

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(IV)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB- 101-E-07

執行期間：101 年 01 月 01 日至 101 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

中華民國 101 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(IV)		
計畫編號	MOTC-CWB- 101-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	101	執行期間	101年1月1日至101年12月31日
本期經費 (單位：千元)			
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(%)
			100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	姚昭智	林其璋	蘇慧紋
		洪李陵	蔡文峰
		朱世禹	葉明紳
報告頁數	35	使用語言	中文
中英文關鍵詞	震損圖、易損性曲線、地震設計規範 damage map, fragility curve, seismic design code		
研究目的	<p>本研究利用四年時間，針對三類建物：中小學校舍、大專院校校舍、及低矮 RC 建物進行研究；主要目的是希望能夠發揮強震儀記錄的優勢，結合各種科學上的分析方法，將過去地震中的損壞經驗，彙整成為可用以預測未來災損的評估資料。</p> <p>在中小學校舍方面，以嘉義市國中、小學為對象，以設計 PGA 模擬之各學校所在位址產生的 PGA 為輸入資料，對學校建築物震損修復時間及非結構物的地震損壞作預估分析，藉以提供學校震後迅速預估震害依據，俾能在最短時間內做有效率的救災活動，並充分掌握重建應投入的財力與時間。</p> <p>在大專院校校舍方面，共有兩項：第一、發展最佳振態還原法，重建結構完整之振態參數，修正建築結構診斷技術及損壞評估流程，並配合速報系統，利用建築結構有限量測訊號，進行損壞樓層及位置之判斷及損壞程度評估。第二、以嘉義地區大專院校建築為例，進行彈性反應預估與震損預估圖之建立。</p>		

	<p>在低矮 RC 建物方面，以嘉義市各里兩層樓和三層樓鋼筋混凝土民房的分佈為例，考慮在建築物耐震設計規範制定的設計和最大考量地震作用下，製作這兩類民房的震損圖，亦即推估嘉義市各地兩層樓和三層樓鋼筋混凝土民房不同震損程度的機率和數量分佈。</p>
<p>研究成果</p>	<p>在中小學校舍方面，成果如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 計算得出嘉義市國中、小學校舍在不同地震加速度下所需的復原時間。 (2) 求得不同地震加速度下校舍非結構物的損失金額。 <p>在大專院校校舍方面，成果如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 層間勁度推導。 (2) 最佳振態還原法：定義時域最佳化指標，藉由比較預估與實測系統反應，可將最佳化指標最小化的預估振態，即本文所定義之最佳還原振態。 (3) 建築結構診斷技術及損壞評估流程。 (4) 彈性反應預估公式。 (5) 中正大學地震館尖峰反應之預估與驗證。 <p>在低矮 RC 建物方面，成果如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 確立易損度曲線的組合方式。 (2) 調整易損度曲線以滿足較新的建築物耐震設計規範。 (3) 在最新建築物耐震設計規範制定的設計和最大考量地震作用下，推估嘉義市各地兩層樓和三層樓鋼筋混凝土民房的震損圖，以不同震損程度的機率和數量分佈表達之。
<p>具體落實應用情形</p>	<p>在中小學校舍方面，本計畫以嘉義市中小學校舍為例，取 0.14G~0.5G 的地震下，將嘉義市國中小各建築物用 DGA 時，所預測修復工期、修復金額分別整理，再將嘉義市各學校 DGA 算出，再將各學校 DGA 分成百分比，並將修復工期分為 6 個區間，預測復原工期。再計算不同百分比之 DGA，提出嘉義市學校間數預測修復工期及修復金額，作為地震後救災指標。</p> <p>在大專院校校舍方面，本研究針對大專院校校舍所建議之彈性反應預估圖及區域性震損圖之建立模式，已實際落實於嘉義地區標的建築物之震損預估，唯受限於各區域校舍基本資料尚未完整收集之限制，無法呈現整體區域建築之彈性反應及震損狀況。未來如有完整之區域建築基本資料庫，則可落實本研究建議之震損評估流程，以提供中央及地方教育主管機關或</p>

	<p>各級防救災單位，於震後救災之參考依據。同時本研究所發展之最佳振態還原法損壞評估技術，可應用於震後學校建築之損壞樓層偵測與損壞程度之細部評估。</p> <p>在低矮 RC 建物方面，震損圖描述某一地區全部或某一類型建築物的損壞狀況，可為震前整備或震後救災之需。本計畫以嘉義市為例，詳細介紹易損度曲線之修正和複合，以及震損圖之建立。依據嘉義市兩層樓和三層樓 RC 民房的震損圖，可以預估各里的損壞棟數，作為震前整備之參考，如避難處所之安排和救災路線之規畫等等。整個分析流程很容易應用於其它地區震損圖之建立，而且當地震實際發生時，損壞指標可依自由場速報測站資料內插立即求得，儘速規劃救災措施。</p>
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)	

(以下接全文報告)

建立建築物震損圖之研究(IV)

姚昭智¹ 林其璋² 洪李陵³ 朱世禹⁴

1. 國立成功大學建築學系
2. 國立中興大學土木工程學系
3. 國立成功大學土木工程學系
4. 國立成功大學土木工程學系

摘要

本研究延續上年度計畫，以嘉義市為對象，以設計 PGA 為輸入資料，首先繼續探討台灣地區學校建築結構之耐震能力，製作地震等震圖(地表加速度分佈圖)，作為政府單位訂定防救災政策及緊急避難措施之參考。其次，針對中小學校舍、大專院校校舍及低矮 RC 建物，以地震的自由場測站紀錄為依據，建立震損圖；並且利用建築強震測站資料及速報系統之自由場測站資料，探討現有規範建議值於震損評估之適用性，同時與實際建築強震測站資料及震損狀況進行比對與驗證。最後以中小學校舍、大專院校校舍及低矮 RC 建物為對象，建立建築震害後災損評估，藉以提供震後迅速預估震害依據，俾能在最短時間內做有效率的救災活動，並充分掌握重建應投入的財力與時間。

關鍵詞：震損圖、易損性曲線、地震設計規範

ABSTRACT

According to the research from 2009 through 2011, this project is a continual research of the last 3 years. The input of Design PGA at Chiayi City will be used to in four major studies. First topic is to study the structural strength against earthquake force in schools. It can be used to assist government to develop disaster preparation and reduction program. The second topic investigates the earthquake damage of 2-story and 3-story RC buildings and try to develop vulnerability maps of like buildings elsewhere. The third topic utilizes the strong ground motion records to develop estimated building response so that building damage can be estimated. Finally, the damage of nonstructural components can be predicted from the input of Design PGA at Chiayi City which offers the damage prediction of nonstructural components in school buildings that can be a valuable reference to assess damage of future earthquake in Chiayi City.

Keyword : damage map, fragility curve, seismic design code

]

一、前言

近年來防災意識抬頭，人們瞭解到某一天然災害會造成的損害，是可以藉由事前的準備，大幅降低對社會的衝擊，並且透過事前的損害評估，讓突發事件的復原過程更有效率。台灣在 921 集集地震後，人們終於瞭解到台灣是個地震多發的地區，未來本島將會不斷有大小不一的各種地震發生，因此如何透過事前的災損評估及防災準備，以求降低地震損害及加速復原工作，是吾人應當努力以致的方向。

地震造成的損壞主要以建築物破壞為大宗，依照損壞程度之不同，而有不同的後果。輕微的損壞只要透過簡易修復即可完成復原；較為嚴重的損壞，便可能會因為進行修復工作，而造成建築機能無法發揮，如學校無法上課、行政單位無法上班、事業單位無法產出等等問題及造成經濟損失；最嚴重的狀況為建築物倒塌，引致大量的人身傷亡。

二、研究目的及意義

本研究利用中央氣象局廣設全島的強震儀紀錄資料（包含地表及建築陣列），進行震損評估的研究。主要目的是希望能夠發揮強震儀記錄的優勢，結合各種科學上的分析方法，將過去地震中的損壞經驗，彙整成為可用以預測未來災損的評估資料。主要意義在於中央及各級地方政府可以利用這些評估的災損資料，在地震前做好防災準備，以提升各個社區抵抗地震的能力及災後重建的復原能力。

本研究利用四年時間，針對三類建物：中小學校舍、大專院校校舍、及低矮 RC 建物進行研究，廣泛收集各個地震中不同校舍及建築的震動紀錄和損壞資料，並建立一個可用以評估地震損壞嚴重程度的方法及資料庫。在最後一年，將這些研究成果應用在地震風險較高的嘉義市，進行震損評估。由於上述三類建築物的建築特色各有不同，因此採用的資料收集方法及分析模式也各自相異，所以本文以下亦將依照各類建築的特色分段說明。

三、研究方法

3.1 中小學校舍

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，復原時間與修復金額的掌控，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，國外 FEMA 所主導之 HAZUS99[1]及國內國家地震工程中心所發展的 TELES 軟體[2、3]無法提供修復金額及修復工期相關資訊。提案人收集了 2000 年以後幾次地震造成的校舍修復資料，據以建立震後修復金額和修復工期易損曲線，藉此可了解學校震損修復金額和修復工期與地表震動之關係。學校經營者在震後能據此快速掌握災損狀況，從事有效率的復原計畫，使教學及各項功能運作正常。

本研究普查嘉義地區國中、小，計 28 間學校，總共[4]棟建築物，包括樓地板面積、興建年代等不同的變數，學校分佈如圖 1 所示。學校總樓地板面積分布的範圍目的在讓樣本能隨機分佈。

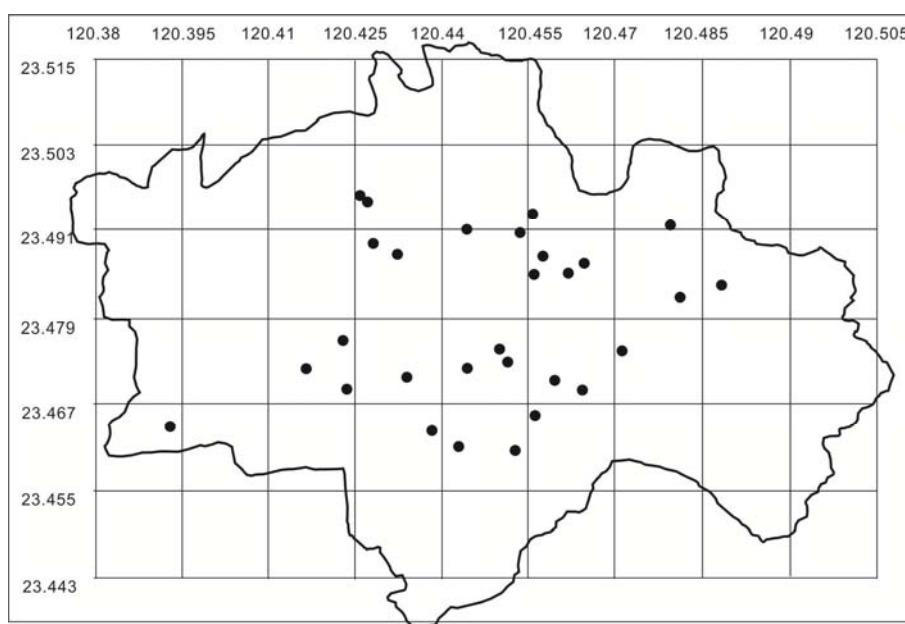


圖 1 嘉義市國中小分佈圖

本計畫參考建築資料集成,推估 1 間教室 40 人使用的空間為 100 平方公尺,但在調查的樣本中,有些空間並不適用成教室,像是老師辦公室、廚房、廁所等不納入計算。

