



地震預警及結構動態反應監測可行性分析—開誠建設住宅案為例

開誠建設股份有限公司／蔡岳宏



一、前言

在經濟發展與高科技精密儀器系統之研發蓬勃的九零年代中期，目前技術發展亦往全面自動化的方式趨前，拜科技所賜讓我們更可在建築安全上更為提升。

本研究以地震防災創新應用服務結合於智慧建築整合系統平台，透過防災技術服務之應用，使建築智慧化的整合系統平台達到地震防災管理功能，長期來說更能有效降低地震所造成的生命財產損失。目的更是在創造安全、健康、舒適、節能與永續的工作及生活環境。

過去921地震的災變影響深植人心，國內對於新、舊建築的結構安全更是日益重視，因此建立一套簡單、可靠著預警和監測系統，來解決上述問題。並且將原本造價昂貴的地震預警及結構物監測儀器推動低造價的策略，作為日後兩大系統應用於住宅建築大樓商用化的可能性，並把醫療管理概念帶入住宅建築中有系統的來管理我們的房子。

首度由開誠建設公司執行「住宅建築防災安全監控系統整合應用計畫」於建案中，搭配三聯科技與國立中興大學土木工程學系的建築結構健康監測暨損害診斷之自動化分析程式產學合作計畫，將兩大系統整合於該住宅建築案當中，建構整個跨領域產業的初步結合及運

用。在日本的「緊急地震速報系統」，從2003年開始測試，2007年正式採用，由中央最高層級，推動至下層的各部會、各研究單位再轉由民間來建立推動地震預警，使之民眾可以透過手機app、電視、廣播等各種公開資訊管道。

二、國內智慧建築

過去內政部建築研究推廣智慧化住宅概念累計十年之多，並發展出「智慧建築標章」來進行評估作為審查依據（溫秀玲等,2002），而智慧建築標章的申請，不但能夠彰顯每棟建築物的差異化價值，更有助於住宅建築在品質上的提升。

1. 建築物防災指標

建築物防災指標是評估建築物防範自然災害或防止災害擴大之智慧化程度，重點還是「主動性防災」及「各自動性系統間整合及聯運動程序評估」。當建築物滿足所有相關法規的需求後，進一步評估建築物防災的智慧化程度（內政部建築研究所,2011）。在此，以建築物防災指標評估基準表來看防震抗風系統之部分，表一。

▼表1 安全防災指標之「建築物防災」指標評估基準（內政部建築研究所,2011）

項次	指標項目	評估類別	評估基準
一	防震抗風系統	偵知通報與顯示性能	設置建築物結構安全狀態監視系統或地震記錄儀
		侷限與排除性能	設置隔震系統或被動、主動制震或抗風系統
			建築物內設置避震裝置及防震管線
其他	可達實質成效且視需求採用之創新技術與工法		

在防震抗風系統內偵知通報與顯示性能類別中，設置建築物結構安全狀態監視系統或地震記錄儀，而未來更可與結構技師、結構鑑定相關單位結合，藉由記錄數據經分析後精準的判定現場破壞的位置。此外，很多破壞並無法透過肉眼觀察，若能記錄地震資訊並且顯示結構系數變化，將能大幅提升震後補強的效率，彰顯建築智慧化的效能。

2. 地震預警系統運作方式

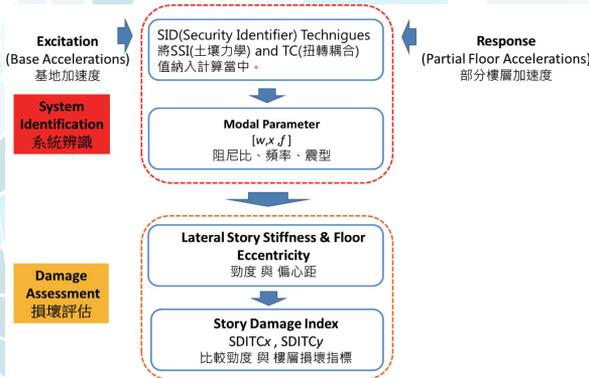
系統組成及運作方式，係由地震P波警報器(Palert)的微機電加速度感測儀，透過儀器偵測地震P波訊息，達到現地預警的目的。自2010年開始佈設，目前全台大約有547座中小學、大學安裝地震P波警報器(圖1)，相互連成地震預報網。



