

加勁擋土牆之設計與施工-以火炎山土石防治工程為例

Reinforced retaining wall design and construction – A prevention project of debris flow in Mt.Huoyan

柳政男¹、曾志企²、陳金洲³、何國彬^{4,*}

¹ 盟鑫工業股份有限公司 經理

² 魯班工程顧問 負責人

³ 聯合大學 土木與防災研究生

⁴ 盟鑫工業股份有限公司 經理

* 通訊作者，電話：04-26595926 轉 3250

關鍵詞：加勁土堤、火炎山、土石防治

Key words: reinforced retaining wall、Mt. Huoyan、prevention of debris flow

摘要：火炎山於 921 大地震後常於颱風豪雨過後發生土石災難，現地採用之石籠及土石堤等工法亦未能有效杜絕土石肇災。為落實節能減碳之政策，於各類災情整治及建設上政府多鼓勵在安全無虞下採用「綠色建築」或「生態工程」，屬於標準生態工程之加勁工法於台灣則已邁入成熟普遍之階段，本案即針對火炎山土石問題首次採用加勁土堤圍堰及導引工法進行整治。本篇先剖析火炎山土石流之成因與特性及肇災機制，再就加勁工法之設計與施工摘其要紀錄其過程與重點，經十數次颱風豪雨侵襲後已證明在適當設計下加勁工法確實可用於治理土石問題，並具極佳之成效。

Abstract

The discussed project is located at the toe of **Mt. Huoyan**. In recent years, frequent unsympathetic climate brought extreme torrential rain. The cloudburst took accumulated deposits to the tunnel portal and the local transportation was definitely suspended. Though several methods such as bright tunnel、gabion walls and earth stone banks were applied, but none of them really overcame the problem entirely. Then a mechanically stabilized earth (MSE) embankment was built while the structure was popularized as a green construction. In this project a MSE embankment was designed and built with the body almost using local earth materials. With an well-controlled mechanical characters in geogrid and procedure in installation, an ingenious positioned MSE embankment is firmly proved that it really satisfied all expectations after 3 years with undergoing of attacks at least 10 typhoons.

一、前言

中台灣著名地標「火炎山」向以崢嶸嶙峋之惡地地形聞名遐邇，其地質屬於更新世紅土台地堆積層，由紅土、礫土及砂土等所組成，因地質年輕，厚積礫石層間之膠結物易遭豪雨沖蝕流失，而形成鬆散不穩定的惡地地形，岩層嚴重裸露，植生貧瘠，近年來每逢颱風豪雨過後常引發規模大小不一之土石流，除了危及民眾生命財產之安全外，更對自然環境造成極大之衝擊與破壞。

紡織品一般被視為柔軟的、纖細的，幾乎無法與粗糙且毀滅性十足的土石流聯想在一起，然紡織加工產品「加勁格網」除了具備高抗拉強度外，其特有之握

裹性與連結性以及韌性正好在土木工程中提供了「視凝聚力」；而加勁格網及土工織物等之繁複組織則提供了比鋼材及混凝土更長更複雜之排水路徑而產生「消能作用」，並進一步提供抗沖刷之功能。這些紡織品的跨領域優點正好促使本案「以土石整治土石」之構想得以實現。

二、研究地區特性與肇災機制探討

2.1 地理位置與地區特性

本案工址位於苗栗縣三義鄉與苑裡鎮交界之火炎山自然保護區坡趾，緊鄰140縣道。火炎山地區原為礫岩紅土台地，經大安溪之切割，加上侵蝕、崩塌等作用而形成壁立山峰、礫石層、卵石流、地下伏流等特殊地形景觀。火炎山前之諸小峰在外形上呈尖銳山峰之組合，山谷內則堆滿卵石，平時無水，望似卵石河流，其出谷後在山前堆積，並形成聯合沖積扇。火炎山巨厚且膠結不良之礫石層受空氣、水、生物等不斷的風化與侵蝕，並同時遭受重力之影響，在已生成之邊坡上，逐一崩解之礫石隨重力往下崩落，再加上不定時遭受狂風暴雨之撞擊與河水之侵蝕，更加速礫石鬆動與下墜。

本區地質屬頭嵙山層火炎山相，由礫石混雜砂、土組成，淘選度差，其早期可能為古大安溪河口之沖積扇，由於地殼之上升運動而逐漸浮出水面，此上升運動現今仍持續進行。台地堆積礫石層上覆有紅土（赭土）或棕紅色之砂質紅土，礫岩層中夾雜之砂、泥與紅土因含有鐵質，經風化氧化而呈紅棕色，殘留土壤時間愈久顏色愈鮮紅，而呈現類似西遊記所描述西域紅色盆地火燄山之景象。礫石

層由於礫石間孔隙大，透水性良好，且沉積物礫石間膠結不良，暴雨時雨水和地面逕流易下滲而造成伏流，且水流下切容易而快速，結果造成本區常發生崩坍並形成現今之深谷、陡坡與石河，如照片 1。