本計畫並依照建築耐震規範可以得知嘉義市各校舍的設計地表加速度 DGA,考慮樣本數所屬的地盤皆為第 2 地盤,嘉義市東邊最靠近的斷層為梅山斷層後,DGA 分佈範圍在 0.308G~0.368G。

依據或然率分佈理論[4]及 MCEER[5]之存活率分析可繪出機率曲線,並引用涂英烈之『建築物中非結構物震損機率曲線之研究』[6]及薛麗梅之『學校建築復原時間之機率曲線研究』[7],調查資料以嘉義,台南,高雄,屏東,台東,花蓮學校,所調查的地震為 2012/3/4 甲仙地震,2006/12/26 恆春地震,2009/12/19 花蓮地震,2006/4/1 台東地震,所得易損性曲線圖如圖 2 所示。

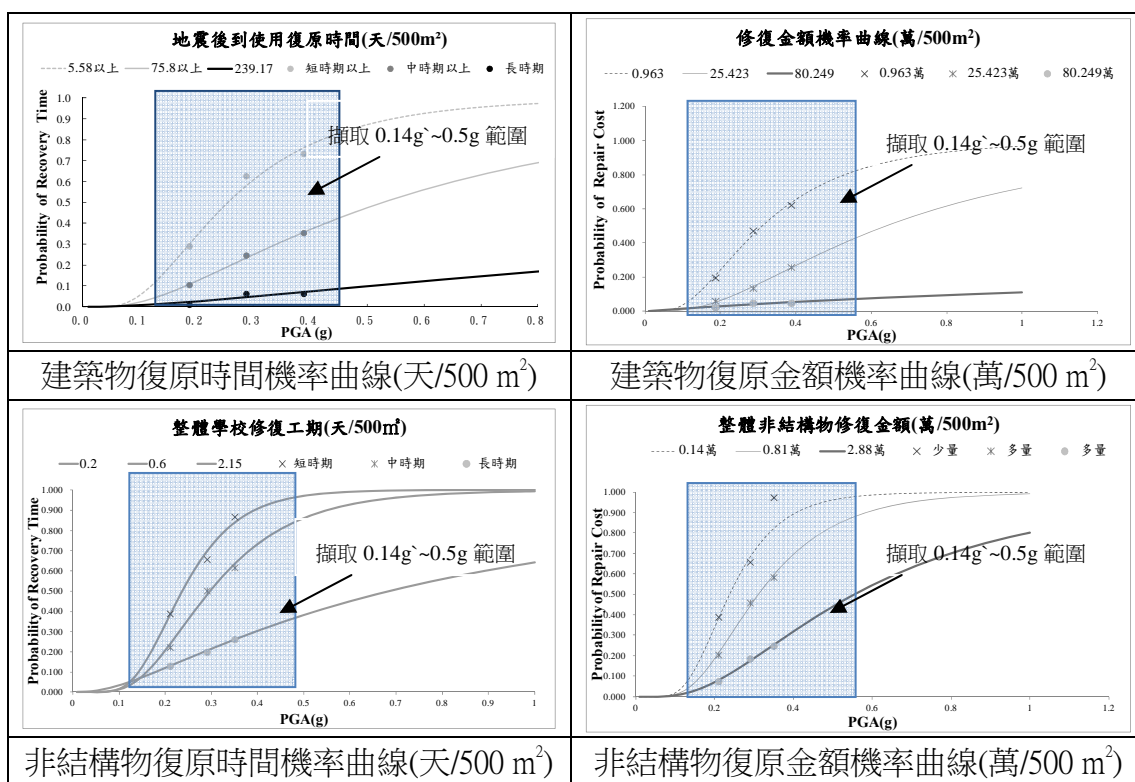


圖 2 復原時間及復原金額機率曲線圖

3.2 大專院校校舍

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)」[8、9]，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[10]，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，無法得知。本研究針對成功大學雲平大樓(測站編號：CHYBA0)、中央大學圖書館(測站編號：TCUBA0)、中興大學土環大樓(測站編號：TCUBA3)以及台東高商資訊大樓(測站編號：TTNBA0)等四棟不同地理位置大專院校建築物，將最大加速度反應量測資料(PBAA)與根據規範週期建議公式[11]所求得自由場加速度反應譜值(Sa)進行迴歸分析與比較，歸納獲得彈性反應預估公式。此公式可推廣應用於無裝設強震觀測儀器之建築物，利用此建築物附近之自由場紀錄預估該建物之最大加速度反應，其流程如圖 3 所示。

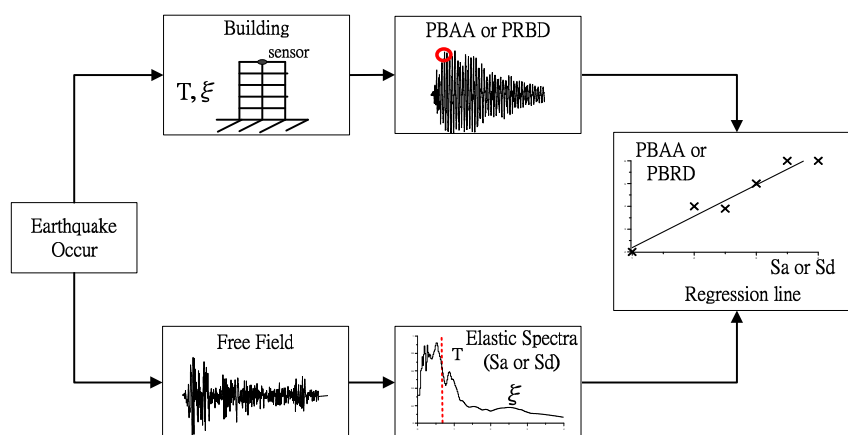


圖 3 彈性反應預估公式流程圖

為應用於嘉義地區另新增嘉義世賢國小至真樓(測站編號：CHYBA3)彈性反應預估公式之迴歸分析。並進一步考量結構物受到較大的地震作用下，其內部構件或斷面產生降伏而造成損壞，提出以雙線性模型為基底並適用於台灣地區結構物之改良型損壞指標[12]，定義如下

$$DI^* = (1 - \bar{\alpha}) \frac{\mu - \mu_e}{\mu_{mom} - 1} + \bar{\alpha} \sqrt{\frac{E_H}{E_{Hmon}}} \quad (1)$$

其中， $\bar{\alpha}$ 為權重係數。當建物週期對應之譜加速度為震波 PGA 的五倍以上則 $\bar{\alpha} = 0.18$ ；若為五倍以下則 $\bar{\alpha} = 0.46$ ，利用所建議之損壞指標即可針對特定地震事件建立區域性震損預估圖。

另外當校舍建築根據震損預估圖之預估值評定為危險等級時，本研究更進一步發展最佳振態還原法損壞評估技術(OMSR)，利用建築結構有限量測訊號，配合系統識別技巧與最佳化程序，茲定義時域最佳化指標[13]，使預估之第一模態振態值，收斂至最佳值。

$$\text{Minimize } J(\hat{\phi}_{m,1}) = \frac{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} [\hat{y}(\hat{\phi}_{m,1}, t) - y(t)]^T [\hat{y}(\hat{\phi}_{m,1}, t) - y(t)]}}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} [y(t)]^T [y(t)]}} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

其中 t_i 為分析訊號之起始點， t_f 為分析訊號之最終點， $\hat{y}(\hat{\phi}_{m,1}, t)$ 為預估的輸出反應， $y(t)$ 實際輸出反應。以已知輸出反應和預估輸出反應各時間點誤差之平方總和開根號為最佳化指標。本研究利用 MATLAB 程式語言中之最佳化搜尋工具箱的直接搜尋法作為最佳化過程的工具。利用程式中的 Pattern Search Tool 搜尋第一模態振態最佳值，所謂最佳值，即將最佳化指標最小化者。直接搜尋工具採用模式搜索法。算法先針對預求最佳值之最佳問題，給定一起始點，計算其相對應之目標函數值，並於起始點周遭有系統的產生一系列點，分別計算該對應之目標函數，其中若有優於起始點之函數值，則定義該目標函數值所對應之點為新的起始點，用以進行下一步之搜索，如此計算相對應之目標函數，更新起始點，如此層層迭代之方式，可有系統且快速地搜索到最佳點及最佳目標函數值。

另依據 Wang 等人之研究[14]，假設在損壞前後樓版質量未改變，依照平面剪力樓房結構勁度與模態參數之關係，以層間勁度的折減定義結構之損壞指標 SDI_r ，其公式如下式：

$$SDI_r = 1 - \frac{k_{Dr}}{k_{0r}} = 1 - \frac{\sum_{l=r}^N \omega_{Di}^2 m_l \phi_{Dil}}{\sum_{l=r}^N \omega_{0i}^2 m_l \phi_{0il}} \bigg/ \frac{\Delta \phi_{Dil}}{\Delta \phi_{0il}} \quad (3)$$

其中下標“0”表示為初始結構，“D”表示為損壞結構。另

$$\Delta \phi_{il} = \begin{cases} \phi_{il} - \phi_{i(l-1)}, & l = 2 \sim N \\ \phi_{il}, & l = 1 \end{cases}$$

SDI_r 值介於 0（無損壞）至 1（完全損壞），可以簡單的表示層間損壞的程度。利用 SDI_r 進行損壞評估，其優點在於只需要單一模態之模態參數（ ω_i 、 ϕ_i ）即可求得，使用上相當方便。本研究之完整損壞評估流程圖如圖 4 所示。

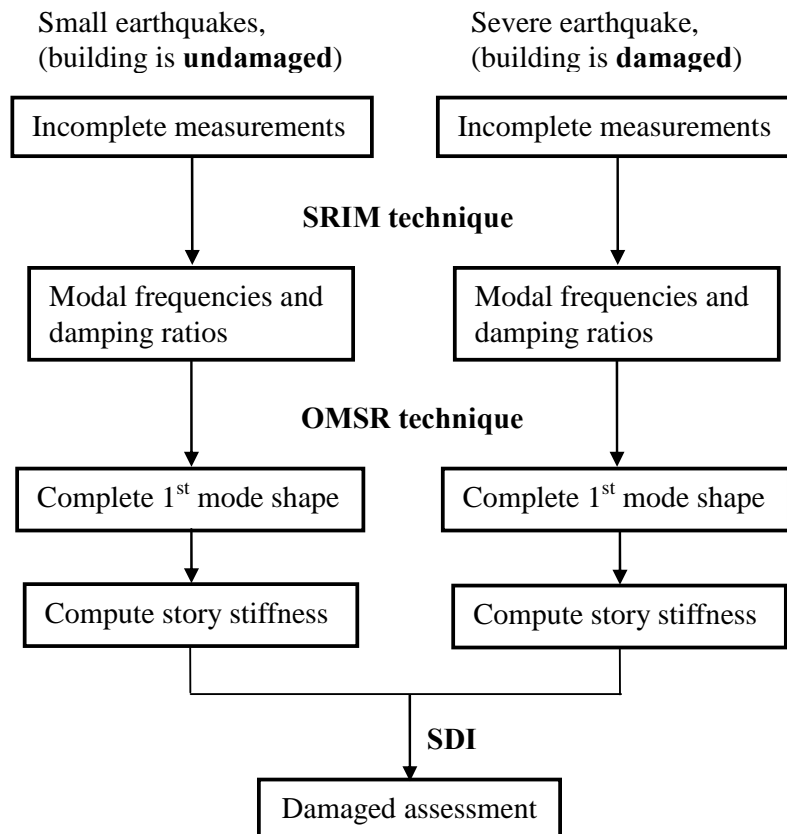


圖 4 完整結構損壞評估流程圖

應用上述所發展之最佳振態還原法損壞評估技術，可求得結構完整之第一模態振形，以計算層間損壞指標，並進行損壞樓層偵測與損壞程度評估。進行特定校舍之詳細損害評估分析，以快速診斷建築結構之損壞位置及損壞程度。

