

行政院及所屬各機關出國報告

〈出國類別：考察〉

台灣自然災害之評估：

活斷層與山崩及參加美國地球物理年會出國報告

服務機關：經濟部中央地質調查所

出國人職 稱：專員

姓 名：朱傲祖

出國地區：美國

出國期間：89年12月2日至89年12月21日

報告日期：90年3月23日

I3/
C09001152

台灣自然災害之評估：

活斷層與山崩及參加美國地球物理年會出國報告

摘要

台灣位於歐亞版塊和菲律賓版塊交會處，地震頻繁，921 集集地震所引發的災害，更是驚人，但也促成國人對地震誘發活動斷層的關注，政府高層在災後也開始重視，加列經費加速加強活動斷層調查工作。

鑑於美國加州的地質環境和台灣有很多相若之處，而且美國對活動斷層的研究，甚為先進；特別在槽溝開挖方面的研究，有值得學習之處。因此筆者選擇前往美國，實地考察學習。

此外參加美國地球物理年會，與其他地質研究人員共同發表論文三篇，藉此機會與在同一領域的專家學者接觸討論，增進對活動斷層的了解。

目次

摘要.....	I
目次.....	II
壹、前言.....	1
貳、目的.....	2
參、過程.....	3
一、加州活動斷層之研究.....	3
二、活動斷層及槽溝開挖.....	4
三、華納斯溪槽溝開挖.....	6
四、巴力溪槽溝開挖.....	7
五、朗特地震地表破裂.....	8
肆、心得.....	9
伍、建議.....	10
陸、參考文獻.....	11
附錄一、參加美國地球物理年會論文節要三篇.....	12
附錄二、附圖.....	16
照片(一至六).....	20

壹、前言

台灣位於菲律賓海板塊和歐亞板塊交會處，過去數百萬年以來兩板塊作相對聚合的移動。由全球衛星定位儀觀測發現：位於菲律賓海板塊上的蘭嶼島正以每年平均八點七公分的速度向澎湖白沙潛移。台灣島嶼的形成，就是累積數百萬年來板塊間相互擠壓，地殼變形而增厚、隆起，形成具有多山及山高的台灣島。

澎湖白沙和蘭嶼兩地相距兩百六十公里，其中跨越了部份台灣海峽、台灣本島及台東外海。若每年八點七公分的縮移量平均分配於這些區域，那麼台灣島上居民便可安之若素，不受干擾。可是地殼的變形並不遵循平均分配律，而是在地殼較脆弱的地方集中地進行變形，產生破裂（斷層）及上升或下降（褶皺）。

板塊持續擠壓累積巨大的能量，若於瞬間釋放出來便產生了地震。從近百年有儀器記錄之地震資料看來，台灣曾多次發生災害性的地震，造成生命及財產的損失。不久之前 921 集集大地震，做成車籠埔斷層長約 100 公里地表破裂，人口死亡逾 2400 人，房屋倒塌超過四萬多棟，估計損失接近兩千億台幣。

由地震誘發地表活動斷層而產生地表破裂，危害最烈。因此對活動斷層的研究，為當務之急。鑑於美國在這方面的研究，甚為先進。今蒙加州理工學院地震實驗室史克(K. Sieh)教授安排，赴野外考察，

到達著名加州聖安德魯斯斷層的槽溝開挖地點，包括有已經成為研究古地震典範的巴力溪(Palsett Creek)及華納斯溪(Wallace Creek)此外美國地質調查所富馬先生(T. Fumar)赴莫哈沙漠考察 1992 年加州朗特地震的地表破裂及相關槽溝開挖的工作。期間使筆者獲得不少活動斷層的新知。

此外筆者參加美國地球物理於三藩市舉辦之冬季年會，與本所同仁賴典章組長、陳文政科長及中央研究院李建成博士，台大地質研究所盧佳遇教授等人共同發表論文三篇(見附錄一)。

貳、目的

鑑於台灣位於地質活躍的環境地震頻繁，地震誘發活動斷層位移而做成極大的災害，因此研究及了解活動斷層為當務之急。槽溝開挖活動斷層及古地震事件的最佳方法。今回赴美考察著名槽溝開挖典範地區，以期獲得如何進行槽溝開挖及採集重要活動斷層資料，作為日後在台灣研究活動斷層的參考。

