

發行人：蔡克銓

本期主編：吳俊霖

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.ncee.org.tw>

九十五年三月出版

八十一年三月創刊·季刊

行政院新聞局局版臺誌第 10286 號

## 目錄

### • 專題報導

臺灣與加拿大跨國橋柱實驗圓滿完成 1

### • 研究動態

地震前兆監測（土壤氣體調查）（下） 3

消防廳舍耐震評估與補強研究 5

### • 實驗室動態

實尺寸兩層樓鋼板剪力牆子結構

擬動態試驗 7

### • 出國考察報告

E-Defense 實尺六層樓 RC 集合式住宅

動態崩塌實驗 9

### • 中心活動

Peter Fajfar 教授論其所發展的建築結構耐震

評估方法 10

### • 研討會預告

## 專題報導

# 臺灣與加拿大跨國橋柱實驗圓滿完成

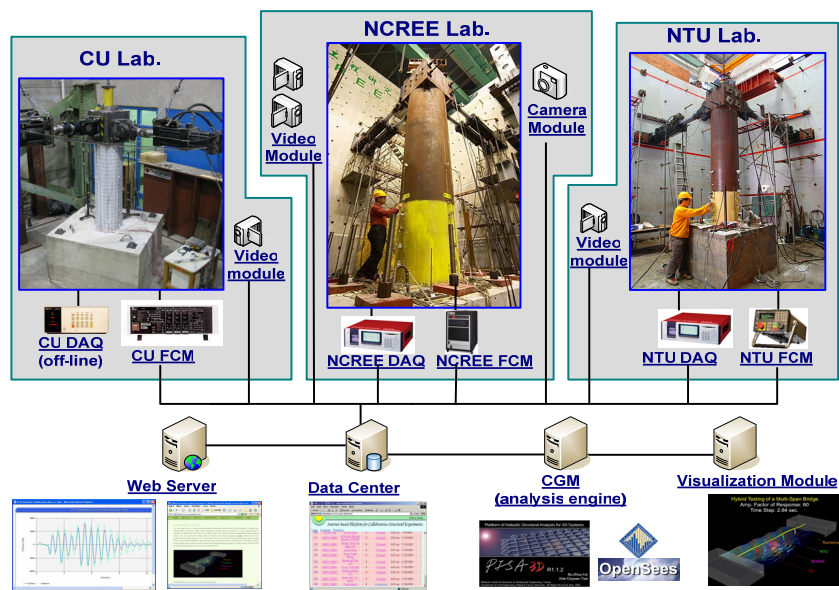
## 一、前言

國家地震工程研究中心(簡稱 NCEE)於 2006 年 3 月，與國立臺灣大學(簡稱 NTU)和加拿大 Carleton 大學(簡稱 CU)成功地完成全世界首次跨國合作式的大尺度雙鋼管混凝土橋柱實驗。本研究採用本中心發展的 ISEE (Internet-based Simulation for Earthquake Engineering)網路實驗系統，並協助加拿大 CU 實驗室建置 ISEE 系統的設備控制模組，提升該實驗室的網路實驗能力。

本實驗採用擬動態實驗技術，模擬一個具四個雙鋼管混凝土柱的橋梁系統，承受雙向地震力的動力反應。橋梁系統中的三支橋柱為真實實驗試體，並分別置於 NCEE、NTU 與 CU 實驗室。其餘結構元件則以擬動態分析引擎進行數值模擬。有關實驗之描述、試體設計與實驗結果等資訊，可參考網頁 <http://exp.ncee.org/dscft>。本文不再贅述。

## 二、本合作式網路實驗之各元件簡介

ISEE 平台是由許多不同功能的模組所組合而成。依據本次實驗的需求，本研究將 ISEE 平台各個模組進行配置，如圖一所示。各個模組的功能簡介如下：

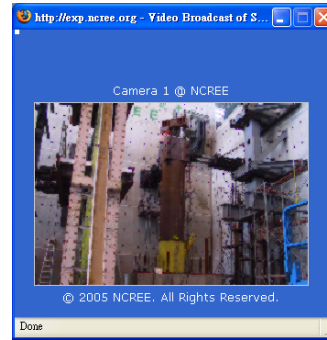


圖一 臺灣與加拿大跨國橋柱實驗試體與各模組的網路配置圖

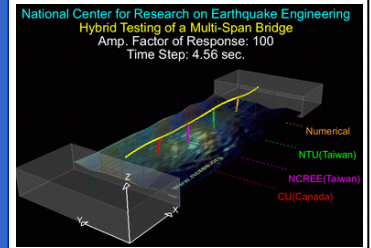
(1) Data Center 置於 NCEE 實驗室，負責各實驗室的主要實驗資料儲存與即時交換的工作。本次實驗之 Data Center 資料包括各柱柱頂雙向位移與反力、軸力、柱底彎矩和曲率、柱底鋼管外層應變值等 72 項可供即時分享的歷時資料。在實驗進行過程中，這些資料都即時地送達資料庫，並可以立即在網路上繪出。Data

Center 並非儲存所有的實驗資料。其餘實驗資料還包括各實驗室的致動器反力、實際達到位移量、基礎位移量、柱內鋼筋、鋼管、混凝土應變值等。

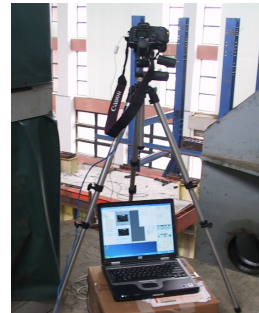
- (2) 各實驗室的設備控制模組(Facility Control Module, 簡稱 FCM)的功能在於執行千斤頂致動器的遠端控制指令。各實驗室的 FCM 從 Data Center 擷取所需的位移指令之後, 驅動致動器, 讓柱試體達到位移指令的位移量, 並回傳其反力予 Data Center。值得一提的是, 由於 CU 實驗室的千斤頂致動器反力支撐無法提供足夠的勁度, 需以外部位移計作為致動器控制的依據, 因此本中心研究人員開發具外部位移計控制功能的 FCM 供 CU 實驗室使用。
- (3) 各實驗室的資料擷取模組(Data Acquisition, 簡稱 DAQ)負責擷取並儲存實驗試體受力變形、混凝土、基礎鋼筋、內外鋼管的應變值、基礎滑移量、柱身角度計數據等 88 項實驗歷時資料。其中 NCREE 與 NTU 實驗室的 DAQ 並回傳部份資料至 Data Center。
- (4) 控制指令產生模組(Command Generation Module, 簡稱 CGM 或稱作 analysis engine)進行數值模擬分析, 並透過 Data Center 送出控制指令予各實驗室的 FCM 並接收其回饋反應。在擬動態實驗中, CGM 的分析核心為本橋柱系統之有限元素動力分析, 其中三支橋柱的反力值採用實驗試體上所量測到的反力數據。本次實驗分別採用本中心修改而具擬動態分析功能的 OpenSees 和本中心開發的 PISA3D 程式, 用於不同的地震反應測試。在反覆側推測試中, CGM 直接產生既定的單向或雙向柱頂反覆位移量, 不需進行動力分析。
- (5) 各實驗室的攝影機視訊模組(Video Module)擷取視訊影像並即時在網路上分享。與前述元件不同, 攝影機視訊模組運作獨立於 Data Center, 並不會直接影響實驗過程。圖二為 NCREE 實驗室攝影機視訊模組所拍攝的影像。
- (6) 視覺化模組 (Visualization Engine)利用 3D 電腦繪圖技術, 自動偵測並擷取 CGM 產生的分析資料, 繪出橋梁變形圖, 並即時分享於網路。視覺化模組為本實驗準備期間新增的 ISEE 模組。本實驗採用的視覺化模組為 GISA3D(PISA3D 之前後處理模組), 並呼叫 MATFOR 有限元素繪圖核心程式。圖三為本實驗視覺化模組在實驗即時產生的影像。
- (7) 相機模組(Camera Module)自動地偵測實驗的時步(time step)完成控制命令的時間點, 自動啟動數位相機的快門並儲存試體實驗過程中的數位相片。相機模組為本實驗準備期間新增的 ISEE 模組。圖四為架設於 NCREE 反力牆上的相機模組。
- (8) 網頁伺服器(Web server)將位移歷時, 回饋反力歷時與遲滯迴圈等重要實驗資料, 即時地繪成曲線圖並呈現於網頁。除了重要實驗資料的繪圖之外, 該網頁並連結視覺化模組圖片、各實驗室即時影像, 與本實驗相關的文章電子檔下載。



