

地工技術分享餐會

近年地工先進陸續結束公職或任職，期望藉由「地工技術分享餐會」，讓地工先進累積的寶貴工程技術與研究成果得以分享，並透過聯誼交流達到經驗之傳承

時 間：中華民國 106 年 12 月 15 日下午 5:30~9:00

地 點：彭園餐廳(臺北市忠孝東路五段 297 號 5 樓)

主持人：陳江淮 董事長 (聯興工程顧問股份有限公司)

主講人：廖銘洋 處長、謝玉山 處長 (榮民工程股份有限公司)

講 題：台灣軟土潛盾隧道與山岳隧道的對話

陳江淮*

淺談台灣軟土潛盾隧道.....廖銘洋處長

謝謝江淮兄，還有各位與會的地工先進、俞董事長以及周董事長(投影片 1)，今天真的是非常難得的聚會，2017 年地工技術分享餐會，為什麼會把這個軟硬地層隧道在這裡做一個對話，我在還沒進入主題，還沒談台灣軟土隧道之前，先做一個開場，剛才介紹也有說，我現在退休後，唯一一個職稱就是地工技術贊助人。

事實上這整個隧道的歷史演變(投影片 2)，從道德經裡面說的，道可道，非常道；名可名，非常名。無名天地之始；有名萬物之母。所有的大地就是由土、氣、水三項度的結合，那大地本身道的本源，沒有所謂的軟硬之分都是大地，為了讓我們表達方便，我們分了所謂的硬的山岳隧道，軟的都市隧道，這是個起源跟交集的碰撞。我們說隧道的來源從最早的，遠古的就是鑿洞引水(投影片 3)，各位可以看看從最早的兩三千年前就知道水理隧道最好的就是蛋型，今天我們做汗水下水道，水的隧道最好的就是蛋型，從這個鑿洞假設愚公知道可以開隧道的話，他就不用三代之人去做移山。各位可以看看，從最早的人以前軟弱隧道或硬的隧道，硬的隧道古時候在做的時候該怎麼辦呢？就曉得在下面用火把它燒熱冷水澆下去，用一個熱脹冷縮讓他脆裂，任何一個岩石都有節理存在，我們的祖先這麼早就知道在下面燒火的時候一定要有一個通風，所以我們講隧道安全，我們的祖宗事實上都想到了；那這臺我不知道是不是軟土隧道的潛盾機，從最早的時候就知道軟弱隧道會崩塌壓到人，就用這個樹根在這

個攪切讓他先坍，坍到安息角為止，所以這些不管是熱脹冷縮或是容易坍的，就開啟了隧道的歷史。事實上，沒有隧道人行依舊卻不會有人行的通達便捷不會有人行隧道的意義(投影片 4)，人行隧道有什麼意義，不管是硬的或是軟的隧道人只有一個信念，就是直到貫通見光。為什麼我們叫見光就是貫通，貫通你看到的這一霎那，那道光之前所有隧道人只有怎樣「勇往直前，日以寸進」，所有隧道不管軟硬都只有一個單一出入口，我們隧道人只要走進去什麼時候可以走出來不曉得，我現在退休以後就在還債，把以前對家庭的虧欠必須永遠都要還，還不了走不了，所以現在不管是隧中隧，從這個隧最早兩三千年前，就有所謂的隧爾相見，就已經看出這個名詞，那道就是一個陰陽合一自然而行，你做隧道不能去違背自然的原則，所以從這樣的一個概念，我們說為什麼談硬的，看到這張照片(投影片 5)，每一次看到隧道一定是這張照片，從這張照片可以看到做隧道的是在一個高粉塵、高熱、高潮濕的情況下工作，這張等一下謝處長會有更精彩的分享，不管你用任何一種工法，以前的山岳隧道所面臨的不只這樣的，常常以前很多人說這麼大的水穿雨衣做什麼，就是一個心理上的自我安慰，事實上是內濕外淋。假設沒有水的時候又是什麼狀況，就是這種狀況，所以在座的遇到做隧道的都要多尊敬他三分。做一個隧道把大地從原本的平衡的狀態破壞他原本的平衡狀態，再用人所謂的力量再去把它恢復平衡，等下謝處長會說這個硬的，我說這兩個的對話有一個共

* 聯興工程顧問股份有限公司

通點，所謂的隧道就是要平衡開鑿的過程。

現在開始來跟各位報告所謂的軟土潛盾隧道；都市內軟土隧道簡稱都是隧道，我們人類從游牧民族開始是逐水草而居，找到一水源豐富的地方，一定是軟土的地方容易建設去開發，各位可以看到這麼一個漂亮的場景(投影片6)，在隧道界潛盾隧道在都市內所發揮的力量從事這些的建設，事實上真正的內涵是這樣的，都市隧道跟山岳隧道最大的差別，也就在這個地方，各位可以很清楚的看到就是地下埋設物，還有對於住民的交通種種的這些影響。從這上面各位可以很清楚看到，任何地下管線就是在這整個地下管線下在這都市內去做挖跟掘，這些挖跟掘去的場景，我們可以遠從西元1818年法國的 Sir.布魯諾(Brunnel)他去渡英國倫敦泰晤士河坐木船發現蛀船蟲而發明了潛盾式工法(投影片7)，因此今天跟各位報告的就是在緬懷這個人跟這條蟲。這條蟲他掘進的過程中，以牠的牙齒去吃咬木頭，但牠也曉得在吃咬這些軟弱木頭的過程裡面會坍塌，因此牠

從唾液裡面吐出蛋白質去穩固這個地盤，這個開挖面就是這個地盤，用身體蠕動的力量把土排掉，因為牠挖的時候這些土就是這些木屑不排掉的話他會噎死。所以從這樣我們今天所講的軟土隧道這一條蛀蟲就是潛盾工法始祖，我們講潛盾工法就是潛之於地，以盾為構，那這個潛地築隧藏行意，我們在地底下做的這個工程默默的進行，就是一個靜的過程裡面；而盾構造道顯動念，就是動靜之間，所以潛盾盾構造隧道常顯行動的意念，所以在這個行動意念裡面，就是用一個稍為大於設計斷面的潛盾機，到地盤裡面(投影片8)以潛盾機的機能、盾殼來支撐外來的壓力在這樣的保護之下，進行傳統隧道裡面掘進、襯砌與背填灌漿(投影片9)，這些作業完了以後，潛盾機脫離以後襯砌就負擔了地盤的壓力與支撐，然後再以襯砌作為推進之反力，完成隧道的構築，所以可以看到的從水處理跟一個防止災變的裡面所構成的潛盾施工法，事實上他就是我們在軟弱隧道所必備的。那今天各位也很清楚了解到，做隧道



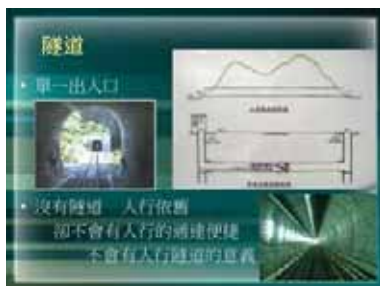
投影片1



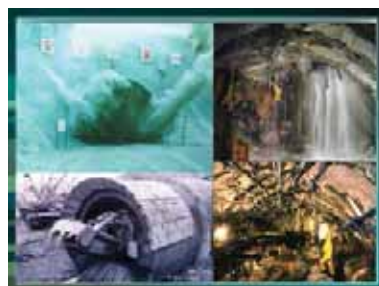
投影片2



投影片3



投影片4



投影片5



投影片6



投影片7



投影片8



投影片9

只有兩件事情，一個是開挖面的穩定，一個是讓後續的沉陷減到最低的程度，所以在你掘進、襯砌與背填灌漿之間唯一跟傳統隧道不同的，不管是 TBM 那樣施工機具，它沒有像潛盾工法一樣以潛盾機的機構，就是機能，做為穩定開挖面主要的設施，也就是潛盾工法異於其他隧道工法的要點。今天以這個潛盾工法做為他的一個主要工作之前，一定要有工作井跟它的基地要有潛盾機(投影片 10)，做完潛盾機之後要有襯砌，來當傳統隧道內用支撐跟襯砌把它合而為一的襯砌，然後背填灌漿來防止地表沉陷，最後一個就是因為潛盾工法短的幾百公尺，長的幾公里，因此在各種不同地質它有很多輔助的工法協助它，那不管這些工法是怎麼樣的工法，這些工法都是以潛盾機為主軸的應變方法。所以在這樣的一個狀態之下，我們國內事實上，整個發展到現在 40 幾年的過程裡(投影片 11)，我們可以看看從衛生下水道 B 主幹管開始用二部開放型手挖式潛盾機輔以壓氣工法施工迄今在國內已 40 年餘年。這個 40 餘年當中，今天在座的有 40 餘年前一起努力的朋友，所以從這樣來說，各位可以看到。施工里程已逾 5、6 百公里，使用潛盾機 4 百餘台次，台北捷運系統 50 台次、高雄捷運 28 台，當初引進距發明國英國首次使用成功近 2 個世紀，這個工法在我們國內開始來施工以後，從第一次的工程當然未完成，那想想看當初手挖式壓氣工法裡面，那時候的壓氣從看到水變化開始一打電話，加壓加壓從 0.5 kg/cm^2 一直加到 1.8 kg/cm^2 ，在裡面工作超過 18 小時，後來有標準才曉得這什麼叫做無知，在裡面假如是到中午，避免再加減壓在裡面沒出來，沒有關係，就請同事帶兩瓶啤酒在裡面當做午餐，現在曉得能夠站在這裡，實在是很幸運，所以 40 年的時間哩，在我們國內已經建立了必要的

基礎跟經驗，廣泛運用在捷運、台電輸配電管道、污水管道、輸水管道等工程範疇，尤以都會捷運系統更使潛盾隧道工程邁入一新的里程碑，所謂的工程技術跟經驗，怎麼去把設計施工連成一線，目前在我們國內繼續要做的現在是越來越受到挑戰，因為好的地質好的路線都已經在我們這麼年代施工完成，現在要做的就是更深更大更複雜的狀況。所以很簡單的從 1969 年民國 58 年第一條隧道是採用英國迷你潛盾(投影片 12)，這個迷你潛盾開始施工管道是太漂亮，它整個的地盤穩定概念跟我們現在的概念完全不同，他是什麼？它是要把地下水永遠跟施工過程中保持水壓平衡，所以它不是處理地下水，而是讓地下水能夠穩定。然後在民國 64 年開始手挖式與壓氣一直到 66 年，事實上一台只做了 42 公尺，一台只做了 33 公尺，等下我會跟各位報告，接下來因為這個工程失敗了以後很多的會議裡面都說，潛盾工法大概不適合用在台灣的地質，那是因為整個的環境的改變，所以自從榮工處接手之後，68 年開始了土壓式平衡式，69 年的泥水加壓式，然後盲式與機械式把這一個潛盾機的各機種在國內扎根，所以為什麼當初不管怎麼樣到今天為止，只要是活著一天只有感謝榮工。當時嚴處長只跟我講一句話，你看看能不能把世界現在在做的潛盾工法在國內都運用一次，才有這樣的一個歷程，然後榮工想自己做潛盾機，就到日本考察了 6 大 12 中 24 小的潛盾機製作廠裡見習，到設計部門裡面 3 個月，一般來講日本的設計公司不允許外人進去，慢慢的從台北的捷運、高雄捷運到海底隧道，以及目前面臨最大的卵粒石層，及 D.O.T 的潛盾機等還有現在很多的特殊工法，這些完了以後，2025 年是我期待的日子海峽隧道，各位看得到，這是我另外一個夢，



投影片 10



投影片 11



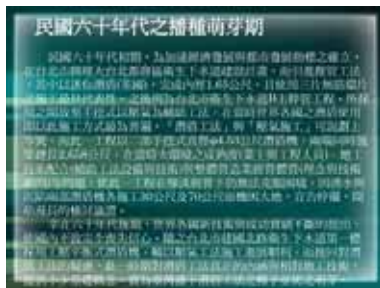
投影片 12

希望有朝一日記得告訴我。所以這些的歷程裡面我們大概說民國 60 年、70 年、80 年、90 年到現在的 100 年每一個階段，都有它的一個時代的意義(投影片 13)，從 60 年開始為了加速經濟，從迷你潛盾(英國)，完成內徑 1.65 公尺，且使用三片無筋環片之施工最具代表性。然後台北市衛生下水道 B 主幹管工程，所採用之開放型手挖式以壓氣為輔助工法，在當時世界各國使用的皆以這工法最為普遍，沒有辦法，當初就是手挖式、開放式、壓氣的，「潛盾工法」與「壓氣施工」可說劃上等號。這兩部機手挖式直徑 ϕ 4.53 公尺潛盾機這可以講很長很長的故事，這是日本的川崎製造的，在這一總長 2,658 公尺，民國 64 年從兩端就要做 2,658 公尺，但是當時大環境業主與工程人員，可運用的極少地工技術來配合這些；一個最簡單的，那時候灌漿、地盤改良所用的 3 號水玻璃台灣沒有，完全靠進口，那就省吃儉用到最後拜託國聯把濕式的做肥皂的水玻璃系統去改造成乾式的，在這樣慘淡的情況下，沒有辦法克服，那時候幾乎所有日本的大的營造業都取經了，但是就剛才講的，這些沒有辦法克服。在六十年代的後期裡面，整個世界的潛盾工法蓬勃，台北市建國北路衛生下水道第一標採用土壓平衡式潛盾機，也是配合壓氣工法施工進展順利，而且是在建國北路高架橋下的基樁，大概是 2 公尺的基座之間大概只有 6 公尺

的間距，潛盾機就是在這個之間鑽來鑽去，這樣潛盾的種子撥種下來。

七、八十年代高雄市污水下水道主幹管工程也開始加入(投影片 14)、然後一直到台北都會區的捷運也在這時候產生了商機出來，這個原本是小尺寸的推進到 6 米的斷面裡面，也從純日本的加入歐美系統，這是把台灣的潛盾歷程多了一項的選擇。到了 90 年代的時候從台電的龍門(投影片 15)，這是一個海底隧道真正的考驗，包括 D.O.T 雙眼的潛盾機，由於最終可惜的是因為國內市場的不穩定性，臺灣到現在為止，完全可以自己製造的潛盾機沒有辦法做，這樣也限制了潛盾機在國內運用的成熟性，潛盾機沒有辦法製做，做的潛盾工法就只有半套，基本的技術，剛才講的應用配合都是靠潛盾機，所以現在各位要做的未來的工程就是未來的大深度大斷面這些變化的考驗，所以期待這些年輕朋友。

各位可以看看當初我們歷經的淡水汙水下水道(投影片 16)，大概可以從這整個下水道走到海洋放流管，這都是以前的路程。那各位還是有機會(投影片 17)，六都的汙水道建設，除了台北市、新北市以外都沒有超過 50%還有很多要做，桃園市連 6%都不到，所以桃園現在在做的這些都是潛盾的未來市場。包括自來水的一、二清水幹管的潛盾工程(投影片 18)，在目前也是一個很重要的關鍵。台電的



投影片13



投影片14



投影片15



投影片16



投影片17



投影片18

數位電線 6 輪 7 輪(投影片 19)可以說是我們現在跟未來的重點工作。就是潛盾施工的重點工作。捷運的第一階段路網(投影片 20)，現在整個完成的顯示。潛盾工法在國內現在及將來的走向包括高雄捷運的潛盾(投影片 21)，單孔隧道的總數 64 條，連絡通道總長接近 45,304 公尺，這裡面的故事也是一籬筐(投影片 22)。潛盾機土壓平衡式在我們國內現在為主要施工方式，土壓平衡式跟這個的差距，就是說我們現在在施工上碰到的問題(投影片 23)。事實上施工案例給我們的一些災變分析跟開挖面穩定分析，沒有告訴各位，各位永遠永遠沒有辦法去看到，已經完成的潛盾隧道，上面另外一條潛盾機竟然可以把這個環片削掉，這告訴我們什麼?所謂的施工管理跟這些所謂的東西在於知覺，知覺對於潛盾，所以我們要認識司馬相如名言，明者遠見於未萌知者避危於無形禍故多藏於隱微而發於人之所忽者也，所以潛盾工程跟其他工程都是一樣的。

在這整個 40 年得過程裡面，雖然短短的 40 年，對於整個世界的潛盾，從 1818 年到現在二個世紀中我們並沒有落後(投影片 24)，我們所落後的是什麼?我們現在在台灣最痛苦的一件事情，我們國內能不能自己挑起，從這個各位可以看到潛盾機的形式大概我們國內都施工過，挖進的方式，還有所碰到的地質，施工中的特殊狀況，障礙物處理，遭遇事故，輔

助工法之運用，種種的這些東西，我們來看一看。事實上潛盾機從開放式的或者是密閉式的，泥水加壓的經驗在我們國內還是不足(投影片 25)，但是不管你是採用開放式或是密閉式對土層在開挖重點就是開挖面的穩定，使用壓氣工法的時候，可以看到壓氣工法上下壓氣一致，泥水加壓還有土壓平衡式，這些跟大地壓力的主動土壓跟被動土壓之間平衡的概念一致。各位看到第一點，我們的作業就是這樣，工程師早上上班第一就是到外面摸摸什麼是地下水的滲漏，然後看到水的時候第一個慣性往後倒，那個土就壓到你的下半身，裡面就嘿咻嘿咻把你拉進去，這樣的一個概念以後，然後慢慢的進程到所謂開放型的密閉式，是國內第一台嘗試做的土壓式平衡潛盾機(投影片 26)，大概這兩台以後，其他小的有做，像這些的大概就沒有了。

