

國立臺灣大學理學院地質科學研究所



碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

2016 M_w 6.4 美濃地震地動參數及受損建築物的關係研究

**Relationships between ground motion parameters and
damaged buildings for 2016 M_w 6.4 Meinong, Taiwan
earthquake**

宋冠毅

Guan-Yi Song

指導教授：吳逸民 博士

Advisor: Yih-Min Wu, Ph.D.

中華民國 109 年 7 月

July, 2020

論文口試委員審定書



國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

2016 Mw 6.4 美濃地震地動參數及受損建築物的關係研究

Relationships between Ground motion parameters and Damaged buildings for 2016 Mw 6.4 Meinong, Taiwan Earthquake

本論文係 宋冠毅 君 (R07224206) 在國立臺灣大學地質科學研究所完成之碩(博)士學位論文，於民國 109 年 6 月 22 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

吳逸民	
(指導教授)	
蕭乃祺	
郭俊翔	
詹忠翰	

系主任、所長

(簽名)

誌謝

師長的部份，首先很感謝我的指導老師吳逸民教授從碩一開始的程式磨練、時序資料的處理課程、地震學領域的知識分享及邏輯的訓練等，透過這些討論的過程，讓我深陷迷惘時，給予我許多的幫助。這兩年以來的指導與照顧，讓我受益良多且感激不盡。接下來則非常感恩蕭乃祺副主任、詹忠翰老師與郭俊翔老師的指教，讓本篇研究有具體方向進行修正與檢討，使本篇論文的成果更加完整。

家庭的部份，要感恩我的父母讓我在從小到大的求學過程當中，始終給予我最大的支持，讓我能夠無後顧之憂地朝著自己的興趣自由地發展。

研究室的部份，感謝冠翔學長從碩一 paper review 中，在口說表達上給予很多的建議；也在我碩二時，針對研究，提出很多務實的修正方向，讓我能夠很明確地往目標持續向前。柏逸學長則常在我困惑時陪我聊研究，同時在討論過程中，發現研究盲點並提出疑問，讓我可以適時反思與檢討。除此之外，還幫忙詢問對於本論文有幫助的相關資料、檢視論文的用詞和語句等。另外，鼎中學長與楊民學長在研究摘要上給予的建議，還有其他學長、學姊們在 Meeting 上的發問與討論，讓我每次都有充足方向得以檢討，這些協助都讓我感謝萬分。

好友與同學的部份，要謝謝家佑同學總是在我英文遇到困難時，發揮他的英文長才，對於我的 PPT、英文口說表達及英文摘要伸出援手；奐鈞同學則在我口說表達上，將他在教育學程上所學習的拿手絕活分享給我，讓我在青年論壇以及論文口試，流暢度大幅提升。除此之外，也要感謝我每天上學遇到的車友，總是關心著我的論文進度，讓我保持早起到校的習慣，使我時時刻刻都不怠惰。還有總在我撰寫論文的空閒時間，陪我聊天的四位好友。雖然聊天的內容五花八門，但也在我研究生的生涯當中，能出現除了研究以外，有不同的話題，讓我能夠適時的舒壓，研究能夠順利。

感謝在我研究生的學習旅途中，幫助我的所有人。我會牢記這些學習過程的專業知識以及這兩年中所培養的學習態度，運用於未來的工作及人生旅途，讓畢業不會成為一個休止符，而僅是一個過程，讓這些經驗還要繼續精進、持續努力，期盼有朝一日可以將所學貢獻國家和人民。

中文摘要

2016年2月6日臺灣高雄市美濃區發生震矩規模 (Moment magnitude, M_w) 6.4 地震，造成 117 人死亡與超過 600 件以上受損建築物，是臺灣在 1999 年集集地震 ($M_w = 7.6$) 後災情最嚴重的地震事件。因此本研究希望透過美濃地震 PGA、PGV 與受損建築物資料建立迴歸關係式，分析兩者關聯性，在下一次面對災害性地震時，提供災防相關單位評估可能造成的損失。

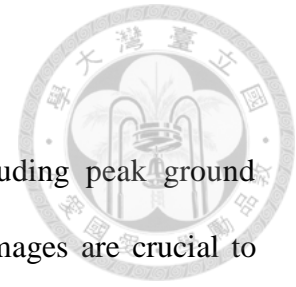
1999 年集集地震地動參數與受損建築物間的迴歸關係式已經被前人建立。由於 2010 年起，臺灣採用新的地震後建築災損評估，從以往的全倒(Totally collapsed)與半倒(Partially collapsed)改為紅單(red-tagged)與黃單(yellow-tagged)，故有重新探討其關聯性之必要。「紅單」意義為建築物的主要結構受損或傾斜達一定程度而發生危險，必須修建或可能拆除；「黃單」則代表建築物的次要結構或鄰近建築物傾斜達一定程度而發生危險，其不需拆除只要經過補強後，確定安全無虞即可取消列管。由於臺灣已經佈放高密度的地震站，於 2016 年美濃地震發生時提供充足且良好的地震紀錄，加上臺南市政府在地震後統計詳盡的災損資料，這是一個很好的機會來重建適用於新法規的迴歸式。

本研究使用資料採用交通部中央氣象局自由場強地動觀測網(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program, TSMIP)的強地動紀錄，分為最大地動加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)與積分後所獲得的最大地動速度(Peak Ground Velocity, PGV)。建築災損資料則使用臺南市政府資料開放平台各行政區紅單及黃單的調查結果。

根據 2016 年美濃地震的分析結果，本研究得到與前人文獻不同的觀察。研究結果顯示，PGA 對應紅單率與黃單率的相關性比 PGV 高。經過調查後發現，受損建築物的總樓層數大約 70% 為三層樓以下。因此 PGA 與災損率的高相關性可能主要與本次地震事件的受損建築物為低矮樓房有關。

關鍵字:災害分析、最大地動加速度、最大地動速度、災害評估、災損率

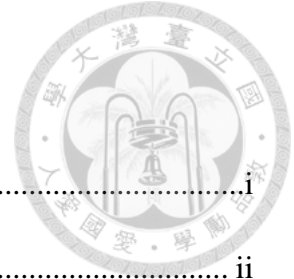
ABSTRACT



The relationships between ground motion parameters (including peak ground acceleration, PGA ; peak ground velocity, PGV) and building damages are crucial to estimate the possible seismic losses for future destructive earthquakes. One of such relationships had been established based on the case of the 1999 Chi-Chi earthquake ($M_w=7.6$). Since 2010, a new assessment system of seismic damaged buildings had been adopted in Taiwan. Damaged buildings are now classified into two categories, yellow-tagged buildings (secondary structural damage) are amendable and red-tagged buildings (major structural damage) may need to rebuild. Our main goal is to renew the relationship to better reflect the current status in Taiwan, both in the buildings and assessment system. The 2016 Meinong earthquake ($M_w=6.4$) caused the most damaging buildings in Taiwan since the 1999 Chi-Chi earthquake. Excellent seismic data was recorded from the Taiwan Strong Motion Instrumentation Program (TSMIP) and detailed damage statistics were sorted by Tainan city government. It's an opportunity to combine ground motion data with building assessments for the new regression relationship. From the results, we find out that in the Meinong earthquake, the PGA seems to possess a higher correlation to the building damages, contrary to the previous studies. Further investigation suggests that it may be due to the biased sample size to the damaged buildings, that is, most of the damaged buildings tend to be lower.

Keywords: Hazard analysis, Peak ground acceleration, Peak ground velocity, Seismic damage assessment, Damage rate

目錄



論文口試委員審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	iii
ABSTRACT	iv
目錄	v
圖目錄	vii
表目錄	ix
Chapter 1 研究介紹與文獻回顧	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	4
1.3 地震後建築物災損評估	5
1.3.1 1999 年 Mw 7.6 集集地震的建築物受損程度評估	5
1.3.2 2016 年 Mw 6.4 美濃地震的建築物受損程度評估	6
1.4 臺灣地動參數與受損建築物關係探討的文獻回顧	8
Chapter 2 研究資料.....	10
2.1 地動紀錄	10
2.2 2016 年美濃地震紅單、黃單資料	13
2.3 2016 年美濃地震受損建築物之總樓層數調查	16
Chapter 3 研究方法與流程	17
3.1 研究流程	17
3.2 地動參數等值圖建立	18

3.3	災損率計算	20
3.4	資料選取與迴歸關係式建立	21
Chapter 4	研究結果.....	23
4.1	PGA 及 PGV 空間分布圖	23
4.2	臺南市各行政區災損率	26
4.3	美濃地震地動參數與災損率迴歸關係式	29
Chapter 5	研究成果討論	38
5.1	迴歸分析結果	38
5.1.1	高 PGA、PGV 與災損間的關係.....	38
5.1.2	低 PGA、PGV 造成災損的原因.....	40
5.2	地動參數與災損率相關性	42
5.2.1	近震源區域的影響.....	42
5.2.2	地動參數與臺南市老屋比例.....	43
5.3	地震波與建築物間的共振關係	45
Chapter 6	結論.....	49
	參考文獻	50
	附錄 A 2016 年美濃地震 TSMIP 測站資訊.....	53
	附錄 B 2016 年美濃地震受損建築物樓層統計	66
	附錄 C 各行政區 SA、耐震規範與總樓層數分類統計圖	68
	附錄 D 臺南市各行政區的位置圖	74



圖目錄



圖 1-1 1901 年~2016 年臺灣的災害性地震.....	2
圖 1-2 災害後危險建築物緊急評估危險標誌.....	7
圖 1-3 2018 年 Mw 6.4 花蓮地震 PGA 與 PGV 最大值	9
圖 2-1 2016 年美濃地震 TSMIP 測站空間分布圖	11
圖 2-2 PGV 的作業流程圖	11
圖 2-3 PGA 與 PGV 展示圖(以新化站為例).....	12
圖 2-4 2016 年美濃地震位於歸仁區紅單建築物與黃單建築物.....	13
圖 2-5 2016 年美濃地震受損建築物分布圖	14
圖 3-1 本研究分析流程圖	17
圖 3-2 2016 年美濃地震臺南市 PGA 的等值線分布圖	18
圖 3-3 2016 年美濃地震臺南市 PGV 的等值線分布圖	19
圖 3-4 2016 年美濃地震 PGA 等值線與臺南市行政區幾何中心點.....	21
圖 3-5 2016 年美濃地震 PGV 等值線與臺南市行政區幾何中心點.....	22
圖 4-1 PGA 空間分布圖	24
圖 4-2 PGV 空間分布圖	24
圖 4-3 2016 年美濃地震紅單率分布圖	26
圖 4-4 2016 年美濃地震黃單率分布圖	27
圖 4-5 PGA 等值圖對應紅單率與黃單率	30
圖 4-6 PGV 等值圖對應紅單率與黃單率	31
圖 4-7 PGA 對應紅單率與黃單率關係式.....	32

圖 4-8 PGV 對應紅單率與黃單率關係式.....	33
圖 4-9 PGV 對應災損率的原始結果與新測試結果比較圖.....	34
圖 5-1 PGA 與受損建築物的空間分布圖.....	39
圖 5-2 PGV 與受損建築物的空間分布圖.....	39
圖 5-3 土壤液化潛勢與受損建築物分布圖.....	41
圖 5-4 2016 年臺南市各行政區的老屋占比分布圖.....	43
圖 5-5 2016 年美濃地震受損建築物的總樓層數分類統計圖.....	46
圖 5-6 臺南市地震站之三分量加速度反應譜.....	47
圖 5-7 玉井區 SA、設計地震力與最大地震考量規範.....	48
圖 5-8 玉井區受損建築物總樓層數分類統計圖.....	48



表目錄



表 1-1 1901 年~2016 年臺灣各區域災害性地震數量與比例.....	3
表 1-2 1901 年~2016 年臺灣南部超過 1000 棟全倒房屋數的地震事件列表.....	3
表 1-3 1999 年集集地震與 2016 年美濃地震的震後建築災損評估差異表.....	5
表 1-4 1999 年 Mw 7.6 集集地震地動參數與災損率關係式.....	9
表 2-1 2014 年臺南市各行政區的建築物總數量.....	14
表 2-2 2016 年美濃地震後紅色危險標誌的受損建築物數量.....	15
表 2-3 2016 年美濃地震後黃色危險標誌的受損建築物數量.....	15
表 4-1 PGA 範圍對應震度標準(中央氣象局).....	25
表 4-2 PGV 範圍對應震度標準(Wu et al., 2003).....	25
表 4-3 2016 年美濃地震紅單率列表.....	27
表 4-4 2016 年美濃地震黃單率列表.....	28
表 4-5 PGA 範圍、採用行政區、平均紅單率與紅單率標準誤差.....	35
表 4-6 PGA 範圍、採用行政區、平均黃單率與黃單率標準誤差.....	35
表 4-7 PGV 範圍、採用行政區、平均紅單率與紅單率標準誤差.....	36
表 4-8 PGV 範圍、採用行政區、平均黃單率與黃單率標準誤差.....	36
表 4-9 PGA 對應平均紅單率及平均黃單率關係式、相關係數與標準誤差.....	37
表 4-10 PGV 對應平均紅單率及平均黃單率關係式、相關係數與標準誤差.....	37
表 4-11 PGV 對應平均紅單率原始及新測試結果關係式、相關係數與標準誤差..	37
表 4-12 PGV 對應平均黃單率原始及新測試結果關係式、相關係數與標準誤差..	37
表 5-1 2016 年第一季臺南市各行政區老屋占比.....	44

表 5-2 2016 年美濃地震紅單建築物總樓層數分類的數量與百分比.....	48
表 5-3 2016 年美濃地震黃單建築物總樓層數分類的數量與百分比.....	48
表 5-4 2016 年美濃地震受損建築物總樓層數分類的數量與百分比.....	48



Chapter 1 研究介紹與文獻回顧

1.1 前言

臺灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的交界帶，聚合速度每年大約 8 公分 (Yu et al., 1999)，地震活動相當頻繁。臺灣主要分成東部與西部地震帶，東部地震大多由菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸板塊所引起，西部地震則主要與斷層活動有關 (Wu et al., 1999)。由於西部地區的災害性地震其震源位置較接近地表且影響範圍常觸及人口密集區，因此災情往往比東部更嚴重，包含人員傷亡與財產損失。

根據中央氣象局統計，從 1901 年至 2016 年在臺灣島內及附近海域共發生 102 次災害性地震(圖 1-1)。這些事件中，死傷最慘重的地震事件為 1935 年 4 月 21 日 6 時 2 分的新竹-臺中地震，共 3276 人死亡、12053 受傷；而損失最大的則是 1999 年 9 月 21 日 1 時 47 分集集地震，共造成 2415 人死亡、11305 受傷(中央氣象局，2017)。若將中央氣象局 102 件災害性地震，參考行政院國家發展委員會訂定之臺灣地區綜合開發計畫，可將震央的位置細分為北部、中部、南部、東部以及臺灣本島以外的外海區，共計五個區域，表 1-1 顯示南部是臺灣本島發生災害性地震次數最多的區域，共 20 件。根據內政部消防署天然災害統計結果，臺灣南部地區的 20 個災害性地震事件中有 5 個事件分別都造成 1000 棟以上建築物的倒塌(表 1-2)。這些地震事件地點與年代分別為 1906 年梅山地震、1906 年鹽水港地震、1941 年中埔地震、1946 年新化地震以及 1964 年白河地震，一共造成超過 2000 人死亡與 26000 棟以上的建築物倒塌，顯示本地區在過去百年中受災害性地震的影響非常大，因此有探討地動紀錄與災情資料關聯性的必要，以期在未來災害性地震來臨時，估計災情與作為調度相關單位進行救災工作的參考，對地震防災工作有所貢獻。

2016 年 2 月 6 日 3 時 57 分，臺灣南部發生 Mw 6.4 地震，震央位於高雄市美濃區，震源深度 14.6 公里，在臺南市共導致 117 人死亡與 626 件受損建築物。本次地震事件因為具有充足的地震紀錄與臺南市詳盡的災情統計資料，在這些條件的基礎下，提供災害分析相關研究有極大的助益。



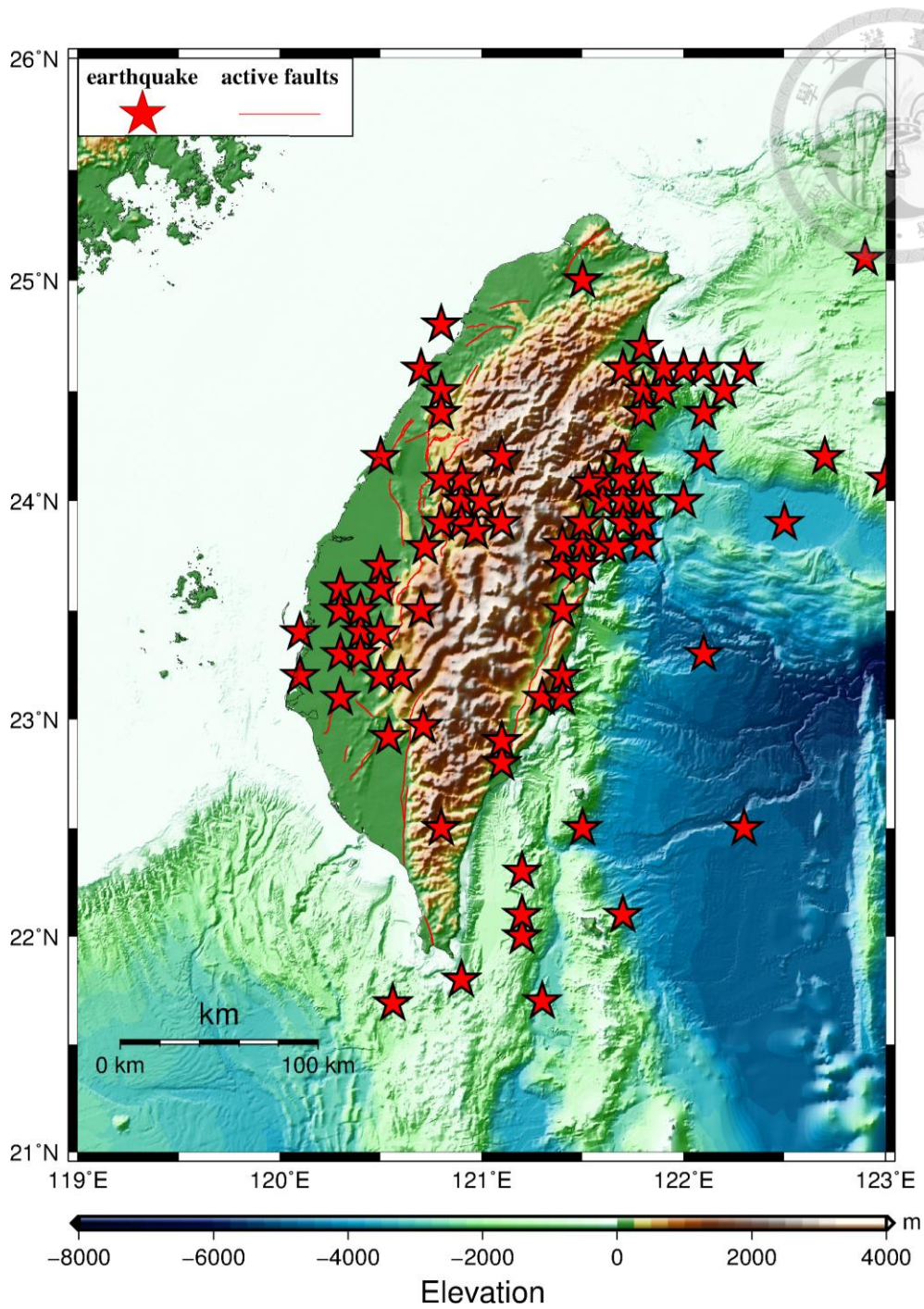


圖 1-1 1901 年~2016 年臺灣 102 件災害性地震(中央氣象局，2017)。

表 1-1 1901 年~2016 年臺灣各區域災害性地震數量與比例(中央氣象局，2017)。

區域	北部	中部	南部
數量	2	17	20
百分比	1.96%	16.67%	19.61%
區域	東部	外海	總共
數量	15	48	102
百分比	14.70%	47.06%	100%

表 1-2 1901 年~2016 年臺灣南部超過 1000 棟全倒房屋數的地震事件列表(中央氣象局，2017；內政部消防署)。

日期	地點	芮氏規模	震源深度	死亡人數	全倒房屋數
1906.03.17	梅山	M _L 7.1	6 公里	1258 人	6769 件
1906.04.14	鹽水港	M _L 6.6	20 公里	15 人	1794 件
1941.12.17	中埔	M _L 7.1	12 公里	358 人	4520 件
1946.12.05	新化	M _L 6.1	5 公里	74 人	1954 件
1964.01.18	白河	M _L 6.3	18 公里	106 人	10924 件



1.2 研究動機與目的

臺灣開始地震觀測工作至今約一百年的時間中，發生多次的災害性地震造成無數生命財產的損失。若能將地震測站所觀測到的紀錄與受損的建築物連結，可以更加了解地震對於建築物所造成的影響。Wu et al. (2002)利用 1999 年 M_w 7.6 集集地震觀測到的地動紀錄與行政院主計處的災損統計資料建立關係式。雖然關係式已經被建立，但基於考量下列四項理由與條件，本研究的目標為重新建立方程式以及探討地動參數 PGA、PGV 與災損資料間的關聯性：

1. 根據 1999 年 M_w 7.6 集集地震的地動紀錄與建築災損統計資料的關係式的研究結果，PGA、PGV 都是評估災情很好的指標(Wu et al., 2002)。
2. 雖然 PGA、PGV 與災損紀錄的關係式已經建立，但是 1999 年 M_w 7.6 集集地震主要影響的範圍為中部地區與台北盆地。然而過去大約一百年的時間裡，臺灣本島內災害性地震發生次數最多的是西南部地區，由於集集地震時該地區受影響程度較低，因此希望以西南部地區的地震事件進行分析，來更加了解本區域 PGA、PGV 與災損間的關係。
3. 行政院主計處統計 1999 年 M_w 7.6 集集地震的建築災損資料以全倒及半倒紀錄。2010 年起，臺灣修正且採用新建築受損程度的評估方式，分為紅單及黃單。其名稱、災損評估項目與記錄所使用單位都與過去有所不同。因此本研究期望能建立符合新法規的關係式，來探討新災損評估制度與地震紀錄的關聯性。
4. 位於臺灣本島西南部地區的美濃，在 2016 年 2 月 6 日發生 M_w 6.4 的地震事件。本次地震事件不僅比過往震央在西南部地區的災害性地震擁有更完整的地震觀測網，臺南市政府還記錄詳盡的災損統計資料。這是一個很好的機會探討此區域的 PGA、PGV 與災損資料間的關聯性且同時建立新的關係式。

綜合以上因素，本研究將探討 2016 年 2 月 6 日 M_w 6.4 美濃地震的地動參數 PGA、PGV 與受損建築物的關聯性，同時也建立兩者的關係式。目標希望當再次面臨災害性地震時，可以進行災情預估以降低地震對國人生活的影響。除此之外，也期望可以作為地震工程領域設計臺灣西南部地區耐震建築的依據或提供政府制定地震災害預防或減災相關工作政策之參考，對防災工作有所貢獻。



1.3 地震後建築物災損評估

1999 年 M_w 7.6 集集地震與 2016 年 M_w 6.4 美濃地震皆在臺灣造成災情，但是針對建築物受損程度的分類依據卻有所不同。本節介紹建築物受損評估的法規變革，將兩事件對建築物受損程度的分類方式與登記單位的主要差異列於表 1-3。

表 1-3 1999 年 M_w 7.6 集集地震與 2016 年 M_w 6.4 美濃地震標準與登記單位。

地震事件	1999 年 M_w 7.6 集集地震	2016 年 M_w 6.4 美濃地震
震後建築災損評估	全倒	紅單
	半倒	黃單
登記單位	戶數	件數

1.3.1 1999 年 M_w 7.6 集集地震的建築物受損程度評估

派遣專業人士至災區現場針對建築物的受損程度進行緊急評估，是地震造成災情時非常重要的工作。其目的是依照受損建築物的損壞程度給予相對應的使用限制，以避免人民遭遇不必要的危險。1999 年 M_w 7.6 集集地震採用的震後建築物受損評估法規起源於民國 54 年 5 月 24 日「臺灣省防救天然災害及善後處理辦法」，本法於 2002 年 5 月 1 日廢止。根據民國 82 年 12 月 7 日臺灣省政府八十二府法四字第 114676 號令修正全文提及災害救助分為住屋全倒救助及半倒救助，登記的單位皆為戶數，其判定標準如下：

住屋全倒救助：

1. 受災戶住屋裂痕深重或傾斜過甚，非經拆除或重建不能居住者。
2. 受災戶住屋屋頂橫斷連同牆壁毀損，或屋頂瓦片連同椽木損毀或共同牆壁倒損超過總面積二分之一者。
3. 受災戶住屋因遭砂石掩埋或積砂泥，致不能修復者。

住屋半倒救助：

1. 受災戶住屋屋頂瓦片連同椽木裂塌毀面積超過三分之一；或鋼筋混凝土造成住屋屋頂之樓板、橫樑因災龜裂毀損，非經修建不能居住者。
2. 受災戶住屋牆壁斷裂、傾斜或共同牆壁倒損，非經翻修不能居住者。
3. 受災戶住屋因遭砂石掩埋或積砂泥，其面積及深度達簷高二分之一者。

本法不論是判定建築災損定義或登記採用的單位皆與 2010 年啟用的震後建築受損程度法規不同，1.3.2 節將對於新法規進行介紹。

1.3.2 2016 年 M_w 6.4 美濃地震的建築物受損程度評估

我國行政院內政部營建署於民國 85 年就訂定「震災後危險建築物緊急鑑定作業基準」，將建築物的受損評估程度依照輕重依序分為綠色(安全)、黃色(限制使用)以及紅色(危險)。除了臺灣，美國與日本亦採用類似的建築物受損程度分類方式。

本法在制定前期被認為評估方法應具有客觀與統一的標準，加上地震工程相關研究的更新，促使此法後續逐步地進行修正與調整(陳建忠等，2014)。最終於民國 98 年 3 月 12 日內營字第 0980800729 號令訂定發布，民國 99 年 4 月 29 日內營字第 0990802619 號修正「災害後危險建築物緊急通報單」、「災害後危險建築物緊急評估明細表」與「災害後危險建築物緊急評估表」並主要劃分為兩種緊急評估危險標誌，分別為紅單(red-tagged)危險標誌及黃單(yellow-tagged)危險標誌(圖 1-2)，這些詳細的評估表可於內政部營建署網站查詢(<https://www.cpami.gov.tw/>)。

2016 年美濃地震後的建築物受損程度分類乃根據此法來進行鑑定。若地震後建築物被分類為紅單危樓，代表此建築物的主要結構受損(柱、樑、外牆、樓版、基礎洩空)或本身傾斜達一定程度；建築物被評為黃單(室內隔間或天花板等)則表示該建築物的次要結構或週遭建築物發生一定程度傾斜(Henry et al., 2017)，採用的登記單位皆為件數。前者因建築物的使用具有危險性，應停止使用，等待補強或重建後才可解除；後者則等待建築物補強或附近危險排除後，即可使用之。



(a)

災害後危險建築物緊急評估危險標誌
(紅色危險標誌)
危險標誌編號：

本建築物依災害後危險建築物緊急評估表辦理緊急評估，緊急評估結果有危險之虞，應暫時停止使用，須經補強認定後始得使用，並解除本標誌或拆除危險建築物。

建物座落：_____縣(市) _____鄉(鎮市區) _____里(村)
_____鄰 _____路(街) _____段 _____巷 _____弄 _____號

