

縱谷斷層中段之古地震研究

Paleoseismology Study of the Middle Segment of the Longitudinal Valley Fault

顏一勤¹ 陳文山¹ 蔡坤智¹ 黃能偉¹ 楊志成¹ 陳勇全¹
朱曜國¹ 宋時驊¹ 劉彥求² 林啟文² 林偉雄² 侯進雄²
林燕慧²

I-Chin Yen¹, Wen-Shan Chen¹, Kun-Jih Tsai¹, Neng-Wei Huang¹,
Chih-Cheng Barry Yang¹, Yung-Chuan Chen¹, Yao-Kao Chu¹,
Shih-Hwa Sung¹, Yen-Chiu Liu², Chii-Wen Lin², Wei-Shyong Lin²,
Chin-Shyong Hou², Yen-Hui Lin²

ABSTRACT

The 1951 Hualian-Taitung earthquake brought about 60-km-long surface ruptures along the Longitudinal Valley Faults, eastern Taiwan. Three trenches have been excavated across the Longitudinal Valley Fault of the middle segment whose position is based on historical records. In the study, measurement of the vertical offset or structural relief was taken with reference to the hanging wall beyond the trishear deformation zone. Therefore we suggest that, for the measurement of offset, we should disregard the trishear zone, and that structural relief on the hanging wall should be represented as a real vertical offset. Through the correlation of three trenches across the Longitudinal Valley Fault, we are able to provide evidence of at least three earthquake events for the past 1550 years before 1951, including the 1951 earthquake. Furthermore, based on the radiocarbon dates, the recurrence interval is about 200 ± 25 years and the minimum vertical uplift rate is 15 ± 2 mm/yr.

前言

台灣頻繁的地震活動 (Tsai et al., 1977; Tsai, 1986) 與快速的地殼運動 (陳, 1974; Yu et al., 1997; Yu and Kuo, 2001), 都顯示位於板塊碰撞交界地帶的花東

1.國立台灣大學地質科學系 (Department of Geosciences, National Taiwan University)
2.經濟部中央地質調查所 (Central Geological Survey, MOEA)

縱谷斷層 (Bonilla, 1977; Hsu, 1962; Biq, 1965, 1981, 1984; Barrier and Angelier, 1986; Teng, 1987; 陳, 1993), 在全新世以來的活動性。

1951年11月25日台東地區分別於02:47及02:50發生兩次強震。經重新定位的結果指出(Cheng *et al.*, 1996), 02:47之地震位於卑南主山東南方(23.100°N, 121.225°E), 震源深度16公里, 地震矩規模 $M_w=6.2$; 02:50之地震位於成功東北東方外海(23.275°N, 121.350°E), 震源深度36公里, 地震矩規模 $M_s=7.0$ (圖一)。造成光復鄉大富村沿海岸山脈山腳至池上鄉的慶豐村等地長約50公里, 以及位於縱谷西側的玉里鎮的地表破裂(楊蔭清, 1953)。

由於921集集地震造成相當的災害與損失, 因此學界對於活動斷層進行一系列的研究。古地震 (paleoseismology) 研究是結合沉積與構造作用, 來解析大地震數千年或數萬年以來斷層的活動特性 (Sieh, 1978; Matsuda *et al.*, 1978; Jacoby *et al.*, 1988; Sieh *et al.*, 1989; Rundle, 1988; Chen *et al.*, 2003)。台灣近年來, 針對車籠埔斷層的古地震研究已有許多相關的成果 (Chen *et al.*, 2001a, b, c; Chen *et al.*, 2004), 而針對縱谷斷層僅有在本研究區南側約一公里處有初步的研究 (陳等, 2004)。因此, 本研究再利用槽溝挖掘, 繼續針對此邊界斷層做更深入的探討, 期待能進一步了解本斷層的活動性, 並評估下次大地震的可能時間。

槽溝鄰近區域之地質與地形

本研究區域位於海岸山脈西側山麓與花東縱谷之交接處。本區域海岸山脈以早期更新世之八里灣層水璉段礫岩為主, 山麓前緣為全新世的沖積扇。

槽溝位於海岸山脈沿山193號縣道光復鄉大富村自強外役監獄至瑞穗鄉鶴岡村之間 (台灣二度分帶: 290225, 2610018, 圖二 a)。主要地形為在山麓的西側形成一系列由東向西的小型沖積扇, 並接合成為一大型的聯合沖積扇地形。地主表示1951年地震當時在山麓前緣曾發生變動。此地形經野外調查顯示, 在山麓前緣的上方為一沖積扇階地的地形, 崖高大於5公尺, 崖階走向為北東45度 (圖三 a)。

因此, 本研究一共開挖三個槽溝, 每個槽溝相距約五公尺, 由南到北分別為大富一號溝、大富二號溝、大富三號溝, 槽溝長度約20~30公尺, 寬度約10公尺, 深度約6~8公尺不等 (圖二 b, 圖三 b)。

古地震研究

地層特性與定年

綜合大富一號、二號及三號槽溝沉積層與特徵，由年輕至老共可分為，T1耕作土層、S1礫質砂層、S2礫質砂層、O1上部有機土壤層、G1礫石層、O2下部有機土壤層、G2砂礫層等七層沉積層（圖四、圖五、圖六、圖七、圖八、圖九），各沉積層描述如下：

1. T1耕作土層：本層為棕灰色的現代耕作土層，厚度約為10至30公分，位於槽溝的最上部層位，沉積物以細砂為主，偶夾零星次圓形礫石。
2. S1礫質砂層：砂層中具平行紋理，並夾有透鏡狀之礫石層，礫石圓度佳，呈顆粒支持，礫石從數公分至15公分，為河道沉積物。本層僅於二號槽溝南北牆剖面出現，上覆 T1耕作表土層，依照二號槽溝剖面，S1層下切至 O1、G1、O2及 G2層。
3. S2礫質砂層：黃棕色泥質砂層，為崖坡的崩積層（colluvium），夾零星的次圓形礫石，呈現基質支持結構，基質以泥質砂為主，厚度約10至100公分不等。本層於 F1斷層之上下盤皆有出現。碳十四定年 CLK-011(430~360, 330~280, 180~150, 10~0 cal B.P.)、CLK-035 (420~400, 320~270, 210~140, 20~0 cal B.P.)、CLK-037 (290~0 cal B.P.)、CLK-056 (280~170, 150~0 cal B.P.)、CLK-066 (440~350, 330~280, 170~150 cal B.P.)、CLK-089 (310~240, 230~70, 40~0 cal B.P.)。綜合比較其定年結果的年代，推測本年代約為 280~0 cal B.P.，即約為1670 A.D.~ 1950 A.D.。
4. O1上部有機土壤層：深棕色有機土壤層，厚度約10至50公分，偶夾零星次圓形礫石，於二號及三號槽溝上覆 O1表土層，一號槽溝上覆 S2礫質砂層。本層僅出現於各槽溝 F1斷層的下盤。本層之碳十四定年為 DF-03 (310~270, 180~150, 10~0 cal B.P.)、DF-04 (310~260, 220~140, 30~0 cal B.P.)、DF-05 (440~350, 330~280, 170~150 cal B.P.)。綜合比較其定年結果的年代，推測本年代約為310~280 cal B.P.，即約為1640 A.D.~1670 A.D.。
5. G1礫石層：沉積物主要由礫石所組成，為河流沉積物。礫石從數公分至20公分，礫石圓粒度次佳，下部沉積物為粗砂，具有平行紋理，沉積物具有顆粒支持結構，層厚約10至60公分，在一、二號槽溝的 G1砂礫層向西逐漸尖滅，上覆 O1上部有機土壤層。本層在三處槽溝中都出現於 F1斷層下盤。

6. O2下部有機土壤層：深棕色有機土壤層，厚度約為10至50公分，夾少量次圓形礫石，覆蓋於 G2層之上，上覆有 G1砂礫層。本層在三處槽溝中也都出現於 F1斷層下盤。碳十四定年有 CLKN-07(480~290 cal B.P.)、CLKN-18(440~350, 330~280, 170~150 cal B.P.)、CLKN-101(450~280 cal B.P.)。綜合比較其定年結果的年代，推測本年代約為450~350 cal B.P.，即約為1500 A.D.~1600 A.D.。
7. G2砂礫層：具層理砂礫層，為槽溝中出露最下部的沉積層。礫石從數公分到25公分，礫石圓粒度次佳，礫石沉積物為顆粒支持，本層出露厚度約1至3公尺。其中夾數層透鏡狀泥質礫石層，厚度約10至100公分，為碎屑流堆積的薄層泥質礫石層，具有基質支持結構，基質為泥質砂土。

構造特徵

槽溝剖面中，共發現三條斷層與褶皺構造。本章節為描述大富一、二、三號溝的構造現象。描述如下：

大富一號槽溝：

南北牆剖面中有一條向東傾斜的 F1逆斷層，都被 T1耕作土層覆蓋。F1斷層上下盤沖積層都受到拖曳作用形成倒轉的褶皺構造（圖十），斷層位態為 N54°E，14° E，根據 G2層中的泥質礫石層在上下盤對比，北牆垂直錯距至少6公尺，南牆垂直錯距至少4.5公尺（圖四、圖五）。

根據一號溝南北牆剖面，F1斷層切過並造成 O1上部有機土壤層與 S2礫質砂層在下盤形成倒轉向斜褶皺變形，這些構造都被 T1耕作土層所覆蓋。由此構造判斷1951年地震可能是沿著 F1斷層產生地表破裂。因無良好之指標層，所以無法得知其變動量。

大富二號槽溝：

槽溝出露三條朝東傾斜的逆斷層，F1、F2及 F3斷層，F3斷層位於 F1斷層上盤，F2斷層位於 F1斷層下盤。F1、F2及 F3斷層都被 T1耕作土層覆蓋；F1斷層截切 S2礫質砂層，F2斷層截切 G1礫石層，但被 O1上部有機土壤層覆蓋；F3斷層被 S2礫質砂層覆蓋。從上述斷層與沉積層的關係來看，F1斷層為最近一次地震事件所造成的斷層，F2與 F3斷層則無法由沉積層與斷層之關係判斷其發生的先後順序。

F1斷層上下盤地層受到斷層拖曳作用在上盤形成倒轉背斜構造，斷層位態為 $N60^{\circ}E, 24^{\circ}E$ ，根據 G2礫石層中所夾的泥質礫石層在上下盤的對比（圖七之 AA'），於南北牆中垂直錯距至少4公尺。F2斷層位於 F1斷層下盤，形成褶皺構造，由斷層兩側 O2有機土壤層對比（圖七之 BB'），北牆中垂直錯距約為0.6公尺，南牆垂直錯距則為0.5公尺。F3斷層位於 F1斷層上盤，也因拖曳作用造成褶皺，斷層位態為 $N68^{\circ}E, 28^{\circ}E$ ，依據 G2礫石層中所夾的泥質礫石層的對比（圖七之 CC'），垂直錯距約為1公尺，南牆約為0.6公尺。

