

重大設施活動斷層調查技術

李易叡

財團法人中興工程顧問社 副研究員

前言

2011年3月11日在日本宮城縣東方外海發生的地震矩規模9.0地震、與緊接引起的海嘯，在福島第一核電廠造成了一系列設備損毀、爐心熔毀、輻射釋放等災害事件。此重大災害使得台灣核電廠之安全性受到全國的重視，其中包括鄰近核電廠之活動斷層若是錯動引發地震，是否會對核電廠本身造成危害，成為重要的探討議題。

台灣位於菲律賓海板塊及歐亞板塊之交界處，活躍的板塊運動使台灣的地震頻仍，因此，在台灣不只是核電廠，有許多重大設施，例如水庫、高架道路、高科技廠房等等，是否會受到活動斷層錯動而致災，都是需要正視的課題。

本文將會簡短描述重大設施場址周圍之活動斷層該如何進行調查，包括針對活動斷層需了解的特性有哪些，活動斷層調查項目包含了什麼，最後則是調查結果可以應用到哪些方面來進行評估。

活動斷層特性

活動斷層的調查目的，主要是爲了了解斷層的特性，包括位置、規模大小以及活動度。

(1) 位置

活動斷層的位置，是進行活動斷層調查時首先需要知道的資訊，而且只有在確定活動斷層之位置後，才能進行後續的調查工作。對於重大設施而言，選擇距離活動斷層越遠的場址，其安全性自然較高，不過以台灣都會區如此密集的開發，一般房屋建築及公共設施皆很有可能直接坐落於活動斷層之上或鄰近兩側。目前國內尚無明確的法規要求避免或約束工程開發的安全性，因此，地震防災可能藉由提高設施耐震設計或是地震保險等方法來實施，而耐震設計和地震保險就和場址附近活動斷層的規模大小及活動度有關。

(2) 規模大小

規模大小指的就是活動斷層在破裂時引發之地震所釋放的能量大小，地震之規模大小與活動斷層之尺度有關，圖1中左圖爲地震規模與斷層破裂長度分布圖，右圖爲地震規模與斷層面積之分布圖，圖中之資料點分別爲走向滑移、正斷層、逆斷層之地震（Wells and Coppersmith, 1994），迴歸後可以得到斷層尺度-規模之經驗公式。

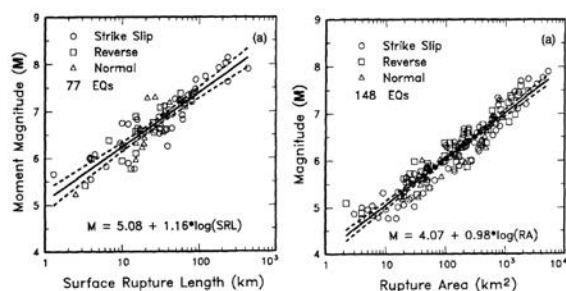


圖 1 斷層尺度與地震矩規模之分布 (Wells and Coopersmith, 1994)

因此，我們要了解活動斷層會引發多大規模的地震，除了從歷史地震目錄推估外，也可藉由斷層尺度經驗公式來獲得，斷層尺度即斷層長度、斷層面積等幾何面相關參數。

(3) 活動度

活動斷層的活動度通常取決於其滑移速率，平均滑移速率是斷層活動的重要指標；滑移速度越快則斷層活動程度也越高 (Bollina, 1970; Matsuda, 1975; Slemmons, 1982)，斷層滑移速率是單位時間內的斷層錯動距離。因為斷層通常是間歇性錯移而少連續滑動，所以一般指的是斷層的平均滑移速率，如果知道斷層的滑移速率及一次地震的錯移量，即可推估地震重複間隔 (李錫堤, 1993)。

活動斷層調查項目

活動斷層各特性的調查方式如表 1 所示，活動斷層潛勢分析流程則可參考圖 2 之調查流程圖。活動斷層調查項目說明可分為遙測與地形、現地地質調查及地球物理探勘三部份，說明如下：

(1) 遙測與地形：

現今技術包括航照判釋、高精度數值高程模型判釋以及合成孔徑雷達差分干涉，說明如下：

(a) 航照判釋(構造線型及變動地形判釋)：為斷層條帶地質圖測製之先期作業。斷層活動會造成地面斷裂、錯移(offset)或撓曲，常在第四紀地形面上留下線形、崖、窪地、隆起、斷錯等異於常態的地形特徵，藉由航空照片立體像對判釋這些異常地形 (anomalous landforms，或稱變動地形 displaced landforms)，可用以推斷活動構造的位置、性質和活動度。

