

第四章 潛盾施工遭遇礫石地層問題解決與處理對策

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問題分別加以說明探討，提出處理對策與心得和建議，使從事相關潛盾人員可由以上潛盾機遭遇礫石層施工案例作參考，選擇較有利之安全、經濟、快速之潛盾機與施工輔助方式。

4.1 地盤改良輔助工法案例問題解決與處理對策

在收集到之國外案例中潛盾工程之輔助工法，在卵礫石地盤採用灌漿工法，大致可分為兩種情形：

灌漿工法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，詳如表 18：

表 18 地盤改良灌漿工法第一種情形事件案例表

事件案例	事件內容	1. 潛盾開挖面或潛盾開挖面上方為砂土及礫石，如 Hiranogawa 地下儲水管道以及日本大阪市防洪計劃之潛盾隧道開挖，其他案例尚有 1-3,6,7,13,21,22,36。
	原因探討	潛盾機通過含砂土以及礫石地層時，因砂土與礫石缺乏凝聚力，盾尾間隙閉合可能造成較大地盤漏失
	處理對策	1. 潛盾施工前先進行地盤灌漿工法改良開挖面土體的強度，減少地盤沉陷。

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，詳如表 19：

表 19 地盤改良灌漿工法第二種情形事件案例表

事件案例	事件內容	大阪市防洪計劃，當開挖面上半部有軟弱土壤，下半部為堅硬的礫石地層形成強度上的差異，其他案例尚有 ①,②,③,⑤,⑥,⑨,⑫。
	原因探討	開挖時潛盾機盾首方向控制不易，造成超挖的現象。例如大阪市防洪計劃，隧道開挖面上方為極軟弱的粉土，其SPT N值僅0~3，且隧道上方的覆土厚度只有4.5m，故此施工條件下，為了避免潛盾機於上部軟弱土造成超挖，及尾隙閉合導致大規模沉陷。
	處理對策	所以在開挖面上方以化學灌漿改良地盤強度。

在收集到之案例中潛盾工程之輔助工法使用地盤凍結工法，是在龍門(核四)計畫循環冷卻水出水道工程到達井之排水頭之海面下在止水灌漿後即採用密接冷凍工法施工，詳如表 20：

表 20 地盤改良凍結工法事件案例表

事件案例	事件內容	龍門(核四)計畫循環冷卻水出水道工程到達井之排水頭之海面下在止水灌漿後即採用密接冷凍工法施工。其他案例尚有 ①,②,⑫。
	原因探討	凍結的主體是水，所以足夠水分為土壤凍結之必要條件
	處理對策	需凍結之水分充足，其凍結效果理想。

4.2 開放式潛盾機高地下水位施工案例問題解決與處理對策

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。

在收集到之案例中潛盾工程之降低水位工法案例問題解決與處理對策探討如下表21：

表 21 潛盾工程之降低水位工法事件案例表

事件案例	事件內容	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
④ ⑤	原因探討	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，使鄰近結構物之受到損害，必須小心控制及實施安全監測掌握現況。
⑥ ⑭ ⑳	處理對策	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。

在收集到之案例中潛盾工程之大直徑降水井案例探討如下表22：

表 22 潛盾工程之大直徑降水井事件案例表

事件案例	事件內容	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。
③	原因探討	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。
	處理對策	有效的降低地下水位，但須配合施工監測避免發生沉陷釀災。

在收集到之案例中潛盾工程之壓氣工法案例探討如下表23：

表 23 潛盾工程之壓氣工法事件案例表

事件案例	事件內容	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。
④	原因探討	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〕。
⑧ ⑩	處理對策	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，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，施工前應特別考量。

4.3 密閉式潛盾機的改良案例問題解決與處理對策

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之案例問題解決與處理對策。

4.3.1 切削輪與切削齒案例問題解決與處理對策

選擇適用於卵礫石層之潛盾機鑽頭：切削鑽頭 (Cutter Bit) 及切刀應具耐久性及其可更換性，根據日本潛盾機遭遇卵礫石層案例，1.0~1.5 公里，必須更換1次，視潛盾實際地質情況而定。故考慮從潛盾機內部設計為可更換之鑽頭，詳如圖52~53說明。潛盾機頭之切削頭上裝設滾動鑽頭 (Roller Bit) 以進行卵礫石之首次破碎，詳如圖54~55。切削頭之外周旋轉速度與一般地層潛盾機相同， $v=15\sim 20\text{m/min}$ 。潛盾機之切削頭之開口率則視地層狀況而定，一般約30%且採用具備類似T.B.M破碎機能面板或切削頭之潛盾機尤佳。

