

老舊鋼筋混凝土建築之耐震評估與補強技術

文·圖/黃世建

臺灣有大量的老舊鋼筋混凝土（Reinforced Concrete; RC）建築，其占建築總數之58%。這些老舊建築係在1999年耐震設計規範有效執行前所建造，其耐震設計需求不足且施工品質不良，所以耐震能力較差故而急需改善。據統計，上述老舊RC住宅應達530萬戶，而臺灣營造業1年極限興建產能僅為15萬戶，故以拆除重建來全面改善老舊RC建築的耐震能力，至少需時35年。考量對老舊RC建築做全面改建，其曠日費時且經費需求高昂，所以對老舊RC建築執行耐震評估與補強，並據以修繕及延壽，才是現今當務之急。

臺灣的老舊RC建築有兩個族群需要特別關注，在公有建築方面為校舍，在私有建築方面則為具軟弱底層的住宅大樓。臺灣在1968年推行9年國民義務教育，因此興建大量耐震能力可能不足的校舍。於1999年921集集地震來襲時，在南投與台中地區有過半的校舍出現嚴重損毀甚至倒塌的現象，如圖1（a）所示。所幸921地震發生在半夜，但若地震於白天上課期間來襲，而師生高度集中於教室內，其傷亡令人難以想像。因此對政府而言，老舊RC校舍的耐震評估與補強確實屬於高度優先執行的項目。

臺灣的都市設計採用住商混合的規劃，故常見底層為商業空間而上層為住宅使用。因為商業活動需要開放空間，所以柱、牆等構材較少；但住宅使用需要私密空間，故牆壁之設置較密。這就造成底層的耐震能力相對較低，亦即所謂之軟弱底層建築。歷年的震災勘查均顯示，軟弱底層為住宅建築倒塌之主因，如圖1（b）所示。大樓倒塌極易造成人員傷亡，故對臺灣軟弱底層建築執行耐震評估與補強，極有必要。

本文擬對臺灣老舊RC建築所需的耐震評估與補強技術作說明，並介紹臺灣校舍與軟弱底層



圖1：老舊RC建築震損之情況。

建築耐震補強計畫之特色及成果，最後再提出對老舊RC建築推動耐震補強的展望。

技術整備

由於臺灣老舊RC建築的混凝土強度較低且剪力鋼筋量不足，所以在地震作用下極易產生混凝土受壓擠碎的剪力破壞。對於符合規範要求的RC建築，其混凝土強度較高且剪力鋼筋量配置充足，上述混凝土擠碎的剪力破壞不易發生，所以各國規範僅以簡單且保守的經驗公式來排除混凝土擠碎的剪力破壞，故而國際上相關的研究極少。因為混凝土受壓擠碎的剪力破壞是臺灣老舊RC建築主要的震損破壞模式，而保守的經驗公式實為耐震評估與補強工作的障礙，所以準確評估RC構件混凝土擠碎破壞之剪力強度即為臺灣技術整備的關鍵項目。

筆者與研究團隊根據RC構材混凝土受壓擠碎破壞的特性，並使用嚴謹的力學理論，開發出軟化壓拉桿模型¹，其可預測柱、梁、牆等RC構件的剪壓破壞強度。此一理論對臺灣老舊RC建築的適用性已被反復驗證，除了實驗室的構件測試驗證（圖2a）外，也通過現場結構側推實驗（圖2b）。此一技術突破為臺灣老舊RC建築的耐震評估與補強工作提供了堅實的基礎。

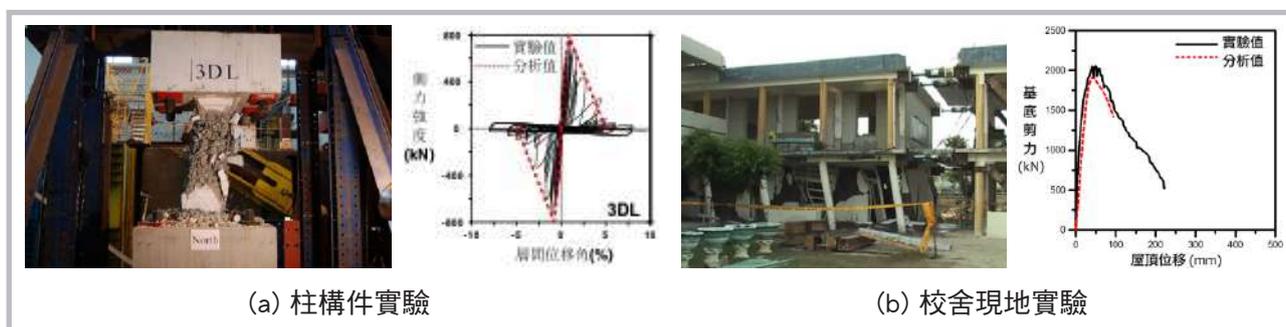


圖2：評估模型之開發與驗證

在使用精細理論找出老舊RC建築的易損構件後，就需加以補強。就耐震補強工法而言，筆者認為應該著重簡單性及經濟性。鑒於臺灣老舊RC建築可分布至深山與離島等偏遠地區，因此補強工作除丙級營造廠可以施工外，亦應開放讓土木包工業者承攬，所以補強工法應力求簡單與材料的可及性。就經濟性而言，筆者與研究團隊追求補強工法在簡單施作後可達目標強度的90%即可，若剩餘的10%強度要透過昂貴的工序來求得，我們就建議排除以控制人工與材料成本。

基於簡易且經濟的原則，筆者與研究團隊建議了將柱斷面增大的擴柱工法、於構架內增設

填充牆的剪力牆工法、以及在柱兩側增設窄牆的翼牆工法（圖3）。這些工法均有配置適用的分析模型以評估其補強功效，而非屬必要的植筋與構件穿孔等工序均經實驗探討予以排除。這些努力確實可有效降低耐震補強之經費需求。



圖3：建議之耐震補強工法。

校舍耐震補強計畫

筆者於國家地震工程研究中心兼職服務時，曾協助教育部爭取行政院特別預算，故可在2009至2022年間針對全國公立高中職以下校舍全面進行耐震評估與補強。國震中心接受教育部委託，成立老舊校舍耐震補強專案辦公室，期對教育部校舍耐震補強計畫提供全面的技術與行政支援工作，而由筆者擔任專案辦公室的召集人。

校舍計畫在正式啟動前已有為期6年的技術與行政準備，所以校舍

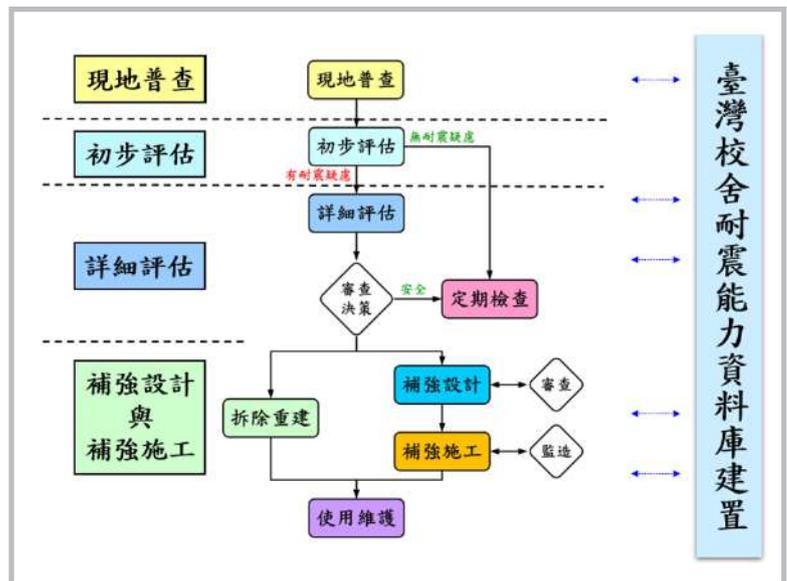


圖4：臺灣校舍耐震能力提升策略

計畫係按圖4的策略依序推動。其中現地普查係邀請大專土木系學生於寒暑假期間，對全國校舍逐一查訪，以建立資料庫並作全面列管。初步評估係快速檢驗，找出柱、牆數量較少的校舍進入詳細評估。詳細評估須經審查，而不合格的校舍就須執行耐震補強設計與施工。耐震補強設

計須通過審查，而補強施工須執行監造。所有階段的工作成果均以數位資料回傳到國震中心的資料庫，以供進度管控與評估決策之用。

校舍計畫自2009年啟動並於2022年結案，計有14年之執行期，預算編列達1,284億元。以工程提升耐震能力之校舍達9,550棟，其占全國公立高中職以下校舍總數27,227棟之35%。此35%之耐震補強鋪設比率，應可有效避免校舍在地震時出現倒塌之情況。例如2024年在花蓮發生0403地震，花蓮女中已補強校舍毫無損傷，但鄰近未補強校舍卻有嚴重震損（圖5），該震損校舍係用早期評估報告解除校舍計畫的列管。此可驗證臺灣老舊校舍耐震補強極具成效，而詳細的執行步驟與成果，詳見計畫結案報告²。



圖5：花蓮女中校舍於0403地震之表現

校舍耐震評估與補強計畫協助臺灣工程師了解以及使用高階的結構分析技術，並促成結構與土木工程師可自行承攬耐震評估與補強工程委託案，此對產業在發展結構耐震評估與補強工作上極有助益。由於校舍耐震補強計畫的順利推動，這讓政府有信心在前瞻計畫內撥款，讓公有建築如警察局、消防廳舍、鄉鎮公所、衛生所、公有市場等之耐震補強工程亦能有效推動。

軟弱底層建築耐震補強計畫

2016年美濃地震引致維冠金龍大樓倒塌造成115人死亡，這是臺灣史上最驚恐的大樓殺人事件。維冠大樓1至3樓為商業空間而4樓以上為住宅，這是臺灣典型的軟弱底層建築，而本案例凸顯對軟弱底層建築執行耐震補強的必要性。

臺灣對公有建築推動耐震評估與補強工作已有多多年，相關技術已經成熟，但對私有建築的耐震補強卻窒礙難行。主要原因為業主眾多難有共識，而且經費籌措困難。若僅對軟弱底層施

作耐震補強，其業主較少且有營利的收入，較易推動耐震補強工作。再加上避免軟弱層震害傷及顧客，政府可用公權力予以要求。就震害風險作考量，若能排除震損最大主因的軟弱底層，大樓倒塌之潛在風險就大幅降低了。基於上述原因，筆者就藉國震中心向內政部營建署提出僅對建築軟弱底層施作耐震補強之芻議，幸獲政府採納。

2018年政府啟動私有建築耐震弱層補強計畫，委由國震中心執行，時任國震中心主任的筆者就擔任計畫主持人。筆者除推動計畫工作外，亦負責耐震設計規範的修訂工作，故將建築物軟弱底層補強納入規範，予以法制化以利政策推動。

自2018年推動至今，已有121建築物獲得政府補助執行弱層補強。2024年0403花蓮地震顯示，完成耐震弱層補強的建築可通過地震考驗，其安然無恙如圖6所示。建築物耐震弱層補強方法現已獲政府及民眾的認同，正迅速推廣中。

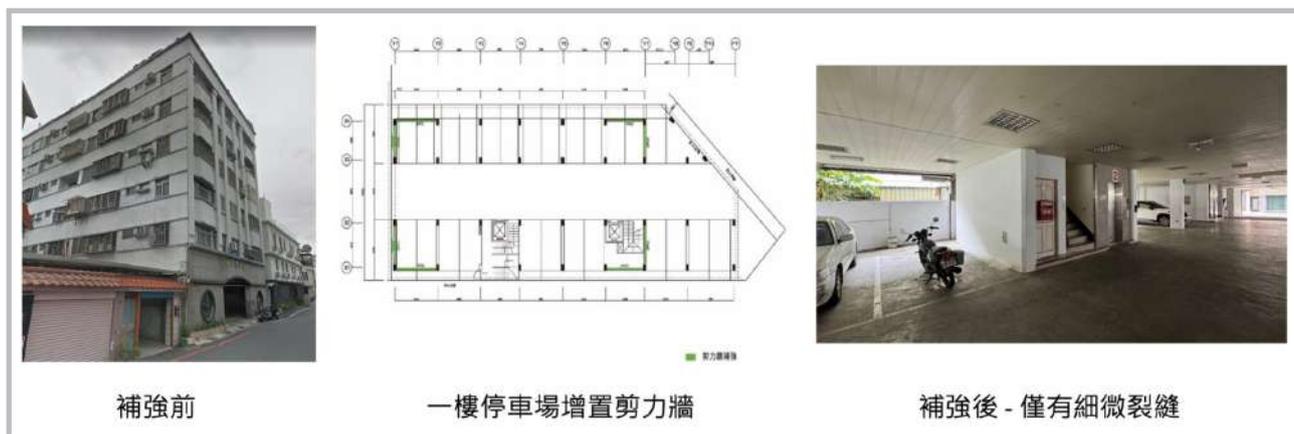


圖6：軟弱底層耐震補強案例

未來展望

日本是建築物耐震補強工作最先進的國家，日本耐震改修促進法就允許私有建築所有權人可對其擁有的住戶進行耐震補強。其可單獨進行無需取得他戶的同意，這種百花齊發的作法值得我國效法。

地震防災的目標是震後人民的生活與城市的機能可以迅速恢復，其中的關鍵是人民可以安居樂業，白話來講就是劇震後人民還居住在自己家中，沒有建築物產生災難性的崩塌。建議政府參考日本耐震改修促進法，對臺灣老舊建築物耐震補強作立法³，排除現有的法規約束，讓臺灣老舊建築物耐震補強工作能夠全面展開。（本專題策畫／工學院闕蓓德副院長）

參考文獻：

- [1] Hwang, S. J., and Lee, H. J., (2002). Strength Prediction for Discontinuity Regions by Softened Strut-and-Tie Model. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 12, December, pp. 1519-1526.
- [2] 黃世建、鍾立來、林瑞良、許健智、簡文郁、蕭輔沛、沈文成、邱聰智、翁樸文、陳鴻銘、楊元森、林敏郎、葉勇凱、楊耀昇、黃瀚緯、蔣佳懋、陳品綺、林延靜、葉韶庭、闕立奇、何郁姍、黃鵬仁、田中鈺（2022）。「臺灣校舍耐震評估與補強計畫」。國家地震工程研究中心報告，NCEE-2022-017，台北。<https://www.ncee.narl.org.tw/accomplishment/technicalreports/page/12149>
- [3] 黃世建、鍾立來、邱世彬、陳信村（2018）。私有建築物耐震補強工作立法之建議。*土木水利學會會刊*，45(1)，8-14。



黃世建 小檔案

臺大土木系畢業（1979），兩年服役期滿後赴美國加州大學柏克萊分校取得土木碩士學位（1982），返國在中興工程顧問社從事鋼筋混凝土結構設計（1982-1984），期間發展出對精進鋼筋混凝土結構設計技術的濃厚興趣，所以返回柏克萊加州大學師事 Jack Moehle 教授，完成實驗與分析研究之博士學位（1989）。1989年起在臺灣科技大學營建系任教，2006年轉任臺大土木系。自2003年在國家地震工程研究中心兼任組長14年，期間主持全國公立高中職以下老舊校舍耐震評估與補強計畫。2017至2021年擔任國震中心主任，持續推動地震工程之學術研究與應用，研究聚焦在鋼筋混凝土建築之耐震設計、評估與補強。