

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強 之耐震能力研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 107 年 12 月

PG10705-0116

107301070000G0054

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強 之耐震能力研究

研究人員：陶其駿

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 107 年 12 月

MINISTRY OF THE INTERIOR
RESEARCH PROJECT REPORT

Seismic behavior of reinforced concrete building columns
strengthened with CFRP composites

BY
CHI CHUN TAO

December , 2018

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘 要	XV
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 文獻回顧	1
第三節 研究方法與進度說明	9
第四節 研究目的	12
第二章 試體計畫	15
第一節 試體設計	15
第二節 試體製作	28
第三節 試驗裝置與測計安排	33
第三章 試驗結果與討論	47
第一節 試驗結果與觀察	47
第二節 CFRP 韌性補強理論設計值合理性	122
第三節 CFRP 韌性補強量對韌性效益影響	123

第四節 碳纖維片設計與實際破壞模式差異	128
第四章 結論與建議	131
第一節 結論	131
第二節 建議	1316
附錄一 研究計畫期初審查會議紀錄	139
附錄二 期中審查會議紀錄	145
附錄三 期末審查會議紀錄	161
參考書目	171

表次

表 1.1 研究進度	13
表 2.1 非韌性柱試體相關參數比較	20
表 2.2 碳纖維布規格	26
表 3.1 鋼筋拉伸試驗結果彙整	50
表 3.2 試體基礎 28 天齡期之圓柱試體抗壓強度	51
表 3.3 各試體柱 28 天齡期之圓柱試體抗壓強度	51
表 3.4 各混凝土圓柱試體抗壓強度	52
表 3.5 各試體對應之強度齡期	52
表 3.6 各柱試體試驗結果之強度與韌性變化	53

圖次

圖 1.1 FRP 組成示意圖(黑色條狀為纖維，灰色填充物為基 材).....	2
圖 1.2 纖維材料與鋼板之應力應變圖	3
圖 1.3 碳纖維布	4
圖 1.4 RC 柱以 CFRP 包覆補強之剖面示意圖	5
圖 1.5 以 CFRP 補強位於狹窄空間之 RC 梁	5
圖 1.6 圓形斷面橋柱之遲滯迴圈	7
圖 1.7 柱構件之角隅因碳纖維布應力集中致使破壞.....	8
圖 1.8 典型沿街店舖式住宅平面示意圖	8
圖 1.9 研究進行之流程圖	14
圖 2.1 典型非韌性配筋柱橫向鋼筋過大之情形	17
圖 2.2 典型非韌性配筋柱試體橫向鋼筋之配置情形	17
圖 2.3 試體 RND 之設計圖	21
圖 2.4 s 間距內碳纖維布與橫向鋼筋側向力	25
圖 2.5 RNDC1.0、RNDC1.5 以及 RNDC2.0 補強前斷面圖	27
圖 3.1 自加工廠完成加工送抵工作區之鋼筋	28
圖 3.2 底座定平與試體放樣.....	29
圖 3.3 底座鋼筋籠之組立	37
圖 3.4 上部柱主筋之定位	37

圖 3.5 底座預留 PVC 管之擺設與封口	38
圖 3.6 試體吊耳於底座之設置	39
圖 3.7 底座模板之組立	39
圖 3.8 底座混凝土澆置	39
圖 3.9 底座拆模後之情形	40
圖 3.10 柱試體應變計之黏貼	40
圖 3.11 應變計之黏貼與固定	41
圖 3.12 上部柱身鋼筋之組立	41
圖 3.13 模板之圓形導角	42
圖 3.14 上部柱身模板完成組立	42
圖 3.15 上部柱混凝土之澆置	43
圖 3.16 上部柱混凝土之搗實	43
圖 3.17 混凝土澆置坍度試驗	44
圖 3.18 混凝土圓柱式體製作	44
圖 3.19 柱頂上部灌漿孔圓形蓋板之封板	45
圖 3.20 應變計訊號線束之收線	45
圖 3.21 上部混凝土柱四周之導角	46
圖 3.22 試體製作完成與養護情形現況	46
圖 3.23 選定 $\Delta y (= \delta y)$ 之定義	55
圖 3.24 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照	

片(續).....	56
圖 3.25 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照	
片(續).....	57
圖 3.26 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照	
片(續).....	58
圖 3.27 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照	
片(續).....	59
圖 3.28 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照	
片	60
圖 3.29 試體 RND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照	
片(續).....	61
圖 3.30 RND 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片	
(續).....	62
圖 3.31 RND 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片	
(續).....	63
圖 3.32 RND 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片	
(續).....	64
圖 3.33 試體 RND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照	
片(續).....	65
圖 3.34 試體 RND 於試驗結束之破壞情形	66

圖 3.35 試體 RND 遲滯迴圈	67
圖 3.36 試體 RND 強度包絡線.....	67
圖 3.37 試體 RNDC2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	70
圖 3.38 試體 RNDC2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	71
圖 3.39 試體 RNDC2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	72
圖 3.40 試體 RNDC2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	73
圖 3.41 試體 RNDC2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	74
圖 3.42 試體 RNDC2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	75
圖 3.43 試體 RNDC2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片	76
圖 3.44 試體 RNDC2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	77
圖 3.45 試體 RNDC2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	78

圖 3.46 試體 RNDC2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	79
圖 3.47 試體 RNDC2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	80
圖 3.48 試體 RNDC2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	81
圖 3.49 試體 RNDC2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	82
圖 3.50 試體 RNDC2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片	83
圖 3.51 試體 RNDC2L 於試驗結束之破壞情形	84
圖 3.52 試體 RNDC2L 遲滯迴圈	85
圖 3.53 試體 RNDC2L 強度包絡線	85
圖 3.54 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	88
圖 3.55 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	89
圖 3.56 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	90
圖 3.57 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形	

照片(續)	91
圖 3.58 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	92
圖 3.59 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	93
圖 3.60 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片	94
圖 3.61 RNDC4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	95
圖 3.62 RNDC4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	96
圖 3.63 RNDC4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	97
圖 3.64 RNDC4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	98
圖 3.65 RNDC4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	99
圖 3.66 RNDC4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	100
圖 3.67 RNDC4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	

照片	101
圖 3.68 試體 RNDC4L 於試驗結束之破壞情形	102
圖 3.69 RNDC4L 試體遲滯迴圈	103
圖 3.70 RNDC4L 試體遲滯迴圈	103
圖 3.71 試體 RNDC8L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	106
圖 3.72 試體 RNDC8L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	107
圖 3.73 試體 RNDC8L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	108
圖 3.74 試體 RNDC8L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	109
圖 3.75 試體 RNDC8L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	110
圖 3.76 試體 RNDC8L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	111
圖 3.77 試體 RNDC8L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片	112
圖 3.78 試體 RNDC8L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片(續)	113

圖 3.79 試體 RNDC8L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	114
圖 3.80 試體 RNDC8L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	115
圖 3.81 試體 RNDC8L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	116
圖 3.82 試體 RNDC8L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	117
圖 3.83 試體 RNDC8L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片(續)	118
圖 3.84 試體 RNDC8L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	
照片	119
圖 3.85 試體 RNDC8L 於試驗結束之破壞情形	120
圖 3.86 試體 RNDC8L 遲滯迴圈	121
圖 3.87 試體 RNDC8L 強度包絡線	121
圖 3.88 試體 RND 與試體 RNDC2L 強度包絡線比較	125
圖 3.89 試體 RND 與試體 RNDC4L 強度包絡線比較	125
圖 3.90 試體 RND 與 RNDC8L 試體強度包絡線比較	126
圖 3.91 RNDC 系列試體強度包絡線比較	126
圖 3.92 各試體遲滯迴圈比較	127

圖 3.93 各試體強度包絡線比較	127
圖 3.94 RNDC2L 試體塑鉸區面外鼓出造成水平裂縫	129
圖 3.95 RNDC4L 試體塑鉸區面外鼓出造成水平裂縫	129
圖 3.96 貼覆垂直向細條碳纖維避免水平裂縫之示意	130

摘要

關鍵詞：RC 柱、CFRP 補強、非韌性配筋

一、研究緣起

配合內政部於 107 年啟動「建築物耐震安檢-給國人依個安心的家」之政策，推動於全面補強及重建期間，先採取階段性補強之策略，發展適用於「階段性補強」的技術研究。提供於重建或全面補強的整合、規劃期間，進行局部性補強措施，以較快速的階段性補強策略，讓建築物排除軟弱層破壞，降低倒塌風險，避免等待期間因遭遇地震建築物傾斜而倒塌。而碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)包覆補強工法，具有施工簡單、工期短、不佔空間、成本低與材料抗拉強度高等特性，在透過專業技師的評估與監督下，可提供有安全疑慮的房子，快速進行耐震補強，讓 RC 柱不易碎裂，增加民眾逃生的機會。

由本研究結果顯示，CFRP 包覆補強工法，可有效增加 RC 柱的韌性；低矮 RC 建築，若採用「韌性」理論進行補強設計，柱構件層間變位角可符合規範規定 3%之要求。柱構件進行 CFRP 貼片補強，應於全柱貼覆 CFRP 貼片，以避免於非預期位置發生破壞。

二、研究方法及過程

本研究旨在探討建築物矩形 RC 柱構件，採碳纖維貼片圍束補強對耐震性能之影響，本研究共規劃 RND 及 RNDC 等 2 個系列共計 4 組試體，分別為 RND 試體為典型非韌性矩形 RC 柱，另外 RNDC2L 試體係以碳纖維貼覆補強 2 層、RNDC4L 試體為以碳纖維貼覆補強 4 層與 RNDC8L 試體係碳纖維貼片補強 8 層，試體隅角部凸角半徑為 3 公分。所有試體於試驗前，均無任何裂縫損傷；加載軸力比為百分之二十，且於定軸壓下進行側向加載試驗，藉以觀察非韌性配筋柱試體，

依 CFRP 韌性理論進行補強設計之合理性，並瞭解 CFRP 韌性補強量對韌性效益之影響。

三、重要發現

(一) 比較 RND 試體與 RNDC2L 試體試驗結果可知，僅補強 2 層碳纖維（即每平方公尺 600 克的碳纖維），塑性轉角容量即可提升 2.92 倍，韌性提升效果明顯。

(二) 由試體破壞模式觀察，以 CFRP 貼片進行韌性補強，可將非韌性配筋(橫向鋼筋量不足者)柱試體原屬剪力控制之破壞模式，轉為於柱端之撓曲破壞主控。

(三) 在低軸力比 20% 下，RND 試體塑性轉角容量為 2.71%，若依韌性補強理論設計為 8.88%，顯示理論韌性補強之設計值，可滿足規範對柱構件塑性轉角容量規定。惟仍必須透過專業技師、建築師的評估與監督。

(四) 比較 RNDC2L、RNDC4L 及 RNDC8L 等試體試驗結果顯示，隨著 CFRP 貼片層數的增加，平均每層所能提升韌性的效率將降低，表示韌性增加之效益，將隨層數增加而趨於一定值。

(五) 矩形 RC 柱試體之隅角部，採凸角半徑為 3 公分之導角，當 RC 柱試體達極限變形時，碳纖維布並未發生因角隅應力集中而斷裂。且沿碳纖維方向之圍束，施做 20 公分的搭接長度，亦未發現碳纖維搭接不足之破壞。

四、主要建議事項

立即可行建議—對於低矮 RC 建築，若採用「韌性」理論進行補強設計，柱構件層間變位角可符合規範規定之要求。

主辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會

協辦機關：內政部建築研究所

當 4 樓以下低矮 RC 建築（低軸力比 20% 下），若依韌性理論進行補強設計，補強後試體塑性轉角容量為 8.88%，可符合規範對柱構件應大於 3% 要求，但 CFRP 補強對側向強度之貢獻，則有限。雖然，柱構件僅補強 2 層碳纖維，其塑性轉角容量達 7.91%，但是考量國內 CFRP 施工品質，以及難以掌握待補強柱實際現況等因素，建議在專業技師、建築師的評估與監督下，仍須依韌性理論僅行補強設計。

立即可行建議—以 CFRP 貼片進行柱構件韌性補強，應於全柱貼覆 CFRP 貼片，以避免破壞發生於非預期之位置。

主辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會

協辦機關：內政部建築研究所

以 CFRP 貼片進行韌性補強，可能將非韌性配筋（橫向鋼筋量不足者）柱，由屬剪力控制之破壞模式，轉為撓曲破壞主控之情況，故不宜僅於柱端可能發生撓曲塑鉸之範圍，貼覆 CFRP 貼片。當 RC 柱試體達極限變形時，若柱斷面採凸角為 3 公分半徑之導角，以及沿碳纖維方向採 20 公分的搭接長度，碳纖維貼片應可避免發生非預期之破壞。

立即可行建議—以 CFRP 貼片進行柱構件韌性補強，對於提升柱韌性的效益，將趨於一定值。

主辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會

協辦機關：內政部建築研究所

隨著 CFRP 貼片補強層數的增加，平均每層所能提升韌性的效率，將呈現降低之趨勢，亦即若貼覆過多的 CFRP 貼片，對於提升柱構件韌性的效益，將趨於一定值或效益增加有限。

ABSTRACT

Key word: RC Column, CFRP strengthened, Non-ductile reinforcement

1. Purpose

Ministry of the Interior implement a policy, seismic-resistant inspect for buildings-a home for the peace of mind, on 2018. For this we adopted and develop a strategy of short-term strengthened before the comprehensive strengthened and rebuilding. During reconstruction or comprehensive strengthened or planning stage, provide local strengthened to avoid weak layer damage and reduce collapse risk by the earthquake. Carbon fiber reinforced polymer composite (CFRP) strengthened. It has the characteristics of simple construction, short construction period, no space occupation, low cost and high tensile strength of materials. Under the supervision of professional technicians, it can quickly provide houses with safety concerns, make the RC column not easy to break, and increase the chance of people's escape.

The results show that the CFRP strengthened can effectively increase the ductility of the RC column, if the low-rise RC building is reinforced by the "ductility" theory, the drift ratio of the column

member can meet the requirements of 3% of the specification. The CFRP strengthened should be applied to the entire column to avoid damage at unintended locations.

2. Method and Steps

The purpose of this study is to investigate the effect of the CFRP strengthened on the seismic performance of rectangular RC column members. This study plan 4 of 2 series specimen including RND and RNDC. All specimens have no crack damage before the test; the loading axial force ratio is 20%, and the lateral loading test was performed under the fixed axial pressure. Observe non-ductility reinforcing column specimen with the strengthened design based on CFRP ductility theory, to understand the effect of CFRP strengthened on the ductility benefit.

3. Main Finding

(1) Comparing the results of the specimen RND and the specimen RNDC2L, they show that two layers of carbon fiber (i.e. 600 g of carbon fiber per square meter) make plastic drift ratio can be increased by 2.92 times, and the ductility improvement effect is

obvious.

- (2) Observing the failure mode of the specimens. The non-ductility reinforcement (insufficient transverse reinforcement), its failure mode of the original is shear damage control. After using CFRP strengthened, the failure mode can be converted to flexural damage control.
- (3) Under the low axial force ratio 20%, the drift ratio of the RND specimen is 2.71%, and the theoretical ductility design is 8.88%, indicating that the value of the theoretical ductility design conforms to the specification for the drift ratio of the column members. However, it must still be evaluated and supervised by professional technicians and architects.
- (4) Comparing the test results of RNDC2L, RNDC4L and RNDC8L, the results show that the average ductility efficiency of each CFRP layers be decrease with the increase of the number of CFRP patches. It means that the benefit of increasing ductility will stable with increase the number of layers.
- (5) The corner of the rectangular RC column specimens are chamfer angle of radius is 3 cm. When the RC column specimen reaches the limit deformation, the carbon fiber does not break due to the stress

concentration of the corner. Moreover, the lap bond (length is 20 cm) was applied along the carbon fibers, they have no damage by the insufficient bonding of carbon fibers.

4. Major suggestion

Immediate adoption suggestion- For low-rise RC buildings, if the "ductility" theory is used for strengthened design, the drift ratio of the column members can meet the requirements of the specification.

Major Office : Architects Association, Structural Engineering
Technician Association, Association of Civil Engineers
Associate Office : Architecture and Building Research Institute
Ministry of Interior

When the low-rise RC building below the 4th floor (axial force ratio is less than 20%), if the strengthened design is based on the ductility theory, the drift ratio of the specimen after strengthened is 8.88%, which can meet the requirements of the specification for column members should be greater than 3%, but The contribution of CFRP strengthened to

lateral strength is limited. Although the column member only reinforces 2 layers of carbon fiber, its drift ratio is 7.91%. However, considering the domestic CFRP construction quality and the difficulty in grasping the actual status of the column to be reinforced. It is recommended that under the assessment and supervision of professional technicians and architects, it must be reinforced according to the ductility theory.

Immediate adoption suggestion-When carbon fiber composite patch is

used to reinforce the column member.

The CFRP patch should be applied to the whole column to prevent the damage from occurring in an unexpected position.

Major Office : Architects Association, Structural Engineering

Technician Association, Association of Civil Engineers

Associate Office : Architecture and Building Research Institute

Ministry of Interior

The non-ductility reinforcement (insufficient transverse reinforcement), its failure mode of the original is shear damage control.

After using CFRP strengthened, the failure mode can be converted to flexural damage control. When the RC column specimen reaches the limit deformation. The corner of the rectangular RC column specimens is chamfer angle (radius is 3 cm), and the lap bond (length is 20 cm) was applied along the carbon fibers. Carbon fiber patches should avoid unintended damage.

Immediate adoption suggestion-The ductility of the column members is enhanced by the carbon fiber composite patch, which will tend to stable value.

Major Office : Architects Association, Structural Engineering
Technician Association, Association of Civil Engineers
Associate Office : Architecture and Building Research Institute
Ministry of Interior

The average ductility efficiency of each CFRP layers be decrease with the increase of the number of CFRP patches. It means that the benefit of increasing ductility will stable with increase the number of layers.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

配合內政部「全面啟動建築物耐震評估、補強及重建」之政策，推動「階段性補強」的技術研究，以避免建築物遭遇強震來襲，而瞬間倒塌。

碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)包覆補強工法，具有施工簡單、工期短、不佔空間、成本較低與材料抗拉強度高等特性，在透過專業技師的評估與監督下，可提供有安全疑慮的房子，快速進行耐震補強，讓 RC 柱不易碎裂，增加民眾逃生的機會。

由以往研究顯示，CFRP 包覆補強工法，可有效增加 RC 柱的韌性與剪力強度(無法增加撓曲與軸壓強度)，而圓柱之補強效益，明顯高於方柱。惟對於方柱或矩形柱補強之應用，仍有待克服柱斷面角隅區應力集中，以及柱斷面直線區圍束補強能力不足等問題，俾提升此類補強工法之耐震效益。

第二節 文獻回顧

一、CFRP 材料特性

纖維強化高分子複合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)是在高分子材料中添加纖維所製成之複合材料，其兼具高分子材料的低比重以及纖維的高抗拉強度特性，廣泛應用於飛機零件、體育用品、建築物等各種用途上[1]。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

FRP 之成分主要分為高分子材料(以下稱基材)、纖維材料、界面等三種，基材通常是聚合物樹脂，如環氧樹脂、聚酯樹脂、熱塑性塑膠等材料，用於包裹纖維以保護其免受摩擦或侵蝕，亦能固定纖維排列方向使其圍束成型，如圖 1.1 所示。

纖維材料主要分為碳纖維(Carbon FRP)、克維拉纖維(Kevlar)及玻璃纖維(Glass FRP)等三種，這三種纖維材料各有優缺點，其中最常用的為碳纖維材料，主因在於其高抗拉強度、耐久表現、耐疲勞表現、抗鹼能力等特性[2]，以抗拉強度為例，圖 1.2 為三種纖維材料與鋼板之拉應力應變曲線圖，其中碳纖維之纖維方向抗拉強度為其中最佳者。纖維—基材的界面必須具有良好的物理和化學性質，以便負荷能夠很順利的由基材傳送到纖維。界面亦須能抵抗由纖維和基材因不同熱膨脹所造成之應力，也可避免複合材料受液體之滲透，幫助基材保護纖維[2]。

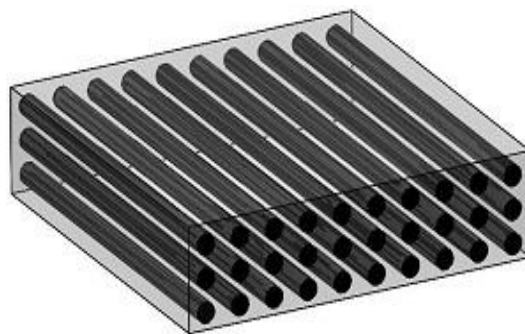


圖 1.1 FRP 組成示意圖(黑色條狀為纖維，灰色填充物為基材)

(資料來源：參考書目[3])

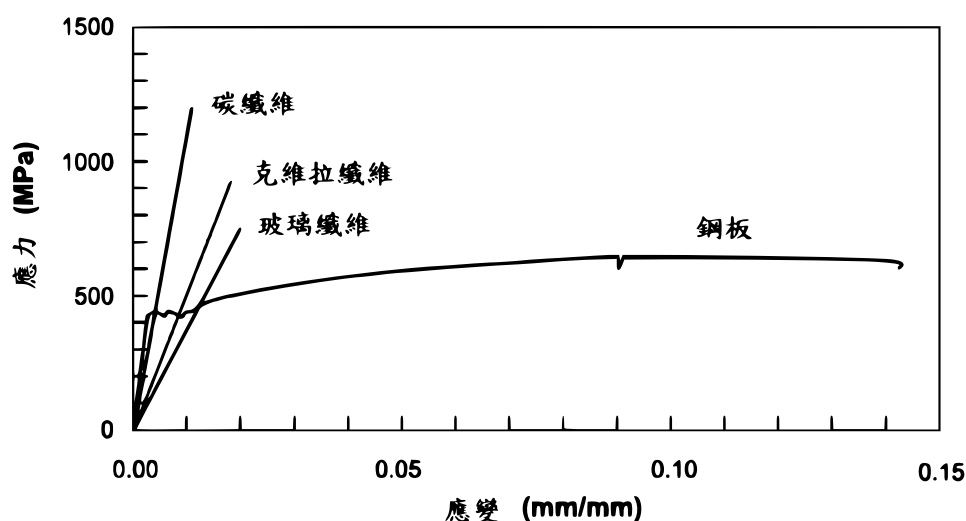


圖 1.2 纖維材料與鋼板之應力應變圖

(資料來源：參考書目[4])

二、CFRP 補強工法之優勢

在纖維複合材料中，採碳纖維複合材料 CFRP 是國內常見補強工程之一，亦為本節介紹重點。在碳纖維與基材成束為 CFRP 後，利用編織技術可將其製造成碳纖維布匹組織，最後製成補強工程所用之碳纖維布(CFRP fabric)，如圖 1.3 所示，以碳纖維布逐層包覆並黏貼於構件上增強韌性，即 CFRP 包覆補強工法(圖 1.4)。除 CFRP 包覆補強工法外，國內另有採鋼板包覆構件之補強工法，此二工法各有優缺點，惟目前仍以 CFRP 為民眾所接受，原因在於其成本、工期、施工便利度皆優於鋼板補強，舉例而言，圖 1.5 顯示位處狹窄空間 RC 梁採 CFRP 補強之實例，此例若採鋼板補強將會造成施工困難。整體而言，相較於鋼板補強工法，CFRP 補強工法有諸多優勢，表列如下[5]：

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

- (1) 不會腐蝕，不須定期油漆維護。
- (2) 不需銲接、自重輕，在狹小空間亦不致施工困難。
- (3) 纖維連續，並可剪刀裁剪，因此不需接頭。
- (4) 碳纖維布柔軟易彎曲，所補強之對象較不受限於構件形狀。
- (5) 鋼板之搬運作業繁複，且施工時需大型吊車輔助，易阻礙交通，降低接受度。
- (6) 工期較短，一般構件補強約 1 至 2 天內可完工。



(a)碳纖維所編織的布匹組織



(b)補強工程用碳纖維布

圖 1.3 碳纖維布

(資料來源：參考書目 [1])

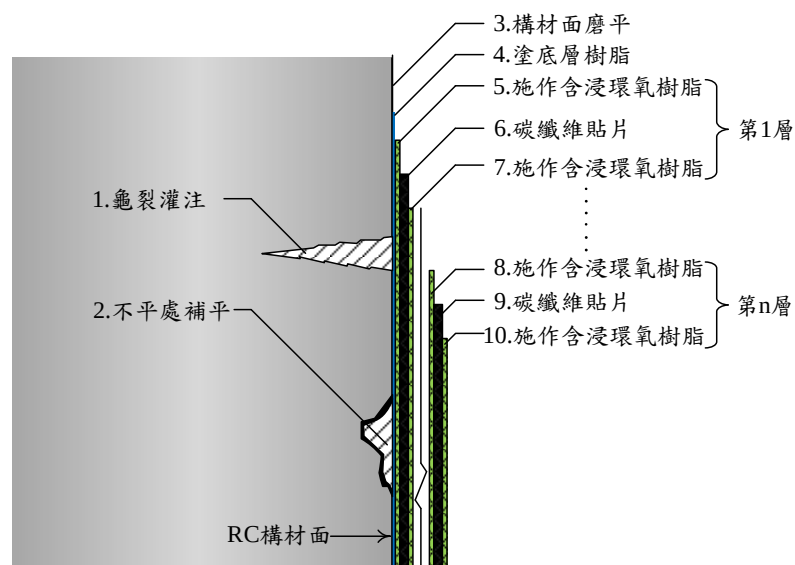


圖 1.4 RC 柱以 CFRP 包覆補強之剖面示意圖

(資料來源：參考書目 [17])



圖 1.5 以 CFRP 補強位於狹窄空間之 RC 梁

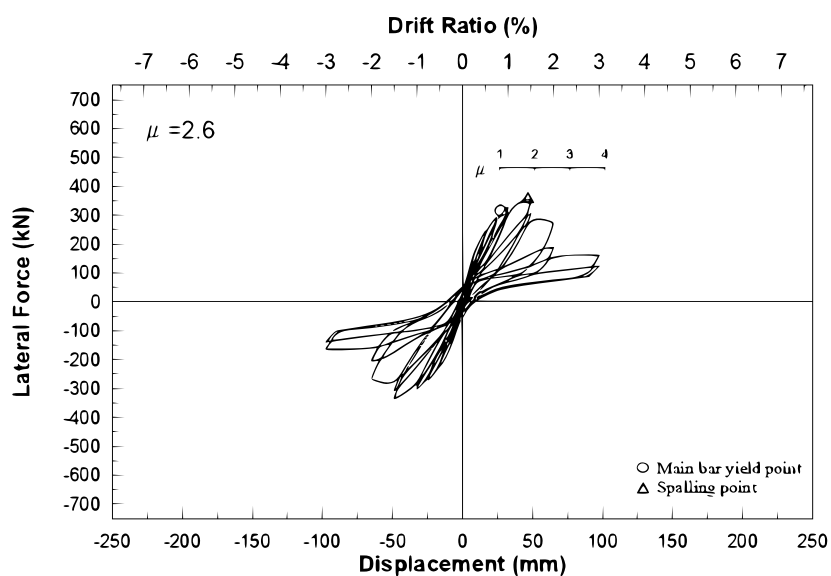
(資料來源：參考書目 [5])

三、影響 CFRP 包覆補強效果之因素

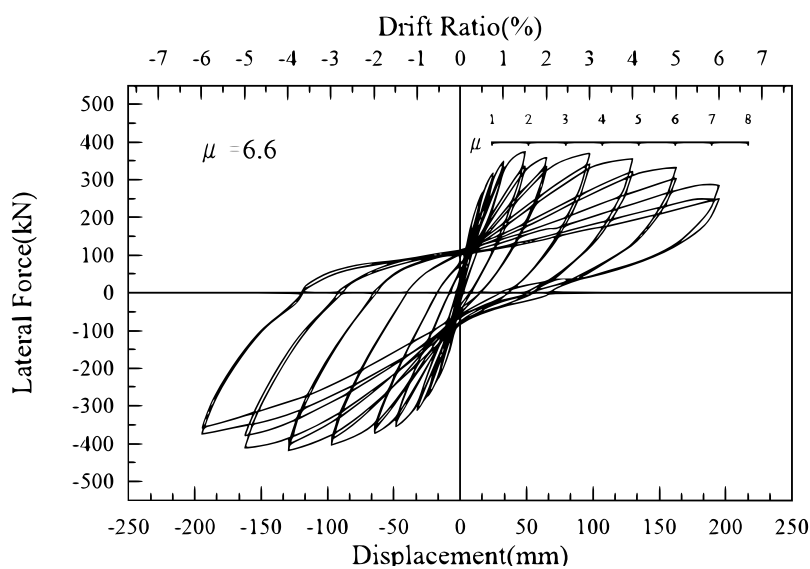
CFRP 包覆柱構件補強工法，主要是以碳纖維布沿柱水平向圍束逐層包覆，以增強韌性的一種補強方式。過去研究顯示，此法應用於圓柱可得相當明顯之成效，舉例而言，圖 1.6 [6]為圓形斷面橋柱之遲

滯迴圈，其中圖 1.6 (a)、(b)採相同之設計，兩者主筋皆於塑鉸區搭接，惟圖 1.6 (b)於塑鉸區採四層 CFRP 包覆補強。比較圖 1.6 (a)、(b)兩者可知試體在達最大強度後，採 CFRP 包覆補強者，強度下降趨勢，大幅低於未補強者，表示 CFRP 包覆補強對圓形斷面柱構件韌性有明顯之提升。

過去研究亦顯示方柱採 CFRP 包覆補強工法之效果不若圓柱，主因為碳纖維布在柱角隅位置的應力集中現象導致其提前斷裂，如圖 1.7 之方柱試體所示，該柱角隅處之碳纖維布，因應力集中而提前破壞。前述圓柱與方柱在國內已有許多研究結果，然而國內絕大多數之老舊低矮型 RC 建築常將柱斷面規劃為矩形，如圖 1.8 之國內典型沿街店舖式住宅平面圖即為一例，另外，此類老舊低矮型 RC 建築不僅設有許多長寬比較大之矩形柱，在設計柱構件時，配置之橫向鋼筋間距，一般大幅低於現行規範[7]之要求，且柱箍筋兩端彎鉤角度多採 90 度彎鉤，亦不符合現行規範對柱構件指定範圍內應配置閉合箍筋及耐震彎鉤之規定，整體而言，此類柱由於橫向鋼筋量不足，將導致韌性不佳，又常見於老舊低矮型 RC 建築中，而有研究其補強方法之必要。若此類柱亦能採用工期短、成本低、施工不占空間的 CFRP 包覆補強工法，將能增加民眾之補強意願，並於透過專業技師及建築師的評估及監督下，有利於國內階段性補強政策之推廣。



(a)未補強試體(BMCL100)；



(b)採 4 層 CFRP 包覆補強試體(FCL1)

圖 1.6 圓形斷面橋柱之遲滯迴圈

(資料來源：參考書目[6])



圖 1.7 柱構件之角隅因碳纖維布應力集中致使破壞

(資料來源：參考書目 [8])

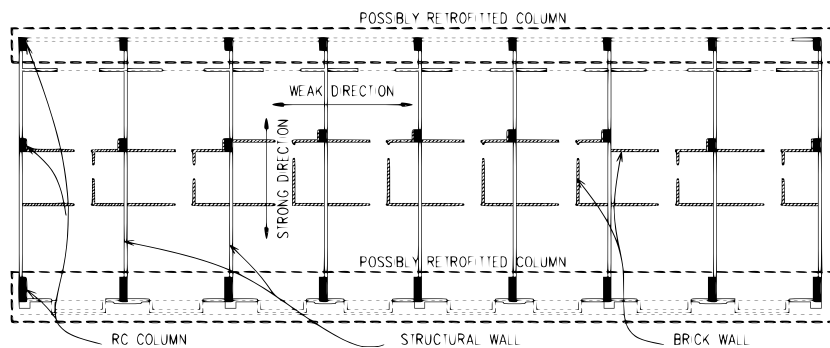


圖 1.8 典型沿街店舖式住宅平面示意圖

(資料來源：參考書目 [9])

第三節 研究方法與進度說明

本計畫研究方法，將透以下階段進行：文獻蒐集與分析、試體設計、試體製作、載重試驗、分析試驗結果及期末報告撰寫。本研究預定之研究進度表，如表 1.1 所示，流程如圖 1.9 所示，

一、文獻蒐集與分析

碳纖維複合材料 CFRP，為國內橋樑及建築補強常見之工法。當碳纖維與基材成束為 CFRP 後，利用編織技術可將其製造成碳纖維布匹組織，並以碳纖維布逐層包覆並黏貼於建築構件上，增加構件之強度及韌性，此補強工法具有成本低、工期短及施工便利之優勢。本研究將蒐集國內、外於 CFRP 包覆柱補強效益之文獻資料，藉以瞭解各文獻的試體設計，並結合國內於相關補強工法之設計實務，俾作為本研究試體設計、試驗規劃、分析模型建置之參採。

二、試體設計

本研究將規劃與製作 4 組，計 RND 及 RNDC 等 2 個系列之矩型 RC 柱試體，其皆為非韌性配筋柱試體，並預計進行固定軸壓力為 $0.2 A_g f'_c$ ，單曲率之反覆載重試驗，以研究其耐震性能。而對於既有低層 RC 建築非韌性配筋柱之模擬與設計，將參考國內典型屋齡約 20 年以上，樓高 4 樓以下騎樓式建築底層柱之實務現況。

三、試體製作

本研究試體製作計分為四個階段，第一階段預計於 6 月分進行試體採購招標作業；第二階段於 7 月分進行試體製作放樣，以及柱試體下部基礎之鋼筋綁紮、模板組立及灌漿施工施工；第三階段為柱試體

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

內部鋼筋，應變量測應變計之施工；第四階段為柱試體上部柱身之鋼筋綁紮、模板組立及灌漿施工。

本研究柱試體製作第一階段之採購作業，係於 107 年 5 月 22 日公告上網，並於 6 月 2 日決標；106 年 6 月 30 日完成第二階段柱試體下部基礎混凝土之灌漿施工；、106 年 7 月 5 日完成第三階段柱試體內部鋼筋應變計之黏貼施工；106 年 7 月 7 日完成第四階段柱試體上部柱身之灌漿施工，混凝土 28 天齡期到達日為 8 月 4 日；柱試體已完成製作，於 8 月 21 日申報驗收。

四、載重試驗

本研究預計進行鋼筋與混凝土材料之基本務理性質試驗。混凝土原柱試體抗壓強度試驗部分，需記錄 28 天齡期抗壓強度，以及各柱試體於實際試驗當日之抗壓強度。鋼筋拉伸試驗部分，係要求各型號與各強度種類之鋼筋，應為同一批號料源，所以各型號與強度種類鋼筋僅進行一次拉伸試驗。後續以 CFRP 包覆補強矩形 RC 柱試體於固定軸壓力 $0.2 A_g f'_c$ 及單曲率反覆載重試驗，用以驗證模擬既有低層 RC 建築底層非韌性配筋 RC 柱，分別於未補強及以 CFRP 包覆補強條件下的耐震行為，並藉以觀察矩形 RC 柱試體於非韌性配筋下，以 CFRP 包覆補強柱試體於耐震性能的差異。

五、分析試驗結果

藉由矩形 RC 柱試體實驗所得量測數據，透過試驗機及應變計所得數據之分析，可瞭解非韌性配筋矩形 RC 柱試體在 $0.2 A_g f'_c$ 軸壓力及單曲率反覆載重試驗下，分別於未補強及以 CFRP 包覆補強耐震性能之差異，進而研提以 CFRP 包覆補強之設計建議。

六、期末報告撰寫

本研究預計提出兩次報告，第 1 次為期中報告，目的在說明本研究於研究過程之進度；第 2 次為期末報告，以敘明本研究之研究成果。

第四節 研究目的

本研究預計針對非韌性配筋矩型混凝土柱進行研究，預期研究目標包括：

- (一) 驗證矩形 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震行為，並研提矩形柱斷面直線區圍束補強能力提升之對策。
- (二) 建立 CFRP 補強鋼筋混凝土柱之設計與施工注意事項。

表 1.1 研究進度

月次	第一月	第二月	第三月	第四月	第五月	第六月	第七月	第八月	第九月	第十月	第十一月	第十二月	備註
工作項目													
資料搜集及整理													
試體設計													
試體招標、製作、養護與驗收													
材料機械性質試驗													
柱試體反覆載重試驗													
試驗數據整理分析													
報告撰寫													
期中報告								※					8/2
期末報告											※		11/28
研究進度百分比	4	8	12	20	28	32	44	56	76	88	96	100	
查核點	第 1 季：期初審查												
	第 2 季：試體採購招標												
	第 3 季：期中報告審查												
	第 4 季：期末報告審查												
說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定研究進度以粗線表示其起迄日期。													
2.預定研究進度百分比一欄，係為配合追蹤考核作業所設計。請以每一小格粗組線為一分，統計求得本計畫之總分，再將各月份工作項目之累積得分(與之前各月加總)除以總分，即為各月份之預定進度。													
3.科技計畫請註明查核點，作為每一季所預定完成工作項目之查核依據。													

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

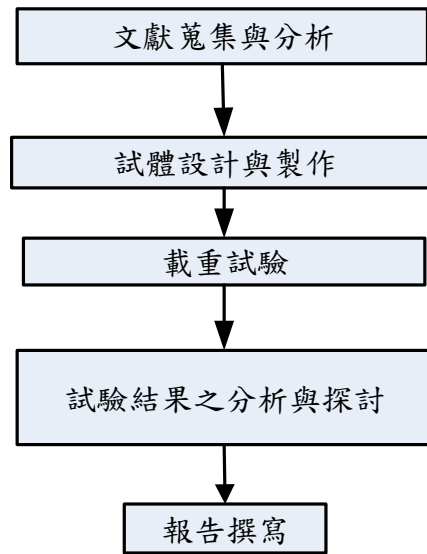


圖 1.9 研究進行之流程圖

(資料來源：本研究製作)

第二章 試體計畫

第一節 試體設計

國內早期老舊低矮型 RC 建築底層柱，多屬橫向箍筋量不足之非韌性配筋柱，且此類斷面常設計為矩形，而本研究所謂「低矮」型之建築物，其樓高定義為四樓以下之建築，其柱斷面承受之軸力不會太高，軸力比多為 20% 以下。本研究旨在探討此類柱構件，以 CFRP 包覆補強工法施作，柱圍束量是否足夠。所謂「非韌性配筋」柱，主要具有以下特性，首要為未適當配置足夠之外箍筋及內繫筋，導致柱橫向鋼筋量不足，以及外箍筋兩端均採用 90 度彎鉤，而未採用 135 度之耐震彎鉤，造成柱內混凝土圍束效果不佳，進而影響柱構件未能發揮足夠之韌性行為，典型非韌性配筋柱橫向箍筋之配筋情形，其箍筋間距甚至超過 20 公分，如圖 2.1 及圖 2.3 所示。

老舊低矮型 RC 建築物的柱，多為矩形的「非韌性配筋」柱，在未配置內繫筋的情況下，矩形柱斷面長邊對內部核心混凝土的圍束需求，勢必遠大於短邊，如圖 2.4 所示。同樣地，若柱外圍採用 CFRP 包覆補強工法，於柱斷面之長邊，亦無法增設類似內繫筋之抗拉元件，因此柱斷面所需碳纖維布之補強需求（層數），將受限垂直於柱斷面長邊方向之水平圍束需求控制。由先前研究亦顯示[10]，隨著碳纖維布層數之增加，其耐震性能之提升效益，將趨近於一個限值。目前國內 RC 建築相關設計規範中，對於 CFRP 包覆補強之設計方法，亦未訂定有可資依循的設計規定，現有設計方法多為引用相關文獻之建議，因此本研究亦希望透過結構試驗之驗證，檢核相關設計方法之合理性。

本研究共規劃四組屬單曲率破壞之單柱試體，試體名稱分別為 RND、RNDC2L、RNDC4L 及 RNDC8L。其中，試體 RND 為矩形的非韌性配筋柱，其斷面尺寸、橫向箍筋量及箍筋端部彎鉤角度之選擇，主要以模擬國內典型老舊低矮 RC 建築物底部樓層柱之配筋方式。試體名稱的第一個字母「R」，

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

代為矩形，即英文 Rectangular 的縮寫；其後的「ND」二字，表示為「非韌性」，及英文 Non-ductility 的縮寫，「R」及「ND」合在一起，即表示為矩形非韌性配筋的柱試體。

RNDC 系列與 RND 系列等 2 個系列之試體，其 RC 柱部分的斷面尺寸、鋼筋配置及材料強度均為相同之設計，惟 RNDC 系列試體係於試體混凝土部分硬化後，再於其外圍以 CFRP 包覆補強工法，進行水平單向圍束之補強，並且於柱試體 4 個角隅處，設置為半徑 3 公分之導角。RNDC 系列試體名稱的第一個字母「R」，同樣表示為矩形，「ND」二字亦為「非韌性」，「RND」表示矩形非韌性配筋的柱試體。隨後之字母「C」為 CFRP 之縮寫，因此「RNDC」表示採用 CFRP 包覆補強工法之矩形非韌性配筋柱試體。RNDC 系列試體名稱的「L」，即英文 Layer 的縮寫。「L」字母前的阿拉伯數字，表示 RC 柱試體所包覆 CFRP 的層數。因此試體 RNDC2L，即「R」-「ND」-「C」-「2」-「L」之組合，表示以 2 層 CFRP 包覆補強之矩形非韌性配筋 RC 柱試體，其餘以此類推。本研究採用 UD300 單層每平方公尺 300 公克之單向碳纖維布，設計抗拉彈性係數為每平方公厘 23,500 公斤。

