鋼管排樁工法應用在土石流及崩塌地防治之實務探討 --以火炎山崩塌地為例

許聖富[1][3]* 施志鴻[2]

摘 要 火炎山屬更新世頭嵙山層，由礫岩、間夾薄層泥質粉砂岩組成，豪雨時容易發生山崩、岩屑滑移及土石流，經核定劃設為「自然保留區」。從衛星圖像可看見大量的下移土石 (主要由 3 號坑溝產生)，已在大安溪北岸堆積成半圓形的聯合沖積扇 (初估土石量超過 57.6 萬 m^3)，影響到大安溪的流況，也將影響北側支流-景山溪之匯流。目前發現 1 號坑溝的崩移土石已堆積至 140 縣道之東隧道口，不久將危及人車安全。採用鋼管排樁工法進行整治應是可行的選項，一旦解決了土石崩移的料源，後續的土石流將可避免發生。本文提出鋼管排樁之初步力學分析及設計流程初步建議，並針對施工實務，如鋼樁出露部份之防銹處理、套管驅動設備選擇、成本分析方式等相關事項提出初步探討。

關鍵詞：土石流、崩塌地、鋼管排樁工法、拱壁效應。

The Practical Application of the Steel Pipe-Wall Method to Control Debris Flow and Landslides - A Case Study of Houyenshan Landslides

Sheng-Fu Sheu[1][3]* Chih-Hung Shih[2]

ABSTRACT The geology of Houyenshan, Miaoli County, is Pleistocene Toukoshan formation, and major gravel beds with thin layers of muddy sandstone. Landslides, detritus slides and debris flows are easily induced by heavy rainfall. It has been officially declared a natural conservation area. From the satellite image, we can see a mass of united alluvial fan on the north bank of the Da-an river impacting its water flow. Meanwhile, the gravel congeries mainly induced by No.1 gully are reaching the east portal of the tunnel along No. 140 county road. However, using the steel pipe-wall method to control the landslide and debris flow can be a good solution. This will prevent debris flows from first occurring. This paper proposes the basic analysis and design steps of a steel pipe wall. Meanwhile, some practical considerations for construction, such as the antirust arrangement of the steel pipe emersion, determination of the casing driver, cost analysis of a single steel pipe etc., are explored.

Key Words : Debris flow, Landslides, Steel pipe-wall method, Arching effect.

一、前 言

全球各地發生的土石流時有所聞，在大地震和極端氣候所帶來強降雨之助虐下，土石流所造成的災情有日益嚴重之趨勢，甚至到了讓人「聞流色變」之地步。近年較著名的重大土石流事件，如 2009 年 8 月 9 日原高雄縣小林村滅村土石流造成近 600 人死亡、2010 年 8 月 8 日大陸甘肅省舟曲縣的特大土石流有 1765 人遇難，以及 2013 年 9 月 20 日在墨西哥阿卡普爾科州 (Acapulco) 因連日暴雨引發土石流，造成 101 人喪生及 68 人下落不明。世人對土石流有系統的研究，至今已有 30 多年的歷史，雖然對土石流的研究已經得到諸多實用性的成果，但由於土石流之形成、土壤組成、崩塌發生機制的複雜性，吾人對它的了解尚嫌不足，目前仍難以科學方式準確預判其發生地點及可能規模。

水土保持局近年來以降雨驅動指標 (RTI，即有效累積雨量及降雨強度之乘積) 作為參考值，將具有相類似性質之土石流潛勢溪流集水區整合為一群集，以統計方法計算出同一群集之土石流降雨警戒雨量值，再行簡化為累積雨量，並訂定各地

〔1〕華勝工程顧問有限公司
Hwa-Sheng Engineering Consultants Co., Ltd., Miaoli, Taiwan.
〔2〕合豐技術顧問有限公司
Harvest Engineering Consultants Co., Inc. Taipei, Taiwan.
〔3〕逢甲大學
Feng-Chia University, Taichung, Taiwan.
* Corresponding Author. E-mail : sanford877@yahoo.com.tw

區土石流警戒基準值 (200-600mm 不等)，提供中央及地方政府機關執行疏散避難時之參考依據。2015 年水土保持局已公告全台 1673 條土石流潛勢溪流。一般而言，土石流之防治可分為抑制、攔阻、疏導、淤積、緩衝等主要方式，現已採用的土石流防治工法，包括源頭治理、坡面打樁編柵、攔砂壩 (透過性及非透過性)、防砂壩、固床工、導流堤、緩衝林帶、淤積工、沉砂池等，一條溪流的防治經費加總起來動輒數千萬元。目前防治土石流的實務工作，偏重在土石流發生後於中下游段流動區及堆積區之整治，甚少研究探討如何有效「抑制」上游段土石流的發生。許聖富、許慶盛 (2013) 提出以分階式鋼管排樁抑制土石流發生之可行性。

