

# 建立建築物震損圖之研究(III) 子計畫一：學校建築

## 自動化診斷及損壞評估之研究

### A Study on the Production of Damage Map for Buildings Automatic Damage Assessment of typical school buildings in Taiwan

主管單位：交通部中央氣象局 計畫編號：MOTC-CWB-E-100-07

林其璋

梁晉得

Lin, Chi-Chang

Liang, Chin-Te

國立中興大學土木工程學系

### 摘要

本研究主要探討台灣地區學校建築結構之耐震能力，期能在地震事件發生後，依據中央氣象局分佈於全省自由場測站量測得到之地震紀錄，製作地震等震圖(地表加速度分佈圖)，配合結構系統識別技巧及損壞評估技術，進而求得校舍之地震損害評估分佈圖，以快速診斷建築結構之損壞位置及損壞程度。本年度計畫將發展一套損壞偵測評估技術，可利用建築結構有限量測訊號，建立模態頻率變化圖像，以進行損壞樓層及構件位置之判斷及損壞程度評估。並以氣象局裝設強震監測系統之學校建築為例，將配合中央氣象局自由場量測記錄分析之場址特性及結構強震監測系統地震紀錄分析結果，應用自我發展之損壞指標進行結構健康診斷與損壞判別，進行學校建築之耐震能力評估，並模擬可能發生之地震境況，製作學校建築震損圖，作為政府單位訂定防救災政策及緊急避難措施之參考。

關鍵詞：地震工程、學校建築、系統識別、損壞評估

### Abstract

In this study, the earthquake resistance capability of typical school buildings in Taiwan is evaluated. It can be used to rapidly produce the seismic hazard maps of school buildings based on the earthquake intensity map reported by the Central Weather Bureau (CWB) with measurements from free-field seismograph stations and the structural system identification techniques and damage assessment technique to obtain the premises of the distribution of earthquake damage assessment in order to quickly diagnose the damage to the building structure position and degree of damage. In this year, this study presents an automatic damage localization technique to identify the location of damage for buildings based on dominant frequencies shifts through incomplete measurements. Finally, the CWB monitored buildings are considered to examine the proposed damage localization technique, and hazard maps of school buildings under possible earthquake hazard scenarios are created. The results are useful to the early assessment of an earthquake event.

Keywords : Earthquake engineering, school buildings, system identification, damage assessment.

## 一、前言

台灣位於環太平洋地震帶，結構耐震能力向來為各界關注的問題。國內耐震法規自民國 63 年起頒布施行並歷經多次修訂，但民國 88 年 921 大地震顯示，國內建築耐震能力存在缺失為不爭的事實，同時，也突顯國內缺乏對於大區域建築結構震損評估之能力，使得救災工作優先順序無法在第一時間進行決策。921 地震震損結構遍佈於各種類型，其中在重要性高於一般民宅的學校建築，也有許多損壞案例，例如光復國中小學，所幸地震並非發生於上課時間，否則後果不堪設想。

為了強化結構物強震監測系統以及全台各地自由場所收錄之監測資料的運用價值，本計畫將發展一套配合速報系統，且利用結構物強震監測系統所量測訊號之建築結構層間損壞評估技術，可利用建築結構有限量測訊號，建立模態頻率變化圖像，以進行損壞樓層及構件位置之判斷及損壞程度評估[1-3]。本方法首先需求得結構初始狀態之模態參數資訊(模態頻率與完整振態)，並以數值模式建立對應結構層間損壞位置之圖像資料庫(MSER)，後續針對此結構進行監測時，僅需由單一樓層量測資訊識別結構模態頻率，再比較損壞前後模態頻率變化，建立頻率變化圖像(SFCR)，利用模糊推論系統等方式進行自動化圖像辨識，以偵測層間損壞位置，最後藉由理論公式，可計算損壞程度。本計畫進一步以中央氣象局於全省各地有裝設強震監測系統之學校建築為例，驗證本方法之實用性，期能作為將來安裝於監測系統內實用之軟體核心技術，在地震事件發生後，快速評估大區域之學校建築損壞評估結果，以作為防救避難決策之參考。本計畫將蒐集中央氣象局監測之學校建築結構之地震紀錄，將學校結構之動態特性包含於分析模式中，以符合真實，增進本方法之準確性與使用性。

## 二、依有限量測之建築結構診斷技術及損壞評估方法

本研究推導建築結構之自然頻率平方變化比(SFCR)、模態應變能比(MSER)與樓層勁度折減比(SSSR)三者間之關係如下：

$$\Omega_{P \times 1} = \Lambda_{P \times N} \cdot \alpha_{N \times 1} \quad (1)$$

