



發行人：蔡克銓

本期主編：邱俊翔

本期副主編：蕭輔沛

發行所：財團法人國家實驗研究院

國家地震工程研究中心

地址：台北市辛亥路三段 200 號

電話：(02)6630-0888 傳真：(02)6630-0858

網址：<http://www.ncree.org.tw>

九十七年三月出版

八十一年三月創刊·季刊

行政院新聞局局版臺誌第 10286 號

中華郵政北台字第 4690 號執照登記為雜誌交寄

## 目錄

### ● 專題報導

台南縣關廟國小校舍耐震補強現地試驗 1

### ● 研究動態

校舍土壤-結構互制試驗 4

高維度陣列資料與 Bayes 分類法於結構物健康診斷之應用 5

### ● 實驗室動態

兩層樓同心斜撐構架試驗 6

模型樁在砂土中之側推及振動台試驗 7

### ● 國際合作

預力剪力牆試驗國際合作報導 8

### ● 研討會紀要

2007 台灣地震損失評估系統講習會 8

校舍耐震補強現地試驗成果研討會 9

跨越斷層橋梁耐震設計與補強研討會 9

### ● 特別報導

日本 E-Defense 實尺寸四層樓鋼造構架振動台試驗模擬比賽成果簡介 10

九十五年度菁英專案擴增留學獎學金研修成果報告 11

九十六年度中心績優員工介紹 12

本刊免費贈閱，歡迎來電索取。

2008.3 第六十五期

## 專題報導

# 台南縣關廟國小 校舍耐震補強現地試驗

## 一、前言

歷年來發生的幾次強震中，每每造成中小學校舍嚴重損毀，尤其在九二一集集大地震中，中小學校舍損毀的情形特別嚴重。所幸地震發生於凌晨時刻，校內均無任何師生活動，否則後果堪憂。早期校舍建築以採光通風為主，並未考慮耐震設計，加上施工品質不良，耐震能力實在堪慮，真可謂「先天不足，後天失調」。經勘災結果統計發現，傳統校舍普遍存在許多共同之問題，諸如分期興建、箍筋間距過大、窗台短柱等，均造成耐震能力明顯不足，在在顯示中小學校舍耐震能力實為當前亟待解決之問題。

有鑒於此，國震中心與教育部攜手合作，針對校舍結構耐震之問題，展開一系列的研究。由於全國校舍數量龐大，欲全面施作詳細耐震能力評估，所需之經費甚鉅，且並不經濟，故國震中心乃研發出校舍耐震能力簡易調查表及初步評估表，經由學校總務人員之簡易調查、工程專業人員之初步評估，有效地將校舍結構之耐震能力排序，以縮小擬解決問題之規模。對於耐震堪虞之校舍，依嚴重程度，由工程之專業人員，進行結構耐震之詳細評估與補強設計，最後透過審查機制，確保評估與補強之有效性及經濟性。

由於補強的工法繁多，其有效性過去多僅透過數值分析及實驗室的構件試驗，然而實際的補強效果無法獲得足夠驗證，利用實際校舍進行現地實驗係屬最直接之驗證方式，但現地實驗除所需動用之人力龐大，亦必須克服衍生之實驗技術問題，故其執行不易，致使世界上少有類似案例，國震中心克服萬難，進行一系列之校舍現地實驗，2005 年首度在花蓮新城國中進行校舍現地試驗，同年 7、8 月在雲林口湖國小進行了 RC 翼牆補強試驗，2006 年在桃園瑞埔國小也進行了隔間牆增設 RC 柱補強試驗研究，均獲得了豐碩的成果。而去年 7~9 月期間，本中心承蒙台南縣政府及關廟國小之協助，得以利用擬拆除之大智樓校舍進行本次現地試驗，本次實驗之主要目的有二：

### 1. 驗證現有評估方法及數值分析模型之可靠性

利用現有待拆除之校舍，於暑假期間進行測試，以觀察及確實瞭解校舍受震破壞之機制、過程及相關細節，透過實驗數據來檢視工程界已發展之評估方法及分析模型之可靠性。

### 2. 驗證補強方法之有效性

配合既有校舍之型態，選擇經濟有效且合適的補強方法，本次實驗係採用擴柱補強、構架式鋼板補強及預力鋼棒補強方式。藉靜態側向推垮試驗，以瞭解校舍在抵抗側向地震力的能力與其受力變形的程度，並確認三種補強方式之成效，以作為未來推廣之依據。

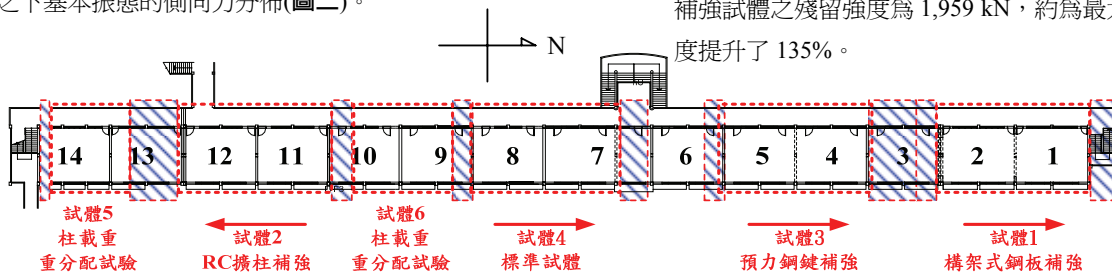
## 二、整體試驗規劃

由國震中心及國立成功大學組成現地實驗工作團隊，於台南縣關廟國小利用待拆除的大智樓，執行校舍耐震補強之現地推垮試驗。大智樓為二層樓懸臂走廊之典型 RC 加強磚造建築，單一樓層有 14 間教室，兩側各有樓梯一座，中間有一穿堂。本次試驗目的主要探討鋼板包覆、擴柱及預力鋼棒等耐震補強工法之成效，因此規劃了三座補強試體與一座標準試體進行推垮試驗比較，每二間教室規劃為 1 座推垮試驗試體，其餘教室作為反力端，剩餘教室則進行柱載重重分配試驗，總計有 6 組試驗試體(圖一)。本次試驗項目包括：

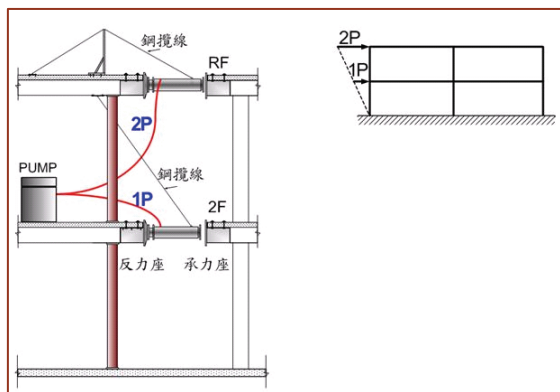
1. 靜態推垮試驗:主要進行補強工法之驗證,包括構架式鋼板補強(試體 1)、RC 擴柱補強(試體 2)、後拉式預力鋼棒補強(試體 3)及原型標準試體等 4 座試體。
2. 垂直載重重分配試驗:主要探討動力放大效應,包括試體 5、試體 6。
3. 門窗性能測試。
4. 土壤結構互制效應量測。
5. 微振動量測、強迫振動測試及影像量測。

靜態推垮試驗是以低樓層且結構系統規則的實物校舍建築為試體，與其結構的第一模態震動反應，模擬一、二樓層側力豎向比例施力，進行現地試驗，這樣可以同時獲得試體的側力抵抗能力及非線性位移能力。

起初將測試試體與反力端相連的樓版和梁切開，然後裝置 4 座油壓千斤頂於反力端各層樓的每一梁端，測試試體斷梁處同步加裝鋼套筒，隙縫封塞石膏，於千斤頂背後的反力端則裝置型鋼做為反力斜撐。本文試驗加載過程中，各試體均利用靜態單向沿走廊方向進行側向加載，並且由施力控制與位移同步兩個要素進行試驗。施力控制係以油壓缸活塞的截面積比來控制屋頂層樓版 RFL 與二層樓版 2FL 的施力，使其為 2 比 1，模擬承受實際地震力作用之下基本振態的側向力分佈(圖二)。



圖一 關廟國小校舍現地試驗試體規劃



圖二 試體加載佈置圖

## 三、靜態側推試驗之試驗方法

靜態側推試驗試體的試驗過程，均由屋頂層位移量控制。從屋頂層位移量 0.25%樓高開始，每增加 0.25%位移量記錄一次至 2.0%，屬於裂縫描繪階段。當屋頂層位移量達規劃的目標位移量時，即停止施力交由專案人員進入試體內查看受損跡象，並由各組工作人員至指定位置描繪裂縫、拍照與紀錄。試體屋頂層位移量達樓高 2.50%時，由於試體已大量變形且柱、樑與牆等構材嚴重損毀，基於安全考量，除保留測力計與位移計量測外，其餘量測設備皆撤離，屬於目視觀察階段。自屋頂層位移量達樓高 2.50%、3.00%、3.50%、4.00%、5.00%至 6.00%等試驗階段，皆於施力暫停之後，相關工作人員不再進入試體內部，只從試體外部進行觀察與拍照。由此試驗階段之構材塑鉸產生及破壞非線性行為，可看出試體破壞機制的發展情形及整體強度的衰減情況，其中殘餘強度降至 80%所對應的位移量，亦可判定它的韌性度。推垮階段是由屋頂層位移量 6.00%樓高開始，漸次施加側力，相對試體變位快速遞增，當大部分柱體發生軸力破壞，試體即迅速地倒塌。這種推垮而最後倒塌之試驗，可找出倒塌前的側位移能力，可研判能否承受經歷過最大地震之後而不倒塌。

## 四、構架式鋼板補強側推試驗成果

如圖三所示，原型試體大部分破壞於一樓底層，主因窗台短柱現象、塑鉸提前產生，造成一樓結構不穩定而快速破壞；而補強試體一樓各柱強度與勁度相若，中間柱與隔間柱間之力量傳遞與分擔力量重分配，軟弱柱現象消除，每根柱始終相互承載受力(圖四)。原型試體之最大基底剪力為 1,444 kN，而鋼板補強後之試體為 3,054 kN，最大強度增加了 1,610 kN，約提昇 110%之強度。比較於 0.8 倍最大強度時，補強後試體之頂樓位移較未補強之空構架試體提高了 30.7 mm，約提昇 15%。當屋頂層位移比達到 5%時，原型試體之殘留強度為 834 kN，約為最大強度之 58%；鋼板補強試體之殘留強度為 1,959 kN，約為最大強度之 64%，殘留強度提升了 135%。



圖三 原型標準構架試體



圖四 構架式鋼板補強構架試體

選用構架式鋼板補強工法，以靜態側向推垮現地試驗，直接驗證補強的成效，證明校舍老舊或單跨懸臂走廊，不代表就是危險教室或是不易補強的教室。既有校舍經此補強工法，依本文補

強試體之設計、製作與其試驗的方法試驗後，強度與韌性的耐震性能均獲明顯提昇，最大強度約提昇了 110%，強度明顯提升，達法規耐震要求以上，且施工簡易，經濟性及安全性都能達到要求，對原有校舍功能之衝擊幾乎沒有，得以提供國內中小學需進行補強的教室應用，使得強烈大地震再度侵襲之後不崩塌，可充份保障師生安全。

## 五、RC 擴柱補強側推試驗成果

原型未補強試體主要破壞發生於一樓，尤以窗台柱於彈塑性階段即提早破壞。若一樓柱再度受載，形成負荷重分配機制，加速隔間牆柱破壞，這是原型未補強試體造成耐震能力不足主因；如圖五所示，擴柱式 RC 補強試體一、二樓皆有受損，其原因應為選對位置補強，讓最軟弱的窗台柱增強勁度和韌度，能夠與隔間牆柱於彈塑性階段甚至於倒塌前階段，共同承載負荷，讓補強試體能明顯提昇耐震性能(強度、韌度與消散能量)及耐震水準(降伏地震力、極限地震力與韌性容量)。

原型未補強試體之窗台柱，因窗台連接於柱，使柱之有效長度變短以致承受過多的水平剪力，又因柱之剪力箍筋配置不足，以致容易產生與水平略成 45° 角之剪力破壞；而擴柱式 RC 補強試體之窗台柱抗剪能力增強，柱於彈塑性階段產生垂直於柱軸之撓曲破壞的裂縫，到了倒塌前階段，主要由於 P- $\Delta$  效應，使柱產生過大之額外彎矩，引致撓曲鋼筋降伏後之挫屈破壞。

上述試驗結果顯示，窗台柱 RC 擴柱補強在力量傳遞連續且新舊結構聯合成一體以及施工品質良好的條件下，補強試體之破壞機制將由原型試體的剪力破壞改善為趨向撓剪破壞，且補強校舍試體之強度與韌性的耐震性能皆獲明顯提昇，達法規耐震要求以上。此外，擴柱式 RC 補強工法之工程費低(補強及修復費約為 1/10 重建費)、施工簡易(傳統 RC 施工)。這些結果證明校舍老舊或單跨懸臂走廊，不代表就是危險教室或是不易補強的教室，老舊校舍經合宜之工法補強後仍可改善為滿足法規耐震要求。

本文所建議之擴柱式 RC 補強工法經驗證為國內中低樓層校舍結構補強經濟有效的可行方案之一，其補強試體設計與製作可以提供國內中小學校舍補強之應用。目前工程業界採用的補強工法種類繁多，唯尚無補強設計與其施作細則之規範，對於工程師如要進行擴柱補強設計，應可參考本研究的設計、施作、試驗與其結果。

## 六、預力鋼棒補強側推試驗成果

預力鋼棒補強試體之初始屋頂層間變位角為 0.25% 時，側力強度為 1,990 kN，當變位角達 0.5% 時，側力強度為 2,651 kN，此時為了看鋼棒是否具彈性回覆力，開始逐步卸載到變位角為 0.24%，此時強度僅有 610 kN，卸載路徑並未完全沿著原來加載的路徑，顯示試體已經有些微開裂的永久變形，接著再開始進行側推加載，當變位角達 0.75% 時，側力強度已達 2,917 kN，持續側推到 1.0% 時，已達最大側力強度 2,985 kN，由此可知，在 0.5% 試體已經有開裂，0.75% 應有明顯開裂，因此自 0.75% 側推到 1.0% 過程中，強度僅些微增加 68kN。接著再進行 1.25% 側推，強度則緩慢衰減為 2,929 kN，隨著屋頂層間變位角達 1.5% 時，強度衰減為 2,822 kN，當變位角為 1.75% 時，強度衰減為 2,751 kN，而變

位角達 2.0% 時，強度仍緩慢衰減為 2,715 kN；但是當變位角達 3.0% 時，強度則明顯衰減為 2,518 kN，此時已接近最大強度 0.8 倍。之後的變位角 4.0%、5.0% 及 6.0%，所對應的強度分別為 2,254 kN、1,937 kN 及 1,760 kN。由於已達測試系統位移上限，本次試驗於此終止(圖六)。



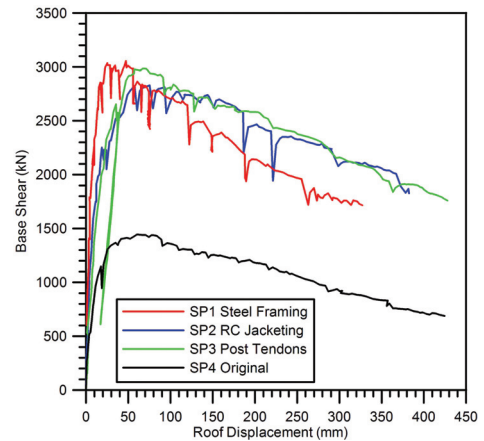
圖五 RC 擴柱補強構架試體



圖六 預力鋼棒補強構架試體

經與標準原型試體載重位移關係比較(圖七)，最大側力強度為 1,444kN，此時屋頂層間變位角為 0.86%，而預力補強試體於屋頂層間變位角 0.98% 時，達到最大側力強度 2,985kN，就強度補強觀點而言，預力鋼棒補強試體強度較原形試體顯著增加 1.07 倍。

本研究與墨西哥進行國際合作進行後拉式預力補強工法現地試驗驗證，並與原型標準試體比較，實驗結果顯示，預力鋼棒補強對側力強度有顯著貢獻。實驗結果顯示，採用鋼棒補強後，強度較原形試體顯著增加 1.07 倍，可有效提升建築物之耐震能力，為強度補強之工法；此補強工法施工方便，補強後若受震損，可快速抽換鋼棒再次補強，為快速補強工法；鋼棒體積不大，因此不影響教室採光及通風，可有效降低裝修工程費用。校舍採用預力鋼棒補強優點包括經濟有效且快速，不影響採光通風，無需大量裝修工程，是值得提供給工程師進行國內校舍補強工法的新選擇。



圖七 各試體側推載重-位移關係曲線之比較圖

## 七、結論與檢討

本試驗除與成功大學建築系及土木系師生共同合作研究外，亦與墨西哥進行國際合作進行後拉式預力補強工法試驗，提供國內校舍補強工法的新選擇。基於本次現地實驗之獨特性，美國、日本及印度多位學者特來臺觀摩。另外，國家實驗研究院及國科會亦提供經費支援，使本實驗得以順利展開。相信由這一系列之試驗與研究成果，可提供給工程師一套準確又實用的方法，來解決既有中小學校舍耐震評估與補強之需求。

專案副研究員 蕭輔沛、助理研究員 邱聰智  
組長 黃世建、邱耀正