# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 防災重要建築物之耐震對策(Ⅱ)---

子計畫九:學校建築構架有效補強措施研究

## **Study for Effective Retrofits of**

## **Reinforced Concrete Frame of School Buildings**

計畫編號:NSC 90-2211-E-041-017

執行期限:90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人:劉玉文 教授 嘉南藥理科技大學工業安全衛生系

共同主持人:許茂雄 教授

成功大學建築學系

### 一、中文摘要

本研究之目的在探討RC含牆構架補強後之 耐震能力,10個含牆構架試驗後之試體視其破壞 模式採取不同的補強工法再進行耐震試驗,比較 補強前後之強度與韌性並建立預測模式。補強工 法包括樑柱節點增設托肩、擴大柱頭、鋼鈑圍封柱 頭或短柱、翼牆等;牆補修是以epoxy樹脂灌注裂 縫等措施。補強(修)後進行正反向加載試驗,所 得P-Δ曲線顯示其耐震能力增加60%以上,補修 試體之極限強度可達原試體之95%以上,以ACI 理論分析所得P-Δ折線,誤差尚屬合理。

關鍵詞:含牆構架,補強,補修,耐震試驗

#### Abstract

The quantitative evaluation of earthquake resistance capability for the retrofit of damaged structure is investigated in this study. 10 large-scale retrofitted or repaired framed wall specimens subjected to reversed cyclic lateral loading have been tested, and a simple prediction formula is proposed to fit the experimental results. According to the failure mechanism of the prototype specimens two specimens were repaired with epoxy and the other specimens were retrofitted by various methods.

Keywords: large-scale RC frame, retrofit, earthquake resistance capability, repair, strengthening.

#### 二、緣由與目的

921 集集大地震摧毁了無數房屋建物, 令人體會大自然天搖地動的威力,受損建物 當中比例最高之前三名依序為土角厝與磚造 房屋、公共建築物以及一般透天厝[1]。公共 建築物則以學校教室共四百餘所嚴重損壞佔 最多數,破壞原因除地震強度太大自然因素 外,餘如建築設計不良、結構設計不良及施 工品質不良等三種人為因素,應可避免。建 築設計與結構設計不良部份,探源禍因,係 為採光而選用柱與柱之間整片窗户設計,造 成短柱效應或平行於走廊方向壁量太少且支 柱面積不足等缺失,目前已檢討作為震後大 害或倒塌之教室改建設計之參考,但對中害 及小害的教室,該如何有效且經濟的補強? 對受震開裂未達倒塌的 RC 壁體,如何補 修?是預防未來地震襲擊崩塌,急需假以試 驗探討不容忽視的課題。這些低矮樓層的 RC 學校建築,破壞模式都是支柱或牆體剪裂, 甚至剪斷或彎斷,現有亟待補強的構架,計 有教室走廊外側純樑柱構架、教室內含整片 窗台矮牆構架、教室廁所含牆開整片高窗構 架、其他如含牆開口構架及含整片牆構架。 國內目前對於 R.C.建物震後補強之探討 [2-3],僅限於各樑、柱單一構材或縮尺寸樑 柱構架,尚未模擬上述學校建築構架之全尺 寸試體,進行震後補強之探討。因此在無縮 尺寸效應下,到底補強後的效果如何?是否

能夠完全發揮補強物的效益?亦需加以深入 探討的問題。

本研究利用同一研究群之另一子計畫 試驗破壞後的 10 座學校建築構架全尺寸試 體[4],模擬受地震導致破壞的結構,在不改 變結構系統下,進行不同方式之耐震強度與 韌度性能補強,補強完成後再進行相同的漸 大式反向加載試驗,分析各種補強(修)措施 受地震時的破壞行為以及補強的效果。其目 的在探討各補強措施之耐震能力提升量,並 利用 ACI 理論[5]分析所得 P-Δ解析結果相 互比較,求得各種補強(修)措施在補強(修) 後強度與韌度上的變化情形,以期將來實際 進行補強(修)施工時,能夠預先知道補強後 的破壞行為及所能增加的強度與韌度,作為 補強(修)設計的依據。

