.....	45
3.5.1	試驗現象觀察.....	45
3.5.2	整體反應.....	48
3.5.3	局部反應.....	49
3.6	試體 4 試驗結果.....	52
3.6.1	試驗現象觀察.....	52
3.6.2	整體反應.....	55
3.6.3	局部反應.....	57



第四章 有限元素分析.....	60
4.1 前言.....	60
4.2 鋼材反覆載重試驗.....	60
4.2.1 試驗鋼材尺寸.....	60
4.2.2 反覆載重歷時.....	61
4.2.3 試驗結果.....	61
4.2.4 材料模型之建立.....	62
4.2.5 材料模型之分析結果.....	64
4.3 削切蓋板有限元素模型建立.....	65
4.4 試體有限元素模型建立.....	66
4.4.1 結構模型.....	66
4.4.2 材料性質.....	66
4.5 分析結果.....	71
4.5.1 彎矩與梁端位移關係.....	71
4.5.2 彈性勁度.....	72
4.5.3 局部反應.....	73
4.5.4 參數.....	75
4.6 削切蓋板挫屈強度之參數研究.....	77
4.6.1 分析模型.....	77
4.6.2 削切蓋板拉壓性質.....	79
4.6.3 參數選取範圍.....	82
4.6.4 迴歸分析模型.....	84
4.7 試體設計步驟修正.....	87
第五章 結論與建議.....	89
5.1 結論.....	89



5.2 建議.....92
參考文獻.....93



表目錄

表 1.1 試體 BFP08 各階段彎矩.....	95
表 2.1 四組試體設計之彎矩強度.....	95
表 2.2 削切蓋板尺寸.....	95
表 2.3 RBS 與 RFP 削切比較.....	96
表 2.4 試體橫隔板尺寸與規範規定值.....	96
表 2.5 試體梁柱交會區剪力.....	96
表 2.6 四組試體削切蓋板撓曲勁度.....	97
表 2.7 四組試體削切蓋板剪力與油壓制動器力量比值(彈性部份).....	97
表 2.8 四組試體削切蓋板剪力與油壓制動器力量比值(塑性部份).....	97
表 2.9 混凝土抗壓強度.....	97
表 2.10 材料拉力試驗強度.....	98
表 3.1 各試體實驗的勁度及與理論勁度之比值.....	98
表 3.2 各試體實驗的彎矩強度比較.....	98
表 3.3 四組試體實驗所得之彎矩強度.....	98
表 3.4 四組試體實驗所得之削切蓋板最大力量.....	99
表 4.1 鋼材反覆載重試片尺寸.....	99
表 4.2 A572 Gr. 50 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令.....	99
表 4.3 A36 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令.....	100
表 4.4 各組試體削切蓋板挫屈長度.....	100
表 4.5 各組分析模型之彈性勁度.....	100
表 4.6 各組分析模型在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時之最大的破壞參數.....	101
表 4.7 試體 1 削切蓋板位移量比例.....	101
表 4.8 試體 2 削切蓋板位移量比例.....	101
表 4.9 參數研究之削切蓋板尺寸與結果.....	102

表 4.10 各強度比值下削切蓋板能量..... 110

表 4.10 修正設計後各組試體之彎矩強度..... 111



圖目錄

圖 1.1 試體 BFP08 設計細節.....	112
圖 1.2 削切蓋板梁柱接頭接合型式.....	112
圖 2.1 蓋板梁柱接頭強度需求.....	113
圖 2.2 蓋板梁柱接頭設計細節.....	113
圖 2.3 削切蓋板梁柱接頭強度需求.....	114
圖 2.4 削切尺寸參考圖.....	114
圖 2.5 試體 1 設計細節.....	115
圖 2.6 試體 1 接合破壞檢核圖.....	115
圖 2.7 試體 2 設計細節.....	116
圖 2.8 試體 3 設計細節.....	116
圖 2.9 試體 4 設計細節.....	117
圖 2.10 試體 3 及 4 之 T 型裝置細部設計.....	118
圖 2.11 試體簡化示意圖.....	118
圖 2.12 試體剪力與彎矩分佈圖.....	119
圖 2.13 削切蓋板鋼材之應力 - 應變曲線.....	119
圖 2.14 構架示意圖.....	120
圖 2.15 實驗載重歷時.....	120
圖 2.16 試體 1 應變計與位移計配置圖.....	121
圖 2.17 試體 2 應變計與位移計配置圖.....	122
圖 2.18 試體 3 應變計與位移計配置圖.....	123
圖 2.19 試體 4 應變計與位移計配置圖.....	124
圖 2.20 梁柱交會區變形量測.....	125
圖 2.21 梁柱交會區剪力變形示意圖 (剛體旋轉前).....	125
圖 2.22 梁柱交會區剪力變形示意圖 (剛體旋轉後).....	126

圖 3.1 試體 1 彎矩與梁端位移關係圖.....	127
圖 3.2 四組試體彎矩與位移關係包絡線圖.....	127
圖 3.3 試體 1 柱轉角分量與彎矩關係圖.....	128
圖 3.4 試體 1 梁柱交會區剪力變形與彎矩關係圖.....	128
圖 3.5 各組試體的梁端位移分量於各層間側位移角之比較.....	129
圖 3.6 各組試體的梁端位移分量比例於各層間側位移角之比較.....	129
圖 3.7 試體 1 上側削切蓋板橫向應變計與柱邊彎矩歷時.....	130
圖 3.8 試體 1 下側削切蓋板橫向應變計與柱邊彎矩歷時.....	131
圖 3.9 試體 1 上側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (正方向施載).....	132
圖 3.10 試體 1 上側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (負方向施載).....	133
圖 3.11 試體 1 下側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (正方向施載).....	134
圖 3.12 試體 1 下側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (負方向施載).....	135
圖 3.13 試體 1 削切蓋板應變沿板縱向變化圖 (正方向施載).....	136
圖 3.14 試體 1 削切蓋板應變沿板縱向變化圖 (負向施載).....	137
圖 3.15 試體 1 削切蓋板削切中央應變計與彎矩歷時.....	138
圖 3.16 試體 1 梁上翼板應變計與彎矩歷時.....	139
圖 3.17 試體 1 梁上翼板應變沿梁縱軸方向變化.....	140
圖 3.18 試體 1 梁翼板應變與估計應變值比較.....	141
圖 3.19 試體 1 梁腹板剪應變與柱邊彎矩歷時.....	142
圖 3.20 試體 1 削切蓋板端部梁腹板剪應變沿梁高度變化圖.....	143
圖 3.21 試體 1 削切蓋板內部梁腹板剪應變沿梁高度變化圖.....	143
圖 3.22 試體 1 梁腹板在每一位移角下之剪力比較.....	144
圖 3.23 各組試體梁腹板各剪力值比例.....	145
圖 3.24 試體 1 梁柱交會區剪應變沿柱寬度方向變化.....	146
圖 3.25 試體 1 梁柱交會區鋼管與混凝土之剪力分佈.....	147

圖 3.26	各試體梁柱交會區鋼管與混凝土之剪力分佈比例.....	148
圖 3.27	各組試體梁柱交會區混凝土剪應力變化情形.....	149
圖 3.28	試體 2 彎矩與梁端位移關係圖.....	149
圖 3.29	試體 2 柱轉角與彎矩關係圖.....	150
圖 3.30	試體 2 梁柱交會區之剪力變形與彎矩關係圖.....	150
圖 3.31	試體 2 上側削切蓋板應變計與柱邊彎矩關係圖.....	151
圖 3.32	試體 2 下側削切蓋板應變計與柱邊彎矩關係圖.....	152
圖 3.33	試體 2 上側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (正方向施載).....	153
圖 3.34	試體 2 上側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (負方向施載).....	154
圖 3.35	試體 2 下側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (正方向施載).....	155
圖 3.36	試體 2 下側削切蓋板應變隨寬度變化圖 (負方向施載).....	156
圖 3.37	試體 2 上側削切蓋板應變沿板縱向變化圖.....	157
圖 3.38	試體 2 削切蓋板中央削切處應變計與彎矩歷時.....	158
圖 3.39	試體 2 梁上翼板應變計與彎矩歷時.....	159
圖 3.40	試體 2 梁上翼板應變沿梁縱軸方向變化.....	160
圖 3.41	試體 2 梁翼板應變與估計應變值比較.....	161
圖 3.42	試體 2 削切蓋板內梁腹板剪應變沿梁高度變化圖.....	162
圖 3.43	試體 2 各位移角下之梁腹板剪力比較.....	162
圖 3.44	試體 2 梁腹板剪力比例與有限元素分析比較.....	163
圖 3.45	試體 2 梁柱交會區剪應變沿柱寬度方向變化.....	164
圖 3.46	試體 3 彎矩與梁端位移關係圖.....	165
圖 3.47	試體 3 柱轉角與彎矩關係圖.....	165
圖 3.48	試體 3 梁柱交會區所提供之轉角分量與彎矩關係圖.....	166
圖 3.49	試體 3 削切蓋板橫向應變計與柱邊彎矩關係圖.....	167
圖 3.50	試體 3 上側削切蓋板靠近端板之應變沿板寬度變化.....	168

圖 3.51	試體 3 上側削切蓋板靠近焊接處之應變沿板寬度變化.....	169
圖 3.52	試體 3 下側削切蓋板靠近焊接處之應變沿板寬度變化.....	170
圖 3.53	試體 3 上側削切蓋板應變沿板縱向之變化.....	171
圖 3.54	試體 3 削切蓋板中央削切處應變計與彎矩歷時.....	172
圖 3.55	試體 3 梁上翼板應變計與彎矩歷時.....	173
圖 3.56	試體 3 梁翼板沿梁縱軸方向變化.....	174
圖 3.57	試體 3 梁翼板軸向應變與估計應變值比較.....	175
圖 3.58	試體 3 梁腹板剪應變與柱邊彎矩歷時.....	176
圖 3.59	試體 3 梁腹板剪應變沿梁深之變化 (正方向施載).....	177
圖 3.60	試體 3 各位移角下之梁腹板剪力比較 (正方向施載).....	178
圖 3.61	試體 3 梁柱交會區剪應變沿寬度之變化.....	179
圖 3.62	試體 4 彎矩與梁端位移關係.....	180
圖 3.63	試體 4 柱轉角與彎矩關係圖.....	180
圖 3.64	試體 4 梁柱交會區所提供之轉角分量與彎矩關係圖.....	181
圖 3.65	試體 3 梁上翼板應變計與彎矩歷時.....	182
圖 3.66	試體 4 梁翼板應變沿梁縱向變化.....	183
圖 3.67	試體 4 梁翼板軸向應變與估計應變值比較.....	184
圖 3.68	試體 4 梁腹板剪應變與柱邊彎矩歷時.....	185
圖 3.69	試體 4 削切蓋板端部之梁腹板剪應變沿梁深之變化.....	186
圖 3.70	試體 4 削切蓋板內部之梁腹板剪應變沿梁深之變化.....	186
圖 3.71	試體 4 各位移角下之梁腹板剪力比較 (正方向施載).....	187
圖 3.72	試體 4 梁柱交會區剪應變沿柱寬度之變化.....	188
圖 4.1	鋼材反覆載重試片尺寸.....	189
圖 4.2	鋼材反覆載重歷時 (固定應變幅度).....	189
圖 4.3	鋼材反覆載重歷時 (穩定增加應變幅度).....	190

圖 4.4 鋼材反覆載重試片 A1 應力 - 應變曲線.....	191
圖 4.5 鋼材反覆載重試片 A2 應力 - 應變曲線.....	191
圖 4.6 鋼材反覆載重試片 A3 應力 - 應變曲線.....	192
圖 4.7 鋼材反覆載重試片 B1 應力 - 應變曲線.....	192
圖 4.8 鋼材反覆載重試片 B2 應力 - 應變曲線.....	193
圖 4.9 鋼材反覆載重試片 B3 應力 - 應變曲線.....	193
圖 4.10 有限元素材料模型之建立.....	194
圖 4.11 等向硬化規則.....	195
圖 4.12 等向固化參數示意圖.....	196
圖 4.13 試片 A1 應變等向固化參數迴歸結果.....	196
圖 4.14 試片 B2 應變等向固化參數迴歸結果.....	197
圖 4.15 走動硬化規則.....	198
圖 4.16 走動硬化參數示意圖.....	199
圖 4.17 試片 A2 應變走動硬化參數迴歸結果.....	199
圖 4.18 試片 A3 走動硬化參數迴歸結果.....	200
圖 4.19 試片 B3 走動硬化參數迴歸結果.....	200
圖 4.20 試片 A2 有限元素模擬結果.....	201
圖 4.21 試片 A3 有限元素模擬結果.....	201
圖 4.22 試片 B3 有限元素模擬結果.....	202
圖 4.23 削切蓋板分析模型網格分佈.....	203
圖 4.24 削切蓋板分析模型在反覆載重下力量與位移關係比較.....	204
圖 4.25 削切蓋板分析模型挫屈時應變沿削切蓋板軸向分佈.....	204
圖 4.26 試體 2 結構模型網格分佈.....	205
圖 4.27 無加勁板之試體 2 結構模型網格分佈.....	205
圖 4.28 蓋板梁柱接頭結構模型網格分佈.....	206

圖 4.29 Mander 混凝土應力 - 應變模型.....	206
圖 4.30 混凝土之張力勁度模型.....	207
圖 4.31 模型中混凝土受壓及受拉之應力與應變關係.....	208
圖 4.32 硬性接觸的接觸壓力與間隙關係.....	209
圖 4.33 軟性接觸的接觸壓力與間隙關係.....	209
圖 4.34 試體 2 分析模型彈簧設置情形.....	210
圖 4.35 蓋板梁柱接頭分析模型翼板挫屈模態.....	211
圖 4.36 試體 2 分析模型之遲滯迴圈與實驗值比較.....	212
圖 4.37 試體 2 分析模型不同加載模式對於彎矩 - 位移關係比較.....	212
圖 4.38 試體 2 分析模型與無加勁板試體 2 分析模型比較.....	213
圖 4.39 試體 2 分析模型與蓋板梁柱接頭分析模型之比較.....	214
圖 4.40 各組分析模型軸向應力 S22 分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	215
圖 4.41 分析模型應變沿梁翼板縱向分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度).....	216
圖 4.42 分析模型應變沿削切蓋板縱向分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度).....	217
圖 4.43 分析模型應變沿削切蓋板橫向分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度).....	218
圖 4.44 各組分析模型剪應力 S12 分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度).....	219
圖 4.45 各組分析模型剪應變沿腹板變化.....	220
圖 4.46 各組分析模型梁腹板剪應變在各位移角比較.....	221
圖 4.47 試體 2 分析模型各項參數分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	222
圖 4.48 無加勁板試體 2 分析模型各項參數分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	223
圖 4.49 蓋板梁柱接頭分析模型各項參數分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	224
圖 4.50 分析模型梁翼板各項參數比較圖 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	225
圖 4.51 (削切)蓋板各項參數比較圖 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	226
圖 4.52 削切蓋板參數研究流程圖.....	227
圖 4.53 試體 1 削切蓋板挫屈模態.....	228

圖 4.54	試體 1 削切蓋板於不同的分析模型下之力量與位移關係.....	229
圖 4.55	矩形與圓弧形削切型式之削切蓋板尺寸.....	229
圖 4.56	削切蓋板在不同削切型式下之力量與位移關係.....	230
圖 4.57	圓弧形削切應力分佈情形 ($t_R = 22 \text{ mm}$, $L_R = 410 \text{ mm}$).....	231
圖 4.58	矩形削切應力分佈情形 ($t_R = 22 \text{ mm}$, $L_R = 410 \text{ mm}$).....	232
圖 4.59	圓弧形削切應力等高線分佈情形 ($t_R = 22 \text{ mm}$, $L_R = 410 \text{ mm}$)..	233
圖 4.60	矩形削切應力等高線分佈情形 ($t_R = 22 \text{ mm}$, $L_R = 410 \text{ mm}$)...	234
圖 4.61	圓弧形削切降伏力量隨削切半徑之變化.....	235
圖 4.62	圓弧形削切降伏力量迴歸分析.....	236
圖 4.63	參數研究所採用之削切蓋板尺寸($R = 60^0$).....	237
圖 4.64	參數研究所採用之削切蓋板尺寸($R = 120^0$).....	237
圖 4.65	參數研究所採用之削切蓋板尺寸($R = 180^0$).....	238
圖 4.66	參數 I_c 資料點分佈情形.....	238
圖 4.67	參數 b_R/b 資料點分佈情形.....	239
圖 4.68	參數 $R/360$ 資料點分佈情形.....	239
圖 4.69	細長比 I_c 對削切蓋板 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 之迴歸分析結果.....	240
圖 4.70	寬度效應 b_R/b 對削切蓋板 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 之迴歸分析結果.....	241
圖 4.71	削切半徑效應 $R/360$ 對削切蓋板 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 之迴歸分析結果.....	242
圖 4.72	迴歸公式準確度分析 (Equation 4.36).....	243
圖 4.73	迴歸公式準確度分析 (Equation 4.37).....	243
圖 4.74	迴歸公式準確度分析 (Equation 4.38).....	244
圖 4.75	固定 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 下細長比 I_c 與寬度效應 b_R/b 關係圖.....	244
圖 4.76	各強度比值下削切蓋板力量與位移關係.....	245
圖 4.77	實驗與有限元素分析所得各組試體之挫屈力量比較.....	245

照片目錄

照片 3.1 試體 1 組裝完成.....	246
照片 3.2 試體 1 試驗前全景.....	246
照片 3.3 試體 1 削切蓋板與梁翼板相接之螺栓滑動($\theta = 0.01$ 弧度)....	247
照片 3.4 試體 1 剪力板端部降伏 ($\theta = -0.015$ 弧度).....	247
照片 3.5 試體 1 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.03$ 弧度).....	248
照片 3.6 試體 1 下側削切蓋板降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度).....	248
照片 3.7 試體 1 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	249
照片 3.8 試體 1 螺栓孔附近梁翼板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	249
照片 3.9 試體 1 削切蓋板端部梁翼板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	250
照片 3.10 試體 1 上側削切蓋板挫屈 ($\theta = 0.05$ 弧度).....	250
照片 3.11 試體 1 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.05$ 弧度).....	251
照片 3.12 試體 1 整體變形情形 ($\theta = -0.06$ 弧度).....	251
照片 3.13 試體 1 上下削切蓋板變形情形 ($\theta = -0.06$ 弧度).....	252
照片 3.14 試體 2 試驗前全景.....	252
照片 3.15 試體 2 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.01$ 弧度).....	253
照片 3.16 試體 2 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.015$ 弧度).....	253
照片 3.17 試體 2 下側削切蓋板與梁翼板之空隙($\theta = 0.015$ 弧度).....	254
照片 3.18 試體 2 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.03$ 弧度).....	254
照片 3.19 試體 2 三角形加勁板降伏 ($\theta = 0.03$ 弧度).....	255
照片 3.20 試體 2 上側削切蓋板端部之梁翼板降伏($\theta = 0.03$ 弧度)....	255
照片 3.21 試體 2 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.03$ 弧度).....	256
照片 3.22 試體 2 梁柱交會區鋼管降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度).....	256
照片 3.23 試體 2 剪力板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度).....	257

照片 3.24	試體 2 上側削切蓋板挫屈 ($\theta = 0.05$ 弧度)	257
照片 3.25	試體 2 上側削切蓋板拉斷 ($\theta = -0.05$ 弧度)	258
照片 3.26	試體 2 加勁板焊道些微拉裂 ($\theta = -0.05$ 弧度)	258
照片 3.27	試體 3 試驗前全景	259
照片 3.28	試體 3 下側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.01$ 弧度)	259
照片 3.29	試體 3 梁下翼板內側降伏 ($\theta = 0.015$ 弧度)	260
照片 3.30	試體 3 梁上翼板於削切蓋板端部些微降伏 ($\theta = -0.02$ 弧度)	260
照片 3.31	試體 3 上側削切蓋板挫屈 ($\theta = 0.03$ 弧度)	261
照片 3.32	試體 3 梁腹板轉動 ($\theta = 0.03$ 弧度)	261
照片 3.33	試體 3 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.03$ 弧度)	262
照片 3.34	試體 3 削切蓋板與梁翼板間焊接處降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)	262
照片 3.35	試體 3 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.04$ 弧度)	263
照片 3.36	試體 3 焊道拉裂 ($\theta = -0.04$ 弧度)	263
照片 3.37	試體 3 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.05$ 弧度)	264
照片 3.38	試體 3 下側削切蓋板與梁分離 ($\theta = 0.06$ 弧度)	264
照片 3.39	試體 4 試驗前全景	265
照片 3.40	試體 4 削切蓋板與梁翼板相接之螺栓滑動 ($\theta = -0.01$ 弧度)	265
照片 3.41	試體 4 螺栓孔周圍因螺栓滑動掉漆 ($\theta = 0.015$ 弧度)	266
照片 3.42	試體 4 削切蓋板靠近端部角落降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)	266
照片 3.43	試體 4 削切蓋板端部之梁翼板降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)	267
照片 3.44	試體 4 剪力板下側端部降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)	267
照片 3.45	試體 4 剪力板上側端部降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)	268
照片 3.46	試體 4 梁下翼板螺栓孔周圍降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)	268
照片 3.47	試體 4 連接 T 型加勁板之前排螺栓傾斜 ($\theta = 0.05$ 弧度)	269
照片 3.48	試體 4 梁翼板降伏 ($\theta = -0.05$ 弧度)	269

照片 3.49	試體 4 上側削切蓋板端部之梁翼板降伏 ($\theta = 0.06$ 弧度).....	270
照片 3.50	試體 4 下側削切蓋板端部之梁翼板降伏 ($\theta = 0.06$ 弧度).....	270
照片 3.51	試體 4 上側螺栓彈出 ($\theta = -0.06$ 弧度).....	271
照片 3.52	試體 4 梁翼版內側及腹板降伏 ($\theta = -0.06$ 弧度).....	271
照片 3.53	試體 4 試驗後全景 ($\theta = 0.07$ 弧度).....	272
照片 3.54	試體 4 下側螺栓彈出 ($\theta = 0.07$ 弧度).....	272
照片 3.55	試體 4 上側削切蓋板挫屈 ($\theta = 0.07$ 弧度).....	273
照片 3.56	試體 4 剪斷之螺栓與完好之螺栓比較 ($\theta = 0.07$ 弧度).....	273
照片 4.1	鋼材反覆載重試驗設置.....	274
照片 4.2	試片 A1 試驗後挫屈情形.....	275



第一章 緒論

1.1 前言

在地狹人稠的都會區，鋼骨結構已被廣泛應用於高層建築。由於鋼骨結構的許多優點，如結構總重量輕、營建工期短，施工上對環境的影響較小等因素，皆使其成為高層結構系統之最佳選擇。而傳統的鋼骨抗彎構架系統中均採用梁翼板與柱焊接，梁腹板與柱之剪力板螺栓接合之設計，期望梁端能在地震力作用下產生塑鉸，利用鋼材之塑性變形吸收地震輸入構架之能量。

然而在 1994 年美國加州洛杉磯北嶺地震及 1995 年日本神戶地震發生後，發現許多傳統鋼骨梁柱接頭破壞(Youssef et al. 1995, kuwamura 1996)，其中大部份的破壞起始於梁下翼板之背墊板與柱翼板接合處產生裂縫，進而造成整個焊道的斷裂，使得接頭無法發揮塑性變形來消釋地震能量。主要的破壞原因，包含在梁柱接頭使用(1)低韌性的焊條，(2)梁下翼板背墊板與柱翼板間的縫隙及(3)鋼材的降伏強度大於設計值。

為了改善鋼骨梁柱接頭在地震下的行為，大部份的研究成果顯示除了使用高韌性的焊條及將梁下翼板的背墊板移除並修補焊道外，使梁的塑性變形在遠離柱面處產生是有效的改良方法，其中主要分為減弱式接頭與補強式接頭，減弱式接頭(Plumier 1990, Chen et al. 1996, Engelhardt et al. 2000, Chou and Uang 2002)為在梁適當位置將梁翼板削切以減弱梁之彎矩強度，而補強式接頭(Thurston et al. 1982, Uang et al. 1996, Engelhardt et al. 1997, Whittaker et al. 2002, Schneider and Teeraparbwong 2002)補強方式則有在梁翼板上加焊蓋板、肋板、托肩、側板等以增加梁端近柱的彎矩強度，此二種類型接頭均可符合強震下強度與韌性的需求，亦經 FEMA 350 (2000)建議使用在高震區的抗彎鋼骨構架系統中。

但若考量地震後結構修復的問題，上述兩種接頭都必須將挫屈破壞的鋼梁更換，增加結構修復的成本，因此若能發展出一種鋼骨梁柱接頭，既有良好的強度與韌性行為外，鋼梁還能在地震後仍保持在彈性範圍而未破壞，就能減低地震後結構修復的成本，增加結構的使用性。本研究提出的削切蓋板梁柱接頭即為達成上述之目的而發展。

1.2 文獻回顧

蓋板梁柱接頭

1. M. D. Engelhardt 和 T. A. Sabol (1997)

Engelhardt 和 Sabol (1997) 共製作 12 組焊接式蓋板梁柱接頭試體，接頭設計為上側蓋板與梁上翼板接合，蓋板形狀為了使梁翼板力量能穩定傳遞至蓋板並減少蓋板端部的應力集中而採用梯形，下側蓋板與梁下翼板接合，為了焊接施工的方便，下側蓋板形狀為矩形。假設接頭的塑鉸發生在蓋板端部的梁，並以此處的梁達 $1.2 M_p$ (其中 M_p 為梁的實際塑性彎矩強度) 時投影至柱面的彎矩強度來做設計，蓋板斷面積的選定為使近柱之蓋板在最大彎矩強度發生時還保持在彈性範圍，其中 9 組試體柱之剪力板與梁腹板採用螺栓配合填角焊設計，另外 3 組則採全滲透焊接合。

實驗結果顯示其中 2 組試體在較低的塑性變形時就已發生脆性破壞，另外 10 組試體則有良好的表現，可發揮較高的塑性轉角。實驗顯示成功的試體在塑性轉角達 $0.01\sim 0.015$ 弧度時，蓋板端部的梁翼板與腹板有局部挫屈現象，並隨著塑性轉角的增加而更明顯，梁的局部挫屈會造成試體的強度下降，且會撕裂蓋板與梁翼板間之焊道。

Engelhardt 和 Sabol (1997) 的研究結果可歸納如下：(1) 蓋板梁柱接頭有良好的韌性行為，在反覆載重歷時下，能發揮較高的塑性轉角，且在所

有的補強式接頭中補強費用最少。(2) 由試驗結果可知，蓋板梁柱接頭的蓋板長度不能過長，太長的蓋板長度設計會造成由蓋板端部投影至柱面之彎矩強度太大，對於短跨度的梁而言是不利的。(3) 蓋板梁柱接頭的蓋板厚度太厚會造成蓋板與柱面接合需使用較多的全滲透焊，且較厚的蓋板易使柱面處之蓋板產生脆性破壞。

2. A. S. Whittaker 和 T. Kim (2002)

Whittaker 和 Kim (2002) 共製作了 10 組焊接式蓋板梁柱接頭試體，其中 5 組試體之梁翼板、蓋板與柱採全滲透焊接合，另外 5 組試體蓋板與柱採全滲透焊接合，而梁翼板與柱之間並無任何接合。所有的試體的梁尺寸為 W30x99，柱為 W14x176，梁柱都採用 A572 Gr. 50 的鋼材，蓋板長度皆為 380 mm，其中 8 組試體之上下側蓋板形狀皆為矩形(蓋板寬度大於梁翼板寬度)設計，另外 2 組則為梯形(蓋板最大寬度等於梁翼板寬度)與燕尾形設計，試體設計為假設試體塑鉸產生於蓋板端部四分之一梁深處，當此處發揮至 $1.1 M_p$ (其中 M_p 為梁的實際塑性彎矩強度) 時，投影至柱面的彎矩強度來設計蓋板尺寸，使近柱的蓋板在試體達最大彎矩強度時仍保持彈性。實驗結果顯示 10 組試體都有良好的韌性行為，試體的主要破壞發生在蓋板端部之梁，破壞型式為梁翼板與腹板的局部挫屈，各試體之柱及蓋板上都沒有觀察到顯著的破壞。

Whittaker 和 Kim (2002) 的研究成果可歸納如下：(1) 試體之梁翼板與柱之間有無接合對試體整體強度無顯著影響，兩種試體設計在反覆載重下均能發揮良好的韌性行為。(2) 對於蓋板形狀而言，採用矩形設計較採梯形設計能發揮較佳的表現，原因為採矩形設計，蓋板寬度較寬，所以在同樣的彎矩強度設計下，矩形蓋板的厚度較薄，所需的填角焊也較少。(3) 蓋板與梁翼板焊接接合最好採用兩側軸向與蓋板端部橫向焊接，原因為橫向

焊接能避免梁翼板局部挫屈直接拉裂蓋板兩側之軸向焊接焊道。(4)在位移角超過 0.03 弧度後，試體強度會因梁翼板與腹板的局部挫屈而迅速的下降。

削切蓋板梁柱接頭

1. S. P. Schneider 和 I. Teerapabwong (2002)

目前國內外對於此種削切蓋板梁柱接頭耐震行為研究非常有限，只有 Schneider 和 Teerapabwong (2002) 部份的研究成果可供參考，Schneider 和 Teerapabwong 從事的研究主要為探討螺栓型蓋板梁柱接頭的破壞模式，所謂的螺栓型蓋板梁柱接頭為在梁翼板上下側各焊一塊蓋板來增加梁端近柱的彎矩強度，而蓋板與梁翼板則採螺栓接合，研究計畫包含 8 組試體測試，共有三種破壞模式，分別為蓋板與梁翼板接合螺栓的拉力破壞，蓋板端部之梁的挫屈破壞、蓋板的韌性破壞，其中試體 BFP 08(如圖 1.1 所示)的預期破壞模式為蓋板的韌性破壞，其接頭的梁尺寸為 W24×68，柱為 W14×120，梁柱都採用 A572 Gr. 50 的鋼材，而蓋板使用 A36 之鋼材，厚度為 25.4 mm，試體 BFP 08 設計目的為將塑鉸移至蓋板上，並能發揮柱面彎矩強度達 $1.0 M_p$ (其中 M_p 為梁的實際塑性彎矩強度)，故在蓋板近柱面處進行削切，以減弱其強度，削切形狀為等寬度矩形削切，削切後寬度約為原本蓋板寬度的一半，削切長度根據在位移角 0.05 弧度時蓋板應變達 10% 來做設計，此梁柱接頭設計與傳統的蓋板梁柱接頭不同，利用削切蓋板來控制接頭的破壞模式與韌性行為。表 1.1 為此試體在削切蓋板降伏及極限強度到達時梁之柱面、削切中心及削切蓋板端部彎矩強度，可發現以削切蓋板降伏強度設計時，柱面處的彎矩強度為 $1.0 M_p$ ，而若考慮削切蓋板之應變硬化行為，當削切蓋板達極限強度時，試體柱面之彎矩強度為 $1.3 M_p$ ，而試體 BFP08 則是以削切蓋板達降伏強度時柱面彎矩強度為 $1.0 M_p$ 做設計。

試體 BFP 08 在第一次試驗在全部反覆載重歷時結束後，發現試體強度

沒有下降的趨勢，但試體部份區域已塑性變形，故在試驗後移除柱的殘留變形並加置一塊厚度為 12.7 mm 的疊合板於梁柱交會區來加強此處的強度，控制再次試驗時，接頭的塑性變形能在梁或削切蓋板上產生，試體由位移角 0.01 弧度開始重新試驗一次，在反覆載重加載至位移角 0.06 弧度時發現梁翼板與腹板有局部挫屈情形，為梁的側向扭轉挫屈所致，梁持續扭轉挫屈至上側削切蓋板突然斷裂而停止試驗，實驗結果與設計預期的破壞模式不同。

試體 BFP 08 的試驗結果可歸納如下：(1) 侷限塑鉸於削切蓋板上產生有其困難度，由實驗結果可知削切蓋板上的非彈性行為非常複雜，其中包含了削切處的降伏與螺栓孔周圍之承壓降伏，且當削切蓋板之變形至應變硬化階段時，板的強度會再次提升，造成塑性鉸不易在削切蓋板上產生，使得接頭於梁發展另外的塑鉸機制，一但塑性鉸於梁產生，則梁翼板與腹板會有局部挫屈的情形。(2) 試體 BFP 08 試驗結果證明了削切蓋板的應變硬化行為確實會影響到接頭整體的彎矩與位移關係，若要侷限塑性鉸於削切蓋板上產生，則削切的斷面尺寸必須以鋼材的極限強度做設計。

1.3 研究動機

根據上述 Schneider 和 Teeraparbong (2002) 有關削切蓋板梁柱接頭所做的研究可知，其接頭設計尚無法確實地將接頭的塑鉸機制侷限於削切蓋板上，故有其改善的空間，因此本研究擷取其接頭設計的概念，並參考其試驗結果之建議，研擬透過將原本削切蓋板之削切形狀改良為圓弧型的漸變斷面，使得削切蓋板上的應力易於集中於削切處，並以材料之極限強度來設計削切最窄處之斷面，如此就能確實地將接頭主要的塑性變形集中於削切蓋板上，而形成塑鉸機制。

1.4 研究目的

本研究重點著重於此種削切蓋板梁柱接頭的塑鉸位置、彈性勁度、強度、韌性行為及能量消釋能力，並藉由削切蓋板與柱、梁翼板間之各種接合設計(如圖 1.2 所示)，來探討其差異性，研究的目的如下所述：

1. 研究削切蓋板梁柱接頭之彈性勁度，並與 FEMA 350 (2000)中建議之蓋板梁柱接頭之彈性勁度做比較，期望能滿足剛性接頭(Rigid Connection)之彈性勁度要求。
2. 比較削切蓋板梁柱接頭在不同的削切蓋板形狀與尺寸下，強度與韌性行為的差異，並依此來修正原本的接頭設計細節。
3. 依據試驗結果，研究削切蓋板梁柱接頭的能量消釋能力及削切蓋板行為。
4. 依據試驗結果，在非線性有限元素軟體 ABAQUS 中建立此種削切蓋板梁柱接頭的分析模型，以探討此種接頭與 FEMA 350 (2000)中建議之蓋板梁柱接頭之力學行為差異，並與實驗結果比較。
5. 針對削切蓋板進行有限元素分析之參數研究，藉由改變其幾何形狀與厚度來探討對受壓強度的影響。

1.5 研究內容

本研究內容共分五個章節，除本章外，第二章為介紹削切蓋板梁柱接頭的設計細節，並規劃試驗的安排。第三章為試體試驗與結果分析，介紹試體製作、組裝過程及試驗現象觀察，分析接頭試驗的結果。第四章為有限元素分析，以有限元素軟體 ABAQUS (2003)分析比較 FEMA 350 (2000)中建議之蓋板梁柱接頭與削切蓋板梁柱接頭力學行為的差異，並針對單一的削切蓋板做參數研究。第五章為結論與建議。

第二章 削切蓋板梁柱接頭試體設計

2.1 前言

本章介紹蓋板梁柱接頭的設計觀念並依據 FEMA 350 (2000)所建議的設計方法決定一組蓋板梁柱接頭的蓋板尺寸，並將此蓋板梁柱接頭加以改良，利用在蓋板上進行削切，減弱蓋板強度與勁度，使所有的破壞及能量消釋皆發生在此蓋板而避免梁之挫屈。2.2 節為試體強柱弱梁檢核，2.3 節為蓋板梁柱接頭之設計，2.4 節為削切蓋板梁柱接頭之設計，2.5 節介紹試體的材料強度，2.6 節介紹試體試驗構架及載重歷時，2.7 節介紹試體量測規劃。

2.2 強柱弱梁

本研究試體的梁與柱為三層樓鋼管混凝土柱斜撐構架系統(Tsai et al. 2003)的鋼梁(W450×200×9×14)及鋼管混凝土柱(W350×350×9)，並依據 AISC 耐震設計規範第 9.6 節(2002)，檢核強柱弱梁：

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} \geq 1.0 \quad (2.1)$$

其中 $\sum M_{pc}^*$ 為連接於梁柱接頭處柱在接頭交接面之標稱彎矩強度總合，計算如下所示：

$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c (F_{my} - P_{uc} / A_g) \quad (2.2)$$

$$F_{my} = F_{cy} + 0.7F_{ry} \frac{A_r}{A_s} + 0.6f'_c \frac{A_c}{A_s} \quad (2.3)$$

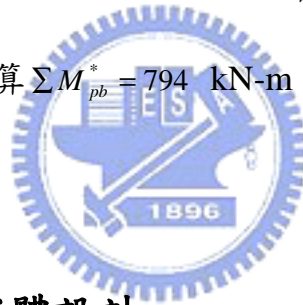
其中 $Z_c (= 1.57 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$ 為鋼管之塑性模數， $A_g (= 0.1225 \text{ m}^2)$ 為鋼管混凝土柱之全斷面積， $A_c (= 0.1102 \text{ m}^2)$ 為混凝土斷面積， $A_r (= 0)$ 為柱主筋之斷面

積， $A_s (=0.0123 \text{ m}^2)$ 為鋼管之斷面積， F_{my} 為鋼管混凝土柱之修正降伏強度 (AISC 1993)， $F_{cy} (= 345 \text{ MPa})$ 為鋼管之標稱降伏強度， F_{ry} 為柱主筋之標稱降伏強度， $f'_c (= 28 \text{ MPa})$ 為混凝土之抗壓強度， $P_{uc} (= 981 \text{ kN})$ 為柱所受的軸向載重，約等於 0.32 倍 $f'_c A_c$ 。經計算 $F_{my} = 493 \text{ MPa}$ ，則 ΣM_{pc}^* 可計算出來，其值為 1523 kN-m。

ΣM_{pb}^* 為連接於梁柱接頭處梁在接頭交接面之彎矩強度總合，其計算如下：

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma(1.1R_y F_{yb} Z_b + M_v) \quad (2.4)$$

其中 $R_y (= 1.1)$ 為考慮材料變異性之參數， $F_{yb} (= 345 \text{ MPa})$ 為梁之標稱降伏強度， $Z_b (= 1.62 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$ 為梁之塑性模數， M_v 為梁位於塑鉸之剪力貢獻至柱中心之彎矩強度，經計算 $\Sigma M_{pb}^* = 794 \text{ kN-m}$ ，則 $\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} = 1.9 \geq 1.0$ ，滿足規範規定之強柱弱梁。



2.3 蓋板梁柱接頭試體設計

從 1994 年北嶺地震之後，有許多研究及試驗在進行，其目的都在尋找更佳的鋼結構梁柱接頭，除了修復或提升原本存在的鋼骨抗彎構架強度外，許多研究 (Engelhardt et al. 1997, Whittaker et al. 2002, Schneider and Teeraparbong 2002, Uang et al. 1996, Thurston et al. 1982) 為加強靠近柱面的鋼梁強度並讓塑鉸遠離柱面發生，而蓋板梁柱接頭 (Engelhardt et al. 1997, Whittaker et al. 2002, Schneider and Teeraparbong 2002) 為許多改良式梁柱接頭設計之一。其接頭的力學行為為藉由蓋板與鋼梁的結合以提高梁近柱面彎矩強度，塑鉸於蓋板端部外四分之一梁深處形成，此處的梁會進入非彈性變形，進行能量消釋。

依據 FEMA 350 (2000)第 3.5.4 節所建議的設計方法決定蓋板梁柱接頭尺寸，設計細節如下：

1. 根據梁與柱的尺寸決定蓋板長度 $l_p = 350$ mm 及寬度 $b_p = 350$ mm(如圖 2.1 所示)，假設接頭塑鉸區域發生在離蓋板端部 $1/4d_b$ ，計算此處極限彎矩強度 M_{pr} ：

$$M_{pr} = C_{pr} R_y Z_b F_{yb} = 738 \text{ kN-m} \quad (2.5)$$

其中 C_{pr} ($=1.2$) 為超強因子， R_y ($=1.1$) 為考慮材料變異性之參數， Z_b 為梁位於塑鉸處之塑性模數， F_{yb} 為梁的標稱降伏強度。

2. 將此彎矩強度投影至柱面，則柱面彎矩 M_f ：

$$M_f = M_{pr} \left(\frac{L_b}{L_b - s_h} \right) = 882 \text{ kN-m} \quad (2.6)$$

其中 L_b 為油壓制動器中心至柱面距離， s_h 為塑鉸至柱面距離。

3. 假設柱邊的彎矩由上下兩片蓋板傳遞，為確保蓋板保持彈性，經由下式可計算蓋板厚度 t_p ：

$$F_{yp} b_p t_p (d_b + t_p) \geq M_f \quad (2.7)$$

其中 F_{yp} 為蓋板標稱降伏強度， b_p 為柱面處蓋板寬度(不含柱外橫隔板部份)，經計算蓋板厚度 $t_p = 16$ mm 可滿足上式。

4. 蓋板與梁翼板採填角焊接合，焊接計算如下：

$$2l_{w1}a_{w1} + l_{w2}a_{w2} \geq \frac{M_f}{0.707 F_w (d_b + t_p)} \quad (2.8)$$

其中 l_{w1} 為沿梁翼板縱向之焊接長度， a_{w1} 為沿梁翼板縱向之焊接深度， l_{w2} 為蓋板端部橫向之焊接長度， a_{w2} 為蓋板端部橫向之焊接深度， F_w 為焊材標稱強度。若兩處的焊接皆採用最大焊深 $a_{w1} = 12$ mm、 $a_{w2} = 14$

mm，而蓋板端部橫向之焊接長度 l_{w2} 取最大的焊接長度 200 mm(梁翼板寬度)，則其沿梁翼板縱軸方向之焊接長度 $l_{w1} = 300$ mm 可被計算出來，圖 2.2 為此蓋板梁柱接頭尺寸。

此接合細節能確保梁塑鉸區域產生在蓋板端部附近之梁處，避免梁柱接合處發生破壞，但是梁會歷經大的塑性變形發生挫屈 (Engelhardt et al. 1997, Schneider et al. 2002, Whittaker et al. 2002)。

2.4 削切蓋板梁柱接頭試體設計

為了避免梁在大變形下產生挫屈，本研究將蓋板進行削切，削減蓋板強度與勁度，迫使所有的能量消釋皆發生在此削切蓋板而非梁上，減少地震後修復的成本，依此目的本研究試體設計細節如下所述。

2.4.1 削切蓋板尺寸

削切蓋板之設計參考 FEMA 350 (2000)建議之蓋板梁柱接頭設計步驟，但為了使能量的消釋皆發生於削切蓋板上，而使鋼梁保持彈性，強度設計的觀念被應用於決定削切蓋板尺寸，由於在蓋板中央部位進行削切，使蓋板彎矩強度小於梁之降伏彎矩強度，而迫使塑鉸於蓋板削切處產生，如圖 2.3 所示，削切蓋板所能發揮之極限彎矩強度 M_{RFP} 可由下式計算：

$$M_{RFP} = F_u b_R t_R (d_b + t_R) \quad (2.9)$$

其中 F_u 為削切蓋板標稱極限強度，對 A36 及 A572 Gr. 50 而言， F_u 各採用 400 MPa 及 450 MPa (ASTM 1984)， b_R 為削切蓋板最窄處寬度， t_R 為削切蓋板厚度。若假設梁位於削切蓋板內部之剪力全由削切蓋板承受，則削切蓋板於柱面的彎矩強度 M_{RFP} 為：

$$M_{RFPF} = M_{RFP} \cdot \frac{L_b}{L_b - s_h} = F_u b_R t_R (d_b + t_R) \frac{L_b}{L_b - s_h} \quad (2.10)$$

其中 s_h 為塑鉸(削切蓋板最窄處)至柱面距離。

當削切蓋板端部之梁翼板開始降伏時，柱面彎矩強度 M_{yf} 為：

$$M_{yf} = M_{yb} \frac{L_b}{L_b - \left(L_R + \frac{d_b}{4}\right)} = S_b F_{yb} \frac{L_b}{L_b - \left(L_R + \frac{d_b}{4}\right)} = 665 \text{ kN-m} \quad (2.11)$$

其中 S_b 為梁之斷面模數， F_{yb} 為梁之標稱降伏強度， M_{yb} 為梁之標稱降伏彎矩， L_R 為削切蓋板長度， d_b 為梁深。確保彎矩強度需求 M_{yf} 大於削切處所提供的柱面彎矩強度 M_{RFPF} 時，則表示當削切蓋板削切處已達極限強度時，位於削切蓋板端部之梁翼板還保持在彈性範圍內。

四組試體削切蓋板最窄處寬度 b_R 都固定為 120 mm，且試體 1 與試體 2 削切蓋板採用 A572 Gr. 50 的鋼材，並限制所能發揮之柱面彎矩強度 M_{RFPF} 在 0.9~1.0 倍 M_{yf} 之間，經計算削切蓋板厚度為 22 mm；同樣地假設試體 3 削切蓋板所能發揮的柱面彎矩強度 M_{RFPF} 在 0.9~1.0 倍 M_{yf} 之間，但削切蓋板材質採用 A36 的鋼材，經計算其削切蓋板厚度為 25 mm；試體 4 之削切蓋板採用 A572 Gr. 50 的鋼材，並限制所能發揮之柱面彎矩強度 M_{RFPF} 在 0.8~0.9 倍 M_{yf} 之間，則削切蓋板厚度為 20 mm。四組試體設計之 M_{RFP} 、 M_{RFPF} 、 M_{RFPF}/M_{np} 及 M_{RFPF}/M_{yf} 列於表 2.1。

削切形狀如圖 2.4(a)所示，並同時參考表 2.2 各組 RFP 尺寸，本研究所採用的蓋板削切尺寸與 FEMA 350 (2000)中建議之削切梁(RBS)接頭不同，其差異列於表 2.3，圖 2.4(b)為削切梁梁柱接頭示意圖。

2.4.2 削切蓋板與鋼梁接合細節

試體 1

圖 2.5 為試體 1 接頭區之立面圖及平面圖，試體 1 的削切蓋板與梁翼板採用高強度螺栓接合，並依據 LRFD(2001) 以承壓型螺栓強度設計接合處所需要的螺栓數量，假設削切蓋板上所能傳遞的力由削切蓋板最窄處的截面積來決定：

$$P_{RFP} = F_u b_R t_R = 1180 \text{ kN} \quad (2.12)$$

若採用 A490 直徑為 25 mm 的螺栓，則螺栓承壓強度 fR_n 由螺栓的剪力強度與蓋板承壓強度中之小值決定：

$$fR_n = f F_{vbolt} A_b = 197 \text{ kN} \quad \text{剪力強度} \quad (2.13)$$

$$fR_n = f (2.4 d_{bolt} t_{fb} F_u) = 446 \text{ kN} \quad \text{承壓強度} \quad (2.14)$$

其中 $f (= 0.75)$ 為折減係數， F_{vbolt} 為螺栓的極限剪力強度， A_b 為螺栓斷面積， d_{bolt} 為螺栓直徑， t_{fb} 為鋼梁翼板厚度， F_u 為鋼材 (A572 Gr. 50) 之極限強度。則一顆 A490 直徑 25 mm 螺栓若採用承壓設計其強度為 197 kN，共計需採用 6 顆螺栓，可提供 1182 kN 的螺栓強度，此六顆螺栓均鎖至規範規定之最小拉力，一顆螺栓滑動的強度為 106 kN (LRFD 2001)，則六顆螺栓滑動的強度預估為 636 kN。

依據 FEMA 350 (2000) 第 3.6.3 節，蓋板與梁翼板接合採螺栓設計時，需檢核螺栓的剪力破壞、淨斷面剪力撕裂破壞、淨斷面張力斷裂破壞，及塊狀撕裂破壞，檢核計算式為：

$$M_{fail} > M_{RFPF} \quad (2.15)$$

其中 M_{fail} 為當破壞開始產生時，柱面之彎矩強度，各種破壞模式之檢核如

下：

1. 螺栓剪力破壞檢核

$$M_{fail} = N(f F_{vbolt} A_b) d_b L_{TF1} = 644 \text{ kN-m} \quad (2.16)$$

$$L_{TF1} = \frac{L_b}{L_b - (S_1 + S_2 + S_3/2)} = 1.21 \quad (2.17)$$

其中 N 為螺栓數量， $f(=0.75)$ 為折減係數， L_{TF1} 為螺栓群中心投影至柱面彎矩梯度之比例， S_1 、 S_2 及 S_3 如圖 2.6 所示。經計算其螺栓達剪力破壞時，柱面彎矩強度 $M_{fail} = 644 \text{ kN-m}$ ，大於試體 1 削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度 $M_{RFPF} = 620 \text{ kN-m}$ ，滿足(2.15)式破壞檢核要求。

2. 削切蓋板螺栓接合淨斷面張力斷裂破壞檢核

$$M_{fail} = f F_u (b_R - 2(d_{bolt} + 1.6)) t_R (d_b + t_R) L_{TF2} = 864 \text{ kN-m} \quad (2.18)$$

$$L_{TF2} = \frac{L_b}{L_b - (S_1 + S_2)} = 1.17 \quad (2.19)$$

其中 $f(=0.85)$ 為折減係數， F_u 為削切蓋板之極限強度， b_R 為接合處削切蓋板寬度， d_{bolt} 為螺栓直徑， L_{TF2} 為靠近柱面之螺栓孔中心投影至柱面彎矩梯度比例。經計算削切蓋板達淨斷面張力斷裂破壞時，柱面彎矩強度 $M_{fail} = 864 \text{ kN-m}$ ，大於試體 1 削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度 $M_{RFPF} = 620 \text{ kN-m}$ ，滿足式(2.15)破壞檢核要求。

3. 削切蓋板螺栓接合塊狀撕裂破壞

$$M_{fail} = f R_n (d_b + t_R) L_{TF1} \quad (2.20)$$

塊狀撕裂強度為剪力撕裂強度及與其垂直面上張力斷裂強度之結合，設計強度 fR_n 為

(i)當張力斷裂強度 $F_u A_{nt}$ 大於剪力撕裂強度 $0.6F_u A_{nv}$ 時：

$$fR_n = f(0.6F_y A_{gv} + F_u A_{nt}) \quad (2.21)$$

(ii)當張力斷裂強度 $F_u A_{nt}$ 小於剪力撕裂強度 $0.6F_u A_{nv}$ 時：

$$fR_n = f(0.6F_u A_{nv} + F_y A_{gt}) \quad (2.22)$$

其中 $f(=0.75)$ 為折減係數， F_y 為削切蓋板降伏強度， A_{gv} 為剪力全斷面積， A_{gt} 為張力全斷面積， A_{nv} 為剪力淨斷面積， A_{nt} 為張力淨斷面積，經計算其設計強度 $fR_n = 1612$ kN，則削切蓋板達塊狀撕裂破壞時，柱邊彎矩 $M_{fail} = 921$ kN-m，大於試體 1 削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度 $M_{RFPF} = 632$ kN-m，滿足(2.15)式破壞檢核要求。

4. 梁翼板淨斷面張力斷裂破壞檢核

$$M_{fail} = F_{ub} (Z_b - 2(d_{bolt} + 1.6)t_{fb} (d_b - t_{fb})) L_{TF3} = 695 \text{ kN-m} \quad (2.23)$$

$$L_{TF3} = \frac{L_b}{L_b - (S_1 + S_2 + S_3)} = 1.25 \quad (2.24)$$

其中 F_{ub} 為梁翼板之極限強度， Z_b 為梁塑性模數， t_{fb} 為梁翼板厚度， L_{TF3} 為離柱面最遠螺栓孔之中心投影至柱面彎矩梯度比例。經計算梁翼板達淨斷面張力斷裂破壞時，柱面彎矩強度 $M_{fail} = 695$ kN-m，大於試體 1 削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度 $M_{RFPF} = 620$ kN-m，滿足(2.15)式破壞檢核要求。

5. 削切蓋板剪力撕裂破壞檢核

$$M_{fail} = T_n (d_b + t_R) L_{TF1} = 2714 \text{ kN-m} \quad (2.25)$$

$$T_n = 2.4F_u (S_3 + S_4) t_R = 4752 \text{ kN} \quad (2.26)$$

T_n 為削切蓋板承壓強度， S_4 如圖 2.6 所示，經計算當削切蓋板達淨斷面剪力斷裂破壞，柱面彎矩強度 $M_{fail} = 2714$ kN-m，大於試體一削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度 $M_{RFPF} = 620$ kN-m，滿足(2.15)式破壞檢核要求。

試體 2

試體 1 與試體 2 採用相同尺寸與材質的削切蓋板，但試體 2 (如圖 2.7 所示)削切蓋板則是以螺栓摩阻型強度配合梁翼板的填角焊設計接合細節，其目的為防止螺栓滑動，藉此與試體 1 比較兩者的差異。根據 LRFD(2001)規定，以摩阻型接合設計之高強度螺栓可與焊接共同分擔載重，為須先鎖緊高強度螺栓後在進行焊接，若先焊接則焊接熱量將使鋼板產生扭曲變形而影響摩阻面之密接作用，致影響其摩阻強度，一顆 A490 直徑 25 mm 摩阻型螺栓強度 fR_n 為 106 kN (LRFD 2001)，六顆摩阻型螺栓可提供 636 kN 的螺栓強度，則焊接所要分擔的載重為削切蓋板傳遞的力扣掉摩阻型螺栓的螺栓強度，因此焊接強度 fR_w 為：

$$fR_w = f F_w (0.707a) \cdot L_w = P_{RFP} - NfR_n \quad (2.27)$$

其中 $f (= 0.75)$ 為折減係數， F_w 為焊材的標稱強度， a 為焊接深度， L_w 為焊接長度。只焊接梁翼板與削切蓋板縱向部份，兩側各焊接 200 mm，蓋板端部與梁翼板處不進行焊接，焊接深度經計算須大於 10 mm，最後焊接深度採用容許的最大焊深 12 mm，焊接強度為 737 kN，最後削切蓋板與梁之接合強度為 1373 kN，大於削切蓋板所要傳遞的力(1180 kN)。柱面之彎矩強度 M_{fail} 為：

$$M_{fail} = (NfR_n + fR_w)(d_b + t_{RFP})L_{TF1} = 784 \text{ kN-m} \quad (2.28)$$

其中 fR_n 為摩阻型螺栓強度， fR_w 為焊接強度， L_{TF1} 為螺栓群中心至柱面彎矩

梯度比例。柱面接合細節的彎矩強度 $M_{fail} = 784$ kN-m，大於試體 1 削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度 $M_{RFPF} = 620$ kN-m，滿足(2.15)式破壞檢核要求。此外，試體 2 於削切蓋板與柱面相接處設置 2 片 12 mm 的加勁板以縮短削切蓋板的挫屈長度。

試體 3

試體 3 之設計細節如圖 2.8 所示，削切蓋板全部以填角焊接於梁翼板，焊接位置為削切蓋板與梁翼板縱向部份及削切蓋板端部，削切蓋板軸力強度 P_{RFP} 為 1200 kN(見表 2.2)，接合處之焊接強度為：

$$fR_w = fR_{w1} + fR_{w2} = f(0.707F_w)(a_{w1}l_{w1} + a_{w2}l_{w2}) = 1364 \text{ kN} \quad (2.29)$$

其中 $f(=0.75)$ 為折減係數， a_{w1} 為削切蓋板沿梁翼板縱向部份之焊接深度， a_{w2} 為削切蓋板端部之焊接深度， l_{w1} 為削切蓋板沿梁翼板縱向部份之焊接長度， l_{w2} 為削切蓋板端部之焊接長度。若在削切蓋板與梁翼板縱向部份採用最大的焊深 12 mm，焊接長度為 220 mm，而位於削切蓋板端部與梁翼板處採用 18 mm 的焊接深度及焊接長度 200 mm，經計算削切蓋板與梁的接合強度為 1364 kN，大於削切蓋板軸力強度 (1200 kN)。其接合細節的柱面彎矩強度 M_{fail} 為：

$$M_{fail} = fR_{w1}(d_b + t_R)L_{TF4} + fR_{w2}(d_b + t_R)L_{TF5} = 803 \text{ kN-m} \quad (2.30)$$

其中 $L_{TF4}(=1.23)$ 為削切蓋板與梁翼板縱向部份焊接中心至柱面彎矩梯度比例， $L_{TF5}(=1.32)$ 為削切蓋板端部焊接至柱面彎矩梯度比例。此彎矩強度大於試體 3 削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度 $M_{RFPF} = 627$ kN-m，滿足式(2.15)破壞檢核要求。

試體 4

試體 4(如圖 2.9 所示)削切蓋板與梁翼板之接合採用與試體 1 同樣的接合細節，但在削切蓋板上方加裝一 T 型加勁板，以防止削切蓋板受壓挫屈。設計如下：

1. 削切蓋板挫屈時假設削切最窄處對加勁板作用一垂直力 P_{stiff} ：

$$P_{stiff} = 0.05 P_{RFP} = 0.05 \times 1080 = 54 \text{ kN} \quad (2.31)$$

為了防止削切蓋板挫屈，限制削切蓋板最窄處往加勁板方向之位移 d_{stiff} 小於 1 mm，則加勁板之抗彎勁度 k_{stiff} 就可決定：

$$k_{stiff} = \frac{P_{stiff}}{d_{stiff}} \geq 54 \text{ kN/mm} \quad (2.32)$$

加勁板兩側與削切蓋板間以螺栓接合，故加勁板可視為一中間受集中載重之簡支梁，則其抗彎勁度為：

$$k_{stiff} = \frac{48E_{stiff} I_{stiff}}{L_{stiff}^3} \geq 54 \text{ kN/mm} \quad (2.33)$$

其中 E_{stiff} 為加勁板彈性模數， I_{stiff} 為加勁板之慣性矩， L_{stiff} 為加勁板兩端螺栓之距離，本研究所使用之加勁板尺寸如圖 2.9(c)所示，慣性矩為 I_{stiff} 為 $4.61 \times 10^{-7} \text{ m}^4$ ，其抗彎勁度 k_{stiff} 為 69 kN/mm，滿足式 2.33 要求，可控制削切蓋板往加勁板方向位移小於 1 mm。

2. T 型加勁板與削切蓋板間採螺栓接合，靠近柱面處之螺栓採用 A490 直徑 14 mm 的高強度螺栓，並在加勁板與削切蓋板上開長槽孔以利螺栓滑動，如此能避免削切蓋板上之力量傳至加勁板，加勁板另一側採用 A490 直徑 25 mm 的高強度螺栓與削切蓋板及梁翼板接合，其開孔為標準孔徑。

2.4.3 削切蓋板與鋼管混凝土柱接合設計

鋼骨梁柱接頭為了將梁翼板的力量傳遞至柱，通常在柱內焊一橫隔板，而鋼管混凝土柱則因需在柱內灌注混凝土而於柱外加一橫隔板(本研究稱為蓋板)以傳遞力量(林克強 2000)。試體 1 及 2 採用將削切蓋板在柱面處擴大寬度，使整個削切蓋板包圍於柱的四周，如此削切蓋板便可將梁翼板的力量透過柱兩側的蓋板傳遞至柱內。依據日本建築學會「混凝土填充鋼管構造設計施工指針」對柱外蓋板之規定(1997)，當柱外蓋板與方形鋼管柱接合時(圖 2.6)，柱外蓋板之容許拉力強度 P_a 可依下式求得：

$$P_a = 2h_s t_R F_{yp} + 2(4t_c + t_R) t_c F_{yc} \quad (2.34)$$

其中 h_s 為柱外橫隔板寬度(一側)， t_R 為蓋板厚度， t_c 為鋼管柱厚度， F_{yp} 為蓋板標稱降伏強度， F_{yc} 為鋼管柱之標稱降伏強度， b_c 為鋼管寬度。試體 1 與試體 2 的 h_s/b_c 、 b_c/t_c 、 t_R/t_c 及規範相對應值列於表 2.4。

為了滿足蓋板受拉不發生破壞，蓋板之容許拉力強度 P_a 必須大於削切蓋板傳遞之力量 P_{RFP} ，則蓋板於柱側的最小寬度 h_s 為 67 mm，本研究採用寬度為 80 mm (如圖 2.5 及圖 2.7 所示)。

試體 3 及 4(如圖 2.8 及圖 2.9 所示)採用削切蓋板與另一底板形成 T 型裝置並將此裝置與柱採用螺栓接合，如此削切蓋板上的力量可透過 T 型裝置之螺栓傳遞至柱內。其 T 型裝置的設計步驟如下：

T 型裝置之設計主要參考 AISC-LRFD (2001) 第 9.10 節中的分析模型，如圖 2.9(d)所示，當 T 型裝置中的削切蓋板受到一拉力 $2T$ ，此時螺栓會提供螺栓拉力 B 但底板端部則會有翹曲力 Q ，此時 T 型裝置之力及彎矩平衡條件為：

$$M_1 + M_2 - T b = 0 \quad (2.35)$$

$$T + Q - B = 0 \quad (2.36)$$

$$M_2 = Q a = a d M_1 \quad (2.37)$$

其中 a 為一評估翹曲力之係數， $a (= 40 \text{ mm})$ 為底板端部至螺栓中心距離， $b (= 45 \text{ mm})$ 為彎矩 M_1 處至螺栓中心距離，當 $a = 0$ 時，表示在底板端部沒有任何的翹曲力；當 $a = 1$ 時，表示底板端部受到最大的翹曲力，此時底板為雙曲率彎曲，而 $d (= (w - 4d_{bolt}) / w = 234 / 330)$ 為底板淨寬度除以底板寬度， d_{bolt} 為螺栓直徑，將(2.37)式帶入(2.35)式、(2.36)式中，可得下列二式：

$$M_1 = \frac{T b}{1 + a d} \quad (2.38)$$

$$B = T \left[1 + \left(\frac{a d}{1 + a d} \right) \left(\frac{b}{a} \right) \right] \quad (2.39)$$

依據 AISC-LRFD (2001) 第 9.10 節要求，底板臨界斷面之彎矩 M_1 需小於底板之塑性彎矩強度：

$$f M_n = f M_p = f Z F_y = f \frac{(w t_{BP}^2)}{4} F_{yB} \quad (2.40)$$

其中 $f (= 0.9)$ 為折減係數， w 為底板寬度(試體 3 與試體 4 均為 330 mm)， t_{BP} 為底板厚度， F_{yB} 為底板標稱降伏強度。則底板厚度為：

$$t_{BP} \geq \sqrt{\frac{4 T b}{f w F_{yB} (1 + a d)}} \quad (2.41)$$

試體 3 與試體 4 其底板厚度計算如下

$$t_{BP} \geq \sqrt{\frac{4 T b}{f w F_{yB} (1 + a d)}} = \sqrt{645} = 25.2 \text{ mm} \quad \text{試體 3} \quad (2.42)$$

$$t_{BP} \geq \sqrt{\frac{4 T b}{f w F_{yB} (1 + a d)}} = \sqrt{571} = 23.9 \text{ mm} \quad \text{試體 4} \quad (2.43)$$

試體 3 及試體 4 其 T 型裝置底板厚度各採用 30 mm、25 mm。

依據 AISC-LRFD(2001) 第 9.10 節要求，須檢核螺栓拉力強度 fR_n ：

$$fR_n \geq T \left(1 + \left(\frac{ad}{1+ad} \right) \left(\frac{a}{b} \right) \right) \quad (2.44)$$

試體 3 與試體 4 其 T 型裝置細部設計如圖 2.10，上下側各使用四顆 A490 直徑 22 mm 高強度螺栓，其四顆螺栓拉力強度 fR_n 為 904 kN，若假設 T 型裝置之底板承受最大的翹曲力 ($a=1$)，則螺栓拉力強度檢核為：

$$fR_n = 904 \text{ kN} \geq 600 \left(1 + \left(\frac{1 \times 0.709}{1 + 1 \times 0.709} \right) \left(\frac{40}{45} \right) \right) = 821 \text{ kN} \quad \text{試體 3} \quad (2.45)$$

$$fR_n = 904 \text{ kN} \geq 540 \left(1 + \left(\frac{1 \times 0.709}{1 + 1 \times 0.709} \right) \left(\frac{40}{45} \right) \right) = 739 \text{ kN} \quad \text{試體 4} \quad (2.46)$$

2.4.4 梁柱交會區剪力強度檢核

梁柱交會區剪力(表 2.5)為：

$$V_{ju} = P_{RFP} - V_{col} \quad (2.47)$$

而梁柱交會區之水平剪力是由鋼管提供之剪力與混凝土提供之剪力所組成，接頭區之剪力強度 V_n 乃由鋼管與交會區混凝土共同提供，表示式如下：

$$V_n = V_{sn} + V_{cn} \quad (2.48)$$

其中 V_{sn} 為鋼管所提供之剪力強度， V_{cn} 為交會區混凝土所貢獻之剪力強度，鋼管剪力強度由鋼管之受剪面積乘上鋼管平均降伏剪應力即可得到，其表示如下：

$$V_{sn} = A_v \cdot \frac{F_y}{\sqrt{3}} = 1223 \text{ kN} \quad (2.49)$$

其中 F_y 為鋼管之降伏應力， A_v 為鋼管剪力面積，基於學者 Elremaily (2001) 之建議，鋼管之剪力面積乃是鋼管全部面積的一半來計算。混凝土抗剪強

度依據 ACI 318M-02 (2002) 第 21.5.3.1 節以四面圍束接頭區來計算

$$V_{cn} = 1.7 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_c = 992 \text{ kN} \quad (2.50)$$

其中 $f'_c (= 28 \text{ MPa})$ 為混凝土 28 天標稱抗壓強度， A_c 為鋼管混凝土柱內混凝土面積 ($= 0.1102 \text{ m}^2$)，四組試體梁柱交會區設計剪力強度 V_d (見表 2.5)：

$$V_d = fV_n = 0.75(V_{sn} + V_{cn}) = 1661 \text{ kN} \quad (2.51)$$

2.4.5 彈性勁度

試體理論之彈性撓曲勁度 K 為梁 (K_b)、柱 (K_c) 及梁柱交會區 (K_{pz}) 之彈性撓曲勁度組合，其表示式如下：

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{pz}} \quad (2.52)$$

利用共軛梁理論，梁與柱之勁度 K_b 、 K_c 可由下式計算 (Englekirk 1994)：

$$K_b = \frac{3E_s I_b L}{L_b^2} = 72743 \text{ kN-m} \quad (2.53)$$

$$K_c = \frac{12EI_{crac}}{H_c} \left(\frac{L_b}{L} \right) \left(\frac{H}{H_c} \right)^2 = 300014 \text{ kN-m} \quad (2.54)$$

其中 L 、 L_b 為梁端至柱心之距離及梁端至柱面之距離， H 、 H_c 為柱長及柱扣掉梁柱交會區部份之長度，而破裂勁度 EI_{crac} 依據 ACI 318M-02 (2002) 第 10.16 節，以下式計算：

$$EI_{crac} = E_s I_s + E_c I_c / 5 \quad (2.55)$$

其中 I_s 、 I_c 為鋼管及混凝土部份之慣性矩， E_s 、 E_c 為鋼及混凝土之彈性模數。

梁柱交會區之彈性撓曲勁度 K_{pz} 之計算為假設當梁柱交會區受到剪力 V_j 作用時，其鋼管與其內之混凝土變形一致，若梁柱交會區轉動一角度 \bar{g} ，

則其貢獻至接頭的整體轉角為：

$$q_{pz} = \frac{\bar{g}}{L} \left(L_b - \left(\frac{H - H_c}{H} \right) L \right) = \frac{V_j}{GAL} \left(L_b - \left(\frac{H - H_c}{H} \right) L \right) \quad (2.56)$$

式中之 GA 應同時考慮梁柱交會區中鋼管及其內混凝土，故其計算表示式如下：

$$GA = G_s A_s + G_c A_c \quad (2.57)$$

G_s 、 G_c 為鋼及混凝土之剪力模數， A_s 、 A_c 為鋼管及混凝土之面積。梁柱交會區的剪力 V_{ju} 為削切蓋板傳入柱內之力量減掉柱之剪力，其表示式如下：

$$V_{ju} = P_{RFP} - V_{col} = \frac{M_b}{(d_b + t_R)} - V_{col} = M_b \left(\frac{1}{(d_b + t_R)} - \frac{L}{L_b H} \right) \quad (2.58)$$

將式(2.57)、式(2.58)帶入式(2.56)，重新整理可得梁柱交會區之彈性勁度 K_{pz} 為：

$$K_{pz} = \frac{M_b}{q_{pz}} = \frac{(G_s A_s + G_c A_c) L}{\left(\frac{1}{(d_b + t_R)} - \frac{1}{L_b H} \right) \left(L_b - \left(\frac{H - H_c}{H} \right) L \right)} = 691736 \text{ kN-m} \quad (2.59)$$

將(2.53)、(2.54)及(2.59)式代入(2.51)式，可得試體理論之彈性撓曲勁度，其值為 53975 kN-m。

2.4.6 梁與削切蓋板剪力與彎矩分佈

當梁端受一力量時，梁的各斷面均會承受一剪力與彎矩作用，理論上大部份的剪力由梁腹板承受，而彎矩則經由力偶方式由兩側梁翼板承受，一側受壓，另一側則受拉，但若在梁上下側各設置一削切蓋板時，則在削切蓋板內部為削切蓋板與梁共同承受剪力，根據各別構件的撓曲勁度則可估計出梁與削切蓋板所承受的剪力比例，圖 2.11 為試體的簡化示意圖，

其中構件 AB 為梁(剛度為 $E_s I_b$)，構件 CD 為梁上下側削切蓋板(勁度為 $2K_{RFP}$)之簡化彈簧，剪力板與柱的接合則模擬為一旋轉彈簧(勁度為 K_q)與一軸向彈簧(勁度為 K_Δ)， L_1 為油壓制動器至削切蓋板與梁接合螺栓群(或焊接)中心之距離， L_2 為削切蓋板與梁接合螺栓群(或焊接)中心至柱面距離， V_{act} 為油壓制動器力量。

剪力板與柱接合之旋轉彈簧與軸向彈簧的勁度根據剪力板受剪時之變位來求得：

$$K_\theta = \frac{M}{\gamma} = \frac{V_{st} L_{st}}{V_{st} / G_{st} A_{st}} = G_{st} A_{st} L_{st} = 18896 \text{ kN-m} \quad (2.60)$$

$$K_\Delta = \frac{V}{\Delta} = \frac{V_{st}}{V_{st} L_{st} / G_{st} A_{st}} = \frac{G_{st} A_{st}}{L_{st}} = 1713905 \text{ kN} \quad (2.61)$$

其中 V_{st} 為剪力板所受之剪力， G_{st} 為剪力板之剪力模數， A_{st} 為剪力板之截面積， L_{st} 為柱面至剪力板與梁腹板接合螺栓之距離。而削切蓋板之簡化彈簧勁度則將削切蓋板視為一端受力之漸變斷面的懸臂梁來分析，並同時考慮削切蓋板的撓曲變形與剪力變形，其中削切蓋板的撓曲變位 Δ_m 之計算利用共軛梁法可求得：

$$\Delta_m = \int_0^{L_R} \frac{M_x x}{E_{RFP} I_x} dx \quad (2.62)$$

其中 x 為削切蓋板各斷面至受力端之距離， M_x 為削切蓋板各斷面所受之彎矩， E_{RFP} 為削切蓋板之彈性模數， I_x 為削切蓋板各斷面之慣性矩。而由剪力產生之削切蓋板的彈性變形曲線，其斜率大約等於中性軸之剪應變，因此若以 y_s 表示由剪力產生之撓度，則斜率方程式為：

$$\frac{dy_s}{dx} = \frac{a_s F}{G_{RFP} A_x} \quad (2.63)$$

其中 a_s 為剪力係數，對矩形斷面 $a_s = 1.5$ ， F 為削切蓋板自由端之剪力， G_{RFP} 為削切蓋板之剪力模數， A_x 為削切蓋板各斷面之截面積，則削切蓋板的剪

力變位 Δ_s 由(2.63)式積分可得：

$$\Delta_s = \int_0^{L_R} \frac{\alpha_s F}{G_{RFP} A_x} dx \quad (2.64)$$

削切蓋板之簡化彈簧的勁度 K_{RFP} 為：

$$K_{RFP} = \frac{F}{\Delta_{RFP}} = \frac{F}{\Delta_m + \Delta_s} \quad (2.65)$$

四組試體削切蓋板之簡化彈簧的勁度列於表 2.6 中，表中 $K_{RFP,e}$ 為削切蓋板彈性段之撓曲勁度， $K_{RFP,p}$ 為塑性段之撓曲勁度，為假設削切蓋板中央削切處已進入塑性(材料塑性勁度 $E_p = 0.02 E_{RFP}$)。

利用圖 2.14 中 D 點的變位諧和條件可解出 D 點梁傳遞至上下側削切蓋板的剪力 V_{RFP} ，首先鎖住 A 點的轉動彈簧與軸向彈簧，梁 AB 可視為一懸臂梁，則梁於 D 點因剪力 $V_{act} - V_{RFP}$ 所造成的位移為 d_1 ，因彎矩 $V_{act} L_1$ 所造成的位移為 d_2 ，再將 A 點鎖住的轉動彈簧解開，則梁於 D 點因剪力 $V_{act} - V_{RFP}$ 所造成的位移為 d_3 ，因彎矩 $V_{act} L_1$ 所造成的位移為 d_4 ，之後將 A 點鎖住的軸向彈簧解開，則梁於 D 點因剪力 $V_{act} - V_{RFP}$ 所造成的位移為 d_5 ，而梁的位移 $\Delta D'$ 為：

$$\begin{aligned} \Delta D' &= d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 \\ &= \frac{(V_{act} - 2V_{RFP})L_2^3}{3E_s I_b} + \frac{(V_{act} L_1)L_2^2}{2E_s I_b} + \frac{(V_{act} - 2V_{RFP})L_2^2}{K_\theta} + \frac{(V_{act} L_1)L_2}{K_\theta} + \frac{(V_{act} - 2V_{RFP})}{K_\Delta} \end{aligned} \quad (2.66)$$

則削切蓋板之簡化彈簧 CD 於 D 點的位移為：

$$\Delta D'' = \frac{V_{RFP}}{2K_{RFP}} \quad (2.67)$$

由變位諧和 $\Delta D' = \Delta D''$ 可計算出削切蓋板所承受剪力 V_{RFP} ：

$$V_{RFP} = \left(\frac{a}{b} \right) V_{act} \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned} a &= 2K_{RFP} K_\theta K_\Delta L_2^2 + 6E_s I_b K_{RFP} K_\Delta L_2^2 + 6E_s I_b K_{RFP} K_\theta + 3K_{RFP} K_\theta K_\Delta L_1 L_2^2 \\ &\quad + 6E_s I_b K_{RFP} K_\Delta L_1 L_2 \end{aligned} \quad (2.69)$$

$$b = 3E_s I_b K_\theta K_\Delta + 2K_{RFP} K_\theta K_\Delta + 6E_s I_b K_{RFP} K_\Delta L_2^2 + 6E_s I_b K_{RFP} K_\theta \quad (2.70)$$

四組試體彈性部份、塑性部份上下側削切蓋板剪力與油壓致動器力量之比值 V_{RFP}/V_{act} 計算結果列於表 2.7、表 2.8，表中第五欄為根據圖 2.11 所建立之有限元素分析模型分析所得之四組試體上下側削切蓋板剪力與油壓致動器力量之比值 V_{RFP}/V_{act} 。

圖 2.12(a)、(b)為梁與削切蓋板沿梁縱軸之剪力圖，在削切蓋板外部，全部的剪力由梁所承受，而在削切蓋板內部，則有一部份的剪力由削切蓋板承受。

對於彎矩而言，假設在削切蓋板與梁之接合中心之彎矩全由削切蓋板承受，之後在根據削切蓋板內部各構件之剪力就可計算出削切蓋板與梁所承受的彎矩，圖 2.12(c)、(d)為梁與削切蓋板沿梁縱軸之彎矩圖。根據基本材料力學概念，可以估計梁翼板上之軸向應變 e_{pre} 為：

$$e_{pre} = \frac{M_b y}{I_b E_b} \quad (2.71)$$

其中 M_b 為梁上彎矩， y 為翼板至中性軸距離， E_s 為鋼材之彈性模數。

2.5 材料性質

四組試體的柱鋼管內混凝土均採用 28 天抗壓強度 $f'_c = 28$ MPa 的混凝土。在混凝土澆置的同時，共製作 12 個混凝土圓柱抗壓試體，待混凝土齡期達 28 天，亦是第一組試體試驗當日，先試驗 3 個混凝土圓柱試體強度，並在之後的每組試體試驗當日取 3 個混凝土圓柱試體進行抗壓試驗，試驗強度如表 2.9 所示。

本實驗的鋼梁與柱鋼管均採用 A572 Gr. 50 鋼材，削切鋼板依各組試體不同的設計需求，採用 A36 與 A572 Gr. 50 兩種鋼材，拉力試驗結果詳表

2.10 所示，圖 2.13 為削切蓋板兩種鋼材之應力 - 應變曲線。

2.6 試體試驗構架及載重歷時

本試驗於國家地震工程研究中心實驗室進行，試驗構架如圖 2.14 所示，試驗所採用的施力系統及資料擷取系統敘述如下。

2.6.1 油壓致動器

本試驗梁柱接合試體採用兩組油壓致動器，鋼管混凝土柱固定在實驗構架上，由其中一組油壓致動器提供鋼管混凝土所需的軸壓力，其軸壓力值為 981 kN，另一組油壓致動器則固定在梁端，以提供實驗載重所需的側位移。



2.6.2 資料擷取收集系統

本試驗所使用的資料擷取收集系統為 THS-1100 高速資料擷取收集紀錄盒，每秒鐘約可以收集 1000 組數據，配合可接收 50 組數據線的高速 SHW-50D 切換器，與擷取資料軟體 Visual Log-Static Measurement Software，可接收各種量測儀器所傳回的數據資料，本試驗所裝置的量測儀器約有 100 組左右。

2.6.3 試驗載重歷時

載重加載歷時如圖 2.15 所示，試驗過程中油壓制動器往上推定義為正方向，試體梁端的位移除以梁距柱中心的距離(3000 mm)定義為正層間位移角 q ，反之油壓制動器往下拉之方向定義為負方向，對應於負層間位移

角。在樓層層間位移角 q 小於 0.015 弧度以下時，試體在每個位移角歷經三個反覆載重歷時，當層間位移角大於 0.015 弧度則試體在每個新的層間位移角需承受二個反覆載重歷時。

2.7 試驗量測規劃

試體 1 至試體 4 的應變計與位移計的設置如圖 2.16 至圖 2.19 所示，本研究主要是藉由削切蓋板來消釋能量，使主要的破壞產生於削切蓋板而鋼梁始終保持彈性，故在上下削切蓋板上設置應變計來量測削切蓋板的應變，並在梁翼板與腹板設置應變計，以量測梁腹板剪應變變化與梁翼板的軸向應變，梁柱交會區也設置應變計，以便量測梁柱交會區的剪應變。實驗所採用的應變計包括：(1) 單軸應變計(以 S 為標示)，量測削切蓋板上的軸向應變以及梁翼板的軸向應變，(2) 三軸應變計(以 R 為標示)，量測梁腹板與梁柱交會區的剪應變。

梁端油壓制動器施力後的梁端總位移 d_{total} 主要包含四種變形分量 (Uang and Bonded, 1996)：梁本身彈性變形分量 d_{be} 、梁柱交會區剪力變形所致的梁端變形分量 d_{pz} 、柱撓曲變形所引致的梁端變形分量 d_c 及梁因削切蓋板塑性變形所致之變形分量 d_{bp} ，其關係如下：

$$d_{total} = d_{be} + d_{pz} + d_c + d_{bp} \quad (2.72)$$

梁柱交會區的整體剪應變 \bar{g} 量測方式可藉由裝設在試體梁柱交會區的兩組位移計 L_1 、 L_2 來推得：

$$\bar{g} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab} \cdot (d_1 - d_2) \quad (2.73)$$

a 與 b 定義如圖 2.20 所示， d_1 與 d_2 為兩組位移計所量測的位移變化量。分析由梁柱交會區剪力變形所造成的梁端變形分量如圖 2.21 所示，然而在真正的實驗過程中，梁柱交會區剪力變形時，柱的兩端為固定不可移動之

鉸接，因此將圖 2.21 所示試體，作一剛體旋轉後如圖 2.22 所示，則可得到真正梁柱交會區剪力變形時所致之梁端變形分量 d_{pz} ：

$$d_{pz} = \bar{g}L_b - \frac{\bar{g}d_b}{H} \left(L_b + \frac{d_c}{2} \right) \quad (2.74)$$

其中 L_b ($= 2825$ mm) 為油壓制動器至柱面距離， H ($= 3200$ mm) 為柱上下鉸接中心距離， d_c ($= 350$ mm) 為柱寬。而梁柱交會區剪力變形所引致的梁端變形角分量 q_{pz} ：

$$q_{pz} = \frac{d_{pz}}{L_b + d_c/2} \quad (2.75)$$

至於由柱整體變形所致的梁端變形分量 d_c 可利用裝設在柱上之兩組位移計 L_3 、 L_4 來推得：

$$d_c = q_c \left(L_b + \frac{d_c}{2} \right) \quad (2.76)$$

$$q_c = \frac{(d_3 - d_4)}{d_b} - \bar{g} \left(1 - \frac{d_c}{H} \right) \quad (2.77)$$

其中 d_3 與 d_4 為柱上兩組位移計所量測的位移變化量， q_c 為柱撓曲變形所致之梁端轉角分量。而梁本身彈性變形所致之梁端位移分量 d_{be} 可藉由圖 2.12 中梁的彎矩分佈以共軛梁法計算梁彈型變形之梁端位移分量 d_{be} ：

$$d_{be} = \frac{1}{3E_b I_b} (V_{act} L_1^3 + V_{bin} L_2^3 + 1.5 V_{bin} L_1 L_2^2) \quad (2.78)$$

而梁彈性變形所致之梁端轉角分量 q_{be} ：

$$q_{be} = \frac{(V_{act} L_1^2 + V_{bin} L_2^2 + 1.5 V_{bin} L_1 L_2)}{3E_b I_b (L_b + d_c/2)} \quad (2.79)$$

其中 V_{act} 為油壓制動器在梁端所施之力量， V_{bin} 為蓋板內部梁上之剪力， L_1 、 L_2 的定義如圖 2.12 所示， E_b 為梁之彈性模數， I_b 為梁之慣性矩。最後，梁因削切蓋板塑性變形所致之變形分量 d_{bp} 可將梁端總位移(油壓制動器之位移)減去梁本身彈性變形分量 d_{be} 、梁柱交會區剪力變形 d_{pz} 與柱撓曲變形

所致之梁端位移分量 d_c 而得，如下所示：

$$d_{bp} = d_{total} - d_{be} - d_{pz} - d_c \quad (2.80)$$

則相對應的轉角分量 為：

$$q_{bp} = \frac{d_{bp}}{L_b + d_c/2} \quad (2.81)$$




第三章 試體實驗與結果分析

3.1 前言

本研究共製作四組削切蓋板梁柱接頭試體，每組試體由鋼管混凝土柱、鋼梁及削切蓋板組合而成，其中削切蓋板與柱採栓接或全滲透焊接合，鋼梁翼板與削切蓋板採螺栓或填角焊接合，鋼梁腹板與鋼管混凝土柱之剪力板採螺栓接合，而鋼管混凝土柱與鋼梁翼板間並無任何接合。本章 3.2 節介紹試體製作與組裝過程，3.3 節為試體 1 試驗結果與分析，3.4 節為試體 2 試驗結果與分析，3.5 節為試體 3 試驗結果與分析，3.6 節為試體 4 試驗結果與分析。

3.2 試體製作與組裝



鋼管柱、鋼梁與削切蓋板由鴻舜鋼鐵廠負責製作，混凝土的澆置則在國家地震工程研究中心實驗室完成。試體養護 28 天後，在實驗室內進行組裝。試體 1 與試體 2 均先將鋼管混凝土柱橫躺在地面上，將鋼梁以天車水平吊起，對準鋼管混凝土柱之剪力板、梁及削切蓋板的螺栓孔位後，即可鎖上螺栓接合(如照片 3.1 所示)，並以扭力板手確認直徑 25 mm 螺栓是否達到 LRFD J3.1(2001)規定的扭力值($=285$ kN)。試體 2 之削切蓋板與梁翼板接合採用螺栓摩阻型接合配合梁翼板的填角焊，故必須在鎖緊螺栓後再進行現場焊接，焊接位置為梁翼板兩側。

試體 3 因其削切蓋板與梁翼板接合只採填角焊，故於工廠內已將削切蓋板焊接於梁翼板上，而其削切蓋板與柱間則採螺栓接合，所以試體 3 的組裝過程只需將含削切蓋板的鋼梁以天車水平吊起，對準鋼管混凝土柱與梁、T 型裝置之端板的螺栓孔位後，鎖上螺栓固定，再以扭力板手確認 T

型裝置之端板與柱接合的每個螺栓(直徑 22 mm)都達到 LRFD J3.1(2001)的扭力值(=218 kN)。

試體 4 之削切蓋板與柱及梁均採螺栓接合，且在上下削切蓋板上多加裝一 T 型加勁板以防止其挫屈，在 T 型鋼板組裝前先塗抹一層油以降低削切蓋板與 T 型加勁板間摩擦力產生，T 型加勁板之組裝過程為先鎖緊上下削切蓋板與梁翼板間後兩排螺栓，再鎖上 T 型鋼板與削切蓋板、梁翼板間直徑 25 mm、16 mm 的螺栓後固定，特別要注意的是此處的螺栓只需用板手鎖至緊貼程度(Snug Tight)，所謂的緊貼程度係用人工盡全力旋緊，使接合面緊密接觸。

3.3 試體 1 試驗結果

3.3.1 試驗現象觀察

照片 3.2 為試體 1 試驗前之全景，圖 3.1 為試體彎矩與梁端位移關係圖，當達到每個新階段的位移角下之最大位移時都將實驗暫停以進行觀察與紀錄，觀察重點在於削切蓋板的降伏挫屈情況及鋼梁是否降伏，有關試驗過程中試體的行為描述如下：

- (1) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.0025$ 弧度 ($P_{max} = 46$ kN, $P_{min} = -44$ kN) 到 $\theta = \pm 0.005$ 弧度 ($P_{max} = 88$ kN, $P_{min} = -85$ kN)

試體保持彈性，柱、梁及削切蓋板均無降伏現象發生。

- (2) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.0075$ 弧度 ($P_{max} = 118$ kN, $P_{min} = -103$ kN)

位移角 $\theta = 0.0075$ 弧度時，試體發出連續聲響，發現是連接削切蓋板與梁翼板之螺栓滑動，此現象持續發生直到試驗結束，並造成試體在位移角 $\theta = \pm 0.0075$ 到 $\theta = \pm 0.02$ 弧度間，梁端的彎矩(圖 3.1)保持在 340

kN-m ($= 0.61 M_{np}$)。裝設在削切蓋板端部的位移計(L7)發生脫落，故在此一階段最大位移時，將實驗暫停重新裝設此一位移計。

- (3) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.01$ 弧度 ($P_{max} = 118$ kN, $P_{min} = -107$ kN)

由於削切蓋板與梁翼板相接的螺栓滑動，觀察到梁翼板相對於削切蓋板位移 2 mm (照片 3.3)。試體梁端彎矩因螺栓滑動依舊保持前次層間側位移角下的大小。在此一試驗階段，裝設在削切蓋板端部的位移計(L7和L8)再次脫落，故在最大位移時，將實驗暫停，拆除脫落的位移計。

- (4) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.015$ 弧度 ($P_{max} = 109$ kN, $P_{min} = -96$ kN)

鋼管混凝土柱上之剪力板上下兩側端部觀察到些許降伏現象(照片 3.4)而梁及削切蓋板均無降伏現象發生。

- (5) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.02$ 弧度 ($P_{max} = 125$ kN, $P_{min} = -138$ kN)

位移角 $\theta = 0.02$ 弧度時，螺栓滑動量可由削切蓋板端部之削切蓋板與梁翼板間位移觀察到，其滑動值為 4 mm，造成連接削切蓋板與梁翼板之螺栓頂住螺栓孔不再滑動，試體梁端彎矩增加。剪力板的降伏較之前顯著，其降伏區域變大，削切蓋板與梁沒有降伏現象。

- (6) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.03$ 弧度 ($P_{max} = 206$ kN, $P_{min} = -194$ kN)

反覆載重進行至位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時，上側削切蓋板中間最窄處之塗漆因為鋼板受壓降伏而開始剝落(照片 3.5)，同時削切蓋板接近柱邊的區域也觀察到掉漆現象。位移角 $\theta = -0.03$ 弧度時，下側削切蓋板也有相同降伏現象(照片 3.6)。在此一試驗階段，油壓系統突然跳電，造成實驗中斷，在緊急修復後實驗繼續進行。

- (7) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.04$ 弧度 ($P_{max} = 248$ kN, $P_{min} = -233$ kN)

位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時，上側削切蓋板降伏情形較前一位移歷時更加顯

著(照片 3.7)，且集中在蓋板削切範圍。從照片 3.7 可觀察到削切蓋板第一排螺栓周圍也有些許降伏現象，同樣的情形也發生在梁翼板之螺栓孔附近(照片 3.8)。位於削切蓋板端部附近的上梁翼板於位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時有些許降伏發生，削切蓋板與梁翼板間滑動量經量測為 9 mm (照片 3.9)。

(8) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.05$ 弧度 ($P_{max} = 265$ kN, $P_{min} = -243$ kN)

反覆載重進行至位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時，上側削切蓋板因受壓而有些微挫屈，挫屈幅度在削切蓋板中央部位為 3 mm (照片 3.10)，挫屈幅度隨著梁端位移的增加而持續增大，此時梁柱交會區的鋼管部份也有些許降伏現象。位移角 $\theta = -0.05$ 弧度時，下側的削切蓋板也發生挫屈，挫屈幅度達 8 mm (照片 3.11)，因為削切蓋板的挫屈，導致試體強度在位移角 $\theta = -0.05$ 弧度之後下降。

(9) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.06$ 弧度 ($P_{max} = 241$ kN, $P_{min} = -168$ kN)

在位移角 $\theta = -0.06$ 弧度第二次遲滯迴圈，試體強度下降至試體最大強度的 63 %，因此停止油壓制動器的控制並結束實驗，照片 3.12 為試體一在此位移角之變形，照片 3.13 顯示此時上側與下側削切蓋板的變形，上側削切蓋板受拉，其挫屈殘留變形為 7 mm，下側削切蓋板受壓而挫屈，挫屈幅度為 35 mm。

3.3.2 整體反應

此節主要是藉由分析試驗數據了解削切蓋板梁柱接頭的行為，茲針對試體彎矩與梁端位移關係、梁端位移分量及彈性勁度分別說明如下。

1、彎矩與梁端位移關係

圖 3.1 所示在位移角 $\theta = 0.0075$ 到 $\theta = 0.0015$ 弧度之間，曲線呈現微小跳動為螺栓滑動所造成，此時的彎矩約為 $340 \text{ kN}\cdot\text{m}(= 0.61 M_{np})$ ，經計算傳遞至削切蓋板的軸力為 652 kN (一顆螺栓約承受 109 kN 之剪力)，大於摩阻型螺栓提供的強度(106 kN)，在位移角 $\theta = 0.0075$ 弧度之內，試體仍保持在彈性範圍內，且試體螺栓未滑動，將其遲滯迴圈做線性回歸，可得彈性勁度，其值為 $48,515 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。在位移角超過 $\theta = 0.02$ 弧度後，螺栓的滑動受到螺栓孔的限制而不再滑動，此時力量才開始往上增加，最大的彎矩強度出現在位移角 $\theta = 0.05$ 弧度，其值為 $741 \text{ kN}\cdot\text{m}(= 1.33 M_{np})$ ，由圖中可看出試體 1 在層間位移角 $\theta = 0.06$ 弧度時因削切蓋板非彈性挫屈而造成強度下降。圖 3.2 為四組試體彎矩與梁端位移之包絡線關係。

2、梁端位移分量

試體 1 的整體轉角主要由梁、柱及梁柱交會區所貢獻，如第 2.6 節所述，由位移計所量測的數據可分別計算出試體 1 的各梁端位移分量 d_{be} 、 d_c 、 d_{pz} 及 d_{bp} ，圖 3.3 為試體 1 柱之轉角 q_c 與彎矩關係圖，圖 3.4 為試體 1 梁柱交會區剪力變形 \bar{g} 與彎矩關係圖，圖中曲線跳動的原因為螺栓滑動所致，柱最大轉角約為 0.005 弧度，而梁柱交會區最大剪力變形約為 0.004 弧度。若將每一個正位移角下各梁端位移分量變化情形繪製成圖表，可得圖 3.5，分析各位移分量所佔的比例(如圖 3.6 所示)，圖中每個側位移角均有四組長條圖，第一組為試體 1 之結果，第二組為試體 2 之結果，第三組為試體 3 之結果，第四組為試體 4 之結果，由圖可知，梁端大部份的位移由梁因削切蓋板塑性變形所致之梁端位移分量 d_{bp} 所貢獻，柱及梁柱交會區所提供的位移分量很小。

3、彈性勁度

試體 1 在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度前仍保持在彈性範圍，其實驗之彈性撓曲勁度為 48515 kN-m，為第 2.3.5 節所述理論之彈性勁度(53975 kN-m)的 90%，各組試體之彈性撓曲勁度列於表 3.1。

3.3.3 局部反應

為了瞭解試體 1 的局部反應，所以在削切蓋板、鋼梁及接頭梁柱交會區的鋼管上設置應變計，應變計的配置如圖 2.13 所示。藉由削切蓋板上設置的應變計，來量測削切蓋板的應變變化，判斷削切蓋板降伏以及挫屈的時機。設置在梁翼板的應變計可量測應變沿著梁縱軸方向的變化並判斷梁是否有發生降伏，梁腹板則設置三軸應變計，可量測梁腹板的剪應變變化並計算梁腹板的剪力。梁柱交會區的鋼管設置三軸應變計，除了可判斷此處的鋼管是否降伏外，也可量測剪應變變化。

1、削切蓋板橫向應變

圖 3.7 與圖 3.8 為削切蓋板近柱面的應變計與彎矩關係圖，圖中顯示上下削切蓋板的應變都超過鋼材的降伏強度。當油壓制動器向正方向推時，上側削切蓋板受壓且削切蓋板在靠柱面處有較大的撓曲變形，造成上側削切蓋板上緣的應變全為壓應變，中間量測的應變值較大(如圖 3.9(a)所示)，原因為鋼管混凝土柱在受壓時提供較大的勁度，使削切蓋板上的力量由中間傳入柱內；而在上側削切蓋板下緣因板撓曲變形所提供的拉應變大於削切蓋板本身承受的壓應變，故其量測的應變全為拉應變(如圖 3.9(b)所示)。當油壓制動器向負方向推時，上側削切蓋板上緣量測的應變全為拉應變(如圖 3.10(a)所示)，且中央量測之拉應變在層間側位移角 $\theta = 0.04$ 弧

度時小於外側之拉應變，原因為當削切蓋板受拉時，兩側之柱外橫隔板所提供的受拉勁度大於中央鋼管提供的受拉勁度；而削切蓋板下緣則因板本身的撓曲變形造成中央部位為壓應變，外側為拉應變(如圖 3.10(b)所示)。同樣的情形也發生在下側削切蓋板，如圖 3.11、圖 3.12 所示。

2、削切蓋板縱向應變

當油壓制動器向正方向推時，上側削切蓋板受壓而下側削切蓋板受拉，其應變沿著削切蓋板縱向的分佈情形如圖 3.13 所示。反之，當油壓制動器向負方向推時，則上側削切蓋板受拉而下側削切蓋板受壓，其應變沿著削切蓋板縱向的分佈情形如圖 3.14 所示。以上側削切蓋板為例，位移角在 $\theta = 0.05$ 弧度前，受壓的削切蓋板其壓應變沿板軸向的變化不大，其值非常平均，中央最窄處應變計 S10 的壓應變並沒有預期地大於兩旁 S9、S11 之壓應變，原因可能為此處的削切蓋板在反覆載重下，使得削切蓋板在受壓時要將先前受拉所造成的殘留拉應變克服，之後才轉變成壓應變(如圖 3.15(a)所示)，如此造成中央最窄處的應變計 S10 所量測的壓應變較小，圖 3.15(a)標記處為上側削切蓋板挫屈的時機，圖中顯示原本應逐漸減少的應變突然地增大，為削切蓋板往上挫屈所造成，此時的位移角為 $\theta = 0.05$ 弧度，由圖 3.13(a)可觀察到中央最窄處的應變由負轉正，顯示此時削切蓋板挫屈，而實驗在此位移角也觀察到削切蓋板挫屈；而當削切蓋板受拉時，其中央最窄處的應變較大，在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度後，中央最窄處的應變明顯大於兩旁之應變，如圖 3.13(b)所示。

3、鋼梁翼板應變

圖 3.16 為設置在梁上翼板應變計(圖 2.16)所量測到應變與彎矩歷時，由圖可知，梁翼板最大的軸向應變發生在削切蓋板端部位置的梁翼板附近，

當油壓制動器往正方向推時，梁上翼板在側位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時達最大應變，其值略小於鋼材之降伏應變(如圖 3.17(a)所示)，而削切蓋板內部之梁翼板軸向應變則非常小；當油壓制動器往負方向推時，梁上翼板受拉，其最大應變約為降伏應變之一半(如圖 3.17(b)所示)。

圖 3.18 為梁上翼板應變計所量測之應變與估計應變值之比較，其中圖(a)為削切蓋板端部之梁翼板應變比較，而圖(b)為位於削切蓋板內部之梁翼板應變比較，估計應變值為根據第 2.3.4 節所述之(2.63)式計算而得，由圖可知，削切蓋板端部之應變計量測之應變值在正方向上與估計值接近，而負方向上在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度內與估計值接近，削切蓋板內部之應變計量測之應變值與估計值在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度內接近。

4、鋼梁腹板剪應變

圖 3.19 為梁腹板應變計之剪應變與彎矩關係圖。削切蓋板端部的梁腹板中央部位之剪應變較上下兩側小，且受壓側梁腹板剪應變大於受拉側(如圖 3.20 所示)。位於削切蓋板內部之梁腹板剪應變在側位移角 ± 0.02 弧度前，其中央之剪應變較上下兩側小，在位移角 ± 0.02 弧度後，其剪應變在受拉側會突然增加，而受壓側則變小(如圖 3.21 所示)。若將每個位移角下削切蓋板內部及外部之梁腹板剪應變沿梁深積分，可得兩個剪力值 V_{in} 、 V_{out} ，圖 3.22 為 V_{in} 、 V_{out} 與油壓制動器力量 V_{act} 在每個位移角下之比較，圖中顯示三個梁剪力值在層間位移角 $\theta = 0.03$ 弧度前接近，圖 3.23 為四組試體蓋板內部之梁腹板剪力值除以油壓制動器力量之比較。

5、梁柱交會區剪應變

梁柱交會區之應變計所量測的剪應變在不同層間側位移角達到時沿柱寬度方向變化如圖 3.24 所示。由圖可知，梁柱交會區的剪應變非常平均且

都在彈性範圍內，若將剪應變沿寬度積分乘上剪力模數，再乘上鋼管面積，所得之剪力為梁柱交會區之鋼管上所承受的剪力 V_{tube} ，而整個梁柱交會區的剪力 V_{ju} 可由下列公式計算：

$$V_{ju} = P_{RFP} - V_{col} \quad (3.1)$$

$$\text{其中 } P_{RFP} = \frac{V_{act} \cdot (L_b - s_h)}{(d_b + t_R)} \quad (3.2)$$

$$V_{col} = \frac{V_{act} \cdot (L_b + d_c / 2)}{H} \quad (3.3)$$

其中 P_{RFP} 為削切蓋板傳遞至梁柱交會區的剪力， V_{col} 為柱之剪力， L_b 為油壓制動器中心至柱面距離， s_h 為塑鉸位置至柱面距離， d_b 為梁深， d_c 為柱深， t_R 為削切蓋板厚度， H 為柱長。

梁柱交會區混凝土所承受的剪力 V_{con} 可由梁柱交會區剪力 V_{ju} 減掉鋼管上之剪力 V_{tube} 計算出來，圖 3.25 為四組試體在各層間側位移角下，梁柱交會區鋼管與混凝土所抵抗的剪力值，而圖 3.26 為各層間側位移角下，四組試體其梁柱交會區鋼管與混凝土所抵抗的剪力比例。由圖可知，一開始梁柱交會區的剪力由鋼管與混凝土平均承受，但當側位移角增大至 $\theta = \pm 0.01$ 弧度後，60~70%的剪力仍由鋼管承受，而鋼管則始終在彈性範圍沒有降伏。

梁柱交會區混凝土上的剪應變可由混凝土承受之剪力 V_{con} 除以混凝土面積 $A_c (= 0.1102 \text{ m}^2)$ 求得，各組試體其混凝土剪應變隨著側位移角變化情形如圖 3.27 所示。根據 ACI 318M-02(2002)第 21.5.3 節規定，混凝土剪應變在四邊圍束下，不能超過 $1.7\sqrt{f'_c}$ ， f'_c 為實際混凝土抗壓試驗所得的抗壓強度，由圖可知，試體 1 梁柱交會區混凝土最大的剪應變發生在 $\theta = 0.05$ 弧度時，其值為 3.5 MPa，約為規定值的 0.4 倍左右。

3.4 試體 2 試驗結果

3.4.1 試驗現象觀察

照片 3.14 為試驗前之全景，圖 3.28 為試體彎矩與梁端位移關係圖，在試驗進行的過程當中，當達到每個新階段的位移角下之最大位移時都將實驗暫停以進行觀察與紀錄，主要觀察重點在於試體之削切蓋板在加上三角形加勁板(Ribs)後，對削切蓋板的行為有何影響，是否會延遲削切蓋板挫屈的時機或增強試體的整體強度，同時觀察削切蓋板中央最窄處及鋼梁是否有降伏發生。有關試驗過程中的現象描述如下：

- (1) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.0025$ 弧度 ($P_{max}=45$ kN, $P_{min}=-42$ kN) 到 $\theta = \pm 0.0075$ 弧度 ($P_{max}=125$ kN, $P_{min}=-125$ kN)

試體保持彈性，柱、梁及削切蓋板無降伏現象發生。

- (2) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.01$ 弧度 ($P_{max}=158$ kN, $P_{min}=-160$ kN)

位移角 $\theta = 0.01$ 弧度時，上側削切蓋板中央削切處受壓開始掉漆，顯示此處發生降伏(照片 3.15)，而此時下側削切蓋板靠近柱面處與梁翼板間出現 3 mm 的空隙。當油壓制動器向負方向推至位移角 $\theta = -0.01$ 弧度時，下側的削切蓋板中央削切處也出現降伏掉漆的現象，上側削切蓋板靠近柱面處與梁翼板間出現 2 mm 空隙。

- (3) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.015$ 弧度 ($P_{max}=195$ kN, $P_{min}=-198$ kN)

位移角 $\theta = 0.015$ 弧度時，上側削切蓋板的降伏範圍由中央削切處延伸至削切蓋板靠近三角形加勁板處，如照片 3.16 所示，顯示此處因為加勁板的影響，使壓應力集中於此，且在削切蓋板接近柱面處有觀察到些微降伏現象。在此一位移角下，也觀察到下側的削切蓋板靠近柱面處與梁翼板間的空隙增至 4 mm，如照片 3.17 所示。位移角 $\theta = -0.015$ 弧

度時，下側的削切蓋板降伏情形與上側之削切蓋板相同，降伏範圍都在削切蓋板中央削切處與靠近加勁板處。

- (4) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.02$ 弧度 ($P_{max}=228$ kN, $P_{min}=-227$ kN)

位移角 $\theta = 0.02$ 弧度時，除了削切蓋板降伏愈趨顯著外，梁翼板於螺栓周圍有些微降伏，此時下側削切蓋板靠近柱面處與梁翼板間空隙為 5 mm。位移角 $\theta = -0.02$ 弧度時，上側削切蓋板靠近柱面處與梁翼板間空隙為 4 mm。

- (5) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.03$ 弧度 ($P_{max}=265$ kN, $P_{min}=-264$ kN)

反覆載重進行至位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時，上側削切蓋板降伏範圍延伸至整個削切範圍(照片 3.18)，由圖可看出削切蓋板上第一排螺栓孔周圍發生降伏，照片 3.19 為在此位移角下，加勁板與上側削切蓋板連接處亦發生降伏，同時上下側削切蓋板端部之梁翼板也發生局部降伏(照片 3.20)。位移角 $\theta = -0.03$ 弧度時，下側削切蓋板有些微的挫屈，挫屈幅度為 3 mm (照片 3.21)，挫屈幅度隨著梁端位移的增加而持續增大，此時梁柱交會區的鋼管部份也有些許掉漆降伏現象(照片 3.22)。

- (6) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.04$ 弧度 ($P_{max}=266$ kN, $P_{min}=-248$ kN)

位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時，上側削切蓋板挫屈幅度為 12 mm，而此時下側削切蓋板靠近柱面處與梁翼板之孔隙達 7 mm，剪力板在此位移角時發生降伏，降伏位置為剪力板於柱接之邊緣上端角落(照片 3.23)。位移角 $\theta = -0.04$ 弧度時，下側削切蓋板挫屈幅度達 19 mm，剪力板於柱接之邊緣下端角落亦發生降伏，在此位移角的第二次遲滯迴圈時，有聲響起，經判斷為剪力板之螺栓滑動所致。

- (7) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.05$ 弧度 ($P_{max}=211$ kN, $P_{min}=-206$ kN)

位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時，上側削切蓋板挫屈幅度達 34 mm(照片 3.24)，由照片可看出下側削切蓋板因挫屈殘留變形為 12 mm，在此位移角下，剪力板的降伏較之前顯著。位移角 $\theta = -0.05$ 弧度時，下側削切蓋板挫屈幅度達 39 mm，其上側削切蓋板挫屈殘留變形為 19 mm，在位移角 $\theta = -0.05$ 弧度的第二次遲滯迴圈時，上側削切蓋板發生斷裂(照片 3.25)，裂縫的寬度為 11 mm，同時也觀察到上側削切蓋板之加勁板焊道有些微的裂縫產生(照片 3.26)。因為削切蓋板斷裂，故在此時停止油壓制動器的控制並停止實驗，實驗後將試體卸下構架台並解體，發現鋼梁除了螺栓孔周圍及削切蓋板端部之梁翼板些許降伏外，並無任何其他位置降伏或破壞產生。

3.4.2 整體反應

試體 2 在削切蓋板上設置三角形加勁板，目的為縮短削切蓋板的無支撐長度，以增強試體的彎矩強度及遲滯消能的能力，茲針對試體彎矩與梁端位移關係及試體梁端分量說明如下。

1、彎矩與梁端位移關係

在反覆載重試驗過程中，試體 2 的彎矩與梁端位移關係如圖 3.28 所示，在位移角 $\theta = \pm 0.01$ 弧度前，試體仍保持彈性，彈性勁度為 48,499 kN-m，為理論彈性勁度的 90 % (見表 3.1)，其後上下側削切蓋板開始達到降伏，相對應的梁端彎矩為 446 kN-m ($= 0.8 M_{np}$)，造成試體勁度開始遞減，當試體反覆載重進行至位移角 $\theta = \pm 0.05$ 弧度第二迴圈時，上側削切蓋板發生斷裂破壞，可以在彎矩與梁端位移關係圖發現試體強度突然降低。最大的彎矩抵抗力出現在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度，其值為 771 kN-m ($= 1.38 M_{np}$)，略大

於試體 1 的最大彎矩抵抗力，在位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時，彎矩抵抗力掉至 582 kN-m，為最大彎矩強度的 75 %，試體 2 的彎矩與梁端位移之包絡線關係如圖 3.2 所示。

2、轉角分量

如第 2.6 節所述，由位移計所量測的數據可分別計算出試體 2 的各梁端位移分量 d_{be} 、 d_c 、 d_{pz} 及 d_{bp} ，圖 3.29 為試體 2 之柱轉角 q_c 與彎矩之關係圖，圖 3.30 為試體 2 梁柱交會區剪力變形 \bar{g} 與彎矩之關係圖，柱最大轉角約為 0.0025 弧度，而梁柱交會區最大剪力變形約為 0.0025 弧度。若將每一個正位移角下各梁端位移分量變化情形繪製成圖表，可得圖 3.5，分析各梁端位移分量所佔的比例，正分向上之梁端位移分量分析如圖 3.6 所示，第二組為試體 2 之結果，由圖可知試體梁端的主要變形由梁因削切蓋板塑性變形所致之梁端位移分量所造成，柱、梁柱交會區所提供的位移分量都很小。

3.4.3 局部反應

1、削切蓋板橫向應變

圖 3.31、圖 3.32 各為上下側削切蓋板應變計(圖 2.17)與彎矩關係圖，當油壓制動器向正方向推時，上側削切蓋板受壓且鋼管混凝土及加勁板提供較大的受壓勁度，使得上側削切蓋板頂部中央的壓應變較兩側大(如圖 3.33(a)所示)，但其值小於試體 1 在此處的壓應變，原因為有部份力量由加勁板傳入柱內所造成；而在上側削切蓋板底部在位移角 $\theta = \pm 0.03$ 弧度前，其值都為壓應變，但在超過此一位移角後，因削切蓋板撓曲變形造成量測的應變為拉應變(如圖 3.33(b)所示)。當油壓制動器向負方向推時，上

側削切蓋板受拉，故上側削切蓋板頂部及底部量測的應變全為拉應變，且兩側的應變比中央應變大，代表當削切蓋板受拉時，力量主要由兩側蓋板及加勁板傳入柱內(如圖 3.34 所示)，同樣的情形也在下側削切蓋板發生，如圖 3.35、圖 3.36 所示。圖中顯示上下削切蓋板的應變在位移角 $\theta = \pm 0.05$ 弧度內都保持在彈性範圍，而未超過鋼材的降伏強度，顯示設置加勁板能有效地降低削切蓋板靠近柱面處的應變，而使部份力量由加勁板吸收。

2、削切蓋板縱向應變

當油壓制動器向正方向推時，上側削切蓋板受壓，在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度內，受壓的削切蓋板壓應變非常平均，靠近加勁板處之應變計 S8 所量測的應變較大，而沿縱向變化不大，但在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時，中央最窄處的應變突然由負轉正，兩旁的壓應變也突然變大(如圖 3.37(a)所示)，顯示削切蓋板在此一位移角發生挫屈，此一現象也可在圖 3.38(a)觀察到，圖中標記處為上下削切蓋板挫屈的時機，至位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時，因上側削切蓋板挫屈變形量太大，造成最窄處應變計 S9 所量測的應變超過其量測範圍，故圖 3.37 沒有繪出 $\theta = 0.05$ 弧度之曲線，應變計 S9 最後的應變讀數約為 17%；反之，當油壓制動器向負方向推時，上側削切蓋板受拉，在位移角 $\theta = -0.01$ 弧度前，削切蓋板其拉應變非常平均，沿縱向變化不大，而當超過此位移角時，其中央最窄處的拉應變變大並超過鋼材的降伏強度，如圖 3.37(b)所示，顯示當削切蓋板受到較大的拉力時，中央最窄處承受主要的變形。

3、鋼梁翼板應變

圖 3.39 為設置在梁上翼板應變計(圖 2.17)所量測到應變與彎矩歷時，由圖可知，梁翼板最大的軸向應變發生在削切蓋板端部位置的梁翼板

附近，梁上翼板在側位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時因受壓而達鋼材之降伏應變(如圖 3.40(a)所示)，而削切蓋板內梁翼板之軸向應變則非常小，始終保持在彈性範圍內；當油壓制動器往負方向推時，梁上翼板受拉，其最大應變約為降伏應變之一半(圖 3.40 (b))。

圖 3.41 為梁上翼板應變計所量測之應變與估計應變值之比較，其中圖(a)為削切蓋板端部之梁翼板應變比較，而圖(b)為位於削切蓋板內部之梁翼板應變比較，估計應變值為根據第 2.3.4 節所述之(2.63)式計算而得，由圖可知，削切端部之應變計量測之應變值在正方向上與估計值接近，負方向上在位移角 $\theta = 0.01$ 弧度後估計值明顯比實驗值大，而削切蓋板內部之應變計量測之應變值與估計值接近。

4、鋼梁腹板剪應變

圖 3.42 為試體 2 位於削切蓋板內部之梁腹板剪應變沿梁高度變化圖，在位移角 $\theta = \pm 0.01$ 弧度內，中央之剪應變與上下兩側之剪應變值相差不大，但超過此一位移角後，上下兩側之剪應變明顯大於中央處，且受拉側的剪應變略大於受壓側之剪應變(如圖 3.42 所示)。若將每個位移角下削切蓋板內部梁腹板剪應變沿梁深積分，可得到各位移角下蓋板內之梁腹板剪力 V_{in} ，其結果與油壓致動器力量 V_{act} 之比較如圖 3.43 所示，圖中之 $V_{act, abaqus}$ 、 $V_{in, abaqus}$ 為有線元素分析所得的梁端力量及削切蓋板內部之梁腹板剪力，圖中顯示無論是實驗或有線元素分析，削切蓋板內部之剪力明顯小於油壓致動器力量，顯示有部份剪力由削切蓋板傳遞，而圖 3.44 為實驗跟有限元素分析中削切蓋板內部之梁腹板剪力與油壓致動器的比值在各位移角下之變化，發現梁在削切蓋板內仍提供將近 80% 的剪力抵抗能力。

5、梁柱交會區剪應變

梁柱交會區之應變計所量測的剪應變在不同側位移角達到時沿柱寬度方向變化如圖 3.45 所示。由圖可知，梁柱交會區的剪應變非常平均且都在彈性範圍內，將剪應變沿寬度積分乘上剪力模數，再乘上鋼管面積，所得的剪力為梁柱交會區之鋼管上所傳遞的剪力 V_{tube} ，而整個梁柱交會區的剪力 V_{pc} 可由第 3.3.3 節 (3.1) 式計算，梁柱交會區混凝土所承受的剪力可由梁柱交會區剪力 V_{pc} 扣掉鋼管上之剪力 V_{tube} ，圖 3.25 為每一個位移角第二組為試體 2 梁柱交會區鋼管與混凝土剪力值，圖 3.26 中每一個側位移角第二組為試體 2 其梁柱交會區鋼管與混凝土所佔的剪力比例。由圖可知，當側位移角增大至 $\theta = 0.01$ 弧度時，約有 60~70 % 的剪力由鋼管承受，混凝土所佔的剪力比例隨著側位移角增大而稍微遞減，而鋼管始終在彈性範圍沒有降伏。

梁柱交會區混凝土上的剪應變可由混凝土承受之剪力除以混凝土面積求得，試體 2 其混凝土剪應變隨著側位移角變化情形如圖 3.27 所示。試體 2 梁柱交會區混凝土最大的剪應變發生在 0.03 弧度時，其值為 4.3 MPa，約為規定值的 0.5 倍左右。

3.5 試體 3 試驗結果

3.5.1 試驗現象觀察

照片 3.27 為試驗前之全景，圖 3.46 為試體彎矩與梁端位移關係圖，有關試驗過程中的現象描述如下：

- (1) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.0025$ 弧度 ($P_{max} = 51$ kN, $P_{min} = -49$ kN) 到 $\theta = \pm 0.005$ 弧度 ($P_{max} = 98$ kN, $P_{min} = -96$ kN)

試體保持彈性，柱、梁及削切蓋板無降伏現象發生。

- (2) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.0075$ 弧度 ($P_{max} = 139$ kN, $P_{min} = -136$ kN)

位移角 $\theta = 0.0075$ 弧度時，下側削切蓋板中央削切處開始掉漆，顯示此處發生降伏，而此時上側削切蓋板接近柱面也有些許降伏發生。

- (3) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.01$ 弧度 ($P_{max} = 172$ kN, $P_{min} = -162$ kN)

位移角 $\theta = 0.01$ 弧度時，上側削切蓋板中央削切處發生降伏，在位移角 $\theta = -0.01$ 弧度時，下側削切蓋板降伏更為明顯，如照片 3.28 所示。

- (4) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.015$ 弧度 ($P_{max} = 201$ kN, $P_{min} = -192$ kN)

位移角 $\theta = 0.015$ 弧度時，除了削切蓋板降伏愈趨顯著外，梁下翼板於削切蓋板端部有些微降伏，如照片 3.29 所示，此時剪力板與柱接之角落也有降伏發生。位移角 $\theta = -0.015$ 弧度時，試體發出連續聲響，經判斷應為剪力板螺栓滑動所致。

- (5) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.02$ 弧度 ($P_{max} = 229$ kN, $P_{min} = -219$ kN)

反覆載重進行至位移角 $\theta = 0.02$ 弧度時，聲響持續發生，上側削切蓋板與梁翼板間出現 1 mm 的空隙，下側削切蓋板與梁翼板間有 2 mm 的空隙。位移角 $\theta = -0.02$ 弧度時，下側削切蓋板些微挫屈，下側削切蓋板與梁翼板間之空隙增加至 3 mm，此時上梁翼板於削切蓋板端部發生降伏，如照片 3.30 所示。

- (6) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.03$ 弧度 ($P_{max} = 253$ kN, $P_{min} = -209$ kN)

位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時，上側削切蓋板挫屈，挫屈幅度為 5 mm (照片 3.31)，而此時下側削切蓋板與梁翼板之孔隙下降至 3 mm，剪力板未塗漆部份裸露顯示梁轉動分離現象 (照片 3.32)。位移角 $\theta = -0.03$ 弧度時，下側削切蓋板挫屈幅度達 21 mm，如照片 3.33 所示，因為挫屈幅

度的增大，造成削切蓋板與梁翼板在板子間之焊接處也出現降伏(照片 3.34)，上側削切蓋板與梁翼板間空隙達 3 mm。

(7) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.04$ 弧度 ($P_{max}=258$ kN, $P_{min}=-239$ kN)

位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時，上側削切蓋板挫屈幅度達 21 mm，下側削切蓋板挫屈殘留變形為 7 mm。位移角 $\theta = -0.04$ 弧度時，下側削切蓋板挫屈幅度達 42 mm，其上側削切蓋板挫屈殘留變形為 6 mm(照片 3.35)，下側削切蓋板挫屈致使連接削切蓋板與梁翼板間之焊道被拉裂，兩側焊道被拉裂的長度各為 83 mm、43 mm，如照片 3.36 所示。

(8) 梁端側位移角 $\theta = \pm 0.05$ 弧度 ($P_{max}=265$ kN, $P_{min}=-222$ kN)

位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時，上側削切蓋板挫屈幅度達 33 mm，因為削切蓋板的挫屈幅度遽大，造成上側削切蓋板焊道也被拉裂，兩側拉裂長度為 29 mm，而下側削切蓋板焊道拉裂長度持續擴大，各達 87 mm、70 mm，下側削切蓋板殘留挫屈幅度為 11 mm。位移角 $\theta = -0.05$ 弧度時，下側削切蓋板挫屈幅度達 64 mm(照片 3.37)，由照片可看出下側削切蓋板焊道拉裂非常嚴重，量測後其兩側拉裂長度各達 107 mm、114 mm，上側削切蓋板挫屈後的殘留變形為 10 mm，此時因為剪力板與梁腹板間的轉動分離，造成下側梁翼板端部已頂到端板與削切蓋板間之焊道。

(9) 梁端側位移角 $\theta = 0.06$ 弧度 ($P_{max}=225$ kN)

試體的上下側削切蓋板雖然挫屈幅度隨著梁端位移的增加而持續增大，但油壓制動器所讀取的力量值卻沒有顯著地下降，故實驗持續進行至位移角 $\theta = 0.06$ 弧度。在此一位移角，上側削切蓋板焊道拉裂持續擴大至 37 mm，最後下側削切蓋板焊道完全拉裂(照片 3.38)，因此停止油壓制動器的控制並結束實驗。

3.5.2 整體反應

試體 3 與試體 1 及 2 的主要差別在於採用鋼材 A36 的削切蓋板，目的為比較不同鋼材對削切蓋板的行為有何影響，削切蓋板與鋼管混凝土柱採用螺栓接合，此節主要是藉由分析試驗數據以了解削切式蓋板梁柱接頭的行為，茲針對試體彎矩與梁端位移關係及試體梁端位移分量分別說明如下。

1、彎矩與梁端位移關係

試體 3 的彎矩與梁端位移關係如圖 3.46 所示，在位移角 $\theta = \pm 0.0075$ 弧度前，試體仍保持彈性，經計算其彈性勁度為 55079 kN-m，為理論彈性勁度的 102 % (表 3.1)，當位移角 $\theta = \pm 0.0075$ 弧度後，上下側削切蓋板開始達到降伏，此時相對應的彎矩為 446 kN-m ($= 0.8 M_{np}$)，造成試體勁度開始遞減，反覆載重進行至位移角 $\theta = \pm 0.03$ 弧度時，上下側削切蓋板挫屈，但試體強度在位移角 $\theta = \pm 0.04$ 弧度時並沒有下降，而是先經歷一段平台後再往上升，最大的試體彎矩強度在位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時發生，其值 749 kN-m ($= 1.34 M_{np}$)，在反覆載重往位移角 $\theta = 0.06$ 弧度時，削切蓋板與梁翼板接合之焊道拉裂，而造成強度驟減，試體 3 在正方向上的彎矩與梁端位移之包絡線關係如圖 3.2 所示，由圖可看出試體 3 與試體 2 在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度內，各位移角下之彎矩強度相近，而在位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時，試體 2 因上側削切蓋板挫屈且中央削切處應變已達 17 % 的關係，故彎矩強度下降，而試體 3 雖然上側削切蓋板也已挫屈，但中央削切處應變明顯小於試體 2，其值約為 5 %，故試體 3 之彎矩強度在此時還能往上升。若探討應變差異的原因，判斷可能為材質或削切形狀的不同所造成。

2、梁端位移分量

如第 2.6 節所述，由位移計所量測之數據可分別計算出試體 3 的各梁端位移分量 d_{be} 、 d_c 、 d_{pz} 及 d_{bp} ，圖 3.47 為試體 3 柱轉角 q_c 與彎矩關係圖，圖 3.48 為試體 3 梁柱交會區剪力變形 \bar{g} 與彎矩關係圖，柱最大轉角約為 0.004 弧度，而梁柱交會區最大剪力變形約為 0.0005 弧度，明顯小於試體 2 梁柱交會區之剪力變形，探討其原因，可能為試體 3 削切蓋板與柱採 T 型裝置接合，能降低梁柱交會區的剪力變形。若將每一個正位移角下各梁端位移分量變化情形繪製成圖表，可得圖 3.5，分析各梁端位移分量所佔的比例，正方向之梁端位移分量分析如圖 3.6 所示，第三組為試體 3 之結果，由圖可知試體梁端的主要變形由梁因削切蓋板塑性變形所致之梁端變形分量所造成，柱、梁柱交會區所提供的位移分量都很小。



3.5.3 局部反應

1、削切蓋板橫向應變

圖 3.49 為削切蓋板上應變計與彎矩關係圖，削切蓋板靠近底板之應變計所量測的應變沿橫向之變化如圖 3.50 所示，由圖中可知，當油壓制動器往正方向推時，上側削切蓋板受壓，此處的壓應變在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度前，應變沿橫向分佈約略相等，但在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度後，中間之壓應變大於兩側(如圖 3.50(a)所示)；而當油壓制動器往負方向推時，削切蓋板受拉，其應變分佈如圖 3.50(b)所示，與受壓情形相同，在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度後，中間之壓應變大於兩側，試體三削切蓋板上靠近底板之應變都較試體 1 與試體 2 大，原因為試體 3 此處的板寬較小所致。上下側削切蓋板靠近焊接處之應變沿寬度方向變化情形如圖 3.51、圖 3.52 所示，以上側削切蓋板為例，當削切蓋板受壓時，此處的壓應變在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度前非

常平均，中央與兩側之值相差不大且都在彈性範圍內，但位移角超過 $\theta = 0.03$ 弧度後，焊道開始拉裂，造成此處的壓應變突增(如圖 3.51(a)所示)；當削切蓋板受拉時，此處的應變在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度前，為拉應變且中間略大於兩側，位移角 $\theta = 0.03$ 弧度後，應變由正轉負(如圖 3.51(b)所示)，原因可能為拉應變未克服之前板受壓時所殘留的壓應變所造成。同樣的情形也在下側削切蓋板焊接處發生，如圖 3.52 所示。

2、削切蓋板縱向應變

如圖 3.53(a)所示，當油壓制動器向正方向推時，上側削切蓋板受壓，在位移角 $\theta = 0.0075$ 弧度內，受壓的削切蓋板其壓應變非常平均，沿縱向變化不大，且都保持在彈性範圍內，但在位移角 $\theta = 0.01$ 弧度時，削切蓋板上之壓應變均超過降伏應變，反覆載重進行至位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時，中央最窄處的壓應變突然變小，旁邊的壓應變則持續變大，顯示削切蓋板在此一位移角發生挫屈，此一現象也可在圖 3.54(a)、(b)觀察到，圖中標記處為上下削切蓋板挫屈的時機；反之，當油壓制動器向負方向推時，上側削切蓋板受拉，在位移角 $\theta = 0.005$ 弧度內，削切蓋板中央最窄處之拉應變大於兩側且削切蓋板保持在彈性範圍，在位移角 $\theta = 0.0075$ 弧度時，中央最窄處的拉應變超過鋼材的降伏強度，且其拉應變遠大於兩側，隨著位移角的增大，中間最窄處的拉應變愈驅增大，如圖 3.53(b)所示，顯示當削切蓋板受到較大的拉力時，中央最窄處承受主要的變形。

3、鋼梁翼板應變

圖 3.55 為設置在梁上翼板應變計(圖 2.18)所量測到應變與彎矩歷時，由圖可知，梁翼板最大的軸向應變發生在削切蓋板端部位置的梁翼板附近，梁上翼板在側位移角 $\theta = 0.02$ 弧度時因受壓而達鋼材之降伏應變(如

圖 3.56(a)所示)，而削切蓋板內之梁軸向應變則非常小，始終保持在彈性範圍內；當油壓制動器往負方向推時，梁上翼板受拉，其最大應變出現在位移角 $\theta = 0.05$ 弧度，其值約為降伏應變之 2 倍(如圖 3.56(b)所示)。

圖 3.57 為梁上翼板應變計所量測之應變與估計應變值之比較，其中圖(a)為削切蓋板端部之梁翼板應變比較，而圖(b)為位於削切蓋板內部之梁翼板應變比較，估計應變值為根據第 2.3.4 節所述之(2.63)式計算而得，由圖可知，削切端板之應變計量測之應變值在正方向上與估計值接近，負方向在位移角超過 $\theta = 0.01$ 弧度後實驗值明顯比估計值大，而削切蓋板內部之應變計量測之應變值在所有的位移角都與估計值接近。

4、鋼梁腹板剪應變

圖 3.58 為梁腹板應變計之剪應變與彎矩關係圖。在削切蓋板端部之梁腹板中央之剪應變明顯小於上下兩側之剪應變值，其值都小於鋼板的降伏剪應變(如圖 3.59(a)所示)。而在削切蓋板內部之梁腹板，其剪應變在正方向上，中央都大於兩側(如圖 3.59(b)所示)。若將每個位移角下削切蓋板內部及外部之梁腹板剪應變沿梁深積分，可得兩個剪力值 V_{in} 、 V_{out} ，圖 3.60 為 V_{in} 、 V_{out} 與油壓制動器力量 V_{act} 在每個位移角下之比較，圖中顯示三個梁剪力值在層間位移角 $\theta = 0.03$ 弧度內接近，圖 3.23 第三組為試體 3 蓋板內部梁腹板剪力值除以油壓制動器力量之比較，由圖可知，梁在削切蓋板內仍提供將近 80 % 的剪力抵抗能力。

5、梁柱交會區剪應變

梁柱交會區之應變計所量測的剪應變在不同側位移角達到時沿柱寬度方向變化如圖 3.61 所示。由圖可知，梁柱交會區的剪應變非常平均且都在彈性範圍內，若將剪應變沿寬度積分乘上剪力模數，再乘上鋼管面積，所

得的剪力為梁柱交會區之鋼管上所傳遞的剪力 V_{tube} ，而整個梁柱交會區的剪力 V_{pz} 可由 3.3.3 節公式計算，梁柱交會區混凝土所承受的剪力可由梁柱交會區剪力 V_{pz} 剪掉鋼管上之剪力 V_{tube} ，圖 3.25 為每一各位移角下梁柱交會區剪力分佈情形，圖 3.26 中每一個側位移角第三組為試體 3 其梁柱交會區鋼管與混凝土所佔的剪力比例。由圖可知，一開始梁柱交會區的剪力由鋼管與混凝土平均承受，但當側位移角增大至 $\theta = 0.01$ 弧度時，約有 60~70 % 的剪力由鋼管承受，混凝土所佔的剪力比例隨著側位移角增大而遞減，而鋼管始終在彈性範圍沒有降伏。

梁柱交會區混凝土上的剪應變可由混凝土承受之剪力除以混凝土面積求得，試體 3 其混凝土剪應變隨著側位移角變化情形如圖 3.27 所示。試體 3 梁柱交會區混凝土最大的剪應變發生在 $\theta = 0.03$ 弧度時，其值為 3.2 MPa，約為規定值的 0.4 倍左右。



3.6 試體 4 試驗結果

3.6.1 試驗現象觀察

照片 3.39 為試體 4 試驗前之全景，在試驗進行的過程當中，當達到每個新階段的位移角下之最大位移時都將實驗暫停以進行觀察與紀錄，主要觀察重點為試體 4 在上下削切蓋板上加裝了防止其挫屈的 T 型裝置後，削切蓋板是否會挫屈，以及削切蓋板端部的梁翼板是否降伏。有關試驗過程中的現象描述如下：

- (1) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.0025$ 弧度 ($P_{max} = 44$ kN, $P_{min} = -48$ kN) 到 $\theta = \pm 0.005$ 弧度 ($P_{max} = 77$ kN, $P_{min} = -92$ kN)

試體保持彈性，柱、梁及削切蓋板無降伏現象發生。

- (2) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.0075$ 弧度 ($P_{max} = 87 \text{ kN}$, $P_{min} = -122 \text{ kN}$)

位移角 $\theta = 0.0075$ 弧度時，試體發出連續聲響，發現是連接削切蓋板與梁翼板之螺栓滑動，此現象持續發生直到試驗結束，並造成試體在位移角 $\theta = \pm 0.0075$ 到 $\theta = \pm 0.02$ 弧度間，彎矩抵抗力保持在 361 kN-m ($= 0.65 M_{np}$) 以內，此行為與試體 1 相似。

- (3) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.01$ 弧度 ($P_{max} = 107 \text{ kN}$, $P_{min} = -121 \text{ kN}$)

由於削切蓋板與梁翼板相接的螺栓滑動，在上側削切蓋板端部觀察到梁翼板相對於削切蓋板位移 2 mm (如照片 3.40 所示)。試體彎矩抵抗力因螺栓滑動，依舊保持定值沒有上升。

- (4) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.015$ 弧度 ($P_{max} = 94 \text{ kN}$, $P_{min} = -128 \text{ kN}$)

位移角 $\theta = 0.015$ 弧度時，削切蓋板與梁翼板接合的螺栓觀察到掉漆現象 (如照片 3.41 所示)，原因為螺栓滑動所造成。

- (5) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.02$ 弧度 ($P_{max} = 120 \text{ kN}$, $P_{min} = -177 \text{ kN}$)

反覆載重進行至位移角 $\theta = 0.02$ 弧度時，梁端位移增加造成連接削切蓋板與梁翼板之螺栓頂住螺栓孔而不再滑動，故試體彎矩抵抗力增加，其滑動量為 4 mm 。裝設於梁柱交會區的位移計 L1 發生脫落，故在此一階段最大位移時，將實驗暫停後，重新裝設此一位移計。

- (6) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.03$ 弧度 ($P_{max} = 190 \text{ kN}$, $P_{min} = -246 \text{ kN}$)

位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時，上側削切蓋板在靠近端部的角落之塗漆因為鋼板受拉降伏而開始剝落 (照片 3.42)，同時上側削切蓋板端部之梁翼板也觀察到降伏現象 (照片 3.43)。鋼管混凝土柱上之剪力板下側端部也有些許降伏發生 (照片 3.44)。

- (7) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.04$ 弧度 ($P_{max} = 246 \text{ kN}$, $P_{min} = -282 \text{ kN}$)

位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時，鋼管混凝土柱上之剪力板上側端部降伏(照片 3.45)，梁翼板螺栓孔周圍也觀察到降伏現象(照片 3.46 所)。

(8) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.05$ 弧度($P_{max} = 283 \text{ kN}$, $P_{min} = -307 \text{ kN}$)

位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時，連接梁下翼板、下側削切蓋板及 T 型裝置之螺栓傾斜(照片 3.47)，顯示當 T 型裝置滑移時，因 T 形裝置的螺栓孔為槽型孔，故此端直徑 16 mm 螺栓可以滑移，但螺栓的另一端則頂住梁翼板上之螺栓孔，而無法滑移，造成螺栓變形，同樣的情形也發生在上梁翼板、上側削切蓋板及 T 型裝置之螺栓。位移角 $\theta = -0.05$ 弧度時，下梁翼板發生降伏現象(照片 3.48)，位置為削切蓋板端部之梁翼板內側。

(9) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.06$ 弧度($P_{max} = 303 \text{ kN}$, $P_{min} = -279 \text{ kN}$)

位移角 $\theta = 0.06$ 弧度時，上下側削切蓋板端部之梁翼板降伏較之前顯著(如照片 3.49 照片 3.50 所示)，位移角 $\theta = -0.06$ 弧度時，連接上梁翼板、上側削切蓋板及 T 型裝置之螺栓被剪斷而彈出試體(照片 3.51)，下側削切蓋板端部之梁翼板內側之降伏較之前顯著(照片 3.52)。

(10) 層間側位移角 $\theta = \pm 0.07$ 弧度($P_{max} = 276 \text{ kN}$)

因試體彎矩強度持續上升，故實驗繼續進行至位移角 $\theta = 0.07$ 弧度，照片 3.53 為此一位移角之試驗全景。在此位移角下，連接下梁翼板、下側削切蓋板及 T 型裝置之螺栓也被剪斷而彈出試體(照片 3.54)，由照片中可觀察到梁翼板螺栓孔位與削切蓋板之螺栓孔位分離，此為造成螺栓剪斷之原因。上側 T 型裝置在此時因螺栓剪斷而無法繼續發揮防止削切蓋板挫屈之作用，上側削切蓋板在此時挫屈(照片 3.55)，挫屈幅度為 5 mm，試體 4 之彎矩抵抗力因削切蓋板的挫屈而下降，其下降比例為正方向上最大彎矩抵抗力的 9 %。故實驗在此位移角下停止油

壓致動器的控制，結束實驗。照片 3.56 為剪斷之螺栓與完好之螺栓的比較。

3.6.2 整體反應

此節主要是藉由分析試驗數據以了解削切式蓋板梁柱接頭的行為，茲針對試體彎矩與梁端位移關係及梁端位移分量分別說明如下。

1、彎矩與梁端位移關係

如圖 3.62 所示，圖中在位移角 $\theta = 0.0075$ 到 $\theta = 0.015$ 弧度之間，曲線呈現微小跳動為螺栓滑動所造成，此時的彎矩約為 362 kN-m ($= 0.65 M_{np}$)，經計算傳遞至削切蓋板的力量為 702 kN (一顆螺栓約承受 117 kN)，大於摩擦型螺栓提供的強度(106 kN)，位移角 $\theta = 0.0075$ 弧度內，試體仍保持在彈性範圍且螺栓還未滑動，將其遲滯迴圈做線性回歸可得試體 4 之彈性勁度，其值為 48142 kN-m，為理論彈性勁度的 0.89 % (見表 3.1)，在位移角超過 $\theta = 0.02$ 弧度後，螺栓的滑動受到螺栓孔的限制而不再滑動，此時力量才開始往上增加，最大的彎矩強度出現在位移角 $\theta = -0.06$ 弧度，其值為 867 kN-m ($= 1.55 M_{np}$)，由圖中可看出試體 4 的層間位移角在 0.07 弧度因削切蓋板非彈性挫屈而造成強度下降，各組試體之降伏彎矩 $M_{y,test}$ 、位移角 $q = 0.04$ 弧度時之彎矩強度 $M_{0.04,test}$ 及最大彎矩強度 $M_{max,test}$ 與梁標稱降伏強度 M_{np} 之比值列於表 3.2。試體 4 的彎矩與梁端位移之包絡線關係如圖 3.2 所示，由圖可看出試體 4 與試體 1 在位移角 $\theta = 0.05$ 弧度前，各位移角下之彎矩強度相近，兩者不同處在於位移角 $\theta = 0.06$ 時，試體 1 削切蓋板挫屈而強度下降，而試體 4 在 T 型加勁板的作用下，削切蓋板沒有挫屈，故強度依舊往上升。

表 3.3 為各組試體實驗所得 M_{RFP} 、 M_{RFPF} 、 M_{RFPF}/M_{np} 及 M_{RFPF}/M_{yf} ，若將表 3.3 與表 2.1 比較，由表中各數值的比較可以發現試體 1、試體 3 之最大彎矩強度皆小於實際 M_{yf} ，約為實際 M_{yf} 的 0.97 倍，符合第 2.4.1 節所述之試體設計要求；試體 2 之彎矩強度較試體 1 高，約為實際 M_{yf} 的 1.01 倍，顯示在削切蓋板上加置三角形加勁板能提昇試體彎矩強度約 4%，而試體 4 之彎矩強度約為實際 M_{yf} 的 1.12 倍，原因為試體 4 在上下側削切蓋板各加置一 T 型防挫屈加勁板，目的為利用此加勁板來防止削切蓋板挫屈，並藉由 T 型加勁板與削切蓋板開設的長槽型螺栓孔，使得 T 型加勁板與削切蓋板、梁翼板接合之直徑 16 mm 螺栓能夠滑動，以避免 T 型加勁板參與削切蓋板的消能行為，但由試驗結果顯示，因在梁翼板上之螺栓孔並沒有如同 T 型加勁板、削切蓋板一樣開設長槽孔，而限制住接合螺栓的滑動，造成有一部份力量由 T 型加勁板傳遞，故試體 4 柱面彎矩強度較當初設計值 ($0.83 M_{yf}$) 大。若計算接合 T 型加勁板之螺栓受剪所造成的柱面彎矩強度，其值約為 147 kN-m，將原本柱面彎矩強度扣除這部份彎矩強度，則為實際削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度，經計算約為 $0.93 M_{yf}$ 。表 3.4 為各組試體之 M_{RFP} 除以力臂 ($d_b + t_r$) 計算所得削切蓋板之最大承受力量 P_{RFP} ，其中試體 4 為以扣掉 T 型加勁板的彎矩強度之 M_{RFP} 來計算。

2、轉角分量

試體 4 的整體轉角主要由梁、柱及梁柱交會區所貢獻，如第 2.6 節所述，由位移計所量測的數據可分別計算出試體 4 的各梁端位移分量 d_{be} 、 d_c 、 d_{pz} 及 d_{bp} ，圖 3.63 為試體 4 柱轉角 q_c 與彎矩之關係圖，圖 3.64 為試體 4 梁柱交會區剪力變形 \bar{g} 與彎矩之關係圖，曲線跳動的原因為螺栓滑動所致，柱最大轉角約為 0.005 弧度，與試體 1 之柱最大轉角接近，而梁柱交會區最

大剪力變形約為0.001弧度(排除跳動的點)，明顯小於試體1梁柱交會區之最大轉角，原因可能為試體4之削切蓋板與柱採T型裝置接合有關。若將每一個正位移角下各梁端位移分量變化情形繪製成圖表(圖3.5)，分析各轉角分量所佔的比例，正方向之梁端位移分量分析如圖3.6所示，圖中第四組為試體4之結果，由圖可知，梁與梁柱交會區所提供的位移分量很小，梁端大部份的變形由梁因削切蓋板塑性變形所致之梁端位移分量所貢獻。

3.6.3 局部反應

1、鋼梁翼板應變

圖3.65為設置在梁上翼板應變計(圖2.19)所量測到應變與彎矩歷時，由圖可知，梁翼板最大的軸向應變發生在削切蓋板端部位置的梁翼板附近，梁上翼板在側位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時因受壓而達鋼材之降伏應變(如圖3.66(a)所示)，而削切蓋板內之梁翼板軸向應變則非常小，始終保持在彈性範圍內；當油壓制動器往負方向推時，梁上翼板受拉，其最大應變發生在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度，其值略小於降伏應變(如圖3.66(b)所示)。

圖3.67為梁上翼板應變計所量測之應變與估計應變值之比較，其中圖3.67(a)為削切蓋板端部之梁翼板應變比較，而圖3.67(b)為位於削切蓋板內部之梁翼板應變比較，估計應變值為根據第2.3.4節所述之(2.63)式計算而得，由圖可知，削切端部之應變計量測之應變值在正方向上與估計值接近，負方向上在位移角超過 $\theta = 0.02$ 弧度後估計值明顯比實驗值大，而削切蓋板內部之應變計量測之應變值與估計值接近。

4、鋼梁腹板剪應變

圖3.68為梁腹板應變計之剪應變與彎矩關係圖。削切蓋板端部的梁腹

板中央之剪應變略小於上下兩側之剪應變，且受拉側之剪應變大於受壓側(如圖 3.69 所示)。位於削切蓋板內之梁腹板剪應變在側位移角 $\theta = \pm 0.04$ 弧度前，其分佈為中央略小於兩側之剪應變值，且受壓側大於受拉側(如圖 3.70 所示)。若將每個位移角下削切蓋板內部及外部之梁腹板剪應變沿梁深積分，可得兩個剪力值 V_{in} 、 V_{out} ，圖 3.71 為 V_{in} 、 V_{out} 與油壓制動器力量 V_{act} 在每個位移角下之比較，圖中顯示蓋板內部梁腹板之剪力 V_{in} 小於其他兩者，在超過位移角 $\theta = 0.03$ 弧度後， V_{in} 明顯較小，圖 3.23 第三組為試體 3 蓋板內部梁腹板剪力值除以油壓制動器力量之比較。

5、梁柱交會區剪應變

梁柱交會區之應變計所量測的剪應變在不同側位移角達到時沿柱寬度方向變化如圖 3.72 所示。由圖可知，梁柱交會區的剪應變非常平均且都在彈性範圍內，若將剪應變沿寬度積分乘上剪力模數，再乘上鋼管面積，所得之剪力為梁柱交會區之鋼管上所傳遞的剪力 V_{tube} ，而整個梁柱交會區的剪力 V_{pz} 可由第 3.3.3 節所述計算，則梁柱交會區混凝土所承受的剪力 V_{con} 可由梁柱交會區剪力 V_{pz} 減掉鋼管上之剪力 V_{tube} 計算出來，圖 3.25 為每一各位移角下梁柱交會區剪力分佈情形，圖 3.26 中每一個側位移角第三排為試體 3 其梁柱交會區鋼管與混凝土所佔的剪力比例。由圖可知，一開始梁柱交會區的剪力由鋼管與混凝土平均承受，但當側位移角增大至 ± 0.01 弧度後，60~70% 的剪力則由鋼管承受，而鋼管則始終在彈性範圍沒有降伏。

梁柱交會區混凝土上的剪應變可由混凝土承受之剪力 V_{con} 除以混凝土面積 $A_c (= 0.104 \text{ mm}^2)$ 求得，各組試體其混凝土剪應變隨著側位移角變化情形如圖 3.27 所示。根據 ACI 318M-02(2002) 21.5.3 規定，混凝土剪應變在四邊圍束下，不能超過 $1.7\sqrt{f'_c}$ ， f'_c 為實際混凝土抗壓試驗所得的抗壓強度，

由圖可知，試體一梁柱交會區混凝土最大的剪應變發生在0.05弧度時，其值為 3.5 MPa，約為規定值的 0.4 倍左右。



第四章 有限元素分析

4.1 前言

由前述之削切蓋板梁柱接頭試驗結果可知，本研究使用的削切蓋板，受力變形行為頗為複雜，削切蓋板的尺寸，如厚度、削切最窄處寬度及削切半徑均影響接頭的勁度與強度。

為了進一步了解接頭的行為及削切蓋板受壓及受拉之強度，本研究使用美國 Hibbit, Karlsson and Sorensen 公司所研發的 ABAQUS 有限元素分析程式(2003)進行結構試體非線性有限元素分析，以探討削切蓋板之力學行為與機制。4.2 節介紹鋼材反覆載重試驗結果與有限元素模擬，4.3 節為削切蓋板有限元素建立，4.4 節為試體有限元素模型的建立，4.5 為有限元素分析結果討論，4.6 為削切蓋板之參數研究，4.7 節為試體設計修正。

4.2 鋼材反覆載重試驗

為了準確模擬整個梁柱接頭在反覆載重下之行為，鋼材彈性模數、降伏應力、極限應力及應變硬化效應等都非常重要，若只採用鋼材拉伸試驗所得的應力-應變曲線來模擬反覆載重下的梁柱接頭，應變硬化效應會較試驗結果小，故分析模型中之材料應力-應變關係必須藉由鋼材反覆載重試驗所得的結果找出分析模型中所需的應變硬化效應參數。鋼材反覆載重試驗細節如下所述：

4.2.1 試驗鋼材尺寸

本試驗共製作 6 組鋼材試片，其中三組材質為 A572 Gr. 50 (編號為 A)，另外三組材質為 A36 (編號為 B)，六組試片尺寸一致，依據 ASTM

E606-80 所建議之尺寸做設計，ASTM E606-80 對鋼材反覆載重試片規定的尺寸為中間相同直徑處長度(L)與直徑(f)的比值為 $2 \leq L/f \leq 4$ ，中間相同直徑處到兩側夾具處之漸變斷面之半徑(R)與中間之直徑(f)的比值為 $2 \leq R/f \leq 6$ ，而夾具處的直徑為 $2f$ ，並參考學者 Dazio(2001)在 UCSD 所做鋼材反覆載重試驗中之試片尺寸，其尺寸為 $L/f=2$ 、 $R/f=6.1$ 及夾具處直徑為 $2f$ ，都在規範要求尺寸上。本研究試片所採用的尺寸(如圖 4.1 所示)為中間相同直徑處長度與直徑的比值為 3($L/f=30 \text{ mm}/10 \text{ mm}=3$)，中間相同直徑處到兩側夾具處之漸變斷面之半徑與中間之直徑的比值為 3($R/f=30\text{mm}/10 \text{ mm}=3$)，夾具處的直徑為 $2f$ ($20 \text{ mm}/10 \text{ mm}$)。表 4.1 為試驗前所量測的各試片直徑(f)、中間相同直徑處長度(L)及上下側夾具間距。



4.2.2 反覆載重歷時

試驗採用兩種載重歷時，一種為固定每次遲滯迴圈下之試片應變達 0.025 之載重歷時(如圖 4.2 所示)，其目的為在固定的應變幅度下，找出等向硬化(Isotropic Hardening)參數；另一種為在一開始的遲滯迴圈，使試片應變由 0.01、0.015、0.02、0.025 穩定地增加至 0.035，而之後的遲滯迴圈都固定試片應變為 0.035(如圖 4.3(a)所示)，其目的為獲得鋼材在反覆載重下走動硬化(Kinematic Hardening)參數。試驗載重模式為應變控制，藉由量測儀器(extensometer)所讀取的應變來控制載重歷時，其加載速率(Strain Rate)為 $0.02/\text{min}$ ，並在試驗時觀察試片，若試片產生挫屈，則停止試驗。

4.2.3 試驗結果

照片 4.1 為試驗設置，構架的夾具夾在試片兩端，相距 80 mm。試片

A1 載重歷時為固定的應變幅度，試片 A1 在整個試驗過程中未發現挫屈現象，但實驗結束後觀察試片，發現試片 A1 有些微挫屈現象(照片 4.2)，其試驗結果如圖 4.4 所示。試片 A2 之試驗結果如圖 4.5 所示，其載重歷時為穩定增加應變幅度，試片 A2 在反覆載重進行至第 9 迴圈時，發現試片有些微的挫屈，但評估後試驗還是繼續進行，在第 13 個迴圈時，因挫屈加劇，而停止試驗。試片 A3 其載重歷時為穩定增加應變幅度，但為了避免試片發生挫屈，在試驗前決定改變載重歷時，在應變幅度達 0.025 後固定應變幅度，試驗結果如圖 4.6 所示。試片 B1 載重歷時為固定的應變幅度，但在加載時載重歷時並沒有照輸入值加載，故在中途就停止此一試驗，此為失敗的試驗，結果如圖 4.7 所示。試片 B2 載重歷時為固定的應變幅度，反覆載重進行至第 7 個迴圈時，觀察到試片已發生挫屈，故停止試驗，試驗結果如圖 4.8 所示。試片 B3 載重歷時為穩定增加應變幅度(與 A3 相同的載重歷時)，試驗結果如圖 4.9 所示。



4.2.4 材料模型之建立

為了找出模擬試體接頭所適用的鋼材材料性質，針對上述鋼材反覆載重試驗所得的結果，以非線性有限元素軟體 ABAQUS 建立一個與試片相同尺寸的模型(圖 4.10)，並在模型的一端束制其三個位移自由度，另一端輸入與試驗相同的位移載重歷時。藉由程式分析所得的應力 - 應變曲線與試驗之應力 - 應變曲線比較，如此就可找出材料模型所需的應變硬化參數，其分析細節如下：

1. 等向硬化(Isotropic Hardening)參數

等向硬化規則為假設受壓降伏應力等於受拉降伏應力，如圖 4.11 所示，材料原本的降伏應力為 A 點(拉)和 A' 點(壓)，但材料受拉至 B 點後解壓

直到 B' 點才會再降伏，則 $\overline{B'C} = \overline{BC}$ ，即降伏面的中心不移動，但降伏面為等方向性變大。依據 ABAQUS/Standard User's Manual 11.2.2，模型等向硬化行為主要是定義在反覆載重下材料降伏面 s^0 (Yield Surface) 與等價塑性應變 \bar{e}^{pl} (Equivalent Plastic Strain) 的關係，其關係可由一指數方程式來表示：

$$s^0 = s_0 + Q(1 - e^{-b\bar{e}^{pl}}) \quad (4.1)$$

其中 s_0 為塑性應變為零時之降伏應力， Q 為控制在每個反覆載重下降伏面之增量， b 為降伏面之增加速率。依據相同應變幅度之鋼材反覆載重試驗，經計算可得每個迴圈下之降伏面 s^0 與等價塑性應變 \bar{e}^{pl} ，其計算式如下：

$$s_i^0 = s_i^t - (s_i^t + s_i^c)/2 \quad (4.2)$$

$$\bar{e}^{pl} = \frac{1}{2}(4i - 3)\Delta e^{pl} \quad (4.3)$$

其中 s_i^t 、 s_i^c 與 Δe^{pl} 之定義如圖 4.12 所示， i 為迴圈數。當計算出每個迴圈之資料點 (s_i^0, \bar{e}^{pl}) ，以式(4.1)進行迴歸，就可得到等向硬化參數 Q 與 b ，圖 4.13 與圖 4.14 分別為試片 A1 與 B2 之迴歸分析結果。

2. 走動硬化 (Kinematic Hardening) 參數

走動硬化規則主要是假設材料在塑性變形時，降伏應力面在保持大小、形狀不變的情況下在應力空間中移動，由於彈性範圍維持不變，所以可以描述包辛格效應 (Bauschinger Effect)，如圖 4.15 所示， $\overline{AA'} = \overline{BB'}$ 且彈性區域的中心在 $\overline{O'O''}$ 上移動。依據 ABAQUS/Standard User's Manual 11.2.2，模型的走動硬化行為包含了兩個部份，一個為線性之走動硬化，另一個為非線性之走動硬化，其中線性之走動硬化遵循 Zielger (1959) 所提出的走動硬化規則，主要是描述降伏面中心在應力空間中的移動，而非線性走動硬化之表示式如下

$$a = \frac{C}{g}(1 - e^{-ge^{pl}}) + a_1 e^{-ge^{pl}} \quad (4.4)$$

其中 a 為降伏面在應力空間中的移動量， e^{pl} 為塑性應變， C 為初始的走動硬化斜率(模數)， g 為走動硬化斜率隨著塑性應變的增加而遞減之速率， a_1 為初始降伏面在應力空間中的移動量。依據穩定增加應變幅度的鋼材反覆載重試驗，可以找出一穩定飽和的迴圈，而所謂的穩定飽和迴圈為此時的遲滯迴圈形狀不再改變，應力不再明顯地增加，此遲滯迴圈資料點如圖 4.16 所示，若將圖上 $e=0$ 之軸線平移至 e_p^0 這一點，則每個資料點的塑性應變 e_i^{pl} 可由下式計算：

$$e_i^{pl} = e_i - \frac{S_i}{E} - e_p^0 \quad (4.5)$$

其中 e_i^{pl} 代表材料剛進入塑性範圍，故 $e_i^{pl} = 0$ 。而對於每個資料點 (s_i, e_i^{pl}) ，降伏面在應力空間中的移動量 a_i 可由下式計算：

$$a_i = s_i - s_s \quad (4.6)$$

$$s_s = (s_1 + s_n) / 2 \quad (4.7)$$

其中 s_s 為平均降伏面大小， s_1 為材料剛進入塑性範圍時的應力， s_n 為迴圈最後的資料點時的應力(如圖 4.16 所示)。當計算出此迴圈之資料點 (a_i, e_i^{pl}) ，以式(4.4)進行迴歸，就可得到走動硬化參數 C 與 g ，圖 4.17、圖 4.18 及圖 4.19 分別為試片 A2、A3 與 B3 之迴歸結果。

4.2.5 材料模型分析結果

有了上述之硬化參數後，可利用 *Cyclic Hardening, Parameter 之功能將 Q 與 b 輸入來定義材料等向硬化行為及 *Plastic, Hardening=Combined, Data Type=Parameters 之功能將 C 與 g 輸入來定義材料走動硬化行為。材料模型

只模擬穩定增加應變幅度之鋼材反覆載重試驗(試片 A2、A3 及 B3)，試片 A2 分析結果如圖 4.20 至圖 4.22 所示，各遲滯迴圈下之最大應力與實驗相似，但包辛格效應的模擬還不夠準確。根據實驗與分析結果，可整理出材料模型最佳的硬化參數，表 4.2、表 4.3 為兩種鋼材 A572 Gr. 50 與 A36 其 ABAQUS 材料設定的輸入指令及最佳硬化參數。

4.3 削切蓋板有限元素模型建立

圖 4.23 為試體 1 與試體 2 之削切蓋板有限元素分析模型網格，邊界條件根據實驗觀測到的削切蓋板挫屈長度與削切蓋板全長之比例(見表 4.4)，其中削切蓋板全長為由柱面至與梁翼板接合的第一排螺栓處或焊接處，由表可知，削切蓋板的有效挫屈係數 K 平均約為 0.5，故模型之邊界條件採用兩端固接的方式模擬。模型中在削切蓋板底下設置彈簧的目的為防止板的面內挫屈發生，故設定彈簧在受壓時有無限大的勁度，而受拉勁度接近零，分析模型的施力方式為在一端施加軸向位移。

圖 4.24 為兩組削切蓋板分析模型之力量與位移關係比較，其中反覆載重的位移歷時為根據實驗時設置在削切蓋板上之位移計所量測到每一位移角下削切蓋板的位移。由圖可知兩組削切蓋板分析模型所得之遲滯迴圈相似，最大受壓與受拉力量接近，顯示設置加勁板對削切蓋板整體行為與力量並無顯著的影響。

圖 4.25 為挫屈時削切蓋板分析模型應變沿軸向分佈情形，其中三角型標記為試體 2 實驗挫屈時應變計所量測之應變，圖中顯示試體 2 削切蓋板分析模型之軸向應變與實驗值接近，且與試體 1 削切蓋板分析模型軸向應變分佈類似，試體 1 削切蓋板分析模型應變略大於試體 2。

4.4 試體有限元素模型建立

為了與實驗結果比較，分析模型採用與試體相同尺寸的削切蓋板梁柱接頭來模擬，亦即一鋼管混凝土柱與一單梁及梁上下側之削切蓋板、加勁板組成一組結構模型，圖 4.26 為試體 2 結構模型之網格，另外本研究模擬了無加勁板之試體 2 梁柱接頭及一組傳統式蓋板梁柱接頭，其結構模型之網格如圖 4.27、圖 4.28 所示，而有關結構模型之建立、材料性質與接合細節的一些特性與假設，分述如下。

4.4.1 結構模型

為得到削切蓋板梁柱接頭較準確的應力分佈情形，元素採用兩種三維結構元素，其中鋼管、梁及削切蓋板皆採用 4 個節點的薄殼元素(S4R)來模擬，每個節點有 5 個自由度；核心混凝土則是採用 8 個節點之磚元素模擬(C3D8R)而成，每個節點有 3 個位移自由度。在結構模型中，柱頂之節點束制 2 個位移自由度，同樣地在柱底之節點也束制 3 個位移自由度，以模擬試驗時柱頂與柱底之鉸接。

分析時採用兩種加載模式，一種為在梁端施加單向的漸增位移，另一種為在梁端施加與實驗一致的反覆載重位移，單向的漸增位移加載模式能節省程式運算的時間與硬碟的使用容量，而反覆載重位移加載模式較為繁複且會造成程式不易收斂，但分析較貼近實驗。

4.4.2 材料性質

輸入模型之材料性質乃根據實驗之材料試驗結果，結構模型之構材主要分為鋼與混凝土兩種材料，材料性質分述如下：

鋼材材料性質

1. 所有鋼材之彈性模數皆為 203000 MPa，波松比為 0.3。
2. 單向的漸增位移加載模式為模擬鋼材真實之力學行為，所有的鋼材之應力 - 應變曲線採用實際鋼材拉伸試驗結果所得之應力 - 應變曲線(如圖 2.13 所示)，而反覆載重加載模式則採用鋼材反覆載重試驗之分析模型所得的硬化參數(如表 4.2 或表 4.3 所示)。

混凝土材料性質

混凝土受圍束之應力與應變關係，採用 Mander et.al. (1998)提出的模型理論，應力與應變關係如圖 4.29 所示，Mander 模型公式描述的混凝土應力 - 應變關係為：

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r-1+x^r} \quad (4.8)$$

$$\text{式中 } f'_{cc} = f'_c \left[2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254} \right] \quad (4.9)$$

$$x = \frac{e_c}{e_{cc}} \quad (4.10)$$

$$e_{cc} = 0.002 \times \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad (4.11)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{\text{sec}}} \quad (4.12)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (4.13)$$

$$E_{\text{sec}} = \frac{f'_{cc}}{e_{cc}} \quad (4.14)$$

受鋼管圍束後的混凝土極限壓應變 e_{cu} 及側向圍束應力 f'_l 為 (Priestley, Seibe,

and Calvi 1995) :

$$e_{cu} = 0.004 + \frac{1.4r_j f_{yj} e_{sj}}{f'_{cc}} \quad (4.15)$$

$$f'_l = 0.95 \times \left(\frac{2f_{yj} t_j}{D - 2t_j} \right) \approx 0.95 \times \left(\frac{2f_{yj} t_j}{D} \right) \quad (4.16)$$

其中 E_c 為混凝土彈性模數， E_{sec} 為割線模數， f'_l 為鋼管對混凝土提供的圍束力， e_{cu} 為圍束混凝土極限應變， f'_{cc} 為受圍束混凝土的抗壓強度。 r_j 為圍束鋼管體積鋼筋比 ($= 4t_j / D$)， D 為鋼管直徑， t_j 為鋼管厚度， f_{yj} 為鋼板降伏強度， e_{sj} 為最大拉應歷時之應變。

ABAQUS 可模擬混凝土材料拉壓強度不同之特性及材料軟化機制，因此本研究之混凝土採用 ABAQUS 所提供之內建材料性質，其應力 - 應變曲線在 $0.3f'_{cc}$ 內仍保持線彈性行為，可利用 *Elastic 來定義彈性模數及波松比 ($= 0.2$)，而大於 $0.3f'_{cc}$ ，利用 *Concrete 之功能定義混凝土超出彈性段的之應力與應變關係，而混凝土極限抗壓強度後之強度下降段亦在此定義之。由於混凝土為脆性材料，在開裂後，強度迅速下降，對於這種行為，ABAQUS 假設材料強度的損失主要是由於材料軟化效應所造成，因此裂縫之發生是以彈性勁度的損失來模擬，這種模擬方式有一優點，即混凝土受壓時，開裂的裂縫可再次閉合。因此極限拉力強度至應力為零時之範圍，可利用 *Tension Stiffening 之功能定義混凝土材料之軟化行為，因無混凝土受拉試驗資料可參考，故採用 ABAQUS 建議值 (如圖 4.30 所示)，其極限拉應力 s'_u 約為受圍束混凝土抗壓強度 f'_{cc} 的 0.1 倍，所對應的極限拉應變為 $e'_u = s'_u / E_c$ ，而最後拉應力為零時之拉應變為極限拉應變的 10 倍。圖 4.31 為模型中混凝土受壓及受拉之應力 - 應變關係。

接觸性質

由於鋼管混凝土柱之鋼管與混凝土間不具有良好的握裹力，不能視為一連續體，因此需使用接觸面(Contact)來定義兩者之間的關係，在有限元素分析中，接觸條件是一種特殊的不連續約束，它允許力從模型的一部份傳遞到另一部份，因為只有當兩個表面發生接觸時才会有約束產生，而當兩個接觸面分開時，就不存在約束作用了。ABAQUS對接觸面法向行為的定義有兩種方式，一為硬性接觸(Hard Contact)，另一為軟性接觸(Soft Contact)，所謂的硬性接觸為當兩個表面之間的間隙歸零時，即加入接觸限制，但對接觸面間能夠傳遞的接觸壓力大小並未做任何限制；當接觸壓力變成零或負值時，兩個接觸面會分離並解除限制，圖 4.32 說明硬性接觸其壓力與間隙的關係。而軟性接觸則指當兩個表面間之間隙開始減少時，其接觸壓力也開始傳遞至另一個接觸面，其壓力與間隙的關係為指數關係(如圖 4.33 所示)。

在結構模型中鋼管部份使用薄殼元素模擬，其模擬的幾何位置為鋼管中心線，而與模擬核心混凝土的磚元素間有一空隙，若使用硬性接觸，則必須先克服此一空隙後，壓力才會由鋼管傳遞至混凝土，但實際狀況鋼管與混凝土間沒有空隙，所以本研究使用軟性接觸來模擬接觸面之法向行為。另外通常當表面發生接觸時，在接觸面間會傳遞切向力，所以在分析中就要考慮阻止表面間相對滑動的摩擦力，摩擦力 t 的定義為：

$$t = m p \quad (4.17)$$

其中 m 為摩擦係數， p 為兩接觸面間的接觸壓力，結構模型中摩擦係數 $m = 0.3$ 。

接合束制性質

結構模型中剪力板與梁腹板的螺栓模擬採用線性束制方程式(Linear Constraint Equations)來模擬，在 ABAQUS 中可利用*Equation 之功能將所要束制的個別節點以線性束制方程式結合，束制的自由度為三個位移自由度。所謂線性束制方程式為一包含所要束制節點的位移及所要束制的自由度，表示式如下：

$$A_1 u_i^P + A_2 u_j^Q + \dots + A_N u_k^R = 0 \quad (4.18)$$

其中 $A_1 \dots A_N$ 為定義節點相對運動的常數， u_i^P 為節點 P 在自由度 i 的變形量，其他如 u_j^Q 、 u_k^R 以此類推。而結構模型中梁與削切蓋板間的接合若採用線性束制方程式來接合，其過程較為繁複，必須針對接合處每個節點各寫六個線性束制方程式(每個線性束制方程式對應一個自由度)，為了有效率地處理梁與削切蓋板間的接合，故採用動態接合束制(Kinematic Coupling Constraints)來模擬，動態接合束制可以有效地束制接合一群節點，使所要束制的節點群對著某一參考點做剛體運動，而此參考點則為節點群的形心位置。在 ABAQUS 中利用*Rigid Body 之功能將所要束制的一群節點以動態接合束制方式結合，其束制的自由度包含所有位移及旋轉自由度。

挫屈控制

試體 2 分析模型與無加勁板試體 2 分析模型削切蓋板與梁均採用薄殼元素模擬，故削切蓋板與梁翼板間有一空隙存在，當梁端施加位移時，削切蓋板很有可能往梁翼板方向挫屈，所以為了防止這種情況發生，本研究在削切蓋板與梁翼板間放置多個彈簧，並使每個彈簧在受壓方向有無限大之勁度，但其受拉勁度為零，圖 4.34 為試體 2 分析模型彈簧的放置情形。圖 4.35 為蓋板梁柱接頭梁翼板挫屈模態。

4.5 分析結果

本研究有限元素分析主要模擬三組接頭型式，分別為試體 2 梁柱接頭、無加勁板的試體 2 梁柱接頭及蓋板梁柱接頭。本節針對三種接頭型式其有限元素分析所得的彎矩與位移關係、彈性勁度、局部行為及各項參數加以討論，其細節詳述如下：

4.5.1 彎矩與梁端位移關係

試體 2 分析模型反覆載重加載模擬至位移角 $\theta = 0.04$ 弧度的第二個迴圈時就停止，原因為分析模型上側削切蓋板的挫屈幅度太大，造成程式無法收斂，但分析結果顯示，在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度前整體反應之遲滯迴圈與實驗結果相近(圖 4.36)，圖中顯示分析模型在反覆載重進行至位移角 $\theta = 0.04$ 弧度第一個迴圈時達到最大的彎矩強度，其值為 726 kN-m，與實驗值之誤差為 3.6 %。圖 4.37 為試體 2 分析模型在梁端施加單向漸增位移所得的彎矩 - 位移關係與實驗遲滯迴圈之包絡線及試體 2 分析模型反覆載重所得遲滯迴圈之包絡線(正方向)之比較，由圖可知，單向漸增位移所得的彎矩 - 位移曲線在位移角 $\theta = 0.015 \sim 0.02$ 弧度間呈現一短暫平台，其原因為削切蓋板進入降伏平台，而導致此時雖然位移持續增加，但分析模型的強度還是維持一定，圖中顯示試體 2 分析模型單向漸增位移所得的最大彎矩強度在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時產生，其值為 668 kN-m，小於實驗之最大彎矩強度 753 kN-m，誤差為 11 %，原因為材料硬化效應的影響。

為了探討試體 2 在削切蓋板上加置的三角形加勁板對接頭行為有何影響，本研究另外模擬了一組無加勁板的試體 2 分析模型，與試體 2 分析模型之彎矩與位移關係比較如圖 4.38(a)，由圖可知無加勁板之試體 2 分析模型之遲滯迴圈在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度內與試體 2 分析模型相近，但在進行位

移角 $\theta = 0.04$ 弧度的第一個迴圈時受壓側削切蓋板挫屈(方形標記處)，而含加勁板之試體削切蓋板於反向加載時才挫屈(三角形標記處)；圖 4.38 (b) 為在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度第一次迴圈時削切蓋板面外位移比較，圖中顯示不含加勁板之試體 2 分析模型因挫屈而使得削切中央之面外位移變大，而試體 2 分析模型在此位移角還未挫屈，由圖中可看出兩者差別。

蓋板梁柱接頭分析模型採用第二章蓋板梁柱接頭設計所述之尺寸，分析結果之彎矩與位移關係與試體 2 分析模型之比較如圖 4.39(a)，由圖可知蓋板梁柱接頭分析模型在位移角 3 % 內與試體 2 分析模型相近，但在位移角 4 % 的第一個迴圈時達分析模型之最大彎矩強度，值為 804 kN-m，大於試體 2 分析模型 11 %，反覆載重進行至位移角 4 % 的第二個迴圈時，蓋板梁柱接頭分析模型於蓋板端部的梁開始挫屈(方形標記處)，致使位移角 $\theta = 0.05$ 弧度時強度下降；圖 4.39(b)為彎矩與位移關係正方向之包絡線比較，圖中顯示蓋板梁柱接頭分析模型在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度達其最大強度，之後因蓋板端部之梁開始挫屈而強度下降。

4.5.2 彈性勁度

各組有限元素分析模型之彈性勁度列於表 4.5 之第二欄，而其中第三欄為各組分析模型之彈性勁度與 Englekirk (1994)所提之簡化彈性勁度 K_{theory} (= 53975 kN-m) 之比值， K_{theory} 的計算如第 2.3.5 節所述，第四欄為各組分析模型之彈性勁度與試體 2 試驗之彈性勁度 K_{exp} (= 48499 kN-m) 比值。本研究有限元素分析中，分析模型的彈性勁度計算以彎矩與位移關係之彈性段迴歸而得，由表可知，試體 2 分析模型之彈性勁度小於實驗值，誤差為 10 %，若比較各組分析模型彈性勁度之差異，發現蓋板梁柱接頭略大於其他兩組分析模型。

4.5.3 局部反應

軸向應變分佈

圖 4.40 分別為各組分析模型在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時軸向應力 S22 之分佈圖，圖 4.41 為在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時之梁翼板應變沿著縱向分佈，圖中顯示試體 2 分析模型之梁翼板最大應變發生在削切蓋板端部之梁翼板，最大應變值在受壓與受拉側分別為-0.0038 與 0.004，其中受壓側之最大應變與實驗值(三角型標記處)較為接近，但受拉側之最大應變卻大於實驗值的兩倍左右，而削切蓋板內部之梁翼板應變在受壓與受拉側則與實驗值接近。無加勁板之試體 2 分析模型之梁翼板最大應變亦發生在削切蓋板端部之梁翼板(如圖 4.41 所示)，最大應變值在受壓與受拉側分別為-0.0046 與 0.0044，略大於試體 2 分析模型之最大梁翼板應變，而對於蓋板梁柱接頭分析模型而言，梁翼板最大應變發生在蓋板端部之梁翼板，在受壓與受拉側最大應變值為-0.0067 與 0.0061，皆大於其他分析模型此處之應變。

分析模型在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時沿削切蓋板之軸向應變分佈如圖 4.42 所示，圖中顯示試體 2 分析模型之削切蓋板上應變在受壓側與受拉側與實驗值接近，而削切蓋板最大應變在受壓與受拉側均在削切中央產生，最大應變分別為-0.0095 與 0.035，受拉側最大應變明顯大於受壓側。無加勁板之試體 2 分析模型之削切蓋板上應變分佈情形與試體 2 相似，最大應變產生於削切中央，在受壓與受拉側分別為-0.0143 與 0.0248。對於蓋板梁柱接頭分析模型而言，在蓋板上之軸向應變除了柱面角落有應力集中情形外，其餘皆在彈性範圍內(如圖 4.40 所示)。

橫向應變分佈

圖 4.43 為削切蓋板靠近柱面處之軸向應變在位移角 $\theta = 0.03$ 弧度時沿

板橫向之變化，圖中顯示試體 2 分析模型柱面中央處之應變與實驗值接近，兩側的應變因靠近柱角落而有應力集中現象，導致此處之應變與實驗值有差異，由圖也可觀測到，試體 2 分析模型其應變在受壓側與受拉側都較無加勁板之試體 2 分析模型低，原因為加勁板吸收了部份力量，使得削切蓋板靠近柱面處的應變減少。

腹板剪應變分佈

圖 4.45 為各組分析模型在位移角 $\theta = 0.01$ 、 0.02 及 0.03 弧度時腹板剪應變分佈情形，其中三角形標記為試體 2 試驗時應變計所量測到的剪應變，圖中顯示試體 2 分析模型剪應變分佈與實驗接近，且與無加勁板之試體 2 分析模型相似，削切蓋板內部腹板剪應變分佈為腹板兩側剪應變略大於中央。對於蓋板梁柱接頭分析模型而言，腹板剪應變取值位置與其他兩組分析模型相同，皆在離柱面 270 mm 與 650 mm 處之腹板，其蓋板內部腹板剪應變分佈為中央剪應變為負，上下兩側為正；而蓋板外部腹板剪應變分佈因為取值位置離蓋板有一段距離(300 mm)，剪應變分佈與理論之梁腹板剪應變分佈相同，中央為最大剪應變，腹板兩側略小。

若將每個位移角下(削切)蓋板內部之剪應變沿梁深積分，可得此處之腹板剪力 V_{bin} ，而削切蓋板上之剪力 V_{RFP} 為各分析模型梁端剪力減去腹板剪力而得，圖 4.46 為削切蓋板內部腹板剪力 V_{bin} 與削切蓋板上之剪力 V_{RFP} 在各位移角下之剪力與剪力比例比較，第一組為試體 2 實驗之結果，第二組為試體 2 分析模型之結果，第三組為無加勁板之試體 2 分析模型結果，第四組為蓋板梁柱接頭模型之結果。由圖可知，試體 2 實驗與分析模型蓋板內部腹板剪力平均約為梁端剪力的 0.8 倍，即約 0.2 倍的梁端剪力由削切蓋板承受；而無加勁板之試體 2 分析模型在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度前蓋板內部腹板剪力平均約為 0.9 倍的梁端剪力，在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時，腹板剪力降至

梁端剪力的 0.6 倍。對蓋板梁柱接頭而言，因蓋板內腹板中央剪應力為負(如圖 4.45 所示)，故積分而得之剪力與梁端剪力相比，平均只有梁端剪力的 0.3 倍，即有大部份的梁剪力由蓋板傳遞至柱內。

4.5.4 參數

本研究使用三種參數來評估接頭發生脆性或韌性破壞的潛在可能區域，分別為靜應力參數(Pressure Index, PI)、等價塑性應變參數(Equivalent Plastic Strain Index, PEEQI)及破裂參數(Rupture Index, RI)。

靜應力參數定義為靜應力(Hydrostatic Stress, s_m)除以降伏應力 s_y ，其表示式如下：

$$PI = \frac{s_m}{s_y} \quad (4.19)$$

$$s_m = -\frac{s_1 + s_2 + s_3}{3} \quad (4.20)$$

其中靜應力 s_m 為主軸應力的平均值取負號，其值可在 ABAQUS 分析結果中直接選取變數 Pressure 得知，而 s_1 、 s_2 及 s_3 為三個主軸應力。若接頭局部區域負靜應力參數高，通常表示此處有較大的主軸拉應力，意味著有極高的可能性發生韌性或脆性破壞，反之較高的正靜應力參數則表示此處有較大的主軸壓應力產生，不易韌性或脆性破壞。

等價塑性應變參數定義為等價塑性應變(PEEQ)除以降伏應變 e_y ，其表示式如下：

$$PEEQI = \frac{PEEQ}{e_y} \quad (4.21)$$

$$PEEQ = I_2 = \frac{1}{6} \left[(e_{y1} - e_{y2})^2 + (e_{y2} - e_{y3})^2 + (e_{y3} - e_{y1})^2 \right] \quad (4.22)$$

其中等價塑性應變(PEEQ)為塑性應變張量的第二個不變量，其值可在

ABAQUS 分析結果中直接選取變數 $PEEQ$ 得知，而 e_{y1} 、 e_{y2} 及 e_{y3} 為三個主軸塑性應變，等價塑性應變參數可偵測接頭局部區域的韌性破壞，參數值愈高表示愈容易產生韌性破壞。

破裂參數其定義為材料常數 a 與等價塑性應變 $PEEQ$ 的乘積再除以韌性破壞時之應變 e_r (Hancock & Mackenzie 1976)，其表示式為：

$$RI = \frac{a \times PEEQ}{e_r} \quad (4.23)$$

$$e_r = a \exp\left(\frac{1.5s_m}{\bar{s}}\right) \quad (4.24)$$

其中 \bar{s} 為米瑟司應力 (Mises Stress)，可在 ABAQUS 中選取變數 Mises 得之。而當靜應力為壓應力時，則 e_r 增加，反之若靜壓力為拉應力時，則 e_r 減少，破裂參數主要為判斷接頭臨界面發生破裂的可能性，參數值愈高表示愈容易產生破裂。

圖 4.47、圖 4.48 及圖 4.49 為在位移角 $\theta = 0.04$ 弧度時 3 組分析模型之靜應力、等價塑性應變及米瑟司應力分佈圖。沿梁翼板縱向分佈的五種參數則示於圖 4.50，圖中顯示每組分析模型各參數最大值皆發生於(削切)蓋板端部之梁翼板，其中位於(削切)蓋板端部之梁下翼板出現最大負靜應力參數，顯示此處承受極大的主軸拉應力，且最大等價塑性應變參數及破裂參數亦發生於此處，故較梁翼板其他位置容易發生韌性或脆性破壞，由於梁翼板與柱面並未接合，所以近柱面處之梁翼板的各項參數都較小。若比較各分析模型參數值的差別，可發現試體 2 分析模型與蓋板梁柱接頭分析模型梁翼板最大靜應力參數相近，相較之下無加勁板之試體 2 分析模型因削切蓋板已挫屈，使得削切蓋板端部之梁翼板的各項參數都較小，而對於等價塑性應變參數與破裂參數而言，蓋板梁柱接頭分析模型較大於其他兩者。

各組分析模型位移角 $\theta = 0.04$ 弧度沿(削切)蓋板縱向分佈的五種參數在則示於圖 4.51，圖中可發現蓋板梁柱接頭分析模型之蓋板上各參數明顯

比其他兩組小，若與圖 4.50 比較，顯示蓋板上之參數也明顯小於梁翼板，故蓋板梁柱接頭分析模型最有可能發生韌性或脆性破壞處為蓋板端部之梁翼板。由圖 4.51(a)可發現無加勁板之試體 2 分析模型因上側削切蓋板已挫屈，故靜應力參數最大值發生在削切蓋板削切處，其中削切中央出現最大負靜應力值，顯示此處承受極大的主軸拉應力，故可能發生脆性或韌性破壞，而削切中央兩側則為最大正靜應力值，其值與試體 2 分析模型削切蓋板上最大靜應力參數相近。而等價塑性應變參數在上側或下側削切蓋板，試體 2 分析模型都大於無加勁板之試體 2 分析模型(如圖 4.51(e)、(f))，顯示在削切蓋板上設置加勁板可能會提高削切蓋板削切中央產生韌性或脆性破壞的可能性，而對削切蓋板上破裂參數而言，試體 2 分析模型在削切蓋板之最大破裂參數明顯大於無加勁板試體 2 分析模型，(削切)蓋板與柱接的部份雖然承受較大的應力，但各項參數都明顯小於削切中央處。若比較每組分析模型各參數於(削切)蓋板與梁翼板，試體 2 分析模型與無加勁板試體 2 其削切蓋板上之參數都大於梁翼板上。

4.6 削切蓋板挫屈強度之參數研究

4.6.1 分析模型

爲了了解削切蓋板削切形狀與尺寸對於壓力強度的影響，有必要對單一的削切蓋板進行有限元素分析之參數研究，藉由改變其削切幾何形狀與厚度來探討壓力強度。參數研究的分析流程如圖 4.52 所示。

首先針對試體 1 之削切蓋板進行三種分析模式，第一種先分析削切蓋板的挫屈模態(圖 4.53)，從中找出與實驗一致的挫屈模態(Mode 1)，之後再開始分析削切蓋板，在水平位移加載前先給予削切蓋板削切中心 1 mm 的幾何不完美(Geometry Imperfection)，其微小的變形為之前的挫屈模態形

狀，再給予受壓方向之漸增位移加載，位移量大小為實驗時試體 2 量側儀器所量測到之板最大位移量；而第二種分析模式為在削切蓋板下方設置彈簧，並設定彈簧有無限大的抗壓勁度來防止削切蓋板往下挫屈，但彈簧的抗拉勁度為零，之後再給予與實驗一致的受壓方向之漸增位移，受壓方向之位移量大小為實驗時試體 2 量側儀器所量測到之板最大位移量；而第三種分析模式與第二種有相同的彈簧性質，但位移加載給予受壓方向與往上推方向之漸增位移，受壓方向之位移量大小為實驗時量側儀器所量測到之板最大位移量，往上推之位移量則為梁的轉角 q_{bp} （見第 2.6 節）乘上板長，試體 1 與試體 2 兩種位移之增量比例如表 4.7、表 4.8 所示，其中試體 1 因螺栓會滑動，故分析模型位移增量採用試體 2 在位移角 $\theta = 0.05$ 弧度之位移增量，水平位移與往上推位移比例接近 1：1。三種分析模式輸入之材料性質都採用實際鋼材拉伸試驗所得之應力 - 應變曲線。

圖 4.54 為試體 1 削切蓋板於三種不同分析模型下力量與位移關係，由圖可知，第一種分析模型(Model 1)與第二種分析模型(Model 2)其力量與位移關係相似，且最大強度約略相同，值為 1462 kN 與 1469 kN，而第二種分析模型(Model 3)最大強度略小於其他兩種分析模式，其值為 1421 kN，與實驗中計算所得之挫屈力量 1419 kN（表 3.4）接近，誤差為 3%，因此決定削切蓋板的參數研究採用第三種分析模型。之後為了簡化板的形狀，分析流程探討其擴板效應，原本試體之削切蓋板與柱接之一端因柱外蓋板之關係必須擴大寬度至 510 mm，簡化參數研究板的形狀，將此擴板部份拿掉，使削切蓋板兩端寬度皆為 240 mm(Reduced Base)，再以第三種分析模式分析無擴板之試體 1 削切蓋板，看是否會改變削切蓋板受壓強度，由圖可知，擴板對削切蓋板之受壓強度無顯著的影響。

4.6.2 削切蓋板拉壓性質

削切形狀

本研究使用的削切蓋板之削切形狀為圓弧形削切，與 Schneider 和 Teeraparbong (2002) 研究中所採用的削切形狀(矩形削切)有所不同，若對這兩種削切蓋板進行有限元素分析，經由受拉與受壓所得之力量位移曲線及蓋板上應力分佈狀況，可瞭解其中之差別，分析中所使用的削切蓋板尺寸如圖 4.55 所示，其中圖(a)之圓弧形削切為試體 1 無擴板之削切蓋板，而矩形削切為根據試體 1 削切蓋板(無擴板)之板長、板寬及最窄處寬度重新以矩形進行削切，中央相同寬度處之長度、漸變斷面之半徑都根據 Schneider 和 Teeraparbong (2002) 研究中之中央相同寬度處之長度、漸變斷面之半徑與厚度比值以等比例方式計算，兩者之板厚皆為 22 mm，板長為 410 mm。而圖(b)之矩形削切採用 Schneider 和 Teeraparbong (2002) 研究中之削切尺寸，而圓弧形削切為根據矩形削切之板長及最窄處寬度重新以圓弧形狀進行削切，削切圓弧之半徑為 120 mm，兩者之板厚皆為 25 mm，板長為 330 mm，材料性質皆採用 A572 Gr. 50 鋼材拉伸試驗所得之真實應力 - 應變曲線。

圖 4.56(a)為厚度 22 mm，板長 410 mm 之削切蓋板受拉與受壓下之力量與位移關係，由圖可知，採圓弧形削切其受拉降伏點的力量為 1114 kN，明顯大於由最窄處截面積乘於降伏強度所得之力量 $P_y = 1030$ kN 為 8%，若從削切蓋板上米瑟司應力(Mises Stress)分佈情形觀察，可發現削切蓋板削切中央之兩側先降伏(如圖 4.57(a)所示)，但中心在彈性範圍，故力量與位移曲線仍是線性，之後經應力重分配，削切中央達整斷面降伏(如圖 4.57(b)所示)，此時為降伏點，而其軸向應力 S11 分佈情形如圖 4.57(c)所示，由圖可知此時削切中央應力為 440 MPa，較降伏應力 $F_y = 390$ MPa 高，若觀察

其主軸應力之方向(如圖 4.57(d)所示),可發現主軸應力會沿著削切形狀改變其方向,造成其軸向應力 S_{11} 不等於主軸應力,而此時削切中央應力乘於最窄處截面積所得之力量(1162 kN)恰與力量與位移曲線之降伏點力量(1114 kN)接近,因此就可解釋上述之情形,圖 4.59 為圓弧形削切應力等高線分佈情形。

對於矩形削切之削切蓋板而言,由圖 4.56(a)可知其降伏點的力量為 1019 kN,與最窄處截面積乘於降伏強度所得之力量 $P_y = 1030$ kN 接近,若從削切蓋板上米瑟司應力(Mises Stress)分佈情形觀察,可發現削切蓋板在削切角落因應力集中而先降伏(如圖 4.58(a)所示),但中心在彈性範圍,故力量 - 位移曲線還是線性,之後削切中央達整斷面降伏(如圖 4.58(b)所示),此時為降伏點,而其軸向應力 S_{11} 分佈情形如圖 4.58(c)所示,由圖可知此時削切中央應力為 400 Mpa,與降伏應力 $F_y = 390$ MPa 接近,若觀察其主軸應力之方向(如圖 4.58(d)所示),可發現主軸應力方向大多沿著受拉軸方向,故其軸向應力 S_{11} 等於主軸應力,因此力量 - 位移曲線之降伏點力量與最窄處截面積乘於降伏強度所得之力量 P_y 接近。由受拉之力量與位移曲線可知,採圓弧形削切所得之最大力量為 1377 kN,較矩形削切之最大力量 1280 kN 高,若比較兩者之最大力量與降伏點力量之比值,圓弧形削切為 1.24,而矩形削切為 1.26,兩者的比值接近。

由圖可知圓弧形削切與矩形削切受壓時都為非彈性挫屈,若比較降伏點力量,可發現圓弧形削切其降伏點力量為 1177 kN,明顯比最窄處截面積乘於降伏強度所得之力量 P_y (標記處)高 10%,原因與上述之受拉情形一樣,而矩形削切則接近 P_y 。若比較兩者之挫屈力量,可發現採圓弧形削切所得之挫屈力為 1433 kN,較矩形削切所得之挫屈力 1140 kN 高,而兩者之挫屈力量與降伏點力量之比值,圓弧形削切為 1.22,而矩形削切為 1.11。

圖 4.56(b)為厚度 25 mm,板長 330 mm 之削切蓋板受拉與受壓下之力

量與位移關係，圓弧型削切與前述削切蓋板情形相同，降伏點的力量在受拉(1622 kN)與受壓(1634 kN)下均大於由最窄處截面積乘於降伏強度所得之力量 $P_y=1486$ kN，原因如前面所述，為採用米瑟司降伏面理論來判斷削切蓋板是否達到降伏，而圓弧形削切會造成在降伏點時削切中央軸向應力 S_{11} 大於降伏強度，故降伏點力量會較大，而對於矩形削切而言，在降伏點軸向應力約等於降伏強度，故力量與最窄處截面積乘於降伏強度所得之力量 $P_y=1486$ kN 接近。由受拉之力量與位移曲線可知，採圓弧形削切所得之最大力量為 2006 kN，較矩形削切之最大力量 1852 kN 高，若比較兩者之最大力量與降伏點力量之比值，圓弧形削切為 1.24，而矩形削切為 1.25，兩者的比值接近。而兩者受壓時之挫屈力量，發現採圓弧形削切所得之挫屈力為 1964 kN，也較矩形削切所得之挫屈力 1677 kN 高，而兩者之挫屈力量與降伏點力量之比值，圓弧形削切為 1.2，而矩形削切為 1.12。



削切蓋板之降伏力量

根據上述之分析可知，削切蓋板若採用圓弧形削切，會造成削切處軸向應力大於米瑟司應力，使得削切蓋板降伏點之力量比以降伏強度乘以最窄處截面積所得之力量 P_y 還高，所以有必要利用有限元素分析之參數研究探討其降伏力量。

由前述可知，採圓弧形削切之削切蓋板主軸應力方向會隨著削切形狀改變，顯示圓弧形削切之削切半徑為影響板降伏力量主要的因素，圖 4.61 為在不同的削切半徑下降伏力量 $P_{yt,R}$ 、 $P_{yc,R}$ 與降伏強度乘以最窄處截面積所得之力量 P_y 之比值，圖中顯示若削切半徑愈小， $P_{yt,R}/P_y$ 就愈高。

若受拉與受壓下，削切蓋板之降伏力量 $P_{yt,R}$ 、 $P_{yc,R}$ 為 P_y 乘上一常數 Ω_t 、 Ω_c ，則其表示式各為：

$$P_{yt,R} = \Omega_t P_y = \Omega_t F_{yR} A_R \quad (\text{Tension}) \quad (4.25)$$

$$P_{yc,R} = \Omega_c P_y = \Omega_c F_{yR} A_R \quad (\text{Compression}) \quad (4.26)$$

其中 F_{yR} 為削切蓋板之實際降伏強度， A_R 為削切蓋板最窄處截面積。參數研究共分析了 288 筆資料，其結果如圖 4.62 所示，其中圖(a)、圖(b)各為受拉與受壓下之結果，實線為以最小平方法(Method of Least Squares)所做之線性迴歸線，其斜率都為 1.06，表示 $\Omega_t = \Omega_c = 1.06$ ，亦表示圓弧形削切受拉與受壓下所得之降伏點力量平均約為 1.06 倍的 P_y ，其中線性迴歸線的決定度 R^2 (Coef. of determination) 接近 1，表示線性迴歸線準確。

4.6.3 參數選取範圍

為模擬試體削切蓋板位置偏心情形，在所研究的削切蓋板中削切中心均距離加載端 0.3 倍板長處。削切蓋板參數研究一共改變五個參數，分別為板的材料 F_{yR} 、板的長度 L_R 、削切最窄處寬度 b_R 、削切半徑 R 及板厚 t_R ，削切蓋板形狀如圖 4.63、圖 4.64 及圖 4.65 所示，總共有 288 筆分析數據。

為了瞭解各參數對削切蓋板之挫屈強度影響，乃將比較分為三個部份，每次只針對一個變數做探討，細節詳述如下：

第一個部份探討細長比 l_c 對削切蓋板挫屈強度的影響，依據 LRFD (2001) 規定，受壓桿件細長比 l_c 對挫屈強度影響甚大， $l_c = 1.5$ 亦為彈性與非彈性挫屈之分界點，其意義為當受壓桿件細長比 l_c 大於 1.5 表示受壓桿件會彈性挫屈，反之，細長比 l_c 小於 1.5 則受壓桿件為非彈性挫屈，其細長比 l_c 之計算公式如下：

$$l_c = \frac{KL}{p r^2} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (4.27)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (4.28)$$

其中 $K (=0.5)$ 為有效長度係數， L 為受壓桿件長度， F_y 、 E 為受壓桿件之降伏強度與彈性模數， r 為受壓桿件之旋轉半徑， I 為受壓桿件之慣性矩， A 為受壓桿件之截面積。而本研究之參數研究主要探討削切蓋板在降伏後之挫屈行為，因此削切蓋板尺寸必須加以限制，使細長比 L_c 小於 1.5，故侷限削切蓋板長度 L_R 在 500 mm 以內，研究長度尺寸分別為 300 mm、410 mm 及 500 mm，而削切厚度 t_R 分別為 15 mm、20 mm、25 mm 及 30 mm，材質則考慮 A36 與 A572 Gr.50 兩種鋼材，依據上述公式，可計算出在不同的削切蓋板長度 L_R 、厚度 t_R 及材質 F_{yR} 下削切蓋板的細長比(如表 4.9 所示)，兩種材質的應力 - 應變曲線如圖 2.13 所示。

第二個部份探討削切蓋板最窄處寬度與板寬之比值(b_R/b)對削切蓋板挫屈強度的影響，最窄處寬度愈小，愈容易造成應力集中現象，則削切蓋板愈容易挫屈，因此 b_R/b 必須加以限制，使其比值不小於 0.5，參數研究中最窄處寬度 b_R 採用四種尺寸做分析，分別為 120 mm、150 mm、180 mm 及 210 mm，而板寬 b 都固定為 240 mm，則 b_R/b 各為 0.5、0.625、0.75 及 0.875(如表 4.9 所示)。

第三個部份探討削切蓋板削切半徑(R)對削切蓋板挫屈強度的影響，在以往的研究中，受壓桿件其截面積是一定的，並不會隨著長度而改變其截面積大小，在削切蓋板參數研究中，削切半徑 R 之效應值得進一步探討，參數研究採用三種削切半徑，為 60 mm、120 mm 及 180 mm，其正規化值 R/L_R 為 0.12、0.146、0.2、0.24、0.292、0.36、0.4、0.439、0.6、(如表 4.9 所示)。

圖 4.66、圖 4.67 及圖 4.68 為參數 L_c 、 b_R/b 與 R/L_R 資料點分佈情形，圖中顯示參數 L_c 分佈平均，範圍在 0.2 至 0.8 之間，但 b_R/b 與 $R/360$ 資料點分佈則較為集中。

4.6.4 迴歸分析模型

線性模型

為參數研究中所有分析資料的整理，共有 288 筆資料。為了瞭解各變數對削切蓋板之挫屈力量與降伏力量比值之相關性，本研究假設挫屈力量 ($P_{cr,R}$) 與降伏力量 ($P_{yc,R}$) 比值 $Y (= P_{cr,R}/P_{yc,R})$ 與變數 X (可為 I_c 、 b_R/b 或 R/L_R) 間為一線性方程式關係，其表示式如下：

$$Y = a + bX \quad (4.29)$$

其中 a 、 b 為常數， $P_{cr,R}$ 為有限元素分析中削切蓋板之挫屈力， $P_{yc,R}$ 為有限元素分析中削切蓋板之降伏力。若方程式能準確預測其關係，則表示所有的變數資料 (X, Y) 均落在方程式上，然而迴歸方程式與各實際資料點間必定存在差值，所以在迴歸分析中是以最小平方方法 (Method of Least Squares) 求出最佳迴歸方程式，再由方程式之斜率來探討變數跟挫屈力量與降伏力量比值的相關性。

圖 4.69、圖 4.70 及圖 4.71 為針對細長比效應 I_c 、寬度效應 b_R/b 與削切半徑效應 R/L_R 對削切蓋板之挫屈力量與降伏力量之比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 所做之線性迴歸分析，由圖可知，細長比 I_c 之斜率為 -0.476，表示細長比 I_c 對削切蓋板之挫屈力量與降伏力量之比值 P_{cr}/P_{yc} 有強烈的相關性，因為對受壓桿件而言，細長比 I_c 對挫屈力量有顯著的影響，愈細長的桿件，愈容易產生挫屈，則其挫屈力量愈小；而對於寬度效應 b_R/b 而言，線性迴歸分析為固定某一細長比 I_c 下針對 b_R/b 與 P_{cr}/P_{yc} 探討其斜率，圖中顯示斜率由 -0.019 至 -0.822，顯示在削切蓋板最窄處厚度 b_R 在不小於 0.5 倍 b 下，削切寬度愈小，其 P_{cr}/P_{yc} 愈高；削切半徑效應 R/L_R ，線性迴歸分析為固定某一細長比 I_c 下針對 $R/360$ 與 P_{cr}/P_{yc} 探討其斜率，圖中顯示斜率由 -0.076 至 0.150，表示對

削切蓋板之挫屈力量與降伏力量之比值 $P_{cr,R}/P_{yR}$ 相關性較低。

非線性模型

爲了探討削切蓋板挫屈強度與降伏強度之比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 與各種變數互相影響下之變化，本研究利用非線性模型來計算各變數對 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 之個別貢獻量，其非線性模型之方程式如下：

$$\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}} = C(I_c)^a \left(\frac{b_R}{b}\right)^b \left(\frac{R}{L_R}\right)^g \quad (4.30)$$

其中指數 a 、 b 、 g 與常數 C 爲迴歸分析中所要決定的值。式(4.30)可經由兩邊各取對數值來線性化：

$$\log\left(\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}}\right) = \log C + a \log(I_c) + \beta \log\left(\frac{b_R}{b}\right) + \gamma \log\left(\frac{R}{L_R}\right) \quad (4.31)$$

將 288 筆有限元素分析所得之數據中之 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 、 I_c 、 b_R/b 與 R/L_R 帶入式(4.31)，如此就可得到 288 個方程式，每個方程式均有 4 個未知數 a 、 b 、 g 與 C ，若將這些方程式利用矩陣的方式表示，其表示式如下：

$$[A]_{288 \times 1} = [B]_{288 \times 4} [C]_{4 \times 1} \quad (4.32)$$

其中矩陣 $[A]_{288 \times 1}$ 、 $[B]_{288 \times 4}$ 與 $[C]_{4 \times 1}$ 各為：

$$[A]_{288 \times 1} = \begin{bmatrix} \log\left(\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}}\right)_1 \\ \mathbf{M} \\ \log\left(\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}}\right)_{288} \end{bmatrix}_{288 \times 1} \quad (4.33)$$

$$[B]_{288 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & \log(I_c)_1 & \log\left(\frac{b_R}{b}\right)_1 & \log\left(\frac{R}{L_R}\right)_1 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ 1 & \log(I_c)_{288} & \log\left(\frac{b_R}{b}\right)_{288} & \log\left(\frac{R}{L_R}\right)_{288} \end{bmatrix}_{288 \times 4} \quad (4.34)$$

$$[C]_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} \log(C) \\ a \\ b \\ g \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (4.35)$$

透過矩陣的運算，就可求得所要的 a 、 b 、 g 與 C ：

$$\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}} = 0.8682(I_c)^{-0.1913} \left(\frac{b_R}{b}\right)^{-0.2019} \left(\frac{R}{L_R}\right)^{0.0008} \quad (4.36)$$

圖 4.72 所示為有限元素分析所得結果與式(4.30)比較，發現公式的估計標準差為 0.0565。從迴歸結果可以看出細長比效應 I_c 與寬度效應 b_R/b 之指數 a 、 b 均為負號，且值接近，這代表兩者對 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 影響程度一樣，且值愈小， $P_{cr,RFP}/P_{yc,RFP}$ 就愈高；而對削切半徑效應 $R/360$ 而言，其指數 g 遠小於 a 、 b ，且值為正號，表示值愈小， $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 就愈低。第二，從前述之線性模型中，可發現削切半徑效應 $R/360$ 對 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 相關性亦不大。

為了進一步簡化非線性模型，本研究將削切半徑效應去除掉，假設其指數 g 為零，則其簡化後之方程式經迴歸分析為：

$$\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}} = 0.8671(I_c)^{-0.1916} \left(\frac{b_R}{b}\right)^{-0.2019} \quad (4.37)$$

圖 4.73 所示為有限元素分析結果與式(4.37)預測結果之比較發現修正過後之方程式其估計標準差為 0.0563，略小於式(4.36)之估計標準差 0.0565。

若將式(4.37)再進行簡化，令指數 $a = b = 0.2$ ，則簡化之方程式經迴歸分析為：

$$\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}} = 0.86(I_c)^{-0.2} \left(\frac{b_R}{b}\right)^{-0.2} \quad (4.38)$$

圖 4.74 所示為有限元素分析結果與式(4.38)預測結果之比較發現修正過後之方程式其估計標準差為 0.0563，與式(4.37)之估計標準差 0.0563 相同，故最後非線性迴歸方程式決定為式(4.38)。為了瞭解在某一個固定 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 下，細長比 I_c 與寬度效應 b_R/b 之關係，故將式(4.38)轉換為：

$$(I_c)^{-0.2} \left(\frac{b_R}{b} \right)^{-0.2} = \frac{P_{cr,R}/P_{yc,R}}{0.86} \quad (4.39)$$

圖 4.75 為利用式(4.39)中固定 $P_{cr,R}/P_{yc,R} = 1.0、1.1、1.2、1.3$ 及 1.4 下，細長比 I_c 與寬度效應 b_R/b 之關係圖，而 $b_R/b = 1$ 則為寬度效應 b_R/b 之限制面，基本上 b_R/b 不可能超過 1。假設若要設計一削切蓋板，其所能發揮之挫屈力為降伏力之 1.3 倍，可經由此圖 $P_{cr,R}/P_{yc,R} = 1.3$ 之曲線來求得所需之細長比 I_c 與對應之最窄處寬度與板寬之比值 b_R/b 。

若以試體 1 削切蓋板形狀為基準 ($b_R/b = 0.5$)，根據圖 4.75 的各強度比值曲線，可得到強度比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R} = 1.0、1.1、1.2、1.3$ 及 1.4 下，所對應的細長比 I_c ，在依據(4.27)式就可得到削切蓋板在各強度比值下之厚度 t_R (表 4.10)，圖 4.76 為 $P_{cr,R}/P_{yc,R} = 1.1、1.2$ 及 1.3 下之力量與位移關係，表 4.10 為各強度比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 下削切蓋板的能量消釋大小，表中顯示強度比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 愈大，削切蓋板所能消釋的能量愈多。

若將各組試體削切蓋板之形狀參數代入式(4.38)來預估削切蓋板挫屈力與降伏力之比值，再利用式(4.26)，便可求出各組試體削切蓋板之挫屈力量 $P_{cr,R}$ ，而與實驗各組試體削切蓋板之挫屈力量、以 ABAQUS 分析各試體單一削切蓋板所得之挫屈力量比較如圖 4.77 所示，圖中顯示非線性迴歸公式預估削切蓋板之挫屈力量與實驗各組試體削切蓋板之挫屈力量接近，試體 1 誤差為 4%，試體 2 誤差為 1%，試體 3 誤差為 4%，試體 4 誤差為 10%，試體 4 誤差較大。

4.7 試體設計步驟修正

由實驗結果與有限元素分析可知，削切蓋板梁柱接頭在保守設計可用削切蓋板的極限力量 P_u 來做設計削切蓋板所能提供之彎矩強度，但實際強

度應以削切蓋板之挫屈力量來預估，所以第 2.4.1 節之削切蓋板梁柱接頭設計需加以修正，式(2.9)之削切蓋板所能發揮之彎矩強度 M_{RFP} 修正為：

$$M_{RFP} = P_{cr,R} (d_b + t_R) \quad (4.40)$$

其中 $P_{cr,R}$ 為削切蓋板之挫屈力量，可利用參數研究中非線性迴歸公式所得削切蓋板之挫屈力量與降伏力量之比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ (式(4.38)) 來求得，而 $P_{yc,R}$ 為削切蓋板受壓之降伏力量，由有限元素分析可知，削切蓋板受壓之降伏力量可由削切蓋板之真實降伏強度 F_{yR} 乘以最窄處面積 A_R 的 Ω_c 倍(式 4.26) 來求得，或利用圖 4.61 中 $P_{yc,R}/P_y$ 與削切半徑 R 之關係圖來更精確求得削切蓋板之降伏力量 $P_{yc,R}$ ，表示式為：

$$P_{cr,R} = \left(\frac{P_{cr,R}}{P_{yc,R}} \right) P_{yc,R} = \left(0.87(I_c)^{-0.2} \left(\frac{b_R}{b} \right)^{-0.2} \right) (\Omega_c F_{yR} A_R) \quad (4.41)$$

其中 I_c 為削切蓋板之細長比(式(4.27))， b_R/b 為削切蓋板最窄處寬度與板寬之比值， Ω_c 為一常數。將削切蓋板所能發揮之彎矩強度 M_{RFP} 投影至柱面，則削切蓋板於柱面的柱面之彎矩強度 M_{RFPF} 為：

$$M_{RFPF} = M_{RFP} \left(\frac{L_b}{L_b - s_h} \right) = P_{cr,R} (d_b + t_R) \left(\frac{L_b}{L_b - s_h} \right) \quad (4.42)$$

並依據圖 2.3 中削切蓋板梁柱接頭之強度需求，當確保彎矩強度需求 M_{yf} 大於削切處所提供的柱面彎矩強度 M_{RFPF} 時，則表示當削切蓋板已達塑性變形至挫屈時，位於削切蓋板端部之梁翼板還保持在彈性範圍內。四組試體經修正後之 M_{RFP} 、 M_{RFPF} 、 M_{RFPF}/M_{np} 及 M_{RFPF}/M_{yf} 列於表 4.11。

另外，根據實驗結果發現，四組試體所能發揮之柱面彎矩強度皆大於 1.34 倍梁的標稱塑性彎矩強度 M_{np} ，明顯較傳統鋼骨梁柱接頭高，顯示若削切蓋板與柱面採焊接接合，為了避免破壞發生於焊接處，則須加強此處的焊道，因此為了修正此一缺點，在削切蓋板梁柱接頭設計時，建議盡量縮短削切蓋板長度，以減少投影至柱面之彎矩強度需求 M_{yf} 。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究共試驗了四組削切蓋板梁柱接頭試體，所使用的柱為鋼管混凝土柱(350×350×9)，鋼梁尺寸為W450×200×9×14，削切蓋板則設置在鋼梁上下側，與梁採用螺栓接合(試體 1、試體 4)、螺栓配合填角焊接合(試體 2)或採用填角焊接合(試體 3)，削切蓋板與鋼管混凝土柱採用全滲透焊接合(試體 1、試體 2)或利用削切蓋板與另一底板形成 T 形裝置並與柱採螺栓接合，四組試體的破壞型式皆為削切蓋板產生挫屈破壞，由試體整體行為來說，削切蓋板梁柱接頭可確保塑性變形發生在削切蓋板上而非梁上，進而避免梁的挫屈發生，且四組試體在反覆載重作用下皆可達到位移角 $\theta = 0.05$ 弧度而無明顯的強度遞減。本研究針對試體 2、無加勁板之試體 2 及蓋板梁柱接頭進行有限元素分析，並對削切蓋板進行有限元素分析之參數研究，探討削切蓋板形狀與尺寸對板抗壓強度的影響

根據本研究試驗結果與有限元素分析，可以歸納出以下幾點結論：

1. 藉由試驗結果與有限元素分析之力量位移關係，將削切蓋板梁柱接頭的彈性勁度與傳統蓋板梁柱接頭的彈性勁度比較，試體 1 試驗之彈性勁度 48515 kN-m、試體 2 試驗之彈性勁度 48499 kN-m(有限元素分析為 44124 kN-m)、試體 3 試驗之彈性勁度 55079 kN-m、試體 4 試驗之彈性勁度 48142 kN-m，而蓋板梁柱接頭有限元素分析所得之彈性勁度 45717 kN-m。由上述的比較可以發現削切蓋板梁柱接頭為傳統蓋板梁柱接頭的彈性勁度 0.97 倍，同時由各組試體的比較分析可以發現，在削切蓋板上加置加勁板後，並沒有增加試體之彈性勁度，而增加削切蓋板的厚度，可以提昇削切蓋板梁柱接頭的彈性勁度。
2. 由各組試體試驗之力量位移關係圖中可以發現，試體 1 至試體 4 降伏時

之柱面彎矩強度為 $0.61 M_{np}$ 、 $0.8 M_{np}$ 、 $0.8 M_{np}$ 及 $0.65 M_{np}$ 。由上述的比較可以發現削切蓋板與梁翼板間若採用焊接，降伏時彎矩強度約為梁的標稱強度 M_{np} 的 0.8 倍，而試體削切蓋板與梁翼板採用螺栓接合，降伏時彎矩強度約為梁的標稱強度 M_{np} 的 0.6 倍。各組試體之削切蓋板所能發揮之彎矩強度 M_{RFP} 、柱面彎矩強度 M_{RFPF} 、柱面彎矩強度與梁標稱彎矩強度之比值 M_{RFPF}/M_{np} 及柱面彎矩強度與實際當位於削切蓋板端部之梁翼板發生降伏時柱面彎矩強度 M_{yf} 之比值 M_{RFPF}/M_{yf} 列於表 3.3，由表中各數值的比較可以發現試體 1、試體 3 之最大彎矩強度皆小於實際 M_{yf} ，約為實際 M_{yf} 的 0.97 倍，符合第 2.4.1 節所述之試體設計要求；試體 2 之彎矩強度較試體 1 高，約為實際 M_{yf} 的 1.01 倍，顯示在削切蓋板上加置三角形加勁板能提昇試體彎矩強度約 4% (表 3.3)，而試體 4 之彎矩強度約為實際 M_{yf} 的 1.12 倍，原因為試體 4 在上下側削切蓋板各加置一 T 型防挫屈加勁板，目的為利用此加勁板來防止削切蓋板挫屈，並藉由 T 型加勁板與削切蓋板開設的長槽型螺栓孔，使得 T 型加勁板與削切蓋板、梁翼板接合之直徑 16 mm 螺栓能夠滑動，以避免 T 型加勁板參與削切蓋板的消能行為，但由試驗結果顯示，因在梁翼板上之螺栓孔並沒有如同 T 型加勁板、削切蓋板一樣開設長槽孔，而限制住接合螺栓的滑動，造成有一部份力量由 T 型加勁板傳遞，故試體 4 柱面彎矩強度較當初設計值 ($0.83 M_{yf}$) 大。若計算接合 T 型加勁板之螺栓受剪所造成的柱面彎矩強度，其值約為 147 kN-m，將原本柱面彎矩強度扣除這部份彎矩強度，則為實際削切蓋板所能發揮之柱面彎矩強度，經計算約為 $0.93 M_{yf}$ 。

3. 由各組試體梁端位移分量可知，各組試體主要梁端位移由梁因削切蓋板塑性變形所致之梁端位移分量所提供，柱、梁柱交會區及梁彈性變形所提供的比例較小。另外，若削切蓋板採用 T 型裝置與柱接合，梁柱交

會區之剪力變形所造成的梁端位移分量明顯較削切蓋板與柱採焊接接合小。

4. 由試驗後各組試體梁翼板軸向應變分析可知，各組試體梁翼板最大應變皆產生於削切蓋板端部之梁翼板，削切蓋板內部之梁翼板軸向應變都很小，在位移角 5 % 時，各組試體梁翼板之最大應變約等於降伏應變。若以第 2.3.4 節所述之梁翼板軸向應變來預估，結果顯示在削切蓋板外部之梁翼板應變正方向上準確，負方向則有差異，削切蓋板內部之梁翼板應變則與估計值接近。
5. 由試驗結果中各組試體梁腹板剪力分析可知，由蓋板內部之梁腹板剪力約為油壓致動器之力量的 0.8~0.9 倍，亦即有 0.1~0.2 倍油壓制動器力量由削切蓋板承受。
6. 藉由試體 2 分析模型、無加勁板之試體 2 分析模型及傳統蓋板梁柱接頭分析模型有限元素分析，比較發現蓋板梁柱接頭分析模型在三者中有最大彎矩強度，而無加勁板試體 2 分析模型則小於試體 2 分析模型，顯示在削切蓋板上設置加勁板對試體強度有影響，與試驗結果相同，分析中顯示無加勁板之試體 2 分析模型削切蓋板較早挫屈(圖 4.38)。
7. 削切蓋板參數研究中顯示採圓弧型削切之削切蓋板其降伏力量不能以最窄處面積乘以降伏強度(P_y)預估，在參數研究中發現圓弧型削切之削切蓋板的降伏力量與削切半徑 R 有關(圖 4.61)，分析中顯示削切半徑愈小，削切蓋板的降伏力量與 P_y 比值愈大。
8. 由參數研究之迴歸分析中顯示削切半徑 R 對削切蓋板挫屈力與降伏力之比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 相關性較低，在非線性迴歸公式中可被忽略。另外，細長比效應 I_c 與 b_R/b 對削切蓋板挫屈力與降伏力之比值 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 有較大相關性，分析中顯示細長比 I_c 或 b_R/b 愈小， $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 就愈大。
9. 以非線性迴歸模型預測四組試體削切蓋板的挫屈力量與以 ABAQUS 分

析各試體單一削切蓋板所得之挫屈力量比較如圖 4.77 所示，圖中顯示非線性迴歸公式預估削切蓋板之挫屈力量與實驗各組試體削切蓋板之挫屈力量接近，試體 1 誤差為 4%，試體 2 誤差為 1%，試體 3 誤差為 4%，試體 4 誤差為 10%，試體 4 誤差較大。

5.2 建議

對於日後在削切蓋板梁柱接頭之耐震行為研究，提出下面三點建議：

1. 削切蓋板與梁翼板之接合設計應盡量使用焊接接合或焊接配合摩阻型螺栓接合，若單一採用摩阻型螺栓設計會造成試體有螺栓滑動的問題，導致試體初期強度不易升高。
2. 梁腹板與柱剪力板之螺栓接合設計應採用較多的螺栓來傳遞剪力，且剪力板的設計應更為保守，採用較厚的剪力板，以避免剪力板發生降伏。
3. 在削切蓋板上加置 T 型防挫屈加勁板應在梁翼板上開長槽孔，以利連接 T 型防挫屈加勁板之螺栓滑動，而避免螺栓參與削切蓋板的消能機制，因而受到削切蓋板傳遞過來的剪力而被剪斷。

参考文献

1. ACI, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02) and Commentary (ACI 318RM-02), American Concrete Institute, USA(2001).
2. AIJ, "Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Tubular Structures," Architectural of Japan, Tokyo, Japan, pp.114-129, (1997).
3. AISC, 1993, "Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings," *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL.
4. ASTM, "Standard Specification for Structural Steel," *American Society for Testing and Materials*, USA (1984)
5. Agerskov, H. 1976, "High-Strength Bolted Connections Subject to Prying," *J. Structural Division*, ASCE, Vol. 102, No. ST1, pp. 161-175.
6. Chen, S. J., Yeh, C. H., and Chu, J. M. 1996, "Ductile Steel Beam-to-Column Connections for Seismic Resistance," *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 11, pp. 1292-1299.
7. Chou, C. C. and Uang, C. M. 2003, "A Procedure for Evaluating Seismic Energy Demand of Framed Structures," *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, pp. 229-244.
8. Chou, C. C. and Uang, C. M. 2002, "Cyclic Performance of a Type of Steel Beam to Steel-Encased Reinforced Concrete Column Moment Connections," *J. Constructional Steel Research*, 58, pp. 637-663.
9. Cofie, N. G., Krawinkler, M. A. 1985, "Uniaxial Cyclic Stress-Strain Behavior of Structural Steel," *J. Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1105-1120.
10. Elramaily, A., and Azizinamini, A, 2001, "Design Provision for Connections Between Steel Beam and Concrete Filled Tube Column," *J. Construction Steel Research*, Vol. 57, pp. 971-995.
11. Engelhardt, M. D., Winneberger, T., Zekany, A. J., and Potyraj, T. 1996, "The Dogbone Connection: Part II," *Modern Steel Construction*, AISC.
12. Engelhardt, M. D., Sabol, T. A. 2002, "Reinforcing of Steel Moment Connections with Cover Plates: Benefits and Limitations," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 4-6, pp. 510-520.
13. Englekirk, R. E., "Steel Structures Controlling Behavior through Design," New York (1994).

14. FEMA 2000. "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings" *FEMA 350*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
15. HKS.ABAQUS User's Manual Version 6.3, 2003, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
16. Hussain, K., de los Rios, E. R. 1993, "Monotonic and Cyclic Stress-Strain Behavior of a Structural Steel," *Scripta Metallurgica et Materialia (USA)*, Vol. 28, No. 6, pp. 757-762.
17. Kim, T., Whittaker, A. S., Gilani, A. S. J., Bertero, V. V., and Takhirov, S. M. 2002, "Experimental Evaluation of Plate-Reinforced Steel Moment-Resisting Connections," *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 483-491.
18. Kim, T., Whittaker, A. S., Gilani, A. S. J., Bertero, V. V., and Takhirov, S. M. 2002, "Cover-Plate and Flange-Plate Steel Moment-Resisting Connections," *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 474-482.
19. Kuwamura, N. 1996, "Fracture of Steel Welded Joints under Severe Earthquake Motion," *11th World Conference on Earthquake Engineering*.
20. Lee, C. H. 2002, "Seismic Design of Rib-Reinforced Steel Moment Connections based on Equivalent Strut Model," *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 9, pp. 1121-1129.
21. Schneider, S. and Teeraparbwong, I. 2002, "Inelastic Behavior of Bolted Flange Plate Connections," *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 492-500.
22. Tsai, K. C., Weng, Y. T., and Lin, M. L. 2003, "Displacement Based Seismic Designing and Analytical Response Evaluations of a Full-scale CFT/BRB Composite Frame," *P. 5th Korea-Taiwan-Japan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures*, Kyoto, Japan.
23. Youssef, N.F.G, Bonowitz, D., and Gross, J.L 1995, "A survey of Steel Moment-Resisting Frame Buildings Affected by the 1994 Northridge Earthquake," *Report NISTR5625*, National Institute of Standards and Technology, Administration, United States Department of Commerce. Gaithersburg, Maryland.
24. Whittaker, A. S. , Gilani, A. S. J., Takhirov, S. M., and Ostertag, C. 2002, "Forensic Studies of A Large Cover-Plate Steel Moment-Resisting Connection," *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 7, pp. 265-283.
25. 林克強 (2000), 「具上下夾型柱外橫隔板之鋼管混凝土柱梁接頭行為研究」, 博士論文, 國立台灣大學土木研究所, 台北

表 1.1 試體 BFP08 各階段彎矩

State	Column Face	Center of RFP	End of RFP
RFP Yielding	M_p	$0.95 M_p$	$0.8 M_p$
RFP Fracture	$1.3 M_p$	$1.23 M_p$	$1.04 M_p$

表 2.1 四組試體設計之彎矩強度

Specimen No.	$M_{RFP} (kN-m)$	$M_{RFPF} (kN-m)$	M_{RFPF}/M_{np}	M_{RFPF}/M_{yf}
1	561	620	1.11	0.93
2	561	620	1.11	0.93
3	570	627	1.12	0.93
4	508	557	1.00	0.83

表 2.2 削切蓋板尺寸

Specimen No.	1	2	3	4
Material Grade	Gr. 50	Gr. 50	A36	Gr. 50
t_R (mm)	22	22	25	20
a (mm)	167	167	80	80
b (mm)	203	203	290	290
c (mm)	60	60	60	60
b_R (mm)	120	120	120	120
R (mm)	120	120	173	173
s_h (mm)	268.5	268.5	255	250
P_{RFP} (kN)	1188	1188	1200	1080
M_{RFPF} (kN-m)	620	620	627	557

表 2.3 RBS 與 RFP 削切比較

Specimen No.	a (mm)	b (mm)	c (mm)	R (mm)
RBS	$(0.5 \sim 0.75)b_f$ = 100 ~ 150	$(0.65 \sim 0.75)d_b$ = 293 ~ 338	$(0.2 \sim 0.25)b_f$ = 40 ~ 50	$(4c^2 + b^2)/8c$ = 288 ~ 311
1	167	203	60	120
2	167	203	60	120
3	80	290	60	173
4	80	290	60	173

表 2.4 試體橫隔板尺寸與規範規定值

Specimen No.	h_s/b_c	b_c/t_c	t_R/t_c
Specimen 1	0.2	38.9	2.4
Specimen 2	0.2	38.9	2.4
AIJ Code	$\geq 0.15 \left(\frac{t_{bf}}{t_R} \right) = 0.095$	20~50	0.75~2.0

表 2.5 試體梁柱交會區剪力

Specimen No.	1	2	3	4
P_R (kN)	1180	1180	1200	1080
V_{col} (kN)	194	194	196	174
V_{ju} (kN)	994	994	1004	906
V_{sn} (kN)	1223	1223	1223	1223
V_{cn} (kN)	992	992	992	992
V_n (kN)	2215	2215	2215	2215
V_d (kN)	1661	1661	1661	1661

表 2.6 四組試體削切蓋板撓曲勁度

Specimen No.	1	2	3	4
$K_{RFP,e}$ (kN/m)	2245	2245	2291	1214
$K_{RFP,p}$ (kN/m)	120	120	101	52

表 2.7 四組試體削切蓋板剪力與油壓致動器比值 (彈性部份)

Specimen No.	Analysis			ABAQUS
	$\alpha (\times 10^{15})$	$\beta (\times 10^{15})$	V_{RFP}/V_{act}	V_{RFP}/V_{act}
1	4.56	19.41	0.23	0.23
2	4.56	19.41	0.24	0.23
3	4.66	19.42	0.24	0.23
4	2.47	18.99	0.13	0.13

表 2.8 四組試體削切蓋板剪力與油壓致動器比值 (塑性部份)

Specimen No.	Analysis			ABAQUS
	$\alpha (\times 10^{15})$	$\beta (\times 10^{15})$	V_{RFP}/V_{act}	V_{RFP}/V_{act}
1	0.24	18.55	0.013	0.011
2	0.24	18.55	0.013	0.011
3	0.21	18.54	0.011	0.009
4	0.11	18.52	0.006	0.005

表 2.9 混凝土抗壓強度

Cylinder NO.	Specimen 1 D.O.T (MPa)	Specimen 2 D.O.T (MPa)	Specimen 3 D.O.T (MPa)	Specimen 4 D.O.T (MPa)
1	25.8	30.4	26.2	27.5
2	25.4	31.9	29.1	26.5
3	26.2	31.2	29.2	24.7
Average	25.8	31.2	28.2	26.2

D.O.T. = Day of Test

表 2.10 鋼材拉力試驗強度

Member	Thickness (mm)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Beam Flange	14	377	491	22
Beam Web	9	397	483	22
Column Tube	9	380	527	17
RFP (A572 Gr. 50)	22	391	539	17
RFP (A36)	25	288	449	14

表 3.1 各試體實驗的勁度及與理論勁度之比值

Specimen No.	1	2	3	4
Elastic Stiffness (kN-m)	48515	48499	55079	48142
K/K_{theory}	0.90	0.90	1.02	0.89

表 3.2 各試體實驗的彎矩強度比較

Specimen No.	$M_{y,test}/M_{np}$	$M_{0.04,test}/M_{np}$	$M_{max,test}/M_{np}$	E_a (kN-m)
1	0.61	1.2	1.33	254
2	0.8	1.34	1.38	332
3	0.8	1.3	1.34	339
4	0.65	1.24	1.55	240

Note : RFP fractures toward 2nd cycle of 5% interstory drift, E_a : 遲滯能與應變能和

表 3.3 四組試體實驗所得之彎矩強度

Specimen No.	M_{RFP} (kN-m)	M_{RFPF} (kN-m)	M_{RFPF}/M_{np}	M_{RFPF}/M_{yf}
1	670	741	1.33	0.97
2	698	771	1.38	1.01
3	681	749	1.34	0.97
4	789	866	1.55	1.12
4*	655	719	1.29	0.93

Note : 4* 為將 T 型加勁板之彎矩扣掉之試體 4 彎矩強度

表 3.4 四組試體實驗所得之削切蓋板最大力量

Specimen No.	1	2	3	4
P_{RFP} (kN)	1419	1479	1434	1394
$P_{RFP,u}$ (kN)	1422	1422	1344	1294

表 4.1 鋼材反覆載重試片尺寸

Coupon	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Diameter of uniform region	10.7	10.6	10.5	10.7	10.7	10.7
Length of the uniform part	40	37	36	38.5	40.4	42.6
Grip Distance	80	80	80	80	80	80

Unit: mm

表 4.2 A572 Gr. 50 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令

Material (Grade)	A572 Gr.50
Input Statement	*Material, Name = Steel A572 Gr.50 *Elastic 21000, 0.3 *Plastic, Hardening = Combined, Data Type = Parameters 390, 29390, 266 *Cyclic Hardening, Parameter 390, 150, 12
Isotropic Hardening Parameters	$Q = 150$ $b = 12$
Kinematic Hardening Parameters	$C = 29390$, $\gamma = 266$

表 4.3 A36 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令

Material (Grade)	A36
Input Statement	*Material, Name = Steel A36 *Elastic 21000, 0.3 *Plastic, Hardening = Combined, Data Type = Parameters 250, 17888, 331 *Cyclic Hardening, Parameter 250, 135, 6
Isotropic Hardening Parameters	$Q = 135 \quad b = 6$
Kinematic Hardening Parameters	$C = 17888, \gamma = 331$

表 4.4 各組試體削切蓋板挫屈長度

Specimen No.	1	2	3
Drift (%)	6	4	4
Buckling Length (mm)	191	184	226
RFP Length (mm)	410	410	410
K Value	0.47	0.45	0.55

表 4.5 各組分析模型之彈性勁度

Analytical Model	Elastic Stiffness, K (kN-m)	K/K_{theory}	K/K_{exp}
Specimen 2 (with stiffeners)	44124	0.82	0.91
Specimen 2 (w/o stiffeners)	43200	0.80	0.89
FP Connection	45717	0.85	0.94

Note : $K_{exp} = 48499$ kN-m (見表 3.1 試體 2 之彈性勁度)

$K_{theory} = 53975$ kN-m (見第 2.3.5 節)

表 4.6 各組分析模型在位移角 4 % 時之最大的破壞參數

Analytical Model	Pressure Index	PEEQ Index	Rupture Index
Specimen 2 (with stiffenres)	0.73 (-0.73)	108 (152)	0.11 (0.75)
Specimen 2 (w/o stiffenres)	-0.78 (-0.42)	78 (62)	0.43 (0.25)
FP Connection	0.51 (-0.49)	40 (40)	0.05 (0.16)

表 4.7 試體 1 削切蓋板位移量比例

Drift (%)	0.5	1	2	3	4	5
U_1 (Horizontal Displacement)	0.32	0.34	0.27	0.27	0.26	0.25
U_2 (Vertical Displacement)	0.68	0.66	0.73	0.73	0.74	0.75

Note : U_1 為削切蓋板上位移計之量測值

$$U_2 = \theta_{bp} \times L_R$$

表 4.8 試體 2 削切蓋板位移量比例

Drift (%)	0.5	1	2	3	4	5
U_1 (Horizontal Displacement)	0.25	0.21	0.30	0.28	0.39	0.53
U_2 (Vertical Displacement)	0.75	0.79	0.70	0.72	0.61	0.47

Note : U_1 為削切蓋板上位移計之量測值

$$U_2 = \theta_{bp} \times L_R$$

表 4.9 參數研究之削切蓋板尺寸與結果

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (mm)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
1	285	300	120	30	60	0.20	0.50	0.20	1.274
2	285	300	120	30	120	0.20	0.50	0.40	1.332
3	285	300	120	30	180	0.20	0.50	0.60	1.401
4	285	300	120	25	60	0.25	0.50	0.20	1.219
5	285	300	120	25	120	0.25	0.50	0.40	1.282
6	285	300	120	25	180	0.25	0.50	0.60	1.369
7	285	300	120	20	60	0.31	0.50	0.20	1.066
8	285	300	120	20	120	0.31	0.50	0.40	1.106
9	285	300	120	20	180	0.31	0.50	0.60	1.174
10	285	300	120	15	60	0.41	0.50	0.20	1.052
11	285	300	120	15	120	0.41	0.50	0.40	1.099
12	285	300	120	15	180	0.41	0.50	0.60	1.108
13	285	300	150	30	60	0.20	0.63	0.20	1.274
14	285	300	150	30	120	0.20	0.63	0.40	1.307
15	285	300	150	30	180	0.20	0.63	0.60	1.332
16	285	300	150	25	60	0.25	0.63	0.20	1.192
17	285	300	150	25	120	0.25	0.63	0.40	1.221
18	285	300	150	25	180	0.25	0.63	0.60	1.228
19	285	300	150	20	60	0.31	0.63	0.20	1.094
20	285	300	150	20	120	0.31	0.63	0.40	1.134
21	285	300	150	20	180	0.31	0.63	0.60	1.160
22	285	300	150	15	60	0.41	0.63	0.20	1.033
23	285	300	150	15	120	0.41	0.63	0.40	1.021
24	285	300	150	15	180	0.41	0.63	0.60	1.011
25	285	300	180	30	60	0.20	0.75	0.20	1.343
26	285	300	180	30	120	0.20	0.75	0.40	1.361
27	285	300	180	30	180	0.20	0.75	0.60	1.381
28	285	300	180	25	60	0.25	0.75	0.20	1.193
29	285	300	180	25	120	0.25	0.75	0.40	1.151
30	285	300	180	25	180	0.25	0.75	0.60	1.224
31	285	300	180	20	60	0.31	0.75	0.20	1.116
32	285	300	180	20	120	0.31	0.75	0.40	1.126
33	285	300	180	20	180	0.31	0.75	0.60	1.128
34	285	300	180	15	60	0.41	0.75	0.20	1.029

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
35	285	300	180	15	120	0.41	0.75	0.40	1.034
36	285	300	180	15	180	0.41	0.75	0.60	1.054
37	285	300	210	30	60	0.20	0.88	0.20	1.271
38	285	300	210	30	120	0.20	0.88	0.40	1.278
39	285	300	210	30	180	0.20	0.88	0.60	1.278
40	285	300	210	25	60	0.25	0.88	0.20	1.158
41	285	300	210	25	120	0.25	0.88	0.40	1.170
42	285	300	210	25	180	0.25	0.88	0.60	1.169
43	285	300	210	20	60	0.31	0.88	0.20	1.053
44	285	300	210	20	120	0.31	0.88	0.40	1.056
45	285	300	210	20	180	0.31	0.88	0.60	1.075
46	285	300	210	15	60	0.41	0.88	0.20	1.029
47	285	300	210	15	120	0.41	0.88	0.40	1.034
48	285	300	210	15	180	0.41	0.88	0.60	1.054
49	285	410	120	30	60	0.28	0.50	0.15	1.382
50	285	410	120	30	120	0.28	0.50	0.29	1.397
51	285	410	120	30	180	0.28	0.50	0.44	1.406
52	285	410	120	25	60	0.34	0.50	0.15	1.162
53	285	410	120	25	120	0.34	0.50	0.29	1.215
54	285	410	120	25	180	0.34	0.50	0.44	1.260
55	285	410	120	20	60	0.42	0.50	0.15	1.080
56	285	410	120	20	120	0.42	0.50	0.29	1.094
57	285	410	120	20	180	0.42	0.50	0.44	1.132
58	285	410	120	15	60	0.56	0.50	0.15	1.064
59	285	410	120	15	120	0.56	0.50	0.29	1.007
60	285	410	120	15	180	0.56	0.50	0.44	1.061
61	285	410	150	30	60	0.28	0.63	0.15	1.222
62	285	410	150	30	120	0.28	0.63	0.29	1.220
63	285	410	150	30	180	0.28	0.63	0.44	1.298
64	285	410	150	25	60	0.34	0.63	0.15	1.156
65	285	410	150	25	120	0.34	0.63	0.29	1.158
66	285	410	150	25	180	0.34	0.63	0.44	1.176
67	285	410	150	20	60	0.42	0.63	0.15	1.066
68	285	410	150	20	120	0.42	0.63	0.29	1.075

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
69	285	410	150	20	180	0.42	0.63	0.44	1.114
70	285	410	150	15	60	0.56	0.63	0.15	1.062
71	285	410	150	15	120	0.56	0.63	0.29	1.082
72	285	410	150	15	180	0.56	0.63	0.44	1.129
73	285	410	180	30	60	0.28	0.75	0.15	1.200
74	285	410	180	30	120	0.28	0.75	0.29	1.208
75	285	410	180	30	180	0.28	0.75	0.44	1.167
76	285	410	180	25	60	0.34	0.75	0.15	1.121
77	285	410	180	25	120	0.34	0.75	0.29	1.133
78	285	410	180	25	180	0.34	0.75	0.44	1.100
79	285	410	180	20	60	0.42	0.75	0.15	1.055
80	285	410	180	20	120	0.42	0.75	0.29	1.060
81	285	410	180	20	180	0.42	0.75	0.44	1.057
82	285	410	180	15	60	0.56	0.75	0.15	1.029
83	285	410	180	15	120	0.56	0.75	0.29	1.037
84	285	410	180	15	180	0.56	0.75	0.44	1.050
85	285	410	210	30	60	0.28	0.88	0.15	1.080
86	285	410	210	30	120	0.28	0.88	0.29	1.095
87	285	410	210	30	180	0.28	0.88	0.44	1.070
88	285	410	210	25	60	0.34	0.88	0.15	1.045
89	285	410	210	25	120	0.34	0.88	0.29	1.059
90	285	410	210	25	180	0.34	0.88	0.44	1.058
91	285	410	210	20	60	0.42	0.88	0.15	1.030
92	285	410	210	20	120	0.42	0.88	0.29	1.036
93	285	410	210	20	180	0.42	0.88	0.44	1.032
94	285	410	210	15	60	0.56	0.88	0.15	1.014
95	285	410	210	15	120	0.56	0.88	0.29	1.019
96	285	410	210	15	180	0.56	0.88	0.44	1.009
97	285	500	120	30	60	0.34	0.50	0.12	1.357
98	285	500	120	30	120	0.34	0.50	0.24	1.355
99	285	500	120	30	180	0.34	0.50	0.36	1.366
100	285	500	120	25	60	0.41	0.50	0.12	1.211
101	285	500	120	25	120	0.41	0.50	0.24	1.255
102	285	500	120	25	180	0.41	0.50	0.36	1.288

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
103	285	500	120	20	60	0.51	0.50	0.12	1.122
104	285	500	120	20	120	0.51	0.50	0.24	1.168
105	285	500	120	20	180	0.51	0.50	0.36	1.182
106	285	500	120	15	60	0.68	0.50	0.12	1.074
107	285	500	120	15	120	0.68	0.50	0.24	1.063
108	285	500	120	15	180	0.68	0.50	0.36	1.090
109	285	500	150	30	60	0.34	0.63	0.12	1.216
110	285	500	150	30	120	0.34	0.63	0.24	1.213
111	285	500	150	30	180	0.34	0.63	0.36	1.196
112	285	500	150	25	60	0.41	0.63	0.12	1.133
113	285	500	150	25	120	0.41	0.63	0.24	1.128
114	285	500	150	25	180	0.41	0.63	0.36	1.110
115	285	500	150	20	60	0.51	0.63	0.12	1.078
116	285	500	150	20	120	0.51	0.63	0.24	1.088
117	285	500	150	20	180	0.51	0.63	0.36	1.090
118	285	500	150	15	60	0.68	0.63	0.12	1.010
119	285	500	150	15	120	0.68	0.63	0.24	1.022
120	285	500	150	15	180	0.68	0.63	0.36	1.037
121	285	500	180	30	60	0.34	0.75	0.12	1.174
122	285	500	180	30	120	0.34	0.75	0.24	1.133
123	285	500	180	30	180	0.34	0.75	0.36	1.116
124	285	500	180	25	60	0.41	0.75	0.12	1.063
125	285	500	180	25	120	0.41	0.75	0.24	1.091
126	285	500	180	25	180	0.41	0.75	0.36	1.115
127	285	500	180	20	60	0.51	0.75	0.12	1.045
128	285	500	180	20	120	0.51	0.75	0.24	1.058
129	285	500	180	20	180	0.51	0.75	0.36	1.065
130	285	500	180	15	60	0.68	0.75	0.12	1.032
131	285	500	180	15	120	0.68	0.75	0.24	1.018
132	285	500	180	15	180	0.68	0.75	0.36	1.015
133	285	500	210	30	60	0.34	0.88	0.12	1.048
134	285	500	210	30	120	0.34	0.88	0.24	1.027
135	285	500	210	30	180	0.34	0.88	0.36	1.042
136	285	500	210	25	60	0.41	0.88	0.12	1.031

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
137	285	500	210	25	120	0.41	0.88	0.24	1.004
138	285	500	210	25	180	0.41	0.88	0.36	1.030
139	285	500	210	20	60	0.51	0.88	0.12	1.030
140	285	500	210	20	120	0.51	0.88	0.24	1.008
141	285	500	210	20	180	0.51	0.88	0.36	1.023
142	285	500	210	15	60	0.68	0.88	0.12	1.013
143	285	500	210	15	120	0.68	0.88	0.24	0.989
144	285	500	210	15	180	0.68	0.88	0.36	1.027
145	390	300	120	30	60	0.24	0.50	0.20	1.305
146	390	300	120	30	120	0.24	0.50	0.40	1.331
147	390	300	120	30	180	0.24	0.50	0.60	1.390
148	390	300	120	25	60	0.29	0.50	0.20	1.252
149	390	300	120	25	120	0.29	0.50	0.40	1.250
150	390	300	120	25	180	0.29	0.50	0.60	1.298
151	390	300	120	20	60	0.36	0.50	0.20	1.119
152	390	300	120	20	120	0.36	0.50	0.40	1.156
153	390	300	120	20	180	0.36	0.50	0.60	1.214
154	390	300	120	15	60	0.48	0.50	0.20	1.023
155	390	300	120	15	120	0.48	0.50	0.40	1.037
156	390	300	120	15	180	0.48	0.50	0.60	1.086
157	390	300	150	30	60	0.24	0.63	0.20	1.222
158	390	300	150	30	120	0.24	0.63	0.40	1.243
159	390	300	150	30	180	0.24	0.63	0.60	1.277
160	390	300	150	25	60	0.29	0.63	0.20	1.146
161	390	300	150	25	120	0.29	0.63	0.40	1.170
162	390	300	150	25	180	0.29	0.63	0.60	1.209
163	390	300	150	20	60	0.36	0.63	0.20	1.048
164	390	300	150	20	120	0.36	0.63	0.40	1.079
165	390	300	150	20	180	0.36	0.63	0.60	1.108
166	390	300	150	15	60	0.48	0.63	0.20	1.025
167	390	300	150	15	120	0.48	0.63	0.40	1.004
168	390	300	150	15	180	0.48	0.63	0.60	1.032
169	390	300	180	30	60	0.24	0.75	0.20	1.273
170	390	300	180	30	120	0.24	0.75	0.40	1.303

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
171	390	300	180	30	180	0.24	0.75	0.60	1.317
172	390	300	180	25	60	0.29	0.75	0.20	1.188
173	390	300	180	25	120	0.29	0.75	0.40	1.197
174	390	300	180	25	180	0.29	0.75	0.60	1.222
175	390	300	180	20	60	0.36	0.75	0.20	1.087
176	390	300	180	20	120	0.36	0.75	0.40	1.088
177	390	300	180	20	180	0.36	0.75	0.60	1.107
178	390	300	180	15	60	0.48	0.75	0.20	1.019
179	390	300	180	15	120	0.48	0.75	0.40	1.026
180	390	300	180	15	180	0.48	0.75	0.60	1.040
181	390	300	210	30	60	0.24	0.88	0.20	1.201
182	390	300	210	30	120	0.24	0.88	0.40	1.207
183	390	300	210	30	180	0.24	0.88	0.60	1.208
184	390	300	210	25	60	0.29	0.88	0.20	1.106
185	390	300	210	25	120	0.29	0.88	0.40	1.113
186	390	300	210	25	180	0.29	0.88	0.60	1.124
187	390	300	210	20	60	0.36	0.88	0.20	1.036
188	390	300	210	20	120	0.36	0.88	0.40	1.046
189	390	300	210	20	180	0.36	0.88	0.60	1.062
190	390	300	210	15	60	0.48	0.88	0.20	1.014
191	390	300	210	15	120	0.48	0.88	0.40	1.025
192	390	300	210	15	180	0.48	0.88	0.60	1.034
193	390	410	120	30	60	0.33	0.50	0.15	1.381
194	390	410	120	30	120	0.33	0.50	0.29	1.363
195	390	410	120	30	180	0.33	0.50	0.44	1.390
196	390	410	120	25	60	0.39	0.50	0.15	1.296
197	390	410	120	25	120	0.39	0.50	0.29	1.295
198	390	410	120	25	180	0.39	0.50	0.44	1.330
199	390	410	120	20	60	0.49	0.50	0.15	1.170
200	390	410	120	20	120	0.49	0.50	0.29	1.139
201	390	410	120	20	180	0.49	0.50	0.44	1.167
202	390	410	120	15	60	0.66	0.50	0.15	1.018
203	390	410	120	15	120	0.66	0.50	0.29	1.032
204	390	410	120	15	180	0.66	0.50	0.44	1.023

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
205	390	410	150	30	60	0.33	0.63	0.15	1.186
206	390	410	150	30	120	0.33	0.63	0.29	1.182
207	390	410	150	30	180	0.33	0.63	0.44	1.235
208	390	410	150	25	60	0.39	0.63	0.15	1.123
209	390	410	150	25	120	0.39	0.63	0.29	1.124
210	390	410	150	25	180	0.39	0.63	0.44	1.151
211	390	410	150	20	60	0.49	0.63	0.15	1.022
212	390	410	150	20	120	0.49	0.63	0.29	1.031
213	390	410	150	20	180	0.49	0.63	0.44	1.079
214	390	410	150	15	60	0.66	0.63	0.15	1.027
215	390	410	150	15	120	0.66	0.63	0.29	1.043
216	390	410	150	15	180	0.66	0.63	0.44	1.057
217	390	410	180	30	60	0.33	0.75	0.15	1.163
218	390	410	180	30	120	0.33	0.75	0.29	1.169
219	390	410	180	30	180	0.33	0.75	0.44	1.119
220	390	410	180	25	60	0.39	0.75	0.15	1.089
221	390	410	180	25	120	0.39	0.75	0.29	1.090
222	390	410	180	25	180	0.39	0.75	0.44	1.068
223	390	410	180	20	60	0.49	0.75	0.15	1.019
224	390	410	180	20	120	0.49	0.75	0.29	1.030
225	390	410	180	20	180	0.49	0.75	0.44	1.032
226	390	410	180	15	60	0.66	0.75	0.15	0.997
227	390	410	180	15	120	0.66	0.75	0.29	0.999
228	390	410	180	15	180	0.66	0.75	0.44	1.010
229	390	410	210	30	60	0.33	0.88	0.15	1.075
230	390	410	210	30	120	0.33	0.88	0.29	1.086
231	390	410	210	30	180	0.33	0.88	0.44	1.070
232	390	410	210	25	60	0.39	0.88	0.15	1.044
233	390	410	210	25	120	0.39	0.88	0.29	1.057
234	390	410	210	25	180	0.39	0.88	0.44	1.052
235	390	410	210	20	60	0.49	0.88	0.15	1.034
236	390	410	210	20	120	0.49	0.88	0.29	1.045
237	390	410	210	20	180	0.49	0.88	0.44	1.044
238	390	410	210	15	60	0.66	0.88	0.15	1.011

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
239	390	410	210	15	120	0.66	0.88	0.29	1.021
240	390	410	210	15	180	0.66	0.88	0.44	1.006
241	390	500	120	30	60	0.40	0.50	0.12	1.288
242	390	500	120	30	120	0.40	0.50	0.24	1.195
243	390	500	120	30	180	0.40	0.50	0.36	1.339
244	390	500	120	25	60	0.48	0.50	0.12	1.199
245	390	500	120	25	120	0.48	0.50	0.24	1.244
246	390	500	120	25	180	0.48	0.50	0.36	1.271
247	390	500	120	20	60	0.60	0.50	0.12	1.077
248	390	500	120	20	120	0.60	0.50	0.24	1.133
249	390	500	120	20	180	0.60	0.50	0.36	1.151
250	390	500	120	15	60	0.80	0.50	0.12	1.035
251	390	500	120	15	120	0.80	0.50	0.24	1.002
252	390	500	120	15	180	0.80	0.50	0.36	1.022
253	390	500	150	30	60	0.40	0.63	0.12	1.214
254	390	500	150	30	120	0.40	0.63	0.24	1.215
255	390	500	150	30	180	0.40	0.63	0.36	1.204
256	390	500	150	25	60	0.48	0.63	0.12	1.153
257	390	500	150	25	120	0.48	0.63	0.24	1.159
258	390	500	150	25	180	0.48	0.63	0.36	1.146
259	390	500	150	20	60	0.60	0.63	0.12	1.048
260	390	500	150	20	120	0.60	0.63	0.24	1.079
261	390	500	150	20	180	0.60	0.63	0.36	1.108
262	390	500	150	15	60	0.80	0.63	0.12	0.946
263	390	500	150	15	120	0.80	0.63	0.24	0.956
264	390	500	150	15	180	0.80	0.63	0.36	0.972
265	390	500	180	30	60	0.40	0.75	0.12	1.096
266	390	500	180	30	120	0.40	0.75	0.24	1.115
267	390	500	180	30	180	0.40	0.75	0.36	1.058
268	390	500	180	25	60	0.48	0.75	0.12	1.033
269	390	500	180	25	120	0.48	0.75	0.24	1.043
270	390	500	180	25	180	0.48	0.75	0.36	1.059
271	390	500	180	20	60	0.60	0.75	0.12	1.009
272	390	500	180	20	120	0.60	0.75	0.24	1.011

表 4.9 (續)

Number	F_{yR} (MPa)	L_R (mm)	b_R (mm)	t_R (mm)	R (rad)	λ_c	b_R/b	R/L_R	$P_{cr,R}/P_{yc,R}$
273	390	500	180	20	180	0.60	0.75	0.36	1.024
274	390	500	180	15	60	0.80	0.75	0.12	1.039
275	390	500	180	15	120	0.80	0.75	0.24	1.044
276	390	500	180	15	180	0.80	0.75	0.36	0.990
277	390	500	210	30	60	0.40	0.88	0.12	1.036
278	390	500	210	30	120	0.40	0.88	0.24	1.024
279	390	500	210	30	180	0.40	0.88	0.36	1.038
280	390	500	210	25	60	0.48	0.88	0.12	1.039
281	390	500	210	25	120	0.48	0.88	0.24	1.018
282	390	500	210	25	180	0.48	0.88	0.36	1.071
283	390	500	210	20	60	0.60	0.88	0.12	1.028
284	390	500	210	20	120	0.60	0.88	0.24	1.011
285	390	500	210	20	180	0.60	0.88	0.36	1.023
286	390	500	210	15	60	0.80	0.88	0.12	1.026
287	390	500	210	15	120	0.80	0.88	0.24	0.952
288	390	500	210	15	180	0.80	0.88	0.36	0.991

表 4.10 各強度比值下削切蓋板之能量

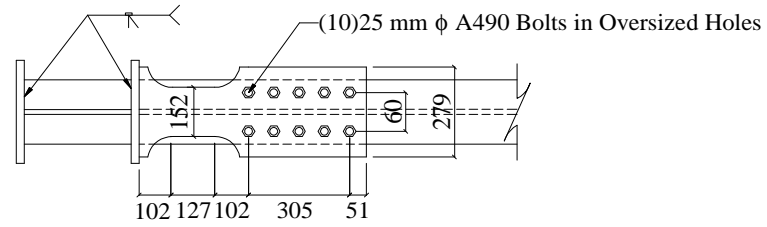
Case	P_{cr}/P_{yc}	t_R (mm)	F_{ye} (MPa)	P_{yc} (kN)	P_{cr} (kN)	P_{cr}/P_{yc}	E_a (kN-m)
1	1.00	10	396	426	426	1.00	44
2	1.10	16	396	853	928	1.09	105
3	1.17	22	396	1139	1408	1.24	186 (177)
4	1.20	25	396	1334	1698	1.27	233
5	1.30	37	396	1979	2765	1.40	462
6	1.40	54	396	2864	4487	1.57	911

Note : Displacement history to 5% interstory drift (2 cycles), E_a : 遲滯能與應變能和

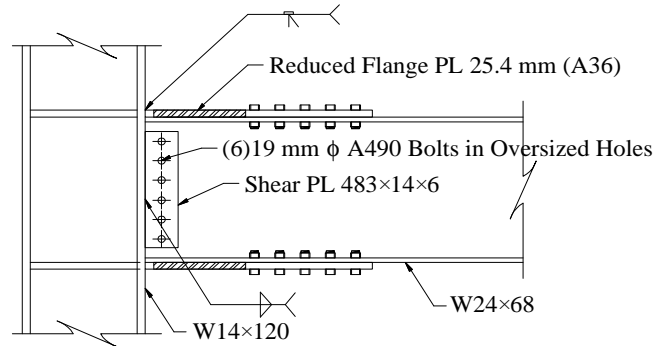
表 4.11 修正設計後各組試體之彎矩強度

Specimen No.	M_{RFP} (kN-m)	M_{RFPF} (kN-m)	M_{RFPF}/M_{np}	M_{RFPF}/M_{yf}
1	626	692	1.24	0.90
2	626	692	1.24	0.90
3	541	595	1.06	0.77
4	546	599	1.07	0.77



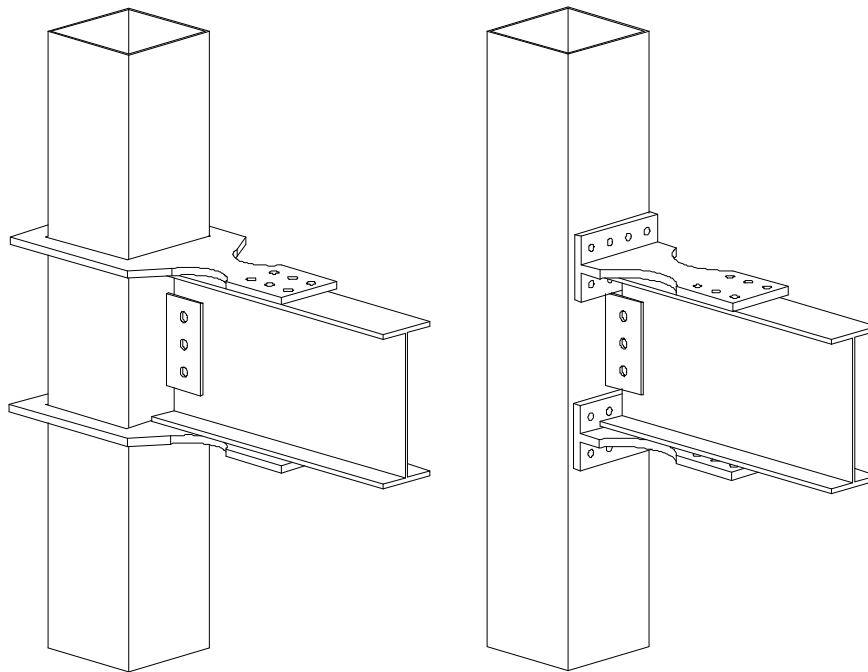


(a) Top View



(b) Elevation

圖 1.1 試體 BFP08 設計細節



(a) Welded RFP-to-column Connection (b) Bolted RFP-to-column Connection

圖 1.2 削切蓋板梁柱接頭接合型式

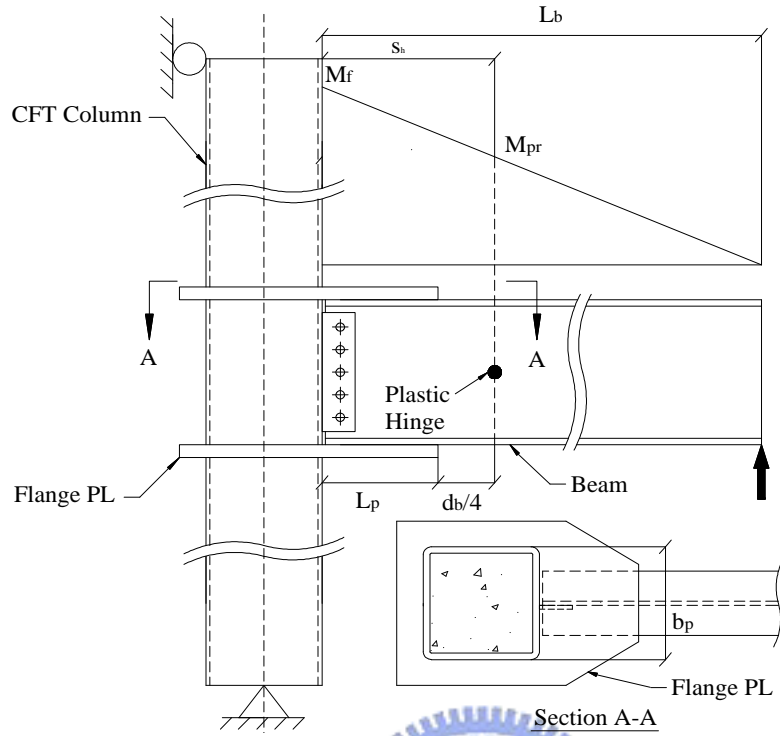
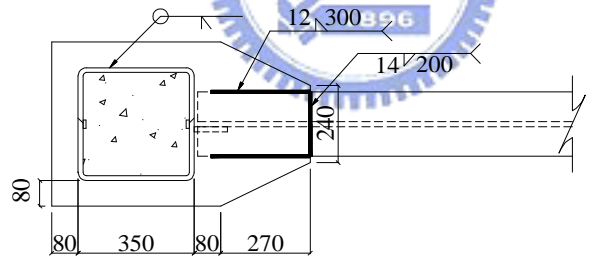
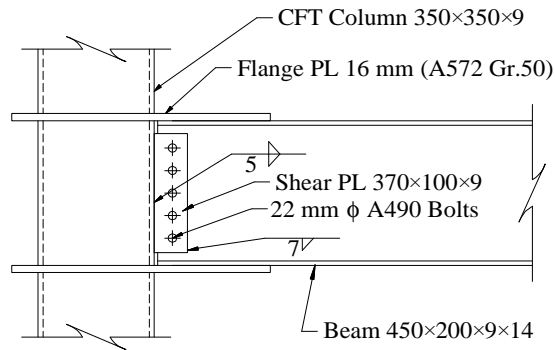


圖 2.1 蓋板梁柱接頭強度需求



(a) Top View



(b) Elevation

圖 2.2 蓋板梁柱接頭設計細節

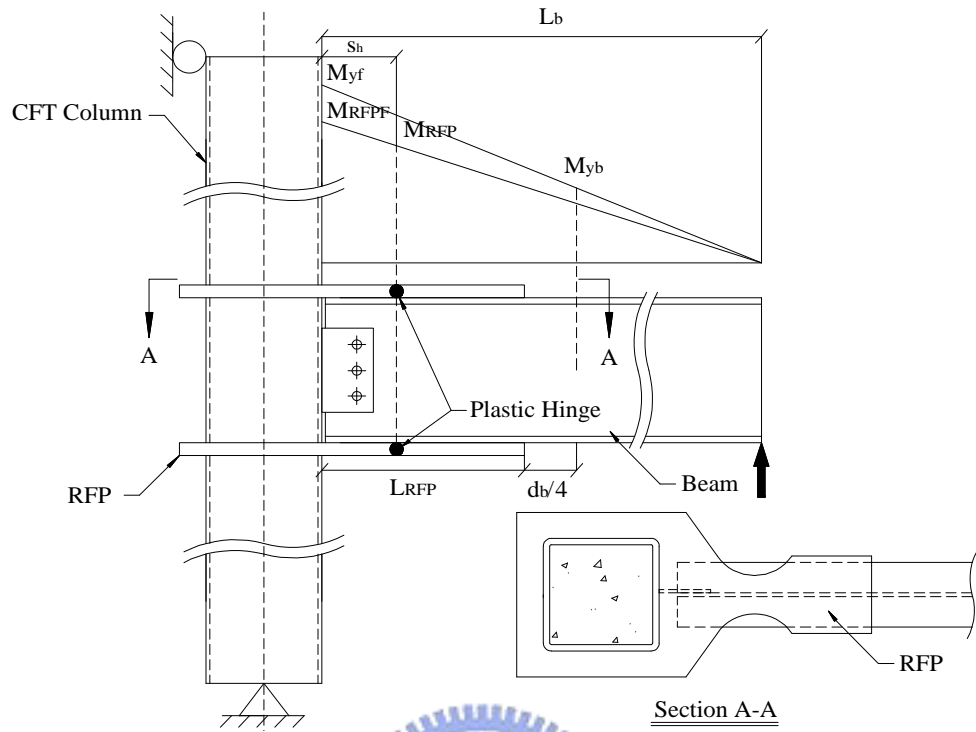


圖 2.3 削切蓋板梁柱接頭強度需求

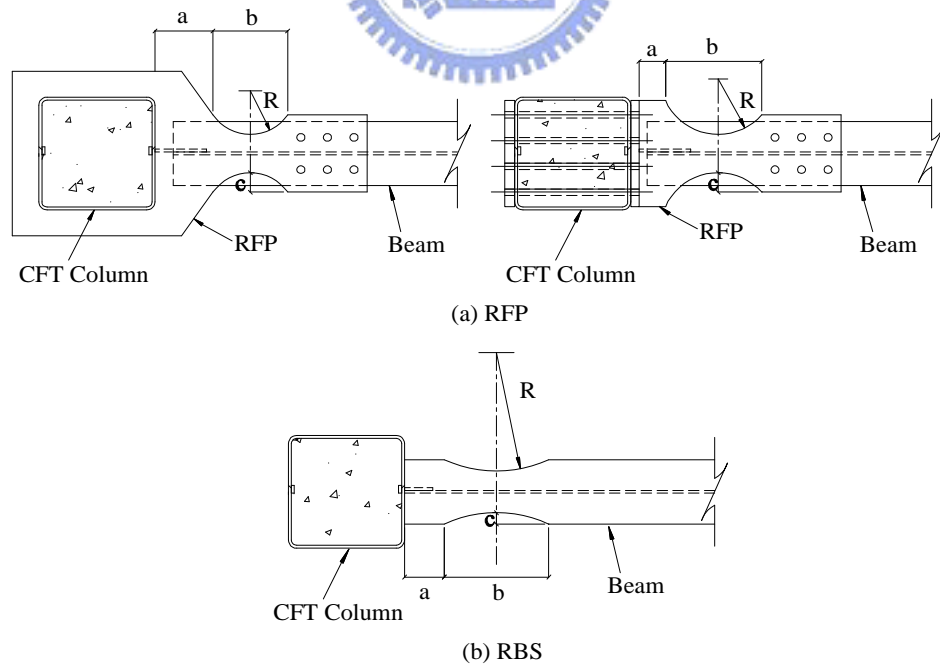
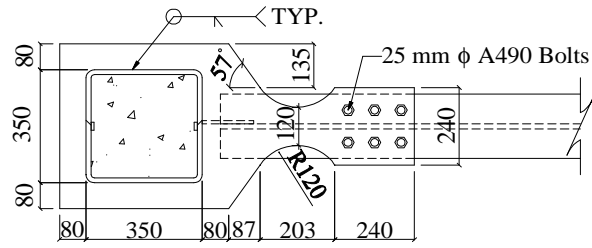
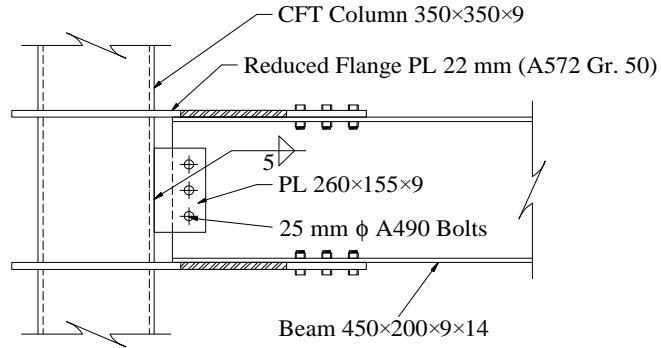


圖 2.4 削切尺寸參考圖



(a) Top View



(b) Elevation

圖 2.5 試體 1 設計細節

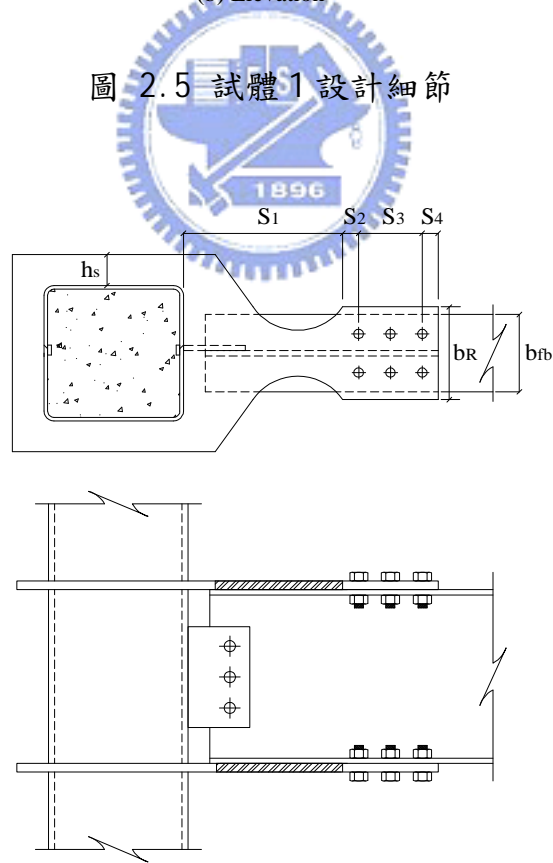
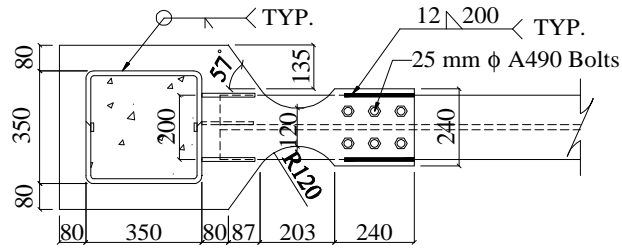
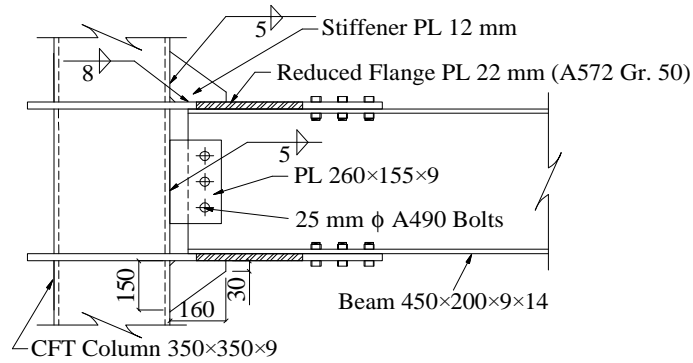


圖 2.6 試體 1 接合破壞檢核圖

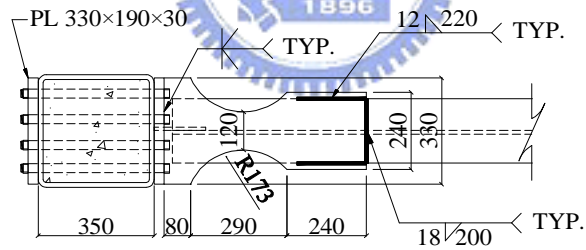


(a) Top View

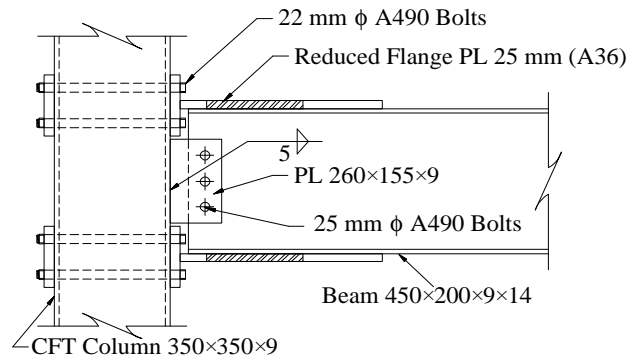


(b) Elevation

圖 2.7 試體 2 設計細節

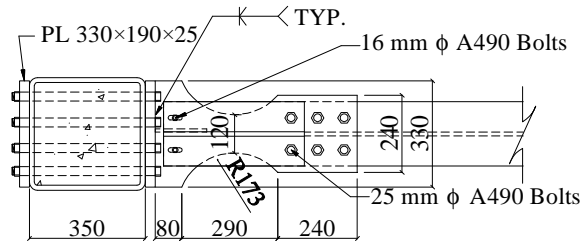


(a) Top View

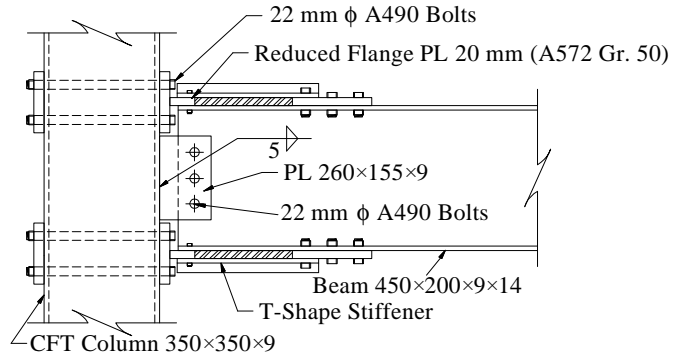


(b) Elevation

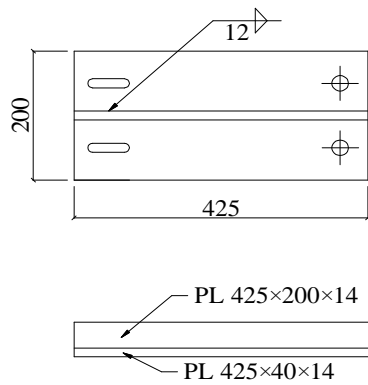
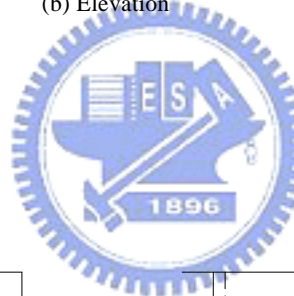
圖 2.8 試體 3 設計細節



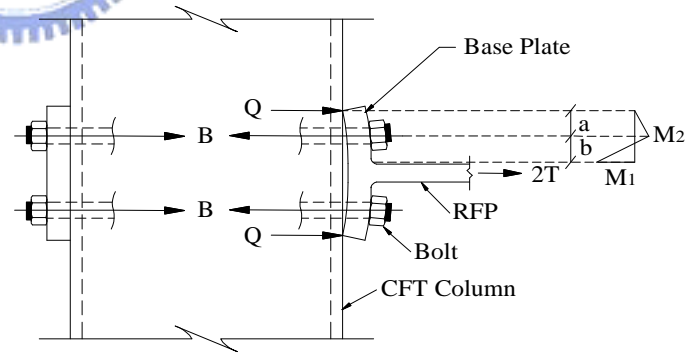
(a) Top View



(b) Elevation

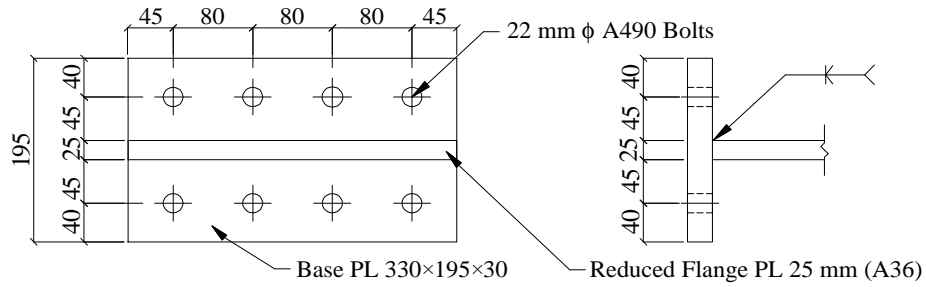


(c) T-Shape Stiffener

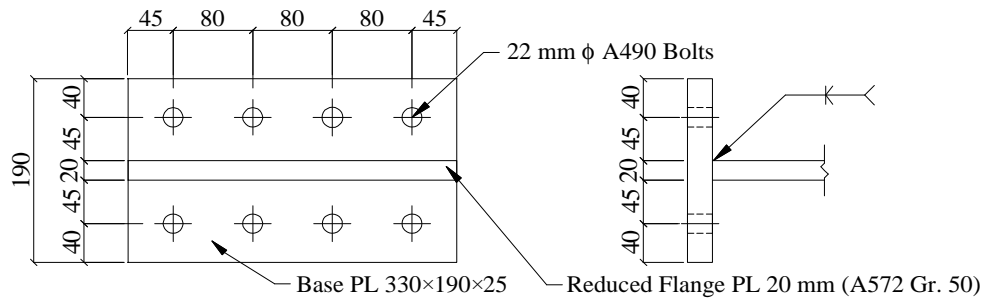


(d) Prying Action

圖 2.9 試體 4 設計細節



(a) Specimen 3



(b) Specimen 4

圖 2.10 試體 3 及 4 之 T 型裝置細部設計

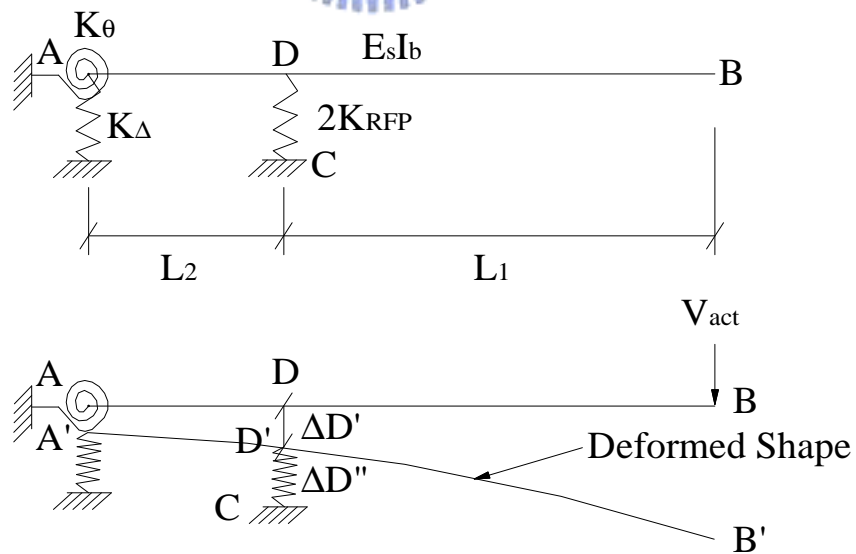


圖 2.11 試體簡化示意圖

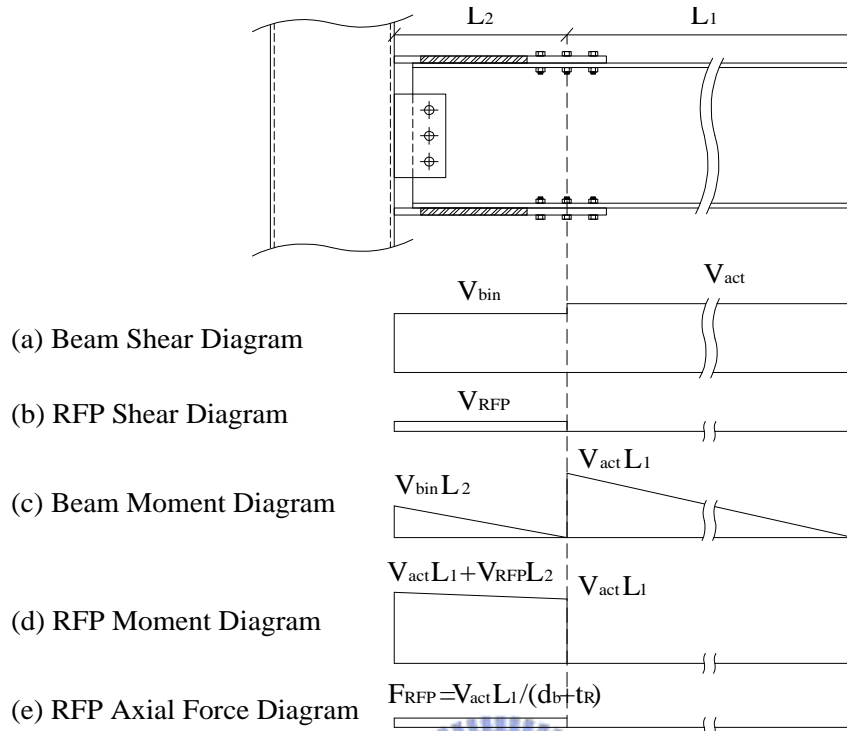


圖 2.12 試體剪力與彎矩分佈圖

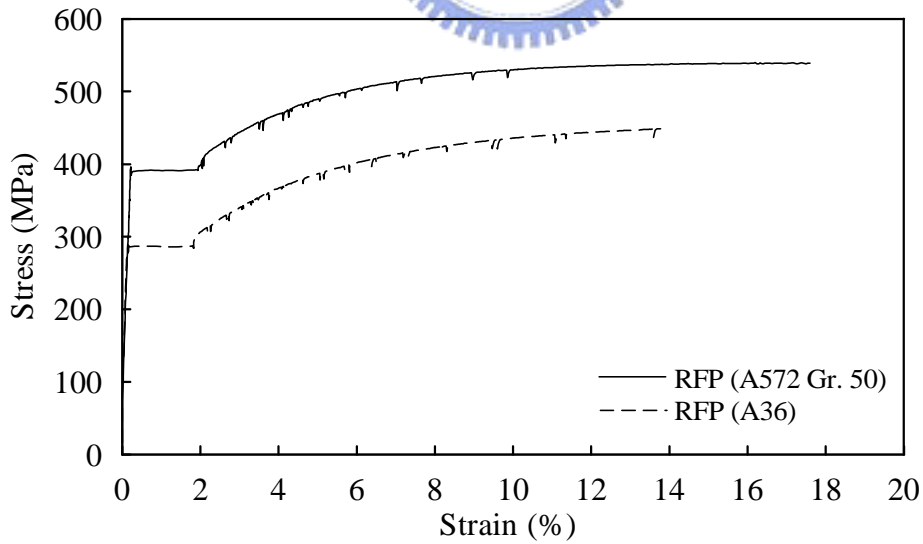


圖 2.13 削切蓋板鋼材之應力 - 應變曲線

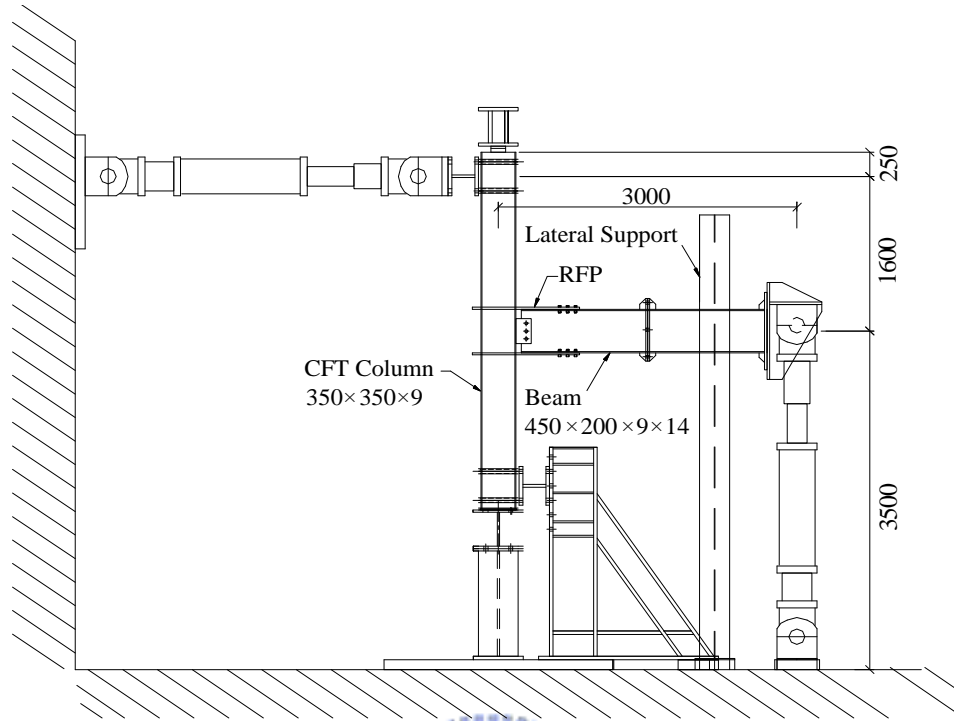


圖 2.14 構架示意圖

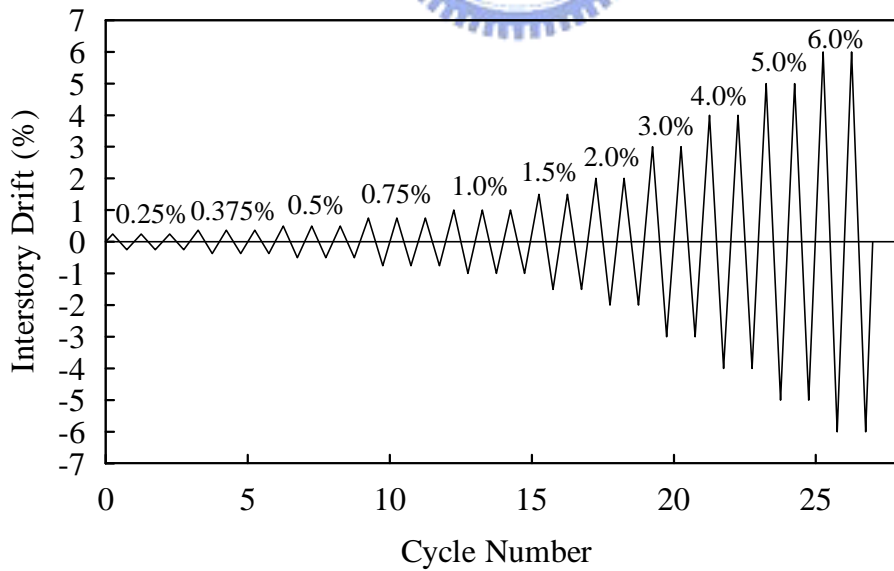


圖 2.15 實驗載重歷時

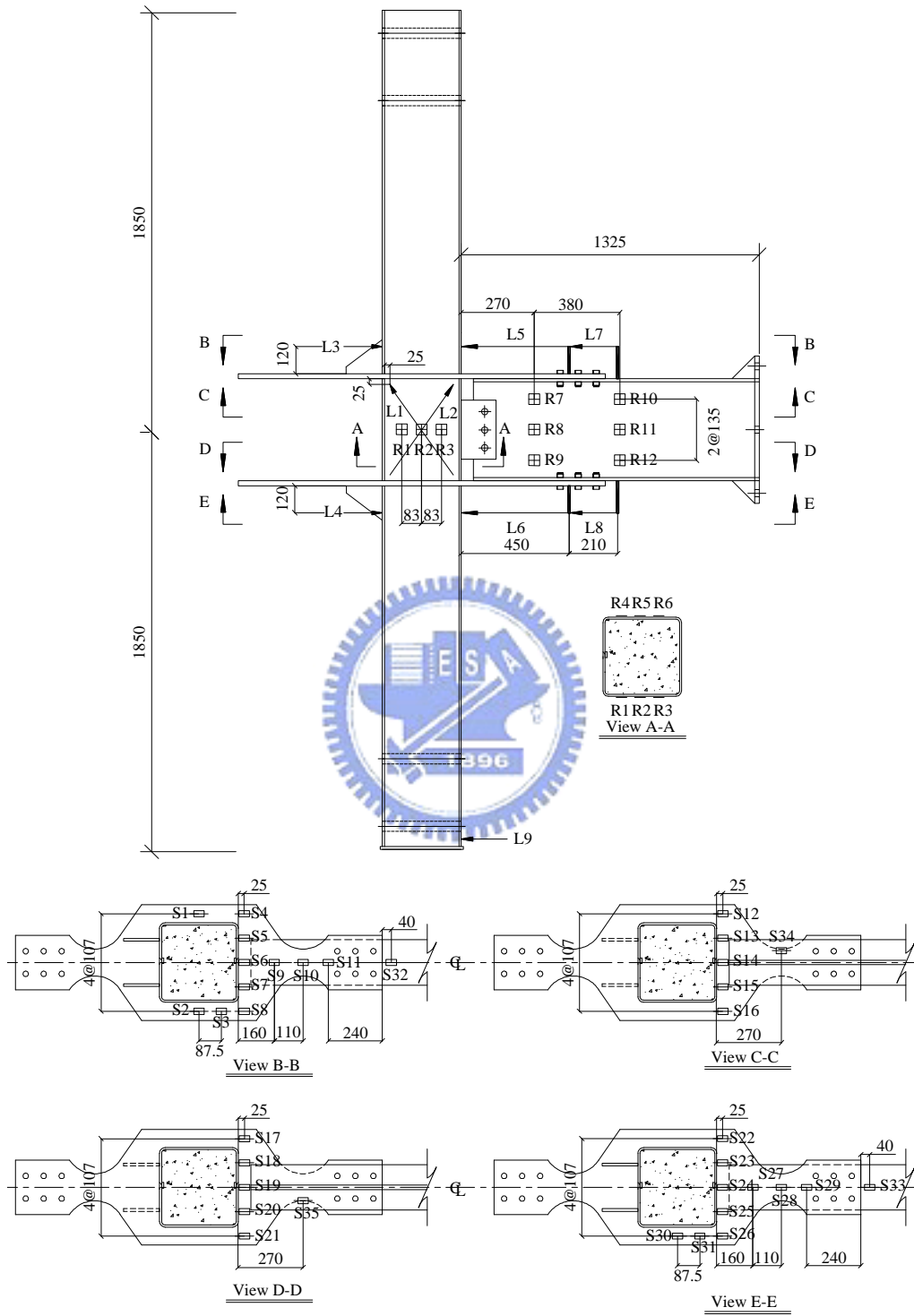


圖 2.16 試體 1 應變計與位移計配置圖

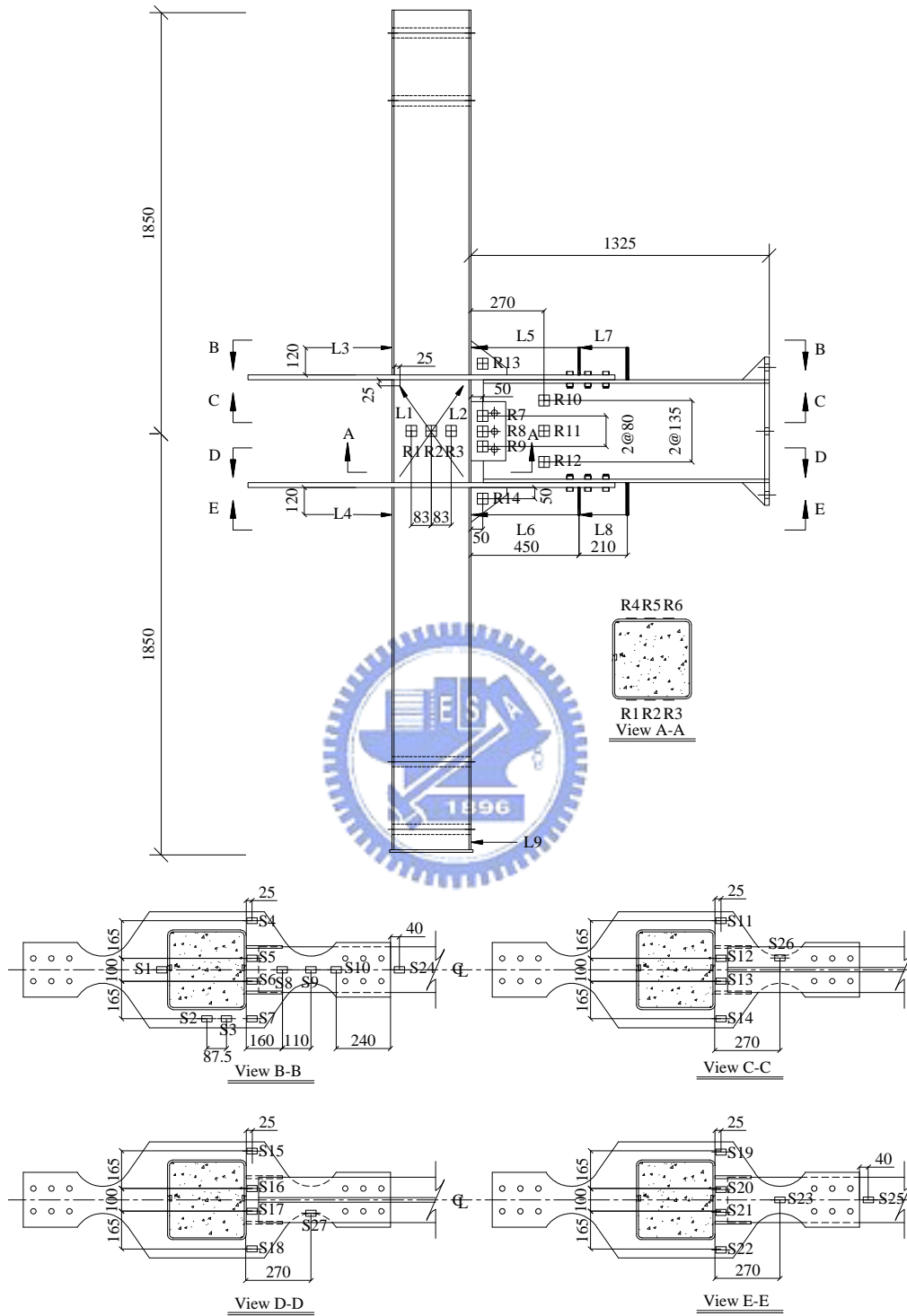


圖 2.17 試體 2 應變計與位移計配置圖

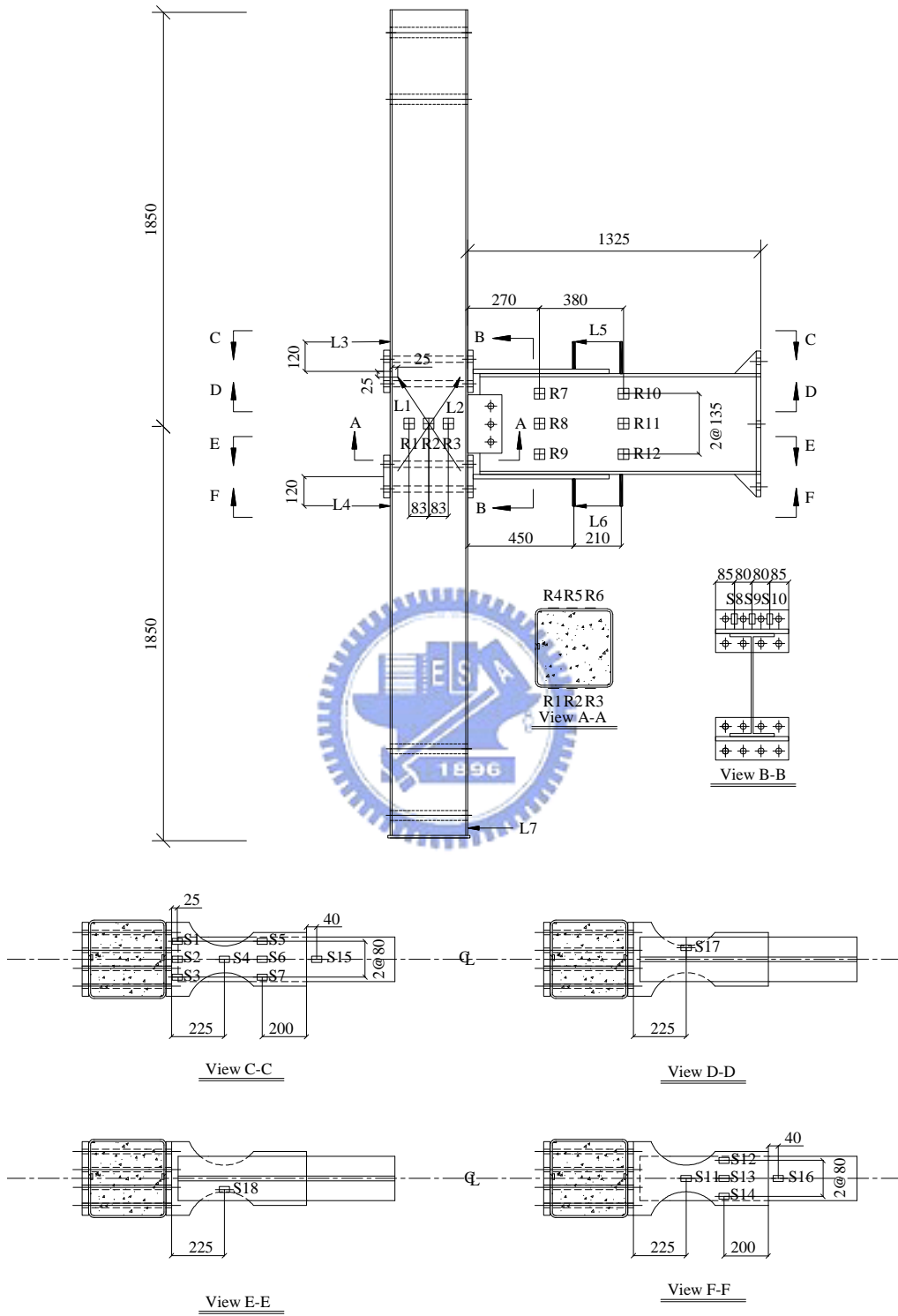


圖 2.18 試體 3 應變計與位移計配置圖

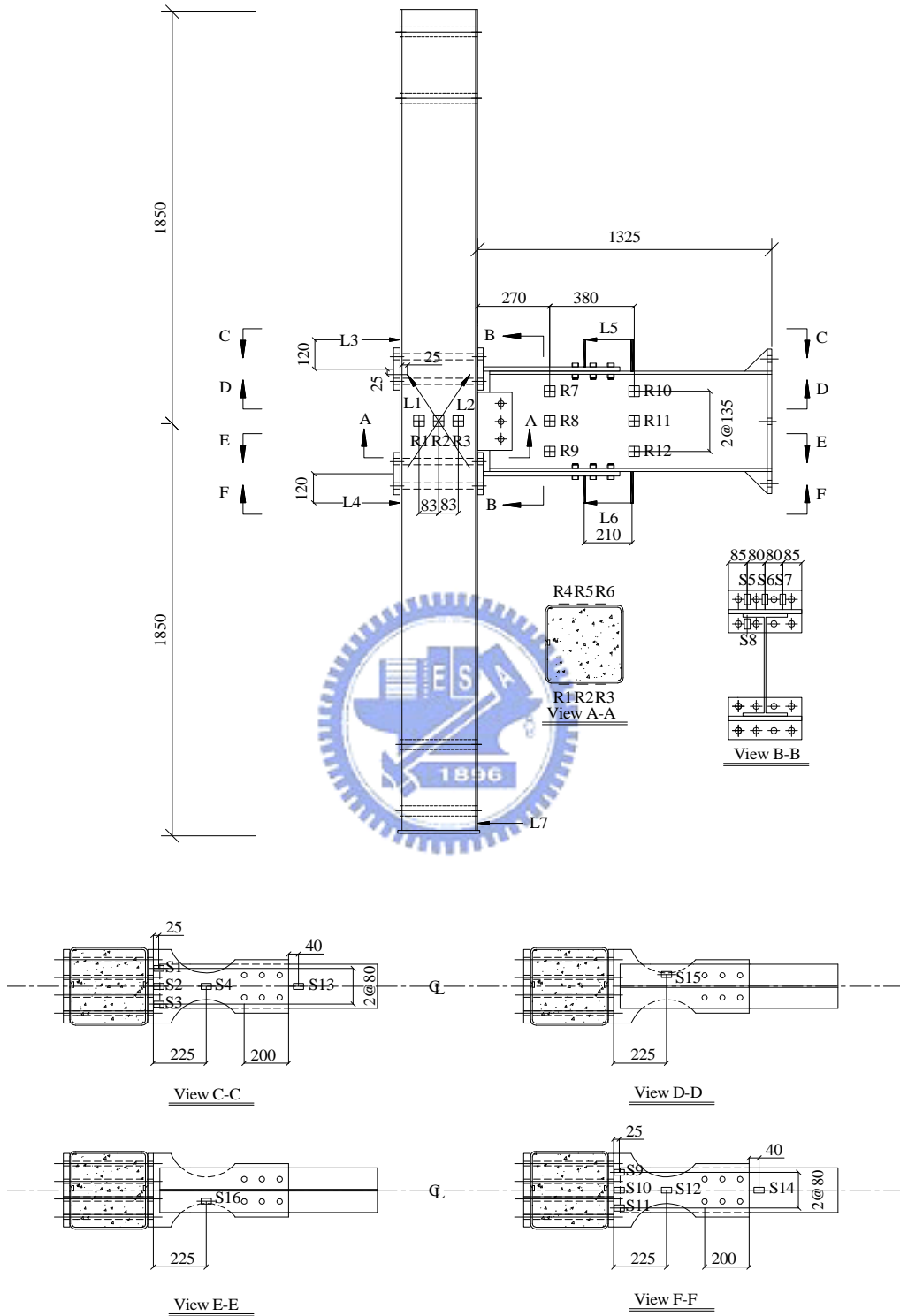


圖 2.19 試體 4 應變計與位移計配置圖

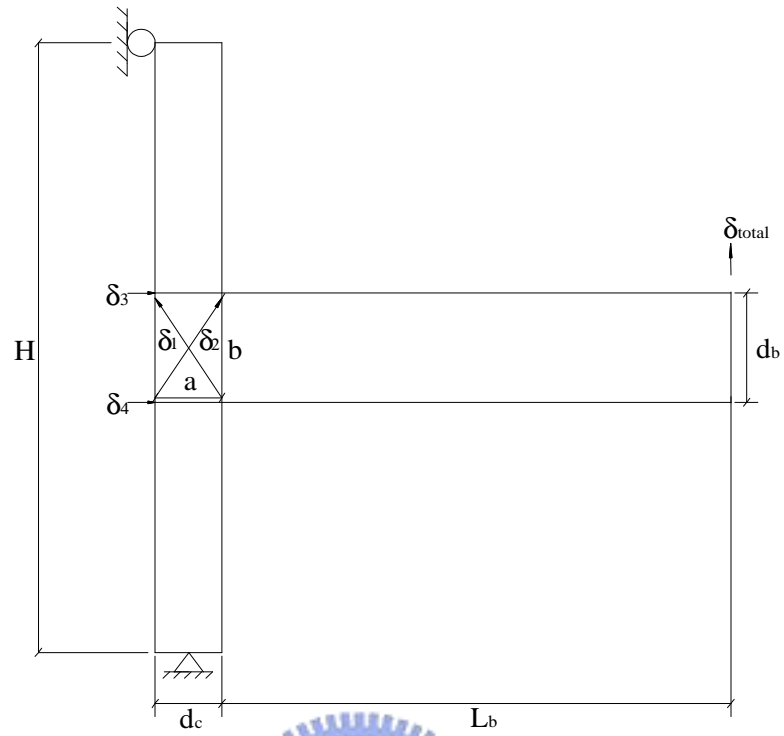


圖 2.20 梁柱交會區變形量測

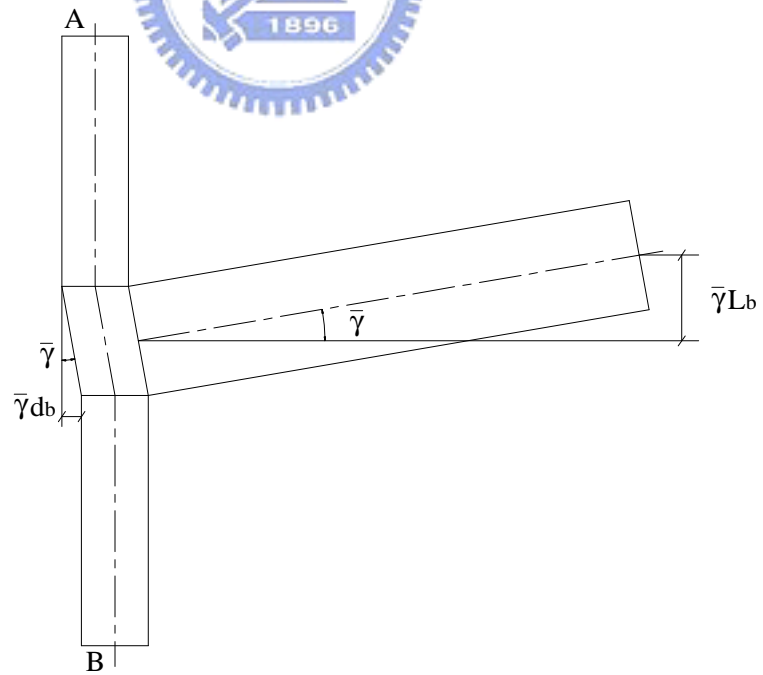


圖 2.21 梁柱交會區剪力變形示意圖（剛體旋轉前）

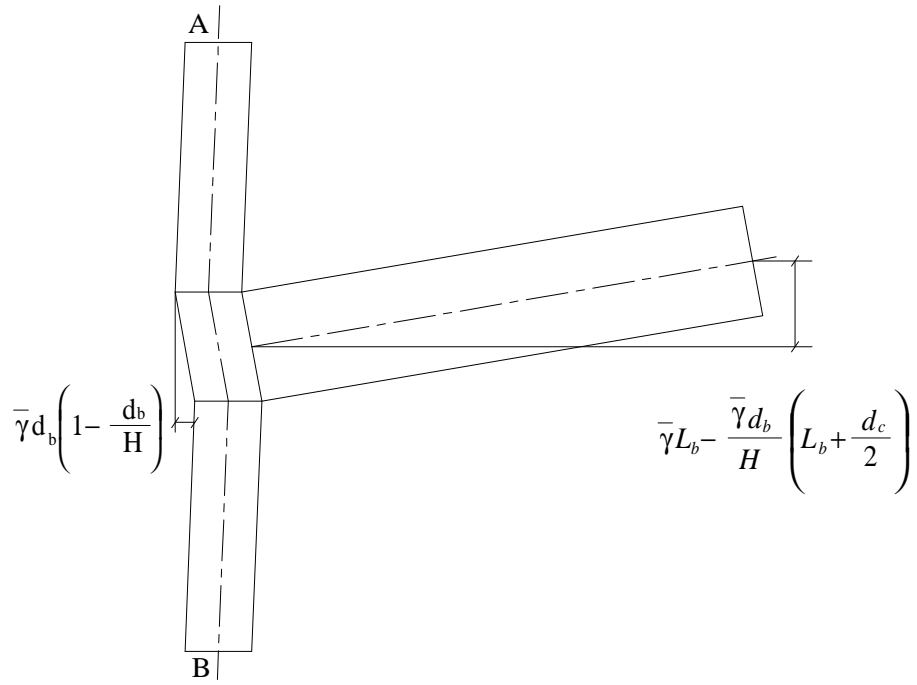


圖 2.22 梁柱交會區剪力變形示意圖（剛體旋轉後）



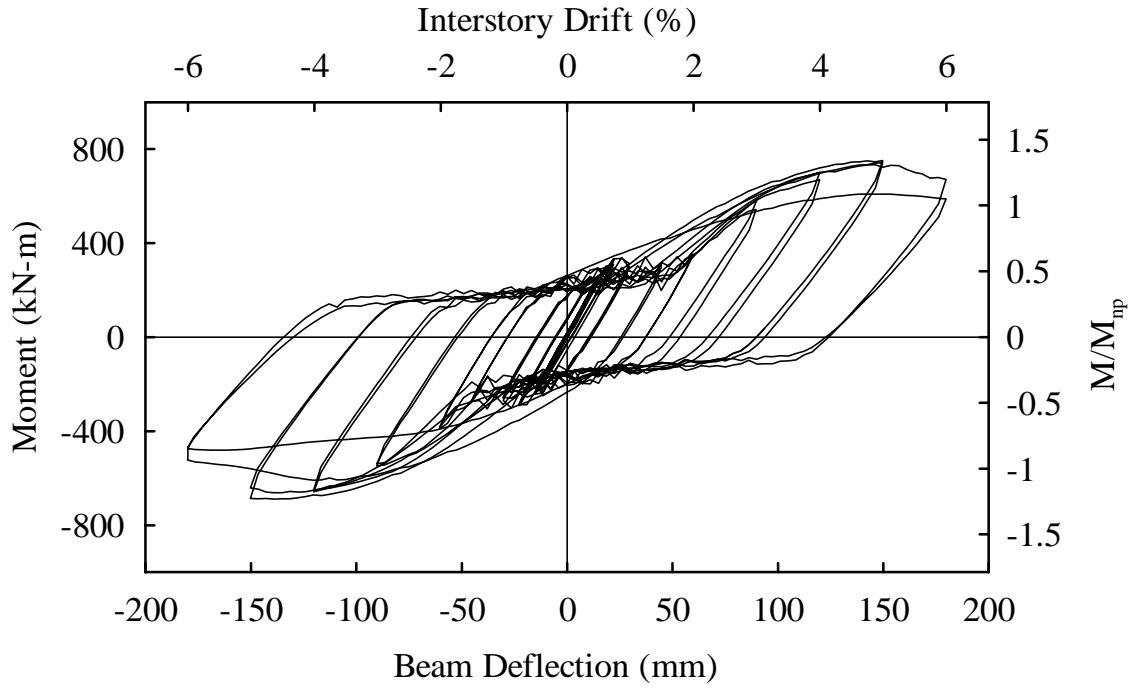


圖 3.1 試體 1 彎矩與梁端位移關係圖

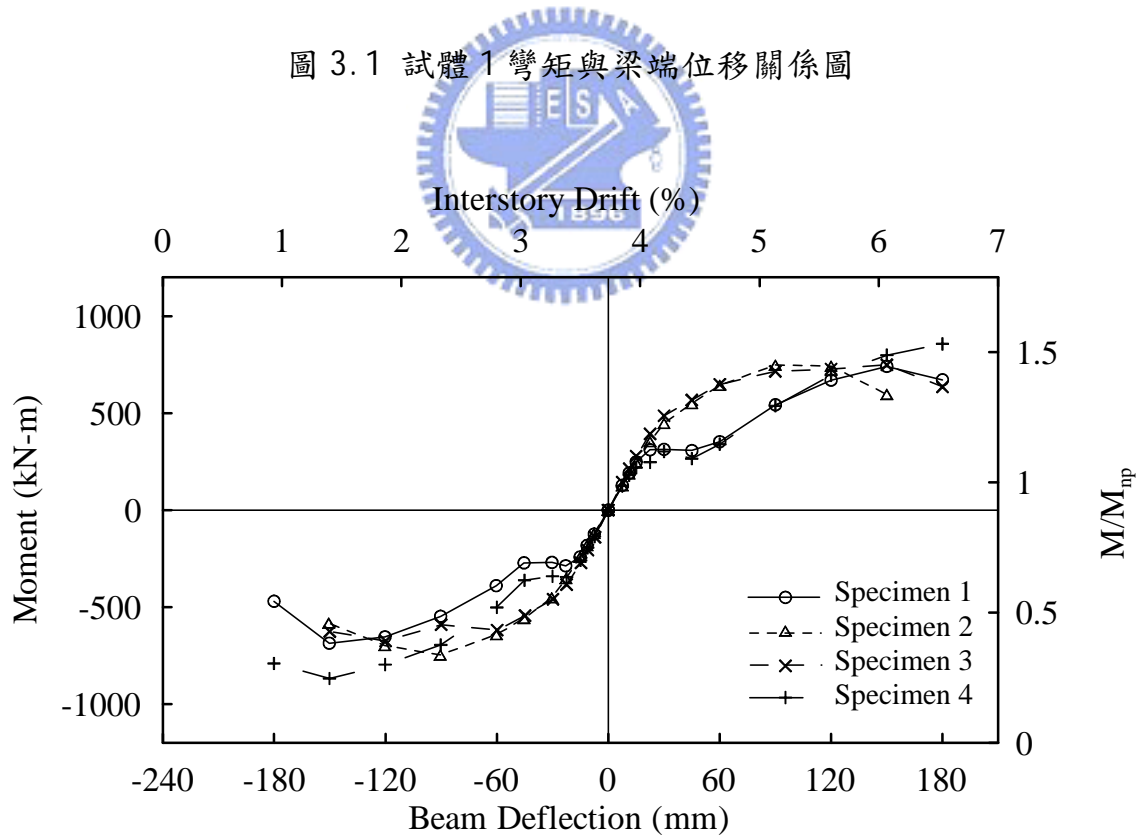


圖 3.2 四組試體彎矩與位移關係包絡線圖

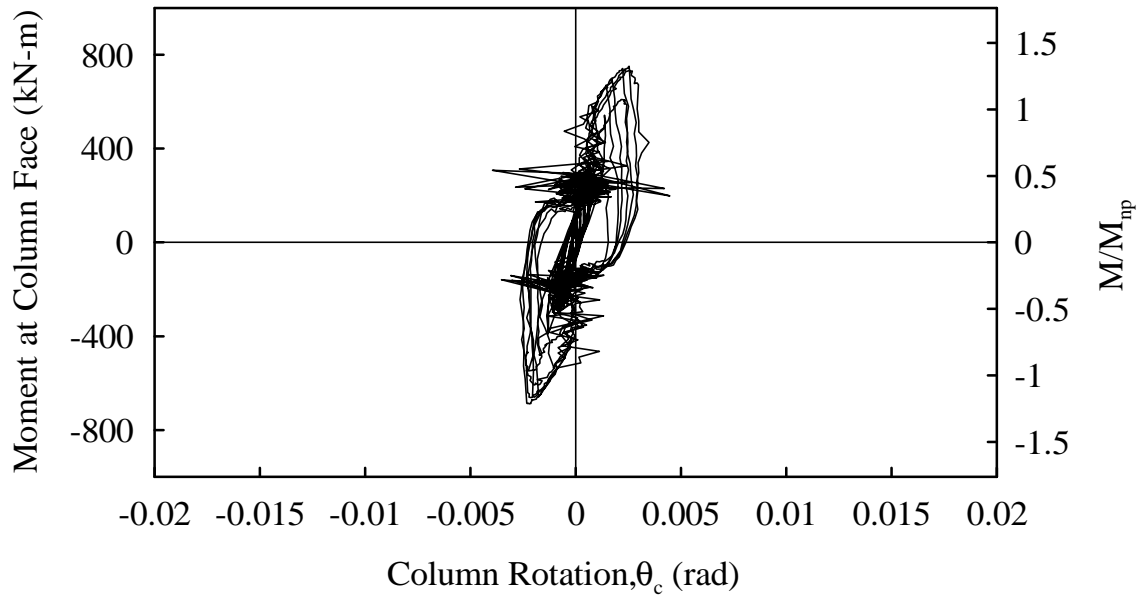


圖 3.3 試體 1 柱轉角分量與彎矩關係圖

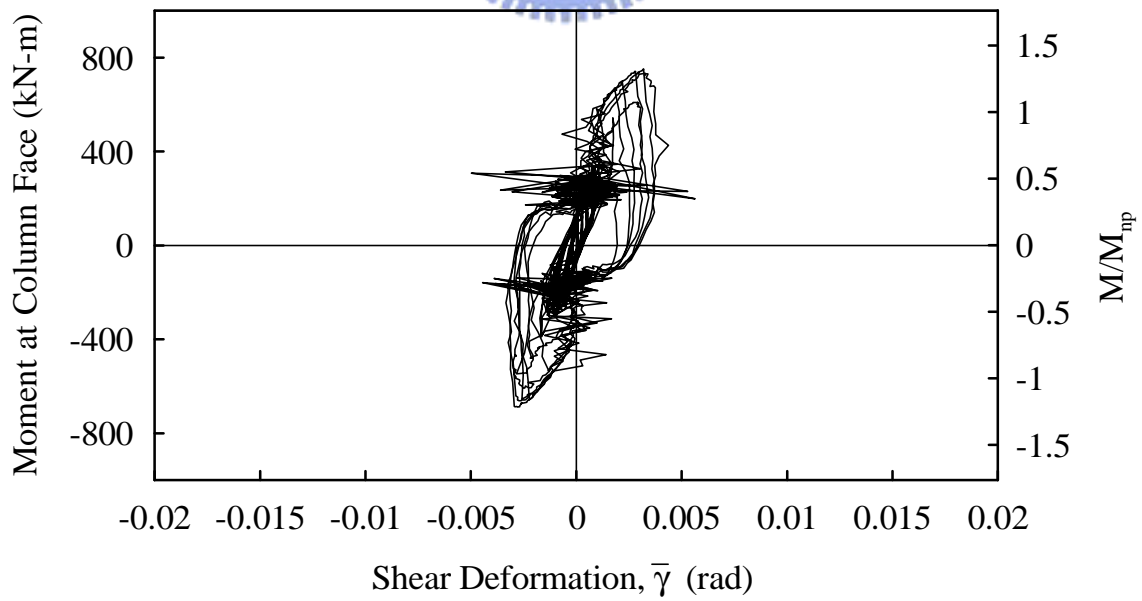


圖 3.4 試體 1 梁柱交會區剪力變形與彎矩關係圖

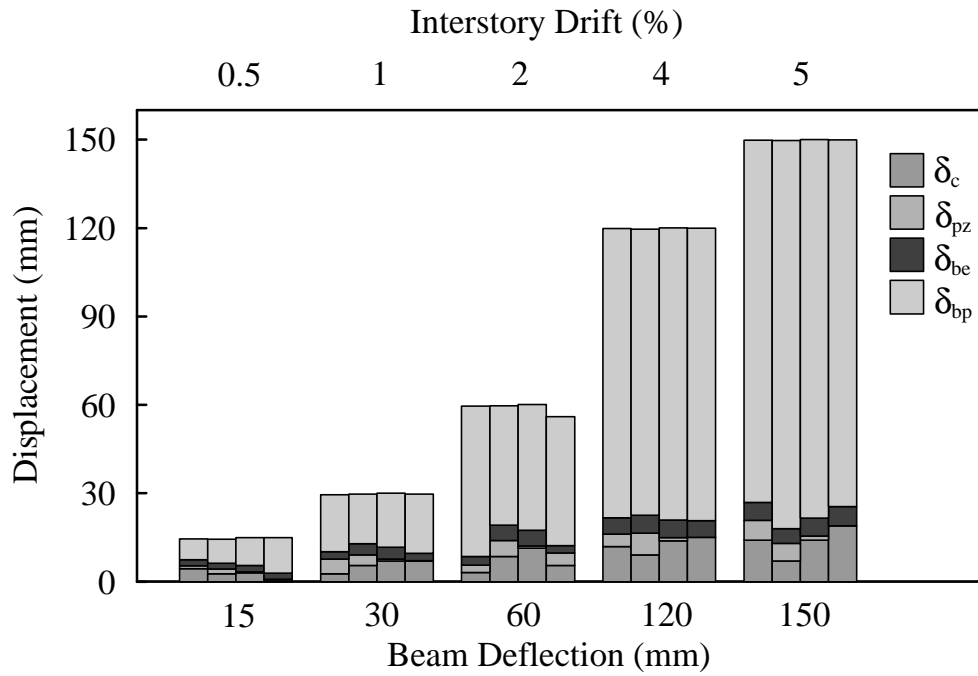


圖 3.5 各組試體的梁端位移分量於各層間側位移角之比較

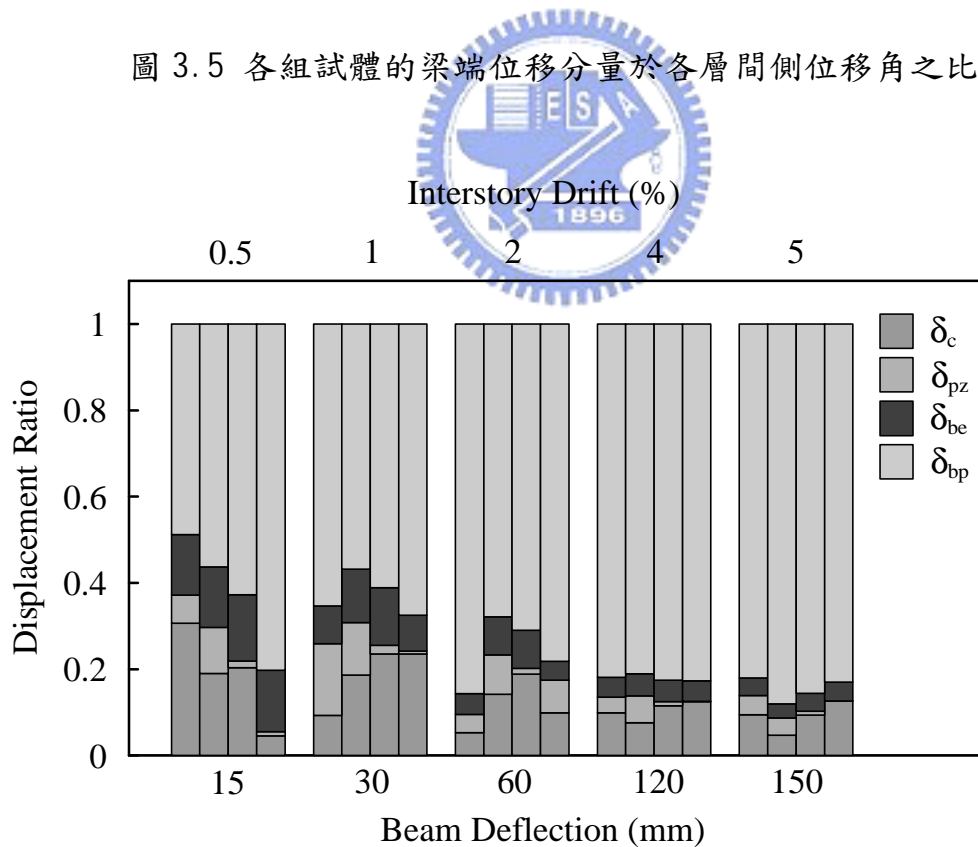


圖 3.6 各組試體的梁端位移分量比例於各層間側位移角之比較

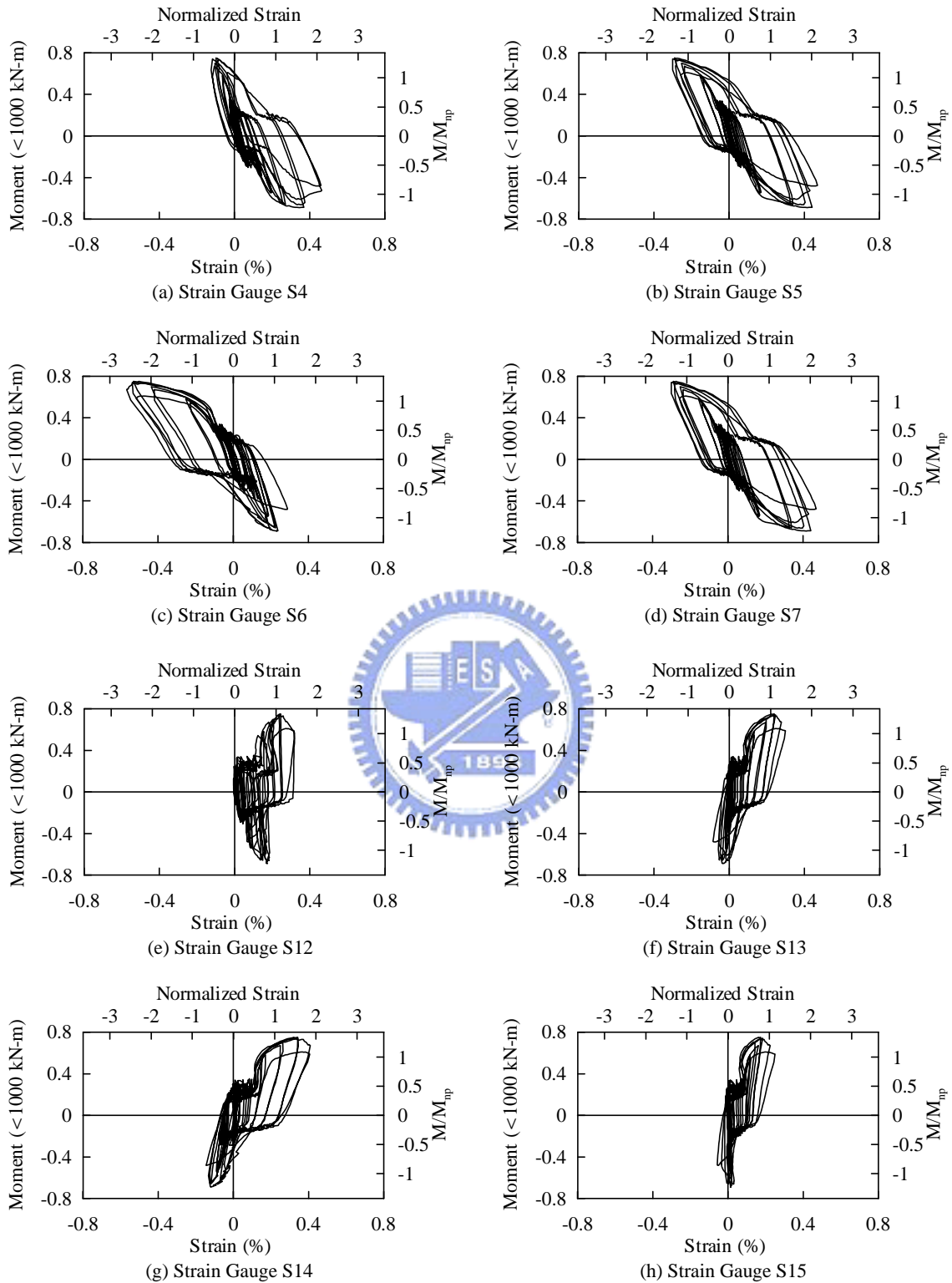


圖 3.7 試體 1 上側削切蓋板橫向應變計與柱邊彎矩歷時

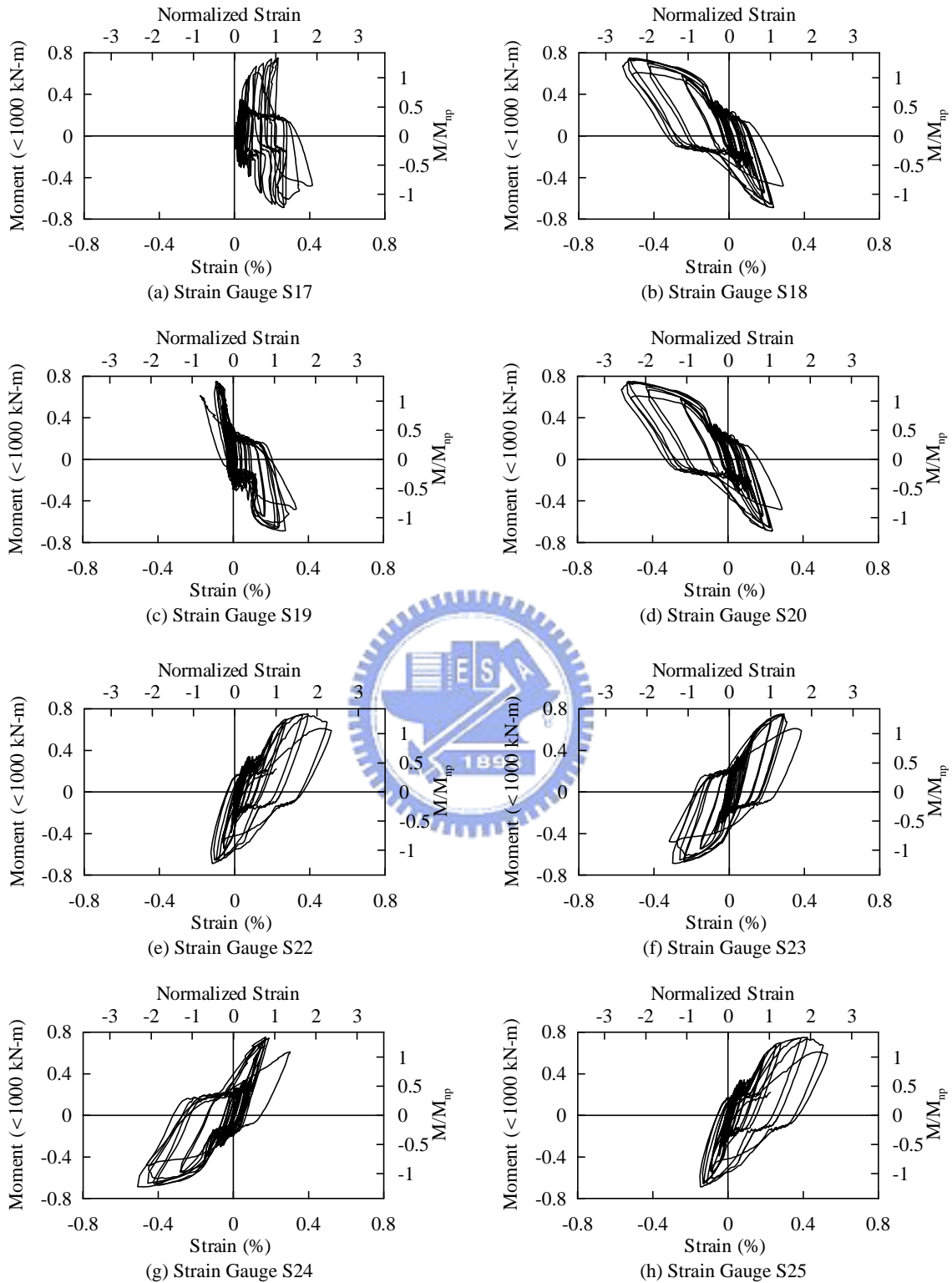


圖 3.8 試體 1 下側削切蓋板橫向應變計與柱邊彎矩歷時

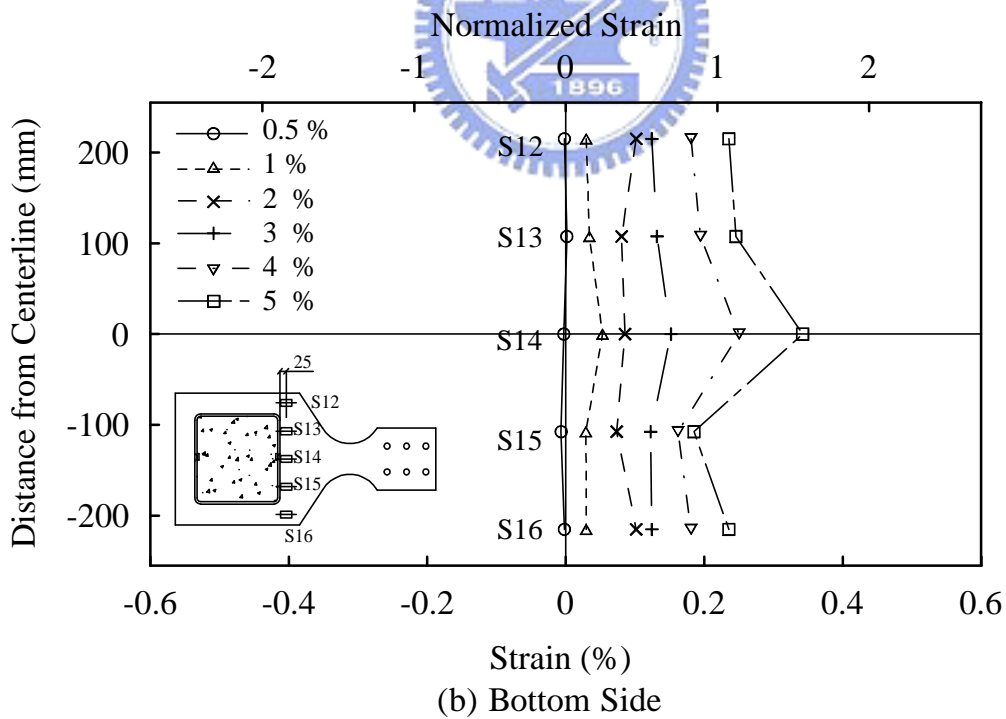
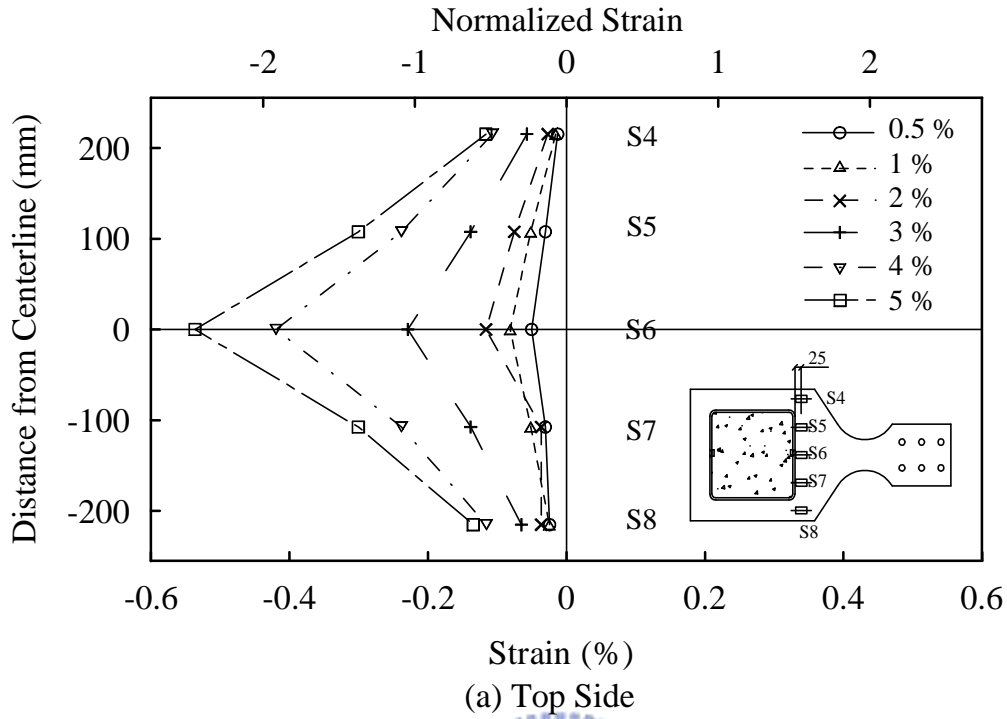