根據二號溝南北牆剖面，F1斷層切過 S2礫質砂層並被 T1耕作表土層所覆蓋，可知 F1斷層為近期內活動的斷層，由於1951年地震此處有地表破裂產生，所以 F1斷層應為1951年造成地表破裂之斷層。至於1951年事件的垂直錯距，根據 S2礫質砂層之比對（圖七之 DD'）約為1.7公尺。

大富三號槽溝：

三號槽溝同樣都具有 F1、F2及 F3斷層，F1斷層被 T1耕作土層覆蓋，F2斷層未切穿 O2下部有機土壤層，F3斷層被 S2礫質砂層所覆蓋。F1斷層拖曳作用造成上盤形成倒轉背斜，下盤形成倒轉向斜構造，斷層位態為 $N70^{\circ}E, E26^{\circ}$ 。根據 G2礫石層中夾泥質礫石層於上下盤的對比（圖八之 EE'），北牆垂直錯距大於5公尺，南牆垂直錯距約大於4公尺。F2斷層造成 G2礫石層、O2下部有機土壤層的傾斜，南牆的 G1礫石層與 O2下部有機土壤層也被 F2斷層影響，北牆形成約0.6公尺的垂直高差（圖九之 FF'；圖十一），南牆垂直錯距約為0.6公尺。顯然 F2斷層是在 O2下部有機土壤層形成之後與 G1礫石層沉積之前產生的活動構造。由 O2下部有機土壤層對比，F2斷層垂直錯動量大約0.6公尺以上。F3斷層切過 F1斷層上盤背斜軸東翼，位態為 $N46^{\circ}E, 44^{\circ}E$ ，垂直錯距因地層無法對比，所以無法量測其垂直錯移量。

三號槽溝南北牆剖面中，F1斷層切過 S2礫質砂層並被 T1耕作土層所覆蓋，可知 F1斷層為最近期活動過之斷層，因為本溝中無良好之指標層，故無法得知其垂直錯距。

討論與結論

槽溝剖面的構造特徵為逆衝斷層，造成斷層兩側地層產生倒轉褶皺，並發現至少三次古地震事件。最近一次的產生斷層作用是沿 F1斷層面活動。本研究

認為1951年的地震斷層即沿著 F1斷層活動，其垂直抬升量約為1.7公尺；但經回覆1951年地震所造成的變形，F1斷層兩側地層還存在2公尺的垂直落差。因此 F1斷層至少為兩次以上的大地震事件所造成。此外，F2斷層造成 G1礫石層的沉積層產生變形，其垂直位移至少0.6公尺，由於目前未有本層之定年資料，因此根據 G1礫石層下覆的 O2土壤層的年代，顯示 1550 ± 50 A.D.至1951A.D.間有兩次以上的事件，故可推測，平均每 200 ± 25 年會有產生地表破裂的地震事件發生。

由槽溝沉積層的比對，可以得知自 G1礫石層之後，造成大於6公尺的垂直抬升量，又 O2土壤層之年代約為 1550 ± 50 A.D.，故其長期的垂直抬升速率為大於 15 ± 2 mm /yr。

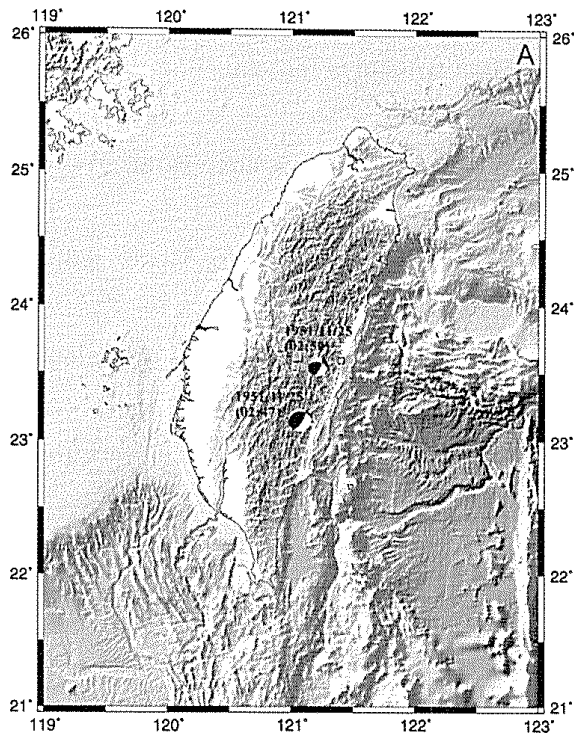
誌謝

本研究經費由經濟部中央地質調查所九十三年度『地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫』－槽溝開挖與古地震研究計畫（3/5）（計畫編號：5226902000-03-93-01），特此致謝。