▲ 圖1 Palert地震儀網絡圖(中央研究院網絡服務中心, 2015)

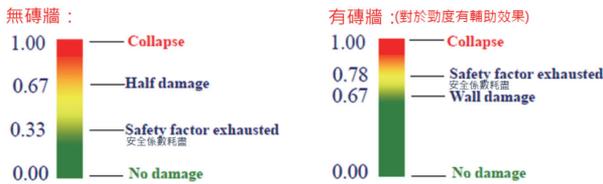
3. 結構物監測系統運作方式

針對該建築物的平立面規劃、結構位置進行評估，並以平面最大的三角範圍與共通的柱樑位置來規劃palert佈點位置，規劃的時候盡可能避開電梯運行的坑道，減少產生共振的可能，更必須考量未來維護的便利性。然而安裝時，必須先確定每顆palert(x、y、z)的方向性，並給每顆palert一組固定虛擬IP作為名稱。當安裝完成後第一次微地震晃動發生之後，每顆palert會根據所設置的點位，匯出偵測時間、加速度gal數據資料，並加入SSI(土壤力學) and TC(扭轉耦合)值、質心座標、樓層重量納入系統識別當中，計算出阻尼比、頻率、震型(圖2)。



▲ 圖2 房屋震害評估程序圖 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫書, 2015)

系統識別第一次地震量測的初始報告，便認定為完工後最佳健康的狀態，未來再接收到地震訊號，將依系統辨識及損壞評估來計算並產出報表，進行標的損壞預警比對(圖3)。



▲ 圖3 3房屋損壞預警圖 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫書, 2015)

三、地震預警及結構物監測整合之建立住宅建築地震預警系統整合實際建置住宅建築地震預警系統整合實際建置

將透過實際的住宅建築建置系統進行分析，為此開誠建設與三聯科技進行跨領域合作的價值工程，整合出初步的系統整合模式，敘述未來住宅建築空間中，地震預警及結構物監測使用計畫的需求與可行技術的交集，並且於規劃內容增加住宅建築對於地震預警及結構物監測系統在居住安全層面的提升。

本計畫將從三個階段---「規劃階段」、「系統建置階段」與「測量成果階段」建立地震預警與結構物監測系統的整合應用方案，依計畫將該系統導入至建築物內，以不佔用使用空間、便利維護等因素更使住宅建築面對地震時安全的提升(圖4)。



▲ 圖4 住宅建築地震預警及結構物監測系統整合概念 (本專案整理)

1. 規劃階段—地震預警及結構物監測系統於住宅建築中

(1) 建築執照圖

建築執照圖平面圖說可以呈現未來佈點的空間，找出最大能佈點的三角型輪廓，並且能夠判讀出公、私空間的區別，評估對於私空間影響最小的點位，並且避開電梯機坑運作位置，接著找出垂直管道空間。

(2) 建築結構圖

在建築結構圖能呈現樑柱位置，並且有助於佈點的選定。

(3) 結構計算書

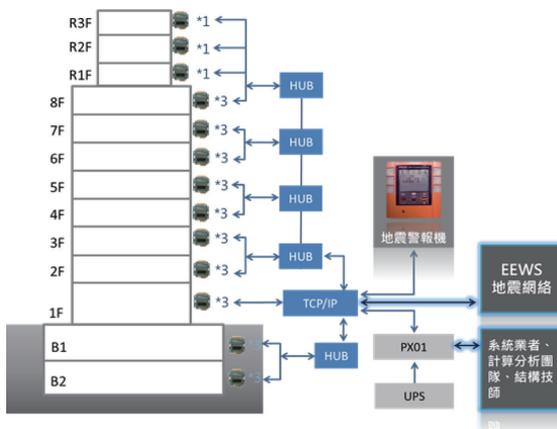
未來地震產生後，必須藉由結構計算書得知樓層重量、原點位置、各層質心座標等結構資訊，根據上述資訊進入系統辨識計算。(若只有地震預警功能則無使用該步驟)。