(b) 高精度數值高程模型判釋：為了精確表達大地的三維立體形貌，除了需要高解析度的航空照片或衛星影像外，更需要高精度及高解析度之數值高程模型(Digital Elevation Model, 簡稱 DEM)。數值高程模型可依應用需要，呈現平面或立體的模型。利用數值高程模型，可輕易地繪製地形剖面，而且地質與地形的重要特徵也都能很快加以檢視與量化。目前以空載雷射測距掃描技術所製成的數值地形，在解析度、精確度、方便性、與去除因建物與樹木遮蔽等方面極為優越，且符合未來各種地形特徵研究應用之要求(Haugerud et al., 2003; Carter and Shrestha, 2003；黃鐘等，2004；Chen et al., 2005；Chan et al., 2007)。

(c) 合成孔徑雷達差分干涉判釋：近來合成孔徑雷達差分干涉(D-InSAR)技術發展迅速，尤其是利用地表人工結構體或天然岩石露頭當做持久性散射體的合成孔徑雷達差分干涉(PS-InSAR)之分析技術更能

得到精確的成果。由於雷達影像是大範圍掃描(一幅雷達影像範圍為 100 km X100 km)，PS-InSAR 的運算結果在市區往往每平方公里可達數十個持久性散射點，是一種高空間密度、高精度且低成本的技术，由 PS-InSAR 所測量的結果配合大地測量

監測可以得到地表變動，掌握震間變形速率，監測地表短期變形速率，了解斷層滑移趨勢並提供斷層出露在地表較明確的位置。

表 1 活動斷層基本資料之蒐集

斷層參數		調查方法與分析模式
斷層位置與特性	斷層位置與長度	<ul style="list-style-type: none"> ● 遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵 ● 地表地質調查與河階地形研究 ● 地物探勘瞭解地下地層錯動情形 ● 既有鑽探瞭解跨斷層之地層差異 ● 根據既有地質鑽探建構地質剖面
	斷層分段與分支	<ul style="list-style-type: none"> ● 遙測地形判釋，各分段地形抬升量有所差異 ● 地表地質調查，以位態改變分辨之 ● 跨斷層河階地形，各分段河階發育不一致 ● 主斷層錯動量與地震規模皆大，分支斷層則次之。 ● 主斷層與分支斷層可以透過運動學分析反演之來綜合解釋。
	斷層位態與 3D 幾何形貌	<ul style="list-style-type: none"> ● 淺層與深層鑽探，斷層走向、傾角、震源機制提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 淺部與深部震測，提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 採用 SEC-2D 軟體進行運動學分析與模擬地下三維構造。
	斷層機制	<ul style="list-style-type: none"> ● 地表斷層露頭與斷層擦痕。 ● 斷層鄰近地震機制。 ● 以 GPS 速度場推估地殼應變量探討機制。
斷層活動性與變形	活動歷程	<ul style="list-style-type: none"> ● 歷史文獻資料有關地震記載 ● 古地震研究(既有槽溝開挖、跨斷層河階定年)
	平均滑移速率	<ul style="list-style-type: none"> ● 短期斷層滑移速率，以 GPS 速度場與精密水準資料推估。 ● 長期斷層滑移速率由槽溝開挖或是階地定年推估
	活動間隔	<ul style="list-style-type: none"> ● 利用長期斷層滑移速率資訊，採用特徵地震模式及適當的統計模式進行推估。
	地表變形量	<ul style="list-style-type: none"> ● 根據斷層機制、GPS 與精密水準資料、透過運動學分析推測地表可能之變形量與變形模式。