參考文獻

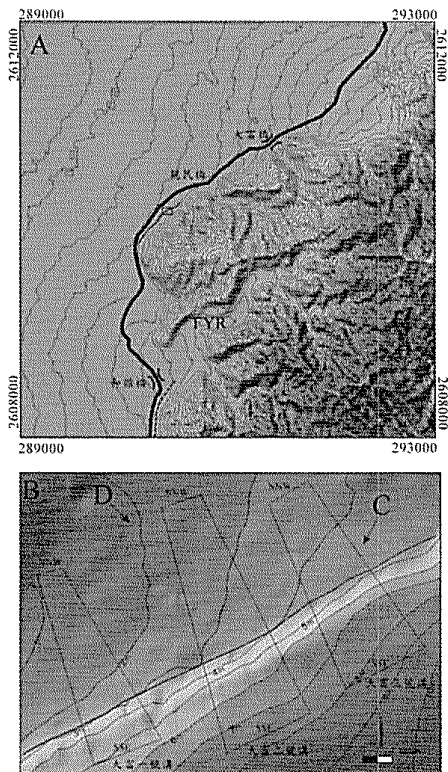
- Barrier, E. and Angelier, J. (1986) Active collision in eastern Taiwan, the Coastal Range: *Tectonophysics*, 115, 167-175.
- Biq, C.C. (1965) The eastern Taiwan rift: *Petrol. Geol. Taiwan*, 4, 93-106.
- Biq, C.C. (1981) Collision, Taiwan-style. *Mem. Geol. Soc. China*, 4, 91-102.
- Biq, C.C. (1984) Present-day manner of movement of the Coastal Range, eastern Taiwan, as reflected by triangulation changes: *Mem. Geol. Soc. China*, 6, 35-40.
- Bonilla, M.G. (1977) Summary of Quaternary faulting and elevation changes in Taiwan, *Mem. Geol. Soc. China*, 2, 43-55.
- Chen, W.S., Lee, K.J., Lee, L.S., Ponti, Daniel. J., Prentice, C., Chen, Y.G., Chang, H.C., and Lee, Y.H. (2004) Slip Rate and Recurrence Interval of the Chelungpu Fault During the Past 1900 Years: *Quaternary International*, 115-116, 167-176.
- Chen, W.S., Chen, Y.G., Chang, H.C., Lee, Y.H., and Lee, C.C. (2001a) Paleoseismic study of the Chelungpu fault in the Wanfung area: *Western Pacific Earth Sciences*, 1, 4, 43-72.
- Chen, W.S., Chen, Y.G., and Cheng, H.C. (2001b) Paleoseismic study of the Chelungpu fault in the Mingjian area: *Western Pacific Earth Sciences*, 1, 3, 351-358.

- Chen, W.S., Huang, B.S., Chen, Y.G., Lee, Y.H., Yang, C.N., Lo, C.H., Chang, H.C., Sung, Q.C., Huang, N.W., Lin, C.C., Sung, S.H., and Lee, K.J. (2001c) Chi-Chi Earthquake, 1999 September 21: A case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes: *Bull. Seis. Soc. Am.*, 91, 5.
- Cheng, S.N., Yeh, Y.T. and Yu, M.S., 1996, Determination of earthquake source parameters using a Monte Carlo algorithm: *Jour. Geol. Soc. China*, 39, 3, 267-285.
- Hsu, T.L., 1962, Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan: *Mem. Geol. Soc. China*, 1, 95-102.
- Jacoby, G., Sheppard, P. and Sieh, K. (1988) Irregular recurrence of large earthquakes along the San Andreas fault-Evidence from trees: *Science*, 241, 196-199.
- Matsuda, T., Ota, Y., Ando, M. and Yonekura, N. (1978) Fault mechanism and recurrence time of major earthquakes in southern Kanto district, Japan, as deduced from coastal terrace data: *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 1610-1618.
- Rundle, J.B. (1988). A physical model for earthquakes, 2, Application to Southern California, *J. Geophys. Res.*, 93, 6255-6274.
- Sieh, K.E. (1978) Slip along the San Andreas fault associated with the great 1957 earthquake: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 68, 1421-1448.
- Sieh, K.E., Stuiver, M. and Brillinger, D. (1989) A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in Southern California: *J. Geophys. Res.*, 94, 603-623.
- Teng, L.S. (1987) Stratigraphic records of the late Cenozoic Penglai Orogeny of Taiwan: *Acta Geologica Taiwanica*, 25, 205-224.
- Yu, S. B. and Kuo, L. C. (2001) Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan: *Tectonophysics*, 333, 199-217.
- Yu, S. B., Chen, H. Y. and Kuo, L. C. (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area: *Tectonophysics*, 274, 41-59.
- 陳文山 (1993) 海岸山脈地區花東縱谷斷層的活動性淺談。地工技術，第四十四期，第52-57頁。
- 陳文山、顏一勤、楊志成、楊小青、陳勇全、蔡坤志、朱耀國、黃能偉、張徽正、林啓文、林偉雄、劉彥求 (2004) 1951年花蓮地震斷層的古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第十五號，137-145頁。
- 陳佳元 (1974) 由三角點檢測證實東臺灣海岸山脈向北北東移動。臺灣省地質調查所彙刊，第二十四號，119-123頁。
- 楊蔭清 (1953) 四十一年來之花蓮地震。台灣文獻，創刊號，第67-71頁。



圖一 1951 年台東地震地表破裂位置與地震震源機制。

Fig.1 The location and focal mechanism of 1951 Taitung earthquake.