這是高雄的泥水加壓，這是盲式的，這是土壓平衡式的，所以從這樣的一個歷程，各位可以看到，開放式潛盾機就是你必須直接跟傳統隧道一樣，這個不是加工的，在以前，開放式潛盾機裡面的溫度大概都是 40 幾度，管控所滲排出來的水而且不影響掘進。各位看看，那個年代竟然還有相思木可以去做枕木，直徑要 25 公分，現在哪裡去找，所以從這樣的各位可以看到，這也是潛盾機，但是所有潛盾機的平衡跟它的穩定、上下、滾轉的調整就是這



投影片19



投影片20



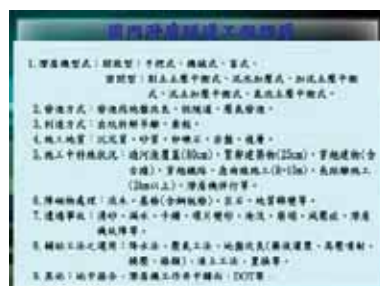
投影片21



投影片22



投影片23



投影片24

沒有用到，現在面臨最大的考驗就是這個。卵礫石層的施工(投影片 32)，卵礫石層的施工所能達到的施工平衡的概念又是另外的，所謂的這一個抽坍就是一個很重要的關鍵，那像這整個的一個粒層裡面。所謂的一個施工特性，像現在已經完全看不到這些了，從下面這穿過去(投影片 33)，因為江淮兄站起來就表示告訴我時間已經到了，像這些中折的裝置(投影片 34)，所以這些的一個應用，包括在中折中產生的偏壓，像我們國內有這些的經驗在，國外所相對應的。那各位可以看到這些整個的巨石、岩盤(投影片 35)，4 公尺的直徑怎麼去解決，像這些的案例像流木，像最孔怖的就是這樣子，在一個斷面裡面有岩盤有軟弱地盤岩盤開挖及軟弱地盤開挖的情形(投影片 36)，這些都是一個很寶貴的經驗。讓各位可以看得到，原來的切尺是這樣(投影片 37)，我們很多同事都很有心，這整個隧道挖完的每個切齒的磨耗情形用這做一個圖解，這就是一個非常寶貴的

資料，假設將來還有這樣的一個機會，這些所經歷過的事情千百種，萬百種的積累。

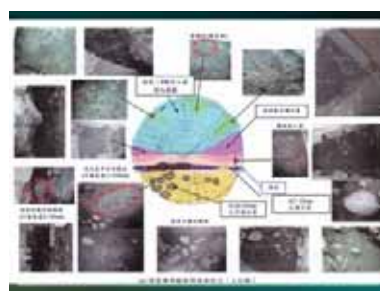
每一次看到電視、報紙報這個的時候(投影片 38)，真的是心底的痛，因為潛盾是在地底下施工，今天為什麼工程怪獸卡地底、民宅龜裂、和或是路坍(投影片 39)，這些不是我們在暗以姑息，心裡的痛就是為什麼為什麼?所以看到這些地中接合竟然會產生這麼大的一個災變，這種糾結，所有地中接合的動作這個是為什麼?到底真正的原因是什麼，因為中折會把整個隧道淹沒，這樣子的一個應對，當然工事工事有工就有事，講這些環片的破壞(投影片 40)，時間的一個經驗往往是一種重新的組合，從這些太多太多的案例往往在告訴我們什麼事情。像這些的應用，可以在潛盾機裡面去更換這些的缺失(投影片 41)，運用了冷凍的工法、灌漿，高壓灌漿真正的形狀跟這些壓氣的這些的所告訴我們的(投影片 42)。地盤改良，在黏性土壤的割裂灌漿、砂質土的滲透灌漿(投影片 43)(投影片 44)。



投影片31



投影片32



投影片33



投影片34



投影片35



投影片36



投影片37



投影片38



投影片39

給各位看到地中接合的步驟(投影片 45)，它是一個有跡可循的東西，到底真正發生在什麼地方的時候要去了解，要去找他真正原因的所在，這樣的一個施工的模式，國內的案例，國外的案例也不多，今天在我們國內這樣的一個使用，這些都是一個困難的問題必需把它留下，解決方式也要留下。事實上從民國 70 年代在我們國內就已經自己做一個地中接合(投影片 46)，完全靠壓氣跟灌漿。海底隧道的接合更不用談(投影片 47)，所以那天中油找我去說觀塘的遇到島礁，漁民抗議，我就舉了這個案例，

那你這邊就不要過去，直接從這裡挖 2 公里的汙排水管子，直接排到 2 公里外的海上(投影片 48)。當然這些各位可以看到在海底下 40 公尺施工(投影片 49)，在海底下 8 米多的潛盾，以及在海上到達井的施工都是一個非常非常大的考驗，這些就各位稍微看一下，一個工程的施工一定不只有單一的，包括灌漿第一次灌漿、第二次灌漿(投影片 50)，還有這些水的來源的考量，在海上的一個到達在施工上又是另外一個的考量，D.O.T 是一個很漂亮的造型(投影片 51)，這就是環片，這就是管型管理，這些就是