此外，於美國地球物理年會，發表有關集集地震的研究論文三篇，並與同一領域不同的專家學者接觸討論，以期對世界各地最新的研究能有更進一步的了解。

參、過程

赴美期間可分為兩部份，第一部份在加州進行活動斷層之野外調查相關文獻的蒐集，第二部份於美國地球物理年會發表有關集集地震的研究論文(見附錄一)，並與相關人員討論。

一、加州活動斷層之研究

加州活動斷層的研究美國自 1978 年創立了國家地震災害減除中心(National Earthquake Hazard Reduction Program, NEHRP)以來，活動斷層及地震的研究便加強及加速起來。加州的地震災害為美國之冠，因此也成立了加州地震災害減少評估委員會。在活動斷層方面，由加州環保局地質礦物組於 1994 年出版加州及鄰近地區斷層活動度分布圖，比例尺為 75 萬分之一。一共列有五百多條斷層，以斷層活動的時代為基礎來分類並參考斷層活動度的性質。每一條斷層均列舉過去的研究，參考文獻及被切割或干擾地層的年代。1995 加州地震機率小組利用有條件的機率模式公佈南加州地震災害機率，預測某一個斷層區段在 30 年內發生地震的機率百分比。

這種有條件機率的預測是以充分獲得地質及地震資料為基礎，公佈南加州某些地區於三十年內(即 1994~2024)可能發生 7 級以上地震

機率達到 80%至 90%，如在洛杉磯東鄰之聖查先奴斷層(San Jacinto fault) 為 30 年內可能發生 7 級以上地震最高機率的活動斷層(圖一)。

當然有條件機率的預測是否精準有賴於地震及地質的資料的完整。其中以古地震地質的資料最為寶貴，獲得古地震地質的資料最重要的方式為槽溝開挖。

二、活動斷層及槽溝開挖

很少活動斷層在有歷史記載或有儀器測量的時間以來有一次以上的活動。只有在十分罕見的例子中能明確辨別一次以上的破裂活動，因此試圖了解斷層在活動的本質不能單靠紀錄而來。因有儀器觀測以來，不過二百年的歷史，而一般活動斷層再次活動的時間間距為數百年至數萬年不等。無論如何，斷層在時間及空間分佈的再活動性對地震預報及地震災害的評估都非常重要。由於活動斷層再活動時間間隔十分長，並且地震觀測紀錄十分短，所以排除了單獨從地震資料來推測斷層的活動性。

因此，活動斷層過去活動的紀錄只能從曾被活動斷層切割或擾動過的地層中尋找。地層中所保存的資料依賴自然的出露，即岩層不為

土壤、植被或水層所覆蓋，或是用人工的方法挖掘。在地面深度十多公尺範圍之內，以溝槽開挖方式來了解活動斷層的特性最為有效。槽溝開挖不單可以獲得斷層的幾何位態、變形的方式，並可以有機會找到被切割最高層位地層的沉積年齡以及緊接覆蓋再斷層上沒有被擾動地層的年齡，因為直接求得斷層的活動年齡十分不容易，所以上述的方法得知被斷層切割最高地層層位的年齡即斷層活動發生年齡的下限，而緊接覆蓋在斷層上沒有被擾動地層的年齡即為斷層活動發生年齡的上限。因此斷層活動的時間即介於兩者之間(圖二)。

古地震是探討近期地質時間內發生地震的特性，包括有地震之再發生率，地震的規模及相關同地震之活動構造的特徵。因此過去的地震特性可提供將來可能發生地震特性，如何時發生、何地發生及發生的規模等，因地震發生所做成的地表破裂，隨即受到風化及侵蝕作用而破壞，經過相當時日之後，於地面難以直接獲得良好的證據及研究的材料。

槽溝開挖：

槽溝開挖是將掩埋於地表下的古地震資料，有系統地收集及分析。因此槽溝要開挖於有地表斷層通過的地方，並於覆蓋在斷層上沉積物中採集定年的樣本，如有機物質及其他可供定年的物質。槽溝開挖的溝壁以鉛直為佳，因鉛直溝壁上呈現的地層及斷層構造變形及扭

曲程度較小。此外開挖地點要注意地下水的排放，溝壁支持以及溝壁面修整平滑等問題，均要一一加以克服，槽溝開挖後的精確測量紀錄及描繪均為必要執行的程序。

三、華納斯溪(Wallace Creek)槽溝開挖

華納斯溪位於卡里蘇平原(Carrizo Plain)東側，距東南方的洛杉磯約 200 公里(圖三)，在航照圖上顯示聖安德魯斯斷層將華納斯溪切割，使溪流流向急轉並平行斷層流動了 130 公尺才回復溪流原來流向(圖四、照片一)華納斯溪流突然改變流向的距離也就等於聖安德魯斯斷層的滑動距離，史克從溪道開始急轉處 X(圖五)找到有機物質(照片二)，定年的結果顯示為 3800 年前的沉積物，那麼 3800 年滑移了 130 公尺，平均每年滑移率為 3.4 公分。

