

台北歷史強地動記錄之分析

葉永田 鄭世楠 溫國樑 呂佩玲 江嘉豪
地球科學研究所 地震測報中心
中央研究院 中央氣象局

摘要

本研究分析 1935 年台北觀測所 2 倍位移型強震儀所收錄的 3 組強地動記錄 (9 個分量)：4 月 21 日 06:02 地震，規模 (M_L) 7.1，震央距 109 公里；4 月 21 日 06:26 地震，規模 6.0，震央距 92 公里；7 月 17 日 00:19 地震，規模 6.2，震央距 95 公里。這些歷史強地動記錄經由數位化、基線修正、等間隔內插、筆桿長度修正、儀器效應修正與帶通濾波等資料處理後，即得到真實的地動記錄。結果顯示水平向最大 PGA, PGV, PGD 分別為 16.2 cm/sec^2 , 4.08 cm/sec , 1.94 cm 。由阻尼值 0.1%，2.0% 週期 1 秒至 10 秒的速度反應譜顯示，最大 Sv 值分別為 42.6 cm/sec , 28.5 cm/sec 與 13.0 cm/sec 。

一、前言

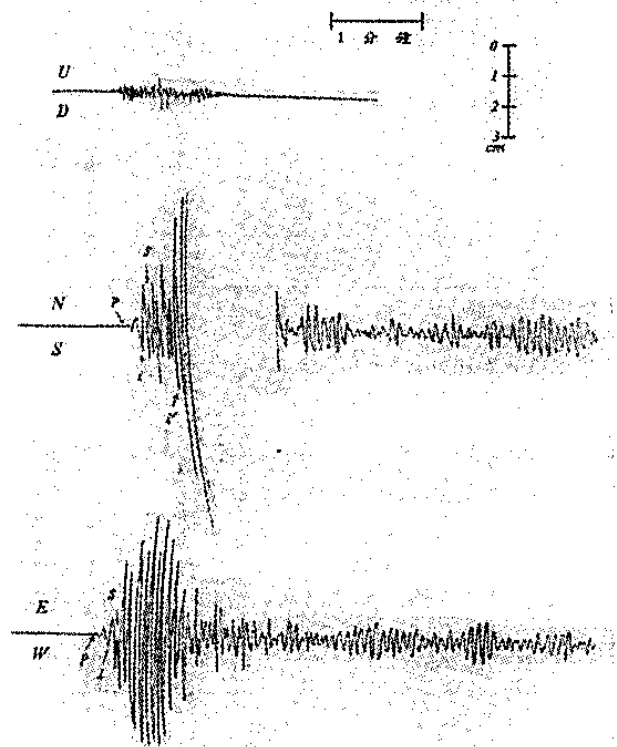
台北盆地為台灣地區最大的都匯區，經濟建設與人口都非常密集，各項重大工程建設均集中在台北地區。為收集強地動地震記錄以供地震學與地震工程上之應用，中央研究院地球科學研究所自 1974 年開始設置加速度強震儀，成立 SMA 強震觀測網，以加強強地動的觀測。中央氣象局自 1991 年起積極執行「強地動觀測計畫」，陸續在台北盆地設置了上百部加速度強震儀，並收錄了相當大量的強地動資料。但目前仍欠缺強震地動學與耐震工程上迫切需要之大地震 ($M_L \geq 7.0$) 的波形記錄資料。

在 1930 年代中央氣象局已在各地震觀測所設置位移型強震儀，並收錄了許多大地震之強地動記錄，如 1935 年新竹—台中地震、1941 年嘉義中埔地震等 [2,3]。雖然這些資料皆為類比式的位移記錄，在解析度與精確度皆不如目前使用之數位式加速度記錄，但由這些寶貴的資料卻可提供目前所欠缺的大地震資料。有鑑於此，本文利用中央氣象局台北觀測所於 1935 年間收錄的三個地震：4 月 21 日 06:02 新竹—台中地震之主震 (規模 7.1)、4 月 21 日 06:26 新竹—台中地震之餘震 (規模 6.0) 與 7 月 17 日 00:19 後龍溪口地震 (規模 6.2)。由 2 倍強震儀所收錄的類比式強地動記錄 (9 個分量) 進行數位化與資料處理，並由處理之資料來探討台北地區的影響。

