

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱 耐震性能影響之驗證研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 108 年 12 月

PG10802-0219

108301070000G0059

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱 耐震性能影響之驗證研究

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 108 年 12 月

MINISTRY OF THE INTERIOR
RESEARCH PROJECT REPORT

Experimental verification of CFRP orientations
on the strengthening
of reinforced concrete columns

BY
CHI CHUN TAO

December , 2019

目次

表次.....	III
圖次.....	V
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 文獻回顧.....	2
第三節 研究方法與進度說明	10
第四節 研究目的.....	13
第五節 預期成果.....	14
第二章 試體計畫	17
第一節 試體設計.....	17
第二節 試體製作.....	31
第三節 試驗裝置與測計安排	37
第三章 試驗結果與討論	51
第一節 試驗結果與觀察	51
第二節 水平向貼覆 CFRP 貼片對耐震能力影響	112
第三節 垂直向貼覆 CFRP 貼片對耐震能力影響	119
第四章 結論與建議.....	125

第一節 結論	125
第二節 建議	130
附錄一 研究計畫期初審查會議紀錄	131
附錄二 期中審查會議紀錄	137
附錄三 期末審查會議紀錄	145
參考書目	157

表次

表 1.1 研究進度規劃	15
表 2.1 非韌性柱試體相關參數比較	22
表 2.2 碳纖維布規格	28
表 3.1 鋼筋拉伸試驗結果彙整	54
表 3.2 試體基礎 28 天齡期之圓柱試體抗壓強度	55
表 3.3 各試體柱 28 天齡期之圓柱試體抗壓強度	55
表 3.4 各混凝土圓柱試體抗壓強度	56
表 3.5 各試體對應之強度齡期	56
表 3.6 各柱試體試驗結果之強度與韌性變化	57

圖次

圖 1.1 纖維材料與鋼板之應力與應變關係曲線圖	3
圖 1.2 碳纖維布匹	5
圖 1.3 RC 柱以 CFRP 包覆補強之剖面示意圖	5
圖 1.4 圓形斷面橋柱之遲滯迴圈	8
圖 1.5 柱構件之角隅因碳纖維布應力集中致使破壞	9
圖 1.6 典型沿街店舖式住宅平面示意圖	9
圖 1.7 研究進行之流程圖	16
圖 2.1 非韌性配筋柱橫向箍鋼筋間距過大之情形	19
圖 2.2 非韌性配筋柱箍筋端部僅為 90 度彎鉤且柱內設有排 水管	19
圖 2.3 試體 RND 與試體 RNDC2L 之破壞模式	20
圖 2.4 試體 ND 之設計圖	23
圖 2.5 矩形 RC 柱採碳纖維包覆補強及碳纖維錨栓之情形	24
圖 2.6 s 間距內碳纖維布與橫向鋼筋側向力	27
圖 2.7 RC 柱試體外圍 CFRP 貼片之包覆方式	29
圖 2.8 NDC 系列試體於補強前之柱試體斷面圖	30
圖 2.9 自加工廠完成加工送抵工作區之鋼筋	31
圖 2.10 底座定平與試體放樣	32

圖 2.11 柱試體斷面應變計之配置圖	38
圖 2.12 軸力構架試驗裝置示意圖	39
圖 2.13 試驗側向加載之位移控制歷時	40
圖 2.14 底座鋼筋籠之組立	40
圖 2.15 上部柱主筋之定位	41
圖 2.16 底座預留 PVC 管之擺設與封口	41
圖 2.17 試體吊耳於底座之設置	42
圖 2.18 底座模板之組立	42
圖 2.19 底座混凝土澆置	43
圖 2.20 底座拆模後之情形	43
圖 2.21 柱試體應變計之黏貼	44
圖 2.22 應變計之黏貼與固定	44
圖 2.23 上部柱身鋼筋之組立	45
圖 2.24 模板之圓形導角	45
圖 2.25 上部柱身模板完成組立	46
圖 2.26 上部柱混凝土之澆置	46
圖 2.27 上部柱混凝土之搗實	47
圖 2.28 混凝土澆置坍度試驗	47
圖 2.29 混凝土圓柱式體製作	48
圖 2.30 柱頂上部灌漿孔圓形蓋板之封板	48

圖 2.31 應變計訊號線束之收線	49
圖 2.32 上部混凝土柱四周之導角	49
圖 2.33 試體製作完成與養護情形現況	50
圖 3.1 試體 ND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片	58
圖 3.2 試體 ND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片	62
圖 3.3 試體 ND 於試驗結束之破壞情形	66
圖 3.4 試體 ND 遲滯迴圈	67
圖 3.5 試體 ND 強度包絡線	67
圖 3.6 試體 NDCH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照 片	70
圖 3.7 試體 NDCH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照 片	75
圖 3.8 試體 NDCH 於試驗結束之破壞情形	80
圖 3.9 試體 NDCH 遲滯迴圈片	81
圖 3.10 試體 NDCH 強度包絡線片	81
圖 3.11 試體 NDCHH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片	84
圖 3.12 試體 NDCHH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形	

照片	90
圖 3.13 試體 NDCHH 於試驗結束之破壞情形	96
圖 3.14 NDCHH 試體遲滯迴圈	97
圖 3.15 NDCHH 試體遲滯迴圈片	97
圖 3.16 試體 NDCVH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片	100
圖 3.17 試體 NDCVH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形 照片	105
圖 3.18 試體 NDCVH 於試驗結束之破壞情形	110
圖 3.19 試體 NDCVH 遲滯迴圈	111
圖 3.20 試體 NDCVH 強度包絡線	111
圖 3.21 試體側向降伏及極限位移之定義	115
圖 3.22 試體 ND 與試體 NDCH 強度包絡線比較	116
圖 3.23 試體 ND 與試體 NDCH 遲滯迴圈比較	116
圖 3.24 試體 ND 與試體 NDCHH 強度包絡線比較	117
圖 3.25 試體 ND 與試體 NDCHH 遲滯迴圈比較	117
圖 3.26 試體 NDCH 與試體 NDCHH 強度包絡線比較 ...	118
圖 3.27 試體 NDCH 與試體 NDCHH 遲滯迴圈比較	118
圖 3.28 試體 NDCVH 與試體 NDCH 強度包絡線比較 ...	121
圖 3.29 試體 NDCVH 與試體 NDCH 遲滯迴圈比較	121

圖 3.30 試體 NDCHH 與試體 NDCVH 強度包絡線比較	122
圖 3.31 試體 NDCHH 與試體 NDCVH 遲滯迴圈比較	122
圖 3.32 各試體遲滯迴圈比較	123
圖 3.33 各試體強度包絡線比較	123
圖 4.1 試體 ND 與試體 NDCH 破壞模式之差異	128
圖 4.2 CFRP 貼片之搭接細部	129

摘 要

關鍵詞：RC 柱、CFRP 補強、非韌性配筋

一、研究緣起

內政部已啟動「全國建築物耐震安檢及重建補強-給國人一個安心的家」的政策，全力推動老舊建築物於重建或全面補強的整合或規劃期間，可進行局部性或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。因此，為配合前揭政策，著手檢視及發展適用於「階段性補強」的技術研究。

碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)包覆補強工法，具有施工容易、施工快速、不佔空間、價格較低與 CFRP 材料抗拉強度高等特性，可提供有安全疑慮的房子，能快速的進行耐震補強。由國內外相關文獻顯示，對 RC 柱試體補強工法之研究，多採水平向進行 CFRP 貼片之貼覆，此亦符合學理上提供水平向之圍束力。惟國內對於 RC 柱以 CFRP 貼片補強工法之實務，常見先垂直向再水平向混貼的補強工法，此種包含垂直向之貼覆方式，在既有文獻中亦不多見。因此，本研究將透過結構試驗驗證，以釐清 CFRP 貼覆方向對 RC 柱韌性補強效益之疑義，並確認 CFRP 補強工法施工細部之合理性。

二、研究方法及過程

本研究共規劃 ND 及 NDC 等 2 個系列共計 4 組試體，分別為試體 ND 為典型非韌性矩形 RC 柱，另外 NDCH 試體係以 1 層碳纖維水平向貼覆進行補強，試體 NDCHH 係貼覆 2 層水平向碳纖維貼片，試體 NDCVH 則表面先垂直向貼覆 1 層 CFRP 貼片，在於其外貼覆地 2 層水平向之 CFRP 貼片，NDC 系列 3 組試體斷面之 4 周角隅，均預製半徑為 3 公分之圓弧導角。所有試體於試驗前，均無任何裂縫損傷；

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

加載軸力比為 20%，且於定軸壓下進行側向加載試驗。

三、重要發現

- (一) 由試體破壞情形觀察，以 CFRP 貼片進行韌性補強，可將非韌性配筋 RC 柱原屬剪力控制之破壞，轉化為於柱端之撓剪破壞主控。
- (二) 比較試體 ND 與 NDCH 試驗結果顯示，若僅於水平向補強 1 層 CFRP 貼片（即每平方公尺 300 克以上的碳纖維），其塑性轉角容量可提升 42.9%，因此若進行 1 層水平向 CFRP 貼片圍束補強，對柱韌性提升效果是明顯的。
- (三) 比較試體 NDCH 與 NDCHH 試驗結果顯示，將水平向 CFRP 貼片，由貼覆 1 層增加為 2 層，其塑性轉角容量可再提升 44.2%，最大側力強度僅再些微增加 4.0%。表示 RC 柱若以水平向 CFRP 貼片進行圍束補強，對韌性的提升效益，明顯優於對最大側力強度之影響。
- (四) 比較試體 NDCH 與 NDCVH 試驗結果顯示，若 NDCH 多貼覆 1 層垂直向 CFRP 貼片，塑性轉角能力僅提升 14%，而最大側力強度僅增加 0.7%，此表示多貼覆 1 層垂直向之 CFRP 貼片，對柱韌性及最大側力強度之效益均有限。
- (五) 比較 NDCHH 與 NDCVH 試驗結果顯示，當試體同樣貼覆 2 層 CFRP 貼片，若 2 層均為水平方向補強，較 1 層垂直 1 層水平方向混貼者，其塑性轉角能力可提升 27%，最大側力強度約略增加 3.5%，故建議 CFRP 貼片應採水平方向施工。

四、主要建議事項

立即可行建議—對於 RC 柱的「韌性」補強效益，若採水平方向貼覆 CFRP 貼片，將明顯優於採垂直向之貼覆。

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

實驗結果顯示，於水平向貼覆碳纖維貼片，可提供柱構件混凝土有較佳的圍束效果，因此對韌性補強效益的提升，明顯優於採垂直向之貼覆方式。國內對於 RC 柱以 CFRP 貼片補強工法之實務，常見先垂直向再水平向混貼工法的補強效益，並未優於均以水平向貼覆的方式。

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，避免破壞發生於非預期位置。

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—RC 柱矩形斷面採凸角半徑為 3 公分以上之圓弧導角，以及沿碳纖維方向採 20 公分以上的搭接長度，可避免隅角部及搭接位置之 CFRP 貼片，發生非預期之破壞。

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

RC 柱斷面之角隅部，採凸角半徑為 3 公分以上之圓弧導角，當 RC 柱達極限破壞時，CFRP 貼片並未過早發生因角隅應力集中之斷裂。並且沿 CFRP 纖維方向採 20 公分以上的搭接長度，

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

以及沿非 CFRP 纖維方向採 10 公分的搭接，亦未發現因纖維搭接長度不足之破壞。

ABSTRACT

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

1. Purpose

The Ministry of the Interior has launched the policy of "Buildings Anti-seismic Security Inspection and Reinforcement- a home for the peace of mind". The policy focus on the old buildings in reconstruction or comprehensive reinforcement. 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. It can quickly provide houses with safety concerns, make the RC column not easy to break, and increase the chance of people's escape. According to the literature, the research of the RC column reinforcement method, the CFRP is applied in multiple horizontal directions. However, The reinforcement method of vertical and then horizontal mixing is common

in Taiwan. This type of covering method including vertical direction is rare in existing literature. Therefore, this study will be through structural tests. Discussion on the CFRP cover direction for the RC column toughness reinforcement effect.

2. Method and Steps

This study plan 4 of 2 series specimen including ND and NDC. ND is a typical non-tough rectangular RC column. NDCH specimen is reinforced with 1 layer of CFRP horizontal overlay. NDCHH specimen is reinforced with 2 layer of CFRP horizontal overlay. reinforced with 2 layer of carbon fiber, one is horizontal overlay, other is vertical overlay. 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.

3. Main Finding

- (1) 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.

(2) Comparing the results of the specimen ND and the specimen NDCH, they show that one layers of carbon fiber (i.e. 300 g of carbon fiber per square meter) make plastic drift ratio can be increased 42.9 percentage, and the ductility improvement effect is obvious.

(3) Comparing the results of the specimen NDCH and the specimen NDCHH, increase the horizontal CFRP layer from 1 layer to 2 layers make plastic drift ratio can be increased 44.2 percentage, maximum lateral force strength increased only 4.0 percentage. The RC column is horizontally reinforced with CFRP to improve the plastic drift ratio, obviously better than the effect on the maximum lateral force strength.

(4) Comparing the results of the specimen NDCH and the specimen NDCVH, NDCVH posted one layer of vertical CFRP, plastic drift ratio is only increased 14 percentage and the maximum lateral force strength is only increased 0.7 percentage. NDCVH specimen is covered with more than one layer of vertical CFRP, which have limited benefits on column plastic drift ratio and maximum lateral force strength.

- (5) When the specimen is also covered with two layers of CFRP, specimen NDCHH plastic drift ratio can be increased 27 percentage and the maximum lateral force strength is increased 3.5 percentage than specimen NDCVH. RC columns are reinforced with CFRP, and the covering should be applied in the horizontal direction.

4. Major suggestion

Immediate adoption suggestion- For the "toughness" reinforcement effect of RC columns, if the CFRP patch is applied horizontally, it will be significantly better than the vertical method.

Major Office : Architects Association, Structural Engineering
Technician Association, Association of Civil
Engineers

Associate Office : Architecture and Building Research Institute
Ministry of Interior

The experimental results show that the application of carbon fiber patches in the horizontal direction can provide better confinement

effect for the column member concrete, so the improvement of the toughness reinforcement effect is significantly better than the vertical application method. In the domestic practice of RC columns with CFRP patch reinforcement method, the reinforcement effect of the vertical and then horizontal mixing method is often not better than the method of horizontally covering.

Immediate adoption suggestion- CFRP patches are used to reinforce the column members. CFRP patches should be applied to the entire column to prevent damage from occurring in unexpected locations.

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

CFRP patch for toughness reinforcement may change the non-reinforced (insufficient transverse reinforcement) column from a failure mode controlled by shear force to a situation where the main

control is damaged by flexural. Flexural plastic hinge to cover the CFRP patch. When the RC column specimen reaches the limit deformation, if the chamfer angle of radius is 3 cm and a 20 cm overlap length along the direction of the carbon fiber, the carbon fiber patch should avoid unexpected damage.

Immediate adoption suggestion-The corner of the rectangular RC column specimens are chamfer angle of radius is 3 cm and the lap bond (length is 20 cm) was applied along the carbon fibers. CFRP at corners and overlaps can be prevented from being damaged unexpectedly.

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

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.

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

內政部自 107 年啟動「全國建築物耐震安檢及重建補強-給國人一個安心的家」的重要政策，全力推動老舊建築物於重建或全面補強的整合、規劃期間，可進行局部性補強之措施，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。因此，本所為配合前揭政策，著手檢視及發展適用於「階段性補強」的技術研究。碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)包覆補強工法，具有施工容易、施工快速、不佔空間、價格較低與材料抗拉強度高等特性，在透過專業技師及建築師的評估與監督下，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。

由以往研究結果顯示，CFRP 包覆補強工法，可有效增加 RC 柱的韌性。對於低矮 RC 建築，若採用「韌性」理論進行 CFRP 補強量之設計，柱構件變形能力可滿足設計規範塑性轉角能力需達 3%之要求。對於矩形 RC 柱橫斷面的角隅處，須研磨為直徑 3 公分的圓角，如此可避免角隅處之 CFRP，過早發生應力集中之破壞，並且 CFRP 沿纖維方向之搭接長度，建議至少應大於 20 公分，俾確保 CFRP 補強工法對提升 RC 柱耐震性能之效益。

考量 CFRP 包覆補強工法對 RC 柱韌性能力提升之主要貢獻，應源自於包覆於 RC 柱外側之水平向碳纖維，所提供柱內混凝土之圍束能力，並且既有國內外對 RC 柱以 CFRP 補強效益相關文獻之探討，多採水平向的 CFRP 貼片包覆，亦較符合學理上水平向圍束之受力機制。惟國內建築物以碳纖維工法之補強實務，對於 CFRP 貼覆方向的

施工方式，卻常見沿纖維方向先垂直向貼，再於外層施以水平向包覆之施工方式，此種包含垂直向之貼覆方式，在既有文獻中亦不多見。因此，為釐清 CFRP 貼覆方向對 RC 柱韌性補強效益之影響，本研究將透過結構試驗驗證之，俾提升補強設計之合理性及耐震效益。

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]。

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，用於包裹纖維材料，以保護碳纖維束不致遭受直接摩擦或侵蝕，亦能固定纖維材料之排列方向，使其圍束成型，如錯誤！找不到參照來源。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 3 種，此 3 種纖維材料各有優缺點，其中最常用的為碳纖維材料，主因在於其具高抗拉強度、耐久、耐疲勞、抗鹼等能力之特性[2]，以抗拉強度為例，圖 1.1 為 3 種纖維材料與鋼板之拉

應力與應變關係曲線圖，其中碳纖維於纖維方向之抗拉強度，為此 3 種纖維材料中最佳者。而纖維及基材的界面，須具有良好的物理和化學性質，讓負荷力量能夠順利的由基材傳遞至纖維。而界面亦須能抵抗由纖維和基材因熱膨脹能力不同所造成之應力，以及避免複合材料受液體之滲透，協助基材保護纖維[2]。

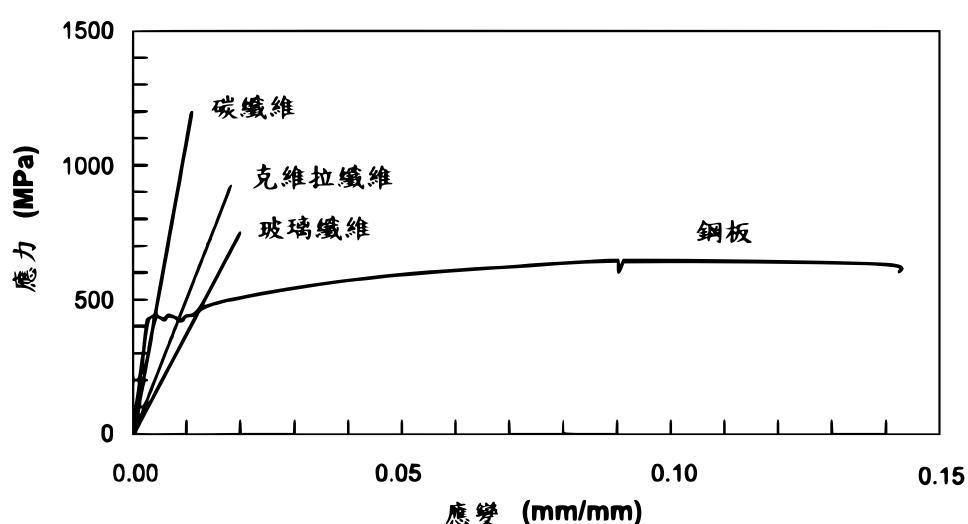


圖 1.1 纖維材料與鋼板之應力與應變關係曲線圖

(資料來源：參考書目[4])

二、CFRP 補強工法之優勢

碳纖維複合材料 (CFRP)，為國內建築物補強工程常用之材料，早在 1999 年 921 大地震後，即見許多老舊建築物採用此種補強工法。利用碳纖維與基材成束為 CFRP 後，再透過編織技術，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 1.2 所示。若將碳纖維布逐層含浸環氧樹脂，並黏貼於結構構件上，以提升結構構件的韌性，此即所謂的 CFRP 包覆補強工法，有關碳纖維布逐層含浸環氧樹脂之施做細部，如圖 1.3 所示。國內常見乾式包覆之補強工法，除 CFRP 包覆外還有以鋼板包覆補強工法，此 2 種工法各有其優缺點，但考量 CFRP 補強工法之價格、工期、施工便利性，以及對居住者生活環境衝擊等因素，略有其優勢，因此較易為設計者及民眾認同。整體而言，CFRP 補強工法相較於鋼板補強工法，其優勢整理如下[5]：

- (一)碳纖維布柔軟易彎曲，較不受待補強構件之形狀限制使用，且在狹小空間亦可以施工。
- (二)碳纖維布可連續成捲，並可使用剪刀直接裁剪。
- (三)碳纖維布自重輕、不需透過銲接接合。
- (四)CFRP 不會腐蝕，不須定期以油漆維護。
- (五)工期較短，一般構件補強僅需約 1 至 2 天。
- (六)碳纖維布搬運作業簡單，且不需大型機具輔助。

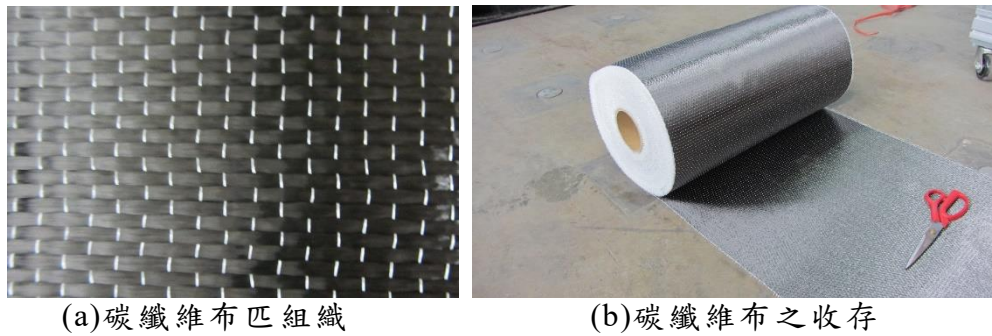


圖 1.2 碳纖維布匹

(資料來源：參考書目 [21])

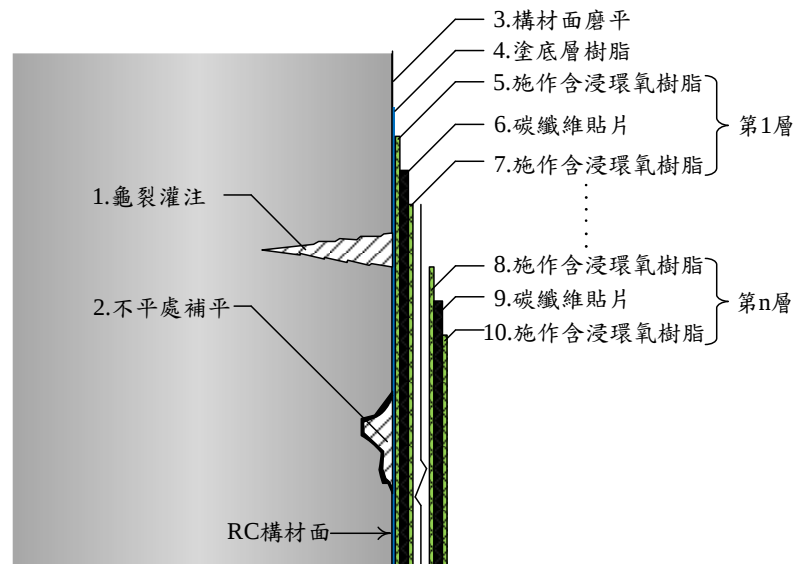


圖 1.3 RC 柱以 CFRP 包覆補強之剖面示意圖

(資料來源：參考書目 [21])

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，以增強柱構件整體韌性的補強方式。由過去研究顯示，此種補強法應用於 RC 圓形斷面橋柱，可獲得相當明顯提升韌性之成效。

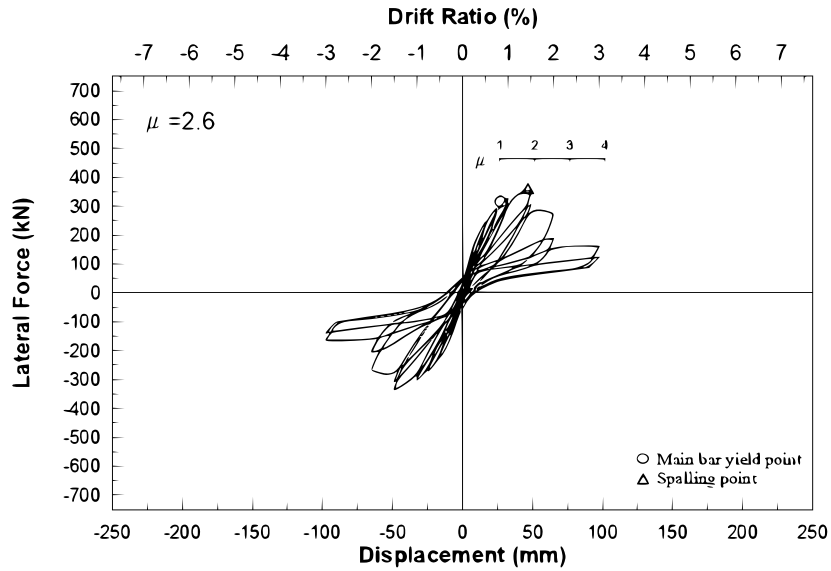
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

例如：圖 1.4 [6]為圓形斷面橋柱試體之遲滯迴圈，其中圖 1.4 (a)及圖 1.4 (b)橋柱試體採相同斷面之設計，且兩試體主筋皆於塑鉸區搭接，所不同之處在於圖 1.4 (a)橋柱試體，未進行碳纖維補強，而圖 1.4 (b)橋柱試體則於塑鉸區，採 4 層 CFRP 水平向圍束包覆之補強。比較圖 1.4 (a)及圖 1.4 (b)兩者，可知試體在達最大強度後，採 CFRP 包覆補強者，強度下降之幅度，遠低於未補強者，此表示 CFRP 包覆補強對圓形斷面柱構件之韌性，具有明顯提升之效益。

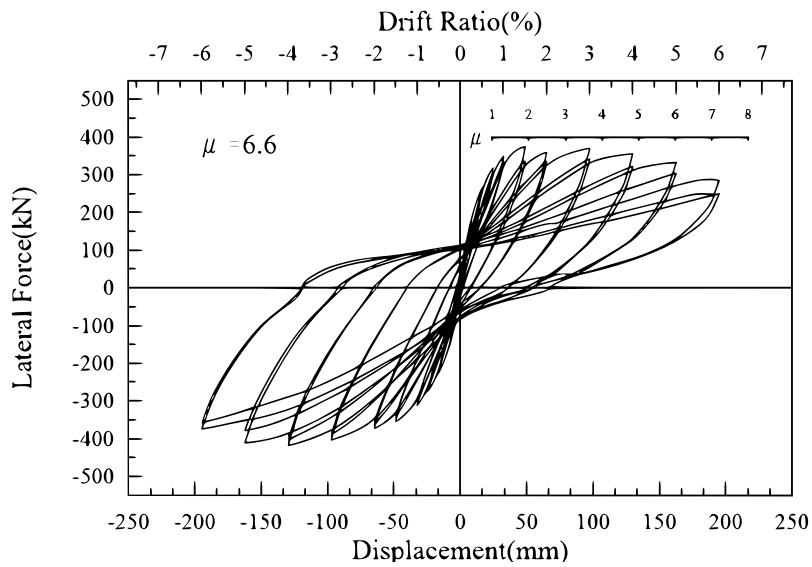
由以往研究[8]顯示，採 CFRP 包覆補強之方柱，其效果不若圓柱，原因為碳纖維布在柱斷面角隅位置，發生應力集中之現象，此將導致 CFRP 貼片提前發生斷裂。圖 1.5 顯示方柱試體在柱角隅處之碳纖維布，因應力集中而導致 CFRP 貼片提早破壞。在國內亦有圓柱與方柱相關的研究成果，由於國內多數老舊低矮型 RC 建築物，常將柱斷面規劃為矩形，圖 1.6 即為國內典型沿街店舖式住宅之平面圖。另外，此類老舊低矮型 RC 建築物，不僅出現許多斷面長寬比較大之矩形柱，其內部所配置橫向鋼筋之間距，大多低於現行規範[7]之需求，並且柱箍筋兩端彎鉤之角度，多採 90 度彎鉤，亦不符合現行規範對柱構件指定範圍內，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，因此有必要進行其補強方法之研究與驗證。對於此類老舊低矮型 RC 建築之柱，若採用工期短、成本低、施工不占空間的 CFRP 包

覆補強工法，似乎較能提升民眾接受之建築補強之意願，並且必須在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正向推廣。

由 2018 年研究結果[8]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。當 4 樓以下低矮 RC 建築（低軸力比 20% 下），由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，建議在專業技師及建築師的評估與監督下，仍須依韌性理論僅行補強設計。



(a) 未補強橋柱試體(BMCL100)；



(b) 採 4 層 CFRP 包覆補強橋柱試體(FCL1)

圖 1.4 圓形斷面橋柱之遲滯迴圈

(資料來源：參考書目[6])



圖 1.5 柱構件之角隅因破纖維布應力集中致使破壞
(資料來源：參考書目[8])

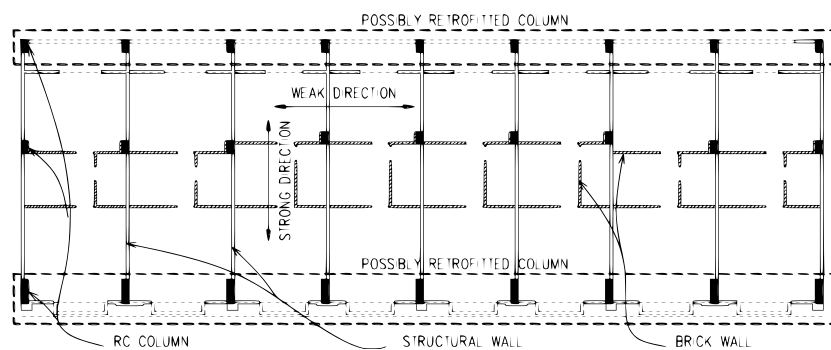


圖 1.6 典型沿街店舖式住宅平面示意圖
(資料來源：參考書目[9])

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，相關預定研究進度之規劃，如表 1.1 所示，研究進行之流程，如圖 1.7 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，在利用編織技術將其製作為碳纖維布匹組織，並以碳纖維布逐層包覆並黏貼於待補強之建築構件上，增加結構構件之韌性及強度，此 CFRP 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、分析討論之參採。

二、試體設計

本研究參採國內典型屋齡約 20 年以上，樓高 4 樓以下騎樓式建築底層柱之實務現況，並規劃製作與進行 4 組 RC 柱試體之試驗，共計分為 ND 及 NDC 等 2 個系列之試體，柱斷面為 50x30 公分之矩型 RC 柱試體，所有柱試體內部橫向鋼筋之配置，皆為間距 20 公分且於端部位設置 135 度耐震之彎鉤，試驗軸壓力固定為 $0.2 A_g f'_c$ ，且為單曲率變形之反覆載重試驗，以瞭解 CFRP 包覆 RC 柱之補強效益。

三、試體製作

本研究相關 RC 柱試體之製作，預計分為 4 個階段進行，第 1 階段試體採購作業：業於 5 月份進行相關採購作業，歷經 2 次開標，遂於 5 月 28 日決標；第 2 階段為試體下部基座之放樣與製作：柱試體

下部基座於 6 月 21 日放樣，6 月 26 日開始綁紮下部基座及上部 RC 柱之鋼筋，7 月 8 日模板組立，7 月 10 日灌漿施工；第 3 階段為上部 RC 柱試體應變計施工：於 7 月 11 日進行柱試體內部鋼筋表面應變計之施做；第 4 階段為上部 RC 柱試體製作：於 7 月 18 日進行上部柱試體橫向鋼筋之調整及封模，並於 7 月 19 日進行灌漿。

經歸納本研究 RC 柱試體製作於第 1 階段之採購作業，係於 108 年 5 月 6 日首次上網公告，俟於 5 月 28 日決標；108 年 7 月 10 日完成第 2 階段柱試體下部基礎混凝土之灌漿施工；108 年 7 月 12 日完成第 3 階段柱試體內部鋼筋應變計之黏貼施工；108 年 7 月 19 日完成第 4 階段柱試體上部柱身之灌漿施工，混凝土 28 天齡期到達日預計為 8 月 16 日；目前 RC 柱試體已完成製作，預計於 8 月底前報驗。

本研究將進行鋼筋與混凝土等材料之基本物性試驗，其中混凝土圓柱試體之抗壓強度試驗，需記錄 28 天齡期抗壓強度，以及各 RC 柱試體於實際試驗當日之抗壓強度。鋼筋拉伸試驗部分，係要求各種型號與強度種類之鋼筋，應儘量為同一批號之料源，所以各種型號與強度種類鋼筋僅進行 1 組拉伸試驗。

四、載重試驗

載重試驗部分，ND 系列及 NDC 系列等試體，後續均以固定軸壓力 $0.2 A_g f'_c$ 及單曲率反覆載重，進行軸壓力及水平反覆載重試驗，用以模擬及驗證老舊低層 RC 建築底層之非韌性配筋 RC 柱，分別於未進行補強及在 CFRP 包覆補強條件下耐震行為，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，因 CFRP 貼覆方向不同，對 RC 柱試體耐震效益的影響。

五、試驗結果之分析與探討

藉由矩形 RC 柱試體實驗所得量測數據，將透過加載致動器、外掛位移計及試體內部應變計所得之數據進行分析與探討，以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 包覆補強之設計施工建議。

六、報告撰寫

本研究預計分 2 次提出報告，第 1 次於 108 年 8 月 7 日提出期中報告，目的在說明研究過程與進度；第 2 次於 108 年 11 月 26 日進行期末報告之審查，用以敘明研究成果與建議。

第四節 研究目的

本研究目的在探討老舊低矮建築物底層的矩形 RC 柱構件，若採碳纖維貼片補強，其貼覆方向對柱構件耐震性能之影響，本研究共規劃 ND 及 NDC 等 2 個系列共計 4 組試體，分別為 ND 試體為典型非韌性矩形 RC 柱。另外，NDC 系列試體為以 CFRP 貼覆補強之典型非韌性矩形 RC 柱，此系列試體共計 3 組，其試體編號分別為 NDCHH、NDCVH 及 NDCH，各組試體不同處在於 CFRP 貼片之貼覆方向及黏貼層數。試體 NDCH 係貼覆一層 CFRP 貼片，試體 NDCVH 及試體 NDCHH 則貼覆兩層。