- 三、研究方法
- 3.1 試體補修工法

每一試體補強(修)前,必須先行了解原試 體鋼筋配置情形,並須觀察牆、柱、樑等各 構材有無混凝土剝離?裂縫之寬度、深度、 長度以及縫與縫怎麼連通?如此確認裂縫狀 況,決定補修施作範圍。對於混凝土龜裂部 份的補修,採以 epoxy 樹脂注入;對於混凝 土剝離部份的補修,則以 epoxy 樹脂砂漿填 充[7],此兩項補修作業是本文不管補強或補 修試體均不可或缺的工作。如係補強試體必 須進一步針對破壞模式予以補強,才可達到 預期效果。本研究含開口牆試體(編號

R-DFW 與 R-WFW)因試驗反力牆無法承受 100 噸以上施力,僅以純補修方式處理。

### 3.2 試體補強工法[8]

(1)以 RC 增設托肩、擴大柱頭補強措施(R-PFH 試體):補強方式與範圍的確認後,以 epoxy 樹脂與樹脂砂漿補修試體裂縫。補強時先鑽 孔與植筋,用 RE-500 黏結劑固結鋼筋、混 凝土新舊界面處理,最後依柱頭與托肩之設 計位置組模、配筋、灌漿與養護。

- (2)以鋼鈑增設托肩、圍封柱頭(R-PFL 試體): 補強方式與範圍的確認後,以epoxy 樹脂 與樹脂砂漿補修試體裂縫。柱頭使用 A507 鋼鈑(10 公厘厚)圍封包覆,並用 25 公厘厚 基座鈑以 M16 化學錨栓固定於地樑。托肩 亦使用 A507 鋼鈑(12 公厘厚),製成兩片 加勁材置於樑柱交角,同樣以 M16 各錨錠 於樑柱兩側。以epoxy 與石英砂之攪拌料 封塞鋼鈑與錨栓空隙後,再以 M308-2 鋼 鈑黏著劑由低處注入預埋管,以機器幫浦 施壓灌注 epoxy 樹脂,直至排氣孔溢出為 止。
- (3)增設 RC 翼牆於柱內側:先以 epoxy 樹脂與 樹脂砂漿補修試體裂縫,在兩側柱內側以 垂直向#4 牆筋(孔深 15 公分、間距 10 公 分),水平向#4 牆筋(孔深 12 公分、間距 15 公分),牆筋搭接長度一律採用 50 公 分,孔徑使用#5 鑽桿鑽孔,用 RE-500 黏 結劑固結鋼筋並對混凝土新舊界面鑿毛處 理。組模高度至樑底下 10 公分,並於牆頂 預留灌漿口,牆體採逆築混凝土施工,最 後以無收縮水泥漿填充牆頂空隙(RLFWH 試體)。依規劃若需切隔離縫,則以鑽石機於 翼牆與窗台牆界線切割 1 公分縫寬 (R-LFWL 試體)。另含高窗開口試體(R-HFWH 試體)亦以相同方式在短柱內側增設翼牆。
- 先以 epoxy 樹脂與樹脂砂漿補修試體裂 縫,在兩側柱上端以 A507 鋼鈑(8 公厘厚) 圍封包覆,其上下各錨錠 30 公分鋼鈑於樑 柱與牆頂,最後以 epoxy 與石英砂之攪拌 料封塞鋼鈑與錨栓空隙後,再以 M308-2 鋼鈑黏著劑由低處注入預埋管,以機器幫 浦施壓灌注 epoxy 樹脂,直至排氣孔溢出 為止。

#### 3.3 實驗裝置

試體試驗裝置如圖1所示,試體基座大 樑以八根直徑80mm之螺桿固定於基座鋼床 之上,試體側面則使用兩根120mm之螺拴 箝制於基座鋼床,避免試體側向滑移,基座

剛床亦使用 80mm 直徑螺桿固定在厚度 800mm 之混凝土強力地板上。試體頂部施力 樑則使用多根 60mm 直徑螺桿與試驗鋼帽相 連接後,試驗鋼帽再與水平千斤頂相接合, 其千斤頂兩端設置以鉸接構造,避免額外作 用力的產生,一端固定於厚度 1500mm 之預 力反力牆上。所使用之水平千斤頂之最大衝 程可達±225mm,最大水平出力為±1500kN。 量测時使用之資料擷取系統為日製 TDS-302 資料 擷取器,多60 組頻道可供位移計(LVDT) 與應變計資料輸入。本文試驗採用一系列之 LVDT 變位計作為試體變位量測,LVDT 變 位計一端使用萬向接頭與試體相連接,另一 端則固定於角鋼測計架上,測計鋼架直接架 設於基座大樑上,可準確量測試體與基座大 樑之相對變位。

四、補強後試體之受力行為預測分析 4.1 剪力屋架模式

純柱樑構架試體(R-PFH及 R-PFL 試 體)、含窗台矮牆構架試體(R-LFWH及 R-LFWL 試體)、含牆開整片高窗構架補強試體 (R-HFWH 及 R-HFWL 試體)、及含牆中央開 門構架(R-DFW 試體)等補強試體,由於在試 驗過程,係以鋼棒緊鎖在強力地板上,無自 由變形,因此將左右兩柱之柱腳當作固定端 形式。試驗時,在施力樑位置套上綱帽,致 使樑柱間之剛度相差達3倍以上,節點將維 持剛性,因此分析時可視為一剪力屋架分析 模型。利用柱底最大彎矩或剪力達到 RC 柱 樑斷面之開裂彎矩(M<sub>cr</sub>)、極限彎矩(M<sub>u</sub>)、屈 服彎矩(Mv,本文取極限彎矩之 60%)時,對 應之水平側向力P視為各試體各階段之分析 强度。計算試體側向位移時,分別考慮剪力 屋架之抗彎變形( $\Delta_{\rm h}$ )及抗剪變形( $\Delta_{\rm s}$ ),對於 各桿件之不同階段抗彎剛度((EI)eff)及抗剪剛 度((AG)eff)均依 ACI 規範建議處理。分析模 型中樑桿件長度為原試體柱樑中心線之節點 到節點的距離, 柱桿件高度是以施力樑底緣 或托肩底緣算起至柱束制或反曲點或開裂彙 集點的距離,不同試體之柱高度及剛度計算 說明如後。

- 以 RC 增設樑柱托肩、擴大柱頭補強(R-PFH 試體):H<sub>b</sub>=2250mm,由施力樑底至擴大 柱頭頂界之距離。
- (2) 以鋼鈑增設樑柱托肩、擴大柱頭補強(R-PFL 試體):H<sub>b</sub>=1500mm,由拖肩底至圍封柱 頭頂之距離。
- (3) 含窗台矮牆構架以 RC 增設翼牆並切隔離縫 補強(R-LFWL 試體):H<sub>b</sub>=3000mm,由施力 樑底至基座樑頂之距離。
- (4) 含窗台矮牆構架以 RC 增補翼牆(R-LFWH 試 體):H<sub>b</sub>=2000mm,由施力樑底至矮窗台 頂之距離。
- (5) 含高窗構架以鋼板短柱圍封補強(R-HFWL 試 體):H<sub>b</sub>=2400mm,由施力樑底至牆斜張 裂縫交點之距離,包括牆開口高度及牆頂 中點沿45度之垂直投影長。
- (6) 含高窗構架以翼牆補強(R-HFWH 試體): H<sub>b</sub>=1100mm,由施力樑底至牆斜張裂縫 交點之距離,包括牆開口高度及翼牆牆角 位置沿45度之垂直投影長。
- (7) 含牆中央開門構架補修試體(R-DFW 試 體):H<sub>b</sub>=2000mm,為開門之高度作為剪 力屋架之高度。
- 4.2 一般屋架模式

含翼牆開口構架(R-WFW 試體)補修後情 況,視同未受破壞兩根長柱的空構架,由於 翼牆及柱結合(稱為翼牆柱)剛度大於施力 樑,且由試驗結果顯示彎矩強度控制,因此 依一般屋架分析。由於兩側翼牆柱剛度不 同,柱底翼牆柱斷面之開裂彎矩及極限彎矩 得分別計算,可得開裂載重  $P_{a=1}(1+\alpha)(M_{1a}+M_{2a}))H$ 與極限載重  $P_{u=1}(1+\alpha)(M_{1u}+M_{2a}))H$ ,其中  $\alpha$  為頂樑與 長柱束制條件係數取 0.524,  $M_{1cr}$ 、 $M_{2cr}$ 、 $M_{1u}$ 、  $M_{2u}$ 分別為左側或右側長柱開裂或極限彎 矩。試體水平位移分析以 ACI 理論及一般門 型屋架分析與方法相同。