二、位移強震儀與原始記錄

中央氣象局為了加強台灣地區大地震的監測工作，於 1930 年代即陸續在台灣各地區設置 2 倍強震儀。2 倍強震儀為機械式位移強震儀，此種地震儀將東西、南北與垂直向三個分量的感應器一起裝置於同一底盤上，並在同一滾筒之燻煙紙上記錄

三分量的位移地動振幅，如圖一所示。記錄滾筒的直徑約 24 公分，寬 40 公分，起動器為限速式發條裝置，圓筒約 30 分鐘轉一周，偏移量為 1 公釐。2 倍強震儀的固有週期約為 4-6 秒，阻尼比 (damping ratio，或稱為制振度) 約為 2-4。但由於 2 倍強震儀為機械式的儀器，因各觀測所安裝與保養的情形不同，造成儀器參數略有不同。台北站 2 倍強震儀垂直向的固有週期為 2.0 秒，阻尼比為 2.0；東西向之固有週期為 5.0 秒，阻尼比為 2.3；南北向的固有週期為 5.0 秒，阻尼比為 2.0。



圖一、台北測候所 2 倍強震儀收錄之 1935 年 4 月 21 日新竹—台中地震強地動記錄。

有了 2 倍強震儀的阻尼比 ν 與固有週期 T_0 後，即可推求儀器的響應曲線 (instrument response curve, U) 與相位差 (phase lag, δ)：

$$U = \frac{V}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2u^2}} \quad (1)$$

$$\delta = \arctan \frac{2hu}{1 - u^2} \quad (2)$$

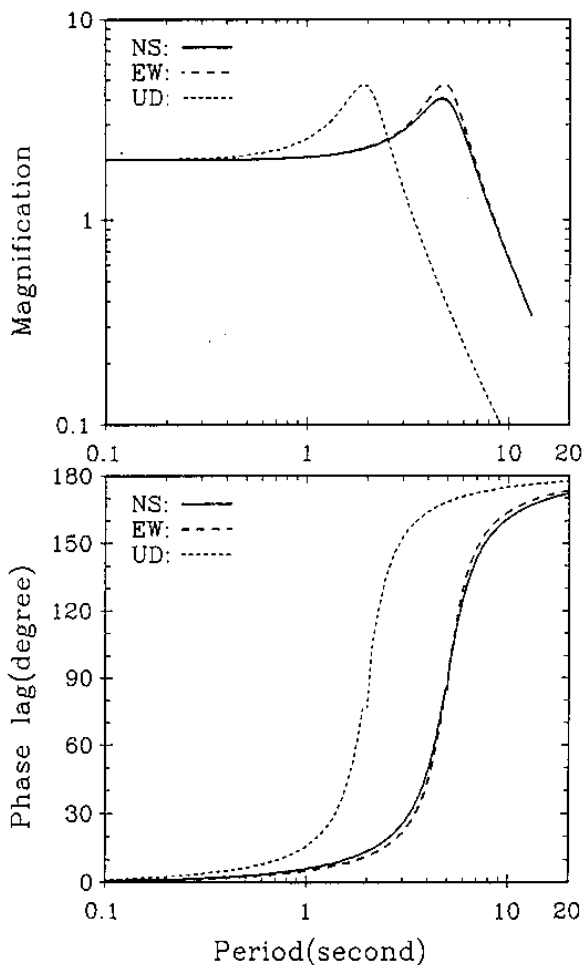
式中 V 為靜態倍率 (static magnification)，2 倍強震儀的靜態倍率為 2； $\mu = T/T_0$ ， T 為地動週期； h 為阻尼常數 (damping constant)：

$$h = 0.733 \frac{\Lambda}{\sqrt{1 + 0.53720\Lambda^2}} \quad (3)$$

式中 Λ 為對數衰減率 (logarithmic decrement)。

$$\Lambda = \log_{10}(\nu) \quad (4)$$

由(1)-(4)式即可推算出 2 倍強震儀在不同阻尼比與固有週期的儀器響應曲線與相位差 [1,4,5,7,9]。圖二為台北站 2 倍強震儀的儀器響應曲線與相位差。



圖二、2 倍強震儀的儀器響應曲線及相位差

三、資料處理

2 倍強震儀將所收錄之位移資料直接記錄在燻煙紙上，為類比式的記錄。為了將原始的地震記錄轉換成為真實的地動位移，必需進行適當的處理。資料處理過程中數位化處理步驟參照林燈河 [6]，Inoue and Matsumoto [9]，葉永田等 [7] 的方式，並以中央研究院地球科學研究所處理 SMA-1 強震儀之類比式地震記錄的方法與計算機程式做為資料處理的骨架。主要的步驟如下：

(一) 數位化 (Digitized):

先將原始的類比式地震記錄放大 (一般為 3 倍)，利用點圖機或數位板進行數位化的工作，將類比式地震記錄轉換為時間序列的數位資料。

(二) 等間隔內插 (Equal space interpolate):

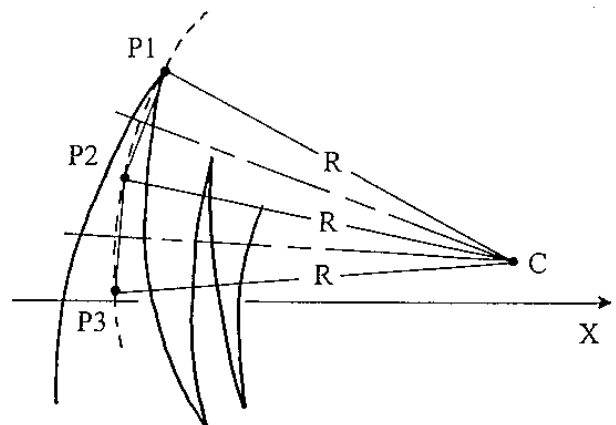
為利於後續之處理與計算機之運算，數位化後的歷時記錄，等間隔內插為每秒 10 點，即每點間隔 (Δt) 為 0.1 秒。

(三) 基線修正 (Baseline correction):

採用最小二乘法 (least square method) 進行基線偏移的修正。

(四) 筆桿長度修正 (Correction of arm length)

2 倍強震儀為機械式的類比記錄，感應器的訊息透過筆桿記錄在統筒上。當振幅較大時即會產生圓弧的現象，如圖一所示。此項修正即是去除筆桿造成的圓弧效應。本文採用 Inoue and Matsumoto [9] 的方法來計算筆桿的長度。方法如圖三所示：先挑選振幅較大且較明顯的波相，推求出此波相的等時線 (如圖三中虛線)，並由點圖機或數位板讀出等時線上的 3 的點：P1, P2 與 P3，由線段 P1.P2 與 P2.P3 的垂直中分線之交點得到 C，則線段 P1.C (=P2.C=P3.C) 的長度即為筆桿長度 (R)。



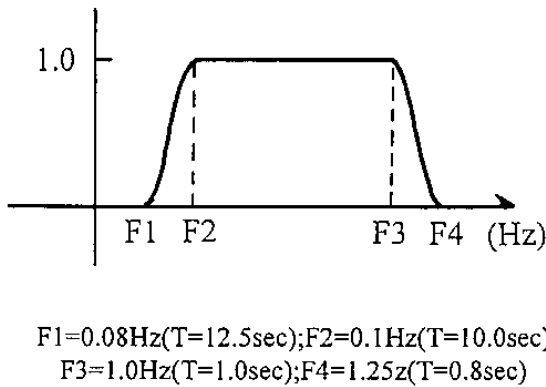
R: 筆桿長度 C: 筆桿的原點 P1, P2, P3: 參考點
 — — — — — : 垂直中分線 - - - - - : 同時弧線
 圖三、估算筆桿長度的方法 (修改自 Inoue and Matsumoto, 1988)

(五)儀器效應修正(Instrument correction)：

2 倍強震儀對於週期小於 2.0 秒的訊號放大 2 倍，5.0 秒左右的訊號則放大約 4 倍，週期大於 9.0 秒的訊號則開始減小，同時相位的差亦隨著訊號的週期而異(圖二，水平向)。此項修正的目的即是去除儀器效應，而將所收錄的訊號還原為真實的地動。由(1)-(4)式即可去除 2 倍強震儀的儀器效應與相位差。

(六)帶通濾波(Bandpass filter)：

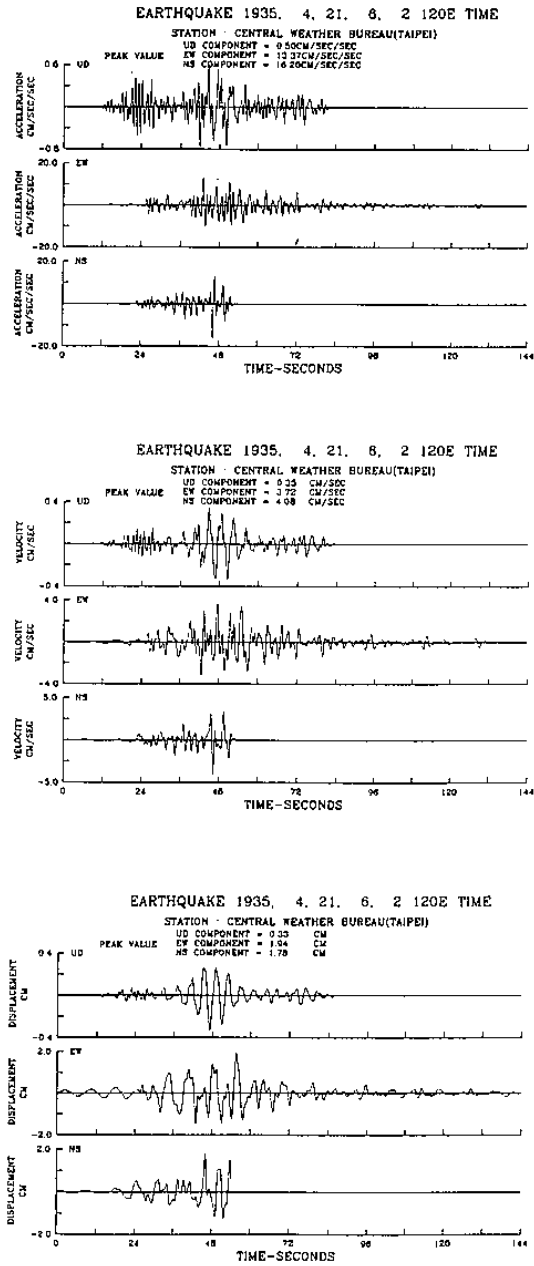
由於數位化處理過程可能引進高頻雜訊(noise)，而在儀器效應修正時可能造成低頻雜訊的放大。為去除可能引進的高頻與低頻的雜訊，此步驟採用帶通濾波器以去除這些雜訊。由於垂直向與水平向的儀器響應差異較大(圖二)，故分別採用放大倍率 0.8 倍(3dB)的頻率做為高通(high pass)的邊界，垂直向為 0.25 Hz (4.0 秒)，水平向約為 0.1 Hz (10.0 秒)；低通(low pass)則採用 1.0 Hz (1.0 秒)。圖四為水平向的帶通濾波器示意圖。



圖四、水平向帶通濾波器示意圖。

原始的類比式地震記錄經由以上六個步驟處理後，便可得到實際的地動位移。位移歷時記錄經由微分(differentiation)運算後，即可得到地動速度歷時記錄，速度歷時記錄經由微分運算後，即可得到地動加速度歷時記錄。圖五顯示 1935 年 4 月 21 日 06:02 地震之位移、速度、加速度歷時記錄(震央距離 109 公里，規模 7.1)。垂直向、東西向與南北向的最大位移值(PGD)分別為 0.33, 1.94, 1.78 cm；最大速度值(PGV)分別為 0.35, 3.72, 4.08 cm/sec；最大加速度值(PGA)分別為 0.50, 13.37, 16.20 cm/sec²。PGA 值略小於台北的震度 IV 級(25-80 cm/sec²)。由於南北向的地震記錄於振幅擺動最劇烈時中斷(圖一)，故僅有 50 多秒的資料，因其記錄在振幅較大時中斷，使得資料處理較不易，在記錄尾段亦易失真，其實際的振幅值應大於上列數值。位移記錄中，振幅較大處(36-60 秒)之顯著的

週期為 4.2 秒(0.24 Hz)，此現象於速度記錄仍可看出，加速度記錄則不明顯。

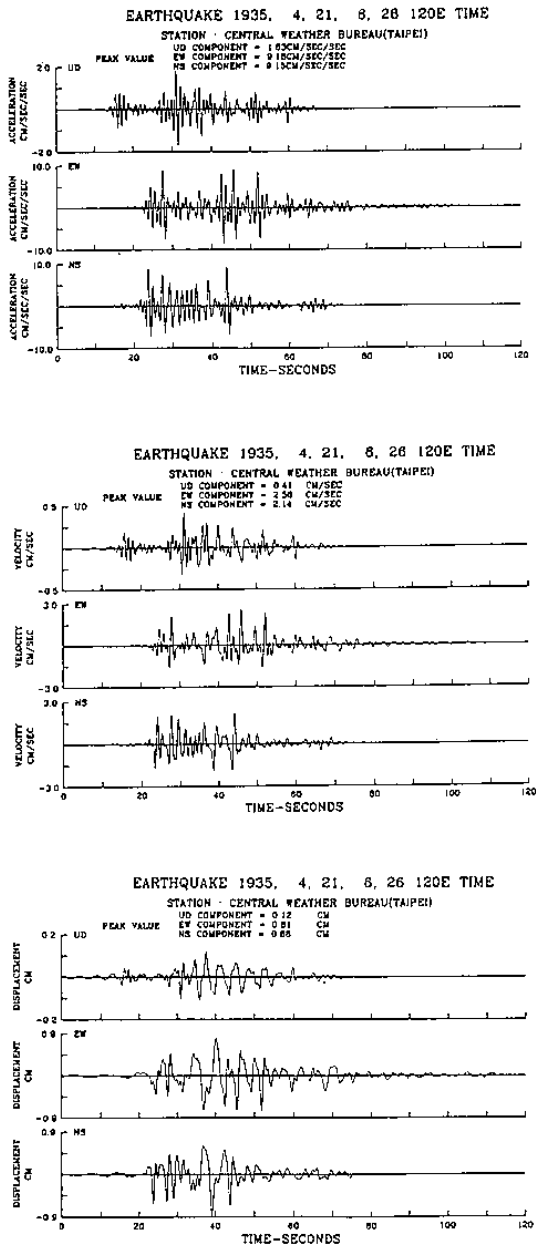


圖五、台北站收錄之 1935 年 4 月 21 日 06:02 新竹—台中地震主震之位移、速度、加速度歷時記錄。

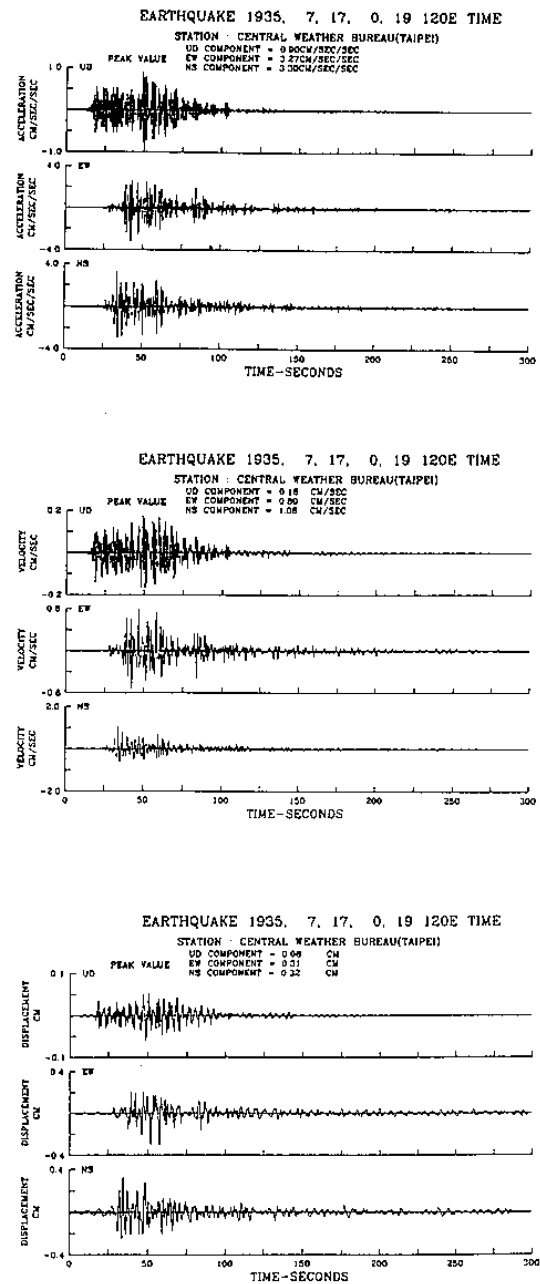
圖六為 1935 年 4 月 21 日 06:26 餘震之位移、速度、加速度歷時記錄(震央距離 92 公里，規模 6.0)。垂直向、東西向與南北向的 PGD 分別為 0.12, 0.81, 0.88 cm；PGV 分別為 0.41, 2.56, 2.14 cm/sec；PGA 分別為 1.83, 9.18, 9.15 cm/sec²。PGA 值與台北的震度觀測 III 級(8-25 cm/sec²)相當吻合。位移記錄中，水平向振幅較大處(35-45 秒)的主頻約為 5.4 秒(0.18 Hz)，垂直向振幅較大處

(30-50 秒)的主頻約為 3.8 秒(0.26 Hz)。

圖七為 1935 年 7 月 17 日 00:19 後龍溪口地震之位移、速度、加速度歷時記錄(規模 6.2，震央距離 95 公里)。垂直向、東西向與南北向的 PGD 分別為 0.18, 0.80, 1.06 cm；PGV 分別為 0.06, 0.31, 0.32 cm/sec；PGA 分別為 0.90, 3.27, 3.30 cm/sec²。PGA 值小於台北的震度觀測 III 級(8-25 cm/sec²)。與 1935 年 4 月 21 日 06:02 地震(圖五)與 06:26 地震(圖六)的記錄比較，整個記錄的高頻能量較為顯著，位移記錄上的振幅亦小很多(表一)。水平向振幅較大處(30-50 秒)的主頻約為 2.8 秒(0.36 Hz)。



圖六、台北站收錄之 1935 年 4 月 21 日 06:26 新竹—台中地震餘震之位移、速度、加速度歷時記錄。



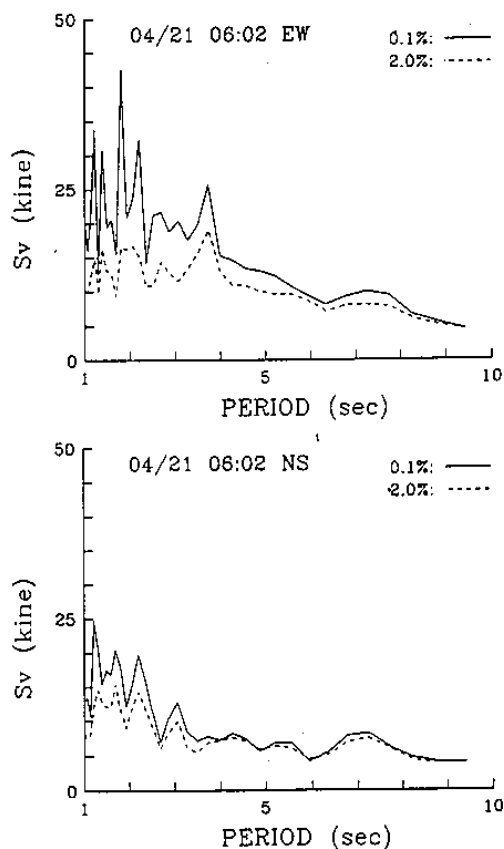
圖七、台北站收錄之 1935 年 7 月 17 日 00:19 後龍溪口地震之位移、速度、加速度歷時記錄。

表一、PGA, PGV, PGD 值一覽表

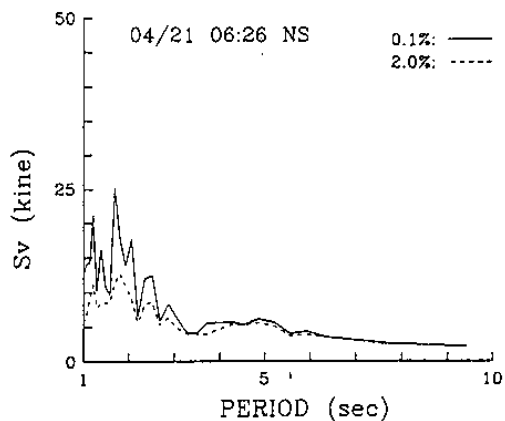
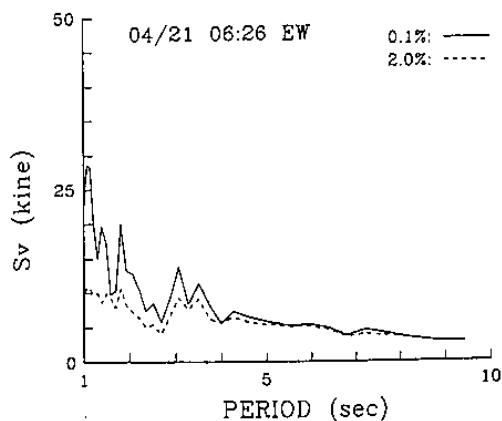
震央 距離 (km)	垂直分量			E-W 分量			N-S 分量		
	PGD cm	PGV kine	PGA gal	PGD cm	PGV kine	PGA gal	PGD cm	PGV kine	PGA gal
1935 年 4 月 21 日 06:02 主震	ML=7.1	Dep=5.0							
109	0.33	0.35	0.50	1.94	3.72	13.37	1.78	4.08	16.20
1935 年 4 月 21 日 06:26 餘震	ML=6.0	Dep=10.0							
92	0.12	0.41	1.83	0.81	2.56	9.18	0.88	2.14	9.15
1935 年 7 月 17 日 00:19 後龍溪口地震	ML=6.2	Dep=30.0							
95	0.06	0.18	0.90	0.31	0.80	3.27	0.32	1.06	3.30

四、速度反應譜

本文應用 Nigam and Jennings[9]之數值法，選定 2 個阻尼比值(damping factor,h) 0.1%與 2.0%，計算 1935 年 3 個地震在週其 1 秒至 10 秒的速度反應譜(velocity response spectra, Sv)。圖八顯示 1935 年 4 月 21 日 06:02 主震水平向的速度反應譜，東西向與南北向在阻尼值為 0.1%之最大 SV 分別為 42.6 kine, T=1.8 sec 與 24.8 kine, T=1.2 sec；當阻尼值為 2.0%時之最大 SV 分別為 30.7 kine, T=1.4 sec 與 21.2 kine, T=1.3 sec。

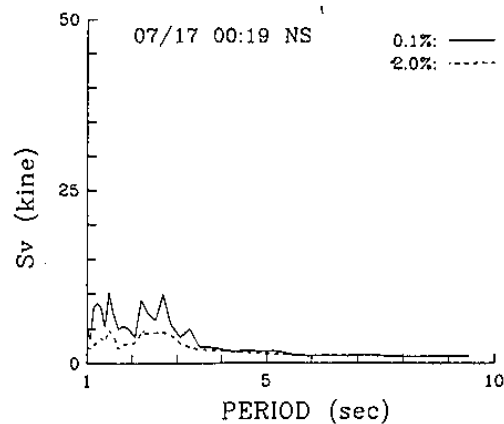
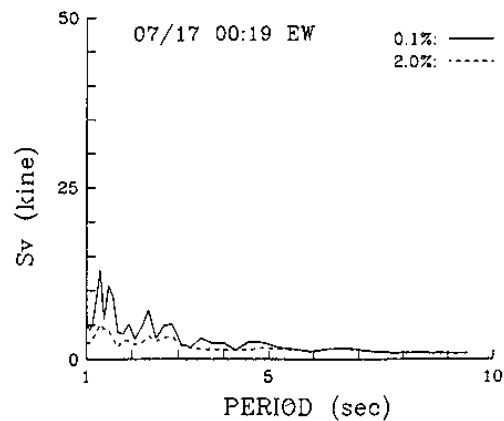


圖八、1935 年 4 月 21 日 06:02 主震之速度反應譜。



圖九、1935 年 4 月 21 日 06:26 餘震之速度反應譜。

圖九為 1935 年 4 月 21 日 06:26 餘震水平向的速度反應譜，東西向與南北向在阻尼值為 0.1%之最大 SV 分別為 28.5 kine, T=1.1 sec 與 25.2 kine, T=1.7 sec；當阻尼值為 2.0%時之最大 SV 分別為 28.5 kine, T=1.1 sec 與 14.1 kine, T=1.1 sec。圖十為 1935 年 7 月 17 日 00:19 後龍溪口地震水平向的速度反應譜，東西向與南北向在阻尼值為 0.1%之最大 SV 分別為 13.0 kine, T=1.3 sec 與 10.4 kine, T=1.5 sec；當阻尼值為 2.0%時之最大 SV 分別為 13.0 kine, T=1.3 sec 與 8.2 kine, T=1.3 sec。



圖十、1935 年 7 月 17 日 00:19 後龍溪口地震之速度反應譜。

誌謝

本研究由中央氣象局(計劃編號:CWB86-2E-06)與中央研究院地球科學研究所資助,中央研究院地球科學研究所黃文紀先生,在資料處理過程給予的協助,特此誌謝。

參考文獻

- 1 中央氣象台,1944:地震觀測法,第四版,東京,145頁(日文)
- 2 台北測候所,1936:昭和10年4月21日新竹-台中烈震報告,台北,160頁(日文)
- 3 台灣總督府氣象台,1942:昭和10年4月21日嘉義地方烈震報告,台北市,227頁(日文)
- 4 李白華,1979:"地震測報手冊",中央氣象局,台北,190頁
- 5 徐明同,1979:"地震學",黎明文化事業公司,台北,388頁
- 6 林燈河,1987:"1935年新竹-台中烈震的震源機制",國立中央大學地球物理研究所碩士論文,88頁
- 7 葉永田、鄭世楠、林燈河,1996:"歷史地震之強震記錄",台灣地區強地動觀測計畫研討會(二)論文摘要,台北,5月,39-43
- 8 Inoue, R. and T. Matsumoto, 1988:"Digitization and processing of the J.M.A. strong motion records in the period of 2 to 20 sec from none great earthquakes", in *Historical Seismograms and Earthquakes of the World*, edit by W.H.K. Lee, H. Meyers and K. Shimazaki, 390-400
- 9 Nigam, N.C. and P.C. Jennings, 1968:"Digital calculation of response spectra from strong-motion earthquake records", *Earthquake Research Laboratory, EERL 68-77*. California Institute of Technology, Pasadena.
- 10 Scherbaun, F. and J. Johnson, 1992: "Programmable Interactive Toolbox for seismological analysis", IASPEI software library volum 5, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, 269pp.

Analysis of the Strong Motion Records in Taipei from Historical Earthquakes

Yeh, Y. T, S. N. Cheng, K. L. Wen, P. L. Lu and C. H. Jiang
Institute of Earth Science Seismology Center
Academia Sinica Central Weather Bureau

Abstract

3 seismograms (including 9 components) from 3 historical earthquakes ($M_L = 6.0$ to 7.1) of 1935 in Taiwan recorded by the CWB low-magnification seismograph within an epicentral distance of 110 km were digitized and analysed. The digitized data were corrected for instrument characteristics, and the high and low frequency noise in the data was removed by applying a bandpass filter (the upper cutoff period is 10 sec, and the lower is 1 sec). Time history of corrected ground motions were obtained. Maximum ground displacement, velocity and acceleration are about 1.94 cm, 4.08 kine and 16.2 gal, respectively. Velocity response spectra, S_v , for the period range of 1 to 10 sec with damping factors, h , of 0.1% and 2% were computed. Maximum value of S_v with $h=0.1\%$ is about 42.6 kine.