投影片40



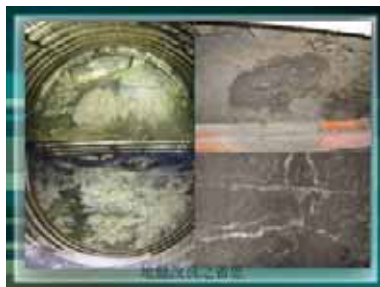
投影片41



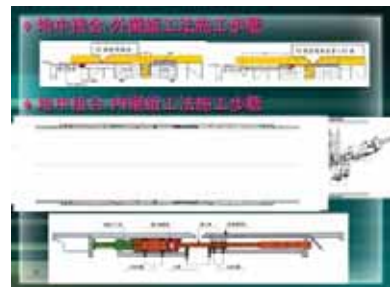
投影片42



投影片43



投影片44



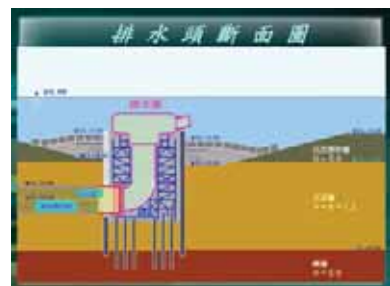
投影片45



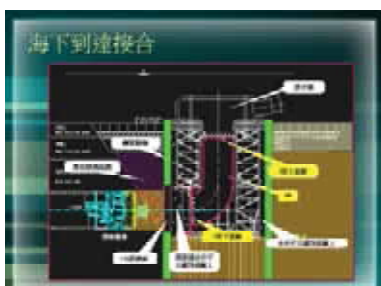
投影片46



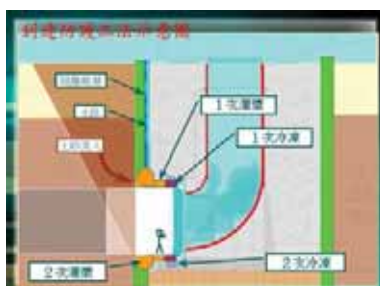
投影片47



投影片48



投影片49



投影片50



投影片51

環片造型(投影片 52)和這些施工的過程當中都是從路線的控制還有這些都可以清楚的看到(投影片 53)。為了這次我翻箱倒櫃去找到 63 年的第一本潛盾工法這本書(投影片 54)，那時候朱啟勳是衛工處副處長，到 2008 年的設計與施工準則跟 2009 的施工困難案例。所以我今天跟各位所報告的，台灣軟土的隧道，所提到的這些都是過去，都是一個過程，沒有過去就沒有今天跟未來所以我也希望說理想與現實是進步的二種相牽引動力今後深耕在地化要勇於面對自我成長。用這個來跟各位共勉。像這一個就是在桃園機場捷運 CU02 標的地質(投影片 55)，這也是非常寶貴的經驗，這些的潛盾機的掘進的施工過程，總共是 8 台潛盾機在上下推進，這也是蠻難得的。接下來是綠線(投影片 56)，這是 5 公里多將近 6 公里的施工，還是卵粒石的，這是我們國內將來潛盾的考驗。

結語：

這是我一個夢(投影片 57)，我做了 40 年我把它歸那出潛盾機的三個要點，夷希微·視之不見名曰夷·聽之不聞名曰希·博之不得名曰微

(想去破壞地質是不行的)，這個裡面所有的現象在八卦裡面(投影片 58)，從太極生兩儀，兩儀生四象，四象生八卦，我說潛盾機也是一樣，兩個真，真正的是你要做什麼；你的真意是什麼，就是開挖面的穩定，減少後續沉陷。你的四個意象，這個管理的意圖，就是挖掘、推進、質量與壓力四個管理意象來達到兩真的管制，從下面演生出來的八個顯象，我們在做潛盾工程的品質只看到這個，從這八個顯象對應出 64 個相對應，今天時間不夠，唯一一個首要的夢就是把潛盾機盾首變成一個八卦，它的磨耗就跟八卦一模一樣。假設今天國內能自己設計潛盾機，一定要去把他實現，我現在也在推，看大陸能不能完成這個夢。我第二個夢是見識與度量夢裡尋他(投影片 59)，我想我是絕對看不到，但是在座各位如果他有一天完成麻煩請告訴我。

最後是我的一個理想一種追尋一份真緣一生執著(投影片 60)，我今天報告到這邊。



投影片52



投影片53



投影片54



投影片55



投影片56



投影片57



投影片58



投影片59



投影片60

淺談台灣山岳隧道..... 謝玉山處長

各位工程界的先進晚安，很榮幸可以跟各位報告台灣山岳隧道施工技術的演進。

台灣山岳隧道發展里程碑主要從十項建設之一的北迴鐵路開始，有 16 座隧道群總長約 31 公里，民國 63 年施工初期一些短隧道仍採用木支保，我個人也參與了一段木支保的工作，長隧道才使用 H 型鋼支保，但 H 型鋼均仰賴進口，業主一般都摳得很緊，所以岩盤稍好的區段就不架設鋼支保。當時鑽孔機具普遍為手提式 TY24 鑽機，我們榮工剛因為北迴，從瑞典引進輪型氣動鑽堡(Jumbo)。

北迴隧道工程規劃兩部大約翰開挖機(Big John) (投影片 1)分別從北端永春隧道與南端崇德隧道發進；中段的谷風、和平等隧道，是採輪型鑽堡由瑞典技師教我們平行拔心(孔深 3.5m)鑽炸工法。大約翰開挖機有盾殼保護，靠兩個抓斗來抓岩石，開挖後組立預鑄環片，讓它頂著環片向前走，事實上大約翰對地質不適用，進度非常的慢。

在民國 65 年，進度落後相當嚴重，榮工就聘請日本鹿島顧問改進施工技術與工進，並由鹿島、熊谷組協建第一長的觀音隧道(7,740m)與第二長的南澳隧道(5,286m)，同時引進門型鑽堡(投影片 2)與軌道工法，軌道式的門型鑽堡，有 6 部鑽機分三層布置，當時我們也擴充好幾個施工所趕工，所以整體進度差很大。

民國 68 年後期，北迴鐵路快完工時，東線鐵路拓寬隧道、奇萊引水隧道也都是使用鋼支保工法，當時也陸續改善出碴機具、系統襯砌鋼模、通風設備等。憶及在北迴的時候，鹿島顧問曾經召集我們檢討，指出我們買的設備都是世界上一流的，但是不適用這個工地，此語讓我們感受很大。

明湖抽蓄水力發電工程後來引進油壓驅動鑽堡，比氣動鑽堡酷多了，它鑽進效率高，噪音較小，那時也繼續請日本鹿島技術顧問指導，國人對鋼堡工法與開挖技術更臻純熟，完成當時國內最大斷面的明湖地下廠房工程。

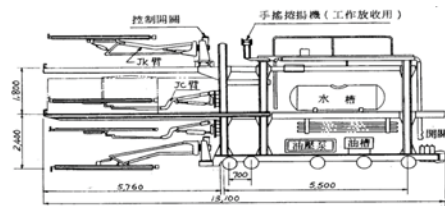
奇萊引水隧道(斷面 8m²)在花蓮木瓜溪的上游，全長 14.6 公里，設 12 處橫坑同時挖進，

隧道沿線並設置五座攔水壩引水至灌澗電廠之龍溪壩，因為這個水庫滲漏水蓄不滿，所以才啟動奇萊引水計畫，從中央山脈的東側開始引水。為國內率先在岩質較佳的地段，採用鋼線網與噴凝土取代混凝土襯砌；初期噴凝土反彈量幾達 100%，粒徑大反彈量就大，經與台電研究改進配比與施噴技術後才改善。

新奧工法(NATM)第一次引進國內是在東線鐵路拓寬工程之自強隧道，長 2,750m 穿越瑞穗舞鶴台地，單線斷面(A=36m²)，當初是用傳統鋼支保工法開挖，因為碰到沉泥擠壓曾停工 2 年。底導坑鋼支保剛剛碰到沈泥的時候，過了不多久就開始擠壓變形鋼(投影片 3)，後來就變泥漿把隧道壓垮 40m，最後就在隧道內做了 2m 厚的鋼筋混凝土擋牆。後來鐵路局長董萍找了德國鐵路顧問(DEC)建議以高壓灌漿及新奧工法。法國 BSG 公司以每輪高壓灌漿長 18m，分 3 階段每 6m 前進灌漿，最大灌漿壓力達 35kg/cm²，開挖一段大約 10m 左右，又變泥漿，又要封面再灌漿，所以平均每月進度 4m。



投影片1 大約翰開挖機(Big John)



投影片2 軌道式門型鑽堡



投影片3 底導坑鋼支保因沈泥擠壓坍塌40m

新奧工法在自強隧道沉泥段克服困難，其後南迴鐵路也有隧道群共 35 座，總長約 39 公里，初期還是採鋼支保工法及軌道運輸，一直到民國 75 年遭遇不好的地質及湧水，才改變為新奧工法，最早是在中央隧道(8,070m 為當時最長鐵路隧道)改用新奧工法，隨後其他長大隧道也陸續變更工法。民國 74 年以後開工的花蓮佳山計畫與明潭抽蓄水力發電計畫之地下開挖全部使用新奧工法。

民國 73 年我曾在南迴鐵路中央隧道負責施工。整個隧道長 8 公里多，中段設置斜坑長 405m，主要向東、西端開挖主隧道，共挖了 2.58km，整座隧道才能在民國 80 年貫通。施工後期，中央隧道西豎井 341m 深，降挖至 160m 因嚴重湧水變成水井，後來從奧地利引進升鑽工法(Raise boring)，先向下鑽孔一個 31cm 導孔，再用擴孔鑽頭 1.52m 向上擴孔(投影片 4)，最後再用全斷面鑽炸擴挖完成，鑽孔精度偏了 1m 多偏差約 0.6%，這是國內首次引進，後來雪山隧道也引進更新的鑽孔技術。

台電明潭廠房是新式的馬蹄型地下廠房(長 158m、寬 22m、高 46m)，廠房開挖前施作頂拱層縫處理用水刀把很細的剪裂泥洗掉再回填水泥漿，以及採用頂拱預錨。

國內明湖之前的所有地下廠房都是採用草菇型(投影片 5)，就是在頂拱開挖之前要先局部開挖並構築厚重的鋼筋混凝土拱約 1m 厚，來撐住岩壓，所以應力會集中在拱的兩端，這個做好了以後，才能往下挖頂拱的部分，然後再慢慢的向下降挖。投影片 5 所示明潭廠房採用較新的岩石力學方法，在還沒開挖之前就先開挖工作廊道做層縫處理，然後從工作廊道向上打預錨，同時利用排水廊道也向下打預錨，把頂拱岩體先施以壓力，全部完成之後，再開挖頂拱，開挖時也會裝設一些岩錨和岩栓來輔助支撐，開挖是採用勻滑開炸，側壁是用預裂法，從澳洲請來開炸顧問指導。支撐系統是以鋼纖維噴凝土、預力岩錨與岩栓，為國內首次引用，拱部之鋼纖維噴凝土厚度約 20cm，側壁為 10cm 左右，整個開挖過程都沒有發生大坍塌，頂拱最大變位量 7cm 是於頂拱還沒開挖就從排水廊道開始量測，側壁最大變位量也只有 10cm，是因為

旁邊還有一個變壓器室也很大，這個工程在國際上是一個很成功的案例。

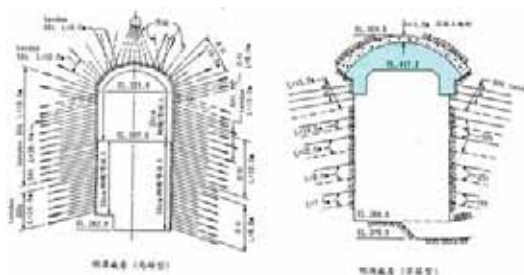
廠房頂拱擴挖(投影片 6)，兩側顯示的地錨就是從工作廊道打上去，中間的地錨就是從上方的排水廊道做下來，開挖後露出的錨頭再把它錨碇，所以擴挖過程都很順利。

又本工程係國內首次引進鋼纖維噴凝土及自動噴漿機，工作人員不用上下移動，比較安全，又能減少反彈量。

明潭還有一項艱鉅的工程就是壓力鋼管傾斜隧道呈 48°，傾斜長度達 400 多米，當時分為上段跟下段施工，為了趕工採用爬升機工法，先開挖導坑(A=5.8 m²)供卸渣料、洩水，



投影片4 南迴鐵路中央隧道西豎井升鑽擴孔



投影片5 明潭及明湖廠房設計斷面比較



投影片6 廠房頂拱擴挖與預錨

爬升機掛在軌道上，拱頂上，從水平工作坑就可以沿著軌道爬升到某一個高度，先上去鑽孔裝炸藥，然後再退下到工作坑(投影片 7)，就這樣一次一次的延長軌道。在明潭工程，創出 248m 的國內爬升紀錄，工作人員要隨同爬升機爬這麼高相當的危險，貫通以後，所有的碴料與水從導坑洩下，施工進度很快。

民國 80 年代左右，台灣的隧道群施工就多了，有台鐵山線三義壹號隧道，北、南二高隧道群，北迴鐵路擴建新南澳、新永春與新觀音隧道。新觀音隧道長 10.3 公里比中央隧道的 8km 還長，這個隧道也是做得相當順利成功，是因為地質調查做很好。這些都是採用新奧工法完成。新永春隧道遭遇國內最大湧水量 80m³/min、水壓 50kg/cm²，吃了蠻多苦頭，經改移部分路線，並採排水廊道與熱瀝青灌漿始克服。這投影片 8 示排水廊道裝置了很多大口徑的排水孔來降低水壓與湧水量，最後用熱瀝青灌漿完成止水。

北二高木柵隧道曾經遭遇彎潭斷層擠壓變形 180cm，但是沒有垮下來只是一直變形，因為一直加強支撐。新店隧道則因邊坡滑動災害，這兩個隧道都分別應用預力岩錨、岩栓補強及剛性支撐克服。

投影片 9 顯示北二高新店隧道北口邊坡滑動後整治，南下線隧道是 4 車道特別的大，當初採用明挖，挖到第 3 階邊坡就開始滑動，上面的電塔也發生位移，所以就停下來補強很多岩錨，補強完成後北上線洞口也開挖，不料邊坡又開始滑動，後來就覆土回去，並打 1m 的排樁擋住側向土壓力，南下線隧道就用雙側導坑開挖 8m 就趕快襯砌，硬是不讓它變形太多，以免邊坡又滑動。那時候國內在洞口段附近為避免開炸震動，引進掘削機(Roadheader)(投影片 10)，這種只適用在軟岩到中硬岩，而且缺點就是粉塵多，而水灑太多又變爛泥，掘削機會下沉。

山線鐵路三義壹號隧道長度 7,260m，位在三義的台地，遭遇三義斷層寬 290m，我們從隧道兩端開挖面較接近斷層時做雙向之隧道震測探查(TSP)，確定位置後對應到山上的小溪去整治，把水通通都阻絕掉，隧道內也施作灌漿，之後很順利通過。

另外一項困難就是中山高速公路穿越段長 183m，它的覆蓋厚度小於 20m，隧道直徑 11m，而且又是在卵礫石層開挖，我們採用超微粒水泥灌漿與管幕工法，每輪管幕 12m 長、開挖 9m，上半開挖平均 11m/月，路面最大沈陷量 79mm，因施工時間有 2 年，全程未影響行車安全。



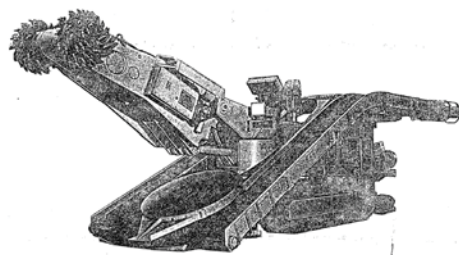
投影片7 壓力鋼管傾斜隧道導坑開挖之爬升機



投影片8 排水廊道大口徑排水降低水壓與湧水量



投影片9 新店隧道北洞口邊坡滑動整治



投影片10 隧道掘削機(Roadheader)

投影片 11 示在卵礫石層施鑽 12m 長管幕 ($\phi 3.5$ 吋)間距是 30cm，但是碰到不均勻地質所以錯位的很嚴重，惟經過超微粒水泥灌漿與管幕之後自立性還相當不錯，還能夠開挖 9m，再繼續做下一輪的管幕。

國內的隧道鑽掘機(TBM)當時在民國 80 年時引進運用在北宜高速公路雪山隧道，初期比較不幸，在頭城端遭遇四稜砂岩層五處斷層帶，所以 TBM 嚴重受困。

導坑雙盾式鑽掘機直徑 4.8M(投影片 12)，主隧道雙盾式 TBM 直徑 11.74M 是德國 (Wirth) 製造的，有兩部。TBM 機頭包括前盾、中間伸縮盾與後盾，可以同時組立環片與開挖並行施工。

為什麼碰到困難，TBM 正好碰到石英砂岩其石英含量最少 80% 以上，單壓強度 310MPa 以上，所以削刀頭很快都磨鈍掉(投影片 13)，甚至 TBM 的盾頭都被磨耗，後來加耐磨鋼板才改善。

導坑在 1km 之內受了十次災害，第十次湧水量達 220L/sec，破碎的四稜砂岩岩塊都湧擠到 TBM 裡面，所以用砂包去擋，用剛支保去擋環片，怕它整個垮下來。

北上線 TBM 就更慘了，碰到湧水量達 750L/sec，水壓 18bar，坍方約 7,000m³，致 TBM 前方 100m 全部壓垮，這一台只開挖了 456m 來改用鑽炸，另外一台 TBM 也就停止開挖。