評估日期：_____年 _____月 _____日

附 註：

1. 依據災害防救法第27條、第31條及災害後危險建築物緊急評估辦法。
2. 本危險標誌非經本府主管機關同意不可隨意撕毀或遮掩。

(縣(市)長用印)

(紅色底色)
(標題文字為紅色，其餘文字為黑色，公告尺寸為 A3尺寸)
(禁止進入符號為紅色)

(b)

災害後危險建築物緊急評估危險標誌
(黃色危險標誌)
危險標誌編號：

本建築物依災害後危險建築物緊急評估表辦理緊急評估，緊急評估結果有危險之虞項目、範圍，應暫時停止使用，須經排除危險認定後始得使用並解除本標誌。

建物座落：_____縣(市) _____鄉(鎮市區) _____里(村)
_____鄰 _____路(街) _____段 _____巷 _____弄 _____號

評估日期：_____年 _____月 _____日

附 註：

1. 依據災害防救法第27條、第31條及災害後危險建築物緊急評估辦法。
2. 本黃單評估結果認定有危險之虞項目、範圍，係指因鄰近建築物傾斜，或有墜落物、傾倒物之其他危險情節，須經排除危險認定後始得使用；危險之虞項目、範圍，詳災害後危險建築物緊急評估表。
3. 本危險標誌非經本府主管機關同意不可隨意撕毀或遮掩。

(縣(市)長用印)

(黃色底色)
(標題文字為紅色，其餘文字為黑色，公告尺寸為 A3尺寸)
(禁止進入符號為紅色)

圖 1-2 災害後危險建築物緊急評估危險標誌，(a) 紅色標誌 (b) 黃色標誌。

1.4 臺灣地動參數與受損建築物關係探討的文獻回顧

地動參數(ground motion parameters)中的最大地動加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)與最大地動速度(Peak Ground Velocity, PGV)是地震發生後評估災情很好的指標。Tsai (2001)分析 1999 年 Mw 7.6 集集地震的地動參數與死亡人數的關聯性，文獻指出地動參數與死亡率的關係為正相關且當 PGA 大於 400 gal 時對應高死亡率。Wu et al. (2002, 2003, 2004)則使用 PGA 與 PGV 對應死亡率、全倒率及半倒率進行迴歸分析，建立地動參數與災損資料關係式(表 1-4)。結果顯示 1999 年集集地震地動參數與災損資料皆具有高度相關性。

根據前人研究顯示，PGV 在規模小的地震事件幾乎不出現異常的高值，但是 PGA 卻在小規模的地震事件中被觀察到大於 400 gal 的紀錄，這與高頻訊號的影響有關 Wu et al. (2003, 2004)。此外，2018 年 2 月 6 日 Mw 6.4 花蓮地震，在震央西北方大約 12.6 公里的秀林鄉，自由場強地動觀測網的太魯閣觀測站(HWA057)記錄到高達 594 gal 的 PGA，但比對花蓮縣政府官方的建築災情統計資料並沒有在此區有建物被判定為紅單或黃單；然而 PGV 最大值發生在花蓮市(HWA014)，觀測值為 152.6 cm/s，同時亦為 2018 年花蓮地震中造成災損最嚴重的區域(紅單 14 件、黃單 16 件) (圖 1-3)。因此不論是規模較小的地震事件中 PGA 出現異常的高值或 PGA 的高值對應無災情的案例，皆說明 PGA 因高頻訊號影響而與實際感受有所差異。相較之下，把地動影響時間列入考慮的 PGV，當值越大通常可觀察到明顯的災損。因此 PGV 被認為是更適合、穩定的指標來作為評估災損的工具。

本研究分析的地震事件為發生於 2016 年 2 月 6 日的美濃地震。Wu et al. (2016)針對美濃地震使用 P-alert 觀測網的觀測結果，發現 11 棟結構性破壞的建築物與高 PGV 關聯性較高。Lee et al. (2017)使用 TSMIP 的資料，針對高 PGA 及高 PGV 對應受損建築物的分布關係進行討論，挑選本次地震事件中 PGA、PGV 值前 10% 的測站並計算測站周圍 3 公里內的受損建築物數量。研究結果發現前 10% 的 PGA 測站 3 公里內包含 63% 的受損建築物，前 10% 的 PGV 測站 3 公里內則涵蓋 70% 受損建築物，顯示 PGV 相關性高於 PGA 7%。

本研究參考 Wu et al. (2002)方法，以不同角度分析 2016 年美濃地震地動參數與建築災損的關係。本研究與前人方法的差異為除了考慮臺南市結構性破壞的建築物，也將其他非結構性破壞的受損建築物加入探討(共 626 件)。除此之外，因為

行政區是統計災情常用的地理單位，加上都市與鄉村存在建築物樣本數的差異，為了解決樣本偏差的問題，本研究將以行政區災損率的形式進行分析工作，以描述災情的嚴重程度。由於本次地震事件僅臺南市政府提供災情統計資料，加上多數的災情皆發生於臺南市內，因此本研究探討區域為臺南市的所有行政區。

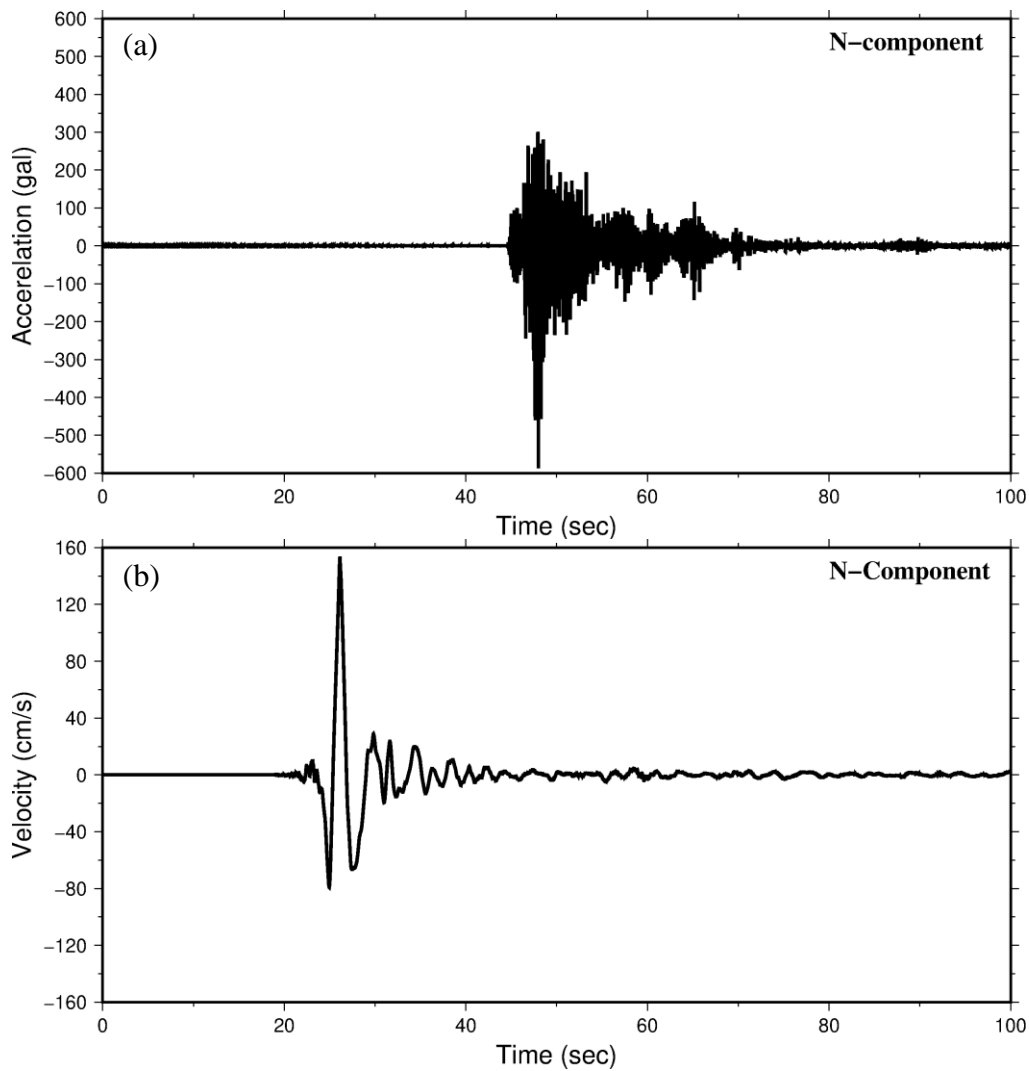


圖 1-3 2018 年 M_w 6.4 花蓮地震 TSMIP 中 PGA 與 PGV 的最大值。(a) PGA 的最大值為 HWA57 的 594.0 gal，(b) PGV 的最大值為 HWA 14 的 152.6 cm/s。

表 1-4 1999 年 M_w 7.6 集集地震地動參數與災損率關係式(Wu et al., 2002)。

	最大尖峰加速度 PGA	最大尖峰速度 PGV
全倒率(Ct)	$\text{Log}(Ct)=4.146\text{Log}(PGA)-10.118$ (1-1 式)	$\text{Log}(Ct)=4.825\text{Log}(PGV)-8.452$ (1-2 式)
半倒率(Cp)	$\text{Log}(Cp)=4.061\text{Log}(PGA)-9.9410$ (1-3 式)	$\text{Log}(Cp)=4.452\text{Log}(PGV)-8.007$ (1-4 式)



Chapter 2 研究資料

本章節介紹本研究所使用的資料，包含地動紀錄、受損建築物統計及受損建築物資料庫等，以利於探討 2016 年美濃地震地動參數與受損建築物間關聯性。

2.1 地動紀錄

中央氣象局於 1991 年起，開始推動強地動觀測計畫，於臺灣島內設置密集的自由場強地動觀測網，在地震來臨時，以加速度形式記錄地表振動的時間序列資料，了解各地詳細地動資訊，進行災害評估工作(Wu et al., 2001)。測站選址條件主要為以下區域：

1. 臺灣島內的大城市。
2. 活動斷層周遭區域。
3. 堅硬岩盤或鬆軟土層等不同地質環境。
4. 國家重大建設或公共設施等。

本研究使用的地動參數分為 PGA 與 PGV。PGA 的部份是由觀測網共 599 站(圖 2-1)三分量的加速度紀錄取絕對值後的最大值代表該站的 PGA，其結果列於附錄 A。取得各測站的 PGA 後，繼續對 599 測站共 1797 加速度紀錄進行以下操作，來獲得最大地動速度 PGV，流程圖為圖 2-2 所示，並將 PGV 結果同樣列於附錄 A。

1. 所有測站加速度紀錄積分一次。
2. 去線性趨勢與平均值後，使用 Butterworth 濾波器將低於 0.075 Hz 的訊號濾除以避免低頻偏移現象(Wu and Kanamori, 2005a, 2005b)。
3. 將三分量的速度紀錄取絕對值後的最大數值作為該站的 PGV。

圖 2-3 以 CHY063 新化站為例，解釋 PGA 與 PGV 的意義，其觀測的地動加速度是 416.92 gal 與地動速度為 74.94 cm/s。

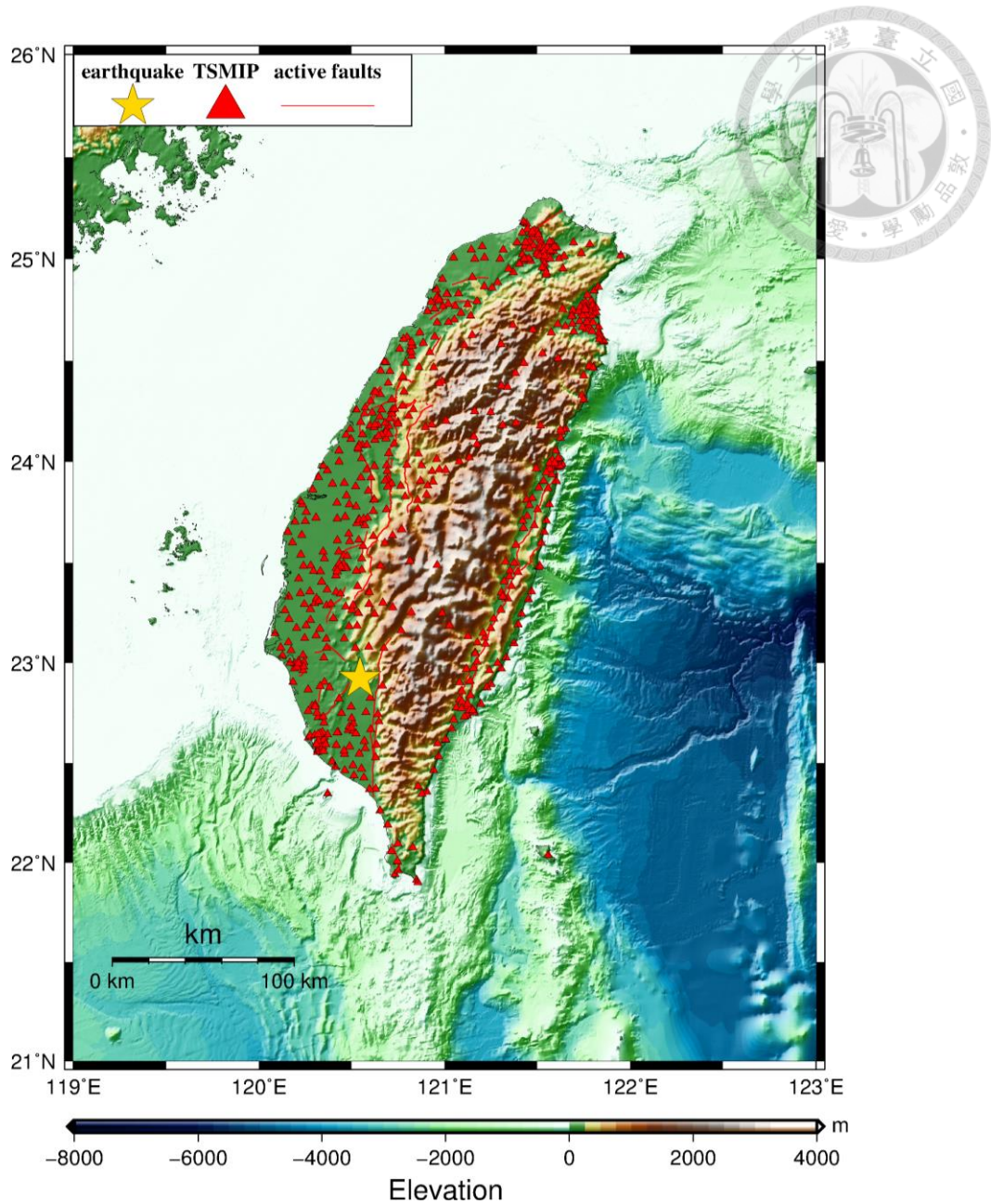


圖 2-1 2016 年美濃地震自由場強地動觀測網共 599 測站的空間分布圖。

PGV operation flow chart



圖 2-2 PGV 的作業流程圖，將地震紀錄原始資料進行積分後，再使用 Butterworth 濾波器濾出 0.075Hz 訊號，找出各測站速度取絕對值後的最大值即為 PGV。

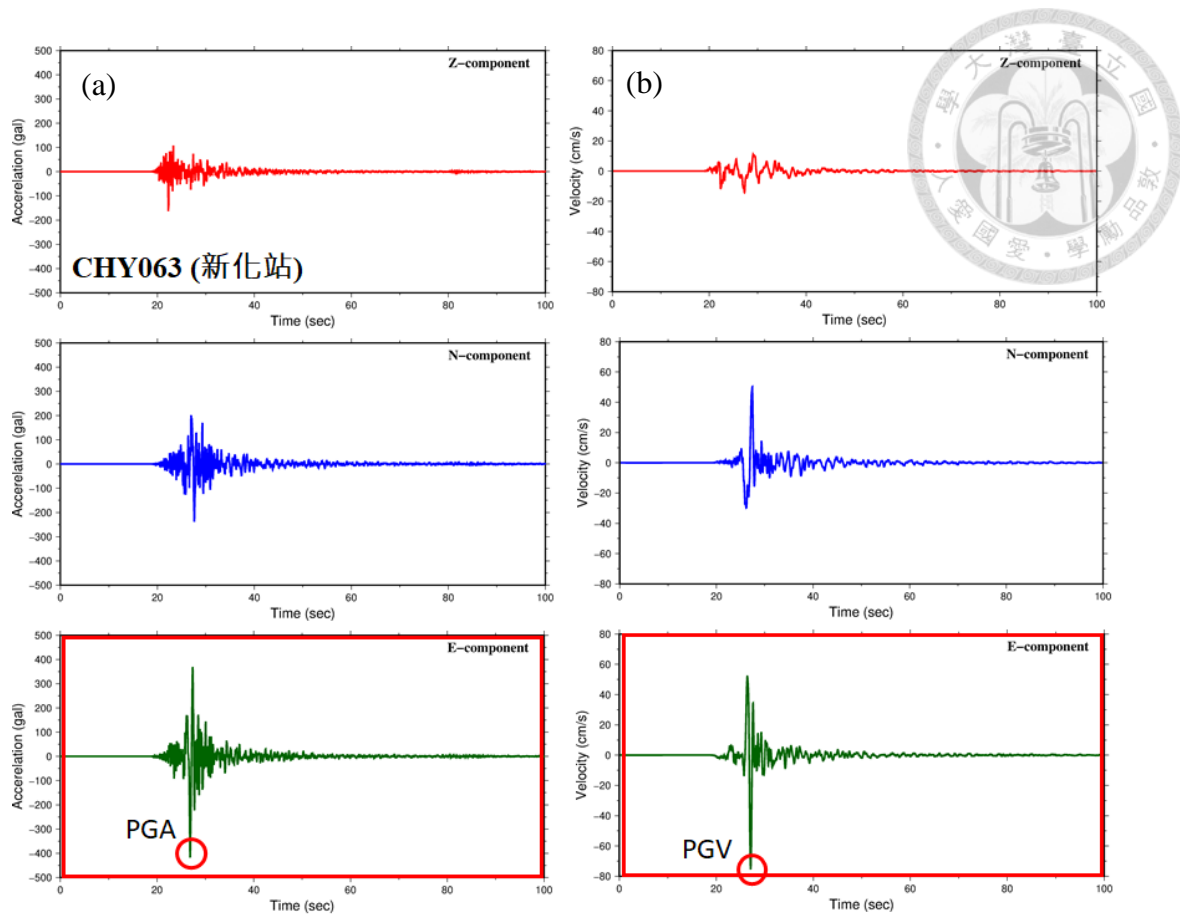


圖 2-3 以 CHY063 新化站為例的 PGA 與 PGV 展示圖。(a) 新化站的地動加速度紀錄，最大地動加速度發生於水平方向的東西分量如紅色圓圈所示，數值為 416.92 gal (b) 新化站的地動速度紀錄，最大地動速度發生於水平方向的東西分量如紅色圓圈所示，數值為 74.94 cm/s。



2.2 2016 年美濃地震紅單、黃單資料

2016 年美濃地震發生後，臺南市政府動員建築、土木等相關專業人士進行災情損失調查，依照建築物受損程度分為紅單及黃單，例子如圖 2-4 所示。為了後續量化工作，本研究蒐集國家災害防救科技中心提供的臺南市 2014 年各行政區建築物總數(表 2-1)及臺南市政府統計的災損資料(臺南市政府資料開放平台，2016)。由於臺南市政府所記錄的紅單與黃單皆以資料筆數呈現，並非以建築物件數登記，因此本研究參考 2016 年美濃地震後受損建築物的門牌與 Google 街景圖，將災損資料更新為件數以符合 1.3.2 節之定義。統計結果顯示，紅單共 271 件、黃單共 355 件。臺南市各行政區的紅單與黃單結果依序列於表 2-2 及表 2-3。紅單與黃單在臺南市的受損建築物分布則如圖 2-5 所示。根據圖 2-5，本次地震所造成的建築物災情主要集中於臺南市的東南部。

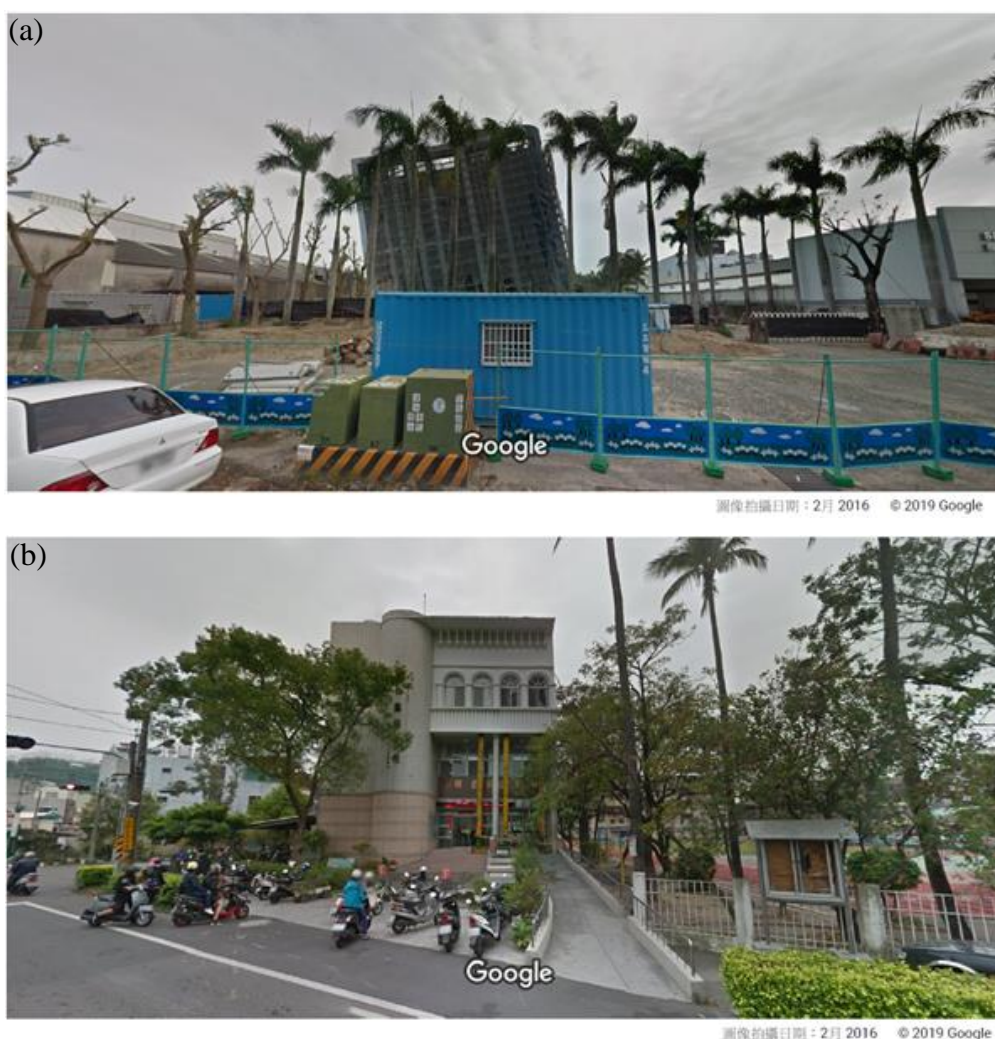


圖 2-4 2016 年美濃地震位於歸仁區的 (a) 紅單建築物 (b) 黃單建築物。

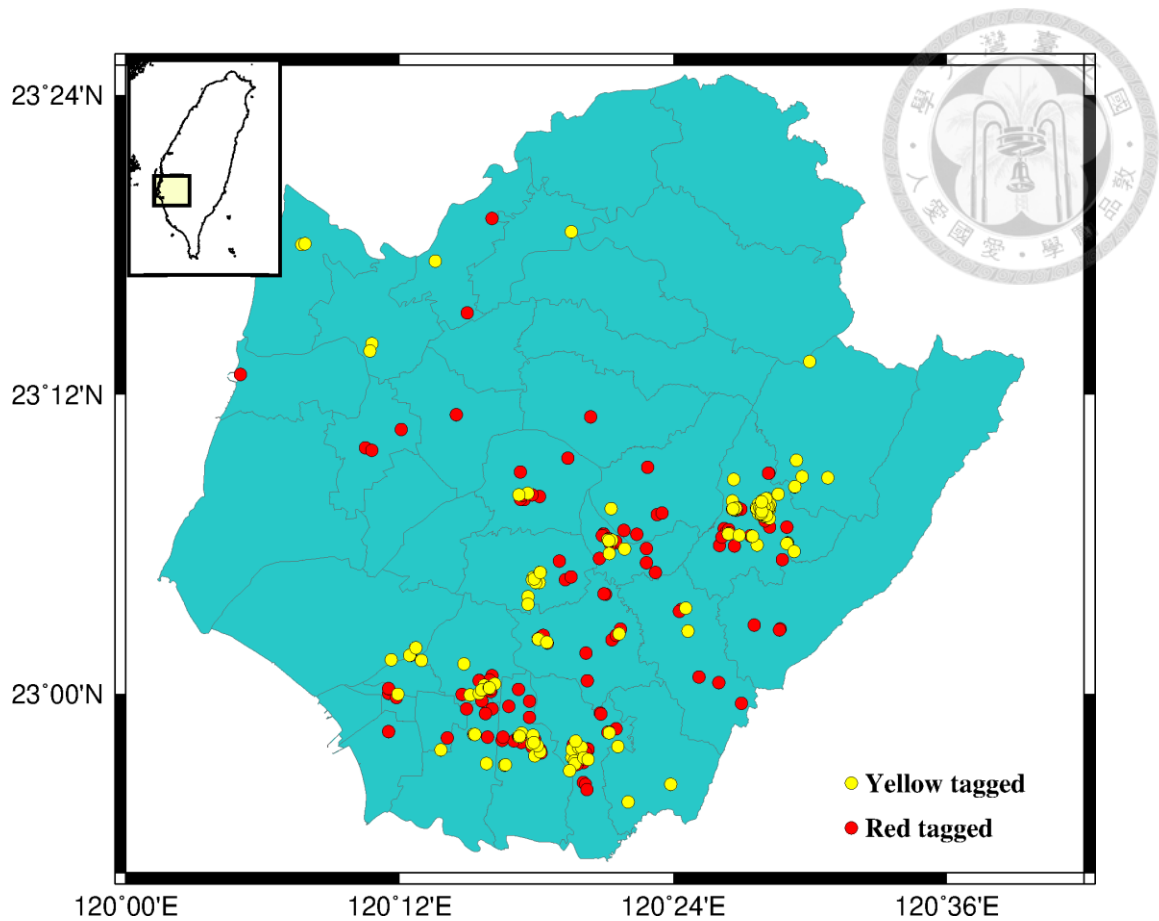


圖 2-5 2016 年美濃地震臺南市受損建築物分布圖，紅色圓形代表被張貼紅單的建築物，黃色圓形代表被張貼黃單的建築物。

表 2-1 2014 年臺南市各行政區的建築物件數。

七股區	下營區	大內區	山上區	中西區	仁德區	六甲區
9053 件	10860 件	3375 件	4350 件	19992 件	31583 件	8455 件
北門區	北區	左鎮區	永康區	玉井區	白河區	安平區
3474 件	25903 件	1626 件	66271 件	5656 件	12090 件	10576 件
安定區	安南區	西港區	佳里區	官田區	東山區	東區
15305 件	59846 件	10165 件	20937 件	14067 件	8339 件	35265 件
南化區	南區	後壁區	柳營區	將軍區	麻豆區	善化區
2353 件	34282 件	12271 件	12552 件	7255 件	17298 件	19173 件
新化區	新市區	新營區	楠西區	學甲區	龍崎區	歸仁區
13981 件	21872 件	27241 件	3174 件	11327 件	1291 件	22135 件
關廟區	鹽水區					
12987 件	11794 件					

