

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's Thesis



P-Alert 系統於結構物健康監測之評估與應用

An Evaluation of the P-Alert System
in Structural Health Monitoring and its application

黃曼晟

Min-Cheng Huang

指導教授：吳逸民 博士
黃尹男 博士
張家銘 博士

Advisor: Yih-Min Wu, Ph.D.
Yin-Nan Huang, Ph.D.
Chia-Ming Chang, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025



國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

P-Alert 系統於結構物健康監測之評估與應用

An Evaluation of the P-Alert System

in Structural Health Monitoring and its application

本論文係黃旻晟（R12224202）在國立臺灣大學地質科學研究所完成之碩士學位論文，於民國 114 年 7 月 9 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Graduate Institute of Geosciences, National Taiwan University on 9 July 2025 have examined a Master's Thesis entitled above presented by Min-Cheng Huang (student ID: R12224202) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

吳逸民 黃尹男 張家銘
(指導教授 Advisor)
周中哲 許丁友

系（所、學位學程）主管 Director: _____

誌謝



時光飛逝，轉眼間，兩年的研究所求學旅程即將劃下句點。回首這段旅程，彷彿是一場 42 公里的馬拉松，我帶著滿懷的期待與熱忱出發，沿途雖有辛勞，卻也獲得無數人的鼓舞與支持。正因如此，即使到了最後一哩路，我依然能堅持初衷，勇敢前行。

首先，我要感謝我的指導教授吳逸民老師。謝謝老師給予我在研究題目上的高度自由，讓我能依興趣探索，並在每次討論中都給予我肯定與鼓勵，這對我而言是莫大的支持。

同時也誠摯感謝兩位共同指導教授黃尹男老師與張家銘老師，您們是我研究路上的兩大貴人。由於我非土木工程背景出身，大學期間也未曾修習結構力學等相關課程，然而在碩一時，兩位老師不吝提供學習資源與研究建議，使我能逐步累積基礎，並從中培養出對土木工程的濃厚興趣。這份啟發讓我在研究過程中投入更多心力，孜孜不倦地學習，只希望能不負老師的期望。

感謝口試委員許丁友老師與周中哲老師在百忙之中撥冗出席，並提供許多寶貴的建議與指導。特別感謝許丁友老師，願意分享先前 P-Alert 相關的振動台試驗原始資料，讓我的研究架構更加完整。同時，也感謝中央氣象署地物資料中心提供完整的強震自由場訊號，使本研究得以進行更深入的分析。

我也要感謝我的家人，不僅在經濟上給予支持，更在精神層面上時常關心我的狀態。雖然他們總是擔心我壓力太大，但其實我過得很快樂、也很充實。感謝研究所期間認識的所有朋友與同學，謝謝你們陪我一起討論各種有趣的研究議題，讓這段旅程充滿回憶與啟發。此外，特別感謝我的男友，在我奮力前行的日子裡，既是我的英文小老師，也是我情緒的垃圾桶，謝謝你一路陪伴，讓我得以順利完成論文。

最後，我想把這篇論文獻給我在高中時，因維冠大樓倒塌而離世的同學們。是你們讓我深刻體會到結構物健康監測的重要性。我期盼這份研究能為社會帶來些許貢獻，在未來每一次地震來臨時，降低災難的發生，守護更多的生命。

中文摘要



臺灣位於歐亞板塊及菲律賓海板塊交界，地震頻繁，若強震事件發生時可能導致房屋倒塌、結構物受損等影響，因此結構物健康監測逐漸受到重視。然而，傳統結構物健康監測因為硬體設施和實驗成本高昂，不易全面推廣至民間。為了解決此問題，本研究採用國立臺灣大學 P-Alert 地震預警系統，透過 P-Alert 儀器成本較低的優勢，評估其地震儀在結構物健康監測的可行性。過去研究中，透過振動台實驗已證實 P-Alert 可利用易損性曲線分析結構物損傷程度，並在分析層間位移時需使用互相關分析進行時間校正。本研究進一步測試，P-Alert 與高精度加速度儀 Setra 在層間位移與模態振形(Mode shape)上的表現，結果顯示 P-Alert 識別出來的結果與 Setra 相符。

此外，本研究亦分析不同類型建物，包括 P-Alert 單站型結構物、P-Alert 多站型結構物以及中央氣象署結構物陣列。並透過不同樓層對地面測站反卷積，求得結構物基本模態。在預估層間位移方面，使用雙重積分法將加速度資料轉換成位移資料，計算出各樓層的層間位移角。在強度測量(Intensity Measure)的參數分析中，則採用最大地表加速度、加速度反應譜進行分析。

研究結果顯示，P-Alert 單站型結構物中， $PGA \geq 80 \text{ gal}$ 才能穩定識別結構物基本模態；在 P-Alert 多站型結構物與中央氣象署結構物陣列分析中則發現：(1) 利用結構物基礎模態的變化，可以快速識別損傷程度。(2)在強度參數分析中，P-Alert 與中央氣象署結構物陣列所測得最大地表加速度、加速度反應譜皆呈現線性關係。(3) 在強度測量參數相同下，結構物振動週期越長，層間位移越大。(4)層間位移角的變化可以快速識別結構物損傷狀態。綜合以上分析結果，P-Alert 不僅在振動台測試結果與高精度加速度儀 Setra 相符外，透過中央氣象署結構物陣列的比較，顯示其在強度測量上的可靠性。另一方面，基本模態與層間位移角的變化，P-Alert 能夠快速識別結構物損傷程度，展現出其系統在結構物健康監測中的應用潛力。

關鍵字：結構物健康監測、強度測量、反卷積、雙重積分法、層間位移



ABSTRACT



Taiwan is located at the junction of the Eurasian Plate and the Philippine Sea Plate, where earthquakes are frequent, and strong earthquakes may lead to house collapses, structural damage, and other impacts, so structural health monitoring is gradually being emphasized. However, due to the high cost of hardware facilities and experiments, it is not easy to fully promote traditional structural health monitoring in the community. In order to solve this problem, this study adopted the P-Alert system developed by the National Taiwan University, and evaluated the feasibility of the P-Alert system for structural health monitoring (SHM) by taking advantage of its lower cost. A previous study demonstrated that P-Alert can analyze structural damage by using damage curves, but time correction using cross-correlation is required to analyze inter-story drift. In this study, the performance of P-Alert and the high-precision accelerometer Setra on inter-story drift and mode shape was further tested, and the results showed that P-Alert recognized the same results as Setra.

In addition, different types of buildings are analyzed, including P-Alert single station structures, P-Alert multiple station structures, and the Central Weather Administration (CWA) building array. The fundamental mode of the structure is calculated by deconvolution, and the inter-story drift and inter-story drift ratio angle are predicted by double integration method. In the parameter analysis of Intensity measure (IM), the peak ground acceleration (PGA) and response spectral acceleration (Sa) are used. The results showed that in P-Alert single-station structures, PGA needs to be higher than 50 gal to recognize the fundamental mode of the structure stably; in the analysis of P-Alert multiple-station structures and building arrays, the findings include: 1. The frequency of the fundamental mode decreases when the structure is damaged. 2. P-Alert showed a

linear relationship with both PGA and Sa (T1) as measured by the building array. 3. With the same IM parameters, the longer the vibration period of the structure, the larger the inter-story drift. 4. The Variety of inter-story drift ratios can immediately recognize the status of structural damage.

In summary, P-Alert not only matches the results of the vibration test with the high-precision accelerometer Setra, but also demonstrates the reliability of the strength measurements by comparing the building array of the Central Weather Administration. On the other hand, with the change of basic mode and inter-story drift ratio angle, P-Alert can expeditiously recognize the damage level of the structure, which demonstrates the potential application of its system in structural health monitoring.

Keywords: Structural Health Monitoring, Intensity measure, Deconvolution, Double integration method, Inter-story drift.

目次



口試委員會審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	iii
ABSTRACT	v
目次	vii
圖次	xi
表次	xvii
Chapter 1 緒論.....	1
1.1 前言與研究動機	1
1.2 研究內容	1
Chapter 2 文獻回顧.....	3
2.1 新一代地震儀預警系統在結構物監測之應用	3
2.1.1 P-Alert 在地震預警之應用	3
2.1.2 振動台實驗	4
2.2 結構物健康監測	10
2.2.1 結構物基礎模態	10
2.2.2 預估層間位移	12
2.2.3 結構物強度測量	14
Chapter 3 研究方法.....	17
3.1 資料預處理	17
3.1.1 P-Alert 資料預處理	17



3.1.2 Building array 資料預處理.....	18
3.2 結構物基本模態	19
3.2.1 單站型結構物：反卷積法	19
3.2.2 多測站結構物：反卷積法	21
3.3 結構物層間位移	23
3.3.1 低頻衰減法(low-frequency attenuation, LFA).....	24
3.3.2 最小平方法	24
3.3.3 層間位移角	26
3.4 結構物強度測量	27
Chapter 4 結構物基本資訊	29
4.1 地震預警系統觀測網 (P-Alert)	29
4.1.1 單站型結構物資訊.....	29
4.1.2 多站型結構物資訊.....	32
4.2 中央氣象署結構物觀測陣列 (CWABA)	34
4.3 振動台實驗	39
Chapter 5 結果與討論	43
5.1 P-Alert 在振動台之性能表徵.....	43
5.1.1 識別結構物基本頻率	43
5.1.2 層間位移的評估測試.....	49
5.2 P-Alert 在實際建物的性能表徵.....	53
5.2.1 單站型結構物週期於強震事件表徵	53
5.2.2 多站型結構物週期於強震事件表徵	57



5.2.3 P-Alert 系統對於結構物振動週期穩定度討論	60
5.3 多站型結構物在強度測量中之表現	64
Chapter 6 結論.....	71
REFERENCES	73
附件 A 加速度儀感測器價格與性能比較表格	75
附錄 B 單站型結構物分析之地震目錄	76



圖次



圖 2.1	P-Alert 儀器示意圖。	3
圖 2.2	臺灣現有地震觀測網分布。	4
圖 2.3	低頻機速度儀校正 P-Alert 之結果圖，。	6
圖 2.4	P-Alert 在預估層間位移角中不同地動強度(50、100、150、200、250、 300、350 gal)分析儀器間時間延遲造成之誤差分布圖。	6
圖 2.5	第一組振動台實驗儀器擺放示意圖。	7
圖 2.6	第二組振動台實驗儀器擺放示意圖。	8
圖 3.1	方位修正示意圖: (A)修正前波形圖；(B)修正後波形圖	17
圖 3.2	P-Alert 資料預處理流程圖	18
圖 3.3	Building array 資料預處理流程圖	18
圖 3.4	P-Alert 地動訊號之時頻圖：左圖為單站型結構物紀錄之波型圖，右圖為 地震紀錄時頻圖。	20
圖 3.5	利用自由場測站、單站型結構物計算結構物振動週期：(A)自由場測站 F019 紀錄(B)結構物測站 W028 紀錄(C)結構物測站與自由場測站反卷積 結果。	20
圖 3.6	識別結構物基本頻率工作流程圖	22
圖 3.7	多站型結構物：地下一樓、五樓、九樓地震紀錄波形圖	22
圖 3.8	多站型結構物：五樓與九樓樓層與地面測站反卷積結果	23
圖 3.9	Butterworth filter 帶通濾波能量趨勢圖	24
圖 3.10	雙重積分法工作流程圖	25



圖 3.11 雙重積分法：加速度資料轉換位移資料示意圖	26
圖 3.12 層間位移角計算示意圖	26
圖 3.13 強度測量參數：PGA、Sa(T_1)與頂樓層間位移之關係圖。(A) 9 樓層間位移與 PGA-E 的關係圖；(B) 9 樓層間位移與 PGA-N 的關係圖；(C) 9 樓層間位移與 Sa(T_1)-X 的關係圖；(D) 9 樓層間位移與 Sa(T_1)-Y 的關係圖	27
圖 4.1 單站型結構物位置分布圖。	30
圖 4.2 花蓮女中建物受損圖。	30
圖 4.3 花蓮女中 P-Alert 測站架設位置圖.....	31
圖 4.4 W028 花蓮女中教室配置圖。	31
圖 4.5 新竹廠房與 P-Alert 擺設位置設計圖.....	33
圖 4.6 結構物強震監測網結構物分布圖。	35
圖 4.7 TCUBA3 結構物與頻道側向設計圖，藍色方框可對照不同方位所選取的測站位置。	37
圖 4.8 振動台實驗安裝位置與其儀器類型	40
圖 4.9 振動台實驗流程圖：綠色框為基礎模態分析步驟、 藍色框為層間位移分析步驟	41
圖 5.1 Case 1 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖：黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。	44
圖 5.2 Case 2 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖：黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。	44
圖 5.3 Case 3 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖：黑色線為一階 SVD 結果，	



藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。	45
圖 5.4 Case 4 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果， 藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。	45
圖 5.5 Case 5 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果， 藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。	46
圖 5.6 Case 6 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果， 藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。	46
圖 5.7 P-Alert 在 Case1 無損傷試體中基礎模態形狀圖	47
圖 5.8 Setra 在 Case1 無損傷試體中基礎模態形狀比較圖	47
圖 5.9 P-Alert 在 Case1 無損傷試體中高階模態形狀圖	48
圖 5.10 Setra 在 Case1 無損傷試體中高階模態形狀比較圖	48
圖 5.11 Case 1: 在 EL_50 訊號中 P-Alert 預估層間位移比較圖	49
圖 5.12 Case1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert 預估層間位移比較圖	49
圖 5.13 Case 1: 在 EL_50 訊號中 P-Alert 最大層間位移前後 2 秒振動圖	50
圖 5.14 Case 1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert 最大層間位移前後 2 秒振動圖	50
圖 5.15 Case 1: 在 EL_50 訊號中預估層間位移頻譜圖	50
圖 5.16 Case 1: 在 TCU_50 訊號中預估層間位移頻譜圖	50
圖 5.17 Case1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert 與 Setra 的預估層間位移比較圖	51
圖 5.18 Case1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖	51
圖 5.19 Case 3: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖	52

圖 5.20 Case 4: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖	52
圖 5.21 Case 5: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖	52
圖 5.22 Case 6: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖	52
圖 5.23 W475 吉安國小 $M_L \geq 6.0$ 之事件之波型圖:(A)2022/09/17 池上地震波型圖。(B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。(D)2024/04/23 花蓮地震波型圖。.....	54
圖 5.24 單站型結構物 $M_L \geq 6.0$ 事件之時頻圖:(A)2022/09/17 池上地震波型圖。(B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。(D)2024/04/23 花蓮地震波型圖。.....	54
圖 5.25 單站型結構物 $M_L \geq 6.0$ 事件之反應譜:(A)2022/09/17 池上地震波型圖。(B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。(D)2024/04/23 花蓮地震波型圖。.....	55
圖 5.26 單站型結構物 $M_L \geq 6.0$ 事件之反卷積結果圖:(A)2022/09/17 池上地震波型圖。(B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。(D)2024/04/23 花蓮地震波型圖。.....	55
圖 5.27 吉安國小於 2022 年至 2024 年 8 月間地震事件之 PGA 分布	56
圖 5.28 吉安國小於 2022 年至 2024 年 8 月間地震事件之規模分布	56
圖 5.29 吉安國小: 地震強度與結構物振動頻率關係圖	56
圖 5.30 多站型結構物地震分類分布圖之結構物短邊分類結果	57

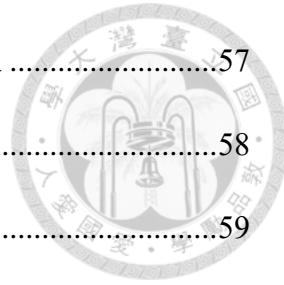


圖 5.31	多站型結構物地震分類分布圖之結構物長邊分類結果	57
圖 5.32	多站型結構物：地震震央及結構物位置分布圖	58
圖 5.33	多站型結構物：結構物振動頻率變化圖	59
圖 5.34	P-Alert 與自由場測站 B017 的實際位置與距離圖	61
圖 5.35	B017 測站於 2020 年至 2024 年底之間超過 10 gal 的地震震央分布	61
圖 5.36	B017 測站於 2022 年三分量的紀錄情形	62
圖 5.37	H010 測站與 B017 測站在 2024/04/03 07:58 花蓮地震識別結構物振動頻率結果：(A) P-Alert 與中央氣象署的波型紀錄 (B) P-Alert 與利用反卷積的波型比較圖 (C) 於 A 圖中的頻率域資料 (D) 於 B 圖中的頻率域資料	62
圖 5.38	H010 測站與 B017 測站在 2024/04/03 10:14 花蓮餘震識別結構物振動頻率結果：(A) P-Alert 與中央氣象署的波型紀錄 (B) P-Alert 與利用反卷積的波型比較圖 (C) 於 A 圖中的頻率域資料 (D) 於 B 圖中的頻率域資料	63
圖 5.39	P-Alert 多站型結構物利用單站型與多站型方法所識別出來的結構物振動頻率結果圖，紅點為單站型結果，藍點為多站型結果。	63
圖 5.41	多站型結構物：強度參數與不同地震陣列比較圖	65
圖 5.42	多站型結構物：不同類型地震對於結構物之影響	66
圖 5.43	多站型結構物：結構物短軸振動週期對於層間位移之影響	67
圖 5.44	多站型結構物：TCUBA3 層間位移角於不同強震事件之變化圖	67
圖 5.46	多站型結構物：新竹測站層間位移角於不同強震事件之變化圖	68
圖 5.47	多站型結構物：新竹廠房於花蓮地震五樓至九樓層間位移變化圖	69



表次



表 2.1 利用第二組振動台實驗比較 Setra 與 P-Alert 在結構物受損曲線識別危 樓結果(Hsu et al., 2018)。	9
表 2.2 強度參數:結構物頻率反應、振幅強度參數、結構物歷時變化參數對照表 (De Biasio et al. , 2014)。	16
表 3.1 P-Alert 測站與自由場測站配對表.....	21
表 4.1 單站型結構物之 $M_L > 6.0$ 之地震目錄	32
表 4.2 新竹廠房樓層對照表	32
表 4.3 新竹廠房收錄 $M_L > 5.5$ 地震目錄	33
表 4.4 TCUBA3 頻道架設位置資訊表。	36
表 4.5 TCUBA3 頻道樓層對照表	37
表 4.6 TCUBA3 所收錄 $M_L \geq 5.5$ 的地震事件目錄.....	38
表 4.7 振動台實驗各案例損傷情形對照表	42
表 5.1 B017 測站所記錄超過 10 gal 以上之地震目錄.....	62
表 5.2 P-Alert 多站型與單站型結構物振動頻率結果表.....	64
表 5.3 多站型建物: 1999 年集集地震、2024 年花蓮地震、2025 年大埔地震對 於結構物長邊強度參數比較表	42





Chapter 1 緒論

1.1 前言與研究動機

臺灣位於歐亞板塊及菲律賓板塊交界處，地震頻繁發生，對於建築物與基礎設施構成重大威脅。在過去五年的強震事件中，如：2022/9/18 M_L6.8 關山地震、2024/04/03 M_L7.2 花蓮地震等均造成結構物損傷。為了減少地震災害，結構物健康監測的普及化逐漸受到重視。

然而目前結構物健康監測所採用的儀器以及實驗材料成本昂貴，若是有低價位的監測儀器，可以提升結構物健康監測普及化之可行性。因此本研究採用由國立臺灣大學與民間科技公司所研發的低成本加速度儀 P-Alert 進行結構物健康監測的分析。

目前 P-Alert 主要應用在臺灣的地震預警系統領域，又因為廣設在臺灣多達 700 處的中小學以及政府部門的建築物當中，這也顯示了利用 P-Alert 確實可以大大提升結構物健康監測的普及性和發展潛力。

從過去研究中，曾利用八樓及六樓的振動台實驗比較 P-Alert 與 Setra 高精度加速度儀以及 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)位移計之性能成效。發現 P-Alert 利用結構物的易損性曲線所分析出來的結構危害準確度高達 100%，但是在計算層間位移則需要先將各測站進行互相關分析來解決時間延遲造成實驗誤差的問題 (Hsu et al, 2018)。建立於上述的研究結果，本研究除了會延續前人的振動台實驗，測試 P-Alert 層間位移、模態形狀的準確度外，也會利用實際的建築物進行結構物分析，採用 De Biasio et al. (2014)的強度測量法(Intensity measure, IM)之參數，把 P-Alert 更全面的應用在結構物健康監測中。

1.2 研究內容

本研究主要分析有關 P-Alert 在結構物健康監測中的應用。研究方向主要可分為兩大部分：第一部份為 P-Alert 在振動台的性能測試，透過前人所提供的振動台資料，採用同勁度的八層樓結構物評估其儀器層間位移和模態形狀的準確性；第二部份則是使用實際的結構物進行分析，採用 P-Alert 單站型結構物、P-Alert 多站型結構物、中央氣象署強震觀測網結構物陣列(Central Weather Administration Building Array, CWABA)三種不同類型的結構物識別基礎模態(Fundamental Mode)、預估層

間位移、層間位移角(Inter-story drift ratio)、結構物振動週期之加速度反應譜值 $Sa(T_1)$ 等參數。藉由強度參數識別結構物損傷和評估 P-Alert 在識別結構物損傷之可行性。

研究方法方面，透過反卷積技術，利用頻率域訊號可相除的特性，分析結構物樓層站與地面站資料之間的結構物放大響應，推估結構物之基礎模態與高模態(Higher mode)頻率。進一步採用雙重積分法(Double integration method, Loh et al., 2016; Dan et al., 2019; Zhu et al., 2020) 估算結構物層間位移，並參考 De Biasio et al. (2014)提出的強度測量方法，分別計算出最大地動加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)、加速度反應譜 Sa 、層間位移角並進行結構物損傷分析。

分析結果顯示，在 P-Alert 地震預警系統中，單站型結構需要 $PGA \geq 80$ gal 方能穩定識別其振動週期；而多站型結構不受地動強度影響，皆能準確識別結構振動週期。此外，各測站的高模態頻率也可以穩定識別，顯示 P-Alert 具備應用於結構物模態分析的潛力。進一步應用於損傷建物中，發現地震造成結構物損壞同時也會導致振動週期降低，且無法回復成震前狀態。

另外，藉由過去 Yin et al.(2016) 所提供的振動台資料比較各儀器所記錄的層間位移，發現 P-Alert 利用雙重積分法估算的即時相對位移結果與 LVDT 位移計紀錄的實際值基本相符，僅在 $0.7\text{ Hz} \sim 1.0\text{ Hz}$ 的範圍內有能量放大的誤差，這是在雙重積分法中使用的濾波器以及儀器在振動臺擺放位置有關。在模態形狀分析中，也發現 P-Alert 利用白噪聲所識別出來的結構物頻率及各樓層間的反應大小皆與高精度加速度儀 Setra 相同。

最後，利用強度測量法將各個 IM 參數進行比較，發現利用 $Sa(T_1)$ 與 PGA 進行分析，P-Alert 與 CWABA 皆顯示兩參數在結構物中的線性關係，也展現了 P-Alert 能應用在實際建物的可行性；另外，利用不同週期的結構物與層間位移比較，在相同強度的地震下，則週期越長的結構物層間位移也會越大；最後，利用不同事件計算各結構物的層間位移角，發現危樓的層間位移角有放大的趨勢，將會造成結構物有更大的危害。統整上述，展示了 P-Alert 可以適用於不同結構物的多元性，對於未來在結構物健康監測的領域中有相當發展的潛力。

綜合以上結果，P-Alert 在不同結構物型態下皆展現良好的測量能力，顯示此系統在結構物健康監測領域具備高度發展潛力與實用價值，同時也解決監測結構物損傷時高成本的問題，對於未來推廣結構物健康監測建立新的里程碑。



Chapter 2 文獻回顧

在文獻回顧中，將簡要說明本研究所引用的方法及其所代表的意義，以增強讀者對後續章節的理解。

2.1 新一代地震儀預警系統在結構物監測之應用

2.1.1 P-Alert 在地震預警之應用

西元 2010 年，國立臺灣大學地震預警團隊與三聯科技公司共同研發出低成本微機電系統加速度型地震儀 P-Alert(圖 2.1)，並展開為期兩個月的地震預警系統測試。根據過去前人研究成果，P-Alert 所偵測的資料與中央氣象署發布的震央位置、震源深度、地震規模等參數互相比對，結果具有高度的一致性(Wu and Lin, 2014)。如圖 2.2 所示，截至 2025 年 P-Alert 系統在臺灣已架設超過 700 處的測站，架設區域涵蓋校園、政府單位等多種建築結構物。此系統不僅增加地震儀陣列的密度外，也會更準確的定位地震、規模預估等。以 2018 年花蓮米崙地震為例，地震發生後 P-Alert 可在 2 分鐘內產出震度分布圖，且分布圖中所呈現的震度與該地區觀察到的破壞模式高度吻合，有效提升了救災時的便利性(Wu et al., 2019)。

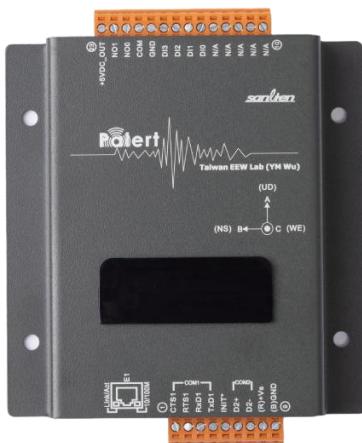


圖 2.1 P-Alert 儀器示意圖。圖片取自：<https://sanlien.com.tw/>

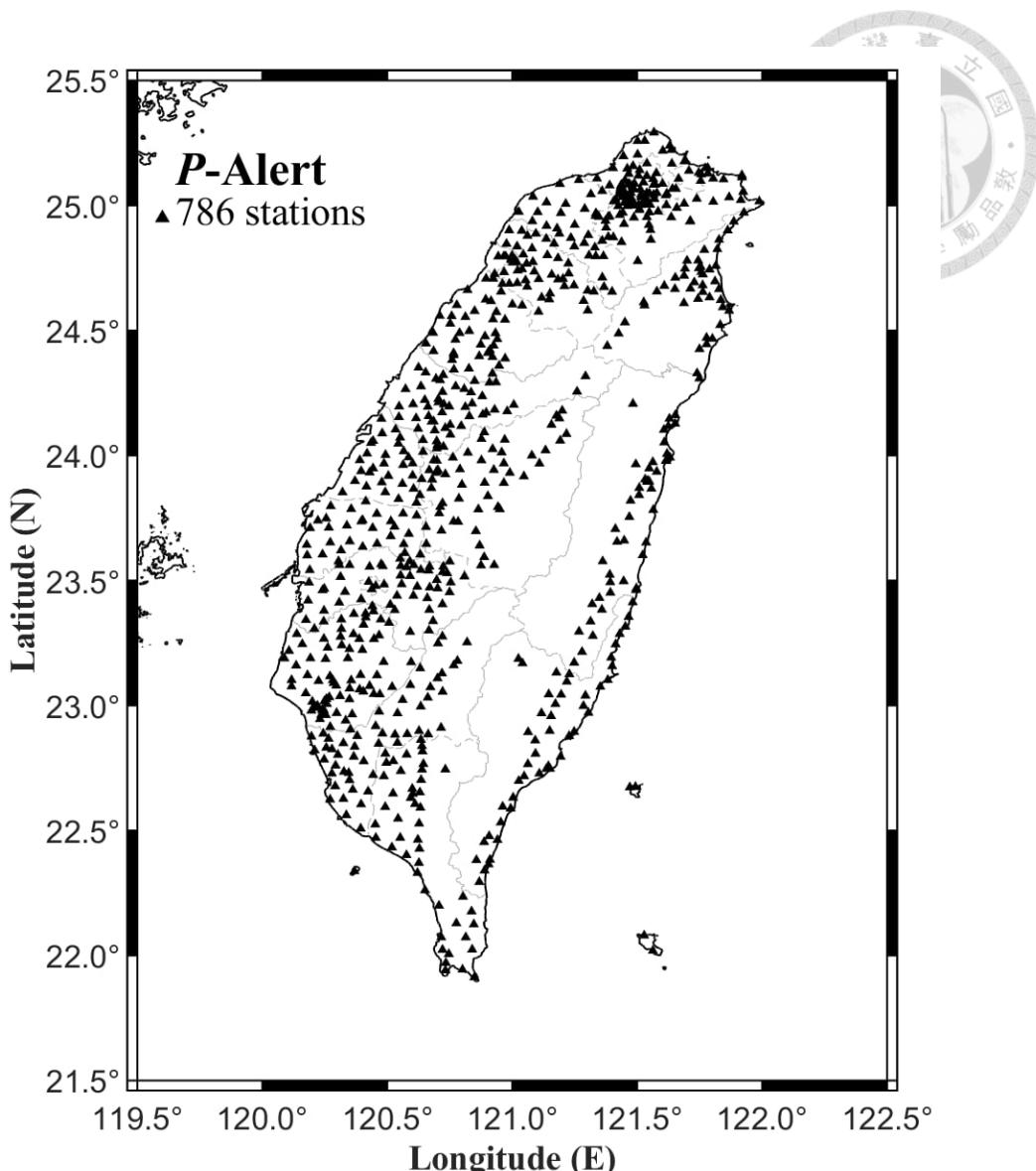


圖 2.2 臺灣現有地震觀測網分布。測站分布資料取自：

<https://palert.earth.sinica.edu.tw/>

2.1.2 振動台實驗

根據 2.1.1 所述，P-Alert 除了安裝在各類建築結構物中，其測站陣列分布非常密集，憑藉這些優勢展現出此系統於結構物健康監測領域中的應用價值。除此之外 Hsu et al.(2018)比較國家地震工程研究中心(NCREE)採用之高精密度加速度儀 Setra 與 P-Alert 的感測器成本上相差 10 倍左右，如附件 A 所示。為了降低每次強地動造成的建物損傷，使用低成本儀器進行結構物健康監測是非常重要的議題。因此驗證 P-Alert 系統應用於結構物監測的可行性，Hsu et al.(2018)與 NCREE 之地震

模擬振動台進行相關實驗測試。本次實驗中採用三種感應器進行比較；高精度加速度儀 Setra、位移計 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)以及低成本微機電系統加速度儀 P-Alert。Setra 是目前結構物健康監測常用之標準儀器，而 P-Alert 則具備低成本的優勢，因此實驗中透過結構物易損性曲線分析，評估 Setra 與 P-Alert 之性能。儀器響應方面，圖 2.3 為透過 NCREE 的低頻加速度儀校正系統(Low Frequency Accelerometer Calibration System, LFACS)進行校正的結果，以均方根(RMS)表示，顯示 P-Alert 在 0.7 Hz 至 10 Hz 頻段內具有良好準確性，但低於 0.7 Hz 的範圍由於需要的訊號週期過長，並無法將 LFACS 與 P-Alert 的訊號有效的耦合，因此在圖 2.3 並未能夠確實呈現出低於 0.7 Hz 的結果；另一方面，如圖 2.4 所示，在進行層間位移角計算時需考慮感測器可能產生的時間延遲現象，這會導致實驗出現誤差，但是將各樓層資料進行互相關分析，可以將時間對齊來解決此問題(Hsu et al., 2018)。

在振動台的實驗中，Yin et al.(2016)設計兩組試驗體：第一組為勁度相等的八層樓建築模型(圖 2.5)，Setra 與 LVDT 感應器分別安裝於結構物兩側(位置 a、b)，P-Alert 擺放在樓層正中心的位置；第二組則是勁度一致的六層建築模型，安裝位置與第一組相同(圖 2.6)。在結構物受損曲線針對不同損傷程度的結構物分析，表 2.1 顯示 P-Alert 在識別結構物是否安全的準確率高達 100%(Yin et al., 2016)，進一步驗證 P-Alert 於結構物健康監測中的應用潛力。

