



各種遙測技術觀測向源侵蝕影響高山公路的應用

台北科技大學資源工程研究所／王泰典、曹孟真、羅百喬·中國文化大學地質學系／陳柔妃 

一、前言

水是流體、具有動能，一旦透過降雨匯聚成流後時時刻刻侵蝕地表，伴隨著沖積物質的加入，持續地造成地形地貌的變化。河流作用(fluvial process)是透過河流機制所造成的侵蝕、搬運及堆積作用。河流自身的動能對其邊界產生沖刷及破壞，依據侵蝕作用的方向，可分為下切(又稱下蝕)、側蝕和向源侵蝕(headward erosion)三種。下切作用的程度主要受到河床水流強度及組成河床物質抗蝕能力影響，流速愈高對河床物質的衝擊能力愈大，也愈容易搬運河床中的石塊、泥沙至下游堆積；因此，當地殼急速上升，河流比降加大，下切作用隨之增強。不同強度的基岩其抗蝕能力亦不同。側蝕作用造成河道左右遷徙或河谷邊坡倒退，使河道擺動或河谷加寬，形成曲流。向源侵蝕則是一種特殊的下切作用，河川或溪溝源頭附近下段的水流強度大於上段，侵蝕作用較強，易形成凹地使河谷縱剖面變陡，再增強水流作用使下切更為劇烈，侵蝕溝於是逐步向上發展。

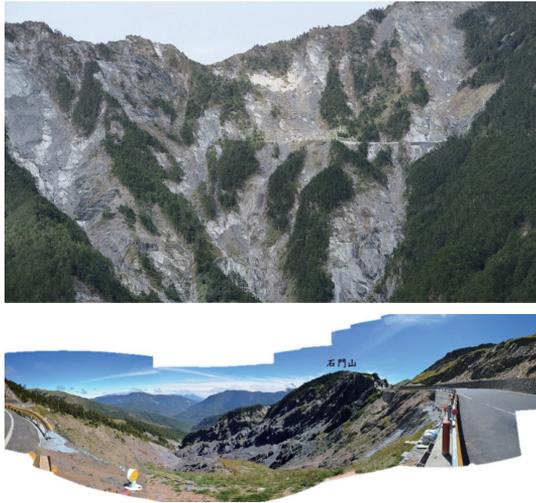
向源侵蝕常伴有崩塌現象，崩塌物質不斷地被搬運至下游，經年累月地作用後多個侵蝕溝相互影響、串接，範圍逐漸擴大，在河川或蝕溝源頭處形成特殊的湯匙狀地貌。旺盛而持續的向源侵蝕造成侵蝕溝不斷朝向流水的反方向發育，甚至超過分水嶺，造成「低位河」搶

奪「高位河」上游集水區的河川襲奪現象。例如台7乙線思源啞口即為蘭陽溪襲奪大甲溪的證據，其附近高侵蝕力作用的地形特徵仍相當顯著。

河流作用、向源侵蝕以及河川襲奪皆是大自然現象，本質上屬於地形地貌演化的一環。當工程建設接近這些自然現象發生範圍時，人為的開發可能影響地形地貌的發育；而建設完成後的運營期間，這些地形地貌的演化也可能影響基礎設施的穩定及服務功能。近年來極端氣候事件規模加大、頻率增高，造成的山坡地災害甚於過往，且有許多崩塌發生在次集水區接近稜線附近，不僅造成大量崩塌物質往下游傳輸，後續也持續影響河流兩側岸堤及邊坡穩定；更會造成鄰近基礎工程設施如公路(圖1)、電力輸配線路等相當程度的危害。

台灣山區隨處可見向源侵蝕現象，其發生初期地形地貌特徵僅有細微的差異，不易辨識；一旦形成蝕溝，下切及側蝕作用增強，地形變化現象加劇，即可能逐漸演化成湯匙狀地貌，形成潛在崩塌的坡地，不僅發展快速，並可能影響大地工程設施。向源侵蝕具有普遍性、範圍廣、地形變化快等特性，傳統監測及測量所需的已知點及觀測點易因地形變動而被破壞，造成其活動性的觀測作業存在一定的難度。本文介紹數種遙感探測技術，並以台14甲

線沿塔次基里溪源頭山區盤繞的克難關路段為例，說明其於觀測高山公路受到向源侵蝕影響的應用。



▲ 圖1 台20線大觀山隧道東口附近(上)及台14甲線克難關路段(下)邊坡的向源侵蝕

二、遙測技術

遙感探測採用非接觸式方法獲取待測物的狀態或信息，具有短時間內取得大範圍數據，可以圖像或非圖像方式表現，以及避免人員於難以抵達或危險地點觀測的優勢，近年來已廣泛應用於蒐集各種地球表面及接近地表的环境資料。對於向源侵蝕造成的地形地貌變化，多種遙測技術皆可進行觀測，包括航空攝影測量、空載光達以及合成孔徑雷達干涉技術等。

航空攝影測量在航空器上拍攝地面像片，透過像片中央透視投影的成像原理，取不同位置拍攝像片的重疊部份影像構成立體像對，即可應用光學投影方法重建攝影幾何，建立地面的立體模型(Lillesand et al., 2015)。取像對上已知點間的距離作為基線，可計算地形地物的平面距離及高程差。航空攝影測量主要用於測繪

1:1000~1:100,000各類比例尺的地形圖。我國林務局農林航測所近期使用的DMC數位相機，像素大小為 $12\ \mu\text{m}$ ，焦距120 mm，在航高2000 m時可提供200 mm空間解析度的像片。

光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)利用雷射發射器射出脈衝雷射光波，於接觸物體後發生散射及反射，部分光波再由接收器記錄下來。分析同一個脈衝雷射光波，可求得雷射發射器與量測物體之間的距離以及物體表面的光學特性。空載光達以航空器為載具搭載雷射發射器，透過航空器上的差分全球衛星定位系統配合慣性導航裝置，可以提供垂直方向100-150 mm、水平方向500-1000 mm的測距精度；且由於雷射發射頻率達每秒數萬次，測點密度甚高，可以量測微小的地形落差，具有夜間或受霾氣及薄霧影響條件仍能作業，以及無需布設大量控制點即可完成大範圍區域測量的能力。更重要的，空載光達採用的雷射脈衝具有多重反射訊號，回波分析後可測繪地表及地面高程(Jaboyedoff et al., 2012)。

合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)為一種微波成像雷達，通常由航空器搭載，飛行過程發射一系列脈衝雷射，接收記錄回波訊號再經過數據處理後，重組合成類似一個極大尺度天線發射器的雷達訊號，並窄縮雷射波波束，獲得極高空間解析度的雷達影像。干涉合成孔徑雷達(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)則是將兩幅或多幅合成孔徑雷達影像圖處理成主像及副像的單觀點複數影像，重新取樣套合後，經過同調、干涉處理產生干涉圖，再依據航空器航跡資訊及基線參數，產製全相位圖像，並依據數值高程模型



修正地形效應，產製地表位移影像。干涉合成孔徑雷達近來發展出多種分析模式，如改良型永久散射體雷達干涉測量法(PS-InSAR)、時域相關點雷達干涉技術(TCP-InSAR)等，觀測山區的地表位移可達公分級精度(Zhang et al., 2011和Zhang et al., 2012)。

表1整理航空攝影測量、空載光達以及合成孔徑雷達干涉技術觀測地表變位的原理及要項

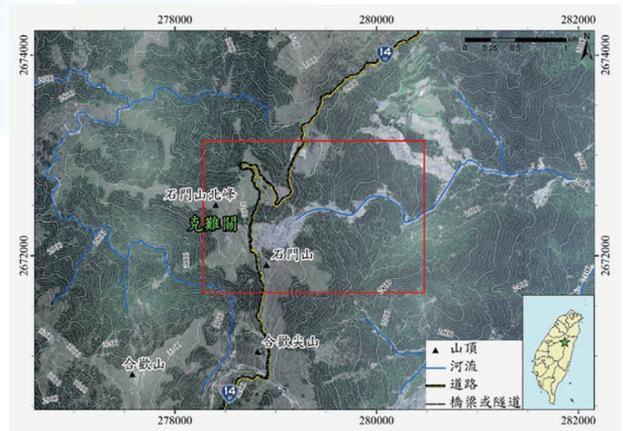
▼表1 航空攝影測量、空載光達及合成孔徑雷達干涉技術觀測地表變位原理及要項			
	航空攝影測量	空載光達	合成孔徑雷達干涉技術
獲取資訊途徑	航空照片	雷射光束	雷達波(長波長)
單次作業涵蓋範圍	小至中等	中等	最廣
更新程度	視航線安排	中等至低	容易
夜間作業	不可	可	可
雲霧影響	高	中	低
地表植生影響	高	低	低
精度	十公分~數公尺級	十公分~公尺級	公分~公尺級

三、案例探討

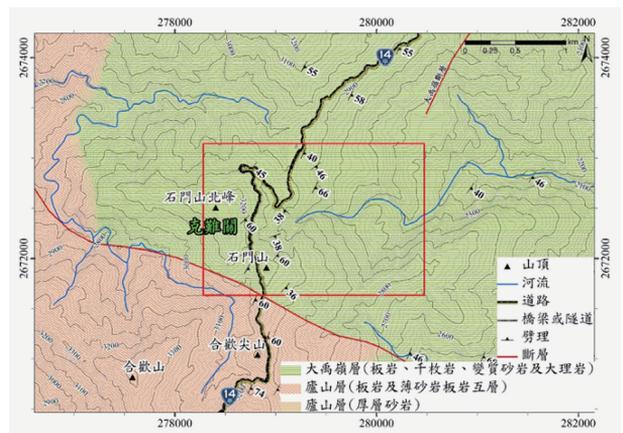
台14甲線克難關路段位於台灣百岳之一—石門山附近，海拔高度約3,200 m，因通過東南側石門山主峰(3,237 m)及西北側石門山北峰(3,275m)連線山稜，形成險峻隘口而得名，路線接近塔次基里溪源頭(圖2)。自1980年後屢發生路基掏空下陷、擋土牆錯動及路面開裂等現象，路基已回填約10 m(圖1下)。

合歡群峰、石門山、石門北峰以及武嶺一帶為台灣中部主要水系的分水嶺，東側為立霧河流域、西北及西側分別為大甲流域及烏溪流域，南側則為濁水河流域。中新世大禹嶺層

及廬山層為此地區主要的地層，前者由板岩、千枚岩、變質砂岩及大理岩構成，後者主要為板岩及薄砂岩與板岩互層(圖3)。克難關路段出露的岩性以板岩為主，劈理傾向東南，傾角在36°-66°之間，擾動明顯，岩體破碎。塔次基里溪的向源侵蝕旺盛，石門山腹裸露的坡面上可見斷層泥(圖1下)。



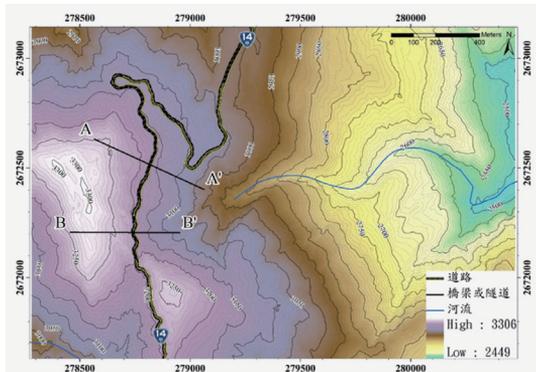
▲ 圖2 台14甲線克難關位置、地形及2010年航空照片產製正射影像



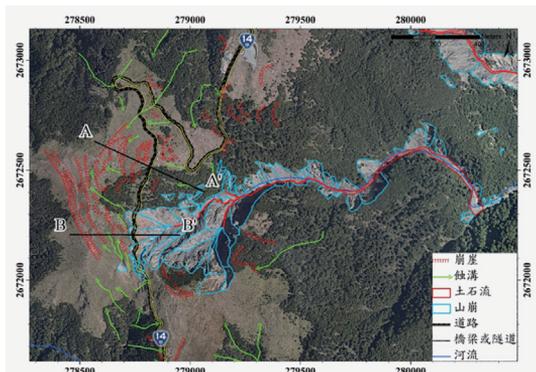
▲ 圖3 台14甲線克難關附近地質圖，底圖取自中央地質調查所出版大禹嶺圖幅(羅偉，1993)