本研究 RNDC 系列試體所採用碳纖維布之層數，係參採較為簡易的 CFRP 包覆「圍束補強」理論[10]進行設計。其中，試體 RNDC4L 旨在驗證，依圍束補強理論之設計結果，試體 RND 經 CFRP 包覆圍束補強後，矩形非韌性配筋柱之耐震行為，是否能達到基本之圍束能力需求。試體 RNDC2L 與試體 RNDC8L 採用碳纖維布之層數，分別為 RNDC4L 的 0.5 倍與 2 倍，此 2 組試體之探討目的有二，其一為觀察隨著碳纖維布補強層數之增加，柱試體於圍束補強後，耐震韌性的提升效益，其二為依柱 CFRP 圍束補強設計之試體 RNDC4L，其耐震韌性是否足夠，以增加民眾的逃生機會。

由於研究經費額度限制及撙節經費之考量，本次研究之矩形柱試體，僅規劃檢核同時進行「弱軸」之側向加載，以及 20%軸力比之軸向加載試驗。



圖 2.1 典型非韌性配筋柱橫向鋼筋過大之情形

(資料來源：參考書目[11])



圖 2.2 典型非韌性配筋柱試體橫向鋼筋之配置情形

(資料來源：本研究)

2.1.1 試體 RND

本研究參考 Sezen[12]所蒐集之典型老舊 RC 建築柱試體資料，以作為矩形非韌性柱試體 RND 之設計參數依據，試體 RND 主要選定以貼近國內非韌性矩形柱試體之典型態樣，本研究亦參考歐昱辰[9]補強前試體之設計參數，其試體源於該研究所歸納之典型國內低矮 RC 建築柱態樣，如混凝土設計抗壓強度 $f'_c=21\text{MPa}$ 。橫向鋼筋多選擇 D10(#3)至 D13(#4)之尺寸，規格為 SD280，縱向鋼筋多選擇 D19(#6)至 D36(#11)之尺寸，規格為 SD420。樓層高度大約介於 3.3 m 到 3.8 m 之間，一樓矩形柱斷面寬度大約介於 30 cm 至 45 cm 之間，深度約介於 40 cm 至 80 cm 之間等，但其所歸納之柱構件，並非均屬於本研究所擬探討之老舊低矮型 RC 建築。林敏郎[13]則針對屋齡較高的老舊低矮型 RC 建築柱，規劃其研究之試體，此試體皆屬非韌性配筋之斷面，較符合本研究試體設計之需求。

整體而言，由於 Sezen[12]柱試體資料由於數量較多，可用於檢核本研究試體 RND 之規劃結果，是否超出一般老舊 RC 建築柱之範圍，但由於其多屬國外型式之試體，未必符合國內低矮 RC 建築柱之態樣。因此本研究柱試體 RND 之斷面尺寸、縱向鋼筋強度與橫向鋼筋強度、剪力跨深比等參數，係參採歐昱辰[9]試體於補強前之參數。而橫向鋼筋間距、箍筋端部彎鉤等配置細節，則參採林敏郎[13]試體。前述 Sezen、歐昱辰、林敏郎，以及本研究試體 RND 設計參數，列於

表 2.1。另外，本研究試體混凝土抗壓強度 f'_c 僅取 140 kgf/cm^2 ，主要參考國內老舊校舍建築於耐震能力詳評之經驗[14, 15]，顯示混凝土鑽心試體實測抗壓強度，普遍低於設計強度許多，經實測抗壓強度 f'_c ，約為 143 kgf/cm^2 [15]。試體 RND 之設計，如圖 2.3 所示，柱斷面橫向箍筋端部均為 90 度彎鉤，全

柱不配置內繫筋，橫向箍筋間距取 20cm，以貼近及顯示國內「典型」老舊低矮建築物柱構件之非韌性配筋方式。另綜評本所相關試驗機的加載能量，以及國內建築物實務現況，選定本研究探討柱試體之斷面深度為 30 cm，寬度為 50 cm，以符合歷次震災調查報告所載老舊低矮型 RC 建築底層柱常見之破壞型態。

表 2.1 非韌性柱試體相關參數比較

項目	Sezen(2002)[12]			林敏郎[13] (2009)	歐昱辰[9](2016) 【試體補強前】	本研究試體 RND
	最小值	最大值	平均值			
a/d	2	4	3	2.89	<u>6.74</u>	<u>6.64</u>
s/d	0.2	1.2	0.61	0.56	0.86	0.67
f'_c (kgf/cm ²)	134	457	253	210	210	<u>140</u>
f_{yl} (kgf/cm ²)	3304	5343	4148	4200	4200	4200
ρ_l	1.0%	4.0%	2.3%	2.3%	3%	2.3%
f_{yt} (kgf/cm ²)	3234	6609	4359	<u>2800</u>	<u>2800</u>	<u>2800</u>
ρ_t	0.1%	0.7%	0.3%	0.1%	0.136%	0.143%
$P/A_g f'_c$	0	0.6	0.2	0.2	0.20	0.2

※標示底線者，表示數據不在 Sezen(2002)所蒐集之 50 座老舊 RC 柱試體資料範圍內。 a/d ：剪力跨深比； s/d ：橫向鋼筋間距與斷面深度比； f'_c ：混凝土抗壓強度； f_{yl} ：縱向鋼筋降伏強度； ρ_l ：縱向鋼筋比(= A_{sl}/bh)； f_{yt} ：橫向鋼筋降伏強度； ρ_t ：橫向鋼筋比(= $A_{sh}/b_c s$)； $P/A_g f'_c$ ：軸力比。

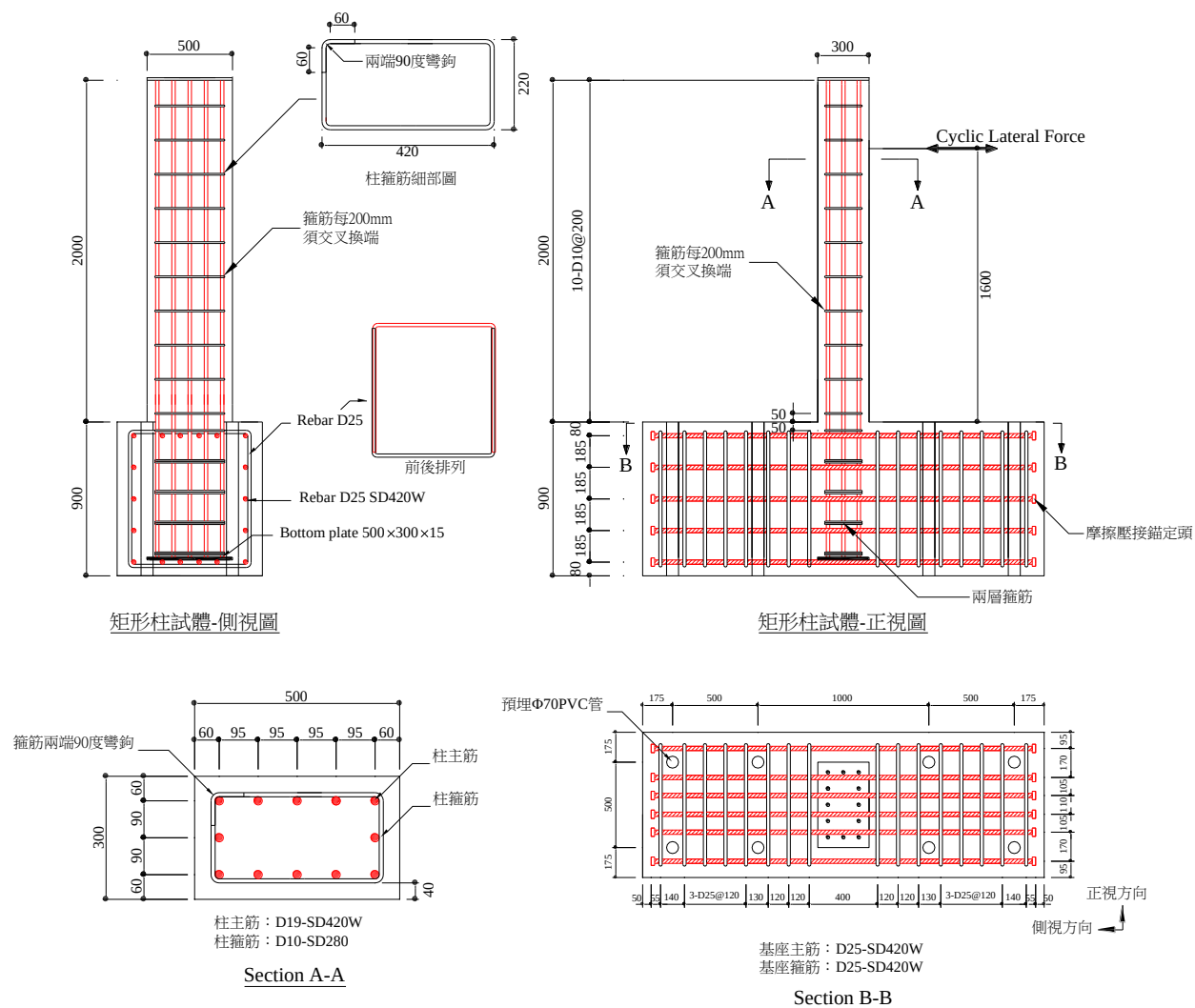


圖 2.3 試體 RND 之設計圖

(資料來源：本研究製作)

2.1.2 RNDC 系列試體

RNDC 系列試體計有試體 RNDC2L、試體 RNDC4L 及試體 RNDC8L 等 3 組，其中試體 RNDC2L 與試體 RND 具有相同 RC 斷面鋼筋之配置，兩者差異在於 RNDC 系列試體 RC 斷面的 4 個角隅處，預先設置半徑為 3 公分之導角，並採用 CFRP 包覆補強工法，對試體進行水平向單向圍束之補強。

考量柱試體耐震韌性之發揮，受橫向鋼筋量之影響，現行混凝土結構設計規範[7]對柱構件矩形橫向鋼筋量之需求，規定如式(式 2.1)所示，式中前者為圍束需求，後者為韌性需求，前者旨在確保當柱構件保護層剝落後，核心混凝土仍有足夠之側向圍束應力，使柱構件軸力強度得以維持。由於本研究柱試體斷面之橫向鋼筋，係採非韌性配置，所提供橫向鋼筋量約為現行規範要求之 20% ($A_{sh}/A_{sh,req} \cong 0.2$)，不足的圍束應力，擬透過碳纖維布補強之方式來彌補。

為計算碳纖維布之補強所需層數，本研究參考林敏郎[8,13]所提之 CFRP 包覆圍束補強設計理論，首先將式(式 2.1)中 f_{yt} 、 sb_c 移項可得式(式 2.2)，在此假設 $\left[0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1\right) f'_c, 0.09 f'_c\right]_{max}$ 為柱構件核心混凝土圍束應力需求為 f_{ce} ，其分別由既有橫向鋼筋提供之圍束應力 f_{ls} ，以及碳纖維布補強提供之圍束應力 f_{lf} 提供，即 f_{ls} 以及 f_{lf} 之和應該要大於核心混凝土圍束應力需求 f_{ce} ，可得式(式 2.4)。其中，橫向鋼筋提供之圍束應力 f_{ls} ，可依式(式 2.5)計算，因此碳纖維布補強須提供之圍束應力 f_{lf} ，將式(式 2.4)代入式(式 2.5)並移項可得式(式 2.6)碳纖維布補強之圍束應力之需求。

因碳纖維布為線性材料(圖 1.2)，故碳纖維布抗拉應力 σ_f 為其抗拉應變 ε_f 與彈性模數 E_f 之乘積。假設碳纖維布厚度為 t_f ，在 s 間距內碳纖維布水平向總圍束力為 $2\varepsilon_f E_f t_f s$ ，其中乘以 2 倍，表示柱斷面兩側包覆之碳纖維布，如圖 2.4 所示。因此將碳纖維布之總側向力均布於 s 間距內，可得其提供之圍束應

力相當於 $2\varepsilon_f E_f t_f / b$ ，得式(式 2.7)之碳纖維布圍束補強之理論設計公式。利用式(式 2.7)即可計算碳纖維布所需厚度 t_f ，再除上單層單向碳纖維布設計厚度 t_{f0} ，最後可求得以碳纖維布補強所需施做之層數 n 需求。

式(式 2.7)之計算，尚須設定碳纖維設計應變 ε_f 以及彈性係數 E_f ，本研究參考 ACI 440.2R-08[16]之建議，將 ε_f 假定為 0.004，而彈性係數 E_f 則參考「CFRP 補強混凝土結構物技術規範(草案)」[17]之建議，設為 2.35×10^6 kgf/cm²，透過此二假設，即可計算碳纖維布所需施做厚度 t_f 。而碳纖維布所需層數，則可由所需厚度 t_f 除上單層設計厚度 t_{f0} ，其中 t_{f0} 係根據碳纖維布規格而有所不同，

表 2.2 所示，表中參考公共工程施工綱要規範中[18]規定之碳纖維布規格，本研究係選用 FAW300 規格進行設計，即選定碳纖維布設計厚度 t_{f0} 為 0.165 mm（不含樹脂）。

根據上述之假設與設計公式，可得試體 RNDC4L 之碳纖維布層數 n 需求為 3.44 層，取整數為 4 層，並以此組試體所包覆之層數為對照組。另試體 RNDC2L 及試體 RNDC8L 所包覆碳纖維之層數，則分別為試體 RNDC4L 之 0.5 與 2 倍層數，即分別對應為施做 2 層與 8 層。此外，為減緩 RNDC 系列柱試體過早發角隅應力集中破壞之效應，試體 RNDC2L、試體 RNDC4L 及試體 RNDC8L 等 3 組試體斷面之角隅處，預先設計製作為半徑 30 mm 之導角，RNDC 系列試體斷面，如圖 2.5 所示。

$$A_{sh} = \left[0.3sb_c \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}, 0.09sb_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \right]_{max} \quad (式 2.1)$$

$$\frac{A_{sh}f_{yt}}{sb_c} = \left[0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) f'_c, 0.09f'_c \right]_{max} \quad (式 2.2)$$

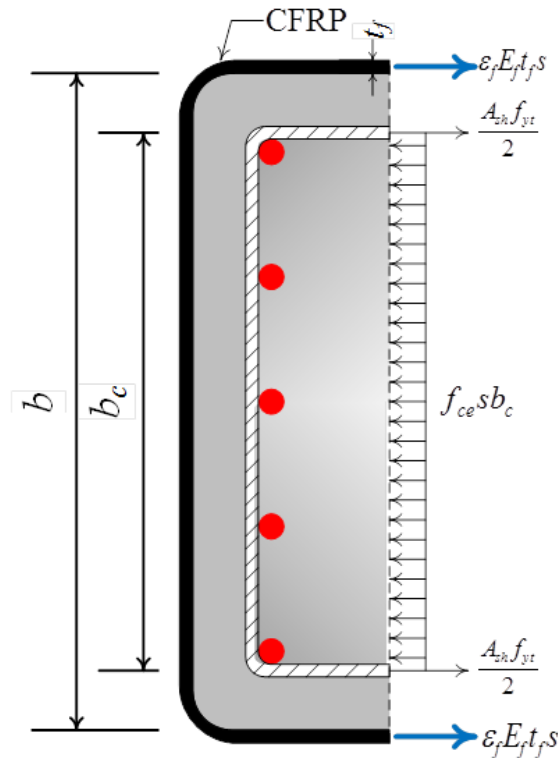
$$f_{ce} = \left[0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) f'_c, 0.09f'_c \right]_{max} \quad (式 2.3)$$

$$f_{ls} + f_{lf} \geq f_{ce} \quad (式 2.4)$$

$$f_{ls} = \frac{A_{sh}f_{yh}}{sb_c} \quad (式 2.5)$$

$$f_{lf} \geq \left[0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) f'_c, 0.09f'_c \right]_{max} - \frac{A_{sh}f_{yh}}{sb_c} \quad (式 2.6)$$

$$\frac{2\varepsilon_f E_f t_f}{b} \geq \left[0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) f'_c, 0.09f'_c \right]_{max} - \frac{A_{sh}f_{yh}}{sb_c} \quad (式 2.7)$$

圖 2.4 s 間距內碳纖維布與橫向鋼筋側向力

(資料來源：參考書目[8])

表 2.2 碳纖維布規格

規格	FAW200	FAW300	測試方法
單位面積纖維質量 (g/m ² /層)	≥200	≥300	CNS13062
抗拉強度 (kgf/cm/層)	460 以上	690 以上	CNS13555
設計厚度 (mm/層)	0.11	0.165	---
伸長率 (%)	≥1.7		CNS 13555
貼片幅寬 (cm)	40 或 50	40 或 50	---

(資料來源：參考書目[18])

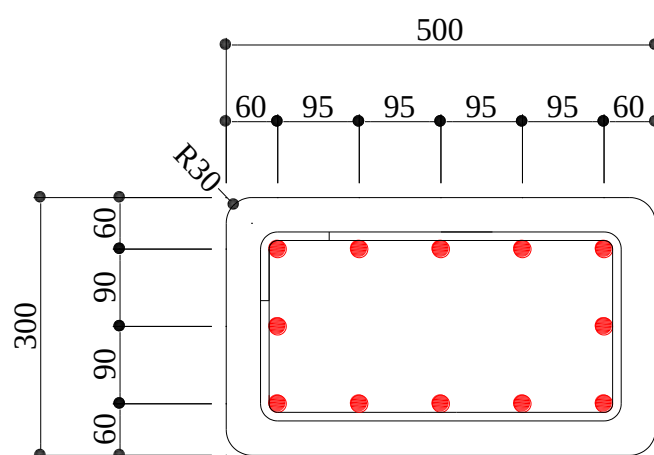


圖 2.5 RNDC1.0、RNDC1.5 以及 RNDC2.0 補強前斷面圖

(資料來源：本研究製作)

第二節 試體製作

本研究 4 組試體之製作，計分為底座定平與試體放樣、基座施工、應變計黏貼與試體上部柱身製作，各項製作程序詳述如下：

2.2.1 底座定平與試體放樣

依據採購須知補充說明圖說所需之鋼筋種類與尺寸，由鋼筋加工廠直接加工後，送抵本所材料實驗中心大型力學實驗室南側施工現場，如圖 3.1 所示。進行試體製作施工區之清理與整地，並確認試體之製作位置，以 6 分木夾板及角木組立底座並定出水平，再進行每組柱試體製作之放樣，訂出底座 8 處直徑為 70 mm 材質為 PVC 預留管的位置，如圖 3.2 所示。



圖 3.1 自加工廠完成加工送抵工作區之鋼筋

（資料來源：本研究）



圖 3.2 底座定平與試體放樣

(資料來源：本研究)

2.2.2 基座施作

由於本研究試體之基座，係採直立方式施工，因此須先完成基座鋼筋籠之製作(如圖 3.3 所示)，再將主筋綁紮於下基座鋼筋籠，此時必須特別注意要掌握縱向鋼筋的位置及垂直度，必須利用水準尺進行檢核。基座鋼筋籠完成組立之後，於基座灌漿前須預埋直徑為 700 mm，中心間距為 500 mm 的 PVC 管，此 PVC 管為試體於後續安裝階段貫穿螺桿之用，基座側邊模板完成組立後，需再確認與固定 PVC 管的設置位置，確認完成後澆置混凝土。

2.2.3 應變計黏貼

為觀察及瞭解柱試體於加載過程中，縱向及橫向鋼筋應變之變化，係規劃於柱試體下方塑性轉角發生區，分別於縱向與橫向鋼筋之適當位置，黏貼 5mm 之金屬應變計，應變計完成黏貼之情形，如圖 3.11 所示。並於黏貼完成之應變計，塗抹防水覆膜膠，最後再以電器膠帶纏繞保護，並要特別注意防止應變計發生非預期之拉扯損毀。

為降低試體於加載過程而造成對應變計之影響，每組柱試體應變計之訊號線束，均由柱底部與基座之交界面，集中成束出線，每組應變計訊號線之規格長度為 3 m。而在應變計收線時，應注意導線須沿著縱向鋼筋內緣或緊靠外箍筋下緣走線，防止混凝土澆置或震動搗實之動作，致拉扯而使應變計損毀。為避免應變計於灌漿或養護時水分進入成束訊號線之集線區，所有外露於柱試體外部之訊號線，均利用塑膠袋包覆保護，應變計訊號線束之出線情形，如圖 3.20。

2.2.4 試體上部柱身製作

下基座拆模後即可進行上部柱身之製作，此時需注意黏貼有應變計的箍筋，必須放置於所規劃佈設應變計之位置，上部柱身鋼筋完成綁紮後，組立上部柱身之模板，並於確認模板與訊號線束穩固後，澆置混凝土。試體混凝土部分製作完成，如圖 3.21 所示。

2.2.4 試體上部柱身碳纖維包覆補強

1. 混凝土表面處理

混凝土表面不平整或有突出物，須修整處理。修復完工後之局部表面高度差應控置於 1 mm 以內，或修整 1：10 以下之斜面。

2. 隅角部處理

為防止隅角部碳纖維貼片提早發生應力集中之破壞。隅角部凸角半徑應大於 30 mm，若於凸出部分應以切割機或砂輪機將其削除，使其平順；如於凹角部位時，則須使用樹脂砂漿填平，使其凹面平滑化，以利碳纖維貼片貼覆及受力強度之發揮。

3. 施工環境

- (1) 施工環境不可有塵土飛揚情形，以免污染未乾之環氧樹脂。
- (2) 如下雨、刮風、有霧或環境相對濕度高於 85% 時，不得施工，另有適當防護措施者除外。

4. 塗布底漆

- (1) 混凝土表面用含水率測濕計檢驗，含水率須低於 8%。
- (2) 於可使用時間內，一次拌和使用量。將底漆之主劑及硬化劑依所規定配比置於拌和桶中，並使用手提電動攪拌機均勻混合，超過可使用時間之材料，則不可使用。
- (3) 底漆以毛刷滾輪均勻塗佈，底漆用量不得低於 0.4 kg/m^2 。

5. 碳纖維貼片黏貼

- (1) 碳纖維布預先以剪刀或刀片，依所設計尺寸裁切。
- (2) 施工面底漆以指觸乾燥確認，底漆施工超過一個星期以上時，應以砂紙打毛。
- (3) 將環氧樹脂之主劑及硬化劑依所規定配比置於拌和桶中，

並使用電動攪拌機均勻混合，超過可使用時間之材料，則不可使用。

- (4) 環氧樹脂以毛刷滾輪平均塗佈，轉角部分要多塗，環氧樹脂用量不得低於 0.6kg/m^2 。
- (5) 單向碳纖維布黏貼於樹脂塗佈面後，以毛刷滾輪或橡皮刮刀順著纖維方向推平，使樹脂浸透並去除氣泡。纖維(長向)方向之搭接長度須 200 mm 以上。
- (6) 黏貼後放置 30 分鐘，如纖維有浮出或脫線情形發生時，以滾輪或橡皮刮刀壓平修正。
- (7) 單向碳纖維布表面於塗佈第二層環氧樹脂(塗於面層)，以毛刷滾輪或橡皮刮刀順著纖維方向推平，使碳纖維完全含浸於樹脂，環氧樹脂用量不得低於 0.4 kg/m^2 。
- (8) 兩層以上碳纖維貼片相疊黏貼時，重覆(4)~(7)步驟，須等待前面一層樹脂指觸乾燥後並經工程司確認後，方可施作下一層。

6. 養護

- (1) 碳纖維貼片補強施工後，為避免雨水、砂、灰塵等附著於上，可使用塑膠布保護達 24 小時以上，並應注意盡量不要碰觸到施工面。
- (2) 如平均氣溫為 20°C ，養護期間為一週；如平均氣溫為 10°C ，養護期間為兩週。

第三節 試驗裝置與測計安排

試體上方設有厚度為15 mm之鋼製頂板，頂板預留直徑為250 mm之圓孔，以利試體由上而下灌漿之用，完成混凝土灌漿後，將鋼製頂板塞回圓孔並鉚接固定，再於混凝土澆置面與鋼頂板下緣間，以無收縮水泥填滿其空間，讓致動器施加軸壓力時，將應力平均分佈於柱試體之頂端，避免應力集中傳遞而造成非預期之破壞。本研究RC柱試體均採單軸應變計，用以記錄柱試體下部塑性鉸區內部縱向鋼筋、外箍筋與CFRP表面等處之單向應變，單一柱試體內部縱向及橫向鋼筋共設置9組應變計，包覆CFRP表面則設置10組應變計，詳如**錯誤! 找不到參照來源。**所示；外掛位移計則量測試體的位移量；試驗裝置有大型試驗構架、600 噸與200 噸油壓致動器，進行撓曲試驗，探討非韌性配筋柱與韌性配筋柱之撓曲行為，詳如圖2.2所示。撓曲試驗中所採用的側向位移歷時圖，如圖2.3所示。本研究之試驗流程為首先針對柱試體施加軸力(試驗過程中軸力維持不變)，再以位移控制模式(Displacement Control Mode)進行側向位移歷時，其中側向位移速率為1 mm/sec。

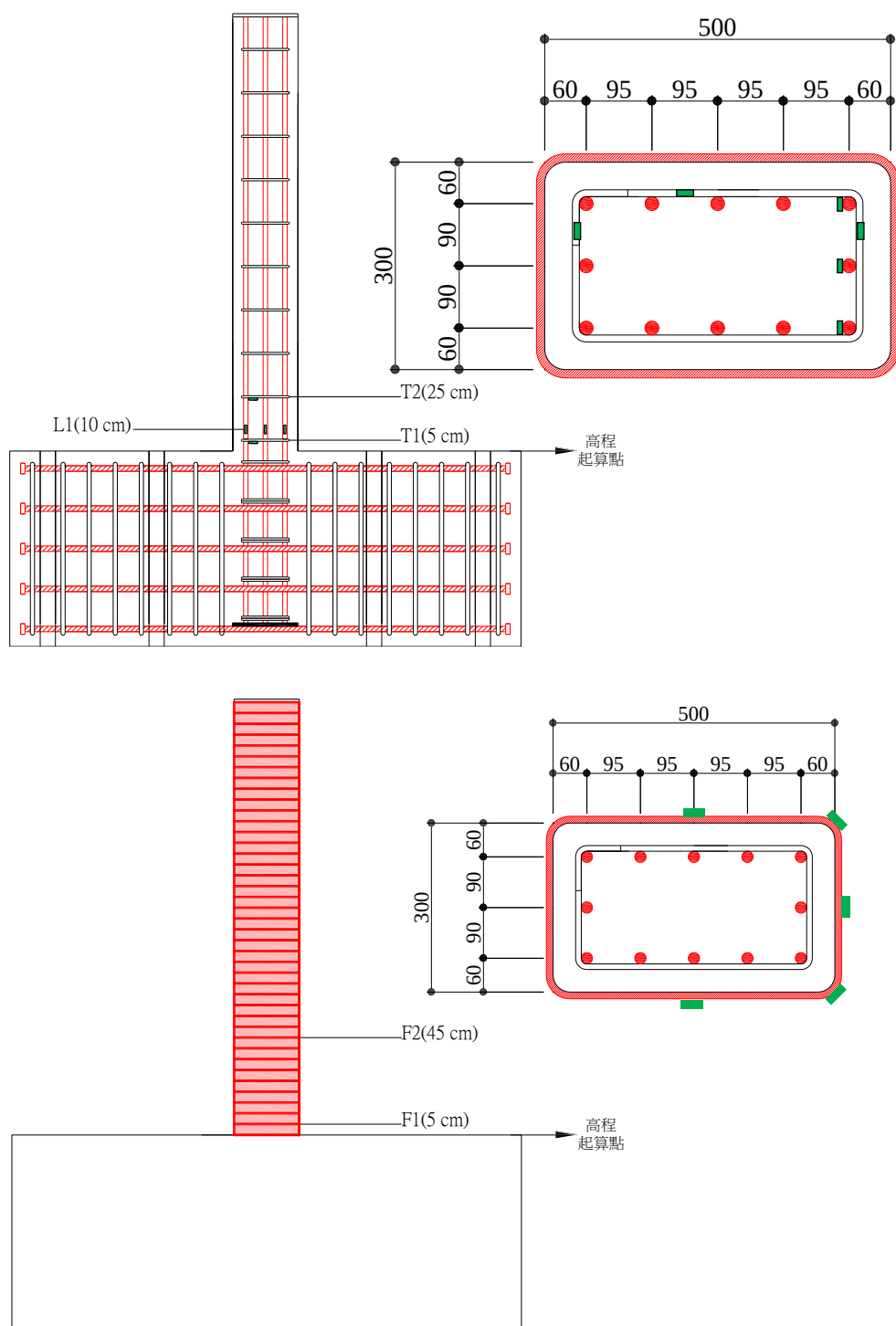


圖 2.1 柱試體斷面應變計之配置圖
(資料來源：本研究製作)

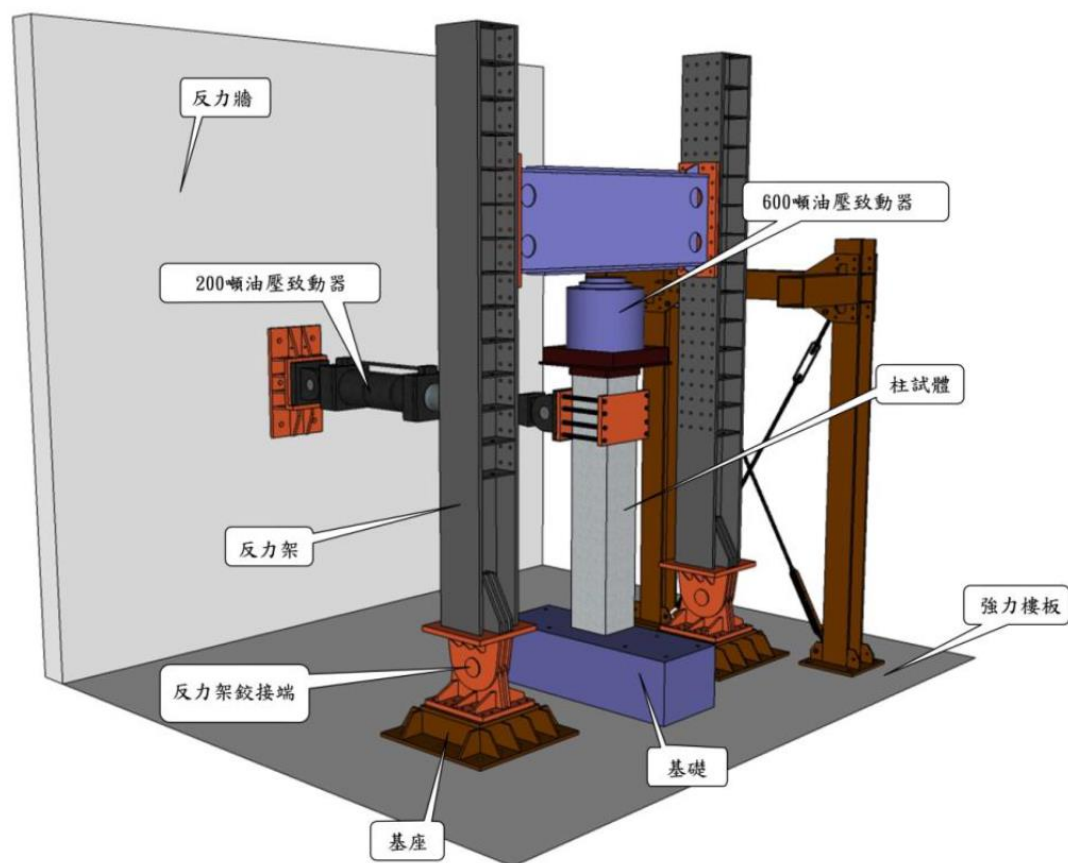


圖 2.2 軸力構架試驗裝置示意圖
(資料來源：本研究)

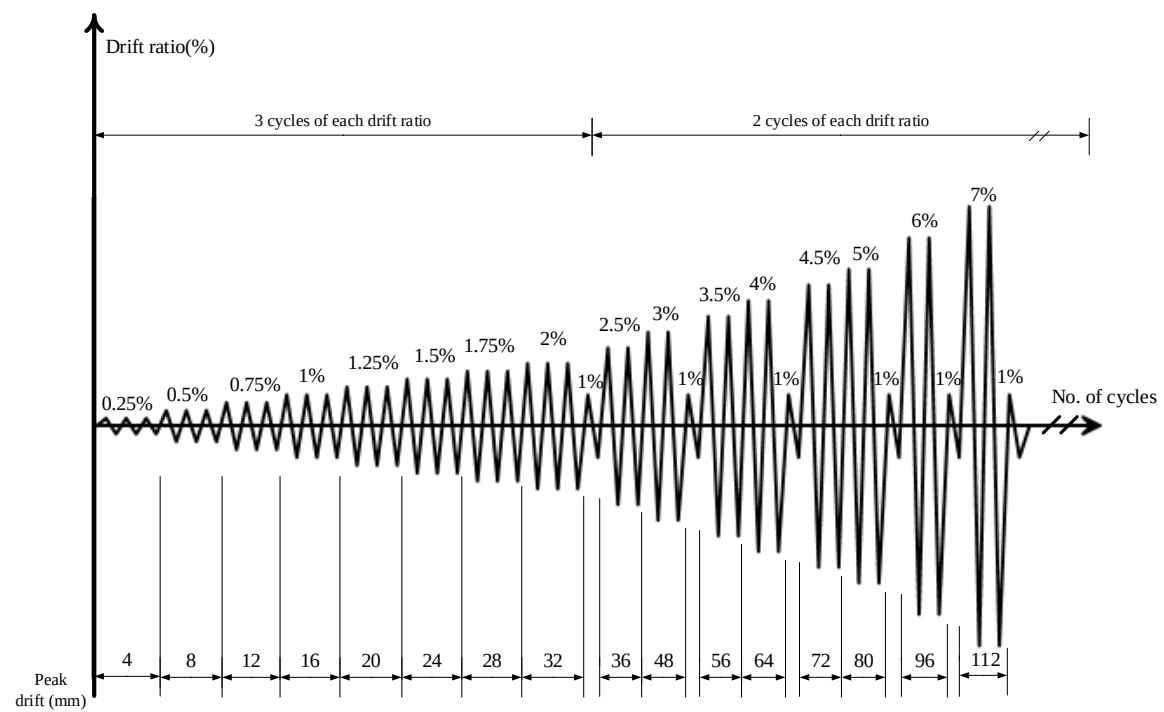


圖 2.3 試驗側向加載之位移控制歷時
(資料來源：ACI-374.1-05 規範)



圖 3.3 底座鋼筋籠之組立

(資料來源：本研究)



圖 3.4 上部柱主筋之定位

(資料來源：本研究)



圖 3.5 底座預留 PVC 管之擺設與封口

(資料來源：本研究)



圖 3.6 試體吊耳於底座之設置

(資料來源：本研究)



圖 3.7 底座模板之組立

(資料來源：本研究)



圖 3.8 底座混凝土澆置

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

(資料來源：本研究)



圖 3.9 底座拆模後之情形

(資料來源：本研究)



圖 3.10 柱試體應變計之黏貼

第二章 試體計畫

(資料來源：本研究)



圖 3.11 應變計之黏貼與固定

(資料來源：本研究)



圖 3.12 上部柱身鋼筋之組立

(資料來源：本研究)



圖 3.13 模板之圓形導角

(資料來源：本研究)



圖 3.14 上部柱身模板完成組立

(資料來源：本研究)



圖 3.15 上部柱混凝土之澆置
(資料來源：本研究)



圖 3.16 上部柱混凝土之搗實
(資料來源：本研究)



圖 3.17 混凝土澆置坍度試驗

(資料來源：本研究)



圖 3.18 混凝土圓柱式體製作

(資料來源：本研究)



圖 3.19 柱頂上部灌漿孔圓形蓋板之封板

(資料來源：本研究)



圖 3.20 應變計訊號線束之收線

(資料來源：本研究)



圖 3.21 上部混凝土柱四周之導角

(資料來源：本研究)



圖 3.22 試體製作完成與養護情形現況

(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論

第一節 試驗結果與觀察

本研究共製作 4 組矩形柱試體，配合本所材料實驗中心大型力學實驗室的既有大型試驗構架(參見圖 2.2)，並結合 600 噸與 200 噸油壓致動器，進行 RC 柱試體承受軸力與水平力之撓曲試驗。本章將分別說明各式體之試驗結果與觀察，並嘗試比較矩形非韌性配筋柱試體 RND 與經 CFRP 包覆圍束補強非韌性配筋柱試體耐震行為之差異，以及觀察隨著碳纖維布補強層數之增加，柱試體於圍束補強後，耐震韌性的提升效益，並且驗證依柱 CFRP 圍束理論補強設計之試體 RNDC4L，其耐震韌性是否有部保守之虞。

本研究鋼筋的機械性質，如表 3.1，相關試體之說明，如下所述。撓曲試驗所加載的軸力，約為柱試體理論軸力強度之 20%。實際強度 P_0 ，係以 $P_0 = f'_c A_g$ 計算之， f'_c 為 28 天齡期混凝土圓柱試體之試驗強度，由表 3.3 得知，本研究 f'_c 為 20.6 MPa； A_g 為柱總斷面積。計算而得之施加軸力為 618 kN。

此外，撓曲試驗中所採用的側向加載位移歷時，如圖 2.27 所示。本研究試體首先於柱試體之頂部，施加設定比率之軸力。試驗過程，軸力控制值，將固定維持不變，當柱試體頂部軸力施加至目標值之後，

再依位移控制模式(Displacement Control Mode)加載之位移歷時，其中側向加載位移空至之速率為 1 mm/sec。

3.1.1 試體 RND

試體 RND 混凝土的設計強度 f'_c 為 140 kgf/cm²，主要參考國內老舊校舍建築於耐震能力詳評之經驗[14, 15]。試體 RND 之設計，如圖 2.3 所示，柱斷面橫向箍筋端部均為 90 度彎鉤，全柱不配置內繫筋，橫向箍筋間距取 20cm，試體斷面深度為 30 cm，寬度為 50 cm，以符合歷次震災調查報告所載老舊低矮型 RC 建築底層柱常見之破壞型態。

在位移比 0.25%時，分別於試體的南側及北側，開始分別出現 1 條及 2 條的微小水平撓曲裂縫，東與西 2 側則分別有 2 條及 3 條的微小水平裂縫，此時於位移比-2.5%對應柱試體達最大承受的側力為-135.3 kN，如表 3.6 所示。在位移比達 0.5%時，位於柱試體北側，自底部往上 30 至 50 公分範圍，出現接近 45 度的斜向裂縫，東側的部分自底部往上 20 至 80 公分處亦有 3 條的剪力裂縫產生。當位移比達 1.75%時，東側及北側的角落，自底部往上至 30 公分範圍，首先出現寬度約 1 公厘以下之垂直裂縫。接著位移比達 2.5%時，於柱試體的四個面的角落，均出現寬度約 1 至 2 公厘的垂直裂縫，另外於西側出現寬度約 1 公厘的交叉剪力裂縫。在位移比 3%時，柱試體的東北側角

落，自底部往上 30 公分範圍，開裂明顯擴大，寬度約惟 3 公厘，此時於位移比+3%對應柱試體達最大承受的側力為+139.9 KN，如表 3.6 所示。而當位移比達 3.5%時，東側及北側的角落，首先出現表層混凝土剝落的情形。接著位移比來到 4%，除息西南側外，已有 3 側的角落出現表層混凝土剝落。最後，在位移比 4.5%時，自底部往上 20 至 70 公分範圍，柱試體顯示嚴重的剪力破壞，箍筋 90 度彎鉤約略脫開，北側主筋挫屈，導致強度迅速降低，停止實驗。

試體 RND 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。位於東與南側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。圖 3.5 為試體 RND 於試驗結束之破壞照片。圖 3.3 與圖 3.4 顯示試體 RND 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

表 3.1 鋼筋拉伸試驗結果彙整

鋼筋規格	鋼筋種類	降伏強度 f_y		抗拉強度 f_u		伸長率 %		拉降比	
		試驗值	平均值	試驗值	平均值	試驗值	平均值	試驗值	平均值
D13	SD280	329	331	497	513	29	31	-	-
		335		527		30		-	
		328		514		34		-	
D19	SD420W	482	481	667	666	20	20.7	1.38	1.38
		478		662		20		1.38	
		483		668		22		1.38	

單位：MPa

表 3.2 試體基礎 28 天齡期之圓柱試體抗壓強度

試體編號	澆置日期	設計強度 (MPa)	28 天抗壓強度 (MPa)	28 天平均抗壓強度 (MPa)
1	2018/07/02	14	25.4	25.7
2	2018/07/02		26.1	
3	2018/07/02		27.3	
4	2018/07/02		25.5	
5	2018/07/02		23.9	
6	2018/07/02		26.2	

註：標準圓柱 150×300 mm

表 3.3 各試體柱 28 天齡期之圓柱試體抗壓強度

試體編號	澆置日期	設計強度 (MPa)	28 天抗壓強度 (MPa)	28 天平均抗壓強度 (MPa)
1	2018/07/17	14	21.0	20.6
2	2018/07/17		21.2	
3	2018/07/17		19.6	

註：標準圓柱 150×300 mm

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

表 3.4 各混凝土圓柱試體抗壓強度

圓柱試體編號	混凝土齡期	混凝土強度 (MPa)	平均混凝土強度(MPa)
1	28	21.0	20.60
2	28	21.2	
3	28	19.6	
4	104	18.7	18.80
5	104	18.9	
6	104	18.8	
7	105	19.3	20.67
8	105	22.0	
9	105	20.7	
10	106	21.1	19.57
11	106	19.0	
12	106	18.6	
13	107	19.4	20.07
14	107	20.7	
15	107	20.1	
16	108	19.1	20.63
17	108	21.8	
18	108	21.0	
19	111	21.3	21.43
20	111	22.1	
21	111	20.9	
22	112	21.4	21.70
23	112	22.3	
24	112	21.4	
	平均值	20.4	

