

第三章 國內外下水道潛盾施工遇礫石層案例

本研究收集國內外含礫石地盤內潛盾隧道施工案例，經整理、歸納後如附錄三〔26〕及〔28〕及表 14 所示，以下各節分別就潛盾機施工前之地盤改良輔助工法、開放式潛盾機高地下水位施工、密閉式潛盾機的改良與國內外潛盾施工遭遇礫石層施工案例分別加以說明探討，提出施工管理應注意事項，做為日後從事相關潛盾機遭遇礫石層施工相關案例參考，俾選擇較有利且安全、經濟、快速之潛盾機與施工輔助工法。

3.1 地盤改良輔助工法

下水道潛盾施工所採用之地盤改良工法大致可分為灌漿工法以及凍結工法兩種，以下就兩種工法其使用時機及國外相關案例進行討論。

3.1.1 灌漿工法

灌漿工法係於地層內灌入適當的材料（化學藥液、水泥漿或黏土液等）填塞土壤顆粒間之空隙，使其結合成一體，提高土壤強度，減少路面下地盤沈陷量及其影響範圍。

林耀煌（1994）〔33〕說明，灌漿材料之分類依材料性質、反應形式、施工方式而異，常用之分類方式，如圖 17 所示。



資料來源：摘自 林耀煌，1994〔33〕

其中化學灌漿地盤改良工法，使用最普遍，可分為滲透灌漿、填充灌漿、強制攪拌灌漿、置換灌漿、割裂灌漿、界層灌漿等多種，通常改良後的透水係數 K 須在 10^{-5} cm/sec~ 10^{-6} cm/sec之間，於鏡面破除時，才不會引起土砂崩坍現象。

灌漿工法為潛盾施工時最常用的輔助工法，如潛盾機發進口及到達段的保護、隧道及工作井周邊地盤的保護、潛盾隧道穿越高速公路、鐵路下方的保護、潛盾隧道穿越河川下方的保護，及潛盾隧道施工沿線之地表建築物的保護等。在收集到之國外案例中潛盾工程之灌漿工法，在卵礫石地盤採用灌漿工法，大致可分為兩種情形：第一種情形為潛盾開挖面或潛盾開挖面上方為砂土及礫石；第二種情形為當開挖面上半部有軟弱土壤，下半部為堅硬的礫石地層。

表 14 國內外潛盾機遭遇礫石層案例歸納表

分類方式		案例編號	總計	
潛盾機分類	開放式	手挖式	②,⑧,⑭,⑮	4部
		半機械式	③,④,⑤,⑥,⑦,⑨,⑳,㉓,㉔,㉕	10部
		機械式	竹科放流管工程採用2部	2部
	密閉式	泥水加壓式	⑫,⑬,㉑,㉒,1-1,2,4,7,8,15,18,24,31,34-1,38-1,39,43,45	18部
		土壓平衡式	①,⑩,⑪,⑯,㉖,㉗,1-2,3-1,3-2,5,8,9,10,11,12,13,14,17,20,21-1,21-2,21-3,22,23,25,26,28,29,30,32,34-2,34-3,35,36,37,38-2,41,42,44 竹科放流管工程採用4部	43部
		水壓式土壓平衡	⑰,⑱,⑲	3部
高地下水之降水 壓氣工法		降水工法	④,⑤,⑥,㉓,㉔	5部
		壓氣工法	④,⑧,⑩	3部
		大直徑降水井	③	1部
密閉式潛盾機改良		切削輪	①,⑪,⑫,⑬,⑯,⑰,⑱,⑲,㉖	9部
		切削盤	1-1,1-2,2,11,18,23,28,29,31	9部
		滾軸鑽頭	8,9,10,12,15,21-1,21-3,22,24,25,26,27,30,32,34-1,34-3,35	17部
		機內碎石機或篩石機或碎石艙	4,6,15,18,24,34-1,45	7部
		泡沫注入設備	⑪,⑯	2部
		錐式閘門與水力閘門	①,⑰,⑱,⑲	4部
		螺運機	㉕,㉖,13,20,26,32,竹科4部	10部
		帶式螺運機	10,12,22,23,27,30	6部
地盤改良 輔助工法		灌漿工法	①,②,③,⑤,⑥,⑨,⑫,1-3,6,7,13,21,22,36	14部
		冰凍工法	①,②,⑫	3部
		絕緣壁工法	26	1部

3.1.2 凍結工法

此工法係將地下水凍結，使其不能流動，而免於湧砂漏水。惟臺灣地屬亞熱帶，地下水充沛，地下流速不正常，較不適合使用。〔34〕；國內台電龍門(核四)計畫循環冷卻水出水道工程，到達井之排水頭於海面下在止水灌漿後，於潛盾機機到達時即採冷凍工法施工密接〔35〕。地盤凍結工法(ground freezing method)係將凍結管(freezing pipe)埋設在欲處理的土層內，並在管內流通極低溫之冷凍液(如氯化鈣、液態氮等)，利用冷凍液的循環來吸收地盤中的熱能。經過一段時間後，凍結管周圍的土壤亦隨之冷卻，待土層內溫度降至水的凍結點以下時，土壤中的土顆粒和孔隙中的水逐漸凍結成固體，即形成所謂的凍土(frozen soil)。被凍結的土壤乃是以凍結管為中心呈年輪狀(同心圓狀)成長，如果多支凍結管加以適當的間隔排列，利用相鄰的凍土柱之管列效應，可在地盤中形成任意形狀及大小的凍土牆，達到支撐外部壓力，以及發揮阻隔地下水的效用。地盤凍結工法可廣泛應用於各種不同的土質，土壤經凍結後具有相當強度；但值得注意的是，若需凍結之土壤水分十分稀少，其凍結效果將不理想，因為凍結的主體是水，所以足夠水分為土壤凍結之必要條件〔26〕。

3.2 開放式潛盾機高地下水位施工

在含卵礫石之地層，由於礫石的粒徑比例大，卵礫石地層多數會具有較高的透水係數。以開放式潛盾機施工時，開挖面可能須先克服遭遇高地下水壓造成地下水流滲入開挖面問題。故如何有效地把地下水位降至隧道開挖面之下，是使用開放式潛盾機在開挖卵礫石地層必須解決的問題。潛盾機的型式的選擇，對地下水壓的抵抗能力有相當大的影響。密閉式潛盾機因為開挖面呈密閉的平衡狀態，且潛盾機內部有平衡的設備，如水壓式土壓平衡潛盾機可以藉由供給水壓管提供適當的水壓來平衡開挖面的高地下水壓，泥水式潛盾機也可以利用加壓之皂土液來穩定開挖面及平衡外部高地下水壓。開放式潛盾機使用人工或機械設備直接挖除隧道土體，缺乏有效擋水設備以平衡潛盾機外部的水壓，故逐漸少採用。在卵礫石地層內開挖時，雖然在開挖的過程中，不必太過擔心卵礫石粒徑及硬度問題，但在混合地盤內掘進的過程中，如何有效的穩定隧道開挖面及降低地下水壓變成最重要的課題。

3.2.1 降低水位工法

開放式潛盾機在開挖卵礫石地層時，為了避免地下水滲入潛盾開挖面，在潛盾開挖之前，常利用點井或深井、真空抽水等方式將地下水位降低，但抽水可能增加地層內之有效應力，易造成對地盤產生壓密作用引致地表地盤沉陷，使鄰近結構物受到損害，必須小心控制及實施安全監測掌握現況。一般點井以10公尺深為限，有效範圍為7公尺，若欲降低更深之地下水位須採深井、真空抽水等方式。

3.2.2 大直徑降水井〔26〕

潛盾隧道所採用對抗高地下水壓的工法有許多種，若採用壓氣工法對抗地下水壓，隧道上方覆土層雖厚，但多為高滲透性之礫石，

為了避免受壓氣體漏失導致開挖面土體崩落的危險，所以此處採降水工法來應付高地下水壓。

降水工法又可分為點井法、水平降水橫坑(horizontal dewatering gallery) 等。在嚴密的地下水文調查後，可考慮降低施工成本，採用大直徑降水井 (large-diameter dewatering wall) 來降低地下水位。

在大直徑降水井施工前，先調查地下水域的分佈範圍及土層之透水係數，依據現地透水試驗得到的滲透參數，施作大直徑降水井。藉由降水井抽水將地下水位降低至仰拱之下，然後依據降水井抽水資料作為下一口降水井的設計參考，以決定下一口降水井位置及施工時間。