其中，SFCR ( $\Omega$ )可由量測結構受損前後之頻率變化求得；MSER ( $\Lambda$ )則須由結構受損前的完整模態參數做計算；SSSR ( $\alpha$ )則可利用 SFCR 與 MSER 作計算。另外， $P$  為考慮之模態數， $N$  則為結構自由度數目。

## 三、損壞評估判別分析

由式(1)可知，SFCR 與 MSER 二向量間存在相同之比例關係，若將二向量分別繪製成長條圖(Histograms)，即可由圖像比對相符即可判別為第  $r$  樓層間損壞。建立對應各樓層間損壞位置之 MSER 圖像，即構成初始結構之“MSER 圖像資料庫”(如圖 1 所示)，其所代表之意義即多模態頻率變化與層間損壞位置之對應關係。再利用建築物破壞前後之自然頻率平方變化比，以長條圖表示，即為

“SFCR 圖像”(如圖 2 所示)，將該圖像於 MSER 圖像資料庫進行比對，尋找最相符之 MSER 圖像，其所對應即為結構層間損壞位置。以圖 2 為例，SFCR 與第 4 個 MSER 圖像最接近，因此可以判定損壞位置為 4 樓。

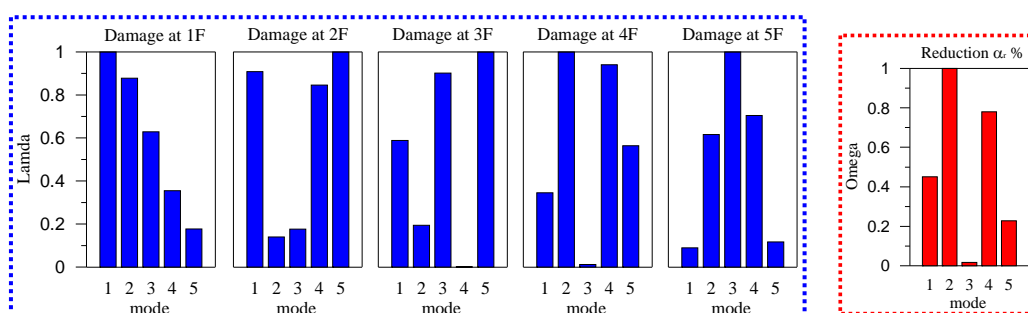


圖 1 MSER 圖像

圖 2 SFCR 圖像

#### 四、自動化系統識別與損壞評估技術之開發

由於本方法必須藉由圖像比對以得知損害樓層，因此必須有一自動化判別方式，以避免人工判讀的錯誤。本計畫利用模糊理論(Fuzzy)發展自動化圖像判別系統，以迅速得知損害發生之樓層。應用模糊理論進行圖像辨識判別層間損壞位置，以 SFCR 圖像之縱軸座標值(比值)為輸入(Input)，輸入個數為所取模態個數。首先利用 MSER 圖像建立模糊規則，用於模糊推論系統(Fuzzy Inference System)進行模糊推論，輸出(Output)即為絕對關係指標，其代表之意義即層間損壞位置。

#### 五、結果分析與討論

本年度計畫為開發一套依有限量測之結構系統識別、即時損壞診斷與震後損壞評估流程，由試驗紀錄分析驗證本層間損壞偵測法應用結果良好，針對單一層間損壞且完整模態數之情況，可依部份量測資訊，透過系統識別與該層損壞間偵測法，對結構進行健康診斷，未來可配合中央氣象局自由場測站量測得到之地表加速度歷時反應所求得 PGA 與反應譜特性，進而針對特定地區特定校舍建築結構進行損壞分析，可提供未來土木結構建立監測系統之核心演算技術。此外，學校建築在救災上通常扮演地區避難所的角色，耐震安全機能要求實屬重要，本研究除可供此類建築之地震預警使用外，評估結果亦可作為震後救災避難所安排選擇之參考。

#### 參考文獻

1. C.C.Lin, C.E.Wang, H.W.Wu, and J.F.Wang, (2005), "On-Line Building Damage Assessment Based on Earthquake Records", Smart Materials and Structures, Vol. 14, No. 3, pp. 137-153.
2. C.C.Lin, J.F.Wang, and C.H.Tsai, (2008), "Dynamic Parameter Identifications for Irregular Buildings Considering Soil-Structure Interaction Effects", Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 3, pp. 641-666.
3. G.L.Lin, C.C.Lin, C.T.Liang, and J.F.Wang, (2010), "Automatic Damage Localization of Buildings Based on Dominant Frequency Shifts Through

Incomplete Measurements,” 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada, July 25-29.

