



# 現地型強震預警技術與應用

許丁友／國立臺灣科技大學營建工程系助理教授、國家地震工程研究中心兼任研究員

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。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，1999年的921集集大地震更造成2,434人死亡、近11萬戶房屋倒塌之災情，直接災害損失逾新台幣3,600億元，佔國民生產總值（GDP）的5%，為近百年來最大規模之地震。

為了降低地震災害造成的損失，除了基本的「小震不壞、地震不倒」抗震對策外，亦必須從緊急應變對策、持續運作對策、以及迅速復原對策等三方面著手，始可於震後快速恢復正常運作，降低因為持續保持受災狀態而造成的損失。為因應「強化國家震後恢復力」的需求，需要發展與精進強震預警技術（Earthquake Early Warning, EEW），作為緊急應變手段之一。

本文將介紹所研發之現地型強震預警技術，該技術有別於傳統的方法，係採用人工智慧技術，以同時考量較多的地震參數。在教育部及科技部的經費支持下，該技術正被國家地震工程研究中心應用於全台灣國中小學之EEW系統，在系統建置的過程中，於2016年初發生了美濃地震，本文亦介紹該系統實際在美濃地震中的表現。

## 前言

由於地震波的速度由快至慢可區分為「P波」、「S波」及「表面波」等，其中以表面波的振幅最大，再來是S波，這兩種地震波的破壞性較大，而振幅小的P波波速較快。故透過偵測P波來預估破壞性較大的地震波，利用不同震波抵達的時間差於強震波來臨前發生預警，便是強震預警技術的主要依據。強震預警之可能性在十九世紀末即被提出，但直到二十世紀後期由於地震觀測技術及電腦計算能力的提高，強震預警技術才開始受到各國注意及發展，其中又以美國、日本、墨西哥及我國等幾個地震災害嚴重的國家最早投入。而由於日本早期在發展新幹線高速鐵路之需要，以及1995年阪神大地震嚴重傷亡之教訓，日本是現今在強震預警領域投入最多，也是實際應用最為廣泛的國家。

強震預警技術可以在強震波到達前數秒至數十

秒，提前發佈地震警報，以便即時採取必要之應變措施。目前現行的強震預警系統分為兩大類，一為區域型（Regional）預警系統，另一為現地型（On-site）預警系統。然而，區域型EEW所需的地震定位，必須利用至少三個測站觀測到P波或S波到時，透過震波走時與測站距離之關係，推算地震發生時間及震源位置，因此區域型強震預警在等待多個測站資料及分析過程中都需花費一定時間，所需發佈時間約為20秒至30秒（辛在勤<sup>[1]</sup>）。然而台灣南北長約400 km、東西寬僅約150 km，幅員小但人口密集。以S波波速每秒3 km估算，即震央半徑至少約60 km以內為警報盲區（如圖1所示）。因此區域型強震預警僅對震央60 km外之地區可提供預警時間，震央60 km內則屬於盲區，無法於強震波到達前即時收到地震警報。因此，台灣一旦大規模地震發生於島內，例如1999年921集集地震，震度6以

上的區域幾乎都為盲區（如圖 2 所示），台灣中部區域將有大半範圍是位於盲區內，而近震央區域卻又是地震動最強、災害最嚴重的地區。另一方面，現地型強震預警為了提早預警，只利用單一測站 P 波資料進行推估，以爭取強震預警時間，故可大幅縮小警報盲區之半徑。以使用 P 波前 3 秒資訊為例，假設震源深度為 5 km、P 波波速為 5.3 km/sec、S 波波速為 3.06 km/sec，則可將預警盲區半徑縮小至約 20 km（如圖 1 所示），若震源深度較深，則警報盲區半徑將更小。以 921 大地震為例，震度 6 以上的區域幾乎都可有預警時間（如圖 3 所示）。

台灣地狹人稠，且多數災害性地震常發生在台灣本島，以縮小警報盲區的觀點而言，現地型強震預警系統的建置確實有其必要。因此，快速且預警盲區較小的現地型強震預警技術，也成為台灣強震預警發展之重要一環。

