

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

建立建築物震損圖之研究(III)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-07

執行期間：100年1月1日至100年12月31日

計畫主持人：姚昭智

協同主持人：林其璋、洪李陵、朱世禹

執行機構：成大研究發展基金會

子計畫1：學校建築自動化診斷及損壞評估之研究

子計畫2：鋼筋混凝土民房震損圖研究(III)

子計畫3：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)

子計畫4：學校建築震害復原時間之機率曲線建立

中華民國 100 年 11 月 25 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	建立建築物震損圖之研究(III) 子計畫 1：學校建築自動化診斷及損壞評估之研究		
計畫編號	MOTC-CWB- 100 – E - 07		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	成大研究發展基金會		
年度	100	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：千元)	1100		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100 %	100 %	0 %
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
	1100	1100	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	林其璋		吳坤鴻
報告頁數	11	使用語言	中文
中英文關鍵詞	等震圖、隨機子空間系統識別		
研究目的	本研究主要探討台灣地區典型中小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)，進而求得典型校舍之地震損害評估分佈圖。		
研究成果	本年度計畫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。		
具體落實應用情形	結構系統之安全，有賴有效之健康監測技術與損壞診斷方法之建立。本計畫發展一套有效之結構系統識別技巧，且可用於應用於非地震事件期間之結構健康狀態評估，以達成結構健康連續檢測之目的，可提供未來結構建立監測系統之核心演算技術。		
計畫變更說明	(若有)		

落後原因	(若有)
檢討與建議 (變更或落後之因應對策)	學校建築在救災上通常扮演地區避難所的角色，機能上實屬重要，本研究未來將更進一步應用所發展系統識別技巧於學校建築之損壞分析，建立有效之健康監測技術與損壞診斷方法。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

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	建立建築物震損圖之研究(III) 子計畫 2：鋼筋混凝土民房震損圖研究(III)		
計畫編號	MOTC-CWB-100-E-07		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	成大研究發展基金會		
年度	100	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：千元)	1,100		
執行進度	預定(%)	實際(%)	比較(%)
	100	100	0
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率(%)
	1100	1100	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	洪李陵		黃百誼
報告頁數	19	使用語言	中文
中英文關鍵詞	震損圖、易損度曲線、混凝土低矮民房,damage map, fragility curve, low-rise RC building		
研究目的	台灣位處歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊交界處，偶有災害性地震發生時，首要任務便是儘速展開救災行動。為能快速評估		

	<p>災損分佈、有效組織行動、合理分配資源等等，地震發生後可即時推估各區域如最大地表加速度或譜位移之分佈圖，再透過易損度曲線轉換為各種損壞程度的震損圖，方便相關單位評估規劃救災方案。</p>
<p>研究成果</p>	<p>本文以 921 集集大地震所建立之震損資料庫中，舊台中縣與南投縣境內二、三層樓 RC 民房為研究對象，尋找強地動指標與損壞機率之關係。將篩選處理後的震損資料分為輕微損壞以上(D₂)、中度損壞以上(D₃)、嚴重損壞以上(D₄)和完全損壞(D₅)4類，統計各村里內上述累計損壞程度之民房棟數，另以房屋稅籍資料推估各村里相同類型民房總棟數，即可得各村里內不同損壞程度之震損百分比。</p> <p>本文以下列四種方法建立易損度曲線：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.分組估計法：將損壞指標依組距比、棟數比及單調遞增性等準則劃分區間，進行統計和估計。優點是降低資料變動幅度，缺點為分組方式影響甚大，不易得到穩定的結果。 2.累計估計法：依各村里損壞指標小至大順序，統計累計震損比和估計。此法不需過多的人為假設，亦可確保破壞機率隨損壞指標遞增之趨勢，反映兩者間合理的關係。 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，並假設 5%或 20%之變異係數，據此估計參數的在後分佈平均值。此法可由樣本資料修正 TELES 之推估值，但對推估值的信任程度會影響修正結果。 <p>依上述方法建立了易損度曲線，在地震發生後，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。</p>

具體落實應用情形	本研究採用實測震損資料建立二、三層樓 RC 民房的易損度曲線。在地震發生之後，可經由即時速報測站紀錄迅速推估各地區之損壞指標和同類型民房的各種程度震損機率，方便相關單位即時評估規劃救災方案。本研究之易損度參數可提供中央氣象局納入速報測站估算各地震度系統之中，發佈等震度圖時，一併產生震損圖。
計畫變更說明	(若有)
落後原因	(若有)
檢討與建議 (變更或落後之因應對策)	

政府研究計畫(期中/期末)報告摘要資料表

計畫中文名稱	建立建築物震損圖之研究(III) 子計畫 3：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)		
計畫編號	MOTC-CWB-100-E-07		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	成大研究發展基金會		
年度	100	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：千元)	1100		
執行進度	預定(%)	實際(%)	比較(%)
	100	100	0
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率(%)
	1100	1100	100

研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	朱世禹		曹峻豪
報告頁數	12	使用語言	中文
中英文關鍵詞	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 Bi-Linear Model Damage Index, System Identification, Nonlinear model, Geophysical Database Management System, Damage Forecast Map		
研究目的	本研究除考量結構物受到較大的地震作用下，其反應可能已從線性階段進入非線性(塑性)階段，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，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韌性譜、遲滯能譜以及震損預估圖，探討現有規範建議值於震損評估之適用性。		
研究成果	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，損壞指標為利用一種定量方式，來描述結構物的損壞情形大小。應用學者所提出的損壞指標，其採用理想彈塑模型進行模擬計算韌性需求、遲滯能與損壞指標，並以縮尺模型 RC 校舍建築物與大專院校之中興土環大樓兩棟建築物，在降伏加速度的部份採用台灣設計規範，計算損壞指標並與實際震損情形顯示，採用理想彈塑模型，會造成韌性需求較大，遲滯能累積較多，使得損壞指標計算結果較為大，與實際震損情形較為不符，而若採用雙線性數值模型進行計算之損壞指標，在計算結果其韌性需求與遲滯能累積結果均較以理想彈塑性小，相較之下雙線性模型則較為合適。最後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指標大小，以對應實際結構物之損壞情形，作為建築物之初步損壞頻估，及修復與補強之依據。		
具體落實應用	本研究採用 2010 年 3 月 4 號甲仙地震調整 PGA 為 200gal，利		

情形	用建議流程可以求得成功大學光復校區之震損預估圖。
計畫變更說明	(若有)
落後原因	(若有)
檢討與建議 (變更或落後 之因應對策)	

政府研究計畫(期中/期末)報告摘要資料表

計畫中文名稱	建立建築物震損圖之研究(III) 子計畫 4：學校建築震害復原時間之機率曲線建立		
計畫編號	MOTC-CWB-100-E-07		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	成大研究發展基金會		
年度	100	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：千元)	1100		
執行進度	預定(%)	實際(%)	比較(%)
	100	100	0
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率(%)
	1100	1100	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	姚昭智		涂英烈
報告頁數	24	使用語言	中文
中英文關鍵詞	復原時間、機率曲線、學校；downtime, probability curve, school		

研究目的	收集學校建築過去地震損壞及復原時間，加以整理分析，探討地震 PGA 大小與震害後復原時間之關係，建立震後復原時間機率曲線，藉此發展學校建築震損圖，並了解復原時間與學校替代空間使用狀況，探討其空間便利性與工期合理性，俾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。
研究成果	本計畫從 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，併提供災後重建參考。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。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。
具體落實應用情形	本研究採用調查震損資料建立學校建築損壞復原時間機率曲線。在地震發生之後，可經由迅速推估各學校之損壞復原時間，提供相關單位即時評估規劃救災方案。本研究之損壞復原時間機率曲線可提供中央氣象局納入速報測站估算各地震度系統之中，發佈等震度圖時，一併產生震損圖。
計畫變更說明	(若有)
落後原因	(若有)
檢討與建議 (變更或落後之因應對策)	

子計畫1：學校建築自動化診斷及損壞評估之研究

林其璋 梁晉得
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

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.

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，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。

依有限量測之建築結構診斷技術及損壞評估方法

考慮含比例阻尼之 N 樓層平面剪力結構，受地表加速度 $\ddot{u}_g(t)$ ，其運動方程式可表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{M} = \text{diag}[m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_l \quad \cdots \quad m_{N-1} \quad m_N] \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \vdots \\ & & \ddots & & & \\ & & & -k_l & k_l + k_{l+1} & -k_{l+1} & \cdots \\ & & & & \ddots & & \\ \vdots & & & & & -k_{N-1} & k_{N-1} + k_N & -k_N \\ 0 & \cdots & & & \cdots & -k_N & k_N \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (3)$$

其中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分別為 $N \times N$ 之質量、阻尼和勁度矩陣， $\mathbf{u}(t)$ 表 $N \times 1$ 之結構相對

地表位移向量， r 表 $N \times 1$ 之外力作用位置矩陣； m_l 及 k_l 分別為第 l 樓層樓版之質量及第 l 樓層間勁度值。由此可得之結構系統之特徵方程式表示如下：

$$\mathbf{K}\Phi = \omega^2 \mathbf{M}\Phi \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \text{diag}[\omega_1^2 \quad \omega_2^2 \quad \cdots \quad \omega_i^2 \quad \cdots \quad \omega_{N-1}^2 \quad \omega_N^2], \\ &(\omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \cdots \leq \omega_i^2 \leq \cdots \leq \omega_{N-1}^2 \leq \omega_N^2) \\ \Phi_{N \times N} &= [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \cdots \quad \phi_i \quad \cdots \quad \phi_{N-1} \quad \phi_N] \\ \phi_{i \times 1} &= [\phi_{1i} \quad \phi_{2i} \quad \cdots \quad \phi_{li} \quad \cdots \quad \phi_{(N-1)i} \quad \phi_{Ni}]^T \end{aligned}$$

對於第 i 模態而言，藉由結構系統物理參數與模態參數之關係，改寫特徵方程式表示如下：

$$\omega_i^2 = \frac{\phi_i^T \mathbf{K} \phi_i}{\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i} \quad (5)$$

當結構因受震等因素而損壞，導致層間勁度折減，並且假設其樓版質量不變。其第 i 模態自然頻率平方變化可表示如下：

$$\Delta \omega_i^2 = \omega_{0i}^2 - \omega_{Di}^2 = \frac{\phi_{0i}^T \mathbf{K}_0 \phi_{0i}}{\phi_{0i}^T \mathbf{M} \phi_{0i}} - \frac{\phi_{Di}^T \mathbf{K}_D \phi_{Di}}{\phi_{Di}^T \mathbf{M} \phi_{Di}} \quad (6)$$

其中下標“0”表示為初始結構，“D”表示為損壞結構。假設層間勁度為輕微、中度折減，合理假設損壞前後振態之變化可忽略即

$$\Phi_0 \approx \Phi_D \quad (7)$$

則(7)式可改寫如下：

$$\Delta \omega_i^2 = \frac{\phi_{0i}^T \Delta \mathbf{K} \phi_{0i}}{\phi_{0i}^T \mathbf{M} \phi_{0i}} \quad (8)$$

其中整體勁度變化矩陣

$$\Delta \mathbf{K} = \mathbf{K}_0 - \mathbf{K}_D$$

將(8)中整體勁度變化矩陣，以層間勁度方式表示，則可改寫表示如下：

$$\Delta \omega_i^2 = \frac{\sum_{l=1}^N \Delta k_l (\Delta \phi_{li})^2}{\phi_{0i}^T \mathbf{M} \phi_{0i}} \quad (9)$$

其中

$$\Delta\phi_{il} = \begin{cases} \phi_{il} - \phi_{i(l-1)}, & l = 2 \sim N \\ \phi_{il}, & l = 1 \end{cases}; \Delta k_l = k_{l0} - k_{lD} = k_{l0} \cdot \alpha_l \quad (10)$$

其中式(10)中之 α_l 為第 l 樓層間勁度折減比(Story Stiffness Reduction Ratio, SSRR)，表示層間勁度折減佔初始層間勁度之比例，其值介於0至1之間，表示層間無損壞到完全損壞之情形。將式(10)代入式(9)並同除 ω_{i0}^2 ，可表示如下：

$$\frac{\Delta\omega_i^2}{\omega_{i0}^2} = \frac{\sum_{l=1}^N k_{0l} (\Delta\phi_{il})^2}{\omega_{i0}^2 \cdot \boldsymbol{\phi}_{0i}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_{0i}} \cdot \alpha_l = \frac{\sum_{l=1}^N k_{0l} (\Delta\phi_{il})^2}{\boldsymbol{\phi}_{0i}^T \mathbf{K}_0 \boldsymbol{\phi}_{0i}} \cdot \alpha_l = \frac{\sum_{l=1}^N S_{0il}}{S_{0i}} \cdot \alpha_l \quad (11)$$

其中 S_{0i} 為第 i 模態之模態應變能(Modal Strain Energy)， S_{0il} 為存在第 l 樓層間，第 i 模態之模態應變能。定義第 l 樓層間所佔其第 i 模態之模態應變能比值為模態應變能比(Modal Strain Energy Ratio, MSER)，可表示如下：

$$\lambda_{il} = \frac{k_{0l} (\Delta\phi_{il})^2}{\boldsymbol{\phi}_{0i}^T \mathbf{K}_0 \boldsymbol{\phi}_{0i}} = \frac{S_{0il}}{S_{0i}} \quad (12)$$

另外，定義第 i 模態之自然頻率平方變化比(Squared Natural Frequency Change Ratio, SFCR)，可表示如下：

$$\Omega_i = \frac{\omega_{0i}^2 - \omega_{Di}^2}{\omega_{i0}^2} = \frac{\Delta\omega_i^2}{\omega_{i0}^2} \quad (13)$$

則利用式(12)與(13)可將(11)簡化表示如下：

$$\Omega_i = \sum_{l=1}^N \lambda_{il} \cdot \alpha_l$$

考慮多個模態 $P(P \leq N)$ ，式(13)可表示為：

$$\boldsymbol{\Omega}_{P \times 1} = \mathbf{A}_{P \times N} \cdot \boldsymbol{\alpha}_{N \times 1} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Omega}_{P \times 1} &= [\Omega_1 \quad \Omega_2 \quad \cdots \quad \Omega_i \quad \cdots \quad \Omega_{P-1} \quad \Omega_P]^T \\ \boldsymbol{\alpha}_{N \times 1} &= [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_i \quad \cdots \quad \alpha_{N-1} \quad \alpha_N]^T \end{aligned}$$

將式(14)展開可得

$$\begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \vdots \\ \Omega_i \\ \vdots \\ \Omega_{P-1} \\ \Omega_P \end{bmatrix}_{P \times 1} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1l} & \cdots & \lambda_{1(N-1)} & \lambda_{1N} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2l} & \cdots & \lambda_{2(N-1)} & \lambda_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{i1} & \lambda_{i2} & & \lambda_{il} & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \lambda_{(P-1)1} & \lambda_{(P-1)2} & & & & \lambda_{(P-1)(N-1)} & \lambda_{(P-1)N} \\ \lambda_{P1} & \lambda_{P2} & \cdots & \cdots & \cdots & \lambda_{P(N-1)} & \lambda_{PN} \end{bmatrix}_{P \times N} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \\ \vdots \\ \alpha_{N-1} \\ \alpha_N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (15)$$

上式即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。其中，SFCR可由量測結構受損前後之頻率變化求得；MSER則須由結構受損前的完整模態參數做計算，本案將依非完全量測系統重建之；SSSR則是吾人想得知之各樓層勁度折減程度。

損壞評估判別分析

若勁度折減集中於某 r 樓層間，則層間勁度折減比 α_r 不為零，其餘樓層之 α 皆為零，可將(15)改寫表示如下：

$$\Omega_{P \times 1} = \lambda_r \cdot \alpha_r \quad (16)$$

其中 $\Omega_{P \times 1}$ (SFCR)為多模態自然頻率平方變化比， λ_r (MSER)為 $P \times 1$ 之向量，其代表第 r 樓層間之多模態應變能比。從上式可知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，以下為其說明。首先利用初始結構建立圖像資料庫， $A_{P \times N}$ 之第 r 行，為 $P \times 1$ 之向量，可表示如下：

$$\lambda_r = [\lambda_{1r} \quad \lambda_{2r} \quad \cdots \quad \lambda_{ir} \quad \cdots \quad \lambda_{(P-1)r} \quad \lambda_{Pr}]^T \quad (17)$$

將 λ_r 除以其向量中最大元素，可表示如下：

$$\bar{\lambda}_r = \frac{\lambda_r}{\|\lambda_r\|_{\infty}} \quad (18)$$

$\bar{\lambda}_r$ 係代表結構第 r 樓層間損壞時，第 r 層間模態應變能比，各模態間之比例關係。將此比例關係，以長條圖表示，即為“MSER圖像”。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。

接著，利用系統識別技巧針對損壞結構進行系統識別，即使在有限量測之情況，亦可識別出 $P(P \leq N)$ 個模態頻率，藉由式(16)，計算多模態之自然頻率平方變化比，即式(15)之 $\Omega_{P \times 1}$ ，其中 $P(P \leq N)$ 代表所取模態個數。 $\Omega_{P \times 1}$ 可表示如下：

$$\Omega_{P \times 1} = [\Omega_1 \quad \Omega_2 \quad \cdots \quad \Omega_i \quad \cdots \quad \Omega_{P-1} \quad \Omega_P]^T \quad (19)$$

將 Ω 除以其向量中最大元素，可表示如下：

$$\bar{\Omega} = \frac{\Omega}{\|\Omega\|_{\infty}} \quad (20)$$

$\bar{\Omega}$ 係代表某一未知樓層間損壞時，自然頻率平方變化比，各模態間之比例關係。將此比例關係，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，而其樓層勁度折減可直接由式(20)計算。

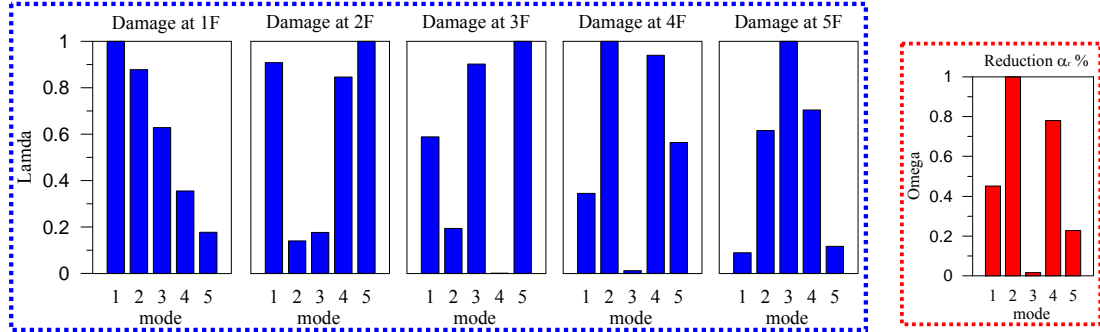


圖 1 MSER 圖像資料庫

圖 2 SFCR 圖像

由於結構的破壞並不一定為單樓層，針對多樓層同時損壞，式(14)係代表結構多模態頻率變化與多層間勁度之關係，透過矩陣運算改寫表示如下：

$$\alpha_{N \times 1} = A_{P \times N}^{\oplus} \cdot \Omega_{P \times 1} \quad (21)$$

其中上標“ \oplus ”表示虛擬反矩陣(Pseudo Inverse)。 $\alpha_{N \times 1}$ 即表示多層建築結構各樓層間之損壞情況。式(21)須符合損壞前後振態之變化可忽略之假設，即任一樓層間勁度折減，振態不產生嚴重改變；式(21)另有模態個數 $P(P \leq N)$ 上之限制，當 $P \rightarrow N$ 則其準確度愈高。層間損壞法之限制與影響，本案亦將作進一步之敏感度分析與探討。圖3為本研究方法之流程圖

