

活動斷層調查與 位移危害度分析案例介紹

李友恒／交通部臺灣區國道新建工程局規劃組地工科科長

田正智／交通部臺灣區國道新建工程局規劃組地工科工程師

李民政／中興工程顧問股份有限公司大地工程部經理

吳富洵／中興工程顧問股份有限公司大地工程部計畫副經理

吳東錦／中興工程顧問股份有限公司大地工程部正地質師

鄒瑞卿／中興工程顧問股份有限公司大地工程部工程師

黃能偉／中興工程顧問股份有限公司大地工程部地質師

前言

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊邊界之褶皺衝撞帶上，活動斷層密布，地震頻繁，為環太平洋地震帶之一環。設計實務上，工程構造物之耐震設計與評估為確保安全之必要工作。因此如何評估地震造成之危害度，並依工程構造物之重要性與經濟性，決定適當的設計或評估標準，為耐震設計與評估之關鍵課題之一。一般而言，地震對工程構造物造成之危害，除地震動造成之地表加速度外，地震斷層錯動引發之地表破裂變形，對工程構造物亦會造成危害，此影響亦應於耐震設計與評估中考量，斷層位移危害度分析因此應運而生。本文以臺中地區某公路工程路線所經過之三義斷層為例，說明如何藉由相關地質調查以求得地震參數，並合理評估斷層位移危害度。

三義斷層調查

三義斷層位於台灣中部，地質構造分區屬於西部麓山帶，麓山帶地質構造乃一典型覆瓦狀排列的褶皺-逆衝斷層帶，地層尚未受到變質作用，但已受到開放型褶皺作用的變形，三義斷層為其中一條低角度逆衝斷層。斷層北段略呈東西走向，由苗栗縣大湖鄉大窩，向西延伸經雙連潭、重河至三義，長約 8 公里；南段呈南北走

向，由三義向南延伸經鯉魚口、中城至大甲溪，向南可能延伸至豐原潭子地區，長約 25 公里（林啟文等^[1]）。本案例公路工程即通過三義斷層之南段。

依地形圖顯示，三義斷層南段通過后里台地與臺中盆地北部，東側鄰西部麓山帶丘陵區。斷層地形於后里台地區，台地和東側麓山帶之地形存在地勢高差，但部分地區因為人為開發與河系侵蝕影響，斷層構造地形不甚明顯。於臺中盆地北部，因豐原地區人為開發與河系侵蝕影響，斷層構造地形不明顯；豐原地區南側鑷子坑口至大里溪之間，呈南北向或東北-西南向的斷層構造崖階線形^[2]。

就地層部分而言，斷層上盤主要為新第三紀的桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層與頭嵙山層；下盤則是更新世至全新世之頭嵙山層、階地堆積層與沖積層。

近年研究顯示三義斷層南段於全新世以來曾經活動^[1,3]，故列為第一類活動斷層，並於 2015 年 12 月正式公告斷層南段之活動斷層地質敏感區^[2]。

依據林啟文等^[1]之活動斷層條帶地質圖，本案例公路工程之路線於臺中市豐原區南側與潭子區交界處原軍方舊有之新田靶場處通過三義斷層。本案例於工程規劃階段即針對三義斷層進行地表地質調查、地球物理探測與地質鑽探，以詳細瞭解三義斷層對路線之影響，並於初步設計階段進一步辦理地質鑽探與槽溝開挖調查，以掌握斷層帶特性、斷層活動性並推估斷層參數。

地表地質調查

新田靶場長約 400 公尺，約略呈東西向配置（圖 1），區內業經整地而未發現任何斷層露頭及斷層地形特徵。但於靶場之南、北兩側，於文獻記載之可能斷層位置，可見有一地形高差，約略呈南、北向延伸。靶場之東側緊鄰一階地崖，高差達 40 至 50 公尺，現地調查於坡趾附近發現一斷層露頭（圖 2），可見風化之砂岩逆衝覆蓋於礫石層之上，初步推測有可能為三義斷層之分支斷層。