表 2-2 2016 年美濃地震臺南市各行政區的紅單受損建築物件數。

大內區	山上區	中西區	仁德區	左鎮區	永康區	玉井區
5 件	20 件	14 件	14 件	5 件	17 件	80 件
安南區	佳里區	官田區	東區	南化區	南區	將軍區
5 件	3 件	1 件	14 件	3 件	2 件	1 件
麻豆區	善化區	新化區	新市區	歸仁區	關廟區	鹽水區
1 件	7 件	13 件	3 件	34 件	27 件	2 件

表 2-3 2016 年美濃地震臺南市各行政區的黃單受損建築物件數。

大內區	山上區	中西區	仁德區	北門區	左鎮區	永康區
1 件	7 件	1 件	9 件	2 件	2 件	21 件
玉井區	安南區	東區	善化區	新化區	新市區	新營區
201 件	3 件	16 件	2 件	9 件	20 件	1 件
楠西區	學甲區	龍崎區	歸仁區	關廟區	鹽水區	
6 件	2 件	3 件	36 件	12 件	1 件	

2.3 2016 年美濃地震受損建築物之總樓層數調查

根據前人研究發現，建築物的擁有者因為擔心被判定為紅單或黃單後會對房屋財產價值產生衝擊而未被貼單(Gilsanz et al., 2016)，也就是說受損建築物判定存在人為的影響。雖然針對上述人為因素無法進行詳盡的釐清與確切的調查，但是在 2.2 節本研究已經針對官方公布紅單、黃單的真實數量做進一步確認，同時也將筆數更新為符合 1.3.2 節定義的件數。

本研究也分類受損建築物的總樓層數同時擷取建築物所在地的街景圖，以利於後續討論一般建築物對不同週期地震波的反應。關於街景圖其操作流程為：

1. 以地址確認受損建築物的位置並比對門牌，取得街景圖。
2. 地址輸入後無法確認，則使用 GPS 定位確認門牌，取得街景圖。
3. 若 GPS 定位之後無建築物或無法成功取得街景圖則分類為無法確定。

房屋總樓層分類則根據內政部建築物公布 2011 年耐震設計規範及解說部份規定修正規定說明短週期結構物為 0.3 秒地震水準之標準，其對應到大致為 3 層樓的自然振動週期；長週期結構物則為 1.0 秒，大約同等於 10 層樓自然振動週期，依此標準將受損建築物的總樓層數分成四種類型：

1. 3 層樓以下。
2. 4 至 9 層樓。
3. 10 層樓以上。
4. 無法確定。

Chapter 3 研究方法與流程



3.1 研究流程

本研究的分析方法參考 Wu et al. (2002) 建立地動參數(PGA、PGV)與災損率迴歸關係式的流程，如下：

1. 使用附錄 A 的之 PGA、PGV 資料建立等值圖。
2. 利用第二章節表 2-1 建築物總件數、表 2-2 紅單件數、表 2-3 黃單件數計算臺南市各行政區的紅單災損率及黃單災損率。
3. 參考前人 PGA 和 PGV 的選取範圍，依照各範圍內所含的行政區幾何中心點所對應的災損率計算平均值，再分配對應的平均 PGA 和 PGV 值。
4. 將地動參數(PGA、PGV)與災損率(平均紅單率、平均黃單率)取對數，再利用最小平方法進行迴歸分析以獲得災損率與地動參數的關係式。

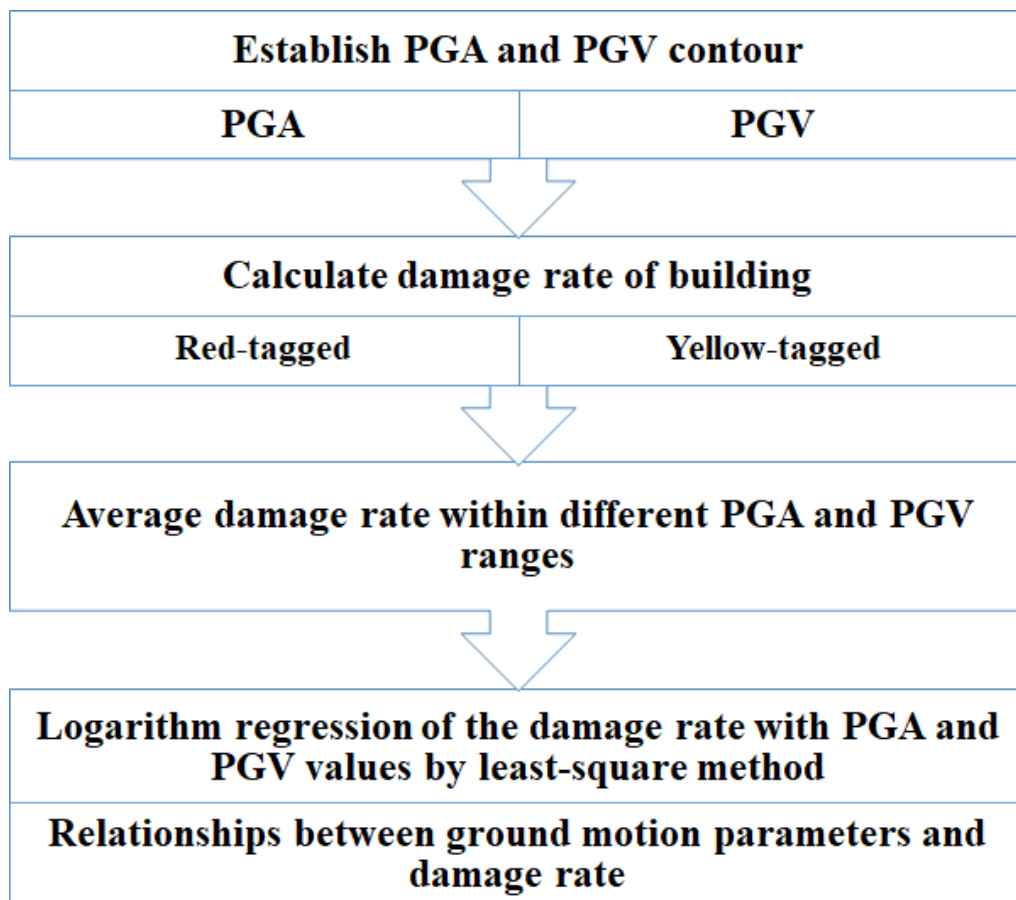


圖 3-1 本研究的分析流程圖。



3.2 地動參數等值圖建立

估計地動參數空間分布及建立地動參數等值圖必須有充足且密集的測站。但是臺灣島內並非每個地區都有佈放地震站，因此須由內插方法將已知測站的數值估計未知點的 PGA 與 PGV，才能進一步獲得地動參數空間分布與等值線。

克利金法(Kriging method)是一種非常適合用於空間中預測未知數值的內插方法，具有最佳線性不偏估計的特性(Cressie, 1990)。此方法依照已知點的空間分布、點與點之間的距離賦予相對應的權重，以估計未知點的數值。若已知點之間的距離越長所對應的權重就會越小；相反地，點之間的距離越短則權重就會越大。

本研究使用 Golden software 開發的軟體 Suffer 13 版的克利金法來進行內插，其計算如公式 3-1 所示。 Z_A 是估計點的值， N 、 Z_i 則分別代表附近已知點的數量與已知點數值， W_i 為權重。資料選取的經度範圍從東經 120.086 度至 121.949 度；緯度則是自北緯 21.901 度至 25.182 度。網格尺寸的部份，經過測試後採用 $0.033^\circ \times 0.033^\circ$ 劃成一個格點，來計算資料選取範圍內無測站地點的 PGA、PGV 值，其等值圖分別如圖 3-2、圖 3-3 所示。

$$Z_A = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (3-1 \text{ 式})$$

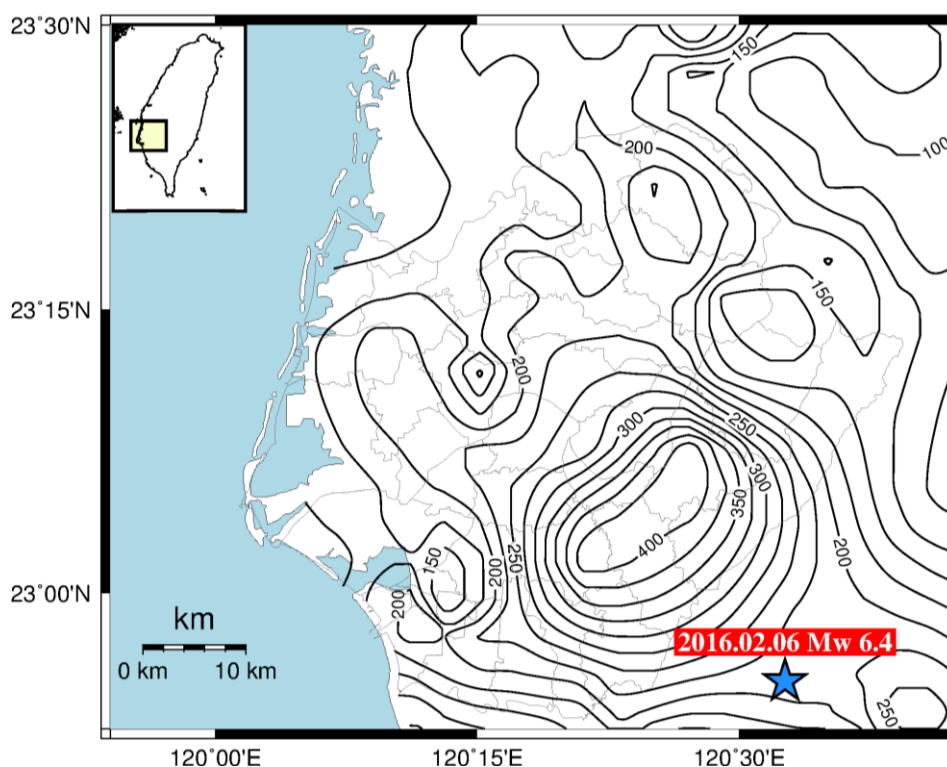


圖 3-2 2016 年美濃地震臺南市的 PGA 等值線分布圖。PGA 單位: gal。

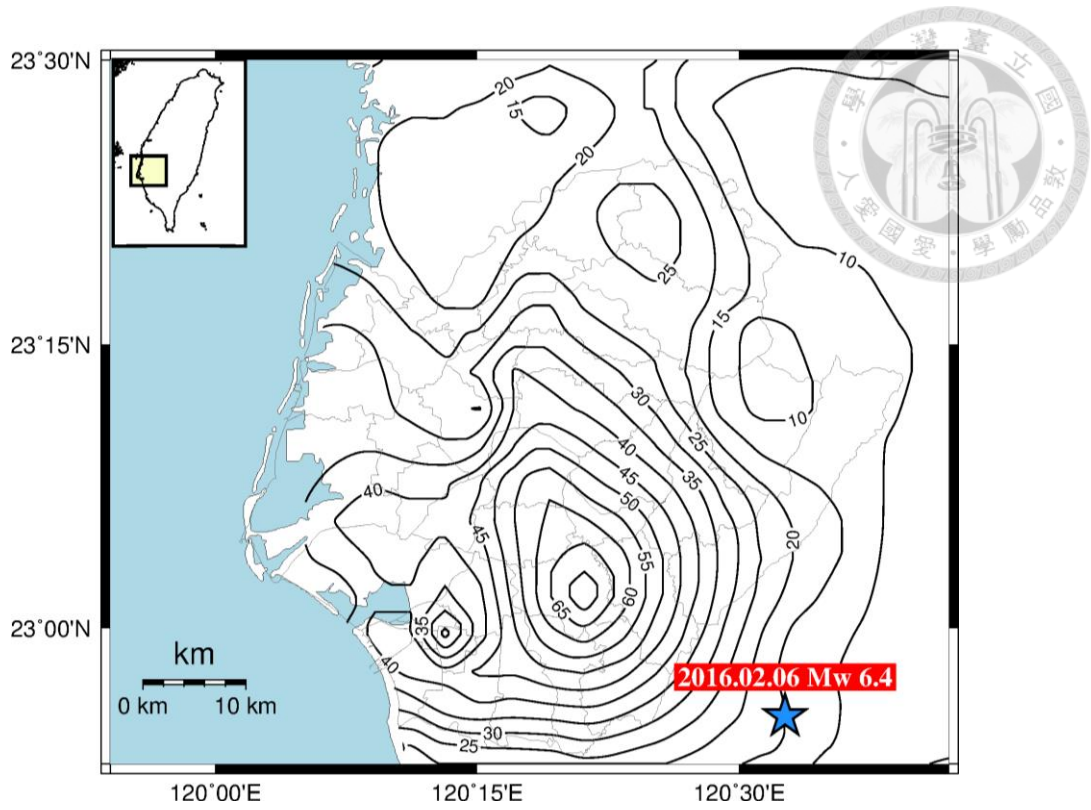


圖 3-3 2016 年美濃地震臺南市的 PGV 等值線分布圖。PGV 單位: cm/s。



3.3 災損率計算

由於官方統計災情資料經常以行政區作為單位，因此行政區是一個很適合用來進行災害分析的工具(Wu et al., 2003)。但因為行政區內的都市與鄉村建築總數有明顯差異，前者建築物繁多且密集，後者建築物相對稀少而分散，若直接以各行政區內的受損建築物個數進行迴歸分析工作，會因為都市地區之總建築物件數較多，造成樣本偏差的問題。因此本研究除了使用 2016 年美濃地震受損建築物資料，也同時將各行政區的總建築物數量列入考量，以災損率作為迴歸分析的應變數。

受損建築物的部份參考臺南市政府 2016 年美濃地震張貼紅單與黃單建築物資料；各行政區總建築物數則使用國家災害防救科技中心 2014 年統計各行政區的建築物數量，進一步計算各行政區的建築災損率。

本研究參考 1.3.2 節的新震後建築災損評估分類，將建築災損率分為紅單率(red tagged rate, R_r)及黃單率(yellow tagged rate, Y_r)。紅單率意義為該行政區總建築物件數中被張貼紅單的建築物數量之百分率，如公式 3-2 所示；黃單率定義是該行政區的總建築物數中被張貼黃單的建築物數量之百分率，如公式 3-3 所示。求得各行政區的災損率後，再進一步與地動參數進行迴歸分析。

$$R_r(\%) = \frac{\text{紅單建築物數量}}{\text{總建築物數量}} \% \quad (3-2 \text{ 式})$$

$$Y_r(\%) = \frac{\text{黃單建築物數量}}{\text{總建築物數量}} \% \quad (3-3 \text{ 式})$$



3.4 資料選取與迴歸關係式建立

使用 3.2 節 PGA、PGV 等值圖，利用臺南市各行政區的邊界求出幾何中心點用黑點表示，作為該行政區災損率分配的位置，如圖 3-4 及圖 3-5 所示。

本研究參考 Wu et al. (2002)劃分的 PGA、PGV 範圍，計算各範圍的平均 PGA 和 PGV 值作為迴歸分析的自變數，再將各範圍內涵蓋的所有幾何中心點(含災損率為零的行政區)所對應的災損率計算平均值作為迴歸分析的應變數。最後將自變數與應變數取對數後，利用最小平方法進行迴歸分析，以獲得本研究欲求的迴歸式並探討 PGA、PGV 與災損率間的相關性。

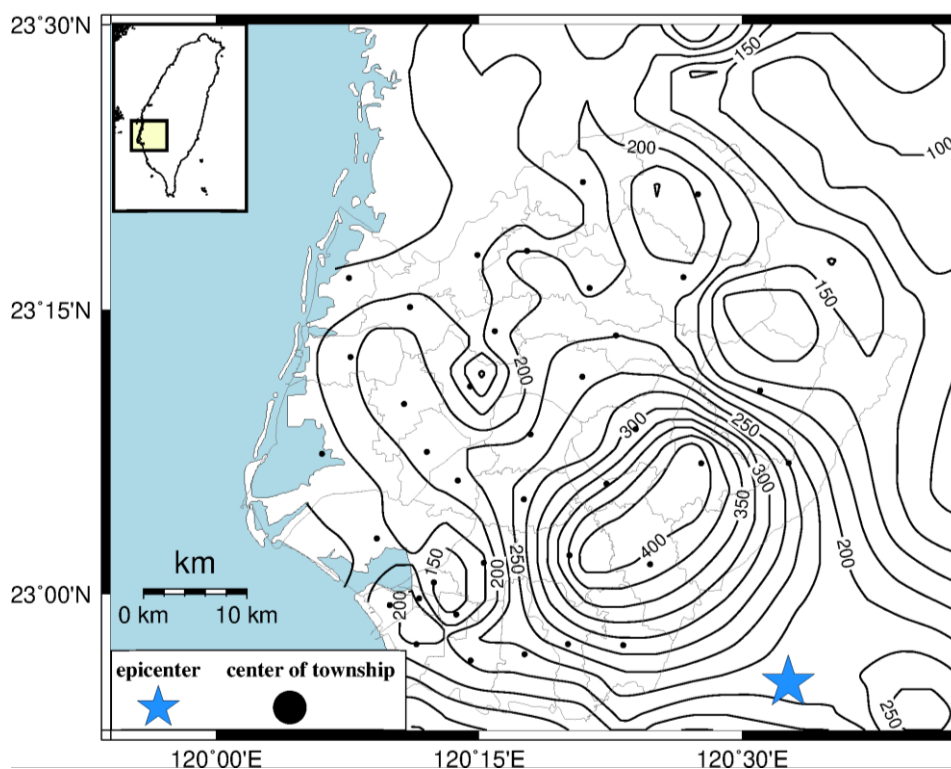


圖 3-4 2016 年美濃地震 PGA 等值線。黑色線是等值線，灰色線為行政區邊界，星號代表震央，黑點則是行政區幾何中心。PGA 單位: gal。

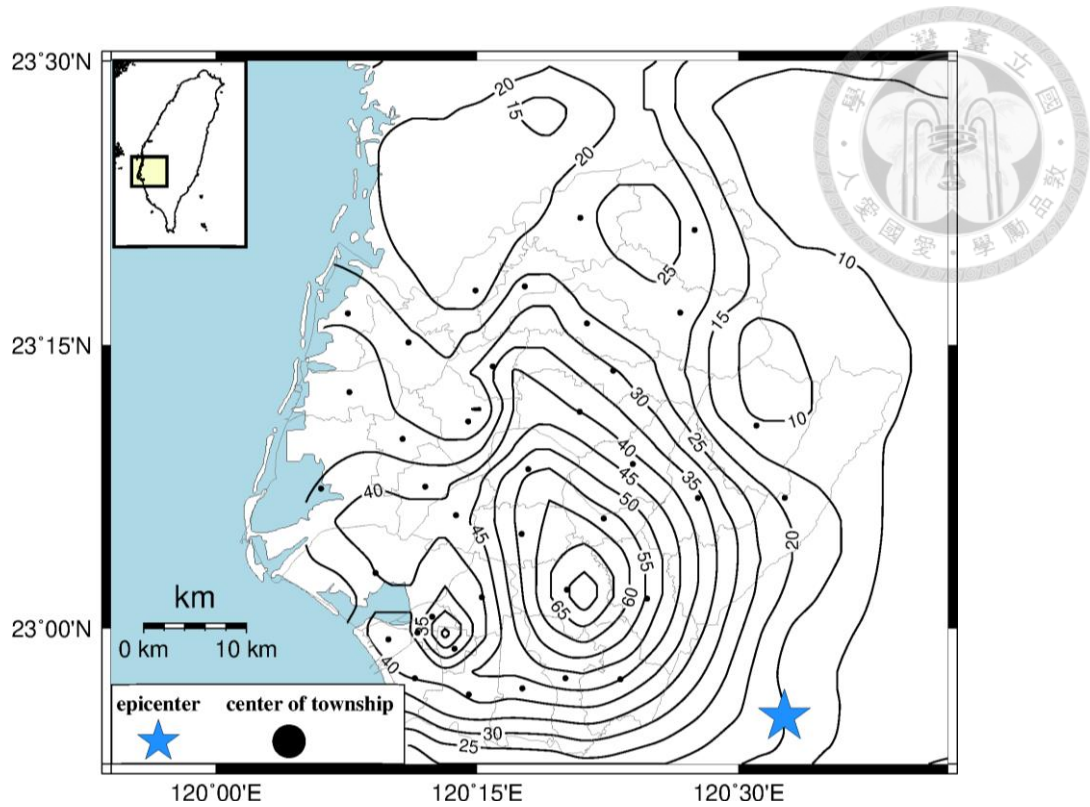


圖 3-5 2016 年美濃地震 PGV 等值線。黑色線是等值線，灰色線為行政區邊界，星號代表震央，黑點則是行政區幾何中心。PGV 單位: cm/s。



Chapter 4 研究結果

4.1 PGA 及 PGV 空間分布圖

本小節展示克利金法所估計未知點的地動參數結果，同時也利用已知觀測值比較估計值的結果，進行檢驗(圖 4-1)。PGA 色條是依照 2016 年中央氣象局震度對應 PGA 的分級標準如表 4-1 進行配色；PGV 色條則參考 Wu et al. (2003)震度與 PGV 關係式(4-1 式)劃分，其地震強度與對照 PGV 範圍分級標準如表 4-2 所示。

$$I = 2.14 \times \log_{10}(PGV) + 1.89 \quad (4-1 \text{ 式})$$

根據圖 4-1 與圖 4-2 的結果，不論是 PGA 還是 PGV 分布圖，已知觀測值(三角形)與克利金法所運算出來的估計值顏色幾乎一致，說明克利金法的估計結果為合理。除此之外，從 PGA、PGV 分布圖還可以觀察最高值皆非分布於震央附近，而是在西北方的臺南市。根據前人研究，此現象與三個因素有關(Lee et al., 2016；Kanamori et al., 2017):

1. 破裂方向性，美濃地震破裂方向以震央往西北方即臺南市方向進行破裂。
2. 震源輻射效應，震波以震源為中心呈現輻射狀往四面八方傳遞，美濃地震的震源輻射放大的區域位於震央的西側。
3. 場址效應，由於臺南市地質條件主要為鬆軟的沖積層。當震波到達時，相似頻率的波會發生建設性干涉，導致振幅被放大，地表感受晃動程度增強，增加對建築物的威脅。

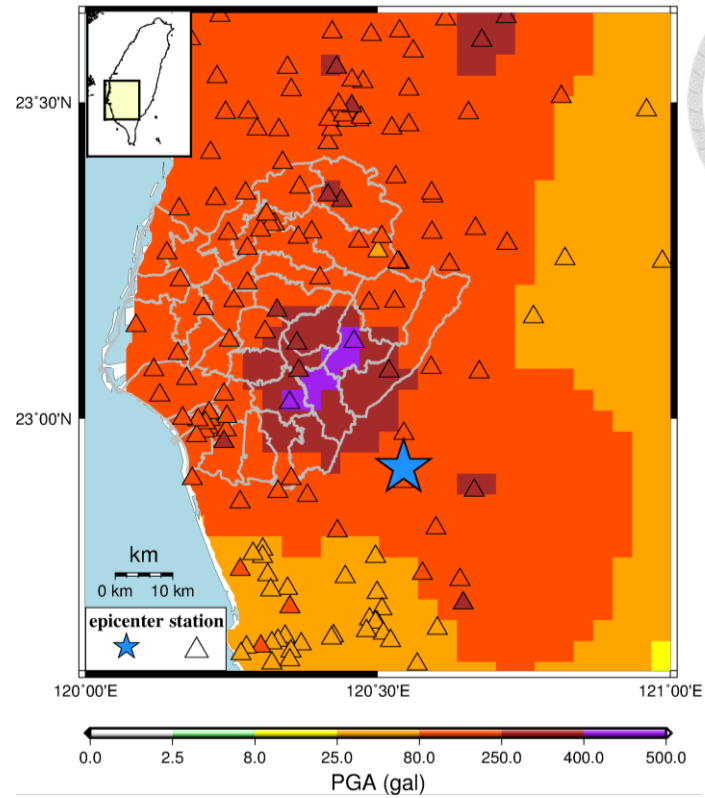


圖 4-1 PGA 空間分布圖，三角形代表測站，星號是震央，線為臺南市行政區邊界。

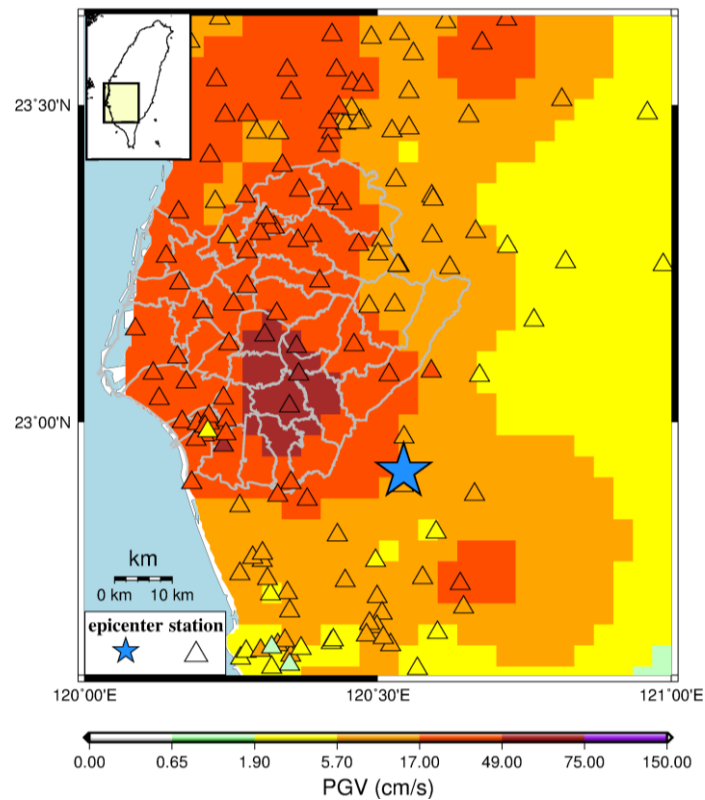


圖 4-2 PGV 空間分布圖，三角形代表測站，星號是震央，線為臺南市行政區邊界。

表 4-1 中央氣象局於 2016 年美濃地震時採用 PGA 範圍對應震度標準。

震度	0-1	2	3	4	5	6	7
PGA (gal)	0-2.5	2.5-8	8-25	25-80	80-250	250-400	>400

表 4-2 根據 Wu et al. (2003) 劃分 PGV 範圍對應震度標準。

震度	0-1	2	3	4	5	6	7
PGV (cm/s)	0-0.65	0.65-1.9	1.9-5.7	5.7-17	17-49	49-75	>75



4.2 臺南市各行政區災損率

本章節結合國家災害防救科技中心提供的 2014 年臺南市各行政區總建築物統計數據與臺南市政府於 2016 年統計紅單、黃單列表清單，依照第 3-3 節 3-2 式與 3-3 式，求出各行政區對應的建築災損率，數據結果依照災損率的大小從左至右依序列於表 4-3 與表 4-4。

紅單率可以當成該行政區的建築物遭受地震破壞程度較高的比例。本研究針對各行政區的紅單率分成五種等級繪製紅單率分布圖(圖 4-3)。其紅單率超過 0.1% 的行政區為玉井區、山上區、左鎮區、關廟區、歸仁區、大內區與南化區。從結果可觀察到這些行政區相對其他區域的紅單率較高，主要集中於臺南市東南部。