3.3 低矮 RC 建物

在易損度曲線之複合方面，前一年度計畫已依 921 集集大地震的損壞建築物調查資料庫，建立兩層樓和三層樓鋼筋混凝土民房的易損度曲線[15]，所用方法有分組估計法、累計估計法、最大概似法與貝氏估計法等四種[15、16]。所得易損度曲線並不一致，此乃評估方法或模式誤差的不確定性，稱為後天不確定性。易損度曲線考慮了先天不確定性，但評估方法的差異造成後天不確定性，易損度曲線將難以取捨。將後天不確定性融入先天不確定性，即需對各種易損度曲線進行複合。

複合易損度曲線有不同的方式，如(1)參數值平均法，即將各種易損度曲線的參數值取平均，重新建立易損度曲線；(2)機率值平均法，即將各種易損度曲線直接取平均；和(3)機率值統計法，即將各種易損度曲線的機率結果視為隨機變數，另以機率密度函數來描述[17、18]。在本計畫中，機率密度函數選用對數常態分佈以及標準貝它分佈，以反映後天不確定性，並比較差異。

茲以兩層樓 RC 民房之易損度曲線為例，不同的評估方法所得完全損壞之易損度曲線示於圖 5(a)，再以不同複合方式所得之易損度曲線示於圖 5(b)。圖 6 則是三層樓 RC 民房完全損壞之易損度曲線的評估結果和複合結果。

綜合以上複合結果，機率值統計法選擇對數常態分佈或標準貝它分佈，其差異並不大；累積機率 90%的機率值統計法結果自然大於參數值平均法和機率值平均法；累積機率 50%的機率值統計法結果介於參數值平均法和機率值平均法之間。為了評估每一種地動參數或損壞指標所對應的破壞機率，並利用超越機率的方式來描述結果，本計畫將採用標準貝它分佈來描述易損度曲線的模式誤差，即後天不確定性。

針對不同耐震設計規範之耐震容量，以 921 集集大地震在南投縣和舊台中縣的損壞建築物比率建立易損度曲線，適用於依當時和之前耐震設計規範[19、20]在該地區興建的建築物。經評估結果，該地區兩層樓和三層樓 RC 民房的水平設計地震力 V_1 約為 $0.11W$ ，其中 W 為建築物自重。921 集集大地震發生後，民國

88 年、95 年和 100 年之「建築物耐震設計規範及解說」陸續修訂，提昇了建築物的耐震容量。因此，921 集集大地震發生後興建的建築物應有不同的易損度曲線。

本計畫以嘉義市兩層樓和三層樓 RC 民房為例，建立震損圖。嘉義市不同耐震設計規範時期完工的兩層樓和三層樓 RC 民房棟數統計分別列於圖 7 和圖 8。表 1 列出嘉義市不同耐震設計規範時期完工的兩層樓和三層樓 RC 民房的水平設計地震力 V_2 [19-23]，大部份 RC 民房的水平設計地震力 V_2 明顯高於 V_1 的 $0.11W$ 。

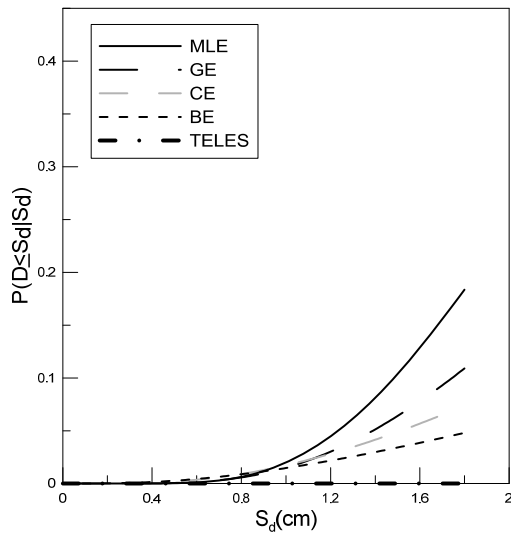
本計畫以 V_2/V_1 修正易損度曲線，即對數常態分佈的中數對數值調整為 $\lambda_{new} = \lambda + (V_2/0.11W)$ ，其值因不同耐震設計規範時期和地區而異。易損度曲線經耐震容量之修正後，才能進行複合。

震損圖描述某一地區全部或某一類型建築物的損壞狀況，除了需知建築物的實際分佈和適用的易損度曲線之外，尚需地震力或損壞指標的大小。因應震後評估災情及救災之需建立震損圖時，損壞指標可由自由場測站資料內插求得；若為震前整備之需建立震損圖時，損壞指標可為特殊事件的境況模擬結果或最新規範的耐震需求。本計畫以 100 年版「建築物耐震設計規範及解說」[21]之耐震需求計算損壞指標，分為 450 年和 2500 年回歸期兩種損壞指標。

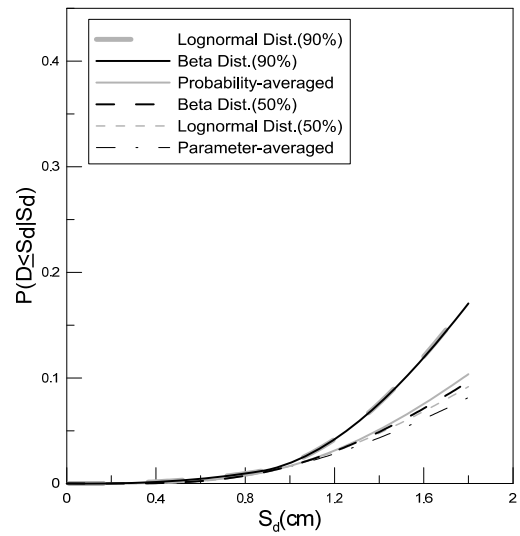
建築物損壞狀況之描述可為損壞棟數或損壞機率。由易損度曲線可計算某一耐震設計規範時期建築物某一種損害狀態的機率，乘上各里該規範時期的實際建物棟數，再合計不同規範時期的損壞棟數，即得各里同一類型同一損害狀態的損壞棟數。將各里同一類型的損壞棟數除以實際建物棟數，即得同一損害狀態的損壞機率。整個嘉義市兩層樓和三層樓 RC 民房震損圖製作流程如圖 9 所示。

表 1 依各規範時期規定嘉義市水平設計地震力

規範時期	地區	地盤種類	工址與斷層距離 r	2F	3F
63年以前	嘉義市	不考慮	不考慮	0.1W	0.1W
63年	嘉義市			0.125W	0.125W
71年	嘉義市			0.15W	0.15W
86~88年	嘉義市(竹村里除外)	第二類地盤		0.157W	0.157W
	嘉義市西區竹村里	第三類地盤		0.157W	0.157W
95年	嘉義市東區	第二類	$r \geq 8$ km	0.175W	0.171W
			$5\text{km} < r \leq 8$ km	0.183W	0.183W
			$2\text{km} < r \leq 5$ km	0.197W	0.197W
	嘉義市西區(竹村里除外)	第二類	$r \geq 8$ km	0.165W	0.161W
			$5\text{km} < r \leq 8$ km	0.169W	0.169W
	嘉義市西區竹村里	第三類	$5\text{km} < r \leq 8$ km	0.179W	0.179W