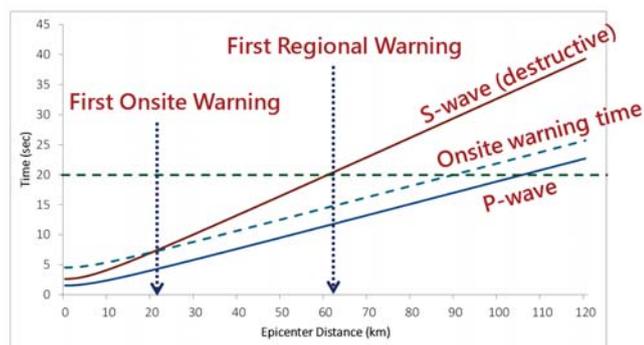


圖 1 區域型及現地型強震預警系統之盲區區域推估

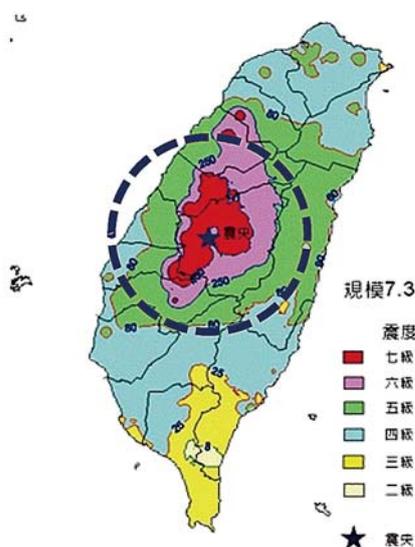


圖 2 區域型強震預警系統之盲區區域 — 以 1999 年 921 集集地震為例

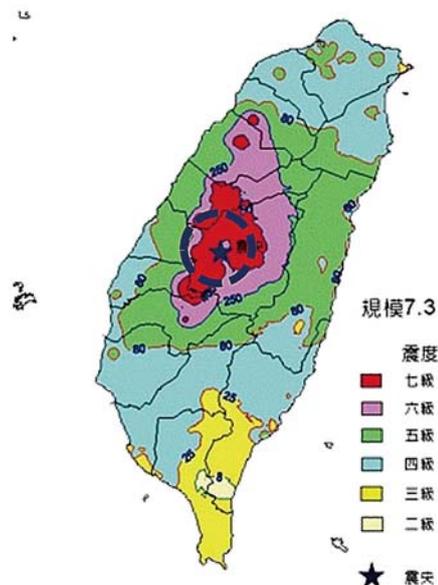


圖 3 現地型強震預警系統之盲區區域 — 以 1999 年 921 集集地震為例

### 現地型強震預警技術創新研發

本研究粹取垂直向地震初達波前數秒的各種特徵，包括平均週期、最大加速度、最大速度、最大位移、累積絕對速度、速度平方積分等，並利用支撐向量法回歸這些初達波特徵與最大地表加速度之關係，即可利用這些初達波特徵預測該測站在該次地震下的最大地表加速度。

以往大部分文獻 (Kanamori<sup>[3]</sup>, Wu<sup>[4,5]</sup>, Zollo<sup>[6]</sup>) 利用初達波特徵所預測之標的，包括地震規模、震央距離、最大地表速度及最大地表位移等。然而，台灣中央氣象局現行採用之震度 (Intensity, I)，係根據最大地表加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 訂定，其關係式為  $\log(\text{PGA}) = (I / 2) - 0.6$ ，PGA 之單位為 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，本研究與目前文獻上的作法不同，預測之標的選定為最大地表加速度 PGA，因其可直接與強震儀實際量測之 PGA 比對，亦可直接換算為震度，作為發佈警報之依據。

另一方面，以往的文獻均選擇少數較具代表性之地震記錄，作為驗證所提出預測方法的資料，因此僅能驗證該方法在特定地震的特定資料之使用性，無法得知實際應用時可能獲得之成效，例如實務應用上可能的誤報機率。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回歸模型，並利用自 1992 年至 2006 年「所有」之地震記錄測試支撐向量回歸模型之預測成功率，瞭解實務上的應用情形，例如預報準確度等。

### 使用之地震資料

建立現地型地震預測模型時，所使用的地震資料為台灣地區中央氣象局強震紀錄資料庫 (Taiwan Strong Motion Instrumentation Program, TSMIP) 於 1992 至 2006 年之資料，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 200 Hz 或 250 Hz，解析度為 16 位元，動態量測範圍大多為 2 G。該原始資料共有 105,360 筆，但有部分紀錄之時間歷時資料明顯有誤，本研究逐一過濾後將其刪除。此外，地震歷時長度少於 3 秒之記錄亦將其刪除，利用以上規則篩選後之地震記錄共 91,142 筆。

在選取作為訓練與驗證支撐向量回歸模型之資料時，由於支撐向量法之優點之一即為僅需具代表性之資料作為支撐向量即可，因此，本研究僅選取該資料中地震規模 ( $M_L$ ) 為 3.0 以上的 71 次地震事件。再者，因為儘管該資料庫收集了 15 年的台灣地震記錄，但是規模較大的地震紀錄仍甚為有限，因此，為了避免此類地震之資料全數作為建立支撐向量回歸模型之依據，使得測試該模型之準確度時，產生有可能僅對於目前有限的大地震之記錄預測結果較好的疑慮，本研究選取上述 71 次地震事件之一半的地震記錄共 4,166 筆，簡稱為「代表地震資料」，作為建立支撐向量回歸模型之依據，其規模及距離之分佈如圖 4 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，用於討論支撐向量回歸模型預測 PGA 的準確度時，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」，以瞭解實際應用時之誤差情形。

### PGA 預測模型建立

#### 支撐向量回歸簡介

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

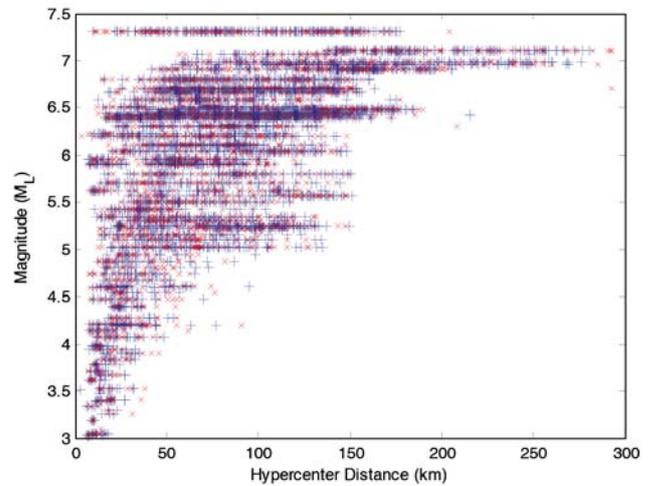


圖 4 「代表地震資料」之規模及距離分佈圖

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<sup>[7]</sup>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， $y_i$  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  $\mathbf{H}$ ，使得：

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

其中  $z$  為  $x$  投射至  $\mathbf{H}$  之向量， $k(\cdot, \cdot)$  為此投射動作之核函數。並於特徵空間  $\mathbf{H}$  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  $\mathbf{H}$  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：

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*} \left[ \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{m} \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) \right] \quad (3)$$

受限於

$$\begin{aligned} \langle w, x_i \rangle + b - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i & y_i - \langle w, x_i \rangle - b &\leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* &\geq 0 & i &= 1, \dots, m \end{aligned}$$

其中  $\varepsilon$  為容忍誤差區間，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。上述目標函數之求解，可引入 Lagrange 參數  $\alpha_i$  及  $\beta_i$ ，將上式轉換成二次規劃 (quadratic programming)，則可將目標函數轉換為對偶型式如下：

$$\max_{\alpha, \beta} \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_j - \beta_j) k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta_i) + \sum_{i=1}^m y_i (\alpha_i - \beta_i) \right] \quad (4)$$

受限於

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

求解二次規劃問題時即可求得  $\alpha_i$  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：

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

本研究所使用之核函數為幅狀基底函數，如下式：

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

### 使用之地震初達波特徵

根據 Satriano 等人於 2011 年發表之論文<sup>[2]</sup>，地震初達波特徵用於地震預警之類型包括地震初達波之極值 (Peak Measurements)、主要週期 (Predominant Period)、積分值 (Integral Quantities) 及平均極值 (Average Peak) 等。其中，由於平均極值與極值類似，且其計算尚須設定某些門檻值，故本研究捨棄不用。因此，本研究僅使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，作為支撐向量回歸模型之輸入資料。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。茲將各初達波特徵之數學式摘要如下：

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

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

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

式中  $u(t)$  為地表位移歷時。由於原始地震記錄係加速度，為計算上述初達波特徵，需將其積分至速度及位移，本研究使用 Butterworth 之高通濾波器將積分後之低頻偏移情形去除，其濾波器之級數及轉角頻率分別為 2 及 0.075 Hz。

### 支撐向量回歸模型

本研究利用「代表地震資料」建置支撐向量回歸模型共 4,166 筆，支撐向量回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。

本研究訓練及驗證支撐向量回歸模型之方式，係將代表地震資料分為 10 個子樣本，以交叉驗證之方式進行，亦即將一個單獨的子樣本被保留作為驗證模型的資料，其他 9 個樣本用來訓練。如此重複 10 次，每個子樣本輪流用來驗證，最後將 10 次結果的平均誤差當作最終之結果。

支撐向量回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，因此本研究選取較小之  $\varepsilon$ ，則支撐向量的個數較多，使該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，搜尋範圍先考慮較大但是格點間隔較寬，然後再逐漸縮小範圍及格點間隔，找到交叉驗證均方誤差最小的格點，即為最佳的參數。

### 歷史地震預測結果探討

本研究利用「測試地震資料」共 91,142 筆來測試所建置之支撐向量回歸模型是否準確，以反應實際應用時預測地震的誤差情形。若利用垂直向初達波到達後之前 3 秒特徵，亦即  $t_p = 3$  秒，所預測 PGA 與實測 PGA 之標準偏差為 21.01 Gal。圖 5 為所預測之 PGA 與實際量測之 PGA 之比較，圖中藍線及紅線分別標示預測震度與實際震度相同與誤差在正負一級內之範圍作為參考。由圖中可以觀察到預測 PGA 與實測

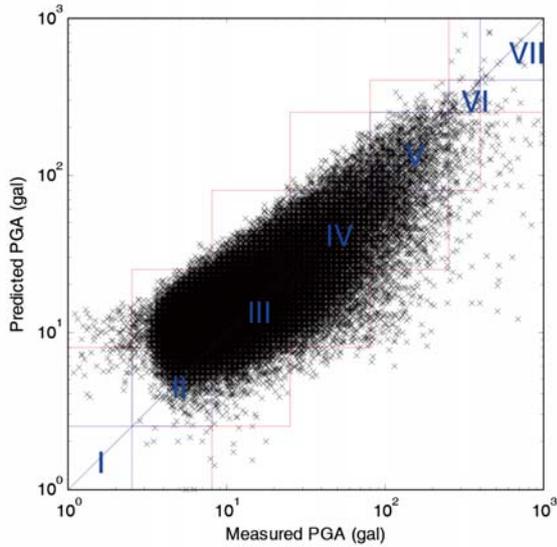


圖 5 「測試地震資料」之預測 PGA 與實測 PGA 比較圖

PGA 相當接近，且震度誤差正負一級以內之比例高達 99.22%。

考慮使用初達波長度  $t_p$  的範圍由 0.1 秒開始逐漸增加至 10 秒，間隔為 0.1 秒（如圖 6 所示）發現預測 PGA 與實測值之標準偏差隨著  $t_p$  的增加而降低，預測震度與實際震度誤差在正負一級內之比例則隨著  $t_p$  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，值得注意的是，即使  $t_p$  僅為 0.1 秒時，預測模型已有非常高之準確率，預測震度與實際震度誤差在正負一級內之比例已高達 91.24%。再者，當  $t_p$  僅為 0.4 秒時，預測震度與實際震度誤差在正負一級內之比例已增加至 97.19%。因此，運用本研究所提之方法所

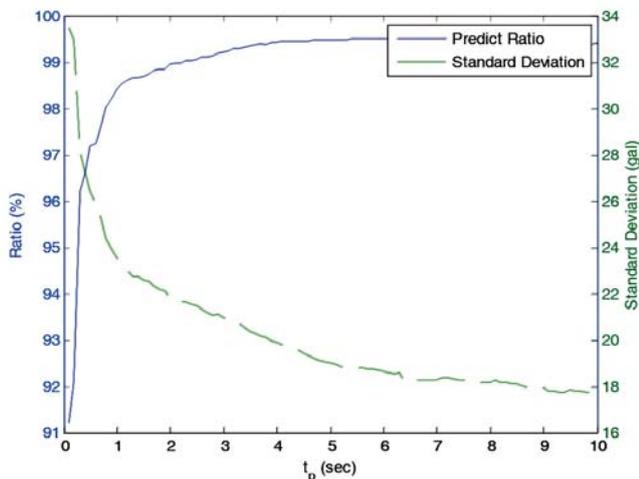


圖 6 「測試地震資料」之預測 PGA 誤差之標準偏差及預測震度誤差在正負一級內之比例隨  $t_p$  之變動

需之  $t_p$  值非常小，應可大幅縮小警報盲區，並爭取寶貴之反應時間。

### 美濃地震的表現

國家地震工程研究中心（National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE）在科技部、教育部和民間業界的合作下，自 2009 年起逐步於全台建置現地型強震預警系統（NCREE's on-site Earthquake Early Warning System, NEEWS）。該系統於主站裝設地震儀及運算主機，將預警訊息分享至半徑 20 km 內之副站，副站僅接收預警訊息並發布警報，當主站密度足夠時，即可將預警訊息提供全台灣中小學使用，以爭取強震波來臨前的寶貴應變時間。

現地型強震預警系統的建置過程中，於台灣時間 2016 年 2 月 6 日凌晨 3:57 分發生了高雄美濃地震，震矩規模為 6.53，震央在北緯 22.92 東經 120.54°，震源深度為 14.6 km，造成 117 死亡、551 人受傷、至少 6 座建築倒塌、超過 247 棟建築損傷。該次地震中，中央氣象局（Central Weather Bureau, CWB）即時強震站（Real-Time Digital, RTD）、國震中心即時強震站（NCREE's Real-Time Seismic stations, NRTS）、及國震中心現地型強震預警系統（NEEWS）共計分別收錄到 80、30、及 16 筆地震紀錄。這些地震紀錄中，於震央西北方向，距離震央約 15 km 的 NRTS A730 測站量測到之 PGA 為 407.89 Gal，距離震央約 25 km 的 RTD CHN3 測站量測到之 PGA 為 401.09 Gal，而距離震央約 7 km 的 NEEWS S01 測站量測到之 PGA 僅為 213.3 Gal。

在這次的高雄美濃地震中，NEEWS 於偵測到地震資料後即時進行預警動作，各測站位置與編號繪於圖 7，本次震央距離最近之 NEEWS 強震預警測站僅 7 km（高雄市新庄國小），最遠為 252 km（台北市公館國小）。上述 RTD、NRTS、及 NEEWS 所記錄之 PGA 分布情形亦繪於該圖，由圖中可明顯觀察到震度 5 級以上（80 Gal 以上）的區域為從震央向西北方向分布。

根據台灣以往震災經驗顯示，震度約達五級（PGA > 80 Gal）以上區域可能發生結構性震損，震度約達四級（PGA > 25 Gal）以上可能開始發生物品掉落等輕微震損。另外，由於台灣東部地區（宜蘭、花蓮、台東）地震發生頻率較高，故居民對於地震時之感受有較高之容忍度，且耐震設計規範之震區係數亦較高，因此相較

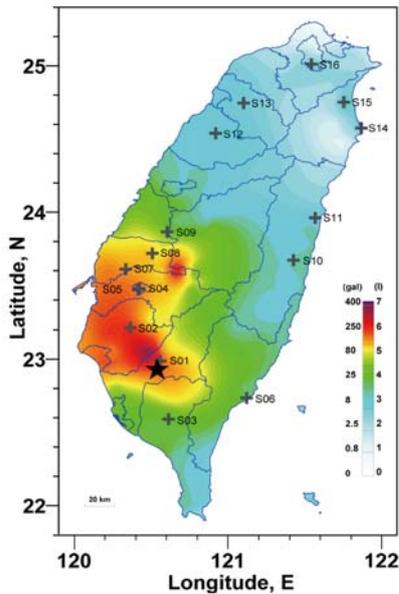


圖 7 現地型強震預警系統測站位置

於西部地區，東部地區發生較大地震時才較可能發生結構性震損。因此，目前各強震預警測站設定之警報門檻值係依據使用者需求進行客製化，除東部地區外，警報門檻值均設定為震度四級，東部地區則設定為震度五級始發出警報。

在本次美濃地震中，現地型強震預警系統之預測 PGA 準確度方面，先觀察預測 PGA 與實測 PGA 比較圖（圖 8），可發現預測 PGA 與實測 PGA 有明顯相同之趨勢，其誤差之標準偏差為 40.8 Gal。在震度差異方面，預測震度大多與實測震度差異在正負一級以內，僅苗栗縣獅潭國小實測 PGA 為 8.8 Gal，剛好超過震度三級的門檻值 8 Gal，然而預測震度僅一級，故預測震度差異為

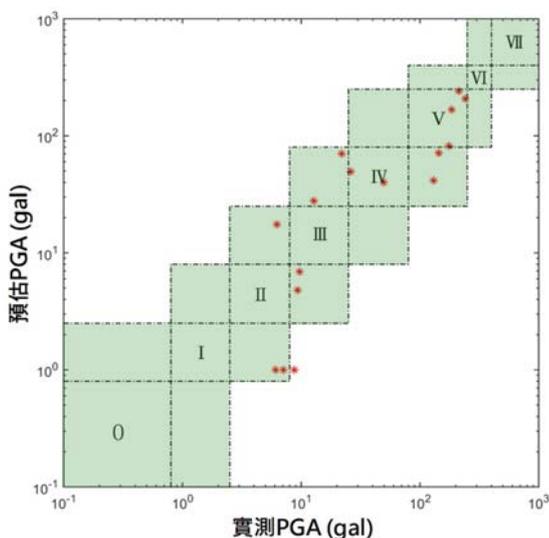


圖 8 預測 PGA 與實際 PGA 比較圖

二級，但是因為實測震度尚未超過警報門檻值四級，故並未造成任何不良影響，亦屬正確預報之情況。

在警報發布準確度方面，根據各站預設之警報門檻值，若實測震度超出警報門檻值而預測震度亦超出警報門檻值，則屬正確警報 (Correct Alarm, CA)；若實測震度未達警報門檻值而預測震度亦未達警報門檻值，則屬正確無警報 (Correct No-Alarm, CNA)；若實測震度超出警報門檻值而預測震度未達警報門檻值，則屬遺漏警報 (Missed Alarm, MA)；若實測震度未達警報門檻值而預測震度反而超出警報門檻值，則屬錯誤警報 (False Alarm, FA)。在本次美濃地震中，警報發出之情況屬正確警報 CA 共 8 個測站，屬正確無警報 CNA 亦共 8 個測站，亦即全數測站警報狀況均為正確（請見表 1）。

在爭取預警時間方面，若將預警時間定義為發出警報時間與 PGA 發生時間的差異，則在本次美濃地震中，觀察預警時間與震央距離的關係（如圖 9 及表 1），可發現預警時間隨著震央距離變大而增加，在震央距離僅 7 km 之高雄市新庄國小測站，可爭取約 3.8 秒之預警時間（圖 10），在鄰近重災區之台南市嘉南國小（震央距約 36 km）約可爭取 8.4 秒之預警時間（圖 11），在較遠但是震度亦為五級的嘉義市育人國小（震央距約 60 km）約可爭取 10.4 秒之預警時間（圖 12）。理論上震央距離越遠的測站預警時間最長，但是距離最遠之台北市公館國小（震央距約 252 km）預警時間僅 4.7 秒，其原因主要為訊雜比過小，亦即地震之 P 波振幅太小，以致於沒有觸發，直到震幅較大之 S 波到達後始觸發，故預警時間較短（圖 13），不過因為該測站實際震度僅二級，不需發布警報，因此即使該測站預警時間較短，亦不會造成任何實際不良影響。

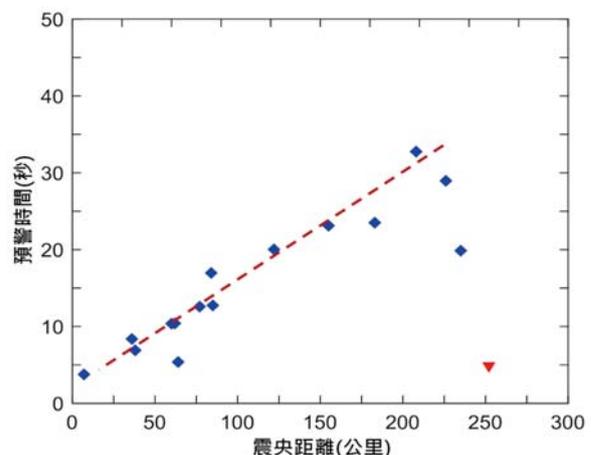


圖 9 預警時間與震央距離關係圖（紅點為台北市公館國小）

表 1 各測站實際量測資料與預警結果彙整表

編號	縣市	測站名稱	震央距離 (km)	預警時間 (sec)	實測PGA (gal)	預測PGA (gal)	實際震度	預估震度	警報門檻	警報狀況
S01	高雄	新庄國小	7	3.8	213.3	240.3	5	5	4	CA
S02	台南	嘉南國小	36	8.4	242.0	207.4	5	5	4	CA
S03	屏東	赤山國小	38	6.9	26.2	49.6	4	4	4	CA
S04	嘉義	育人國小	60	10.4	184.3	167.7	5	5	4	CA
S05	嘉義	港坪國小	62	10.4	175.8	81.8	5	5	4	CA
S06	台東	豐里國小	64	5.4	22.0	70.7	3	4	5	CNA
S07	雲林	北港	77	12.6	144.2	70.8	5	4	4	CA
S08	雲林	斗六工業區	85	12.8	130.8	41.3	5	4	4	CA
S09	彰化	東和國小	104	17.0	49.4	40.2	4	4	4	CA
S10	花蓮	光復國小	122	20.0	12.8	27.9	3	4	5	CNA
S11	花蓮	稻香國小	155	23.1	9.7	6.9	3	2	5	CNA
S12	苗栗	獅潭國小	183	23.5	8.8	1.0	3	1	4	CNA
S13	新竹	碧潭國小	208	32.8	7.1	1.0	2	1	4	CNA
S14	宜蘭	南安國中	226	29.0	6.1	1.0	2	1	5	CNA
S15	宜蘭	宜蘭國小	235	19.9	9.3	4.8	3	2	5	CNA
S16	台北	公館國小	252	4.7	6.3	17.4	2	3	4	CNA

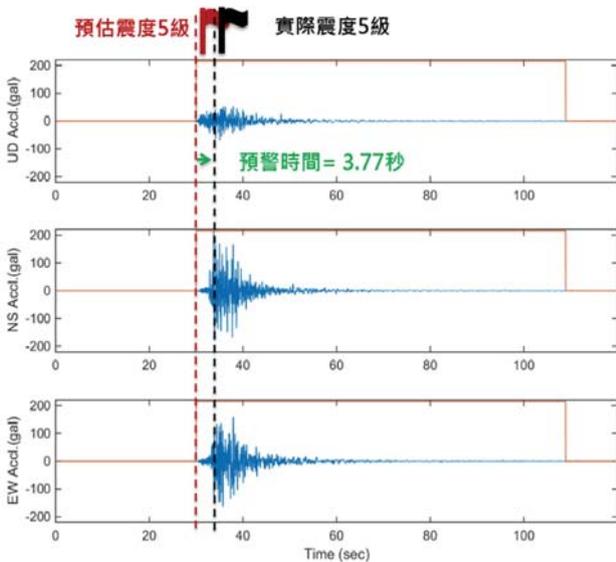


圖 10 高雄市新庄國小測站紀錄與警報發佈情形

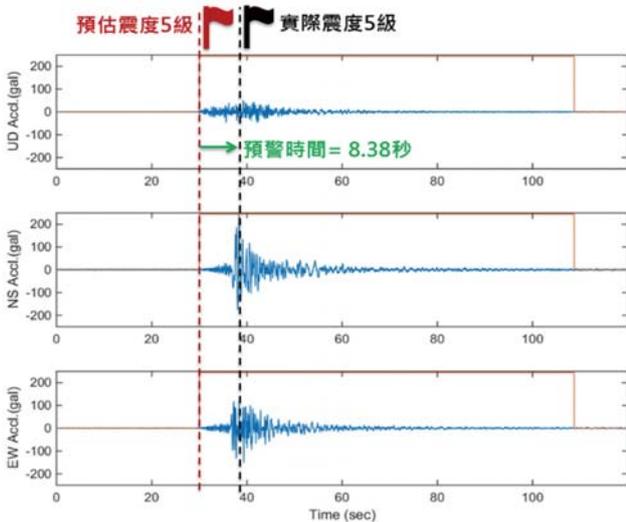


圖 11 台南市嘉南國小測站紀錄與警報發佈情形

### 結語

區域型強震預警技術對於鄰近震央區域無法提供有效的預警時間，亦即於鄰近震央區域的強震區反而成為所謂的盲區。本研究發展的現地型強震預警技術，相較於區域型強震預警技術，可於近震區提供準確且更為即時的預警。觀察本次美濃地震實際震度五級以上的測站，包括高雄市新庄國小測站、台南市嘉南國小、嘉義市育人國小、嘉義市港坪國小、雲林縣北港站、雲林斗六工業區等六個測站，現地型強震預警系統提供了約 4 秒至 13 秒的預警時間（圖 14），且警報正確率亦為 100%，顯見現地型強震預警技術應用於近震區域，對於降低震損確有其潛在功用。

目前，雖然政府的經費拮据，但是在立法院的強力督促下，教育部與科技部正積極投入相關經費，目標在未來的兩、三年內，可提供全台灣中小學校強震預警訊

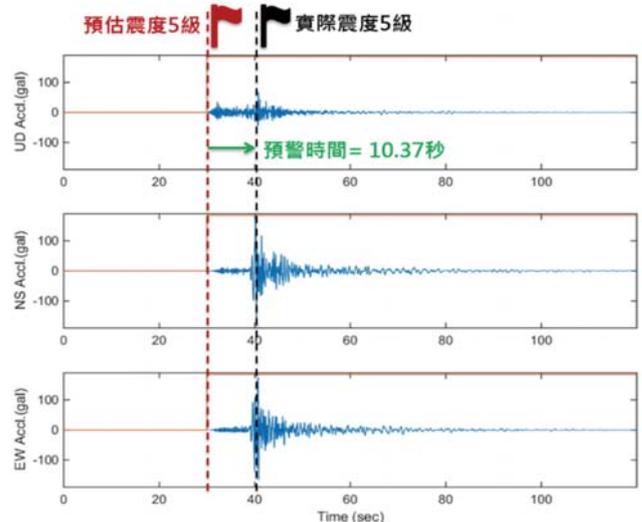


圖 12 嘉義市育人國小測站紀錄與警報發佈情形

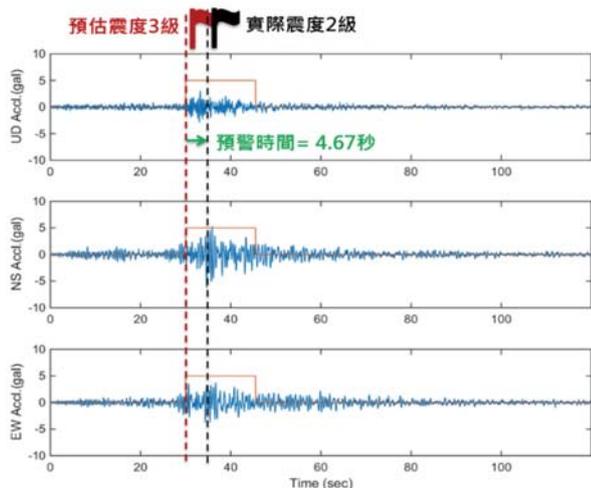


圖 13 台北市公館國小測站紀錄與警報發佈情形



圖 14 各測站名稱、實測震度與預警時間分布圖

息，再配合平時的應變演練以及自動化控制，期能大幅降低震災傷亡與損失。

然而，強震預警的推廣應用，有賴於使用者了解其使用上之限制。強震預警技術必然有誤報以及漏報的機率，即使如強震預警技術最成熟的日本，亦多次發生誤報的事件。雖然本研究之現地型強震預警技術，在本次美濃地震表現非常良好，但是，強震預警不可能完美。在此，期望台灣社會大眾未來不會因為少數誤報或漏報的事件，而否定了大多數正確警報的貢獻。

### 參考文獻

1. [http://www.cwb.gov.tw/V7/hottopic/earthquake\\_alert.pdf](http://www.cwb.gov.tw/V7/hottopic/earthquake_alert.pdf).
2. 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).
3. Kanamori H., "Real-time seismology and earthquake damage mitigation," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33:195–214 (2005).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. V. Vapnik. *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York, NY (1998).



許丁友於國立台灣大學土木工程系取得博士學位，求學期間曾獲科技部補助訪問比利時天主教魯汶大學土木工程系一年，進行有關結構健康診斷相關研究。現任職於台灣科技大學營建系助理教授，曾任國家地震工程研究中心研究員，現亦繼續兼任該中心研究員，與該中心合作進行結構健康診斷以及現地型強震預警技術等研究開發。目前，所開發之強震預警技術，正推廣應用於教育部的中小學校、台灣高速鐵路公司、科學園區高科技廠房等等。另一方面，所開發之結構健康診斷技術，亦正推廣應用於住辦大樓、科學園區管理局大樓，以及高科技廠房等。

### 學歷

國立臺灣大學土木工程學系工學博士（2004/09~2010/12）、比利時魯汶大學土木工程學系訪問學者（2009/08~2010/08）、國立台灣科技大學營建工程學系碩士（1997/09~1999/06）、國立成功大學土木工程學系學士（1993/09~1997/06）

### 經歷

國立台北科技大學土木工程系兼任助理教授（2012/08~2013/01）、國家地震工程研究中心結構控制組研究員（2015/01~2016/07）  
國家地震工程研究中心結構控制組副研究員（2011/01~2014/12）、國家地震工程研究中心結構控制組助理研究員（2004/01~2011/01）  
國家地震工程研究中心結構控制組專案助理研究員（2000/01~2004/01）

### 研究興趣

結構健康診斷（損傷診斷、震後評估、系統識別、訊號分析、嵌入式系統）  
現地型強震預警（預測模式、人工智慧應用、場址效應）  
地震工程（耐震評估、隔震設計）