照片 1 火炎山坑溝地貌

依中央地調所目前公佈之參考資料，距離火炎山最近之活動斷層為三義斷層與屯子腳斷層，其距離分別為 1.6km 及 4.4km。依據歷史紀錄，歷年來大地震對火炎山產生重大影響者，包括 1935 年中部大地震、1939 年卓蘭強震及 1999 年 921 大地震等，顯示火炎山分別受到中至強震之威脅，因此，火炎山地質構造可歸納為兩點：一為近斷層；二為曾經因烈震震動受損。

2.2 肇災機制探討

因本工址適位於大安溪畔之沖積扇區，140 線縣道自建成後常遭受上方土石

覆蓋掩埋甚至已危害過往車輛行人之安全。民國 94 年底公路局為保護此兩鄉鎮間重要聯絡要道上之人車安全，於土石流衝擊段構築一長達 780m 之明隧道，近年來因極端氣候日益劇烈，強颱豪雨發生之規模及雨量屢創新高，造成隧道上方六條坑溝(如圖 1)所攜出之土砂量局部區域已超過預定導流土堤高度，導致往苑裡方向之西側隧道出口於暴雨期仍發生大量土石順坡面漫流並引發災難(如照片 2)，其中尤以民國 96 年韋帕、柯羅莎、聖帕等颱風造成之災情最為嚴重。