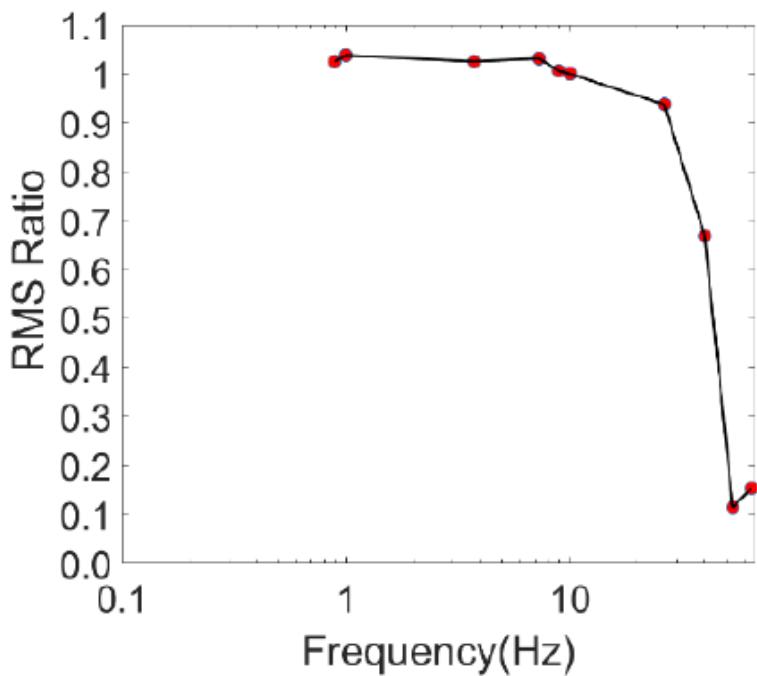
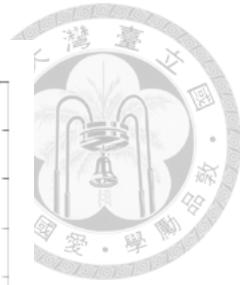


圖 2.3 低頻機速度儀校正 P-Alert 之結果圖，圖中顯示 0.7 Hz 至 10 Hz 頻段內 RMS 接近 1.0，具有良好準確性(Hsu et al., 2018)。

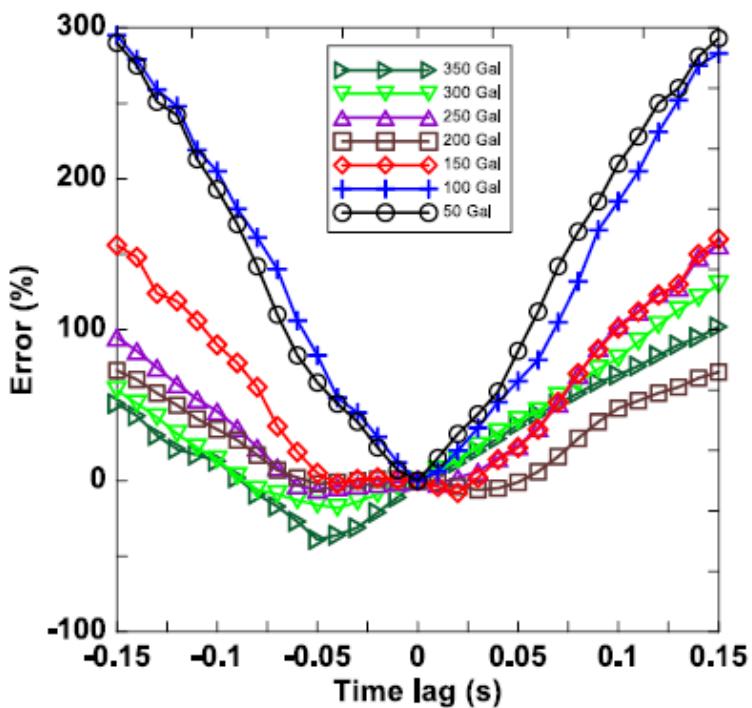


圖 2.4 P-Alert 在預估層間位移角中，利用不同地動強度(50、100、150、200、250、300、350 gal)分析儀器間時間延遲造成之誤差分布圖(Hsu et al., 2018)。

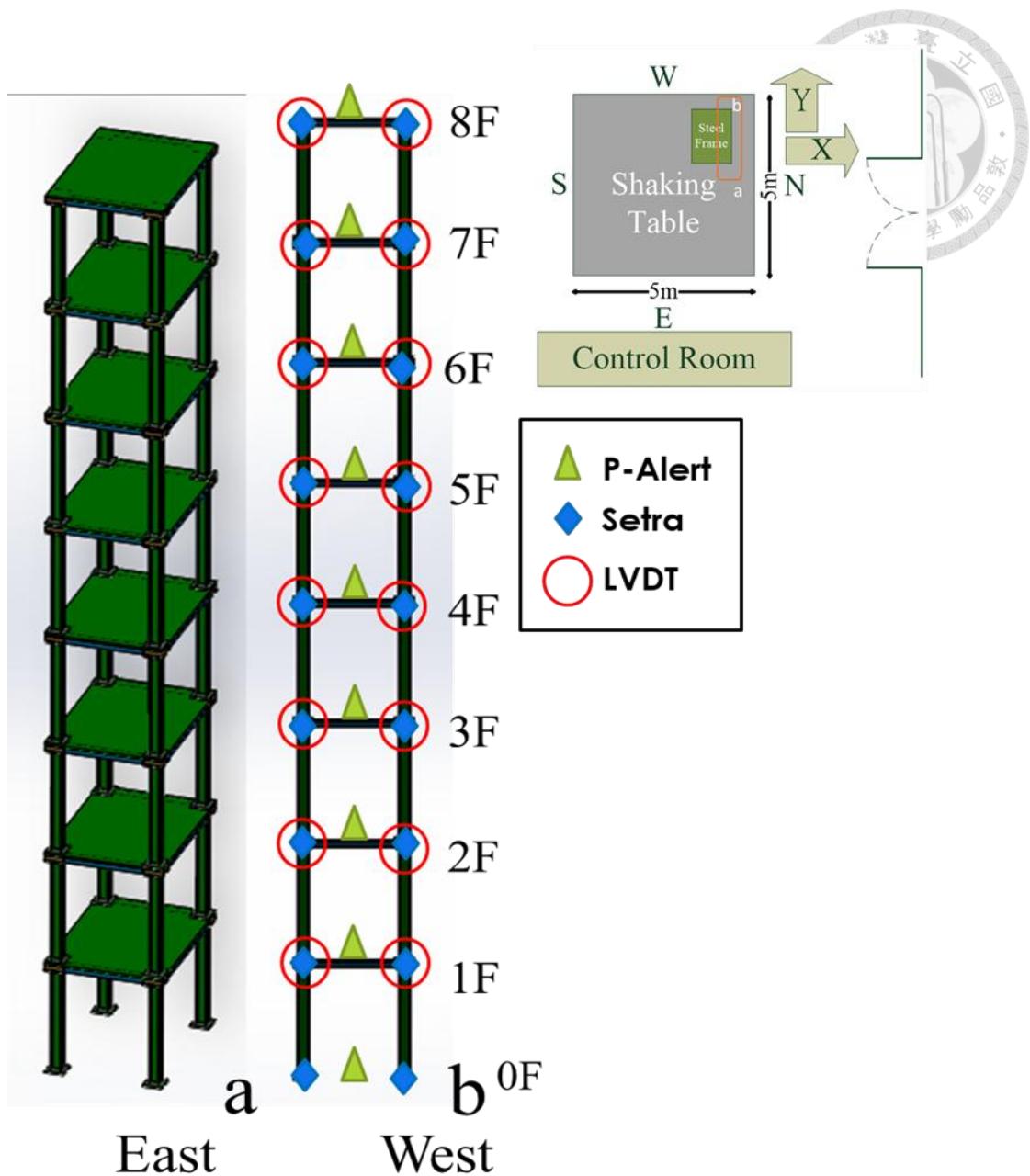


圖 2.5 第一組振動台實驗儀器擺放示意圖(Yin et al., 2016)。

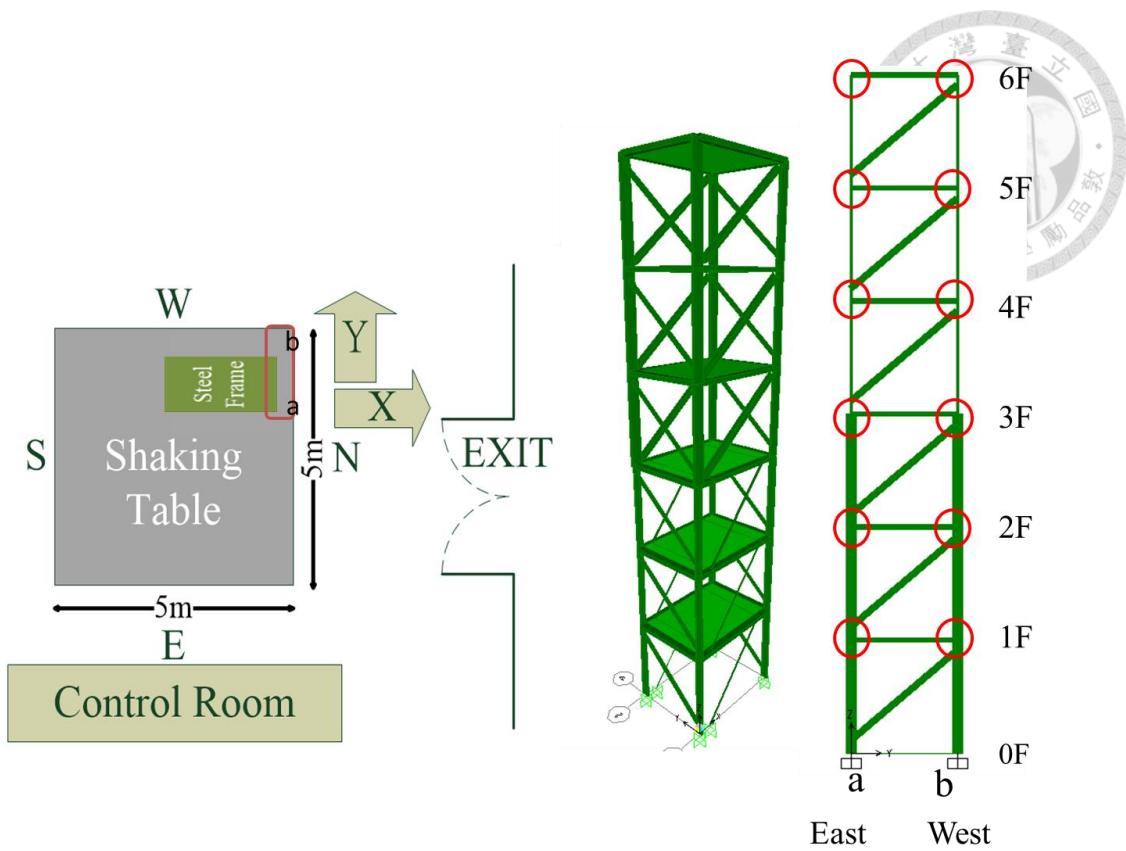


圖 2.6 第二組振動台實驗儀器擺放示意圖(Yin et al., 2016)。

表 2.1 利用第二組振動台實驗比較 Setra 與 P-Alert 在結構物受損曲線識別危樓
結果(Hsu et al., 2018)。

	Input (gal)	Setra (Estimated/Reference Damage Level)	Correct (Y/N)	P-Alert (Estimated/Reference Damage Level)	Correct (Y/N)
Case 1	EL50	Safe / Safe	Y	Safe / Safe	Y
Case 1	EL100	Safe / Safe	Y	Safe / Safe	Y
Case 1	EL150	Safe / Safe	N	Non-safe / Non-safe	Y
Case 1	EL200	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 1	EL250	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 1	EL300	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 1	EL350	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 2	EL50	Safe / Safe	Y	Safe / Safe	Y
Case 2	EL100	Safe / Safe	Y	Safe / Safe	Y
Case 2	EL150	Safe / Safe	Y	Safe / Safe	Y
Case 2	EL200	Non-safe / Safe	N	Safe / Safe	Y
Case 2	EL250	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 2	EL300	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 2	EL350	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 3	EL200	Safe / Safe	Y	Safe / Safe	Y
Case 3	EL300	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 3	EL400	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 4	EL250	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 4	EL400	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Case 4	EL450	Non-safe / Non-safe	Y	Non-safe / Non-safe	Y
Correct rate (%)		95.0		100.0	



2.2 結構物健康監測

結構物健康監測系統利用多個感測器安裝在結構物各個樓層的樓板、牆面、梁柱中進行即時的監測，而系統中會有一個控制中心單位與傳輸單位進行測站管理，將結構物中的所有感測器時間校正外，也可以同時監測各樓層的振動情形(Vahid et al., 2022)，如圖 2.7 所示。若結構物受損時可立即利用感測器做出的即時反饋、振動週期變化等識別結構物受損程度。過去的研究中，許多人利用了不同種方法進行結構物健康監測，包含結構物基礎模態、層間位移、結構物強度測量等，因此本章節將介紹如何將這些參數識別建物損傷。

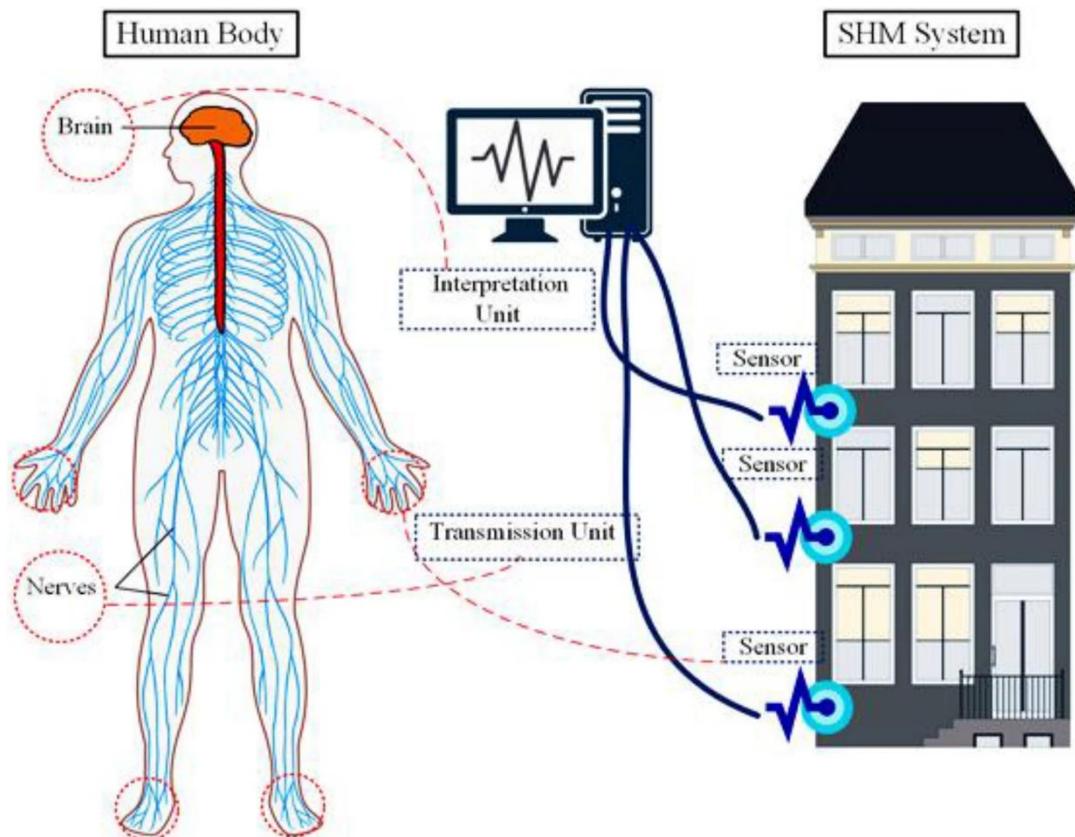


圖 2.7 結構物健康監測示意圖

2.2.1 結構物基礎模態

每座結構物會根據其材料特性與樓層高度，皆會展現出特有的結構振動週期。根據經驗公式，結構振動週期隨樓層數增加而呈現線性變化。然而，結構物因為年老或是地震所造成損傷，導致結構勁度降低，將使其振動週期變長。透過結構物健康監測(Structure Health Monitoring, SHM)能即時記錄結構物的基礎模態，當發生強震時，便可以快速辨別結構物是否可能受損。

前人研究中，Francois-Holden et al.(2022)針對紐西蘭威靈頓的市政大樓 WHSB 建築進行長期監測，分析 2010 年至 2020 年間遭受多次規模 7 以上地震後的結構物振動週期變化。研究結果指出，2016 年 Kaikoura 地區發生規模 7.8 強震後，WHSB 的振動頻率下降約 0.2 Hz (如圖 2.所示)，顯示強震確實對結構剛性造成影響。此外，Wen et al.(2024)曾針對國立中正大學圖書館進行日常監測，透過基礎模態進行時頻分析，發現人為活動亦會放大結構物基礎模態的訊號(圖 2.)，顯示基礎模態分析除了應用在結構損傷外，也可以當作日常監測的依據。綜合上述研究結果，基礎模態不僅能識別結構物受震後潛在損傷，亦能記錄人為活動，若本研究採用結構物基礎模態作為評估 P-Alert 的識別準確性，將有助於拓展此系統在未來結構健康監測應用上的潛力。

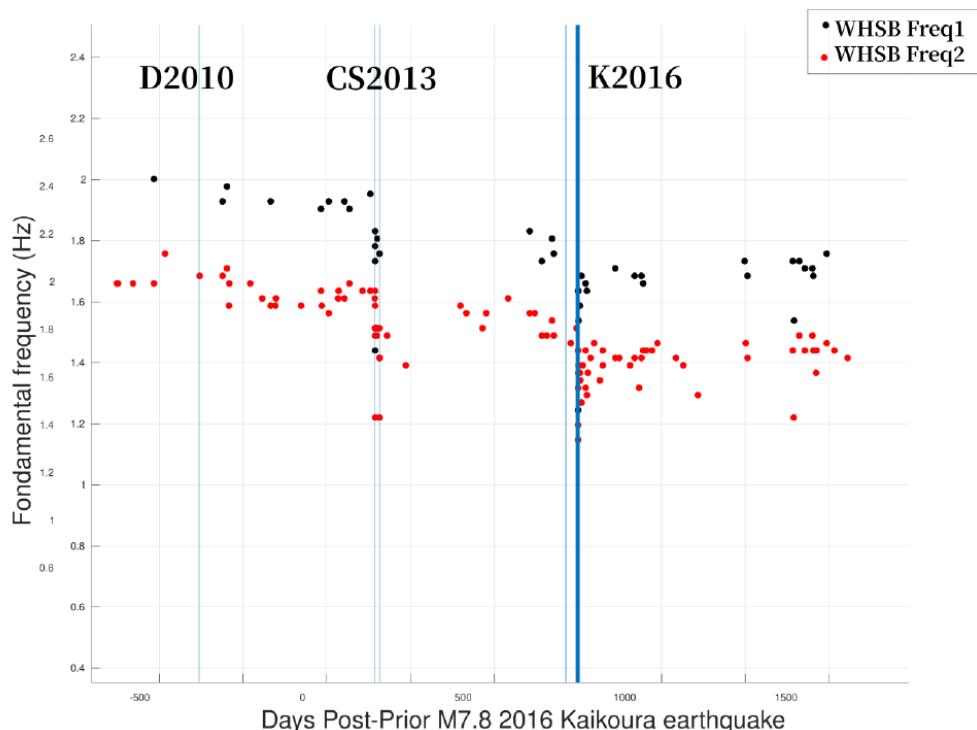


圖 2.8 WHSB 建築頻率變化圖：紅色標點為結構物的基礎模態，黑色標點為結構物的高階模態(Francois-Holden et al., 2022)。

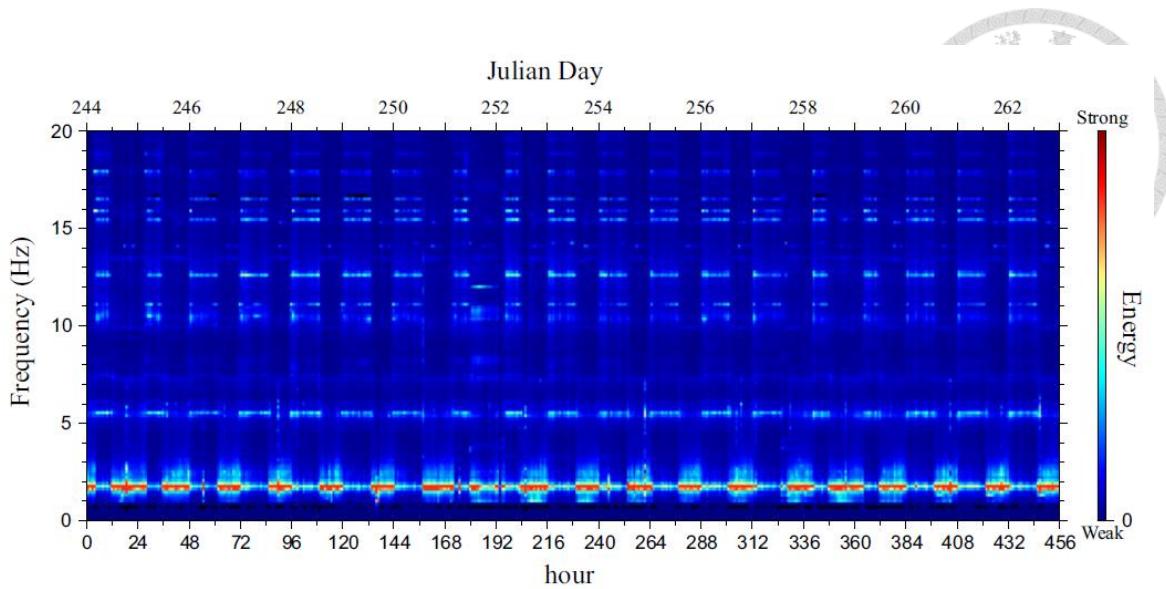


圖 2.9 國立中正大學圖書館利用約兩個月的時間監測結構物時頻圖，圖中紅色代表能量越強，藍色能量越弱(Wen et al., 2024)。

2.2.2 預估層間位移

層間位移分析是結構物健康監測常用的評估指標之一，由於多數監測系統採用加速度感測器，因此想要獲得即時的層間位移，通常需要透過雙重積分法進行計算。針對此方法的誤差修正，已有需多學者進行研究與改善。如 Loh et al.(2016)提出的雙重積分法，工作流程如圖 2.所示，透過 Ormsby 濾波器搭配去資料趨勢化處理，可以有效計算出即時位移數據。然而，此方法在濾波的過程中易造成低頻的訊號產生，導致結果失真。Dan et al.(2019)則採用 Butterworth 濾波器並結合最小平方法進行資料去趨勢化，雖能改善基線飄移的問題，但在振動初期仍會產生較大的位移誤差，如圖 2.所示。此外，Zhu et al.(2020)直接應用頻率域的方式進行雙重積分法，並指出若是 Butterworth 濾波器設計衰變參數為 0.97 時，能獲得最佳的位移估算結果，如圖 2.所示。綜合前人的文章，本研究將參考並採用前人提出之研究方法，利用振動台實驗資料，比較 P-Alert、Setra 以及 LVDT 三種感測器所記錄之位移結果，進一步評估 P-Alert 在層間位移預估上的準確性與應用可行性。

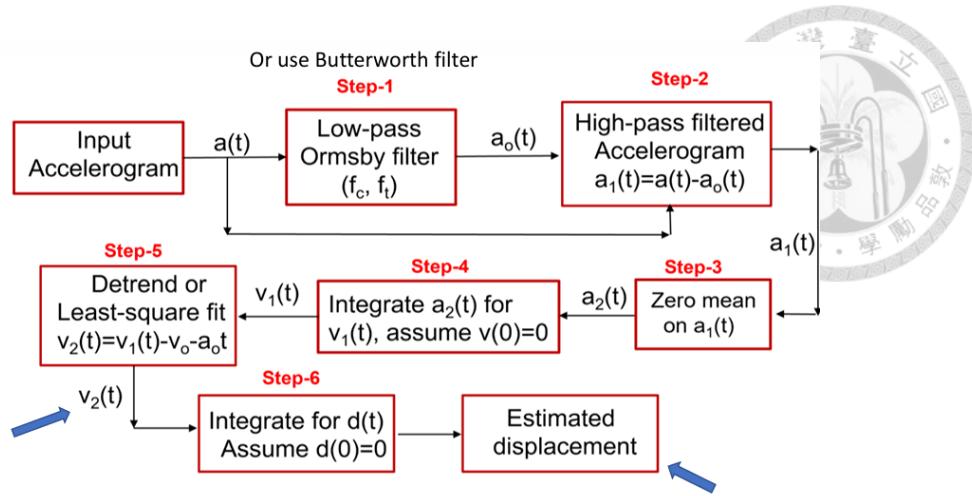


圖 2.10 雙重積分法流程圖，採用 Ormsby 濾波器以及去平均後進行兩次積分，從加速度資料轉換成位移資料(Loh et al., 2016)。

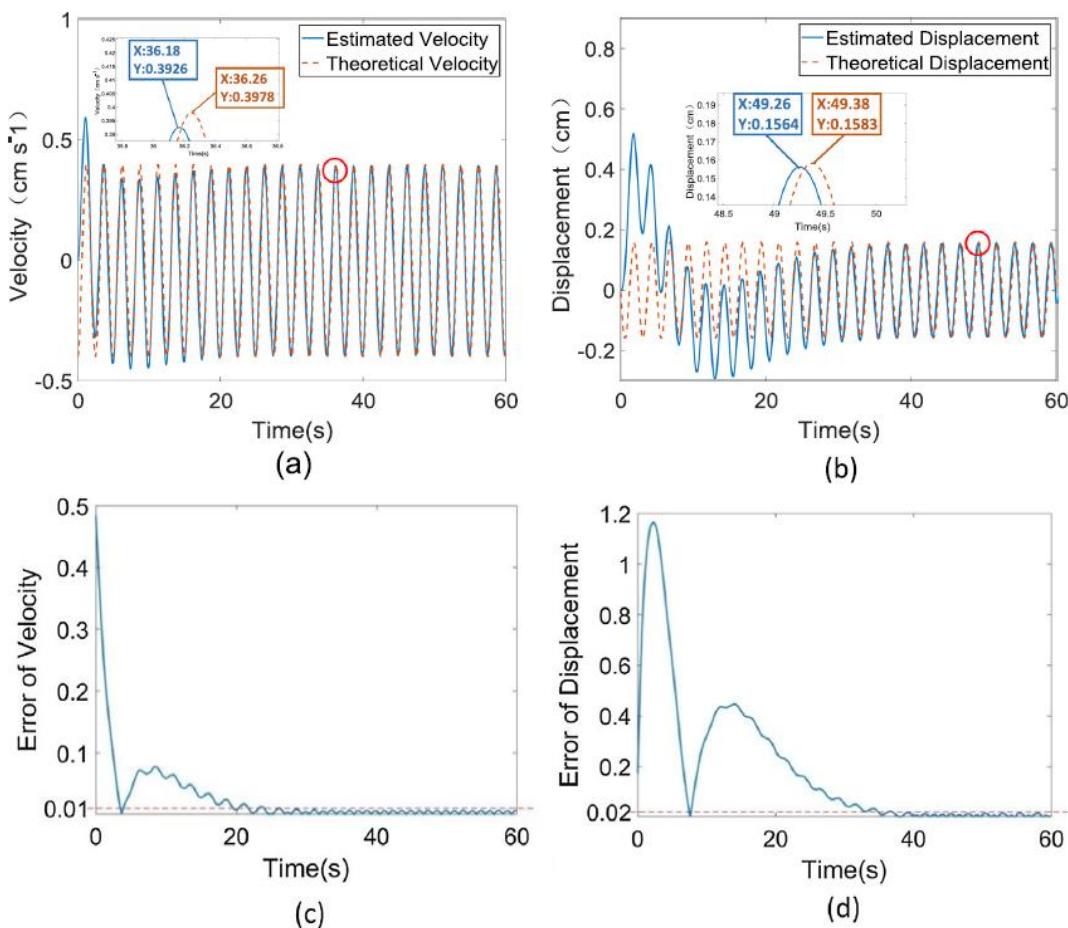


圖 2.11 利用最小平方法計算評估位移和實際位移誤差圖(Dan et al., 2019)。(a)預估速度結果。(b)預估層間位移結果。(c)預估速度誤差分布圖。(d)預估層間位移誤差分布圖。

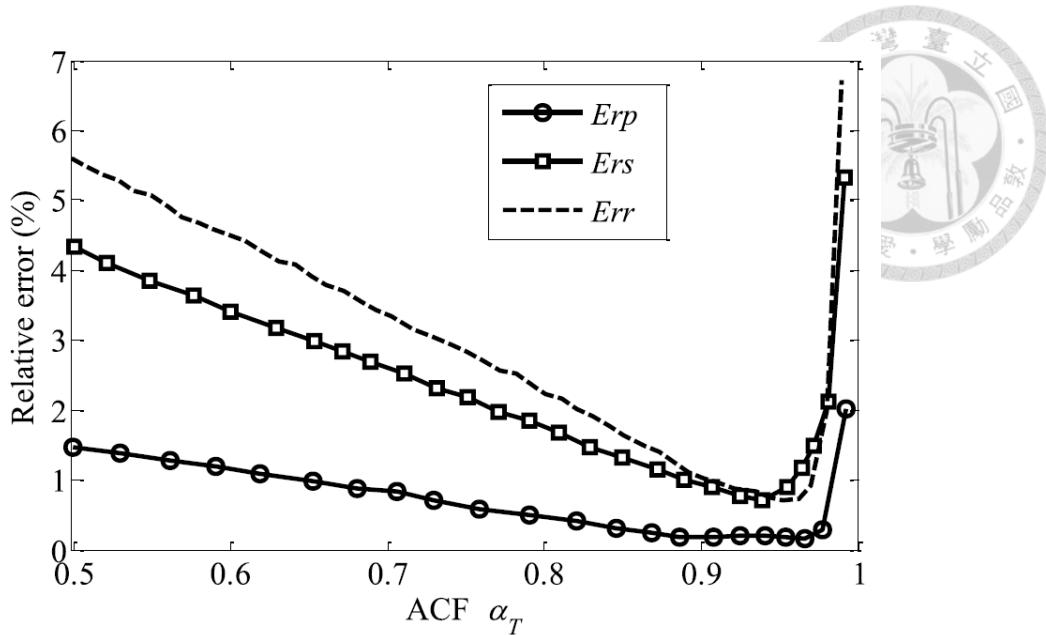


圖 2.12 Butterworth filter 曲線衰減參數誤差比較圖， Erp 、 Ers 、 Err 代表利用不同的衰變方程式比較之結果(Zhu et al., 2020)

2.2.3 結構物強度測量

在結構物健康監測的應用中，經常需藉由地震資料來分析結構物所受的影響。為了量化地震對結構物的損傷程度，De Biasio et al. (2014) 彙整出常用的強度測量指標 (IM)，如表 2.2 所示，並將其分為三大類：結構物頻率反應參數、強度參數與時間域參數。根據研究需求，可透過這些指標進行地動強度分析或歷時分析，以進一步評估建物在地震中的振動行為（圖 2.12）。

本研究在前人彙整基礎上，採用強度參數中的 PGA 來探討一樓測站與周圍自由場測站對於結構物振動頻率的影響與關聯性。此外，也可將一樓測得之加速度反應譜值，結合結構物基本振動週期 T_1 ，計算出 $Sa(T_1)$ ，進一步分析不同地震類型下結構物所受的振動影響，以及各結構物在地震來臨時所展示的振動特性。