二、土石流發生之啟動機制說明

依據「水土保持技術規範第 69 條」：土石流係指泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物，以重力作用為主，水流作用為輔之流動體。依其所含土、砂、礫、岩塊等材料性質之成份不同，以及土石大小之比率差異與含水量之多少，具有下列不同之流態：土砂流、泥流、礫石型土石流、土流等，而土石流發展過程包含：發生區、流動區及堆積區。一般而言，豐富的堆積物、一定的坡度及充足的水份，是促使土石流發生之三個要素。江永哲、林啟源 (1991) 研究分析台灣地區土石流發生之降雨特性，其部份結論為：1) 土石流發生之降雨延時全部在 12 小時以上；2) 土石流發生之雨量至少大於 150mm。另周憲德等 (2014) 由火炎山歷年土石流事件期間的實測降雨資料及現地勘查，求得火炎山礫石溝發生土石流之有效降雨量門檻值為 57.5mm，之後若超過 3mm/hr 之降雨強度即可能觸發土石流。

除了降雨量之因素外，游政勳、黃宏斌 (2004) 整理比較國內外學者所推導出土石流之發生機制模式後，提出主要結論如后：1) 在土石流發生之機制模式中，土壤凝聚力參數可以忽略不計；2) 土石流發生之臨界角度約為 15^o～40^o；3) 當礫石在土體中比例較高時，造成土壤間活動度增大，較易發生土石流，即臨界坡度會減少；4) 土石流發生之臨界角度隨著土壤孔隙比之增加而降低，而在相同之孔隙比值時，有逕流水深者其臨界角度最小。蘇苗彬、陳育志 (2003) 則指出土石流啟動必先經過液化的過程，不論液化來自於水流推擠土石堆積產生剪應力不足抵抗，而後滑動變形產生液化或堰塞土體經堆積體內滲流作用產生向源侵蝕或滑動破壞等，其局部液化的現象都必需存在。許聖富、許慶盛 (2013) 則提出堆積土石中孔隙比的增加、地表逕流水深與堆積土層厚度之比例變化，加上臨界水力坡降 (i_c) 的影響，將誘發土石流的啟動。整體而言，在長時間大量降雨及達到土壤入滲平衡後，地表水位逐漸上升，此時地表逕流水頭壓力及中間流造成堆積土層前緣之內部孔蝕，致使孔隙比 (e) 逐漸增大，i_c 將隨之大幅降低，同時當地表逕流水深 h_0 與堆積土層厚度 H 之比值等於 i_c 時，即為土石流的「啟動臨界」(critical initiation)。

對於坡面大量堆積土石或不安定土層，整體同時液化或全體一起滑動的可能性甚低，可以理解的是從幾處可能的潰散點開始，在大量水流作用下，帶動土石坡面向源性的連動潰散而形成土石流。其中最可能發生此種現象的應是堆積土石前緣的起始潰散 (局部液化)，因作用在前緣土體的力量包括：土體自重 (W_S)、地表逕流水重 (W_W)、地表逕流流動作用力 (曳引力 F_W)、超額孔隙水壓上舉力 (U_W)、中間滲流水作用力 (F_S)、土層抗滑力 (F_R) 以及強大的瞬間陣風壓力 (F_T)。在颱風及暴雨期間歷經長時間的超大降雨後，堆積土層(滑動層)內部土壤已達飽和狀態，加上地表逕流水深的壓力作用下，堆積土層內部之中間流已經形成，開始在前緣的外側形成管湧 (洪耀明等，2013)，進而帶出較小細粒土壤，致使滲流速度快速增加，再帶出較大細粒及較小粗粒土壤，逐步形成前緣土石結構的孔洞化，孔隙比 (e) 即大幅增加，在前述各種作用力相互作用下，造成前緣土石結構的潰散，稱之為起始潰散 (initial collapsing)，繼而帶動土石坡面向源性的連動潰散，引發土石流。此種細料流失所形成局部孔洞化的現象，亦符合一般的觀察，當發生土石流，高濃度的土砂向下移動時，其先端部會有較大土石顆粒的情形。

三、鋼管排樁工法施工及機具說明

鋼管排樁置入的施工方法，目前國內可使用搖管機 (oscillator)、全迴機 (rotator) 與旋鑽機 (rotary drilling rig) 等設備帶動套管植入，而套管內的取土工具則採錘式抓斗或伸縮鑽桿 (kelly bar) 帶動的鑽掘桶 (bucket) 為主 (鄭道明、陳光輝，2004)。國內較常見的設備係以履帶式吊車附掛搖管機施工 (圖 1a)，搖管機帶動套管以 15^o～30^o 來回轉動，並藉套管與搖機管上盤的自重產生下壓力以切削地層。鑽掘施工中，履帶式吊車除需吊掛套管、搖管機等施工設備外，亦需連接搖管機作為轉動套管時的反力機制。以履帶式吊車之主、副吊索搭配附掛錘式抓斗進行取土，若土層含水量較高則另採取泥水桶清除泥水。此類設備主要限制為履帶式吊車需以其正前方連接搖管機，設備移動較不靈活，常需較大的整平作業空間。

全迴機則帶動套管以同一方向 360^o 旋轉切削地層，亦藉套管及該機具上盤之自重產生下壓力以切削地層並以錘式抓斗進行取土。若使用平底式全迴機需有足夠吊重能量之履帶式

圖 1a 搖管機照片

Fig.1a Photo of Oscillator

吊車配合，另外亦有附掛動力箱設備的履帶自走式全迴機 (圖 1b)，可使吊車與全迴機的場地配置與動線安排較靈活。另一選擇係以附掛套管驅動設備的履帶自走式旋鑽機 (圖 1c) 將套管置入，其使用旋鑽機驅動伸縮鑽桿，並以前端的鑽掘桶切削地層並取土，再配合套管驅動器帶動套管植入地層。由於鑽掘施工時無需大型吊車，整地之平台範圍可最小，設備施工移動更加靈活。