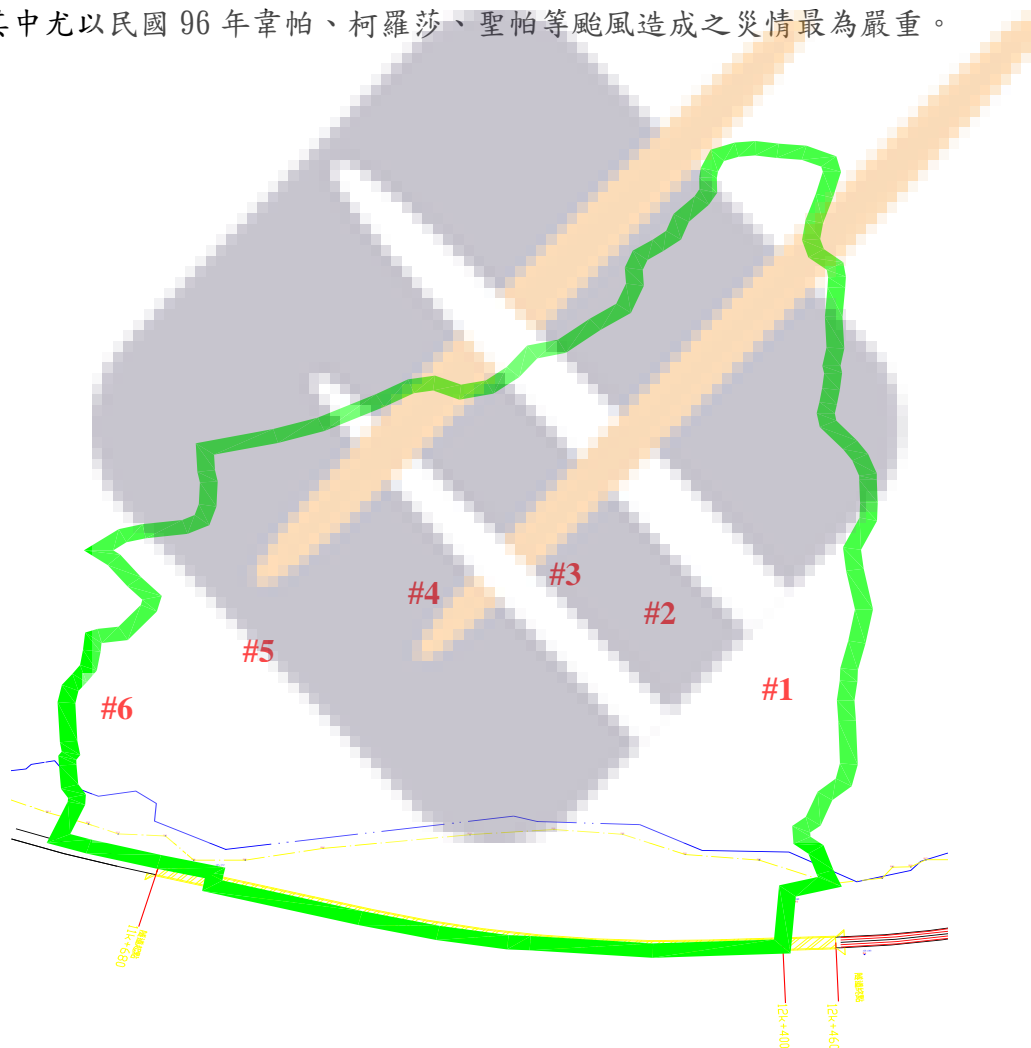


圖 1 火炎山土石流區坑溝分佈位置圖



照片 2 火炎山隧道西側出口土石災情

由圖 1 所示火炎山隧道上方坑溝共計 6 條，由東向西編號依序為#1~#6，因隧道將原有流路出口抬高約 7m，其坡度由 20%降至 8%，土石流出谷口後脫離河槽束制而轉成擴散，因地層透水率高導致急速脫水而造成勢能枯竭，當地又屬於具高摩擦角之紅土礫石層($\phi_r \cong 45^\circ$ ，資料來源：中興顧問社)，加上坡度變緩及擴散距離變短，導致續流受阻而往上爬升壅高，再因重力作用而往側向低處繼續流動，目前於西側隧道口流出之土石主要來自#5 及#6 坑溝，#5 坑溝低於#4 號坑溝約 5m，#5 受#4 壓迫而往西側低處流動，在衝破既有土堤後漫流至 140 線縣道(如照片 3)，#6 為新生沖蝕溝，有持續擴大之趨勢。另中央部份包括#2~#4 號坑溝流出之土石一部份往下游順利排放至大安溪，餘者持續淤積於隧道以上之沖積扇，淤積厚度增加情況對隧道結構體之效應有二：其一為由高往低推擠之力即靠山側(火炎山)推向靠溪側(大安溪)對隧道產生推倒傾覆力量，而現場靠溪側因淤砂披覆不良，並無法提供隧道體足夠之被動土壓抵抗力；其二為隧道上方覆土直接造成結構體重力壓力，若任其持續增厚，則實有壓垮隧道之虞。



照片 3 火炎山土石流破堤漫流情形

由以上分析可歸納出，本區肇災之主要原因除較不可控制之極端氣候外，主要則為年輕脆弱且受損之地質、陡峭之地勢、以及易堆積壅高之土石特性等。

三、研究料材與方法

本區土石整治所曾採用之工法主要有RC結構(火炎山明隧道)、石籠、以及土石堤等，惟以上工程皆未能完全杜絕土石所引致之災害。加勁結構之導入是否能產生更佳之治理功效則為本篇所主要探討之課題，而除導入加勁結構外，針對本區之特性進行因地制宜之設計與配置亦將為本篇較為深入著筆之處。

生態工程強調從整體角度來思考問題，除應將工程主體與邊界外之環境影響整體納入評估外，其應用更須因地制宜並盡量就地取材，並考量不同的地理、人文與生態條件，來進行最合宜之工法設計與施工。

土石流整治之重點主要為抑制、攔阻、淤積及疏導等，由於火炎山坑溝發生區與流動段都位於保護區範圍內，僅剩淤積區可資作為整治利用，因此相對應之措施乃以疏導及沉砂為主。在思考整治該區土石流之工法上，根據所蒐集之各項地質資料及經過完整之現地測量後，在設計上乃將安全、生態及經濟性並列為三

大要點，且須符合耐震及隧道保護與避免災情擴大等要求。以具擋土功能之結構物而言，因本區基礎不穩定(基礎亦為礫石層)，因此各類擋土結構物之長期應用風險皆高。反觀現地滿坑滿谷之砂礫本便為極佳之土木結構應用材料，只是缺乏如水泥般之膠結凝聚力，若能為此等砂礫提供足夠之凝聚力，則該土石本身將可轉而成為最佳之工程用結構材料。就此而言，具學理力學可分析性及施工技術成熟之加勁擋土結構物則具備了可行且符合上述諸項要求之工程特質，且其結構對變形之容忍度較鋼筋混凝土高，此將可大大降低整體擋土用結構之長期應用風險。

加勁結構主要由加勁材、面板系統(回包式、鋼柵式、預鑄面板式、景觀石式及場鑄面板式等)及排水系統等組合而成，其結構原理乃藉由加勁材層層包覆握裹回填土料，並以內穩定模式確保加勁土體之穩定，再以加勁土體整體作為類似重力式擋土牆之功能以抵抗加勁土體內側之土壓力以及上部之荷重，國內最常見者則為回包式加勁結構，因其結構面層可供植栽綠美化而接受度較廣，其外貌如照片 4 及照片 5 所示。加勁結構目前於台灣之應用極為廣泛，舉凡山坡地水土保持工程、大地工程、交通工程、河海工程及環保工程等皆可見普遍之應用，各級機關單位如工程會(第 02838 章)、公路總局(第 02839 章)及高速公路局(第 02839 章)等皆有相關之施工規範以供各界參考；而在設計規範方面國內台灣營建研究院以及台北市土木技師工會等亦多有書目及設計手冊出版；而輔助用套裝軟體部分常見者則有 Stedwin、MSEW、Reslope、ReSSA及Plaxis等。