4.3 各補強試體預測結果比較

依據前述之分析方法代入各試體所得結果 與試驗曲線包絡線比較如表1至表3所示,P- △解析結果與試驗包絡線比較,發現剛度分析偏軟,極限載重預測誤差在-2~13%。

#### 五、結論

(1) 混凝土裂縫以 epoxy 樹脂注入,若注入順序正確且無滲漏現象,則試驗新生長的裂縫,不會沿著已注入 epoxy 樹脂的舊有裂縫發生。

(2) 裂縫以 epoxy 樹脂注入、混凝土剝落以 epoxy 樹脂砂漿填充等工法,為一理想的補 修措施,若施工得當確實,耐震強度可修復 達 95%以上,但剛度則趨於軟化。

(3) 植筋錨錠處之位置,會影響錨錠強度, 錨錠長度應適度加長,以防範保護層不足。
(4) 以鋼鈑圍封柱頭或短柱,必須要有足夠 強度之錨錠端,使與既有試體聯結成一體, 受力時完全發揮剪力強度,否則會因接合處 化學錨栓抗拉強度不足而被拔起情形。

(5) 含窗台矮牆或高窗之構架而言,於柱內 側增設翼牆能顯著提高其耐震能力,翼牆與 既有柱樑可以植筋方式連結。

(6) 鋼鈑作為補強材料進行補強,與鋼筋混凝土比較可得較佳之強度與韌度增量。

(7) 綜合各補強試體構架,以簡單理想化的 分析模式,利用 ACI 理論未予修正下,所得 預測結果與試驗值相互比較,誤差均在容許 範圍。

(8) 含窗台矮牆構架以R.C.增設翼牆並切割 隔離縫,在耐震強度與韌度上,較以R.C.增 設翼牆方案為佳。

(9) 含高窗構架以鋼鈑圍封極短柱,在耐震 強度與韌度上,較增設 RC 翼牆方案為佳。
(10) 純樑柱構架以鋼鈑增設托扇、圍封柱 頭,在耐震強度上,較以 RC 補強材料為佳。
(11) 含牆開中央門構架或含翼牆構架或整片 牆構架,已具有足夠之耐震強度,以補修方 式為之即可。

#### 六、參考文獻

(1)國立成功大學及國科會,"1999集集大 地震災害調查研討會論文集",1999/11。
(2)廖慧明,"建築物耐震診斷及補強方 法",台灣省土木技師公會,建築物補強研 討會論文集,民國81年5月,ppG1~G88。
(3)張荻薇,"地震後受損鋼筋混凝土建築物 之補修及耐震補強設計法",中華民國結構工 程季刊第二卷第一期,P79-90,1987/1。
(4)李威璁,"含牆鋼筋混凝土構架試驗研 究",成功大學土木研究所碩士論文,民國 90年7月。

(5) ACI Committee 318, "Building Code
Requirements for Structural Concrete (ACI318-95) and Commentary (ACI318-95R)", ACI
Committee 318, American Concrete Institute, pp.131-145,1995.

試 體	原始試體試驗值						
	(震後補強試體之試驗值)						
编號	Pcr	Ру	Pu	$\Delta cr$	$\Delta y$	$\Delta u$	
PFH	49.00	89.47	128.38	18.60	50.00	89.66	
(R-PFH)	(61.74)	(121.52)	(215.60)	(6.97)	(19.45)	(69.83)	
PFL	19.60	69.97	123.48	6.00	29.60	83.33	
(R-PFL)	(51.94)	(147.00)	(333.20)	(4.17)	(17.14)	(98.54)	
LFWL	26.56	128.38	172.48	0.53	20.20	53.49	
(R-LFWL)	(39.20)	(183.26)	(357.70)	(2.52)	(15.96)	(62.72)	
LFWH	43.12	138.18	190.12	4.40	15.9	56.20	
(R-LFWH)	(46.06)	(222.46)	(375.34)	(0.40)	(10.22)	(46.53)	
HFWL	115.64	345.94	378.28	0.24	3.23	12.90	
(R-HFWL)	(128.38)	(623.28)	(1034.88)	(2.07)	(12.33)	(59.82)	
HFWH	123.48	355.74	392.00	2.40	5.18	22.50	
(R-HFWH)	(115.64)	(306.74)	(734.02)	(0.45)	(2.5)	(14.92)	
DFW	84.28	478.24	958.44	0.43	8.50	21.67	
(R-DFW)	(137.20)	(470.40)	(944.72)	(0.02)	(7.50)	(22.40)	
WFW	187.18	309.68	586.04	0.54	4.20	19.20	
(R-WFW)	(159.74)	(313.60)	(592.90)	(2.84)	(9.60)	(34.85)	
LWFH	307.72	768.91	807.52	0.61	1.50	13.02	
(R-LWFH)	(391.02)	(882.00)	(942.76)	(1.28)	(4.69)	(42.62)	
LWFL	222.46	672.97	735.98	0.33	1.29	12.00	
(R-LWFL)	(349.86)	(872.20)	(935.90)	(0.64)	(1.71)	(17.02)	

表1 各試體補強(修)前後 P- $\Delta$ 試值(kN-mm)

表 2 各試體補強(修)前後耐震性能比較							
試體編號		補強(修)措施	強度變	剛度變	變形能力	韌性比	消散能量
補強前	補強後		化(倍)	化(倍)	變化(倍)	變化(倍)	變化(倍)
PFH	R-PFH	R.C. 增設樑柱托肩擴大 柱頭斷面補強	1.68	2.16	0.78	2.01	1.87
PFL	R-PFL	鋼鈑增設樑柱托扇圍封 柱頭補強	2.70	2.28	1.18	2.05	3.43
LFWL	R-LFWL	R.C. 增設翼牆並切割隔 離縫補強	2.07	1.77	1.17	1.43	2.66
LFWH	R-LFWH	R.C. 增設翼牆補強	1.96	2.37	0.83	1.53	1.95
HFWL	R-HFWL	柱圍封鋼鈑補強	2.74	0.59	4.64	1.22	13.77
HFWH	R-HFWH	R.C. 增設翼牆補強	1.87	2.82	0.66	1.38	2.83
DFW	R-DFW	EPOXY 低壓注入與EPOXY 樹脂砂漿填充補修	0.98	1.12	1.03	1.17	1.01
WFW	R-WFW	EPOXY 低壓注入與EPOXY 樹脂砂漿填充補修	1.01	0.56	1.82	0.99	2.51
LWFH	R-LWFH	EPOXY 低壓注入與EPOXY 樹脂砂漿填充補修	1.17	0.36	3.27	1.05	2.07
LWFL	R-LWFL	增設鋼片斜撐框架補強	1.27	0.88	1.45	1.09	2.07

試 體	解析值						
	(特定試驗值)						
編號	Pcr	Ру	Pu	$\Delta cr$	$\Delta y$	$\Delta u$	
R-PFH	42.43	121.52	202.57	4.56	19.63	70.47	
	(61.74)	(121.52)	(215.60)	(6.97)	(19.45)	(69.83)	
R-PFL	37.73	176.40	294.00	4.20	18.23	104.79	
	(51.94)	(147.00)	(332.20)	(4.17)	(17.14)	(98.54)	
R-LFWL	46.65	194.04	323.40	0.38	14.54	57.15	
	(39.20)	(183.26)	(357.70)	(2.52)	(19.56)	(62.72)	
R-LFWH	46.65	196.98	328.30	0.17	6.58	29.98	
	(46.06)	(222.46)	(375.34)	(0.40)	(10.22)	(46.53)	
R-HFWL	140.04	610.83	1018.02	0.30	10.73	52.08	
	(128.38)	(623.28)	(1034.88)	(2.07)	(12.33)	(59.82)	
R-HFWH	117.01	439.04	731.67	0.09	2.19	13.08	
	(115.64)	(306.74)	(734.02)	(0.45)	(2.50)	(14.92)	
R-DFW	185.12	562.32	937.27	0.12	7.67	22.90	
	(137.20)	(470.40)	(944.72)	(0.02)	(7.50)	(22.40)	
R-WFW	148.96	347.90	579.96	0.36	12.17	54.98	
	(159.74)	(313.60)	(592.90)	(2.84)	(9.60)	(43. 38)	
R-LWFH	352.51	601.72	801.64	0.33	3.15	28.67	
	(391.02)	(882.00)	(942.76)	(1.28)	(4.69)	(42.62)	
R-LWFL	352.51	739.80	986.37	0.30	1.42	14.10	
	(349.86)	(872.20)	(935.80)	(0.64)	(1.71)	(17.02)	

表3 各補強試體 P-△解析結果與特定試驗值比較(kN-mm)



圖1 本文試驗裝置及設備圖