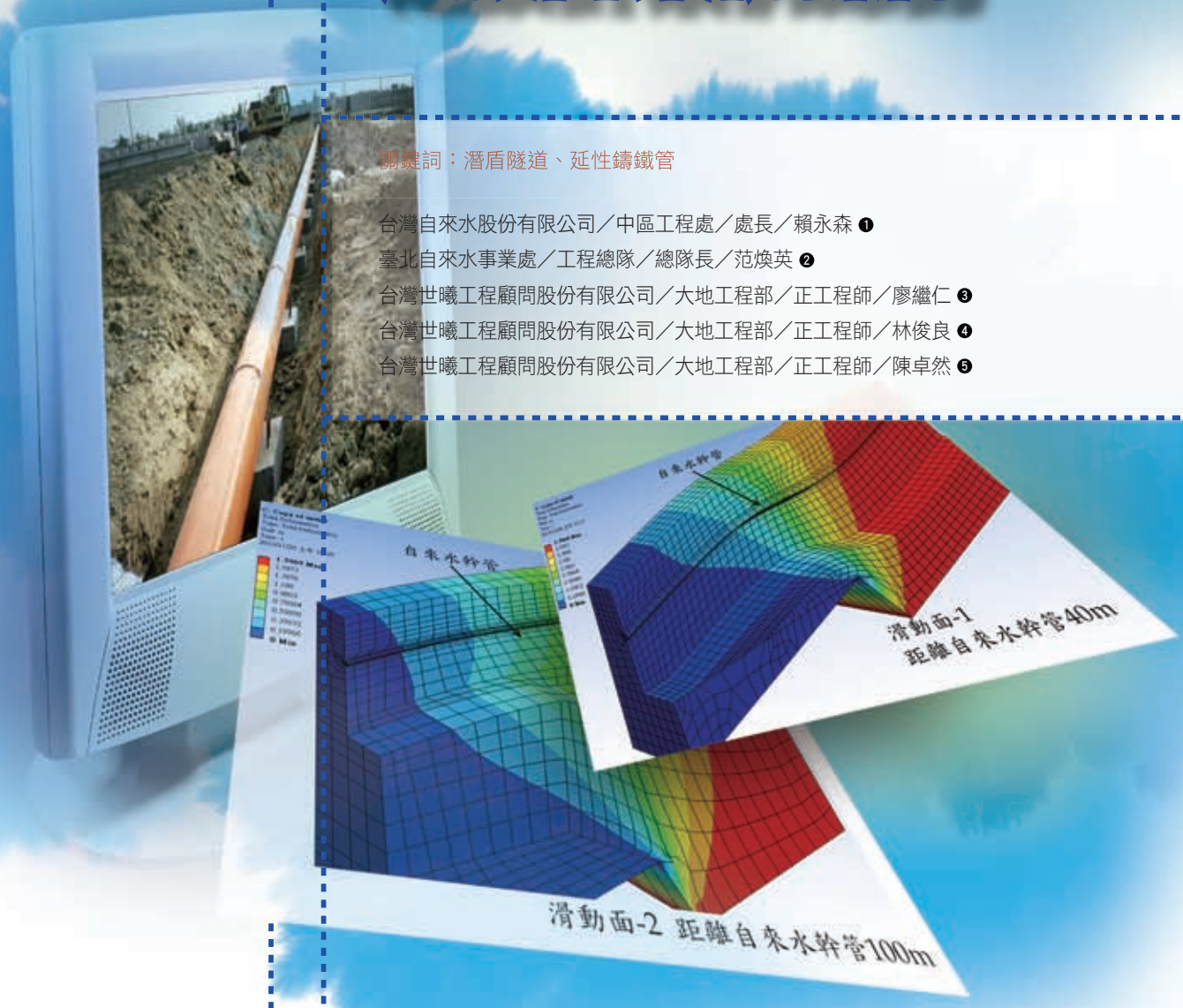
地下管線遭遇斷層之設計案例探討

關鍵詞：潛盾隧道、延性鑄鐵管

台灣自來水股份有限公司／中區工程處／處長／賴永森 ❶
臺北自來水事業處／工程總隊／總隊長／范煥英 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／廖繼仁 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／林俊良 ❹
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／陳卓然 ❺



摘 要 ABSTRACT

本文介紹兩個地下管線通過斷層之設計案例，分別是「鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)設計」及「大度線輸水管新設工程設計」計畫，其中大度線輸水管位於臺北市大度路，除通過橋梁基樁及近接大度陸橋與另條潛盾隧道外，並對於通過山腳活動斷層有特殊考量；另鯉魚潭水源北送計畫係屬台灣自來水股份有限公司三義交流道至三義減壓池φ1000mm延性鑄鐵管(DIP)輸水管線工程，是國內首例以潛盾施工並於隧道內部預留維修通道之自來水輸水幹管工程，由於沿線為台13線三義木雕街商圈且遭遇之地層為中部地區堅硬之卵礫石層，對潛盾隧道施工與自來水管線設計係一大挑戰。

壹、前言

為維持都會區自來水供應順暢，有些路段無可避免地須跨越活動斷層帶，例如前述兩個計畫，其中大度路輸水管位於臺北市大度路，係採用有填充材包裹保護的管中管設計，跨越活動斷層的影響主要係考量山腳斷層地盤錯動所產生的永久變位，對於自來水管隧道造成強制變位損害；另鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)，係採用潛盾施工後再於隧道內進行內穿自來水管並設置維修步道，受到活動斷層的影響主要係探討地震波搖晃對於潛盾隧道內自來水管的影響。上述兩計畫之自來水管及潛盾隧道的幾何配置相當複雜，傳統地工的平面應變問題無法因應，須進行三維數值計算以瞭解斷層地盤錯動對於自來水輸水幹管的影響，藉由數值計算結果提出可能的因應對策並納入設計考量。

貳、自來水管隧道耐震分析方法

自來水管隧道行經路線靠近活動斷層時，有必要探討將來活動斷層錯動所引發地震對於自來水管隧道的影響。活動斷層錯動所引發地震之影響可細分兩大類：(1)斷層錯動所引發地震波搖晃對於新設自來水管結構的影響，例如鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)工程；(2)斷層錯動位移量對於新設自來水管結構的影響，例如大度路輸水管新設工程。茲將其分析方法分述如下：

一、地震搖晃對於自來水管隧道影響的分析方法

(一) 強制變位法(Racking method)

依據耐震設計規範475年回歸期之設計地震值的應用，僅適用於地上結構物，

自來水管隧道係屬埋置於地底下的地下結構物，類似臺北或高雄捷運系統，其受到地震損害影響的評估方法與傳統地上結構物不同。一般皆採用強制變位法(Racking method)評估地震對於地下結構物的影響，捷運潛盾隧道亦如是，即以強制變位角作用於地盤再傳遞到自來水管隧道，以瞭解地震搖晃瞬間對於自來水管隧道的損害影響。地盤的強制變位角度大小與地盤性質有關，地盤性質越佳地盤的強制變位角越小，一般地盤的強制變位角度很少超過千分之五，主要與地盤的標準貫入試驗SPT-N值有關，其具體評估方法如下：

