

出國報告（出國類別：開會）

參加第 41 屆世界隧道大會及長隧道施工 觀摩並考察水力發電建設

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：專業總工程師 陳蒼賢

派赴國家：奧地利、斯洛維尼亞、克羅埃西亞

出國期間：104 年 5 月 16 日至 104 年 5 月 29 日

報告日期：104 年 7 月 28 日

摘要

2015 年國際隧道大會(World Tunnel Congress)於 5 月 22 日至 5 月 28 日在克羅埃西亞的杜布羅夫尼克市(Dubrovnik)舉辦，共有 71 個國家 1573 人參加，其中 5 月 25 日至 5 月 27 日為技術研討會，研討會主題包括 1. 隧道與地下結構之規劃與設計 2. 隧道機械化施工之發展與運用 3. 傳統隧道工法之發展與運用 4. 隧道與地下結構之運轉維護 5. 隧道與地下結構之設備 6. 隧道與地下結構之防火安全 7. 地下結構之風險分析與技術 8. 地下結構成本與財務最佳化等 13 項。研討會部分內容可供本公司未來辦理隧道及其他地下結構物之規劃、設計、施工及營運之參考。

本次出國亦順道參訪位於奧地利薩爾茲堡附近特里本(Triebeben)之 Konigsbach 與 Modringbach 以及位於克羅埃西亞境內之 Jaruga 與 Zakucac 等水力電廠，其中 Jaruga 水力電廠位於克爾卡(Krka)國家公園內，為克羅埃西亞最古老之水力電廠，與附近景觀結合為著名景點。另 Zakucac 電廠為克羅埃西亞最大及最重要之水力電廠，自 2012 年起逐年進行機組設備更新以提高發電出力等，均可供本公司水力電廠規劃及營運之參考。

目次

目錄

一、	目的.....	3
二、	過程.....	3
(一)	出國行程紀要.....	3
(二)	水力電廠參訪.....	3
1.	Zakucac 水力電廠.....	3
2.	Jaruga 水力電廠.....	8
3.	Konigsbach&Modringbach 水力電廠.....	8
4.	Sunkbach 水力電廠.....	9
(三)	Kolektor&Turboinstitut 參訪.....	10
1.	Kolektor.....	10
2.	Turboinstitut.....	10
(四)	世界隧道大會技術研討會.....	11
1.	新義大利隧道工法.....	11
2.	山岳隧道止滲設計.....	11
3.	水密性隧道應用於水文環境之維護.....	12
4.	世界最大型 TBM 之創新與挑戰.....	15
5.	鋼纖維混凝土在隧道預鑄環片之運用.....	15
6.	隧道技術應用於海管埋設.....	16
7.	隧道診斷決策支援系統之發展.....	17
三、	心得及建議.....	19

本文

一、目的

第 41 屆世界隧道大會於 2015 年 5 月 22 日至 5 月 28 日由國際隧道及地下空間協會於克羅埃西亞之杜布羅夫尼克市(Dubrovnik)舉辦，參加世界隧道大會可藉此吸取先進國家在隧道、地下廠房等地下工程包括規劃、設計、施工、營運等階段之技術及經驗，以提升國內地下工程之水準。

奧地利、斯洛維尼亞及克羅埃西亞在小水力發電之設計、製造、施工等經驗豐富，順道觀摩小水力電廠，期能對本公司未來在小水力開發、更新及運轉維護等方面有所助益。

二、過程

(一) 出國行程紀要

5 月 16 日~ 5 月 17 日	台北~維也納~薩爾茲堡(Salzburg)
5 月 18 日	參訪 Konigsbach 與 Modringbach 水力電廠
5 月 19 日	薩爾茲堡~盧比安納(Ljubljana)
5 月 20 日	參訪 turboinstitut(TI)公司及水工模型實驗室
5 月 21 日~ 5 月 22 日	參訪 Jaruga 與 Zakucac 水力電廠
5 月 23 日	希貝尼克(Sibenik)~杜布羅夫尼克(Dubrovnik)
5 月 24 日~ 5 月 27 日	參加第 41 屆隧道大會
5 月 28 日~ 5 月 29 日	維也納~台北

(二) 水力電廠參訪

1. Zakucac 水力電廠

Zakucac 水力電廠位於克羅埃西亞奧米什(Omis)附近，臨近采蒂納河(Cetina River)出海口，為一地下電廠，廠內共裝置四部豎軸法蘭西式水輪發電機，總裝置容量 488MW，年發電量 1458GWh，為克羅埃西亞最大之慣常水力電廠。該電廠分兩期興建，第一期先裝置兩部機，單機裝置容量為 108MW，於 1961 年完成，第二期再裝置兩部機，單機裝置容量為 135MW，於 1980 年完成。兩條頭水隧道之進水口位於 Prancevici 水庫，為壓力式隧道，相距 45 公尺，直徑分別為 6.1 及 6.5 公尺，長度分別為 9,876 公尺及 9,849 公尺，設計流量分別為 100m³/s 及 120m³/s。每條頭水隧道再分支成兩條壓力鋼管並設置蝶閥，直徑分別為 3.5 及 3.75 公尺，閘室上游 50 公尺處設置平壓塔，壓力鋼管為垂直式，相距 15 公尺，長度 289 公尺，進入水輪發電機前設置球形閥，直徑分別為 2.4 及 2.6 公尺。主要工程布置如 Figure.1~Figure.3，電廠發電設備主要工程數據如表 1。

