

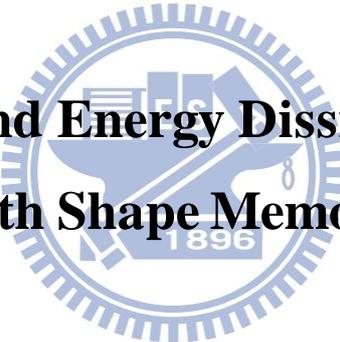
國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

鋼柱基底含形狀記憶合金裝置
之自復位與消能

**Self-centering and Energy Dissipation of a Steel
Column Base with Shape Memory Alloy Devices**



研究生：蔡榮軒

指導教授：陳誠直博士

中華民國一零二年十月

鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之自復位與消能

Self-centering and Energy Dissipation of a Steel Column Base with Shape Memory Alloy Devices

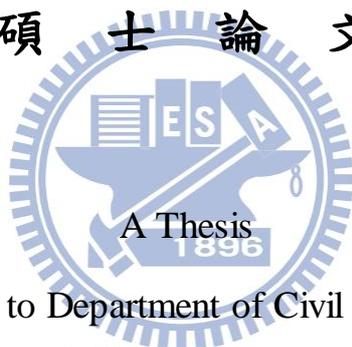
研究生：蔡榮軒

Student : Rung-Shiuan Tsai

指導教授：陳誠直博士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

國立交通大學
土木工程學系
碩士論文



Submitted to Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering

October 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一零二年十月

鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之自復位與消能

研究生：蔡榮軒

指導教授：陳誠直 博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

本研究探討鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之消能與自復位行為，利用形狀記憶合金之超彈性以鉸接方式將鋼柱與基礎接合，取代傳統的銲接或螺栓接合，使結構擁有承受地震後自復位與無殘餘變形之能力。研究參數包含柱頂垂直載重大小與形狀記憶合金裝置，探討其於子結構之自復位以及消能行為之影響。研究方法先採理論推導，建立子結構遲滯迴圈之行為模式；進而規劃試體進行試驗，以驗證其行為。形狀記憶合金材料試驗顯示其超彈性深受熱處理影響。實驗結果之遲滯迴圈顯示藉由柱頂之垂直載重與形狀記憶合金裝置之超彈性，使得子結構具有良好之自復位與消能能力。柱頂垂直載重越大子結構之解壓彎矩越大，且間隙開啟後旋轉勁度下降也越大。理論分析模型可準確預測鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之行為。本研究證實採用形狀記憶合金裝置於鋼柱基底，鋼柱於受反覆側向載重後可達自復位與消能之效果。

關鍵字：自復位、形狀記憶合金、消能、柱基底

Self-centering and Energy Dissipation of a Steel Column Base with Shape Memory Alloy Devices

Student : Rung-Shiuan Tsai Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

This study aims to investigate behaviors of the self-centering and energy dissipation of steel column base connections with shape memory alloy (SMA) devices. Instead of using traditional welded or bolted means, the pinned connections between the column and foundation used superelastic austenite SMAs to achieve the self-centering and without residual deformation of the structures. To explore the effects on the self-centering and energy dissipation of the subassembly, the parameters studied included the gravity load at the column tip and the SMAs. The hysteretic behavior of the subassembly was established analytically, and the test specimens were further designed to proceed the test and to validate the behavior. The material test of the SMAs demonstrated that the heat treatment significantly influenced the super elasticity. The hysteresis loops of the test results showed that the subassembly was capable of the self-centering and energy dissipation attributed to the gravity load at the column tip and the use of the SMAs. The increase of the gravity load at the column tip resulted in the increase of the decompression moment of the subassembly and the decrease of the rotational stiffness after gap opened. Furthermore, the analytical models predicted well the test results. This study had verified that the use of the SMA devices at the column base could achieve the results of the self-centering and energy dissipation while the column was subjected to lateral cyclic loads.

Keywords: self-centering, shape memory alloy, energy dissipation, column base.

誌謝

感謝恩師 陳誠直博士在我碩士班期間的教誨與細心指導，於這兩年中讓我學習到了獨立思考以及隨機應變能力，雖於研究過程中困難重重，但在克服了問題之後便會更加進步，在此對恩師致上最誠摯的敬意。

研究所期間，感謝林政億學長不計辛勞的協助，無論是生活上、學術上與技術層面上，學長總是能夠在我有困難時提供解決方法；感謝王士庭學長、湯偉乾學長、黃政勳學長、林家毅學長與吳政哲學長在研究室中對我的照顧；感謝同學林桓緯、胡耀光與柯宗滕無私的研究交流與討論；感謝學弟李承剛、謝哲民及王信賢於試驗進行時的協助，使我的試驗過程可以更加順利。陳誠直老師研究室一直都會是一個對於研究、試驗、課業以及各位的興趣交流的好環境。

感謝國家地震工程研究中心之受震自復位結構性能研究團隊，蔡克銓教授、許協隆教授、鄭錦銅教授、周中哲教授、陳垂欣教授、林克強博士以及莊勝智研究員的協助與熱心指導；感謝國家地震工程研究中心的陳安志先生、姚天佑先生、陳家乾學長以及鴻舜機械周仁財先生及其工作同仁對於試體安裝以及試驗的協助；感謝中瑞材料科技有限公司李老闆提供形狀記憶合金之資訊與協助；感謝亞竹企業社許金源老闆沒有怨言的替試體趕工。

最後感謝父母親多年來的體諒與照顧，使我擁有一個沒有生活壓力、良好的學習環境，致使我可以專心於研究上。

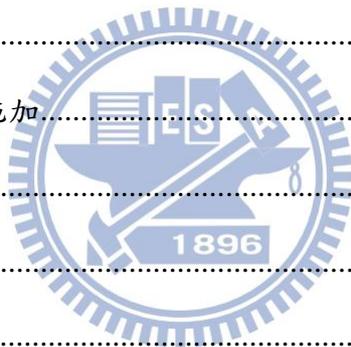
僅將此篇碩士論文獻給我的家人以及曾經協助過我的各位，願大家與我一同分享此份喜悅與榮耀。

榮軒 一百零二年十月

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
符號表.....	xii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究方法.....	2
1.4 文獻回顧.....	2
1.4.1 預力系統.....	2
1.4.2 形狀記憶合金.....	3
1.5 論文內容.....	5
第二章 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之力學行為.....	6
2.1 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置受力之特性.....	6
2.2 柱之柱底面回復彎矩與層間變位角.....	6
2.3 形狀記憶合金裝置之柱底面回復彎矩.....	7
2.4 柱頂垂直載重之柱底面回復彎矩與層間變位角.....	8
2.5 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之模型建立.....	9
第三章 實尺寸子結構反覆載重試驗.....	12
3.1 前言.....	12

3.2	形狀記憶合金.....	12
3.2.1	簡介.....	12
3.2.2	製造與形狀記憶處理.....	13
3.2.3	應力應變曲線測定.....	14
3.3	試驗設計之參數討論.....	14
3.4	柱翼加勁板.....	15
3.5	形狀記憶合金裝置.....	16
3.6	設計步驟.....	16
3.7	試驗規劃.....	17
3.7.1	試驗簡介.....	17
3.7.2	試體規劃.....	17
3.8	試體組裝與預力施加.....	19
3.8.1	試體組裝.....	19
3.8.2	預力施加.....	19
3.9	試驗設置.....	20
3.9.1	加載系統.....	20
3.9.2	量測系統.....	20
3.10	試驗程序.....	21
第四章	試驗結果與討論.....	23
4.1	形狀記憶合金材料試驗.....	23
4.1.1	試體 H0D23.5.....	23
4.1.2	試體 H0D19-1.....	23
4.1.3	試體 H0D19-2.....	23
4.1.4	試體 H600D19.....	24



4.1.5 試體 H450D19	24
4.2 試驗數據修正方法	25
4.3 實尺寸子結構試驗	26
4.3.1 試體 R0LR20	26
4.3.2 試體 R2LR20	27
4.3.3 試體 R2LR20-S	28
4.3.4 試體 R2LR30	28
4.4 試體之遲滯迴圈消能行為	30
4.5 試驗之變位分析	31
4.6 試驗數據與理論推導之比較	32
4.7 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之設計建議	34
第五章 結論與建議	36
5.1 結論	36
5.2 建議	36
參考文獻	38



表目錄

表 3.1 NiTi 形狀記憶合金之出廠報告	41
表 3.2 試體參數表.....	41
表 3.3 試體之理論數據.....	42
表 3.4 考慮預力鋼絞線之試體理論數據.....	42
表 3.5 鋼材實際材料性質表.....	42
表 3.6 鋼絞線性質表.....	43
表 4.1 形狀記憶合金各試體之材料試驗數據.....	44
表 4.2 試體各層間變位角之消能.....	44
表 4.3 各試體間隙開啟角度與理論比較.....	45
表 4.4 試體 R0LR20 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較	46
表 4.5 試體 R0LR20 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較	46
表 4.6 試體 R2LR20 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較	47
表 4.7 試體 R2LR20 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較	47
表 4.8 試體 R2LR20 各層間變位角之形狀記憶合金應變最大值	48
表 4.9 試體 R2LR20 各層間變位角迴圈結束之形狀記憶合金殘餘應變	48
表 4.10 試體 R2LR20-S 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較	49
表 4.11 試體 R2LR20-S 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較	49
表 4.12 試體 R2LR30 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較	50
表 4.13 試體 R2LR30 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較	50
表 4.14 試體 R2LR30 各層間變位角之形狀記憶合金應變最大值	51
表 4.15 試體 R2LR30 各層間變位角迴圈結束之形狀記憶合金殘餘應變	51
表 4.16 各層間變位角之迴圈結束之鋼絞線內力.....	52
表 4.17 各試體鋼絞線內力比較表.....	52

圖目錄

圖 1.1 含消能鋼棒之預力梁柱接頭 (Christopoulos et al. 2002).....	53
圖 1.2 預力系統之預鑄混凝土梁柱接頭 (Englekirk 2002).....	53
圖 1.3 應用楔形墊片之柱與基礎接合 (Takamatsu and Tamai 2005).....	54
圖 1.4 預力自復位系統之柱與基礎 (Chi and Liu 2012).....	54
圖 1.5 形狀記憶合金加熱前後之試驗數據比較 (Ocel et al. 2004).....	55
圖 1.6 各截面積之形狀記憶合金試驗數據比較 (DesRoches et al. 2004).....	55
圖 1.7 橋梁接合處移位摔落 (Andrawes and DesRoches 2005).....	56
圖 1.8 不同溫度熱處理之形狀記憶合金應力應變曲線：(a) 400 °C; (b) 440 °C; (c) 480 °C; (d) 520 °C; (e) 560 °C; (f) 600 °C (Du et al. 2005).....	56
圖 1.9 棒狀形狀記憶合金運用於剪力牆 (Liao et al. 2006).....	57
圖 1.10 形狀記憶合金安裝於三層樓構架 (McCormick et al. 2006).....	57
圖 1.11 銅鋁鎳形狀記憶合金運用於梁柱接頭 (Sepúlveda et al. 2007).....	58
圖 1.12 形狀記憶合金有無預拉應變之比較 (Zhang and Zhu 2008).....	58
圖 2.1 未受到任何外加力之自由體圖.....	59
圖 2.2 施加水平力於柱頂之自由體圖.....	59
圖 2.3 柱與基礎間隙開啟前瞬間之自由體圖.....	60
圖 2.4 柱與基礎間隙開啟後之自由體圖.....	60
圖 2.5 形狀記憶合金應力應變曲線.....	61
圖 2.6 形狀記憶合金提供柱底面彎矩與間隙開啟角關係圖.....	61
圖 2.7 柱頂垂直載重於柱底面彎矩與層間變位角關係圖.....	62
圖 2.8 柱頂垂直載重於柱底面彎矩之常數項與層間變位角關係圖.....	62
圖 2.9 柱頂垂直載重於柱底面彎矩之變數項與層間變位角關係圖.....	63
圖 2.10 整體子結構勁度疊加示意圖.....	63
圖 2.11 整體子結構之遲滯迴圈圖.....	64
圖 3.1 形狀記憶合金之應力應變曲線示意圖 (DesRoches et al. 2004).....	65

圖 3.2 形狀記憶合金車牙切削設計圖.....	65
圖 3.3 形狀記憶合金應力應變曲線測定載重歷時圖.....	66
圖 3.4 試體設置圖.....	67
圖 3.5 試體設計圖之一.....	68
圖 3.6 試體設計圖之二.....	69
圖 3.7 試體設計圖之三.....	70
圖 3.8 基礎內鋼構件設計圖.....	71
圖 3.9 混凝土基礎設計圖之一.....	72
圖 3.10 混凝土基礎設計圖之二.....	72
圖 3.11 試體部件圖之一.....	73
圖 3.12 試體部件圖之二.....	73
圖 3.13 試體部件圖之三.....	74
圖 3.14 試體 R0LR20 之遲滯迴圈預測圖.....	75
圖 3.15 試體 R2LR20 之遲滯迴圈預測圖.....	75
圖 3.16 試體 R2LR20-S 之遲滯迴圈預測圖.....	76
圖 3.17 試體 R2LR30 之遲滯迴圈預測圖.....	76
圖 3.18 鋼柱、基礎與形狀記憶合金裝置之鉸接定位.....	77
圖 3.19 形狀記憶合金裝置之鉸接點鉚固定.....	77
圖 3.20 形狀記憶合金裝置之鉸接外側填角鉚、內側開槽鉚.....	78
圖 3.21 鋼絞線由中央開始預緊.....	78
圖 3.22 油壓槍依順序施加預力.....	79
圖 3.23 預力施加完成.....	79
圖 3.24 量測儀器設置圖.....	80
圖 3.25 AISC 建議之反覆載重位移歷時圖.....	81
圖 4.1 形狀記憶合金材料試驗設置圖.....	82
圖 4.2 試體 H0D23.5.....	82
圖 4.3 試體 H0D19-1.....	83

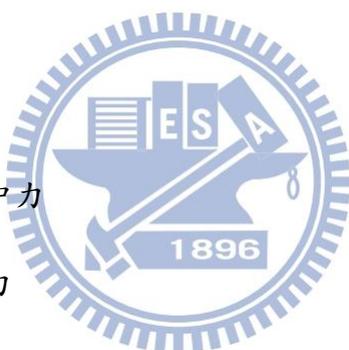
圖 4.4 試體 H0D19-2	83
圖 4.5 試體 H600D19	84
圖 4.6 試體 H450D19	84
圖 4.7 試體 H0D19-2 之試驗數據圖	85
圖 4.8 試體 H600D19 之試驗數據圖	86
圖 4.9 試體 H450D19 之試驗數據圖	87
圖 4.10 試驗之數據修正示意圖.....	88
圖 4.11 修正完成之子結構自由體圖.....	89
圖 4.12 實尺寸試驗現場設置圖.....	90
圖 4.13 鋼柱側向嚴重滑移.....	91
圖 4.14 側向滑移束制用鋼板.....	91
圖 4.15 間隙開啟且可放入一張 A4 厚度紙張.....	92
圖 4.16 鋼柱西向滑移頂至束制用鋼板.....	92
圖 4.17 試體 R0LR20 遲滯迴圈圖	93
圖 4.18 正迴圈之鉸接旋轉.....	94
圖 4.19 負迴圈之鉸接旋轉.....	94
圖 4.20 試體 R2LR20 遲滯迴圈圖	95
圖 4.21 SS400 鋼棒	96
圖 4.22 消能鋼棒與挫屈束制鋼管.....	96
圖 4.23 消能鋼棒挫屈.....	97
圖 4.24 試體 R2LR20-S 遲滯迴圈圖	98
圖 4.25 西南側形狀記憶合金斷裂.....	99
圖 4.26 東北側形狀記憶合金斷裂.....	99
圖 4.27 東北側斷裂之形狀記憶合金.....	100
圖 4.28 鋼柱與基礎接面石膏漆剝落.....	100
圖 4.29 試體 R2LR30 遲滯迴圈圖	101
圖 4.30 試體 R0LR20 之變位分析圖	102

圖 4.31 試體 R2LR20 之變位分析圖	103
圖 4.32 試體 R2LR20-S 之變位分析圖	104
圖 4.33 試體 R2LR30 之變位分析圖	105
圖 4.34 試體 R0LR20 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較	106
圖 4.35 試體 R2LR20 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較	106
圖 4.36 試體 R2LR20-S 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較	107
圖 4.37 試體 R2LR30 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較	107
圖 4.38 試體 R0LR20 之鋼絞線內力	108
圖 4.39 試體 R2LR20 之鋼絞線內力	108
圖 4.40 試體 R2LR20-S 之鋼絞線內力	109
圖 4.41 試體 R2LR30 之鋼絞線內力	109



符號表

A_c	鋼柱之截面積
A_f	形狀記憶合金之沃斯田態結束溫度
A_{flange}	鋼柱單側翼板之截面積
A_s	形狀記憶合金之沃斯田態開始溫度
A_{stif}	單側柱翼板加勁板之截面積
$A_{SMA,1}$	受拉側之形狀記憶合金截面積
$A_{SMA,2}$	受壓側之形狀記憶合金截面積
d_c	鋼柱之腹板高
E_s	鋼柱之彈性模數
F_{comp}	柱翼板所受之集中力
F_{pt}	預力鋼絞線之內力
$F_{pt,i}$	預力鋼絞線之初始內力
F_{SMA}	形狀記憶合金軸力
$F_{SMA,1}$	受拉側之形狀記憶合金軸力
$F_{SMA,2}$	受壓側之形狀記憶合金軸力
I_c	鋼柱之慣性矩
K	子結構之旋轉勁度
K_1	鋼柱與基礎間隙尚未開啟之子結構旋轉勁度
$K_{1,th}$	鋼柱與基礎間隙尚未開啟之子結構旋轉勁度理論值
K_2	鋼柱與基礎間隙開啟後形狀記憶合金未降伏之子結構旋轉勁度



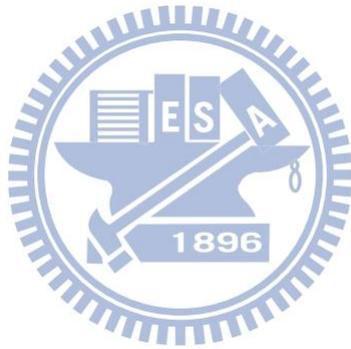
$K_{2,th}$	鋼柱與基礎間隙開啟後形狀記憶合金未降伏之子結構旋轉勁度理論值
K_3	鋼柱與基礎間隙開啟後形狀記憶合金已降伏之子結構旋轉勁度
$K_{3,th}$	鋼柱與基礎間隙開啟後形狀記憶合金已降伏之子結構旋轉勁度理論值
K_4	卸載階段近似於線性段之子結構旋轉勁度
$K_{4,th}$	卸載階段近似於線性段之子結構旋轉勁度理論值
K_5	卸載階段近似於非線性段之子結構旋轉勁度
$K_{5,th}$	卸載階段近似於非線性段之子結構旋轉勁度理論值
K_c	鋼柱之旋轉撓曲勁度
K_{DL}	柱頂垂直載重所造成彎矩之旋轉勁度
$K_{SMA,1}$	受拉側形狀記憶合金提供柱底之旋轉勁度
$K_{SMA,1,ea}$	e-a 階段受拉側形狀記憶合金提供柱底之旋轉勁度
$K_{SMA,1,ab}$	a-b 階段受拉側形狀記憶合金提供柱底之旋轉勁度
$K_{SMA,1,bc}$	b-c 階段受拉側形狀記憶合金提供柱底之旋轉勁度
$K_{SMA,1,cd}$	c-d 階段受拉側形狀記憶合金提供柱底之旋轉勁度
$K_{SMA,2}$	受壓側形狀記憶合金提供柱底之旋轉勁度
$K_{SMA,2,ea}$	e-a 階段受壓側形狀記憶合金提供柱底之旋轉勁度
L_c	鋼柱之長度
L_{stiff}	柱翼加勁板之長度
$L_{SMA,1}$	受拉側之形狀記憶合金長度
$L_{SMA,2}$	受壓側之形狀記憶合金長度
M	柱底面彎矩

M_c	鋼柱之彎矩
$M_{correct}$	將鋼絞線內力修正為柱頂垂直載重之柱底面彎矩
M_d	解壓彎矩
$M_{d,th}$	解壓彎矩之理論值
M_{exp}	柱底回復彎矩之試驗值
M_f	形狀記憶合金之麻田散態結束溫度
$M_{max,th}$	柱底面彎矩之理論最大值
M_{pt}	預力鋼絞線提供柱底之彎矩
M_{pred}	柱底回復彎矩之預測值
M_s	形狀記憶合金之麻田散態開始溫度
M_y	鋼柱之降伏彎矩
M_A	A 點之彎矩
M_B	B 點之彎矩
M_C	C 點之彎矩
M_D	D 點之彎矩
M_{DL}	柱頂垂直載重提供柱底之彎矩
M_E	E 點之彎矩
M_H	因柱頂層間變位角造成之分力提供柱底之彎矩
$M_{SMA,1}$	受拉側之形狀記憶合金提供柱底之彎矩
$M_{SMA,2}$	受壓側之形狀記憶合金提供柱底之彎矩
P	柱頂側向加載力



$P_{correct}$	將鋼絞線內力修正為柱頂垂直載重之柱頂側向加載力
P_y	鋼柱之軸向降伏強度
$r_{SMA,1}$	受拉側之形狀記憶合金對間隙開啟支點之力臂
$r_{SMA,2}$	受壓側之形狀記憶合金對間隙開啟支點之力臂
W	柱頂之垂直載重
ΔF_{pt}	間隙開啟後鋼絞線之內力增加量
ΔM_{pt}	間隙開啟後鋼絞線之內力增加量造成之彎矩
δ	柱頂之總側向位移
δ_c	柱構件之撓曲變形所造成柱頂之側向位移
δ_g	鋼柱與基礎間隙開啟所造成柱頂之側向位移
δ_{SMA}	形狀記憶合金軸向變位
$\delta_{SMA,1}$	受拉側之形狀記憶合金軸向變位
$\delta_{SMA,2}$	受壓側之形狀記憶合金軸向變位
θ	層間變位角
θ_d	鋼柱與基礎間隙開啟瞬間之層間變位角
θ_g	鋼柱與基礎之間隙開啟角
$\theta_{g,exp}$	鋼柱與基礎之間隙開啟角之試驗值
$\theta_{g,pred}$	鋼柱與基礎之間隙開啟角之預測值
$\theta_{g,t,th}$	到達目標載重時鋼柱與基礎之間隙開啟角理論值
$\theta_{i,th}$	到達目標載重時之層間變位角理論值
θ_A	A 點之層間變位角
θ_B	B 點之層間變位角

- θ_C C 點之層間變位角
- θ_D D 點之層間變位角
- θ_E E 點之層間變位角
- $\sigma_{y,col}$ 鋼柱之降伏應力
- $\sigma_{y,stif}$ 柱翼加勁板之降伏應力



第一章 緒論

1.1 研究背景

隨著科技的進步，在土木建築的技術上也有更進一步的成長。由於台灣地狹人稠的情況下高樓林立，鋼骨系統則廣泛運用於高樓建築上，再加上台灣位於歐亞板塊和菲律賓海板塊交界處，為地震頻繁區域，因此建築物的耐震能力不論在設計或是施工上均備受重視。傳統的耐震設計，無非是利用建築結構物的韌性容量來抵抗地震力，但是在遭遇更為強大的地震時，結構物將進入非線性階段，留下嚴重的殘餘變形且不易修復，大幅降低其使用性。

近年來，使結構擁有承受地震後降低殘餘變形之能力是結構工程的一大研究重點，Englekirk (1996) 為強震區提出了一種創新的解決方法，於結構物接合處採取自復位系統，以非傳統之銲接或是栓接接合，在受震時結構之接合處將可開啟，避免接合處的嚴重永久形變甚至是撕裂破壞，並於 2002 年於舊金山市設計一棟高 128 m 共 39 層樓的預力系統預鑄混凝土建築結構，在建造預力系統之結構之時，同時也進行相關試驗與規範制定，啟發了後續之預力結構系統發展。然而，預力自復位系統，消能效果幾乎趨近於零，沒有消能迴圈，為使結構物擁有消能之能力，在結構物接合處安裝消能裝置可有效降低地震力對結構的傷害，而消能裝置有多種形式，如摩擦型消能裝置、降伏型消能裝置和各種阻尼器。

隨著材料的進步，形狀記憶合金在建築結構上的應用已開始著手研究，形狀記憶合金於應變臨界值內造成的永久形變可在受熱後消除，稱為形狀記憶效應。Ocel et. al (2004) 將形狀記憶合金應用於梁柱接頭，於試驗後加熱形狀記憶合金，運用其形狀記憶效應使已擁有殘餘變形之梁柱接頭回復至原本形狀，且重複相同試驗發現形狀記憶合金在加熱後與第一次試驗行為並沒有很大差距，結果顯示形狀記憶合金可以提供結構自復位與消能能力。近年來之技術已可將形狀記憶合金之相變溫度降低至常溫，使得形狀記憶合金可以於常溫之下以釋放應力方式消除其永久形變，稱為超彈性效應，利用此效應可不需加熱且有效的提供結構自復位以及消能之能力。

1.2 研究目的

形狀記憶合金在拉伸試驗與卸載後，有旗幟狀之遲滯迴圈圖。本研究利用形狀記憶合金之形狀記憶效應與超彈性效應，將形狀記憶合金裝置安裝在鋼柱翼板與基礎間，當結構受震時鋼柱與基礎間之間隙開啟，形狀記憶合金裝置產生軸向變形，進入非線性狀態而後再因其超彈性效應之特性消除永久形變，進而達到鋼柱之自復位與消能之目的。

1.3 研究方法

研究方法為先蒐集國內外之相關文獻，瞭解鋼柱與基礎接合之基本行為與特性；進行理論推導，探討柱構件與基礎的非傳統接合之行為，進一步推導出柱構件與基礎接合含形狀記憶合金裝置之力學行為。並規劃實尺寸柱構件與基礎接合含形狀記憶合金裝置試體，透過試驗，瞭解柱構件與基礎接合之消能與耐震行為，並繪製遲滯迴圈圖，建立鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之設計方法與流程，以驗證子結構之行為。

1.4 文獻回顧

1.4.1 預力系統

Christopoulos et al. (2002) 於預力鋼結構系統中以鋼棒做為消能裝置，將 H 型鋼柱與鋼梁以預力鋼棒接合，進行梁柱接頭的反覆載重試驗，如圖 1.1 所示。試驗證實預力接合系統的力學行為與預力鋼絞線與消能鋼棒的疊加行為吻合，且整體構架可承受極大的非彈性位移且對有效降低梁柱接合處的殘餘變形。

Englekirk (2002) 設計舊金山市一棟高 128 m 共 39 層樓的預力系統預鑄混凝土建築結構，其梁柱接合如圖 1.2 所示。當時預力系統建築結構尚未有完善之設計規範，因此設計與相關試驗同步進行，以驗證其設計理念，試驗證實預力系統之接頭其容許層間變位角可達 4%，且並未有結構物破壞情形發生，預力系統接頭可實際運用於建築結構的耐震補強上，為預力系統結構之設計方法、規範，以及研究方向的一個重要里程碑。

Takamatsu and Tamai (2005, 2006) 提出了一種新型的柱與基礎接合，以兩端



車牙中間段車細之鋼棒提供子結構消能能力。設計之概念圖如圖 1.3 所示，以楔形之墊片與彈簧來填補間隙開啟之後消能鋼棒伸長後之空隙，使得消能鋼棒不會因殘餘變位產生空隙而無法受到拉力。反覆載重結果顯示此柱與基礎接合擁有良好之消能能力，因楔形之墊片填補了消能鋼棒降伏後之空隙，消能鋼棒可於每個迴圈間隙一開啟便開始提供額外力量與消能。

Chi and Liu (2012) 分析預測預力系統之柱與基礎迴圈行為，並以試驗證實。為避免在受震過程中結構破壞，柱與基礎之接合採用預力自復位系統，受震過程中間隙將開啟與閉合可使柱構件免於破壞，且以挫屈束制之鋼板作為消能裝置，試驗過程中考慮柱頂側向力、預力鋼棒之伸長量、柱頂垂直載重等，如圖 1.4 所示。結果顯示預力自復位系統可有效避免柱構件之破壞，並於試驗後保持彈性，且消能鋼板可有效提供接合處之消能能力。

黃崇豪 (2005) 研究含消能鋼棒之預力梁柱接頭於反覆載重行為下參數之影響，先以理論分析，藉由試驗驗證預力鋼梁接 CFT 柱接頭含消能鋼棒具有良好的結構受震自復位以及消能之能力。

1.4.2 形狀記憶合金

Ocel et al. (2004) 在梁柱接頭區安裝了棒狀形狀記憶合金消能裝置，進行兩組不同尺寸之反覆加載試驗，遲滯迴圈圖顯示出形狀記憶合金可有效提供結構消能能力，並將已挫屈之形狀記憶合金消能裝置加溫回復至原始形狀，重複相同試驗，比較兩者行為後顯示差異性非常小，如圖 1.5 所示。結果顯示利用形狀記憶合金之形狀記憶效應可以有效提供結構自復位與消能之能力。

DesRoches et al. (2004) 進行了不同尺寸的形狀記憶合金之拉伸試驗，不加溫的情況下，形狀記憶合金在施加 6% 應變以內，卸載後殘餘變形趨近於 0，在超過 6% 後將會形成相對較大的殘餘變形，須以加熱方式消除殘餘變形。截面積大小對於形狀記憶合金之行為亦有影響，線狀消能面積較大，且殘留應變較小，但是遲滯迴圈圖較不穩定，為疲勞效應所造成；棒狀消能面積小，但遲滯迴圈圖相對較穩定，如圖 1.6 所示。

Andrawes and DesRoches (2005) 以數值方法分析裝有形狀記憶合金束制裝置之橋梁與傳統橋梁之受震行為。傳統之橋梁接合於地震後易發生摔落，如圖

1.7 所示，近年來許多研究採用金屬或是液態阻尼。文中利用形狀記憶合金之自復位能力代替傳統之橋梁接合，結果顯示裝有形狀記憶合金之橋梁接合可有效降低受震後之殘留變位，避免橋梁間產生過大縫隙造成摔落。

Du et al. (2005) 進行了熱處理對於 NiTi 形狀記憶合金影響超彈性之研究，採用相同比例與尺寸之形狀記憶合金試體，其 A_f 為 $-21\text{ }^\circ\text{C}$ ，即試體於室溫之下為沃斯田態，以不同的溫度進行熱處理後以萬能試驗機測試其應力應變曲線，結果顯示以不同溫度做熱處理之合金超彈性效應皆不同，圖 1.8 所示。

Liao et al. (2006) 將棒狀形狀記憶合金安裝於鋼筋混凝土剪力牆之對角方向，在剪力牆受震時拉力方向提供額外強度，如圖 1.9 所示。研究中所使用之形狀記憶合金有兩種形態，分別為麻田散與沃斯田。試驗結果顯示麻田散形狀記憶合金較沃斯田形狀記憶合金的殘餘變形大，沃斯田形狀記憶合金在試驗過程中有一支挫屈，雖消能的能力不如預期，但形狀記憶合金確實可有效提供剪力牆額外強度。

McCormick et al. (2006) 研究了 NiTi 形狀記憶合金在結構受震時的自復位以及阻尼之能力，先進行線狀與棒狀形狀記憶合金之材料試驗，結果顯示兩種尺寸之形狀記憶合金皆擁有良好之自復位能力，在最大應變為 6% 的情況下，卸載後之殘餘應變量皆為 1.2% 以內，平均為 0.75%。兩者相較之下，線狀形狀記憶合金之阻尼係數較高，但相同材料下最大應力為棒狀之 70~80%，在實務上須考慮其應用以選取較經濟之設計方式。在材料試驗後以小型震動台進行試驗以及數值分析方式來分析形狀記憶合金於三層樓構架之受震行為，如圖 1.10 所示，結果顯示安裝形狀記憶合金之斜撐可有效提升構架之耐震能力。

Sepúlveda et al. (2007) 利用銅鋁鎳之棒狀形狀記憶合金作為梁柱接頭之自復位與消能之裝置，進行了梁柱接頭之反覆載重試驗，如圖 1.11 所示，並將其試驗數據代入三層樓鋼構架模型進行模擬，結果顯示層間變位角於 3% 以內結構將無任何的損壞與殘餘變位，且遲滯迴圈圖非常穩定。研究指出形狀記憶合金之自復位與消能之能力與初始預力有很大的關聯，且形狀記憶合金能有效的降低結構物損害與殘餘變位，但整體結構所能承受的總地震力並無有效提升。

Zhang and Zhu (2008) 進行了三層樓非線性之鋼構架模擬，利用線狀形狀記

憶合金作為阻尼器，其中形狀記憶合金分別為有無 3% 預拉應變，研究中顯示有預拉 3% 應變之形狀記憶合金消能行為較佳，如圖 1.12 所示，且無論是否有預拉應變，形狀記憶合金將可有效提供結構受震自復位與消能之能力。

1.5 論文內容

內容共分為以下五個章節：

- 第一章 緒論：介紹研究背景、研究目的、研究方法與國內外相關文獻介紹。
- 第二章 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之力學行為：先以理論推導建立鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之行為模型，用以預測鋼柱基底含形狀記憶合金裝置在反覆載重下之行為，建立柱底面之回復彎矩與層間變位角或間隙開啟角度之關係圖。
- 第三章 實尺寸子結構反覆載重試驗：實尺寸鋼柱與基礎接合、試體參數之討論、形狀記憶合金應力應變曲線測定、試體規劃設計、製作、試驗準備與試驗程序等相關說明。
- 第四章 試驗結果與討論：對試體試驗結果進行討論，並與理論分析比較驗證。
- 第五章 結論與建議：對本研究結果提出結論與建議，擷取經驗以提供後續之研究與改進。

第二章 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之力學行為

本研究中鋼柱與基礎採用非傳統之接合方式，在受震過程中鋼柱與基礎交界處將會有間隙開啟與閉合的現象發生，其行為可大致分為以下階段。

2.1 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置受力之特性

當子結構未受其他外力時，此時基礎給予柱底面之合應力等於柱頂之垂直載重，且合力點位於鋼柱的形心，形狀記憶合金裝置與鋼柱之間無相對位移，因此並無額外應力的產生，柱之自由體圖如圖 2.1 所示。

當施加水平外力於柱頂且柱底面間隙尚未開啟前，基礎給予柱底面之合應力仍然等於柱頂之垂直載重，此時應力不再均勻分佈，應力之合力點向翼板處偏移，外力所造成的彎矩值為柱頂之垂直載重與柱底面之偏心壓應力彎矩差值，此時形狀記憶合金裝置與鋼柱之間仍然無相對位移，柱之自由體圖如圖 2.2、圖 2.3 所示。

當施加水平力所造成的彎矩值達到解壓彎矩時，柱底面並無銲接於基礎，因此柱底面將會有間隙開啟的現象發生，當間隙開啟瞬間，形狀記憶合金開始產生軸向變形，造成之力提供柱底面額外彎矩。

間隙開啟後，基礎給予柱底面的應力將集中於柱翼板之一側，其力量大小為柱頂之垂直載重與形狀記憶合金提供垂直向分力之合力，外力造成之彎矩由柱頂之垂直載重與形狀記憶合金所抵抗，其柱之自由體圖如圖 2.4 所示。

由上述可知鋼柱含形狀記憶合金消能之行為可依間隙開啟前後分為三階段，第一階段為間隙尚未開啟時，第二階段為間隙開啟形狀記憶合金尚未降伏，第三階段則為間隙開啟後形狀記憶合金降伏。以下將依據此三階段分析其行為。

2.2 柱之柱底面回復彎矩與層間變位角

鋼柱保持彈性階段，其鋼柱的旋轉撓曲勁度為一定值，對柱翼板與基礎接合處為支點取彎矩，則鋼柱之柱底面彎矩，如下式所示：

$$M_c = K_c \theta \quad (2.1)$$

$$K_c = \frac{3E_s I_c}{L_c} \quad (2.2)$$

2.3 形狀記憶合金裝置之柱底面回復彎矩

在鋼柱與基礎之間隙尚未開啟階段，形狀記憶合金無任何的形變，因此並沒有作用，而當鋼柱與基礎之間隙開啟後，形狀記憶合金開始產生形變，兩側分別為受拉與受壓，其受拉側形狀記憶合金所提供之軸力與彎矩如下式所示：

$$F_{SMA,1} = \frac{E_{SMA,1} A_{SMA,1} \delta_{SMA,1}}{L_{SMA,1}} = \frac{E_{SMA,1} A_{SMA,1} r_{SMA,1}}{L_{SMA,1}} \sin \theta_g \quad (2.3)$$

$$M_{SMA,1} = F_{SMA,1} r_{SMA,1} \cos \theta_g = \frac{E_{SMA,1} A_{SMA,1} r_{SMA,1}^2}{L_{SMA,1}} \sin \theta_g \cos \theta_g \quad (2.4)$$

假設鋼柱在受力過程中皆視為小角度變形，可將上式簡化分析

$$\sin \theta_g \approx \theta_g \quad (2.5)$$

$$\cos \theta_g \approx 1 \quad (2.6)$$

$$F_{SMA,1} = \frac{E_{SMA,1} A_{SMA,1} r_{SMA,1}}{L_{SMA,1}} \theta_g \quad (2.7)$$

$$M_{SMA,1} = F_{SMA,1} r_{SMA,1} = \frac{E_{SMA,1} A_{SMA,1} r_{SMA,1}^2}{L_{SMA,1}} \theta_g \quad (2.8)$$

令

$$M_{SMA,1} = K_{SMA,1} \theta_g \quad (2.9)$$

經由整理可得受拉側形狀記憶合金之旋轉勁度，如下式所示：

$$K_{SMA,1} = \frac{E_{SMA,1} A_{SMA,1} r_{SMA,1}^2}{L_{SMA,1}} \quad (2.10)$$

受壓側之形狀記憶合金之旋轉勁度可由同樣方式求得，如下式所示：

$$K_{SMA,2} = \frac{E_{SMA,2} A_{SMA,2} r_{SMA,2}^2}{L_{SMA,2}} \quad (2.11)$$

圖 2.5 為形狀記憶合金之軸力與變位曲線圖，其座標軸分別為 F_{SMA} 和 δ_{SMA} ，經由公式 2.3 與 2.8 之關係，可轉換為形狀記憶合金提供柱底面彎矩與間隙開啟角關係圖，座標軸分別為 M_{SMA} 和 θ_g ，如圖 2.6 所示。

2.4 柱頂垂直載重之柱底面回復彎矩與層間變位角

考慮柱頂之垂直載重作用，為使鋼柱與基礎之間隙開啟，柱頂之側向加載所造成之彎矩必須大於垂直載重所提供之解壓彎矩，且柱頂垂直載重之方向將永遠鉛錘向下，其關係如下式所示：

$$M_{DL} = W \frac{d_c}{2} - WL_c \theta \quad (2.12)$$

在到達解壓點時之彎矩如下式所示：

$$M_d = W \frac{d_c}{2} - WL_c \theta_d \quad (2.13)$$

根據柱撓曲分析

$$M_d = K_c \theta_d \quad (2.14)$$

將公式 2.13 與 2.14 聯立後可求得解壓點之層間變位角

$$K_c \theta_d = W \frac{d_c}{2} - WL_c \theta_d \quad (2.15)$$

$$\theta_d = \frac{W \frac{d_c}{2}}{K_c + WL_c} \quad (2.16)$$

令

$$K_{DL} = -WL_c \quad (2.17)$$

將上式代入 2.12 式中，可得

$$M_{DL} = W \frac{d_c}{2} + K_{DL} \theta \quad (2.18)$$

柱頂垂直載重於柱底面彎矩與層間變位角關係圖，如圖 2.7 所示，拆成兩部分來分析，兩項視為並聯接合，圖 2.8 與 2.9 之勁度分別為 0 與 K_{DL} ，在並聯疊加之後可以得到柱頂垂直載重於柱底面彎矩之旋轉勁度等同於 K_{DL} 。

柱頂垂直載重所提供柱底面之彎矩將隨著層間變位角的增加而減少，因此層間變位角必須設定一上限值，當層間變位角大於上限值後柱頂垂直載重所提供之回復彎矩將轉變為傾倒彎矩，其關係如下式所示：

$$L_c \theta \leq \frac{d_c}{2} \quad (2.19)$$



$$\theta \leq \frac{d_c}{2L_c} \quad (2.20)$$

2.5 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之模型建立

子結構之勁度由鋼柱之勁度 K_c 、兩側之形狀記憶合金裝置對應於柱底之勁度 $K_{SMA,1}$ 、 $K_{SMA,2}$ 與柱頂垂直載重造成之旋轉勁度 K_{DL} 所提供，兩側形狀記憶合金裝置之勁度與鋼柱之勁度串聯，再與柱頂垂直載重造成之旋轉勁度並聯，接頭之勁度示意圖如圖 2.10，如下式所示：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{SMA,1} + K_{SMA,2}}} + K_{DL} \quad (2.21)$$

將鋼柱、柱頂垂直載重與形狀記憶合金裝置三者關係之模型建立後，鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之遲滯迴圈圖如圖 2.11 所示，以下分各個階段分析之：

O-E 階段，此階段由原點 O 至解壓點 E，鋼柱與基礎之間隙尚未開啟，根據圖 2.2 中所示，柱頂垂直載重提供之彎矩將會與基礎給予柱底面之反力所造成彎矩相減，其差值為側向加載力之彎矩所提供，此時形狀記憶合金裝置並未產生額外形變，因此將形狀記憶合金裝置影響忽略，勁度如下式所示：

$$K_1 = K_c + K_{DL} \quad (2.22)$$

直到側向加載所造成之彎矩等於解壓彎矩的瞬間，鋼柱與基礎之間隙便開啟，E 點之解壓彎矩與解壓點之層間變位角如下式所示：

$$\theta_E = \theta_d \quad (2.23)$$

$$M_E = M_d = K_1 \theta_E \quad (2.24)$$

E-A 階段，此階段由解壓點 E 至拉力側形狀記憶合金降伏點 A，鋼柱與基礎之間隙已開啟，此時形狀記憶合金產生變位，提供柱底面額外之彎矩，勁度如圖 2.6 中之 o-a 段所示，子結構之勁度如下式所示：

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{SMA,1,oa} + K_{SMA,2,oa}}} + K_{DL} \quad (2.25)$$

A 點與 E 點之相對轉角可由形狀記憶合金降伏瞬間之軸向變位，轉變為子結構之間隙開啟角度後，依據柔度分配所推得，A 點之柱底彎矩與層間變位角如下式所示：

$$\theta_a - \theta_o = \frac{\frac{1}{\frac{K_{SMA,1,oa} + K_{SMA,2,oa}}{1}}}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{\frac{K_{SMA,1,oa} + K_{SMA,2,oa}}{1}}} (\theta_A - \theta_E) \quad (2.26)$$

$$\theta_A = \theta_E + \frac{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{\frac{K_{SMA,1,oa} + K_{SMA,2,oa}}{1}}}{\frac{1}{K_{SMA,1,oa} + K_{SMA,2,oa}}} (\theta_a - \theta_o) \quad (2.27)$$

$$M_A = M_E + K_2 (\theta_A - \theta_E) \quad (2.28)$$

A-B 階段，此階段由拉力側形狀記憶合金降伏點 A 至目標層間變位角之點 B，此時拉力側之形狀記憶合金開始進入非線性段，提供之勁度如圖 2.6 中之 a-b 段所示，而壓力側之形狀記憶合金仍保持線性段，勁度仍保持在 o-a 段，子結構之勁度如下式所示：

$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{\frac{1}{K_{SMA,1,ab} + K_{SMA,2,oa}}}} + K_{DL} \quad (2.29)$$

B 點之柱底面彎矩如下式所示：

$$M_B = M_A + K_3 (\theta_B - \theta_A) \quad (2.30)$$

B-C 階段，此階段由目標層間變位角之點 B 開始卸載至轉折點 C，此時拉力側之形狀記憶合金沿著近似於線性段之勁度卸載，提供之勁度如圖 2.6 中之 b-c 段所示，而壓力側之形狀記憶合金仍保持線性段，勁度仍保持在 o-a 段，子結構之勁度如下式所示：

$$K_4 = \frac{1}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{\frac{1}{K_{SMA,1,bc} + K_{SMA,2,oa}}}} + K_{DL} \quad (2.31)$$

C 點之柱底面彎矩與層間變位角如下式所示：

$$\theta_c - \theta_b = \frac{\frac{1}{\frac{K_{SMA,1,bc} + K_{SMA,2,oa}}{1}}}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{\frac{K_{SMA,1,bc} + K_{SMA,2,oa}}{1}}} (\theta_C - \theta_B) \quad (2.32)$$

$$\theta_c = \theta_B + \frac{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{SMA,1,bc} + K_{SMA,2,oa}}}{\frac{1}{K_{SMA,1,bc} + K_{SMA,2,oa}}} (\theta_c - \theta_b) \quad (2.33)$$

$$M_C = M_B + K_4 (\theta_C - \theta_B) \quad (2.34)$$

C-D 階段，此階段由轉折點 C 至轉折點 D，根據形狀記憶合金之形狀記憶效應，原本已造成殘餘變位之拉力側形狀記憶合金沿著近似於非線性段之勁度消除其殘餘變位，提供之勁度如圖 2.6 中之 c-d 段所示，而壓力側之形狀記憶合金仍保持線性段，勁度仍保持在 o-a 段，子結構之疊加勁度如下式所示：

$$K_5 = \frac{1}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{SMA,1,cd} + K_{SMA,2,oa}}} + K_{DL} \quad (2.35)$$

D 點與 C 點之相對轉角等於圖 2.6 中之 d 點與 c 點之相對轉角，D 點之柱底面彎矩與層間變位角如下式所示：

$$\theta_d - \theta_c = \frac{\frac{1}{K_{SMA,1,cd} + K_{SMA,2,oa}}}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{SMA,1,cd} + K_{SMA,2,oa}}} (\theta_D - \theta_C) \quad (2.36)$$

$$\theta_D = \theta_C + \frac{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{SMA,1,cd} + K_{SMA,2,oa}}}{\frac{1}{K_{SMA,1,cd} + K_{SMA,2,oa}}} (\theta_d - \theta_c) \quad (2.37)$$

$$M_D = M_C + K_5 (\theta_D - \theta_C) \quad (2.38)$$

D-E-O 階段，於 D 點拉力側之形狀記憶合金已消除其殘餘變位，沿著原來的路徑經由閉合點 E 回復至原點 O，反向加載與卸載之行為與上述呈現對稱。

第三章 實尺寸子結構反覆載重試驗

3.1 前言

本研究採取一層樓高之鋼柱與基礎接合之自復位構架，在考慮柱頂之垂直載重下模擬結構受震後之行為，設計 4 組不同參數之實尺寸試體。為確保鋼柱與基礎可重複使用，在試驗與施作過程中將控制所有參數使得材料均保持彈性狀態。本研究將觀察試體在受震後之行為，以驗證其理論推導。

3.2 形狀記憶合金

3.2.1 簡介

形狀記憶合金是一種功能性之金屬材料，Olander (1932) 於研究 Au-Cd 合金時首次發現此種合金擁有相變的可逆性，為往後之形狀記憶合金研究開啟了先例。Buehler et. al (1963) 於美國海軍軍械研究室開發新型阻尼材料時，已彎曲過之絲狀 NiTi 合金意外地與香菸火苗接觸，並發生逆相變回復至原始形狀，偶然發現 NiTi 合金擁有良好的形狀記憶效應，由於 NiTi 合金之形狀記憶效應非常顯著，引起了許多學者的關注與興趣。至目前為止已知之形狀記憶合金有三大類，鐵基合金、鎳基合金和銅基合金，其中以 NiTi 合金最為穩定且性能表現最佳，但相對價格也較貴，為其他合金數十倍以上，本研究所使用之材料為 NiTi 合金。

根據溫度的不同，形狀記憶合金中的原子排列順序也不同，將會形成兩種主要相態，麻田散態與沃斯田態。當合金溫度低於其相變溫度時，受力造成有限度之永久變形後，可藉由加熱方式消除其永久變形，回復至原本形狀，此種特性稱為形狀記憶效應；若合金之溫度高於其相變溫度時，受力且已進入一般所認知之塑性階段後，可藉由自身釋放其應力，其特性稱為超彈性。圖 3.1 為形狀記憶合金於麻田散態與沃斯田態下之應力應變曲線示意圖。

3.2.2 製造與形狀記憶處理

於形狀記憶合金製造過程中，許多參數將影響形狀記憶合金完成後之形狀記憶效應及超彈性，合金之比例、材料之純淨度、滾軋時之溫度、退火溫度及時間等，雖然為相同的材料，於不同條件中製造出來的形狀記憶合金特性也不同。Du et. al (2005) 對相同配比之 NiTi 形狀記憶合金進行 400-600 °C 熱處理，以拉伸試驗測試其應力應變曲線，結果顯示形狀記憶合金於特定溫度進行熱處理可擁有超彈性特性。簡要的形狀記憶合金製造過程由下述之：

1. 精確取得形狀記憶合金中各成份之比例，就 NiTi 形狀記憶合金來看，Ni 的比例越高，其相變溫度將會越高。
2. 於潔淨之鍋爐中融合，形狀記憶合金之製造過程中有著極高之失敗率，若其中參入過多的雜質將嚴重影響形狀記憶合金之形狀記憶效應及超彈性，甚至出現材料缺陷。
3. 澆鑄成鑄塊，滾軋 (Hot rolled) 成所要之形狀，鍛造時之溫度將影響形狀記憶合金之抗拉強度，溫度越高抗拉強度越高，但若超過 900 °C 將會產生嚴重之氧化現象，一般約為 700-900 °C，而後冷卻至室溫。
4. 若有需要可在試體冷卻後進行冷加工 (Cold formed)，尤以棒狀形狀記憶合金之冷抽 (Cold drawn) 多寡將影響其形狀記憶效應及超彈性。
5. 冷加工完成之合金，於高溫爐中鍛燒數分鐘至數小時 (由合金之比例、尺寸而定)，形狀記憶合金在特定的溫度之下將析出 Ti_3Ni_4 之分子，此分子結構將使得合金擁有超彈性效應，記憶目前之形狀。

本研究採用 Ni56%-Ti44% 之棒狀形狀記憶合金，製造方式為熱軋成形，無進行冷抽處理，依形狀記憶合金製造商之建議，車削完成後於高溫爐中以 450 °C 鍛燒 25 分鐘，以水冷方式將其冷卻。

3.2.3 應力應變曲線測定

本研究將採用材料為 Ni56%-Ti44%之棒狀形狀記憶合金，其原始直徑為 25 mm、長度為 550 mm，車削段直徑為 19 mm、長度 350 mm，於棒狀形狀記憶合金兩端車牙，如圖 3.2 所示。根據形狀記憶合金之出廠報告書，其 A_f 溫度為 15 °C，試驗場地溫度皆高於此溫度，因此形狀記憶合金之相態為沃斯田態，特性為超彈性，表 3.1 為形狀記憶合金之出廠報告。

以螺帽將棒狀形狀記憶合金兩端固定於萬能試驗機進行拉伸試驗，試驗載重歷時圖如圖 3.3 所示，以每秒 0.05% 應變之速率，0.5%、1%、2%、3%、4%，和 5% 各兩個迴圈，於 6% 時 4 個迴圈。試驗結果詳述於 4.1 節。

3.3 試驗設計之參數討論

根據理論推導之鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之自復位與消能行為，將於柱頂之垂直載重與形狀記憶合金之截面積，做為參數設計之考量，總共設計 4 組試體，如表 3.2 所示。

表 3.3 為試體之遲滯迴圈理論數據，參數變化所造成之影響將由以下敘述之：

- (1) 柱頂垂直載重與鋼柱之降伏強度比值 W/P_y 越高，欲達到鋼柱與基礎間隙開啟之解壓彎矩 M_d 越大。
- (2) 柱頂垂直載重與鋼柱之降伏強度比值 W/P_y 越高，遲滯迴圈圖開啟後各階段之勁度下降量越多。
- (3) 在相同的柱頂垂直載重與鋼柱之降伏強度比值下，形狀記憶合金與消能鋼棒之截面積相同，比較其遲滯迴圈行為。

試驗過程中是以預力鋼絞線模擬柱頂之垂直載重，為使試體於試驗過程中保持彈性階段，因此以鋼柱之彎矩容量 M_y 為設計之上限，必須確保在間隙開啟後鋼絞線之內力與形狀記憶合金所提供之彎矩總合最大值小於 M_y ，其考慮鋼絞線內力與形狀記憶合金所提供之彎矩之理論數據如表 3.4 所示。

3.4 柱翼加勁板

試驗過程中，當鋼柱與基礎間之間隙開啟後，鋼柱所受到基礎給予的反力皆集中於柱翼板，為確保柱翼板仍保持在彈性階段，將須補強其面積，如下式所示：

$$A_{flange} \sigma_{y,col} + A_{stif} \sigma_{y,stif} \geq F_{comp} \quad (3.1)$$

經整理後

$$A_{stif} \geq \frac{1}{\sigma_{y,stif}} (F_{comp} - A_{flange} \sigma_{y,col}) \quad (3.2)$$

試驗過程中，鋼柱將承受柱頂垂直載重與形狀記憶合金裝置給予的軸力以及側向加載所造成的彎矩，為確保試體在軸力與彎矩的交互作用之下能保持彈性階段，可根據「鋼結構極限設計法規範及解說」對稱斷面構材承受彎矩與軸力交互作用之規定來計算柱翼加勁板需補強之長度，由以下討論之：

由距離柱頂端 z 處之彎矩

$$M(z) = \frac{M}{L_c} z \quad (3.3)$$

柱構件所承受之軸力為柱頂垂直載重與形狀記憶合金裝置給予之合力

$$P_u = W + F_{SMA} \quad (3.4)$$

根據「鋼結構極限設計法規範及解說」之規定

$$\text{當 } \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \text{ 時}$$

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1.0 \quad (3.5)$$

$$\text{當 } \frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2 \text{ 時}$$

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1.0 \quad (3.6)$$

其中，

P_u ：所需之軸拉力或軸壓力強度。

P_n ：標稱抗拉強度或標稱壓力強度。

M_u ：所需之撓曲強度。

M_n ：標稱撓曲強度。

x：強軸，y：弱軸。

ϕ ：為軸力載重下之強度折減係數。

ϕ_b ：為撓曲載重下之強度折減係數。

本研究為單向加載，可計算出 z 之最大值，進而求出柱翼加勁板補強

$$L_{stif} = L_c - z \quad (3.7)$$

3.5 形狀記憶合金裝置

本研究採用棒狀形狀記憶合金，於合金兩端車牙以螺帽安裝於鋼柱翼板上，為確保形狀記憶合金裝置在試驗過程中螺牙段不發生破壞，將於棒狀形狀記憶合金中間段由 25 mm 依試驗參數車削至 19 mm。

形狀記憶合金之變形量可由鋼柱與基礎之間隙開啟角度所求得，其關係如下式所示：

$$\delta_{SMA} = r_{SMA} \theta_g \quad (3.8)$$

根據形狀記憶合金變形量和試驗參數之形狀記憶合金之最大應變量，整理後可求得車削段所需長度，如下式所示：

$$L_{SMA} = \frac{\delta_{SMA}}{\epsilon_{SMA}} \quad (3.9)$$

3.6 設計步驟

目前自復位結構系統仍處於發展階段，尚未有詳細的規範訂定設計步驟與細節，本研究將由此章節所探討各構件之設計方法與概念進行試體設計，設計步驟如下：

1. 決定鋼柱斷面大小。
2. 決定子結構之最大層間變位角 θ_{design} ，本研究將設定為 0.04 rad.，並預估間隙開啟角為 0.035 rad.。
3. 決定柱頂之垂直載重大小，以施加預力鋼絞線方式來模擬柱頂垂直載重。

4. 確保到達目標載重時，鋼絞線之內力須小於其降伏應力。
5. 決定形狀記憶合金之總截面積以及長度。
6. 對應力集中點如鋼柱翼板、鋼柱與油壓致動機接合點，以及預力錨定端進行補強。

3.7 試驗規劃

3.7.1 試驗簡介

本研究於國立交通大學土木結構大樓進行 4 組實尺寸鋼柱基底含形狀記憶合金消能裝置之試驗。當結構物受到地震力時，樓版一般可視為剛體，將柱構件以自由體圖來分析，可簡化為柱頂承受一水平力。本研究將模擬一層樓高之鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之行為，採用高度 3.93 m 之鋼柱架設於鋼筋混凝土基礎上，試驗設置圖如圖 3.4 所示。為避免試體在試驗過程中有過大之側向變位或扭轉發生，將設置側向支撐。

3.7.2 試體規劃

本研究之試體依據「鋼結構極限設計規範與解說」、「混凝土結構設計規範」，以及第二章所推導之理論公式來進行設計，設計圖如圖 3.5 至圖 3.13 所示。

柱構件採用 RH400x400x13x21 熱軋型鋼，材料為 A572 Gr. 50 之鋼材，為確保試體於試驗過程中皆保持在彈性階段，因此依據試驗中承受最大外力之試體的補強需求，考慮鋼柱與基礎間隙開啟後的柱翼板集中應力，以及在側向加載時的彎矩與軸力交互作用，在柱翼板處鐸上 600x440x1600x30 之梯形加勁板。為確保試驗之精度，柱翼板和柱腹板皆進行拉伸試片試驗，實際材料性質如表 3.5 所示。

柱頂之垂直載重以預力鋼絞線方式模擬，因為鋼絞線隨著層間變位角的變化將會出現水平分力以及額外內力，所以必須修正。本試驗採用 ASTM 416 Gr. 270 ϕ 15.2 mm 之鋼絞線，為防止鋼絞線在試驗過程中發生斷裂，取其降伏應力作為設計之限制條件，材料性質如表 3.6 所示。

形狀記憶合金裝置採用 Ni56%-Ti44%之棒狀合金，兩端車牙以螺帽與攻牙鋼板分別固定於柱翼板與基礎上，其設計圖如圖 3.7 所示。

基礎採鋼筋混凝土與鋼構件複合材料設計，材料選用 35 MPa 強度之混凝土以及 A572 Gr. 50 之鋼材，基礎長 1500 mm、寬 1500 mm、高 1180 mm，於基礎底部預留凹槽，為安裝預力鋼絞線與固定鋼絞線之錨定座預留空間，撓曲鋼筋與剪力鋼筋皆採用 #6 鋼筋。基礎內鋼構核心採用 H 型斷面上下銲接鋼板，以提高混凝土承壓面積，因鋼構核心須施加預力之關係，所以鋼筋無法直接穿越使混凝土與鋼構件結合，須另外於鋼構核心之翼板銲接 #8 鋼筋續接器，以 T 型錨定頭增加兩材料間之握裹能力，且提高弱面之剪力強度，基礎設計圖如圖 3.8 至圖 3.10 所示。

為驗證鋼柱基底含形狀記憶合金裝置於試驗中，比較是否有安裝形狀記憶合金裝置及改變形狀記憶合金裝置之受震自復位能力、改變柱頂之垂直載重大小、柱構件是否保持於彈性階段、形狀記憶合金於試驗後是否有殘留應變，以及柱與基礎是否可重複使用等。以下就各試體細節討論：

試體 R0LR20：本試體並無安裝形狀記憶合金裝置，利用預力鋼絞線模擬鋼柱與基礎接合之柱頂垂直載重，鋼絞線數量為每股 7 根共 4 股，每股鋼絞線之初始預力為 375 kN，可觀察僅有柱頂垂直載重之鋼柱受震之行為。

試體 R2LR20：本試體安裝四支形狀記憶合金裝置，利用預力鋼絞線模擬鋼柱與基礎接合之柱頂垂直載重，鋼絞線數量為每股 7 根共 4 股，每股鋼絞線之初始預力為 375 kN，可與未安裝形狀記憶合金裝置之鋼柱比較受震後之遲滯消能行為。

試體 R2LR20-S：本試體安裝四支 SS400 鋼棒消能裝置，利用預力鋼絞線模擬鋼柱與基礎接合之柱頂垂直載重，鋼絞線數量為每股 7 根共 4 股，每股鋼絞線之初始預力為 375 kN，可與安裝形狀記憶合金裝置之試體 R0LR20 比較受震後之遲滯消能行為。

試體 R2LR30：本試體安裝四支形狀記憶合金裝置，利用預力鋼絞線模擬鋼柱與基礎接合之柱頂垂直載重，鋼絞線數量為每股 7 根共 4 股，每股鋼絞線之初始預力為 575 kN，可與承受較小柱頂垂直載重之鋼柱比較受震後之遲滯消能行為。

圖 3.14 至圖 3.17 為各試體在側向加載與柱頂垂直載重作用下之柱底面回復彎矩與柱頂側向位移預測圖。

3.8 試體組裝與預力施加

3.8.1 試體組裝

基礎於工廠製作完成，運送至國立交通大學試驗場地，將鋼柱與基礎以及形狀記憶合金裝置之鉸接定位完成，以螺桿方式將鋼柱與鉸接假固定，形狀記憶合金裝置之鉸接稍微點鉸固定後移開鋼柱，以外側填角鉸、內側開槽鉸方式將形狀記憶合金裝置之鉸接鉸接於基礎上，鉸接完成後將鋼柱放上基礎核對尺寸無誤，如圖 3.18 至圖 3.20 所示。



3.8.2 預力施加

預力施加作業由國家地震工程研究中心派專業技術人員前往試驗場地協助進行，先將鋼柱與基礎平躺於地面，定位完成後以小型千斤頂將鋼柱墊高以保持其相對位置，進行鋼絞線之穿線工作，先將基礎底部錨定版與鋼絞線夾片安裝完成，荷重計依序定位於鋼柱頂且安裝上錨定版與鋼絞線夾片，共 4 個，於中心鋼絞線施加些許預力以固定荷重計位置，檢查位置無誤後依序施加預力。

施加預力之千斤頂為兩支瑞太 JSL-28TON 油壓千斤頂，以對角方式施加，順序為中心鋼絞線先施加，之後兩邊分別以順時針與逆時針方向施加下一條鋼絞線，結束後再轉換為另外一對角。施加預力分為三階段，第一階段將鋼絞線施加目標預力之一半，第二階段施加至目標之預力量，第三階段將不足預力之鋼絞線補足其力量後即完成組裝作業，如圖 3.21 至圖 3.23 所示。

