

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

計畫名稱：防災重要建築物之耐震對策(Ⅰ) 子計畫九：學校建築構架有效補強措施研究

Subproject 9 : THE STUDY OF EFFECTIVE RETROFITTING OF SCHOOL BUILDINGS

計畫編號：NSC 89-2218-E-041-002

執行期限：89年08月01日至90年7月31日

主持人：劉玉文 嘉南藥理科技大學 工業安全衛生系

共同主持人：許茂雄 國立成功大學建築研究所(系)

計畫參與人員：謝東評 國立成功大學建築研究所碩士生兼任助理

一、摘要

從 921 地震調查報告顯示校舍建築破壞的主要原因是構架中短柱效應或平行走廊方向壁量太少所致，對倒塌之建築震害原因調查，雖可作為往後建築設計之參考，但對中害或小害的建築如何補強，卻是不容忽視之重要課題。本計畫之目的是探討學校建築常見之補強方式，並利用非線性歷時分析程式評估其提升耐震能力之多寡。研究結果顯示以增設剪力牆的補牆方式提升其耐震能力最佳，其次為增設翼牆；擴大柱斷面及切隔離縫方式之補強，雖可提升其耐震能力與韌度，但不利於功能設計目標之要求。對補強標準檢核以功能設計目標較為嚴格，該目標中又以 475 年地震再現期地震作用下之層間變位角檢核為最主要關鍵點。

關鍵詞：學校建築，有效補強，耐震能力，功能設計

ABSTRACT

The major failure reason of school buildings induced by 921 Chi-Chi earthquake is reported to be either short column effect or fewer walls along the walkway. However, the quantitative evaluation of earthquake resistance capability for the retrofit of damaged structure is more important. The objective of this project is to study the effective retrofitting of school building frames and evaluate their aseismic capacity. First year, this study investigates the failure reasons of school buildings in Pu-Li, and proposed an effective retrofit method by evaluating its earthquake resistance capability quantitatively. The analytical result shows that the best retrofit is adding RC shear walls and secondly good is the adding wing walls among frames. Although the models of enlarge column size and cut separated slit along window and column are promote their aseismic capacity, they are unfavorable to The Performance Based Requirements.

The key of conform to The Performance Based Requirements is drift angle of maximum relative stories under 475 years recur of earthquake.

Keywords : school building, effective retrofit, aseismic capacity, performance based requirement.

二、計畫緣由與目的

台灣因地理位置正處於歐亞大陸板塊與菲律賓板塊交界處，地表活動頻繁，每當地震發生，總是帶給我們恐慌與災情。在 1999 年 9 月 21 日清晨 1:47 在南投縣發生芮氏規模達 7.3 的大地震，造成數千人死亡外，有許多建築物倒塌或嚴重損壞[1,2]。此次大地震南投縣境內國中小學建築災害尤為嚴重，除極少數新建工程考慮耐震設計者外，大多數教室建築均受程度不等之震害，嚴重者倒塌或柱樑爆裂，輕者結構元件，如柱、梁、牆、板等被剪裂或彎壞，亦有非結構元件如天花、磁磚等破損或脫落[3,4]。整個災後重建工程除倒塌者拆除重建外，中害或小害之建築以結構補強方式處理為最佳，許多結構技師或建築師均以其專業背景向主管機關（南投縣政府、重建委員會）或學校單位提出補強規劃設計，但對這些補強設計後之校舍建築，其耐震能力到底提高多少？規劃補強位置及方式，是否有效或會造成鄰近桿件或節點降低其韌度？這些疑點便是產官學界極想知道的答案。本文在此背景下先以埔里鎮內所有國中小學建築為對象，分析其震害之原因並收集建築師或結構技師常採用之結構補強方式。篩選不同結構系統之教室建築，包括倒塌拆除重建與小害補強等不同狀況，評估原有之教室建築之耐震能力，確定其震害情況是否與現況相同；根據分析篩選案例之破壞型式，選擇不同補強方式並評估補強後之教室建築耐震能力。

三、計畫執行結果與討論

本研究進行校舍建築耐震能力診斷時，採用 Li Kang-Ning 教授等人所發展之非線性歷時動力分析軟體(CANNY-99) [5]，分析所用之地震加速度歷時資料，則取自埔里鎮內育英國小實際紀錄之 921 地震歷時資料，如此較能合理模擬當時 921 地震對埔里鎮學校建築物破壞情形。耐震診斷分析時之結構物基礎假設為固定端，忽略與土壤間之互制效應；柱、樑桿件視為完全剛性接合，即柱樑在端部產生塑性鉸也不影響其剛性接合特性；柱子緊靠磚造窗臺長度部分視為剛域。補強前與補強後之耐震管制標準以現行建築技術規則[6-8]要求校舍建築物崩塌地表加速度在強震區應達 $0.33g \times 1.25 \times = 0.413g$ 時，樓層間相對位移角不超過千分之二十五。校舍建築之耐震能力另依 Vision 2000 功能設計法[9-10]及洪李凌教授所提台灣地區設計地震力檢討建議[11]整理設計標準如表 1 所示，即學校建築在 72 年地震再現期 ($PGA = 0.18g$) 時之層間變位角 $< 0.25\%$ ，即建築物屬無害狀況(保證全部設施維持正常機能)；在 475 年地震再現期 ($PGA = 0.3g$) 時之層間變位角 $< 0.5\%$ ，即建築物屬小害狀況(設施無礙於使用)；在 950 年地震再現期 ($PGA = 0.36g$) 時之層間變位角 $< 1.5\%$ ，即建築物屬中害狀況(保證人命安全)；取，小害取 $< 0.5\%$ ，中害取 $< 1.5\%$ ，大害取 2.5% ；崩塌地表加速度取 $0.413g$ 。

本研究對埔里鎮轄區內國中小學 14 所共收集之校舍建築 84 棟，其中倒塌已拆除 51 棟，需要補強有 30 棟，完好的有 3 棟。探討震害受損原因[3,4]包括柱量太少(走廊無柱)使壹樓形成軟弱層、牆壁量太少且僅配置在一個方向上、建築平面型規劃不良、建築之立面勁度改變過大、窗台設置使短柱現象發生、牆體勁度不足、走廊柱抗彎強度不足造成柱頭或柱腳彎曲破壞、廁所普遍存在之高窗短柱被剪壞、箍筋間距太大且無 135 度接合造成柱爆裂破壞及混凝土強度不足等。

本研究針對篩選的七個案例以圖說資料建檔如表 2 所示，地震力由小逐漸增大，若該建築之相對層間變位角超過 2.5% 或程式運算過程發散時，則該建築視為已無法再承受地震力而結束該程式之執行。其中最大輸入地表加速度從建築技術規則之規定值 ($0.33g$) 開始，逐漸加大到 921 地震發生時當地的實際地震紀錄(育英國小設置之測震儀)之地震歷時資料最大 ($0.58g$) 者，每次輸入時間間隔為 0.005 秒，分析結果均紀錄各桿件之內力、塑性鉸位置、各樓層之相對側位移及對應之基底剪力。由分析結果顯示各案例教室建築之鋼筋及混凝土強度若達設計要求時，則其耐震能力可符合法規要求，但無法通過 921 地震 $PGA = 0.58g$ 之考驗。各棟建築間之耐震能力比較，顯示育英國小北棟及埔里國小南棟教室在 $PGA = 0.44g$ ，時間約 39 秒時之地震輸入，第一層樓之層間變位角超過 2.5% 而停止分析，其耐震能力最低，而愛蘭國小南棟及溪南國小北棟教室最高，其耐震能力達 $0.53g$ ，但最大地表加速度增至 $0.58g$ 時，愛蘭國小南棟教室之層間變位角

也已超過 2.5% ，其比較如表 3 所示。若將混凝土抗壓強度降至 $130kg/cm^2$ ，鋼筋降伏強度降至 $1800kg/cm^2$ 來模擬時，則僅溪南國小北棟教室能通過 $PGA = 0.41g$ 之考驗，此結果說明當時之地震力確實過大已遠超過該等校舍之設計耐震能力外，各校舍建築之施工品質好壞會顯著影響其耐震能力之高低，並與實際現況相當符合。

學校建築之震害原因主要是構架中短柱效應或平行走廊方向壁量太少所致，本文除參考內政部建築研究所研究報告[12,13]所提補強建議外，直接以埔里鎮各學校之補強案例觀察整理如下：

1. 切隔離縫

利用水刀將各教室之所有窗台柱與窗台分開 3 至 5 公分後，以低密度保麗龍及環氧樹脂填充，可增加柱有效長度。

2. 增設剪力牆

為了教室採光與通風，剪力牆配置選在中間走廊或兩側廁所空間或不作教室之跨間，即剪力牆配置在長向之兩側為原則，但對整個建築平面而言，應使對稱而不偏心。各校舍案例構架配置略有不同，每棟校舍建築增設四片 25 公分厚之剪力牆，高度從基礎延伸至頂樓，牆筋水平與垂直雙向均使用 #5 主鋼筋，間距 20 公分。分析所用之混凝土抗壓強度 $f_c' = 210 kg/cm^2$ ，鋼筋降伏強度 $f_y = 2800 kg/cm^2$ 。

3. 增設翼牆

在適當之窗台柱，不影響到教室採光及門窗開關下設置翼牆，分析所用混凝土抗壓強度 $f_c' = 210 kg/cm^2$ ，鋼筋降伏強度 $f_y = 2800 kg/cm^2$ ，牆筋水平與垂直雙向均使用 #5 主鋼筋，間距 20 公分，牆厚 25 公分，高度從基礎延伸至頂樓，每棟校舍建築增設 8 片 25 公分厚，寬度 50 公分之翼牆。翼牆以每間教室均勻配置兩片為原則，對整個建築平面而言，可達對稱而不偏心又可顧及每間教室之採光與通風。

4. 柱斷面加大

直接對於走廊外柱或窗台柱之斷面加粗以增大其抗震能力，擴大之斷面周圍增加 12-#8 主鋼筋及 #4@15cm 箍筋，增大後之柱斷面尺寸為 $60 \times 60 cm^2$ ，且補強時在新舊材料之間需埋設剪力傳遞筋。每個案例均對 8 支柱補強，其位置以最外側教室或中間走廊之兩側為原則，但需維持結構平面之對稱性。若有走廊柱之校舍，選 4 支走廊外柱及 4 支窗台柱補強，其他情形均對窗台柱補強。分析時之混凝土抗壓強度 $f_c' = 210 kg/cm^2$ ，鋼筋降伏強度 $f_y = 2800 kg/cm^2$ 。

各案例結構補強之耐震能力分析如表 4 所示。各案例以切隔離縫、增設翼牆、增設剪力牆、擴大柱斷面等不同方案進行結構補強，這些補強後之耐震能力分別以能建築技術規則要求 ($0.41g$ ， $< 2.5\%$) 及功能設計標準檢驗。其補強與耐震能力之關係如下：

1. 愛蘭國小南棟教室：將混凝土抗壓強度降至 $130 kg/cm^2$ ，鋼筋降伏強度降至 $1800 kg/cm^2$ 來模擬愛

- 蘭國小南棟教室狀況輸入地震力，以層間變位角 2.5% 管制時，僅能通過 $PGA=0.36g$ 之考驗，且 921 地震後部份樑柱接頭及窗台柱端已達降伏階段。因此以切隔離縫、增設翼牆、增設剪力牆、擴大柱斷面等不同方案進行結構補強，這些補強後之耐震能力均能通過建築技術規則要求 ($0.41g$ ， $< 2.5\%$) 檢驗；但以功能設計標準檢驗，除增設剪力牆外，其他三種方案都無法通過檢驗。增設翼牆補強時在 475 年再現期地震 ($0.30g$) 之層間變位角超過 0.5%，若要完全符合功能設計標準要求，則需再增設 8 片翼牆。對於切隔離縫或擴大柱斷面的補強方式，則很難達到功能設計標準的要求。
2. 愛蘭國小北棟教室：與愛蘭國小南棟教室相同條件下輸入地震力，僅能通過 $PGA=0.3g$ 之考驗，因此也以切隔離縫、增設翼牆、增設剪力牆、擴大柱斷面等不同方案進行結構補強，除切隔離縫外，其他三種補強後之耐震能力都能通過建築技術規則要求，但無法通過功能設計標準檢驗 (增設剪力牆除外)。增設翼牆補強時在 475 年及 950 年再現期地震之層間變位角超過功能設計之標準，若再增設 16 片翼牆則可符合其要求。對於切隔離縫或擴大柱斷面的補強方式，則很難達到功能設計標準的要求。
3. 模擬國中教室：本棟教室建築已符合現行建築技術之規定，與愛蘭國小南棟教室相同條件下輸入地震力，無法通過 $PGA=0.41g$ 之考驗，因此以增設翼牆、增設剪力牆、擴大柱斷面等三種方案進行結構補強，這些補強後之耐震能力也都能通過建築技術規則要求 ($0.41g$ ， $< 2.5\%$) 檢驗，但都無法通過功能設計標準檢驗。增設剪力牆補強時在 475 年再現期地震之層間變位角超過 0.5%；而增設 8 片翼牆之補強則在 72 年及 475 年再現期地震作用下之層間變位角超過功能設計之標準；擴大柱斷面的補強方式，則對功能設計的三個管制標準都無法通過。若要補強至符合功能設計之標準則需三種補強方式同時加入。
4. 溪南國小北棟教室與忠孝國小北棟教室：由於這兩棟建築已完成補強工程，因此補強方案直接採用原設計單位所提供之資料，即增設翼牆及擴大柱斷面之方式進行結構補強，如此補強後之耐震能力都能通過建築技術規則要求與功能設計標準之檢驗。前者之最大耐震能力可達 $PGA=0.65g$ 至 $0.70g$ 之間而後者之最大耐震能力則在 $PGA=0.58g$ 至 $0.65g$ 之間。

四、結論

本文經前述之耐震能分析結果，獲得到下列初步之結論：

1. 校舍建築震害嚴重之原因除地震力太大外，主要原因包括材料強度不足、結構系統規劃時之長向壁量太少及柱量不足、窗台設置使柱有效長度縮短及柱箍筋間距不足等。

2. 一般形態之校舍建築若材料強度符合設計要求，則其耐震能力均在 $0.41g$ 以上，在 921 地震時會倒塌破壞，最主要原因是該地震實在太大了。
3. 利用 Vision 2000 建議之功能設計目標，對校舍建築之耐震能力診斷要比現行建築技術規則所規定之極限耐震能力分析標準嚴格。
4. Vision 2000 建議之功能設計目標以 475 年地震迴歸期之控制為最主要關鍵點，只要補強後能滿足 475 年地震迴歸期這個控制點，其它控制點大都可符合要求。
5. 實際校舍建築之結構耐震補強方案，最常被採用的方式有增設構架、增設剪力牆、增設翼牆、擴大柱斷面、切隔離縫、包覆鋼板或強化纖維複合材料 (FRP) 等，而前五種補強元件之剛度可模擬下，容易進行補強後耐震能力提升之計量分析。
6. 各種補強方式中，以增設剪力牆方式對建築物耐震能力提昇效果最大，其次是加翼牆補強方式。
7. 以擴大柱斷面及切隔離縫之補強方式雖可提高其耐震能力，但側位移仍嫌太大，不利功能設計目標之檢驗。
8. 以現有補強方案之校舍建築診斷，顯示不但符合功能設計目標之要求，其最大耐震能力均達 $0.58g$ 至 $0.70g$ 之間。

五、計畫結果自評

本研究計畫執行內容包括南投縣埔里鎮 14 所國中小學之校舍 84 棟 921 地震後之建築災害資料收集及七棟教室詳細耐震能力分析後，除已倒塌的校舍驗證外，對有補強的學校建築進行不同補強方式之效果檢討其耐震能力。與原計畫內容完全相符並能達成預期目標，目前正整理將發表在適當的學術期刊發表。

六、參考文獻

1. 內政部建築研究所，「921 集集大地震建築物震害調查初步報告」，內政部建築研究所，第 43-62 頁，台北，1999。
2. 國科會工程科技推廣中心，「1999 集集大地震災害調查研討會論文集」，國科會工程科技推廣中心，台南，1999。
3. 國家地震工程研究中心，「1999 年 9 月 21 日台灣中部集集地震初期勘災報告」，國家地震工程研究中心，台北，1999。
4. 張嘉祥、陳嘉基、呂國維、謝永宏，「921 集集大地震建築物災害調查分析」，財團法人成大建築文教基金會，第三-1~三-24，台北，1999。
5. Li Kang-Ning, "Canny 99 Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package " Technical Manual & User, Manual, Civil Dept. National University of Singapore, 1996.
6. 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.
7. 內政部營建署,「最新建築技術規則」,詹氏書局,1997。
 8. 內政部營建署,「建築耐震設計規範及解說」,營建雜誌社,1997。
 9. Structure Engineers Association of California Vision 2000 Committee,“ Performance Based Seismic Engineering of Buildings ”,SEAOC Vision 2000 Committee, Final Report,1995.
 10. 詹景超,「以 RC 住宅建築耐震行為檢討 VISION 2000 設計目標」,國立成功大學建築研究所碩士論文,民國 88 年 6 月。
 11. 洪李凌,「台灣地區設計地震力檢討」,民國 89 年國科會防災研究成果發表會,2000.11。
 12. 許茂雄、張嘉祥、蔡瑞河,「新建學校建築耐震規畫設計與既有學校建築耐震補強指針研擬」,內政部建築研究所專題研究計畫期末報告(MOIS-860010),民國 86 年 6 月。
 13. 黃世建、陳正平、王森源、陳正誠、蕭興臺,「學校建築常見之結構損害現象歸類及補強計畫建議」,內政部建築研究所籌備處專題研究計畫期末報告(MOIS-850016),民國 85 年 6 月。

表 1 強震地區(台中市)之功能設計法建議之設計標準

		無害	小害	中害	大害
		全部機能保證	無礙使用	人命安全	不得崩塌
		< 0.2%	< 0.5%	< 1.5%	< 2.5%
地震再現期	小震 22 年 ($a_c=0.12g$)	●			
	中震 72 年 ($a_c=0.18g$)	●	●		
	大震 475 年 ($a_c=0.30g$)	●	●	●	
	烈震 950 年 ($a_c=0.36g$)		●	●	●

不准設計

一般建築

安全緊要 重要建築

表 2 本研究分析案例整理

	走廊系統	窗台柱數	興建年代	樓層高度	建築現況
育英國小北棟教室	無走廊柱型	每間教室有四支	民 75 年	三層, 12 米	拆除重建
埔里國小南棟教室	無走廊柱型	每間教室有四支	民 74 年	三層, 12 米	拆除重建
愛蘭國小南棟教室	無走廊柱型	每間教室有四支	民 74 年	兩層, 8 米	已完成震後補強
愛蘭國小北棟教室	單邊有走廊柱型	每間教室有兩支	民 75 年	兩層, 8 米	已完成震後補強
溪南國小北棟教室	單邊有走廊柱型	每間教室有四支	民 74 年	兩層, 8 米	已完成震後補強
忠孝國小北棟教室	無走廊柱型	每間教室有四支	民 75 年	兩層, 8 米	已完成震後補強
模擬國中教室	單邊有走廊柱型	每間教室有四支		三層, 12 米	依現行耐震設計規範設計

表 3 921 地震前依設計圖說之耐震能力分析

	最大輸入地表加速度且層間變位角 < 2.5% 作判定						
	0.41g	0.44g	0.47g	0.50g	0.53g	0.56g	0.58g
育英國小 北棟教室		×	×	×	×	×	×
埔里國小 南棟教室		×	×	×	×	×	×
愛蘭國小 南棟教室						×	×
愛蘭國小 北棟教室			×	×	×	×	×
溪南國小 北棟教室						×	×
忠孝國小 北棟教室					×	×	×
模擬國中 教室				×	×	×	×
材料強度： $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$ ， $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$ ：表示可符合要求，×：表示無法達到要求							

表 4 埔里鎮各學校可補強建築完成不同方式補強後之耐震能力分析

	結構補強方式	建築技術規程要求	功能設計標準要求			
		0.41g < 2.5%	0.18g < 0.2%	0.30g < 0.5%	0.36g < 1.5%	
愛蘭國小 南棟教室	切隔離縫		×	×	×	
	加翼牆			×		
	加剪力牆					
	柱斷面加大		×	×	×	
愛蘭國小 北棟教室	切隔離縫	×	×	×	×	
	加翼牆			×	×	
	加剪力牆					
	柱斷面加大		×	×	×	
模擬國中 教室	加剪力牆			×		
	加翼牆		×	×		
	柱斷面加大		×	×	×	
溪南國小 北棟教室	加翼牆及 柱斷面加大 ^{*註}					
忠孝國小 北棟教室	加翼牆及 柱斷面加大 ^{*註}					
原始材料強度， $f_c' = 130 \text{ kg/cm}^2$ ， $f_y = 1800 \text{ kg/cm}^2$ 新加入之材料強度， $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$ ， $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$ 表示耐震能力可符合要求，×表示無法達到要求。 ^{*註} ：溪南國小北棟教室與忠孝國小北棟教室之補強方式均採現況情形						