

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

斷層活動引發地下水位變化及大地應變之分析(II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2116-M-002-013-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學地質科學系暨研究所

計畫主持人：賈儀平

計畫參與人員：江藝萱、李在平、何哲豪、林耿億

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

斷層活動引發地下水位變化及大地應變之分析 (II)

Analysis of Groundwater Level Changes and Tectonic Strain Induced by Fault Movement (II)

計畫編號：NSC 93-2116-M-002-013

執行期限：93 年 08 月 01 日至 94 年 07 月 31 日

主持人：賈儀平 台灣大學地質科學系

研究人員：江藝萱、李在平、何哲豪、林耿億

一、中文摘要

斷層活動可能導致區域應力場的改變，附近地層架構勢必因而產生應變，地層之孔隙水壓亦將出現相應之變化，並可由附近井孔水位之升降予以印證。集集地震發生時，車籠埔斷層下盤地區 157 口觀測井曾出現明顯的同震地下水位變化，而且順著東西方向呈現規律之升降變化。為瞭解斷層活動引發地層中孔隙水壓及大地應變隨空間與時間的變化，本計畫將分析台灣西南地區在集集地震及其餘震期間地下水位在時空上的分佈狀況，並將探討斷層附近地層孔隙水壓與大地應力偶合作用，以提升吾人對車籠埔斷層逆衝活動導致同震孔隙水壓上升或下降及地層壓縮或伸張的機制與其瞬態變化過程之認知。目前研究成果指出，斷層附近地層孔隙水壓與大地應力偶合作用可依據土壤三維壓密理論來建立，持久性之同震地下水位變化可能與其剪應變相關，因此同一井站不同深度之同震水位變化幅度隨著含水層的物理特性而變。震波引發之動態應變可引發淺處地下水位之短期變化，但不易導致岩層中同震地下水位變化。同震水位變化之回復速率則由含水層的水文地質條件與抽水狀況主控。下盤之同震水位升降與斷層距相關，但是水位變化量則與震央距相關。未來將持續配合國際認知致力於同震地下水位變化及大地應變的研究。

關鍵詞：地震、地下水位、大地應變

Abstract

The pore water pressure and volumetric strain of geologic formation could be changed by tectonic stress redistribution resulting from fault movement. During the occurrence of Chi-Chi earthquake, 157 monitoring wells in the footwall of Chelungpu fault recorded water level changes, inspiring the study of relations between groundwater level changes and tectonic strain due to the fault movement. This project intends to establish a conceptual model, develop a mathematical model and a finite-element model to evaluate the transient processes of groundwater level changes and tectonic strain due to fault movement under various geologic conditions and physical parameters. The theoretical study results will be compared and validated by the observed spatial and temporal distribution of groundwater level changes and horizontal displacement induced by the Chi-Chi earthquake. Results of this study are anticipated to enhance our understanding of major factors controlling the coupled process of groundwater level changes and volumetric strain due to fault movement. Furthermore, the project will cooperate with the United States and France in the research of static and dynamic processes of coseismic groundwater level changes.

Keywords: earthquake, groundwater level, tectonic strain

二、計畫緣由與目的

地震發生時震源附近地區應力場的變化將導致地層之孔隙水壓產生變化，因此地震引發的地下水位變化向來是地震研究所關注的重點，並被考量為具有潛力的地震前兆之一。世界各地於強震發生時出現地下水位變化的報導屢見不鮮，然而區域性有系統、定量化、可供驗證的地震相關地下水位資料並不多見，因此至今既難確知地震前後地下水位及相應之地殼變形在時空上的變化關係，亦難確認何種形式的地下水位變化可能具有潛力作為地震預測的依據。

集集地震發生時，車籠埔斷層西側下盤地區觀測井出現從上升 8.4 公尺至下降 11.1 公尺之間的同震地下水位變化，其中水位下降之觀測井皆位於車籠埔斷層鄰近地點，而其他地區之地下水位多出現上升現象，同震地下水位變化沿著東西方向似呈現規律之形式。10 月 22 日發生之 $M_L 6.4$ 嘉義地震亦導致台灣西南地區多口監測井出現明顯的同震地下水位變化，此項訊息啟發了我們思考藉助這些觀測資料進一步瞭解台灣地區斷層活動、應力場變人與地下水位升降之間的關係。

