

既有建物耐震評估與補強

Seismic Evaluation and Retrofitting on Existing Buildings

主管單位：財團法人國家實驗研究院

邱聰智¹ 翁樸文¹ 沈文成¹ 葉勇凱¹ 鍾立來¹ 黃世建¹
Chiou, Weng, Shen, Yeh, Chung, Huang,
Tsung-Chih¹ Pu-Wen¹ Wen-Cheng¹ Yeong-Kae¹ Lap-Loi¹ Shyh-Jiann¹
¹財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心

摘要

臺灣既有建築物的耐震能力一直是抗震防災的一大隱憂，如何提升既有建築物的耐震能力，是防災準備工作的重點之一。本研究介紹既有建築物如何透過評估程序篩選出急需進行補強的建築物，並給予經濟且有效之補強措施，達到提升既有建築物耐震能力的目標。目前全國已有 19,085 棟校舍通過列管程序，其他公有建築，如醫院、消防廳舍、警政廳舍及鄉鎮公所辦公廳等，也分別由其主管機關執行耐震評估與補強作業。為了將公有建築物施行評估與補強之成功經驗應用於私有建築物，本研究開發適合街屋建築之耐震快速評估方法，以街屋隔間磚牆構件實驗校驗評估參數，並收集 149 棟街屋作為評估示範例。逐步推廣應用於私有建築物，期能達到全面提升既有建築物耐震能力的目標。

關鍵詞：既有建物、耐震評估、耐震補強

Abstract

Seismic performance of existing buildings has been a great latent worry for seismic disaster mitigation in Taiwan. How to upgrade the seismic capacity of existing buildings becomes one of the main points in earthquake preparedness. This paper presents the evaluation procedures to screen the existing buildings for the ones which have higher priority for seismic upgrading. Economical and effective retrofit measures are implemented so that the goal of upgrading the seismic performance of existing buildings is fulfilled. Up to now, there are 19,085 school buildings which have passed through the screening procedures. Their seismic performance is confirmed through evaluation process or upgraded through retrofit process. Other government-owned buildings such as hospitals, fire departments, police stations and local government offices also underwent seismic evaluation and retrofit by relevant authorities. In order to apply the successful experience in seismic upgrading of public buildings to private buildings, this research develops a quick evaluation method for street-front buildings. The evaluation parameters were verified by the experiments of structural frames of street-front buildings with partition brick walls. In addition, data of 149 existing street-front buildings was collected and served as examples of the evaluation method.

The implementation of seismic upgrading procedures is gradually extended to private buildings so that the goal to enhance overall seismic performance of existing buildings can be achieved.

Keywords : existing buildings, seismic evaluation, seismic retrofit.

一、前言

十多年前的九二一集集大地震，使得全國數萬餘棟建築物倒塌或嚴重受損，讓臺灣居民瞭解地震的威力，並開始深思防震的重要性，開始檢討建築物的防震措施。為了避免將來地震造成建築物嚴重損傷，危及民眾之生命財產安全，需發展一套合理且能夠量化真實結構物耐震能力之評估程序，篩選出耐震能力不足之建築物，給予適當補強或拆除重建，以提升全國建築物的耐震能力。

有鑑於此，政府擬訂建築物耐震能力評估與補強方案[1]，要求主管機關與各級政府以逐年編列經費方式全面進行耐震能力之檢查。目前全國已有 19,085 棟校舍通過列管程序，其他公有建築，如醫院、消防廳舍、警政廳舍及鄉鎮公所辦公廳等，也分別由其主管機關執行耐震評估與補強作業。至於私有建築物則以宣導方式推動，針對一定面積以上之私有公用建築，基於公共安全考量，仍應比照公有建築辦理耐震評估與補強作業，至於私建築，則應立法鼓勵主動辦理耐震評估及補強，逐步達到全面提升既有建築物耐震能力的目標。

在公有建築物方面的執行成果方面，本文以校舍為例，說明推動校舍耐震能力提升工作之技術、策略與管控成果；在私有建築物方面，本文以街屋為研究標的，說明目前評估技術開發之成果以及初步應用範例。