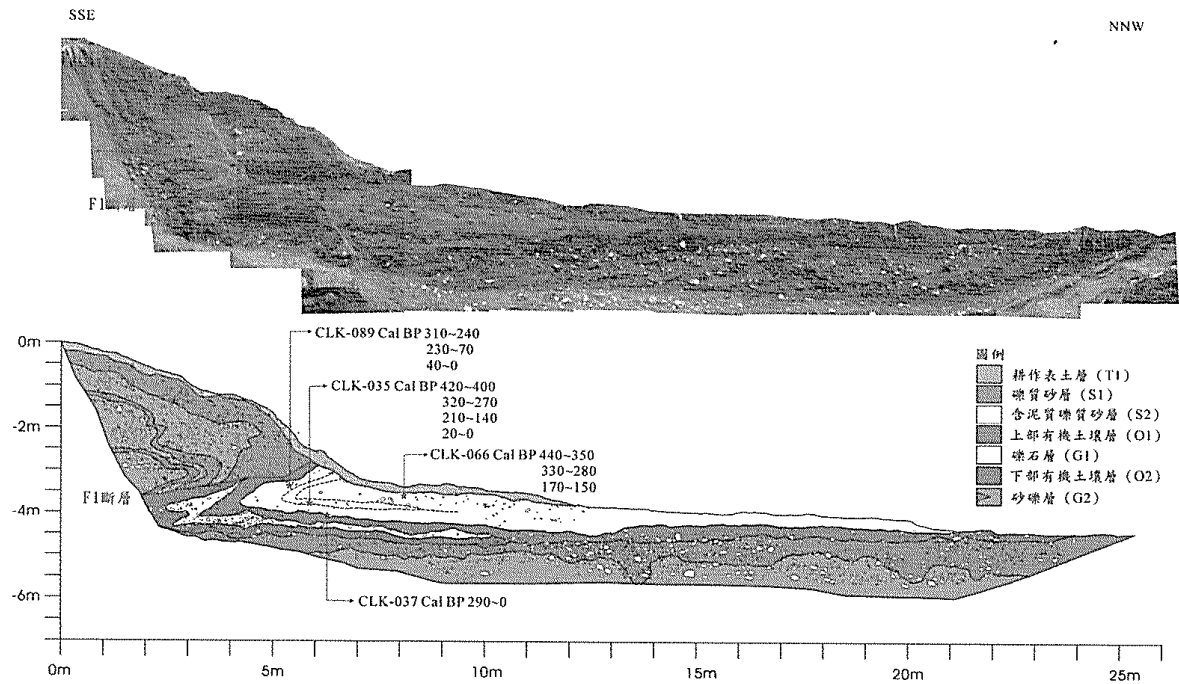
圖二 a、大富地區槽溝附近地形，FYR 為富源溪。b、槽溝位置圖（C、D 分別為圖三 a 與圖三 b 之拍攝位置，沿箭頭方向拍攝）。

Fig.2 a.The trench site position, the FYR is Fuyuan River. b.Topography around the trench.



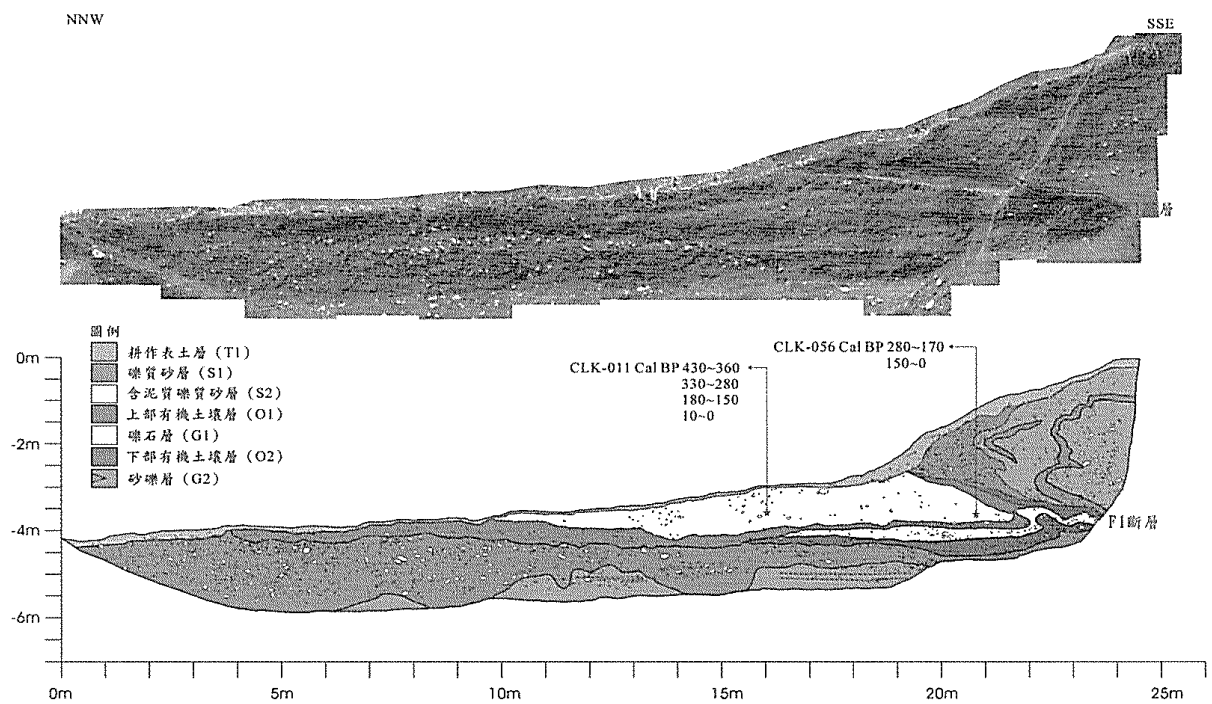
圖三 a、槽溝開挖前之地形崖，向西南方拍攝。b、槽溝全景，向東南方拍攝。

Fig.3 a.The fault scarp view before excavation, photo from NE to SW direction. b.The hold view of trench, photo from NW, photo from NE to SW direction. to SE direction.