黃單率的部份則為該區域建築物被地震破壞程度相對於紅單率較輕微的比例。本研究同樣把各行政區黃單率依大小分成五種顏色繪製黃單率分布如圖 4-4。其黃單率超過 0.1% 的行政區為玉井區、龍崎區、楠西區、山上區、歸仁區與左鎮區。這些是相對於其他行政區黃單率較高的區域，而且與紅單率分布相似，主要也集中於臺南市東南部。

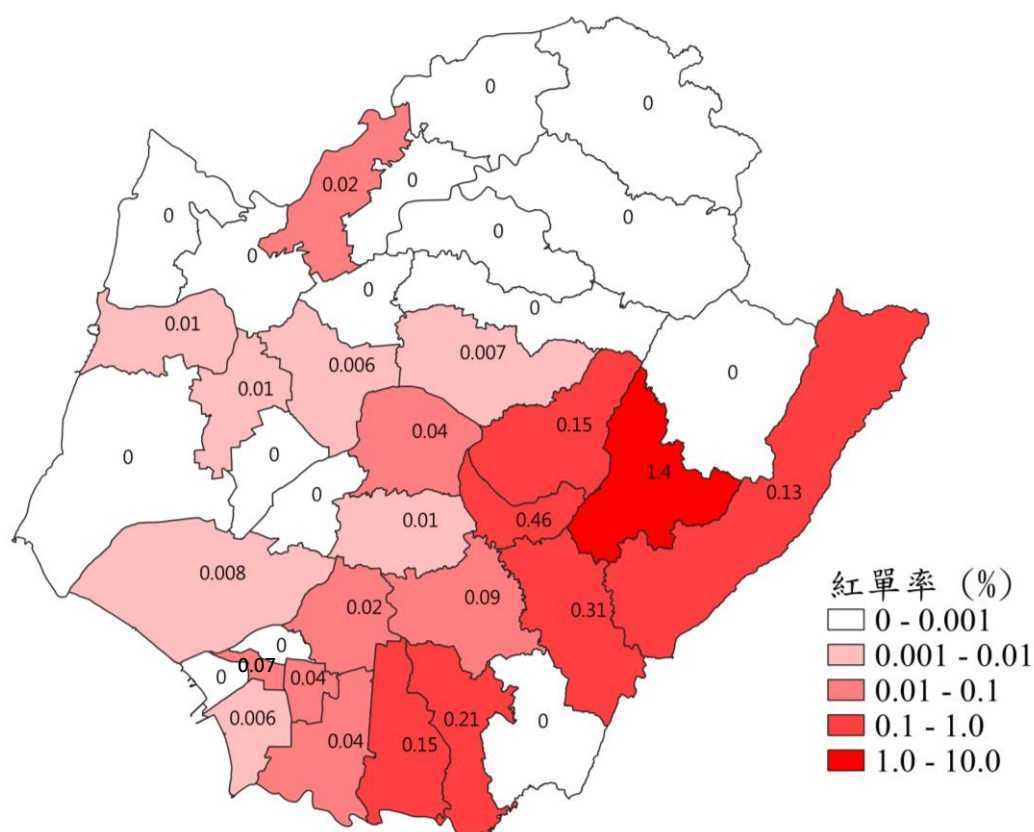


圖 4-3 2016 年美濃地震紅單率分布圖，災損率較高的區域主要位於臺南市東南部。

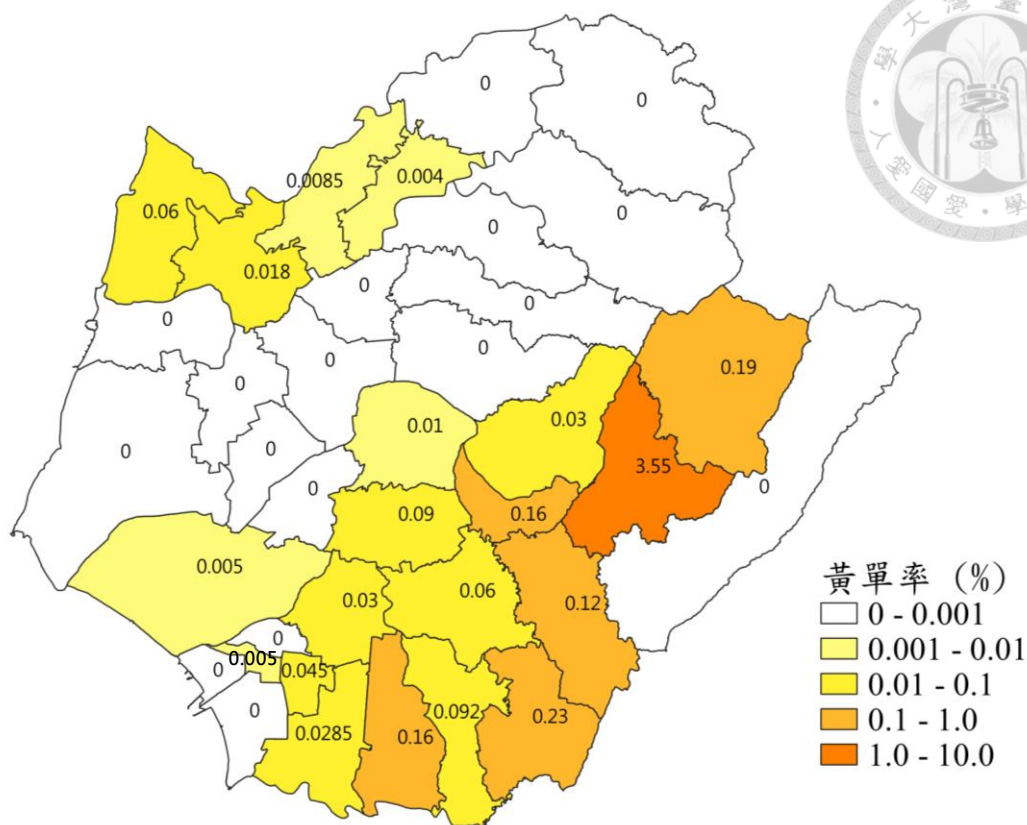


圖 4-4 2016 年美濃地震黃單率分布圖，災損率較高的區域也位於臺南市東南部。

表 4-3 2016 年美濃地震紅單率列表。

玉井區	山上區	左鎮區	關廟區	歸仁區	大內區	南化區
1.414%	0.460%	0.308%	0.208%	0.154%	0.148%	0.127%
新化區	中西區	仁德區	東區	善化區	永康區	鹽水區
0.093%	0.070%	0.044%	0.040%	0.037%	0.026%	0.017%
佳里區	將軍區	新市區	安南區	官田區	麻豆區	南區
0.014%	0.014%	0.014%	0.008%	0.007%	0.006%	0.006%
七股區	下營區	六甲區	北門區	北區	白河區	安平區
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
安定區	西港區	東山區	後壁區	柳營區	新營區	楠西區
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
學甲區	龍崎區					
0%	0%					

表 4-4 2016 年美濃地震黃單率列表。

玉井區	龍崎區	楠西區	山上區	歸仁區	左鎮區	關廟區
3.554%	0.232%	0.189%	0.163%	0.161%	0.123%	0.092%
新市區	北門區	新化區	東區	大內區	永康區	仁德區
0.091%	0.064%	0.058%	0.045%	0.032%	0.030%	0.028%
學甲區	善化區	鹽水區	中西區	安南區	新營區	七股區
0.018%	0.010%	0.008%	0.005%	0.005%	0.004%	0%
下營區	六甲區	北區	白河區	安平區	安定區	西港區
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
佳里區	官田區	東山區	南化區	南區	後壁區	柳營區
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
將軍區	麻豆區					
0%	0%					



4.3 美濃地震地動參數與災損率迴歸關係式

本章節使用第 4.1 節 PGA、PGV 等值圖以及第 4.2 節紅單率、黃單率結果，透過迴歸分析建立關係式。本研究 PGA 與 PGV 區間乃參考 Wu et al. (2002) 的設定範圍，先將各行政區對應的紅單率、黃單率標示於 PGA、PGV 等值圖中各行政區的幾何中心點，分別如圖 4-5、圖 4-6 所示，再依照各 PGA、PGV 範圍內涵蓋的所有災損率計算平均值，同時分配對應的平均 PGA 和 PGV 值。PGA 範圍所對應行政區的平均紅單率、平均黃單率之結果及災損率標準誤差(standard error)分別列於表 4-5 及表 4-6；PGV 範圍所對應行政區的平均紅單率與平均黃單率之結果及標準誤差則依序列於表 4-7 及表 4-8。

接下來再根據表 4-5 至表 4-8 的結果，將地動參數(PGA、PGV)及平均災損率(平均紅單率、平均黃單率)取對數後，使用最小平方法(Least square method)建立迴歸式，共 4 式，如圖 4-7 與圖 4-8 所示，分別代表 PGA 及 PGV 對應災損率的結果。PGA 對應建築災損率的迴歸式、相關係數、標準誤差列於表 4-9；PGV 的部份則列於表 4-10。

經過數據分析統計後結果如下：

1. 根據圖 4-7、圖 4-8 顯示地動參數對應建築災損率的相關性皆為正相關，PGA 對應紅單率、黃單率的相關係數分別為 0.98 及 0.81(如表 4-9)；PGV 對應紅單率、黃單率的相關係數分別為 0.46 及 0.26(如表 4-10)。其意義不論以加速度或速度形式，只要地表最大振動程度越大，該地區被地震破壞的建築物就越多，符合物理概念。
2. 圖 4-8 PGV 位於 15 cm/s 所對應紅單率比 25 cm/s 高上許多；黃單率的部份，PGV 15 cm/s 的黃單率則不僅只比 25 cm/s 高，甚至比 65 cm/s 的災情還嚴重，這可能與 PGV 10 至 20 cm/s 區間所對應的平均紅單率、平均黃單率僅由少數行政區組成有關。當樣本缺乏時，某行政區出現災損率異常響應，就會對迴歸分析結果產生影響。
3. 承第 2 點，由於 PGV 在 15 cm/s 時的紅單率與黃單率出現異常響應，本研究嘗試移除此點作為 PGV 新的測試結果，如圖 4-9、表 4-11、表 4-12。結果發現 PGV 對應紅單率的相關係數從原先 0.46 提升至 0.78；PGV 對應黃單率的相關係數則從 0.26 增加至 0.43，其新測試結果的相關係數與斜率都比原始結果提升。

4. 根據前述幾點，不論是 PGV 的原始結果或新測試結果，PGA 與災損率的相關係數都比 PGV 大，其相關討論會在第五章進行進一步的解釋與說明。

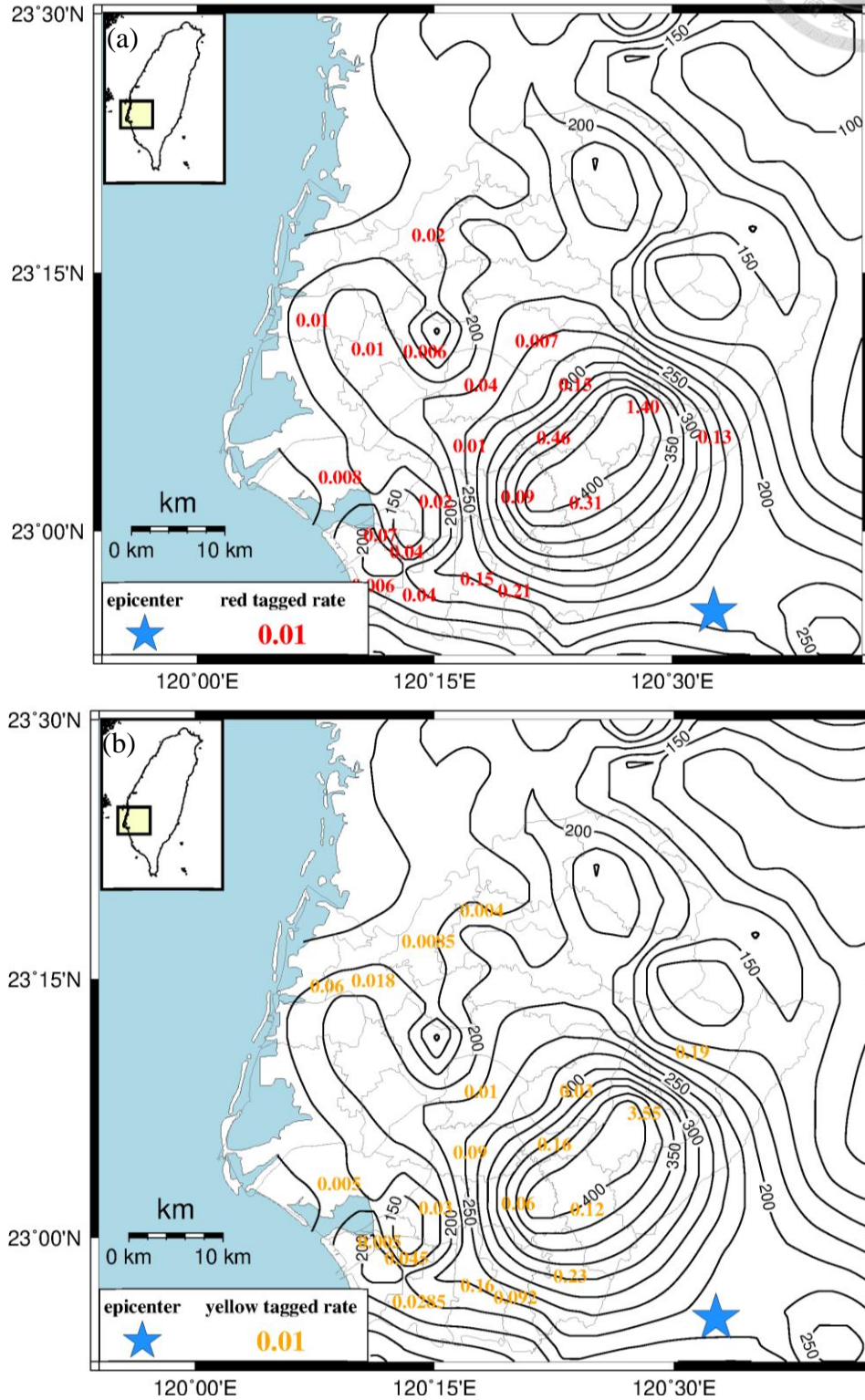


圖 4-5 (a) PGA 等值圖與紅單率 (b) PGA 等值圖與黃單率。

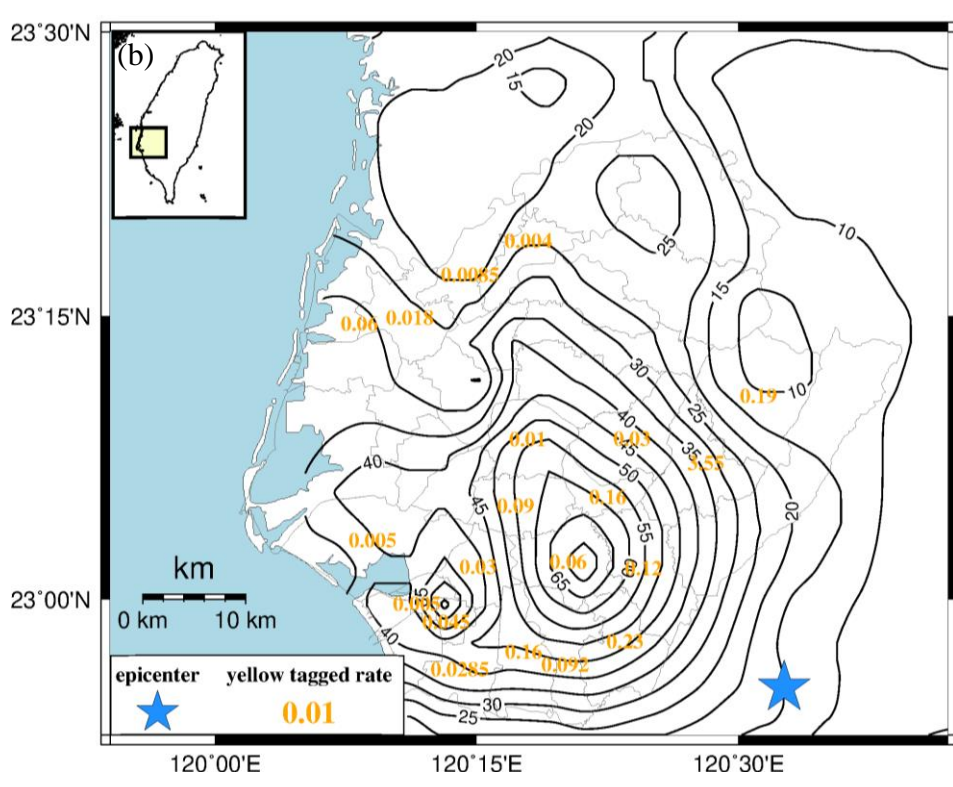
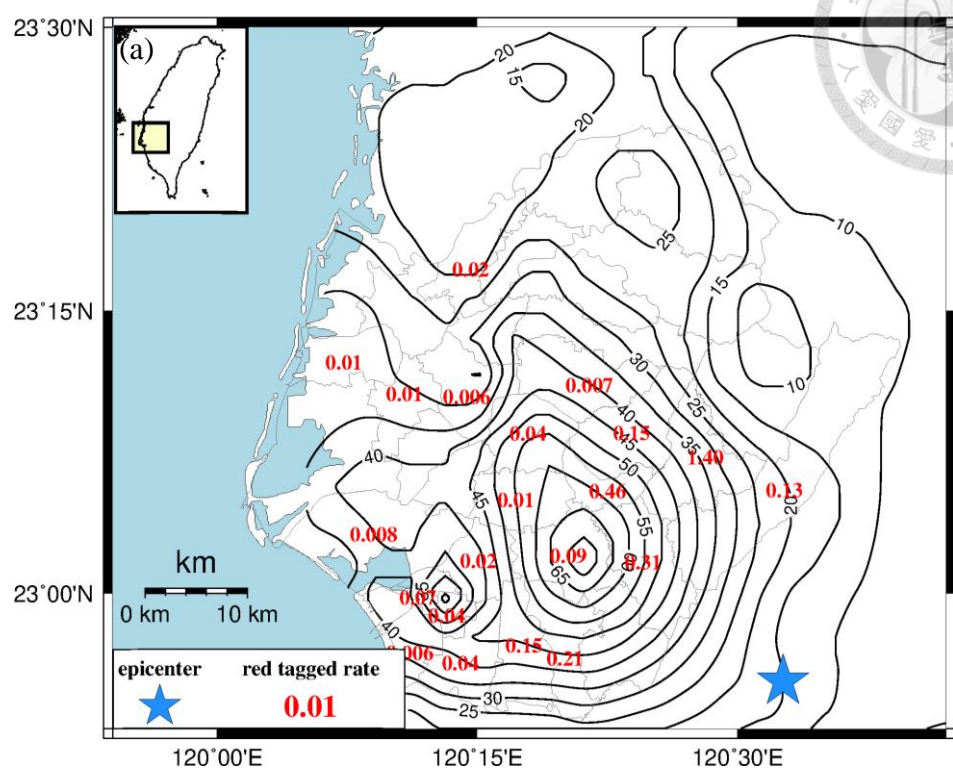
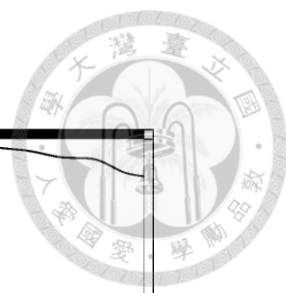


圖 4-6 (a) PGV 等值圖與紅單率 (b) PGV 等值圖與黃單率。

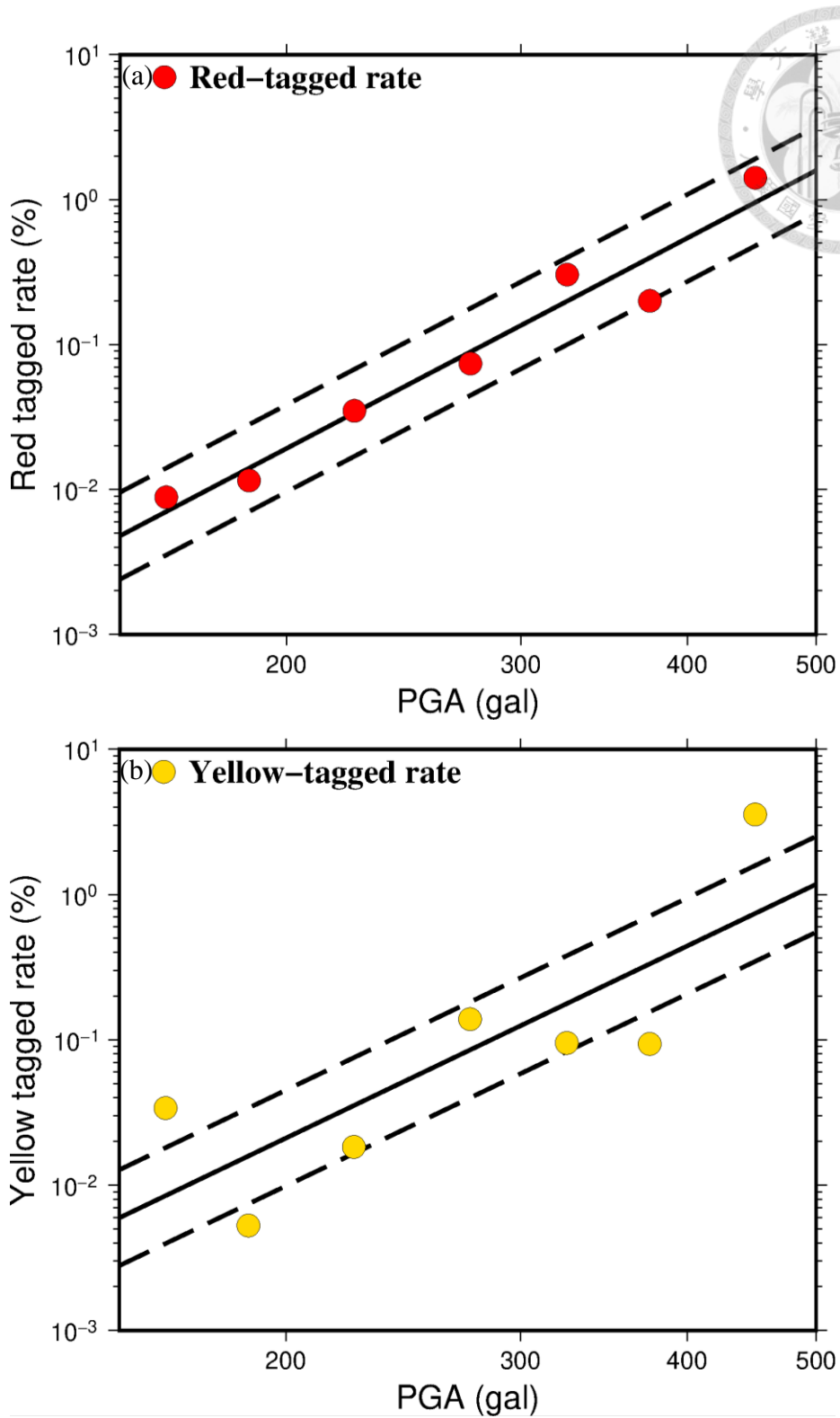


圖 4-7 (a) PGA-紅單率關係 (b) PGA-黃單率關係。紅、黃點分別為各 PGA 範圍所對應的平均紅單率與平均黃單率，關係式以實線表示，虛線為標準誤差線。

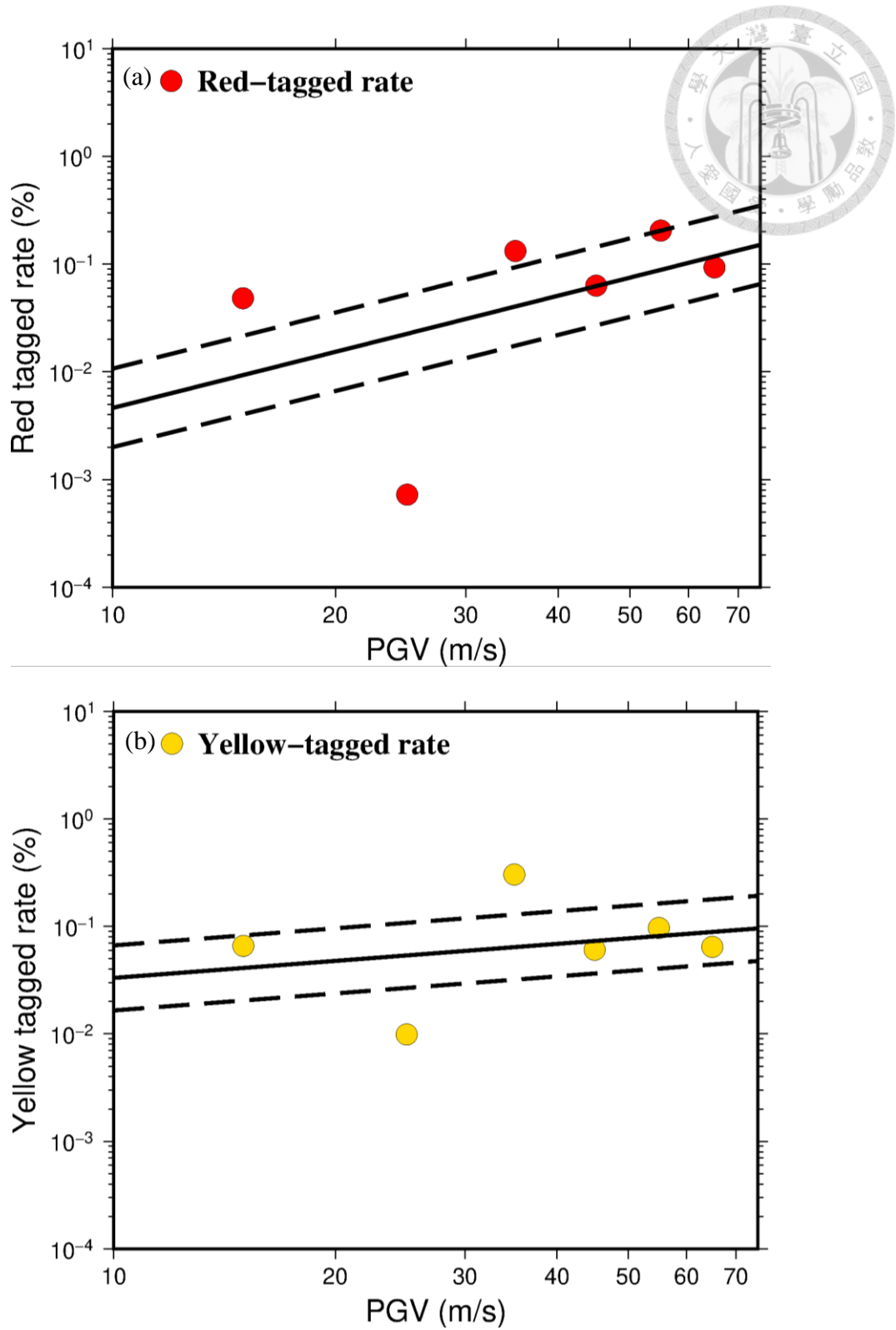


圖 4-8 (a) PGV-紅單率關係 (b) PGV-黃單率關係。紅、黃點分別為各 PGV 範圍所對應的平均紅單率與平均黃單率，關係式以實線表示，虛線為標準誤差線。

