

阿里山森林鐵路隧道復建工程設計與施工紀實

文／圖 ■ 連祥益 ■ 林務局嘉義林區管理處技士

一、前言

國寶級的阿里山森林鐵路是全世界著名的高山鐵路之一，98年8月8日莫拉克颱風重創南臺灣，嘉義阿里山區累積雨量高達2,500mm以上，造成數十處路段上、下邊坡坡體崩滑，鐵道路基流失，迫使森林鐵路中斷行駛。阿里山森林鐵路以Sta.49k+780-50k+100（以下簡稱多林段）及Sta.60k+550-61k+450（以下簡稱屏遮那段）兩路段最為嚴重，多林段崩塌最大橫向寬度約550m，鐵道遭上方邊坡崩落巨石掩埋及損毀如圖1所示；屏遮那段崩坍區縱向長度達2km，最大橫向寬度達800m，崩坍範圍內鐵道Sta.60k+500-61k+300路基全數流失如圖2所示。

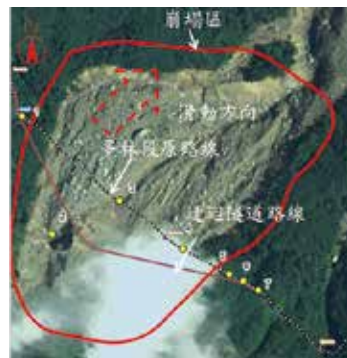
為使阿里山森林鐵路能全線安全復駛，復建工程以「順應自然、尊重自然、不對抗自然」為原則，採取迂迴隧道方式避開大型崩塌區，調整後之隧道路線如圖3及圖4所示，其中多林段隧道總長約487m，最大覆蓋厚度約100m，屏遮那段隧道總長約1,141m，最大覆蓋厚度約80m，隧道穿越之地層主要以崩積層、砂岩及砂頁岩互層等性質不同之地層。



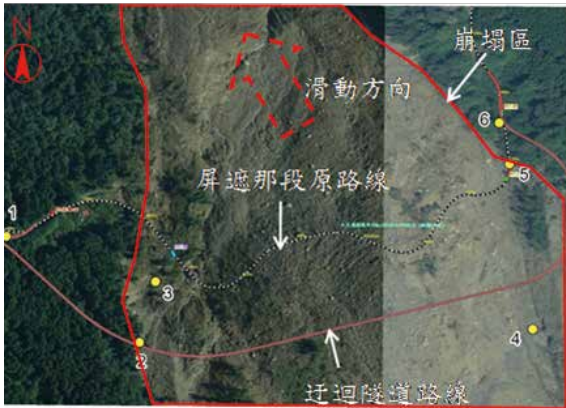
▲圖1 多林段崩塌區



▲圖2 屏遮那段崩塌區



▲圖3 多林段崩塌區路線圖



▲圖4 屏遮那段崩塌區路線圖

二、地形與地質

(一) 地形

計畫區大部分區域高度在 1,500m 以上，地形由東部阿里山森林遊樂區向西逐漸降低，地貌皆為高山坡地，地表植被皆因大規模沖刷，表土或表面岩塊皆已流失或崩落，於坡面地表分佈組織疏鬆緊密程度不一之厚層崩積層。而崩塌區外之地表地貌主要為高山闊葉林及部份淺根系之竹林所覆蓋。

(二) 地質

計畫區位於阿里山山脈南緣，於臺灣地質分區屬西部麓山帶地質區，此地質區地層經過造山運動，岩層受到擠壓變動，致使覆瓦狀斷層及不對稱褶皺非常發達，其間多緊密褶皺，且有許多斷層切割，主要地質構造線均大致呈北北東或北北西走向。

本區之地層屬南莊層，岩盤出露於崩塌區上邊坡處，其岩性主要為淡灰色厚層砂岩間夾砂頁岩互層或薄層灰黑色頁岩，多林段岩層位態約為 $N68^{\circ}\sim 74^{\circ}E/32^{\circ}\sim 34^{\circ}S$ ，向東南傾向山體，

