# 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<sub>L</sub> 6.8 (M<sub>W</sub> 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。

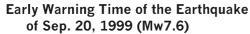
### 二、台灣預警系統及研究現況

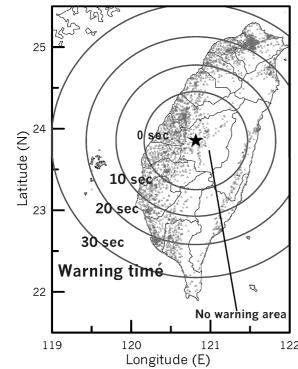
從 1995 年起中央氣象局開始安裝即時強震觀測系統,從事地震速報工作。爲了加強運用即時的強震訊號,地震預警系統也積極發展中,採用 M<sub>L10</sub>的地震規模估計方法[3]及區域地震子網[4]或虛擬子網[5]之設計,計算出地震參數的時間估計可以縮短至約 20 秒,因此,對於離震央70 公里外的都會區,將以提供不同程度預警時間。如圖一所示爲以集集地震所做之案例。

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。主要爲所採用 M<sub>L10</sub> 是一個較爲傳統的估計方法,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<sub>L</sub>)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

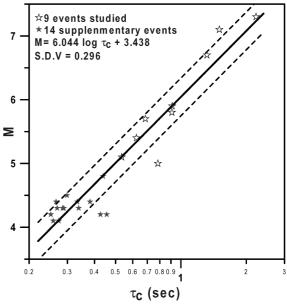
越長,可利用初達波的振動週期來推算其規模。 我們採用 $\tau_c$  方法來決定地震規模[9,10,11],  $\tau_c$  是平均振動週期參數。 $\tau_c$  的計算是由 3 秒 P 波 訊號之地動位移(u(t))及速度( $\dot{u}(t)$ )之積分比值 (r)得之,如下:

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

上式中時間之積分爲 $(0,\tau_0)$ ,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:

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

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



圖二 南加州地區τ。與地震規模之關係

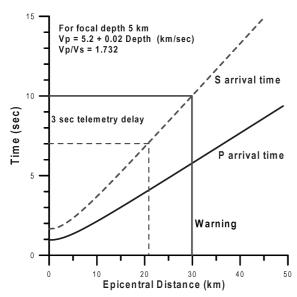
$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{\langle f^2 \rangle}} = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \tag{3}$$

藉由τ。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。讀值與地震規模之關 係,結果顯示τ。之對數值與地震規模成線性關 係,由τ。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。大於 2.1 秒時,就可能為 Mw>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]。

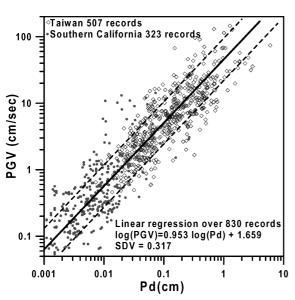
我們利用南加州地震網的資料分析[10],發現地震發生之後7秒時,至少有4至6個測站,記錄了P波到後3秒訊號,可以用來從事地震預警用途。因此,採用此方法有可能將地震大小的判定時間縮至10秒(其中已考慮3秒之通訊延遲),對於離震央30公里外的都會區提供預警(圖三)。

#### 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

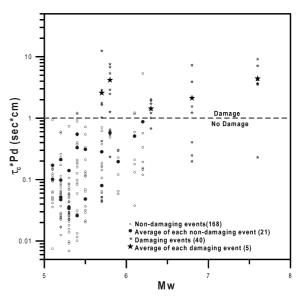


圖四 P 波到達後 3 秒最大位移振幅(Pd)與地動 速度峰值(PGV)之關係

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。及 Pd 可以用來辨識災害地震



圖五 利用 P 波到後 3 秒所決定τ<sub>c</sub> 和最大位移 Pd 乘積値與規模之對應關係

(如圖五所示),當τ<sub>c</sub>\*Pd 大於 1 時則可能爲災害性地震發生,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爲實際的地震減災方法。爲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。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。及Pd乘值大於1時則爲可能爲災害性地震發生。

#### 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 9<sup>th</sup> 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).