3.9 試驗設置

試體以 4 支高拉力鋼棒設置於厚度 1 公尺之強力地板，油壓致動器架設於反力牆上，以水平向方式與鋼柱柱頂連接。為配合試驗場地，油壓致動器前端須架設轉接座以符合試驗所需之行程，為避免試體於試驗過程中產生過大之側向位移。於距離牆力地板 3 公尺高處架設側向支撐，且於試體東西向各預留 3 mm 之距離以避免在試驗過程中產生摩擦現象。

3.9.1 加載系統

本試驗所採用之加載系統為單支油壓致動器，設置於鋼柱頂部，以模擬樓板給予柱頂之側向力，以位移控制方式由 MTS 控制室之伺服器監控。本試驗所使用之油壓致動器，為美國 MTS 公司製造，其衝程為正負 200 mm，最大拉力與最大壓力皆為 500 kN，由控制器 MTS 244.41 控制。

3.9.2 量測系統

資料擷取系統

本試驗中試驗數據分別由資料擷取器 UCAM 截取各量測儀器所量測之數據資料以及 MTS 控制室之主機截取油壓致動器之數據資料，由電腦即時圖形化繪製油壓致動器力量與位移圖，以便觀察當時的試體情形。資料擷取器 UCAM 之資料截取速率為 80 ms/CH，MTS 控制室之伺服器截取速率為 0.5 秒速率之倍數，因此為配合兩者資料擷取速率相同，試驗過程中將資料擷取速率設定為 2 秒/次。

量測儀器系統

此試驗之量測儀器系統所量測之內容包括：變形、位移、角度、應變和力量，量測儀器之設置圖如圖 3.24 所示，量測儀器之介紹如下：

(1) 位移計：試驗中使用 4 支 LVDT 以磁性座方式固定於柱翼加勁板側邊直線處，量測反覆載重過程中，間接量測鋼柱與基礎間隙開啟之垂直位移量，可由力臂轉換為間隙開啟角。

(2) 傾斜儀(Tilt meter)：架設於鋼柱兩側腹板，可直接量測出反覆載重過程中鋼柱與基礎間隙開啟角。

(3) 應變計(Strain gauge)：安裝於柱翼加勁板與基礎的接合處附近以及柱翼板與柱翼加勁板之交界區，以砂紙與砂輪機方式將鋼表面清理乾淨後，以黏貼方式將應變計安裝上，主要安裝於理論分析應力集中處，以量測反覆載重過程中局部之應變且可觀察其是否降伏。

(4) 荷重計(Load cell)：試驗中使用 4 個荷重計，量測鋼絞線之內力，每股鋼絞線皆安裝 1 個荷重計，於施加鋼絞線預力時安裝於柱頂，以量測施加預力時之鋼絞線內力，並於反覆載重過程中量測鋼絞線之初始預力大小以及內力變化量。

3.10 試驗程序

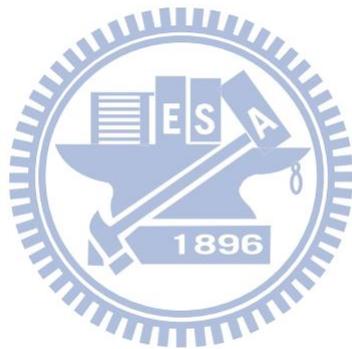
試體設置完成後，於柱翼加勁板與基礎的接合處附近以及柱翼板與柱翼加勁板之交界區適當範圍內均勻漆上白色石膏漆，試驗過程中可藉由石膏漆之剝落狀況觀察出反覆載重過程中之應力集中與變形之狀況。

本試驗為位移控制，其位移歷時如圖 3.25 所示，依據 AISC(2010)建議之加載歷程進行，於層間變位角 0.375、0.5、0.75% 各進行 6 次循環，層間變位角 1.0% 進行 4 次循環，再於層間變位角 1.5、2.0、3.0、4.0% 各進行 2 次循環，試驗加載速率採用 1 mm/sec 之固定速率。

試驗開始前將由 MTS 控制室之伺服器控制將油壓致動器與鋼柱接合，再以螺栓將油壓致動器與鋼柱固定，由 MTS 控制室之伺服器控制油壓致動器之初始位移歸零，進行最後一次檢查後開始進行試驗。

試驗過程進行中，於加載歷程所設定之各層間變位角之第一循環位移正負方向最大值時，暫時停止油壓致動器，進行試體觀察，以表格、照片等方式記錄其試體狀況，內容包括鋼柱與各量測儀器是否有移位、觀察鋼柱與基礎之間隙開啟狀況、石膏漆是否有紋路甚至剝落產生、形狀記憶合金裝置是否有挫屈情形發生，

以及各部位之鐸道是否有撕裂現象等。完成紀錄後便開始下一循環，直至試驗達到預定之層間變位角之第二迴圈結束為試驗完成。



第四章 試驗結果與討論

4.1 形狀記憶合金材料試驗

材料試驗於國家地震工程研究中心執行，因形狀記憶合金之材料性質會根據其截面積形狀稍微改變，因此材料試驗所使用之形狀記憶合金尺寸大小皆與實尺寸試驗相同，為確保試驗中螺牙處不破壞，將中間段車削至較小直徑，並於棒狀形狀記憶合金兩端車牙，以螺帽方式固定於螺栓用夾具上，以 100 噸材料試驗機進行拉伸試驗，設置圖如圖 4.1 所示。NiTi 形狀記憶合金不同配比與不同的熱處理其性質不同，以驗證廠商提供之材料性質，材料試驗一共進行了 5 次。

4.1.1 試體 H0D23.5

試體之設計為原始直徑 25 mm、長度 550 mm，車削段直徑 23.5 mm、長度 350 mm，兩端為 1 英吋標準牙，尚未進行熱處理，如圖 4.2 所示。試體於行程 5.12 mm、軸向拉力 250.52 kN 時由螺牙處斷裂，觀察應變計讀數為 0.7%，由行程換算此時應變應為 1.46%，顯示大部分力量由螺牙處承受，為應力集中關係所致。

4.1.2 試體 H0D19-1

本試體是由試體 H0D23.5 加工而成，其中一端維持 1 英吋標準牙，原本斷裂端加工為 7 分標準牙，為確保試驗時不由螺牙處斷裂，將車削段直徑降為 19 mm，尚未進行熱處理，如圖 4.3 所示。此次試驗於行程 3.12 mm 時發生嚴重崩牙，顯示形狀記憶合金加工為 7 分標準牙無法承受 79.71 kN 以上之力量。

4.1.3 試體 H0D19-2

試體之設計為原始直徑 25 mm、長度 550 mm，車削段直徑 19 mm、長度 350 mm，兩端為 1 英吋標準牙，尚未進行熱處理，如圖 4.4 所示。試體於行程 6.94 mm、應變計讀數 0.89% 進入非線性段，且在卸載路徑時完全根據線性段時勁度，產生

大量殘留應變，於試驗結束時最大軸向應力為 647.8 MPa、殘餘應變為 4.12%，圖 4.7 為試體 H0D19-2 之試驗數據圖。

4.1.4 試體 H600D19

試體之設計為原始直徑 25 mm、長度 550 mm，車削段直徑 19 mm、長度 350 mm，兩端為 1 英吋標準牙，進行 600 °C 熱處理 30 分鐘，空氣冷卻方式待試體回復至室溫，如圖 4.5 所示。試體於行程 6.81 mm、應變計讀數 0.87% 進入非線性段，且在卸載路徑時完全根據線性段時勁度，產生大量殘留應變，於試驗結束時最大軸向應力為 638.2 MPa、殘餘應變為 4.52%，圖 4.8 為試體 H600D19 之試驗數據圖。

4.1.5 試體 H450D19

試體之設計為原始直徑 25 mm、長度 550 mm，車削段直徑 19 mm、長度 350 mm，兩端為 1 英吋標準牙，進行 450 °C 熱處理 25 分鐘，浸水方式將試體急速冷卻至室溫，如圖 4.6 所示。試體於行程 5.06 mm、應變計讀數 0.77% 進入非線性段，於最大應變量 2% 時卸載可以完全回復至原始形狀，且擁有良好消能迴圈，於 3% 迴圈時開始產生些微殘餘應變，且同一行程之第二迴圈殘餘應變較第一迴圈大，於 6% 時的最大軸向應力為 665.0 MPa，殘餘應變為 2.47%，自復位與消能能力良好。

試驗結果顯示在線性階段時，卸載之路徑與加載之路徑會相同，卸載結束後回到原點，且每階段之兩個迴圈皆相當穩定。在進入非線性階段後，卸載之路徑與加載之路徑開始呈現落差，此迴圈面積即形狀記憶合金之消能能力，同一行程第二迴圈之殘餘應變較第一圈迴圈大，且在多次重覆性加載與卸載之後線性段與非線性段之轉折點將越來越模糊，由原點至加載目標值之間呈現圓弧圖形。圖 4.9 為試體 H450D19 之試驗數據圖，其自復位與消能能力良好，實尺寸試驗試體之加工方式將與此試體之加工方式相同，表 4.1 為各試體之材料試驗數據。

4.2 試驗數據修正方法

本試驗考慮柱頂垂直載重之影響，試驗中以預力鋼絞線模擬柱頂之垂直載重，因為鋼絞線所提供之預力方向為永遠指向錨錠頭，合力方向與提供之內力大小將隨著柱頂層間變位角而改變，與柱頂之垂直載重有些許誤差，所以必須將其修正為一垂直向下且保持定值之力，修正方法如下：

側向加載所造成之柱底面彎矩

$$M = PL_c \quad (4.1)$$

間隙開啟後，鋼絞線伸長所提供額外內力可由荷重計測得，因間隙開啟角度為小角度分析，力臂視為定值，其造成彎矩如下：

$$F_{pt} = F_{pt,i} + \Delta F_{pt} \quad (4.2)$$

$$\Delta M_{pt} = \Delta F_{pt} \frac{d_c}{2} \cos \theta_g \quad (4.3)$$

$$\cos \theta_g \approx 1 \quad (4.4)$$

$$\Delta M_{pt} = \Delta F_{pt} \frac{d_c}{2} \quad (4.5)$$



因柱頂層間變位角所造成之側向分力提供之彎矩

$$M_H = F_{pt,i} L_c \sin \theta \quad (4.6)$$

將公式 4.1 至 4.6 整理後可以推得預力鋼絞線內力修正為柱頂垂直載重之柱底面回復彎矩，如下式所示：

$$M_{correct} = M - \Delta M_{pt} - M_H \quad (4.7)$$

修正後之柱頂側向力

$$P_{correct} = \frac{M_{correct}}{L_c} \quad (4.8)$$

圖 4.10(a)(b)分別為整體子結構之自由體圖與鋼絞線於柱頂之分量分析圖，圖 4.11 為修正完成之子結構自由體圖。

4.3 實尺寸子結構試驗

本試驗之加載方式採用位移控制，其現場試驗設置如圖 4.12 所示，試驗過程進行中，於加載歷程所設定之各層間變位角之第一循環位移正負方向最大值時，暫時停止油壓致動器，進行試體觀察，以表格、照片等方式記錄其試體狀況，各試體之行為由以下分別作討論。

4.3.1 試體 R0LR20

本試體為僅有預力鋼絞線，尚未安裝形狀記憶合金裝置，此試驗一共進行兩次，第一次試驗於層間變位角 $\pm 0.75\%$ 時鋼柱開始產生少許側向滑移，試驗繼續進行後鋼柱於層間變位角 $+1.0\%$ 時產生了約 20 mm 之側向滑移，如圖 4.13 所示，考慮到試驗的安全性將試驗停止，將試體重新組裝，且於基礎東西向銲上四塊鋼板，以防止鋼柱有過大側向滑移，如圖 4.14 所示。

第二次試驗順利進行至試驗結束，理論分析中鋼柱將於層間變位角 $\pm 0.297\%$ 間隙開啟，於 MTS 控制室即時監控之遲滯迴圈圖已有轉折點出現，顯示間隙已開啟，但在試驗進行之層間變位角 $\pm 0.375\%$ 停止時所觀察為肉眼無法辨識，開啟之間隙仍然無法放入一張 A4 厚度之紙張，於層間變位角 $\pm 0.5\%$ 可由肉眼觀測到間隙已開啟，並可放入一張 A4 厚度之紙張，如圖 4.15 所示。

試驗進行至層間變位角 $+1.0\%$ 開始產生西向滑移，在頂到基礎西側所銲上之側向滑移束制用鋼板後便停止滑移，如圖 4.16 所示，此時由控制室觀察之遲滯迴圈圖開始有些許之消能面積，應為側向支撐束制用鋼板與鋼柱摩擦所造成。直至層間變位角 $\pm 3.0\%$ 後，柱翼加勁板之石膏漆開始產生裂紋，且因為開啟角度越大，與側向滑移束制用鋼板摩擦越大，所以遲滯迴圈圖中之消能面積也越大。試驗結束後，試體並無產生破壞，翼板上之應變計讀數皆保持在彈性階段，且擁有良好之自復位行為，柱頂之最大側向載重為 $+178.2\text{ kN}$ 與 -178.5 kN ，試驗之遲滯迴圈圖如圖 4.17 所示。

4.3.2 試體 R2LR20

本試體之參數設計為鋼絞線總內力量為鋼柱軸向降伏強度之 20%，在試驗當天荷重計之讀數為 1401 kN，為鋼柱軸向降伏強度之 18.7%，且在鋼柱翼板兩側分別安裝 2 支形狀記憶合金裝置。試驗剛開始便可聽見試體與側撐之些許摩擦聲，是因試體於之前試驗結束後向西偏移。

於理論分析中預計於層間變位角為 $\pm 0.286\%$ 時到達解壓彎矩，此時鋼柱與基礎間應有間隙開啟，但於試驗中層間變位角為 $\pm 0.375\%$ 時觀察結構之狀況，以肉眼無法辨認間隙是否開啟，可由 MTS 控制室中的即時圖形觀測出遲滯迴圈圖有稍微轉折，證實鋼柱與基礎間確實有間隙開啟，且形狀記憶合金裝置開始提供額外力。於層間變位角為 $\pm 0.5\%$ 時已可由肉眼觀測出鋼柱與基礎間隙開啟。

根據理論分析，於層間變位角 $\pm 1.311\%$ 時形狀記憶合金應進入非線性段，遲滯迴圈圖應要有第二次轉折出現，實際試驗中於層間變位角 $\pm 1.5\%$ 可觀察出遲滯迴圈圖有些微的勁度改變，其中誤差應為理論分析以直線模擬其勁度，直接以一角度作為勁度轉變，而實際形狀記憶合金應力應變曲線之線性段與非線性段是以一平滑曲線轉變。於層間變位角 $\pm 1.5\%$ 至 $\pm 3.0\%$ 間，由 MTS 控制室即時圖形之遲滯迴圈圖可明顯觀察出有消能迴圈產生，觀察南北兩側的鉸接旋轉狀況，發現南側鉸接較北側鉸接隨著鋼柱旋轉之角度小，鉸接與鋼柱之間有明顯縫隙產生，應為鋼柱已滑移至偏北側所致，如圖 4.18 和 4.19 所示。於層間變位角 $\pm 4.0\%$ 時，兩側形狀記憶合金之應變計讀數最大值為 3.93-4.21%，試驗結束後殘餘應變為 0.94-1.10%，擁有良好之消能面積。

此次試驗於各階段中皆無石膏漆之剝落，翼板上之應變計讀數皆保持在彈性階段，且鋼柱無任何側向位移，為基礎上鉸接之側向位移束制鋼板所致，顯示整體子結構擁有良好之自復位行為，柱頂之最大側向載重為+218.6 kN 與-239.8 kN，正負行程之誤差值為兩側初始預力量所致，由荷重計可觀察到南側初始預力總量

較北側初始預力總量多約 40 kN，形狀記憶合金之殘餘應變最大為 1.10%，試驗之遲滯迴圈圖如圖 4.20 所示。

4.3.3 試體 R2LR20-S

本試體之消能裝置為 SS400 鋼棒，如圖 4.21 所示，參數設計為鋼絞線總內力量為鋼柱軸向降伏強度之 20%，在試驗當天荷重計之讀數為 1375 kN，為鋼柱軸向降伏強度之 18.4%，且在鋼柱翼板兩側分別安裝 2 支 SS400 消能鋼棒，以螺帽安裝於翼板上使得消能鋼棒可承受拉力與壓力，並套上挫屈束制鋼管，如圖 4.22 所示。理論分析預計於層間變位角為 $\pm 0.283\%$ 時到達解壓彎矩，於試驗中層間變位角為 $\pm 0.375\%$ 時觀察結構之狀況，尚未能以肉眼辨識，於層間變位角為 $\pm 0.5\%$ 時已可由肉眼觀測出鋼柱與基礎間隙開啟，且可以放入一張 A4 厚度之紙張。

於層間變位角為 $\pm 1.0\%$ 時，可由資料擷取系統觀察到消能鋼棒已降伏，且鋼柱的西側有稍微觸碰到側撐。於層間變位角為 $\pm 1.5\%$ 時，開始有明顯之消能迴圈出現，兩側之消能鋼棒與鋼管仍是鬆動狀態，消能鋼棒尚未嚴重挫屈。於層間變位角為 -2.0% 時，西南側之消能鋼棒已與鋼管緊密貼合，造成嚴重挫屈。於層間變位角為 $\pm 3.0\%$ 至 $\pm 4.0\%$ ，兩側之消能鋼棒皆嚴重挫屈，且鉸接端為向外旋轉，如圖 4.23 所示。此次試驗於各階段中皆無石膏漆之剝落，翼板上之應變計讀數皆保持在彈性階段，整體子結構擁有良好之自復位行為，柱頂之最大側向載重為 +220.7 kN 與 -236.1 kN，試驗之遲滯迴圈圖如圖 4.24 所示。

4.3.4 試體 R2LR30

本試體之參數設計為鋼絞線總內力量為鋼柱軸向降伏強度之 30%，由前面試驗所得到之經驗，可知在試驗時預力量將會損失，因此在施加預力時事先增加 8%，試驗當天荷重計之讀數為 2422 kN，為鋼柱軸向降伏強度之 32.3%，鋼柱翼板兩側分別安裝 2 支形狀記憶合金裝置。試驗剛開始便可聽見試體與側撐之些許

摩擦聲，為試體已向西偏移導致，且在間隙開啟後每一迴圈中皆有夾片與錨定頭之摩擦聲，應為間隙開啟後夾片與錨定頭拉緊之現象。

理論推導中預測試體將於層間變位角為 $\pm 0.467\%$ 時間隙開啟，但在層間變位角為 $\pm 0.5\%$ 時仍然未能由肉眼觀測出間隙，控制室之即時圖形也未能觀察出明顯勁度轉折。於層間變位角為 $\pm 0.5\%$ 提升至 $\pm 0.75\%$ 時則可以由肉眼觀察到間隙開啟，此刻正行程出現消能迴圈，為試體與側撐以及基礎上側向束制鋼板摩擦所致。

於層間變位角 $\pm 1.0\%$ 時可觀察出鉸接皆可順利地轉動，但於層間變位角 $\pm 2.0-3.0\%$ 時形狀記憶合金軸向拉力增大，以致於東南側之鉸接與翼板出現縫隙，沒有完全與鋼柱平行轉動。

層間變位角 $+4.0\%$ 迴圈，於行程 137 mm、層間變位角 $+3.84\%$ 時西南側之形狀記憶合金裝置由下方螺牙處斷裂，如圖 4.25 所示，應變計讀數為 3.67%，遲滯迴圈圖之正向加載最大值與卸載過程之強度下降；層間變位角 -4.0% 迴圈，於行程-141.3 mm、層間變位角 -3.94% 時東北側之形狀記憶合金裝置由上下螺牙處同時破壞，如圖 4.26 和 4.27 所示，應變計讀數為 2.78%，遲滯迴圈圖行為與正向加載破壞時相同，試驗於此迴圈完成後停止。

此次試驗於試驗結束將鉸接拆除後觀察到翼板與基礎交接處有石膏漆之剝落，如圖 4.28 所示，翼板上之應變計讀數皆保持在彈性階段，鋼柱無任何側向位移，為基礎上鉚接之側向位移束制鋼板所致，除了形狀記憶合金有破壞之情形，整體子結構擁有良好之自復位行為，柱頂之最大側向載重為 $+244.9$ kN 與 -287.6 kN，較預測值小許多，是因為形狀記憶合金裝置斷裂所致，無法得到確切之消能迴圈，完整的兩支形狀記憶合金殘餘應變最大為 0.47%，試驗之遲滯迴圈圖如圖 4.29 所示。

於事後檢討形狀記憶合金之斷裂原因，為以下幾點：

1. 斷裂之形狀記憶合金已做過多次試驗，每次試驗皆累計約 1.0% 之殘餘應變，由此繼續進行試驗將可能超出形狀記憶合金所能負荷。

2. 此次試驗中可觀察形狀記憶合金之最大應變值較之前試驗小，將可推論車削段形狀記憶合金尚未進入預期之應變階段，螺牙處經過多次試驗已無法承受如此大的變位，導致由螺牙處斷裂。
3. 螺牙處牙底為尖牙，容易有應力集中之現象，可由加工時製作為梯形牙或是圓底牙。

4.4 試體之遲滯迴圈消能行為

試體 R0LR20 未安裝形狀記憶合金裝置，理論分析中並無任何的消能能力，在試驗之遲滯迴圈圖中，發現有少量之消能面積出現，於層間變位角 2% 內幾乎沒有消能面積，但在試體層間變位角 2% 至 4% 間，鋼柱與基礎之間隙逐漸變大後，柱翼加勁板與基礎上之側向滑移束制用鋼板摩擦越大，導致有些許之消能面積產生。

試體 R2LR20 於翼板兩側各安裝了 2 支形狀記憶合金，於鋼柱與基礎間隙開啟之前並沒有任何的消能行為，而間隙開啟之後又分為兩階段，形狀記憶合金在線性段時僅提供了額外之回復彎矩，但尚未擁有消能能力，在形狀記憶合金進入了非線性段後，藉由其超彈性效應釋放應力來提供整體子結構消能之能力。

試體 R2LR20-S 於翼板兩側各安裝了 2 支消能鋼棒，間隙開啟前尚無消能能力，於間隙開啟後，消能鋼棒開始提供額外之回復彎矩，且因消能鋼棒重覆性的受拉與受壓降伏，使子結構擁有消能之能力。相較於形狀記憶合金裝置，雖然遲滯迴圈圖消能面積較大，但是整體行為因為有挫屈較不穩定，且在消能鋼棒受拉降伏產生殘餘變位後將形成額外抵抗自復位之彎矩。

試體 R2LR30 於翼板兩側各安裝了 2 支形狀記憶合金，應與試體 R2LR20 有相同之消能面積，因為此次試驗在層間變位角 4% 前形狀記憶合金便已破壞，無法觀察其真正消能行為。

藉由比較各試體間之遲滯迴圈消能行為，證實形狀記憶合金可提供子結構額外回復彎矩與消能迴圈，達到整體子結構自復位與消能之目的，雖然相較下相同

尺寸之形狀記憶合金之消能能力不如鋼材，但消能迴圈穩定且可提供自復位能力。試體各層間變位角遲滯迴圈之消能如表 4.2 所示。

4.5 試驗之變位分析

本試驗於 MTS 控制室中所觀察之位移為柱頂受側向加載之總位移 δ ，其中總位移包括柱構件形變所造成之柱頂變位 δ_c 以及鋼柱與基礎間隙開啟所造成之柱頂變位 δ_g ，其關係式如下：

$$\delta = \delta_c + \delta_g \quad (4.6)$$

根據 MTS 控制室所截取之柱頂總側向位移，可以由公式 4.2 推得柱頂之層間變位角 θ 。

$$\theta = \frac{\delta}{L_c} \quad (4.7)$$

鋼柱與基礎間之間隙開啟角度 θ_g 可直接由架設於鋼柱腹板之傾斜儀量測得到，以及由安裝於試體南北向之位移計取得間隙開啟高度間接求得，其間隙開啟角度所造成之柱頂側向位移之關係式如下所示：

$$\delta_g = \theta_g L_c \quad (4.8)$$

$$\theta_g = \frac{\delta_g}{L_c} \quad (4.9)$$

由以上之關係式可以求得柱構件之形變所造成之柱頂側向位移，如下式所示：

$$\delta_c = \delta - \delta_g \quad (4.10)$$

柱構件之撓曲變形所造成之部分柱頂層間變位角，如下式所示：

$$\theta_c = \theta - \theta_g \quad (4.11)$$

圖 4.30(a)至圖 4.33(a)為間隙開啟角度與柱頂側向加載之關係圖，圖 4.30(b)至圖 4.33(b)為鋼柱之形變與柱頂側向加載之關係圖。由圖中可觀察到大部分之柱頂側向位移為鋼柱與基礎間隙開啟所造成，約占總位移之 80%，而鋼柱形變所

造成之位移很小；且間隙開啟後可觀察到圖形有明顯轉折點，位移增加量非常小，鋼柱之變形量仍保持於彈性範圍內，符合結構受震後不破壞且保持彈性範圍內之要求。試驗值之間隙開啟角度較預測值小，是因為鋼柱與基礎接合處之剪力鋼板與側向束制鋼板摩擦所致。表 4.3 為各試體於目標層間變位角時之預測值與試驗值之間隙開啟角度。

4.6 試驗數據與理論推導之比較

根據第二章中所建立之分析模型與實際試驗之數據進行比較，分別討論遲滯迴圈、柱端所受之側向力、各階段之勁度以及鋼絞線之內力。

圖 4.34 至圖 4.37 為各試體之預測值與試驗數據遲滯迴圈比較圖，其中試體 R0LR20 之試驗數據較預測值擁有消能面積，是因為柱翼加勁板與基礎上之側向滑移束制用鋼板摩擦所致。試體 R2LR20 之試驗數據與預測值的誤差值較大，解壓點的預測非常準確，是因為此次試驗中鋼絞線之內力變化量非常小，但在形狀記憶合金開始作用之勁度卻與預測有很大差距，其中誤差應為理論分析以直線模擬其勁度，直接以一角度作為勁度轉變，而實際形狀記憶合金應力應變曲線之線性段與非線性段是以一平滑曲線轉變，當形狀記憶合金進入非線性段後勁度之試驗數據與預測值非常接近。試體 R2LR20-S 之試驗值與預測值之誤差非常大，遲滯迴圈圖之層間變位角 $\pm 3.0\%$ 與 $\pm 4.0\%$ 迴圈，加載過程於間隙開啟後勁度會先轉變為一平緩曲線，上一迴圈挫屈的消能鋼棒開始被拉直，此時遲滯迴圈勁度快速上升，直至消能鋼棒再次到達降伏點後勁度趨於穩定；卸載過程先以消能鋼棒之線性勁度卸載至消能鋼棒零內力，之後消能鋼棒開始受壓，消能鋼棒尚未降伏前便進入挫屈狀態，此時遲滯迴圈圖之勁度下降，直至消能鋼棒嚴重挫屈接觸到管壁後勁度再次上升至消能鋼棒降伏。由於試體 R2LR30 之形狀記憶合金已做過多次試驗，在試驗過程中觀察到之形狀記憶合金之降伏點較試體 R2LR20 更不明顯，由線性至非線性過程為一平滑曲線，在間隙開啟之後可以觀察到遲滯迴圈之勁度下降幅度較試體 R2LR20 大許多。藉由試驗數據與預測值之比較，顯示出第二章

所建立之理論分析模型，若擁有完整之材料性質可準確預測鋼柱基底含形狀記憶合金之自復位與消能行為。

表 4.4、4.6、4.10 和 4.12 為試體各層間變位角第一迴圈之柱底回復彎矩試驗值與預測值比較，表 4.5、4.7、4.11 和 4.13 為 4%迴圈之勁度試驗值與預測值比較。

表 4.8 與 4.9 分別為試體 R2LR20 於各層間變位角之第一迴圈以及各層間變位角迴圈結束時之形狀記憶合金殘餘應變，從中可以觀察到形狀記憶合金於層間變位角 $\pm 1.5\%$ 後有明顯的受力行為，試體行程回到原點時仍然零殘餘應變，直至層間變位角 $\pm 3.0\%$ 時形狀記憶合金之軸向最大應變為 2.58-2.83%，開始出現微小的殘餘應變 0.31-0.33%。在進入目標層間變位角 $\pm 4.0\%$ ，形狀記憶合金之軸向最大應變為 3.93-4.21%，試驗結束後殘餘應變為 0.94-1.10%，與材料試驗之數據軸向最大應變 4.0%時殘留應變約 1.0%比較後，結果非常吻合。

表 4.14 與 4.15 分別為試體 R2LR30 於各層間變位角之第一迴圈以及各層間變位角迴圈結束時之形狀記憶合金殘餘應變，可觀察到形狀記憶合金於層間變位角 $\pm 1.5\%$ 後有受力行為，而因為形狀記憶合金已做過多次試驗，藉由材料試驗之結果可知，其降伏點會越來越不明顯，應力應變曲線由原點至最高點轉變為一平滑曲線，因此子結構之遲滯迴圈也呈現一平滑曲線。此試體於各層間變位角之第一迴圈最大值時，形狀記憶合金之應變計讀數較之前試驗時小，表示相同之間隙開啟所造成位移由車削段承受變小，螺牙段提供較多變位，導致於層間變位角 4%時形狀記憶合金由螺牙處斷裂。

圖 4.38 至圖 4.41 為各試體之鋼絞線內力預測值與試驗值比較圖，由圖中可以觀察到試體 R0LR20 之內力值在間隙開啟之後每一迴圈皆有衰減，隨著間隙開啟角度越大，鋼絞線內力值越大，使得鋼絞線之夾片以及錨定頭之間有些許滑動，每次滑動將造成鋼絞線內力衰減，試驗結束後衰減 11%。試體 R2LR20 在整個試驗過程中鋼絞線之內力值幾乎沒有衰減，是因為試體 R2LR20 是接著試體

R0LR20 試驗結束後之剩餘預力量繼續試驗，鋼絞線之夾片以及錨定頭之間隙應為非常緊密，致使鋼絞線之內力值未大於上一次試驗之最大值前夾片以及錨定頭不會滑動，所以內力值沒有明顯衰減。試體 R2LR20-S 為接著試體 R2LR20 之預力值繼續試驗，內力值並無明顯衰減，其理由與上述相同。試體 R2LR30 為增加預力至鋼柱降伏強度之 30%，由圖中可以觀察到從試驗開始到結束有預力損失，可以證實尚未進行過試驗的試體鋼絞線之夾片與錨定頭應有些微縫隙，經過試驗鋼絞線拉緊之過程將會造成預力損失，且使夾片與錨定頭更加緊密。表 4.16 為試體於各層間變位角時之鋼絞線內力量與初始預力比值，表 4.17 為試體之鋼絞線初始預力量、最大內力以及試驗結束時內力比較。

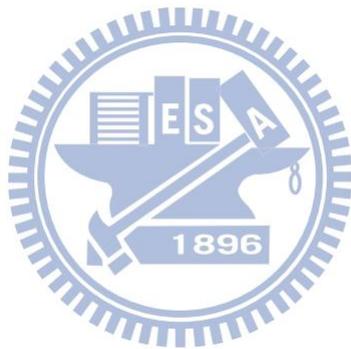
4.7 鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之設計建議

本試驗為鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之自復位行為與消能，必須確保試驗過程中整體構架完全保持在彈性範圍中，因此本試驗之參數將由鋼柱之降伏彎矩 M_y 作為設計之依據。由於本試驗是以預力鋼絞線方式模擬柱頂垂直載重，為確保試體在受震後仍然保持彈性且具有自復位與零殘留變形之特性，柱構件之最大彎矩值必須小於其降伏彎矩。