綜整國內目前鑽掘的施工設備，能施作之套管外徑為 80cm 至 300cm，若考慮普遍且輕量化及較適合坡地施工的設備，建議採外徑 80cm 至 150cm 之套管排樁進行規劃。與國內常見之全套管樁工法不同的是，鋼管排樁工法不需吊放鋼筋籠及澆置混凝土，而是以鋼管排樁作為阻擋土石的設施，藉以抑制坡面的堆積土石不讓其發生土石流或滑動，此工法亦可用來整治漏斗狀崩塌地。由於本工法不會將鋼管取出，因此排樁之套管宜針對永續埋置與成本考量另行製造，而非採用目前全套管樁施工重複使用之制式套管。

在進行崩塌地及土石流整治工程之前應辦理必要之地質調查，而傳統的鑽探及取樣大都採用標準貫入試驗，對於粘性土層及岩層可使用外徑 5cm、內徑 3.5cm 的分裂式取土器進行土樣及岩塊的摘取。對於卵礫石及粗粒層，則靠標準貫入試驗之逐次錘擊次數 (SPT-N 值)，推估內摩擦角 ø、相對密度及基礎承載力，並無法得知堆積土石下方地層的實際狀況。因此，為完整取得堆積土石 (不安定層) 及其下方安定層 (基岩層) 的地質資料，除傳統式的鑽探取樣外，亦可採用類似「鋼管排樁」的施工方式，選定少量適當的樁數及點位，將「大口徑鋼管 (0.8-3.0m)」壓入土層內，同時抓出管內土石材料，現場紀錄(拍照、錄影)、量測及判讀相關土石資料 (組成材料、粒徑大小、比例等)，亦可視現況需要吊放坑內攝影機，以查看管底的地質狀態、地下水位、基岩的位態 (走向及傾向)，以上土層資料可與傳統鑽探作業所獲得的資料進行比對，一併作為後續設計及施工之參考。

四、以鋼管排樁防治土石流及整治崩塌地之概念

本工法在整治崩塌地時，係在漏斗狀或環狀崩塌地的袋口附近施作鋼管排樁，即仿照水壩擋水及蓄水的概念 (水庫)，以鋼管排樁作為阻擋及攔蓄陸續崩落土石的構造物，防止其向下移動，可稱之為土石庫。作法上 (如圖 2a 所示) 係在崩塌地依其土石性質推估安息角 θ，於坡面上緣某處向下邊坡拉出一條斜線 (θ 角)，再依地質鑽探或其他土層資料選定適當位置 (如圖 2b) 施作鋼管排樁，而鋼管排樁與背後崩塌區所形成的空間可收容後續崩落之土石。若為考量整體坡面之景觀性，亦可以人工方式將歷次崩落堆積在鋼管排樁下游處之土石移回鋼管排樁背後之收容空間，或以人工方式進行環狀削坡 (如圖 2a)，依安息角整出安定之坡面，再於坡面上施作適合當地環境的植生及綠美化工程。

茲以苗栗縣三義鄉火炎山為例，說明鋼管排樁工法如何應用在土石流及崩塌地之防治工作 (許聖富、許慶盛，2014)。

圖 1b 自走式全迴機照片

Fig.1b Photo of Rotator

圖 1c 旋鑽機照片

Fig.1c Photo of Rotary drilling rig

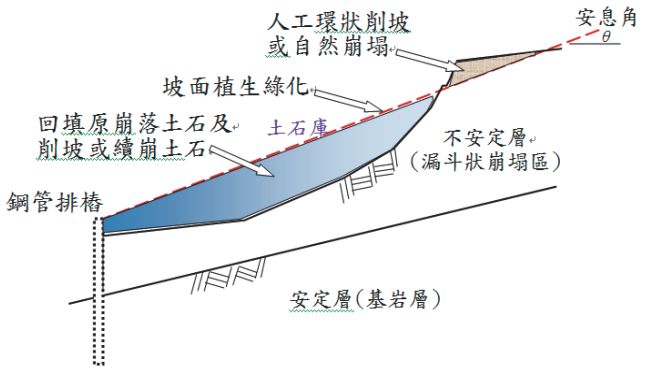

圖 2a 鋼管排樁在漏斗狀崩塌地防治應用示意圖

Fig.2a Diagram of steel pipe-wall to control the funnel-shaped sliding area

火炎山位於三義鄉與苑裡鎮之交界，南鄰大安溪、右毗中山高速公路，屬苗栗丘陵南端，地勢北高南低，東高西低，最頂點高程為 596m，旁邊為鐵砧山台地及后里台地。依中央地調所網站地質資料，火炎山屬更新世頭嵙山層，地層由礫岩、間夾薄層泥質粉砂岩組成，921 大地震後本區礫岩層更加不穩定，表層土壤更加破碎，豪雨時容易發生山崩、岩屑滑移及土石流，邊坡亦容易崩落形成草木不生的惡地景觀。本區於 1986 年經林務局劃設為「火炎山自然保留區」(林務局網站，2008)，而公路總局為保障 140 縣道的人車安全，遂於 2004 年斥資新台幣 3 億 5 千萬元，在 140 縣道上興建一條 780m 長、淨寬 15m 之單孔箱涵式隧道，並於 2006 年元旦開放通車，該工程同時於隧道上方設置四道南北向的土石堤形成護堤，引導土石流自隧道上方洩流至大安溪，由於大量土石陸續向下崩移，漸次掩埋該土石護堤，現場已不易目視其存在。