監測記錄指出地震引發井孔中之地下水位變化通常會出現兩種同震變化：震盪性的變化和持續性的變化。震盪性的地下水位變化是觀測井內的水柱因應表面波的震動而呈現上下起伏的現象，震波通過後幾分鐘內，水位震盪幅度將迅速衰減，逐漸恢復至震前狀況，其振幅及持續時間與地震之規模及震源距離相關。靜態水位變化則多呈現較為持久性的階梯式變化。由於地震活動將導致斷層附近的大地應力重

新分佈，而地層應力場瞬間的改變勢必引發其孔隙水壓上升或下降。類似的人為活動，例如水力或核爆破裂試驗，亦可對周遭地層施加瞬間的壓力，致使地下水位產生相應之變化。

由於地下水位變化可能反映出斷層活動或地層應變狀況，而台灣西南部地區未固結沈積物範圍內之監測井密佈，觀測記錄豐富，且具備水文地質調查資料，因此適於針對集集地震及其餘震之同震地下水位變化在時間與空間上的分佈，以及相應之全球定位系統記錄資料作詳細的整合分析。進而探討相關之孔隙水壓與地殼變形的理論發展，進行數值模擬分析期間的偶合關係，並可嘗試以現地觀測記錄加以比對。

本計畫旨在提升我們對斷層活動引發地層中孔隙水壓及大地應力應變隨空間與時間上的變化及其相關機制之瞭解。除了將整合分析台灣西南地區在集集地震及其餘震期間地下水位及地殼變形在時空上的分佈狀況，並將探討斷層附近地層孔隙水壓與大地應力偶合變化機制相關理論依據，發展斷層活動導致地下水位變化之概念模型及數學模式，比較驗證斷層活動導致同震孔隙水壓上升或下降的過程與其在空間上的分佈變化，進而探討地層孔隙水壓隨時間消散的過程與主控因素。

三、結果與討論

1. 車籠埔斷層活動引發地下水位變化及岩體應變之概念模式與數學模式可依據土壤三維壓密理論來建立，孔隙水壓可因斷層錯動引發大地應力的重新調整而變，地層的現地應力瞬間增減，而且三軸應力大小各異，勢將在孔隙介質中產生剪應變，導致地下水位升降。

2. 地下水流由震前之穩態狀況轉變為震後之瞬態狀況，因此地下水流在震後之地下水位變化過程中扮演極為重要的角色。除了側向之地下水流外，不同深度含水層之同震水位變化幅度差異頗大，勢必加速跨越地層之垂向地下水流。許多監測井地下水位皆出現震後持續上升一段時間的現象，推測皆與垂向地下水流相關。
3. 持久性之同震地下水位上升、下降及其變化量有潛力作為斷層錯動導致地層應力改變或體積應變的間接指標，理論上其空間上的分佈可以呈現出地震導致淺處地層大地應力變化重新分佈狀況。然而過去依據地震斷層位移量所計算出之體積應變與現地同震地下水位變化觀測紀錄往往並不一致。
4. 斷層附近地區地震引發之地下水位變化在空間上的分佈狀況過去鮮為人知。本研究分析集集地震引發之同震地下水位的升降似與其距離斷層遠近相關，但是同震地下水位變化量則與其距離震央遠近相關。
5. 在研究區域北側，大多數集東井站最大的同震水位變化量都出現在當地一個區域受壓含水層內，此一現象佐證了同震水位變化幅度可能與含水層的物理特性相關性。
6. 大多數觀測井的同震上升或下降之水位於震後立即開始回復，但是回復速率往往隨著含水層的水文地質條件而異。由於受壓含水層或部分受壓含水層之自然地下水流動相當緩慢，同震上升或下降的水位通常需要數日至數月才能逐漸回復，因此時水位歷線多呈現階狀變化。而自由含水層之地下水可與地面水迅速的互相流通，1點47分出現

的同震水位變化可以在幾分鐘內即行回復至震前狀況，所以2點之時水位記錄僅能呈現小部分同震變化，甚而難以認定其微幅之變化。

7. 高頻率取樣之地下水位記錄地震期間出現震盪性地下水位變化，初步分析結果可能與表面波（特別是雷利波）較為相關，但是細部變化仍難以認定。此外經由國際合作研究，嘗試了解震波引發之動態應變對同震地下水位變化之影響，目前可由土壤液化證明震動引發淺處地下水位之上升，但是深處岩層中之礦物顆粒膠結良好，動態應變與岩層中同震地下水位變化之關係較小。