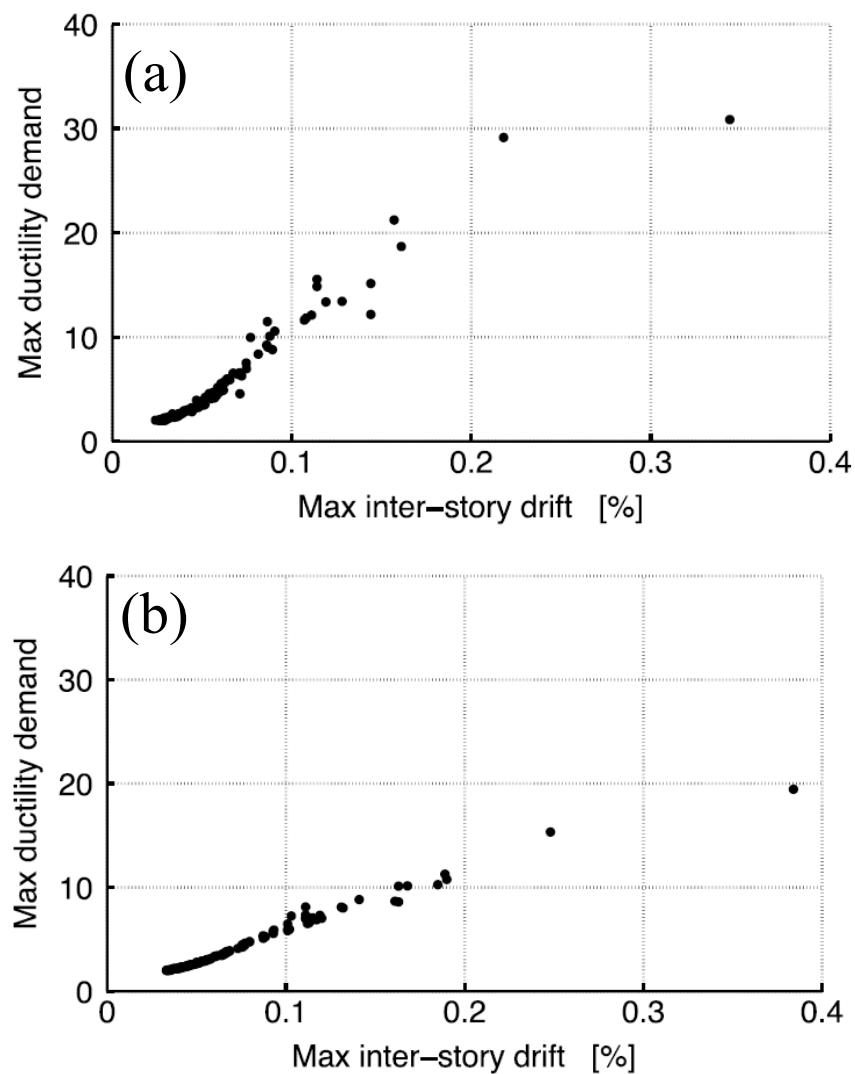


圖 2.13 強度參數最大層間位移與最大搖晃歷時在勁度不同的結構物中的線性關係圖：(a) 高勁度試體 (b) 低勁度試體 (De Biasio et al., 2014)

表 2.2 強度參數:結構物頻率反應、振幅強度參數、結構物歷時變化參數對照表
 (De Biasio et al. , 2014)。



Type	IM	Notes
Frequency response-based	$S_{pa}(T_1)$ $I_H \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT$ $EPA = \frac{1}{2.5} \int_{0.1}^{2.5} S_{pa}(T, \xi) dT$ $ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_{pa}(T, \xi) dT$ $S^* = S_{pa}(T_1) \left(\frac{S_{pa}(T_2)}{S_{pa}(T_1)} \right)^{0.5}$ $I_{NP} = S_{pa}(T_1) \left(\frac{S_{paAV}(T_1, \dots, T_2)}{S_{pa}(T_1)} \right)^{0.4}$	$S_{pa}(T_1)$ = pseudo-spectral acceleration at the fundamental period S_v = spectral velocity ξ = damping ratio S_{pa} = pseudo-spectral acceleration ξ = damping ratio S_{pa} = pseudo-spectral acceleration ξ = damping ratio S_{pa} = pseudo-spectral acceleration T_1 = fundamental period $T_2 = 2 \times T_1$ S_{paAV} = averaged pseudo-spectral acceleration between T_1 and T_2 T_1 = fundamental period $T_2 = 2 \times T_1$
Amplitude-based	$PGA = \max a(t) $ $PGV = \max v(t) $	$a(t)$ = acceleration time history $v(t)$ = velocity time history
Duration-based	$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a(t)^2 dt$ $CAV = \int_0^{t_f} a(t) dt$ $SCAV = CAV_i + \int_{i-1}^{t_i} a(t) dt$ $a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_d} [a(t)]^2 dt}$ $I_c = a_{RMS}^{1.5} T_d^{0.5}$	$a(t)$ = acceleration time history t_f = total duration of the record $a(t)$ = acceleration time history t_f = total duration of the record $a(t)$ = acceleration values during a 1 s interval, with at least one value exceeding 0.025 g $i = 1, \dots, n$ with n equal to the record length, in seconds $a(t)$ = acceleration time history T_d = time elapsed between the first and last excursions of acceleration above 0.05 g T_d = time elapsed between the first and last excursions of acceleration above 0.05 g

Chapter 3 研究方法



本章節將詳細介紹在此研究中所應用的方法和原始資料處理之步驟，除了統整過去前人研究的方法外，同時考慮本研究所需要的方法進行改良，也能讓讀者能了解後續章節的前後關係。

3.1 資料預處理

本研究所使用的原始數據來源，主要來自兩種不同觀測系統。其一是 P-Alert 系統紀錄的地震事件的加速度資料；另一種則是 CWABA 系統所收集同一建物中所有測站的加速度資料。為了確保資料分析的準確性，分別進行資料預處理，後續將詳細說明其處理流程與步驟，相關步驟如圖 3.2 和圖 3.3 所示。

3.1.1 P-Alert 資料預處理

由於 P-Alert 主要應用於地震預警系統，感測器僅記錄正北方向(a_n)與正西方(a_w)的加速度資料，並未依照結構物長邊或短邊方向配置。因此在進行資料分析前，需要根據系統提供的結構物方位與正北方向的夾角(θ)，進行方位修正。修正的方程式如下：

$$\begin{bmatrix} a_Y \\ a_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ a_w \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

透過式(3.1)，可將正北方原始資料(a_n)與正西方資料(a_w)轉換為結構物長邊方向(a_Y)與結構物短邊方向(a_X)的加速度值(圖 3.1)。完成方位修正後，採用 Butterworth 濾波器進行頻率範圍 0.3 Hz 至 0.8 Hz 的零相位濾波，有效去除地震雜訊，最後將處理後的數據儲存成 SAC 格式，方便研究後續分析。

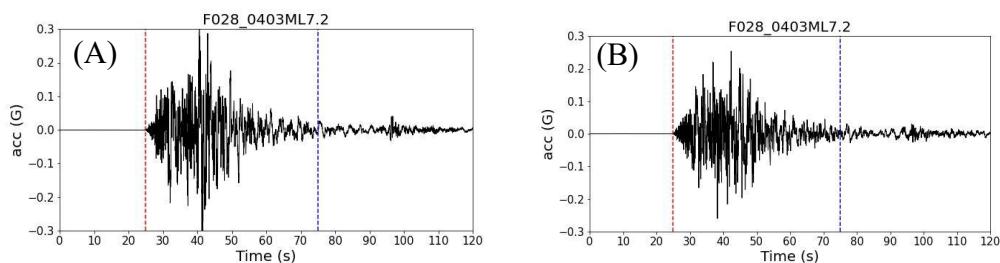


圖 3.1 方位修正示意圖：(A)修正前波形圖；(B)修正後波形圖

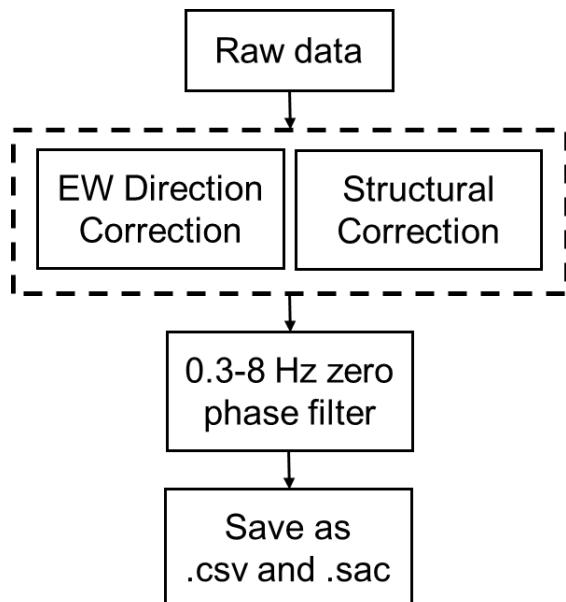


圖 3.2 P-Alert 資料預處理流程圖

3.1.2 Building array 資料預處理

在 Building array 的資料預處理較為單純，由於過去在擺設加速度儀時就是以結構物的長短邊進行擺設，但由於方便與 P-Alert 比較波型，將此資料進行降採樣率從 200 Hz 降至 100 Hz，如此一來兩者的儀器採樣率皆會相同。且為了確保波型在結構物傳遞時的時間差不會影響到分析結果，有利用交叉功率譜密度(Cross Power Spectral Density, CPSD)的方式，將參數頻率點數設定為 512 個資料點，且 Hanning window 為 50%，確保各樓層的感測器相位差為零。

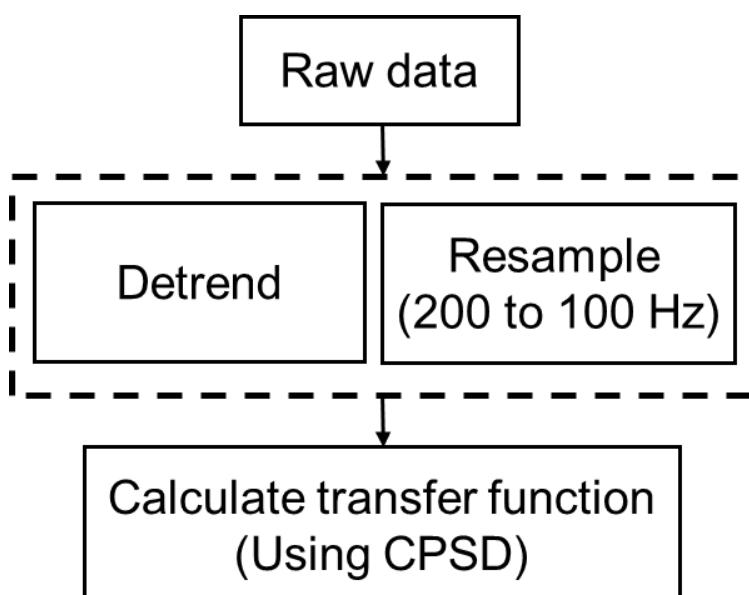


圖 3.3 Building array 資料預處理流程圖



3.2 結構物基本模態

在結構物健康監測中，結構物的基本模態是一項重要的指標。結構物頻率的變化與結構物的勁度有關，當結構物因地震產生損傷，導致勁度下降時，則結構物的自然振動週期 T_1 將會變長。因此，藉由觀測結構物基本模態的變化，能有效評估結構物的健康狀態。在本研究中，依據 P-Alert 結構物的測站配置，將結構物類型區分為單站型結構物與多站型結構物。由於不同類型結構物，分析方法不盡相同，因此以下將針對兩種類型的建物說明分析流程。

3.2.1 單站型結構物：反卷積法

在單站型結構物的損傷監測中，儀器通常安裝於建築物的一樓或二樓等低樓層位置。由於地震發生時，地動的能量往往會主導觀測紀錄，在圖 3.4 時頻分析中，發現過強的地動訊號容易掩蓋結構物本身的動態特徵，容易覆蓋結構物響應，進而影響結構物基礎頻率的正確識別。因此，為了剔除地動影響、提取結構物固有響應，需將建築物測站的觀測數據與相鄰自由場測站的資料進行反卷積分析。

首先，需針對研究對象的建築物測站，配對距離最近的中央氣象署自由場測站，如表 3.1 所示，標示出各結構物測站與對應自由場測站的距離。接著，應用反卷積的基本定義公式：

$$f(t) * g(t) = h(t) \quad (3.2)$$

$$f(t) * g(t) + \varepsilon = h(t) \quad (3.3)$$

式(3.2)(3.3)可知 $h(t)$ 為建築物測站(P-Alert)所觀測的加速度資料， $g(t)$ 則是自由場測站的加速度紀錄， $f(t)$ 是結構物響應函數，而 ε 表示資料中不可避免的雜訊。為了降低雜訊影響，需要對資料進行 0.3 Hz 至 8.0 Hz 的帶通濾波，之後再做快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，將時域訊號轉換至頻率域，分別獲得結構物測站頻率域訊號 $u(h)$ 以及自由場測站的頻率域訊號 $u(g)$ ，進而得出結構物的傳換函數 $u(f)$ ，如式(3.4)所示：

$$u(f) = \frac{u(h)}{u(g)} \quad (3.4)$$

從 $u(f)$ 所提供的頻率域訊號，圖 3.5 於特定頻率位置會出現能量放大的峰值，該峰值所對應的頻率，即為結構物的自然振動週期。

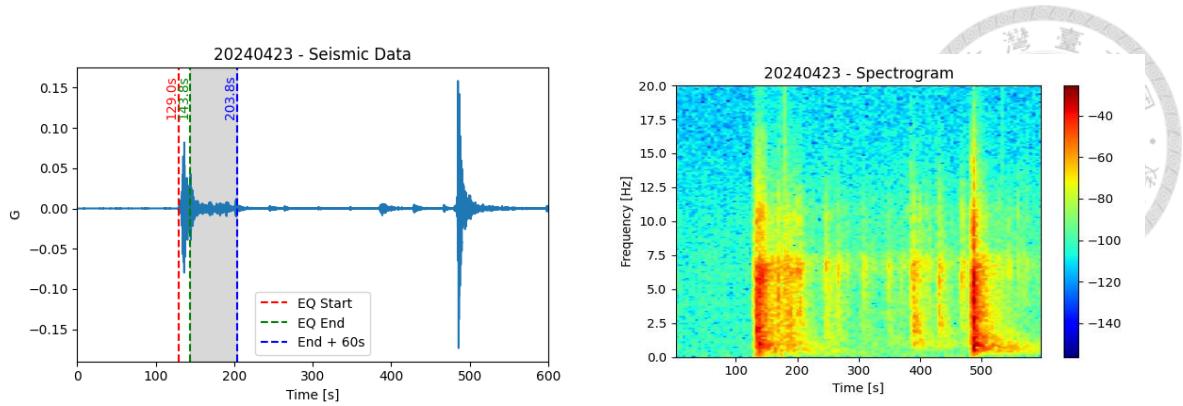


圖 3.4 P-Alert 地動訊號之時頻圖：左圖為單站型結構物紀錄之波型圖，右圖為地震紀錄時頻圖。

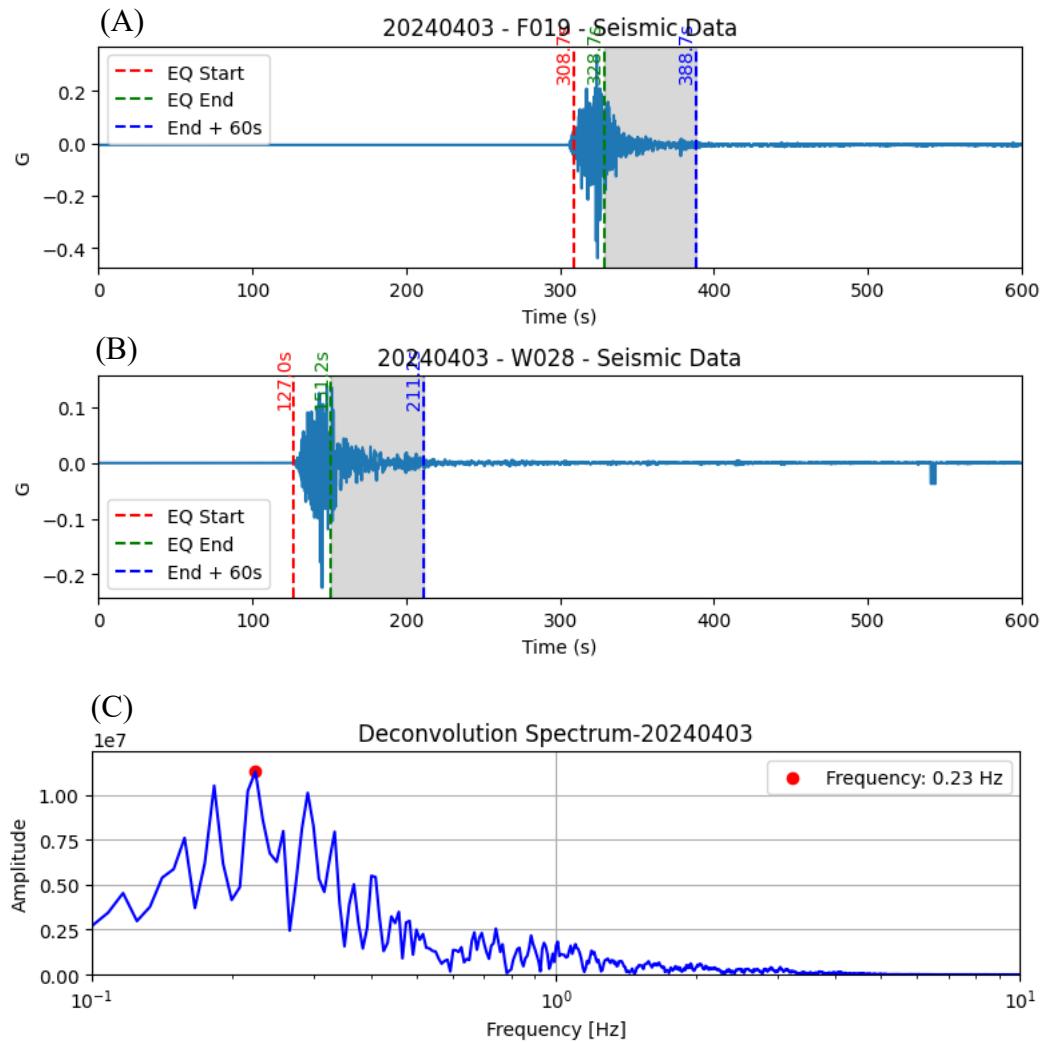


圖 3.5 利用自由場測站、單站型結構物計算結構物振動週期：(A)自由場測站 F019 紀錄(B)結構物測站 W028 紀錄(C)結構物測站與自由場測站反卷積結果。



表 3.1 P-Alert 測站與自由場測站配對表

P-Alert 測站編號	中央氣象署 自由場測站編號	兩者距離(單位:公尺)
W00B	F028	758
W00F	F019	516
W014	F026	1653
W023	F026	1365
W028	F019	524
W475	F015	28

3.2.2 多測站結構物：反卷積法

在診斷結構物損傷診斷中，多測站結構物因為能同步取得不同樓層的振動訊號，所以將地表或一樓的測站訊號進行反卷積處理，可以與 3.2.1 節所述，於頻率域中獲得脈衝波的峰值，求得結構物自然振動週期 T_1 。在反卷積的公式上僅需要改寫式(3.3)與式(3.4)轉變成單一結構物不同樓層間的關係，其修正後的公式如下所示：

$$H(h, t) = G(h_0, t) * F(h, t) \quad (3.5)$$

$$D(h, h_0, \omega) = \frac{u(h)}{u(h_0)} \quad (3.6)$$

其中， h 代表結構物測站所在的樓層高度， h_0 則是地面或一樓測站的高度位置， $H(h, t)$ 為該樓層測站所記錄的加速度資料， $G(h_0, t)$ 則是地面或一樓測站的地動資料， $F(h, t)$ 則為待求的結構物響應函數。利用式(3.6)將各樓層測站與地面測站進行頻率域的相除，就可以獲得 $D(h, h_0, \omega)$ ，並從脈衝波的峰值判斷結構物自由振動周期 T_1 ，其詳細流程圖如圖 3.6 所示，在圖 3.7 中展示在結構物中各樓層的波形紀錄圖，圖 3.8 為各樓層對地面站反卷積後的結果。

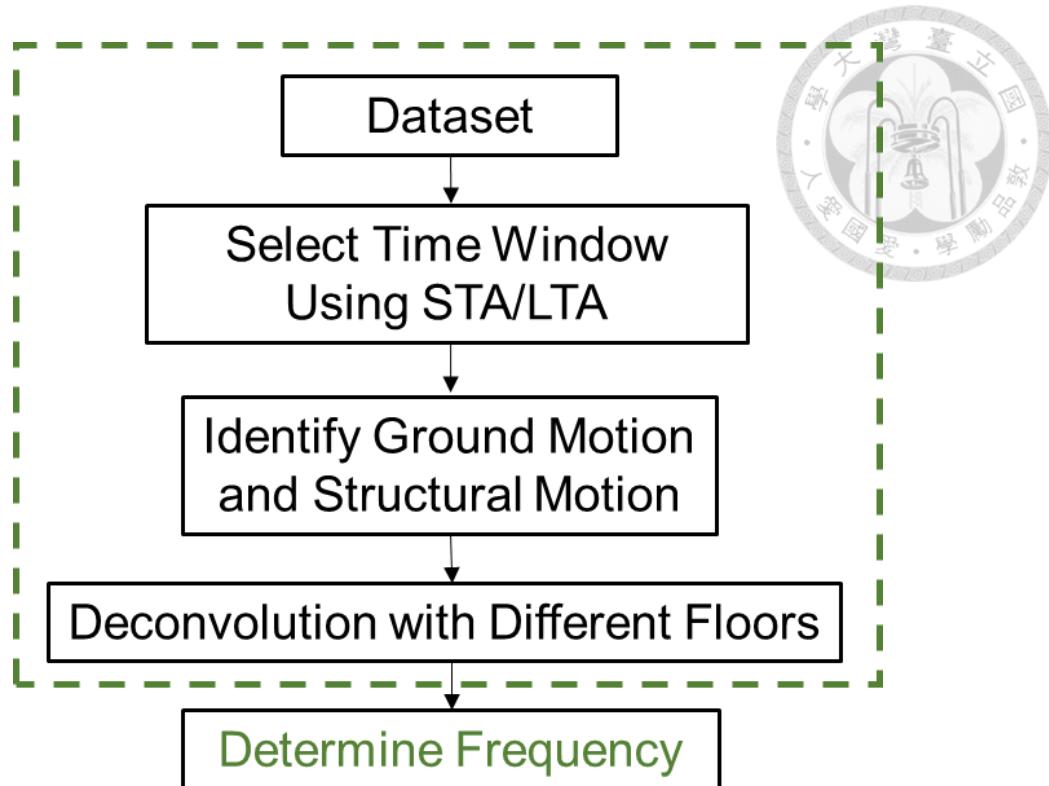


圖 3.6 識別結構物基本頻率工作流程圖

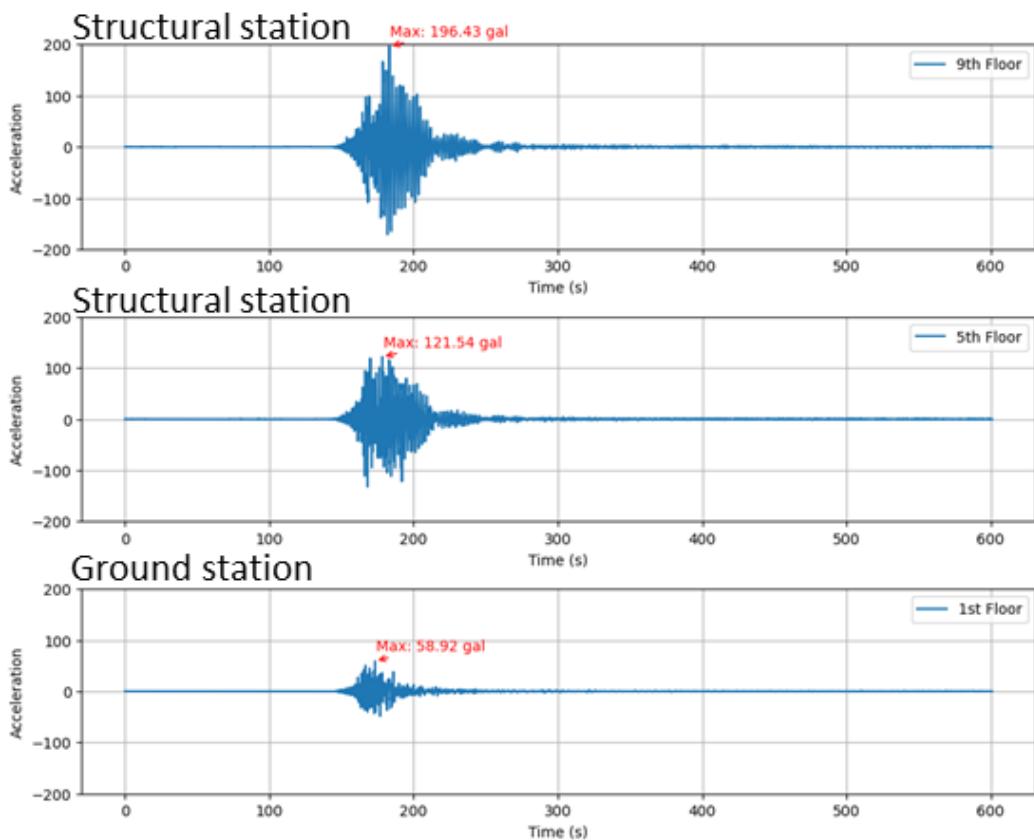


圖 3.7 多站型結構物：地下一樓、五樓、九樓地震紀錄波形圖

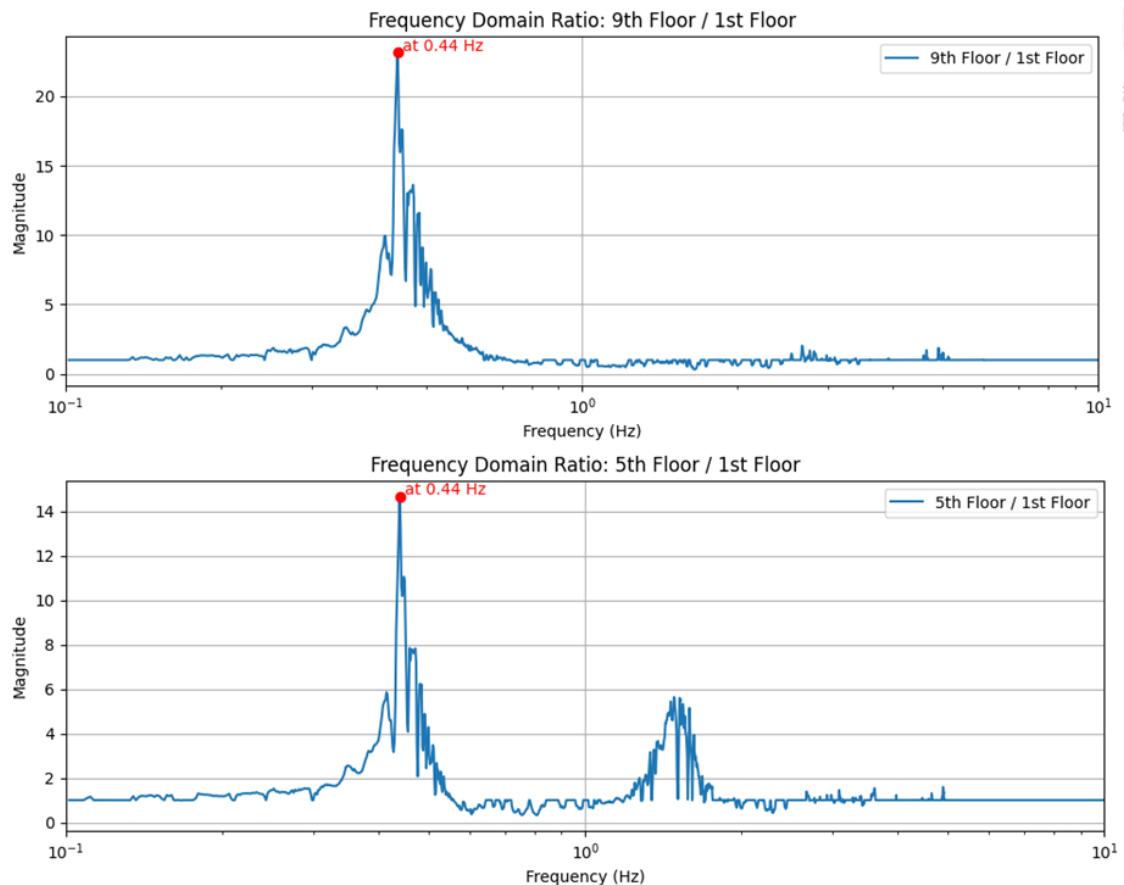


圖 3.8 多站型結構物：五樓與九樓樓層與地面測站反卷積結果

3.3 結構物層間位移

層間位移量的變化能夠直接描述結構物在地震作用下結構柱之變位情形，因此在結構物健康監測與損傷評估中，層間位移常被視為判斷結構物受損程度的重要指標。然而，大多數用於監測結構物損傷的感測器為加速度儀，其原始數據無法直接提供即時位移資訊。根據前人研究，透過雙重積分法可以將加速度資料轉換為位移數據，進而實現即時位移監測(Loh et al., 2016; Dan et al., 2019; Zhu et al., 2020)，因此本節將詳細說明雙重積分法的計算流程。

為了避免測站間存在時間延遲而影響計算結果，因此本研究採用的測站類型僅 P-Alert 多測站結構物以及 CWABA 的結構物，且進行互相關分析以及相位差校正的方式對訊號進行時間修正，以確保使時間一致性並降低計算誤差。



3.3.1 低頻衰減法(low-frequency attenuation, LFA)

除了將各測站時間對齊外，為了確保每次積分時所產生的低頻訊號，本研究採用 Butterworth 濾波器 0.3 Hz 至 8.0 Hz 零相位濾波的方法去除不必要之訊號。另外，由於 Butterworth filter 此濾波器的衰減係數也會影響層間位移之結果，其方程式如式 3.7 所示：

$$\begin{cases} H_B(\tilde{f}) = -\frac{\tilde{f}^2}{\left(\tilde{f}^4 - 1 + \frac{1}{\alpha_T}\right)} \\ H_B^{acc}(\tilde{f}) = \frac{\tilde{f}^4}{\left(\tilde{f}^4 - 1 + \frac{1}{\alpha_T}\right)} \end{cases} \quad (3.7)$$

此方程中 $H_B(\tilde{f})$ 是輸入加速度資料的方程式， $H_B^{acc}(\tilde{f})$ 則是經過濾波器後的加速度資料方程式， α_T 是衰變係數，而 Zhu 等人發現當 α_T 是 0.97 時會有最小的誤差值，其頻譜圖圖 3.9 所示，因此本研究將採用此數值進行濾波。

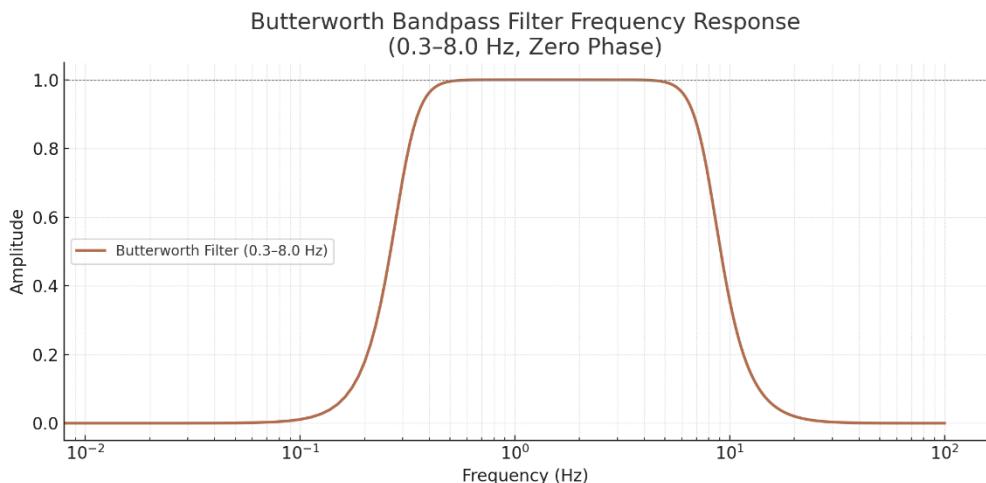


圖 3.9 Butterworth filter 帶通濾波能量趨勢圖

3.3.2 最小平方法

在雙重積分法中，須注意異常的低頻訊號外，往往在數值積分後產生了基線飄移(Baseline drift)，因此需要利用最小平方法的方式，找到各資料點的趨勢線，將基線校正成接近 0 且水平的位置。而此方法可以利用以下最佳耦合方程式：

$$\varphi(t) = \sum_{k=0}^m a_k \varphi_k(t) \quad (3.8)$$

由式(3.8)可以找出於找出資料點 $\{x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 中的最小值 $\sum_{i=1}^N |\varphi(t_i) - x_i|^2$ 。