照片 4 施工中之回包式加勁結構



照片 5 植栽後之回包式加勁結構

近年來生態保育觀念已成為各類工程必須也應該考量的重點，水泥及鋼材等工程材料因不符合節能減碳之效益而不被鼓勵全面採用；相對下，經過德國碳足跡比較(Georg Heerten, 2010)及國內成大研究發展基金會等單位之研究結果(財團法人成大研究發展基金會, 1999)，屬於紡織相關產品之加勁格網及其應用工法實具有極優越之節能減碳效應。而加勁格網所具有之柔韌性除可有效圍束砂礫以提供穩定性外，其較RC結構優越之韌度模數更具有吸能消能之絕佳抵抗衝擊效果。因此，在現地調查結果與工程需求與理想訴求之綜合衡量下，乃選擇以「**加勁土堤**」之方式作為本案土石整治之主要結構型式，並在設計功能中同時納入淤積、疏導及清淤便道等複合功能，其中清淤便道之功能主要針對消弭火災山隧道上方過量負載之土石，以確保隧道結構安全無虞並兼顧疏通流路。

本區土石流發生之條件主要為鬆動的土石、過量的水，以及超過臨界值的坡度，而相應下其防災重點應為穩固的支撐與導引結構、有效的動能消彌，以及正確地將土石流導引或搬移至不造成危害的地方。另外，加勁土堤結構雖具有較剛

性結構更佳之韌性與變形耐受度，但於實際應用上應仍以避免與土石流直接衝撞方為長久之計，經過評估後本案乃於西側隧道口設置一座淤沙容量可達 3 萬立方公尺之沉砂池(主要為消能)，隧道上方則進行堆積土石方之清除以至安全高度與坡度(挖方約 22 萬 5 千立方公尺、回填方約 2 萬 5 千立方公尺)，並由西側隧道口沿 140 縣道新建一加勁土堤，而該土堤除作為滯洪池之圍堰主體外，於結構上亦必須能承受滯洪池滿庫甚至繼續壅高至加勁堤頂之擋土功能。其工程配置如圖

2。

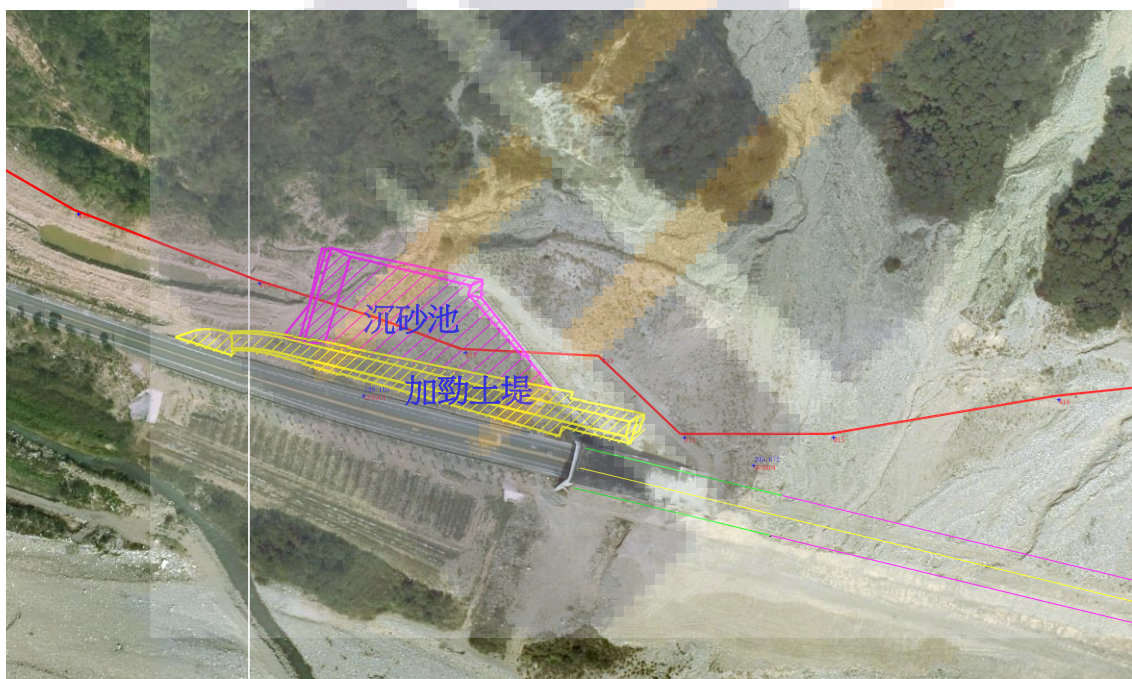


圖 2 加勁土堤及沉砂池平面配置圖

公路總局於「130 甲線 11k+550~12K+800 火炎山土石流路段工程」設計時已完成地質鑽探工作，其後魯班公司又於現場進行土壤分類試驗。本計畫除由鑽探

成果建立地層分布模型外，另依據標準貫入試驗所得之N值藉由一般慣用之公式推估力學強度參數；另為補不足，乃廣為蒐集基地現場附近以往相同地質之鑽探試驗資料補充，並加以綜合判釋後引用。尚幸基地主要為石英砂岩質礫石（平均佔 70%以上），並由砂及黏土等填充物膠結而成，因其土層深厚並無變異性大之地層或軟弱地層存在，於邊坡穩定分析時遂行相對單純，各項邊坡之參數建立整理如表 1（資料來源：1 公路總局；2 魯班公司），其並將被引用作為設計時穩定分析之地質參數。