二、執行策略

有鑑於臺灣老舊建築物之數量龐大，欲全數透過拆除重建方式改善建築物之耐震能力實屬不易，需要建立一套經濟且有效的執行策略，以期能全面提升建築物之耐震能力。因此國家地震工程研究中心(以下簡稱國震中心)提出一套解決方案，本策略程序包含現地普查、初步評估、詳細評估、補強設計與補強施工等階段(圖 1)。於開始執行耐震評估作業前，應針對建築物進行現地普查作業，透過蒐集建築物之相關基本資料，並建置至資料庫中統一管理，以確實掌握建築物之現況與數量規模。

於掌握建築物之數量規模後，將不符合現行耐震設計規範之建築物，進行耐震能力之初步評估。初步評估係以垂直構件提供之強度與建築物耐震之需求，來求得建築物之耐震指標 I_s ，可作為篩選建築物是否有耐震疑慮之依據。初步評估由土木營建專業人員(土木技師、結構技師或建築師)根據建築物現況調查，而得到初步評估耐震指標 I_s ，透過網路方式回傳至資料庫中予以保存，主管機關可以耐震指標之高低，作為排定補助詳細評估經費先後順序之依據，將初步評估可能有耐震疑慮之建築物，進一步進行耐震能力之詳細評估。

詳細評估係將初步評估階段篩選出之耐震有疑慮建築物，對建築物進行細部量測及相關材料強度試驗，取得更詳盡之結構物相關耐震資料，再透過結構分析進行詳細的評估，以確認其耐震能力是否足夠，若不符合現行耐震設計法規之要求，則需提出相關結構耐震補強之方案，以供使用者進行後續補強或拆除重建之參考。為求能確保詳細評估階段的品質，於詳評階段設置有專業審查機制，透過有經驗之專家學者對評估內容加以把關，於期初審查時協助承攬廠商檢視建築物之現況調查結果，釐清各方面可能對建築

物耐震能力造成影響之因素，確保分析者能對結構物進行完整之模擬分析，以得到最符合現況的分析結果；於期末審查時，則著重於檢核建築物之現況耐震能力分析結果合理性，及所建議之補強修復方案是否經濟有效，是否符合使用者之實際需求等等考量，給予承攬廠商適當之建議，以維護詳細評估作業之品質。

補強設計主要可分基本規劃以及細部設計等二部分，於基本規劃時，設計者需針對使用者之使用需求，結合建築、美學、經濟等觀點，為使用者建議適切之補強規劃，並同樣透過審查會議，確立設計者對結構補強之需求與設計理念均能符合使用者需求；確立補強設計理念之後，設計者即開始進行細部設計，且需評估建築物於補強後之耐震能力，並通過期末審查專家學者之檢視，以確保達到現行耐震設計規範之要求。

於完成補強設計之後，始能進行補強工程之發包作業。補強工程之施工品質對補強之成效影響甚大，除施工單位需進行自主檢查維持品質管理外，業主則可以委由監造單位協助以達到品質保證的目的，國震中心也邀請專家學者訂定了適合補強工程使用之施工計畫書、品質計畫書及安全衛生管理計畫書等參考文件，提供施工廠商使用，以維持補強施工的進度管理，及確保施工品質良好。

三、公有建築物執行成果

依行政院 2008 年核定修正之「建築物實施耐震能力評估及補強方案修正案」[2]規定，凡未依民國 86 年 5 月 1 日修正發布施行之建築技術規則設計建造之公有建築物，應全面檢視其耐震能力，若不符合耐震設計規範之建築物，則儘速進行結構耐震補強，以維護民眾安全。而公有建築物之範圍則包含有中央、直轄市及縣（市）政府、鄉鎮市（區）公所之辦公廳舍；消防及警務機關執行公務之建築物；供震災避難使用之國中、小學之校舍、教學醫院及各級醫院；發電廠、自來水廠與緊急供電、供水直接有關之廠房與建築物；提供煉製、輸送、儲存多量具有毒性或爆炸性等危險物品之建築物；其他經中央各目的事業主管機關認定之建築物。

近年來，各主管機關積極地推動公有建築物之耐震評估與補強相關工作。其中，又以校舍建築之規模最為龐大，校舍建築於平時供學生上課使用，於震害來臨時則提供作為避難場所，其重要性相對較高，更應儘速提升其建築物之耐震能力，在此茲以校舍建築物做為說明公有建築物推行成效之對象。