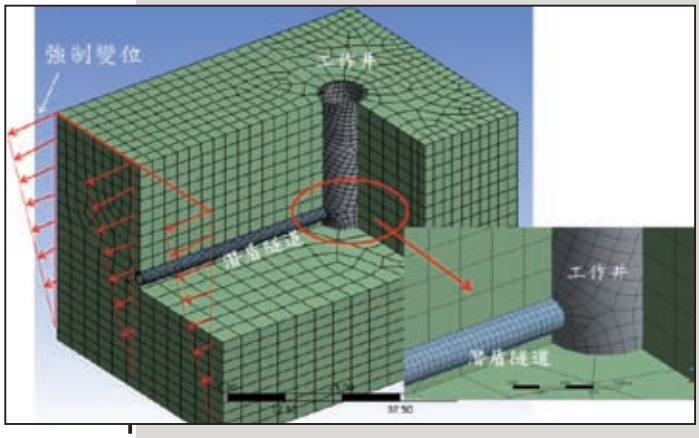


圖1a 出發工作井與潛盾隧道相關位置之數值分析網格

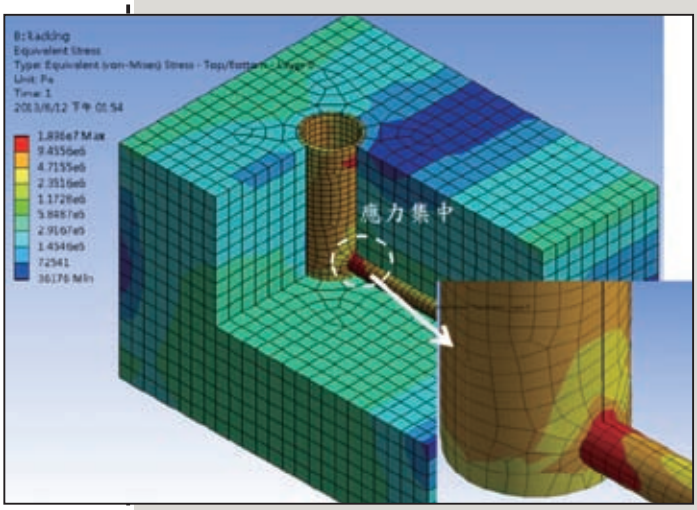


圖1b 強制變位法作用下之平均應力增加等值圖

圖1 分析網格及應力等值圖

自由場內土壤受地震力作用後，所產生的剪變形量(Racking deformation)為：

$$R = I \times \frac{V_{max}}{C_{se}}$$

其中$I=1.2$為重要係數，V_{max}為地表運動最大速度(m/sec)，C_{se}為潛盾隧道所在位置地層剪力波速，應依量測值而定，若無量測值，下列經驗公式可用來決定。地層剪力波速(m/sec)

$C_{se}=100N^{\frac{1}{3}}$　適用於凝聚性土壤；

$C_{se}=80N^{\frac{1}{3}}$　適用於無凝聚性土壤；

「鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)設計」計畫中的工作井壓入式沉箱與潛盾隧道接頭受地震搖晃的影響，即採用地盤強制變位法評估。由於工作井壓入式沉箱與潛盾隧道兩者結構勁度差異大，於地震波搖晃的強制變位作用下容易在兩者接頭處造成應力集中現象，如圖1a及1b所示。上述工作井沉箱與潛盾隧道等地下結構物周遭都受到土壤包圍著，為考慮到土壤與結構互制(SSI)問題，數值計算時將工作井沉箱、潛盾隧道及周遭圍束土層一併考慮，此種分析方法雖較精確但計算時間也相對較耗時。

(二) 地震反應譜分析(Response Spectrum Analysis)

「鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)設計」係採用潛盾隧道內設置ϕ1000mm自來水管，並預留人員巡檢步道與後續管材拆換維修之運輸通道。潛盾隧道與周遭圍束土層相連，但自來水幹管僅是固定於鋼梁上，周遭為空氣，其受到地震波搖晃的行為與一般地上結構物之地震反應類似，前述的強制變位法將不再適用。

結構物受地震波搖晃影響的最精確分析是進行時間域數值計算(Time domain analysis)。若地震歷時為60秒相當於須進行12000次的一般靜力計算才能得到結構物受地震作用的反應，若結構物形狀複雜自由度大，如圖2所示。數值計算執行上相當困難，因此一般採用數值計算代價較小的頻率域地震反應譜分析(Response spectrum analysis)

地震反應譜分析係藉由模態分析(mode analysis)得到整個系統振動搖晃時的可能振動模態形狀(mode shape)及其所對應的自然頻率(Natural frequency,ω)，亦可以得到各種

