

如何利用地震初達波從事地震預警

台灣大學地質科學系 吳逸民

一、前言

台灣位在地震頻繁的環太平洋地震帶上，地震活動頻繁，災害性地震也經常發生。如 1906 年嘉義梅山地震、1935 年新竹台中烈震及 1999 年集集大地震至今都在民眾心中都產生無法抹滅之回憶。因此，地震防減災是必須持續加強的研究重點。

地震預測一直都是熱門的地震防災研究議題，儘管有許多的前兆現象能被確認[1]，但目前仍未達實用階段。由於體認到地震預測之運用成效仍低，許多國家進而將資源投入地震預警系統之發展[2]。快速的地震資訊，除了是地震防救災反應重要的指標外，也能滿足社會大眾及新聞媒體的期待。地震預警系統所提供之訊息，更是直接提供重大工程及民生設施採取緊急地震應變的關鍵。

地震預警是當地震發生之後，在破壞性的地震波尚未來襲前之數秒至數十秒提出警告。這段時間可直接用於降低地震災害，運用的範圍如下：

- (1) 學校學童躲入桌子底下尋求保護及心理應變。墨西哥市的預警系統研究成果顯示，接受地震預警訊息的學童，在心理上大幅降低對地震之恐懼。
- (2) 工人能離開危險的工作位置。
- (3) 醫院進行的手術能暫時停止或調整精細及關鍵的操作，例如：眼科手術等。
- (4) 運輸系統能自動停止或減速，例如：高速鐵路列車減速以降低翻車之風險。
- (5) 維生管線及通訊網路能自動調整、重組或關閉，例如：關閉瓦斯及供水管線，減少地震所引起之火災及其他災害。
- (6) 工廠能及時進行緊急應變，保護振動敏感之設備，例如：晶元製造廠。

地震預警系統是目前經評估有效的地震減災方法，美國、日本、墨西哥及台灣都投入這項

工作。台灣預警系統設計的動機是基於 1986 年 11 月 15 日 M_L 6.8 (M_W 7.8) 花蓮地震所帶來的警示。該地震之震央雖然在花蓮地區，然而主要的震災卻發生在 120 公里外的台北地區。根據地震波走時資料，剪力波由花蓮地區傳遞至台北地區至少須 30 秒的時間，如果地震監測系統能在 30 秒內提供震央的地理位置及其規模。則將能在破壞性振動來襲之前，爭取數秒至十餘秒的預警時間，運用於緊急減災應變。因此，中央氣象局於 1994 年開始投入地震預警工作。