其中，試體 NDCHH 係於 RC 柱試體外側，再以碳纖維貼覆補強，碳纖維沿水平方向貼覆 2 層；試體 NDCVH 同樣貼覆 2 層 CFRP 貼片，只是於 RC 柱試體外側，碳纖維先沿垂直方向貼覆 1 層 CFRP 貼片，再於此層之外，改沿水平方向貼覆 1 層 CFRP 貼片。試體 NDCH 為僅於 RC 柱試體外側，碳纖維沿水平方向貼覆 1 層 CFRP 貼片。所有 NDC 系列試體斷面之隅角部，已導角為半徑 3 公分之圓弧角。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施工之合理性，並瞭解 CFRP 韌性補強貼覆方向，對柱試體韌性效益之影響。

第五節 預期成果

- 一、驗證以碳纖維貼片進行非韌性配筋矩形 RC 柱韌性補強，CFRP 貼覆方向對 RC 柱之補強效益。並在專業技師及建築師的評估與監督下，提供有耐震安全疑慮的建築，快速及有效的補強工法，降低建築物倒塌風險。
- 二、研提國內常見 CFRP 補強工法之設計施工注意事項。

表 1.1 研究進度規劃

工作項目	月次												備註
	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	
資料搜集及整理													2/18 期初
試體設計													
試體招標、製作、養護與驗收													7/10 基座 7/19 上柱
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													8/7
期末報告													11/26
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(2/18)												
	第 2 季：試體採購招標												
	第 3 季：期中報告審查(8/7)												
	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。													

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

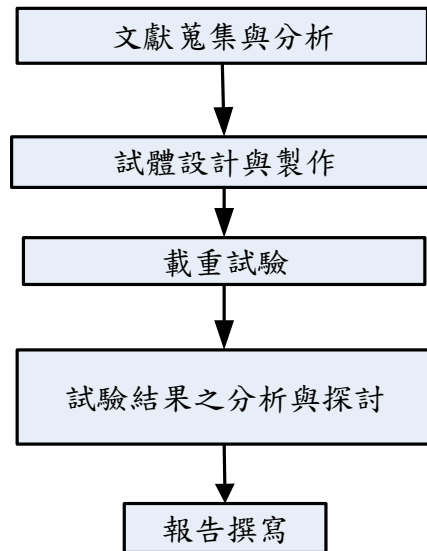


圖 1.7 研究進行之流程圖

(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，而本研究所謂「低矮」型之建築物，其樓高定義約為 4 層樓以下之建築物，因此柱試體斷面承受之軸力不會太高，一般而言柱試體軸力比多為 20% 以下。本研究旨在探討此類非韌性配筋柱，若以 CFRP 包覆進行補強，其貼片貼覆方向對 RC 柱試體補強效益之影響。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設置內繫筋，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，導致柱橫向鋼筋量之不足，而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 2.4 所示。

老舊低矮型 RC 建築物的柱，通常為矩形的「非韌性配筋」柱，在未配置內繫筋的情況下，相關研究顯示：矩形 RC 柱斷面之長邊，對內部核心混凝土的圍束需求，將遠大於柱斷面的短邊，如圖 2.6 所示。同樣地，若柱外圍採用 CFRP 包覆補強工法，雖然有研究建議，可利用碳纖維錨栓，以抑制柱構件發生面外鼓出之現象，提升對柱內混凝土的圍束效益，如圖 2.6 所示。但是於國內補強工程實務上，考量早期低矮建築物部分外柱之內部，常設有雨水排水管，若水平向鑽孔施做碳纖維錨栓，將可能貫穿柱內的排水管，反而引致柱內漏水的問題，故本研究未規劃採用此種碳纖維錨栓。

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，在專業技師及建築師的評估與監督下，仍須依韌性理論僅行補強設計，且 CFRP 貼片之補強應用，至少需貼覆 2 層[21]。由於 CFRP 包覆補強可將屬剪力控制之破壞模式，轉為撓曲破壞主控之情況，故應於全柱包覆 CFRP 貼片，除非已調查確認未補強柱為抗彎矩能力之不足。若柱斷面採導角為半徑 3 公分

之圓角，並且沿碳纖維方向採至少 20 公分的搭接長度，可避免碳纖維貼片提早發生非預期之破壞[21]。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，檢核相關設計施工細節之合理性。

本研究共規劃 4 組屬單曲率破壞之單柱試體，試體名稱分別為試體 ND、NDCHH、NDCVH 及 NDCH。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「ND」二字，表示為「非韌性」，及英文 Non-ductility 的縮寫，即表示為矩形非韌性配筋的柱試體。

NDC 系列與 ND 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 NDC 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，並且於柱試體斷面的 4 個角隅處，設置為半徑 3 公分之圓型導角。NDC 系列試體名稱的「ND」二字，亦為「非韌性」之意。隨後之字母「C」，為 CFRP 之縮寫，因此「NDC」表示採用 CFRP 包覆補強工法之矩形非韌性配筋柱試體。NDC 系列試體名稱，所接續的字母「H」與「V」，分別為英文 Horizontal 與 Vertical 的縮寫，亦即表示碳纖維分別以水平向或垂直向貼覆，CFRP 貼片詳細的貼覆方式，如圖 2.6 所示。因此，「HH」表示 RC 柱試體外側，以水平向的碳纖維，連續包覆 2 層 CFRP 貼片。「VH」表示 RC 柱試體外側，先以垂直向之碳纖維，包覆 1 層 CFRP 貼片，再以水平向的碳纖維，包覆另 1 層 CFRP 貼片。「H」表示 RC 柱試體外側，僅以水平向的碳纖維，包覆 1 層 CFRP 貼片，其細部施做方式如圖 2.6 所示。因此，試體 NDCVH，即「ND」-「C」-「VH」之組合，表示此為矩形非韌性配筋之 RC 柱試體，並於試體外側以 2 層 CFRP 貼片進行包覆補強，第 1 層係以垂直向 CFRP 貼片包覆，第 2 層（最外層）為水平向貼片包覆。



圖 2.1 非韌性配筋柱橫向箍鋼筋間距過大之情形

(資料來源：李宏仁)



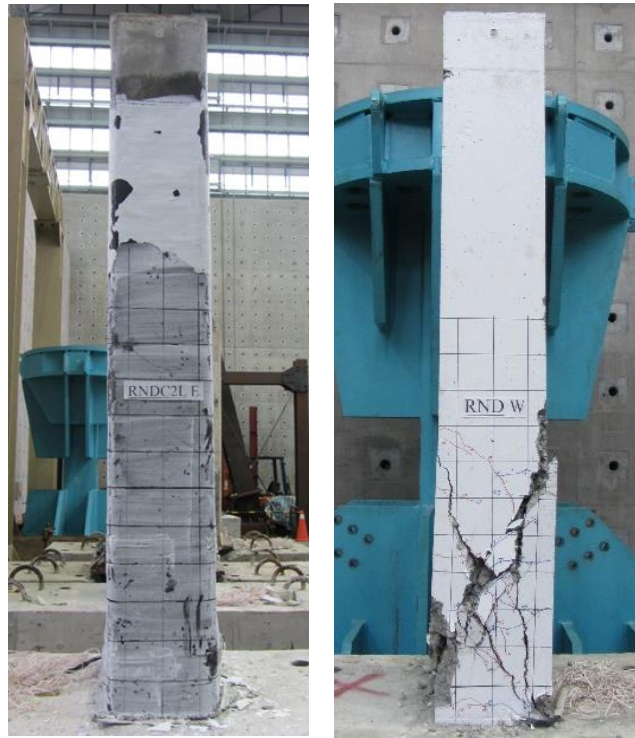
圖 2.2 非韌性配筋柱箍筋端部僅為 90 度彎鉤且柱內設有排水管

(資料來源：李宏仁)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

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。NDC 系列試體所規劃碳纖維布之層數，未依 CFRP 補強的「圍束補強」理論[10]進行設計。

由於研究經費額度限制及擲節經費之考量，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。



(a)試體 RND C2L

(b)試體 RND

圖 2.3 試體 RND 與試體 RND C2L 之破壞模式

(資料來源：[21])

2.1.1 試體 ND

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 ND 之設計參數依據，試體 ND 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 ND 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 ND 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 ND 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 ND 之設計，以及柱試體斷面之詳細尺寸，如圖 2.4 所示。柱試體橫向箍筋之端部，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。

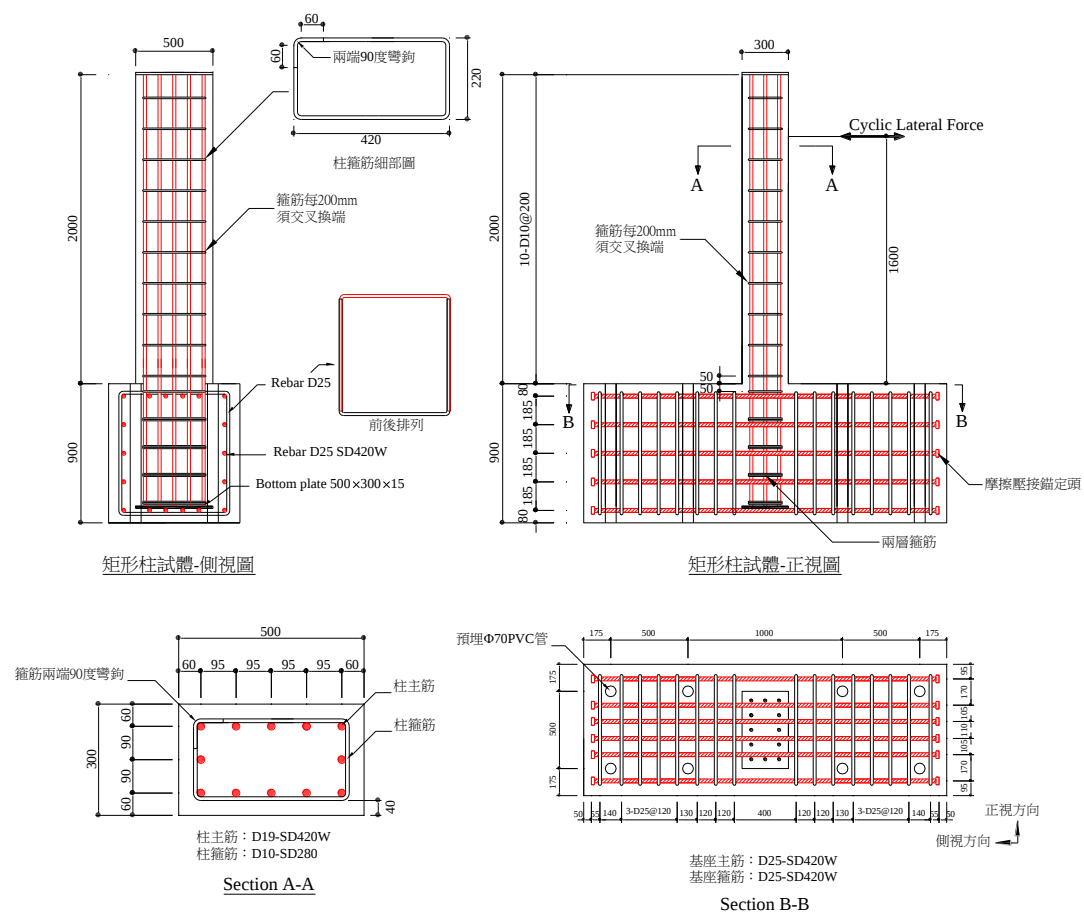


圖 2.4 試體 ND 之設計圖

(資料來源：本研究製作)

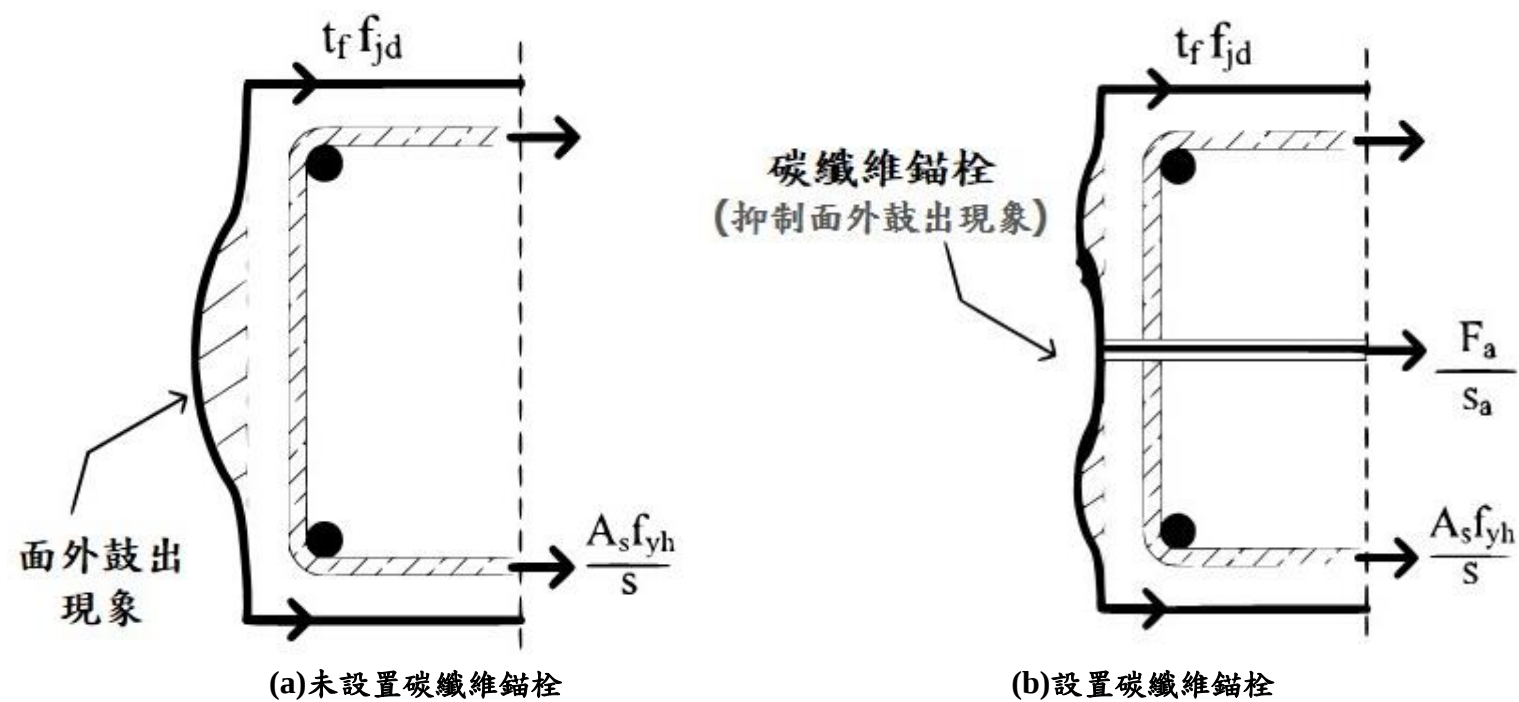


圖 2.5 矩形 RC 柱採碳纖維包覆補強及碳纖維錨栓之情形

(資料來源：[13])

2.1.2 NDC 系列試體

NDC 系列試體計有試體 NDCHH、試體 NDCVH 及試體 NDCH 等 3 組，其中 NDC 系列與 ND 系列試體均具有相同 RC 斷面及鋼筋配置，兩者差異在於 NDC 系列試體 RC 斷面的 4 個角隅處，預先設置半徑為 3 公分之圓弧導角，並採用 CFRP 貼片進行包覆補強。

試體 NDCHH 與試體 NDCVH 均貼覆 2 層碳纖維貼片，只是試體 NDCVH 係先以垂直向貼覆後，最外層再以 1 層 CFRP 貼片以水平向貼覆。此 2 試體主要用以比對，若同樣施以 2 層之 CFRP 貼片補強，究竟是以 2 層均為水平向，或者是 1 層垂直向 1 層水平向補強，何者之耐震效益為佳。而試體 NDCVH 與試體 NDCH 之比對，主要為觀察於試體 NDCVH 中，單層垂直向 CFRP 貼片，對 RC 柱試體之補強貢獻。

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，係考量透過碳纖維布補強之方式來彌補。

由既有研究結果顯示[21]，為計算碳纖維布圍束所需之補強數量，可採林敏郎[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} 、 s_b 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 1.1)，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 2.6 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）。

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

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

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

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

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

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

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

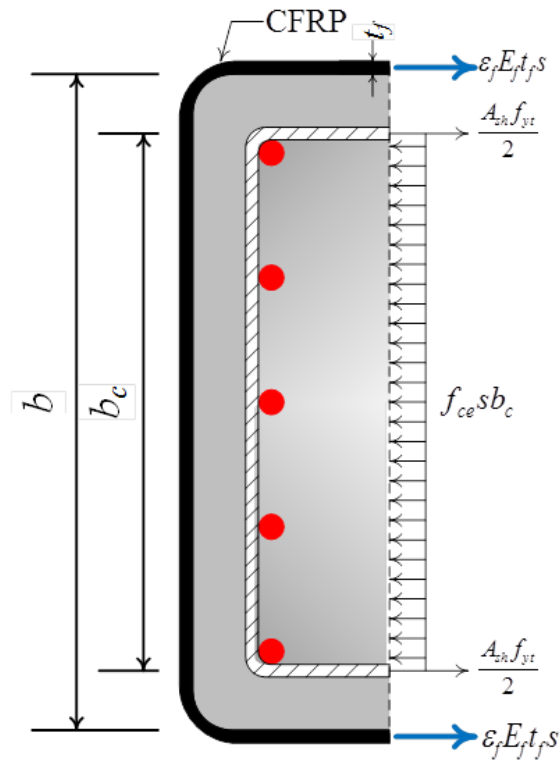


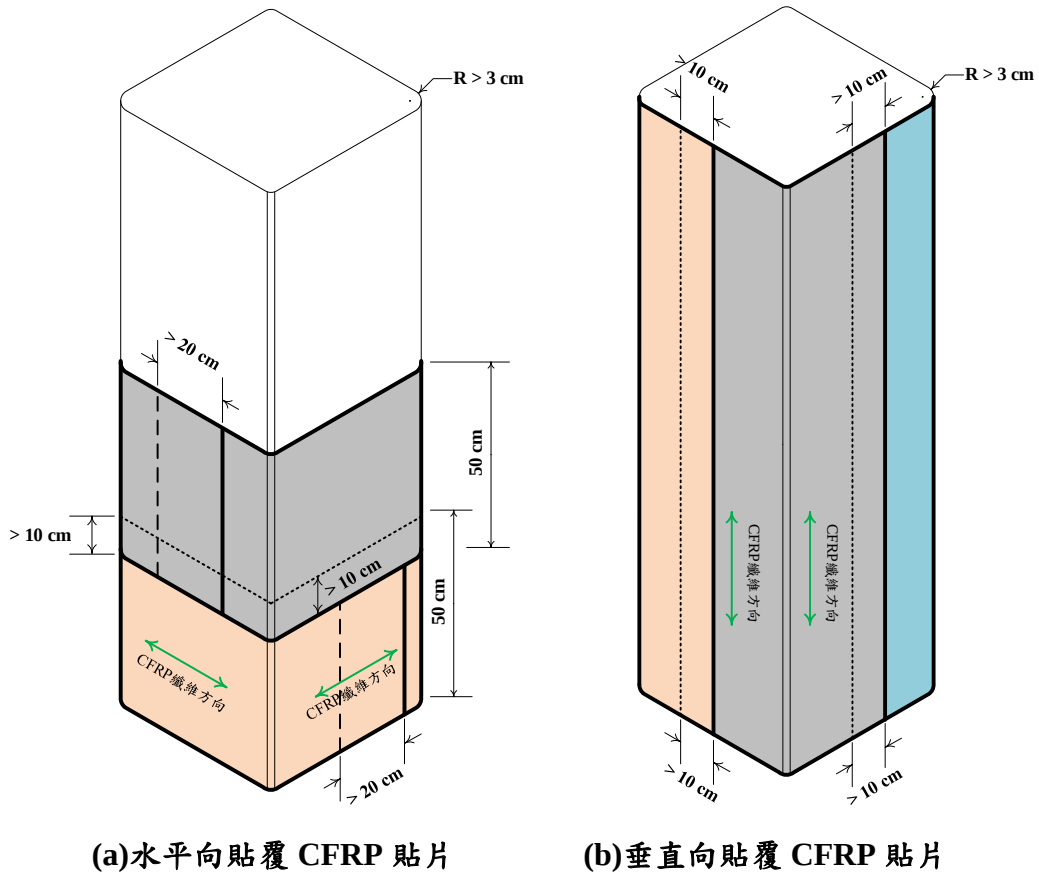
圖 2.6 s 間距內碳纖維布與橫向鋼筋側向力

(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])



(a)水平向貼覆 CFRP 貼片

(b)垂直向貼覆 CFRP 貼片

圖 2.7 RC 柱試體外圍 CFRP 貼片之包覆方式

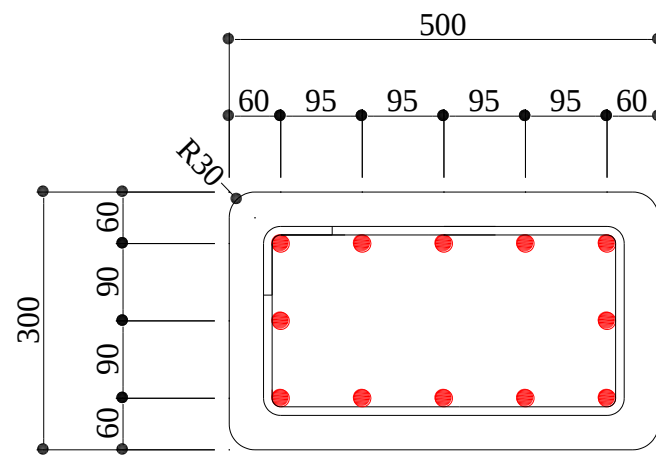


圖 2.8 NDC 系列試體於補強前之柱試體斷面圖

(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 2.8 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 2.9 所示。



圖 2.9 自加工廠完成加工送抵工作區之鋼筋

（資料來源：本研究）



圖 2.10 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 2.13 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 2.20

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 2.30 所示。

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 2.32 所示。

2.2.5 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 3 公分之圓弧角，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 2 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 0.4kg/m^2 。
- (8) 兩層以上碳纖維貼片相疊黏貼時，重覆(4)至(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

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

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銲接固定，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，詳如圖2.10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2.11所示。撓曲試驗中所採用的側向位移歷時圖，如圖2.12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。

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

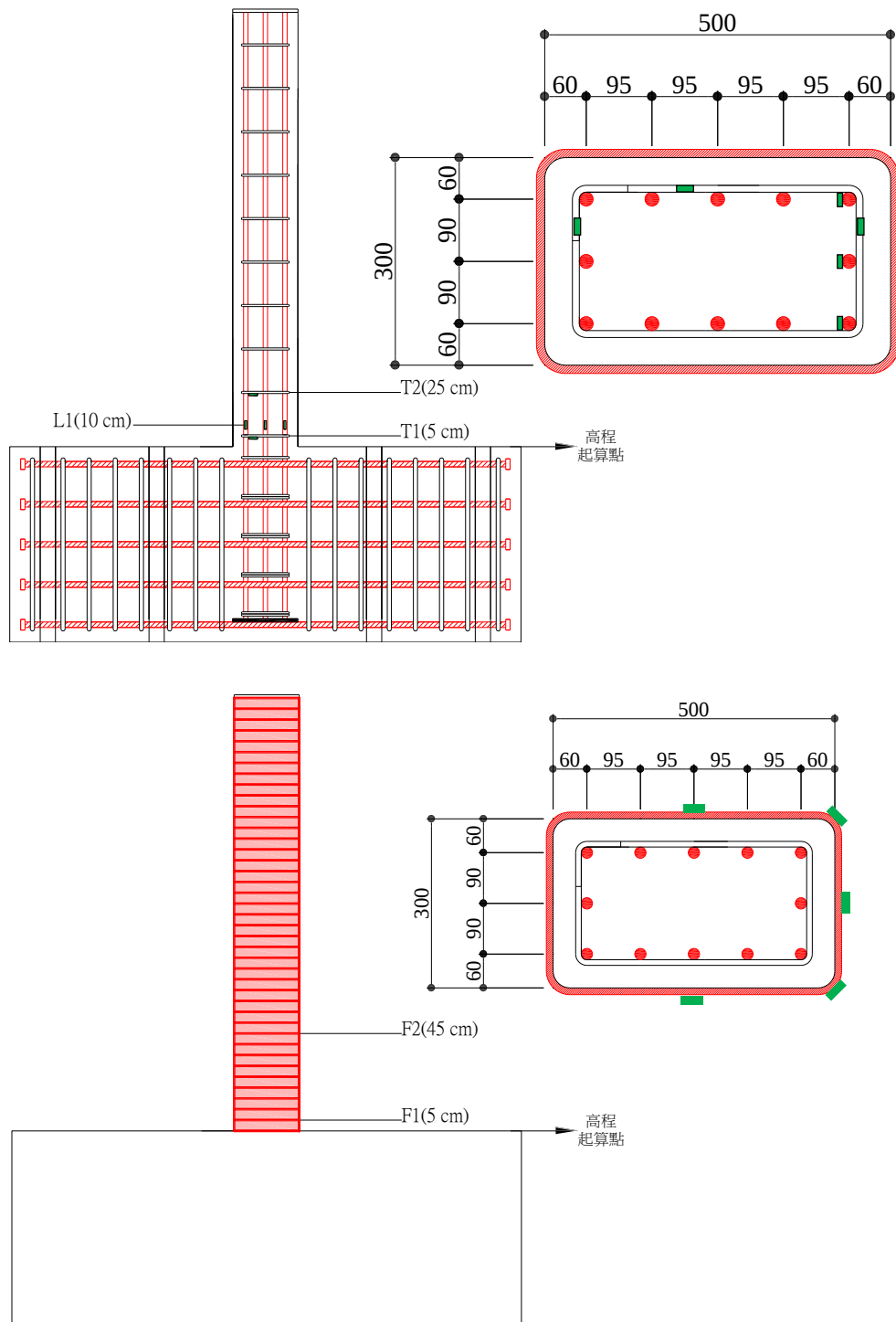


圖 2.11 柱試體斷面應變計之配置圖

(資料來源：本研究製作)

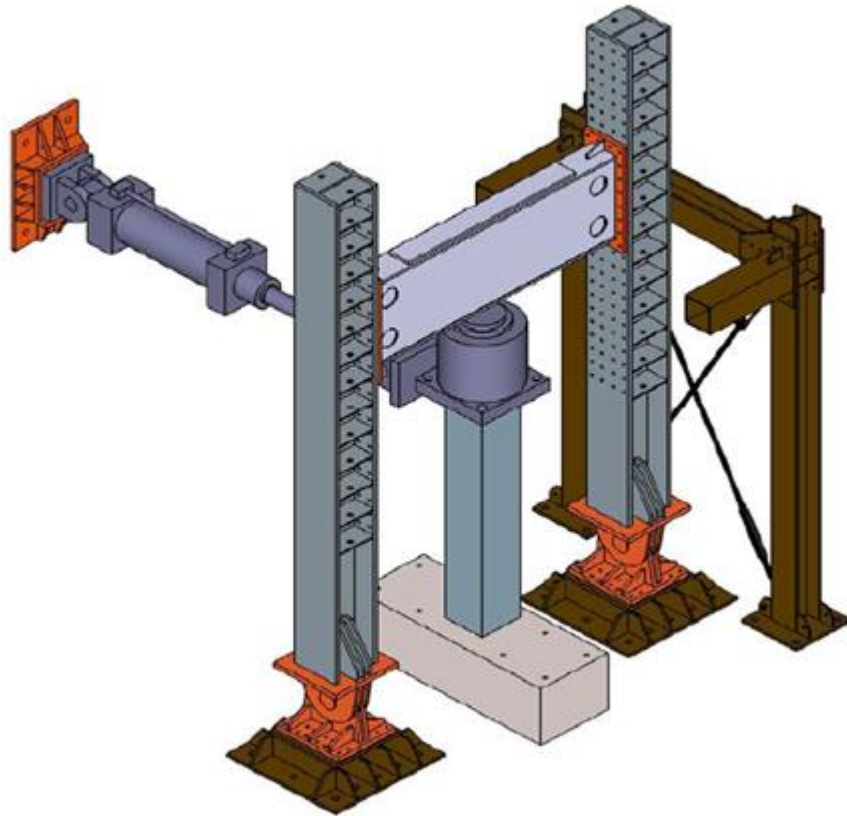


圖 2.12 軸力構架試驗裝置示意圖
(資料來源：李台光)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

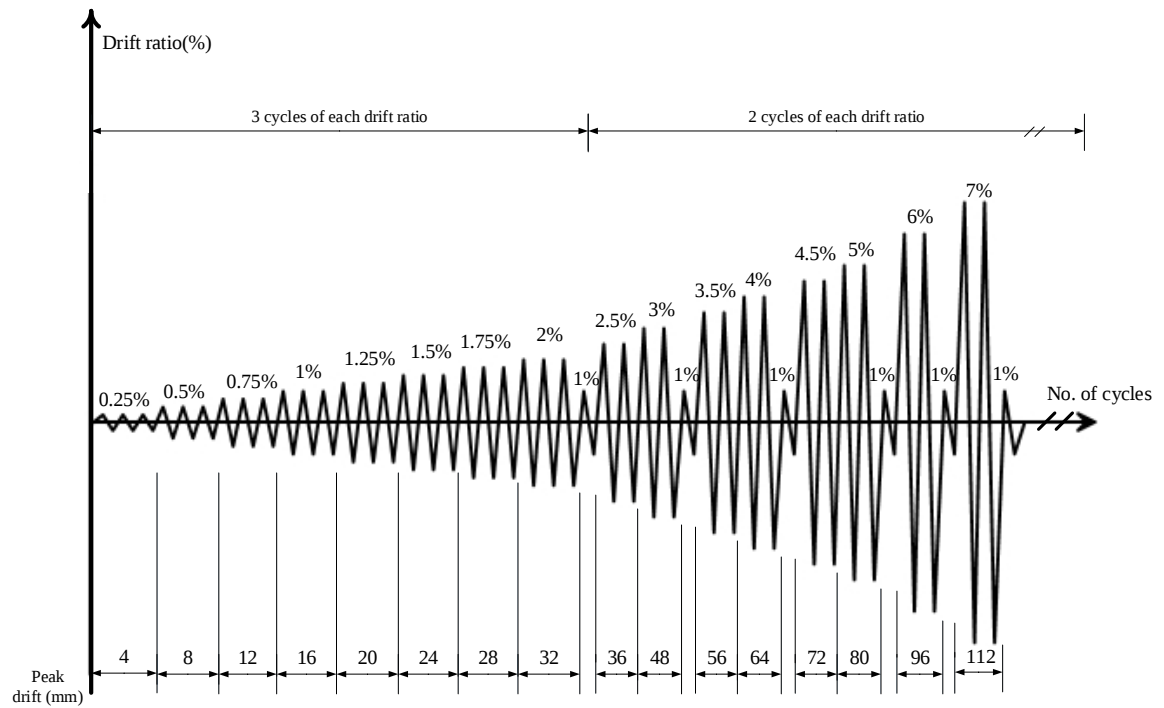


圖 2.13 試驗側向加載之位移控制歷時

(資料來源：ACI-374.1-05 規範)



圖 2.14 底座鋼筋籠之組立

(資料來源：本研究)



圖 2.15 上部柱主筋之定位

(資料來源：本研究)



圖 2.16 底座預留 PVC 管之擺設與封口

(資料來源：本研究)



圖 2.17 試體吊耳於底座之設置

(資料來源：本研究)



圖 2.18 底座模板之組立

(資料來源：本研究)



圖 2.19 底座混凝土澆置

(資料來源：本研究)



圖 2.20 底座拆模後之情形

(資料來源：本研究)



圖 2.21 柱試體應變計之黏貼

(資料來源：本研究)



圖 2.22 應變計之黏貼與固定

(資料來源：本研究)



圖 2.23 上部柱身鋼筋之組立

(資料來源：本研究)



圖 2.24 模板之圓形導角

(資料來源：本研究)



圖 2.25 上部柱身模板完成組立

(資料來源：本研究)



圖 2.26 上部柱混凝土之澆置

(資料來源：本研究)



圖 2.27 上部柱混凝土之搗實

(資料來源：本研究)



圖 2.28 混凝土澆置坍度試驗

(資料來源：本研究)



圖 2.29 混凝土圓柱式體製作

(資料來源：本研究)



圖 2.30 柱頂上部灌漿孔圓形蓋板之封板

(資料來源：本研究)



圖 2.31 應變計訊號線束之收線

(資料來源：本研究)

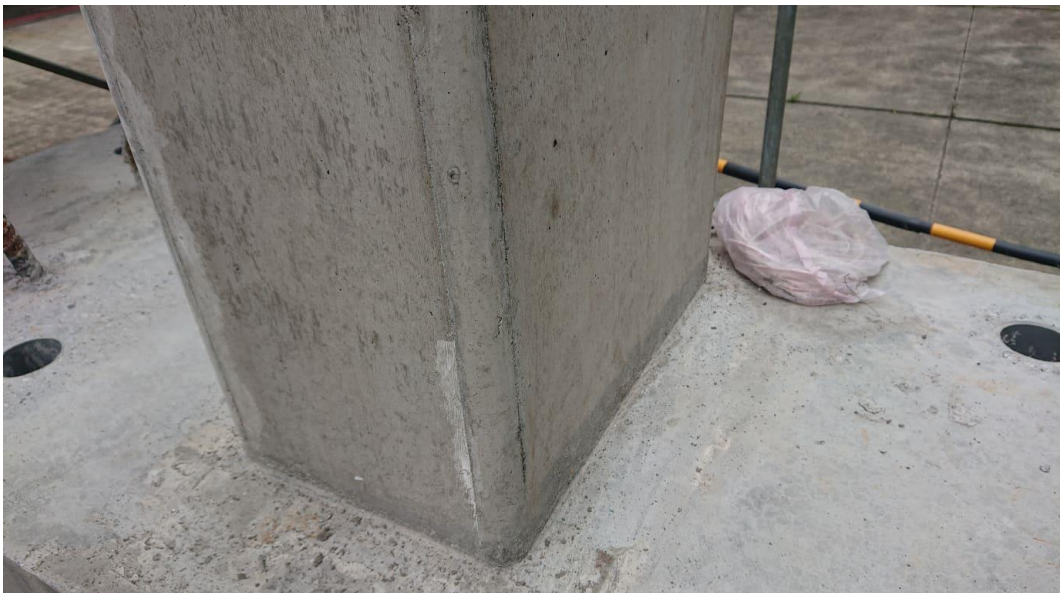


圖 2.32 上部混凝土柱四周之導角

(資料來源：本研究)