史克推算每一次地震若為移了 9 公尺一如 1857 年(8 級)大地震的滑距，3800 年來華納斯溪則經歷過 13 次同樣規模的大地震，而地震回復週期將會為 290 年，假設每次地震斷層的週期也這麼規則的話，下一次 8 級的地震將於公元 2150 年發生。地震發生的時間及空間具規律性的模式是否正確，史克另外在巴力溪(Pallett Creek)的槽溝開挖，將此模式大大地做了修改。

四、巴力溪(Palmett Creek)槽溝開挖

以槽溝開挖方法來研究活動斷層及古地震是相當新近的事情，不滿三十年的歷史。加州理工學院地震研究室史克教授於七十年代末期(Sieh, 1978, 1984)以槽溝開挖的方法來研究加州聖安德魯斷層，開挖地點在加州洛杉磯東北 55 公里處之巴力溪(Palmett Creek)，在華納斯溪東南方，相距 200 公里(圖三)，此處於二十世紀初年尚為一湖泊，之後下切形成深達十公尺的峽谷，出露地層屬沼澤沉積環境，富含有機物質(圖六、照片三及四)，初步結果明確指出 1857 年及 1812 年地震，其後更定出 8 次古地震事件，包括有 1480 年、1346 年、1100 年、997 年、797 年、734 年及 677 年發生的地震。其中 1480 年、1812 年及 1857 年地震的滑距為 6 公尺。從巴力溪及附近其他古地震的資料，推算出加州聖安德魯斷層在莫哈沙漠這一段的平均滑移率為每年 3.5 公分。估計地震回復週期為 134 年。建立了聖安德魯斷層在巴力溪的溪段有地震回復週期現象的可能性。

但是莫哈沙漠巴力溪聖安德魯斷層區段於 1857 年地震滑移不超過 6 公尺，不若在卡里斯平原華納斯區段於同一地震滑移達到 9 公尺之多。此外，史克教授將 1857 年大地震(8 級)沿中南部聖安德魯斷層破裂的位移量標示出來(如圖七)，從北到南發生 350 多公里長

地表破裂一共劃分六個區段(segment)，右移的位移量從 3 公尺左右到 10 公尺不等，位移量的估算主要是從河川錯位而來。有兩種模式可以來解釋為何這兩個斷層區段或甚至多個斷層區段在同一個地震的滑距的差異，一則介於這兩個區段間的地殼受到擠壓，加厚而隆起，現地觀察這種現象並沒有發生或不容易察覺，因可能以區域寬廣的變形方式(褶皺)來呈現，二則於莫哈沙漠巴力溪區斷的斷層滑移量均為較小，但地震斷層產生的次數較華納斯溪為頻繁，因此在一較長的單位時間之內兩個斷層區域所產生的滑移距離則無差別，有相同的長期平均滑移率。

此模式亦稱為滑移補足模式(slip-patch model)。後者這一個模式，比較能符合觀察到的現象。

五、朗特地震(Landers Earthquake, 1992)地表破裂

1992 年 6 月 28 朗特地震(Landers Earthquake, 7.5 級)是加州自 1906 年三藩市大地震以來呈現最大地表破裂的地震。朗特地震的震央位於莫哈沙漠(Mojave Desert)的沃卡谷(Yucca Valley)附近(圖八為朗特地震地表斷層位移分佈圖)。照片五及六所示地表破裂位於上約翰谷(Upper Johnson Valley)之 Emerson Fault 之地表破裂，水

平位移逾五公尺，沿直位移逾一公尺，為右移斷層。照片五及六呈現地表破裂切割並將小溪谷及其兩側之稜線，產生右移的錯位。(傲祖攝於 2000 年 12 月 8 日)。

朗特地震和集集地震有不少相同之處，雖然前者為右移斷層，後者為逆衝斷層。二者地震震度相當，約為 $M=7.5$ ，同震地表破裂均為一百公里。地表斷裂位移量最大的地方均為斷層末端部份，且遠離主震震央。二者均誘發一些較新或以往不知道全新世的活動斷層的活動。

