

使用地震引致之地下水位異常變化推估應力異常區

王士榮¹ 徐國錦¹ 王建力¹ 賴文基^{1,2} 李友平³

¹國立成功大學資源工程學系

²國立成功大學防災研究中心

³經濟部水利署第一河川局

摘要

地震之發源區經常為大地應力異常區域。根據孔彈性理論，應力與地下水位為耦合之關係，本研究應用點源施力之孔彈性解析解，由地震引致地下水位之異常變化來推估可能之地層應力集中區。經由地震引致地下水位變化之分類後，採用躍變類型之異常水位變化，建立其與地震規模之變化關係。研究台灣地區之地震案例結果發現，由水位變化可偵測之應力異常距離隨地震規模之增加有快速增加之趨勢，其可偵測之最大震央距離小於 250 公里，可偵測之最小地震規模為 5.0。其後使用點源施力模式之半經驗式與全經驗式，建立台灣地區地震規模、震央距離與水位異常躍變變化之關係。並於有限水位資料中，應用交叉疊合原理於兩場地震案例尋找應力異常區。結果顯示，地下水位異常變化可作為應力異常區之推估，而應力異常區可用於解釋震央之可能位置。

關鍵詞：孔彈性理論，地震，地下水位，震央，應力集中區

一、前言

地震引致之地下水位變化在國內與國外均已經被觀測與研究多年，其多為同震之水位反應，包含了振盪（oscillation）與躍變（step）之反應。前者被認為是受到震波的影響，產生與地震波相似的振盪現象，後者則被認為由應力造成之體積應變（volume strain）有關；另外有少部分觀測發現到前兆（precursor）現象，在地震發生前的數分鐘到數天有明顯的地下水位變化現象產生（Roeloffs, 1996），因此地下水位變化之分析為地震研究之重要一支。地下水位之變化可間接反應地殼之應變，其設置較一般應變計更為容易與經濟（李民，2002），其並可配合電離層觀測與水氫、水化學資料進行總體地震判釋。地震引致地下水文異常變化研究

中，最早是由 Blanchard and Byerly 在 1935 年以浮筒方式發現地下水位在地震時之震盪現象，然而在地震引致地下水位變化之機制解釋部分，目前並沒有一個明確的定論，其中 Biot 在 1941 年提出之孔彈性理論（poroelastic theory），是目前用來探討地震引致地下水位變化的理論之一（Roeloffs, 1996），其可用來解釋應力與超額孔隙水壓間耦合之關係。孔彈性理論已廣泛應用於土壤力學、水文地質與地球科學領域中，其假設土體受到應力作用使土壤顆粒與孔隙水產生交互之作用，造成土體之伸張或壓縮與孔隙水壓之變化。

地震發生區與應力異常集中區密切相關，牛安福（2000）使用大陸地區的地殼變形突變性觀測資料，分析並估算不同測站對應之可能震央距離，進而以交叉疊合方式推估震央位

置。本文則藉由大地應力與水體兩者間的耦合作用，由觀測到之水位變化來推估可能應力的來源，並經由交叉疊合方式找出可能之應力集中區。本研究首先收集並整理水利署為偵測地震引致地下水位異常變化所新設置之 8 個觀測井 2 分鐘水位觀測資料（經濟部水利署，2005），其包含 2003 年至 2004 年合計 21 場引致水位異常反應之台灣地區地震。並將地震引致地下水位之變化進行分類，選定由應變機制為主之躍變類型水位變化進行分析，探討不同地震規模可偵測之最大震央距離並與文獻做比較。之後以假設之水文地質與地工參數建立地震規模與點源施力間之關係，作為使用地下水位變化推估不同地震規模對應之震央距離的基礎，最後將模式應用於兩場地震案例。

二、點源作用力解析解

孔彈性力學已發展相當成熟（Roeloffs, 1996），呂志宗（1991）考慮無限域之飽和多孔介質，假設介質為均質等向性土體，受到三個沿座標軸之集中力（ F_r 、 F_θ 與 F_z ）作用，且有 Q 體積的孔隙水於時間 $t=0$ 之瞬間注入。當 $t>0$ 時，集中力仍持續作用於介質上。若以介質位移 u_r 、 u_θ 、 u_z 及超額孔隙水壓力 P 為基本變數，並將座標原點置於點源上，則孔彈性理論之基本控制方程式可以圓柱座標表示為

$$G\nabla^2 u_r + G(2\eta-1)\frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \frac{G}{r}\left(2\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}\right) - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{F_r}{r}\delta(r)\delta(\theta)\delta(z)H(t) = 0 \quad (1)$$

$$G\nabla^2 u_\theta + G(2\eta-1)\frac{1}{r}\frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} + \frac{G}{r}\left(2\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}\right) - \frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{F_\theta}{r}\delta(r)\delta(\theta)\delta(z)H(t) = 0 \quad (2)$$

$$G\nabla^2 u_z + G(2\eta-1)\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{F_z}{r}\delta(r)\delta(\theta)\delta(z)H(t) = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{K}{\gamma_w}\nabla^2 P + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + n\beta_f\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{Q}{r}\delta(r)\delta(\theta)\delta(z)\delta(t) = 0 \quad (4)$$

其中 r 為水平向距原點距離， z 為點源深度， t 為時間， ε 為體積應變（volume strain, $\varepsilon = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$ ）， G 為剪力模數（shear modulus）， $\eta = (1-\nu)/(1-2\nu)$ ， ν 為泊松比（Poisson ratio）， K 為水力傳導係數（hydraulic conductivity）， γ_w 為水的比重

（specific weight of water）， n 為孔隙率（porosity）， β_f 為水的壓縮係數（water compressibility）， δ 為 Dirac-delta 函數， H 為 Heaviside step 函數。忽略抽注水作用（ $Q=0$ ）與切向力 F_θ ，並假設水平與垂直方向均勻施力（ $F_r = F_z = F$ ），令 $D' = R^2/4Dt$ ， D 為水力擴散係數（hydraulic diffusivity）， $C_0 = 1/8\pi G\eta S_s$ ， S_s 為比儲水率（specific storage, $S_s = K/D$ ），簡化後可得到點源施力（ F ）對不同位置造成之水位變化（ Δh ）關係式為

$$\Delta h = \frac{P}{\gamma_w} = \frac{C_0 F (r+z)}{R^2} \left[\text{erf}\left(D'^{\frac{1}{2}}\right) - \left(\frac{4D'}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \exp(-D') \right] \quad (5)$$

其中 R 為點源與觀測點距離（ $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ ）。若考量平面二維模式，令 z 方向之作用為零（ $z = u_z = F_z = 0$ ），可得解為

$$\Delta h = \frac{C_0 F}{r^2} \left[\text{erf}\left(\bar{D}^{\frac{1}{2}}\right) - \left(\frac{4\bar{D}}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \exp(-\bar{D}) \right] \quad (6)$$

其中 $\bar{D} = r^2/4Dt$ 。(5)(6) 式中括號內代表施一固定點源力 F 時，隨著時間的增加逐漸排除的超額孔隙水壓對應之水位變化，而括號外的係數部分則表示時間為零時之水位躍變量。

三、地下水位變化分類

地震引致之地下水位變化含有多種形式與資訊，但並非所有水位變化型式均可用於應力異常區之推估，如躍變類型屬於區域性塊體變形，故可偵測距離有限，而振盪類型由波動傳遞所引致，只要震波能量夠大，距離數千公里仍可觀測到振盪異常，如南亞地震，距台灣超過三千公里仍然可以觀測到地下水位異常振盪（經濟部水利署，2005）。本研究提出一套地震引致地下水位異常變化之分類模式，作為研究所須選用資料之基礎。異常水位發生時段狀態，依據水位異常變化點與地震發生點之時間差，定義地下水位異常變化之震前（pre-seismic）、同震（co-seismic）與震後（post-seismic）現象，分別以水位地震時態之前二字母為標示代表，若地震發生前發生異常標示為 pr、地震發生後標示為 po，地震發生同