教育部於政府推動之「振興經濟擴大公共建設特別預算案」中，爭取到特別預算的支持，自 2009 年 4 月起全面針對公立高中職以下各級學校，展開「加速高中職及國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」[3, 4]。於本計畫中針對 88 年以前興建之校舍建築物，全面進行耐震評估與補強工作，加速提升現有建築物之耐震能力，保障學校師生之生命財產安全。截至目前為止，校舍耐震資訊網已蒐集逾 24,000 筆現地普查資料、11,800 多筆初步評估資料、6,300 餘筆詳細評估資料、逾 3,800 筆之補強設計資料，以及逾 2,300 筆之補強竣工資料(圖 2)，並透過網頁提供主管機關、縣市政府以及學校等單位隨時上網查詢，迄今該網頁總瀏覽人數達 33 萬人。透過前述耐震能力提昇策略，經過各階段執行程序確認耐震能力暫無疑慮之校舍建築物計 6,970 棟，於評估後判定有耐震疑慮且已完成補強之校舍則有 2,554 棟，已有效保障逾 135 萬名師生之生命安全。

四、私有建築物執行成果

私有建築物數量眾多，建築類型也複雜多樣，其中在九二一地震中，損壞最嚴重的類型，就屬低矮型 RC 造騎樓式街屋(圖 3)。根據第二節所述，執行大規模建築物耐震評估與補強計畫前，首先應進行普查，確定標的物數量。可以預期的是，臺灣傳統街屋的數量相當龐大，因此要進行後續的初步評估及詳細評估，確實會耗費相當大的人力及財力，也會降低私有建築物所有權人的意願。有鑑於此，國震中心藉由整理校舍耐震詳細評估資料庫的大量分析數據，篩選結構材料、系統與型式相近之老舊典型校舍，以統計迴歸直接找尋垂直構材量與校舍耐震性能之線性關係，以及探討樓層數等變因對耐震性能之影響。藉由統計研究，可定義校舍之安全柱量比，而柱量比(colum-to-floor ratio, CFR)係指一樓柱總斷面積和相對於二樓以上總樓地板面積之比值。由於典型街屋的結構型式與典型校舍類似，因此利用本研究建議之校舍耐震能力初步診斷公式，可對既有街屋建築結構耐震能力進行評估，進而發展出適用於街屋的耐震能力快速評估法。私有建築物所有權人可利用此方法進行住宅自主檢查，一旦發現有耐震疑慮可尋求專業單位協助補強設計及施工。

4.1 研究方法

既有建築物耐震能力評估方法有初步評估與詳細評估，其中初步評估[5]直接考慮各構材極限剪力強度和之疊加折減後即為此校舍之耐震能力。但此方式一則忽略構架韌性之行為，二則與實際整體系統行為不完全相符；因為實際上校舍各柱承受水平與垂直載重時，力分配並非平均，導致各柱無法同時達到極限剪力強度；又當校舍為含磚牆構架時，磚牆為脆性構材，往往比鋼筋混凝土(RC)柱之韌性構材提早達到剪力強度而破壞，使柱無法發揮所有強度，應有所折減較為適當。而詳細評估[6]則是以性能設計法模擬實際校舍構架之反覆側推分析曲線，再參考美國 ATC-40[7]的容量震譜法，轉換成校舍耐震能力曲線，此分析方式已經由多次的校舍現地試驗[8]得到驗證，具備可靠與精確性，惟方法複雜，需要建築物各項完整詳細之結構與材料強度等資料，但評估費用遠高於前二階段篩選。

因此，本研究希望能吸取二種方法之所長，透過對詳細評估資料庫內之數據進行統計與迴歸分析，比較垂直構材與其他參數對耐震能力之影響，並全部轉換成等值柱量，以方便現地調查時統計使用。最後找尋出適用於街屋之耐震能力初步診斷方法，以建築物垂直構件是否大於安全等值柱量，作為快速篩選建築物是否需要進行詳細評估之依據。

4.2 校舍與街屋建築震害特性

1. 沿騎樓方向破壞

「典型校舍」通常呈一長排相連之教室配置，並以配置隔間牆來區分各間教室，因此在垂直走廊方向(短向)能提供較高抵抗剪力之強度；在沿走廊方向(長向)為了通風、採光等需求而大量開門開窗，則僅由鋼筋混凝土構架來抵抗耐震能力，故校舍長向抵抗地震的能力普遍不足。