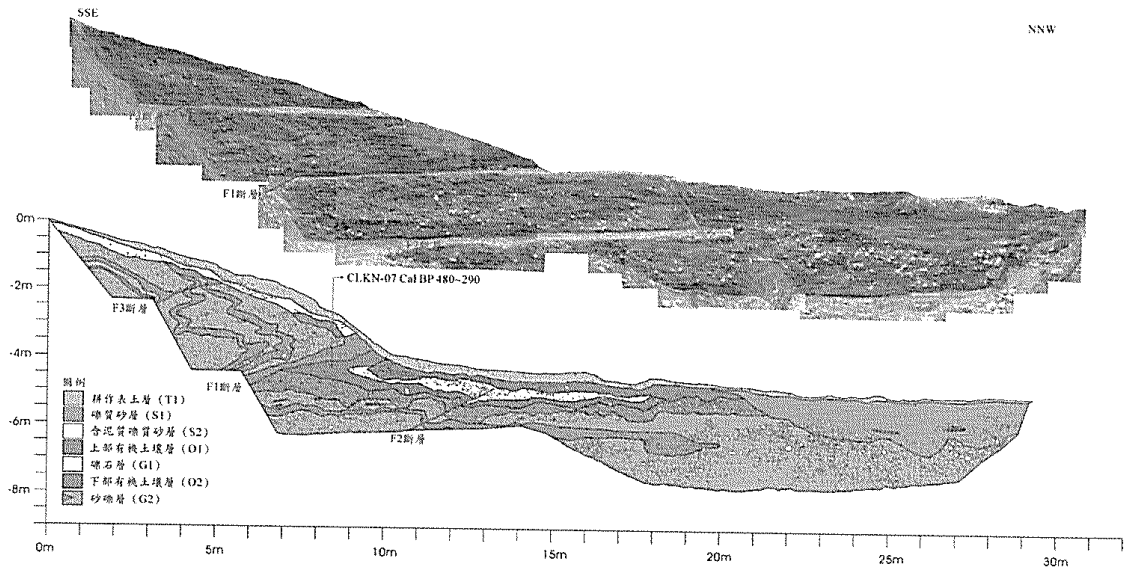
圖四 大富一號槽溝南牆剖面。

Fig4. South wall profile of Dafu No. 1 trench.



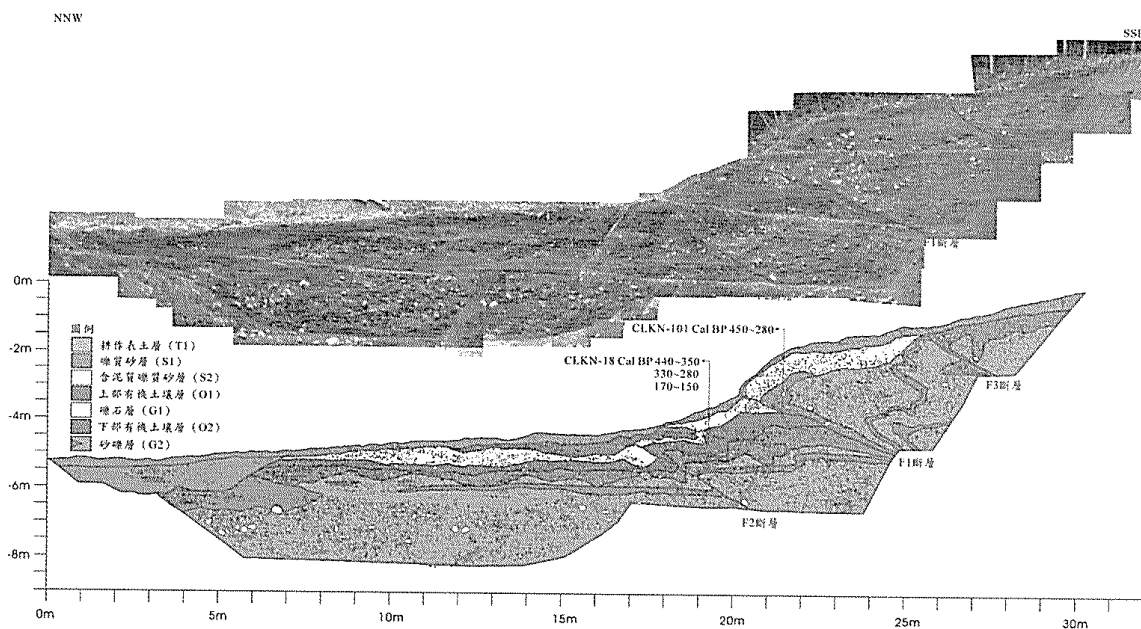
圖五 大富一號槽溝北牆剖面。

Fig.5 North wall profile of Dafu No. 1 trench.