(a) 不同評估方法



(b) 不同複合方式

圖 5 兩層樓 RC 民房完全損壞之易損度曲線

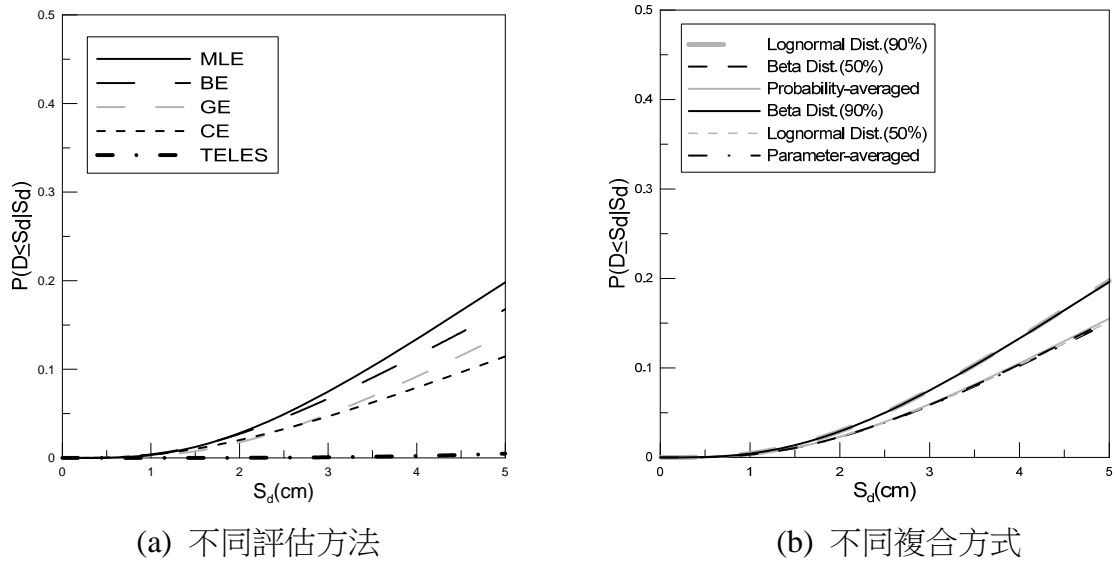


圖 6 三層樓 RC 民房完全損壞之易損度曲線

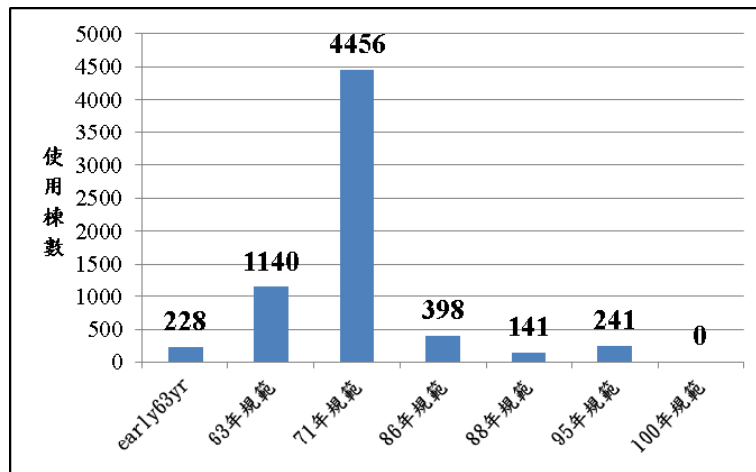


圖 7 嘉義市兩層樓 RC 民房各版規範之棟數統計

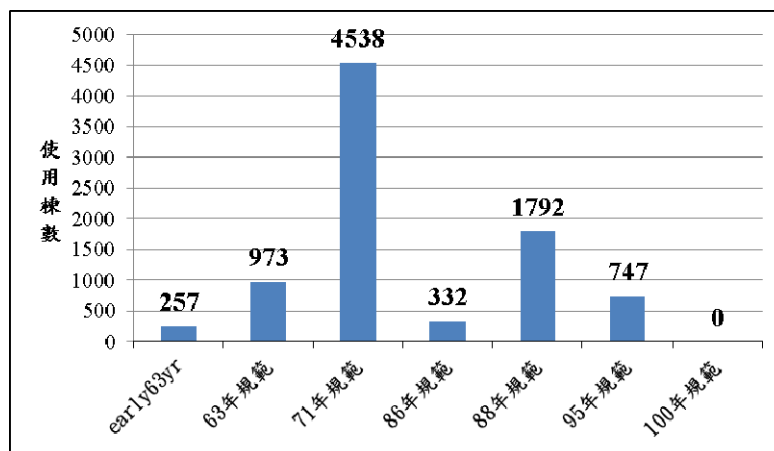


圖 8 嘉義市三層樓 RC 民房各版規範之棟數統計

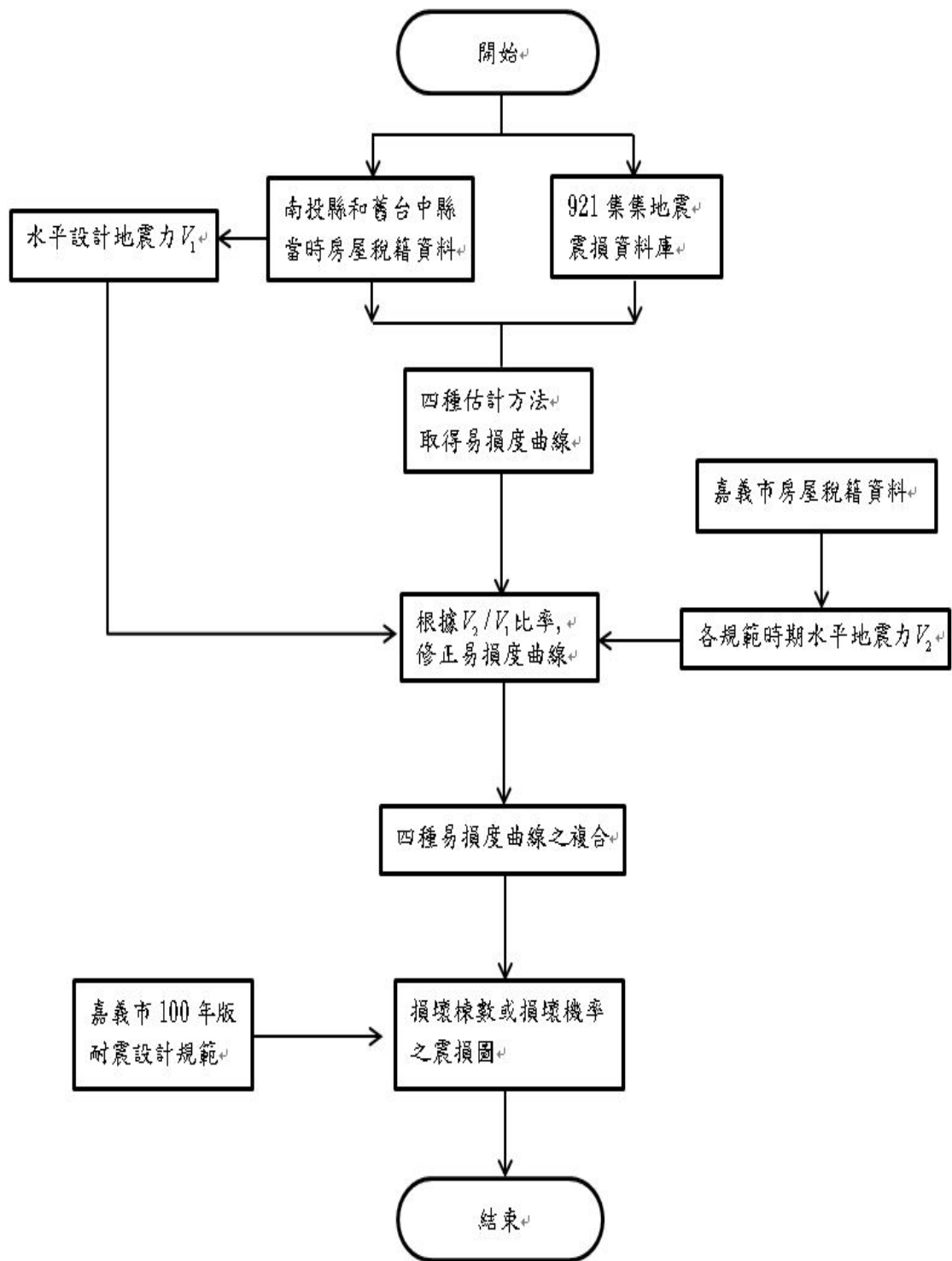


圖 9 嘉義市低矮 RC 民房震損圖製作流程圖

四、具體成果

4.1 中小學校舍

在嘉義市國中小修復工期及金額之預測方面，本計畫以建築物與非結構物分別討論，在建築物及非結構物上，分別製作修復金額預測表格及修復工期預測表格，進而將嘉義市國中小輸入 PGA 及樓地板面積，得到修復金額表及修復工期表。

以製作修復工期表格為例，如圖 10 所示，取 0.14G~0.5G 的地震下，計算單位以 PGA 為小數點後兩位計算，超過後兩位，則是以內插法求取。將嘉義市國中小各建築物用 DGA 時，所預測修復工期分布整理成圖 11，圖 11 中橫座標用建築物總樓地板面積換算以 100 平方公尺為 1 間教室。修復金額表製作流程相同。

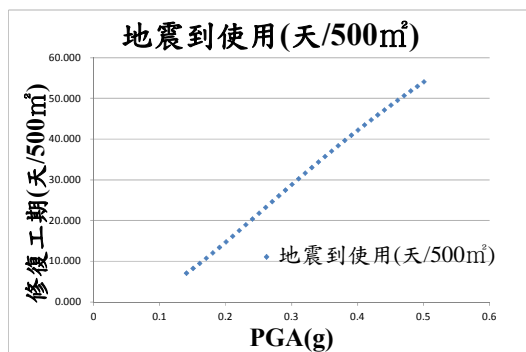


圖 10 建築物復原時間圖

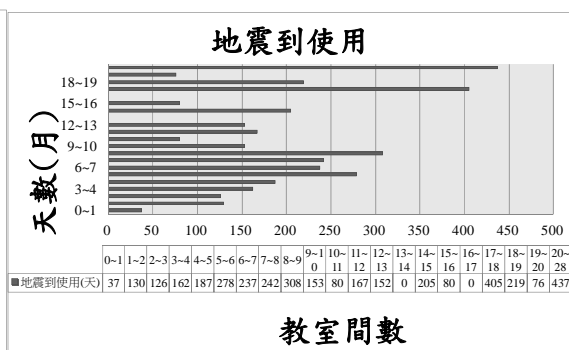


圖 11 嘉義市學校建築物之工期分佈圖

至於在預測不同 DGA 復原工期方面，本計畫將嘉義市各學校 DGA 算出，再將各學校 DGA 分成百分比，並將修復工期分為 6 個區間，如圖 12 所示。預測復原工期以建築物為主，在計算不同百分比情況下 DGA，將嘉義市學校間數預測工期分佈圖繪出，各百分比 DGA 以相同流程製作，即可得到圖 12。

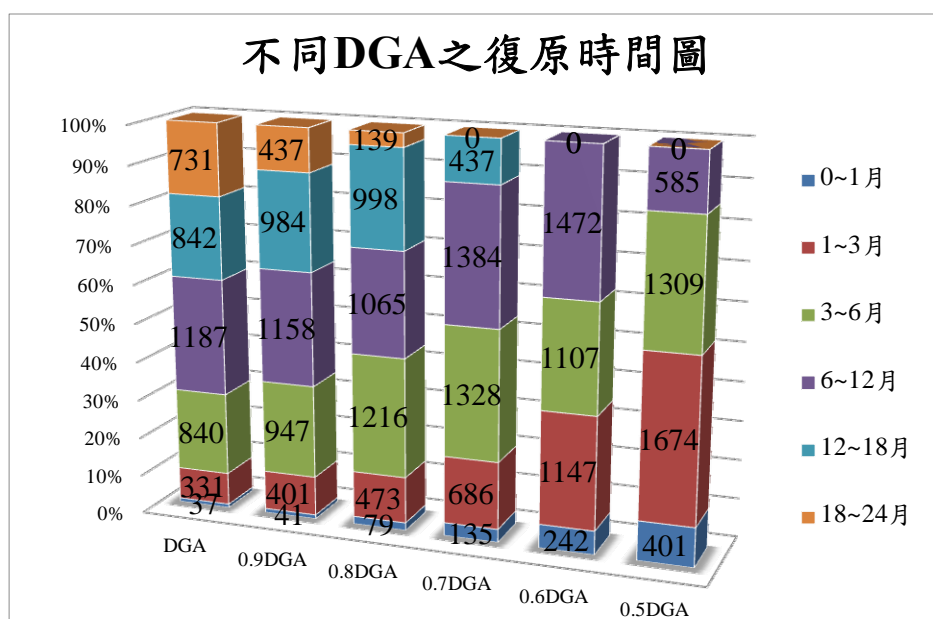


圖 12 不同 DGA 之預測復原時間圖

由圖 12 得知，在 100%DGA 時，嘉義市各學校教室需要修復 6~12 個月有 1187 間，需要修復 0~1 個月有 37 間，而需要修復 18~24 個月有 731 間，修復 12~18 個月及 3~6 個月分別為 842 間及 840 間。由圖 12 的分佈，可以發現需要復原時間隨著 DGA 從 100% 降至 50% 時，12 個月以上復原時間教室會漸漸減少，甚至為零。

另外，在預測不同 DGA 復原金額方面，本計畫預測嘉義市國中小修復總金額分為建築物與非結構物分析，將每間學校 DGA 算出後，在計算不同百分比情況下 DGA，分別為 10%~100%DGA 計算出來，再對照修復金額表格得知修復金額每 500 平方公尺，在一個棟數總樓地板面積正規化相乘，得到修復金額，並將每個學校所花費的金額相加，分別得到修復總金額，並分別計算建築物及非結構物。建築物學校總修復金額在 100%DGA 為 6172 萬，如圖 13 所示。非結構物學校總修復金額在 100%DGA 為 765 萬，如圖 14 所示。經建築物及非結構物比較，非結構物總修復金額在 DGA 情況下為建築物 10% 左右。