台14甲線公路建造前8(1948)年的航空照片中已可見克難關附近舊崩塌地及明顯的向源侵蝕溝。1956年公路沿崩塌地頂部西側繞過，

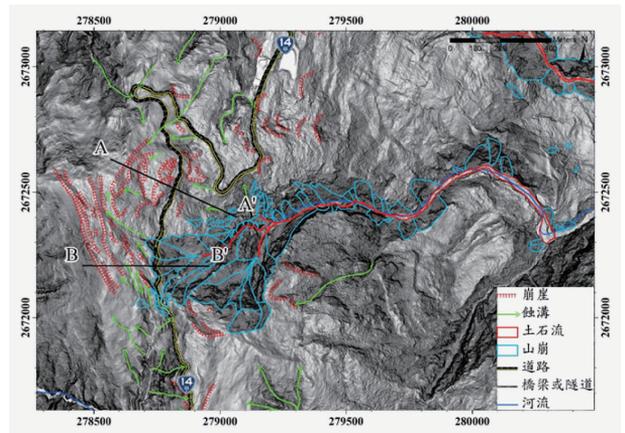
隨後數十年蝕溝發育旺盛，鄰近邊坡崩坍不斷，迫使公路西移繞閉緩和路基流失問題，然崩崖已向上發育，超出現有公路上邊坡(西)側 50 m 以上。圖4為空載光達測繪數值高程模型產製克難關附近(圖2及圖3中紅色框線範圍)地形坡度圖，圖5及圖6利用2014年航空照片配合空載光達測繪數值高程模型產製坡度圖判釋崩崖、蝕溝、土石流及崩塌的空間分佈，石門山北峰附近明顯可見多道崩崖，在稜線東側大致沿地形等高線分佈，斷斷續續向西陷落，稜線東側亦可見數道崩崖，呈雁形排列分佈，並可見多道反斜崖，狀似多重山脊。



▲ 圖4 空載光達2014年測繪數值高程模型產製克難關附近地形圖(取自羅百喬、王泰典, 2015)

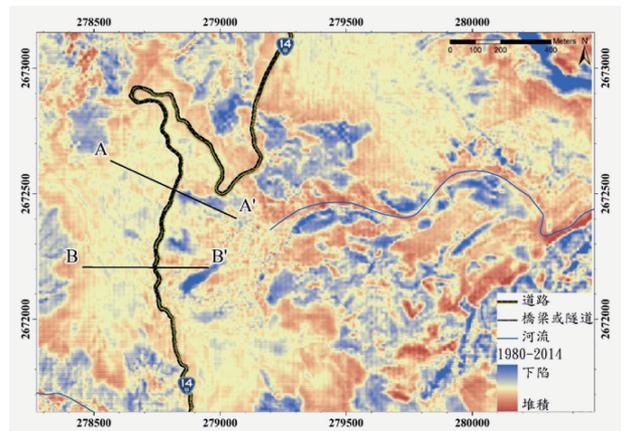


▲ 圖5 克難關附近崩崖、蝕溝、土石流及崩塌空間分佈，底圖為2014年航空照片產製正射影像

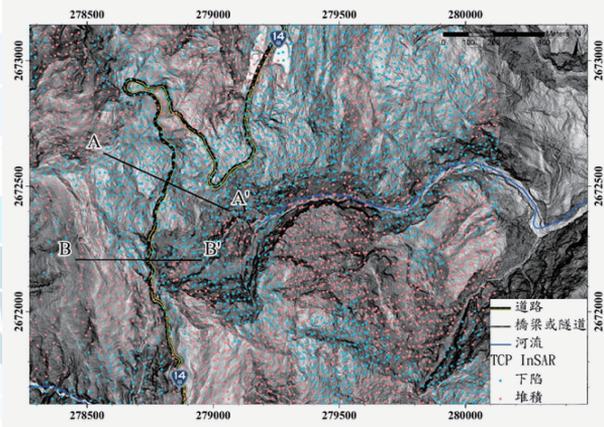


▲ 圖6 克難關附近崩崖、蝕溝、土石流及崩塌空間分佈，底圖為2014年空載光達測繪數值高程模型產製坡度圖(取自羅百喬、王泰典, 2015)