地球物理探查

為能初步掌握調查區及鄰近地區可能之地質構造狀況，本計畫採用地球物理探查方法進行調查。經檢討該區域之地層特性與分布，因地表覆蓋有厚層之沖積礫石層，若採用震波探測方法，震波遭遇礫石層之干擾較大，探測效果恐不理想。同時考量礫石層與岩層之地電阻值有較顯著之差異，使用地電阻影像剖面探查方式應可獲得較具參考性之成果。測線配置起自新田靶場端，

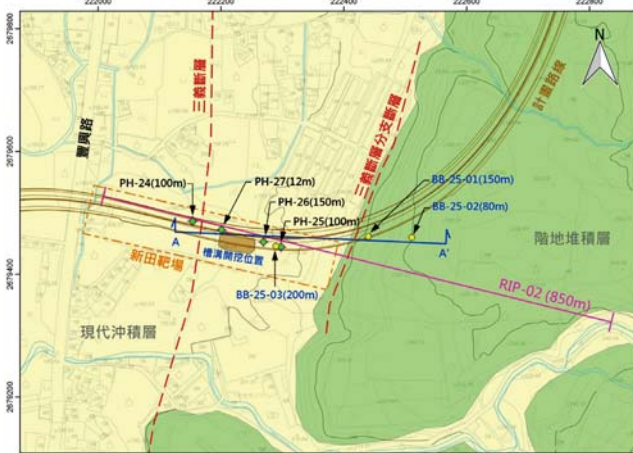


圖 1 本案各項地質調查相關位置圖



圖 2 新田靶場東側階地崖坡趾處之斷層露頭

沿靶場往東延伸至階地上方（圖 1），測線編號 RIP-02，總長度 850 公尺。其探測結果（圖 3）顯示在剖面里程 220 公尺及 410 公尺處，兩側地層有較大之地電阻率差異，推測此兩處可能有斷層不連續面存在。剖面中較高電阻率之地層應為礫石層，在新田靶場部分，礫石層之厚度較大，約有 70 至 80 公尺厚，階地上方之礫石層厚度較薄，約 20 至 30 公尺厚。

地質鑽探調查

本案例於規劃階段，依據相關文獻、現地調查之地形特徵、及地電阻影像剖面探查結果，於推估可能之斷層位置兩側進行地質鑽探，以二分逼近之方式調查斷層較明確之位置。本階段於新田靶場內可能斷層位置兩側共施鑽 4 孔地質鑽孔，自西而東分別為 PH-24（100 公尺垂直孔）、PH-27（12 公尺垂直孔）、PH-26（150 公尺斜孔，70 度西傾）及 PH-25（100 公尺垂直孔）（圖 1）。第一階段於斷層下盤與上盤分別施鑽 PH-24 與 PH-25 兩鑽孔，兩孔間距約 150 公尺。PH-24 鑽孔鑽至 100 公尺深均為礫石層，PH-25 鑽孔則於 74.93 公尺深鑽遇岩盤，岩盤具發達之剪裂構造，剪切紋理角度約 20 至 40 度。依據此兩孔鑽探結果，可將斷層可能位置侷限於兩鑽孔之間（圖 4）。第二階段於 PH-25 鑽孔之西側約 25 公尺處施鑽向西傾斜 70 度之 PH-26 斜孔，惟該鑽孔並未如預期鑽遇岩盤，表示斷層位置尚在 PH-26 斜孔之東側，位於 PH-25 與 PH-26 兩鑽孔間之狹小範圍內。施鑽 PH-26 鑽孔之同時，於 PH-24 鑽孔東側約 50 公尺處施鑽深度 12 公尺之 PH-27 鑽孔，以調查該區表層土層之延伸與是否受到斷層活動之影響，鑽探結果顯示該處之表層土層並未受到斷層活動之影響。

本工程案例於初步設計階段，為再進一步確認三義斷層之位置，於 PH-25 與 PH-26 鑽孔之間，補充施鑽深度 200 公尺之 BB-25-03 垂直孔。BB-25-03 鑽孔於深度 75.5 公尺處鑽遇岩層，而於深度 106.1 公尺處再度鑽遇礫石層，並至孔底均為礫石層。本鑽孔於深度 75.5 公尺至 106.1 公尺之間應係貫穿斷層之上盤岩層，因此確認三義斷層之分布位置。另於靶場東側三義斷層分支斷層之上盤分別施鑽深度 150 公尺及 80 公尺之 BB-25-01 及 BB-25-02 兩垂直孔，以探查分支斷層。BB-25-01 鑽孔於深度 84.5 公尺處鑽遇下盤礫石層，至深度 121.45 公尺再次鑽進岩盤。BB-25-02 鑽孔於深度 23.1 公尺以下至孔底，鑽遇下盤之砂土礫石層。依據地球物理探查與地質鑽探結果所繪製之新田靶場區三義斷層地質剖面圖如圖 4 所示。三義斷層之斷層面約為 20 至 40 度，依