後來我們就用頂帽坑工法，就是挖一個比較小的上半斷面，然後 TBM 再挖其餘部分，頂帽坑一定要做的很堅固，同時兩側要擋住 TBM 滾動也做了縱向扶壁(投影片 14)，此頂帽坑開挖達 1.9 公里。

TBM 過了四稜砂岩段之後，導坑與主坑也分別開挖了一長段，而且導坑單月最佳進度達 400.8m，主坑也達到 360.1m，相當好的表現，雪隧單月最好的鑽炸進度也只有 126m，也就是在好的岩盤用 TBM，進度快很多，但是地質調查要做得比較詳細。

雪山隧道除了隧道困難以外它還有三處豎井，也創了很多的新紀錄，在中間段的 2 號豎井，當時為了趕工，增闢主、導坑開挖面，深 250m，所以底下設了一個很大的汗水

處理廠，把汗水處理到幾近清澈才用高揚程的幫浦一次排出，要不然底下淹水，整個設備就報銷。從 2 號豎井的冒險，在底下挖了 5km 隧道才能提前在 2006 通車，否則最少要延後 3-5 年的時間。

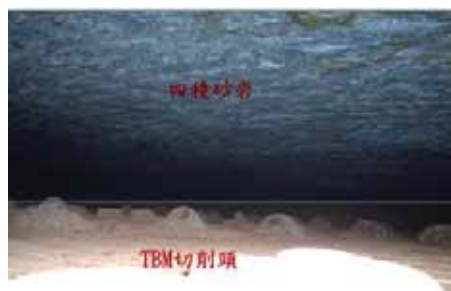
另外在四稜砂岩層附近有一個 3 號豎井是 450m 深，採用降挖工法，當初南非廠商



投影片 11 高速公路穿越段卵礫石層開挖採超微粒水泥灌漿與管幕



投影片 12 導坑TBM(Robbins)直徑4.8M



投影片 13 四稜砂岩(石英 $\geq 80\%$), $qu \geq 310\text{MPa}$



投影片 14 主坑TBM在頂帽坑下開挖

在四稜砂岩層以 39m 長鑽孔灌漿止水，效果不佳，後來就撤離把國內合作廠商丟下，所以我們就縮減為 19m 的灌漿、開挖 15m，完成國內降挖工法最深的 450m 紀錄。

當時國內最深的雪山隧道 1 號豎井 (500m)，因坪林老百姓抗爭，擔心山上都是茶樹，若要做兩個豎井，那以後地下水就沒了，所以我們就從俄羅斯找了深井灌漿，500m 一次全部做皂土水泥灌漿，先把會漏水的地方灌漿止水，兼有固結的作用，完成後再找奧地利廠商做升鑽工法，因為有南迴的工作經驗，要求做好鑽孔精度控制，所以就從德國找了導向鑽孔系統，兩豎井之鑽孔精度 500m 僅各偏差 72cm 與 14cm，等於 0.14%，南迴是偏差 0.6%。另關於擴孔直徑，鑑於南迴豎井只有 1.5m，曾經被卸下的碴料堵住，所以要求擴孔直徑要做到 2.44m，當然價錢也不一樣了(投影片 15)。

後續 TBM 的案例在士林電廠頭水隧道，是採用開放式的 TBM，開挖 3.5km，進度不錯單月最佳進度 560m，平均每月 380m 創國內紀錄。稍後的新武界引水隧道也是開放式 TBM，開挖 6.5km，創國內最佳單月進度 659.3m，平均每月 315m。後期有東部碧海電廠頭水隧道 TBM 因遭遇破碎地質與大湧水，最後拆除了。所以 TBM 的使用地質調查是相當的重要。

近年的施工技術，從民國 90 年代，雪山隧道鑽炸段、高速鐵路及花東鐵路雙軌化的新建隧道，均使用桁型鋼堡、鋼纖噴凝土、自鑽式岩栓等新技術，以縮短工時。

東線鐵路新自強隧道雙線斷面($A=106m^2$)比舊自強隧道大 3 倍，也是遭遇沈泥層，隧道擠壓變形達 150cm，連開挖鏡面也像擠牙膏一樣擠壓凸出。後來用中導坑開挖配合先撐管幕、矽酸鹽樹脂及 LW 複合式灌漿、並在開挖鏡面打玻璃纖維灌漿管加固開挖鏡面。中導坑貫通之後(投影片 16)，就用短台階(約 2m)，包括仰拱閉合，最終克服約 200m 的沈泥段。

民國 100 年的蘇花公路改善計畫廣續應用新施工技術，並就工程碳足跡追蹤、環境生態保育措施等均為更佳之創舉。

比較新的還有曾文水庫防淤隧道，開啟國內排砂隧道之先河，這個工程的消能池室鄰近

河道，覆蓋薄，開挖斷面巨大約 $1,050m^2$ ，施工風險更高，為國內目前已完成最大地下開挖斷面。消能池室斷面寬 23m、高 47m 將來排泥水量甚大，所以頂拱與側壁還是有襯砌保護(投影片 17)，地下廠房還高大。

結語：台灣隧道施工挑戰性較高的主因：地質年代較新、複雜多變，斷層與剪裂帶較密集，且年雨量約 2,500mm，地下水充沛，歐洲年雨量只有 600mm，當隧道開挖擾動周圍岩體，岩隙滲水及匯集，沒有灌漿處理，就容易引發湧水與坍塌。

依個人 40 多年來的經驗，大約統計過國內隧道施工約 200m 就會遭遇剪裂弱帶而易發生抽坍或湧水，須謹慎開挖並儘速支撐與細心觀測。



投影片 15 雪山隧道 1 號豎井(500m)以導向鑽孔系統進行昇鑽工法



投影片 16 新自強隧道沉泥段先以中導坑貫通再擴挖(摘自地工技術No.151/2017.3)



投影片 17 曾文水庫防淤隧道消能池室襯砌(摘自水利署南水局簡報)