從 2010 年 5 月 10 日及 2013 年 11 月 9 日火炎山衛星圖像 (圖 3a 及 3b)，清楚可見大量的下移土石 (主要由 3 號坑溝產生) 已在大安溪北岸形成半圓形的聯合沖積扇，土石坡面的安息角約 12°(如圖 3e)，2014 年 6 月筆者現勘時發現，1 號坑溝的崩移土石已漸次堆積至 140 縣道之東隧道口 (如圖 3d)，依照近年的崩移速度，不久的將來 1 號坑溝崩落的土石即可能掩過東隧道口，進而危及 140 縣道上的人車安全。而苗栗縣政府曾在過去 10 年二度辦理隧道至河岸間堆積土石之清理作業，數量共約 10 萬 m^3。

由於火炎山土石流所造成的聯合沖積扇 (半徑約 120m)，粗估河床上堆積土石量達到 57.6 萬 m^3，從流域土砂管理的角度來看，如果不加以處理，任由崩落土石繼續向下滑移，再度擴大聯合沖積扇的範圍，將會影響到大安溪的流況及縮減其通洪斷面，也將影響到大安溪北側支流-景山溪之匯流及威脅到水利署第三河川局在該處設置之農田灌溉用取水口。經衡量各種可用的工法後，採用鋼管排樁工法進行整治應是可行的選項，即在土石料源漏斗狀崩崖區之袋口處打設鋼管排樁 (如圖 3f 及 3g)，此處之主要考量為：儘可能讓漏斗狀土石庫之容量約略等於安息角坡角斜線上方所切出之環狀楔形體積，形成另一種形式的「挖填平衡」，此處土石平衡之後再於鋼樁背後之

圖 2b 漏斗狀崩塌地照片

Fig.2b Photo of funnel-shaped sliding area

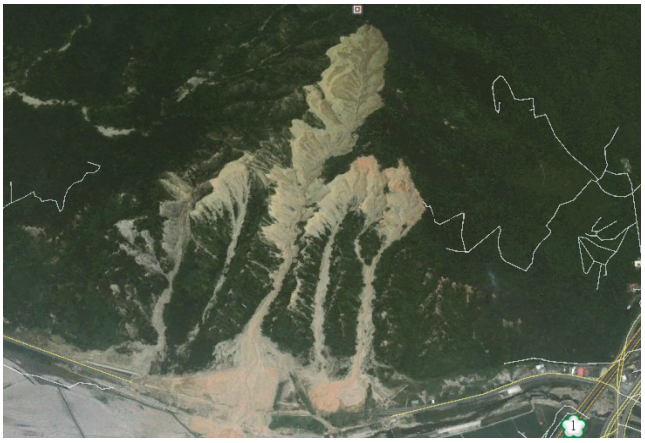

圖 3a 火炎山 (Google Earth 20100510)

Fig.3a Houyenshan

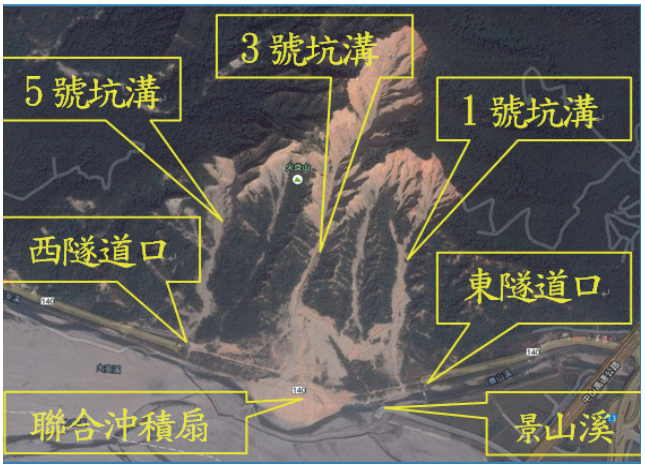

圖 3b 火炎山 (Google Earth 20131109)

Fig.3b Houyenshan

圖 3c 大安溪南岸遠眺火炎山照片

Fig.3c Houyenshan-view from south bank of Da-an river

坡面表層進行植生，整體坡面即可維持穩定狀態。這種漏斗狀崩崖區係土石產生、向下輸移的主要料源，一旦解決了土石崩移的來源，應可避免後續土石流的發生。又為安定在袋口以下坡面上既有的堆積土石，亦可考慮在土石堆積坡面的前緣及中間適當處打設鋼管排樁，另使用高架吊具將袋口以下坡面上既有的堆積土石，移往鋼樁背後的漏斗狀土石庫內堆砌。

五、鋼樁之初步力學分析及設計流程初步建議

本研究提出下列鋼管排樁設計時應考量之事項及概要作業流程供參考，然因各案之現況、區位、地質、施工條件及實務需求不盡相同，實際進行設計作業時仍需審酌各案特性予以個別考量。