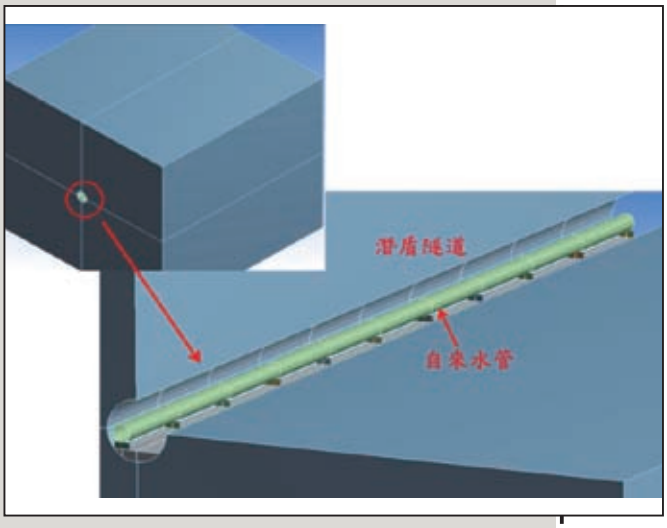


圖2 自來水管系統之三維空間幾何配置

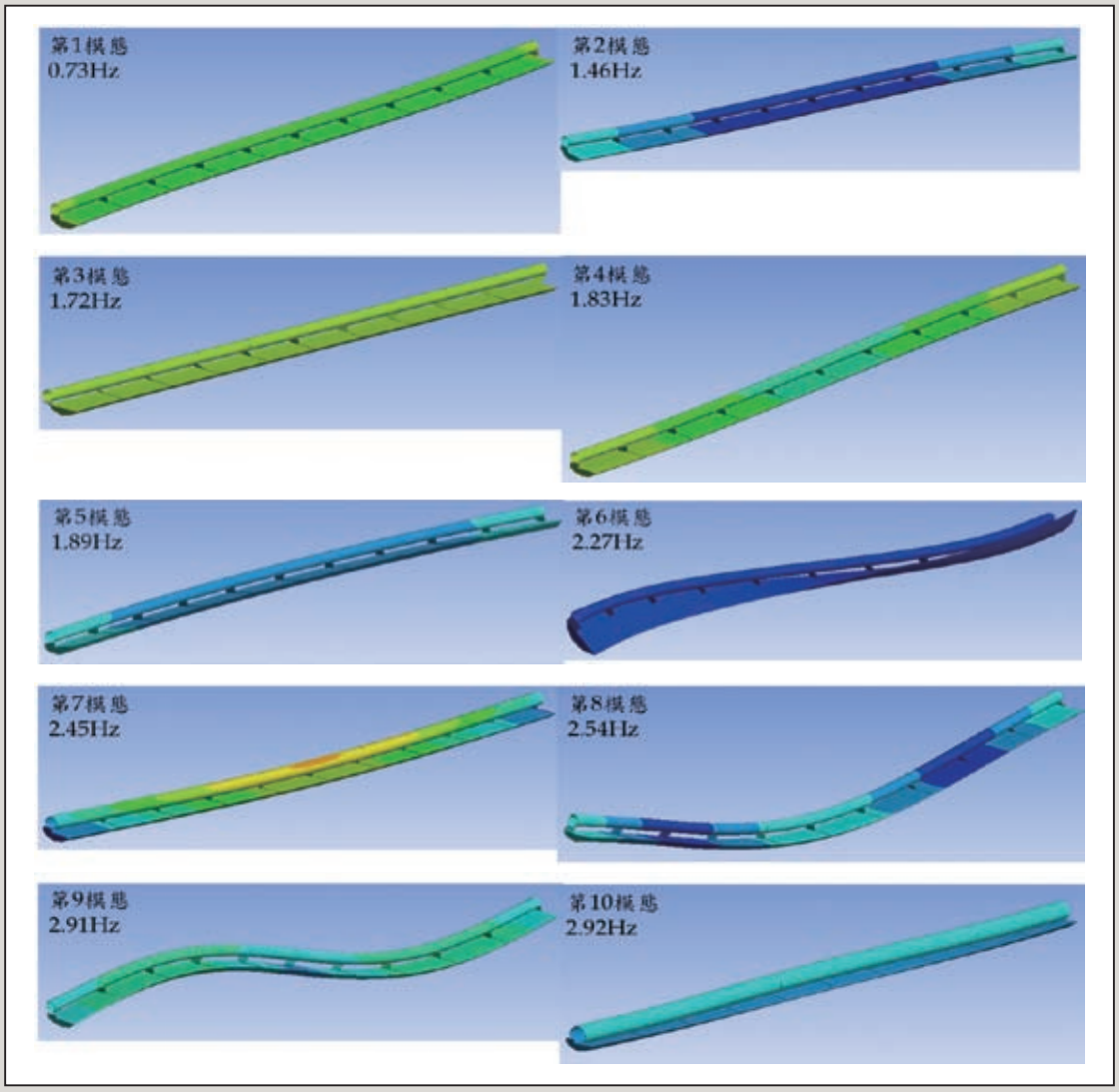


圖3 自來水管前10個模態形狀及其所對應的頻率

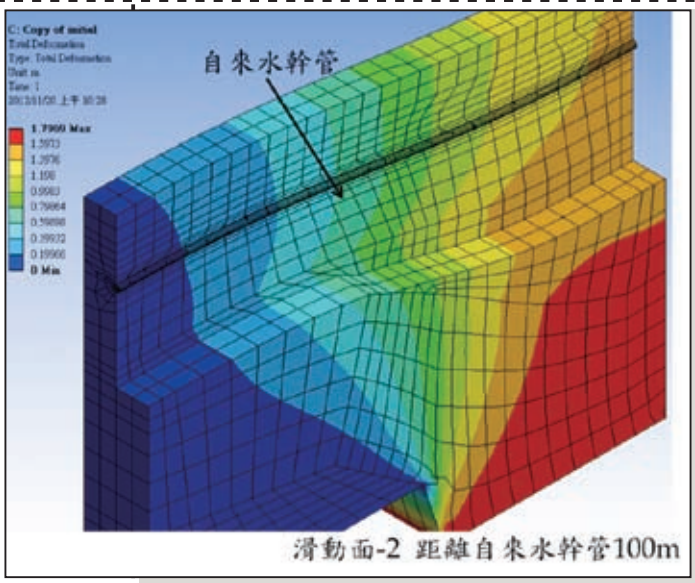


圖4a 距離100m斷層下滑錯動位移所造成之地盤變位等值圖

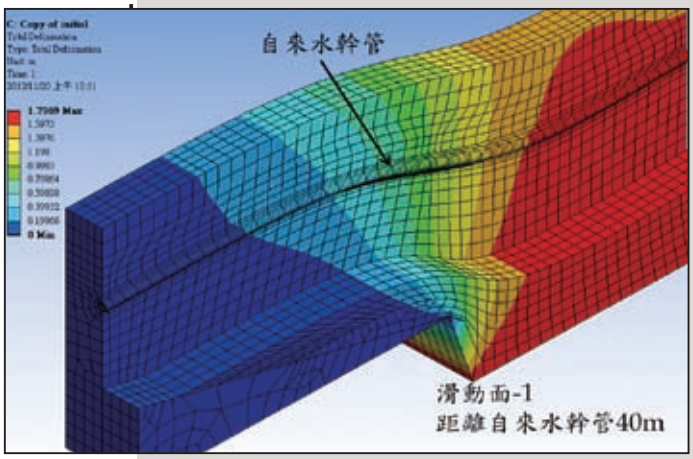


圖4b 距離40m斷層下滑錯動位移所造成之地盤變位等值圖

圖4 不同距離斷層下滑錯動位移造成地盤變位等值圖

振動模態對於整個系統振動搖晃的貢獻程度，即所謂參與因數(participation factor)。理論上連續體結構物系統具有無限多個自由度即具有無限個振動模態，惟因高頻振動模態對於體系的動力影響較小，因此通常只考慮少數幾個基本模態，將使數值計算工作大為減化且計算精度也能滿足要求。本工程數值計算實際執行時只要取前面的10個模態，如圖3所示，進行模態疊加分析已可達到足夠的精度。每個模態各有其對應的頻率或週期，根據各模態的頻率或週期再藉由國家地震工程研究中心所提供之適用於本工區的地震加速度反應譜，即可計算出本工程自來水管結構系統之前10模態所對應的地震反應。上述10個自來水管振動模態中，以第1模態(0.73Hz)及第4模態(1.83Hz)對於地震搖晃的反應貢獻最大，其貢獻度分別為70%及16%。因此，本工程自來水管系統於地震作用期間的擺動形狀約略像第1及第4模態的綜合表現。

