



新烏山嶺引水隧道 施工遭遇 瓦斯資源 之對策

汪世輝* / 利德工程股份有限公司 經理

蕭富元 / 財團法人中興工程顧問社 組長

周永川 / 台灣世曦工程顧問股份有限公司 經理

王建力 / 國立成功大學資源工程系 副教授

天然氣瓦斯對採礦者而言，係汲汲想得到的資源；但對土木水利者而言，係萬萬不想碰到的災害。八田與一興建之舊烏山嶺隧道為串連曾文水庫與烏山頭水庫之重要且唯一的引水隧道。沿線因通過台灣產油氣的地層，施工當時曾引起數次瓦斯氣爆事件，造成不少死傷。鑑於此，新烏山嶺引水隧道參考過去經驗，採取先進之「不打岩栓」、「分層探查」、「加強通風」、「止氣噴灌」、「鑽井洩氣」、「勤測瓦斯」及「嚴控火源」等施工關鍵技術，隧道自 104 年 12 月進洞至 107 年 5 月貫通期間，無發生任何抽坍及氣爆事件，有效掌控高瓦斯隧道之施工安全。本文期供後續類似高瓦斯隧道施工之參考。

關鍵字：烏山嶺引水隧道、瓦斯隧道、可燃性氣體

前言

新烏山嶺引水隧道主要係因連結曾文水庫與烏山頭水庫供水系統的舊引水隧道，自 1930 年通水啟用至今已逾 90 年。隧道結構品質日漸劣化，且在無法長期停水，進行全線補強加固下，為避免舊引水隧道發生突發性崩壞的斷水風險，並恢復原有的 $56 \text{ m}^3/\text{sec}$ 輸水能力。因此，乃於其下游側約 200 ~ 400 公尺處，興建新的引水隧道。新烏山嶺引水隧道全長約 3.4 公里，開挖斷面積約 43 m^2 ，穿越阿里山山脈南緣分支，覆蓋最高約 400 多公尺。由隧道東口至西口依序經過現代沖積層、鹽水坑頁岩、糖恩山砂岩、六重溪層（砂頁岩互層），如圖 1 所示。

糖恩山砂岩及六重溪層均為臺灣西南部的產油氣層，雖暫不具經濟生產價值，但開挖過程中，若遭遇油氣入滲，在隧道侷限空間內之低濃度（5% ~ 15%）下，

倘遇火源即具有爆炸之風險，如圖 2 所示。根據資料顯示^[1]，過去舊引水隧道施工過程中，即曾遭遇多達 25 次規模不等之油氣洩出事件，並曾發生 9 次氣爆意外災害。

臺灣以往已有多起煤礦開採及隧道施工氣爆案例，例如舊烏山嶺引水隧道、鯉魚潭水庫士林水力電廠頭水隧道、曾文水庫越域引水西隧道等。但災害發生後，鮮少系統性探討其處理對策，本文歸納成功貫通之新烏山嶺引水隧道，介紹其所採取之「不打岩栓」、「分層探查」、「勤測瓦斯」、「加強通風」、「止氣噴灌」、「鑽井洩氣」及「嚴控火源」等施工關鍵對策，期供未來瓦斯隧道施工之參考。

不打岩栓

系統岩栓是新奧工法一個重要的支撐構件。但對瓦斯隧道來說，岩栓的打設過程，可能造成裂隙連通，油氣入滲的管道。因此，本隧道構思以「不打設岩栓」之觀念，來進行隧道設計；再輔以加厚噴凝土及仰拱閉合，來彌補

* 通訊作者，shihuiwang@raitocom.tw

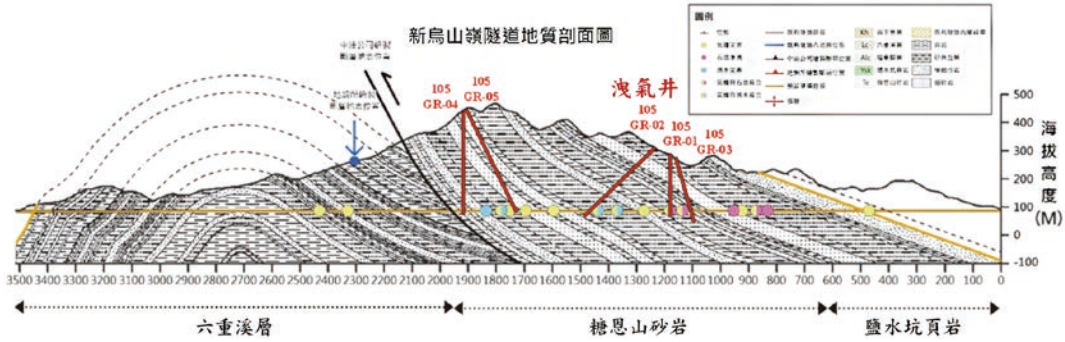


圖 1 隧道地質圖及洩氣井配置圖

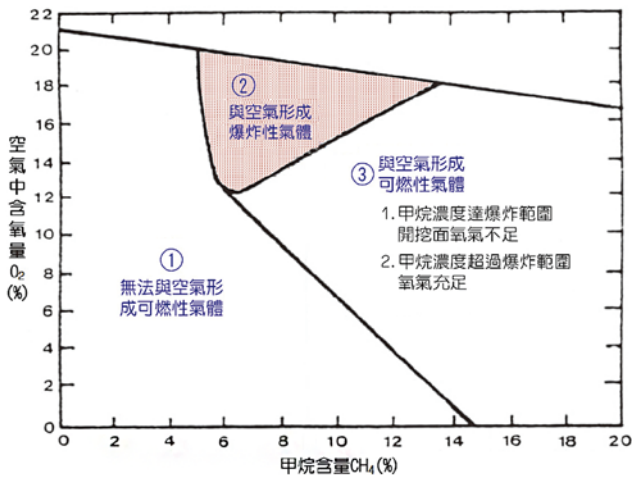


圖 2 甲烷爆炸性和空氣中含氧量關係圖

隧道支撐。後經開挖驗證，實際頂拱及水平收斂變位量也不到預估變形量之 30% (如圖 3)。

但在一些特殊區段，如：洞口段、交叉段及避車道等，避免不了需岩栓補強時，則以「自鑽式岩栓」取代，於第一層噴凝土完成後隨即施打，並以第二層噴凝土披覆方式，以避免油氣藉由岩栓滲出，如圖 4 所示。另為通風順暢，避免瓦斯蓄積，這些特殊區段，線型設計亦盡量採「順接」方式，如避車道斷面順接設計 (如圖 5) 及橫坑交叉段順接設計 (如圖 6)。

分層探查

「瓦斯分層探查」概念，源自石油工程技術。過去完井後的孔口瓦斯測定，僅可得知全井地層甲烷氣體逸出濃度，而無法研判瓦斯出氣位置、出氣地層特徵及相對應的出氣濃度。因此，在補充地質調查階段，乃構思配合鑽孔施作過程，每鑽進固定深度 (如 10 m ~ 20 m) 或鑽井回水有氣泡冒出、或地層變異破碎處等，即辦理氣體成分分析及瓦斯濃度量測。

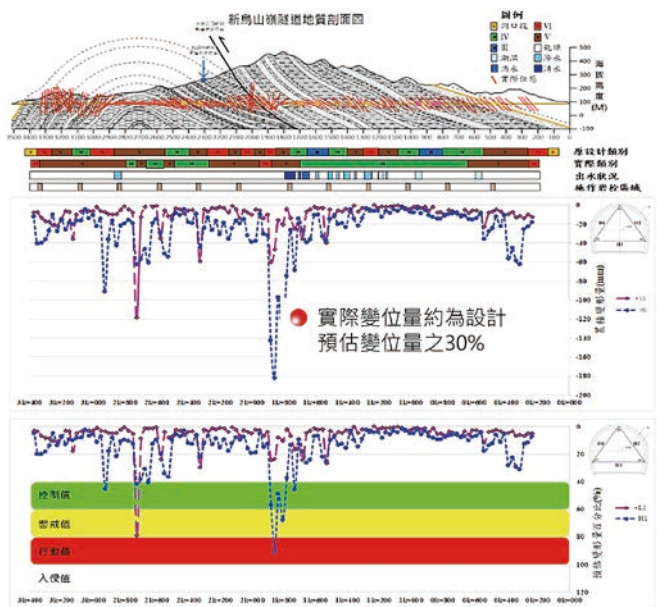


圖 3 瓦斯隧道沿線變位情況

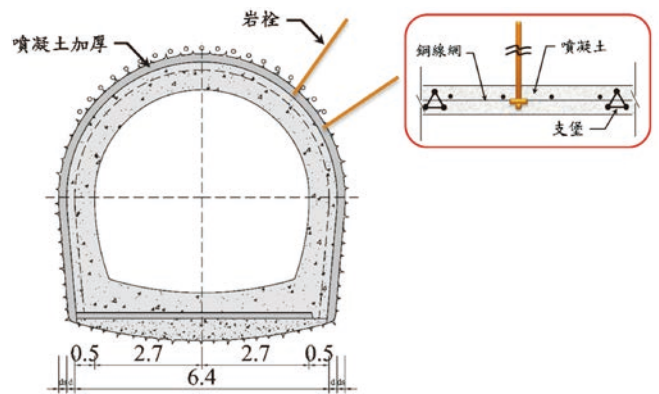


圖 4 瓦斯隧道開挖支撐示意圖



圖 5 避車道斷面順接設計



圖 6 施工橫坑交叉段順接設計

量測方法係將氣體收集裝置導入至鑽井特定位置（如疑似出氣地層或地下水位上方 20 ~ 50 cm 處），以密封管路連接至地面集氣設備，而後開始進行抽氣作業，打開地面氣體收集閥口，確認管路中已無原殘留空氣後，置入氣體偵測器量測可燃性甲烷氣體濃度及其歷時變化情形，取氣體濃度歷時變化達穩定時之觀測值做為偵測結果。由於已鑽進段的孔壁均有鑽桿接續，而鑽桿與岩壁間的距離通常極微，故鑽孔中所偵測到的氣體主要應來自孔底鑽頭地層中所滲出，故該次量測結果，應可視為該深度位置所滲出的氣體濃度。圖 7 為瓦斯分層探查過程及結果。

依瓦斯的成因，可分為煤系瓦斯地層及非煤系瓦斯地層（油頁岩及含天然氣、石油地層）。本隧道依據瓦斯絕對湧出量的多少，劃分不同的「瓦斯地層」，如表 1 所示。

一個瓦斯工區內不同地段原瓦斯地層中的初始瓦斯含量，可能受施工通風及止氣影響，而稀釋出不同瓦斯濃度。根據釋出之瓦斯濃度，本隧道將瓦斯工區劃分為「微瓦斯工區」、「低瓦斯工區」、「高瓦斯工區」與「瓦斯突出工區」等四種管理等級，如表 2 所示。

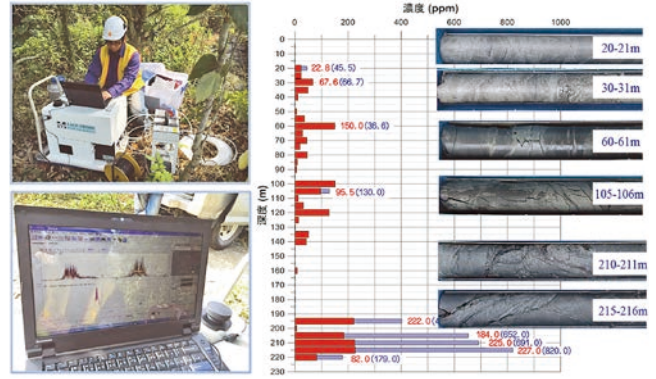


圖 7 鑽井過程瓦斯分層探查情形 [2]

表 1 瓦斯地層等級劃分

瓦斯地層	瓦斯湧出量 Q_{CH_4} (m^3/min)
微瓦斯	$Q < 0.5$
低瓦斯	$0.5 \leq Q < 1.5$ (8L/S)
高瓦斯	$1.5 \leq Q < 4.8$ (25L/S)
瓦斯突出	$Q \geq 4.8$ (80L/S)

表 2 瓦斯工區等級劃分（氣爆濃度 5% ~ 15%）

瓦斯工區	瓦斯濃度 (%)	爆炸下限 LEL (%)
微瓦斯	< 0.25	< 5
低瓦斯	0.25 (含) ~ 0.5	5 ~ 10
高瓦斯	0.5 (含) ~ 1.0	10 ~ 20
瓦斯突出	≥ 1.0	> 20

加強通風

隧道作業中裝炸、出碴、焊接等不可避免會產生火花，要完全杜絕難度極大。從降低瓦斯濃度觀點，通過通風稀釋，將其控制在爆炸下限內，使即出現少數火花，也不會導致瓦斯氣爆，是最為有效防護。

研究表明，風速在 0.3 m/s 時，甲烷會從發生點逆流形成甲烷層（約 20 cm）；當風速達 0.5 m/s 時，甲烷幾乎不會發生逆流，但會形成甲烷層；當風速超過 1.0 m/s 時，甲烷散亂，甲烷層會消失，不會在頂拱上部聚積。

為達回風速 1.0 m/s，本隧道採 1.2 m 管徑「雙管送風」方式，總送風量 $43 \times 60 = 2,580 m^3/min$ 以上，如圖 8。其優點有效射程大，稀釋、排出瓦斯及煙塵之效果好；工作面回風流不通過風機及風管，對有瓦斯湧出的工作面安全性高；而污濁空氣沿隧道流出，沿途帶走隧道內瓦斯、粉塵及廢氣，對改善洞內環境、降低瓦斯更有利。另外受氣壓影響，隧道內回風速不足區段，本隧道亦引進射流風機進行補強，同時可作為隧道貫通後延續加強通風用。

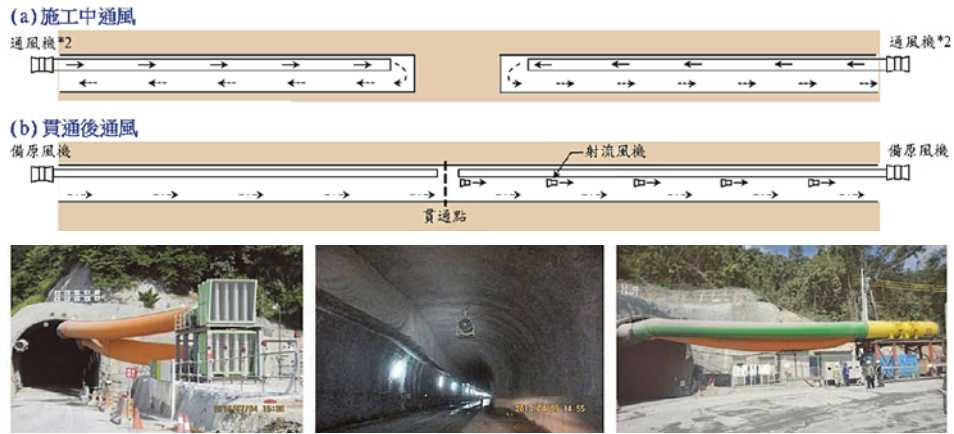


圖 8 雙管送風及射流風機方式

止氣噴灌

台灣止氣灌漿之施工案例較止水灌漿少很多。因此，本案例藉由成大資源系岩力實驗室之微流細孔分析儀來量測各種止氣材料的透氣係數，供施工選用之參考。實驗結果顯示，隧道圍岩地層及設計噴凝土屬於半透氣性質 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；襯砌混凝土、水泥砂漿及選用之樹脂止氣灌漿與止氣噴漿材可介於不透氣性質 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$ ，圖 9 所示。

本隧道「止氣噴灌」使用時機，為遭遇高瓦斯地層，雙管通風仍無法降低瓦斯濃度時。未開挖段採用「止氣灌漿」；已開挖段採用「止氣噴漿」，即所謂前灌後噴方式。灌漿材採用 PU 樹脂類；噴漿材則使用高分子聚合物，薄層施噴後 4 小時即可達單壓強度 100 kg/cm^2 以上。

以止氣噴漿成效為例，於未止氣灌漿區段開炸後瓦斯滲出，加強通風（2 管）達 5 hr 仍無法降低瓦斯濃度至 20LEL 以下，人員無法進入，顯示高瓦斯工區瓦斯有持續滲入；但施作止氣灌漿後，開炸所造成之瓦

斯滲漏，可在加強通風下約 1 hr 內，將瓦斯濃度降至人員可進入（出碴）之濃度，顯示止氣灌漿有效阻斷並減少高瓦斯氣體持續滲入（如圖 10）。

而完工前，利用紅外線光譜儀（如圖 11）來量測不同階段隧道瓦斯空間分布情形，如圖 12。由圖 12 可知隧道貫通完成噴漿情況下，瓦斯濃度值最高約 500 PPM；而於隧道襯砌完成後，出氣段瓦斯濃度已降至 250 PPM；而於最後完成襯砌拱頂回填灌漿後，量測之瓦斯濃度甚低至 100 PPM 左右（遠低於瓦斯管制濃度 2,500 PPM 甚多）。

鑽井洩氣

新烏山嶺隧道所採用之「鑽井洩氣」工法，乃模仿大地工程的點井降水工法原理。構思在隧道遭遇瓦斯突出地層前進行鑽孔，並安裝高性能抽氣設備，事先洩除地層中的瓦斯氣體，避免開挖時大量高濃度氣體突入隧道內，如圖 13 所示。傳統豎井排氣工法則是在氣體進入隧道內後，再透過豎井將氣體排出隧道外，二者差異，

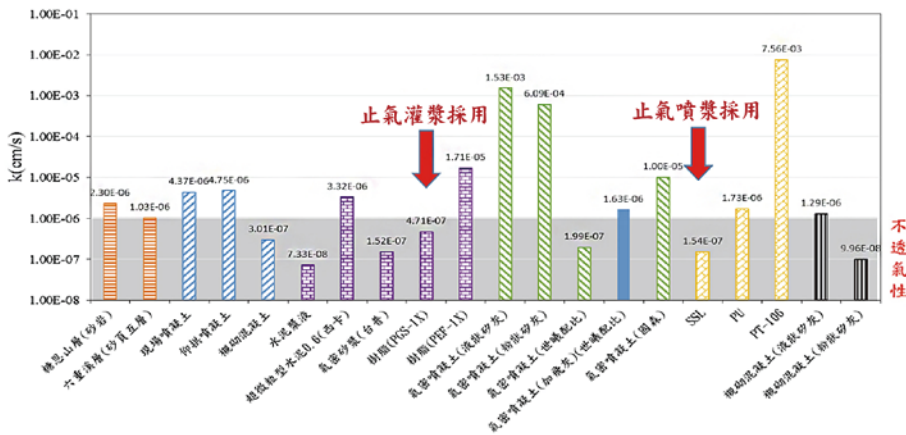


圖 9 各種止氣材料試驗結果

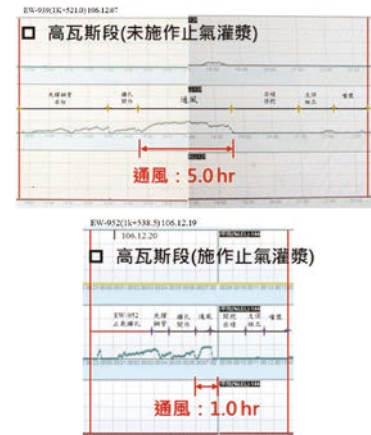


圖 10 止氣灌漿成效示意圖

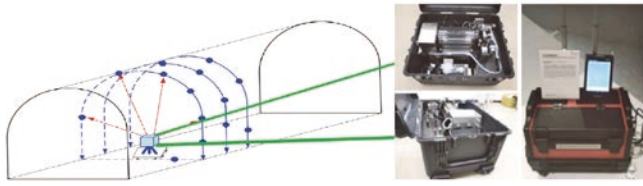


圖 11 隧道空間紅外線光譜儀氣體量測系統 (精度 10 PPM)

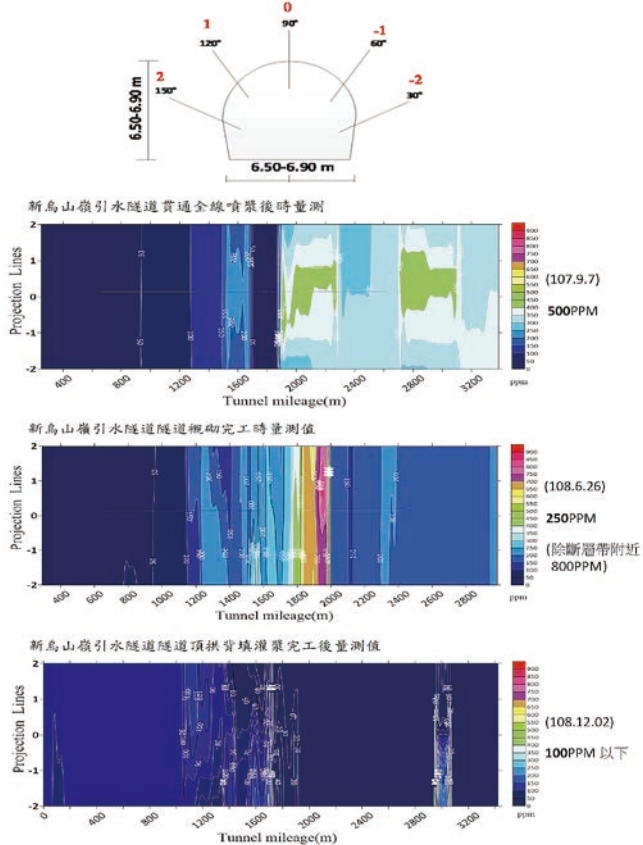


圖 12 隧道噴漿、襯砌及回填灌漿後瓦斯濃度測值 (PPM)

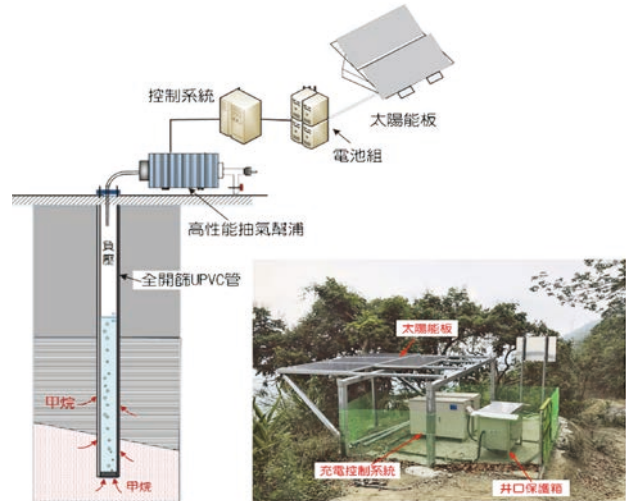


圖 13 鑽井洩氣工法示意圖 [3]

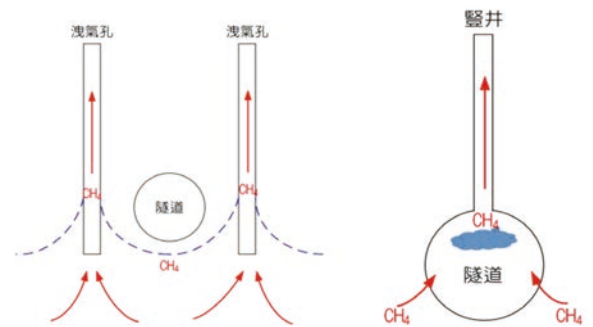


圖 14 瓦斯排氣工法示意圖

如圖 14 所示。豎井排氣過程係將隧道內的氣體濃度逐步降低，如圖 15 所示。以洩氣井 GR-04 為例，完井後濃度持續下降，降至 LEL20% 左右便維持平穩趨勢，但仍表示地層中有高濃度瓦斯，隧道應隨時注意氣爆之風險。

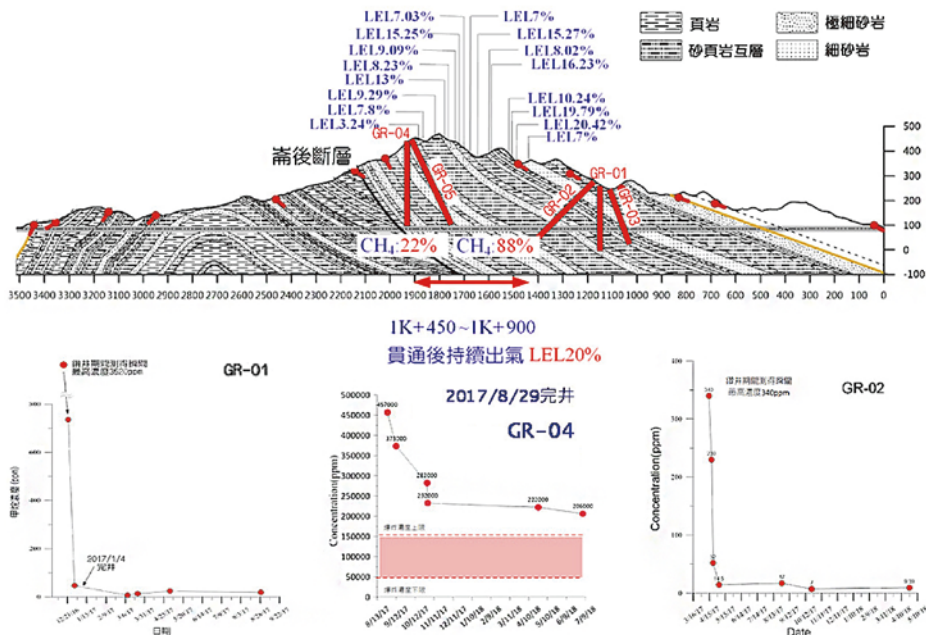


圖 15 瓦斯排氣工法成效示意圖

勤測瓦斯

瓦斯濃度及回風速度量測，是瓦斯工區很重要的管控指標。微瓦斯、低瓦斯工區慣採用人工檢測方式；而高瓦斯、瓦斯突出工區，則採用人工檢測與自動檢測相結合方式。本案例除採用原有四合一氣體偵測器勤測外，每隔 250 M 設置固定式氣體偵測器，如圖 16 所示。

以往，瓦斯隧道氣爆事件之發生，很大程度上是瓦斯濃度及回風速度量測訊息，無法立即分析回饋，並進一步等級判定，採取適當對策所致。圖 17 為本案例所量測到的瓦斯連續監測數據，分析後發現瓦斯滲出大部分集中在開炸後及打設先撐鋼管階段，雖達高瓦斯工區濃度，但經採取加強通風後，一般能在 30 ~ 60 分鐘內，將瓦斯降至管控值 LEL < 10 內（即低瓦斯工區），使非防爆型之行走式作業機具能夠進場施工。

嚴控火源

施工階段瓦斯工區機具設備防爆等級，原則採表 3 方式。微瓦斯工區可採用非防爆型機具設備；低瓦斯工

區則電氣設備需防爆型；高瓦斯工區固定式作業機具需防爆型，而行走式作業機具在進行防爆改裝後，可採非防爆型。有鑑作業機械要採防爆型較為困難，本隧道採以通風為主、止氣為輔對策，希望將高瓦斯工區降為低瓦斯工區後，始進洞施工。

表 3 瓦斯工區防爆等級

瓦斯工區	電氣設備 (固定式)	作業機具 (固定式)	作業機械 (行走式)
微瓦斯	×	×	×
低瓦斯	○	×	×
高瓦斯	○	○	× (防爆改裝)
瓦斯突出	○	○	○

註：× 非防爆型 ○ 防爆型

結論

目前台灣瓦斯隧道之調查及施工，多仍侷限於原則及定性之建議，甚少量化指標原則。對於遭遇瓦斯之處理對策，亦缺乏實質系統性介紹。本文以成功貫通之新烏山嶺瓦斯隧道為例，介紹實際採取之各項施工技術及預防對策，以圖 18 所示，希此文供後續類似案例參考。

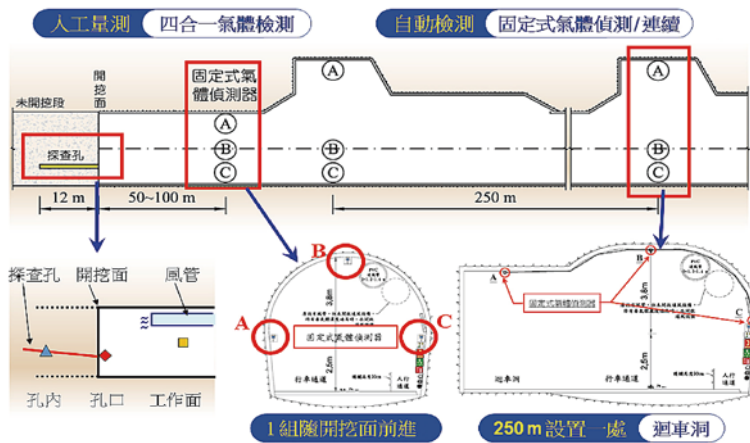


圖 16 氣體檢測方法示意圖

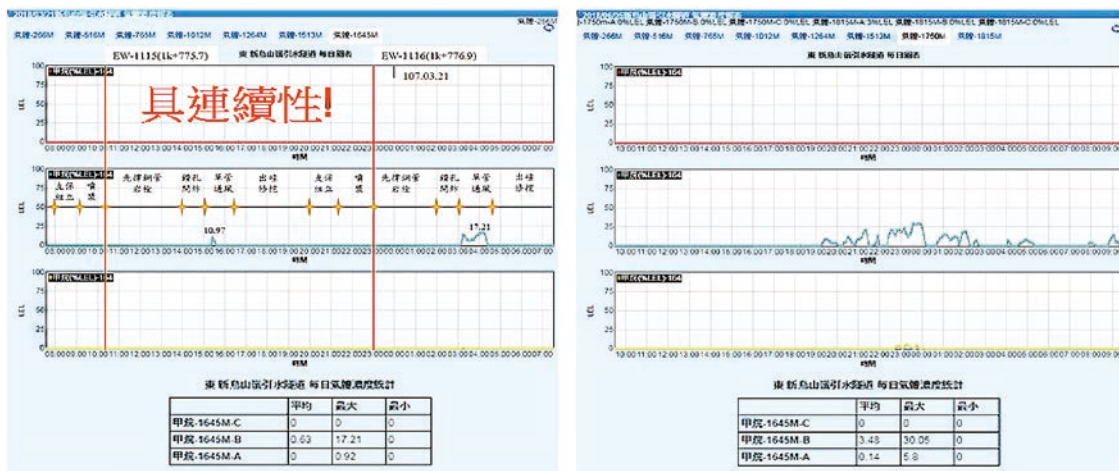


圖 17 固定式氣體偵測連續監測圖

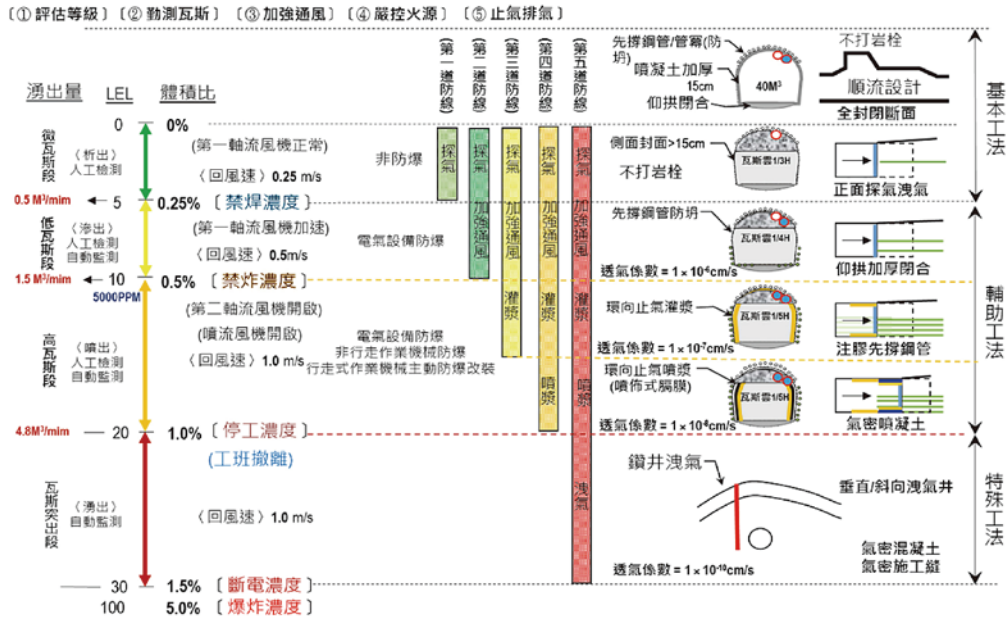


圖 18 瓦斯隧道施工對策圖

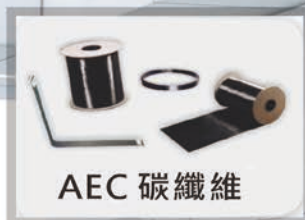
參考文獻

1. 利德工程股份有限公司、松和工業股份有限公司、世曦工程顧問股份有限公司 (2015), 新烏山嶺引水隧道工程服務建議書, 臺灣嘉南農田水利會。
2. 汪世輝、林文斌、呂金彥、蕭富元 (2020), 「主動式洩氣工法於

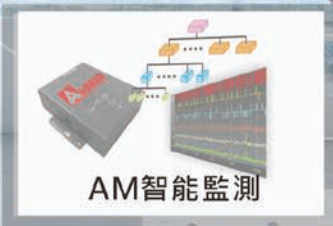
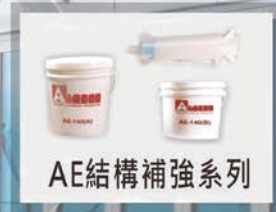
- 新烏山嶺引水隧道成效評估」, 第 18 屆大地工程學術研究討論會論文集, 台灣屏東。
3. 汪世輝、王薇薇、蔡政憲、蕭富元、高憲彰 (2017), 「鑽井洩氣工法應用於降低隧道開挖出氣濃度的可能性探討」, 第 16 屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集, 貴州, 第 239-246 頁。



安得固



建築修復結構補強
STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM



免費服務電話 台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
0800-009-666 桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw