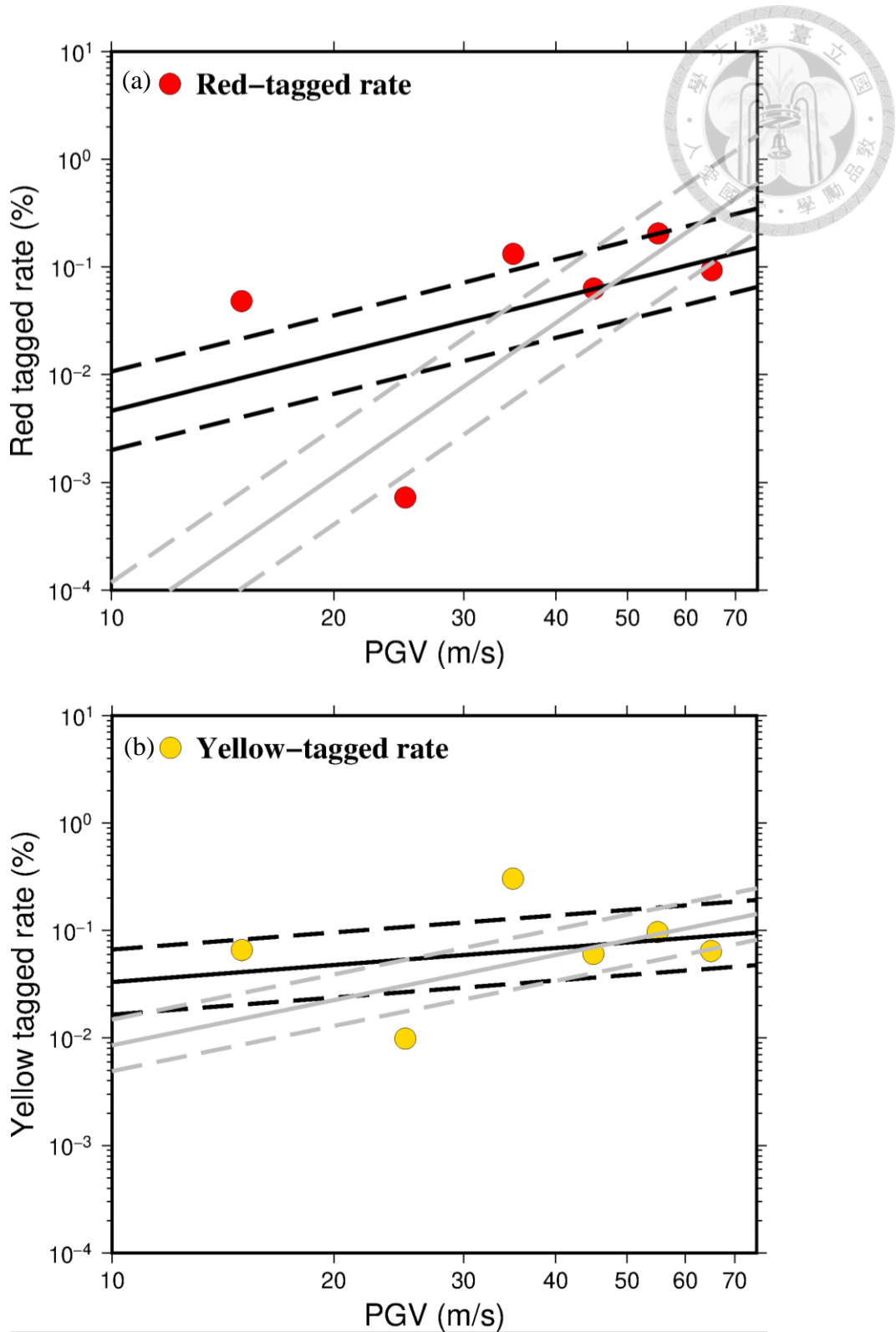


圖 4-9 PGV 對應災損率的原始結果(黑色線)與新測試結果(灰色線, 不考慮 PGV 15 cm/s 的災損率)的比較圖, (a) PGV-紅單率關係 (b) PGV-黃單率關係。

表 4-5 PGA 範圍、採用行政區、平均紅單率與紅單率標準誤差。

PGA 範圍	平均 R _r	採用行政區	標準誤差
150-175	0.009%	有災損:安南、東區、麻豆、鹽水 無災損:七股、北門、北區、楠西	0.005
175-200	0.012%	有災損:中西、永康、南區、將軍 無災損:下營、安平、後壁、柳營、新營、學甲	0.007
200-250	0.035%	有災損:仁德、佳里、官田、南化、善化、歸仁 無災損:六甲、白河、安定、西港、東山	0.017
250-300	0.074%	有災損:新市、關廟 無災損:龍崎	0.067
300-350	0.304%	有災損:大內、山上 無災損:無	0.156
350-400	0.200%	有災損:左鎮、新化 無災損:無	0.107
400-500	1.414%	有災損:玉井 無災損:無	

表 4-6 PGA 範圍、採用行政區、平均黃單率與黃單率標準誤差。

PGA 範圍	平均 R _r	採用行政區	標準誤差
150-175	0.038%	有災損:北門、安南、東區、楠西、鹽水 無災損:七股、麻豆、北區	0.023
175-200	0.005%	有災損:中西、永康、新營、學甲 無災損:下營、安平、南區、後壁、將軍、柳營	0.003
200-250	0.018%	有災損:仁德、善化、歸仁 無災損:佳里、官田、南化、六甲、白河、安定、西港、東山	0.015
250-300	0.139%	有災損:新市、龍崎、關廟 無災損:無	0.047
300-350	0.095%	有災損:大內、山上 無災損:無	0.066
350-400	0.094%	有災損:左鎮、新化 無災損:無	0.029
400-500	3.554%	有災損:玉井 無災損:無	

表 4-7 PGV 範圍、採用行政區、平均紅單率與紅單率標準誤差。

PGV 範圍	平均 R _r	採用行政區	標準誤差
10-20	0.048%	有災損:南化、鹽水 無災損:楠西	0.040
20-30	0.001%	有災損:麻豆 無災損:北門、白河、東山、後壁、柳營、新營、學甲	0.001
30-40	0.132%	有災損:中西、永康、玉井、安南、佳里、東區、將軍 無災損:七股、下營、六甲、北區、西港	0.117
40-50	0.063%	有災損:大內、仁德、官田、南區、歸仁、關廟 無災損:安平、安定、龍崎	0.028
50-60	0.204%	有災損:山上、左鎮、善化、新市 無災損:無	0.108
60-70	0.093%	有災損:新化 無災損:無	

表 4-8 PGV 範圍、採用行政區、平均黃單率與黃單率標準誤差。

PGV 範圍	平均 R _r	採用行政區	標準誤差
10-20	0.066%	有災損:楠西、鹽水 無災損:南化	0.062
20-30	0.010%	有災損:北門、新營、學甲 無災損:麻豆、白河、東山、後壁、柳營	0.007
30-40	0.303%	有災損:中西、永康、玉井、安南、東區 無災損:佳里、將軍、七股、下營、六甲、北區、西港	0.296
40-50	0.061%	有災損:大內、仁德、龍崎、歸仁、關廟 無災損:官田、南區、安平、安定	0.028
50-60	0.096%	有災損:山上、左鎮、善化、新市 無災損:無	0.032
60-70	0.064%	有災損:新化 無災損:無	

表 4-9 PGA 對應平均紅單率及平均黃單率的關係式、相關係數與標準誤差。

PGA	紅單率	黃單率
關係式	$\text{Log}(R_r) = 4.822\text{Log}(\text{PGA}) - 12.813$ (4-2 式)	$\text{Log}(Y_r) = 4.390\text{Log}(\text{PGA}) - 11.778$ (4-3 式)
相關係數	0.98	0.81
標準誤差	0.30	0.33

表 4-10 PGV 對應平均紅單率及平均黃單率的關係式、相關係數與標準誤差。

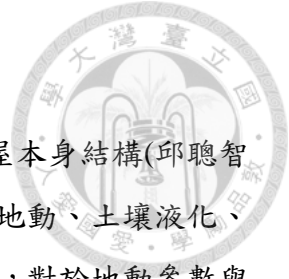
PGV	紅單率	黃單率
關係式	$\text{Log}(R_r) = 1.731\text{Log}(\text{PGV}) - 4.067$ (4-4 式)	$\text{Log}(Y_r) = 0.527\text{Log}(\text{PGV}) - 2.007$ (4-5 式)
相關係數	0.46	0.26
標準誤差	0.36	0.20

表 4-11 PGV 對應平均紅單率原始及新測試結果的關係式、相關係數與標準誤差。

PGV	原始結果	新測試結果(不考慮 PGV 15 cm/s)
關係式	$\text{Log}(R_r) = 1.731\text{Log}(\text{PGV}) - 4.067$ (4-4 式)	$\text{Log}(R_r) = 4.745\text{Log}(\text{PGV}) - 9.122$ (4-6 式)
相關係數	0.46	0.78
標準誤差	0.36	0.45

表 4-12 PGV 對應平均黃單率原始及新測試結果的關係式、相關係數與標準誤差。

PGV	原始結果	新測試結果(不考慮 PGV15 cm/s)
關係式	$\text{Log}(Y_r) = 0.527\text{Log}(\text{PGV}) - 2.007$ (4-5 式)	$\text{Log}(Y_r) = 1.396\text{Log}(\text{PGV}) - 3.465$ (4-7 式)
相關係數	0.26	0.43
標準誤差	0.20	0.24



Chapter 5 研究成果討論

2016 年 2 月 6 日美濃地震造成建築物受損的原因包含房屋本身結構(邱聰智等, 2016), 速度脈衝分布(Kuo et al., 2017; 饒瑞鈞, 2017)、強地動、土壤液化、建築物樓層及房屋年齡皆有關聯。本章節以 4.3 節的結果為依據, 對於地動參數與受損建築物之間的關聯性進行解釋與討論。

5.1 迴歸分析結果

本研究將地動參數與受損建築物的空間分布圖(圖 5-1、圖 5-2)區分兩部份進行探討。其震度對應 PGA、PGV 的關係同樣參考表 4-1、表 4-2。第一部份為震度條件為 6 級以上($PGA \geq 250$ gal、 $PGV \geq 49$ cm/s)對應的災損, 主要位於臺南市東南部。第二部份是震度 6 級以下($PGA \leq 250$ gal、 $PGV \leq 49$ cm/s)對應受損建築物的關係。根據前人研究, 臺南市的東南部(右下)主要以建築物結構的受損為主, 臺南市的西北部(左上)的建築損壞與土壤液化的災害有關(李德河等, 2016)。接下來的小節將針對這兩部份做進一步的討論。

5.1.1 高 PGA、PGV 與災損間的關係

2016 年美濃地震因為場址效應, 造成臺南市許多建築物損壞(Kuo et al., 2017)。本小節首先將受損建築物標於 PGA、PGV 空間分布圖(圖 5-1、圖 5-2)。如圖所示, 可以觀察到多數受損建築物坐落於震度 6 級以上的地區。

震度 6 級以上相當於 PGA 250 gal 以上及 PGV 49 cm/s 以上。根據 4.3 節的表 4-5 與表 4-6, PGA 250 gal 以上的行政區為新市區、龍崎區、關廟區、大內區、山上區、左鎮區、新化區及玉井區, 主要位於臺南市中央至南部或延伸於東南部的區域; PGV 的部份, 表 4-7 及表 4-8 顯示 PGV 大於 49 cm/s 以上的地區為山上區、左鎮區、善化區、新市區以及新化區, 大致位於臺南市中央至南部區域。將這些震度 6 級以上的高 PGA、PGV 區域與 4.2 節紅單率、黃單率的空間分布進行比較, 可以發現在臺南市災損率相對高的區域與高 PGA、PGV 的分布一致。因此推斷這些地區所對應的高災損率, 主要由強地動而導致。

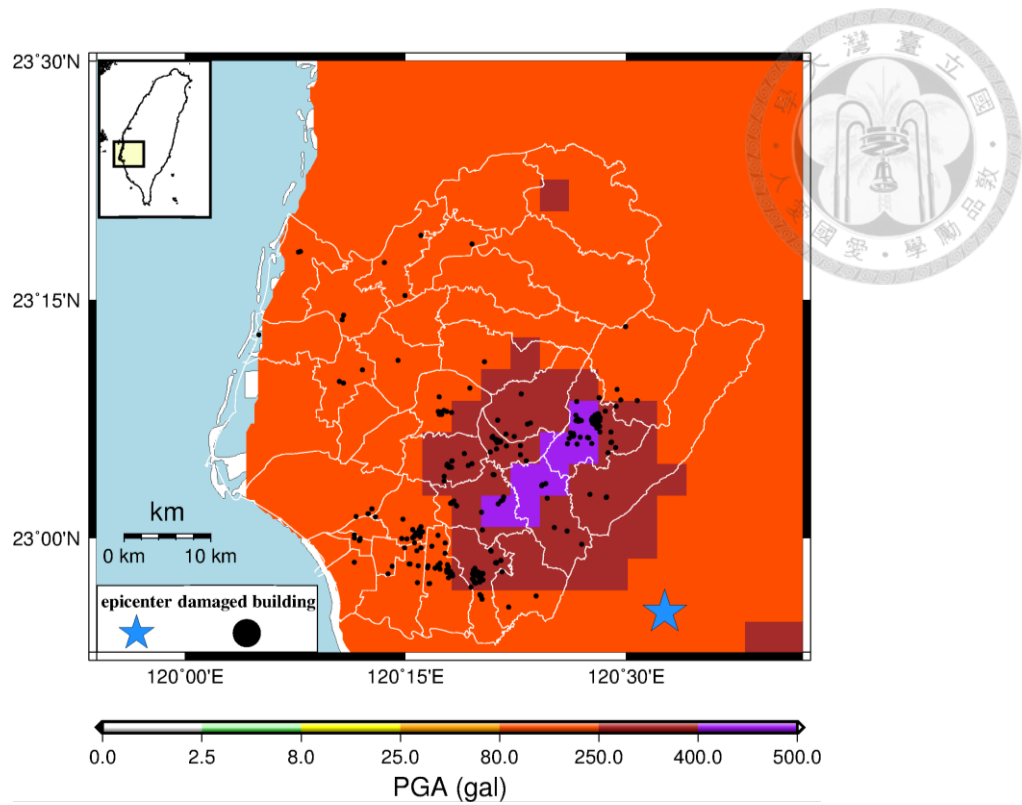


圖 5-1 PGA 與受損建築物的空間分布圖，星號為震央，黑點為受損建築物。

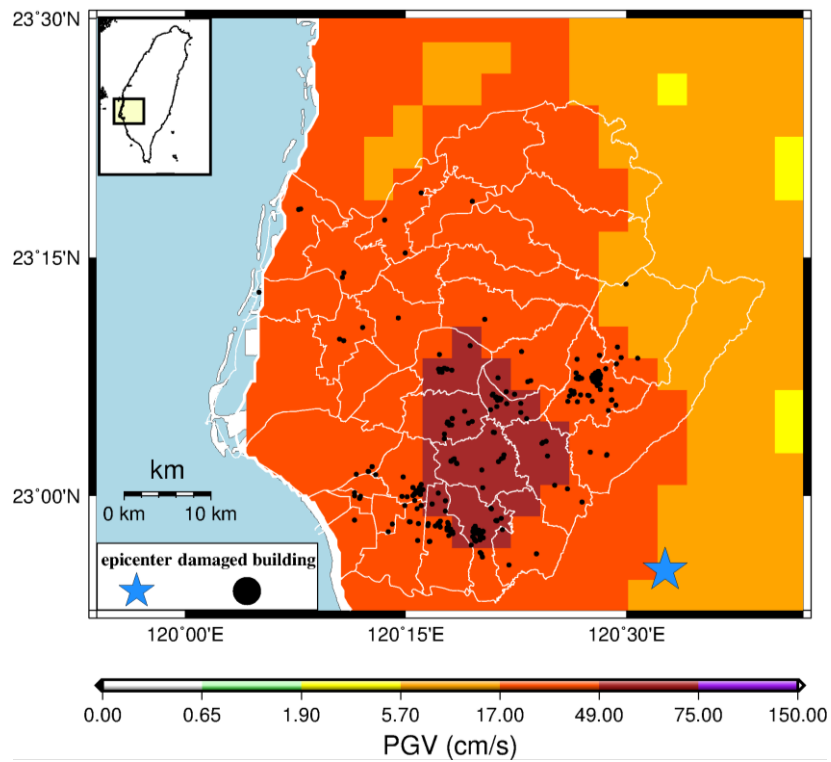


圖 5-2 PGV 與受損建築物的空間分布圖，星號為震央，黑點為受損建築物。



5.1.2 低 PGA、PGV 造成災損的原因

本節探討迴歸分析結果，發現在低 PGA、PGV 對應的區域還是有些許受損建築物，這些地區的 PGA 大約介於 0.2 g(約 196 gal)至 0.25 g(約 245 gal)或者更小(Henry et al., 2017)，進一步檢視造成此現象的因素，其原因可能與土壤液化現象有所關聯。

土壤液化是指地震來臨時，飽和的泥砂因為地動導致排列趨於緊密，此時孔隙水壓會增高而使顆粒彼此被水隔開，形成流沙；地面上的結構彷彿瞬間浮在液體上，發生倒塌的現象(劉聰桂等，2018)。

本研究利用經濟部中央地質調查所的土壤液化潛勢資料(經濟部中央地質調查所，2020)，將潛勢分成高、中、低三種等級，並同時把紅單及黃單的受損建築物位置標示於圖 5-3 中。根據圖 5-3，臺南市西北部的行政區距離震央較遠且 PGA 及 PGV 較低，這些行政區包含北門區、學甲區、鹽水區、將軍區、佳里區、麻豆區、新營區的紅單、黃單建築物幾乎位於中、高潛勢區如藍色方框的區域，顯示這些建築物受土壤液化的影響較大，進而造成受損的情況。除了上述行政區，調查結果也發現紅色圖框的臺南市西南部的行政區，包括安南區、新市區、中西區、北區、永康區、新化區等也有土壤液化的現象發生，其中以新市與安南區土壤液化的災情最嚴重(Lu et al., 2017)。值得一提的是，臺南市西南部地區若比對圖 5-3，不少災損點位於土壤液化低潛勢區域，卻仍觀察到液化現象，例如：安南區，根據前人研究此地發生土壤液化的原因是過去曾經為舊池塘(Hutchinson et al., 2017；Henry et al., 2017；楊炫智等，2017)。在這樣的地質背景條件下，因為高地下水位且土壤結構鬆散而引發災情。

若將上述臺南市西北部與西南部地區參考表 4-5 至表 4-8 行政區所對應的 PGA、PGV 值，除了新市區與新化區之外，多數行政區都對應到較低的 PGA 162.5~225 gal 與 PGV 15~35 cm/s 區間。雖然兩區域的震度相對於臺南市東南部的 PGA、PGV 較低，但是根據前人文獻及調查結果，臺南市的西北部與西南部在本次美濃地震都被觀察到有土壤液化災情的發生。因此土壤液化是低 PGA、PGV 區域，導致建築物受損的原因之一。

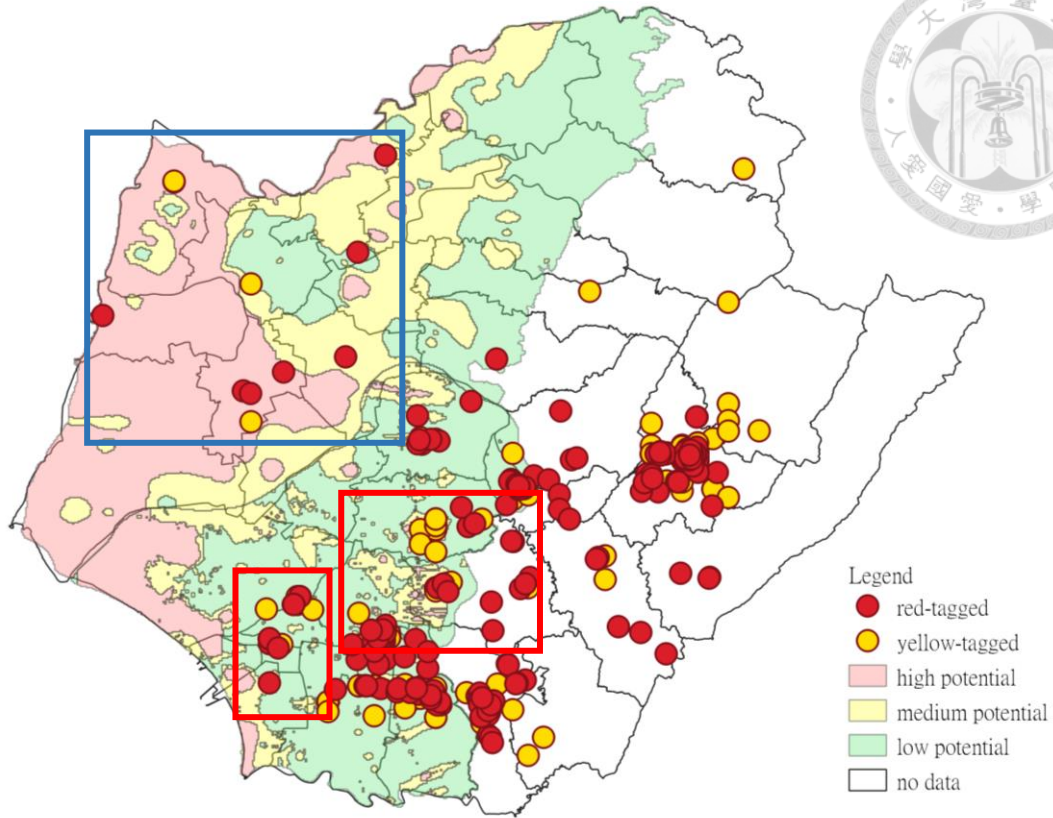


圖 5-3 土壤液化潛勢與受損建築物分布圖，粉紅色代表高潛勢、黃色是中潛勢、綠色為低潛勢區域、白色顯示無潛勢資料，紅、黃點分別表示紅、黃單建築物。藍色方框代表位於臺南市西北部地區受土壤液化影響而建築物受損的區域。除了上述區域之外，臺南市的西南部亦被觀察到土壤液化造成建築損害的現象如紅色方框所示。



5.2 地動參數與災損率相關性

依循第 4-3 節表 4-9 至表 4-12 的結果，PGA 對應紅單率、黃單率的相關係數都明顯地比 PGV 還要大，本章節將針對這個結果的成因，分兩部份討論：

1. 高 PGA 值(250 gal 以上)的影響範圍比高 PGV 值(17 cm/s 以上)更靠近震源。
2. 高 PGA 值分布於老屋(屋齡 30 年以上)占比較高的行政區。

5.2.1 近震源區域的影響

根據第 5.1.1 節，PGA 250 gal 以上的行政區共有 153 件紅單建築物與 255 件黃單建築物，各佔全部紅單建築物與黃單建築物中 56.46%與 71.83%；PGV 49 cm/s 以上的行政區中總共含有 48 件紅單建築物與 40 黃單建築物，分別佔全部紅單建築物與黃單建築物中 17.71% 與 11.27%。

上述資料顯示，以受損建築物的件數來看，震度 6 以上相當於 PGA 250 gal 以上的區域所含的紅單、黃單建築物都佔總數中超過 50% 以上；然而 PGV 49 cm/s 以上的區域卻是不到 20%。若參考 4.2 節紅單率或黃單率空間分布，以災損率的角度觀察，這些災損率高的行政區皆分布於臺南市東南部，剛好與 PGA 250 gal 以上的影響範圍幾乎一致。因此不論是受損建築物的件數或是災損率，PGA 都對應的更為密切。背後因素推測可能是 PGA 250 gal 以上的影響範圍比起 PGV 49 cm/s 以上的區域，更加靠近美濃地震的震源，導致臺南市東南部的建築物相對於其他地區受到地震的影響較大，被強烈的震度破壞。

5.2.2 地動參數與臺南市老屋比例

除了近震源的影響，還可能與地動參數 PGA 250 gal 以上的影響範圍主要落於老屋占比較高的行政區有關。因此本研究參考 2016 年第一季內政部地政司的房屋稅籍住宅類數量依屋齡區分的統計資料，計算臺南市各行政區屋齡 30 年以上的占比，其數據與分布圖分別如表 5-1 及圖 5-4 所示(內政部地政司，2016)。

PGA 250 gal 以上的影響範圍主要分布於臺南市東南部，根據圖 5-4 顯示，本地區屋齡 30 年以上的占比皆超過 50% 以上。當某行政區的房屋之屋齡組成以老房為主時，若承受較大的震度，因為老房子比新房子的耐震較差，建築物有較高的機率被高震度所破壞。除此之外，因為玉井區是臺南市東南部的行政區當中，建築物受損災情最嚴重的地區，所以本研究也參考 2016 年美濃地震玉井區建築物普查暨震損建物資料庫，結果顯示，玉井區的房屋主要建造於民國 64 年~71 年且在本次地震受損的比率最高，相較之下，因為耐震規範的更新，民國 87 年以後建造的房屋損壞率較低(邱聰智等，2016)。因此高 PGA 對應屋齡偏老的區域，可能也是災損率與 PGA 高相關性的其中原因之一。

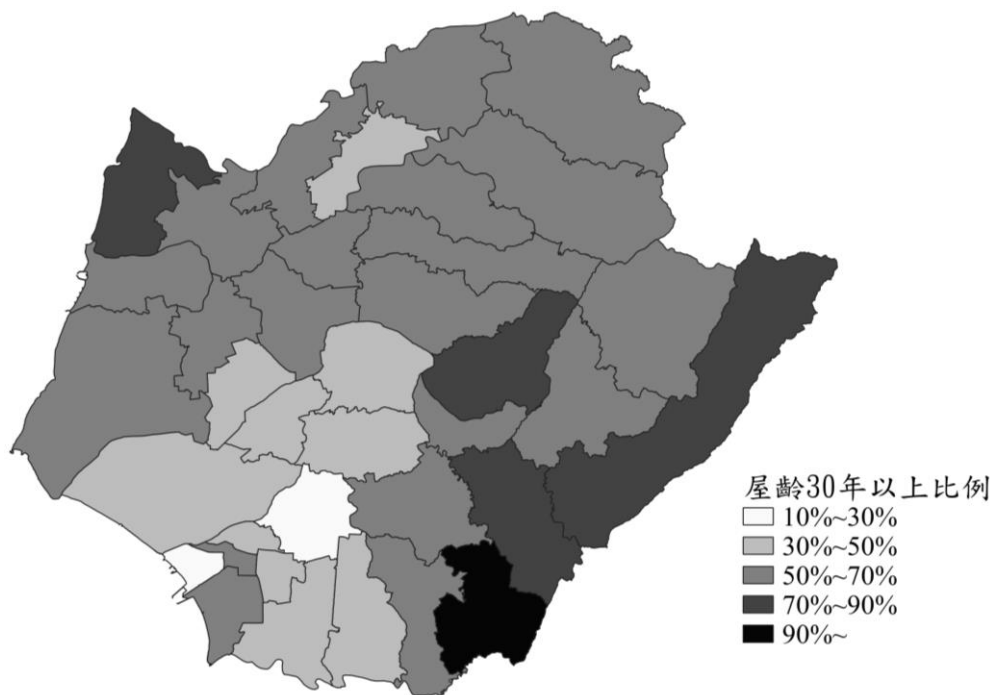


圖 5-4 2016 年第一季臺南市各行政區的老屋(屋齡超過 30 年)占比分布圖，顏色越深表示老屋比例越高。

表 5-1 2016 年第一季臺南市各行政區老屋占比(內政部地政司，2016)。

七股區	下營區	大內區	山上區	中西區	仁德區	六甲區
64.34%	57.04%	71.10%	61.91%	54.06%	40.63%	55.24%
北門區	北區	左鎮區	永康區	玉井區	白河區	安平區
82.26%	45.33%	73.69%	24.08%	60.71%	61.73%	11.23%
安定區	安南區	西港區	佳里區	官田區	東山區	東區
43.15%	39.49%	47.22%	50.12%	54.85%	67.44%	38.12%
南化區	南區	後壁區	柳營區	將軍區	麻豆區	善化區
70.14%	56.99%	63.16%	56.06%	68.96%	52.93%	41.61%
新化區	新市區	新營區	楠西區	學甲區	龍崎區	歸仁區
51.02%	37.18%	44.45%	64.80%	59.17%	91.91%	44.25%
關廟區	鹽水區					
62.67%	51.95%					