二、斷層錯動位移量對於自來水管隧道的分析方法

活動斷層錯動所引發地震對於自來水管隧道之影響，除地震波搖晃對於自來水管隧道的影響外，地盤錯動所產生的永久或塑性變位，亦可能對自來水管隧道造成強制變位損害。大度線輸水管新設工程設計計畫，φ1200mm自來水幹管剛好跨過山腳斷層，為降低斷層錯動位移破壞自來水幹管而影響正常供水，對於跨過斷層地段管採用管中管設計，即以潛盾隧道及軟弱填充材包裹保護著DIP(Ductile Iron Pipe)自來水鑄鐵管，必要時於自來水鑄鐵管內設置多處柔性接頭，以吸收斷層錯動的大變位。具體分析方法係根據地質資料研判，未來斷層可能的錯動位置、變位量大小及斷層錯動型態等進行強制位移模擬。一般而言，距離斷層錯動位置愈遠，斷層錯動變位傳到自來水隧道的影響應愈小；逆斷層比正斷層的影響範圍來得大。大度路自來水幹管受到山腳斷層下滑錯動位移角度80°、下滑錯動位移量1.8m作用下，滑動面-1(距離自來水幹管40m)及滑動面-2(距離自來水幹管100m)傳遞到地盤及自來水管隧道之變位等值圖，如圖4a及4b所示。圖中顯示，滑動面-2附近的變位小於位於滑動面-1附近的變位，主要係因自來水管隧道位於滑動面-2附近，與斷層錯動下滑位置的距離較遠所造成。

參、案例1-鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)設計

鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)設計計畫係於台13線苗栗縣三義鄉水美街道路下方(木雕觀光商圈)以潛盾隧道內穿自來水管方式新設φ1000mm之送水管線路，總長度約1,416m，並與兩端淺埋之φ1000mm管線聯絡後供應銅鑼、苗栗地區之用水，相關位置詳圖5所示。

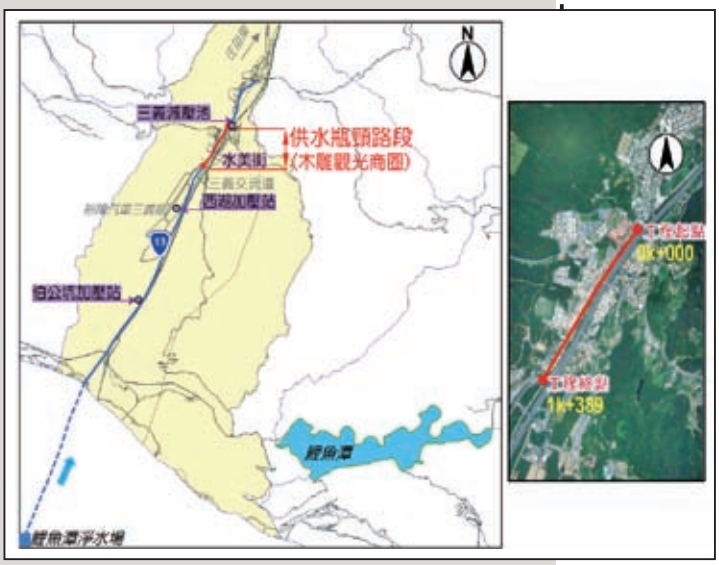


圖5 鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)輸水管網路位置圖

一、工地環境

本工程之潛盾發進井位於台水公司三義減壓池旁(台13線49k+000)，沿三義水美街(木雕街)，

圖6 鯉魚潭水源北送支援苗栗管(三)設計計畫沿線工址環境現況

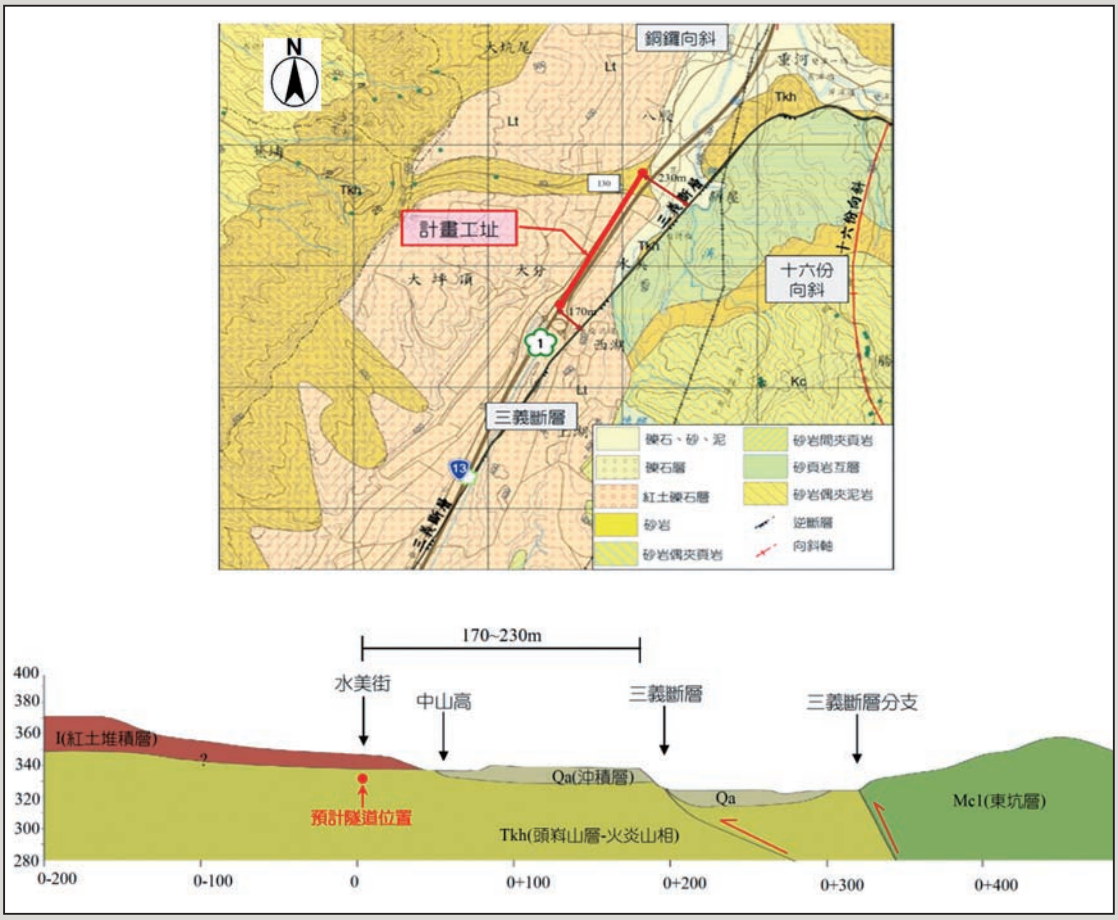


圖7 區域岩性分布圖

往南穿越木雕觀光商圈後至台13線50k+400處附近路旁設到達井為終點(里程1k+416)，沿線現況詳圖6所示。

二、地形、地質與水文

(一) 區域地形及地質

本工址位於丘陵區，海拔高度約310～365m之間。區域地質分區屬於西部麓山帶，由沉積岩組成，岩性以三義斷層為界線東西兩側有顯著的不同，東側砂頁互層為主，西側以礫石為主。計畫工址位於斷層西側紅土礫石堆積層上，現場調查卵礫石粒徑約達0.2～1.0m間。