綜合本試驗所規劃之試驗結果，鋼柱基底含形狀記憶合金裝置之設計建議敘述如下：

1. 根據所選用之材料、斷面性質，以及預計柱頂所承受之垂直載重，可依照第二章所推導之理論公式，計算出欲設計接合之各階段勁度。
2. 子結構遲滯迴圈圖之行為可由鋼柱之撓曲行為、鋼柱受柱頂垂直載重之行為，以及形狀記憶合金裝置疊加而成，其中解壓點可由 2.4 節中所推導之公式求得，開啟之後各階段之勁度與層間變位角可由 2.5 節之分析中求得。
3. 在試驗過程中試體將受到軸力與彎矩之交互作用，為確保試體在受震後仍然保持彈性且具有自復位與零殘留變形之特性，須根據 3.4 節中所引用「鋼結

構極限設計法規範及解說」對稱斷面構材承受彎矩與軸力交互作用之規定來
計算柱翼加勁板需補強之長度。



第五章 結論與建議

5.1 結論

藉由理論分析以及試驗的觀察，可以歸納出以下幾點結論：

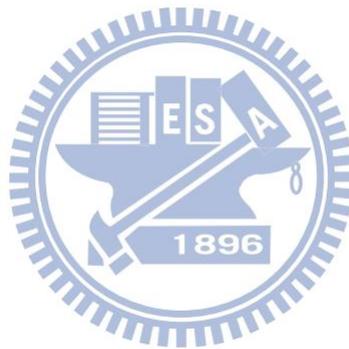
1. 試驗結果顯示出鋼柱基底含形狀記憶合金裝置於適當的設計之下，受震後擁有良好的自復位以及消能能力。
2. 柱頂垂直載重為一永遠鉛錘向下之力，可提供子結構回復彎矩，隨著層間變位角的增加，對於柱底面彎矩的力臂減小進而造成回復彎矩也減小；若層間變位角過大超出支點距離，其回復彎矩將會轉變為傾倒彎矩，因此在設計上必須確保最大層間變位角所造成位移不大於支點距離。
3. 形狀記憶合金在最大軸向應變 4% 以內，可確保卸載後之殘餘應變量小於 1.0%，且可以提供結構受震時自復位與消能能力。
4. 相同尺寸之下，雖然形狀記憶合金之消能能力較鋼材為小，但是遲滯迴圈非常穩定，且鋼材將於降伏後造成大量殘餘變位，形狀記憶合金進入非線性段後可根據其超彈性效應釋放應力，使子結構擁有零殘餘變位能力。
5. 藉由比較試驗結果與理論分析，顯示出本研究之理論推導之公式可以有效地模擬其接合行為，且準確性良好。

5.2 建議

1. 目前國內對於形狀記憶合金尚未有許多深入研究，可以對於材料特性以及應用方面做深入研究，確保在設計時使用材料之穩定性。
2. 目前國內機械加工廠對於 NiTi 形狀記憶合金較為不熟悉，加工之品質較不穩定，可隨著本研究所配合的廠商，經過嘗試發展出較穩定之 NiTi 形狀記憶合金之加工方式。
3. 雖然 NiTi 形狀記憶合金擁有良好的自復位以及消能能力，但價格過於昂貴，若依照本研究所使用的設計方式其性價比並非相當突出，可將形狀記憶合金

裝置以軸壓方式設計，減少形狀記憶合金之總長度，但保持相同的軸向應變，可有效降低其價格。

4. 本研究是以預力鋼絞線模擬柱頂垂直載重，藉由後製之資料修正得到考慮柱頂垂直載重之遲滯迴圈圖，修正過程中難免需要做簡化計算，因此會出現些微誤差，若是試驗場地與試驗器材允許，建議直接施加柱頂一保持定值之力。



参考文献

- AISC. (2010). "Seismic provisions for structural steel buildings." American institute of steel construction.
- Andrawes, B. and DesRoches, R. (2007). "Comparison between shape memory alloy seismic and restrainers and other bridge retrofit devices." *J. Bridge Eng.*, 12(6), 700-709.
- Andrawes, B. and DesRoches, R. (2008). "Sensitivity of seismic applications to different shape memory alloy models." *J. Eng. Mech.*, 134(2), 173-183.
- Araya, R., Marivil, M., Mir, C., Moroni, O. and Sepúlveda, A. (2008). "Temperature and grain size effects on the behavior of CuAlBe SMA wires under cyclic loading." *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 496(1-2), 209-213.
- Auricchio, F., Fugazza, D. and DesRoches, R. (2006). "Earthquake performance of steel frames with nitinol braces." *J. Earth. Eng.*, 10(1), 1-22.
- Auricchio, F., Fugazza, D. and DesRoches, R. (2006). "Numerical and experimental evaluation of the damping properties of shape-memory alloys." *J. Eng. Mater. Technol.*, 128(3), 312-319.
- Buehler, W.J., Gilfrich, J.V. and Wiley R.C. (1963). "Effect of lowtemperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi." *J. Appl. Phys.*, 34(5), 1475-1477.
- Cai, J.F., He, Z.R., Liu, M.Q., Yang, J. and Wang, Q. (2010). "Effect of annealing processes on microstructure and properties of Ti-Ni-Co shape memory alloy." *Trans. Mater. Heat Treat.*, 31(8), 20-24.
- Chi, H., Liu, J. (2012). "Seismic behavior of post-tensioned column base for steel self-centering moment resisting frame." *J. Constr. Steel Res.*, 78, 117-130.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C. M., Folz, B. (2002). "Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames." *J. Struct. Eng.-ASCE*, 128(9), 1111-1120.
- DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. (2004). "Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars." *J. Struct. Eng.*, 130(1), 38-46.

- Du, Y., Shen, Y. Sun B. and Li, H. (2005) “Effect of heat treatments on super-elasticity of NiTi shape memory alloy.” *Rare Metal Mat. Eng.*, 34(3), 229-231.
- Englekirk, R. E. (2002). “Design-construction of the paramount – a 39-story precast prestressed concrete apartment building.” *PCI J.*, 47(4), 56-71.
- Tyber, J., McCormick, J, Gall, K. and DesRoches, R. (2007). “Structural engineering with NiTi. I: Basic materials characterization.” *J. Eng. Mech.-ASCE*, 133(9), 1009-1018.
- Liao, W.I., Effendy, E., Song, G., Mo, Y.L., Hsu, T.T.C. and Loh, C.H. (2006). “Effect of SMA bars on cyclic behavior of low-rise shear walls.” *Proceedings of the SPIE*, 6174, 1116-1123.
- McCormick, J., Fugazza, D., Auricchio, F. and DesRoches, R. (2006). “Seismic vibration control using superelastic shape memory alloys.” *J. Eng. Mater. Technol.*, 128(3), 294-301
- Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R. T., Hess, W. G., Krumme, R., Hayes, J. R., and Sweeney, S. (2004). “Steel beam-column connections using shape memory alloys.” *J. Struct. Eng.*, 130(5), 732-740.
- Olander, A. (1932). “An electrochemical investigation of solid cadmium gold alloys.” *J. Am. Chem. Soc.*, 56, 3819-3833.
- Raghavendra, R.A., Fengchun, J., Kenneth, S.V. and George, T.G. (2006). “Response of NiTi shape memory alloy at high strain rate-A systematic investigation of temperature effects on tension-compression asymmetry.” *Acta Mater.*, 54(17), 4609-4620.
- Sepúlveda, J., Boroschek, R., Herrera, R., Moroni, O. and Sarrazin, M. (2008). “Steel beam-column connection using copper-based shape memory alloy dampers.” *J. Constr. Steel Res.*, 64(4), 429-435.
- Takamatsu, T. and Tamai, H. (2005). “Non-slip-type restoring force characteristics of an exposed-type column base.” *J. Constr. Steel Res.*, 61(7), 942-961.
- Takamatsu, T., Tamai, H., Yamanishi, T. and Matsuo, A. (2006). “Self-centering performance of non-slip-type exposed column base.” *Proceedings of the fifth*

international conference on behavior of steel structures in seismic areas
STESSA 2006, Yokohama, Japan, August 14-17, Taylor and Francis, London,
U.K.

Wang, Z. (1995). "Experimental study of mechanical behaviour of TiNi shape memory alloy." *Acta Mechanica Sinica*, 11(5), 587-596.

Zhang, Y. and Zhu, S. (2007). "A shape memory alloy-based reusable hysteretic damper for seismic hazard mitigation." *Smart. Mater. Struct.*, 16(5), 1603-1613.

Zhang, Y. and Zhu, S. (2008). "Seismic response control of building structures with superelastic shape memory alloy wire dampers," *J. Eng. Mech.-ASCE*, 134(3), 240-251.

工業技術研究所機械工業研究所編(1985)，「機械零件標準手冊」。新竹市：工業技術研究所機械工業研究所。

內政部營建署(2010)，「混凝土結構設計規範」。台北市：內政部營建署。

內政部營建署(2010)，「鋼結構極限設計法規範及解說」。台北市：內政部營建署。

林振寧(2005)，「形狀記憶合金之彈性係數的溫度效應之研究」，大同大學機械工程研究所碩士論文，葉隆吉指導。

李啟全、祈珊(2003)，「NiTi 形狀記憶合金超彈性的研究進展」。國外金屬熱處理，24(4)，5-9。

黃崇豪(2005)，「預力鋼梁接 CFT 柱接頭含消能鋼棒之行為」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，陳誠直指導。

蔡豐銘(2004)，「形狀記憶合金之有限元素分析」，國立雲林科技大學機械工程系碩士論文，黃順發指導。

翟玉敬(2011)「冷變形和熱處理對 TiNiV 形狀記憶合金超彈性影響之研究」，江蘇大學碩士論文，司乃潮指導。

機械設計便覽編集委員會(1973)，「機械設計便覽」。東京：丸善出版社。

表 3.1 NiTi 形狀記憶合金之出廠報告

Element	Requirement (wt%)	Top (wt%)
Ti	Balance	Margin
Ni	54.5-57	55.98
C	0.050 max.	0.058
Co	0.050 max.	< 0.01
Cu	0.010 max.	< 0.005
Cr	0.010 max.	< 0.005
H	0.005 max.	0.001
Fe	0.050 max.	0.017
Nb	0.025 max.	< 0.01
N+O	0.050 max.	0.067

Requirement (ASTM E8)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Result	945	495	27.0	30.5
	906	475	20.0	22.5
Requirement	M_s (°C)	M_f (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)
Result	-16.6	-61.9	-27.3	15.1

表 3.2 試體參數表

Specimen	Amount of SMA bars	Amount of Steel bars	W/P_y (%)
R0LR20	0	0	20
R2LR20	2	0	20
R2LR20-S	0	2	20
R2LR30	2	0	30

表 3.3 試體之理論數據

Specimen	$K_{1,th}$ (kN-m/rad)	$K_{2,th}$ (kN-m/rad)	$K_{3,th}$ (kN-m/rad)	$K_{4,th}$ (kN-m/rad)	$K_{5,th}$ (kN-m/rad)
R0LR20	106210	-5410	-	-5410	-
R2LR20	106660	13604	-979	13604	-979
R2LR20-S	106700	43145	-3960	43145	-3960
R2LR30	103506	10451	-4131	10451	-4131

Specimen	W/P_y (%)	$M_{d,th}/M_y$ (%)	$M_{max,th}/M_y$ (%)	$\theta_{g,t,th}$ (% rad)	$\theta_{t,th}$ (% rad)
R0LR20	20	27.6	27.6	3.7	4.0
R2LR20	20	27.6	39.1	3.7	4.0
R2LR20-S	20	27.6	37.6	3.7	4.0
R2LR30	30	39.4	48.6	3.7	4.0

表 3.4 考慮預力鋼絞線之試體理論數據

Specimen	$F_{pt,i}/P_y$ (%)	$M_{d,th}/M_y$ (%)	$M_{max,th}/M_y$ (%)	$\theta_{g,t,th}$ (% rad)	$\theta_{t,th}$ (% rad)
R0LR20	20	30.4	60.2	3.7	4.0
R2LR20	20	30.4	76.1	3.7	4.0
R2LR20-S	20	30.4	65.1	3.7	4.0
R2LR30	30	45.6	89.8	3.7	4.0

表 3.5 鋼材實際材料性質表

Specimen	Steel grade	Modulus of elasticity (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
Column web	A572 Gr. 50	201127	416	528
Column flange	A572 Gr. 50	199250	400	524
ED bar	SS400	207108	556	628

表 3.6 鋼絞線性質表

Specification	Diameter (mm)	Sectional area (mm ²)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
ASTM A416 Gr. 270	15.24	140	1670	1860	195000

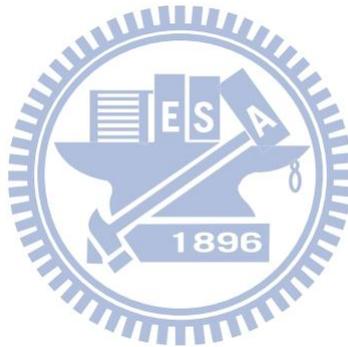


表 4.1 形狀記憶合金各試體之材料試驗數據

Specimen	Diameter (mm)		Area (mm ²)		Length (mm)	
	Before	After	Before	After	Before	After
H0D19-2	19.13	18.65	287.42	273.18	553	566
H600D19	19.07	18.65	285.62	273.18	553	567
H450D19	18.93	18.83	281.44	278.48	550	557

Specimen	Residual displacement (mm)	Residual strain (%)	Reduction of area (%)
H0D19-2	13	4.12	4.95
H600D19	14	4.52	4.36
H450D19	7	2.47	1.05

Specimen	Yield strain (%)	Yield strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Strength of 6% strain (MPa)
H0D19-2	0.89	571.3	64191	647.8
H600D19	0.87	569.7	65483	638.2
H450D19	0.77	498.4	64727	665.0

表 4.2 試體各層間變位角之消能

Story drift (%)	Energy dissipation (kN-m)			
	R0LR20	R2LR20	R2LR20-S	R2LR30
0	0	0	0	0
0.375	0.12	0.15	0.16	0.19
0.5	0.16	0.19	0.18	0.27
0.75	0.18	0.30	0.28	0.41
1.0	0.29	0.40	0.43	0.55
1.5	0.46	0.68	1.24	0.87
2.0	0.60	1.15	2.43	1.25
3.0	1.20	3.07	7.47	2.90
4.0	2.17	5.51	9.91	-

表 4.3 各試體間隙開啟角度與理論比較

Specimen	4.0% Story drift	
	$\theta_{g,pred}$ (% rad)	$\theta_{g,exp}$ (% rad)
R0LR20	3.69	+3.42
		-3.51
R2LR20	3.71	+3.35
		-3.37
R2LR20-S	3.73	+3.38
		-3.49
R2LR30	3.56	+3.12
		3.54

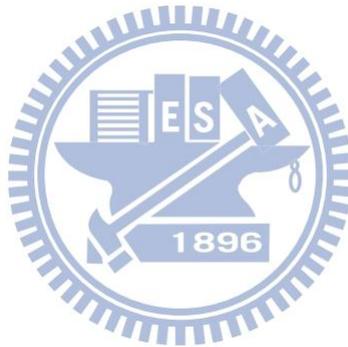


表 4.4 試體 R0LR20 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較

Story drift (%)	M_{pred} (kN-m)	M_{exp} (kN-m)	
		正層間變位角	負層間變位角
0.375	311	288	290
0.5	304	310	316
0.75	291	302	306
1.0	277	301	293
1.5	250	273	275
2.0	223	254	261
3.0	169	210	217
4.0	115	178	171

表 4.5 試體 R0LR20 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較

Stiffness	Predicted value (kN-m/rad)	Experimental value (kN-m/rad)
K_1	106210	86087 -86890
K_2	-5410	-3630 3396
K_3	-	- -
K_4	-5410	-4324 4273
K_5	-	- -

表 4.6 試體 R2LR20 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較

Story drift (%)	M_{pred} (kN-m)	M_{exp} (kN-m)	
		正層間變位角	負層間變位角
0.375	305	273	301
0.5	322	303	341
0.75	356	322	354
1.0	390	344	381
1.5	425	370	415
2.0	421	372	428
3.0	410	346	422
4.0	400	341	401

表 4.7 試體 R2LR20 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較

Stiffness	Predicted value (kN-m/rad)	Experimental value (kN-m/rad)
K_1	106660	85005 -80683
K_2	13604	6781 -7155
K_3	-979	-967 283
K_4	13604	52440 -49864
K_5	-979	291 -1278

表 4.8 試體 R2LR20 各層間變位角之形狀記憶合金應變最大值

Story drift (%)	Axial strain (%)			
	Northwest	Northeast	Southwest	Southeast
0.375	0.01	0.03	0.03	0.02
0.5	0.03	0.06	0.08	0.05
0.75	0.12	0.22	0.24	0.18
1.0	0.31	0.44	0.44	0.33
1.5	0.80	0.98	0.88	0.72
2.0	1.37	1.57	1.42	1.34
3.0	2.62	2.83	2.58	2.75
4.0	3.96	4.21	3.93	4.05

表 4.9 試體 R2LR20 各層間變位角迴圈結束之形狀記憶合金殘餘應變

Story drift (%)	Axial strain (%)			
	Northwest	Northeast	Southwest	Southeast
0.375	0.00	-0.01	0.00	0.00
0.5	0.00	-0.01	0.00	0.00
0.75	0.00	-0.01	0.00	0.00
1.0	0.00	0.00	0.00	-0.01
1.5	0.02	0.01	0.02	0.00
2.0	0.06	0.07	0.07	0.04
3.0	0.33	0.31	0.33	0.33
4.0	1.10	0.94	1.09	1.00

表 4.10 試體 R2LR20-S 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較

Story drift (%)	M_{pred} (kN-m)	M_{exp} (kN-m)	
		正層間變位角	負層間變位角
0.375	334	265	317
0.5	365	294	330
0.75	355	327	353
1.0	345	355	385
1.5	325	405	436
2.0	305	404	444
3.0	266	372	429
4.0	226	352	396

表 4.11 試體 R2LR20-S 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較

Stiffness	Predicted value (kN-m/rad)	Experimental value (kN-m/rad)
K_1	106700	86065
K_2	43145	-84446
K_3	-3960	38746
K_4	43145	-36495
K_5	-3960	-3628
		-2715
		38553
		-33441
		-5546
		-6224

表 4.12 試體 R2LR30 各層間變位角之第一迴圈試驗值與預測值比較

Story drift (%)	M_{pred} (kN-m)	M_{exp} (kN-m)	
		正層間變位角	負層間變位角
0.375	388	335	313
0.5	457	456	431
0.75	484	455	502
1.0	510	470	515
1.5	553	474	521
2.0	532	475	517
3.0	491	401	498
4.0	449	-	-

表 4.13 試體 R2LR30 於 4%迴圈時各階段勁度之試驗值與預測值比較

Stiffness	Predicted value (kN-m/rad)	Experimental value (kN-m/rad)
K_1	103506	94542
K_2	10451	-78838
K_3	-4131	1797
K_4	10451	-1982
K_5	-4131	-6448
		6138
		-
		-
		-
		-

表 4.14 試體 R2LR30 各層間變位角之形狀記憶合金應變最大值

Story drift (%)	Axial strain (%)			
	Northwest	Northeast	Southwest	Southeast
0.375	0.02	0.01	0.02	0.01
0.5	0.02	0.01	0.03	0.01
0.75	0.10	0.06	0.25	0.08
1.0	0.24	0.16	0.45	0.23
1.5	0.77	0.63	0.92	0.66
2.0	1.32	1.15	1.45	1.14
3.0	2.36	2.33	2.62	2.70
4.0	2.64	-	-	3.88

表 4.15 試體 R2LR30 各層間變位角迴圈結束之形狀記憶合金殘餘應變

Story drift (%)	Axial strain (%)			
	Northwest	Northeast	Southwest	Southeast
0.375	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	-0.01	0.00	0.00	0.00
0.75	-0.01	0.01	0.00	0.00
1.0	-0.01	0.01	0.01	0.00
1.5	0.00	0.02	0.02	0.01
2.0	0.04	0.04	0.05	0.04
3.0	0.22	0.16	0.22	0.21
4.0	0.47	-	-	0.46

表 4.16 各層間變位角之迴圈結束之鋼絞線內力

Story drift (%)	Strand force ratio ($F_{pv}/F_{pt,i}$)			
	R0LR20	R2LR20	R2LR20-S	R2LR30
0	1.000	1.000	1.000	1.000
0.375	0.995	1.001	0.992	0.993
0.5	0.995	1.002	0.991	0.994
0.75	0.991	0.995	0.991	0.991
1.0	0.987	1.006	0.991	0.990
1.5	0.972	0.999	1.000	0.983
2.0	0.954	1.004	1.001	0.976
3.0	0.925	1.000	1.001	0.957
4.0	0.886	1.000	0.999	0.942

表 4.17 各試體鋼絞線內力比較表

Specimen	鋼絞線總初始 預力 (kN)	試驗結束鋼絞 線內力 (kN)	最大鋼絞線內 力 (kN)	最大鋼絞線內 力與降伏力比
R0LR20	1644	1402	2737	0.42
R2LR20	1401	1391	2400	0.37
R2LR20-S	1394	1393	2417	0.37
R2LR30	2422	2290	3275	0.50

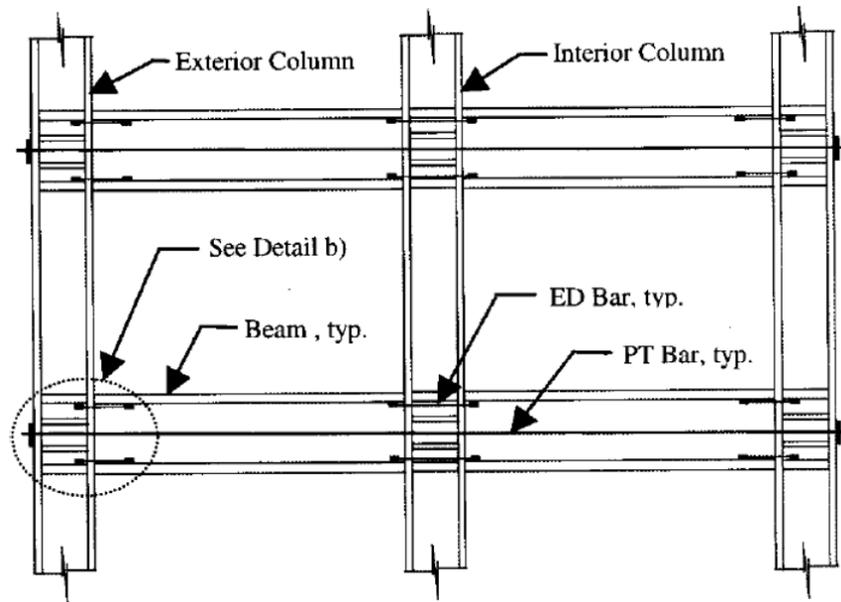


圖 1.1 含消能鋼棒之預力梁柱接頭 (Christopoulos et al. 2002)

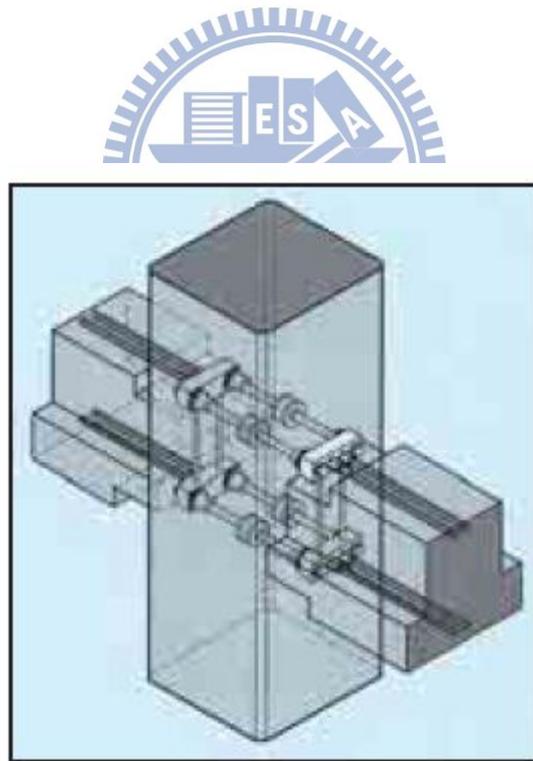


圖 1.2 預力系統之預鑄混凝土梁柱接頭 (Englekirk 2002)

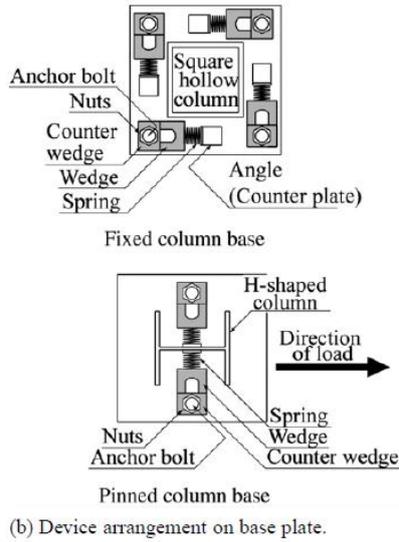
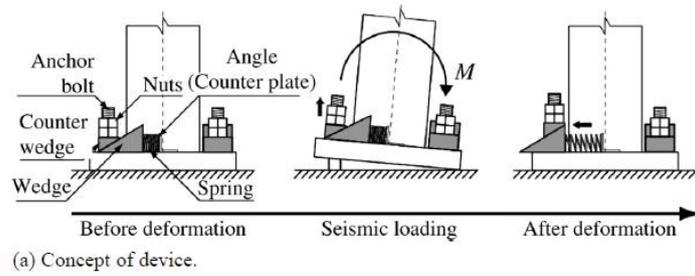


圖 1.3 應用楔形墊片之柱與基礎接合 (Takamatsu and Tamai 2005)

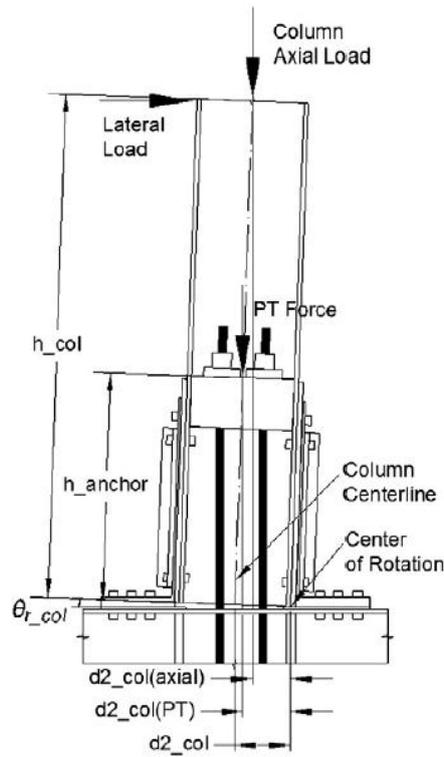


圖 1.4 預力自復位系統之柱與基礎 (Chi and Liu 2012)

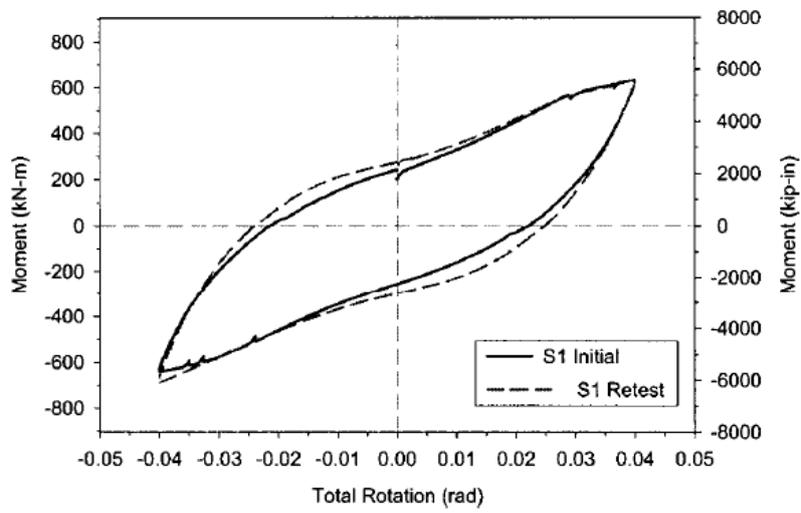


圖 1.5 形狀記憶合金加熱前後之試驗數據比較 (Ocel et al. 2004)

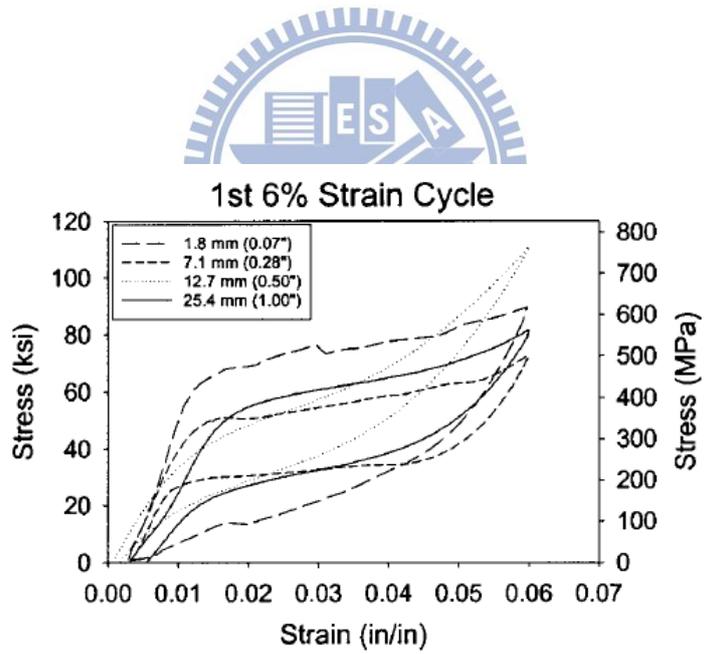


圖 1.6 各截面積之形狀記憶合金試驗數據比較 (DesRoches et al. 2004)

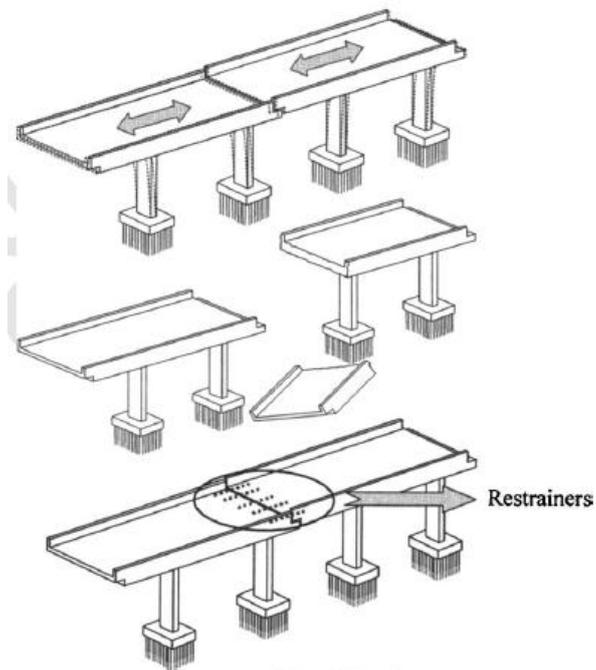


圖 1.7 橋梁接合處移位摔落 (Andrawes and DesRoches 2005)