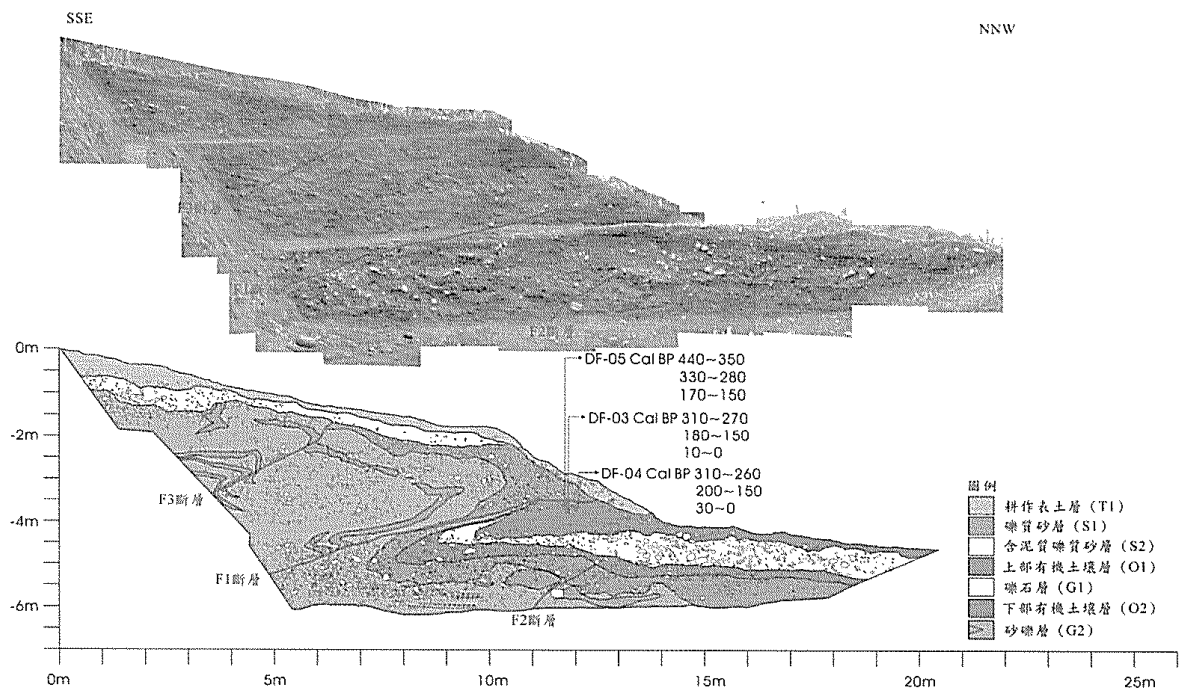
圖六 大富二號槽溝南牆剖面。

Fig.6 South wall profile of Dafu No. 2 trench.



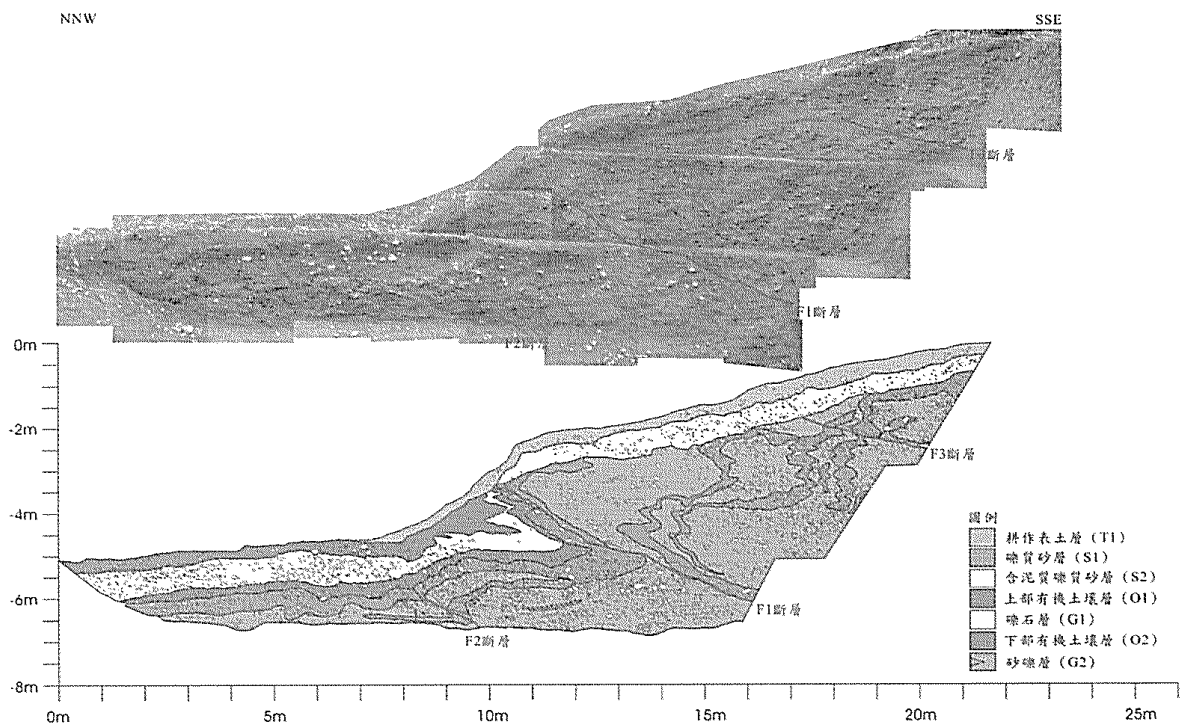
圖七 大富二號槽溝北牆剖面。

Fig.7 North wall profile of Dafu No. 2 trench.