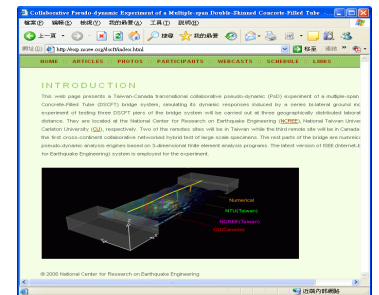
圖三 NCREE Video 影像



圖四 視覺化模組影像



圖五 NCREE 相機模組



圖六 本實驗網頁首頁畫面

### 三、實驗測試項目

本次實驗進行多次不同的測試, 主要包括:

- (1) 純軟體測試: 以軟體來模擬各實驗室試體的回饋反應, 在不影響試體狀態的情況下, 測試軟體模組與網路的功能與效能。
- (2) 微小地震力測試: 微量地驅動一個或多個實驗室的試體, 測試各實驗室的 FCM 與 DAQ 軟體與硬體的功能與效能。
- (3) 不同危害度地震的擬動態測試: 這是本次合作實驗最主要的測試, 模擬橋梁系統承受以四個不同危害度的地震力(PGA 值依序為 0.25g、0.39g、0.74g 與 0.39g)的動力反應。
- (4) 反覆側推測試: 在完成上述的擬動態測試之後, 本研究接著進行 CU 試體的雙向反覆側推測試與 NCREE 試體的單向反覆側推測試, 以測試橋柱試體的極限承載能力。

### 四、結語

本研究利用 ISEE 平台, 結合 NCREE、NTU 和 CU 三個實驗室的試體和軟硬體資源, 成功地完成全世界首次跨國合作式的大尺度雙鋼管混凝土橋柱之擬動態實驗。本實驗的準備期間, 研究人員並藉此機會, 擴增 ISEE 平台的功能, 包括 FCM 的外部位移計控制功能、DAQ 模組的網路化、視覺化模組的功能提升與相機模組的建立, 使 ISEE 平台能提供更豐富的實驗功能。本實驗的順利完成, 不但建立了本中心與 CU 實驗室的合作實驗機制, 亦進一步驗證了本中心進行跨國合作實驗的能力。

本實驗由蔡克銓主任主持。參與人員除了本文作者, 還包括汪向榮先生、王孔君先生、陳沛清先生、鄭維中先生、翁元滔博士、林敏郎博士、林柏州先生、莊明介先生, 以及在加拿大 Carleton 大學的 David T. Lau 教授和張雅英小姐。本實驗並經由周志雄先生、陳鴻文先生等各實驗室人員的鼎力協助方得以完成。

副研究員 楊元森

## 地震前兆監測（土壤氣體調查）（下）

### 五、利用流體成份變化監測斷層與地震活動

在監測斷層與地震活動的方法中，地球化學變化常可提供有用的前兆訊息。這些大部分與熱水作用相關的流體成份異常，一般歸之於斷層活動過程造成的地下流體（水與氣）循環系統的改變而導致的這些流體的混合作用。

據 Dobrovolsky et al. (1979) 之研究，在大地應力作用下，即將發生地震的震源區會形成一個震前岩石變形破裂帶。假設此變形帶為一個以震央為中心的圓，其應變半徑 ( $\rho$ ) 與地震規模的關係為：

$$\rho = 10^{0.43M} \text{ Km}$$

由此估算，一個規模  $M=5$  的地震，其應變半徑可達約 140 公里；規模  $M=6$  的地震，應變半徑約 380 公里；規模  $M=7$  的地震，更可達 630 公里以上。因此適當選擇有較深循環的地下水與氣系統，常可有機會反應出地震前兆。而地震前兆出現的時間，一般與測站距震源的距離成反比關係。

地震學者經過長期的觀察研究，歸納得知地震發生可能的五個步驟為：(1) 板塊擠壓，地殼累積彈性應變；(2) 地層發生膨脹和發展微裂隙；(3) 斷層帶上有流體侵入和變形；(4) 發生地震；(5) 餘震後地殼應力突然陡降(Bolt, 1999)。一般而言，在前三個步驟的地震孕育期中，地殼或多或少可能會有一些徵兆的發生。若能對這些前兆的發生有所了解及掌握，則對於地震的即將發生，可能會有所知曉。這些徵兆包括地球物理的前震和地形變，以及水文地球化學的變化，如流體可能發生的物理性質異常包括有：流體的酸鹼度(pH)、氧化還原勢(Eh)、溫度(T)、導電度(conductivity)和地下水位等；氣體成分的異常包括有：氫( $H_2$ )、氦(He)、氮( $N_2$ )、氧( $O_2$ )、氬(Ar)、汞(Hg)、氡(Rn)、甲烷( $CH_4$ )、硫化氫( $H_2S$ )和二氧化碳( $CO_2$ )等；流體成分的異常包括有：鈉離子( $Na^+$ )、鉀離子( $K^+$ )、鎂離子( $Mg^{+2}$ )、鈣離子( $Ca^{+2}$ )、二氧化矽( $SiO_2$ )、氟離子( $F^-$ )、氯離子( $Cl^-$ )、碳酸氫離子( $HCO^-$ )、碳酸根離子( $CO_3^{-2}$ )、硫酸根離子( $SO_4^{-2}$ )等(Barsukov et al., 1985; Igarashi et al., 1995; King et al., 1995; Koizumi et al., 1985; Li et al., 1985; Liu et al., 1985; Roeloffs, 1988; Sammonds et al., 1992; Sugisaki et al., 1996; Thomas, 1988; Toutain et al., 1997; Tsunogai and Wakita, 1995)。氣體和流體同位素的異常包括有氫、氮、氧等同位素(Barsukov et al., 1985)。

### 六、自動化連續氣體監測站設置

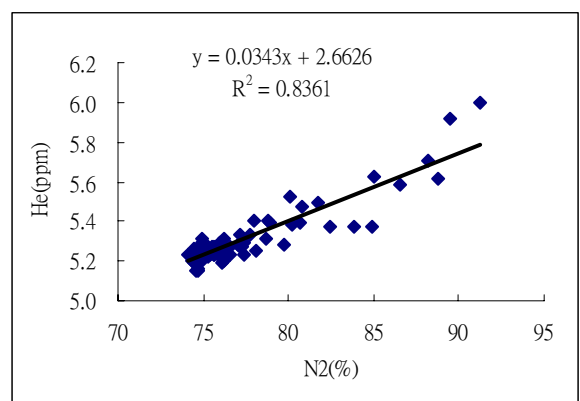
經過普遍性的在橫跨新城斷層兩側所做的土壤氣體採樣分析後，我們針對氮氣及氦氣濃度高的地點再作一段時間的採樣觀察，並根據以下幾點原則，評估該處是否適合設置監測站：

- (1) 鄰近斷層帶（破碎帶）
- (2) 確認地底下之氣體來源
- (3) 考量地震活動對當地的影響程度

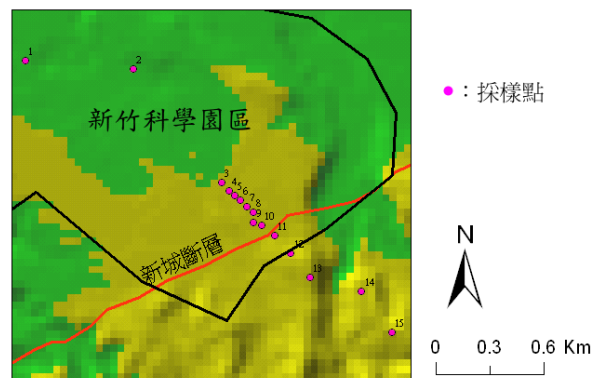
- (4) 選擇地下水位較低或地形較高之地點
- (5) 多因子同步監測
- (6) 盡量避免有腐蝕性的環境
- (7) 選擇外人不易到達，但具有通訊與電源供應設備的地點

以本計畫 2005 年於新竹科學園區設置土壤氣體監測站為例，在土壤氣體各成分間關係中，氦氣與氮氣具有較高的相關性，顯示氮氣可能為該地區之載流氣體 (carrier gas)，如圖六。

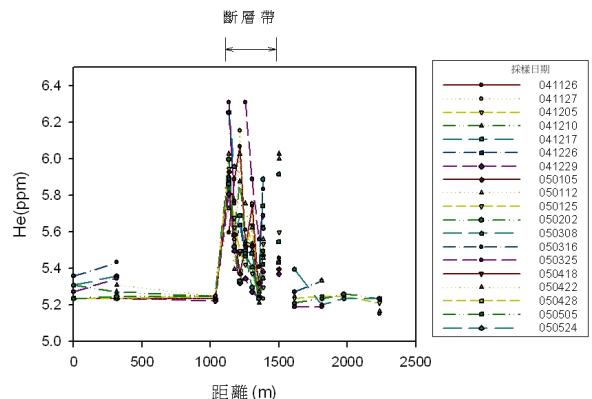
在完成初步調查階段後，隨即在園區內選定一條橫跨新城斷層之剖面，設置臨時之固定採樣點，如圖七，不定期前往採樣，其結果如圖八，在斷層帶附近有較高之氦氣濃度。



圖六 氦氣與氮氣成分關係圖



圖七 新城斷層通過竹科內所設置剖面位置圖



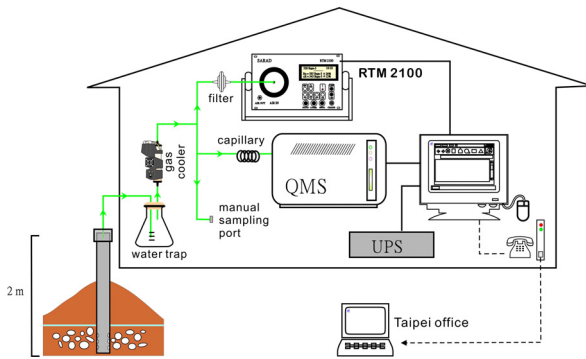
圖八 竹科內一橫跨新城斷層剖面所分析出氦氣變化與時間關係圖

2005 年 9 月底於新竹科學園區內選擇一合適地點設置一座觀測站，裡面放置氬氣分析儀、四極桿質譜儀、地震儀及一台個人電腦，透過網路即時將資料傳回台北辦公室中，其外觀及內部配置圖如圖九所示。地底下之土壤氣透過之前預先埋設 2m 長水管，先通過乾燥劑去除水氣後，再通過氬氣分析儀及四極桿質譜儀分析。

截至 2006 年 2 月底，由氬氣分析儀所收集到之氬氣、溫濕度及二氧化碳成分隨時間變化如下圖十，期間台灣地區所發生地震事件中，對新竹地區有造成影響的有兩三起地震事件。在 2005 年 11 月 30 日凌晨 6:41，宜蘭外海發生規模 5.7 級之地震，觀測站所記錄到之震度為 2 級，然而在地震發生前 12 小時，氬氣成分似乎有明顯變化（圖十一），而在地震發生後 12 小時，亦產生一同樣變化之趨勢。此一驟然的氣體成份變化與該次地震事件是否有關，仍需更多資料以進一步確認，以釐清此次異常變化是否為偶發？抑或真是與地震活動有關的前兆現象？



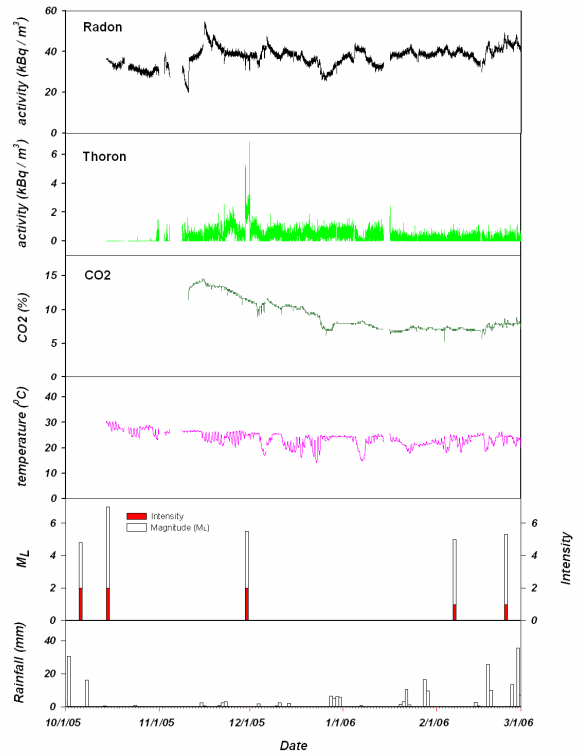
圖九 (A) 土壤氣體觀測站外觀



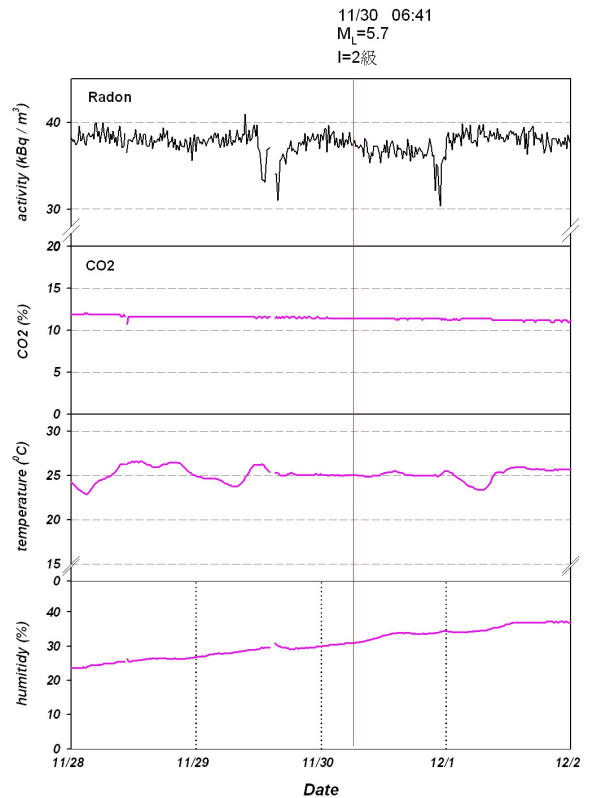
(B) 土壤氣體觀測站內部儀器配置圖

## 六、結語

目前本觀測站可 24 小時連續分析土壤內氣體成分變化，不過觀測站開始運作時間為 2005 年 10 月，與地震發生事件的比對資料仍嫌不足。而 11 月 30 日凌晨於宜蘭外海規模 5.7 之地震對本觀測站之影響仍需進一步確認，待長期觀測資料建立完成後，將有助於瞭解氣體成分變化與地震活動之關連性。



圖十 2005 年 10/14 至 2006 年 2/28 期間，新竹監測站所量測到之土壤氣內中氬氣成分變化與時間之關係



圖十一 2005 年 11/28~12/02 期間，監測站所測得土壤氣中氬氣成分變化與時間之關係

副研究員 瓦里亞、助理研究員 林世榮

# 消防廳舍耐震評估與補強研究

## 一、前言

在地震災難發生時，各級政府之消防單位為第一線的救災機關，甚至肩負震災緊急應變指揮中心或前進指揮所之責任，是以消防廳舍的耐震能力必須高於一般的建築物。根據建築物耐震設計規範，針對消防等單位執行公務之建築物，其用途係數  $I=1.5$ ，易言之，消防廳舍之設計地震力為一般建築物之 1.5 倍，其耐震能力之確保非常重要。但是，隨著科技之進步及經驗之累積，建築物耐震設計規範不斷更新，既有之消防廳舍係按照起造當時之規範來設計，從現今之角度觀之，既有消防廳舍之耐震能力未必符合現行規範之要求。同時，為了爭取災害搶救之時效，發揮救災之功能，消防廳舍必須保持動線暢通無阻，其結構系統具有獨特性，可能導致某些耐震弱點，而降低其耐震能力。消防廳舍除了考量其結構安全外，更要確保其救災機能，才能在地震發生後，擔負起緊急救災的任務，以降低二次災害，儘快回復人民生活作息。台灣位處地震帶，地震乃台灣之宿命，大地震必然去而復返，在下次大地震之來臨之前，實有必要對全國之消防廳舍進行耐震能力之「體檢」，若「體檢」不及格，即進行耐震能力不足之「療程」。為了使消防廳舍耐震能力之提昇，能有效率地展開，建立消防廳舍耐震評估及補強之技術及其施行之策略，乃刻不容緩之課題。

## 二、消防廳舍特性調查

本研究針對台北市景美、八德、城中、龍山、社子、天母、光明、雙園、古亭、華山等 10 消防分隊進行結構特性調查，主要調查項目包括總樓地板面積、樓層數、樓高、柱斷面尺寸及數量、牆斷面尺寸及數量及功能性。

消防廳舍特性調查結果發現有些許共通特性：(1)一樓挑高，一樓為消防車庫；(2)垂直消防車進出方向為弱軸，方便消防車進出；(3)懸臂結構系統，增加辦公室空間。

## 三、消防廳舍耐震能力初步評估

本研究由所收集之 17 個消防分隊作為有效樣本，來訂定初評表所需之參數設定。本耐震初步評估法是以現場實地勘察所得之數據，如：柱、牆等構材截面積、樓地板面積與樓層數，再依序計算個別抗橫力構材之強度，將其相加。再配合現行規範之地震力計算公式，可以得到整體結構物之耐震能力，是為消防隊建築物之『基本耐震指標』分數  $E$ ，再乘以『調查因子項目』 $Q$ ，從而得出耐震指標  $I_s$ ，據以判斷其是否有耐震能力上之疑慮。統計得到之參數有：(1)單位面積載重為  $1200\text{kg/m}^2$ ；(2)三面圍束磚牆單位面積強度  $1.5\text{ kg/cm}^2$ ；(3)四面圍束磚牆單位面積強度  $5\text{ kg/cm}^2$ ；(4)RC 牆單位面積強度  $24\text{ kg/cm}^2$ ；(5)RC 柱單位面積強度  $8\text{ kg/cm}^2$ ；(6)工址正規化水平加速度反應譜係數  $C$  為 2.5；(7)地震力折減係數  $F_u$  為 1.53。

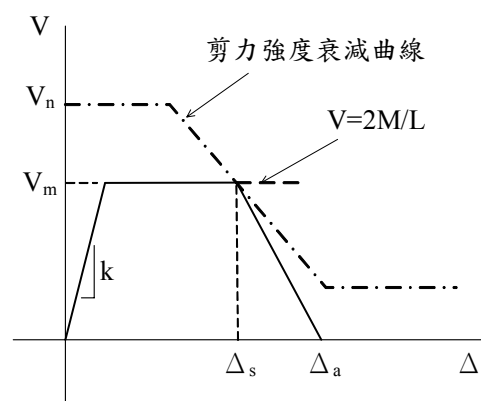
本評估表之目的為找出於設計地震力作用下，可能倒塌之消

防廳舍建築，以 100 分作為耐震能力堪慮之標準，若消防廳舍調查所得之耐震指標值低於 100 分者，表示其耐震能力頗為不足，應有耐震疑慮，若有相當於 475 年回歸週期之地震發生時，可能有嚴重損壞或倒塌之疑慮，應最優先進行耐震能力詳細評估；耐震指標值介於 100 分及 150 分者，表示消防廳舍耐震性之安全係數可能不符合耐震設計規範對於此等重要性建築物之耐震需求，仍有耐震性能不足的疑慮，列為次優先進行耐震能力詳細評估之對象；耐震指標值高於 150 分者，表示其尚無耐震疑慮。

## 四、消防廳舍耐震能力詳細評估

目前工程師常用的耐震詳評方法，係台大蔡益超教授發展的耐震能力靜力法。該法並未考量到結構物之變形，未將構材之非線性直接納入計算，以致其分析結果與實際建築物受震反應有所差別。而利用加權平均得到各樓層之韌性容量的方法，也是值得商榷。

本文即依據美國 ATC-40 的建議，建立消防廳舍的基底剪力與屋頂位移的關係曲線，與非彈性反應譜比較，進而由性能點及等效阻尼，可決定消防廳舍的破壞地表加速度，若高於設計地表加速度，表示耐震能力足夠，反之則不足。基底剪力與屋頂位移的關係曲線可由推垮分析(Pushover)建立，可適度的表現建物的受力與變形關係，使建物的耐震能力不再只由強度決定，而是由強度與韌性一起貢獻。



圖一 撓剪破壞載重位移曲線

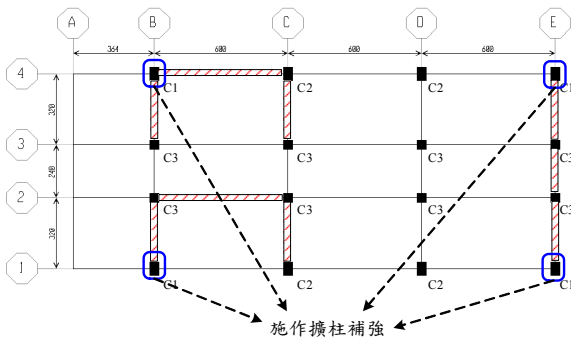
本研究使用套裝軟體 ETABS 作為耐震詳評的分析工具。ETABS-Nonlinear 為 ETABS 包含非線性分析的版本，程式提供的非線性靜力分析又稱推垮分析，可用以分析消防廳舍的基底剪力與屋頂位移的關係曲線，亦即容量曲線。結構的非線性行為集中由結構元件上的指定鉸來表現，鉸類別有：(1)軸力鉸，不限定位置，表現元件的軸向破壞；(2)剪力鉸，不限定位置，表現元件的純剪破壞，即脆性剪力破壞；(3)彎矩鉸，設在元件兩端，表現撓曲或撓剪破壞，屬韌性破壞。鉸的特性是擷取元件載重位移曲線之塑性部分。梁柱單元的載重位移關係，依破壞模式可分為三種：(1)撓剪破壞；(2)剪力破壞；(3)撓曲破壞。圖一所示為最常見的撓剪破壞載重位移曲線，圖中  $V_m$  為撓曲強度； $V_n$  為剪力強度； $\Delta_s$  為剪力破壞位移； $\Delta_a$  為喪失軸向承載能力之位移。