## 子計畫二：鋼筋混凝土民房震損圖研究(III)

### A study on damage maps for reinforced concrete private buildings (III)

洪李陵

黃百誼

Hong, Li-Ling

Huang, Barry

國立成功大學土木工程學系

#### 摘要

台灣處於地震發生頻繁的環太平洋地震帶，如何在地震發生前，作好災害風險管理與建築物耐震設計；在地震發生後，快速評估災害範圍，執行有效率的救災行動，遂為一重要課題。根據 921 集集大地震所造成的實際民房損壞資料與強地動紀錄，配合房屋稅籍資料，本文先進行整理和分析的作業，包括篩選與資料處理，並以分組估計法、累計估計法、最大概似法與貝氏估計法等四種方法，建立二樓和三樓鋼筋混凝土民房的易損度曲線。最後再製作這兩類民房的震損圖。

關鍵詞：震損圖、易損度曲線、混凝土低矮民房

#### Abstract

Taiwan locates on the Pacific ring of fire with high seismicity. It definitely becomes an important issue to design earthquake-resistant buildings and manage disaster risk before earthquake occurrences and to quickly assess disaster range and efficiently arrange rescue after earthquake occurrences. The damaged building data and the free-field records during the Chi-Chi earthquake together with the housing tax information are processed and analyzed in this study. Then, we construct the fragility curves for reinforced concrete buildings of two and three stories by four statistics methods: grouping estimate, cumulative estimate, maximum likelihood estimate and Bayesian estimate. Finally, the damage maps of those buildings are provided.

Keywords : damage map 、 fragility curve 、 low-rise RC building

## 一、前言

台灣位於環太平洋地震帶上，地震發生頻繁，如何減少因地震帶來的損失，一直都是工程界所追求的目標。迄今為止，仍無法預知地震的發生，但若能提供一套方法，評估建築物在地震作用下，不同損害程度的超越機率，對於地震發生後之搶救和修復作業必有一定的助益，亦可於地震發生前，為災害風險管理作業或建築物耐震設計提供可靠評估數據。

## 二、建築物震損資料和強地動紀錄

本研究以舊台中縣和南投縣二、三層樓鋼筋混凝土造民房在 921 集集大地震的震損分佈為研究對象。以村里為單位，統計二層樓和三層樓 RC 民房各種損壞程度的棟數。各村里同類型建築物的總棟數則由國家地震工程研究中心以房屋稅籍資料統計整理之，震損百分比可由各村里之震損棟數除以總棟數而得。選擇舊台中縣和南投縣附近的 98 個自由場強地動觀測站資料，以內插方式計算損壞指標。

## 三、易損度曲線

本文以四種方法建立易損度曲線，1. 分組估計法：將損壞指標劃分區間，進行統計和估計；2. 累計估計法：依各村里損壞指標由小至大順序，統計累計震損比和估計；3. 最大概似法：以最大概似法對各村里的震損比資料建立易損度曲線；4. 貝氏估計法：假設易損度曲線參數的在前分佈為均勻分佈且統計獨立，其平均值採信 TELES 之推估值，據此估計參數的在後分佈平均值。

## 四、震損圖

建立了易損度曲線後，當地震發生時，由即時速報測站紀錄可迅速推估各地區損壞指標之分佈，並轉換為二、三層樓 RC 民房各種損壞程度的震損圖，方便相關單位評估規劃救災方案。

## 五、結果分析與討論

在建立易損度曲線時，會因最佳化的目標函數不同，而有不同的參數推估結果。分組估計法與累計估計法相比，參雜了許多人為的設定，因此累計估計法推定參數會比分組估計法更為理想。貝氏估計法之結果受到概似函數與在前機率密度函數之影響，在前機率密度函數的變異性大小將決定貝氏估計法之結果是偏向在前機率密度函數之平均值或是偏向最大概似法之結果。若有合理的工程判斷值和已知的變異性，配合觀測資料修正之，則貝式估計法比其它方法較具代表性。

## 參考文獻

1. 中央氣象局，921 大地震各地震度原始資料，網頁資料：  
<http://scman.cwb.gov.tw/eqv5/special/19990921pga.asp>

- 盧志清 (1998), 「鋼筋混凝土建築物模態參數之不確定性分析」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 台南。
- 葉錦勳、林主潔、陳緯蒼(2009), 「住宅地震保險地震風險評估系統: 震災境況模擬技術手冊」, 國家地震工程研究中心, 台北。
- Ang, A. H-S and W. H. Tang (1979), *Probability Concepts in Engineering: Planning and Design*, John Wiley & Sons.
- ATC-13 (1985), *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council.