項目	試驗參數值	邊坡穩定採用之參數值	
		上層土-卵礫石	下層土(N<50)-緊密砂
現地密度(γ_t)	2.21(t/m ³)	2.21(t/m ³)	2.1(t/m ³)
凝聚力(c_r)	0	0(t/m ²)	0(t/m ²)
磨擦角(ϕ_r)	45°	45°	35°
彈性模數(E)	38800(t/m ²)	38800(t/m ²)	30000(t/m ²)
垂直地盤反力係數(kv)	62500(t/m ³)		
水平地盤反力係數(kh)	60000(t/m ³)		
柏生比(ν)	0.3	0.3	0.4

表 1 火炎山地區土層力學參數表

3.1 加勁主體結構之設計

本案採回包式加勁土堤之設計型式，以縱向極限抗拉強度為 200kN/m 以上之加勁格網為主軸，利用加勁格網以每層 50cm 之間距層層包覆現地之土砂，加勁土堤之設計高程自 Elev.=163m 漸變至 Elev.=176.6m，終點高出隧道頂 4.3m，經保護層披覆後尚有 2.7m；總長 177m，深入隧道口內 15m；平均坡度 7.69%，最大坡度達 8.91%；堤頂寬度 6.6m，並設置淨寬 6m 之鋼筋混凝土路面及塊狀護欄，以作為日後清淤車輛行駛之用；兩側則以 V:H=1:0.5 之坡度向下延伸至基礎，基礎寬度最寬達 20m(如圖 3 及圖 4)。在細部設計上，雖加勁結構已為滲透性較 RC 高之結構物，然為更有效降低土石流衝擊時所產生之高額孔隙水壓力，乃於加勁土堤底部設置間隔 5m 之 10cm 直徑 HDPE 排水管，並以雙排直徑 60cm 之水泥涵管作為滯洪池出流之設施。另加勁土堤外側為具生態效果而採回包式搭配土壤包以利植生；內側因將與土石接觸，除亦採回包式設計以維持其韌度模數外，為增加接觸面之抗磨損及消能效果而另包覆一層土工織物強化層(如照片 6)。而在回包段長度之設計上，為更長久有效維持由機具施加於回包段格網之預拉力，除確實施做錨定溝外，更將回包段長度設計至 2.5m 以上。

