速報及預警系統中隨時變之地震規模制定Ⅱ

吳逸民　詹忠翰　劉恕群
國立臺灣大學 地質科學系

何美儀　陳燕玲　陳達毅
中央氣象局地震測報中心

摘要

地震發生過後，在地震速報與預警系統中，須及早決定規模以達成防救災與預警報的目的。然而地震初期的規模判定不確定性大，因此本計畫探討在接收到地震波的初期訊息時最佳的規模制訂方法。根據本研究的成果顯示，利用 2-5 秒的 P 波位移振幅 Pd，可以用來估算地震之規模，無論從地震發生之後的收斂速度以及穩定性與準確性皆優於單獨使用 3 秒 Pd 來估算地震規模。對於超大的地震發生，根據過去的研究，我們認為超過一定震度的覆蓋面積或是總有效震動，可以被用來計算規模，而不受規模飽和的影響。

關鍵詞: 地震、地震預警、即時地震學。

Earthquake magnitude is a key parameter for seismic monitoring and hazard mitigation especially for early warning system. However, magnitude determination from earthquake initial signals is generally with large uncertainty. For large earthquake may have magnitude saturation problem. It seriously affects earthquake damage estimation and rescue actions. Thus, time factor should be included in magnitude determination. In this project, we propose an updating earthquake magnitude determination in considering for different time windows. Results from this project show that combination using P-wave vertical displacement Pd from 2 to 5 seconds in estimating earthquake magnitude are better than using Pd from 3 seconds. It could obtain robust magnitude estimation much earlier than using Pd from 3 seconds. For really large earthquake magnitude determined from shaking coverage area could be used. It is possible to solve magnitude saturation problem.

Key words: earthquake, earthquake early warning, real-time seismology.

一、背景

地震預警系統利用震央附近地震測站觀測到的早期震波資料，解算地震規模、位置等資訊，並透過網路、光纖等通訊技術，在較具威脅性的地震波(S 波)到達前，對地區通報預估震度以及震波到達時間。地震預警需要在地震發生數秒至數十秒內對各地區以及重要設施發出警報，因此必須快速解算震央及規模。

估算地震大小常使用芮氏規模(M_L)，然而此種方法需使用最大振幅資訊，對於講求時效性的地震預警並不適合。Nakamura (1988) 首先使用 P 波的顯著頻率來估算規模，而為了爭取更多的時間，一系列的 P 波方法被開發來估算地震規模 (Allen and Kanamori, 2003；Kanamori, 2005；Wu and Kanamori, 2005a, 2005b；Wu and Zhao, 2006)。過去考慮能分辨規模 M_w6.5 的地震，我們採用 P 波後三秒的訊號來估算地震規模 (Kanamori, 2005; Wu and Kanamori, 2005a, 2005b, 2008a, 2008b)，然而近震央的測站也許有更多的訊號沒有被使用，如果能加入時間因子，近震央測站使用長時窗，距震央較遠的測站使用短時窗，一方面可以更快估算出規模，另一方面使用更多訊號維持規模估算的準確性，如此應可取得時效性與準確性的最適化。

二、研究方法

一般所得到的 P_d 與規模(M_w)的關係式如下：

$$M_W = a + b\log(P_d) + c\log(r) \tag{1}$$

其中 r 為震源距離，a、b、c 為回歸常數。採用臺灣強震觀測網（TSMIP）觀測記錄，收錄 1993 至 2012 年間，規模大於 5.5 之淺源（震源深度小於 30 公里）地震（圖一）。為評估近場特性，僅使用測站震央距小於 50 公里之記錄。去除無法判定 P 波到時之記錄，總計使用 1901 筆資料。利用式 (1) 以最小平方法（least square）回歸各時窗與其他參數之間關係，得到：