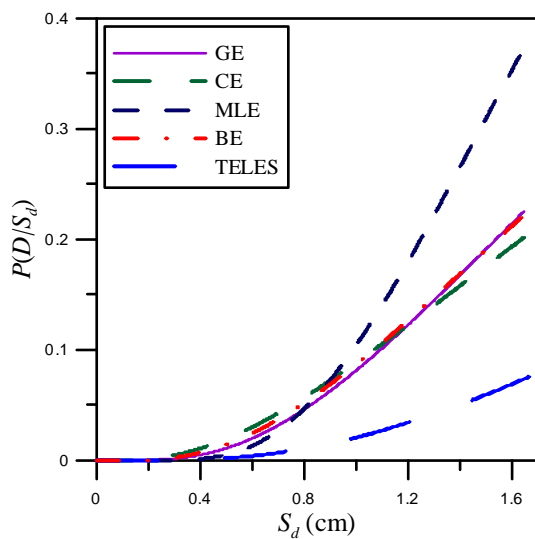


圖 1、二層樓 RC 民房輕微損害以上之  
易損度曲線

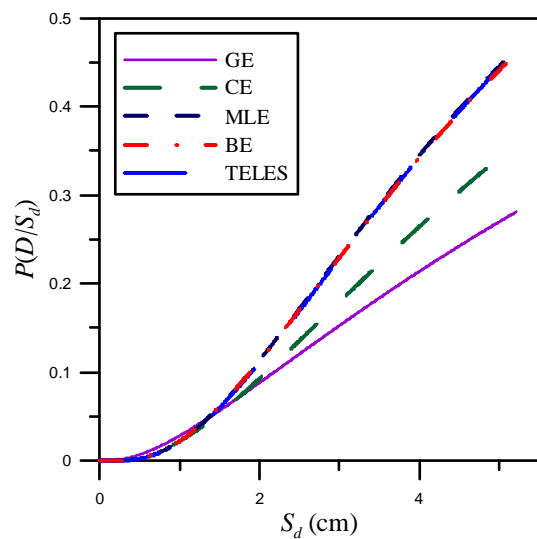


圖 2、三層樓 RC 民房輕微損害以上之  
易損度曲線

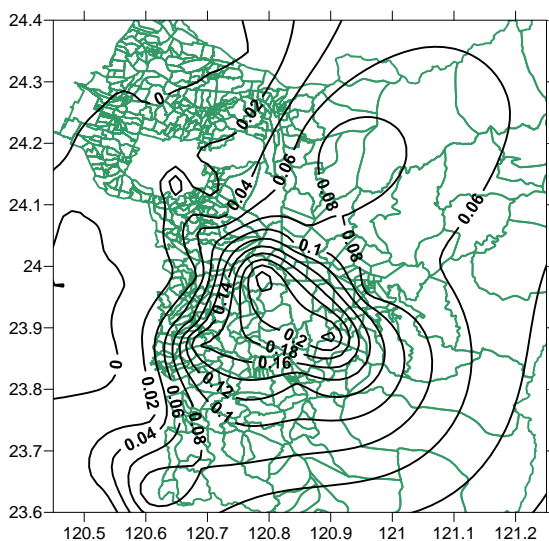


圖 3、二層樓 RC 民房輕微損害以上之  
震損圖

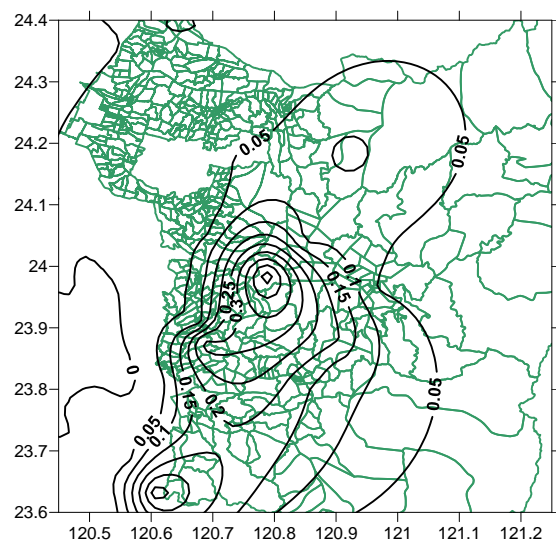


圖 4、三層樓 RC 民房輕微損害以上之  
震損圖

# 子計畫三：以速報系統為基準進行大專院校建築震損 圖建立模式之研究(III)

## The Development of Campus Building Damage Map Based on Geophysical Database Management System (III)

朱世禹                      林鈺桐                      曹峻豪  
Chu, Shih-Yu              Lin, Cheng-Tung              Tsao, Chun-Hao  
國立成功大學土木工程系(所)

### 摘要

本年度計畫，除考量結構物受到較大的地震作用下，內部構件或斷面產生降伏而可能造成損壞。並參考 Bozorgnia 與 Bertero 基於理想彈塑模型所建議之損壞指標，改良其理論模型為雙線性模型，先利用二層樓 RC 校舍縮尺模型振動台試驗資料與中興土環大樓實測資料，校正損壞指標模型之參數，以獲得合理之損壞指標。並進一步利用大專院校建築強震測站資料及速報系統之自由場測站資料，建立大專院校建築結構之震損預估圖。

關鍵字：雙線性模型損壞指標、系統識別、非線性數值模型、地球物理資訊管理系統、震損預估圖

### Abstract

The damage indices of buildings based on the combinations of the ratio of ductility demand over capacity and the ratio of hysteretic energy demand over capacity are modified from the simplified single-degree-of-freedom (SDOF) elastic-perfectly-plastic model into the proposed SDOF bi-linear model in this study. Some critical parameters of the bi-linear model are calibrated from the experimental measurements of shaking table tests of scaled-down two-story reinforced concrete school building models. Based on the proposed damage indices and the calibrated results, the regional damage forecast map can be illustrated based on the strong motion records of nearby free-field stations from the CWB's Geophysical Database Management System.