表 3.5 各試體對應之強度齡期

試體	試驗日期	對應齡期
RND	2018/10/30	106
RNDC2L	2018/11/02	111
RNDC4L	2018/11/06	112
RNDC8L	2018/11/01	108

表 3.6 各柱試體試驗結果之強度與韌性變化

試 體	H_{peak}^+ (KN)	$\delta_{H_{peak}}^+$ (mm)	H_{peak}^- (KN)	$\delta_{H_{peak}}^+$ (mm)	δ_y^+ (mm)	δ_y^- (mm)	δ_u^+ (mm)	δ_u^- (mm)	θ_p^+ (%)	θ_p^- (%)	平均 θ_p (%)
RND	139.9	47.8	-135.3	-39.7	23.9	-18.0	65.1	-63.5	2.57	-2.85	2.71
RNDC2L	143.0	63.7	-154.3	-47.3	23.6	-16.6	133	-160	6.85	-8.96	7.91
RNDC4L	150.1	48.1	-149.1	-56.1	24.1	-19.6	152	-176	7.99	-9.77	8.88
RNDC8L	144.7	56	-168.1	-56.1	26.5	-18.0	165	-192	8.64	-10.9	9.76

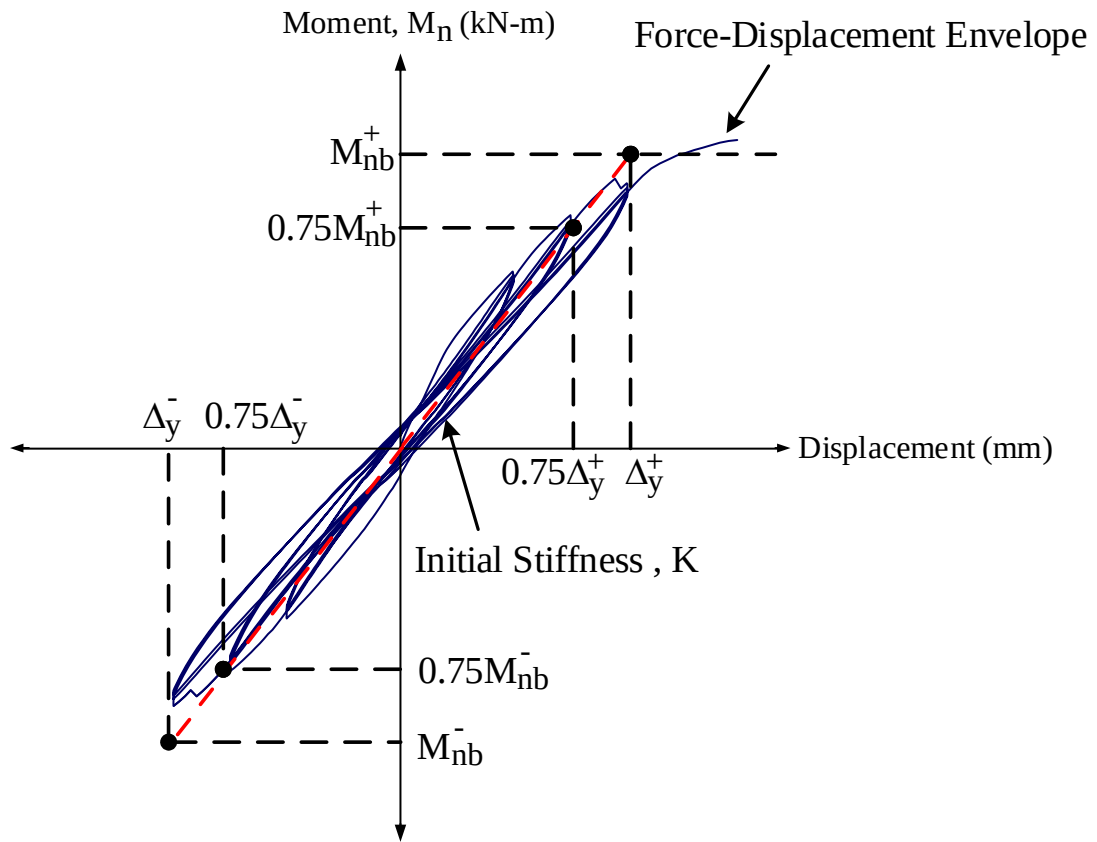


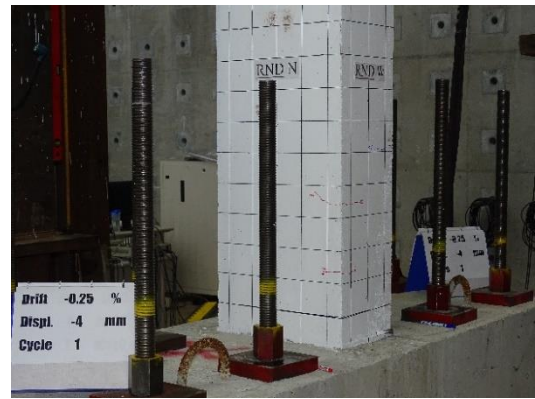
圖 3.23 選定 $\Delta_y (= \delta_y)$ 之定義

(資料來源：參考書目[20])

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



(a) $\theta = 0.25\%$



(b) $\theta = -0.25\%$



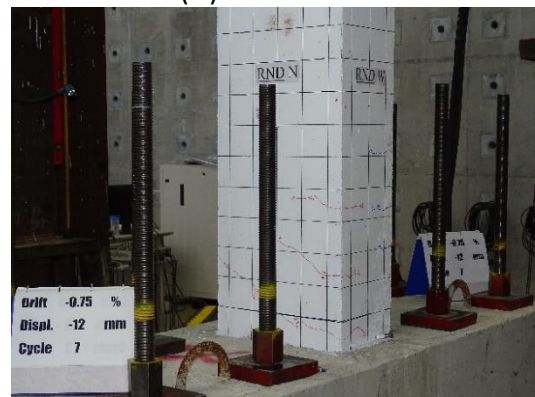
(c) $\theta = 0.5\%$



(d) $\theta = -0.5\%$

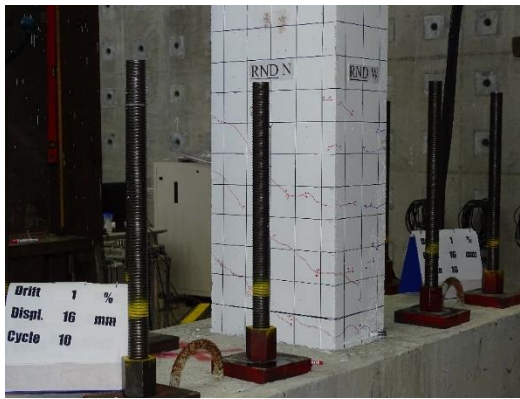


(e) $\theta = 0.75\%$

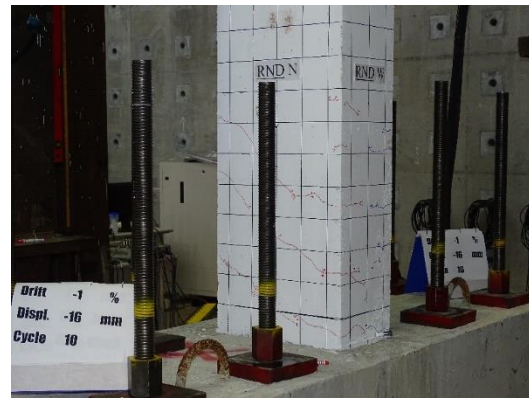


(f) $\theta = -0.75\%$

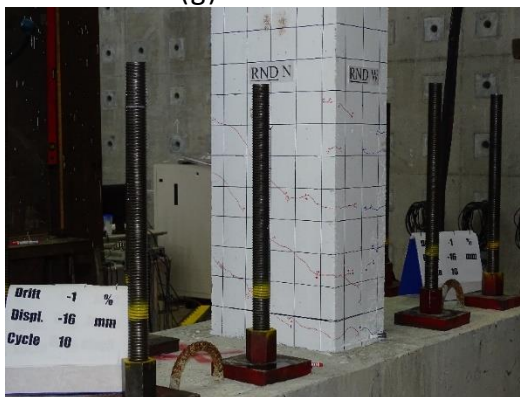
圖 3.24 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片



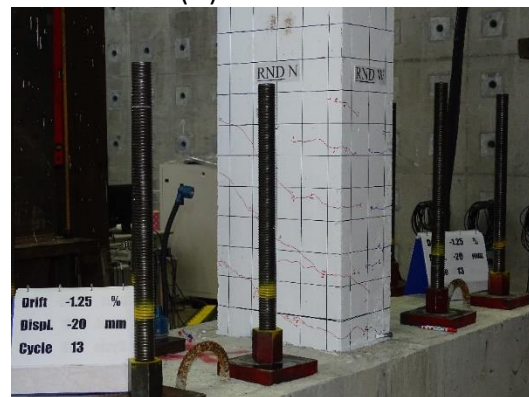
(g) $\theta = 1.0\%$



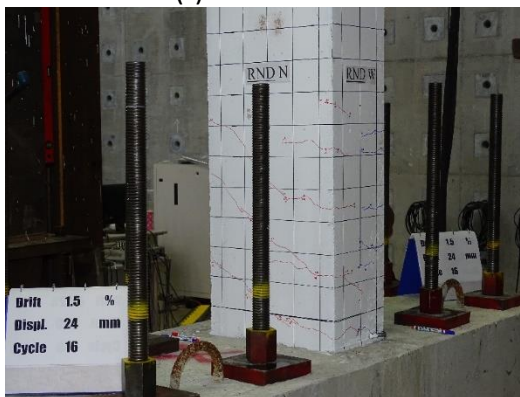
(h) $\theta = -1.0\%$



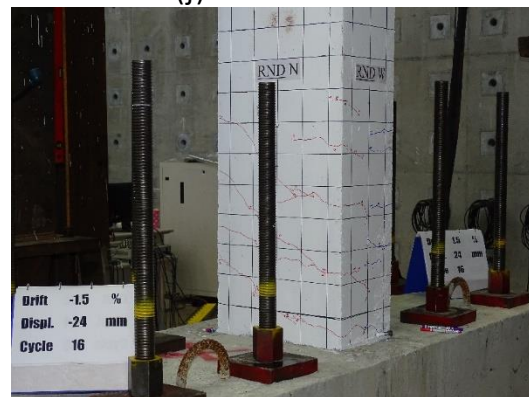
(i) $\theta = 1.25\%$



(j) $\theta = -1.25\%$



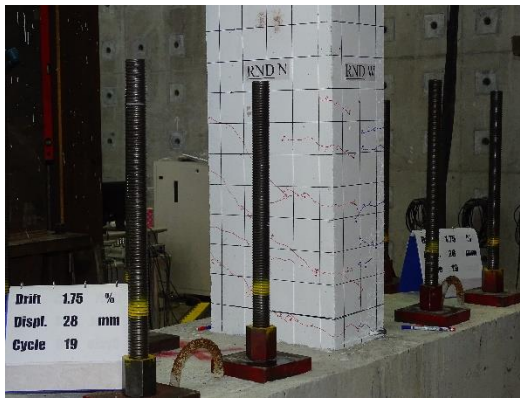
(k) $\theta = 1.5\%$



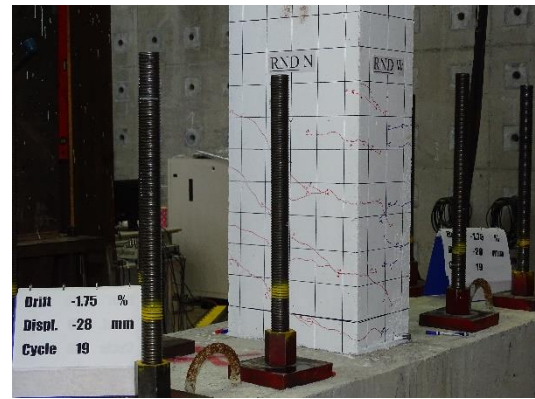
(l) $\theta = -1.5\%$

圖 3.25 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

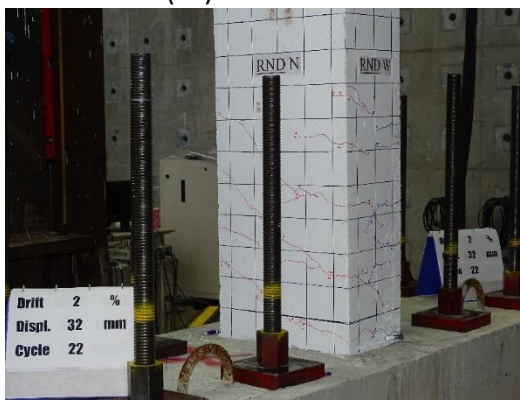
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



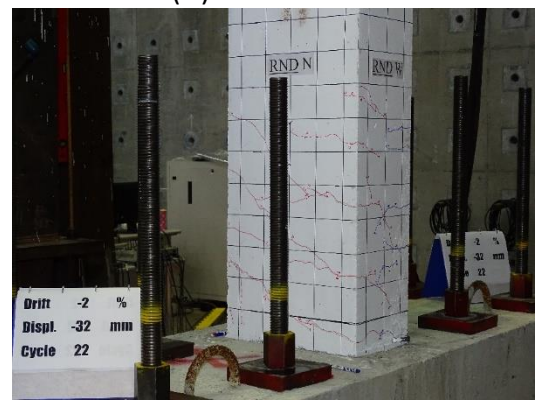
(m) $\theta = 1.75\%$



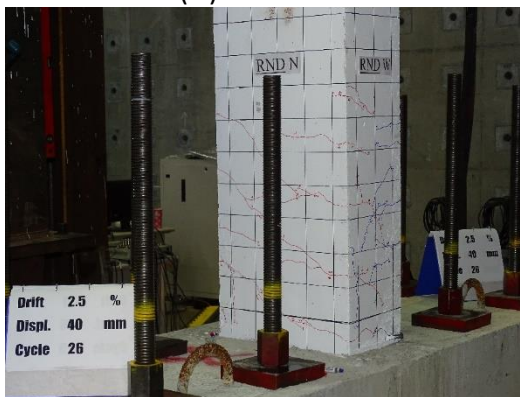
(n) $\theta = -1.75\%$



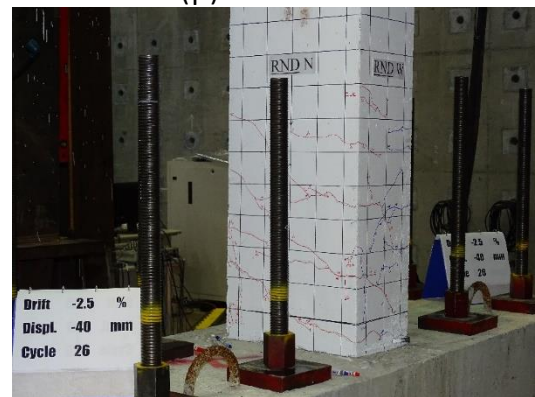
(o) $\theta = 2.0\%$



(p) $\theta = -2.0\%$

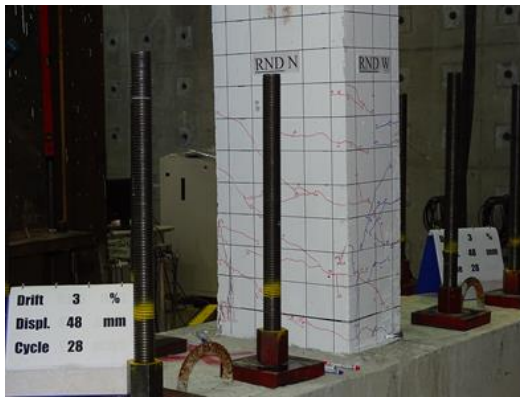


(q) $\theta = 2.5\%$



(r) $\theta = -2.5\%$

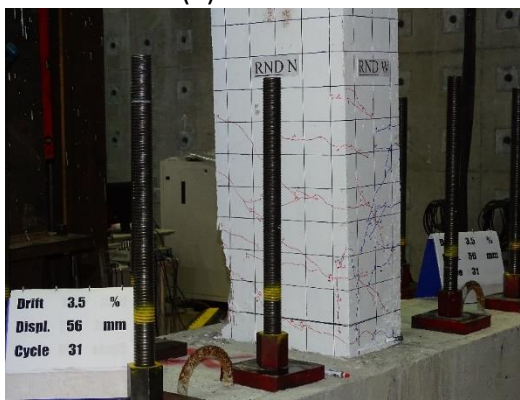
圖 3.26 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



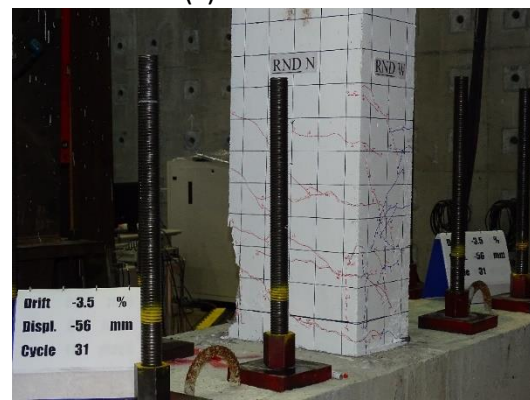
(s) $\theta = 3.0\%$



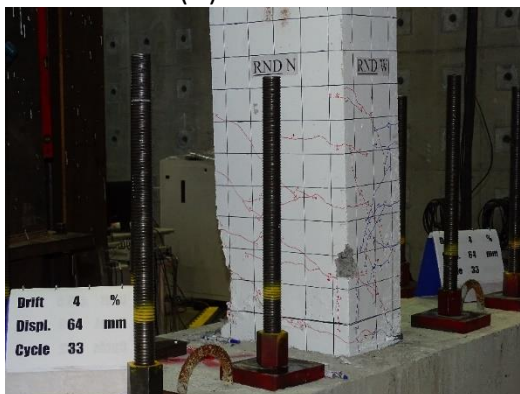
(t) $\theta = -3.0\%$



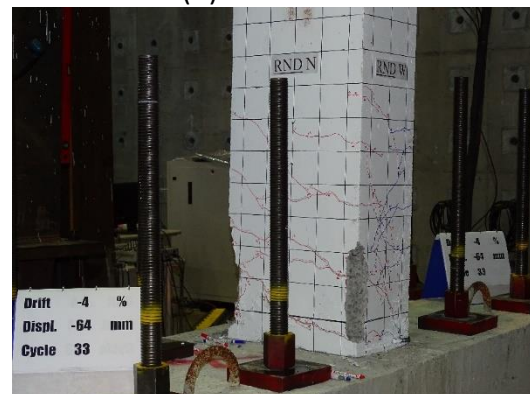
(u) $\theta = 3.5\%$



(v) $\theta = -3.5\%$



(w) $\theta = 4.0\%$



(x) $\theta = -4.0\%$

圖 3.27 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

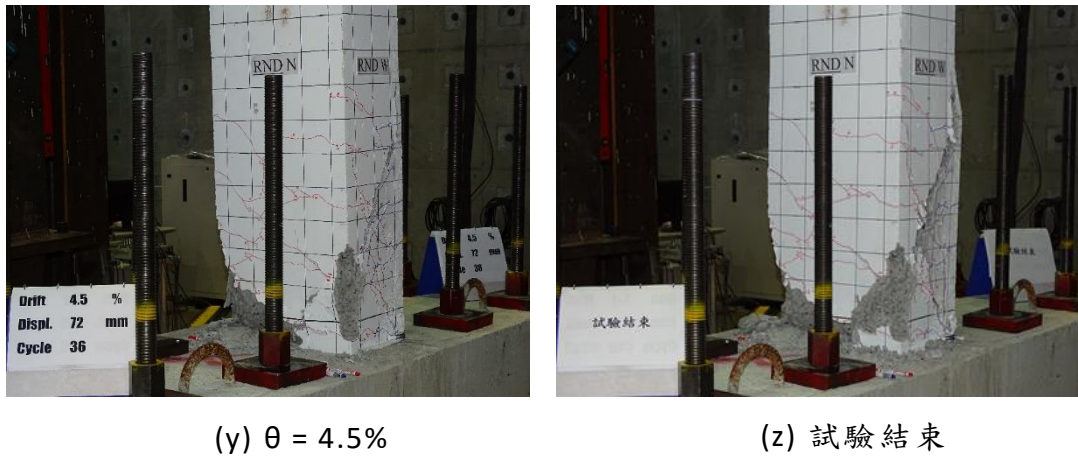


圖 3.28 試體 RND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

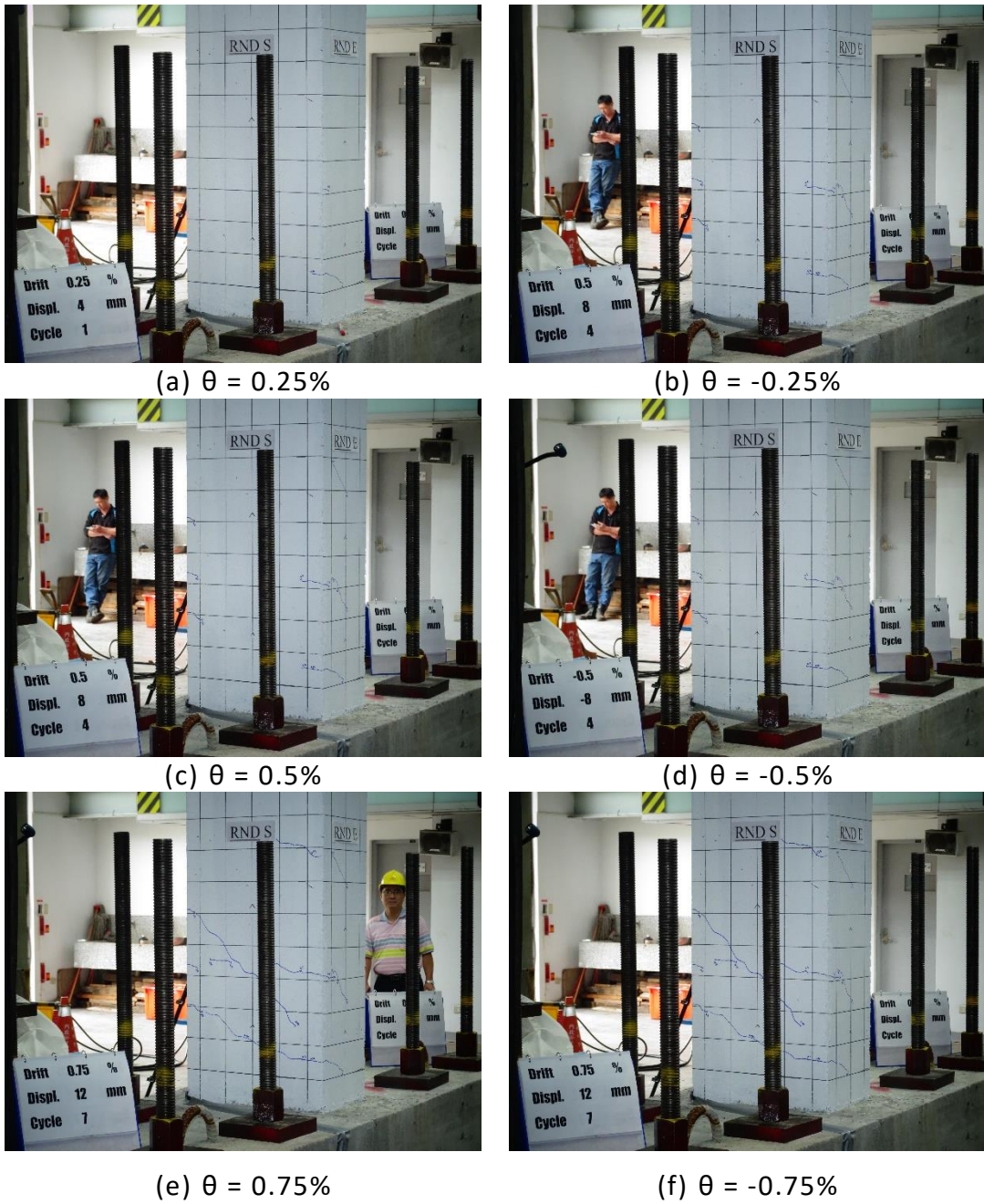
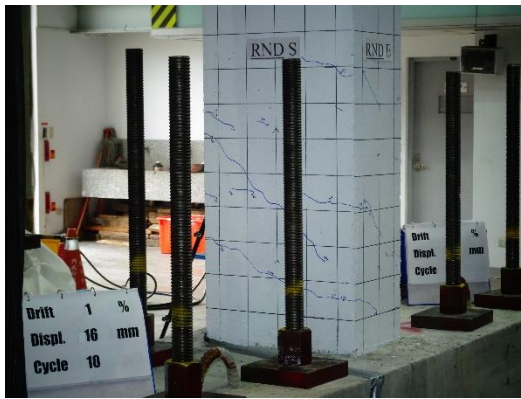
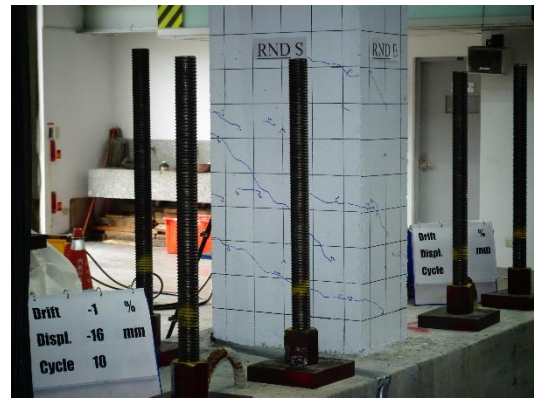


圖 3.29 試體 RND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

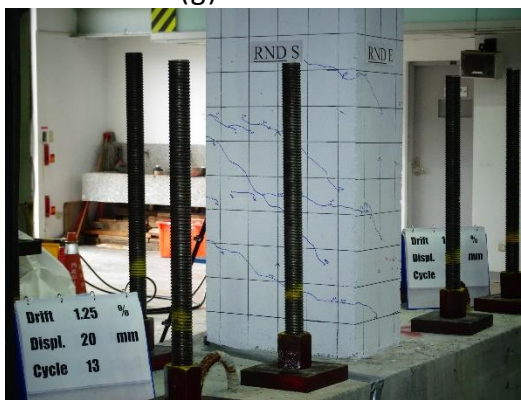
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



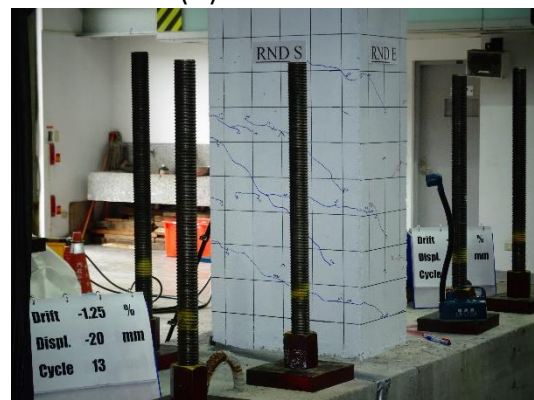
(g) $\theta = 1.0\%$



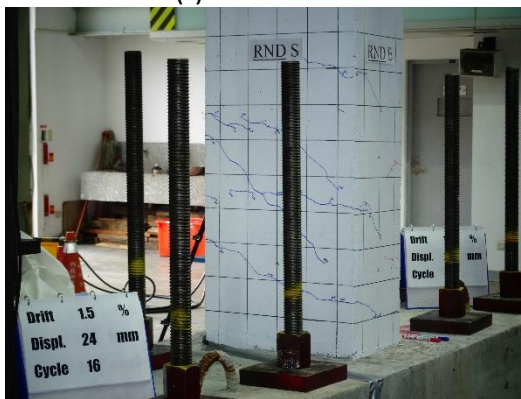
(h) $\theta = -1.0\%$



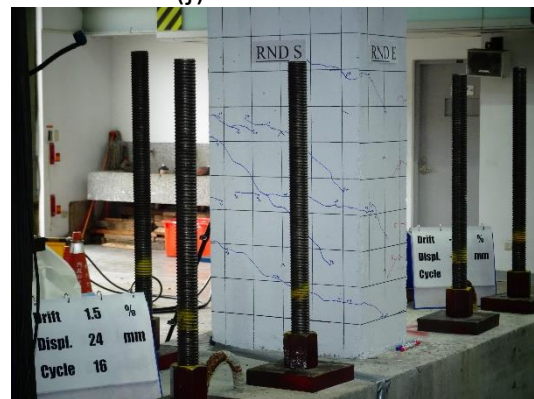
(i) $\theta = 1.25\%$



(j) $\theta = -1.25\%$

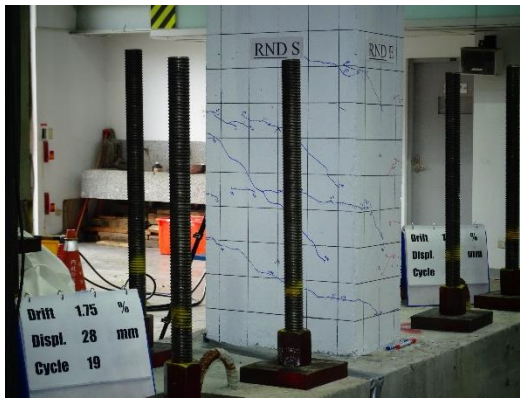


(k) $\theta = 1.5\%$

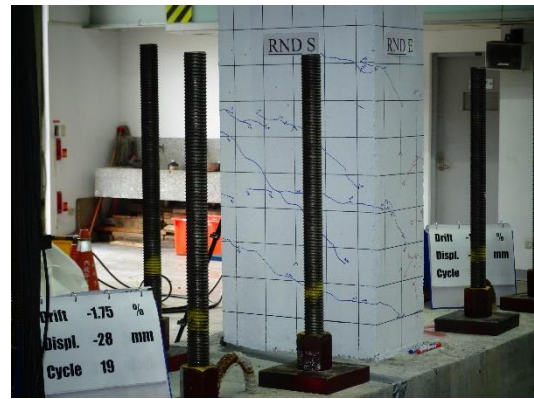


(l) $\theta = -1.5\%$

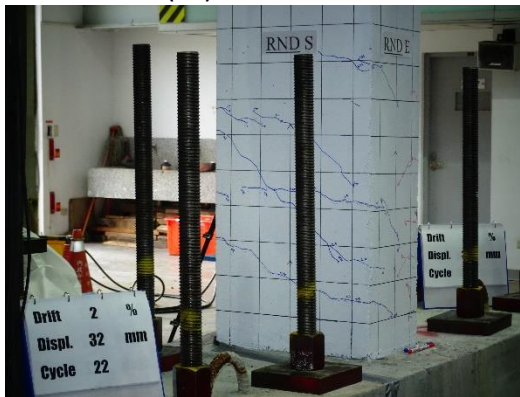
圖 3.30 RND 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



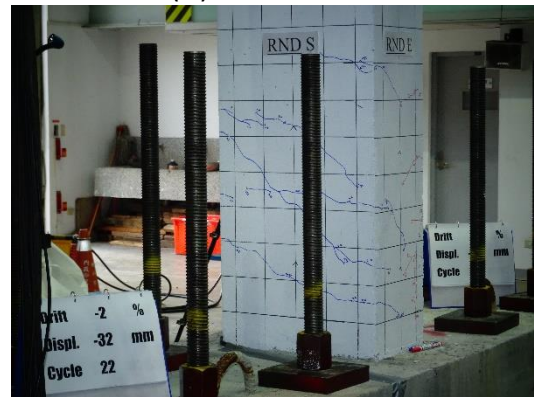
(m) $\theta = 1.75\%$



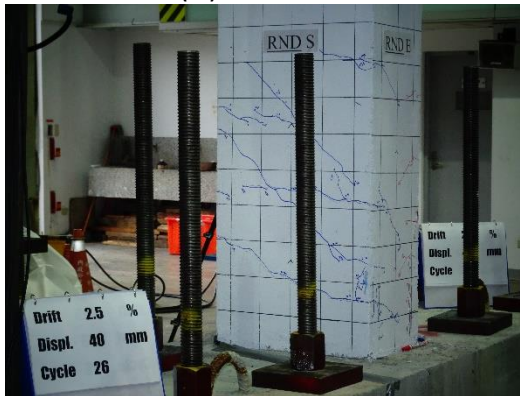
(n) $\theta = -1.75\%$



(o) $\theta = 2.0\%$



(p) $\theta = -2.0\%$



(q) $\theta = 2.5\%$



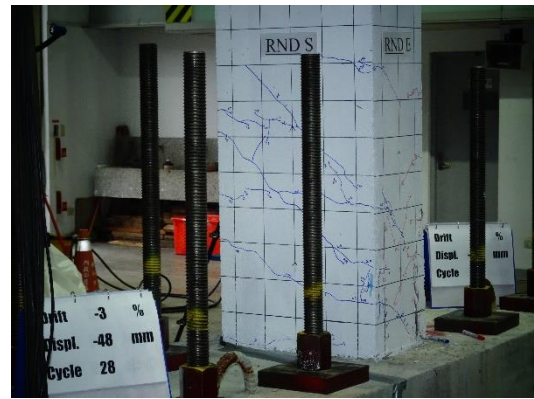
(r) $\theta = -2.5\%$

圖 3.31 RND 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

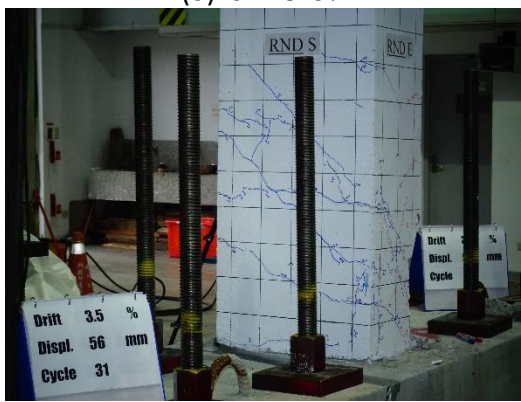
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



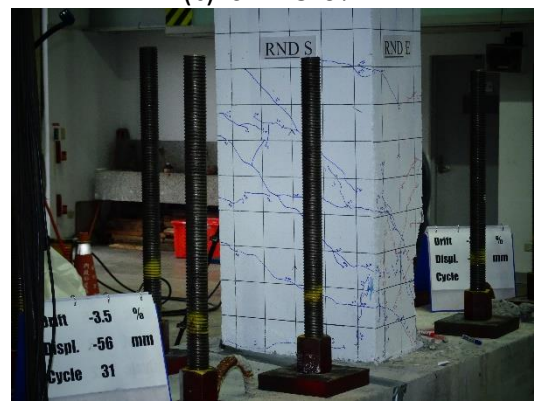
(s) $\theta = 3.0\%$



(t) $\theta = -3.0\%$



(u) $\theta = 3.5\%$



(v) $\theta = -3.5\%$



(w) $\theta = 4.0\%$

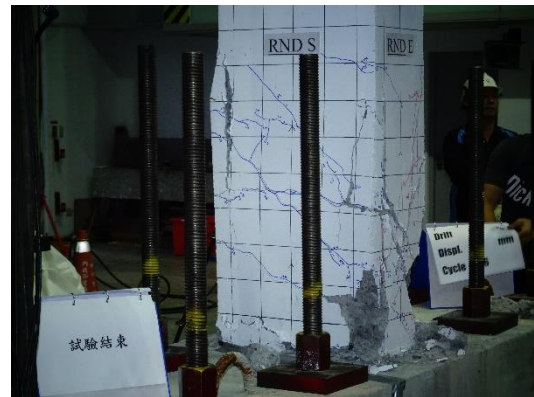


(x) $\theta = -4.0\%$

圖 3.32 RND 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(y) $\theta = 4.5\%$



(z) 試驗結束

圖 3.33 試體 RND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(a) 試體 RND 西側發生剪力破壞與保護層剝落



(b) 試體 RND 北側之破壞情形

圖 3.34 試體 RND 於試驗結束之破壞情形

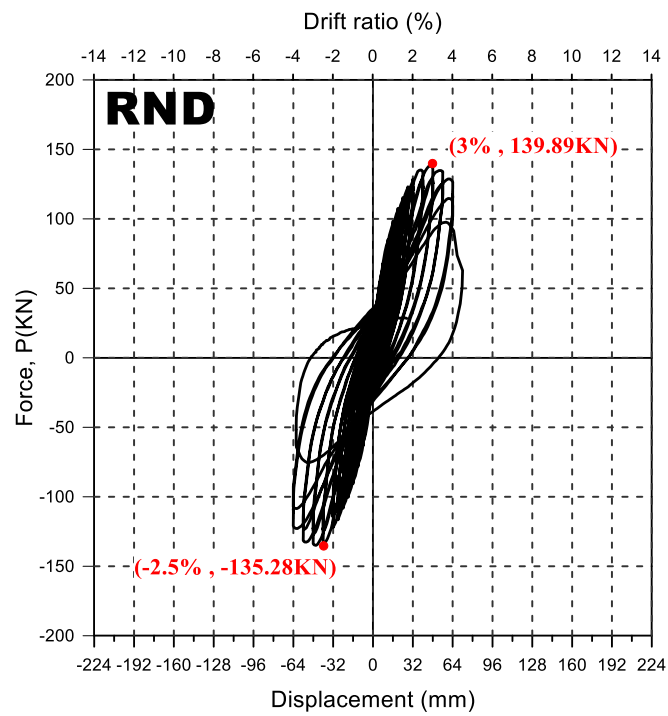


圖 3.35 試體 RND 遲滯迴圈

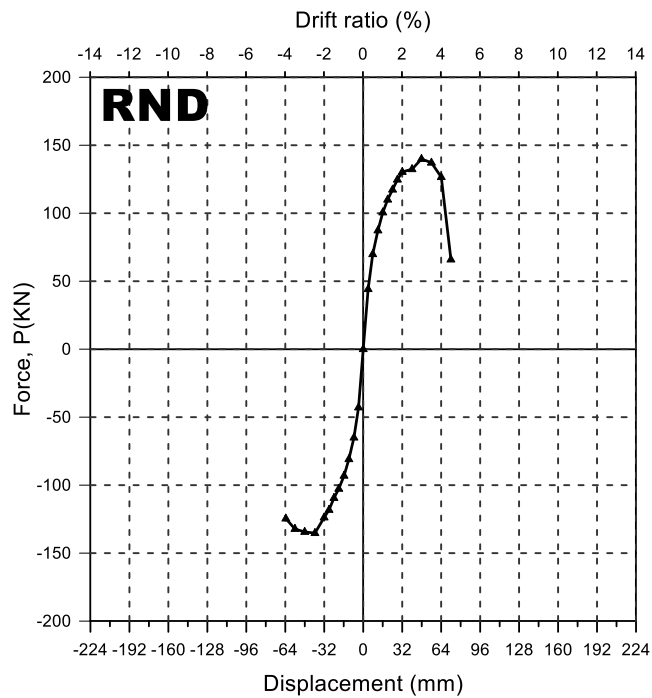


圖 3.36 試體 RND 強度包絡線

3.1.2 試體 RNDC2L

在位移比 1.5% 前，試體 RNDC2L 表面貼覆的 CFRP，均未發現裂縫產生。當位移比為 1.75% 的時，試體得南側及北側，自底部往上 22 至 36 公分範圍，CFRP 表面出現寬度約 1 公厘的微小水平裂縫。位移比達 2% 時，試體南側自底部往上 20 至 25 公分範圍，以及北側自底部往上 35 至 37 公分範圍，CFRP 表面出現微小水平裂縫，並分別水平向延伸至試體東側及西側。當移比於 -3% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 -154.3 KN，如表 3.6 所示。接著位移比達 3.5% 時，試體南側自底部往上約 8 至 10 公分範圍，CFRP 表面亦出現明顯水平裂縫，以及於試體北側自底部往上約 0 至 35 公分範圍與南側自底部往上約 0 至 20 公分範圍，CFRP 表面發生些微的面外鼓起。後續位移比至 4% 時，試體北側底部往上約 10 公分處，也出現明顯裂縫及些微鼓起的現象，此時位移比於 +4% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 +143.0 KN，如表 3.6 所示。接著當位移比達 9% 時，試體北側自底部往上約 0 至 40 公分範圍與南側自底部往上約 0 至 30 公分範圍，均出現多處水平向裂縫，部分垂直向裂縫，同時延伸至東側及西側面自底部往上約 0 至 40 公分範圍，均出現多處裂縫；並於試體北側 10 至 30 公分範圍，CFRP 表面明顯發生面外鼓起的現象。後續位移比為 10% 時，試體北側中間於 CFRP 鼓起處約自底部往上約 15 公分位置，水平向裂縫明顯擴大，其裂縫寬度約為 15 公厘，此時可清楚觀察到混凝土

層碎裂及部分 CFRP 貼片發生纖維破斷。最後，在位移比 11%時，試體北側自底部往上約 15 公分處，水平向裂縫寬度擴大為 20 公厘，約 1 公分寬度之 CFRP 貼片，發生纖維破斷；試體南側自底部往上約 8 公分及 11 公分等處，CFRP 貼片纖維破斷寬度約 0.5 公分，此時北側主筋已嚴重挫屈，試體側向強度迅速降低，停止實驗。

試體 RNDC2L 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。位於東與南側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。圖 3.5 為試體 RNDC2L 於試驗結束之破壞照片。圖 3.3 與圖 3.4 顯示試體 RNDC2L 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