街屋建築型態與典型校舍類似，也呈一長排相連之店面配置，各戶之間以隔間牆來

區分，因此在垂直走廊方向(短向)能提供較高抵抗剪力之強度；在沿走廊方向(長向)則力求店面寬敞而盡可能降低牆量，形成沿走廊方向為耐震弱向(圖 4)。

2. 軟弱底層

校舍與街屋結構型式都類似剪力屋架(shear building)，梁版的勁度與強度皆大於垂直柱，會產生弱柱強梁之行為，往往導致垂直構材先發生破壞。又每層樓柱斷面設計不會隨樓層高低作調整，使每層樓抵抗側力之能力相仿，且一樓的垂直載重與水平受力皆為最大，兩相作用之下造成底層的破壞最為嚴重(圖 4)。

3. 非韌性配筋構架

校舍與街屋之柱斷面設計多採非韌性配筋，箍筋間距超過 20 公分，使用 90°彎鉤，造成圍束能力不足，且主筋量偏低(校舍柱約 1.7%；街屋柱約 2%)。眾多因素造成柱容易發生剪力或撓剪破壞，降低整體構架的耐震能力。

綜合上述各項破壞特性，可以明顯發現垂直構材量對於耐震能力影響極大，尤其以鋼筋混凝土柱為首，所以柱量的大小為柱抗剪能力大小之關鍵變因，計算此類結構一樓所有柱量及其他垂直構材量的總和，相應於其總重量之比值，即可快速評估建築物整體耐震能力之大小。

4.3 街屋結構耐震快速評估法

2011 年宋嘉誠[9]利用詳細評估資料庫中所有長向純構架校舍資料，經過適當篩選條件，選取校舍數量 1,187 棟，對可信賴之校舍進行分析探討。藉由 SPSS 統計分析軟體，以柱量比 CFR 為應變數，性能目標地表加速度 A_p 與樓層數 N_f 為自變數，進行迴歸分析。其中柱量比 CFR(colum-to-floor ratio)可由下式定義：

$$CFR = \frac{\sum A_c}{\sum A_f} \quad (1)$$

式中， $\sum A_c$ 為一樓所有 RC 柱構材斷面積和 (cm^2)； $\sum A_f$ 為二樓以上總樓地板面積 (cm^2)。

性能目標地表加速度 A_p 為工程師經過詳細評估的結果，經迴歸分析可將純構架校舍結構之性能目標地表加速度以柱量比 CFR 及樓層數 N_f 表示，即

$$\begin{cases} CFR \geq (0.4 - 0.05N_f)\% : \\ A_p = \frac{100CFR - 0.4 + 0.05N_f}{1.62 - 0.24N_f} \\ CFR < (0.4 - 0.05N_f)\% : \\ A_p = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中樓層數 N_f 只適用於一至四層樓之建築物，若為五層樓校舍則以四樓計算之。

另參考郭心怡之建議[10]，將三面圍束磚牆轉換等值柱量比之關係改由式(3)計算

$$CFR_{eq} = \frac{\sum A_c}{\sum A_f} + 0.444 \frac{\sum A_{bw3}}{\sum A_f} \quad (3)$$

其中， $\sum A_{bw3}$ 為一樓所有三面圍束磚牆斷面積和(cm^2)。同時也將四面圍束磚牆轉換等值柱量比之關係改由式(4)計算

$$CFR_{eq} = \frac{\sum A_c}{\sum A_f} + 1.368 \frac{\sum A_{bw4}}{\sum A_f} \quad (4)$$

其中， $\sum A_{bw4}$ 為一樓所有四面圍束磚牆斷面積和(cm^2)。另外，建議三面圍束之 RC 牆轉換等值柱量比之關係可由式(5)計算

$$CFR_{eq} = \frac{\sum A_c}{\sum A_f} + 4.31 \frac{\sum A_{rcw3}}{\sum A_f} \quad (5)$$

其中， $\sum A_{rcw3}$ 為一樓所有三面圍束 RC 牆斷面積和(cm^2)。將三面圍束磚牆、四面圍束磚牆及三面圍束 RC 牆之等值柱量比關係代入式(2)即可快速計算出該棟街屋之性能目標地表加速度 A_p 。

以本研究所蒐集的 146 棟街屋建築資料(圖 5)，進行耐震能力快速評估所得之 A_p ，除以各棟街屋所在位置的耐震需求 A_T ，定義為快速評估指標 IS 值，即

$$IS = \frac{A_p}{A_T} \quad (6)$$

當 IS 值小於 1.0 代表耐震能力不符合耐震設計需求，反之 IS 值大於 1.0 即為符合耐震設計需求。將各棟街屋的快速評估指標 IS 值以 0.25 為級距分佈(圖 6)，可以看出累計 IS 值小於 1.0 的總棟數為全部數量的 31.5%，表示以此快速評估方法進行街屋耐震評估，約有三成的街屋數量需要進行補強。