Keywords : Bi-Linear Model Damage Index, System Identification, Nonlinear model, Geophysical Database Management System, Damage Forecast Map



## 一、前言

為了有效地降低與預防地震災害，中央氣象局於 1991 年起積極執行「台灣地區強震觀測計畫(TSMIP)」[2][4]，至今在台灣地區已設置六百五十餘個自由場加速度地震儀[1]，並於原有遙記式測站加裝可即時傳輸的加速度型地震儀，構築成「台灣地震速報系統」，此系統提供每次地震的地動參數，如 PGA、PGV 以及震度分佈，但對於各自由場附近建築物受地震後是否損壞則無法進一步預估，因此對於災害型地震後各結構體是否安全或毀損，則無法得知。本研究利用三分之一縮尺之二層樓 RC 校舍模型振動台試驗資料與中興土環大樓實測資料，進行損壞指標參數之校正，並分別採用理想彈塑模型(Elastic-Perfectly Plastic, EPP)及雙線性模型(Bi-Linear Model, BLM)為損壞指標之數值模型，藉由實驗與實測資料之真實破壞狀況校正模型參數，進一步建立大專院校建築結構之震損預估圖，以作為初步損壞評估及修復補強的參考依據。

## 二、結構損壞指標簡介與建立流程

本研究參考 Bozorgnia 與 Bertero[3]於 2001 年提出之損壞指標為基礎，該指標假設評估之標的建築物可簡化為一單自由度理想彈塑性模型加以描述其損壞行為，其損壞指標表示如下：

$$DI_1 = (1 - \alpha_1)(\mu - \mu_e) / (\mu_{mon} - 1) + \alpha_1 (E_H / E_{Hmon}) \quad (1)$$

$$DI_2 = (1 - \alpha_2)(\mu - \mu_e) / (\mu_{mon} - 1) + \alpha_2 \sqrt{(E_H / E_{Hmon})} \quad (2)$$

其中， $\alpha_1$  建議值為 0.29 而  $\alpha_2$  建議值為 0.31。本研究亦將以此建議值進行理想彈塑模型損壞指標與改良雙線性模型損壞指標之參數，並進行比對與校正。

## 三、建立區域性建築物損壞預估圖

根據縮尺寸 RC 校舍模型與中興土環大樓實測資料之損壞評估結果，採用雙線性模型進行模擬計算之損壞指標，對照建築物實際破損情形較為合理，所以根據該模型建立震損預估圖，建立流程以圖 1 說明。在建立損壞指標前，先繪製不同週期所對應降伏加速度之圖形，如圖 1(a)，並以單自由度雙線性模型給定勁度折減比  $\alpha$ ，當輸入地表加速度歷時，對於給定系統參數可以計算出遲滯能容量