1. 現勘及工址初步資料蒐集：現地勘察工址範圍內之地形、坡度、植栽、地表裸露狀況等，並用 GPS 定位儀檢測工區週界點之座標資料 (N-E 值及高程)，再查詢該區域之大略地層及地質組成，另外訪查及蒐集工址附近過往是否有其他工程計畫曾經辦理之地質鑽探資料。
2. 工址地質鑽探：依前一階段所蒐集之概略地質資料研判及選定需進行地質鑽探之點位，包括傳統地質鑽探及大口徑鋼管樁鑽探作業點位 (許聖富，2014)，前者可取得 SPT-N 值，推估內摩擦角 ø、相對密度及地盤承載力等資料，後者則可完整取得土層 (不安定層及安定層) 及地下水位之詳實資料。
3. 地形測量：為了解現地實際之地形條件及詳細土石坡度，有必要進行工址範圍內之地形測量，作為後續設計作業之參考依據。
4. 土石坡面之穩定分析：依詳細之地質鑽探資料進行邊坡穩定分析，並研判可能的邊坡破壞型式 (平面滑動或弧形滑動)，找出可能的破壞面，作為樁長設計之依據。鋼樁需有足夠長度以貫穿滑動面，並植入穩固且非降伏之地盤，以發揮其抗滑及攔阻土石之功能。
5. 鋼管排樁的配置：土石堆積的邊坡上不論規劃幾排鋼樁，除最下方 (即前緣) 那排鋼樁以外的各排鋼樁，因其上下側均有約略等高之堆積土石，在無重大坡面條件改變的情況下，各排鋼樁應會處於穩定狀態，能有效攔阻土石之下滑推力。為考量工程整體之經濟性、堆積土層內水份的流動，並維持相當程度的土砂平衡，鋼樁與鋼樁之間宜保持一定的距離，其淨間距在 1～3 倍鋼樁直徑 (張睦雄等，2010; Chen and Martin, 2002; Duncan and Wright, 2005)，可發揮樁背土石堆積區之拱壁效應 (arching effect)。
6. 鋼樁長度與厚度設計：欲求鋼樁出露段之高度 h，可依坡面土石之性質推估安息角 θ (如圖 2a 所示)，於坡面上緣

圖 3d 140 縣道東隧道口土石堆積照片

Fig.3d Photo of debris near east tunnel portal

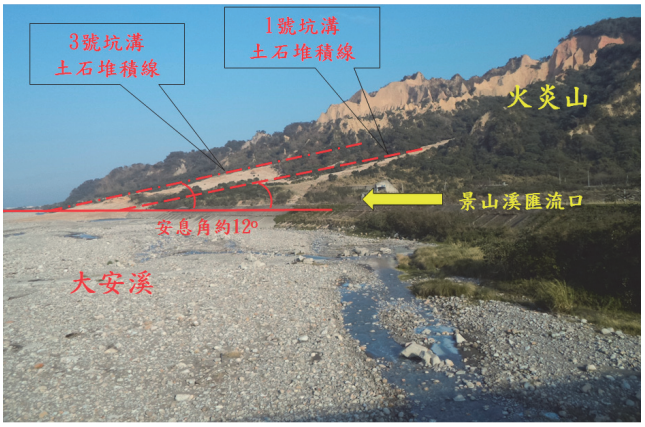

圖 3e 國道一號高速公路側視火炎山照片

Fig.3e Houyenshan-side view from No. 1 Freeway

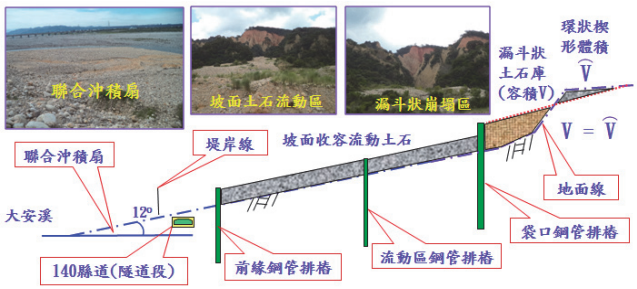

圖 3f 火炎山土石流動區及漏斗狀崩塌地施作鋼管排樁示意圖

Fig.3f Diagram of steel pipe-walls to control debris-flow and funnel-shaped sliding area in Houyenshan

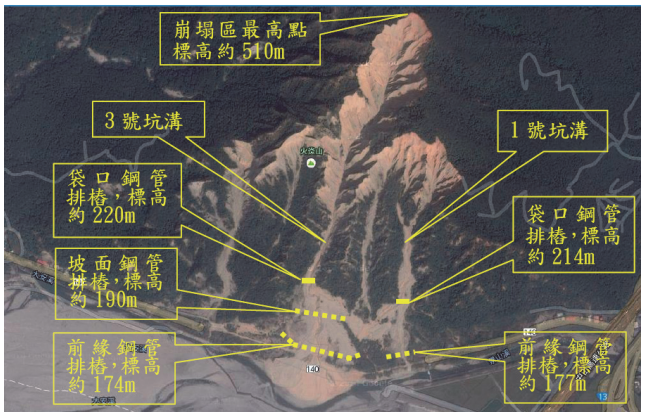

圖 3g 火炎山崩塌地及土石坡面施作鋼管排樁位置示意圖 (Google Earth)