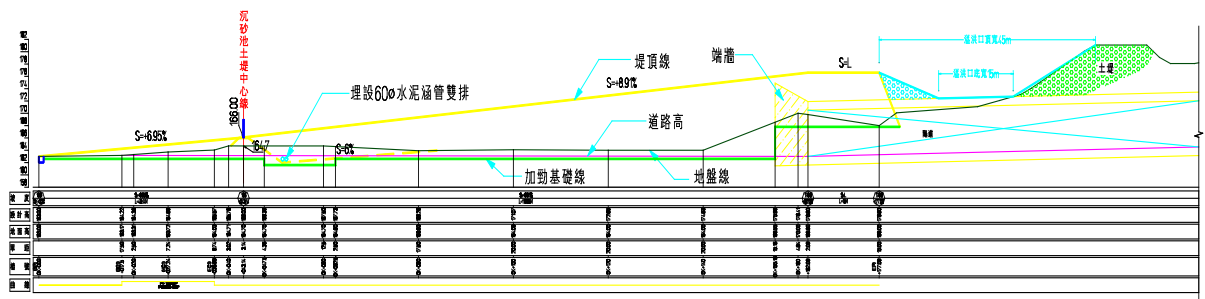


圖 3 加勁土堤縱斷面圖

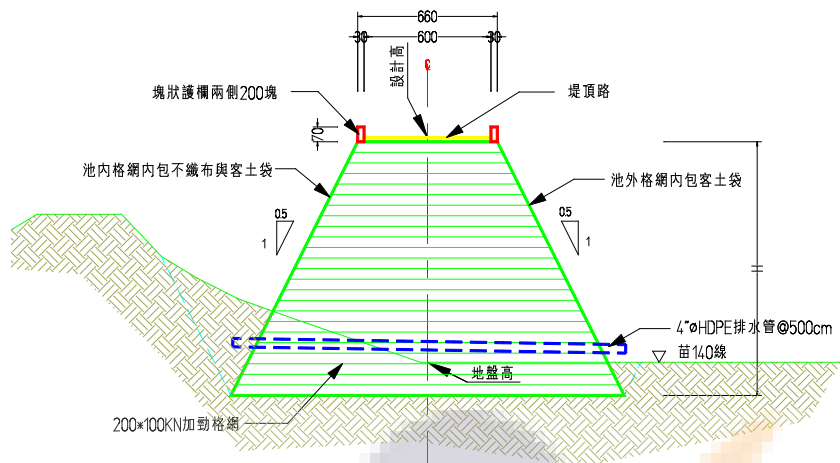


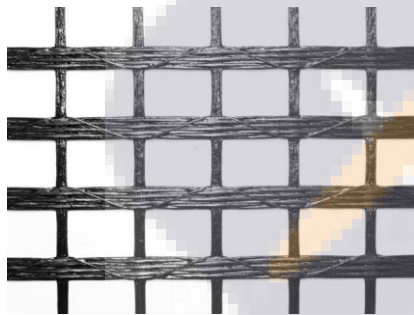
圖 4 加勁土堤橫斷面圖



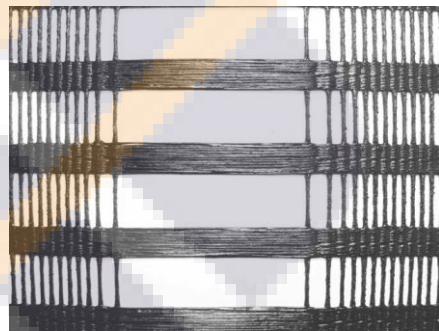
照片 6 加勁土堤內側之地工織物鋪設

在提供結構強度之加勁格網選擇上，因本案之加勁結構物除用以圍堰土石外，加勁土堤上部平台亦作為清淤用之砂石車通道，因此除了結構強度安全外亦需要求長效性穩定。一般工程應用上可見之加勁格網類型繁多，除材質之相異外，主要之差別則在於編織法。本案在經濟性與便利性之考量下選用台灣地區最普遍之聚酯纖維(PET)材質格網，而為避免加勁結構產生過大之變形而產生不穩

定狀況，在比較了出現時間較早的簡式編織法(如照片 7)與強化結點強度與格網橫向強度之複式編織法(如照片 8)後，複式編織法格網明顯在網材結構上較為緊緻，以初始模數而言，複式編織法之加勁格網在縱向 2%應變強度上平均高出同縱向強度之簡式編織法 25%以上(盟鑫工業之品管數據統計)，且於施工上較利於以機具施加格網「預拉力」，此動作可使加勁土體更為緊實而提高其穩定性，並減少以機具施工造成之損傷，因此，為使本案之加勁結構”柔中帶剛”，乃選擇複式編織法格網進行施做。



照片 7 簡式編織法格網



照片 8 複式編織法格網

在結構穩定分析上，本案以永久性結構物定位進行設計，因此需考慮長期折減效應，加勁格網之縱向綜合折減係數採用 3(依據參考文獻[2])，容許抗拉強度為 66.7kN/m，抗拉模數為 2300~2900kN/m² (盟鑫工業提供)，分析則分別採用極限平衡法及有限元素法 (強度折減法 SSR)進行。極限平衡法之分析如圖 5、圖 6 以及圖 7(由盟鑫工業以套裝軟體 Stedwin2.17 版進行分析)，其結果顯示於平時、地震及暴雨狀況下之安全係數分別為 2.08、1.22 及 1.41，皆大於水土保

持手冊所要求之 1.5、1.2 以及 1.1。

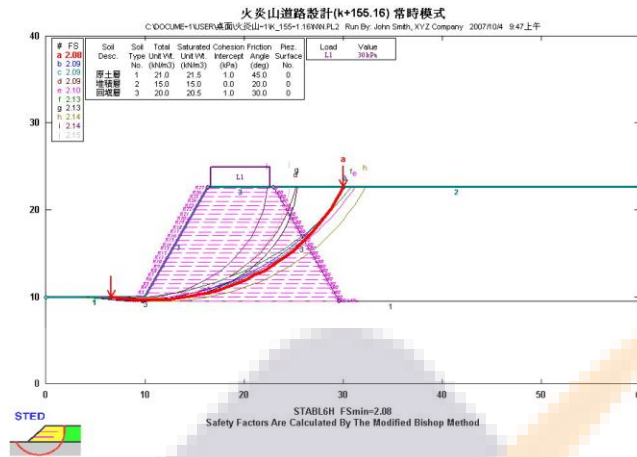


圖 5 加勁土堤之極限平衡法力學穩定分析(平常模式)