$E_{Hmon}$ ，再利用反應計算韌性需求  $\mu$ 、遲滯能  $E_H$  與損壞指標  $DI_1$  及  $DI_2$ ，繪製如圖 1(b)(c)(d)；最後以建築物系統週期對應損壞指標最大值作為該建築物之損壞指標，所得之值可標註於該區域的建築物上，即完成區域性建築物之震損預估圖。本研究採用 2010 年 3 月 4 號甲仙地震調整 PGA 為 200gal，可以求得成功大學光復校區之震損預估圖如圖 1(e)。

## 四、結論

在結構物受到較大的地震外力下，當結構物的反應已經超過降伏加速度，結構物內部構件可能發生構件降伏，進而產生破壞，損壞指標利用定量方式，來描述結構物的損壞情形大小。依據震損預估圖上之損壞指標結果，可以快速初步瞭解建築物損壞狀況，如對應實際結構物之損壞情形，可作為建築物之初步損壞評估，及修復與補強之依據。

## 參考文獻

1. 辛在勤，灣地區強地動觀測計畫，台灣地區強地動觀測計畫研討會論文 1-10。
2. 吳逸民，地震速報與預警系統之發展—台灣經驗，國立中央大學博士論文。
3. Bozorgnia, Y., and Bertero, V. V., (2001), "Improved shaking and damage parameters for post-earthquake applications", Proceedings of SMIP01 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, Los Angeles, CA.
4. Liu, K.-S., T.-C. Shin and Y.-B. Tsai (1999), "A free field strong motion network in Taiwan: TSMIP", TAO, 10, 377-396.