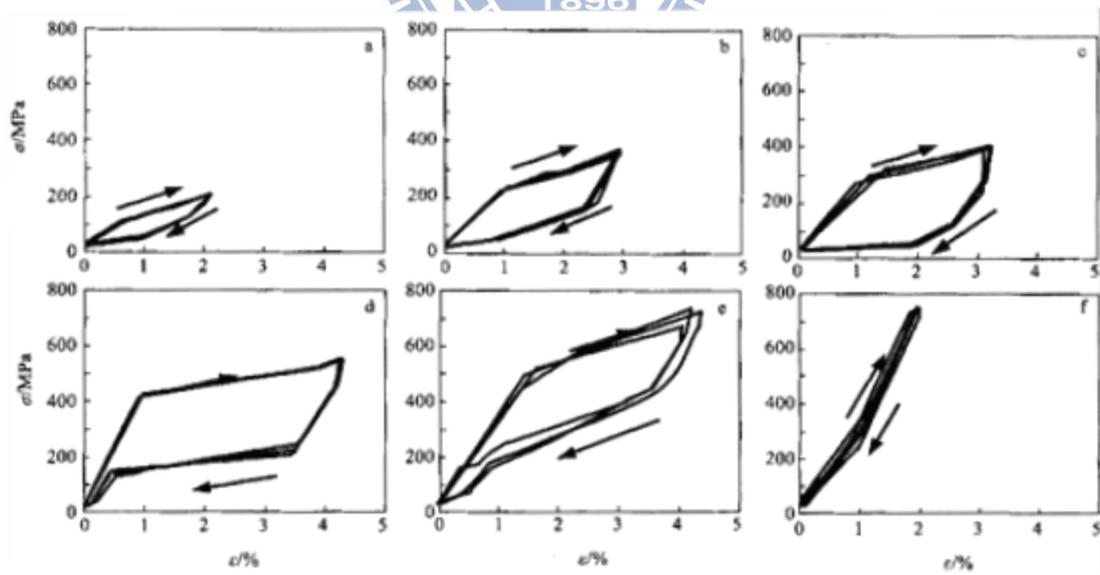


圖 1.8 不同溫度熱處理之形狀記憶合金應力應變曲線：(a) 400 °C；(b) 440 °C；
(c) 480 °C；(d) 520 °C；(e) 560 °C；(f) 600 °C (Du et al. 2005)



圖 1.9 棒狀形狀記憶合金運用於剪力牆 (Liao et al. 2006)

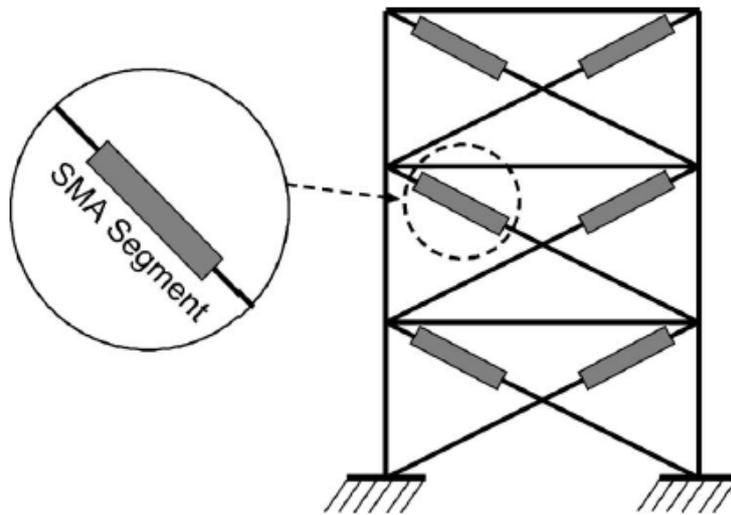


圖 1.10 形狀記憶合金安裝於三層樓構架 (McCormick et al. 2006)

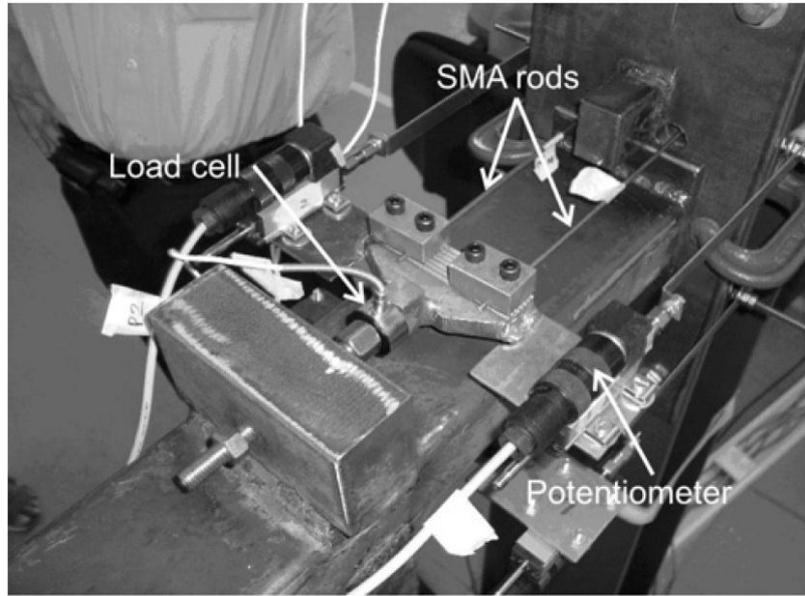


圖 1.11 銅鋁鎳形狀記憶合金運用於梁柱接頭 (Sepúlveda et al. 2007)

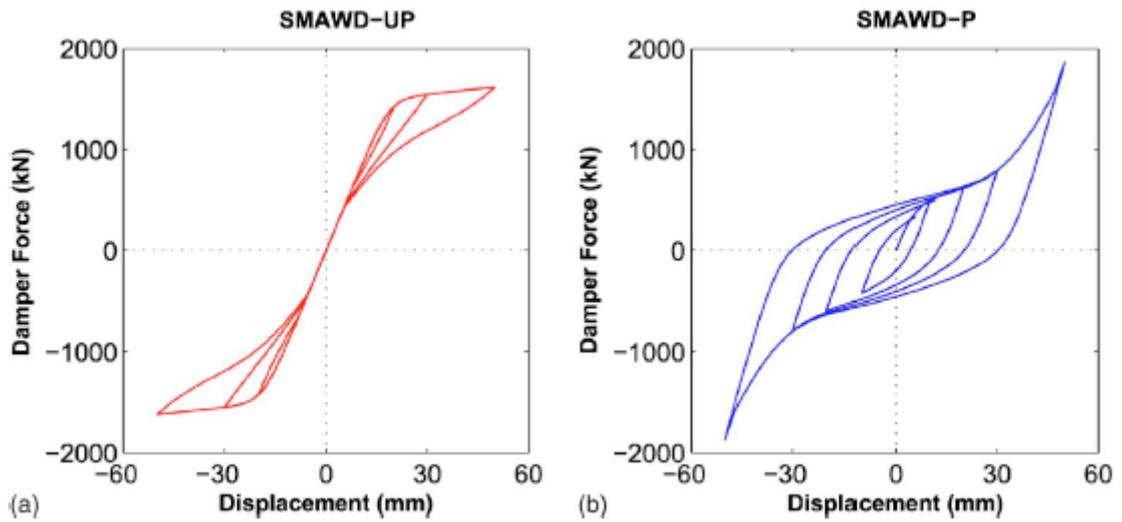


圖 1.12 形狀記憶合金有無預拉應變之比較 (Zhang and Zhu 2008)

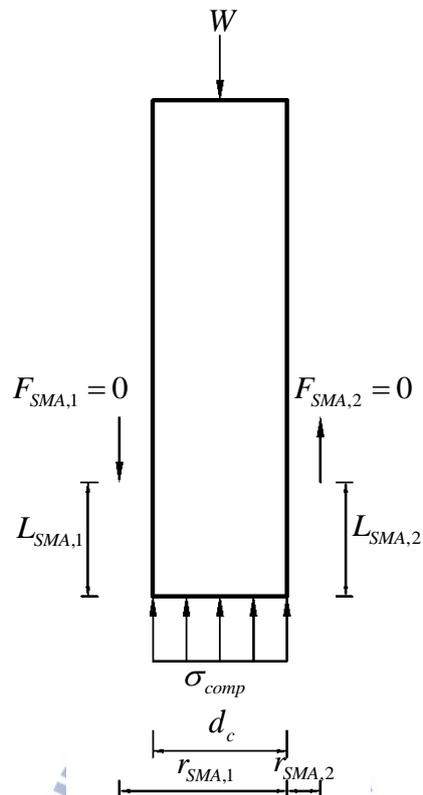


圖 2.1 未受到任何外加力之自由體圖

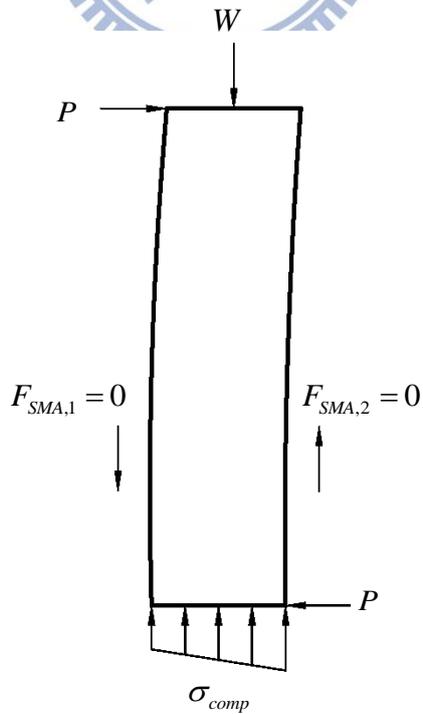


圖 2.2 施加水平力於柱頂之自由體圖

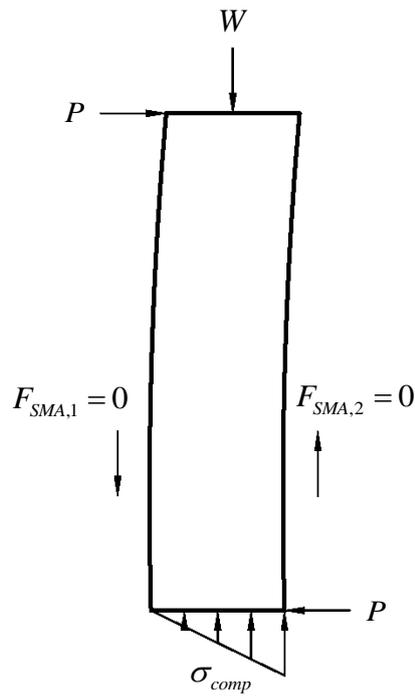


圖 2.3 柱與基礎間隙開啟前瞬間之自由體圖

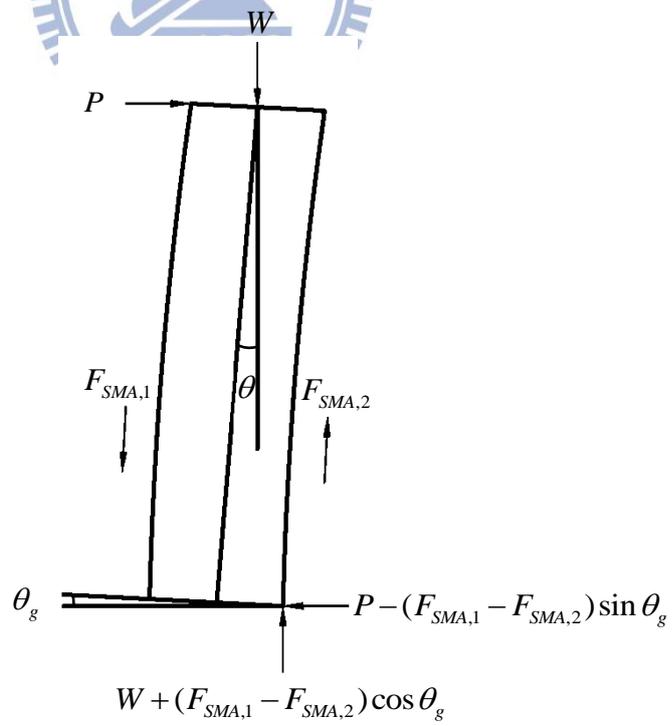


圖 2.4 柱與基礎間隙開啟後之自由體圖

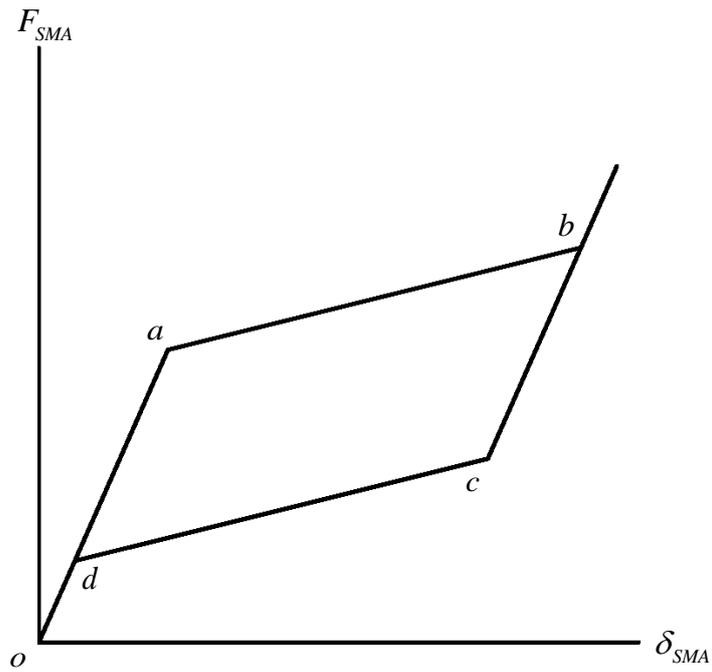


圖 2.5 形狀記憶合金軸力與變位

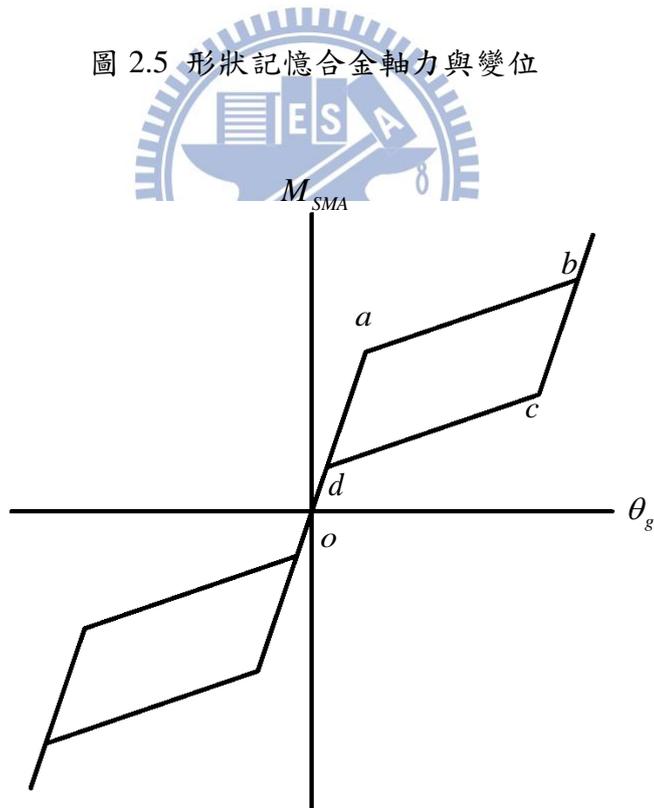


圖 2.6 形狀記憶合金提供柱底面彎矩與間隙開啟角關係圖

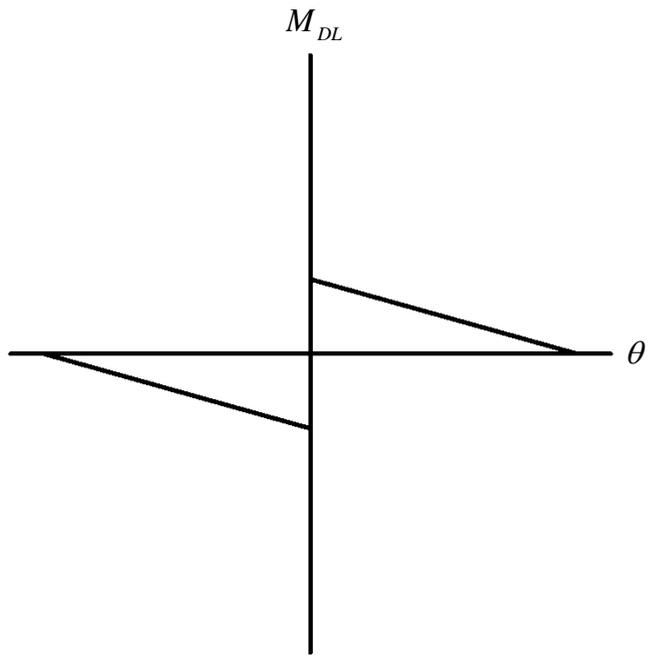


圖 2.7 柱頂垂直載重於柱底面彎矩與層間變位角關係圖

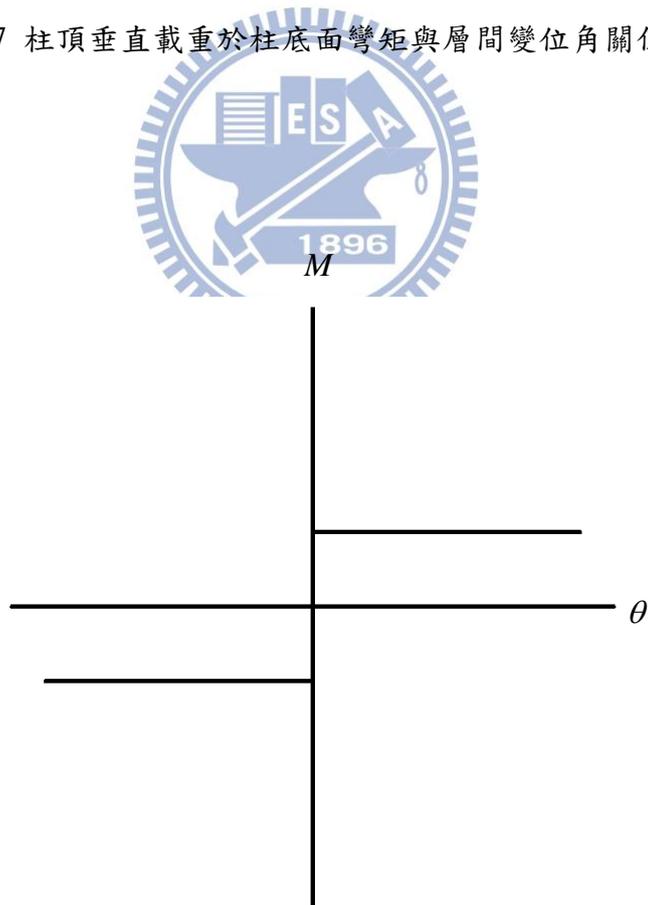


圖 2.8 柱頂垂直載重於柱底面彎矩之常數項與層間變位角關係圖

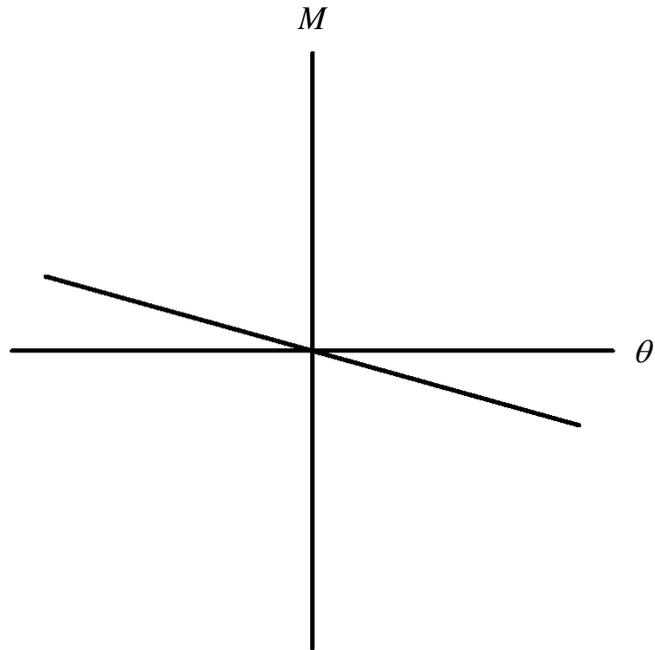


圖 2.9 柱頂垂直載重於柱底面彎矩之變數項與層間變位角關係圖

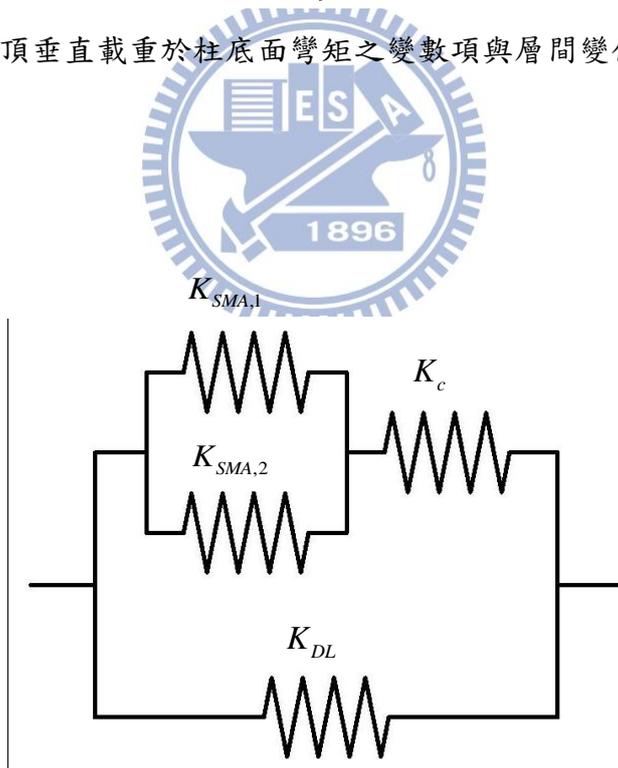


圖 2.10 整體子結構勁度疊加示意圖

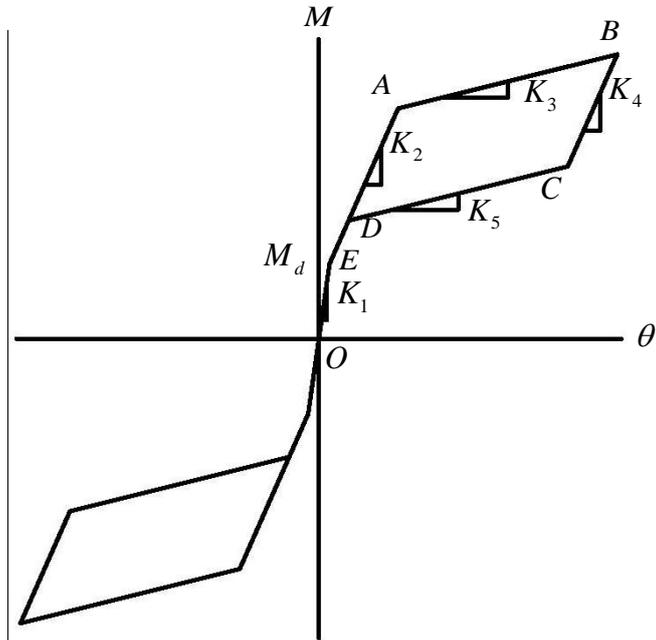


圖 2.11 整體子結構之遲滯迴圈圖



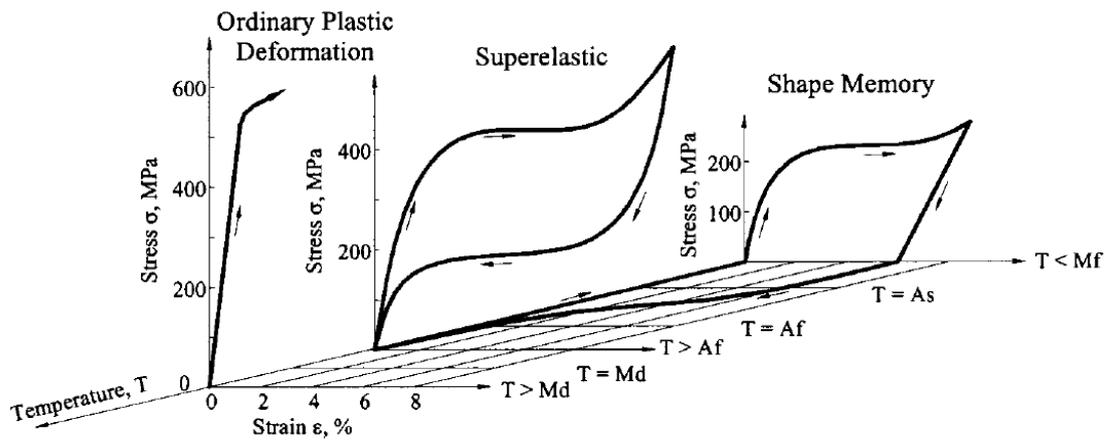


圖 3.1 形狀記憶合金之應力應變曲線示意圖 (DesRoches et al. 2004)

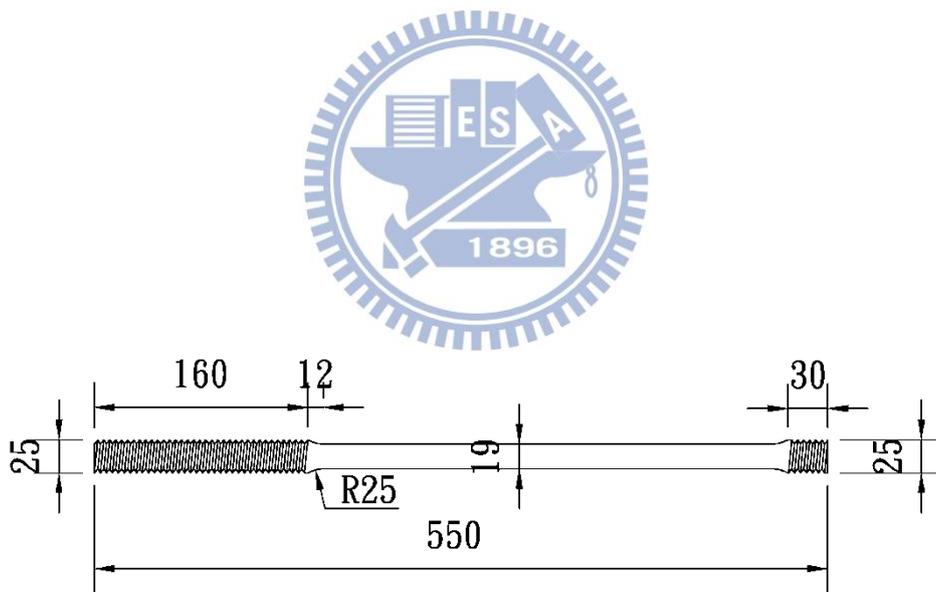


圖 3.2 形狀記憶合金車牙切削設計圖

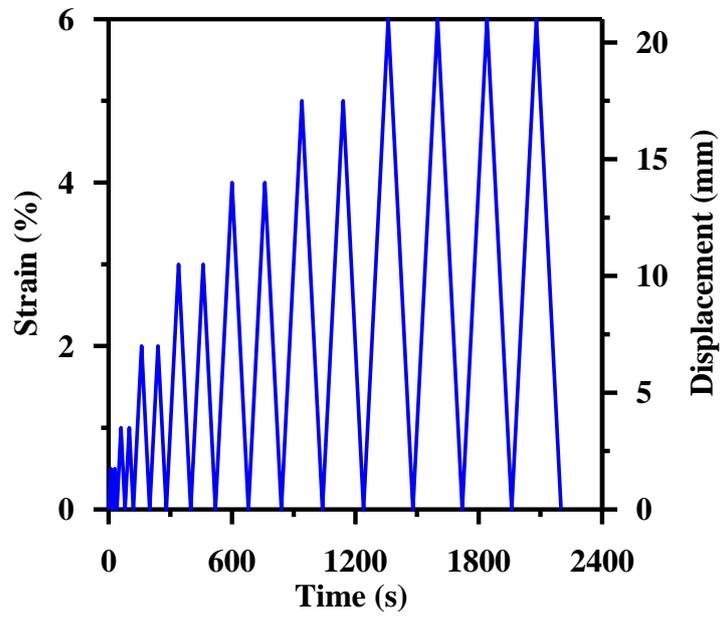
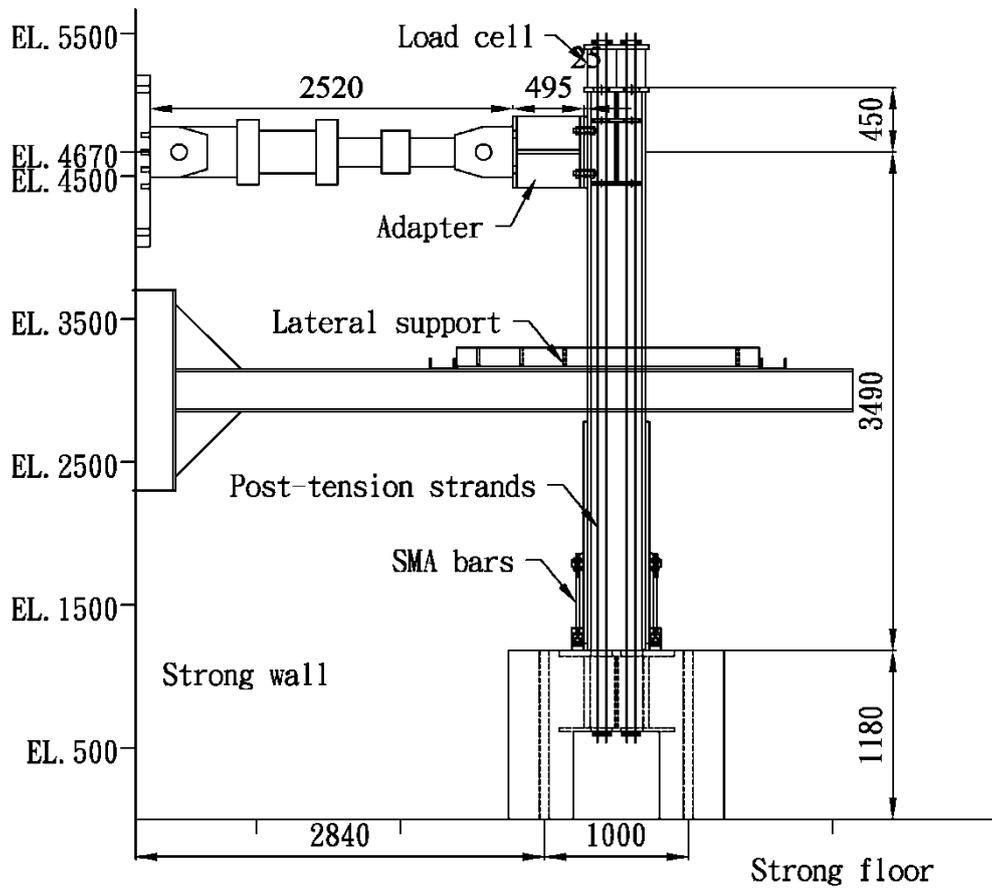
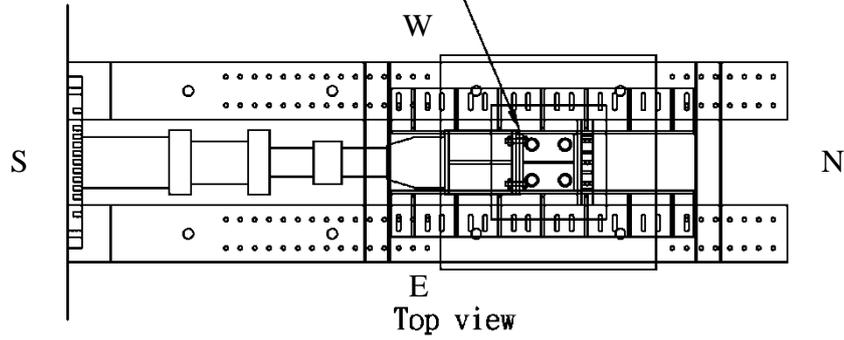