圖 3.9 試體 1 上側削切蓋板應變隨寬度方向變化圖 (正方向施載)

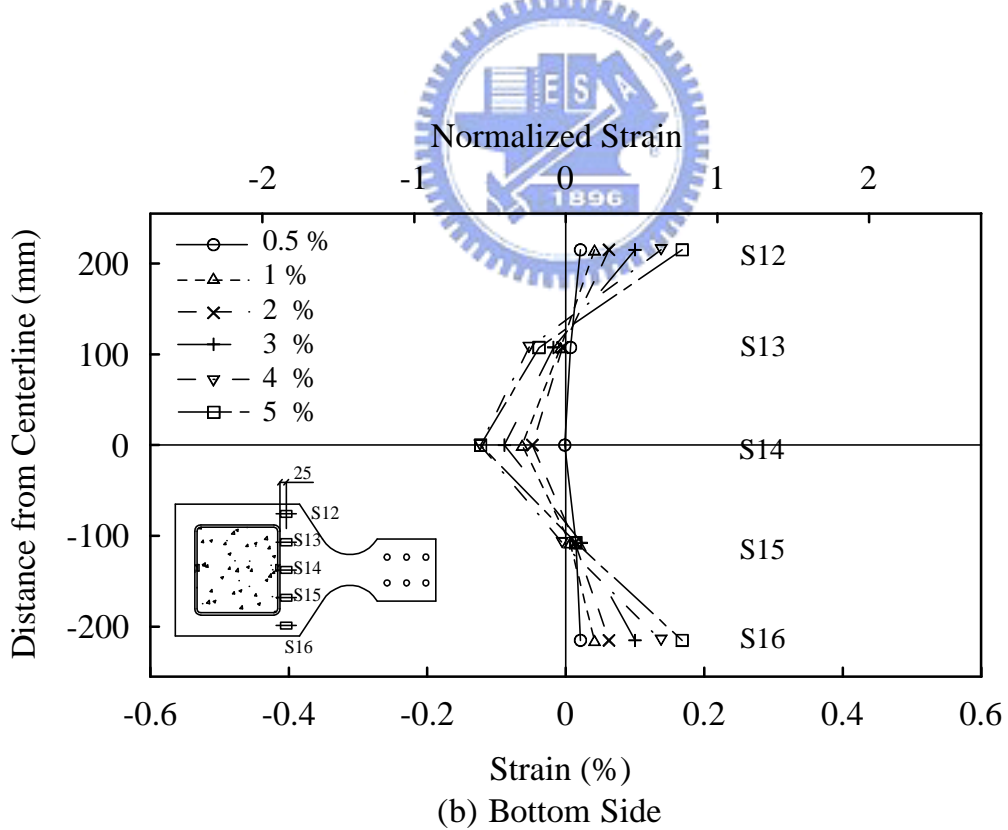
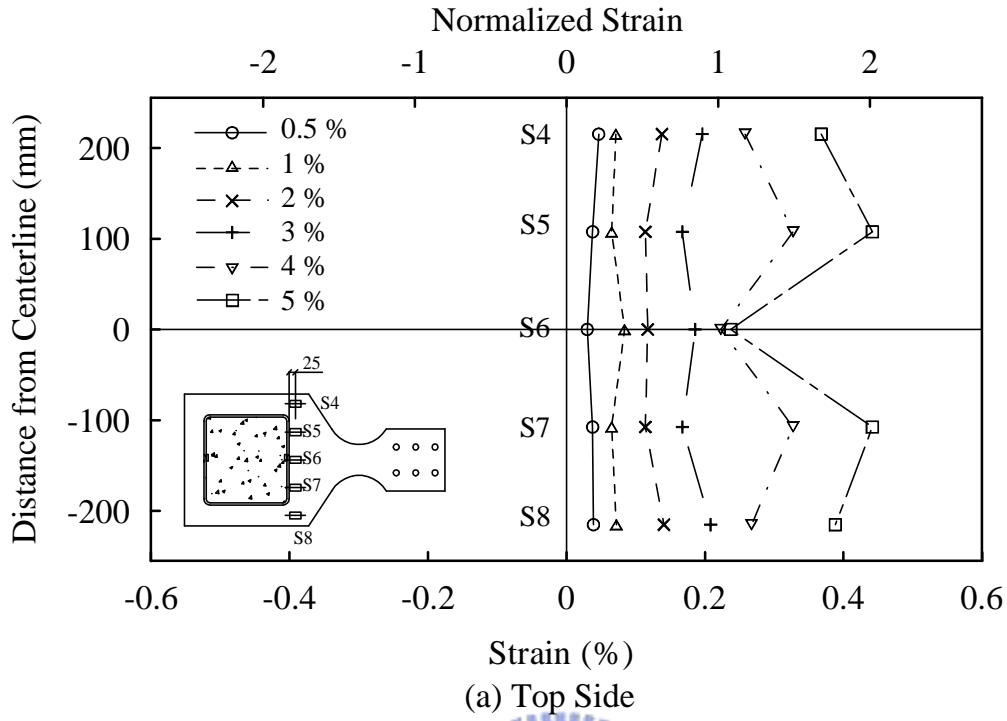


圖 3.10 試體 1 上側削切盖板應變隨寬度方向變化圖 (負方向施載)

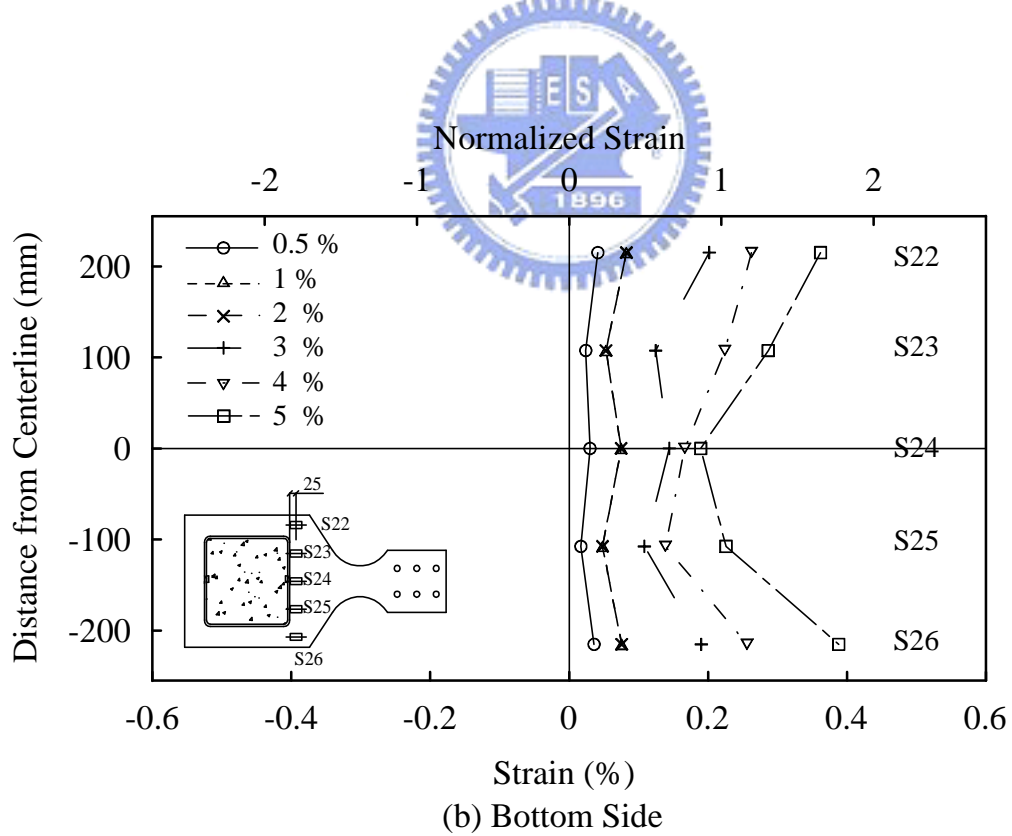
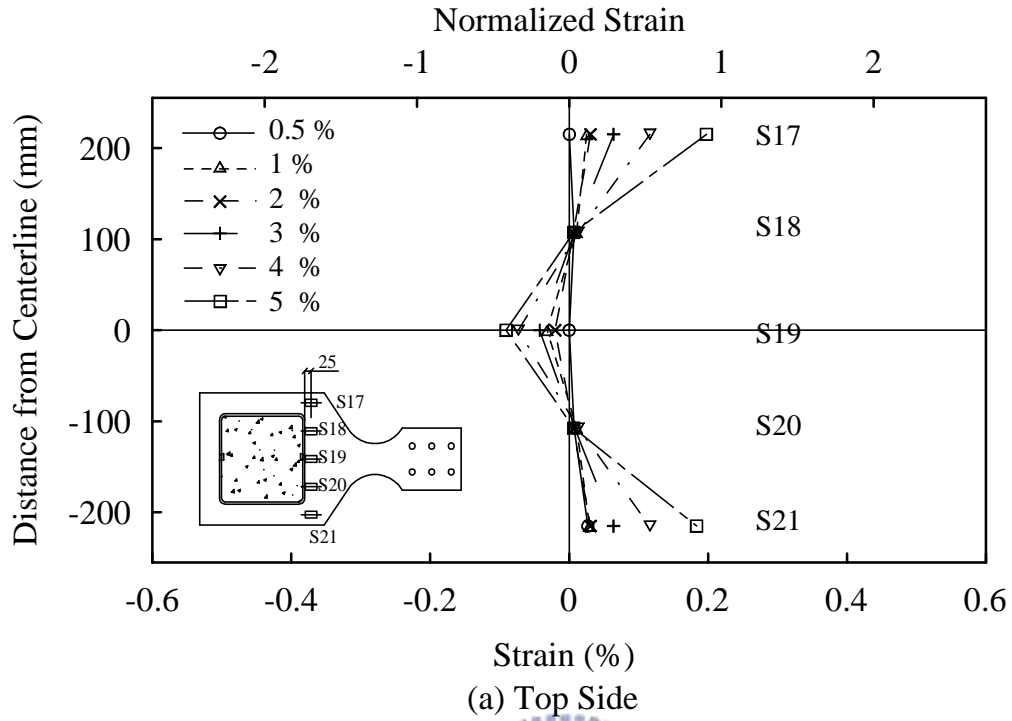


圖 3.11 試體 1 下側削切盖板應變隨寬度方向變化圖 (正方向施載)

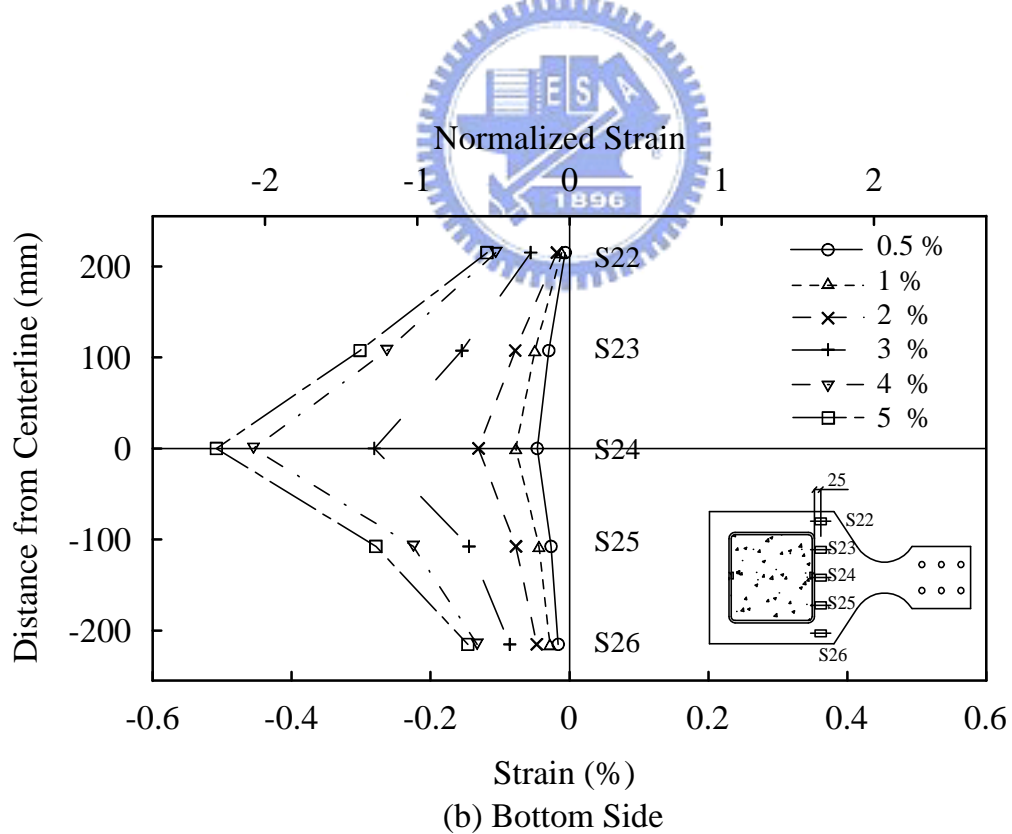
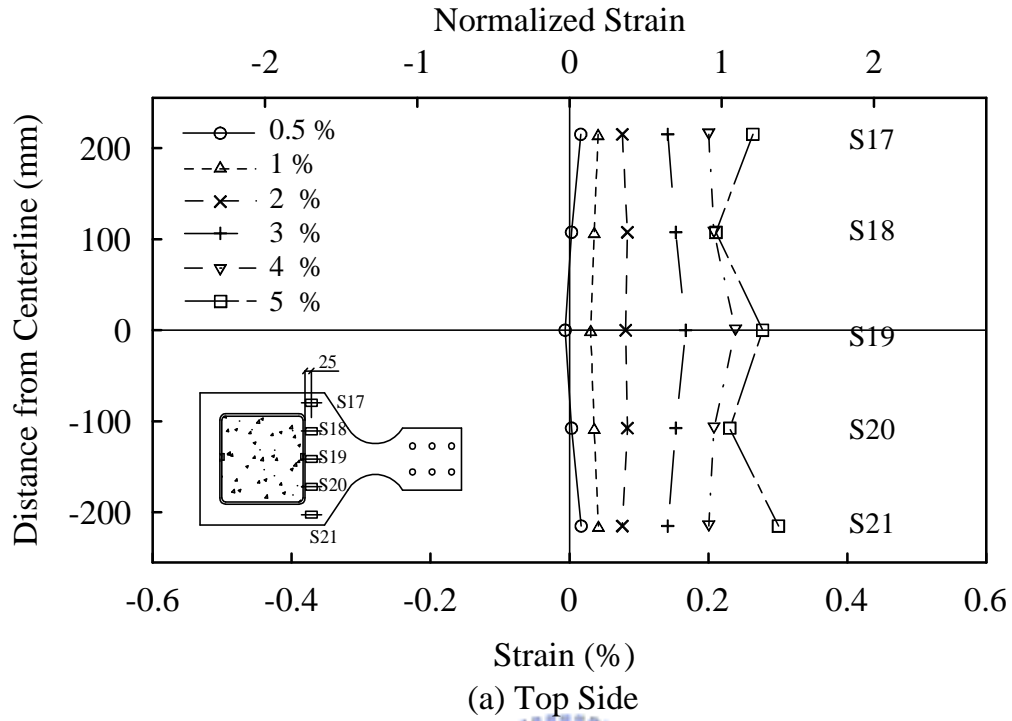
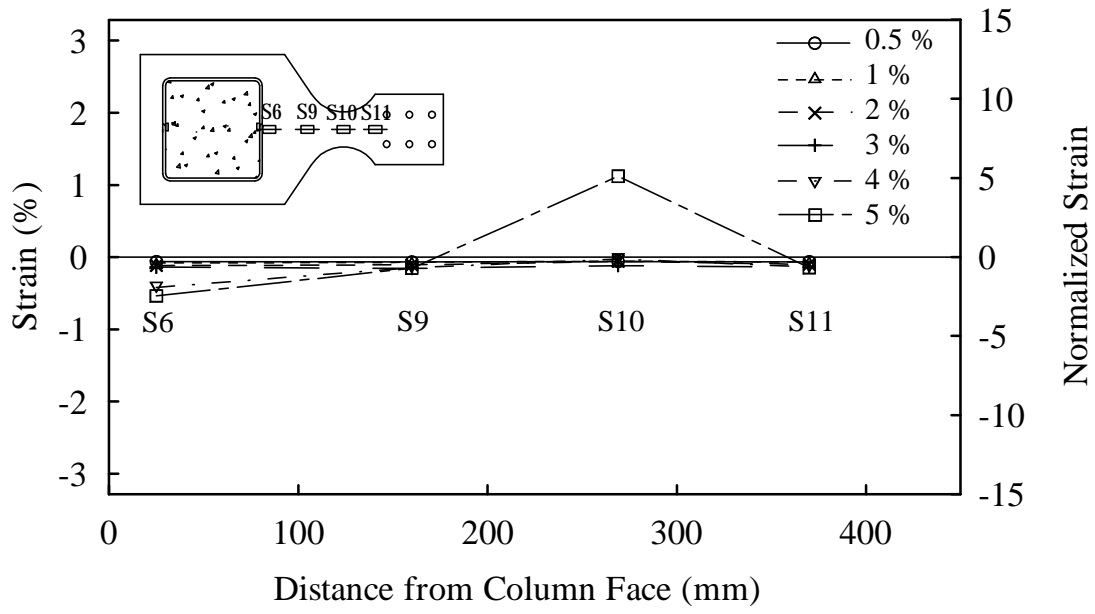
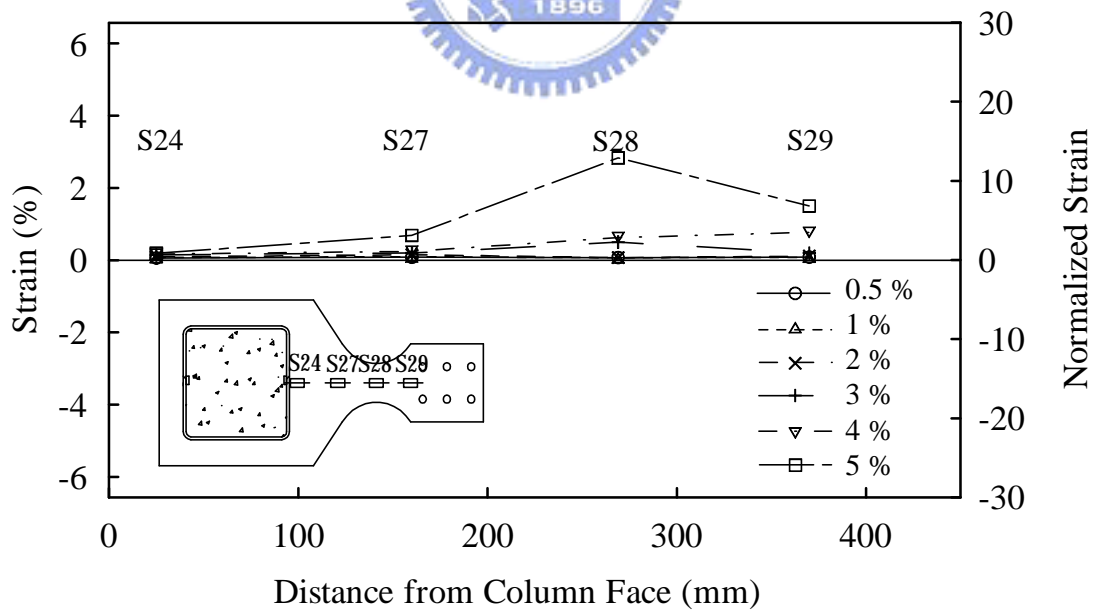


圖 3.12 試體 1 下側削切盖板應變隨寬度方向變化圖 (負方向施載)

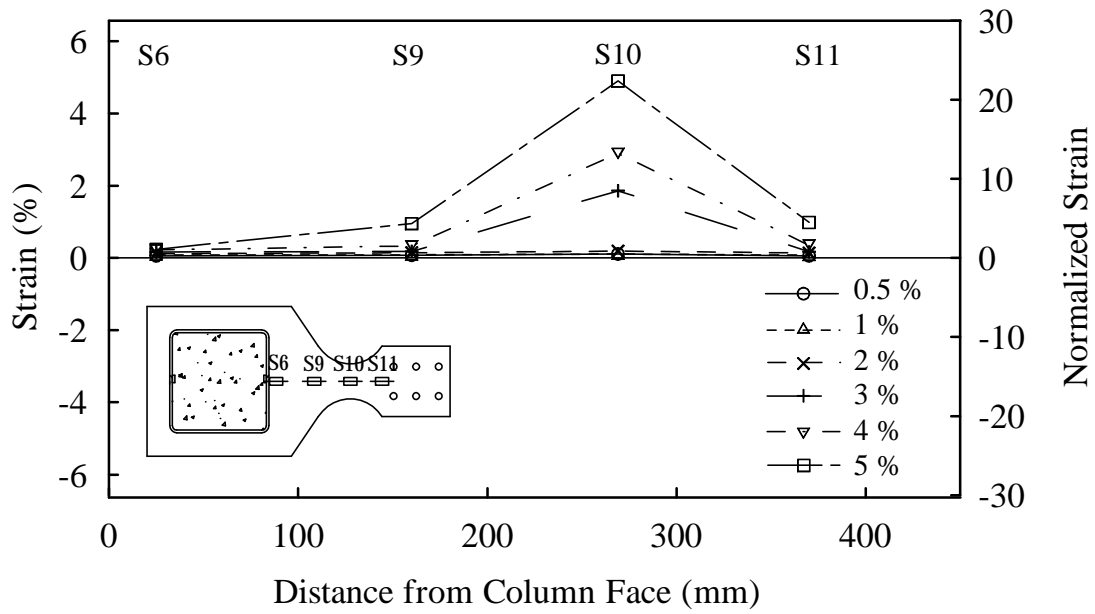


(a) Top Plate

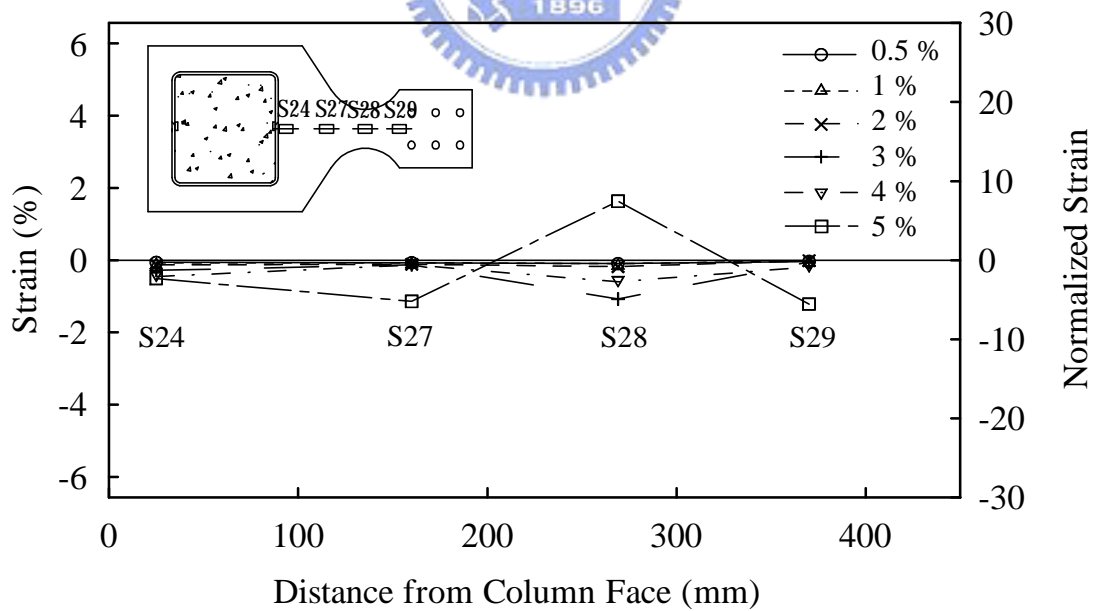


(b) Bottom Plate

圖 3.13 試體 1 削切蓋板應變沿板縱向變化圖 (正方向施載)

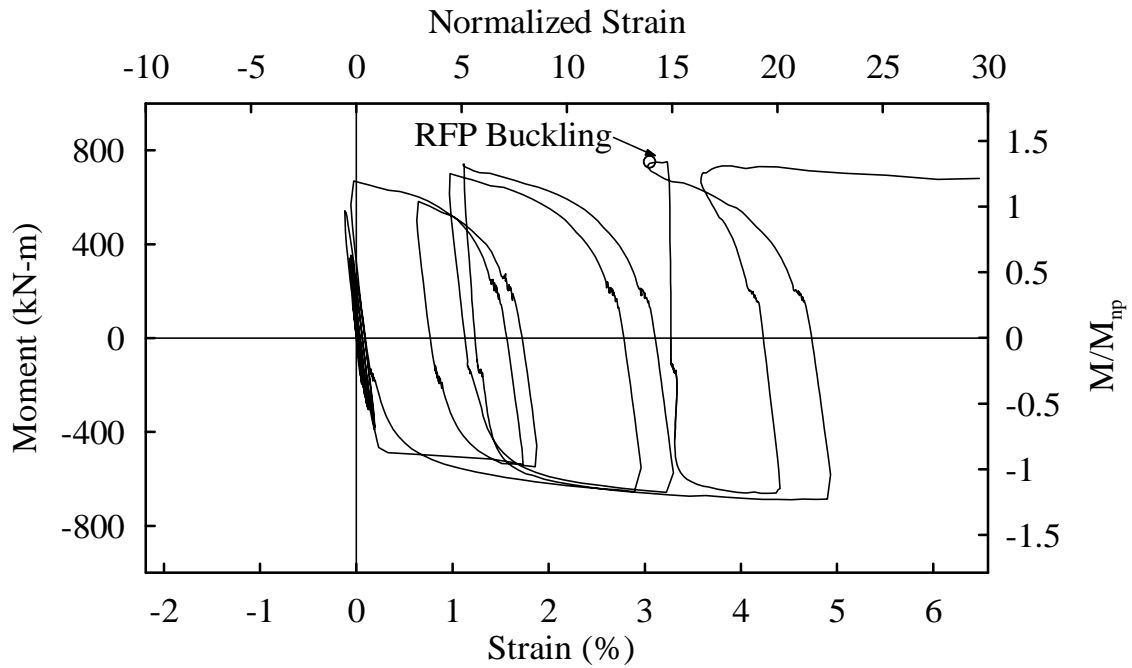


(a) Top Plate

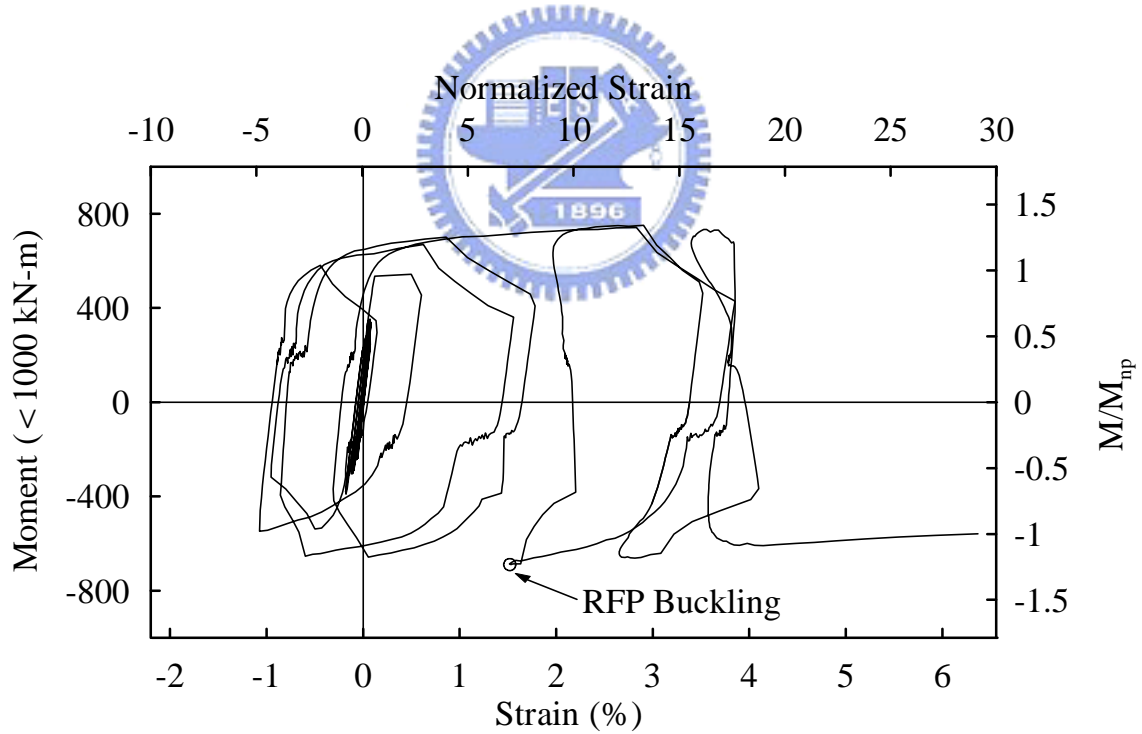


(b) Bottom Plate

圖 3.14 試體 1 削切盖板應變沿板縱向變化圖 (負向施載)

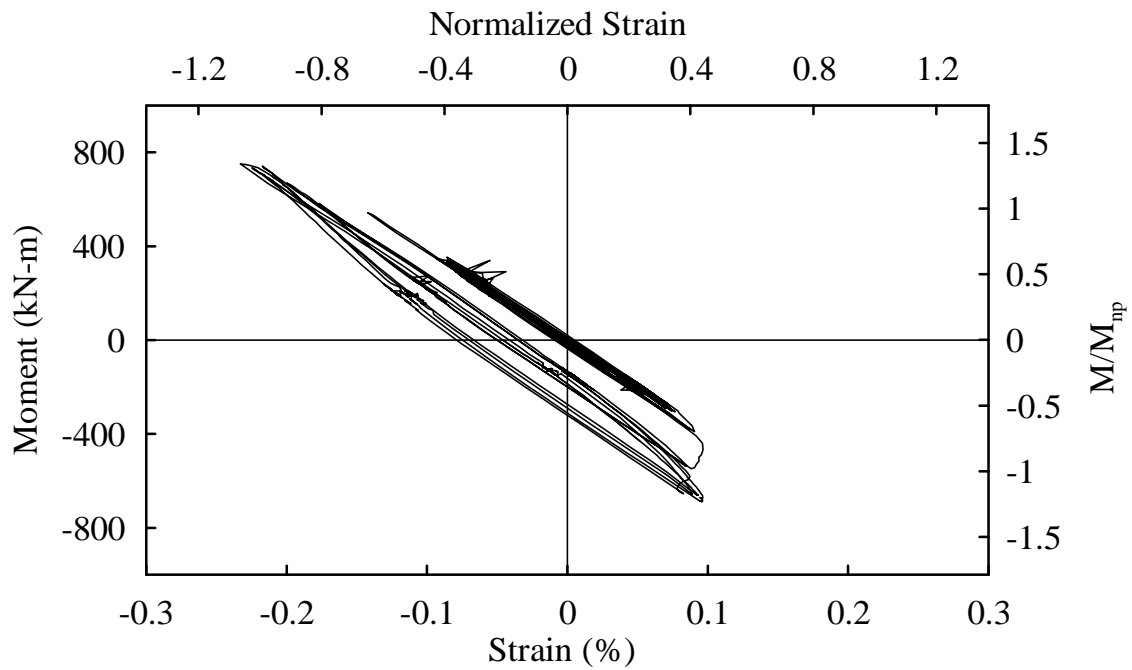


(a) Strain Gauge S10

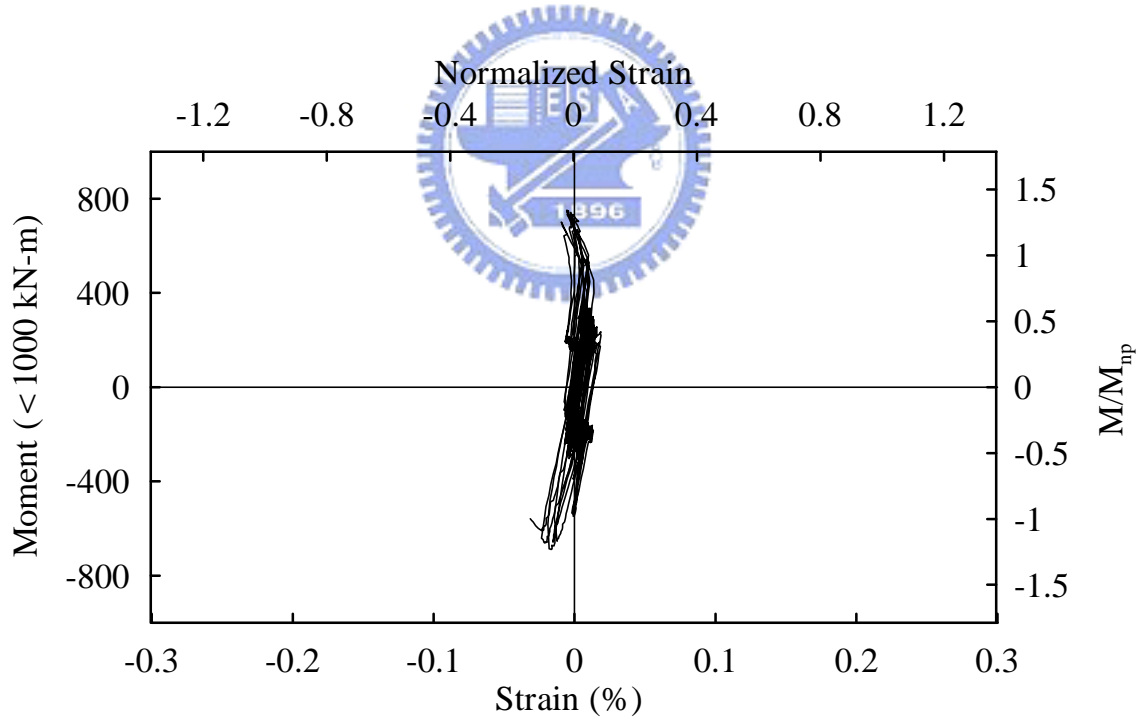


(b) Strain Gauge S28

圖 3.15 試體 1 削切蓋板削切中央應變計與彎矩歷時

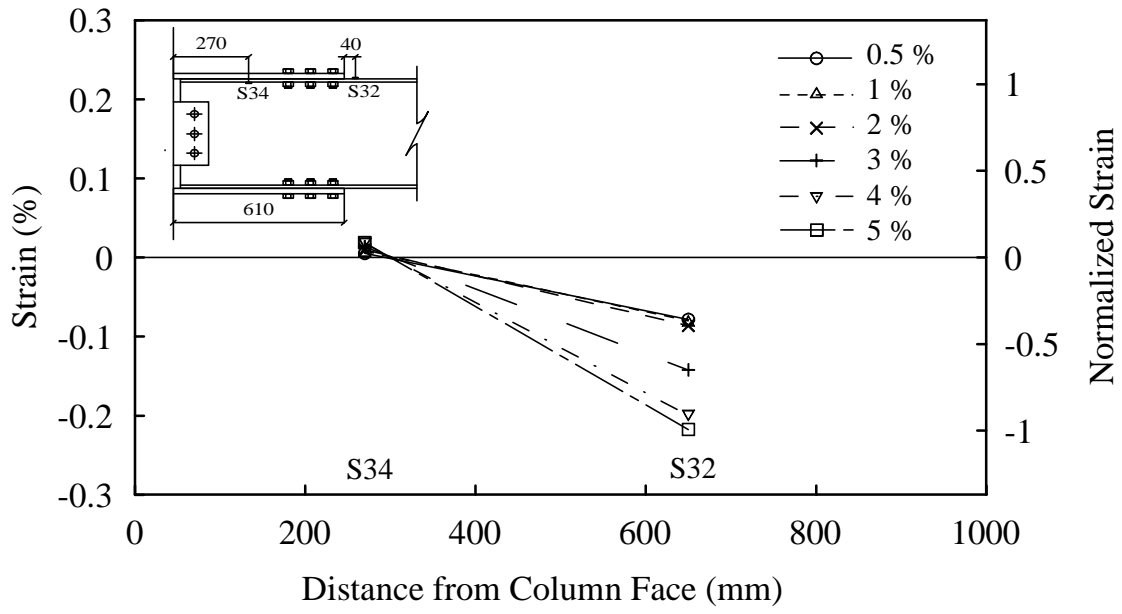


(a) Strain Gauge S32

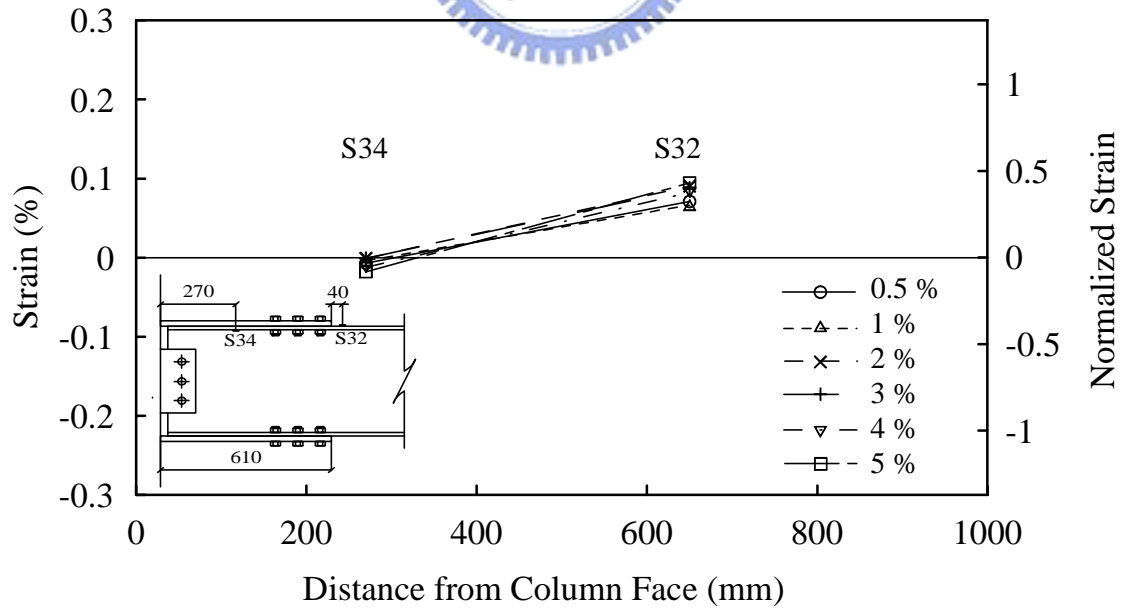


(b) Strain Gauge S34

圖 3.16 試體 1 梁上翼板應變計與彎矩歷時

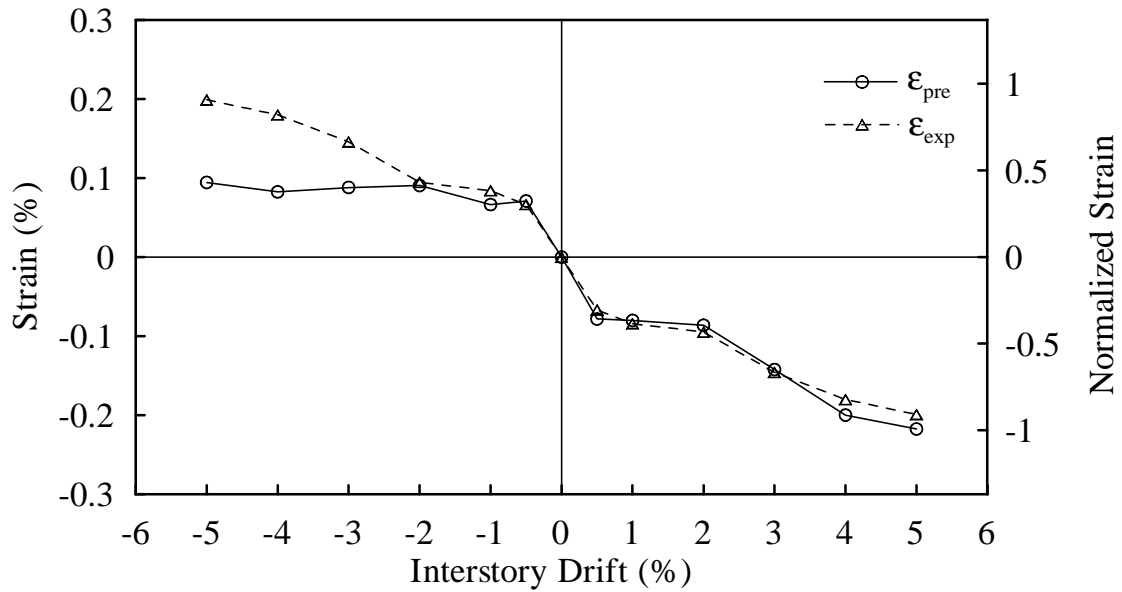


(a) Positive Bending

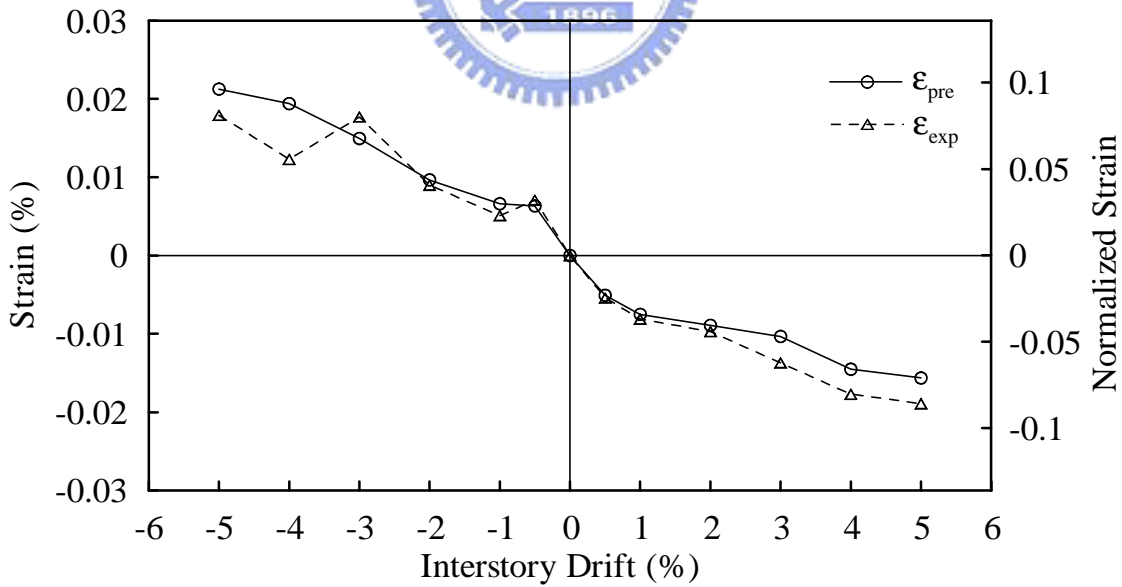


(b) Negative Bending

圖 3.17 試體 1 梁上翼板應變沿梁縱軸方向變化

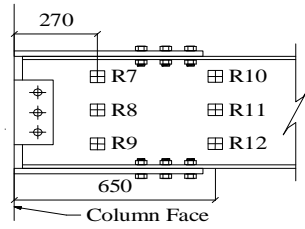


(a) S32

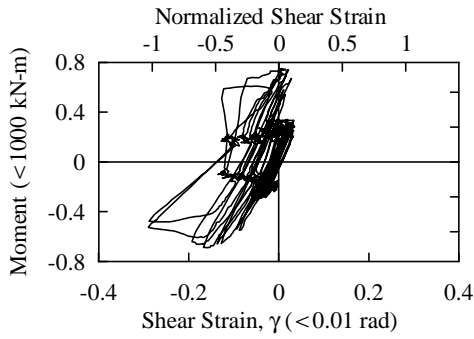


(b) S34

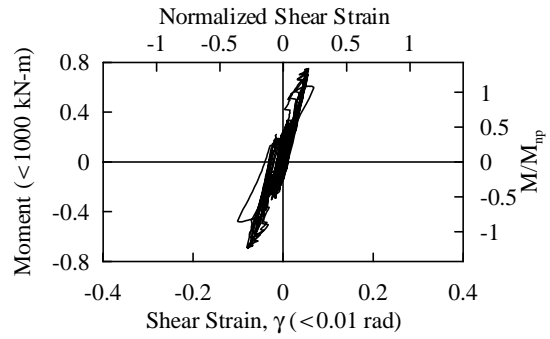
圖 3.18 試體 1 梁翼板應變與估計應變值比較



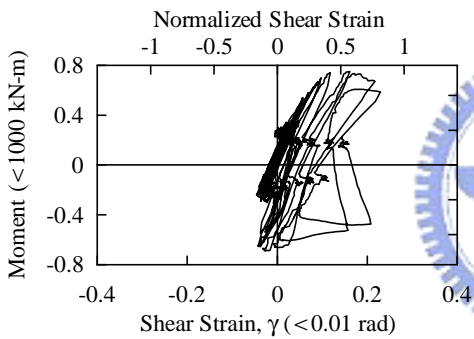
(a) Rosset Location



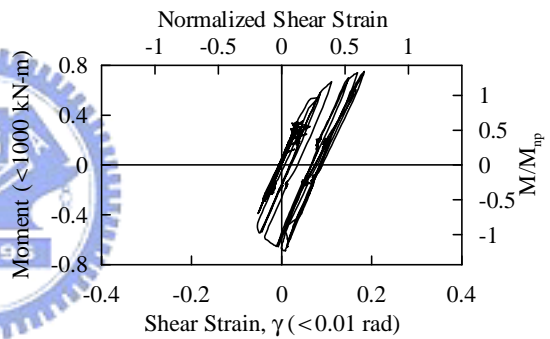
(b) Rosset R7



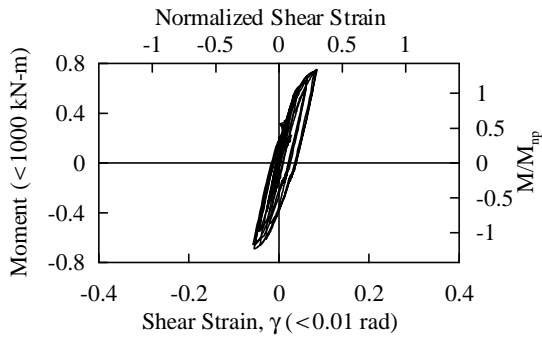
(c) Rosset R8



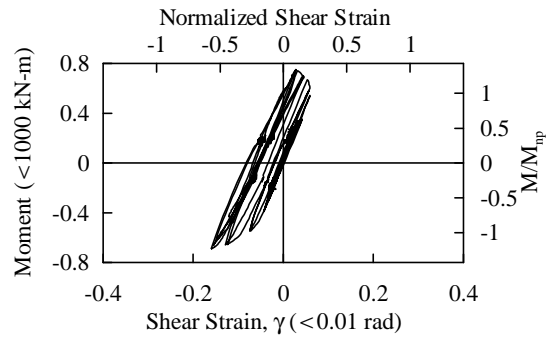
(d) Rosset R9



(e) Rosset R10



(f) Rosset R11



(g) Rosset R12

圖 3.19 試體 1 梁腹板剪應變與柱邊彎矩歷時

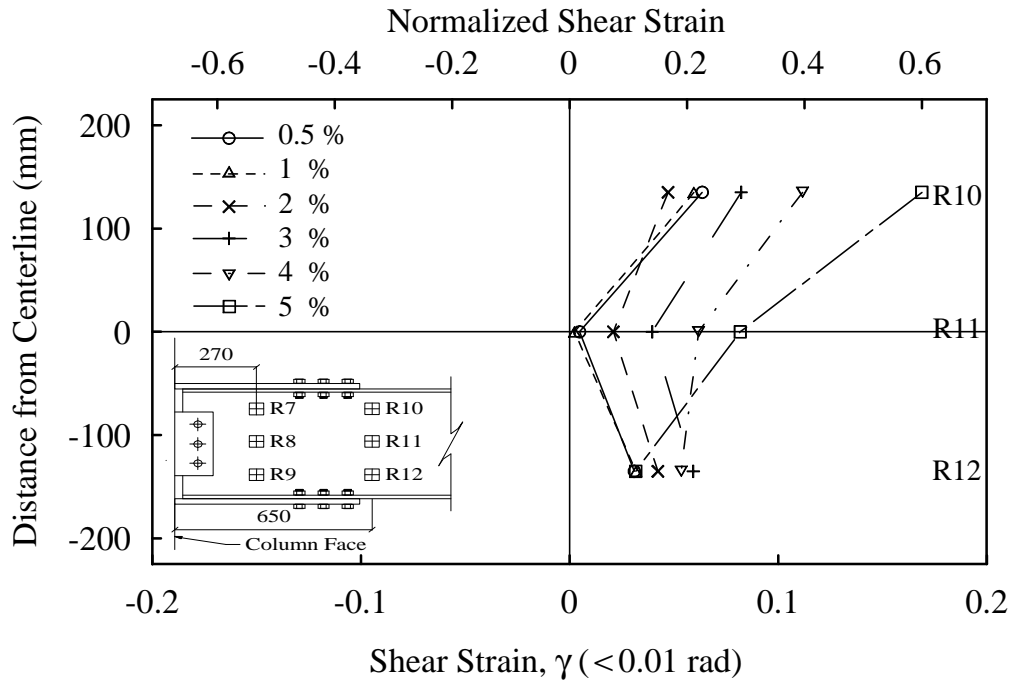


圖 3.20 試體 1 削切蓋板端部梁腹板剪應變沿梁高度變化圖

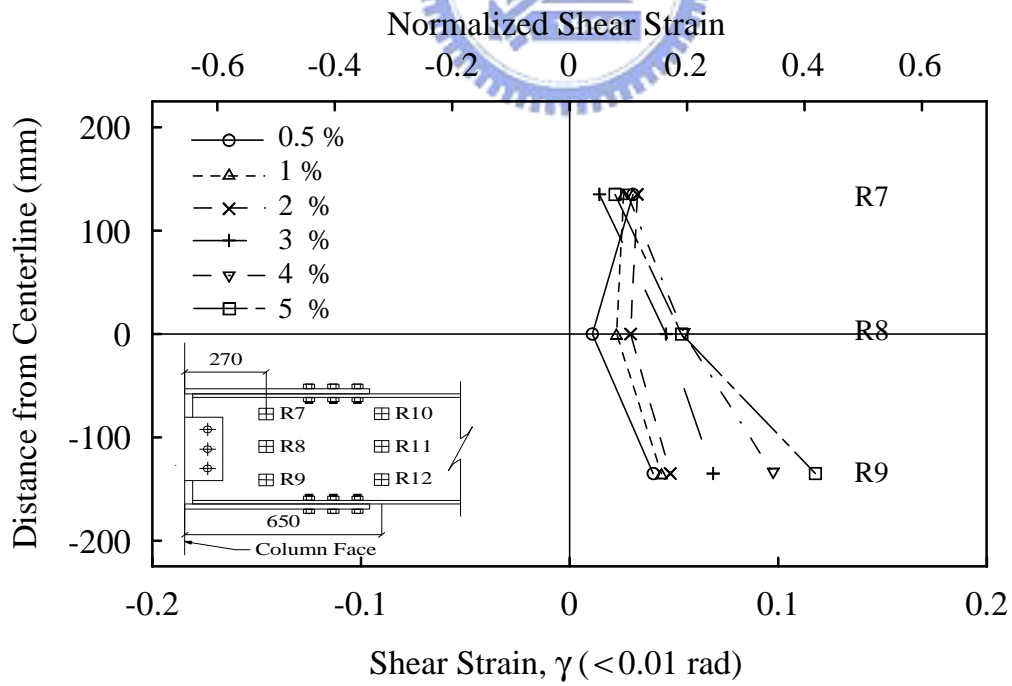


圖 3.21 試體 1 削切蓋板內部梁腹板剪應變沿梁高度變化圖

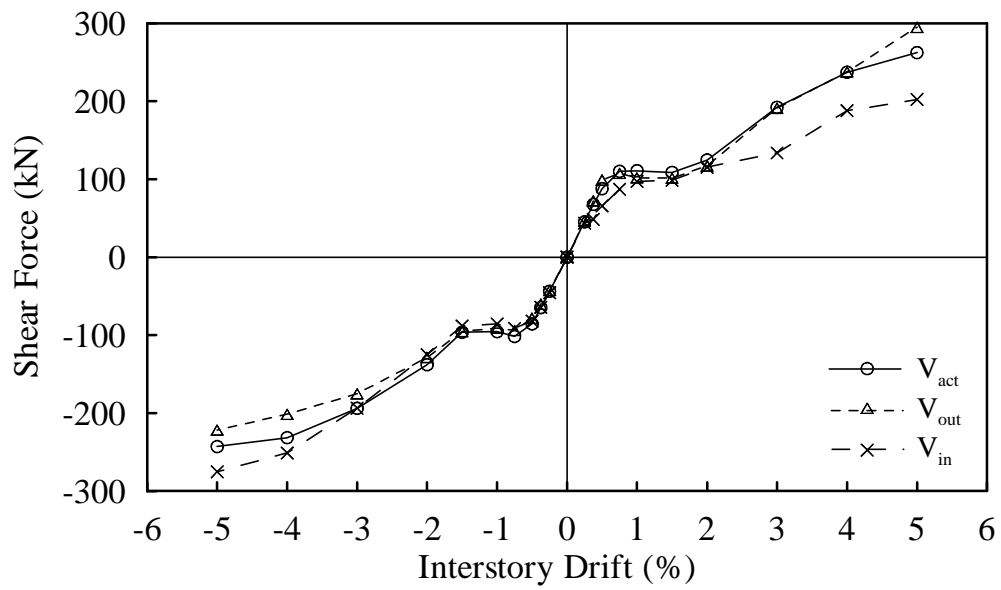


圖 3.22 試體 1 在各位移角下之梁腹板剪力比較



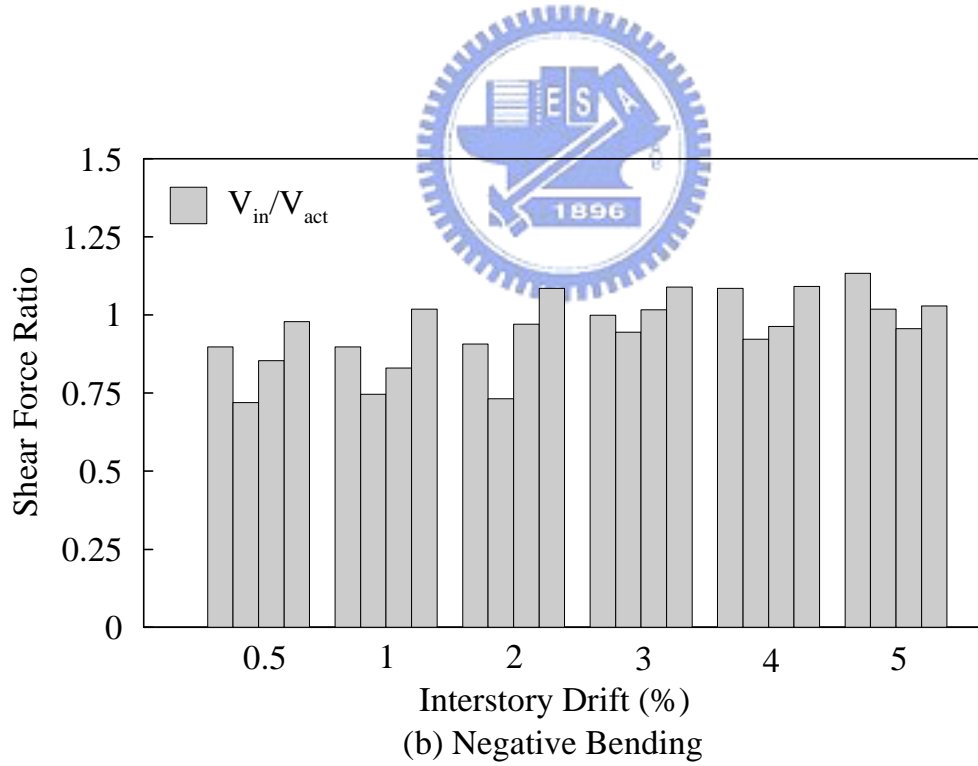
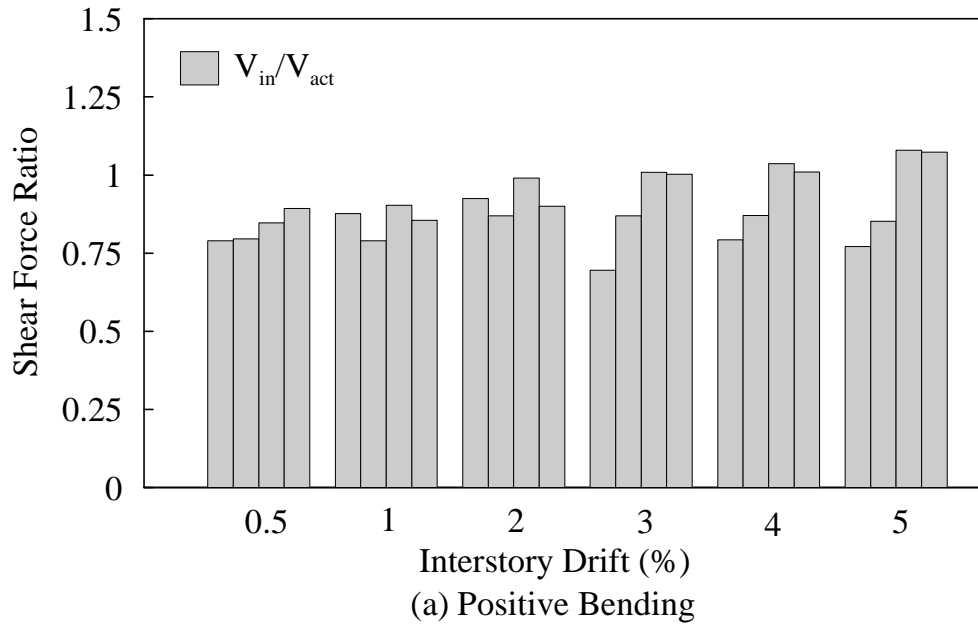
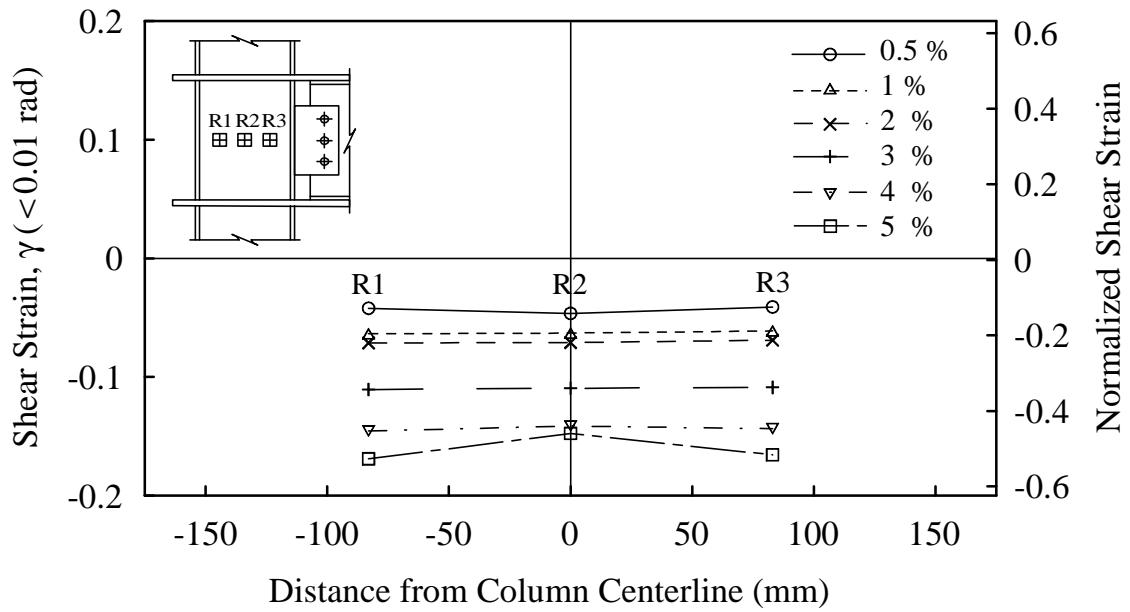
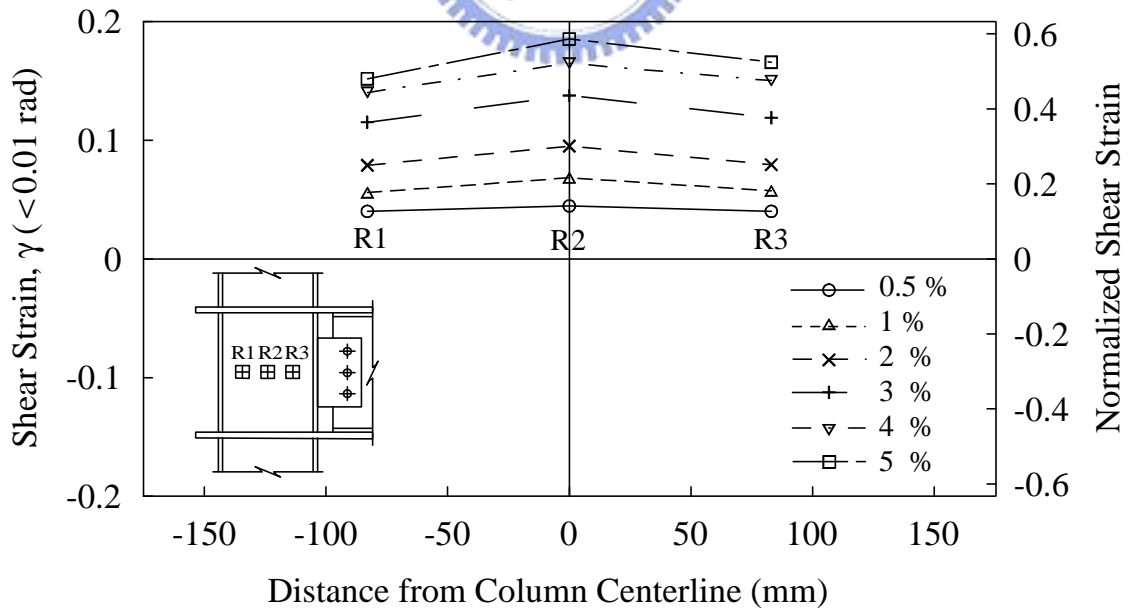


圖 3.23 各組試體梁腹板各剪力值比例



(a) Positive Bending



(b) Negative Bending

圖 3.24 試體 1 梁柱交會區剪應變沿柱寬度方向變化

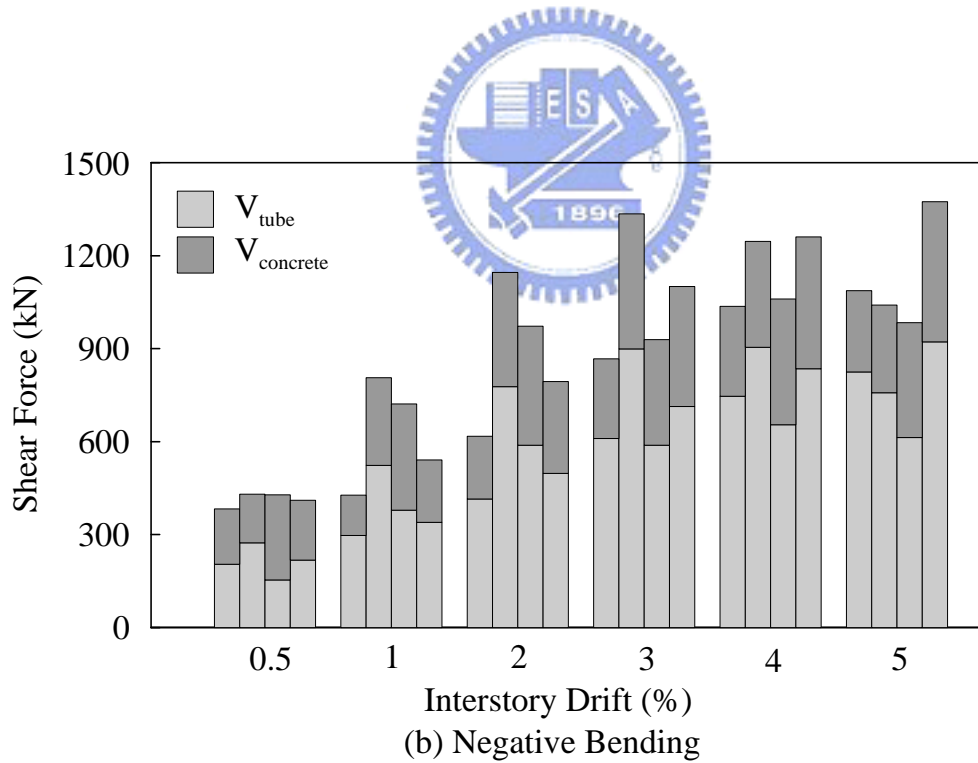
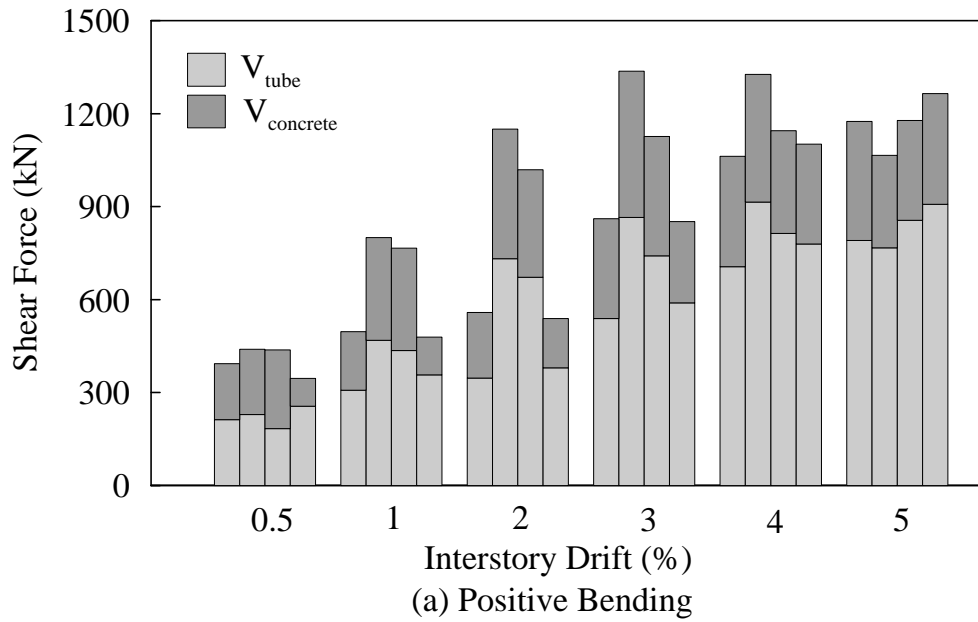


圖 3.25 各組試體梁柱交會區鋼管與混凝土之剪力分佈

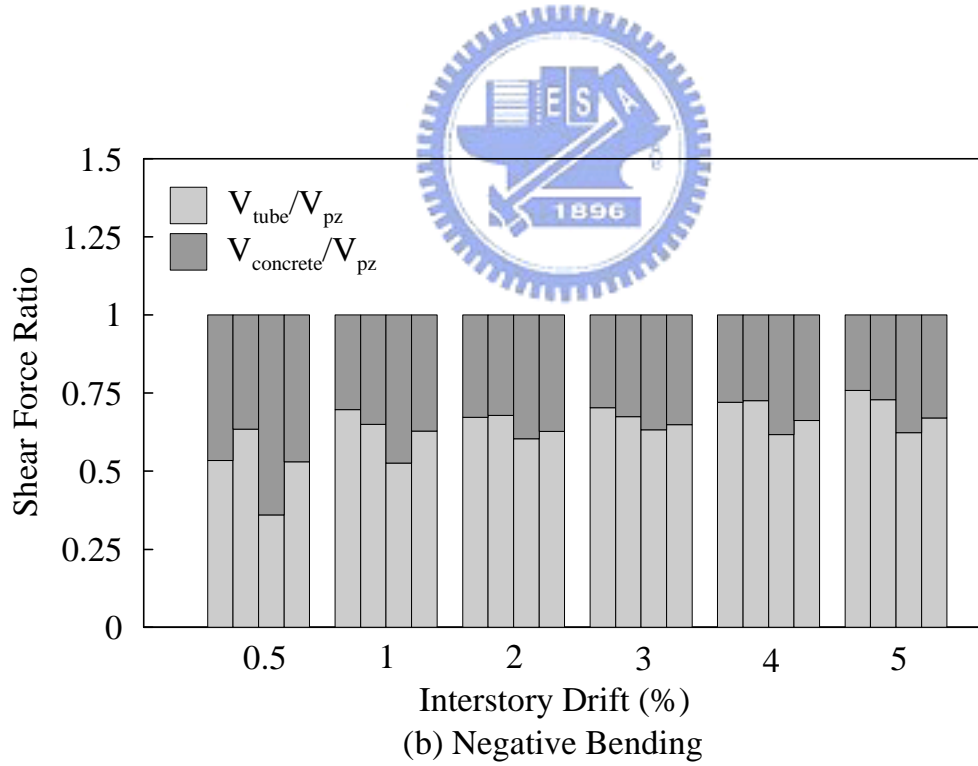
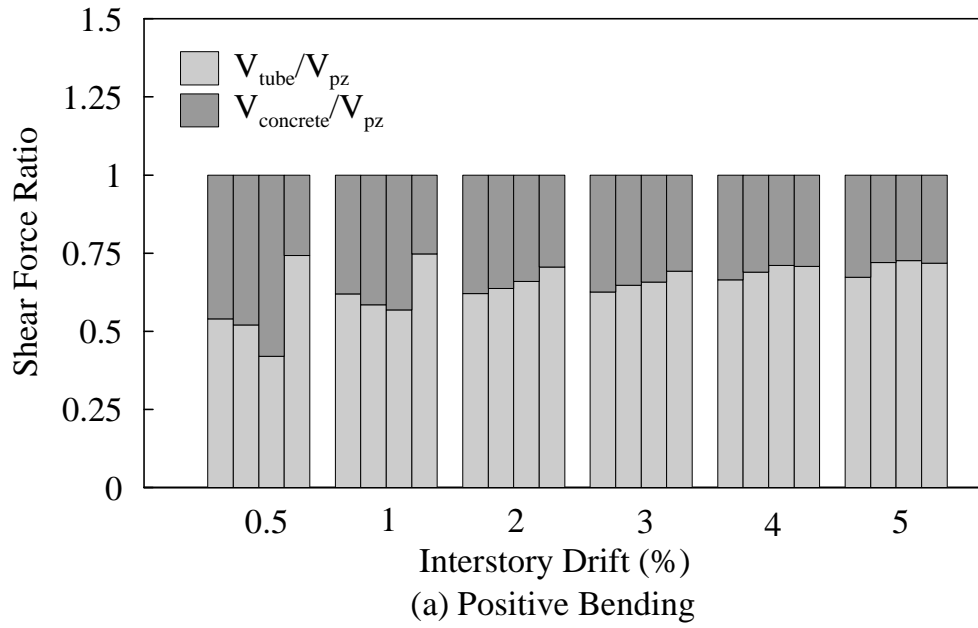


圖 3.26 各組試體梁柱交會區鋼管與混凝土之剪力分佈比例

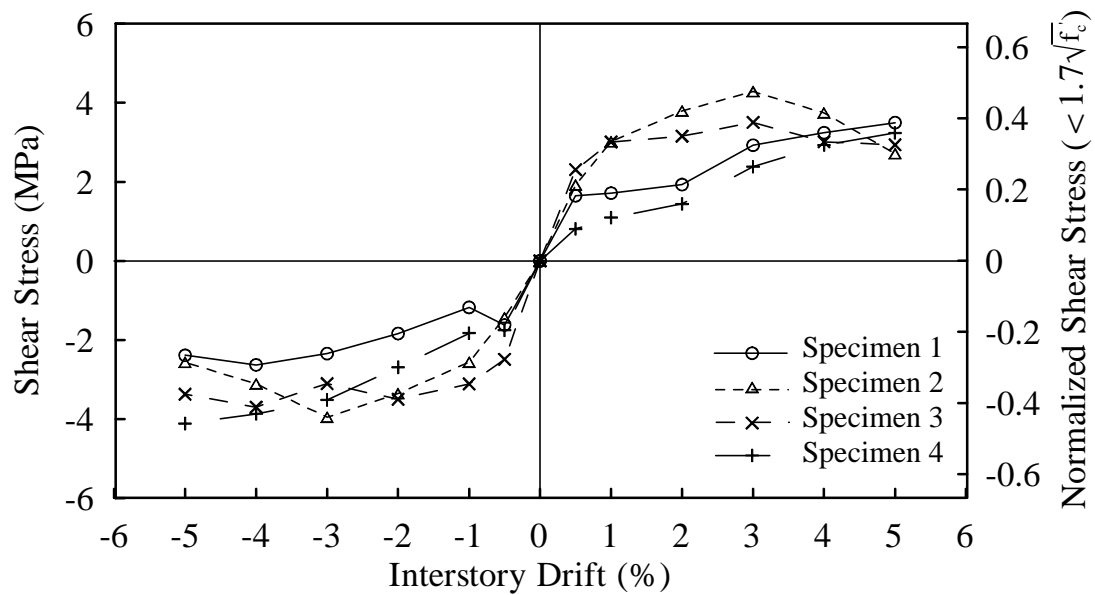


圖 3.27 各組試體梁柱交會區混凝土剪應力在各側位移角之變化情形

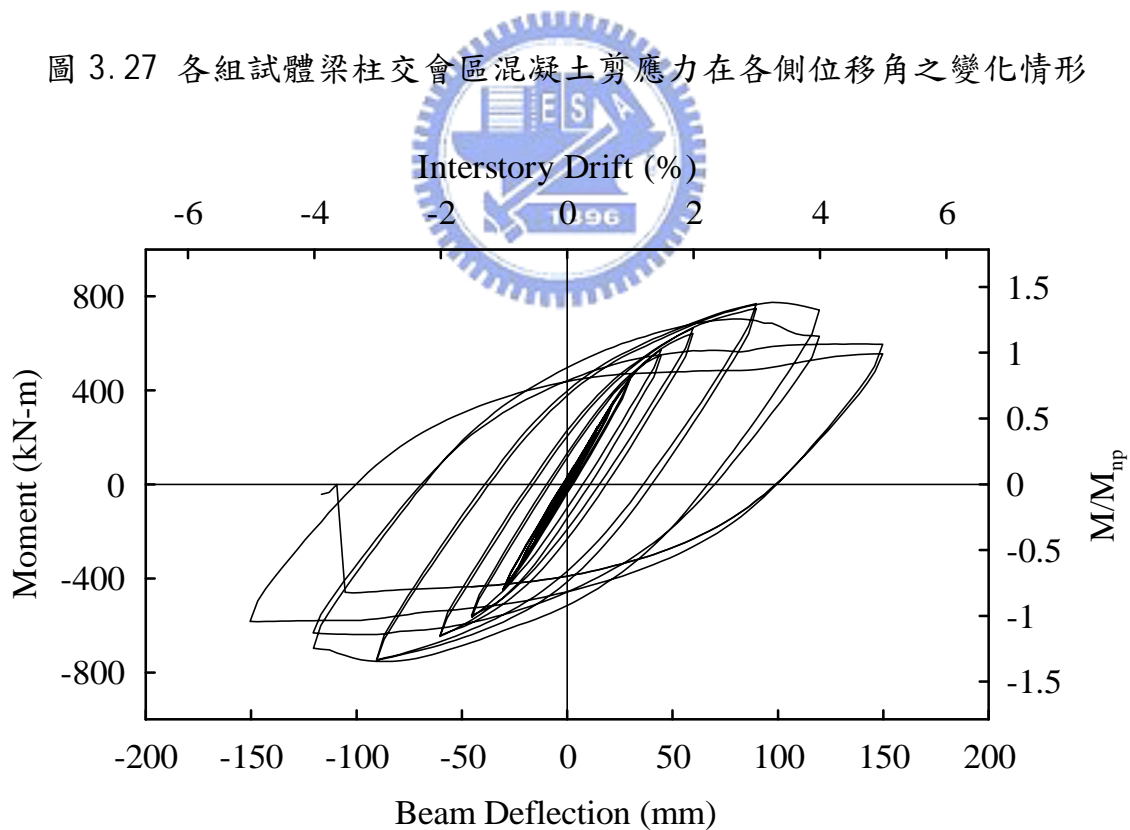


圖 3.28 試體 2 彎矩與梁端位移關係圖

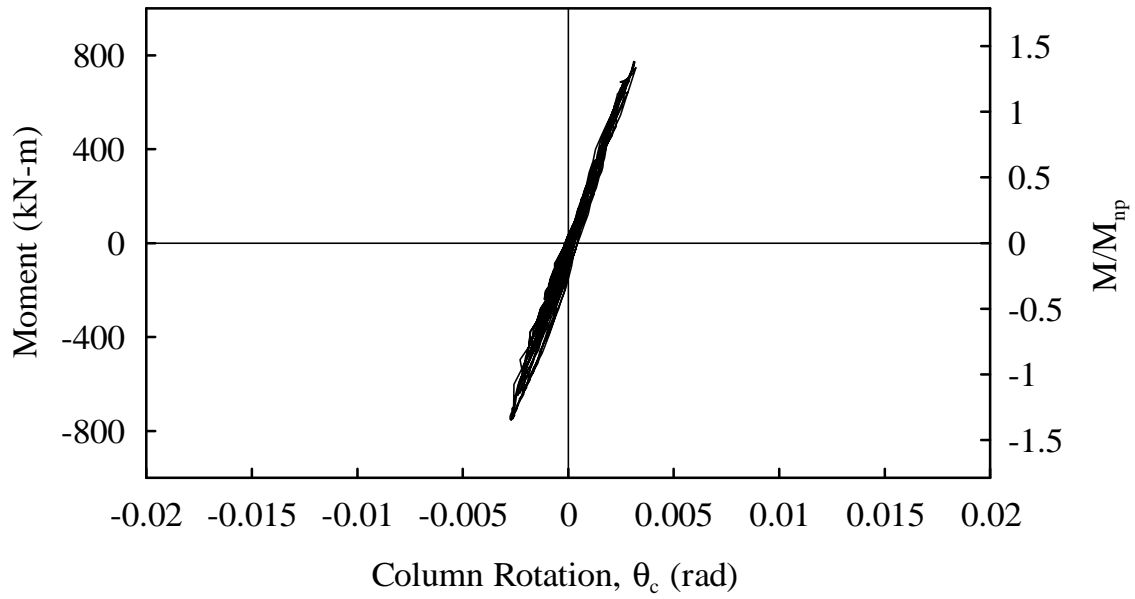


圖 3.29 試體 2 柱轉角與彎矩關係圖

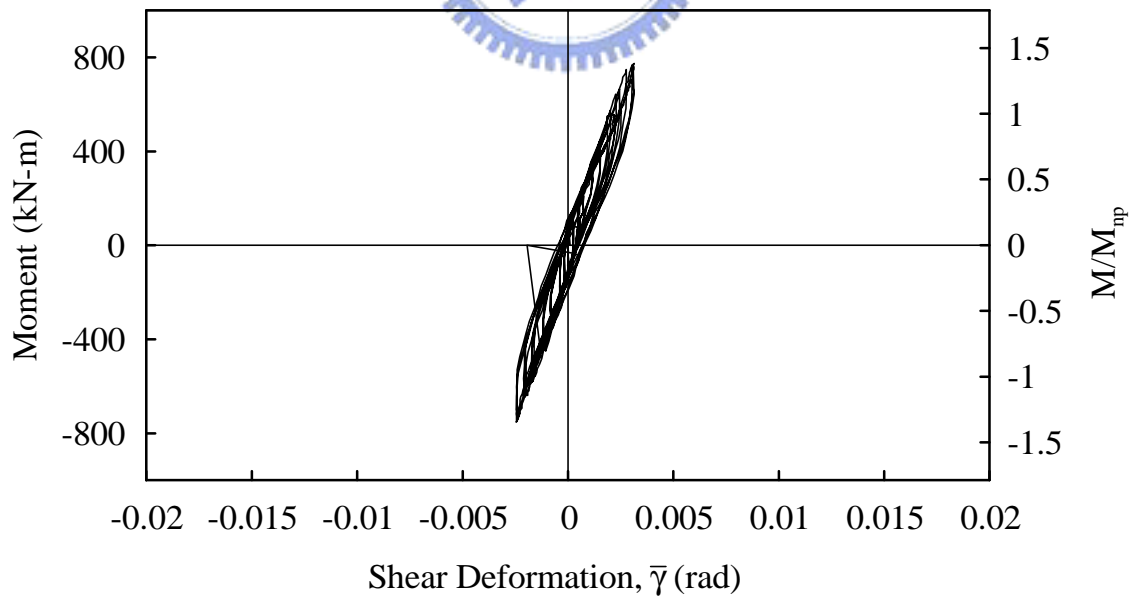


圖 3.30 試體 2 梁柱交會區之剪力變形與彎矩關係圖

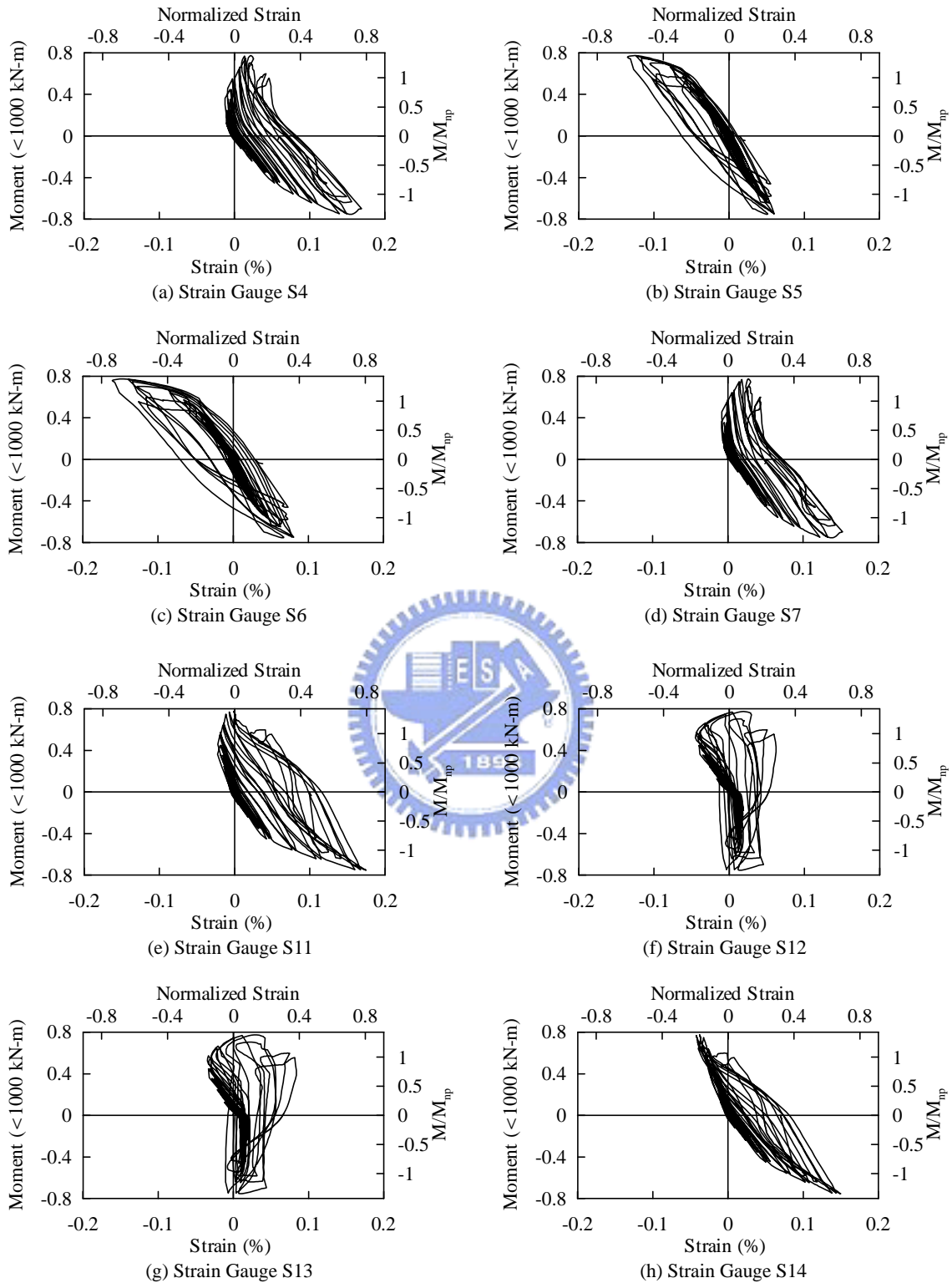


圖 3.31 試體 2 上側削切蓋板應變計與柱邊彎矩關係圖

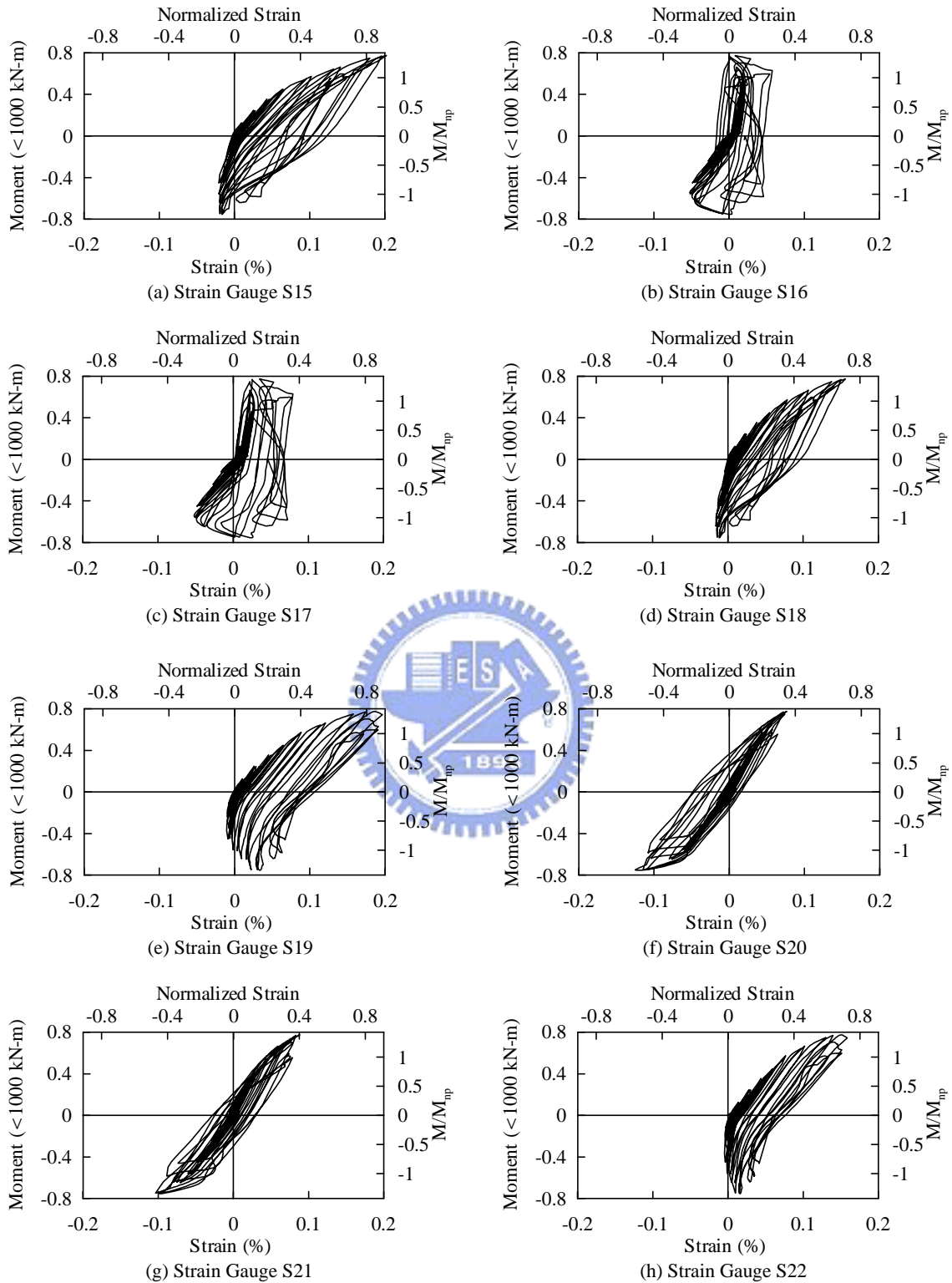


圖 3.32 試體 2 下側削切蓋板應變計與柱邊彎矩關係圖

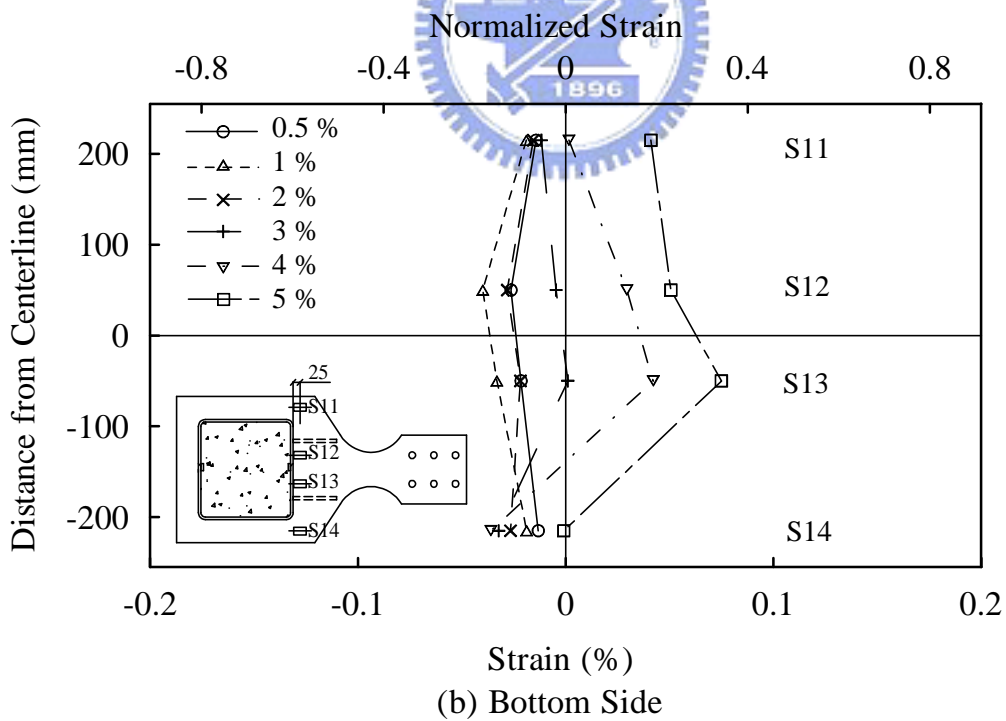
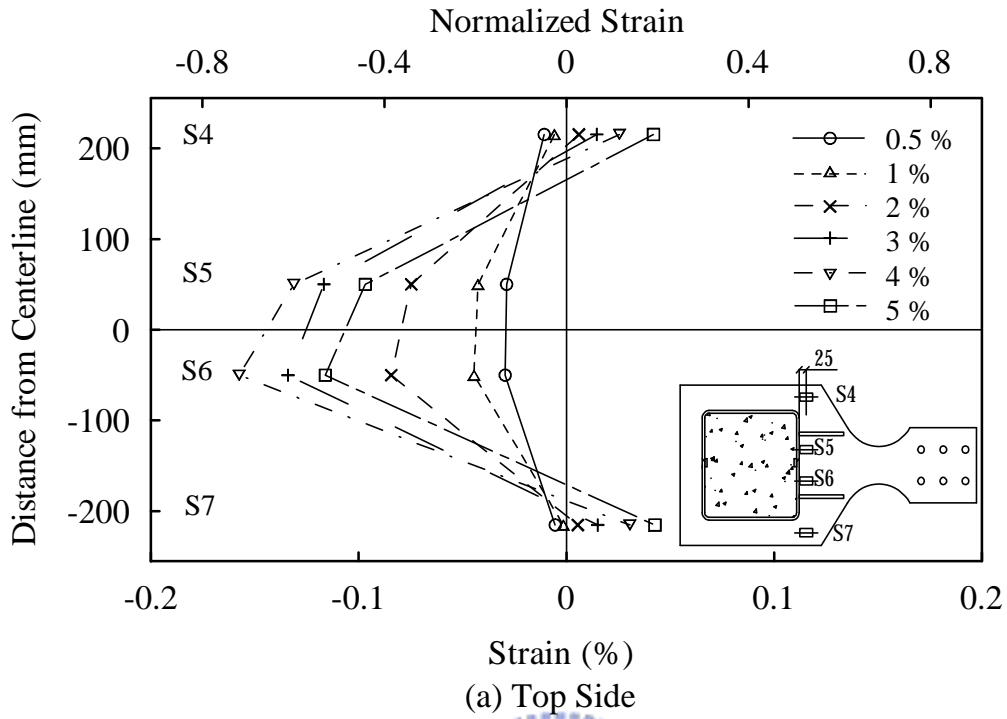


圖 3.33 試體 2 上側削切盖板應變隨寬度方向變化圖 (正方向施載)

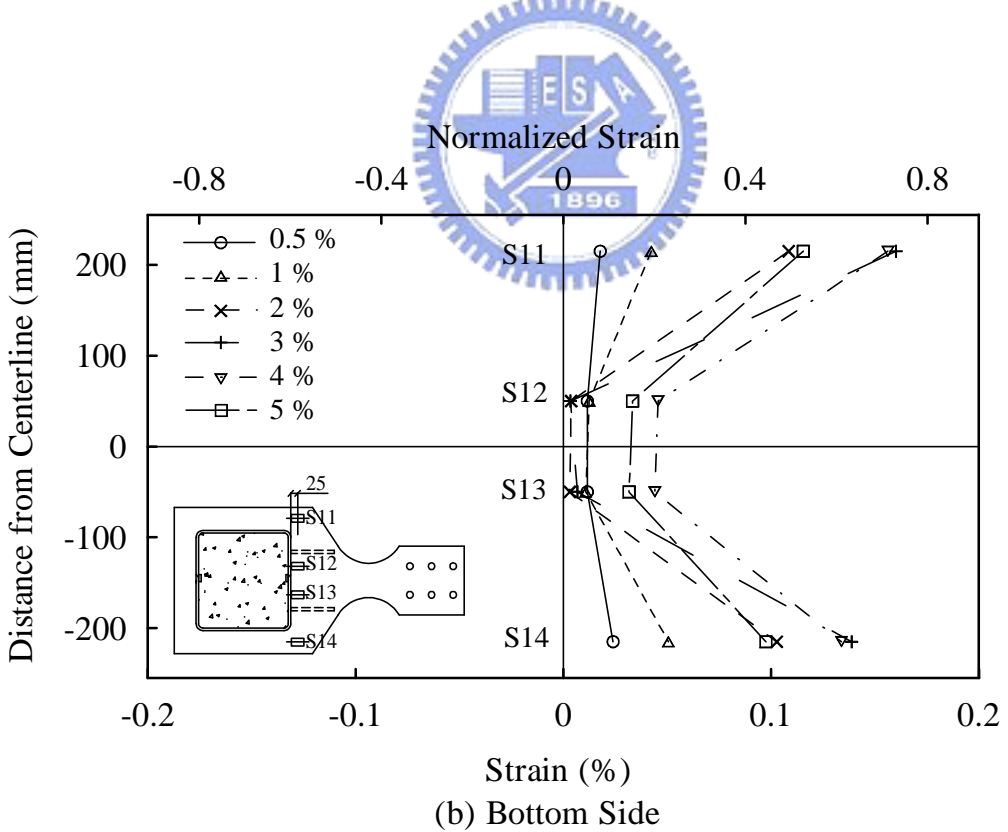
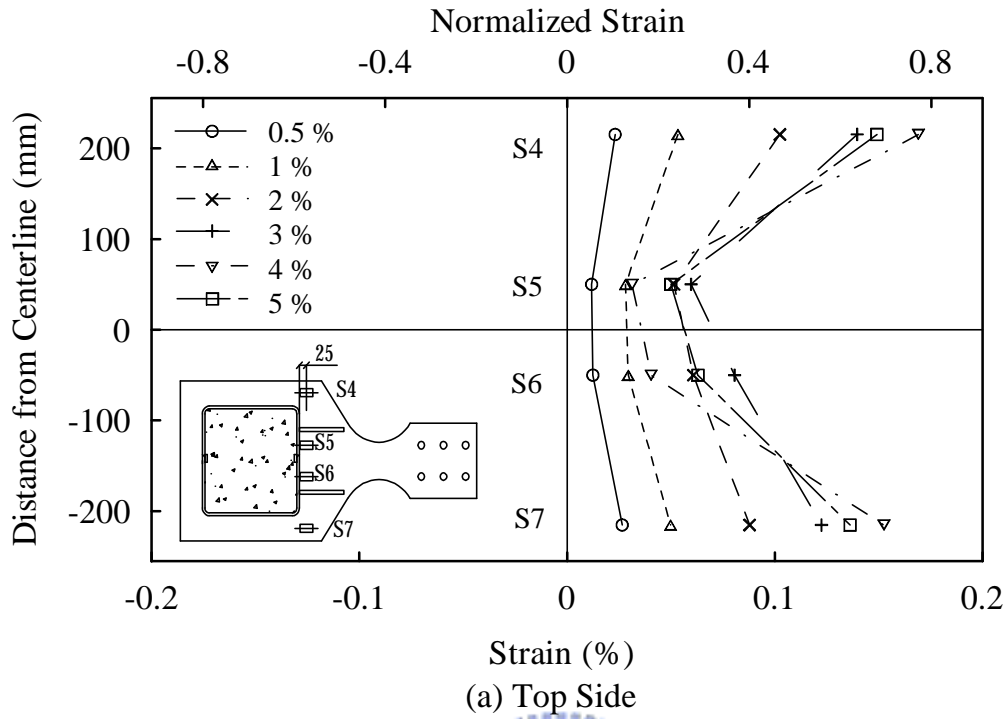