圖7比較1980年航空攝影像片產製地形與2014年空載光達測繪結果，圖8為使用日本ALOS衛星2007年與2011年影像運用TCP-InSAR技術解算所得山區的地表位移，兩圖皆可觀察到塔次基里溪源頭處公路下邊坡明顯的向源侵蝕，3-4道蝕溝下切朝向路基發育；石門山腹及對岸邊坡有多處崩塌，坍塌土石堆積在塔次基里溪，尚未完全往下游傳輸。

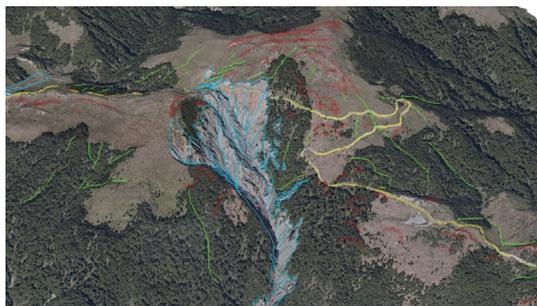


▲ 圖7 比較1980年航空攝影像片產製地形圖與2014年空載光達測繪結果

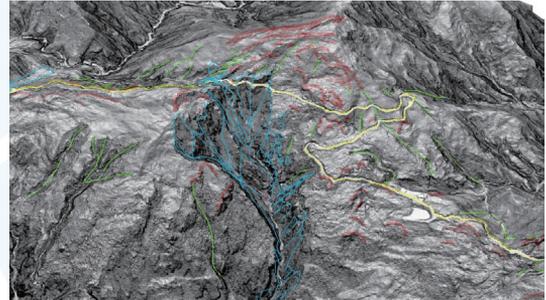


▲ 圖8 ALOS衛星2007年與2011年TCP-InSAR解算所得地表位移

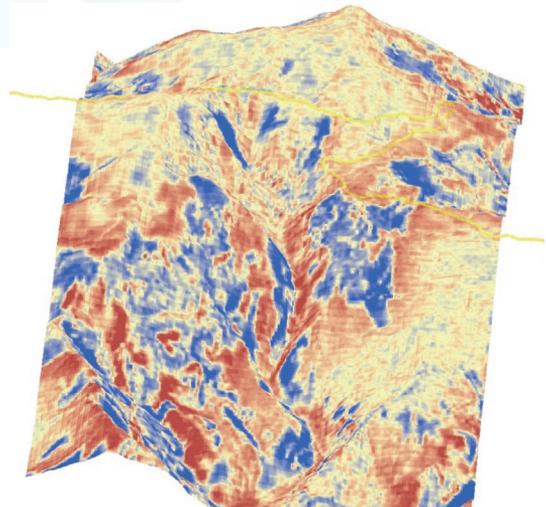
圖9及圖10為克難關附近邊坡崩崖及蝕溝等判釋結果套疊三維模型展示，圖11及圖12分別為圖7及圖8的三維展示，圖13進一步繪出圖7中A-A'及B-B'剖面的地形變化圖，公路下邊坡塔次基里溪的向源侵蝕，造成邊坡淺層崩滑不斷，持續惡化公路路基。上邊坡的線形陷落及反斜崖，顯露了大規模邊坡深層潛移的徵兆，而石門山北峰附近雁形排列的崩崖，疑似區域尺度正斷層的地貌之一；但是後二者對於克難關路段路基下陷的影響，仍待進一步探討。