肆、心得

蒙加州理工學院地震實驗室史克教授(Prof. K. Sieh)悉心親赴著名槽溝開挖現場，講解說明活動斷層的特性與古地震的關係，進而推知活動斷層活動的模式及地震斷層發生的機率，希望能達到中期至短期地震預測，減少地震所誘發的災害，認識槽溝開挖的重要性。

此外參加美國地球物理年會，發表研究論文並與來自各地同一領域的學者討論，吸收新知，有助日後繼續的研究及發展。

伍、建議

(一)

槽溝開挖是古地震、活動斷層、地震發生機率等研究所獲得資料的重要途徑。但要對於第四紀地質及定年學、構造地質學、土壤、地形及沉積學有所掌握才能充分發揮槽溝開挖所得到的資料，建議強化相關的研究，而美國及日本均為活動斷層研究先進國家，值得學習及借鏡之處甚多，日後擬多和美日等學者交流、學習。

(二)

美國地球物理年會是美國地球科學會最大的學術研討會之一，參加人數達數千人，其中有來自一百個不同國家的會員，亦可以說是一個國際性的科學會。在五天的會期中，有關活動斷層、地震、大地構造、地質構造論文數百篇，以口述及壁佈的形式發表。儼祖此行有機會與在同一領域不同的專家學者接觸討論，對世界最新的研究，能有更進一步的了解，收穫良多。建議日後本所人員能多有機會參加此等學術會。

陸、參考文獻

- Fumal, T. E., S. K. Pezzopane, R. J. Weldon II, and D. P. Schwartz, A 100-years average recurrence interval for the San Andreas fault at Wrightwood, California, *Science*, 259, 199-203, 1993.
- Hart E. W., Bryant W. A., and Treiman J. A., 1993, Surface Faulting Associated with the June 1992 Landers Earthquake, California: *California Geology*, 10.
- Lisa B. and Sieh, K., 1994, Paleoseismic evidence of clustered earthquakes on the San Andreas fault in the Carrizo Plain, California: *J. Geophys. Res.*, 99, 6819-6814,
- Sieh, K. and Le Vay, S., 1998, *The earth in Turmoil* Freeman and Company: NY. 324p.
- Sieh, K., 1995, The repetition of large-earthquake ruptures: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 93, pp.3764-3771, April 1996.
- Sieh, K., et al., Near-field investigation of the Landers Earthquake sequence, April to July 1992, *Science*, 260, 171-176, 1993.
- Sieh, K., 1978a, Pre-historic large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Pallett Creek, California: *J. Geophys. Res.*, 83, 3907-39.
- Sieh, K., 1978b, Slip along the San Andreas fault associated with the great 1857 earthquake: *Seismol. Amer. Bull.*, 68, 1421-48.
- Working Group on California Earthquake Probabilities (WGCEP), Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault, U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 88-398, 1988.

附錄一

American Geophysical Union 2000 Fall Meeting

December, 15-19, 2000

San Francisco, California USA

Surface Ruptures of the Chi-Chi Earthquake in the Shihgang-Neiwan area, Taiwan

Chu, H chuht@linx.moeacgs.gov.tw

Central Geological Survey, 2 Lane 109, Huahsin St. Chunggho City, Taipei, Taiwan, Taiwan

Chen, W wencheng@linx.moeacgs.gov.tw

Central Geological Survey, 2 Lane 109, Huahsin St. Chunggho City, Taipei, Taiwan, Taiwan

Lai, T tim@linx.moeacgs.gov.tw

Central Geological Survey, 2 Lane 109, Huahsin St. Chunggho City, Taipei, Taiwan, Taiwan

Lee, J jcleee@earth.sinica.edu.tw

Institute of Earth Sciences, Academic Sinica, P.O. Box 1-55, Nankang, Taipei, Taiwan, Taiwan

Lu, C chia@ccms.ntu.edu.tw

Department of Geology, National Taiwan University, 245 Choushan Road, Taipei, Taiwan, Taiwan

The severe earthquake ($M_w = 7.6$) which struck west-central Taiwan on September 21, 1999 was felt strongly throughout the island of Taiwan. It was the most destructive earthquake of the century, killing about 2400 people. An approximately 100-km surface rupture has become notorious for its savage destructiveness. Surface ruptures of fault scarps and fold scarps are well exhibited in the Shihgang and the Neiwan area

in the northern segment of the Chi-chi earthquake fault. Thrust scarps with several meters of vertical throws and horizontal heaves are common. Rapid changes of topographic features have tremendous effects on the surface drainage system. Most of the fault traces trend N-S except in the northern part where the strikes of the fault traces turn into the E-W and NEE-SWW. The nearly E-W trending fault traces form a deformation zone of more than one kilometer in width which is bounded by thrusts either northerly or southerly directed. Complex surface ruptures of pop-up structures composing thrust and back thrust, pressure ridges, tension gashes and gentle folding are well exhibited in this nearly E-W trending deformation zone. The damaged Shihgang Dam, which is straddling diagonally across this deformation zone, is a record of the relationship between ground breakage and civil constructions.