圖 2.33 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 RC 柱試體，並利用本所材料實驗中心大型力學實驗室的大型試驗構架(參見圖 2.11)，以及結合 600 噸(軸向)與 200 噸(水平向)油壓致動器，進行 RC 柱試體承受軸力與水平力之撓曲試驗。本章將分別說明各試體之試驗結果與觀察，並嘗試比較矩形非韌性配筋 RC 柱試體 ND 與以 CFRP 包覆補強非韌性配筋 RC 柱試體耐震行為之差異，同時觀察隨著碳纖維布貼覆層數與貼覆纖維方向之不同，並藉由結構實驗驗證 RC 柱試體於耐震韌性的提升效益。

本研究 RC 柱試體鋼筋的機械性質及各實驗齡期混凝土的抗壓強度，詳如表 3.1 至表 3.6 所示。相關試驗設定細節，說明如下。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 30.7 MPa； A_g 為柱總斷面積。計算而得之施加軸力為 921 kN。

此外，撓曲試驗中所採用的側向加載位移歷時，如圖 2.12 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

側向加載位移控制之速率為 1 mm/sec。

本研究 RC 柱試體於撓曲試驗，對試驗彈性勁度、降伏位移及極限位移等量化指標之決定，主要參採相關撓曲試驗研究之定義，係由試體試驗之載重-位移包絡線求得，並據以探討 RC 柱試體之耐震性能。RC 柱試體之彈性勁度 K ，係由正向包絡線取原點與 $0.75H_{peak}^+$ 對應點連線之斜率，如圖 3.21 所示。降伏位移 δ_y^+ 定義為 H_{peak}^+ 除以 K 。極限位移 δ_u^+ 為強度下降段對應於 $0.85H_{peak}^+$ 之位移，若第一迴圈包絡線下降段之試驗載重，並未低於 $0.85H_{peak}^+$ 之時，則取包絡線之最大位移。試體試驗的塑性轉角 θ_p ，為極限位移與降伏位移的差值除以試體高度 L ，本研究相關試體試驗結果之強度與韌性數據，如表 3.6 所示。

3.1.1 試體 ND

試體 ND 混凝土的設計強度 f'_c 為 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]。試體 ND 之設計，如圖 2.10 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。

試體 ND 在位移比 0.25% 時，分別於試體的南側自底部往上 20 至 50 公分處及北側自底部往上 50 公分範圍，開始分別出現 3 條及 4 條的微小水平撓曲裂縫，西側自底部往上 50 公分範圍則有 4 條的微小

水平裂縫，此時於位移比-1.5%對應柱試體達最大承受的側力為-207.38 kN，如表 3.6 所示。在位移比達 0.5%時，位於柱試體東北及東南側，自底部往上 10 公分範圍，首先出現寬度約 1 公厘以下之垂直裂縫。在位移比 1.5%時，東西兩側自底部往上 20 公分處，首先出現接近 45 度剪力裂縫產生。當位移比達 2%時，南側自底部往上至 15 公分處，首先出現混凝土剝落的情形。接著位移比達 2.5%時，南側自底部往上 20 公分範圍及東北側自底部往上 20 至 30 公分範圍，表層混凝土大量剝落，另外於東西兩側出現剪力裂縫交叉的情形，裂縫寬度約 2 至 3 公釐，此時於位移比-2.5%對應柱試體達最大承受的側力為-194.96kN。最後，在位移比 3%時，自底部往上 70 公分範圍，柱試體顯示嚴重的撓剪破壞，南側及北側自底部往上 70 公分範圍表層混凝土完全剝落，自底部往上 20 至 40 公分處主筋挫屈，箍筋 90 度彎鉤脫開，導致強度迅速降低，停止實驗。

試體 ND 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.1。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 3.3 為試體 ND 於試驗結束之破壞照片。圖 3.4 與圖 3.5 顯示試體 ND 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

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	303	339	472	449	32	26.7	-	-
		366		526		24		-	
		349		499		24		-	
D19	SD420W	455	449	645	658	22	22.7	1.42	1.47
		446		670		22		1.50	
		445		660		24		1.48	

單位：MPa

（資料來源：本研究）

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	2019/07/10	14	20.1	20.1
2			20.8	
3			19.5	

註：標準圓柱 150×300 mm

(資料來源：本研究)

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	2019/07/19	14	32.0	30.7
2			30.2	
3			39.8	

註：標準圓柱 150×300 mm

(資料來源：本研究)

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	32.0	30.7
2	28	30.2	
3	28	39.8	
4	88	35.7	35.7
5	88	35.2	
6	88	36.2	
7	91	34.9	35.0
8	91	34.6	
9	91	35.5	
10	95	36.4	35.6
11	95	34.4	
12	95	36.1	
13	102	38.2	37.6
14	102	38.4	
15	102	36.1	
	平均值	34.9	

(資料來源：本研究)

表 3.5 各試體對應之強度齡期

試體	試驗日期	對應齡期
ND	2018/10/15	88
NDCH	2019/10/18	91
NDCVHH	2019/10/21	95
NDCVH	2019/10/22	102

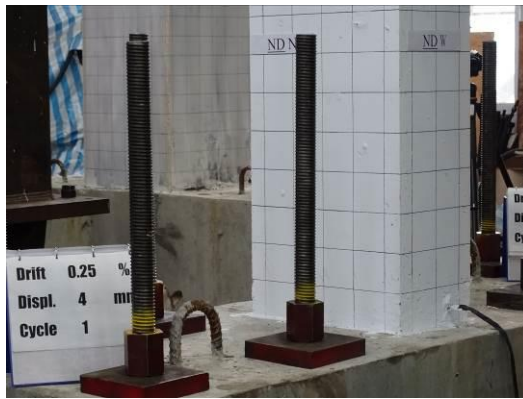
(資料來源：本研究)

表 3.6 各柱試體試驗結果之強度與韌性變化

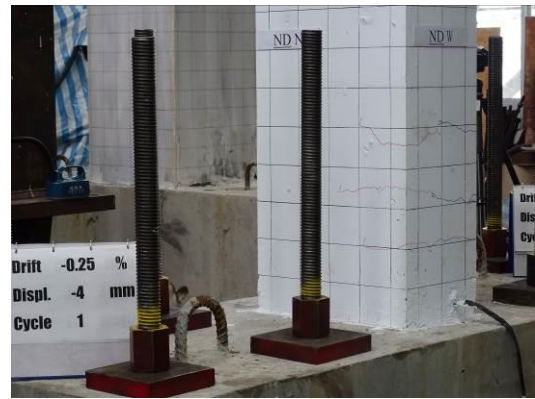
試體	H_{peak}^+ (kN)	$\delta_{H_{peak}}^+$ (mm)	H_{peak}^- (kN)	$\delta_{H_{peak}}^-$ (mm)	平均 H_{peak} (kN)	δ_y^+ (mm)	δ_y^- (mm)	δ_u^+ (mm)	δ_u^- (mm)	θ_p^+ (%)	θ_p^- (%)	平均 θ_p (%)
ND	194.04	31.7	-207.38	-27.4	200.71	20.1	-15.5	39.3	-40.0	1.17	-1.48	1.33
NDCH	220.04	39.8	-225.14	-31.3	222.59	21.1	-16.6	48.5	-51.8	1.66	-2.12	1.90
NDCHH	230.44	44.4	-233.59	-45.5	231.02	21.7	-28.7	65.3	-75.7	2.65	-2.84	2.74
NDCVH	224.16	38.6	-224.16	-38.1	224.16	21.8	-20.4	59.5	-53.9	2.28	-2.03	2.16

(資料來源：本研究)

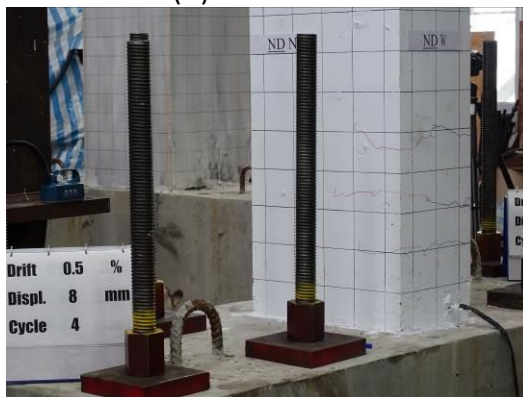
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



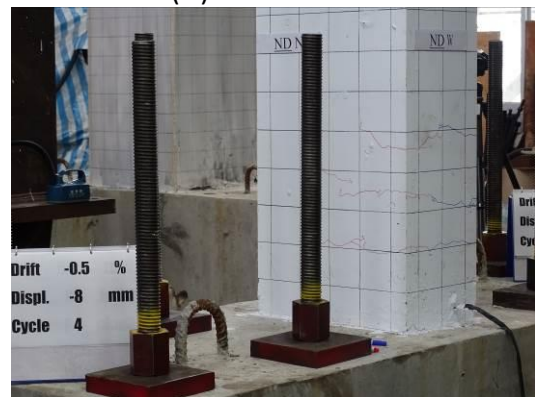
(a) $\theta = 0.25\%$



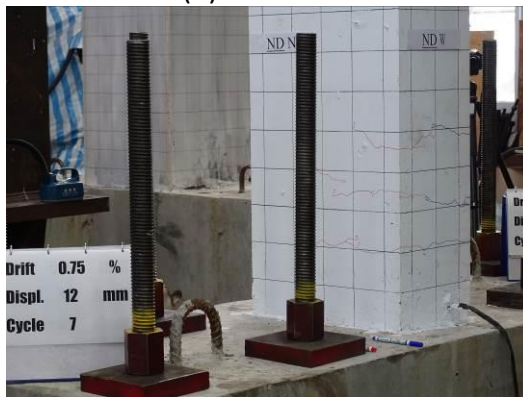
(b) $\theta = -0.25\%$



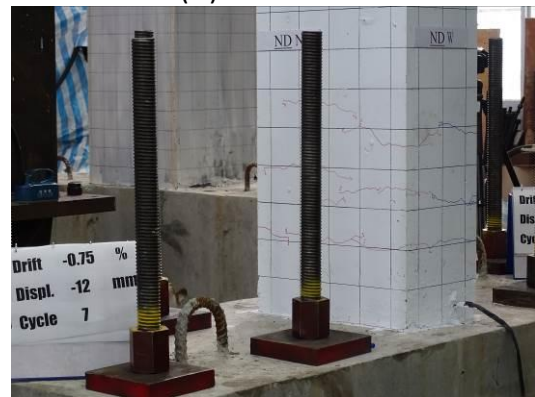
(c) $\theta = 0.5\%$



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



(e) $\theta = 0.75\%$

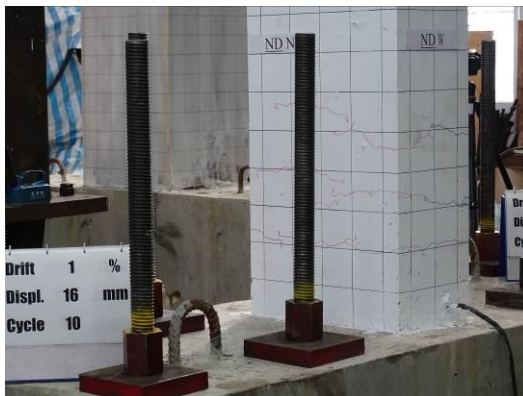


(f) $\theta = -0.75\%$

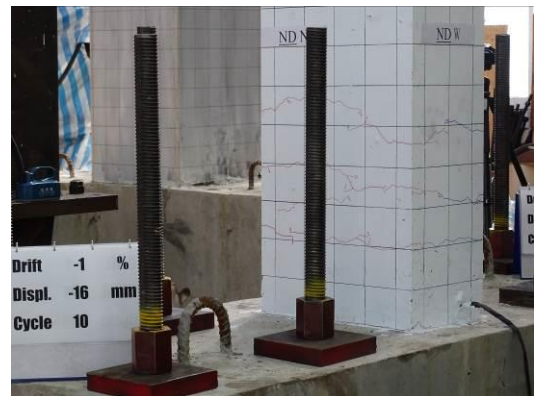
圖 3.1 試體 ND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

(資料來源：本研究)

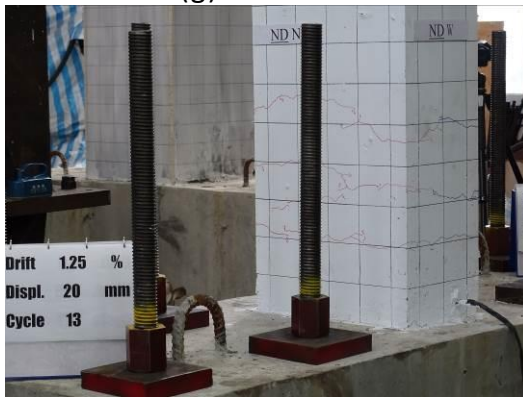
第三章 試驗結果與討論



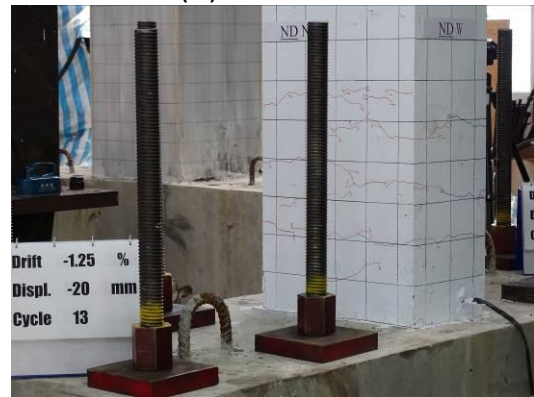
(g) $\theta = 1.0\%$



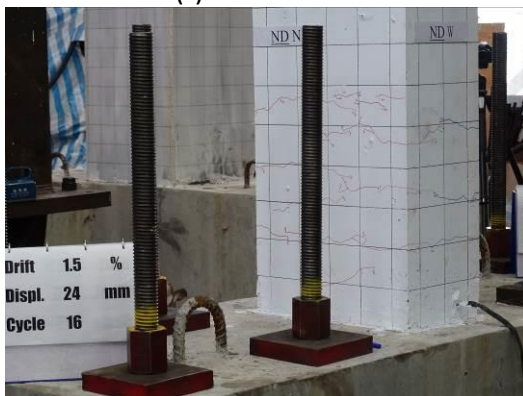
(h) $\theta = -1.0\%$



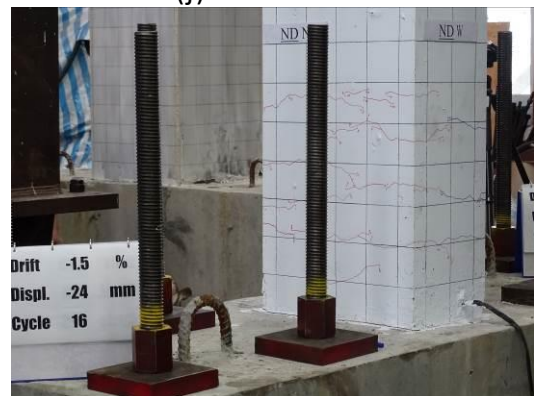
(i) $\theta = 1.25\%$



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



(k) $\theta = 1.5\%$

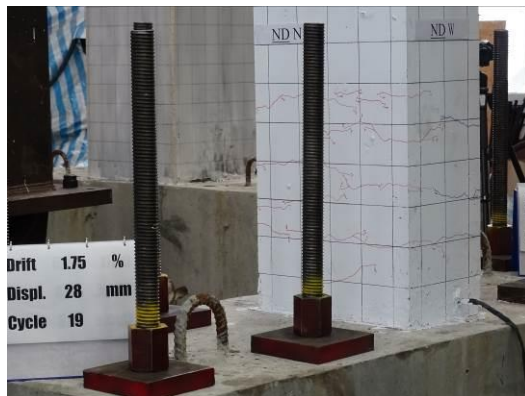


(l) $\theta = -1.5\%$

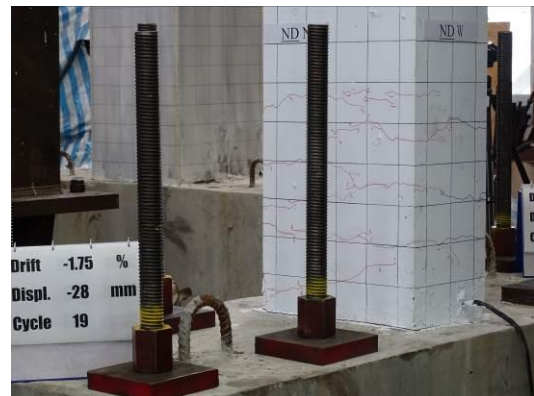
圖 3.1 試體 ND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

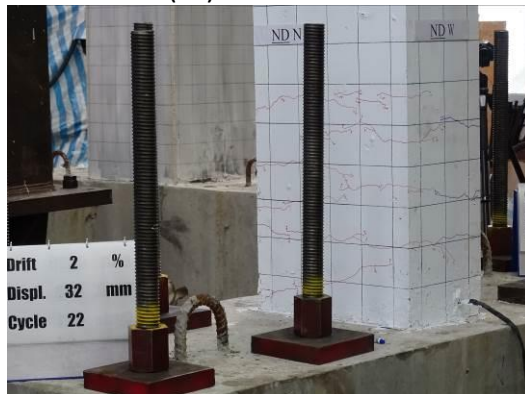
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



(m) $\theta = 1.75\%$



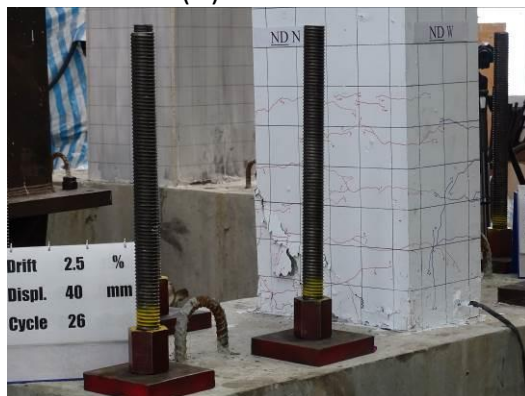
(n) $\theta = -1.75\%$



(o) $\theta = 2.0\%$



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



(q) $\theta = 2.5\%$



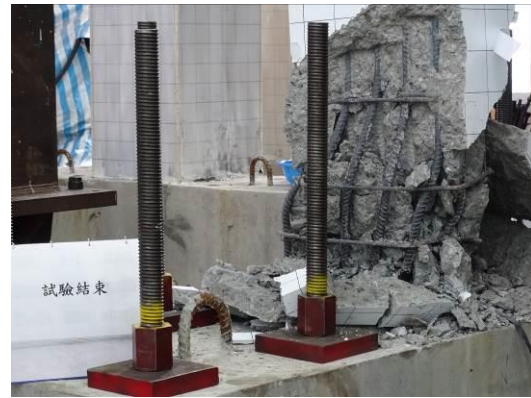
(r) $\theta = -2.5\%$

圖 3.1 試體 ND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)



(s) $\theta = 3.0\%$



(t) 試驗結束

圖 3.1 試體 ND 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



圖 3.2 試體 ND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論

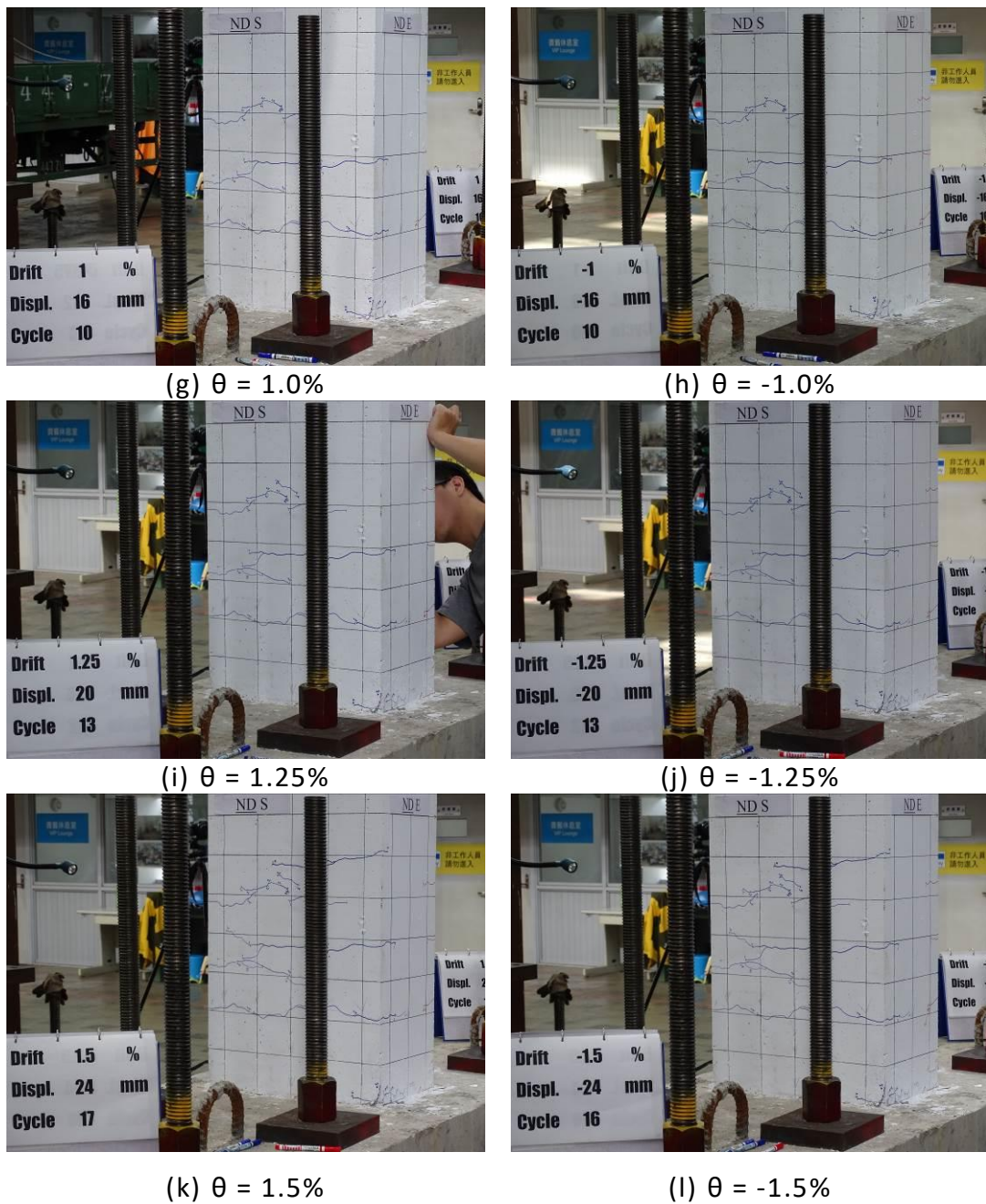


圖 3.2 試體 ND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

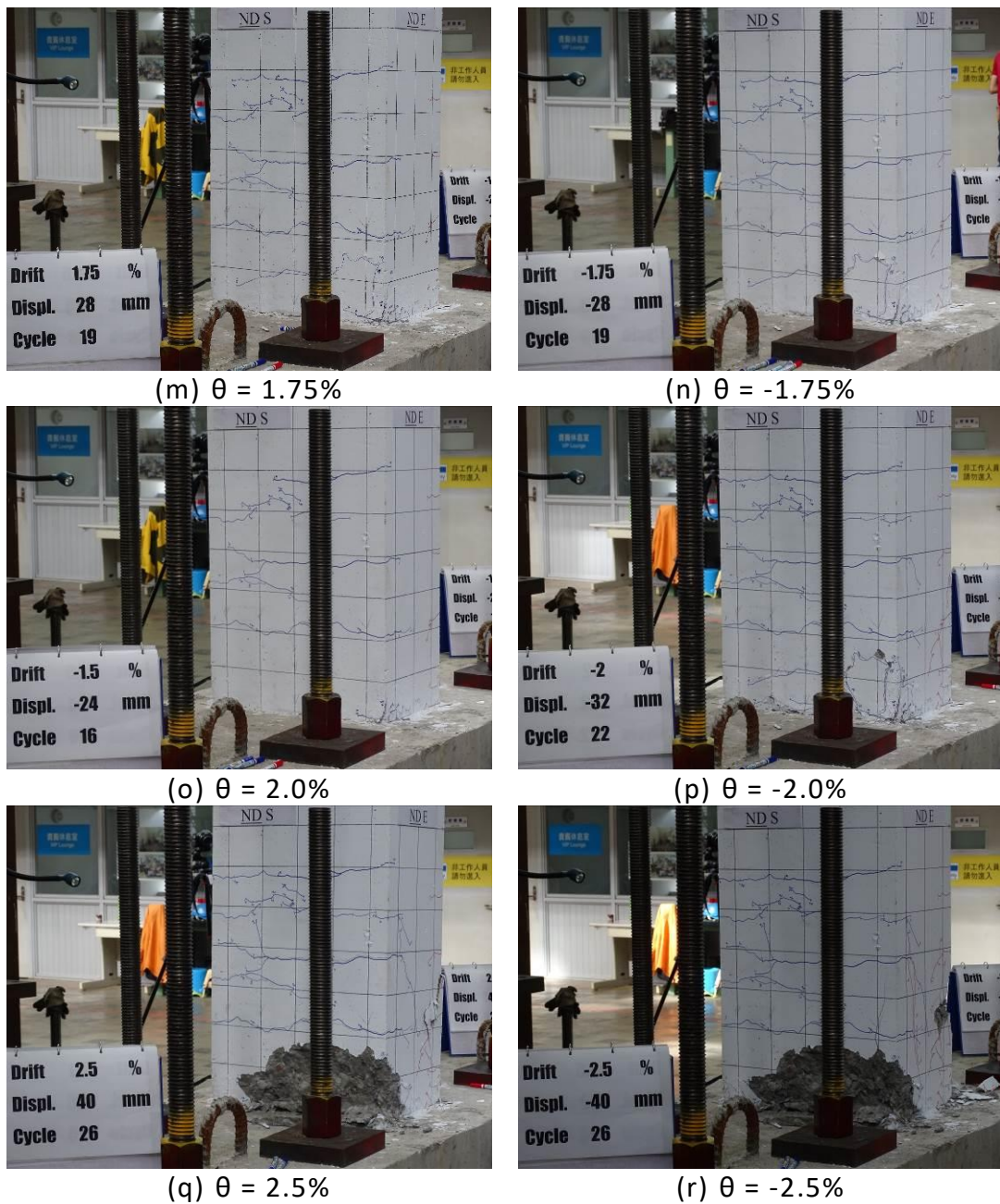
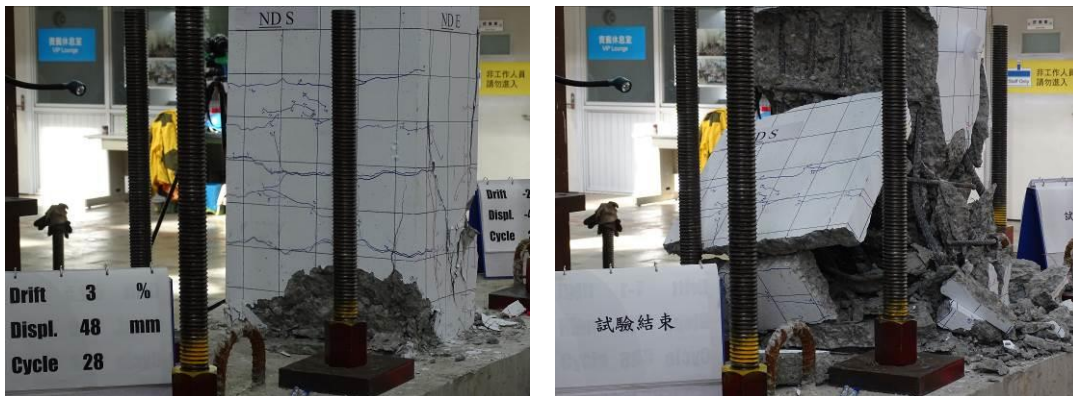


圖 3.2 試體 ND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論



(s) $\theta = 3.0\%$

(t) 試驗結束

圖 3.2 試體 ND 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)



(a) 試體 ND 東側之破壞情形



(b) 試體 ND 南側之破壞情形

圖 3.3 試體 ND 於試驗結束之破壞情形

(資料來源：本研究)

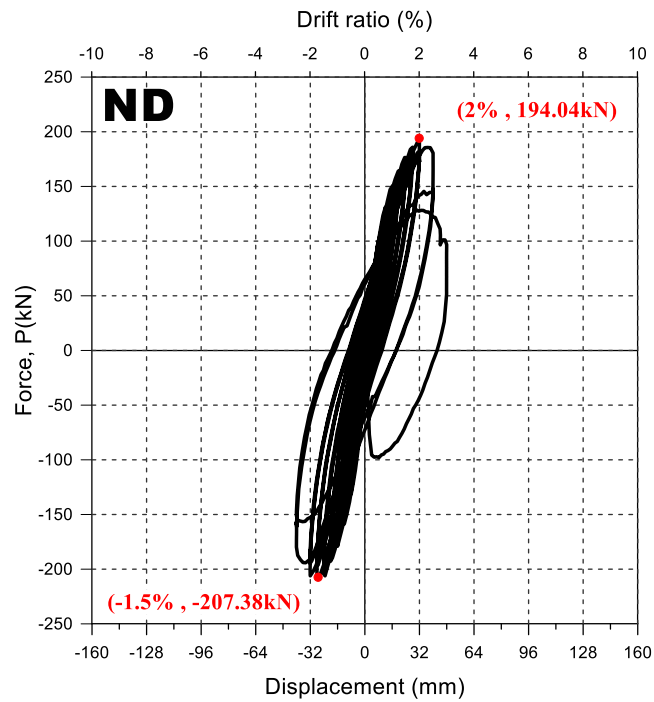


圖 3.4 試體 ND 遲滯迴圈

(資料來源：本研究)

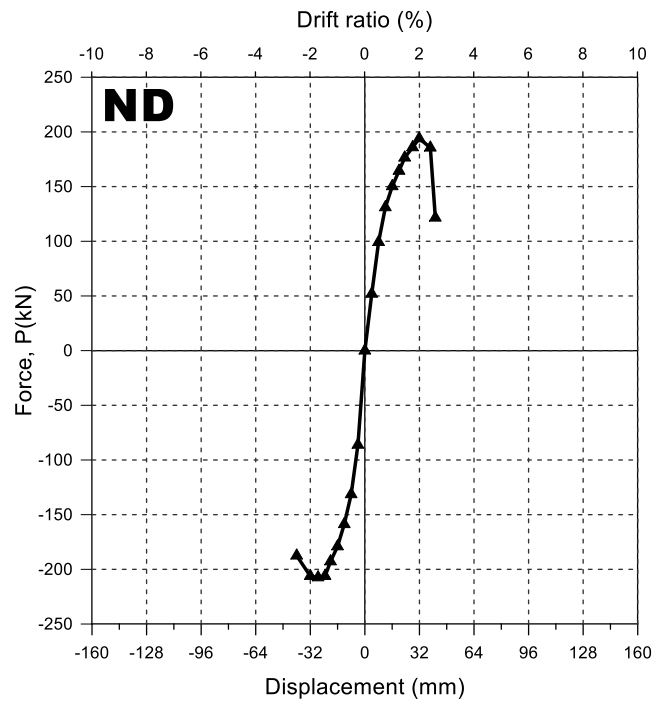


圖 3.5 試體 ND 強度包絡線

(資料來源：本研究)

3.1.2 試體 NDCH

試體 NDCH 係於試體外層，僅貼覆一層纖維方向為水平向之 CFRP 貼片。當位移比 0.25% 時，試體 NDCH 表面貼覆的 CFRP，其表面並未觀察到有裂縫之產生。當位移比為 0.5% 的時，試體北側自底部往上 20 至 23 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 0.75% 時，試體南側及北側自底部往上 20 至 25 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西兩側。接著當位移比達 1% 時，試體南側及北側自底部往上 38 至 43 公分範圍，接連出現微小水平裂縫。當移比於 -2% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 -225.14 KN，如表 3.6 所示。接著位移比達 2.5% 時，試體南側自底部往上約 10 至 20 公分範圍，CFRP 表面發生些微的面外鼓起，此時位移比於 +2.5% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 +220.04 KN，如表 3.6 所示。後續位移比達 3% 時，試體北側底部往上約 12 公分處，也出現些微鼓起的現象。接著當位移比達 4% 時，試體南側自底部往上 0 至 60 公分範圍出現多處水平向裂縫，並分別於 25 公分處及 32 公處出現表面鼓起的現象，另北側自底部往上 0 至 50 公分處，亦出現多處明顯水平向裂縫，裂縫同時延伸至東側及西側面自底部往上約 0 至 50 公分範圍。後續位移比為 4.5% 時，試體南側及北側自底部往上 0 至 25 公分位置，多處水平向裂縫明顯擴大，其裂縫

寬度約為 5 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 5% 時，試體北側自底部往上約 30 公分範圍，CFRP 貼片於同一時間陸續發生纖維斷裂，混凝土大量碎裂，試體側向強度迅速降低，停止實驗。

試體 NDCH 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.6。位於試體東與南側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.7。圖 3.8 為試體 NDCH 於試驗結束之破壞照片。圖 3.9 與圖 3.10 顯示試體 NDCH 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

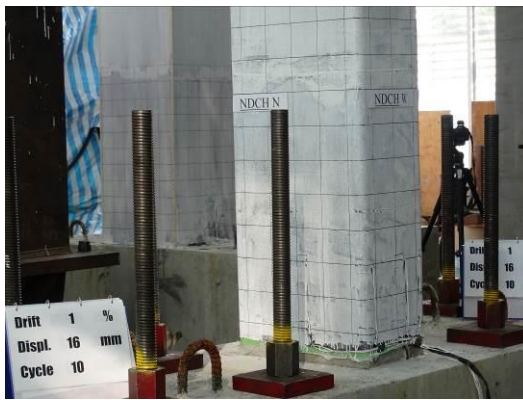
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



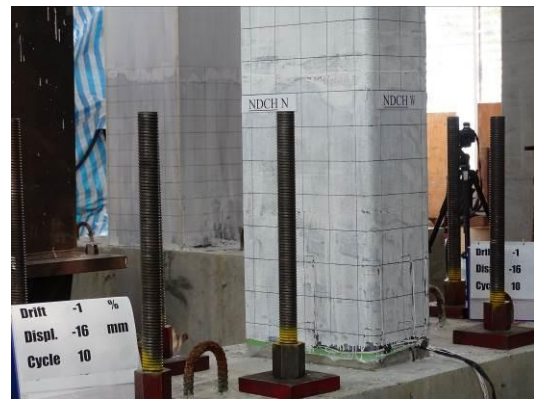
圖 3.6 試體 NDCH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

(資料來源：本研究)