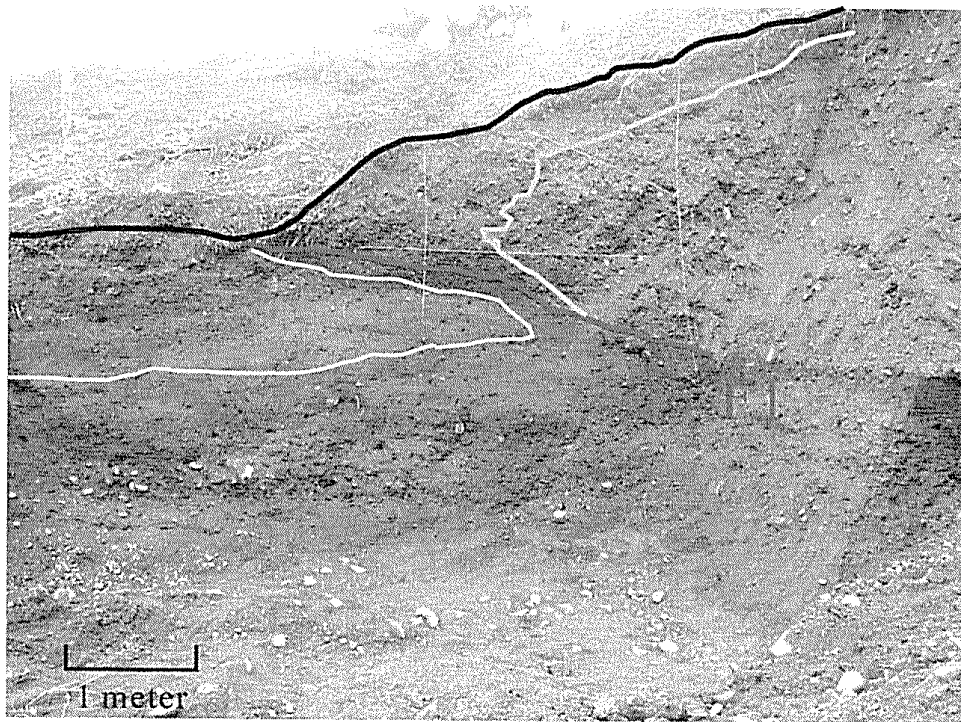
圖八 大富三號槽溝南牆剖面。

Fig.8 South wall profile of Dafu No. 3 trench.



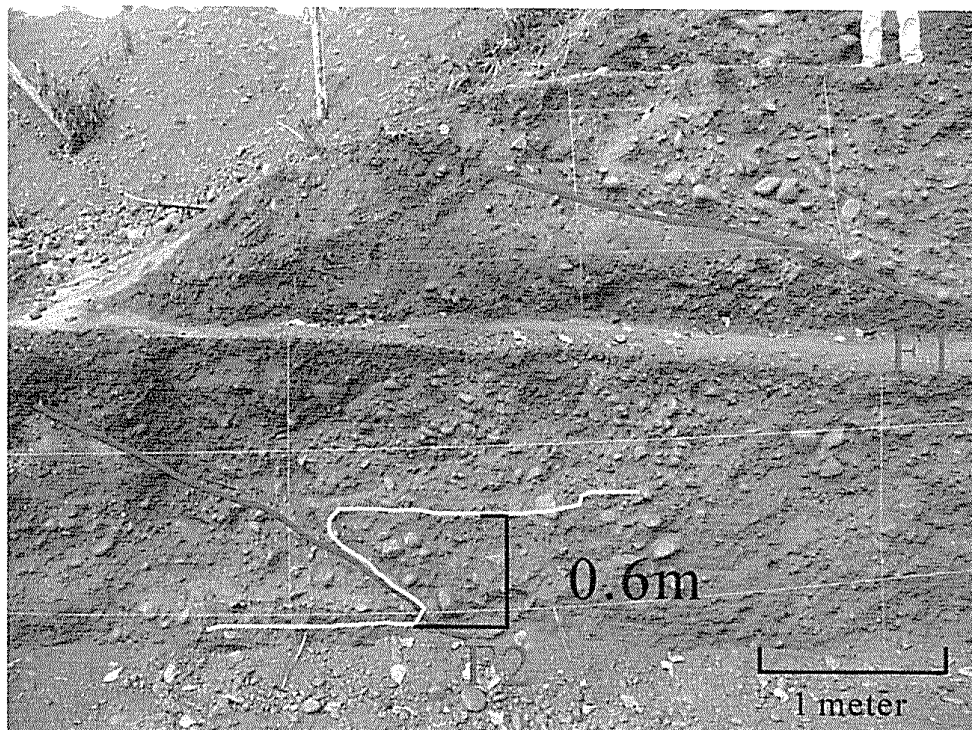
圖九 大富三號槽溝北牆剖面。

Fig.9 North wall profile of Dafu No. 3 trench.



圖十 F1 斷層上下盤沉積層受拖曳形成倒轉褶皺。

Fig.10 The overturn folding along F1 fault.



圖十一 F2 斷層上下盤沉積層錯距 0.6 公尺。

Fig.11 The vertical offset 0.6 m beside F2 fault.