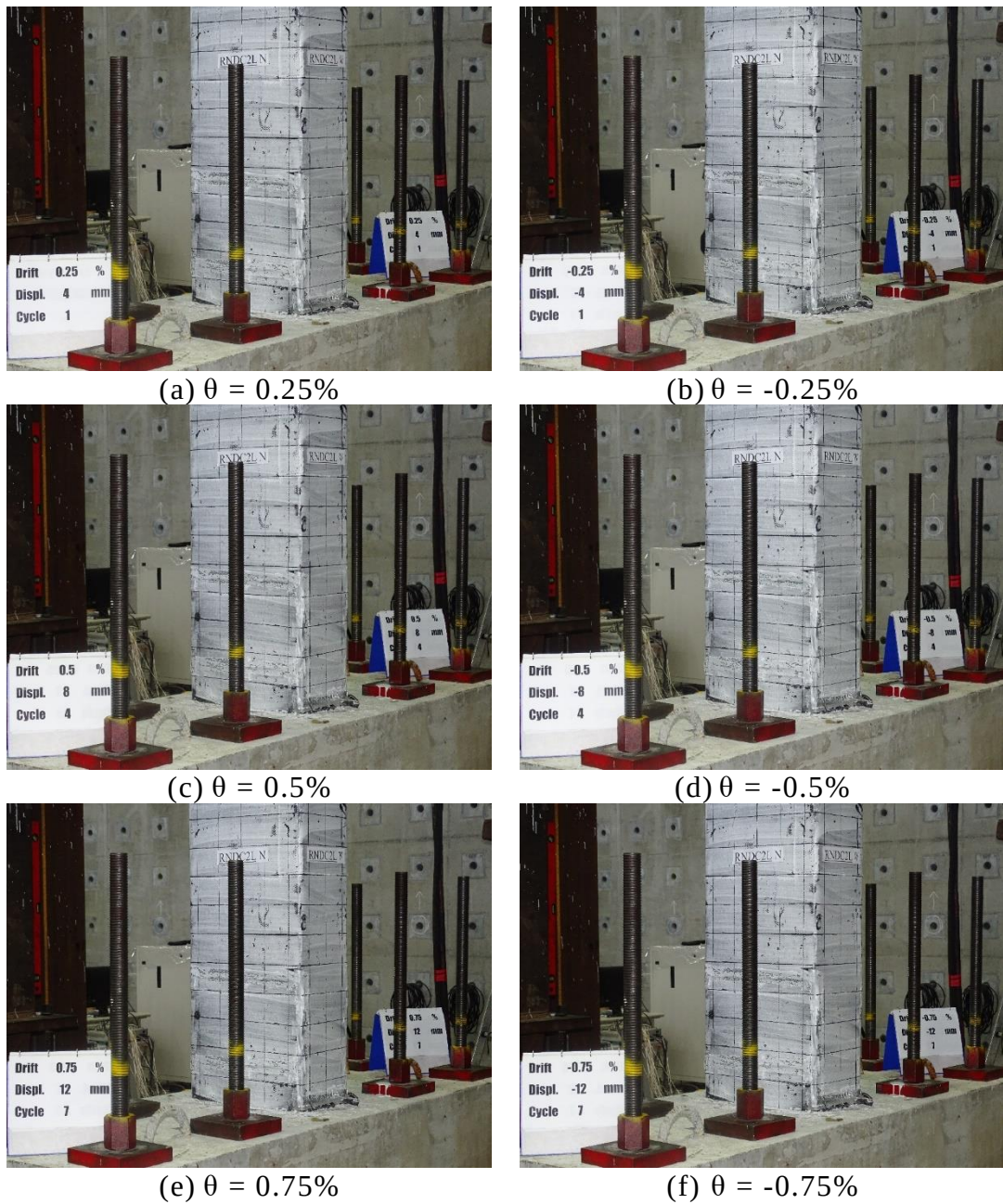


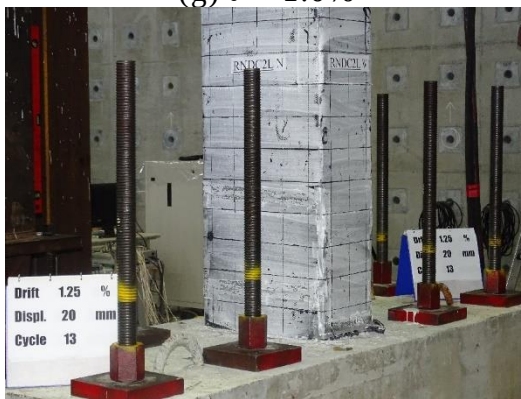
圖 3.37 試體 RNDCL2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



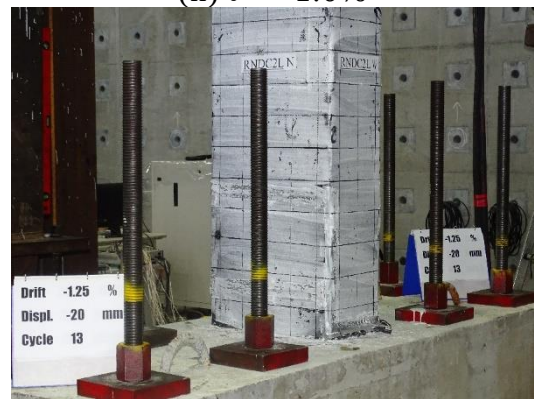
(g) $\theta = 1.0\%$



(h) $\theta = -1.0\%$



(i) $\theta = 1.25\%$



(j) $\theta = -1.25\%$



(k) $\theta = 1.5\%$



(l) $\theta = -1.5\%$

圖 3.38 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

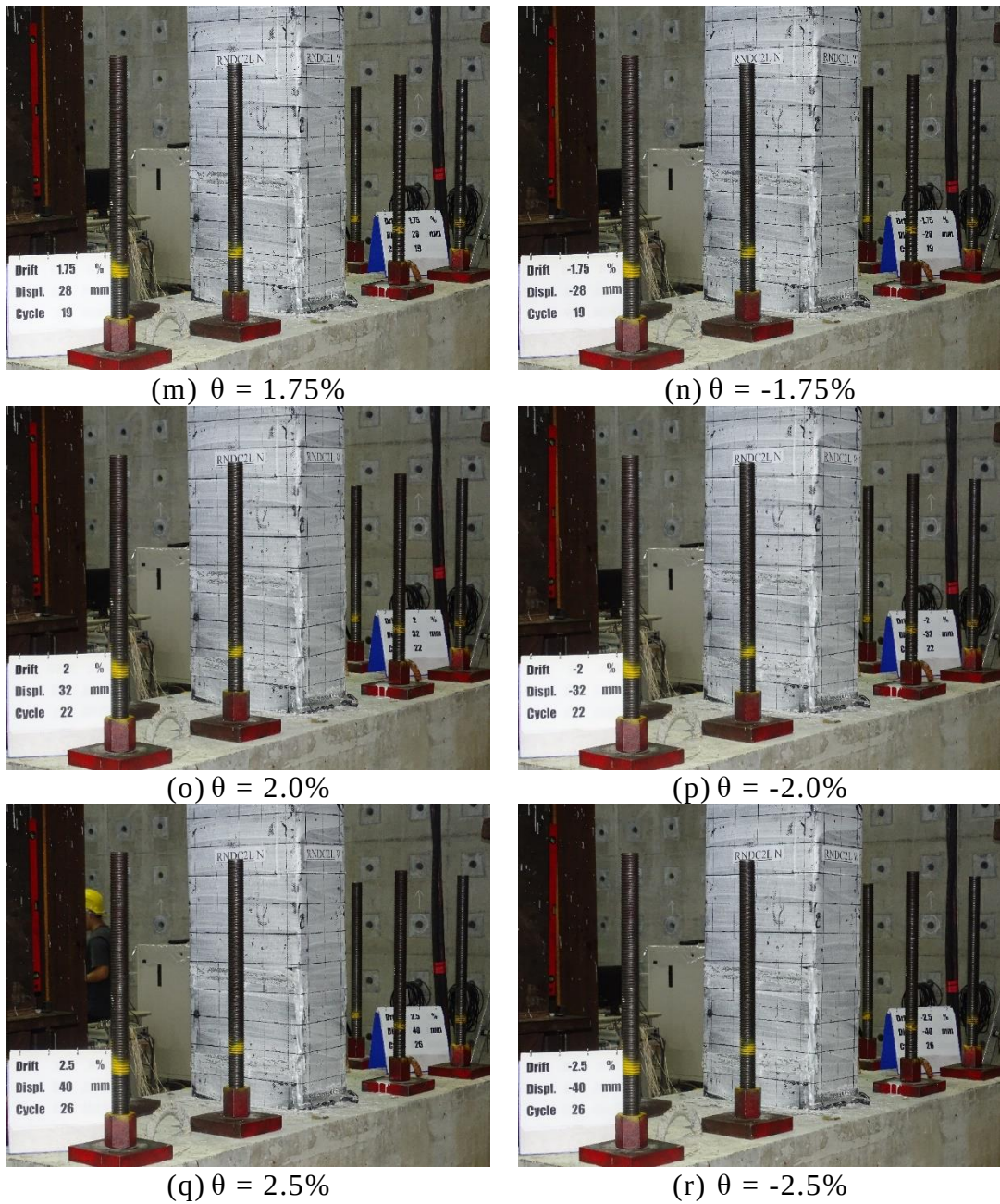


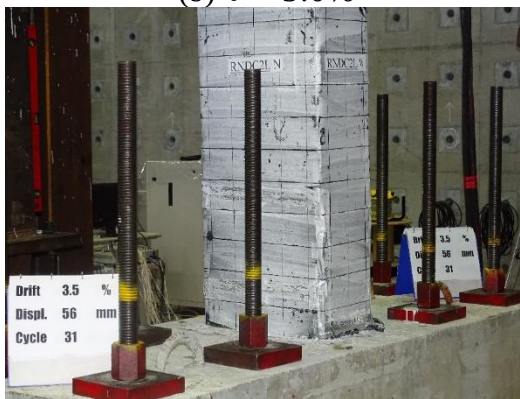
圖 3.39 試體 RNDCL2L 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



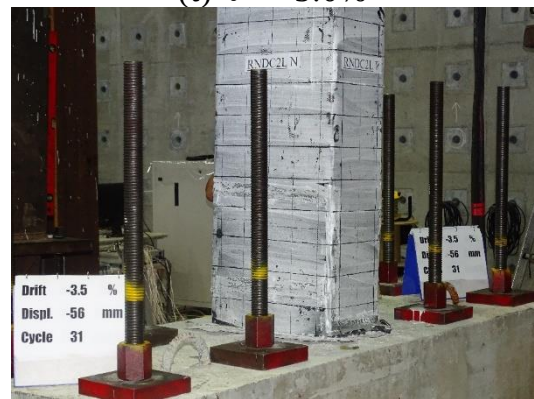
(s) $\theta = 3.0\%$



(t) $\theta = -3.0\%$



(u) $\theta = 3.5\%$



(v) $\theta = -3.5\%$



(w) $\theta = 4.0\%$



(x) $\theta = -4.0\%$

圖 3.40 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

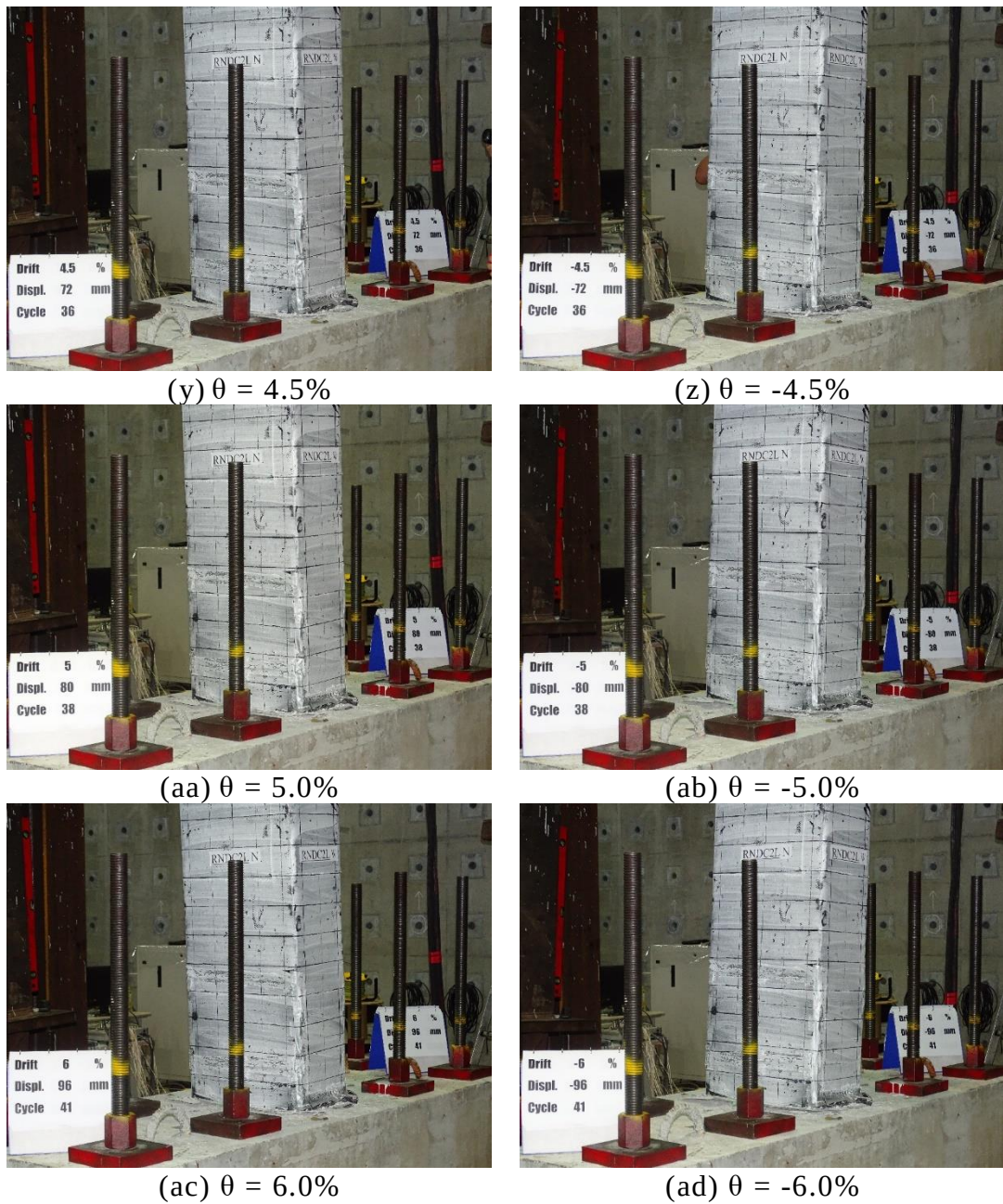


圖 3.41 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

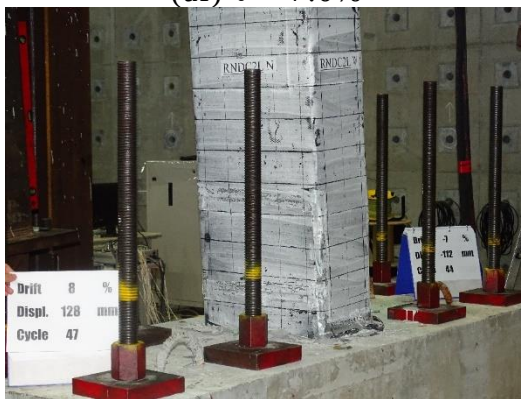
第三章 試驗結果與討論



(af) $\theta = 7.0\%$



(ag) $\theta = -7.0\%$



(ah) $\theta = 8.0\%$



(ai) $\theta = -8.0\%$



(aj) $\theta = 9.0\%$



(ak) $\theta = -9.0\%$

圖 3.42 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



(al) $\theta = 10.0\%$



(am) $\theta = -10.0\%$

圖 3.43 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照

片

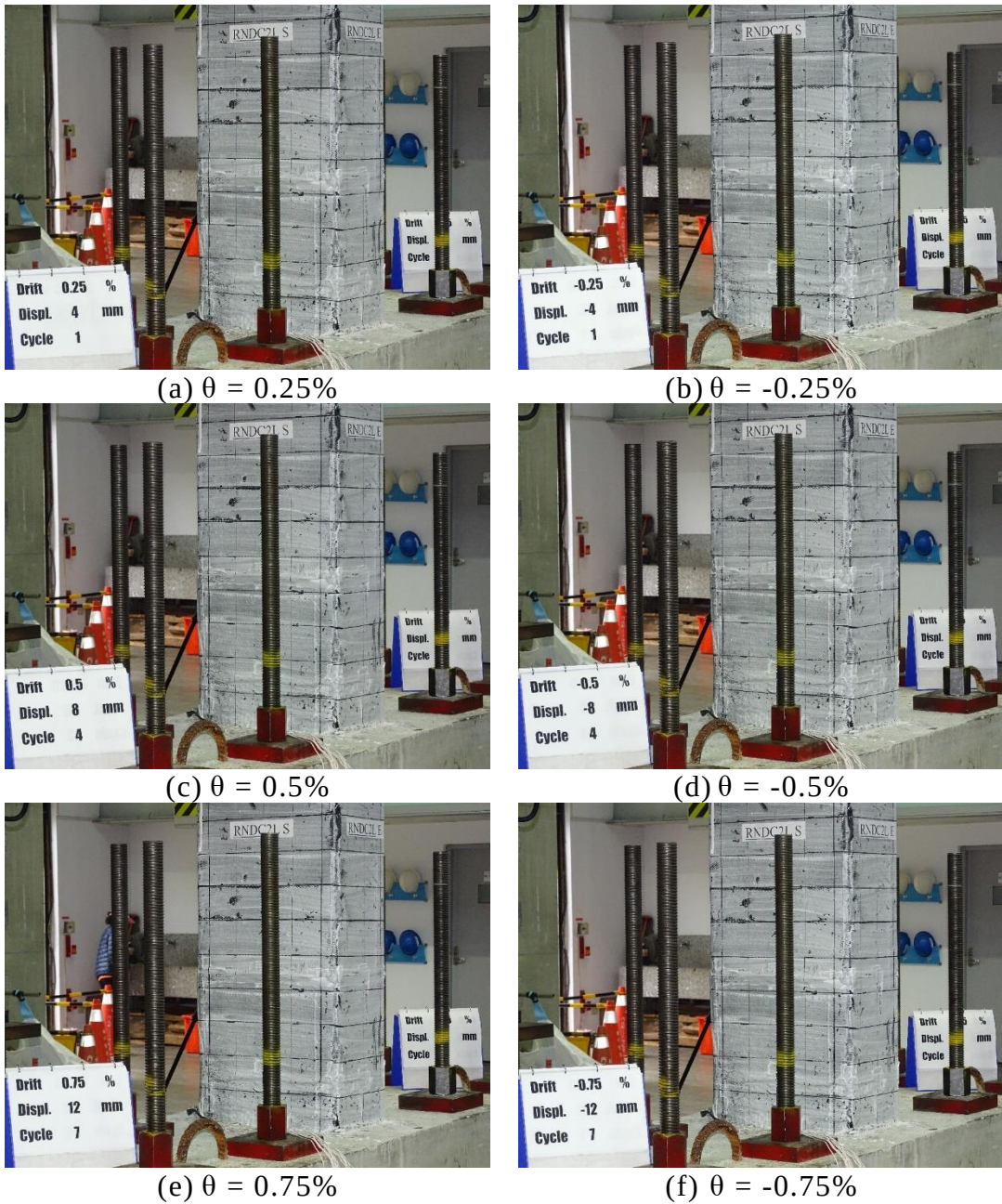


圖 3.44 試體 RND2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

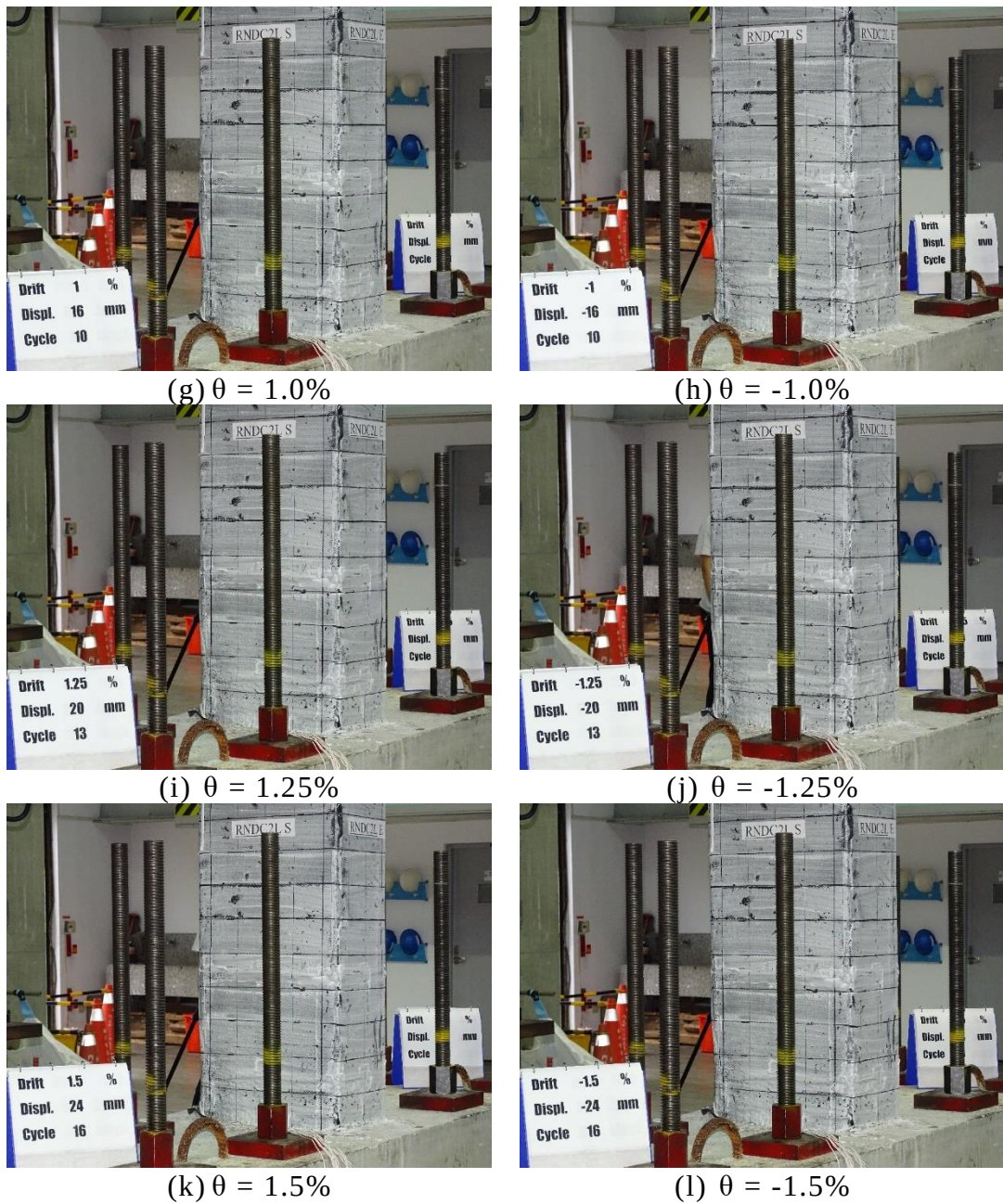


圖 3.45 試體 RND2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(m) $\theta = 1.75\%$



(n) $\theta = -1.75\%$



(o) $\theta = 2.0\%$



(p) $\theta = -2.0\%$



(q) $\theta = 2.5\%$



(r) $\theta = -2.5\%$

圖 3.46 試體 RNDCL 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

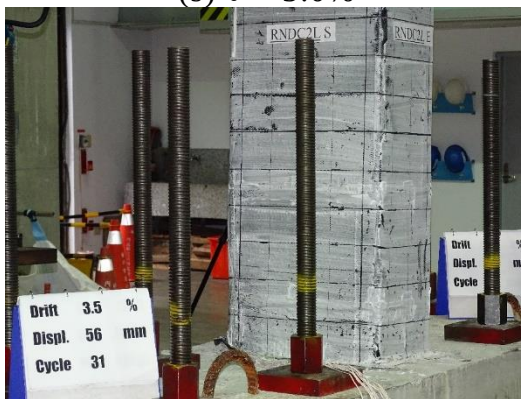
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



(s) $\theta = 3.0\%$



(t) $\theta = -3.0\%$



(u) $\theta = 3.5\%$



(v) $\theta = -3.5\%$



(w) $\theta = 4.0\%$



(x) $\theta = -4.0\%$

圖 3.47 試體 RNDCL2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

第三章 試驗結果與討論

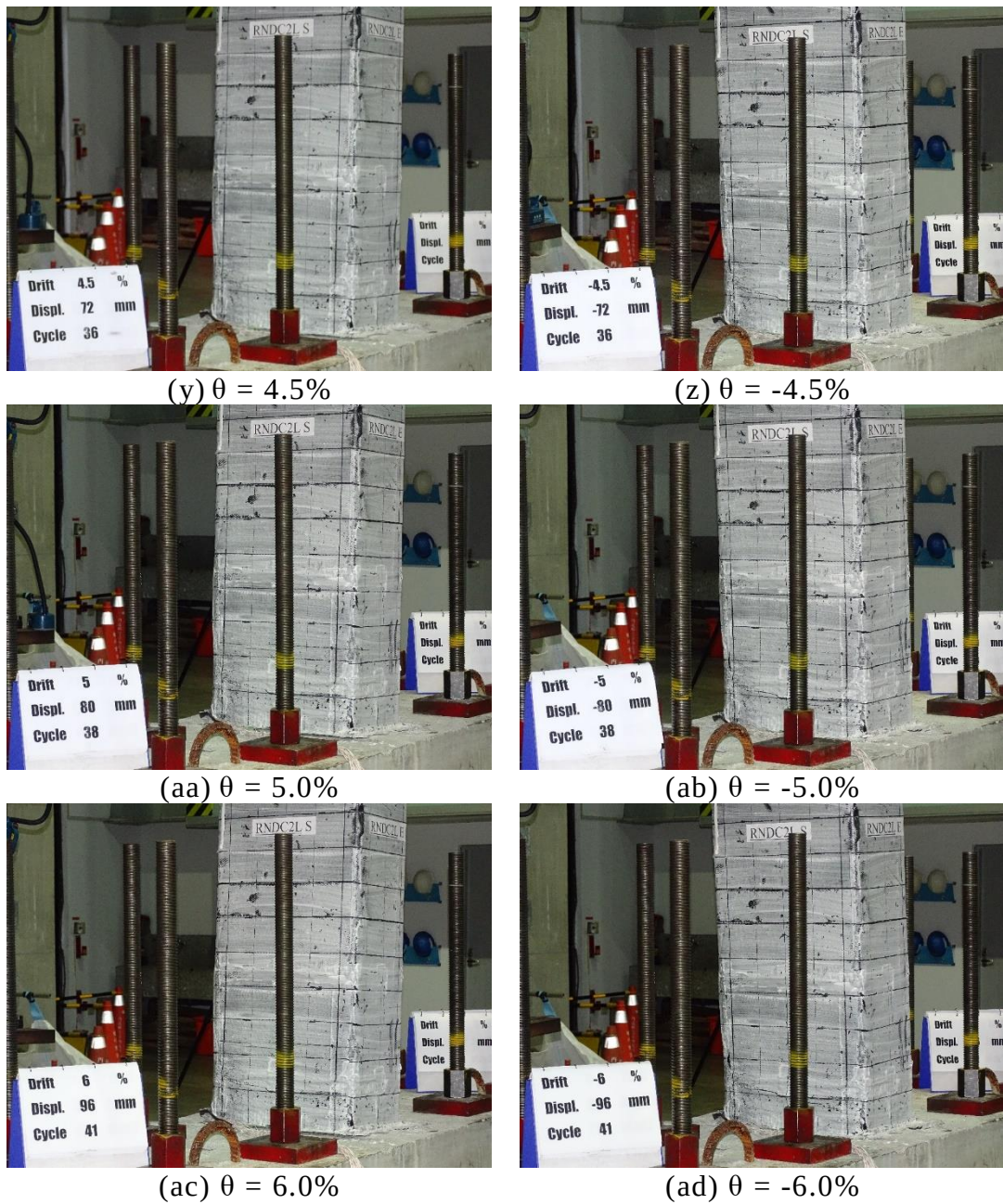


圖 3.48 試體 RNDCL2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



(ae) $\theta = 7.0\%$



(af) $\theta = -7.0\%$



(ag) $\theta = 8.0\%$



(ah) $\theta = -8.0\%$



(ai) $\theta = 9.0\%$



(aj) $\theta = -9.0\%$

圖 3.49 試體 RNDCL 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(ak) $\theta = 10.0\%$



(al) $\theta = -10.0\%$

圖 3.50 試體 RND2L 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(a) 試體 RNDC2L 南側發生剪力破壞與保護層剝落



(b) 試體 RNDC2L 北側之破壞情形

圖 3.51 試體 RNDC2L 於試驗結束之破壞情形

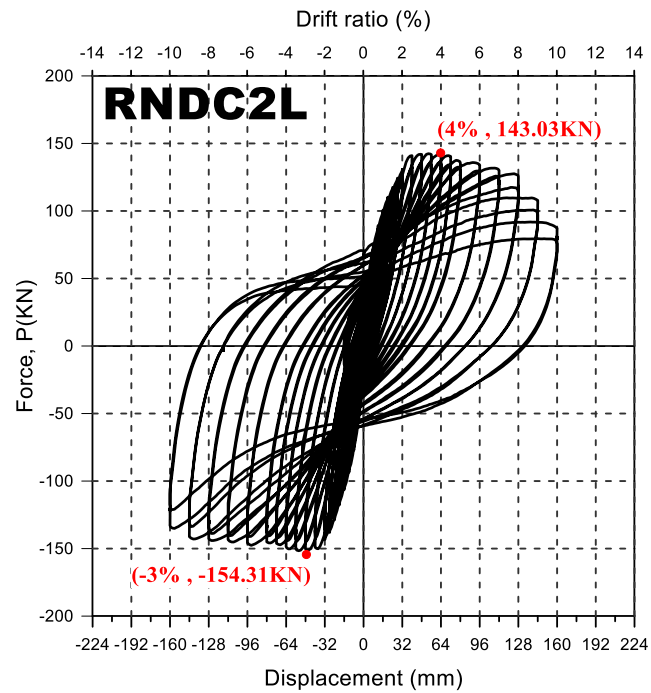


圖 3.52 試體 RNDC2L 遲滯迴圈

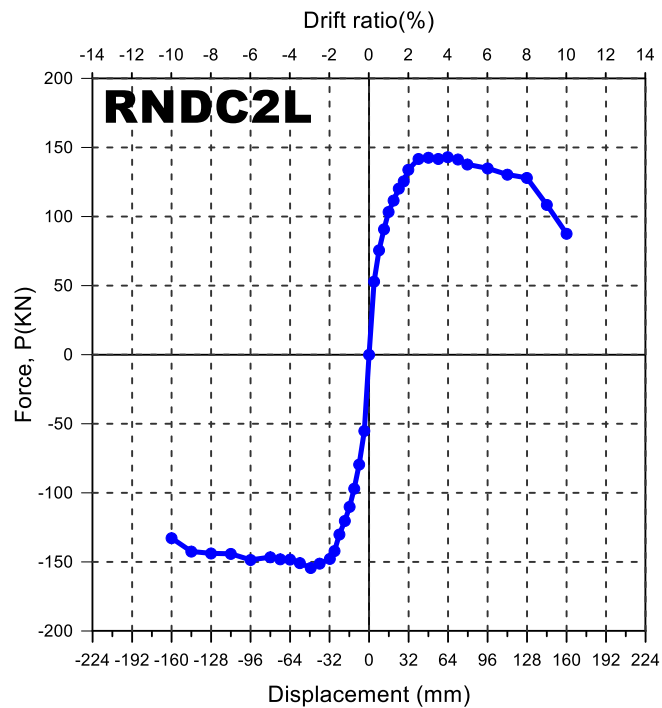


圖 3.53 試體 RNDC2L 強度包絡線

3.1.3 試體 RNDC4L

在位移比 3% 前，試體 RNDC4L 表面的 CFRP，均未發現裂縫及鼓起，當位移比於 +3% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 +150.1 kN，如表 3.6 所示。當位移比為 3.5% 時，試體的南面及北面，自底部往上約 3 公分處，CFRP 表面出現些微面外鼓起的現象，而北面比南面明顯；當位移比於 -3.5% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 -149.1 kN，如表 3.6 所示。直至位移比 5.5% 之前，均未發現 CFRP 表面水平向開裂的情形。接著當位移比達 6% 時，試體南面中間自底部往上約 13 公分處，發現 CFRP 水平向開裂，並延伸至東面及西面，以及東北面角隅自底部往上約 18 公分處，CFRP 表面出現寬度小於 1 公厘的微小裂縫。後續位移比達 7% 時，試體北面自底部往上約 12 公分處，亦出現水平向開裂的現象，裂縫寬度約 2 公厘，並延伸至東及西兩面。當位移比達到 9% 時，南面及北面的 CFRP 裂縫明顯擴大，水平裂縫最大寬度約 15 公厘，此時可清楚看到表層混凝土碎裂情形。後續於位移比 10% 時，試體北面自底部往上 0 至 20 公分範圍，出現明顯面外鼓起的現象。並且於位移比 11% 時，試體北面自底部往上 0 至 30 公分範圍，多處出現水平向裂縫，以及面外鼓起情形，隨試體側向變位之加大愈趨明顯。最後，於位移比 12% 時，試體北側自底部往上約 12 公分處，水平向裂縫寬度擴大為 10 公厘，約 5 公厘寬度之 CFRP 貼片，

發生纖維破斷；試體南側自底部往上約 13 公分等處，CFRP 貼片表面有水平向裂縫，北側及南側水平向裂縫，均延伸至東側及西側 2 面，此時北側主筋已挫屈，試體側向強度迅速降低，停止實驗。

試體 RNDC4L 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。位於東與南側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。圖 3.5 為試體 RNDC4L 於試驗結束之破壞照片。圖 3.3 與圖 3.4 顯示試體 RNDC4L 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

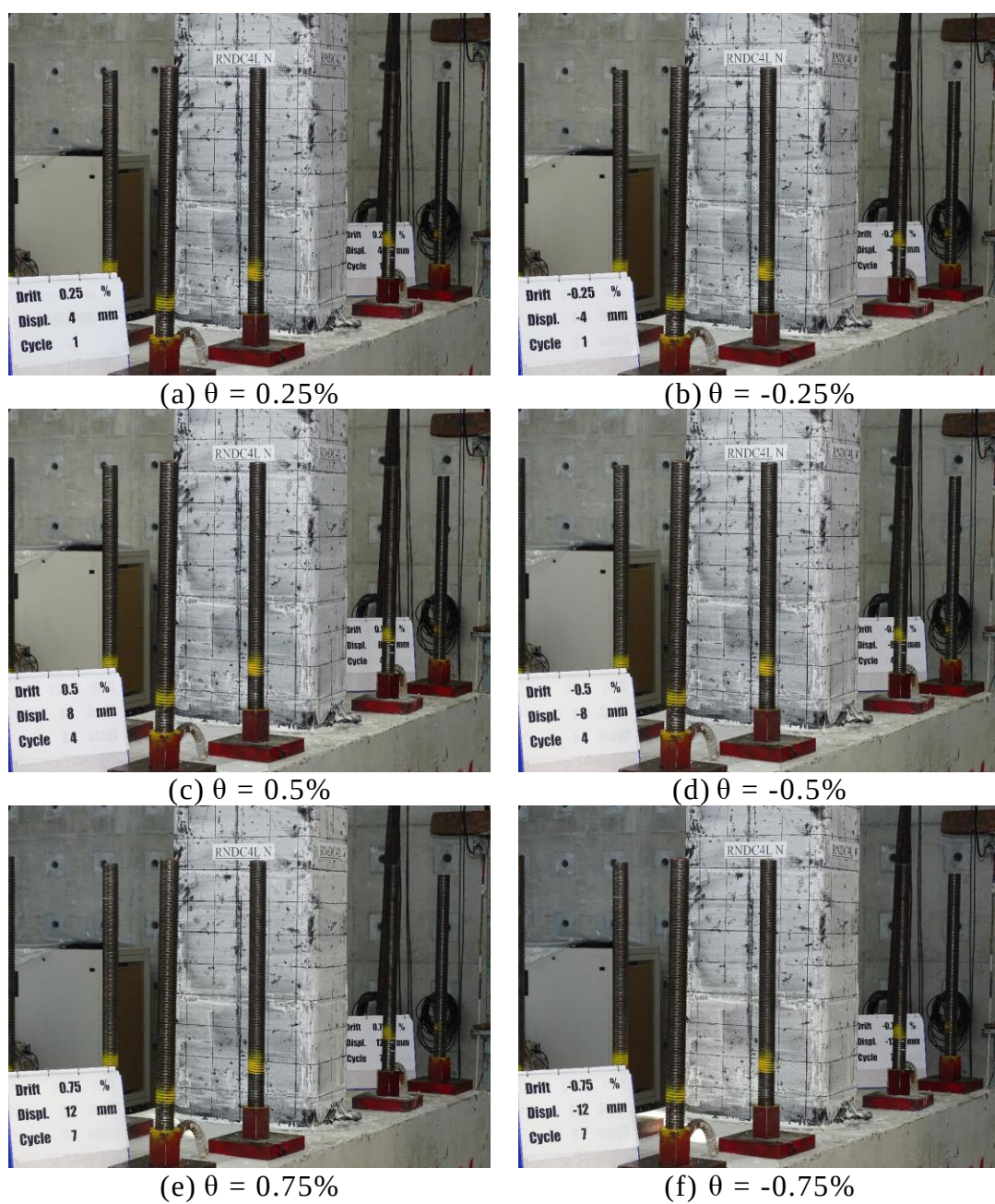


圖 3.54 RNDC4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

第三章 試驗結果與討論

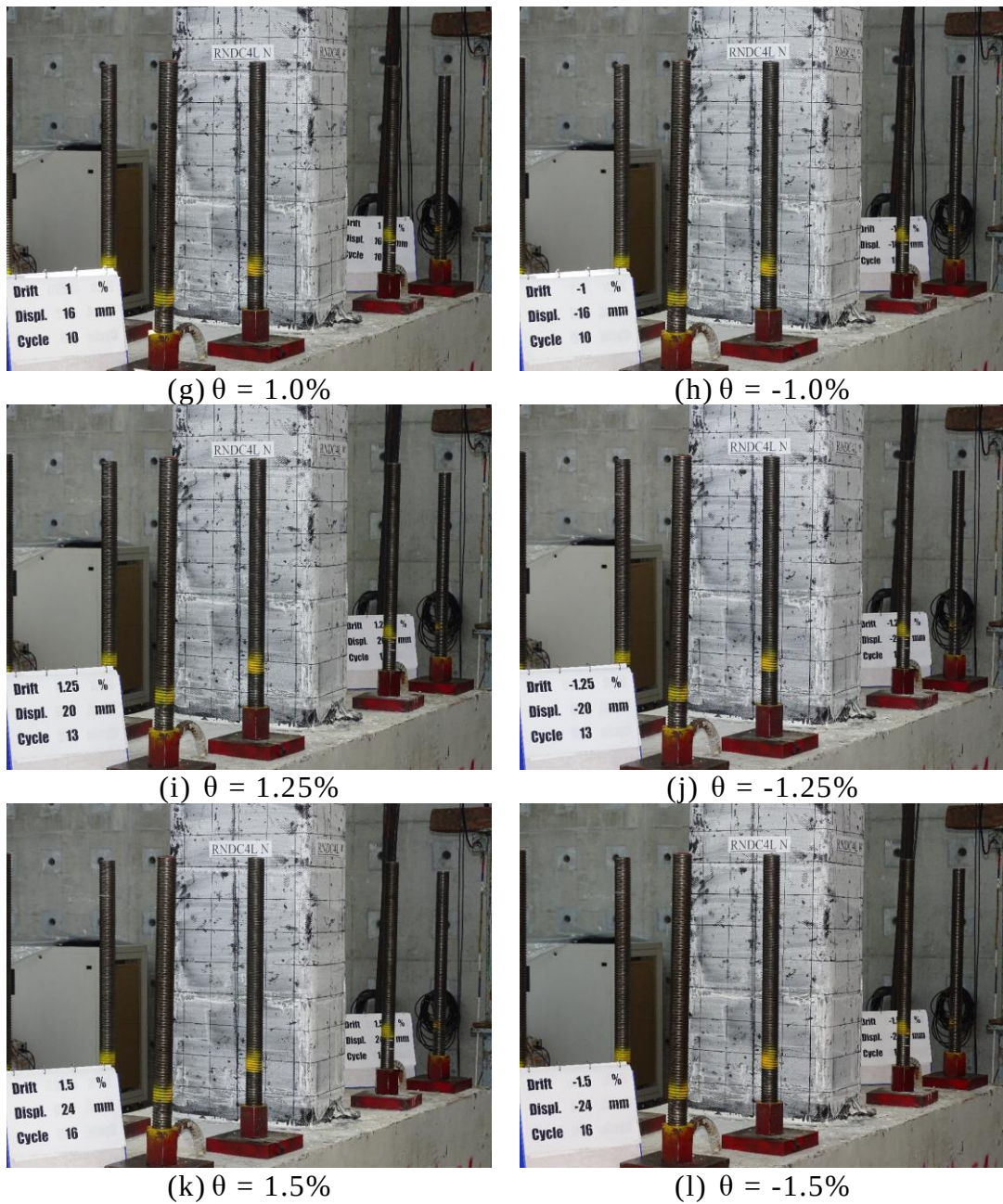
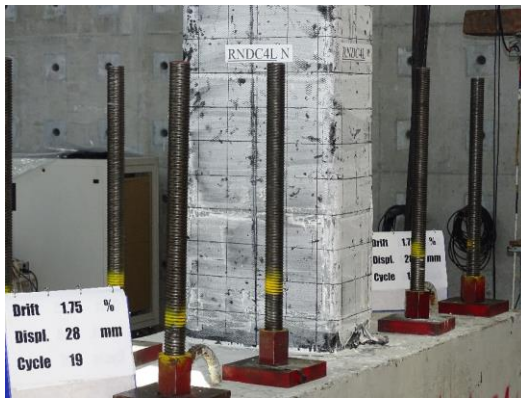
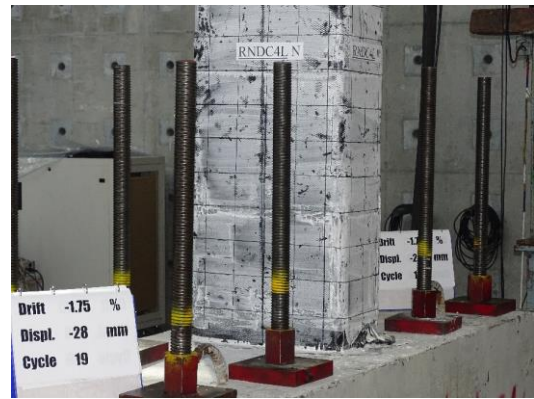