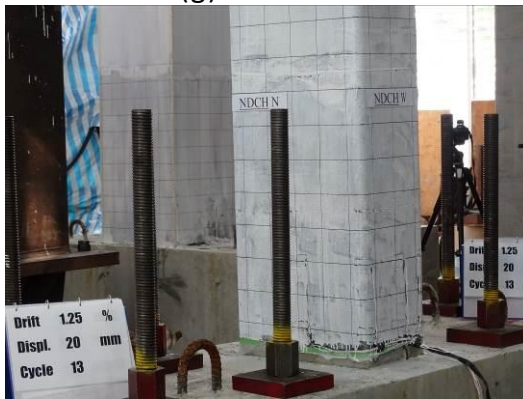
第三章 試驗結果與討論



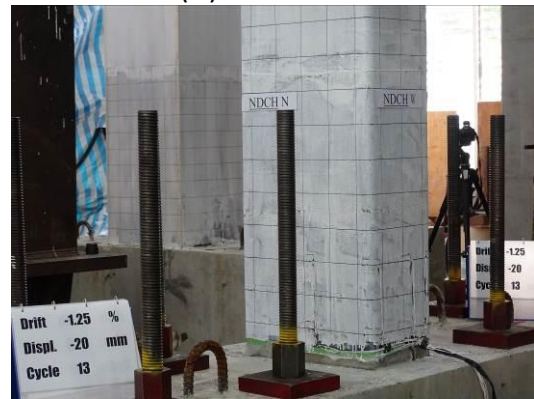
(g) $\theta = 1.0\%$



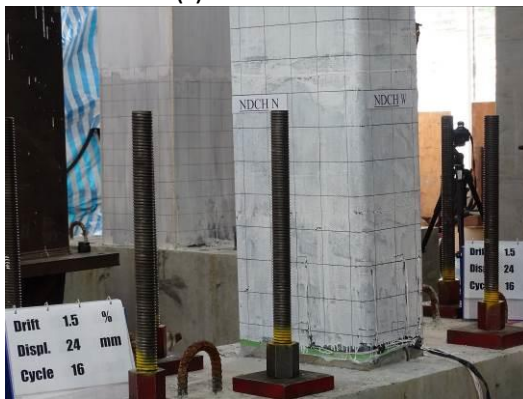
(h) $\theta = -1.0\%$



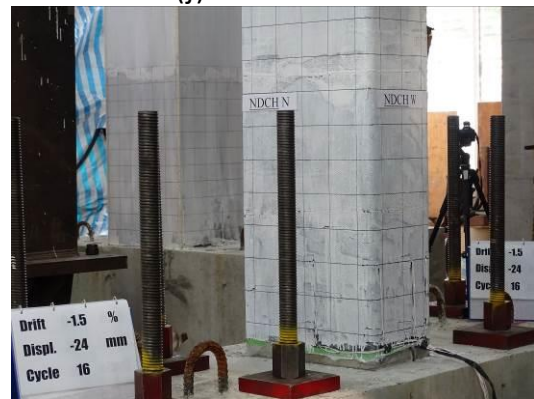
(i) $\theta = 1.25\%$



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



(k) $\theta = 1.5\%$



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

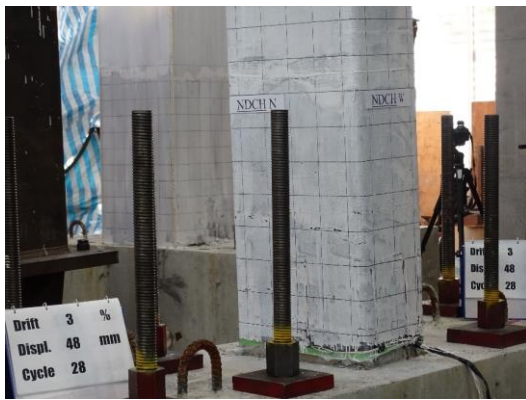
圖 3.6 試體 NDCH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

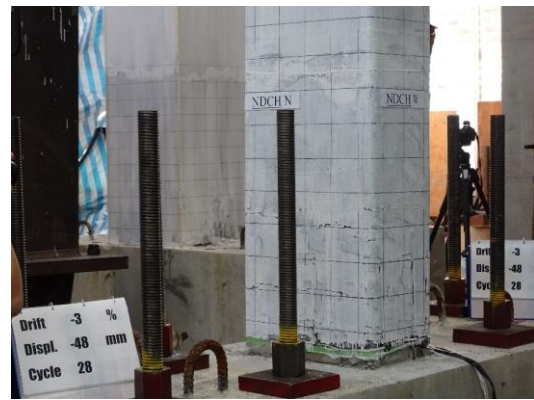
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



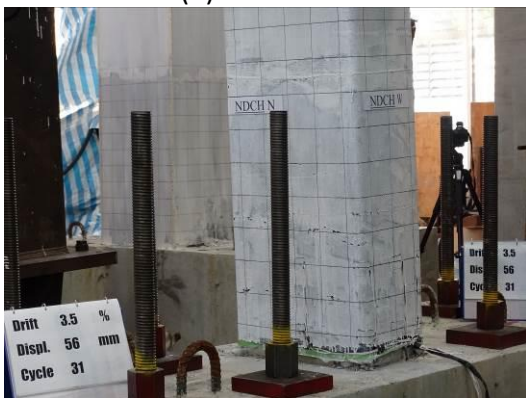
圖 3.6 試體 NDCH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)



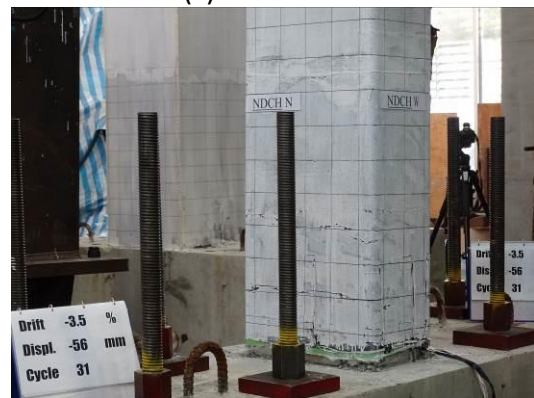
(s) $\theta = 3.0\%$



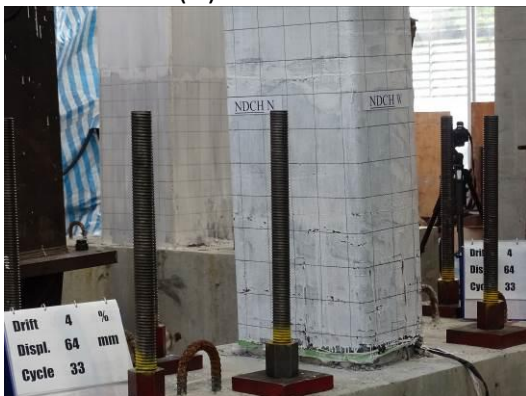
(t) $\theta = -3.0\%$



(u) $\theta = 3.5\%$



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



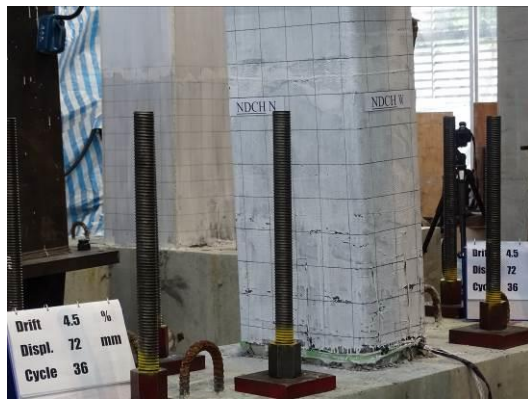
(w) $\theta = 4.0\%$



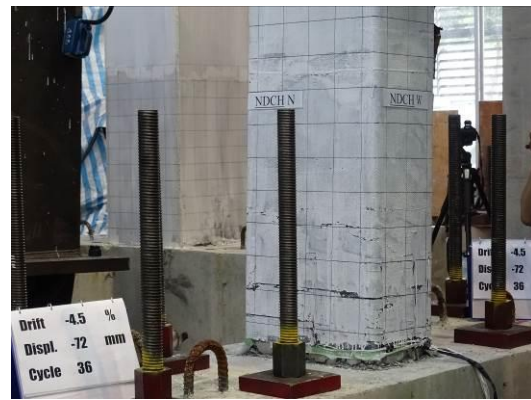
(x) $\theta = -4.0\%$

圖 3.6 試體 NDCH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



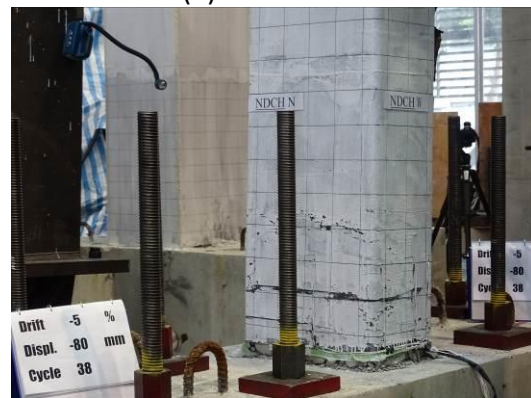
(y) $\theta = 4.5\%$



(z) $\theta = -4.5\%$



(aa) $\theta = 5.0\%$



(bb) $\theta = -5.0\%$



(cc) 試驗結束

圖 3.6 試體 NDCH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論

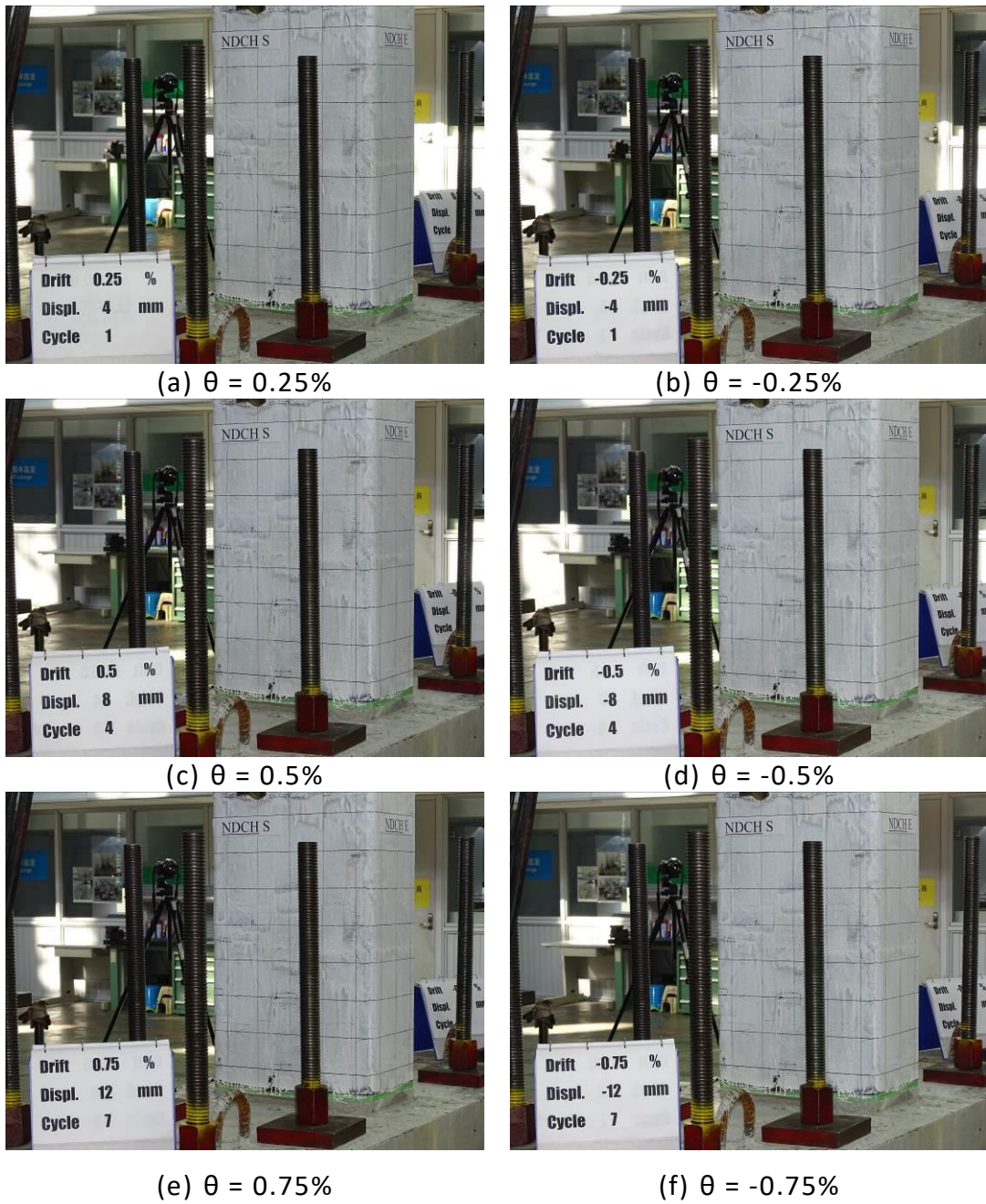


圖 3.7 試體 NDCH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

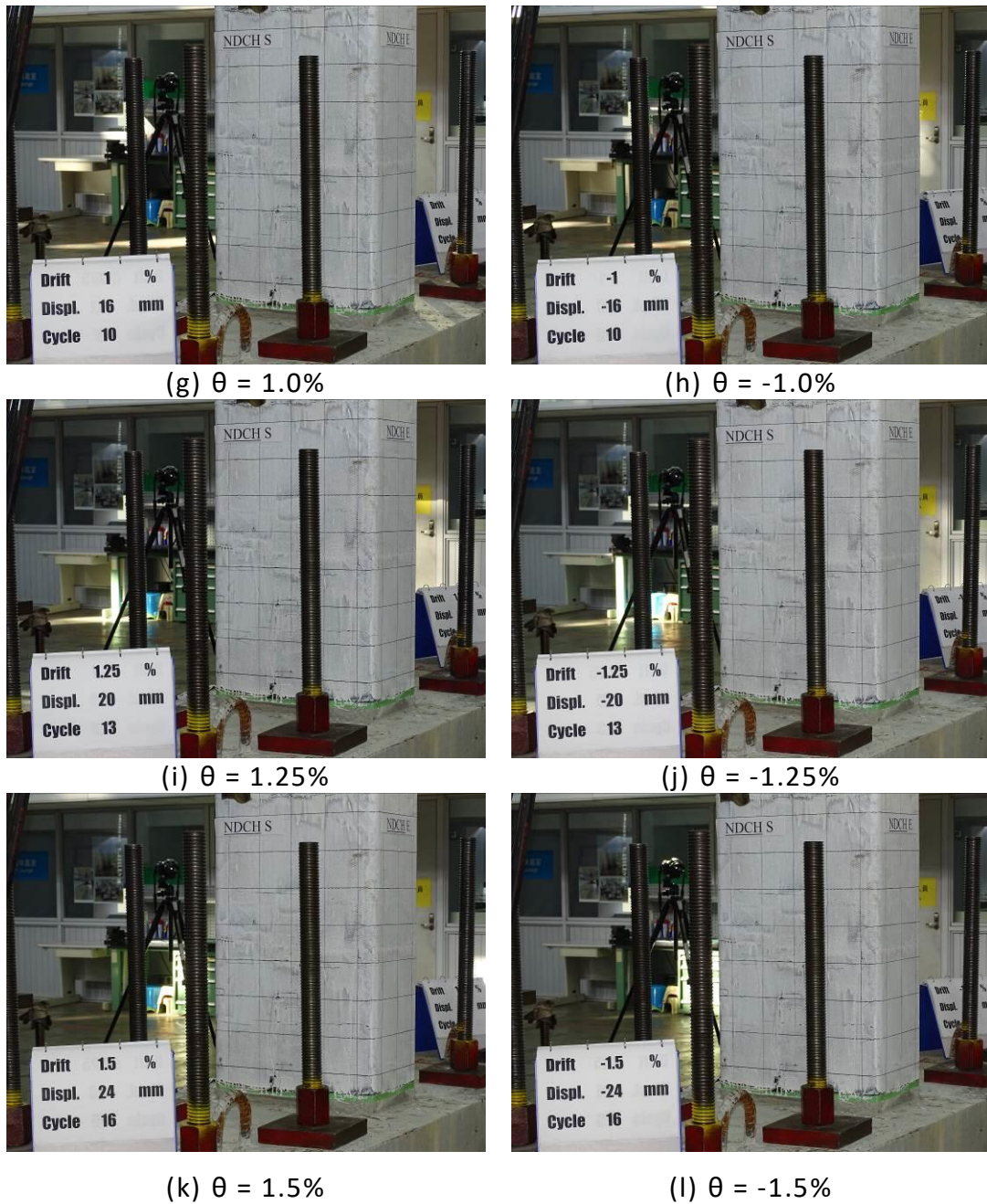


圖 3.7 試體 NDCH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

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) $\theta = -2.5\%$

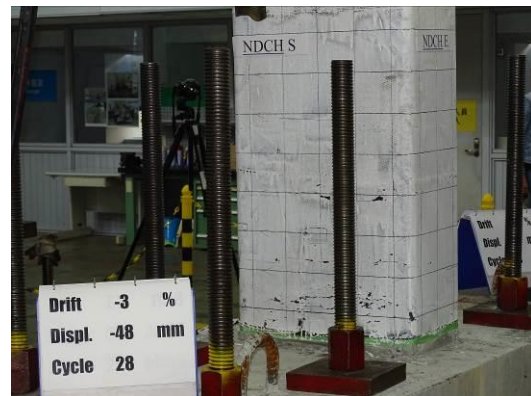
圖 3.7 試體 NDCH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

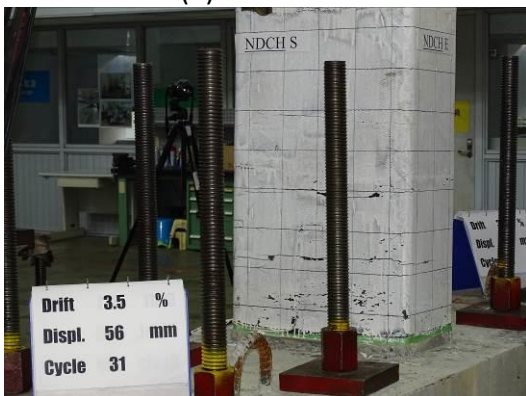
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



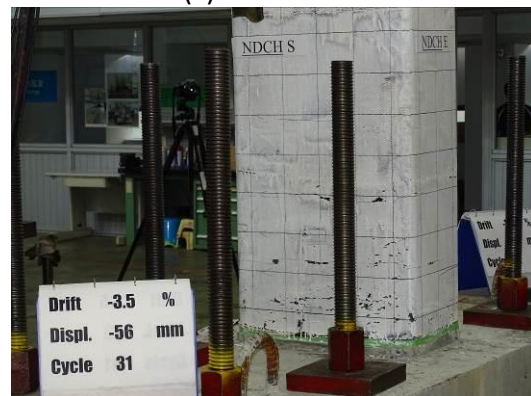
(s) $\theta = 3.0\%$



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



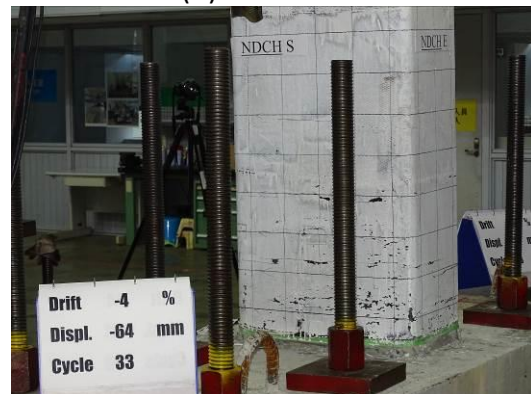
(u) $\theta = 3.5\%$



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



(w) $\theta = 4.0\%$



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

圖 3.7 試體 NDCH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

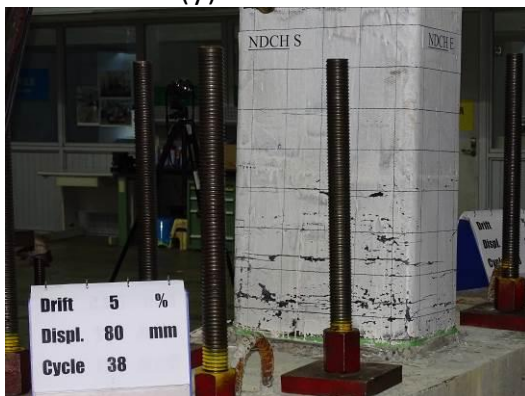
第三章 試驗結果與討論



(y) $\theta = 4.5\%$



(z) $\theta = -4.5\%$



(aa) $\theta = 5.0\%$



(bb) $\theta = -5.0\%$



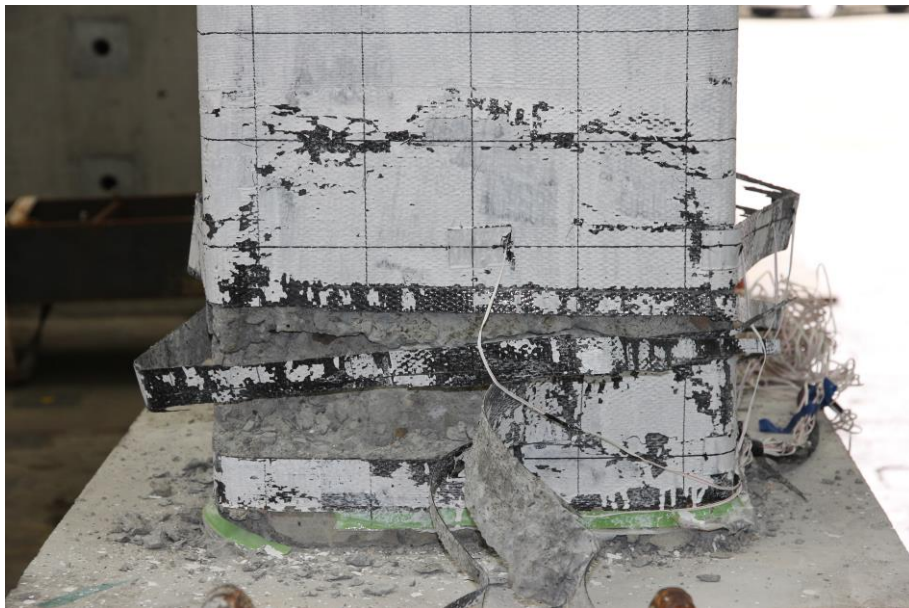
(cc) 試驗結束

圖 3.7 試體 NDCH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)



(a) 試體 NDCH 西南側角隅發生 CFRP 貼片斷裂的情形



(b) 試體 NDCH 北側之破壞情形

圖 3.8 試體 NDCH 於試驗結束之破壞情形

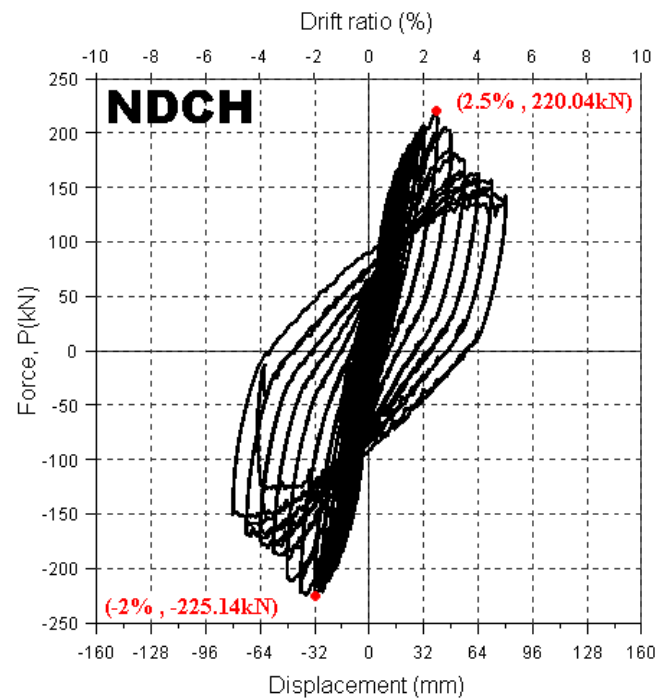


圖 3.9 試體 NDCH 遲滯迴圈片

(資料來源：本研究)

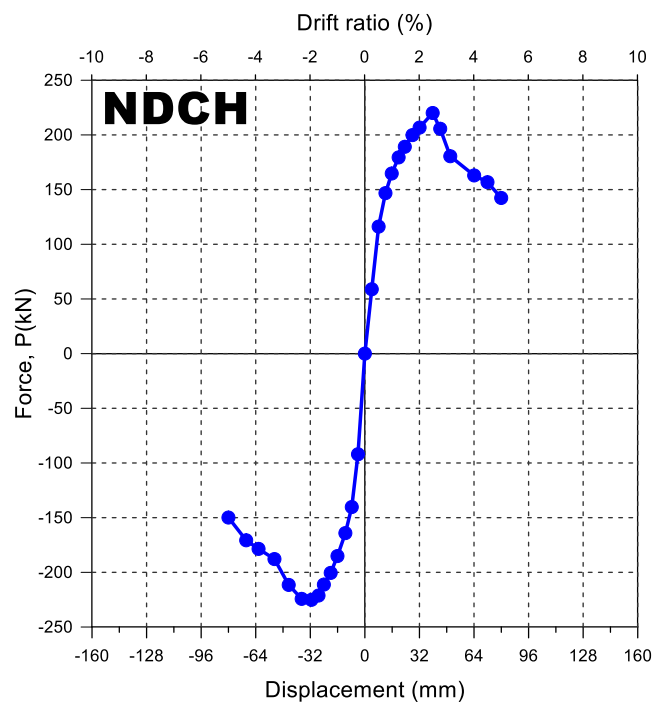


圖 3.10 試體 NDCH 強度包絡線片

(資料來源：本研究)

3.1.3 試體 NDCHH

試體 NDCHH 係於試體外層，貼覆二層纖維方向為水平向之 CFRP 貼片。當位移比 0.75% 前，試體 NDCHH 表面的 CFRP，均未發現裂縫及鼓起，當移比於 +0.75% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 +158.2 KN。當位移比為 1% 時，試體的南面及北面，自底部往上約 21 公分處，CFRP 表面出現微小水平裂縫；當移比於 +1% 時，對應柱試體達最大承受的側力為 +177.5 KN。接著當位移比達 1.25% 時，試體南面及北面中間自底部往上約 21 公分處水平向裂縫延伸至東面及西面。後續位移比達 3% 時，試體南面及北面自底部往上約 20 公分、40 公分及 60 公分處，均出現水平向裂縫，裂縫寬度約 1 公厘，另北面 12 公分處，出現些微鼓起的現象，此時柱試體達最大承受的側力為 -232.59kN。當位移比達到 3.5% 時，南面自底部往上約 12 公分處亦出現些微鼓起的現象。後續於位移比 4% 時，試體北面自底部往約 40 公分處，出現第 3 處鼓起的現象。後續於位移比 6% 時，試體南面及北面自底部往上 21 公分處，水平向裂縫均擴大約為 5 公厘，明顯可見表層混凝土輕微碎裂的情形，隨試體側向變位之加大愈趨明顯。最後，於位移比 8% 時，試體南側自底部往上 0 至 20 公分範圍，CFRP 貼片瞬間斷裂；試體側向強度迅速降低，停止實驗。

試體 NDCHH 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如

所示圖 3.11。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 3.12。圖 3.13 為試體 NDCHH 於試驗結束之破壞照片。圖 3.14 與圖 3.15 顯示試體 NDCHH 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

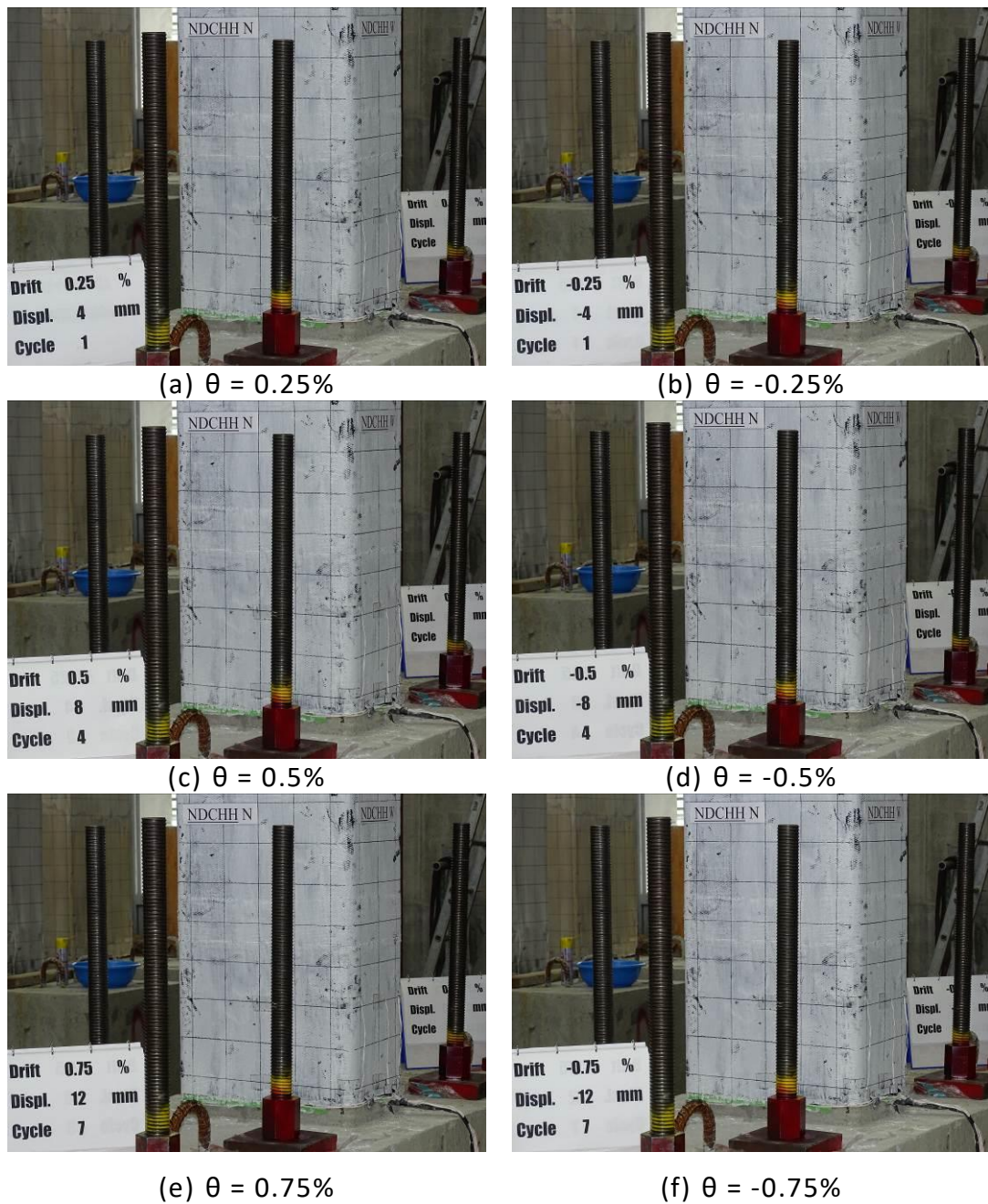


圖 3.11 試體 NDCHH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片
(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論