接著，利用計算出最小值的函數 $\varphi(t)$ 進行基線的校正，減少基線飄移所造成在積分時的誤差。

透過上述的低頻衰減法以及最小平方法的修正後，即可透過圖 3.10 與下述的步驟進行雙重積分法：

- (1) 選取想要的加速度資料 $\{x_i\}$ 。
- (2) 利用 Butterworth filter 進行帶通濾波 0.3 Hz 至 8 Hz，且衰變係數設定 0.97。
- (3) 進行資料去平均(Zero-mean)。
- (4) 利用式(3.8)找出基線飄移趨勢線，並進行校正。
- (5) 利用三角形積分法(Trapezoidal method)，將數值積分。
- (6) 重複 (2) ~ (5) 兩次，即可求得結構物層間位移值，如圖 3.11 所示。

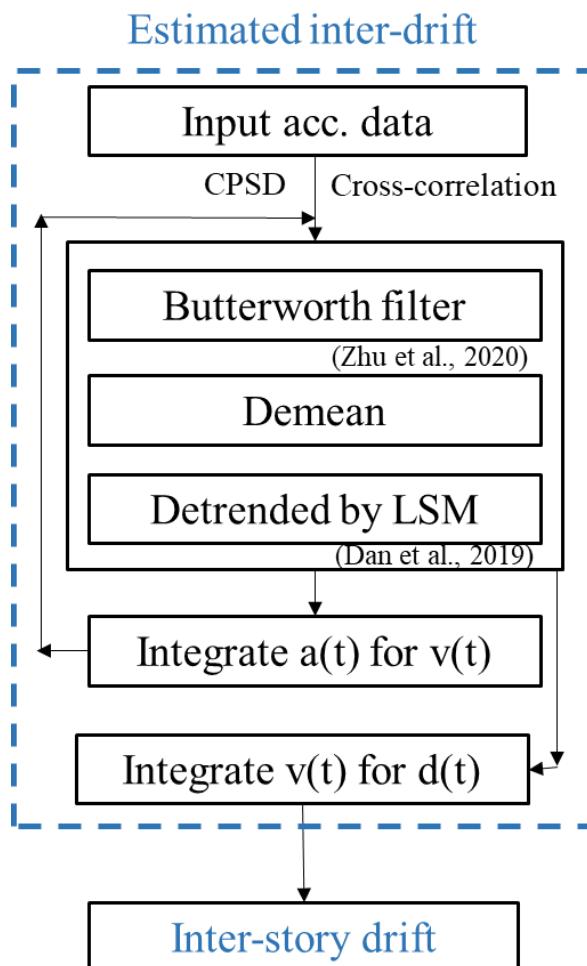


圖 3.10 雙重積分法工作流程圖

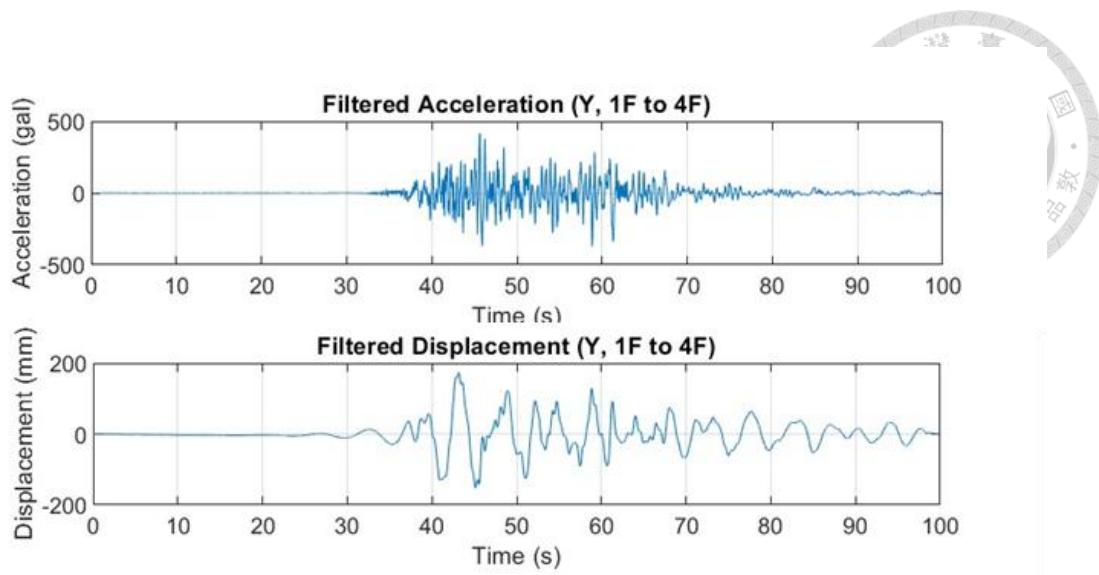


圖 3.11 雙重積分法：加速度資料轉換位移資料示意圖

3.3.3 層間位移角

根據臺灣內政部建築技術規則建築設計施工編第 236 條，層間位移角的角度若超過千分之五則結構物有受損之可能。因此本研究為了解結構物經過強震事件後的層間位移角變化，可以依照前人所提供的層間位移角方程式：

$$\theta_i = \frac{d_i - d_{i-1}}{h} \quad (3.9)$$

將不同樓層的即時位移值 d_i 和 d_{i-1} 進行相減後得到 Δ_1 與 Δ_2 ，再將 Δ_1 、 Δ_2 與高度差 h 相除，即可獲得結構物的層間位移角(如圖 3.12)，又可從不同的地震事件了解層間位移角的變化，及時監測結構物是否有損傷之疑慮。

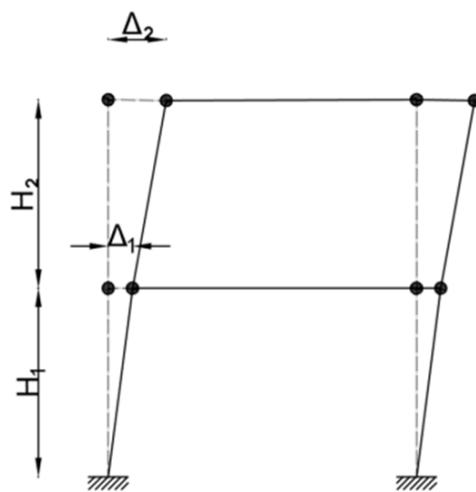


圖 3.12 層間位移角計算示意圖 (Seo et al., 2014)



3.4 結構物強度測量

為了量化地震對於結構物造成的損害，在現今土木工程的領域中有針對不同的類型進行參數的分類，如表 2.2 強度參數:結構物頻率反應、振幅強度參數、結構物歷時變化參數對照表(De Biasio et al., 2014)表 2.2，例如：結構物頻率反應、振幅強度、結構物歷時變化。在本研究中的目的是希望分析在短時間的強震事件對於結構物的頻率變化，所以本研究所採用的參數有四個： $Sa(T_1)$ 、PGA、層間位移、層間位移角。利用以上參數評估 P-Alert 系統在強震中的趨勢變化，如圖 3.13 所示，以確保在實際建物 P-Alert 系統之可用性。

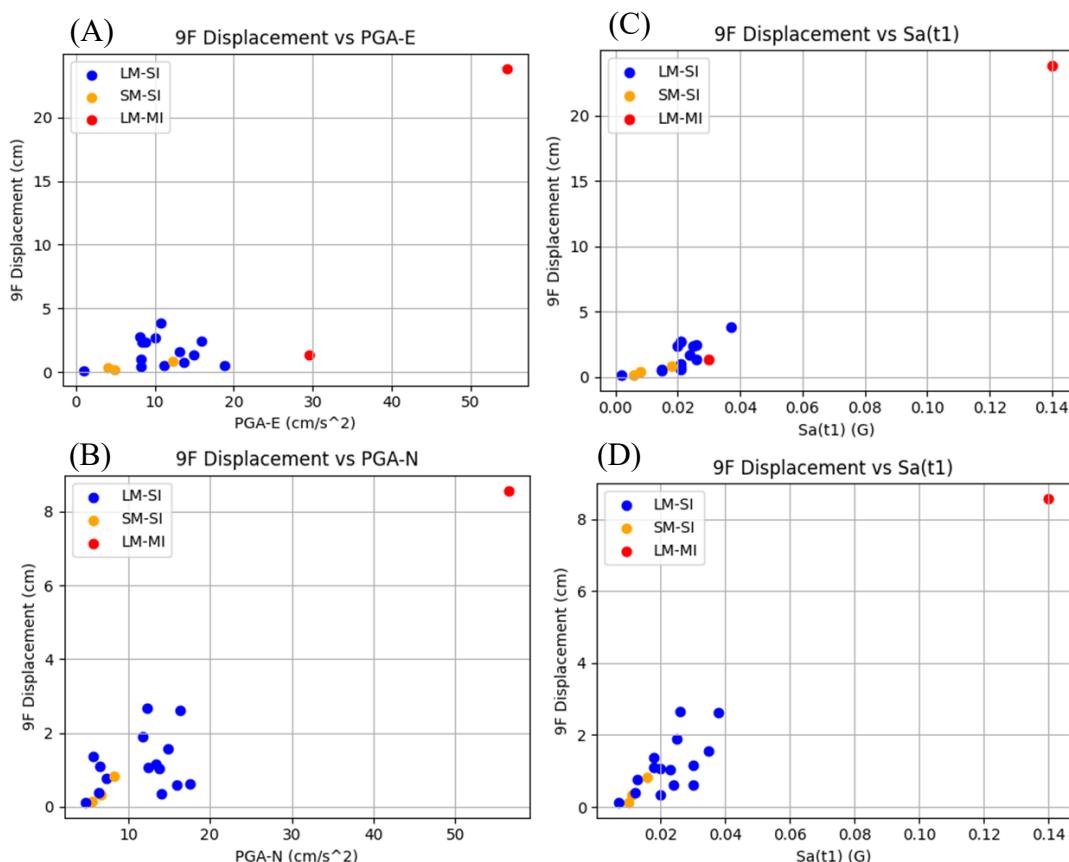


圖 3.13 強度測量參數: PGA、 $Sa(T_1)$ 與頂樓層間位移之關係圖。(A) 9 樓層間位移與 PGA-E 的關係圖；(B) 9 樓層間位移與 PGA-N 的關係圖；(C) 9 樓層間位移與 $Sa(T_1)$ -X 的關係圖；(D) 9 樓層間位移與 $Sa(T_1)$ -Y 的關係圖





Chapter 4 結構物基本資訊

本章節主要介紹有關研究中會使用的結構物資訊、測站架設位置、收到地震事件個數等，以及振動台試驗之細節。

4.1 地震預警系統觀測網（P-Alert）

本研究主要利用 P-Alert 系統中的觀測網進行評估，依據感測器設置個數，P-Alert 系統主要分成兩種類型的結構物。其中一種為單站型結構物，即指單一結構物中僅安裝一個地震測站。另一種結構物為多站型結構物，指在單一結構物中擁有兩個以上的地震測站。本節將針對兩種類型結構物進行說明。

4.1.1 單站型結構物資訊

如同 2.1.1 節中的介紹，P-Alert 所採用的感測器具有三分量的加速度儀，通常安裝在結構物的剪力牆或者是梁柱上。在本次研究中，分析範圍聚焦在 2024 年 4 月 3 日花蓮地震中，有房屋倒塌的行政區域進行結構物損傷分析。如圖 4.1 所示最北端為 W014 花蓮縣立秀林國小，鄰近受災嚴重的砂卡噹步道，最南端為 W475 花蓮縣立吉安國小附近的廢棄洗衣廠房在餘震序列中倒塌(圖 4.2 所示)。值得注意的是，W028 花蓮女中站在此次地震事件中有一棟結構物列為危險建築，因此在強震事件中 P-Alert 扮演極重要之角色。

以花蓮女中為例，P-Alert 測站安裝在行政大樓一樓的廣播室，安裝位置大約為剪力牆高度的一半，如圖 4.3 所示。該建築物共四層樓，結構物長軸與正北方向夾角約為 43 度。考量地震學與結構工程領域對於軸向命名的差異，本研究將經過方位修正後，X 軸定義結構物短邊方向，Y 軸則是結構物長邊方向(圖 4.4)。

在地震事件收錄方面，由於單站型結構物需要結合中央氣象署地球物理強震觀測網的自由場資料，透過反捲積分析以辨識結構物的基頻。因此參考表 3.1 各結構物與觀測網的對照表，研究收錄時間於 2020 年 1 月 1 日至 2024 年 8 月 31 日止，共有 5 次 $M_L > 6.0$ 地震事件，如。圖片取自：<https://www.hlgs.hlc.edu.tw/> 表 4.1 所示，並利用 97 筆地震事件分析單站型結構物基頻，地震目錄如附件 B。



圖 4.1 單站型結構物位置分布圖。圖片取自：<https://palert.earth.sinica.edu.tw/>



圖 4.2 花蓮女中建物受損圖。圖片取自：<https://www.ner.gov.tw>



圖 4.3 花蓮女中 P-Alert 測站架設位置圖



圖 4.4 W028 花蓮女中教室配置圖。圖片取自：<https://www.hlgs.hlc.edu.tw/>



表 4.1 單站型結構物之 $M_L > 6.0$ 之地震目錄

地震時間(UTC +8)	經度	緯度	地震規模(M_L)	花蓮測站 PGA-N	花蓮測站 PGA-E
2018/02/06 23:50:41	121.730	24.100	6.2	442.2 gal	399.8 gal
2022/09/17 21:41:19	121.160	23.080	6.6	8.1 gal	11.7 gal
2022/09/18 14:44:15	121.196	23.137	6.8	39.4 gal	49.4 gal
2024/04/03 07:58:09	121.584	23.8607	7.2	457.9 gal	256.0 gal
2024/04/23 02:26:51	121.543	23.8525	6.1	178.5 gal	156.7 gal

4.1.2 多站型結構物資訊

在 P-Alert 系統的觀測網中，僅有一棟建物符合此類型。該結構物位於新竹科學園區內的一處廠房，總樓高達十層樓，樓層高度約為四公尺，結構形式為鋼筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)，如圖 4.5 所示。此結構物中共架設三組 P-Alert 加速儀，分別安裝於地下一樓天花板(H010)、一樓管道間(H009)、九樓管道間(H008)，並且三個加速度儀垂直方向均有對齊，方便後續分析。另一方面，結構物長邊與正北方向夾角約 15 度，本研究依照方位校正，將 X 軸指方向定義為結構物短邊，Y 軸則是結構物長邊，其儀器與方位對照圖可參考表 4.2 新竹廠房樓層對照表。在資料收錄方面，時間收錄範圍自 2014 年 12 月 10 日至 2024 年 8 月 31 日止，期間共蒐集到 19 筆地震事件，其中有 16 筆地震事件的 $M_L > 6.0$ 以上，完整事件資訊如表 4.3 所示。

表 4.2 新竹廠房樓層對照表

	B1	5F	9F
X	H010	H009	H008
Y	H010	H009	H008

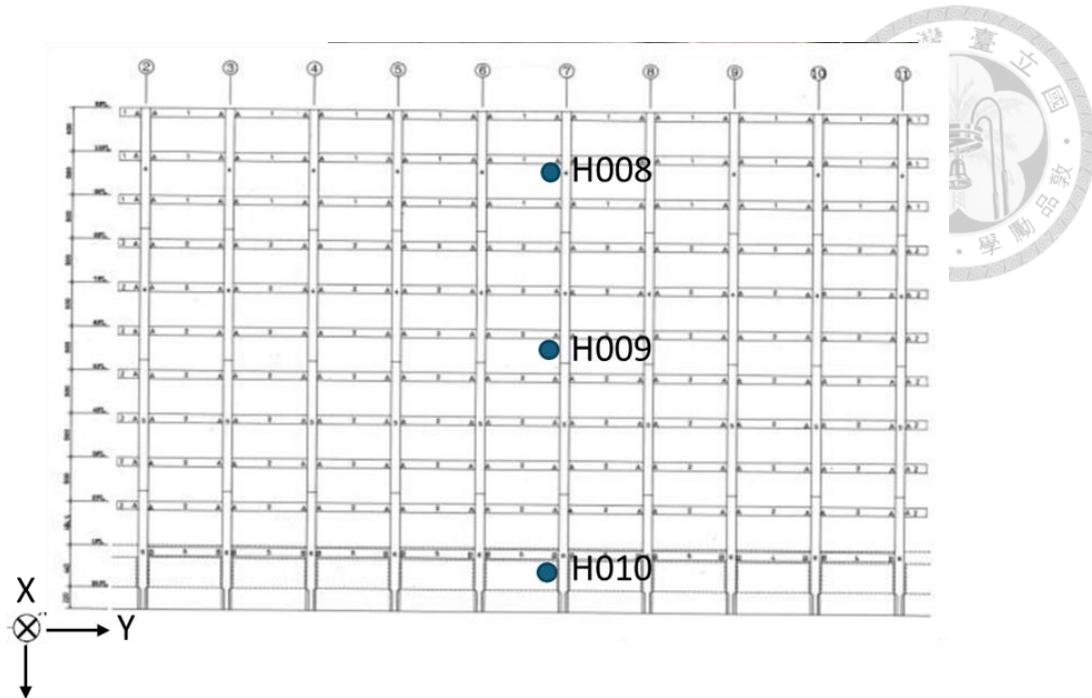


圖 4.5 新竹廠房與 P-Alert 擺設位置設計圖(Chou et al., 2015)

表 4.3 新竹廠房收錄 $M_L > 5.5$ 地震目錄

發震日期	經度	緯度	規模(M)	PGA-X	PGA-Y
2025/1/21 00:17	120.547	23.221	6.4	6.2	11.6
2024/8/16 07:35	121.705	23.782	6.3	12.6	14.2
2024/4/27 02:49	121.689	24.254	5.8	13.2	7.8
2024/4/27 02:21	121.684	24.190	6.1	11.9	17.5
2024/4/23 02:32	121.543	23.852	6.3	15.0	8.3
2024/4/3 10:14	121.976	24.146	6.2	21.4	22.8
2024/4/3 08:11	121.651	24.130	6.5	8.7	7.4
2024/4/3 07:58	121.584	23.860	7.2	58.9	66.8
2022/9/18 14:44	121.196	23.137	6.8	14.6	17.0
2022/1/3 17:46	122.171	24.020	6.0	11.1	6.7
2021/10/24 13:11	121.775	24.533	6.5	18.2	17.9
2021/4/18 22:14	121.480	23.860	6.2	10.9	19.2
2021/2/7 01:36	122.610	24.660	6.2	1.9	4.8
2021/1/9 19:35	122.020	24.730	5.8	6.6	9.6
2020/12/10 21:19	122.000	24.740	6.6	13.5	16.6
2019/8/8 05:28	121.910	24.440	6.2	31.0	17.2
2019/4/18 13:01	121.560	24.050	6.3	10.6	15.6
2016/5/31 13:23	122.680	25.490	6.9	8.6	7.2
2016/5/12 12:29	122.020	24.690	5.7	5.4	8.6
2016/5/12 11:17	121.980	24.690	6.1	9.3	15.5



4.2 中央氣象署結構物觀測陣列 (CWABA)

隨著人口密度逐漸提升，以及高樓大廈與橋樑等大型結構物的興建，結構物的耐震能力評估與結構物健康監測也日益重要。為此，中央氣象署於西元 1993 年起於不同地質區域及不同型態結構物內設置結構物強震監測系統，紀錄強震對於結構物之影響。

結構物站點依照振動週期分為低層建築物 ($T_1 < 0.5$ 秒)、中高層建築物 ($T_1 = 0.5 \sim 1.5$ 秒) 及超高層建築物 ($T_1 > 1.5$ 秒)，其測站分布位置與地震類型如圖 4.6 所示。而本次研究的結構物為國立中興大學土木環工大樓(測站編號：TCUBA3)，如圖 4.7 所示。此結構物樓房包含地下一層，地上長軸方向中 1/3 部分為三層，其餘則為七層，整體結構屬中高層建築物。值得注意的事，七層樓區段的地下室與地面存在約 1.5 公尺的間隔。該建物內共安裝多組地震儀，其位置與頻道配置如表 4.4 所示，感測器分別設置在地下一樓、一樓、四樓及七樓的樓地板，並且包含自由場資料，總共記錄 29 個頻道。在進行建物健康檢測時，需考慮各樓層感測器擺放位置在垂直方向上保持一致。因此選取頻道的結果如表 4.5 所示，長軸方向為 CH8、CH26、CH14、CH21；短軸方向為 CH10、CH27、CH15、CH22。

此結構物地震收錄時間為西元 1994 年至 2010 年止。收錄事件如表 4.6 所示，共計 78 筆地震事件，其中有 54 筆地震事件 $M_L > 6.0$ 。

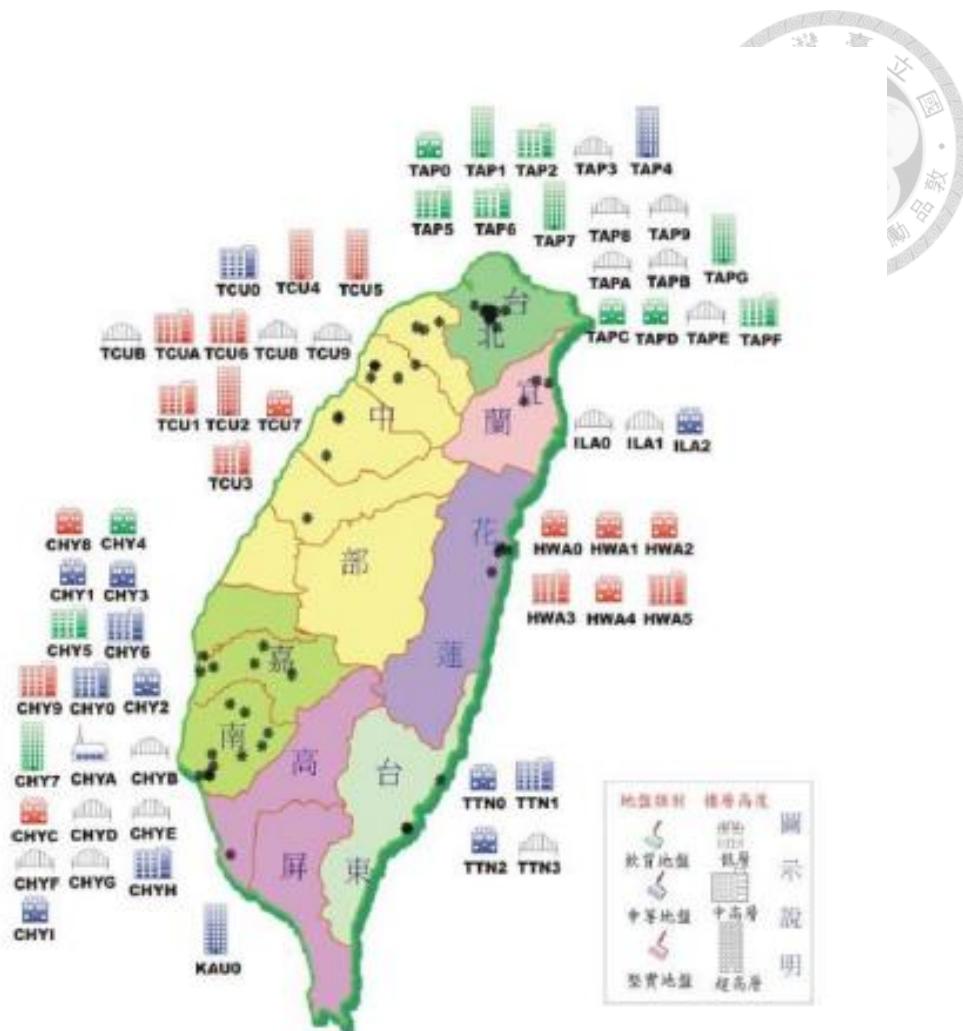


圖 4.6 結構物強震監測網結構物分布圖。圖片取自：<https://www.cwa.gov.tw/>

表 4.4 TCUBA3 頻道架設位置資訊表。資料取自：<https://www.ncree.niar.org.tw/>

編號	軸向	位置描述	參考點	X	Y
CH01	X	自由場	1D	-1175	2130
CH02	Y	自由場	-1D	-1175	2130
CH03	Z	自由場	1D	-1175	2130
CH04	Y	B1 下中間樓地板上	8D	-26	-78
CH05	Z	B1 下中間樓地板上	8D	-6	83
CH06	X	B1 下中間樓地板上	18B1	-25	-14
CH07	Z	B1 下中間樓地板上	18B1	-4	-19
CH08	Y	B1 下中間樓地板上	8A	19	4
CH09	Z	B1 下中間樓地板上	8A	29	-30
CH10	X	B1 左中間樓地板下	1C	361	9
CH11	Z	B1 左中間樓地板下	1C	352	29
CH12	Y	4F 下中間樓地板下	9C	-675	-21
CH13	X	4F 右中間樓地板下	18B	26	28
CH14	Y	4F 右中間樓地板下	9B	682	28
CH15	X	4F 左中間樓地板下	1B	-569	9
CH16	Z	4F 電機系教室樓地板下	2C	692	30
CH17	Y	4F 電機系教室樓地板下	2C	692	19
CH18	Z	RF 下中間樓地板下	9D	33	-14
CH19	X	RF 下中間樓地板下	18B	219	2
CH20	Z	RF 下中間樓地板下	18B	-40	4
CH21	Y	RF 下中間樓地板下	9A	-8	-8
CH22	X	RF 下中間樓地板下	1B	-152	1
CH23	Z	RF 下中間樓地板下	1B	-131	3
CH24	Y	1F 中間樓地板下	8D	-11	20
CH25	X	1F 中間樓地板下	18B1	-6	7
CH26	Y	1F 中間樓地板下	8A	23	21
CH27	X	1F 中間樓地板下	1C	355	28
CH28	X	1F 土木實驗室樓地板上	20B1	-23	-16
CH29	Z	1F 土木實驗室樓地板上	20B1	-33	-21



表 4.5 TCUBA3 頻道樓層對照表

	B1	1F	4F	7F(RF)
X	CH10	CH27	CH15	CH22
Y	CH8	CH26	CH14	CH21

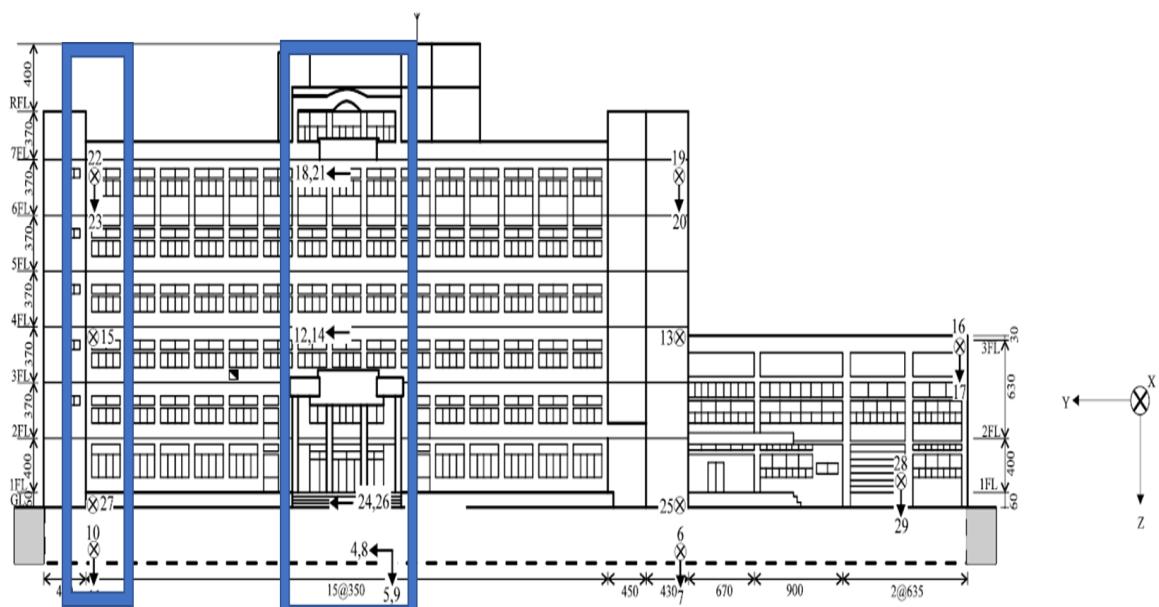


圖 4.7 TCUBA3 結構物與頻道側向設計圖，藍色方框可對照不同方位所選取的測站位置。圖片取自：<https://www.ncree.niar.org.tw/>

表 4.6 TCUBA3 所收錄 $M_L \geq 5.5$ 的地震事件目錄

發震日期	經度	緯度	規模(M)	PGA-X	PGA-Y
1994/10/5 01:13	121.720	23.160	5.8	34.7	35.0
1995/2/23 05:19	121.690	24.200	5.7	8.6	7.0
1995/6/25 06:59	121.670	24.610	6.5	11.7	10.7
1996/7/29 20:20	122.350	24.490	6.1	7.4	5.9
1998/7/17 04:51	120.660	23.500	6.2	8.3	8.7
1999/9/20 17:47	120.820	23.850	7.3	219.2	245.9
1999/9/20 17:49	120.830	23.980	6.1	29.4	26.2
1999/9/20 17:51	121.040	24.090	6.0	29.2	28.8
1999/9/20 17:57	121.040	23.910	6.4	29.2	33.1
1999/9/20 17:58	121.060	23.910	5.7	13.8	13.2
1999/9/20 18:03	120.860	23.800	6.6	49.0	38.6
1999/9/20 18:11	121.070	23.860	6.7	47.9	44.5
1999/9/20 18:16	121.040	23.860	6.6	92.8	87.1
1999/9/23 12:24	121.090	23.930	5.6	7.5	7.5
1999/9/25 23:52	121.000	23.850	6.8	67.2	61.2
2000/5/17 03:25	121.100	24.190	5.6	8.0	6.7
2001/6/14 14:35	121.930	24.420	6.3	7.8	7.5
2002/2/12 03:27	121.720	23.740	6.2	13.5	12.0
2002/3/31 06:52	122.190	24.140	6.8	16.2	17.3
2002/5/15 03:46	121.870	24.650	6.2	4.1	3.8
2003/6/9 01:52	122.020	24.370	5.7	4.7	4.5
2003/6/10 08:40	121.700	23.500	6.5	17.0	15.0
2003/12/10 04:38	121.400	23.070	6.4	10.5	8.8
2004/2/4 03:23	122.150	23.380	5.6	5.1	4.4
2004/5/16 06:04	121.980	23.050	5.7	3.9	3.6
2004/5/19 07:04	121.370	22.710	6.0	4.8	4.9
2004/10/15 04:08	122.850	24.460	7.1	7.8	7.9
2004/11/8 15:54	122.760	23.790	6.6	5.3	5.0
2004/11/11 02:16	122.160	24.310	6.1	2.1	1.7
2005/2/18 20:18	121.670	23.340	5.6	4.1	3.4
2005/3/5 19:06	121.840	24.650	5.9	2.2	2.8
2005/3/5 19:08	121.800	24.650	6.0	3.2	3.2
2006/4/1 10:02	121.080	22.880	6.2	4.7	4.5
2006/4/4 19:30	122.760	24.490	5.8	0.9	0.8
2006/4/15 22:40	122.660	23.970	6.0	3.0	3.1
2006/7/28 07:40	122.660	23.970	6.0	1.8	1.8
2006/10/9 10:01	119.830	20.700	6.0	1.3	1.0
2006/12/26 12:26	120.560	21.690	7.0	11.4	9.5