Hagmann and Andraskay (1981) [36] 評估後指出，藉由施工中量取之地下水滲流參數來作為降水井施工的參考，其施工成本與可靠性，比在隧道施工前，藉由數量龐大的點井一次把地下水位降低為佳。

3.2.3 壓氣工法

壓氣工法原理方法是潛盾隧道內部設置壓氣室注入壓縮空氣，以壓縮空氣之壓力抑制地下水壓，阻止土壤中地下水滲入開挖面，而維持開挖面的穩定。本工法需在潛盾機盾首處附近設置一隔艙，僅在開挖面作業室加壓，可避免施工人員暴露於壓氣環境下，提高施工人員之安全性。並在盾首隔艙裝設一小型氣閘室，做為緊急、障礙物排除或維修之用。

對於潛盾開挖面地下水的排除，在完善的施工管理下，壓氣工法為可靠的工法，因壓氣對地下水、環境及地表結構物影響最小，施工中不需先行降水，不受開挖斷面大小、形狀的限制影響，亦不會造成路面先期沉陷，且不會遺留永久之地下擋水物。但必須要保持壓氣壓之穩定，不穩定會易造成地下水忽升忽降造成湧砂或造成臨近上方道路造成崩坍下陷及鄰近建物造成傾斜之災害發生。

蔡茂生 [37] 說明，壓氣工法施工時，需注意防範漏氣、噴發等事故，並需經常檢測施工範圍之空氣狀況，避免發生施工人員缺氧等事故。進出壓氣施工區時，四周壓力的快速上升或下降，可能造成人員罹患潛水夫病 (the bends)，若未予適當之管制，此輔助工法可能對經常出入壓氣區域之工作人員造成傷害。

廖銘洋 [38] 指出，依壓氣工法之運作及壓氣施作之區域，大致可分為下列三種方式：

隧道開挖區全體壓氣為最具代表性之壓氣方式，在隧道壓氣區設置隔艙及氣閘室，使開挖側之隧道充份壓氣。氣閘室之設置可依隧道斷面之大小，將材料與人員氣閘室分開或共同使用。使用本方法之特徵敘述如下：

1. 隨著隧道之掘進壓氣部分容積增大，因漏氣量增加將使輸氣量激增，有引起隧道內部壓力變化安全問題之可能。
2. 隧道周圍土壤因壓氣作用，有止水與安定地盤之效果，將有助於背填灌漿及減少地層沉陷。
3. 可減少盾尾封圈之湧水及流砂現象，有利於環片之組裝。

4. 若在中小斷面施作，人員與材料共用氣閘室，進出時間受到限制，將使作業效率嚴重降低。
5. 因壓氣範圍侷限於潛盾機開挖面，壓氣儲蓄之容積較小，在地層漏氣量增大時，易使壓氣壓力急遽下降，有湧水或流砂之危險。
6. 潛盾機盾首限制壓氣
開放式潛盾機在地下水位以下施工，除上述降水方法之外，常採用壓氣工法，藉由潛盾機內部提供壓縮空氣來抵抗外部之地下水壓，避免滲水及維持開挖面的穩定。
7. 壓氣工法有其使用上的限制，若覆土層太薄，採用壓氣工法可能因為潛盾機上方的向下覆土壓力不足以對抗向上之氣壓，發生氣體漏失的現象。若上部地層非細顆粒的土壤，如黏土，所加之氣壓可能沿著土壤顆粒間的孔隙逸散至地表，使開挖面穩定性降低，因此土體隨著開挖面崩落。採用壓氣工法除了要注意地下可能的氣體流失路徑，如砂土、礫石以及鑽孔等，對於作業人員的施工安全，也要特別注意。作業人員應依據施工安全規範，避免在壓力環境施工過久，及避免在施工後壓力解除過快，導致作業人員健康的傷害產生職業病。
8. 開放式潛盾機（手挖式、半機械式）在卵礫石地層的案例中，有三個案例採用壓氣工法來對付遭遇高透水性質及高地下水壓的狀況。這三個案例的共同特性為隧道中心線覆土厚均超過 11 m，且開挖面上方有黏土層或粉土層的存在〔26〕。在此條件下，壓氣工法才適用於開放式潛盾機於卵礫石地層的施工，在日本已很少使用開放式潛盾機，在日本之潛盾工法中，潛盾機採用之趨勢為密閉型96.9%、開放型2.6%、其他型式0.5%，密閉型占絕大多數，以確保施工人員安全〔39〕。

3.3 密閉式潛盾機的改良

在卵礫石混合地盤內施工以密閉式潛盾機施工，在收集到之國外案例中，為了克服卵礫石大粒徑、高硬度、及高透水性的特性，潛盾機加裝特定設備以利於通過卵礫石地盤。以下各節分別介紹切削輪與切削齒、水力閘門、及卵礫石處理設備與螺運機等特定潛盾機改良項目。

3.3.1 切削輪與切削齒

密閉式潛盾機開挖卵礫石土體的利器為切削輪與切削齒，藉由切刀盤的旋轉，固定在切刀盤上的切削輪與切削齒也跟著研磨開挖面的土體。一般密閉式潛盾機的切刀盤都會安裝切削齒，如圖 18〔40〕所示。若遭遇堅硬的卵礫石層，更可能在切刀盤上加裝切削輪，用以破除大粒徑的卵石，如圖 19及圖21〔41〕所示。如卵礫石係在開挖面前方(尚未進入潛盾機內)即予以破碎者，稱為「1次破碎」，通常在面板上裝設滾動切刀(Roller Cutter)，潛盾機頭耐久性及其可更換性之切刀，各類切刀適用之岩石單軸壓縮強度詳表11及礫石破碎型土壓平衡式潛盾機，如圖 21。



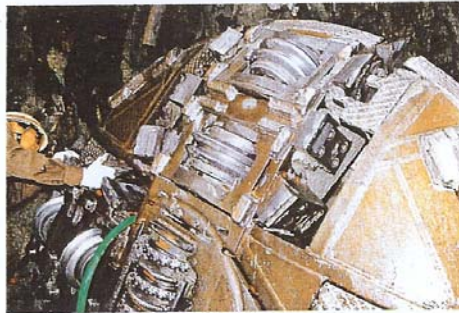
圖18 附切削齒之切刀盤適合切削卵礫石及流木
 資料來源：(after Hitachi Zosen, 1990)〔40〕

	リング交換型	一体型
硬岩	○	
軟岩	○	○
礫		○

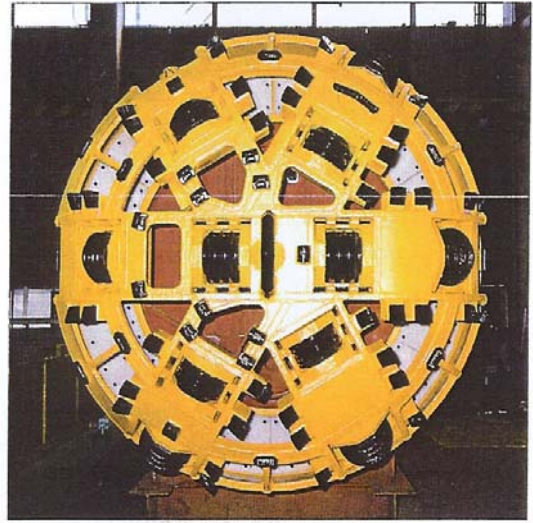
圖19 切削硬岩、軟岩及礫石之切削輪
 資料來源：(after Mitsubishi Heavy Industry, 1997)〔41〕



切刃維修人孔



切刃之維修及更換



具備滾動切刃之潛盾機

圖 20 潛盾機頭耐久性及其可更換性之切刃

表 15 各類切刃適用之岩石單軸壓縮強度

切刃種類	岩石強度			單軸壓縮強度 (kg/cm ²)			地盤種類
	500	1000	1500	500	1000	1500	
齒輪型 (gear)	100	300		1000	1200		軟岩~中硬岩
刃頭植入型 (chip insert)				800	1000		中硬岩~硬岩
盤型 (disc)	200	700	900				軟岩、卵礫石