五、結論與展望

1999 年在南投發生九二一集集地震，2013 年在南投再度發生規模 6.1 的地震(0327 仁愛地震)；同樣的 2008 年在四川發生 0512 汶川地震，2013 年在四川又再度發生規模 6.6 的地震(0420 雅安地震)，顯示斷層應力尚未完全釋放。以現今科技並無法準確預測地震何時再發生，唯有做好震前準備，才能降低震後損失，提升災後回復能力。因此建議公有建築應盡速依據建築物耐震能力評估與補強方案[1]執行，私有建築物應盡速通過既有建築物耐震評估及補強促進條例，以利全面推動防災準備工作。

本研究開發之快速評估方法，是利用校舍耐震詳細評估資料庫進行迴歸分析而得，由於詳細評估是以性能設計法模擬實際校舍構架之耐震行為，並經由多次的校舍現地試驗作驗證，具備可靠與精確性。以此基礎推演出來的快速評估方法，比目前的耐震初步

評估法更具準確性，相當適合發展給街屋建築使用，進行耐震快速評估，為一經濟且方便的評估工具。

參考文獻

1. 行政院(2000)，「建築物實施耐震能力評估及補強方案」。
2. 行政院(2008)，「建築物實施耐震能力評估及補強方案修正案」。
3. 教育部(2009)，「加速高中職老舊校舍及相關設備補強整建計畫」。
4. 教育部(2009)，「加速國中小老舊校舍及相關設備補強整建計畫」。
5. 許丁友、鍾立來、廖文義、邱建國、簡文郁、周德光，「國民中小學典型校舍耐震能力初步評估法」，國家地震工程研究中心報告，NCREE-03-049，臺北，2003年12月。
6. 鍾立來、葉勇凱、簡文郁、蕭輔沛、沈文成、邱聰智、周德光、趙宜峰、楊耀昇、涂耀賢、柴駿甫、黃世建、孫啓祥，「校舍結構耐震評估與補強手冊第二版」，國家地震工程研究中心報告，NCREE-09-023，臺北，2009年11月。
7. Applied Technology Council (ATC), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", Report No. ATC-40, California, USA, Nov., 1996.
8. 葉勇凱、沈文成、蕭輔沛、周德光，「側推分析於校舍現地試驗之驗證」，國家地震工程研究中心報告，NCREE-08-031，臺北，2008年7月。
9. 宋嘉誠，「臺灣中小學校舍結構耐震安全柱量比之研究」，國立臺灣大學土木工程研究所，碩士論文，黃世建教授指導，臺北，2011年7月。
10. 郭心怡，「RC學校建築快速耐震診斷」，國立成功大學建築研究所，碩士論文，許茂雄教授指導，臺南，2000年6月。