2. 系統建置階段—地震預警與結構物監測系統空間架構

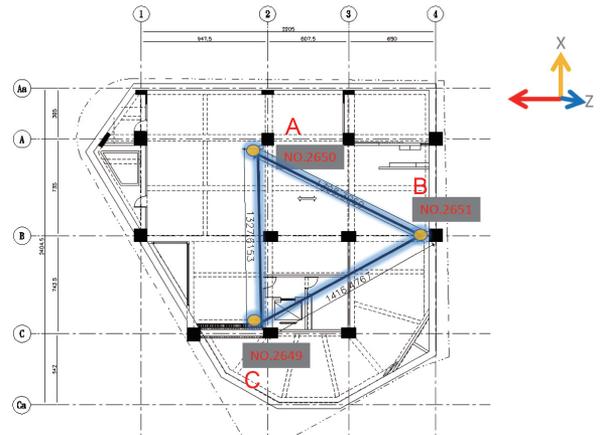
系統功能	預警系統、設備	空間	設備數量
結構物監測	A. Palert地震P波警報器	H. 建築1F或B1F	33部
	B. FTE-D04地震警報機	I. 大廳	1部
	C. PX-01地震預警主機	J. 設備空間	1部
	D. UPS不斷電系統	K. 設備空間	1組
	E. 電源線平波線	L. 設備空間	實際
	F. 網路線CAT.6	M. 於palert經管道間至設備空間	實際
	G. 固定實體IP / 固定虛擬IP	N. 同上	1組 / 33組

3. 系統建置階段—現場實際建置流程

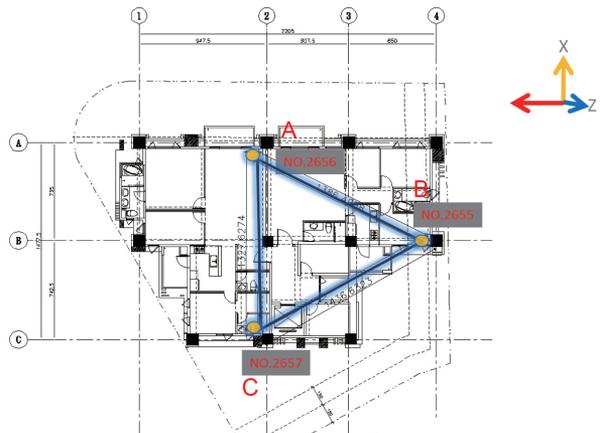
雖然上述兩系統可以採分案獨立。本次實測地震預警及結構物監測系統將整合於一體，以下繪製兩系統整合後於住宅建築架構路徑，如(圖5~圖7)。



▲ 圖5 兩系統整合於住宅建築架構路徑圖 (本專案整理)



▲ 圖6 地下1層安裝位置圖 (本專案整理)



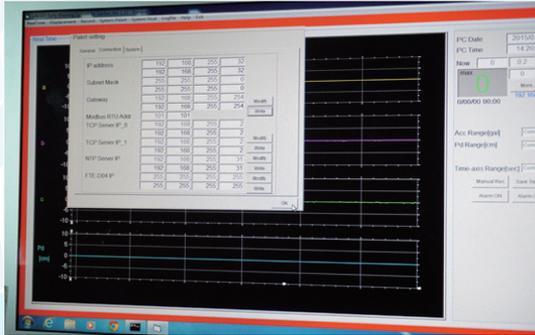
▲ 圖7 標準層安裝位置圖 (本專案整理)

4. 系統建置照片

現場系統建置過程照片，如(圖8~圖10)。



▲ 圖8 各部palert安裝完成後訊號確認 (本專案整理)



▲ 圖9 系統連線訊號測試 (本專案整理)

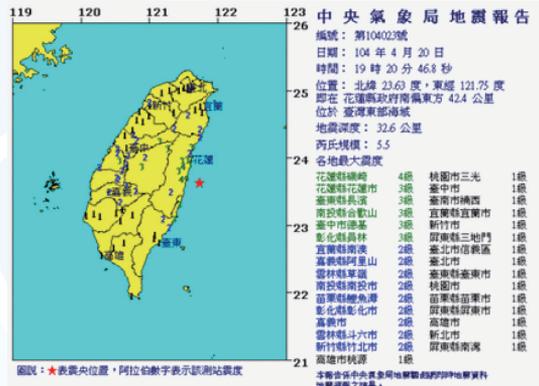


▲ 圖10 機櫃系統組立完成 (本專案整理)