5.3 地震波與建築物間的共振關係

除了前幾章提到幾項造成建築物受損的原因，建築物的受損與共振效應亦有關聯。其機制為地震波通過建築物時，若地震波的振動週期與建築物本身自然振動週期相近甚至相同，此時地震波對於建築物影響會加劇，受損的機率也將提高。

關於建築物自然振動週期的計算，1 層樓大約 0.1 秒，若房屋總樓層數為 10 層樓即為 1.0 秒。本研究利用 2.4 節美濃地震受損建築物的樓層調查分類，進一步將美濃地震紅單、黃單、紅單及黃單總和的建築物總樓層數的統計結果依序列於表 5-2、表 5-3 及表 5-4，統計圖則如圖 5-5 所示，其他各行政區詳細的受損建築物總樓層數統計表則列於附錄 B。結果發現，本次地震事件造成的紅單建築物其總樓層數在三層樓以下佔全部總數的 66.8%；黃單建築物則佔總數的 71.0%，也就是說三層樓以下(短週期結構物)佔全部總數中大約七成左右，其對應自然振動週期為 0.3 秒以下，這可能是 PGA 對應這些建築物災損高相關性的主因。

一般建築物對於不同週期地震波的反應則使用加速度反應譜(Spectral Acceleration, SA)方法進行分析。其系統運動方程式為 5-1 式，意義為單自由度的振盪系統中，各頻率對應最大加速度反應。根據內政部建築物耐震設計規範與解說提到，若只單純考慮地震直接對建築物的影響，會將阻尼比(damping ratio, h)設定為 5%，此時長週期及短週期的阻尼修正係數皆為 1.0 (內政部營建署，2011)。本研究參考此規範將阻尼比定為 5%，使用反應譜計算工具程式(Cui, 2018)針對有災損紀錄且同時有佈地震站的行政區，求出每個週期下所對應的最大加速度反應，其結果如圖 5-6 所示。

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -g \quad (5-1 \text{式}), \quad SA = \text{maxium}|g + \ddot{x}|$$

圖 5-6 加速度反應譜較大的響應三分量皆主要集中於短週期，也就是說本次地震事件，地震波對於臺南市區內之短週期結構物有較大的影響，與本研究受損建築物樓層統計以 3 層樓以下的矮樓為主的資料結果一致，表示本次地震事件，矮樓受到地震波的影響大。

由於前面的結果已顯示美濃地震的受損建築物的自然振動週期多為 0.3 秒(含)以下，因此本研究參考前人研究之 SA0.3 分布圖，可以明顯地觀察到高的 SA0.3 值同樣落於臺南市的東南部地區(Lee et al., 2017)。因為玉井區的紅單件數佔總數 29.5%、黃單件數佔總數 56.6%，是 2016 年美濃地震中建築物受損最嚴重的行政

區。所以本章節將以建築物受損件數最多同時亦為災損率最高的玉井區做為代表，列出該區的總樓層數分類統計與加速度反應譜，同時比較國家地震工程研究中心的臺灣規範設計反應譜之建築耐震設計標準，其他有災損紀錄且同時有佈地震站的行政區則附於附錄 C。

根據建築物耐震設計規範與解說之耐震設計基本原則，國家地震工程研究中心的臺灣規範設計反應譜採用兩種，設計地震力與最大考量地震。設計地震力意義代表回歸期 475 年地震或者代表 50 年內超越機率 10%；最大考量地震則是地震回歸週期為 2500 年或 50 年內超越機率為 2%(內政部營建署,2011;饒瑞鈞,2017)。本研究將利用國震中心的工址設計水平加速度反應譜係數 SaD 與工址最大水平加速度反應譜係數 SaM 與本研究 SA 結果進行比較(簡文郁等,2013)。

圖 5-7 與圖 5-8 分別為玉井區的三分量加速度反應譜與總樓層分類統計。根據圖 5-7 玉井區加速度反應譜，週期大約 0.3 秒時，水平分量有一個非常高的加速度反應，接近 1.5 g (1 g = 980 gal)遠超過最大地震設計以及標準地震設計的規範，顯示玉井區之自然振動週期大約 0.3 秒的結構物受到地震波會有非常大的響應。從圖 5-8 的受損建築物的樓層分類結果，玉井區的紅單建築物三層樓以下佔 77.5%、黃單佔 86.6%；十層樓以上不分紅單、黃單皆為 0 件，表示此區三層樓以下建築物的確受到極大的衝擊。因此從反應譜與總樓層分類的統計結果，以美濃地震的案例，加速度的反應與受損建築物樓層具有高度相關性。

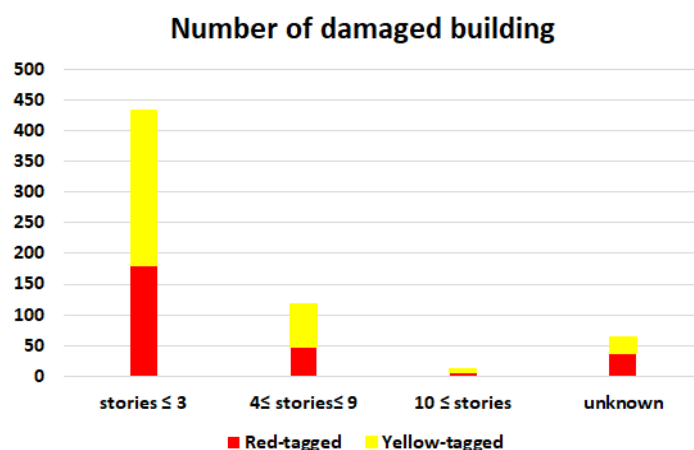


圖 5-5 2016 年美濃地震受損建築物的總樓層數分類統計。

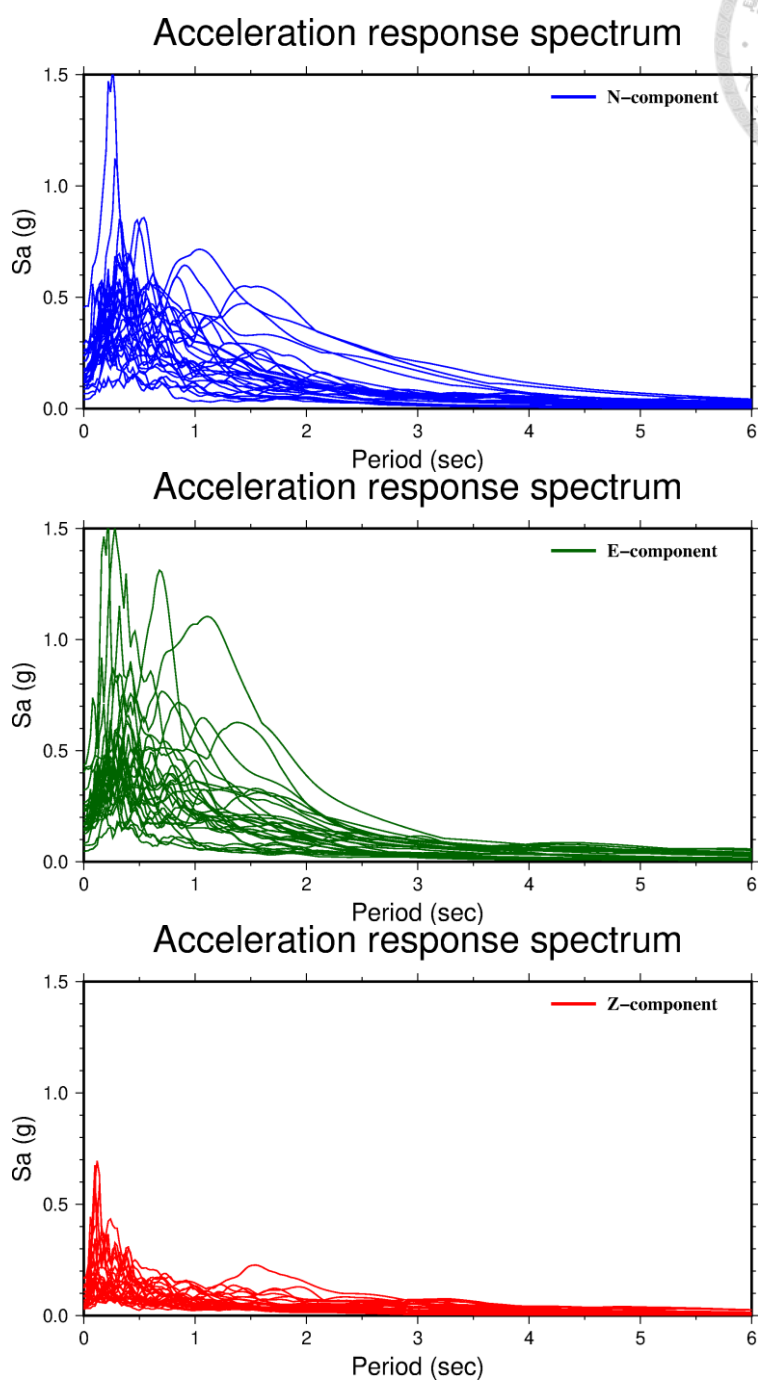
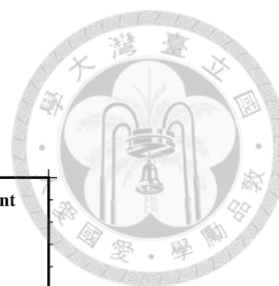


圖 5-6 臺南市地震站之三分量加速度反應譜。藍色表示南北向的水平分量，綠色代表東西向的水平分量，紅色則是垂直向的分量(僅列出有災損紀錄且有佈放地震站的行政區)。其中三分量皆呈現較大的加速度反應主要集中於高頻(短週期)。

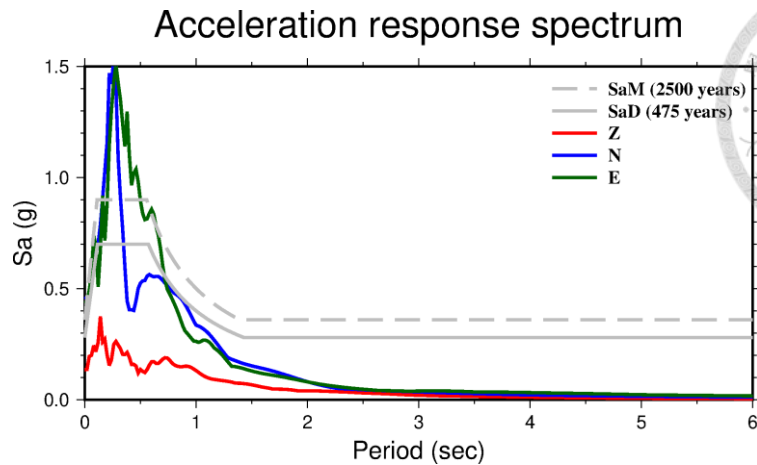


圖 5-7 玉井區三分量加速度反應譜、設計地震力(SaD)與最大地震考量規範(SaM)。

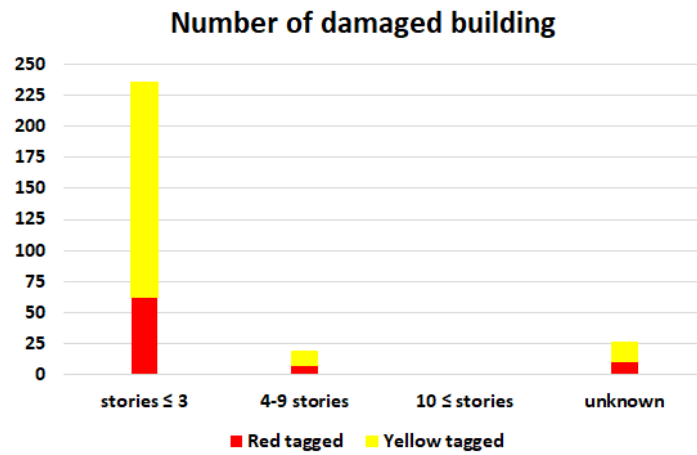


圖 5-8 玉井區受損建築物總樓層數分類統計。

表 5-2 2016 年美濃地震紅單建築物總樓層數分類的數量與百分比。

紅單	三層以下	四層至九層	十層以上	無法確定	總數
數量 (件)	181	48	5	37	271
百分比 (%)	66.8%	17.7%	1.8%	13.7%	100%

表 5-3 2016 年美濃地震黃單建築物總樓層數分類的數量與百分比。

紅單	三層以下	四層至九層	十層以上	無法確定	總數
數量 (件)	252	69	7	27	355
百分比 (%)	71.0%	19.4%	2.0%	7.6%	100%

表 5-4 2016 年美濃地震受損建築物總樓層數分類的數量與百分比。

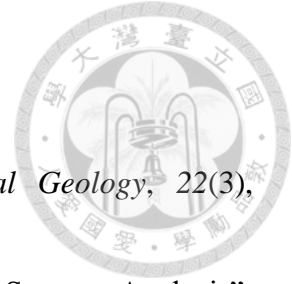
紅單+黃單	三層以下	四層至九層	十層以上	無法確定	總數
數量 (件)	433	117	12	64	626
百分比 (%)	69.2%	18.7%	1.9%	10.2%	100%

Chapter 6 結論

本研究針對 2016 年 2 月 6 日 M_w 6.4 美濃地震的案例，經由迴歸分析建立受損建築物與地動參數關係式並探討兩者的相關性後，得到以下幾點結論：


1. PGA 對應紅單率與黃單率的相關係數分別是 0.98 及 0.81。PGV 則分為兩部份，原始結果 PGV 對應紅單率、黃單率的相關係數依序為 0.42 與 0.26；新測試結果為不考慮 PGV 15 cm/s 時的災損率，此時 PGV 所對應的紅單率、黃單率之相關係數分別為 0.78 與 0.43。根據以上數據，利用本研究方法分析 2016 年美濃地震的案例，PGA 是一個很好指標來估計各行政區建築物的受損災情。
2. 經比對地動參數、地質條件與建築物分布資料後將受損原因主要分為兩種原因。高的 PGA、PGV 值對應的建築物損害與高震度相關；低的 PGA、PGV 值對應的建築物損害，土壤液化可能是致災的原因之一。
3. PGA 與災損率的高度相關性，可能與 PGA 250 gal 以上的影響範圍靠近震源以及分布於老屋(屋齡 30 年以上)占比較高的行政區有關。
4. 本研究計算臺南市有災損分布的行政區之加速度反應譜(SA)，其響應較劇烈的週期大約主要集中於短週期的 0.3 秒，呼應本研究針對 2016 年美濃地震受損建築物總樓層數的調查結果，約 70% 受損建築物為三層樓以下的矮樓房，可能就是 PGA 與災損率高度相關的主要原因。
5. PGV 的穩定性較高，被認為是一個很適合用來評估災情的工具。根據本研究的結果，若受損建築物以矮樓房為主，PGA 會與災損建築物有高度的相關性。因此本研究建議，在未來地震發生時，同時使用 PGA 與 PGV，可以使災情評估工作更加完整。

參考文獻



- [1] Cressie, N. (1990). The origins of kriging. *Mathematical Geology*, 22(3), 239–252.
- [2] Cui, J. D. (2018). “SPECTR – A program for Response Spectra Analysis”. <http://www.jdcui.com/?p=1875>.
- [3] Gilsanz, R., Huang, C., Mandrick, J., Mugford, J., Steficek C., Çelebi, M., & Hwang, S. J. (2016). Learning from the recent Taiwan Meinong earthquake. *In 2016 SEAOC convention proceedings* (pp. 400–408).
- [4] Henry, R. S., Lee, B. Y., McGuigan, D., Finnegan, J., & Ashby, G. (2017). THE 2016 Meinong Taiwan earthquake: Learning from earthquakes report. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 50(3), 436–468.
- [5] Hutchinson, T. C., Clahan, K., Sun, J., Menq, F., & Lo, E. (2017). Important lessons from field reconnaissance following the 2016 Meinong earthquake in southern Taiwan. 12.
- [6] Kanamori, H., Ye, L., Huang, B. S., Huang, H. H., Lee, S. J., Liang, W. T., Lin, Y. Y., Ma, K. F., Wu, Y. M., & Yeh, T. Y. (2017). A strong-motion hot spot of the 2016 Meinong, Taiwan, earthquake ($M_w = 6.4$). *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(5), 637–650.
- [7] Kuo, C. H., Lin, C. M., Huang, J. Y., & Hsu, T. Y. (2017). Strong Ground Motions and Site Amplifications in the Near-source Region of the 2016 M_w 6.5 Meinong Earthquake, Taiwan. *NCREC Research Programs and Accomplishments*, 13-16.
- [8] Lee, S., Yeh, T., & Lin, Y. (2016). Anomalous Large Ground Motion in the 2016 M_L 6.6 Meinong, Taiwan, Earthquake: A Synergy Effect of Source Rupture and Site Amplification. *Seismological Research Letters*, 87(6), 1319–1326.
- [9] Lee, Y. T., Wang, Y. J., Chan, C. H., & Ma, K. F. (2017). The 2016 Meinong earthquake to TEM PSHA2015. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(5), 703–713.
- [10] Lu, C. C., Hwang, J. H., & Hsu, S. Y. (2017). The impact evaluation of soil liquefaction on low-rise building in the Meinong earthquake. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 109.
- [11] Shin, T. C., C. H. Chang, H. C. Pu*, H. W. Lin, and P. L. Leu, 2013: The Geophysical Database Management System in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*,

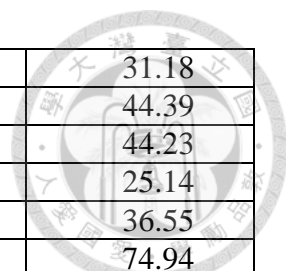
- 24, 11-18.
- [12] Tsai, Y. B. (2001). Spatial Distribution and Age Dependence of Human-Fatality Rates from the Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of 21 September 1999. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 1298–1309.
- [13] Wu, Y. M., Liang, W. T., Mittal, H., Chao, W. A., Lin, C. H., Huang, B. S., & Lin, C. M. (2016). Performance of a Low-Cost Earthquake Early Warning System (P -Alert) during the 2016 M_L 6.4 Meinong (Taiwan) Earthquake. *Seismological Research Letters*, 87(5), 1050–1059.
- [14] Wu, Y. M., Chung, J. K., & Shin, T. C. (1999). Development of an Integrated Earthquake Early Warning System in Taiwan-Case for the Hualien Area Earthquakes. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 10(4), 719.
- [15] Wu, Y. M., Hsiao, N. C., Teng, T. L., & Shin, T. C. (2002). Near Real-Time Seismic Damage Assessment of the Rapid Reporting System. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 13(3), 313.
- [16] Wu, Y. M., Hsiao, N. C., & Teng, T. L. (2004). Relationships between Strong Ground Motion Peak Values and Seismic Loss during the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. *Natural Hazards*, 32(3), 357–373.
- [17] Wu, Y. M., Teng, T. L., Shin, T. C., & Hsiao, N. C. (2003). Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Intensity in Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), 386–396.
- [18] Wu, Y. M., Shin, T. C., & Chang, C. H. (2001). Near Real-Time Mapping of Peak Ground Acceleration and Peak Ground Velocity Following a Strong Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 1218–1228.
- [19] Wu, Y. M., & Kanamori, H. (2005a). Rapid Assessment of Damage Potential of Earthquakes in Taiwan from the Beginning of P Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3), 1181–1185.
- [20] Wu, Y. M., & Kanamori, H. (2005b). Experiment on an Onsite Early Warning Method for the Taiwan Early Warning System. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(1), 347–353.
- [21] Yu, S. B., Kuo, L. C., Punongbayan, R. S., & Ramos, E. G. (1999). GPS observation of crustal deformation in the Taiwan-Luzon Region. *Geophysical Research Letters*, 26(7), 923–926.
- [22] 中央氣象局(2017)，地震百問，交通部中央氣象局，初版。

- 
- [23] 內政部不動產資訊平台(2016)，統計資訊主題查詢-房屋稅籍住宅類數量依屋齡區分，內政部地政司，<https://pip.moi.gov.tw/V3/E/SCRE0402.aspx>。
- [24] 內政部營建署(2011)，建築物耐震設計規範及解說。
- [25] 李德河、蔡百祥、吳建宏(2016)，0206 地震台南土壤液化災區之地層特性，土木水利，第 43 卷第 2 期，第 17-23 頁。
- [26] 邱聰智、涂耀賢、翁樸文、沈文成、李翼安、黃世建、鍾立來、杜怡萱(2016)，0206 美濃地震震損調查系列報告-低矮型私有住宅建物，中華民國第十三屆結構工程研討會暨第三屆地震工程研討會，NO. 2309。
- [27] 邱聰智、黃李暉、翁樸文、何郁姍、王上康、黃世建、鍾立來、葉錦勳(2018)，2016 美濃地震玉井區建築物普查暨震損建物資料庫，國家地震工程研究中心報告，NCREE-18-003。
- [28] 陳建忠、李台光、鄒本駒、周楷峻、葉勇凱、翁樸文、邱聰智、沈文成(2014)，震災後危險建築物緊急評估技術及制度之修訂研究，內政部建築研究所，第一版。
- [29] 楊炫智、盧志杰、游騰瑞(2017)，美濃地震台南地區土壤液化災害與因應對策，技師期刊，第 77 期，第 25-35 頁。
- [30] 經濟部中央地質調查所(2020)，土壤液化潛勢-地質雲加值應用平台，<https://www.geologycloud.tw/map/liquefaction/zh-tw>。
- [31] 臺南市政府資料開放平台(2016)，0206 地震專區紅單、黃單危樓列表，<https://data.tainan.gov.tw/dataset/0206-earthquake>。
- [32] 劉聰桂、傅學海、曾泰琳、胡植慶、陳文山、劉德慶、宋聖榮、吳樂群、蔡金河、郭陳濤、李錫堤、林俊全、洪奕星、陳文福、張竝瑜、顏君毅、劉平妹、張英如、鄧茂華、羅立(2018)，普通地質學上下冊，國立臺灣大學，初版。
- [33] 簡文郁、劉勛仁、張毓文(2013)，臺灣規範反應譜查詢介面(64 位元版)，國家地震工程研究中心，DesignSpectraW64。
- [34] 饒瑞鈞(2017)，2016 年高雄美濃地震-震後科學調查，臺灣地震科學中心。

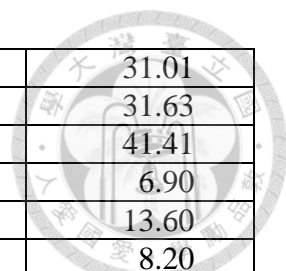
附錄 A 2016 年美濃地震 TSMIP 測站資訊

2016 年美濃地震觸及測站名稱、PGA、PGV、經度與緯度資訊，共 599 筆。

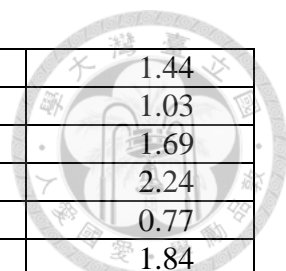
測站名稱	經度	緯度	PGA (gal)	PGV (cm/s)
CHY001	120.25	23.70	100.58	11.47
CHY002	120.42	23.72	102.78	15.92
CHY003	120.54	23.72	73.18	11.09
CHY004	120.18	23.60	112.46	16.23
CHY005	120.42	23.61	227.62	29.76
CHY006	120.56	23.58	159.66	13.61
CHY008	120.28	23.48	193.18	22.40
CHY009	120.42	23.47	188.62	18.33
CHY010	120.55	23.46	85.08	6.08
CHY011	120.65	23.48	157.52	9.12
CHY012	120.16	23.33	131.68	21.19
CHY013	120.27	23.36	170.66	18.38
CHY014	120.59	23.29	185.32	13.90
CHY015	120.41	23.35	262.36	30.50
CHY016	120.16	23.22	221.26	30.42
CHY017	120.28	23.21	210.14	44.15
CHY018	120.40	23.22	227.42	28.78
CHY020	120.16	23.10	174.20	43.84
CHY024	120.62	23.76	79.34	4.63
CHY025	120.52	23.78	171.92	15.94
CHY026	120.42	23.80	103.44	10.80
CHY027	120.25	23.75	103.66	8.79
CHY028	120.62	23.63	244.44	14.42
CHY029	120.54	23.61	86.84	10.59
CHY030	120.48	23.64	102.14	14.19
CHY033	120.22	23.54	136.86	21.22
CHY034	120.55	23.52	156.58	13.68
CHY036	120.49	23.61	124.40	14.79
CHY037	120.43	23.55	271.08	26.07
CHY038	120.46	23.53	239.60	19.95
CHY039	120.35	23.52	219.62	26.43
CHY042	120.59	23.36	92.58	7.81
CHY043	120.34	23.40	214.66	20.61
CHY045	120.67	23.30	82.22	6.33
CHY046	120.47	23.48	183.86	9.96
CHY047	120.46	23.49	279.20	13.48
CHY048	120.45	23.47	136.64	11.94
CHY049	120.37	23.37	189.36	25.30
CHY051	120.47	23.28	215.84	21.70
CHY053	120.36	23.29	177.52	20.97
CHY054	120.32	23.31	200.78	28.17
CHY055	120.28	23.27	167.22	28.47



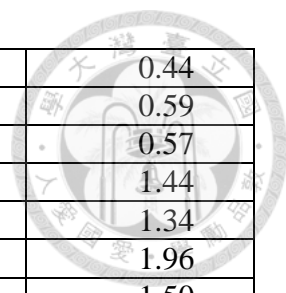
CHY056	120.14	23.26	165.50	31.18
CHY058	120.33	23.17	250.12	44.39
CHY060	120.25	23.12	237.26	44.23
CHY061	120.52	23.07	316.68	25.14
CHY062	120.46	23.12	444.54	36.55
CHY063	120.35	23.03	416.92	74.94
CHY064	120.24	23.00	136.94	38.29
CHY065	120.35	22.90	165.92	32.09
CHY067	120.19	23.00	207.74	37.64
CHY068	120.21	22.99	165.38	3.58
CHY069	120.19	22.97	230.22	43.56
CHY070	120.24	22.96	250.12	52.18
CHY071	120.17	23.06	187.52	42.55
CHY073	120.43	23.50	167.56	18.39
CHY074	120.81	23.51	81.34	6.30
CHY076	120.23	23.64	161.12	14.48
CHY077	120.20	23.17	231.72	28.41
CHY078	120.24	23.04	143.86	31.48
CHY079	120.53	23.19	145.60	8.30
CHY080	120.68	23.60	334.00	39.54
CHY081	120.50	23.26	65.12	7.78
CHY082	120.31	23.72	128.32	10.15
CHY083	120.59	23.72	126.18	11.48
CHY084	120.46	23.73	90.04	14.54
CHY085	120.21	22.99	231.74	36.77
CHY086	120.59	23.35	102.16	8.03
CHY087	120.53	23.38	126.76	7.01
CHY088	120.44	23.34	252.46	26.98
CHY089	120.36	23.08	394.52	64.87
CHY092	120.49	23.79	122.48	12.01
CHY093	120.16	23.65	128.14	14.33
CHY095	120.33	23.46	189.30	12.38
CHY096	120.24	22.98	164.68	28.22
CHY097	120.21	23.01	127.46	33.84
CHY098	120.17	23.00	192.14	45.57
CHY101	120.57	23.68	106.68	11.12
CHY102	120.62	23.24	170.12	14.39
CHY103	120.54	23.70	146.24	13.88
CHY105	120.35	23.55	188.92	24.88
CHY106	120.41	23.44	149.96	22.19
CHY107	120.30	23.30	241.12	29.96
CHY108	120.25	23.19	100.00	22.02
CHY109	120.54	23.25	72.22	8.28
CHY110	120.53	23.25	143.94	6.79
CHY111	120.23	23.79	103.18	7.18
CHY112	120.19	23.70	85.92	11.19
CHY113	120.21	23.42	159.64	18.72