與坡向相反，形成逆傾坡，兩組主要節理，由於地勢陡峭，且節理發達、連續性佳，易與層面及坡面形成岩楔，造成岩體鬆動，崩落於坡面，而於下邊坡堆積規模不等之崩積層；屏遮那段層面位態約呈 $N54^{\circ}\sim 68^{\circ}E/22^{\circ}N$ ，略與坡面走向平行，形成順向坡，上覆崩積層主要由崩積岩塊夾砂、土所組成，其中塊石以黃棕色或紅褐色風化砂岩塊及深灰色至黑色之頁岩塊為主，礫徑可達 5m 以上。

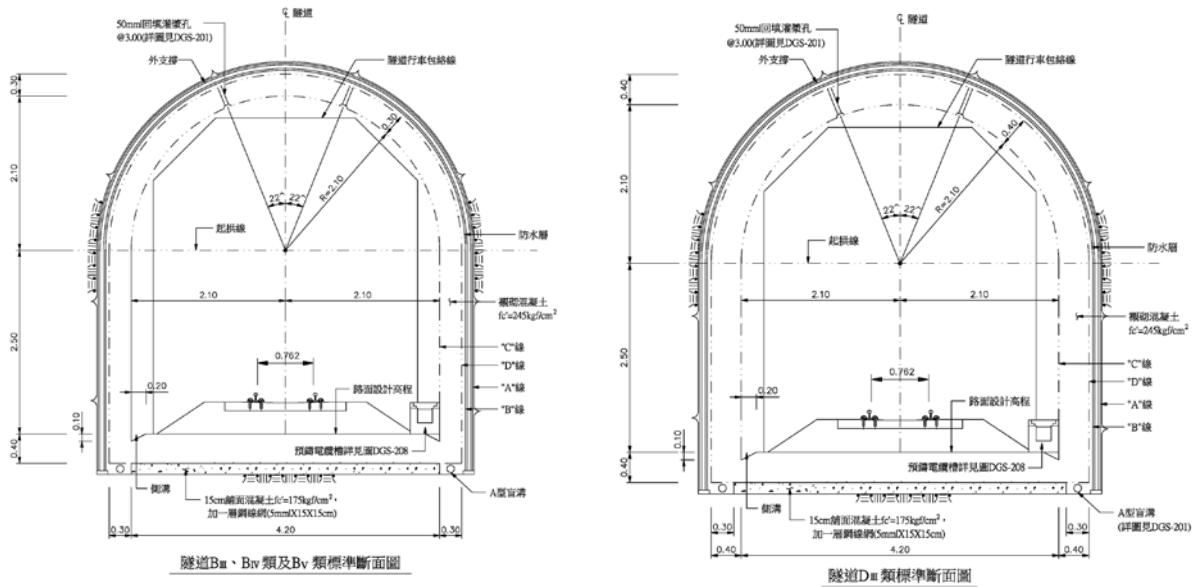
三、隧道開挖與支撐之設計

(一) 隧道開挖工法

考量隧道之長度、斷面形狀及地盤條件等，開挖方式採用國內技術已臻成熟，且施工應變能力較佳之鑽炸工法或鑿岩機開挖工法，同時採全斷面開挖，輪進長度依地質狀況不同分為 0.8m~1.5m。