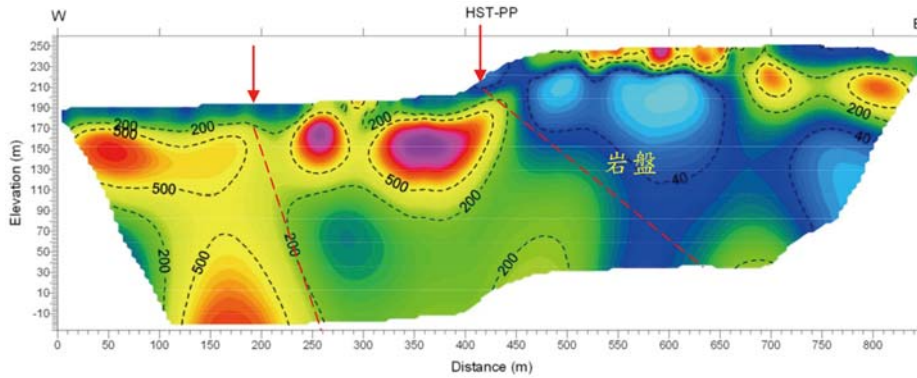


圖 3 新田靶場 RIP-02 測線地電阻影像剖面探查成果

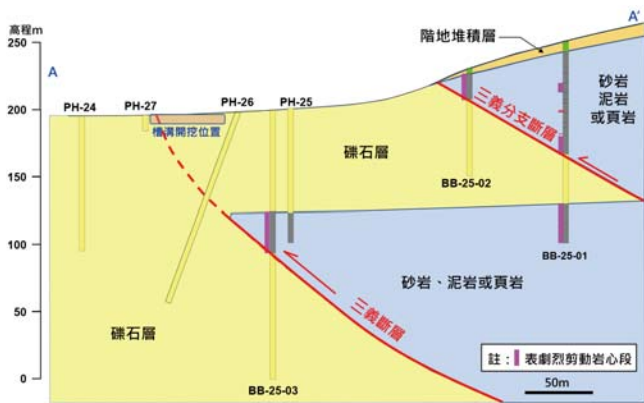


圖 4 新田靶場三義斷層地質剖面圖



圖 5 槽溝開挖完成全景

據 PH-27 鑽孔表層土壤未受到斷層活動之擾動推測，斷層面於近地表處可能呈現較陡之傾角，約 60 度。三義分支斷層之斷層面約成 40 度傾角。

槽溝開挖調查

槽溝開挖調查係利用判釋與測定槽溝剖面中之岩層年代，以及估算過去斷層活動事件中岩層的錯移量 (displacement)，藉以了解斷層的活動性與古地震活動歷史。利用槽溝開挖方法可以直接觀察地表下淺層沉積層受到斷層或構造活動的影響，並由沉積層與錯動面之截切關係來研判斷層的走向、傾角、位移方向、斷層活動事件次數，配合碳十四定年資料來推估該斷層發生地震之再現週期及長期滑移速率等，並獲得地震相關參數，以供後續斷層位移危害度及工程設計使用。

本案例依據前述相關地質調查成果，同時考量用地取得之因素，選擇於新田靶場內 PH-26 及 PH-27 兩鑽孔之間進行槽溝開挖調查 (圖 1)。槽溝形貌為地表下四階式開挖，其長度約 40 公尺，寬度約 15 公尺，四階總深度約 8 公尺。槽溝開挖完成後進行南、北兩側剖面之地質測繪與碳十四定年樣本採樣 (圖 5)。

由本槽溝剖面南、北側剖面調查結果，可區分出三次古地震事件 (圖 6)，最早一次為 4,490 ~ 5,710 BP 之後，第二次事件在 3,400~3,720 BP 之後，第三次事件則在 1,860 BP 之後，其中前二次造成沈積層傾斜，第三次則造成沈積層錯移約 30 公分，然斷層未露出地表，僅造成礫石層變形或沉積層局部錯移。由本槽溝開挖之三次古地震事件，推估其再現週期約為 1,620 年，由於各次事件時間間隔大，故實際之再現週期可能小於 1,620 年。以本槽溝剖面中分層之最大位移落差與可能活動年代來估算，其垂直抬升速率約 0.78 公厘/年，配合本案推估淺層處斷層角度約 60 度，則沿斷層面之長期滑移速率約 0.9 公厘/年。而推估滑移速率可能因實際落差增加及間隔年代之縮小而變大，因此推估長期滑移速率有可能大於 0.9 公厘/年。綜合槽溝及相關地質鑽孔資料，推算三義斷層活動性相關參數如表 1 所示。

表 1 三義斷層活動性相關參數表

斷層名稱	斷層角度	斷層性質	最近可能發生年代 (BP)	垂直變動速率 (mm/yr)	長期滑移速率 (mm/yr)	再現週期 (年)
三義斷層	近地表處約為 60 度；以下推估約 40 度。	逆衝	1,860BP 之後	0.78	0.9	小於 1,620 年

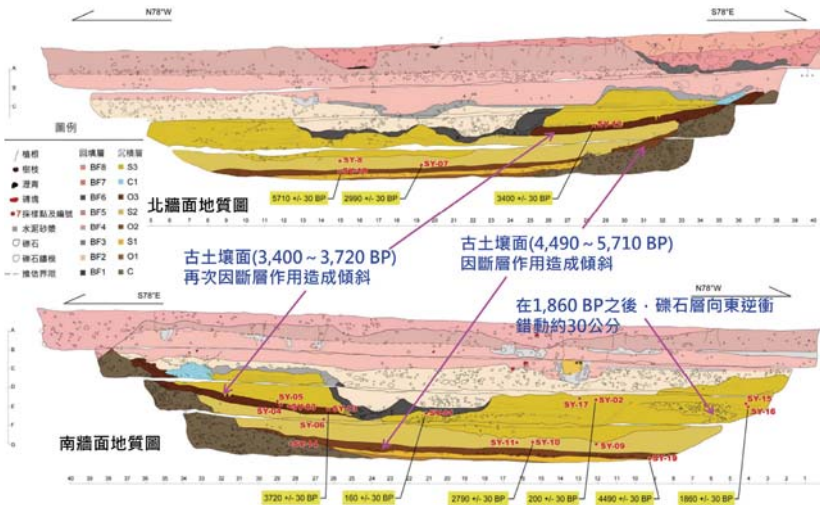


圖 6 槽溝開挖破十四定年及斷層活動事件解釋成果圖

斷層位移危害度分析

目前業界與學界採用之位移危害度分析方法，依分析概念可分為定值式與機率式位移危害度分析。定值式分析為利用位移量與地震規模、斷層機制以及斷層距離等參數之迴歸公式，推估斷層發生設計地震時，工址之位移量大小。機率式危害度分析之最早由 Cornell [4] 提出，其主要係假設地震之發生符合包生過程 (Poisson Process) 之統計模式，並利用統計模式分析地震資料，計算不同危害程度下之年發生率 (Annual Frequency of Exceedance)，而年發生率之倒數即一般所稱之再現週期 (Return Period)。

機率式斷層位移危害度分析 (PFDHA) 方法

本計畫之機率式斷層位移危害度分析 (Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis, PFDHA)，採用地震法 (Earthquake Approach) 斷層位移危害度分析 (Youngs 等人 [5])，地震法之基本理論與分析程序與 Cornell [4] 提出之機率法地震危害度分析 (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) 相同。目的為計算場址地表破裂位移 (D) 超越 d 的年發生率 $v(d)$ ，計算之公式可大略以下式表示：

$$v(d) = \sum_n N_n(m_0) \int_{m_0}^{m_u} f_n(m) \left[\int_0^\infty P_n(D > d | m, r) \right] dm \quad (1)$$