本工址鄰近構造有銅鑼向斜、十六份向斜及三義斷層。三義斷層平行於工址東方約170～230m，屬於第一類活動斷層，破碎帶約200～400m寬，相關設計應考量斷層活動對管路、隧道與工作井之影響。本工程計畫沿線之區域岩性分佈及三義斷層位置如圖7所示。

(二) 水文概況

區域內有西湖溪由南向北流，沿線堆積許多河川堆積層的礫岩，工址位於河流西側的斜坡上，另本計畫設計期間於發進井及到達井佈設水位觀測井各1處，並量測沿線2處台灣自來水股份有限公司之鑽井水位資料，經對本工程沿線地下水位經(102.7～102.12)實際量測結果，顯示除局部路段約150m受季節性影響有地下水，大部分路線均在地下水位之上，相關水位

量測成果如圖8所示，於觀測期間發進井附近地下水位約在地表下5.7m～12.6m之間，到達井附近地下水位則約在地表下40m左右。

(三) 工程地質

經由鑽探資料顯示本計畫沿線地層除上覆約1～5m回填層及砂質粉土層外，其餘均為棕紅色之卵礫石層，卵礫石層之岩性為砂岩，其單軸抗壓強度介於753～1,475 kgf/cm^{2}之間，相關地層參數如表1所示。

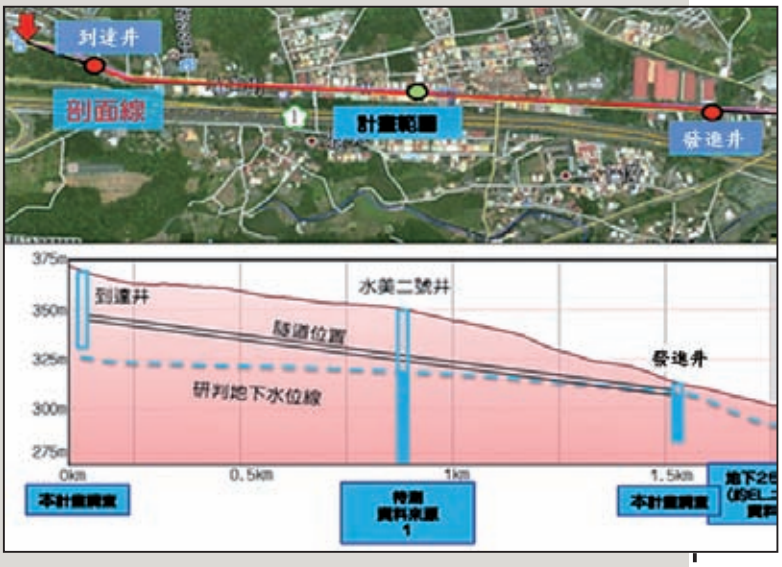


圖8 計畫沿線水位量測成果

表1 簡化地層及參數表

層次	土層描述	分佈深度	N值	γ_t (t/m^3)	c (t/m^2)	ϕ (deg.)	S_u (t/m^2)	C_c
1	回填層	1.2	-	1.80	0	29	-	-
2	砂質粉土層	3.2	9	1.91	0	31	5.6 *1	0.18 *2
3	卵礫石夾砂層	40	50	2.10	0	35	-	-

*1. 以S_u＝N/1.6(t/m^2)估算。

*2. 以C_c＝0.009(LL-10)估算。

三、潛盾隧道設計

(一) 隧道定線原則

本計畫隧道因內部需設置ϕ1000mm自來水管，故相關路線規劃原則除須考量隧道施工因素外，尚須考慮自來水延性鑄鐵管之穿管安裝作業，相關考量要點為(1)隧道之覆土厚(2)隧道路線之最大縱坡(3)隧道路線之最小排水縱坡。

(二) 隧道斷面規劃

1. 潛盾隧道內設置ϕ1000mm自來水管(延性鑄鐵管第1級-K型(D1K))，並需留人員巡檢步道與後續管材拆換維修之運輸通道。

2. 需考量人員進出隧道侷限空間前之送、排氣所需之通風路徑，俾利符合工安。

3. 規劃採內徑3200mm，環片200mm厚之潛盾隧道，規劃隧道斷面如圖9所示。

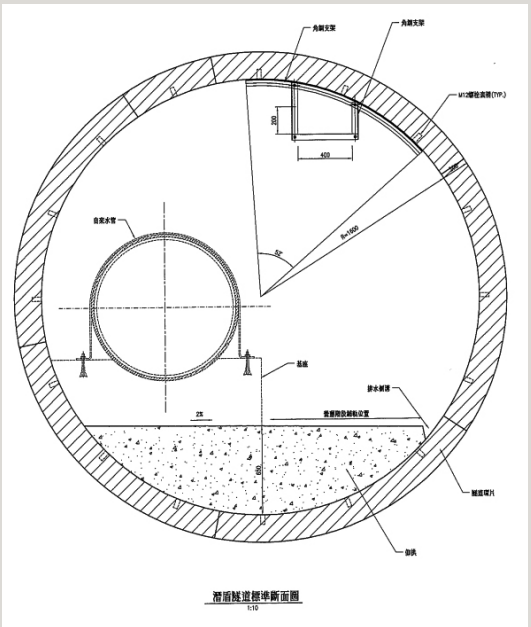


圖9 隧道斷面示意圖

(三) 潛盾環片設計

環片由三片A型環片、一片B2型、一片B1型環片及一片K型環片組合而成。RC環片厚度經分析，採200mm厚度規劃，K型環片採軸方向插入理念，以減少環片段差，地下水滲漏到襯砌內側之情形，另鋼筋混凝土環片之寬度則可採用1.0m潛盾環片資料如表2所示。

表2 RC環片襯砌設計一覽表

項目	說明
隧道內徑	3,200mm
襯砌厚度	200mm
襯砌長度	1,000mm
接頭個數	環間11個，片間12個
A、B型環片角度	67.5°
K型環片角度	梯型22.5°平推式
混凝土強度	450 kg/cm^2
接頭止水條	水膨脹性橡膠止水條

四、工作井設計

(一) 工作井尺寸：經考量潛盾發進與到達作業需求，規劃發進井內徑為10m，到達井內徑8m，以方便後續6m長D1K管吊放施工。

(二) 發進井：開挖深度約為12m，發進井採沉箱辦理，另為減少開挖沉陷影響減壓池，可考量採壓入輔助措施施工以確保安全，相關配置詳圖10及圖11所示。

(三) 到達井：開挖深度約29m，規劃採施工機具設備量體小且機動性高之圓型鋼襯鈑(Liner plate)工法施工，以減低對施工用地取得及交通衝擊影響，相關配置詳圖12及圖13所示。