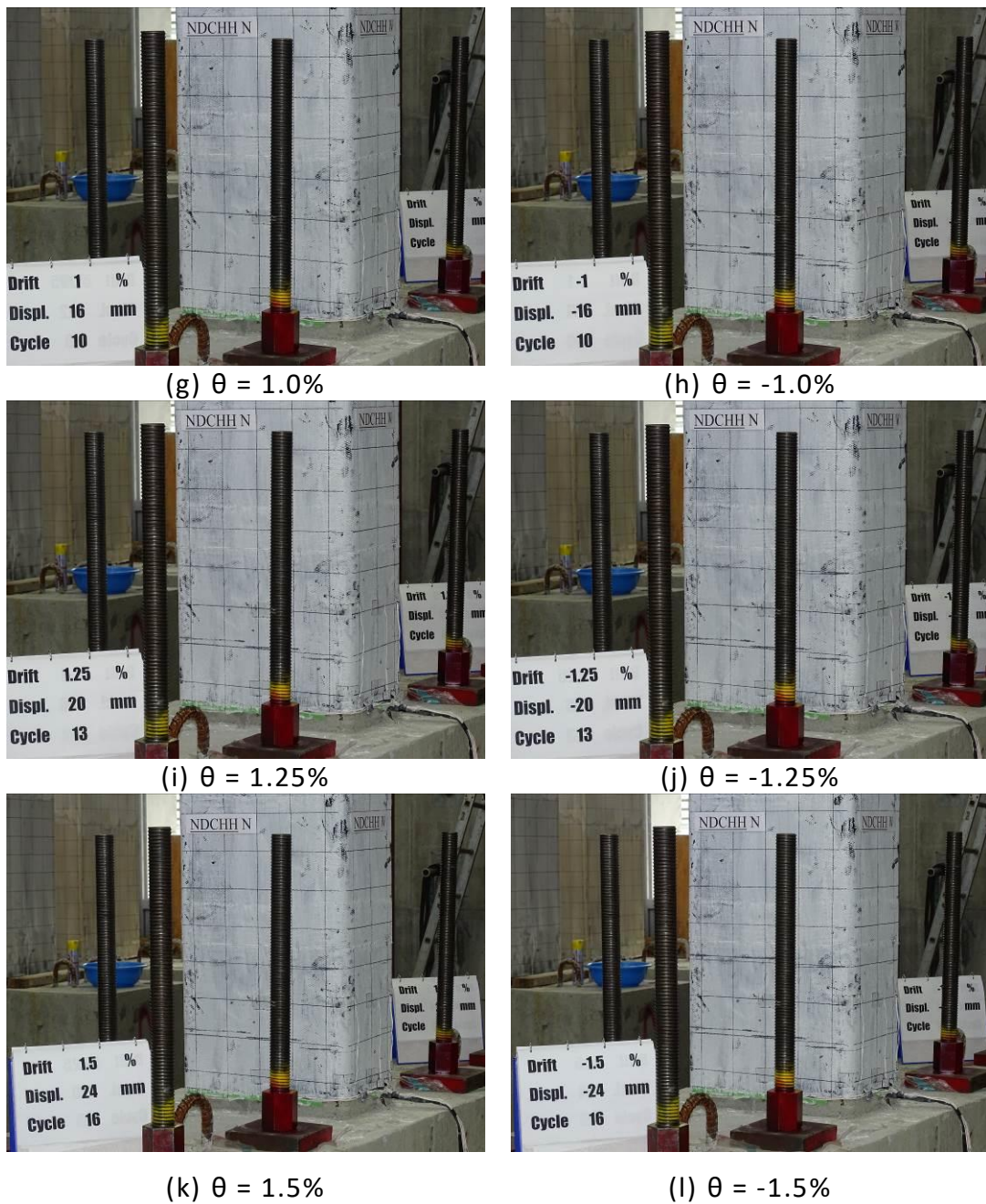


圖 3.11 試體 NDCHH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

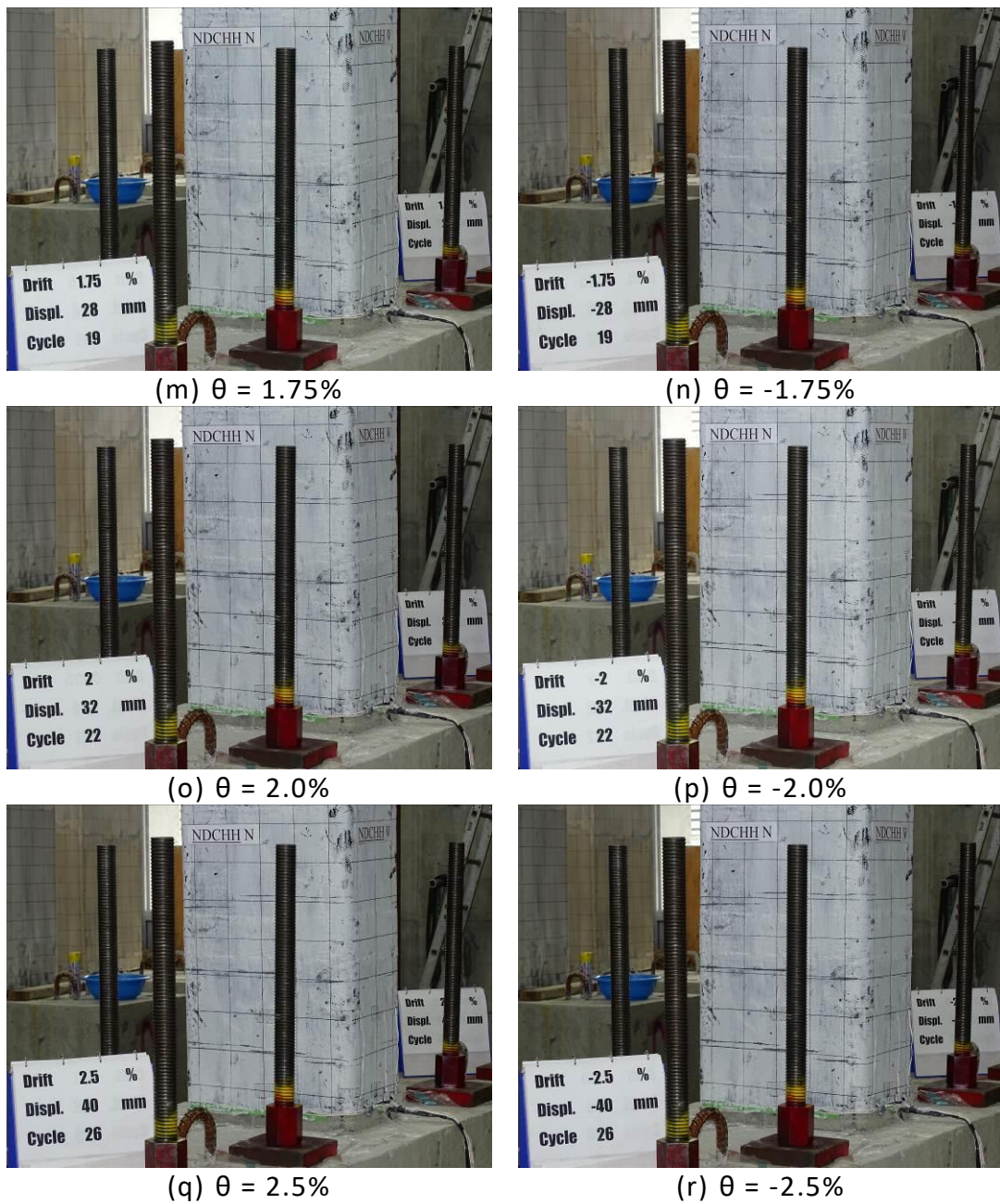
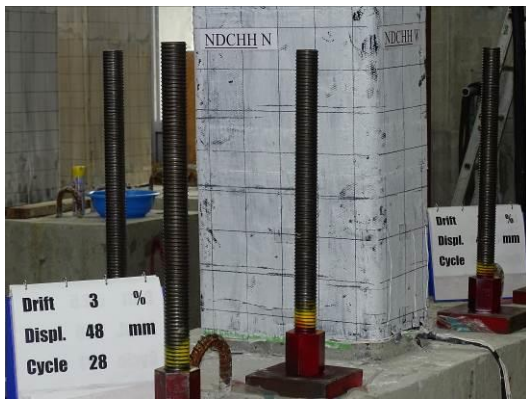
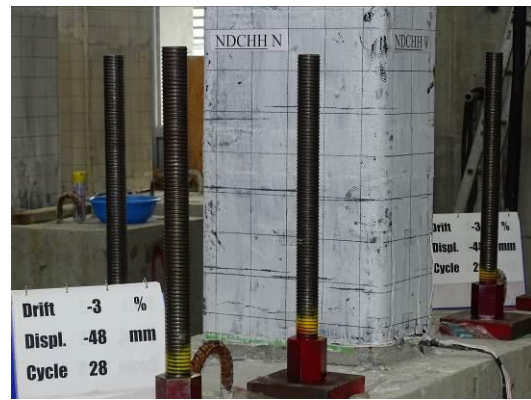


圖 3.11 試體 NDCHH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)



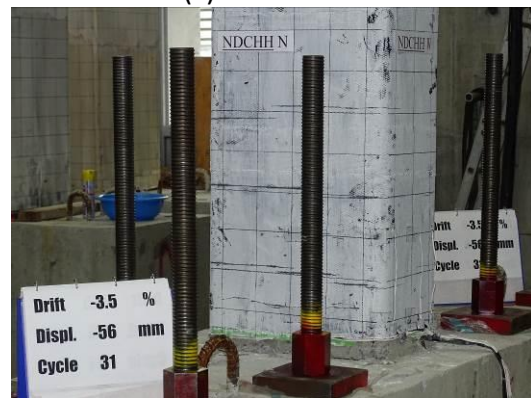
(s) $\theta = 3.0\%$



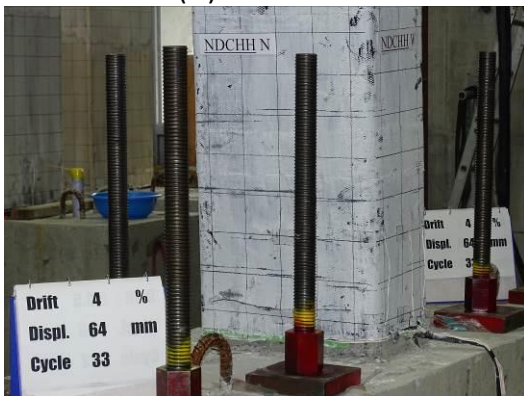
(t) $\theta = -3.0\%$



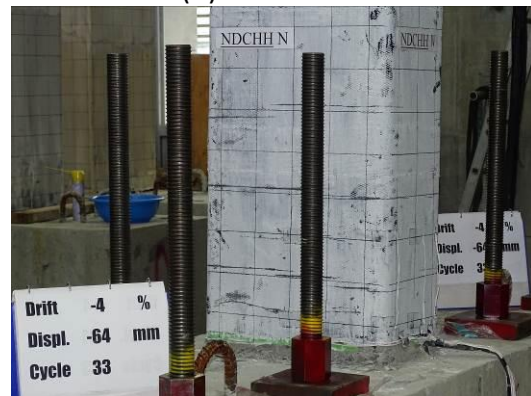
(u) $\theta = 3.5\%$



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



(w) $\theta = 4.0\%$

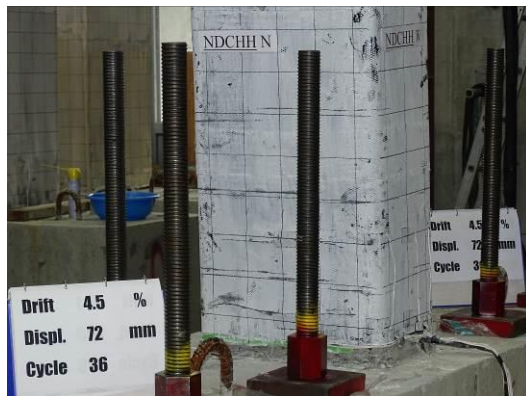


(x) $\theta = -4.0\%$

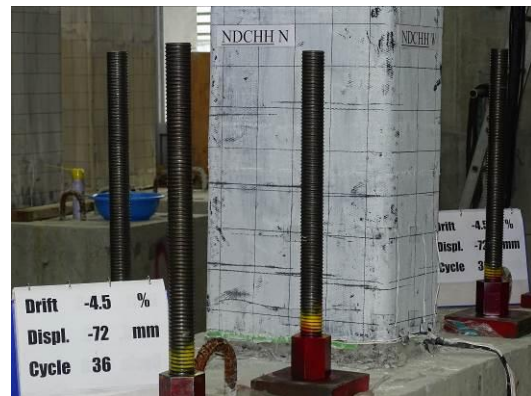
圖 3.11 試體 NDCHH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

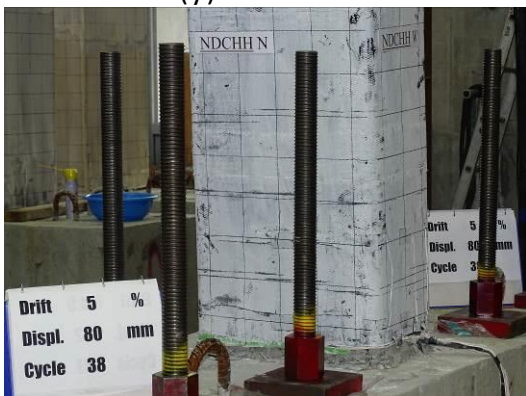
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



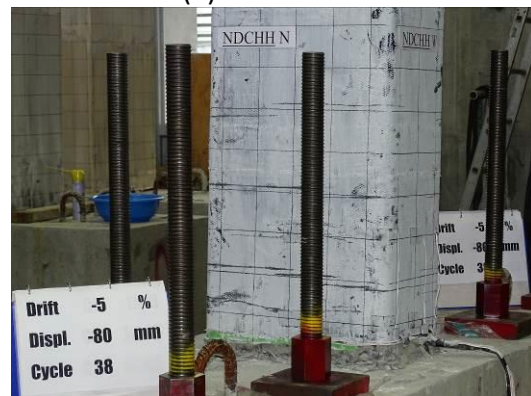
(y) $\theta = 4.5\%$



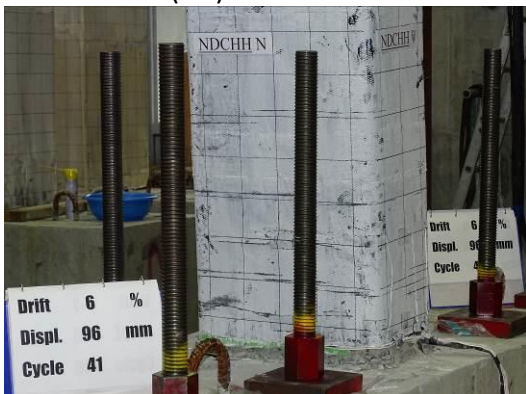
(z) $\theta = -4.5\%$



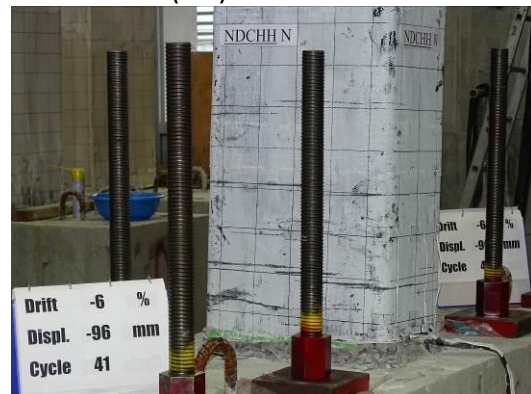
(aa) $\theta = 5.0\%$



(bb) $\theta = -5.0\%$



(cc) $\theta = 6.0\%$



(dd) $\theta = -6.0\%$

圖 3.11 試體 NDCHH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論

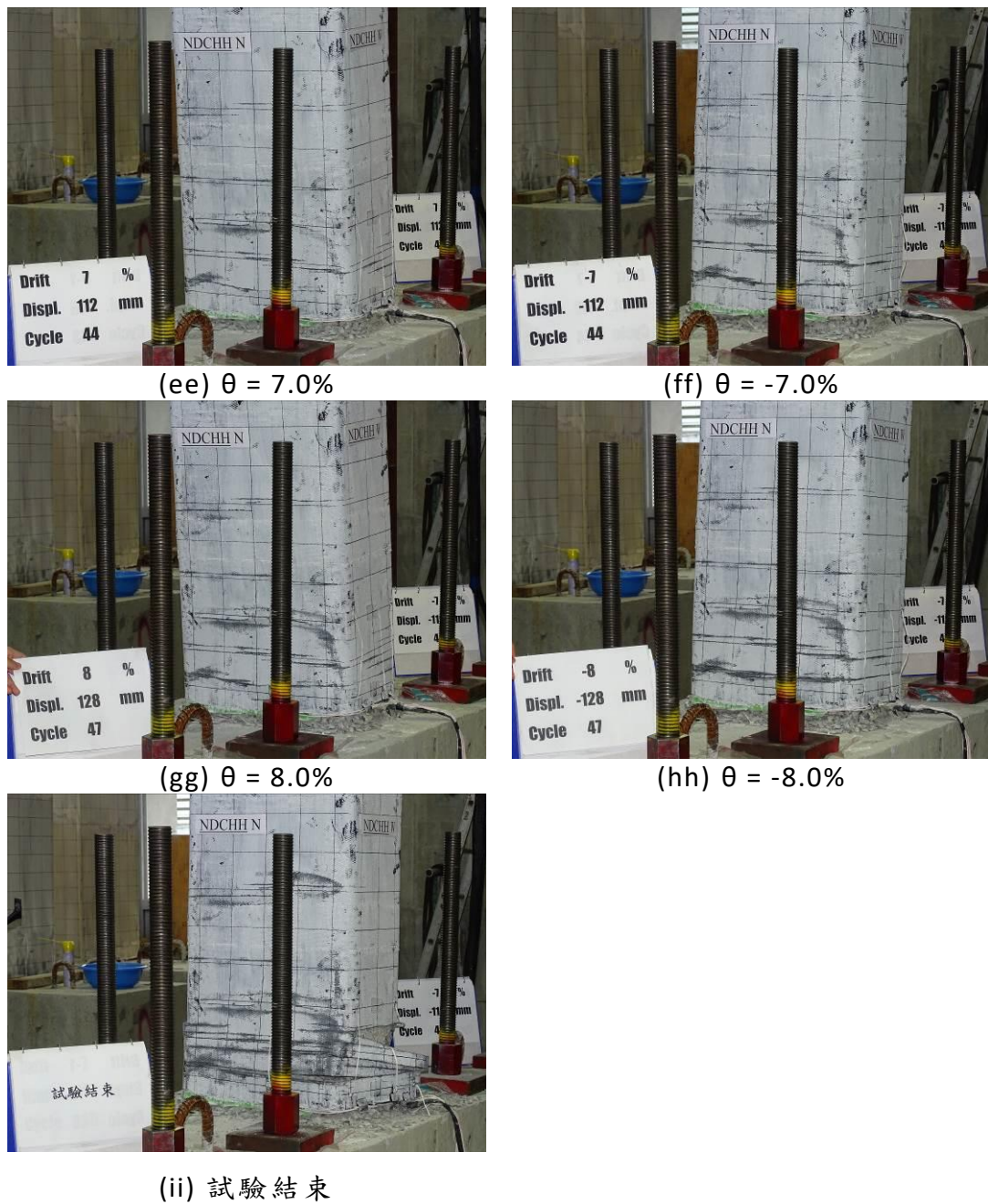


圖 3.11 試體 NDCHH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

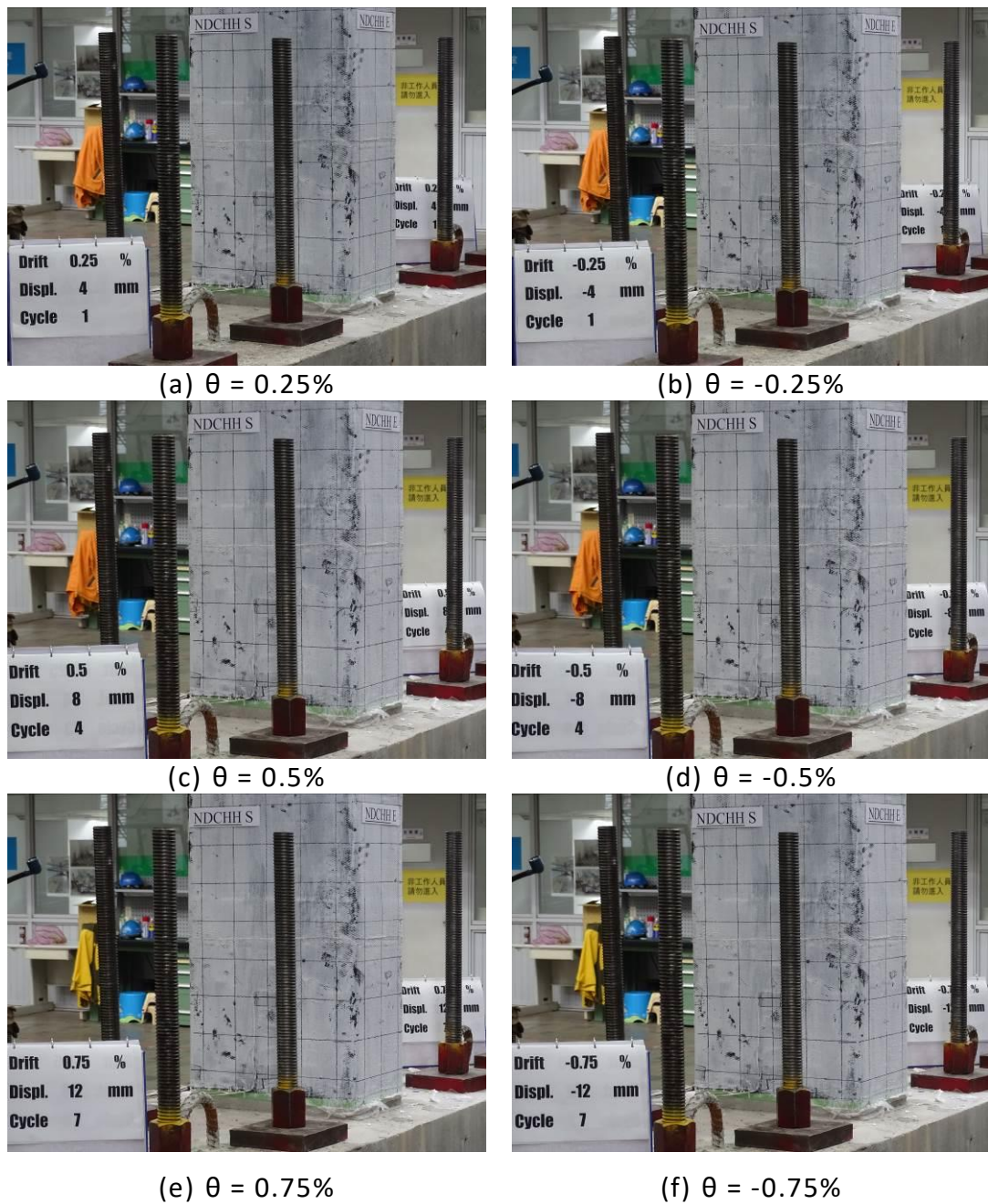


圖 3.12 試體 NDCHH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片
(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論

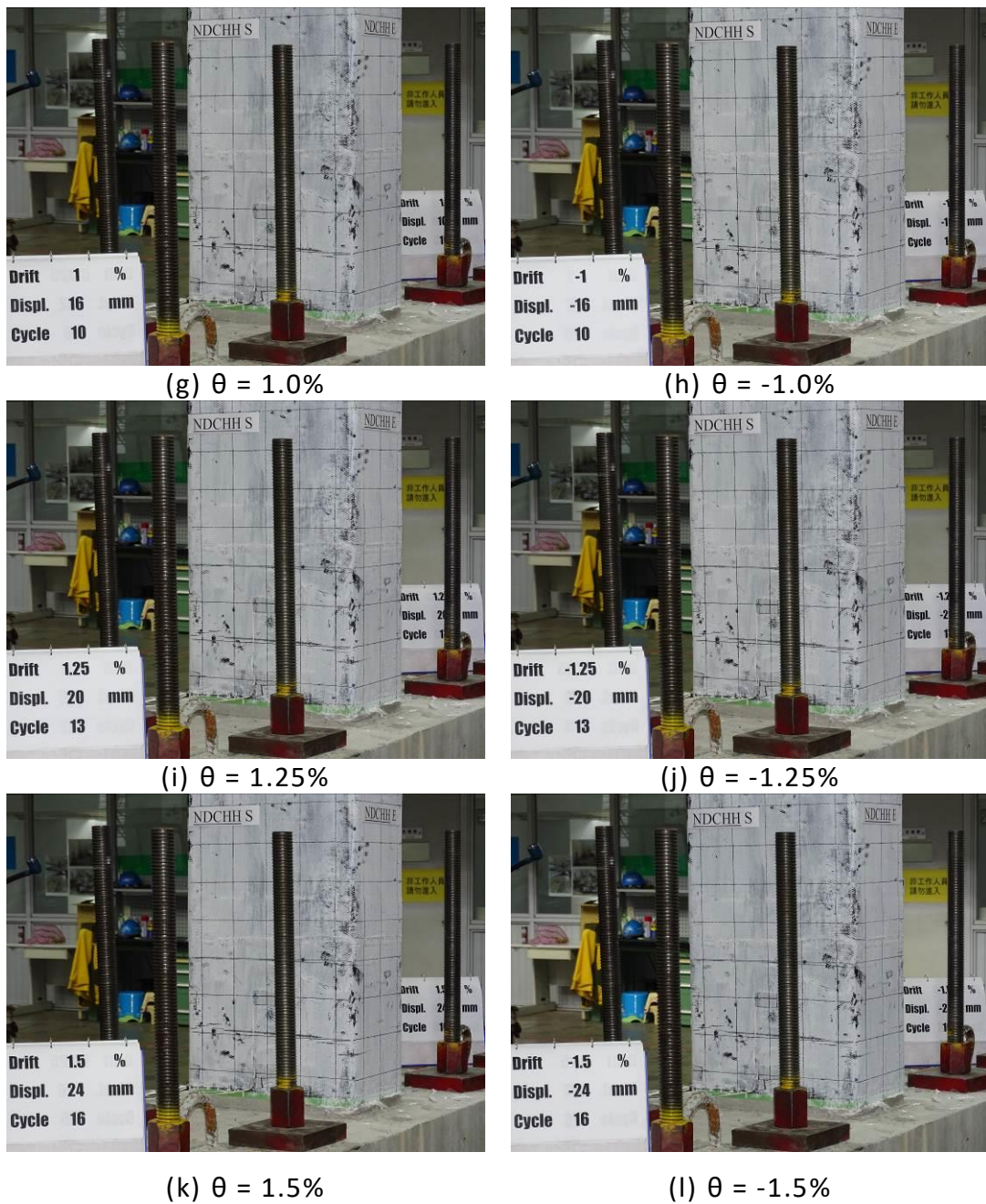


圖 3.12 試體 NDCHH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

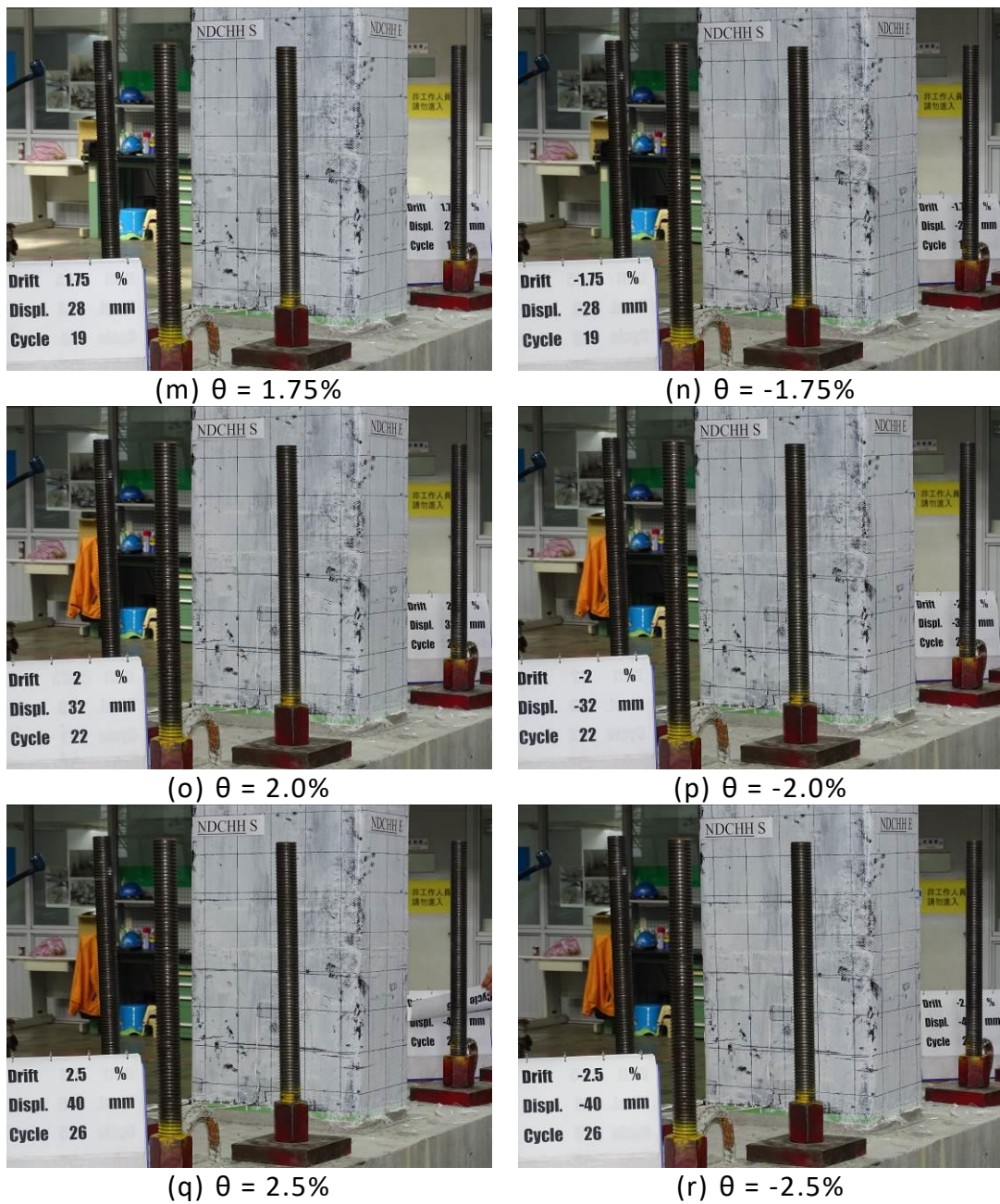
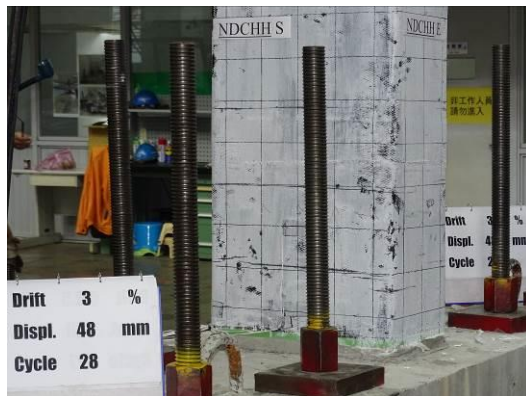
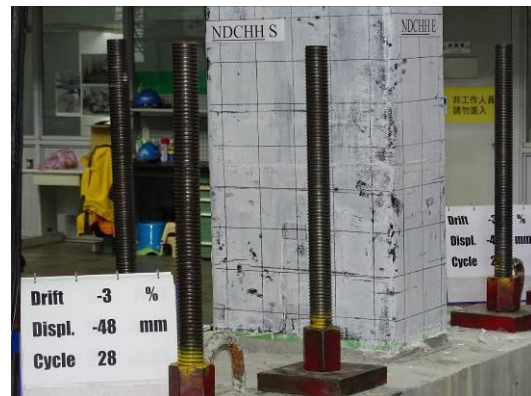


圖 3.12 試體 NDCHH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)

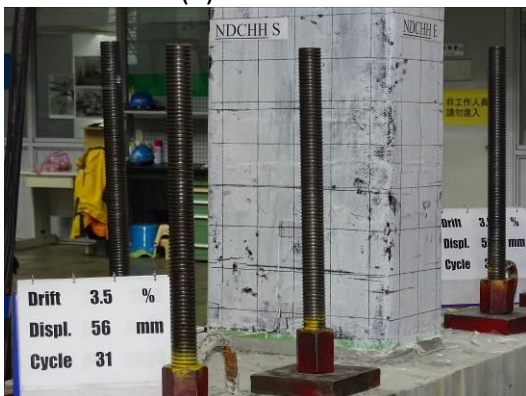
第三章 試驗結果與討論



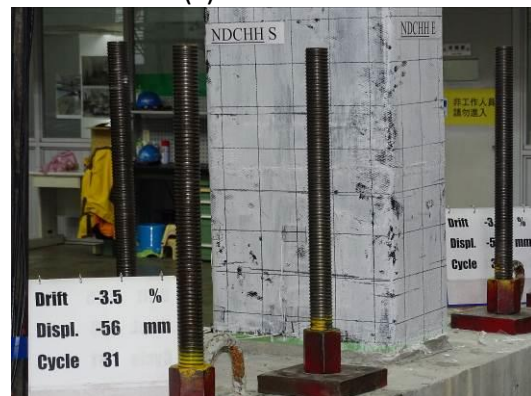
(s) $\theta = 3.0\%$



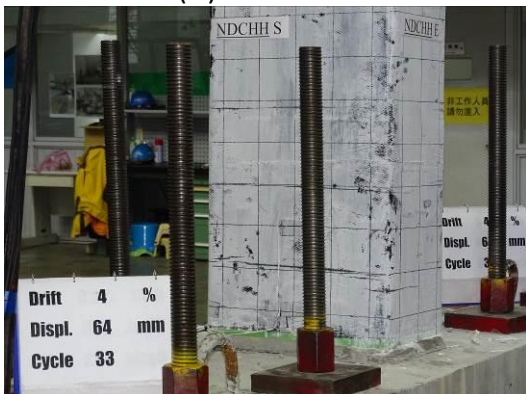
(t) $\theta = -3.0\%$



(u) $\theta = 3.5\%$



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



(w) $\theta = 4.0\%$



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

圖 3.12 試體 NDCHH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

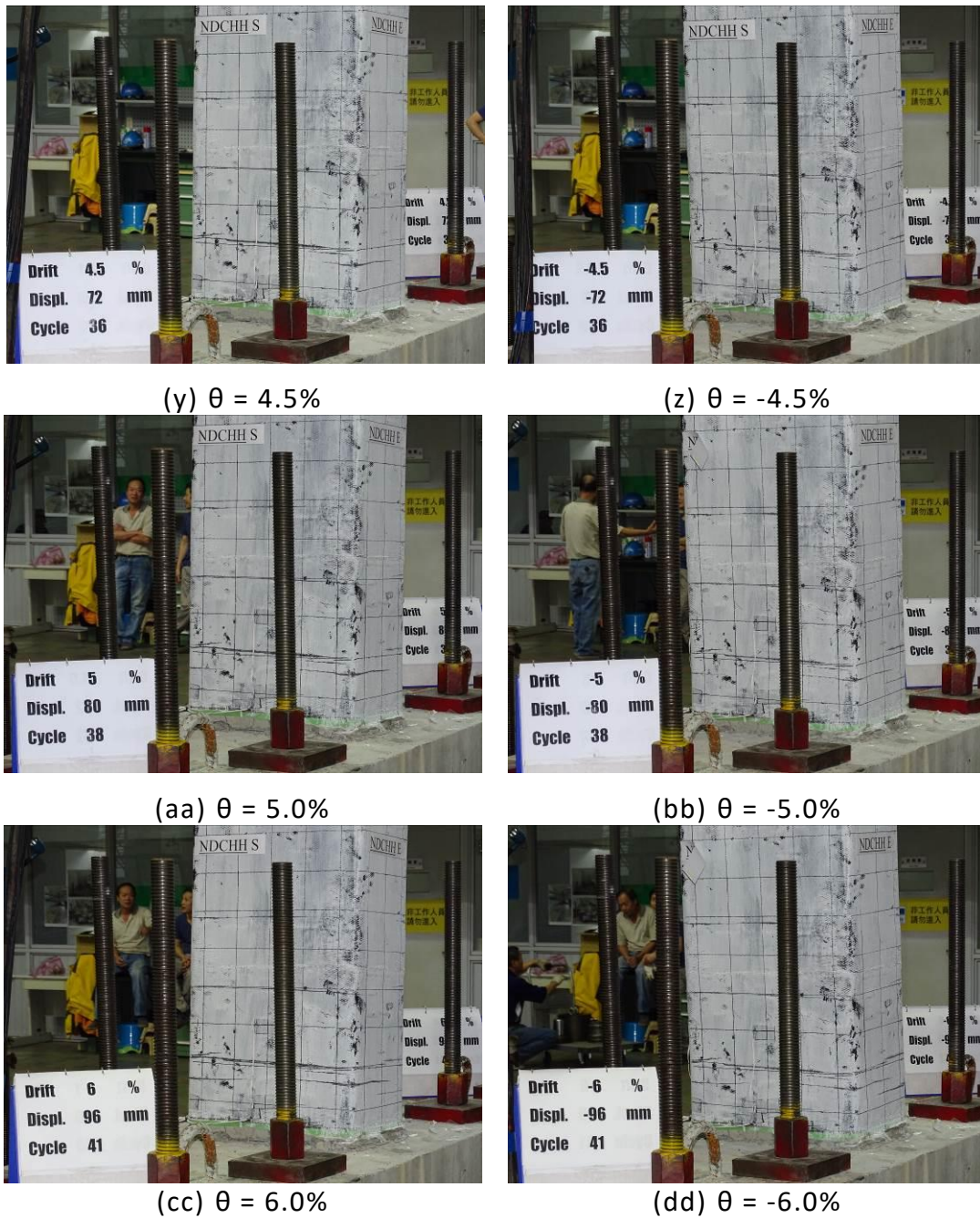


圖 3.12 試體 NDCHH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論

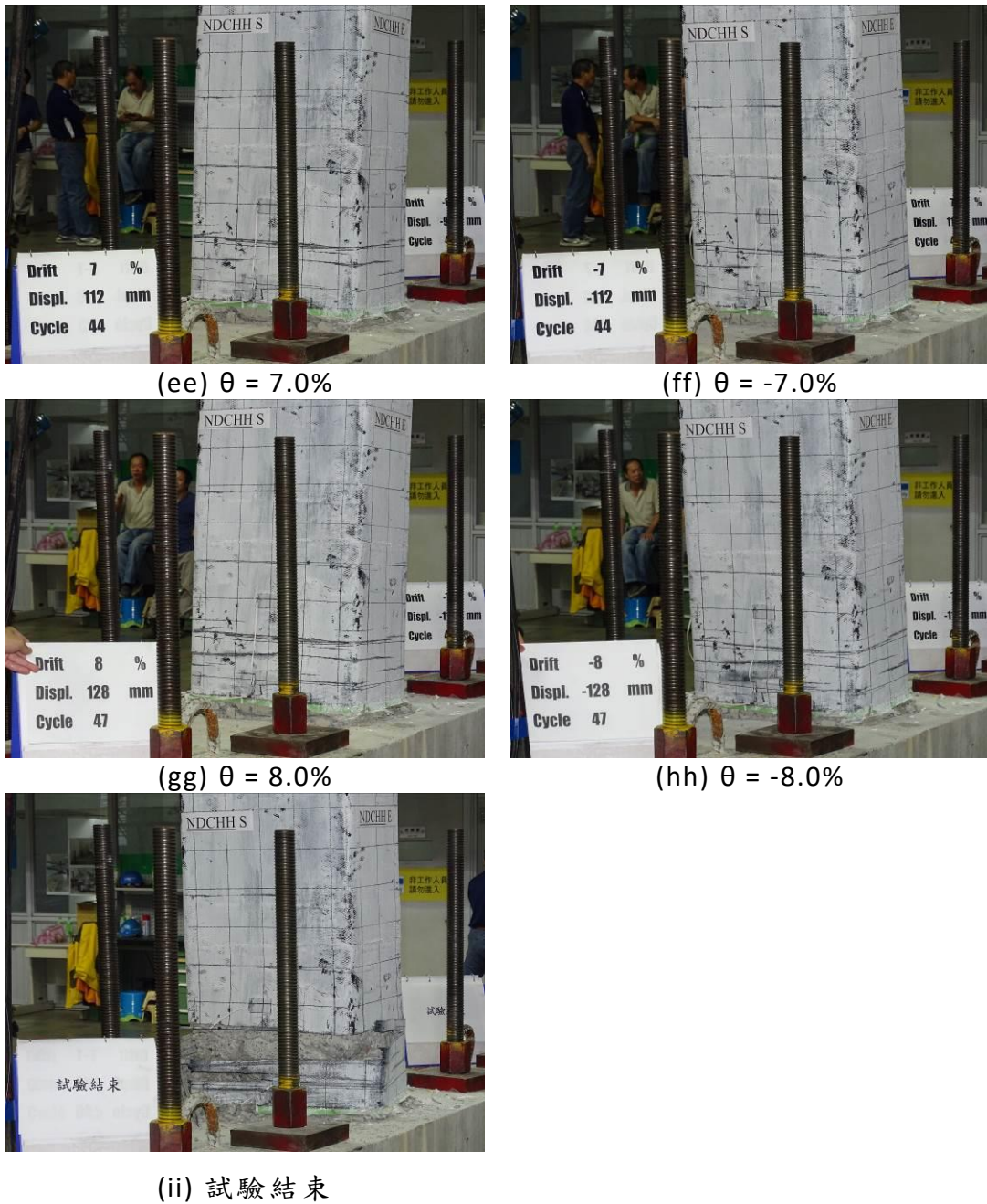


圖 3.12 試體 NDCHH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)