圖 3.55 RND4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



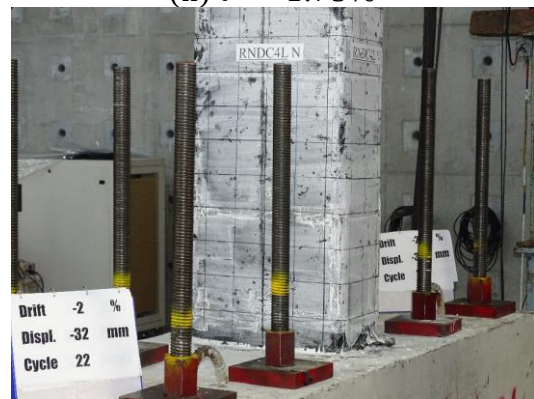
(m) $\theta = 1.75\%$



(n) $\theta = -1.75\%$



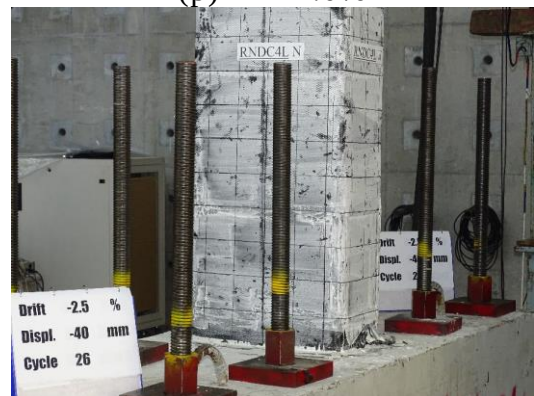
(o) $\theta = 2.0\%$



(p) $\theta = -2.0\%$



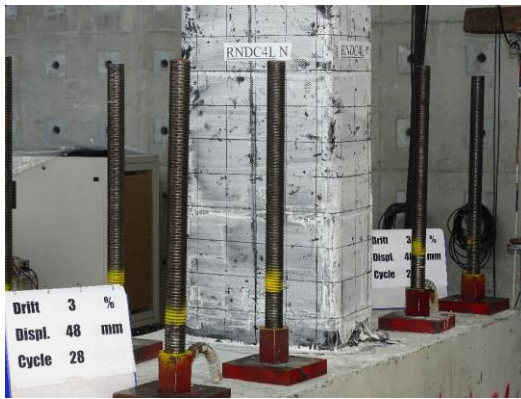
(q) $\theta = 2.5\%$



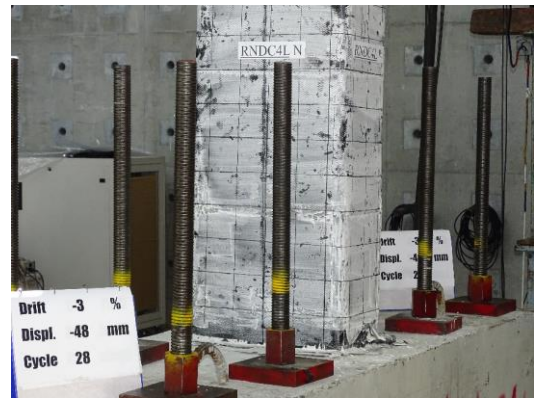
(r) $\theta = -2.5\%$

圖 3.56 RND4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

第三章 試驗結果與討論



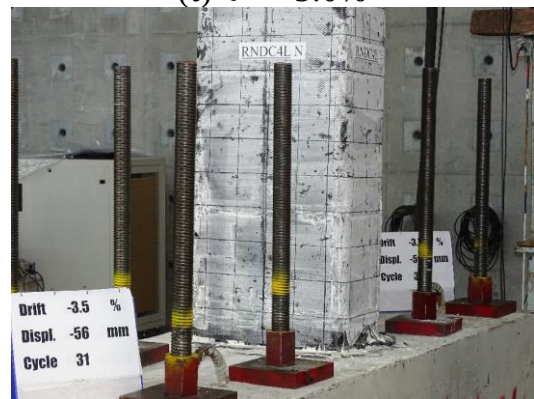
(s) $\theta = 3.0\%$



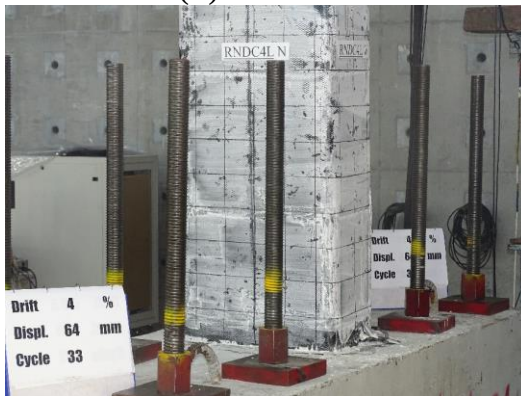
(t) $\theta = -3.0\%$



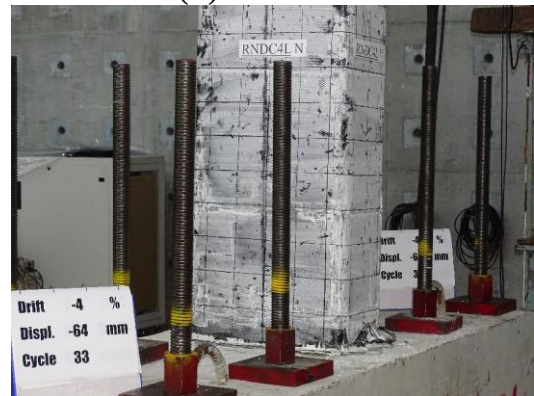
(u) $\theta = 3.5\%$



(v) $\theta = -3.5\%$



(w) $\theta = 4.0\%$



(x) $\theta = -4.0\%$

圖 3.57 RNDCL 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

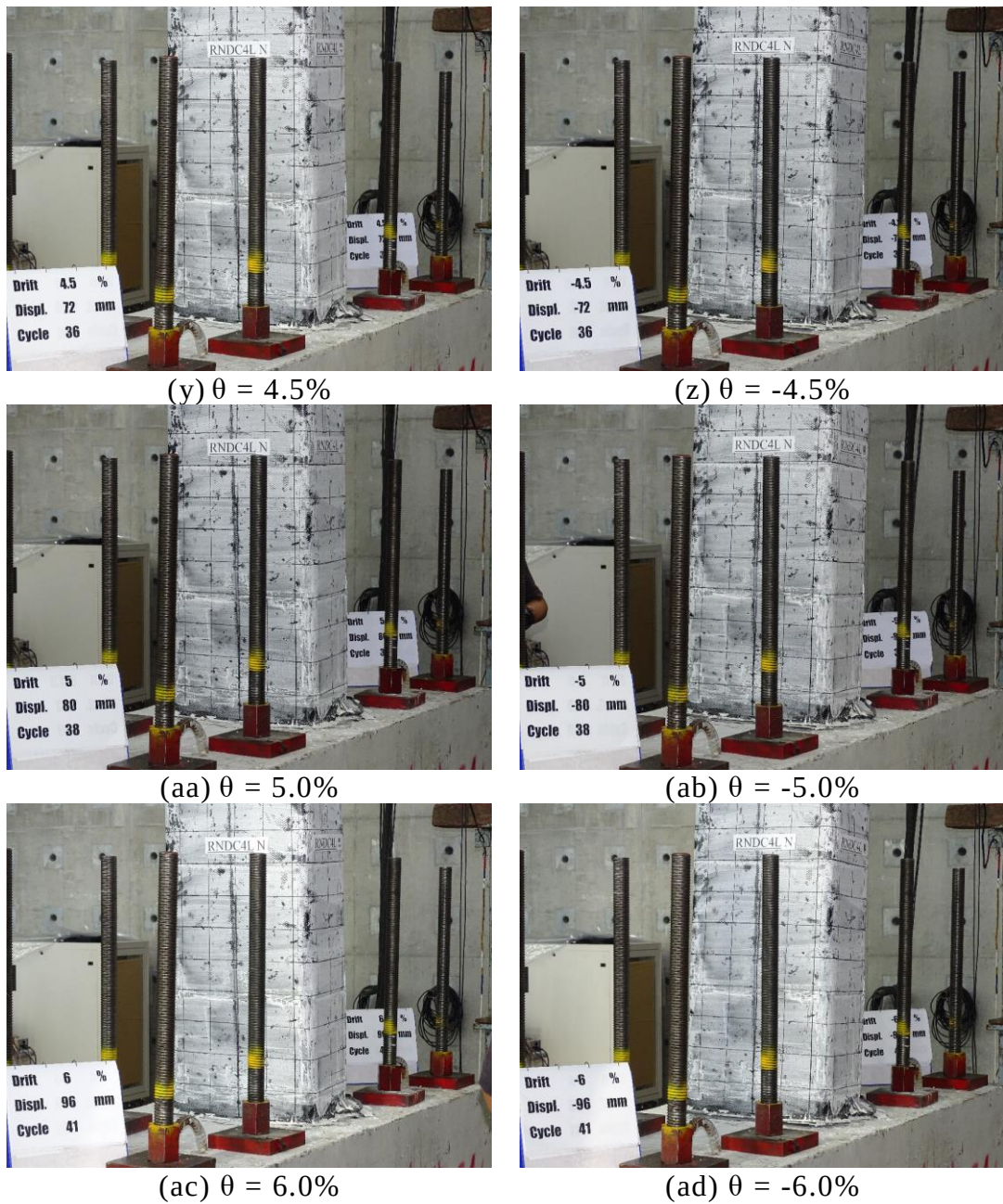
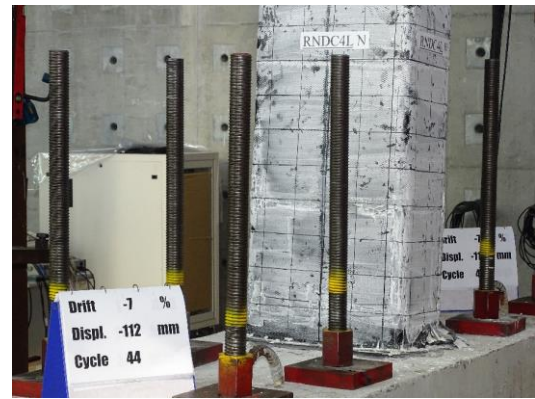


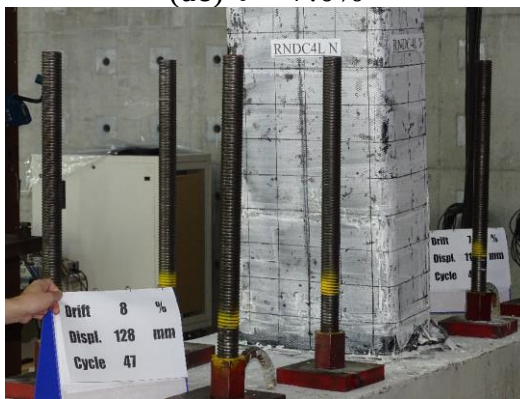
圖 3.58 RND4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



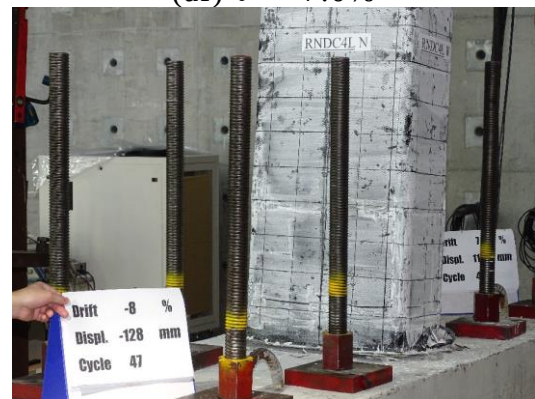
(ae) $\theta = 7.0\%$



(af) $\theta = -7.0\%$



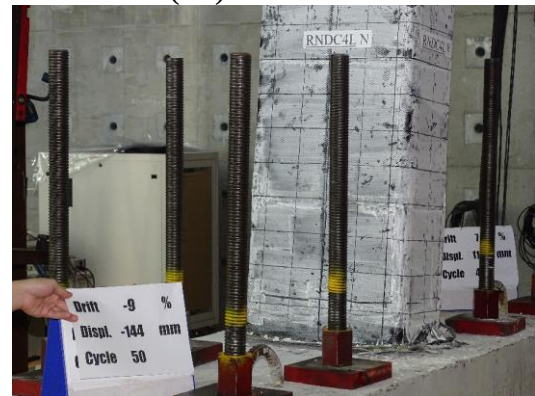
(ag) $\theta = 8.0\%$



(ah) $\theta = -8.0\%$



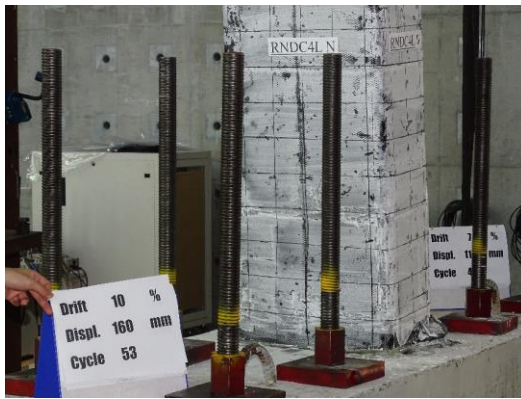
(ai) $\theta = 9.0\%$



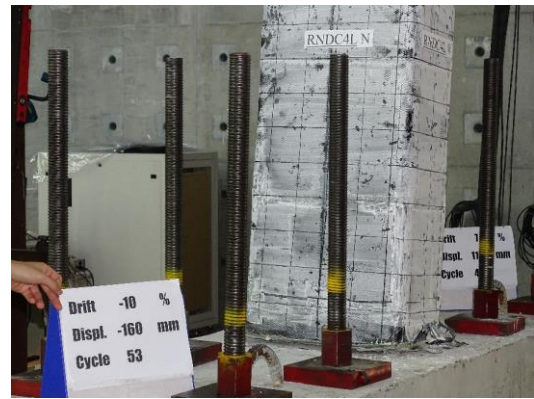
(aj) $\theta = -9.0\%$

圖 3.59 RND4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

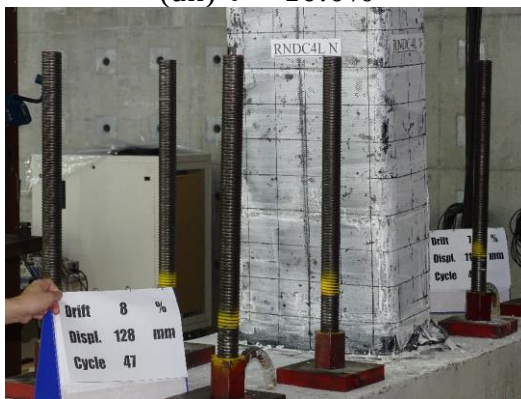
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



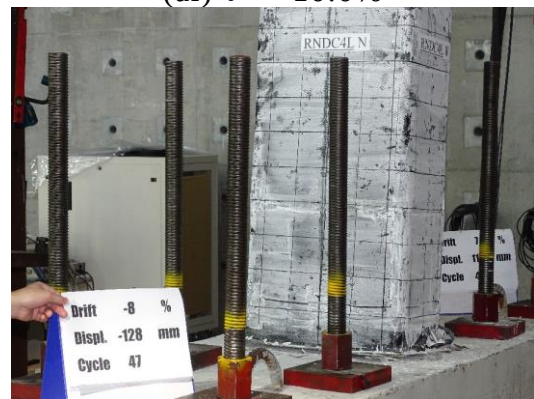
(ak) $\theta = 10.0\%$



(al) $\theta = -10.0\%$



(am) $\theta = 11.0\%$



(an) $\theta = -11.0\%$

圖 3.60 RND4L 試體西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

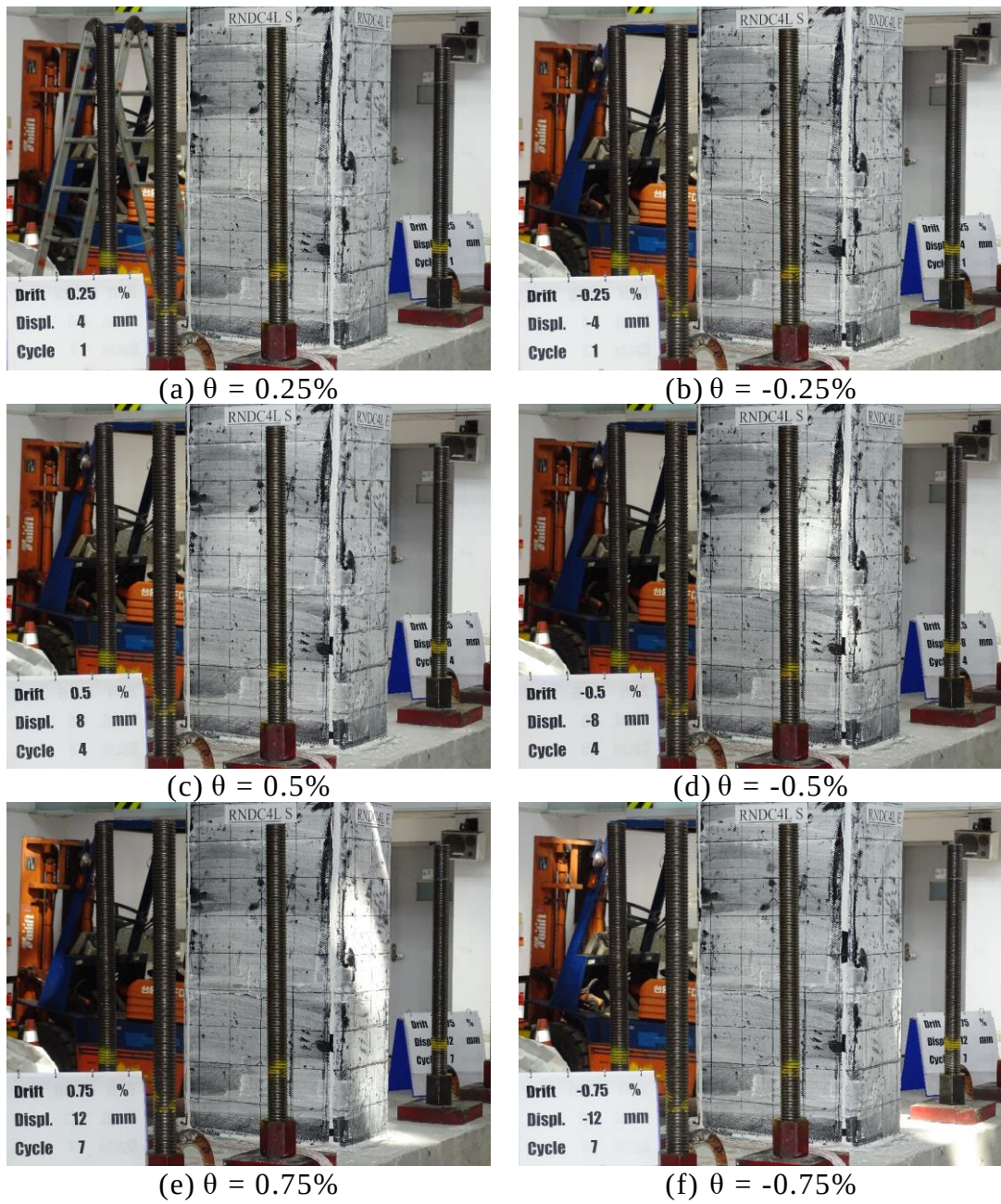


圖 3.61 RND4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

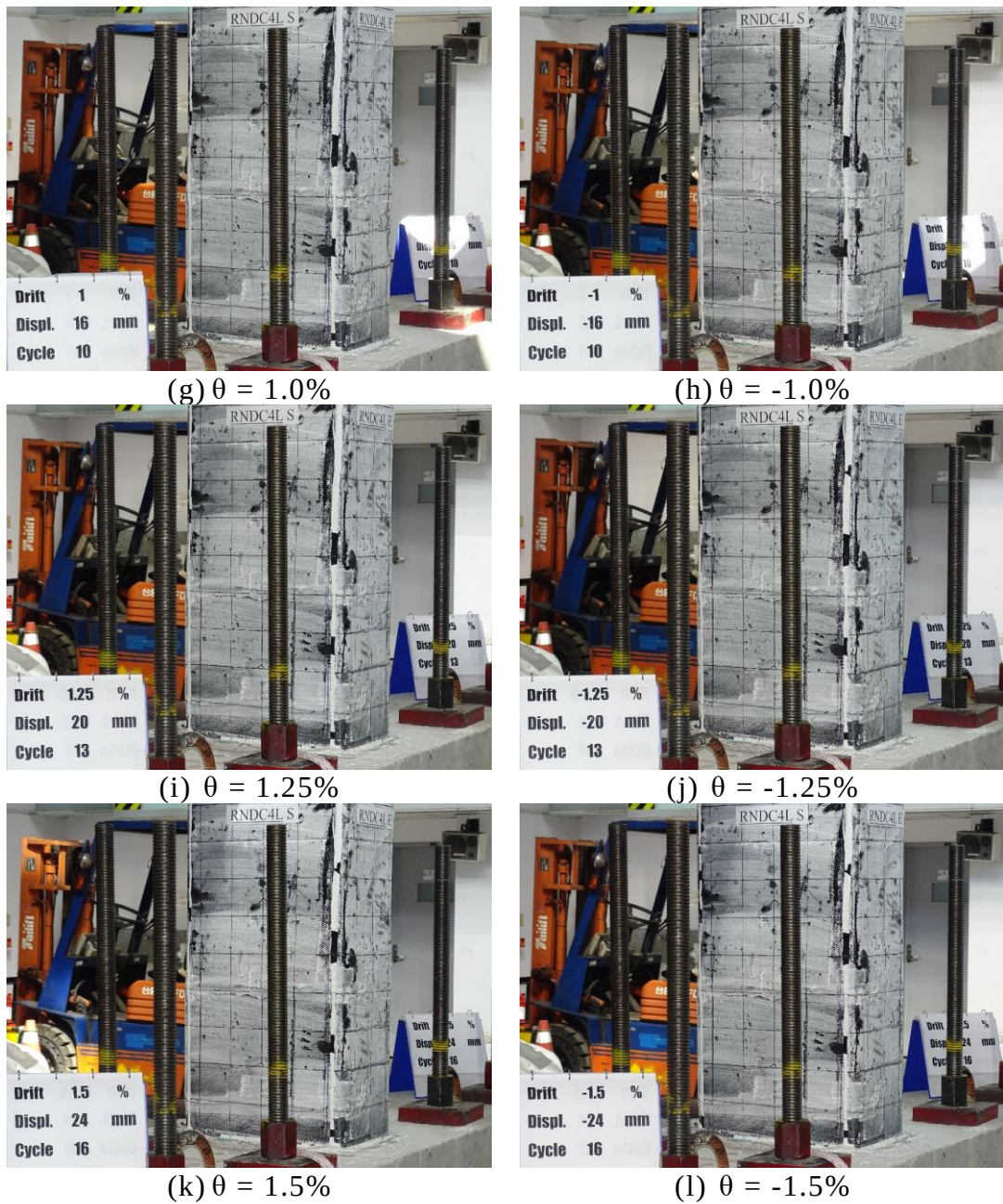
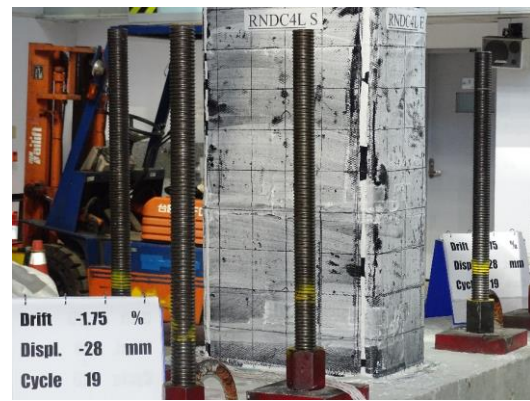


圖 3.62 RND4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

第三章 試驗結果與討論



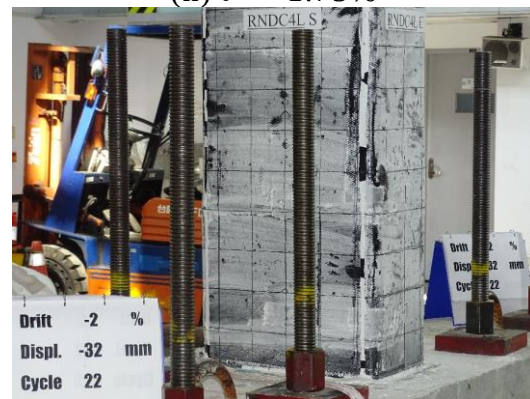
(m) $\theta = 1.75\%$



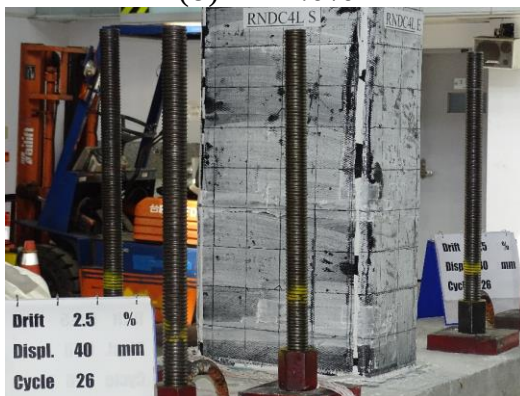
(n) $\theta = -1.75\%$



(o) $\theta = 2.0\%$



(p) $\theta = -2.0\%$



(q) $\theta = 2.5\%$



(r) $\theta = -2.5\%$

圖 3.63 RNDCL 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

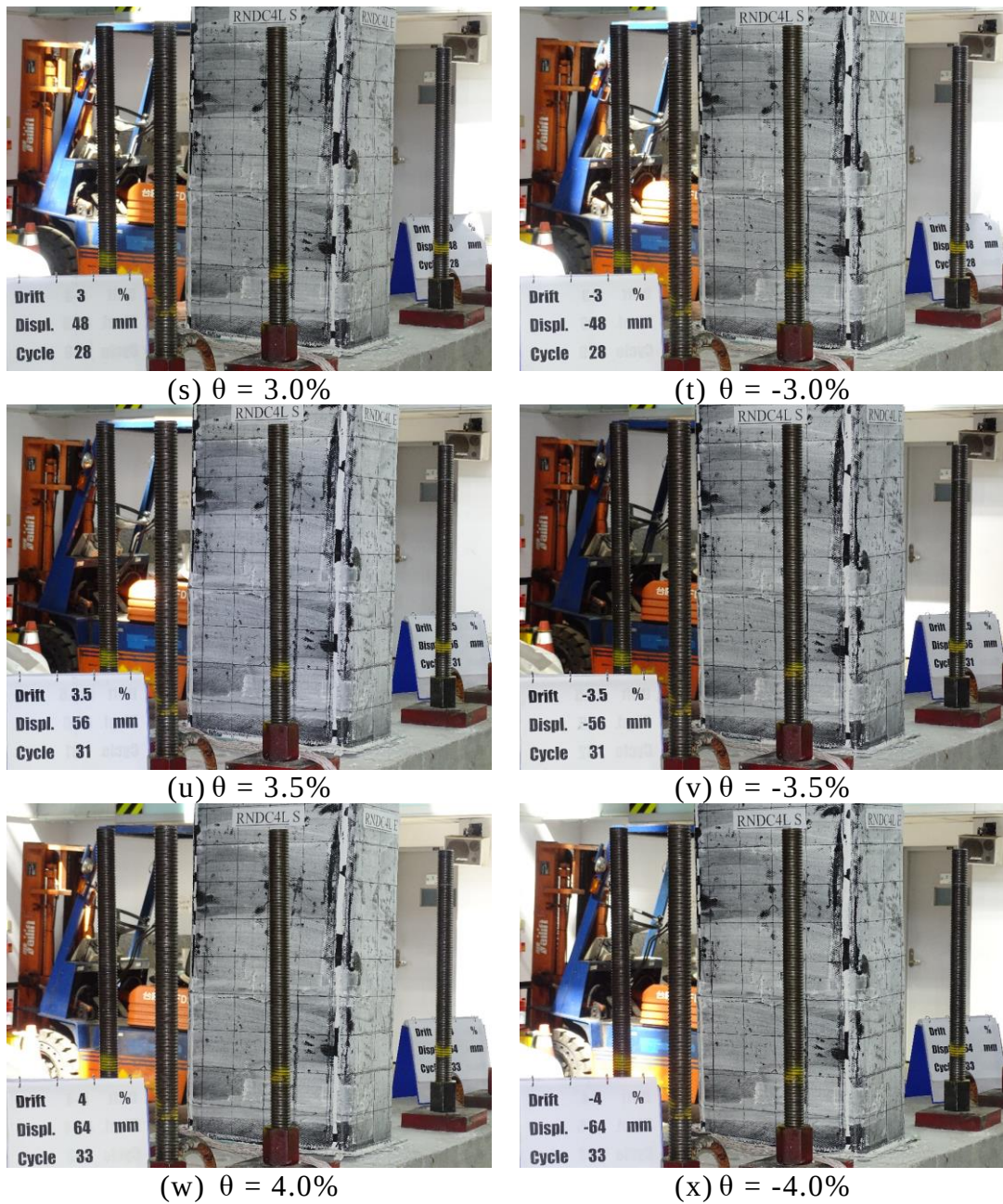


圖 3.64 RND4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

第三章 試驗結果與討論

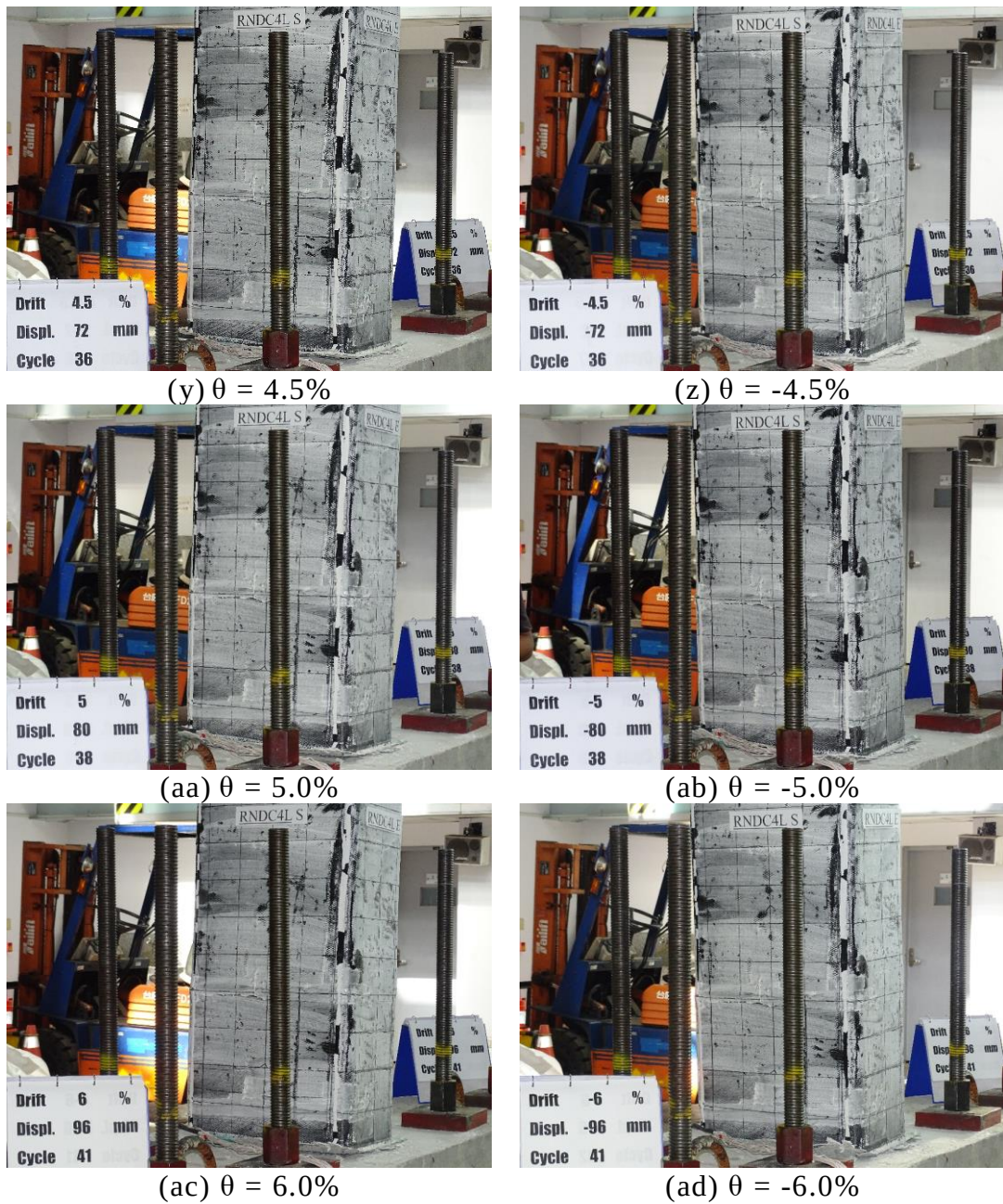


圖 3.65 RND4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

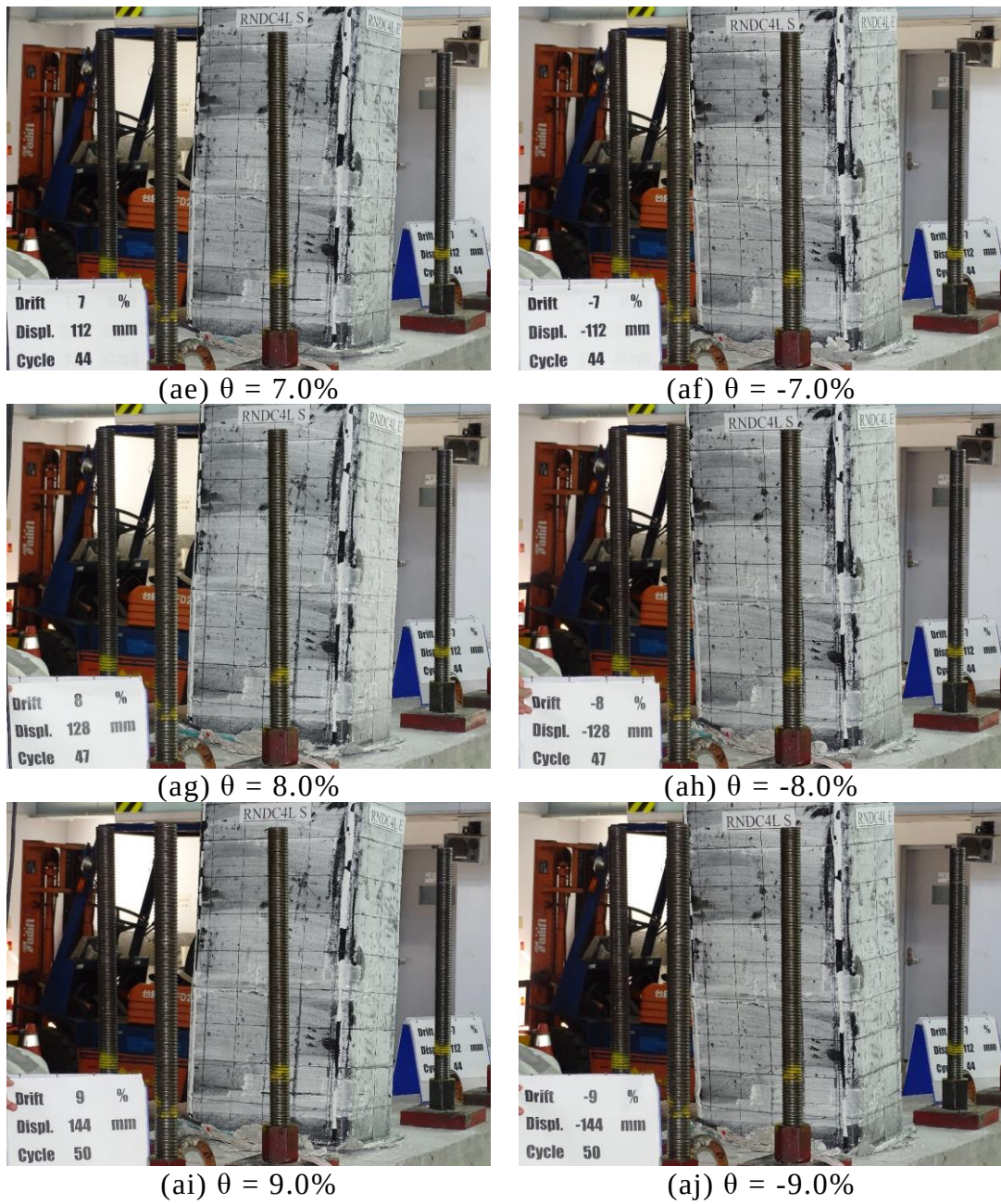


圖 3.66 RND4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

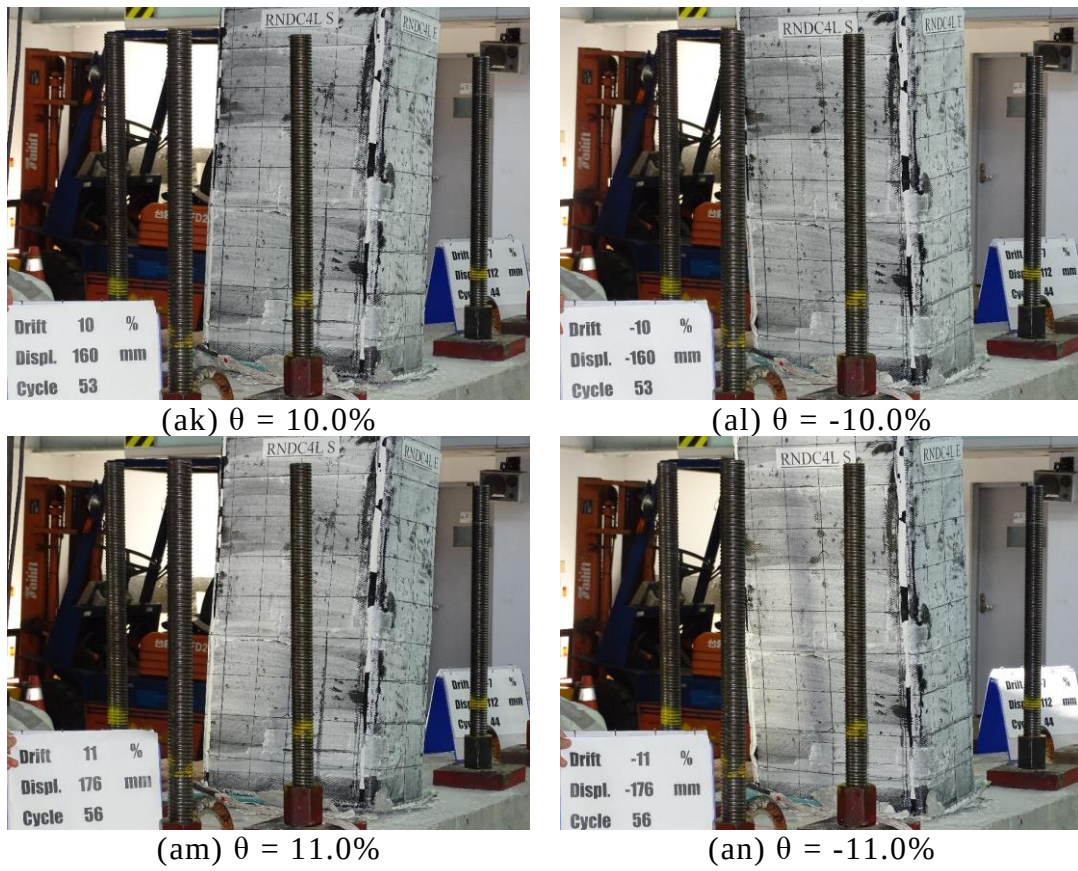


圖 3.67 RND4L 試體東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(a) 試體 RNDC4L 南側發生剪力破壞與保護層剝落