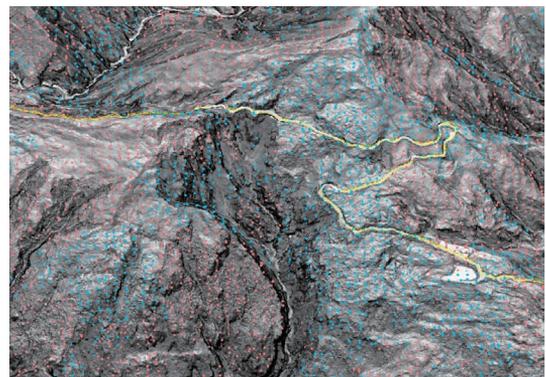
▲ 圖9 克難關附近崩崖、蝕溝、土石流及崩塌在三維影像上的空間分佈



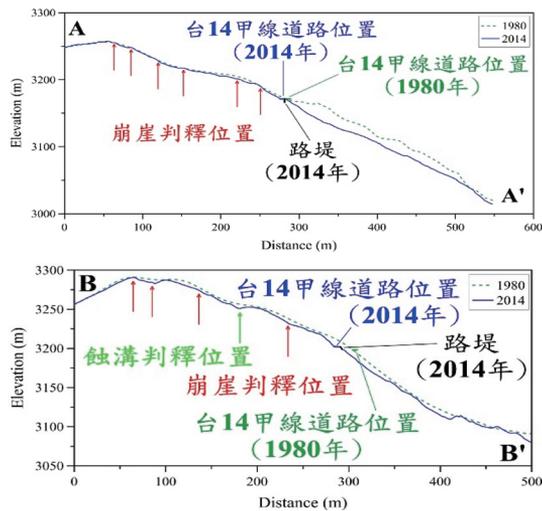
▲ 圖10 克難關附近崩崖、蝕溝、土石流及崩塌在三維坡度圖上的空間分佈(取自羅百喬、王泰典，2015)



▲ 圖11 克難關附近1980-2014年間地形變化，寒色系表示下蝕，暖色系表示堆積



▲ 圖12 克難關附近20XX-20XX年間TCP-InSAR解算所得地形變化，寒色系表示下蝕，暖色系表示堆積



▲ 圖13 克難關附近地形變化，A-A' 及B-B' 剖面位置參考圖4至圖8

比較圖9至圖13可知，航空攝影測量、空載光達以及合成孔徑雷達干涉技術皆可有效觀測向源侵蝕造成的地形及地貌變化，然而各種技術觀測所得量值略有差異，向源侵蝕對高山公路及其附近大地工程設施的影響，仍需更精細的技術配合監測，綜合觀測及監測結果提供設施管理及維護作業的參考依據。

四、結語

我國交通路網遍及全島，前一世紀下半葉建成的公共資產迄本世紀上半葉逐漸面臨接近、甚至超過設計年限的問題；基礎建設將達高度現代化國家水平之際，維修與養護工作成為穩定經濟發展、提供安居樂業環境的重要課題。然臺灣受到板塊運動影響，地質作用強烈且頻繁，季風氣候區常見旺盛河流作用及岩土下坡運動，近年更受到全球氣候變遷極端事件規模加劇、頻率加大的影響，完工營運的公路邊坡破壞阻斷交通的事件時有所聞，高度影響了社會經濟的永續發展。

山區公路沿線邊坡的穩定性隨時間而動態

變化，且受到極端事件如地震、強降雨等影響甚巨，其中向源侵蝕為地形地貌演化的一環，發生初期表徵不明顯，一旦形成蝕溝則發育相當快速，形成潛在崩塌的坡地。公路及其他基礎設施接近這些自然現象發生範圍時，設施穩定及服務功能將受到影響。本文以台14甲線沿塔次基里溪源頭山區盤繞的克難關路段為例，透過蒐集航空攝影測量、空載光達以及合成孔徑雷達干涉技術觀測成果，判釋分析地形及地貌變化，獲知各種技術皆具應用的可行性，然而各種技術觀測所得地形變化量值略有差異，向源侵蝕對高山公路及其附近大地工程設施的影響，仍需更精細的技術配合監測，以提供設施管理及維護作業的參考依據。

☒ 參考文獻

1. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R. and Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards*, 61, 5-28.
2. Lillesand T., Kiefer, R.W. and Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. 7th Edition, John Wiley & Sons.
3. Zhang, L., Ding, X. and Lu, Z., (2011). Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 547-556.
4. Zhang, L., Lu, Z., Ding, X., Jung, H.-S., Feng, G. and Lee, C.-W., (2012). Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin. *Remote Sensing of Environment*, Vol.117, 429-439.
5. 羅偉(1993)，五萬分之一臺灣地質圖及說明書-大禹嶺，經濟部中央地質調查所出版。
6. 羅百喬、王泰典(2015)：遙測影像及光達技術判釋邊坡運動之應用，台8線及台14甲線易致災路段調查評估與災害控管計畫委託服務工作教育訓練講義，公路總局第四區養護工程處。