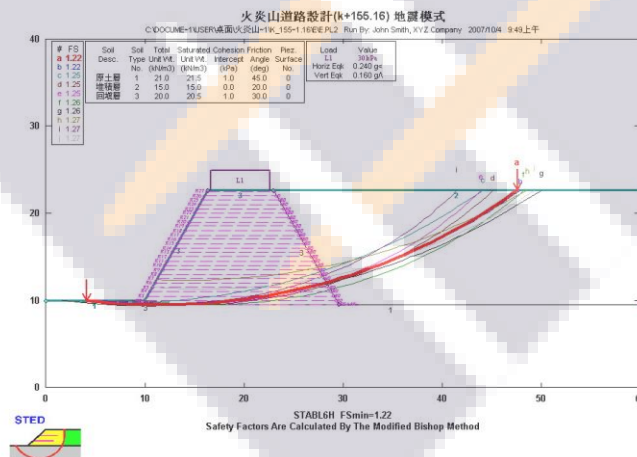


圖 6 加勁土堤之極限平衡法力學穩定分析(地震模式)

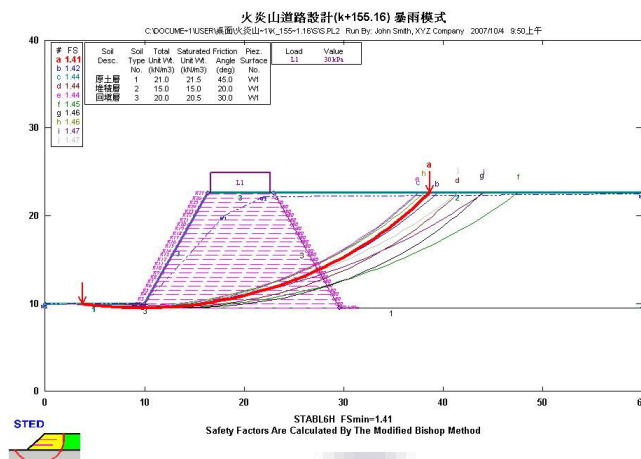


圖 7 加勁土堤之極限平衡法力學穩定分析(暴雨模式)

另以有限元素法分析所得之結果如圖 8 及圖 9(由魯班工程顧問以套裝軟體 Phase2 v6.0 進行分析)，其考慮狀況為：

- a. 空壩時承受第一坡土石流以滿庫加載，堤頂部分則以外加載重方式模擬道路載重，結果整體安全係數 1.5，大於規範要求之 1.2(依據參考文獻[3]水土保持手冊)，加勁格網最大承受拉力為 49 kN/m，小於設計強度 66.7，故屬安全，其分析如圖 8。

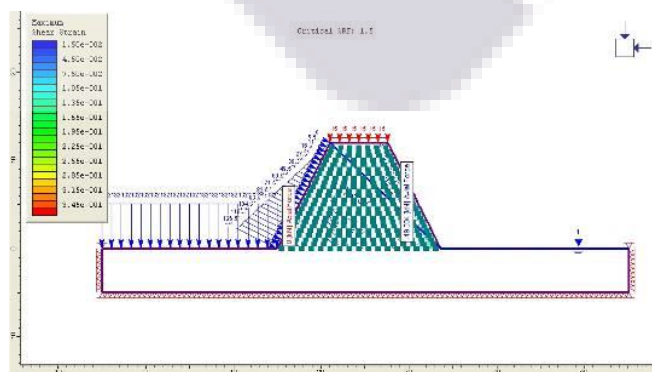


圖 8 加勁土堤之有限元素法力學穩定分析(滿庫)

- b. 空壩時發生最大地震之安全性經計算所得安全係數為 1.5，大於規範要求之

1.1(依據參考文獻[3]水土保持手冊)，加勁材最大承受拉力為 42kN/m，小於格網設計強度 66.7，故屬安全，其分析如圖 9。

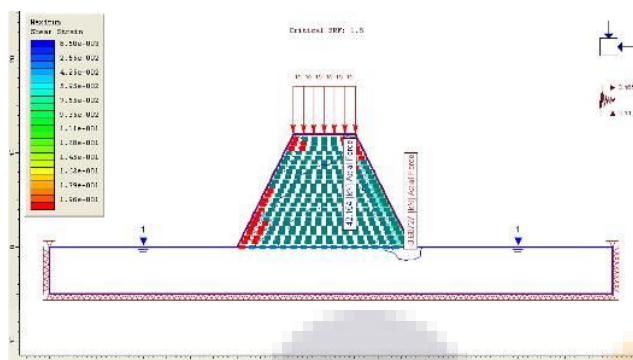


圖 9 加勁土堤之力學穩定分析(地震)

由以上綜合分析結果，本案設計之加勁土堤足以提供整治土石流之圍堰抵抗力。另因本案所設置之沉砂池屬於離槽式，非設於土石流動之河道上，加上離坑溝自山谷出口處達 100m 以上，土石流一般淤積長度甚少超過 100m 者，因此加勁土堤不須直接承受土石流體與大粒徑塊石之衝擊力，因此更進一步確認其安全性。