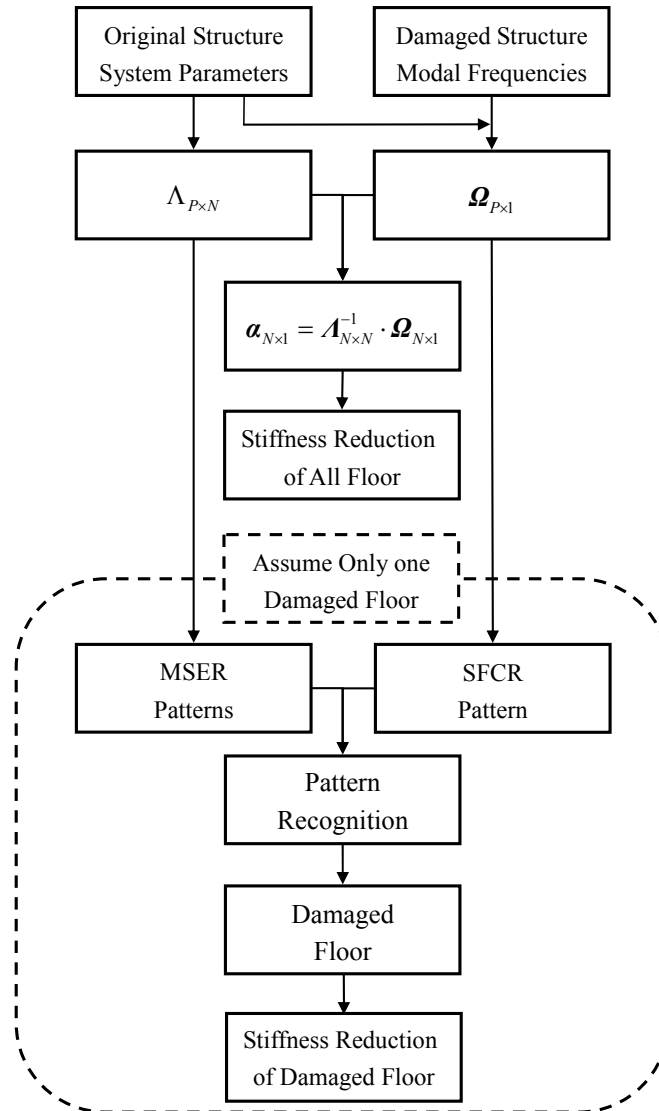


圖 3 層間損壞位置偵測流程

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 $P(P \leq N)$ 。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。圖3所示即一般模糊推論系統演算之流程圖，主要分為以下三個階段。模糊化(Fuzzification)、模糊推論(Fuzzy Inference)、解模糊化(Defuzzification)。圖4為自動化圖像系統流程圖，以SFCR圖像為系統輸入，MSER圖像資料庫用以建立模糊規則，經模糊推論後，系統輸出則為受損樓層。

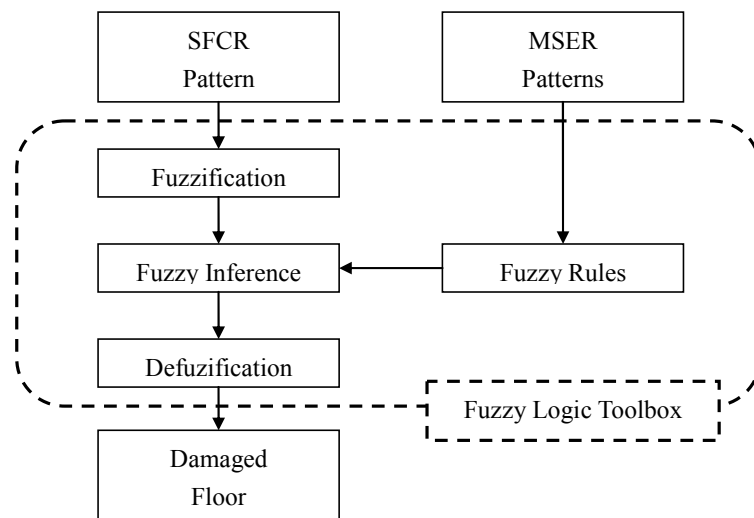


圖 4 自動化圖像判別系統(模糊推論系統)

試驗量測紀錄分析

為驗證本計畫發展之層間損壞偵測法，利用國家地震工程研究中心(National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE)所完成標竿構架振動台試驗之量測資料進行系統識別，並應用層間損壞偵測法，針對損壞偵測結果進行驗證與討論。試驗結構之空構架為由型鋼組成之三層樓結構，每層樓各為單跨，長向(X向)跨距3公尺，短向(Y向)跨距2公尺，每層樓高3公尺。完整模型結構如圖5所示。標竿結構以剛性樓版以及鋼柱組合而成，剛性樓版由 $H150 \times 150 \times 7 \times 10$ 之型鋼為梁並與 $25mm$ 厚之鋼板焊接而組成，而鋼柱亦採用 $H150 \times 150 \times 7 \times 10$ 之型鋼，另於每層樓版以質量塊加載，各樓層總重達6000公斤，結構尺寸如表一。

本計畫以2種類型構架分別表示未損壞結構(undamaged structure)及損壞構架(damaged structure)，如圖6所示。未損壞結構即為標竿構架之空構架，損壞結構則為空構架底層柱型鋼翼版進行削角，削角位置及型式如圖6所示。試驗僅對長向(X向)輸入地震力，量測各樓層樓版之長向(X向)動態反應(加速度歷時)，利用試驗之量測資訊進行系統識別，其加速計安裝位置如圖6所示，依其加速度計之配置與構架形式，系統識別之假想模型，係為不考慮扭轉耦合效應之三層樓平面剪力結構。

表1 國家地震工程研究中心三層樓標竿構架尺寸

Floor Dimension:	3mx2m
Floor Height:	3m
No. of floor:	3 stories
Floor mass:	6 ton/floor
Beam:	H150x150x7x10
Column:	H150x150x7x10
Floor plate:	25mm



圖5 NCREE三層樓標竿構架示意圖

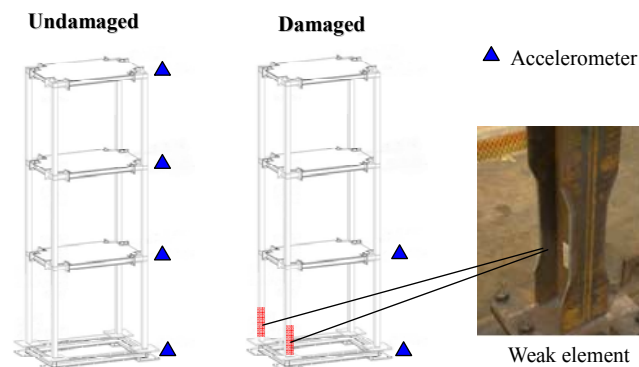


圖6 未損壞及損壞結構

為建立初始結構之MSER圖像資料庫，以全量測訊號藉由系統識別獲得平面之結構模態參數，並配合SRIM系統識別技巧[1-2]計算結構層間勁度，藉此建立初始結構模型，作為MSER圖像資料庫建立之依據。另系統識別損壞結構，係採用單一樓層(底層)之輸出量測訊號，並使用基底量測訊號為輸入，可識別損壞結構之模態頻率，並搭配前述初始結構之模態頻率，即可建立SFCR圖像。最後利用本計畫發展自動化圖像辨識方法判別層間損壞位置，並計算其層間勁度折減比。未損壞及損壞結構系統識別結果之系統模態參數如表2與表3所示，MSER圖像資料庫如圖7(a)所示，SFCR圖像如圖7(b)，由層間損壞偵測法經比對後顯示第一樓層間損壞，與事實相符，層間勁度折減比達15%，證實本計畫所提出透過系統識別與該層間損壞偵測法，可依部份量測資訊，對結構進行健康診斷。

表2 未損壞結構之系統識別結果及其模態參數

System Modal Parameter – (undamaged)			
Mode	1	2	3
Frequency (Hz)	1.07	3.26	5.13
Damping ratio (%)	1.97	0.21	0.18
Mode shapes	1	0.41	-1.00
	2	0.79	-0.50
	3	1.00	0.84

表3 損壞結構之系統識別結果及其模態參數

System Modal Parameter – (damaged)			
Mode	1	2	3
Frequency (Hz)	1.03	3.16	5.08
Damping ratio (%)	0.97	0.32	0.20
Mode shapes	1	N/A	N/A
	2	N/A	N/A
	3	N/A	N/A

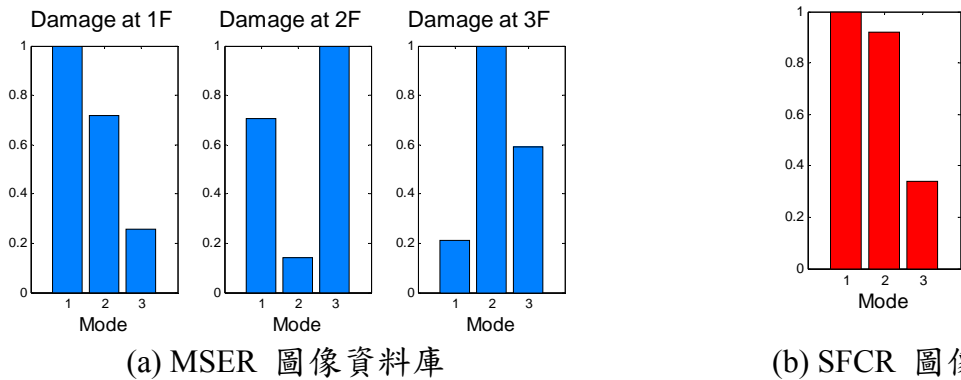


圖 7 MSER 及 SFCR 圖像資料

結論

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.
4. Pandey, A. K., and Biswas, M., “Damage Detection in Structures using Changes in Flexibility”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 169, No. 1, pp. 3-17, 1994.

子計畫 2：鋼筋混凝土民房震損圖研究(III)

洪李陵 林彥谷
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。

關鍵字：震損圖、易損度曲線、混凝土低矮民房

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. The damage maps of those buildings are finished finally.

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

前言

台灣位於環太平洋地震帶上，地震發生頻繁，偶有強烈地震發生，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。由於地震的發生具高度不確定性，在無法預知的情況下，造成的損失對於台灣地區經濟、社會發展影響甚鉅。迄今為止，仍未有能夠有效預知地震發生的方法，若能提供一套建築物在地震作用下超越不同損害程度的機率，對於地震發生後之修復所需時間與成本評估作業上能有一定的助益，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。

研究目的及意義

台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界，屬環太平洋地震帶，一旦大地震發生，造成的災害範圍甚廣，影響甚鉅，且越靠近震央之建築物，受損的機率也越大。因此，除了加強結構物的耐震設計、提高建築物的耐震能力外，能夠在地震發生後，迅速推估各地的受損災情，便能有效率的執行救災行動，以期地震產生的災害降至最低。

本研究主要目的在採用 921 集集大地震所造成的實際民房損壞資料與強地動紀錄建立易損度曲線，方法含分組估計法、累計估計法、最大概似法與貝氏估計法。當地震發生時，即可由強地動速報測站計算損壞指標，代入易損度曲線估算損壞機率，建立該類型民房之震損圖。本文比較建立易損度曲線的不同作法，提供易損度曲線和震損圖，對日後評估地震造成鋼筋混凝土低矮民房的損害程度和範圍能有所裨益。

建築物震損資料和強地動紀錄

921 集集大地震的震損資料庫登錄了震損民房的地址、種類、經緯度座標、樓層數和損壞程度等資料，當時登記的震損民房資料庫中，連棟民房統一登記為一筆資料，而本研究是以民房棟數為單位做統計分析，因此須將連棟民房資料整理成以戶為單位。本研究以舊台中縣和南投縣境內鋼筋混凝土造民房的震損分佈為主，其中因二、三層樓民房居絕對多數，故以這兩類 RC 民房為研究對象。為了建立易損度曲線，在此將震損資料庫的損壞程度重新分類為：(1)完全損壞(Complete, C)：包含原始震損資料庫的 1.完全毀壞(整體或部分塌陷)和 2.完全毀壞(整體或部分傾斜)，即民房無法再使用。(2)嚴重損壞(Extensive, E)：原始震損資料庫的 3.嚴重破壞(補強或拆除)，即民房大量補強後可再使用。(3)中度損壞(Moderate, M)：原始震損資料庫的 4.中度破壞(可修復或補強)，即適量補強或大量修復後可再使用。(4)輕微損壞(Slight, S)：原始震損資料庫的 5.輕度破壞(可修復)，即民房適量修復後可再使用。以舊台中縣和南投縣的村里為單位，依據上述分類，統計二層樓和三層樓 RC 民房各種損壞程度的棟數。計算損壞百分比需以各村里同類型建築物的總棟數為母數，然由震損民房資料庫無法確切得知二層樓和三層樓 RC 民房的無損壞棟數，因此須藉由房屋稅籍資料來統計總棟數。此資料由國家地震工程研究中心以房屋稅籍資料統計整理之，各損壞程度震損百分比可由各村里內該損壞程度之震損棟數除以總棟數而得。

根據中央氣象局的災害地震資料，可在個案報導的 921 集集大地震各地震度原始資料中[1]，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，包括舊台中縣與南投縣所有 39 個自由場強地動觀測站，以及台東縣、舊台南縣、花蓮縣、苗栗縣、雲林縣、嘉義縣、彰化縣靠近舊台中縣與南投縣的 59 個自由場強地動觀測站，俾便以內插方式計算地動強度或震損參數(如最大地表加速度 PGA 或

譜位移等 S_d) 的分佈。震損民房資料庫和自由場測站皆有記錄經緯度座標，但兩者之座標系統不同，前者為 TWD67，後者為 TWD97，兩者在座標系統上的參考橢圓體並不相同，若弄錯座標系統，其結果可能相差一公里，因此將測站資料的原始座標系統 TWD97 轉換為 TWD67，使兩資料庫經緯度座標系統一致。

最大地表加速度可直接由測站紀錄資料取得，而譜位移則涉及單自由度系統的自然振動周期和阻尼比，黃偉倫[2]和盧志清[3]經由系統識別和迴歸分析，提出不分長、短向時， N 層樓 RC 民房基本振態參數的經驗公式如下[3]：

$$\text{基本振動週期} \quad T_1 = 0.081N^{0.802} \text{ (sec)} \quad \sigma_{\ln T_1|N} = 0.249$$

$$\text{基本振態阻尼比} \quad \mu_{\zeta_1} = 0.034 \quad \sigma_{\ln \zeta_1} = 0.629$$

然而盧志清[3]在系統識別與迴歸分析時，採用的實際建築物中，低矮樓層的資料並不多，且基本振動週期的迴歸公式在低矮樓層部份為低估，故將二層樓與三層樓 RC 民房之中位數基本振動週期加上一個標準差，因此本研究採用之二、三層樓 RC 民房之基本振動週期與阻尼比如下所示：

$$\text{二層樓}(N=2) \quad T_n = 0.1812 \text{ sec} \quad \zeta = 0.034$$

$$\text{三層樓}(N=3) \quad T_n = 0.2508 \text{ sec} \quad \zeta = 0.034$$

資料分析和篩選

由於斷層上盤的活動會較下盤劇烈，越靠近斷層線的地表各類活動更為劇烈，而舊台中縣和南投縣各村里可能位於斷層上盤、下盤或是斷層線經過，故 RC 民房受損不一定全為強地動之故，亦可能因斷層錯動、土層滑動、土壤液化等造成。本文僅探討因地表振動造成 RC 民房損壞，故斷層錯動造成的損壞資料不應列入統計。然而當初登錄震損資料時，並無詳細記錄各民房的損壞原因，因此在探討強地動損壞指標時，應盡量剔除非地表振動所造成之損壞情況。經由初步分析，發現位於斷層線上之村里在較小的譜位移時，已有相當大的損壞百分比，其原因可能是斷層錯動或是土層滑動，也可能是斷層線附近的譜位移無法以遠處測站紀錄內插或外插之，以目前的資訊無法正確推估或修正，因此在後續的易損度曲線建立時，位於斷層線上的 76 個村里資料將不列入統計。

本文選取 98 個測站紀錄，其中有 77 個測站位於下盤，21 個測站位於上盤，故測站大多分佈在斷層下盤，而上盤部份在斷層邊界的測站並不多，因此以全部測站紀錄推估的損壞指標，在上盤靠近斷層處將有低估現象，故考慮以車籠埔斷層為分界，分別以上、下盤的測站紀錄內插推估上、下盤村里的最大地表加速度和譜位移，並繪製為等損壞指標圖。以二層樓 RC 民房為例，等譜位移圖分別示於圖 1 及圖 2，可發現 TCU052 與 TCU068 兩測站紀錄會使推估的譜位移呈現越靠近斷層越小的趨勢，將低估部份村里的損壞指標。排除此兩測站紀錄，採用其餘 19 個上盤測站紀錄重新推估損壞指標，則能呈現越靠近斷層越大的趨勢，因此後續建立易損度曲線時，皆排除此兩測站紀錄。

斷層處為不連續面，上、下盤損壞指標的變化各有不同趨勢。採用所有測站紀錄或僅用上盤測站紀錄分別推估上盤各村里的二、三層樓 RC 民房譜位移，並取各村里的平均值為損壞指標代表值，對應於該村里之損壞百分比，結果示於圖 3 及圖 4。此兩圖顯示僅採用上盤測站紀錄內插推估之上盤村里的譜位移比採用所有測站紀錄者來得高，因其不受斷層下盤測站較低紀錄影響之故。相對之下，採用所有測站紀錄或僅用下盤測站紀錄推估譜位移分佈，其差異比較有限。因此獨立採用上盤測站紀錄推估上盤各村里的損壞指標時，可減少靠近斷層各村里的損壞指標被低估的可能性。

在排除車籠埔斷層所經過之村里及 TCU052 與 TCU068 兩測站紀錄的前提下，本文以車籠埔斷層為分界，位於上盤的村里以上盤測站紀錄推估損壞指標分佈，據以選取上盤各村里的平均損壞指標為代表值；下盤的村里則以下盤測站紀錄推估損壞指標分佈，據以選取下盤各村里的平均損壞指標為代表值，作為建立易損度曲線之用。

易損度曲線

易損度曲線以損壞指標預測發生各種損壞狀態的超越機率，其橫軸為損壞指標，如最大地表加速度、譜位移、或樓層變位角等等；縱軸則為超越不同損壞狀態的機率，其值介於 0 至 1 之間。本文選取較能表現系統特性之譜位移作為損壞指標，定義累計損壞程度如下： $D_2 = S \cup M \cup E \cup C$ 、 $D_3 = M \cup E \cup C$ 、 $D_4 = E \cup C$ 和 $D_5 = C$ ，分別代表輕微損壞以上、中度損壞以上、嚴重損壞以上和完全損壞。假設建築物達到某一損壞程度 D_j 時，所對應之損壞指標為對數常態分佈之隨機變數 DI ，其累積分佈函數即為易損度曲線，可以標準常態分佈的累積分佈函數 Φ 描述如下：

$$P[D_j | DI = S_d] = \Phi\left(\frac{\ln S_d - \lambda_j}{\zeta_j}\right) \quad j = 2, 3, 4, 5$$

所謂推導或建立易損度曲線，即是以理論模式、數值分析、試驗數據或是實際震損資料估計上述對數常態分佈之參數，方式和方法不一。

對變動幅度大的資料而言，將整個資料範圍劃分為數個區間，各資料值則按其大小分配至所歸屬的區間，並選定區間內資料的某一統計性質(如平均數)為代表值，稱為分組估計法(GE)。假設各種累計損壞程度所對應之損壞指標為對數常態分佈，將如式(1)所示之目標函數最小化，進行非線性迴歸分析，可推估對應累計損壞程度 D_j 之損壞指標 S_d 呈對數常態分佈的參數值 λ_j 和 ζ_j ：

$$\Delta_j^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ P_{ji} - \Phi\left[\frac{\ln(\bar{S}_d)_i - \lambda_j}{\zeta_j}\right] \right\}^2 \quad (1)$$

式中，下標 i 代表第 i 個 S_d 區間， n 為 S_d 區間總數，下標 j 代表累計損壞程度 D_j ， $(\bar{S}_d)_i$ 為第 i 個 S_d 區間的平均數， P_{ji} 為第 i 個 S_d 區間內達到損壞程度 D_j 的機率，本文以實際震損資料的損壞棟數與房屋稅籍資料的總棟數之比率估算。首先選擇將損壞指標 S_d 劃分為四個區間，並以不等距分組的方式估算 $(\bar{S}_d)_i$ 和 P_{ji} ，再建立易損度曲線。因為分區的範圍和樣本數的多寡皆會影響易損度曲線的推定密合度和可靠性，在劃分區間時，作了下列三項限制：