(b) 試體 RNDC4L 北側之破壞情形

圖 3.68 試體 RNDC4L 於試驗結束之破壞情形

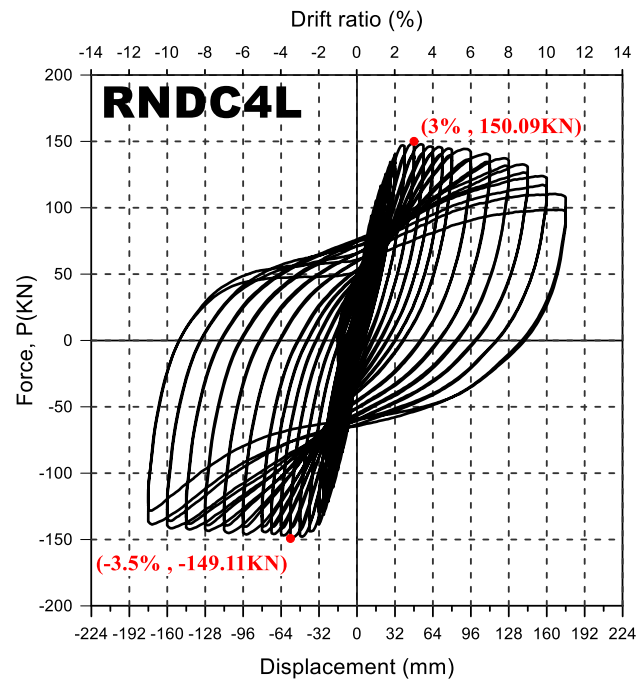


圖 3.69 RNDC4L 試體遲滯迴圈

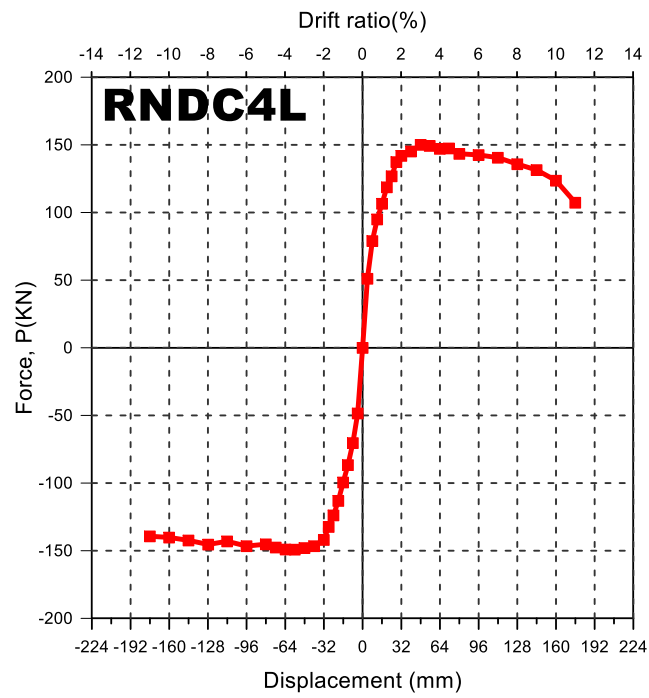


圖 3.70 RNDC4L 試體遲滯迴圈

3.1.4 試體 RNDC8L

在位移比 3% 前，試體 RNDC4L 表面的 CFRP，均未發現裂縫及鼓起，當移比於 +3% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 +150.1 kN，如表 3.6 所示。當位移比為 3.5% 時，試體的南面及北面，自底部往上約 3 公分處，CFRP 表面出現些微面外鼓起的現象，而北面比南面明顯；當移比於 -3.5% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 -149.1 kN，如表 3.6 所示。直至位移比 5.5% 之前，均未發現 CFRP 表面水平向開裂的情形。接著當位移比達 6% 時，試體南面中間自底部往上約 13 公分處，發現 CFRP 水平向開裂，並延伸至東面及西面，以及東北面角隅自底部往上約 18 公分處，CFRP 表面出現寬度小於 1 公厘的微小裂縫。後續位移比達 7% 時，試體北面自底部往上約 12 公分處，亦出現水平向開裂的現象，裂縫寬度約 2 公厘，並延伸至東及西兩面。當位移比達到 9% 時，南面及北面的 CFRP 裂縫明顯擴大，水平裂縫最大寬度約 15 公厘，此時可清楚看到表層混凝土碎裂情形。後續於位移比 10% 時，試體北面自底部往上 0 至 20 公分範圍，出現明顯面外鼓起的現象。並且於位移比 11% 時，試體北面自底部往上 0 至 30 公分範圍，多處出現水平向裂縫，以及面外鼓起情形，隨試體側向變位之加大愈趨明顯。最後，於位移比 12% 時，試體北側自底部往上約 12 公分處，水平向裂縫寬度擴大為 10 公厘，約 5 公厘寬度之 CFRP 貼片，

發生纖維破斷；試體南側自底部往上約 13 公分等處，CFRP 貼片表面有水平向裂縫，北側及南側水平向裂縫，均延伸至東側及西側 2 面，此時北側主筋已挫屈，試體側向強度迅速降低，停止實驗。

試體 RNDC4L 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。位於東與南側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.2。圖 3.5 為試體 RNDC4L 於試驗結束之破壞照片。圖 3.3 與圖 3.4 顯示試體 RNDC4L 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

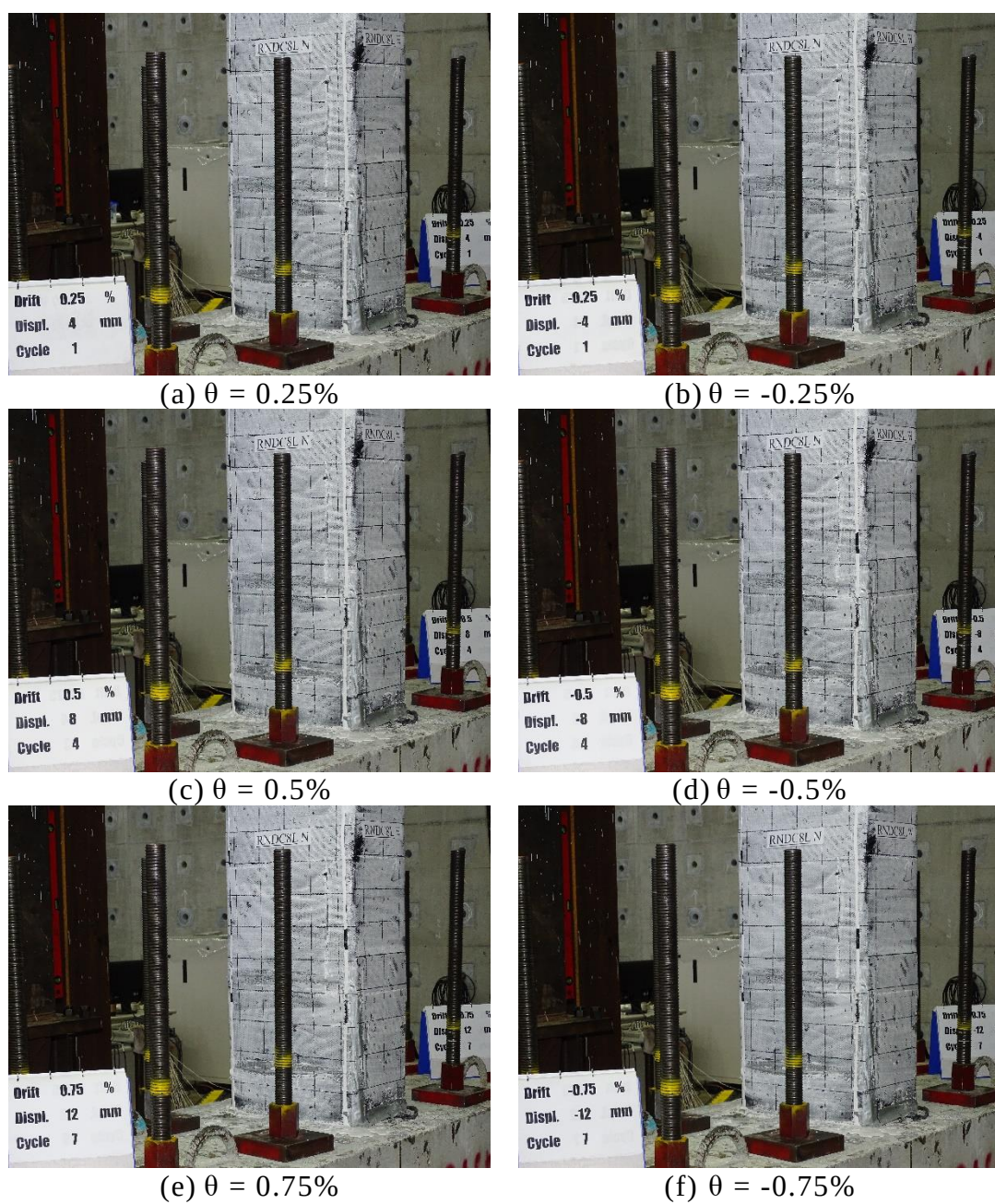
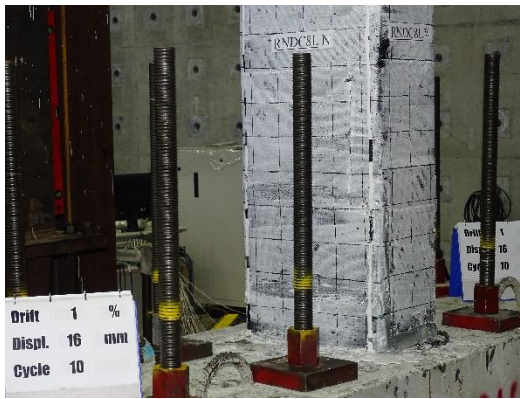
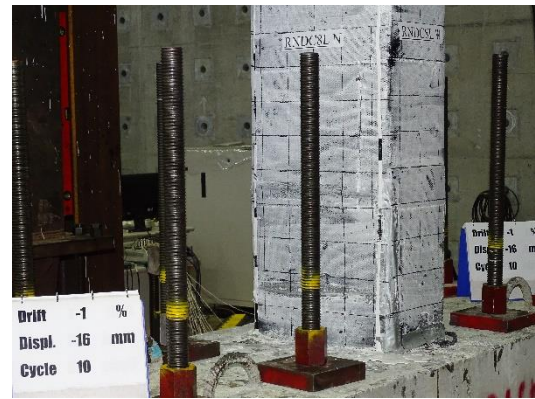


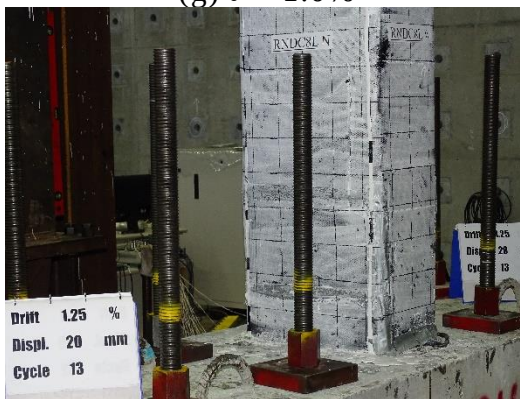
圖 3.71 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片



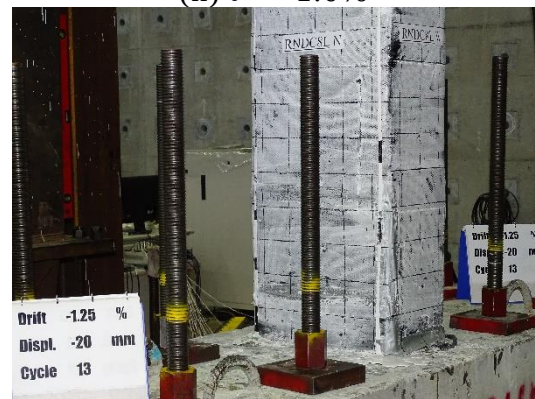
(g) $\theta = 1.0\%$



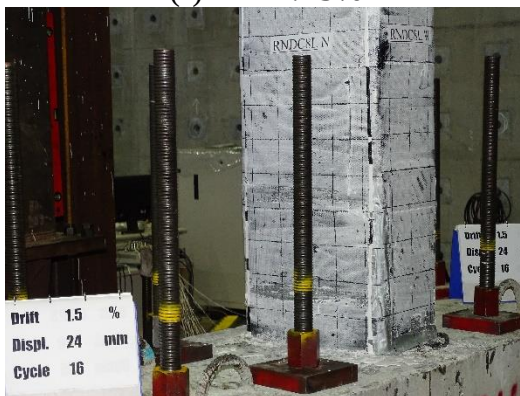
(h) $\theta = -1.0\%$



(i) $\theta = 1.25\%$



(j) $\theta = -1.25\%$



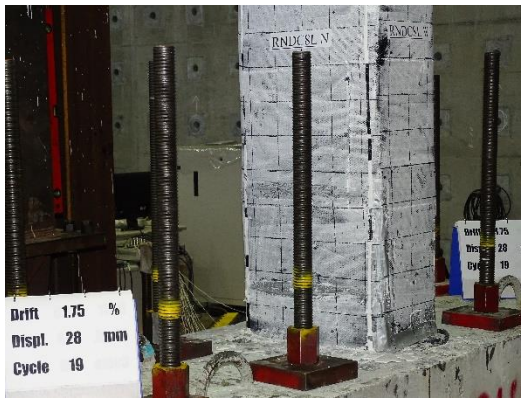
(k) $\theta = 1.5\%$



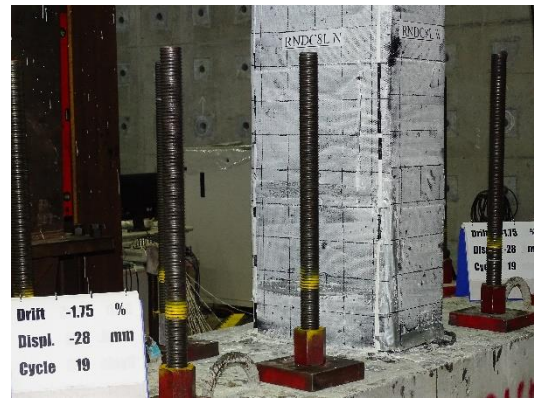
(l) $\theta = -1.5\%$

圖 3.72 試體 RNDCL 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

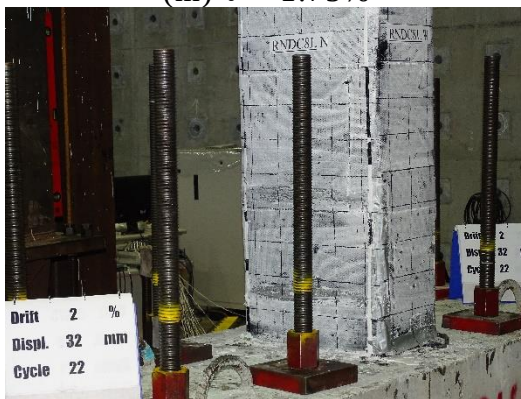
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



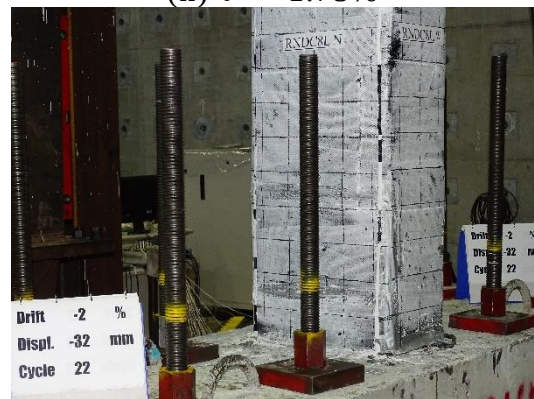
(m) $\theta = 1.75\%$



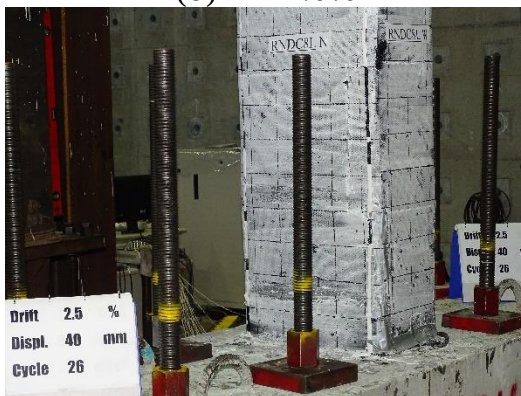
(n) $\theta = -1.75\%$



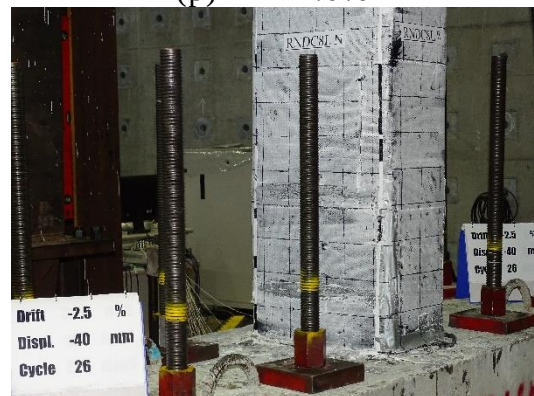
(o) $\theta = 2.0\%$



(p) $\theta = -2.0\%$

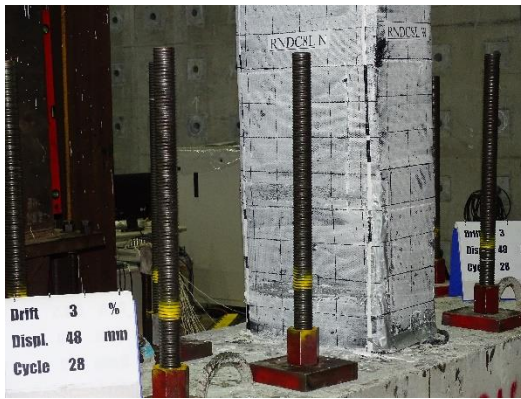


(q) $\theta = 2.5\%$

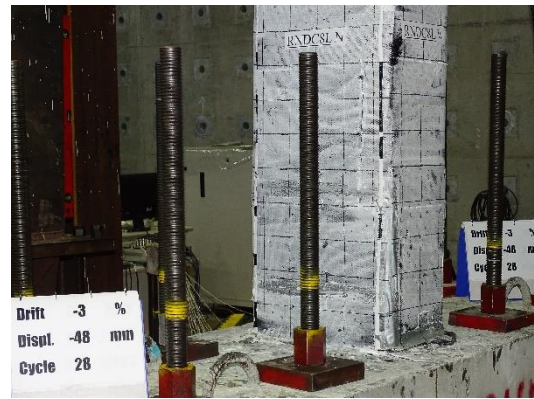


(r) $\theta = -2.5\%$

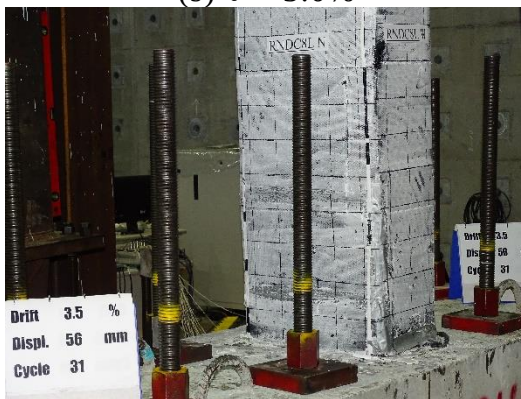
圖 3.73 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



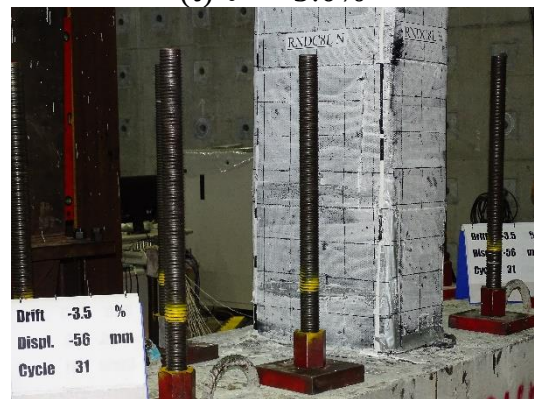
(s) $\theta = 3.0\%$



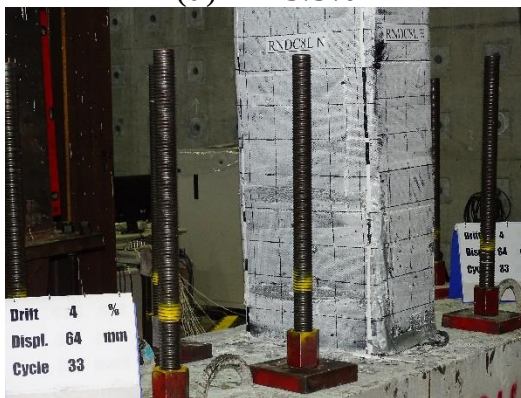
(t) $\theta = -3.0\%$



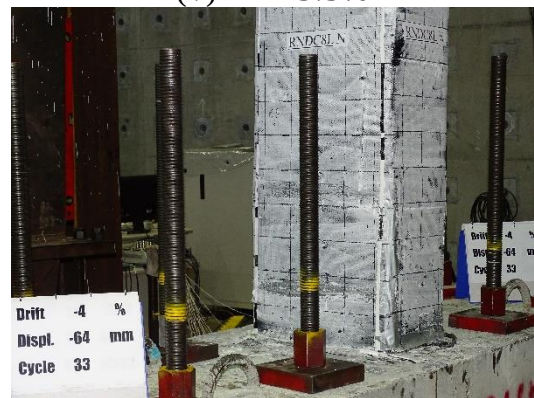
(u) $\theta = 3.5\%$



(v) $\theta = -3.5\%$



(w) $\theta = 4.0\%$



(x) $\theta = -4.0\%$

圖 3.74 試體 RNDCL 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

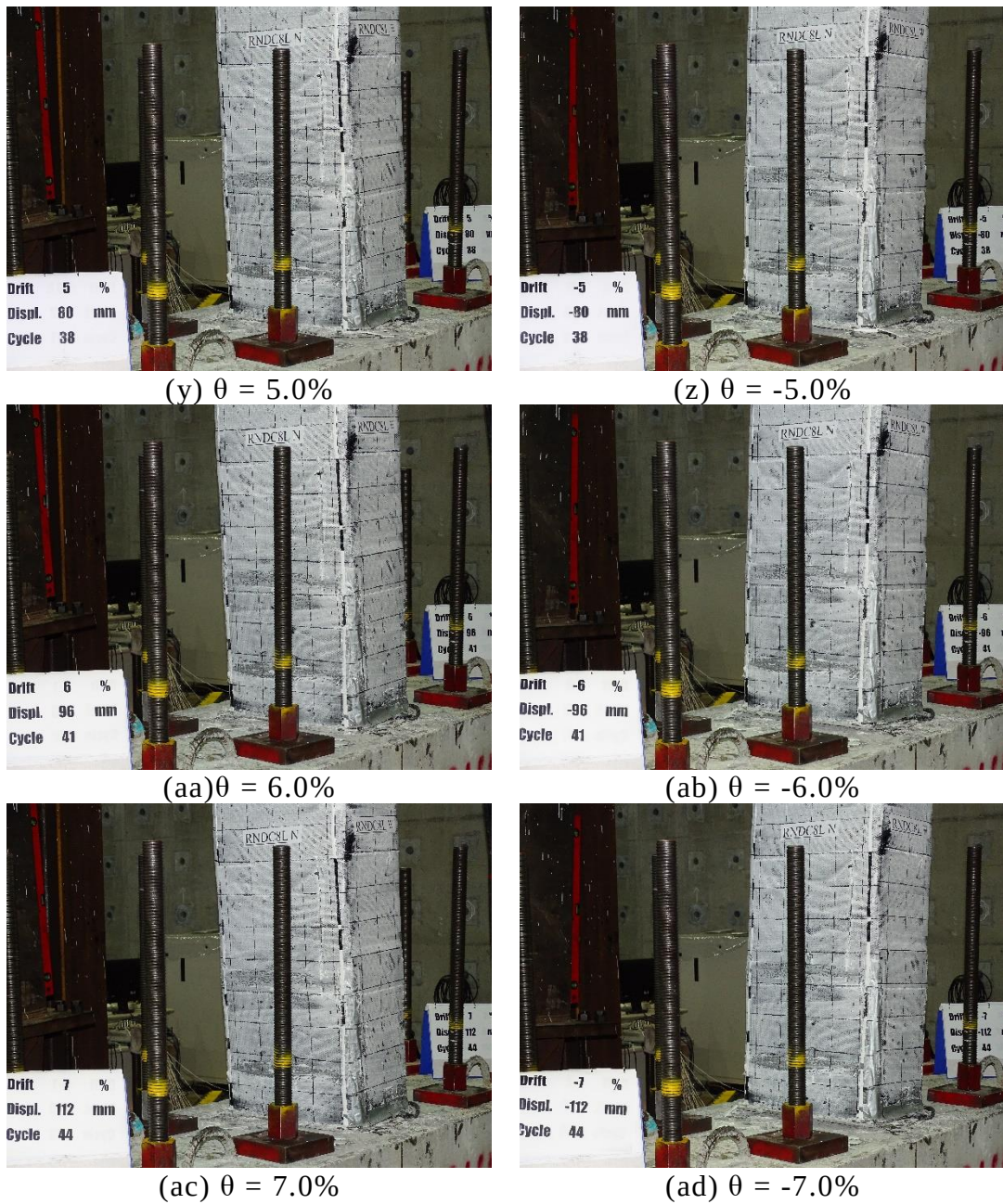
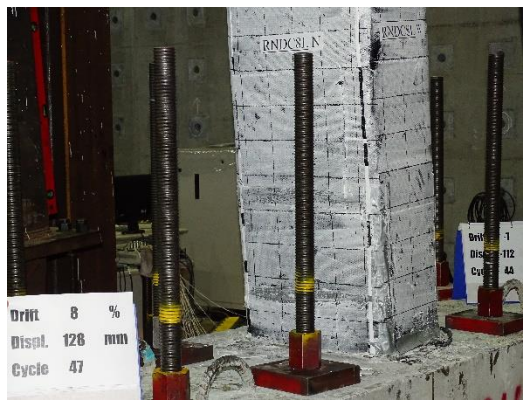
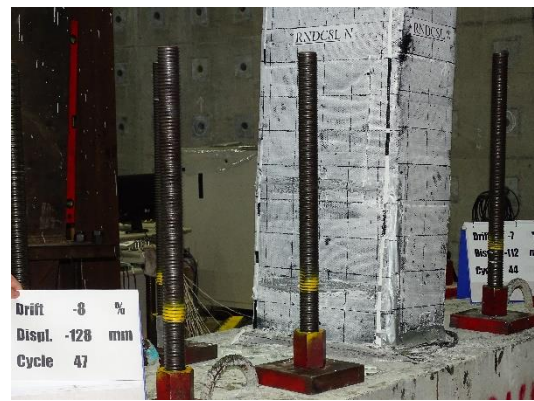


圖 3.75 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

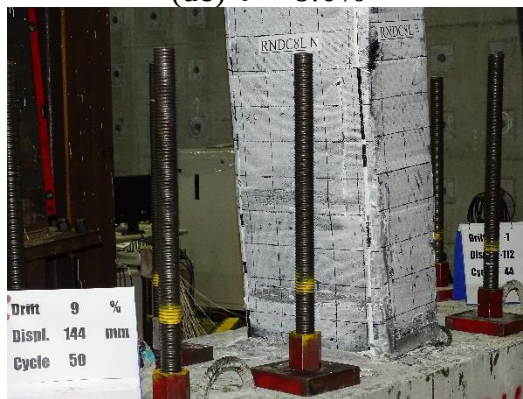
第三章 試驗結果與討論



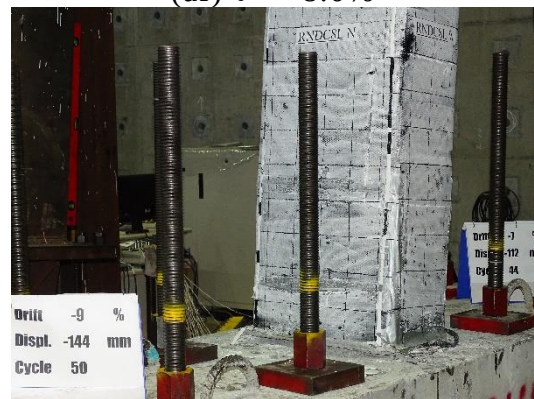
(ae) $\theta = 8.0\%$



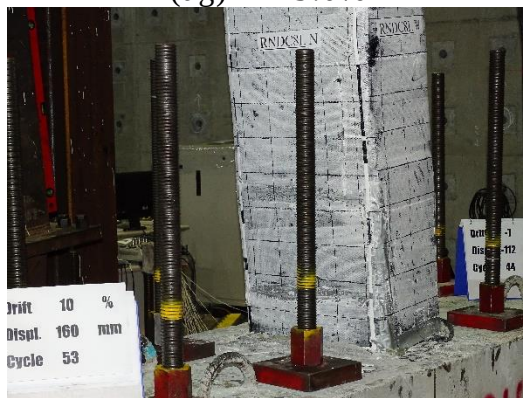
(af) $\theta = -8.0\%$



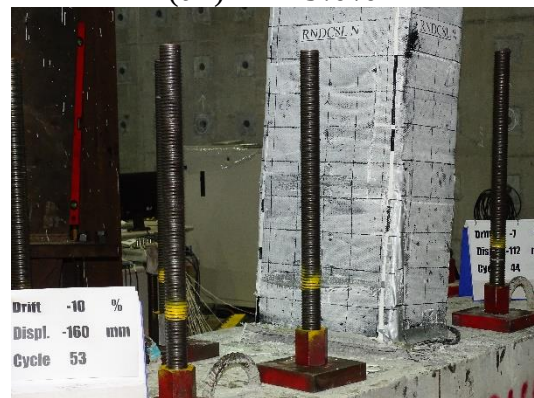
(ag) $\theta = 9.0\%$



(ah) $\theta = -9.0\%$



(ai) $\theta = 10.0\%$



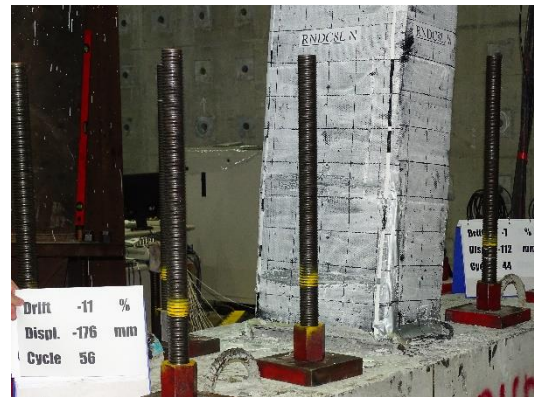
(aj) $\theta = -10.0\%$

圖 3.76 試體 RNDCL 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

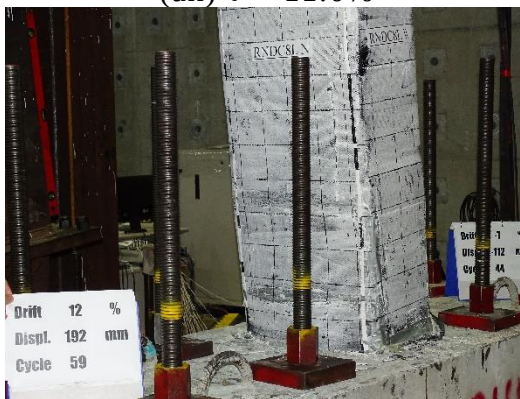
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



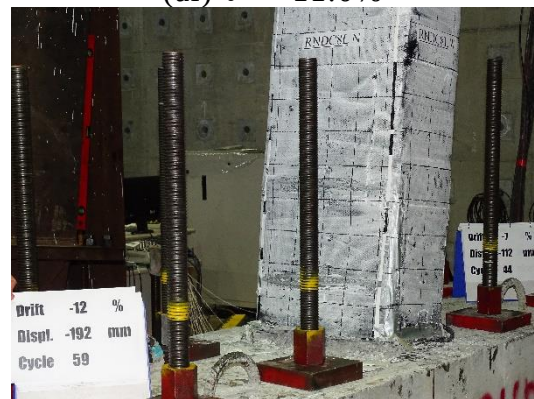
(ak) $\theta = 11.0\%$



(al) $\theta = -11.0\%$



(am) $\theta = 12.0\%$



(an) $\theta = -12.0\%$

圖 3.77 試體 RNDCLN 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

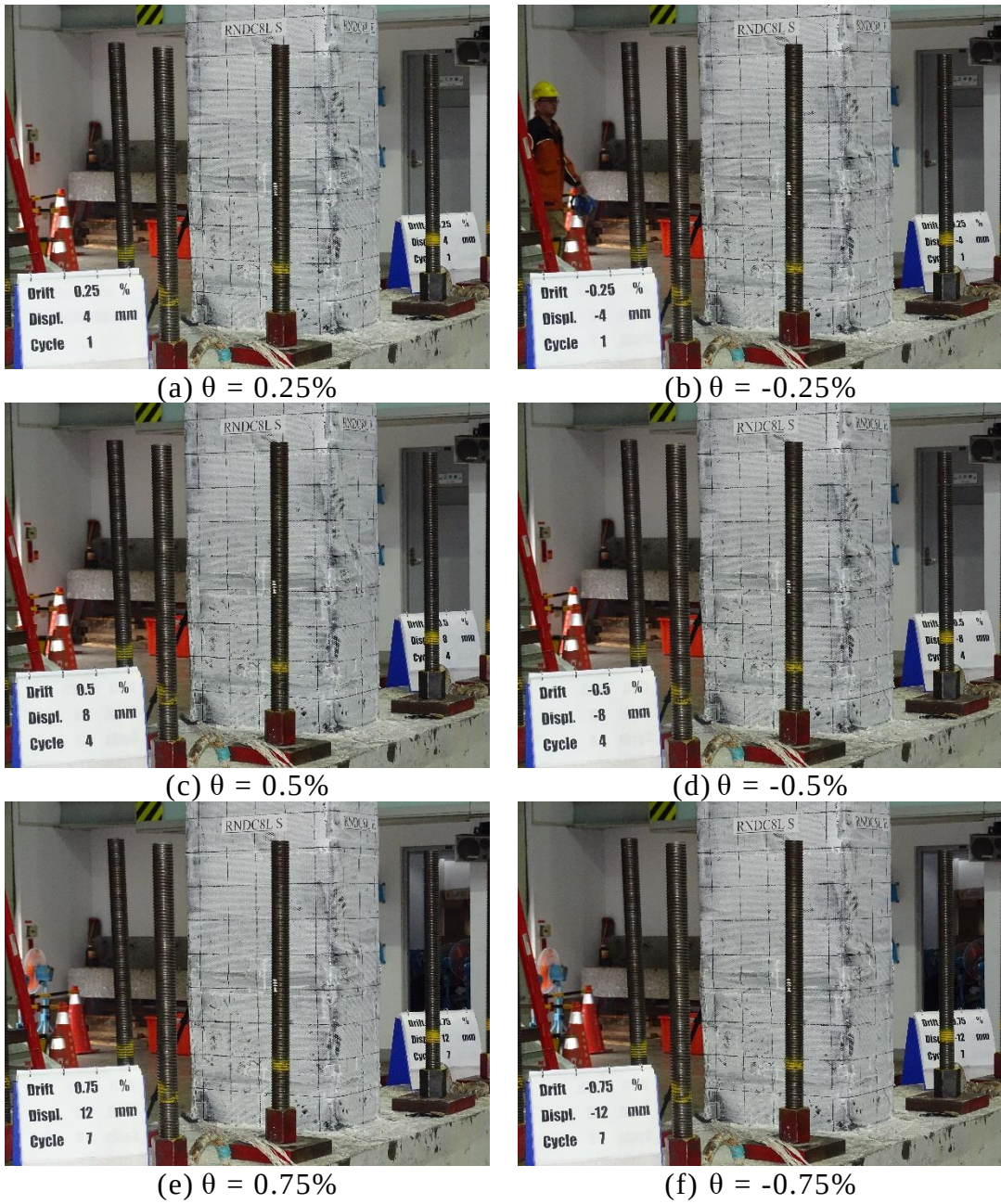
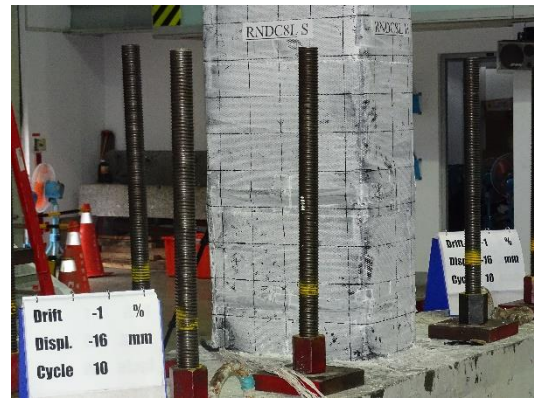


圖 3.78 試體 RNDCL S 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



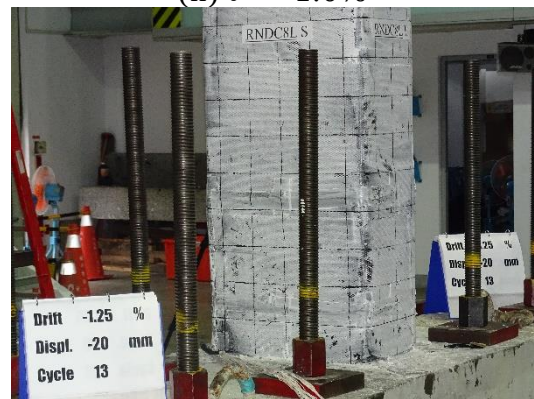
(g) $\theta = 1.0\%$



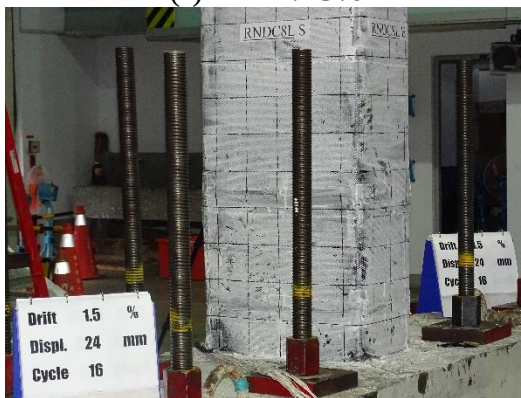
(h) $\theta = -1.0\%$



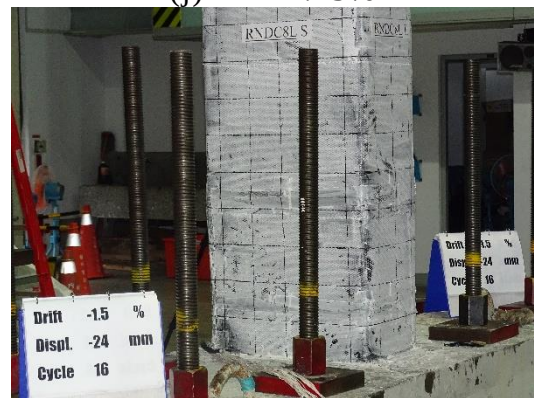
(i) $\theta = 1.25\%$



(j) $\theta = -1.25\%$



(k) $\theta = 1.5\%$



(l) $\theta = -1.5\%$

圖 3.79 試體 RNDCL 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(m) $\theta = 1.75\%$