2006/12/26 12:34	120.420	21.970	7.0	11.3	11.6
2007/1/25 10:59	122.030	22.630	6.2	4.6	3.8
2007/7/23 13:40	121.640	23.720	5.8	5.7	3.5
2007/8/9 00:55	121.090	23.650	5.7	1.3	1.4
2007/9/6 00:00	122.250	24.280	6.6	6.7	5.3
2008/4/23 18:28	121.679	22.870	5.6	1.8	2.0
2008/5/10 19:42	122.530	23.950	5.6	1.5	1.5
2008/6/1 16:59	121.790	24.860	5.8	1.1	1.3
2008/9/9 07:43	122.630	24.610	5.9	1.1	1.5
2008/12/2 03:16	121.490	23.340	5.6	6.7	5.5
2008/12/7 21:18	122.200	23.850	5.9	2.2	2.0
2009/5/26 22:27	119.550	21.740	5.7	0.7	0.6
2009/7/13 18:05	122.220	24.020	6.0	3.0	3.0
2009/7/29 16:53	120.480	22.050	5.8	1.2	1.3
2009/10/3 17:36	121.580	23.650	6.1	8.0	6.3
2009/11/5 09:32	120.720	23.790	6.2	26.3	22.6
2009/11/5 11:34	120.760	23.770	5.7	17.1	15.2
2009/12/19 13:02	121.660	23.790	6.9	21.5	24.2

4.3 振動台實驗

本研究在感應器效能驗證方面，採用 2016 年於 NCREE 進行的地震模擬振動台實驗資料進行比對分析。正如 2.1.2 節所述，實驗中使用的感應器為以下三種：Setra 高精度加速度儀、LVDT 位移計、強震預警系統 P-Alert。根據 Yin et al.(2016) 的研究說明，Setra 加速度儀的噪訊比的品質比 P-Alert 高。然而在成本方面，P-Alert 價格僅為 Setra 的四分之一(Hsu et al., 2018)。為了探討 P-Alert 在結構物健康檢測之應用，本研究特別針對加速度儀在層間位移的結果進行評估，比較 Setra 與 P-Alert 所計算出來的位移結果與 LVDT 所記錄的實際層間位移，了解 P-Alert 在層間位移準確度。

根據 2.1.2 節所提的前人實驗，本研究所採用的是第一組試驗體，此結構物主要由勁度相等的八層樓所組成，且三種感測器擺放位置由圖 4.8 所示，每層樓的 X、Y、Z 三分量均為 1.1 公尺、1.5 公尺、1.17 公尺。而八層樓主要由以下構件組成：底板、樓板、樑、矩形鋼、等邊角鋼斜撐、等邊角鋼接合板。

在實驗流程方面可參考圖 4.9 的流程圖，共使用了下列三種不同的訊號作為地動訊號：白噪音（White Noise, WN）、El Centro Earthquake（標準時間 1940 年 5

月 19 日 4 點 36 分，M 7.1，地震工程界常使用的地震記錄)、TCU068 (標準時間 1999 年 9 月 20 日 17 點 47 分， M_L 7.3，測站靠近斷層北緣)，其中 WN 振動源可以分析試體的模態形狀，而其餘兩種地震訊號則是可以根據不同搖晃強度了解結構物的頻率和試體的層間位移。此外，該組實驗針對試體設定了六種不同的結構狀態，分別標記為 Case1 至 Case6，Case1 代表結構最穩固的狀態，Case6 則為結構最不穩固的條件。各案例的詳細配置說明如表 4.7 所示。

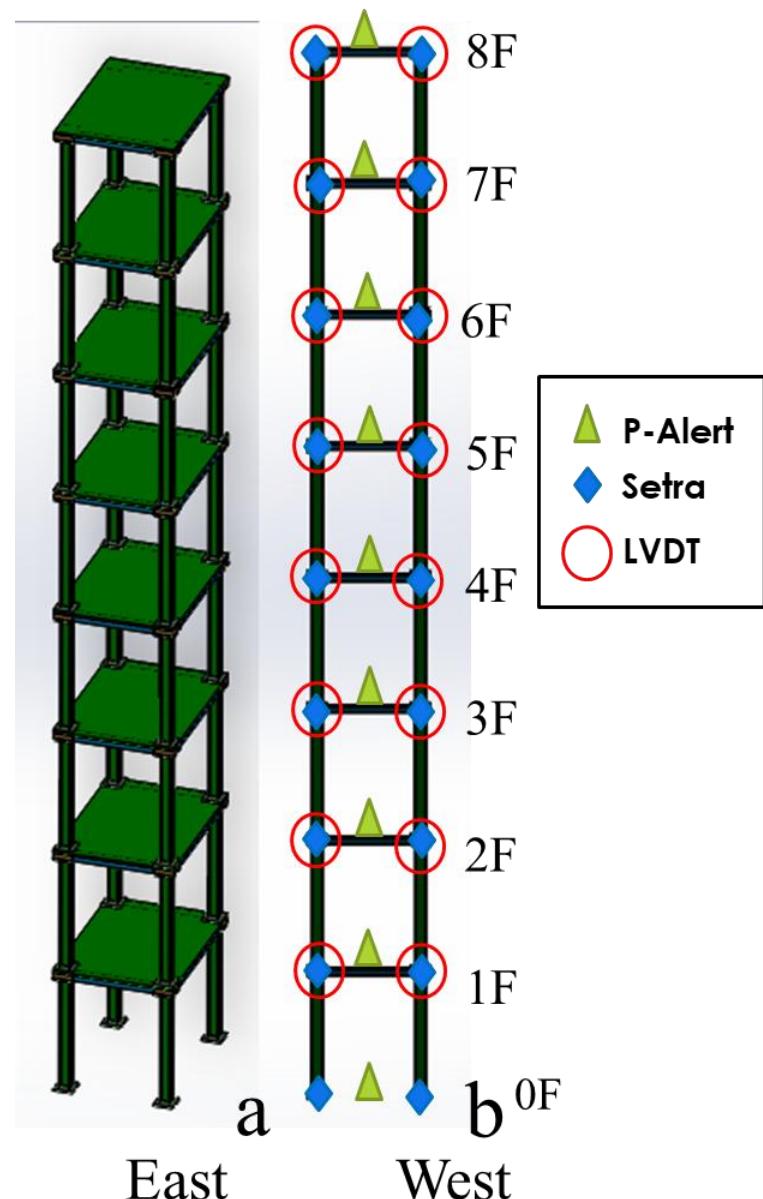


圖 4.8 振動台實驗安裝位置與其儀器類型(Yin et al., 2016)



Workflow from shaking table:

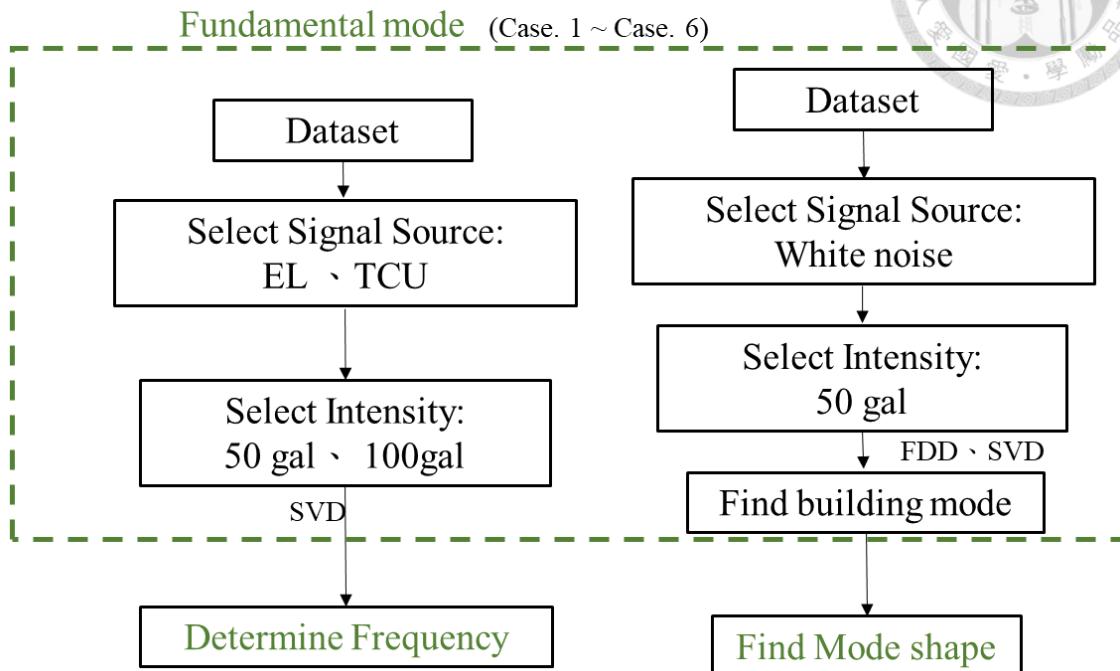


圖 4.9 振動台實驗流程圖：綠色框為基礎模態分析步驟、
藍色框為層間位移分析步驟



表 4.7 振動台實驗各案例損傷情形對照表

案例編號	結構物損傷情形	輸入訊號
Case 1	未損傷	
Case 2	2F 更換較細斜支撐	
Case 3	2F 切一邊柱腳 (5cm*15cm 矩形)	WN 50 gal、 El Centro 50 gal、 El Centro 100 gal、 TCU068 50 gal
Case 4	2F 切兩邊柱腳 (5cm*15cm 矩形)	
Case 5	2F 切兩邊柱腳 6F 切一邊柱腳	
Case 6	2F 切兩邊柱腳 6F 切兩邊柱腳	



Chapter 5 結果與討論

在本章節將詳細解釋本研究的分析結果，以及在分析結果中看到的現象與解釋，更全面剖析 P-Alert 系統在結構物損傷之應用性。

5.1 P-Alert 在振動台之性能表徵

為了瞭解 P-Alert 在實際的結構物中進行損傷檢測的能力，本試驗主要著重在：

(1) 結構物基本振動頻率與模態形狀之識別、(2)試體層間位移之分析。透過上述兩項指標的探討，驗證 P-Alert 在實際建物中對結構物損傷程度的測量準確性。

5.1.1 識別結構物基本頻率

本振動台試驗中，以強度為 50 gal 的白躁訊為輸入訊號，並採用奇異譜分解法 (Singular Value Decomposition, SVD) 進行訊號分析。從圖 5.1 可見，Case 1 在未損傷狀態下，由八樓測站相對於地面測站的反應結中，可以觀察到於 3.11 Hz 出現基本頻率訊號，此外在 15.7 Hz 亦可以觀測到高階模態訊號的出現。進一步比較不同損傷狀態 (Case 2 至 Case 6) 之結果如圖 5.2 至圖 5.6 所示，可見各損傷案例皆識別出在 2.84Hz 出現基礎頻率訊號產生。此現象顯示結構物勁度隨損傷程度下降，將導致其自然振動頻率下降。

另一方面，將 P-Alert 與高精度加速度儀 Setra 進行模態形狀對比，圖 5.8 和圖 5.8 可發現在無損傷狀態下，P-Alert 所識別出來的模態變化與右圖的 Setra 所得結果相符。除此之外，如圖 5.9 和圖 5.10 也顯示在高階模態形狀中，兩儀器的識別結果相符。此結果說明，P-Alert 雖為低成本感測器，仍具備識別結構頻率之能力，具有實用性與應用潛力。

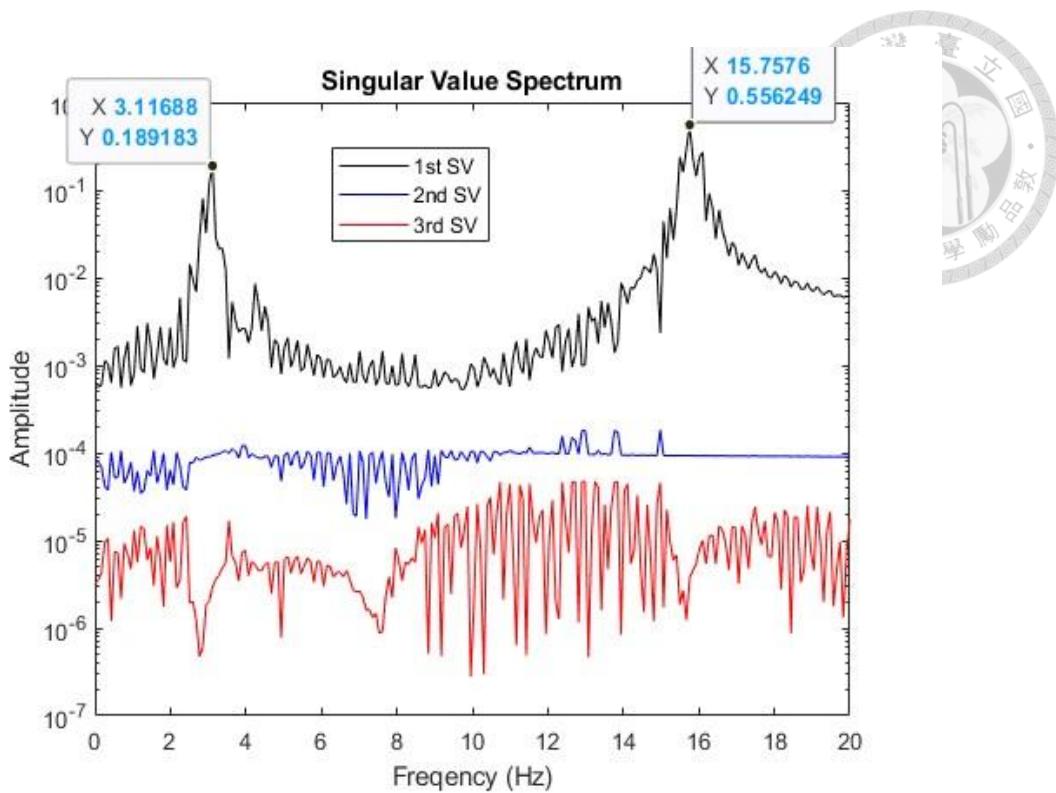


圖 5.1 Case 1 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。

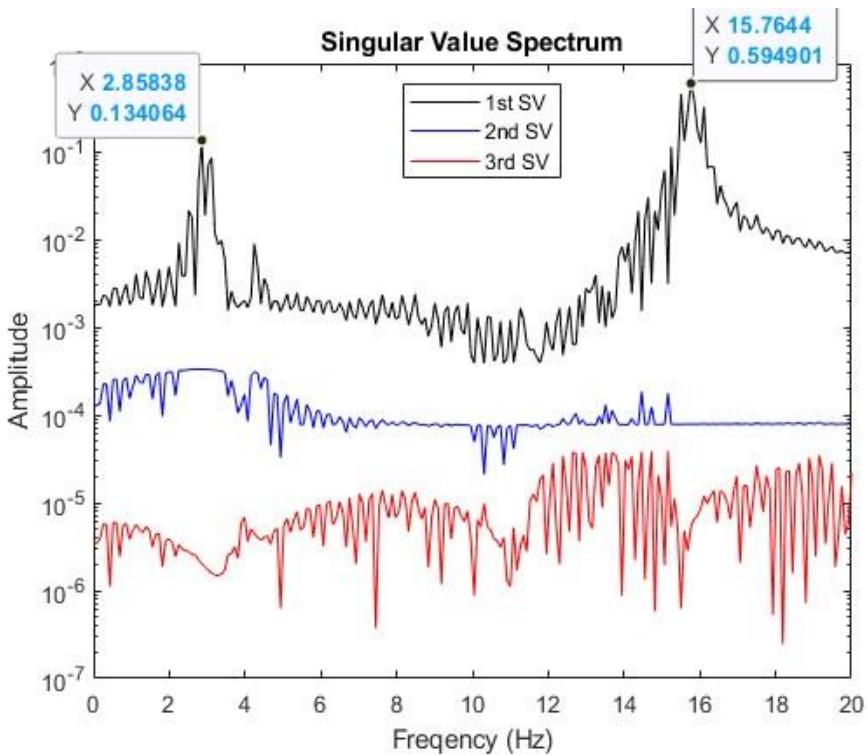


圖 5.2 Case 2 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。

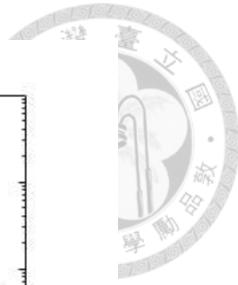
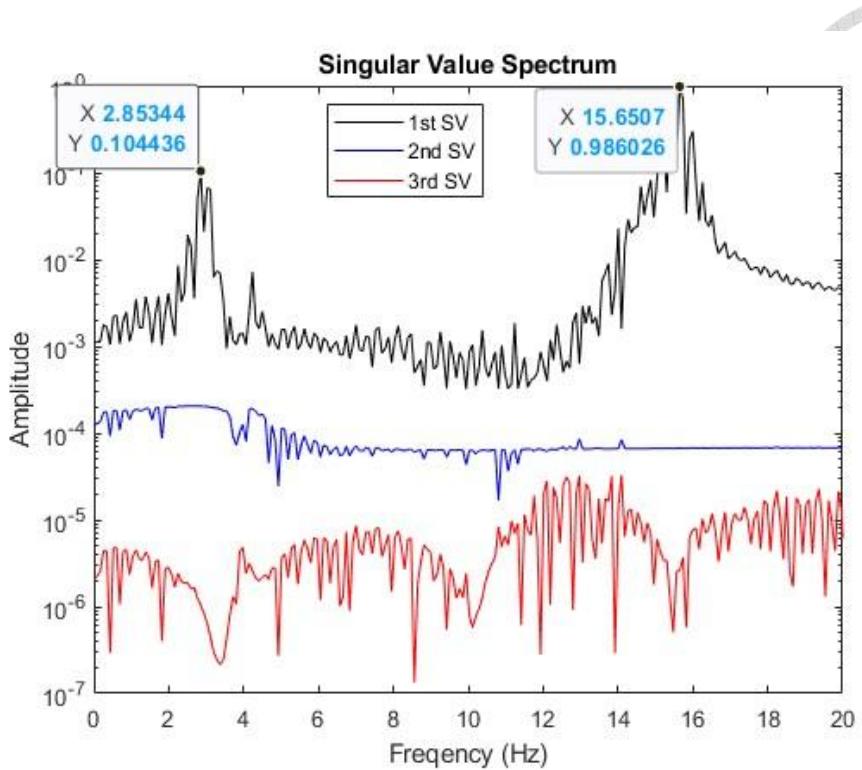


圖 5.3 Case 3 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。

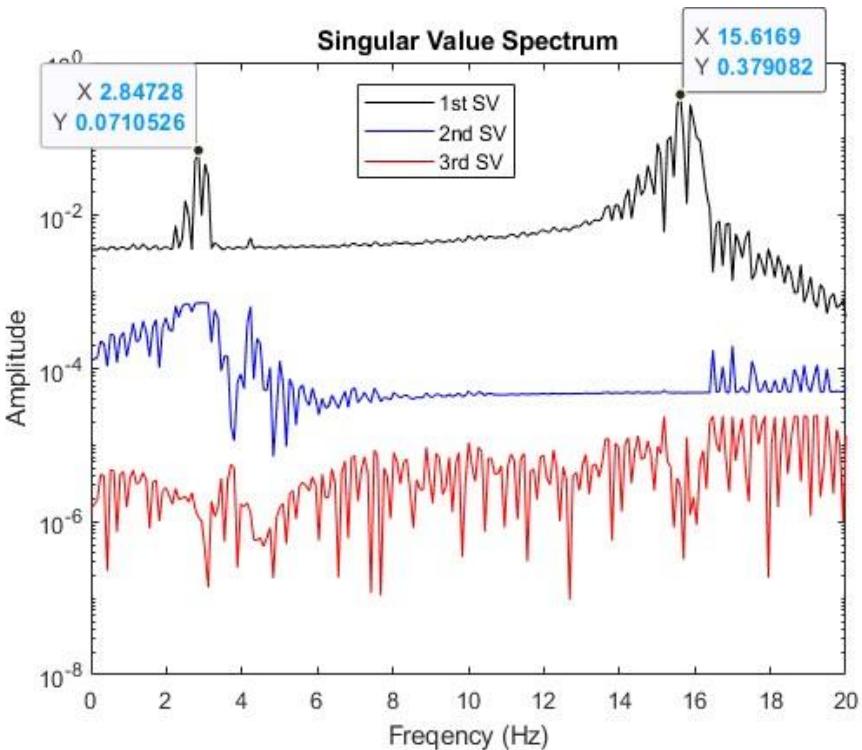


圖 5.4 Case 4 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。

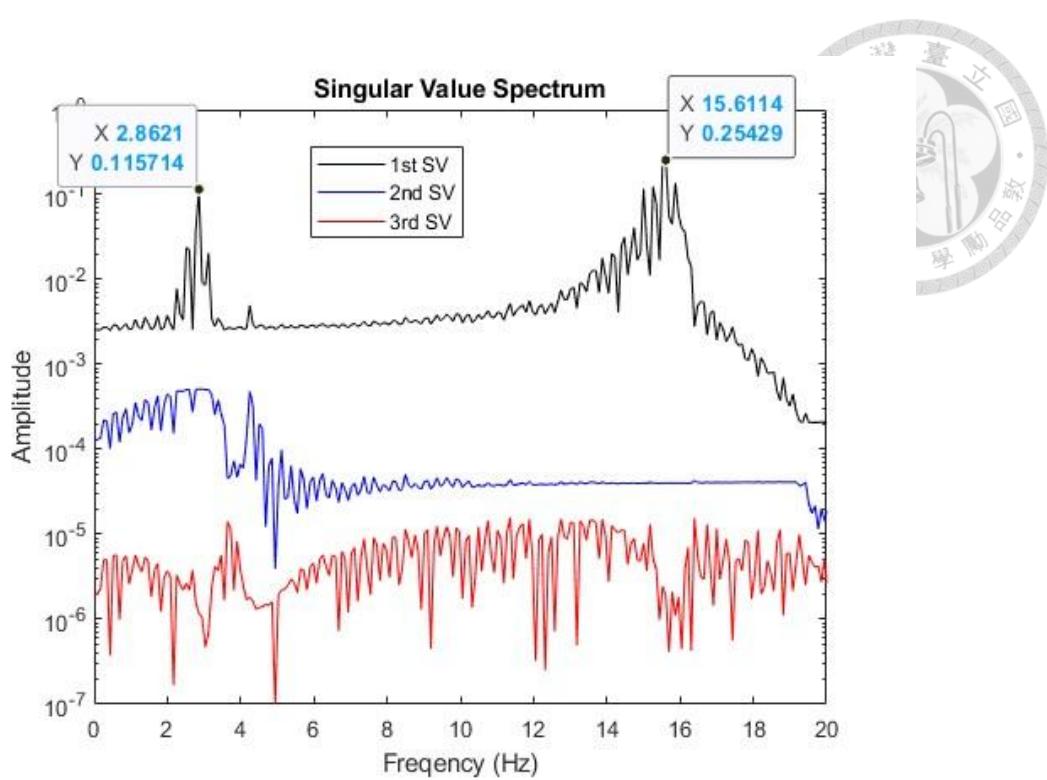


圖 5.5 Case 5 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。

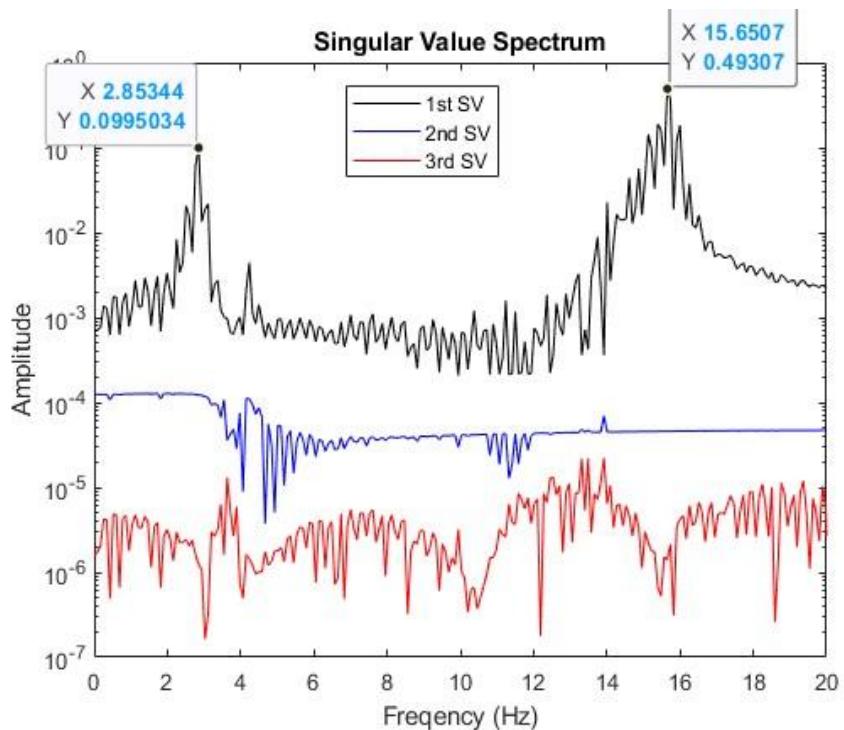


圖 5.6 Case 6 的 SVD 分析結構物振動週期結果圖:黑色線為一階 SVD 結果，藍色為二階 SVD 結果，紅色線為三階 SVD 結果。

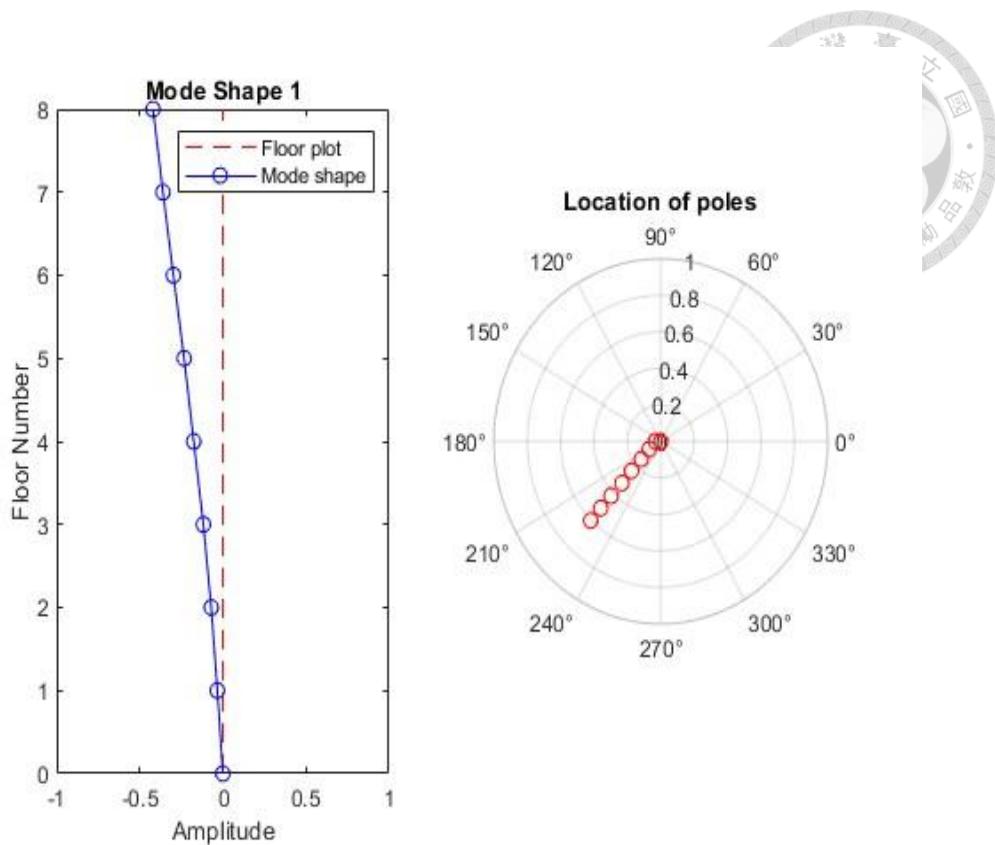


圖 5.7 P-Alert 在 Case1 無損傷試體中基礎模態形狀圖

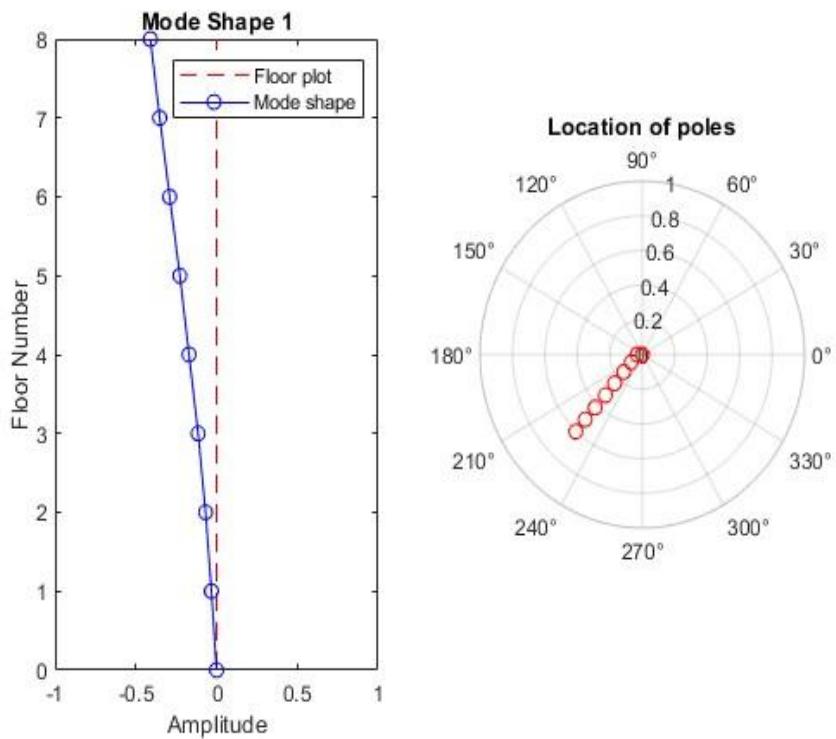


圖 5.8 Setra 在 Case1 無損傷試體中基礎模態形狀比較圖

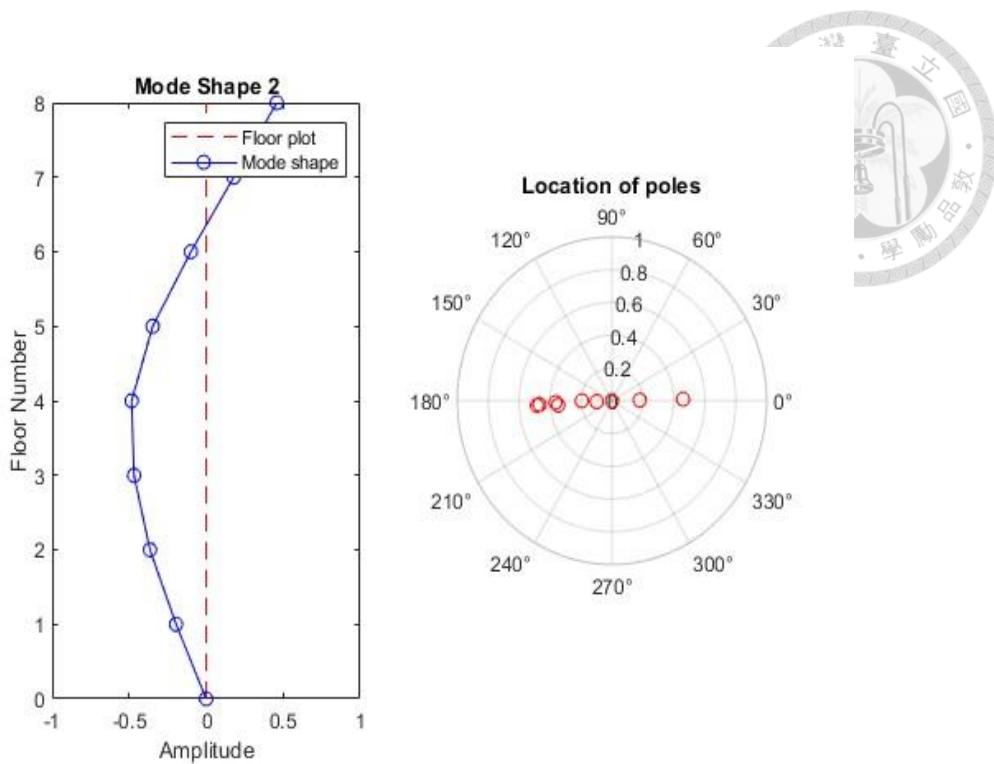


圖 5.9 P-Alert 在 Case1 無損傷試體中高階模態形狀圖

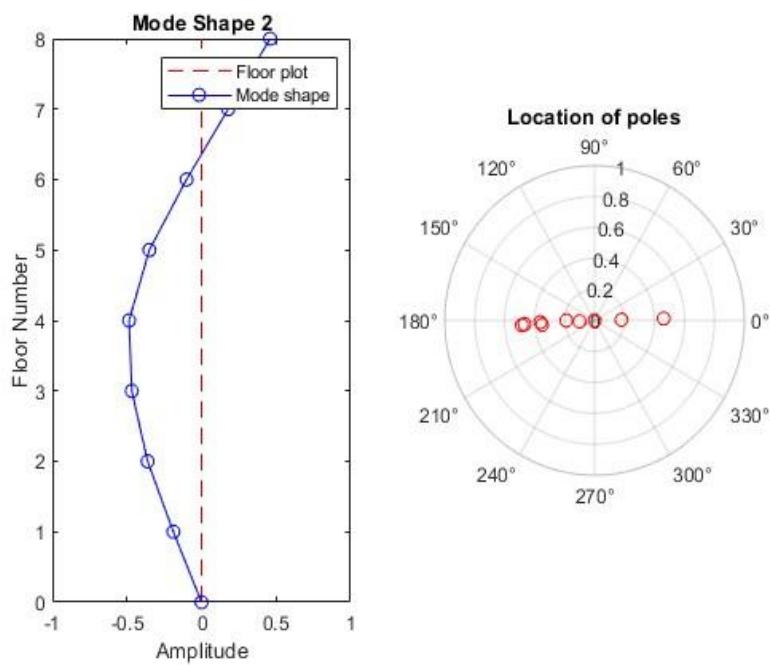


圖 5.10 Setra 在 Case1 無損傷試體中高階模態形狀比較圖



5.1.2 層間位移的評估測試

此試驗中所使用的儀器包含 P-Alert、Setra 高精度加速度儀以及 LVDT 位移計，透過 3.3 節所述的雙重積分法進行層間位移之評估分析。本次分析所使用的訊號源為 1999 年集集地震在測站 TCU068 所記錄的加速度資料與 El Centro 地震加速度資料。