1. 組距比： $a_l \leq (\Delta S_d)_i / \sum (\Delta S_d)_i \leq a_u \quad i=1,2,3,4$
2. 棟數比： $b_l \leq n_i / \sum n_i \leq b_u \quad i=1,2,3,4$
3. $0 \neq (n_1)_{D_2} / n_1 < (n_2)_{D_2} / n_2 < (n_3)_{D_2} / n_3 < (n_4)_{D_2} / n_4$

限制組距比和棟數比的上下限，可避免各分區的範圍和資料數相差過於懸殊，限制 3 則確保各分區累計損壞程度比率估算的遞增性。在滿足上述三項限制條件下，對應於誤差平方和最小之分組方式的詳細資料列於表 1，二、三層樓 RC 民房選取最佳分組方式估計易損度參數的結果分別列於表 2 和表 3。

累計估計法(CE)乃將條件機率的前提改為損壞指標小於等於 S_d 。將各村里的平均損壞指標 $(\bar{S}_d)_i$ 由小到大排序後，則損壞機率依累計棟數比估算如下：

$$P[D_j | DI \leq (S_d)_k] = \frac{\sum_{i=1}^k (n_{D_j})_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$$

其中 n_i 為第 i 個村里 RC 民房總棟數， $(n_{D_j})_i$ 為該村里損壞狀態達 D_j 的 RC 民房棟數。累計估計法可視為將原本起伏變動很大的離散資料，以累加的方式形成一條較為平滑的曲線。欲採用累計棟數比 $P(D|Y \leq y)$ 來估算 $P(D|Y = y)$ 之參數 λ 與 ζ ，必須有其對應關係，公式推導如下：

$$P(D|Y = y) = \frac{P(D \cap Y = y)}{P(Y = y)} = \frac{P(D \cap Y = y)dy}{f_Y(y)dy} = \Phi\left(\frac{\ln y - \lambda}{\zeta}\right)$$

$$P(D|Y \leq y) = \frac{P(D \cap Y \leq y)}{P(Y \leq y)} = \frac{P(D \cap Y \leq y)}{F_Y(y)}$$

式中 $f_Y(y)$ 和 $F_Y(y)$ 分別為損壞指標 Y 的機率密度函數和累積分佈函數，兩者為積分關係， $F_Y(y) = \int^y f_Y(y')dy'$ ，而

$$\begin{aligned} P(D \cap Y \leq y) &= \int^y P(D \cap Y = y')dy' = \int^y P(D|Y = y')f_Y(y')dy' \\ &= \int^y \Phi\left(\frac{\ln y' - \lambda}{\zeta}\right)f_Y(y')dy' \end{aligned}$$

故條件機率 $P(D|Y \leq y)$ 可表示為：

$$P(D|Y \leq y) = \frac{\int^y \Phi\left(\frac{\ln y' - \lambda}{\zeta}\right) f_Y(y') dy'}{\int^y f_Y(y') dy'} \quad (2)$$

式(2)涉及損壞指標 Y 的機率分佈函數，由於本文的損壞指標為村里的平均譜位移，難以追溯其機率分佈來源，在此假設為簡單的離散均勻分佈：

$$f_Y(y) = \delta(y - y_i) / n_T \quad i = 1, 2, \dots, n_T$$

其中 n_T 為村里總數， δ 為 Dirac Delta 函數， y_i 為各村里的損壞指標，則式(2)可改寫為：

$$P(D|Y \leq y_k) = \frac{\frac{1}{n_T} \sum_{i=1}^k \Phi\left(\frac{\ln y_i - \lambda}{\zeta}\right)}{k/n_T} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Phi\left(\frac{\ln y_i - \lambda}{\zeta}\right)$$

以非線性迴歸分析將式(3)所示之目標函數最小化，即可推估出對應累計損壞程度 D_j 之損壞指標呈對數常態分佈的參數值 λ_j 與 ζ_j ：

$$\Delta_j^2 = \sum_{k=1}^{n_T} \left[\frac{\sum_{i=1}^k (n_{D_j})_i}{\sum_{i=1}^k n_i} - \frac{\sum_{i=1}^k \Phi\left(\frac{\ln(\bar{S}_d)_i - \lambda_j}{\zeta_j}\right)}{k} \right]^2 \quad (3)$$

二、三層樓 RC 民房以累計估計法推估易損度參數的結果分別列於表 2 和表 3。

最大概似法(MLE)為統計估計常用的一種方法，利用樣本出現值來推估機率分佈的參數值。假設隨機變數 X ，其機率密度函數為 $f_X(x; \theta)$ ，其中 θ 為參數，在隨機取樣的前提下，得到 n 個相互獨立樣本值 x_1 、 x_2 、...、 x_n 的可能性為：

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = f_X(x_1; \theta) f_X(x_2; \theta) \dots f_X(x_n; \theta)$$

此即為觀測值 x_1 、 x_2 、...、 x_n 的聯合機率密度函數，亦稱為參數 θ 的概似函數，可簡示為 $L(\theta)$ 。使此概似函數 $L(\theta)$ 為最大的 $\hat{\theta}$ ，稱為 θ 的最大概似估計值，故將 $L(\theta)$ 對 θ 微分，並使之為 0 而求得 $\hat{\theta}$ ，此時概似函數往往為最大。

以本文所需推定之參數 λ 與 ζ 而言，其概似函數可表示如下：

$$L(\lambda, \zeta) = \prod_{i=1}^{n_T} \binom{n_i}{(n_D)_i} P_i^{(n_D)_i} (1 - P_i)^{n_i - (n_D)_i} \quad (4)$$

其中 $P_i = \Phi\left[\frac{\ln(\bar{S}_d)_i - \lambda}{\zeta}\right]$ ， n_i 為某一村里 RC 民房總棟數， $(n_D)_i$ 為該村里超越某一損壞程度的民房棟數。由於概似函數為參數 θ 的乘積函數，所以可將概似函

數取對數，再對各變數偏微分，以求其最大值，即為參數估計值：

$$\ln L(\lambda, \zeta) = \sum_{i=1}^{n_T} \ln \binom{n_i}{(n_D)_i} + \sum_{i=1}^{n_T} (n_D)_i \ln P_i + \sum_{i=1}^{n_T} [n_i - (n_D)_i] \ln(1 - P_i)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial \ln L(\lambda, \zeta)}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^{n_T} \frac{P_i}{\zeta(1 - P_i)} \left[n_i - \frac{(n_D)_i}{P_i} \right] = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\lambda, \zeta)}{\partial \zeta} = \sum_{i=1}^{n_T} \frac{\ln(\bar{S}_d)_i - \lambda}{\zeta^2} \frac{P_i}{1 - P_i} \left[n_i - \frac{(n_D)_i}{P_i} \right] = 0 \end{cases}$$

二、三層樓 RC 民房以最大概似法估計易損度參數的結果分別列於表 2 和表 3。

要正確推定參數值，需大量有代表性的樣本資料，但工程上的問題，資料往往有限，或是局限於一側，因此在推定參數時，若已有判斷性的資料，可配合樣本資料來作修正，即為貝氏估計法(BE)。假設機率分佈函數中，參數 θ 也是隨機變數，其更新關係式如下：

$$f''(\theta) = kL(\theta)f'(\theta)$$

式中， $f'(\theta)$ 稱為在前機率密度函數， $L(\theta)$ 為 θ 的概似函數，已於前述最大概似法中建立， $f''(\theta)$ 稱為在後機率密度函數，而正規化常數 $k = \left[\int_{-\infty}^{\infty} L(\theta)f'(\theta)d\theta \right]^{-1}$ ，則參數 θ 的估計值可以平均值推定之：

$$\hat{\theta}'' = \int_{-\infty}^{\infty} \theta f''(\theta)d\theta$$

TELES 以側推曲線和容量震譜推估 λ 和 ζ ，其中適用於中耐震設計三層樓以下低矮 RC 建築物之參數列於表 2 和表 3。雙參數的貝氏估計公式中，假設 λ 和 ζ 為統計獨立，即：

$$f''(\lambda, \zeta) = kL(\lambda, \zeta)f'(\lambda)f'(\zeta) \quad (5)$$

其中 $k = \left[\iint L(\lambda, \zeta)f'(\lambda)f'(\zeta)d\lambda d\zeta \right]^{-1}$ ，則參數估計公式為：

$$\begin{cases} \hat{\lambda}'' = \iint \lambda f''(\lambda, \zeta)d\zeta d\lambda \\ \hat{\zeta}'' = \iint \zeta f''(\lambda, \zeta)d\lambda d\zeta \end{cases} \quad (6)$$

假設數 λ 和 ζ 的在前機率密度函數為均勻分佈，且其平均值為 TELES 的推估值，並假設有大小不一的兩個變異係數 5% 和 20%，即可透過式(4)的概似函數和式(5)的貝氏更新公式代入式(6)推估 λ 和 ζ 。二、三層樓 RC 民房以貝氏估計法推估易損度參數的結果分別列於表 2 和表 3。

上述四種方法所建立之二、三層樓 RC 民房易損度曲線示於圖 5 至圖 12，比

較如下：

1. 分組估計法(GE)：可將數量眾多的資料點以分組的方式，將組距內的資料性質以一代表值表示。此法在組距的選取與資料的代表性之間，往往難以取得平衡，分組太多則組距太小，將使組距內的資料缺乏代表性；若想令組距內的資料有其代表性，在組距的範圍上可能有所差距，故人為限制太多，包括組數、組距、各分組資料數等。
2. 累計估計法(CE)：亦可視為 GE 的特殊分組方式，其分組方式是依據損壞指標由小到大排序，不斷累加前一點的資料，形成一條隨著損壞指標越大而有上升趨勢之曲線，迴歸分析時較為合理。在建立易損度曲線時，能有效反應損壞指標越大，損壞建築物越多的趨勢，故此法是較為合理且結果較佳之方法。
3. 最大概似法(MLE)：在估計參數時，基本上都是根據迴歸分析的概念，而最大概似法與其他方法之差異，可從概似函數觀察出。例如一村里建築物總棟數為 10 棟，損壞棟數為 1 棟，破壞百分比是 10%，概似函數可視為 $\binom{10}{1} P^1 (1-P)^{10-1}$ ，同樣破壞百分比為 10%，總棟數為 100 棟，損壞棟數為 10 棟，概似函數卻為 $\binom{100}{10} P^{10} (1-P)^{100-10}$ 。在估計參數時，迴歸分析所選用的目標函數不同，推估的結果自然有所差異。
4. 貝氏估計法(BE)：雖說此法能根據樣本資料來修正判斷性資料，但其結果與在前機率密度函數的假設有很大的關係，若不清楚在前機率密度函數為何種分佈時，假設分佈的形式與變異性，都是人為影響之因素。

資料的不精確性也會影響各方法之估計結果，假如能得到精確的數據，如正確的建築物經緯度座標、每一棟建築物的真實基本振動週期與阻尼比、建築物損壞的真正成因、和所有同類型建築物的總數等等，則各方法估計參數之差異性應會降低。精確的資料往往取得不易，在各種人為因素的影響下，若缺乏判斷性資料以利用貝氏估計法推估參數，則累計估計法為最佳選擇。

震損圖

一旦地震發生，取得自由場測站紀錄後，即可迅速計算東西向和南北向的損壞指標，取其最大值，再依據本文建立之易損度曲線，找出各測站的二層樓和三層樓 RC 民房各種累計損壞程度的百分比，繪製為各種累計損壞程度的等百分比分佈圖，即為震損圖。以貝氏估計法($\delta=20\%$)所建立之易損度曲線為例，二層樓和三層樓 RC 民房各損壞程度下的震損圖分別示於圖 13 至圖 20。

結論

1. 探討建築物因地表振動造成的損壞機率，應將非地表振動造成的損壞，如斷層錯動、土層滑動、或是土壤液化等情況剔除。921 集集大地震因車籠埔斷層錯動，於斷層線上有較高機率發生土層滑動或土壤液化，造成建築物破壞，選擇將斷層線上的村里資料移除，能有效提高易損度曲線之可信度。
2. 建立損壞指標分佈圖時，通常採用全部測站紀錄內插估算之，本文選擇採用上盤與下盤測站紀錄分開方式，分別計算上盤損壞指標分佈圖和下盤損壞指標分佈圖，能有效降低在斷層附近低估損壞指標之可能性。
3. 在地震發生後，最大地表加速度可於第一時間取得，以之為損壞指標有其優勢；然而譜位移較能呈現建築物振動的最大幅度，據此建立之震損圖較有參考性。
4. 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。
5. 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。
6. 本文提供四種參數估計方法，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，其中也包含人為設定因素與資料的不精確性。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。
7. 若缺乏判斷性資料以進行貝式估計法，累計估計法為合理且結果較佳之易損度曲線建立方法，因其人為假設影響易損度曲線較少。

建議

1. 本研究僅針對低矮 RC 民房，以及損壞指標最大地表加速度和譜位移進行易損度曲線之建立，未來應建立其它類型建築物與其它損壞指標之易損度曲線，以提供更完備的分析結果。
2. 其它類型建築物與高樓層建築物的損壞資料並不多，因此可採用貝氏估計法，將數量不多的實測資料搭配判斷性資料，建立易損度曲線。

表 1 譜位移分組估計法之分組方式

	S_d 分組範圍(cm) /棟數				誤差 平方和
	二層樓	(0 ~ 0.32) /4104	(0.32 ~ 0.64) /5866	(0.64 ~ 0.99) /6115	
三層樓	(0 ~ 0.75) /13230	(0.75 ~ 1.29) /14712	(1.29 ~ 2.64) /12251	(2.64 ~ 5.22) /4684	0.001455

表 2 二層樓 RC 民房譜位移易損度參數之比較

	分組估計法		累計估計法		最大概似法		貝氏估計法 ($\delta = 20\%$)		TELES	
	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j
D_5	1.36019	0.62722	1.87020	0.88476	1.04671	0.50887	2.49094	1.14358	3.80986	0.85
D_4	1.27607	0.72709	1.68975	0.98463	0.86441	0.52607	2.03705	1.14311	3.11671	0.85
D_3	1.21548	0.79073	1.48126	0.98423	0.74018	0.52329	1.58419	1.03747	2.42356	0.85
D_2	1.08609	0.77816	1.30925	0.96978	0.67127	0.53356	1.14267	0.84105	1.73042	0.85

表 3 三層樓 RC 民房譜位移易損度參數之比較

	分組估計法		累計估計法		最大概似法		貝氏估計法 ($\delta = 20\%$)		TELES	
	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j	λ_j	ζ_j
D_5	2.57338	0.89268	2.90926	1.08048	2.33979	0.86140	2.52627	0.95213	3.80986	0.85
D_4	2.60002	1.13187	2.48962	1.07455	2.07910	0.89364	2.17196	0.94424	3.11671	0.85
D_3	2.41216	1.13873	2.23883	1.04056	1.89077	0.87651	1.93233	0.90063	2.42356	0.85
D_2	2.36870	1.23853	2.01536	0.99852	1.72636	0.85452	1.73642	0.86069	1.73042	0.85

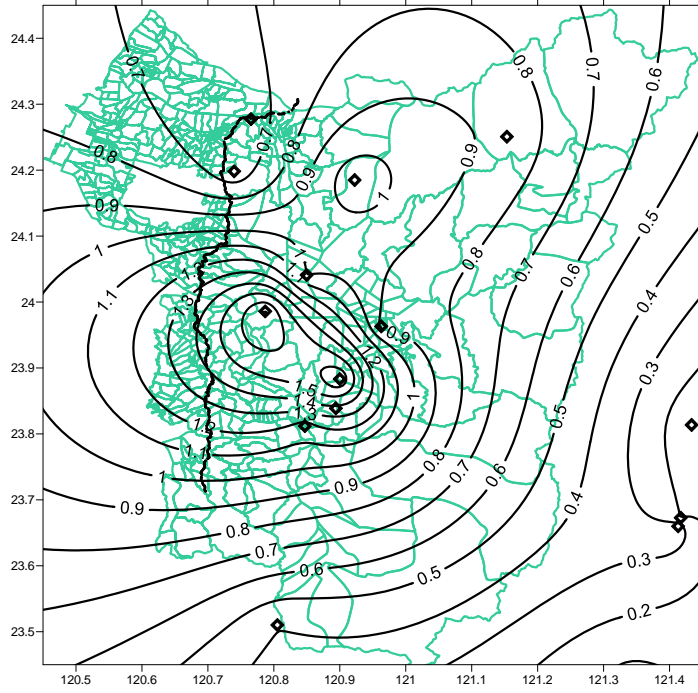


圖 1 依斷層上盤測站紀錄推估之二層樓 RC 民房譜位移分佈圖(cm)

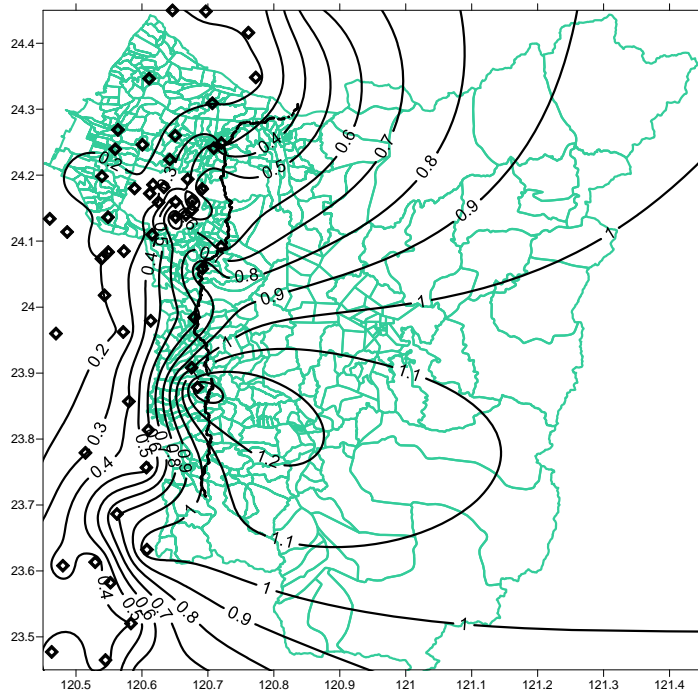


圖 2 依斷層下盤測站紀錄推估之二層樓 RC 民房譜位移分佈圖(cm)