圖10 發進井平面位置圖

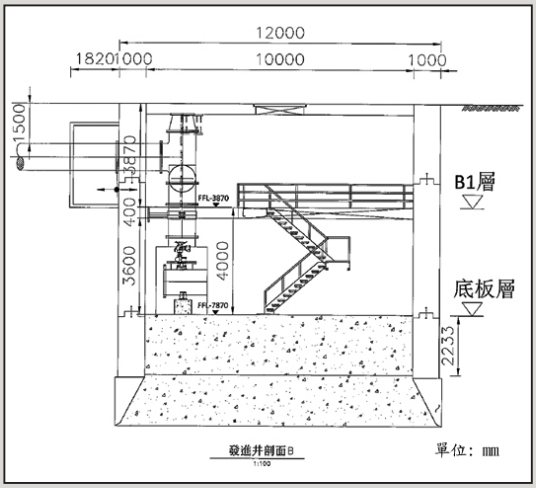


圖11 發進井A-A剖面圖

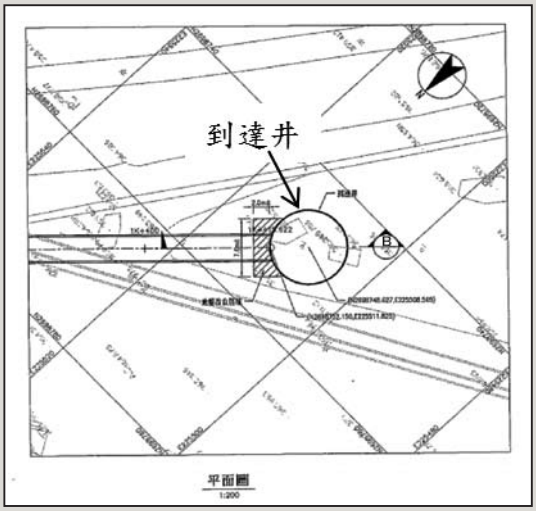


圖12 到達井平面位置圖

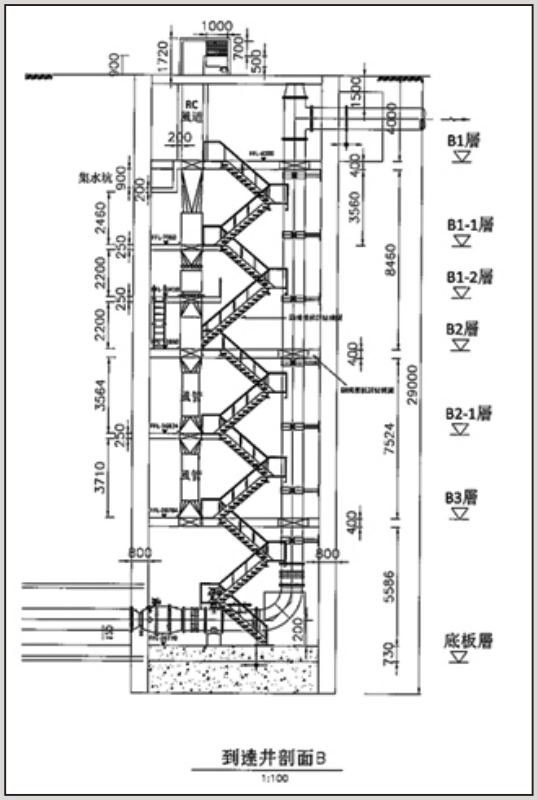


圖13 到達井B-B剖面圖

五、管線工程設計

(一) 管材研選

本計畫管線埋設方向與三義斷層平行(距離約200m)，就承受內外壓力、維修性、施工性等因素作通盤性考量如下：

1. 潛盾內穿管段：本工程潛盾內穿管段之管材採延性鑄鐵管第1級-K型接頭(D1K)為主。

2. 發進及到達井段：因工作井為永久性維護井，並採樓板設計，考量施工便利性及防蝕需求，故工作井豎管管材考量採SUS304設計。

3. 與上下游既有管銜接：建議與上下游管材一致，即採DIP第3級管。

(二) 管線設計

為達便利及維護需求，未來潛盾發進及到達井將作為永久操作維護閥井，並設置相關閥件，如表3所示，包含：(1)制水閥(蝶閥)：可達到分段停水維修功能；(2)排氣閥：設置於管段相對高點，除可降低水錘作用亦可減少復水時間；(3)排泥閥：可供管線清除積泥使用；(4)可撓管：設置於管線埋設不同介面處(隧道與直井及直井與傳統埋管處)，除可避免沉陷造成管線位移問題，亦可提供地震時保護管線功能。

表3 本工程發進井及到達井之閥栓配置表

閥井	功能需求	設置相關閥件
發進井	・與既有φ1000mm管線銜接 ・與既有減壓池φ400mm出水管銜接	1-φ1000mm電動蝶閥、 1-φ400mm彈性座封閥、 1-φ1000mm雙拉桿伸縮接頭、 1-φ400mm排氣閥、 2-φ1000mm可撓管
到達井	・與既有φ1000mm管線銜接	1-φ1000mm電動蝶閥、 1-φ1000mm雙拉桿伸縮接頭、 1-φ150mm排氣閥、 2-φ1000mm可撓管

肆、案例2-大度線輸水管新設工程設計

「大度線輸水管新設工程設計」計畫係屬於大度配水池暨加壓站至台水公司銜接點之大度淡海線φ1200mm輸水管潛盾工程，計畫目標與效益係滿足於民國104年底完成淡海新市鎮及附近區域之水源供應，相關位置詳圖14所示。

一、工地環境

圖14 大度線輸水管位置圖

本計畫管線起點發進井位於臺北市北投區大度配水池暨加壓站(里程0k+000)，出發後轉彎穿越貴子坑溪橋涵至大度路北側，沿大度路北側向西行，平行大度陸橋並橫交穿越捷運淡水線後，至中央北路與民權路交叉路口槽化島為工程終點(里程2k+249)，詳圖15所示。

二、地形、地質與水文

本計畫位於臺北盆地西北緣之關渡平原區，地形平緩，海拔高程多在10m以下。主要水系基隆河流經計畫管線南側，於關渡與淡水河滙流。計畫所在地層以現代沖積層為主(為臺北盆地最表層之松山層)，主要組成為未固結之砂泥堆積材料。在靠近計畫管線西端因進入大屯火山區，其地層以安山岩火山角礫岩為主，工址地層剖面如圖16所示。