為了確保本研究雙重積分法的準確性，在進行 P-Alert 與 Setra 高精度加速度儀評估層間位移的比較之前，將本研究雙重積分法與前人研究的雙重積分法(流程圖可參考圖 2.)分別轉換後 P-Alert 所獲得的位移變化與 LVDT 位移計所量測的資料進行比對。如圖 5.11 至圖 5.14 所示，在兩種雙重積分法的計算中，雖然在時間域的結果皆相似於真實層間位移。但是經由快速傅立葉轉換後發現，前人研究所採用的 Ormsby 濾波器會造成低頻的訊號產生，而本研究的方法則較貼近真實層間位移，如圖 5.15 和圖 5.16 所示。

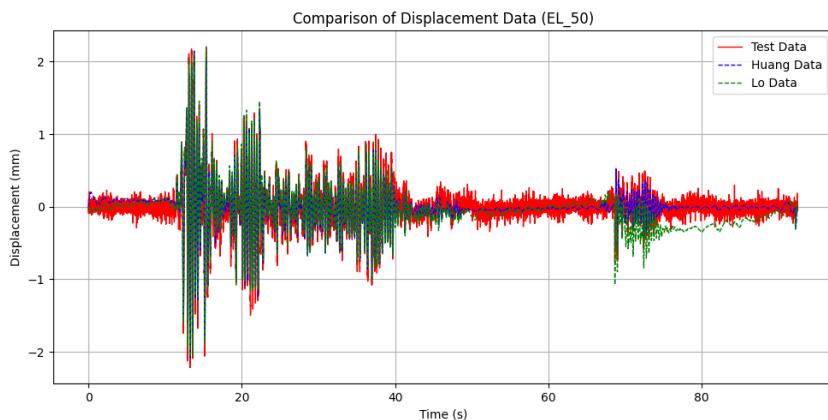


圖 5.11 Case 1: 在 EL_50 訊號中 P-Alert 預估層間位移比較圖

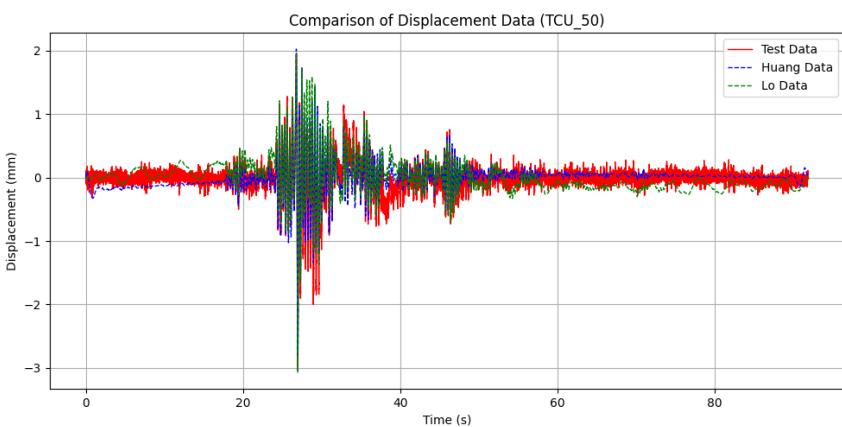


圖 5.12 Case1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert 預估層間位移比較圖

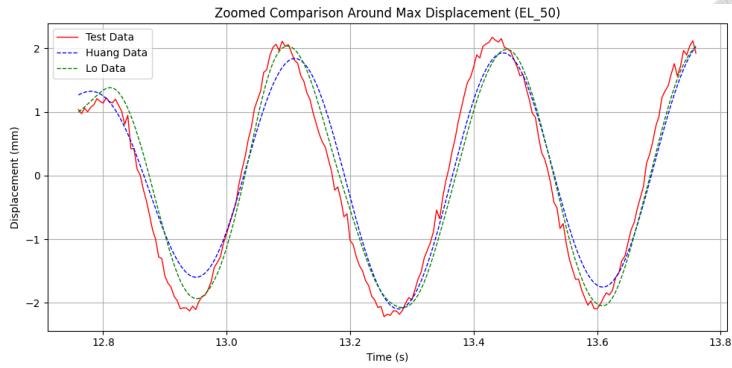


圖 5.13 Case 1: 在 EL_50 訊號中 P-Alert 最大層間位移前後 2 秒振動圖

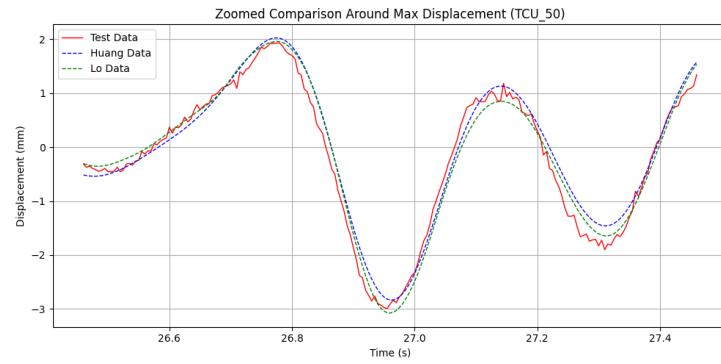


圖 5.14 Case 1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert 最大層間位移前後 2 秒振動圖

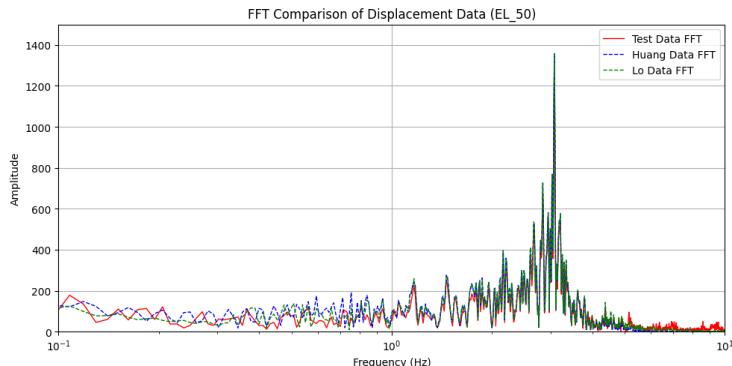


圖 5.15 Case 1: 在 EL_50 訊號中預估層間位移頻譜圖

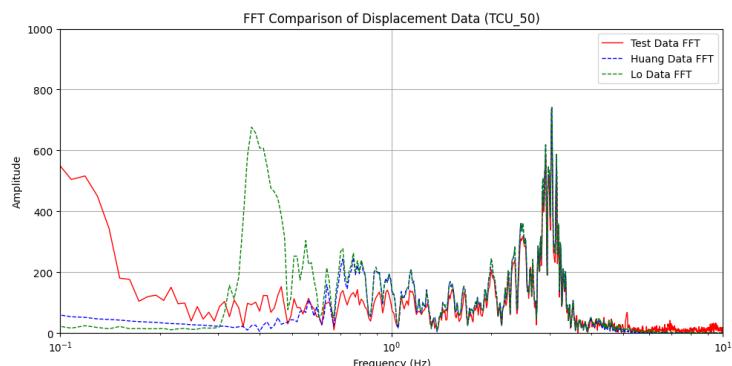


圖 5.16 Case 1: 在 TCU_50 訊號中預估層間位移頻譜圖

進一步比較 P-Alert 與 Setra 高精度加速度儀在預估層間位移的結果如圖 5.17 所示，在結構物振動基礎頻率上的能量與 LVDT 位移計計算出來的是相同的，僅在 0.7~1.0 Hz 中有能量放大的趨勢，如圖 5.18 所示。在不同損傷的案例中，從圖 5.19 至圖 5.22 皆可以看到上述頻段皆有放大的現象，進而推測可能與不同儀器之響應特性有關。儘管如此，在結構物基本頻率範圍內，P-Alert 與 Setra 兩者皆能準確量測實際位移，顯示 P-Alert 在結構健康監測上的應用具高度潛力與實務價值。

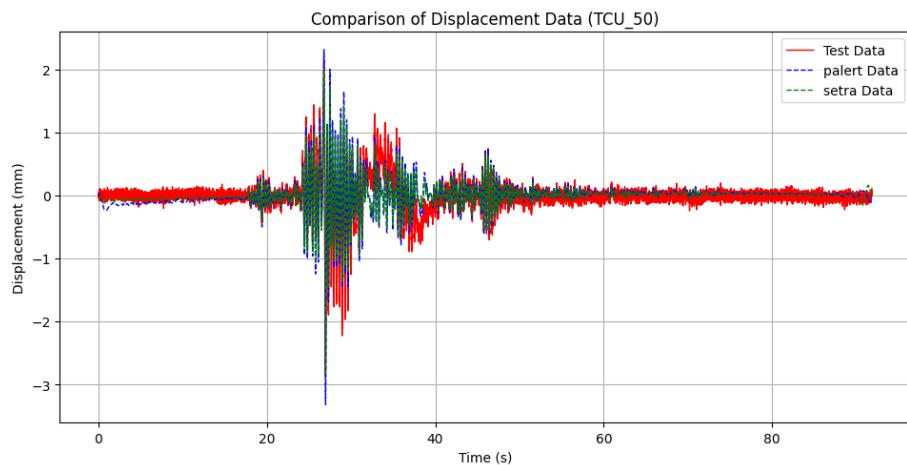


圖 5.17 Case1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert 與 Setra 的預估層間位移比較圖

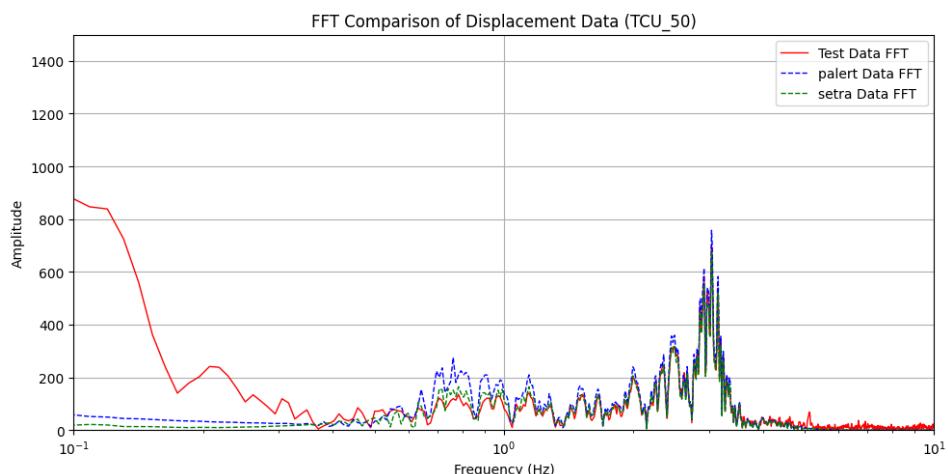


圖 5.18 Case1: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖

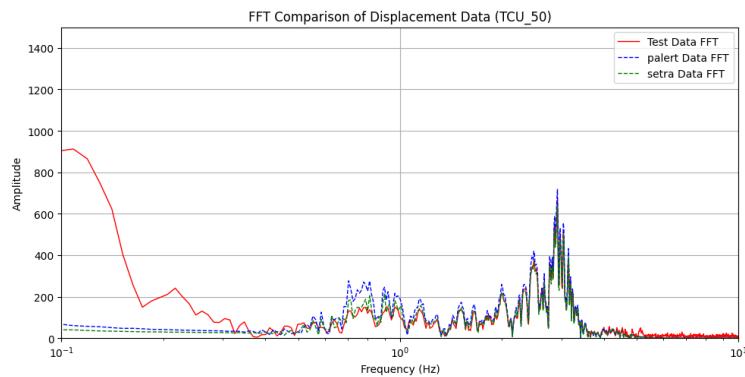


圖 5.19 Case 3: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖

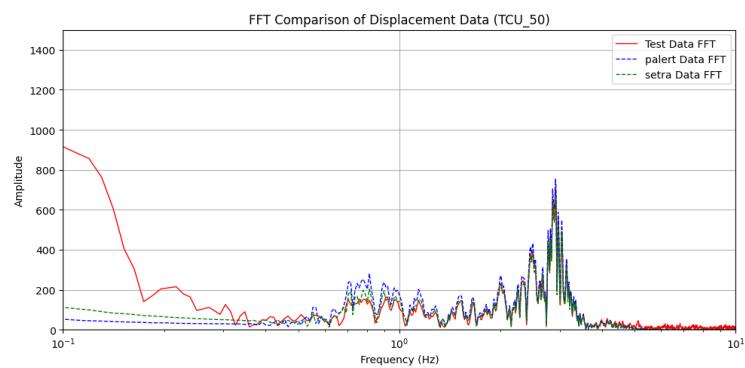


圖 5.20 Case 4: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖

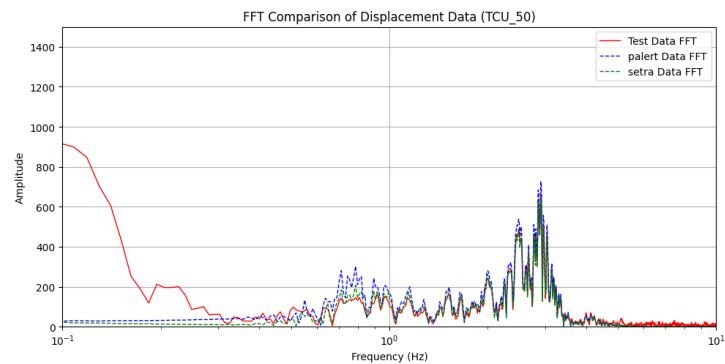


圖 5.21 Case 5: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖

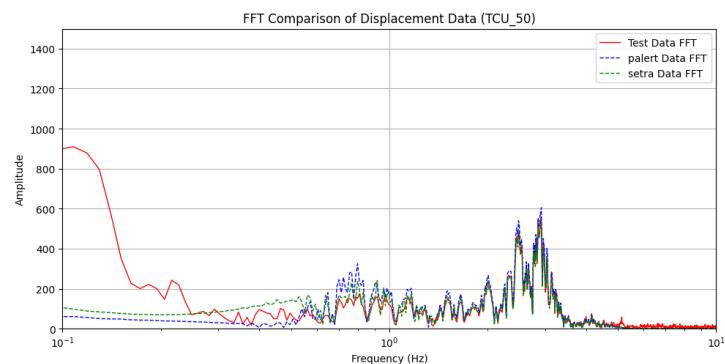


圖 5.22 Case 6: 在 TCU_50 訊號中 P-Alert、Setra 預估位移與實際位移頻譜圖



5.2 P-Alert 在實際建物的性能表徵

根據 Chapter 4 所提供的結構物資訊，本節主要分成單站型結構物、多站型結構物進行分析與討論。

5.2.1 單站型結構物週期於強震事件表徵

多數 P-Alert 測站於結構物中僅架設單一加速度感應器，為了識別出結構物的基礎頻率，則需要結合中央氣象署強震監測網的共站資料進行分析。如圖 4.1 所示，此圖為 2024 年 4 月 3 日花蓮地震序列所導致房屋倒塌之行政區與 P-Alert 測站的空間分布圖。針對上述測站，本研究採用西元 2022 年初至 2024 年 8 月間，地震 $M_L > 6.0$ 的地震進行結構物頻率的分析。

以 W475 吉安國小站為例，參考圖 5.23 波型訊號，若是測站所收到的 PGA 過小，則結構物的訊號容易被地面振動的訊號覆蓋。若是測站震度 $PGA \geq 80 gal$ ，則可以在時頻圖中找到其一穩定訊號於 7.0 Hz，如圖 5.24 所示，經過反應譜訊號的分析，也可以發現結構物在約 0.19 秒有較強的訊號產生，如圖 5.25 所示，從時頻圖的訊號與反應譜的訊號做比較發現兩者皆與強烈地動訊號有關。為了解決此問題，經過反卷積的分析，藉由自由場測站去除原始資料中含有的地表振動訊號，發現測站 $PGA \geq 80 gal$ 時，識別出來結構物的週期約為 0.67 秒，而 $PGA < 80 gal$ 時，結構物的週期約為 0.35 秒，如圖 5.26 所示。由上述識別結果發現結構物識別的穩定性與其測站所接收到的強度有關。

為了驗證以上推測，本研究進一步將篩選地震的標準降低，且地震事件需達 $M_L 4.0$ 且中央氣象署花蓮地震測站的震度需達 4 級，達到以上條件的地震事件共 96 筆，圖 5.27 和圖 5.28 顯示 W475 吉安國小站在 2022 年至 2024 年 8 月間每次事件的 PGA 和規模分布。當每個事件頻率識別後發現確實單一測站結構物的頻率識別準確度與測站的 PGA 有關，當測站 $PGA \geq 80 gal$ 時可以穩定識別其結構物的頻率，若是 $PGA < 80 gal$ ，結構物訊號被地動訊號覆蓋，導致結構物振動頻率有高估的情形產生，如圖 5.29 所示。

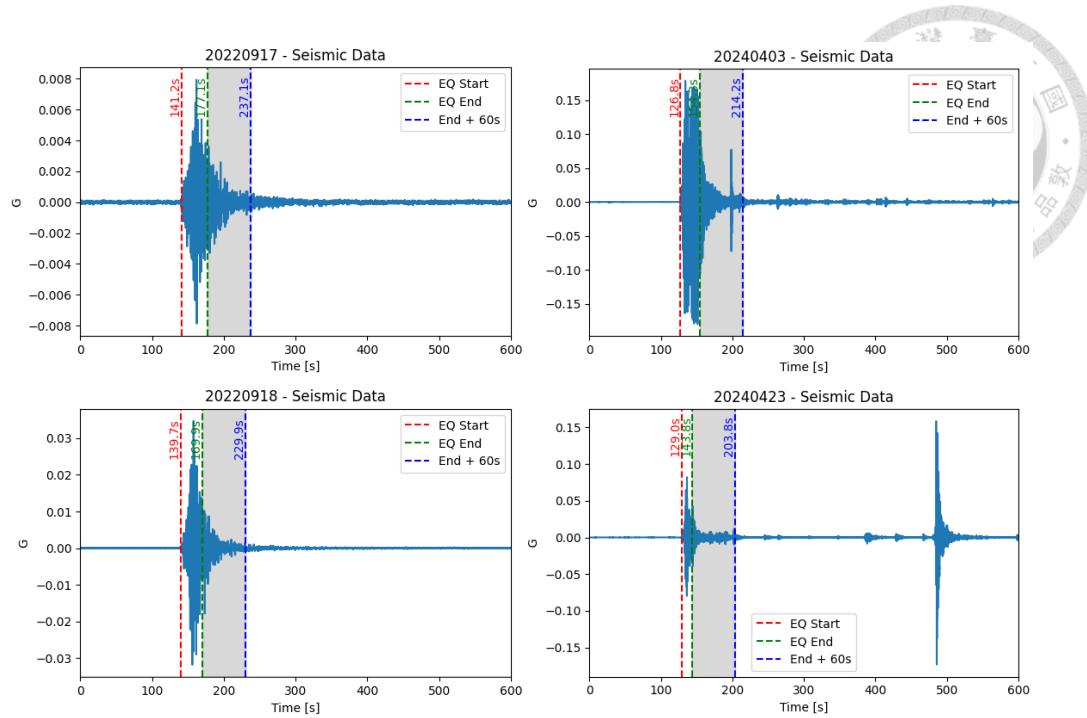


圖 5.23 W475 吉安國小 $M_L \geq 6.0$ 之事件之波型圖:(A)2022/09/17 池上地震波型
圖。(B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。
(D)2024/04/23 花蓮地震波型圖。

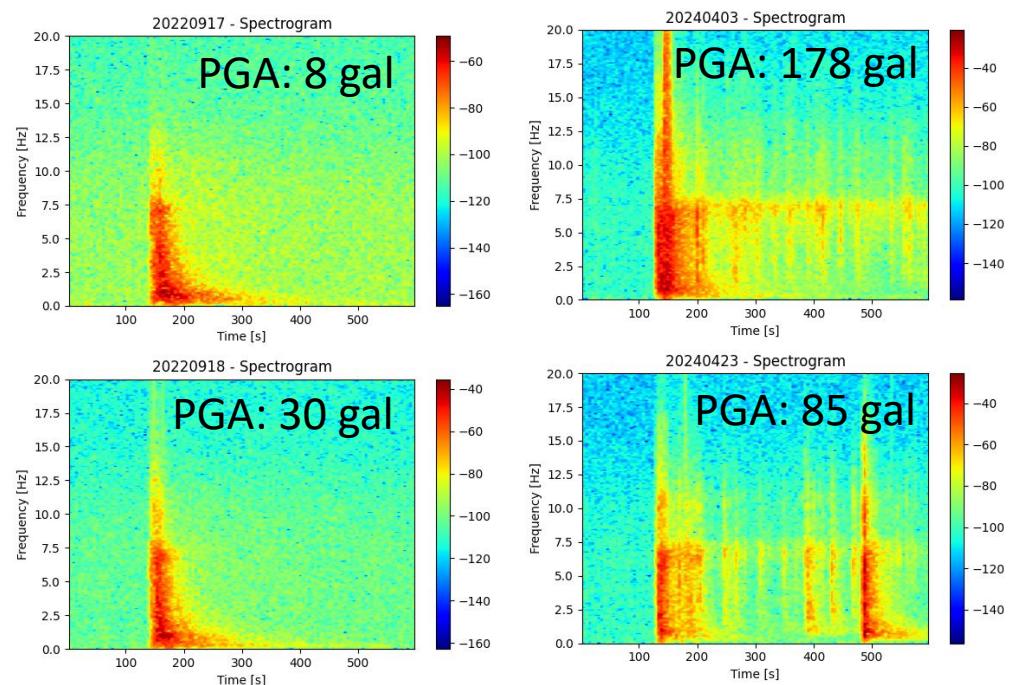


圖 5.24 單站型結構物 $M_L \geq 6.0$ 事件之時頻圖: (A)2022/09/17 池上地震波型圖。
(B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。(D)2024/04/23
花蓮地震波型圖。

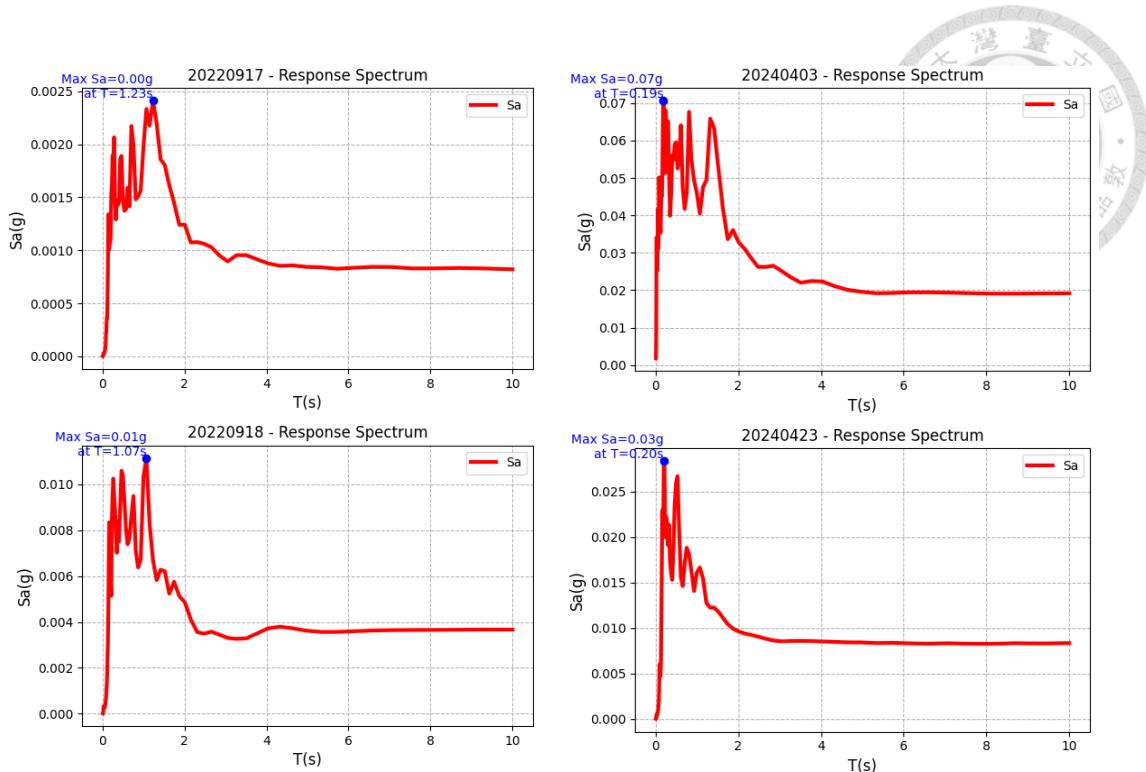


圖 5.25 單站型結構物 $M_L \geq 6.0$ 事件之反應譜: (A)2022/09/17 池上地震波型圖。
 (B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。(D)2024/04/23
 花蓮地震波型圖。

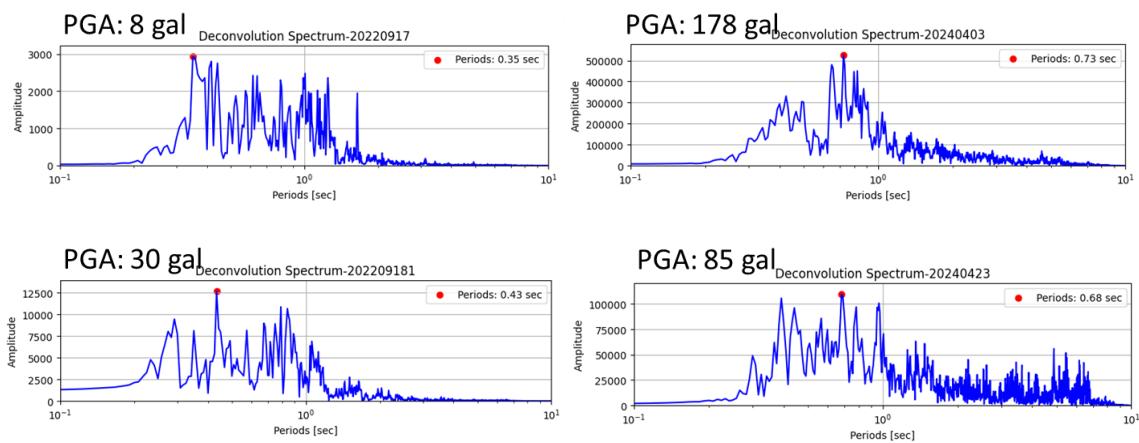


圖 5.26 單站型結構物 $M_L \geq 6.0$ 事件之反卷積結果圖: (A)2022/09/17 池上地震波
 型圖。(B)2022/09/18 關山地震波型圖。(C)2024/04/03 花蓮地震波型圖。
 (D)2024/04/23 花蓮地震波型圖。