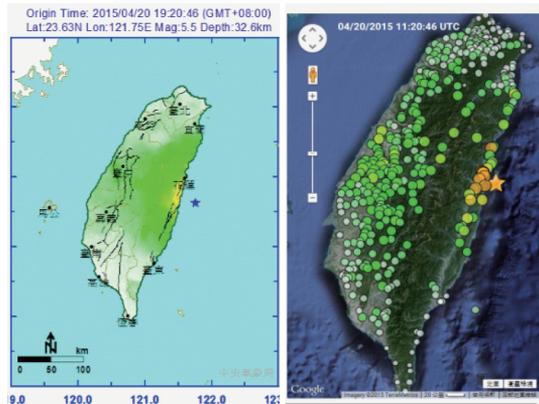
5. 測量成果階段—地震預警系統

由於現場內部裝修尚未完成。因此地震預警部分先採用台北市復興南路上三聯科技辦公大樓之地震預警系統來做為本專案測量成果。

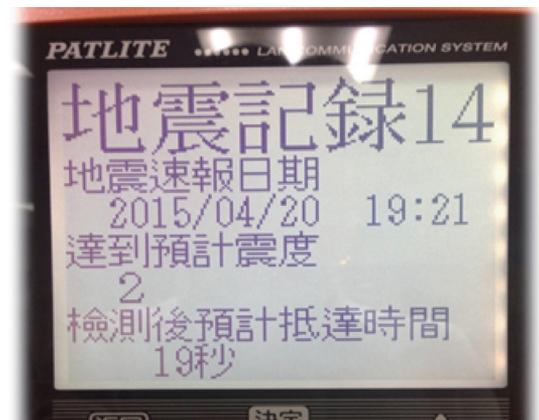
2015年04月20日19點20分46.8秒發佈花蓮東方海域發生芮氏規模5.5級的地震(圖11)。將Palert等震圖與中央氣象局相比較(圖12)，兩者所量測的等震度圖顏色上非常相近。調閱PX01記錄，以該地震為例，中央氣象所公佈的地震時間20分46.8秒，定位時間在21分04秒，位在使用端已發出19秒後會有2級震度抵達的地震預報(圖13)。



▲ 圖11 地震報告圖 (交通部中央氣象局地震百問, 2015)



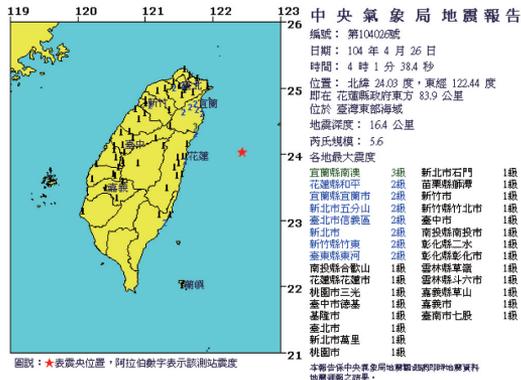
▲ 圖12 等震圖 (交通部中央氣象局地震百問/中央研究院網絡服務中心, 2015)



▲ 圖13 PX01地震預警主機 (三聯科技, 2015)

6. 測量成果階段－結構物監測系統

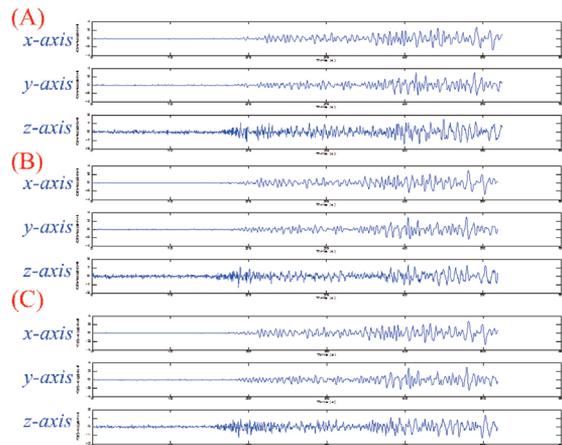
在2015年04月26日清晨04點01分38.4秒花蓮外海發生地震(圖14)。這段時大多數的人都還在睡夢當中，而安裝的Palert在這時間同時都記錄下建築物所感受的震度。