時則標示為 co，記錄水位異常變化是否含有前兆反應。同震狀態採用振盪（Oscillation, O）與躍變（Step, S）來記錄地下水位異常反應之兩個主要型態，其中躍變類型水位變化為岩體形變所造成，而振盪類型水位變化則由震波傳遞所引起。震後狀態則採用消退（Decay, D）與位態（Position, P）來描述，其中水位消退曲線可提供現地水文地質參數推求之資訊，位態則表示了含水層在地震後受到壓應力水位上升或張應力水位下降之狀態。振盪、躍變與消退現象觀測到之上下反應方向，及異常變化後相對於反應前之位態改變狀況，使用小寫英文字母描述。若由原水位向上反應標記為 u（up），若由原水位向下反應標記為 d（down），若水位無反應或回復到原水位則以 o（none）來表示。

以下舉四個地震引致地下水位變化的例子作說明，並整理記錄成表 1。圖 1 為 2004 年 5 月 19 日芮氏地震規模 6.5 之地震，其水位異常變化與地震發生同時標示 co；其水位變化為向上之振盪，標示為 Ou；其亦顯示向上之躍變，標示為 Su；但不見其有消退現象，標示為 Do；且異常反應後高於原始水位，標示為 Pu；因此其記錄寫為 OuSuDoPu+co。圖 2 為 2004 年 5 月 19 日芮氏地震規模 6.5 之地震，其水位異常變化與地震發生同時，標示 co；其水位為向下振盪，標示為 Od；無躍變反應，標示為 So；

亦無消退現象，標示為 Do；異常反應後水位回到原始水位，標示為 Po，因此其記錄寫為 OdSoDoPo+co。圖 3 為 2004 年 5 月 19 日芮氏地震規模 6.5 之地震，其水位異常變化與地震發生同時標示為 co；其水位無振盪，標示為 Oo；無消退現象，標示為 Do；水位向上躍變，標示 Su；異常反應後高於原始水位，標示為 Pu，因此記錄為 OoSuDoPu+co。圖 4 為 2004 年 10 月 15 日芮氏地震規模 7.0 之地震，其水位異常變化與地震發生同時，標示為 co；水位為向上振盪，標示為 Ou；向下躍變，標示為 Sd；其有向下之消退現象，標示為 Dd；異常反應後低於原始水位，標示為 Pd，因此記錄為 OuSdDdPd+co。

此系統記錄了振盪與躍變兩大異常變化之型態，且描述了震後消退曲線與含水層受到應力之狀態，提供現地水文地質參數資訊，並將地震與地下水位反應之時間差異做記錄，了解是否有地震前兆現象。因此，經由分類記錄下之水位變化，描述了原始異常水位變化之物理狀態，且由表中（如表 1）可清楚知道不同地震案例對不同觀測井所造成之異常反應型態，方便相關研究選用所需之資料型態作後續研究與分析。如本研究欲選用應變引致之躍變類型異常地下水位資料，僅需選取資料記錄中含有 S 項目且有 u 或 d 的記錄。

表 1 地震引致地下水位異常變化之分類記錄案例

Table 1. The record example of categories of groundwater level anomaly triggered by earthquake.

測站	時間差(T)	振盪(O)	躍變(S)	消退(D)	位態(P)
東和	co	u	u	o	u
新埔	co	d	o	o	o
銅鑼	co	o	u	o	u
壯圍	co	u	d	d	d

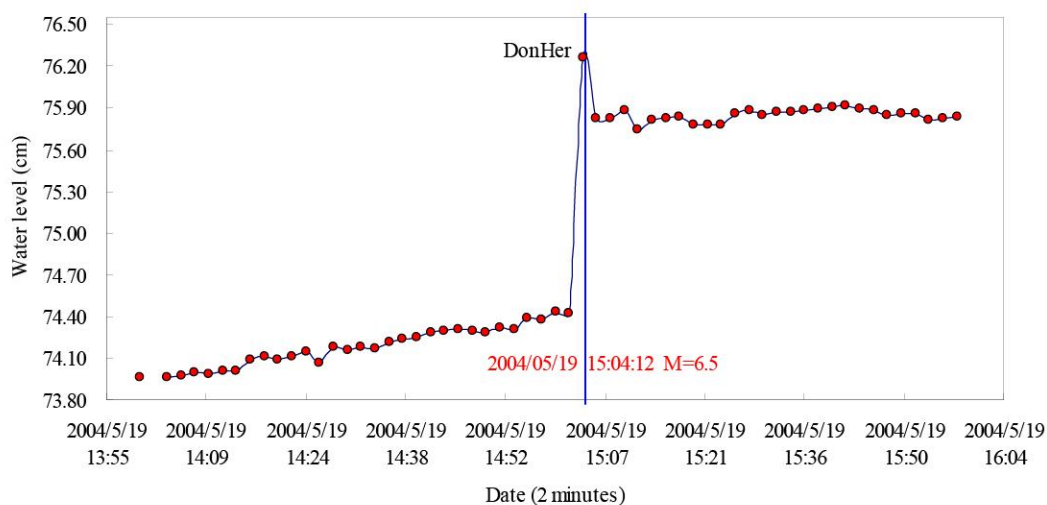


圖 1 水位異常變化與地震發生同時，有向上之振盪與向上之躍變但無消退現象且異常反應後高於原始水位，記錄為：OuSuDoPu+co

Figure 1. Co-seismic anomaly with upward oscillation and step but no decay phenomenon, and after response the water level higher than original situation record of OuSuDoPu+co

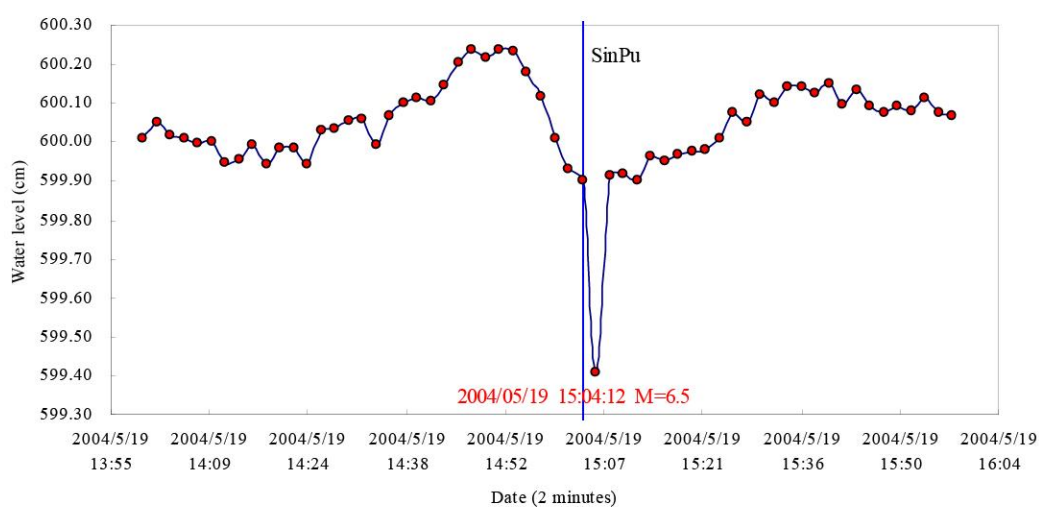


圖 2 水位異常變化與地震發生同時，有向下振盪但無躍變與消退現象且異常反應後回到原始水位，記錄為 OdSoDoPo+co

Figure 2. Co-seismic anomaly with downward oscillation but no step and decay phenomena, and after response the water level returns to original situation record of OdSoDoPo+co