MN: Fall Meeting 2000

Structural Characteristics of Northern Surface Ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi, Taiwan Earthquake

Lee, J jcleee@earth.sinica.edu.tw

Inst.Earth Sciences, Academia Sinica, P.O.Box 1-55,
Nankang, Taipei, 115 Taiwan

Chu, H Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan

Angelier, J Dept. Geotectonique, Univ. Paris VI, Paris, France

Chan, Y Inst.Earth Sciences, Academia Sinica, P.O.Box 1-55,
Nankang, Taipei, 115 Taiwan

Hu, J Inst. Secondary School Teacher of Taiwan, Taichung,
Taiwan

Lu, C Dept. Geology, National Taiwan University, Taipei,
Taiwan

The 1999 Mw=7.6 Chi-Chi earthquake resulted from the reactivation of a major frontal thrust, the Chelungpu fault, within the Taiwan collision belt. In the northern segment of the earthquake surface breaks (referred to as the Shihgang-Shangchi Fault Zone), the surface ruptures turned

clockwise to apart from the Chelungpu fault and produced a series of thrust-and-backthrust pop-up structures, about 15 km long in the ENE-WSW direction, forming several discontinuous subsegments. The bedding-parallel thrusting occurred on both sides (i.e., two limbs) of the regional synclinal structure of the Shihkang-Shangchi Fault Zone, whereas the thrust faulting cutting across the bedding planes developed in the central portion of the syncline. At several places, the pop-up structure developed on, and was inherited from, pre-existing local anticlines. Geological and morphological evidence shows that these gentle anticlinal folds seemingly started to develop recently in late Quaternary and have been reactivated during the last few earthquakes. Combining the GPS measurements, seismological data, and the geological analyses, we propose a kinematic model with a 3-D earthquake fault surface. We highlight the influence of both local and regional pre-existing structures on the development of the earthquake rupture, and hence the role of the structural inheritance. The striking northeast clockwise turn of the 1999 earthquake surface ruptures resulted not only from the 3-D geometry of regional lithology/structure, but probably also from an edge effect of the northward rupture propagation. This latter is related to the presence of a regional-scale NW-SE trending transfer fault zone to the north, as revealed by a local concentration of seismicity.

MN: Fall Meeting 2000

Impact of Basement Shape on Thrust Wedge Kinematics - Example from the 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake

Lu, C chia@ccms.ntu.edu.tw

Department of Geosciences, National Taiwan University, 245 Choushan Road, Taipei, 106 Taiwan

Chu, H chuht@linx.moeacgs.gov.t

Central Geological Survey, P.O. Box 968, Taipei Taiwan

Lee, J jcleee@earth.sinica.edu.tw

Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, P.O. Box 1-55, Nankang, Taipei, Taiwan

Chan, Y yuchanf@earth.sinica.edu.tw
Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, P.O. Box 1-55,
Nankang, Taipei, Taiwan

Chang, K chia@ccms.ntu.edu.tw
Department of Geosciences, National Taiwan University, 245
Choushan Road , Taipei, 106 Taiwan

Neotectonics of Taiwan is mainly controlled by the active oblique convergence between the Eurasian plate and the Philippine Sea plate. The shape of the basement significantly influences the foreland fold-and-thrust structures.

Deformation in association with the 1999 Chi-chi Taiwan earthquake appears to indicate such a basement-controlled deformation mechanism. Sandbox experiments have been conducted to simulate the framework of western Taiwan. The results of specific analog models demonstrated that: (1) hinterland vergent backthrust and out-of-sequence thrust may developed while the thrust wedge approaching the basement high; (2) link faults (i.e. transfer faults zone) developed between the major thrust segments, the Sanyi-Puli transpression zone and the Chiayi transtension zone are interpreted as major transfer zones in association with the Chelungpu fault of the 1999 Chi-Chi earthquake; and (3) the increase of displacement along the Chelungpu fault from the south to the north might be in association with the fault geometry which is mainly related to the basement shape and convergent direction.