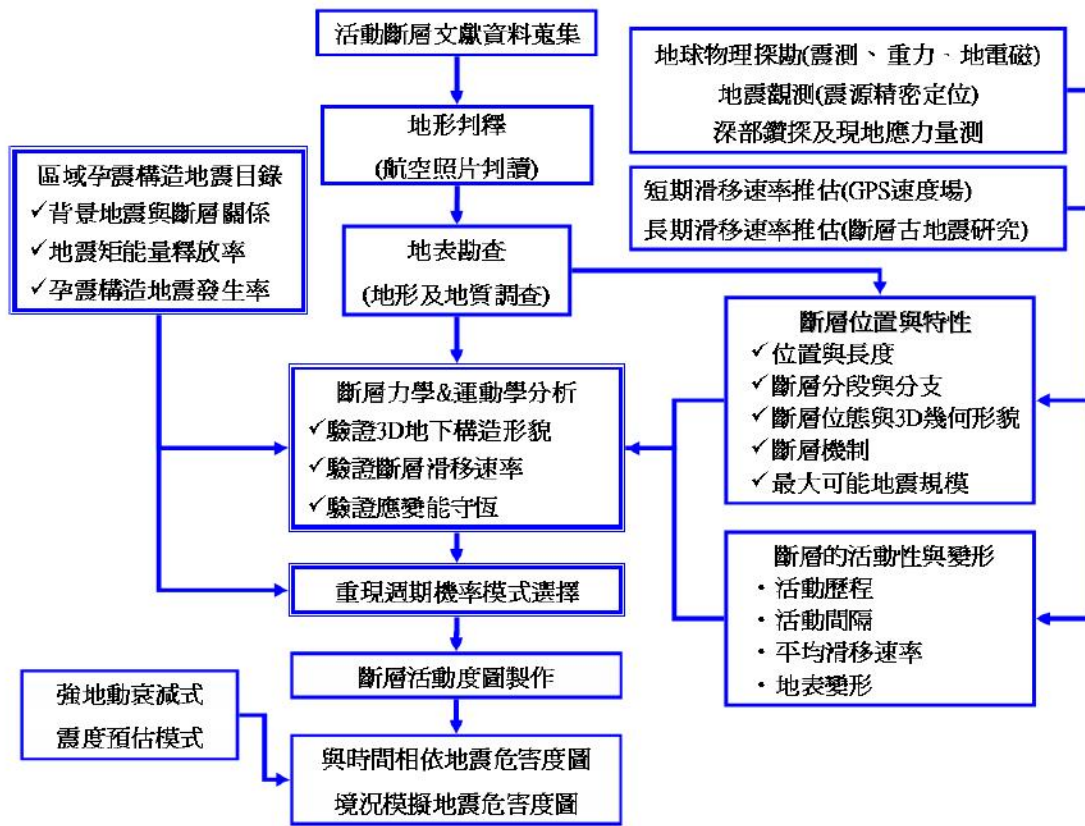


圖 2 斷層潛勢分析工作流程圖

(2) 現地地質調查

現地地質調查包括地表地質調查及地下地質調查。

地表地質調查針對地質構造弱面、層態資料、特殊地質（溫泉、火山口、泥火山、化石、煤層、山崩、湧水、溶蝕洞，或其他特殊地質現象）做進一步地質補充、追蹤調查，以了解區域地層構造狀態。野外測繪時應量測並記錄岩層中之層面、節理等主要不連續面之位態資料。

地下地質包括地質鑽探、槽溝開挖或是探坑等等。地質鑽探是了解地下地質最直接的方法，從鑽探岩心中，可以分辨出

覆土層或回填層或沖積層厚度，可以眼或手判釋岩層的風化狀況、破碎狀況、組成材料為何以及顆粒大小，可以將岩層做分層，了解各層的厚度與分部深度，更可以判釋剪裂帶所出現的深度、厚度、剪裂泥的粗糙或細緻等等。比對不同位置的鑽探岩心，可以建立地層剖面，探知地層分布狀況或是構造延伸狀況。斷層帶深孔鑽探調查結果，若能確實掌握斷層位置，則進一步於地表出露的範圍內，以槽溝開挖或淺孔排鑽之方式探查，以期建立斷層位置、延伸與活動速率等相關資料。

根據野外調查資料，配合地球物理探

測與地質鑽探結果，綜合研判製作斷層條帶地質圖，圖中除標示岩層單位分布外，亦應標示主要地質構造線、露頭點位置、岩層位態、鑽探位置、地球物理探測位置等資料。

(3) 地球物理

一般活動斷層的調查除了地表地質調查之外，對於地下構造的形貌多依賴地球物理的調查方法來進行調查，因為多數地球物理的調查方法，可提供 2D 的調查成果供我們進行構造的判釋，且相較於鑽井的費用而言，地球物理方法提供一個較為經濟、方便與快速的調查方式，因此，在進行斷層鑽探之前，先安排地球物理探勘，獲得地下的構造之後可輔助調整鑽探的位置與深度，確保能獲得鑽探斷層的成果與節省經費的目標。