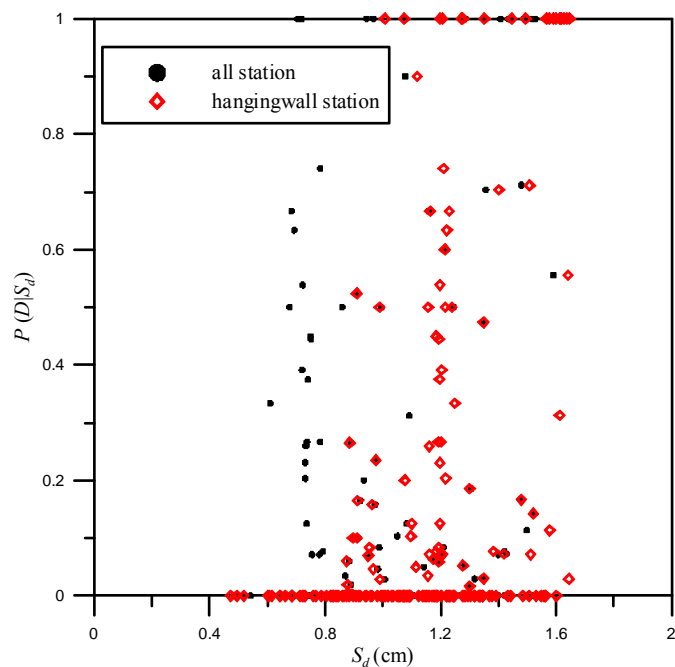


圖 3 不同測站紀錄推估上盤村里二層樓 RC 民房譜位移之比較

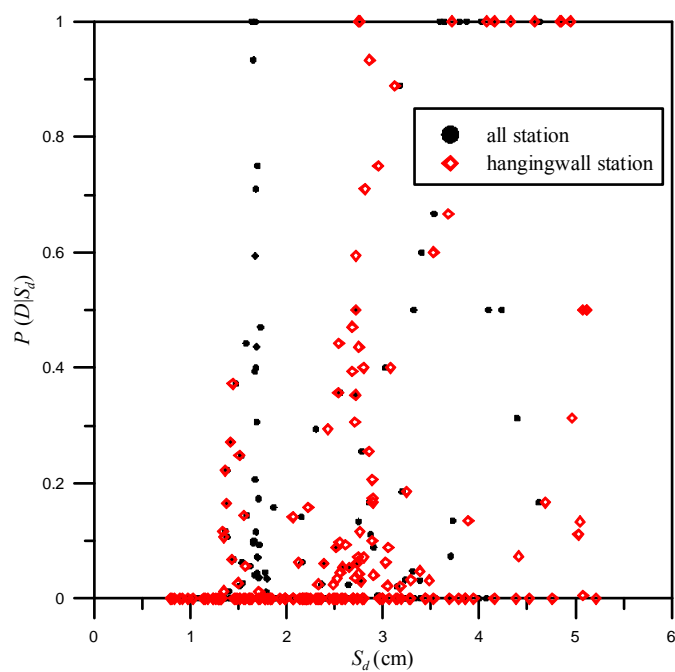


圖 4 不同測站紀錄推估上盤村里三層樓 RC 民房譜位移之比較

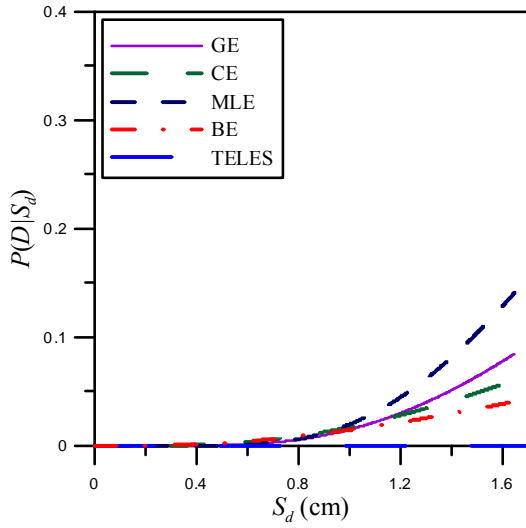


圖 5 二層樓 RC 民房損害狀態 D_5 之易損度曲線比較

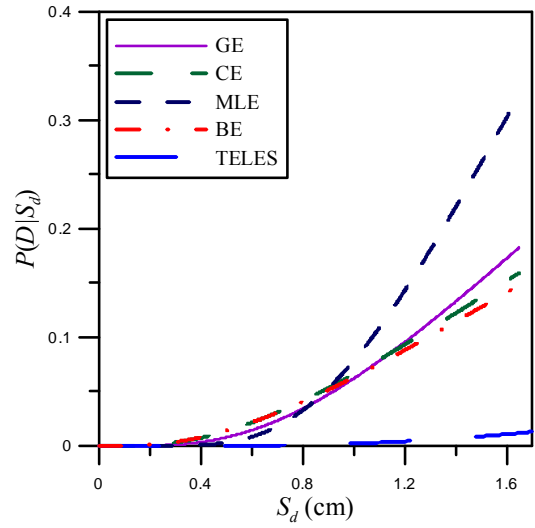


圖 7 二層樓 RC 民房損害狀態 D_3 之易損度曲線比較

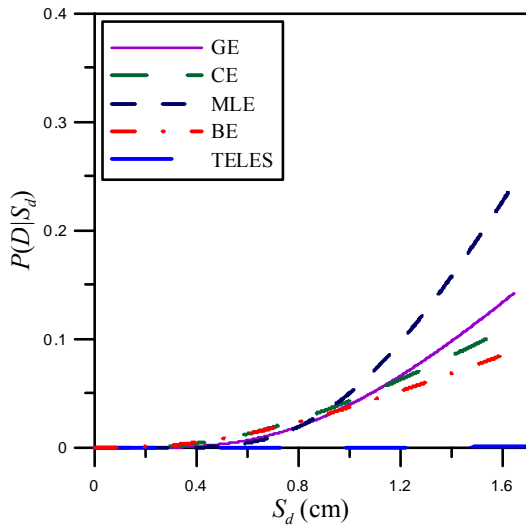


圖 6 二層樓 RC 民房損害狀態 D_4 之易損度曲線比較

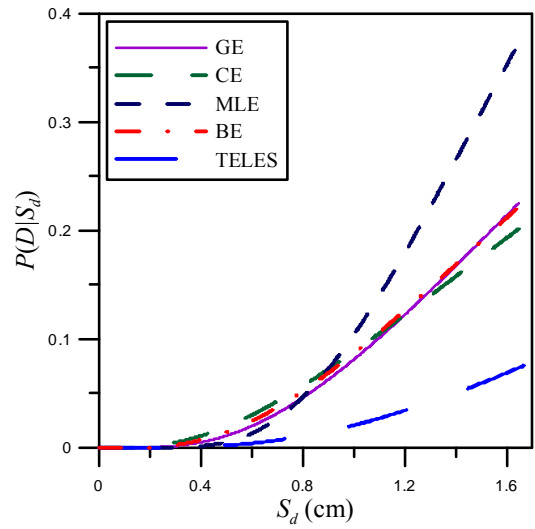


圖 8 二層樓 RC 民房損害狀態 D_2 之易損度曲線比較

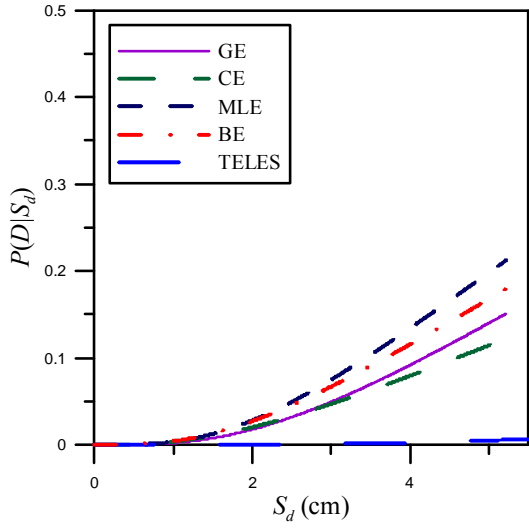


圖 9 三層樓 RC 民房損害狀態 D_5 之易損度曲線比較

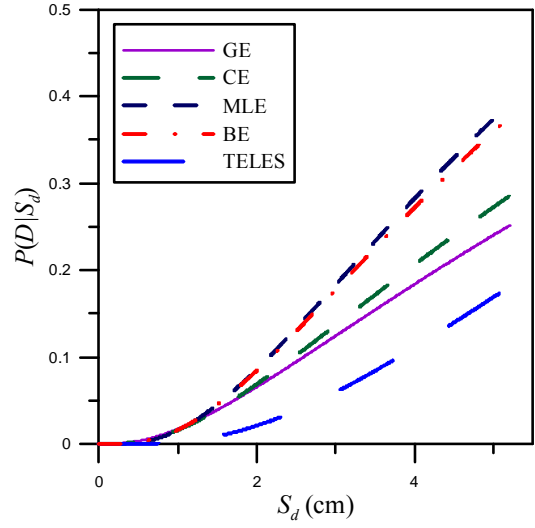


圖 11 三層樓 RC 民房損害狀態 D_3 之易損度曲線比較

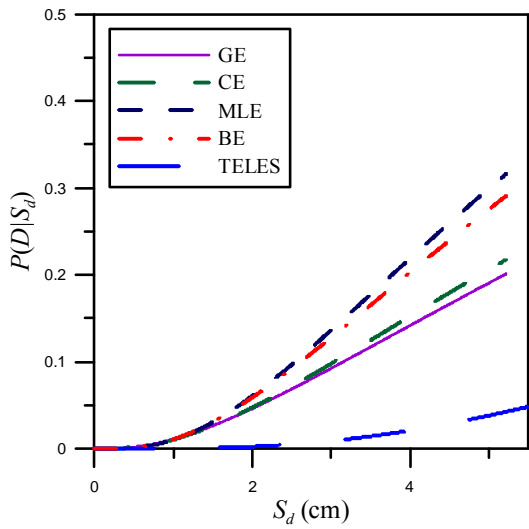


圖 10 三層樓 RC 民房損害狀態 D_4 之易損度曲線比較

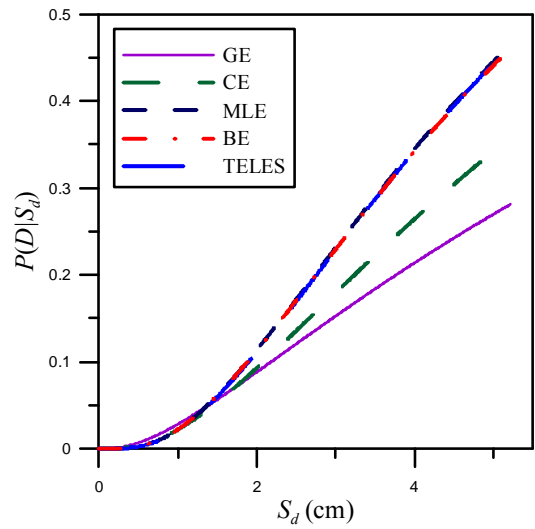


圖 12 三層樓 RC 民房損害狀態 D_2 之易損度曲線比較

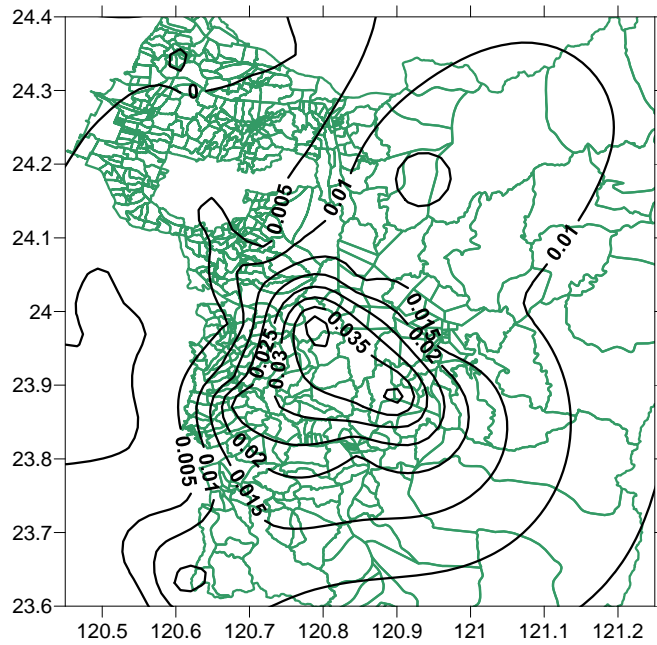


圖 13 二層樓 RC 民房完全損壞之震損圖

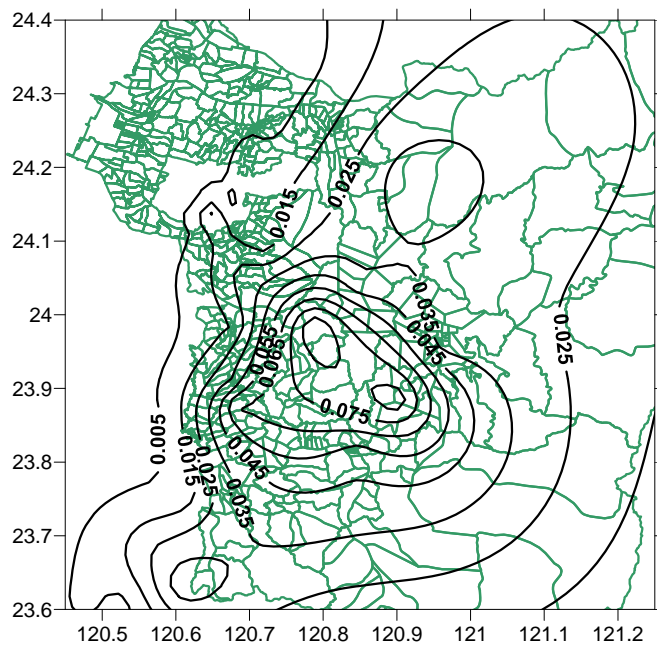


圖 14 二層樓 RC 民房嚴重損壞以上之震損圖

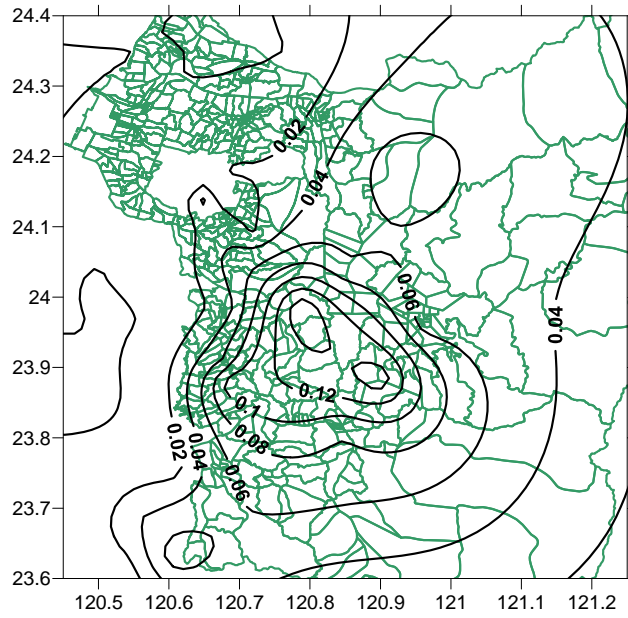


圖 15 二層樓 RC 民房中度損壞以上之震損圖

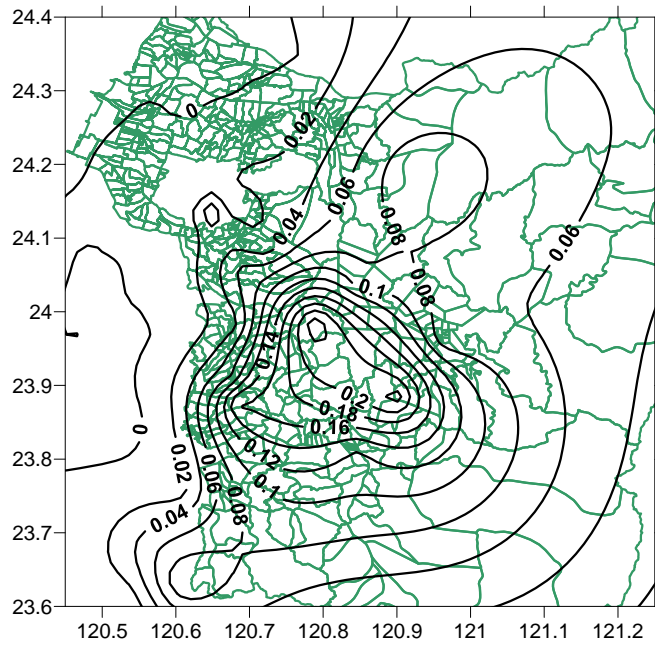


圖 16 二層樓 RC 民房輕微損壞以上震損圖

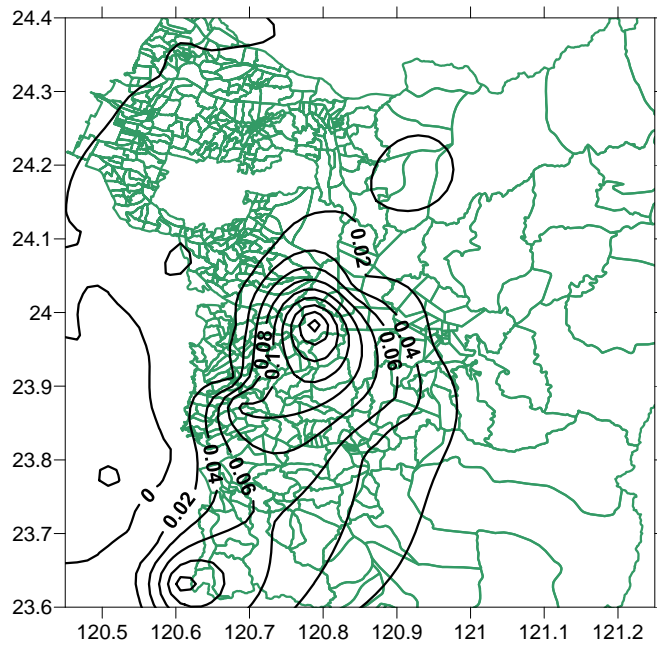


圖 17 三層樓 RC 民房完全損壞之震損圖

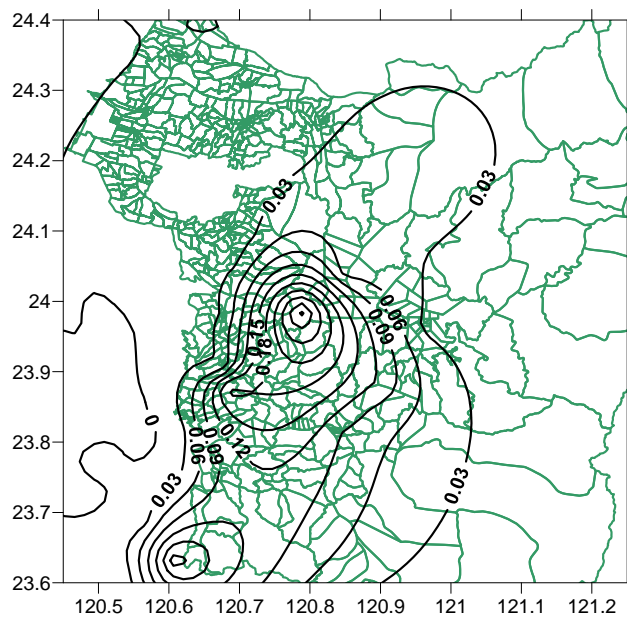


圖 18 三層樓 RC 民房嚴重損壞以上之震損圖

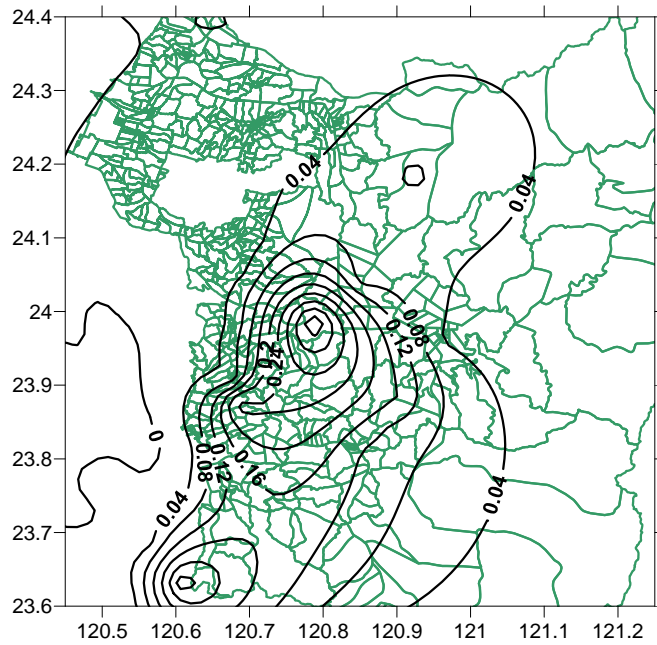


圖 19 三層樓 RC 民房中度損壞以上之震損圖

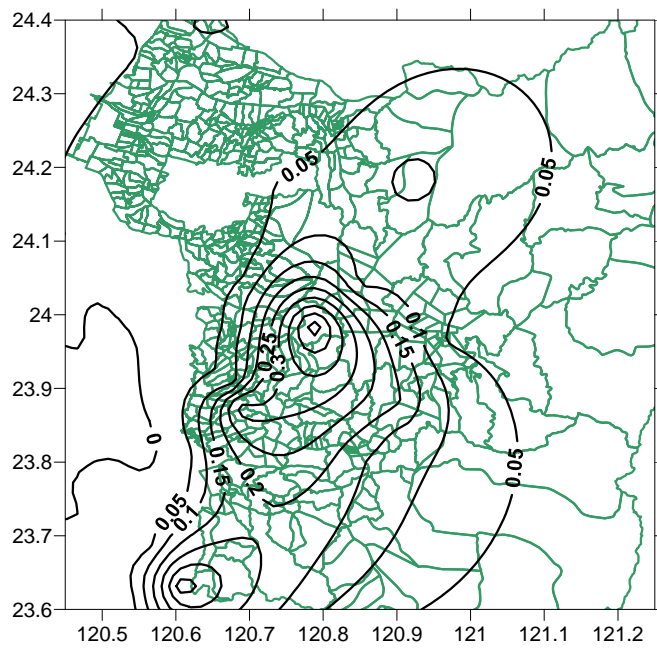


圖 20 三層樓 RC 民房輕微損壞以上之震損圖

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>
- [2] 黃偉倫 (1996)，「建築物基本振動周期與尺寸之迴歸分析」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，台南。
- [3] 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。
- [4] 羅啟源 (2005)，「以等震度與等母體數建立建築物易損曲線-以集集地震為例」，國立中央大學土木工程學系碩士論文，中壢。
- [5] 林宜德 (2007)，「鋼筋混凝土結構物之地震易損性分析—不同時期規範之比較」，國立中央大學土木工程學系碩士論文，中壢。
- [6] 胡智淵 (2008)，「利用集集大地震震損資料建立建築物易損性曲線之研究」，逢甲大學土木工程學系碩士學位論文，台中。
- [7] 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。
- [8] Ang, A. H-S and W. H. Tang (1979), *Probability Concepts in Engineering: Planning and Design*, John Wiley & Sons.
- [9] ATC-13 (1985), *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council.
- [10] Bozorgnia, Y., and V. V. Bertero (2001), "Improved shaking and damage parameters for post-earthquake applications," *Proceedings, SMIP01 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*, pp. 1-22.