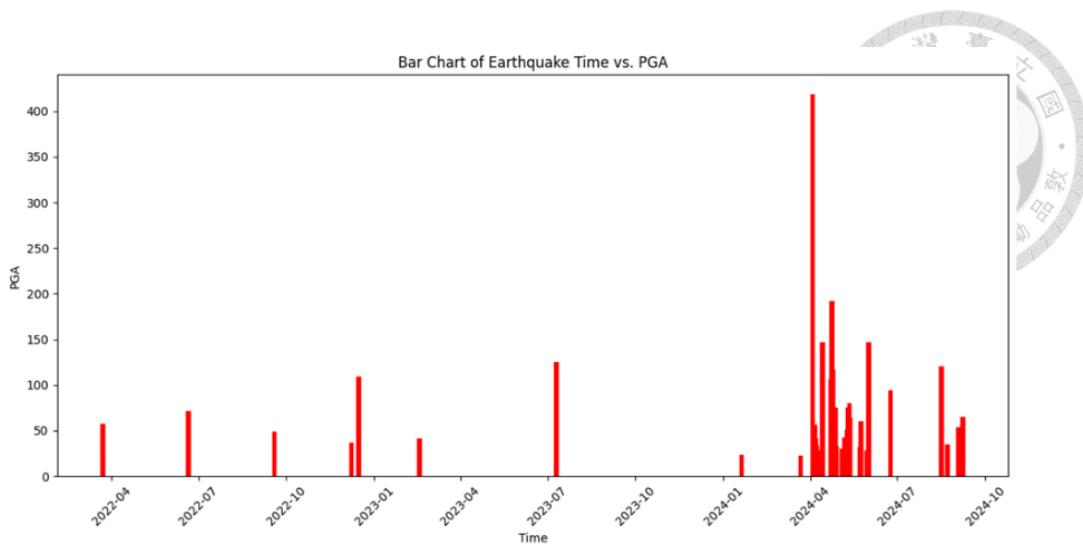


圖 5.27 吉安國小於 2022 年至 2024 年 8 月間地震事件之 PGA 分布

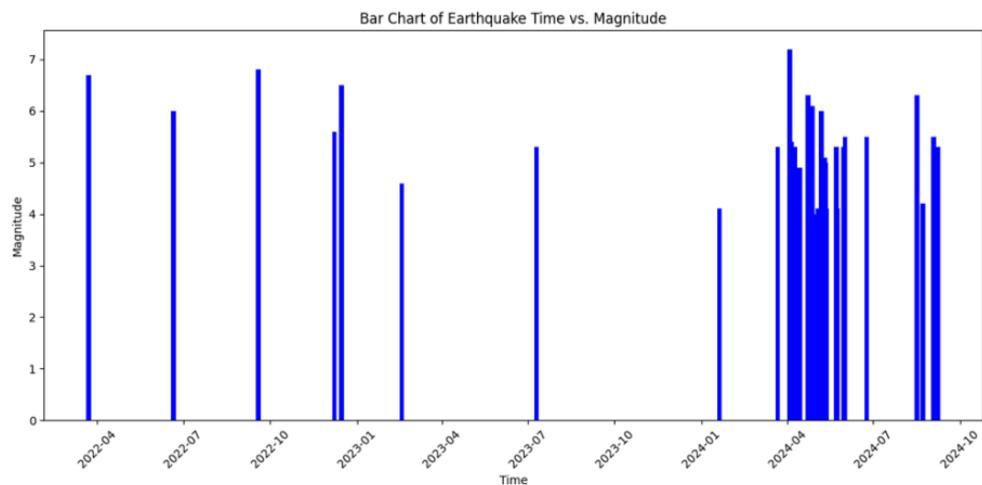


圖 5.28 吉安國小於 2022 年至 2024 年 8 月間地震事件之規模分布

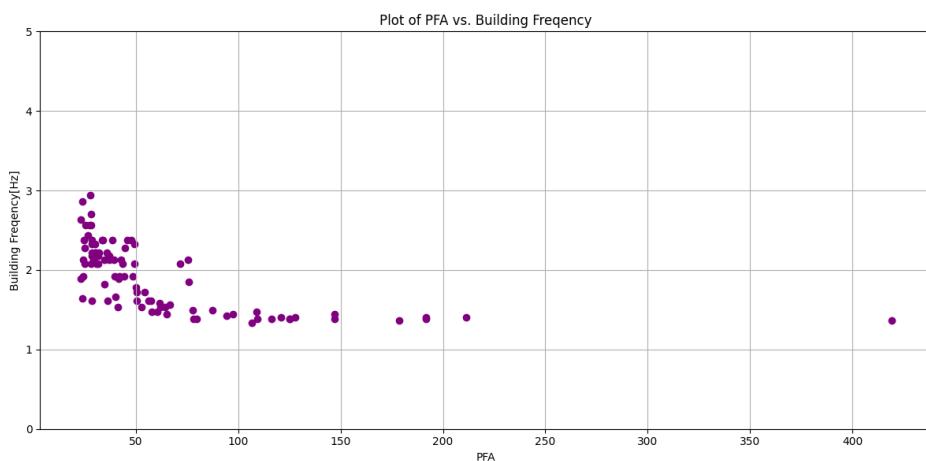


圖 5.29 吉安國小：地震強度與結構物振動頻率關係圖



5.2.2 多站型結構物週期於強震事件表徵

相較於單站型結構物，多站型結構物損傷檢測可更有效的進行。此方法不需要考量測站震度所帶來的衰減變化，可以直接透過各樓層與地面樓層資料進行反卷積識別出建物的週期。在多測站結構物的分析中，本研究選取的地震規模需大於 5.5，且將根據地震規模和震度進行分類，若 $M_L \geq 6.0$ 為大型地震(Large Magnitude, LM)， $M_L < 6.0$ 為小型地震(Small Magnitude, SM)，震度超過三級為強振動(More Intensity, MI)，震度低於三級為弱振動(Strong Intensity, SI)，因此可分成四類：LM-MI、LM-SI、SM-MI、SM-SI，如圖 5.30 和圖 5.31 所示，結構物位置則如圖 5.32 所示。

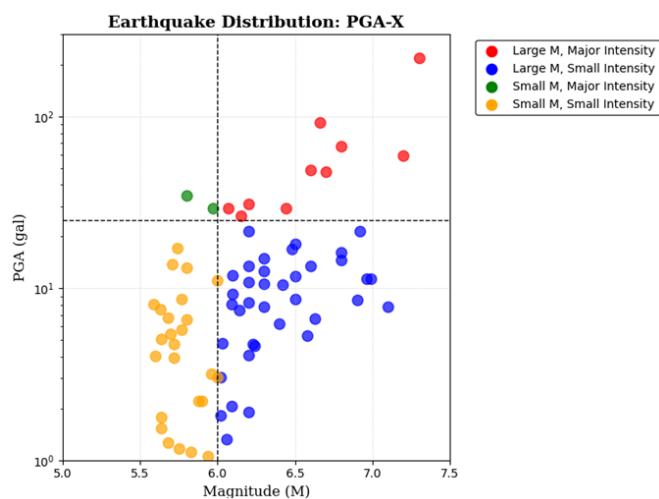


圖 5.30 多站型結構物地震分類分布圖之結構物短邊分類結果

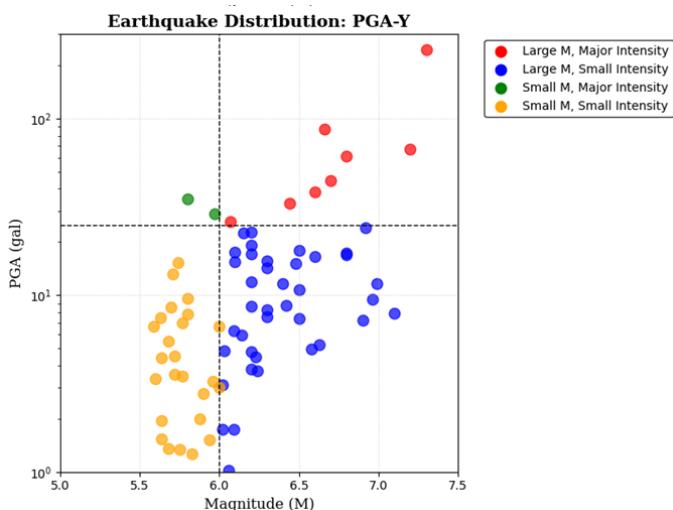


圖 5.31 多站型結構物地震分類分布圖之結構物長邊分類結果

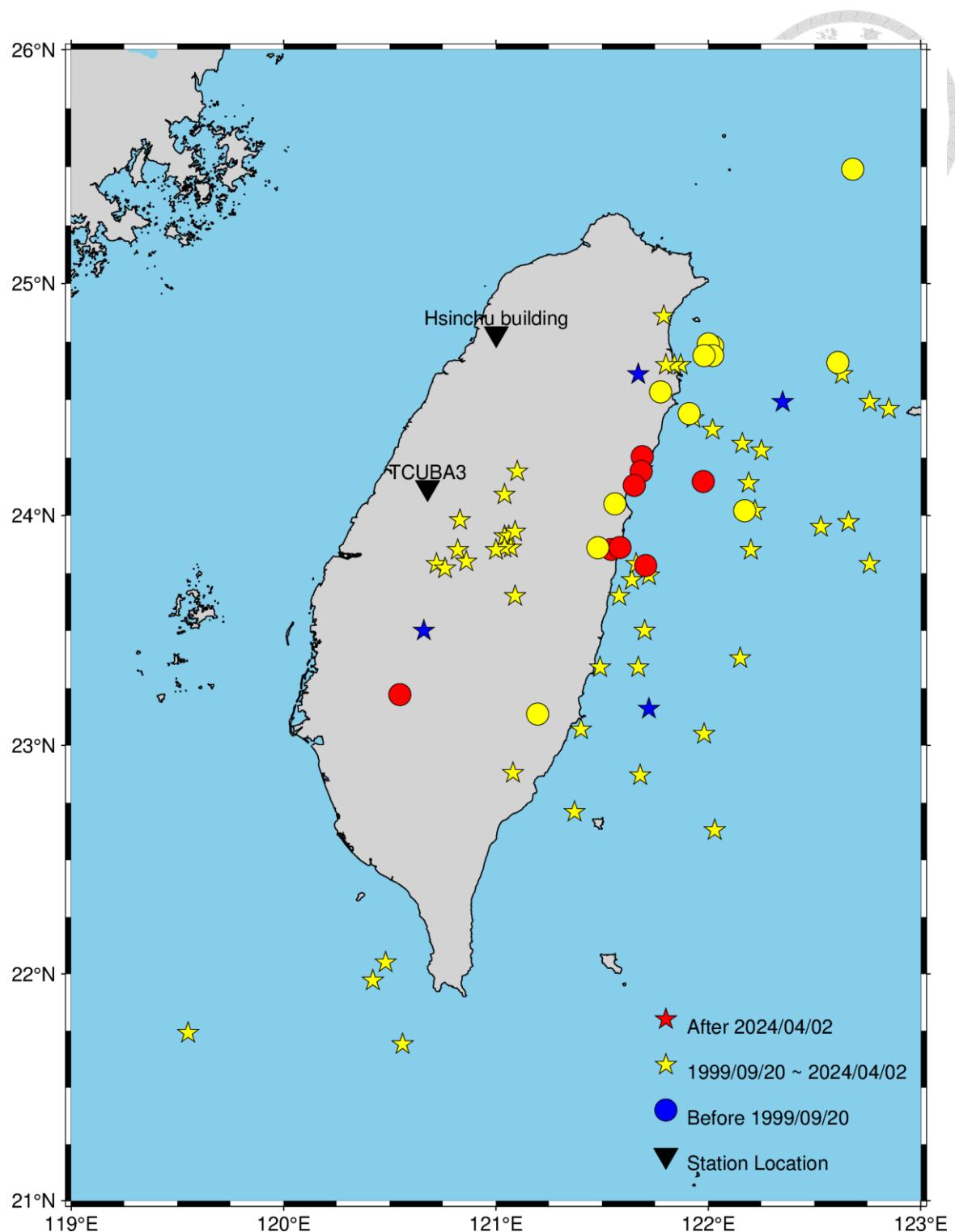


圖 5.32 多站型結構物：地震震央及結構物位置分布圖

從地震分布圖可以發現，TCUBA3 中興大學測站資料收錄的時間為 1993 年至 2010 年，共收錄 56 筆強震事件，其中有 4 筆為 1999 年集集地震之前，其餘則皆在集集地震之後。而新竹廠房測站自 2014 年架設後開始直至 2025 年共收錄 20 筆強震事件。有 11 筆為 2024 年花蓮地震前所發生，其餘的事件皆在花蓮地震之後。透過圖 5.33 看出從 1993 年至 2025 年間兩建物振動頻率的變化發現，TCUBA3 中興大學測站在 1999 年的集集主震遭受強烈的振動造成結構物頻率從 3 Hz 下降至約 2 Hz，隨著結構補強工程進行，頻率從 2 Hz 慢慢回升至約 2.5 Hz，直至 2003 年完成補強結構物後，結構物的頻率才穩定在約 2.7 Hz。另一方面，新竹廠房測站並沒有明顯的頻率變化，這也暗示新竹廠房是未受損的建築。另外，針對兩建物基礎週期的比較，TCUBA3 測站的週期為 2.7 Hz 屬於較短週期的建築，新竹廠房的頻率則是 0.45 Hz 屬於長週期建築，然而不同建物的材質、結構皆會造成頻率表現不同，為此則需進一步利用強度測量參數進行分析。

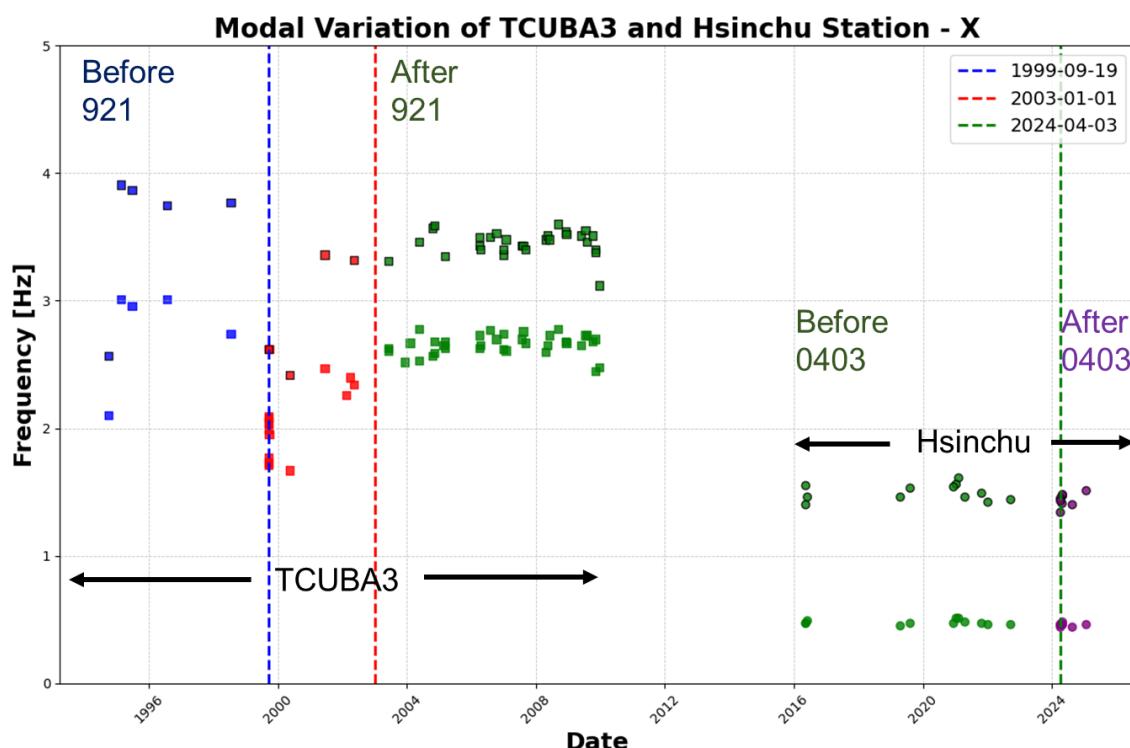


圖 5.33 多站型結構物：結構物振動頻率變化圖



5.2.3 P-Alert 系統對於結構物振動週期穩定度討論

由 5.2.1 與 5.2.2 節中，討論單站型結構物與多站型結構物在強震事件中的振動頻率識別，發現單站型結構物在 PGA 較低的地震事件中，結構物振動的訊號並不明顯，因此有高估結構物振動頻率的現象產生。為了解決此問題，需要初步了解多站型結構物是否用單站型結構物的方法也會有振動週期不穩定的識別產生，因此本節利用多站型的結構物中的地下一樓 H010 測站與附近的中央氣象署強地動觀測網 B017 新竹測站(如圖 5.3 P-Alert 與自由場測站 B017 的實際位置與距離圖)進行單站型結構物反卷積計算步驟進行分析。

根據 5.2.1 與 5.2.2 節中的研究結果，單站型結構物約在 80 gal 會有識別不穩定的情形。因此採取 2020 年至 2024 年底對於 B017 新竹測站超過 10 gal 的事件，如此一來可以直接觀測完整識別情況，地震目錄如表 5.1 與圖 5.35 所示。但 B017 測站在 2020 至 2022 年 4 月之間有更換地震儀，因此編號 1.至 4.的事件並無法完整分析，如圖 5.36 所示。

以 2024 年 4 月 3 日花蓮地震主震為例，圖 5.37 顯示出 PGA 紀錄超過 60 gal，而且在結構物振動頻率為 0.44 Hz，與圖 5.33 所識別出來的頻率皆為相同。但在 2024 年 4 月 3 日的花蓮地震餘震中，圖 5.38 顯示出 PGA 紀錄超過 60 gal，而且在結構物振動頻率為 1.86 Hz，與圖 5.33 所識別出來的頻率卻不相同。因此將表 5.1 所有地震造成的結構物振動頻率進行分析，從圖 5.39 發現表示單站型結構物的紅色三角形資料點，隨著一樓測站的 PGA 降低，振動頻率有增加的趨勢，但如果利用多站型結構物進行分析頻率，如藍色標點所示，則可以去除結構物振動週期的不穩定性，而各事件所記錄到的頻率如表 5.2 所示。

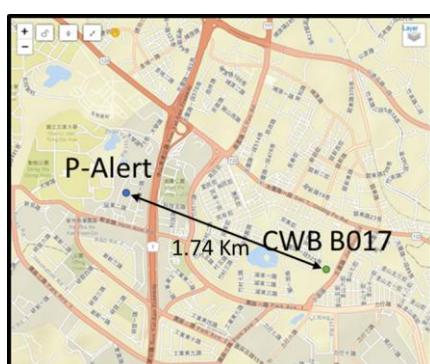


圖 5.34 P-Alert 與自由場測站 B017 的實際位置與距離圖

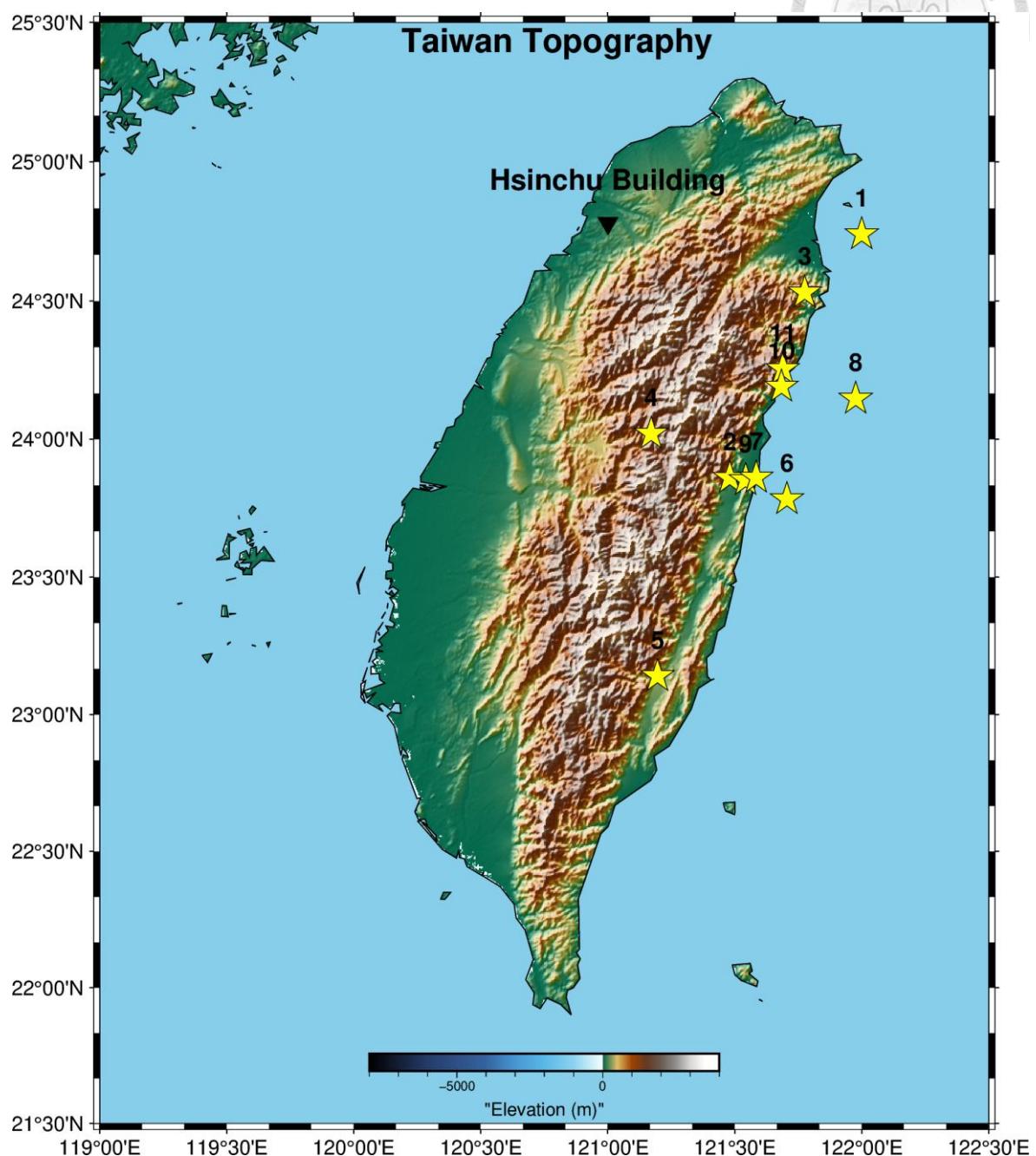


圖 5.35 B017 測站於 2020 年至 2024 年底之間超過 10 gal 的地震震央分布

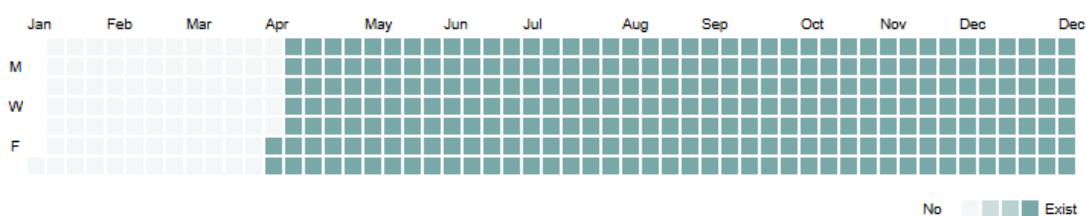




圖 5.36 B017 測站於 2022 年三分量的紀錄情形

表 5.1 B017 測站所記錄超過 10 gal 以上之地震目錄

Num.	DATE	PGA (Y)
1.	2020/12/10 21:19	16.6 gal
2.	2021/04/18 22:14	19.2 gal
3.	2021/10/24 13:11	18.2 gal
4.	2022/01/03 17:46	11.1 gal
5.	2022/09/18 14:44	17.0 gal
6.	2024/04/03 07:58	66.8 gal
7.	2024/04/03 10:14	22.8 gal
8.	2024/04/23 02:32	15.0 gal
9.	2024/04/27 02:21**	14.2 gal
10.	2024/04/27 02:49**	13.2 gal
11.	2024/08/16 07:38	17.5 gal

備註：**為 P-Alert 紀錄有異常，無法與 B017 一起做分析

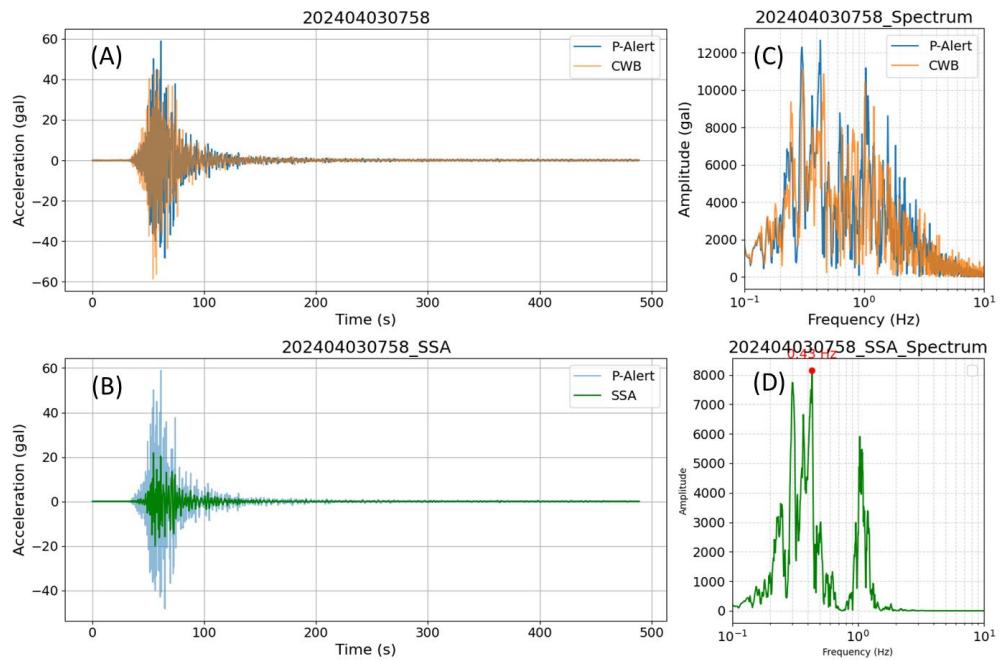


圖 5.37 H010 測站與 B017 測站在 2024/04/03 07:58 花蓮地震識別結構物振動頻率結果：(A) P-Alert 與中央氣象署的波型紀錄 (B) P-Alert 與利用反卷積的波型

比較圖 (C) 於 A 圖中的頻率域資料 (D) 於 B 圖中的頻率域資料

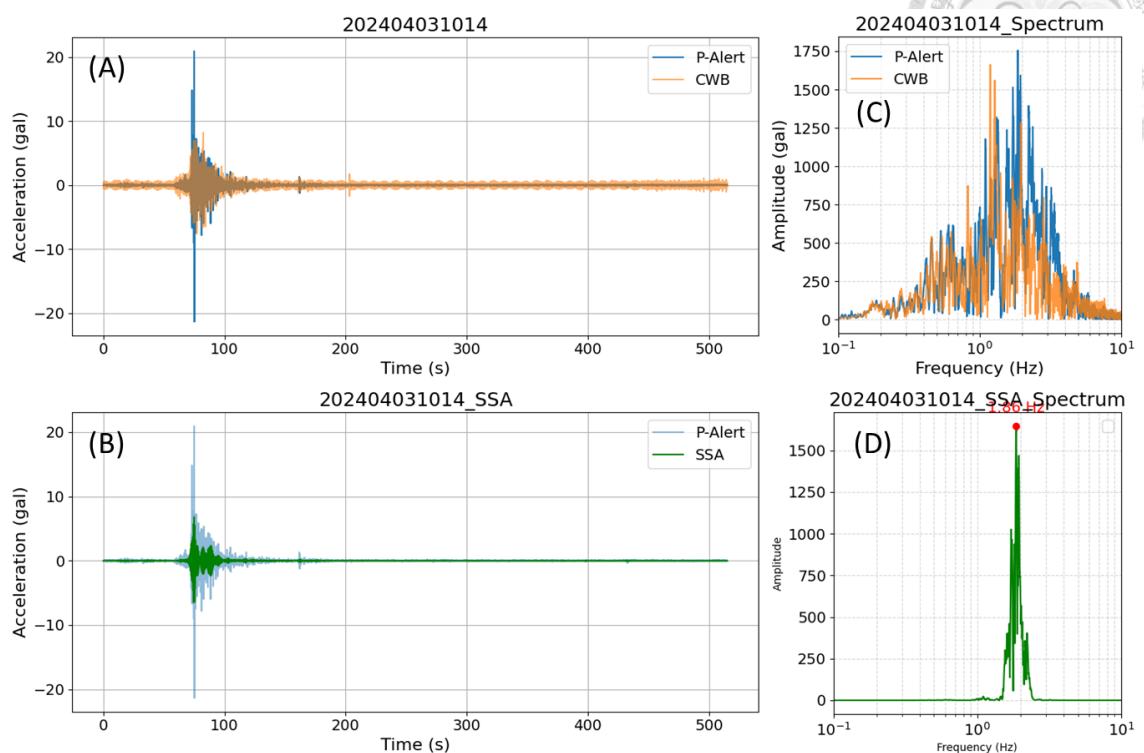


圖 5.38 H010 測站與 B017 測站在 2024/04/03 10:14 花蓮餘震識別結構物振動頻率結果：(A) P-Alert 與中央氣象署的波型紀錄 (B) P-Alert 與利用反卷積的波型
比較圖 (C) 於 A 圖中的頻率域資料 (D) 於 B 圖中的頻率域資料

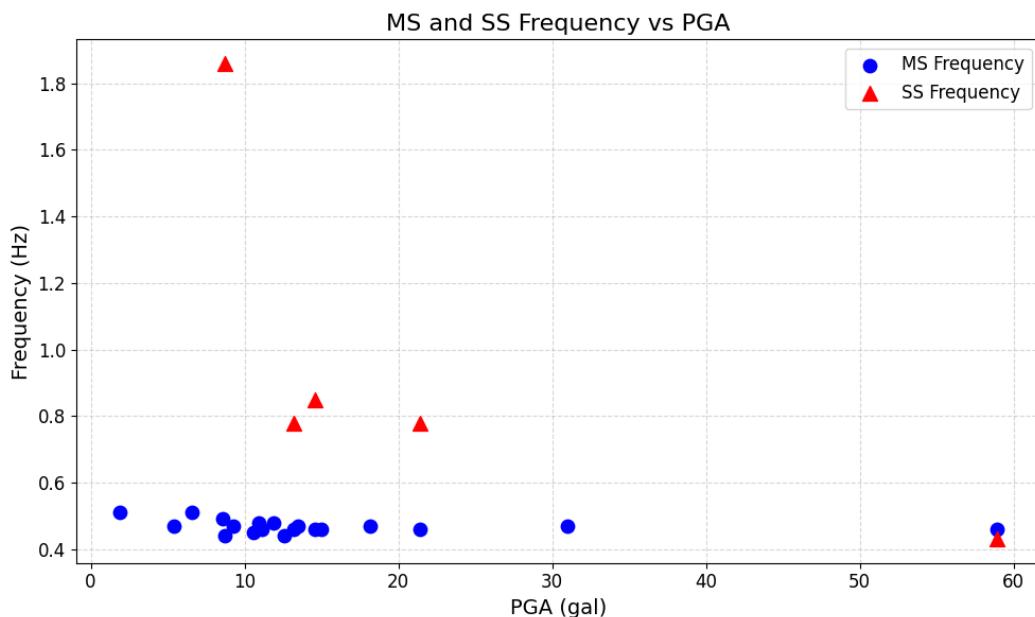


圖 5.39 P-Alert 多站型結構物利用單站型與多站型方法所識別出來的結構物振動頻率結果圖，紅點為單站型結果，藍點為多站型結果。



表 5.2 P-Alert 多站型與單站型結構物振動頻率結果表

Num.	DATE	PGA (Y)	Multi-station Structural (MS)	Singal-station Structural (SS)
5.	2022/09/18 14:44	14.6 gal	0.46 Hz	0.85 Hz
6.	2024/04/03 07:58	66.8 gal	0.46 Hz	0.43 Hz
7.	2024/04/03 10:14	22.8 gal	0.46 Hz	1.86 Hz
8.	2024/04/23 02:32	15.0 gal	0.46 Hz	0.78 Hz
11.	2024/08/16 07:38	17.5 gal	0.44 Hz	0.78 Hz

5.3 多站型結構物在強度測量中之表現

延續 5.2.2 節對於多站型結構物週期特徵之探討，本節進一步分析結構物強度測量參數方面的表現。透過比較 $Sa(T_1)$ 、PGA 與結構物自然振動週期的關係，可以發現在結構物未損傷的情形下， $Sa(T_1)$ 與 PGA 並不會造成結構物頻率的變動，如圖 5.40 所示。這顯示出在結構物振動型態為線性時，強度參數雖然會因為不同地震事件改變，但對結構物頻率特徵的即時改變並無明顯影響。然而，進一步從 CWABA 與 P-Alert 系統所識別出來的 $Sa(T_1)$ 與 PGA 數值進行比較，可以明顯發現兩系統在參數的表現上皆呈現線性關係(圖 5.4041)，可以準確識別出結構物在強度參數下的反應行為，也暗示 P-Alert 足以勝任於地震工程領域中之強度分析應用，並具實務操作價值。