(a) 試體 NDCHH 西南側角隅發生 CFRP 貼片斷裂的情形



(b) 試體 NDCHH 北側之破壞情形

圖 3.13 試體 NDCHH 於試驗結束之破壞情形

(資料來源：本研究)

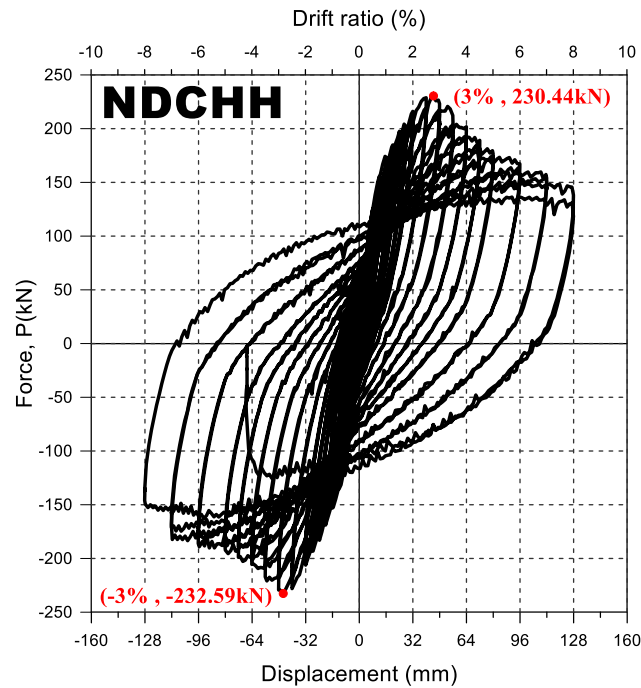


圖 3.14 NDCHH 試體遲滯迴圈

(資料來源：本研究)

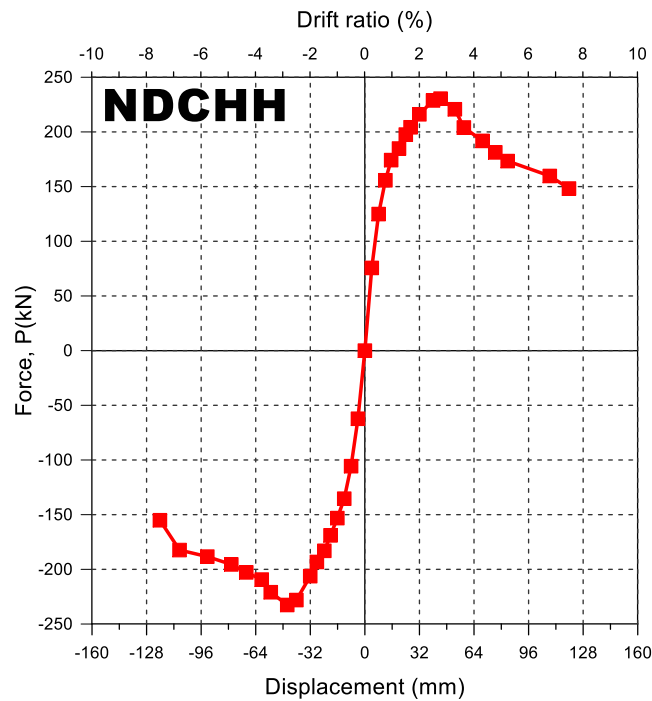


圖 3.15 NDCHH 試體遲滯迴圈片

(資料來源：本研究)

3.1.4 試體 NDCVH

試體 NDCVH 係於試體外層，共計貼覆二層 CFRP 貼片，首先第一層係纖維方向為垂直向之 CFRP 貼片，最外圍為貼覆纖維方向為水平向之貼片。在位移比 2% 前，試體 NDCVH 表面的 CFRP，均未發現裂縫及鼓起。當位移比為 2.5% 時，試體的南面自底部往上 0 至 20 公分範圍，CFRP 表面出現些微面外鼓起的現象；當移比於 -2.5% 時，此時達柱試體最大承受的側力為 -224.16kN，如表 3.6 所示。當位移比達 4% 時，試體北面自底部往上 10 至 20 公分範圍，亦產生些微面外鼓起的現象，直至位移比 4.5% 之前，均只有前述南北面持續往面外方向鼓起，並未發現 CFRP 表面水平向開裂的情形。接著當位移比達 5% 時，試體北面自底部往上約 24 公分處，發現 CFRP 水平向些微開裂，以及東北面角隅自底部往上約 0 至 30 公分範圍，CFRP 表面出現垂直方向石膏漆脫落的情形。當位移比達 6% 過程中，試體東北面角隅自底部往上約 0 至 24 公分處，首先出現 CFRP 延垂直方向瞬間斷裂的情形，最後由東北側 CFRP 貼片持續斷裂至底部往上 40 公分範圍，以及西南側角隅自底部往上 40 公分範圍，CFRP 垂直方向斷裂，試體側向強度迅速降低，停止實驗。

試體 NDCVH 西與北側 2 側，於各位移比逐步破壞情形照片，如所示圖 3.16。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 3.17。圖 3.18 為試體 NDCVH 於試驗結束之破壞照片。圖 3.19 與圖 3.20 顯示試體 NDCVH 的遲滯迴圈（側力與位移歷時曲線）與強度包絡線。

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

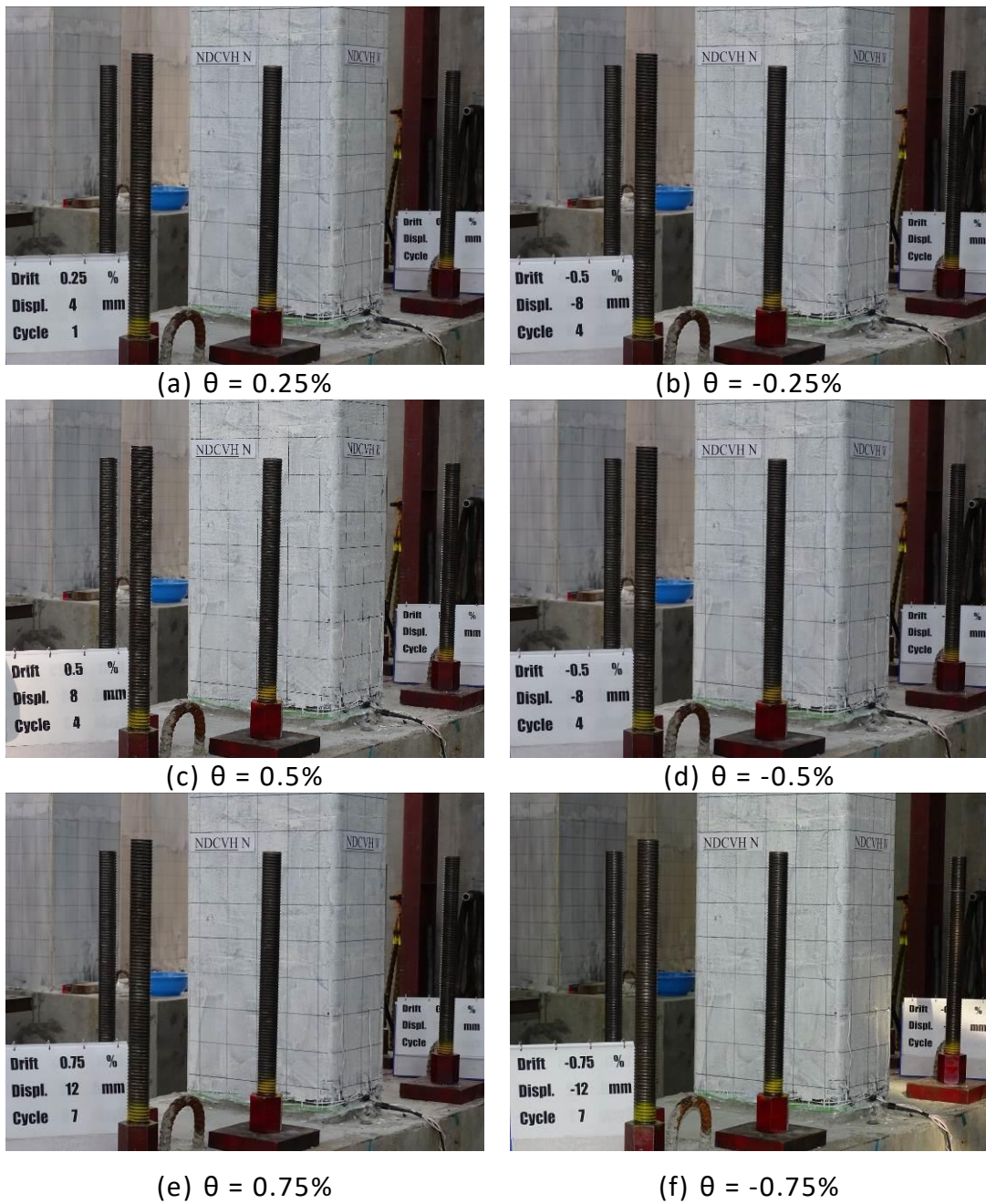


圖 3.16 試體 NDCVH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片
(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論



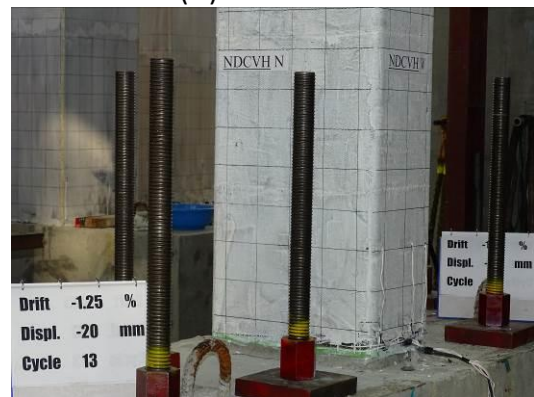
(g) $\theta = 1.0\%$



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



(i) $\theta = 1.25\%$



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



(k) $\theta = 1.5\%$



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

圖 3.16 試體 NDCVH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

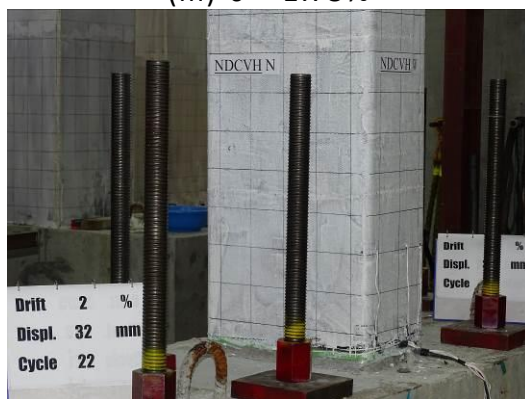
CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



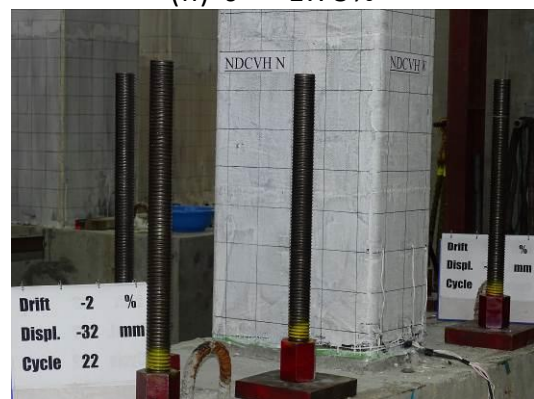
(m) $\theta = 1.75\%$



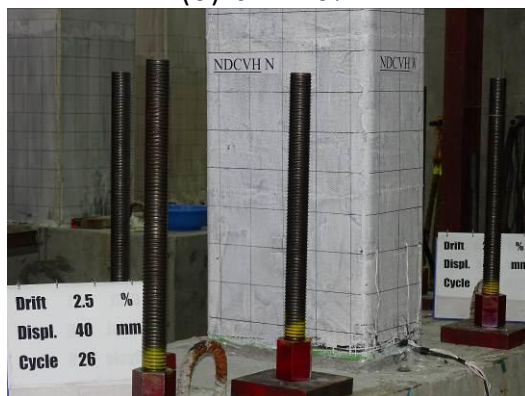
(n) $\theta = -1.75\%$



(o) $\theta = 2.0\%$



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



(q) $\theta = 2.5\%$



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

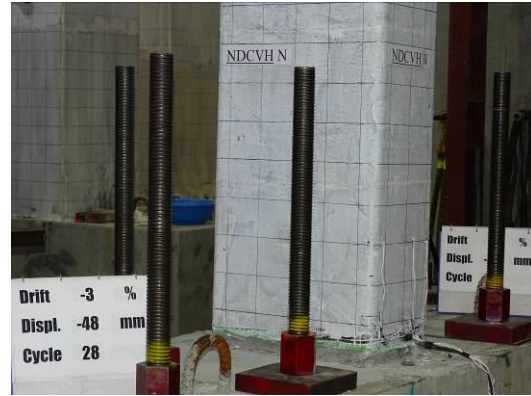
圖 3.16 試體 NDCVH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

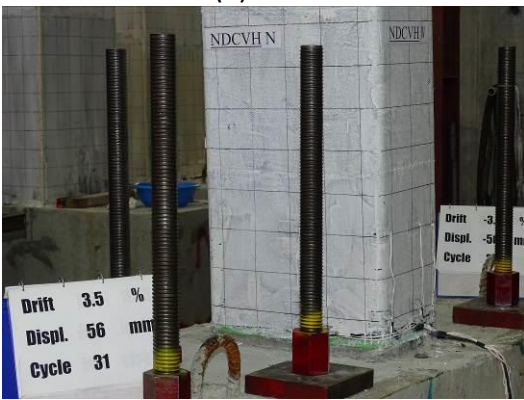
第三章 試驗結果與討論



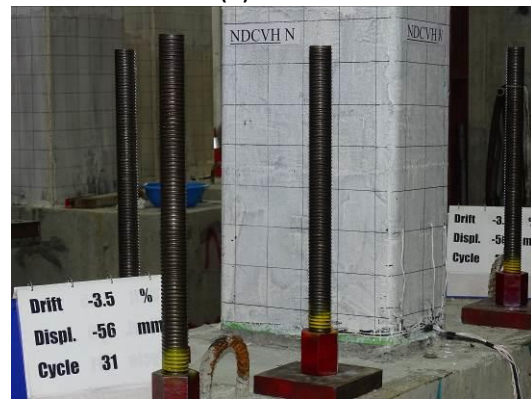
(s) $\theta = 3.0\%$



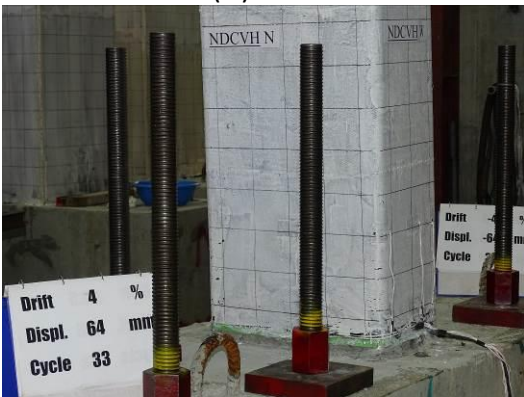
(t) $\theta = -3.0\%$



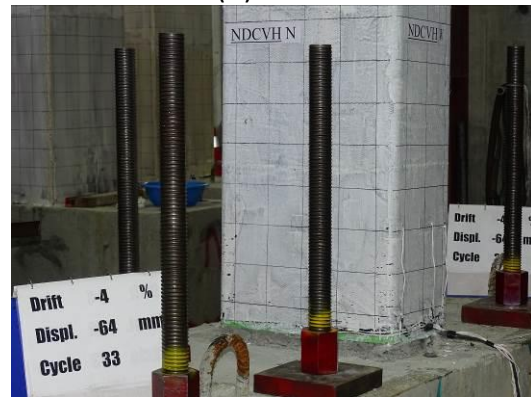
(u) $\theta = 3.5\%$



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



(w) $\theta = 4.0\%$



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

圖 3.16 試體 NDCVH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

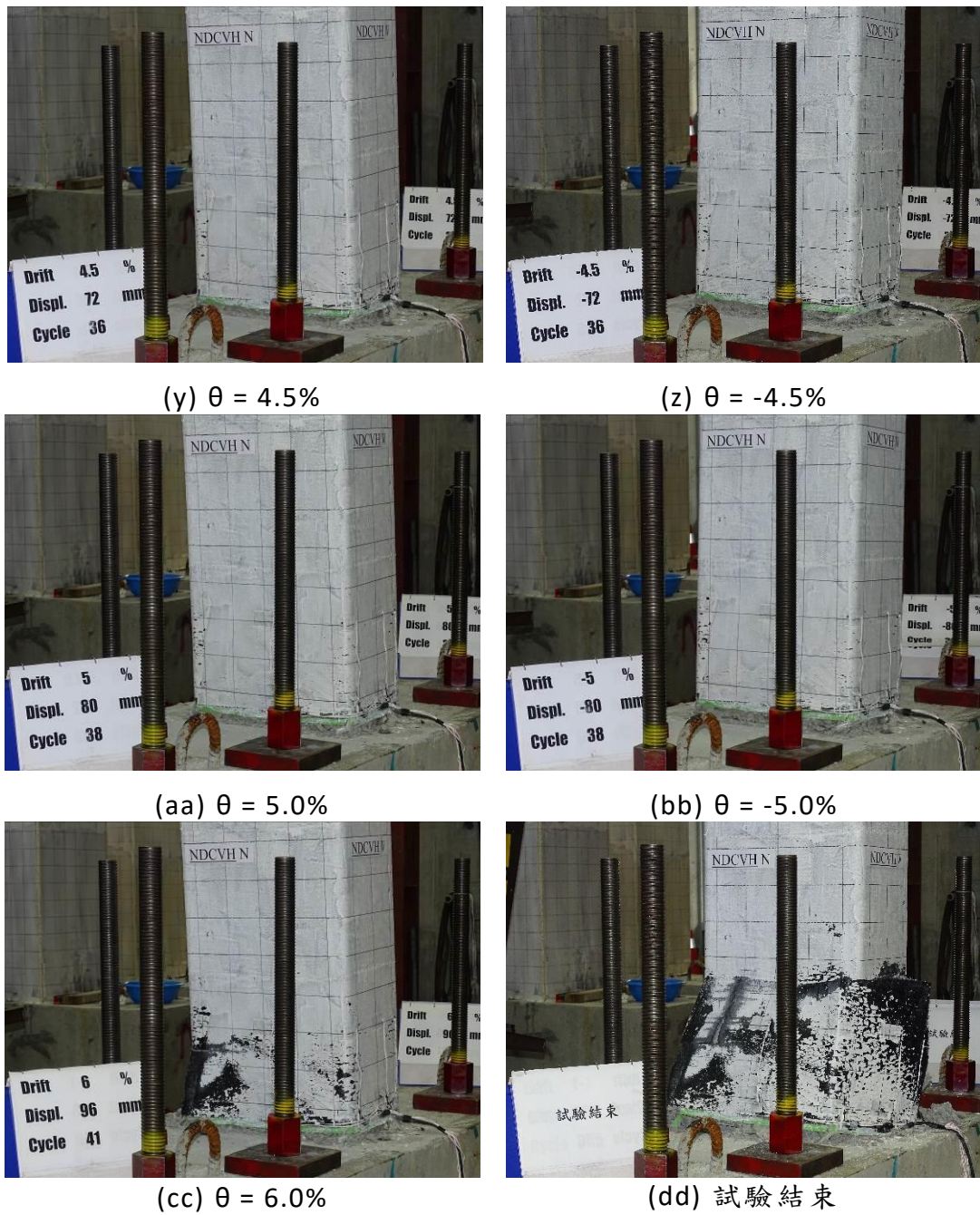


圖 3.16 試體 NDCVH 西與北 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

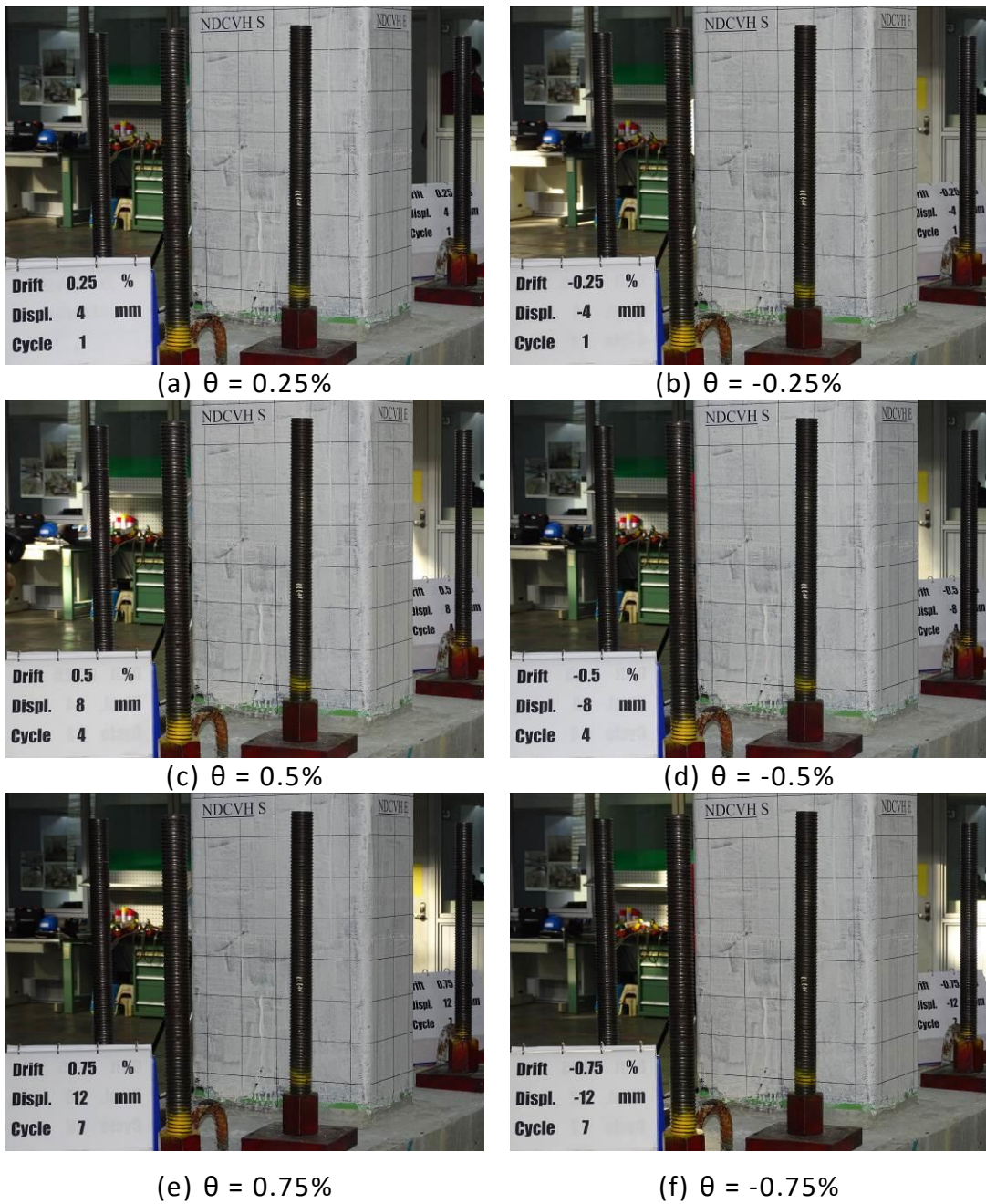


圖 3.17 試體 NDCVH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片
(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

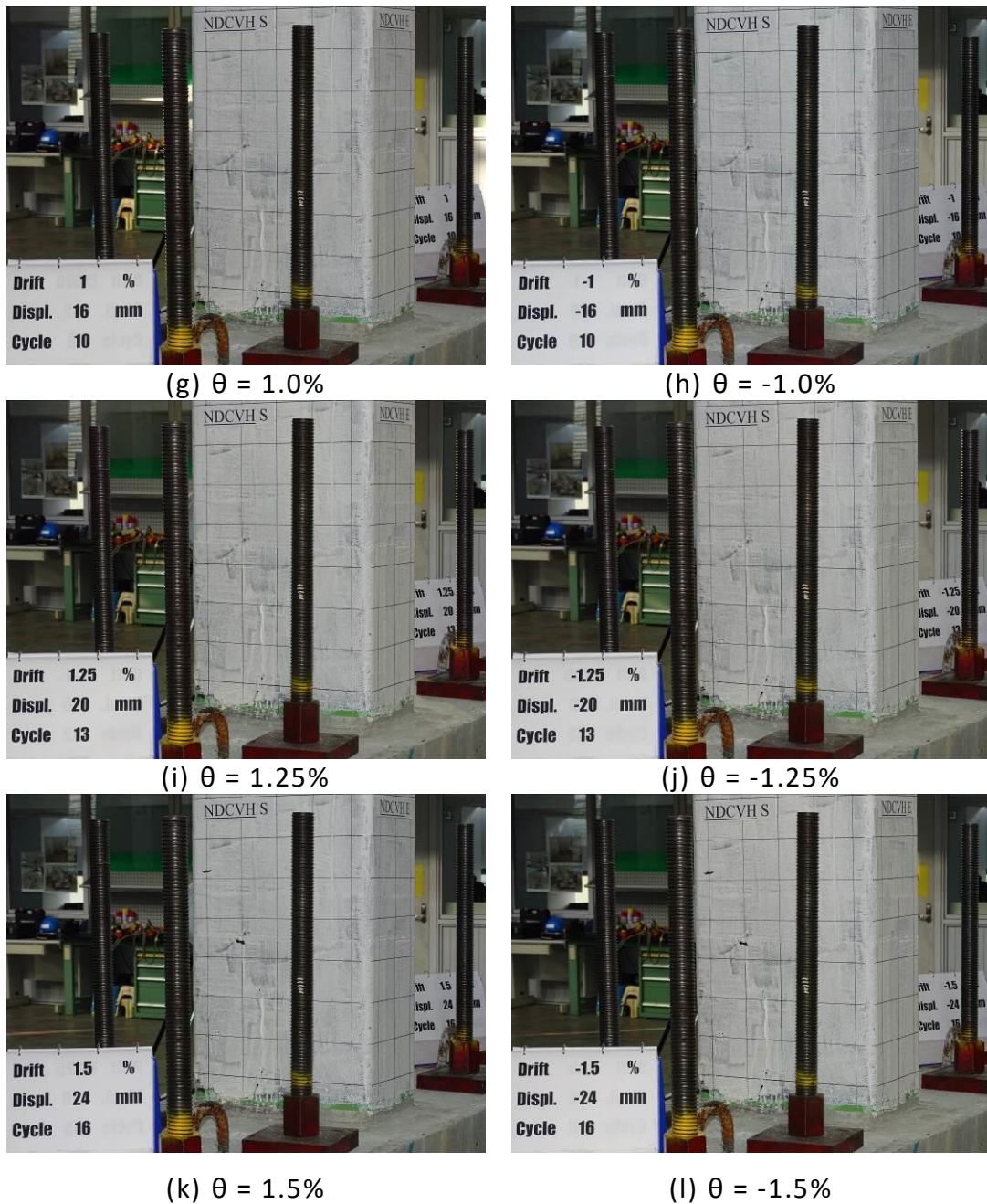


圖 3.17 試體 NDCVH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)

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) $\theta = -2.5\%$

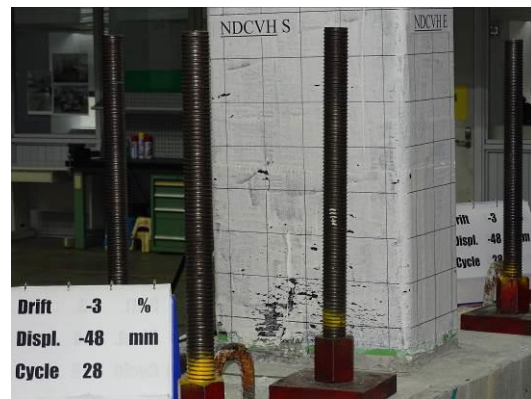
圖 3.17 試體 NDCVH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究



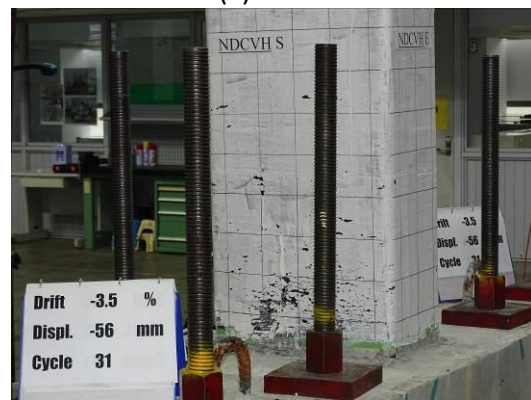
(s) $\theta = 3.0\%$



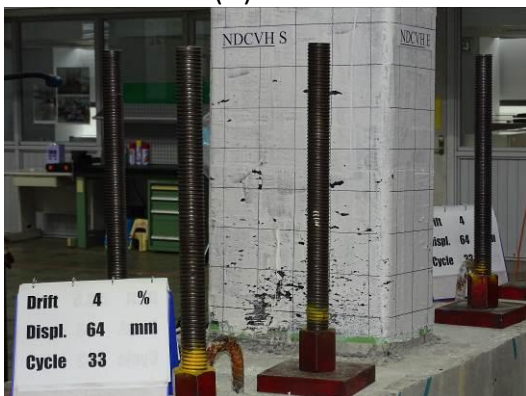
(t) $\theta = -3.0\%$



(u) $\theta = 3.5\%$



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



(w) $\theta = 4.0\%$



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

圖 3.17 試體 NDCVH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)

(資料來源：本研究)

第三章 試驗結果與討論



圖 3.17 試體 NDCVH 東與南 2 側於各位移比逐步破壞情形照片(續)
(資料來源：本研究)



(a) 試體 NDCVH 西南側發生 CFRP 貼片破裂情形



(b) 試體 NDCVH 東北側發生 CFRP 貼片破裂情形

圖 3.18 試體 NDCVH 於試驗結束之破壞情形

(資料來源：本研究)