圖 3.34 試體 2 上側削切蓋板應變隨寬度方向變化圖 (負方向施載)

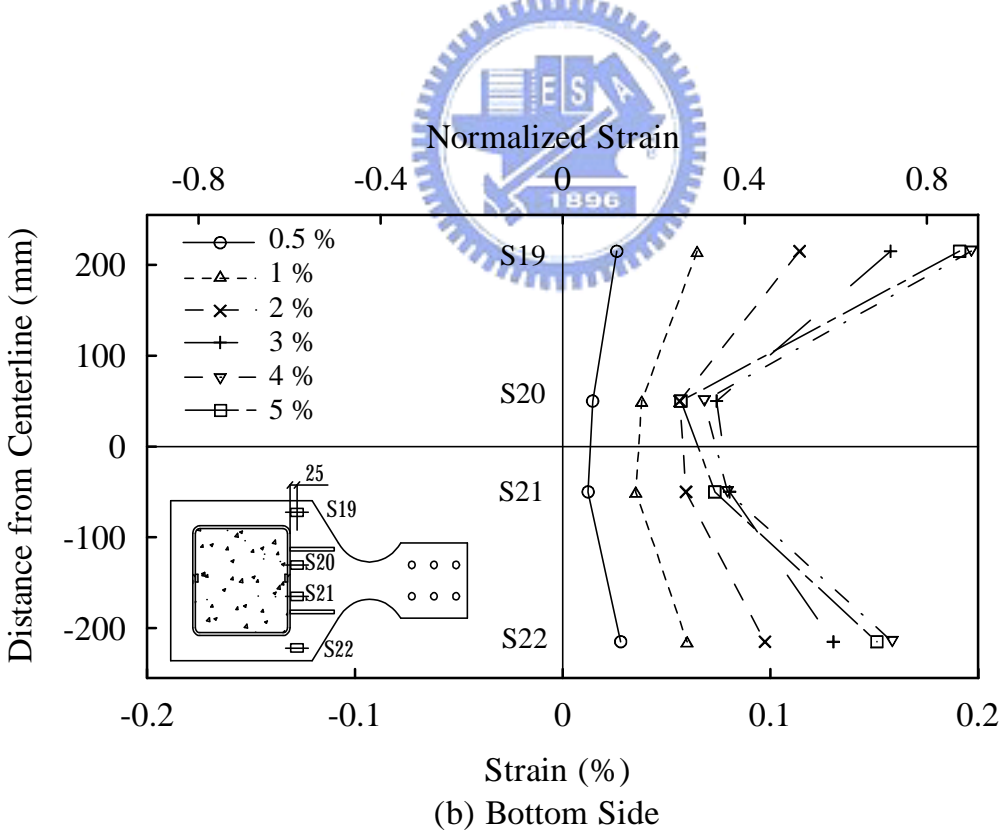
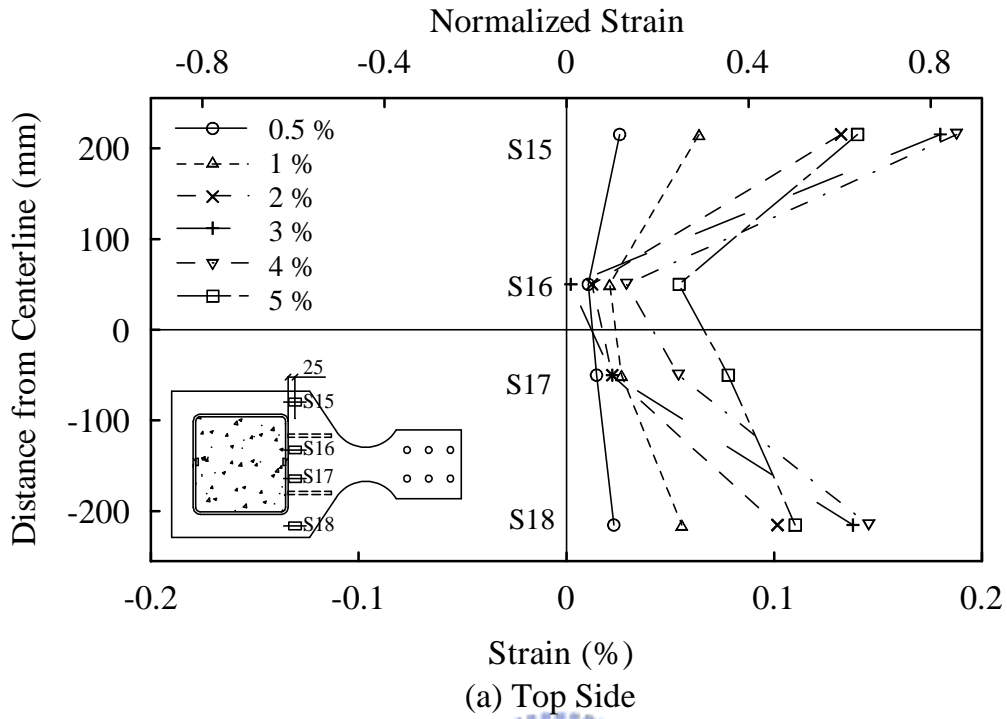


圖 3.35 試體 2 下側削切盖板應變隨寬度方向變化圖 (正方向施載)

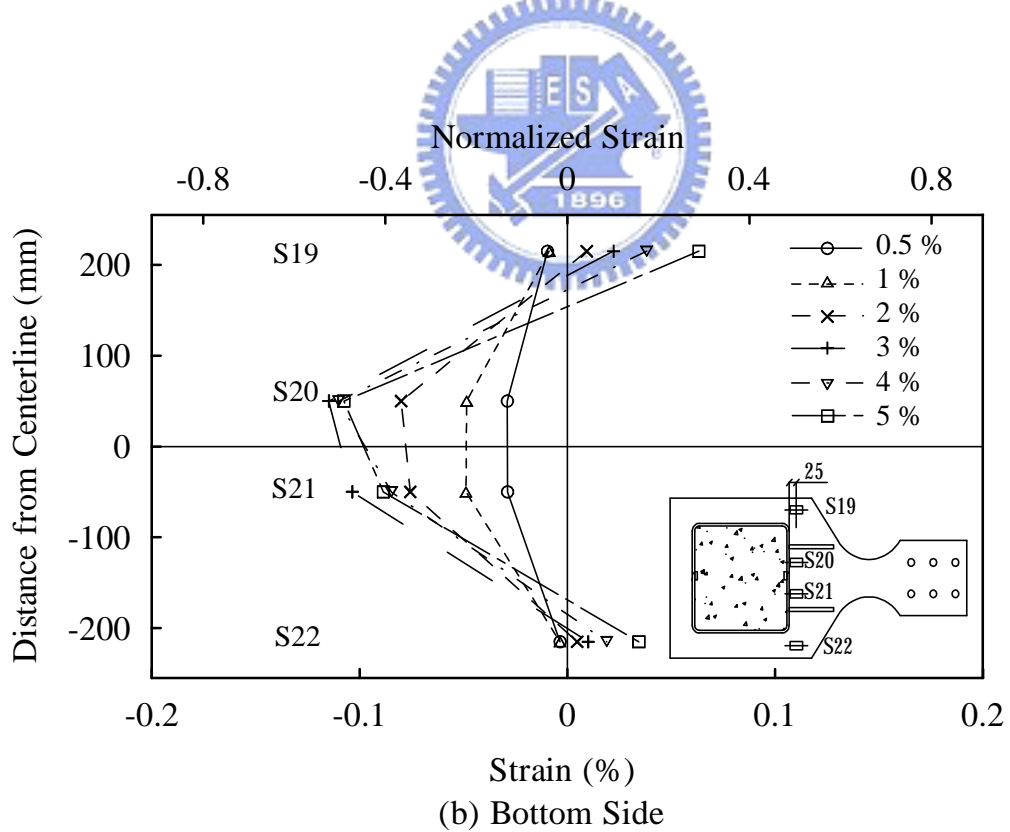
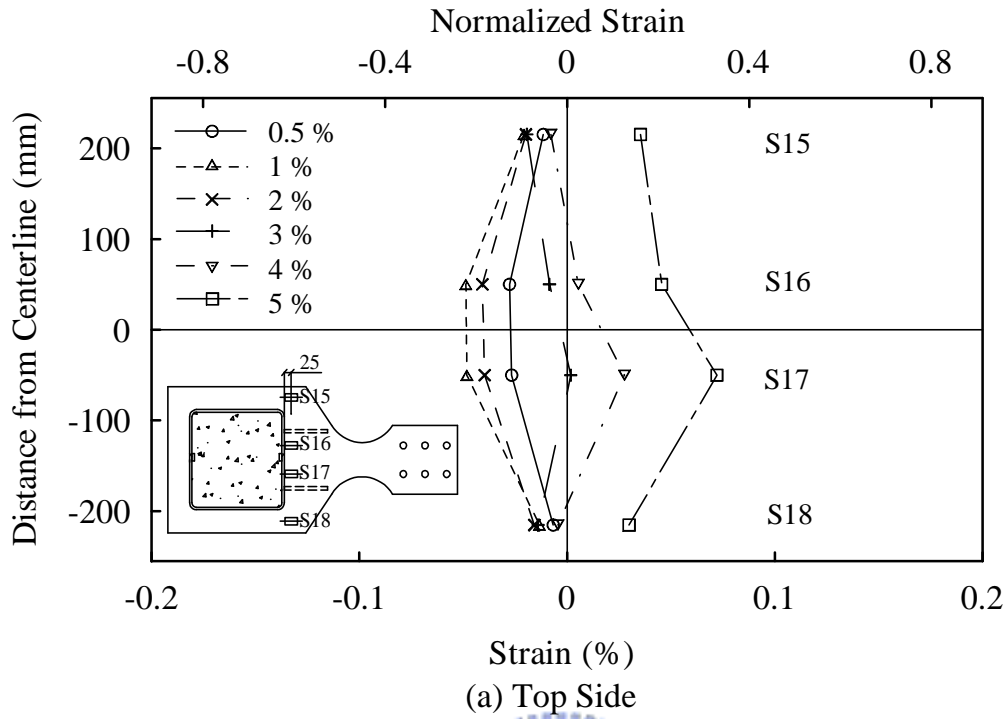
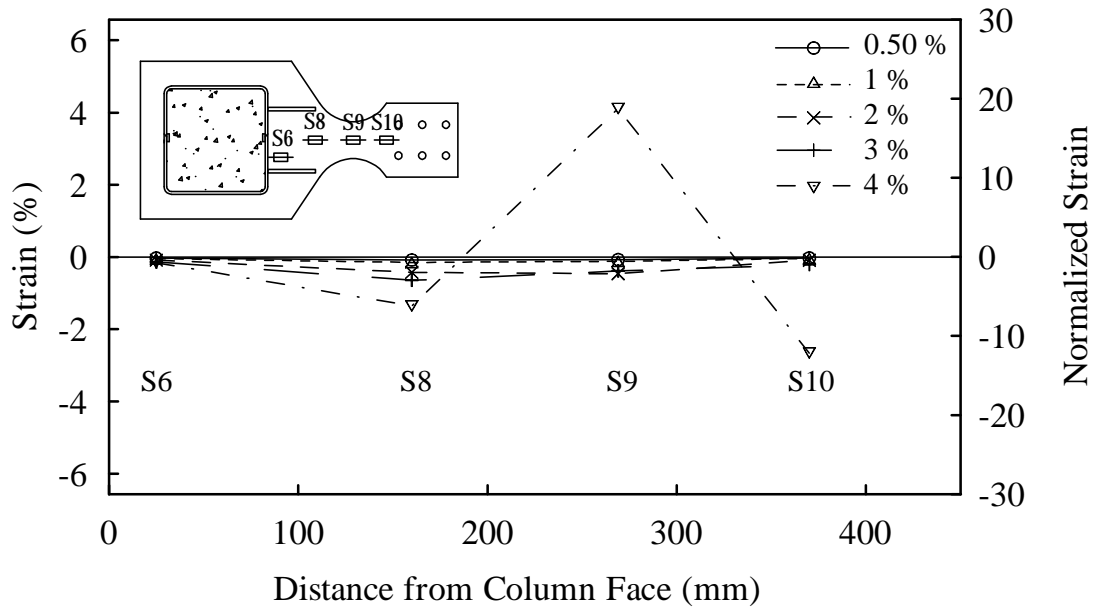
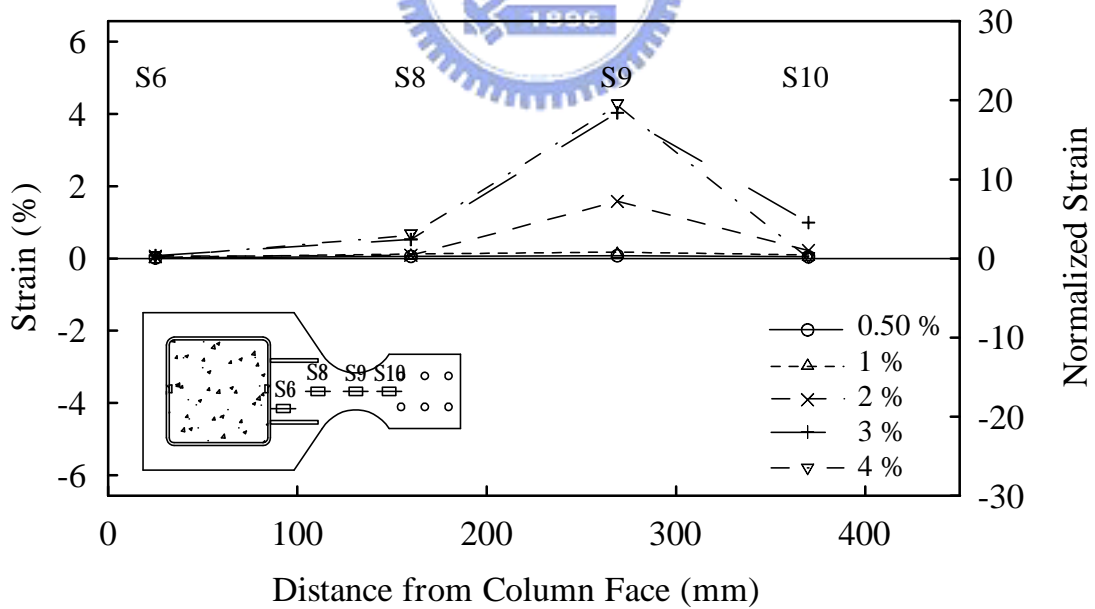


圖 3.36 試體 2 下側削切蓋板應變隨寬度方向變化圖 (負方向施載)



(a) Positive Bending



(b) Negative Bending

圖 3.37 試體 2 上側削切蓋板應變沿板縱向變化圖

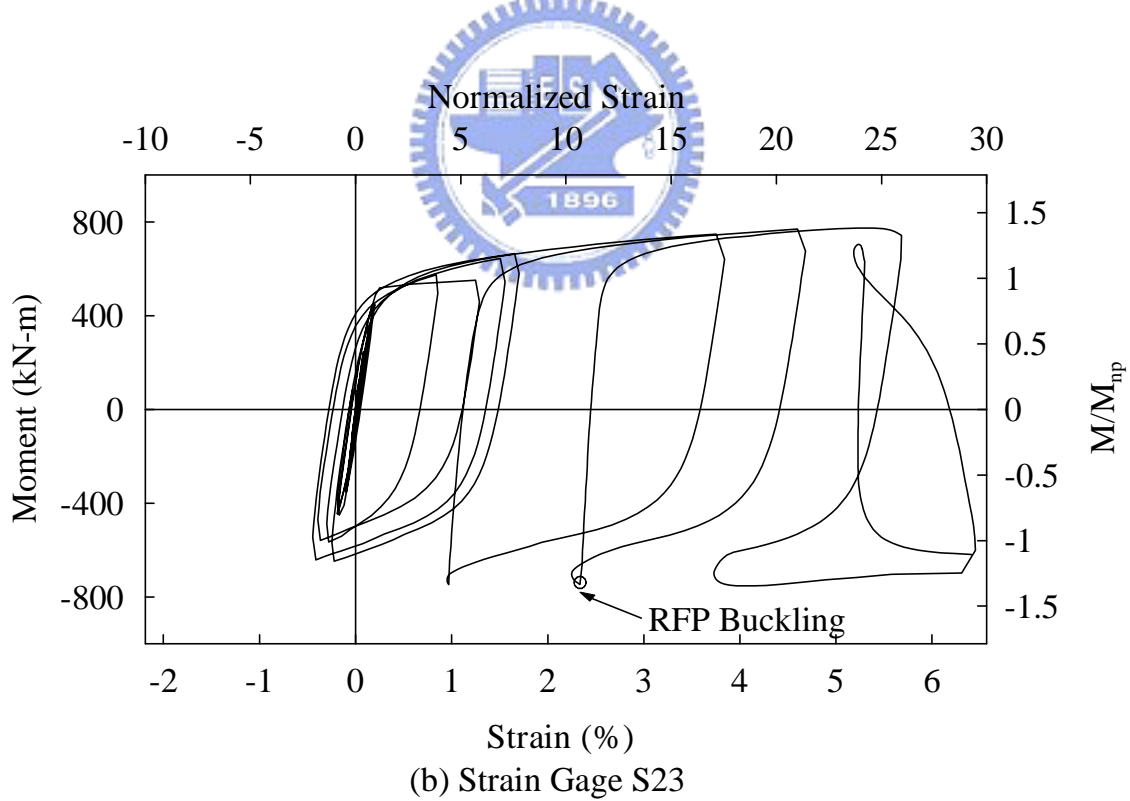
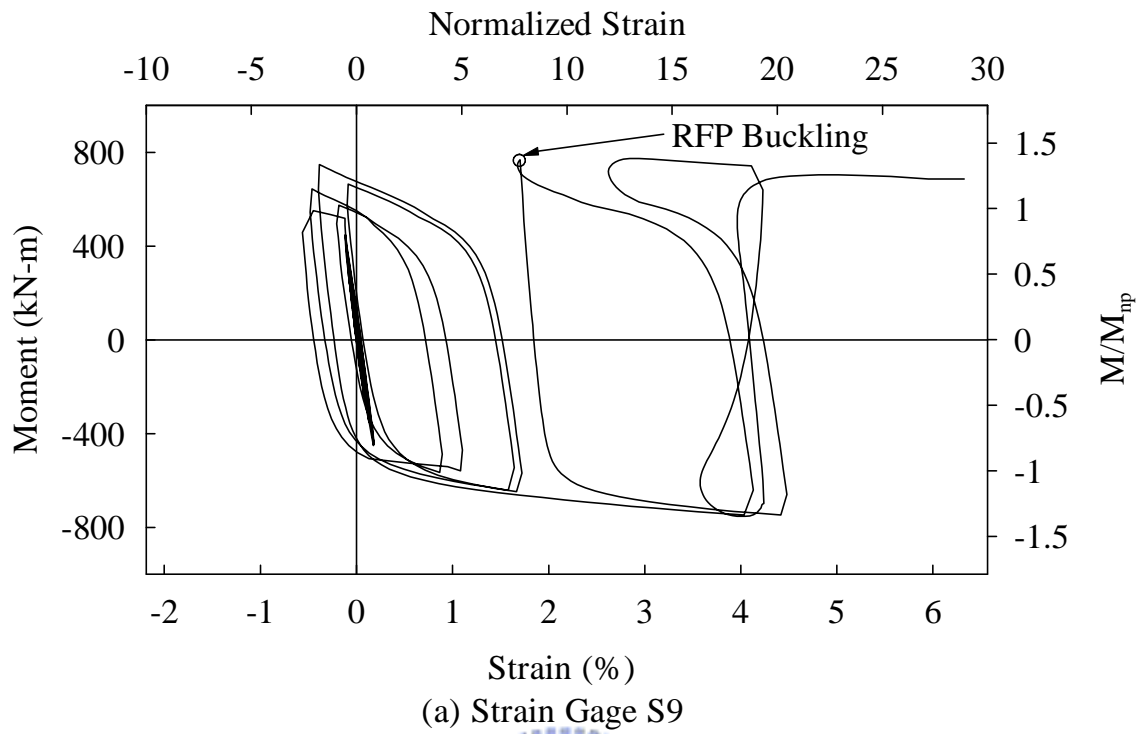
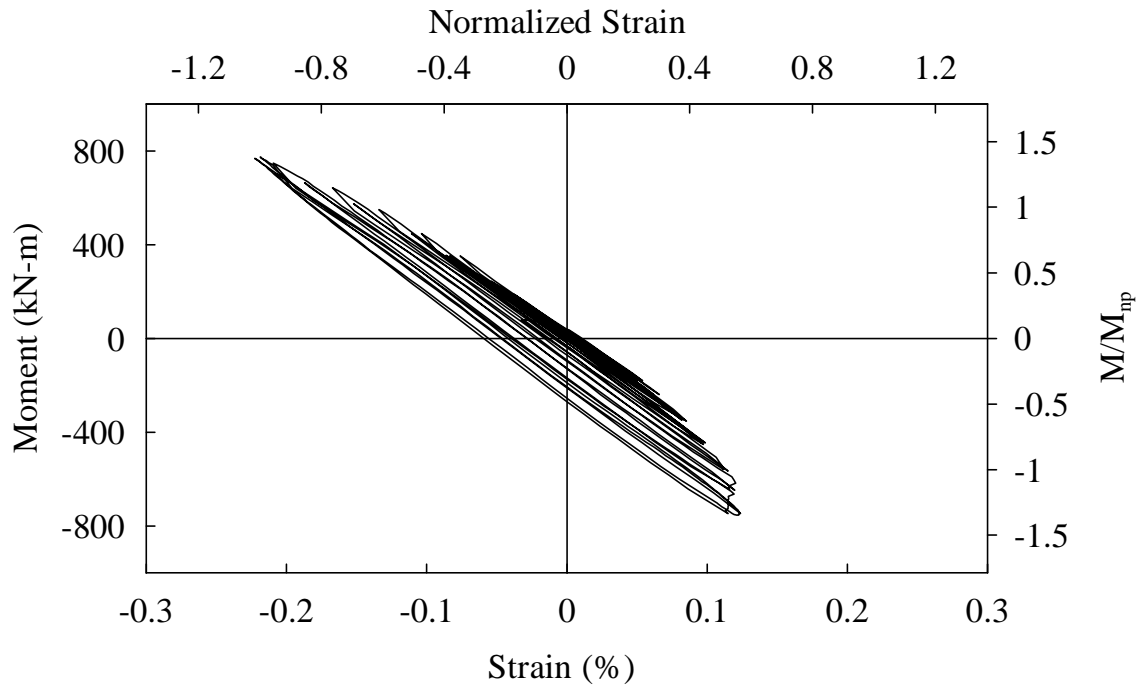
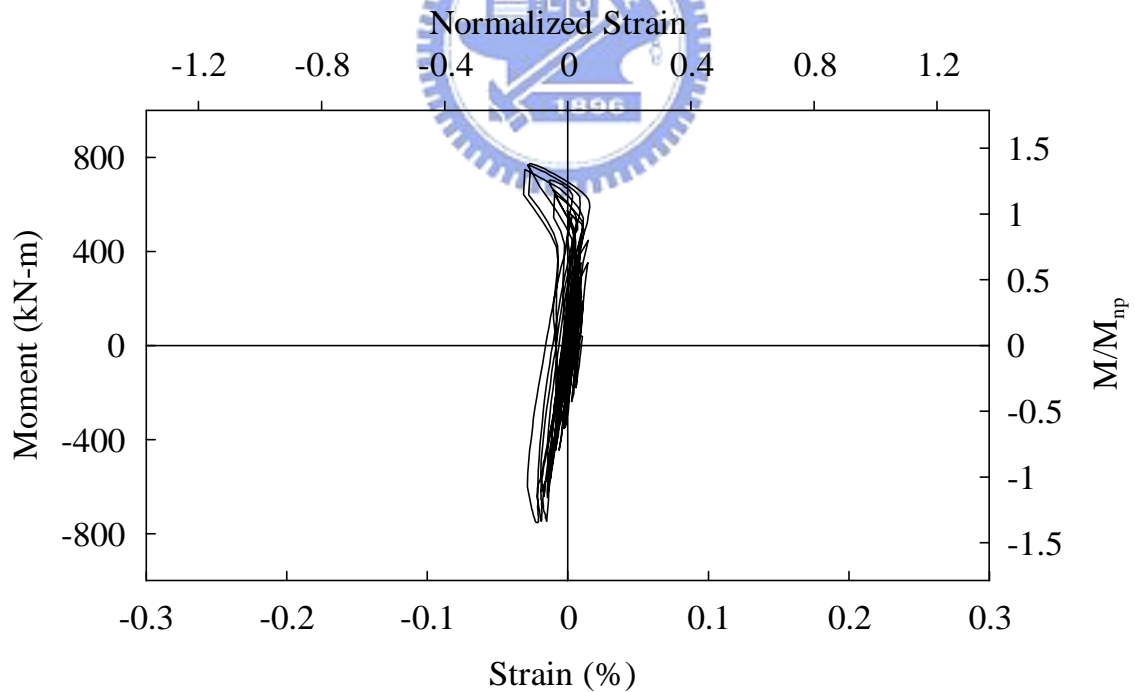


圖 3.38 試體 2 削切蓋板中央削切處應變計與彎矩歷時

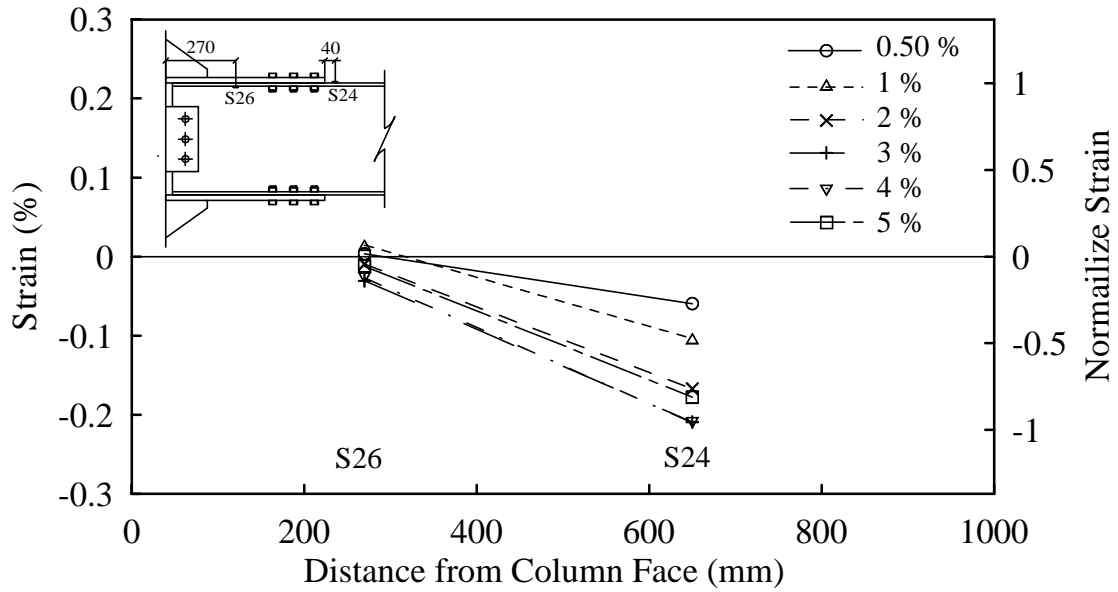


(a) Strain Gage S24

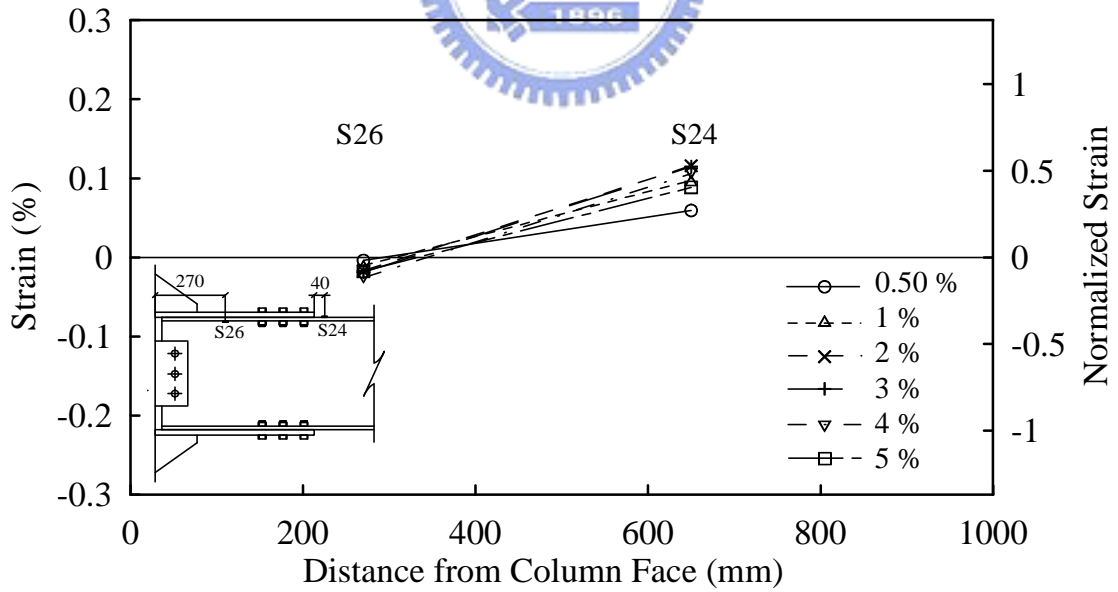


(b) Strain Gage S26

圖 3.39 試體 2 梁上翼板應變計與彎矩歷時

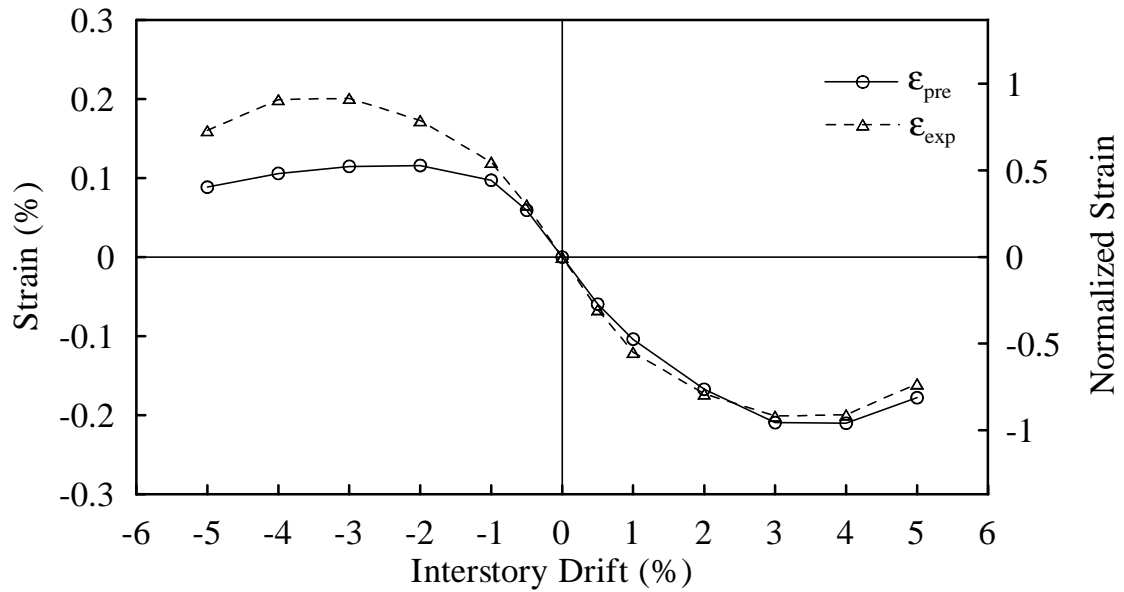


(a) Positive Bending

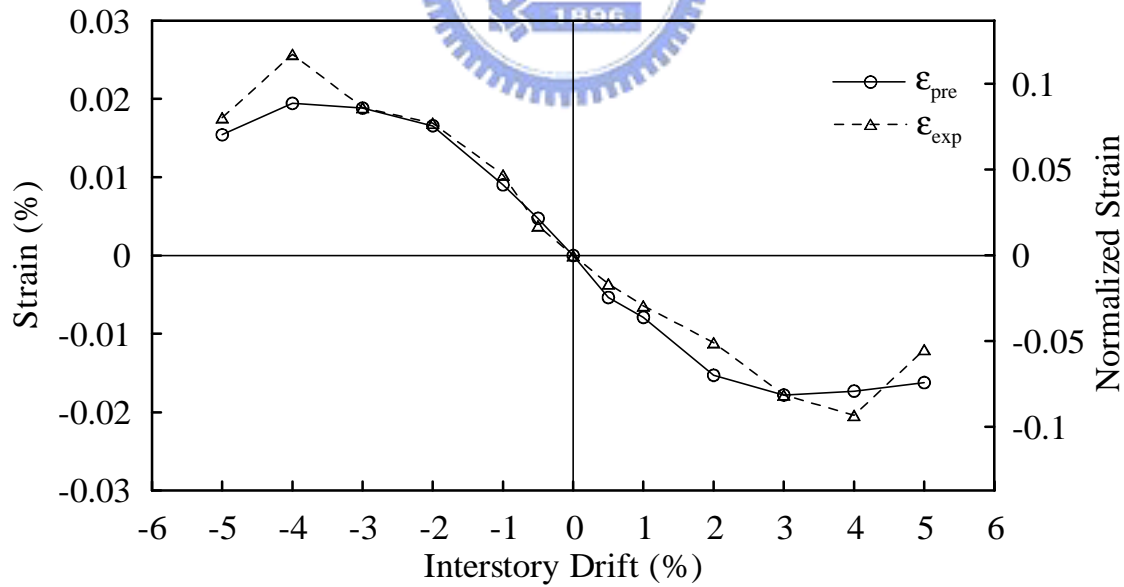


(b) Negative Bending

圖 3.40 試體 2 梁上翼板應變沿梁縱軸方向變化



(a) S24



(b) S26

圖 3.41 試體 2 梁翼板應變與估計應變值比較

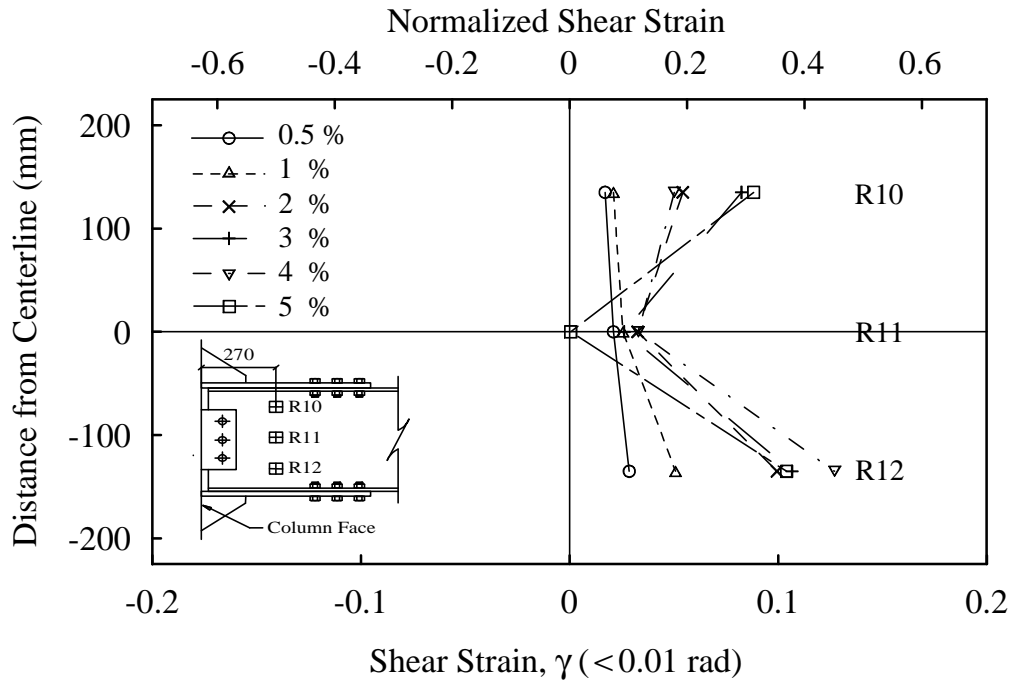


圖 3.42 試體 2 削切蓋板內部梁腹板剪應變沿梁高度變化圖

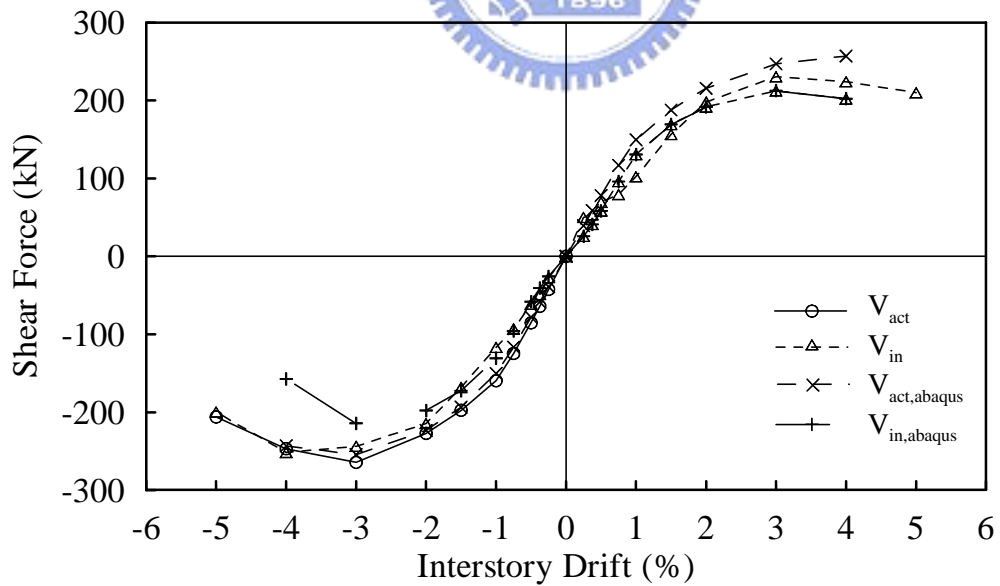


圖 3.43 試體 2 在各位移角下之梁腹板剪力比較

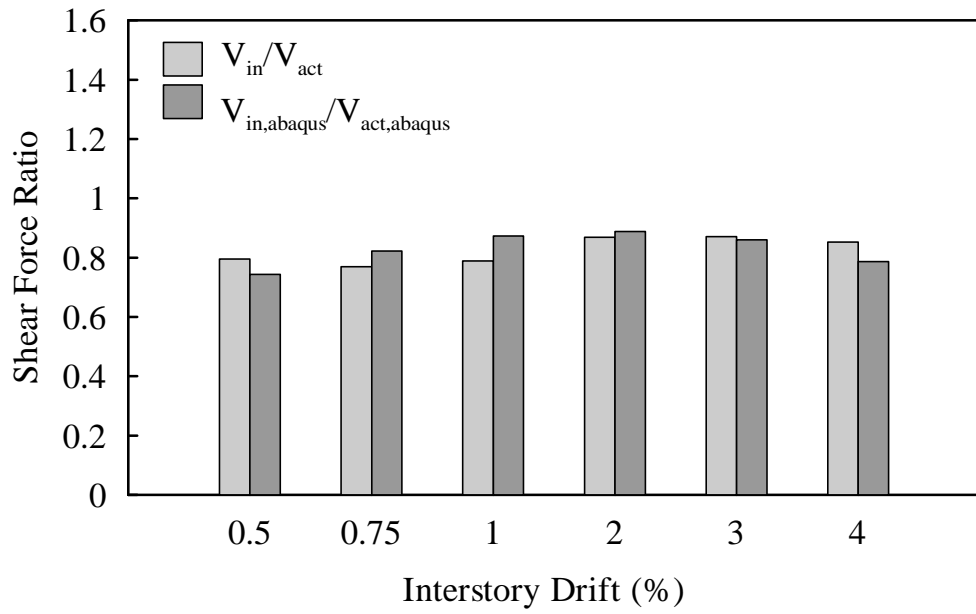
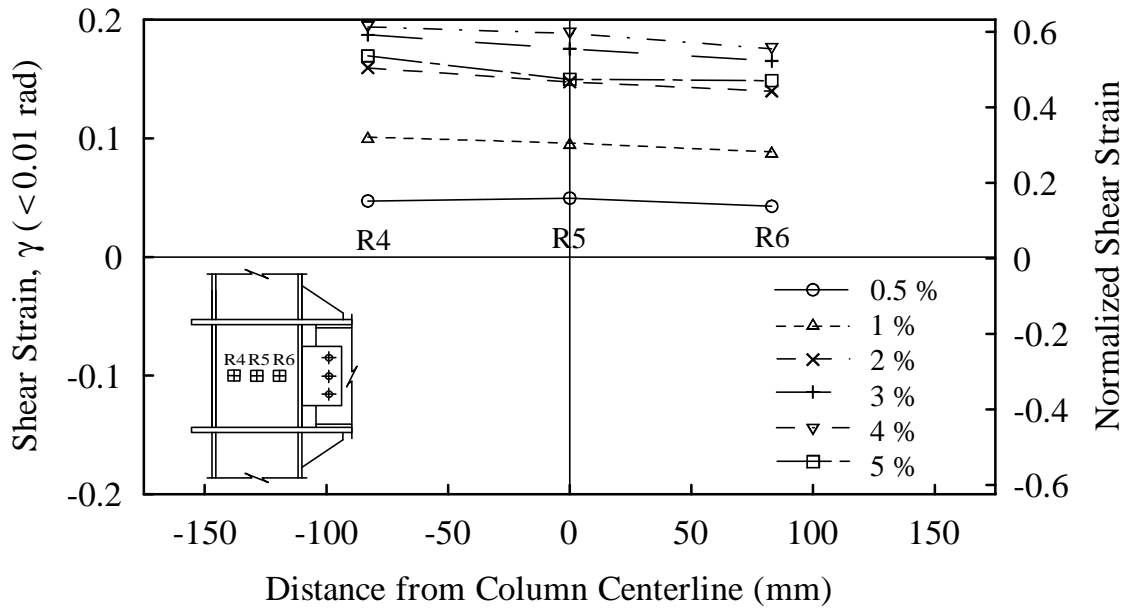
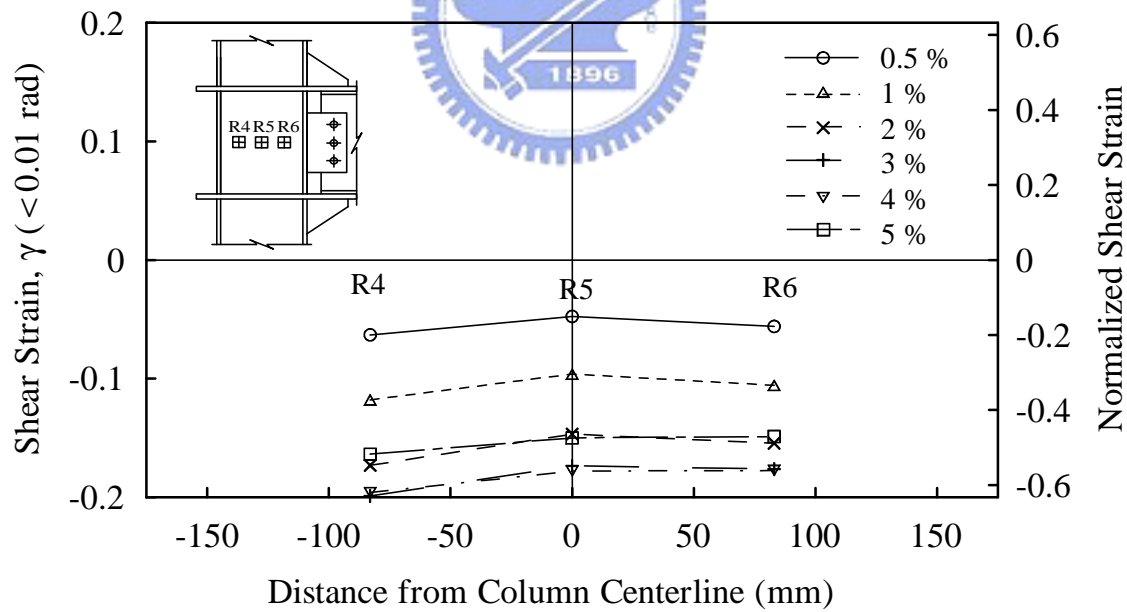


圖 3.44 試體 2 梁腹板剪力比例與有限元素分析比較





(a) Positive Bending



(a) Negative Bending

圖 3.45 試體 2 梁柱交會區剪應變沿柱寬度方向變化

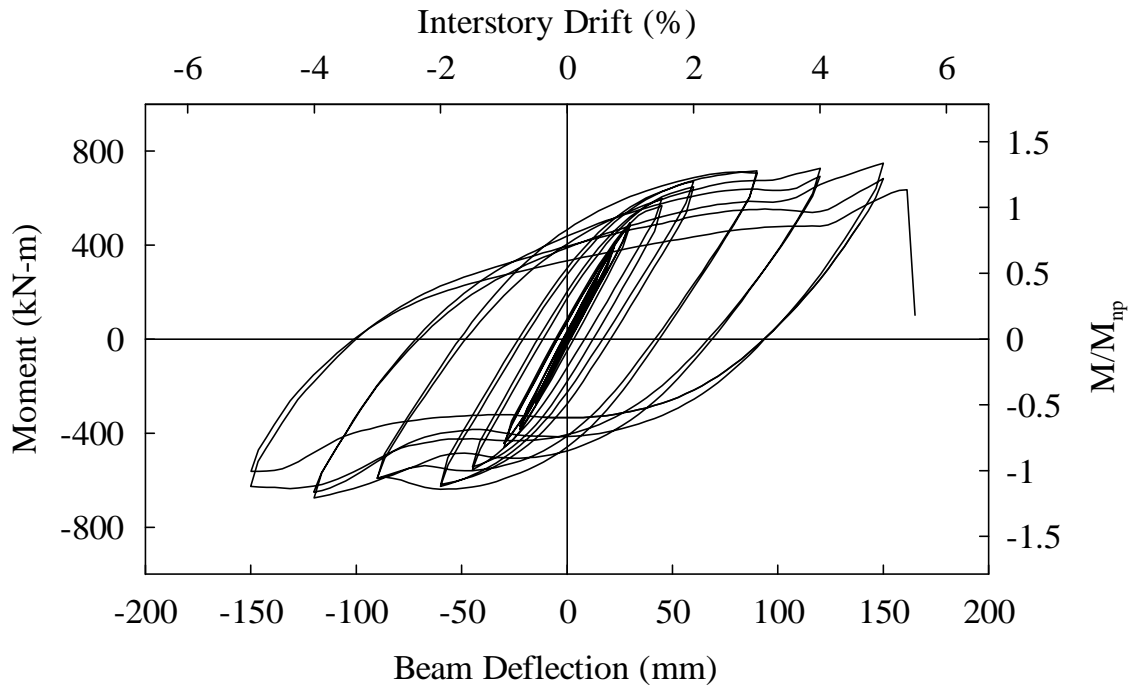


圖 3.46 試體 3 彎矩與梁端位移關係圖

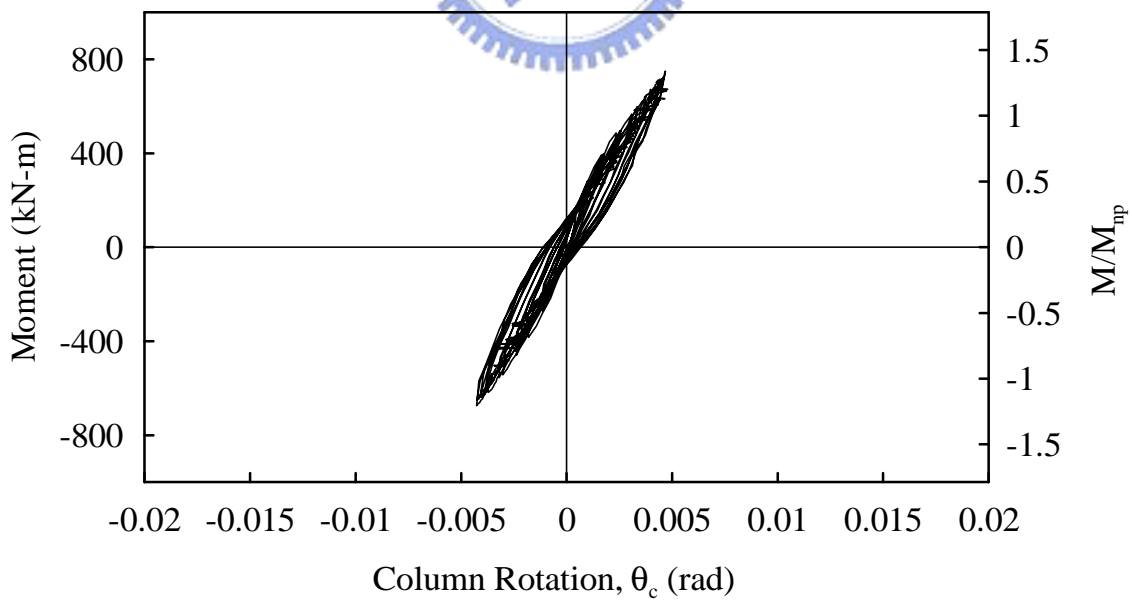


圖 3.47 試體 3 柱轉角與彎矩關係圖

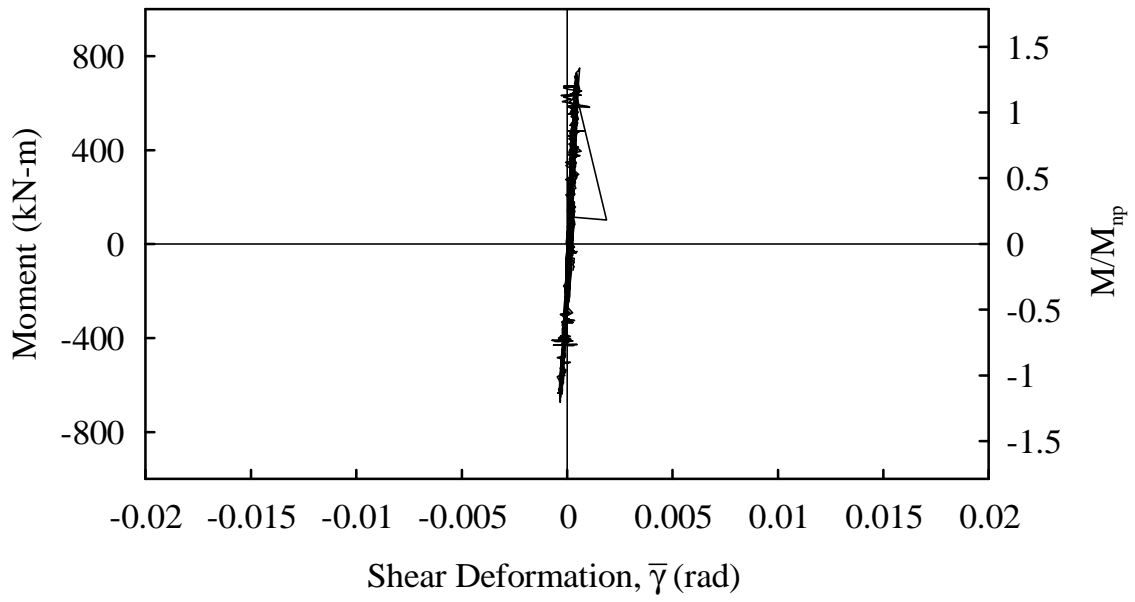


圖 3.48 試體 3 梁柱交會區剪力變形與彎矩關係圖



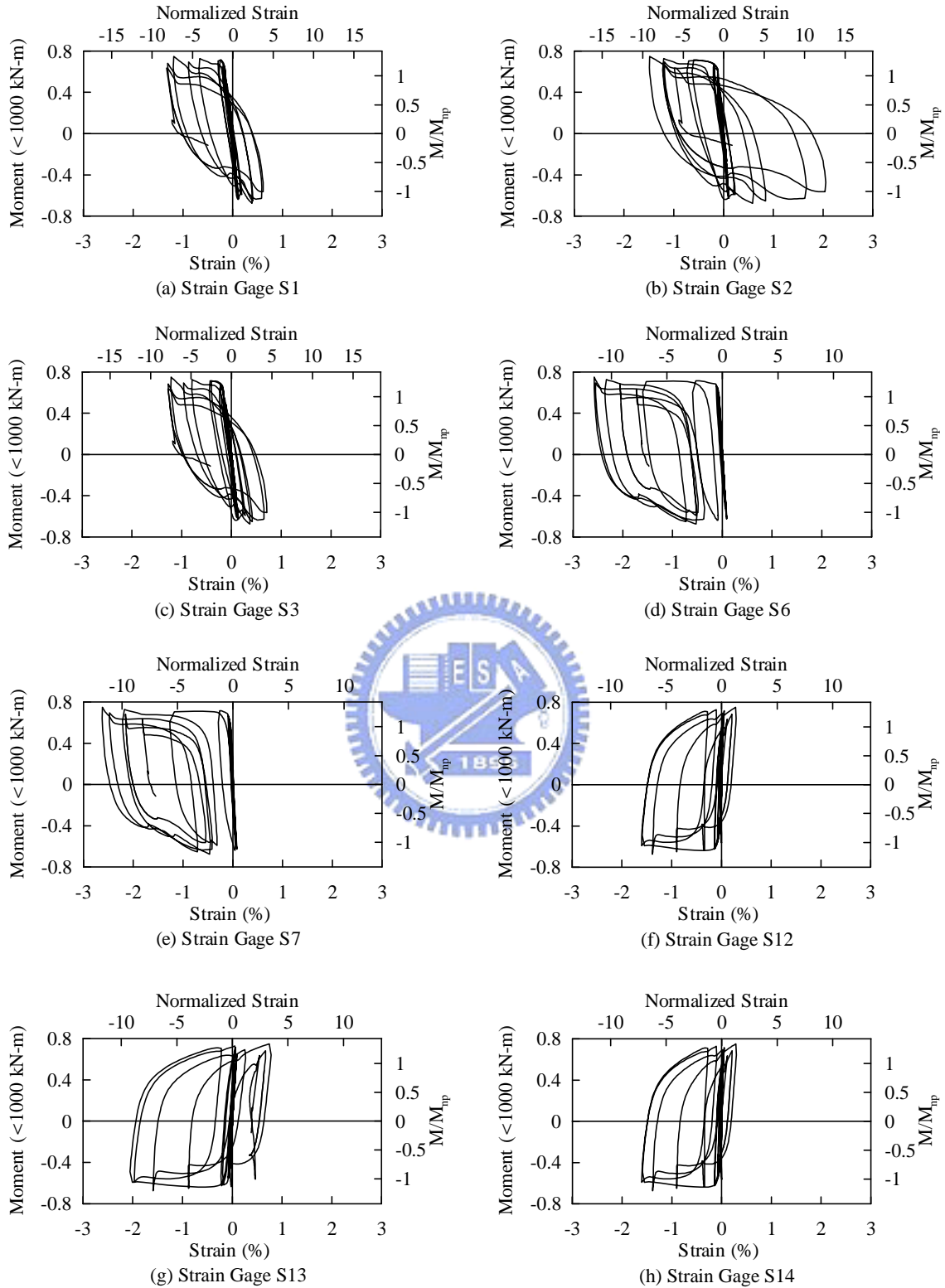


圖 3.49 試體 3 削切蓋板橫向應變計與柱邊彎矩關係圖

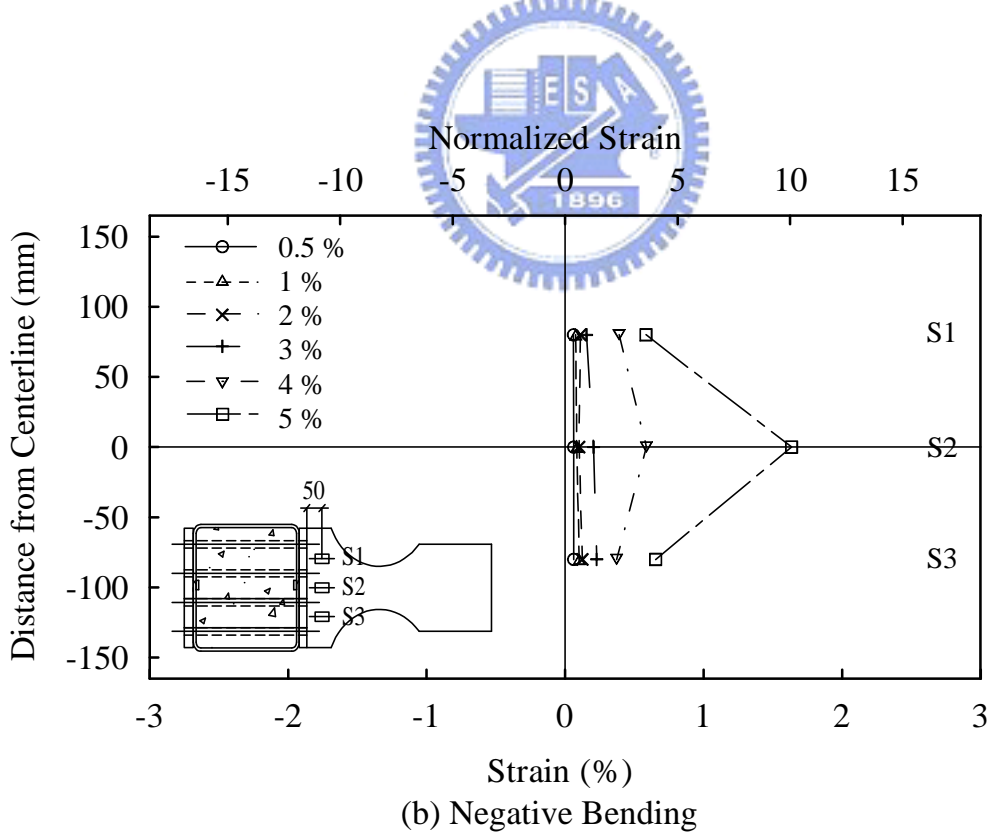
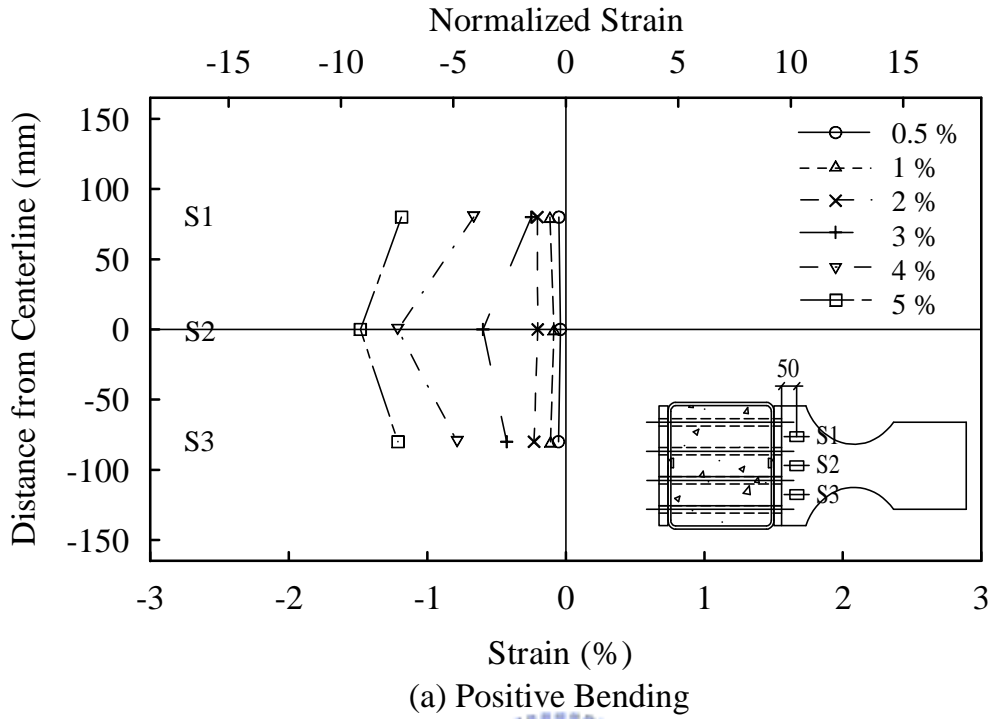


圖 3.50 試體 3 上側削切蓋板靠近端板之應變沿板寬度方向變化

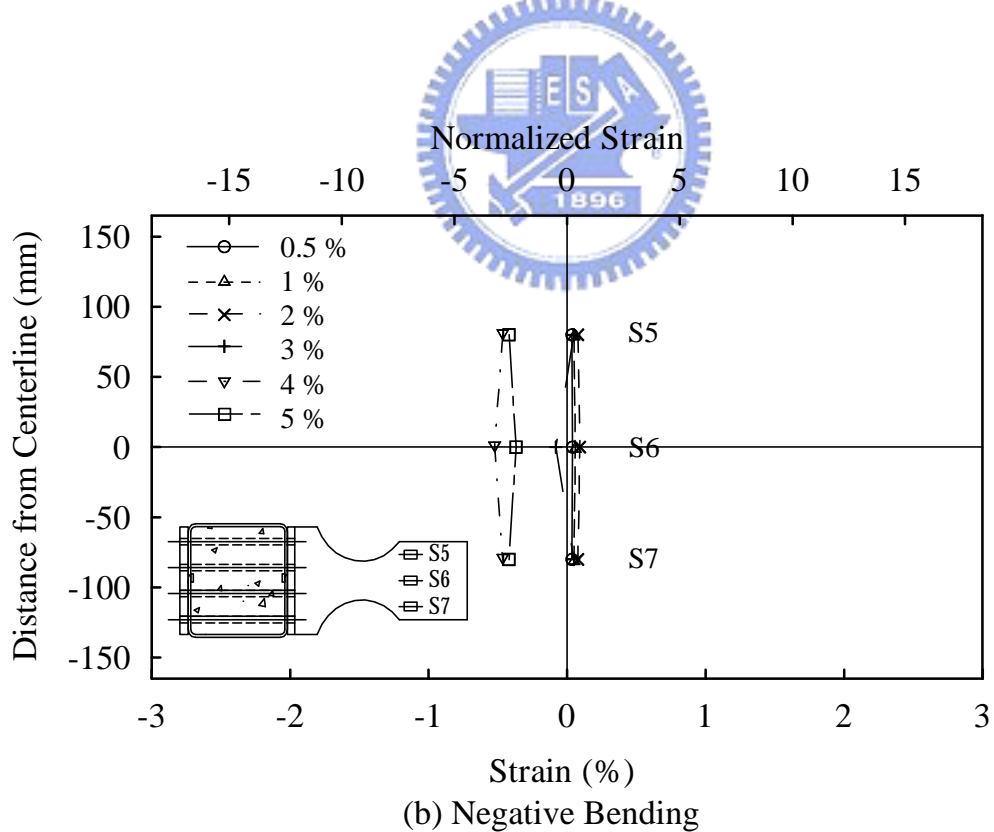
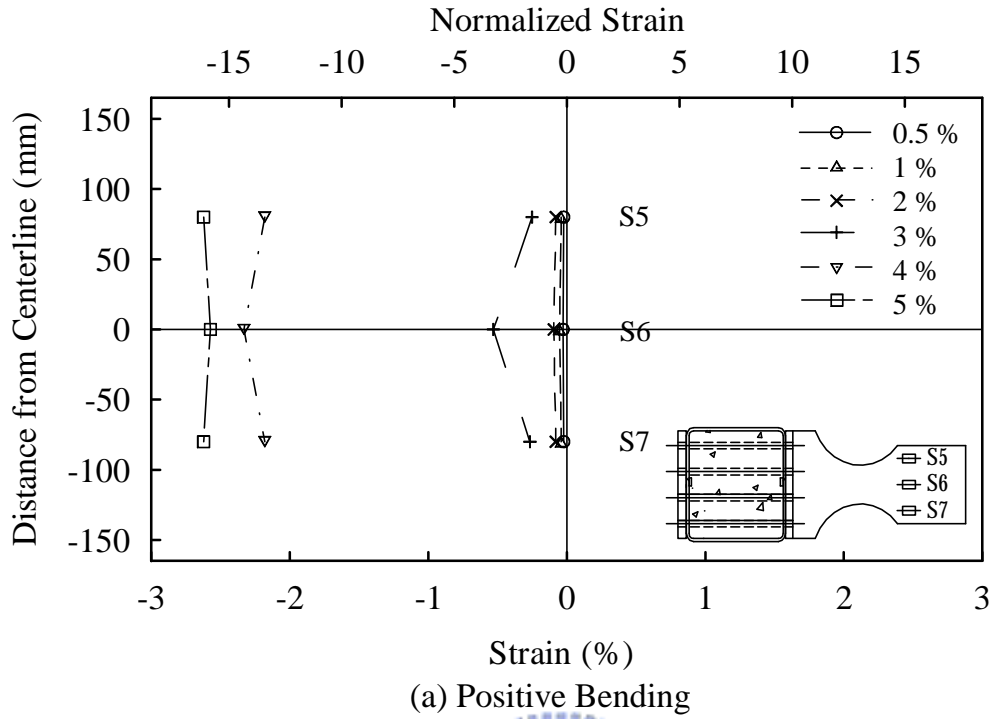


圖 3.51 試體 3 上側削切蓋板靠近焊接處之應變沿板寬度方向變化

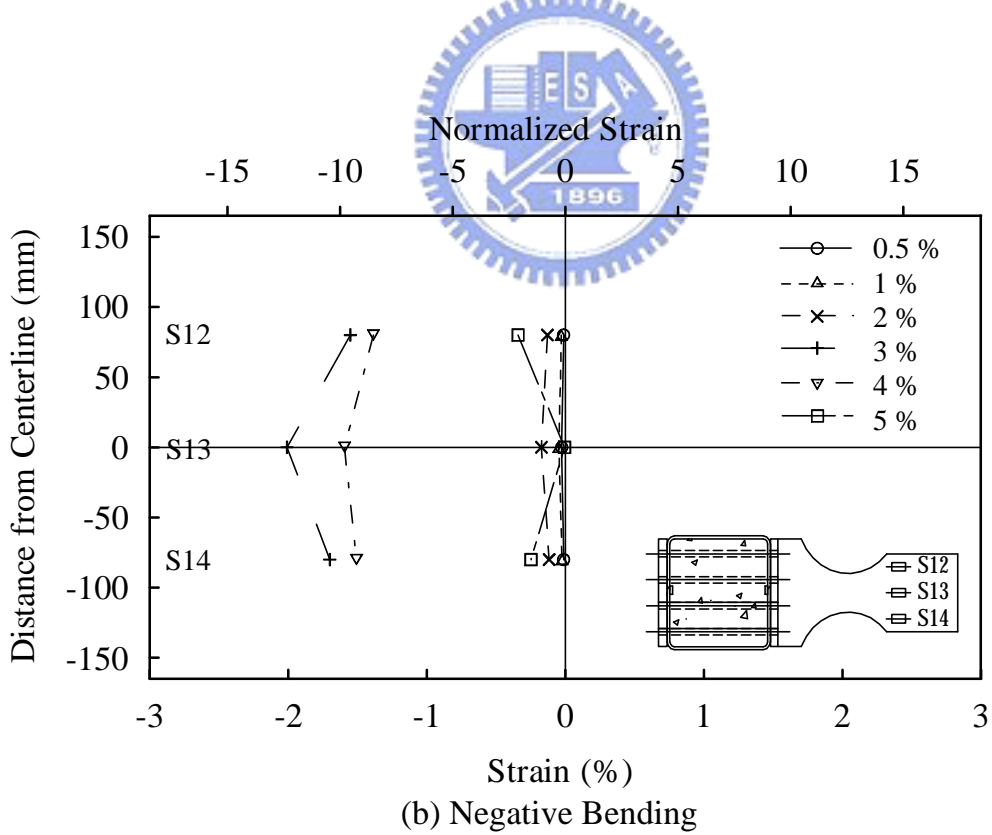
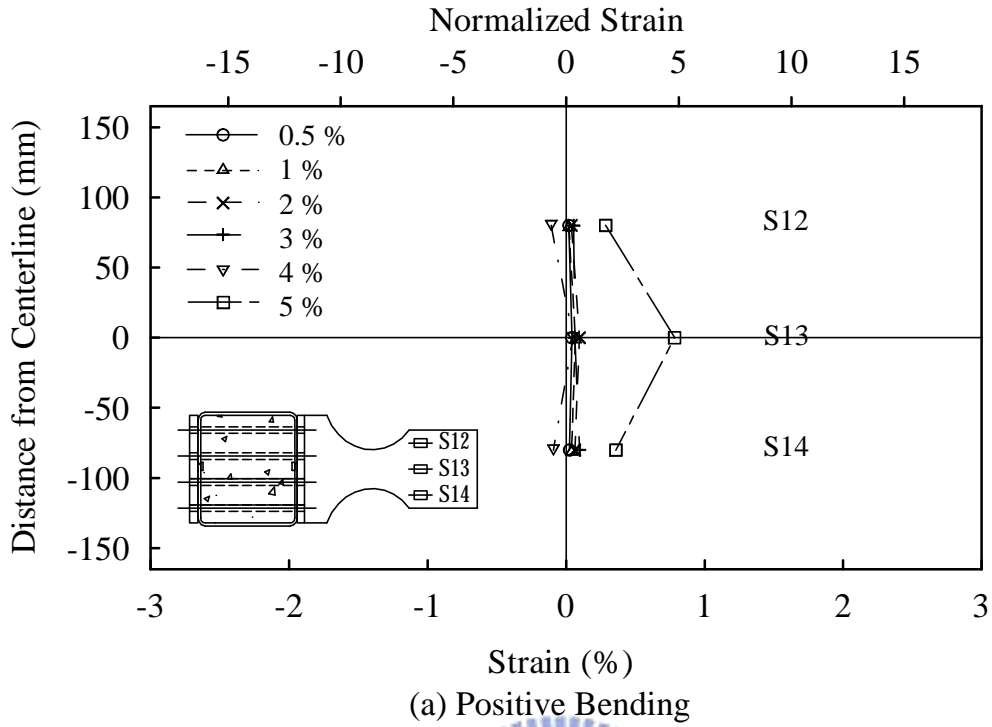
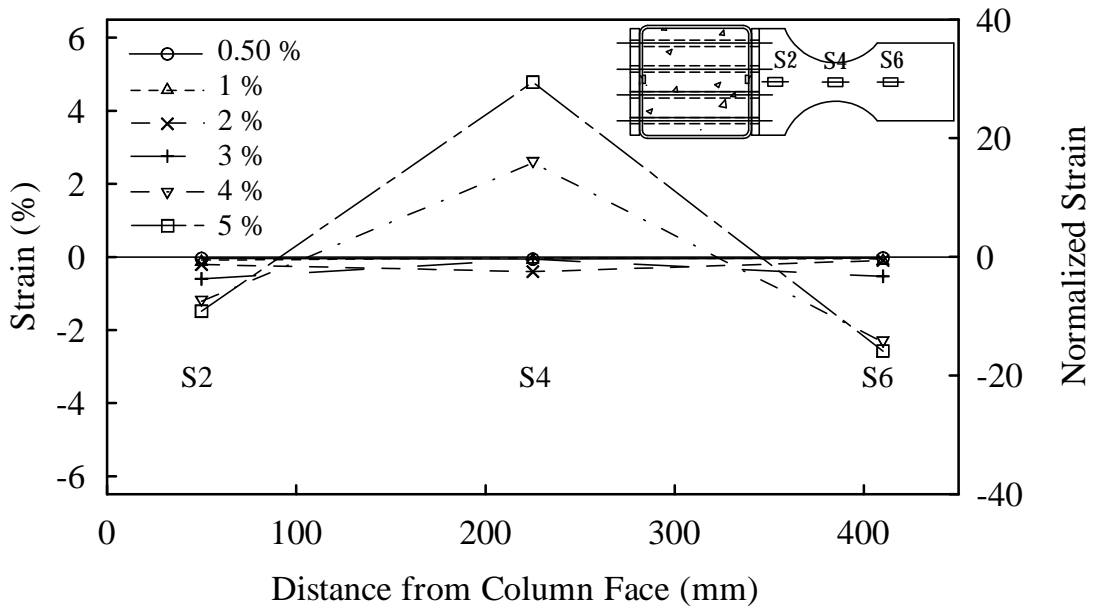
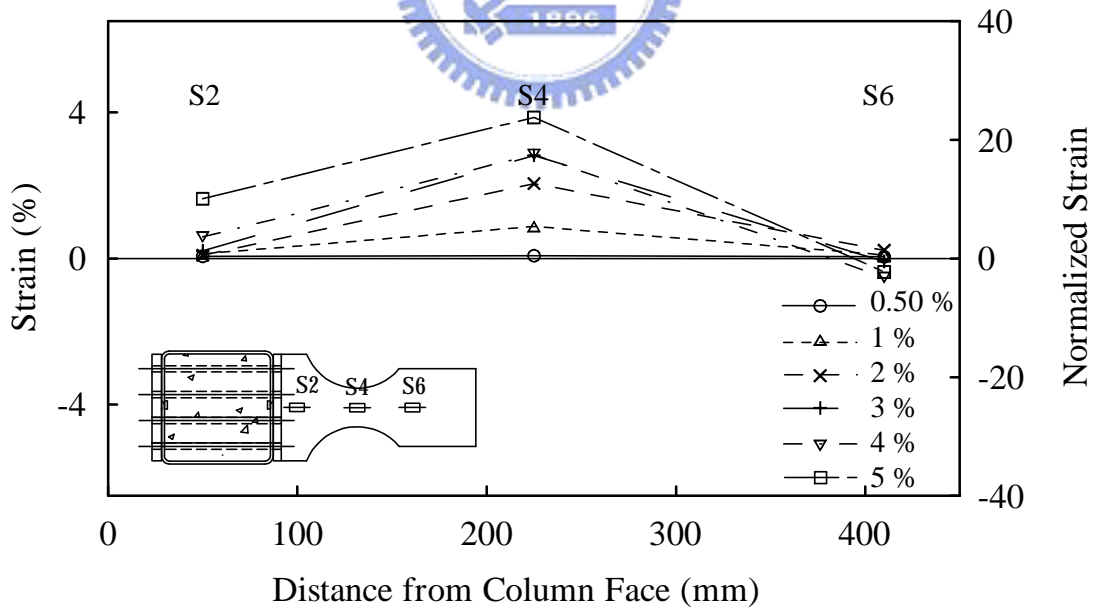


圖 3.52 試體 3 下側削切蓋板靠近焊接處之應變沿板寬度方向變化

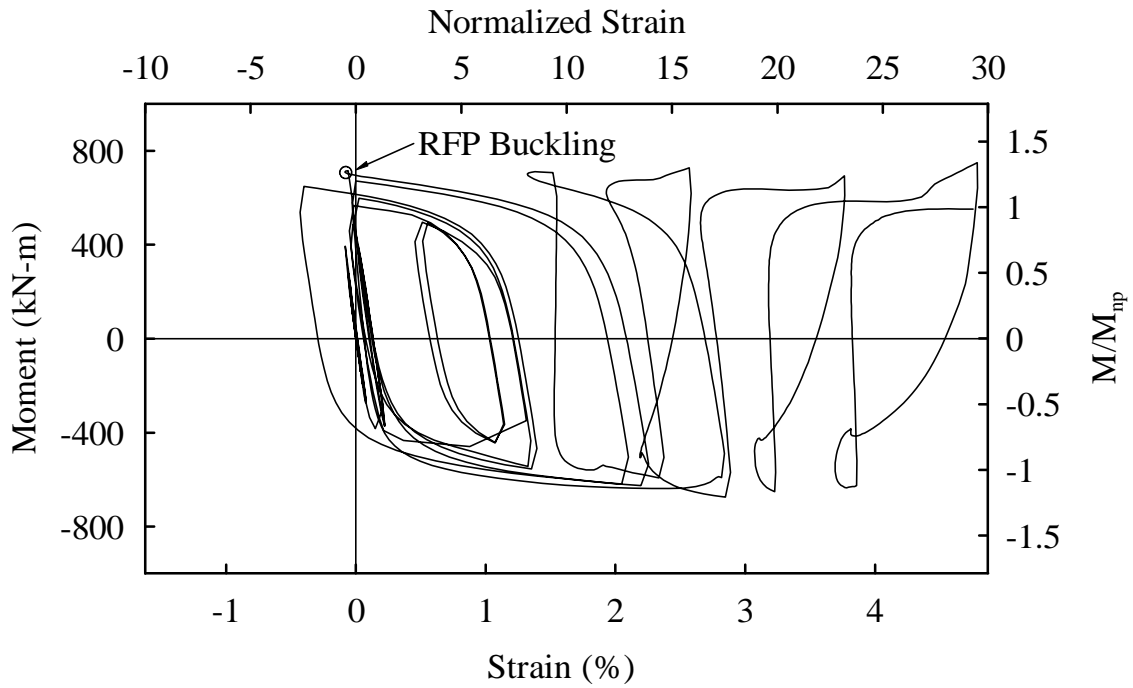


(a) Positive Bending

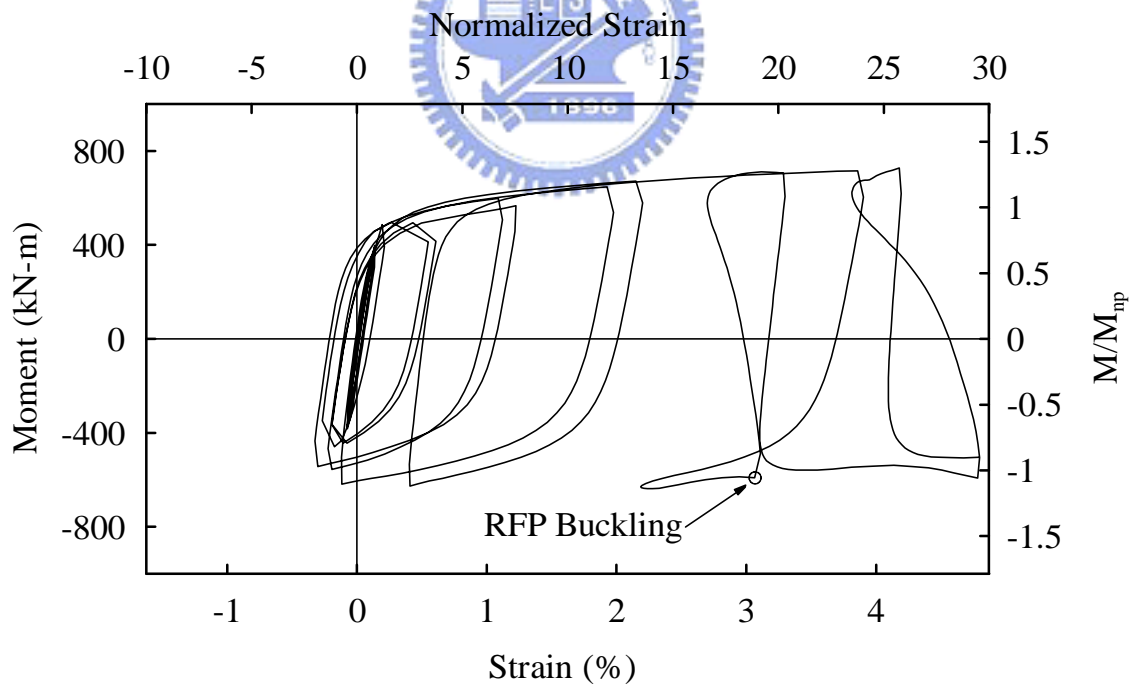


(b) Negative Bending

圖 3.53 試體 3 上側削切蓋板應變沿板縱向之變化

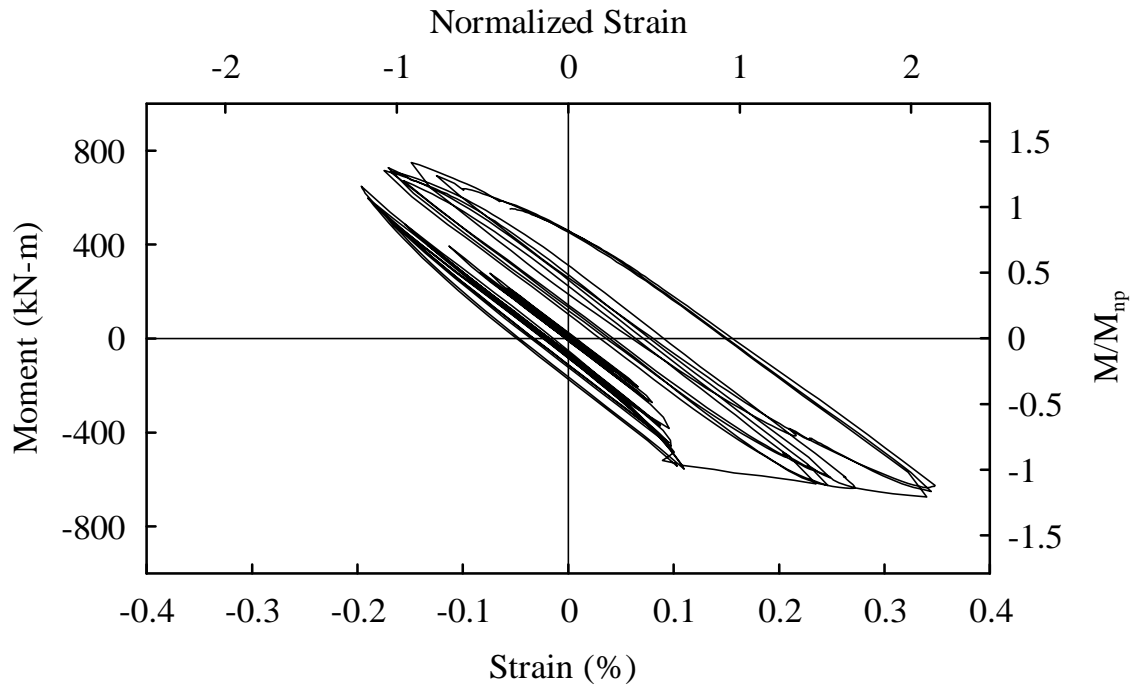


(a) Strain Gage S4

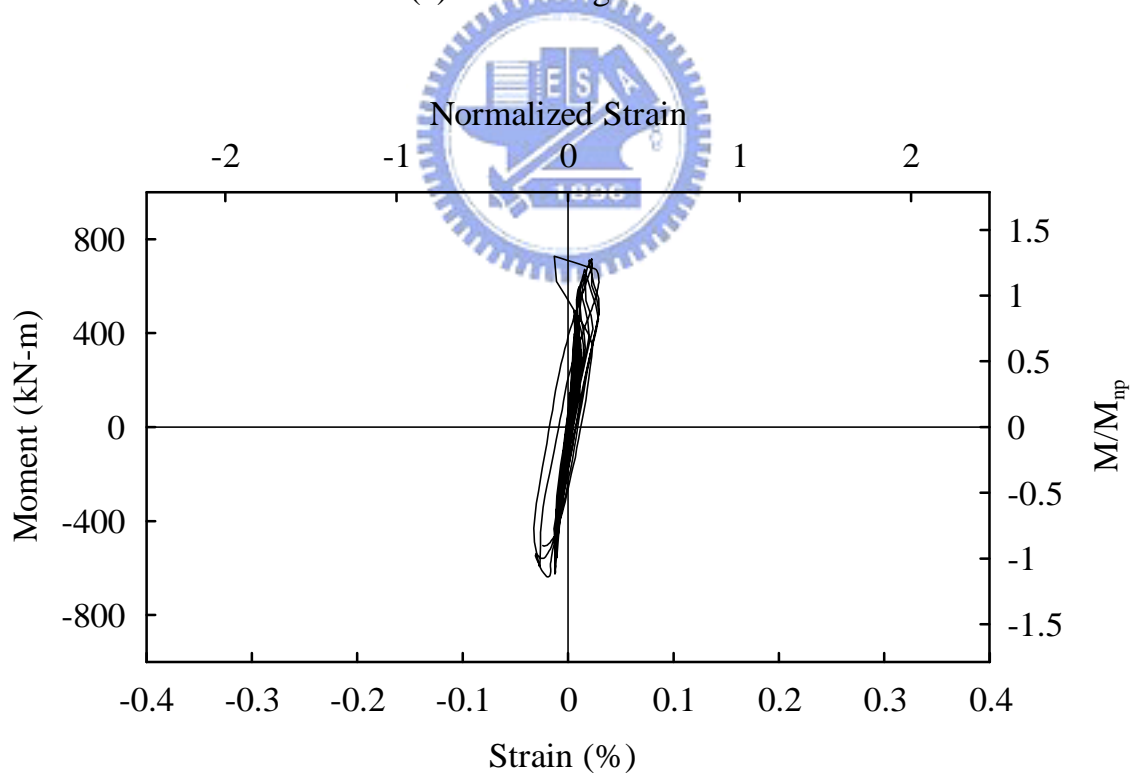


(b) Strain Gage S11

圖 3.54 試體 3 削切蓋板中央削切處應變計與彎矩歷時

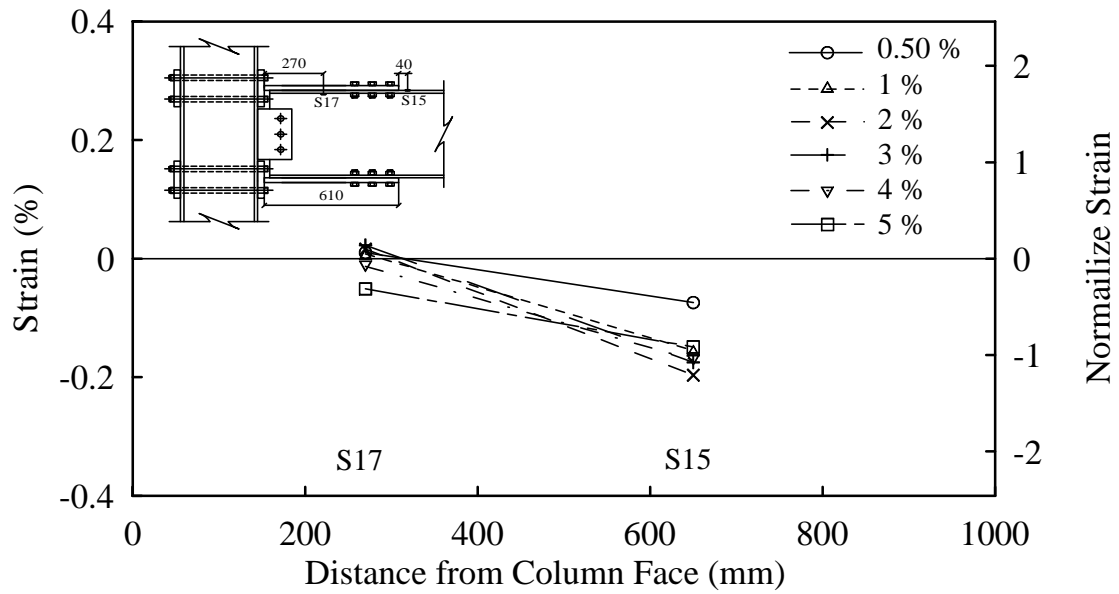


(a) Strain Gage S15

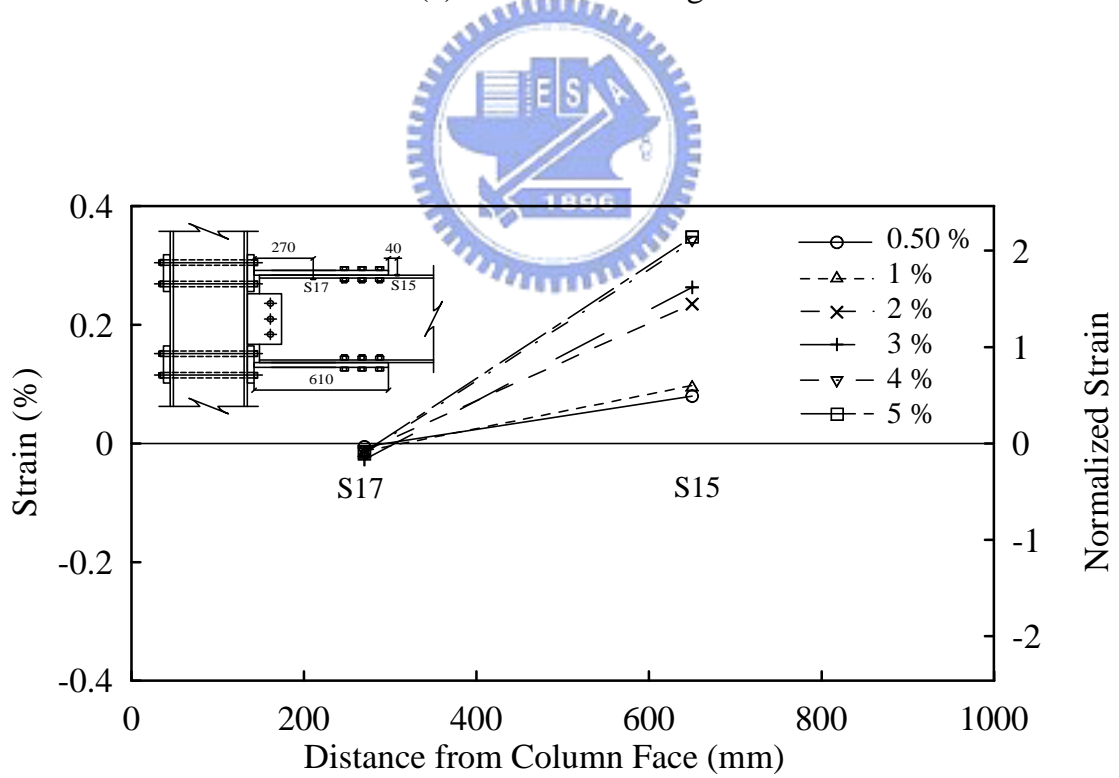


(b) Strain Gage S17

圖 3.55 試體 3 梁上翼板應變計與彎矩歷時

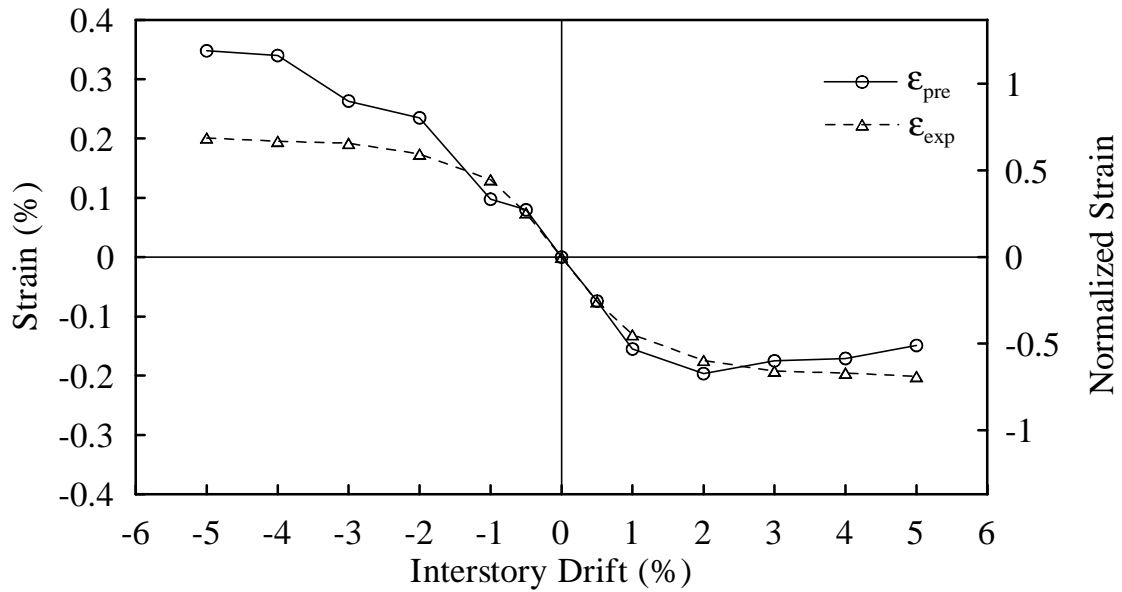


(a) Positive Bending

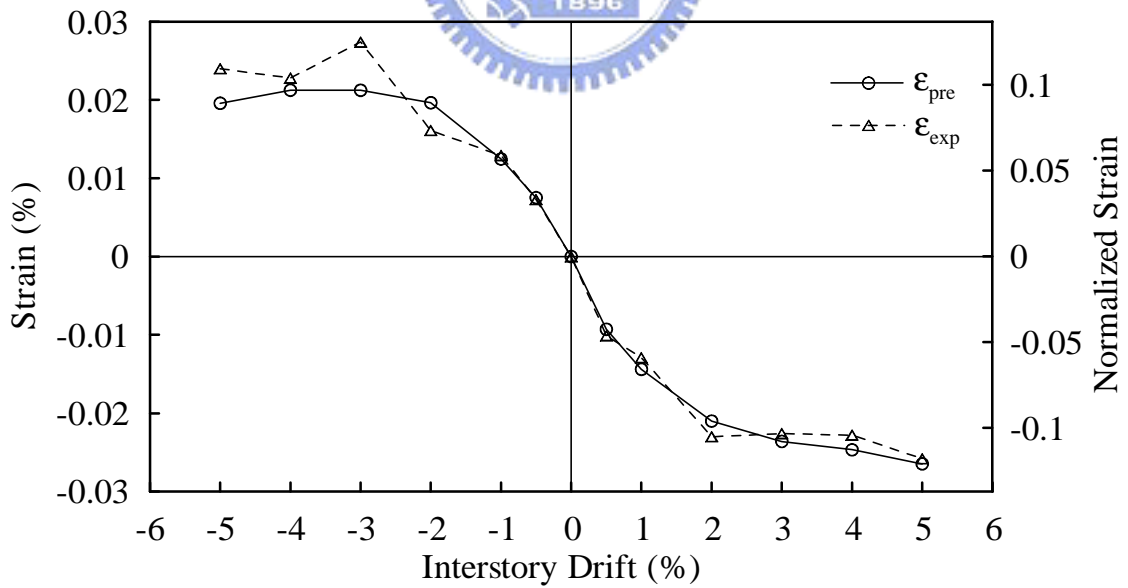


(b) Negative Bending

圖 3.56 試體 3 梁上翼板沿梁縱軸方向變化

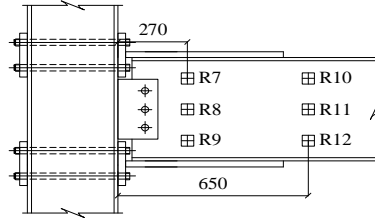


(a) S15

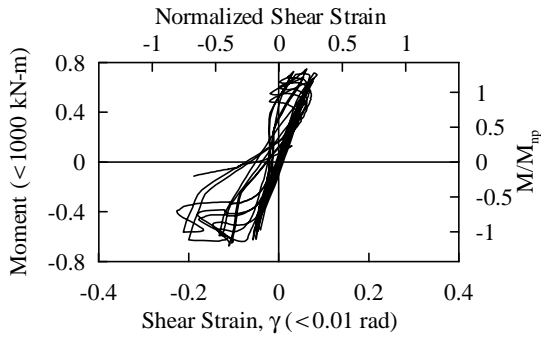


(b) S17

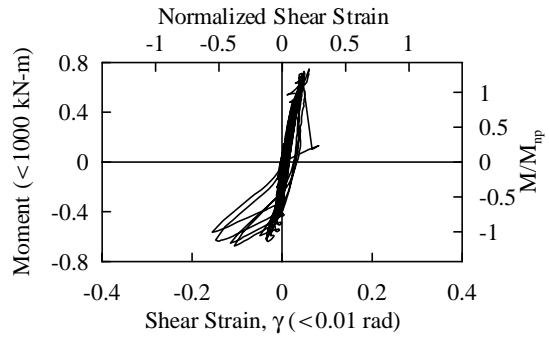
圖 3.57 試體 3 梁翼板軸向應變與估計應變值比較



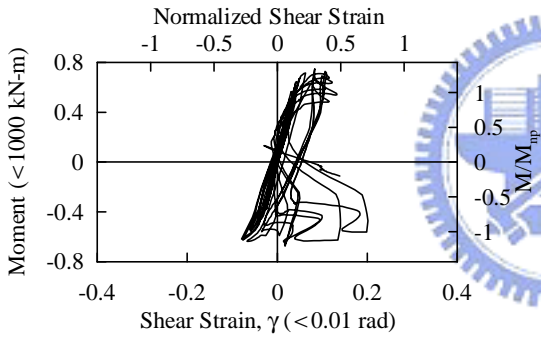
(a) Rosset Location



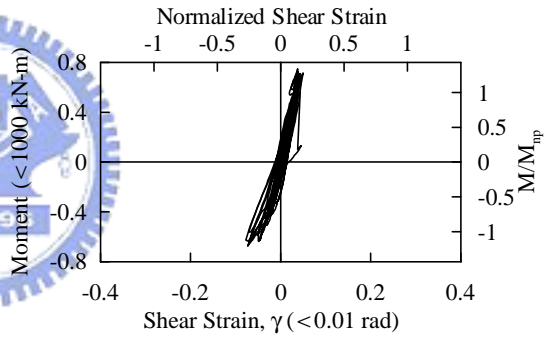
(b) Rosset R7



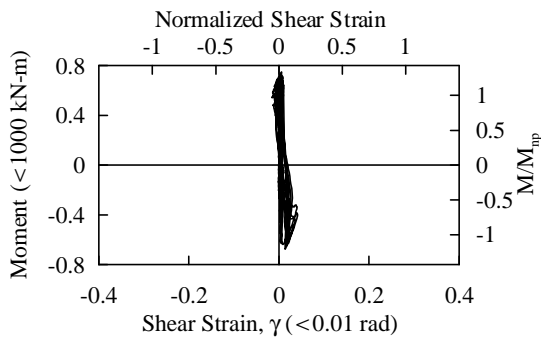
(c) Rosset R8



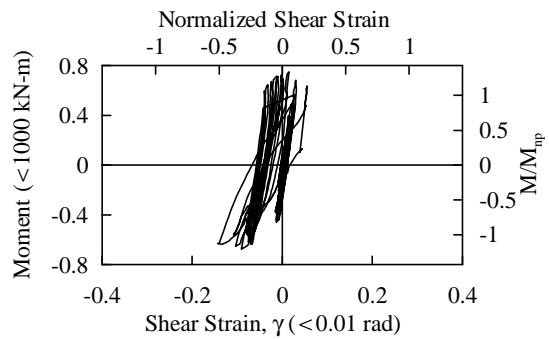
(d) Rosset R9



(e) Rosset R10



(f) Rosset R11



(g) Rosset R12

圖 3.58 試體 3 梁腹板剪應變與柱邊彎矩歷時

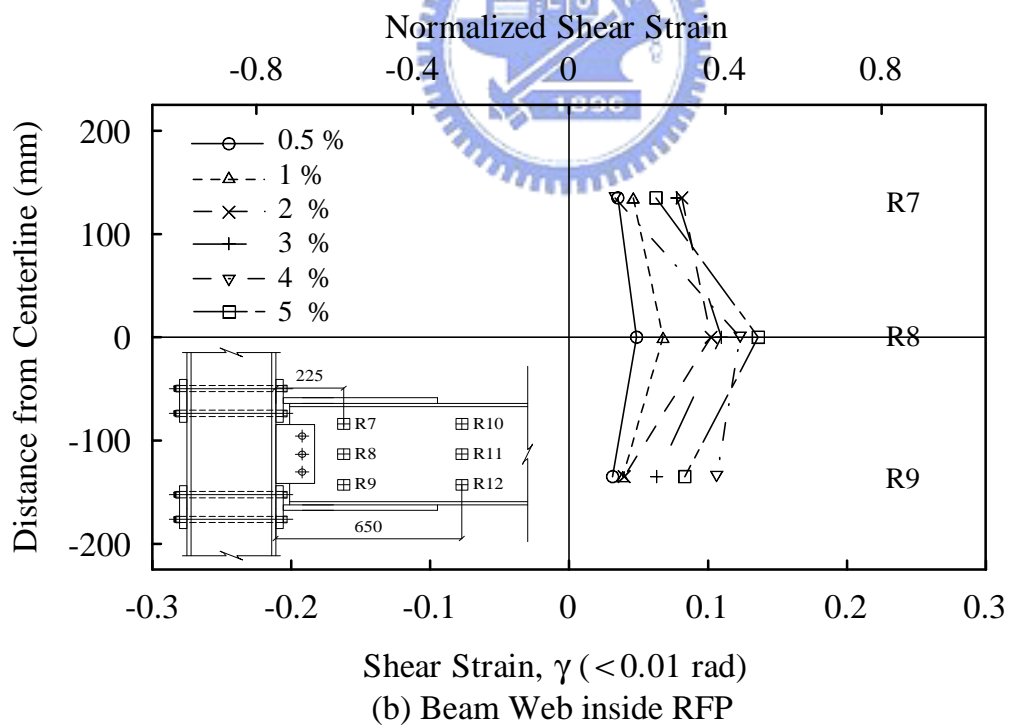
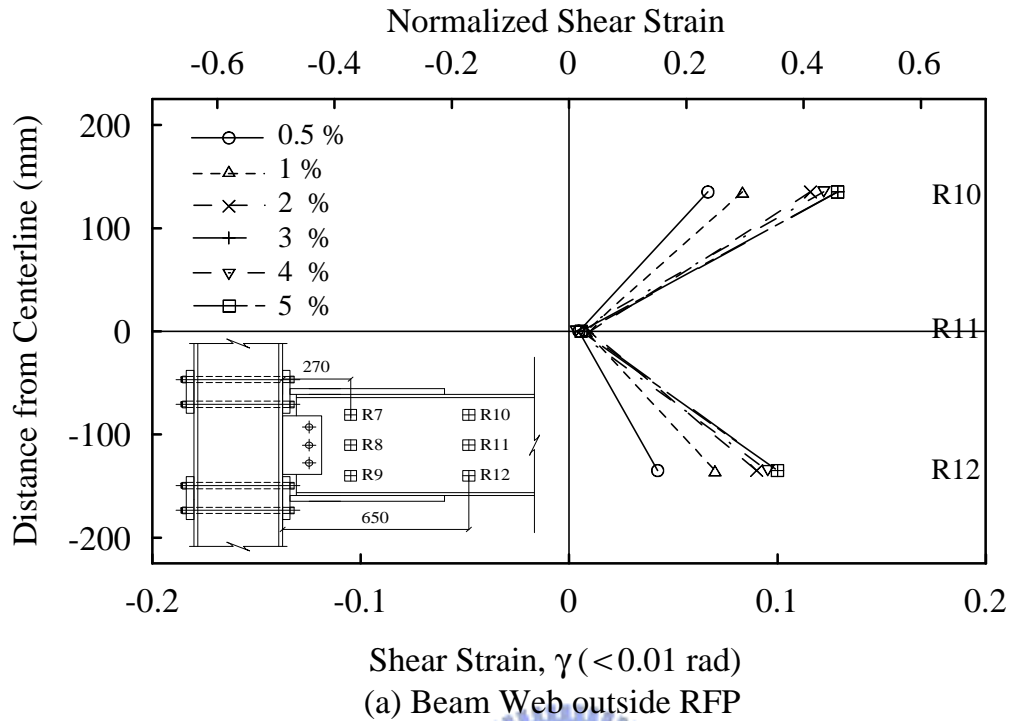


圖 3.59 試體 3 梁腹板剪應變沿梁深之變化 (正方向施載)