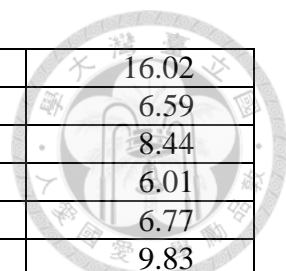
CHY114	120.13	23.04	139.16	31.01
CHY115	120.09	23.15	157.94	31.63
CHY116	120.12	23.08	166.10	41.41
CHY117	120.22	23.80	68.40	6.90
CHY118	120.48	23.18	169.58	13.60
CHY119	120.47	23.47	116.32	8.20
CHY120	120.29	23.46	154.56	13.02
CHY121	120.96	23.49	49.22	3.13
CHY122	120.31	23.32	142.26	20.90
CHY123	120.24	23.48	185.10	22.58
CHY125	120.20	22.98	133.16	45.31
CHY126	120.53	23.69	103.02	12.11
CHY128	120.39	23.29	199.12	21.58
CHY129	120.24	23.29	171.34	16.16
CHY131	120.36	23.12	263.14	52.02
CHY132	120.52	23.46	82.82	6.99
CHY133	120.47	23.53	249.76	20.29
CHY134	120.22	23.35	147.34	15.77
CHY135	120.51	23.29	172.52	14.29
CHY136	120.72	23.63	289.80	24.75
HWA001	121.56	23.79	10.50	0.91
HWA002	121.52	23.60	10.50	1.24
HWA003	121.51	23.48	5.54	0.87
HWA004	121.25	23.17	33.90	2.12
HWA006	121.43	23.67	10.48	1.04
HWA007	121.63	23.99	8.48	1.06
HWA008	121.60	23.99	11.20	1.93
HWA009	121.62	23.99	7.46	0.94
HWA010	121.60	23.98	11.64	1.88
HWA011	121.59	24.00	11.44	1.81
HWA012	121.63	23.99	5.50	1.19
HWA013	121.60	23.98	14.44	1.60
HWA014	121.61	23.97	14.42	2.25
HWA015	121.56	23.97	6.58	0.87
HWA016	121.57	23.96	8.38	0.76
HWA017	121.55	23.95	8.48	0.94
HWA018	121.53	23.90	9.54	1.19
HWA019	121.61	23.98	13.34	1.58
HWA020	121.44	23.81	6.78	0.73
HWA021	121.33	23.50	12.98	0.89
HWA024	121.31	23.35	5.24	0.64
HWA025	121.65	24.16	4.98	0.47
HWA026	121.62	24.12	4.10	0.96
HWA027	121.60	24.05	7.22	0.61
HWA028	121.61	24.01	9.66	1.62
HWA029	121.58	23.94	6.08	1.02
HWA030	121.46	23.78	7.84	0.79



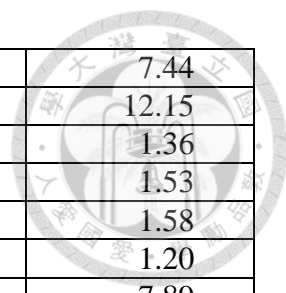
HWA031	121.50	23.76	8.34	1.44
HWA032	121.42	23.71	11.86	1.03
HWA033	121.48	23.68	16.00	1.69
HWA034	121.38	23.59	19.56	2.24
HWA035	121.44	23.73	7.26	0.77
HWA036	121.37	23.50	12.78	1.84
HWA037	121.39	23.45	25.70	2.74
HWA038	121.35	23.46	10.58	1.16
HWA039	121.36	23.38	15.24	1.41
HWA041	121.30	23.26	18.74	1.66
HWA042	121.26	23.22	15.74	1.71
HWA043	121.55	23.71	9.32	0.73
HWA044	121.54	23.65	9.10	1.04
HWA045	121.75	24.31	4.36	0.43
HWA046	121.63	24.15	4.42	0.41
HWA048	121.58	24.01	11.44	1.06
HWA049	121.56	23.99	8.20	0.89
HWA050	121.59	23.99	11.20	1.59
HWA051	121.56	23.87	16.00	2.25
HWA052	121.47	23.82	5.26	0.61
HWA053	121.32	23.41	6.30	0.60
HWA054	121.35	23.43	9.60	1.33
HWA055	121.34	23.32	18.82	2.17
HWA056	121.52	24.18	4.08	0.41
HWA057	121.62	24.16	4.34	0.22
HWA058	121.49	23.97	8.76	0.68
HWA059	121.51	23.87	13.74	1.49
HWA060	121.60	23.90	9.52	0.86
HWA061	121.61	24.02	11.72	1.40
HWA062	121.62	23.98	6.08	1.08
HWA063	121.59	23.99	12.16	1.60
HWA065	121.32	23.33	15.00	1.24
HWA066	121.51	23.48	5.34	0.87
ILA002	121.80	24.84	5.04	1.04
ILA003	121.79	24.80	6.32	1.31
ILA004	121.79	24.74	8.20	2.15
ILA006	121.83	24.64	6.44	0.91
ILA007	121.85	24.59	5.80	0.60
ILA008	121.77	24.71	5.86	1.54
ILA012	121.74	24.78	7.70	1.58
ILA013	121.74	24.73	11.40	1.83
ILA014	121.73	24.69	5.18	0.81
ILA016	121.69	24.75	6.56	1.18
ILA017	121.69	24.72	4.02	0.97
ILA018	121.69	24.68	4.52	0.97
ILA019	121.70	24.64	4.92	0.43
ILA020	121.64	24.75	3.34	0.44



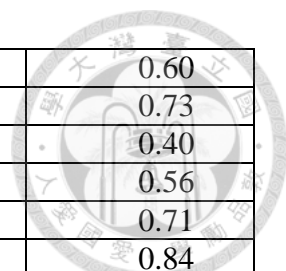
ILA022	121.65	24.67	3.44	0.44
ILA023	121.61	24.68	5.34	0.59
ILA025	121.57	24.64	4.26	0.57
ILA026	121.77	24.67	7.58	1.44
ILA027	121.77	24.69	6.48	1.34
ILA028	121.75	24.75	8.82	1.96
ILA029	121.75	24.77	6.40	1.50
ILA030	121.76	24.73	10.92	1.61
ILA032	121.83	24.62	3.78	0.54
ILA033	121.83	24.86	5.36	0.54
ILA035	121.77	24.82	4.52	0.88
ILA036	121.76	24.79	6.32	1.09
ILA037	121.72	24.74	6.98	1.03
ILA038	121.74	24.72	6.68	1.82
ILA039	121.73	24.76	6.50	0.93
ILA040	121.80	24.77	9.60	2.57
ILA041	121.80	24.72	7.74	1.51
ILA042	121.80	24.69	7.34	1.50
ILA044	121.76	24.65	11.00	2.50
ILA046	121.74	24.66	4.14	0.82
ILA047	121.79	24.64	7.08	1.13
ILA048	121.76	24.77	9.72	1.63
ILA049	121.76	24.76	5.20	1.16
ILA050	121.75	24.43	4.72	0.41
ILA051	121.68	24.72	5.82	0.77
ILA053	121.74	24.33	5.96	0.46
ILA055	121.82	24.74	7.30	1.35
ILA056	121.82	24.76	8.60	1.74
ILA059	121.83	24.67	5.14	0.98
ILA062	121.80	24.47	5.72	0.58
ILA064	121.79	24.48	4.74	0.47
ILA065	121.78	24.47	4.58	0.46
ILA067	121.38	24.44	9.96	0.84
ILA068	121.86	24.60	8.44	0.88
ILA070	121.75	24.75	8.10	1.80
KAU003	120.27	22.63	38.56	2.97
KAU004	120.35	22.63	52.80	6.03
KAU005	120.35	22.62	58.30	0.68
KAU006	120.33	22.59	36.04	0.25
KAU007	120.37	22.64	65.22	5.45
KAU009	120.26	22.87	104.38	14.58
KAU010	120.29	22.79	56.10	10.45
KAU011	120.26	22.76	83.38	9.35
KAU012	120.38	22.88	210.66	21.25
KAU014	120.35	22.70	80.04	8.56
KAU015	120.34	22.65	53.14	6.45
KAU017	120.39	22.51	44.00	6.68



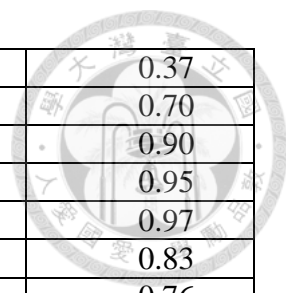
KAU020	120.54	22.90	203.56	16.02
KAU021	120.44	22.75	49.86	6.59
KAU023	120.50	22.68	34.48	8.44
KAU024	120.48	22.66	38.64	6.01
KAU025	120.49	22.68	39.72	6.77
KAU026	120.51	22.70	40.90	9.83
KAU027	120.51	22.66	39.34	8.89
KAU028	120.60	22.83	83.12	4.38
KAU029	120.58	22.75	89.30	6.01
KAU030	120.57	22.61	39.12	5.65
KAU031	120.49	22.58	50.64	6.29
KAU032	120.46	22.54	55.18	15.31
KAU033	120.46	22.46	32.12	0.33
KAU034	120.63	22.53	9.78	1.01
KAU035	120.54	22.55	25.10	5.36
KAU036	120.55	22.47	72.14	8.47
KAU037	120.65	22.26	34.82	4.54
KAU038	120.69	22.19	13.18	1.30
KAU039	120.75	22.10	5.40	0.80
KAU043	120.85	21.91	5.96	0.88
KAU044	120.51	22.44	32.32	6.24
KAU045	120.32	22.57	33.20	5.64
KAU046	120.75	22.00	14.18	2.19
KAU047	120.59	23.08	195.40	17.08
KAU048	120.50	22.72	60.34	13.50
KAU049	120.64	22.74	102.29	41.52
KAU050	120.77	23.16	55.82	4.35
KAU051	120.63	22.37	16.16	2.02
KAU053	120.43	22.82	86.00	9.02
KAU054	120.72	23.28	110.26	5.37
KAU055	120.34	22.58	58.10	4.62
KAU056	120.35	22.56	61.34	5.55
KAU057	120.28	22.64	46.88	4.77
KAU058	120.33	22.65	60.94	7.58
KAU059	120.32	22.73	47.46	4.84
KAU061	120.30	22.64	90.00	7.53
KAU063	120.18	22.90	105.96	20.36
KAU065	120.31	22.75	56.00	6.82
KAU066	120.35	22.73	69.60	8.07
KAU067	120.42	22.66	31.34	4.42
KAU068	120.54	22.98	216.86	12.16
KAU069	120.66	22.89	285.92	8.53
KAU070	120.50	22.78	69.24	4.87
KAU071	120.52	22.65	50.96	5.88
KAU072	120.60	22.67	25.36	2.36
KAU074	120.57	22.57	30.54	4.91
KAU075	120.51	22.49	61.20	10.46



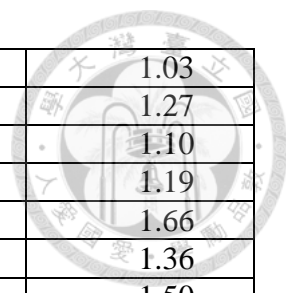
KAU076	120.56	22.43	25.82	7.44
KAU078	120.65	22.71	274.82	12.15
KAU079	120.63	22.59	26.84	1.36
KAU080	120.71	22.06	7.82	1.53
KAU081	120.75	22.01	11.38	1.58
KAU082	120.73	21.94	7.06	1.20
KAU083	120.46	22.56	41.44	7.89
KAU084	120.37	22.35	19.14	3.85
KAU085	120.33	22.88	149.22	21.58
KAU086	120.30	22.79	64.24	8.24
KAU087	120.32	22.61	40.74	4.41
KAU088	120.32	22.64	63.28	0.85
KAU089	120.41	22.48	37.32	0.72
KAU090	120.42	22.59	88.26	6.88
KAU091	120.86	21.90	5.36	1.02
KAU092	120.31	22.55	37.64	6.60
KAU093	120.36	22.59	56.26	6.67
KAU095	120.50	22.68	40.58	10.31
KAU098	120.75	21.96	9.66	1.26
KAU099	120.83	22.08	4.40	0.35
KAU100	120.31	22.59	24.60	5.01
MTN118	121.42	25.13	4.00	0.57
MTN120	121.44	25.08	7.42	1.00
MTN123	121.55	24.93	4.66	0.57
MTN126	121.64	25.01	5.54	0.56
MTN128	121.61	24.51	3.54	0.49
MTN129	121.43	24.49	3.98	0.46
MTN132	121.11	24.58	3.98	0.34
MTN133	121.15	24.63	5.76	0.55
MTN134	121.30	24.58	16.60	1.34
MTN139	121.47	24.65	2.70	0.35
MTN142	121.12	24.78	11.96	1.19
MTN145	121.31	24.18	5.76	0.71
MTN147	121.01	24.20	19.42	0.03
MTN148	120.90	24.17	11.08	0.86
MTN150	120.81	24.23	14.56	0.57
MTN151	120.75	24.19	28.26	0.24
MTN152	121.57	25.00	3.46	0.56
MTN155	120.67	23.07	98.82	5.05
MTN156	120.82	23.25	57.22	2.17
MTN158	120.99	23.25	35.92	2.80
MTN161	121.13	24.02	10.36	0.02
MTN162	121.17	24.09	8.16	1.27
MTN166	121.16	24.12	5.46	0.58
MTN167	121.01	23.96	28.16	1.70
MTN168	121.38	24.19	6.28	0.39
MTN170	120.86	23.77	31.36	2.96



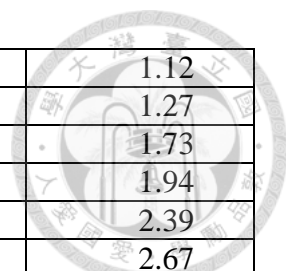
MTN171	121.08	24.00	11.34	0.60
MTN172	121.25	24.24	8.22	0.73
MTN174	121.31	24.38	4.12	0.40
MTN175	121.34	24.37	3.44	0.56
MTN176	120.94	24.47	11.88	0.71
MTN180	120.97	24.39	9.62	0.84
MTN181	121.53	24.54	7.32	0.82
TAP001	121.51	25.04	5.16	0.93
TAP002	121.47	25.13	4.98	0.82
TAP003	121.46	25.09	6.28	1.35
TAP004	121.48	25.11	4.64	1.32
TAP006	121.52	25.09	3.86	0.63
TAP007	121.52	25.07	4.98	0.71
TAP009	121.58	25.08	5.18	0.74
TAP010	121.48	25.07	4.42	0.81
TAP012	121.52	25.05	4.66	0.97
TAP013	121.53	25.06	3.86	1.03
TAP014	121.55	25.06	6.32	1.31
TAP015	121.58	25.05	5.26	0.73
TAP016	121.43	25.06	4.90	0.97
TAP017	121.46	25.05	7.02	1.46
TAP019	121.50	25.04	5.38	1.08
TAP020	121.53	25.04	6.72	1.11
TAP022	121.56	25.03	8.86	1.37
TAP025	121.50	25.02	4.06	0.92
TAP026	121.51	25.01	6.12	1.02
TAP029	121.54	25.01	3.26	0.53
TAP030	121.54	25.00	4.64	0.61
TAP033	121.54	24.98	4.68	0.72
TAP034	121.54	24.95	3.78	0.50
TAP035	121.55	24.92	4.62	0.38
TAP038	121.42	25.02	7.96	1.33
TAP039	121.37	24.93	3.22	0.59
TAP040	121.44	25.17	4.74	0.96
TAP041	121.42	25.18	3.56	0.68
TAP042	121.46	25.13	4.50	0.82
TAP043	121.42	24.99	3.72	0.94
TAP044	121.40	24.97	3.44	0.72
TAP047	121.34	24.95	3.22	0.72
TAP049	121.45	25.15	5.00	0.76
TAP052	121.39	25.08	2.88	0.58
TAP053	121.52	24.96	5.04	0.53
TAP054	121.44	25.00	4.76	1.28
TAP057	121.69	25.08	4.34	0.54
TAP071	121.62	25.00	3.68	0.53
TAP074	121.64	24.95	3.42	0.59
TAP075	121.74	25.03	3.36	0.47



TAP080	121.95	25.02	3.44	0.37
TAP088	121.59	25.04	6.80	0.70
TAP090	121.60	25.06	7.00	0.90
TAP091	121.59	25.06	6.94	0.95
TAP093	121.57	25.08	6.36	0.97
TAP094	121.48	25.14	4.18	0.83
TAP095	121.50	25.13	5.04	0.76
TAP096	121.50	25.12	4.16	0.65
TAP103	121.78	25.07	5.26	0.81
TAP106	121.47	25.13	4.10	0.88
TAP109	121.57	25.04	4.54	0.75
TAP115	121.47	24.99	8.40	1.01
TAP117	121.54	25.01	4.66	0.70
TAP126	121.45	25.00	5.08	0.99
TCU003	121.14	25.05	3.28	0.86
TCU004	121.20	25.06	3.68	0.85
TCU006	121.15	24.91	3.32	1.02
TCU008	121.21	25.01	3.84	0.75
TCU010	121.16	25.00	4.44	0.82
TCU011	121.29	24.88	4.66	0.66
TCU013	121.21	24.86	3.14	0.59
TCU014	121.32	25.04	3.96	0.71
TCU015	120.95	24.76	9.02	1.03
TCU016	120.97	24.81	8.32	1.02
TCU017	121.02	24.78	5.50	0.76
TCU019	120.99	24.90	4.74	0.88
TCU021	121.17	24.79	4.30	0.48
TCU022	120.99	24.77	8.20	0.90
TCU023	121.14	24.72	6.94	0.74
TCU024	121.09	24.73	6.80	0.85
TCU027	121.07	24.83	3.58	0.70
TCU028	121.05	24.70	10.64	0.86
TCU029	120.76	24.56	9.74	1.02
TCU030	120.89	24.59	6.80	0.89
TCU032	120.82	24.52	18.06	1.54
TCU034	120.87	24.64	12.88	1.08
TCU035	120.80	24.61	8.76	1.04
TCU036	120.71	24.45	12.36	2.40
TCU037	120.68	24.49	9.16	1.60
TCU038	120.67	24.49	18.88	1.86
TCU039	120.79	24.49	23.06	2.26
TCU040	120.66	24.45	22.44	2.19
TCU041	120.70	24.39	18.92	1.43
TCU042	120.81	24.55	16.84	1.50
TCU043	120.96	24.69	9.70	0.83
TCU045	120.92	24.54	9.12	0.72
TCU046	120.86	24.47	6.54	0.84

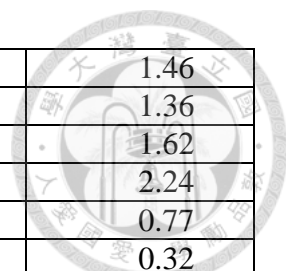


TCU047	120.95	24.62	9.88	1.03
TCU048	120.60	24.18	14.88	1.27
TCU049	120.70	24.18	14.58	1.10
TCU050	120.64	24.18	9.72	1.19
TCU052	120.75	24.20	20.02	1.66
TCU053	120.68	24.19	15.02	1.36
TCU054	120.69	24.16	12.12	1.50
TCU055	120.67	24.14	12.98	1.38
TCU057	120.62	24.17	18.38	1.59
TCU058	120.71	24.25	15.96	1.02
TCU059	120.57	24.27	50.46	4.76
TCU060	120.65	24.22	12.60	1.25
TCU061	120.56	24.13	25.42	2.22
TCU062	120.68	24.12	19.22	2.09
TCU063	120.62	24.11	5.12	0.44
TCU064	120.62	24.34	21.34	1.85
TCU066	120.70	24.21	16.94	1.09
TCU067	120.73	24.09	14.92	1.55
TCU068	120.77	24.28	16.34	1.24
TCU069	120.83	24.26	14.50	1.53
TCU070	120.55	24.20	56.86	0.93
TCU071	120.80	23.98	15.38	1.10
TCU072	120.86	24.04	22.68	2.09
TCU073	120.96	24.01	6.82	0.72
TCU074	120.97	23.96	17.46	1.73
TCU075	120.69	23.98	12.94	1.47
TCU076	120.68	23.91	18.90	1.62
TCU077	120.79	23.83	33.38	2.95
TCU078	120.85	23.81	40.14	1.95
TCU079	120.90	23.84	29.26	2.39
TCU080	120.94	23.90	21.28	1.65
TCU081	121.01	24.83	5.32	0.96
TCU082	120.68	24.15	10.46	1.25
TCU084	120.91	23.88	44.98	4.46
TCU085	121.37	24.67	3.88	0.44
TCU086	120.29	23.86	53.54	5.71
TCU087	120.78	24.35	18.84	1.47
TCU088	121.16	24.25	14.48	0.90
TCU089	120.87	23.91	13.10	1.12
TCU093	120.96	24.85	8.30	0.84
TCU094	121.06	24.77	6.20	0.96
TCU095	121.02	24.69	9.98	0.99
TCU096	120.97	24.79	4.92	0.76
TCU097	120.93	24.79	8.72	0.91
TCU098	120.91	24.74	14.64	1.52
TCU099	120.70	24.14	11.76	1.38
TCU100	120.63	24.18	16.24	1.61



TCU101	120.72	24.24	13.56	1.12
TCU103	120.72	24.31	10.46	1.27
TCU104	120.61	24.24	21.10	1.73
TCU105	120.57	24.24	10.76	1.94
TCU106	120.56	24.08	40.64	2.39
TCU109	120.58	24.08	39.22	2.67
TCU110	120.58	23.96	28.58	3.23
TCU111	120.49	24.11	41.38	3.96
TCU112	120.43	24.06	63.86	6.70
TCU113	120.40	23.89	68.52	6.38
TCU116	120.59	23.86	55.62	4.12
TCU117	120.47	24.13	79.78	5.96
TCU118	120.43	24.00	101.06	10.14
TCU119	120.32	23.92	105.14	8.07
TCU120	120.62	23.98	19.02	1.59
TCU121	120.46	23.89	82.34	9.20
TCU122	120.62	23.81	56.20	4.44
TCU123	120.55	24.02	28.38	3.68
TCU124	120.69	23.91	24.94	2.27
TCU125	120.69	23.95	32.24	3.21
TCU126	120.69	23.76	65.24	4.15
TCU128	120.77	24.41	13.48	1.68
TCU129	120.69	23.88	28.02	2.00
TCU132	120.83	24.57	9.60	1.15
TCU133	120.66	24.13	15.26	1.27
TCU135	120.65	24.33	13.20	1.97
TCU136	120.66	24.26	17.72	1.58
TCU137	120.93	24.18	5.88	0.42
TCU138	120.60	23.92	25.94	2.75
TCU139	120.55	23.92	53.02	4.25
TCU140	120.37	23.96	90.26	7.13
TCU141	120.47	23.83	102.28	10.92
TCU142	120.88	23.98	13.94	1.59
TCU143	120.76	23.88	51.44	4.85
TCU145	120.35	23.98	110.90	8.26
TCU146	120.49	24.16	51.80	4.85
TCU147	121.26	24.86	5.54	1.21
TCU148	120.93	23.95	23.28	1.44
TCU149	120.52	24.26	65.46	7.73
TCU150	120.71	23.89	67.78	4.12
TCU152	120.96	24.81	6.52	0.80
TCU154	120.82	24.54	8.40	1.05
TCU156	120.72	24.26	12.14	1.03
TCU157	120.70	24.04	26.46	2.12
TCU158	120.54	24.06	40.58	3.92
TCU159	120.68	23.91	14.76	1.83
TCU162	120.52	23.88	77.10	6.79

TCU163	121.30	25.00	4.74	0.67
TCU164	121.01	24.83	5.40	1.18
TCU165	120.64	24.13	17.66	1.60
TCU166	120.69	23.88	30.00	2.16
TCU167	120.77	23.66	132.46	14.23
TCU168	121.05	25.01	5.14	0.83
TCU169	120.99	24.40	29.38	0.29
TRB003	120.97	24.80	7.64	0.84
TRB004	120.82	24.57	12.00	1.35
TRB005	120.78	24.61	17.30	1.24
TRB006	120.77	24.42	15.04	1.72
TRB008	120.60	22.37	29.16	5.66
TRB013	121.43	25.00	4.86	1.27
TRB016	120.82	24.59	8.84	0.94
TRB017	120.73	24.26	15.96	1.80
TRB019	120.54	24.08	48.70	4.11
TRB020	120.62	23.81	52.34	4.67
TRB021	120.53	24.07	51.14	4.03
TRB022	120.60	24.30	13.50	1.49
TRB023	120.63	24.34	15.82	2.07
TRB024	120.44	23.48	144.86	11.73
TRB025	120.42	23.46	166.58	19.89
TRB026	120.54	23.71	104.28	14.89
TRB027	120.56	23.72	142.74	14.17
TRB028	120.32	23.31	176.36	26.68
TRB029	120.31	23.14	235.16	60.47
TRB030	120.21	23.00	115.48	30.25
TRB031	120.30	22.78	62.56	9.58
TRB032	120.42	22.65	29.48	4.82
TRB033	121.00	22.62	13.60	1.08
TRB034	121.31	23.33	12.16	1.66
TRB035	121.16	23.05	40.22	5.22
TRB036	121.12	22.79	12.00	1.55
TRB037	120.88	22.35	8.64	0.96
TRB039	121.76	24.75	8.26	1.90
TRB041	121.83	24.60	6.84	0.53
TRB044	121.80	24.46	5.10	0.61
TTN001	121.45	23.32	17.16	2.03
TTN002	121.30	22.97	17.70	1.32
TTN003	121.01	22.62	12.16	0.84
TTN004	121.14	22.91	35.28	4.26
TTN005	121.15	22.75	14.76	2.02
TTN006	121.15	22.77	13.98	1.85
TTN007	121.15	22.76	13.78	2.25
TTN008	121.16	22.76	17.08	2.44
TTN010	121.12	22.74	23.22	1.75
TTN011	121.12	22.78	20.82	1.38



TTN012	121.14	22.76	12.82	1.46
TTN013	121.14	22.77	10.18	1.36
TTN014	121.37	23.10	13.88	1.62
TTN015	121.15	22.75	17.02	2.24
TTN016	120.90	22.36	6.44	0.77
TTN017	121.56	22.04	5.62	0.32
TTN018	121.08	22.82	22.20	2.21
TTN020	121.21	23.13	16.38	1.73
TTN021	121.18	23.10	13.80	1.31
TTN022	121.22	23.10	22.10	2.22
TTN023	121.16	23.05	44.56	5.33
TTN024	121.12	22.97	22.78	2.22
TTN025	121.08	22.90	33.90	2.29
TTN026	121.09	22.86	31.30	2.41
TTN027	121.09	22.81	37.68	2.55
TTN028	121.06	22.78	17.92	1.54
TTN029	121.05	22.72	11.20	0.84
TTN031	121.47	23.36	11.76	1.26
TTN032	121.41	23.24	15.28	1.17
TTN033	121.40	23.19	5.18	0.91
TTN034	121.25	22.90	19.28	1.60
TTN035	121.23	22.88	19.66	1.84
TTN036	121.19	22.80	10.36	1.26
TTN037	120.97	22.53	15.88	0.96
TTN038	120.94	22.46	9.40	0.66
TTN040	121.21	23.15	10.00	0.85
TTN041	121.13	23.13	40.46	2.37
TTN042	121.29	23.00	23.94	1.97
TTN043	121.33	23.03	16.70	1.50
TTN044	121.17	23.01	30.38	3.74
TTN045	121.16	22.97	15.64	1.97
TTN046	121.24	22.96	15.16	1.25
TTN047	121.14	22.84	20.60	1.53
TTN048	121.09	22.77	21.88	1.57
TTN049	121.11	22.73	17.70	1.51
TTN050	121.04	22.67	15.84	1.13
TTN051	121.03	23.19	14.92	1.52
TTN052	120.96	22.60	22.72	1.52
TTN053	120.86	22.38	10.20	1.09
TTN056	121.15	22.76	12.84	1.92

附錄 B 2016 年美濃地震受損建築物樓層統計

2016 年美濃地震紅單受損建築物總樓層數分類統計表

區域	3 層以下	4~10 層	10 層以上	無法確定	總數
仁德區	3	11	0	0	14
新化區	10	0	1	2	13
大內區	4	0	0	1	5
東區	13	0	1	0	14
中西區	13	0	1	0	14
安南區	5	0	0	0	5
南區	0	0	0	2	2
山上區	18	0	0	2	20
北門區	0	0	0	0	0
左鎮區	3	1	0	1	5
永康區	9	3	1	4	17
玉井區	62	7	0	11	80
佳里區	2	1	0	0	3
官田區	1	0	0	0	1
南化區	3	0	0	0	3
將軍區	0	1	0	0	1
麻豆區	0	1	0	0	1
善化區	4	2	0	1	7
新市區	3	0	0	0	3
新營區	0	0	0	0	0
楠西區	0	0	0	0	0
學甲區	0	0	0	0	0
龍崎區	0	0	0	0	0
歸仁區	11	20	1	2	34
關廟區	15	1	0	11	27
鹽水區	2	0	0	0	2
總件數	181	48	5	37	271
比例	66.79%	17.71%	1.85%	13.65%	100%

2016年美濃地震黃單受損建築物總樓層數分類統計表

區域	3層以下	4~10層	10層以上	無法確定	總數
仁德區	1	8	0	0	9
新化區	9	0	0	0	9
大內區	1	0	0	0	1
東區	0	16	0	0	16
中西區	1	0	0	0	1
安南區	3	0	0	0	3
南區	0	0	0	0	0
山上區	7	0	0	0	7
北門區	2	0	0	0	2
左鎮區	2	0	0	0	2
永康區	11	6	0	4	21
玉井區	174	12	0	15	201
佳里區	0	0	0	0	0
官田區	0	0	0	0	0
南化區	0	0	0	0	0
將軍區	0	0	0	0	0
麻豆區	0	0	0	0	0
善化區	2	0	0	0	2
新市區	17	1	0	2	20
新營區	1	0	0	0	1
楠西區	5	0	0	1	6
學甲區	1	0	0	1	2
龍崎區	2	0	0	1	3
歸仁區	3	25	7	1	36
關廟區	9	1	0	2	12
鹽水區	1	0	0	0	1
總件數	252	69	7	27	355
比例	70.99%	19.44%	1.97%	7.60%	100%

附錄 C 各行政區 SA、耐震規範與總樓層數分類統計圖

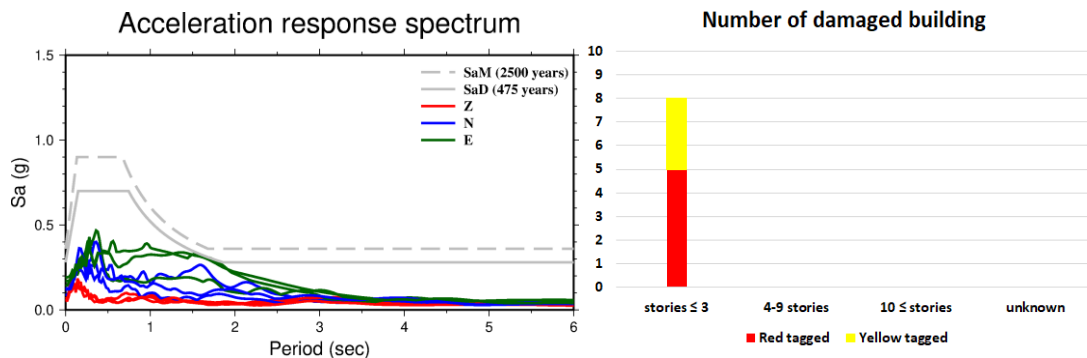
本附錄列出臺南市具有建築物災損且有測站分布的行政區之加速度反應譜、總樓層數分類統計與各地盤類型的建築耐震規範設計反應譜(簡文郁等, 2013)。由於臺南市有些行政區所佈放測站不止一站而且還位處不同類型的地盤, 其耐震規範設計反應譜會因為地盤類型的不同而有所調整。因此本附錄參考全國強震測站場址工程地質資料庫中的 V_{s30} , 依照內政部建築物耐震設計規範與解說, 將各行政區測站所有地盤類型的耐震規範設計反應譜皆列出, 其地盤類型、地盤軟硬程度與 V_{s30} 對照表的標準如下(內政部營建署, 2011):

地盤類型、地盤軟硬程度與 V_{s30} 對照表

地盤類型	地盤軟硬程度	V_{s30} (m/s)
第一類地盤	堅實地盤	$V_{s30} \geq 270$ m/s
第二類地盤	普通地盤	$270 \text{ m/s} \geq V_{s30} \geq 180$ m/s
第三類地盤	軟弱地盤	$180 \text{ m/s} \geq V_{s30}$

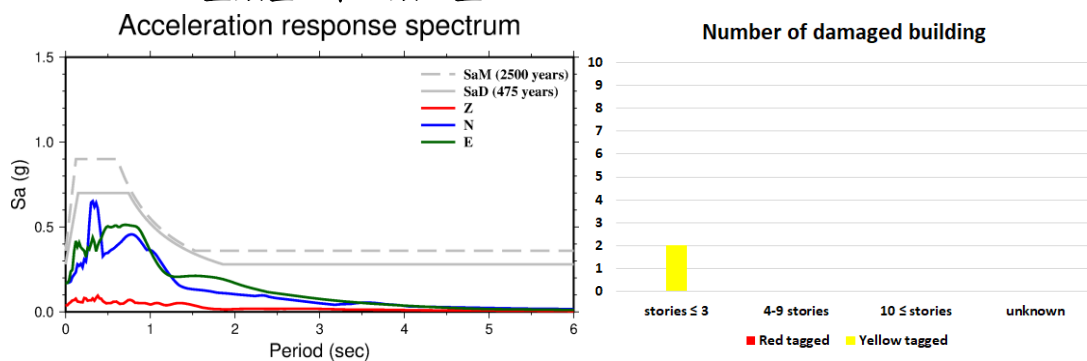
▲ 安南區

地盤類型: 第二類地盤



▲ 北門區

地盤類型: 第二類地盤

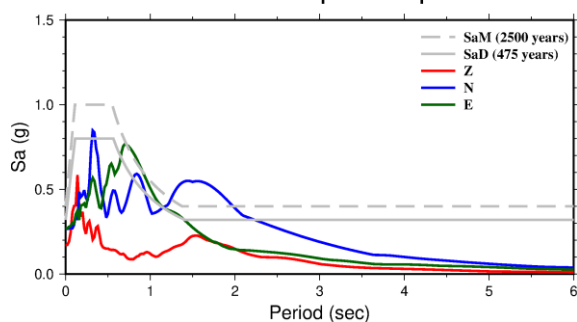




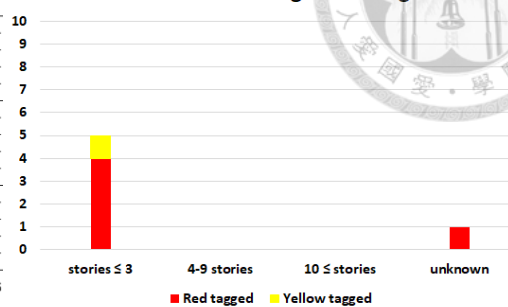
▲ 大內區

地盤類型：第一類地盤

Acceleration response spectrum



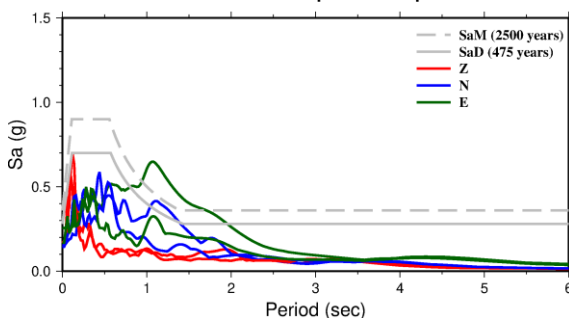
Number of damaged building



▲ 東區

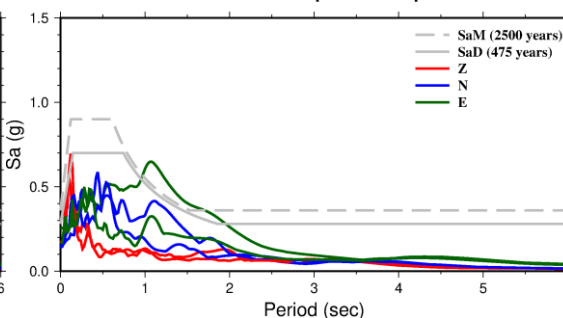
地盤類型：第一類地盤

Acceleration response spectrum

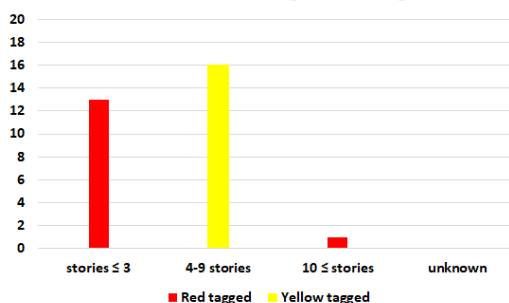


地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum



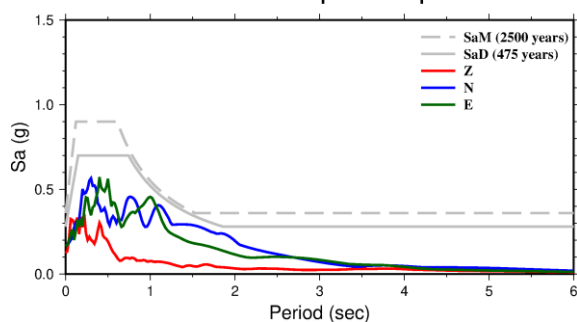
Number of damaged building



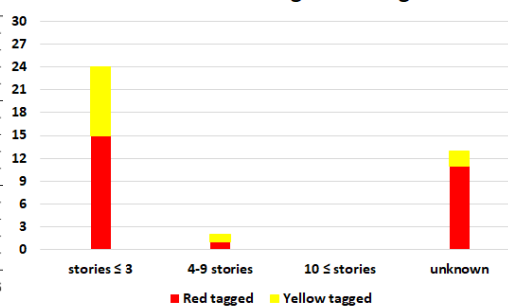
▲ 關廟區

地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum



Number of damaged building

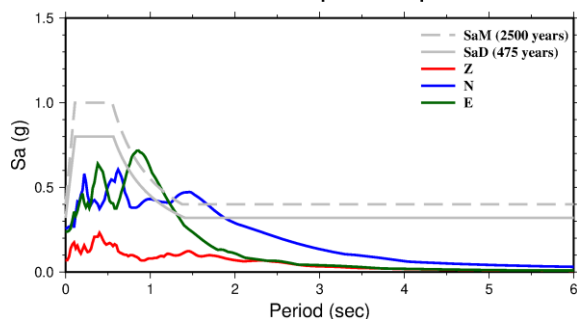




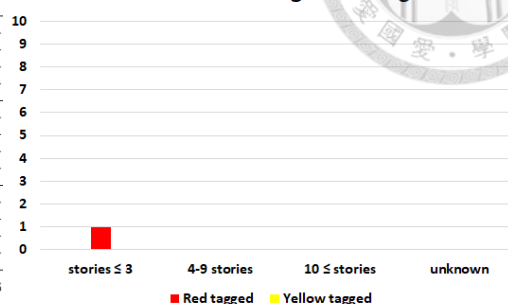
▲ 官田區

地盤類型：第一類地盤

Acceleration response spectrum



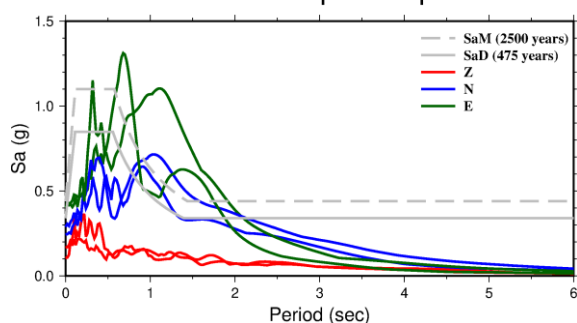
Number of damaged building



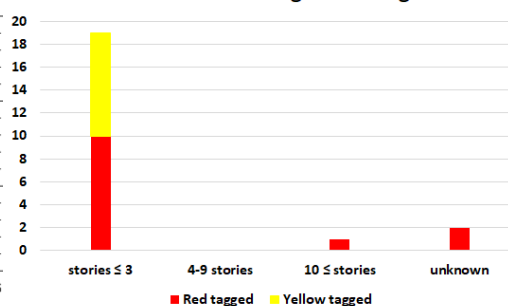
▲ 新化區

地盤類型：第一類地盤

Acceleration response spectrum



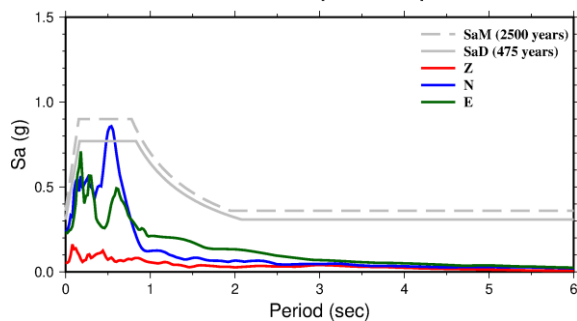
Number of damaged building



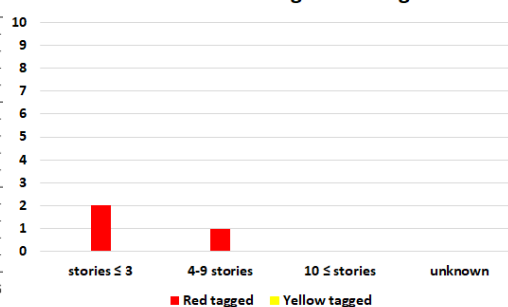
▲ 佳里區

地盤類型：第三類地盤

Acceleration response spectrum



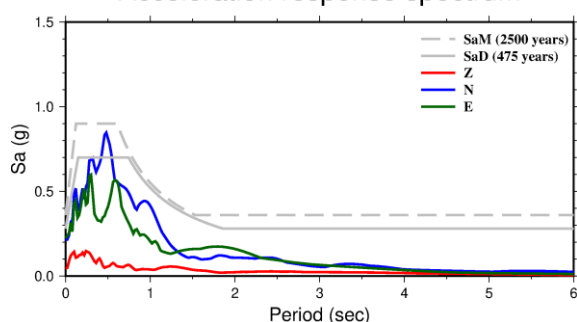
Number of damaged building



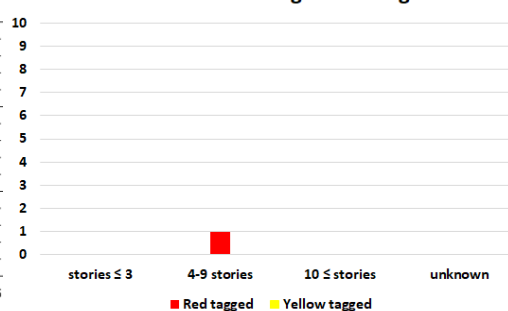
▲ 將軍區

地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum



Number of damaged building

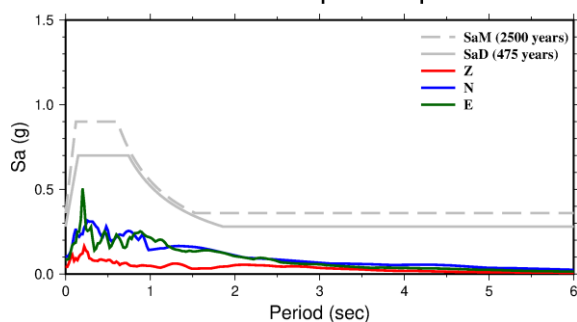




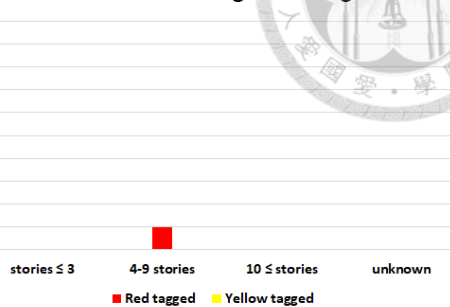
▲ 麻豆區

地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum



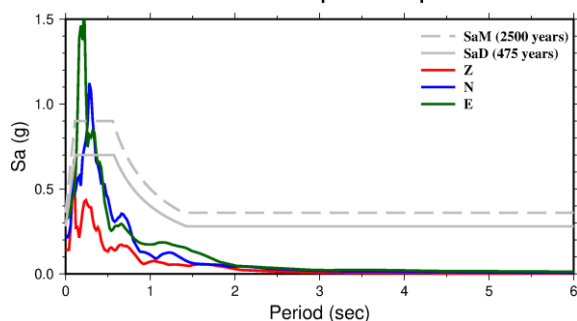
Number of damaged building



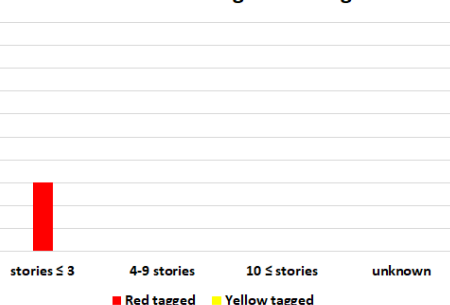
▲ 南化區

地盤類型：第一類地盤

Acceleration response spectrum



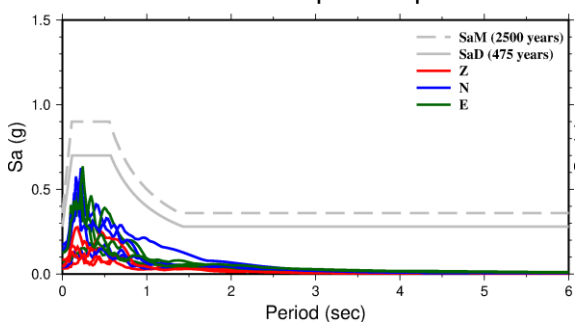
Number of damaged building



▲ 楠西區

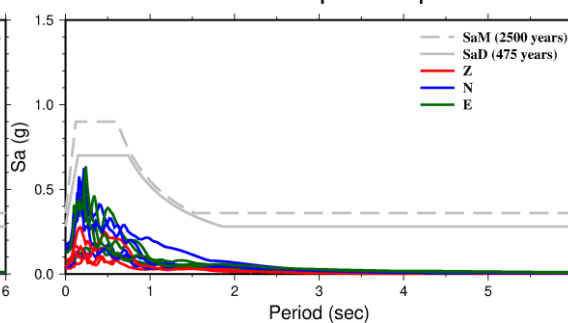
地盤類型：第一類地盤

Acceleration response spectrum

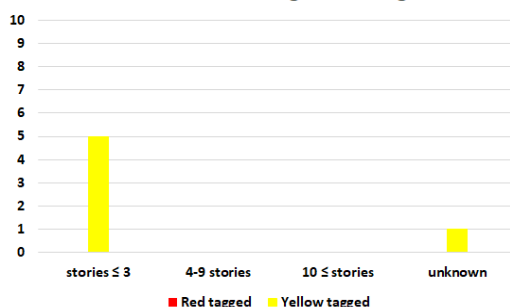


地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum



Number of damaged building

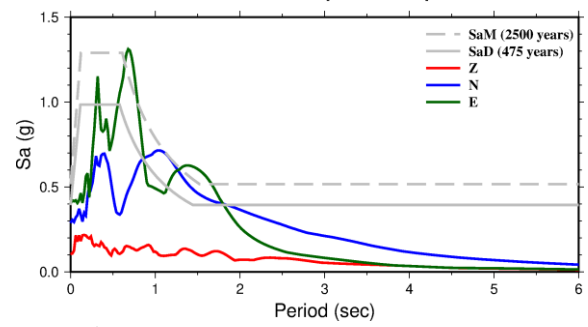




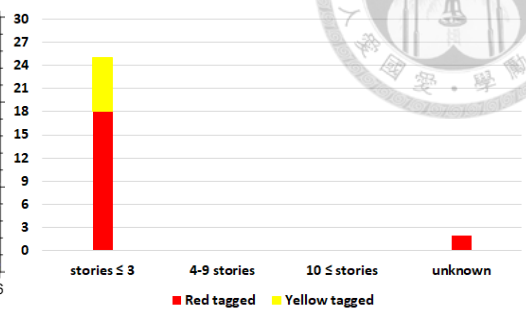
▲ 山上區

地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum



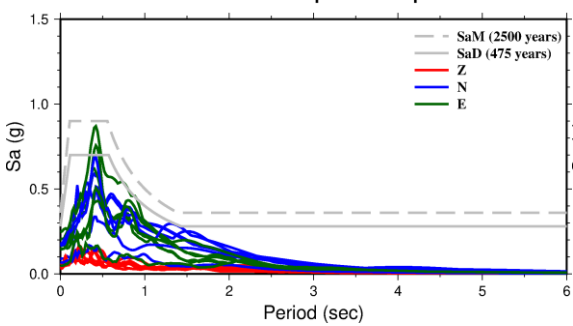
Number of damaged building



▲ 新營區

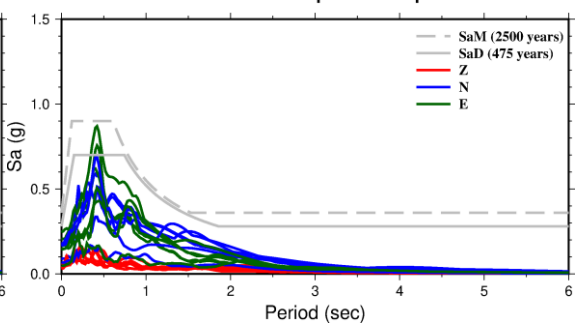
地盤類型：第一類地盤

Acceleration response spectrum



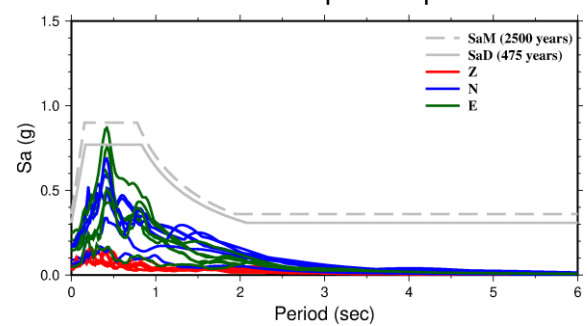
地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum

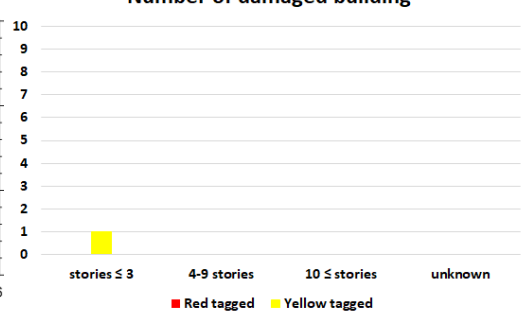


地盤類型：第三類地盤

Acceleration response spectrum



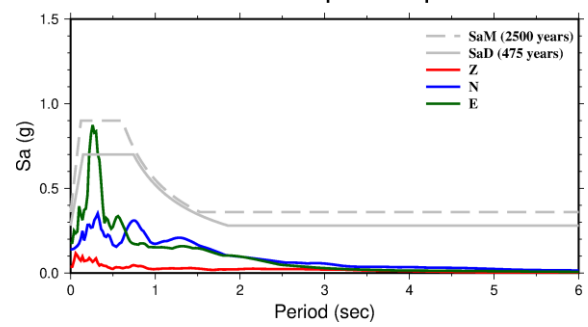
Number of damaged building



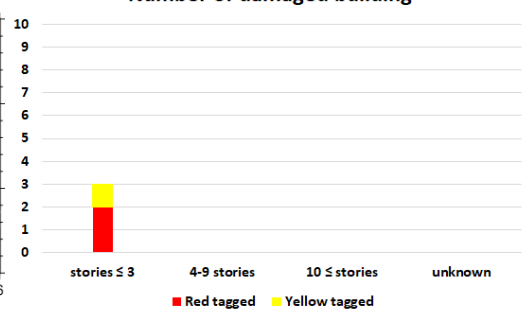
▲ 鹽水區

地盤類型：第二類地盤

Acceleration response spectrum

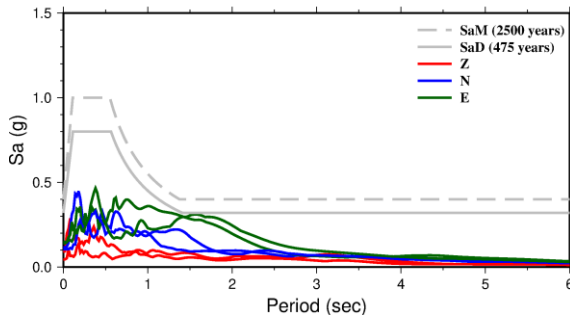


Number of damaged building

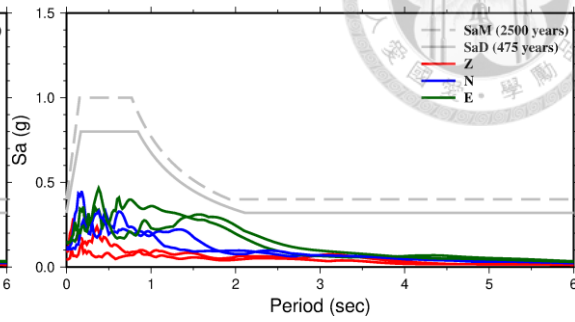


▲ 永康區

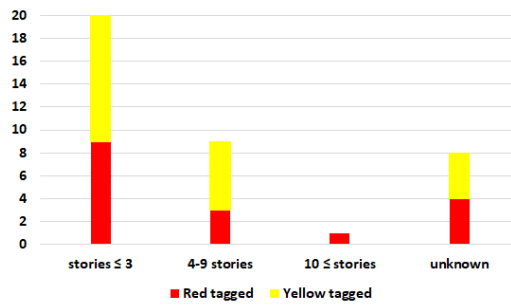
地盤類型：第一類地盤
Acceleration response spectrum



地盤類型：第三類地盤
Acceleration response spectrum



Number of damaged building



附錄 D 臺南市各行政區的位置圖