本研究將鋼筋混凝土牆模擬為等值寬柱；磚牆模擬為等值斜撐。並以兩棟消防廳舍為例，進行耐震詳評。

## 五、消防廳舍耐震補強之對策與設計原則

所謂耐震補強，即是針對耐震能力不足的結構物，做最適當的整體加勁或是桿件修補，讓結構物能符合現行最新的耐震規範對於地震力之要求。目前既有建築物耐震補強採取的方式大致可分為：(1) 結構元件補強、(2) 結構系統之調整與改善、(3) 輸入地震力之減少，等三大類。耐震補強設計時，須考慮結構物補強對於建築物機能的影響、地震力之傳遞路徑、基礎的穩定性和承載力及補強工程之施工性、經濟性等，同時兼顧增加韌性、增加強度、防止過大變形等三大原則。

基於消防廳舍之基本特性，考量消防車輛進出動線，補強策略不宜影響大部分平面使用空間。因此為了不影響消防廳舍的使用功能，及工法成熟性與經濟性的考量，本研究以擴大柱斷面補強、增加翼牆補強與鋼板包覆補強三種工法為例，說明其設計方法，並以一棟虛擬消防廳舍進行三種補強設計。圖二所示為消防隊 A 之擴柱補強配置。採用強度補強途徑時，一般建議擴柱補強及翼牆補強工法，擴大柱斷面補強乃增加結構構件面積之補強方式，可提高補強構件的承載能力與構件勁度，改善其耐震性能。增加翼牆補強乃在耐震弱向增加翼牆的方式進行補強，提高整體結構物在耐震能力不足方向上的強度，以抵抗地震力。鋼板包覆補強乃於結構構件四周以鋼板包覆的方式進行補強，可在不增加構件斷面尺寸的情形下大幅提高構件韌性，適用於鋼筋混凝土梁柱構架之補強。



圖二 消防隊 A 之擴柱補強配置

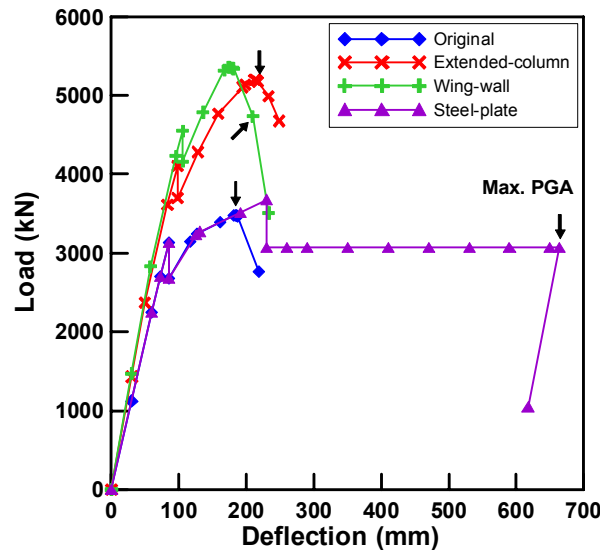
## 六、消防廳舍耐震補強之對策與設計原則

欲藉由推垮分析所得之容量曲線求取建物之破壞地表加速度，必須指定性能點，也就是評估補強成效所依據之量化指標，此性能點之決定須符合以下之性能要求：

- (1) 強度衰減不得大於 20%：進行推垮分析時，部份桿件會因塑鉸產生以致建物進入非線性行為，並使整體強度衰減，當基底剪力下降到最大強度的 80% 以下，結構將進入不穩定狀態，因此在殘餘強度未降至 80% 前所對應之最大地表加速度才是可靠值。
- (2) 垂直桿件應保有垂直承載力：當建物的任一垂直桿件完全喪失其垂直承載力時，結構可能會發生崩塌。在以 ETABS 進行分析時，當任一桿件之強度降為零時，程式亦會立即終止。

- (3) 一樓最大位移不得大於 25 公分：典型消防廳舍除供消防人員的辦公與住宿，還要停放消防車，且重要之救災機具設備多附於消防車上，為維持消防隊之運作機能，建物之變形需限制不得妨礙消防車之進出。根據現場訪查結果，消防車停放時與一樓柱之間距約為 50 公分，考量停車的誤差，消防車與柱之距離可能僅有 25 公分，依此一樓頂之最大位移需限制在 25 公分以下，雖然一樓最大變位達 25 公分時，其殘餘變位可能小於 25 公分，為求保守，仍以此值作為性能設計之要求。

建物補強後之破壞地表加速度應符合耐震規範的規定。以本研究採用的示範例，位於台北市二區的消防隊，其破壞地表加速度需大於 475 年回歸期地震相對的設計地表加速度乘上使用係數，也就是  $0.24 \times 1.5 = 0.36g$ 。圖三為三種補強與未補強消防隊 A 的基底剪力與屋頂位移的關係曲線比較圖，由圖中可發現擴柱及翼牆補強能大幅提昇廳舍強度，而達成耐震能力之需求。鋼板補強對廳舍強度沒有助益，而是大量提昇其韌性，但由於廳舍最大位移之限制，鋼板補強較不適用於消防隊 A。



圖三 消防隊 A 各式補強容量曲線比較

## 七、結語

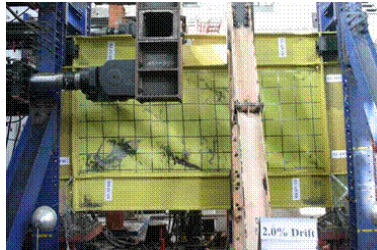
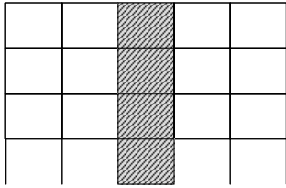
本研究依據廳舍的功能需求，提出的功能量化指標，可檢核性能點的適切與否。補強後的廳舍也可用本研究提出的耐震詳細評估法再進一步確認其對於破壞地表加速度之提升。

研究員 葉勇凱、專案副研究員 蕭輔沛  
組長 鍾立來、副主任 黃世建  
助理研究員 邱聰智、周德光、林金祿

# 實尺寸兩層樓鋼板剪力牆子結構擬動態試驗

## 一、前言

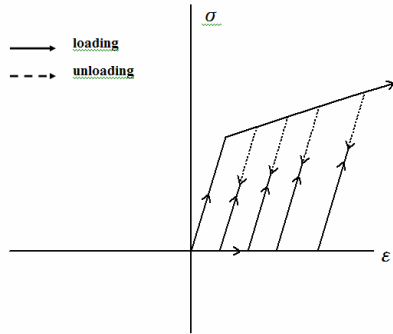
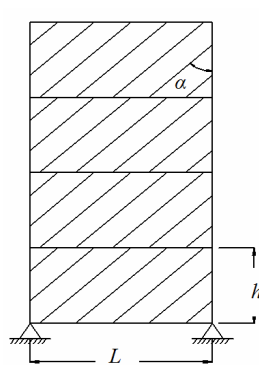
鋼板剪力牆構架為一種在結構構架中含有鋼板之抗側力系統(如圖一),但由於極高勁度與強度的效應,鋼板剪力牆通常使用薄鋼板,雖然不加勁之薄鋼板極易發生挫屈,但在鋼板發生挫屈之後能產生拉力場(Tension Field)的機制(如圖二),藉由拉力場效應來抵抗側力並藉鋼板拉力降伏來消散外力所輸入的能量。