資料來源：圖 20 及表 15 摘自中華顧問工程司 大地工程部，1996 年 7 月〔28〕

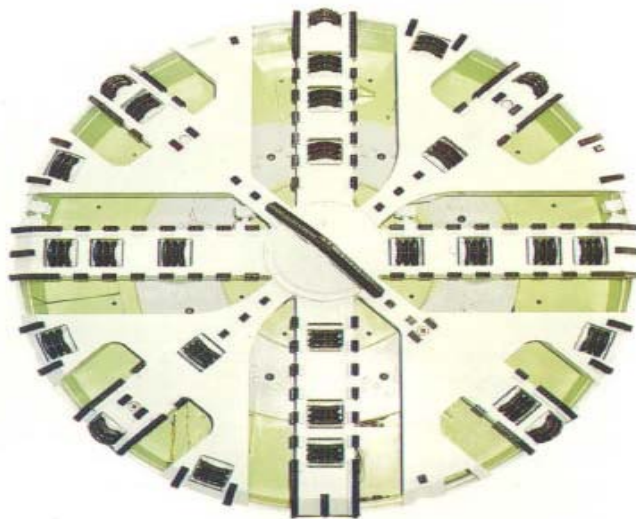


圖 21 直徑6.71 m 礫石破碎型土壓平衡式潛盾機

資料來源：(after Mitsubishi Heavy Industry, 1997)〔41〕

3.3.2 潛盾機千斤頂推力及水力閘門

潛盾機千斤頂推力遇卵礫石層通常使用較大：根據日本潛盾機遭遇卵礫石層千斤頂推力使用從91~292tf/m²，平均值134 tf/m²，較一般地層潛盾機之千斤頂推力使用從110~120tf/m²，高出10%~20%〔28〕。

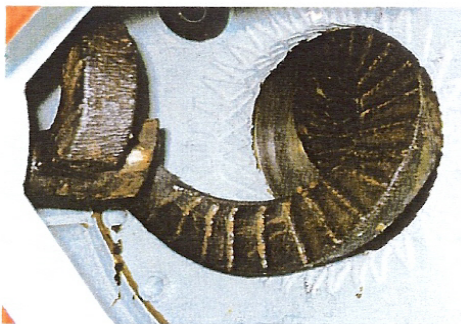
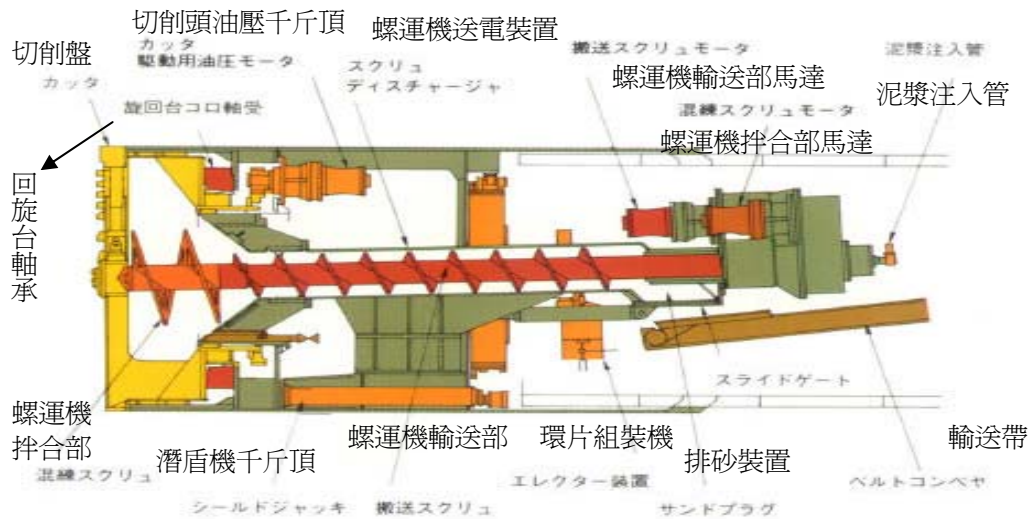
在卵礫石混合地盤，伴隨高地下水壓情況下施工，大阪防洪計劃案例之Block 3採土壓平衡式潛盾機施工，在螺運管後方加裝錐式閘門，藉由閘門開口大小，來控制排土量以及對抗開挖面地下水壓。避免砂土在潛盾機掘進過程中，因為切刃盤旋轉及向前推擠造成盾首土體之地下水壓升高，超額孔隙水壓造成砂土之有效應力下降，使開挖面穩定性下降。

水壓式土壓平衡潛盾機，也有類似錐式閘門的設備。在螺運機後方的水力閘門，一方面藉由閘門開口的大小調整開挖土量，一方面也可以對抗地下水壓。當遇到緊急事件，可以關閉水力閘門，避免開挖面的土壤繼續進入潛盾機內。

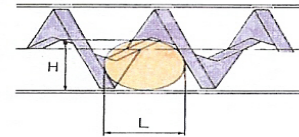
聖地牙哥市南灣海放管計劃，潛盾隧道在聖地牙哥層內開挖，該案例即採用泡沫工法輔助，將化學泡沫注入開挖面及土倉中，以增加土體塑性和開挖面之穩定性。此外，因為開挖土體含有 70% 以上的礫石，所以在切削的過程中隨時以泡沫注入開挖面，減少切削卵礫石過程中的磨損及降低切刃盤所需要的扭力，並使開挖土體的流動性增加，有利於排土過程〔26〕。

3.3.3 卵礫石處理設備與螺運機

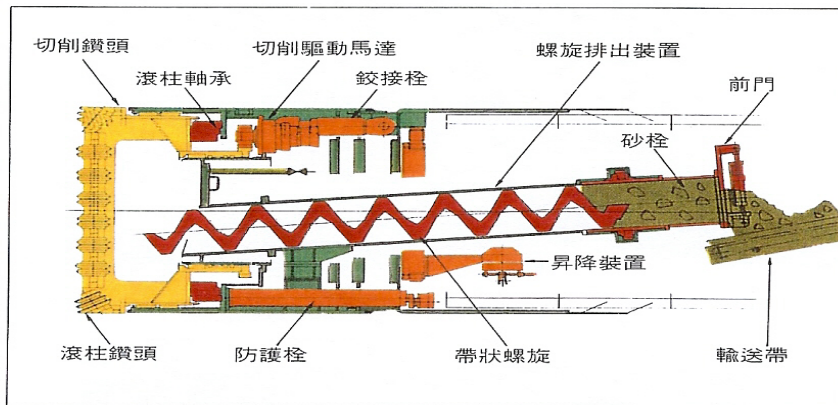
潛盾機掘進後之卵礫石粒徑較大，所以要切削成適合螺運機通過的尺寸土壓平衡式潛盾機才能進行排土的程序。如圖22所示，一般的潛盾機採螺桿式螺運機，能通過的卵礫石粒徑視機身粗細而定，通常約為螺運機直徑 1/3，帶狀螺旋式螺運機因為沒有軸心阻擋卵礫石的通過，對相同直徑的螺運機而言，帶狀螺旋式螺運機較螺桿式螺運機能夠容納更大粒徑的卵礫石。



帶式螺運機



帶式螺運機之可排除礫徑



具帶式螺運機之潛盾機示意圖

圖22 螺桿式與帶狀螺旋式螺運機之比較

資料來源：(after Hitachi Zosen Corporation, 1990) [40]

3.4 國內外潛盾施工遭遇卵礫石層案例探討

依據國內外潛盾施工遭遇到礫石地層案例，作分類探討如下表：
所採用之潛盾機及型式

1. 開放型---手挖式潛盾機。
2. 開放型---半機械式潛盾機。
3. 開放型---機械式潛盾機。

4. 密閉型——泥水式潛盾機。
5. 密閉型——土壓平衡式潛盾機。
6. 密閉型——水壓式土壓平衡潛盾機。
7. 密閉型——泥水加壓式及土壓式潛盾機 (T.B.M)。

3.4.1 開放型——手挖式潛盾機

手挖式潛盾機於卵礫石地層施工，不用考慮卵礫石粒徑大小以及礫石本身強度對潛盾機切削及出碴等造成之影響。在施工過程中，所遭遇之主要問題是要如何維持開挖面穩定以及處理卵礫石層高透水性問題。手挖式潛盾機，如圖 23 所示，施工案例參考湯程傑〔26〕論文：