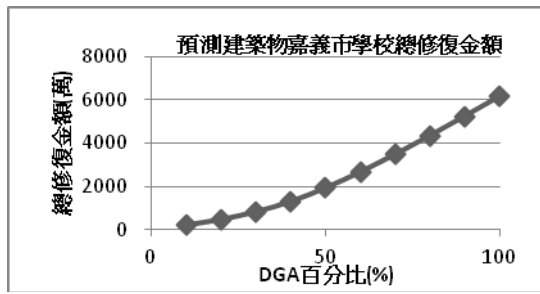


圖 13 預測建築物嘉義市學校
總修復金額圖

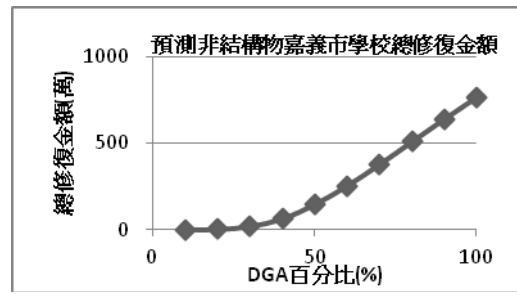


圖 14 預測非結構物嘉義市學校
總修復金額圖

為了檢視預測和實際地震間的相關性，本計畫以預測復原工期及金額與甲仙地震作分析，收集發生 2012/3/4 甲仙地震在嘉義市國中小實際復原工期及金額，其調查各學校震度範圍介於 54%DGA 到 72%DGA，將 DGA 取平均，64%DGA 當作甲仙地震在嘉義市震度，再預測 DGA 以 64%計算嘉義市各學校教室間數復原時間，將預測結果與實際相比較，如圖 15 所示。

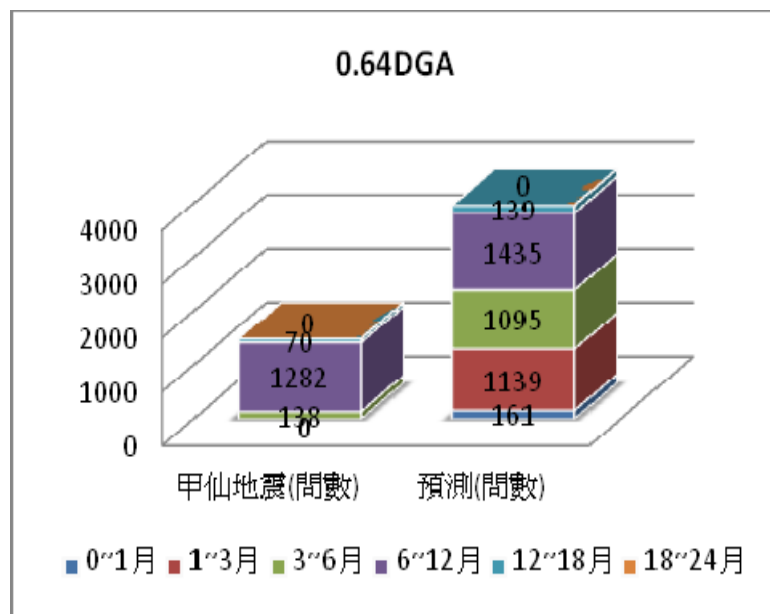


圖 15 甲仙地震與預測比較圖

從圖 15 中可以得知，甲仙地震由於調查無法全部取得資料，教室間數約為預測的教室間數約三分之一，甲仙地震總教室間數為 1490 間，預測的教室間數為 3969 間。甲仙地震與預測復原工期的誤差，係將每間學校棟數的預測工期，

與甲仙地震實際修復工期相減，再除以實際工期所得到的誤差值而得，計算結果誤差為 37.27%。

4.2 大專院校校舍

根據圖 3 之流程及本研究前期所進行之建築物與鄰近自由場之迴歸分析，依據不同的自由場反應譜值或多或少都會造成彈性反應迴歸之誤差，所以本研究進一步針對世賢國小附近四處自由場，個別進行迴歸分析，藉此得知各自由場對此建築物彈性反應預估之適用性。世賢國小至真樓加速度彈性反應預估公式如表 2 第一條公式，另外四條為前期研究[24]所得到之公式。其中世賢國小至真樓之地震事件數較少之原因，是只取最佳化自由場之資料。而這五棟建築物之基本高度資料如表 3 所示，由於世賢國小至真樓屬於細長型平面配置，所以於東西向與南北向之公式斜率差異明顯比其於四棟為大，此乃規範建議之週期僅考慮建築物樓高，因此對平面配置較方正之建物之預估較合理。

表 2 使用規範週期之加速度彈性反應預估迴歸公式

建築物	事件數	方向	$PBAA = A \times Sa + B$		σ (gal)	R^2
			A	B(gal)		
世賢國小至真樓	7	NS	0.415	59.096	20.870	0.838
		EW	0.965	21.329	33.072	0.855
成大雲平樓	22	NS	0.978	22.942	26.281	0.313
		EW	1.035	14.792	13.366	0.619
中央大學圖書館	38	NS	1.131	14.179	15.322	0.879
		EW	1.269	5.281	12.725	0.935
中興土環大樓	28	NS	1.019	14.297	12.272	0.461
		EW	0.652	18.877	13.471	0.31
台東高商資訊樓	46	NS	1.039	5.24	29.286	0.76
		EW	1.201	9.21	33.931	0.794

表 3 各迴歸建築物之高度資料

	世賢國小 至真樓	成功大學 雲平樓	中央大學 圖書館	中興大學 土環大樓	台東高商 資訊樓
高度(m)	18.5	30.36	37.39	26.8	14.38

本研究依據嘉義世賢國小所在地(嘉義市西區)之現行規範設計考量地震(475年回歸期)與最大考地震(2500年回歸期)，利用洪李陵教授提供對應之近域人造地震震波(如圖 16 至圖 19)模擬自由場量測紀錄，當該兩種地震事件發生時，針對世賢國小至真樓、嘉義大學蘭潭校區綜合大樓及新民校區管理大樓等三棟標的建築物進行現地樓高資料調查結果，可依照規範建議之週期公式求得對應之基本振動週期列於表 4，因此可利用表 3 之加速度彈性反應預估迴歸公式，針對上述三個區域之三棟標的建築物獲得其最大加速度反應預估圖。

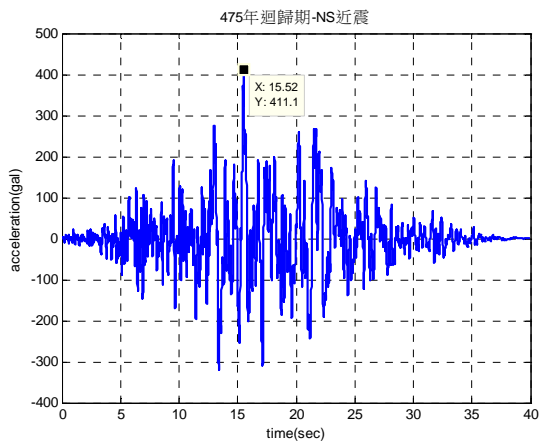


圖 16 南北向 475 年回歸期人工近震

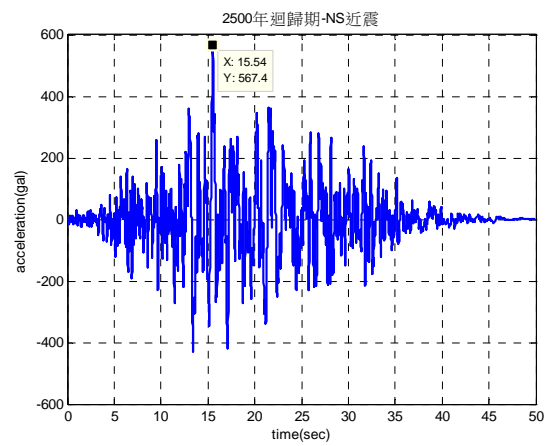


圖 17 南北向 2500 年回歸期人工近震

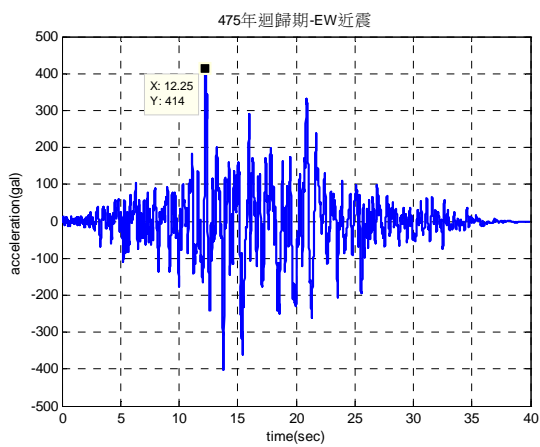


圖 18 東西向 475 年回歸期人工近震

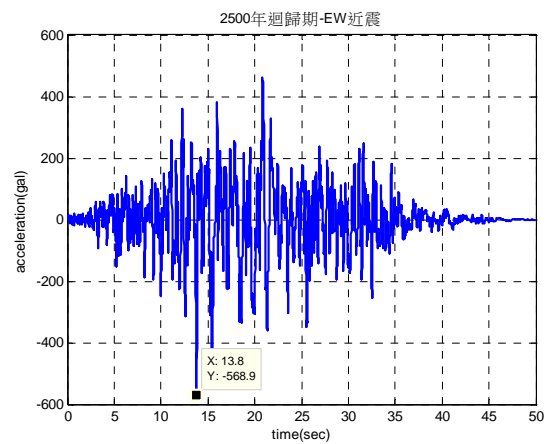


圖 19 東西向 2500 年回歸期人工近震

表 4 各標的建築物之高度與規範週期

建築物	嘉義世賢國小 至真樓	嘉義大學蘭潭校區 綜合大樓	嘉義大學新民校區 管理學院 A 棟
高度(m)	18.5	32.15	31.9
規範週期(sec)	0.5352	0.675	0.671

為進一步繪製區域性震損預估圖，須根據前述損壞指標所定義之等值雙線性模型之參數，進行非線性分析與計算以求得對應之各項頻譜值與對應之損壞指標，詳細之繪製流程如圖 20 所示。對於三座標的建築物之降伏加速度可根據規範定義之基底剪力加以推求；對於勁度折減比 α 需有實際量測資料加以迭代，由於目前嘉義市校舍建築僅有世賢國小至真樓有實測紀錄，因此三棟標的建築物均採用世賢國小至真樓於東西向迭代而得之 $\alpha = 0.381$ 。另外根據世賢國小至真樓南北向之實測紀錄顯示，至真樓於該方向截至目前並無降伏之狀況發生，無法對勁度折減比進行迭代，因此後續之震損圖僅針對東西向進行繪製。最後，對於各模型之韌性容量，一般可有三種方式加以評估：第一種乃根據規範之建議，對於 RC 樑柱系統且外牆為 RC 牆之韌性抗彎構架混凝土構造，規範建議韌性容量為 $R=4.8$ 。第二種乃根據曹峻豪[12]之研究結果，規範所建議之韌性容量較為保守，而建築物實際韌性容量往往都大於規範所建議，在尚未獲知標的建築物之材料強度等資料時，可採用韌性容量經驗值 $R=11$ 。第三種可利用建築物感測器量取到之加速度積分後之位移極值，根據林鈺桐[25]之建議，將積分後之位移極值乘上 1.2 作為實際位移極值來據以預估，對於世賢國小至真樓東西量測結果之預估值 $R=6$ 。