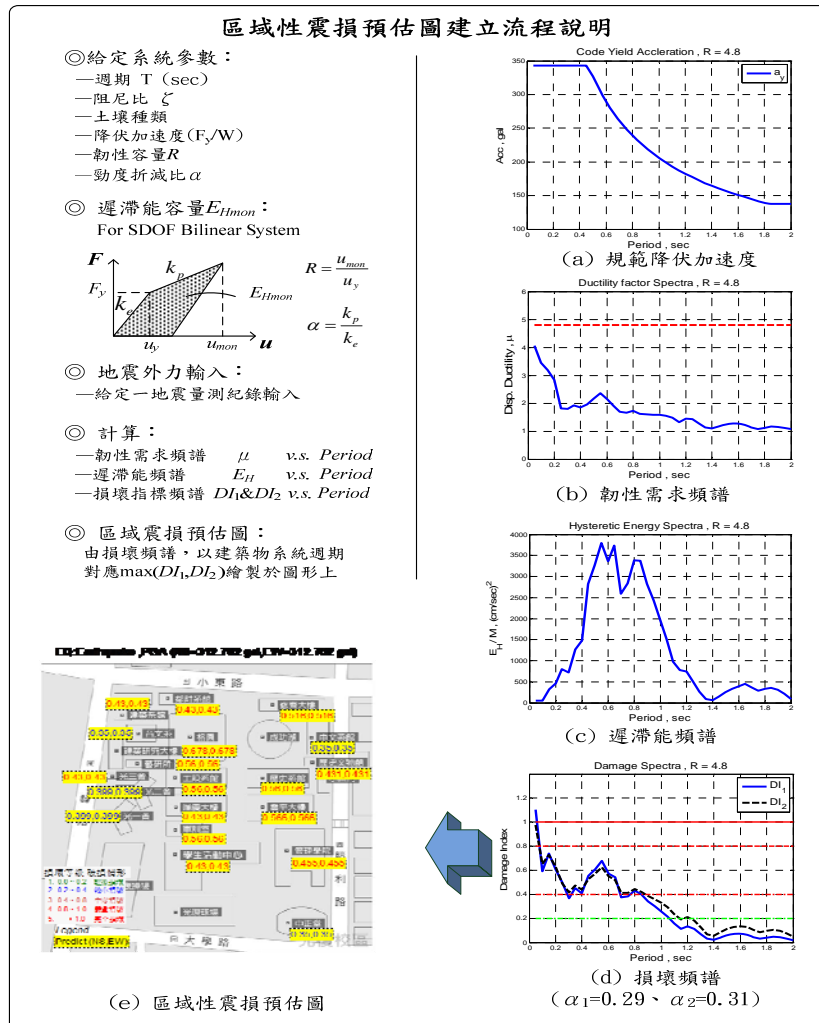


圖 1 區域性震損預估圖之建立流程

# 子計畫四：學校建築震害復原時間之機率曲線建立

## A Establish on Probability Curves of Recovery Time in School Buildings

姚昭智

涂英烈

薛麗梅

Yao, George C. Tu, Ying-Lieh Hsueh, Li-Mei

國立成功大學建築學系

### 摘要

本計畫以學校建築為對象，把國內過去數次地震所引起的 232 所學校的破壞資料及修復過程為調查重點，進行地震損壞後，對學校的整體復原時間（Downtime）作評估分析。復原時間區分成：地震後至招標、招標至開工、開工至完工、完工至開始使用，等四個階段加以分析統計。利用易損性曲線（Fragility Curve）觀念，探討地震 PGA 大小與震害後復原時間的關係，建立學校建築震害後復原時間機率曲線（Probability Curve），提供學校震後迅速預估復原時間依據，俾能從事有效率之修復，使震害對教學活動之影響降至最低。

關鍵詞：復原時間、機率曲線、學校

### Abstract

Downtime of school buildings after an earthquake is estimated in this study. We reviewed 232 school buildings damaged in various earthquake events and their rebuilt process. Downtime is treated as the summation of four stages: Incident to Bidding, Bidding to Ground Breaking, Ground Breaking to Project Complete, and Project Complete to Occupation. The relationship between PGA and downtime was analyzed by the concept of fragility curve. This study offers the downtime probability curve of school buildings which could be a reference to assess downtime of future earthquake in school buildings. According to the probability curves, this study shows that the downtime prediction for school buildings can be executed.

Keyword: downtime, probability curve, school

## 一、前言

目前，國外由 FEMA 所主導之 HAZUS99【1】，及國內由國家地震工程中心(NCREE)所發展的 TELES 軟體【2、3】，可以在地震後提供傷亡人數之概估，但針對於學校建築的復原時間，則缺乏一套國內的資料可用，而無法提供相關資訊。因此根據提案人在 2009 年發表「學校建築中非結構物破壞易損性及修復金額和修復工期機率曲線研究」【4】，調查 2006 年台東地震及恆春地震學校建築的非結構物，評估非結構物的修復金額與修復工期機率曲線。本研究利用上述的概念針對恆春、花蓮、台東及甲仙地震之學校中建築物的復原時間，建立建築物復原時間之機率曲線。探討其工期合理性，使學校經營者在震後能快速掌握修復時間，從事有效率的復原計畫，使教學及各項功能運作正常。

## 二、問卷調查表設計及花蓮地震資料收集

根據上一年度計劃之問卷調查表，調整及簡化表格內容，針對學校受到地震損害到修復完工的時間作為調查的重點。本研究將恆春地震之屏東地區計有 24 所；花蓮地震之花蓮地區計有 67 所；台東地震之台東地區計有 43 所；甲仙地震之嘉義地區、台南地區及高雄地區計有 119 所，合計有 253 所學校納入本計劃做為研究樣本。應用 Weber-Fechner 法則將震度階級 5 細分為 5-與 5+，其分界之 PGA 為 140ga，震度階級 6-與 6+的分界加速度為 315gal。

## 三、學校中建築物於不同復原時間機率曲線比較分析

利用易損性曲線的觀念，將不同時間點之建築物於各個震度階級中不同復原時間之個數，再依據 MCEER 存活率分析方法【5】來繪製該項建築物復原時間之機率曲線。

本研究將各項建築物之修復工期描述分類為短時期、中時期及長時間，分別繪製建築物於不同時間點復原時間機率之機率曲線。將有進行招標工程(263 筆樣本)與未進行招標工程(226 筆樣本)的建築物各別做分析比較。分析後之機率曲線如圖 4-1 所示，表 4-2，顯示學校中建築物各復原時間發生機率表。