1. 計劃緣由：大阪防洪計劃 (Kitamura and Ohbayashi 1981)〔42〕於 1974 年在大阪市東方建造 8.8 km 長之下水道。
2. 施工項目：本計劃共分為 7 個 Block，其中 Block 2 即採用手挖式潛盾機。Block 2 全長 1.6 km，以手挖式潛盾機配合壓氣工法施工，如圖 24 所示。
3. 施工目的：在下水道施工前，大雨所降之雨水直接由地面流向 Hiraro 河，地面逕流區域造成大阪市東方許多地區洪水氾濫。大阪防洪計劃使原先地面逕流的部分直接流入下水道內 (Tennohji-Benten Giant Trunk Sewer) 然後直接流至 Benten 抽水站，最後排至 Ohkawa 河，以解決大阪市東方區域的水患。
4. 地質條件：如圖 25 所示，可分為砂土、沖積黏土以及礫石三個部分。
5. 重點問題：如何維持開挖面穩定施工為最主要的問題。
6. 處理解決對策：將土壤改良形成一冰凍區 (frozen zone)，以控制開挖面穩定問題及控制地下水滲流問題。
7. 手挖式潛盾機施工優點：其優點為較容易將卵礫石自地層中開挖並運至地表，適用於卵礫石地層。
8. 手挖式潛盾機施工缺點：開放式潛盾機施工常需配合輔助工法，如降水工法、壓氣工法、灌漿工法、冰凍工法等，以穩定開挖面及控制地下水滲入隧道造成開挖面不穩定之問題。

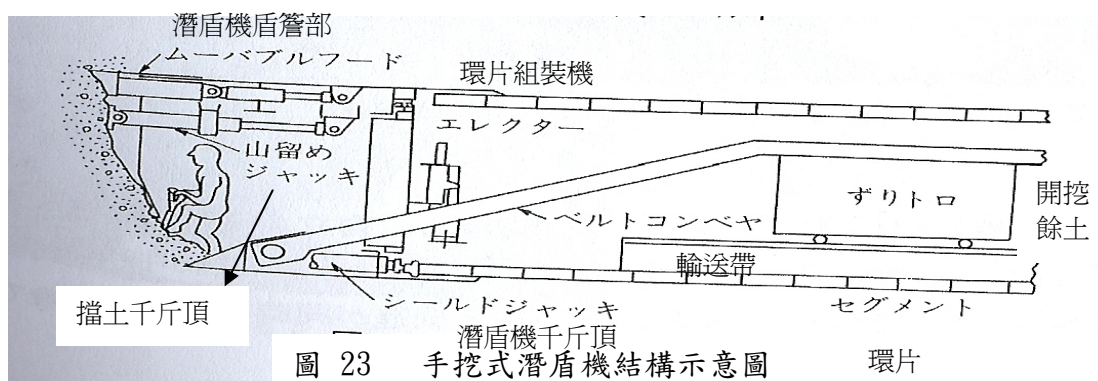


圖 23 手挖式潛盾機結構示意圖 環片

資料來源：摘自 日本潛盾機 (シールド)工法入門，平成 4 年〔4〕。



圖 24 大阪防洪計劃 (Tenuhji-Benten Giant Trunk Sewer)
 資料來源：(after Kitamura and Ohbayashi, 1981)〔42〕

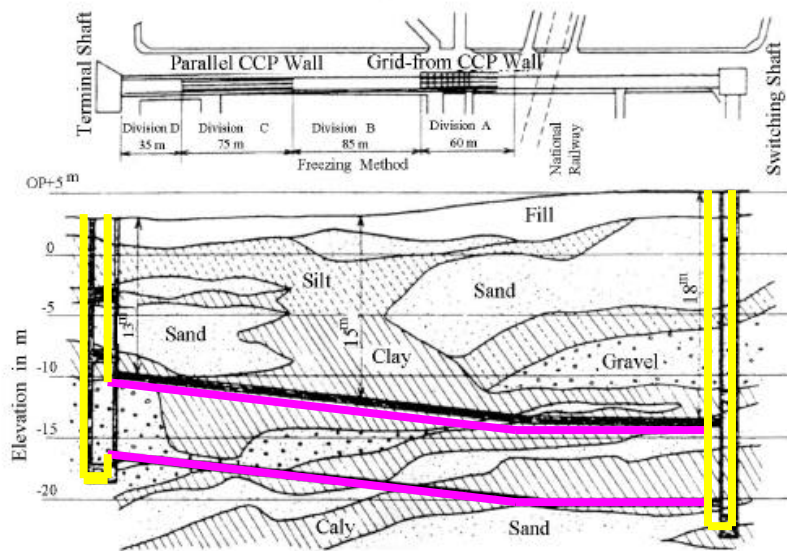


圖 25 Tenuhji-Benten 地下水主幹管 Block 2 沿線及土層斷面
 資料來源：(after Kitamura and Ohbayashi, 1981)〔42〕

3.4.2 開放型——半機械式潛盾機

半機械式潛盾機屬於開放型潛盾機的一種，使用機械手臂(digger)直接開挖，開挖出之棄土經由輸送帶以台車運出隧道外。所以卵礫石的粒徑大小及卵礫石本身高強度的特性較不影響開挖的過程。

半機械式潛盾機型式如圖 26 所示，施工案例參考湯程傑〔26〕論文：

1. 計劃緣由：華盛頓都會區運輸局(Washington Metropolitan Area Transit Authority, WMATA)〔43〕興建之地鐵系統(Butler and Hampton 1975)在 A-2 段以半機械式潛盾機施作雙隧道。
2. 施工項目：在潛盾隧道通過財政大樓廣場(treasure yard)由於建物本身的重要性以及第一條隧道施工過程造成之相當大之地表沉陷(270mm)準備興建第二條隧道施工。
3. 施工目的：興建第二條隧道施工在經過財政大樓廣場下方時，施工單位以化學灌漿將隧道上方砂土及礫石改良成一長方體之改良土體區，以增加開挖面上部砂土及礫石之穩定性，減少地表沉陷量。由監測資料得知，第二條隧道在灌漿區域施工所造成之地表沉陷小於50mm。
4. 地質條件：其地質狀況，隧道上方以及頂拱附近之地質為砂土及礫石其中夾雜卵石及巨石，隧道中心線為砂質黏土。
5. 重點問題：在高地下水位下，如何確保開挖面穩定。
6. 處理解決對策：財政大樓廣場下方的隧道施工中，隧道開挖前地下水位約在頂拱附近，由於開挖面為開放形式，所以採用抽水井將地下水位降低至仰拱以下，以確保開挖面穩定。但抽水井並無法有效的將地下水位降低至開挖面之下，故在開挖的過程中，滲入隧道之地下水將開挖面上部砂土和礫石層內的細粒料掏出，造成開挖面的不穩定，使地表沉陷量變大，致財政大樓附近所測得的地表沉陷量為90mm—330mm。
7. 半機械式潛盾機施工優點：半機械式潛盾機開挖的速度大於手挖式潛盾機，但是同樣要注意卵礫石層高滲透性的特質。
8. 半機械式潛盾機施工缺點：採用開放式潛盾機在卵礫石地層施工，常需配合降水工法或以灌漿改良地盤，使卵礫石層不致崩落向開挖面，造成大量之地表沉陷量。



圖 26 半機械式潛盾機

資料來源：摘自 日本三菱重工業株式會社提供，2002〔44〕。

3.4.3 開放型—機械式潛盾機

竹科第二加壓站至污水處理廠潛盾案例簡介：

本工程為自新竹科學園區既有第一、二加壓站之進流污水管線截流後，分別埋設 $\phi 700\text{mm}$ 及 $\phi 1200\text{mm}$ RCP導入新設之污水管線，順流入污水處理廠之前處理設施。新設污水管線採潛盾掘進工法施工，內徑為1.65公尺，第一次襯砌為鋼製環片，二次襯砌為無筋混凝土(II型水泥)加設耐酸鹼內襯PVC防蝕軟片，沿線並作臨時地盤改良，並設置匯流井與污水處理廠前處理設施銜接；至於第一、二加壓站則設置C1~C3人孔及C4接合井以連接現有進流污水管線，沿線中間並設置M2人孔一座，由於本管線採重力排放方式，管線埋設深度最深達19公尺，為避免妨礙園區道路交通及影響現有地下管線，全線採用潛盾施工法施工，為縮短施工時程，本工程同時啟用二部潛盾機施作，並分別自M1及M2工作井分別掘進，詳如圖27及本工程所選擇的潛盾機採用開放式-機械式潛盾機，如圖28所示。