圖 3.3 形狀記憶合金應力應變曲線測定載重歷時圖



為避免雜亂，此側SMA裝置未顯示



Elevation view

試體設置圖

S= 1/200 for A4

單位 = mm

圖 3.4 試體設置圖

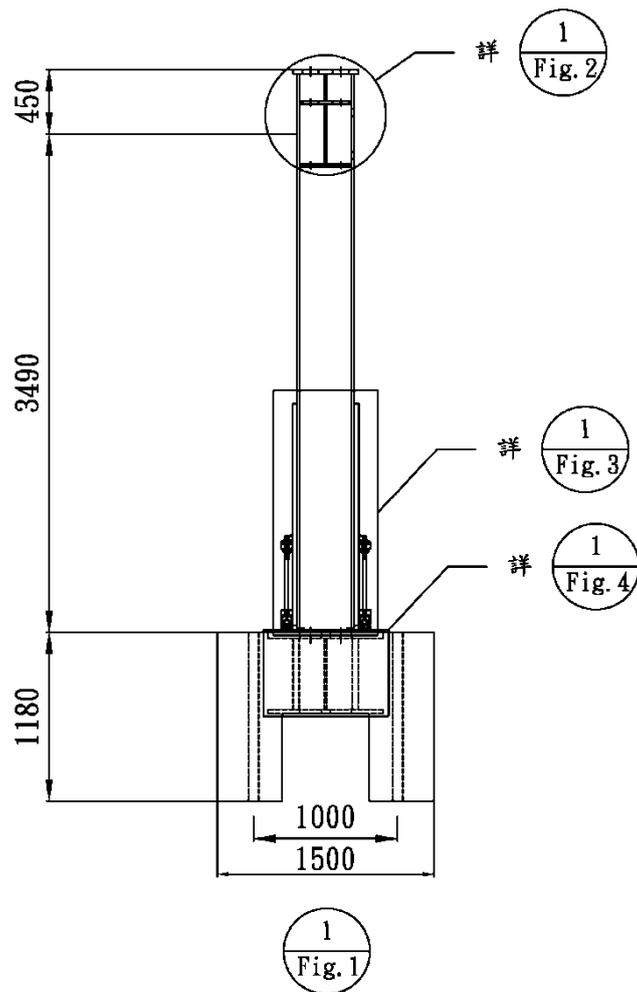
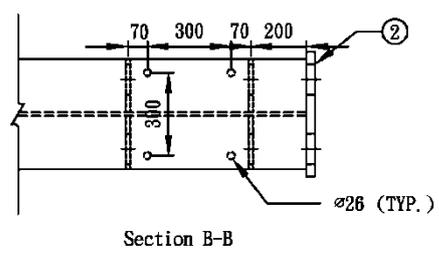
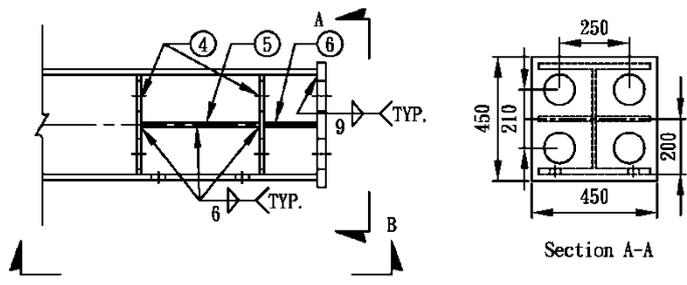


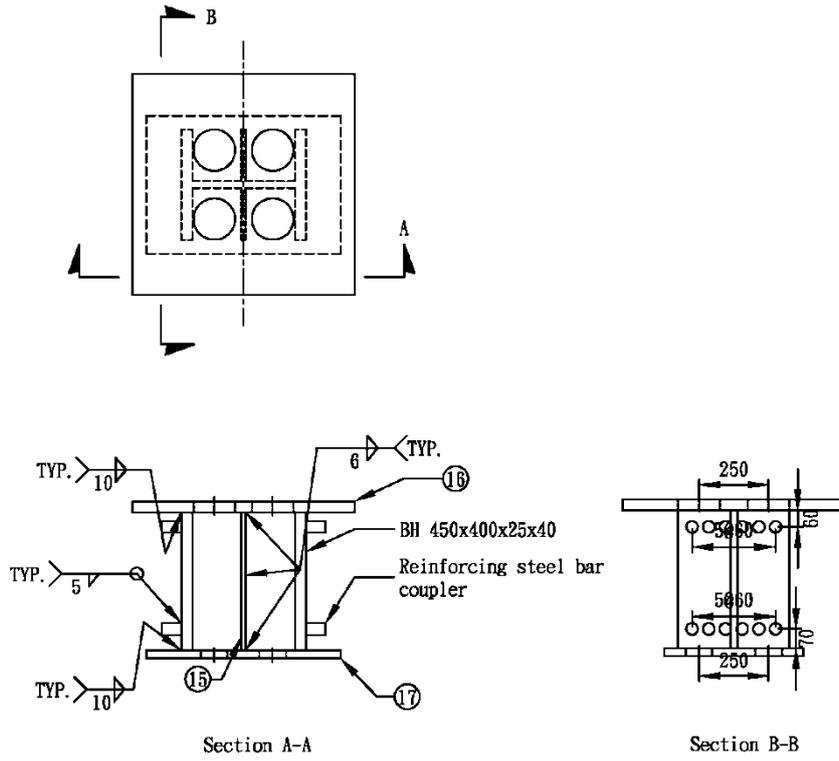
圖 3.5 試體設計圖之一



1
Fig. 2

圖 3.6 試體設計圖之二





1
Fig. 4

圖 3.8 基礎內鋼構件設計圖

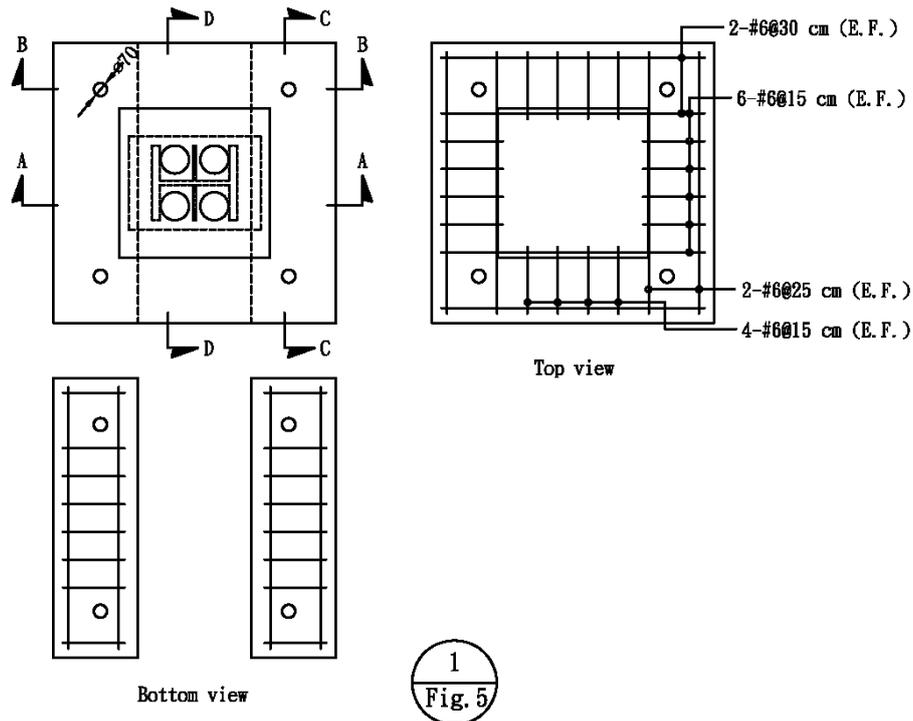


圖 3.9 混凝土基礎設計圖之一

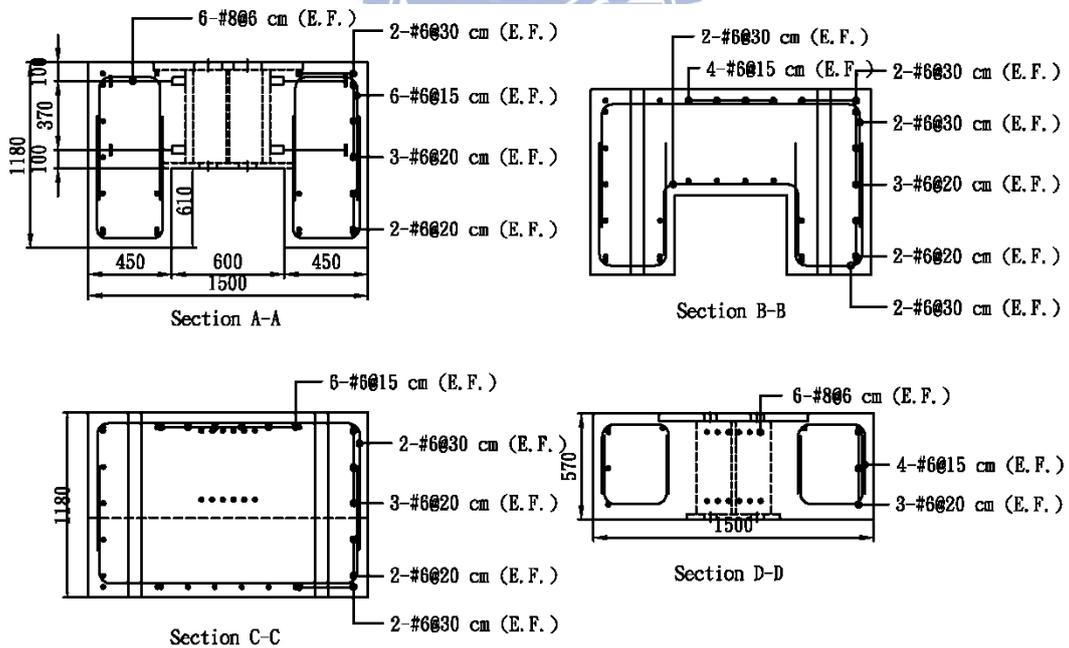
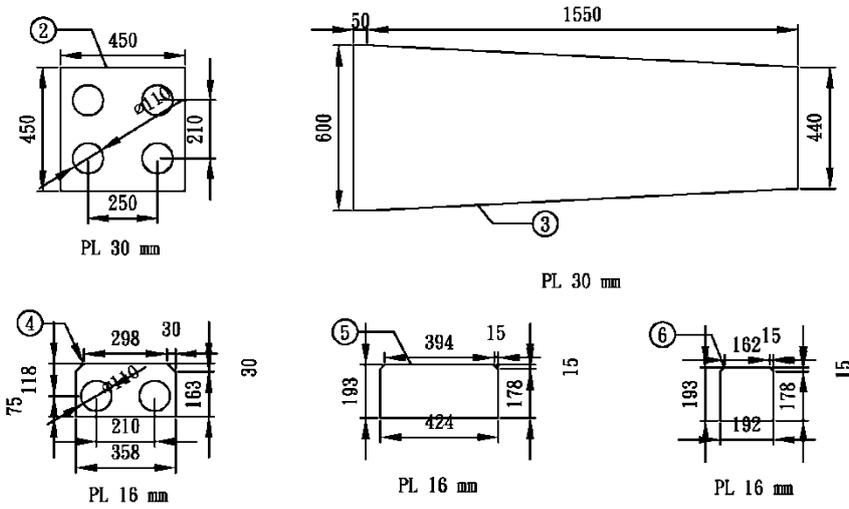
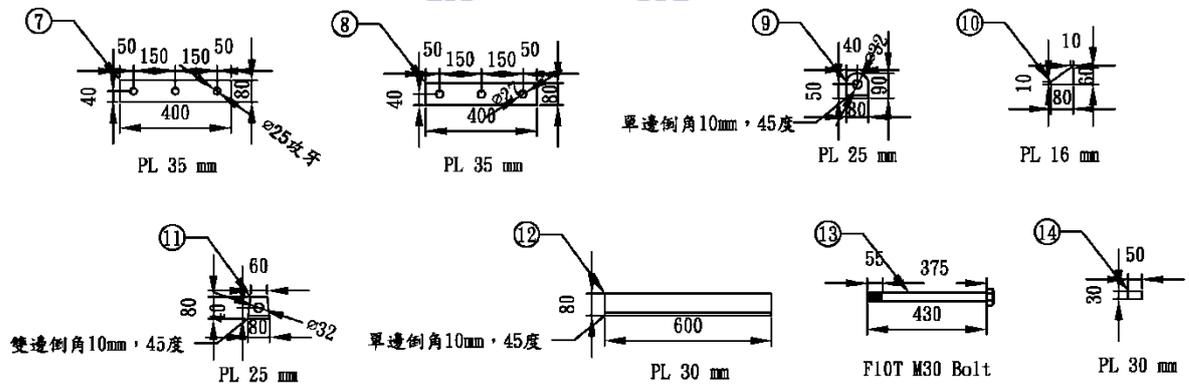


圖 3.10 混凝土基礎設計圖之二



1
Fig. 7

圖 3.11 試體部件圖之一



1
Fig. 8

圖 3.12 試體部件圖之二

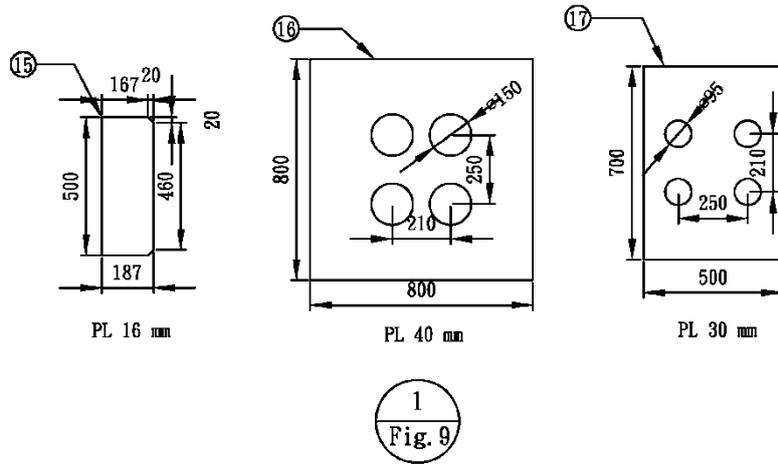
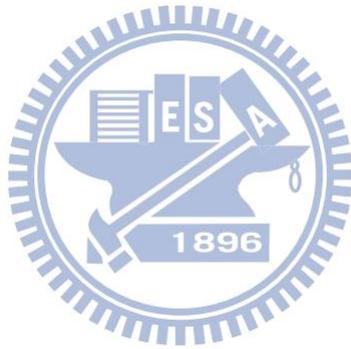