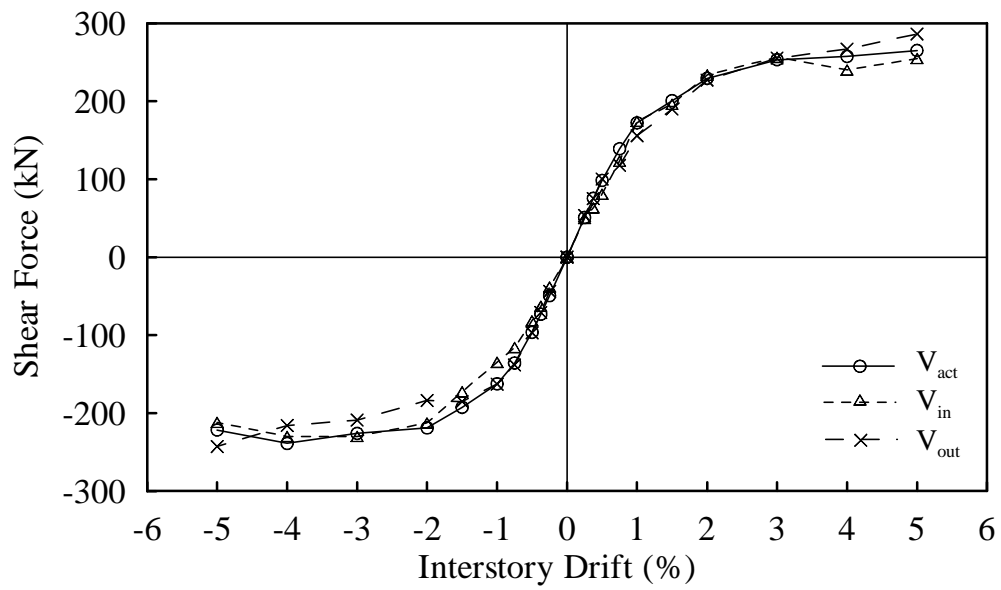
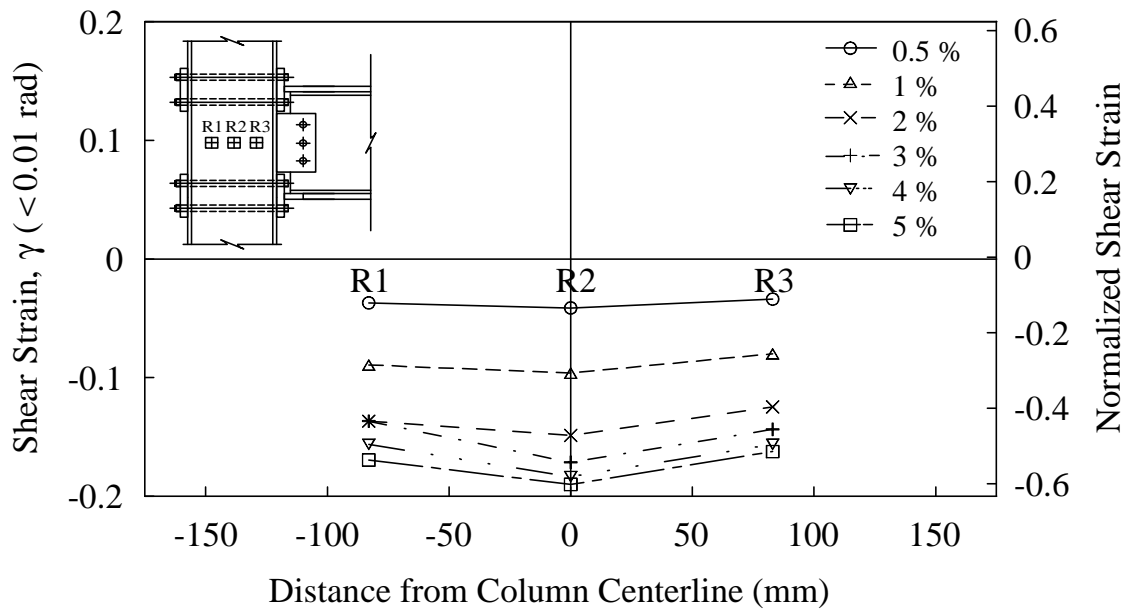
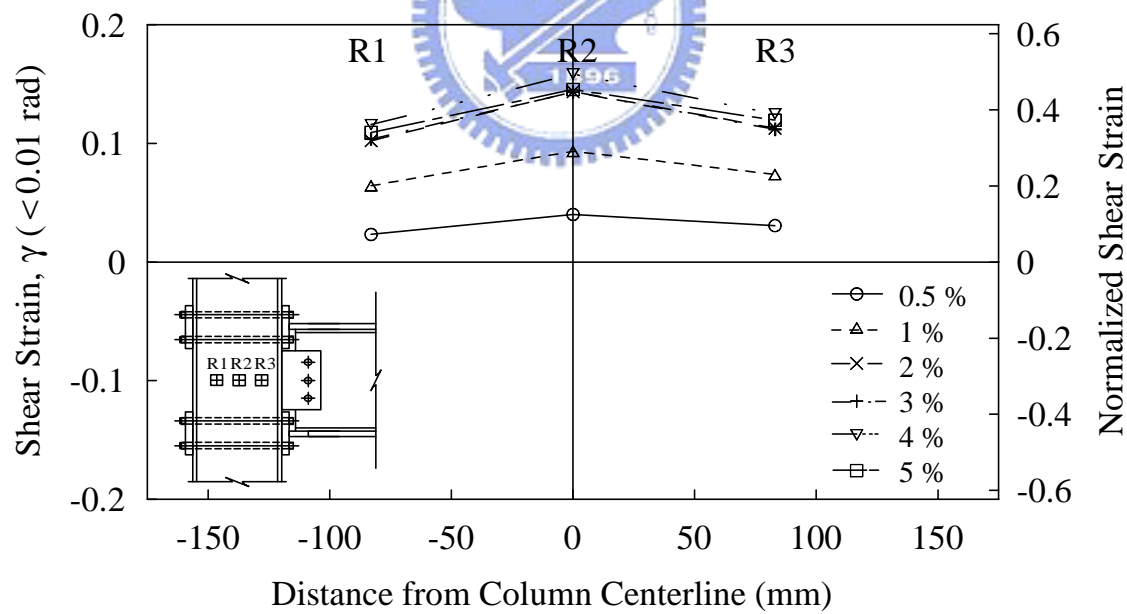


圖 3.60 試體 3 各位移角下之梁腹板剪力比較





(a) Positive Bending



(a) Negative Bending

圖 3.61 試體 3 梁柱交會區剪應變沿寬度之變化

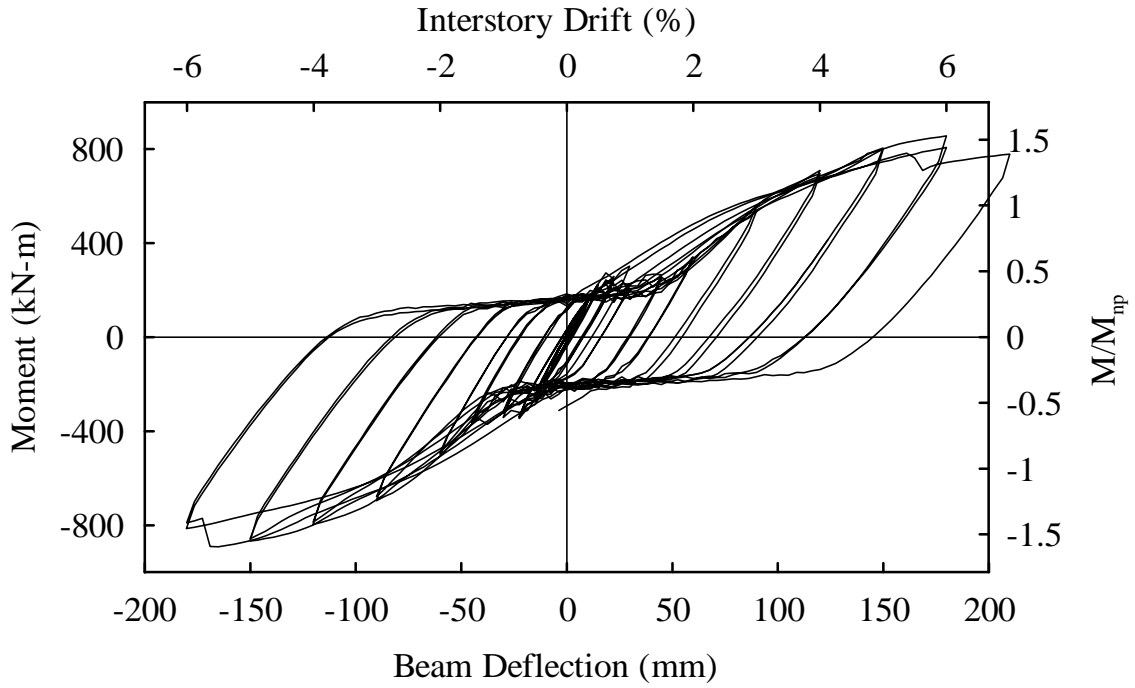


圖 3.62 試體 4 彎矩與梁端位移關係

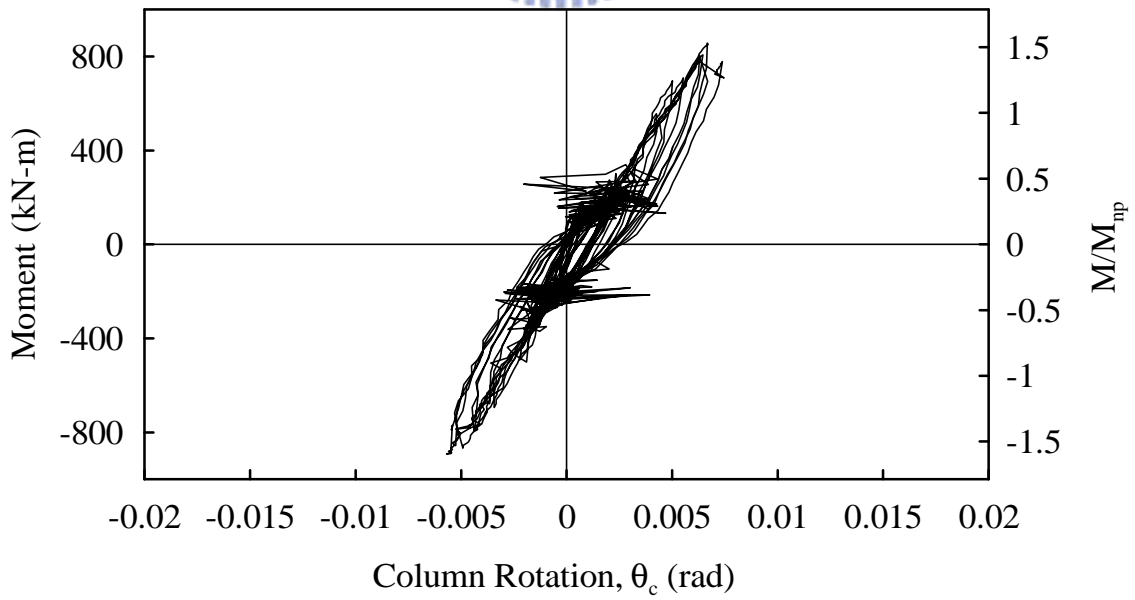


圖 3.63 試體 4 柱轉角與彎矩關係圖

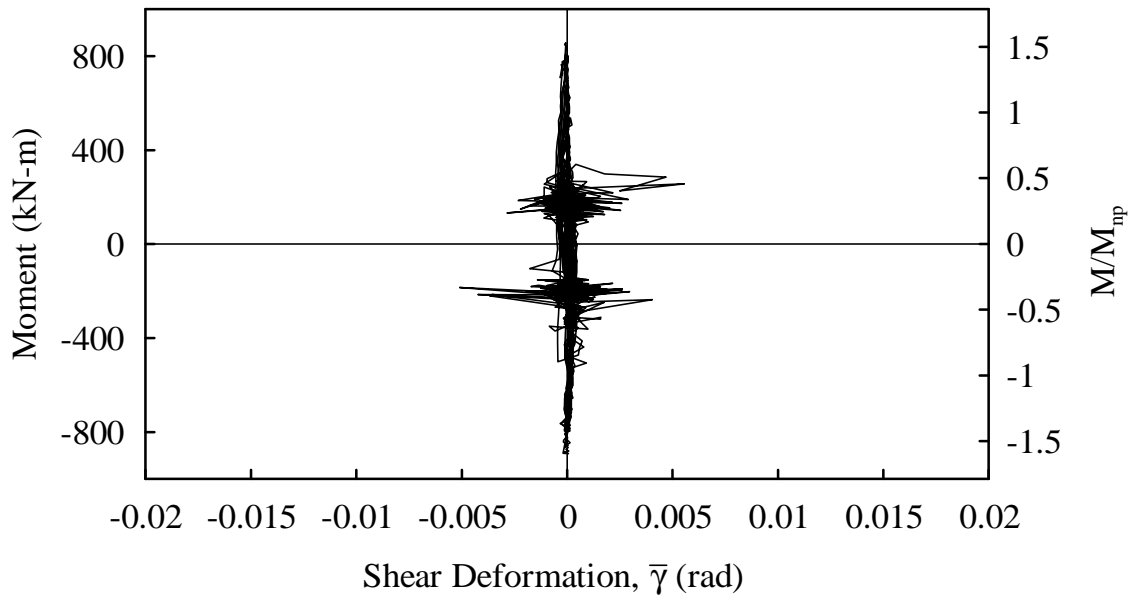
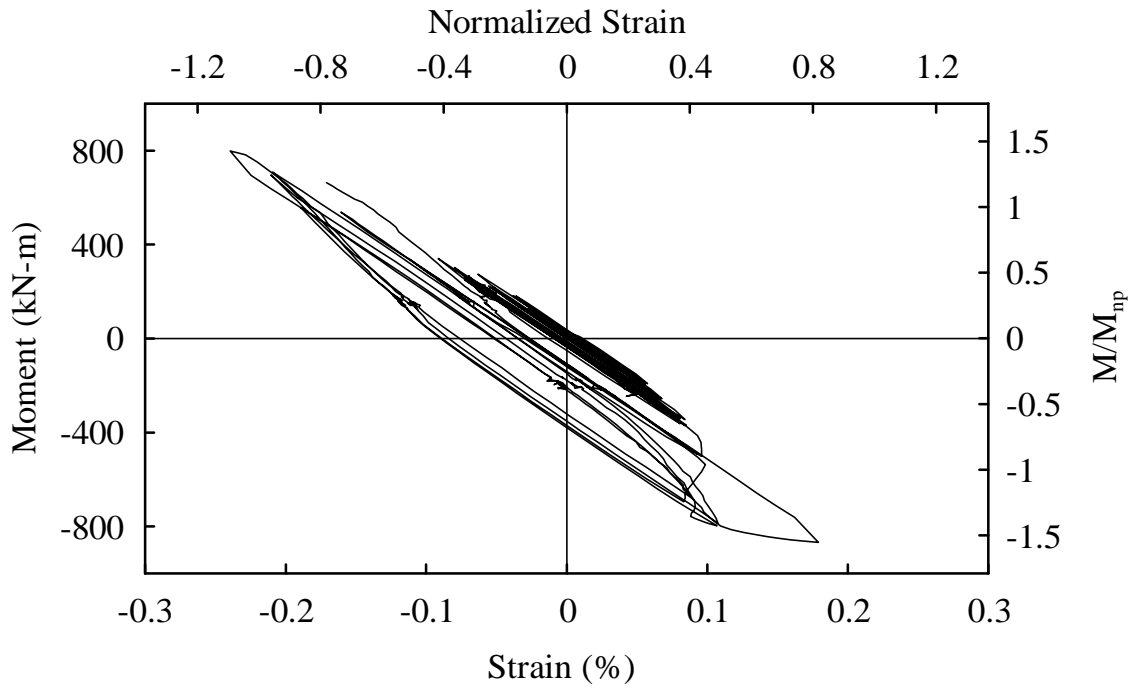
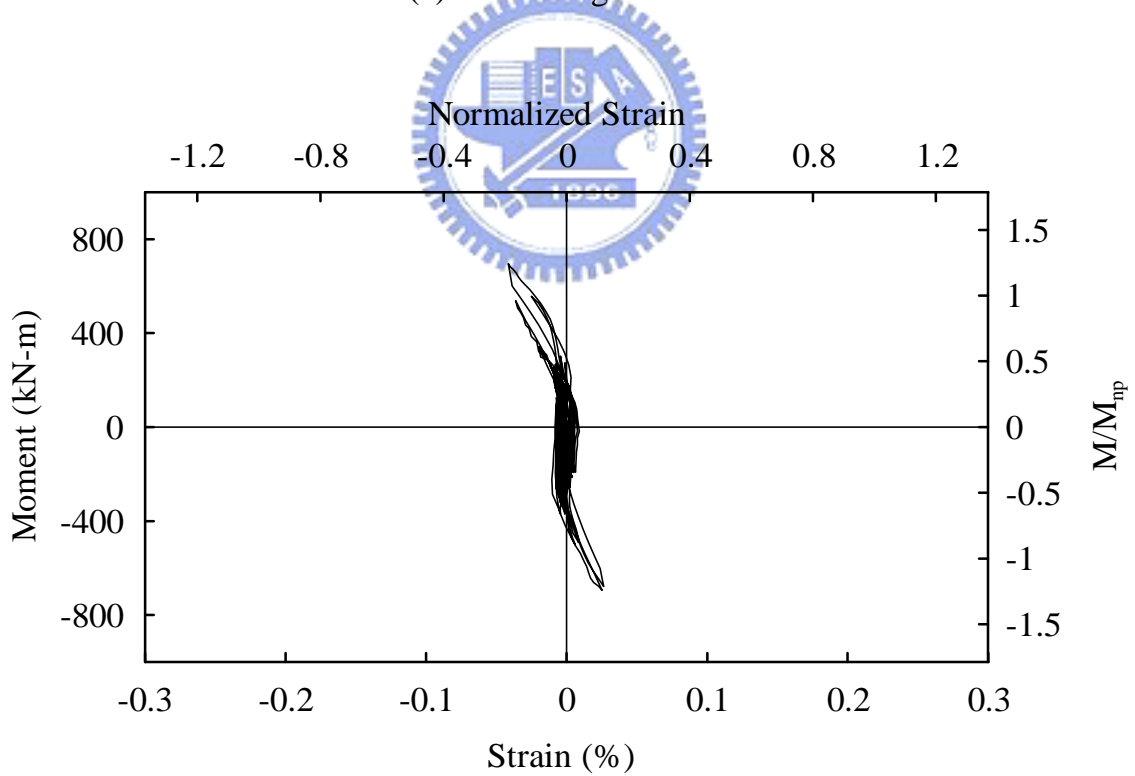


圖 3.64 試體 4 梁柱交會區所提供之轉角分量與彎矩關係圖



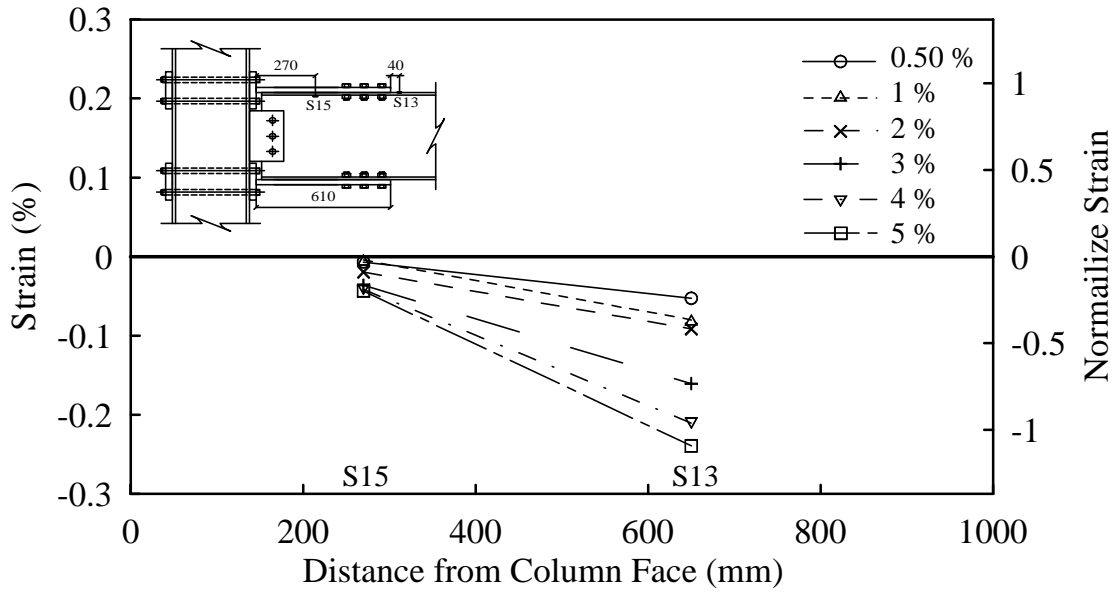


(a) Strain Gage S13

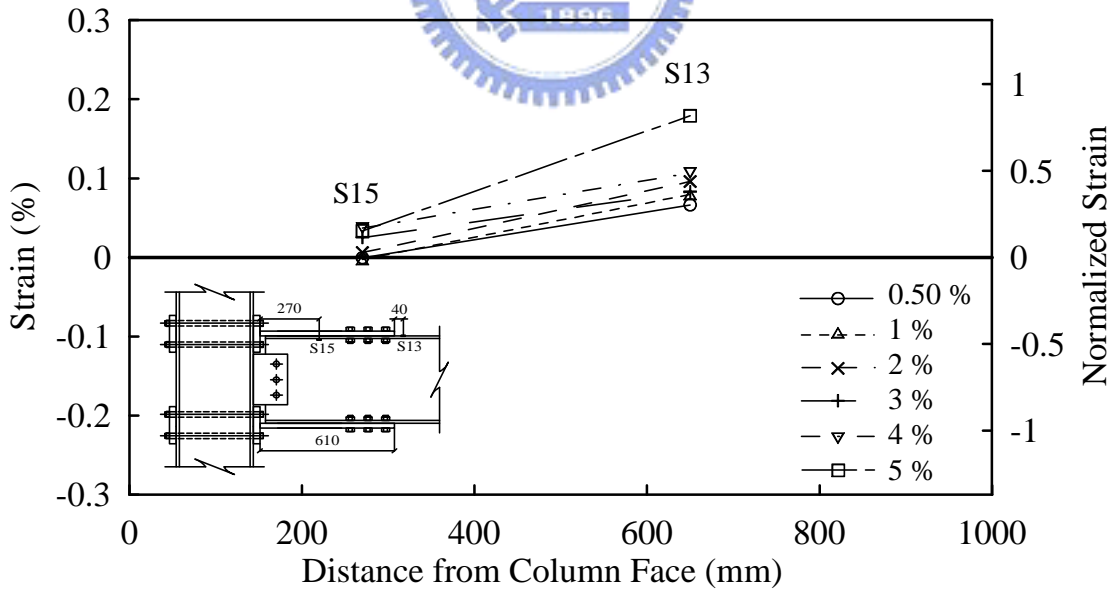


(b) Strain Gage S15

圖 3.65 試體 3 梁上翼板應變計與彎矩歷時

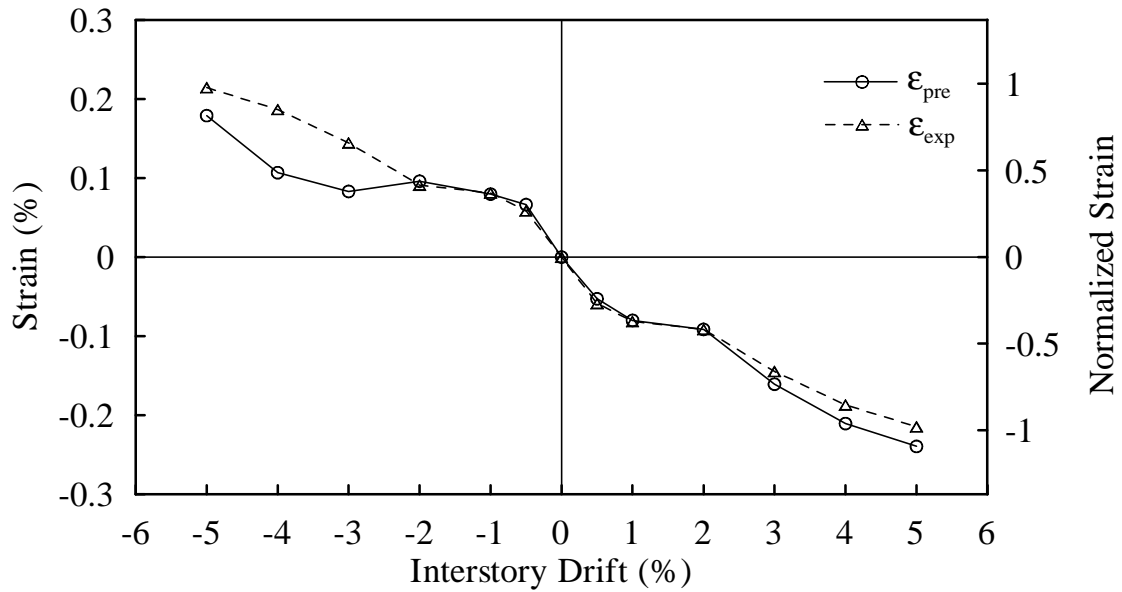


(a) Positive Bending

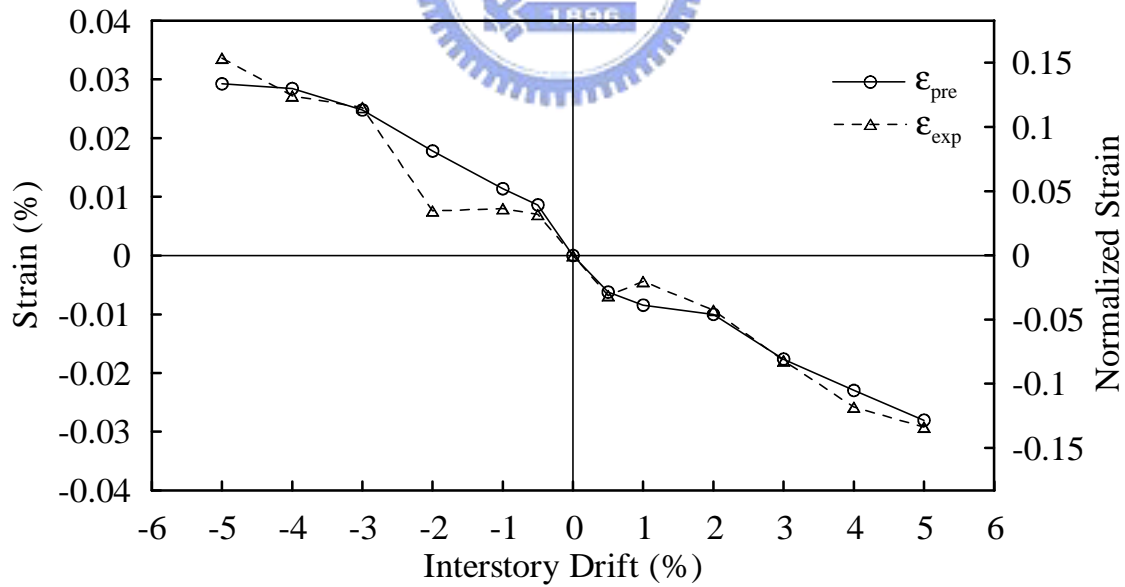


(b) Negative Bending

圖 3.66 試體 4 梁翼板應變沿梁縱向變化

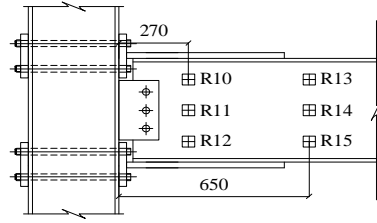


(a) S13

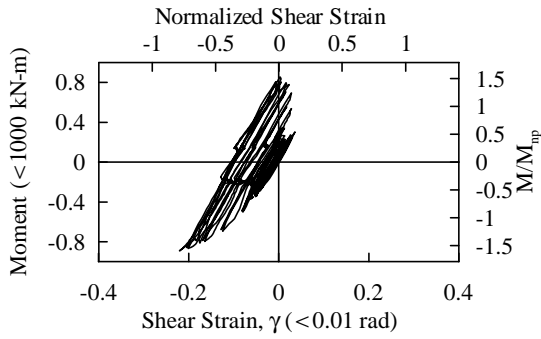


(b) S15

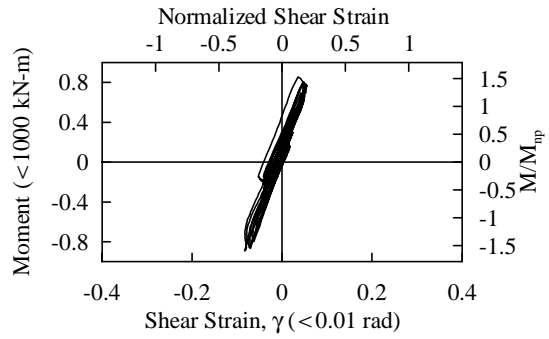
圖 3.67 試體 4 梁翼板軸向應變與估計應變值比較



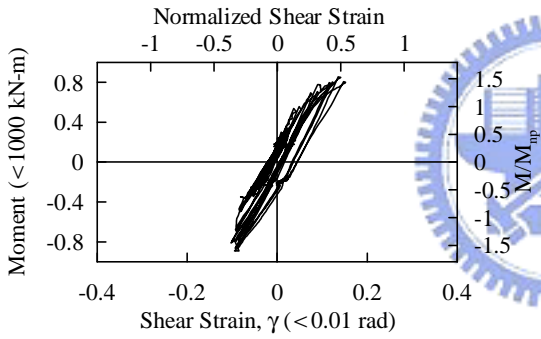
(a) Rosset Location



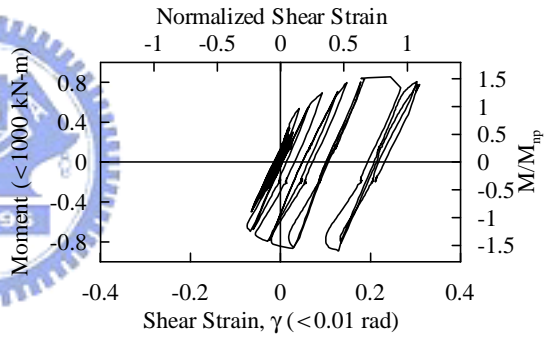
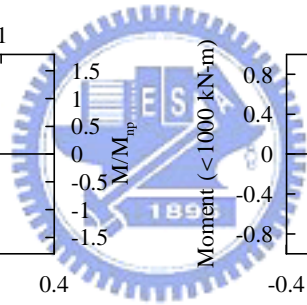
(b) Rosset R10



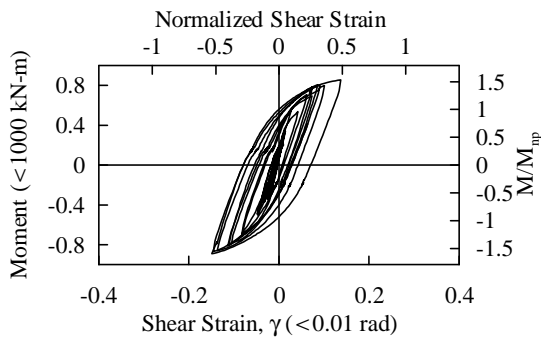
(c) Rosset R11



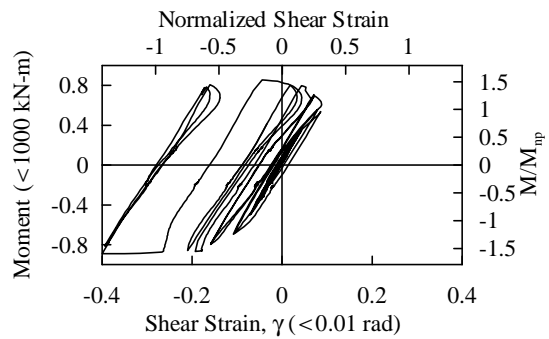
(d) Rosset R12



(e) Rosset R13



(f) Rosset R14



(g) Rosset R15

圖 3.68 試體 4 梁腹板剪應變與柱邊彎矩歷時

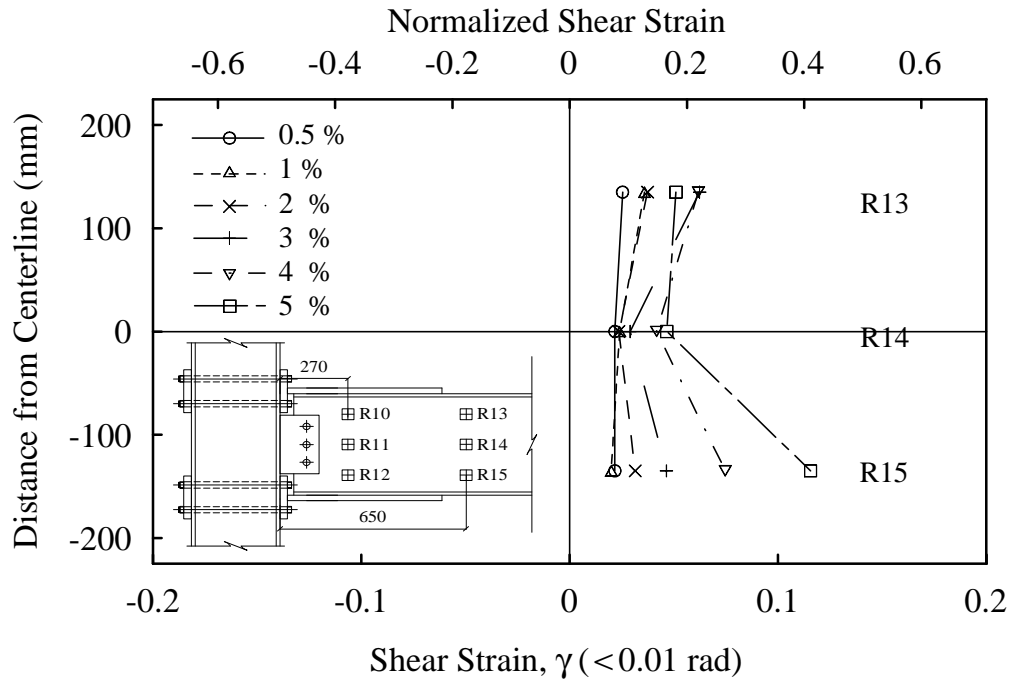


圖 3.69 試體 4 削切蓋板端部之梁腹板剪應變沿梁深之變化

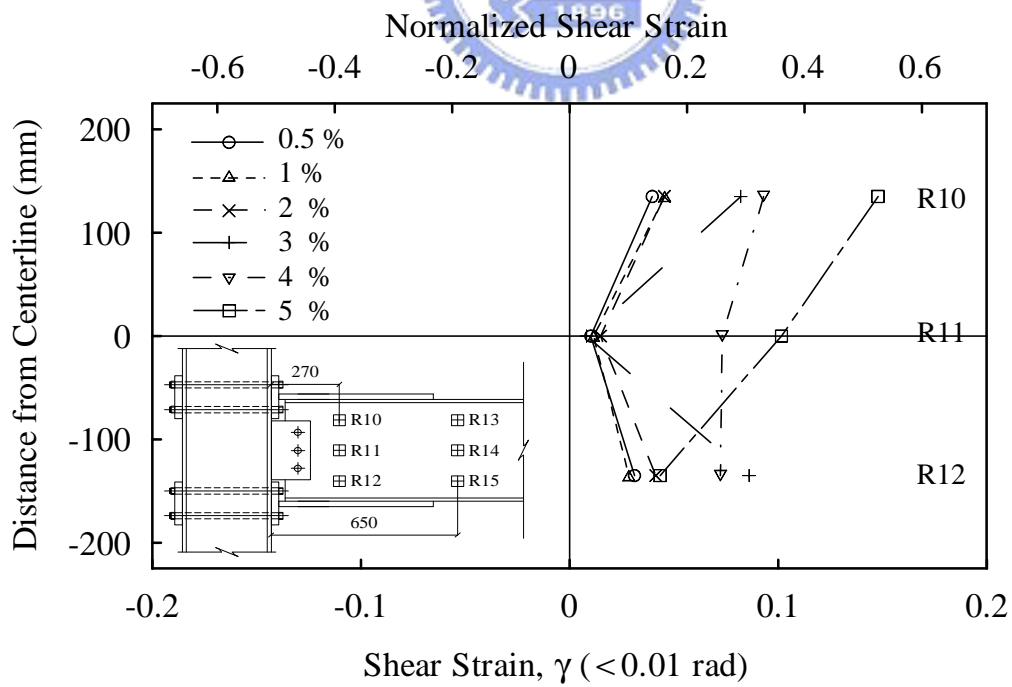


圖 3.70 試體 4 削切蓋板內部之梁腹板剪應變沿梁深之變化

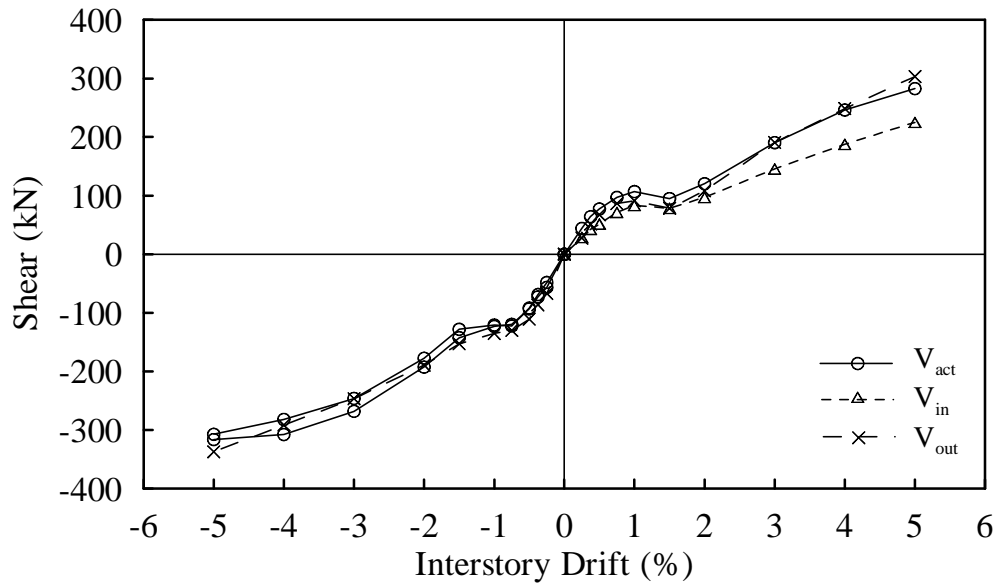
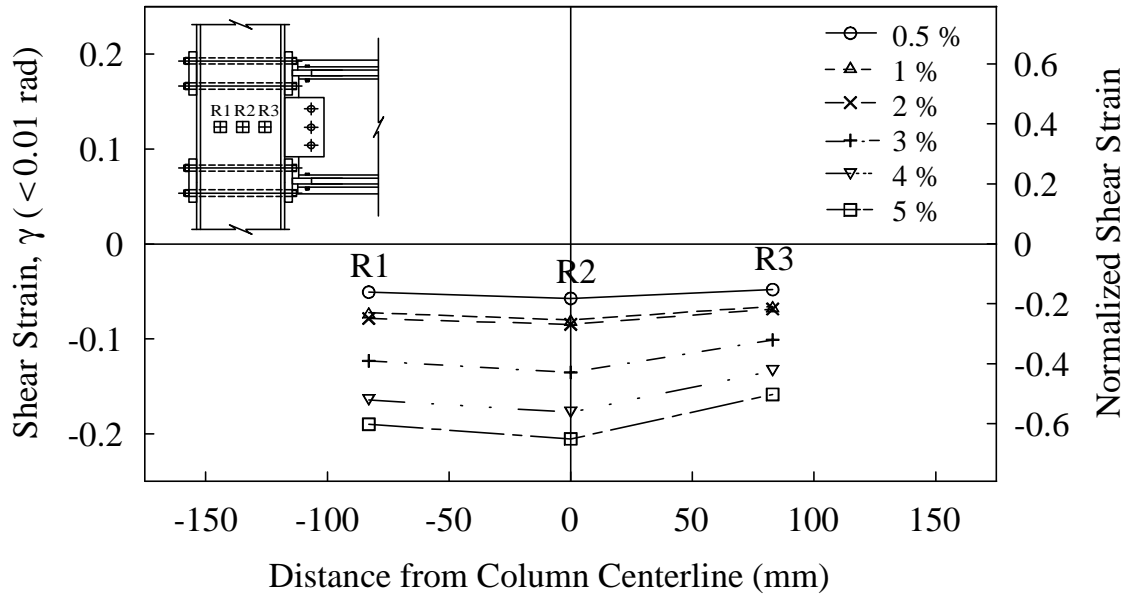
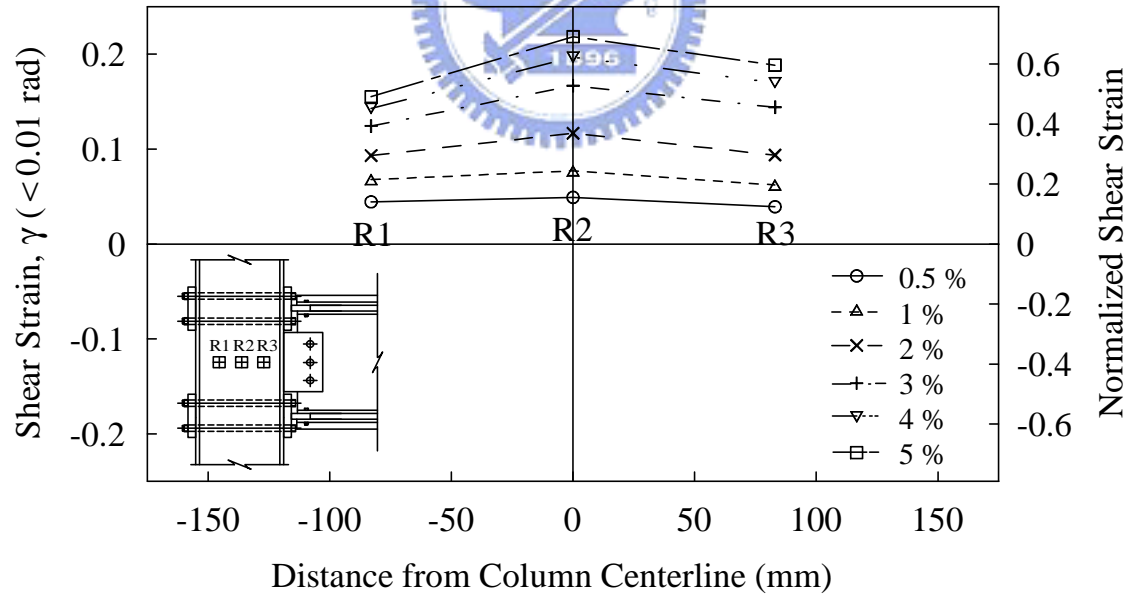


圖 3.71 試體 4 各位移角下之梁腹板剪力比較 (正方向施載)





(a) Positive Bending



(b) Negative Bending

圖 3.72 試體 4 梁柱交會區剪應變沿柱寬度之變化

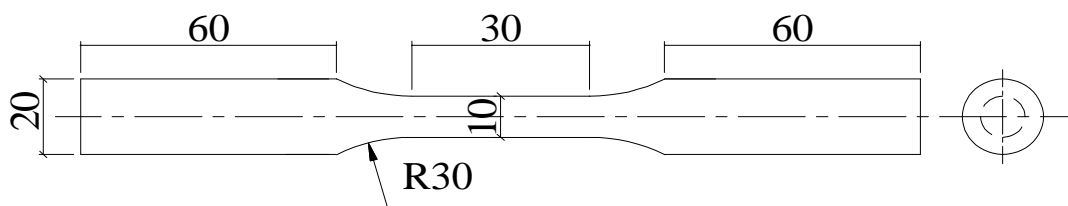


圖 4.1 鋼材反覆載重試片尺寸 (單位：mm)

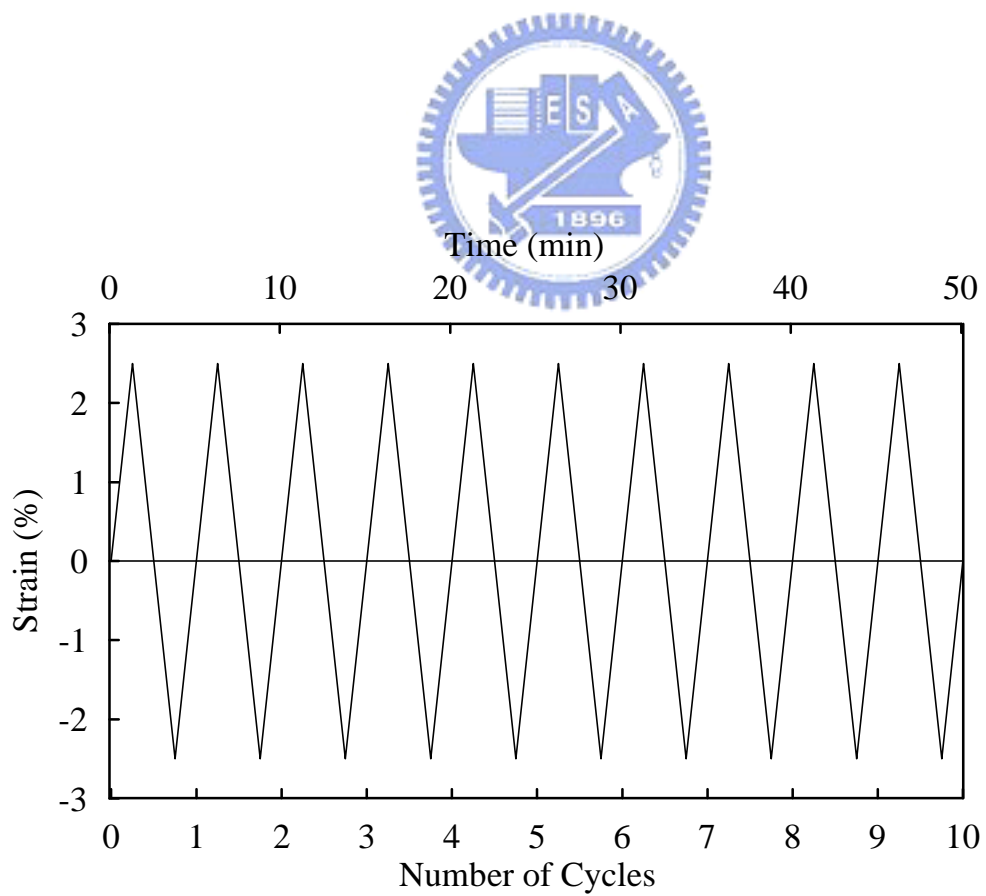
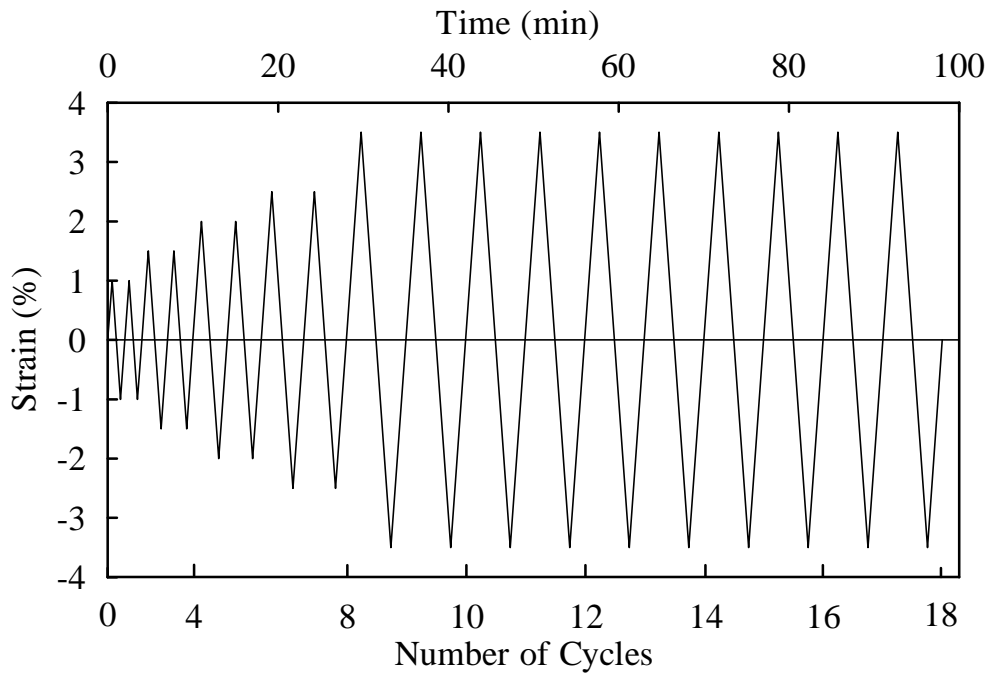
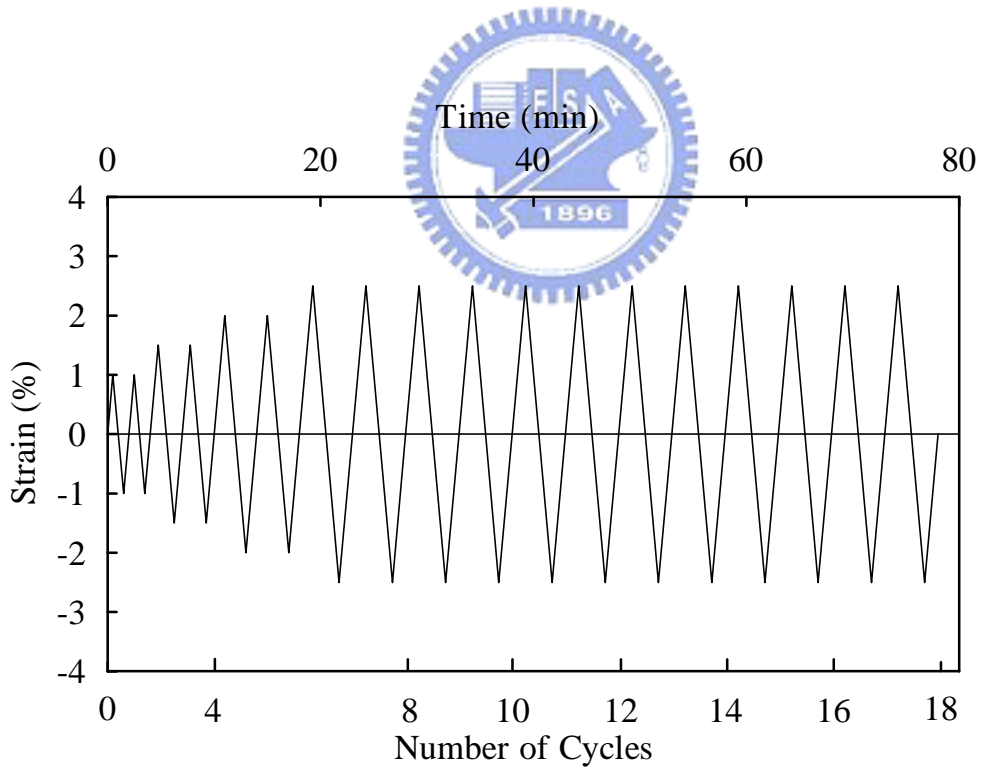


圖 4.2 鋼材反覆載重歷時 (固定應變幅度)



(a) Maximum Strain = 3.5 %



(b) Maximum Strain = 2.5 %

圖 4.3 鋼材反覆載重歷時 (穩定增加應變幅度)

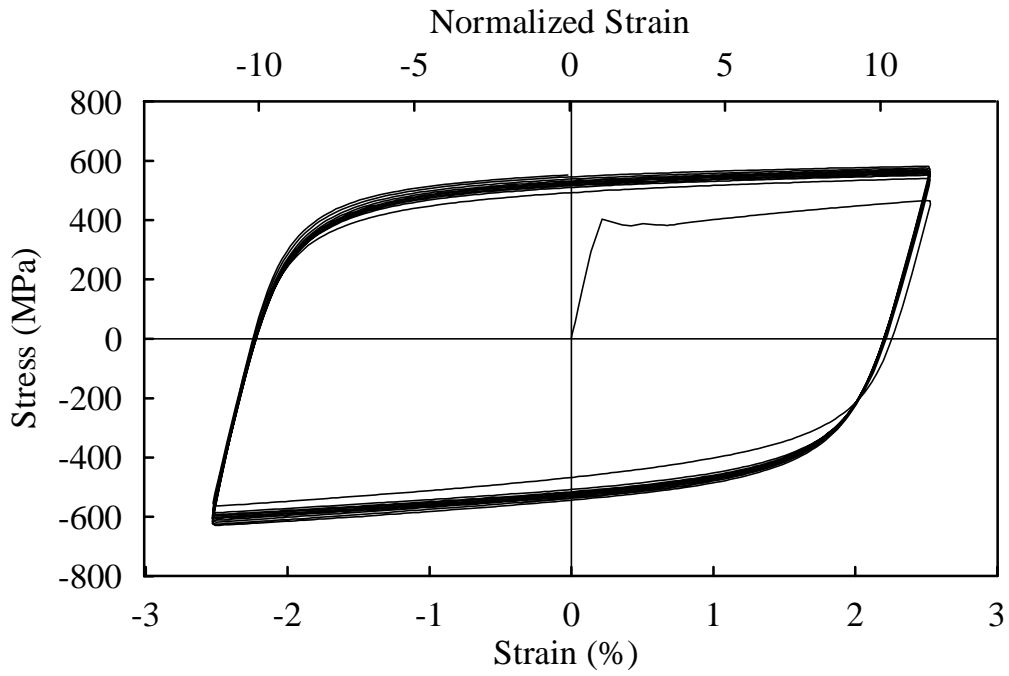


圖 4.4 鋼材反覆載重試片 A1 應力 - 應變曲線

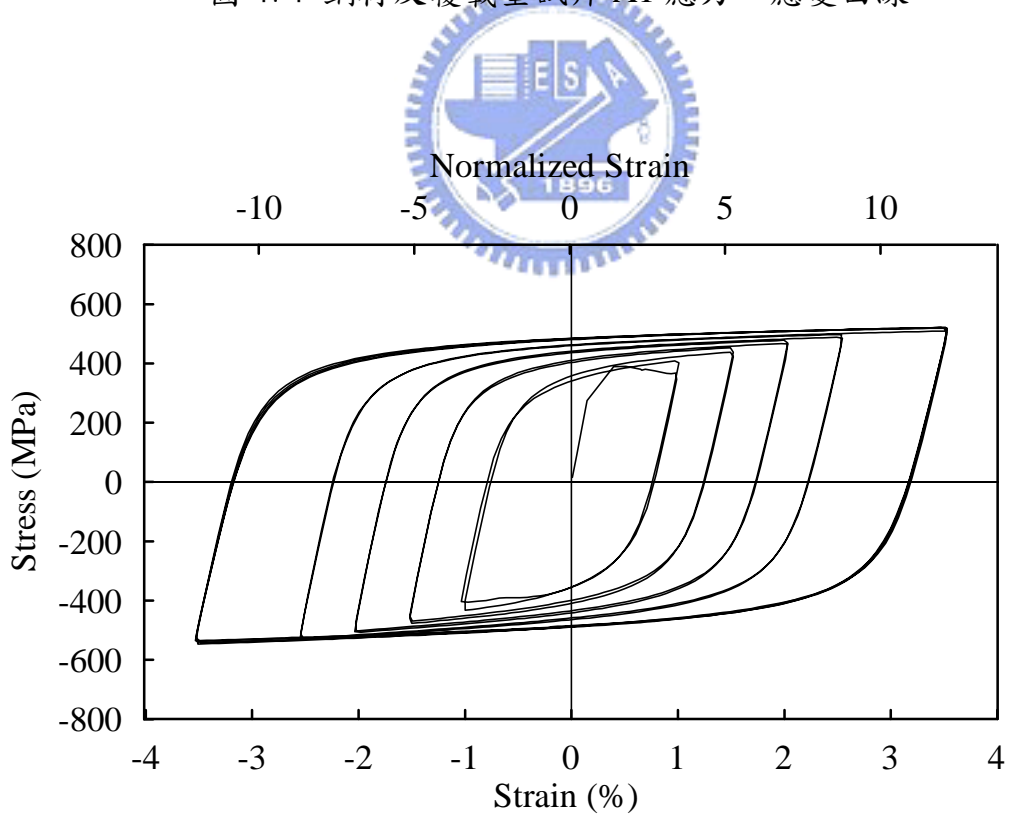


圖 4.5 鋼材反覆載重試片 A2 應力 - 應變曲線

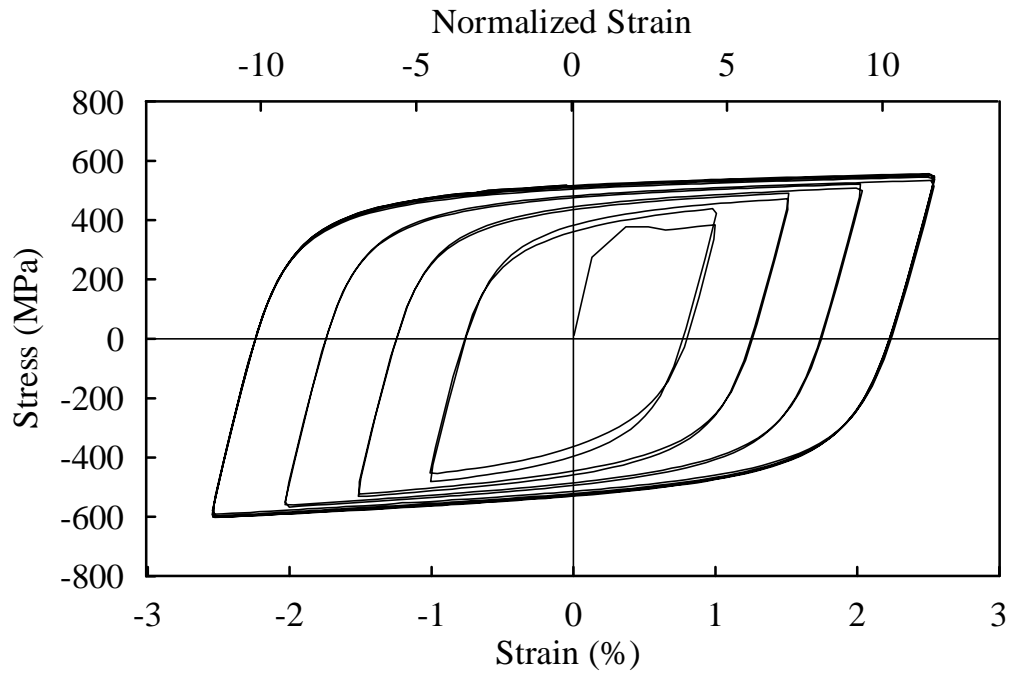


圖 4.6 鋼材反覆載重試片 A3 應力 - 應變曲線

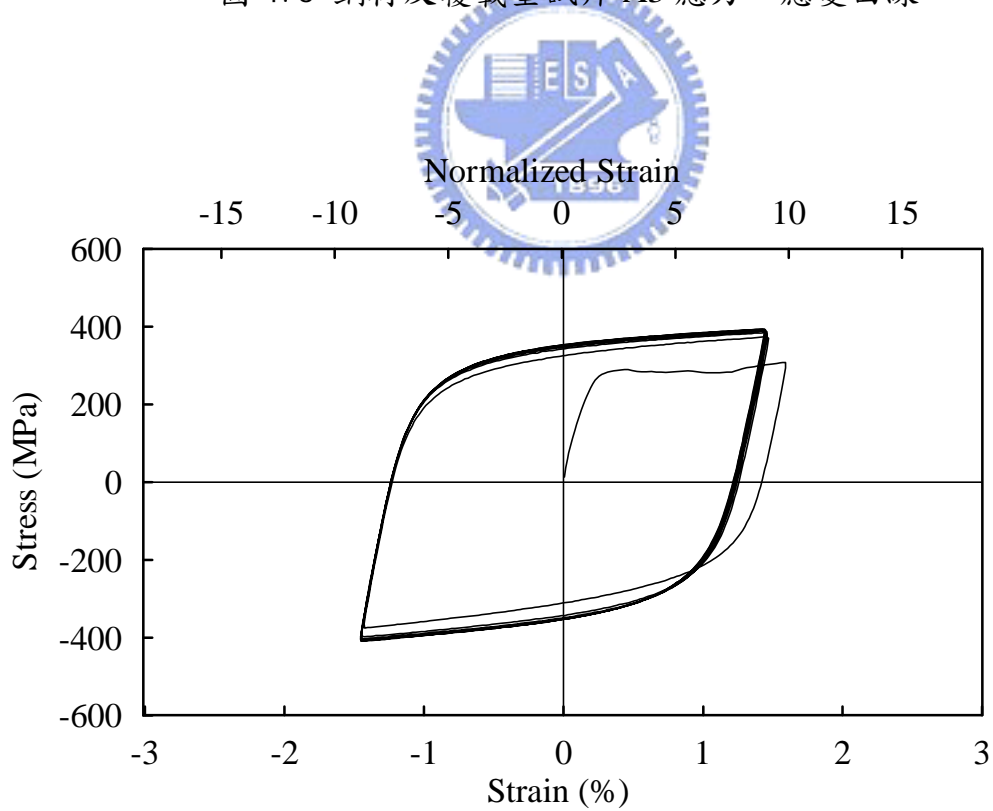


圖 4.7 鋼材反覆載重試片 B1 應力 - 應變曲線

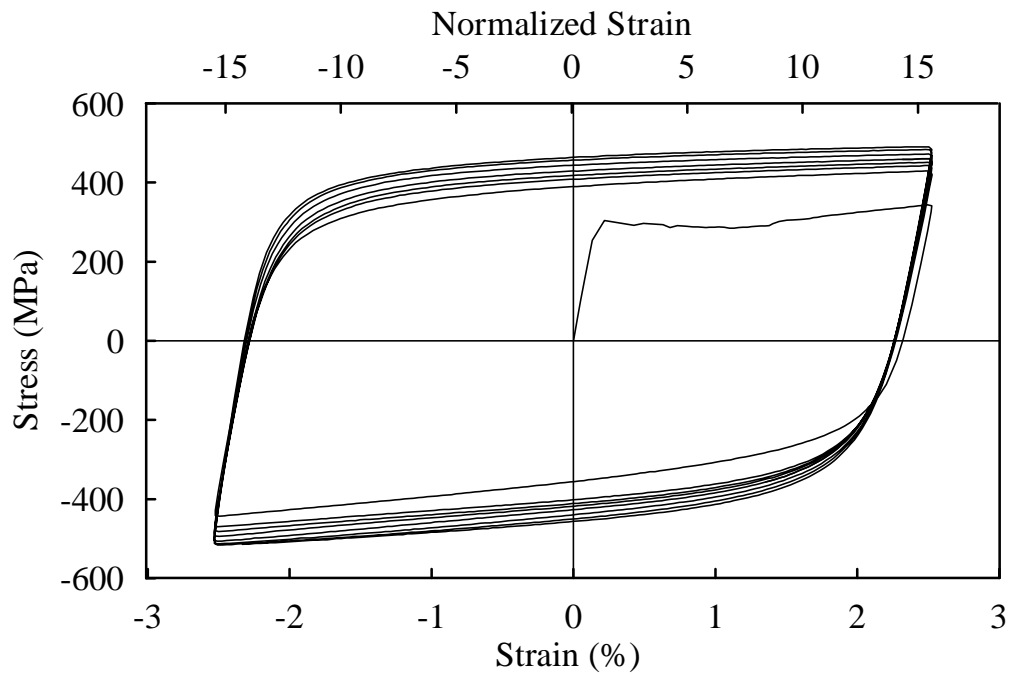


圖 4.8 鋼材反覆載重試片 B2 應力 - 應變曲線

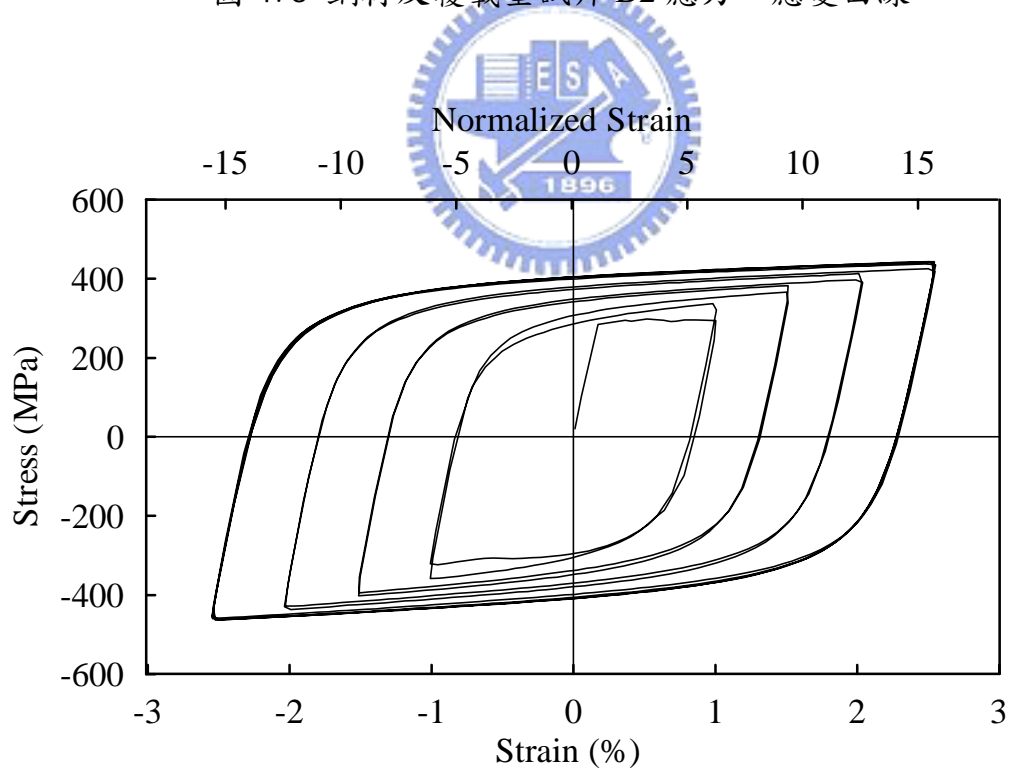


圖 4.9 鋼材反覆載重試片 B3 應力 - 應變曲線

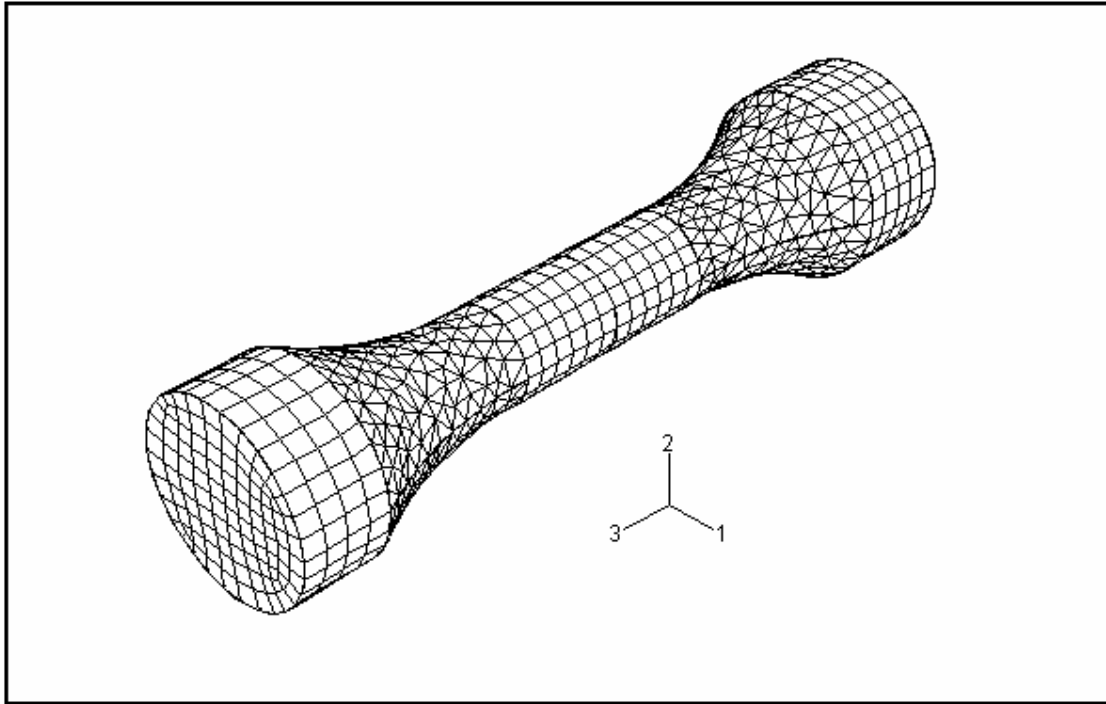


圖 4.10 有限元素材料模型之建立



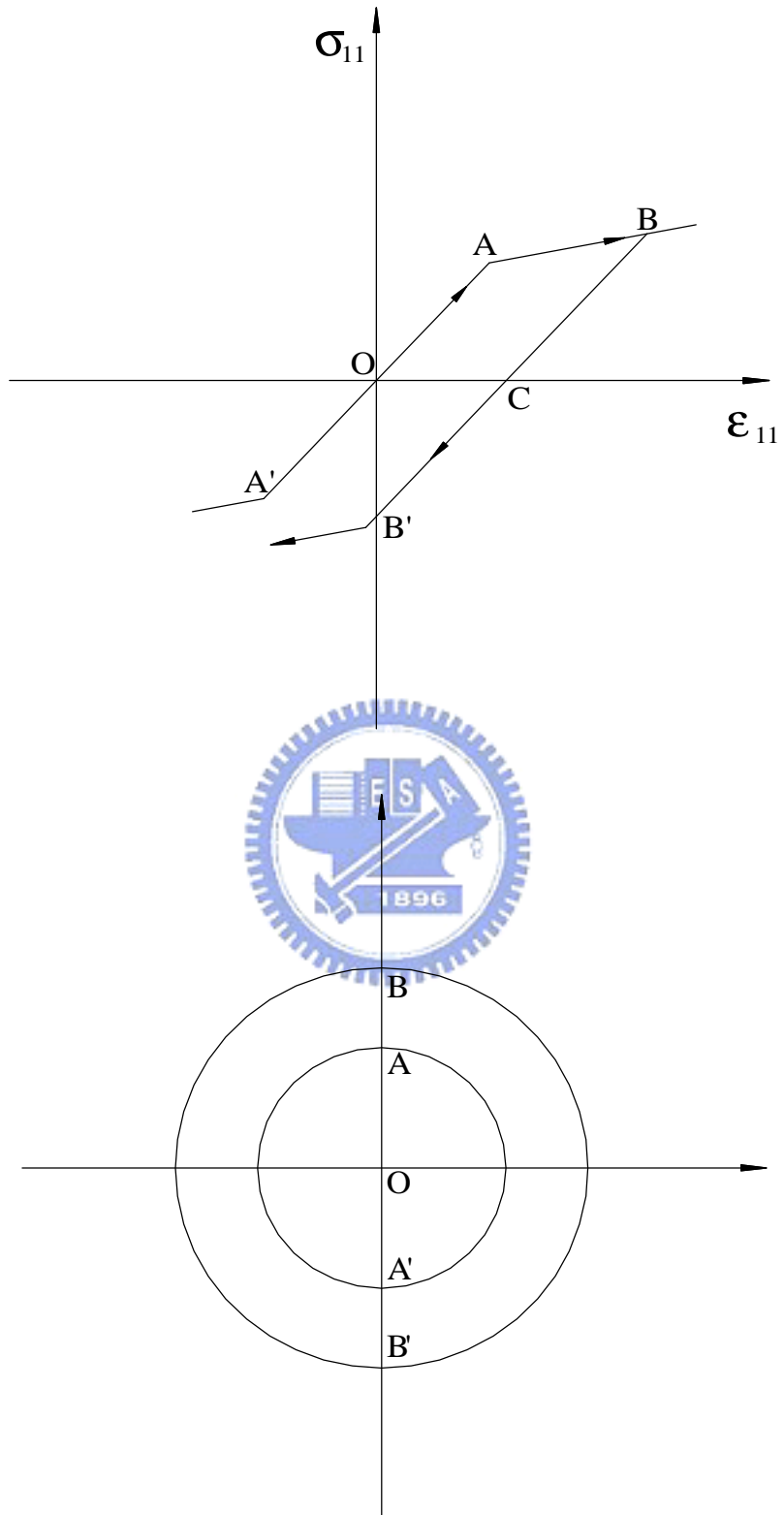


圖 4.11 等向硬化規則

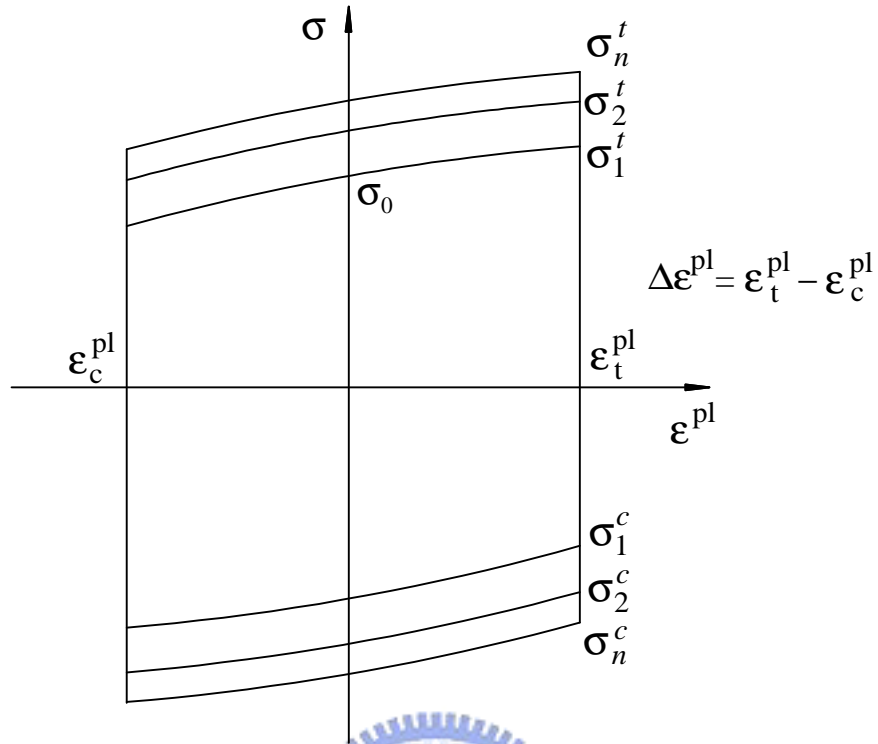


圖 4.12 等向硬化參數示意圖

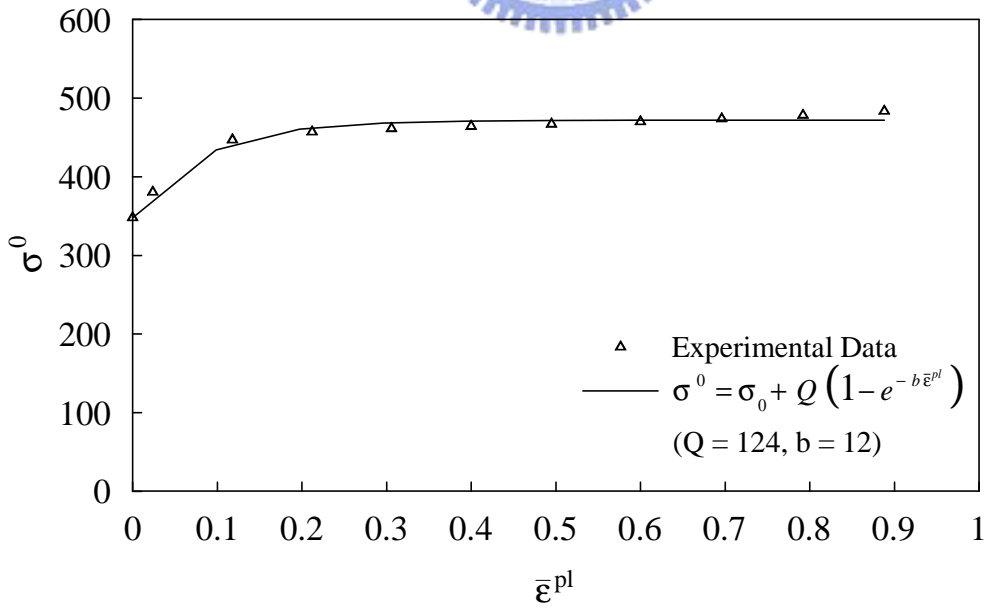


圖 4.13 試片 A1 應變等向硬化參數迴歸結果

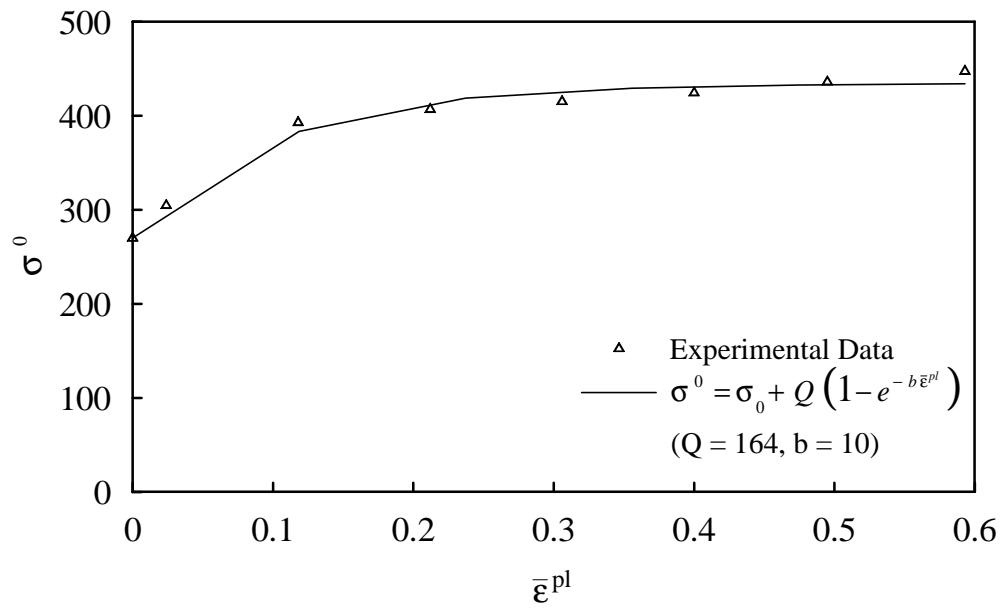


圖 4.14 試片 B2 應變等向硬化參數迴歸結果



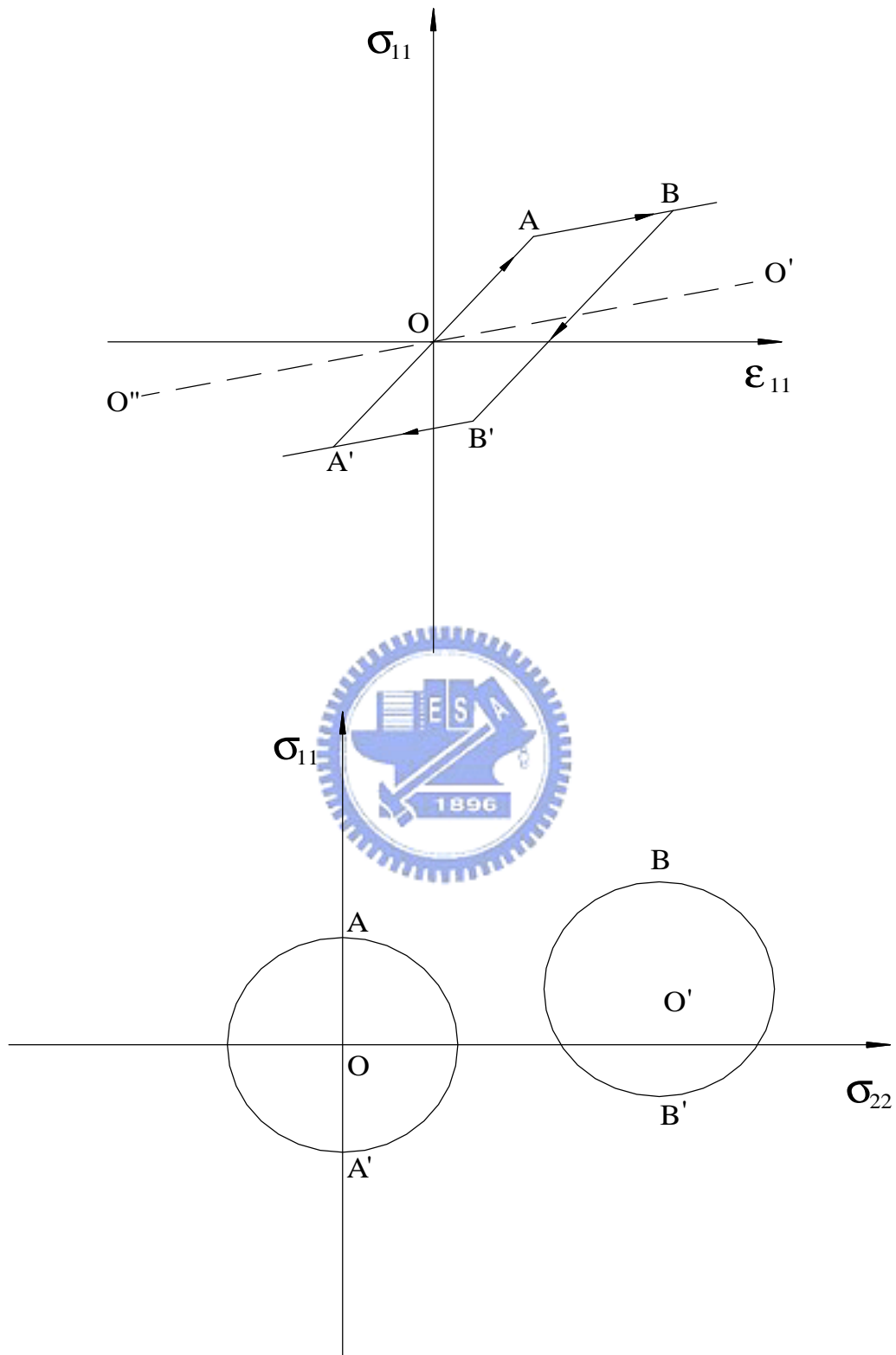


圖 4.15 走動硬化規則

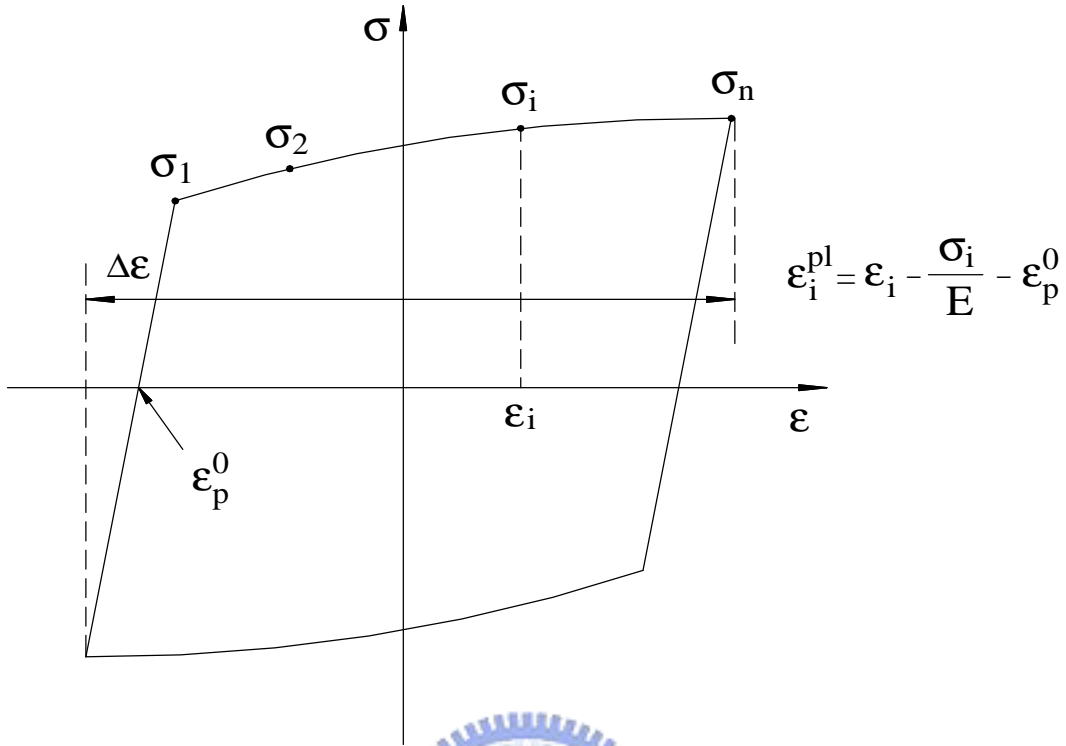


圖 4.16 走動硬化參數示意圖

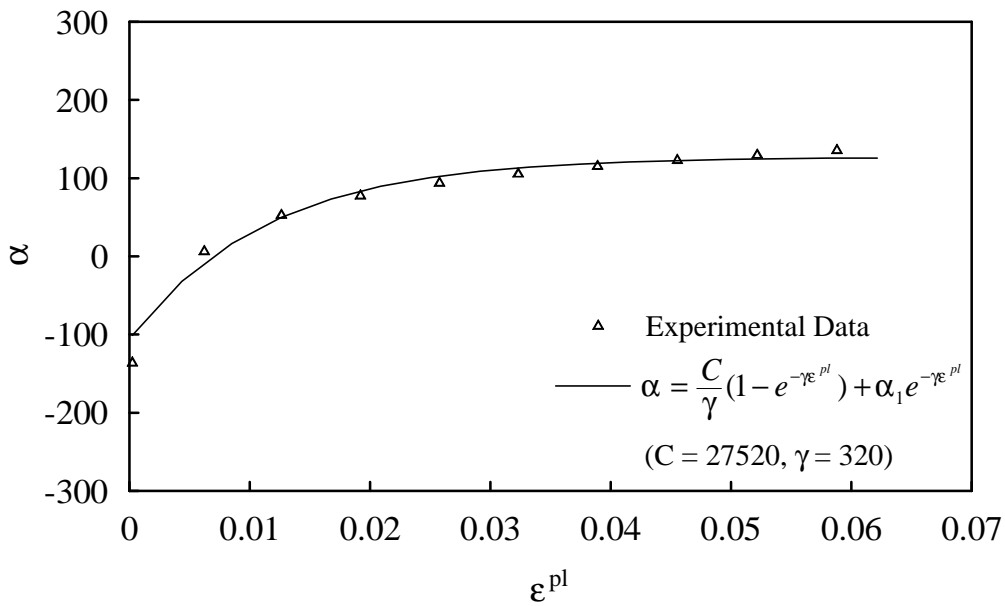


圖 4.17 試片 A2 應變走動硬化參數迴歸結果

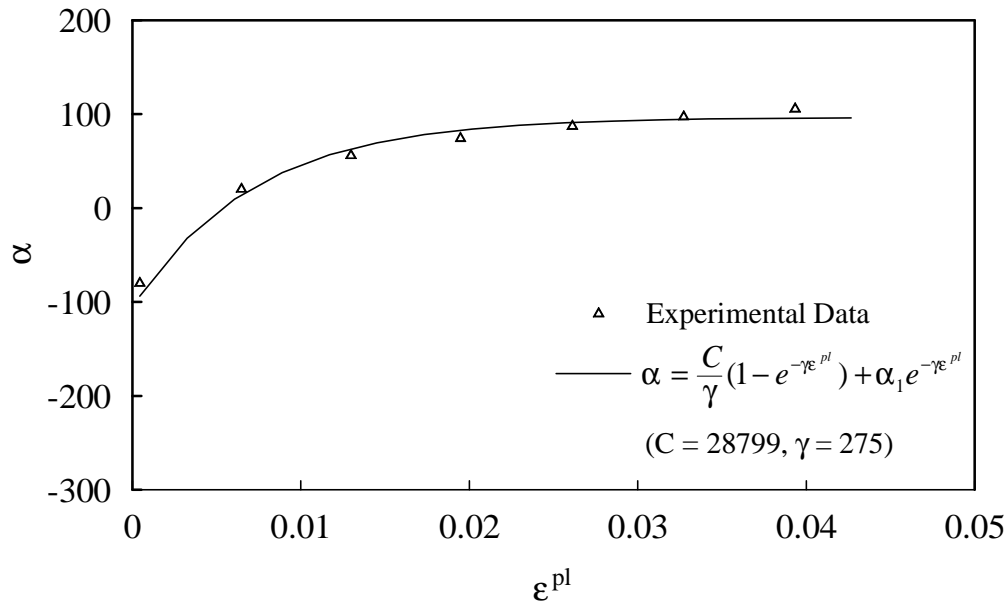


圖 4.18 試片 A3 走動硬化參數迴歸結果

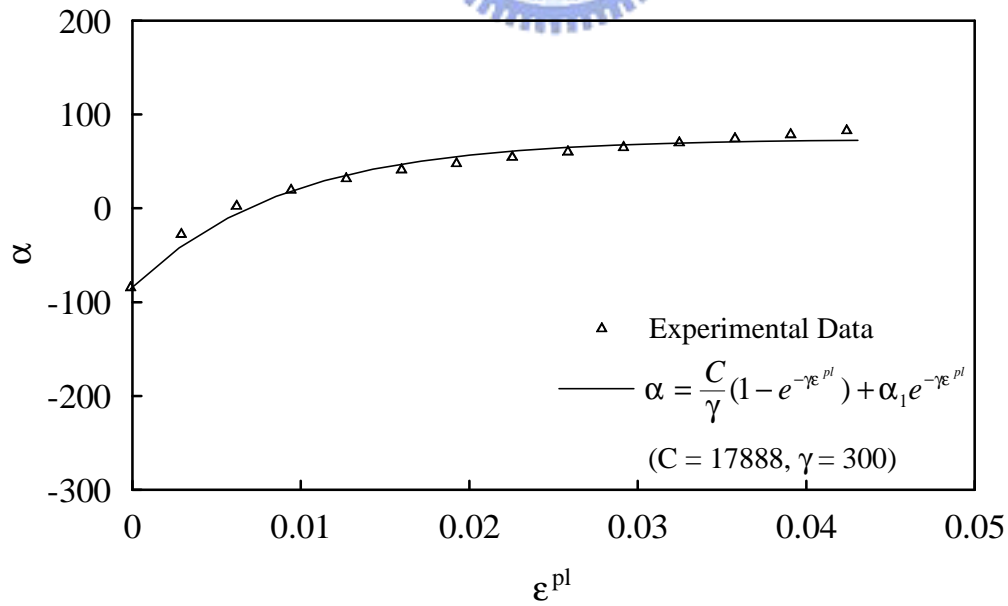


圖 4.19 試片 B3 走動硬化參數迴歸結果

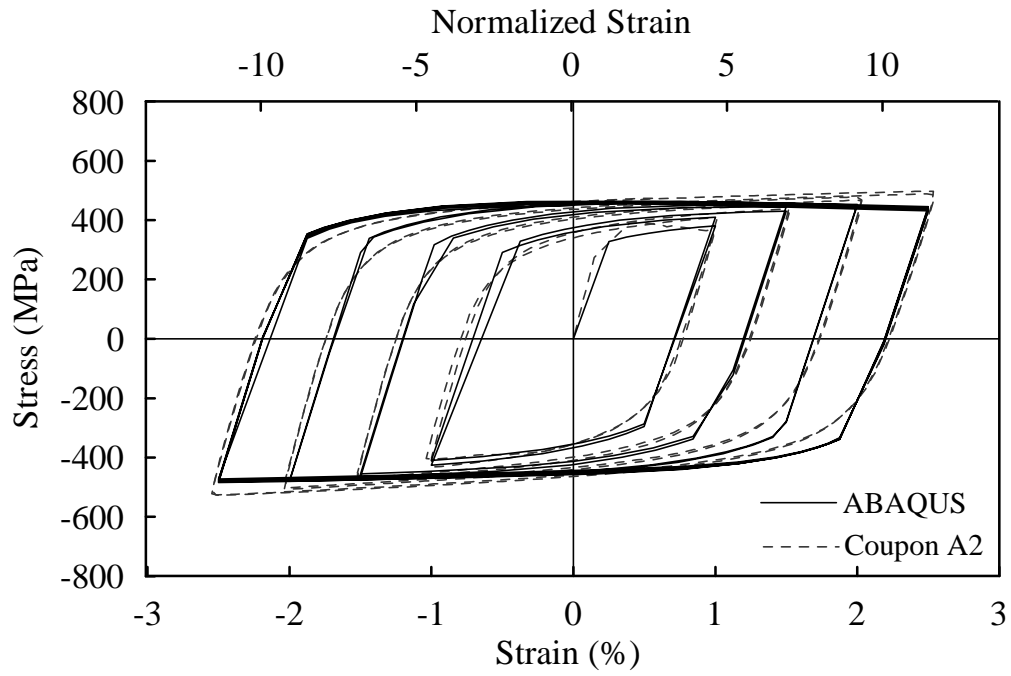


圖 4.20 試片 A2 有限元素模擬結果

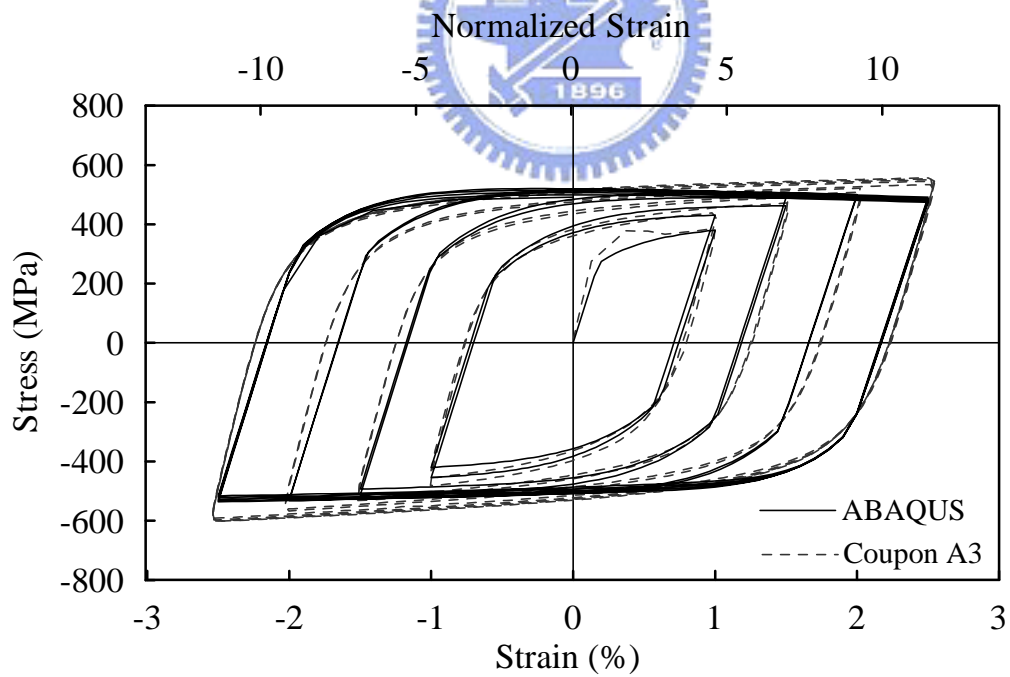


圖 4.21 試片 A3 有限元素模擬結果

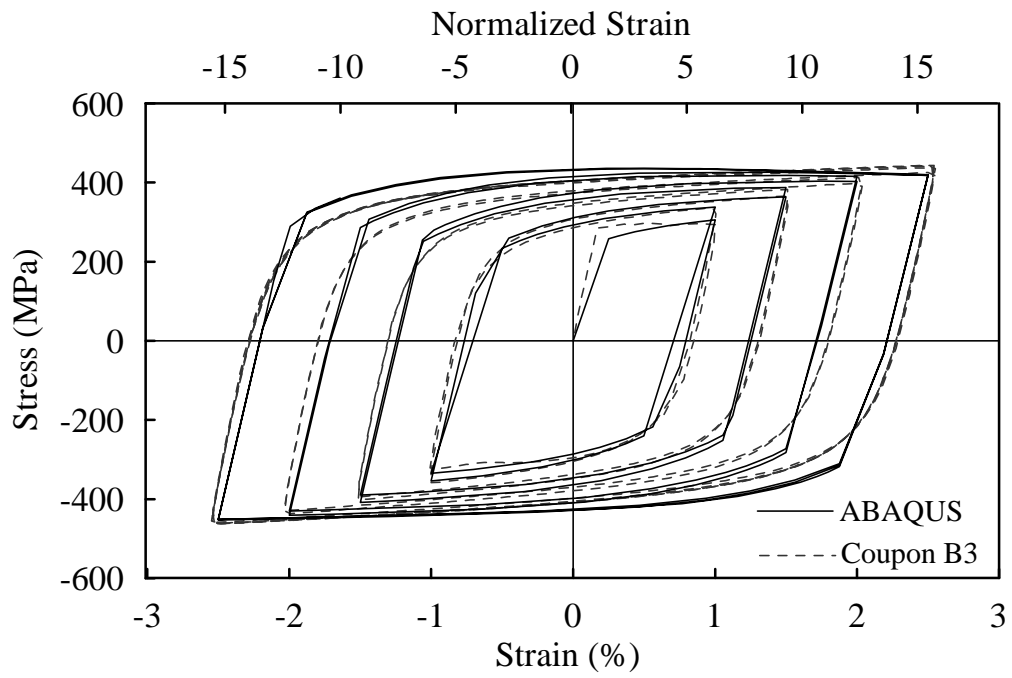
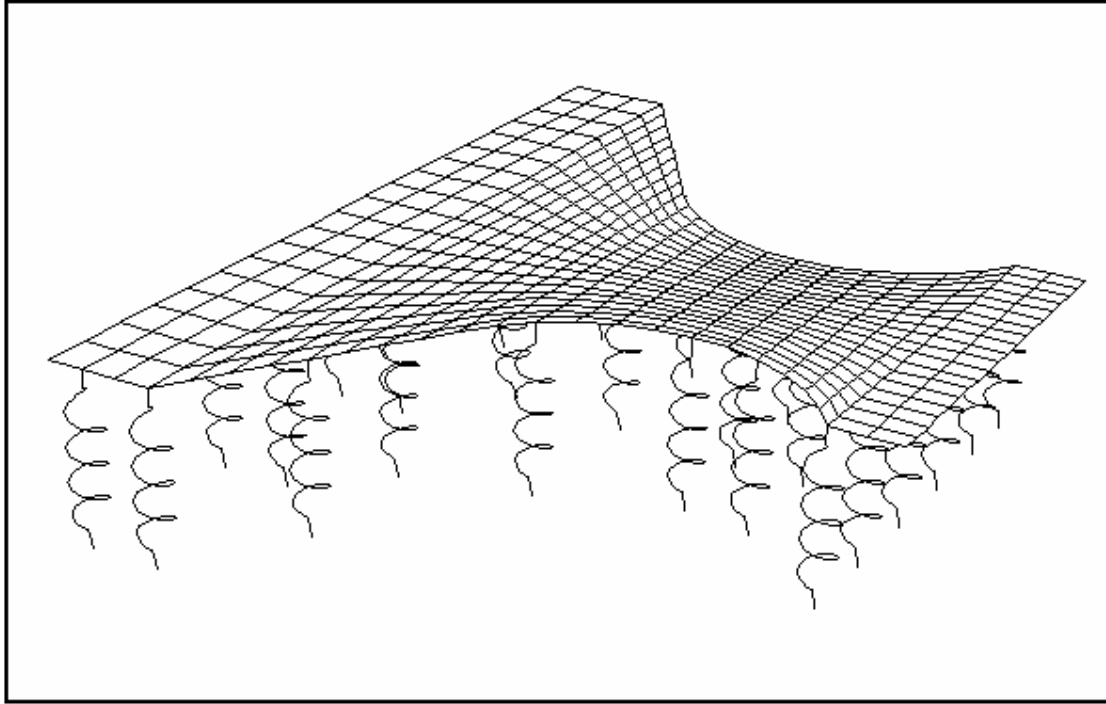
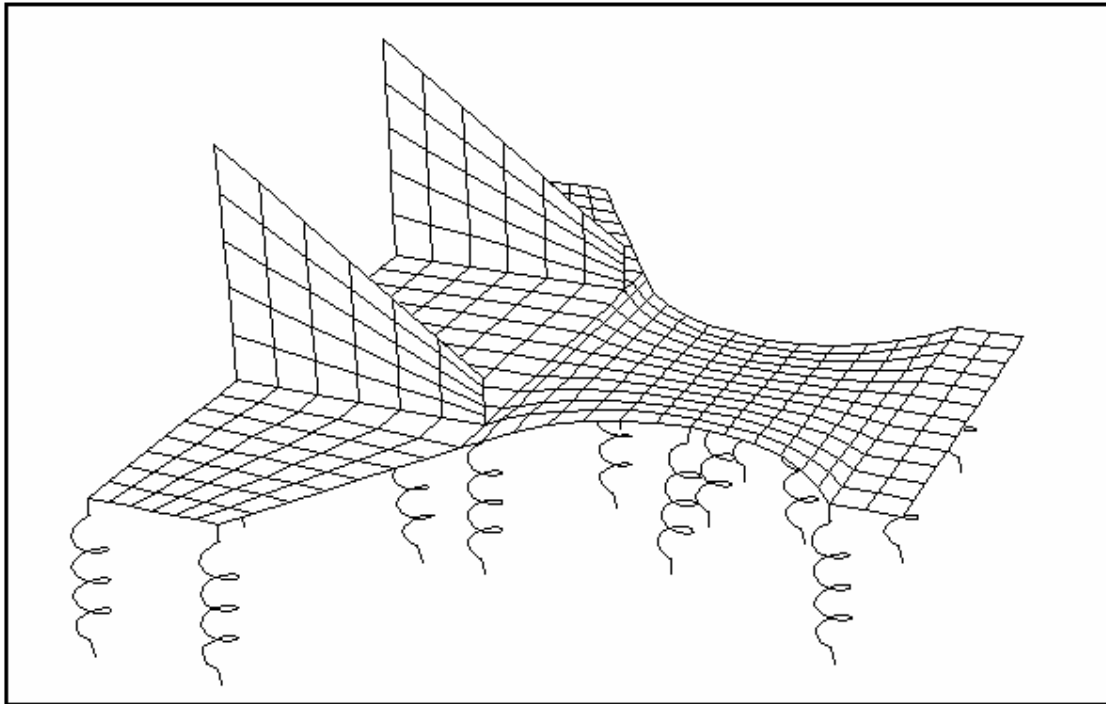


圖 4.22 試片 B3 有限元素模擬結果





(a) Specimen 2 RFP Model (without stiffeners)