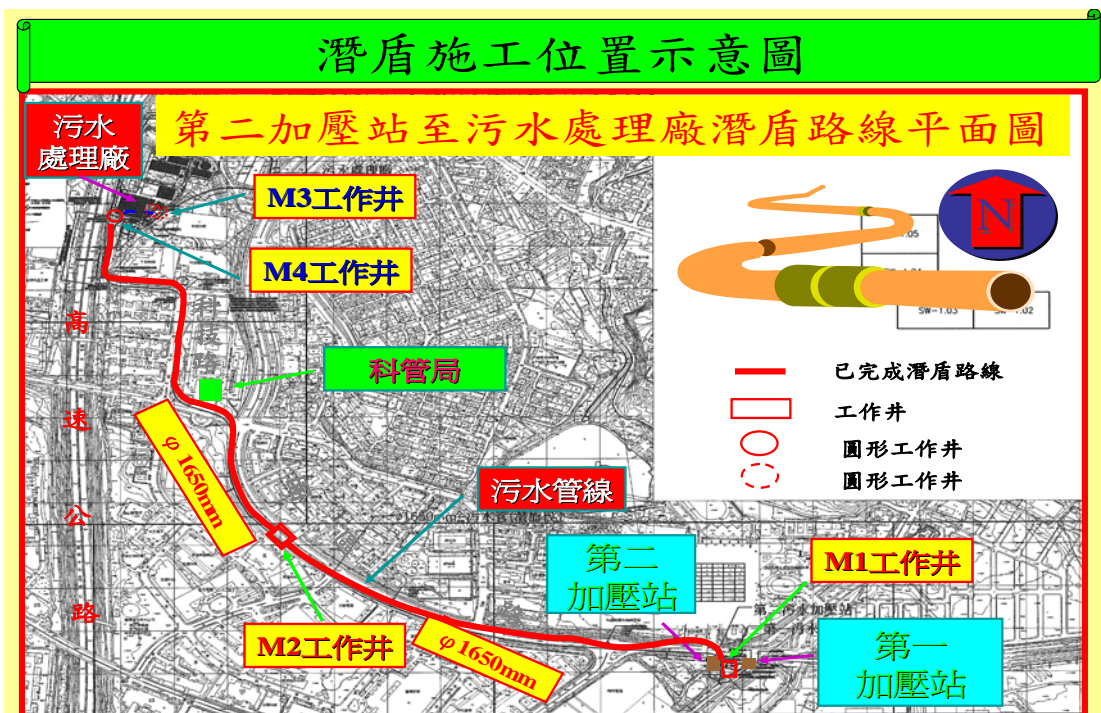


圖 27 第二加壓站至污水處理廠潛盾路線平面圖

本工程由第二加壓站之 M1 發進井沿園區一路，左轉新安路再右轉工業東二路，再左轉科技五路最後到污水處理廠 M3 到達井，全長 1934 公尺。本調查基地位於新竹科學工業園區內，由現場鑽探結果研判主要為紅土礫石地層，係由紅土及其下十數公尺之卵礫石砂土等所組成。本基地現場鑽探最大深度為 25 公尺試驗 8 個鑽孔，就本調查基地其地層分佈及其性質簡單說明如下：

1. 第一層次：表土紅土層，從 0.0~最大 3.35 間，主要係由粘土、粉砂、細砂及粗砂夾小礫石所組成之地層，色呈棕黃色。依室內土壤一般物理性試驗結果，土壤單位重平均 2.10t/m^3 ，而自然含水量平均 15.13%，根據土壤統一分類法則，本層次之土壤分類為 SM。
2. 第二層次：卵礫石層，厚度在 10.5 公尺至 24.35 公尺之間，主要係由卵礫石及具有膠結性之紅土與砂之混合填充物所組成之地層，色呈棕黃色。礫

石由圓形至次圓形之石英岩或砂岩礫石組成，直徑由數公分至數十公分，平均礫石量約在50%~60%之間，土壤單位重平均 $2.22\text{t}/\text{m}^3$ ，土壤直接剪力強度凝聚力 c 值平均約在 $2.67\text{t}/\text{m}^3$ ，內摩擦角 ϕ 平均約在 41.6° ，而自然含水量平均13.30%，根據土壤統一分類法則，本層次之土壤分類為GM。本工程潛盾施工均位於本層次內。

3. 第三層次：風化砂岩層：僅出現在CH-8號鑽孔，鑽探最大深度15.0公尺止於此層，研判厚度1.50公尺以上。主要係由風化泥質砂岩所組成之地層，色呈棕黃色。綜合基地土層各項工程性質，得本基地之地層剖面圖，如圖29所示。

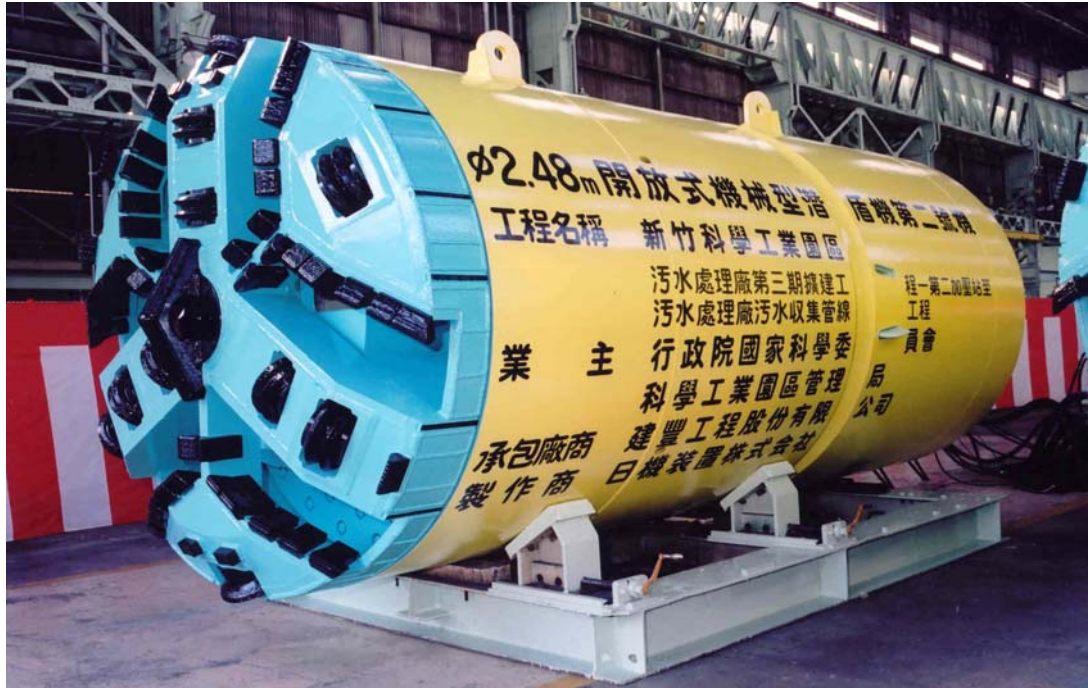


圖 28 日本日機裝置株式會社開放式機械型潛盾機

本工程原設計之管線高程位於地下水位之上，如圖30所示。因實際開挖後，管線高程低於地下水位且出水量大，全線均行經卵礫石層（粒徑60~70cm以上約10%，30~50cm約45%）之情況。潛盾施工時勢必全線點井抽水，嚴重影響交通，且易造成路面塌陷及建物龜裂之危險。將管線高程提昇4~5公尺後，如圖31所示，避開地下水之困擾，增加土壤穩定，降低施工潛在之風險。高程提昇後配合地下管線修正部分路線，經試挖及召開管線協調會後，並不影響施工。經提昇管線高程及修正部分路線後，與既有管線不相衝突，且無須全線點井降低地下水位，不致發生路面塌陷及建物龜裂之危險。經提昇埋設高程至地下水層以上，因無地下水位之影響，施工安全，工程得以維持正常進度，如圖32所示。水力功能方面不影響，符合原設計要求，且利於操作維護，如圖33所示。