(二) 隧道開挖斷面

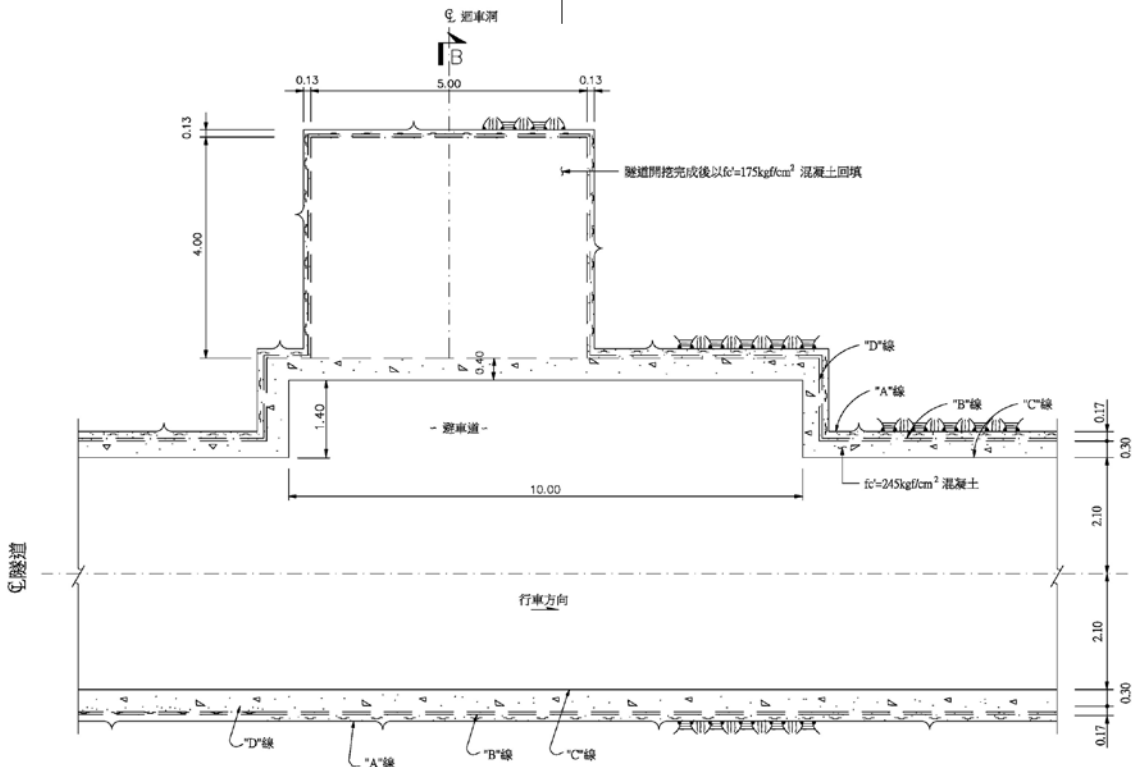
隧道斷面設計除了要考慮功能需求外，尚需考慮開挖工法、隧道沿線的地質狀況、施工腹地及交通運輸等條件。依據「阿里山森林鐵路修建作業規定」，全線隧道斷面以最小曲線半徑 50m 為原則。隧道採用倒 D 型斷面，另為因應未來鋼軌及道碴升級的空間，隧道內空寬度為 4.20m，隧道內空高度為 4.60m，襯砌厚度為 30~40cm。隧道襯砌外側鋪設防水層，理論上，隧道內應無滲水情況，惟為周全考量，於隧道斷面兩側另增設 L 型溝，並於隧道洞口設置橫向截流溝，可避免豪大雨時洞口逕流流入隧道內，設計隧道斷面如圖 5 所示。



▲圖5 隧道標準開挖斷面

由於本隧道斷面較小，為方便隧道開挖機具進出與加速施工進度，特別每 200m 設計 1 處「迴車洞」及「避車道」，其中「迴車洞」可供機具迴轉空間，完工後予以回填；「避車

道」可供隧道開挖機具會車之用，完工後不予回填與每 40m 設置之標準「避車洞」合併佈置，可供日後維修人員緊急閃避之避坑如圖 6 所示。

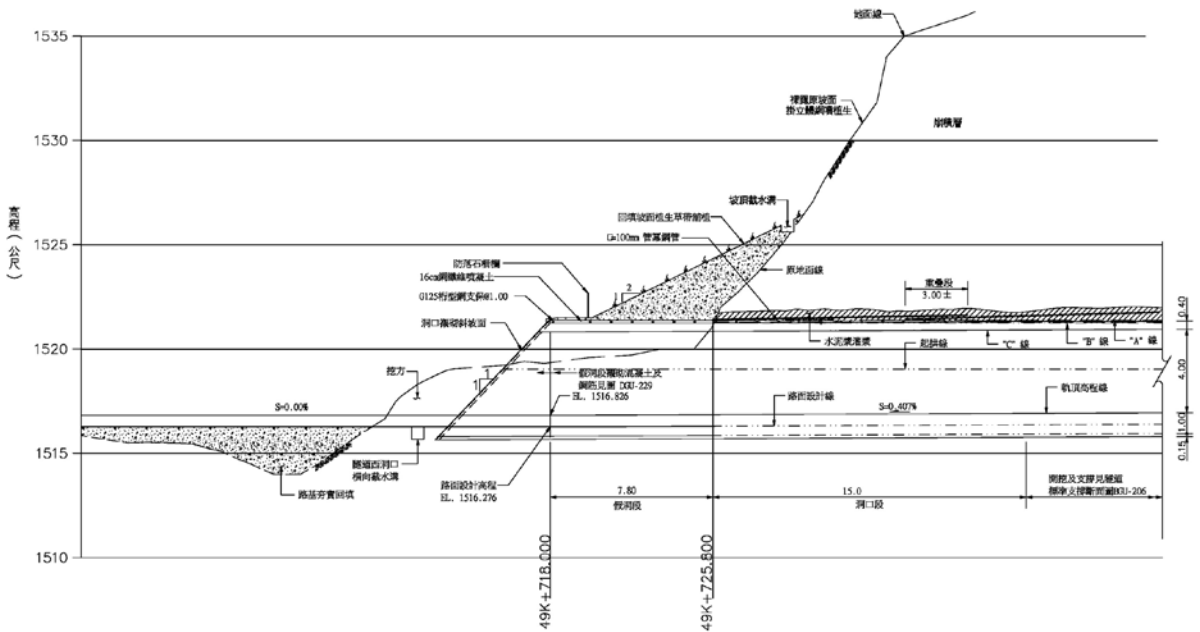


▲圖6 避車道及迴車洞開挖平面圖

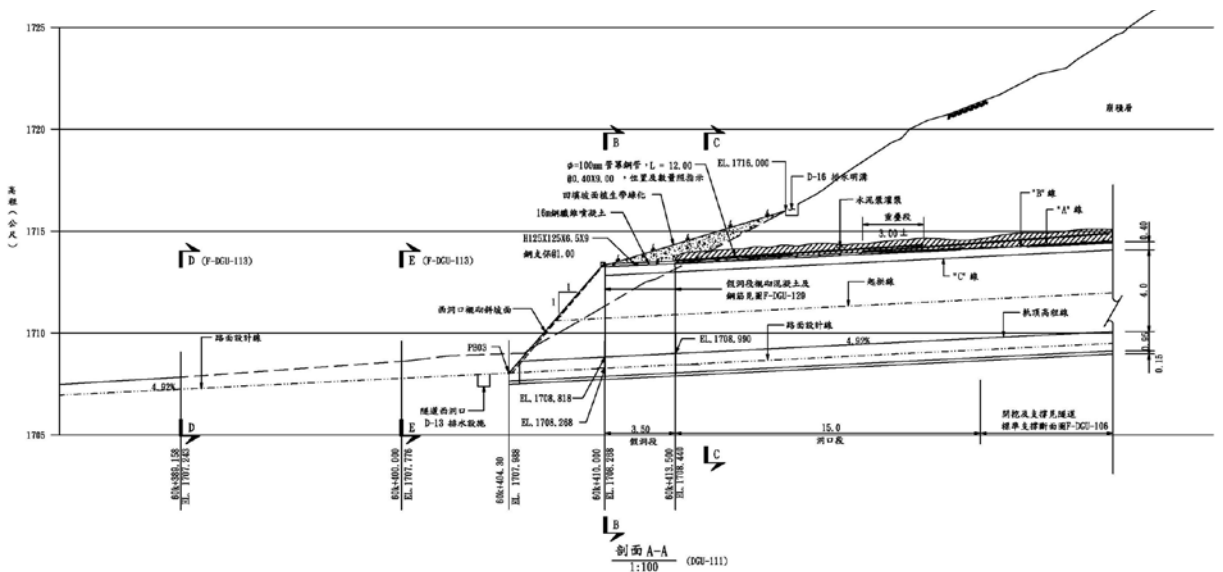
(三) 隧道洞口支撐設計

由於隧道洞口地層屬崩積層，厚度較厚，為減少洞口大量開挖，隧道洞口均直接由既有坡面上鑽設支撐管幕鋼管，以增加頂拱之穩定性，再於洞外架設桁型鋼支保及噴佈鋼纖維噴凝土以形成假洞，視需要於假洞完成後再回填