附錄二

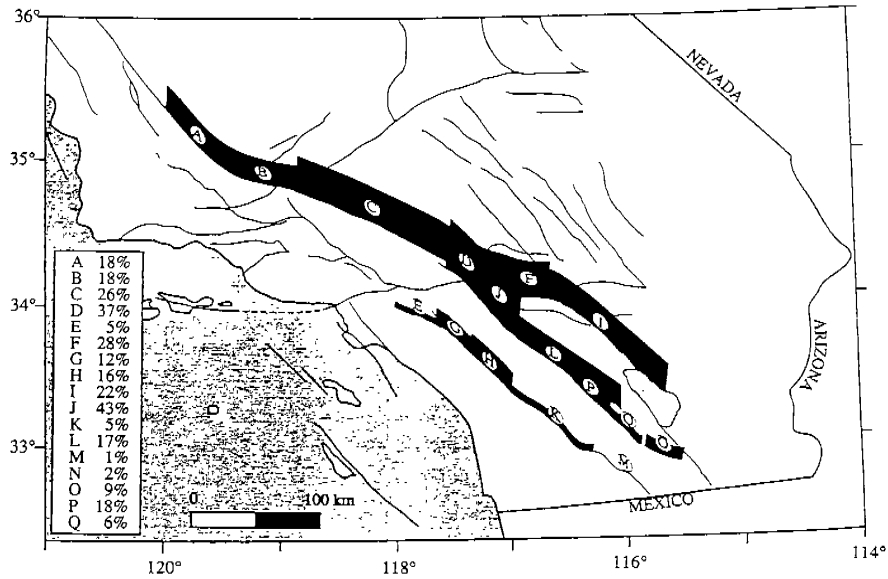


Figure 10.1. Probabilities of fault rupture for the period 1994 to 2024. Width of the shaded bars indicate percent probability for each fault segment. (After Working Group on California Earthquake Probabilities, 1995)

圖一 南加州 30 年內(1994-2024 年)可能發生 7 級以上地震機率分佈圖(摘自加州地震機率工作小組 1995)

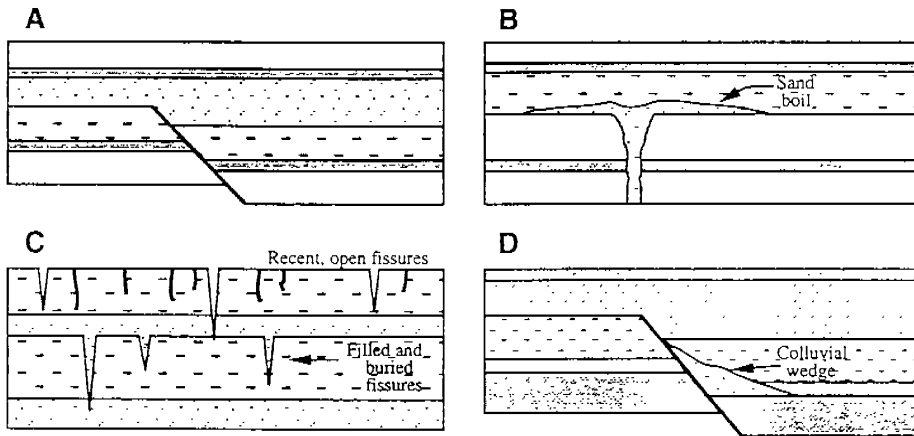
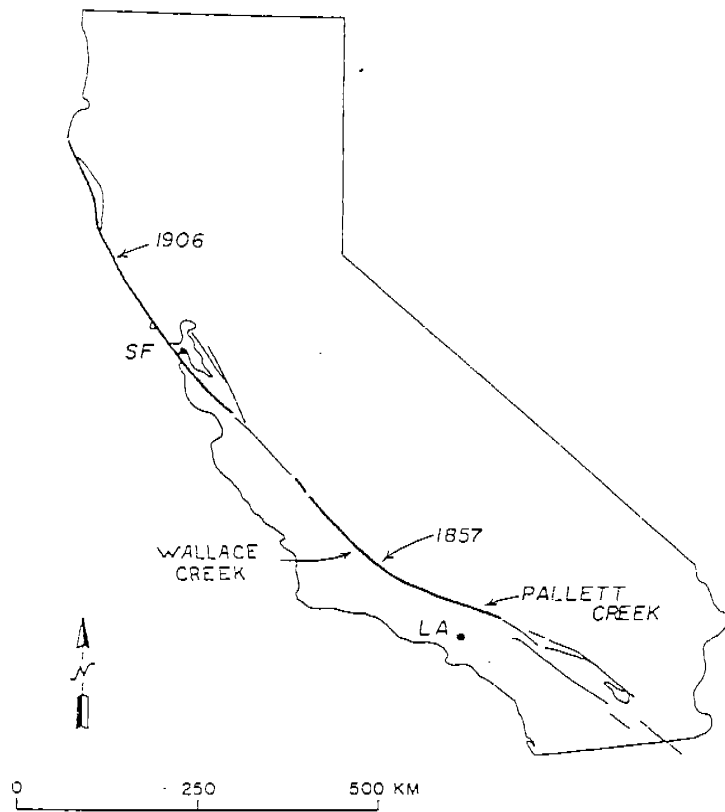