圖一 鋼板剪力牆構架系統 圖二 鋼板挫曲後所產生之拉力場

## 二、鋼板剪力牆之拉力桿件模型

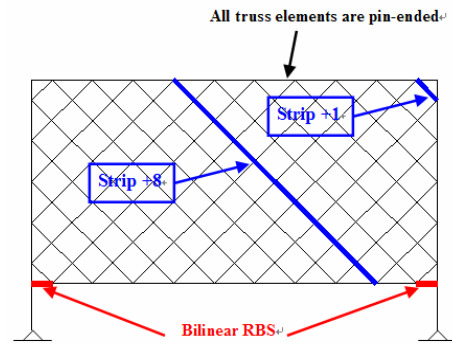
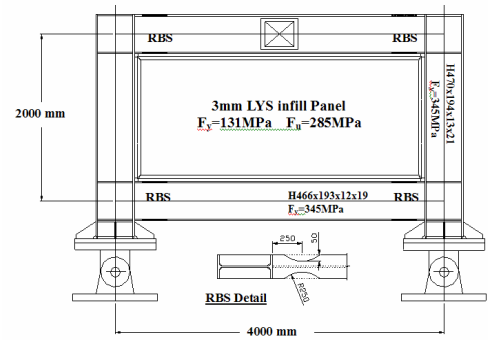
在進行鋼板剪力牆的結構分析時,其分析模型通常採用 Kulak 等人在 1983 年所提出的 strip model(圖三),而在模型中拉力桿件(strip)的性質與實際狀況的相近是否,將會大大的影響模擬結果的精確度,因此本研究針對薄鋼板拉降伏壓挫屈的特性,在 PISA3D 中新增一材料模型(TensionOnly material)來模擬拉力桿件的行為,其材料性質示意圖如圖四所示,並利用 PISA3D 程式(林柏州與蔡克銓,2003)建置模型,針對拉力桿件採用不同材料模型的情形下進行討論,與 2004 年林盈成等人所進行之試驗結果比較,試體與對應之 PISA3D 模型,如圖五所示,由分析結果(圖六)可知採用 TensionOnly material 不論是在整體(SPSW Frame)或局部(strip)的行為均能準確的模擬。



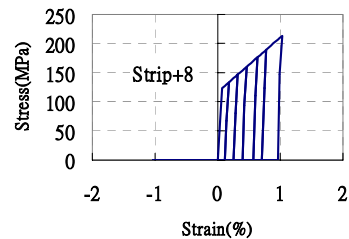
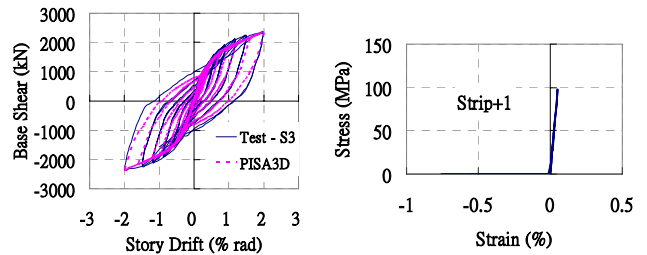
圖三 Strip model 示意圖 圖四 TensionOnly material

## 三、試體介紹

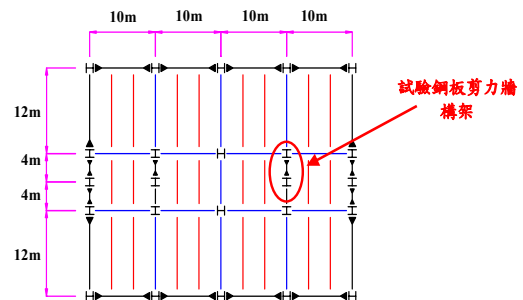
本次試驗的構架為一實尺寸兩層樓的試體,模擬一虛擬 3D 結構中的抗側力系統(如圖七),本次試驗為求在未來應用上材料取得之便利性,試體所用之鋼板是採用 SS400 材質(材料性質與 A36 相近),而外圍梁柱則是使用 A572 材料,鋼板厚度使用 2mm(2F)



圖五 鋼板剪力牆試體圖與分析模型 (林盈成與蔡克銓,2004)

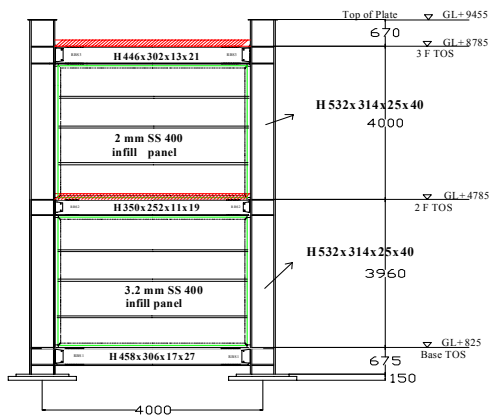


圖六 PISA3D 模擬結果(TensionOnly material model)



圖七 虛擬 3D 結構

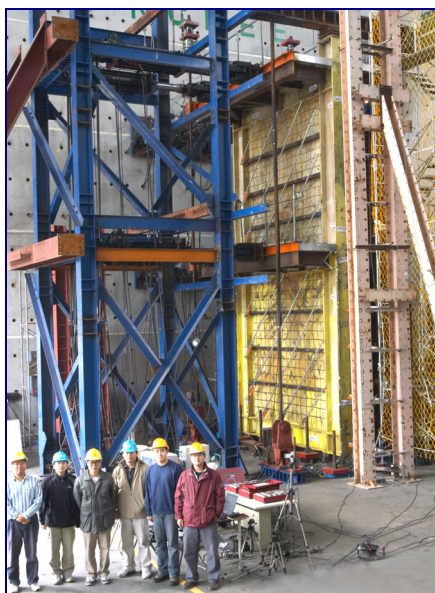
與 3mm(1F), 降伏強度分別為 335 與 338Mpa, 詳細的試體尺寸設計如圖八所示。



圖八 試體構架立面

並於每層鋼板牆之兩側加上矩型鋼管，提供側向的束制，而本次試體有關束制構件之設計，最主要是針對使用性的提升，希望能藉由此種束制方式有控控制鋼板剪力牆的面外變形及鋼板挫屈時所產生之巨大聲響，每面鋼板牆均使用 6 根鋼管束制(一側各 3 根)，把鋼板分為四等份，至於束制鋼管斷面與接合的設計則是採用過去研究(林盈成與蔡克銓，2004)的建議，斷面設計的部分以鋼板面內 3%的剪力作為鋼管的設計力，可以設計出所需之鋼管斷面(1 樓：125x75x4 mm，2 樓：125x75x2.3mm)，至於接合的設計是採栓接的形式，以螺栓讓兩根鋼管緊緊夾住鋼板，而鋼管的兩端則是與焊在柱翼上的支撐板採栓接形式，支撐板上打長條孔，使束制鋼管可以滑動，在提供束制的同時，不希望鋼管承受額外的力量。

周圍梁柱接頭均採抗彎接合，在梁上作斷面切削(RBS)，採用此種設計的原因主要是不希望破壞產生在梁柱的接合面，但由過去實驗之觀察，RBS 斷面在挫屈後會產生較大的側向變形，對柱會造成一扭轉(Torsion)的效應，若是配合上較深的斷面，可能會產生不可忽視的翹曲應力(warping stress)，因此在設計 RBS 斷面時，也必須檢核前述的深柱效應(deep column effect)，並在 RBS 斷面附近適當的增加側稱，以控制 RBS 斷面的側位移，避免柱因此種效應發生非預期的破壞，本次試驗在 RBS 斷面附近亦適當的加入側向小梁，控制 RBS 斷面的側向變形，試驗構架如圖九所示。