其中 $N_n(m_0)$ 為震源 n 過去在單位時間 (如每年) 內，規模大於 m_0 地震之平均發生次數，考慮該震源可能發生之地震規模介於 m_0 與 m_u 之間； m_u 為震源可能發生最大地震規模； m_0 為分析考量地震規模下限； f_n

(m) 為震源 n 發生地震時，地震規模分布之機率密度函數； $P_n(D > d | m, r)$ 為震源 n 發生規模 m 地震以及與場址距離 r 時，場址位移 D 大於 d 之機率。場址距離 r 為場址距離斷層最近之地表距離。

$N_n(m_0)$ 利用斷層能量累積與釋放之概念，配合斷層年平均滑移速率 (S , mm/year) 推估如下：

$$N_n(m_0) = \frac{\mu AS}{\text{Mean} \left[\frac{M_0}{eqk} \right]} \quad (2)$$

μ 為地盤剪力模數 (一般採用 3×10^{11} dyne/cm²)； A 為斷層破裂面積 (cm²)； $\text{Mean} [M_0/eqk]$ 為每次地震平均釋放能量。

一般地震危害度分析時，假設在影響範圍內，斷層錯動一定會造成場址發生不同程度之加速度 (與場址距離斷層最短距離有關)；Youngs 等人之斷層位移分析研究 (Youngs 等人 [5]) 發現，在影響範圍內，斷層錯動不一定必然造成場址地表破裂，因此將 $P_n(D > d | m, r)$ 改寫為下式：

$$P_n(D > d | m, r) = P_n(\text{Slip} | m, r) P_n(D > d | m, r, \text{Slip}) \quad (3)$$

其中 $P_n(\text{Slip} | m, r)$ 為震源 n 發生規模 m 地震與距離 r 時，場址發生地表破裂之機率； $P_n(D > d | m, r, \text{Slip})$ 為震源 n 發生規模 m 地震與距離 r 時，場址發生地表破裂位移時，位移 D 大於 d 之機率。

根據地震事件後之斷層位移測繪資料分析，場址因斷層錯動造成之地表破裂位移形式可分為主要位移 (Primary Displacement) 與次要位移 (Secondary Displacement)，主要位移來自於主要破裂 (Principal Rupture) 之作用，次要位移來自於次要破裂 (Secondary Rupture 與 Distributed Rupture) 之作用。主要破裂為地震發生時，地震能量釋放之斷層破裂區域；次要破裂為地震發生時，主要破裂附近斷層因主要破裂造成之破裂。依據不同位移型式以及斷層類型，不同研究者提出對應之 $P_n(\text{Slip} | m, r)$ 以及 $P_n(D > d | m, r, \text{Slip})$ 計算公式，如 Moss and Ross [6] 對逆斷層提出之公式。當公式 (1) 中各項分析參數與模式決定後，便可進行地震法分析。

由以上地震法分析之結果，可將提供場址之危害度曲線 (Hazard Curve)，危害度曲線為公式 (1) 計算所得之年發生率 ($v(d)$) 或再現週期 ($1/v(d)$) 對場址地表破裂位移 (d) 作圖之曲線。設計所需之場址位移值，可依據工程之重要性與經濟性決定設計之年發生率或是再現週期，由危害度曲線對應設計位移值。

此外，利用包生過程 (公式 (4))，可將年發生率轉換成未來 T 單位時間 (年) 內，至少發生場址位移 (D) 超越 d 之機率。

$$P(D > d | T) = 1.0 - e^{-v(d) \cdot T} \leq v(d) \cdot T \quad (4)$$

例如 $v(d)$ 為 4.04×10^{-4} ，再現週期為 $1/(4.04 \times 10^{-4}) = 2475$ 年，利用公式 (4) 可轉換成 50 年內至少發生場址位移 (D) 超越 d 之機率為 2% (或其同義詞「50 年內超越機率 2%」)。

三義斷層機率式斷層位移危害度分析結果

本節針對地震法分析參數與模式進行說明 (如表 2)，其中地震規模採用 Wells and Coppersmith^[7] 及 Yen and Ma^[8] 提供之斷層長度與地震矩規模關係式推估；地震規模分布採用斷層僅重複發生最大可能地震規模之純粹特徵地震 (Pure Characteristic) 模式，該模式中僅最大可能地震，而不考慮中小地震之發生；位移發生機率模式採用 Wells and Coppersmith^[9] 提出之經驗公式，該公式採用 276 組世界各地各類型斷層資料進行迴歸；斷層位移量預測公式，採用 Moss and Ross^[6] 針對逆斷層所提出之經驗公式。

地震法機率式斷層位移危害度分析之成果如圖 7，如依照耐震設計規範中採用之地震水準，設計地震基準 (再現週期 475 年) 之情況下，相對應之地表破裂位移量遠小於 1 cm，如用危害程度說明結果，為設計

年限 50 年時間超越機率 10%；最大可能地震基準 (再現週期 2,500 年) 之情況下，相對應之地表破裂位移量為 1 cm，為設計年限 50 年時間超越機率 2%。

三義斷層定值式位移分析結果

除機率法分析外，本分析另提供定值法結果供比較分析，利用斷層位移預測公式計算位移量中值，計算可能位移量之範圍，斷層位移預測公式採用 Petersen et al.^[10] 與 Moss and Ross^[6] 提出之公式 (表 3)。

定值式分析結果彙整如表 4 所示，三義斷層採用特徵地震規模為 6.85 及 6.95，計算所得位移量介於 0.79 m 至 1.08 m。

本計畫之斷層設計位移量，建議參照美國加州運輸部 (California Department of Transportation) 之斷層位移量取舍建議，採用機率式分析與定值式分析結果之較大值進行設計，因此建議之三義斷層設計考量位移量為 1.1 m。

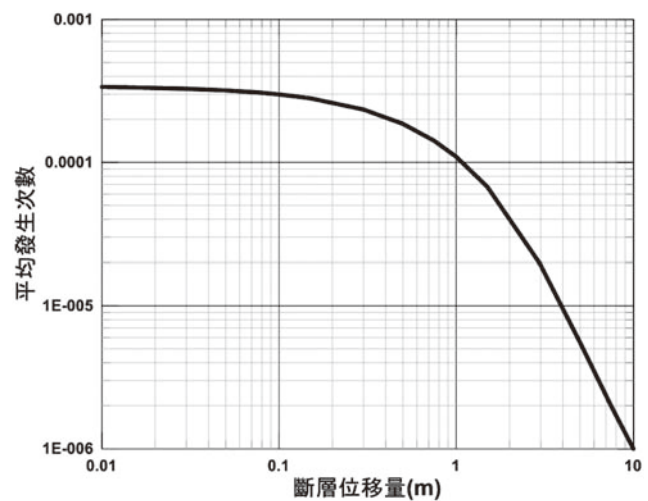


圖 7 三義斷層之斷層位移危害度曲線

表 2 三義斷層分析參數與模式表

參數或模式	數值或公式	參數或模式	數值或公式
長度 / 傾角	33km/60 度東	最大可能地震規模 ⁽¹⁾	$M_w = 6.85^{(2)}$, $M_w = 6.95^{(3)}$
規模分布模式	純粹地震特徵模式	滑移速率	1.0mm/yr (權重 0.6) 0.5mm/yr (權重 0.2) 1.5mm/yr (權重 0.2)
位移發生機率模式 ⁽⁴⁾	$P_n(Slip m, r) = e^{a+bm} / (1 + e^{a+bm})$ $a = -12.51$, $b = 2.053$, m 地震規模	位移量預測公式 ⁽⁵⁾	$\log AD = 0.3244M - 2.2192$ (AD 單位公尺)

註：(1) 各採 0.5 權重值計算 (2) Wells and Coppersmith^[7] (3)Yen and Ma^[8] (4)Wells and Coppersmith^[8] (5) Moss and Ross^[6]