子計畫3：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)

朱世禹 林鈺桐 曹峻豪
國立成功大學土木工程學系

摘要

在前二年度子計畫中，藉由地震彈性反應頻譜為工具，已建立大專院校區域性結構振動反應(絕對加速度極值、相對速度極值、相對位移極值)預估圖。本年度計畫，除考量結構物受到較大的地震作用下，其反應可能已從線性階段進入非線性(塑性)階段，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，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韌性譜、遲滯能譜以及震損預估圖，探討現有規範建議值於震損評估之適用性。藉由損壞指標來初步評估結構物損壞程度，以作為往後結構物修復與補強之依據，並校正大專院校建築結構降伏強度及韌性容量之規範建議值。往後進一步可以利用損壞指標來建立區域性震動損壞預估圖。

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

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 and the strong motion records of a real building. Based on the proposed damage indices and the calibrated results, the regional damage spectra can be established based on the strong motion records of nearby free-field stations from the CWB's Geophysical Database Management System. Finally, the regional damage forecast map can be illustrated based on the damage spectra and the building information of the region. The KuangFu campus of Nation Cheng Kung University is adopted in this study as the demonstration region for establishing its regional damage forecast map.

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

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][3]，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[4]，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」(TREIRS, Taiwan Rapid Earthquake Information Release System)，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[5]，進行損壞指標之校正模擬與驗證，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，藉由實驗之真實破壞狀況校正模型參數，以作為往後損壞指標之參考與應用。

結構損壞指標簡介與建立流程

結構損壞指標主要分為兩大類，一般可分為動態反應類與結構物理參數類，而動態反應類的指標乃利用量測結構物在單一地震事件於擾動作用下的反應，並計算其相關的損壞物理量，例如：尖峰相對位移、尖峰加速度、尖峰速度、反應能量等；第二大類屬於以結構物理參數為基礎的指標，利用地震事件損壞後的結構參數進行評估，通常利用系統識別方法來獲得結構物損壞前、後的一些重要參數，如模態頻率或模態振形之變化，以作為結構之勁度是否下降之初步評估依據。本研究參考 Bozorgnia 與 Bertero[1]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(1)、(2)式所示：

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

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

其中 α_1 及 α_2 為大於 0、小於 1 的常數，研究中採用多筆地震實際量測資料對 Park 與 Ang[6]所提出之損壞指標進行迴歸，獲得 α_1 建議值為 0.29、 α_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，損壞指標建立流程如圖 1 所示。

依照圖 1 流程，建立損壞指標過程中，需先給定結構系統動態參數，一般利用系統識別方法(如 OKID/ERA、Least square method 等)求得；另外需要結構物降伏加速度(降伏強度/結構物質量)，一般可以利用設計規範估算結構物降伏加速度，或由實際實驗單向外力側推與位移關係，評估其降伏加速度；若採用雙線性

模型，則需另給定一勁度折減比係數 α ，其定義為降伏後的系統勁度除上降伏前系統勁度，理想彈塑模型則無 α 參數；對於遲滯能容量 E_{Hmon} 之計算，其定義為所假設損壞數值模型所包圍的斜線面積；進一步藉由輸入地表加速度資料，可模擬獲得輸出反應，便可以計算損壞指標的參數，藉由給定建議之權配係數，即可算出該結構物於某次地震事件後之損壞指標 DI_1 與 DI_2 的大小，用以描述結構物的損壞程度大小。Park 與 Ang 將損壞指標與對應之損壞程度關係描述列於表 1 所示。

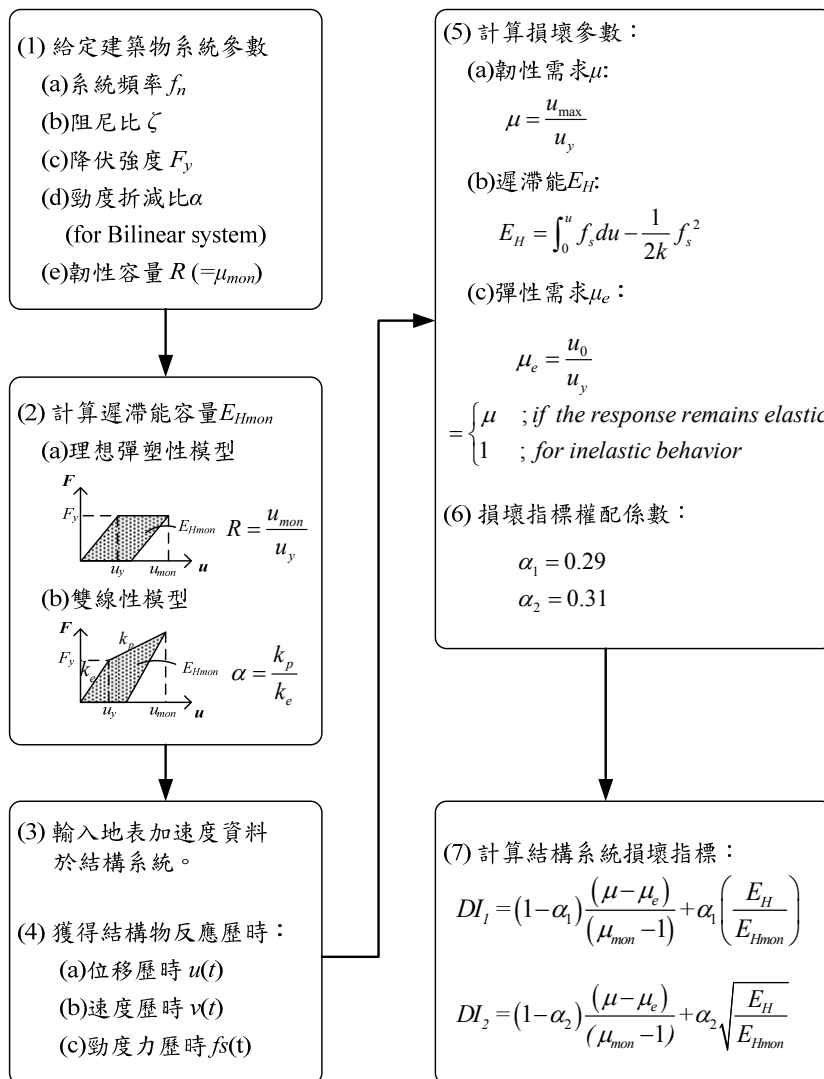


圖 1 損壞指標建立流程圖

表 1 損壞指標程度描述(參考 Park 與 Ang[6])

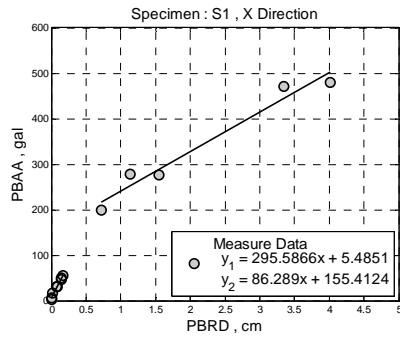
損壞等級	損壞指標範圍	破損描述	修復狀況
輕微損壞(slight)	$DI < 0.2$	零星裂縫產生	容易修復
較小損壞(minor)	$0.2 < DI < 0.4$	部份柱端產生破裂	可修復
中度損壞(moderate)	$0.4 < DI < 0.8$	大量的保護層產生剝落破壞	修復困難
嚴重破裂(severe)	$0.8 < DI < 1$	混凝土開裂延伸 鋼筋裸露、挫屈	修復困難
倒塌損壞(collapse)	$DI \geq 1$	建築完全或部份倒塌	無法修復

Bozorgnia 與 Bertero 所採用的損壞指標 DI_1 與 DI_2 其特性描述如下：

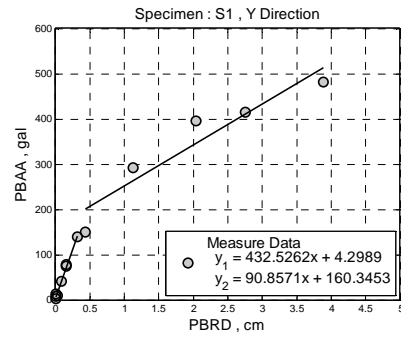
- (1) 若反應仍保持為彈性，此時 $\mu = \mu_e$ 且 E_H 為 0，此時損壞指標為 0，表示結構物沒有損壞。
- (2) 結構物系統承受單向外力側推下，當消耗掉全部結構物韌性容量時，此時 $\mu_e = 1$ 、 $\mu = \mu_{mon}$ ，代表此時結構物完全損壞，損壞指標為 1。
- (3) 損壞指標 DI_1 、 DI_2 利用 α_1 與 α_2 調整韌性需求與遲滯能量之權重分配。
- (4) 當 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ 時，損壞指標 DI_1 、 DI_2 則僅與塑性變形有關係。
- (5) 當 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ 時，損壞指標 DI_1 、 DI_2 則僅與遲滯能量有關係。

縮尺 RC 校舍模型之損壞指標模擬與驗證

為建立 RC 校舍模型之合理損壞指標，損壞指標數值模型分別採用理想彈塑性與雙線性模型[8]，將數值模型對照結構物最大絕對加速度(Peak Building Absolute Acceleration, PBAA)對應之最大相對位移(Peak Building Relative Displacement, PBRD)，利用模擬結果其 PBAA 與 PBRD 圖形可以對應數值模型結果，並由圖形判別於健康狀態(線性段)的系統參數作為該結構的動態參數，阻尼比設定 4%。本研究採用三分之一縮尺之二層樓 RC 校舍模型振動台試驗資料[5]之 S1 試體模型實際量測資料，將 PBAA 與 PBRD 圖形繪製如圖 2 所示，數據資料共 13 筆， y_1 為試體尚未損壞共 8 筆之線性迴歸趨勢， y_2 為試體損壞後 5 筆之線性迴歸趨勢。



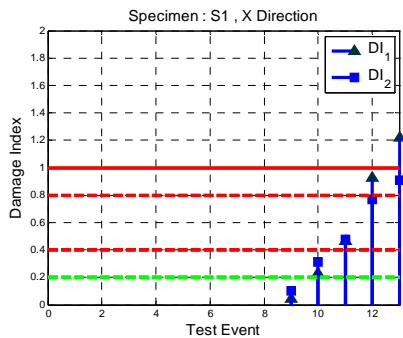
(a) X 向



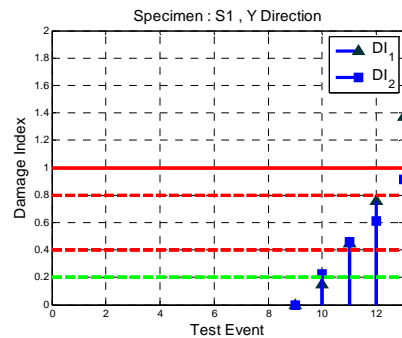
(b) Y 向

圖 2 S1 試體 PBAA 對應 PBRD 圖形

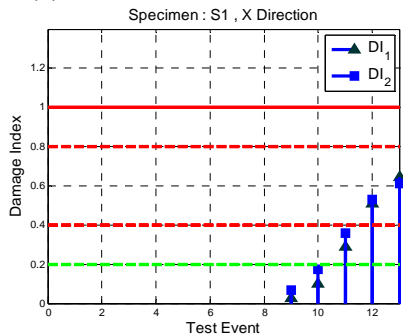
圖 2 為 S1 試體實際 PBAA 對應 PBRD 圖形，可以利用線性段斜率，來簡化計算結構物之系統頻率，X 向為 2.7363Hz、Y 向為 3.3100Hz； α_M 為實際量測結構勁度折減比，X 向為 0.2919、Y 向為 0.2101；由實際試驗之迴歸趨勢可評估結構系統可能之降伏加速度，X 向為 110gal、Y 向為 140gal；並利用結構物實際量測之最大位移除上降伏位移($u_y = a_y / \omega_n^2$)，可以得到結構物保守預估之韌性容量，X 向為 13、Y 向為 14。因此當實際量測之加速度超過判別的降伏加速度，便可以利用 EPP 及 BLM 兩種數值模型獲得反應，進一步計算對應之損壞指標，其結果如圖 3 所示。



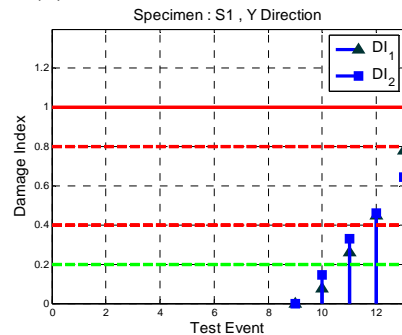
(a) EPP 模擬之 X 向損壞指標



(b) EPP 模擬之 Y 向損壞指標



(c) BLM 模擬之 X 向損壞指標



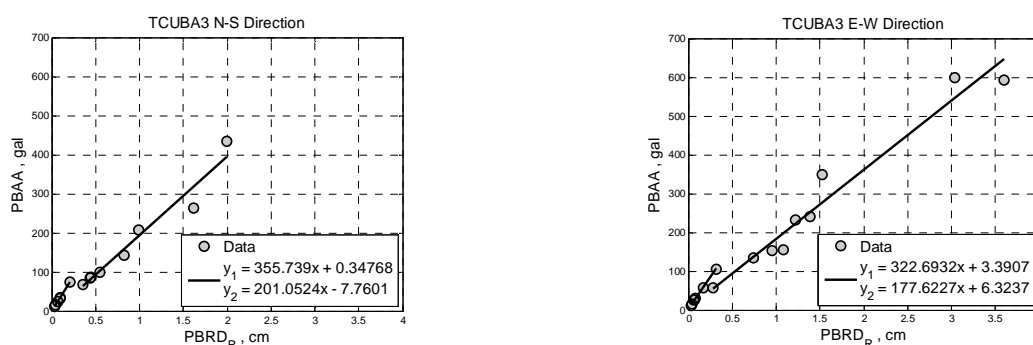
(d) BLM 模擬之 Y 向損壞指標

圖 3 S1 試體損壞指標圖形

根據圖 3(a)、(b)以 EPP 模擬之結果，雖在第 9 筆過後有損壞產生，代表結構物已經進入非線性階段，但在最後一筆試驗其值超過 1，表示結構物完全損壞，與試驗之觀察不符。其原因為建議之損壞權配係數 α_1 及 α_2 所影響，使得以傳統 EPP 進行模擬，其韌性需求計算結果較高，且在遲滯能累積較 BLM 多，導致在損壞指標結果較為大；而同樣的權配係數在 BLM 的模擬結果於如圖 3(c)、(d)，在第 9 筆過後損壞指標大於 0，而其最後一筆試驗數據，損壞指標約為 0.7，對應表 1 之損壞程度描述情形為大量保護層破損，實際損壞狀況亦為如此。依結果來看，以 BLM 之模擬結果其損壞指標較符合實際破壞情形。

大專院校建築物之損壞指標-中興土環大樓

進一步建立大專院校建築物之合理損壞指標，損壞指標數值模型亦分別採用理想彈塑性與雙線性模型[8]，將數值模型對照結構物最大絕對加速度($PBAA$)與利用即時結構反應積分器(Real-time Structural Response Integrator, RTSRI)[9]積分出之最大相對位移($PBRD_R$)，利用模擬結果其 $PBAA$ 與 $PBRD_R$ 圖形可以對應數值模型結果，並由圖形判別於健康狀態(線性段)的系統參數作為該結構的動態參數，阻尼比設定 4%。本研究採用實際量測資料，將 $PBAA$ 與 $PBRD_R$ 圖形繪製如圖 4 所示，數據資料共 16 筆， y_1 為 921 主震前(序號 1~7 筆)視結構物為健康狀態的線性迴歸趨勢， y_2 為 921 主震破壞後之序號 8 至 16 筆包含線性段之最末點共計 10 點的線性迴歸趨勢。可以利用線性段斜率，來簡化計算結構物之系統頻率，南北向為 3.0Hz、東西向為 2.86Hz；由迴歸趨勢可評估結構系統可能之降伏加速度，南北向約為 120gal，東西向約為 150gal。並利用結構物實際量測之最大位移除上降伏位移($u_y = a_y / \omega_n^2$)，可以得到結構物保守預估之韌性容量，南北向為 13、東西向為 14。



(a) 南北向

(b) 東西向

圖 4 中興大學土環大樓 PBAA 對應 PBRD_R 之圖形

又考量由於一般結構物並無裝設位移計，以雙線性模型數值模擬， α 值的求

取由下列步驟進行求取：

- (1) 由裝設於建築物上的地震量測之加速度歷時資料，將位於頂樓加速度歷時扣除地表加速度歷時即為頂樓相對加速度反應，並給定結構系統第一模態頻率，經由 RTSRI 積分器積分成為頂樓相對位移。
- (2) 根據頂樓之絕對加速度極值($PBAA$)與相對位移極值($PBRD_R$)便可以繪圖如圖 5(a)所示， $PBRD_R$ 即為由 RTSRI 積分所獲得之相對位移極值，並由雙線性斜率可以求 α_R ，即為實際量測之絕對加速度經 RTSRI 積分後由雙線性斜率所計算之系統勁度折減比。
- (3) 接著以相同地震資料輸入，採簡化之單自由度雙線性模型模擬，輸入系統參數(系統模態頻率、阻尼比、降伏加速度)，並給定系統勁度折減比 α ，得到頂樓之絕對加速度與相對位移反應，由極值結果便可以繪得如圖 5(b)所示， $PBAA'$ 與 $PBRD'$ 分別為雙線性系統模擬之絕對加速度極值與相對位移極值。
- (4) 經由步驟(3)，再一次以頂樓絕對加速度扣掉輸入地表加速度(模擬)，進行 RTSRI 積分獲得相對位移歷時，便可以繪製 $PBAA'$ 對應 $PBRD_R'$ 圖形即圖 5(c) 結果， $PBRD_R'$ 即為雙線性系統模擬後，將反應進行 RTSRI 積分之相對位移極值，而 α_{SR} 為此時計算之系統勁度折減比。
- (5) 不斷的嘗試下，當 α_{SR} 可以與圖 5(a) 所對應接近，所模擬之 α_R 即為在一般結構物在無裝位移計下雙線性模型之系統勁度折減比參數 α 。