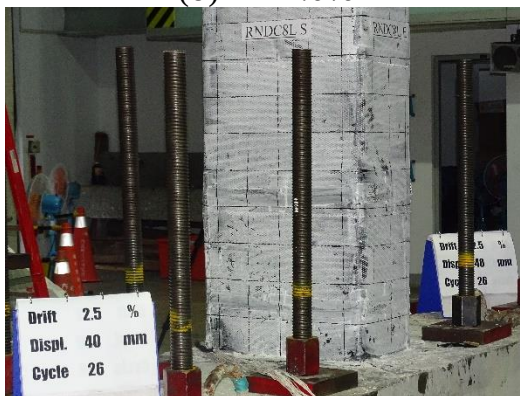
(n) $\theta = -1.75\%$



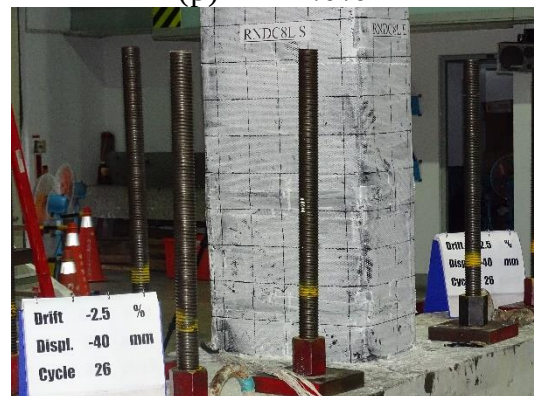
(o) $\theta = 2.0\%$



(p) $\theta = -2.0\%$



(q) $\theta = 2.5\%$



(r) $\theta = -2.5\%$

圖 3.80 試體 RNDCL 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

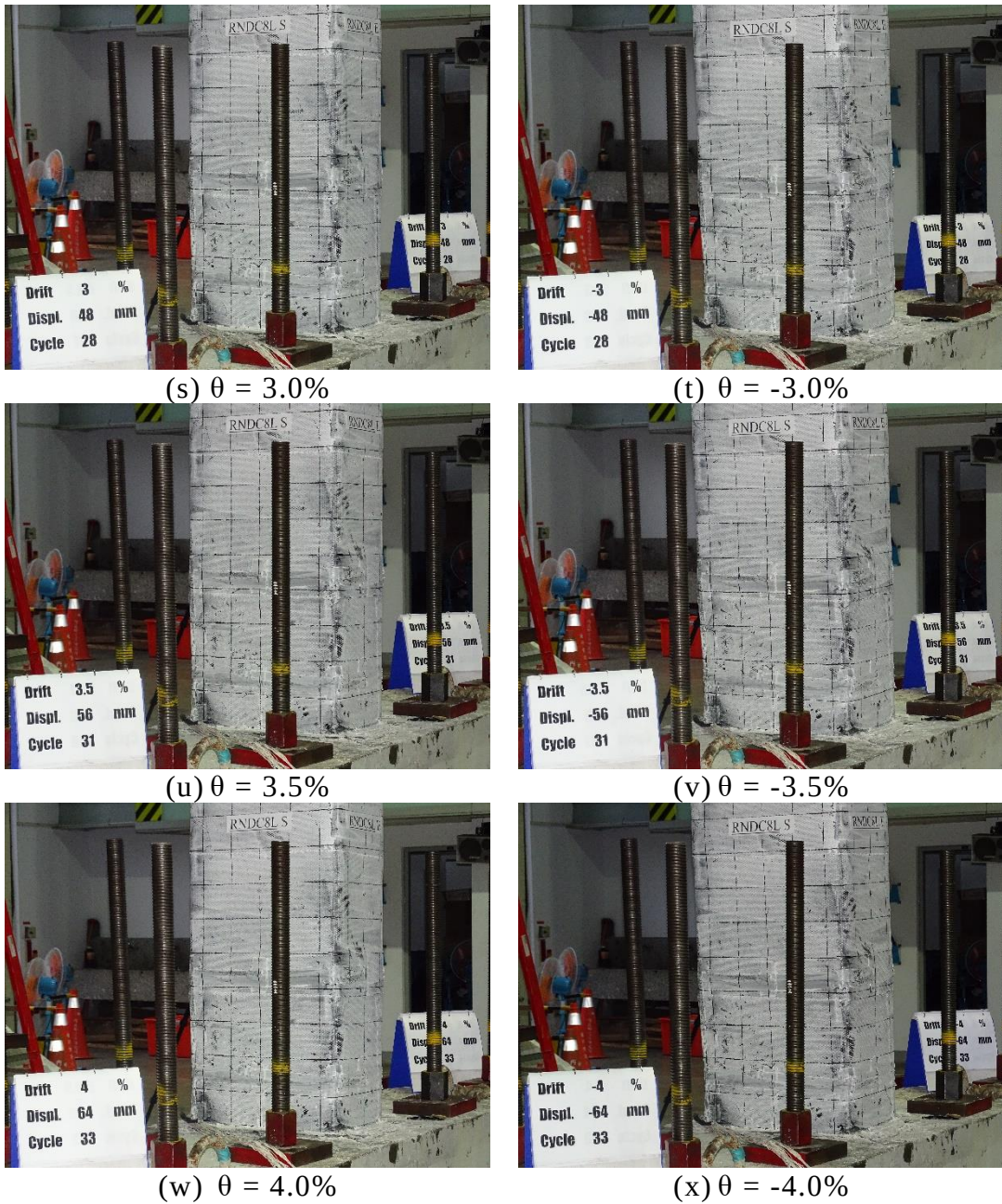


圖 3.81 試體 RNDCL S 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

第三章 試驗結果與討論

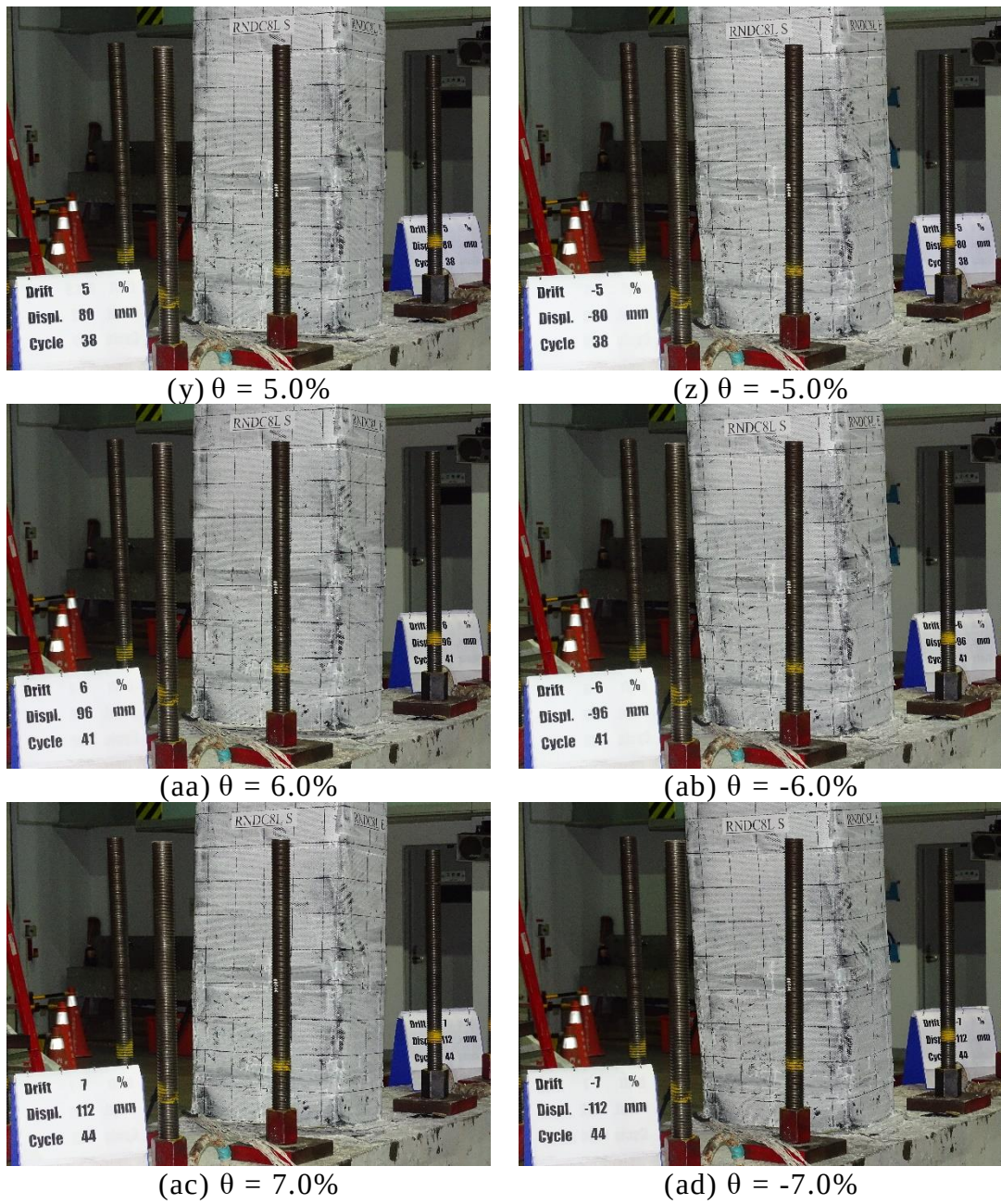
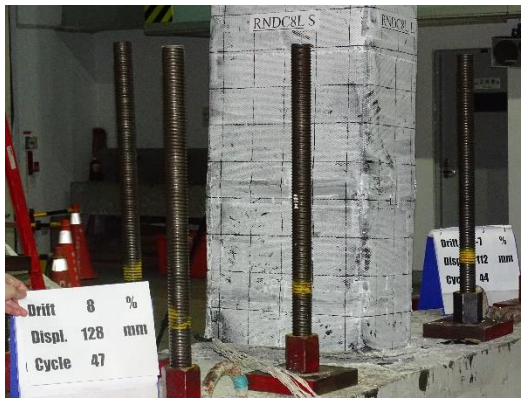


圖 3.82 試體 RNDCL S 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

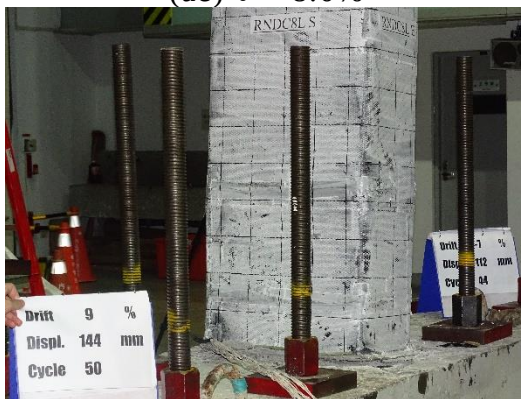
建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究



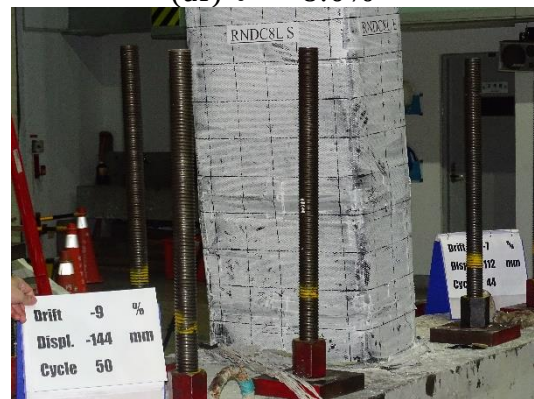
(ae) $\theta = 8.0\%$



(af) $\theta = -8.0\%$



(ag) $\theta = 9.0\%$



(ah) $\theta = -9.0\%$



(ai) $\theta = 10.0\%$



(aj) $\theta = -10.0\%$

圖 3.83 試體 RNDCL 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

第三章 試驗結果與討論

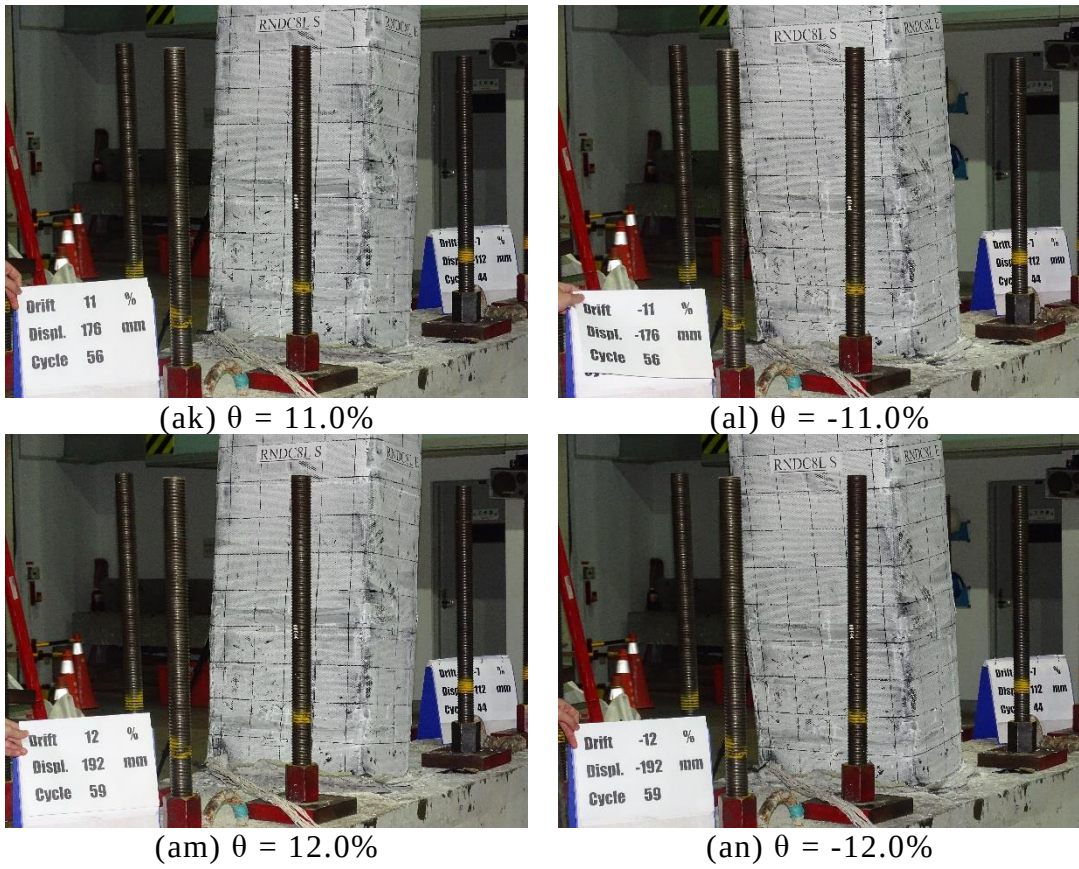


圖 3.84 試體 RNDCL S 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)



(a) 試體 RND8L 南側發生剪力破壞與保護層剝落



(b) 試體 RND8L 北側之破壞情形

圖 3.85 試體 RND8L 於試驗結束之破壞情形

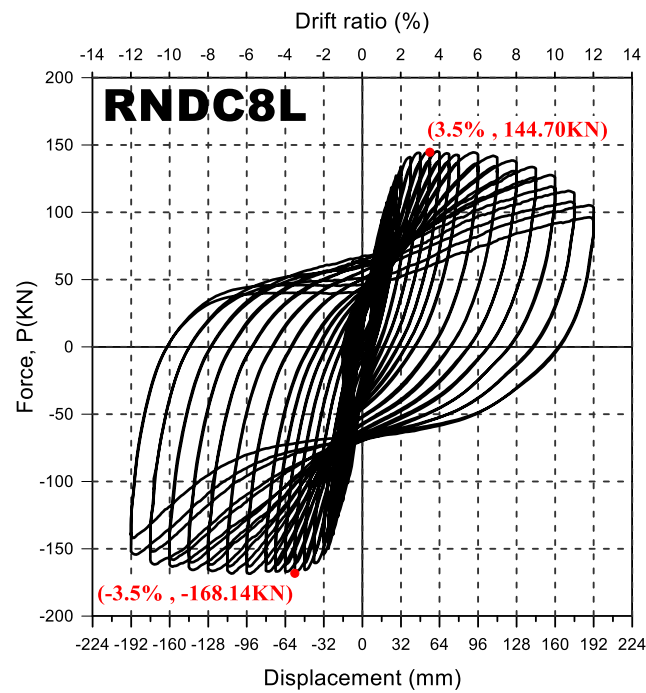


圖 3.86 試體 RNDC8L 遲滯迴圈

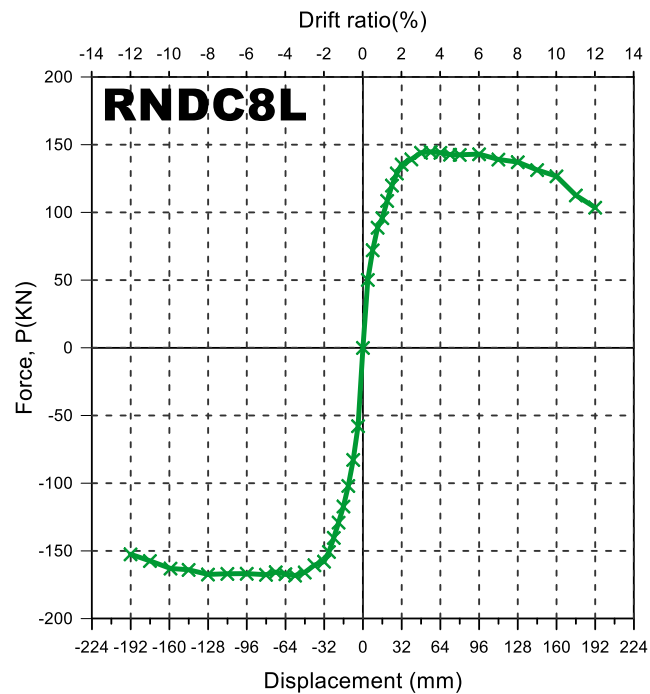


圖 3.87 試體 RNDC8L 強度包絡線

第二節 CFRP 韌性補強理論設計值合理性

在軸力比 20% 下，RND 塑性轉角容量 θ_p 為 2.71%，依韌性補強設計 RNDC4L 則為 8.88%，為未補強試體的 3.28 倍，表示理論韌性強之設計值，可滿足規範對柱耐震韌性之要求。在軸力比 20% 下，RND 試體最大側向強度為 137.6 kN，RNDC4L 則為 149.6 kN，試體側向強度雖提升 8.7%，但顯示 CFRP 補強對柱試體側向強度之影響有限，與既有文獻資料相符。CFRP 韌性補強之設計公式[8](式 3.1 及式 3.2)，可用於低矮（軸力比 20% 以下）建築物非韌性柱之韌性補強。

$$t_f \geq \frac{b}{2\varepsilon_f E_f} \left\{ \left[\begin{array}{c} 0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) f'_c \\ 0.09 f'_c \end{array} \right]_{max} - \frac{A_{sh} f_{yh}}{s b_c} \right\} \quad (\text{式 3.1})$$

$$n = \frac{t_f}{t_{f0}} \quad (\text{式 3.2})$$

RND 塑性轉角容量 θ_p 為 2.71%，RNDC2L 則為 7.91%，表示僅 2 層 CFRP 補強即有明顯效果。RND 試體最大側向強度為 137.6 kN，RNDC2L 則為 148.7 kN，試體側向強度雖提升 8.0%，但影響有限。在軸力比 20% 且柱斷面 4 周設置半徑為 3 公分倒角下，雖然 RNDC2L 的補強量為設計要求之半，其 θ_p 為未補強試體 2.92 倍，且滿足柱構件之層間變位角大於 3% 之要求，但仍建議採用圍束補強設計方法，進行韌性補強之設計。

第三節 CFRP 韌性補強量對韌性效益影響

試體 RND 為矩形的非韌性配筋柱，其斷面尺寸、橫向箍筋量及箍筋端部彎鉤角度之選擇，主要以模擬國內典型老舊四樓以下低矮（低軸力比）RC 騎樓式建築物底部樓層柱之配筋方式。本研究 RNDC 系列試體所採用碳纖維布之層數，係參採較為簡易的 CFRP 包覆「韌性補強」理論[10]進行設計。其中，試體 RNDC4L 旨在驗證，依圍束補強理論之設計結果，試體 RND 經 CFRP 包覆圍束韌性補強後，矩形非韌性配筋柱之耐震行為，是否能達到基本之圍束能力需求。試體 RNDC2L 與試體 RNDC8L 採用碳纖維布之層數，分別為 RNDC4L 的 0.5 倍與 2 倍，此 2 組試體之探討目的有二，其一為觀察隨著碳纖維布補強層數之增加，柱試體於圍束補強後，耐震韌性的提升效益，其二為依柱 CFRP 圍束韌性補強設計之試體 RNDC4L，其耐震韌性是否足夠，以增加民眾的逃生機會。

試體 RND 及試體 RNDC 遲滯迴圈與強度包絡線，如圖 3.88~圖 3.93 所示，各試體試驗結果之極限強度及塑性轉角容量，如表 3.6 所示，並可歸納以下比較結果：

一、「弱軸」側向加載及 20%軸力比軸向加載下，矩形非韌性柱試體

RND 之最大試驗側力強度為 137.6kN(兩方向平均)，RNDC2L、

RNDC4L、RNDC8L 則分別為 148.65 kN、149.6 kN、156.4kN。

由此可知，即使貼覆 8 層碳纖維，試體強度僅上升 13%，表示碳纖維圍束補強對強度之影響不大，此結果與既有文獻資料相符。

二、RND 試體之塑性轉角容量 θ_p 為 2.71%，RNDC2L 則為 7.91%，表示僅兩層碳纖維布補強即有明顯效果，進一步計算可發現 RNDC2L 之塑性轉角容量 θ_p 為未補強試體(RND)之 2.91 倍，RNDC4L 以及 RNDC8L 則分別為未補強試體之 3.27 倍以及 3.6 倍，表示所提升之韌性隨層數增加而趨於一定值。

三、RNDC2L 旨在觀察補強層數達設計要求之半時，圍束補強對韌性之增加，就結果而言，RNDC2L 之塑性轉角容量已滿足在最大考量地震力下(Maximum Considered Earthquake, MCE)，柱構件之層間變位角大於 3%之要求[19]，然而，本研究仍建議採用本研究之設計方法所計得之設計值進行補強，主因在於 RNDC4L 之塑性轉角容量 θ_p 仍大於 RNDC2L 許多。

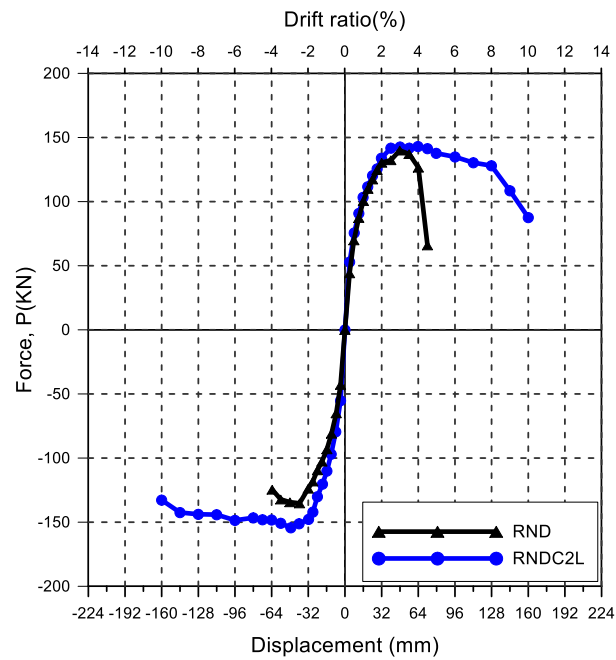


圖 3.88 試體 RND 與試體 RND C2L 強度包絡線比較

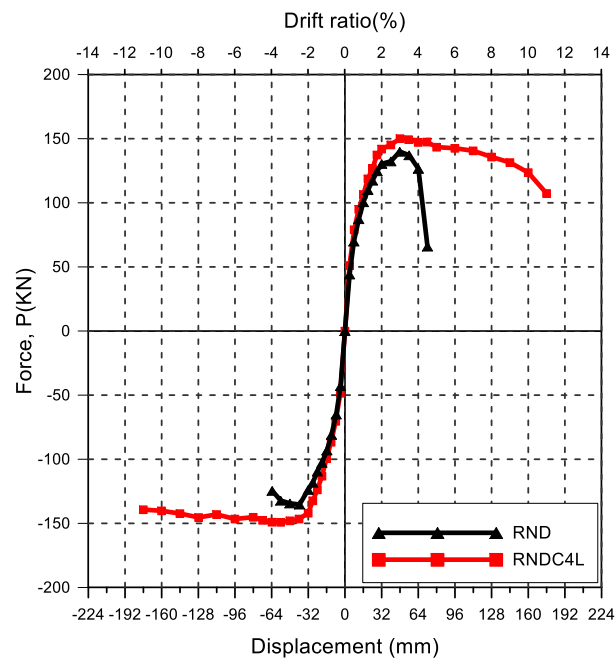


圖 3.89 試體 RND 與試體 RND C4L 強度包絡線比較

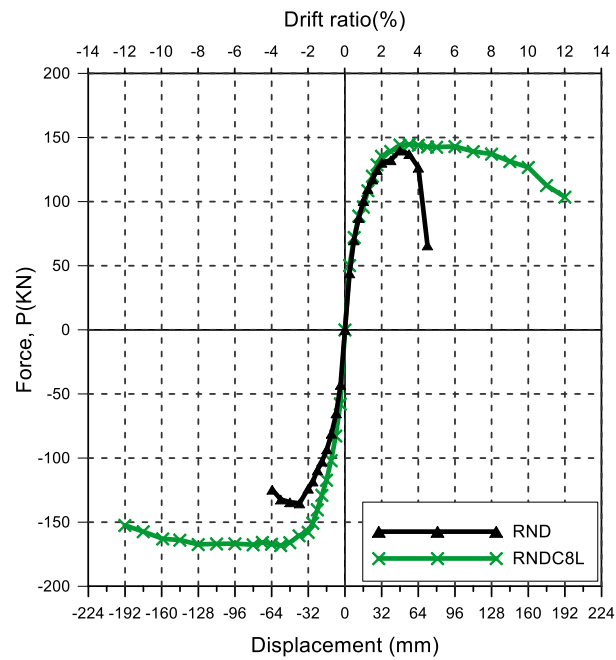


圖 3.90 試體 RND 與 RND C8L 試體強度包絡線比較

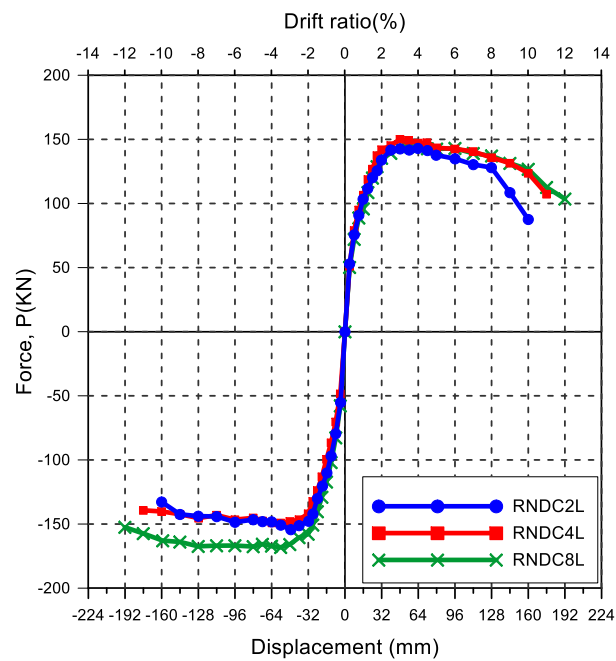


圖 3.91 RND C 系列試體強度包絡線比較

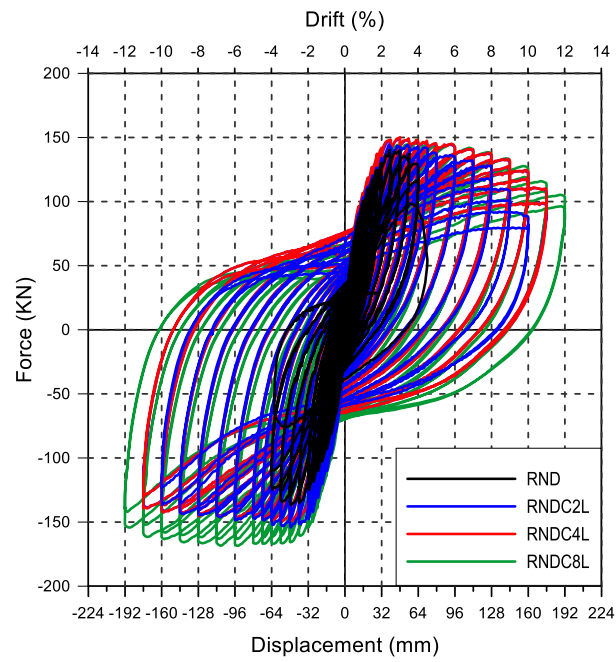


圖 3.92 各試體遲滯迴圈比較

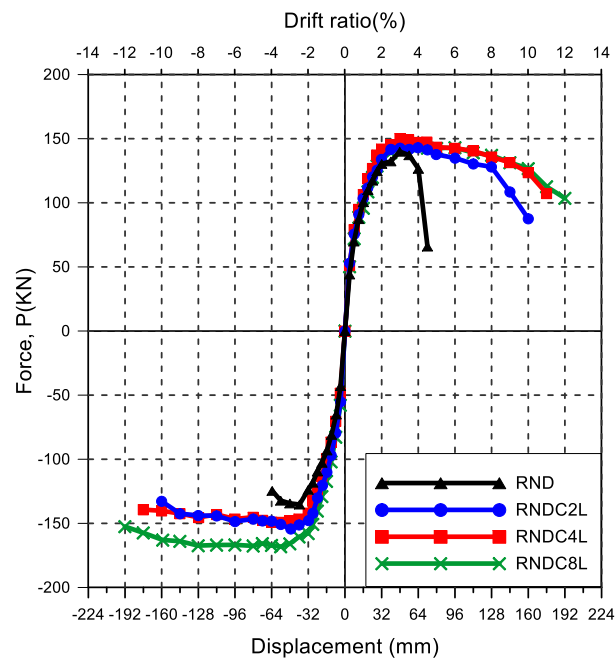


圖 3.93 各試體強度包絡線比較

第四節 碳纖維片設計與實際破壞模式差異

試驗結果與觀察，試體 RNDC2L 以及 RNDC4L 之碳纖維布在位移量較大時，皆出現明顯之水平裂縫，而未出現較明顯之垂直向裂縫，表示碳纖維布係因垂直向受拉(垂直纖維方向)而破壞，此破壞模式與設計時所假設之碳纖維布受水平向拉力(平行纖維方向)破壞之假設不符，表示設計方法尚可改善，以避免碳纖維布在達預變形前，即提早破壞。

本研究參考之設計方法假設碳纖維布在混凝土受壓時因蒲松效應而承受拉力進而提供圍束。惟計算時並未考量面外鼓出現象所引致之垂直向拉力。如圖 3.94 與圖 3.95 所示，此二圖分別顯示 RNDC2L 與 RNDC4L 之長邊面外鼓出現象引致之水平向裂縫，由圖可知長邊面外鼓出現象為三維球狀鼓出，對碳纖維布而言，將同時引致水平與垂直向拉力，又碳纖維之垂直纖維方向拉力強度遠低於平行纖維方向，因此垂直向之拉力將優先使碳纖維布出現水平向裂縫，使得破壞模式與設計方法假設不符。

為了解決矩形柱長邊面外鼓出導致垂直纖維方向受拉形成水平裂縫之現象，本研究參考 Richard D. Iacobucci[10]之 CFRP 碳纖維圍束補強之配置，建議在塑鉸區範圍內，除貼覆水平向碳纖維布以外，亦添加條狀垂直向碳纖維布，以抵抗面外鼓出造成之垂直方向拉力，

如圖 3.96 所示，惟若為矩形柱則本研究建議貼覆於長邊中央，因該位置面外鼓出現象較為明顯。



圖 3.94 RNDC2L 試體塑鉸區面外鼓出造成水平裂縫
(資料來源：本研究)



圖 3.95 RNDC4L 試體塑鉸區面外鼓出造成水平裂縫
(資料來源：本研究)

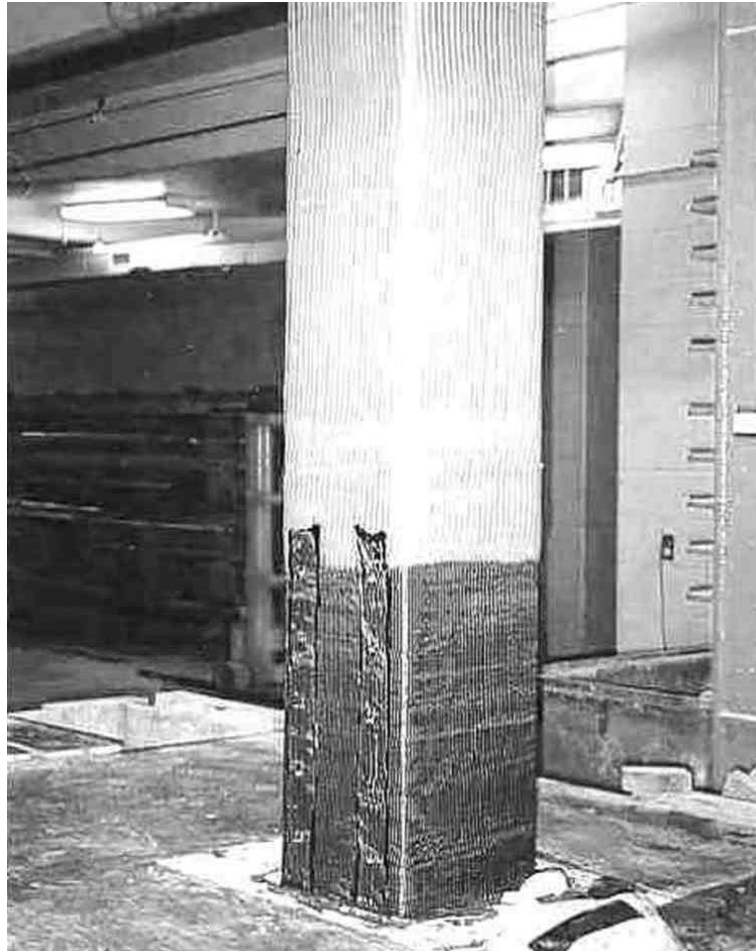


圖 3.96 貼覆垂直向細條碳纖維避免水平裂縫之示意

(資料來源：參考書目[10])

第四章 結論與建議

第一節 結論

本研究旨在探討建築物矩形 RC 柱構件，採碳纖維貼片圍束補強對耐震性能之影響，本研究共規劃 RND 及 RNDC 等 2 個系列共計 4 組試體，分別為 RND 試體為典型非韌性矩形 RC 柱，另外 RNDC2L 試體係以碳纖維貼覆補強 2 層、RNDC4L 試體為以碳纖維貼覆補強 4 層與 RNDC8L 試體係碳纖維貼片補強 8 層，試體隅角部凸角半徑為 3 公分。所有試體於試驗前，均無任何裂縫損傷；加載軸力比為百分之二十，且於定軸壓下進行側向加載試驗，所得結論如下：

1. 由比較 RND 試體與 RNDC2L 試體試驗結果可知，僅補強 2 層碳纖維（即每平方公尺 600 克的碳纖維），塑性轉角容量即可提升 2.92 倍，韌性提升效果明顯。
2. 由試體破壞模式觀察，以 CFRP 貼片進行韌性補強，可將非韌性配筋（橫向鋼筋量不足者）柱試體原屬剪力控制之破壞模式，轉為撓曲行為主控（圖 4.1），故建議不宜僅貼覆於可能產生撓曲塑鉸之範圍，俾避免發生非預期之破壞。
3. 在低軸力比 20% 下，RND 試體塑性轉角容量 θ_p 為 2.71%，若依韌性補強理論設計（RNDC4L）則為 8.88%，為未補強試體的 3.28 倍，表示理論韌性補強之設計值，可滿足規範對柱構件之層間變位角大

於 3% 要求；但 CFRP 補強對側向強度之貢獻則有限。惟考量國內 CFRP 施工品質，以及難以精確評估待補強柱實際現況等因素，恐影響對柱補強後韌行能力之掌握，故本研究仍建議採「韌性補強」之設計方法（式 4.1），並且必須透過專業技師、建築師的評估與監督。

$$t_f \geq \frac{b}{2\varepsilon_f E_f} \left\{ \left[\begin{array}{c} 0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) f'_c \\ 0.09 f'_c \end{array} \right]_{max} - \frac{A_{sh} f_{yh}}{s b_c} \right\} \quad (\text{式 } 4.1)$$



(a) 試體 RND



(b) 試體 RND C2L

圖 4.1 試體 RND 與試體 RND C2L 之破壞模式

- 4.比較 RNDC2L、RNDC4L 及 RNDC8L 等 3 組試體試驗結果顯示，隨著 CFRP 貼片層數的增加，平均每層所能提升韌性的效率將降低，表示韌性之增加，將隨層數增加而趨於一定值。
- 5.為避免矩形 RC 柱之長邊，過早發生面外鼓出之現象，引致垂直於纖維方向受拉，而產生水平向之裂縫，而與設計破壞模式假設不符，建議於 CFRP 進行水平向圍束補強時，可考慮於 RC 柱長邊外表面，再貼覆縱向碳纖維貼片，以延緩前述水平向裂縫之發生。

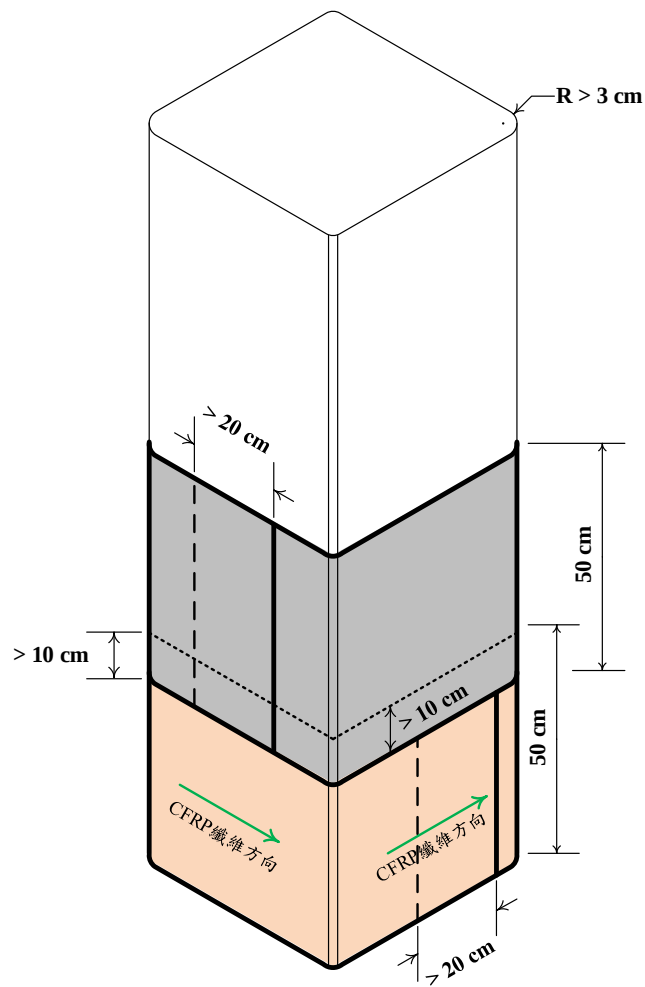


圖 4.2 碳纖維貼片之貼覆細部

6. 矩形 RC 柱試體之隅角部，採凸角半徑為 3 公分之導角（圖 4.2），

由實驗結果顯示，當 RC 柱試體達極限變形時，碳纖維布並未發生因角隅應力集中而斷裂。且沿碳纖維方向之圍束，施做 20 公分的搭接長度，亦未發現碳纖維搭接不足之破壞。

本研究 CFRP 貼片係直接貼覆於研究製作之 RC 柱試體，主要為橫向箍筋量不足之 RC 柱，並未將柱試體預為破壞至某特定程度後，再進行碳纖維貼片之補強，故試驗結果在於驗證於震前，柱尚無發生任何細微裂縫或剝落之情形，而進行 CFRP 補強之效益探討。惟此試驗結果，在工程專業技術人員的評估下，可應用柱於輕微裂縫之損害。雖然，本研究柱試體係模擬老舊建築物柱構件橫向箍筋不足之情況，但由於實際柱構件之破壞模式，可能為剪力破壞、撓曲破壞及軸力破壞，或者合併發生前述之破壞，再依柱損害的程度，又可分為裂縫、粉刷層脫落、保護層剝落、主筋挫屈（或斷裂）及箍筋脫開（或斷裂）等等級，故本研究試體數量之限制，尚無法模擬或探討受破壞的柱。

本研究柱試體於 CFRP 補強後，的確發現 RC 柱試體於補強前，係由剪力強度主控，於補強後，柱試體轉變為撓曲強度控制。而柱試體試驗結果顯示，試體試驗側向強度增幅最大僅為 13.6%，故側向強度增加有限。

在學理上，於水平向貼覆碳纖維貼片，提供柱構件混凝土有較佳的圍束效果。而碳纖維貼片的層數，取決於碳纖維的厚度或單位面積

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

的重量，而非刻意為單數層或雙數層的方式。至於補牆工程實務，碳纖維貼覆方式，先貼縱向再包覆水平向圍束的工法，或許可列為後續年度之研究範疇。

有關矩形 RC 柱斷面四周導角最小半徑的規定，已有相關文獻探討之，且國內公共工程委員會相關施工綱要規範，亦已訂有碳纖維包覆補強於隅角部處理之規定供參。而本研究實驗結果顯示，隅角部凸角半徑為 3 公分，可避免所貼覆 CFRP 貼片發生應力集中之過早破壞。

若待補強柱遇有單側與隔戶牆接合，仍應打除部分與柱連接之隔戶牆，讓沿纖維方向之 CFRP 貼片，能閉合且須有 20 公分以上之搭接，以確保圍束混凝土之有效性，否則建議應另覓其他補強工法協助。

本研究模擬非韌性配筋柱之行為，相關柱試體鋼筋之斷面尺寸、配筋量、配筋細部及強度等，係參採國內外相關文獻及勘災資料而決定，本案柱試體僅為單一柱之半柱，未包含梁構造之部分，故無法藉以探討梁柱行為。

柱以 CFRP 貼覆補強工法，具施工容易及工期短特性，可有效提供階段性補強之韌性補強使用，亦可能為永久性之補強措施，惟必須在工程專業技術人員的評估下進行，並建議搭配可提升結構構件或系統強度之補強工法，提升整體建築物之耐震行為。

第二節 建議

立即可行建議—在 4 樓以下低矮 RC 建築，若採用「韌性」理論進行補強設計，柱構件層間變位角可符合規範規定 3% 之要求。

主辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會

協辦機關：內政部建築研究所

在 4 樓以下低矮 RC 建築（低軸力比 20% 下），若依韌性理論進行補強設計，補強後試體塑性轉角容量為 8.88%，可符合規範對柱構件應大於 3% 要求，但 CFRP 補強對側向強度之貢獻，則有限。雖然，柱僅補強 2 層碳纖維，其塑性轉角容量達 7.91%，韌性效益明顯，但是考量國內 CFRP 施工品質，以及難以掌握待補強柱實際現況等因素，建議必須在專業技師、建築師的評估與監督下，可依韌性理論僅行補強設計。CFRP 貼覆補強工法，應適用於低矮 RC 建築物（騎樓）柱之韌性補強，亦適合老舊建築於重建或全面補強的整合、規劃期間，較快速的先進行局部性或階段性之補強措施，降低等待期間，因遭遇地震建築物傾斜或立即倒塌之風險。

立即可行建議—以 CFRP 貼片進行柱構件韌性補強，應於全柱貼覆 CFRP 貼片，以避免破壞發生於非預期之位置。

主辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會

協辦機關：內政部建築研究所

以 CFRP 貼片進行韌性補強，可能將非韌性配筋（橫向鋼筋量不足者）柱由屬剪力控制之破壞模式，轉為撓曲行為主控之破壞，故不宜僅於柱端可能發生撓曲塑鉸之範圍，貼覆 CFRP 貼片，以避免發生非預期之破壞。矩形 RC 柱採凸角半徑為 3 公分之導