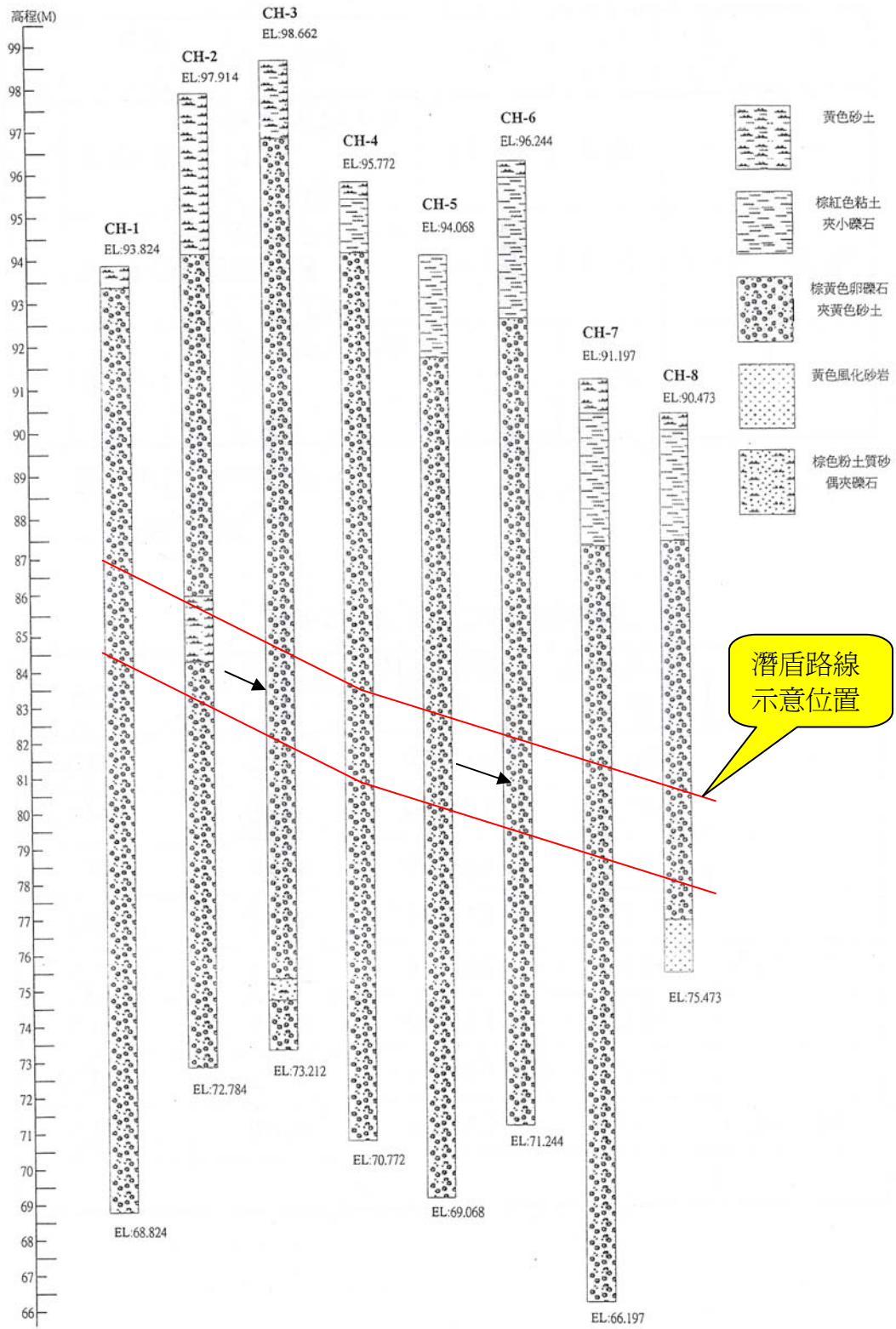


圖29竹科污水處理廠第三期擴建工程第二加壓站至污水處理廠污水收集管線工程 CH1~CH8 地質鑽探柱狀圖

資料來源：摘自環島工程有限公司，2003年5月。〔45〕

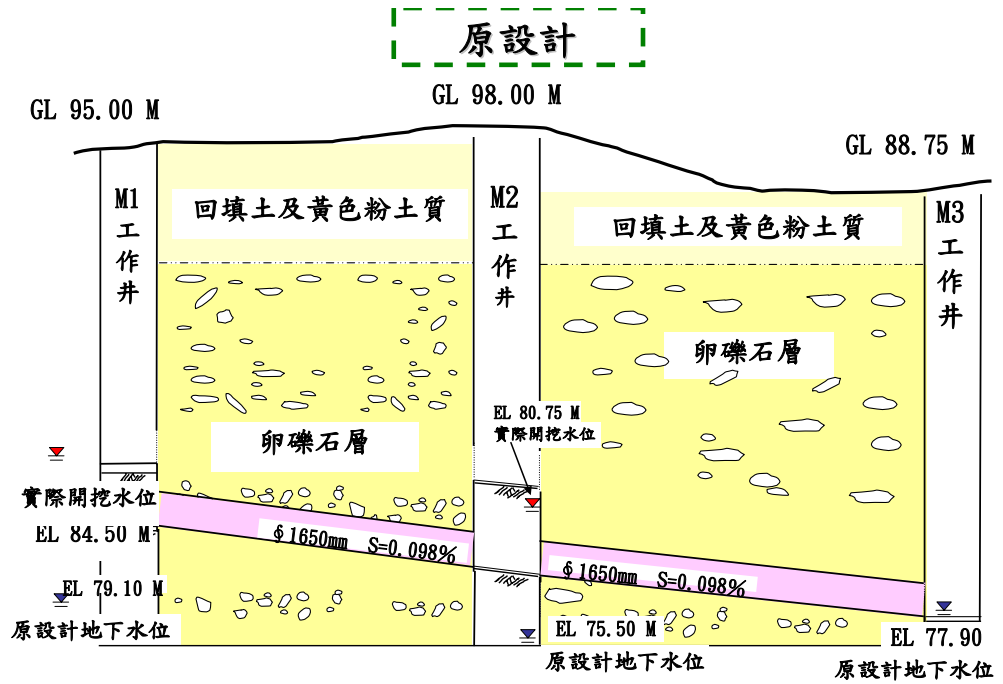


圖 30 地下水位變化與管線高程示意圖

資料來源：摘自 中華顧問—陳德華，2003 年 10 月〔46〕。

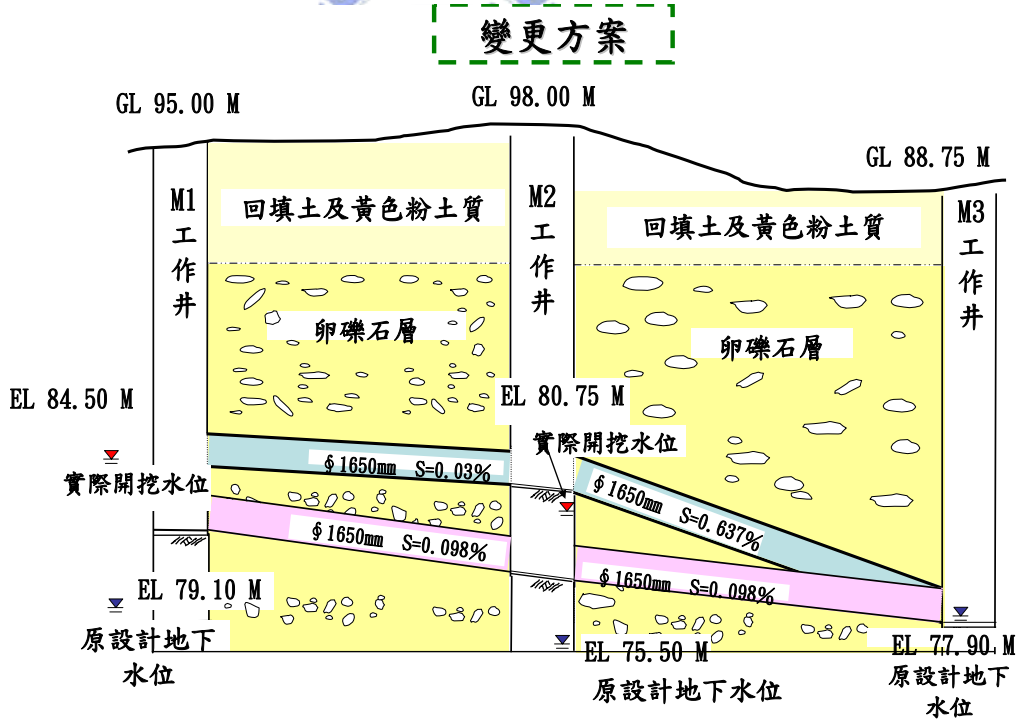


圖 31 地下水位變化前後管線高程示意圖

資料來源：摘自 中華顧問—陳德華，2003 年 10 月〔46〕。

變更方案

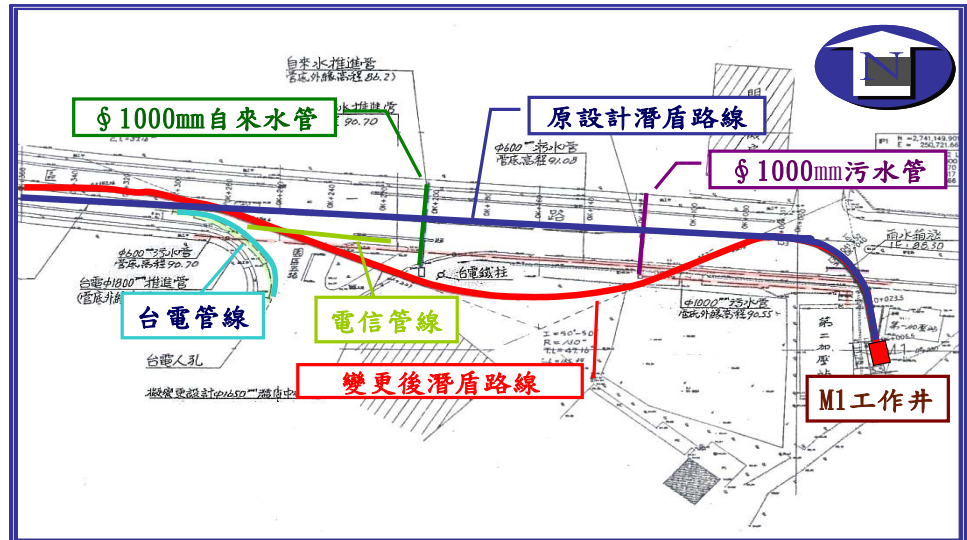


圖 32 地下管線與潛盾路線平面圖

資料來源：摘自 中華顧問—陳德華，2003 年 10 月〔46〕。

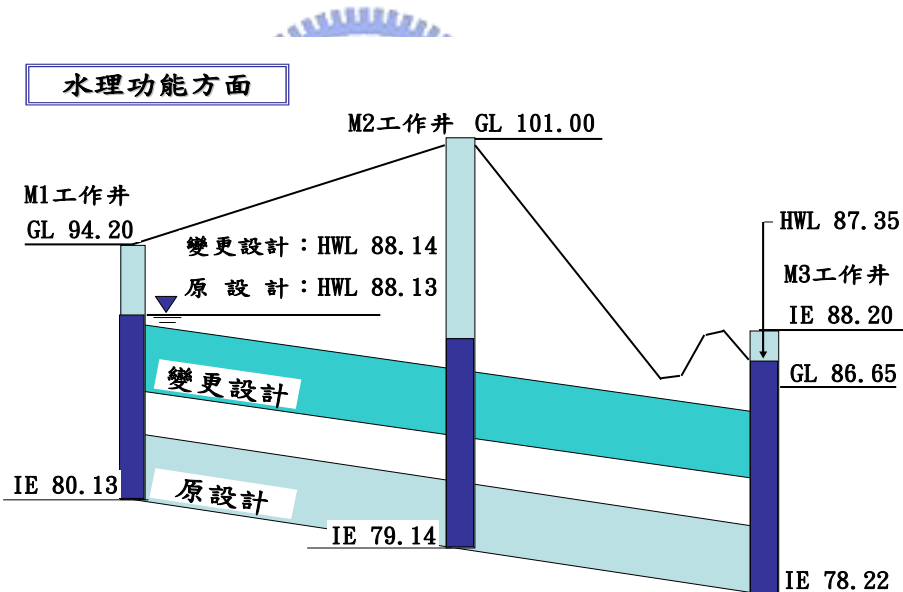


圖 33 污水管線水力剖面圖

資料來源：摘自 中華顧問—陳德華，2003 年 10 月〔46〕。

含礫石地層潛盾施工，潛盾之施工機械有開放型及密閉型兩大類，而密封型有「土壓平衡式」及「泥水加壓式」兩種主要型式，依土質條件、施工條件、環境因素以及經濟性、施工性而選擇潛盾機械。因「泥水加壓式」泥水處理設備費貴且設備佔用面積較大，細粒分之泥水分離困難，容易污染環境，使用電力及送排泥泵設備亦較多，因此目前潛盾施工以採用「土壓式」掘進機械為主。本工程潛盾掘進斷面深度處之土壤為卵礫石，且曲線段之曲率半徑 R 小於 $30m$ ，潛盾掘進

機械之選擇十分困難，潛盾切削盤(Cutter-head)之取土口開口率太小，則砂泥質不易取入，開口率太大則卵礫石通過排土機構(Screw-convery)容易阻塞。本工程潛盾掘進機械，經衡量上述土質因素，採用「開放式機械型」卵礫石中折式潛盾機。

本工程開放式機械型潛盾機械之構造性能設備及能力特點、特別加強注意事項如下：

本潛盾機主體構造分三大部分：

1. 切削盤(Cutter-head)：面版式構造，裝置切削錐(Roller-Bit)及切削片(Cutter-Bit)兩種，開口率為32%。
2. 潛盾主體架構：(Skin-plate)：以焊接方式作成圓筒狀內裝油壓千斤頂、驅動馬達、減速箱、排土機、環片架設機、超挖刀、土壓計及泥土注入裝置。
3. 盾尾部(Tail)：內裝二層式防水鋼刷及盾尾油注入孔。

能力特點：

1. 本潛盾掘進機械之切削盤(Cutter head)裝置，切削錐(Roller Bit)及切削片(Cutter Bit)兩種，開口率為32%，可以破碎卵石及岩盤，並可取入排除25φcm以下之卵石。
2. 本潛盾掘進機，可以由潛盾機內部更換切削錐及切削片。
3. 本潛盾機裝置有超挖刀及中折千斤頂，可以克服曲率半徑R=30m之曲線段施工。

特別加強注意事項如下：