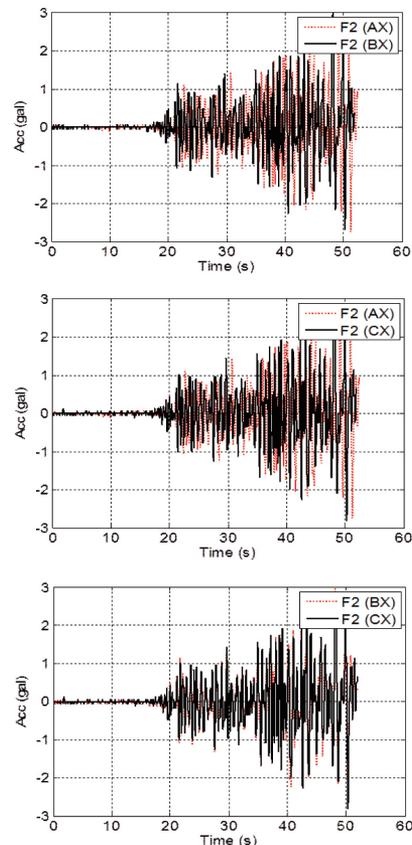
▲ 圖14 地震報告圖 (交通部中央氣象局地震百問, 2015)

將Palert所記錄的地震訊號分別進行SRIM之初步識別，本次計算分析引用 (C.C.Lin, C.E.Wang, H.W.Wu, and J.F.Wang,2005)，“On-Line Building Damage Assessment Based on Earthquake Records”, Smart Materials and Structures, Vol. 14, No. 3, pp. 137-153. 中的SRIM之初步識別。

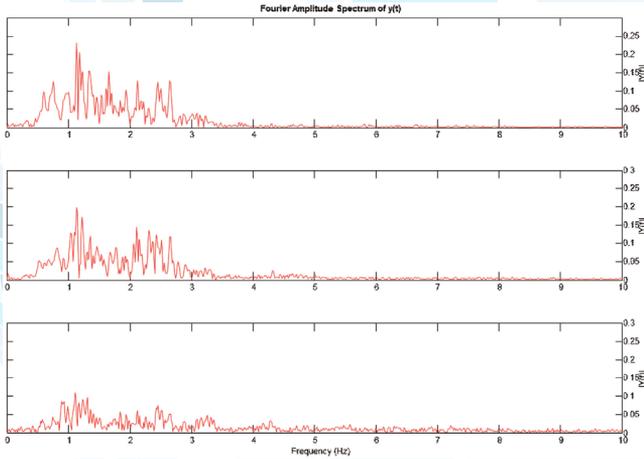
分別先繪製各樓層Palert量測加速度歷時圖(圖15)。再將每單一樓層歷時圖進行交叉比對，如下(圖16)，圖中紅色的線段是地震所造成的振動，而黑色線段代表量測的結構振動。接著將各Palert量測資料轉換成FFT頻譜，從這裡可得知一個訊號在不同頻率下的資訊可能是振幅、功率、強度或相位等。而Palert A、B、C之FFT頻譜圖(圖17)，兩儀器x、y軸所得到的線形最高都落在1Hz，z軸則高點則落在1Hz前後。



▲ 圖15 各層歷時圖繪製－以B1~2F之y向為例 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)

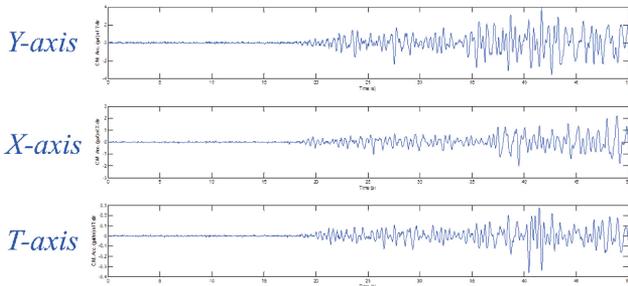


▲ 圖16 各層歷時圖比較－以二樓為例Palert X軸向為例 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)



▲ 圖17 各層量測資料之FFT頻譜圖—二樓Palert A (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)

由於目前現場基地的限制，本棟建築物並未設置自由場感應器，故本專案將以結構基底之感應器訊號為基礎，計算基底樓板質心之兩水平向與扭轉向加速度歷時，作為結構系統之輸入加速度。並進行座標轉換至質心之加速度歷時，如下(圖18)。



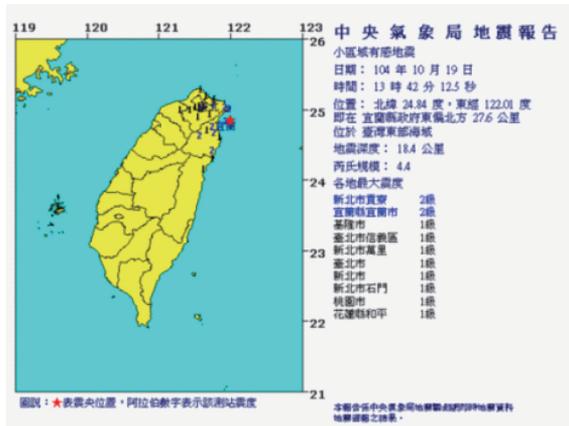
▲ 圖18 各樓層質心座標轉換圖—以二樓為例 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)

這次初步結構物監測的分析結果(圖17)，以十層樓的鋼筋混凝土建築為例(隔間牆尚未建置的狀況下)，在頻率上會接近1Hz，週期則會接近1Sec。本棟建築物在頻率、週期、振形上

相對符合。第一次模態分析後與前者FFT頻譜圖是相吻合的，整體振形確實與理論上的第一模態振形相符，阻尼比的識別結果偏低，且3F出現異常的振形，該部分尚待釐清很可能是系統的運算問題。而目前這筆SRIM之初步識別結果視這建築物目前最健康的狀態，日後將成為每次大規模地震影響後的比對資料。

	第一模態	
頻率 (Hz)	1.0316360	
週期 (Sec.)	0.96933416	
阻尼比	0.79066395	
振形	1F	0.12130139
	2F	0.19397407
	3F	-0.042873547
	4F	0.25710522
	5F	0.40491452
	6F	0.87076497
	7F	0.93064033
	8F	1

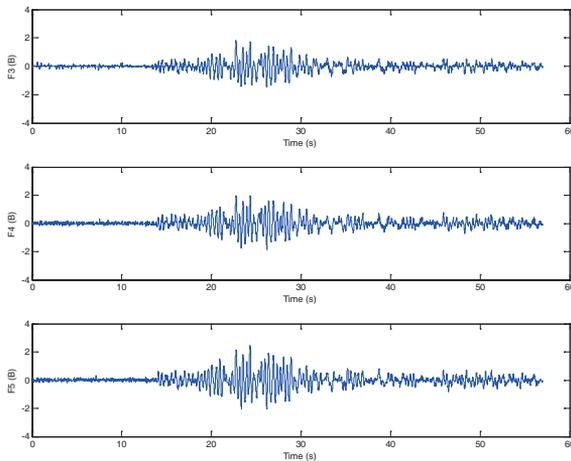
▲ 圖19 SRIM之初步識別結果X向 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)



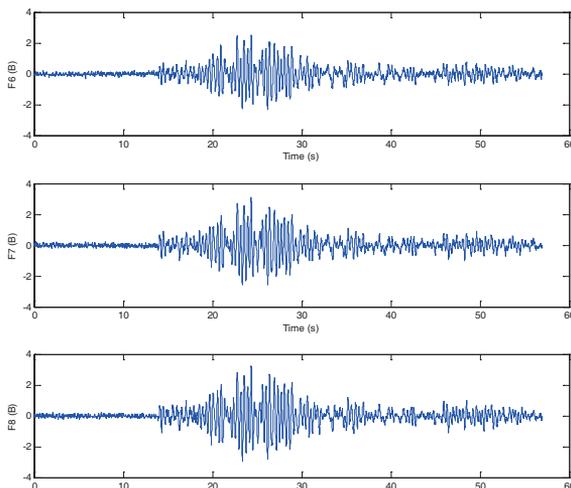
▲ 圖20 地震報告圖(交通部中央氣象局地震百問, 2015)