因此當實際量測之加速度超過判別的降伏加速度，便可以利用 EPP 及 BLM 兩種數值模型獲得反應，進一步計算對應之損壞指標，其結果如圖 6 所示。根據圖 6(a)、(b) 以 EPP 模擬之結果，可以觀察到在第 8 筆的損壞指標超過 1，代表結構物受 921 主震後已完全崩塌損壞，而對應實際損壞情形並未產生嚴重性崩塌，實為不符；BLM 的模擬結果於如圖 6(c)、(d)，在第 8 序列地震為 921 主震所造成損壞程度結果，損壞指標大於 0 代表結構物存在內在損壞，且損壞指標介於 0.8 上下處，對應破損程度為中度損壞與嚴重損壞間，與實際損壞結果尚屬合理範圍。依結果來看，以 BLM 之模擬結果其損壞指標較符合實際破壞情形。

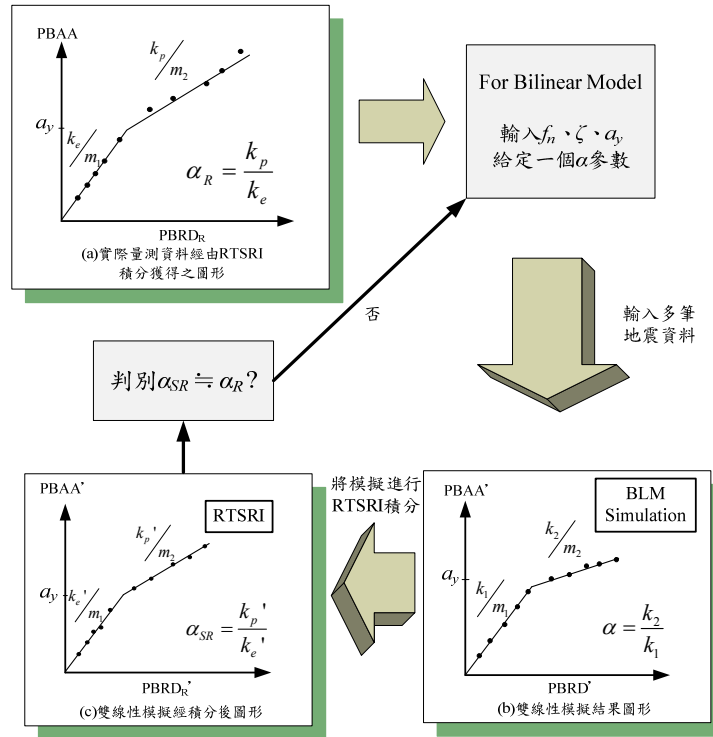
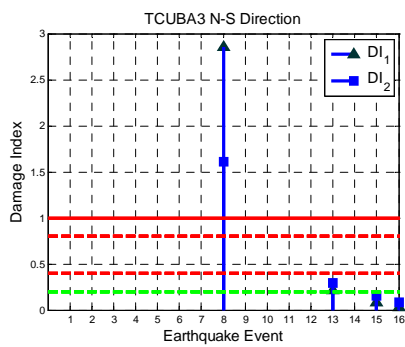
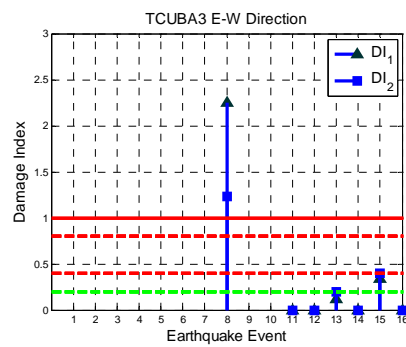


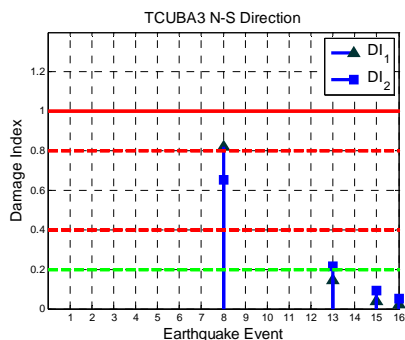
圖 5 雙線性參數計算流程圖 (考量建築物無裝設位移計狀況下)



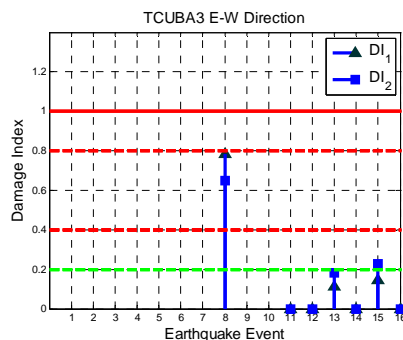
(a) 南北向 (EPP 模擬)



(b) 東西向 (EPP 模擬)



(c) 南北向(BLM 模擬)



(d) 東西向(BLM 模擬)

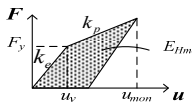
圖 6 中興大學土環大樓於 1994~1999 年之損壞指標

建立區域性建築物損壞預估圖

根據上述縮尺寸 RC 校舍模型與中興土環大樓之損壞評估結果，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，所以採用雙線性模型進行計算結構物韌性需求頻譜、遲滯能頻譜與損壞頻譜。以進一步利用損壞頻譜繪製區域性建築物損壞預估圖，作為區域性建築物之初步損壞預估。應用前述學者所提出的損壞指標，建立韌性需求頻譜、遲滯能頻譜與損壞頻譜，建立流程以圖 7 進行說明。在建立損壞指標前，需先計算規範所建議的降伏加速度，計算降伏加速度需考量該區域的土壤種類與建築物之韌性容量，便可以繪製不同週期所對應降伏加速度之圖形，如圖 7(a)，並以單自由度雙線性模型給定勁度折減比 α ，當輸入一地表加速度歷時，對於給定系統參數(包含系統自然週期、阻尼比、韌性容量 R)，可以計算出遲滯能容量 E_{Hmon} ，在利用反應結果計算韌性需求 μ 、遲滯能 E_H 與損壞指標 (DI_1 & DI_2)，因此由給定不同自然週期下，經由反應結果便可以將韌性需求頻譜、遲滯能頻譜與損壞頻譜繪製如圖 7 (b)(c)(d) 並進一步以建築物系統週期來對應 DI_1 或 DI_2 的最大值作為該建築物之損壞指標，所得之值繪製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。利用圖 7 流程可以求得成功大學光復校區之震損預估圖如圖 8。

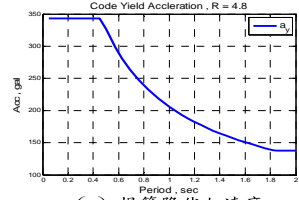
區域性震損預估圖建立流程說明

- ◎ 給定系統參數：
 - 週期 T (sec)
 - 阻尼比 ζ
 - 土壤種類
 - 降伏加速度(F_y/W)
 - 韌性容量R
 - 勁度折減比 α
- ◎ 遲滯能容量 E_{Hmon} ：
For SDOF Bilinear System

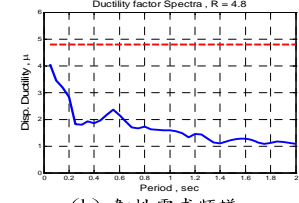


$$R = \frac{u_{mon}}{u_y}$$

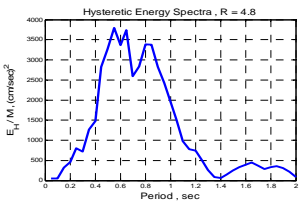
$$\alpha = \frac{k_p}{k_e}$$
- ◎ 地震外力輸入：
—給定一地震量測紀錄輸入
- ◎ 計算：
 - 韌性需求頻譜 μ v.s. Period
 - 遲滯能頻譜 E_H v.s. Period
 - 損壞指標頻譜 DI_1 & DI_2 v.s. Period
- ◎ 區域震損預估圖：
由損壞頻譜，以建築物系統週期對應 $\max(DI_1, DI_2)$ 繪製於圖形上



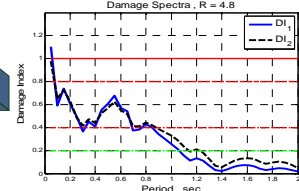
(a) 規範降伏加速度



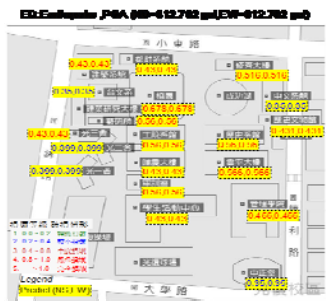
(b) 韌性需求頻譜



(c) 遲滯能頻譜



(d) 損壞頻譜
($\alpha_1=0.29$ 、 $\alpha_2=0.31$)



(e) 區域性震損預估圖

圖 7 區域性震損預估圖之建立流程

EQ:2010-0304-0018 ,PGA (NS=200 gal,EW=200 gal)

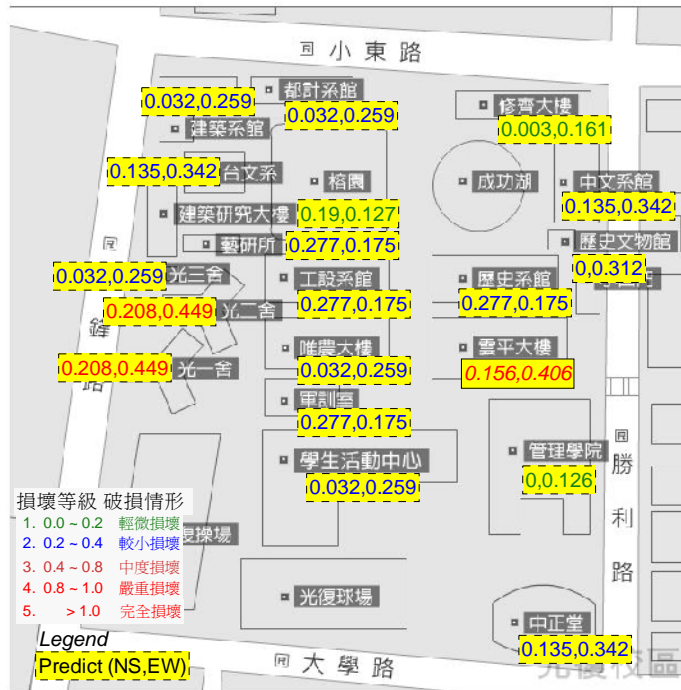


圖 8 成功大學光復校區之震損預估圖(甲仙量測地震 PGA 放大為 200gal)

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，損壞指標為利用一種定量方式，來描述結構物的損壞情形大小。應用學者所提出的損壞指標，其採用理想彈塑模型進行模擬計算韌性需求、遲滯能與損壞指標，並以縮尺模型 RC 校舍建築物與大專院校之中興土環大樓兩棟建築物，在降伏加速度的部份採用台灣設計規範，計算損壞指標並與實際震損情形顯示，採用理想彈塑模型，會造成韌性需求較大，遲滯能累積較多，使得損壞指標計算結果較為大，與實際震損情形較為不符，而若採用雙線性數值模型進行計算之損壞指標，在計算結果其韌性需求與遲滯能累積結果均較以理想彈塑性小，相較之下雙線性模型則較為合適。最後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指標大小，以對應實際結構物之損壞情形，作為建築物之初步損壞頻估，及修復與補強之依據。

誌謝

本研究案承蒙交通部中央氣象局提供建築物強震監測資料和研究經費補助(編

號MOTC-CWB-100-E-13)，並得到地震測報中心強震課同仁之配合協助，方得以順利進行，特此致謝。

參考文獻

- [1] 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.
- [2] 吳逸民 (1999)，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] Liu, K.-S., T.-C. Shin and Y.-B. Tsai (1999), “A free field strong motion network in Taiwan: TSMIP”, TAO, 10, 377-396.
- [4] 辛在勤 (1993)，台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摘要，1-10。
- [5] 許茂雄、廖文義、杜怡萱、許士昱，「三分之一縮尺二層樓RC校舍模型振動台試驗」，國家地震工程研究中心報告編號：NCREE-02-001，2002。
- [6] Park, Y.-J., Ang, A. H.-S. (1985), “Mechanistic Seismic Damage model for reinforced concrete”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 111(4), 722-739.
- [7] Uang, C-M, and V.V. Bertero . “Implications of recorded earthquake ground motions on seismic design of building structures,” Report No. UCB/EERC-88/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1988
- [8] 羅仕杰，記憶體共享光纖網路設備於即時擬動態試驗之初步研究，國立暨南大學土木工程學系，南投，(2005)
- [9] 王國書，「結構動態反應訊號自動監測系統於剛心識別之應用」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，2007年6月。

子計畫四：學校建築震害復原時間之機率曲線建立

姚昭智 涂英烈 薛麗梅
成功大學建築學系

摘要

本計畫以學校建築為對象，把過去地震所引起的破壞資料為調查重點，進行地震損壞後，對學校的整體復原時間（Downtime）作評估分析。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

A downtime of school buildings after an earthquake would be estimated in this study. 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

前言

一般而言，學校建築平時為教學及各項活動的重要空間，發生緊急災難時則是當地居民最主要公共避難空間，學校建築在地震中若因結構體或非結構物破壞，不但造成經濟損失、影響教學活動，甚至會威脅學生或避難民眾的安全，因

此在地震中，學校建築的安全與否是值得關切的課題。另一方面，學校建築若因地震而遭受損壞，為使教學活動能儘快恢復正常，復原時間的掌控，必須有一套可靠的預測模式，方便整體復原規劃的作業。

近年來，以過去地震所引起之破壞資料為調查重點，從地震災後調查問卷中，將破壞程度加以分類，建立資料庫並利用機率觀念分析其易損性曲線 (Fragility curve)，用以預測並了解將來地震發生時之各項損壞程度，已成為研究潮流。在 1990 年代末期，美國由 FEMA 主導的 ATC-58 開始著手以功能性為主之耐震設計觀念，至今已成為世界耐震設計主流。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。

氣象局所欲建立的震損圖，對於用以評估某一地區的建築物損壞狀態可以提供一項極為有力的工具。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。延續此一研究，並擴及結構體與非結構物，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之關係。本研究收集學校建築過去地震損壞及復原時間，加以整理分析，建立震後復原時間機率曲線，藉此發展學校建築震損圖，並了解復原時間與學校替代空間使用狀況，探討其空間便利性與工期合理性，俾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。

樣本基本資料收集與建立

調查表格設計與樣本篩選

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，如附錄 1 所示。

由於地表加速度 PGA 小於 140gal 的學校並不容易於地震時受到嚴重的損壞，而中央氣象局對於國內地震震度階級僅區分為 0 至 7 級，為研究之便利性，本計劃利用等比中數將震度階級 5 細分為 5-與 5+ (震度階級 5 的分界加速度為

$\sqrt{80 \times 250} = 140 \text{ gal}$)；震度階級 6 細分為 6-與 6+ (震度階級 6 的分界加速度為 $\sqrt{250 \times 400} = 315 \text{ gal}$)。根據上述原則，在學校樣本篩選方面，以恆春地震、花蓮地震、台東地震及甲仙地震的學校為主要研究範圍。南部屏東地區共有國中 35 所，國小 167 所，共計 202 所；在恆春地震中計有 24 所(國中 6 所，國小 18 所)之震度階級超過 5+。東部花蓮地區共有國中 25 所，國小 107 所，共計 131 所；在花蓮地震中計有 67 所(國中 13 所，國小 54 所)之震度階級超過 5+。東部台東地區共有國中 21 所，國小 91 所，共計 112 所；在台東地震中計有 43 所(國中 9 所，國小 34 所)之震度階級超過 5+。南部嘉義地區、台南地區及高雄地區共有國中 170 所，國小 599 所，共計 769 所；在甲仙地震中計有 119 所(國中 24 所，國小 95 所)之震度階級超過 5+。篩選震度階級 5+以上者 (PGA 大於 140gal)，合計共有 253 所學校。本計劃針對上述 253 所學校實問卷調查、電話訪查或實地訪查，訪查對象為學校總務主任或學校專職營繕工程人員，依據調查表格所列項目詢問地震發生後，學校的修復狀況，將地震後招標、開始動工、完工及開始使用的日期，標記於問卷調查表上。在資料彙整中，為增加樣本之同質性，從中刪除僅非結構物損壞之學校建築物 (25 棟) 及修復工期資料有疑慮者 (7 棟)，餘計有 263 棟學校建築物納入本計劃建築物復原時間之機率曲線研究樣本。

機率曲線分析中，為考慮校舍建築規模大小之影響，各棟建築物及整體學校修復工期，均以校舍樓地板面積做正規化，期能使本研究廣泛應用於其他學校。本研究以 500 平方公尺為一基本單位 (不足 500 平方公尺者以 500 平方公尺計)，統籌計算各校之單位母數，作為上述正規化之分析。

恆春、花蓮、台東及甲仙地震等震度圖

為充分了解各學校所在位置之 PGA，本計畫根據中央氣象局於恆春、花蓮、台東及甲仙地震當時分別量測全國 452 個(2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分)、104 個(2009 年 12 月 19 日 21 時 02 分)、290 個(2006 年 04 月 01 日 18 時 02 分)、108 個(2010 年 03 月 04 日 08 時 18 分)地震測站 (如圖 1 所示) 之經緯度座標與三向度 (東西、南北、垂直向) 最大地表加速度(PGA)，應用 Surfer 繪圖軟體繪製三個地震之三向度等震度圖，如圖 2~4 所示。再將各個三向度等震度圖與屏東 24 所、

花蓮 67 所、台東 43 所及嘉義 77 所、高雄 6 所、台南 36 所學校的經緯度座標疊合，以 Kriging 內插法[5]求得 253 所學校的三向度 PGA，對照中央氣象局震度階級表，找出各個 PGA 數值所對應的震度階級。

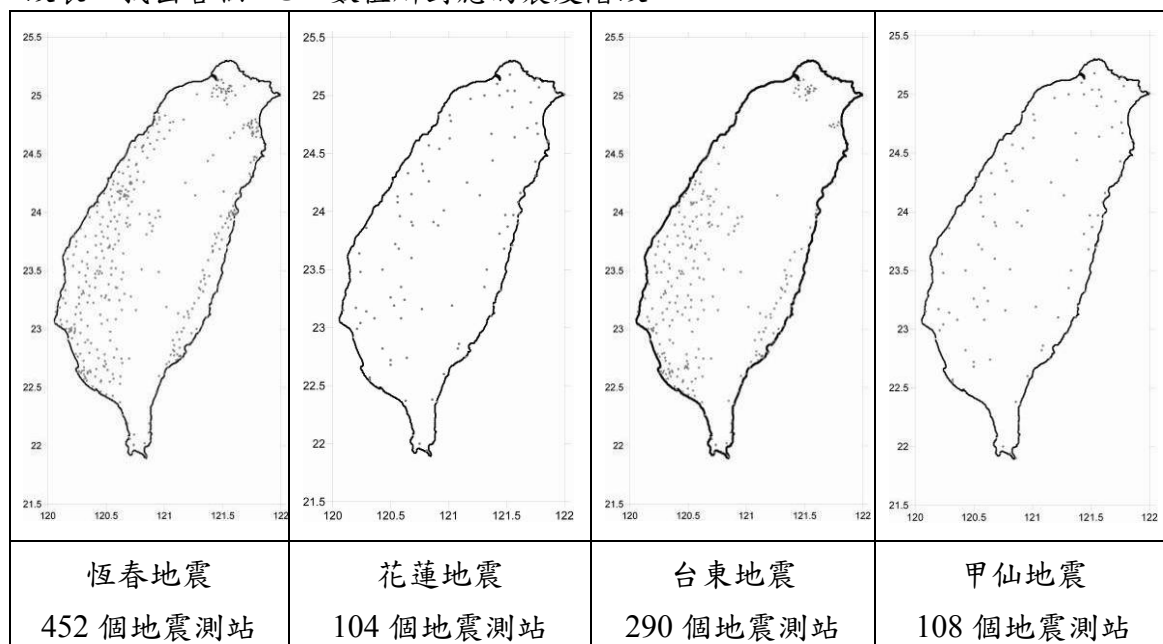


圖 1. 地震測站位置分佈

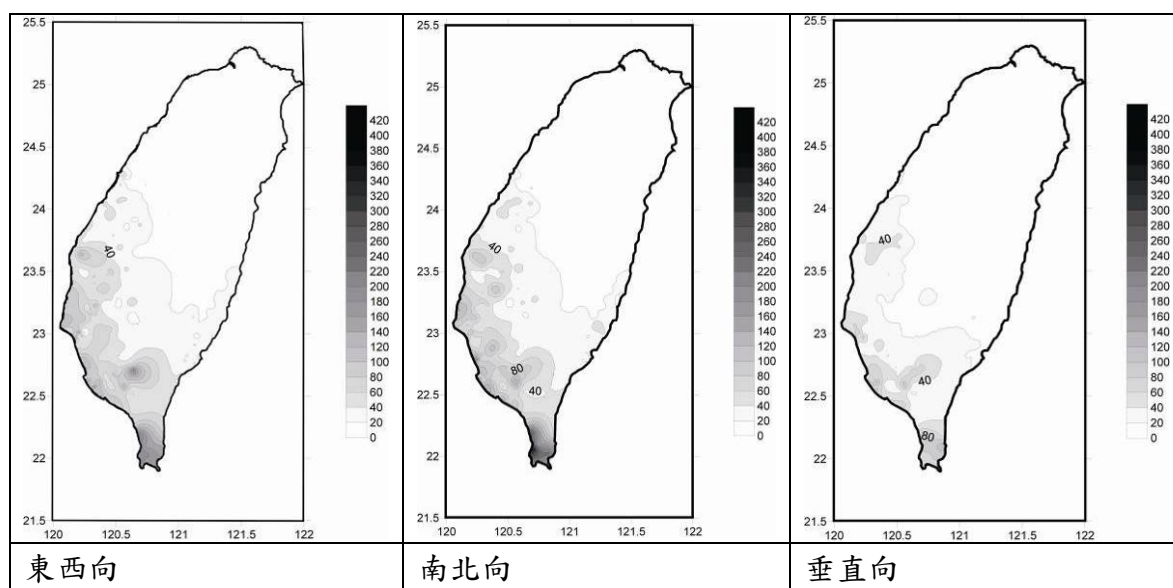


圖 2. 恆春地震等震度圖(2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分)