3.2 加勁土堤回填料之處理

本案加勁土堤所使用之回填料主要取自開挖滯洪池而來，除可消化土方外更可兼具降低經費之效。以火災山現地之土石料而言，除部分顆粒較大外，大致上符合工程會第 02383 章 2.1.3 節中填築材料之要求(不得含有其含量會影響加勁擋土牆工程品質之有機物質，如樹枝葉、雜草等，及會影響土體穩定與加勁材強度之有害物質)。因此，施工上僅需以現場土石篩除粒徑大於 125mm 者即可用作加勁回填料(如照片 9)。



照片 9 加勁土堤之回填料(就地取材篩選之)

3.3 加勁施工細節之管理

在加勁結構之施工準則上，工程會第 02383 章第 3 節中已有詳盡之敘述。除了基本的施工必備機具如挖土機、夯實機及修面用拍板外，遴選具豐富加勁施工經驗之專業工班亦為事半功倍之方式。而施工過程中之重點則可分為以下三項：

3.3.1 **基礎施工**：本區基礎開挖後地盤並未發現局部變異性(比較原設計)，亦無預期外之滲水情形，屬穩定之礫石層地盤，與設計條件相符。

3.3.2 **格網鋪設**：加勁格網之拉力強度伴隨拉伸產生，因此本案在鋪設格網時特別以增加程序與技巧之方式使格網呈現張緊狀態，如分段覆土壓制後再以機具施加拉力或輔以錨定溝再行夯實等。

3.3.3 **土包區之處理**：回包式加勁結構面層土包區之作用為輔助內側回填料夯實、增加塑形之彈性以及作為植生基床。土包區亦為整體加勁結構之「圍束單元」，當土包區之土體不動如山時，加勁土體內側之回填土亦將不至因側向推擠

變形而造成上部之沈陷。因此，本案加勁施工之重點特別落在土包區上，其細節

如照片 10 中所示。



照片 10 土包區之施工概況

四、成果與討論

火炎山除了擁有台灣面積最大的馬尾松天然林外，還有松樹、相思樹、楓香、烏白、大頭茶、杜鵑等闊葉林及多種蕨類植物；常見之動物種類則包括赤腹松鼠、莫氏樹蛙、褐樹蛙、攀木蜥蜴等。火炎山土石之整治除可保障過往人車之安全外，對大自然之維護亦為整治主要目的之一，本案在火炎山邊坡基腳所提供之整治已經有效地延緩火炎山地區崩坍之速度。加勁土堤之施做除提供完善之安全保障外，加勁牆面的現地植生演替更使該人工結構能最大程度融入火炎山整體之自然景觀中。本案於 2007 年 12 月底開工，至 2008 年 2 月中完成加勁主體結構，歷時約 1.5 個月。完工迄今已逾 3 年，期間經歷過卡玫基、鳳凰、如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜及莫拉克等超過 15 個颱風及豪大雨侵襲，加勁土堤與上部清淤便

道依舊穩定安全，且土石流亦未再由此處造成災情。相關照片如照片 11 及照片 12。



照片 11 施工中之加勁土堤概況



照片 12 加勁土堤現況

以硬碰硬正面阻擋土石之作法或許可突顯加勁結構體之強韌與工程之人定勝天成就，但實際上卻不如做得巧來得有經濟效益。本案主要結構加勁土堤之設計便著重於「巧」之精神，是故設計前之環境調查與完工後之維護便成為極重要之課題。本區之土石治理雖已見成效，惟其卻實非一勞永逸之作法。因本區之土石壅高現象仍持續不斷延續發展，為避免災害再度發生，仍須利用加勁土堤上方

之便道適時進行土石清淤之工程，並於常時確實維持加勁土堤內側沈砂池之設計容量，此方為長治久安之計。

五、結論

火炎山土石問題有其特殊之環境肇因與保全需求(民眾生命財產及保留區之動植物與著名之地貌)，工程上之作為仍主要偏重於人車安全之保障。本案於設計上秉持知己(工法與料材)知彼(環境特性)之科學精確精神，確實針對災害癥結以「巧勁」進行了成功之治理，並在兼顧安全、經濟與環保下導入較新穎之工法與配置方式，其成功應有值得分享之處。雖此，以火炎山此等大規模之土石問題，是否能有一勞永逸之解決作法應仍須從源頭進行全盤之考量，本案或可作為其眾多參考工法之一。

參考文獻

- [1]台灣營建研究院(2004)，「生態與景觀式加勁擋土牆設計與施工實務」。
- [2]台北市土木技師公會(2004)，「結合生態與景觀之加勁擋土結構設計及施工規範」，詹氏書局，台北市。
- [3]行政院農業委員會水土保持局暨中華水土保持學會(2005)，「水土保持手冊」。
- [4]財團法人成大研究發展基金會(2009)，「混凝土、RC及景觀加勁擋土牆生命週期減碳之研究」。
- [5] Georg Heerten(2010)，「Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering by use of geosynthetics」。