結構隔間牆建置完成後，結構的勁度會有顯著的提升，使結構頻率增加。在10月19日下午13點42分12.5秒，震央在宜蘭東方海域的地

震作用下(圖20)，所有的palert同時啟動並記錄到完整的資料，據此再次進行SRIM系統識別，由結果發現由於隔間牆的建置，使結構主頻明顯上升，以下為其說明。圖21~圖22為此次地震所量測到的結構反應歷時圖。

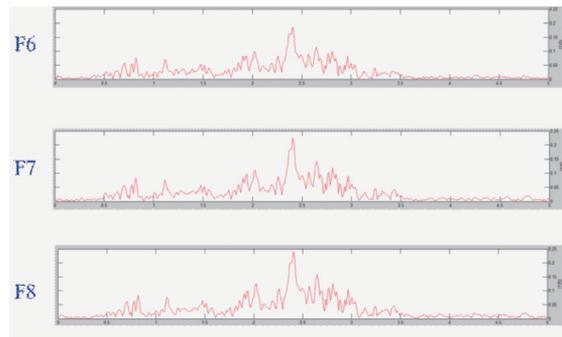


▲ 圖21 各層歷時圖繪製-以3F~5F之y向為例 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)



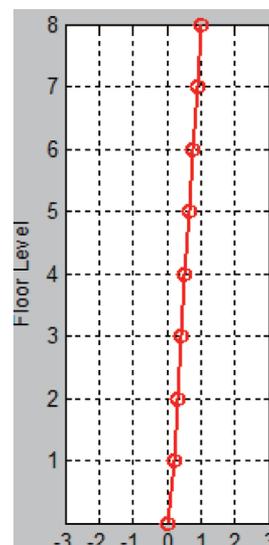
▲ 圖22 各層歷時圖繪製-以6F~8F之y向為例 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)

再從8F的FFT頻譜圖可知，在隔間牆建置完成後結構物的第一模態為2.4左右(圖23)。



▲ 圖23 各層量測資料之FFT頻譜圖-以6F~8F之y向為例 (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)

有別於2015年04月26日清晨04點01分38.4秒，震央在花蓮外海的地震資料識別結果，由於當時結構尚未建置隔間牆，因此識別出之結構頻率大約為1Hz。本次地震記錄識別出之結構頻率大約為2.4Hz，振形如圖24所示，證明隔間牆對於結構勁度的增加有很大的影響，且三聯科技所建置的結構健康監測系統，確實可有效監測結構物的動態特性。



▲ 圖24 SRIM所識別出之第一模態振形(y向) (國立中興大學土木工程學系/三聯科技產學計畫, 2015)



四、結語

首先在地震預警系統部分，在台北使用戶端顯示19秒的預警，在這短暫的時間已經足以透過設備連結電梯、瓦斯、電力端做緊急的應對。未來可以為住宅建築地震安全的部分提出預警的功能，藉以提升住宅建築對於地震預警的安全性，降低二次災害的功能。

在結構物監測系統的部分，Palert訊號經過SRIM之初步識別，可於得知該建築物的頻率、週期、阻尼比及振形，於第二次地震發生前，未來將會以這次的識別結果做為下一筆地震發生所計算出的分析來做比對。最後這次的識別分析上，結果資料呈現第一模態頻率與FFT圖相當吻合，整體振形與理論之第一模態振形也相符合。

這次實驗我們以低價的Palert運用於住宅建築上，從最初的規劃評估到實驗分析結果。站在建設公司的角度上，其實兩系統均是MEMS所組成的儀器，顛覆過去傳統地震儀造價相對昂貴，所以這次實驗儀器系統對於實際的建築造價成本上影響性並不高，但卻可以為建設公司及住戶帶來莫大的幫助提升建築價值，以建設公司而言先可以針對自己的住宅產品在建築結構上做第一層的認識，檢視建築結構與結構計算書之定義是否相符。地震預警在面對大規模地震來襲前預報的安全性，而地震災後也可以快速地分析比對結構安全性，達到社區永續營運維護的目的。

若能於住宅建築導入地震預警與結構監測系統在緊急狀況時充份發揮效能，使之與日常生活充份結合，創造住宅建築最大效益與價值。

現今科技產業日漸趨向服務化的情況下，未來住宅產業更能夠探討跨領域與物聯網結盟，透過物聯軟件來得知居住空間震前或震後的安全訊息，若能透過廣大的網路系統，更能促進地震預警網絡系統，更即時有效的連結資訊，提升安全性。

✉ 參考文獻

1. 台大嚴慶齡工業研究中心,智慧化居住空間安全監控系統整合應用計劃,2007,12
2. 內政部100.1.19台內營字第0990810250號,建築技術規則,建築構造編
3. 鄧屬予,國立台灣大學地質科學系暨研究所,台北盆地地質研究,西太平洋地質科學,2006,12
4. 溫琇玲,智慧型公寓大廈自動化系統設計準則研究,1996
5. 溫琇玲,鑑別分析法運用於建築物智慧化程度之評估研究,2002
6. 溫琇玲,智慧建築解說與評估手冊,內政部建築研究所,2003
7. 溫琇玲,智慧型建築物營運計畫與設施管理技術之研訂,2005
8. 許宗熙、楊逸詠等,智慧型建築基準指標及未來發展方向之研究,1992
9. 張智元,建築醫學之概念與應用機制研究,國立臺灣大學土木工程學研究所,2006,06
10. 智慧建築解說與評估手冊,2011
11. 內政部,建築技術規則,2014版
12. 交通部中央氣象局,地震百問
13. 內政部100.1.19台內營字第0990810250號
14. 國震中心網站,地震問與答
15. 台北測候所,1899;台灣氣象會,1997
16. 郭冠宏,以低價位P波警報器建置及時強地震觀測系統及其於地震預警之運用,國立臺灣大學地質科學研究所學位論文,2013,07

17. 劉庭佑,以到時比序法及微型地震網改進臺灣低價位地震預警系統 國立臺灣大學地質科學研究所學位論文,2014,07
18. 張國鎮、宋裕祺等,橋樑基礎沖刷安全監測系統研發, Journal of Engineering, National Chung Hsing University, Vol. 25, No. 3, pp. 85-94
19. 施建良,小型鋼構架之結構健康檢測,國立臺北科技大學土木與防災研究所,2009.07
20. 顏士閔,依識別模態參數之建築結構層間損壞指標,國立中興大學土木工程學系,2005
21. 三聯技術期刊90期, 2013,12
22. 三聯技術期刊91期, 2014,03
23. 三聯技術期刊92期, 2014,06
24. 三聯科技股份有限公司,公司網站,2015 <http://www.sanlien.com/web/homepage.nsf/main3?OpenForm&View=EQ1>
25. Chi-Chang Lin 1,2,3, Chieh-ErhWang2, Huang-WenWu2 andJer-Fu Wang2, On-line building damage assessmentbased on earthquake records, Received 2 April 2004, in final form 3 March 2005, Published 26 May 2005
26. Jer-Fu Wang1,Chi-Chang Lin,Shih-Min Yen,A story damage index of seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape, Received 18 July 2006; received in revised form 23 October 2006; accepted 23 October 2006 Available online 20 December 2006
27. Jer-Fu Wang1,Chi-Chang Lin, M.EERI, Ging-Long Lin, and Chun-Hao Yang, Story Damage Identification of Irregular Buildings Based on Earthquake Records, Earthquake Spectra, Volume 29, No. 3, pages 963–985, August 2013; © 2013, Earthquake Engineering Research Institute
28. MOTC-CWB-98-E-13 建立建築物震損圖之研究, 姚昭智,林其璋,洪李陵,朱世禹
29. MOTC-CWB-92-E-10-4依強震記錄探討建築物動態特性及損害評估(I),林其璋,施詠陽
30. MOTC-CWB-97-E-10 地震初達波強震即時警報系統之研發, 吳逸民
31. MOTC-CWB-98-E-10 地震初達波強震即時警報系統之研發(II), 吳逸民



產業專業術語英文教室

Structure Health Monitoring
結構物健康監測

量測結構受外力作用所產生之加速度或變位等, 評估其健康狀態、損壞程度及損壞位置, 進而規劃設計結構補強或減振。

FFT (fast Fourier transform) Spectrum
快速傅立葉頻譜

用於轉換信號格式並求得相對應的頻譜。

Damping
阻尼

系統震盪使用裝置或電路產生反向震盪使原系統不振盪。