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

角，以及沿碳纖維方向採 20 公分的搭接長度，當 RC 柱試體達極限變形時，未發現碳纖維貼片發生非預期之破壞。

立即可行建議—柱構件以 CFRP 貼片進行韌性補強，其對於韌性能力的提升效益，將趨於一定值。

主辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會

協辦機關：內政部建築研究所

本研究試驗結果顯示，隨著 CFRP 貼片補強層數的增加，平均每層所能提升韌性的效率，將呈現降低之趨勢，亦即表示若貼覆過多的 CFRP 貼片，對柱構件韌性效益的提升，將趨於一定值，或韌性效益增加有限。

附錄一 研究計畫期初審查會議紀錄

檔 號：

保存年限：

內政部建築研究所 函

機關地址：231新北市新店區北新路3段200號13樓

承辦單位：環境控制組

聯絡人：林霧霆

聯絡電話：06-3300504 分機2103

傳真電話：06-3300480

電子信箱：wtlin@abri.gov.tw

受文者：如行文單位

發文日期：中華民國107年3月27日

發文字號：建研環字第1070002970號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨

主旨：檢送本所107年度第6次研究業務協調會議紀錄1份，請查照

。

正本：王代理所長安強、鄭主任秘書元良、王組長順治、蔡組長緯芳、陳組長建忠、羅組長時麒、蔡主任介峰、陶主任其駿、姚約聘研究員志廷、陳副研究員麒任、王副研究員家瑩、林副研究員招焯、張助理研究員志源、林約聘助理研究員霧霆

副本：本所環境控制組

電子交換率

內政部建築研究所 107 年度第 6 次研究業務協調會議紀錄

一、時間：107 年 3 月 19 日(星期一)下午 2 時

二、地點：本所簡報室

三、主席：王代理所長安強

四、出席人員：詳簽到簿

記錄：陳麒任、王家瑩、姚志廷、

五、主席致詞：(略)

蔡介峰、林招焯、林霧霆、

六、研究案主持人簡報：(略)

張志源、陶其駿等。

七、發言要點：

(一)「我國近零能源建築之發展策略與可行性評估研究」案：

1. 有關因地制宜節能策略之研擬，請考量我國與其他國家不同之氣候條件等各方面因素，並加強政策面的分析。
2. 簡報所提「被動式」建築設計，請修正為「誘導式」之用語。
3. 國外推行近零能源建築常以實證示範場域做起，建議可先蒐集國內、外推行近零能源建築場域之相關資料，並就相近型態之建築案例比較分析，以利後續策略研擬參考。
4. 請釐清本研究與本所 98-99 年零碳綠建築相關研究之差異性，審慎區隔避免重複。
5. 建議本研究從都市計畫、區域計畫及建築設計等不同尺度分別進行發展策略之檢討。
6. 本研究課題名稱建議調整為「我國近零能源建築發展策略與可行性研究」。

(二)「以 ISO 7235 規範進行 R1 消音箱實驗設備性能檢核驗證研究」案：

1. 本研究範疇為震災後實驗設施修復量測驗證，相關引用測試標準係屬研究內容不須呈現於題目，建議調整研究課題名稱；並建議一併探討如何避免地震損壞之措施或方法。
2. 本案目前採用 ISO 標準進行設施量測驗證，因國內亦具備與 ISO 7235 內容相同之 CNS 實驗標準，建議考量採 CNS 標準進行相關驗證，另後續請一併檢討國內、外建築音響相關標準之更新狀況。
3. 研究主題對本所實驗室具有重要性，相關修復及量測驗證之經驗，未來可作為實驗量測參考應用，並建議將成果投稿擴大推廣分享。
4. 本研究課題名稱建議調整為「震災後建築音響消音箱實驗設備性能驗證之研究」。

(三)「建材逸散塑化劑檢測技術開發與試驗調查之研究」案：

1. 建議釐清本研究內容與前期 105 年「建築材料逸散塑化劑風險評估及檢測方法之研究」、104 年「建材逸散法定毒性總揮發性有機化合物資料庫與調查之研究」差異之處，並請澄清室內空氣品質非等同建材逸散，以免造成混淆。
2. 本研究擬參酌 ISO 16000-33 研擬「室內空氣－鄰苯二甲酸酯類塑化劑試驗法－氣相層析質譜儀法」CNS 標準(草案)，建議應先瞭解是否適用於建築材料，以利本所後續應用。

3. 塑化劑應用層面廣泛，包括玩具、器具及包裝等均可能殘留，非僅存在於建材，建議應聚焦在本所業務領域，避免過度發散，並請調整本案研究緣起、相關課題定義及預期管制目標等。

(四)「健康建築認證納入我國綠建築評估之可行性研究」案：

1. 建議釐清 WELL 健康建築認證體系如何與 LEED 評估內容接軌，並探討導入方式。
2. 健康建築應考量的不只有建築物本體，建議將後續使用者管理維護因素納入考量。
3. 健康的定義廣泛，對於不同專業領域而有不同的認定，建議限縮範圍，俾與綠建築結合，另應釐清說明「病態建築」與「健康建築」的差異。
4. 本研究主要重點為提升與健全我國綠建築健康指標群，建議簡化研究課題名稱，研究範疇並以我國綠建築認證體系為主，避免與其它認證混淆。
5. 本研究課題名稱建議調整為「綠建築室內環境指標整合健康概念之可行性研究」。

(五)「健康綠建材試驗標準方法之精進研究」案：

1. 本研究擬修訂健康綠建材試驗標準方法，考量目前許多單位及試驗機構引用該方法，建議至少召開 2 場次座談會審慎研議，俾彙整各界意見。
2. 避免本研究造成各界誤解為新試驗方法之研提，建議課題名稱調整為「室內建材揮發性有機逸散物質檢測標準試驗方法及程序之精進研究」。

(六)「國內外綠建材類標章評估系統比較分析之研究」案：

1. 本案所提研究範圍過大，建議聚焦於循環經濟及低碳等符合國際發展趨勢之議題。
2. 建議評估是否可將綠建材之防火性能一併納入探討。
3. 建議將國內相關標章（例如環保標章等）納入研究分析對象。

（七）「推動社會住宅之社區營造研究」案：

1. 建議本研究聚焦社會住宅與環境關係及居住者社會邊緣化之問題分析，另有關住戶增加自我認同、社區認同及與周邊社區共容等議題，未來亦可考量規劃相關研究議題。
2. 本研究課題名稱建議調整為「推動社會住宅之社區照顧研究」。

（八）「建築 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」案：

1. 本案 CFRP 貼片補強工法屬乾式工法，亦符合推動建築物「階段性補強」政策之需求，惟建議應將此種工法之施工時間、所需費用與適用範圍等，納入研究探討。
2. CFRP 貼片補強工法，雖可有效增加 RC 柱的韌性與剪力強度，但也受限於對撓曲與軸壓強度之補強效益，建議未來可考慮結合其他修復補強方法共同使用。
3. 建議可參採本所歷年相關研究成果，或就教其他同仁實驗經驗，並強化相關文獻蒐集。
4. 建議本研究可改以柱局部小段試體進行實驗，以解決試體發包不易及費時問題，俾爭取報告撰寫時間。

八、會議結論：

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

請參考與會同仁之寶貴意見，並請納入研究內容參採修正，
使研究成果更為豐富完整。

九、散會：(下午 4 時 30 分整)

附錄二 期中審查會議紀錄

檔 號：

保存年限：

內政部建築研究所 函

機關地址：231新北市新店區北新路3段200號13樓

承辦單位：工程技術組

聯絡人：李台光

聯絡電話：02-29310686 分機1303

傳真電話：02-(02)2931-0656

電子信箱：taikuang@abri.gov.tw

受文者：如行文單位

發文日期：中華民國107年8月14日

發文字號：建研工字第1070007434號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨

主旨：檢送本所107年度自行研究「建築RC柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」、「國內公有建築物申請耐震標章之案例探討」及「既有建築RC柱乾式鋼板補強實驗研究」等3案期中審查會議紀錄1份，請查照。

正本：李技師英傑、林副研究員敏郎、林教授耀煌、張董事長宏成、張協理敬昌、陳教授正誠、陳建築師澤修、黃技師耀文、中央研究院、臺北市政府都市發展局、中華民國全國建築師公會、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、社團法人中華民國建築技術學會、財團法人台灣建築中心、台灣電力股份有限公司、本所陳組長建忠、陶主任其駿、黃助理研究員國倫

副本：本所工程技術組、材料實驗中心(均含附件)

電子交換章

內政部建築研究所 107 年度自行研究「建築 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」、「國內公有建築物申請耐震標章之案例探討」及「既有建築 RC 柱乾式鋼板補強實驗研究」等 3 案期中審查紀錄

一、時間：107 年 8 月 2 日（星期四）上午 9 時 30 分

二、地點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 4 會議室（新北市新店區北新路 3 段 200 號 15 樓）

三、主持人：陳組長建忠 記錄：陶其駿、李台光、黃國倫

四、出席人員：如簽到單

五、簡報內容：略。

六、綜合討論意見（依發言順序）：

（一）「建築 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」案：

中華民國全國建築師公會 陳建築師澤修：

1. 屋齡 30 年以上的建築為一般補強之對象，建議本研究試體斷面之配筋，應依當時規定之製作。
2. 建議收集歷年地震建築柱構件之破壞模式，再探討其補強方式。
3. CFRP 纖維具有方向性，試驗試體之製作，應探討不同貼覆方式及包覆層數不同的效果。
4. 以單柱進行試驗，僅具實驗性，建議考慮整體構架的行為模式，較為精確。
5. CFRP 的黏著劑的材質，建議亦能加以探討。

中華民國結構工程技師公會全國聯合會 陳技師正平：

1. 柱尺寸對一般公寓而言，通常柱寬同牆寬，因一 B 磚實

際尺寸約 20 cm；若欲對老舊公寓補強，則應以 20x50 cm 柱尺寸進行探討。

2. 老舊公寓均在柱底有搭接，若試體未能反映搭接，恐高估有效性。

李技師英傑：

1. 碳纖維的防火性較差，故對於補強外覆材的選用，是否亦能說明。
2. 以碳纖維貼覆，對圍束的效果及補強能力的提升較佳，但實務上的補強評估設計，是希望能以實驗的效果提供分析塑鉸模式或模擬的方法，故希望能建立一套配合 SERCB 或 NCREE 耐震評估分析的塑鉸模型標準。

林副研究員敏郎：

1. 持續進行耐震補強技術研發，落實老舊建築耐震補強工作，方可降低未知強震來襲，可能造成人命財產損失。本研究進行 RC 柱以碳纖維包覆補強技術研發，具有必要性及重要性，值得肯定。
2. 對於碳纖維包覆補強成敗，碳纖維包覆施工程序與施工品質為重要因素之一，建議應嚴選合格之施工廠商，並確實要求施作品質。
3. 本研究 4 組試體之剪力跨深比為 6.64，且為單曲率施載，推估為撓曲主控，主要破壞可能集中於柱底塑鉸區，對於 RNDC1.5 及 RNDC2.0 等 2 組試體，可考慮於塑鉸區域包覆 6 層及 8 層，其餘則包覆 4 層碳纖維貼片，以降低補強成本。

張協理敬昌：

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

本研究以適用老舊公寓之矩形柱進行研究，目前試體全周 CFRP 包覆，實務上有些柱子與牆接合，建議可納入後續探討內容。

陳組長建忠：

1. 可試圖分析目前以 CFRP 補強工法案件，工料使用量、單價直接及間接費用。
2. 此類工法補強，如何保證達到法規要求的耐震能力？
3. 期中或期末報告書，宜有專章在學理、規定及施作工法，以及對耐震力的演算與理論為宜。CFRP 補強工法，目前僅作地震初期已破壞部分的臨時措施，如本研究補強是永久性的，宜分析其差異。
4. 目前施作試體強度達 260 kgf/cm^2 ，比預期 140 kgf/cm^2 高出太多，如何推估當時建築物耐震強度是重大議題。

張董事長宏成(書面審查意見)：

1. 本研究具工程實務參考價值。
2. 本研究已完成試體製作，惟期中報告書第 9 頁進度說明，誤將試體製作日期寫成 106 年，請修正。
3. 期待 9 月初試驗結果。

中華民國土木技師公會全國聯合會 陳技師建民(書面審查意見)：

矩形柱碳纖維布包覆之搭接長度 20 cm，是否足夠？

建議以實驗驗證不同搭接長度之比較。

計畫主持人回應（陶主任其駿）：

1. 在試體細部設計之初，本研究即已蒐集國內自民國 63 年起之建築技術規則建築構造編，乃至 91 年訂頒「結

構混凝土設計規範」(內政部 91.6.27 台內營字第 0910084633 號令訂定)之期間，關於柱構件於箍筋設計規定之資料。由 63 年至 91 年間，建築技術規則建築構造編柱箍筋之設計規定，均無進行修訂，故經核算本研究所製作柱試體之箍筋量，係符合此期間建築技術規則之規定，惟建築技術規則規定：主筋每隔一根，仍應以箍筋圍紮。而參採歷次 921 地震或近日花蓮地震的實際建築震損情形發現，許多受損騎樓式低矮建築柱斷面配筋，實際上多未配置內繫筋，故本研究柱試體斷面配筋之設計，已考量民國 91 年以前建築技術規則規定及實際建築震損破壞模式等因素。

2. 本研究柱試體碳纖維貼片之貼覆，係採水平方向貼覆，主要提供柱核心混凝土之圍束強度，另碳纖維貼片包覆層數不同之探討，已納入本研究後續內容。
3. 有關 CFRP 黏著劑材質種類、主筋搭接方式、柱含牆接合之補強及碳纖維貼片之搭接長度，不屬本案研究目的及試體所能探討之範疇，故建議另案辦理。
4. 雖一般老舊公寓柱斷面尺寸約為 20 公分，惟此類與 1B 磚同寬之柱構件，多與隔戶牆連結，必須先敲除柱周邊之牆壁，其寬度至少 30 公分以上，因此不易直接進行碳纖維貼覆補強之施工，亦不利於民間建築之推動，而本研究所探討柱寬約 30 公分的斷面，依先前地震調查建築震損之實際案例，顯示約 4 層樓以下騎樓式建築物於低樓層之外柱，此類柱構件多為獨立之柱，未來較易於推動採碳纖維貼覆之階段性補強作為。

5. 由於本研究僅有 4 組試體，試驗參數主要為碳纖維貼片的層數（即提供圍束之能力），故無法整體含蓋主要參數之探討，且試體數量偏少，尚不足以建立配合 SERCB 或 NCREE 耐震評估法，有關柱端塑性鉸之分析模型。
6. 本研究規劃 4 組試體主要為撓曲主控，預期破壞可能集中於柱底塑鉸區，惟為避免本研究實驗結果，被錯用於撓剪或剪力主控之情形，即主要破壞非集中於柱底塑鉸區，故對於 RNDC1.5 及 RNDC2.0 等 2 組試體，暫維持於柱構件全長，貼覆 CFRP 貼片之規劃。
7. 本研究因受限於研究僅規劃 4 組柱試體，並未包含實務上柱構件表面之打除、整平及柱斷面 90 度角導角為圓弧施工等參數，且僅探討半柱於撓曲主控柱底塑鉸區破壞之情況，實無法僅透過 4 組試體試驗結果，去涵蓋或推估整棟建築的耐震行為，且每棟老舊建築物經耐震能力之評估，其結果可能為結構系統、結構構件細部、結構損壞現況或使用材料等之問題，亦可能為施工缺失、用途變更、基礎構造或工址土壤等因素，而導致建築物耐震能力之欠缺。RC 柱以碳纖維貼覆補強，僅為對柱補強工法之之一種，究竟需補強之數量與位置或補強工法之搭配，必須透過專業技師或建築師的評估與監督為之，故本研究僅能提出對單一柱試體補強之費用分析，實甚難藉由單一柱補強，推估整體建築補強費用。
8. RC 柱以碳纖維貼覆補強，僅為對柱補強工法之之一種，須透過專業技師或建築師的專業評估，以有效決究竟需進行結構系統補強，還是補強梁構件、柱構件或牆構件，

與補強之數量。一般而言，RC 柱以碳纖維貼覆補強工法，在專業技術人員的監督下，尚必須搭配其它適當補強工法，才較有可能確保達到法規的標準，而 RC 柱以碳纖維貼覆之補強工法，屬局部性之補強措施，可作為較快速的階段性補強，讓建築物排除軟弱層破壞之可能，降低倒塌之風險，避免於重建或全面補強整合期間，因遭遇地震而倒塌。

9. 碳纖維貼覆補強之工法，可為 RC 柱長期性或臨時性的補強措施，而本研究所探討碳纖維貼覆補強之 RC 柱，僅模擬於地震前之狀況，亦即柱試體於補強前，並未施以預先之破壞。
10. 本研究柱試體混凝土目標強度為 210 kgf/cm^2 ，而採購發包設計強度為 140 kgf/cm^2 ，目前柱試體基座部分混凝土 28 天齡期實測強度為 260 kgf/cm^2 ，比預期為高 50 kgf/cm^2 ，而柱試體上部混凝土尚未達 28 天，且本研究所採降低發包設計強度之措施，已為參照歷年試體製作經驗之具體對策，後續擬依試驗研究之慣例，於研究成果註明材料實驗之實際強度。
11. 本研究期中報告誤繕之文字，將參酌委員意見修正。

(二)「國內公有建築物申請耐震標章之案例探討」案：

中華民國全國建築師公會 陳建築師澤修：

1. 耐震標章之審查機制繁複、成本高，能否有較為簡省的重點審查機制來達成降低成本，促進民間參與的意願提高。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

2. 由於危老重建的推動，耐震標章的審查案件大為增加，是否對增設審查機構訂出標準，提供營建署參考。
3. 針對耐震設計的審查，應予以落實，有好的設計，才有好的產品。

中華民國結構工程技師公會全國聯合會 陳技師正平：

本公會已研擬審查要點可供參考。

財團法人台灣建築中心 李經理明濤：

目前公有建築申辦耐震標章意願偏低的情形，在於無法編列相關預算，本研究可藉由實際案例，蒐集如在統包或專案管理及監造模式，申辦耐震標章的執行經驗，做為相關機關之參考。

李技師英傑：

對公有建築物的耐震標章制度推動，立意及成效皆相當的優良，但對於公家工程，在推動耐震標章的執行，仍有探討的空間，個人以為至少在執行面，會有以下 2 個問題：

制度位階：公有建築物設計、監造人規定是建築師，而結構耐震監造與原有的結構監造即有部分重疊，如何區分權責。

設計、施工規範的執行：公有建築須依行政院公共工程標準版的施工規範，然耐震標章的實行，卻有更嚴格的標準，故對於施工規範的研修，有其必要。

張協理敬昌：

由既有完成耐震標章的公私有建築，確實發現許多原

始設計圖說之接頭或細部施工不易及無法符合耐震需求。本研究如能分別就 RC、SRC 及 SS 之案例，彙整設計與施工問題與具體建議，有助於建築師與結構技師團隊進行合理系統規劃配置與設計。

張董事長宏成(書面審查意見)：

1. 完成文獻蒐集分析。
2. 期待藉由實際案例，建立國內設計及施工資料，提供業界更具實務參考價值。

中華民國土木技師公會全國聯合會 陳技師建民(書面審查意見)：

耐震標章之案例探討非常適切，建議能增加台灣建築中心受理大量申請案之能力，並開放相關土木、結構等公會受理業界申請、發證及推廣作業。

陳組長建忠：

1. 本研究可由實際案例，分析公有建築因申請耐震標章，申請與聘請第三特別監督單位費用，以及其他如材料使用量及工期影響等間接費用，提供業界參考。
2. 本研究應加深研究的深度及廣度，並將本所答覆審計部、立法院及監察院資料，納入研究內容。

計畫主持人回應（李副研究員台光）：

1. 本研究將建議台灣建築中心，精進簡化標章申請流程等作業，並評估降低申請費用之可行性，以提升申請耐震標章之意願。
2. 目前「耐震標章」制度的耐震設計標準，僅為符合內政部公告建築物規定的耐震能力，並未提高設計標準；而

是在施工階段，以耐震標章制度導入「特別監督人」的監督及「耐震標章審查委員會」的察證機制，為現行公共工程的施工品管與施工查核制度外，增加的輔助性措施。

3. 未來將蒐集建築師及土木、結構技師等公會耐震標章相關審查要點資料，納為本研究參考。
4. 本研究後續將針對申請耐震標章之公有建築代表性案例，逐步建立國內設計及施工資料，並彙整設計與施工問題與具體建議，供業界參考。
5. 本研究將蒐集公有建築的執行經驗，做為相關機關編列申辦耐震標章經費之參考。
6. 後續將彙整本所答覆審計部、立法院及監察院資料，以及並將公有建築因申請耐震標章之間接費用，納入研究內容。

(三)「既有建築 RC 柱乾式鋼板補強實驗研究」案：

中華民國全國建築師公會 陳建築師澤修：

1. 鋼板與 RC 柱於多次反覆載重後，不同材料間易產生分離，填充材實驗採用無收縮砂漿，其與鋼板的結合性為何？
2. 結構構架於地震作用下，不只會產生軸壓力，也會產生拉力破壞，其解決方式為何？
3. 鋼板與 RC 柱是否有更好的結合方式？例如：植入螺栓鎖固。

中華民國結構工程技師公會全國聯合會 陳技師正平：

1. 不打除保護層，是否打除面磚？
2. 底座受力是面外勁度，效果有限。

中華民國土木技師公會全國聯合會 陳技師建民(書面審查意見)：

鋼板補強試體加裝鋼板及灌入無收縮砂漿時，如何確保灌注漿體填滿空隙？

李技師英傑：

鋼板補強對原有 RC 柱的 f'_c 提升或剪力提升的效益，是否能建立一套配合現有耐震評估分析程式(例如 SERCB 或國家地震工程研究中心的 TEASPA)的塑鉸模擬建議或方法。

林副研究員敏郎：

1. 持續進行耐震補強技術研發並落實老舊建築之耐震補強工作，方可降低未知強震來襲可能造成人命財產損失。本研究進行 RC 柱以乾式鋼板補強技術研發，具有必要性及重要性，值得肯定。
2. 本研究標的為既有建築 RC 柱，試驗施加 15%軸力比可能偏低，建議考慮增加軸力比。
3. 補強試體底部採用化學錨栓加固強化之設計，但包覆鋼板與柱身似無額外連結處理，未見明確的力量傳遞機制，恐難有效提升抗彎強度，宜再進行評估。
4. 因包覆鋼板僅靠加勁板與原柱面接觸，實際施作要如何使加勁板確實與柱面貼緊，建議先思考可行方法。
5. 包覆鋼板厚度、加勁板厚度與間距等為補強成效之重要參數，建議補強設計上宜再仔細檢討。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

張協理敬昌：

本研究以乾式鋼板補強非韌性配筋柱，以進行軸力彎矩試驗，因塑鉸發生於柱底，因此柱底的束制條件直接影響強度與變形，本研究試體之基座尺寸較柱大，補強鋼板底部設有垂直加勁板，透過底板、螺栓與基座連接，此部份與實務上與梁相接之狀況略有不同，建議予以探討，以提供合適之補強建議。

張董事長宏成(書面審查意見)：

1. 本研究具有工程實務參考價值。
2. 試體規劃製作完成。
3. 建議增加乾式鋼板補強之施工順序，及是否有其他影響因子(例如：RC 表面油漆、粉刷層疏鬆等)之說明。

陳組長建忠：

1. 可試圖分析目前以乾式鋼板補強工法案件，及工料使用量，單價直接與間接費用。
2. 此類補強如何保證達到法規要求的耐震能力？
3. 期中或期末報告書宜有專章在學理、規定及施作工法，以及其對耐震力的演算與理論為宜。
4. 乾式鋼板補強目前僅作地震初期已破壞部分的臨時措施，如本案的補強是永久性的，宜分析其差異。
5. 目前施作試體強度達 260 kgf/cm^2 ，比預期 140 kgf/cm^2 高出太多，如何推估當時建築物耐震強度是重大議題。
6. 本研究對象的高度或層數是多少？

計畫主持人回應（黃助理研究員國倫）：

1. 由去年研究結果可知，高軸力作用下無收縮砂漿與鋼板

結合性尚可。

2. 拉力與地震力同時作用之情況，需另案辦理，不在本研究範圍內。
3. 本研究為求保守，鋼板與 RC 柱之間部使用化學錨栓結合，實務上有使用化學錨栓會得到更佳效果。
4. 本研究 SNDR2 試體，比較像是有打除面磚之情況。
5. 本研究補強鋼板斷面與原 RC 柱之間，留有較大空隙，以無收縮砂漿灌注時，可以清楚判斷是否灌滿。
6. 本研究將依委員建議，考量增加軸力比。
7. 本研究原針對 20 m 以下之 RC 建築物，惟委員建議調整增加軸力部分，調整後適用對象需要再評估確認。

七、會議結論：

- (一) 本次會議 3 案期中報告，經徵詢在場審查委員與機關團體代表意見，審查結果原則通過。
- (二) 請業務單位將與會審查委員及出席代表意見暨部分委員所提之書面意見詳實記錄，供計畫主持人參採，並於期末報告針對期中審查意見逐一回應，如期如質完成研究計畫。

八、散會：中午 12 時 10 分。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

內政部建築研究所

本所 107 年度自行研究「建築 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」、「國內公有建築物申請耐震標章之案例探討」及「既有建築 RC 柱乾式鋼板補強實驗研究」等 3 案期中審查會議簽到簿

時 間：107 年 8 月 2 日(星期四) 上午 9 時 30 分			
地 點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 4 會議室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 15 樓)			
主 席：陳組長建忠		記 錄：李台光 黃國倫	
出席人員	簽到處	代 理 人	
		職 稱	簽 到 處
李技師英傑	李英傑		
林副研究員敬卿	林敬卿		
林教授耀煌			
張董事長宏成	(提供書面意見)		
陳教授正誠			
陳建築師澤修	陳澤修		
黃技師耀文			
中興研究院	唐文淵		
臺北市政府都市發展局			
中華民國全國建築師公會	陳澤修		
中華民國土木技師公會全國聯合會	(陳建築師提供書面意見)		
中華民國結構工程技師公會全國聯合會	張正平		

[圖檢閱：1700069495]

附錄二 期中審查會議紀錄

社團法人中華民國建築技術學會			
財團法人台灣建築中心	李明融		
台灣電力股份有限公司			
陶主任其璽	陶其璽		
李副研究員台光	李台光		
黃助理研究員國倫	黃國倫		
相關人員	白景富		
張協理敬昌	張敬昌		

[圖檢閱 1070039/95]

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

附錄三 期末審查會議紀錄

檔 號：

保存年限：

內政部建築研究所 函

機關地址：231新北市新店區北新路3段200號13樓

承辦單位：工程技術組

聯絡人：黃國倫

聯絡電話：02-29310686 分機1322

傳真電話：02-29310656

電子信箱：glhuang@abri.gov.tw

受文者：如行文單位

發文日期：中華民國107年12月28日

發文字號：建研工字第1070012036號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨

主旨：檢送本所107年度自行研究「既有建築RC柱乾式鋼板補強實驗研究」及「建築RC柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」等2案期末審查會議紀錄1份，請查照。

正本：李技師英傑、林副研究員敏郎、林教授耀煌、張董事長宏成、張協理敬昌、陳教授正誠、陳建築師澤修、黃技師耀文、中央研究院、臺北市政府都市發展局、中華民國全國建築師公會、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、社團法人中華民國建築技術學會、財團法人台灣建築中心、台灣電力股份有限公司、本所陳組長建忠、陶主任其駿、黃助理研究員國倫

副本：本所工程技術組(含附件)、材料實驗中心

電子交換章

內政部建築研究所 107 年度自行研究「既有建築 RC 柱乾式鋼板補強實驗研究」及「建築 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」等 2 案期末審查會議紀錄

一、時 間：107 年 11 月 28 日（星期三）上午 9 時 30 分

二、地 點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 4 會議室（新北市新店區北新路 3 段 200 號 15 樓）

三、主持人：陳組長建忠 記錄：黃國倫、陶其駿

四、出席人員：如簽到單

五、簡報內容：略。

六、綜合討論意見（依發言順序）：

（一）「既有建築 RC 柱乾式鋼板補強實驗研究」案：

張協理敬昌：

1. 請提供各試體於設計軸力下之計算強度，及預估破壞模式，以作為試驗後之檢討。
2. 本案 2 支補強試體之試驗強度判斷，應為受化學螺栓之強度控制，建議將化學螺栓相關設計參數及影響，納入說明討論。

陳建築師澤修：

1. 鋼板包覆後保護層灌注，使用無收縮水泥砂漿，應也可考慮採用 EPOXY 來灌注。
2. 保護層未敲除，直接鋼板包覆之試體，其效能比打除保護層敲除後，重新灌注保護層之試體好，與預期成果有落差，宜再進一步探討。
3. 目前試體為實驗室新做，與地震後的結構補強是否類似？

建議於後續研究，可探討地震後的結構補強。

4. 後續研究建議加入基礎補強。

張董事長宏成(書面意見)：

1. 報告書第 7 頁設體設計，軸力比($P/A_g f'_c$)為 50%，但第 9 頁表 2-1 為 20%，請確認。
2. 由本案結論得知，RC 柱乾式鋼板補強確實能將塑性轉角由 2%提升到 5%，提升韌性能力。
3. 本案具工程實務參考。
4. 建議將來可進一步研究柱斷面尺寸與鋼板厚度關係，方便工程界參考。

黃技師耀文(書面意見)：

1. 報告書第 33 頁說明「建議實務上可考量在進行鋼板補強前，將柱上層之載重儘量移除」，因舊有結構物柱上層均存在載重，建議對移除方式略作說明。
2. 本案補強鋼板試體底部設有固定垂直加勁板，惟一般補強較少採用鋼板底部或頂部加勁固定，似有實務上有差異，建議此部份可略加說明。

陳組長建忠：

1. 實驗中對敲除保護層效果不顯著，可能係因本案混凝土是新灌而非既有建築物，請試從文獻尋找答案。例如以往本所相關研究，光是混凝土中性化速度，50 年約是 5 公分。
2. 對柱子的構造，似乎沒充分掌握鋼筋部分，若基於保守進行補強，有沒有安全上負面的影響？例如強柱弱梁等問題。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

3. 本案成果可否適用在階段性補強？可否做永久性補強。
4. 施工對試驗結果之影響，除經費外，其他項目可收集整理。
5. 文獻回顧宜再加強，對選用的方法，或學理、實驗宜比較分析。

計畫主持人回應（黃助理研究員國倫）：

1. 感謝委員的肯定與指導。
2. 本案考量無收縮砂漿的流動性及強度，一般均較 EPOXY 低，實務上若採用 EPOXY，理論上補強效果會更好。
3. 震後 RC 柱補強及使用 EPOXY 補強等議題，建議另案研究之。
4. 報告書第 7 頁之軸力比係誤植為 50%，將於成果報告時修正。
5. 進行鋼板補強前將上層載重儘量移除之方法，將於成果報告說簡要說明。
6. 敲除保護層試體補強效果不如預期，推估係由許多因素造成，例如底部化學錨栓之強度最先控制整體強度、敲除保護層可能造成內部初始裂縫等。
7. 本案鋼筋已進行拉力試驗得到實際材料強度，故已充分掌握鋼筋強度。基於保守對柱進行補強，強柱弱梁並不會有疑慮。
8. 本案可應用於階段性補強，亦可做為永久性補強。

（二）「建築 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」案：

張協理敬昌：

1. 碳纖維搭接長度，應與碳纖網單位重量有關，本案建議 20cm 應屬合宜。
2. 建議提供各試體於設計軸力下之計算強度及預期破壞模式，並與試驗結果比較。
3. 建議依據本案試驗結果，討論柱以 CFRP 補強之時機。
4. 簡報中提到 CFRP 補強對柱剪力強度增加之效果不佳，是否因補強後試體受撓曲強度控制，而試驗側向強度未增加之故？

陳建築師澤修：

1. 價格較低、施工快速及容易施工是碳纖維補強的優勢，值得推廣。
2. 老舊受破壞的柱試體，如何模擬？
3. 碳纖貼覆方式，多數以單數層方式，先包圍束的水平向，再貼垂直向，最外層再收圍束。
4. 方柱導角的長度，應可研究其長度與柱大小的比例關係。
5. 方柱導角，應說明需磨圓角。
6. 原有裂縫應先灌注修補後，再包覆。

張董事長宏成(書面意見)：

1. 由本案得知碳纖維貼覆補強可提升柱之塑性轉角 2.7 倍以上，提升耐震能力。
2. 提供工程界碳纖維補強具參考價值。
3. 建議將施工實際流程步驟說明整理，讓工程界參考。

黃技師耀文(書面意見)：

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

1. 本案結論，個人覺得具有工程實務之參考價值。
2. 綜觀舊有建築物(尤其舊式公寓)，大部分至少柱都有一側與隔戶牆接合，且礙難拆除界面，恐較無法達到 CFRP 貼片圍束效果，其補強是否與本案有所差異？建議可予以說明，或另案研究探討。

陳組長建忠：

1. 對柱子的構造，似乎沒充分掌握鋼筋部分，如基於保守補強，有沒有安全上負面的影響？例如強柱弱梁等問題。
2. 本案可否做階段性補強用？可否做永久性補強。
3. 補強之影響，除經費外的項目可收集整理。
4. 文獻回顧宜再加強，對選用的方法，或學理、實驗宜比較分析。

計畫主持人回應（陶主任其駿）：

1. 本案所規劃鋼筋混凝土之柱試體，其重要探討參數為柱橫向箍筋量之不足，並未考量將柱試體預為破壞至某特定程度後，再進行碳纖維貼片之補強，故試驗結果旨在驗證於震前，柱尚無發生任何裂縫損傷之時機，而進行 CFRP 補強之效益探討。惟此試驗結果，在工程專業技術人員的評估下，應可適用柱於輕微裂縫之損害。
2. 本案柱試體於 CFRP 補強後，的確發現補強前由剪力強度主控，補強後試體轉變為撓曲強度控制。而本案柱試體試驗結果顯示，試體試驗側向強度增幅最大亦為超過 10%，故本案才提及側向強度增加有限。
3. 本案柱試體係模擬 老舊建築物柱構件橫向箍筋不足之

情況，由於柱構件主要破壞模式包含剪力破壞、撓曲破壞及軸力破壞，或者合併發生前述之破壞，再依柱損害的程度，又可分為裂縫、粉刷層脫落、保護層剝落、主筋挫屈（或斷裂）及箍筋脫開（或斷裂）等等級，故本案尚無法模擬受破壞的柱。

4. 在學理上，於水平向貼覆碳纖維貼片，提供柱構件混凝土有較佳的圍束效果。而碳纖維貼片的層數，取決於碳纖維的厚度或單位面積的重量，而非刻意為單數層或雙數層的方式。至於委員建議 碳纖貼覆方式，先包圍束的水平向，再貼垂直向，最外層再收圍束，或許可列為下年度研究之範疇。
5. 有關矩形柱斷面四周導角最小半徑的規定，已有相關文獻探討之，且國內公共工程委員會相關施工綱要規範，亦已訂有碳纖維包覆補強於隅角部處理之規定供參。本案實驗結果顯示，隅角部凸角半徑宜大於 3 公分。
6. 若待補強柱遇有單側與隔戶牆接合，仍應打除部分與柱連接之隔戶牆，讓沿纖維方向之 CFRP 貼片，能閉合且須有 20 公分以上之搭接，以確保圍束混凝土之有效性，否則建議應另覓其他補強工法協助。
7. 本案用以模擬非韌性配筋柱之行為，相關柱試體鋼筋之斷面尺寸、配筋量、配筋細部及強度等，係參採國內外相關文獻及勘災資料而決定，本案柱試體僅為單一柱半柱，未包含梁構造之部分，故無法藉以探討梁柱行為。依相關文獻及本案試驗結果顯示，以 CFRP 貼覆，可大幅提升柱構件塑性鉸之韌性，約略提升水平側向強度。

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

8. 柱以 CFRP 貼覆補強工法，具施工容易及工期短特性，可有效提供階段性補強之韌性補強使用，亦可能為永久性之補強措施，惟必須在工程專業技術人員的評估下進行，並建議搭配可提升結構構件或系統強度之補強工法，提升整體建築物之耐震行為。
9. 本案原提供碳纖維貼覆補強工法之經費分析，主要參採各縣市「建築物工程施工損害鄰房鑑定手冊」修復費用估算之單價分析表，惟綜評與會委員之討論意見，並考量各補強施工環境及條件之差異，為避免造成使用之困擾，擬不納入經費分析之敘述。
10. 將再加強相關文獻之蒐集、整理與分析。

七、會議結論：

- (一) 本次會議 2 案期末報告，經與會審查委員及出席代表審查結果原則同意通過；請業務單位將與會審查委員及出席代表意見詳實記錄，供計畫主持人參採，於成果報告中製作回應表妥予回應，並確實依照本部規定的格式製作報告。
- (二) 請注意文字與圖表的智慧財產權，如有引述相關的資料，應註明資料來源。整份報告的結論與建議，應考量具體可行。

八、散會：中午 12 時 10 分。

內政部建築研究所

本所 107 年度自行研究「既有建築 RC 柱乾式鋼板補強實驗研究」及「建築 RC 柱以碳纖維貼覆補強之耐震能力研究」等 2 案期末審查會議簽到簿

時 間：107 年 11 月 28 日(星期三) 上午 10 時整			
地 點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 4 會議室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 15 樓)			
主 席：陳組長建忠		記 錄：黃國偉	
出席人員	簽 到 處	代 理 人	
		職 稱	簽 到 處
李技師英傑	(請假)		
林副研究員敏郎	(請假)		
林教授耀煌	(請假)		
張董事長宏成	(書面意見)		
張協理敬昌	張敬昌		
陳教授正誠	(請假)		
陳建築師澤修	陳澤修		
黃技師耀文	(書面意見)		
中央研究院			
臺北市政府都市發展局			
中華民國全國建築師公會	陳建忠		
中華民國土木技師公會全國聯合會			

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

中華民國結構工程技師公會全國聯合會			
社團法人中華民國建築技術學會			
財團法人台灣建築中心	吳聖賢		
台灣電力股份有限公司			
陶主任其駿	陶其駿		
黃助理研究員國倫	黃國倫		
相關人員	范仲樸		
	康永榮		

參考書目

- [1] 國家地震工程研究中心，安全耐震的家—認識地震工程，2011。.
- [2] 楊清宏，「複合材料圍束混凝土構材受軸力行為之數值分析」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，民國 95 年。.
- [3] DragonPlate，What is Carbon Fiber? Carbon Fiber Technology，網址：
<https://dragonplate.com/sections/technology.asp>.
- [4] 彭康瑜、吳明興、陳建宏、王吉杉、林生發、鄭俊傑，「國道橋梁耐震補強之碳纖維包覆設計與施工」，結構工程，第三十二卷，第三期，2017，pp.88-105。.
- [5] 李有豐，國內既有鋼筋混凝土結構物補強之現況檢討，鋼筋混凝土結構物維修補強技術研討會論文集，p4-1~4-37，92 年 11~12 月，臺北。.
- [6] 李有豐、宋奕穎、朱育正，RC 橋柱之 CFRP 補強成效驗證-圓形柱，"RC 結構物以 CFRP 補強設計導則及案例說明之研究與成果推廣"研討會論文集，2002，p105~153，臺北。.
- [7] 內政部營建署，「混凝土結構設計規範」，2011，臺北。.
- [8] 吳穎涵，鋼筋混凝土構造新型碳纖維補強技術之試驗與分析，國立台北科技大學博士論文，2013 年，臺北。.
- [9] 歐昱辰，低矮 RC 建築以非矩形斷面柱提升耐震性能之實驗研究，內政部建築研究所委託研究報告，2016 年，臺北。.
- [10] Richard D. Iacobucci, Shamim A. Sheikh, and Oguzhan Bayrak,"Retrofit of Square Concrete Columns with Carbon Fiber-Reinforced Polymer for Seismic Resistance",ACI Structural Journal, V. 100, No. 6,2003.
- [11] 921 地震教育園區，網址：<https://hiveminer.com/Tags/921%E5%9C%B0%E9%9C%87>.

- [12] Sezen, H., 2002. Seismic Response and Modeling of Lightly Reinforced Concrete Building Columns, Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- [13] 林敏郎、林至聰、陳沛清、蔡克銓、吳穎涵，2009 年，「矩形 RC 柱採碳纖維包覆暨碳纖維錨栓耐震補強研究」，NCREE-09-014，國家地震工程實驗中心，台北。.
- [14] 張順益、廖文義、宋裕祺、尹世洵、陳亭偉，既有 RC 建築物修復補強工法之性能試驗研究(2)，內政部建築研究所委託研究報告，2011 年。.
- [15] 陳正平，談「結構混凝土規定抗壓強度之最低設計強度」修訂，技師報-結構設計，台灣省土木技師公會，2017 年。.
- [16] ACI Committee 440, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures," ACI 440.2R-08, Farmington Hills, MI, American Concrete Institute, 2008.
- [17] 李有豐，CFRP 補強混凝土結構物技術規範(草案)，補助單位：內政部營建署，2003 年。.
- [18] 行政院公共工程委員會，第 03240 章碳纖維包覆補強，公共工程施工綱要規範，2016 年，臺北。.
- [19] 蔡宛婷，2016，「鋼筋混凝土橫簷柱耐震圍束之研究」，碩士論文，黃世建指導，國立台灣大學土木工程學系。.
- [20] 張家榮，2014，「新高強度鋼筋混凝土外部梁柱接頭剪力強度測試」，碩士論文，國立雲林科技大學營建工程學系。.

建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陶其駿

出版年月：107 年 12 月

版次：第一版

ISBN：