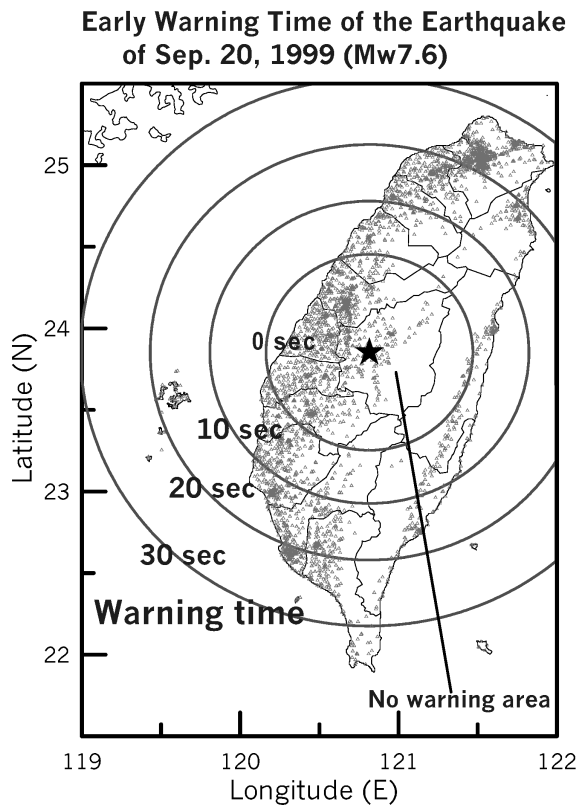
二、台灣預警系統及研究現況

從 1995 年起中央氣象局開始安裝即時強震觀測系統，從事地震速報工作。為了加強運用即時的強震訊號，地震預警系統也積極發展中，採用 M_{L10} 的地震規模估計方法[3]及區域地震子網[4]或虛擬子網[5]之設計，計算出地震參數的時間估計可以縮短至約 20 秒，因此，對於離震央 70 公里外的都會區，將以提供不同程度預警時間。如圖一所示為以集集地震所做之案例。

然而，目前的方法對於離震央 70 公里內的區域是無法提供預警。主要為所採用 M_{L10} 是一個較為傳統的估計方法，需要利用地震被偵測後 10 秒的地動訊號，因此，無法將提供警告的時間縮短至地震發生後 15 秒以內。因此，近年來我們研究地震初達波(P 波)之方法從事地震預警研究，以期能將提供警告的時間縮短至地震發生後 10 秒。

三、地震初達波的規模估算方法

在地震預警研究中，利用初達波決定地震規模是最重要且最困難的關鍵技術。傳統的芮氏規模(M_L)估計是由特定頻段地震波的最大振幅經距離修正而得之。然而，當觀測到最大振幅時已無預警時間。因此，傳統的規模計算方法並不適用於地震預警系統中。所幸，經過去多人的研究發現[6,7,8]，當地震越大時地震訊號的振動週期



圖一 以集集大地震為例，目前預警系統於各地區可能提供不同程度的預警時間。圖中三角形代表國民小學之分布，相當程度反映人口分佈

越長，可利用初達波的振動週期來推算其規模。

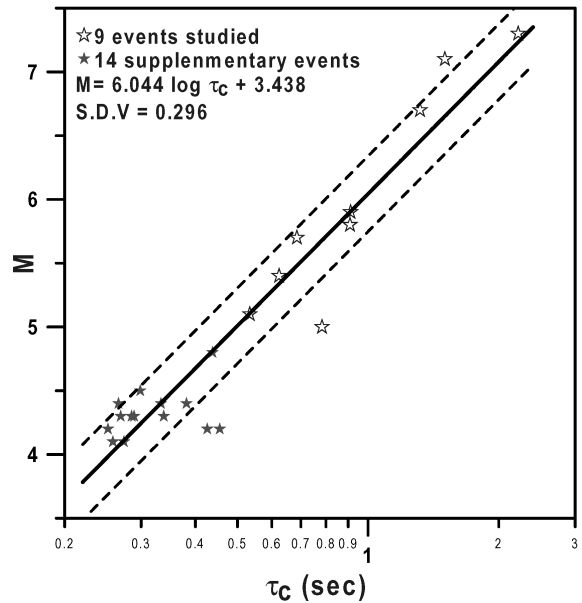
我們採用 τ_c 方法來決定地震規模[9,10,11]， τ_c 是平均振動週期參數。 τ_c 的計算是由3秒P波訊號之地動位移($u(t)$)及速度($\dot{u}(t)$)之積分比值(r)得之，如下：

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad (1)$$

上式中時間之積分為 $(0, \tau_0)$ ，從P波到達後計，一般我們取3秒的時間範圍，經由Parseval's理論，上式可以改寫如下：

$$r = \frac{4\pi^2 \int_0^\infty f^2 |\hat{u}(f)|^2 df}{\int_0^\infty |\hat{u}(f)|^2 df} = 4\pi^2 \langle f^2 \rangle \quad (2)$$

上式中 $\hat{u}(f)$ 為 $u(t)$ 於頻率域之函數 $\langle f^2 \rangle$ 平均頻率。因此， τ_c 可定義如下：



圖二 南加州地區 τ_c 與地震規模之關係

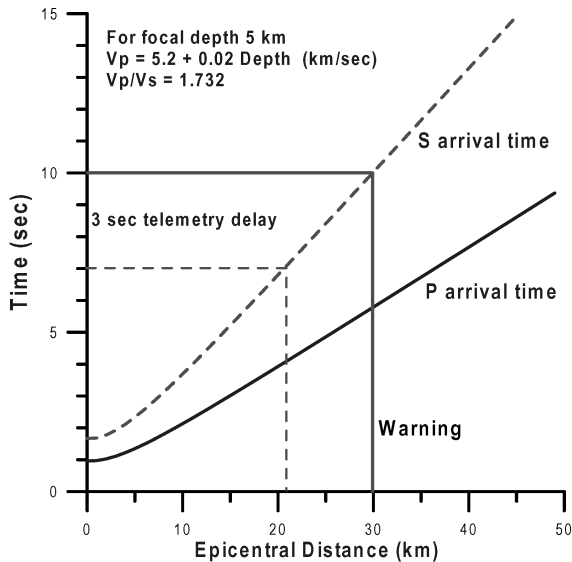
$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{\langle f^2 \rangle}} = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \quad (3)$$

藉由 τ_c 的計算我們可由P波訊號估算規模，圖二所示為南加州地區 τ_c 讀值與地震規模之關係，結果顯示 τ_c 之對數值與地震規模成線性關係，由 τ_c 決定地震規模，其誤差約0.3個單位。在台灣地區，我們的研究結果顯示當 τ_c 大於2.1秒時，就可能為 $M_w > 6.5$ 的地震發生[9]。即使只用一個測站也有相當好之成果[11]。

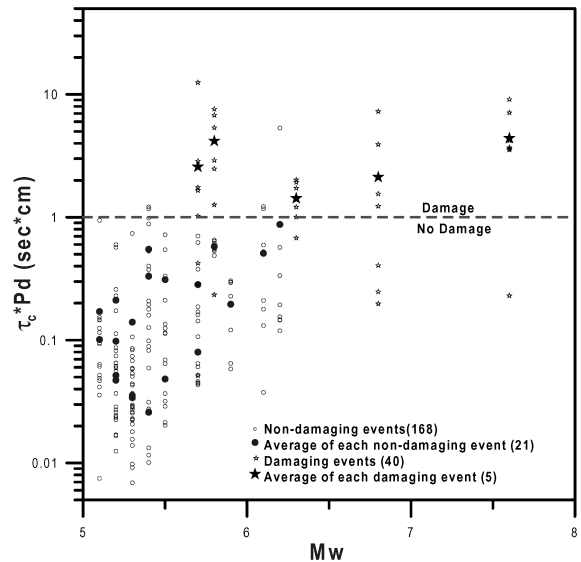
我們利用南加州地震網的資料分析[10]，發現地震發生之後7秒時，至少有4至6個測站，記錄了P波到後3秒訊號，可以用來從事地震預警用途。因此，採用此方法有可能將地震大小的判定時間縮至10秒(其中已考慮3秒之通訊延遲)，對於離震央30公里外的都會區提供預警(圖三)。

四、利用地震初達波預估震度

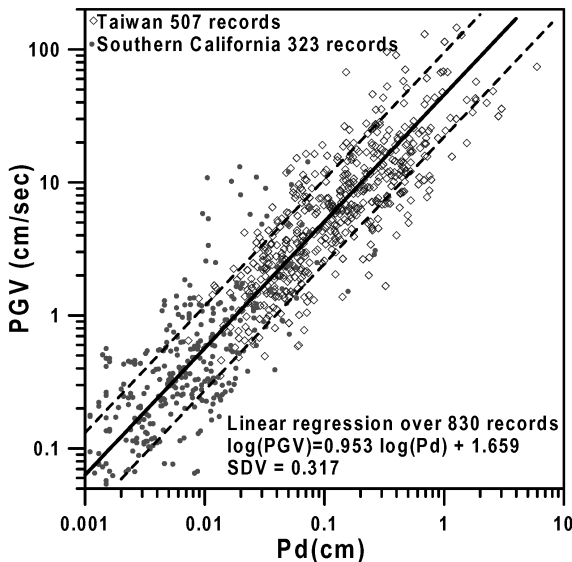
一般地震初達波會攜帶地震訊息，剪力波則攜帶大部分的能量且較可能造成災害。若能由地震初達波來推估即將來襲剪力波之振動強度，就可以直接運用於現地型預警系統中。我們分析了台灣地區[12]與南加州[10]的大地震記錄發現，P波到達後3秒最大位移振幅(Pd)與地動速度峰值(PGV)呈現對數線性關係(圖四)。因此，可以由



圖三 南加州地震發布時間及預警距離之示意圖



圖五 利用 P 波到後 3 秒所決定 τ_c 和最大位移 Pd 乘積值與規模之對應關係



圖四 P 波到達後 3 秒最大位移振幅(Pd)與地動速度峰值(PGV)之關係

地震初達波來估算震度[13]，且其誤差約在一個震度階。這項成果對於誤報敏感度低的預警保護對象，將有相當良好的成效。例如：電梯之控制，於地震時與最近樓層停止，並打開門，此類設施即使偶而將小振動高估之誤報，亦不受影響。

五、災害性地震之快速辨認

判定災害性地震是救災應變之重要關鍵。因此，我們分析了台灣地區的淺源大地震記錄，研究結果發現結合 τ_c 及 Pd 可以用來辨識災害地震

(如圖五所示)，當 $\tau_c * Pd$ 大於 1 時則可能為災害性地震發生，若依據此原理也可能將判定地震是否釀成災害的時間縮短至 10 秒，而爭取更多救災反應時間[9]。

六、結語

對於地震之防減災而言，地震預測之技術仍有待努力，地震預警系統是目前最為實際的地震減災方法。為了在強震波來襲之前提供更多的預警時間，我們使用 P 波到達後 3 秒的訊號來決定地震規模、預估震度及快速辨認災害性地震。採用 τ_c 方法有可能將地震大小的判定時間縮至 10 秒，對於離震央 30 公里外的都會區提供預警。Pd 可以用來估算震度，可以直接運用於現地型預警系統中。 τ_c 及 Pd 乘值大於 1 時則為可能為災害性地震發生。

參考文獻

- [1] Y. M. Wu and L. Y. Chiao, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, in press (2006).
- [2] H. Kanamori, E. Hauksson and T. Heaton, *Nature*, **390**, 461 (1997).
- [3] Y. M. Wu, T. C. Shin and Y. B. Tsai, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 1254 (1998).
- [4] Y. M. Wu, J. K. Chung, T. C. Shin, N. C. Hsiao, Y. B. Tsai, W. H. K. Lee and T. L. Teng, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic*

- Sciences*, **10**, 719 (1999).
- [5] Y. M. Wu and T. L. Teng, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2008 (2002).
- [6] Y. Nakamura, *Proceeding of 9th world conference on earthquake engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, (1988).
- [7] R. M. Allen and H. Kanamori, *Science*, **300**, 685 (2003).
- [8] H. Kanamori, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **33**, 5.1-5.20 (2005).
- [9] Y. M. Wu and H. Kanamori, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 347 (2005).
- [10] Y. M. Wu, H. Kanamori, R. M. Allen and E. G. Hauksson, *Bull. Seism. Soc. Am.*, submitted (2006).
- [11] Y. M. Wu, H. Y. Yen, L. Zhao, B. S. Huang and W. T. Liang, *Geophysical Research Letters*, submitted (2006).
- [12] Y. M. Wu and H. Kanamori, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 1181 (2005).
- [13] Y. M. Wu, T. L. Teng, T. C. Shin and N. C. Hsiao, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 386 (2003).