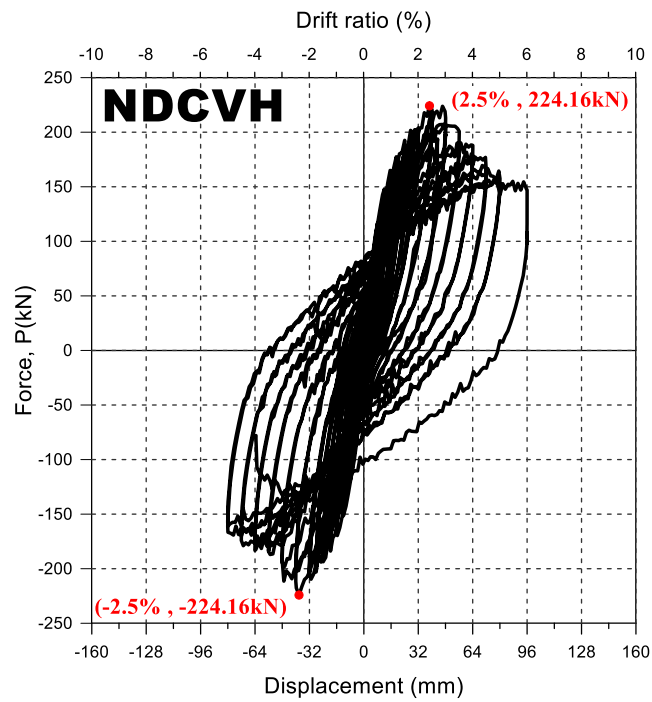


圖 3.19 試體 NDCVH 遲滯迴圈

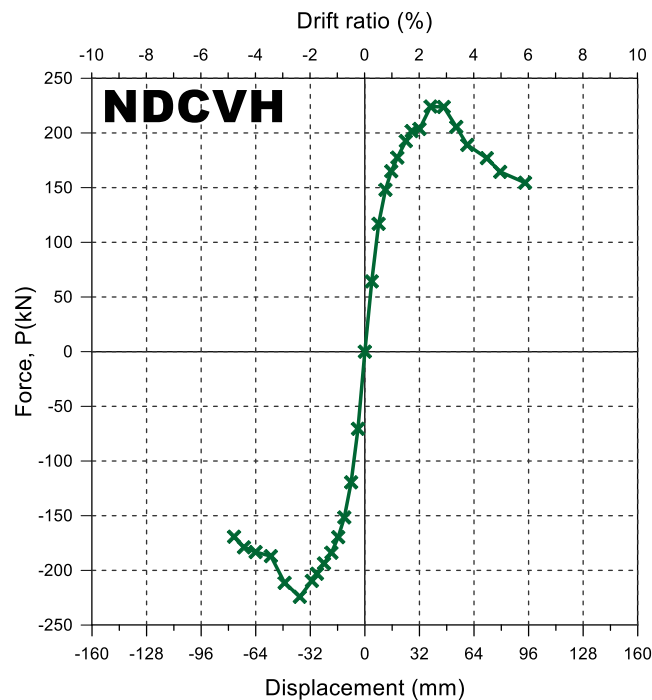


圖 3.20 試體 NDCVH 強度包絡線

(資料來源：本研究)

第二節 水平向貼覆 CFRP 貼片對耐震能力影響

試體 ND 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 ND 系列 RC 柱試體韌性補強之設計需求，若參採較為簡易的 CFRP 包覆「韌性補強」理論[13]進行設計，如公式[13]式 3.1 及式 3.2，因此透過計算可得到試體碳纖維布層數需求為 3.44 層，取整數為貼覆 4 層之 CFRP 貼片，才有機會滿足規範對柱耐震韌性之要求。

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

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

試體 NDCH 與試體 NDCHH 採用碳纖維布之層數，分別為水平方向貼覆 1 層與 2 層的 CFRP 貼片，此 2 組試體可探討隨著水平方向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，並可驗證若未依 CFRP 圍束韌性補強理論進行設計，其耐震韌性可能是不足夠的。

試體 ND 及試體 NDCH、試體 NDCHH 之遲滯迴圈與強度包絡線比較圖，如圖 3.22 至圖 3.25 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，並可歸納以下之比較結果：

- 一、試體 ND 及試體 NDCH 比較：此 2 組試體斷面的配筋方式、試體長度與材料強度均同，差別於試體 NDCH 斷面之 4 周角隅，預製為半徑為 3 公分之圓弧導角，並且碳纖維先沿水平方向僅包覆 1 層 CFRP 貼片。兩者試體遲滯迴圈與強度包絡線，如圖 3.22 與圖 3.23 所示。「弱軸」側向加載及 20%軸力比軸向加載下，試體 ND 塑性轉角容量 θ_p 為 1.33%，而試體 NDCH 其塑性轉角容量則為 1.90%，為未補強試體的 1.43 倍，表示僅於水平向貼覆 1 層 CFRP 貼片之補強，對柱試體韌性即有明顯的效果。ND 試體最大側力強度為 200.71 kN（兩方向平均），試體 NDCH 則為 222.59 kN，試體最大側力強度較 ND 試體提升 10.9%，此顯示水平向碳纖維圍束補強，對塑性轉角容量的提升效益，優於對最大側力強度之影響，此結果與既有文獻資料相符。
- 二、試體 ND 及試體 NDCHH 比較：此 2 組試體斷面的配筋方式、試體長度與材料強度均同，差別於試體 NDCHH 斷面之 4 周角隅，預製為半徑為 3 公分之圓弧導角，並且碳纖維沿水平方向包覆 2 層 CFRP 貼片。兩者試體遲滯迴圈與強度包絡線，如圖 3.23 與圖 3.24 所示。「弱軸」側向加載及 20%軸力比軸向加載下，試體 NDCHH 塑性轉角容量 θ_p 則為 2.74%，為未補強試體的 2.06 倍，表示僅於水平向貼覆 2 層 CFRP 貼片之補強，對柱試體韌性有更

明顯的效果。ND 試體最大側力強度為 200.71 kN(兩方向平均)，試體 NDCHH 則為 231.02 kN，試體最大側力強度較 ND 試體提升 15.1%，表示 2 層水平向碳纖維之圍束補強，對塑性轉角容量的提升效益，明顯優於對最大側力強度之影響。

三、試體 NDCH 及試體 NDCHH 比較：此 2 組試體之 CFRP 貼片方向皆為水平向，僅差別於 NDCH 試體為 1 層，NDCHH 試體為 2 層。由實驗結果得知，NDCH 試體與 NDCHH 試體 2 者之塑性轉角容量 θ_p 分別為 1.90%與 2.74%，為未補強試體的 1.43 倍與 2.06 倍，而試體 NDCHH 之塑性轉角容量 θ_p ，為試體 NDCH 的 1.44 倍，表示水平向碳纖維貼覆層數由 1 層增加為 2 層，對 RC 柱試體韌性效益明顯提升 44%，但 2 者之塑性轉角容量，仍不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。然而，2 試體之最大側力強度則分別為 222.59kN 與 230.44 kN，為未補強試體分別提升 10.9%與 15.6%，而試體 NDCHH 之最大側力強度，為試體 NDCH 的 1.04 倍，表示水平向碳纖維貼覆層數由 1 層增加為 2 層，對 RC 柱試體側力強度並無明顯的差異。

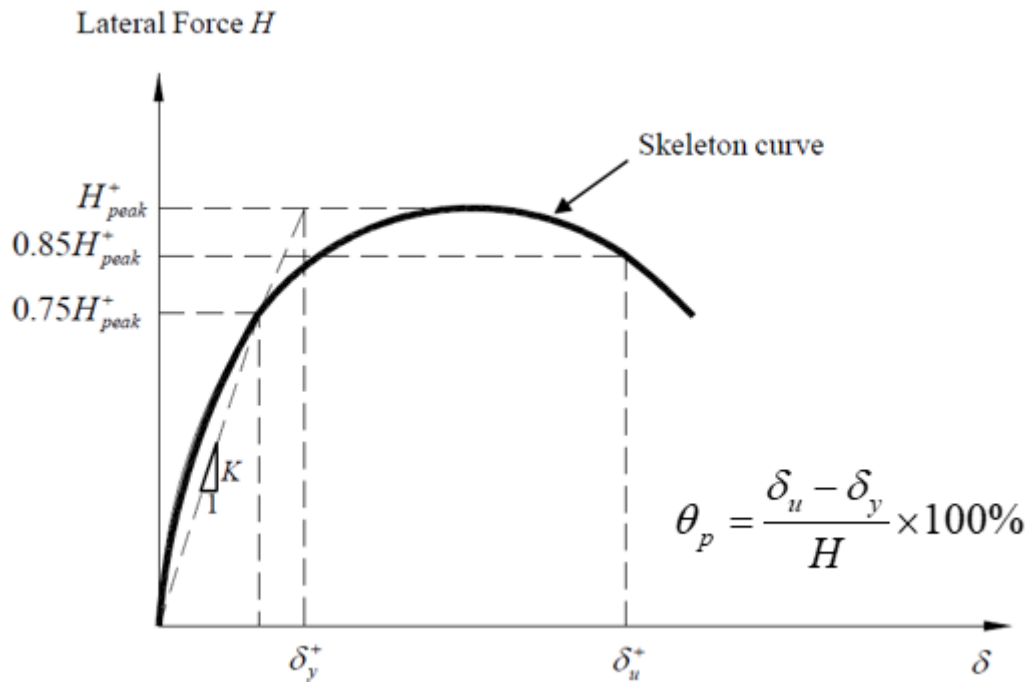


圖 3.21 試體側向降伏及極限位移之定義

(資料來源：本研究)

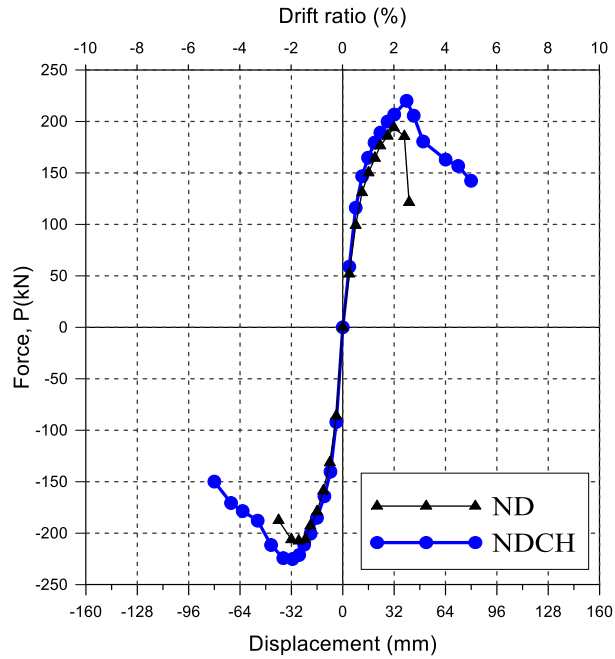


圖 3.22 試體 ND 與試體 NDCH 強度包絡線比較

(資料來源：本研究)

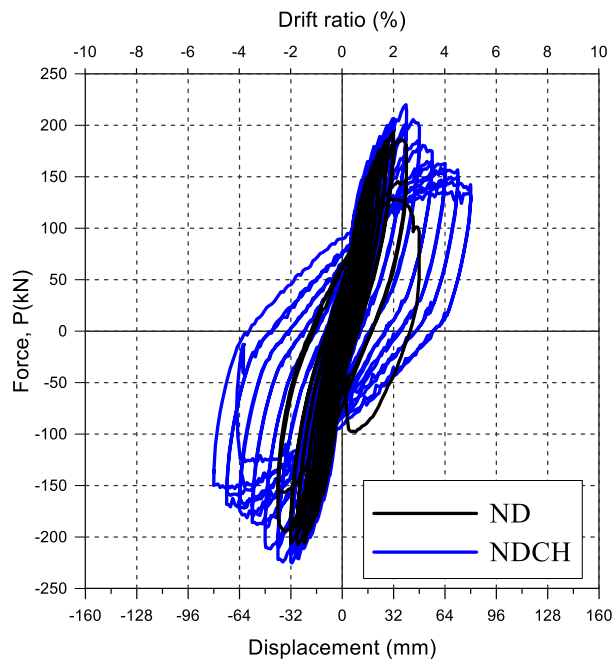


圖 3.23 試體 ND 與試體 NDCH 遲滯迴圈比較

(資料來源：本研究)

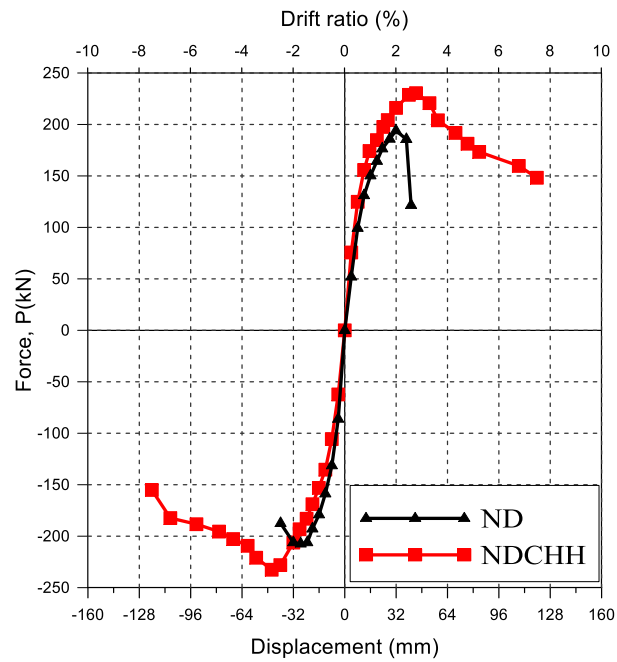


圖 3.24 試體 ND 與試體 NDCHH 強度包絡線比較

(資料來源：本研究)

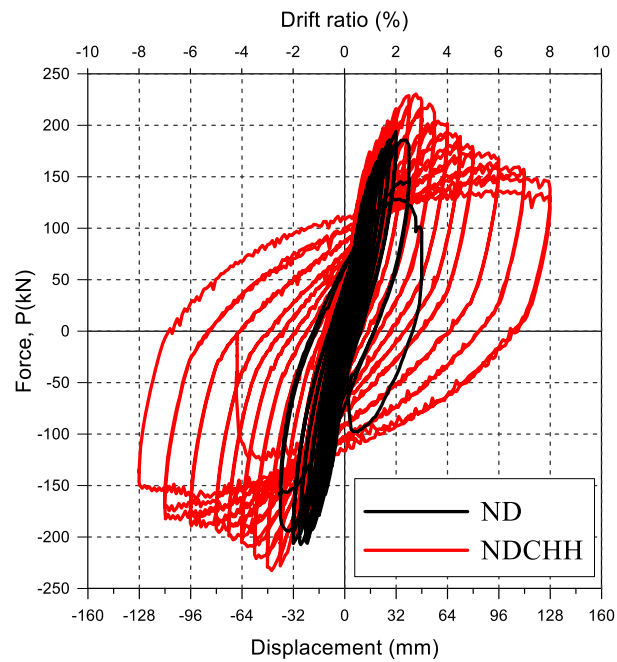


圖 3.25 試體 ND 與試體 NDCHH 遲滯迴圈比較

(資料來源：本研究)

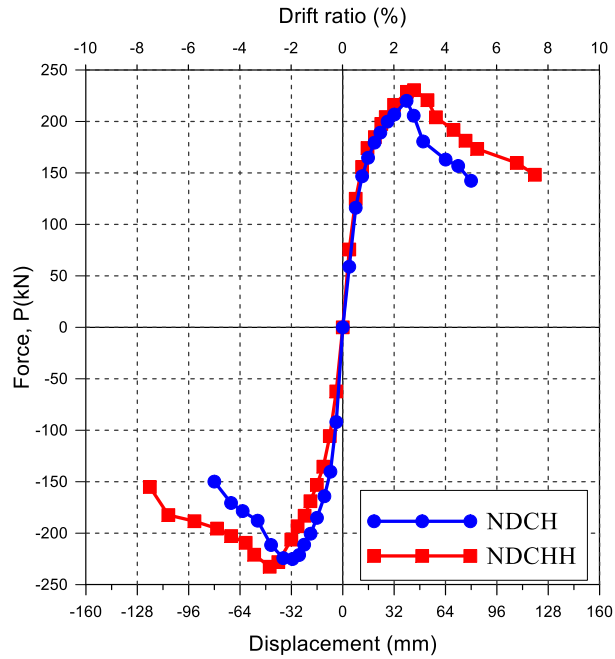


圖 3.26 試體 NDCH 與試體 NDCHH 強度包絡線比較
(資料來源：本研究)

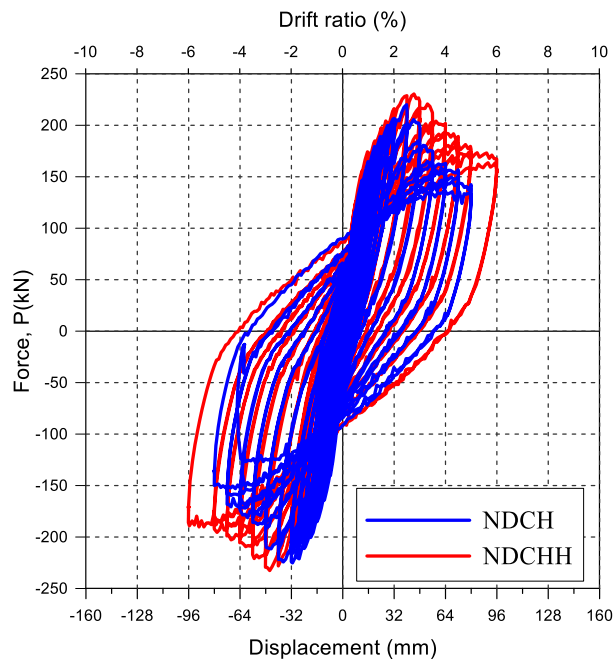


圖 3.27 試體 NDCH 與試體 NDCHH 遲滯迴圈比較
(資料來源：本研究)

第三節 垂直向貼覆 CFRP 貼片對耐震能力 影響

試體 NDCVH 斷面的配筋方式、試體長度與材料強度等，均與試體 NDCH 及試體 NDCHH 相同。試體斷面四周角隅區，均預製為半徑 3 公分之圓弧導角。試體 NDCVH 係貼覆 2 層 CFRP 貼片，試體表面先垂直向貼 1 層 CFRP 貼片，再於其外側貼 1 層水平向之 CFRP 貼片，其遲滯迴圈與強度包絡線，如圖 3.28 與圖 3.29 所示。試體 NDCVH 可藉以探討若採垂直方向貼覆碳纖維布，進行 RC 柱試體之圍束補強，對其耐震韌性的影響。

試體 NDCH、試體 NDCHH 及試體 NDCVH 相關遲滯迴圈與強度包絡線比較圖，如圖 3.28 至圖 3.33 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，並可歸納以下之比較結果：

一、試體 NDCH 及試體 NDCVH 比較：此 2 組試體斷面的配筋方式、試體長度與材料強度均同，差別於試體 NDCVH 係貼覆 2 層 CFRP 貼片，試體表面先垂直向貼 1 層 CFRP 貼片，再於其外側貼 1 層水平向之 CFRP 貼片，兩試體遲滯迴圈與強度包絡線，如圖 3.28 與圖 3.29 所示。「弱軸」側向加載及 20%軸力比軸向加載下，試體 NDCH 塑性轉角容量 θ_p 為 1.90%，而試體 NDCVH 其塑性轉角容量則為 2.16%，試體 NDCVH 為試體 NDCH 的 1.14 倍，表示試

體 NDCVH 多貼覆 1 層的垂直向 CFRP 貼片，對柱試體韌性補強效益有限。試體 NDCVH 最大側力強度為 224.16 kN（兩方向平均），試體 NDCH 則為 222.59 kN，試體 NDCVH 最大側力強度較試體 NDCH 僅約略增加 0.7%，幾乎無差異，此表示雖然試體 NDCVH 比試體 NDCH 多貼覆 1 層垂直向的碳纖維貼片，對 RC 柱試體之塑性轉角容量及最大側力強度，並無明顯之影響。

二、試體 NDCHH 及試體 NDCVH 比較：此 2 組試體同為貼覆 2 層 CFRP 貼片，僅差別於試體 NDCVH 表面先垂直向貼覆 1 層 CFRP 貼片，再於其外側貼覆第 2 層水平向之 CFRP 貼片，而試體 NDCHH 所貼覆的 2 層 CFRP 貼片，均為水平向 CFRP 之包覆。由實驗結果得知，NDCHH 試體與 NDCVH 試體 2 者之塑性轉角容量 θ_p 分別為 2.74% 與 2.16%，而試體 NDCHH 之塑性轉角容量 θ_p ，為試體 NDCVH 的 1.27 倍，表示試體 NDCVH 所先貼覆第 1 層的垂直向 CFRP 貼片，對柱試體韌性之提升，將是無效的。試體 NDCHH 最大側力強度為 230.44 kN（兩方向平均），試體 NDCVH 則為 224.16 kN，試體 NDCHH 最大側力強度較試體 NDCVH 僅約略多 3.5%，也幾乎無差異，表示碳纖維貼覆方向，並不影響柱試體最大側向強度之發揮。

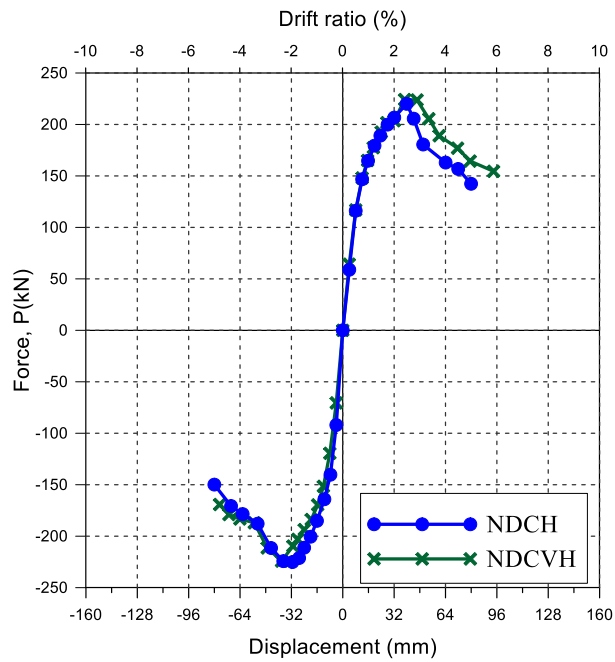


圖 3.28 試體 NDCVH 與試體 NDCH 強度包絡線比較
(資料來源：本研究)

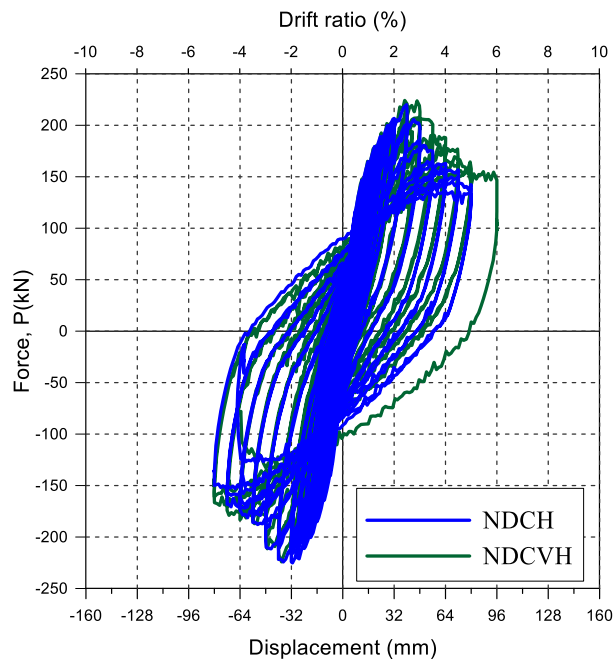


圖 3.29 試體 NDCVH 與試體 NDCH 遲滯迴圈比較
(資料來源：本研究)

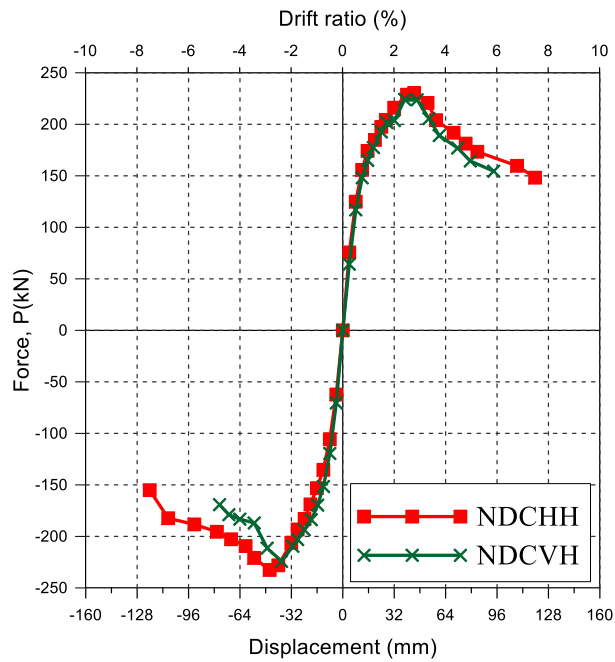


圖 3.30 試體 NDCHH 與試體 NDCVH 強度包絡線比較
(資料來源：本研究)

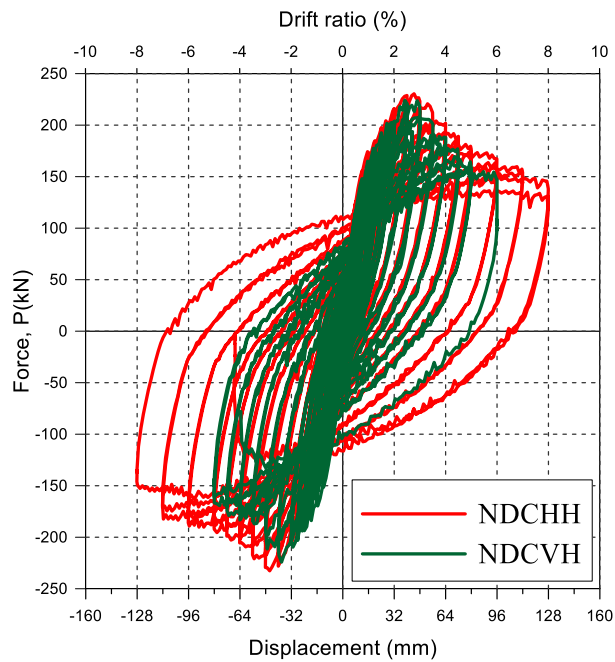


圖 3.31 試體 NDCHH 與試體 NDCVH 遲滯迴圈比較
(資料來源：本研究)

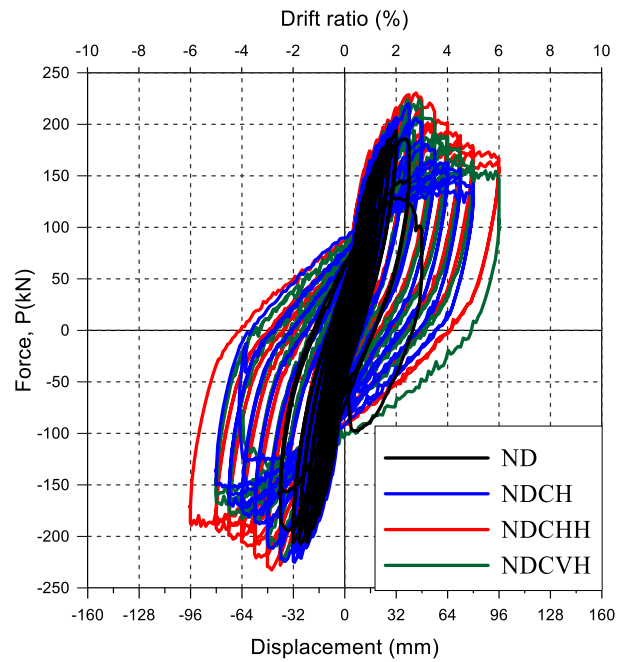


圖 3.32 各試體遲滯迴圈比較

(資料來源：本研究)

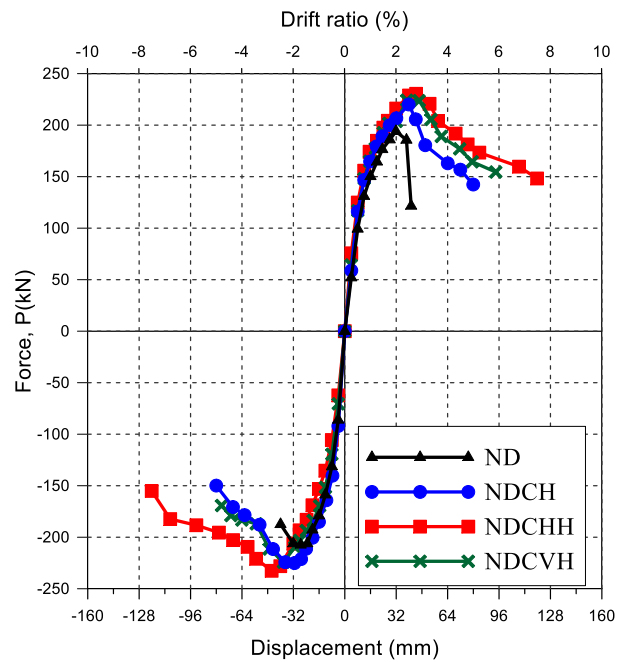


圖 3.33 各試體強度包絡線比較

(資料來源：本研究)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

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非韌性 RC 柱構件，採碳纖維貼片圍束補強，探討 CFRP 貼片貼覆方向，對 RC 柱耐震能力之影響，本研究共規劃 ND 及 NDC 等 2 個系列共計 4 組試體，分別為試體 ND 為典型非韌性矩形 RC 柱，另外 NDCH 試體係以 1 層碳纖維水平向貼覆進行補強，試體 NDCHH 係貼覆 2 層水平向碳纖維貼片，試體 NDCVH 則表面先垂直向貼覆 1 層 CFRP 貼片，在於其外貼覆地 2 層水平向之 CFRP 貼片，NDC 系列 3 組試體斷面之 4 周角隅，均預製半徑為 3 公分之圓弧導角。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)柱試體原屬撓剪力控制之破壞模式，轉化為撓曲行為主控。惟為避免發生非預期之破壞，故還是建議於全柱包覆補強，不宜僅包覆於撓曲塑鉸之發生範圍，如圖 4.1 所示。
2. 由比較試體 ND 與試體 NDCH 之試驗結果可知，僅於水平向貼覆 1 層 CFRP 貼片之試體 NDCH，其塑性轉角容量為未補強試體的 1.43 倍，試體最大側力強度較未補強試體提升 10.9%，表示水平向碳纖維圍束補強，對塑性轉角容量的提升效益，明顯優於對最大側力強

度之影響。

3. 由比較試體 NDCH 與試體 NDCHH 之試驗結果可知，雖然將水平向 CFRP 貼片之貼覆層數，由 1 層（即每平方公尺 300 克的碳纖維）增加為 2 層（即每平方公尺 600 克的碳纖維），塑性轉角容量可再提升 44.2%，韌性明顯提升。但試體 NDCHH 的 θ_p 為 2.74%，尚無法滿足在最大考量地震力下，柱構件層間變位角大於 3% 要求。故採 CFRP 貼片補強，仍建議必須透過專業技師及建築師的評估與監督。
4. 比較 NDCH 與 NDCVH 試驗結果，若 NDCH 多貼覆 1 層垂直向 CFRP 貼片，則對 θ_p 僅提升 14%，最大側力強度僅增加 0.7%。表示多 1 層垂直向貼覆之 CFRP 貼片，對柱韌性及最大側力強度之影響有限。
5. 試體 NDCHH 及試體 NDCVH 之試驗結果可知，NDCHH 試體（2 層均水平貼）的塑性轉角容量 θ_p ，為試體 NDCVH（1 層垂直 1 層水平貼）的 1.27 倍，最大側力強度約略增加 3.5%。表示 NDCHH 的韌性補強效益優於 NCDVH，最大側力強度無明顯差異，故建議水平向施工。由試體 NDCVH 破壞形式觀察，垂直向貼覆 CFRP 貼片，柱構件於受力過程，僅能延緩於柱試體端部 CFRP 貼片水平向裂縫發生。
6. 本研究有貼覆 CFRP 貼片 RC 柱試體斷面之角隅部，均採凸角半徑為 3 公分之導角（圖 4.2），以避免 CFRP 貼片因柱試體斷面角隅形狀之不平順，致柱試體韌性未達預定之目標前，而過早發生應力集中之斷裂。並由實驗結果顯示，當 RC 柱試體達極限破壞時，CFRP

貼片並未過早發生因角隅應力集中之斷裂。且沿碳纖維方向若採 20 公分的搭接長度，以及沿非碳纖維方向採 10 公分的搭接，均未發現因碳纖維搭接長度不足之破壞。

然而，事實上沒有任何一種耐震補強工法，可適用於進行建築結構系統或構件耐震能力的補強，因此為能發揮結構補強效益，有賴於先透過正確的耐震能力評估，找出結構系統或構件耐震能力（強度、韌性或勁度）不足之所在，進而再擇定一種或由多種補強工法組合的最佳工法，才能真正讓所選擇的補強工法，發揮預期的效益。而本研究案探討的 CFRP 貼片補強工法，雖具有施工簡單、工期短及 CFRP 纖維抗拉強度高等優勢，但是為能發揮 CFRP 貼片對混凝土的圍束效益，因此 CFRP 纖維必須沿水平方向圍繞柱構件進行施作，另外還需面對對於柱構件勁度與側力強度提升效益有限的問題。雖然，本研究在於探討 CFRP 貼片貼覆方向對 RC 柱耐震能力之影響，主要目的為協助國內工程業界，釐清補強工法實務之疑義，並未特別強調此種補強工法之採用。至於採用與否，仍建議須透過專業技師及建築師的評估與監督。

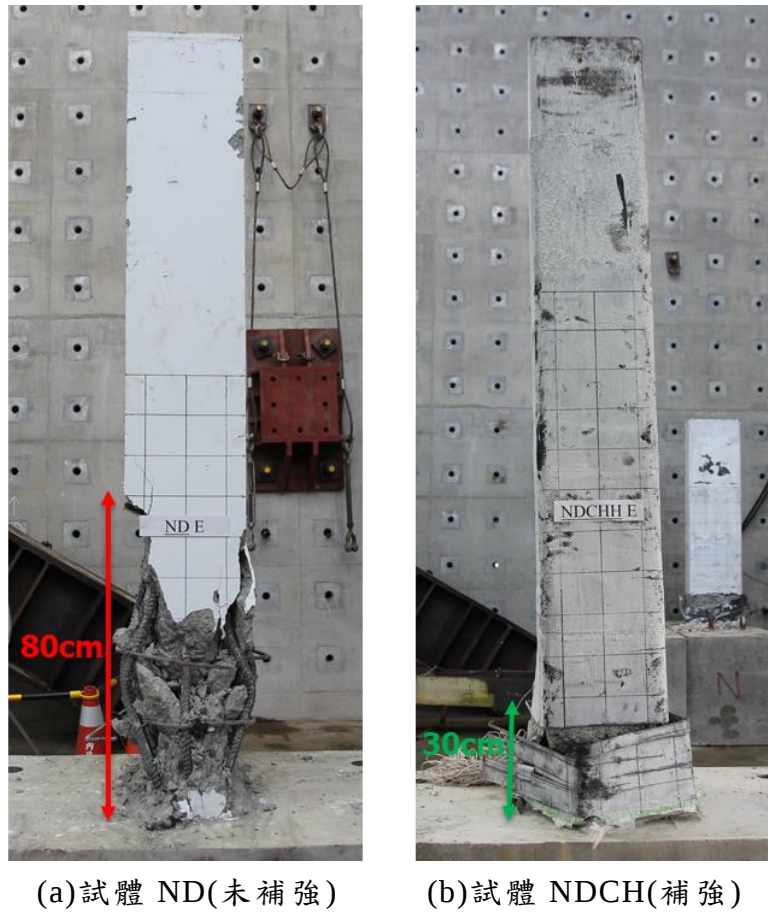


圖 4.1 試體 ND 與試體 NDCH 破壞模式之差異

(資料來源：本研究)