四、計畫成果自評

研究成果有助於提昇學術界對地震發生期間孔隙水壓變化與地層應變過程之瞭解，以作為探討斷層附近地下水位異常變化之分佈與機制，甚至斷層活動引發地質災害之參考。自本研究相關成果報導後，其他相關研究也在國內外各學術機構陸續展開。日後若能配合其他相關計畫之研究與觀測，得以瞭解地面水平與垂直位移與地下水位變化的相關性，或能進一步瞭解地震發生時地下水位與地層體積可能出現的變化。若能進一步釐清震前之地下水位變化相關訊息，將有機會改進未來適於研究調查地震預兆徵候之時間與地點。

在經建及應用方面，本研究成果將有潛力提升我國地下水監測技術，具潛力延伸台灣地區地下水觀測網之附加價值，並可增進吾人對地下水位變化與土壤液化之間關係的瞭解，期能有助於日後有效降低地震造成之生命財產損失。

本研究計畫進行尚稱順利，本年度分析九二一集集地震基本資訊承蒙水利署、地質調查所協助，因此對於地震引發地下

水位異常變化之記錄 能夠獲致合理的評估，前述兩個單位亦採納本研究之建議加強相關研究與資訊品質之改進。本研究整合各相關資料分析比對，篩選出可信之地下水位記錄，並針對集集地震發生前後造成之水位異常變化進行重點研究，預期將對地震相關之水文地質研究與地下水監測工作有所助益。

五、參考文獻

- Angelier, J., Lee, J.C., Chu, H.T., and Hu, J.C. (2003) Reconstruction of fault slip of the September 21st, 1999, Taiwan earthquake in the asphalted surface of a car park, and co-seismic slip partitioning: *Jour. Struct. Geol.*, v. 25, p. 345-350.
- Chia, Y., Y. S. Wang, J. J. Chiu, and C. W. Liu (2001) Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi earthquake in the Choshui River alluvial fan in Taiwan, *Bull. Seis. Soc. Am.* 91, 1062-1068.
- Ge, S. and S. C. Stover (2000) Hydrodynamic Response to Strike- and Dip-slip Faulting in a Half-space, *J. Geophys. Res.* 105, 25513-25524.
- Grecksch G., F. Roth and H. J. Kumpel (1999) Co-seismic well-level changes due to the 1992 Roermond earthquake compared to static deformation of half-space solutions, *Geophys. J. Int.* 138, 470-478.
- King, C.-Y., S. Azuma, G. Igarashi, M. Ohno, H. Saito, and H. Wakita (1999) Earthquake related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, Central Japan, *J. Geophys. Res.* 104, 13,073-13,082.
- Kissin, I.G., V.M. Belikov, and G.A. Ishankuliev (1996) Short-term groundwater level variations in a seismic region as an indicator of the geodynamic regime, *Tectonophysics* 265, 313-326.
- Montgomery, D. R. and M. Manga (2003) Streamflow and water well responses to earthquakes, *Science* 300, 2047-2049.
- Palciauskas V. V. and P. A. Domenico (1989) Fluid pressure in deforming porous rocks. *Water Resour. Res.*, 25, 203-213.
- Quilty E.G. and E. A. Roeloffs (1997) Water-level changes in response to the 20 December 1994 earthquake near Parkfield, California. *Bull. Seis. Soc. Am.* 87, 310-317.
- Roeloffs, E. A. (1998). Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquake, *J. Geophys. Res.* 103, 869-889.
- Rojstaczer, S. and S. Wolf (1992) Permeability changes associated with large earthquakes: an example from Loma Prieta, California, *Geology* 20, 211-214.
- Rudnicki, J. W., and Yin, J. (1993) Analysis of water level changes induced by fault creep at Parkfield, California, *J. Geophys. Res.*, 98, 8142-8152.
- Wakita, H. (1975). Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science* 189, 553-555.
- Wang, C. Y., L. H. Cheng, C. V. Chin, and S. B. Yu (2001) Coseismic Hydrologic Response of an Alluvial Fan to the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan, *Geology* 29, 831-834.
- Wang, H.F. (1997) Effects of deviatoric stress on undrained pore pressure response to fault slip: *J. Geophys. Res.*, v. 102, p. 17943-17950.