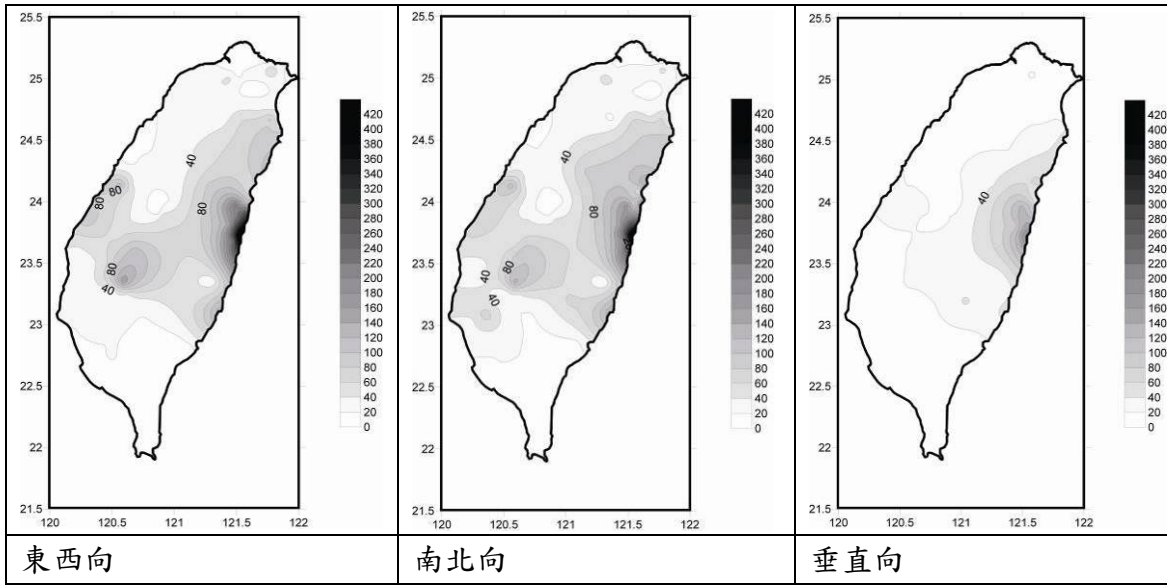


圖 3. 花蓮地震等震度圖(2009 年 12 月 19 日 21 時 02 分)

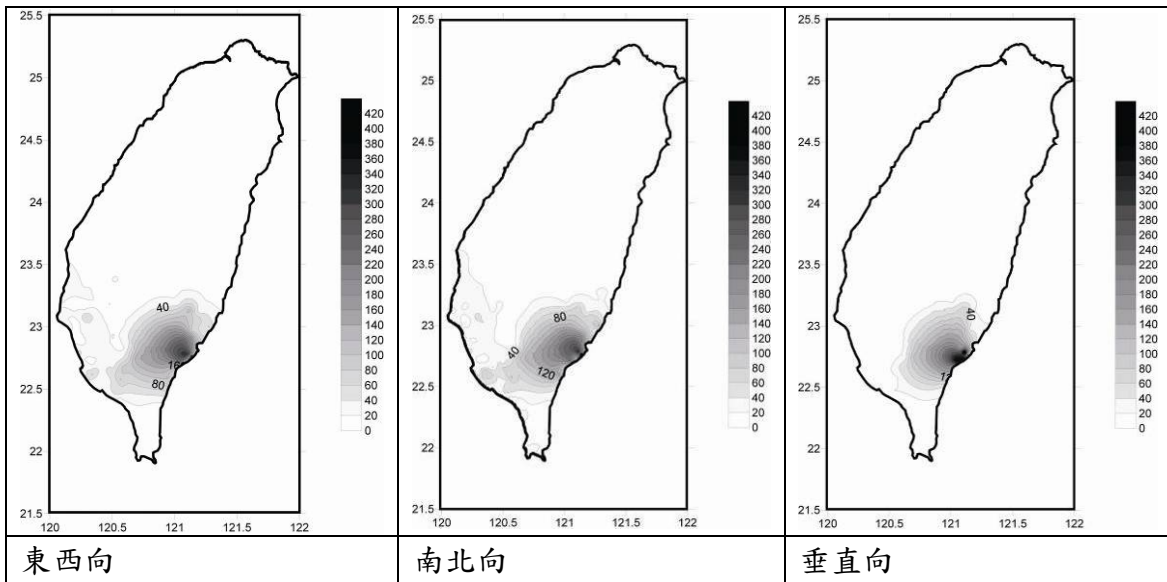


圖 4. 台東地震等震度圖(2006 年 04 月 01 日 18 時 02 分)

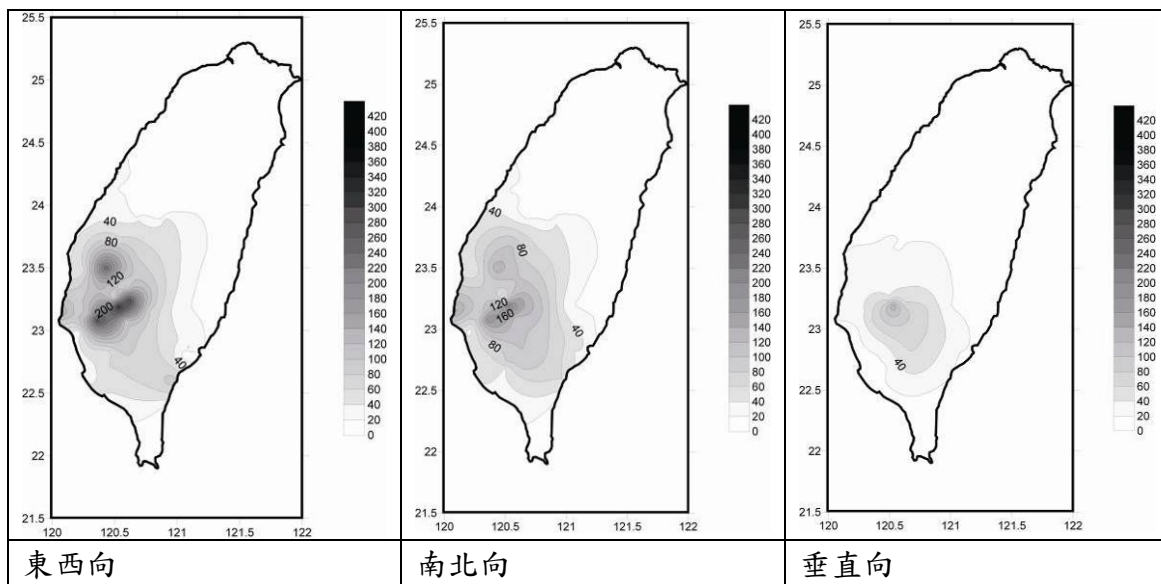


圖 5. 甲仙地震等震度圖(2010 年 03 月 04 日 08 時 18 分)

損壞機率之易損性曲線基本理論

易損性曲線理論與探討

依據或然率分佈理論[6]，當 \ln^X 形成常態分佈時，隨機變數 X 即形成對數常態分佈 (Lognormal Distribution)，對數常態分佈的或然率密度函數為(1)式：

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad 0 \leq x < \infty \quad (1)$$

該分佈可用 $LN(\lambda, \zeta)$ 符號來代表， λ 與 ζ 分別為 \ln^X 對數常態分佈的平均值與標準差。由於該分佈與常態分佈為對數轉換關係，所以其或然率 P 值亦可依(2)式計算，其值為分佈曲線下 a 、 b 兩點之間的面積：

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] dx \quad (2)$$

由於對數常態分佈的隨機變數定義域恆為正數，它的或然率分佈恆可用它的累積分佈函數 (Cumulative Distribution Function, CDF) 來描述，所以如果將任一項非結構物達到某損害程度時所對應之工程需求參數 (Engineering Demand Parameter, EDP) 模擬為隨機變數，該隨機變數以對數常態分佈來表示時，其機

率累積分佈曲線即為非結構物之易損性曲線，詳如上年度計畫中所述。

本研究求取機率曲線的方法，係沿用 MCEER [7]在技術報告中提出，以機率論為基礎之存活率分析 (Survival Analysis)，其計算方式詳見上年度計畫。

復原時間之機率曲線

利用上節易損性曲線的觀念，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 存活率分析方法來繪製該項建築物復原時間之機率曲線。

彙整調查 263 棟建築物完成的建築物損壞問卷調查表，結果如附錄 2 所示。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。

整體學校之復原時間機率曲線

地震後到招標時間之機率曲線

在增加樣本同質性考量下，並刪除 32 棟學校建築物復原時間之調查資料中有疑慮者 (7 棟)，餘計有 263 棟建築物納入本計畫建築物復原時間之機率曲線研究樣本。其中嘉義縣共有 71 所學校(86 棟建築物)、台南市共有 30 所學校(32 棟建築物)、高雄市共有 6 所學校(6 棟建築物)、屏東縣共有 21 所學校(23 棟建築物)、台東縣共有 41 所學校(47 棟建築物)及花蓮縣共有 63 所學校(69 棟建築物)，合計共有 263 棟建築物列入調查。

另外有些學校建築因地震規模較小，使得學校建築本身損壞程度不大，所以只有進行建築物局部損壞修復工程。因屬於小額採購，所以未進行招標工程，其中未進行招標的建築物共有 37 棟建築物，其餘計有 226 棟建築物納入建築物復原時間之機率曲線研究。

在地震後到招標時間方面，調查樣本之時間介於 0 至 528 天之間，依樣本分佈之合理性，將其分為 3 個區間，即 0 天-24 天、24 天-100 天、100 天以上。取每一區間中之平均值，分別為 1.78 天、46.32 天、207.92 天，分別作為第一類，第二類、第三類之機率曲線超越標準。再將 226 樣本之 PGA 區分為震度 5+、6-、6+ 等三區，並取各區之加權平均數 0.19g、0.29g、0.38g 為機率曲線橫軸之指標，以 MCEER 存活率分析分別獲得該三類之機率點，配合非線性迴歸，即可得時間之機率曲線，如圖 6、7。

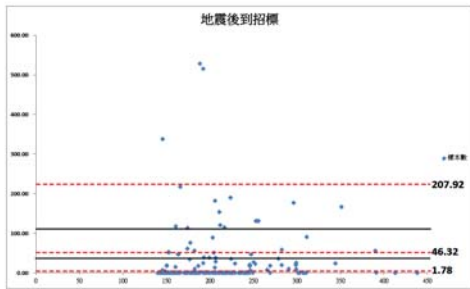


圖 6. 地震後至招標時間樣本分布
與第 I、II、III 類平均值

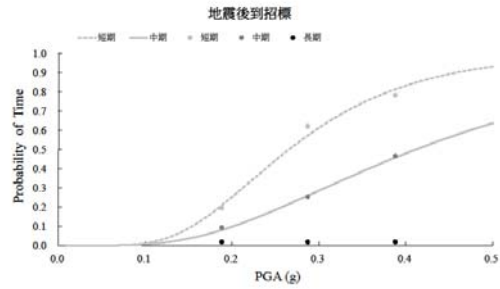


圖 7. 地震後至招標時間之機率曲線

招標到開工時間之機率曲線

從招標到開工時間方面，調查樣本時間介於 0 至 25 天之間，依樣本分佈之合理性，將其分為 3 個區間，即 0 天-3 天、3 天-8 天、8 天以上。取每一區間中之平均值，分別為 0.27 天、5.06 天、14.11 天，分別作為第一類，第二類、第三類之機率曲線超越標準。再將 226 樣本之 PGA 區分為震度 5+、6-、6+ 等三區，並取各區之加權平均數 0.19g、0.29g、0.38g 為機率曲線橫軸之指標，以 MCEER 存活率分析分別獲得該三類之機率點，配合非線性迴歸，即可得時間之機率曲線，如圖 8、9。

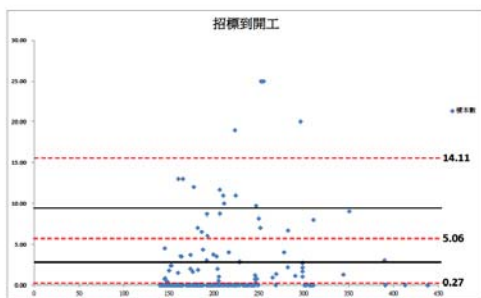


圖 8. 招標至開工時間樣本分布
與第 I、II、III 類平均值

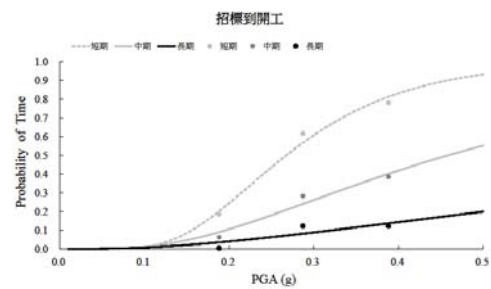


圖 9. 招標至開工時間之機率曲線

開工到完工時間之機率曲線

從開工到完工時間方面，調查樣本時間介於 0 至 40 天之間，依樣本分佈之合理性，將其分為 3 個區間，即 0 天-8 天、8 天-19 天、19 天以上。取每一區間中之平均值，分別為 0.81 天、11.72 天、27.65 天，分別作為第一類，第二類、第三類之機率曲線超越標準。再將 263 樣本之 PGA 區分為震度 5+、6-、6+ 等三區，並取各區之加權平均數 0.19g、0.29g、0.38g 為機率曲線橫軸之指標，以 MCEER 存活率分析分別獲得該三類之機率點，配合非線性迴歸，即可得時間之機率曲線，如圖 10、11。

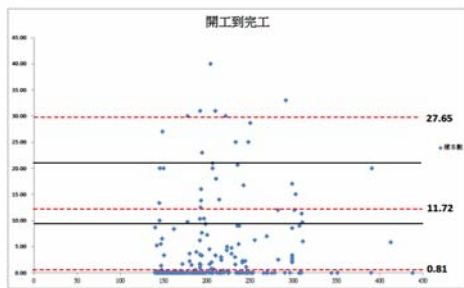


圖 10. 開工至完工時間樣本分布
與第 I、II、III 類平均值

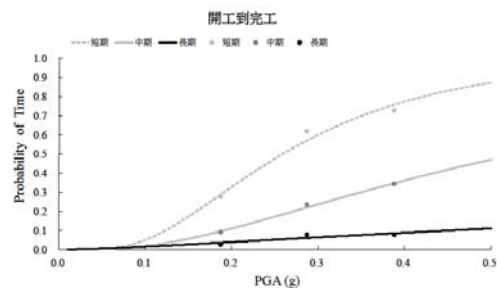


圖 11. 開工至完工時間之機率曲線

完工到開始使用時間之機率曲線

從完工到開始使用時間方面，調查樣本時間介於 0 至 21 天之間，依樣本分佈之合理性，將其分為 3 個區間，即 0 天-1 天、1 天-5 天、5 天以上。取每一區間中之平均值，分別為 0.12 天、2.55 天、11.71 天，分別作為第一類，第二類、第三類之機率曲線超越標準。再將 263 樣本之 PGA 區分為震度 5+、6-、6+ 等三區，並取各區之加權平均數 0.19g、0.29g、0.38g 為機率曲線橫軸之指標，以 MCEER 存活率分析分別獲得該三類之機率點，配合非線性迴歸，即可得時間之機率曲線，如圖 12、13。

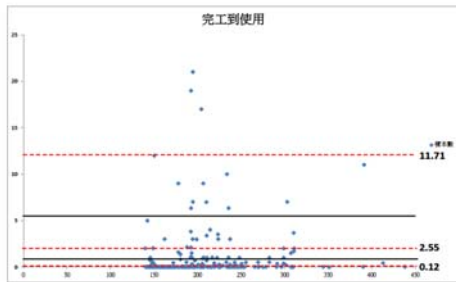


圖 12. 完工至開始使用時間樣本分布
與第 I、II、III 類平均值

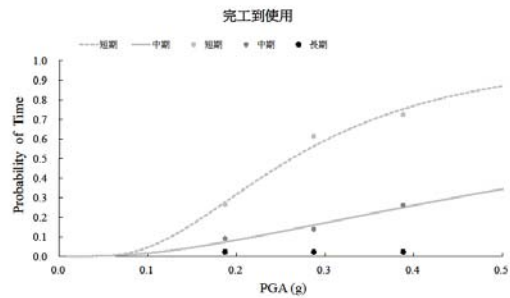


圖 13. 完工至開始使用時間之機率曲線

招標到開始使用時間之機率曲線

從招標到開始使用時間方面，調查樣本時間介於 0 至 80 天之間，依樣本分佈之合理性，將其分為 3 個區間，即 0 天-10 天、10 天-25 天、25 天以上。取每一區間中之平均值，分別為 0.70 天、16.88 天、46.35 天，分別作為第一類，第二類、第三類之機率曲線超越標準。再將 226 樣本之 PGA 區分為震度 5+、6-、6+ 等三區，並取各區之加權平均數 0.19g、0.29g、0.38g 為機率曲線橫軸之指標，以 MCEER 存活率分析分別獲得該三類之機率點，配合非線性迴歸，即可得時間之機率曲線，如圖 14、15。

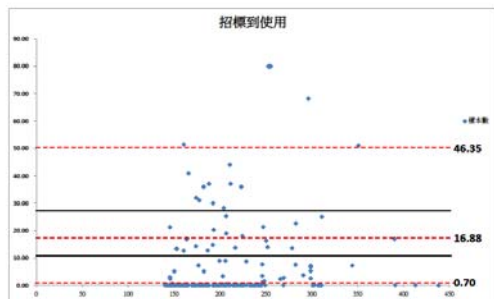


圖 14. 招標至開始使用時間樣本分布
與第 I、II、III 類平均值

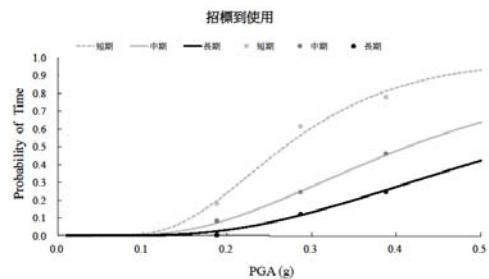


圖 15. 招標至開始使用時間之機率曲線

地震後到開始使用時間之機率曲線

從地震後到開始使用時間方面，調查樣本時間介於 0 至 564.67 天之間，依樣本分佈之合理性，將其分為 3 個區間，即 0 天-50 天、50 天-110 天、110 天以上。取每一區間中之平均值，分別為 5.93 天、70.63 天、234.42 天，分別作為第一類、第二類、第三類之機率曲線超越標準。再將 263 樣本之 PGA 區分為震度 5+、6-、6+ 等三區，並取各區之加權平均數 0.19g、0.29g、0.38g 為機率曲線橫軸之指標，以 MCEER 存活率分析分別獲得該三類之機率點，配合非線性迴歸，即可得時間之機率曲線，如圖 16、17