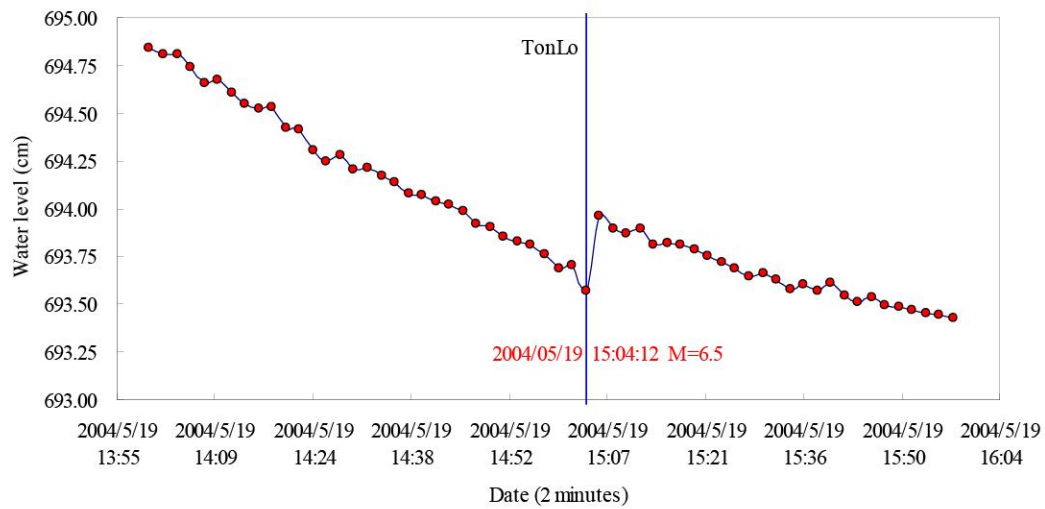


圖 3 水位異常變化與地震發生同時，無振盪與消退現象但有向上躍變且異常反應後高於原始水位，記錄為 OoSuDoPu+co

Figure 3. Co-seismic anomaly with no oscillation and decay phenomena but upward step, and after response the water level higher than original situation record of OoSuDoPu+co

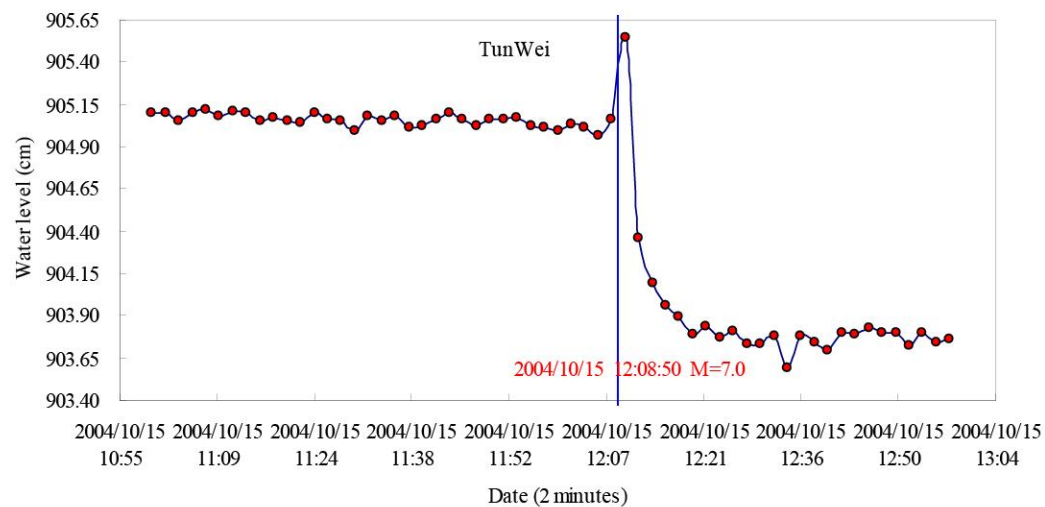


圖 4 水位異常變化與地震發生同時，有向上振盪並向下躍變，有向下之消退現象且異常反應後低於原始水位，記錄為 OuSdDdPd+co

Figure 4. Co-seismic anomaly with upward oscillation but downward step and decay phenomena, and after response the water level lower than original situation record of OuSdDdPd+co

四、地震地下水位觀測井

成功大學防災研究中心執行經濟部水資源局「地震發生前後地下水水位異常變化之研究」，針對地震引致地下水位異常變化之目標，由台灣地區地下水觀測網中現有之 465 口井，經由地質構造、抽水影響、降雨影響、氣壓反應、地潮反應與地震反應等評估中，選出 18 口具有進行地震地下水觀測潛力的井位，分年設置取樣頻率 2 分鐘，觀測精度 2 公厘之高精度水位計，其分佈如圖 5 所示。

本研究收集並整理水利署提供之高精度地下水位觀測資料，但其中因遷站與分年設置井

位之關係，導致各井之資料長短不一。本研究選用資料為 2003 至 2004 年建置完成之 8 口井位資料，分別為六甲(LiuJar)、那菝(NaBa)、東和(DonHer)、新埔(SinPu)、花蓮(HuaLien)、壯圍(TunWei)、銅鑼(TonLo)與河東(HerDon)。由前述地震引致地下水位變化之分類方法，共收集 21 場引起地下水位異常變化之台灣地區地震案例如表 2 所示，其中 O 表該井位在該場地震中偵測到振盪類型水位變化，S 則表偵測到躍變變化，而測站與震央之分佈如圖 6 所示。其中僅有 2003/04/03 之地震事件為西部地震帶（Tsai et al., 1977）發生之地震，其餘皆為東部與東北部地震帶發生之地震。

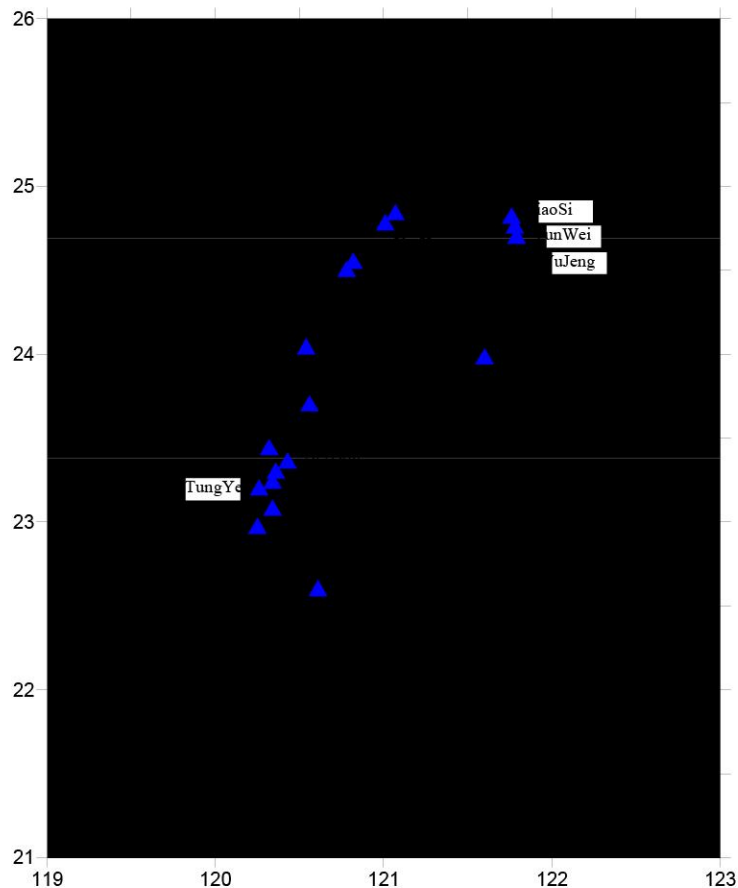


圖 5 地震地下水觀測站井位建置位置圖

Figure 5. The distribution of earthquake-groundwater observation wells.

表 2 本研究所使用之地震事件與水位反應

Table 2. Earthquake events used in this research and the groundwater level responses.

地震時間	規模	深度 (km)	震央座標		震央距離 km (水位反應)							
			經度	緯度	六甲	那菽	東和	新埔	花蓮	壯圍	銅鑼	河東
2003/04/03 14:59:33.7	5.0	14.5	120.5	23.2	17(S)	18(S)	60	195	—	—	—	—
2003/06/09 09:52:52.6	6.3	21.3	122.0	24.4	212(O)	223	165(O)	104(S)	—	—	—	—
2003/06/10 16:40:32.7	6.5	27.6	121.7	23.5	140(S)	145(S)	115(OS)	157(O)	—	—	—	—
2003/06/17 02:33:39.9	5.9	18.8	121.6	23.6	135	141(O)	108	151	—	—	—	—
2003/12/10 12:38:15.2	6.6	10.0	121.3	23.1	103(S)	102	103(OS)	194(O)	—	—	—	—
2003/12/11 08:01:49.8	5.7	12.6	121.4	22.8	121	115(O)	133	230	—	—	—	—
2004/01/01 11:15:18.5	5.9	17.8	121.6	23.4	132	135	113	170	66(O)	152(O)	150	122(O)
2004/01/06 08:55:33.5	4.6	54.9	121.7	24.6	199	213	148	68	64	24(O)	90	184
2004/01/13 17:29:00.8	5.0	19.8	121.8	24.0	172	182	131	117	20(S)	82	116	158
2004/02/04 11:24:00.5	6.0	4.1	122.1	23.4	177	181	155	184	75(O)	147(O)	175(O)	167(O)
2004/02/09 15:13:49.6	4.3	37.8	121.7	24.1	162	173	119	105	10(O)	78	102	148
2004/04/20 01:51:24.7	5.1	43.4	121.4	22.8	115	109	128	226	131(O)	218(O)	196	113(O)
2004/04/24 23:20:31.2	5.3	20.7	121.5	24.0	141	152	98	106	13	93	93(O)	126
2004/05/01 15:56:13.3	5.8	17.8	121.5	24.1	153	164(O)	107	95	15(S)	78(S)	88(O)	138
2004/05/08 16:02:48.4	5.7	6.2	121.5	22.0	183	171	214	321	223(O)	310	289(O)	188
2004/05/16 14:04:08.3	6.0	12.5	122.0	23.1	169	169	160	214(O)	106(O)	185	198	162
2004/05/19 15:04:12.0	6.5	8.7	121.4	22.7	122	115(O)	138(OS)	238(O)	143(O)	230(OS)	208(S)	122(S)
2004/07/06 15:32:03.3	5.8	9.8	122.2	24.9	267	279	216	116	121	48(S)	153	251
2004/10/15 12:08:50.2	7.0	58.8	122.9	24.4	292(O)	300(O)	—	192(O)	141(O)	121(OS)	216(O)	278(O)
2004/11/08 23:54:58.8	6.7	10.0	122.6	23.9	237(O)	243(O)	—	—	97(O)	124(OS)	192(O)	224(O)
2004/11/11 10:16:44.4	6.0	13.9	122.2	24.3	224(O)	235	180	—	71(O)	62(S)	144	210

*「—」表該井位無資料

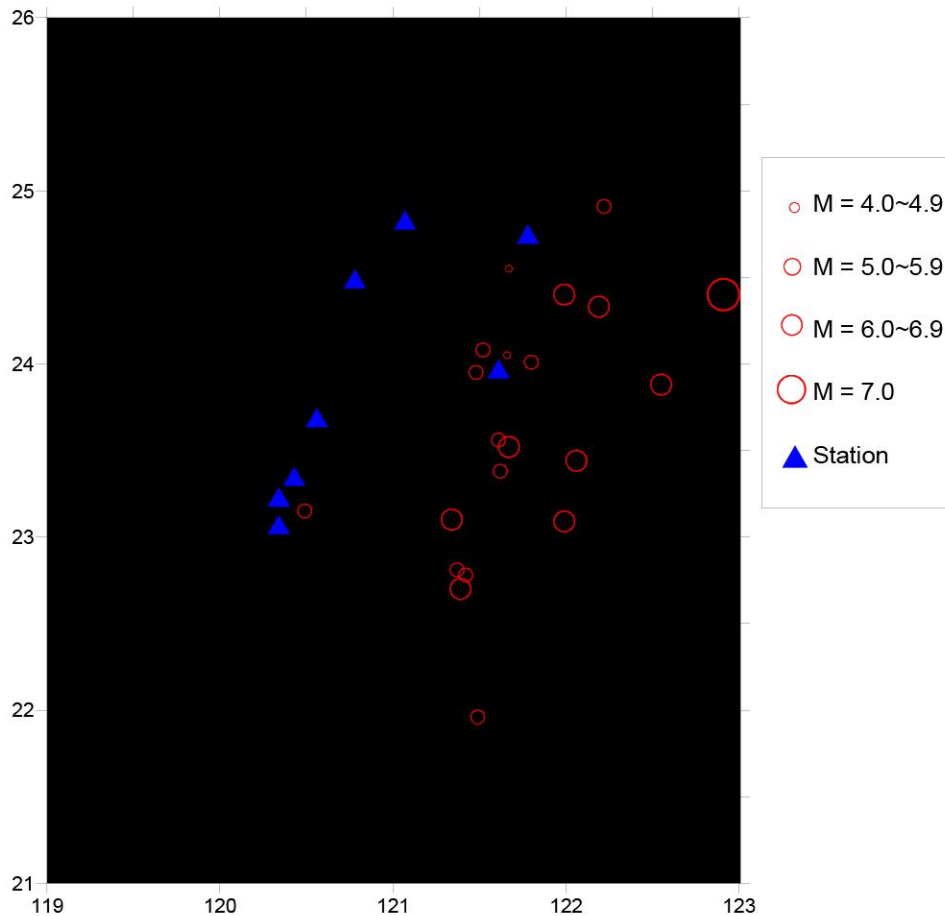


圖 6 地震事件與測站分布圖

Figure 6. Distributions of 21 earthquake events and 8 observation wells.

五、結果與討論

本研究先將所有地下水位觀測資料配合成功大學防災研究中心所發佈之異常通報單，進行水位歷線之繪圖、判讀與記錄。將異常水位分為躍變與振盪二大類，其中躍變類型水位變化之機制主要為岩體變形所造成，而振盪類型水位變化主要由震波傳遞所引起，兩者對土體之作用在微小應變假設下皆可使用孔彈性理論描述。由於實際取樣時間非連續，無法得知振盪類型水位變化之真正振盪量之大小，且本研究主要以岩體變形機制引致之水位變化為研究對象，故以躍變類型水位變化為模式建構之依據。表 3 為 2003~2004 年間，8 個測站分別偵

測到此兩種類別之次數統計與躍變次數排名，由表中可知，壯圍站對躍變類型之水位異常偵測能力較好，而花蓮站則對振盪類型有較佳偵測能力。

（一）應力異常區距離之偵測

圖 7 與圖 8 分別為躍變類型與振盪類型之異常水位變化事件，各測站在每場地震事件中所偵測到最大震央與震源距離對地震規模之關係，縱軸之距離採用對數表示。兩圖均顯示，可偵測最大震央與震源距離隨地震規模之增加有快速增加之趨勢。由搜集之地震地下水位案例資料可知，躍變類型水位變化可偵測之最大震央與震源距離皆小於 250 公里，且可偵測最小地震規模為 5.0；而振盪類型可偵測最大距離

約 300 公里，最小地震規模為 4.3。若資料持續收集與分析，可偵測之地震規模與距離將有可能降低。為探討水位變化與地震規模之關係，分別對躍變及振盪類型水位變化與地震規模做迴歸，以躍變類型水位變化所得之迴歸結果較佳，再以震央距離及震源距離對地震規模迴歸，得到關係式如下

$$d = 0.090 \times 10^{0.4785M} \quad (7)$$

$$D = 0.212 \times 10^{0.4226M} \quad (8)$$

其中 M 為芮氏地震規模， d 為可偵測之最大震央距離 (km)， D 為可偵測之最大震源距離 (km)。牛安福 (2000) 曾迴歸統計大陸地區之地震，得到突變性前兆之有效最大震央距離約為 200 公里，而 Dobrovosky et al. (1979) 則提出地震規模 (M) 與造成 10^{-8} 體積應變量之最大半徑 (d, km) 經驗式

$$d = 10^{0.43M} \quad (9)$$

若以規模 7.0 地震使用躍變類型之震央距離迴歸式 (7) 計算，本島躍變類型之水位變化最大偵測距離約 200 公里，與牛安福 (2000) 結果

表 3 各測站對選用地震事件偵測躍變與振盪兩類型之次數統計

Table 3. The frequency of oscillation and step types of choice earthquake events of each observation well.

測站	振盪	躍變	總計
壯圍	7	6	13
六甲	4	3	7
東和	4	3	7
花蓮	10	2	12
那菽	6	2	8
銅鑼	6	1	7
河東	5	1	6
新埔	5	1	6
總計	47	19	66

相近，但遠低於式 (9) 計算所得約 1000 公里之值，由此推測可偵測之躍變類型水位變化，其對應之應變量大於 10^{-8} 。唯本研究之案例受限於測站數少且彼此距離遠；且觀測時間尚短偵測到之地震事件不多；而各測站因地質條件不同對異常之偵測能力不同會有所差異，即在可偵測距離內之測站不一定能偵測到異常事件。

(二) 地震規模與點源施力之關係

由於地震規模無法於孔彈性模式中使用，必須給予地震規模一個明確之力源大小，故本研究由收集之地震案例建構出地震規模與點源力之關係，輸入參數考量台灣全島之平均狀況以砂岩為代表如表 4。圖 9 與圖 10 分別為採用三維 (式 5) 與平面二維模式 (式 6) 計算地震規模與力源大小之結果，圖上實心圓點為每個測站觀測到之異常事件，實心三角形表同一場地震事件所有測站的幾何平均值。由圖中可知，點源施力隨著地震規模之增加成指數性增加，其中又以平面二維模式之擬合結果較好，可能原因為本研究所蒐集之地震案例皆為淺層地震且地殼為薄形幾何之緣故。若採用二維模式，每場地震事件之平均值擬合線可寫為

$$F = 126590 \times 10^{1.2477M} \quad (10)$$

其中 F 為點源力 (N)， M 為芮氏地震規模。

表 4 輸入模式之參數設定值

Table 4. The input parameters used in our model.

參數	輸入值	單位
楊氏模數	1.00×10^8	N/m ²
泊松比	0.25	none
孔隙率	0.375	none
水的壓縮係數	4.40×10^{-10}	m ² /N
水的比重	9810	N/m ³
水力傳導係數	1.00×10^{-4}	m/s

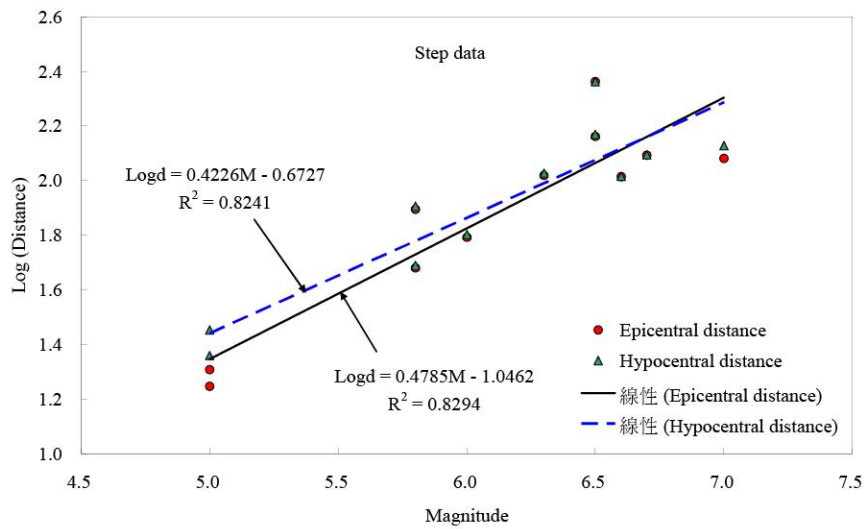


圖 7 各測站所能偵測到躍變型式之異常事件最大震央、震源距離與地震規模之關係（台灣地區地震）

Figure 7. The relationship between maximum epicentral and hypocentral distances and earthquake magnitude of step type anomaly observed in Taiwan

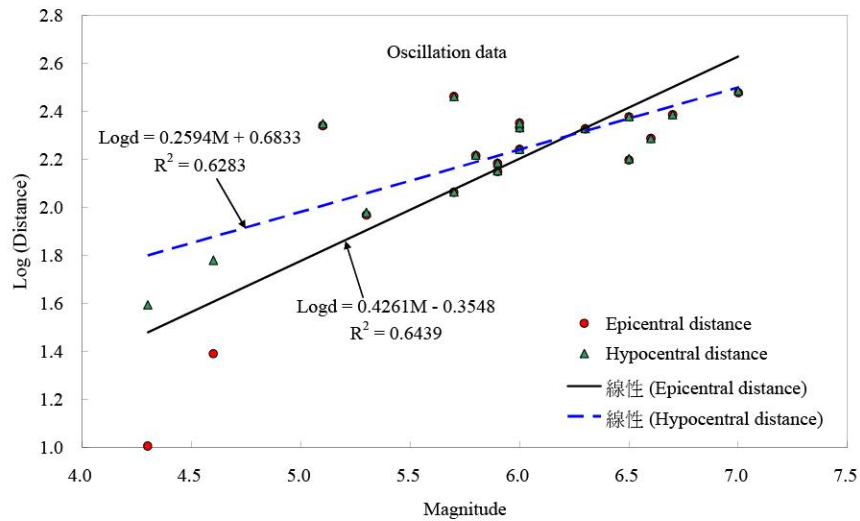


圖 8 各測站所能偵測到振盪型式之異常事件最大震央、震源距離與地震規模之關係（台灣地區地震）

Figure 8. The relationship between maximum epicentral and hypocentral distances and earthquake magnitude of oscillation type anomaly observed in Taiwan

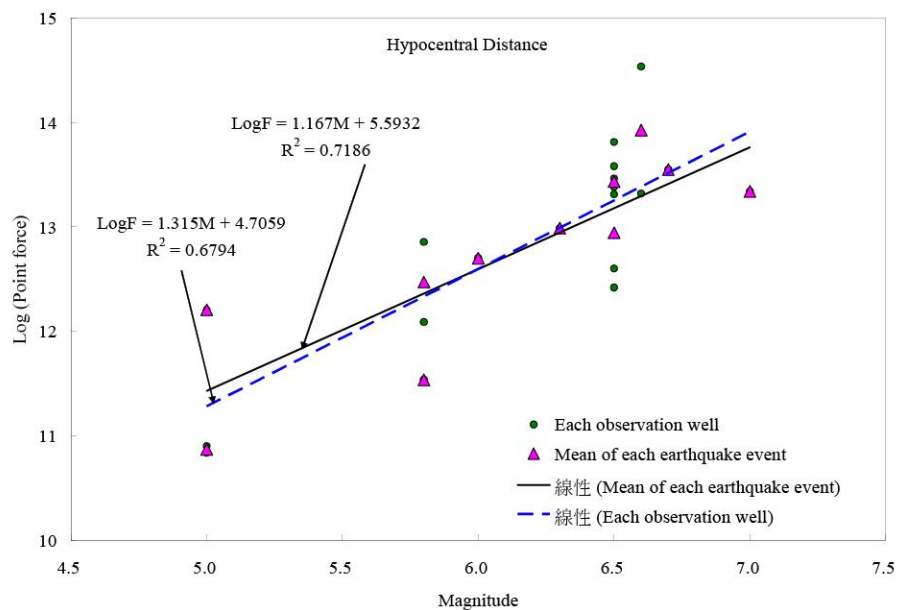


圖 9 三維模式計算所得之點源力與地震規模之關係

Figure 9. The relationship between point force and earthquake magnitude under three-dimensional model.

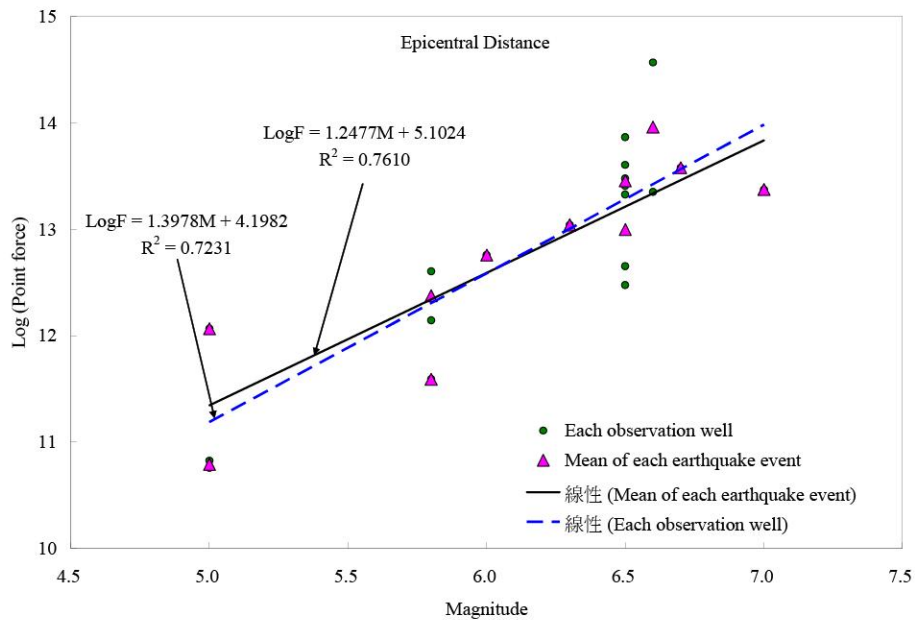


圖 10 平面二維模式計算所得之點源力與地震規模之關係

Figure 10. The relationship between point force and earthquake magnitude under two-dimensional model.

(三) 應力異常區估算

異常區估算採用交叉疊合原理(牛安福, 2000), 但不同於文獻以純統計方式估算震央距離, 本文使用孔彈性理論模式並採用地下水位變化為基礎, 以地下水位測站為圓心, 模式估算所得之力源距離為半徑畫圓, 若有三個以上測站觀測到躍變類型水位變化, 則理論上三圓可交叉疊合出一確切點或 2 個以上二圓交叉點之區域, 其可用於定義可能之應力異常集中區。若只有兩個測站觀測到異常變化, 則無法判定應力來源方向, 可依據歷史資料或地殼應力狀況猜測一個較大之可能區域。

採用平面二維躍變模式, 由施力瞬間 ($t=0$) 之水位躍變量 Δh , 估算給定地震規模 M 對應之點源施力 F 下之力源距離 r , 可將式 (6) 與式 (10) 合併作整理, 得地震規模與水位躍變量對力源距離之半經驗關係式

$$\log(r) = -0.5 \log(\Delta h) + 0.62385M + 0.001503 \quad (11)$$

其中 r 與 Δh 單位皆為公尺。上式之係數亦可由所搜集資料直接迴歸求得全經驗式, 判定係數 (R-square) 為 0.843, 結果可表為

$$\log(r) = -0.1613 \log(\Delta h) + 0.5934M + 0.8960 \quad (12)$$

其中力源距離 r 在此同震央距離 d , 單位同樣皆為公尺。上二式可作為異常水位躍變量在特定地震規模下對力源距離之估算, 並將半經驗式 (11) 定義為模式一, 全經驗式 (12) 定義為模式二來作比較。

地震地下水水位記錄資料雖然不長, 但仍提供寶貴的資訊。因每場地震事件觀測到躍變類型水位變化之測站數不同, 本研究採用多個測站同時觀測到躍變類型水位變化的地震事件, 其為 2004/05/19 規模 6.5 的地震與模式建構所採用資料以外的 2005/04/30 規模 5.6 的地震, 來作為模式之應用與比較。其中後者因資料僅有半年且無三個以上之測站在同一場地震事件觀測到躍變類型水位變化, 因此僅有二個

測站可以使用。

假設躍變類型水位變化之資料成常態分佈, 採用統計學中之單尾經驗法以 50%、84% 與 95% 之力源距離涵蓋率來表示, 則各井位觀測到之躍變類型水位變化所估算之不同力源距離涵蓋率結果如表 5 所示, 其中模式二之估算結果較為接近實際震央距離, 而模式一之結果則較為保守。主要在於模式二以純統計方式估算模式之係數, 其中包含了模式參數的不確定性, 而模式一採用設定的參數值, 存在較大的參數不確定性, 然而在對異常應力區的推估方面, 以下之結果則顯示出不同的結論。

圖 11 與圖 12 分別顯示發生於 2005/04/30 地震規模 5.6 的地震, 使用模式一 (式 11) 與模式二 (式 12) 估測應力異常區之結果。因僅有兩個測站觀測到躍變類型水位變化, 採用 50%、84% 與 95% 之力源距離涵蓋率來表示可能之應力異常集中區 (圖上斜線區域)。模式一中, 花蓮站對力源距離之估算相當接近, 但壯圍站估算結果偏小, 若考慮變異性以 84% 力源距離涵蓋率來作計算, 可得 84% 應力異常估算區涵蓋震央位置。模式二中, 使用 95% 力源距離之涵蓋率仍然無法包含震央位置, 顯示模式二在此案例中估算結果不理想。

圖 13 與圖 14 為發生於 2004/05/19 規模 6.5 的地震在模式一中計算之結果, 分別以 50% 與 84% 之力源距離涵蓋率來作展示, 其中實心圓點代表各測站估算力源距離所得各圓之交點, 斜線部分則代表兩組交點所形成可能之應力異常集中區。圖 13 為 50% 力源距離涵蓋率估算結果, 兩組可能之應力異常集中區 (圖上斜線區域) 中, 上半部之區域呈長條狀分散而下半部之區域則較集中, 由交叉疊合原理可知, 應力集中區應位於各估算點所成圓形之交叉點較集中區域, 顯示下半部為較可能之應力異常集中區, 此估算區域接近震央位置。圖 14 為 84% 力源距離涵蓋率估算結果, 同樣原理判定下半部為較可能之應力異常集中區, 此區已涵蓋地

震之震央位置。圖 15 與圖 16 則分別表示發生於 2004/05/19 規模 6.5 的地震在模式二中以 50%與 84%力源距離涵蓋率計算之結果，兩圖均顯示可能之應力異常區位於台灣東南部外

海，估算結果雖然接近震央位置但可能之應力異常集中區仍然無法包含震央位置，唯交叉疊合所得之區域較模式一更集中。

表 5 躍變類型地下水位變化在不同之力源距離涵蓋率下估算結果

Table 5. The results of different confidences of source distance with step groundwater fluctuation.

地震時間	規模	站名	震央距離 (km)						
			實際距離	50%		84%		95%	
				模式一	模式二	模式一	模式二	模式一	模式二
2003/04/03 14:59:34	5.0	六甲	17.36	34.10	20.81	65.49	29.97	99.78	37.92
		那菝	17.63	32.03	20.40	61.52	29.37	93.73	37.16
2003/06/09 09:52:53	6.3	新埔	104.34	95.43	93.82	183.31	135.11	279.28	170.95
2003/06/10 16:40:33	6.5	六甲	139.53	65.78	99.68	126.35	143.55	192.50	181.63
		那菝	144.80	276.25	158.36	530.64	228.05	808.46	288.54
		東和	114.65	268.47	156.90	515.69	225.96	785.69	285.89
2003/12/10 12:38:15	6.6	六甲	103.10	25.02	79.88	48.06	115.03	73.22	145.54
		東和	102.79	101.14	125.34	194.28	180.51	296.00	228.39
2004/01/13 17:29:01	5.0	花蓮	20.26	8.82	13.45	16.94	19.38	25.81	24.52
2004/05/01 15:56:13	5.8	花蓮	14.52	10.71	29.50	20.57	42.48	31.34	53.75
		壯圍	78.39	98.16	60.28	188.56	86.81	287.28	109.84
2004/05/19 15:04:12	6.5	東和	138.39	88.24	109.59	169.50	157.82	258.24	199.68
		壯圍	230.07	169.62	135.30	325.81	194.85	496.39	246.53
		銅鑼	207.82	182.18	138.46	349.95	199.40	533.17	252.28
		河東	121.86	97.42	113.14	187.14	162.94	285.11	206.16
2004/07/06 15:32:03	5.8	壯圍	47.85	113.59	63.19	218.18	90.99	332.41	115.13
2004/10/15 12:08:50	7.0	壯圍	120.50	205.47	226.07	394.68	325.58	601.32	411.93
2004/11/08 23:54:59	6.7	壯圍	123.58	108.25	140.23	207.94	201.94	316.80	255.50
2004/11/11 10:16:44	6.0	壯圍	61.87	51.06	58.49	98.08	84.23	149.43	106.56

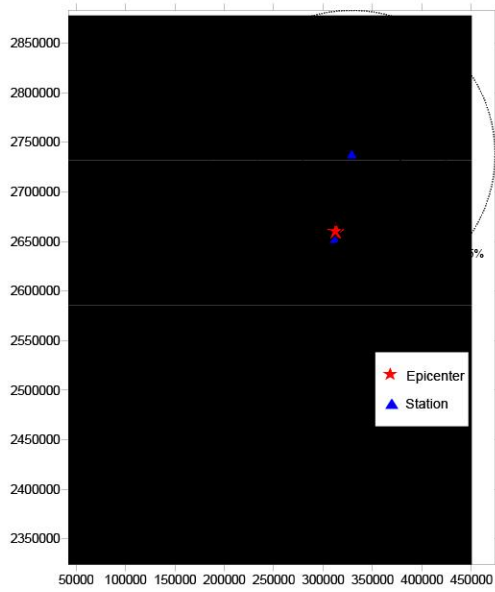


圖 11 發生於 2005/04/30 地震規模 5.6 之地震事件在模式一中之結果

Figure 11. The model one result of 5.6 magnitude earthquake triggered on April 30, 2005.

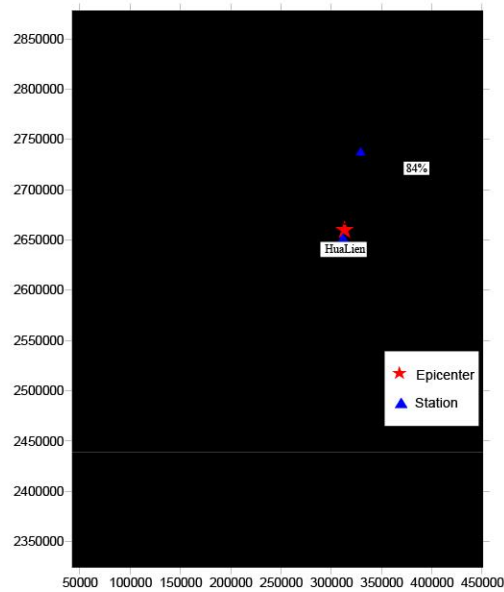


圖 12 發生於 2005/04/30 地震規模 5.6 之地震事件在模式二中之結果

Figure 12. The model two result of 5.6 magnitude earthquake triggered on April 30, 2005.

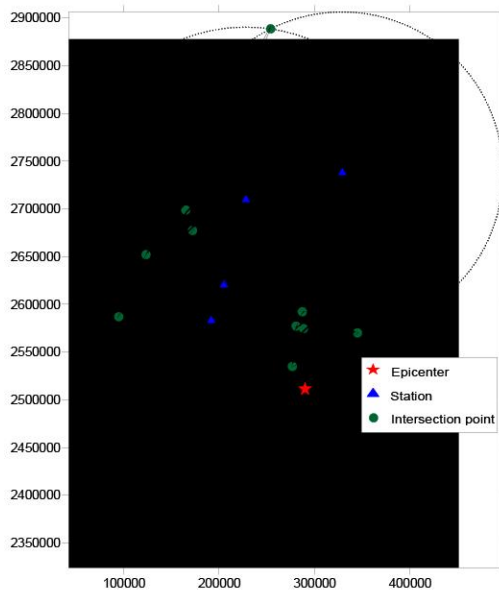


圖 13 發生於 2004/05/19 地震規模 6.5 之地震事件在模式一中 50%力源距離涵蓋率之結果

Figure 13. The model one result of 50% confidence of point force distance in 6.5 magnitude earthquake triggered on May 19, 2004.

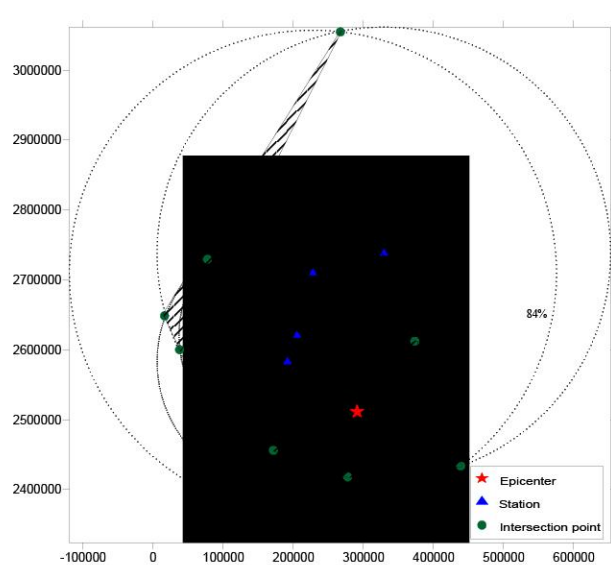


圖 14 發生於 2004/05/19 地震規模 6.5 之地震事件在模式一中 84%力源距離涵蓋率之結果

Figure 14. The model one result of 84% confidence of point force distance in 6.5 magnitude earthquake triggered on May 19, 2004.