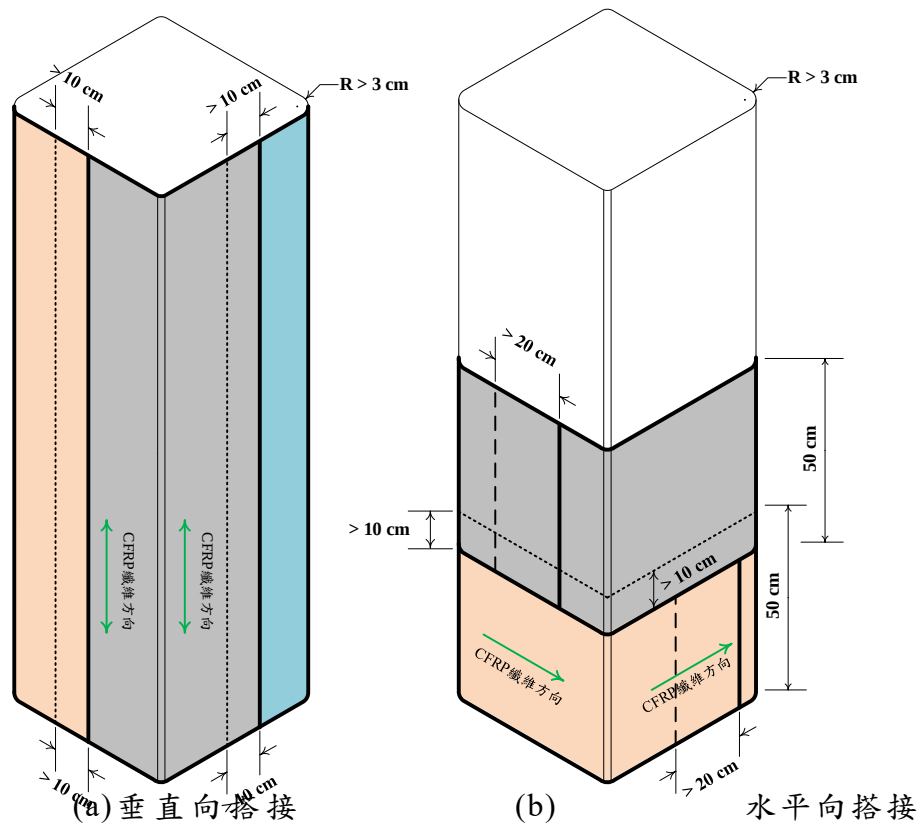


圖 4.2 CFRP 貼片之搭接細部

(資料來源：本研究)

第二節 建議

立即可行建議—對於 RC 柱的「韌性」補強效益，若採水平方向貼覆 CFRP 貼片，將明顯優於採垂直向之貼覆方式。

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

實驗結果顯示，於水平向貼覆碳纖維貼片，可提供柱構件混凝土有較佳的圍束效果，因此對韌性補強效益的提升，明顯優於採垂直向之貼覆方式。國內對於 RC 柱以 CFRP 貼片補強工法之實務，常見先垂直向再水平向混貼工法的補強效益，並未優於均以水平向貼覆的方式。

立即可行建議—RC 柱矩形斷面採凸角半徑為 3 公分以上之圓弧導角，以及沿碳纖維方向採 20 公分以上的搭接長度，可避免隅角部及搭接位置之 CFRP 貼片，發生非預期之破壞。

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

RC 柱斷面之角隅部，採凸角半徑為 3 公分以上之圓弧導角，當 RC 柱達極限破壞時，CFRP 貼片並未過早發生因角隅應力集中之斷裂。並且沿 CFRP 纖維方向採 20 公分以上的搭接長度，以及沿非 CFRP 纖維方向採 10 公分的搭接，亦未發現因纖維搭接長度不足之破壞。

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：安全防災組

聯絡人：王天志

聯絡電話：06-2392755 分機1101

傳真電話：06-2392701

電子信箱：tcwang@abri.gov.tw

受文者：如行文單位

發文日期：中華民國108年2月23日

發文字號：建研安字第1080002168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108年度第1次研究業務協調會議紀錄1份，請查照。
。

正本：王所長榮進、王副所長安強、鄭主任秘書元良、王組長順治、蔡組長緯芳、陳組長建志、羅組長時麒、蔡主任銘儒、王約聘研究員天志、陳約聘助理研究員佳玲、張助理研究員怡文、陶主任其駿、黃助理研究員國倫

副本：本所安全防災組、各組自行研究計畫研究人員(均含附件)

電子交換章

內政部建築研究所 108 年度第 1 次研究業務協調會議紀錄

一、時間：108 年 2 月 18 日(星期一)下午 2 時 30 分

二、地點：本所簡報室

三、主席：王所長榮進

記錄：王天志、陳佳玲、蔡銘儒

四、出席人員：詳簽到簿

張怡文、陶其駿、黃國倫

五、主席致詞：(略)

六、研究案主持人簡報：(略)

七、發言要點(依簡報順序)：

(一)「應用國家標準大尺度試驗驗證建築外牆立面保溫材防火性」案：

1. 本案題目請考量國內氣候環境隔熱需求及參考與會人員意見酌修為「應用 CNS 國家標準大尺度試驗驗證建築外牆立面隔熱材防火性」。
2. 建築技術規則對於建築外牆防火已有明確規定，請加強補充說明本案研究對象為外加貼覆於外牆立面的飾板防火性，以確立研究對象。
3. 請補充說明目前國內使用建築外牆立面隔熱材的案例及後續業界的需求性，以加強本案研究的重要性。
4. 本案執行時需與另案中尺度的研究內容做好分工，同時研究成果希望能有大、中尺度的相關性探討及後續採用的建議。
5. 大尺度試驗費時費力，加上今年還有建置設備及驗證的工作內容，如有需要明年持續進行，請規畫好研究內容及經費安排。

6. 請再多收集各國相關的檢測標準、性能要求及建築管理規定等資料，彙整後供給主管機關引用參考。

(二)「建築外牆保溫飾板中尺度立面延燒研究」案：

1. 本案題目請考量國內氣候環境需求及參考與會人員意見酌修為「建築外牆隔熱飾板中尺度立面延燒研究」。
2. 國內對於中尺度外牆延燒實驗應用資料較少，請後續研究中多加收集相關資料及文獻，以更清楚了解大尺度及中尺度使用的範圍、目的及二者差異性。
3. 因我國為亞熱帶氣候，且實驗需大量人力及經費，請補充說明市場應用隔熱飾板之需求及普及性，以加強本案研究的重要性。
4. 實驗樣品應與大尺度實驗要有共通性，且為市場較廣泛性之產品進行試驗，以提高驗證結果之防火安全的可信度。
5. 實驗材料可同時進行 Cone、中尺度及大尺度實驗，以尋求其實驗結果相關性，以作為訂定法規的參考依據。

(三)「防火實驗中心營運管理關鍵成功因素之研究」案：

1. 請評估與規劃後市場管理檢測及指定實驗室監督管理等項以增加業務來源。
2. 請就業務增加後人力需求與來源加以評估與規劃。
3. 預期成果請增列完成推動計畫，例如：若配合建管後市場管理檢測等業務，所需人力、物力與資源規劃。
4. 建議增加問卷調查以增加策略之支持度。
5. 各實驗中心(室)皆各提一案相似計畫，是否作為預算爭取之用？是否要整合？由誰整合？
6. 建議研訂 KPI 指標作為執行成效。

(四)「建築物昇降設備遠端檢查技術發展調查研究」案：

1. 建築物昇降設備遠端檢查技術目前仍在研究發展中，但可解決檢查人力不足之問題，具有未來發展性，建議可列為中長期投入之研究課題。
2. 本(108)年度研究範圍可先聚焦於蒐集現階段技術發展資料，從評估現階段實施可行性及提出推動策略等方向著手，以回應本部營建署之意見。提出推動策略時，建議可參照現行「建築物昇降設備設置及檢查管理辦法」三級管理制度，第1階段先推動遠端檢查結果供「管理人」、「專業廠商之專業技術人員」自主參考，待技術更臻成熟且檢查項目更為完整時，再擴大供「檢查機構之檢查員」、「建築主管機關」管理參據，最後階段則可能係提供昇降設備維護保養機器人使用，以分階段漸進方式提出相關建築法規調適建議。
3. 經濟部標準檢驗局目前朝向參採歐盟 EN 標準修訂 CNS 建築物昇降設備規定，建議可將歐盟 EN 相關標準發展情形列入蒐集資料範圍。

(五)「CFRP 貼覆方向對 RC 柱補強效益之驗證研究」案：

1. 本案 CFRP 貼片補強工法屬乾式施工法，符合建築物「階段性補強」政策之技術需求，惟建議應再與國家地震工程研究中心所執行階段性補強策略及示範例研究案連結，俾強化 CFRP 補強工法之適用性。
2. 為確保不同施工廠商於選用 CFRP 材料規格及品質之一致性，建議本案可就 CFRP 材料的檢測方法，以及相關補強材料認可機制，納為後續研究討論。

3. 本案研究課題名稱敘及補強「效益」之驗證，惟究竟屬經濟成本效益，還是耐震韌性效益之探討，建議課題名稱宜再予精進，或可參採修正為「CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究」。
4. 惟考量組內年度研究經費吃緊，以及因應未來可能為籌組建築物構造技術規範修正草案審查專案小組之經費需求，建議本案所規劃之試體數量，宜再審慎檢討擷節。

(六)「老舊 RC 建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」案：

1. 本案發展創新補強工法，請考量是否可用以申請專利，為本所增加績效。
2. 乾式鋼板補強之施工法，亦符合建築物「階段性補強」之政策，建議同前案與國家地震工程研究中心相關研究團隊聯繫，強化本案工法與階段性補強探討工法之結合。
3. 建議可就增加本所績效之觀點，強化本案研究目的之論述。
4. 本案課題名稱與近年研究課題名稱「老舊建築」與「既有建築」用法不一，請考量是否修正課題名稱。
5. 考量今年本組部分經費將需支應辦理建築物技術規範修訂相關審查會議，組內年度經費有吃緊之情形，建議本案再審酌設計規劃之試體數量。

八、會議結論：

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 5 時 40 分)

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

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108年8月23日

發文字號：建研工字第1080007973號

類別：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108年度自行研究「材料實驗中心實驗設備發展精進策略之研究」、「CFRP補強貼覆方向對RC柱耐震性能影響之驗證研究」及「老舊RC建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」等3案期中審查會議1份，請查照。

正本：中華民國全國建築師公會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、中華民國土木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、本所陳組長建忠、陶主任其駿、李副研究員台光、黃助理研究員國倫

副本：本所工程技術組、材料實驗中心

電子交換章

本所 108 年度自行研究「材料實驗中心實驗設備發展精進策略之研究」、「CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究」及「老舊 RC 建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」等 3 案期中審查會議紀錄

一、時 間：108 年 8 月 7 日（星期三）上午 9 時 30 分

二、地 點：本所簡報室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓)

三、主 席：陳組長建忠 記錄：李台光、陶其駿、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：(依簡報順序)

(一)「材料實驗中心實驗設備發展精進策略之研究」案：

中華民國全國建築師公會 楊建築師勝德：

推動 BRB 試驗法制化，對於抽驗比例，請慎重訂定。

財團法人台灣建築中心 侯副理雅壹：

1. 實驗室的願景及方向宜釐清，便於人力及機械設備的盤點，以及對應後續的採購及協力實驗室的合作。
2. 在人力精簡的情況下，部分實驗業務及設備可考慮委外經營，以活化場地及設備使用率。

主席：

1. 各年度設備採購經費，宜事先妥適規劃分配數。
2. 請依本所政策，積極規劃實驗室租借營運。
3. TGA 業經安全防災組全權接管，本組不宜未經瞭解、協調即行納入本精進策略。
4. 氬弧燈式耐候試驗機業因法令變遷，業務量大減，但改

善措施卻是增購設備？除建議添購新穎設備外，宜有其他積極作為。

計畫主持人回應（李副研究員台光）：

1. 經評估兼顧國內研究及商業檢測之需求，以及參考本所 106 年「混凝土與鋼材表面塗裝系統之耐候性能量化分析與使用年限研究」案之建議：進行建築塗裝材料耐久設計之基礎研究，後續將針對建築用混凝土表面之長期耐候性塗料(面漆)，聚焦於耐衝擊性、耐酸鹼性等試驗方法所需設備之建置。
2. 本研究案之精進策略，將暫不納入增購熱重分析儀 (TGA) 之採購，以及與台灣建築中心評定業務之結合，並依主席提示停止進行防火填塞材料（燒失量）品質一致性抽檢之可行性評估。
3. 目前本所 材料實驗中心 B1、1 樓及 4 樓部分空間，本組已奉示朝建置 BIM Academy 訓練中心及 BIM 示範基地進行規劃，以進行 BIM 技術推廣應用及產學交流，並活化既有空間之利用，至相關空間使用是否能位本所增加歲入收入，尚有賴依示整合及檢討。
4. 鑑於未來於科技計畫爭取購置設備經費，將愈形困難，材料實驗設備將再檢視並活化既有設備，例如申辦氬弧燈式試驗機及鹽霧試驗機 TAF 認證，提升實驗能力。

(二)「CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究」案：

中華民國全國建築師公會 楊建築師勝德：

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

1. 對於以 CFRP 貼片補強之柱桿件，實務上雖遇有垂直向貼覆之情形，但無論於學理或直覺上，係以橫向貼覆碳纖維為主。
2. 本研究案若有交替橫向及豎向貼覆 CFRP 貼片補強的實驗結果釋出，仍樂見對業界的解惑。

財團法人台灣建築中心 侯副理雅壹：

1. 本研究案研究方向及成果明確。
2. 本研究補強柱試體之設計，能否考慮再新增 1 組試體 NDCHVH，以進行 3 層 CFRP 貼覆補強實務的比較。

主席：

1. 濕式施工及乾式施工，請列表比較成本及效益面，如施工時間、工料費用、人力作業或其他事項。
2. 本研究案已進行數年，請注意研究成果之應用性。
3. 補強效果請與規範規定之需求比較分析說明。

計畫主持人回應（陶主任其駿）：

1. 本案研究目的研訂之初，除參酌去年度相關研究案期末審查會議中華民國全國建築師公會的代表，對碳纖維補強後續研究之建議外，亦多次向實際曾從事碳纖維補強工程之建築師及施工廠商請教及查證，的確國內相關補強工法實務，常出現縱向貼覆 CFRP 貼片之情形，故本研究案擬探討以 CFRP 補強貼覆方向，對 RC 柱耐震耐震性能之效益，以及協助補強工程業界，釐清國內施工實務之疑義。
2. 本研究案 NDC 系列試體之設計，主要為釐清縱向貼覆 CFRP 貼片對柱試體之補強效益，因此各試體僅規劃貼

覆 1 至 2 層的貼片，若將柱試體外側貼覆之 CFRP 貼片，增加成為 3 層，亦即先貼水平向，再垂直向貼，最後外層再水平向包覆 1 層 CFRP 貼片，則相關柱試體的實驗結果，將難以觀察其中單層垂直向 CFRP 貼片之補強效益。

3. 去年度 RC 柱 CFRP 貼覆補強耐震性能驗證的相關研究，於期末報告曾敘及 CFRP 補強工法之成本效益分析，經以該研究試體製作所包覆碳纖維實際施做費用之分析，其結果係接近於由台北市政府工務局審定「台北市建築物工程施工損害鄰房鑑定手冊」之建議單價，惟經當時與會委員之建議，由於考量補強工法之施做環境、條件及待補強柱構件損壞狀況之不同，致目前國內 CFRP 補強工法之施作價格迥異，故為避免相關說明反造成對業界之困擾，後已於成果報告中移除成本分析說明。因此，對於類似補強工法之成本效益，實難進行客觀分析。
4. 本研究案為延續去年，進行第 2 年的試體驗證研究，每年度試體數量為 4 組，約能進行 1 至 2 項參數之討論，故對於實驗參數之擇定，已經審慎之評估，務期能與補強工程之實務相結合，並能提供業界設計採用，惟對其成果應用性之精進，有賴於研究過程中，能多徵詢實際從事 CFRP 補強工法設計及施作者之意見。

(三)「老舊 RC 建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」案：

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

中華民國全國建築師公會 楊建築師勝德：

早年從 4 角隅「角鋼」加「腰帶」作圍束補強，比較醜陋，現在進化到 4 片鋼板補強，考慮加勁效果，外觀美觀，但是提高軸力並不是那麼顯著。若能再次進化到鋼板「穿孔」美化，更能讓業主接受。

財團法人台灣建築中心 侯副理雅壹：

1. 本案的研究方向及成果很明確。
2. 可搭配 CFRP 補強貼覆工法。
3. 未來有無發展預警檢測的可行性，提供不同地震發生時，補強的效果是否維持。

主席：

1. 濕式施工和乾式施工請列表比較成本及效益面，如施工時間、工料費用、人力作業或事項。
2. 本案已進行數年，請注意成果應用性。
3. 補強效果請與規範規定之需求比較分析說明。

計畫主持人回應（黃助理研究員國倫）：

1. 使用內部加勁板對於圍束混凝土沒有效果，但是鋼板受力後期可能產生挫屈，內部加勁板可延後挫屈的發生時機，進而達到提升柱耐震韌性的效果。
2. 「角鋼」加「腰帶」的作法，應也可達到不錯的補強效果，實務上仍然可以採用。
3. 設計補強鋼板具有「穿孔」的美化效果，只要能避開柱產生塑鉸的區域，應仍可有良好補強效果，只是灌漿時需要額外使用模版，實務上應屬可行。
4. 補強效果與規範規定需求比較分析，將納於期末報告內

容。

5. 其他意見將再研究考量，納於期末報告內容，或考量納為未來研究可能課題。

七、會議結論：

1. 本次會議 3 案期中報告，經審查結果原則通過。請詳實記載出席代表意見，並請計畫主持人參採，於期末報告書作適當回應。
2. 請計畫主持人掌握研究時程，並請留意成果報告格式，以符規定。

八、散會：上午 11 時 30 分。

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

內政部建築研究所

召開本所 108 年度自行研究「材料實驗中心實驗設備發展精進策略之研究」、「CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究」及「老舊 RC 建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」等 3 案期中審查會議簽到簿

時 間：108 年 8 月 7 日(星期三) 上午 9 時 30 分			
地 點：本所簡報室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓)			
主 席：陳組長建忠		記 錄：陶其駿、李台光、黃國倫	
出席人員	簽 到 處	代 理 人	職 稱
中華民國全國建築師公會	楊勝權		簽 到 處
中華民國結構工程技師公會全國聯合會			
中華民國土木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	侯雅堂		
陶其仁吳敏	陶其駿		
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			

[圖章欄 1080807/CS]

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108年12月9日

發文字號：建研工字第1080011286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108年度自行研究「CFRP補強貼覆方向對RC柱耐震性能影響之驗證研究」、「老舊RC建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」及「太陽光電板支撐結構系統耐風性能研究」等3案期末審查會議紀錄1份，請查照。

正本：王理事長昭烈、江建築師星仁、李技師英傑、林研究員敏郎、張教授景鐘、張協理敬昌、歐教授昱辰、黎教授益肇、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、中華民國風工程學會、本所陳組長建忠、陶主任其駿、李主任鎮宏、黃助理研究員國倫

副本：本所工程技術組、材料實驗中心、風雨風洞實驗室

電子交換率

本所 108 年度自行研究「CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究」、「老舊 RC 建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」及「太陽光電板支撐結構系統耐風性能研究」等 3 案期末審查會議紀錄

一、時間：108 年 11 月 26 日(星期二) 上午 9 時 30 分

二、地點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 3 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、黃國倫、李鎮宏

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）「CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究」案：

中華民國全國建築師公會楊建築師勝德：

1. 樓板纖維補強，皆有強調雙向鋪貼的必要性。但柱補強以水平纖維為主，提供柱圍束效果，提高承載軸力，其垂直向纖維補強，貢獻不大，如試驗結果所示。
2. 建議報告書結論應加重提醒，RC 柱角隅應作「導角」處理，以免纖維布應力集中而容易斷裂。

財團法人台灣建築中心侯副理雅壹：

結論成果明確，建議可彙整如貼覆方向的組合及影響，交接處搭接長度建議等，供業界參考。

江建築師星仁：

1. 報告書第 1 頁第 8 行應為專業技師及建築師。
2. 報告書第 3 頁圖 1.1 意思表達不清楚。
3. 報告書第 23 頁細部圖箍筋用#8 鋼筋，與實務上不同。

4. 報告書第 41 頁圖片裡看起來不只 4 個試體。
5. 報告書第 59 頁柱身混凝土的實際抗壓強度太強，有無影響試驗結果？
6. 報告書第 130 頁建議之內容意思表達不清楚。
7. 外柱或與鄰戶共用柱應如何處理？
8. 請補充成本相關說明。

李技師英傑：

1. 符合預期成果需求。
2. 建議再對碳纖維附貼底層之材料強度限制提供數據。
3. 對原有柱混凝土之強度提升是否可考慮？
4. 報告書第 25 頁碳纖維錨栓的使用時機建議為何？

林研究員敏郎：

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之人命財產損失。本案針對非韌性配筋矩形 RC 柱，進行 CFRP 貼覆方向對於補強效益之實驗驗證，具有其必要性及重要性，成果豐富，並可立即供國內工程實驗參考，符合預期成果。
2. 建議於報告書中對四組試體之破壞模式，可增加說明與比較。

張教授景鐘：

1. 報告書表 3.2 至 3.4 試體設計強度 f_c' 為 14 MPa，與實際抗壓強度 f_c' 為 20 至 40 MPa 差異過大，恐影響實驗結果。
2. 報告書第 128 頁結論第 3、5 及 6 點敘述，請再修飾調整。
3. 報告書第 130 頁建議一及二，可以是結論第 127 頁之具體研究成果。

黎教授益肇：

1. 報告書請加入摘要。節標題格式有誤。
2. CFRP 補強比較不同包覆方式，與施作人員作法不同而發生不確定度問題，是否考慮此部分影響？

陳組長建忠：

1. 請於報告書載明各試體製作之實際上依現場操作情形修訂工料分析、單價分析、規格及價金，以供後續使用或研究參考。(尤其是乾式施工法效益在時間及操作場所與濕式工法的比較說明更有價值。)
2. 期望自辦案能有機會凸顯於透過本所合宜程序下，成果應用的情形。

張協理敬昌(書面意見)：

1. 依據結論第 1 及 2 點所述，NDCH 側向強度為 ND 之 1.11 倍，而韌性增加 43%，顯示 CFRP 不僅對韌性有貢獻，也對剪力強度亦有貢獻，惟當試體不受剪力控制時，則增加 CFRP 層數對提升側向強度幫助就較不明顯(如 NDCHH 之側向強度為 NDCH 之 1.04 倍)。
2. 結論第 5 點係針對矩形柱長邊提出研究建議，是否方形柱撓曲受壓側亦有保護層剝落鼓出之趨勢。

計畫主持人回應(陶主任其駿)：

1. 實際上，沒有任何一種補強工法，是萬能的或是最好的，或者可以適用所有建築結構的補強。為有效進行建築結構之補強，必須透過正確的耐震能力評估，找出結構性能不足所在，進而再評估擇定一種或由多種補強工法組合的最佳工法。而本案探討的 CFRP 補強工法，雖具有施工簡單、工期短及抗拉強度高等優勢，但也必須面對要圍繞施作，以及對於結構勁

度與強度提升效益有限的問題。本研究案雖以 CFRP 貼片貼覆方向為探討之主體，目的為協助工程業界，釐清補強工法施作實務之疑義，並未強調建議採用此種補強工法。

2. 有關 RC 柱以 CFRP 貼片補強之人工、材料及成本等分析，曾於去年度 CFRP 補強的相關研究期末報告中提出，主要依據試體包覆 CFRP 貼片之施工所進行，惟查其分析結果恰與經各縣市政府審定相關「建築物工程施工損害鄰房鑑定手冊」或「建築工程建築物安全鑑定手冊」建議單價相近。復經前項研究期末審查會議與會委員之建議，考量各補強工法實際施作環境、條件及待補強構件損壞情形之不同，以致 CFRP 補強工法之施作價格迥異，實難進行客觀之探討，因此為避免相關工料分析敘述，造成外界之錯用及誤用，進而對工程業界帶來困擾，最後決定移除相關分析說明。
3. 有關報告書第 3 頁圖 1.1 之 FRP 組成示意圖，易造成視覺錯亂及失焦之部分，經查該圖之原始圖檔，於電腦螢幕觀看是正常且清晰顯示的，惟經列印成紙本報告後，略有造成視覺錯亂及失焦情形，為免造成疑義，已移除該圖。
4. 本案試體混凝土於 28 天齡期之試驗強度，的確明顯超過預計標稱強度(14 Mpa)許多，目前除已詳實記錄於報告書，並配合修正原以標稱強度所計算之數值。未來於相關試體之製作，將持續叮嚀廠商要求預拌廠商注意，或修正預拌配比。
5. 報告書第 4 章建議之陳述及語法，係依照本所相關慣例所書寫，須為具體可行之建議事項，且要能立即提供相關主、協辦單位參採者，此與學位論文對未來研究提出建議之方式不同。

6. 對於外柱或鄰戶共用柱等部分，若採貼覆 CFRP 之補強，必須敲除柱周邊部分之牆體，以利 CFRP 貼片能水平向圍繞貼覆於柱表面，以發揮圍束補強之效益。
7. 有關報告書第 25 頁所提之碳纖維錨栓，主要為文獻回顧之介紹，對於 CFRP 貼覆補強使用時機之說明，建議可參閱國家地震工程研究中心(編號：NCREE-09-14)相關研究報告。
8. 本案 4 組 RC 柱試體之破壞模式，以及柱角隅「導角」處理方式，將納於成果報告說明。

(二)「老舊 RC 建築高軸力非韌性配筋柱乾式鋼板補強」案：

中華民國全國建築師公會楊建築師勝德：

1. 鋼板加勁後空隙填充材應詳加說明，是 Epoxy 或水泥砂漿？
2. 柱鋼板補強，著重強度提升，可忽略勁度提升。

財團法人台灣建築中心侯副理雅壹：

1. 結論成果明確，建議可彙整鋼板及加勁板的設計建議參數，供業界參考。
2. 有關鋼板補強後強度過高造成基礎破壞部分，建議可說明適用條件或範圍。

江建築師星仁：

1. 報告書第 5 頁進度表顯示 12 月仍進行實驗，請修正。
2. 報告書第 11 頁細部圖內標示 30 是哪裡的距離？如何固定？
3. 報告書第 17 頁柱頂為何要灌注 560 kgf/cm² 無收縮砂漿？會否失真？
4. 報告書第 25 頁圖片裡看起來不只 4 個試體。
5. 以鋼板在 RC 表面以乾式鋼板補強，是否四面均需補強？會否

補後太強，造成上方太弱？

6. 需要的費用評價如何？每支柱所需財務成本為何？

7. 報告書第 34 至 37 頁圖片看起來有貼磁磚？

李技師英傑：

1. 符合預期成果需求。
2. 請再說明乾式施工，原柱與鋼板間的傳力模式。
3. 加勁板與原柱間之距離是否有限制？
4. 薄板的全滲透鐸是否會產生不平整而影響強度。

林研究員敏郎：

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之人命財產損失。本案進行 RC 柱以乾式銅板補強技術研發，具有其必要性及重要性，且成果豐富，並可立即供國內工程實驗參考，符合預期成果。
2. 建議於報告書中對 4 組試體之破壞模式可增加說明與比較。
3. 建議移除完成試驗試體之外包覆鋼板，以了解 RC 柱內部損壞情形。

張教授景鐘：

1. 報告書表 2-1 試體之材料特性與尺寸，請詳列。例如：鋼板厚度 t 及混凝土設計抗壓強度 f_c' 。
2. 報告書第 19 頁柱身混凝土試體抗壓強度與基座差異過大，影響實驗結果，請檢討。
3. 報告書第 47 頁結論請條列式敘述。

黎教授益肇：

加固後破壞多發生在基座，是否呈現柱子補強的效果？

陳組長建忠：

1. 請於報告書載明各試體製作之實際上依現場操作情形修訂工料分析、單價分析、規格及價金，以供後續使用或研究參考。（尤其是乾式施工法效益在時間及操作場所與濕式工法的比較說明更有價值。）
2. 期望自辦案能有機會凸顯於透過本所合宜程序下，成果應用的情形。

張協理敬昌(書面意見)：

1. 因實際試體混凝土強度較原規劃高，故未補強時之韌性較預期佳。
2. 乾式補強之施工影響較濕式少，如實務上結構柱有粉刷、貼磁磚時是否可逕行應用鋼板包覆補強，建議補充討論。
3. 圖 2-5 之鋼板未開槽銲接細部，僅適用於厚度 10mm 以下之鋼板，建議說明較厚鋼板之預檢定銲道需開槽。
4. 圖 3-12 顯示鋼板上亦有設置應變片，是否於軸力施加及彎矩加載過程中有顯著應變變化及其意義，建議說明。
5. 反「覆」載重建議改為反「復」載重。

計畫主持人回應（黃助理研究員國倫）：

1. 報告書第三章已有說明鋼板與原柱間係以無收縮砂漿填充。
2. 將於成果報告補充乾式鋼板補強需注意基礎或相鄰構件之承載強度。
3. 報告書第一章進度表將於成果報告中修正。
4. 鋼板補強必須四面均補強方有增加耐震韌性之效果。
5. 去年度自行研究「既有建築 RC 柱乾式鋼板補強實驗研究」案，期末審查意見回應表已有說明乾式補強公法花費約為每

平方公尺新臺幣 1 萬 8,000 元，惟實際所需費用仍依個案情況不同而有所變化。

6. 其他意見將再評估，考量納於成果報告或考量納為未來研究可能課題。

(三)「太陽光電板支撐結構系統耐風性能研究」案：

中華民國全國建築師公會楊建築師勝德：

1. 本案著重野外實際測試，風扇轉速 30 Hz。
2. 風壓分佈測試紀錄集中 6 m 中間部分，比較可惜，若能了解全部壓力變化，就會完美。

財團法人台灣建築中心侯副理雅壹：

1. 成果符合預期。
2. 有關後續研究，是否能發展針對既有光電設施強度進行例如快篩之類的檢測？

江建築師星仁：

1. 報告書第 1 頁第 6 行應為「投(融)資」。
2. 報告書第 2 至 4 頁申請流程圖，第 2 頁免雜項執照備查函，再生能源設施免請領雜項執照標準。
3. 報告書第 2 頁「4 大步驟」應改為「5 大步驟」。
4. 報告書第 11 頁文獻回顧少了對原建築物影響之檢討。
5. 強烈颱風風速為 51 m/s 以上，本案風速僅達中度颱風，請補充說明。

李技師英傑：

1. 符合預期成果需求。
2. 請補充光電板的材料強度數據及最大支撐間距。

3. 是否可提供一標準模組的參數尺寸及擺置方式，作為設計參數。

林研究員敏郎：

本案透過戶外大型風機，藉由系統性實驗與測試，提出太陽光電板支撐結構系統耐風性能測試方法，確保太陽能光電系統之完整性及穩定性。成果豐富，並可立即供國內工程實務參考，符合預期成果。

張教授景鐘：

1. 請補充加速度(g)之單位。
2. 報告書結論一為本案之敘述，不是研究結論。
3. 報告書結論二，請補充風壓值，以便與結論三及四做比較。
4. 報告書結論五，請補充敘述，此結果為保守與否？
5. 報告書結論六之敘述，請再潤飾調整。

黎教授益肇：

1. 風速的分佈與測試區的配置有關，能否定義出參考風速及位置？
2. 請詳述 3 秒陣風的定義與計算方式。
3. 一般太陽能板破壞多發生在扣件，因振動所發生的局部破壞或疲勞破壞，以此實驗設計如何呈現？例如需要吹多久？風速要吹多高？
4. 風力係數(Cf)計算採耐風設計規範，建議採用太陽能板的規範。
5. 風壓或加速度建議以無因次值呈現。

陳組長建忠：

1. 請於報告書載明各試體製作之實際上依現場操作情形修訂工

料分析、單價分析、規格及價金，以供後續使用或研究參考。
(尤其是乾式施工法效益在時間及操作場所與濕式工法的比較說明更有價值。)

2. 期望自辦案能有機會凸顯於透過本所合宜程序下，成果應用的情形。

張協理敬昌(書面意見)：

1. 加速度以 g 為單位，因數值非常大，請再確認單位。
2. 本案已針對風洞試驗所量測之風壓力與規範結構設計風壓力進行比較，惟如研究內容所述，光電板隱裂現象會影響集電效率。而結構設計需同時考慮強度與變形控制要求，針對後者亟待有進一步研究並儘速制訂相關標準以供業界設計遵循。

計畫主持人回應(李主任鎮宏)：

1. 實驗室目前之造風機直徑為 4m，風扇運轉最大轉速為 30Hz，對應之陣風風速約為 40m/s。
2. 報告書中所提光電板設置無須申請雜項執照之範疇，將於成果報告中補充說明。
3. 尖峰加速度單位為 $g(m/s^2)$ ，每一加速規皆有其對應之靈敏度係數，將所量得電壓除以靈敏度係數即可得知加速度歷時。
4. 由於加速規黏貼位置包含光電板垂直向、梁水平向與垂直向，故數據資料有所差異。
5. 單跨 4m 光電板耐風實驗於期中報告時已完成，當時因未能及時納入風壓管線佈設，故無風壓數據資料。
6. 風力係數係以所量得之最大陣風風速，來加以無因次化。

七、會議結論：

- (一) 本次會議 3 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。
- (二) 請業務單位將與會審查委員、出席代表及書面意見詳實記錄，供計畫主持人參採，於成果報告中妥予回應，並確實依照本部規定的格式製作報告。

八、散會：中午 12 時 10

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，「矩形 RC 柱採碳纖維包覆暨碳纖維錨栓耐震補強研究」，NCREE-09-014，2009 年，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，「鋼筋混凝土橫樑柱耐震圍束之研究」，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。.

- [21] 陶其駿，「建築 RC 柱以碳纖維包覆補強之耐震能力研究」，內政部建築研究所委託研究報告，2018 年。

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

CFRP 補強貼覆方向對 RC 柱耐震性能影響之驗證研究

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：108 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN：