

發行人：張國鎮

本期主編：王仁佐、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>

九十九年六月出版

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

• 特別報導

國道三號基隆汐止瑪陵坑七堵路段橋梁載重試驗 1

• 專題報導

台灣既有校舍耐震補強計畫 4

PISA4SB 校舍耐震能力詳細評估系統之研發與應用 6

• 研究動態

向量式有限元分析方法於鋼筋混凝土結構非線性行為之應用 7

• 研討會

台美大都市巨型災害防治研討會 9

• 中心活動

2010 抗震盃活動報導 10

2010 建築物耐震設計國際訓練班 10

• 勘災報告

2010 年 0304 高雄甲仙地震 11

特別報導

國道三號基隆汐止瑪陵坑七堵路段橋梁載重試驗

一、緣由

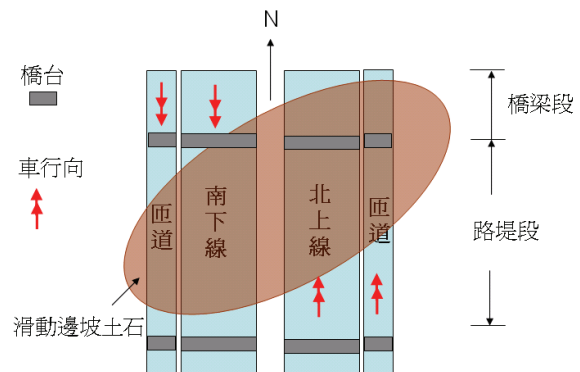
民國九十九年四月二十五日下午 2 時 33 分，國道三號南下 3.25 公里處、靠近瑪陵坑七堵路段，發生山崩意外，造成國道三號雙向車道封閉，坍塌的大量土石掩埋路堤以及部分的橋梁段(圖一)。意外發生後，高速公路局盡速搶修路段，搶修後為確認高架橋修復成效，以及釐清大眾對本路段橋梁結構安全疑慮，於是委託台灣世曦顧問工程公司及國家地震工程研究中心擬定載重試驗計畫。



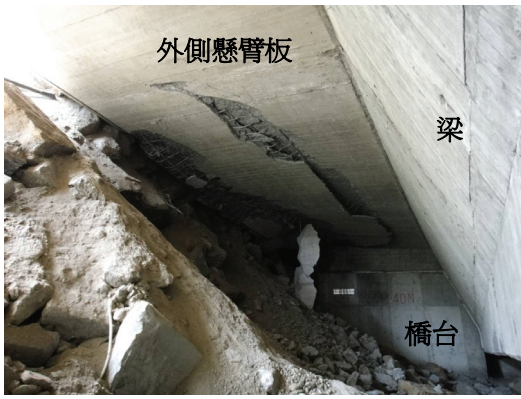
圖一 靠近瑪陵坑七堵路段，山崩空照圖(照片來源：空警隊)

二、橋梁災損情形

邊坡滑動過後，大部分土石掩埋路堤，少部分土石掩覆橋梁段，所以橋梁段的受創程度比原先預期中的程度小，橋梁段受損程度較嚴重的是北向主線道與匝道，如圖二所表示。最為明顯災損的是：北上主線道第一跨箱梁近橋台處之外側懸臂板破損(圖三)，北向匝道橋台處支承位移及損壞(圖四)，以及橋台背牆損壞。



圖二 土石掩覆區域示意



圖三 北向主線道近橋台處



圖四 北向匝道橋台處支承位移及損壞

三、高速公路局搶通作業規劃

高速公路局規劃盡速搶通主線道，於是先搶修損毀的橋台背牆以及箱梁外側懸臂板，圖五與圖六照片是修復中的橋台背牆與箱梁外側懸臂板。至於連接快速道路台 62 線的匝道部分(北向)，待主線道完全通車後，再行修復。



圖五 橋台背牆修復作業中



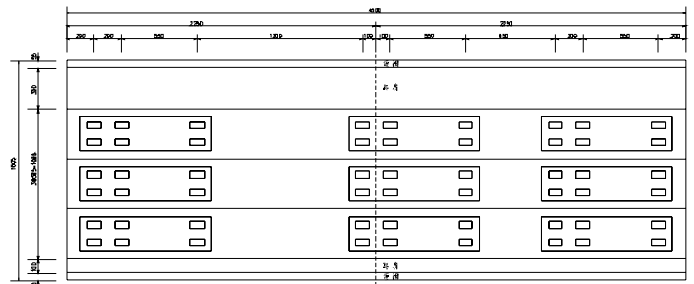
圖六 箱梁外側懸臂板修復作業中

四、載重試驗計畫

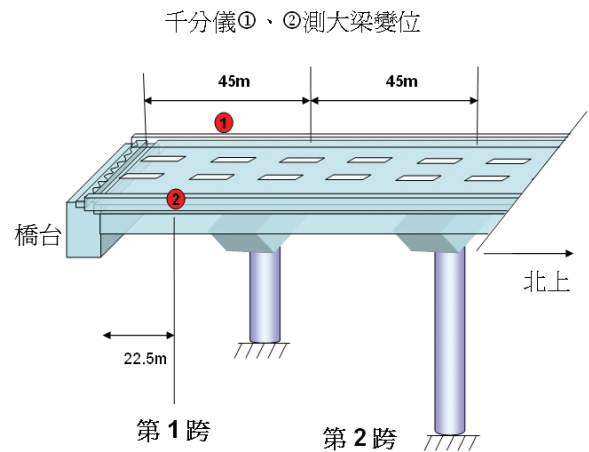
為確認高架橋修復成效，釐清大眾對本路段橋梁結構安全疑慮，台灣世曦顧問工程公司規劃及國震中心協助執行相關載重試驗計畫：5 月 18 日執行南下線車輛載重試驗、5 月 23 日執行北上線車輛載重試驗、5 月 27 日執行北上線及南下線車輛載重試驗以量測最大活載重對橋墩(台)變位之影響。

五、試驗結果重點摘要

根據台灣世曦顧問工程公司所擬之試驗規劃，採用每輛約 26.5 噸的砂石車作為試驗載重，每車道 3 輛，三車道總共 9 輛。砂石車佈設位置與大梁變位監測儀器如圖七與圖八：



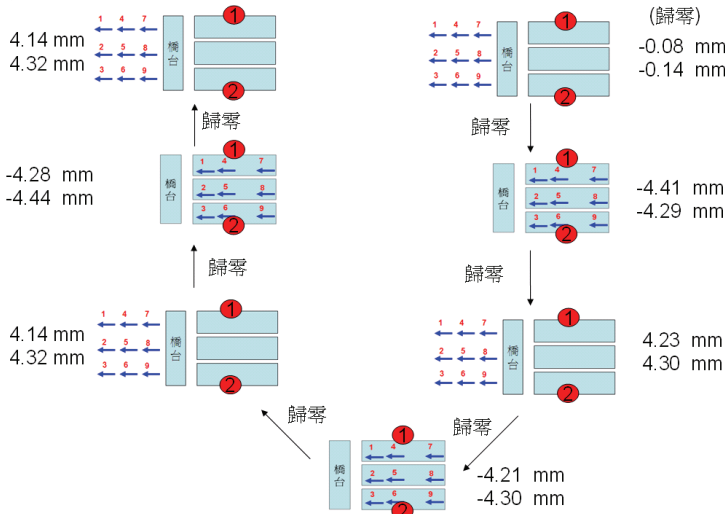
圖七 最大活載重試驗



圖八 監測大梁變位之千分儀

北上線大梁反覆加載與卸載試驗

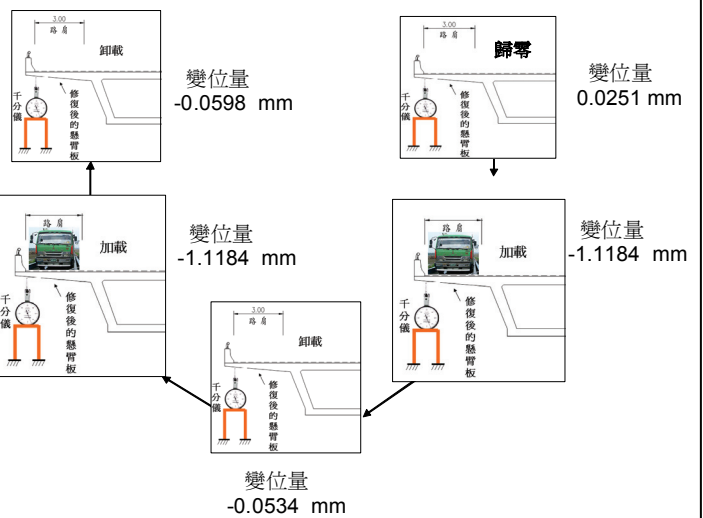
最大活載重下之大梁反覆加載與卸載試驗，試驗過程如圖九示意，圖中數據為大梁中點變位反應，數據顯示大梁近似完全彈性反應。



圖九 反覆加載與卸載過程，千分儀測得的大梁中點變位

北上線箱梁外側懸臂板修復後反覆加載與卸載試驗

為檢驗懸臂板修復成效，載重試驗以一部 26.5 噸重砂石車，反覆加載與卸載於修復區域，如圖十所示，圖中數據為懸臂板變位反應，數據顯示修復區域之結構載重表現近似彈性反應。

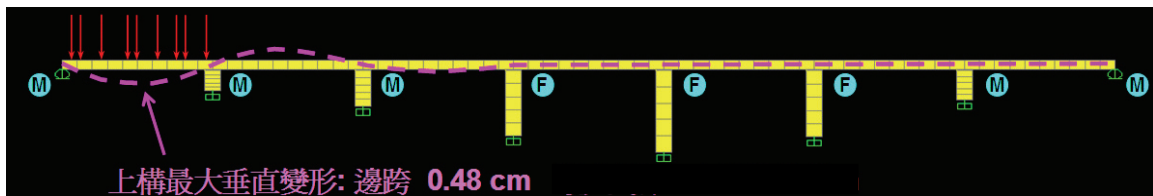


圖十 修復後的外側懸臂板，反覆加載與卸載過程，千分儀測得的變位反應

六、數值模擬分析

北上線大梁加載之模擬

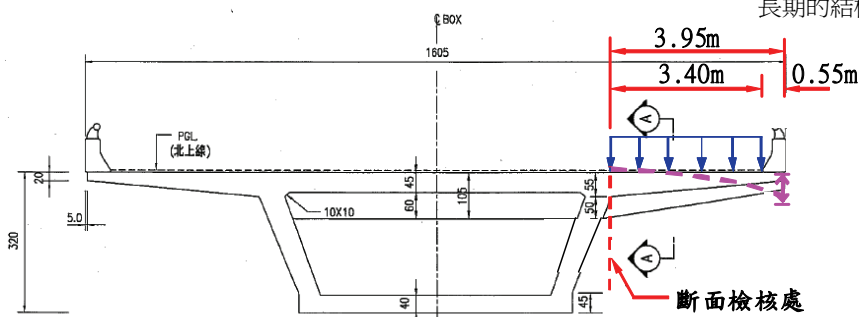
台灣世曦顧問工程公司按原設計數值模型，模擬圖七最大活載重試驗，三車道總共 9 輛，每車道 3 輛，每輛砂石車約 26.5 噸重，得如圖十一之結構反應，其中首跨最大垂直變位約 0.48cm，略大於試驗之 0.43cm。



圖十一 最大活載重之數值分析

北上線箱梁外側懸臂板加載分析

將一部重 26.5 噸重砂石車，轉換為等值均佈載重，並依據原懸臂板結構設計，如圖十二所示，分析得到垂直變位 $\Delta = 1.26$ mm，略大於試驗結果之 1.12 mm（反覆加載與卸載過程）。



圖十二 一部砂石車加載於懸臂板之變位分析
(台灣世曦顧問工程公司)

七. 試驗結論

修復後，大梁與懸臂板的載重試驗，於加載及卸載過程中，橋梁結構均無明顯殘餘變位，變位表現相當接近設計反應，顯示橋梁結構於規劃的活載重作用下，變形均在彈性範圍內。不過，考量長期的結構安全起見，仍建議日後進行小範圍的局部結構監測。

國家地震工程研究中心：
副研究員 李政寬、洪曉慧、劉光晏
專案助理研究員 翁士晟
組長 宋裕祺、主任 張國鎮
台北科技大學：張哲豪教授
台灣世曦公司：戚樹人工程師 吳弘明經理

台灣既有校舍耐震補強計畫

一、前言

地震乃台灣之宿命，大地震必然去而復返。在台灣地震史上，曾發生多次毀滅性大地震。每次大地震後，均可觀察到中小學校舍之震害尤為顯著，雖然校舍結構之設計地震力較一般樓房高出四分之一，但校舍卻是破壞最為嚴重的一群建築物。以民國八十八年九二一集集大地震為例，中部地區近二分之一的校舍倒塌或嚴重受損，中小學遭到損壞者共計 656 所，約佔全國中小學總數的五分之一，災後重建所需費用約為 400 億元，相當於中小學十年內建築相關之經費。所幸九二一集集大地震發生在凌晨，校舍空無一人，否則校舍倒塌所引致之師生傷亡，將不堪設想。

為加速改善現行高中職及國中小校舍耐震能力不足問題，解決地震所造成校舍災損之困境，以期提供師生安全的校園學習環境，並使父母對子女在校安全感到安心，教育部爰於 98 年至 101 年分別推動「加速高中職老舊校舍及相關設備補強整建計畫」及「加速國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」，並爭取特別預算以加速辦理校舍耐震評估、補強及拆除重建事宜。其執行內容包括辦理國中小校舍耐震評估(含初步評估及詳細評估)、補強設計、補強工程、拆除重建工程、建置校舍耐震資料庫、以及改善暨充實教學環境設備等。為期逐步提昇校舍耐震能力，並期有效且系統地執行上述計畫，教育部爰委託財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心(以下簡稱國震中心)建置校舍耐震能力之資料庫，並據以蒐集全國高中職及國中小校舍之初步評估、詳細評估及補強資料，且依耐震能力之急迫性訂定其優先處理順序，其中將藉由初步評估之排序結果做為後續詳細評估之依據，再藉由詳細評估之排序結果做為後續補強之依據。

九二一集集大地震發生至今已滿十年，國震中心已針對校舍建築物之耐震能力問題，提出有效之解決策略；另一方面，為深入瞭解校舍建築物於地震作用下之行爲，亦進行了耐震評估與補強之研究，並發展一套耐震能力詳細評估方法與經濟有效之補強工法，提供工程界選取使用。本文首先說明由歷年來之勘災結果，發現校舍建築物於抵抗地震力普遍存在之問題，接著並提出解決策略。最後，為加速解決校舍建築物之耐震問題，將介紹政府責成教育部推動之「加速高中職及國中小老舊校舍補強整建計畫」，期能於四年篩選出耐震能力確有疑慮之校舍，並給予適當之結構補強，以保障師生之生命安全。

二、校舍結構耐震能力不足之問題

中小學教室多採一排教室相連的方式，在預算逐年編列的情況下，未能作整體規劃，一排教室往往分期建造，而且樓層數目不一，在高低樓層於相接處亦容易引起碰撞及拉扯等破壞情形。學校教室並未設有獨立的管線間，所有排水及給水管線均埋置於柱子內，降低了柱子之有效斷面積，同時，柱子之箍筋間距過大，均導致柱子之耐震能力不足。在垂直走廊方向，教室與教室之間設有隔間牆，而且牆壁完整；但是，在沿走廊方向，設有大量玻

璃窗作採光之用，並無完整的牆壁，此外，柱子下方為窗台所束制，形成短柱效應，使柱子趨向剪力破壞，因此，教室之破壞均發生在平行走廊方向。

1. 校園欠缺整體規劃

中小學校園的整體規劃不完整，常常以拼湊的方式，擴充學校規模，遂帶來耐震不足的後遺症。因為學區人口的成長及教學科目的多元化，造成原有教室不敷使用的窘況，校方遂逐年爭取經費，若預算通過，即在校舍之水平方向或垂直方向分期增建，以比鄰相接或頂樓加蓋的方式，來解決教室不足的問題，此舉嚴重破壞了原來的結構系統，使其耐震能力大幅減弱。

2. 平行走廊方向崩塌

中小學校舍大多依據民國五十五年發佈的標準圖設計，教室呈一長排相連，教室外設置走廊，且許多走廊外側不設柱子。在橫切於走廊的方向，教室與教室之間以牆壁分隔，故牆壁面完整；但是，在縱沿於走廊的方向，則以大量門窗作為通道及採光之用，然而窗台並非完整的牆壁，且窗台這種牆壁係在重力方向不連續。在走廊上不設柱子，雖對學童之活動空間有利，但亦導致校舍贅餘度不足。贅餘度愈低，應力愈無法有效重新分配，韌性亦隨之難以發揮。因此，結構安全餘裕度不夠，校舍傾向於平行走廊方向破壞或崩塌，而未聞於垂直走廊方向崩塌之案例。

3. 兩側開窗形成短柱剪力破壞

絕大多數的中小學校舍為了採光的考量，在縱沿於走廊的方向廣設玻璃窗，因此，柱子下端之左右兩側由鋼筋混凝土造或磚造窗台所束制，而柱子上端之左右兩側則由鋁製或木造窗框所束制。因為窗框之強度及勁度遠不及窗台的強度及勁度，故柱子之有效長度縮短，而形成短柱效應。柱子愈短，承受之剪力愈大。當校舍承受水平側力時，柱子斷面之剪力首先達到其剪力強度，因而產生剪力破壞，並於柱子在縱沿於走廊的方向上，出現 X 字型裂縫。

4. 柱內埋管

中小學校舍並未設有獨立的管線間，所有維生管線包括給水、排水及電力等大多埋置在柱子內，遂使柱子之有效面積大幅降低。中小學校舍柱子之尺寸原本就不大，沿走廊方向之深度常約 30 公分左右，而單是埋設其中之排水管直徑就超過 5 公分，故管線所佔面積不容忽視。因柱子之強度會隨其有效面積之減少而降低，遂使教室之安全堪虞。故校舍應設置獨立的管線間，或以明管布設維生管線，以保持柱子之完整性。

5. 箍筋不足

中小學校舍柱子之箍筋間距往往超過 20 公分，箍筋間距過大容易導致剪力破壞、縱向主筋挫屈破壞及核心混凝土壓碎破壞，這些均為脆性破壞。鋼筋混凝土結構乃由鋼筋及混凝土組成，因鋼筋細長，在承受壓力時，容易挫屈破壞；混凝土則僅具抗壓強度，其抗拉強度只達抗壓強度的十分之一，故混凝土承受張力時，很容易因產生張力裂縫而破壞。而且無論是鋼筋挫屈破壞或混凝土壓碎破壞，均為脆性破壞。因此，鋼筋或混凝土均無法單獨成

為土木結構，兩者必須緊密結合，相輔相成，互補長短，才能以土木結構的形式矗立於大地之上。

6. 立面或平面不規則

規則之結構在地震中之行為較易掌握，地震力在構件間之分布較勻稱，應力不會集中在局部構件。造型奇特而不規則之土木結構，在地震中容易導致應力集中之現象，其結構分析之難度高於規則結構，工程師若無充分經驗，不易充分掌握不規則結構之安全性。因此，建築設計應儘量避免不規則結構，若因基地形狀或造形需求，不得不採用不規則立面或平面時，建築物可由數個規則結構組成，使之看似不規則，實為規則結構之組合，但規則結構之間應有足夠的地震隔離縫，以避免相鄰結構之碰撞或拉扯。

三、校舍耐震能力提昇策略

中小學校舍數量龐大，各級學校約有 3,500 所，而校舍總數則高達 15,000 棟。主管機關必須以經濟有效之手段，訂出輕重緩急之先後順序，全面地逐年提升校舍結構之耐震能力。國震中心與教育部，共同提出校舍結構耐震能力之策略，該策略分為五個階段，校舍耐震能力提昇之完整程序如圖一所示。第一階段為簡易調查，委由校方辦理，每棟校舍之簡易調查約需半天時間。校方將校舍之資料（一樓柱量、一樓牆量及總樓地板面積），經由網路上傳至國震中心之校舍耐震資訊網，國震中心再依據校舍之資料評分，並按評分（即耐震能力）之高低排序，如此則可縮小下一階段工作之規模。第二階段為初步評估，委由專業之工程師辦理，以現地勘查為主，每棟校舍之初步評估以半天為原則。依據簡易調查之統計分析及年度之預算，將有助於縣市政府教育局處之決策，針對簡易調查評分較低之校舍，優先進行初步評估。專業工程師再將評估結果，上傳至校舍結構耐震資訊網，並按其評分排序，如此可再進一步縮小校舍耐震能力提升工作之規模。第三階段為詳細評估，依據初步評估之統計分析及年度之預算，將更有助於縣市政府教育局處之決策，針對初步評估時評分較低之校舍，優先列入詳細評估。經詳細評估後，若校舍結構之耐震能力無虞，則可逕行結案。若其耐震能力不足，且補強不符經濟效益者，則予以拆除重建。若其耐震能力雖不足，但可予以補強者，則進入第四階段之補強設計，補強設計須以經濟有效之方法為原則。同一棟校舍之詳細評估與補強設計，應委由同一專業工程師辦理，如此則責任之歸屬明確。為確保校舍耐震能力提升之品質，第三階段之詳細評估及第四階段之補強設計，需經學者專家之會同審查，至於第五階段之補強施工則需專業工程師監造，以達成預期之補強效果。

四、加速高中職及國中小老舊校舍補強整建計畫

為加速處理校舍耐震能力不足之問題，國震中心於 97 年 8 月彙整多年校舍評估與補強之經驗，研擬「國民中小學校舍耐震問題與對策」，向國科會提出說明。國科會主委並於 97 年 9 月 11 日在科技首長會議中提出報告，會議結論指示「教育部及國科會指定專責聯絡窗口，並提出校舍耐震問題之最佳方案」；97 年 9 月 18 日行政院 3110 次會議，院長指示「老舊校舍潛在的安全問題不容漠視，請曾政務委員志朗協調教育部、國科會等機關會

同災害防救科技中心及地震工程相關科技單位，持續檢視，排定優先順序迅速予以補強」，國科會指定國震中心協助教育部提出老舊校舍耐震能力提昇計畫，爭取行政院特別預算支持。98 年 4 月 10 日立法院立法院三讀通過「振興經濟擴大公共建設特別預算案」，總編列新臺幣 1491 億元，其中「加速高中職及國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」執行期程為 98 年至 101 年，各年度編列經費為 98 年 65 億元、99 年 85 億元、100 年 35 億元、101 年 31 億元，總計四年共需經費 182 億元，並將採特別預算方式辦理。其執行內容包括辦理高中職校舍耐震評估、補強設計、補強工程、拆除重建工程、無障礙校園工程、身心障礙學生教學設施整建、改善體衛教學環境以及改善暨充實實習及科學圖儀等教學環境設備。

教育部「加速高中職及國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」之目標乃針對高中職以下之公立學校推動耐震能力評估與補強工作，篩選出耐震能力不足之校舍，並給予適當之補強，以保障師生之安全。國震中心承接教育部委託成立「加速高中職及國中小老舊校舍補強整建專案辦公室」（以下簡稱專案辦公室），為達成本計畫之預期目標，專案辦公室除辦理專業審查外，亦持續舉辦技術推廣與教育講習，並建置資料庫以蒐集校舍初評、詳評與補強資料，作為後續資料處理與分析。專案辦公室目前已舉辦多場評估與補強之說明會，提供學校總務人員、縣市教育局（處）承辦人員、負責承攬技師或建築師參與受訓。專案辦公室配合教育部之計畫具體工作目標為：

1. 推動評估與補強之專業審查，提昇整體計畫之品質。參照「加速高中職及國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」，四年預期進度如表一及表二所示。
2. 建置校舍耐震評估與補強資料庫，落實建置校舍之耐震能力履歷表。
3. 推廣專業技術與教育講習，提昇計畫執行之成效。

目前已積極展開「加速高中職及國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」，預計 4 年後將可完成約 6,000 棟國中小校舍之初步評估，進而篩選出耐震能力不足，需進行下一階段之詳細評估之校舍約為 3,061 棟，完成耐震能力詳細評估後，確實需進行結構修復補強之校舍估計約為 1,513 棟，近 3,000 所公立學校受惠，且老師學童之生命安全將受到更多保障。

五、結論與展望

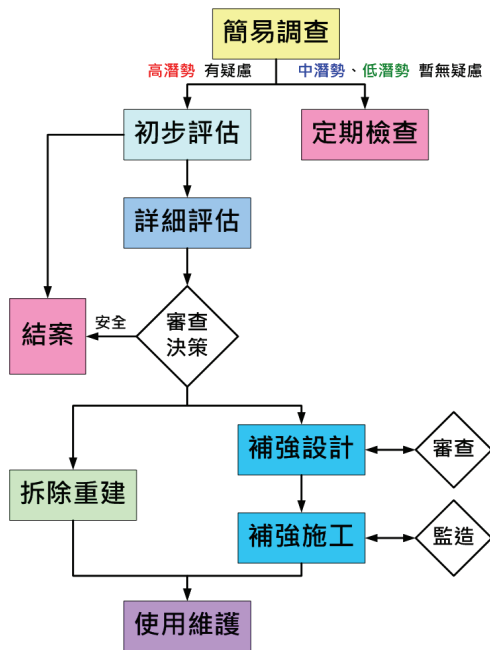
國震中心長期投入校舍耐震評估與補強之研究，研擬校舍耐震能力提昇策略供主管機關參考。策略包含簡易調查、初步評估、詳細評估、補強設計及補強工程等階段工作。今年度，國震中心配合教育部「加速國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」接受教育部委託成立「加速高中職及國中小老舊校舍補強整建專案辦公室」，提供技術諮詢、教育推廣、補強設計之專業審查、資料庫建置等服務，期能協助本計劃依經濟有效之原則順利執行，全面提升校舍耐震能力，保障師生安全、降低地震造成之傷害。

為避免因校舍建築於地震中倒塌，而奪去一整個新世代，致使世代交替出現斷層，校舍結構耐震能力之提升實乃國家之首要課題。國震中心將提供必要之技術支援，讓產官學研等各界共同

努力，以有條理、有系統，且經濟有效之方法，逐年提昇校舍結構之耐震能力，為下一次強烈地震之來臨，預先做好最充足的準備，減輕地震造成之災害，保障師生之安全，俾讓台灣得以永續經營。

PISA4SB 校舍耐震能力 詳細評估系統之研發與應用

根據近年來屢次發生的大地震，顯現出我國許多老舊校舍在結構安全上的相關問題，又因校舍為強震後的緊急避難場所，其結構安全的重要性不言而喻，故國震中心針對老舊校舍其耐震性能，進行相關研究與模擬工作，並透過許多大型結構實驗驗證，綜合上述各項成果提出容量震譜法此一詳細評估方法，該法中靜力側推所求取的容量曲線，乃是基於各構件良好的非線性行為之定義，因此國震中心提供相關輔助工具，輔助使用者結合市面上的商用結構分析軟體，採用容量震譜法進行耐震能力詳評工作，惟操作流程中，使用者需要透過文字界面定義構件斷面，自行彙整考量重力作用下的柱構件軸力，並進行一連串的跨平台軟體操作才能完成詳評工作。由於國震中心所研發之高性能結構非線性分析軟體 PISA3D 已通過中華民國結構技師公會全國聯合會認證，並技術授權多家工程顧問公司運用於多項超高樓建築與重要工程之分析。故為呼應校舍耐震能力詳細評估之需求，國震中心以 PISA3D 作為開發基礎，研發 PISA4SB 校舍耐震能力詳細評估系統，搭配國震中心所推行之詳細評估方法(容量震譜法)操作流程，免費開放業界使用。PISA4SB 除了提供典型校舍樣板模組(圖一)可供使用者快速建構數值模型(圖二)，且自動載入重力分析結果設定各構件的非線性行為，並可針對其側推分析結果與使用者輸入的參數進行性能目標地表加速度的運算工作，並可藉由其分析結果加以檢核並得知耐震能力(圖三)，因此 PISA4SB 透過客製化的軟體開發實現單一平台的操作，希望藉由 PISA4SB 的軟體開發與免費釋出，幫助工程界快速導入 PISA3D/PISA4SB 相關應用技術，並降低非線性分析的技術門檻與軟體成本，提供進行校舍耐震能力詳評工作的執業人員更多結構非線性分析的工具與技術支援。



圖一 校舍耐震能力提昇程序

表一 國中小校舍耐震補強之四年預期進度

年度	98 年度		99 年度		100 年度		101 年度		合計	
	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)
初步評估	6,000	0.36	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6000	0.36
詳細評估	660	2.38	850	3.06	375	1.35	276	0.99	2161	7.78
補強設計	198	0.71	450	1.62	195	0.7	88	0.32	931	3.35
補強工程	171	31.55	420	40.32	187	17.95	153	14.69	931	104.51
合計	-----	35	-----	45	-----	20	-----	16	-----	116

表二 高中職校舍耐震補強之四年預期進度

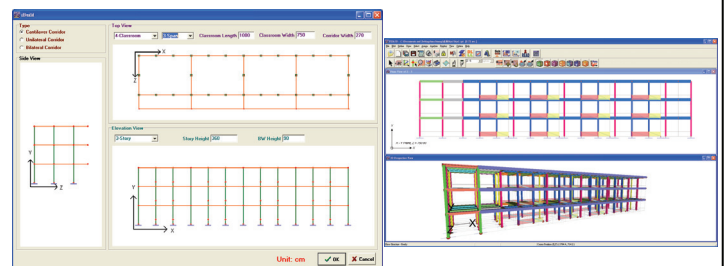
年度	98 年度		99 年度		100 年度		101 年度		合計	
	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)	棟數 (棟)	費用 (億)
初步評估	已完成的								-----	-----
詳細評估	900	3.51	已完成的		已完成的		已完成的		900	3.51
補強設計	252	1	200	0.8	66	0.28	64	0.27	582	2.35
補強工程	252	26.43	200	20.9	66	6.8	64	6.66	582	60.79
合計	-----	30.94	-----	21.7	-----	7.08	-----	6.93	-----	66.65

副研究員 蕭輔沛

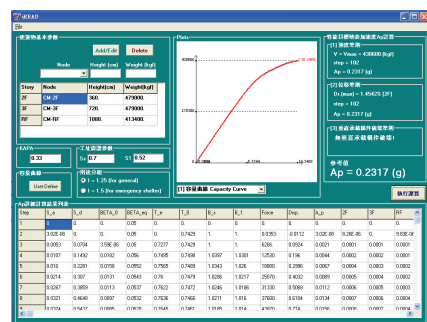
組長 黃世建、鍾立來

研究員 葉勇凱、簡文郁

助理研究員 沈文成、邱聰智、周德光



圖一 PISA4SB 典型校舍樣板模組 圖二 PISA4SB 校舍數值模型



圖三 PISA4SB 性能目標地表加速度(耐震能力)計算模組

理研究員 莊明介

專案助理研究員 游宜哲

向量式有限元分析方法 於鋼筋混凝土結構非線性行為之應用

一、前言

鋼筋混凝土結構物是目前使用最為廣泛的一種結構，近年來，隨著高強度混凝土材料、活性粉混凝土材料等等的廣泛應用，對於鋼筋混凝土結構的安全性、耐久性、和使用性的要求越來越高，若能詳細了解結構物受力之後之行為，便滿足安全又經濟的結構物的需求，而數值模擬分析方法是除了實驗之外，能夠提供預測鋼筋混凝土結構變形破壞之有效方法之一。因此本計畫是採用向量式有限元素法來作為數值分析方法之基本理論，採用之元素為平面固體元，來模擬混凝土材料模型受力之後的行為，以及向量式有限元素法之一維桁架桿件元來模擬鋼筋材料模型受力之後的情形。

本計畫主要是採用向量式有限元素法(vector form intrinsic finite element, VFIFE, V-5)，來模擬鋼筋混凝土結構之非線性行為，因此利用向量式有限元素法之平面固體元，來模擬混凝土受力之後的幾何非線性行為，以及利用向量式有限元素法之一維桁架桿件元來模擬鋼筋材受力之後的情形。結合上述元素即可構成鋼筋混凝土結構之數值模擬分析體系。在材料模型選擇中，混凝土採用非線性彈性模型，以 Darwin 和 Pecknold 之等效應變模型。鋼筋材料模型則採用雙折線彈塑性模型，並且鋼筋混凝土之間是以完全握裹接觸情況來進行模擬分析。為了證明本計畫所開發之鋼筋混凝土分析程式之精確性，分別比較無箍筋之鋼筋混凝土簡支梁以及含箍筋之鋼筋混凝土簡支梁之實驗。透過一系列數值算例和實驗結果比較結果可以得知，VFIFE 方法確實可以有效的模擬鋼筋混凝土結構之非線性行為。

二、平面固體元之 VFIFE 方法基本理論

VFIFE 基本假設

向量式有限元，在選擇時間點的總數和增量，或途徑單元時，作了以下的假設：

1. 在途徑單元內，結構單元的變形很小。內力計算是小變形和大變位問題。
2. 在途徑單元內，結構單元的幾何變化在內力計算中省略。

在選擇空間點的總數和配置，或結構單元的網格時，作了以下的假設：

1. 構單元的變形近似一個均勻變形。
2. 單元內的位移用內插函數作近似計算。
3. 單元網格滿足構件為連續體的物理條件。

向量式有限元考慮一組連續體，它的形狀及運動可以用一組質點的運動軌跡以及在平面上的位置來描述。將時段 t_0 至 t 分割成 N 個適當的離散時段， $t_a \leq t \leq t_b$ 為一途徑單元。考慮一質量 m 為的任意質點的自由體，質點在時間為 t 時的運動方程式可以寫成：

$$m\ddot{\mathbf{d}} = \mathbf{P} + \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i - \sum_{i=1}^n \mathbf{f}_i, t_a \leq t \leq t_b$$

位移向量 \mathbf{d} 為

$$\mathbf{d} = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_a = \begin{Bmatrix} x(t) - x(t_a) \\ y(t) - y(t_a) \end{Bmatrix}$$

\mathbf{x}_a 是質點在 t_a 時的位置向量。取一任意三節點平面固體元，節點編號為(1, 2, 3)。由節點位置向量 $\mathbf{X}_\alpha(t)$ ， $\alpha = 1, 2, 3$ ，求節點變形是兩個步驟：(1)估算在 $t - t_a$ 時段內平面元的剛體平移和轉動。(2)以逆向運動計算變形位移向量。即可得到剛體位移和變形向量。

三、混凝土與鋼筋材料模型

正交異性之混凝土材料模型

Drawin 和 Pecknold 之模型是建立在主軸方向上，並且假設主應力軸與主應變軸相同。根據能量守衡以及令柏松比沒有方向性，可得混凝土材料正向應力-正向應變之增量關係：

$$\Delta \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}$$

$$= \frac{1}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} E_1 & \nu\sqrt{E_1 E_2} & 0 \\ \nu\sqrt{E_1 E_2} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu^2)G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

其中 E_1 、 E_2 和 ν 是應力相依之材料參數， G 為剪力模數， γ_{12} 為工程剪應變(= $\alpha\varepsilon_{12}$)；材料軸與主應力軸(1-2)相同。假設剪切模數 G 沒有方向性，可求得：

$$(1-\nu^2)G = \frac{1}{4}(E_1 + E_2 - 2\nu\sqrt{E_1 E_2})$$

在此假設主應力軸與主應變軸相同。

等效單軸應變分析模型之基本理念

Drawin 和 Pecknold 提出等效單軸應力-應變關係曲線。此觀念是找出等效單軸應變使其符合混凝土之強度準則及符合真實多軸載重下之應力應變關係，因此定義等效單軸應變增量和雙軸應變增量之間的關係公式，將 Poisson's 效應移到應變項。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{1u} \\ d\varepsilon_{2u} \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

其中

$$d\varepsilon_{1u} = \frac{1}{1-\nu^2}(d\varepsilon_1 + \nu\sqrt{E_2/E_1}d\varepsilon_2)$$

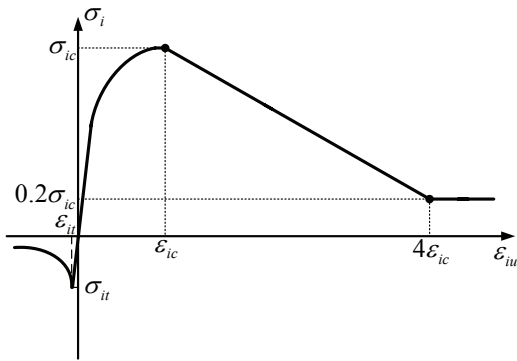
單向加載之等效單軸應力-應變曲線

本文採用 Saenz 提出以下之公式來描述混凝土材料受壓應力作用下之行為(如圖一所示):

$$\sigma_i = \frac{E_0 \varepsilon_{iu}}{1 + \left(\frac{E_0}{E_s} - 2\right) \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^2}$$

$$E_i = d\sigma_i / d\varepsilon_{iu}$$

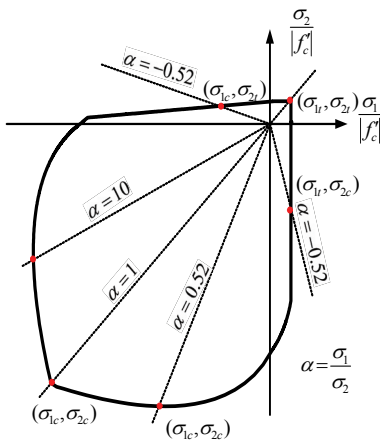
其中 E_0 為初始切線彈性模數, σ_{ic} 為最大壓應力, ε_{ic} 為最大壓應力所對應之壓應變。



圖一 效單軸應力-應變曲線

(a) σ_{ic} 、 σ_{it} 之取值

在求取 σ_{ic} 、 σ_{it} 時是根據雙軸強度包絡綫求得。此雙軸強度包絡綫分為四個區域, 不同之 $\alpha = \sigma_1 / \sigma_2$ 值則對應出不同之 σ_{ic} 、 σ_{it} ($i=1, 2$), 如圖二 用由 Kupfer 和 Gerstle 所提出近似雙軸強度包絡綫之公式。



圖二 雙軸強度包絡綫

壓-壓區之公式:

$$\sigma_{2c} = \frac{(1+3.65\alpha)}{(1+\alpha)^2} f'_c, \quad \sigma_{1c} = \alpha \sigma_{2c}$$

壓-拉區之公式

$$\sigma_{1t} = (1-0.8 \frac{\sigma_2}{f'_c}) f'_t, \quad \sigma_{2c} = \frac{(1+3.28\alpha)}{(1+\alpha)^2} f'_c$$

拉-拉區之公式

$$\sigma_{1t} = f'_t, \quad \sigma_{2t} = f'_t$$

(b) ε_{ic} 之取值

$$\text{當 } |\sigma_{ic}| \geq |f'_c| \quad \varepsilon_{ic} = \varepsilon_p \left[3 \left(\frac{\sigma_{ic}}{f'_c} \right) - 2 \right]$$

$$\text{當 } |\sigma_{ic}| < |f'_c| \quad \varepsilon_{ic} = \varepsilon_{cu} \left(-1.6 \left(\frac{\sigma_{ic}}{f'_c} \right)^3 \right) + \varepsilon_{cu} \left(2.25 \left(\frac{\sigma_{ic}}{f'_c} \right)^2 \right) + \varepsilon_{cu} \left(0.35 \left(\frac{\sigma_{ic}}{f'_c} \right) \right)$$

其中 ε_{cu} 真實單軸曲線下峰值應力所對應之應變。

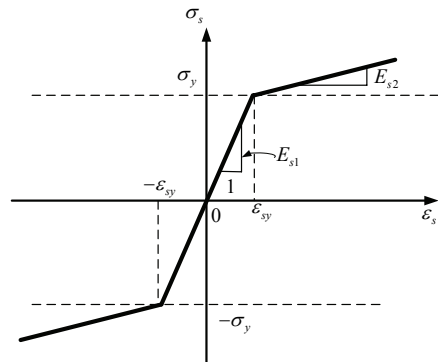
(c) 柏松比 ν 之取值, $\nu = 0.2$ 適用於壓-壓區及拉-拉區, 而

$$\nu = 0.2 + 0.6 \left(\frac{\sigma_2}{f'_c} \right)^4 + 0.4 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1t}} \right)^4$$

$$\nu \leq 0.99$$

則適用於單軸壓力及拉-壓區。

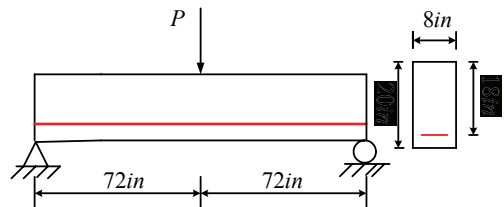
本計畫採用一維桁架單元來模擬鋼筋的受力行為, 一維桁架單元指的是只能承受軸力, 而不能承受彎距及剪力之桿件。鋼筋混凝土之握裹滑移效應採用完全握裹的方式, 將其反應於鋼筋之應力-應變關係中呈現, 本文採用以下公式之應力-應變關係來描述鋼筋受完全握裹於單向加載下之行為, 此模型為模擬握裹滑移之線彈性及線性應變軟化之雙折線模型, 如圖三所示。



圖三 鋼筋之應力-應變關係

四、數值分析算例

本計畫比較兩題分析算例, 首先比較 VFIFE 與 Burns 和 Siess 之實驗結果以及 Barzegar 和 Schnobrich 數值模擬結果之力與位移曲線比較結果如圖四所示, 可以發現 VFIFE 分析結果與文獻及實驗接近。



台美大都市 巨型災害防治研討會

「台美大都市巨型災害防治研討會」(英文名稱: US-Taiwan Workshop on the Advancement of Societal Responses to Mega-Disasters Afflicting Mega-Cities)於五月六日及七日兩天假國家實驗研究院地震工程研究中心及國立台灣大學土木新館舉行, 國科會主任委員李羅權博士蒞臨開幕式致辭; 本研討會係由台美雙方國科會聯合補助, 委由國立台灣大學土木工程學系、國家災害防救科技中心、國家颱風洪水研究中心、國家地震工程研究中心與台灣災害管理學會共同主辦。基於近年來的天然災害對於人民生命財產以及經濟造成巨大的衝擊, 諸如民國 88 年的集集地震、民國 94 年的卡妮娜颶風及民國 98 年的莫拉克颱風, 本次研討會針對這類大都市巨型災害的防治, 考量緊急災害的災時應變、災後恢復與重建等方面, 研訂當前挑戰的研發課題與對應之研究方向。本次研討會邀請在緊急應變、社會經濟、土地使用、自然災害防治(包括颱風、洪水、土石流及地震等)、災後重建、資訊管理等方面資深專家學者參與, 期望透過跨領域的合作, 共同廣泛地探討這些議題以及因應對策。會議首先安排美國加州大學聖塔芭芭拉分校 Michael F. Goodchild 教授、美國聯邦緊急應變總署 William L. Carwile III 先生、國立中央大學黃鏐教授以及公共工程委員會副主任委員陳振川博士等進行四場講座演講, 俟後依據: (1) 事件預報及社經衝擊、(2) 防災科技研發、(3) 災情評估、(4) 災後應變及重建等 4 個工作分組進行分組研討, 本次會議共邀請 21 位美國資深專家學者、兩位國際觀察員(1 位日本、1 位香港)以及數十位國內大學院校資深教授、政府機關主管人員等產官學界人士, 共約 110 位代表與會, 本會議最後彙總各工作分組於兩天議程內研討成果, 對未來短期及長期防災研究領域需求規劃及政府政策方針提出書面建言。

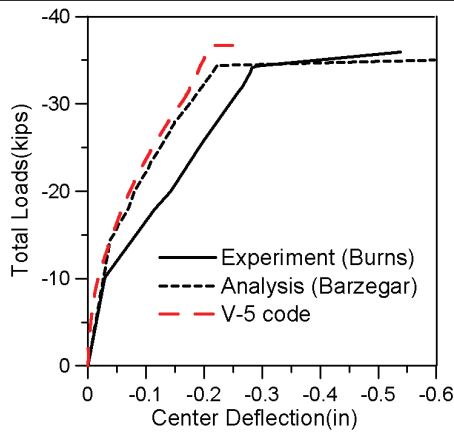
研討會論文集及相關成果請詳:

<http://conf.ncree.org.tw/IndexEng.aspx?n=I09905060>



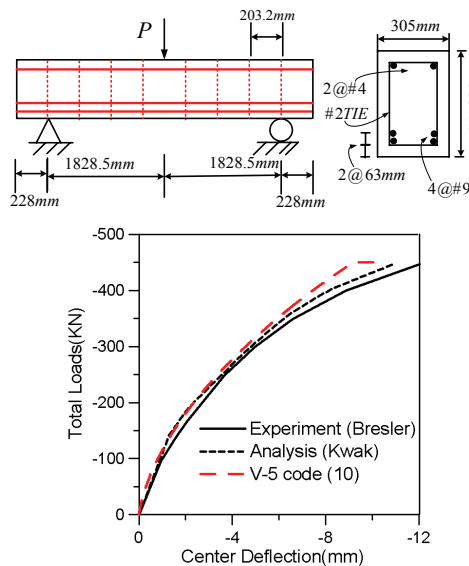
國科會主任委員李羅權博士蒞臨「台美大都市巨型災害防治研討會」開幕式致辭

副研究員 吳俊霖



圖四 無箍筋鋼筋混凝土簡支梁力與位移比較圖

算例二為 VFIFE 與 Bresler 和 Scordelis 實驗以及 Kwak 和 Filippou 數值模擬結果之力與位移曲線比較結果如圖五所示。



圖五 有箍筋鋼筋混凝土簡支梁力與位移比較圖

四、結語

本計畫中對於鋼筋混凝土簡支梁模擬中, 在混凝土簡支梁未開裂前有不錯的模擬結果, 但是在微開裂之後, 結果與實驗之結果有所差距, 會造成這種狀況可能除了因為用三節點之固體元來模擬之外, 也可能是因為在鋼筋材料模型與混凝土材料模型之間的握裹滑移效應, 是以完全握裹來模擬, 當混凝土開裂之後, 鋼筋材料模型不會因為混凝土開裂而減低鋼筋對簡支梁之作用力, 因此造成結構強度比實驗來的高。由數值算例結果可以得知, 本計畫已經成功將 VFIFE 方法的固體元中, 加入二維混凝土模型並比較文獻實驗結果, 均發現 VFIFE 方法能有效模擬鋼筋混凝土結構非線性變形行為。

副研究員 王仁佐
國立中央大學教授 王仲宇

2010 抗震盃活動報導

為增進學生地震工程之防災知識，藉由競賽活動及互動式參與增進結構抗震觀念，國家地震工程研究中心自 2001 年起舉辦「抗震盃—地震工程模型製作校際競賽」，至本年度為止，已歷經九屆競賽，參加學生人數已超過 3000 多人，參賽國際隊伍包含英國、美國、日本、韓國、紐西蘭、香港、菲律賓、新加坡、越南、印尼、馬來西亞等國，為世界上規模最大之抗震競賽之一。

今年比賽延續往年之規模，分成高中、大專及研究生三組，亦邀請國內外學生隊伍參賽。活動內容則朝創意提升與工程應用結合邁進，高中、大專之參賽隊伍需在活動期間製作抗震結構模型，通過相關耐震測試。另在研究生隊伍部分，舉辦研究生國際研討會，每隊參賽隊伍須簡報該隊之設計原理與隔減震方式，並經由與裁判及國內外參賽隊伍之討論，以增加競賽之教育意義。

此外，配合地震週活動，本中心於 9 月 20 日及 21 日兩天舉辦「安全耐震的家—地震工程防災科普教育演講及體驗」活動，開放有興趣之社會大眾參與，內容包含地震防災教育之宣導以及地震工程研發成果之展示等，以落實地震教育之普及。

2010 抗震盃預計將於 9 月 24~26 日假國家地震工程研究中心舉辦（活動網址：<http://w3.ncree.org/ideers/2010/>），24 日舉行研究生組之研討會，各隊簡報其設計與構想並討論、溝通規則，25 日為模型製作及審查日，26 日則為模型測試、比賽日。此外對於國外參賽之學生及指導老師，於 9 月 23 日舉辦地震教育之旅，參觀 921 地震教育園區、石崗壩、集集震害景點等，以瞭解台灣的地震歷史及背景。期望透過這些活動的舉辦，能讓國內青年學子有更多國際交流機會，增進地震工程之相關知識，同時對耐結構震設計產生興趣，進而於未來投入地震工程相關領域貢獻一己之力。

2010 建築物耐震設計 國際訓練班(ITP2010)

台灣與其他位於環太平洋地震帶或歐亞地震帶上的亞太地區國家一樣隨時遭受地震的威脅，強烈地震的襲擊常造成重大的傷亡，尤其在落後地區或開發中國家，更因建築物耐震設計不良與施工品質低劣，使得建築物耐震能力不足，因而加劇損失與傷亡程度。世界各地近二十年來發生許多災情慘重的大地震，例如 1984 年墨西哥地震、1990 年伊朗地震、1994 年美國洛杉磯 Northridge 地震、1995 年日本阪神地震、1999 年土耳其伊茲米特地震與我國集集地震、2001 年印度古吉拉特邦地震、2003 年伊朗巴姆大地震、2004 年摩洛哥胡塞馬地震與印尼蘇門達臘地震（造成南亞大海嘯）、2005 年印尼蘇門達臘地震與印度-巴基斯坦邊界之喀什米爾地震、2006 年印尼日惹地震、2007 秘魯地震、2008 年四川汶川地震等，均造成重大財產損失及人員傷亡。

根據災害調查資料分析的結果，可以發現在地震中的人員傷亡，90%以上是因為建築物耐震能力不足倒塌而引起。因此提升建築物之耐震能力，使其在強烈地震來臨時所受損傷能獲得一定程度的控制，則可以有效的減低地震中人員的傷亡數目，減少地震衝擊。為協助位於環太平洋地震帶或歐亞地震帶上隨時遭受地震威脅的亞太地區開發中國家，減少因地震所可能引致的災害，許多國際性地震工程協會組織均曾多次提議，由耐震設計等相關地震工程研究與實務均較為優良先進的國家，如美、日、紐、加和我國等，以短期研討會課程培訓開發中國家相關之政府官員與工程師。以國際合作之模式協訓開發中國家的相關工程人員與主管政府官員，提升各國之結構物耐震設計水準，進而提升其建築物耐震能力，降低地震災害。

為此，在行政院國家科學委員會國際合作處之經費補助下，國家地震工程研究中心自 2002 年開始舉辦「建築物耐震設計國際訓練班」，邀集東南亞及中南美國家之政府官員、工程師及研究人員，展開為期一週的訓練課程以及經驗分享，藉以宣導及推廣我國在耐震設計上的研究成果及工程實務經驗，提昇其耐震設計能力。截至目前已舉辦八屆，計有來自十九個不同國家，共二百七十四位學員參與。

本年度規劃之課程，預定於民國九十九年十一月八日至十一月十三日，在國家地震工程研究中心舉辦。會中預計邀請十二國共三十位具耐震設計相關背景之學者專家進行短期研習活動。更多詳細訊息，請見本研討會網站：<http://w3.ncree.org.tw/ITP/2010/>。

專案副研究員 許尚逸



IDEERS 2010 活動網頁截圖，顯示了活動的註冊、論壇、模型照片、活動照片和一日遊照片等內容。

線上註冊
台灣隊伍專用

Register
Foreign Teams

論壇 Forum
有任何問題，來這裡就對了！
Any questions? Here are the answers!

誰會是最後的勝出者呢？
Who will be the winners?

模型照片 Models
活動照片 Activity
一日遊照片 Day Trip

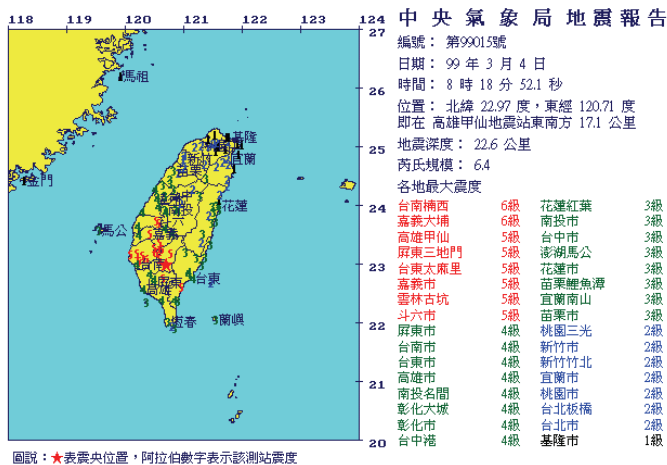
活動網址：<http://w3.ncree.org/ideers/2010/>

助理研究員 邱世彬

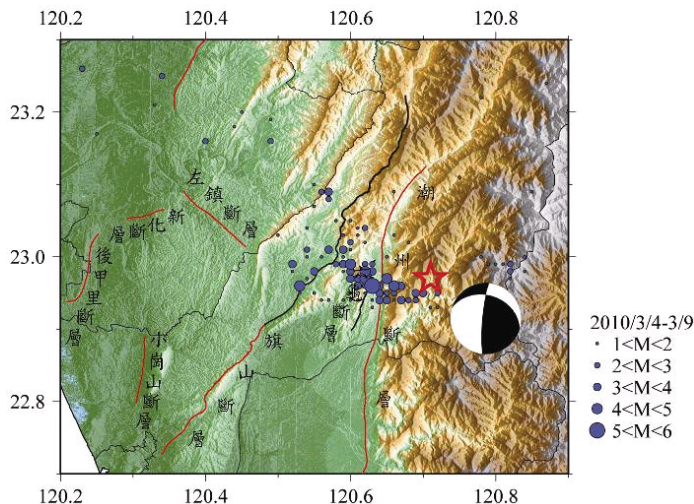
一、概述

台灣時間 2010 年 3 月 4 日 8 時 18 分 (世界時間 0 時 18 分) 於高雄甲仙地震站東偏南方 17.0 公里發生一起芮氏規模 $M_L 6.4$ 之地震；根據中央氣象局修訂後所公佈之震源參數顯示，震央位置在北緯 22.97 度、東經 120.71 度(圖一)，震源深度則由極淺的 5 公里大幅修正為 22.64 公里。此次地震為臺灣西南地區近年來規模較大的地震，震撼整個台灣，各地都感受到明顯搖晃，全台最大震度發生在嘉義縣大埔及台南縣楠西地區，震度皆達到六級。

主震發生後餘震頻仍，氣象局於兩天內所觀測到之餘震數即有 300 多起，最大之餘震為主震後 8 小時所發生之 $M_L 5.7$ ，位於主震西邊 9 公里處。圖二為 5 天內之餘震活動分佈，餘震主要發生在主震之西側，以 $M_L 5.7$ 之餘震為中心，大致呈西北-東南方向分佈。



圖一 中央氣象局 0304 高雄甲仙地震報告



圖二 0304 高雄地震之餘震分佈，紅色星號為主震位置，並繪上氣象局震源機制解

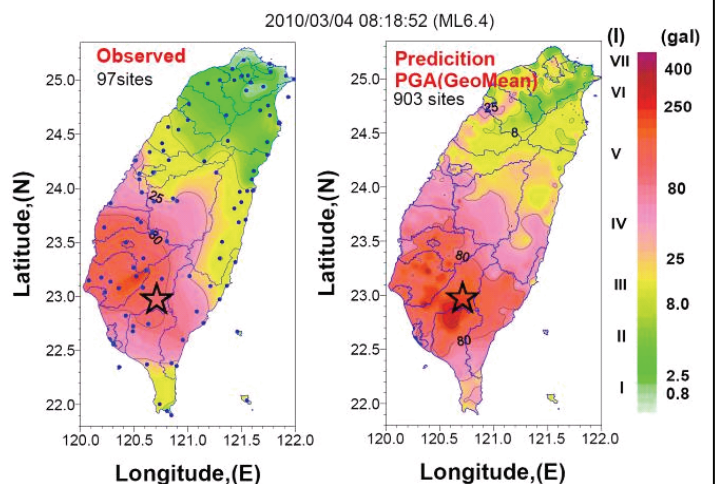
高雄甲仙地震之震源破裂面型態可由震源機制解(圖二)及餘震在深度上之空間分佈推測，其屬於一呈西北-東南走向、傾向東北方向之低角度逆衝斷層，帶有部分左移分量。根據國震中心在此區域之微震監測結果，此震源破裂面在較淺的餘震位置是較為脆弱的，平常即有微震活動，而較深的主震位置可能較為強韌，

可累積較多應力，造成此次高雄甲仙地震之發生。震央附近地區有數條活動斷層存在(圖二)，與位於震央西側之潮州斷層，更只相距 8 公里；但由於破裂面特性與目前地表已知活動斷層的特性皆不符合，且其震源深度較深，也沒有觀測到斷層出露之地表破裂現象，一般認為此次地震是由地殼內未知之盲斷層活動所造成。

二、強地動與地震動分析

0304 高雄甲仙地震時，氣象局全台即時站之最大地表加速度 (PGA)分佈如圖三所示，位於台南縣的楠西地區的 CHN1 測站(震央距 30.84 公里)記錄到 310gal 的全台最大地表震動，而嘉義縣大埔地區的 WTP 測站(震央距 32 公里)記錄到 280 gal 的地表震動。此外，新化地區的 CHN3 測站(震央距 38.07 公里)則記錄 252gal，位於地震震央位置的甲仙鄉的 SGS 測站(震央距 18 公里)的最大地表加速度 (PGA) 為 111gal，另外嘉義市 CHY 測站也量測到約 242gal 的 PGA 值；震度均達到五級(80gal)。經由反應譜分析，CHN1、CHY 及 CHN3 測站兩水平向的反應譜值，在結構週期 0.1 秒及 1 秒附近均大於或接近設計反應譜，這意味著中低層樓的房子可能會受到輕微或中度損害。此次地震之強地動也在台南新化一帶農田產生多處土壤液化之噴砂現象，但所幸無造成建物因液化受損之情形。

針對台灣各地所造成之地震動分佈，經由震源相依的地震動衰減律結合場址修正係數的混合地震動估算模型，可精細顯現各地區地震動之差異變化。圖三為氣象局 97 個即時站實際觀測之震動分佈圖與配合場址修正係數所精細預估(903 個站)之地震動分佈圖的比較。由預估地震動分佈圖，本中心震後勘災之各校舍、建物所受到的地震動大小也可經由內插推估，作為後續耐震能力評估之參考。



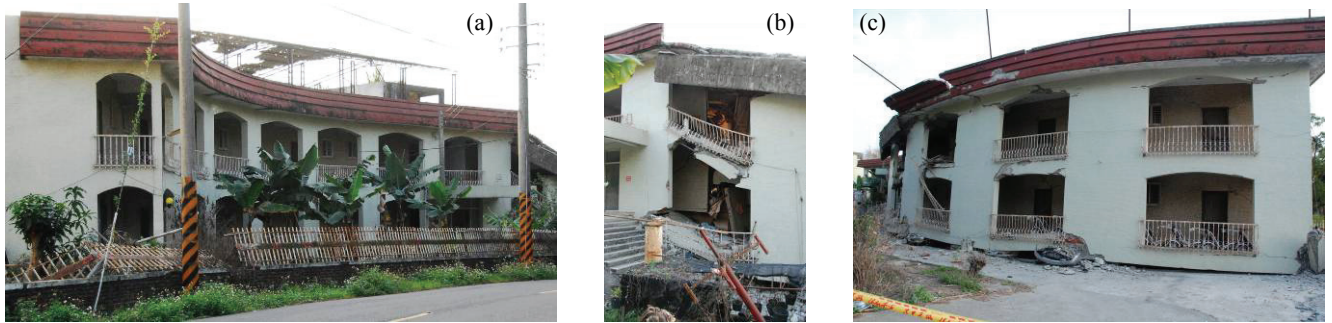
圖三 0304 高雄甲仙地震氣象局 97 個即時站實際觀測(左圖)與配合場址修正係數所精細預估(右圖)之地震動分佈圖的比較

三、建物震害調查

高雄甲仙地震導致南台灣的嘉義、台南、高雄等縣市部分區域建物受損。本次勘查非校舍建築震害地點共計 15 處，包含

民宅、寺廟、警局及鄉鎮公所等，除台南新化球場旁三層樓建物與內門紫竹寺活動中心兩棟建物發生嚴重倒塌情形外，其他建物受震損害大多集中於非結構磚牆，並未對主要結構造成嚴重破壞。

如圖四所示，台南新化球場旁之建物為一兩層樓構架與三層樓構架相搭接之結構，且三層樓構架之一樓作為停車場用途使用。如圖四(c)所示，三層樓構架的一樓停車場於地震時倒塌，研判係因一樓為軟弱層，而無法承受地震力及樓層重量共同作用之效應所致。圖四(b)則展示兩層樓及三層樓構架連接處因三層構架之一樓受震倒塌而造成剪力破壞。



圖四 台南新化球場旁之建物：(a) 兩層樓構架，(b) 剪力破壞之連接處，(c) 一樓停車場倒塌之三層樓構架



圖五 內門紫竹寺活動中心：(a) 建物整體受損狀況，(b) 一樓側視照，(c) 建物一樓倒塌狀況



圖六 內門紫竹寺活動中心一樓柱構件壓碎破壞情形

四、校舍震害調查

高雄甲仙地震發生後，國震中心協助勘災校舍共計有 10 所國中小學及高中職，各校受震程度依最大地表加速度大小排序如表一。本次地震未有校舍發生倒塌，大部分校舍均為設備、非結構體或伸縮縫之破損，僅有少部分校舍有結構性之損傷。其中以玉井國中為本次受震破壞最嚴重之學校，而相鄰 1 公里之玉井工商，其受損情況實屬相當輕微。

玉井國中現有「忠孝樓」、「仁愛樓」、「信義樓」、「和平樓」、「文化樓」、「專科教學大樓」及「活動中心」等七棟校舍。在本次地震後，除「活動中心」僅非結構性之天花板輕鋼架擠壓破壞，以及「專科教學大樓」一樓廊外磚牆有明顯裂縫外，

內門紫竹寺活動中心為三層樓 RC 建築，其一樓部分無結構或非結構牆，而僅依靠 12 根柱承受上層樓載重。此建築的一樓部份於餘震時倒塌，建物整體受損狀況如圖五(a)所示。圖五(b)為該建物一樓側視照，照片中所示之 6 根柱未發現明顯破壞，圖五(c)為該建物另一側倒塌狀況，而圖六則為一樓柱構件壓碎破壞情形，可依此研判部分一樓柱構件強度不足為其破壞主因。

其餘校舍均產生明顯之結構性損壞，圖七為其典型破壞狀況。

表一 0304 高雄甲仙地震勘災校舍受震程度

編號	縣市	校名	Max. PGA(gal)	震度(級)
1	高雄縣	龍肚國中	293.76	6
2	高雄縣	龍肚國小	295.33	6
3	高雄縣	廣興國小	277.50	6
4	高雄縣	美濃國小	297.14	6
5	高雄縣	旗美高中	187.31	5
6	高雄縣	甲仙國小	199.83	5
7	高雄縣	六龜國小	214.01	5
8	台南縣	玉井國中	182.45	5
9	台南縣	玉井國小	164.00	5
10	台南縣	玉井工商	171.09	5

玉井工商現有十六棟校舍可分為四類，分別為：(a)已完成補強工程、(b)詳細評估後耐震能力足夠(CDR>1)、(c)詳細評估後耐震能力不足(CDR<1)、(d)補強工程施作中。各類校舍之震後狀況分述如下(見圖八)：

- (a) 已完成補強工程：「商科大樓」、「圖書館」及「學生活動中心」已完成補強工程，本次震後僅輕微或無損傷。
- (b) 詳細評估後耐震能力足夠(CDR>1)：「行政大樓」及「教學大樓」於本次地震後，僅兩棟間連接之空廊底層柱頂磁磚及保護層部份掉落。
- (c) 詳細評估後耐震能力不足(CDR<1)：「科學館」、「電機工場」、「電機科工場」、「食品工場」、「音樂教室」、「普通教室」、「餐廳及學生宿舍」及「電子工廠」均屬之。其中以「科學館」較為嚴重，其一樓磚牆破裂嚴重，且一樓柱有斜裂縫之結構性損傷。其餘校舍則無明顯之結構性損傷。
- (d) 補強工程施作中：「化工科工場」、「莒光樓」、「餐廳及學生宿舍」及「電子工場」屬之。其中「化工科工場」有磚牆之裂縫產生。「莒光樓」於樓梯間沿走廊方向有一水平裂縫。「餐廳及學生宿舍」則未發現結構性損傷。「電子工場」樓梯間有數處水平裂縫，部份沿走廊方向之磚翼牆與既有柱接合處開裂。

由玉井國中與玉井工商之勘災結果可知，經初步評估或詳細評估判定校舍有安全疑慮，其須補強卻尚未能進行補強程序之玉井國中校舍，經歷 0304 甲仙地震，確有多處柱體產生結構性損壞，影響結構整體耐震能力。而玉井工商部分已完成補強之校舍，在 0304 甲仙地震中皆無產生結構性破壞，明顯達到校舍補強目的。台灣未來面臨之劇災型地震將發生於何時何地，均屬未知，也無從推測。在與時間競賽的壓力下，儘速地完成全國校舍耐震能力提昇，應是所有人殷殷期盼之願景。



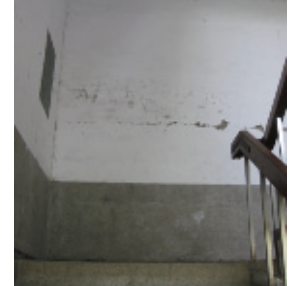
商科大樓



教學大樓



科學館



莒光樓

圖八 玉井工商震後災損照片

五、橋梁震害調查

甲仙地震後，高美大橋於高雄縣美濃端上橋引道處，下陷約 15 公分左右，且橋台翼牆護欄出現裂痕。此外，推估整體橋梁沿橋軸向運動，造成伸縮縫距離增大、欄杆毀損，並使橋墩產生撓曲裂縫。(圖九) 田寮三號高架橋疑受龍船斷層錯動影響，產生 A1 橋台與上部結構之擠壓碰撞與支承滑動變形(圖十)，為確認整體橋梁變位機制，建議以 GPS 定位監測方式進行大地與結構體等之變位監測，以利釐清橋梁變形原因與擬定後續復原計畫。國道關廟休息站之人行跨越鋼橋兩端支承均發生滑動變形現象，經勘查結果發現上部結構與左右兩端橋台業已擠壓碰撞貼合(圖十一)，評估此橋應受地殼變動影響而縮短橋台間距，建議監測大地變形並切除部分上部結構以利恢復通行。



忠孝樓



仁愛樓



信義樓



和平樓

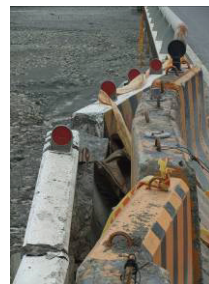


文化樓



專科教學大樓

圖七 玉井國中震後災損照片



圖九 高美大橋引道輕微下陷、伸縮縫距離增大、橋台翼牆護欄開裂、欄杆毀損、橋墩產生撓曲裂縫等震災



圖十 田寮三號橋北端橋面與橋台碰撞與盤式支承異常滑移



圖十一 關廟休息站人行跨越鋼橋引橋伸縮縫處出現損傷，固定端伸縮縫擠壓變形

六、非結構物震害調查

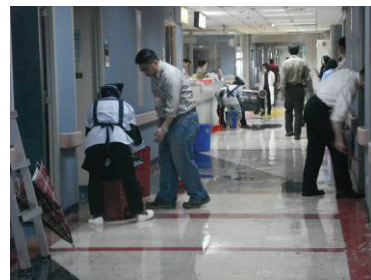
針對非結構物之震害，此次共勘查 8 間醫院、11 間學校與 2 間大學圖書館。上述三類設施中均有多起輕鋼架天花板系統破壞的案例，包括有 5 間醫院、7 間學校及 1 間圖書館。天花板骨架破壞主要位於天花板系統與結構體相接處，骨架與固定於結構體之收邊材脫離，導致骨架與面板掉落，次要破壞則發生於中間區域相互擠壓造成骨架面外隆起。特別是學校活動中心由於挑高、面積廣大，其天花板系統修復問題最為複雜。此次勘查的 11 間學校當中，有 4 間學校活動中心天花板系統發生破壞(圖十二)。

除了天花板系統之外，其他較為嚴重之非結構損害，包括 4 間醫院的機電系統管線破裂，造成醫療使用的不便；其中 2 間醫院更因消防撒水管破裂而嚴重淹水，圖十三所示即為地震後院方人員忙於清理淹水之景象。另有 2 間醫院電梯無法使用，其中一家起因於配重塊導滑器脫落，另一家則是消防水管斷裂漏水淹水以及機房內控制面板短路所致。

此次勘查之大學圖書館中，裝設橫向連桿相互連結之書架均未傾倒，而僅有一靠牆放置無橫向連桿之書架發生傾倒。圖書館內之主要震害為書籍與書架隔板掉落以及書架滑移。由現場觀察到之滑移痕跡，可知書架最大滑移量甚至達 60 公分(圖十四)。學校之非結構震害裡顯著影響學校正常教學功能的損壞，除前述之活動中心大規模輕鋼架天花板破壞外，尚有實驗用化學藥劑外洩以及水塔與管線破壞。龍肚國中行政教學大樓 3 樓之理化教室，由於化學藥品櫃受面外作用力而門扇開啓，造成大量化學實驗藥品掉落、有毒氣體外洩，當天下午學校因而被迫停課(圖十五)。此外，11 所學校中有 4 所學校的水塔受損，主要原因為水塔基座處整體強度不足，包括水塔基腳錨定處破壞、基腳桿件挫屈與箍圈變形(圖十六)，因而造成水塔之傾斜與傾倒，以及連接管線斷裂漏水等破壞。



圖十二 學校禮堂輕鋼架天花板骨架與面板掉落



圖十三 工作人員忙於清理消防管線斷裂造成之淹水(院方提供)



圖十四 書架未傾倒但於地面留有明顯滑移痕跡(館方提供)



圖十五 學校理化教室之化學藥品掉落(校方提供)



圖十六 學校水塔基腳破壞造成傾斜

研究員 柴駿甫、簡文郁
副研究員 林克強、郭耕杖、洪曉慧、張道明、蕭輔沛
專案副研究員 林哲民、劉光晏
助理研究員 張毓文、林凡茹
專案助理研究員 翁樸文
研究助理 楊耀昇、陳政宇