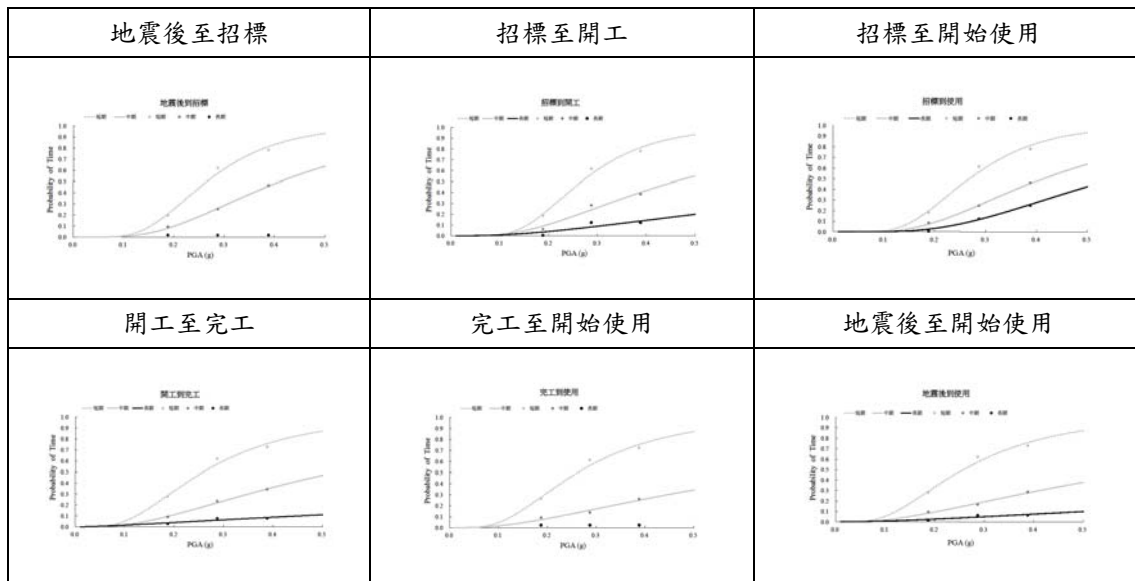


圖 4-1.恆春、花蓮、台東及甲仙地震之學校中建築物於不同復原時間的機率曲線

表 4-1.學校中建築物各復原時間發生機率表

	0.188g			0.287g			0.388g		
	短時期	中時期	長時期	短時期	中時期	長時期	短時期	中時期	長時期
地震後至招標	19.4%	8.2%		58.2%	26.4%		81.7%	46.1%	
招標至開工	20.8%	9.2%	3.5%	57.6%	24.4%	8.3%	81.5%	40.3%	13.7%
開工至完工	27.7%	9.9%	3.7%	57.7%	22.4%	6.1%	75.9%	34.9%	7.8%
完工至開始使用	28.6%	7.5%		56.9%	15.3%		75.6%	26.2%	
招標至開始使用	20.4%	7.5%	2.6%	57.4%	25.5%	11.8%	81.5%	45.6%	25.9%
地震後至開始使用	30.0%	9.5%	1.1%	57.9%	16.6%	4.6%	76.1%	27.9%	6.3%

#### 四、結論

1. 本計劃從 232 所學校調查資料中，利用機率理論之存活率分析，獲得非結構物復原時間之機率曲線。透過該曲線，工程人員可從建築物位址之 PGA，掌握該地區學校中建築物復原時間之機率，進而研判建築物之復原時間，達到學校震後迅速預估復原時間之目的，並提供災後重建參考。
2. 在研究過程中發現，隨著樣本增加或減少，所分析之機率會有所變動，屬於正常現象，如果樣本數達到一定數量則機率表現會趨於穩定。因此，本計畫建議應持續增加樣本資料庫，以達到分析穩定原則。
3. 建築物復原的時間會隨著震度階級提升而變長，但有時地震震度較小時，則有例外情形產生，猜測可能會是建築物興建年代或施工品質等外在因素。
4. 在評估建築物之復原時間機率曲線時，地震後到招標及地震後到開始使用之復原時間較為長，其次招標到開始使用及開工到完工之復原時間，最後招標到開工及完工到開始使用之復原時間較為短。

#### 參考文獻

1. Federal Emergency Management Agency(FEMA), HAZUS99 Technical annual, 1999。
2. 葉錦勳，「台灣地震損失評估系統-TELES」，國家地震工程研究中心，台北，2002。
3. 蔡克銓、葉錦勳，「2007 台灣地震損失評估系統研討會」，國家地震工程研究中心，台北，2007。
4. 涂英烈、姚昭智、洪李陵，「學校建築中非結構物破壞易損性及修復金額和修復工期機率曲線研究」，中國土木水利工程學刊，第二十一卷第四期，台北，2009。
5. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), Seismic Reliability Assessment of Critical Facilities: A Handbook, Supporting Documentation, and Model Code Provisions, Technical Report MCEER-99-0008, USA, 1999.