坡面，可避免後續開挖時發生偏壓現象，當內部襯砌厚度為 40cm 完成後，再將洞口形塑為一斜坡面造型，最後於假洞上方補充覆土植生，隧道進洞口開挖支撐設計圖如圖 7 及圖 8 所示。



▲圖7 多林段隧道西洞口開挖支撐設計圖



▲圖8 屏遮那段隧道西洞口開挖支撐設計圖

（四）設計及施工巧思

在設計階段及施工過程中，運用了許多獨特的巧思，創造出一些環保型之工法如下：

1. 「減少地表開挖」，洞口崩積層較厚，傳統洞口工程為先將崩積層削挖，再配合邊坡保護設施，但是多林段隧道及屏遮那段隧道之西洞口直接由既有坡面上鑽設先撐管幕鋼管，增加頂拱穩定性，再於洞外架設鋼支保及噴佈鋼纖維噴凝土形成假洞，部分覆土培厚，以避免發生偏壓現象。當內部襯砌完成後，再將洞口造型為斜坡面，最後於假洞上方覆土植生。以此種工法施工結果，可大量減少露天明挖部分之開挖量，提高洞口邊坡的穩定性，完工後為綠化的景觀坡面，可增加觀光價值。
2. 「減少工程費及工期」，將新建多林段隧道東口由距離既有 35 號隧道東口約 70m 處匯接至既有結構良好的舊 35 號隧道，形成交叉段，除了減少新建多林隧道之總長度之外，亦無需新建隧道東洞口，減少工程費及工期，並保留既有 35 號隧道東口結構物，亦不破壞邊坡生態環境。
3. 「減少林木砍伐」，通達便道過陡段就地取材以塊石堆疊方式構築。
4. 「減少進出時間」，隧道內每隔 200m 施以避車道及迴車洞設計。
5. 「減少崩坡震動」，隧道開炸時施以振動控制監測。
6. 「減少輪進時間」，DIII、BIV 及 BV 類支撐以無岩栓設計。
7. 「減少洞內泥濘」，隧道開挖後立即施以 15cm 鋪面混凝土。

8. 「減少土方外運」，隧道碴料以工區內自設棄土區規劃。由於隧道開挖作業所產生之土石方量大，考量土方外運所費不貲，同時大量砂石車進出對於阿里山公路交通將造成嚴重衝擊，故於工區內尋找適宜之填土區作為棄土地點，可節省運輸及土資場費用，並減輕運土造成之污染及交通影響。
9. 「減少開挖面積」，隧道初期支撐以鋼纖維噴凝土設計。
10. 「減少開挖長度」，隧道線型以最小轉彎半徑 $R=50m$ 設計。
11. 「減少施工災害」，隧道開挖施以防護措施及逃生路線規劃。「減少地下水滲入」，隧道襯砌外以全罩式防水膜設計。

四、隧道施工困難及突破性

（一）多林段隧道

1、配合不定期暫停施工

因鄰標工程材料必須仰賴工程列車運送，及監工區道班工路線養護工作等，均須通過工區，如圖 9 所示，因此本工程期間必須隨時與奮起湖車站及監工區保持聯絡，當需運送材料或監工區道班工路線養護等工作時，配合清理軌道及暫停施工，使得施工效率明顯降低。



▲圖9 工程列車運輸材料

2、通達道路狹小

工區對外唯一通達道路為森林鐵路(里程 49K+353~49K+780)，因路幅僅有 3.5m 寬，且須經過既有森林鐵路第 34 號隧道(淨高 3.5m)，如圖 10 所示，無法行駛大型運輸車輛，且於雨季易發生路基坍方致無法通行材料，迫使必須採用二次搬運方能到達工區。



▲圖10 唯一通達道路

3、崩積層段開挖進度緩慢

隧道開挖階段因崩積層段地質鬆軟及經常出現大塊堅硬塊石或塊石群，導致隧道開挖過程易崩坍，採用 12m 長管幕鋼管先撐工法，於開挖即將開挖面先行加固支撐，避免開挖面崩坍，如圖 11 所示。雖此工法花費較長工時，但對開挖面之穩定效果顯著，使開挖過程均無大規模崩坍發生，得以安全順利通過崩積層段。



▲圖11 崩積層地質現況

4、材料運輸路線易崩塌

施工中所需之材料選擇由森林鐵路第 35 號隧道東洞口運輸至施工點，材料運輸路線須通過崩塌區才可抵達隧道東洞口，因上邊坡地質不穩，遇颱風豪雨易發生土石滑落，於颱風豪雨來臨前即安排施工機具待命，當邊坡崩坍時，立即進行災害修復工作，以便在最短期間內恢復正常施工，如圖 12 所示。



▲圖12 材料運輸路線

5、隧道斷面狹小

隧道貫通後，接續進行仰拱襯砌、鋪設防水層、鋼筋綁紮、鋼模襯砌澆置等工項，如圖 13 所示，因隧道斷面狹小各工項無法同時進行施作，使得施工進度緩慢，因此，由隧道西洞口往東施作各工項，並將材料由既有森林鐵路第 35 號隧道以小搬運方式運入施工點，部份因其他工項已施作而無法以車輛運輸時，改為利用人工搬運方式配合施工，以發揮最大之趕工效率。



a.全罩式防水層鋪設

b.鋼模襯砌澆置

▲圖13 隧道施工現況

6、新舊隧道銜接斷面

本工程隧道與既有森林鐵路第 35 號隧道銜接處，因既有 35 號隧道未設置防水層，施工期間每逢豪雨，即造成新舊隧道銜接處發生滲水現象，如圖 14 所示，經會同監造技師現勘研商，決定在新舊隧道銜接處進行注膠材料灌漿，並於既有 35 號隧道設置排水盲溝導，將隧道內積水導排致隧道洞口外，如圖 15 所示，避免日後隧道內產生積水情形，以確保行車安全。



▲圖 14 新舊隧道銜接斷面滲水



a. 埋置排水盲溝

b. 透水材料回填

▲圖 15 新舊隧道銜接斷面滲水處理

(二) 屏蔽那段隧道

1、危評計畫送審

本標隧道長度超過 1 公里，依據勞動檢查法規定係屬「丁類危險性工作場所」，因此，須於隧道進洞前，完成危評審查。即初期動員階段，除須完成整體施工、整體品質、安全衛生管理、環境保護等基本計畫外，最重要是通過勞檢單位之危評計畫。經業主、監造及施工單位齊心努力，自開工到完成危評審查，僅花費 4 個月，較原規劃的 6 個月，提早了 2 個月。

2、施工便道鋪築

因工址無公路可直接到達，為利施工材料及機具可運至工區，勢必開闢施工便道，而基於「減少林木砍伐」原則，踏勘選定施工便道路線後，立即進行便道之擴寬修整、林木砍伐、級配鋪築及 15cm 鋼線網混凝土澆置等工作，如圖 16 所示。



a. 埋置排水盲溝

b. 林木砍伐



c. 級配鋪築

d. 混凝土澆置

▲圖 16 施工便道鋪築

3、工地拌合廠設置

依施工規範規定預拌混凝土自拌合廠起運送至工地澆鑄完成之時間，不得超過 90 分鐘。工區位處偏僻高山，距離阿里山公路台 18 線 85k，尚須花 15 分鐘的下坡車程。不僅最近之合法拌合廠無法滿足品質需求，開工時亦無道路可供拌合車順利到達。考量日後隧道噴凝土及襯砌混凝土使用量較大，且需日夜施工，決定以自設工地型簡易預拌廠方式供料。同時，為避免因颱風、暴雨，造成便道中斷供料不及，將拌合場設於西洞口隧道附近，即原屏蔽那車站旁，如圖 17 所示。



▲圖17 工地拌合廠

4、火藥庫設置

本工程爆炸物使用量較大，且使用期限較長（超過 1 年），加上 10km 範圍內，無其他火藥庫可供寄存。因此，基於爆炸物領、退料之運輸安全，決定採自設火藥庫。依據礦務局「火藥庫設置期限及設置標準」規定，火藥庫應選擇無崩塌及淹水之慮之乾燥地點。本標位於大規模老崩塌範圍內，擇地不易；加上位於林務局及阿里山國家風景區內，依據「非都市土地使用管制規則」第六條規定，土地作為臨時設施使用，須經過中央目的事業主管機關認定為重大建設計畫，及徵得使用地之中央主管機關及有關機關同意；核准時，同時函請地方政府通知土地登記機關於土地登記簿標示部加註臨時使用用途及期限。因此，本案土地使用核准程序較一般工程繁瑣冗長。經礦務局會勘後，避開原本崩塌區潛勢範圍，選擇通達便道旁（嘉義縣阿里山鄉屏遮段 92 號地號內）之一處安全穩定區域，興建一座 11 噸火藥庫，如圖 18 所示。自申請到完成火藥庫使用，共費 8 個月之久，較原先規劃的 4 個月，多了 4 個月。



▲圖18 火藥庫

5、西口崩積層進洞難題

西洞口屬古老崩積層，地表植生茂密，且為人造林，原研判為穩定狀態，因此原設計未施以任何邊坡保護工，且採邊坡零開挖方式進洞。但現場清除掘除後發現，洞口泥濘且有地下水滲出，進洞困難且有偏壓情況，為避免坡腳開挖造成崩積層失穩，先以（塊石堆疊）培厚後，再搭配管幕進洞，如圖 19 所示。



▲圖19 西洞口培厚搭配管幕工法

6、東口落石區進洞

東洞口岩盤裸露，入洞 10 餘公尺即可進入岩盤，不同於西洞口崩積地層，且緊鄰野溪蝕溝，須先以乾砌塊石牆及涵管跨築野溪後，如圖 20 所示，才能到達東洞口。本以為

地質較穩定之東洞口，於 2013 年 8 月 30 日因康芮颱風侵襲，造成東洞口上邊坡巨石滾落砸毀機具設備，經緊急會勘後，以落石防護網及假隧道延伸 5m 方式變更處理，以確保施工人員安全，如圖 21 所示。



▲圖20 乾砌塊石牆及涵管施工完成照片



▲圖21 落石防護網及假隧道延伸5m

7、全罩式防水層襯砌施工

本工程採用全罩式防水層鋪設，需鋪底部防水層，但因本隧道斷面小，長度不短，若採全罩式防水層施工完成後，再進行鋼筋與襯砌澆置方式，工期必不足。加上小斷面鋼模無法如公路隧道大斷面鋼模，在打設襯砌時，以維持下方通行方式規劃動線，因此，本案採上、下分部方式施工，其施工程序如下：A 型盲溝→下部防水層→鋪底混凝土→下

部鋼筋→仰拱襯砌→35cm 高側牆→上部防水層→上部鋼筋→鋼模襯砌澆置，如圖 22 所示。



a. A型盲溝鋪築

b. 下部防水層鋪設



c. 鋪底混凝土

d. 下部鋼筋綁紮



e. 仰拱襯砌澆置

f. 35cm高側牆澆置



g. 上部防水層及鋼筋

h. 鋼模襯砌澆置

▲圖22 全罩式防水層襯砌施工程序

8、鋼模襯砌選擇

路線平面線形以曲線半徑 $R=50m$ 、 $R=200m$ 兩個同向曲線進入隧道西口，為因應曲線變更，分別選用 12m 及 6m 兩套鋼模，逐單元由內向外打設。當遭遇 $R=50m$ 之最小曲線半徑時，西段 12m 鋼模可拆解為 9m 模及 3m 模；而東段 6m 模可拆解成 3m 模及 3m 模，如圖 23 所示。



a. 西段12m鋼模

b. 東段6m鋼模

▲圖23 襯砌鋼模照片

五、結論

林務局為確保屬文化資產之阿里山森林鐵路能動態保存，積極爭取重建經費，獲得行政院全力支持，分別投入新臺幣3億6千萬及1億3千萬元辦理屏遮那及多林隧道復建工程，採用多項創新性規劃、設計及施工措施，成功克服長達100m之崩積層開挖及順利貫通隧道，兼顧生態環境維護措施，完成新建隧道及填土區的景觀坡面。

多林隧道工程榮獲行政院農業委員會103年度優良農建工程獎，而屏遮那隧道及多林隧

道工程亦獲中華民國隧道協會「103年度優良隧道工程」榮譽，再次肯定林務局及嘉義林管處辦理森林鐵路復建工作用心。🌱