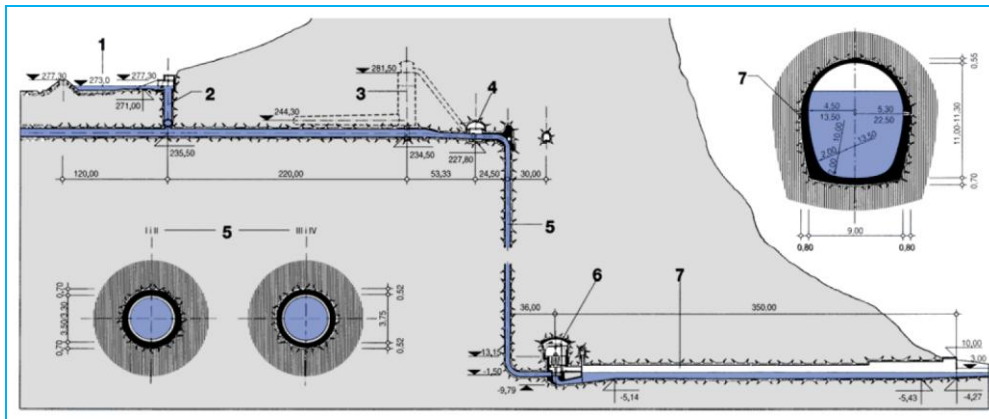


Figure.1 工程布置縱剖面圖

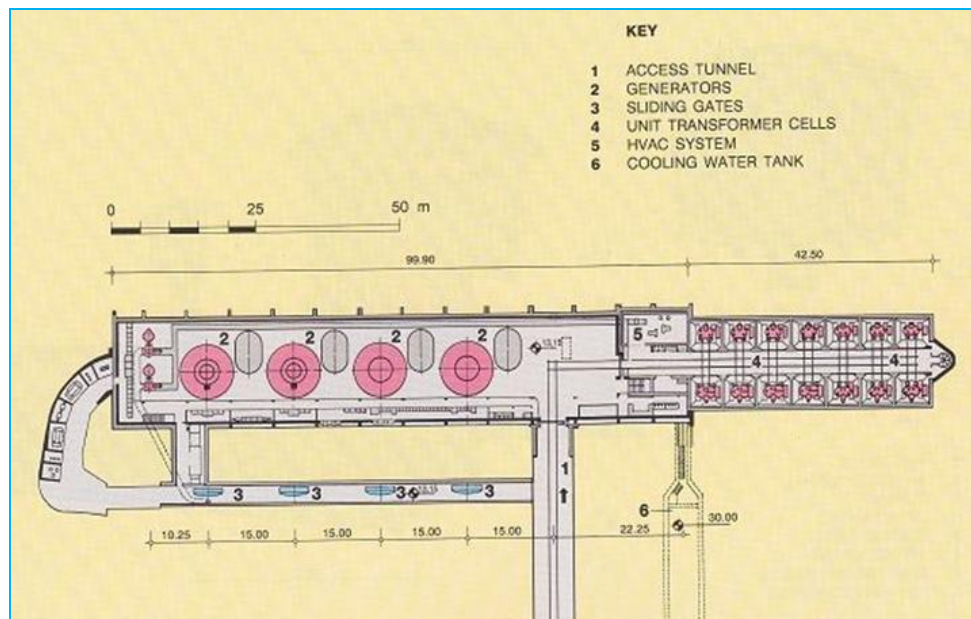


Figure.2 電廠發變電設備布置平面圖

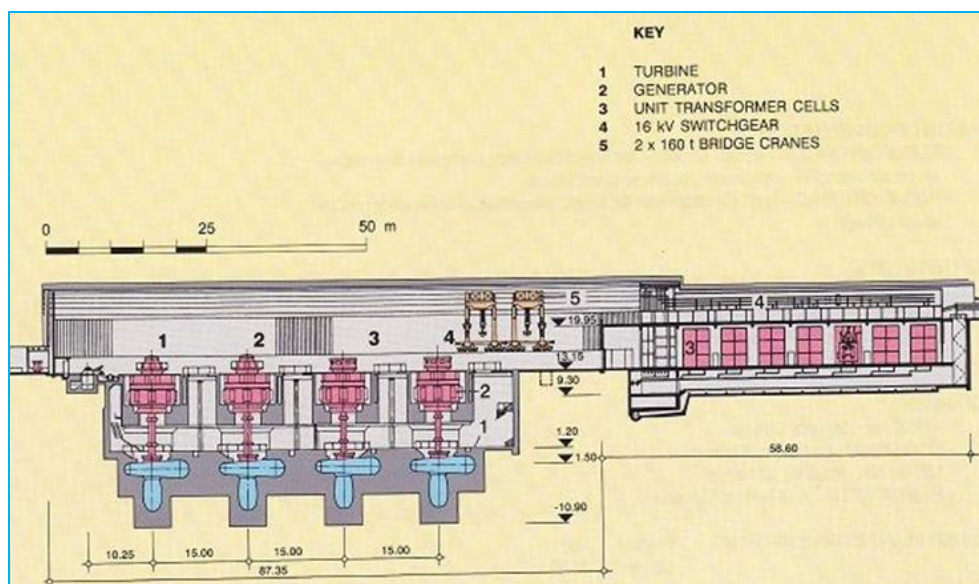


Figure.3 電廠發變電設備布置縱剖面圖

表 1. 既有水輪機及發電機規格

	第一期 機組 A&B	第二期 機組 C&D
水輪機:		
額定轉速	300 rpm	333.3 rpm
額定輸出	110 MW	138.3 MW
額定水頭	250.4 m	252 m
最大輸出	119 MW	152.6 MW
最大水頭	267 m	269 m
最大流量	50 m ³ /s	60 m ³ /s
動輪直徑	3440 mm	3226 mm
導翼高度	480 mm	380 mm
原廠供應商	Voith Siemens	Litostroj
發電機:		
額定輸出	120 MVA	150 MVA
額定電壓	16 kV	16 kV
原廠供應商	Koncar	Koncar

由於 Zakućac 水力電廠年發電量約佔 Cetina Hydropower System(HPS) 的 69%，在該電力系統中扮演舉足輕重的地位，由於機組 A&B 發電機組平均每年運轉時數約 6,000 小時，加上機組老舊，磨損的設備須採用先進的水工設計及設備予以更換。機組 C&D 則因動輪的前邊緣有密集的穴蝕 (cavitation) 問題，須進行定期維修。

根據調查結果，訂定更新計畫的要旨如下：

- 機組 A&B 更新的主要目標為提升出力。考量既定的動輪直徑，當改變額定速度時，會增加水輪機的流量及輸出。
- 在最大水頭 $H_{max}=270m$ 時的出力須提升至約 $2 \times 150MW$ 。
- 應儘可能改善機組的效率及年發電量。
- 須維持既有 Voith 機組防止穴蝕的優異性能，不容許在動輪前緣產生穴蝕現象。
- 維持既有 Litostroj 機組(unitC&D)的出力，但須改善穴蝕情形。

要增加機組 A&B 的出力，須評估潛在穴蝕的限制。設計調查結果顯示增加動輪斗 (runner bucket) 的數量及延伸輪帶 (band) 的長度，兩者皆可因增加輪葉面積，達成在 270 公尺水頭及既定尾水情況下，將既有機組的出力提升至 150MW，同時也能維持既有機組優異的穴蝕性能。訂定穴蝕係數目標值 0.05，對設計而言是一大挑戰。改良設計後的機組運轉效率與修正後的相關組件幾何形狀及為達成目標出力所需的流量有關。

為強化機組性能，詳細設計採用 Computational Fluid Dynamics(CFD) 以評估水輪機組件的能量損失及穴蝕性能。在預期的運轉水頭、尾水及流量的範圍內，分析導翼的進流量並據以進行動輪設計。設計的主要挑戰是要在新的出力下又能獲得滿意的穴蝕性能，要達此設計目標，葉片的壓力

分布至為關鍵。將動輪葉片數 13、15 及 17 列為設計考量，設計時須特別注意避免於極端水頭的運轉範圍內在進水口處產生穴蝕。Figure.4 為在最高水頭及最大流量的情況下，在動輪進水口處的葉片壓力，以 Thoma's 穴蝕系數(Thoma's sigma)表示。圖中可發現在接近設計穴蝕係數時，葉片上沒有壓力，表示不會發生穴蝕情形。

在吸出管直徑 2500mm 的限制下，將動輪的流量直徑儘可能予以放大，俾在增加流量及出力的情形下，將維持既有機組優異穴蝕性能的可能性最大化。延長 band 後的動輪設計與既有動輪如 Figure.5。

動輪設計完成後於 Voith Siemens Hydro 位於美國賓州的模型試驗室進行評估，確知吸出管的性能會影響機組整體性能的水準。使用 CFD 分析並結合模型試驗，有助於診斷出吸出管的能量損失係來自吸出管肘部內側，如 Figure.6。修正吸出管的幾何形狀並在試驗室驗證，以改進其效能。新動輪(Figure.7)的結構評估係採用有限元素分析(Finite Element Analysis,FEA)工具 ANSYS，以確知動輪組件的應力及變形。

既有水輪機除了埋設於混凝土中的渦殼及吸出管外，大部分的組件都用新設計的組件予以更換，新舊水輪機的斷面比較如 Figure.8。

第一部機組更新工作於 2012 年 12 月底完成，其餘三部機組更新預定 2015 年完成。

本次參訪時，電廠正進行第三部機組年度歲修，相關照片如 photo.1 及 photo.2。

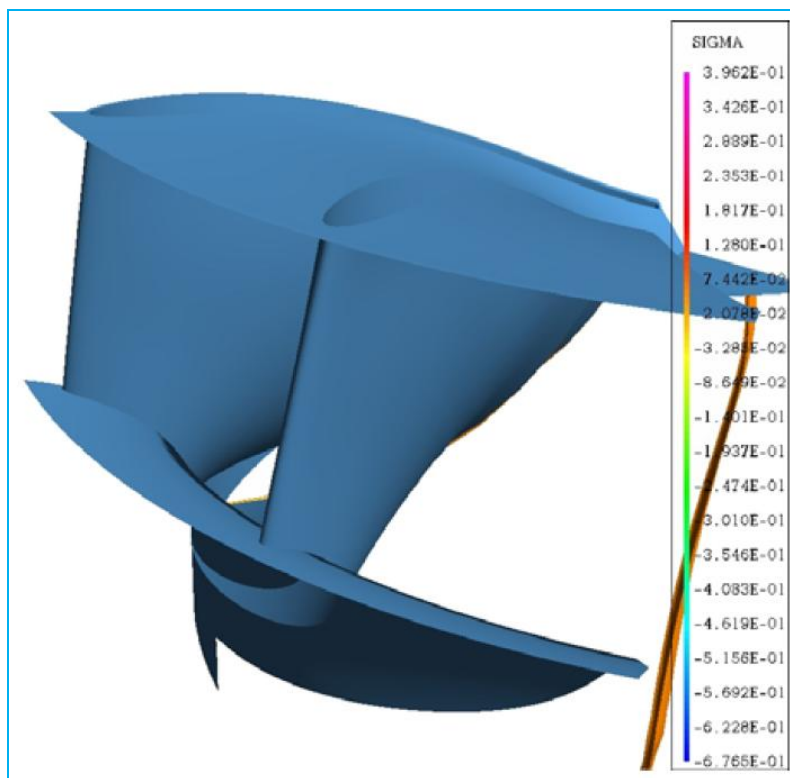


Figure.4 最大水頭與流量下，動輪葉片進口端的壓力分佈。

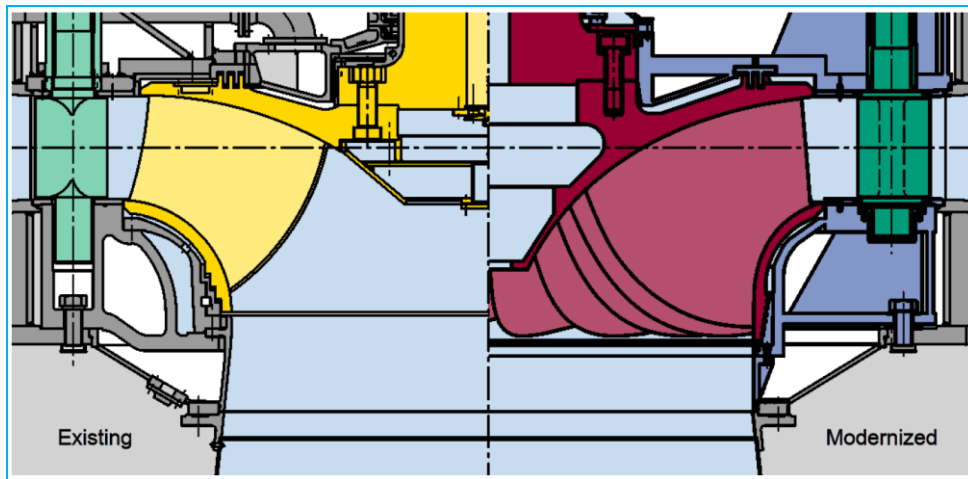


Figure.5 電廠機組既有與新式動輪比較圖

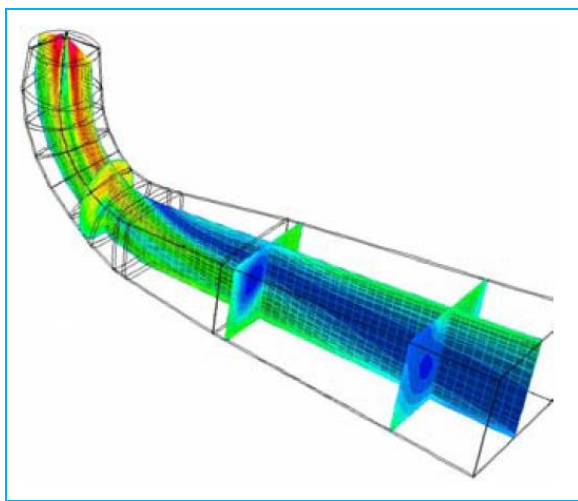


Figure.6 吸出管能量損失分布圖

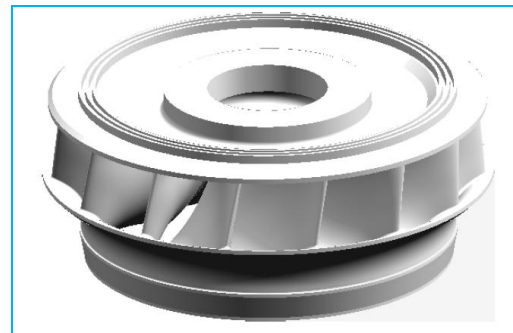


Figure.7 改良後之動輪外觀

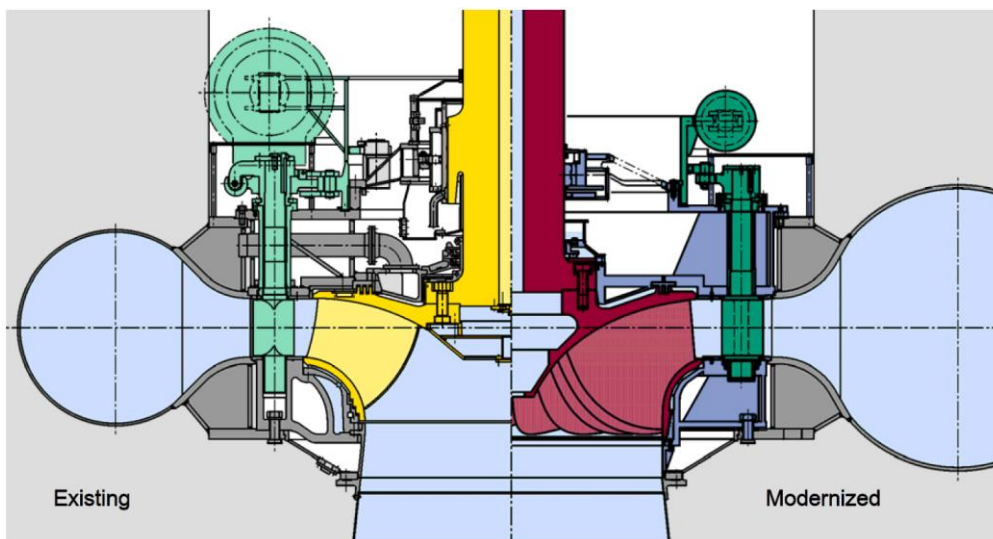


Figure.8 新舊水輪機的縱斷面圖



Photo.1

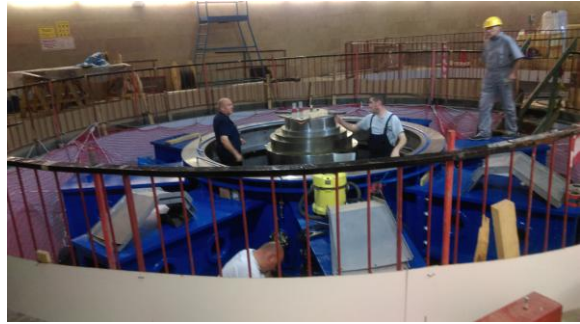


Photo.2

2. Jaruga 水力電廠

JarugaI 水力電廠位於克羅埃西亞 Sibenik-Knin county 的 Krka river，為 Krka River 集水區五座水力電廠最下游一座，係克羅埃西亞第一座直流電力系統的電廠，也是歐洲第一座，全世界第二座商業化水力電廠，僅次於尼加拉瀑布的 Adams 電廠。Jaruga 電廠於 1894 年 4 月開始興建，1895 年 8 月完工運轉，共裝置兩部發電機組，每部容量為 550kW，原先 Jaruga 電力系統係供應 Sibenik 的街燈及部分家庭的電力。

JarugaI 水力電廠完成後三年，JarugaII 水力電廠開始施工，1903 年完成第一部機，裝置容量為 6MW，1936 年安裝第二部機，裝置容量 5.6MW。JarugaII 完工運轉後分別於 1916,1937,1970,1995 及 2008 年進行更新，但仍維持電廠的基本概念。JarugaII 電廠外觀及內部分別如 photo.3 及 photo.4。

Jaruga 電廠位於 Krka National Park 內，與周圍景觀結合，成為熱門觀光景點。



Photo.3 JarugaII 電廠外觀



Photo.4 JarugaII 電廠內部

3. Konigsbach&Modringbach 水力電廠

Konigsbach & Modringbach 水力電廠位於奧地利特里本(Trieben)附近，2012 年 1 月完工發電，廠內共裝置兩部水輪發電機組，兩部機組之規格性能如表 2，廠內設備如 photo.5

Konigsbach & Modringbach 電廠附近畜牧業發達，周圍散佈甚多農舍，廠房外部裝修材料採用當地竹材，以融入地方特色，從外觀幾乎無法得知為廠房建築，廠房外觀如 photo.6。

表 2. Konigsbach&Modringbach 機組規格性能

	Konigsbach 機組	Modringbach 機組
設計流量	2801/s	5201/s
設計水頭	234.86m	147.24m
水輪機型式	佩爾頓(Pelton),3 噴嘴	佩爾頓(Pelton),4 噴嘴
水輪機容量	530kW	620kW
年發電量	1.78GWh	2.41GWh



Photo.5 Konigsbach&Modringbach 電廠發電機組



Photo.6 Konigsbach&Modringbach 電廠外觀

4. Sunkbach 水力電廠

Sunkbach 水力電廠位於 Konigsbach&Modringbach 電廠下游，進水口如 photo.7，廠房外觀如 photo.8，廠房內機組配置如 photo.9 及 photo.10。



Photo.7 Sunkbach 電廠攔河堰及進水口



Photo.8 Sunkbach 廠房外觀



Photo.9 Sunkbach 發電機外觀



Photo.10 Sunkbach 廠房端壓力鋼管

(三) Kolektor&Turboinstitut 參訪

1. Kolektor

Kolektor 集團位於斯洛維尼亞的伊德里亞(Idrija)，多角化經營，其中之能源與工業科技部門經營項目與電力有關者包括：

- 小水力：從構想到實現的整體解決方案，範圍涵蓋吸出管、水輪機、發電機、主閥、冷卻系統、潤滑系統、液壓系統、控制保護系統、激磁系統、主變壓器、輔助變壓器等。
- 水力：開發、設計、模型試驗、水輪機製造、水輪機更新、抽水機優化、控制與調速設備等。
- 變壓器：電力變壓器(500MVA 以下)、配電變壓器、特殊變壓器。
- 電力設備與系統：低壓變電所、工廠等之低壓配電設備。

2. Turboinstitut

Turboinstitut 為 Kolektor 集團之子公司，近年來致力於小型水力水輪機(20MW 以下)之研發與製造，在營收方面已成為 Turboinstitut 之核心事業，在全世界的模型試驗領域中亦佔有獨特的地位。Turboinstitut 在小型水力設備的設計及施工亦有豐富的經驗，有超過 100 座小水力電廠的調速與控制系統、發電機與電氣設備、輔機設備等之設計、製造、安裝、試運轉由 Turboinstitut 負責下完成。

Turboinstitut 致力於 Pelton、Francis、Bulb 等各式水輪機的研究、模型試驗、現地試驗、更新等工作，實驗室如 photo.11



Photo.11 Turboinstitut 模型試驗室

(四) 世界隧道大會技術研討會

國際隧道協會(International Tunnel Association,ITA)目前共有 71 個會員國，我國為其中之一，每年藉由會員國大會同時舉辦世界隧道大會(World Tunnel Congress,WTC)。近年來位於東南歐之克羅埃西亞大力推動地下鐵及水力發電等地下建設，因此本年之第 41 屆會員國大會選擇在克羅埃西亞南部度假勝地杜布羅夫尼克(Dubrovnik)市舉辦，本屆會議主題為 SEE TUNNEL：Promoting Tunnelling in SEE Region，超過 1500 人與會，發表論文共分 13 類 391 篇。5 月 25 日之開幕儀式由主辦國克羅埃西亞隧道協會主席主持，開幕式後即進行 keynote lecture，之後為連續 3 天的分組研討會，會場另安排知名隧道設備製造廠商及施工廠商展覽，共有 136 家廠商參展。茲選擇與本公司及國內隧道技術較相關之研討會論文摘述如下。

1. 新義大利隧道工法

新義大利隧道工法為本屆會議兩個 keynote lecture 之一，由義大利 Dr.Pietro Lunadri 主講，講題為：Extrusion Control of the ground core at the excavation face as a stabilization instrument for the cavity，主要在介紹義大利最近發展之新隧道工法(Analysis of Deformations in Rocks and Soils)，此工法與台灣目前廣泛採用之新奧地利隧道工法(New Austria Tunnelling Method,NATM)最大之差異為，NATM 工法著重於在隧道開挖後利用岩栓、噴凝土、輕型鋼支堡等半剛性支撐及岩體共同形成岩拱來穩定隧道。新義大利工法則著重在開挖面前方土心的穩定，依據廣泛蒐集 1000 多個隧道案例並經研究分析後，發現很多隧道發生抽坍是因開挖面前方土心滑動所導致，並認為隧道結構是在開挖階段承受最大應力而非完工之後。

因此，新義大利隧道工法將注意力集中於開挖面前方的土心穩定，除了如 NATM 工法於隧道開挖後進行收斂變形監測外，更進行開挖面前方土心的擠壓變形(extrusion)及預收斂變形(pre-convergence)監測分析，以控制開挖面前方的擠出及變形，進而達到開挖面後方的隧道穩定。

2. 山岳隧道止滲設計

隧道止滲設計係將防水膜片像三明治般鋪設於臨時及永久性襯砌混凝土之間，由於臨時性襯砌混凝土表面不平整，且存有錨筋及岩栓頭，加上鋼筋綁紮等施工作業，經常造成防水膜片破損而產生滲漏。為解決此問題，遂發展出所謂的噴布式(spray-applied)止水材。

中國大陸交通大學於 1998 年即開始研發聚丙烯酸酯(acrylate)噴布式防水膜，並成功使用於十個以上之地下結構。噴布式防水膜具有以下優點：

- 可以方便地噴布於幾何形狀不規則的區域。
- 連續性佳，沒有傳統防水膜片般的接頭，可減少滲漏。
- 使用簡單，可減少人力成本。

- 友善環境，噴布時不會產生有害氣體。
- 日後修補容易。

以功能為基礎之止水設計(Performance Based Waterproofing Design, PBWD)的流程如 Figure.9，與傳統設計相較，PBWD 的創新處在於評估特定隧道在模擬的特定環境下防滲漏系統的功效，因此必須詳細調查隧道在生命週期的環境情況。

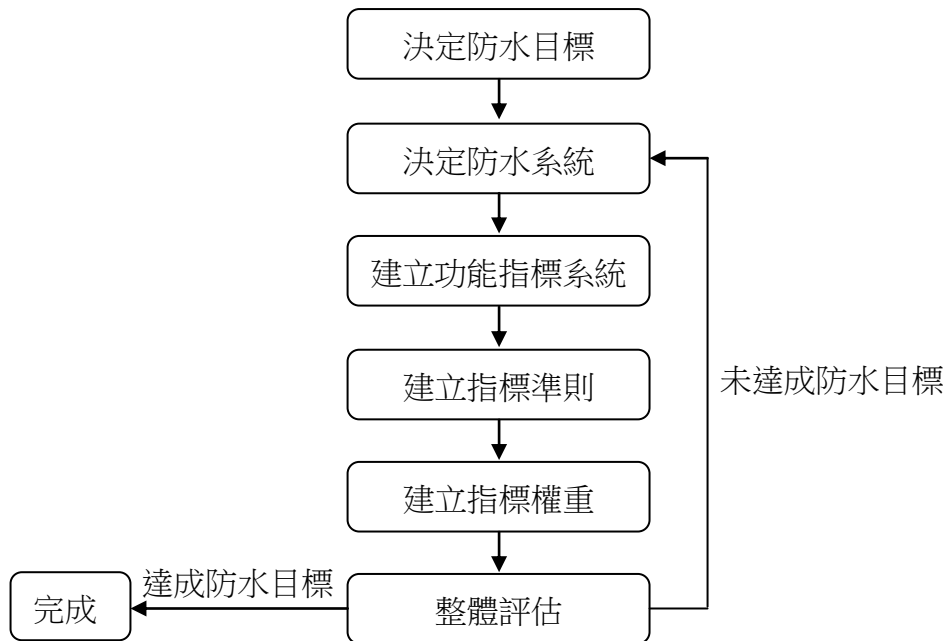


Figure.9.以功能為基礎之止水設計流程

3. 水密性隧道應用於水文環境之維護

近年日本水密性隧道的數量逐漸增加，以符合社會對維護水文環境的要求。以前標準的岩石隧道皆有排水設施的設計，將地下水適度導入隧道內，降低隧道附近的地下水位，以免隧道結構承受靜水壓力。水密性隧道則因隧道襯砌混凝土表面皆被防水材料覆蓋，以避免地下水流入隧道內，因此隧道將承受靜水壓，故襯砌結構須為高強度混凝土並使用類圓形斷面。由於水密性隧道不僅須要優良的施工技術，同時會增加成本及工期，因此必須評估水密性隧道施工之可行性。日本曾利用數值分析法針對 20 個規劃為水密性之隧道，依據其興建目的及施工條件進行個案分析，以評估水文與隧道施工及地質情況之關係，並據以研擬對應之工法，以確保隧道安全及成本合理。個案分析結果摘要如下：

(1) 目的及施工條件

考量施工情形與水文環境之容許程度，水密性隧道可分為 TypeI 及 TypeII 兩類，TypeI 是隧道開挖期間要避免地下水位下降；TypeII 是隧道開挖後必須為水密性，但容許隧道開挖期間地下水位下降。儘管 TypeI 與 TypeII 的襯砌結構相同，但 TypeI 須於隧道開挖前施作隧道固結灌漿改善周圍地質情況，改善範圍約為隧道外圍 3-10 公尺，改善

目標為將滲透係數降到約 10^{-5} cm/s，以限制開挖期間地下水位的下降。TypeII 雖然不須於開挖前施作隧道周圍灌漿，但仍須於水密性隧道與排水隧道的界面處施作擋水設施，如傘形隔幕灌漿幕等，以避免地下水由水密性隧道流入排水隧道。一般而言，TypeI 水密性隧道因須大量灌漿，故施工成本較 TypeII 高出甚多。因此必須充分檢查施工條件及可容許的水位下降，以決定那一型的水密性隧道較為適當。分析結果約有 30%採用 TypeI 水密性隧道。

採用水密性隧道的目的可分為三類，第一類目的是保護自然及文化遺址，如稀有物種或自然森林等。第二類目的是維護地下水資源供公眾使用。第三類目的是避免臨近之地上結構物因地下水位降低導致壓密沉陷而變形。針對第一類及第三類目的，普遍使用 TypeI 水密性隧道，至於第二類目的則經常採用 TypeII 水密性隧道。在施工條件方面，水密性隧道適用的地質條件，覆蓋層厚度從 $1D$ (D 為隧道開挖斷面寬度) 到超過 100 公尺，地層從未壓密土體到硬岩，地下水位高度可達 50 公尺。

(2) 隧道襯砌結構

日本公路隧道通常採用的標準斷面為扁平之馬蹄形斷面，仰拱曲率半徑大。但對水密性隧道而言，則以接近圓形之斷面較佳，因馬蹄形斷面承受之彎曲力矩較大。另因公路隧道的開挖斷面通常較鐵路隧道或輸水隧道大，因此斷面形狀的選擇對施工安全及成本會有重大影響。全圓斷面的缺點是開挖面積較大成本較高及施工性較差，優點是混凝土襯砌厚度較其他斷面薄。因此設計時必須設法找出符合安全、成本及施工性之最合理隧道斷面。

Figure.10 表示在各設計水頭下的斷面形狀，並依斷面的高/寬比 ($R=V/H$) 分成三類。(a) 為標準斷面， R 值小於 0.8，(b) 為類圓斷面， R 值為 0.8-1.0，(c) 為圓形斷面， R 值為 1.0。設計水頭與 R 值的關係如 Figure.11，(a) 顯示標準斷面適用之設計水頭小於 20 公尺，圓形斷面適用之設計水頭約可高達 50 公尺；(b) 為各型斷面頂拱與仰拱的襯砌厚度；(c) 為每單位縱向長度頂拱與仰拱主要鋼筋的使用量。另水密性隧道的混凝土設計強度為 $f'_{ck}=24-30$ MPa，高於一般隧道的 18MPa。Figure.11(b) 及 (c) 顯示，為符合容許應力規定，仰拱厚度及鋼筋用量均較頂拱為多。

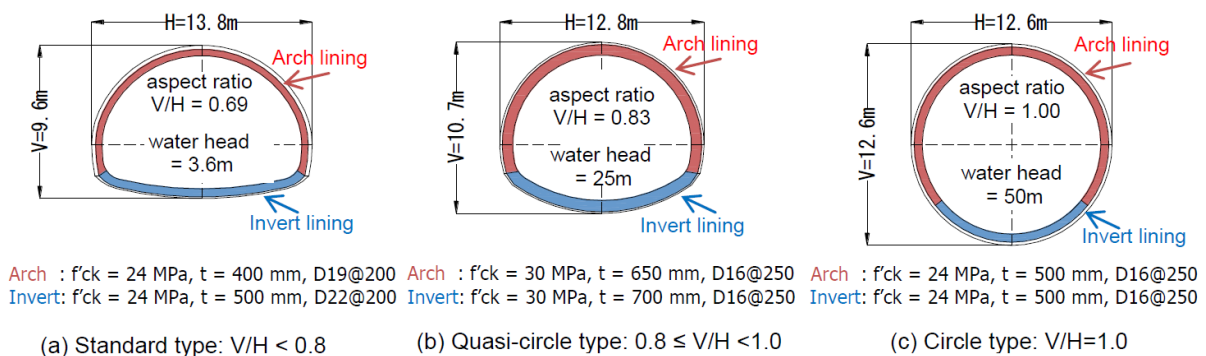


Figure.10 不同設計水頭下之隧道斷面

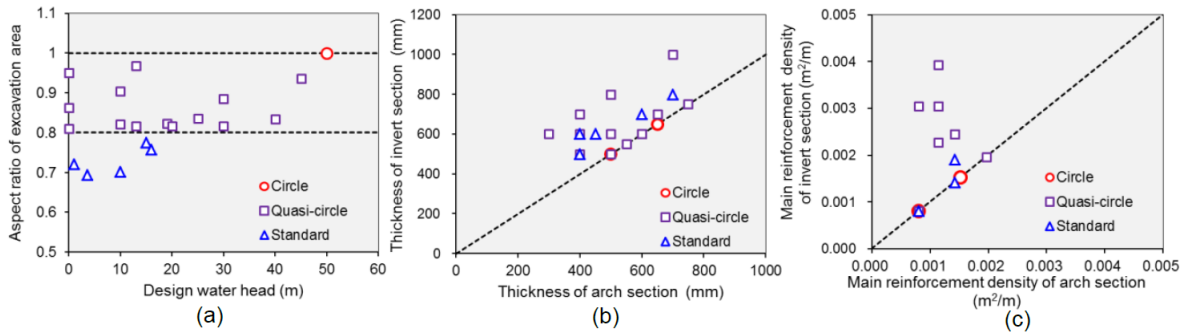


Figure.11 (a)設計水頭與隧道斷面高／寬比之關係。
 (b)不同斷面形狀下，頂拱與仰拱之混凝土襯砌厚度。
 (c)每單位長度頂拱與鋼筋之使用量。

(3)水密結構

為達到水密功能，通常是在隧道襯砌混凝土的外圍鋪設防水材料，如 Figure.12 所示，防水材料通常由防水布及背面緩衝材組合而成。防水布的功能是阻斷地下水流入隧道，一般使用 2mm 厚的樹脂布，緩衝材的功能是保護防水布及確保水流效果，一般使用 0.8mm 厚的樹脂布。防水材料的完整性對確保水密功能至為重要，然而因受施工方法限制很難避免在防水材料、襯砌混凝土與開挖支撐材料間形成空隙，這些空隙的產生會導致防水材破損，產生滲水路徑。因此施工時須設法使各種材料間能緊密接觸，並將可能產生的空隙以灌漿材料填滿。

如果地下水經由破損之防水材料進入襯砌混凝土背面，則地下水會由混凝土施工縫流入隧道內。解決的方法是在施工縫設置擋水設施，將滲水區域限制在相鄰兩施工縫間，再利用灌漿系統灌入止水漿材，以恢復水密功能。此灌漿系統最好在襯砌混凝土施工時先予預埋，以避免事後鑽設時損壞防水材料。

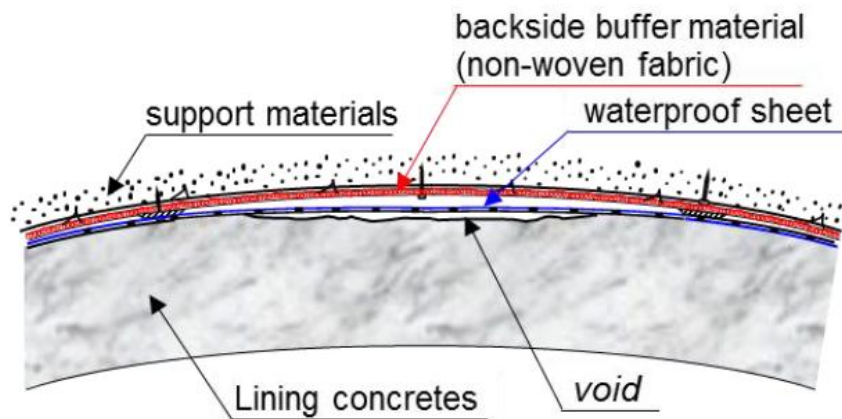


Figure.12 防水材料佈置示意圖

4. 世界最大型 TBM 之創新與挑戰

Sparvo Tunnel 為一 3 線單向雙隧道，為義大利 Variante di Valico 計畫之一部分，該計畫係為更新波隆那(Bologna)與佛羅倫斯(Florence)65 公里長公路網，並提升薩索馬可尼(Sasso Marconi)與巴爾貝里諾(Barberino)段之公路交通水準。Sparvo Tunnel 全長 2.5 公里，沿路經過之地層非常複雜，包括砂岩、頁岩、泥岩、黏土等，且岩層中含有甲烷可燃氣體。施工廠商經過仔細評估後，決定捨棄傳統之開挖工法，改採 TBM 機械開挖，以提升施工安全並可縮短開挖工期至少兩年。

TBM 為德國 Herrenknecht 公司製造，造價 6500 萬歐元，屬土壓平衡式(Earth Pressure Balance, EPB)，隧道開挖斷面直徑達 15.62 公尺，混凝土襯砌後直徑為 13.6 公尺。TBM 全長 130 公尺，包括 12.2 公尺長之圓錐盾(conical shield)及 4 個供機電設備組裝之支援構台。TBM 總重達 4500 公噸，其中 3000 公噸為盾殼及切削頭重量，其餘為支援構台重量。為能同時因應軟硬地層，TBM 切削頭配備有 72 個切割輪(disk cutter)以切割硬岩，216 個刮輪(scraper)以刮削軟岩或土壤。出渣系統使用螺旋輸送機(screw conveyor)及連續皮帶輸送機，全長 7 公里，每小時出渣量 2000 噸，隧道開挖總量為 1,500,000 立方公尺。另為因應具危險性之甲烷混合物，TBM 裝備有自動氣體監測系統，並設定防爆區域，用於出渣之螺旋輸送帶及皮帶輸送機則特別裝置雙重保護設施，以避免有害氣體進入，此外另以 25m³/s 的送風量將新鮮空氣送入皮帶輸送機，以稀釋可能進入之有害氣體濃度。TBM 上裝設 13 具氣體偵測器及資料蒐集/警報系統，並使用特殊之軟體予以分析及監控管理。

2011 年 3 月開始於工地組裝 TBM，並於 6 月完成，同年 8 月開始從北側隧道掘進，2012 年 7 月完成，歷時 11 個月，隨後利用特殊創新設備將 TBM 迴轉 180 度，僅花費 15 天即成功完成迴轉作業，如採傳統作法將 TBM 拆卸後再重新組裝須費時數個月。2012 年 10 月進行南側隧道開挖，2013 年 6 月完成，歷時 8 個月。TBM 開挖掘進期間的最大挑戰是遭遇巨大土體擠入切削室而被夾埋，主軸承及 50 個切削頭中有一半受損而須更換，經採取一系列試驗後選用最佳之化學灌漿處理終於脫困，但已停工將近三個月。

以整體績效而言，本 TBM 可適應複雜及均質岩體。最大日掘進速率達 24 公尺(12 輪進)，月最大掘進速率為 406 公尺。由於表現傑出，Sparvo Tunnel 曾獲 2013 年度隧道獎。

5. 鋼纖維混凝土在隧道預鑄環片之運用

隧道預鑄環片是在 TBM 開挖一輪進後在 TBM 的盾尾(shield tail)利用組立器安裝，施工期間預鑄環片經常承受諸如 TBM 掘進時反力座之壓力、環片尺寸缺陷、環片組立位置偏移等因素所產生之集中荷重，致造成環片承受壓力甚至撕裂張力，當張應力超過混凝土張力強度時，混凝土便會產生龜裂及剝落，特別是在環片四周及角落更容易受到損壞。

傳統實務上，一般是在混凝土構材中加入橫向鋼筋來承受集中荷重產生的張應力，但構材表面區域則很難以此方式補強。新的設計觀念是利用

特殊混凝土技術製造混合混凝土(Hybrid Concrete,HC)，即在構材表面區域採用以鋼纖維加強之混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete,SFRC)，構材內部則採用純混凝土(Plain Concrete,PC)。混凝土的承載能力及破壞行為，與鋼纖維混凝土厚度、鋼纖維形狀、載重大小及偏心情形等參數有關，設計階段應予詳細調查及分析。與傳統鋼筋相較，鋼纖維較能分散於混凝土中，以有效強化結構。實驗室試驗結果顯示，不論是在軸心或偏心載重下，SFRC 皆因延展性較佳，可減少混凝土龜裂及剝落發生。

6. 隧道技術應用於海管埋設

愈來愈多的人口往城市移居，使得城市逐漸發展為人口數超過 500 萬人的大都會，而這些大都會大部分都位於海邊或河岸地區。全世界超過 40% 的人口居住於離海岸 100 公里內的地區，其餘 40% 的人口則居住於沿著河岸的城市。因此，如何提供居民充分的飲用水及處理生活廢水，以確保居民健康及生活品質，已成為重要的挑戰。在海水淡化廠或電廠附近利用隧道技術於離岸興建供應水源之進水口，為一理想選擇。另外因全世界對石油與天然氣的需求逐漸增加，也使興建海管成為供應油氣的重要條件。

在沿海或河岸地區，使用隧道技術興建放流口、進水口及海管埋設等公共基礎設施，為一有效與永續的方法。無溝渠(trenchless)施工方法埋設海管相較於傳統之明挖(open cut)工法，有下列優點：

- 減輕對環境的衝擊：無溝渠工法完全在地底下施工，不會傷害海洋生物，影響海水品質。
- 減輕對既有基礎設施的影響：無溝渠工法因工地需求的空間較小，可應用於人口密度高的地區。另外無溝渠工法都在地底下施工，不影響觀光、交通，既有的管線網路也可以保留。
- 對工期及海管生命週期有利：海管施工幾乎不受氣候、暴風雨、海潮、洪水或沉積物等外在條件的影響。長期而言，因海管埋設於地下，可免於受到船隻撞擊或人為破壞，受沉積物或地震的風險也較小，因此可以延長海管的生命週期。

四種離岸無溝渠海管安裝工法概述如下：

(1) 推管及小隧道工法(Pipe Jacking and Microtunnelling)

此工法是先在管線的陸上端開挖出發井，於井內施作推力牆以提供推管前進時千斤頂之反力。於出發井地表附近的控制室操控設備，因此施工期間不必有人員在隧道內，可提升施工安全。此工法目前技術發展成熟，可進行長距離推進並適用於困難地質。

以色列的特拉維夫(Tel Aviv)因降雨大都集中在冬季，為因應人口成長及提供居民足夠之飲用水，故設置海水淡化廠。海淡廠位於特拉維夫南方 15 公里的 Sorex，每年可提供 1 億 5 千萬立方公尺的引用水，為當今世界最大海淡廠之一。該海淡廠共有 3 條海管，其中 2 條為供水管，另 1 條為排放管，管徑 3100mm，每條長度為 1160 公尺至 1315 公尺，使用 Pipe Jacking 工法，每天最大輪進長度達 36 公尺。

(2) 環片襯砌(Segment Lining)

環片襯砌工法主要應用於內徑大於 2 公尺或長距離之海管隧道，環

片組立係於掘進機器的尾部進行。較著名之施工案例為澳洲雪梨海淡廠的海管施工，海淡廠之進出水海管各一條，每條長度 2579 公尺，使用 2 部雙盾式隧道鑽掘機(Double Shield TBM)開挖，隧道直徑 4340mm。

(3) 水平導向鑽孔(Horizontal Directional Drilling,HDD)

HDD 工法分三階段施工，第一階段先施鑽導孔(pilot hole)，第二階段為將導孔擴孔，第三階段為安裝管線。HDD 工法適用於管徑小於 1.5 公尺，長度小於 3000 公尺且地質情況較穩定之工程。

(4) 直接埋管工法(Direct Pipe Method)

此工法是將鑽孔及埋管一氣呵成，鑽孔設備裝設在管線前端，此工法結合 microtunnelling 的優點，同時將風險降至最低。

7. 隧道診斷決策支援系統之發展

由法國 Valdes 及英國 Thakker 所發表之隧道診斷決策支援系統 (Decision Support System on Tunnel Diagnosis, 簡稱 DSS)，係為歐洲 NeTTUN(New Technologies for Tunnelling and UNDERground Work)研究計畫之一部分，DSS 系統之專家決策流程如 Figure.13，主要係根據隧道監測結果及地質情況、施工經過、氣候等相資訊，經由專家知識研判隧道發生異狀之原因、劣化速度以及影響程度等。DSS 系統架構分為三層，第一層為資料層(data layer)，包括隧道基本資料及監測資料，第二層為處理層 (processing layer)，將專家知識及案例經驗轉化為電腦研析程序，並透過第一層之資料擷取提出最佳處理方案，第三層為系統展示及操作介面層 (presentation layer)，提供隧道檢查監測資料輸入及使用者操作介面，系統架構如 Figure.14。DSS 系統依據隧道襯砌混凝土及圍岩情況，將隧道之缺陷異狀分成老化(物理作用)、風化(化學作用)、其他(機械作用)等三類如表 4。

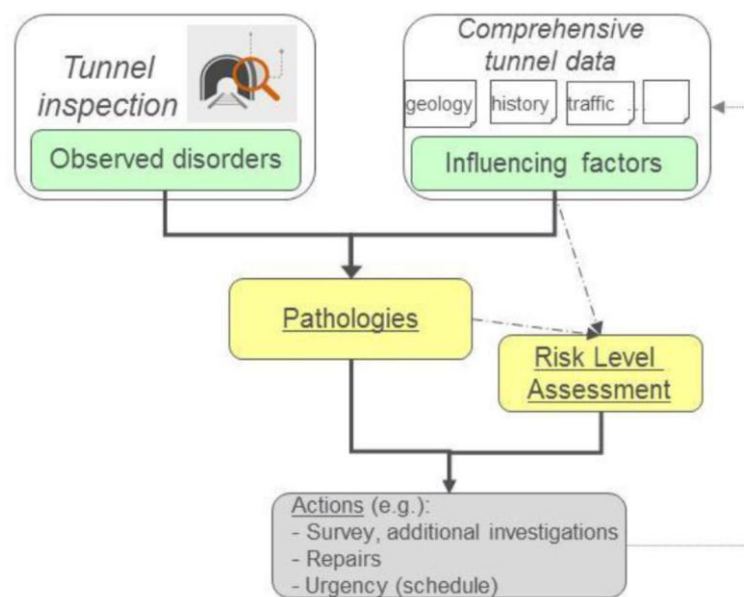


Figure.13 DSS 系統專家流程圖

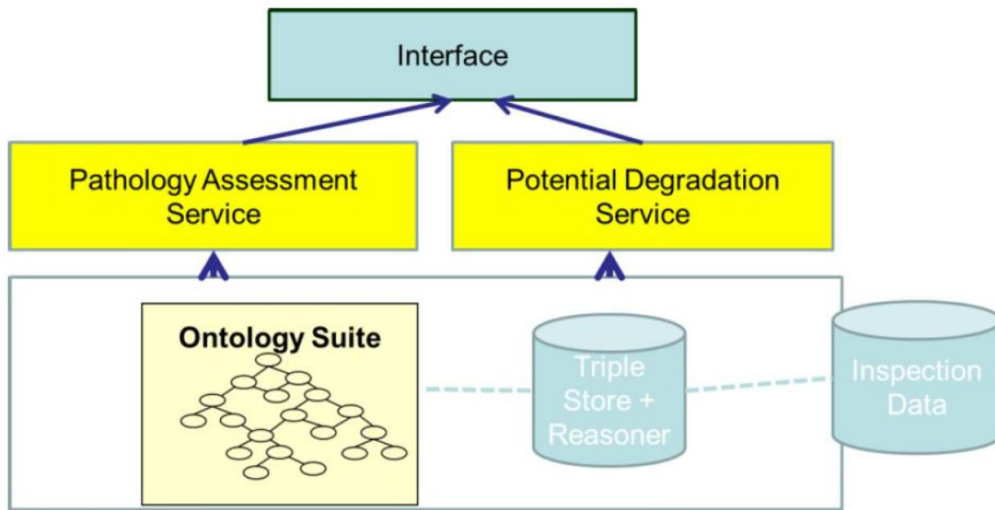


Figure.14 DSS 系統架構示意圖

表 4. DSS 系統隧道異狀診斷項目表

Process	Lining pathology	Ground pathology
Ageing (physical)	Split of a brick layer Lining material ageing Concrete shrinkage	Rock blocks instability Creep
Weathering (chemical)	Carbonation Chlorides attack Sulfate attack	Dissolution Swelling Rock weathering
Other actions (mostly mechanical)	Freezing-thawing cycles degradation Drainage system inefficiency Construction damage development	Ground loading changes Fluctuation of water level Slope instability

三、心得及建議

- (一) 本屆 ITAWTC 研討會在克羅埃西亞的杜布羅夫尼克市舉辦，隧道的維護管理議題已逐漸受到重視，並成為未來技術發展的重點之一，如何提升隧道完工後之維護與管理績效進而延長隧道使用壽齡，應及早因應。
- (二) 國內隧道施工因影響地下水文而受到民眾質疑甚至抗爭，如何精進隧道之止滲技術進而發展出如日本之水密性隧道，為未來隧道工程技術努力的重點之一。
- (三) 本次藉由參與國際性會議，可瞭解目前全世界隧道技術發展的趨勢與重點，建議持續派員參與類似會議，以增進同仁之技能及國際視野。
- (四) 歐洲之水力開發歷史悠久，累積甚多寶貴經驗，此次參訪奧地利及克羅埃西亞之水力電廠，有的位於國家公園內，並成為熱門景點，有的電廠外觀完全融入地方特色，有的則透過更新大幅提升裝置容量及發電量。水力資源有限，國外之經驗有很多值得借鏡之處。