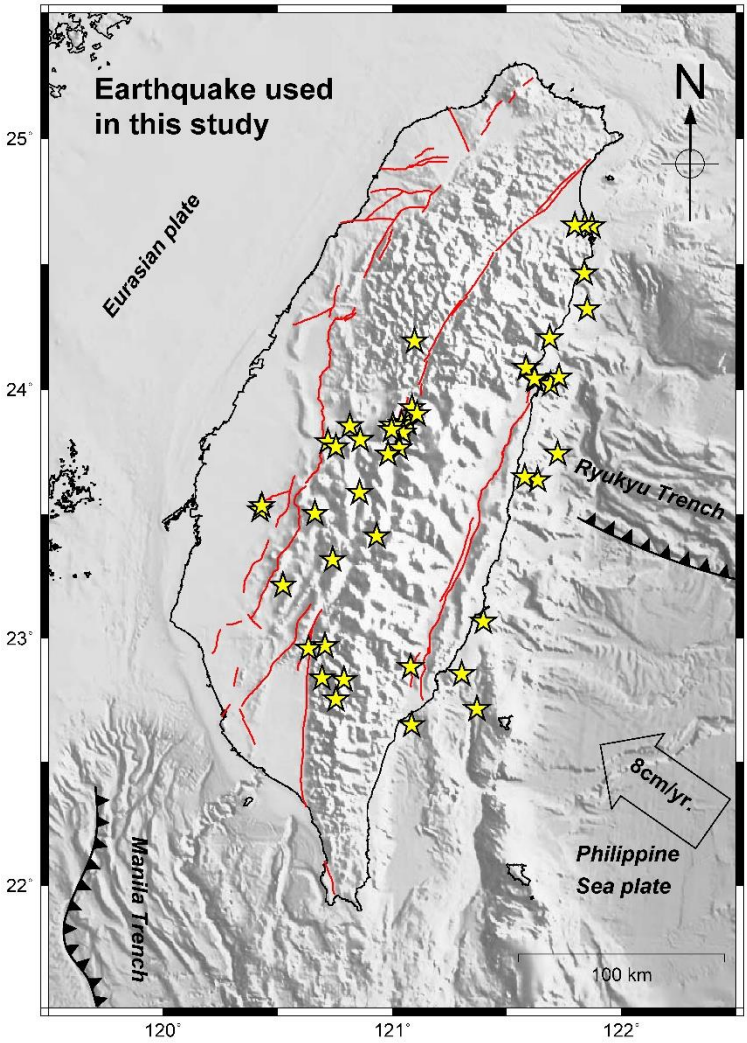
$$\log(P_{d1}) = -1.354 + 0.183M - 0.810\log(r) \pm 0.443 \tag{2}$$

$$\log(P_{d2}) = -2.708 + 0.438M - 0.812\log(r) \pm 0.427 \tag{3}$$

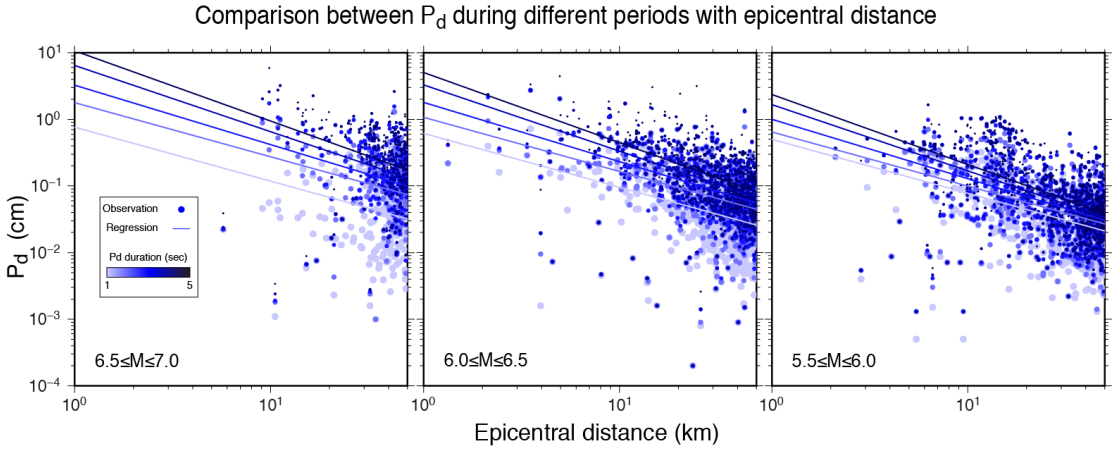
$$\log(P_{d3}) = -2.944 + 0.512M - 0.891\log(r) \pm 0.428 \tag{4}$$

$$\log(P_{d4}) = -3.172 + 0.590M - 0.994\log(r) \pm 0.438 \tag{5}$$

$$\log(P_{d5}) = -3.386 + 0.654M - 1.053\log(r) \pm 0.431 \tag{6}$$



圖一、本研究地震規模回歸式使用之地震分布圖。

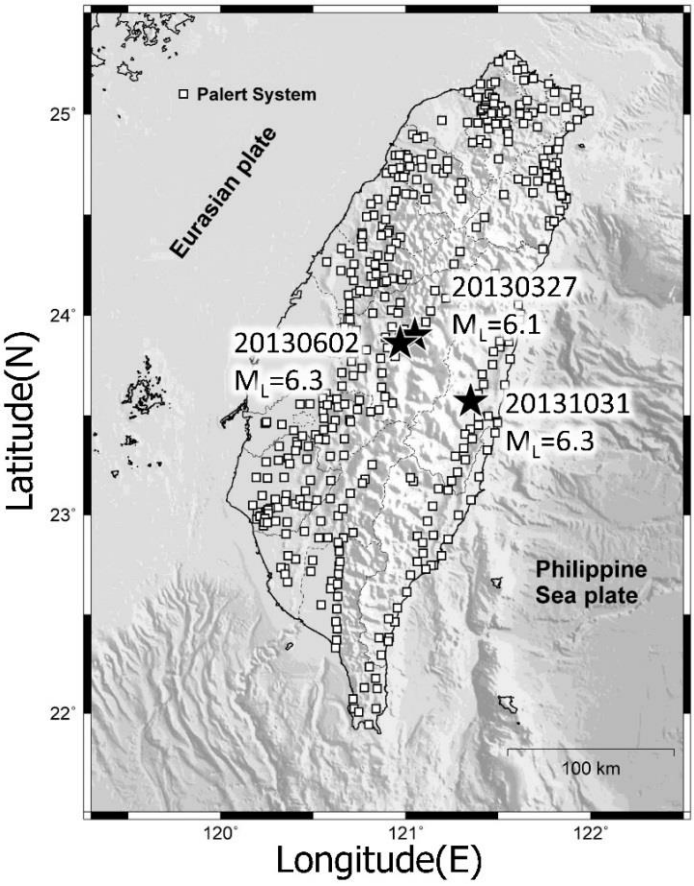


圖二、(a) 規模 6.5 至 7.0、(b) 規模 6.0 至 6.5、(c) 規模 5.5 至 5.0 地震觀測記錄中震央距與不同時窗長度的最大振幅比較圖。不同顏色代表不同時窗長度；圓圈代表觀測值；線段代表各時窗之回歸最佳解。

根據回歸結果可以發現， P_{d1} 之規模項係數（0.183）明顯較其他時窗小，將造成推估規模時之不穩定性，因此本研究希望比較單獨使用 P_{d3}、P_{d1} 至 P_{d5} 和 P_{d2} 至 P_{d5} 三種不同時窗取用方式，在地震發生後各時間點評估之規模，討論其可行性與時效性。

為了解在實際案例上，不同時窗評估地震規模的效果，使用本實驗室以低價位地震儀(Palert)架構於全台之地震觀測網，此地震網密度高，2013 年已設置達 401 個測站，在地震初期能較快獲得多測站的震波資料，擷取 2013 年 3 月 27 日、6 月 2 日發生於南投以及 10 月 31 日發生於花蓮共三筆規模(M_L)大於 6 的地震資料(圖二)，去除無法判斷 P 波到時的紀錄，各有 246、310 和 333 筆測站資料，假定第一次定位之震央即為中央氣象局地震報告之震央位置，利用觀測資料回推地震發生後各時間點使用不同時窗評估之規模。

另使用臺灣強震觀測網（TSMIP）的觀測記錄，收錄 1993 至 2012 年間，規模大於 5.5 之淺源（震源深度小於 30 公里）地震（圖一）共 45 筆事件，計算地震發生後各時間點，使用不同時窗評估之規模與中央氣象局地震速報系統測得地震規模的平均差值，以期了解不同時窗評估規模之穩定性與準確性的變化與差異。



圖三、本研究使用之地震案例與 Palert 地震觀測網分布圖。

三、結果與討論

Palert 地震網紀錄中，2013 年 3 月 27 日南投地震共有 246 個測站之資料可使用。在地震發生後約 1 秒即有第一個測站偵測到初達波，在此案例中，第一個測站偵測到初達波後 3 秒，即有 3 個測站偵測到初達波，故初達波後 4 秒即可計算 P_{d1} 至 P_{d5} 以評估地震規模。在初達波後 5 秒可計算 P_{d2} 至 P_{d5}，而初達波後 6 秒可計算 P_{d3}，圖四為利用不同時窗之 P_d 評估地震規模隨時間的變化。由圖四可以看出使用 P_{d1} 至 P_{d5} 雖可及早評估地震規模，但在震後 12 秒前所估算之地震規模變動較大，準確性明顯不如 P_{d2} 至 P_{d5} 及 P_{d3}，但在震後 12 秒後則有收斂的現象，以不同時窗之 P_d 估算之地震規模範圍約為 6.3±0.1。相同的現象也可在 2013 年 6 月 2 日南投地震(圖五)中觀察到，此次地震共有 310 個測站之資料可使用。在震後的前 10 秒，以 P_{d1} 至 P_{d5} 估算之地震規模，其變動幅度明顯高於 P_{d2} 至 P_{d5} 及 P_{d3} 所估算之地震規模，且有低估規模的狀況，而利用 P_{d2} 至 P_{d5} 估算地震規模則較穩定，且在震後 7 秒即可收斂至 6.47±0.1 之間。2013 年 10 月 31 日花蓮瑞穗地震(圖六)共有 333 個測站之資料可使用，在這次地震當中，發現不同方法評估的地震規模差距不大，皆在震後約 12 秒趨於穩定。

總觀三個地震以選取不同時窗之 P_d 估算規模的表現，皆可獲得可信的規模評估，但以 P_{d1} 至 P_{d5} 估算之地震規模在震後初期其變動幅度較大，而使用 P_{d2} 至 P_{d5} 與 P_{d3} 則可以快速趨於穩定。其中使用 P_{d2} 至 P_{d5} 除了較單獨使用 P_{d3} 早一秒可以估算地震規模，且準確性與 P_{d3} 相似甚至更好。

最後使用臺灣強震觀測網（TSMIP）1993 至 2012 共 45 個地震事件的觀測紀錄，計算不同時窗估算震後不同時間點的規模與中央氣象局地震速報系統測得規模之平均差值(圖七)，藉此來觀察使用不同時窗估計規模的準確性以及在不同地震事件上的穩定性。時窗選取越短能夠越早估算地震規模，但我們可以看出在震後 10 秒內 P_{d1} 至 P_{d5} 估算之規模差值變動範圍很大，其他時窗選取方法則較為穩定，而 P_{d2} 至 P_{d5} 估算之規模差值收斂的速度最快，平均差值也最低，在震後 10 秒為 0.13。整體而言，至震後 15 秒以後，不同時窗方法評估的規模差值皆已收斂，但準確性與穩定性仍以 P_{d2} 至 P_{d5} 與 P_{d3} 至 P_{d5} 最佳。

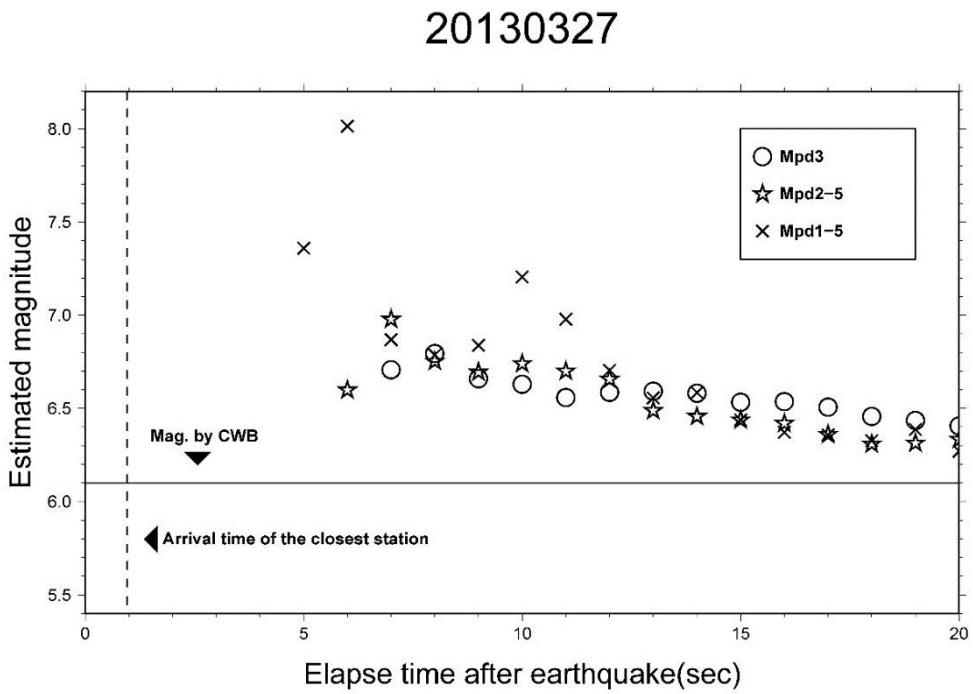
綜合兩個不同地震網的地震紀錄結果來看，使用 P_{d2} 至 P_{d5} 來估算地震規模應該是較好的選擇，無論從地震發生之後的收斂速度以及穩定性與準確性皆優於單獨使用 P_{d3} 來估算地震規模。

然使用 P_d 估算規模因儀器量測地震波振幅值有其上限，故在地震規模大於 7 的大地震應採用不同的估算方式避免規模飽和，例如使用地動加速度值涵蓋面積（PGA Covered Area）求得規模（M_A）（Teng et al., 1997）。Lin and Wu (2010) 利用特定地動加速度值涵蓋面積與規模呈現對數線性關係的概念，使用臺灣強地動觀測網（TSMIP）資料，共 53 個地震事件所建立的地動加速度值（100gal 以上）涵蓋面積與地震規模回歸式:

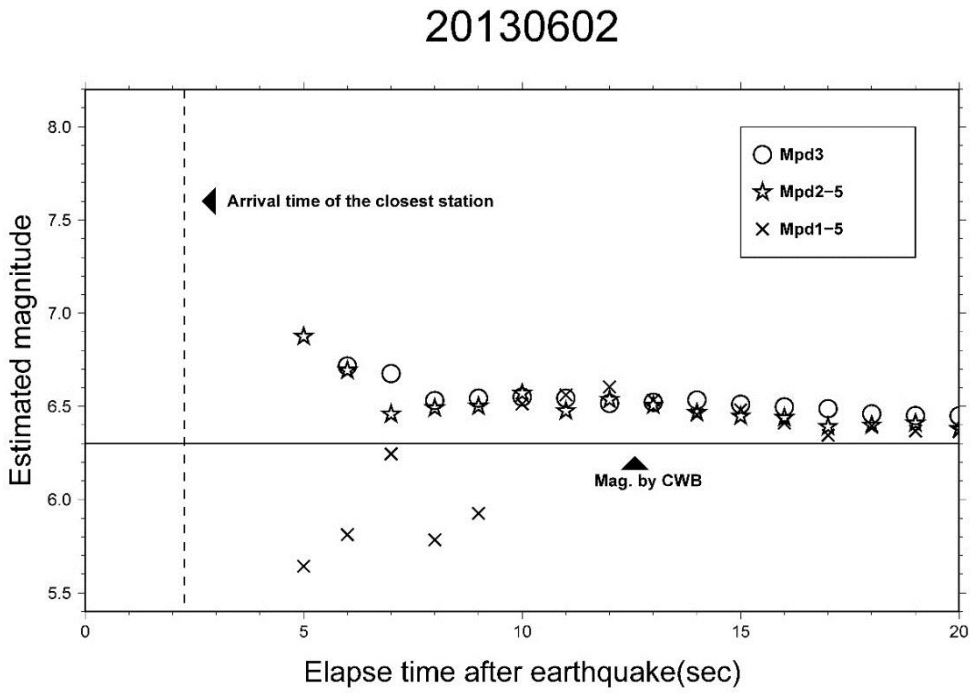
$$M_A = 1.95 \log A + 0.006P - 1.619 \qquad (7)$$

上式中 M_A 代表地震預估規模，A 代表特定地表加速度值的涵蓋面積，P 代表特定地表加速度值。使用此種規模推估可以在大地震發生時避免規模飽和的問題，

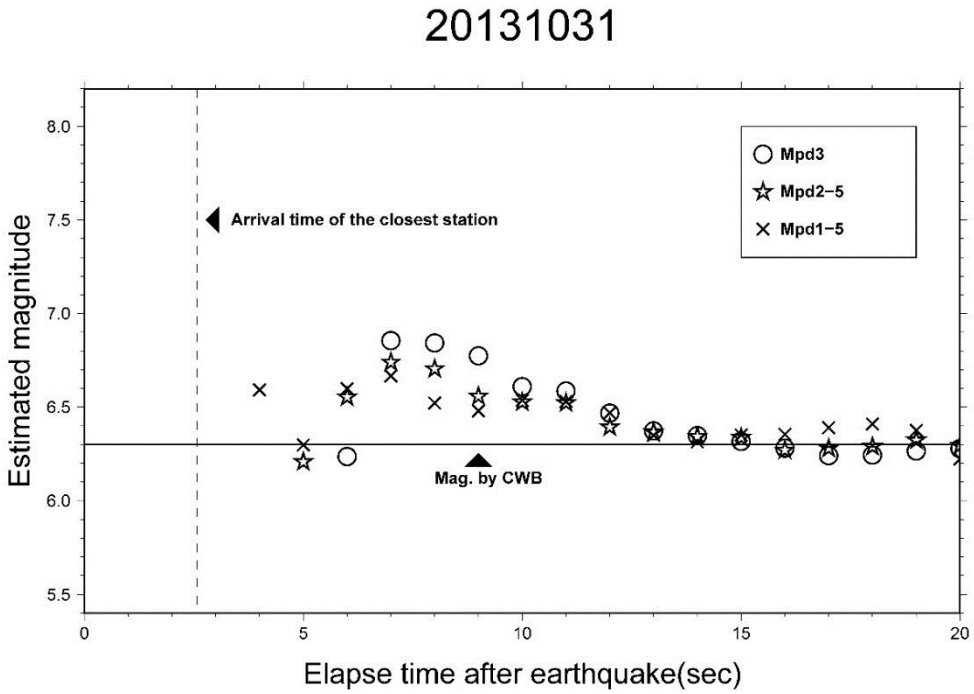
並且也能夠配合地震防救災需求，利用地動加速度關係式繪製震度圖及災害損失評估(Wu et al., 2001; Hsiao, 2007)。



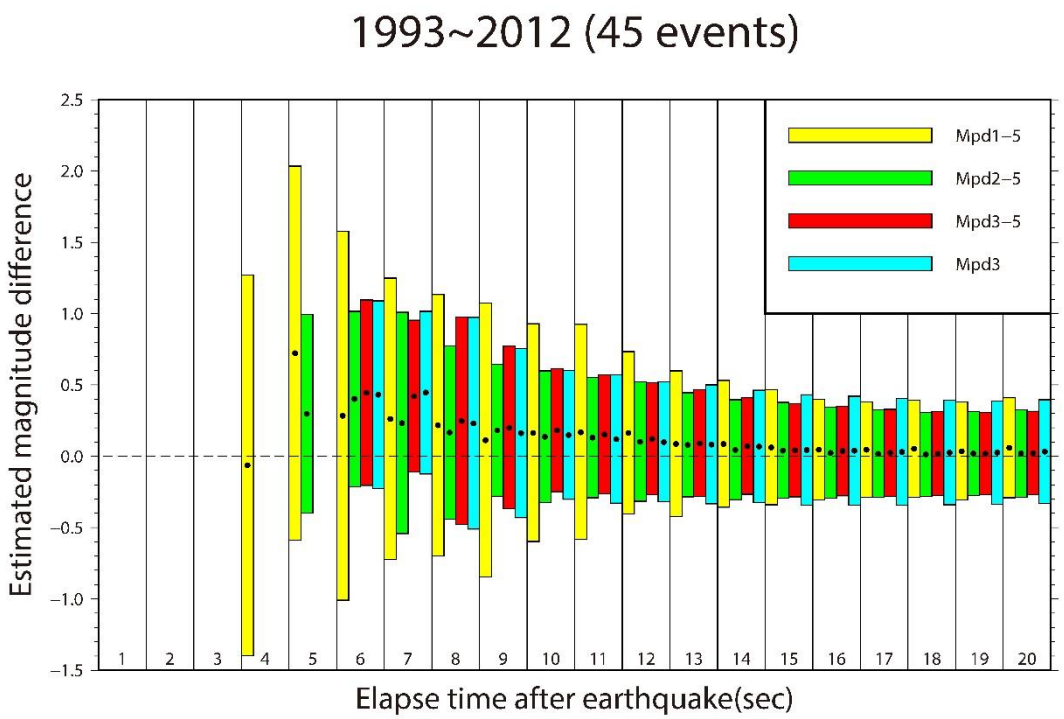
圖四、2013 年 3 月 27 日南投地震，利用 P_{d1} 至 P_{d5}(叉號)、P_{d2} 至 P_{d5}(星號)以及單以 P_{d3}(圓圈)於震後不同時間點評估之地震規模。虛線為地震初達波於最近測站之到時；實線為中央氣象局地震速報系統測得本次地震之規模。