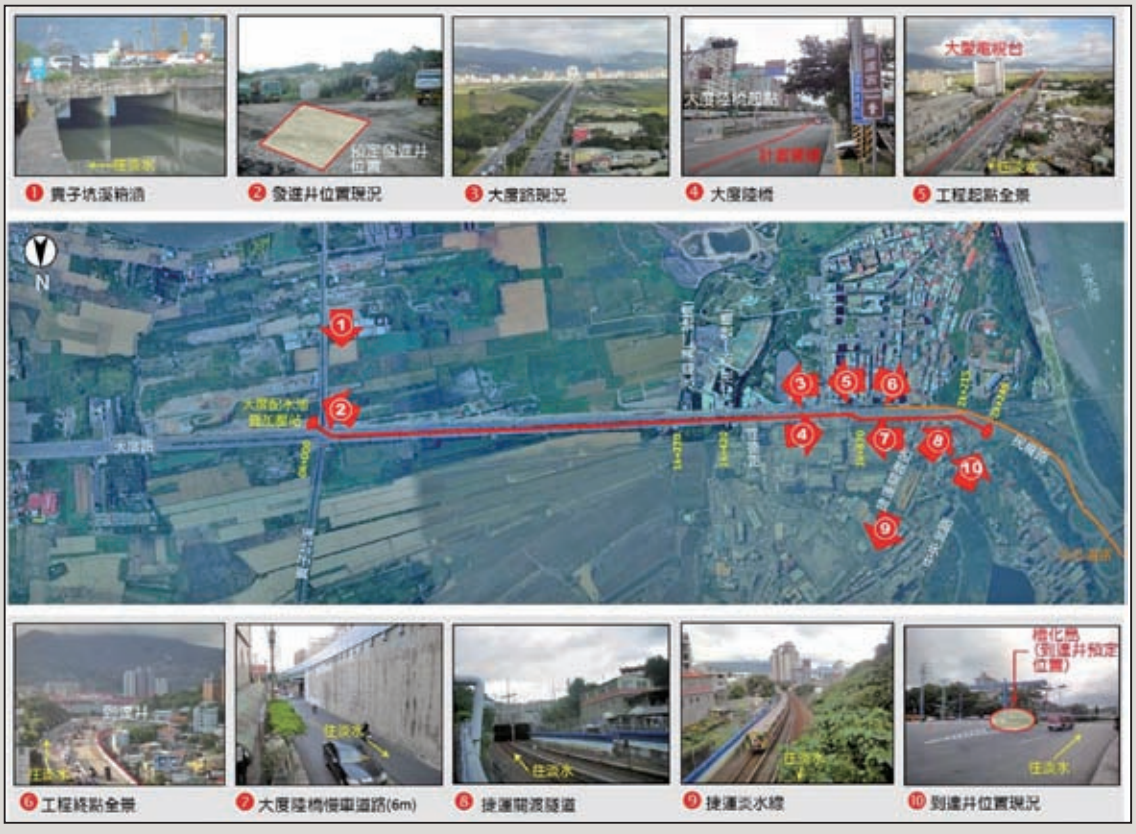


圖15 計畫沿線工址環境現況照片

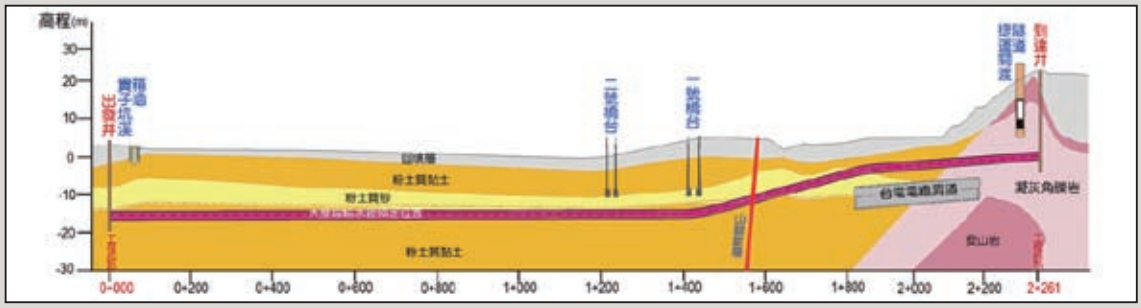


圖16 計畫沿線工址地層剖面

依經濟部中央地質調查所2010年活動斷層資料，本工址鄰近斷層由西向東依序為新莊斷層、金山斷層及山腳斷層，山腳斷層屬第二類活動斷層，其餘均為非活動斷層；新莊斷層約於工址西側0.2km 處通過，山腳斷層及金山斷層穿越本計畫管線，但均為臺北盆地松山層所覆蓋。

三、潛盾隧道設計

(一) 隧道定線原則

本工程為自來水管線，須以加壓方式克服地形限制，定線原則不考慮緩和曲線配置(舒適性)，於曲線段僅在直線與直線間插入適當半徑圓曲線。

水平定線上之主要考慮在於如何穿越地中障礙物之施工考量，相關因素有下列幾點：

1. 地中障礙物：既有橋涵基礎基樁及既有管線之位置，於定線過程中需確認，確保潛盾施工無礙。

2. 避免不必要之彎曲以減少DIP彎頭設置：盡量以直線設計，減少管材施工接合及運輸困難。

3. 確認定線範圍為公有之道路用地：定線於既有道路，若因閃避既有地中障礙物，也需定線於大度路兩側公有綠帶用地內。

依照上述之原則發展後，基本設計之平面線形呈東西向，定線範圍為自大度路配水池發進井0k+000～中央北路2k+249間，長約2,249m，共有8處曲線段，曲線半徑分別為125m～1,000m不等。

(二) 隧道斷面規劃

本工作潛盾隧道主要依下列項目進行設計：

1. 隧道需內穿 ϕ 1200mm U型DIP自來水管運送空間
2. DIP管兩側預留施工空間約400mm
3. 山腳斷層地震錯動變位餘裕空間
4. 可撓管耐震接頭尺寸接合施工方式

本工程隧道斷面綜合上述因素，訂出最小隧道內部直徑為2.1m，如圖17所示。

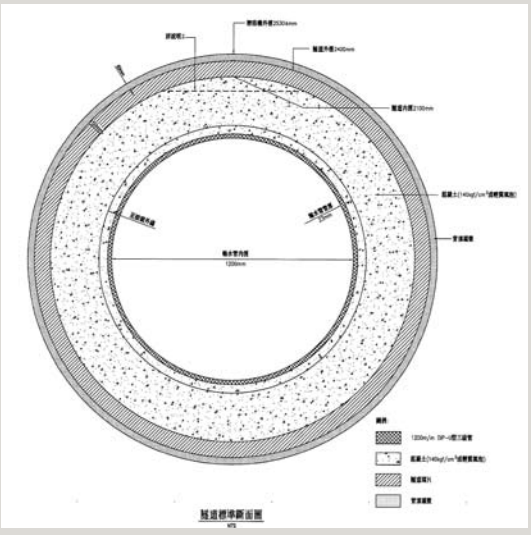


圖17 隧道斷面示意圖

(三) 潛盾環片設計

環片由三片A型環片、二片B型及一片K型環片組合而成。環片厚度經分析，採150mm厚度規劃，另混凝土環片之寬度則採用1.0m。潛盾環片資料如表4所示。

表4 RC環片襯砌基本設計一覽表

項目	說明
隧道內徑	2100mm
襯砌厚度	150mm
襯砌長度	1000mm
接頭個數	環間11個，片間12個
A、B型環片角度	65.45°
K型環片角度	梯型32.73°平推式
背填灌漿孔徑及個數	ϕ58mm×6
混凝土強度	450kg/cm^2
接頭止水條	水膨脹性橡膠止水條