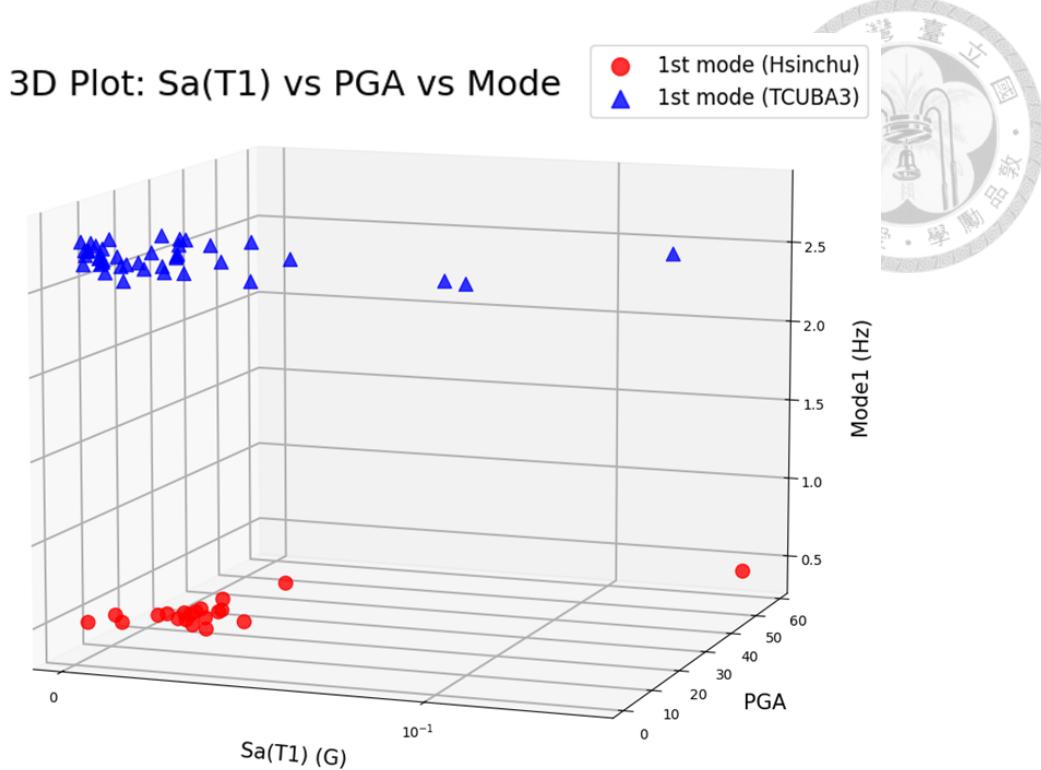


圖 5.40 多站型結構物：結構物頻率與強度參數 PGA、 $Sa(T_1)$ 關係圖。

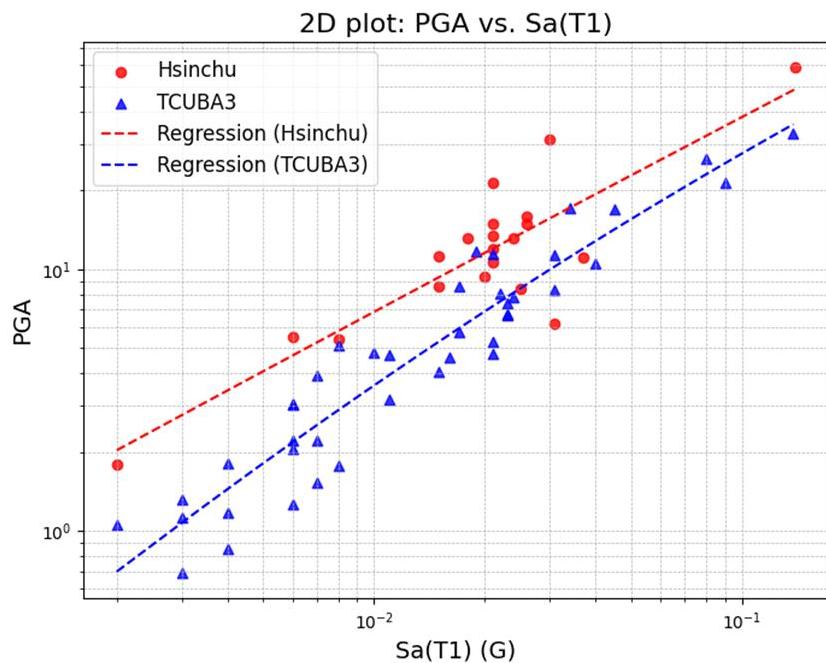


圖 5.401 多站型結構物：強度參數與不同地震陣列比較圖

在地震分類的比較下，本研究採用兩建物長邊最高樓層與地面上的層間位移與 $Sa(T_1)$ 與 PGA 進行比較，發現 LM-MI 造成的位移量較大(圖 5.4142)，且透過 1999 年集集地震、2024 年花蓮地震、2025 年大埔地震進行比較，可以發現集集地震地

面測站收到的 PGA 為 245.85 gal，造成結構物一樓至頂樓的最大位移高達 15 公分。而 2024 年花蓮地震地面測站收到的 PGA 為 66.7 gal，造成地面與頂樓位移值高達 7 公分。另外新竹測站識別週期中，花蓮地震識別出 2.15 秒，大埔測站則是 2.01 秒，其結果也凸顯出 P-Alert 在強震事件中識別結構物週期的穩定性，詳細資訊如表 5.所示。

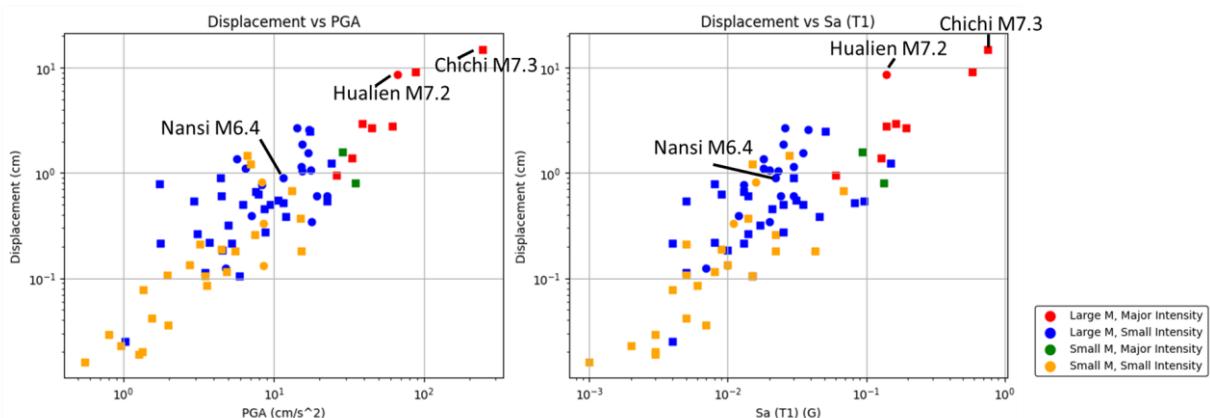


圖 5.412 多站型結構物：不同類型地震對於結構物之影響

表 5.3 多站型建物：1999 年集集地震、2024 年花蓮地震、2025 年大埔地震對於結構物長邊強度參數比較表

地震事件 強度參數	1999 年集集地震	2024 年花蓮地震	2025 年大埔地震
結構物名稱	TCUBA3	新竹廠房	新竹廠房
PGA-Y	245.8 gal	66.7 gal	11.5 gal
最大層間位移	15.15 cm	8.55 cm	0.90 cm
Sa(T ₁)	0.7527 g	0.1418 g	0.0228 g

在結構物週期的比較下，本研究採用兩建物短邊(X 方向)的最高樓層與地面的層間位移與 Sa(T₁)、PGA 進行比較，如圖 5.42 發現新竹廠房造成的位移量較大，會有如此現象與結構物的振動長短有關，若結構物振動週期長，可能與大規模地震產生的低頻訊號共振，造成更大的層間位移量。

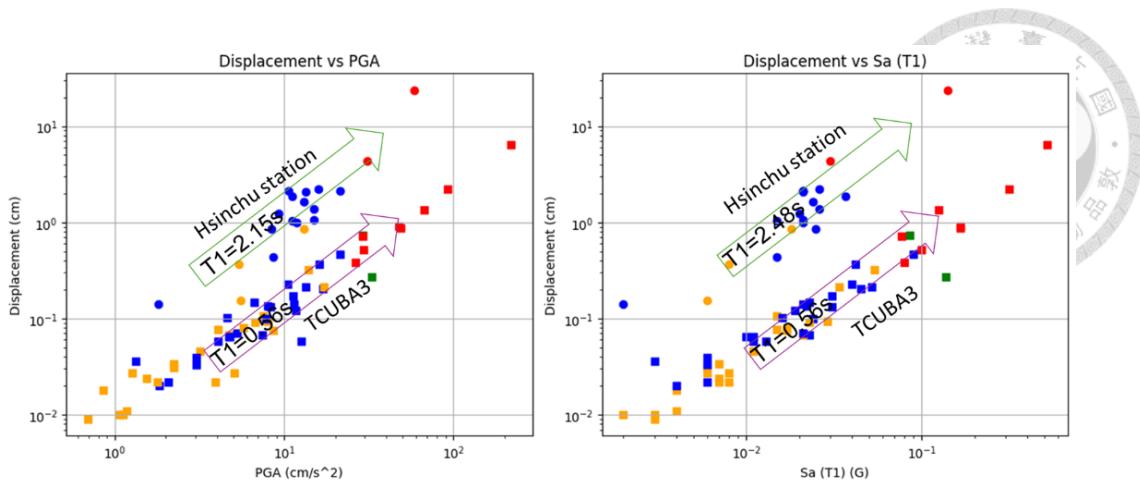


圖 5.423 多站型結構物：結構物短軸振動週期對於層間位移之影響

最後在層間位移角的分析，從圖 5.4344 可以發現 TCUBA3 中興大學測站在集集地震後呈危樓時的四樓至七樓之層間位移角接近千分之五，且最大層間位移達到 3.2 公分(如圖 5.45)，這表示在高樓層中有可能有部分樓層已經超越能承受地震振動的極限，促使此建物的結構受損。不過當結構補強過後，可以發現層間位移角又可以回復成地震前的狀態。而在新竹廠房測站中，可以從圖 5.446 發現僅在花蓮地震的主震時層間位移角有明顯的上升，且五樓至九樓最大位移量達到 8.6 公分，如圖 5.47，但是新竹廠房本身屬於長週期結構物，因此結構物雖然振動幅度大，但本身結構物韌性高，則會使結構損傷降低。除此之外，其餘事件的層間位移角皆低於千分之二，也同時證明結構物並沒有受到損害。

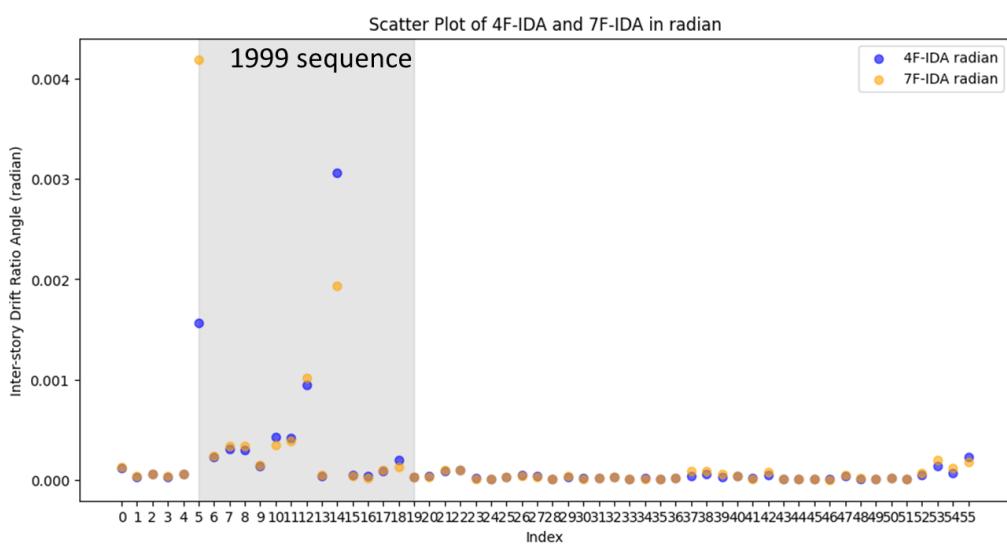


圖 5.434 多站型結構物：TCUBA3 層間位移角於不同強震事件之變化圖

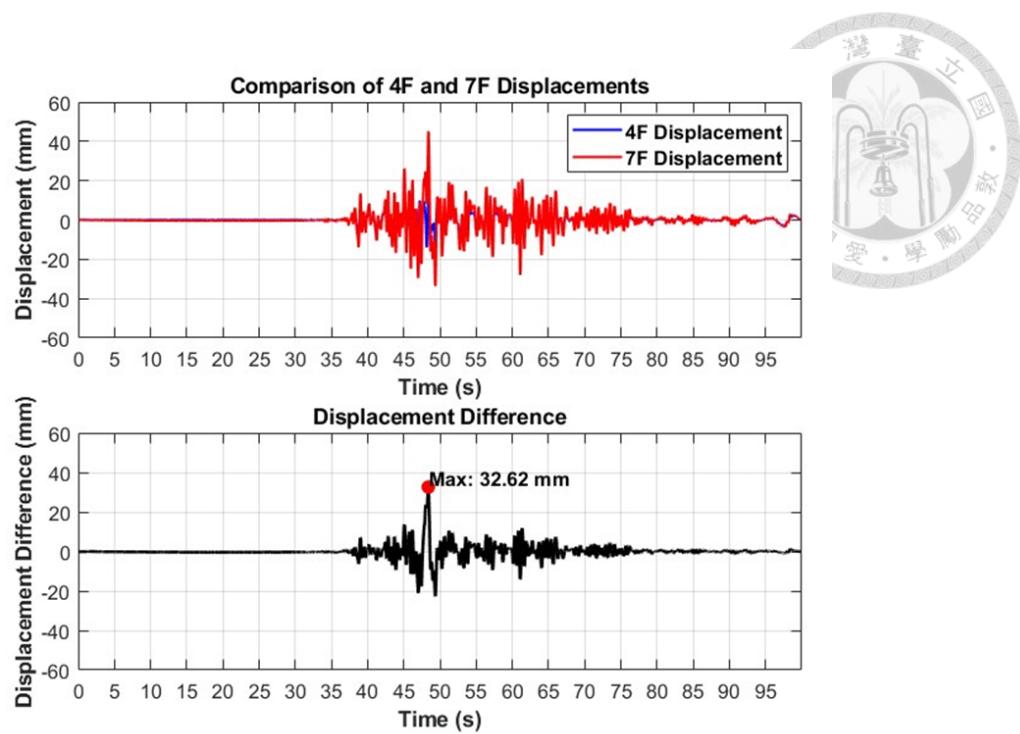


圖 5.45 多站型結構物：TCUBA3 於集集地震四樓至七樓層間位移變化圖

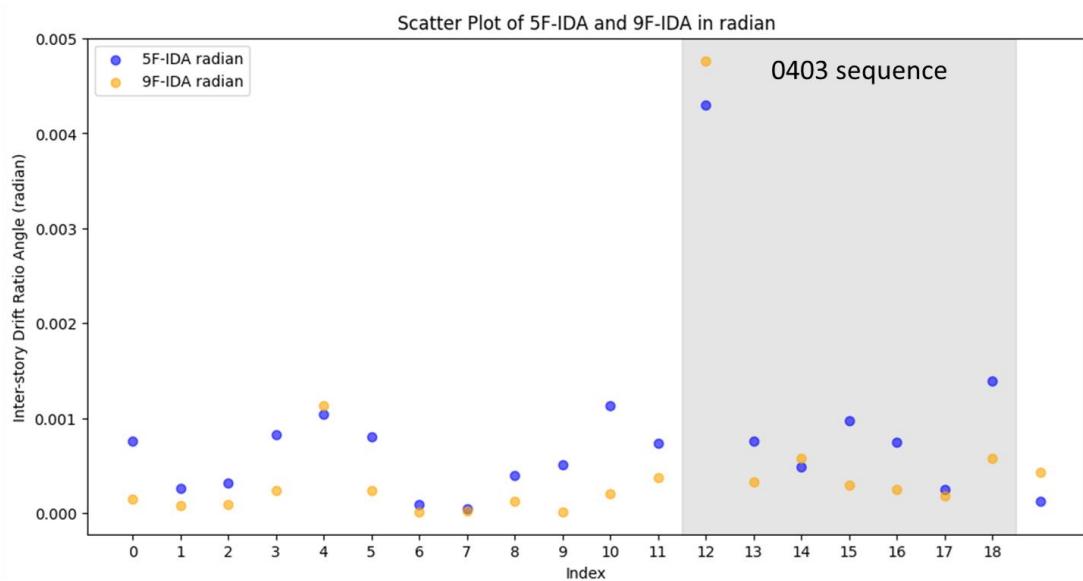


圖 5.446 多站型結構物：新竹測站層間位移角於不同強震事件之變化圖

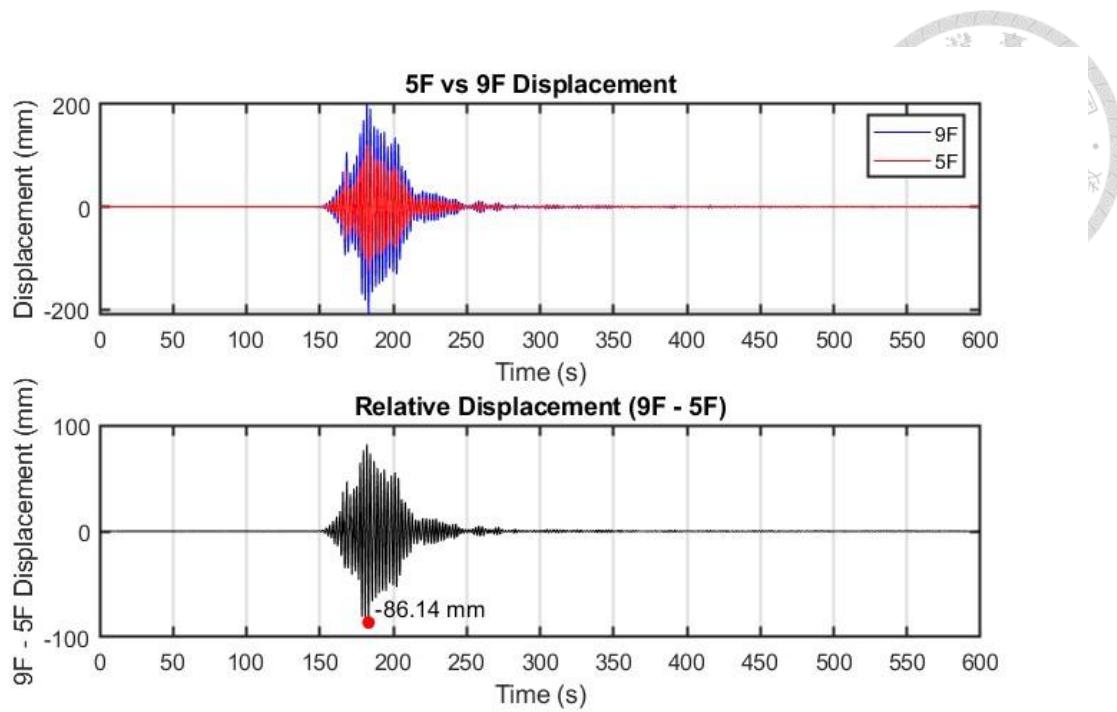


圖 5.457 多站型結構物：新竹廠房於花蓮地震五樓至九樓層間位移變化圖





Chapter 6 結論

在結構物健康監測中，過去常使用高精密、高準確度的儀器進行測量，導致實驗以及監測成本往往造成高昂的費用，因此利用低成本的儀器進行結構物損傷監測以便檢測問題。本研究中採用國立臺灣大學所研發的地震預警系統 P-Alert 進行結構物損傷的測試。在振動台的實驗中，利用了奇異譜訊號成功識別出目標物的振動週期以及各模態的形狀，並利用雙重積分法的方式估算層間位移，透過高精度的加速度儀 Setra 與 P-Alert 的預估位移比較發現，P-Alert 與 Setra 的位移資料皆與位移計 LVDT 所記錄的即時位移相同。藉由此次振動台的測試，P-Alert 在識別結構物週期與層間位移的結果是可信的，因此本研究將 P-Alert 應用在實際的建物中。

在 P-Alert 系統的結構物類型中分為單測站結構物和多測站結構物，發現單測站結構物需要利用中央氣象署的自由場測站進行反卷積以便去除地動訊號覆蓋結構物訊號的問題，另外單測站結構物需要考慮地震訊號的 PGA 大小，若測站震度 $PGA \geq 80 gal$ 則可以穩定識別出結構物週期，反之，當測站震度 $PGA < 80 gal$ 識別出來的結果有高估頻率的可能性。另一方面，多測站結構物因為在同一建物中有擺設地面站與結構物站，因此可以準確的測量結構物的週期。

在強度測量中，本研究比較兩棟多測站結構物，分別是 P-Alert 的新竹廠房測站和 CWBAB 的 TCUBA3 中興大學測站。在這兩棟測站中，利用結構物在時域上的頻率變化，中興大學測站於集集地震主震時有明顯的頻率下降的趨勢並持續穩定，至結構物補強頻率才回復至損傷前的狀態。另外，透過結構物參數 $Sa(T_1)$ 和 PGA 與振動週期做比較得知兩者間並無關聯，但 P-Alert 和 CWABA 所識別出來的 $Sa(T_1)$ 和 PGA 關係皆呈現線性。另一方面，透過層間位移與強度測量參數的比較發現結構物振動週期越長造成的層間位移越大，且地震類型是 LM-MI 會使結構物有較大的損傷。在層間位移角也可以快速的辨別結構物損傷的情形，若結構物受損時層間位移會變大，當接近或超過千分之五時有可能使結構物損傷。

最後，透過結構物損傷監測對低成本加速度儀 P-Alert 進行可行性的分析，發現此儀器不管在結構物振動週期的識別抑或是強度測量的結果都顯示其儀器有能力應用在此領域中，對於未來結構物損傷儀器的選擇可以更加多元，開啟了新的里程碑。



REFERENCES



- [1] Chou, Y. T., Wen, S., Liao, C. F., Chen, Y. N., & Kuo, C. H. (2024). Exploring changes in building strength using seismic wave deconvolution. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **35**(7).
- [2] De Biasio, M., Grange, S., Dufour, F., Allain, F., & Petre-Lazara, I. (2014). A simple and efficient intensity measure to account for nonlinear structural behavior. *Earthquake Spectra*, **30**(4), 1403–1426.
- [3] Francois-Holden, C. (2022). Seismic structural monitoring in Wellington using advanced seismological techniques. *NZSEE 2022 Annual Conference*, **30**(4) .
- [4] Hsu, T. Y., Yin, R. C., & Wu, Y. M. (2018). Evaluating post-earthquake building safety using economical MEMS seismometers. *Sensors 2018*, **18**, 1437
- [5] Loh, C.-H., Chan, C.-K., Chen, S.-F., & Huang, S.-K. (2016). Vibration-based damage assessment of steel structure using global and local response measurements. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **45**(5), 699–718.
- [6] Seo, J., Hu, J. W., & Davaajamts, B. (2015). Seismic performance evaluation of multistory reinforced concrete moment resisting frame structure with shear walls. *Sustainability*, **7**(10), 14287–14308.
- [7] Wu, Y. M., Mittal, H., Huang, T. C., Yang, B. M., Jan, J. C., & Chen, S. K. (2019). Performance of a low-cost earthquake early warning system (P-Alert) and shake map production during the 2018 Mw 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake. *Seismological Research Letters*, **90**(1), 19–28.
- [8] Zheng, W., Dan, D., Cheng, W., & Xia, Y. (2019). Real-time dynamic displacement monitoring with double integration of acceleration based on recursive least squares method. *Measurement*, **141**, 460–471.
- [9] Zhu, H., Zhou, Y., & Hu, Y. (2020). Displacement reconstruction from measured accelerations and accuracy control of integration based on a low-frequency attenuation algorithm. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **133**, 106122.
- [10] 中央氣象署. 臺灣地震與地球物理資料管理系統. <https://gdms.cwa.gov.tw/>
- [11] 尹仁正(2016)，應用低價位的微機電系統地震儀在建築物健康監測的實驗研究，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 120 頁。
- [12] 呂佩玲、羅俊雄、蕭文啟、趙曉玲(2014)，應用結構物強震監測紀錄檢討我國

耐震設計規範中水平及垂直地震力之設計值，子計畫一：應用結構物強震監測紀錄檢討我國耐震設計規範中水平及垂直地震力之設計值 I，科技部專題研究計畫報告，MOTC-CWB-104-E-16。

- 
- [13] 陳宏宇、吳逸民、李中生、周中哲(2014)，企業標準化防災管理之研究以科學工業園區為例，科技部專題研究計畫報告，MOST 103-2119-M-002-010-。
 - [14] 羅俊雄、趙書賢、呂佩玲、蕭文啟、林金全(2013)，結構物強震監測紀錄應用於結構物耐震評估之研究，子計畫一：建構結構物強震及常態反應特徵分析之軟硬體系統整合研究，科技部專題研究計畫報告，MOTC-CWB-103-E-14。
 - [15] 謝志龍(2019)，震前預警系統之建置與震後實體建物結構安全速診之可行性評估，三聯技術 113，34–42。

附件 A 加速度儀感測器價格與性能比較表格

名稱	P-Alert	Episensor	Setra
外觀			
樣式	Tri-axial MEMS accelerometer	Tri-axial force balance accelerometer	Linear accelerometer
最大可承受範圍	-2 g ~ +2 g	-4 g ~ +4 g	-15 g ~ +15 g
價格 (美金)	\$ 1,600	\$ 6,000 ~ \$ 12,000	\$ 12,000

附錄 B 單站型結構物分析之地震目錄

地震時間	經度	緯度	規模	深度
2024/9/13 12:59	121.696	23.96	5	29.2
2024/9/7 13:16	121.692	23.96	5.3	29.5
2024/9/2 16:26	121.64	23.93	5.6	32.7
2024/8/22 09:23	121.513	24.04	4.3	18
2024/8/16 07:35	121.705	23.78	6.3	19.4
2024/6/23 22:27	121.619	23.83	5.5	23.8
2024/6/1 01:10	121.533	24.06	5.5	18.1
2024/5/30 07:54	121.754	24	5.3	26.7
2024/5/24 03:29	121.563	24.03	4.1	7.5
2024/5/22 16:00	121.739	23.83	5.3	5.9
2024/5/12 05:47	121.582	24.03	4.1	8.1
2024/5/11 19:09	121.585	23.93	4.4	9.5
2024/5/11 13:16	121.629	23.87	5	6.5
2024/5/10 09:37	121.607	23.85	5.1	6.7
2024/5/9 20:36	121.602	23.91	4.6	11.1
2024/5/6 17:52	121.541	23.75	5.9	24.8
2024/5/6 17:45	121.562	23.77	6	27.7
2024/5/3 17:35	121.594	23.9	4.1	10.4
2024/4/28 03:24	121.615	23.93	4	9.8
2024/4/27 02:21	121.675	24.18	6.3	35.5
2024/4/25 07:53	121.61	23.92	4.5	7.1
2024/4/24 17:23	121.611	23.92	4.5	10.8
2024/4/23 21:29	121.61	23.93	4.1	6.1
2024/4/23 19:13	121.599	23.91	4.6	9.6
2024/4/23 18:31	121.582	23.9	4	8.8
2024/4/23 18:22	121.578	23.93	4.1	6.6
2024/4/23 13:08	121.515	23.79	4.5	5
2024/4/23 10:23	121.602	23.89	4.7	8
2024/4/23 10:21	121.541	23.86	5.5	8.9
2024/4/23 09:45	121.575	23.81	5.4	7.4
2024/4/23 08:16	121.56	23.85	4.8	2.3
2024/4/23 08:15	121.584	23.89	4.5	2.8
2024/4/23 08:11	121.59	23.89	5.2	11.6
2024/4/23 08:04	121.572	23.84	6.1	11.7
2024/4/23 07:17	121.59	23.92	4.1	3
2024/4/23 05:31	121.541	23.85	5.7	7.7
2024/4/23 05:19	121.537	23.76	5.7	5.8

2024/4/23 05:14	121.523	23.75	5.1	5.7
2024/4/23 05:04	121.507	23.7	5.5	4
2024/4/23 04:52	121.518	23.77	5.4	6.7
2024/4/23 04:49	121.564	23.74	5.8	8.8
2024/4/23 04:07	121.528	23.89	4.4	5
2024/4/23 04:03	121.604	23.83	5.2	8.1
2024/4/23 03:34	121.56	23.78	5	6.8
2024/4/23 03:19	121.555	23.86	5.2	7.9
2024/4/23 03:13	121.548	23.87	4.8	5.1
2024/4/23 02:35	121.574	23.9	4.6	6
2024/4/23 02:32	121.521	23.85	6.2	7.7
2024/4/23 02:26	121.613	23.74	6.1	9.2
2024/4/22 22:11	121.502	23.78	5.9	8.6
2024/4/22 19:13	121.534	23.82	5.4	8.2
2024/4/22 18:50	121.545	23.75	5.7	6.8
2024/4/22 18:49	121.531	23.75	5.2	6.6
2024/4/22 18:46	121.532	23.76	5.5	5.4
2024/4/22 17:52	121.581	23.77	5.2	9.5
2024/4/22 17:15	121.516	23.77	5.1	4.9
2024/4/22 17:12	121.541	23.79	5.3	8
2024/4/22 17:08	121.54	23.76	5.6	10.3
2024/4/13 22:26	121.545	24.03	5	13.5
2024/4/9 06:14	121.696	23.99	5	27.6
2024/4/9 02:02	121.656	23.94	5.4	35.4
2024/4/7 05:15	121.722	24.04	5.2	21.5
2024/4/6 18:47	121.666	23.94	5.3	34
2024/4/6 11:52	121.728	24.19	5.3	20.5
2024/4/6 04:26	121.75	23.97	5.4	26
2024/4/5 17:04	121.655	24.03	4.9	29.8
2024/4/5 12:50	121.697	24.12	5.5	18
2024/4/5 10:10	121.579	23.93	4.3	11.8
2024/4/5 02:35	121.656	24.17	5.5	30.9
2024/4/4 02:29	121.762	23.81	5.4	19.2
2024/4/3 16:56	121.631	24.07	4.8	14.9
2024/4/3 15:24	121.587	23.99	4.5	13.7
2024/4/3 14:31	121.522	23.91	4.8	11.3
2024/4/3 13:38	121.566	23.93	4.1	7.6
2024/4/3 11:57	121.601	23.81	5.2	27.8
2024/4/3 11:20	121.642	24.16	5.2	32.8
2024/4/3 10:14	121.976	24.15	6.2	26.9

2024/4/3 09:53	121.544	23.87	5.2	15.9
2024/4/3 09:39	121.773	23.8	5.6	20.4
2024/4/3 08:50	121.572	23.83	5.5	20.5
2024/4/3 08:46	121.7	24.19	5.6	6.1
2024/4/3 08:37	121.56	23.96	4.9	12.7
2024/4/3 08:17	121.699	24.04	5.4	31.1
2024/4/3 08:11	121.651	24.13	6.5	13.4
2024/4/3 07:58	121.574	23.88	7.1	19.7
2024/3/21 18:49	121.525	24.08	5.3	21.3
2024/1/20 02:01	121.608	23.9	4.1	10.9
2023/7/10 06:11	121.513	24.05	5.3	20.1
2023/2/17 09:22	121.47	23.94	4.6	18
2022/12/15 12:03	121.845	23.78	6.5	16.3
2022/12/8 00:54	121.601	23.8	5.6	29.7
2022/9/18 14:44	121.196	23.14	6.8	7.8
2022/6/20 09:05	121.454	23.69	6	7
2022/3/23 01:43	121.428	23.42	6.2	22.6
2022/3/23 01:41	121.612	23.4	6.7	25.7