Figure 9.3. Stratigraphic evidence of earthquakes.

圖二 從地層的擾動及被地層切割關係來了解斷層活動的時間

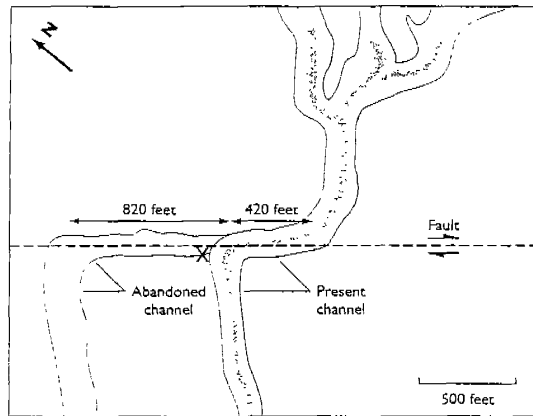
- A 為斷層作用後受更新的地層覆蓋
- B 為斷層活動同時有噴砂的現象
- C 與地震同時產生地面張裂裂縫
- D 由同地震斷層崖崩塌形成崖前堆積物



圖三 聖安德魯斯斷層於1906年及1857年發生地表破裂的區域，並標示華納斯溪及巴力溪所在地。(摘自 Sieh, 1978a)



圖四 聖安德魯斯斷層從空中往東北看華納斯溪被右移斷層錯動情形，位於卡里蘇平原東側。(摘自 Sieh and Le Vay, 1998)



圖五 華納斯溪被聖安德魯斯斷層錯動而產生右移現象，X 為碳物質定年採樣點。(摘自 Sieh and Le Vay, 1998)