本潛盾機掘進施工時，係由上游往下游施工，故需加強工作井上方四週之防水措施，工作井及隧道內準備好污水高揚程抽水機抽水，以免下雨造成隧道內淹水，影響潛盾機繼續掘進施工。下水道潛盾施工，施工期間應特別注意潛盾施工高程及方向控制，避免曲線蛇形及高低起伏過大，均須維持正確或規範值容許範圍內。

本工程下水道潛盾施工，因辦理變更設計後，施工範圍在地下水位以上且採用「開放式機械型」卵礫石中折式潛盾機，容易將卵礫石自地層中開挖並運至地表，無主要地下水層且卵礫石層自立性良好，距地表有足夠的覆土厚度，故施工時較無遇到特殊難以解決之狀況。

3.4.4 密閉型--泥水式潛盾機

泥水式潛盾機屬於密閉式潛盾機的一種。皂土液經由輸泥管到達開挖面後方的土倉中。開挖面被切削之土體排入土倉後，與皂土液經由攪拌器混合後，經排泥管排出潛盾機之外，皂土液與土渣分離後仍可循環繼續使用。泥水式潛盾機遭遇卵礫石地層時，必須以切削盤上之切削輪(roller bit)或切削齒(cutter bit)先將大粒徑之卵礫石切削成可進入土倉之尺寸，並可以通過排泥管，切削之土體才可以順利的排出潛盾機外。

泥水式潛盾機施工案例，參考湯程傑〔26〕論文：

1. 計劃緣由：日本 Hiranogawa 地下儲水管道(Hashimoto 1989)〔47〕為了處理大阪市之洪水而建造之地下儲水設施。
2. 施工項目：本工程以泥水式潛盾機施作直徑 10m 的大口徑儲水管道，管道長度達 1.9km。
3. 施工目的：在豪雨時期，河水面會超過地表面，若只靠原先沿著河面建築的堤防來預防洪災，只能達阻擋的作用。地下儲水管道是利用疏導的方式來達成預防洪水的效果，將降水經由數條主要下水道引至地下儲水管道，儲存多餘之雨水。地下儲水管道在豪雨期間可儲存 140,000 m³ 的水量，避免大阪市區淹水的危險。管線位置及剖面如圖34。
4. 地質條件：隧道開挖面的地質為砂土、卵礫石以及硬黏土，其中卵礫石的粒徑多在2 mm 至 20 mm，最大粒徑達 100 mm。在泥水式潛盾機開挖卵礫石時，切刃盤上的切削齒因卵礫石強度甚高，導致切削齒嚴重磨損，卵礫石處理方式選擇方式詳如圖35〔28〕流程。
5. 重點問題：本工程隧道長度達 1.9km，在設計潛盾機時即賦予在開挖過程中，可更換切削齒的功能，才使潛盾機得以順利推進。由於卵礫石高透水性，使得開挖面地下水壓達 2kgf/cm²，泥水式潛盾機可以加壓皂土液平衡開挖面前方之高水壓。
6. 處理解決對策：本工程仍額外使用化學灌漿改良土層，使開挖面無滲水之情況，並採用迅速的背填灌漿以填補大直徑潛盾機所衍生之較大盾尾間隙。地下儲水管道工程所引致之地表沉陷，除了在出發井附近約發生 20 mm，其餘管線中心線上方處均無測得明顯之地表沉陷。
7. 泥水式潛盾機施工優點：泥水式潛盾機屬於閉式潛盾機，適用於地質變化較大，高水壓之地層。於都市潛盾隧道常遭遇軟弱砂質地層，相對的被壓含水層為高地下水所在，此時以泥水為媒介加壓做為穩定開挖面之措施，利用加壓之泥水壓力抵抗開挖面之土壓、水壓，詳如廖銘洋〔15〕。
8. 泥水式潛盾機施工缺點：泥水加壓潛盾機在地面上必須有相當大之空間放置泥水處理設備和堆置皂土，較不利於都市空間擁擠地區施工。