四、工作井設計

(一) 工作井尺寸：經考量潛盾發進與到達作業需求，規劃發進井內徑為10m，到達井內徑8m，以方便後續6m長D3U管吊放施工。

(二) 發進井：由於發進井用地受限，採用圓形沉箱工法施作，可符合經濟、安全與環境需求，經評估以沉箱施工之準確性及安全性，在本工程沉積地層應為較佳之選擇，並於規範要求垂直度之限制。相關配置詳圖18及圖19所示。

(三) 到達井：到達井之地質狀況為凝灰角礫岩，若採用沉箱工法施作下沉困難，經評估以鋼襯板配合環型鋼加勁，在岩性地層為較佳之選擇。相關配置詳圖20及圖21所示。

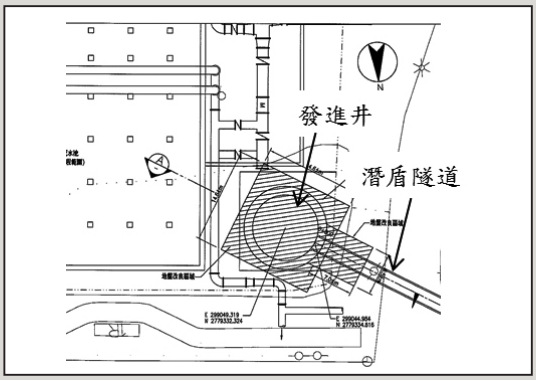


圖18 發進井平面位置圖

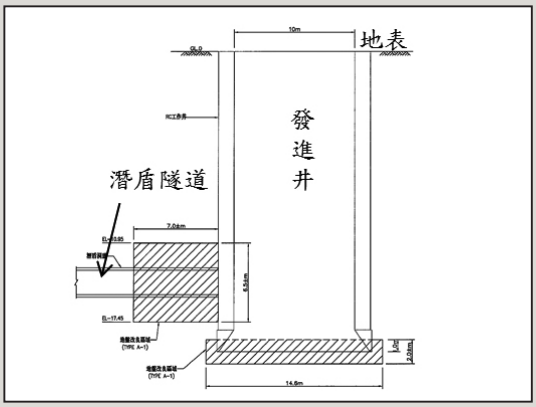


圖19 發進井A-A剖面圖

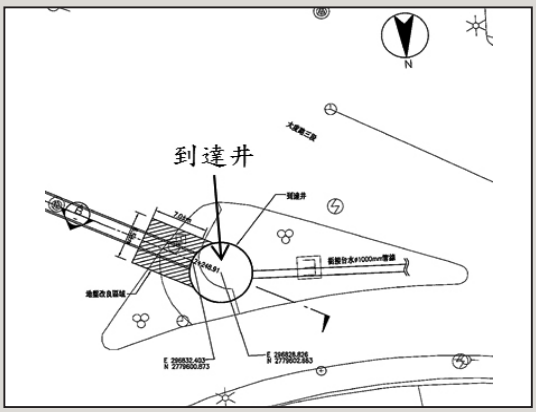


圖20 到達井平面位置圖

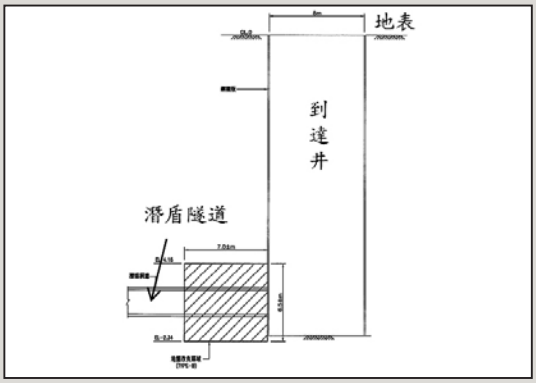


圖21 到達井B-B剖面圖

表5 本工程發進井及到達井之閥栓配置表

閥井	功能需求	設置相關閥件
發進井	・與大度加壓站出水管(壓力管)銜接 ・與大度路貴子坑溪φ1000mm水管橋銜接	1-φ1200mm電動蝶閥、1-φ1000mm電動蝶閥、 1-φ1200mm雙拉桿伸縮接頭、1-φ1000mm雙拉桿伸縮接頭、 1-φ200mm排氣閥、1-φ1200mm可撓管
到達井	・與台灣自來水公司φ1000mm輸水幹管銜接	2-φ1200mm可撓管、1-φ1200mm電動蝶閥、 1-φ1200mm雙拉桿伸縮接頭、1-φ200mm排氣閥、 1-φ400mm彈性座封閥

五、管線工程設計

(一) 管材研選

本工程潛盾隧道內穿管管種採用延性鑄鐵管第3級管-U型接頭(D3U)，明挖段採延性鑄鐵管第3級管-K型接頭(D3K)，U型及K型接頭型式即為柔性接頭，會隨著地盤變形而拉伸及彎曲，兩者均適用於一般管路，而U型接頭可用於需管內面接合之工法。

(二) 管線設計

為達便利操作及日後維護需求，本工程應於適當位置設置各種閥類，包含潛盾發進及到達井將作為永久操作維護閥井，設置相關閥件如表5所示。

伍、結論

一、自來水地下管線隧道通過斷層之設計，須考量斷層錯動所引發地震波搖晃及斷層錯動位移量對於自來水管的影響。

二、自來水管受到斷層錯動的影響，除DIP管的轉角檢核外，也須對DIP管的伸長量進行檢核，設計皆須納入考量以避免受震損壞。

三、自來水管隧道距離斷層錯動位置愈遠，斷層錯動變位傳到自來水隧道的影響則愈小。

四、為避免土壤與結構互制問題，自來水管受斷層錯動影響，建議將土壤與自來水管一併考慮進行數值分析計算。

參考文獻

1. 自來水管線耐震分析及震後緊急應變措施之研究(1/2)，國家實驗研究院國家地震工程研究中心，經濟部水利署，2010。
2. 大度線輸水管新設工程地球物理調查工作報告書，台灣世曦工程顧問股份有限公司， 2012。
3. 大度線輸水管新設工程委託設計服務案設計報告書，台灣世曦工程顧問股份有限公司，2013。
4. 經濟部中央地質調查所2010年活動斷層資料，經濟部中央地質調查所，2010。
5. ANSYS程式使用手冊，2013。