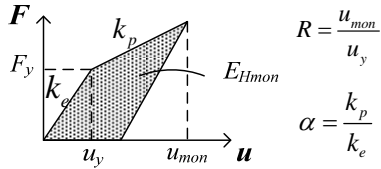
區域性震損預估圖建立流程說明

◎ 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



◎ 地震外力輸入：

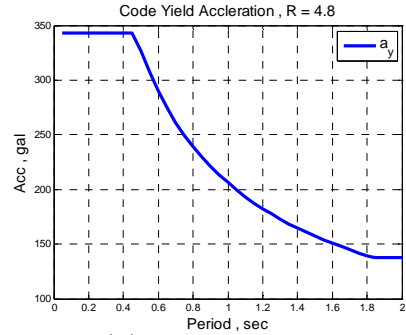
- 給定一地震量測紀錄輸入

◎ 計算：

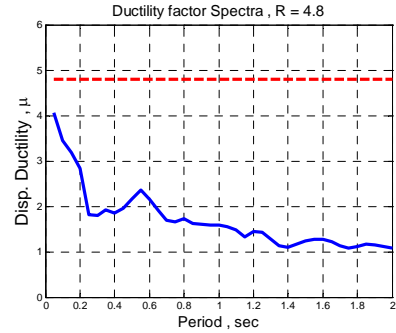
- 韌性需求頻譜 μ v.s. Period
- 遲滯能頻譜 E_H v.s. Period
- 損壞指標頻譜 DI_1 & DI_2 v.s. Period

◎ 區域震損預估圖：

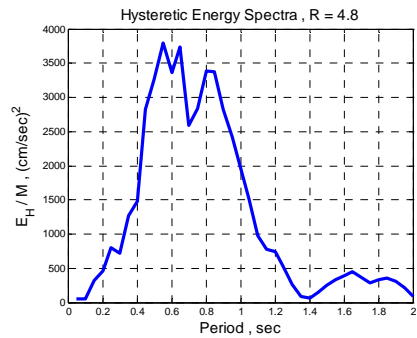
由損壞頻譜，以建築物系統週期對應 $\max(DI_1, DI_2)$ 繪製於圖形上



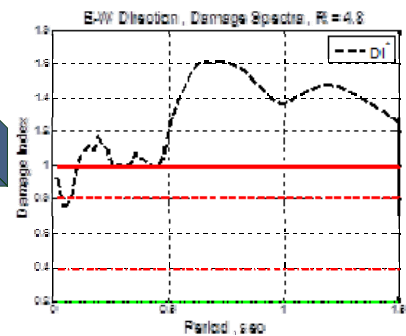
(a) 規範降伏加速度



(b) 韌性需求頻譜



(c) 遲滯能頻譜



(d) 損壞頻譜
($\bar{\alpha}=0.46$)

EQ: Earthquake, PGA (NS=312.762 gal, EW=312.762 gal)



(e) 區域性震損預估圖

圖 20 區域性震損預估圖之建立流程

本研究採用不同之韌性容量與不同回歸期之地震事件進行比較，區域性震損預估圖建立之流程如圖 20，首先由前面所計算之參數(降伏加速度、勁度折減比、韌性容量)，可建立建築物之雙線性模型與計算出遲滯能容量，再利用反應結果計算韌性需求、遲滯能與損壞指標，因此依照建築物之不同自然週期，便可據以繪製韌性需求頻譜、遲滯能頻譜與損壞頻譜，則可進一步求得對應損壞指標。圖 21 至圖 23 為標的建築物遭受到 475 年回歸期人工地震之最大加速度反應預估圖與震損預估圖，而圖 24 至圖 26 為標的建築物遭受到 2500 年回歸期人工地震之最大加速度反應預估圖與震損預估圖。各圖中左側方格表示不同彈性反應預估公式所得到之南北向與東西向之最大加速度反應之預估值，而右側方格則表示東西向使用不同韌性容量所得到之損壞指標。

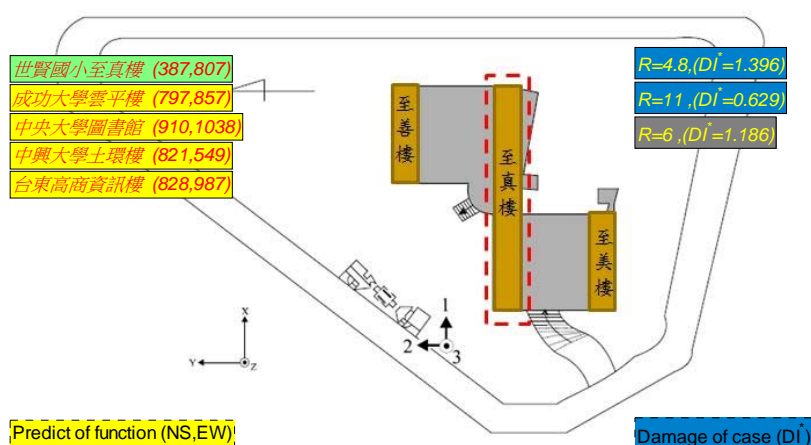


圖 21 世賢國小至真樓於 475 年回歸期人工地震之最大加速度預估與震損預估圖



圖 22 嘉義大學蘭潭校區綜合大樓於 475 年回歸期人工地震之最大加速度預估與震損預估圖



圖 23 嘉義大學新民校區管理學院 A 棟於 475 年回歸期人工地震之最大加速度預估與震損預估圖

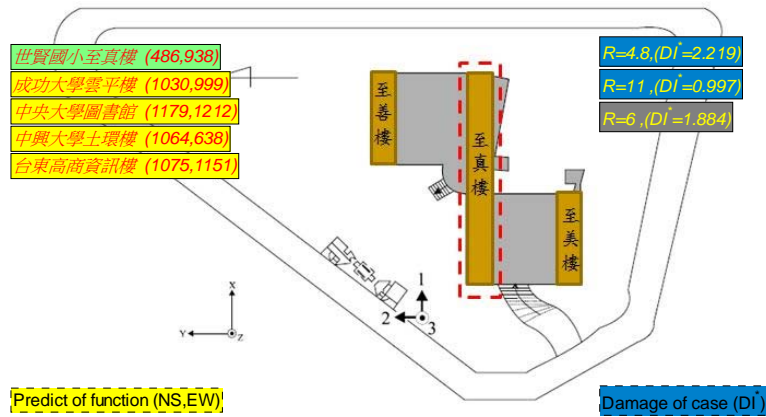


圖 24 世賢國小至真樓於 2500 年回歸期人工地震之
最大加速度預估與震損預估圖



圖 25 嘉義大學蘭潭校區綜合大樓於 2500 年回歸期人工地震之
最大加速度預估與震損預估圖



圖 26 嘉義大學新民校區管理學院 A 棟於 2500 年回歸期人工地震之最大加速度預估與震損預估圖

4.3 低矮 RC 建物

本計畫建立嘉義市兩層樓和三層樓 RC 民房的震損圖，以供震前整備之需。震損圖若以各里的損壞棟數標示，代表不同損害狀態的預估震損災情；若以損壞機率呈現，通常畫等機率圖，顯示不同損害狀態的相對震損比例，兩種震損圖各有其應用價值。本計畫的 RC 民房有 2 類（兩層樓和三層樓），定義 5 種損害狀態（無、輕微、中度、嚴重和完全），採用 2 種損壞指標（最大地表加速度和譜反應位移），針對 2 種耐震需求（回歸期 475 年和 2500 年），易損度曲線模式誤差的累積機率有 2 種（50%和 90%），故得嘉義市兩層樓和三層樓 RC 民房的震損圖各 80 張，其中半數為損壞棟數，另一半為損壞機率。

因篇幅所限，本文僅列印 475 年回歸期下，以譜反應位移評估達完全損壞，且模式誤差累積機率為 50%的嘉義市兩層樓和三層樓 RC 民房的震損

圖，分別如圖 27 至圖 30 所示。由損壞棟數之震損圖可得知嘉義市二層樓 RC 民房以中庄里和興村里的損壞棟數最多，三層樓 RC 民房以太平里的損壞棟數最多，這些里的民房總棟數比較多，且相當多數興建於早期。觀察損壞機率之震損圖，嘉義市北邊的損壞機率比較高，嘉義市東區的損壞機率也比西區高，皆因比較靠近梅山斷層，耐震需求較高之故。

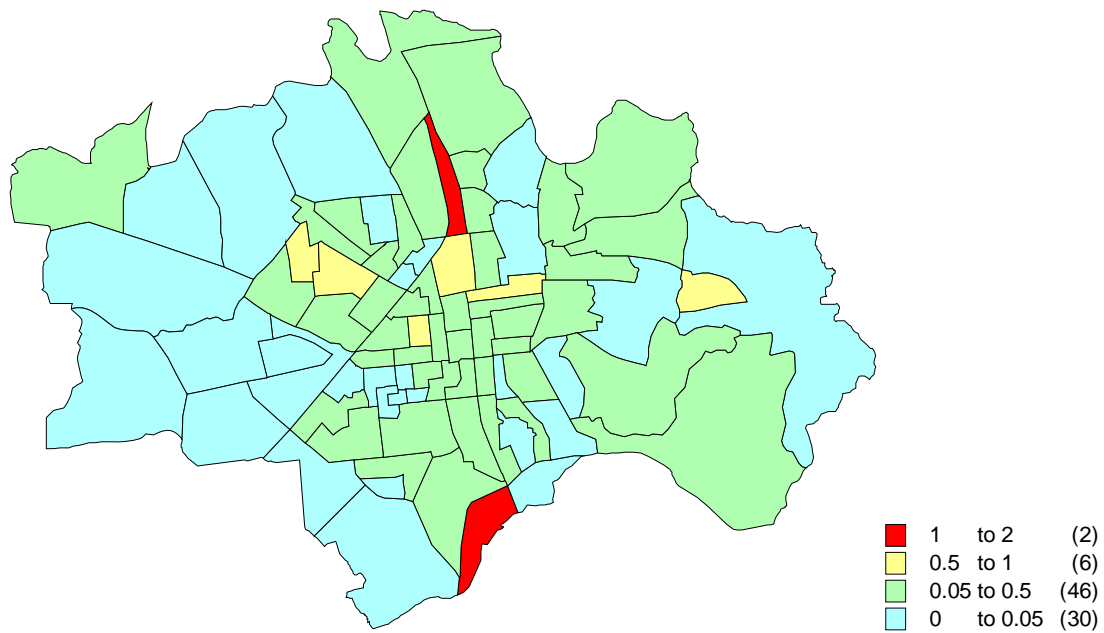


圖 27 475 年回歸期之嘉義市二層 RC 民房損壞棟數分佈

(完全損壞，損壞指標 S_d ，50%)