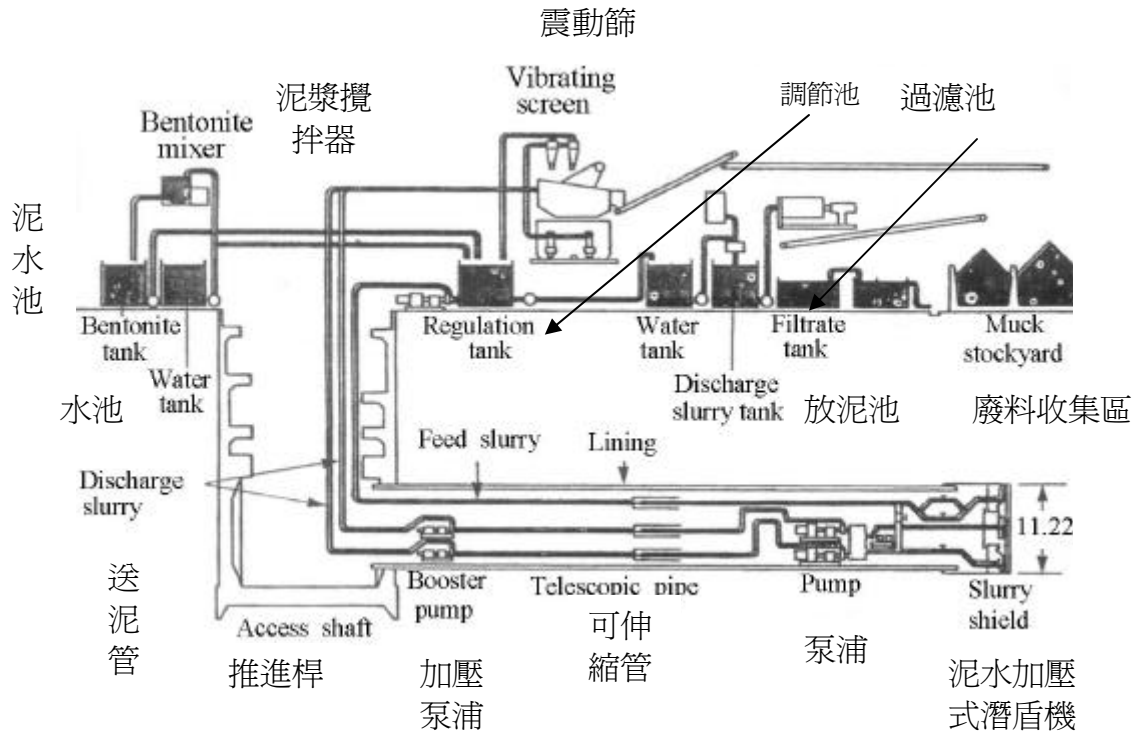


圖34 泥水加壓式潛盾機示意圖

資料來源：摘自 (after Hashimoto, 1989) [47]

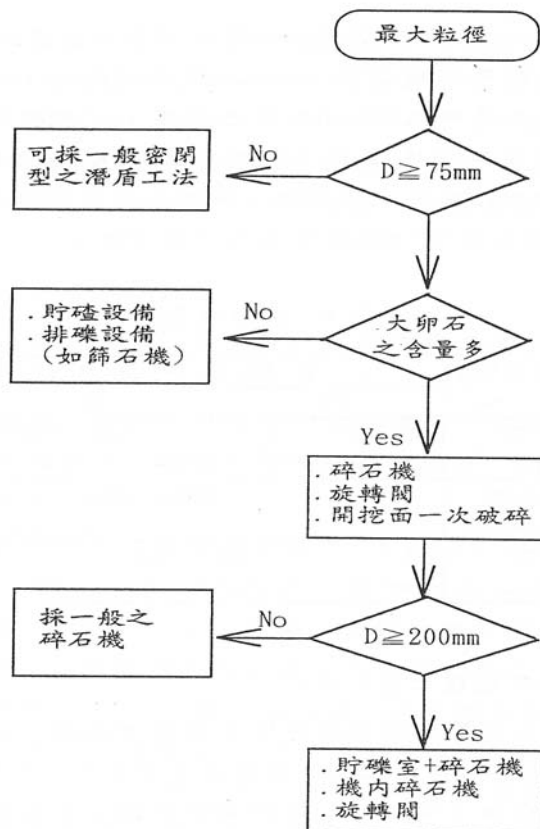


圖35 卵石處理方式選擇 (以泥水加壓潛盾工法為例)

參考資料：摘自中華顧問工程司 大地工程部 1996年7月 [28]

提供日本橫濱市下水道及地中接合式MSD工程所採用之新功能之泥水式潛盾機資料，詳如圖36及圖37，具有更多掘進施工技術。

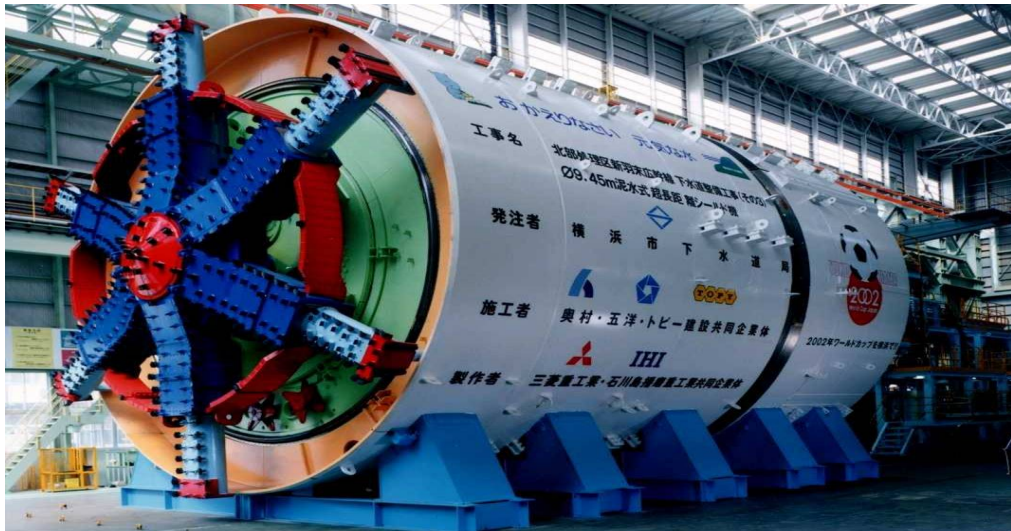


圖 36 日本橫濱市下水道採用之泥水式潛盾機

資料來源：摘自 日本三菱重工業株式會社提供，2002〔48〕。

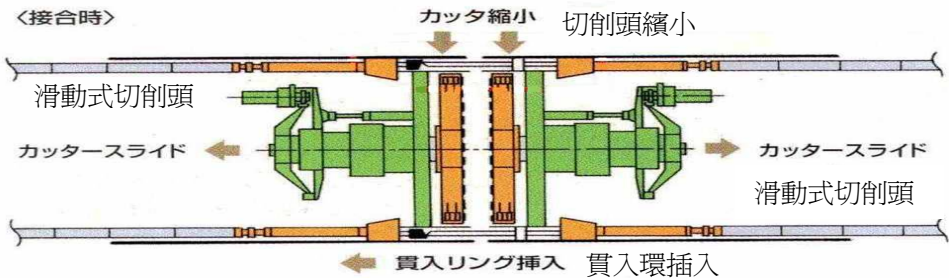


圖 37 日本地中接合式MSD (Mechanical Shield Docking) 工法之泥水式潛盾機

資料來源：摘自 日本三菱重工業株式會社提供，2002〔48〕。