

現地型強震即時警報系統之研發

Development of the On-site Earthquake Early Warning System

主管單位：財團法人國家實驗研究院

林沛暘¹ 黃謝恭¹ 江宏偉¹ 許丁友¹ 盧恭君¹
Lin, Pei-Yang¹ Huang, Shieh-Kung¹ Chiang, Hung-Wei¹ Hsu, Ting-Yu¹ Lu, Kung-Chun¹
¹財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心

摘要

臺灣位處環太平洋地震帶上，平均每年發生四千多起大小地震，近百年來臺灣已經發生了多起重大的災害性地震。1999年的921集集大地震更造成2434人死亡、近十一萬戶房屋倒塌之災情。然以現今的科學技術而言，地震仍無法進行事前預估而先行避難。但可以利用地震波傳遞的特性，偵測傳播速度較快的P波，計算評估後續地震的大小，對影響區域發佈地震警報，爭取數秒至數十秒的時間，提早進行地震防災應變，這就是強震即時警報的原理。本研究發展出一套現地型強震即時警報系統，並將此系統裝置於一棟兩層樓之模型展示屋，透過國震中心之三軸向地震模擬震動台進行驗證測試。以921地震為例，依據各地區距離震央的遠近，可以分別為嘉義、台中、新竹與臺北多爭取11、7、17與27秒的預警時間(相較於台灣高鐵所採用的地震告警系統)。在劇烈震波抵達前，透過廣播、字幕機、電視插播等方式提出預警。同時也自動關閉瓦斯，以避免火災的發生；開啟大門、以及逃生動線指示燈以利逃生；將電梯停至最近樓層並開啟電梯門，減低傷亡與受困；透過以上種種自動化警報展示以及減災控制的方式，可讓人們順利進行避難疏散與掩蔽，大幅減低地震所造成的傷亡。此外國震中心分別在臺北市芳和國中、宜蘭縣宜蘭國小、南安國中、中興保全羅東分公司、花蓮縣花蓮火車站、光復國小、玉東國中、嘉義縣中正大學以及港坪國小建置強震即時警報示範站。進行現地的長期驗證測試，也同時配合應用單位進行地震防災教育的推廣。近兩年多的現地驗證測試結果顯示，本系統正負一級預測震度準確率約八成，依據震央的遠近可以爭取數秒至二十餘秒的預警時間。配合學校平時的防災演練，以於多個地震事件實際發揮預警之功效。

關鍵詞：地震預警系統、自動化減災控制

Abstract

Taiwan located at circum-Pacific seismic belt and the junction of the Eurasian plate and Philippine Sea plate. In average, more than 4000 earthquake occurred annually. However, with today's science and technology, the earthquake is still unable

to estimate and evacuate the people in advance. As the source of seismic waves generated in the body of the earth, when the wave passes on the mantle through various distinct characteristics of the media, the wave velocity varied. The seismic waves can be divided into two kinds, P-waves and S-waves. The velocity of P-wave is about 5-7 (km / sec); the velocity of destructive S-wave is about 3-4 (km / sec). This research develops the on-site Earthquake Early Warning System (EEWS) by the physical characteristics of the P-wave velocity greater than S-wave velocity. The on-site EEWS only used the signal from the on-site sensor, the calculation time was less and suitable to provide earthquake early warning to the region which close to the epicenter. In the same time, the proposed on-site EEWS was integrated with the disaster reduction control system in a demonstration house and been tested on NCREE's shake table. The integrated on-site EEWS can provide the early earthquake warning through broadcast, TV and LED text display. Also, it will automatically park the elevator, shut-off the gas, switch the power, open the door and turn on the light of the escape route. Combine the on-site EEWS and disaster reduction control system, the life and economic loss can be greatly reduced. In the other hand, the on-site, long-term test results were also preceded. According to the validation test results in the past two years, the proposed on-site EEWS can provide about 80% accuracy of the predicted intensity levels and 5~30 seconds response time according to the different distance between the epicenter. With the help of the earthquake disaster reduction drill, the proposed EEWS has successful raised the alarm before the main shake, and people can take cover in several real earthquakes.

Keywords : Earthquake Early Warning System, Disaster Reduction Control

一、前言

鑑於台灣因地理特性其地震發生頻率較高，中央氣象局建置強震監測網偵測地震活動情形，由於地震本身具有 P 波與 S 波相異速度差之物理現象，且地表震度、最大地表加速度(PGA)皆與 S 波息息相關，又因電子訊號傳遞速度接近光速，雖受限於傳遞方式以及傳遞介質其速度會有所遞減，但仍遠快於地震波的波速，故可利用近震央測站接收 P 波資料，並傳遞給運算核心，透過相關演算法推估後續 S 波對於地表之影響，進而針對受強震影響之區域，於劇烈震動開始前提出警示。

此一構想最早由美國 Cooper 博士(1868)所提出，美國與墨西哥於 19 世紀末皆分別發展適用該地區之強震即時警報系統，而在日本方面，早期由 Hakuno 教授進行此方面的研究，日本氣象廳於 2007 年建置強震即時警報系統(Earthquake Early Warning System, EEWS)，透過網格大小約為 20 平方公里之地震觀測網，集合靠近震央的測站群之即時資料，進行該次地震事件之震波影響情形推估，並對於 S 波尚未到達的區域(距震央較遠處)提出警示。此種運用測站群資料，統合運算推估地震規模、地表震度以及 S 波到達時間等相關參數之運行模式，可視為廣域型強震即時警報系統，目前正由中央氣象局輔以遍布全台的地震測站(強震觀測網, TSMIP)，進行強震即時警報系統的開發與測試。

廣域型強震即時警報系統以大型地震觀測網收集地震資料，當地震發生時，藉由震央周圍測站群記錄資料，統合推估該地震事件之相關影響，因地震波於地球體內傳遞受相異介質影響，為了減少推測數據之誤差，故利用多個測站資料交互分析以期降低誤差。大範圍、高密度的觀測群可以提升系統的預估準確性，實際運作時，由於需要確認多個地震站之資訊，必須耗費些許時間(約 18 秒)，因此對於近震央區域無法提供預警系統。近年來日本也開始著手開發現地型地震即時警報系統(on-site EEWS)，它是運用現地的地震儀直接進行相關地震警報的預測演算。由於僅用現地一組地震儀的資訊，其計算時間可以大幅縮減能提供快速的地震預警。但相對的其準確度較區域型地震警報系統為遜色。有鑒於此，若能整合區域型與現地型地震即時警報系統，便是未來發展的趨勢。可以縮小警報系統的盲區，同時也能兼顧警報的準確度。日本已開始利用現地型預警系統提升其強震即時警報系統對於該國強震警示服務的即時性，兩者系統示意圖如圖*所示。有鑒於中央氣象局已經在進行區域型地震即時警報系統之研發。國家地震工程研究中心的研發目標，便是在於現地型地震即時警報系統(on-site EEWS)的研發。

如圖 1 所示，國震中心研發之現地型強震即時警報系統可以分為三大部份，首先為現場預警模組。這個模組運用現地之地震儀偵測 P 波，並運用所量測之資料演算法推估相關地震參數，如地震規模、震度、預計到達時間等等。第二部份為結構快速反應評估模組，這個模組可以快速地進行結構物的反應評估，分別提供建築物各個位置的預測震度，以利後續地震防災標準作業程序參考。最後的一部分為地震警報的應用研究，整合前兩部分的預估參數，以及各種地震防災境況模擬，建構地震自動化防災系統的雛型規劃，以及整合測試。長期的研究規劃，將以不同的警報使用端，分別進行通用型 EEWS 以及進階型 EEWS 的研發與測試。通用型 EEWS 主要的服務對象為學校、政府機構、住宅等。以經濟、快速的地震即時警報系統為目標，並能整合自動警報與減災控制系統。如瓦斯自動關閉，疏散路線燈號控制、大樓電梯停止運作，人員避難動作導引...等。現地型強震即時警報系統受限於只使用單一測站即時資訊進行後續 S 波所影響之地震參數推算，遠低於廣域型強震即時警報系統之資料量。其預估精度較低，因此初期之合作與測試對象以對於誤報率容許度較高的學校為優先。進階型 EEWS 主要的規劃目標在於重要與高價值之建物與設施。藉由高精密度與多區域性的結構快速反應評估技術，可以針對各個位置作獨立之地震震度預警。同時可以整合自動化地震防災控制系統，減少經濟與人員的損失。

現地型強震即時警報系統



台灣預警系統



通用型EEWS

- 學校、政府機構
- 各樓層受震反應預估
- 自動警報與減災控制

進階型EEWS

- 重要設施、高經濟價值結構
- 各結構點受震反應預估
- 自動化減災控制(減低經濟損失)

圖 1： 台灣與日本強震預警系統之示意圖

二、系統架構與開發

2.1 地震警報系統架構

國震中心自民國 79 年創立以來，於著重於地震災損評估、建物耐震設計、橋梁減震分析等相關領域之研究，當 1999 年之 921 大地震發生後，協同各個政府單位(如交通部公路總局、國道新建工程局等)及民間學術團體和工程界相關企業組織針對災區內受損之建物與橋梁進行大範圍且深入之研究。有鑑於中央氣象局已經建置中央地震觀測網，以及區域型強震即時警報系統。區域型系統可以依據不全台的地震儀進行偵測與計算，計算完後對全台灣發布地震預警，因此需要一定的作業時間。以發生在內陸地震來說，平均約需要 18~20 秒才能提出警報，然而此時地震波已經散布出一段距離，近震央區域(50~70km 半徑內)已經來不及在地震來臨前收到地震警報，這些區域稱之為地震預警系統的”盲區”。台灣地區幅員較小，南北向約三百餘公里，多西向約一百公里。災害型地震的發生，其震央大多在島內，如 1999 年的九二一大地震，其震央在南台線集集鎮。以此推算北至新竹縣，南至台南縣皆可能是地震預警系統的盲區。偏偏這一些盲區都是地震的重災區，因此縮小盲區辨是一件刻不容緩的任務。有鑑於此，國家地震工程研究中心自九十七年起開始進行現地型強震即時警報系統的建置研究。其中包含現地型強震即時警報模組、結構物反應快速評估模組、嵌入式系統整合與測試、客製化地震警報展示與自動化減災控制。

2.2 現地型強震即時警報模組

國家地震工程研究中心近年來已經研發出兩套技術，可以偵測地震來臨前人們感覺不到的微小 P 波，並運用其波型訊號，預測後續地震的震度以及地震的規模。這兩套技術分別是體波震源法以及類神經網路法。這兩套方法分別運用台灣歷年來數十萬筆地震紀錄進行研發與測試，均可以準確有效地預測地震規模、震度等地震參數。

2.3 結構物反應快速評估模組

除了地震預測相關研究外，國家地震工程研究中心一直在進行結構物受震反應相關研究，也已經開發出結構物反應快速評估技術。可運用預測地表震度以及一些預先設定的結構物參數，在幾十微秒內快速計算結構物各各

樓層位置的震度。有了這項技術，不論是在一樓還是五十樓，均可以即時計算出預估樓層震度，即時提供預警。並可以依據需求計算任意位置的反應，做客製化應用。

2.4 嵌入式系統整合與測試

地震預警以及結構物快速反應評估這兩項技術，均已經通過數值分析的驗證測試。為了更進一步將相關技術落實應用，國震中心採用嵌入式即時運算系統(dSpace, Micro-box)，連接現地的高精度地震儀，並將預警技術嵌入至即時運算核心。藉由高精度的地震儀偵測地震前導的微小振動 P 波，並即時進行計算，提供預估震度等地震預警訊息。整體系統已經通過國家地震工程研究中心的振動台測試，可以即時偵測地震 P 波，並提供預測震度等預警訊息。以 1999 年 921 大地震為例，可以分別為台中縣大里鎮、新竹科學園區以及台北市大安區爭取 7、17 以及 27 秒的預警時間(相較於台灣高鐵所採用之地震告警系統所能提早的時間差)。並已經陸續於台北、宜蘭以及嘉義建置示範系統，實際進行現地長期測試。於測試期間，已經成功在地震來臨前提出地震預警資訊。

2.5 客製化地震警報展示與自動化減災控制

由於地震即時警報系統所能爭取的時間有限，依據震央的遠近至多只能有數十秒的預警時間。如何應用有限的預警時間，降低生命財產的損失億是一項重要的課題。國家地震工程研究中心針對往後潛在的使用環境以專家座談會及問卷調查方式，依一般住宅、建築工地、醫療院所、公路運輸、鐵路運輸、機場與港口、教育設施、廠房、救災單位、發電廠與集會廠所等 11 個類型進行探討，使用統計分析方式整合相關政府單位、學術研究團體及民間企業組織之意見，以作為強震預警系統之研發目標及推估台灣地震產業的潛在市場價值。統整多方意見，國家地震工程研究中心依據各個應用端，設計了自動化減災控制以及客製化警報展示系統。用以在最短的時間內，透過自動化廣播、跑馬燈、電視、電話簡訊等等方式，讓所有的使用者收到地震訊息。同時自動關閉瓦斯、停妥電梯並開門、切換備用電源、逃生動線指引等。讓使用者只須注意自身的安全，迅速進行避難疏散與掩蔽。相關設備會進行自動化減災控制，並提供相關逃生指引與語音指示。

三、現地示範站驗證測試

3.1 強震即時警報系統示範站規劃

為進一步驗證此地震預警系統，並進行地震防災教育推廣，本計畫分別於台北市芳和國中、宜蘭縣宜蘭國小、南安國中、花蓮縣光復國小、玉東國中、嘉義縣中正大學、港坪國小、花蓮火車站以及中興保全羅東分公司進行示範站架設。並依據使用端的需求，設計建置自動化警報展示系統。在各個示範站可以同時接收中央氣象局所發送之區域型強震即時警報訊息，以及國震中心所提供的現地型強震警報訊息。考量學校師生對於地震警報訊息傳遞的需求，芳和國中以及宜蘭國小皆可透過專用的地震警報廣播系統，將訊息傳遞至校園每一個角落。重要場合與集合場所設置地震預警訊息字幕機，提供文字警報訊息。同時也會發布群組簡訊，提供地震預警訊息置相關行政人員。圖 2 顯示強震即時警報系統的架構以及設置地點。示範站可接收中央氣象局所提供之區域型強震即時警報，也同時運用現地強震儀進行現地型強震即時警報的計算。一旦偵測到地震，且預估震度超過學校所預設之震度門檻值，系統將會自動進行警報的廣播，字幕機也同時撥放相關警訊。學校以及國震中心相關同仁也會收到簡訊以及 E-MAIL 通知。



圖 2：強震即時警報系統示範站系統應用範圍

3.2 地震防災演練

考量地震預警系統所能爭取的預警時間有限，特別在鄰近震央地區，預警時間可能僅有數秒至十餘秒。如何有效應用此系統所提供的寶貴但短暫的預警時間，進行相關避難疏散，減少人員的傷亡便是一重大課題。本計畫與個示範站學校合作，依據強震即時警報系統於震前所能提供之警報，幫各個學校修改其地震防災演練標準作業流程。並實地勘查地震避難地點、集合地點以及逃生動線。規劃客製化校園地震防災演練計畫。並結合 EEWS 示範系統，每年進行多次地震防災演練，確認學校師生能夠確實應用此系統，於地震主震來臨前完成避難疏散之準備。圖 3 顯示地震防災演練流程，在人們尚未感受到地震前，本系統首先透過專用廣播與字幕機發出警報”強震即時警報、預估震度五級、請立刻進行避難疏散”，一樓師生聽到警報聲後須立刻依照逃生動線疏散至戶外空曠處，各校平均約略 15 秒鐘便能完成一樓師生的疏散。二樓以上的師生聽到警報後須立刻進行防震掩蔽，遠離窗戶、保護頭部，躲至桌下或桌旁並作掩蔽動作。劇烈震波來臨時，一樓已經淨空，二樓以上師生已經就掩蔽位置。待地震結束後，由師長廣播，請全體師生慢慢疏散集合地點集合、清點、檢傷、救護以及後續事項。希望藉由實際且頻繁的防震演練，落實強震即時警報系統於實質應用，並於地震時可以真正發揮減災的作用。



圖 3：地震防災演練流程

四、誤報控制

現地型強震即時警報系統歷經數年的實驗室驗證，現地示範站長期驗證，已經證明其在真實地震下之預警能力。然而為了盡量多爭取一些預警時間，本系統需在 2gal 下的訊號進行高精度的分析與計算。由於訊號及其微弱，因此極易受外力所干擾，如電子干擾、人為干擾以及車輛干擾。電子干擾的處理較為簡單，因為其頻率與地震頻率差異較大，可以用一些訊號處理的方式作處理就可以排除。本計畫已經採用電源穩定機制、訊號濾波模組等等方式，阻絕電子干擾所導致之誤報。至於人為擾動可以見圖 4：人為振動導致誤觸案例。其來源可能是有多人在附近運動所導致，因為其出現時間均固定於某一時段。由於其頻率以及震動幅度與真實地震之前導 P 波有些類似，不容易由一些訊號處理的方式來濾除。

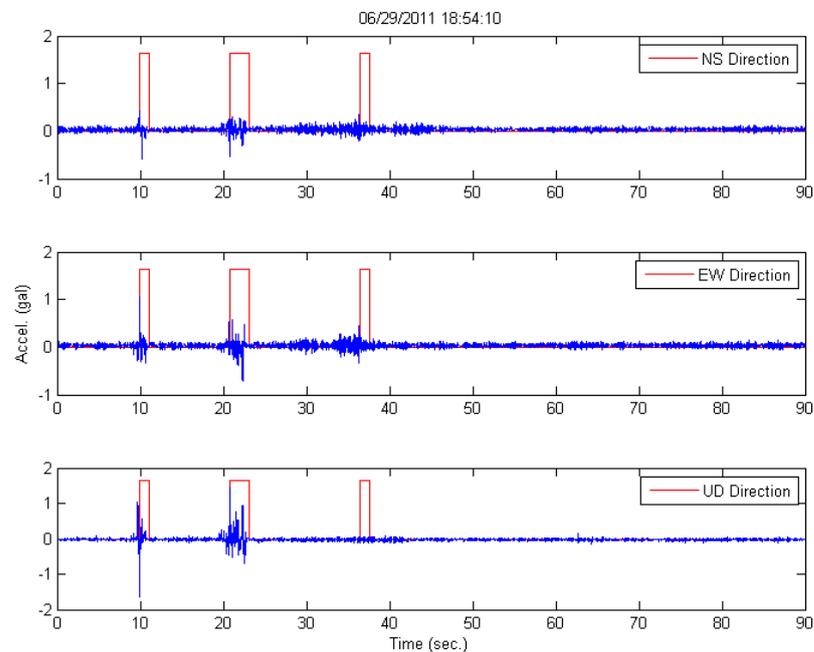


圖 4：人為振動導致誤觸案例

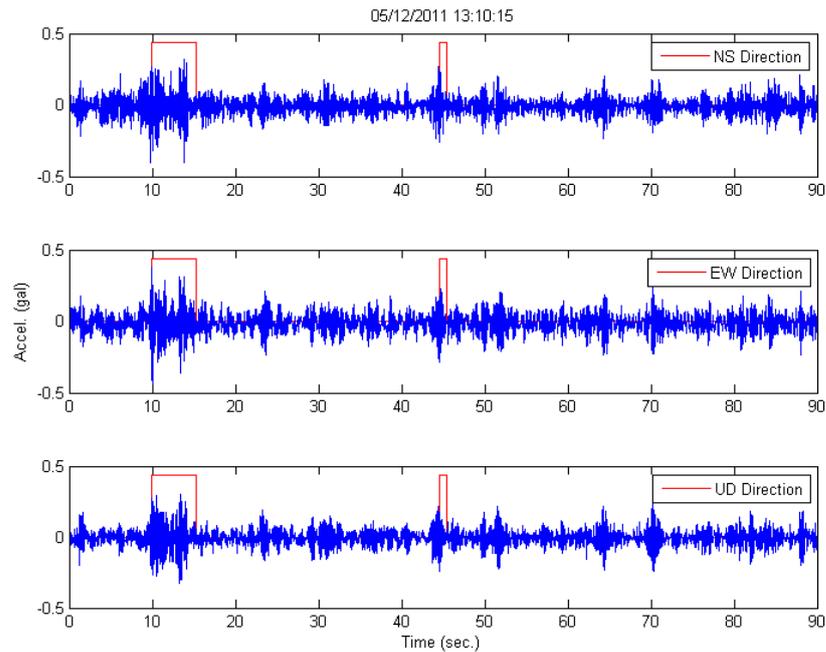


圖 5：車輛振動導致誤觸

車輛震動導致誤觸案例如圖 5，這類振動較人為振動更難處理。因為這類的震波透過土壤將振動傳遞至地震儀，其傳遞路徑與方式與地震相似，因此其振幅與頻率均與真實地震之前導 P 波及為相似。為解決人為振動以及車輛振動的誤觸案例。本研究分別採取多種地震儀裝置方式進行分析，包含：一樓地板設置地震儀、2m 淺井式地震儀、40m 深井式地震儀、2m 淺井式地震儀+頂樓設置備援地震儀。以下針對這幾種配置作檢討：

一樓地板設置地震儀：首次在現地示範站設置時，地震儀均設置於學校教室內的地板上，設置位置會盡量避免在師生活動較多之地點。一般都可以在學校較為安靜的室內空間是布設地震儀(如圖 6)，或是於花園設置地面式強震測站與 FRP 觀測屋。這類的布設情形在約一年後便觀察到會受到一些師生活所造成的人為擾到干擾。這類振動大多非直接觸碰到地震儀，而是透過結構物傳至地震儀。因為是透過波傳的關係，其振幅與頻率內涵與真實地震難以區隔。很難用訊號處理的方式來解決。

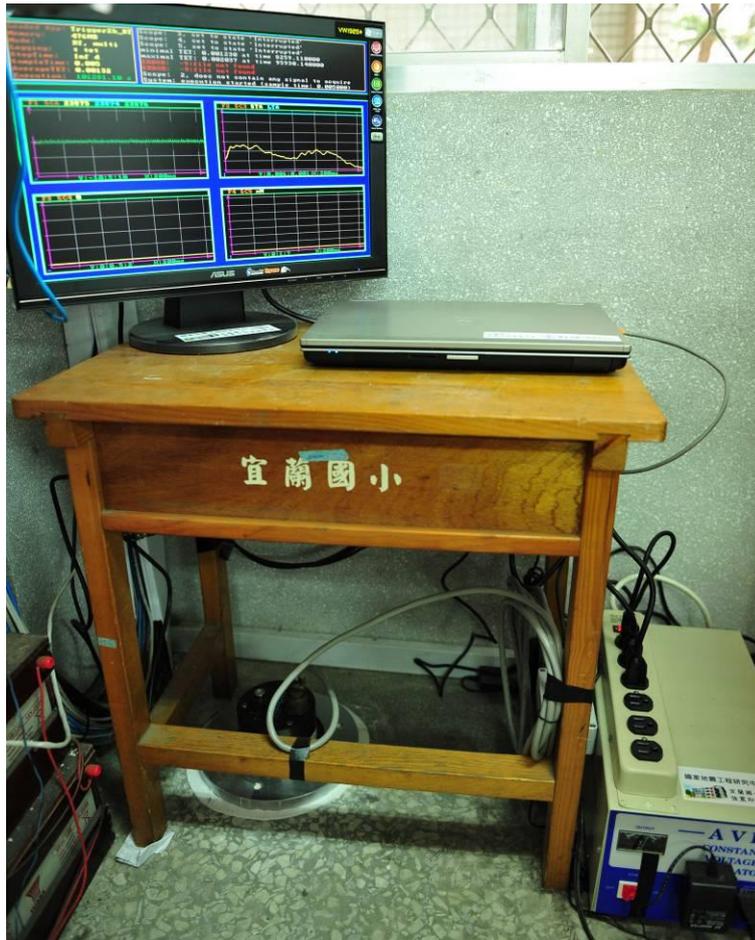


圖 6：宜蘭國小示範站室內地震儀設置方式

2m 淺井式地震儀：考量師生活動所造成的人為振動干擾難以濾除，本計畫因此轉向將地震儀的設置改置於花園中的 2m 淺井內，希望藉由花園的 2m 厚土壤，隔絕 2m 淺井干擾。其設置圖說如圖 7，設置照片如圖 8。裝置初期的成效卓著，先前在特定時間的人為干擾均不會對強震即時警報系統造成干擾。然而觀察近一年的實測紀錄發現，示範站外的車輛卻會導入車輛振動干擾，雖然次數較少，但仍無法接受。而且因為車輛振動透過道路下的土壤，震波傳遞數十至百餘公尺後被地震儀偵測出來，其震波特性與地震前導波更為類似。無法以訊號處理的方式來濾除。

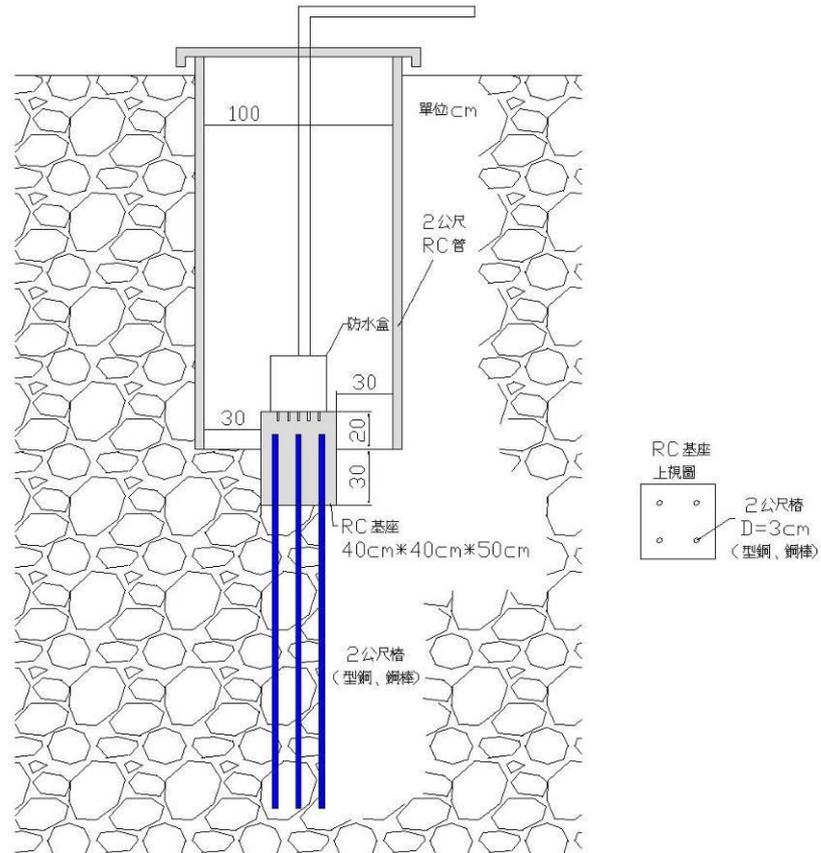


圖 7：2m 淺井式地震儀裝置圖說



圖 8：南安國中示範站 2m 淺井式地震儀裝置照片

40m 深井式地震儀：經過近兩年的測試，淺井式地震儀無法排除車輛的干擾，因此在有中等以上交通狀況之示範站，這項問題必須透過地震儀的配置方式來作解決。本計畫於 101 年下半年於宜蘭國小示範站設置 40m 深井式地震儀，希望藉由深達 40 餘米的土層，隔絕一切的人為以及車輛的振動

干擾。圖 9 為宜蘭國小示範站 40m 深井式地震儀設置照片。自 2012 年 11 月 30 日深井式地震儀正式開始上線測試，至今已經超過五個多月，無任何非自然地震之誤觸案例，由此可見深井式有其優越之抗干擾功效。



圖 9：宜蘭國小示範站 40m 深井式地震儀設置照片

2m 淺井式地震儀+頂樓設置備援地震儀：考量到深井式地震儀的設置經費為淺井式地震儀之 2.5 倍，這對強震即時警報系統的未來推廣是一大阻力，因此本計畫也同時進行整合 2m 淺井式地震儀與頂樓設置備援地震儀的複合評判方式。2m 淺井式地震儀不受人為振動干擾但易受車輛干擾，因此於示範站的遠處結構物頂樓室內裝置備援地震儀，由於裝置於結構體上，不易受車輛振動干擾，但可能會受人為振動干擾。結合兩者的訊號，進行作綜合評判，便可以屏除人為以及車輛振動所造成之干擾。如圖，自 2012 年 10 月 28 日系統正式運作開始，統計至 2013 年 3 月 27 日止，所有的觸發紀錄如圖，如設定震度四級為警報門檻，共計警報 8 次。如設定震度四級為警報

門檻，共計警報 4 次。這些警報時間均在中央氣象局有公布之地震事件中，由此可知此方式也可以有效抑制人為以及車輛振動所造成之誤報。

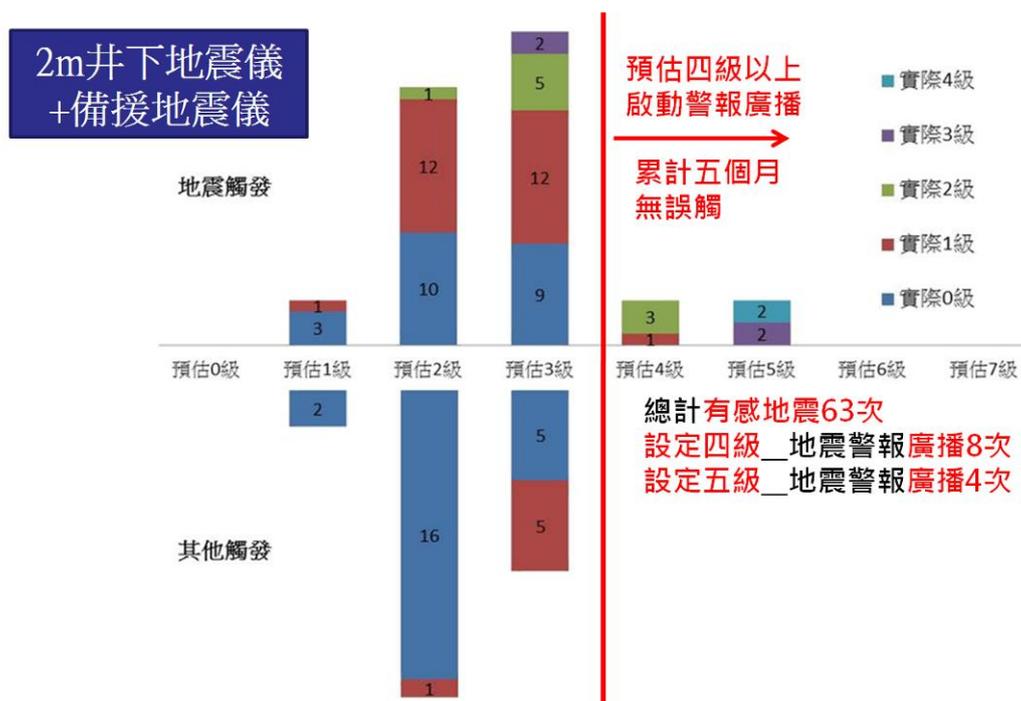


圖 10：宜蘭國小示範站”2m 淺井式地震儀+備援地震儀”實測統計

五、實測地震紀錄

本系統歷經兩年多的現地試驗，期間已經多次成功地偵測到地震避即時提出預警。初期考量現地型強震即時警報的可靠度，均以氣象局所提供的區域型強震即時警報作為發布警報的依據。然而一些鄰近震央的案例顯示，區域型強震即時警報的發布時間可能會因為計算以及訊號傳遞的時間延遲，錯失了預警的時間。在誤報控制有重大突破後，現地型強震即時警報逐步開始正式上線服務，提供鄰近震央區域較為快速的地震預警訊息。

2013 年 3 月 27 日的南投地震，嘉義市港坪國小離震央約七十公里，如圖 11 所示，現地型強震即時警報系統於 10 點 3 分 48 秒發布警報”地震警報、預估震度五級”，10 點 04 分 01 秒劇烈震波抵達，實測震度四級。本系統成功在 13 秒前發布警訊，全校師生也確實如防震演練一般迅速、確實地完成避難疏散動

作。整個事件恰巧被家長以手機全程記錄，並透過媒體讓大家知道這套系統確實發揮了預期之功效。

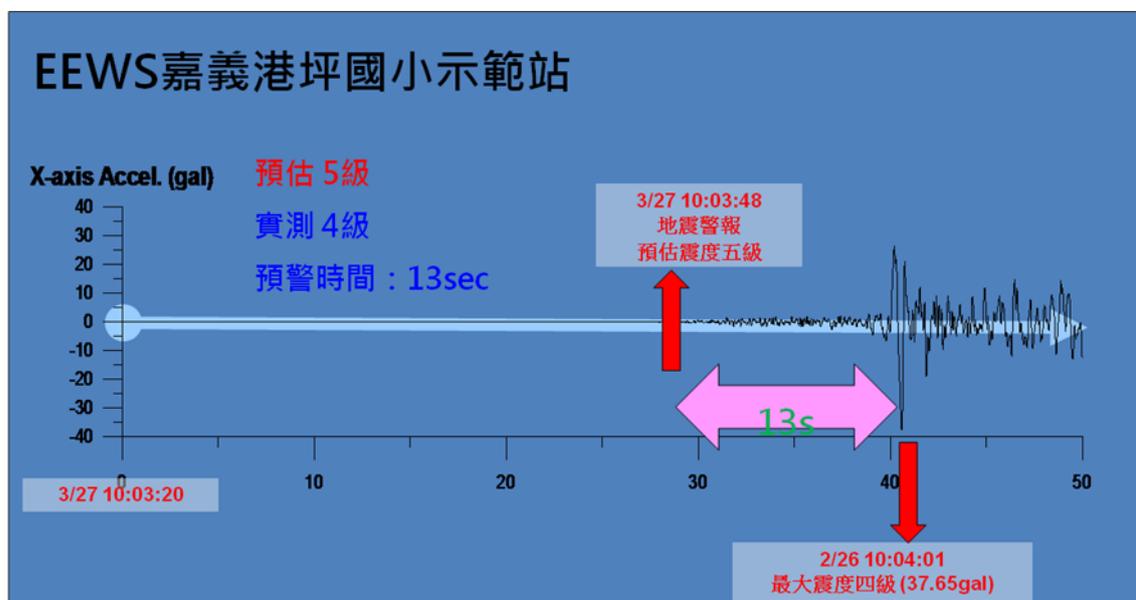


圖 11：2013-3-27 港坪國小示範站實測紀錄

五、結論

台灣因獨特之地理環境導致地震災害時而耳聞，中央氣象局統計 1901-2006 年之地震資料(中央氣象局，2007)，有 97 次的地震造成災害，其中有 52 次的地震災害有人命傷亡，尤以 921 集集大地震之災情影響為最。地震因具有瞬時破壞力，且以目前的科學技術無法準確提前預測地震發生，故地震災前預防極為重要。強震即時警報系統的提出，可以於地震來臨前提供數秒至數十秒的地震預警時間。雖然預警時間短暫，但也足以進行地震防災掩蔽動作。本系統的核心技術歷經十餘年的研究，離型系統分別通過國家地震工程研究中心的三軸向振動台測試，以及現地驗證測試。一路上不段克服重重阻礙，終於已經能夠正式提供地震預警的服務。然而地震預警系統所能爭取的時間有限，唯有透過持續的教育推廣與防震演練，方能將此系統發揮其減災之功效。此外國震中心也將與相關單位密切合作，開始進行大規模系統建置之規畫研究，相信再過幾年，全國各地應該就能開始裝置這套系統，並透過相關教育推廣與演練，實際落實此系統於減災應用。

參考文獻

1. Allen, R. M. (2007), The ElarmS Earthquake Early Warning Methodology and Application across California, Earthquake Early Warning Systems, P. Gasparini, G. Manfredi, J. Zschau (Eds), 21-44.
2. Bana-Hani, K., Ghaboussi, J. and Schneider, S.P. (1999a), Experimental Study of Identification and Control of Structures Using Neural Network Part 1: Identification, Earthquake Engng. Struct.Dyn. 28(9), 995-1018.
3. Blume, J. A. (1968) "Dynamics Characteristics of Multi-story Buildings", Journal of the Structural Division, ASCE, 94, 337-402.
4. Chassiakos, A. G. and Masri, S. F. (1996), Modeling Unknown Structural Systems Through the Use of Neural Networks, Earthquake Engng. Struct.Dyn. 25, 117-128.
5. Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Taiwan.
6. Joghataie, Ghaboussi, J. and Wu, X. (1995) "Learning and architecture determination through automatic node generation," International Conference on Artificial Neural Networks in Engineering, ANNIE '95, St. Louis, Missouri.
7. Learh, R. R. Jr. and Dowla, F. U. (1996), Earthquake Early Warning System Using Real-time Signal Processing, IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing.
8. Lin, C. C. J. (1999) "A neural network based methodology for generating spectrum compatible earthquake accelerograms" PhD thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, Illinois.
9. Wurman, G., Allen, R. M. and Lombard, P. (2007), Toward earthquake early warning in northern California, Journal of Geophysical Research, Vol. 112, B08311.