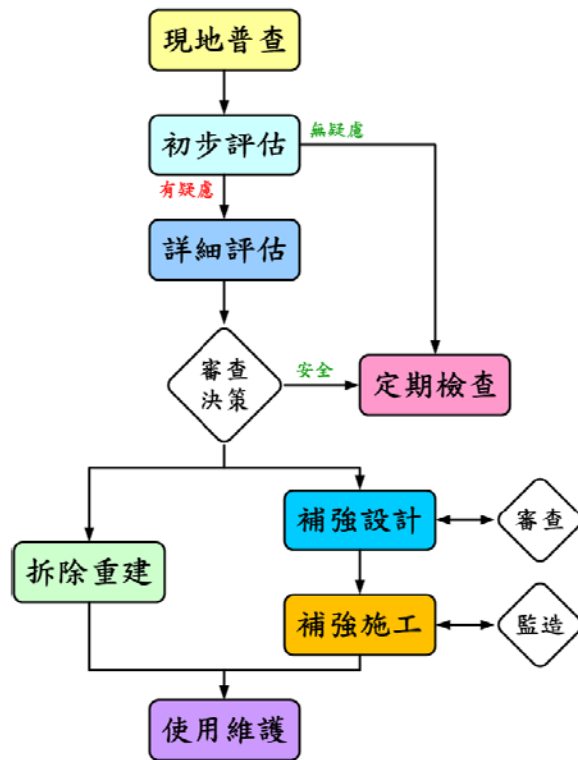


圖 1、建築物耐震能力提升策略之執行流程

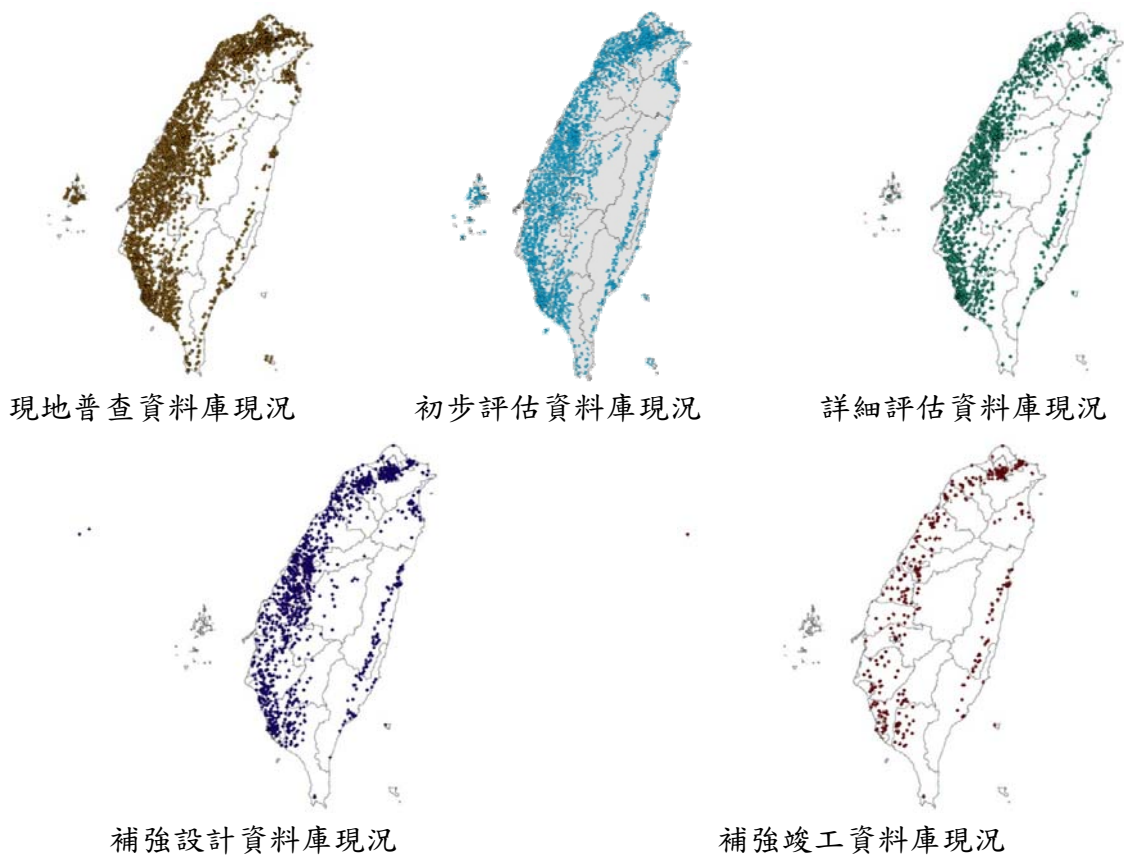


圖 2、各階段執行流程蒐集資料現況

三角窗建築向街角傾倒



樓梯平行街道方向之建築倒塌



樓梯垂直街道方向之建築倒塌



軟弱底層破壞



圖 3、街屋建築物之破壞模式

校舍震害照片



街屋震害照片



圖 4、校舍與街屋具有類似的震害特性(照片來源: 蔡萬來技師)