(b) Specimen 2 RFP Model

圖 4.23 削切蓋板分析模型網格分佈

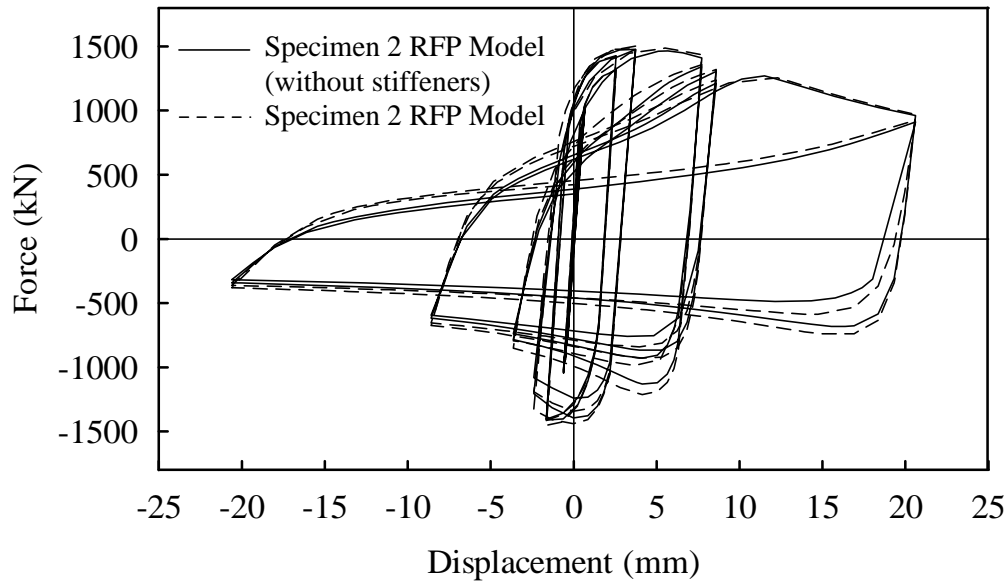


圖 4.24 削切蓋板分析模型在反覆載重下力量與位移關係比較

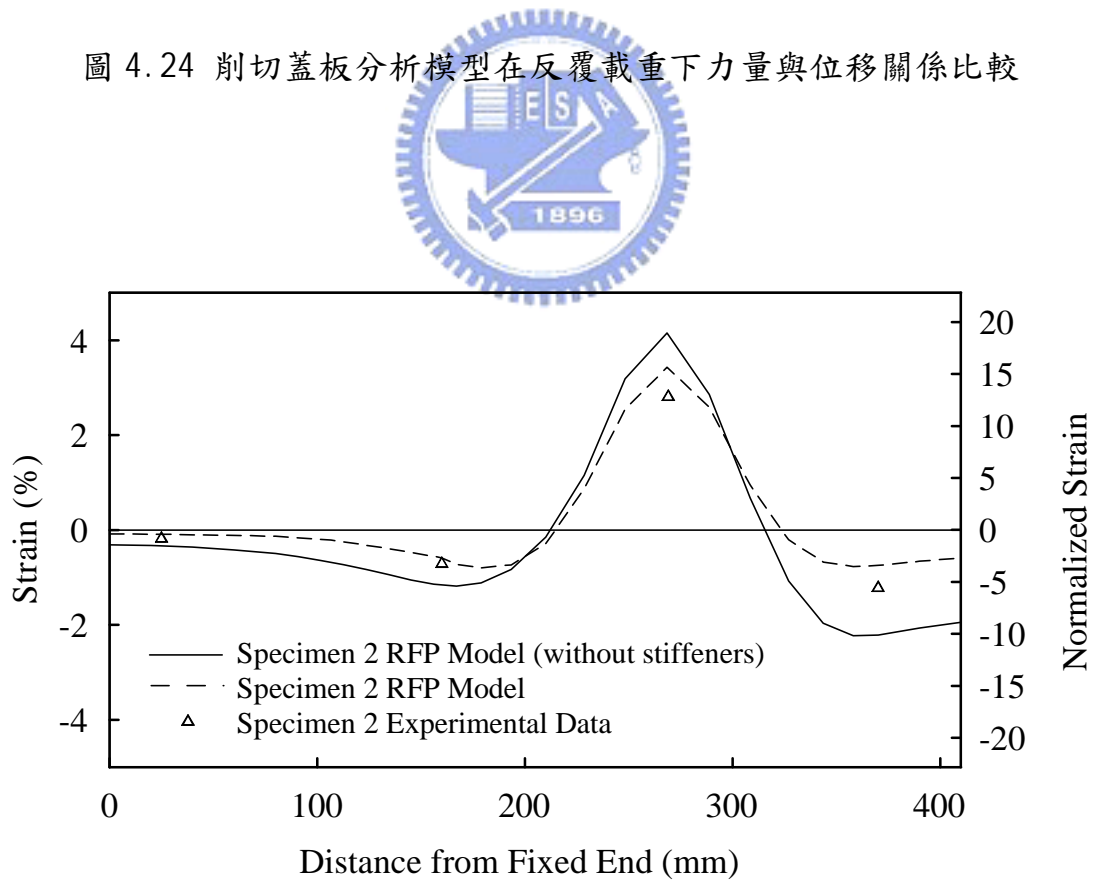


圖 4.25 削切蓋板分析模型挫屈時應變沿削切蓋板軸向分佈

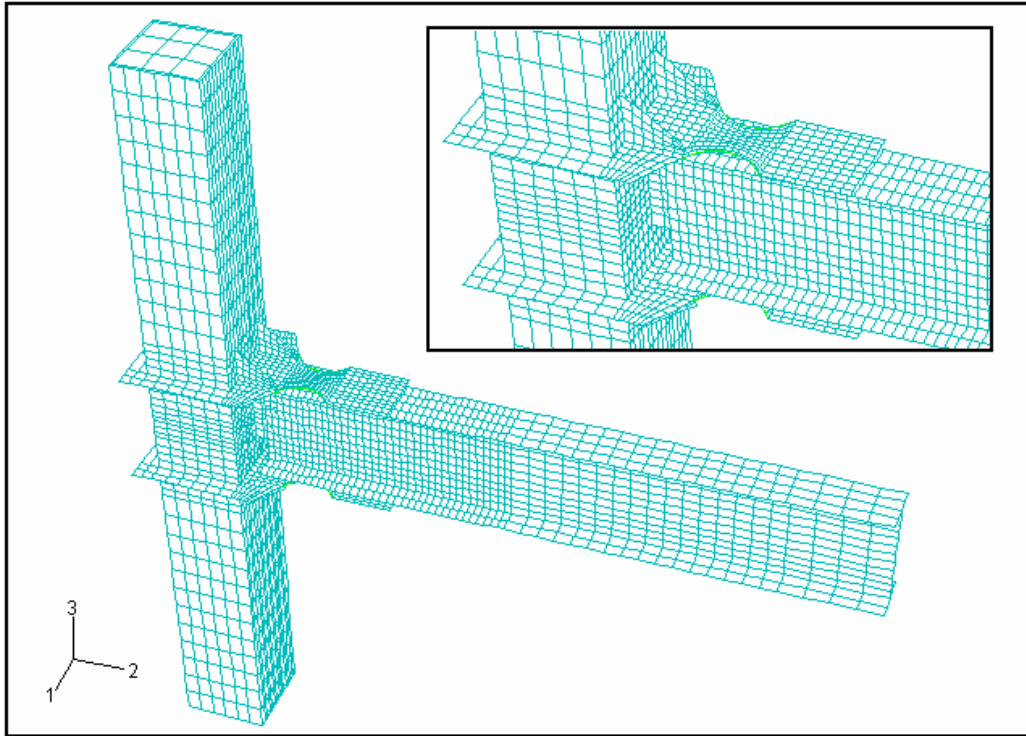


圖 4.26 試體 2 結構模型網格分佈

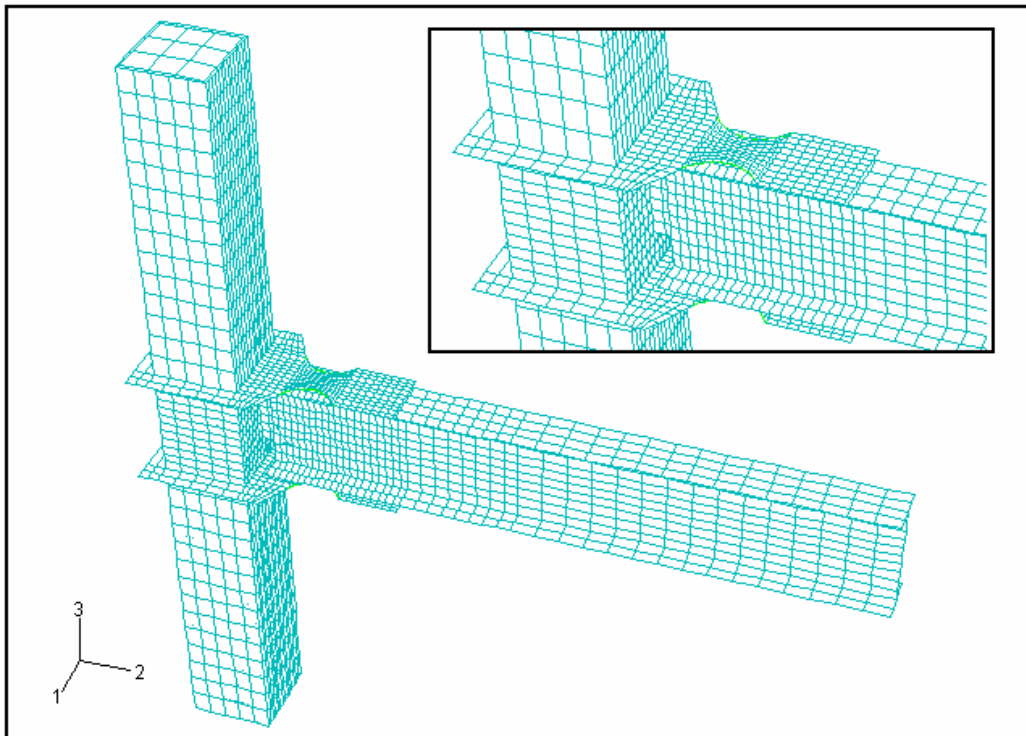


圖 4.27 無加勁板之試體 2 結構模型網格分佈

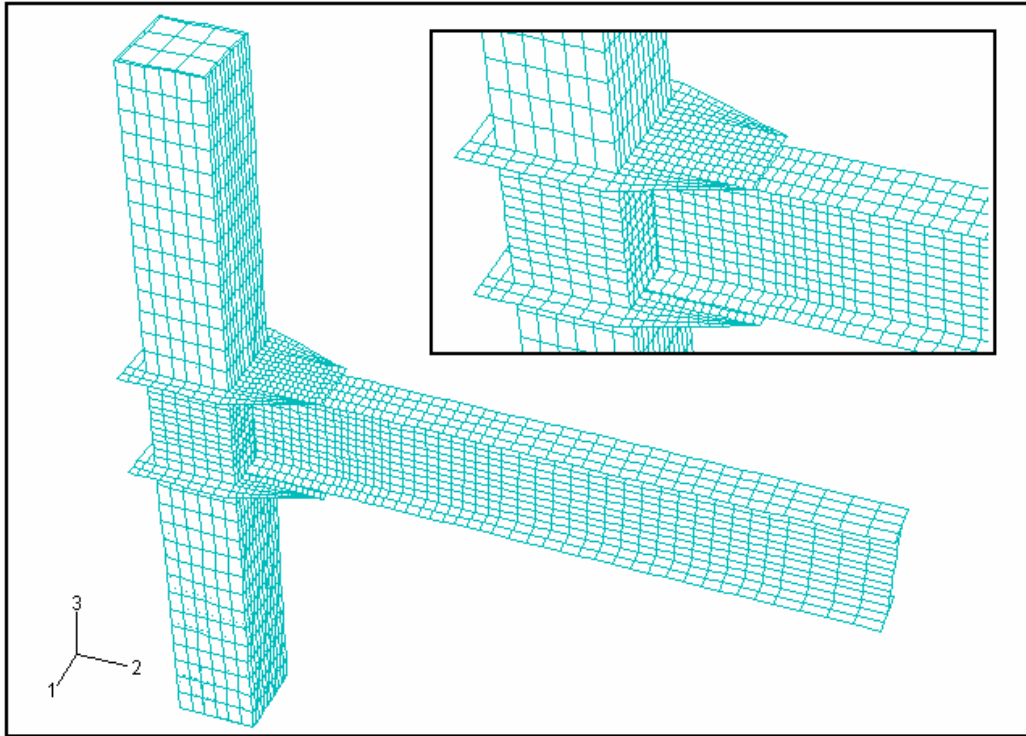


圖 4.28 蓋板梁柱接頭結構模型網格分佈

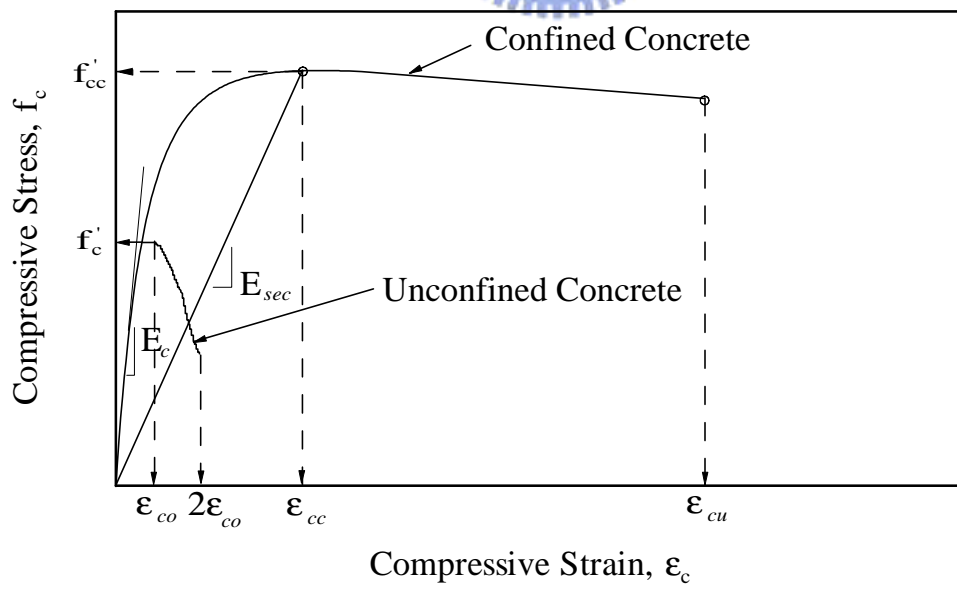


圖 4.29 Mander 混凝土應力 - 應變模型

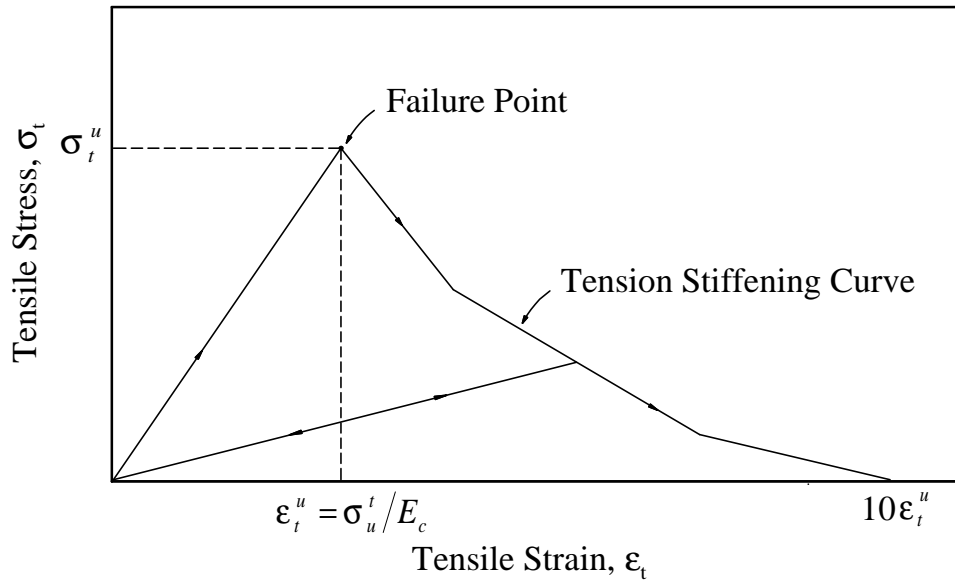
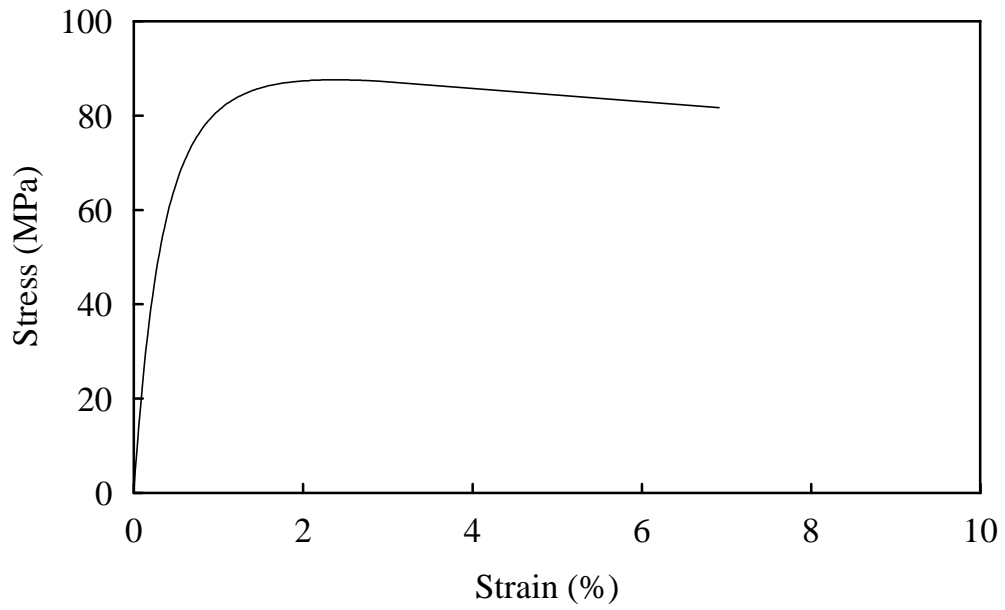
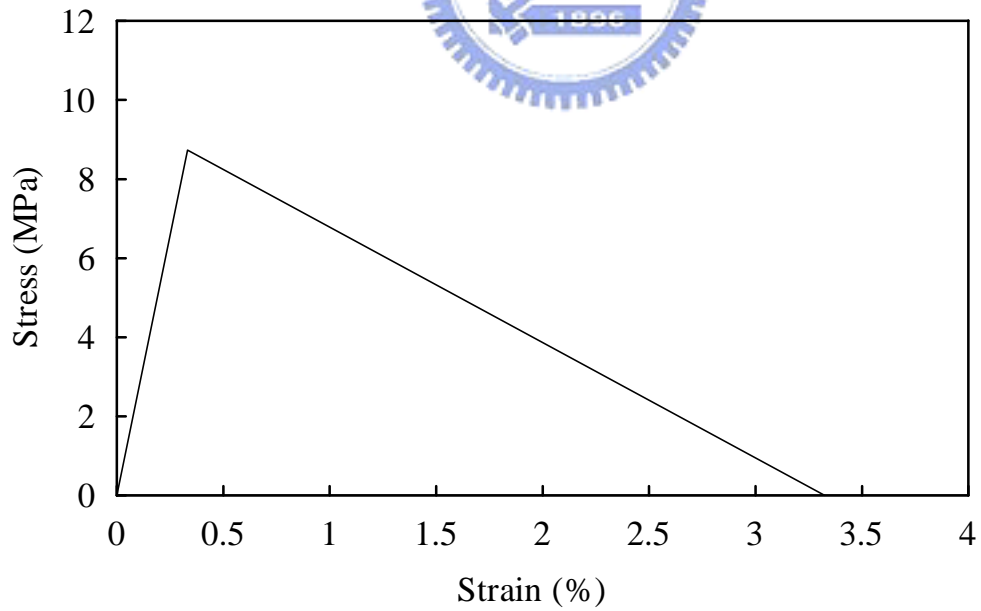


圖 4.30 混凝土之張力勁度模型





(a) Compression



(b) Tension

圖 4.31 模型中混凝土受壓及受拉之應力與應變關係



圖 4.32 硬性接觸的接觸壓力與間隙關係

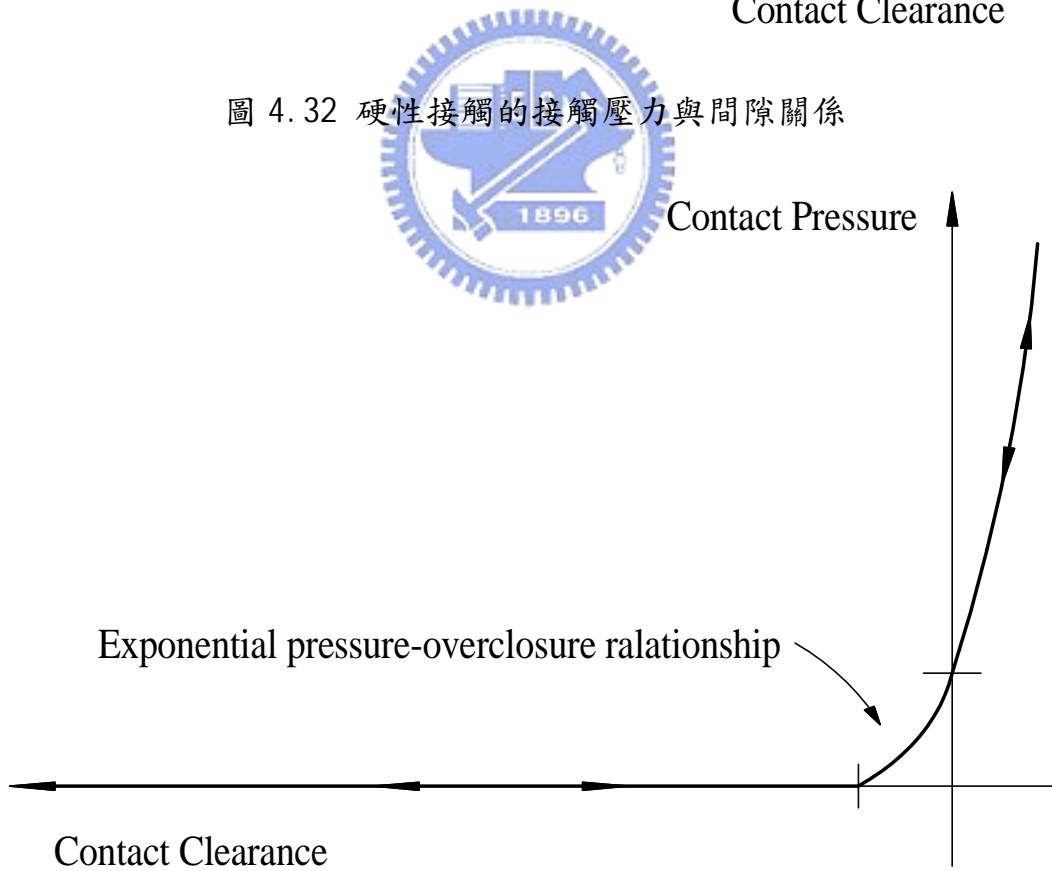


圖 4.33 軟性接觸的接觸壓力與間隙關係

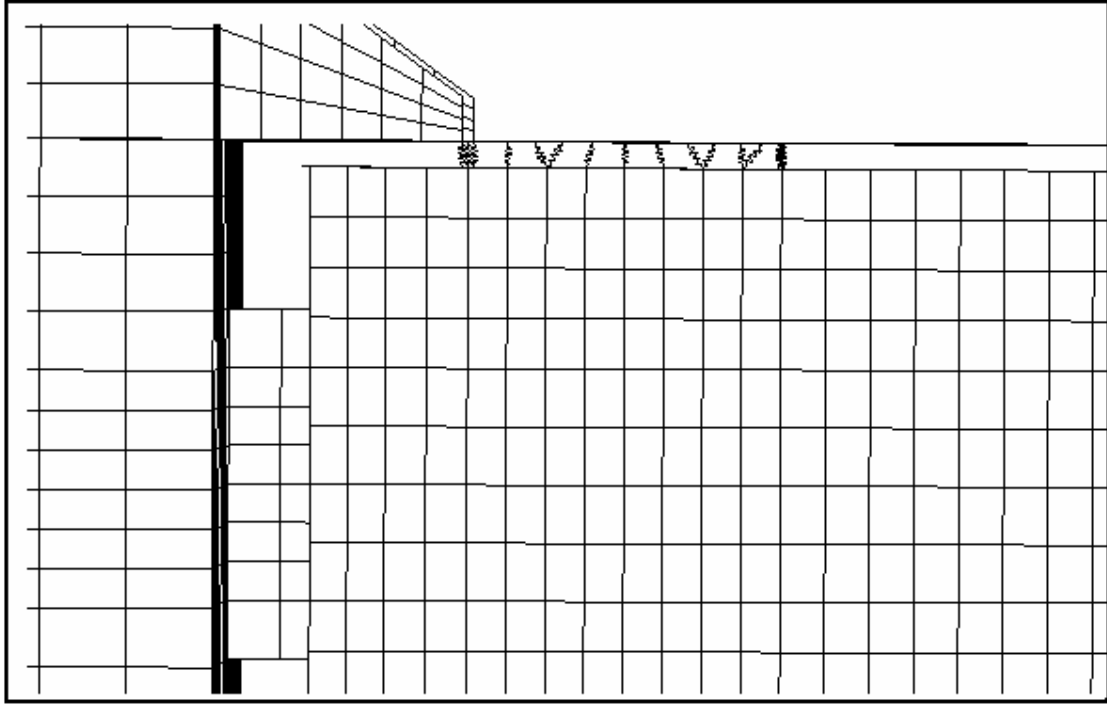
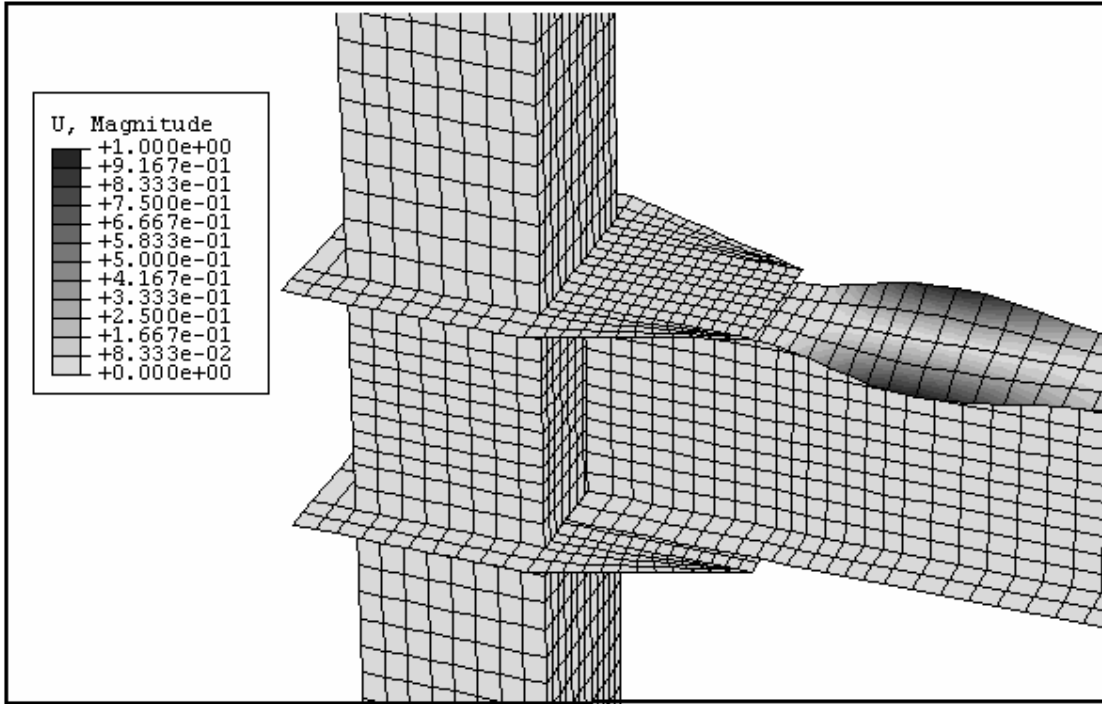
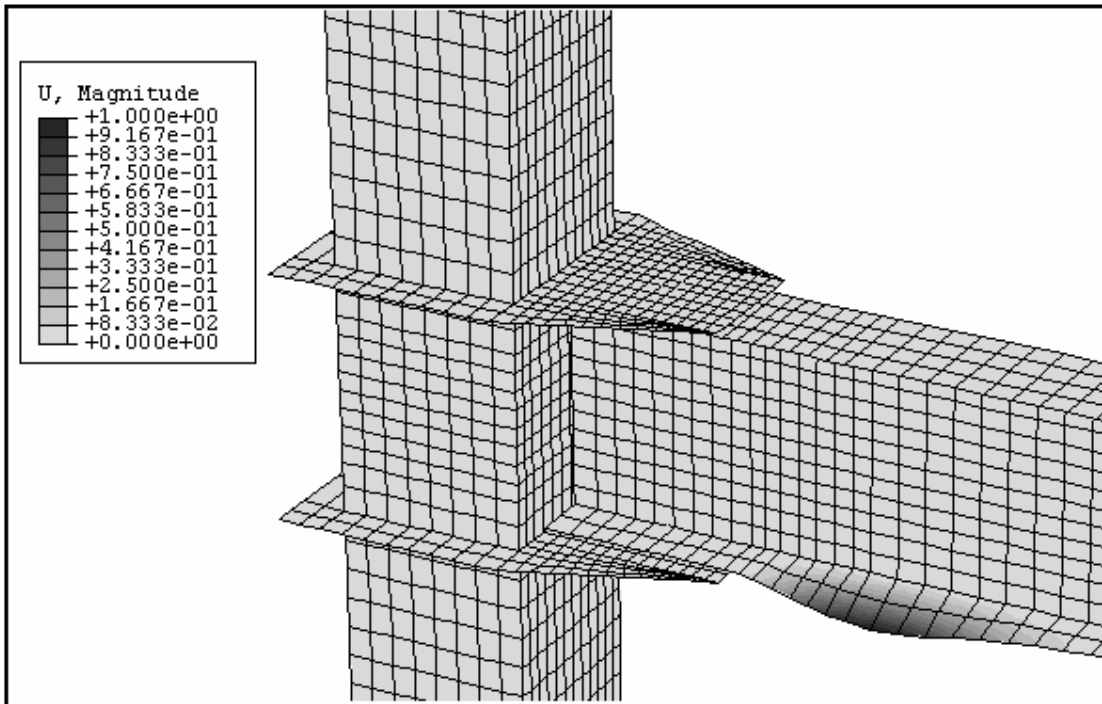


圖 4.34 試體 2 分析模型彈簧設置情形





(a) Top Beam Flange Buckling



(b) Bottom Flange Buckling

圖 4.35 盖板梁柱接頭分析模型翼板挫屈模態

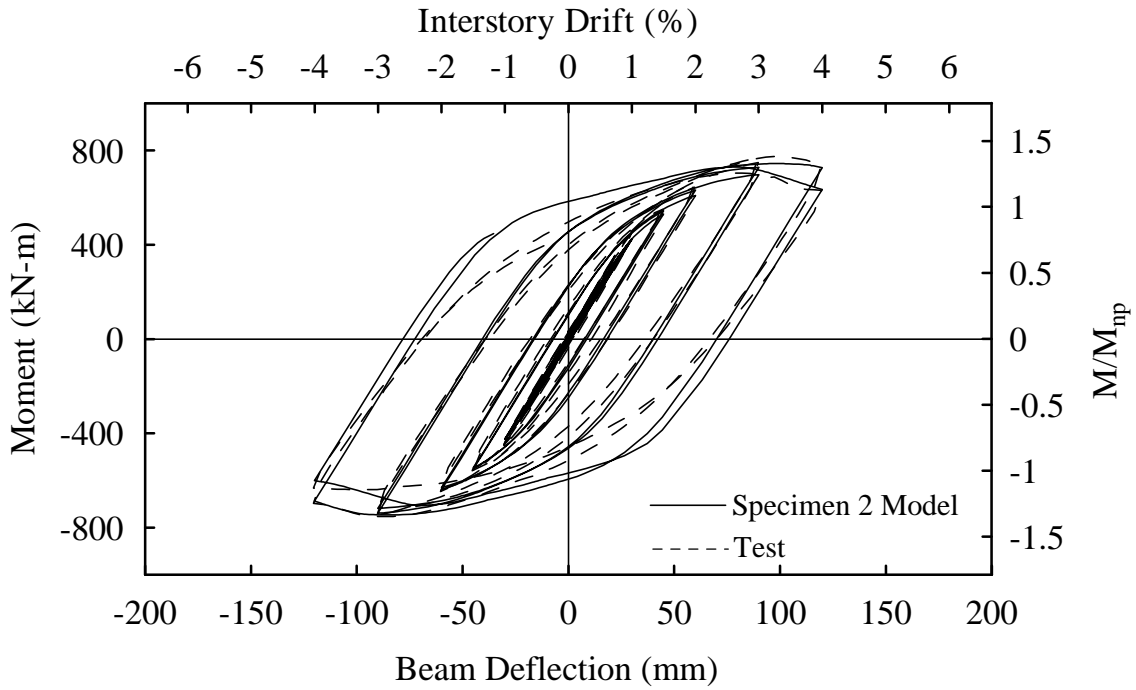


圖 4.36 試體 2 分析模型之遲滯迴圈與實驗值比較

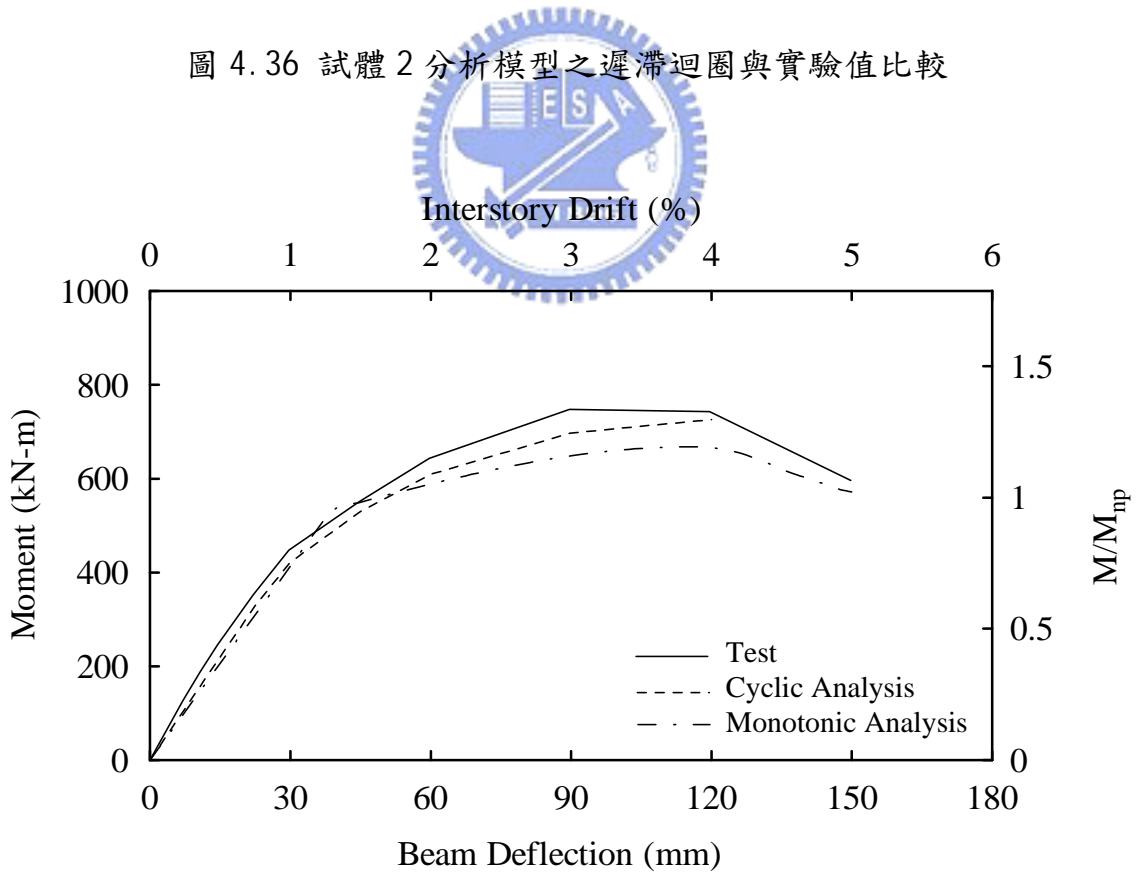
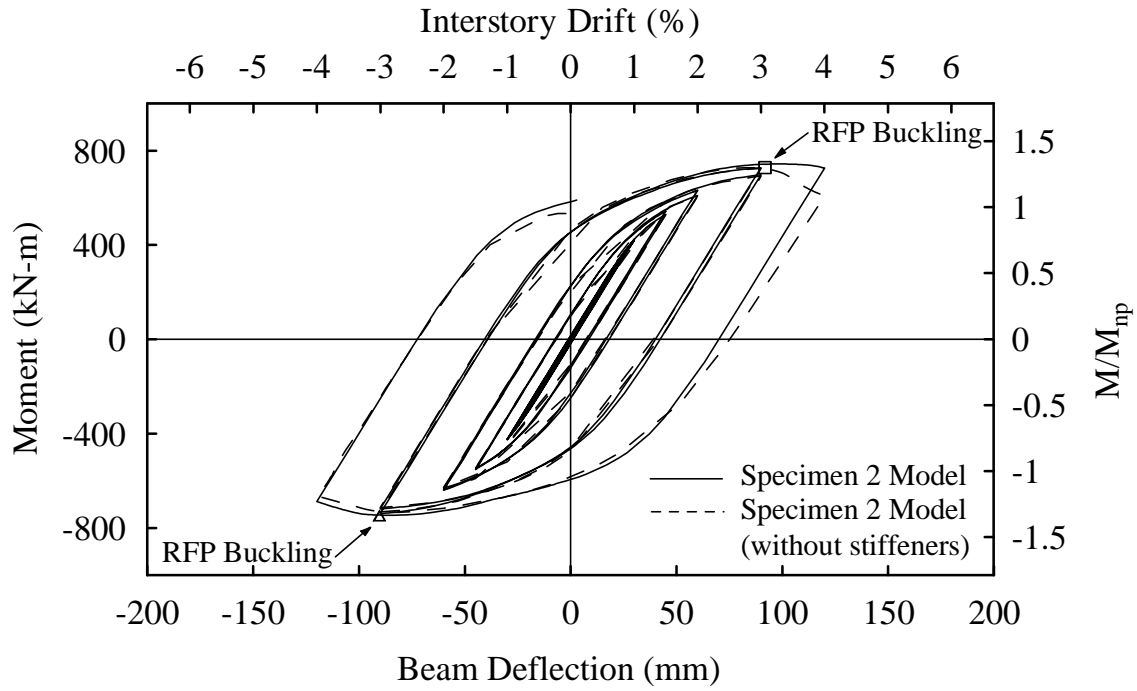
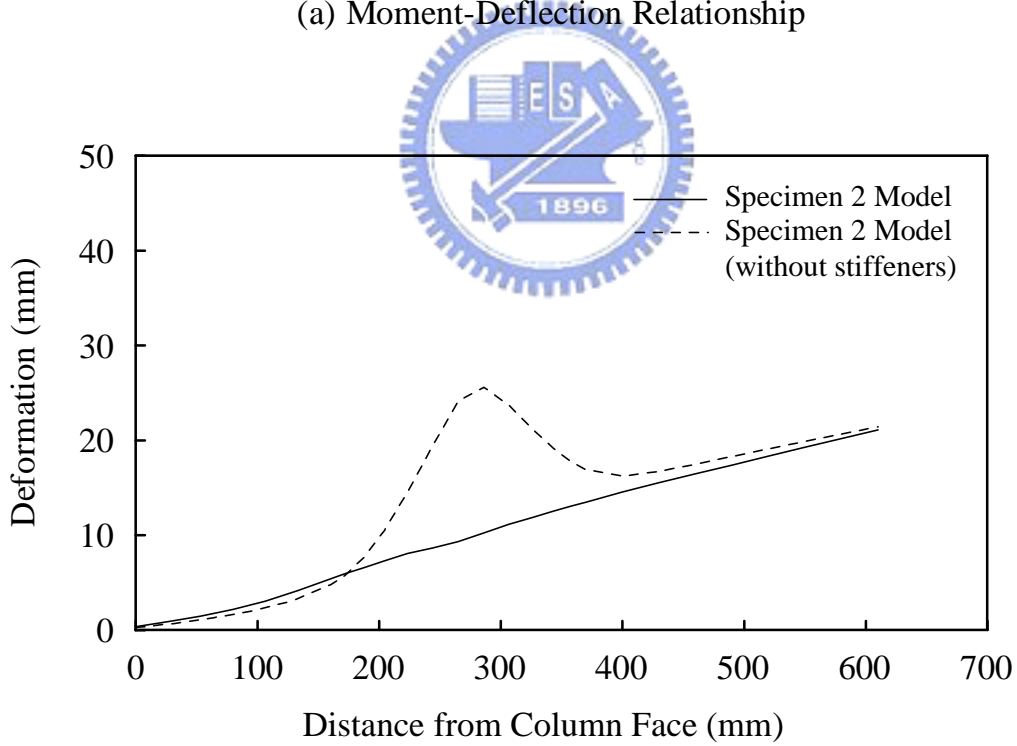


圖 4.37 試體 2 分析模型不同加載模式對於彎矩 - 位移關係比較

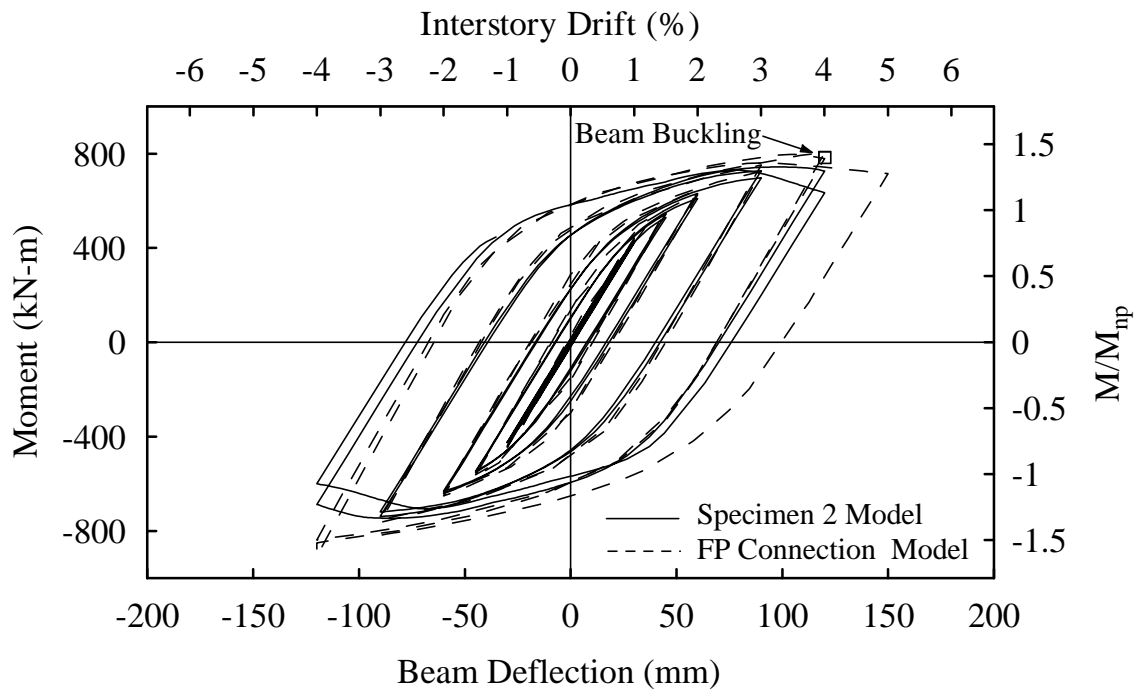


(a) Moment-Deflection Relationship

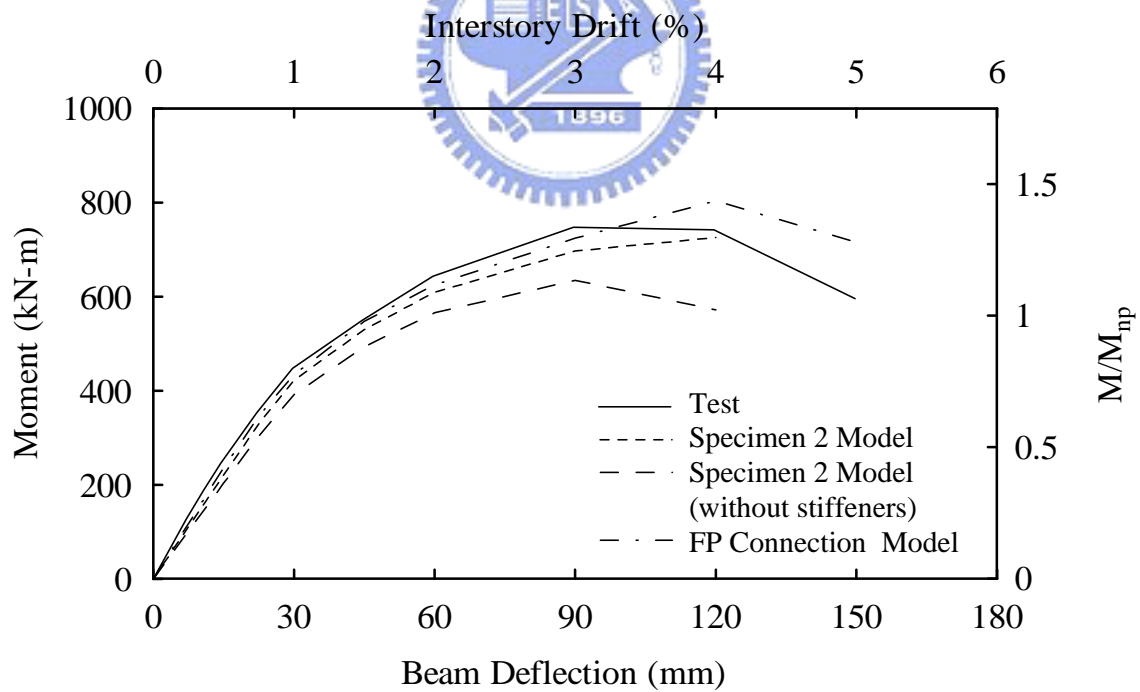


(b) RFP out-of-plane Deformation

圖 4.38 試體 2 分析模型與無加勁板試體 2 分析模型比較

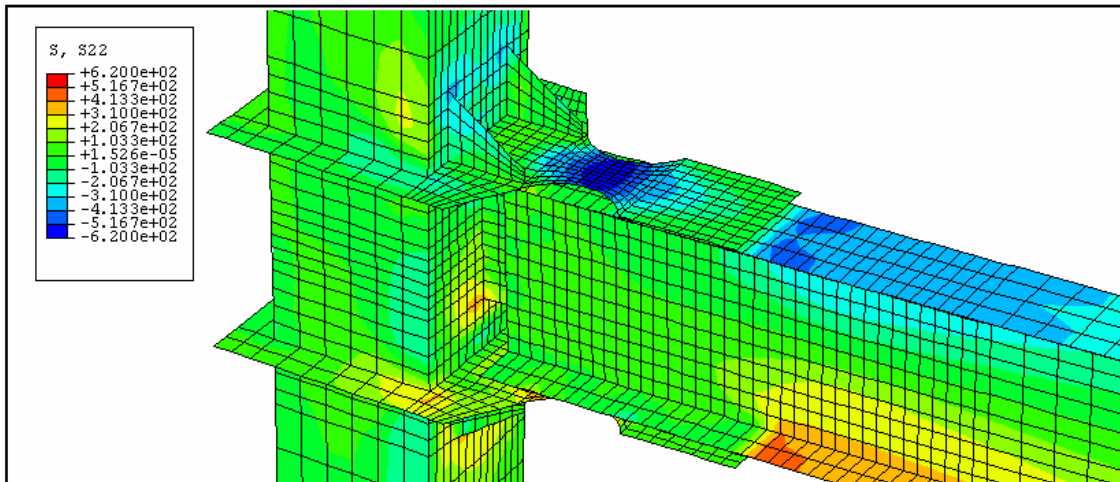


(a) Moment-Deflection Relationship

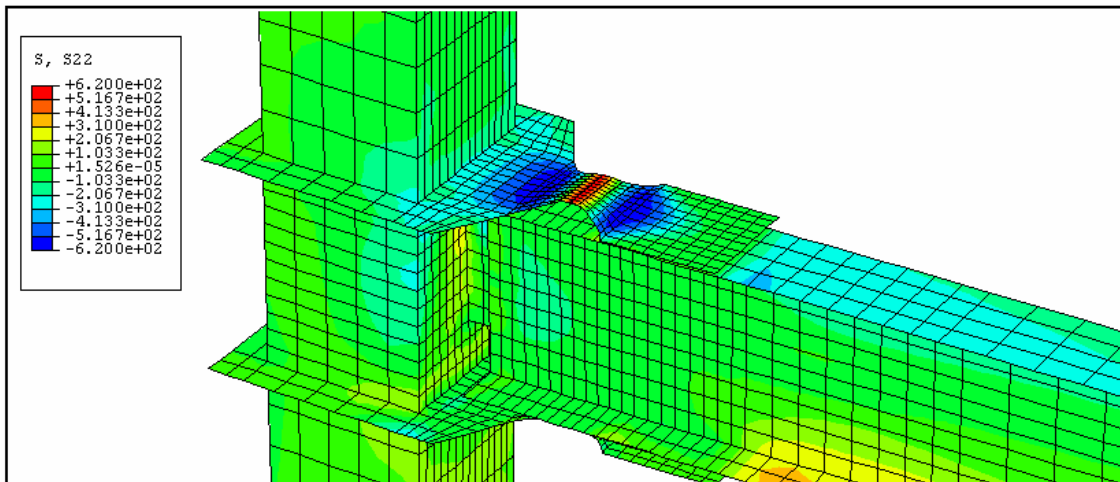


(b) Envelope

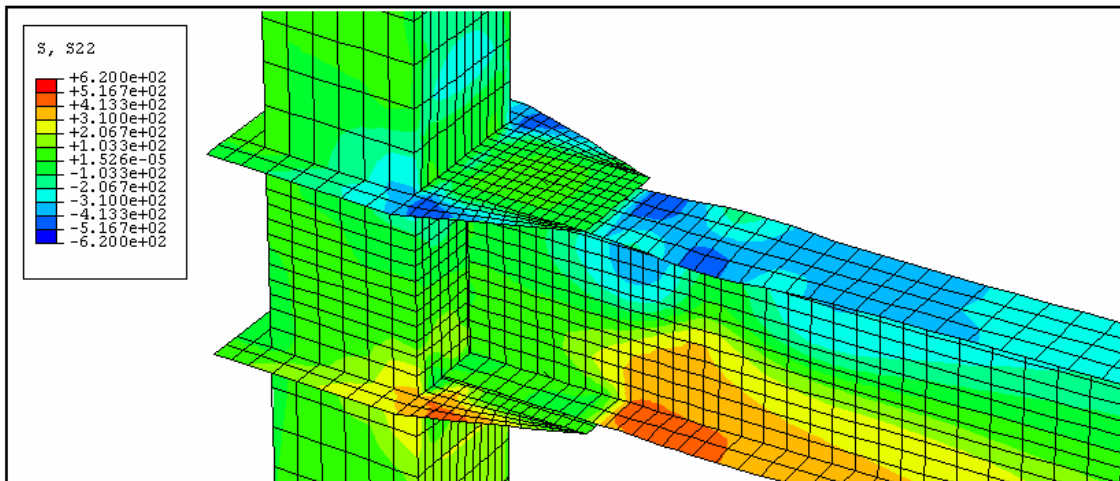
圖 4.39 試體 2 分析模型與蓋板梁柱接頭分析模型之比較



(a) Specimen 2 Model

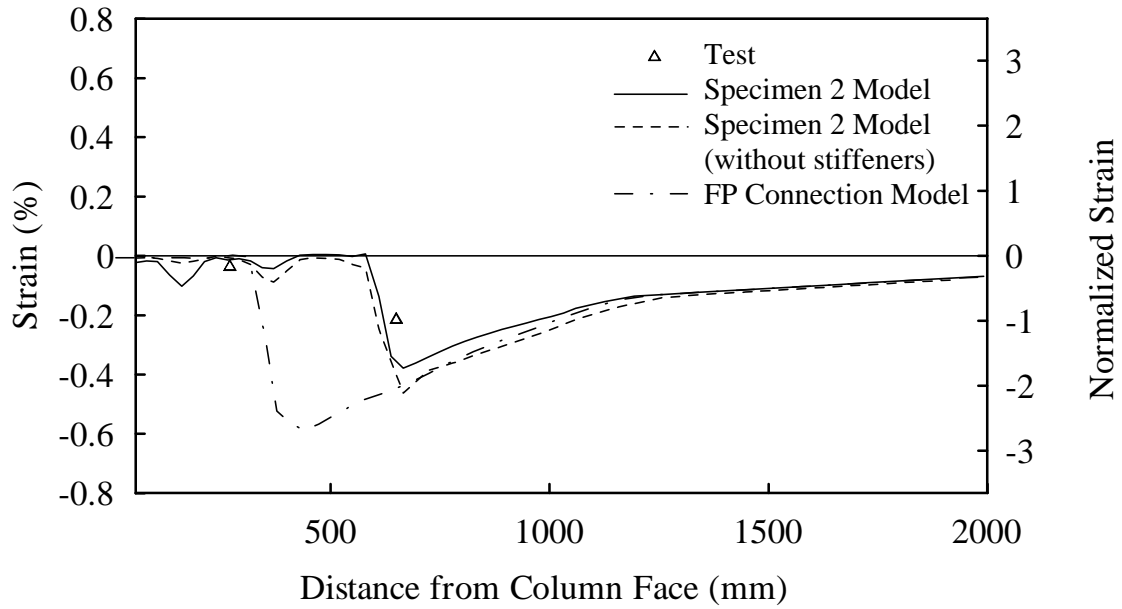


(b) Specimen 2 Model (without stiffeners)

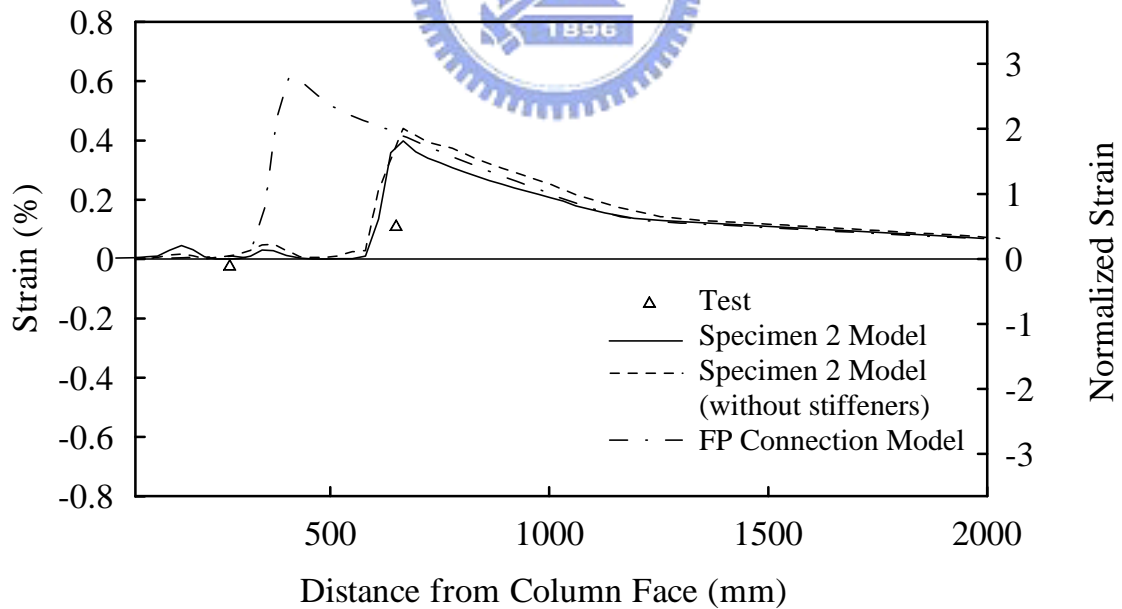


(c) FP Connection Model

圖 4.40 各組分析模型軸向應力 S22 分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度)

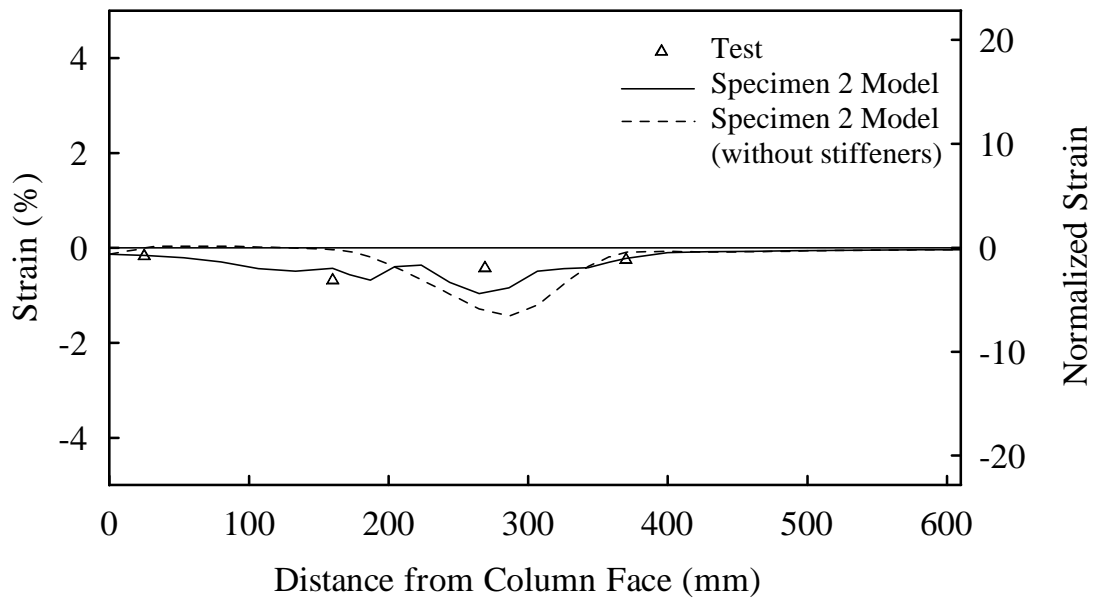


(a) Top Beam Flange

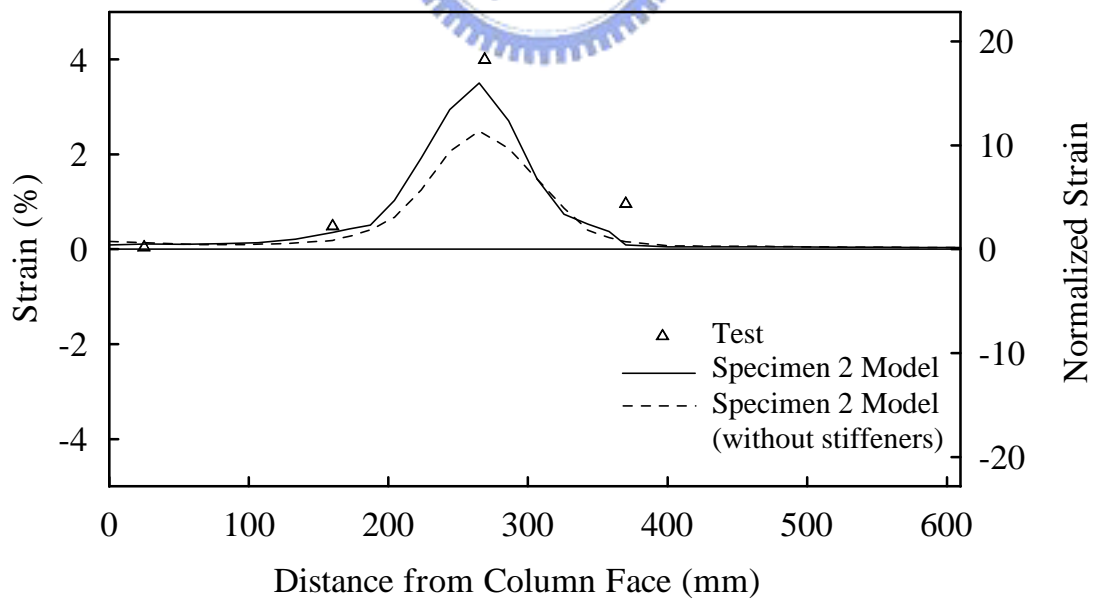


(b) Bottom Beam Flange

圖 4.41 各組分析模型軸向應變沿梁翼板縱向分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度)

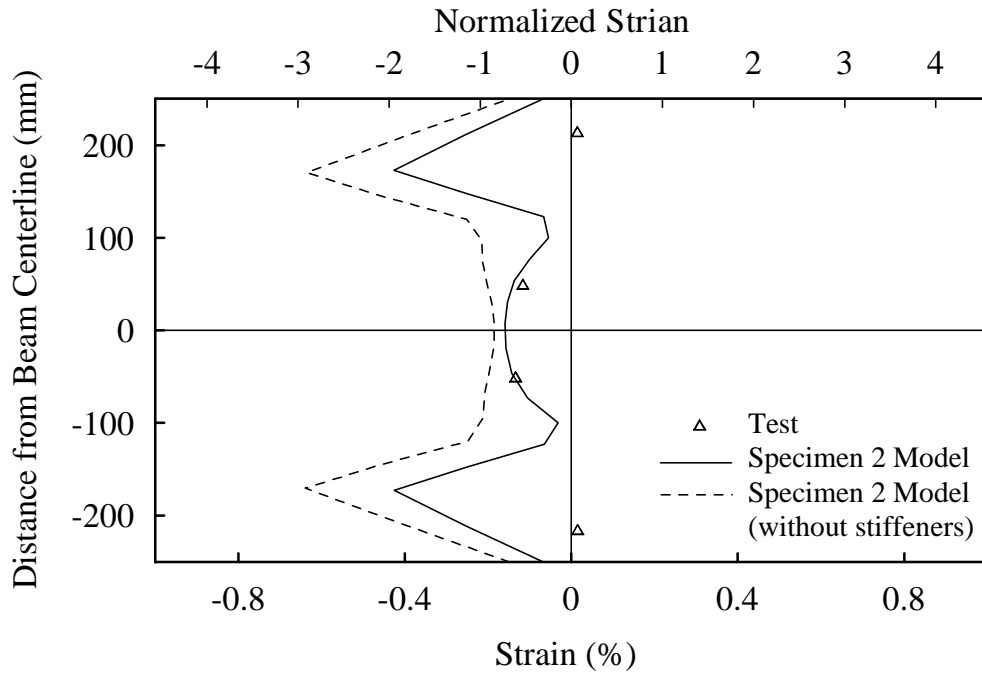


(a) Top RFP

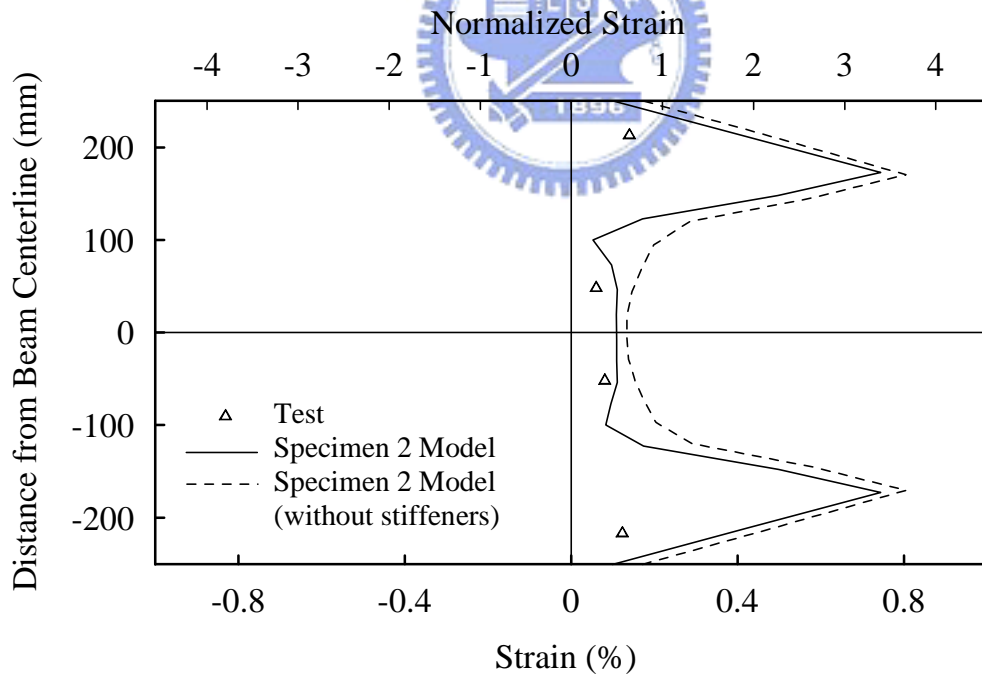


(b) Bottom RFP

圖 4.42 分析模型軸向應變沿削切蓋板縱向分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度)

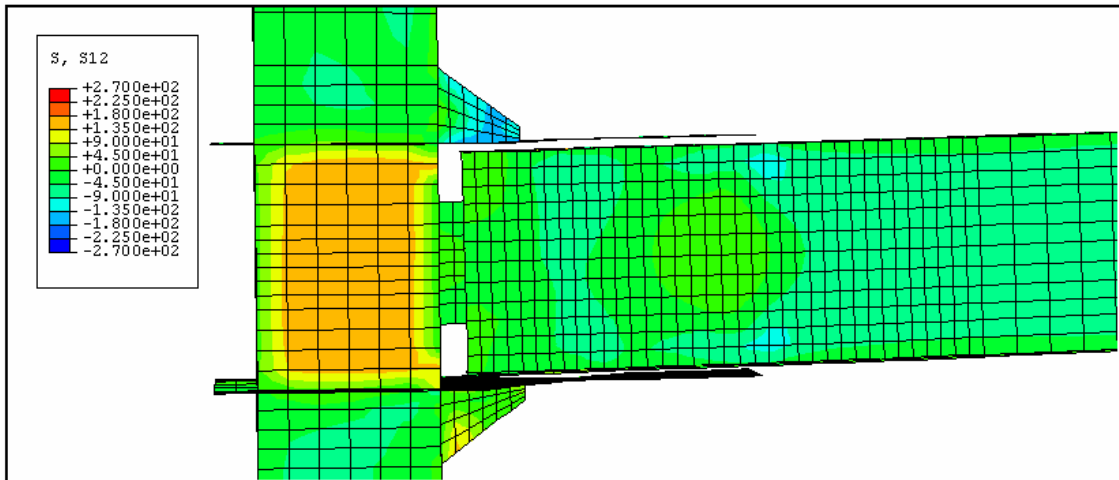


(a) Top RFP

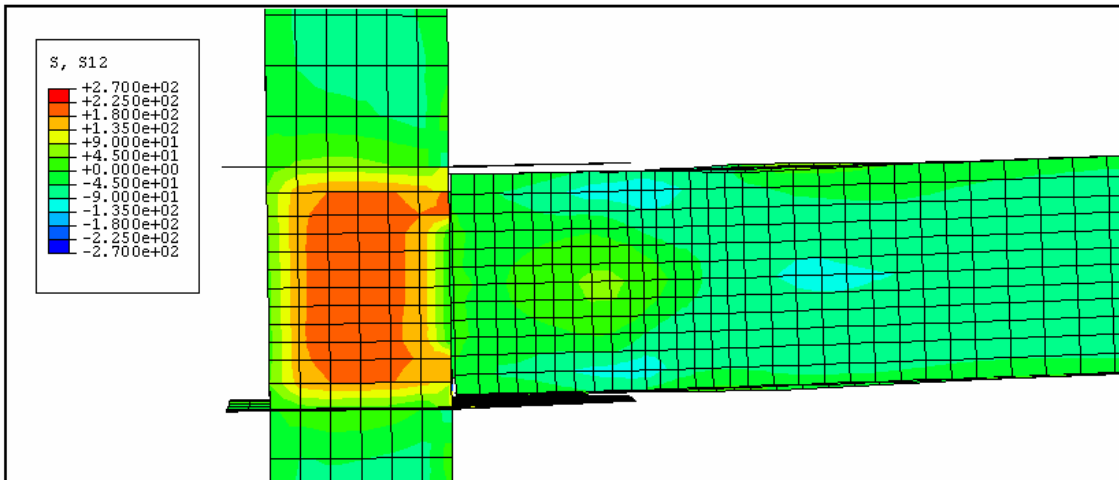


(b) Bottom RFP

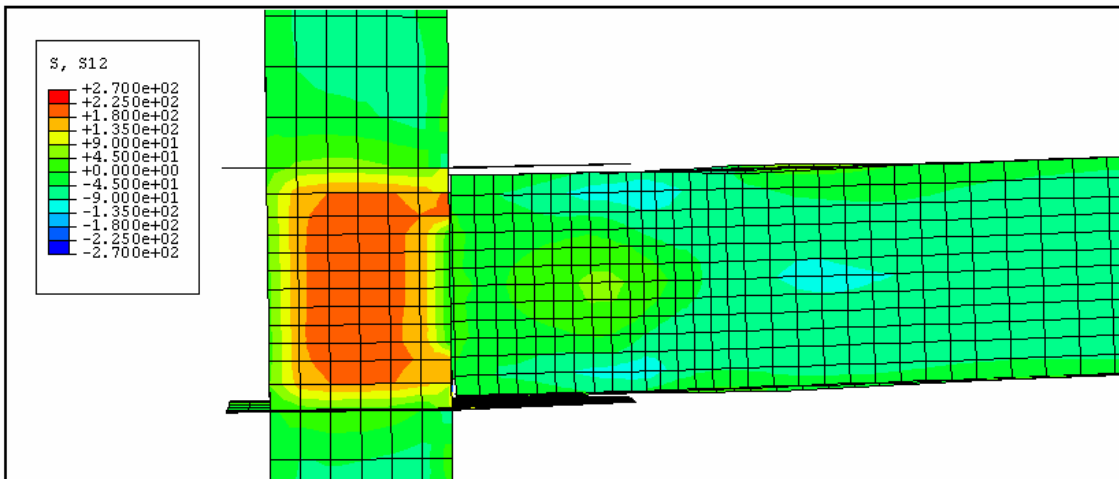
圖 4.43 分析模型軸向應變沿削切蓋板橫向分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度)



(a) Specimen 2 Model

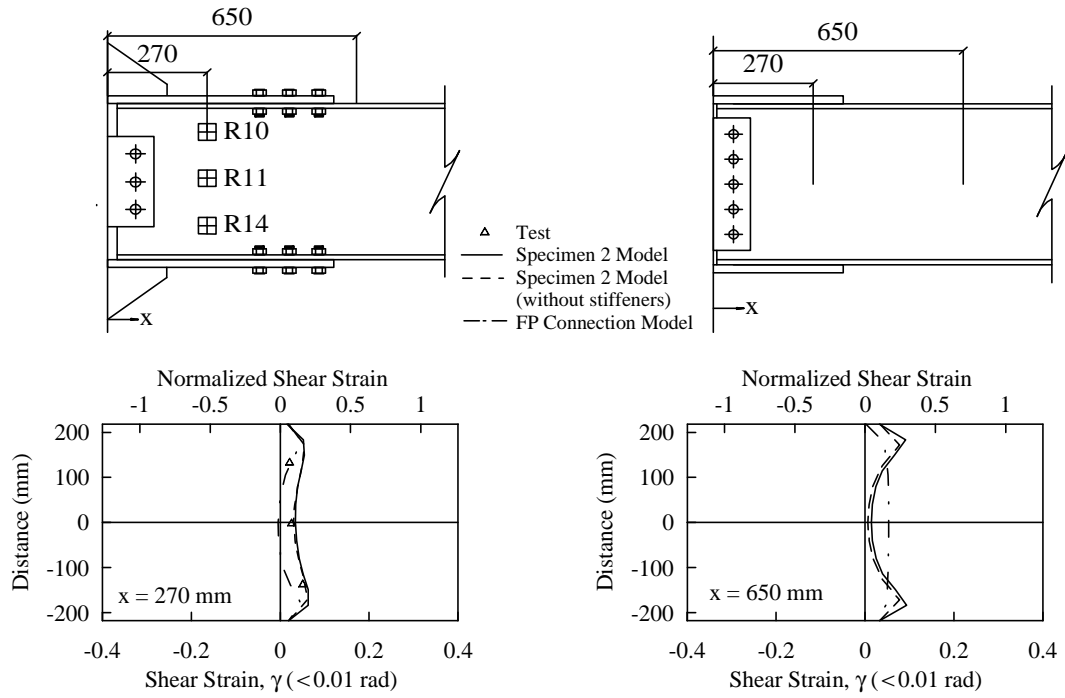


(b) Specimen 2 Model (without stiffeners)

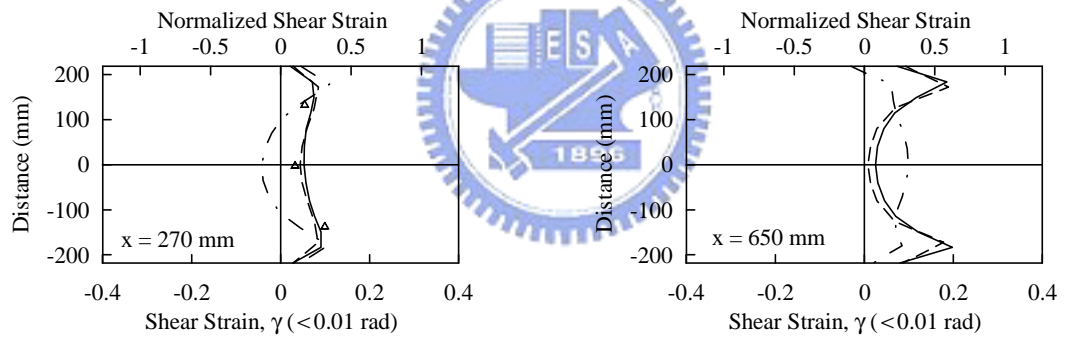


(c) FP Connection Model

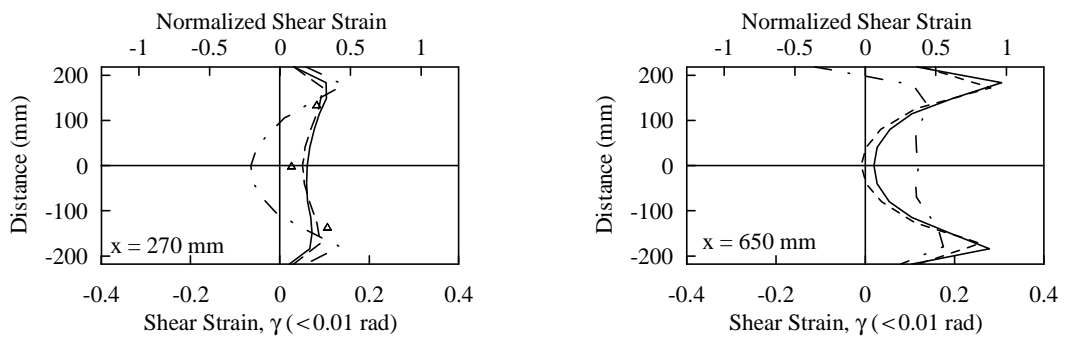
圖 4.44 各組分析模型剪應力 S12 分佈圖 ($\theta = 0.03$ 弧度)



(a) 1 % Drift



(a) 2 % Drift



(c) 3 % Drift

圖 4.45 各組分析模型剪應變沿腹板變化

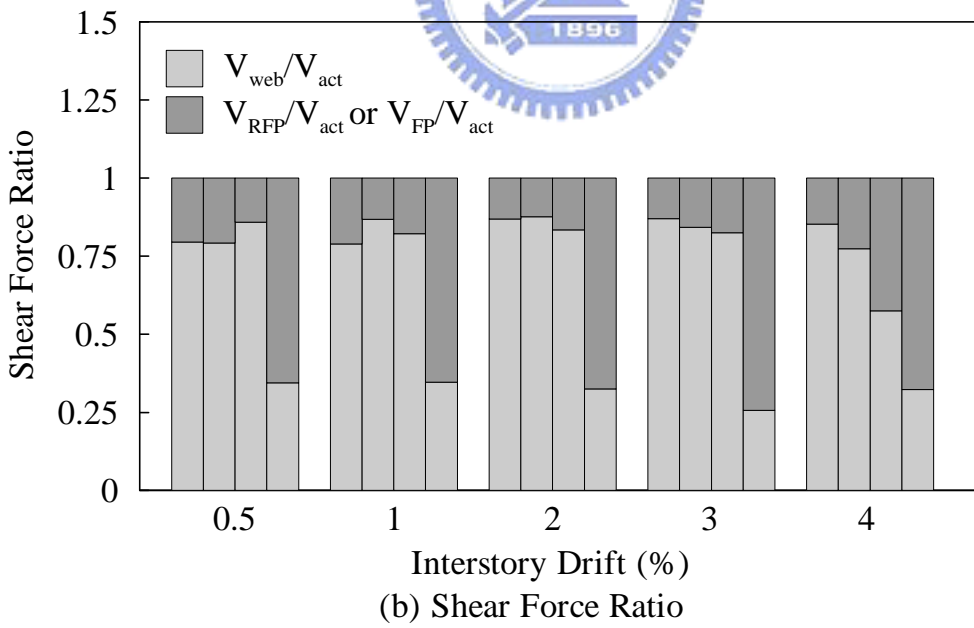
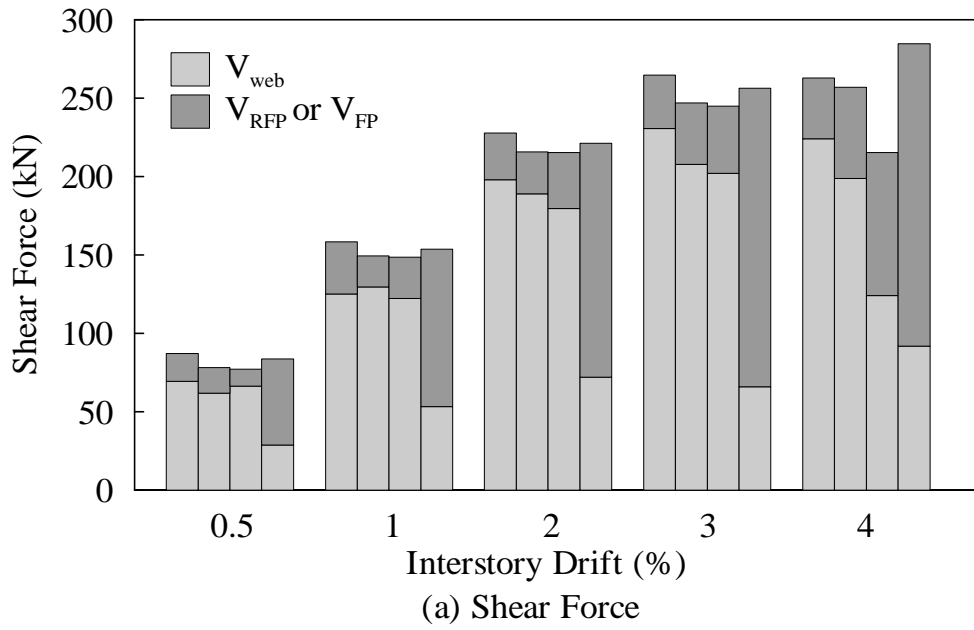
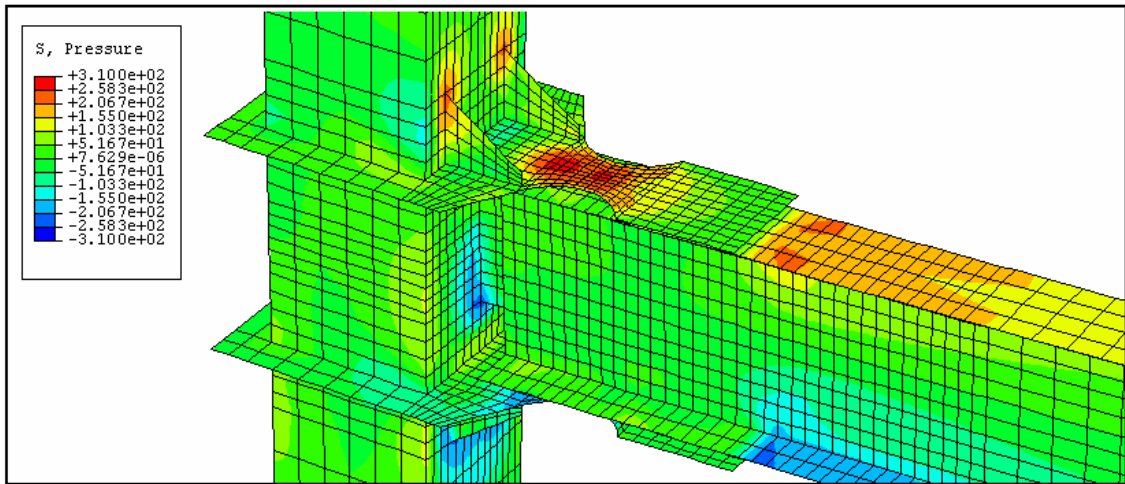
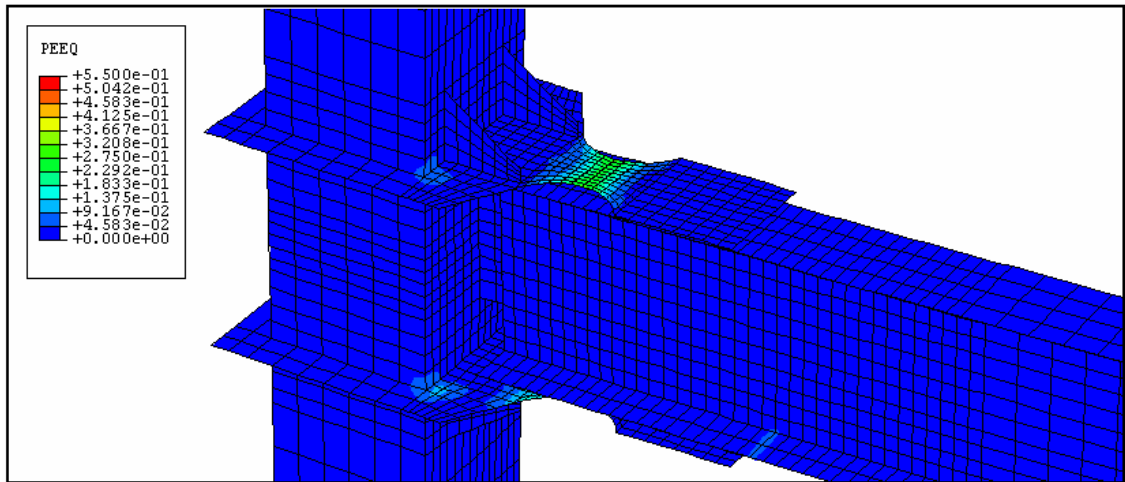


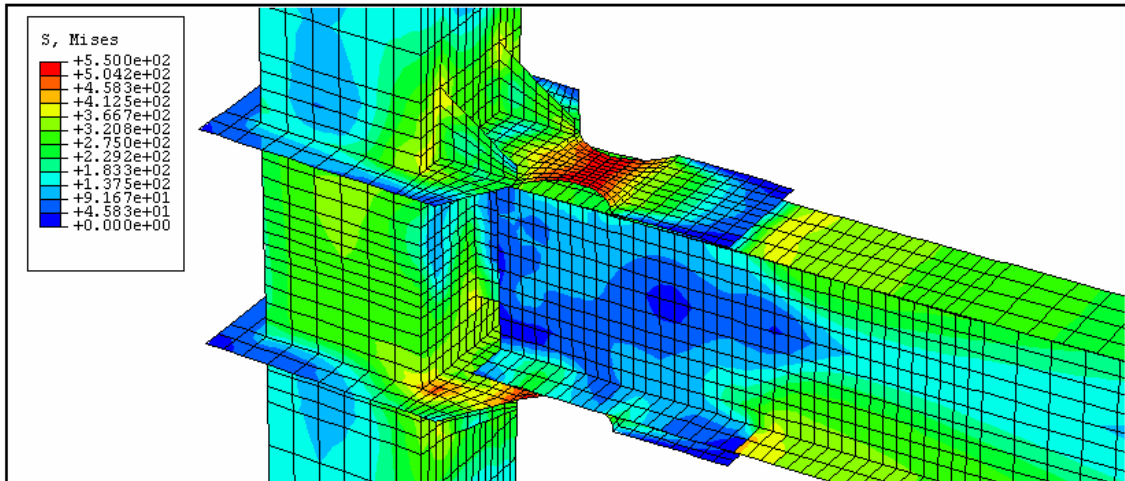
圖 4.46 各組分析模型梁腹板剪力在各位移角比較



(a) Pressure Stress

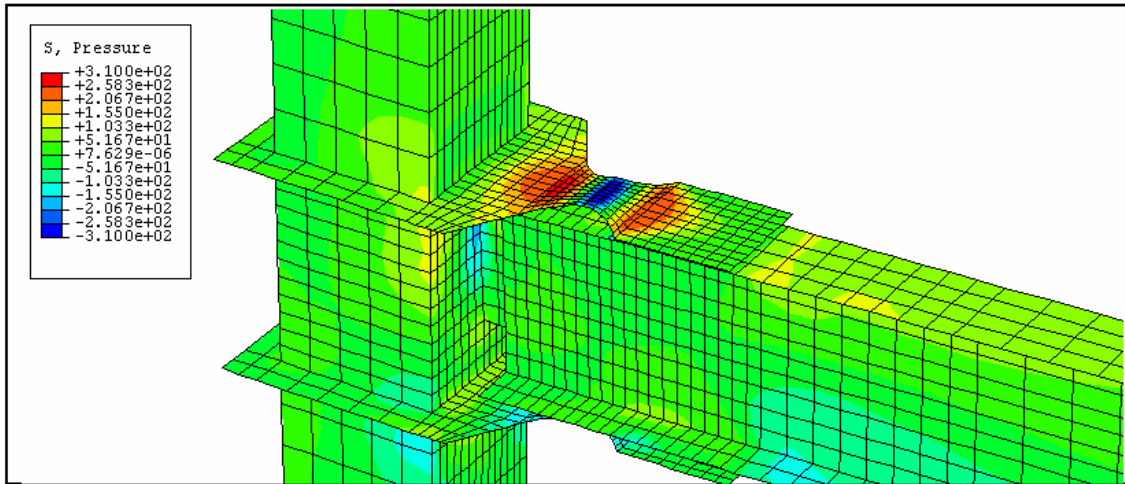


(b) PEEQ

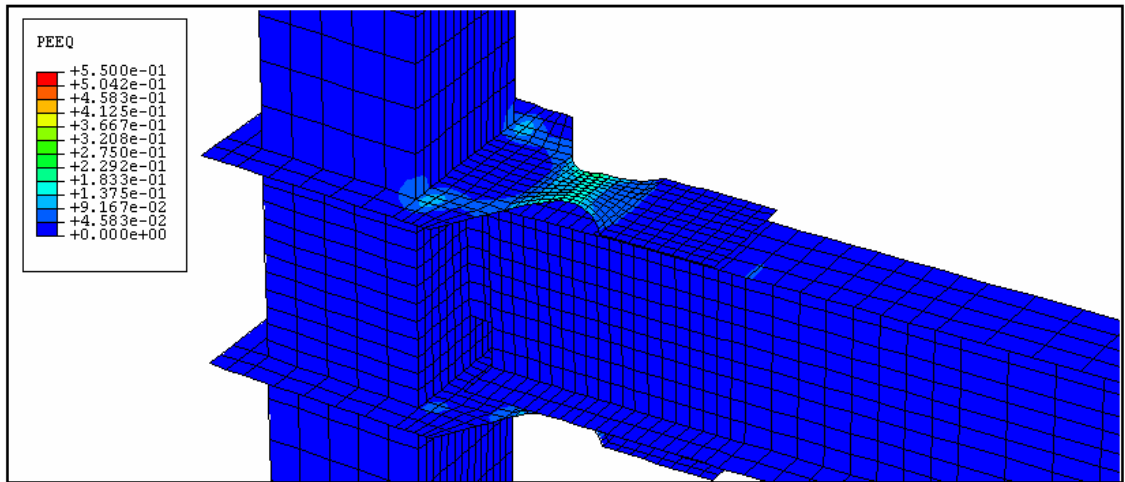


(c) Mises Stress

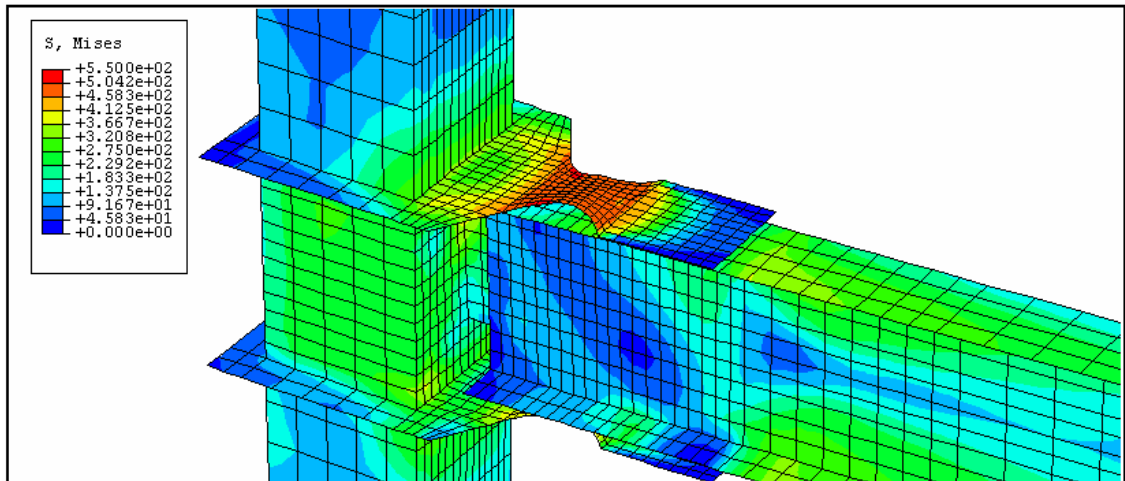
圖 4.47 試體 2 分析模型各項參數分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度)



(a) Pressure Stress

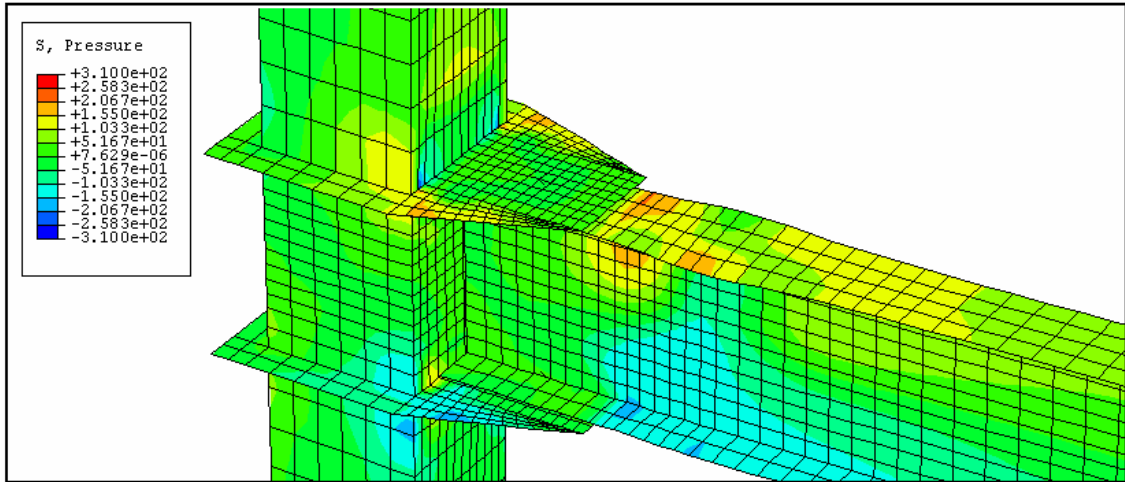


(b) PEEQ

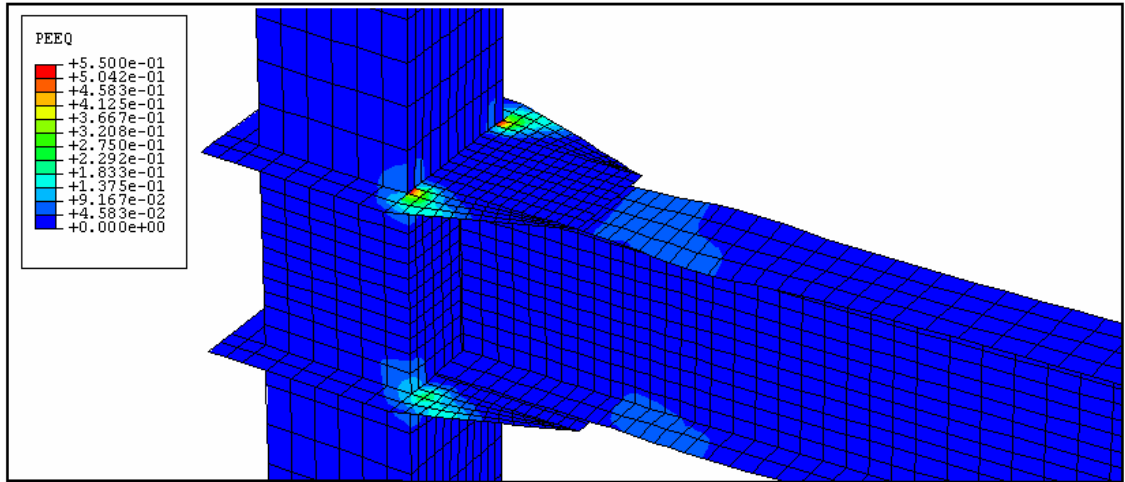


(c) Mises Stress

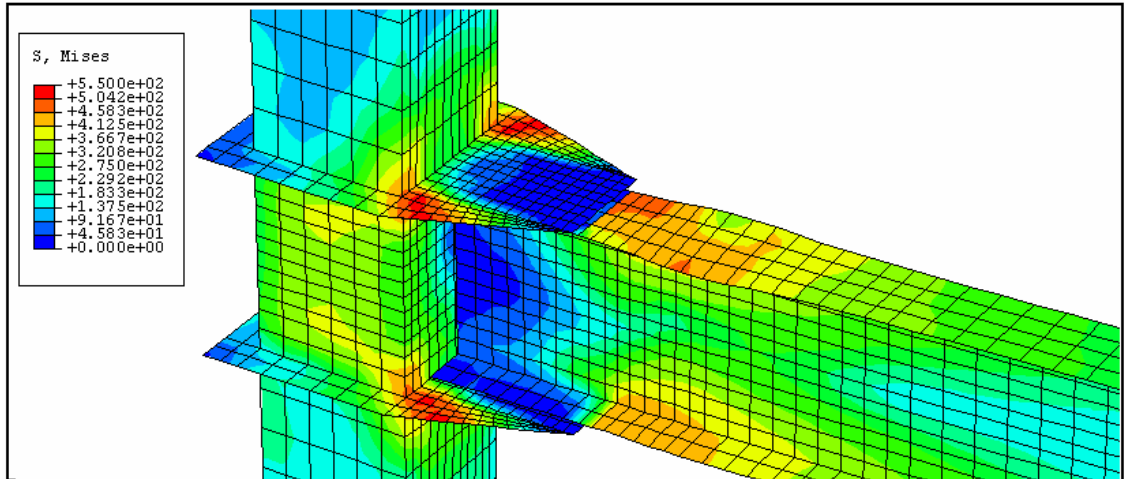
圖 4.48 無加勁板試體 2 分析模型各項參數分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度)



(a) Pressure Stress



(b) PEEQ



(c) Mises Stress

圖 4.49 蓋板梁柱接頭分析模型各項參數分佈圖 ($\theta = 0.04$ 弧度)

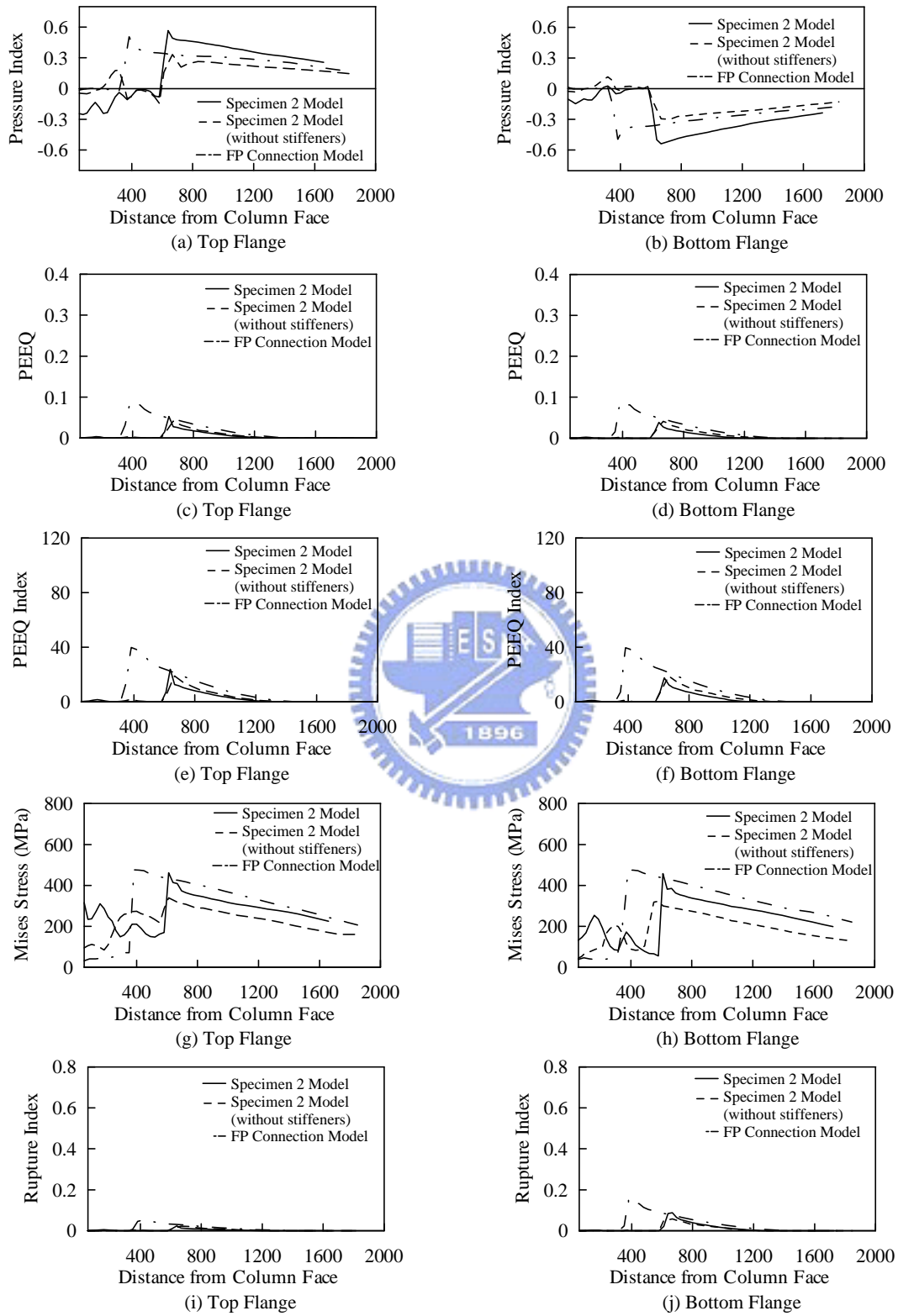


圖 4.50 分析模型梁翼板各項參數比較圖 ($\theta = 0.04$ 弧度)

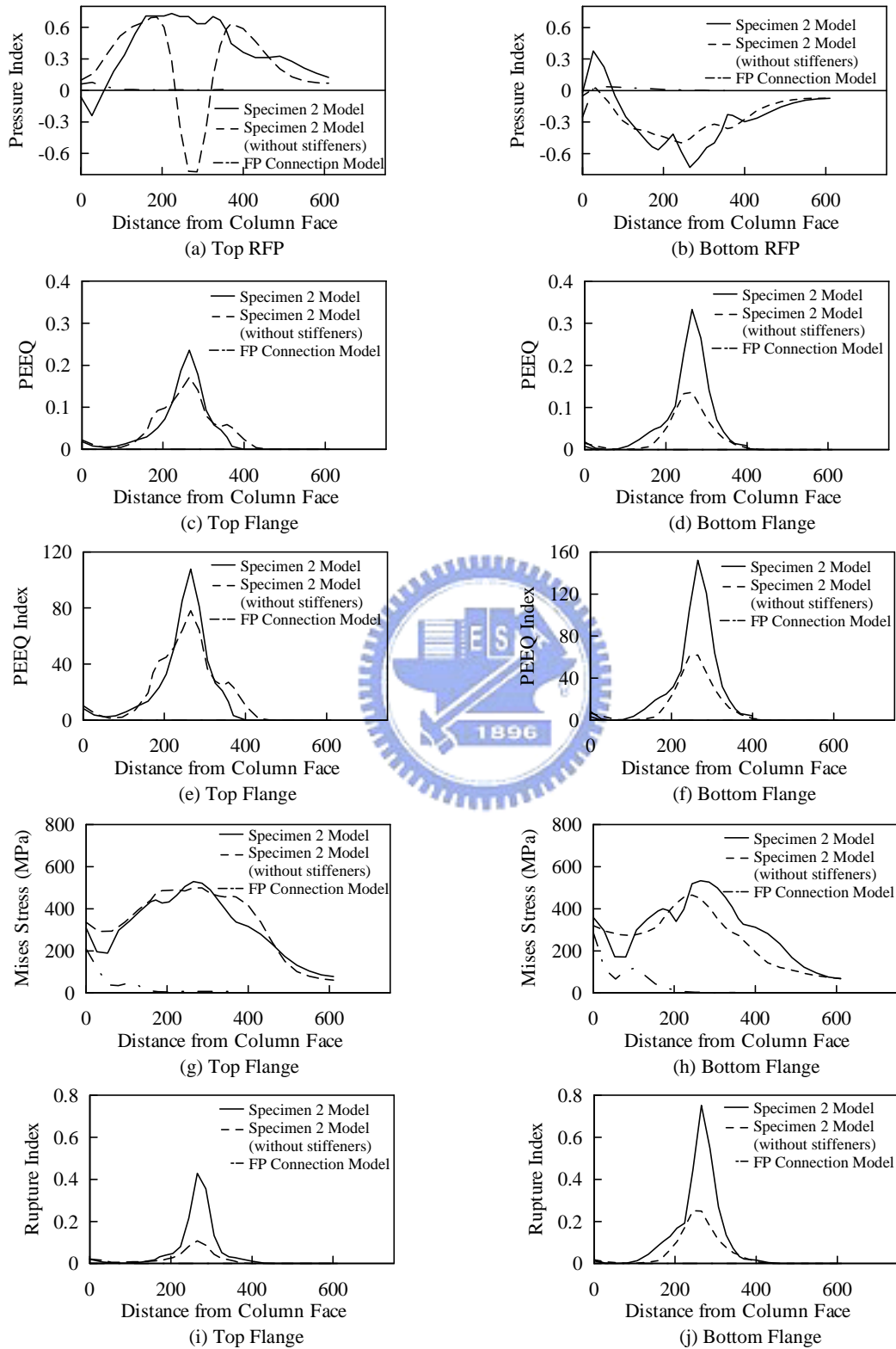


圖 4.51 (削切)蓋板各項參數比較圖($\theta = 0.04$ 弧度)

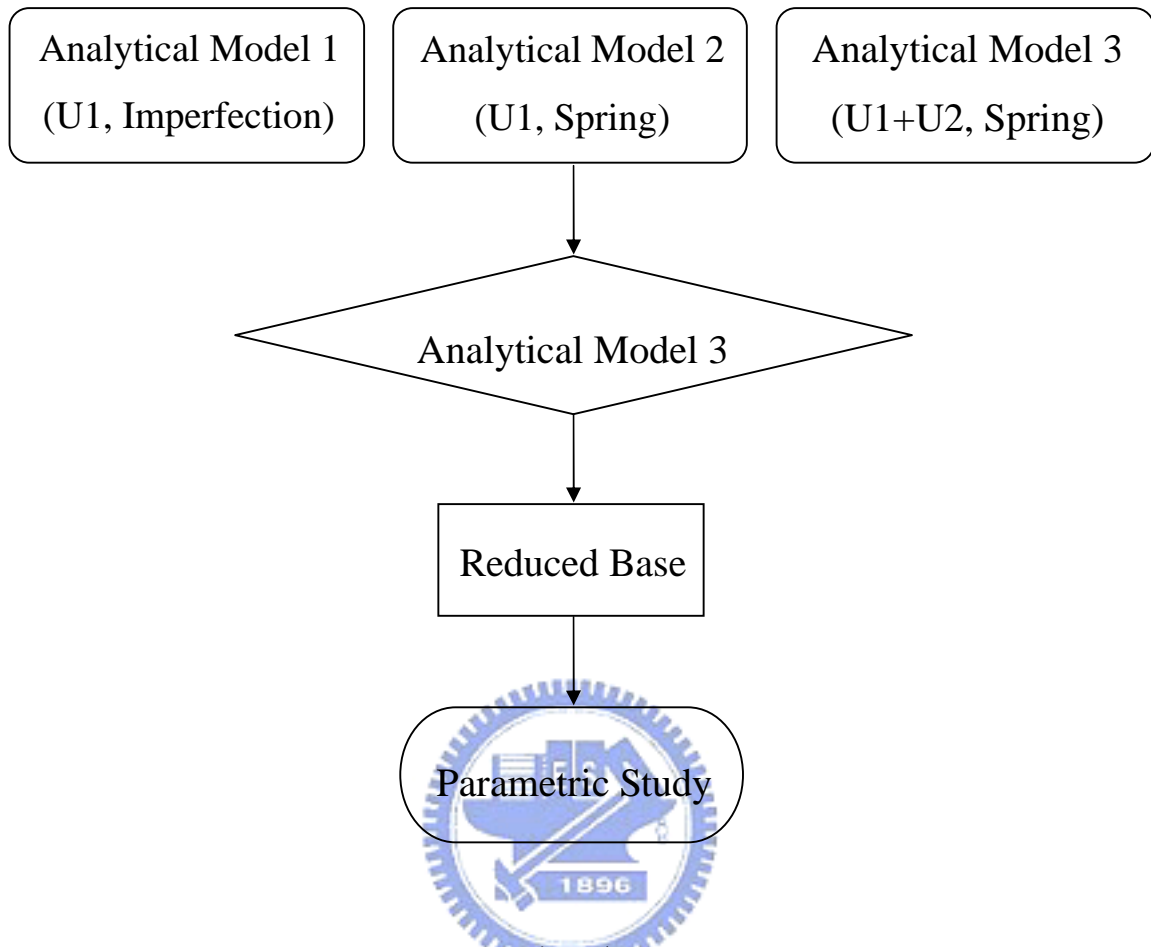
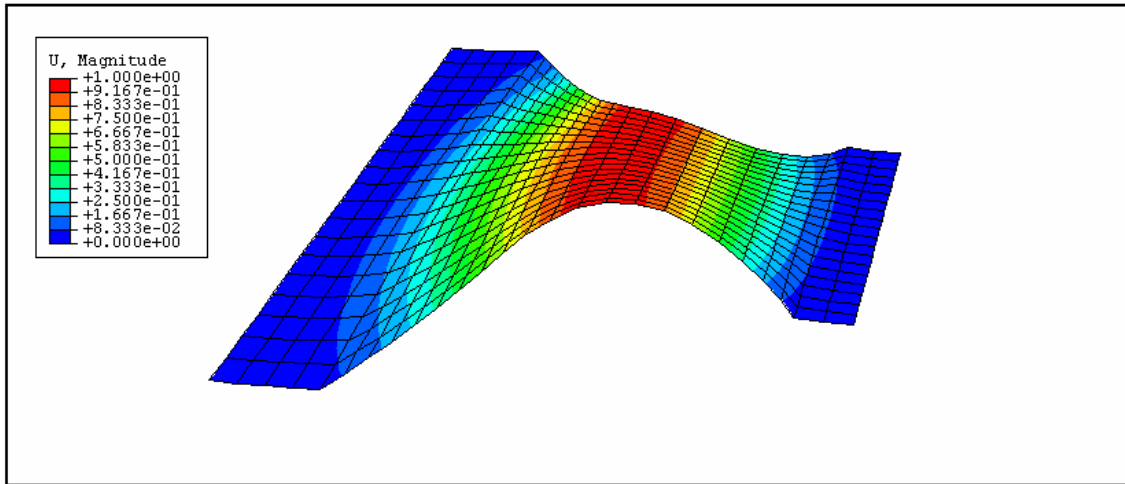
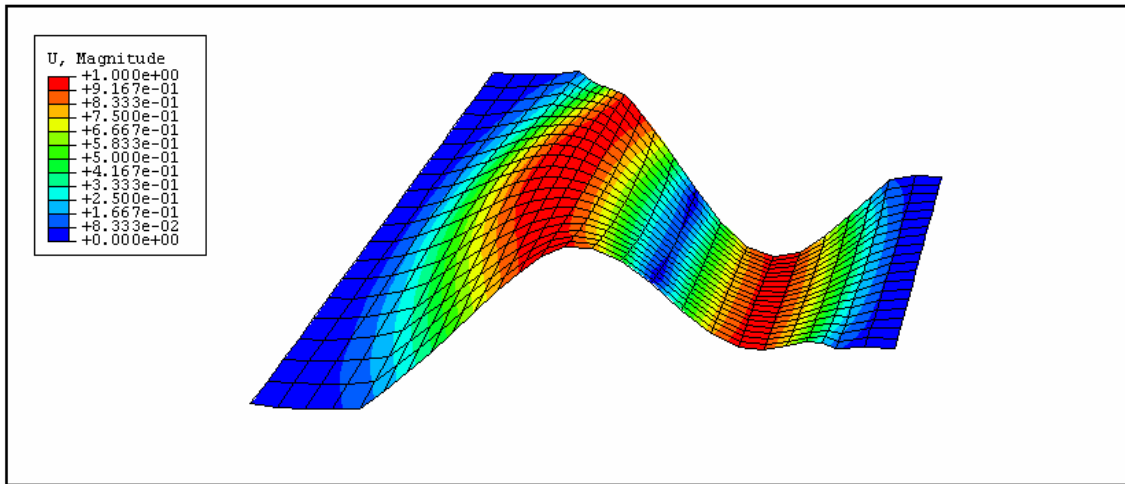