表 3 平均斷層位移量計算公式

關係式	公式
Petersen et al. ^[10] $d = f(M, l/L)$	$\ln(d) = 3.3041x^* + 1.7927M - 11.2192$ d 單位公分, M 為地震規模 $x^* = \sqrt{1 - \frac{1}{0.5^2} [(l/L) - 0.5]^2}$
Petersen et al. ^[10] $d = f(d/AD(1/L), AD)$ 與 Wells and Coppersmith ^[7] $AD = f(M)$	$\ln(d/AD) = 3.2699x^* - 3.2749$ $x^* = \sqrt{1 - \frac{1}{0.5^2} [(l/L) - 0.5]^2}$ $\log AD = 0.69M - 4.80$ AD 單位公尺, M 為地震規模
Moss and Ross ^[6] $d = f(d/AD(1/L), D)$ 與 Moss and Ross ^[6] $AD = f(M)$	$f(z) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{z}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(z/\lambda)^k} \quad z = d/AD$ $k = \exp\left(-31.8\left(\frac{l}{L}\right)^3 + 21.5\left(\frac{l}{L}\right)^2 - 3.32\frac{l}{L} + 0.431\right)$ $\lambda = \exp\left(17.2\left(\frac{l}{L}\right)^3 - 12.8\left(\frac{l}{L}\right)^2 + 3.99\frac{l}{L} - 0.38\right)$ $\log AD = 0.3244M - 2.2192$ AD 單位公尺, M 為地震規模

表 4 三義斷層定值式位移量分析成果表

斷層	地震規模 Mw	位移預測公式	位移量 (m)	位移量範圍 (m)
三義斷層	6.85	Petersen et al. ^[10]	0.79	0.79 至 1.08
		Petersen et al. ^[10] Wells and Coppersmith ^[7]	0.84	
		Moss and Ross ^[6]	1.01	
	6.95	Petersen et al. ^[10]	0.94	
		Petersen et al. ^[10] Wells and Coppersmith ^[7]	0.99	
		Moss and Ross ^[6]	1.08	

定值式位移分析法之優點為評估結果對使用者而言簡明且易瞭解。然而，定值式分析並無法將地震之不確定性以及地震發生之機率，合理且有系統的於評估中考量，將有可能誤導使用者，或採取過於保守之設計或評估標準。

參考文獻

- 林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村 (2008), 「臺灣中部的活動斷層層二萬五千分之一活動斷層條帶地質圖說明書」, 經濟部中央地質調查所特刊, 第 21 號。
- 中央地質調查所 (2015), 活動斷層地質敏感區劃定計畫書—F0010 三義斷層。
- 劉彥求、李奕亨 (2006), 「三義斷層於大甲溪兩岸剖面與淺層震測結果比對分析」, 2006 年台灣地區地球物理學術研討會摘要集。
- Cornell, C. A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 5, pp.1583-1606.
- Youngs, R. R., et al. (2003), "A Methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)," *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 1, pp. 191-219.
- Moss, R. E. S. and Ross, Z. E. (2011), "Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis for Reverse Faults," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, pp. 1542-1553.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J. (1994), "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, pp. 974-1002.
- Yen, Y.-T., and Ma K.-F. (2011), Source-Scaling Relationship for M 4.6-8.9 Earthquakes, Specifically for Earthquakes in the Collision Zone of Taiwan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 2, pp. 464-481.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1993), "Likelihood of Surface Rupture as a Function of Magnitude (Abs.)," *Seismological Research Letters*, Vol. 64, No. 1, pp. 54.
- Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz, D. P., and Frankel, A. D. (2011), "Fault Displacement Hazard for Strike-Slip Faults," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 2, pp. 805-825.

結語

本案例針對活動斷層之調查，考量現地地形特徵與地層特性，選用適當有效之地球物理探測方法，獲取地下地質構造具體之初步模式，並據以規劃地質鑽探之位置與方位，以進一步確認斷層位置與斷層帶特性。根據相關地球物理探查與地質鑽探之成果，配合斷層地形特徵與表土層擾動情況，合理選擇適當之槽溝開挖調查位置，進而獲得斷層之活動性與古地震史，並求得斷層相關參數，供後續相關分析與設計重要參考依據。藉由本案例活動斷層調查方法與程序之介紹，期能供後續相關工程案例之參考。

機率式位移危害度分析利用統計模式，考慮地震之不確定性及發生之機率，並經由包生過程將所得之年發生率與一般所熟知之危害程度（例如：50 年內超越機率 10%）結合，評估結果可讓使用者依據建築物之重要性以及經濟性選擇適當標準。因此目前不論學界或業界，已逐漸接受並採用機率式位移危害度分析運方法，評估設計考量之斷層可能位移。