Fig.3g Layout of steel pipe-walls in Houyenshan sliding area

某處向下邊坡拉出一條斜線（θ 角），依地形及土層資料選定施作鋼管排樁之適當位置，鋼管排樁位置決定後即可求得 h；再依相關公式初步計算鋼樁之長度，並先行假設鋼樁之厚度，依力學分析之作用力（彎矩及剪力等）檢算長度及厚度。

本研究以火炎山崩塌地為例，針對最下方之鋼管排樁進行初步之靜態模擬分析，即不考慮地震時動態作用力，而鋼樁施鑽完成後樁背以人工方式回填土石，鋼樁亦不受撞擊作用力。茲假設樁背土石坡面之夾角 θ 為 15^0 且樁前土石面為水平，鋼管排樁出露地面之長度為 8m，依據柳政男等（2011）辦理 140 縣道西隧道口附近加勁擋土牆工程之相關資料，現地土壤單位重為 2.21 tf/m^3，內摩擦角 ø 為 45^0，凝聚力 C 值為零。又依據 140 縣道隧道新建工程所做之沿線地質鑽探結果（共 5 孔，鑽孔深度 20-45m），該區之地層均為礫石層，其標準貫入試驗 SPT-N 值大都為 50，初判本工址坡面無弧形滑動之情形。依相關公式計算主動土壓力係數、被動土壓力係數（陳信雄, 2007），求得樁深係數 λ (如圖 4) 及樁長係數 δ。建議選取鋼樁長度 24m(3 倍出露段長度)、鋼樁外徑 1.5m(鋼管厚度取 3cm)，並分析鋼樁出露段視為基地土壤開挖後無內支撐高度之安全性。

7. 鋼樁出露段間之相關設施：鋼樁為主要的土石作用力承載構件，而鋼樁與鋼樁出露段之間亦需設置必要之設施，以防止邊坡拱壁區之土石掉落。本研究建議三種方式：(a) 在鋼樁與鋼樁之淨間距較小時（如≦1.2m），直接以現地之大卵石堆砌；(b) 以型鋼橫擋、直桿及鋼網組成防落石設施（如圖 5），而其網目或孔徑之大小則依土砂平衡之需求來決定，此種方式適用於非緊鄰公路邊坡之鋼管排樁(道路行車安全不受影響)；(c) 由適當直徑且管壁較薄之鋼管所切割出來的弧形鋼鈑，焊接在相鄰二鋼樁上作為防落石設施，例如鋼樁與鋼樁之淨間距為 1 倍鋼樁直徑，由相同直徑之鋼管垂直對切，得到二片適用此淨間距之弧形鋼鈑，若是鋼樁與鋼樁之淨間距為 2 倍鋼樁直徑，則由 2 倍直徑之鋼管垂直對切，餘此類推；此法較適用於緊鄰公路邊坡之鋼管排樁，因土石崩落會影響公路之路基穩定及行車安全。又為順利排除樁背之積水，在弧形鋼鈑上仍需如一般擋土牆，約每 2m^2 設置一處排水孔及排水器。

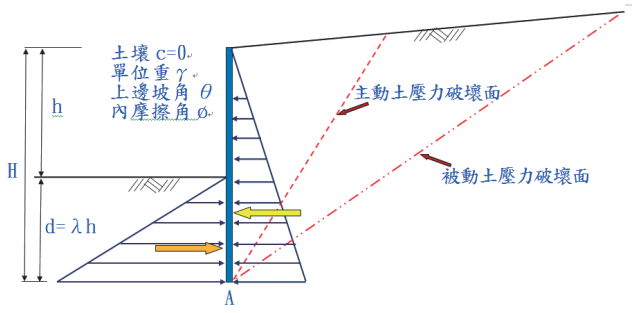

圖 4　擋土構造物主動及被動土壓力作用示意圖

Fig.4 Active and passive earth pressure diagrams of retaining structure

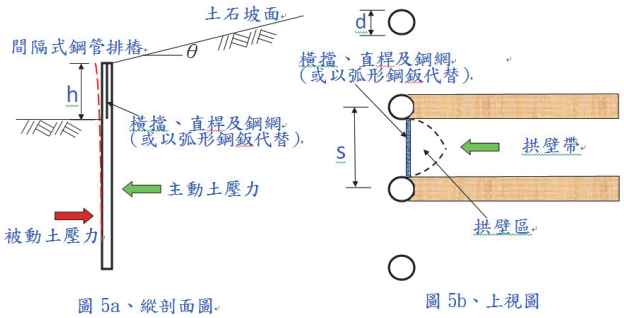

圖 5　鋼管排樁受力及變形示意圖

Fig.5　Force and bending diagrams of steel pipe-wall

六、鋼管排樁工法應用上之實務探討

本章係針對鋼管排樁工法實際應用在土石流及崩塌地潛勢地區之防治，施工時需考慮之課題做進一步的說明及探討，包括：1) 鋼樁出露段之防銹處理；2) 鋼套管驅動設備之選擇；3) 成本分析方式。

