

# 現地型強震即時警報系統之研發

## Development of the On-site Earthquake Early Warning System

執行單位：國家地震工程研究中心

張國鎮<sup>1</sup> 林沛暘<sup>1</sup> 許丁友<sup>1</sup> 盧恭君<sup>1</sup>

Chang, Kuo-Chun<sup>1</sup> Lin, Pei-Yang<sup>1</sup> Hsu, Ting-Yu<sup>1</sup> Lu, Kung-Chun<sup>1</sup>

黃謝恭<sup>1</sup> 江宏偉<sup>1</sup>

Huang, Shieh-Kung<sup>1</sup> Chiang, Hung-Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心

### 摘要

台灣位處環太平洋地震帶，地震頻仍，平均15至20年即發生一次災害性地震。雖然地震無法避免，但是可以藉由強震即時警報系統提供預警，大幅減低地震所造成之生命財產損失。強震即時警報系統乃是利用地震波傳的特性，偵測速度較快但破壞力較小的P波，並預估地震之大小以及所影響的範圍，運用多重通訊管道對可能產生災害之區域進行預警。透過自動化控制的方式，協助人們運用短暫的預警時間，作有效地疏散與掩蔽，同時減少產業的損失。本計畫擬以三年的時間，進行強震即時警報系統的研發與應用研究。整合中央氣象局所提供之區域型強震即時警報以及國家地震工程研究中心所研發的現地型強震即時警報，眾合研判提供快速準確的地震預警。運用中興保全公司的雲端技術，建置經濟、可靠的警報傳遞網絡，並一同開發地震防災系統與服務。依據不同客戶與場域需求，規劃地震警報傳遞以及防災避難情境。運用自動化控制的方式（如自動廣播、逃生動線指引、停妥電梯、遮斷瓦斯、暫停生產線等等方式），提供地震防災整合服務，並規劃與協助執行防災演練，以落實與應用。

**關鍵字：地震預警系統**

### Abstract

Taiwan located at circum-Pacific seismic belt and the junction of the Eurasian plate and Philippine Sea plate. In average, more than 4000 earthquakes 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 proposal will integrate the regional EEWs provided by CWB and the on-site EEWs developed by NCREE to provide the rapid and accurate earthquake early warning. With the cloud technology of SECOM, the project will build a reliable and rapid-transit

earthquake warning networks. In addition, NCREE and SECOM will work together to generate the total solution of the earthquake disaster prevention service. With the consideration of the demand and condition of different customers, the different disaster prevention scenario will be derived. With the integration of the automatically disaster control, the elevator will be automatically park, the gas will be shut-off, the door and the light escape route will turn onto help people escape. In addition, this project will help the potential customer to do the earthquake disaster prevention drill. Through the drill, the customer will learn how to apply the system to help them reduce the seismic disaster. This project will install two on-site EEWSs and the cloud server in the first year. In the second year, the third on-site EEWS will be installed and the customer-designed earthquake disaster prevention system (including the software and hardware) will be developed. At least one earthquake disaster prevention drill will be done. In the third year, the integration system of the earthquake early warning, disaster prevention and structure safety protection will be introduced through a demonstration example.

**Keywords : Earthquake Early Warning System**

## 一、地震預警系統簡介

### 1.1 地震威脅

台灣地區位於環太平洋地震帶上，地處歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界帶，地質活動頻繁，平均每年發生四千多起大小地震，包括兩百多起有感地震。台灣位處環太平洋地震帶，地震頻仍，自西元 1904 年迄今已發生超過 10 次災害性地震，平均 15 至 20 年即發生一次災害性地震，累積已造成超過 8,000 人罹難，包括 1906 年的梅山地震、1935 年的新竹—台中地震、以及 1999 年的集集地震等。其中集集地震造成 2,505 人罹難，直接災害損失逾新台幣 3600 億元，佔國民生產總值(GDP)的 5%，為近百年來最大規模之地震。

上述強烈地震，每次均造成大量的人員傷亡以及財產的損失，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，然而已經可以運用地震預警技術，爭取寶貴短暫的預警時間，減低生命財產損失。

### 1.2 區域型地震預警系統

美國和墨西哥於 1980 年代中後期，開始發展強震預警系統。1989 年美國地質調查所(United states Geological Survey, USGS)在深受地震所苦的加州裝設了一個偵測餘震的預警系統，利用原有地震網接收餘震訊息，並使用無線電訊號提供給正在幫忙救災中的救援人員餘震的訊息。而墨西哥在 1985 年沿著海岸線佈置了一連串的地震儀，該系統曾於 1995 年發生的規模 7.3 地震中，成功的在 S 波襲擊墨西哥市前 72 秒發佈地震警報。

而跟台灣同樣位處環太平洋地震帶的鄰國日本，在 2007 年 10 月建構了強震即時警報系統(Earthquake Early Warning, EEW)，並推廣到日本全國。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，偵測速度較快的 P 波，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，可視為區域型強震即時警報系統。

國內強震即時警報系統發展方面，中央氣象局自 2004 年起執行「強地動觀測第三期計畫—發展強震即時警報系統」，在全台已佈建將近 700 個強震測站，其中有 109 個是即時測站。目前中央氣象局所開發之區域型即時警報系統，在地震預警動態展示預警訊息的介面和地震定位技術已有顯著成果，但尚待進一步提升強震即時警報資訊精度，落實應用至地震防災實務工作上。相關估見分析如下：

1. 警報技術尚待強化：區域警報技術開發技術已經成熟，但實際運用上耗時較久。因此即須發展現地型強震即時警報技術，與區域型警報相輔相成，可以維持地震預警精度，並有效縮小地震預警盲區。
2. 應用系統及整合：目前地震預警相關技術仍集中在學界，因此急需建置現地示範站，落實地震預警相關技術的實質應用。
3. 防災意識提升：地震所造成的災害十分巨大，唯有強化地震防災意識，並配合相關地震預警與減災系統，方能有效減低地震災害。

### 1.3 現地型強震即時警報系統研發

有鑑於中央氣象局已經建置中央氣象局地震觀測網，以及區域型強震即時警報系統。區域型系統可以依據散布全台灣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傳遞一段距離，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，東西向約一百公里。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，其震央在南投縣集集鎮。以此推算北至新竹縣，南至台南市皆可能是地震預警系統的盲區。偏偏這些盲區都是地震的重災區，因此縮小盲區便是一件刻不容緩的任務。在台灣，災害型地震多發生於內陸之斷層錯動，距人口稠密處都在數十公里內，如果僅發展區域型地震預警系統，勢必會有數十公里半徑之盲區無法於地震前得到預警，因此台灣需要發展區域型以及現地型地震預警系統，方能提供足夠的防護，為近震央區域提供快速的地震預警服務，為其他區域提供準確的地震預警服務。

有鑑於此，國家地震工程研究中心自 2008 年起開始進行現地型強震即時警報系統的研發。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。

## 二、地震預警技術之研發

本研究乃利用垂直向地震初達波(P 波)前數秒的各種特徵，爾後藉由支撐向量法求得初達波特徵與最大地表加速度之迴歸預測模型，以達成使用初達波特徵預測最大地表加速度之目標。

以往大部分文獻[1-4]利用初達波特徵所預測之標的大多為地震規模、震央距離、最大地表速度及最大地表位移等。現今台灣中央氣象局採用之震度(Intensity, I)，係根據最大地表加速度(Peak Ground Accleleration, PGA)訂定，其單位為 gal。此外，美國及日本等地之地震震度分級，均與加速度相關。因此，本研究之預測指標訂為 PGA，因其可直接與強震儀量測之 PGA 比對，亦可換算為震度，作為發佈警報之依據。

本研究利用中央氣象局自 1992 年至 2006 年之少數代表性地震記錄訓練及驗證支撐向量迴歸模型，並利用自 1992 年至 2006 年所有之地震記錄測試支撐向量迴歸模型之預測成功率，最後再以 2012 年 8 月 14 日至 2013 年 11 月 17 日於宜蘭縣南安國中現地測站為例，進一步瞭解支撐向量法於實務上的應用情形。

### 2.1 地震資料彙整與篩選

本文所使用的地震資料為台灣地區中央氣象局(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program, TSMIP)於 1992 至 2006 年之強震紀錄資料庫，該資料庫收集了分佈於台灣地區共約 650 個自由場強震儀之資料，其資料之取樣頻率為 200Hz 或 250Hz，解析度為 16 位元，動態量測範圍大多為 2g。於篩選後共計 91,142 筆。

在選取作為訓練與驗證支撐向量迴歸模型之資料時，由於支撐向量法優點之一為僅需具代表性之資料作為支撐向量即可。在實際選取代表性資料中，考慮到歷年來於台灣

地區有限的大規模地震及其支撐向量模型預測表現之一般性，本文選取一半的地震規模 ( $M_L$ ) 3.0 以上的 71 次地震事件(簡稱為「代表地震資料」)，共計 4,166 筆地震記錄，作為建立支撐向量迴歸模型之依據，其規模及距離之分佈如圖 2.1 中之紅色交叉點所示，藍色十字點為另外一半未使用於訓練及驗證的資料。此外，於末後討論支撐向量迴歸模型之預測準確度時，則使用 1992 至 2006 年篩選後之所有地震紀錄共 91,142 筆，簡稱為「測試地震資料」，以模擬線上實測時之誤差情形。

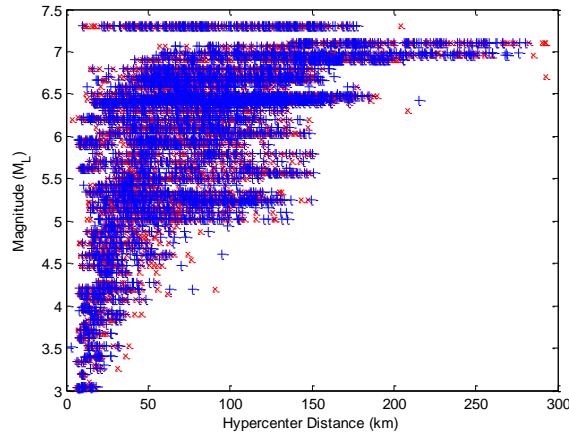


圖 2.1 「代表地震資料」之規模及距離分佈圖

## 2.2 方法

### 2.2.1 支撐向量迴歸簡介

支撐向量機(support vector machine, SVM)係從統計學習理論之結構風險最小化法則(structural risk minimization)所演化而來，依其應用之方法可分為支撐向量分類(support vector classification, SVC)與支撐向量迴歸(support vector regression, SVR)兩類，近年來已成功應用於許多領域。本研究擬利用支撐向量迴歸[5]所建構之模型來預測 PGA，以下針對所使用之支撐向量迴歸理論方法簡要介紹。

假設有一組訓練資料  $\{x_i, y_i\}, i = 1, \dots, k$ ，其中  $x_i$  為輸入的向量值， $y_i$  為目標值，則當有一個新的輸入向量  $x_{new}$ ，可以利用訓練資料所建構之支撐向量迴歸模型來預測  $y_{new} = f(x_{new})$ ，其作法為將  $x$  投射到一高維度之特徵空間  $H$ ，使得：

$$\langle z_i, z_j \rangle = k(x_i, x_j) \quad (1)$$

其中  $z$  為  $x$  投射至  $H$  之向量， $k(\bullet, \bullet)$  為此投射動作之核函數。並於特徵空間  $H$  找出一線性之決定方程式如下：

$$f(z) = \langle w, z \rangle + b \quad (2)$$

其中  $w$  為一向量，代表於  $H$  空間中之一超平面之方向， $b$  為常數，代表此一平面與原點之距離。則尋找一最佳之回歸方程式，即為求解以下目標函數：

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*} \left[ \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{m} \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) \right]$$

受限於

$$\begin{cases} \langle w, x_i \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ y_i - \langle w, x_i \rangle - b \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad i=1, \dots, m \quad (3)$$

其中  $\varepsilon$  為容忍誤差，即超平面與最近之支撐向量之距離； $\xi_i, \xi_i^*$  為資料點落於容忍誤差區間外之誤差值；成本參數  $C$  為衡量這些誤差值的懲罰權重。爾後引入 Lagrange 參數  $\alpha_i$  及  $\beta_i$ ，將目標函數轉換為對偶型式：

$$\max_{\alpha, \beta} \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_j - \beta_j) k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta_i) + \sum_{i=1}^m y_i (\alpha_i - \beta_i) \right]$$

受限於

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \beta_i) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \beta_i \leq \frac{C}{m} \end{cases} \quad (4)$$

對目標函數(3)與其對偶型式(4)求解，可得  $\alpha_i$  及  $\beta_i$ ，則當有一個新的輸入向量  $\mathbf{x}_{new}$  時， $y_{new}$  可由以下之決定方程式求得：

$$y_{new} = f(\mathbf{x}_{new}) = \left[ \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \beta_i) k(\mathbf{x}_{new}, \mathbf{x}_i) \right] + b^* \quad (5)$$

其中  $b^*$  可將任一組符合  $\alpha_n \neq 0$  且  $\alpha_n \neq \frac{C}{m}$  的  $\{\mathbf{x}_n, y_n\}$  代入 Karush-Kuhn-Tucker conditions 求得：

$$b^* = y_n - \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \beta_i) k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_n) \quad (6)$$

本研究所使用之核函數為幅狀基底函數，如下式：

$$k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

### 2.2.2 地震初達波特徵

根據 Satriano C. 發表之論文[6]，地震初達波特徵主要為震初達波之極值(Peak Measurements)、主要週期(Predominant Period)、積分值(Integral Quantities)等。本文主要採用垂直向地震歷時於 P 波到達後  $t_p$  秒間之加速度極值  $P_a$ 、速度極值  $P_v$ 、位移極值  $P_d$ 、主要週期  $\tau_c$ 、累積絕對速度 CAV 及速度平方積分(IV2)共 6 種初達波特徵作為輸入資料。初達波到達時間之決定係利用短時平均與長時平均差異法(Short-Term Average/Long-Term Average, STALTA)來決定。相關特徵運算方式如下：

$$\tau_c = 2\pi/\sqrt{r}, \text{ where } r = \int_0^{t_p} \dot{u}^2(t) dt / \int_0^{t_p} u^2(t) dt \quad (8)$$

$$CAV = \int_0^{t_p} |\ddot{u}(t)| dt \quad (9)$$

$$IV2 = \int_0^{t_p} \dot{u}^2(t) dt \quad (10)$$

式中  $u(t)$  為地表位移歷時。

### 2.2.3 建立預測模型

研究利用「代表地震資料」建置支撐向量迴歸模型共 4,166 筆，其支撐向量迴歸模型之輸入資料為上述 6 種地震初達波特徵，並將其正規化至介於-1 至 1 之值，輸出資料則為地震波在三方向之地表加速度絕對值之最大值。

本研究利用交叉驗證方式確保支撐向量迴歸模型之強健性，意即將代表地震資料分為 10 個子樣本，其中一個子樣本作為驗證模型的資料，其餘 9 個樣本用來訓練。如此重複 10 次後，將 10 次結果之平均作為最終預測結果。

支撐向量迴歸模型之待定參數包括  $\sigma$ 、 $\varepsilon$  及  $C$ ，由於  $\varepsilon$  直接影響支撐向量的個數，因此本文選取較小之  $\varepsilon$ ，使其模型可涵蓋不論大小地震之情形。其餘參數  $\sigma$  及  $C$ ，則以格點尋找的方式，找到交叉驗證均方誤差最小的格點，即為最佳的參數。

## 2.3 結果探討

### 2.3.1 地震資料庫測試與預測結果探討

本研究利用「測試地震資料」共 91,142 筆來測試與模擬支撐向量模型於實際應用時之準確性。圖 2.2 為利用垂直向初達波到達後之前 3 秒特徵所預測之 PGA 與實際量測之 PGA 之比較；圖中藍線及紅線分別為預測震度與實際震度相同與誤差在正負一級內之範圍，其震度誤差正負一級以內之比例高達 99.22%。

考慮  $tp$  的範圍由 0.1 秒開始逐漸增加至 10 秒，間隔為 0.1 秒，如圖 2.3 所示，預測 PGA 與實測值之標準偏差隨著  $tp$  的增加而降低，預測震度與實際震度誤差在正負一級以內之比例則隨著  $tp$  的增加而增加，顯示運用初達波越長的資訊所預測之 PGA 越接近實際值，反之，使用越少量資訊所預測之 PGA 越不可靠。

然而，即使  $tp$  僅為 0.1 秒時，其預測震度與實際震度誤差在正負一級以內之比例已高達 91.24%。再者，當  $tp$  僅為 0.4 秒時，預測震度與實際震度誤差在正負一級以內之比例已增加至 97.19%。因此，運用本研究所提之方法所需之  $tp$  值非常小，應可大幅縮小警報盲區，並爭取寶貴之反應時間。

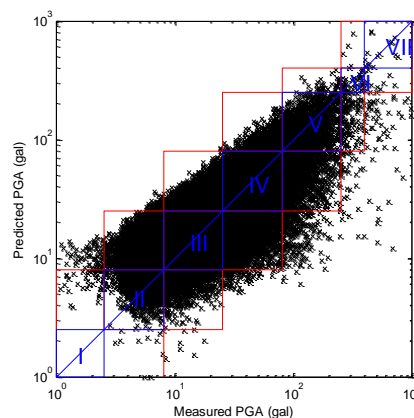


圖 2.2 「測試地震資料」之預測 PGA 與實測 PGA 比較圖

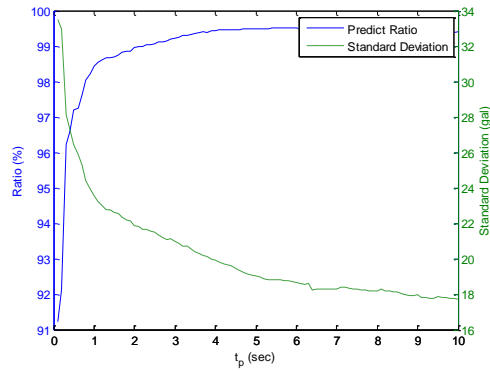


圖 2.3 「測試地震資料」之預測 PGA 誤差之標準偏差及預測震度誤差在正負一級內之比例隨  $t_p$  之變動

### 2.3.2 現地測站案例討論

由上述得知，支撐向量模型於「測試地震資料」中擁有相當的預測成效。為更加確立支撐向量法之強健性，我們將更進一步探討支撐向量迴歸法於現地測站的預測表現。以下擬探討支撐向量迴歸法於宜蘭縣南安國中(2012年8月14日至2013年11月17日)之線上實測表現，其中共計4704筆地震資料，圖2.4為南安國中線上實測之預測PGA與實測PGA比較圖，圖中紅色三角形皆為經中央氣象局比對過後的地震事件，其餘無法與中央氣象局比對之事件以藍色圓圈表示。

此外，就即時警報而言，因誤報而造成公司龐大的成本支出(高報)，抑或是縮短民眾的逃難時間(低報)是必須避免的。於此，降低誤報率亦是強震即時警報技術所關心的指標的之一。

本研究將「預測震度四級以上且實測震度低於二級」之情形定義為「高報」，亦即圖2.4左上角黑色虛線區域。「高報」個數占預測震度四級以上地震事件個數的比例(%)定義為「高報率」；同樣地，「實測震度四級以上且預測震度低於二級」之情形定義為「低報」，亦即圖2.4右下角黑色虛線內區域為「低報區」。「低報」個數占實測震度四級以上地震事件個數的比例(%)則定義為「低報率」，其中低報率之地震事件專指經中央氣象局比對過後的地震事件。

結果顯示南安國中於2012年8月14日至2013年11月17日期間之震度誤差於正負一級以內的比例為99.5%，其高報率為26.7%，低報率為0.0%。

震度誤差於正負一級以內的比例高達99.5%說明了支撐向量迴歸法於線上實測上仍有好的強健性以及預測準確表現。就誤報情形來看，仍有高達26.7%的高報率尚待克服，以利於強震即時警報系統於實際上之應用。最後，零低報率乃肇因於目前所收集到之實測地震震度為四級以上的數量有限，仍須持續於現地測站收集足夠之地震事件，始可得到較為可信的統計數字。



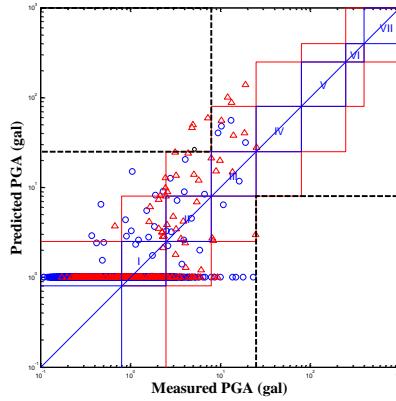


圖 2.4 南安國中現地測站之預測 PGA 與實測 PGA 比較圖

### 三、校園地震預警系統建置成果

為確保提升校園師生對天然及人為災害的認識與預防、整備、應變能力，藉由辦理校園地震防災演練，檢視學校災害處置能力及各項應變流程，並配合強震即時警報系統建置，整合災害處理效能，並從中汲取經驗，以強化學校地震災害防救應變處置暨善後復原重建作業能力。藉由學校師生演練與觀摩，瞭解地震災害防救的實際操作，大幅降低受災人數，深化各學齡層防災素養，達成校園地震防災的目標，奠基永續安全校園。

#### 3.1 校園地震預警示範站規劃

為進一步驗證此校園地震預警系統，並進行地震防災教育推廣，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、花蓮火車站、中興保全羅東分公司、嘉義縣中正大學、嘉義市港坪國小、育人國小、蘭潭小、嘉大附小進行示範站架設，並依據使用端的需求，設計建置自動化警報展示系統。

近期於嘉義市設立示範主站於育人國民小學、副站於蘭潭國民小學及嘉義大學附設實驗國民小學。育人國小接收中央氣象局所發送之區域型強震即時警報訊息及運用現地強震儀進行現地型強震即時警報的計算，同時在主站與副站間建置現地資訊傳遞管道，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，由育人國小發送強震訊息，蘭潭國小及嘉大附小亦同步發出警報，警報系統將會自動進行廣播、字幕機的播放等相關警訊，提供各示範站快速、準確之地震預警訊息。地震預警資訊傳遞架構如圖 3.1。

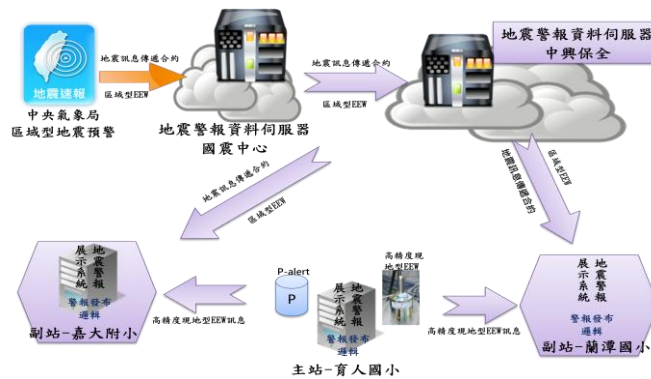


圖 3.1 地震預警資訊傳遞架構

### 3.1.1 育人國小硬體架構

育人國小為示範主站，負責接收中央氣象局所發送之區域型強震即時警報訊息、運用現地強震儀進行現地型強震即時警報的計算及透過現地資訊傳遞管道發送強震訊息給主、副站。因此，硬體架構可以分為地震警報展示系統(包含地震警報主機、地震警報專用 LED 字幕機及地震警報專用廣播)以及高精度現地型地震預警系統(包含嵌入即時計算系統及地震儀)兩大部份如圖 3.2，其裝設於校園內位置如圖 3.3。



圖 3.2 育人國小地震預警系統硬體架設



圖 3.3 育人國小硬體設備位置圖

### 3.2 校園地震防災教育與演練

過去地震發生時，位於在校園內的師生在第一時間就地避難，以書包保護頭部，躲到桌子下，或者是靠在樑柱旁，等地震搖晃結束後再疏散至安全地點。但在疏散時因學生急忙離開教室，在走道上推擠，以致無法在最短時間有效疏散至避難地點。

利用國震中心所提供的現地型強震警報訊息，當搖晃較大的地震波抵達前，專用的地震警報廣播系統，將訊息傳遞至校園每個角落。考量地震預警系統所能爭取的預警時間有限，在鄰近震央地區，預警時間可能僅有數秒至十餘秒。在有效應用此寶貴但短暫的預警時間，進行相關避難疏散，這也是此計畫的重點。本團隊赴每個示範學校進行場勘，依據校園的規劃、人員活動方式規畫事宜的地震防災撤離路線規畫。參考各校的地震防救災計畫，加入地震預警相關演練，重新擬定校園地震防災計畫。配合地震預警系

統，每年進行多次地震防災演練。讓全校師生確實了解地震預警系統運作方式及相關避難動作。以確保在關鍵的預警時間，全校師生能好好把握，大幅減低地震所造成之傷亡。

### 3.2.1 育人國小

該校為示範主站，此校分為兩校區，在舊校區的幼兒園裝設現地型地震儀，在新校區三樓裝設在即時警報主機與廣播系統，在司令台上加裝地震預警字幕機，並於每棟建築物皆裝設一臺以上的擴音喇叭，確保校園各角落都可以聽到廣播。

在地震防災演練過程，當強震即時警報系統響起，位於教室內上課的老師先關閉電源，教室前後門已打開，學生立即戴上防災頭套保護頭部，就近蹲在桌子下方，抓住桌腳做固定，坐窗戶旁的學生注意窗戶玻璃避免玻璃掉落砸傷，教職員工靠樑柱或實牆蹲下。在室外上課的師生聽到警報聲響起，立即離開建築物就地蹲下，雙手保護頭部。等待地震過後，校方會以廣播或哨音通知全校師生進行緊急疏散，此時聽從老師指揮依照防災地圖進行逃生疏散。全體師生疏散至操場後集合進行清點人數回，緊急救護組到災害應變中心前設立緊急醫護站，校方進行巡視校園勘查，注意是否有學生受困於教室或受傷，檢視校園受災情況，並回報給災害應變中心與教育部校安中心。經評估安全、無後續餘震後再回到教室上課。圖 3.4 為演練過程照片。



圖 3.4 育人國小防災演練過程照片

## 四、現地型地震預警系統運作成果

### 4.1 育人國小現地型地震預警示範站安裝與維護

現地型地震預警示範站可分為前端預警系統與後端連動控制二部分，前端預警系統硬體包含地震儀、即時運算主機與監控電腦等（如圖 4.1）；後端連動控制硬體包含電腦主機、廣播設備、網路設備等（如圖 4.2）。示範站的運作方式為地震儀以 24 小時不間斷傳送振動訊號至即時運算主機，當主機偵測到振動並開始判別機制，依據量測到的振動波型去推算往後可能出現的振動大小（預測震度），再由運算主機以每秒傳送 10 次的頻率輸出振動判別、預測震度與實測震度，輸出的訊號由後端連動控制電腦接收，並藉由設定預測震度的門檻來決定是否發送警報廣播與連動其他設備，藉以確保現地型地震

預警示範站最重要的環節，即系統的準確性與穩定性。

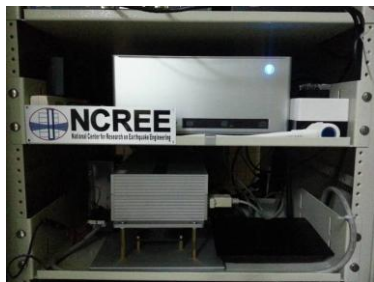


圖 4.1 前端預警系統設備照片



圖 4.2 後端連動控制設備照片

在設置現地型地震預警示範站初期，為得知示範站現地狀況與周遭環境對預警系統的影響程度，預警系統初始設定會調整至較為敏感，使系統判別機制作動較為頻仍，以獲得更多資訊進行參數調整，並測試系統穩定性。

從預警系統上線後的觸發記錄分析結果來看，預警系統的預測震度幾乎都高於實測震度。且在系統運作其間因為雜訊的干擾，還發生預測震度 5 級的誤報，為改善前端預警系統的準確性，團隊在後續研究中進行新的預測震度演算法開發，使預測震度更接近實測震度，也在振動判別的機制加上備援地震計的概念以減少非地震誤報的次數。並在 2014 年 3 月 4 日進行系統更新與備援地震計安裝，期望能使預警系統更加準確與穩定。

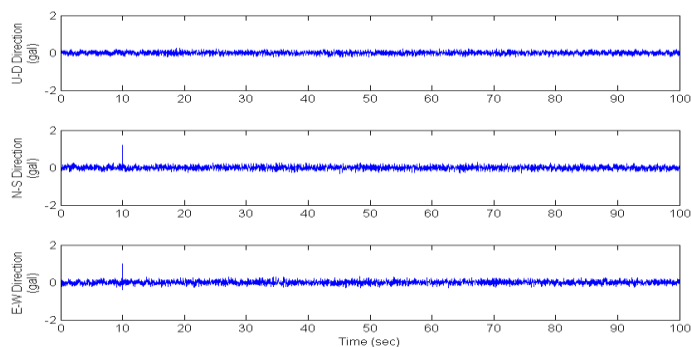


圖 4.3 系統運作其間雜訊干擾

#### 4.2 育人國小現地型地震預警示範站實測記錄

國家地震工程研究中心因應產學合作計畫計畫而設置現地型地震預警示範站。嘉義市育人國小自 102 年 6 月專題研究計畫開始實行時即刻與校方展開接洽，同年 10 月 29 日由國家地震工程研究中心之團隊親臨國小安裝現地型強震即時警報系統，截至專題研究計畫實行至八個月，該系統已經運作 122 日。以下，研究團隊取 102 年 11 月 01 日至 103 年 2 月 28 日共四個月，進行分析統計。

在上述四個月內，中央氣象局彙整的地震活動大略如下：102 年 11 月計有 99 個有感地震，編號有感地震共 33 個，小區域地震 66 個；102 年 12 月計有 37 個有感地震，編號有感地震共 8 個，小區域地震 29 個；103 年 1 月計有 56 個有感地震，編號有感地震共 18 個，小區域地震 38 個；103 年 2 月計有 56 個有感地震，編號有感地震共 18 個，小區域地震 38 個。其中關於有感地震之發布標準參照中央氣象局之定義如下，

交通部中央氣象局有感地震之發布標準：

- 一、所有測站單站震度 4 級（含），或兩站震度 3 級（含）以上。

- 二、縣市政府所在地測站單站震度 3 級（含），或兩站震度 2 級（含）以上。
  - 三、台北市或高雄市測站震度 1 級（含）以上。
- 若未達有感地震發布標準，但符合以下條件之地震，則發布小區域有感地震：
- 一、所有測站震度單站 3 級（含），或兩站 2 級（含）以上。
  - 二、未達前述標準但明顯有感、一般民眾或機構反應查詢之地震。

本系統於上述月份內總共有 3,623 次機制做動：判斷該次振動是否為地震與是否應該發布警報，平均每月約 906 次執行判別機制。上述次數取決於系統參數調整，若將系統調整至較為敏感，則每月偵測到振動的次數將上升而判別機制隨即頻繁，更有機會在地震來臨前發布警報，反之，若將系統調整較和緩，則每月偵測到振動的次數將下降而判別機制隨之減低。上述三千餘次振動資料中，實測震度達到中央氣象局有感地震發布標準之事件僅 1 次，此事件恰為震度四級，而達到小區域地震標準之事件僅 2 次（分別為震度三、四級）。與上述中央氣象局彙整的資料相互比較，國家地震工程研究中心安裝於嘉義市育人國小之現地型強震即時警報系統所量測到的振動資料相當符合預期。

現地型強震即時警報系統於四個月內所偵測到的三千餘次振動資料，其預測震度與實測震度分佈圖如下圖，圖中每藍色\*號代表一次現地型強震即時警報系統偵測到振動並判別的結果，黑色虛線代表震度的界線，紅色虛線則表示震度三與四級的交界。

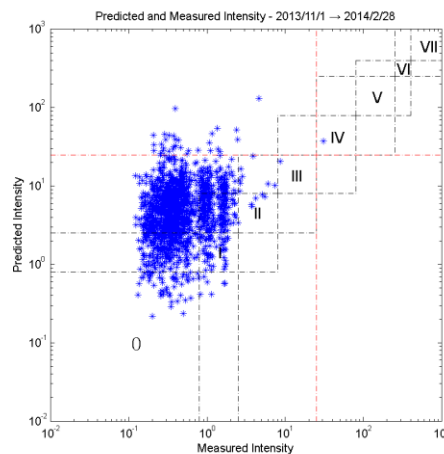


圖 4.4 四個月內之預測震度與實測震度分佈圖

相較於實測震度三級以上僅有 2 次的結果，本系統偵測到的三千餘次振動資料中，預測震度五級共 2 次、預測震度四級共 30 次、預測震度三級共 361 次，依據上述統計與圖 4.4 可推斷，現行現地型強震即時警報系統震度預估均為高估。因此，若以現行系統實行並於校園內發布地震警報，建議選取震度五級以上作為發布警報的門檻，藉此避免過多警報騷擾師生，打亂校園正常作息，而依照上述推薦之警報門檻實行，平均兩個月會發布一次地震警報，如此頻率應當保有系統時效性並且不至過於擾亂校內秩序。

承上，嘉義市育人國小之現地型強震即時警報系統於四個月內詳細的預測震度與實測震度報表如表 1。表一再次說明現地型強震即時警報系統於預測震度高估的傾向。而憑藉此表，研究團隊可以大致得到下列推論：預測震度完全命中實測震度之機率為 59.51%，預測震度與實測震度的誤差在正負一級內之機率為 13.31%，預測震度與實測震度的誤差在正負二級內之機率為 19.93%，如圖 4.5 所示。若以正負二級為預測震度與實測震度的容許誤差，現地型強震即時警報系統享有九成之高正確率（92.75%），但若

較為嚴格的取正負一級為預測震度與實測震度的容許誤差，現地型強震即時警報系統仍保有七成之正確率（72.82%）。

表 1、四個月內之預測震度與實測震度報表

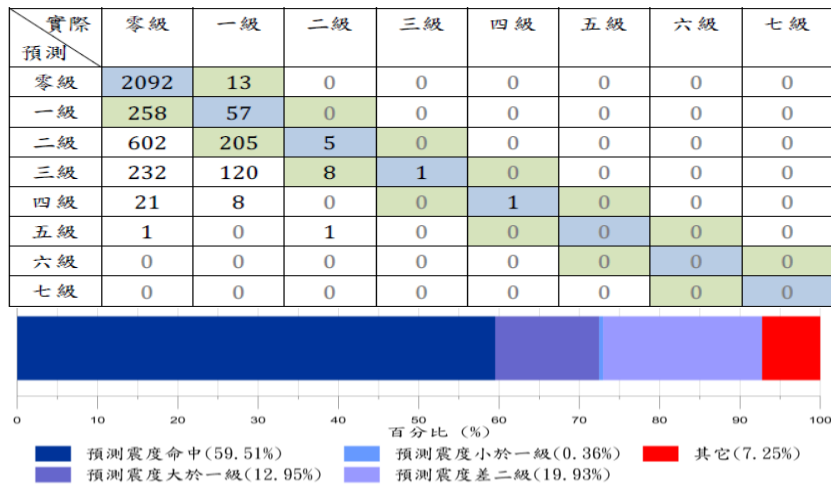


圖 4.5 四個月內之預估測震準確率圖

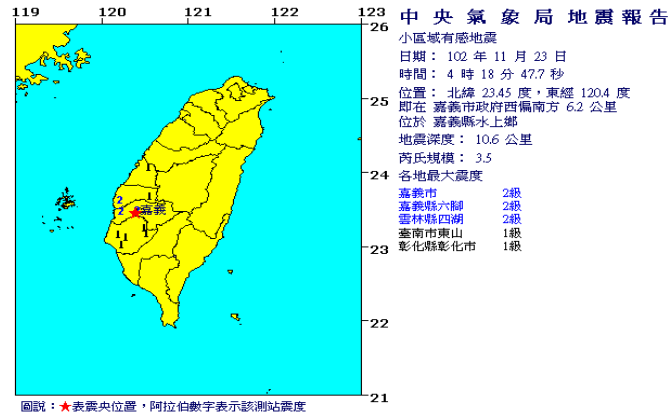


圖 4.6 中央氣象局公佈之 102 年 11 月 23 日小區域有感地震報告

在 102 年 11 月 1 日至 103 年 2 月 28 日的統計資料中，嘉義市育人國小歷經最具代表性的地震是 102 年 11 月 23 日 04 時 18 分發生於嘉義縣水上鄉的小區域有感地震，中央氣象局地震報告如圖 4.6，此地震距嘉義市政府 6.2 公里，距育人國小僅 3 公里。本系統紀錄之震波如下圖，圖中藍色實線為加速度訊號，紅色實線為系統偵測振動的歷時。

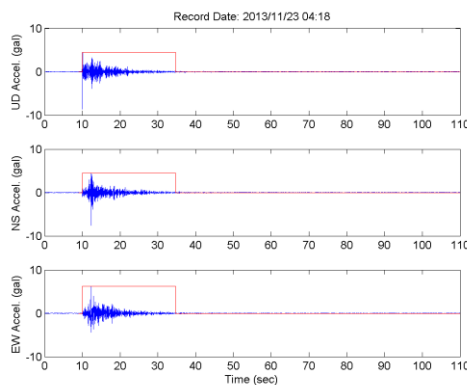


圖 4.8 現地型強震即時警報系統紀錄之 102 年 11 月 23 日地震報紀錄

圖中系統所紀錄的三軸向最大加速度分別為：南北向 7.5505 gal，東西向 6.2885 gal，

垂直向 8.5985 gal。根據紀錄，本次地震之實測震度為三級，系統發布之預測震度亦為三級，而系統發布預測震度至該次地震達到實測震度的時間差研究團隊稱為預警時間，以此次地震為例，距震央約 3 公里時系統仍保有 2~3 秒的預警時間。

## 五、結論

台灣相對於日本而言，在地震預警的技術難度較高。日本的地震多發生於外海，離陸地至少數十公里遠，因此預警時間比較長。以 311 東日本大地震為例，其震央離東京超過 200km，因此有超過一分鐘的預警時間。然而台灣的災害型地震如 921 地震，其震央都是在島內。據震央百公里內都是重災區，因此我們的預警時間絕對比日本短很多。也就因為如此，台灣在地震預警系統的推動與發展面臨了更大的挑戰。

考量預警時間短暫，需要最有效之應用，因此本團隊預計與國內產業界攜手合作，在全國之國中小建置地震預警示範系統。透過這些系統的建置，實際將相關技術轉移至產業界。本團隊同時也進行驗證把關，確保地震預警系統的功能。未來可運用產業界的力量，將這套預警系統的成本降低，同時也能長時間的維運。此外最重要的便是在這些國中小進行防災教育推廣以及地震防災演練，實際將這套系統落實於地震防災中，同時也藉由示範學校的師生推廣這套系統之功效，以及其正確的使用觀念。

地震預警系統可以提供寶貴但短暫的預警時間，但結構是否能撐過地震而不倒塌才是真正的關鍵，因此我們必須注意結構的安全與耐震性能，再透過地震預警系統爭取預警時間，並加強防災教育與防震演練，相信地震所造成的威脅便可以大幅降低。

## 參考文獻

- [1] Kanamori H., "Real-time seismology and earthquake damage mitigation," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33:195–214 (2005).
- [2] Wu Y.M., Yen H.Y., Zhao L., Huang B.S. and Liang W.T., "Magnitude determination using initial P waves: A single-station approach," *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L05306 (2006).
- [3] Wu Y.M. and Kanamori H., "Exploring the feasibility of on-site earthquake early warning using close-in records of the 2007 Noto Hanto earthquake," *Earth Planets Space*, 60, 155–160 (2008).
- [4] Zollo A., Lancieri M. and Nielsen S., "Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records," *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L23312 (2006).
- [5] V. Vapnik. *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York, NY (1998).
- [6] Satriano C., Wu Y.M., Zollo A. and Kanamori H., "Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 106–118 (2011)