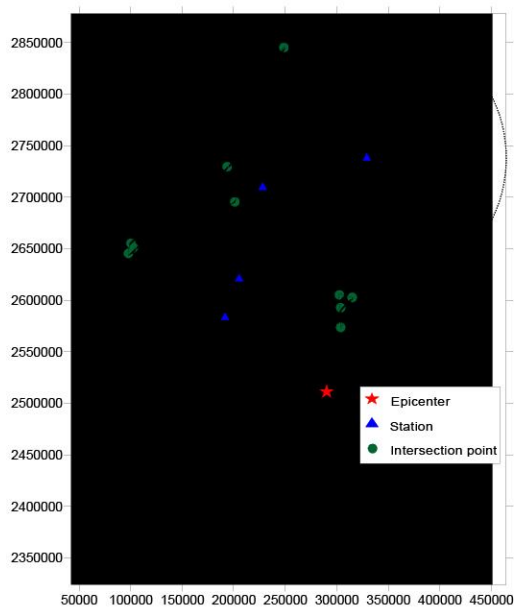


圖 15 發生於 2004/05/19 地震規模 6.5 之地震事件在模式二中 50%力源距離涵蓋率之結果

Figure 15. The model two result of 50% confidence of point force distance in 6.5 magnitude earthquake triggered on May 19, 2004.

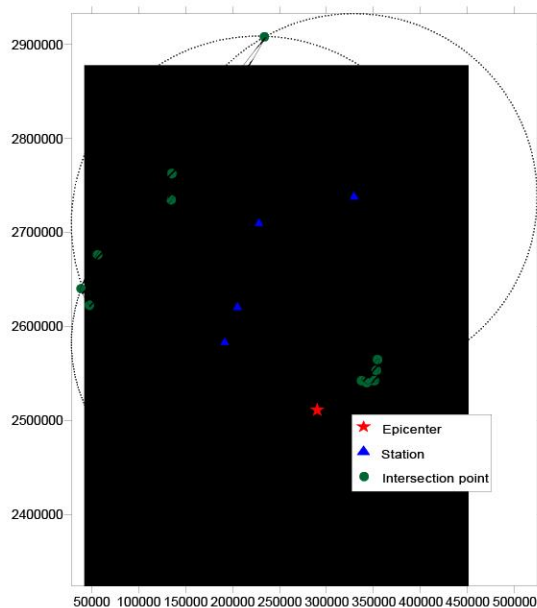


圖 16 發生於 2004/05/19 地震規模 6.5 之地震事件在模式二中 84%力源距離涵蓋率之結果

Figure 16. The model two result of 84% confidence of point force distance in 6.5 magnitude earthquake triggered on May 19, 2004.

六、結論

地下水位變化可做為地層應變之指標，本研究使用躍變類型之異常地下水位變化推估應力異常區，由本文之地震案例可知最大可偵測之震央距離小於 250 公里、最小可偵測地震規模為 5.0，且可偵測距離隨地震規模之增加成指數型增加。將地震規模以點源施力之形式作量化，建立地震規模與震央距離之關係，並由理論關係式獲得躍變類型之地下水位變化量、地震規模與震央距離之關係模式，進而以半經驗式與全經驗式來推估可能之異常應力集中區。兩模式應用於實際地震案例之結果顯示，半經驗模式對於應力異常區之估算較全經驗模式之結果為佳，其在 84%力源距離涵蓋率下之應力異常區估算結果皆能包含震央位置，唯估算區域之範圍較大，不如全經驗式之結果為佳。但

目前兩模式之建構所使用之地震案例絕大多數來自花東地區，對台灣全島之代表性有限，未來可多收集台灣地區之不同地震區，地震引致地下水位變化案例，並考量不同參數之變異性，應可獲得更可靠之結果。而水文地文參數在半經驗模式中採用均一值代表台灣全島，忽略不同地質狀況造成之影響，且不同測站所處之水文地文條件不同，對水位之反應也迥異，未來在給定相關參數部份，將是一大挑戰。

誌謝

感謝經濟部水利署提供地震地下水位資料與研究經費。

參考文獻

Biot, M. A. (1941): eneral theory of three-dimensional consolidation, Journal of

- Applied Physics, 12, 155-164.
- Blanchard, F. B., and P. Byerly (1935): study of a well gauge as a seismograph,? Bulletin of the Seismological Society of America, 25, 313-321.
- Dobrovolsky, I. P., S. I. Zubkov, and V. I. Miachkin (1979): estimation of the size of earthquake preparation zones,? Pure and Applied Geophysics, 117, 1025-1044.
- Roeloffs, E. A. (1996): poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena,? in Advances in Geophysics, edited by R. Dmowska, Academic, San Diego, Calif, 137, 135-195.
- Tsai, Y.-B., T.-L. Teng, J.-M. Chiu, and H.-L. Liu (1977): tectonic implications of the seismicity in the Taiwan region,? Memoir of the Geological Society of China, 2, 13- 40.
- 牛安福 (2000):「地殼變形的突變性與地震短期預報」,中國地震局地球物理研究所博士論文,大陸。
- 呂志宗 (1991):「多孔介質彈性力學之基本解與壓密沉陷解析」,國立成功大學土木工程學系博士論文,台南。
- 李民 (2002):「集集地震前後與其同震水文變化研究」,國立台灣大學地質科學研究所博士論文,台灣。
- 經濟部水利署 (2005):「地震發生前後地下水水位異常變化之研究 (5/5) 一期未成果報告書」。

Estimating the Anomalous Stress-source Area by Using Earthquake-triggered Groundwater Fluctuations

Shih-Jung Wang¹, Kuo-Chin Hsu¹, Chein-Lee Wang¹, Wen-Chi Lai^{1,2}, and Youe-Ping Lee³

¹Department of Resources Engineering, NCKU

²Disaster Prevention Research Center, NCKU

³Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs

ABSTRACT

Earthquakes are usually triggered in the stress-concentrated area. For explaining stress distribution, the poroelastic theory is one of the commonly used models. In this model, stress and pore pressure are coupled. We applied an analytical solution of point force based on poroelastic model for earthquake-triggered groundwater fluctuations to estimate the stress-concentrated area. A classification system of groundwater level anomalies is developed and step groundwater fluctuations are used for data analysis. The collected anomalous data shows that the detectable distance of groundwater level anomaly increases as the earthquake magnitude increases. The maximum detectable distance is about 250 km and the minimum detectable earthquake magnitude is about 5.0 based on the groundwater fluctuations. Semi-analytical and empirical models are also developed to construct the relations among earthquake magnitude, epicentral distance, and groundwater level anomaly. Using the principle of superposition, the stress-concentrated areas can be estimated from two earthquake events in Taiwan. The results show that earthquake-triggered groundwater fluctuations can be a potential tool to estimate the stress-concentrated area and may be used to indicate the possible area of an epicenter.

Key words: poroelasticity, earthquake, groundwater level, epicenter, stress-concentrated area