1. 鋼樁出露段防銹處理：實務上鋼樁的入土段在土體內較無銹蝕的問題，但鋼套管接近露出地面之懸臂段及樁間防落石之鋼料設施則需增加必要之防銹處理，以維持鋼管排樁長時間之穩定性，防止因銹蝕而影響其結構功能。
2. 套管驅動設備之選擇：在一般土石堆積之邊坡上，施工場地之條件常是決定使用何種套管驅動設備的要件，若在地層與坡度條件下可以整理出較大的平坦台階時，可採國內最為普遍之履帶式吊車附掛搖管機施工，此工法也最為經濟。若預定施作鋼樁位置整地後可供施工之平坦台階範圍較小時，則可考慮施工設備配置較為靈活的全迴機或旋鑽機。
3. 成本分析方式：一般的施作成本可分為假設工程、鋼管排樁工程、後續坡面整地等三大部分：
   (1) 整地及假設工程：包含施工便道、坡地之台階整地、防坍的安全措施等。依現場狀況評估交通動線、挖填方整地方式而有較大之成本差異，需個案進行評估加以決定。
   (2) 鋼管排樁工程：鋼管排樁施工成本可分為材料、機具設備、人員與施工等三類。材料以鋼套管材料及其工廠內之加工費為主，國內將鋼板成型並焊接為套管之技術已相當成熟，考量現場施工、焊接、運輸等都是鋼管成本的重要因素；機具設備則包含進場之吊車、挖土機、套管驅動設備（搖管機、全迴機或旋鑽機）之機具設備運費、租金與維修成本；人員與施工成本以施工人員薪資、機具動力與發電機所需之柴油、施工所需之雜項工料為主，每組施工人員（含吊車操作手、挖土機操作手）約需 4~6 名技工。本研究針對前述鋼樁外徑 1.5m、長度 24m、套管厚度 3cm 之案例，舉其施工成本之單價分析方式（如表 1 所示）供參考。
   (3) 後續坡面整地工程：鋼管排樁打設完成後需進行後續之整地、削坡等作業，並於坡面及土址內辦理必要之植生綠化工程，其施作範圍、規模及所需經費則需視個案不同進行評估。

以上是鋼樁外徑 1.5m、長度 24m、套管厚度 3cm 之單價分析案例，再加上鋼樁與鋼樁間防落石設施 (使用型鋼橫擋、直桿及鋼網等) 之相關施作費用，平均每根鋼樁之成本約新台幣 100 萬元左右。若以火炎山第 1 及第 3 號坑溝之袋口 (如圖 3g，寬度各約 30m) 作為整治對象，且鋼樁與鋼樁之淨間距取 1 倍鋼樁直徑 (1.5m)，所需鋼樁數共計 22 根，鋼管排樁工程之直接工程費約 2200 萬元，加上整地及假設工程、後續坡面整地工程、利稅保險、工程管理及空污費等間接費用，共約需 3000 萬元左右。

七、結　論

本研究提出鋼管排樁工法及其抑制土石流和防治崩塌地之概念性實務應用，亦提出鋼樁之概要之設計作業流程供各界參考，惟實際設計時尚需考量土壤和地表有水之情形，以及地震時之動態作用力，讀者可依相關理論公式 (如日本物部氏公式) 或力學模式進一步求解。

全套管基樁工法目前已普遍應用在橋樑及其他構造物之基樁工程，國內施工機具及人力技術均十分完備成熟，新闢道路的橋樑工程也常位於偏遠的山區，不管地質條件如何，只要施工便道開闢出來，施工所需的重機裝備及材料設備，即可順利運達並進行鋼管排樁工法之施作。若考量邊坡土壤之拱壁效應，將鋼管排樁工法輔以間隔式設置，即可有效降低施工成本。

誌　謝

茲感謝交通部公路總局第二養護工程處苗栗工務段蔡宜宏段長提供 140 縣道隧道新建工程之鑽探及火炎山相關資料。

表 1　鋼管單樁之成本單價分析表

Table 1　Cost analysis for a steel pipe

項次	工程項目	單位	數 量	單價 (元)	複價 (元)	備註
1-1	材料-鋼管材料 (長24 m，外徑1.5m，厚3cm)	kg	26,102	33	861,366	
2-1	機具設備-折舊維修租金-套管機	時	10	1667	16,670	LK-200搖管機
2-2	機具設備-折舊維修租金-吊車	時	10	2000	20,000	80T履帶吊車
2-3	機具設備-折舊維修租金-挖土機附屬設備	時	10	600	6,000	PC-200型挖土機
2-4	機具設備-動復員運費	式	1	13636	13,636	以22支分擔
3-1	人員與施工-領班1人	時	10	400	4,000	
3-2	人員與施工-吊車鑽掘手1人、技工2人	時	30	380	11,400	
3-3	人員與施工-一般工1人	時	10	300	3,000	
3-4	人員與施工-現場工程師1人	時	10	300	3,000	
3-5	人員與施工-柴油	L	450	33	14,850	
3-6	人員與施工-套管焊接	處	1	20000	20,000	
3-7	人員與施工-零星器材及雜項工料	式	1	5625	5,625	施工費10%
每支總計					**979,547**	

參考文獻

[1] 許聖富、許慶盛 (2013)，「以工程方法抑制土石流發生之可行性」，技師期刊，63，62-71。(Sheu, S.F., and Hsu, C.S. (2013). "The feasibility of using engineering method to curb the happening of debris-flow." *Professional Engineer Journal*, 63, 62-71. (in Chinese))