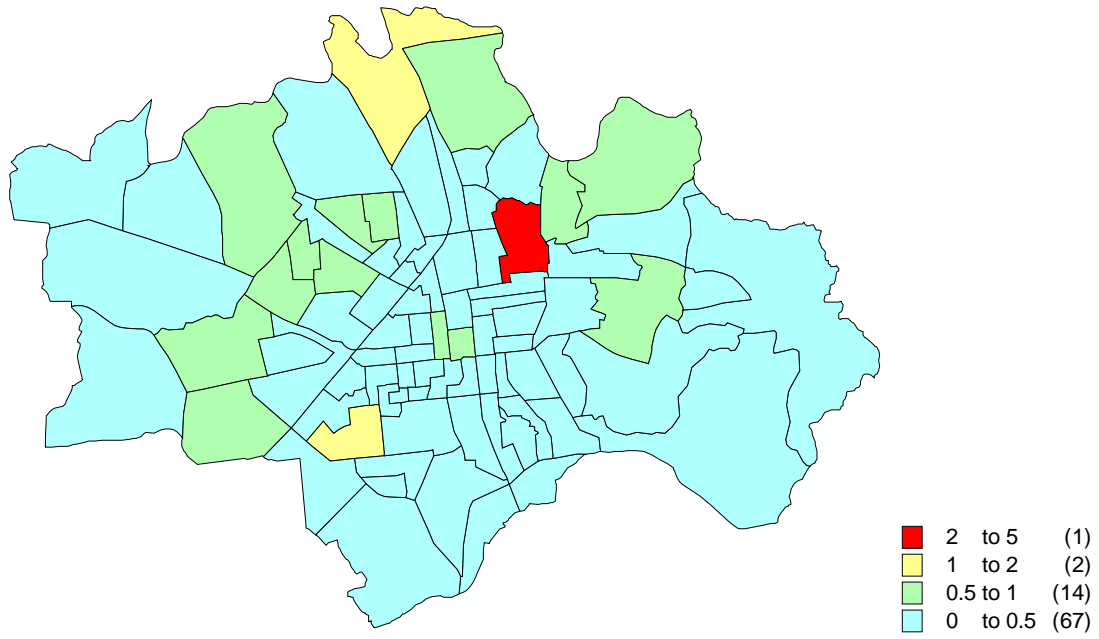


圖 28 475 年回歸期之嘉義市三樓 RC 民房完全損壞棟數分佈

(完全損壞，損壞指標 S_d ，50%)

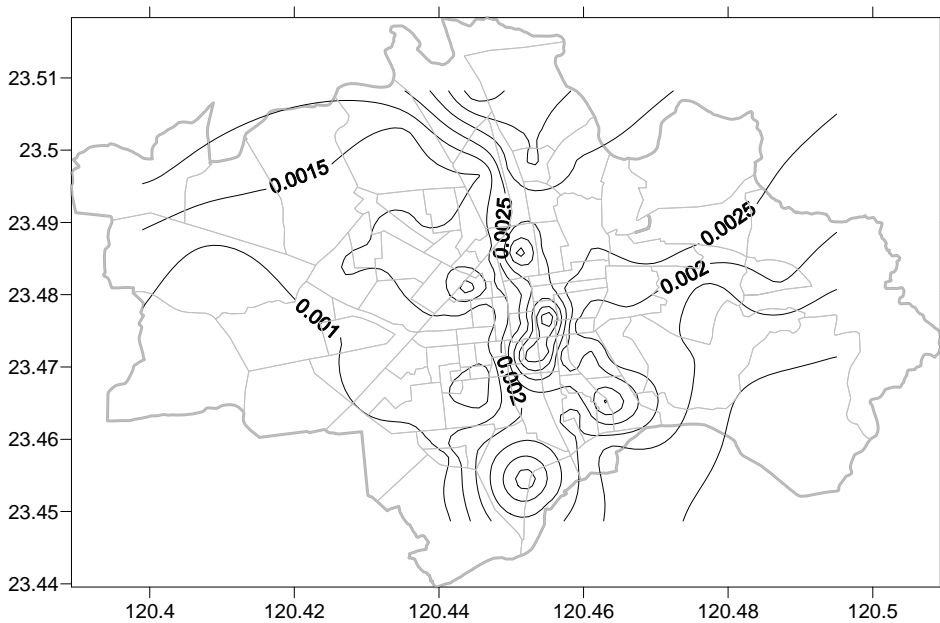


圖 29 475 年回歸期之嘉義市二樓 RC 民房損壞機率分佈

(完全損壞，損壞指標 S_d ，50%)

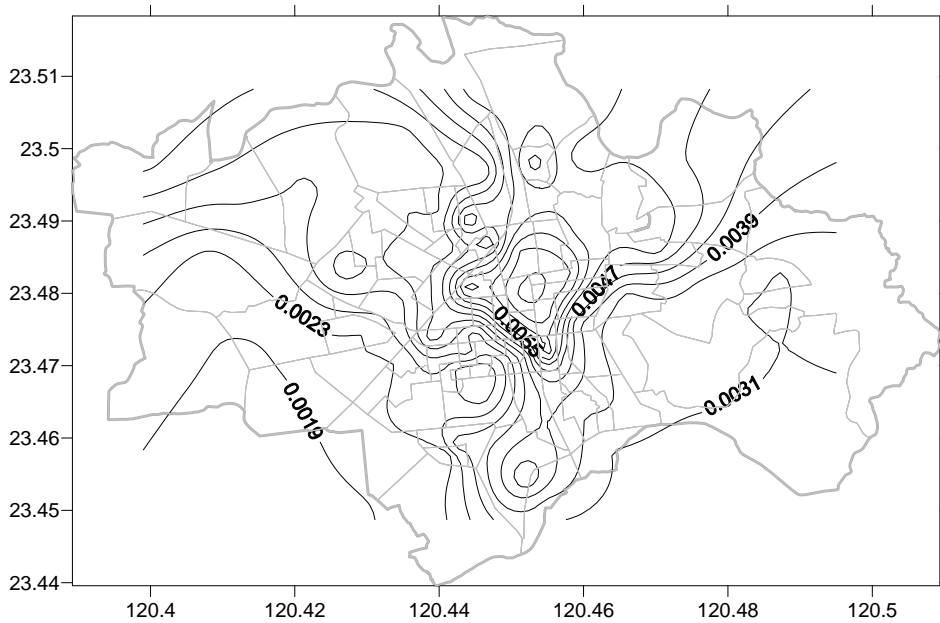


圖 30 475 年回歸期之嘉義市三樓 RC 民房損壞機率分佈
(完全損壞，損壞指標 S_d ，50%)

五、結論與建議

5.1 中小學校舍

透過復原時間及復原金額機率曲線，相關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及復原金額，達到學校震後迅速預估復原時間之目的，併提供災後重建之參考。

嘉義市國中小在較小 DGA 時，其復原時間與復原金額降低，在復原金額中，非結構物下降趨勢較整體建築物來的快，其復原金額約為整體經費的十分之一。

預測復原時間與甲仙地震比較，可得到誤差值為-37.27%，實際復原時間較預測復原時間久，猜測可能是樣本數不足或是抽樣次數等因素影響此誤差值。

5.2 大專院校校舍

由各個區域各標的建築物最大加速度反應可以看出不同預估公式有些許的差別，當中除了嘉義世賢國小至真樓南北向及中興大學土環大樓東西向預估公式中之斜率離理論值 1.0 差距過大加以剔除外，對於 475 年回歸期地震事件，自由

場模擬地震紀錄之 PGA 為(NS,EW)=(411,414)gal，至真樓最大加速度反應為(NS,EW)=(910,1038)gal，綜合大樓最大加速度反應為(NS,EW)=(1228, 1230)gal，管理學院 A 棟最大加速度反應為(NS, EW)=(1241,1220) gal。對於 2500 年回歸期地震事件，自由場模擬之地震紀錄之 PGA 為(NS,EW)=(567, 569)gal，至真樓最大加速度反應為(NS,EW)=(1179,1212)gal，綜合大樓最大加速度反應為(NS,EW)=(1666,1669)gal，管理學院 A 棟最大加速度反應為(NS, EW)=(1684,1651) gal。

上述之東西向加速度彈性反應均已超過規範建議之降伏加速度，所以彈性反應預估公式所推估之最大加速度值僅供參考，真實結構之行為應均進入降伏狀態，因此需進一步探討震損之趨勢。當各標的建築於使用 R=4.8 規範建議之韌性容量時損壞指標非常大，而世賢國小至真樓使用 R=6.0 之損壞指標結果，雖小於 R=4.8 規範建議之韌性容量之結果，但損壞指標還是過大。如採用曹峻豪[12]之韌性容量經驗值 R=11，較符合預期之損壞情形。依照曹峻豪[12]細分之損壞指標描述，世賢國小至真樓於 475 年回歸期地震事件可能會造成中度損壞，而嘉義大學兩棟大樓會造成嚴重破壞。至於該地區若遭受 2500 年回歸期地震事件，則三棟指標建築均已達到倒塌之損壞程度。

當標的建築物於初步之震損預估圖中顯示可能於某次地震事件後造成損壞，可進一步根據本研究所提出之最佳振態還原法損壞評估技術(OMSR)進行詳細損壞狀況與位置之評估，由於該技術必須利用量測之加速度資料進行損壞評估，因此本研究利用一座五層樓剪力結構模型，探討於量測雜訊強度下本方法之適用性。量測雜訊之模擬方式為

$$y_a(t) = y(t) + N_a(t) \quad (4)$$

其中， $y_a(t)$ 為量測到的反應， $y(t)$ 為真實的反應， $N_a(t)$ 則為噪訊。量測雜訊之強度則以噪訊比NSR定義如下

$$NSR = \frac{\sigma_n}{\sigma_y} \times 100\% \quad (5)$$

其中， σ_y 與 σ_n 分別為 $y(t)$ 與 $Na(t)$ 的均方根值。圖31與32分別以兩樓層同時損壞與三樓層同時損壞的案例，在不同的噪訊強度下之損壞評估結果。由圖可知在噪訊比20%以內時，本方法仍可正確評斷損壞樓層與損壞程度。

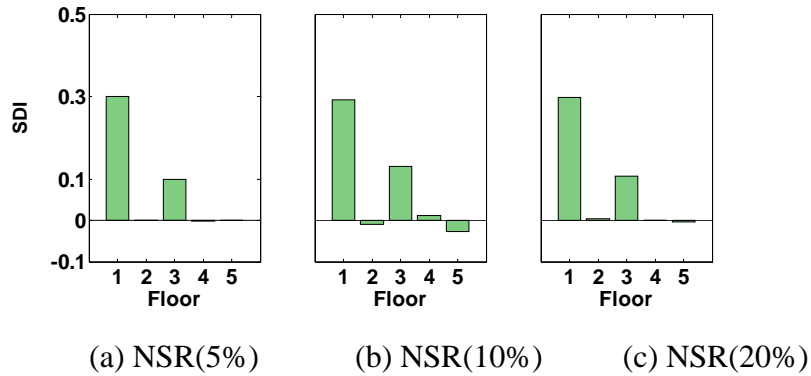


圖31 噪訊比對損壞評估之影響 (損壞於 1F(0.3) 與 3F(0.1))

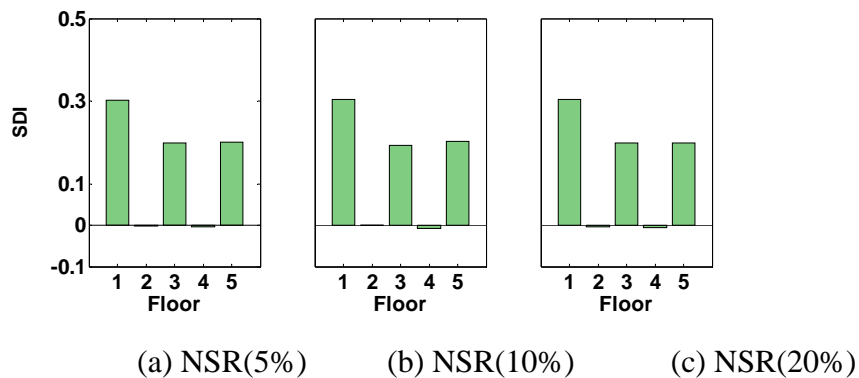


圖32 噪訊比對損壞評估之影響 (損壞於 1F(0.3), 3F(0.2) 與 5F(0.2))

上述方法更進一步採用國家地震工程研究中心(National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE)所完成之三層樓鋼結構標竿構架振動台試驗資料進行系統識別，並應用最佳振態還原法，針對損壞偵測結果進行驗證與討論。圖 33 為標竿構架模型與破壞模式定義，原有之標竿構架為破壞前結構，一樓兩根柱底有削角者為破壞後結構。本文方法僅利用地表與一樓之加速度訊號即可進行三個樓層之損壞評估。另外，利用全量測結果之損壞評估結果將作為比較組。由圖 34 可知，本文方法與全量測之結果皆可準確評估一樓為損壞之位置，其餘兩樓之 SDI 值則較低，誤差可在接受範圍內。

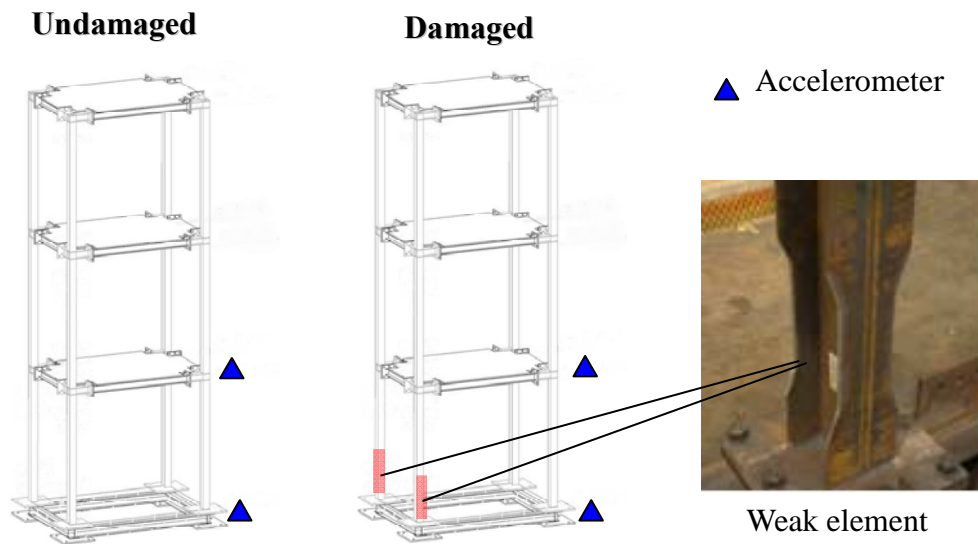


圖33 破壞模式定義與量測位置(本文方法)

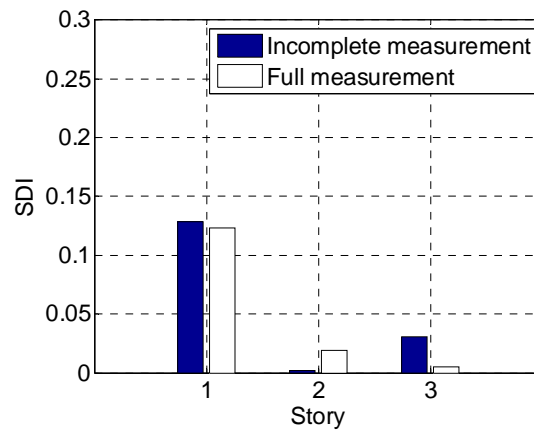


圖34 不足量測與全量測之損壞評估結果比較

5.3 低矮 RC 建物

1. 易損度曲線因評估方式的不同造成誤差，為後天不確定性。本研究以貝它分佈考慮此後天不確定性，以複合不同的易損度曲線。易損度曲線複合有其必要性，但選用何種機率分佈形式，則差異不大。
2. 不同耐震設計規範時期完工於不同地區的同類型建築物有不同的耐震容量，適用的易損度曲線也因之有異，需調整修正之。

3. 震前整備建立震損圖時，損壞指標可為特殊事件的境況模擬結果或最新規範的耐震需求；震後救災建立震損圖時，損壞指標可由自由場測站資料內插求得。
4. 以嘉義市損壞棟數的震損圖觀之，兩層樓 RC 民房以中庄里與興村里的損壞棟數最多，三層樓 RC 民房以太平里的損壞棟數最多。
5. 以嘉義市損壞機率的震損圖觀之，嘉義市東區低矮 RC 民房的損壞機率比西區高，嘉義市北邊低矮 RC 民房的損壞機率也比較高。

六、成果的價值與貢獻

在中小學校舍方面，研究提出對學校建築物中非結構物的地震損壞預估分析，可提供學校主管單位或經營者從建築物位址之 PGA，立即掌握該學校建築震後的修復金額與復原時間，達到震後迅速救災目的，併提供災後重建參考。

在大專院校校舍方面，本研究以中央氣象局速報系統之自由場地震量測紀錄及校舍強地動監測紀錄為基礎，進行小區域大專院校結構振動反應預估圖之建立研究，並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，藉由定義適合台灣建築型態之損壞指標，進一步建立區域建築結構之韌性譜、遲滯能譜以及震損預估圖，並應用於嘉義地區發生之人造地震呈現區域性震損圖之成果。同時可僅根據部份樓層量測訊號進行最佳振態還原與結構健康診斷，應用圖像識別與 MAC 指標，判別損壞層間位置，並估算其層間勁度折減比。除利用數值模擬方式，探討此方法於平面剪力結構與扭轉耦合結構之應用，並藉由國家地震工程研究中心標竿構架振動台試驗進行驗證。本文所發展之振態還原技巧，可有效準確偵測建築結構受震損壞位址。

在低矮 RC 建物方面，本計畫依據 921 集集大地震在南投縣和舊台中縣的實際損壞建築物比例，推導兩層樓和三層樓 RC 民房的易損度曲線，有其可信度。再根據不同耐震設計規範時期不同地區的耐震容量，修正易損度曲線，增加其應用性。最後考量推估易損度曲線方法之不確定性，加入模式誤差機率之評估，進

行易損度曲線之複合，以避免過度高估或低估損壞機率。利用複合之易損度曲線，可以建立任何地區同一類型建築物的震損圖，描述該地區此一類型建築物的損壞狀況，可為震前整備之需或因應震後救災之參考。本計畫以嘉義市為例，完整介紹易損度曲線之修正和複合，以及震損圖之建立。

七、落實應用情形

在中小學校舍方面，本計畫以嘉義市中小學校舍為例，取 0.14G~0.5G 的地震下，將嘉義市國中小各建築物用 DGA 時，所預測修復工期、修復金額分別整理，再將嘉義市各學校 DGA 算出，再將各學校 DGA 分成百分比，並將修復工期分為 6 個區間，預測復原工期以建築物為主，在計算不同百分比情況下 DGA，提出嘉義市學校間數預測修復工期及修復金額，作為地震後救災指標。

在大專院校校舍方面，本研究針對大專院校校舍所建議之彈性反應預估圖及區域性震損圖之建立模式，已實際落實於嘉義地區標的建築物之震損預估，唯受限於各區域校舍基本資料尚未完整收集之限制，無法呈現整體區域建築之彈性反應及震損狀況，未來如有完整之區域建築基本資料庫，則可落實本研究所建議之震損評估流程，以提供中央及地方教育主管機關或各級防救災單位，於震後救災之參考依據。同時本研究發展之最佳振態還原法損壞評估技術，可應用於震後學校建築之損壞樓層偵測與損壞程度之細部評估。

在低矮 RC 建物方面，震損圖描述某一地區全部或某一類型建築物的損壞狀況，可為震前整備或震後救災之需。本計畫以嘉義市為例，詳細介紹易損度曲線之修正和複合，以及震損圖之建立。依據嘉義市兩層樓和三層樓 RC 民房的震損圖，可以預估各里的損壞棟數，作為震前整備之參考，如避難處所之安排和救災路線之規畫等等。整個分析流程很容易應用於其它地區震損圖之建立，而且當地震實際發生時，損壞指標可依自由場速報測站資料內插立即求得，儘速規劃救災措施。

參考文獻

1. Federal Emergency Management Agency(FEMA) (1999), HAZUS99 Technical annual。
2. 葉錦勳 (2002)，「台灣地震損失評估系統-TELES」，國家地震工程研究中心，台北。
3. 蔡克銓、葉錦勳、洪李陵 (2007)，「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。
4. 蔡益超譯 (1979)，「工程或然率」，中國土木水利工程學會，台北，第 80-106 頁。
5. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), (1999), Seismic Reliability Assessment of Critical Facilities: A Handbook, Supporting Documentation, and Model Code Provisions, Technical Report MCEER-99-0008, USA.
6. 涂英烈 (2012)，建築物中非結構物震損機率曲線之研究-以醫院及學校為例，國立成功大學博士論文。
7. 薛麗梅 (2013)，學校建築復原時間之機率曲線研究，國立成功大學碩士論文。
8. 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。
9. Liu, K.-S., T.-C. Shin and Y.-B. Tsai (1999), "A free field strong motion network in Taiwan: TSMIP", TAO, 10, 377-396.
10. 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。
11. 內政部 (1989)，最新建築技術規則。
12. 曹峻豪 (2012)，「雙線性模型震損指標之權重係數迴歸研究」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文。
13. G.L. Lin, , C.C. Lin, K.S. Hsieh (2011), "Damage assessment of seismically-

excited buildings through incomplete measurements”, The 11th Pacific Conference on Earthquake Engineering, April 14-16, 2011, Auckland, New Zealand.

14. J.F. Wang, C.C. Lin, S.M. Yen (2007), “A Story Damage Index of Seismically-Excited Buildings Based on Modal Frequency and Mode Shapes,” *Engineering Structure*, 29(9): 2143-2157.
15. 林彥谷 (2011), 「低矮鋼筋混凝土民防震損圖之研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 台南。
16. 蔡文峰 (2012), 「低矮鋼筋混凝土民防震損圖之建立-以嘉義市為例」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 台南。
17. 葉錦勳 (2003), 「台灣地震損失評估系統-TELES」, 國家地震工程研究中心報告, NCREE-03-002。
18. 中國土木水利工程學會 (1972), 「中國工程師手冊」, 科技圖書公司。
19. 內政部營建署 (1982), 「建築技術規則」。
20. 內政部營建署 (2011), 「建築物耐震設計規範及解說」。
21. 經濟部中央地質調查所, 網頁資料 :
<http://fault.moeacgs.gov.tw/TaiwanFaults/PageContent.aspx?type=C&id=76>
22. 國立中央大學應用地質研究所工程地質與防災科技研究室, 台灣活斷層查詢系統, 網頁資料 : <http://gis.geo.ncn.edu.tw/act/actq.htm>
23. A. H-S. Ang, and W. H. Tang (1984), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volume II Decision, Risk, and Reliability*.
24. 方璿堯 (2010), 「應用 OKID/ERA 識別方法校正結構反應預估圖之建立流程」, 國立成功大學土木工程研究所, 碩士論文。
25. 林鈺桐 (2011), 「應用雙線性模型震損指標建立區域性震損預估圖之研究」, 國立成功大學土木工程研究所, 碩士論文。