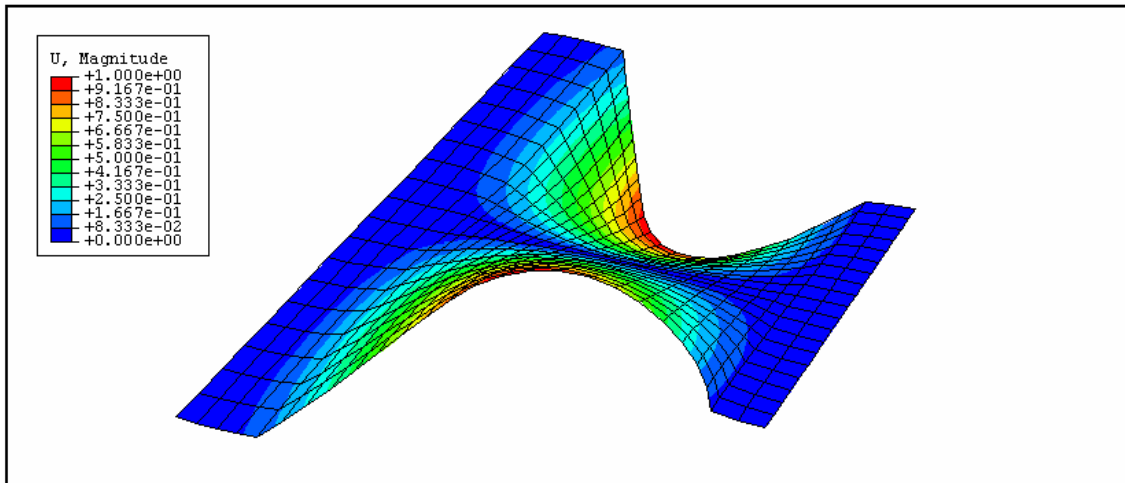
圖 4.52 削切蓋板參數研究流程圖



(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3

圖 4.53 試體 1 削切蓋板挫屈模態

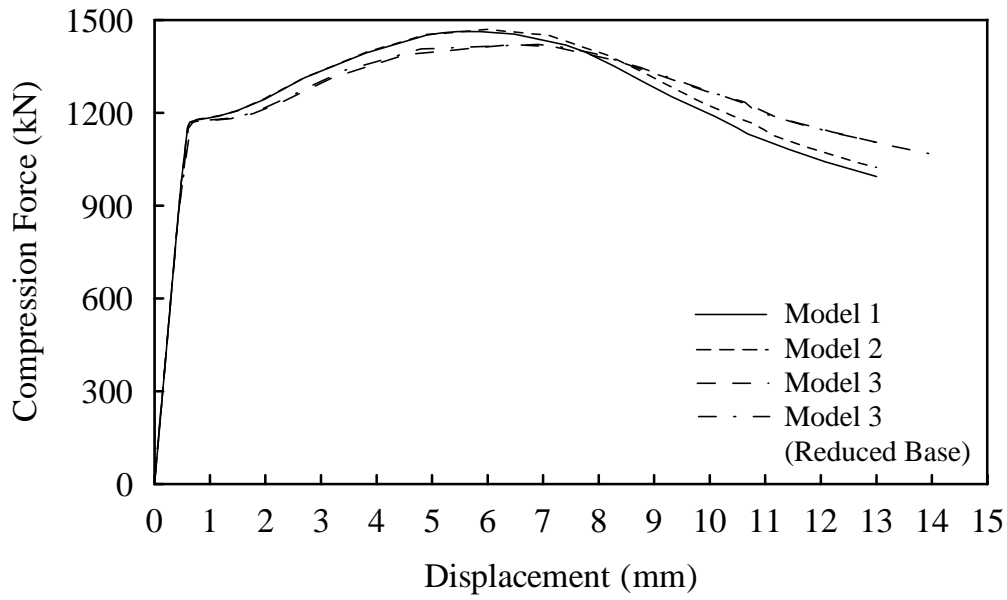


圖 4.54 試體 1 削切蓋板於不同的分析模型下之力量與位移關係

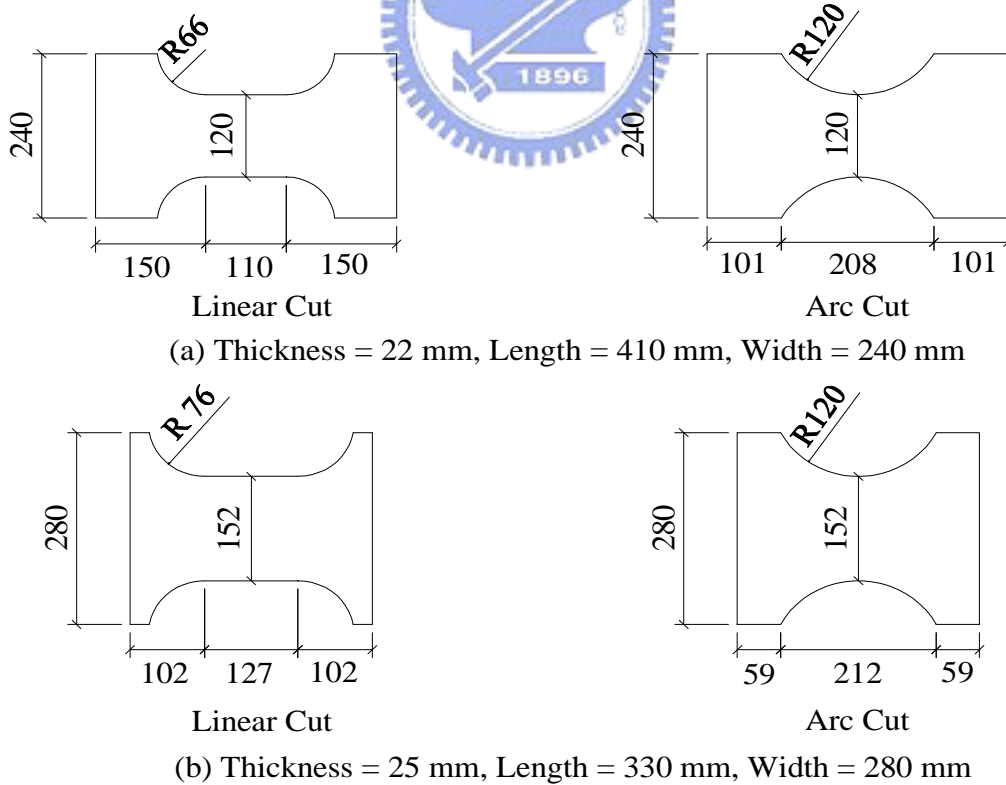
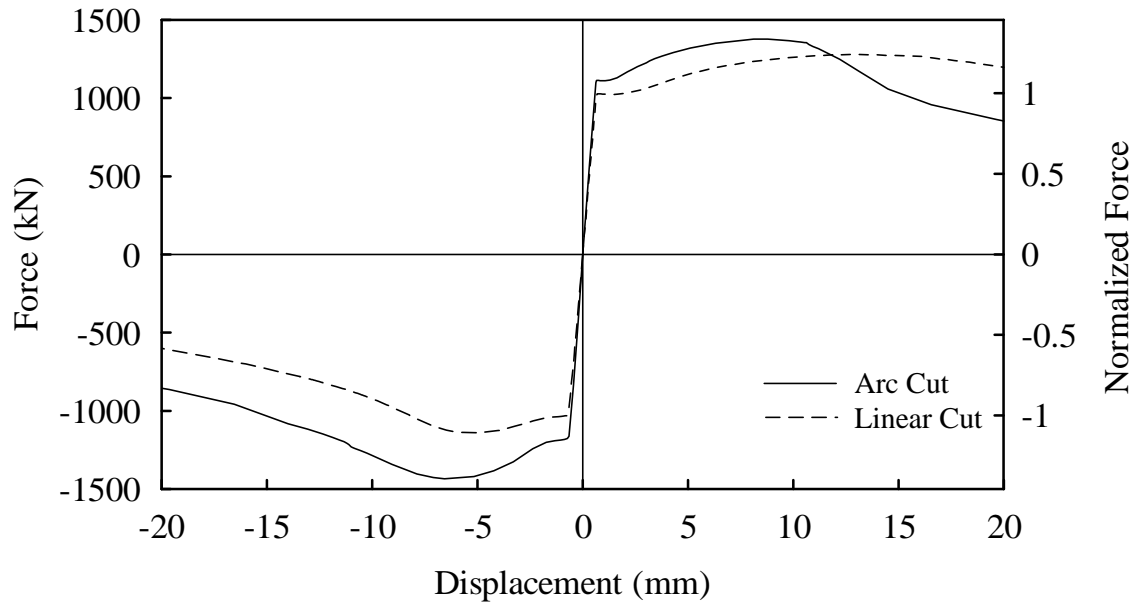
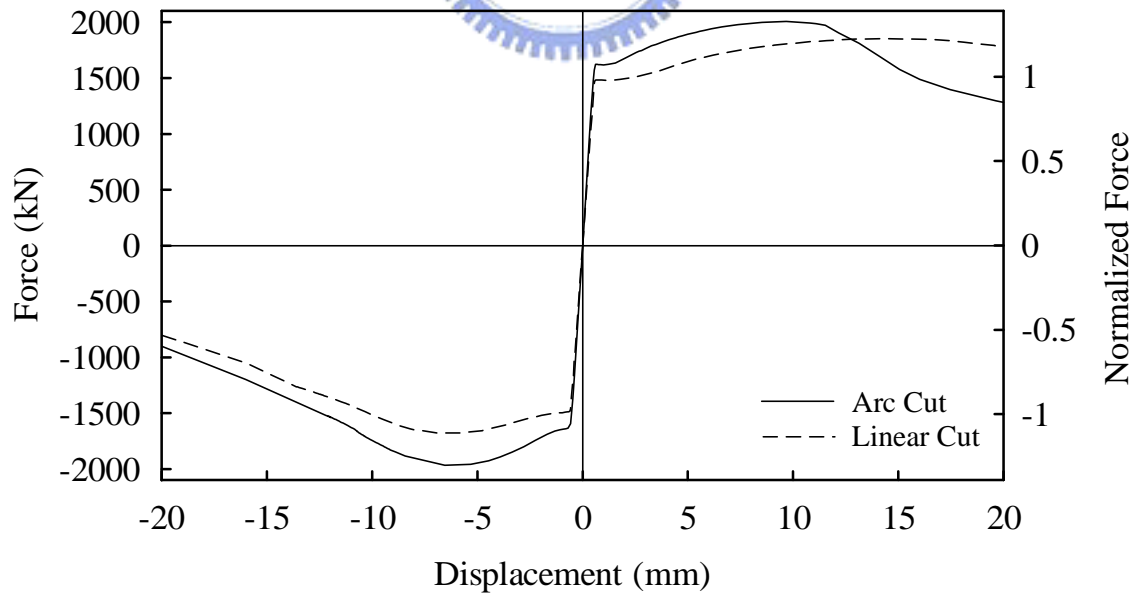


圖 4.55 矩形與圓弧形削切型式之削切蓋板尺寸



(a) $t_R = 22 \text{ mm}$, $L_R = 410 \text{ mm}$



(b) $t_R = 25 \text{ mm}$, $L_R = 330 \text{ mm}$

圖 4.56 削切蓋板在不同削切型式下之力量與位移關係

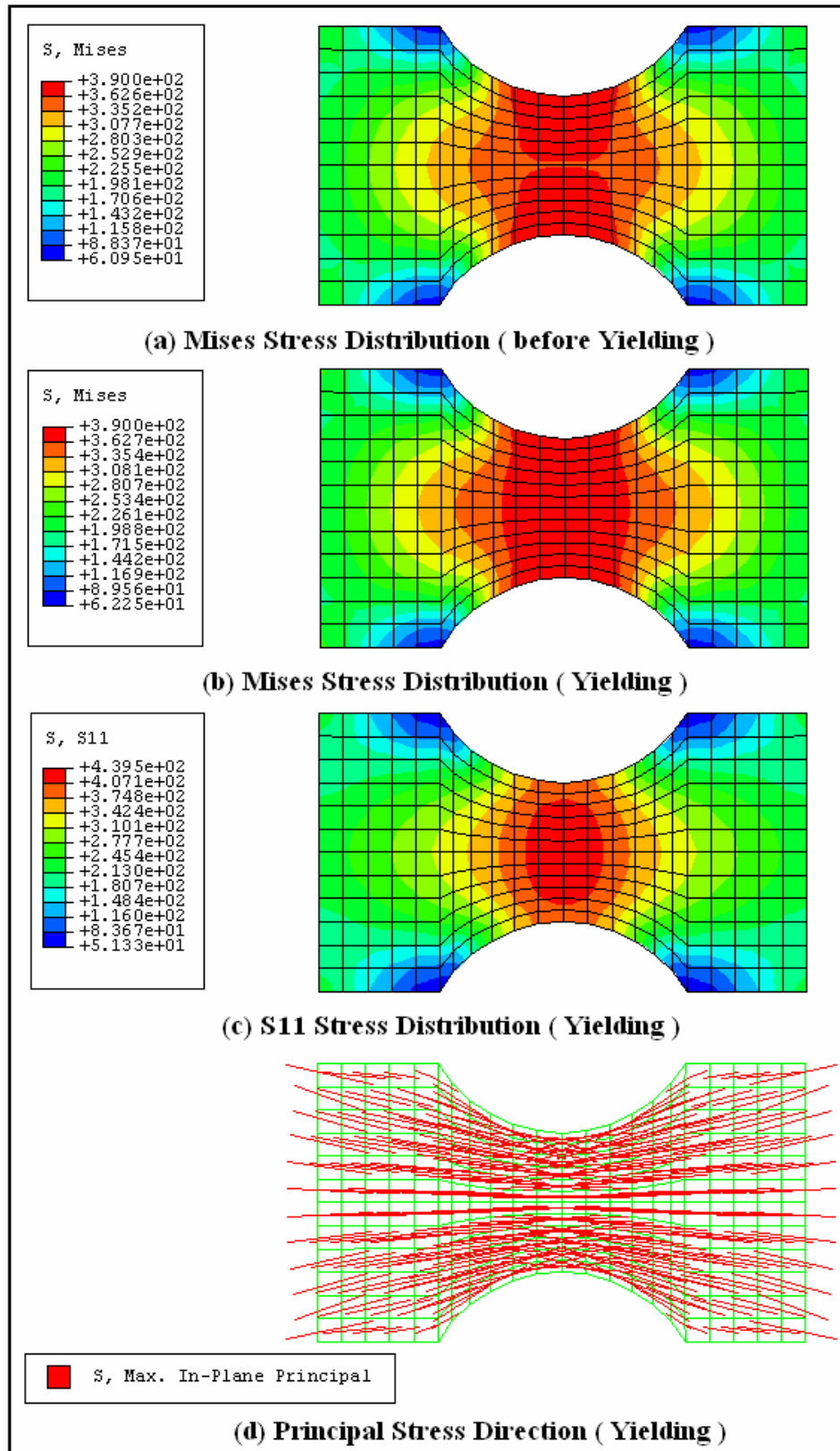


圖 4.57 圓弧形削切應力分佈情形 ($t_R = 22$ mm, $L_R = 410$ mm)

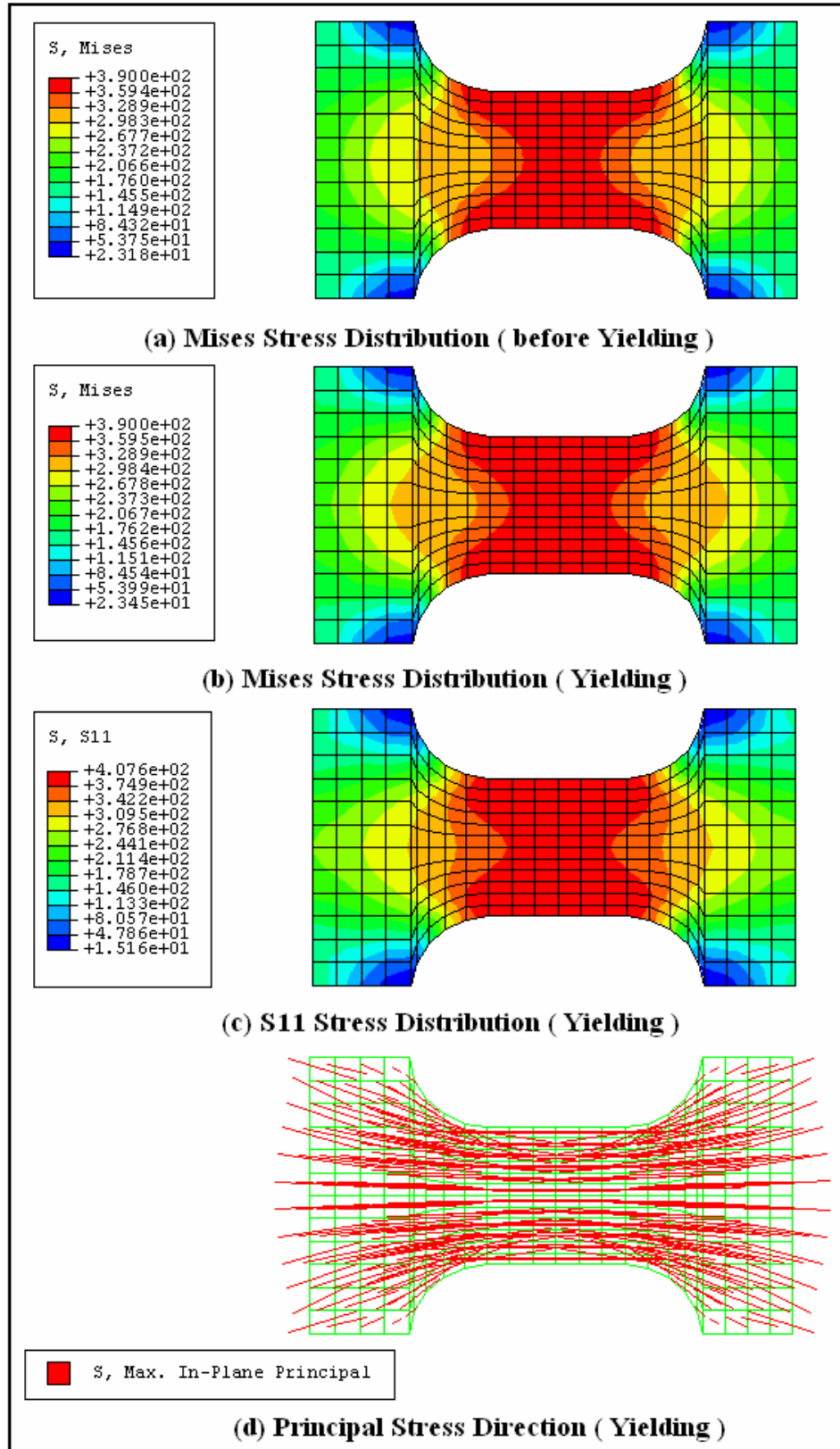
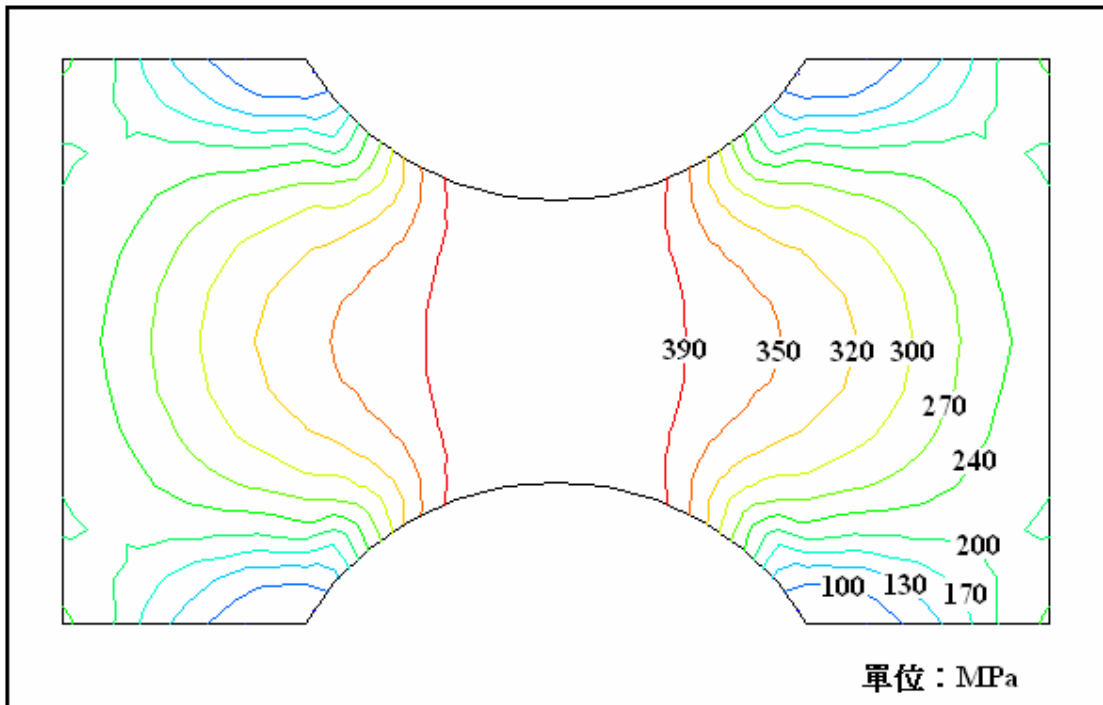
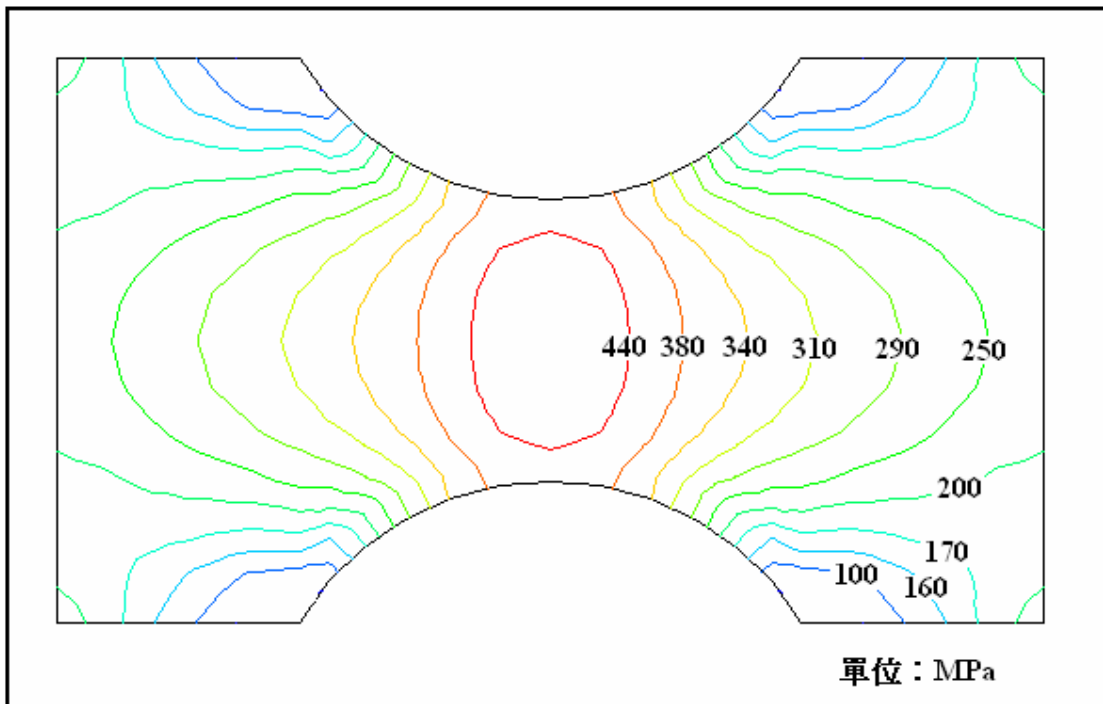


圖 4.58 矩形削切應力分佈情形 ($t_R = 22$ mm, $L_R = 410$ mm)

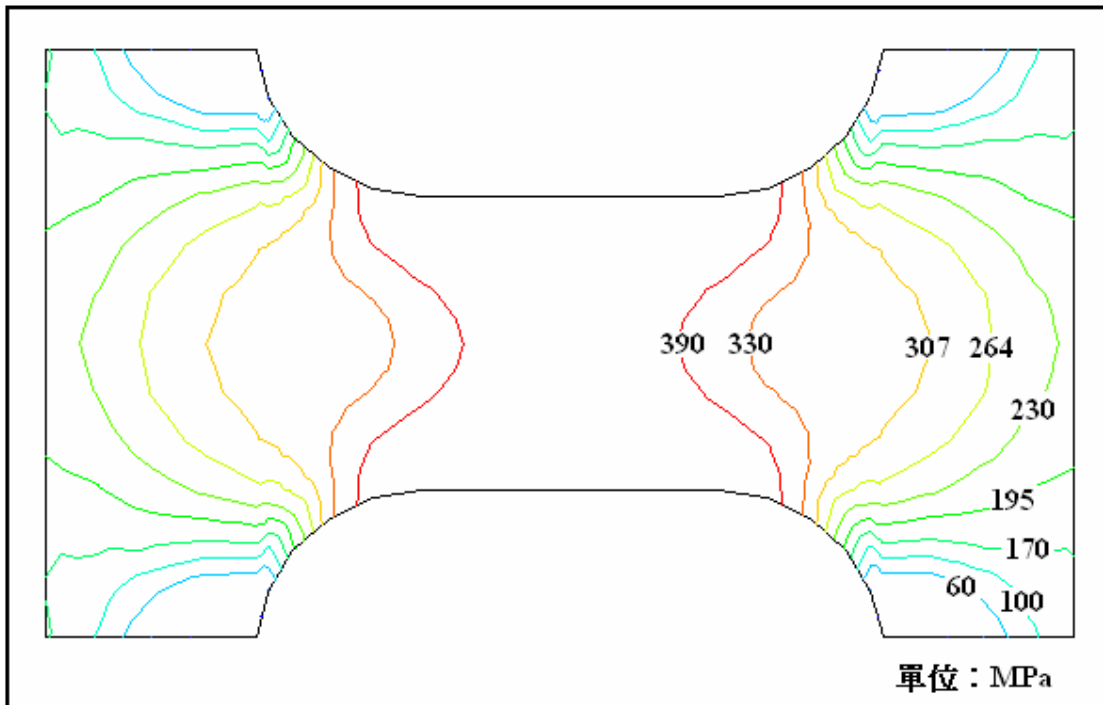


(a) Mises Stress

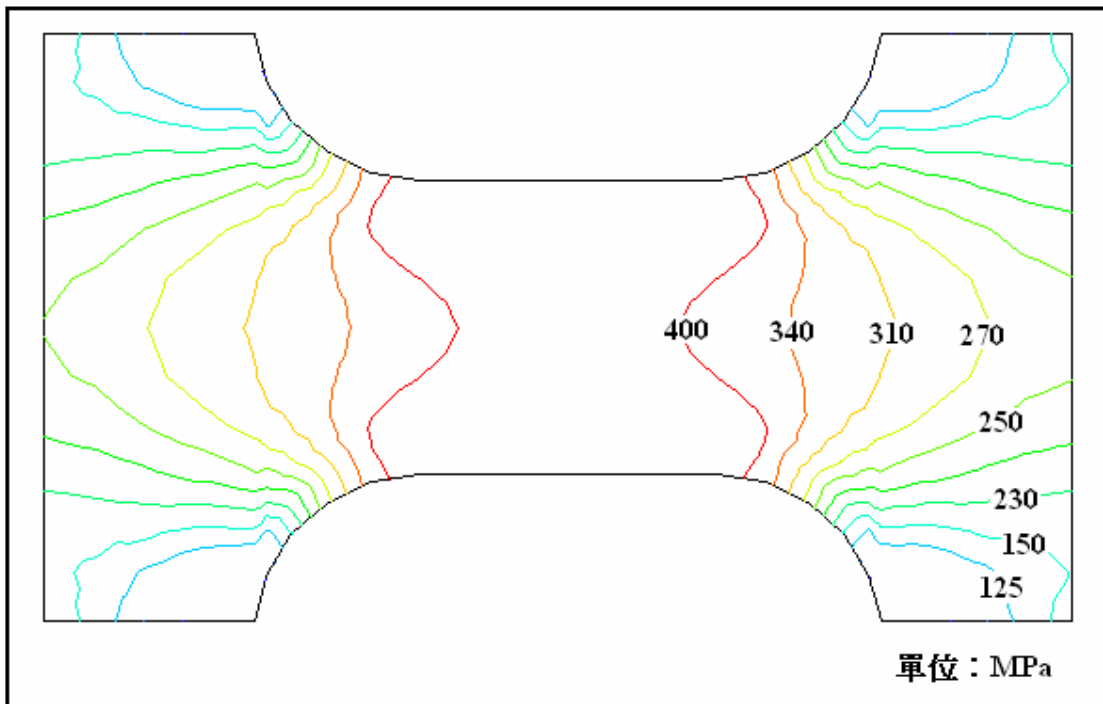


(b) S11 Stress

圖 4.59 圓弧形削切應力等高線分佈情形 ($t_R = 22$ mm, $L_R = 410$ mm)



(a) Mises Stress



(b) S11 Stress

圖 4.60 矩形削切應力等高線分佈情形 ($t_R = 22$ mm, $L_R = 410$ mm)

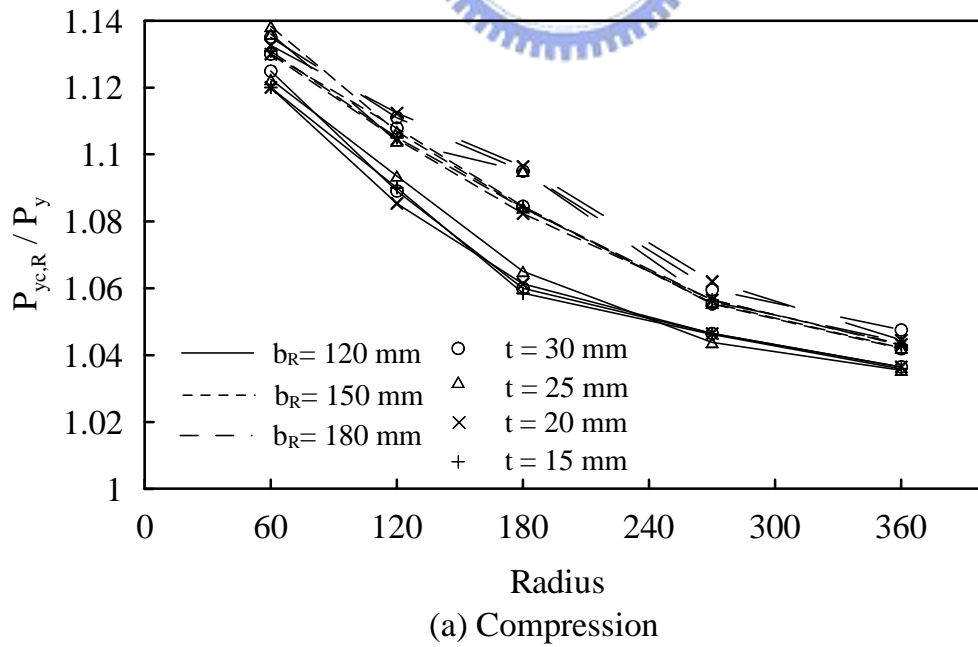
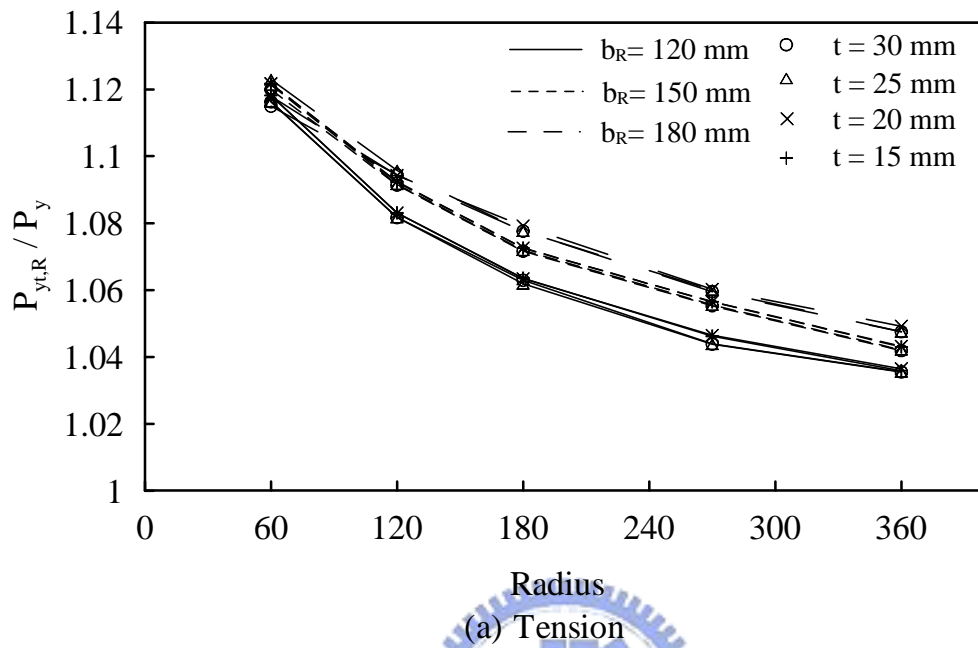
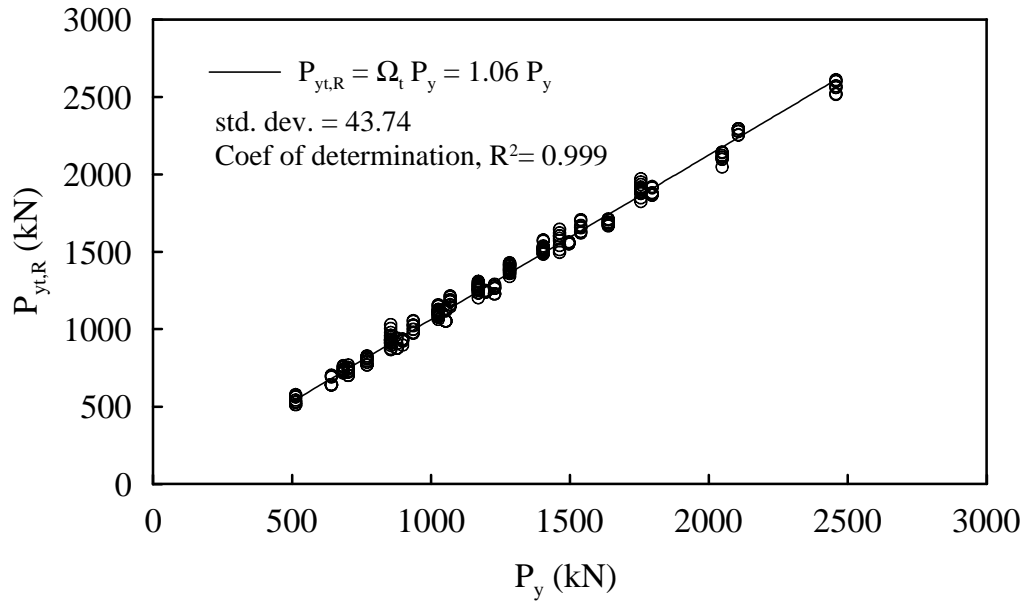
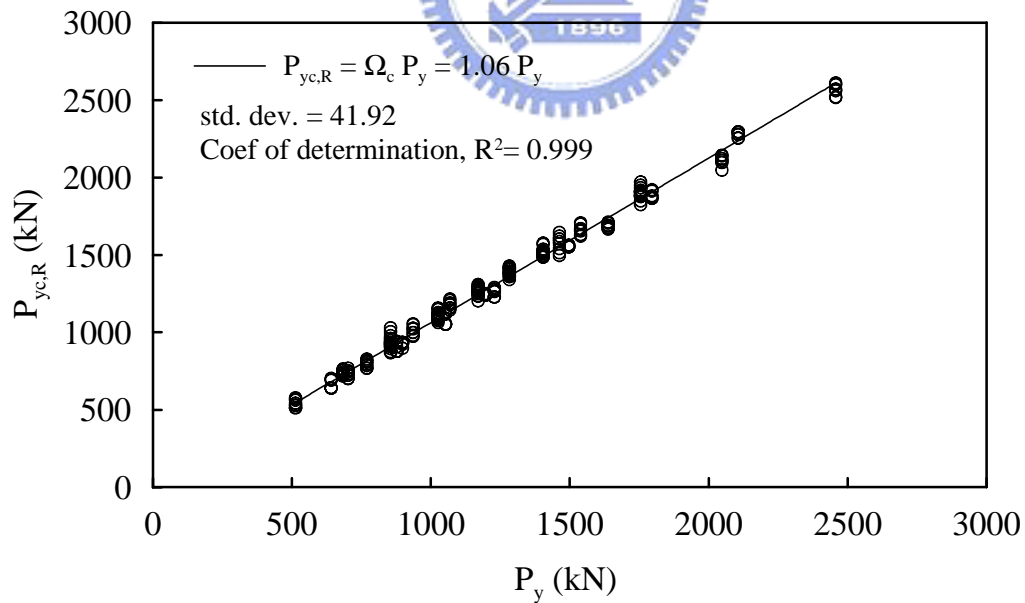


圖 4.61 圓弧形削切降伏力量隨削切半徑之變化



(a) Tension



(b) Compression

圖 4.62 圓弧形削切降伏力量迴歸分析

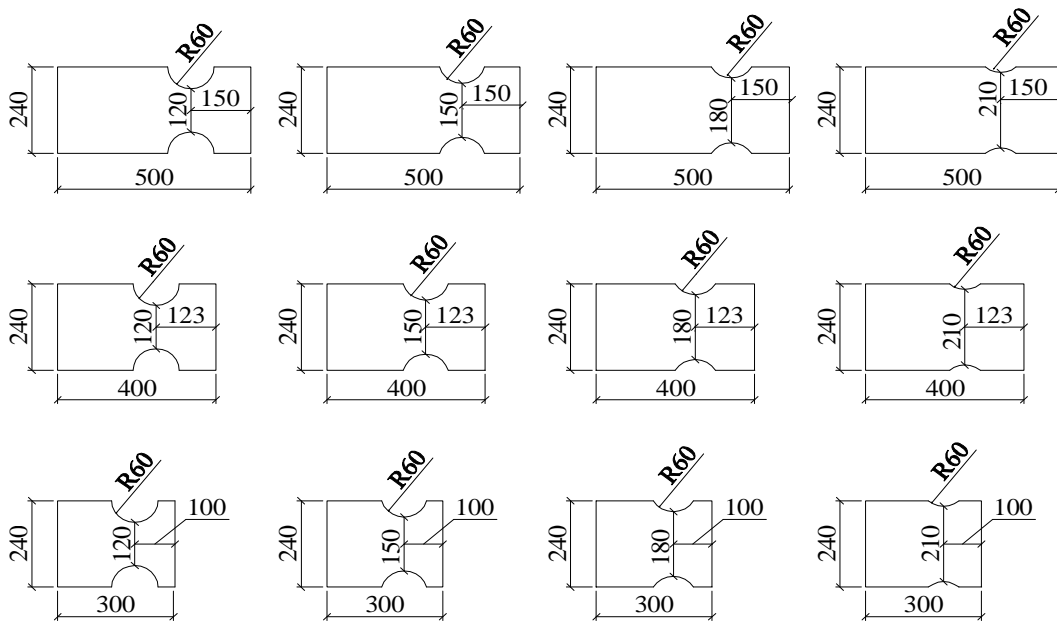


圖 4.63 參數研究所採用之削切蓋板尺寸 ($R = 60 \text{ mm}$)

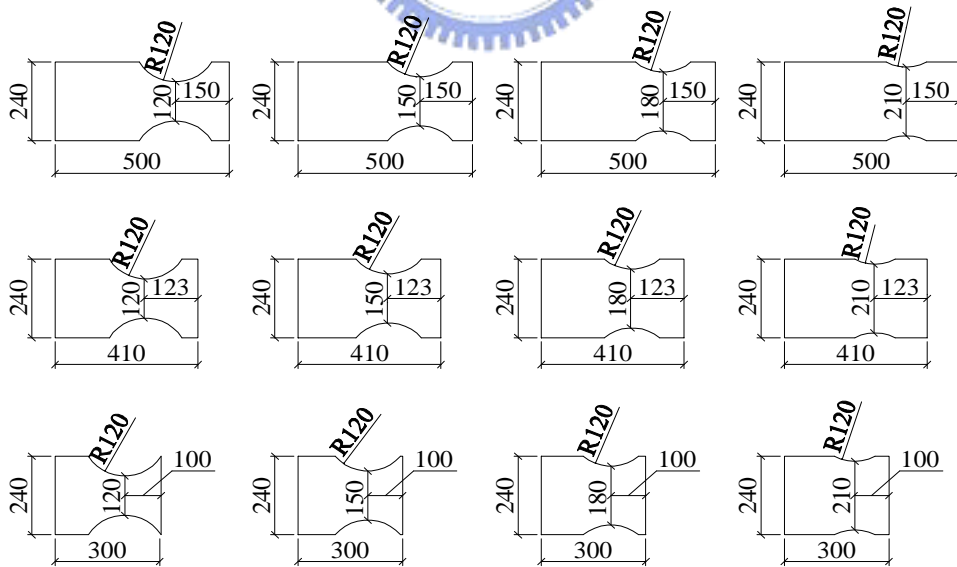


圖 4.64 參數研究所採用之削切蓋板尺寸 ($R = 120 \text{ mm}$)

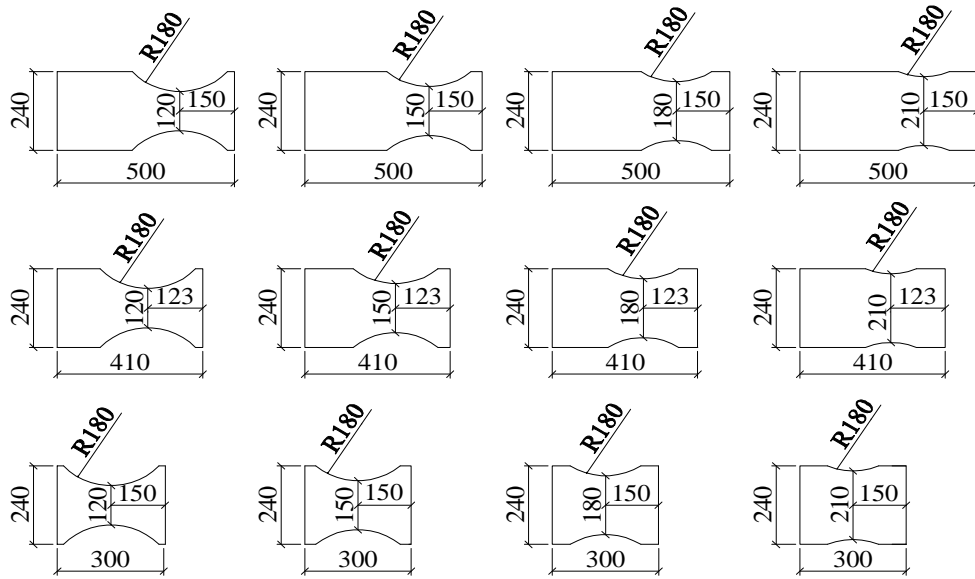


圖 4.65 參數研究所採用之削切蓋板尺寸 (R = 180 mm)

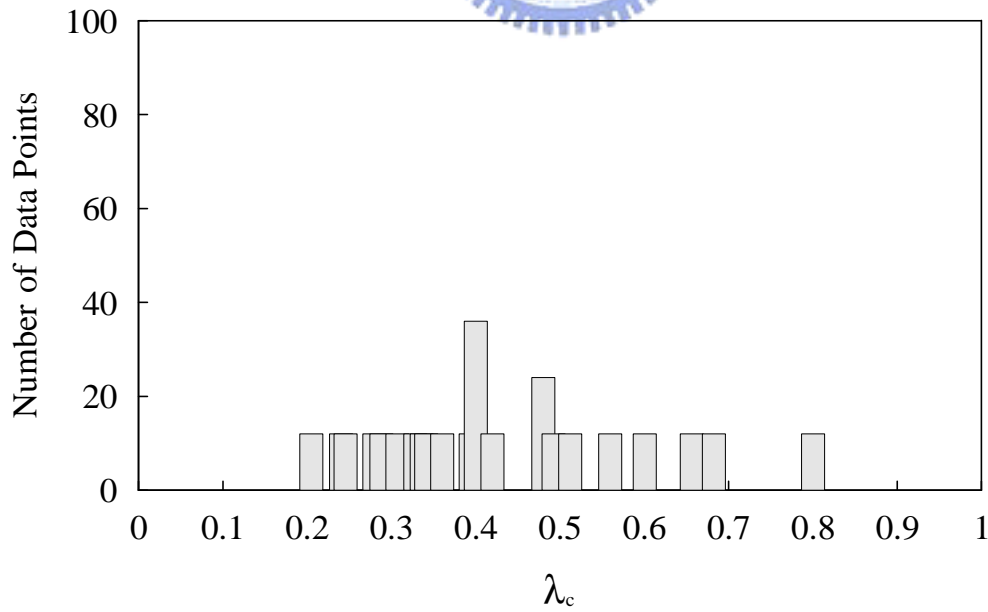


圖 4.66 參數 λ_c 資料點分佈情形

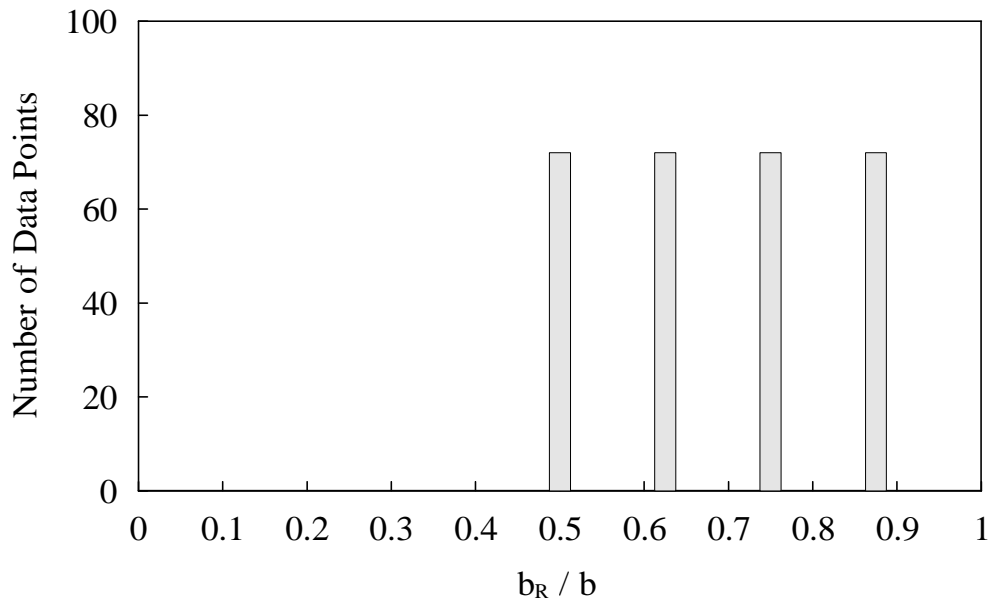


圖 4.67 參數 b_R / b 資料點分佈情形

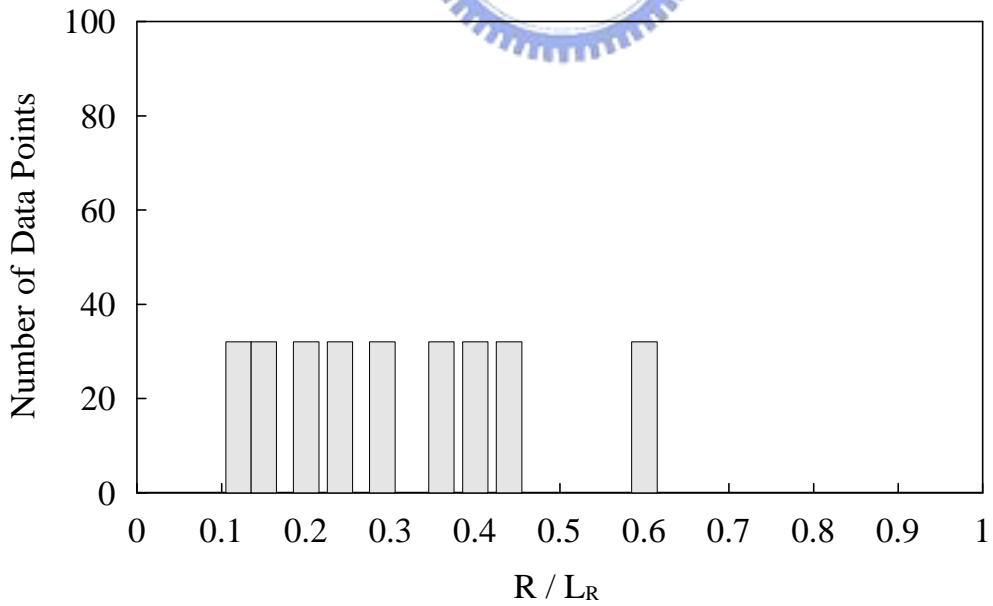


圖 4.68 參數 R / L_R 資料點分佈情形

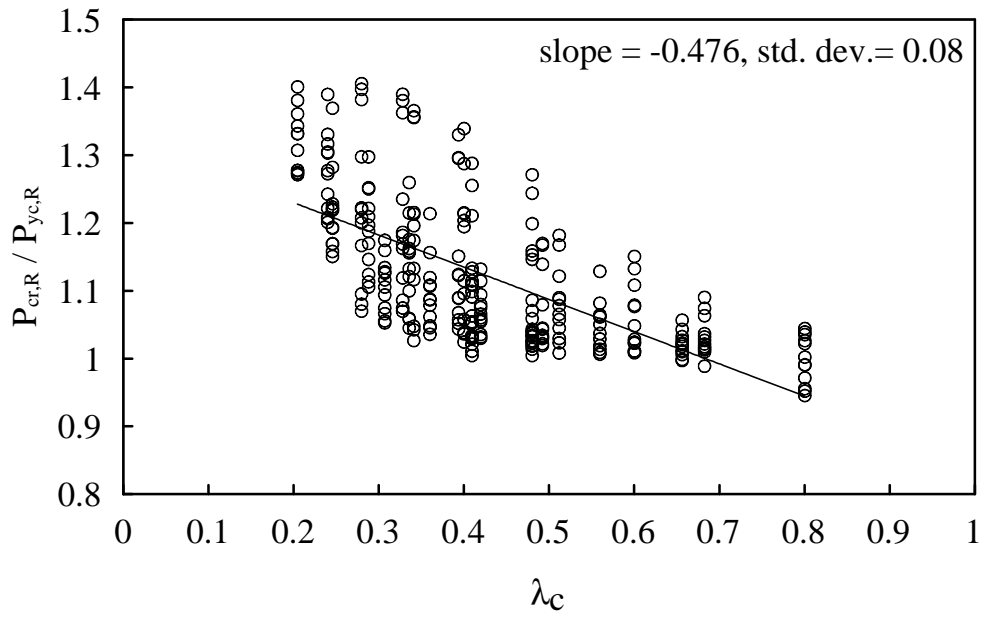


圖 4.69 細長比 I_c 對削切蓋板 $P_{cr,R} / P_{yc,R}$ 之迴歸分析結果



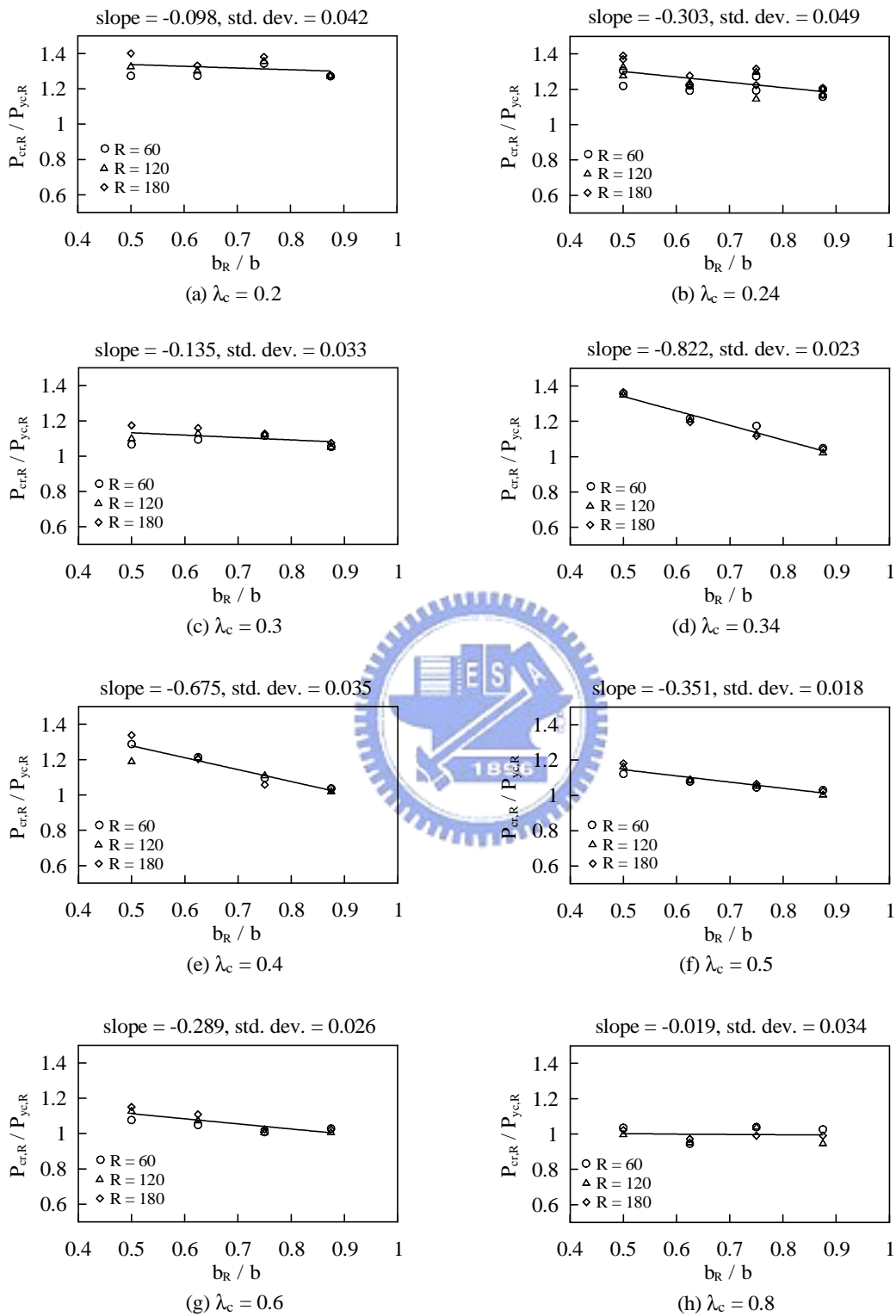


圖 4.70 寬度效應 b_R/b 對削切蓋板 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 之迴歸分析結果

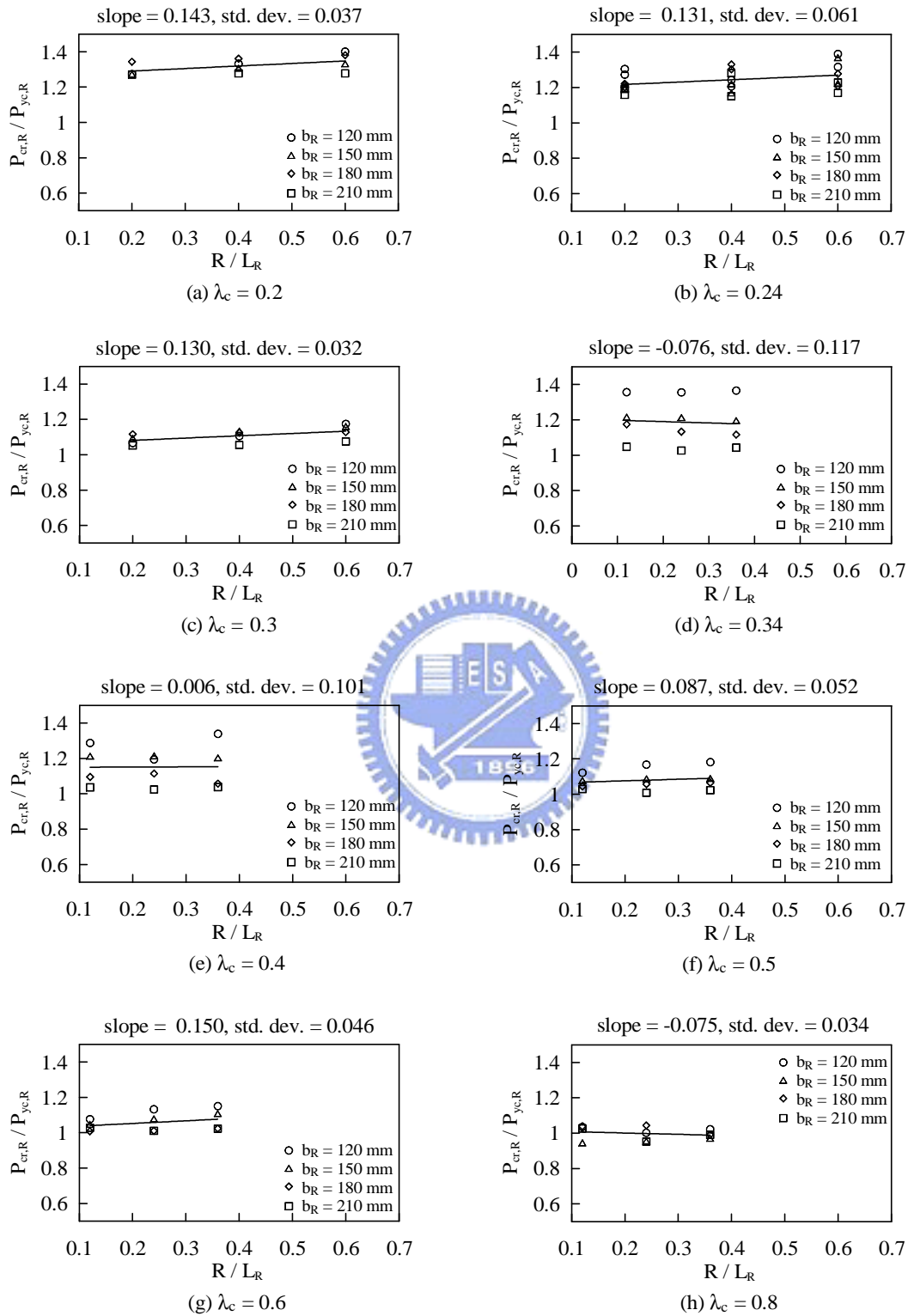


圖 4.71 削切半徑效應 R/L_R 對削切蓋板 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 之迴歸分析結果

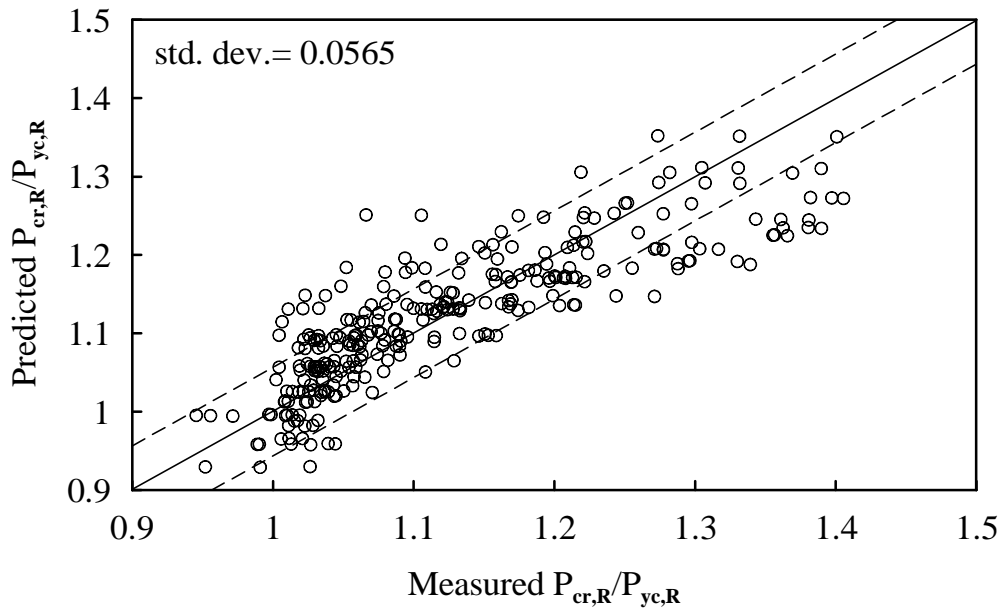


圖 4.72 迴歸公式準確度分析 (Equation 4.36)

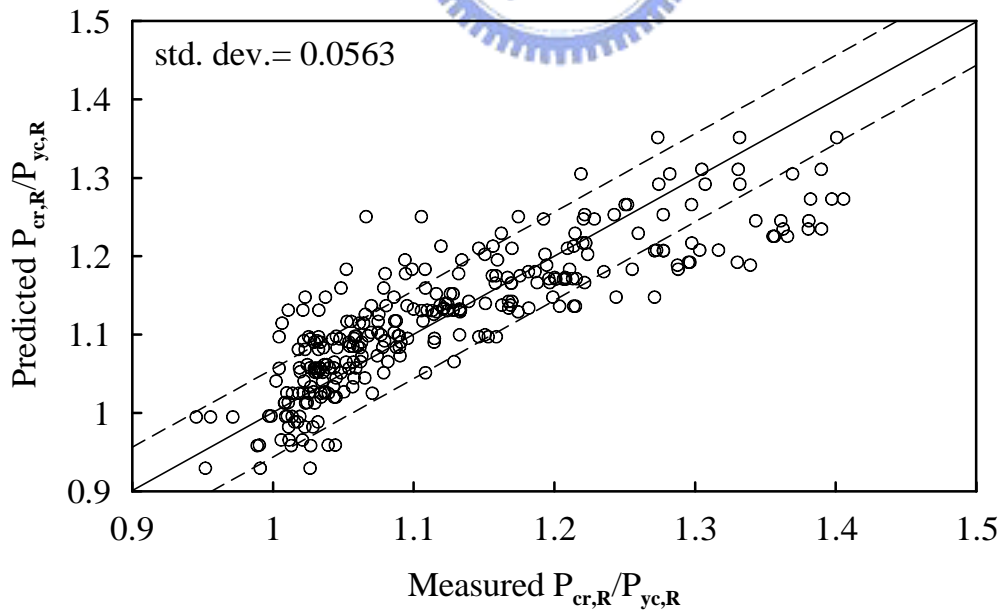


圖 4.73 迴歸公式準確度分析 (Equation 4.37)

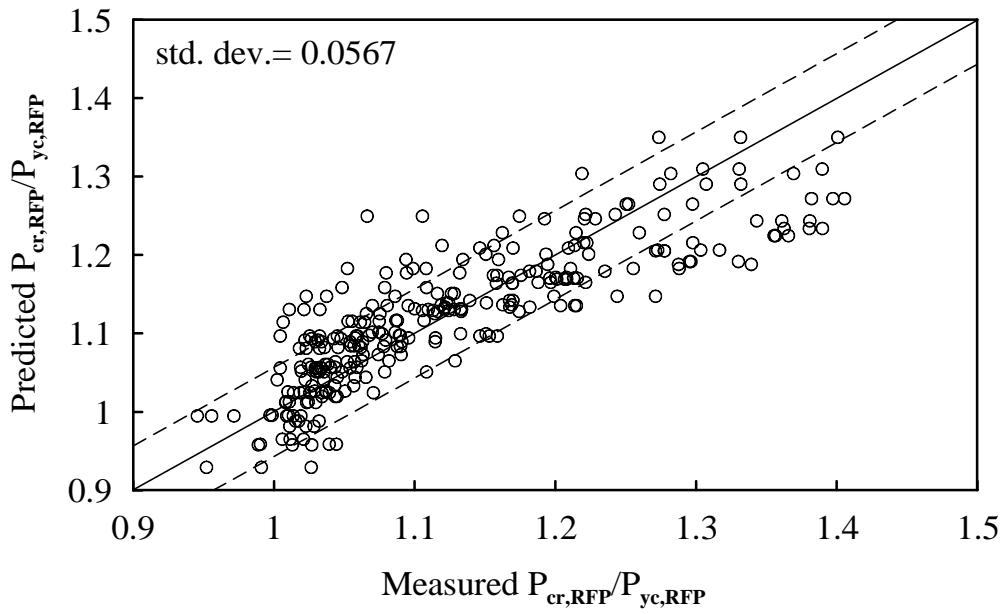


圖 4.74 迴歸公式準確度分析 (Equation 4.38)

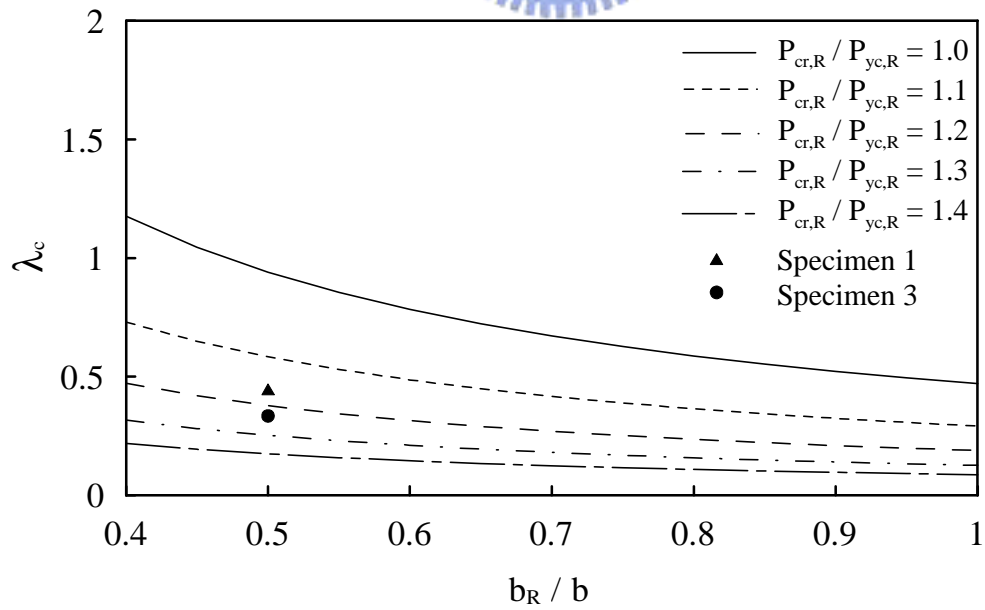


圖 4.75 固定 $P_{cr,R}/P_{yc,R}$ 下細長比 λ_c 與寬度效應 b_R/b 關係圖

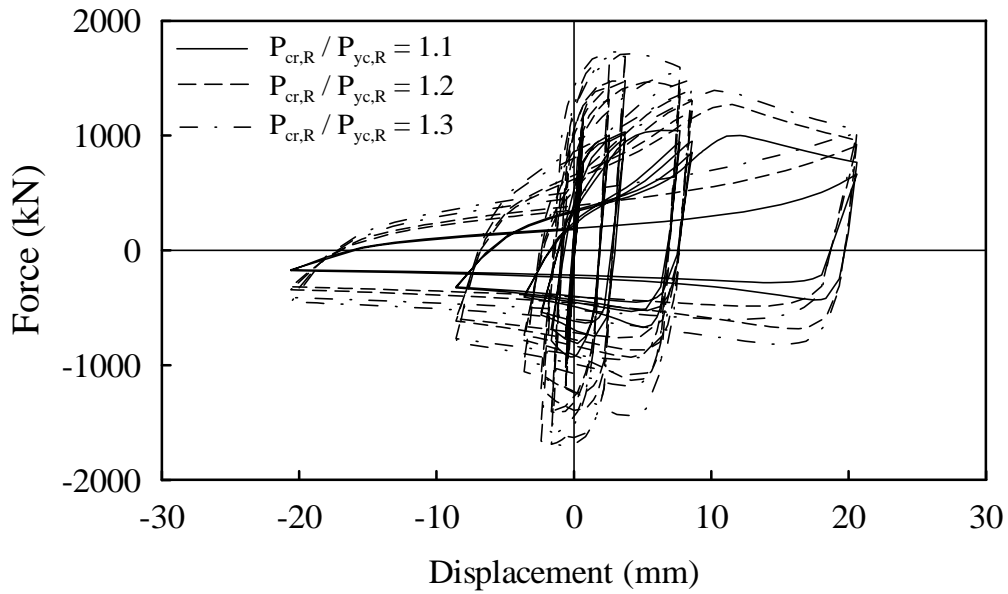


圖 4.76 各強度比值下削切蓋板力量與位移關係

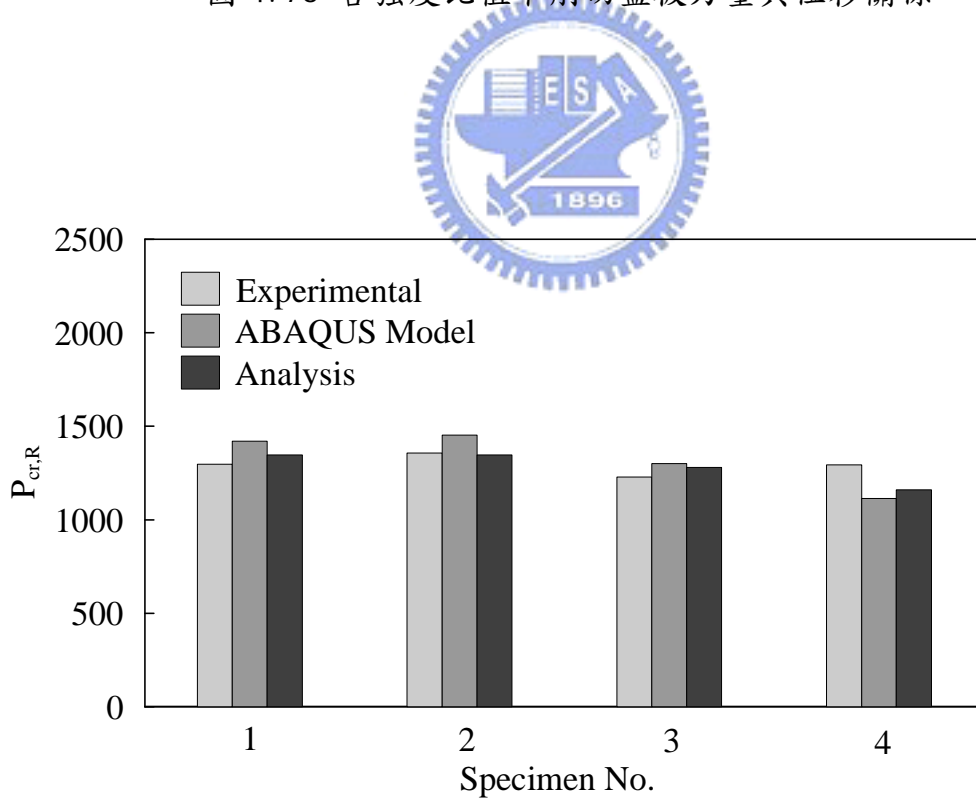


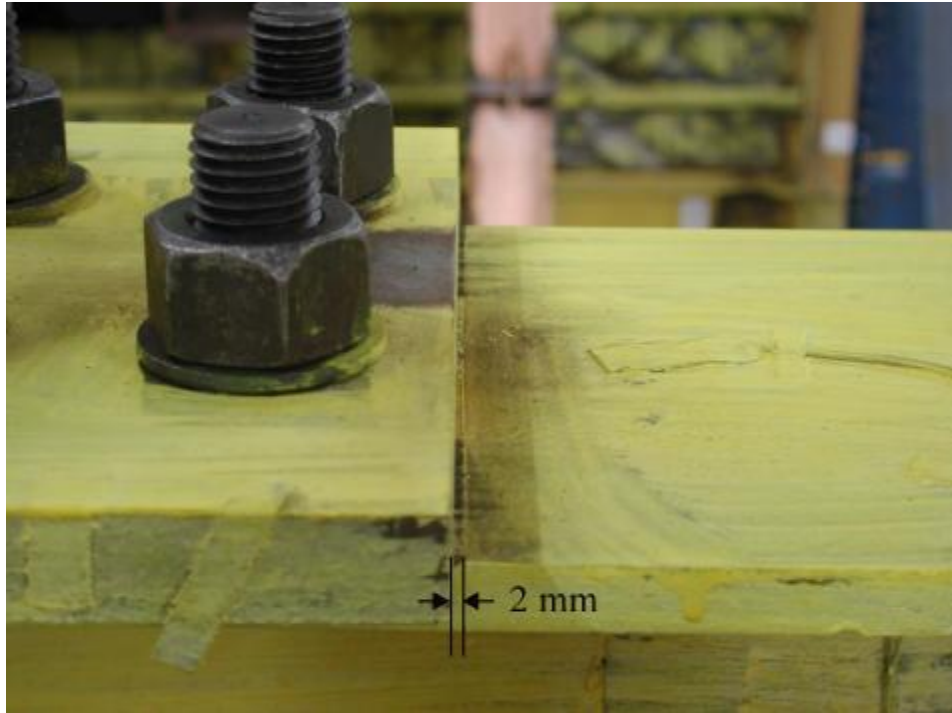
圖 4.77 實驗與有限元素分析所得各組試體之挫屈力量比較



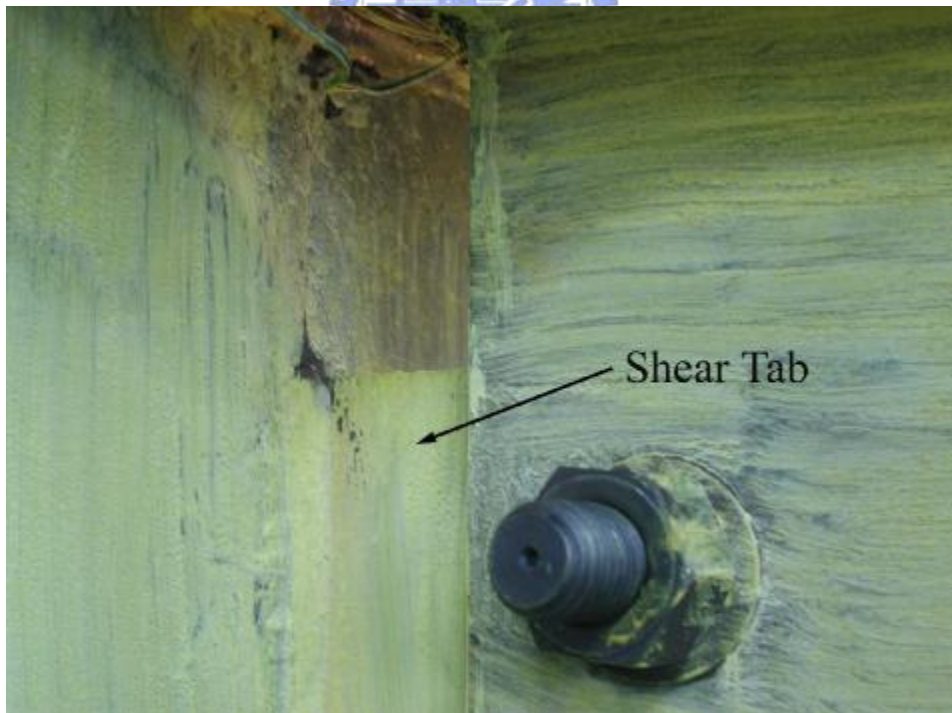
照片 3.1 試體 1 組裝完成



照片 3.2 試體 1 試驗前全景



照片 3.3 試體 1 削切蓋板與梁翼板相接之螺栓滑動 ($\theta = 0.01$ 弧度)



照片 3.4 試體 1 剪力板端部降伏 ($\theta = -0.015$ 弧度)



照片 3.5 試體 1 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.03$ 弧度)



照片 3.6 試體 1 下側削切蓋板降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)



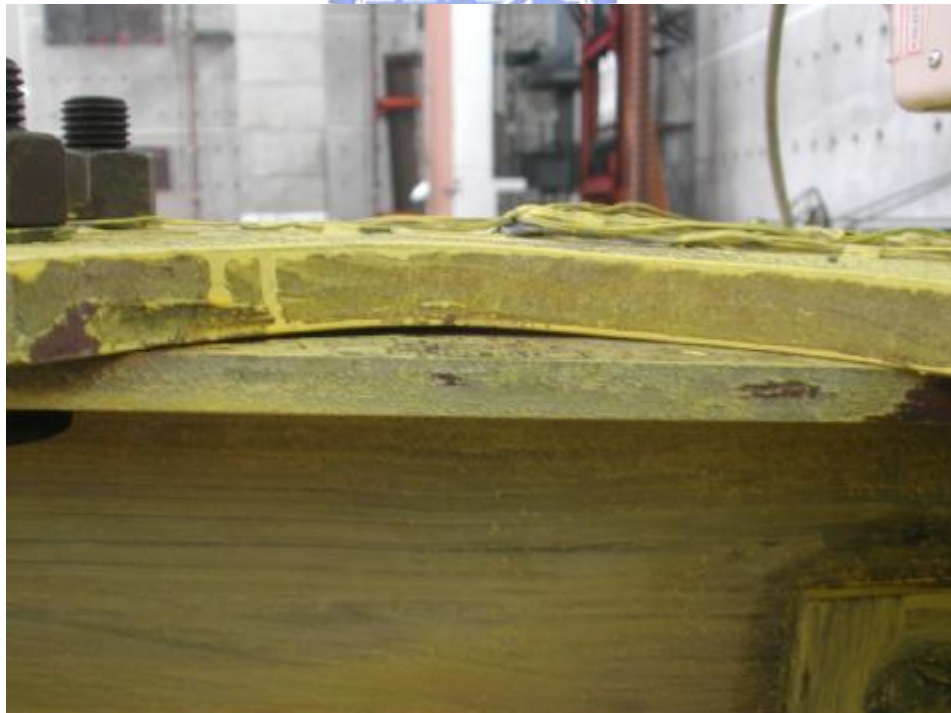
照片 3.7 試體 1 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)



照片 3.8 試體 1 螺栓孔附近梁翼板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)



照片 3.9 試體 1 削切蓋板端部梁翼板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)



照片 3.10 試體 1 上側削切蓋板挫屈 ($\theta = 0.05$ 弧度)



照片 3.11 試體 1 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.05$ 弧度)



照片 3.12 試體 1 整體變形情形 ($\theta = -0.06$ 弧度)



照片 3.13 試體 1 上下削切蓋板變形情形 ($\theta = -0.06$ 弧度)



照片 3.14 試體 2 試驗前全景



照片 3.15 試體 2 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.01$ 弧度)



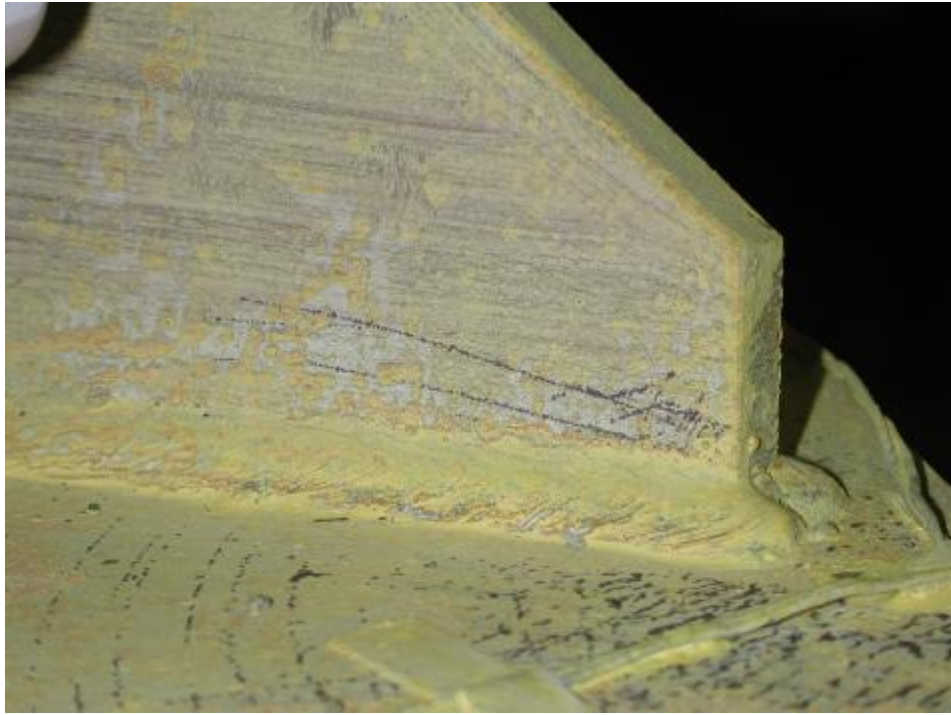
照片 3.16 試體 2 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.015$ 弧度)



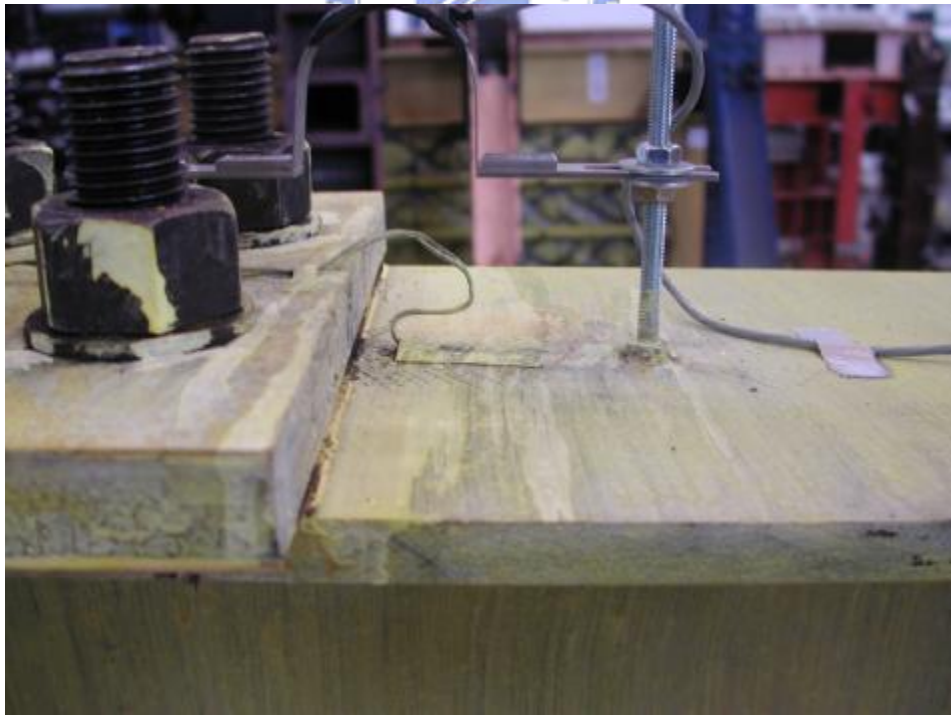
照片 3.17 試體 2 下側削切蓋板與梁翼板間之空隙 ($\theta = 0.015$ 弧度)



照片 3.18 試體 2 上側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.03$ 弧度)



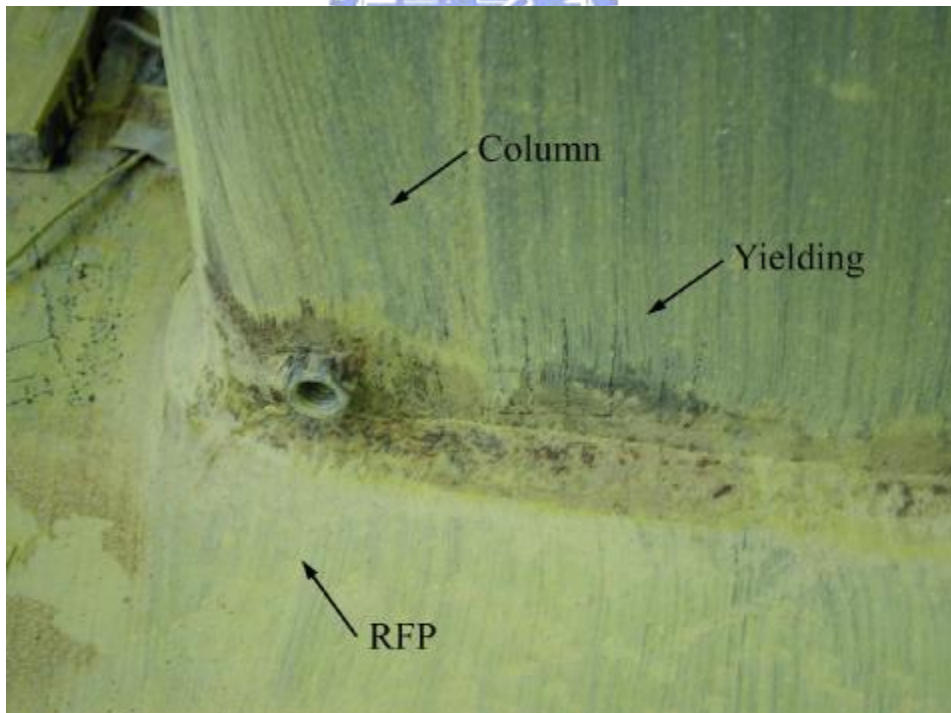
照片 3.19 試體 2 三角形加勁板降伏 ($\theta = 0.03$ 弧度)



照片 3.20 試體 2 上側削切蓋板端部之梁翼板降伏 ($\theta = 0.03$ 弧度)



照片 3.21 試體 2 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.03$ 弧度)



照片 3.22 試體 2 梁柱交會區鋼管降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)



照片 3.23 試體 2 剪力板降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)



照片 3.24 試體 2 上側削切蓋板挫屈 ($\theta = 0.05$ 弧度)



照片 3.25 試體 2 上側削切蓋板拉斷($\theta = -0.05$ 弧度)



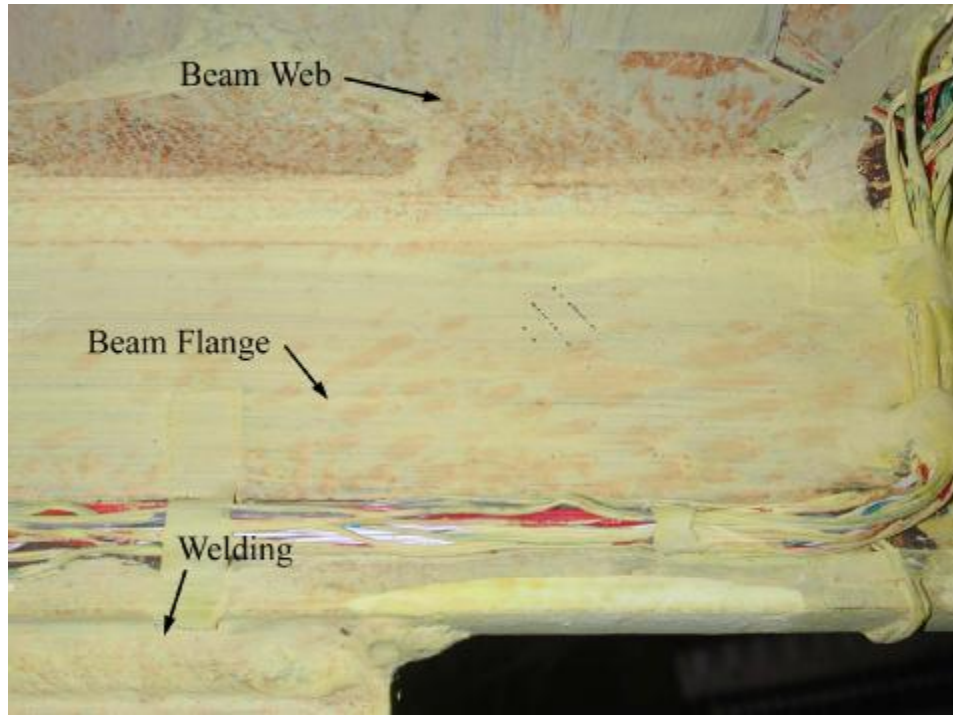
照片 3.26 試體 2 加勁板焊道些微拉裂 ($\theta = -0.05$ 弧度)



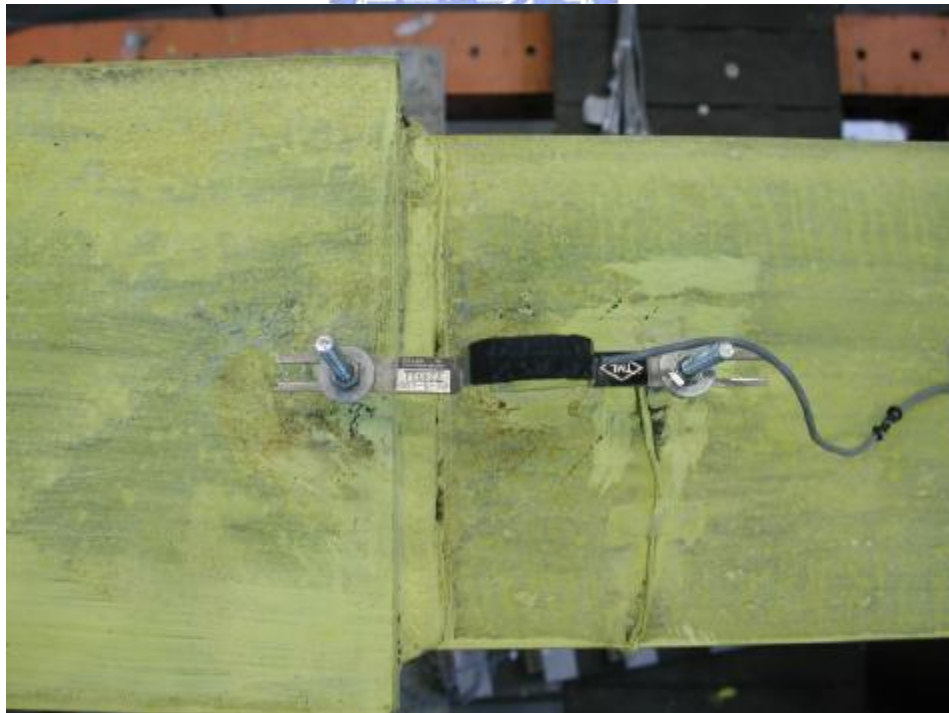
照片 3.27 試體 3 試驗前全景



照片 3.28 試體 3 下側削切蓋板降伏 ($\theta = 0.01$ 弧度)



照片 3.29 試體 3 梁下翼板內側降伏 ($\theta = 0.015$ 弧度)



照片 3.30 試體 3 梁上翼板於削切蓋板端部些微降伏 ($\theta = -0.02$ 弧度)



照片 3.31 試體 3 上側削切蓋板挫屈 ($\theta = 0.03$ 弧度)



照片 3.32 試體 3 梁腹板轉動 ($\theta = 0.03$ 弧度)



照片 3.33 試體 3 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.03$ 弧度)



照片 3.34 試體 3 削切蓋板與梁翼板間焊接處降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)



照片 3.35 試體 3 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.04$ 弧度)



照片 3.36 試體 3 焊道拉裂 ($\theta = -0.04$ 弧度)



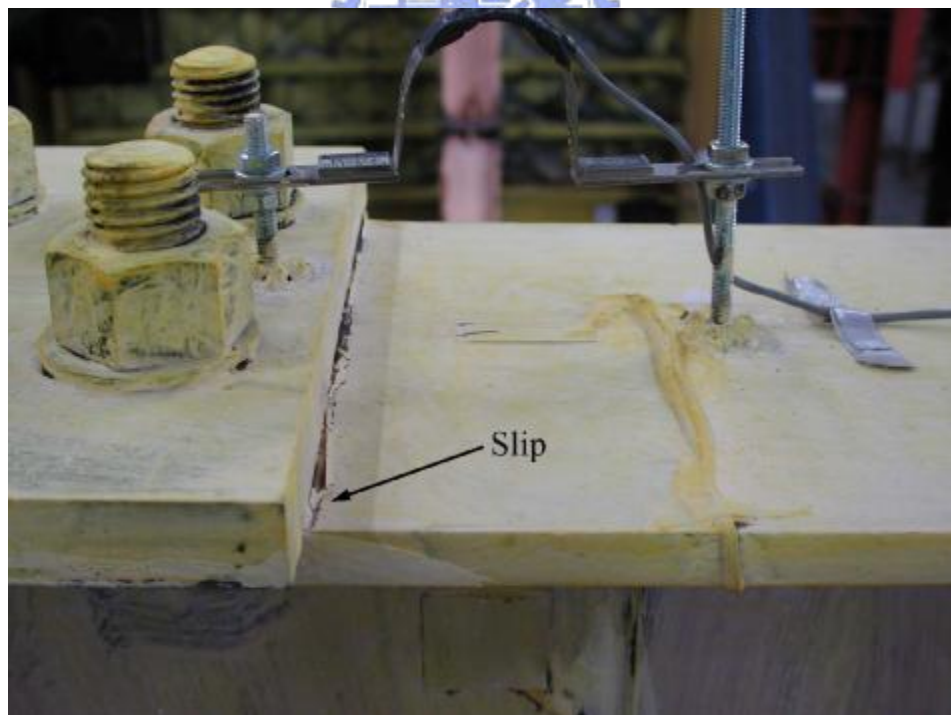
照片 3.37 試體 3 下側削切蓋板挫屈 ($\theta = -0.05$ 弧度)



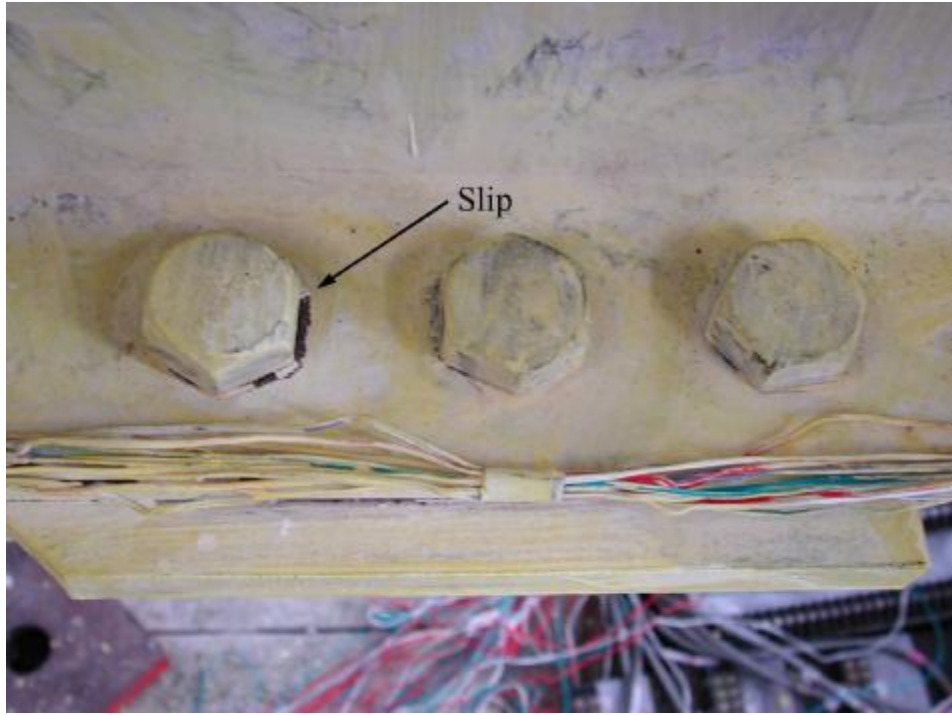
照片 3.38 試體 3 下側削切蓋板與梁分離 ($\theta = 0.06$ 弧度)



照片 3.39 試體 4 試驗前全景



照片 3.40 試體 4 削切蓋板與梁翼板相接之螺栓滑動 ($\theta = -0.01$ 弧度)



照片 3.41 試體 4 螺栓孔周圍因螺栓滑動掉漆 ($\theta = 0.015$ 弧度)



照片 3.42 試體 4 削切蓋板靠近端部角落降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)



照片 3.43 試體 4 削切蓋板端部之梁翼板降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)



照片 3.44 試體 4 剪力板下側端部降伏 ($\theta = -0.03$ 弧度)



照片 3.45 試體 4 剪力板上側端部降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)



照片 3.46 試體 4 梁下翼板螺栓孔周圍降伏 ($\theta = 0.04$ 弧度)



照片 3.47 試體 4 連接 T 型加勁板之前排螺栓傾斜 ($\theta = 0.05$ 弧度)



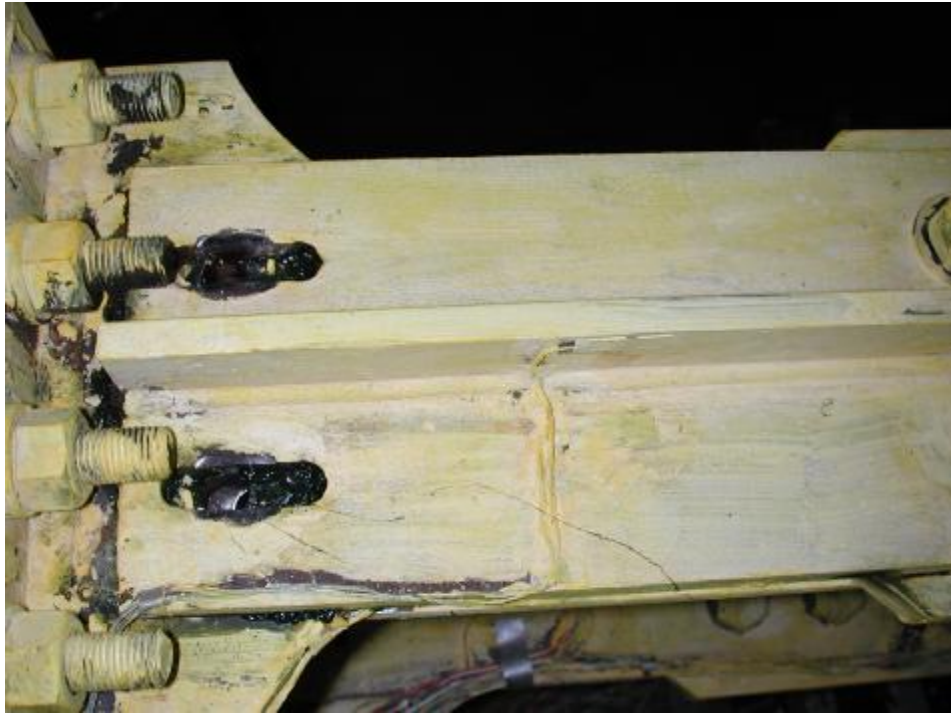
照片 3.48 試體 4 梁翼板降伏 ($\theta = -0.05$ 弧度)



照片 3.49 試體 4 上側削切蓋板端部之梁翼板降伏 ($\theta = 0.06$ 弧度)



照片 3.50 試體 4 下側削切蓋板端部之梁翼板降伏 ($\theta = 0.06$ 弧度)



照片 3.51 試體 4 上側螺栓彈出 ($\theta = -0.06$ 弧度)



照片 3.52 試體 4 梁翼板內側及腹板降伏 ($\theta = -0.06$ 弧度)



照片 3.53 試體 4 試驗後全景 ($\theta = 0.07$ 弧度)



照片 3.54 試體 4 下側螺栓彈出 ($\theta = 0.07$ 弧度)



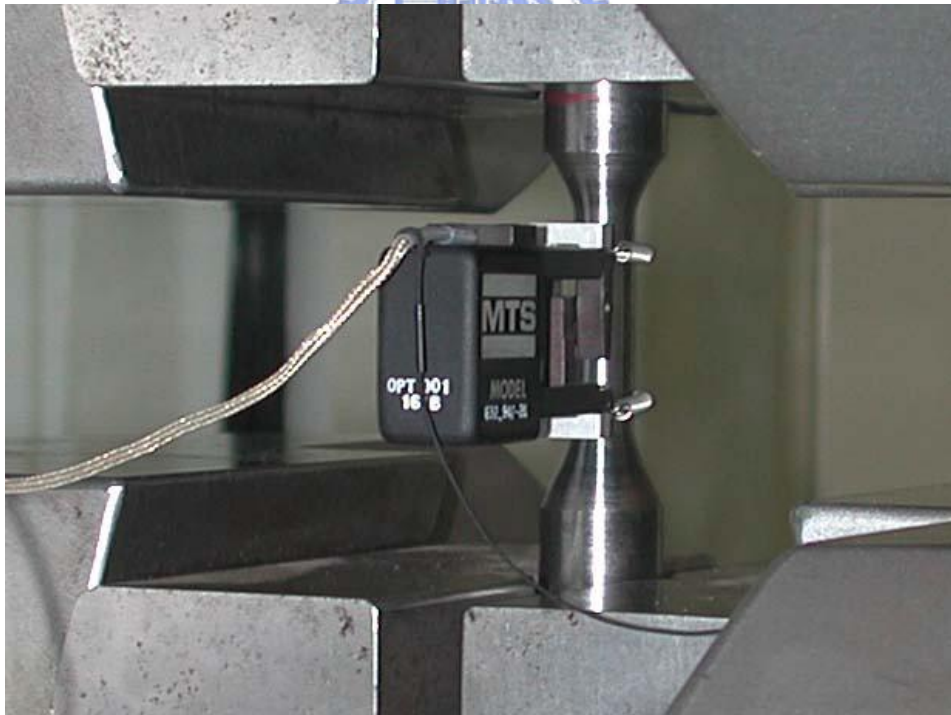
照片 3.55 試體 4 上側削切蓋板挫屈($\theta = 0.07$ 弧度)



照片 3.56 試體 4 剪斷之螺栓與完好之螺栓比較 ($\theta = 0.07$ 弧度)



(b) Test Setup



(b) Close-up

照片 4.1 鋼材反覆載重試驗設置



照片 4.2 試片 A1 試驗後挫屈情形