圖五、2013 年 6 月 2 日南投地震，利用 P_{d1} 至 P_{d5}(叉號)、P_{d2} 至 P_{d5}(星號)以及單以 P_{d3}(圓圈)於震後不同時間點評估之地震規模。虛線為地震初達波於最近測站之到時；實線為中央氣象局地震速報系統測得本次地震之規模。



圖六、2013 年 10 月 31 日花蓮瑞穗地震，利用 P_{d1} 至 P_{d5}(叉號)、P_{d2} 至 P_{d5}(星號)以及單以 P_{d3}(圓圈)於震後不同時間點評估之地震規模。虛線為地震初達波於最近測站之到時；實線為中央氣象局地震速報系統測得本次地震之規模。



圖七、臺灣強震觀測網（TSMIP）自 1993 至 2012 共 45 個地震的觀測紀錄，在震後 20 秒內之各時間點中，不同規模評估方法與中央氣象局地震速報系統測得地震規模的平均差值（黑色圓點）以及標準差。

四、結語

在大地震過後，快速且準確的評估地震規模對於地震預警及防救災是一個重要的課題，然而地震初期的規模評估不確定性大，且有低估的可能。在本研究中利用臺灣地區的地震紀錄來探討採取不同時窗的 P 波振幅，在震後不同時間點評估地震規模的情形，藉此找尋最佳的評估方法。此結果還需要更多地震資訊來做分析驗證，以期提升地震預警的準確性與時效性。根據本研究的成果顯示，利用 2-5 秒的 P 波位移振幅 Pd，可以更快速及穩定估算地震規模。對於規模大於 7 的地震建議改用地動加速度值涵蓋面積（PGA Covered Area）或是總有效震動值(Wu and Teng, 2004; Lin and Wu, 2012)來估算規模。

五、相關重要文獻

Allen, R. M. and H. Kanamori (2003). The potential for earthquake early warning in Southern California, *Science* **300**, 685-848

Hsiao, N. G. (2007). *The application of real-time strong-motion observations on the earthquake early warning in Taiwan* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis).

Kanamori, H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **2005**, *33*, 195-214, doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122626.

Lin T. L. and Y. M. Wu (2010). Magnitude estimation using the covered areas of strong ground motion in earthquake early warning, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L09301, doi:10.1029/2010GL042797.

Lin, T. L. and Y. M. Wu (2012), A fast magnitude estimation for the M 9.0 2011 Great Tohoku Earthquake, *Seismo. Res. Let.*, **83**, 667-671, doi: 10.1785/0220110119.

Nakamura, Y. (1988), On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS), *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. VII, pp. 673–678, Jpn. Assoc. for Earthquake Disaster Prev., Tokyo.

Teng, T. L., Wu, L., Shin, T. C., Tsai, Y. B., & Lee, W. H. (1997). One minute after: strong-motion map, effective epicenter, and effective magnitude. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *87*(5), 1209-1219.

Wu, Y. M. and T. L. Teng (2002). A virtual sub-network approach to earthquake early warning, *Bull. Seism. Soc. Am* **92**, 2008-2018.

Wu, Y. M. and T. L. Teng (2004). Near Real-Time Magnitude Determination for Large Crustal Earthquakes. *Tectonophysics* **390**, 205-216.

Wu, Y. M., H. Kanamori (2005a) Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system. *Bull. Seism. Soc. Am.* **2005**, *95*, 347-353.

Wu, Y. M. and H. Kanamori (2005b). Rapid Assessment of Damaging Potential of

Earthquakes in Taiwan from the Beginning of P Waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**,1181-1185.

Wu, Y. M., H. Y. Yen, L. Zhao, B. S. Huang, and W. T. Liang (2006). Magnitude determination using initial P waves: A single-station approach, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L05306.

Wu, Y-.M. and Zhao, L. 2006, Magnitude estimation using the first three seconds *P*-wave amplitude in earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 33, L16312, doi:10.1029/2006GL026871.

Wu, Y. M., and H. Kanamori (2008a). Development of an Earthquake Early Warning System Using Real-Time Strong Motion Signals, *Sensors*, **8**, 1-9.

Wu, Y. M. and H. Kanamori (2008b). Exploring the feasibility of on-site earthquake early warning using close-in records of the 2007 Noto Hanto earthquake, *Earth, Planets and Space* **60**, 155-160.