圖 3.13 試體部件圖之三



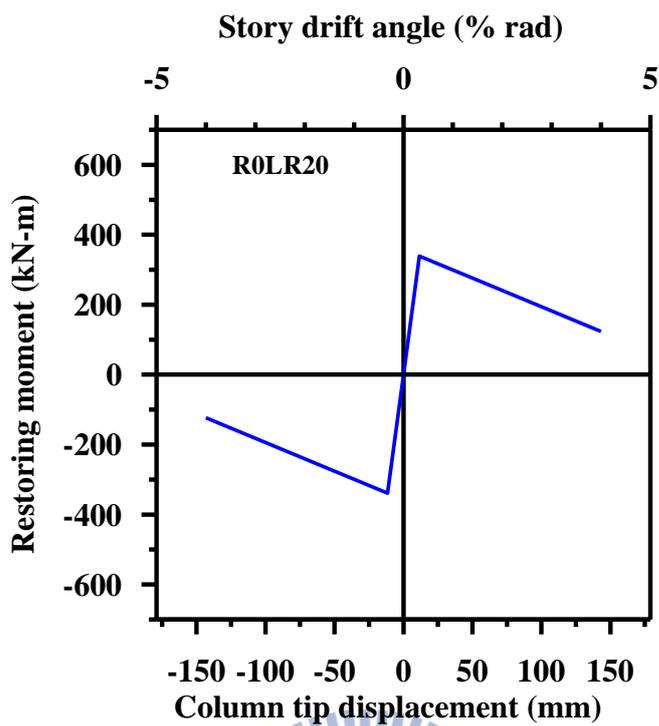


圖 3.14 試體 R0LR20 之遲滯迴圈預測圖

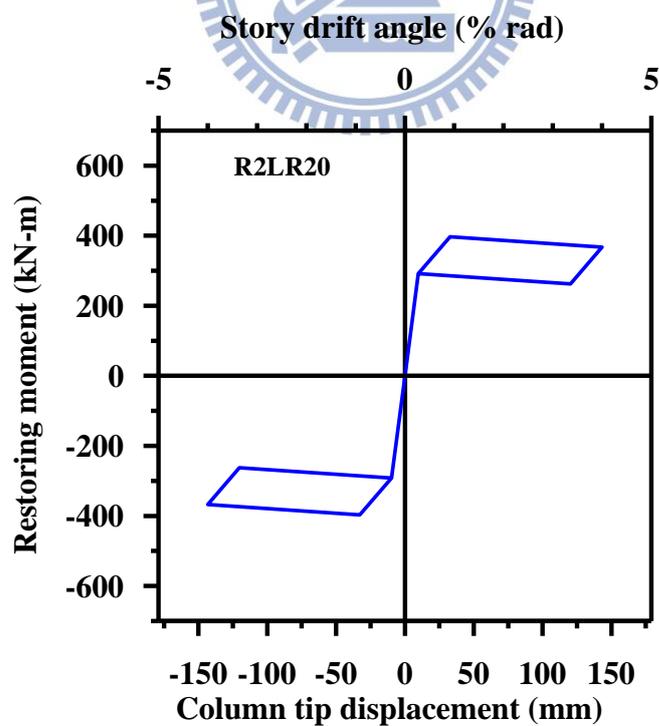


圖 3.15 試體 R2LR20 之遲滯迴圈預測圖

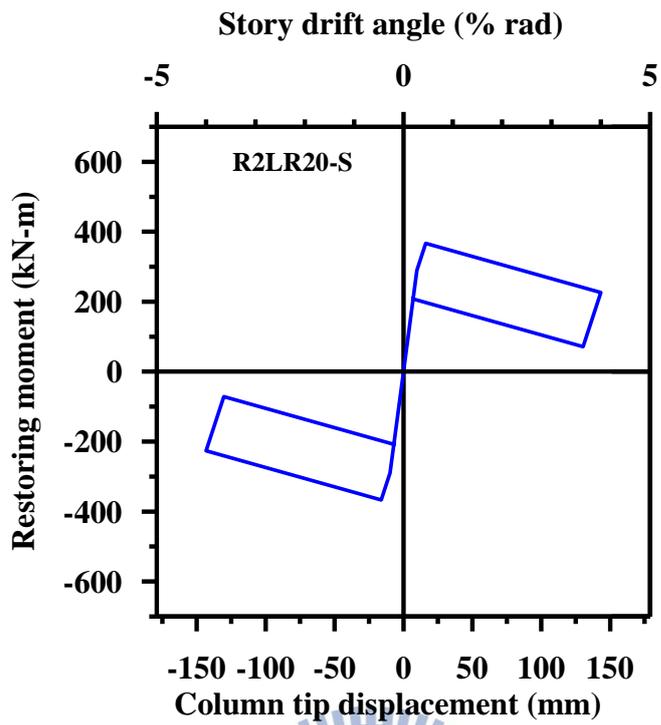


圖 3.16 試體 R2LR20-S 之遲滯迴圈預測圖

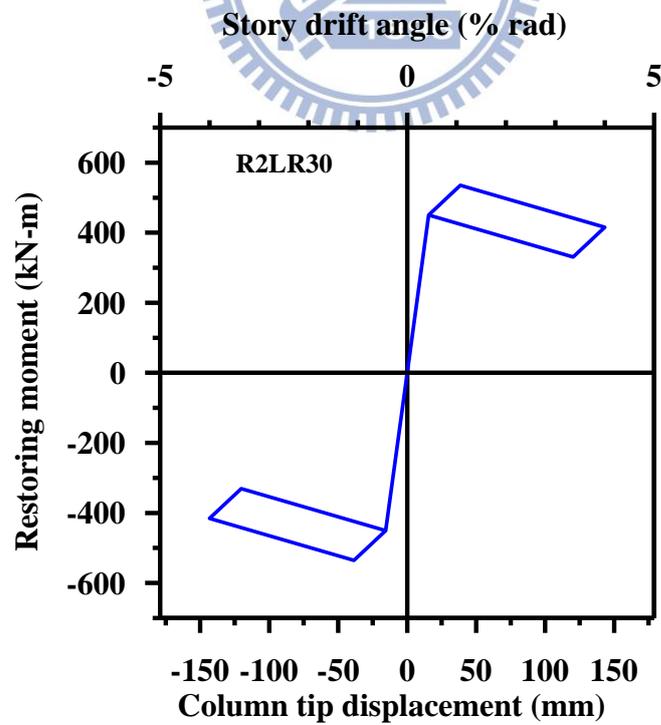


圖 3.17 試體 R2LR30 之遲滯迴圈預測圖

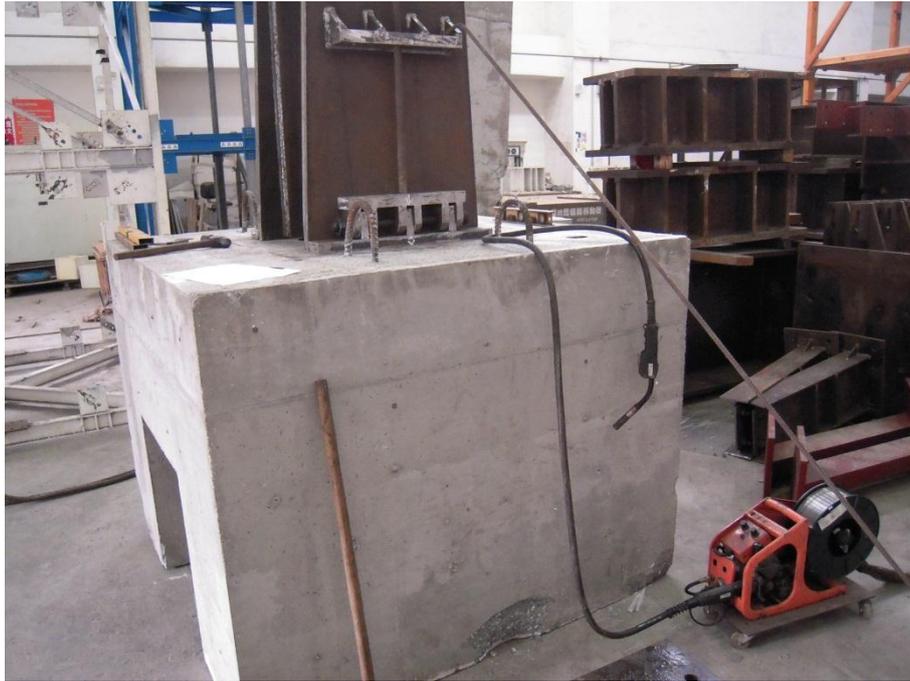


圖 3.18 鋼柱、基礎與形狀記憶合金裝置之鉸接定位



圖 3.19 形狀記憶合金裝置之鉸接點鐸固定



圖 3.20 形狀記憶合金裝置之鉸接外側填角銲、內側開槽銲



圖 3.21 鋼絞線由中央開始預緊

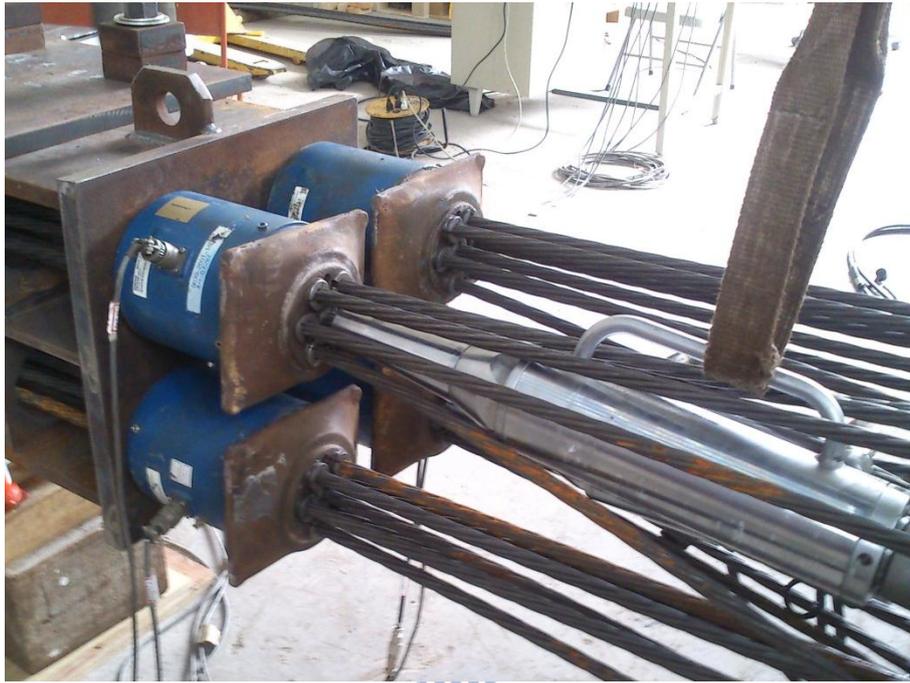


圖 3.22 油壓槍依順序施加預力



圖 3.23 預力施加完成

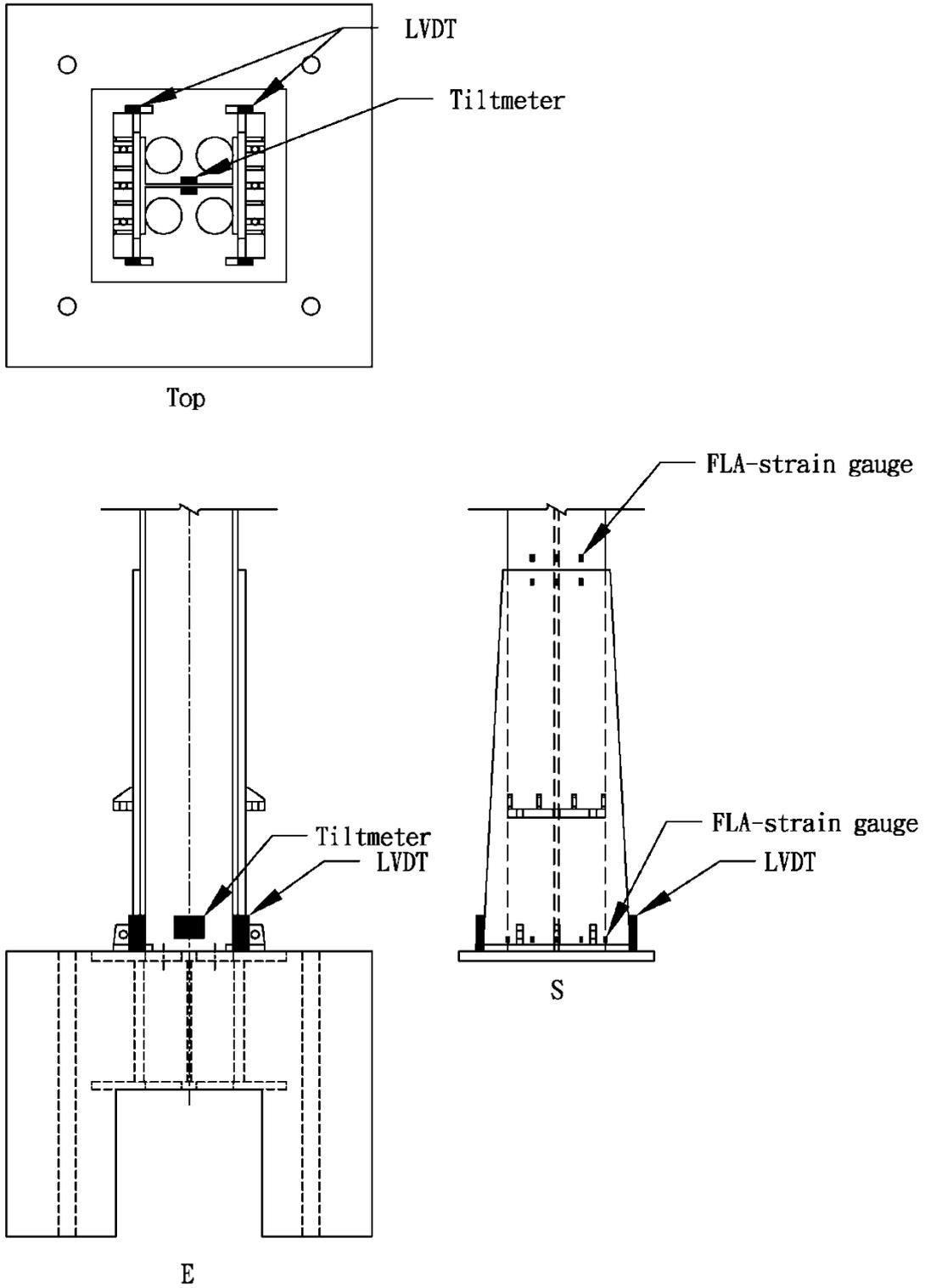


圖 3.24 量測儀器設置圖

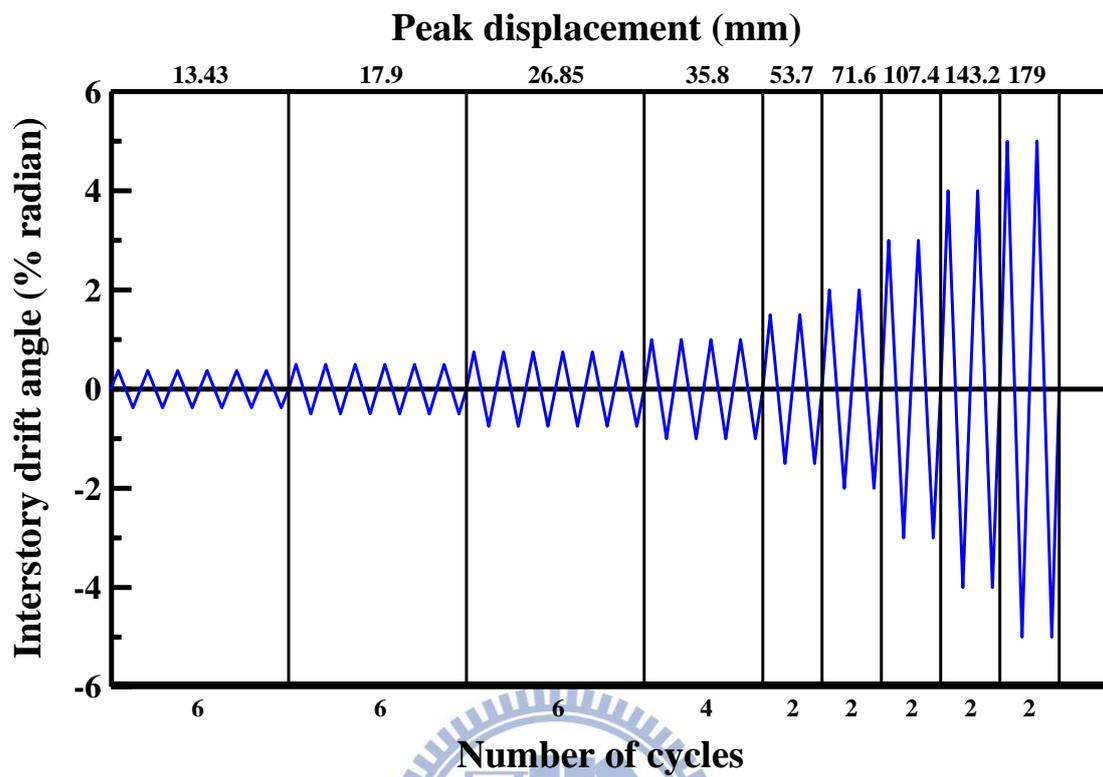


圖 3.25 AISC 建議之反覆載重位移歷時圖



圖 4.1 形狀記憶合金材料試驗設置圖



圖 4.2 試體 H0D23.5



圖 4.3 試體 H0D19-1



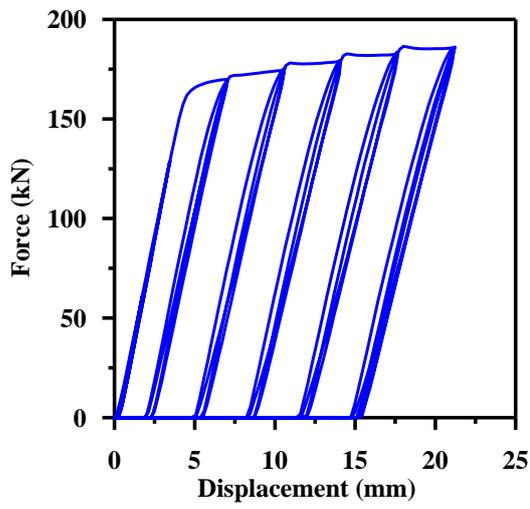
圖 4.4 試體 H0D19-2



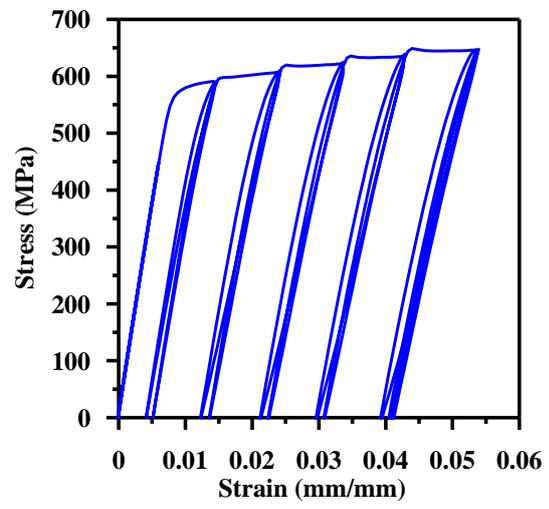
圖 4.5 試體 H600D19



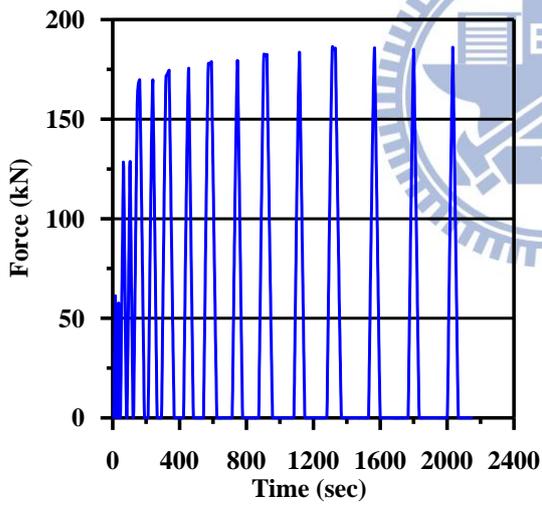
圖 4.6 試體 H450D19



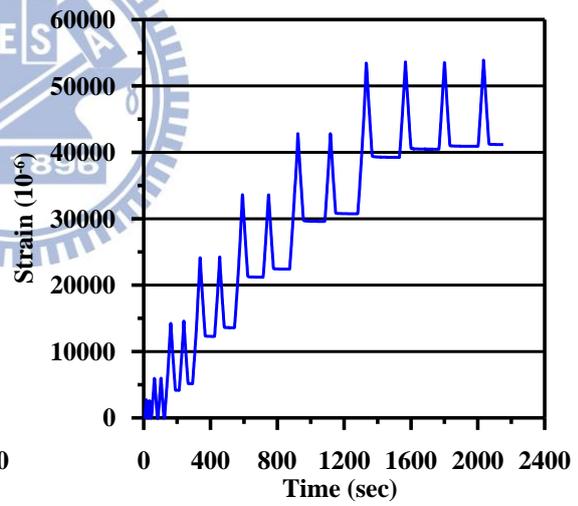
(a) 軸力與位移關係圖



(b) 應力應變曲線

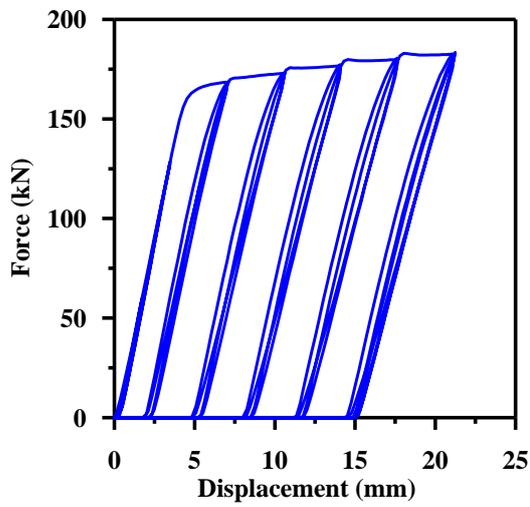


(c) 載重反應圖

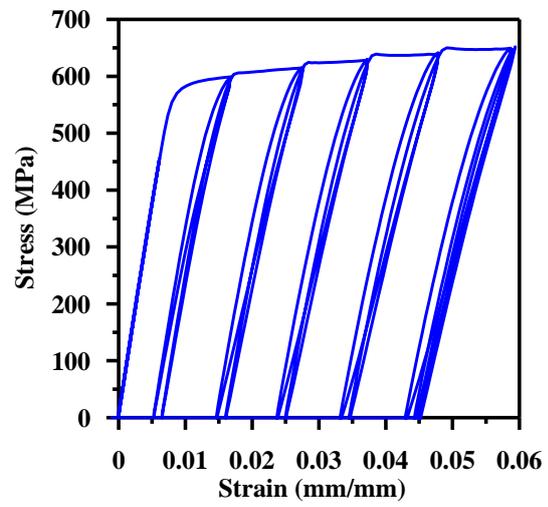


(d) 應變反應圖

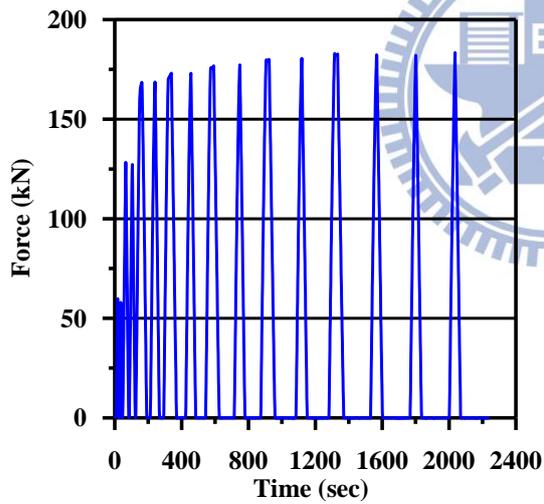
圖 4.7 試體 H0D19-2 之試驗數據圖



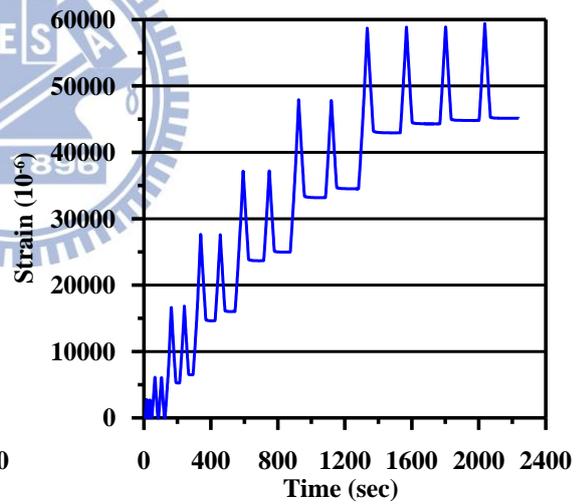
(a) 軸力與位移關係圖



(b) 應力應變曲線

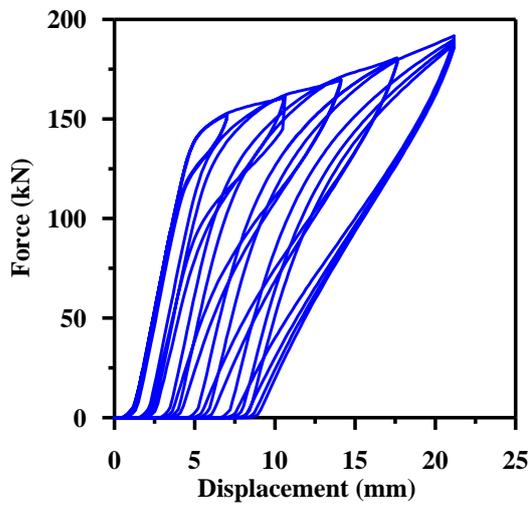


(c) 載重反應圖

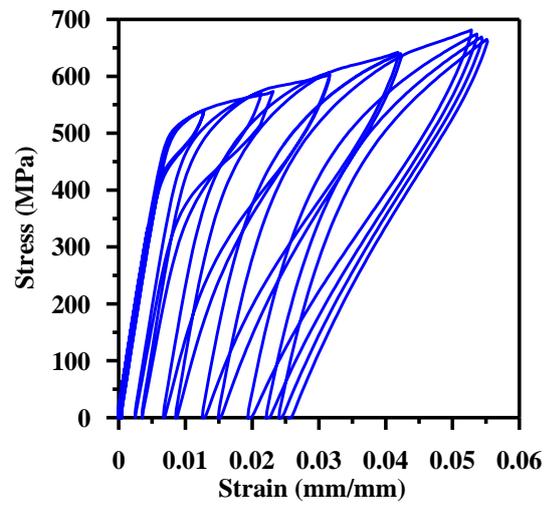


(d) 應變反應圖

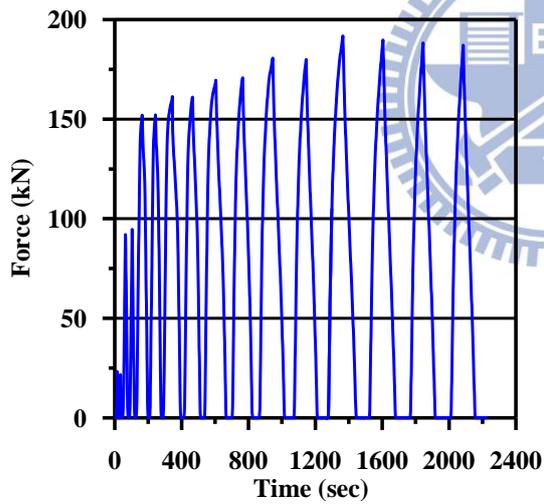
圖 4.8 試體 H600D19 之試驗數據圖



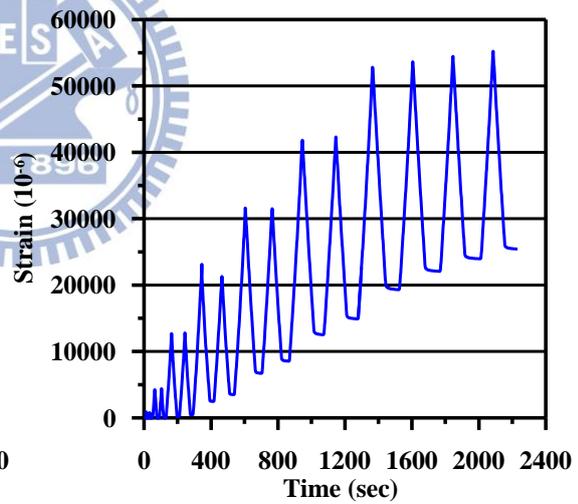
(a) 軸力與位移關係圖



(b) 應力應變曲線

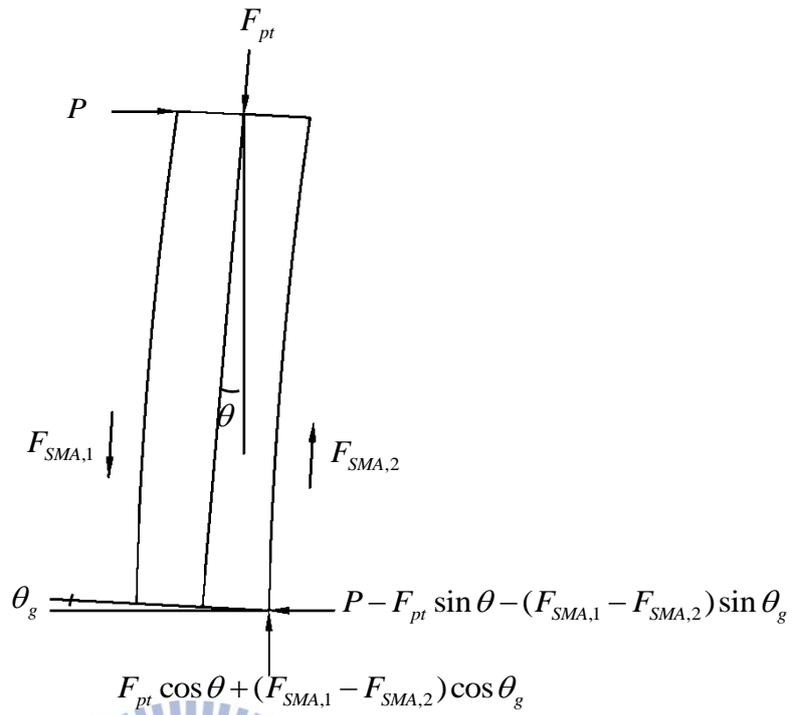


(c) 載重反應圖

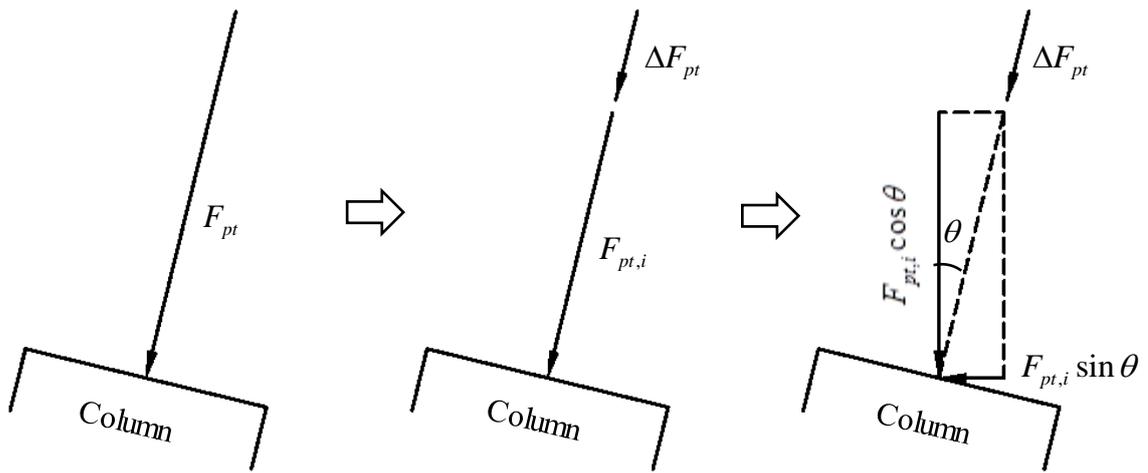


(d) 應變反應圖

圖 4.9 試體 H450D19 之試驗數據圖



(a) 整體子結構之自由體圖



(b) 鋼絞線之內力分析

圖 4.10 試驗之數據修正示意圖

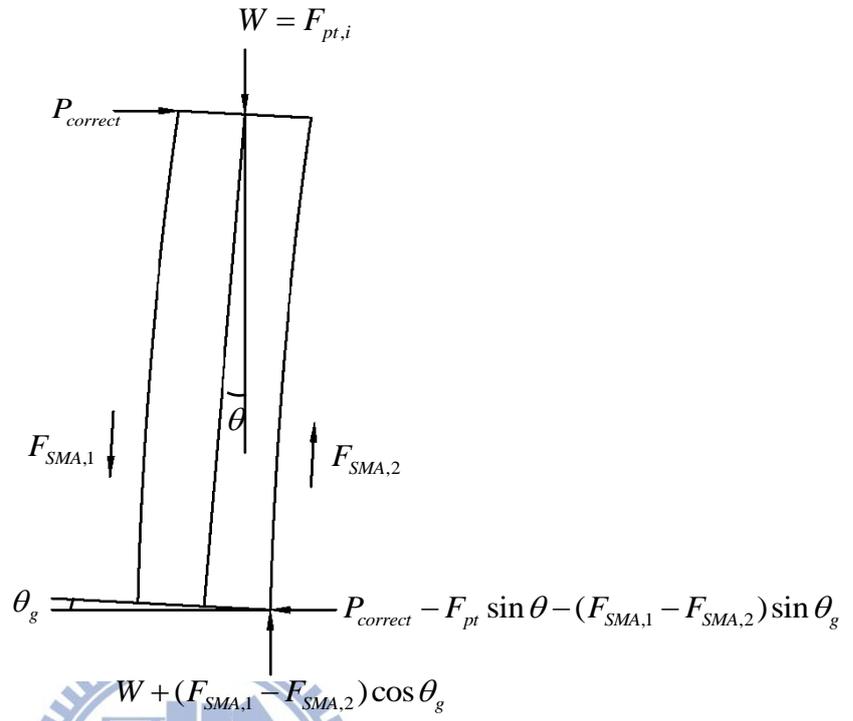


圖 4.11 修正完成之子結構自由體圖



圖 4.12 實尺寸試驗現場設置圖



圖 4.13 鋼柱側向嚴重滑移



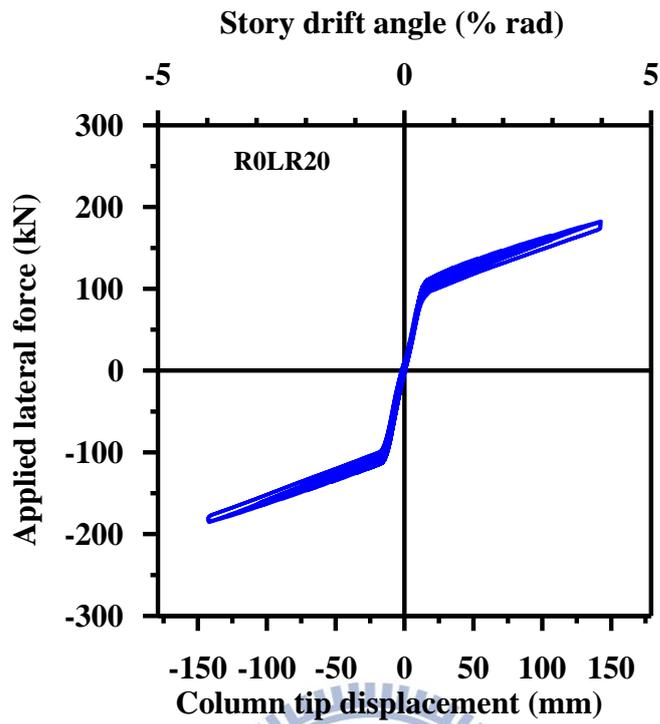
圖 4.14 側向滑移束制用鋼板



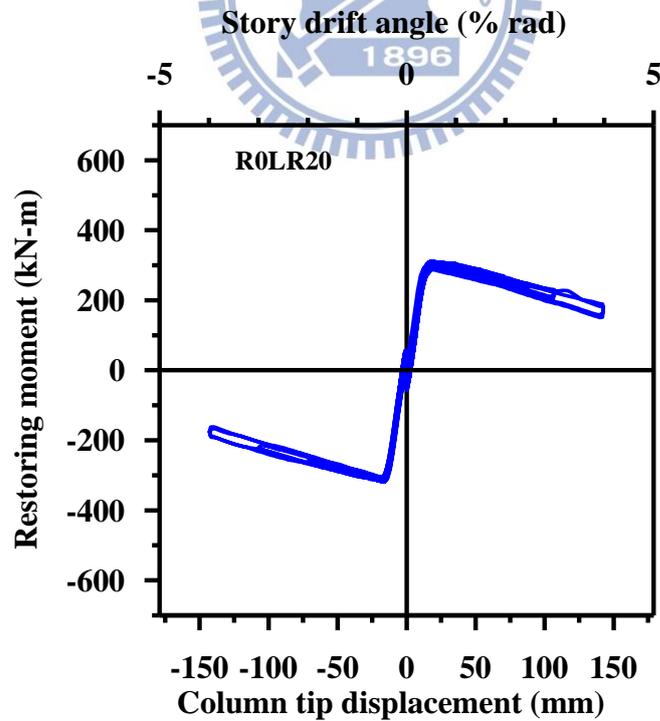
圖 4.15 間隙開啟且可放入一張 A4 厚度紙張



圖 4.16 鋼柱西向滑移頂至束制用鋼板



(a) 試驗實際數據之柱頂側向加載



(b) 修正為柱頂垂直載重之回復彎矩

圖 4.17 試體 R0LR20 遲滯迴圈圖

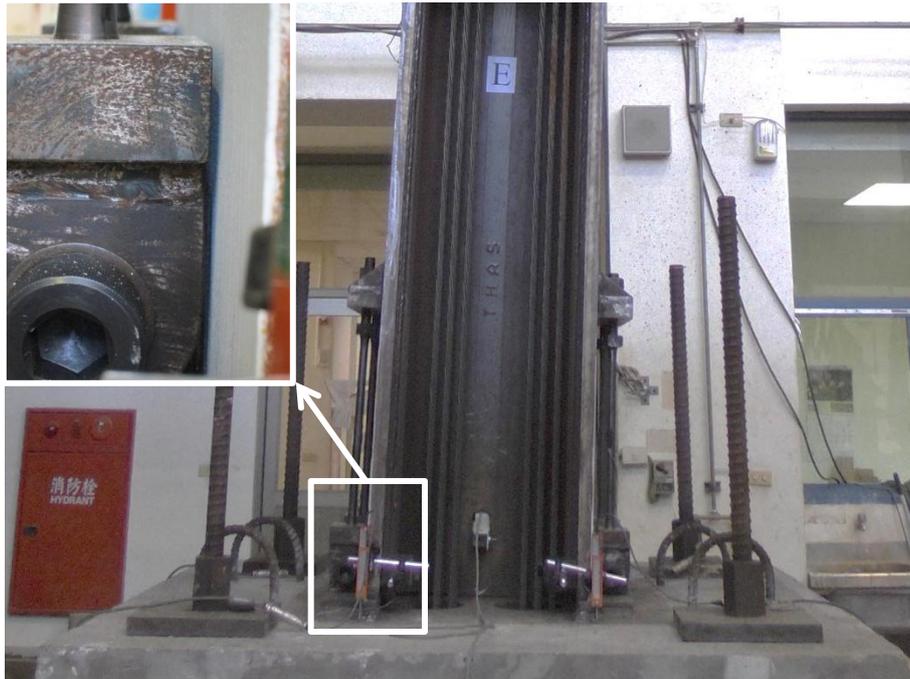


圖 4.18 正迴圈之鉸接旋轉

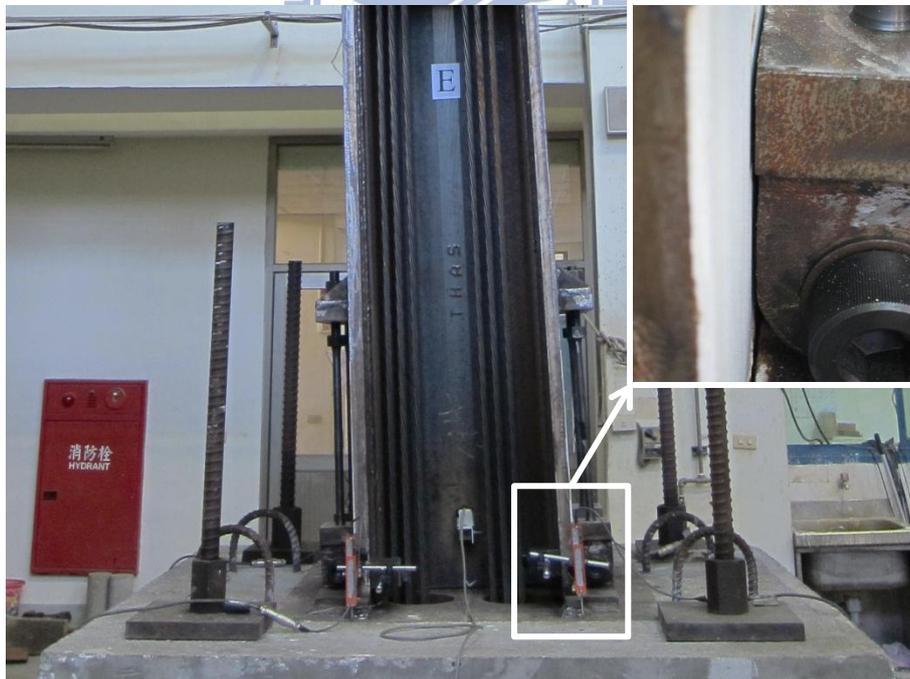
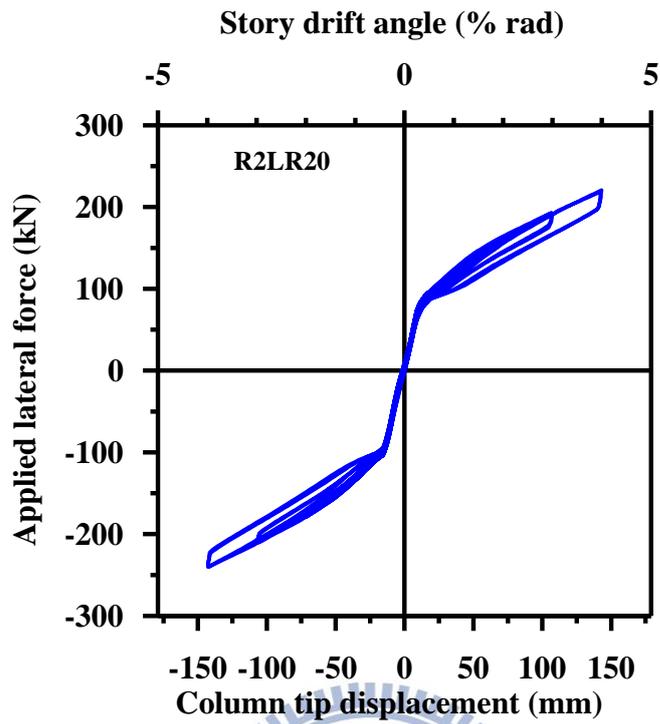
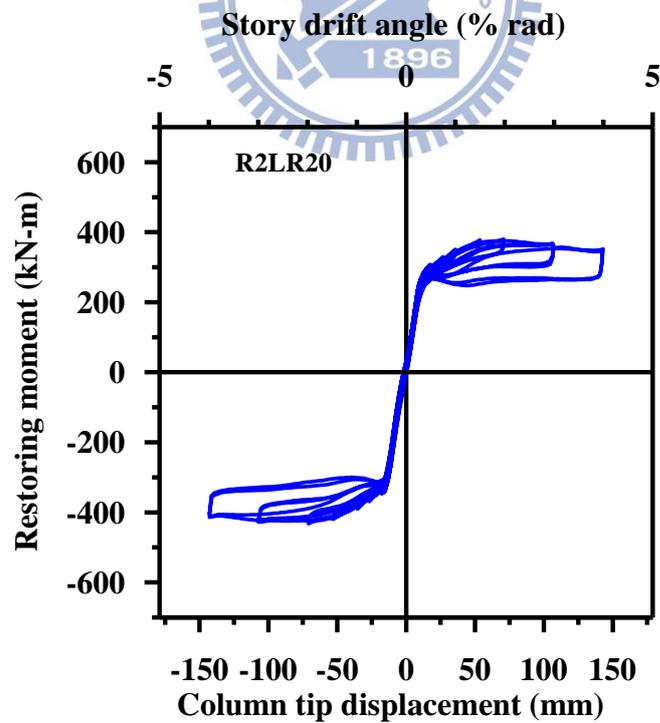