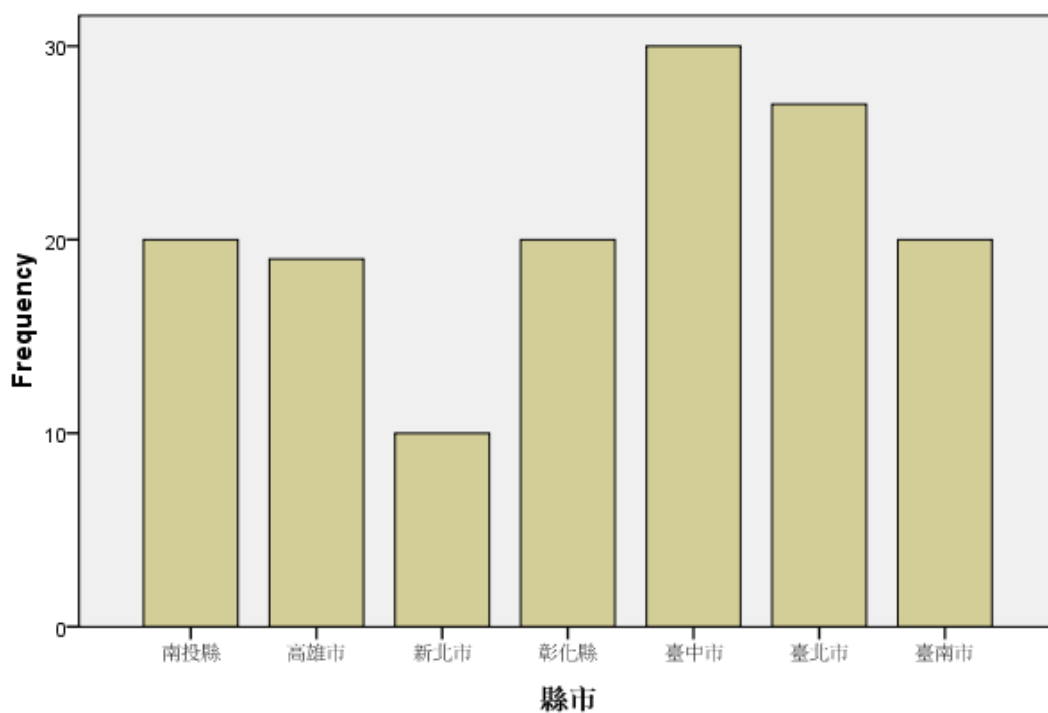


圖 5、街屋資料庫

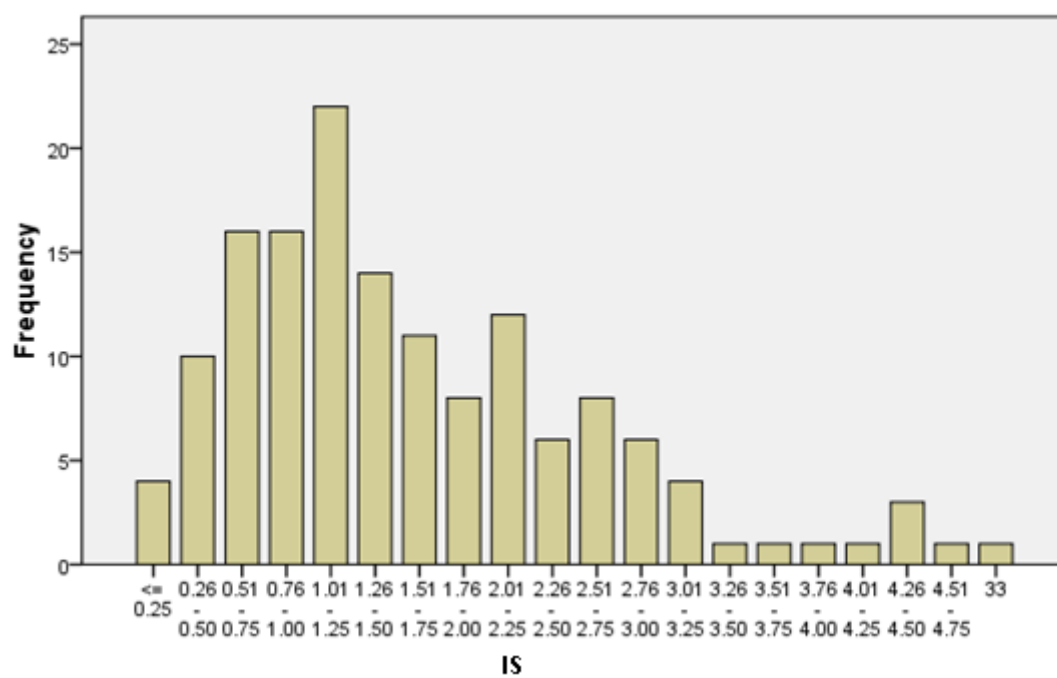


圖 6、街屋資料快速評估結果