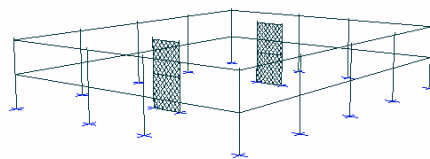


圖九 兩層樓鋼板剪力牆構架

#### 四、兩層樓試體構架分析模型

為了能夠對鋼板剪力牆構架在受震時的行為能有更佳深入的了解，且希望能在實驗後對照結果，改善模型以得到更高的準確性，在試驗前針對本次試體所模擬的虛擬兩層樓結構，利用 PISA3D 進行模擬，並討論其分析結果，PISA3D 模型中，鋼板剪力牆是使用 12 條兩端鉸接的 truss element 來模擬，分別建置在  $\pm 41^\circ$  的方向，至於材料特性方面，用以模擬鋼板之 truss element，是使用新開發出來的僅能承受張力材料(TensionOnly material)，而梁柱方面則是使用雙線性材料(Bilinear material)，至於降伏強度與降伏後勁度則是參考材料試驗結果做適當調整，以期模型能貼近現實狀態，進而得到較佳之預測結果，PISA3D 模型圖如圖十所示。

至於結構物的週期方面，由於用以模擬鋼板剪力牆的 strip model 是將挫屈後產生的拉力場，視為多根建置於  $\pm\alpha$  角方向(本試體模型中  $\alpha=41^\circ$ )且兩端鉸接的 truss element，因此在計算結構勁度時，對於鋼板牆所貢獻的勁度會有重複計算的現象，進而造成所得之結構週期，會比結構物實際週期要來的小，無法適當反映出結構物真正的週期，所以必須就結構週期之求取提出修正的方法，可在建 Model 時只建置單向的 truss 元素( $+\alpha$  角或  $-\alpha$  角方向)，求取結構週期，如此可有效修正所得之結構週期，使之能確實反映出結構實際的狀態，但進行構架靜動力分析時，仍需建置雙向 truss element( $\pm\alpha$  角方向)，方能得到正確的分析結果。詳細試驗計畫、試體介紹與試驗結果請參見網頁 <http://exp.ncree.org/spsw/>。



圖十 PISA3D 模型

#### 五、結論

1. 利用 PISA3D 程式建立模型，採用 Strip model 模擬未束制鋼板剪力牆時，若使用新開發之 TensionOnly material 來代表拉力桿件的行為，無論在勁度、強度或遲滯迴圈飽滿程度均能準確模擬，可以推論 TensionOnly material model 確為一適合的拉力桿件性質。
2. 梁柱接頭採用 RBS 時，應考慮是否有深柱效應的產生，並適當的在 RBS 斷面附近增加束制側位移的支稱，以免柱發生非預期的破壞情況。
3. 本研究新開發之拉力桿件材料性質 TensionOnly material，在拉降伏區段是採雙線型模型，未來若能改成以會走動與等向硬化(kinematic 與 isotropic hardening)的塑性模型來模擬，應可得到更佳的模擬結果。
4. 關於鋼板剪力牆行為，現今所採用的 strip model 確能得到相當準確的模擬結果，但在建置 strip model 時，每面鋼板剪力牆至少須建置 10 根拉力桿件，就模型的建置上，太過複雜，未來應找尋較為簡單、方便的模型，來模擬鋼板剪力牆的行為。

專案助理研究員 林志翰、專任助理 林盈成、主任 蔡克銓

# E-Defense 實尺六層樓 RC 集合式住宅動態崩塌實驗

## 一、前言

2004 年 10 月日本財團法人防災科學技術研究所 (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention 簡稱 NIED) 於兵庫縣成立兵庫地震工程研究中心 (Hyogo Earthquake Engineering Research Center) 簡稱 E-Defense。該實驗室配置一座 15mX20m 三軸向振動台，由水平 X、Y 雙向各 5 具及垂直向 14 具油壓制動器驅動，最大承載重 1200 噸，水平向最大加速度 1g，垂直向最大加速度 1500  $\text{cm/s}^2$ ，為目前全世界最大型的地震模擬器。本設施自啓用以來，實尺 6 層樓 RC 建築崩塌實驗是其規模最大，難度最高，也是刷新世界紀錄的實驗。

日本阪神地震 (芮氏規模 7.2) 自 1995 年 1 月 17 日發生迄今已屆滿 11 週年，東京大學壁谷澤壽海 (Toshimi Kabeyasawa) 教授帶領由日本國內 10 所著名大學及研究機構組成的研究團隊，特地針對 1970 年代日本典型 6 層樓 RC 集合式住宅規劃了實尺動態崩塌實驗，除於週年前夕悼念震災往者之外，並讓受難者家屬及一般民眾了解日本政府運用其高科技能力的優勢，冀望有效解決建物耐震問題的決心。

## 二、實驗規劃及試體受損狀況

6 層樓試體總高 16m，基地面積 12mX17m，東西向 3 跨，中間跨由 1 樓至頂樓配置剪力牆，南北向 2 跨，由 1 樓至頂樓配置袖牆，試體總重量約 1000 噸，整體側向強度約 500 噸。本次實驗規劃的測試項目非常多元化，包括樑、柱 (韌性柱、窗台柱等)、樑柱接頭、樓版、剪力牆、非結構外牆及隔間牆、外牆瓷磚、外牆泥作、輕鋼架懸吊天花板、吊燈、逃生門、室內泥作及木作裝潢、桌、椅、沙發、櫥櫃傢俱等。量測系統配備 888 個監測頻道，有應變計、加速規、速度計、拉線式位移計、磁環式位移計、雷射測距儀、3 向荷重計、同步數位攝影機系統等。實驗期程安排如下：

1 月 13 日 (週五)：全程開放媒體採訪及一般民眾參觀，採用 1995 年阪神地震 JMA 測站 3 向地震紀錄作為輸入地震力，先後加載 40% 及 100% JMA 地震力。壁谷澤教授主持了 50 分鐘的測試前簡報，共有 50 位日本國內及國際專家學者出席，實驗結束後召開記者會、專家座談、及開放振動台管制區以外之遠距拍照。如預期，建築體於測試後，仍保有垂直承載力。

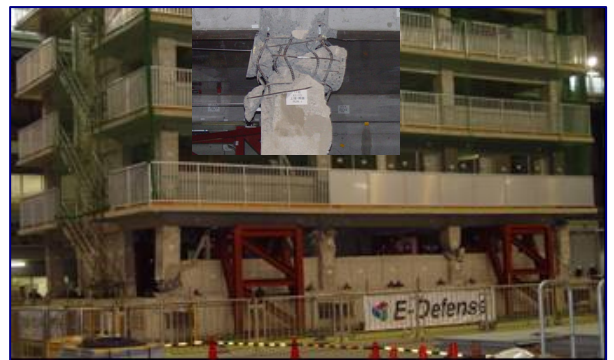
1 月 14 日 (週六)：本日開放專家學者進入建築物內勘驗破壞情形及拍照，並進行專家學者座談。

1 月 16 日 (週一)：本日測試僅限專家學者參加，分別使用 30% 及 60% 1995 年阪神地震 JMA 測站地震紀錄作為輸入地震力，實驗結束後同樣開放振動台管制區以外之遠距拍照。部份結構元件於測試後已喪失垂直承載能力，惟整體結構系統仍可保持穩定 (collapse prevention)。

總括這一次振動台實驗結果，建築物整體以一樓受損最為嚴重；其中，南側一樓窗台柱呈剪力崩塌，軸向鋼筋嚴重挫屈，箍筋破壞，已喪失垂直承載力；一樓剪力牆牆體受震後則出現許多剪力裂縫，牆底部並已崩裂穿透，鋼筋挫屈外露。整體結構因平面勁度分配不均的影響，受震時扭曲效應頗為明顯。



6 層樓 RC 集合式住宅西北側立面照片



6 層樓 RC 試體南側於 1 月 16 日測試後受損情形 (子畫面為窗台柱剪力破壞特寫)

## 三、心得與總結

日本自 E-Defense 振動台啓用以來，與美國 NEES 計劃採國際合作方式，積極推動地震工程前瞻性研究，受測結構種類涵蓋木構造、鋼結構及 RC 結構等，立意加速新型抗震系統研發的腳步，落實耐震功能設計架構，並藉由實驗驗證精進其數值分析技術能力，企圖保持其科技大國地位的決心令人欽佩。在這次考察觀摩的行程中，日方研究團隊展現了不少優點：(1) 施工品質優良，(2) 試體細部施工與監測儀器設置計劃的互動協調，(3) 先進多元的量測系統規劃，(4) 整合研究團隊進行大規模試前模擬，(5) 振動台油壓制動器精準的控制技術，(6) 實驗期程掌握及有效的時間管理，(7) 網路即時轉播技術，(8) 多元監測頻道的同步，(9) 大量實驗數據即時處理及呈現，(10) 大規模參觀人潮引導及動線規劃等。雖然在日方優勢科技能力競爭下，但是中心目前仍能在某些崩塌研究子題上保持領先，包括利用消費型數位攝影機開發的影像量測技術，還有將破壞力學觀點納入崩塌分析內考量等，建議可繼續善用領先項目，與日美等國在耐震科技領域鼎足而三。至於以後若有其他工程先進或學界同仁欲前往三木市 E-Defense，以下交通路線可供參考：(1) 自行開車者可自新幹線新神戶站出發穿越新神戶隧道後沿公路行駛抵達 E-Defense，全程約 40 分鐘；(2) 搭乘公共交通工具者，可由神戶市營地鐵線三宮站出發搭乘至西神中央站 (約 30 分鐘) 再轉乘計程車抵達 E-Defense (約 20 分鐘，計程資費約 2,900 日元)。

國家地震工程研究中心 吳俊霖、邱聰智、黃世建

# Peter Fajfar 教授論其所發展的建築結構耐震評估方法

本中心於三月六日至十日特別邀請國際知名的斯洛維尼亞共和國 Ljubljana 大學土木與大地工程學系 Peter Fajfar 教授來台參訪，Peter Fajfar 教授的研究領域主要為性能導向地震工程，耐震性能設計與評析，著作甚豐且見解獨到，目前擔任許多國際地震工程著名期刊之編輯或評審委員，亦曾受邀至國際知名大學擔任客座教授。本中心於三月七日下午在中心一樓演講廳，特別邀請 Peter Fajfar 教授講論其所發展的建築結構耐震評估方法(N2 method)，該方法乃是結合靜力側推分析與非線性反應譜之耐震性能簡化分析技術，並已被融入歐洲耐震規範 Eurocode 8 中作為耐震設計分析檢核之用。但 N2 method 早期僅能適用於平面結構，故最近研究已針對此一限制，將其研發改良成可考慮實際三維建築結構之平面不對稱特性，並可適用於例如須考慮強度衰減之 RC 構架耐震性能評估程序。其中亦發展出可決定 RC 柱構件變形容量之經驗計算式，其次，相對於增量式動力分析(IDA)更加簡化之增量式 N2 method 已可用於或然率分析之中，本演講主要介紹 N2 method 之基本原理與實際測試及應用範例。該演講全程歷經一小時，在座有許多台灣的著名的專家學者、土木工程師及



Peter Fajfar 教授(左)本中心蔡克銓主任(右)

學生，主持人蔡克銓主任邀請聽眾提問或回應(如照片)，反應頗為熱烈，其中有關 N2 method 如何考量平面不對稱三維建物所須考慮的扭轉效應，以及 RC 柱構件變形容量之經驗計算式的建立方法，與會者有諸多討論與交流。

副研究員 翁元滔

## 研討會預告

### 第四屆國際地震工程研討會 (4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Engineering)

國家地震工程研究中心將於今年 10 月 12 日至 13 日假台北市福華國際文教會館舉辦第四屆國際地震工程研討會(本會議全程使用英文)。會議主題強調『加強地震工程前瞻研究之國際合作及防救災實務應用』，屆時將有來自 20 個國家約 250 位專家學者與會發表最新研發成果；會議並將安排實地觀摩世界罕見的「構架內磚牆面外崩塌振動台試驗」。本會議歡迎國內產官學研各界先進報名與會。發表論文課題涵蓋：工程地震學、大地工程、結構工程、先進科技、維生管線、非結構元件行為及儀器設備隔減震、耐震設計及規範、地震工程應用、地震災損評估、基礎建設減災、資訊及數值計算科技、地震勘災及海嘯、社會經濟議題、地震引致火災等。已繳交論文摘要之學者專家將於 2006 年 4 月 1 日前接獲審查結果，獲接受論文請於 2006 年 7 月 31 日前利用 4ICEE 專屬網頁上傳論文全文。如需更多本研討會相關資訊，請至 4ICEE 專屬網頁閱覽查詢。

### 挫屈束制支撐設計與施工研討會

時間：95 年 4 月 26 日(星期三)

地點：本中心 101 演講廳

繼 921 集集與 331 大地震以來，建築物或重要結構物安裝隔制震裝置作為耐震消能系統之案例日益增加，且往往成為建築結構主要特色及銷售賣點，其中挫屈束制支撐(Buckling Restrained Braces)因具備高效率、性能穩定、構造單純、材料取得容易及免管理維護等優點，近年來被應用為結構抗震系統的案例快速成長。透過我國學術界、工程界與產業界持續不斷的研究發展與應用推廣，台灣目前已與美國、日本成為世界前三大使用與製造挫屈束制支撐之國家，同時美國與日本已相繼將此類裝置納入相關設計規範。由於我國目前尚未將此類裝置納入設計規範，故初次接觸此類設計之工程師往往不得其門而入，不瞭解應注意之細節，有鑑於此，本中心特地邀請國內具備相關設計與實務經驗之專家與廠商，針對其設計與施工上之重點，作一深入淺出之講解與技術交流。

### 公有建築耐震評估與補強對策 研討會暨座談會

時間：95 年 4 月 28 日(星期五)

地點：本中心 101 演講廳

921 大地震，造成嚴重的災情，亦使公有建築物嚴重受損，公有建築多半需擔任緊急救災的指揮中心，緊急避難的場所，有鑑於此，實行公有建築的耐震能力評估與補強實為重要課題。因此內政部於 89 年提出「建築物實施耐震能力評估與補強方案」，期望能於 95 年完成公有建物的耐震評估與補強，但在執行上遇到些許困難，以及為了因應 94 年 7 月內政部所推出之新版的建築技術規則，所以準備了一個修正案，預計於 95 年推出。為了配合與有效的實行修正案，所以在執行前廣徵產官學各界之意見，期能落實學界的研究成果，並提供主管機關推動政策時之參考，也讓工程師能瞭解方案的實行內容，有助於公有建築物執行耐震評估與補強之相關工作。請以傳真或線上報名。

(02-6630-0858)，<http://www.ncree.org>