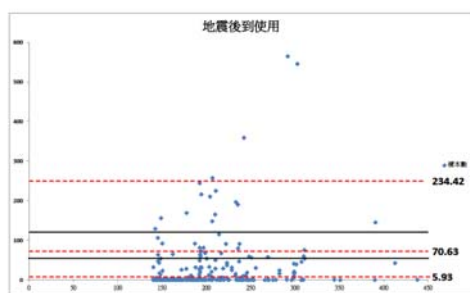


圖 16. 地震後至開始使用時間樣本分佈與第 I、II、III 類平均

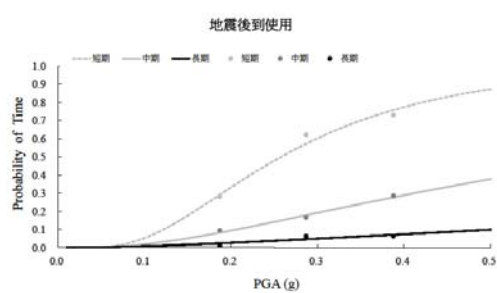


圖 17. 地震後至開始使用時間之機率曲線

小結

由表一可得知，在評估建築物之時間機率曲線時，可得知地震後到招標及地震後到開始使用之時間較為長。地震後到之招標這段時間，可能需要專家評估建築物是否進行復原工作，因此會造成建築物在進行復原工作時，產生延宕的情形發生。其次招標到開始使用及開工到完工之時間，最後招標到開工及完工到開始使用之時間較為短，而招標到開工的這段時間，學校幾乎都是招標結束就馬上進行修復作業，因此復原時間會較短，而從完工到開始使用的這段時間，學校幾乎都是當日完工，隔日就開始使用，因此時間會最短。

由表二得知，當震度達到 0.188g(達震度階級 5+)時，地震後到招標的短時期、中時期的復原時間比率分別 19.4%、8.2%；招標到開工的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 20.8%、9.2%、3.5%；開工至完工的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 27.7%、9.9%、3.7%；完工至開始使用的短時期、中時期的

復原時間比率分別 28.6%、7.5%；招標至開始使用的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 20.4%、7.5%、2.6%；地震後至開始使用的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 30%、9.5%、1.1%。整體修復時間的比率不到五成，當中以短時期復原時間的比率較為高。

以 0.287g(達震度階級 6-)而言，地震後到招標的短時期、中時期的復原時間比率分別 58.2%、26.4%；招標到開工的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 57.6%、24.4%、8.3%；開工至完工的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 57.7%、22.4%、6.1%；完工至開始使用的短時期、中時期的復原時間比率分別 56.9%、15.3%；招標至開始使用的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 57.4%、25.5%、11.8%；地震後至開始使用的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 57.9%、16.6%、4.6%。同樣也是以短時期的比率較為高，大約六成，而中時期或長時期的比率不到三成。

以 0.388g(達震度階級 6+)而言，地震後到招標的短時期、中時期的復原時間比率分別 81.7%、46.1%；招標到開工的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 81.5%、40.3%、13.7%；開工至完工的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 75.9%、34.9%、7.8%；完工至開始使用的短時期、中時期的復原時間比率分別 75.6%、26.2%；招標至開始使用的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 81.5%、45.6%、25.9%；地震後至開始使用的短時期、中時期、長時期的復原時間比率分別 76.1%、27.9%、6.3%。達短時期復原時間之比率超過七成，而中時期的地震後至招標、招標至開工及招標至開始使用皆超過四成，其餘大約三成，長時期的比率除了招標到開始使用約三成，其餘大約一成。

表一. 整體學校之復原時間機率曲線

	區間			區間平均值			平均值 λ			標準差 ζ			有效 樣本數
	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	短時期	中時期	長時期	
地震後 至招標	0天~24天	24天~100天	100天 以上	1.78天	46.32天	207.92天	-1.3256	-0.8866	-28.9745	0.425	0.5571	10.7313	226棟
招標至 開工	0天~3天	3天~8天	8天以上	0.27天	5.06天	14.11天	-1.3187	-0.7792	0.1604	0.4198	0.6625	1.0086	226棟
開工至 完工	0天~8天	8天~19天	19天 以上	0.81天	11.72天	27.65天	-1.3502	-0.6320	1.4047	0.5802	0.7974	1.7123	263棟
完工至開 始使用	0天~1天	1天~5天	5天以上	0.12天	2.55天	11.71天	-1.3378	-0.3182	-12.754	0.5715	0.9308	2.6655	263棟
招標至開 始使用	0天~10天	10天~25天	25天 以上	0.7天	16.88天	46.35天	-1.3153	-0.8825	-0.5837	0.4171	0.5396	0.5532	226棟
地震後至 開始使用	0天~50天	50天~110天	110天 以上	5.93天	70.63天	234.42天	-1.3545	-0.4062	1.1237	0.5832	0.9118	1.4038	263棟

表二. 復原時間樣本之機率

	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%

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，併提供災後重建參考。
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. 周學政，「GIS 辭典」，崧旭資訊股份有限公司，台北，台灣，2004。
6. 蔡益超譯，「工程或然率」，中國土木水利工程學會，台北，第 80-106 頁，1979。
7. 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.
- 8.

附錄 1

學校建築地震損壞修復工期間卷調查表

■學校名稱： ■學校地址：																	
■學校班級數： 班 ■全校學生人數： 人 ■填表人：																	
■電話：																	
編號	建築物名稱	樓層數		總樓地 板面積 (平方公 尺)	損壞修復日期								修復 金額 (萬)	備註			
		地上(層)	地下 (層)		招標			開工			完工				恢復使用		
					年	月	日	年	月	日	年	月			日	年	月
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	

附錄2

甲仙、恆春、台東及花蓮地震建築物復原時間資料

建築物 編號	PGA	震度	ET(天)	TS(天)	SF(天)	FU(天)	TU(天)	EU(天)
1	149.7833	5+	0	0	0	0	0	0
2	151.6818	5+	0	0	0	0	0	0
3	153.0805	5+	0	0	0	0	0	0
4	154.2536	5+	0	0	0	0	0	0
5	172.5293	5+	0	0	0	0	0	0
6	174.1246	5+	0	0	0	0	0	0
7	177.0172	5+	0	0	0	0	0	0
8	180.3956	5+	0	0	11	4	0	21
9	180.3956	5+	0	0	11	4	0	21
10	182.4263	5+	0	0	0	0	0	0
11	189.3246	5+	0	0	0	0	0	0
12	211.3403	5+	0	0	0	0	0	0
13	211.9547	5+	0	0	0	0	0	0
14	216.9112	5+	0	0	3	1	0	67
15	219.7961	5+	0	0	0	0	0	0
16	238.9987	5+	0	0	0	0	0	0
17	241.4629	5+	73	9	25	1	33	105
18	241.4629	5+	73	9	25	1	33	105
19	242.6199	5+	1352	18	67	2	85	1436
20	244.6092	5+	0	0	18	1	0	90
21	265.8423	6-	0	0	0	0	0	0
22	270.5356	6-	0	0	0	0	0	0
23	278.6361	6-	0	0	0	0	0	0
24	141.0211	5+	0	0	0	0	0	0
25	143.4862	5+	0	0	0	0	0	0
26	143.5209	5+	224	20	13	2	33	256
27	144.4259	5+	0	0	0	0	0	0
28	145.8373	5+	0	0	0	0	0	0

29	147.099	5+	0	0	0	0	0	0
30	147.099	5+	0	0	22	1	0	172
31	150.6115	5+	161	16	30	1	1	1
32	150.6115	5+	161	16	30	1	1	1
33	150.6115	5+	161	16	30	1	1	1
34	151.7352	5+	0	0	0	0	0	0
35	151.9747	5+	0	0	0	0	0	0
36	155.0231	5+	0	0	0	0	0	0
37	155.4531	5+	0	0	0	0	0	0
38	159.2096	5+	0	0	0	0	0	0
39	159.9803	5+	0	0	0	0	0	0
40	161.0317	5+	0	0	0	0	0	0
41	161.9217	5+	0	0	0	0	0	0
42	162.2092	5+	259	12	42	15	67	325
43	162.2092	5+	259	12	42	15	67	325
44	165.9969	5+	0	0	0	0	0	0
45	169.1459	5+	0	0	0	0	0	0
46	169.8761	5+	0	0	0	0	0	0
47	170.5591	5+	0	0	0	0	0	0
48	170.5992	5+	0	0	0	0	0	0
49	171.1862	5+	0	0	0	0	0	0
50	171.5827	5+	0	0	0	0	0	0
51	171.6034	5+	0	0	0	0	0	0
52	172.8552	5+	0	0	0	0	0	0
53	173.0692	5+	0	0	0	0	0	0
54	176.7409	5+	0	0	0	0	0	0
55	177.662	5+	182	18	117	19	152	333
56	177.662	5+	354	39	90	27	154	507
57	178.6221	5+	0	0	0	0	0	0
58	182.3571	5+	0	0	0	0	0	0
59	182.3959	5+	0	0	0	0	0	0
60	182.6519	5+	0	0	0	0	0	0

61	183.7275	5+	0	0	0	0	0	0
62	183.746	5+	0	0	0	0	0	0
63	185.2488	5+	0	0	0	0	0	0
64	188.4344	5+	0	0	0	0	0	0
65	193.1764	5+	188	14	50	6	68	255
66	193.1764	5+	188	14	50	6	68	255
67	197.7324	5+	0	0	0	0	0	0
68	199.5556	5+	0	0	0	0	0	0
69	204.9692	5+	0	0	0	0	0	0
70	206.8235	5+	217	13	21	9	41	257
71	206.9378	5+	0	0	20	1	0	148
72	210.1115	5+	0	0	31	7	0	165
73	210.4004	5+	0	0	10	2	0	149
74	214.1612	5+	0	0	0	0	0	0
75	215.9976	5+	0	0	0	0	0	0
76	216.7	5+	0	0	0	0	0	0
77	219.187	5+	0	0	1	1	0	29
78	219.187	5+	0	0	2	2	0	143
79	225.3869	5+	0	0	1	1	0	4
80	226.0798	5+	0	0	0	0	0	0
81	234.4815	5+	0	0	0	0	0	0
82	234.9609	5+	0	0	0	0	0	0
83	235.4283	5+	0	0	0	0	0	0
84	238.3819	5+	0	0	0	0	0	0
85	239.3374	5+	0	0	0	0	0	0
86	251.9287	6-	0	0	0	0	0	0
87	252.7901	6-	0	0	0	0	0	0
88	296.3796	6-	0	0	0	0	0	0
89	307.9428	6-	0	0	0	0	0	0
90	310.6848	6-	184	11	29	5	43	226
91	391.1127	6+	227	4	40	22	64	290
92	412.9856	7	174	8	29	1	1	1

93	140.6169	5+	0	0	0	0	0	0
94	145.6396	5+	76	12	20	1	31	106
95	150.3097	5+	0	0	20	12	0	92
96	163.2202	5+	0	0	0	0	0	0
97	171.1597	5+	0	0	0	0	0	0
98	172.3107	5+	0	0	0	0	0	0
99	184.7558	5+	0	0	0	0	0	0
100	187.4492	5+	0	0	0	0	0	0
101	193.8743	5+	0	0	0	0	0	0
102	199.5928	5+	0	0	0	0	0	0
103	222.1896	5+	56	7	30	1	36	91
104	224.4853	5+	0	0	0	0	0	0
105	224.5138	5+	0	0	0	0	0	0
106	224.7219	5+	0	0	0	0	0	0
107	232.9364	5+	101	19	30	5	52	152
108	237.6089	5+	0	0	9	3	0	91
109	245.2845	5+	0	0	0	0	0	0
110	245.6149	5+	0	0	0	0	0	0
111	246.7342	5+	0	0	0	0	0	0
112	247.2375	5+	0	0	0	0	0	0
113	250.4813	6-	0	0	86	1	0	168
114	253.7379	6-	0	0	0	0	0	0
115	255.552	6-	70	26	25	2	51	120
116	269.4104	6-	0	0	14	1	0	115
117	269.4222	6-	0	0	0	0	0	0
118	275.417	6-	0	0	0	0	0	0
119	282.5172	6-	0	0	12	1	0	15
120	282.5172	6-	0	0	5	1	0	46
121	290.6228	6-	0	0	0	0	0	0
122	291.5953	6-	1584	13	99	1	111	1694
123	298.935	6-	0	0	17	2	0	41
124	298.935	6-	0	0	12	2	0	95

125	298.935	6-	0	0	17	2	0	41
126	298.935	6-	0	0	12	2	0	95
127	298.935	6-	0	0	17	2	0	41
128	298.935	6-	0	0	17	2	0	41
129	301.5993	6-	123	15	60	1	74	196
130	302.8896	6-	1547	26	45	21	90	1636
131	307.0799	6-	0	0	0	0	0	0
132	307.3836	6-	0	0	18	3	0	90
133	309.7675	6-	0	0	0	0	0	0
134	310.1971	6-	118	18	34	11	61	178
135	311.1514	6-	0	0	6	2	0	54
136	344.354	6+	0	0	0	0	0	0
137	351.2038	6+	0	0	0	0	0	0
138	390.0785	6+	0	0	0	0	0	0
139	438.3373	7	0	0	0	0	0	0
140	143.7581	5+	0	0	0	0	0	0
141	140.1004	5+	0	0	0	0	0	0
142	171.8837	5+	0	0	15	4	0	231
143	246.1559	5+	0	0	0	0	0	0
144	196.9051	5+	0	0	31	2	0	243
145	158.2339	5+	0	0	0	0	0	0
146	242.4538	5+	0	0	0	0	0	0
147	237.0958	5+	153	15	22	1	36	188
148	237.0958	5+	153	15	22	1	36	188
149	246.0383	5+	0	0	11	1	0	187
150	184.2305	5+	0	0	0	0	0	0
151	187.2354	5+	177	7	1	1	7	183
152	249.3256	5+	0	0	0	0	0	0
153	235.8407	5+	153	6	62	19	85	237
154	248.2747	5+	0	0	25	1	0	58
155	164.786	5+	0	0	0	0	0	0
156	153.9322	5+	0	0	0	0	0	0

157	196.2924	5+	0	0	0	0	0	0
158	152.3195	5+	0	0	0	0	0	0
159	148.1676	5+	27	1	1	1	1	27
160	226.055	5+	0	0	0	0	0	0
161	235.6385	5+	182	1	9	1	9	190
162	145.4848	5+	114	35	40	3	76	189
163	145.4848	5+	114	35	40	3	76	189
164	156.6762	5+	0	0	0	0	0	0
165	171.0639	5+	0	0	0	0	0	0
166	238.0339	5+	0	0	0	0	0	0
167	149.1137	5+	0	0	0	0	0	0
168	241.1918	5+	0	0	0	0	0	0
169	168.068	5+	0	0	0	0	0	0
170	191.8868	5+	0	0	0	0	0	0
171	233.4981	5+	153	11	25	10	44	196
172	147.4099	5+	0	0	0	0	0	0
173	148.9101	5+	120	10	27	2	37	156
174	148.5906	5+	0	0	13	1	0	106
175	205.7169	5+	0	0	0	0	0	0
176	181.5546	5+	0	0	0	0	0	0
177	178.1	5+	0	0	0	0	0	0
178	150.8976	5+	0	0	0	0	0	0
179	142.4182	5+	462	16	21	20	55	516
180	154.961	5+	0	0	0	0	0	0
181	144.1946	5+	0	0	0	0	0	0
182	188.1863	5+	0	0	0	0	0	0
183	186.7644	5+	0	0	0	0	0	0
184	173.2354	5+	0	0	0	0	0	0
185	174.2491	5+	0	0	0	0	0	0
186	210.8092	5+	190	19	18	1	36	225
187	206.9076	5+	0	0	0	0	0	0
188	186.8842	5+	0	0	0	0	0	0

189	200.6141	5+	141	44	29	1	72	212
190	141.2039	5+	0	0	0	0	0	0
191	142.195	5+	0	0	0	0	0	0
192	166.8832	5+	0	0	0	0	0	0
193	141.8134	5+	0	0	0	0	0	0
194	152.4136	5+	0	0	0	0	0	0
195	188.1052	5+	162	20	28	15	61	222
196	190.5238	5+	0	0	0	0	0	0
197	163.3057	5+	0	0	0	0	0	0
198	148.5392	5+	0	0	0	0	0	0
199	174.1523	5+	0	0	0	0	0	0
200	165.8486	5+	0	0	0	0	0	0
201	161.825	5+	0	0	0	0	0	0
202	160.7499	5+	0	0	0	0	0	0
203	188.0376	5+	0	0	0	0	0	0
204	150.319	5+	0	0	0	0	0	0
205	159.6088	5+	0	0	0	0	0	0
206	182.5671	5+	0	0	31	2	0	227
207	147.2143	5+	0	0	11	1	0	134
208	140.2425	5+	0	0	52	12	0	191
209	151.3376	5+	0	0	0	0	0	0
210	172.4472	5+	0	0	0	0	0	0
211	177.9846	5+	0	0	0	0	0	0
212	160.2041	5+	0	0	0	0	0	0
213	163.2003	5+	0	0	0	0	0	0
214	164.1352	5+	0	0	0	0	0	0
215	178.7139	5+	0	0	0	0	0	0
216	151.5874	5+	0	0	0	0	0	0
217	206.9076	5+	0	0	0	0	0	0
218	211.7551	5+	0	0	0	0	0	0
219	205.2106	5+	0	0	0	0	0	0
220	224.1931	5+	148	5	24	16	43	190

221	210.4038	5+	307	18	49	51	116	422
222	205.7169	5+	272	11	32	15	56	327
223	205.7169	5+	272	11	32	15	56	327
224	199.0142	5+	139	29	28	9	64	202
225	207.6446	5+	156	51	47	9	105	260
226	215.0613	5+	0	0	0	0	0	0
227	223.484	5+	161	49	30	21	98	258
228	223.484	5+	161	49	30	21	98	258
229	204.4204	5+	131	25	40	17	80	210
230	204.4204	5+	131	25	40	17	80	210
231	204.4204	5+	131	25	40	17	80	210
232	233.0705	5+	154	17	30	1	46	199
233	192.8561	5+	251	19	21	1	39	289
234	207.2794	5+	0	0	0	0	0	0
235	193.6359	5+	0	0	97	2	0	217
236	193.6359	5+	0	0	32	2	0	120
237	192.4348	5+	177	20	31	19	68	244
238	192.4348	5+	177	20	31	19	68	244
239	192.4348	5+	177	20	31	19	68	244
240	192.4348	5+	177	20	31	19	68	244
241	192.4348	5+	0	0	1	1	0	2
242	192.4348	5+	177	20	31	19	68	244
243	228.7893	5+	173	15	33	1	47	219
244	228.7893	5+	173	15	33	1	47	219
245	203.3038	5+	254	27	45	1	71	324
246	203.3038	5+	254	27	45	1	71	324
247	203.3038	5+	254	27	45	1	71	324
248	216.9559	5+	0	0	68	1	0	158
249	145.8366	5+	0	0	0	0	0	0
250	186.9732	5+	0	0	0	0	0	0
251	182.3175	5+	0	0	0	0	0	0
252	143.6162	5+	0	0	0	0	0	0

253	160.4869	5+	0	0	0	0	0	0
254	164.5226	5+	0	0	0	0	0	0
255	163.1985	5+	0	0	0	0	0	0
256	195.4585	5+	0	0	0	0	0	0
257	214.4827	5+	181	16	28	8	50	230
258	194.6045	5+	166	9	23	21	51	216
259	194.6045	5+	166	9	23	21	51	216
260	194.6045	5+	166	9	23	21	51	216
261	202.5768	5+	0	0	0	0	0	0
262	205.8366	5+	0	0	0	0	0	0
263	234.0417	5+	0	0	0	0	0	0