圖 4.19 負迴圈之鉸接旋轉



(a) 試驗實際數據之柱頂側向加載



(b) 修正為柱頂垂直載重之回復彎矩

圖 4.20 試體 R2LR20 遲滯迴圈圖



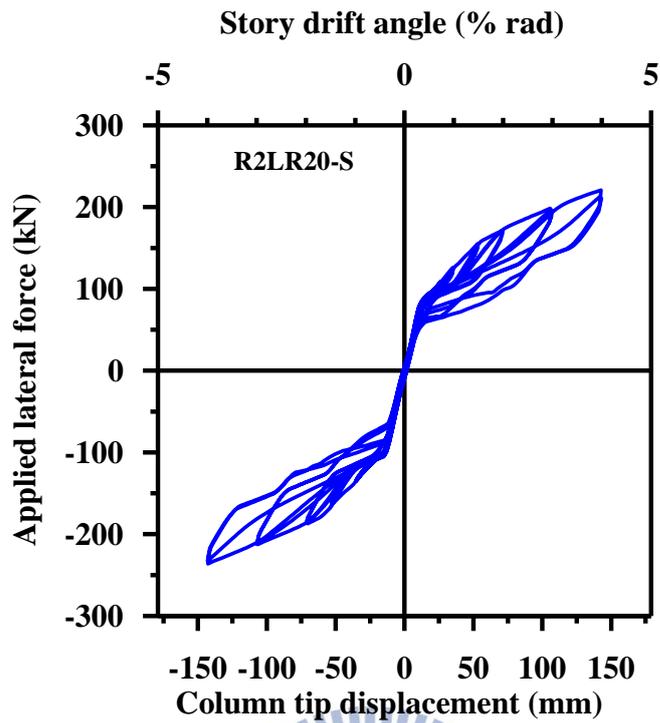
圖 4.21 SS400 鋼棒



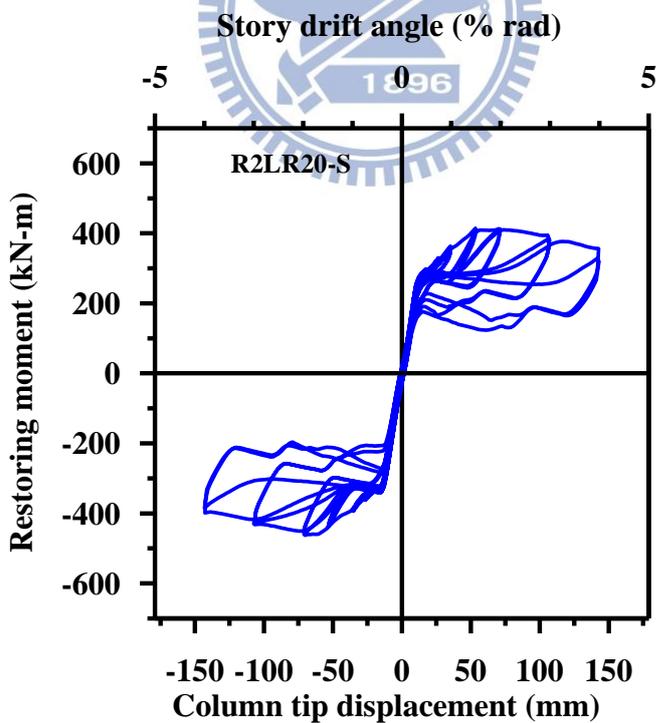
圖 4.22 消能鋼棒與挫屈束制鋼管



圖 4.23 消能鋼棒挫屈



(a) 試驗實際數據之柱頂側向加載



(b) 修正為柱頂垂直載重之回復彎矩

圖 4.24 試體 R2LR20-S 遲滯迴圈圖



圖 4.25 西南側形狀記憶合金斷裂



圖 4.26 東北側形狀記憶合金斷裂



圖 4.27 東北側斷裂之形狀記憶合金

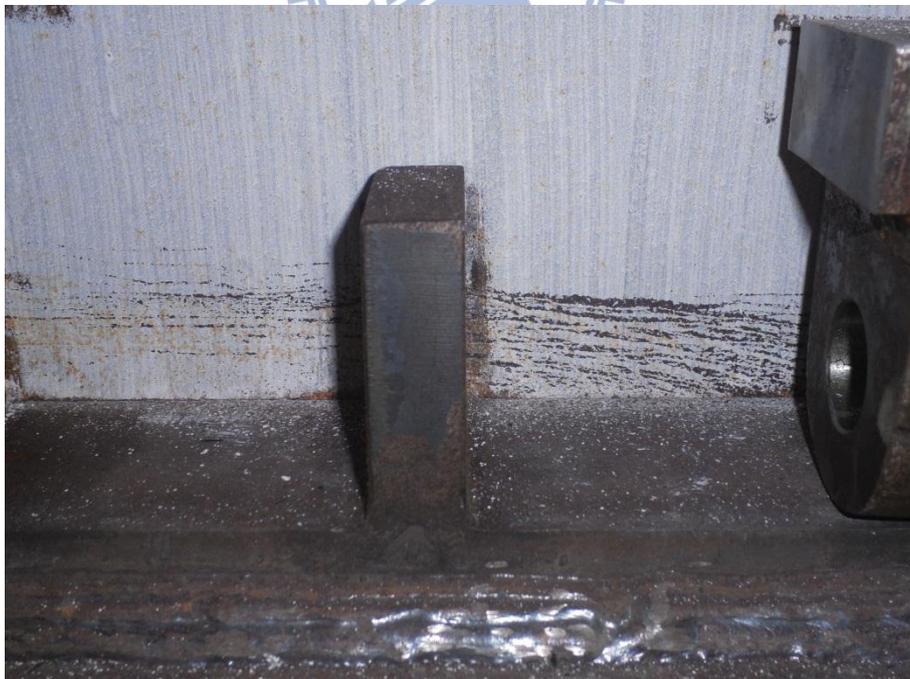
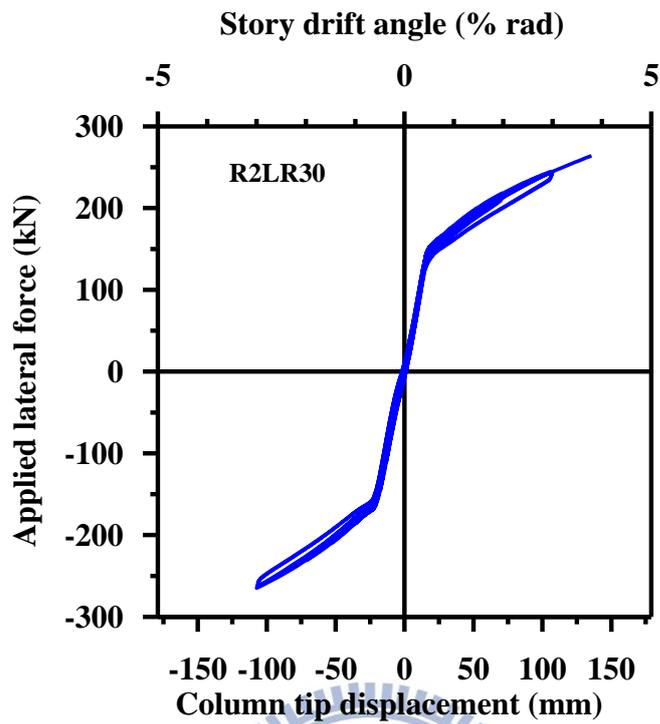
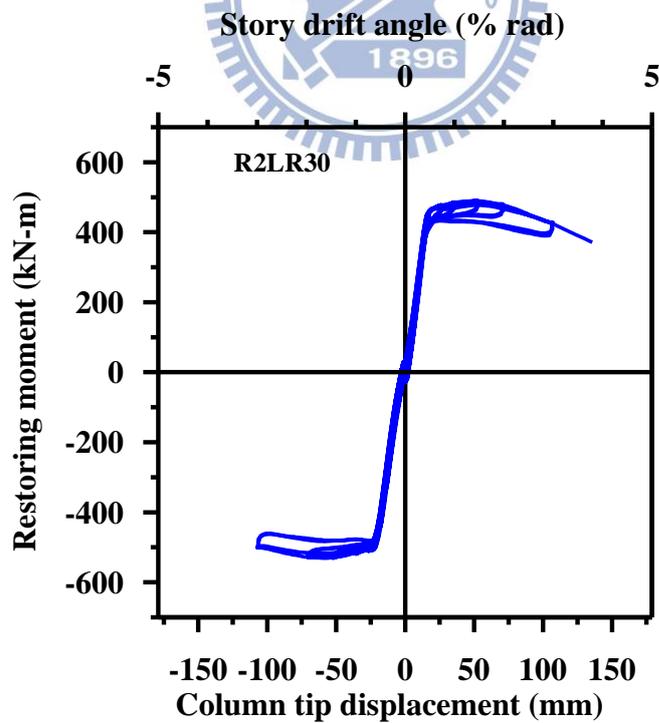


圖 4.28 鋼柱與基礎接面石膏漆剝落

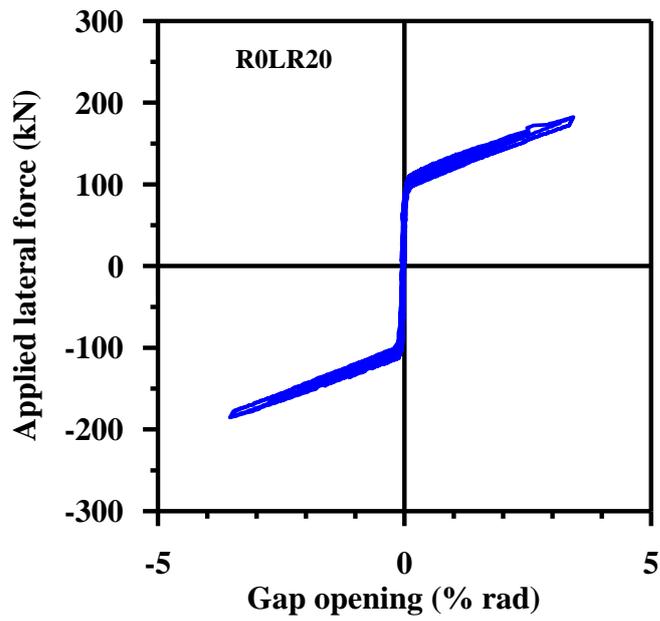


(a) 試驗實際數據之柱頂側向加載

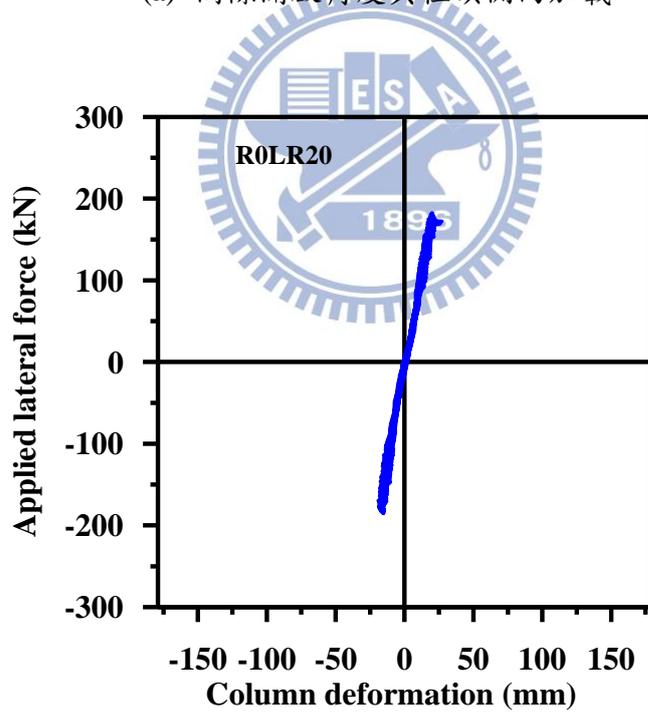


(b) 修正為柱頂垂直載重之回復彎矩

圖 4.29 試體 R2LR30 遲滯迴圈圖

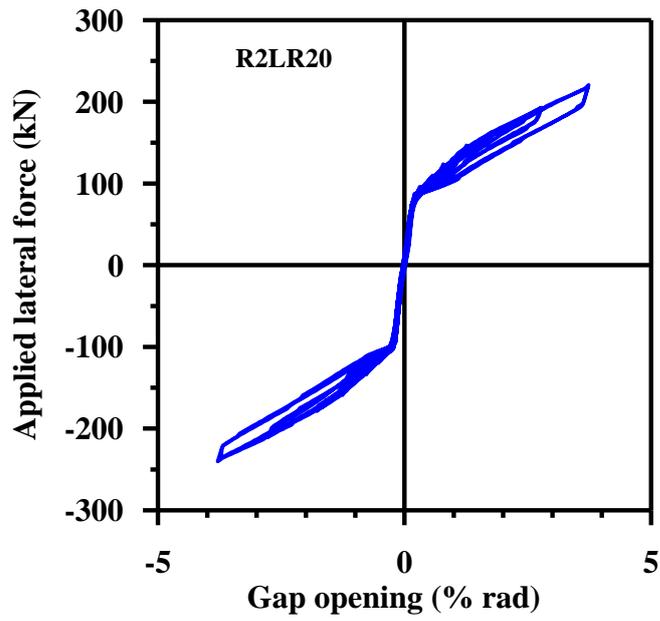


(a) 間隙開啟角度與柱頂側向加載

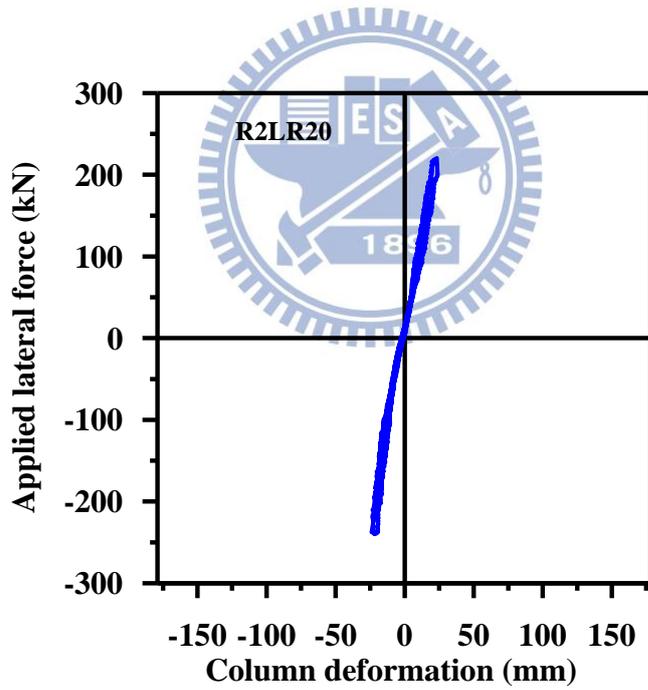


(b) 柱構件變位

圖 4.30 試體 R0LR20 之變位分析圖

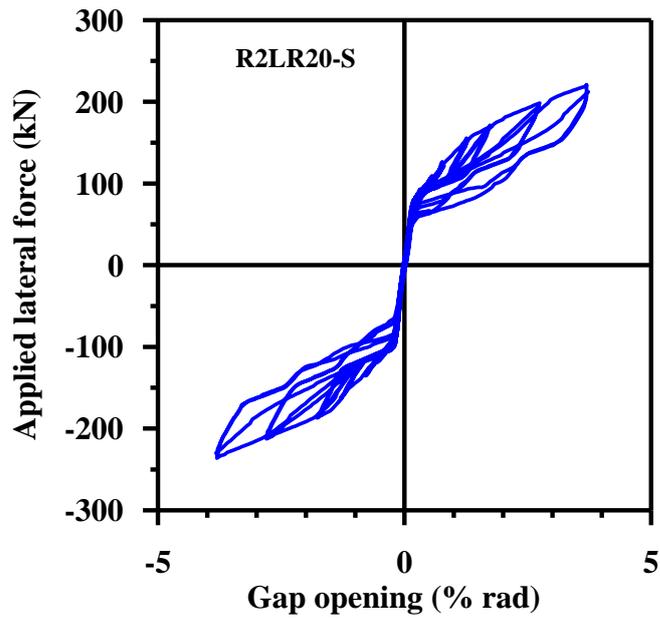


(a) 間隙開啟角度與柱頂側向加載

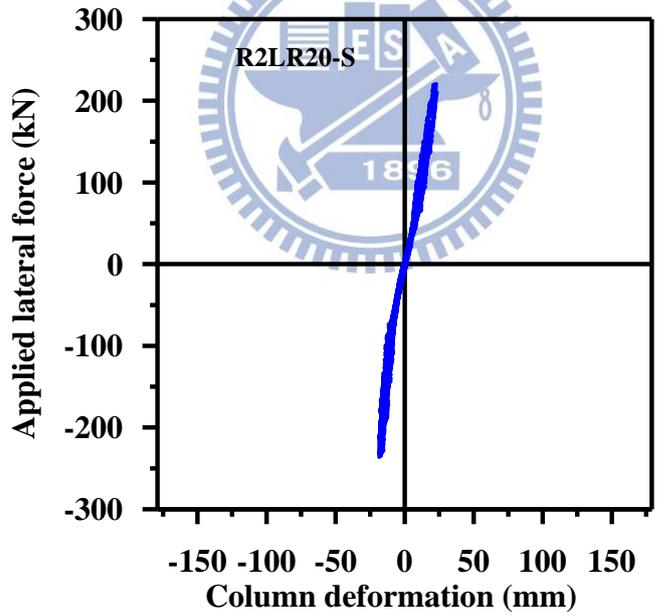


(b) 柱構件變位

圖 4.31 試體 R2LR20 之變位分析圖

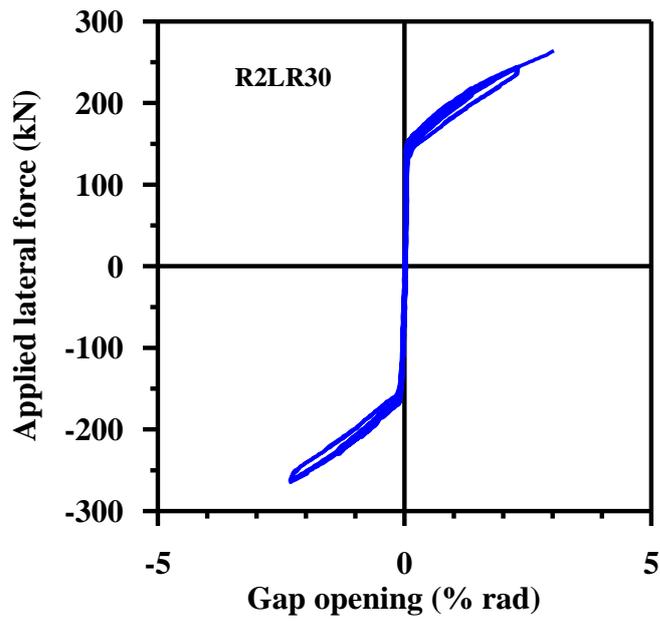


(a) 間隙開啟角度與柱頂側向加載

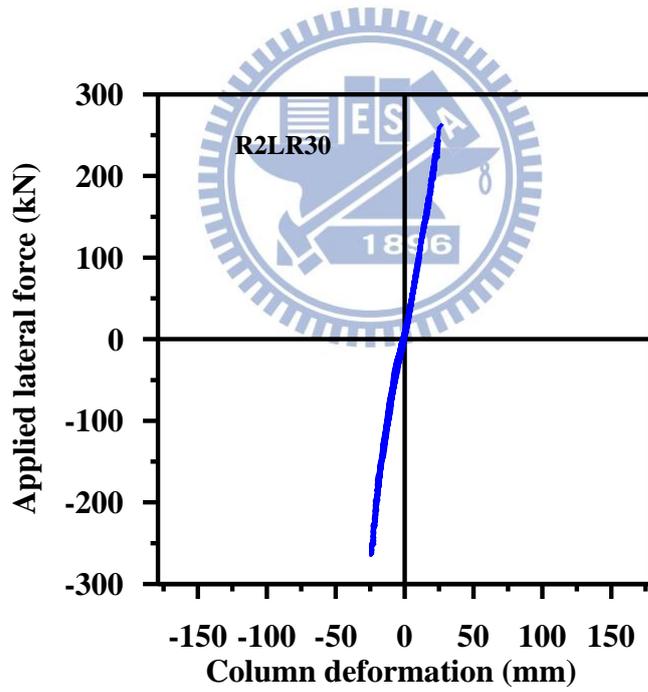


(b) 柱構件變位

圖 4.32 試體 R2LR20-S 之變位分析圖



(a) 間隙開啟角度與柱頂側向加載



(b) 柱構件變位

圖 4.33 試體 R2LR30 之變位分析圖

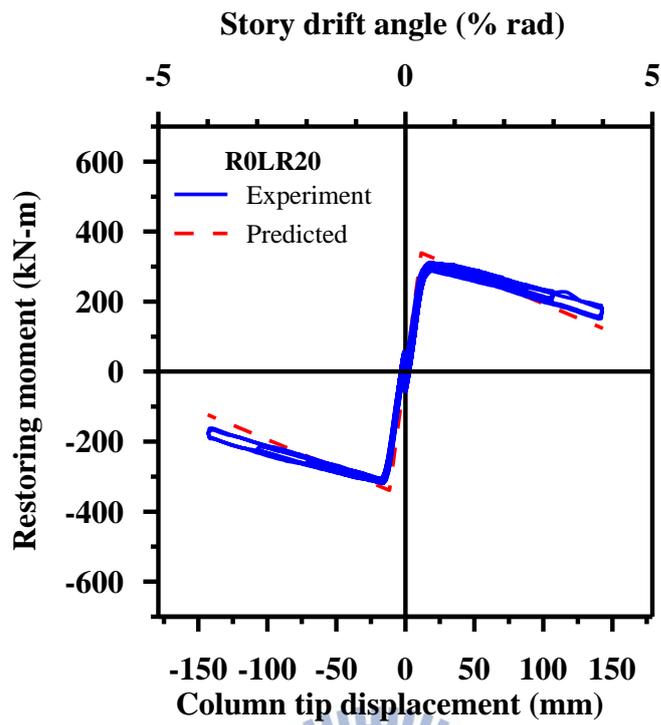


圖 4.34 試體 R0LR20 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較

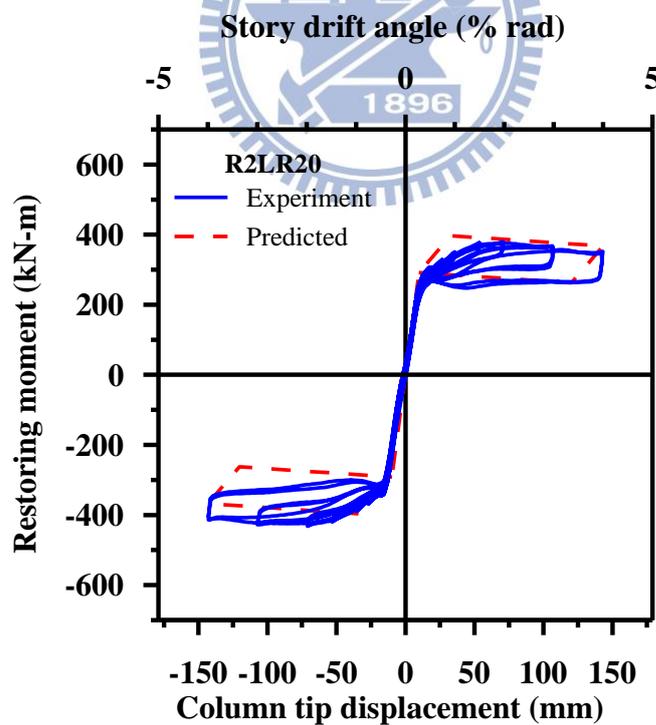


圖 4.35 試體 R2LR20 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較

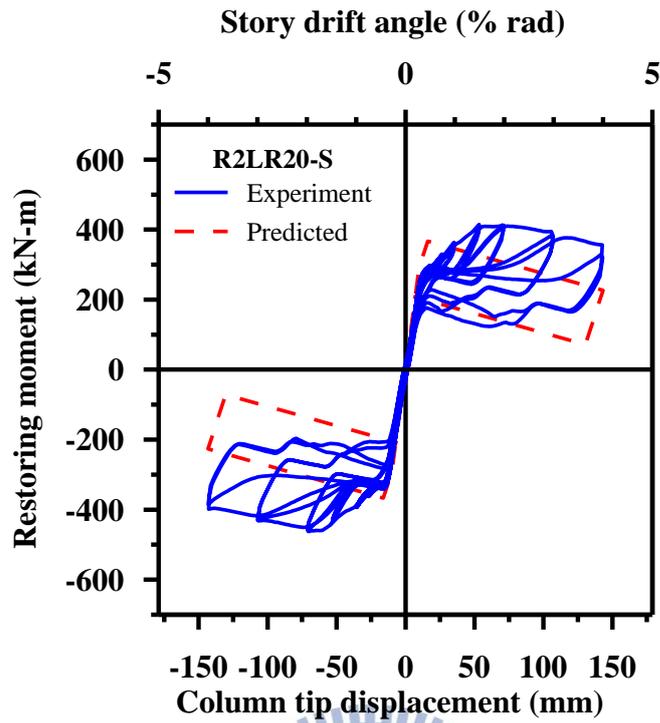


圖 4.36 試體 R2LR20-S 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較

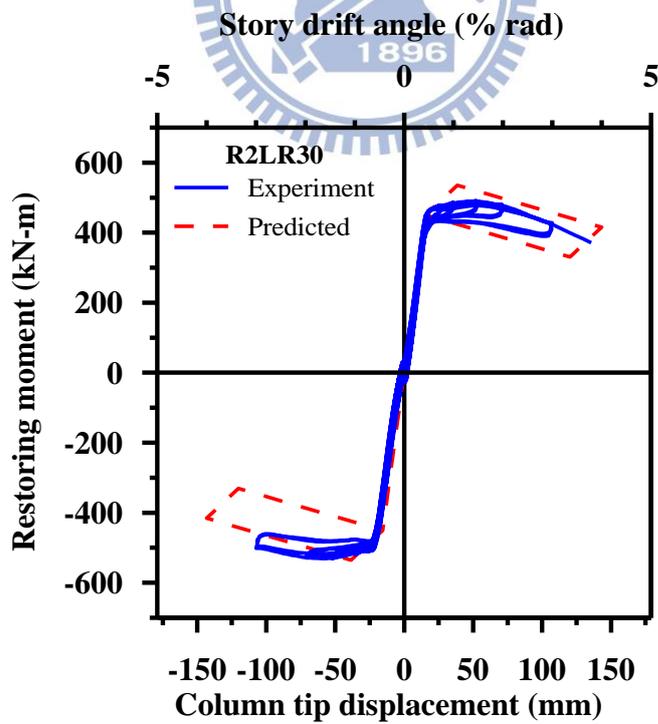


圖 4.37 試體 R2LR30 遲滯迴圈圖之試驗值與預測值比較

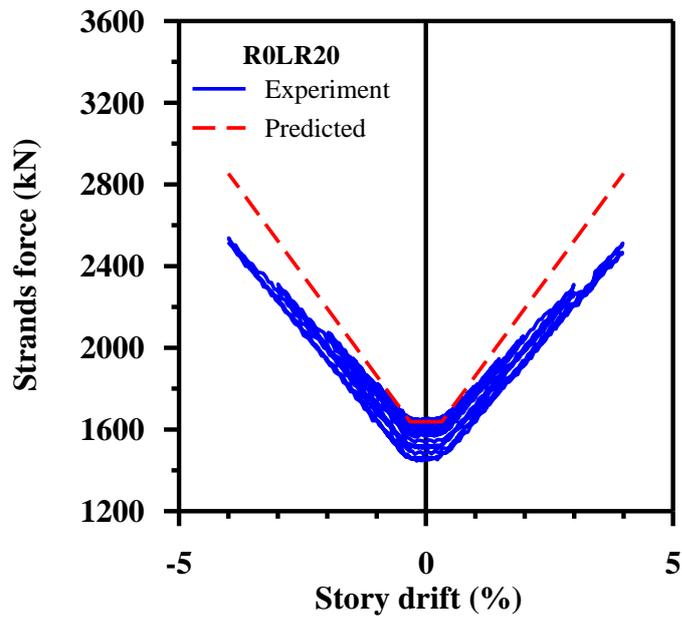


圖 4.38 試體 R0LR20 之鋼絞線內力

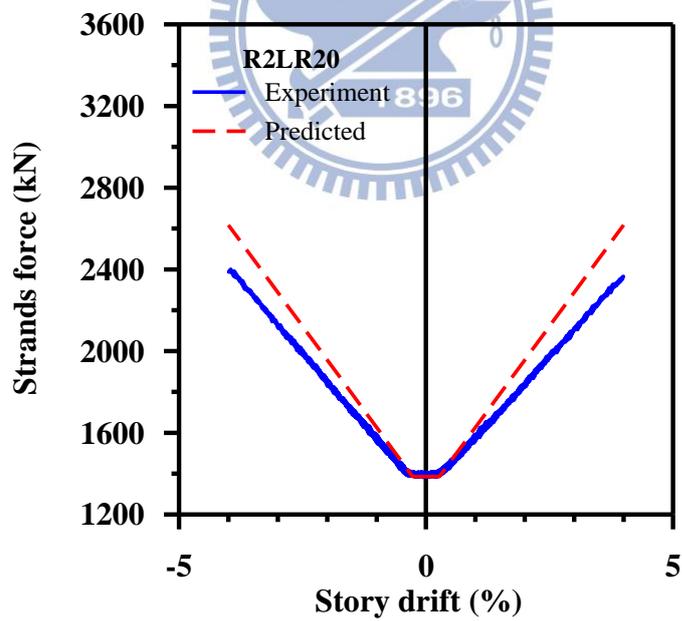


圖 4.39 試體 R2LR20 之鋼絞線內力

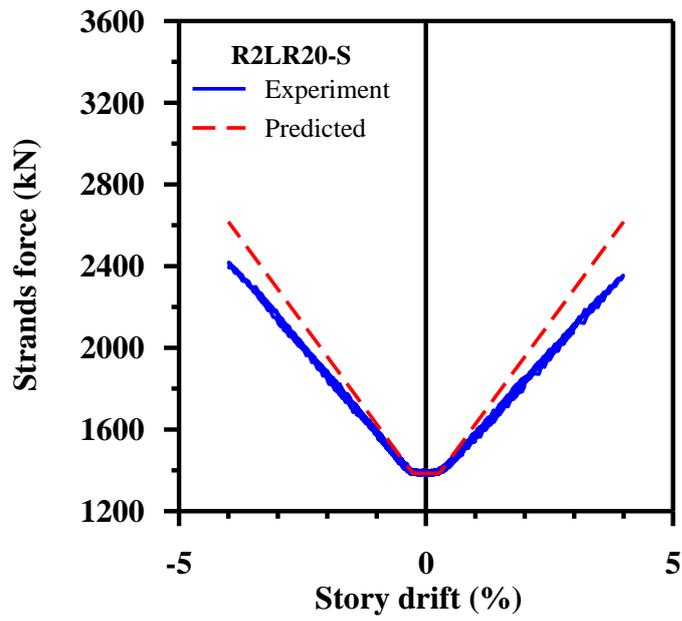


圖 4.40 試體 R2LR20-S 之鋼絞線內力

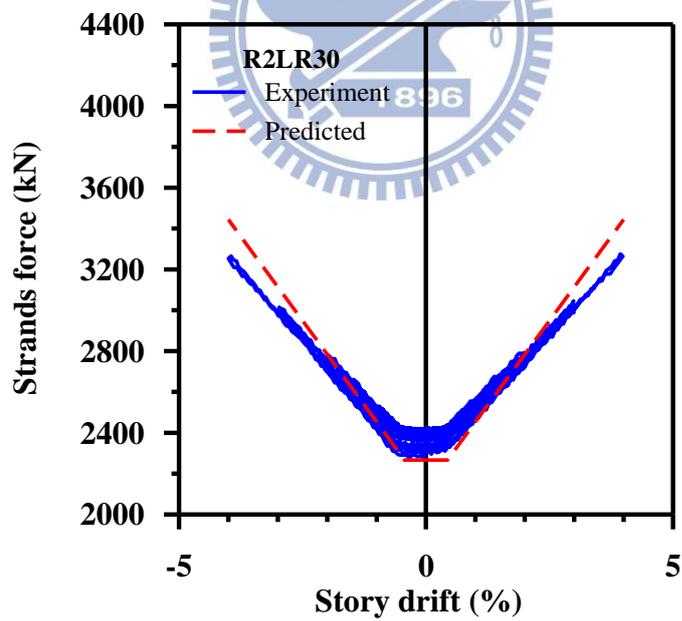


圖 4.41 試體 R2LR30 之鋼絞線內力