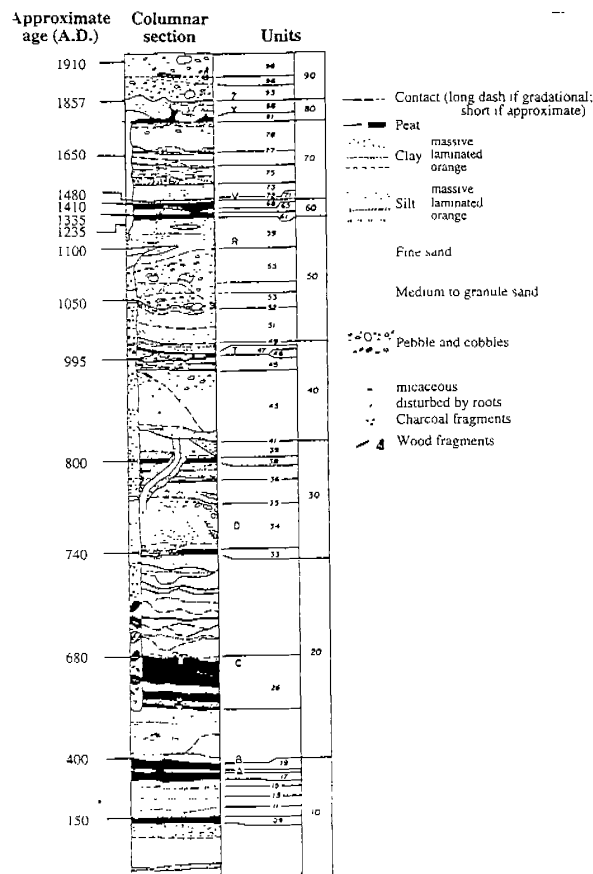
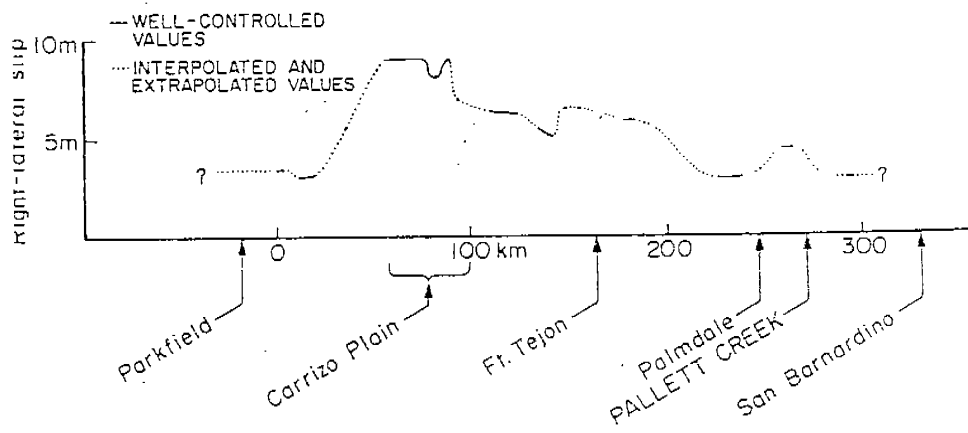
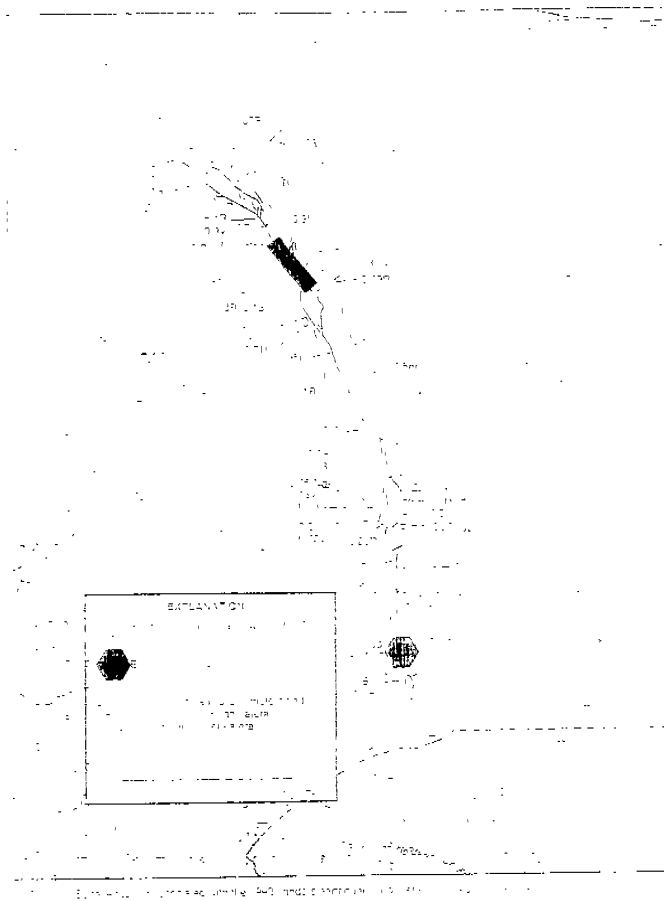


Figure 9.4 Stratigraphic column at Pallett Creek trench site. (From Sieh et al, 1989).

圖六 巴力溪槽溝開挖之地層剖面，黑色為富含碳物質地層並有年代的資料。(摘自 Sieh 等, 1989)



圖七 聖安德魯斯斷層於1857年大地震地表破裂在各區段呈現不同的位移量。
(摘自Sieh, 1978b)



圖八 1992朗特地震地表斷層位移分佈圖。(R=右移，L=左移，V=垂直位移，以公尺為單位)



照片一 華納斯溪道被聖安德魯斯斷層切割形成急轉彎。



照片二 在華納斯溪的槽溝開挖現場，拍攝平行聖安德魯斯斷層，右側為卡里蘇平原。



照片三 史克教授於巴力溪槽溝開挖剖面說明富含碳物質的沼澤沉積物被地震斷層切割情形。



照片四 巴力溪槽溝開挖剖面局部呈現斷層(照片中央部份)切割左側厚層有黑色富有機物地層。



照片五 1992年朗特地震(Landers Earthquake)地表破裂現象。圖中所示位於上約翰谷之Emerson斷層，水平位移逾五公尺，沿直位移逾一公尺(於2000年12月8日拍攝)



照片六 拍攝地點如上圖，拍攝方向略沿斷層之走向，明顯呈現斷層崖及崖前崩塌堆積物。