對於活動斷層的調查而言，代表性的地球物理方法，有重力探查、電磁法探查、反射或折射震測探查及地電阻探查等(不含海域及井下的地球物理調查)。重力探查適合用於廣域構造的調查，對於已知的活動斷層調查幫助不大，且淺層的解析度不若震測，可透過蒐集既有的調查成果配合整體構造解釋即可。電磁法調查易受於高壓電塔與電線的干擾，而調查區恰位於核電廠周圍，有許多高壓輸配線路，不利於此項調查項目。

美國 NRC 的 RG 1.132 Appendix E 中，提到反射震測可以測繪地下構造，進行深度測定、斷層測繪與地層不連續性偵測，以及其他異常特徵的測繪。反射震測可以快速的進行地下構造的調查，但是不

適合用於土壤飽和的區域。而地電阻測勘通常配合反射震測，可以用於偵測辨別岩石、地下水、砂、礫，對於地下孔洞的調查也很有幫助，是一種相當經濟的調查方法，不過地電阻對於深度的變化掌握不佳，需要配合其他調查方法確認(如：震測)。

海底地形的調查包含二種調查項目，分別為多音束水深及側掃聲納(side-scan sonar)。

多音束水深用於調查海床的地形起伏特徵，其成果類似於陸地上產製數值地形(DTM, Digital Terrain Model)，利用多波束測深機所蒐集到的測值來建立海床地形資料，藉以判釋海床上的線型構造，並綜合陸上地形以全面認識線狀地形的連續性，作為斷層分布之構造依據。側掃聲納探測技術類似多音束水深，但是側掃聲納儀在接收海底反射的回波訊號後會記錄訊號強度並處理成聲學圖像，可以藉此瞭解海底地貌情況。

海域的多頻道反射震測可顯示海床以下數十米至一、兩千米內的地層構造，透過反射震測剖面結果，可判斷斷層在地下的錯移情形、斷層寬度及斷層延伸情形，這也是調查海域斷層的重要的方法之一。

後續應用

整合活動斷層相關基礎資料，透過斷層分段、滑移速率、重複間隔等特性上的了解，搭配活動斷層發生機率統計模式、強地動衰減式、震度預估模式等來推算活動斷層地震規模機率密度函數，可進一步

建立活動斷層區域境況模擬震度圖及地震危害度圖。

藉由地表活動性資料，以數值模擬方式，反演間震期斷層面上之活動性，可了解包括斷層面上粗糙體(Asperity)之分布情形，以及間震期的滑移速率，並推測活動斷層再活動時，地震可能發生之位置、深度及大小，這些資訊也可以提供做為後續地震模擬之相關參數。

這些成果可應用在重大工程設計之最大可能地震或安全停機地震耐震設計之參考，並可提供工址地震風險評估決策之參考依據，達到防災減災及永續經營之最終目的。

參考文獻

1. Bollina, M. G. (1970) Surface faulting and related effects: in earthquake engineering. R. L. Wiegel, Editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 47-74.
2. Matsuda, T. (1975) Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault associated. J. Seism. Soc. Japan, Series 2, 28, 268-283.
3. Slemmons, D. B. (1982) Determination of design earthquake magnitudes for microzonation, Proceedings, 3rd International Earthquake Microzonation conference, Seattle, Washington, 1,119-130.
4. 李錫堤 (1993) 活斷層工程評估的新發展。地工技術，44 期，5-18。
5. Haugerud, R. A., Harding, D. J., Johnson, S. Y., Harless, J. L., Weaver, C.S. (2003) High-resolution LiDAR topography of the Puget Lowland, Washington-A bonanza for earth science, GSA Today, 4-10.
6. Carter, B., and Shrestha, R. L. (2003) National center for airborne laser mapping proposed, EOS, 84, 281-285.
7. 黃鐘、詹瑜璋、胡植慶、李建成、史天元、陳于高 (2004) 空載雷射掃描技術製出之數值高程模型之簡介，地質，第二十三卷，第一期，43-54 頁。
8. Chen, R. F., Chan, Y. C., Angelier, J., Hu, J. C., Huang, C., Chang, K. J., Shih, T. Y., (2005), Large earthquake-triggered landslides and mountain belt erosion: the Tsaoling case, Taiwan, Comptes Rendus Geoscience, 337, 1164-1172.
9. Chan, Y. C., Chen, Y. G., Shih, T. Y., Huang, C. (2007) Characterizing the Hsincheng active fault in northern Taiwan using airborne LiDAR data: detailed geomorphic features and their structural implications, Journal of Asian Earth Sciences, 31, 303-316.