[2] 許慶盛、許聖富 (2013)，「以分階式鋼管排樁工法抑制土石流之可行性」，102 年水土保持研討會論文集，D-3, 1～18。(Hsu, C.S., and Sheu, S.F. (2013). "Feasibility to curb the happening of debris-flow by using multi-layer steel pipe-wall." *Proceedings of the 2013 Conference on Soil and Water Conservation*, Taichung, Taiwan, D-3-1～18. (in Chinese))

[3] 江永哲、林啟源 (1991)，「土石流之發生雨量特性分析」，中華水土保持學報，22(2)，21-37。(Chiang, Y.C., and Lin, C.Y. (1991). "An analysis of rainfall characteristics for debris flow events in Taiwan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 22(2)，21-37. (in Chinese))

[4] 周憲德、楊祥霖、李璟芳、黃郅軒 (2014)，「火炎山土石流之地貌變遷與流動型態分析」，2014 年中華水土保持學會年會及學術研討會論文集，86。(Chou, H.T., Yang, H.L., Lee, C.F., and Huang, C.H. (2014). "The landscape variations and flow patterns of debris flows at Houyenshan, Miaoli, Taiwan." *Proceedings of the 2014 Conference on Soil and Water Conservation*, Taichung, Taiwan, 86. (in Chinese))

[5] 游政勳、黃宏斌 (2004)，「土石流發生機制模式之研究」，農業工程學報，50(1)，35-49。(Yu, C.H., and Huang, H.P. (2004). "Triggering mechanism of debris flow." *Journal of Chinese Agricultural Engineering*, 50(1)，35-49. (in Chinese))

[6] 蘇苗彬、陳育志 (2003)，「液化引致土石流啟動的探討」，中華水土保持學報，34(4)，381-388。(Su, M.B., and Chen, Y.J. (2003). "Investigation on debris flow triggered by liquefaction." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 34(4)，381-388. (in Chinese))

[7] 洪耀明、蔡瀚陞、楊瑞昌 (2013)，「地下水滲流導致邊坡破壞之初步試驗」，102 年度水土保持研討會論文集，VII-6。(Hong, Y.M., Cai, H.S., and Yang, R.C. (2013). "A preliminary study on the experiment of landslide due to groundwater seepage." *Proceedings of the 2013 Conference on Soil and Water Conservation*, Taichung, Taiwan, VII-6. (in Chinese))

[8] 鄭道明、陳光輝 (2004)，「全套管基樁施工資源組合分析」，台灣公路工程，30(9)，2-19。(Cheng, T.M., and Chen, G.H. (2004). "Combination analysis of construction resources for all-casing pile." *Journal of Taiwan Highway Engineering*, 30(9)，2-19. (in Chinese))

[9] 許聖富、許慶盛 (2014)，「以鋼管排樁抑制土石流及防治崩塌地之可行性」，2014 年兩岸水土保持學術研討會論文集 (湖北武漢)，396-407。(Sheu, S.F., and Hsu, C.S.

(2014). **"**The feasibility of using steel pipe-wall to curb the happening of debris-flow and to control the landslide area." *Proceedings of the 2014 Cross-strait Conference on Soil and Water Conservation,* Wu-Han, China, 396-407. (in Chinese))

[10] 許聖富 (2014)，「鋼管排樁工法在防治土石流及崩塌地之應用」，水保技術，9(4)，1-8。(Sheu, S.F. (2014). "The application of steel pipe-wall method to curb the happening of debris flow and to control landslide area." *Journal of Soil and Water Conservation Technology*, 9(4), 1-8. (in Chinese))

[11] 張睦雄、張俊隆、陳建華、蔡衛勇、蔡宗成 (2010)，「公路邊坡抗滑排樁現地土壓力之量測與判釋」，台灣公路工程，36(1)，2-19。(Chang, M.H., Chang, J.L., Chen, J.H., Tsai, W.Y., and Tsai, C.C. (2010). "Measurement and interpretation for earth pressure of anti-slide pile on highway slope." *Journal of Taiwan Highway Engineering*, 36(1), 2-19. (in Chinese))

[12] Chen, C.Y., and Martin, G.R. (2002). "Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles." *Computers and Geotechnics,* 29, 363-386.

[13] Duncan, J.M., and Wright, S.G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*, John Wiley & Sons, Inc.

[14] 柳政男、曾志企、陳金洲、何國彬 (2011)，「加勁擋土牆之設計與施工-以火炎山土石防治工程為例」，水保技術，6(3)，162-170。(Leo, Z.N., Tseng, Z.C., Chen, J.J., and Ho, G.B. (2011). "Reinforced retaining wall design and construction - a prevention project of debris flow in Houyenshan." *Journal of Soil and Water Conservation Technology*, 6(3), 162-170. (in Chinese))

[15] 陳信雄 (2007)，「水土保持學」，明文書局，頁 191-247，台灣。(Chen, S.S. (2007). "*Soil and Water Conservation*." Ming-Wen Book Publisher, 191-247, Taiwan. (in Chinese))

2014 年 12 月 29 日　收稿
2015 年 05 月 15 日　修正
2015 年 06 月 04 日　接受
(本文開放討論至 2016 年 3 月 31 日)