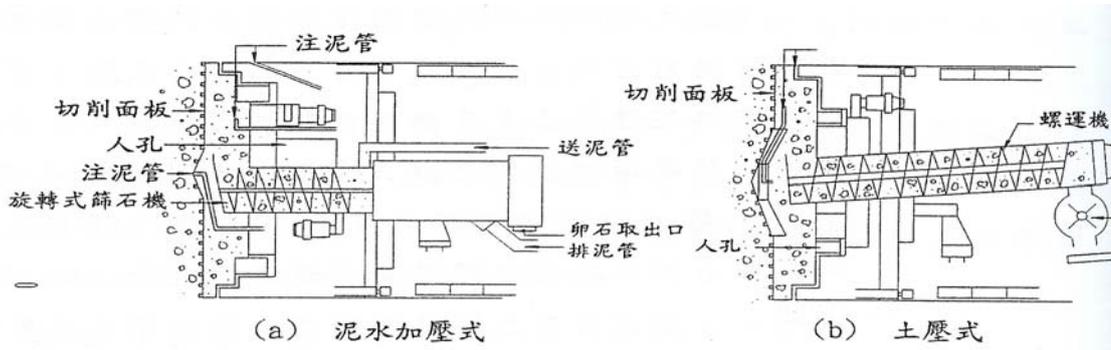


圖 52 卵石層適用潛盾機示意圖

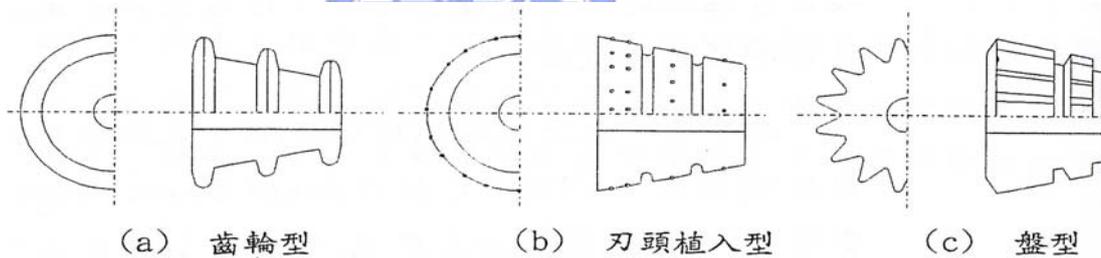


圖 53 潛盾機滾動切刀之種類

資料來源：圖 52~53 摘自中華顧問工程司大地工程部，1996年7月〔28〕



圖 54 日本潛盾機所採用切削鑽頭及滾動切刀相片



圖55 日本潛盾機採用切削鑽頭及滾動切刀(一次破碎方式)

參考資料：圖 54-55 摘自中華顧問工程司 大地工程部，1996 年 7 月〔28〕

蒐集到國外於含礫石地盤之隧道的施工案例，採用密閉式潛盾機（包含土壓平衡式、泥水式潛盾機）共有 43 個案例，其中有 26 個案例的潛盾機在切刀盤上裝設有切削齒及切削輪，詳如表 9 說明。

茲中華顧問—何泰源〔19〕整理提供日本 45 個施工案例，適用於卵礫石層潛盾機，潛盾機切刀扭距係數 α 應較高：在日本潛盾機遭遇卵礫石層之大多數案例有 $\alpha \geq 3.0$ 之傾向，一般地層情況通常為 2.0~2.5。故潛盾機切刀扭距 $T = \alpha D^3$ (D : 潛盾機外徑) 表示將較一般潛盾機為大，更能有效處理卵礫石地層。日本實際案例詳 (NO. 1, 8, 9, 10, 11, 12, 21, 27, 28, 34, 37, 38, 42, 44, 45)

切削頭之縫口尺寸：為使推進切削面的安定，切削頭縫口寬度與開口率是相當的任務，卵礫石層時開口寬度比較狹窄，則盤式切刀所承受負荷較大，還有阻力也大，掘進速度慢，相反地，開口寬度增大時，恐有切削面不安定與大卵礫石的取入而堵塞，有排水的危險性。依據日本潛盾機遭遇卵礫石層案例經驗判斷，其縫口的開口尺寸大致為潛盾機的排水裝置所能通過的礫徑的尺寸〔28〕。故土壓平衡式潛盾機，大約 300mm；泥水加壓式潛盾機，大約 100~150mm，詳如勝沼 清〔53〕。

加裝防止旋轉設備：為預防潛盾機切刀扭距過大造成潛盾機體旋轉，所採用之設備，如 T. B. M 之周邊抓地措施。

若隧道掘進沿線地層之卵礫石含量不高，經評估後可能僅於切刀

盤上安排切削齒來磨蝕卵礫石，雖然切削齒會因摩擦高硬度卵礫石損耗，但設備成本可能較經濟。在卵礫石內推進一段距離後，若有必要更換切削齒，某些特殊設計的潛盾機可藉由封閉切刃盤，以人工進行切削齒的更換工作。

英國下水道更新工程 (the new southern Trunk Scheme) (54) 採用直徑 2.15m 的泥水式潛盾機進行開挖 (Lock1988) 開挖土體為主要為砂土、礫石以及直徑 200 mm 至 300 mm 的卵石，因此選擇了切刃盤設有切削輪的泥水式潛盾機 [26]。

經由切刃盤的旋轉，切削輪可以破除 20% 隧道直徑的大顆粒卵石約 430MM，在英國西北方海岸清理計劃中，最龐大的單項工程為 Fylde 海岸水質改善計劃 (Fylde coastal water improvement scheme) 長度 1.18km 的廢水收集隧道，其直徑為 2.9m，以土壓平衡式潛盾機施作 (Cole 1996) (55)。沿線地質為砂土及卵石黏土 (boulder clay; 巨石、卵石及礫石以黏土膠結在一起)。在此種地質狀況開挖，潛盾機盾首部分以及螺運機都遭受嚴重磨損，承包商因此採用切削輪取代切削齒，並且用高硬度金屬化合物 (Trimay) 鍍在盾首以及螺運機表面，以增加抗磨能力。開挖過程亦發生黏性高的黏土附著在土倉及螺運機內，使排土過程遭受阻礙的情形。在採取泡沫注入開挖面使黏土黏性降低後，排土情況改善許多。泡沫注入所產生潤滑作用，也使切削輪及螺運機較不易磨損 [26]。

4.3.2 潛盾機千斤頂推力及水力閘門案例問題解決與處理對策

在收集到之案例中潛盾工程之千斤頂推力及水力閘門案例問題解決與處理對策探討如下表 24：

表 24 千斤頂推力及水力閘門事件案例表

事件案例 ① ⑰ ⑱ ⑲	事件內容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 根據日本潛盾機遇卵礫石層時千斤頂推力通常使用較大。 2. 大阪防洪計劃案例之 Block 3 採土壓平衡式潛盾機施工在卵礫石地層遇高地下水壓情況下施工。
	原因探討	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遇卵礫石層通常掘進推力會受影響亦會造成切削頭磨損 2. 避免使開挖面穩定性下降，遇砂土地層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。
	處理對策	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用於卵礫石層之潛盾機，通常在潛盾機型式之選擇時應採用較大推力之千斤頂。 2. 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。 3. 對於砂礫石土體而言，為增加潛盾機頭流動性，使其高硬度之卵礫石順利運送，可於潛盾機頭將泡沫材料注入也可以減少切刃盤、切削齒、切削輪以及螺運機在開挖此類硬度高的土體所造成的磨耗，提高潛盾機的耐久性。

4.3.3 卵礫石處理方式

開挖面所出現之卵礫石、孤石或岩塊之處理方式有二種，即排除(取入)方式與破碎方式〔28〕，茲敘述如下：

1. 排除方式：「排除方式」係將出現於開挖面之卵礫石不加以破碎，即直接取入潛盾機內加以排除之方式。採此處理方式之潛盾機型包括開放型(Open Type)及密閉型潛盾工法。惟為利於土碴處理，大卵石有時仍須在潛盾機內或後方予以破碎成利於排除之尺寸後才予以出碴。
2. 破碎方式：「破碎方式」係將開挖面前方出現之卵礫石加以破碎分解成大小適中之尺寸後才予以出碴之方式。一般以機械式破碎物體時，所須作用力有加壓、衝擊、剪碎及磨碎等四種，應依岩石強度、粒徑大小及出現頻率等，選擇不同之破碎型式組合及適當之設備。

在卵礫石潛盾開挖會造成周邊地盤鬆動的模式，詳如圖56所示。

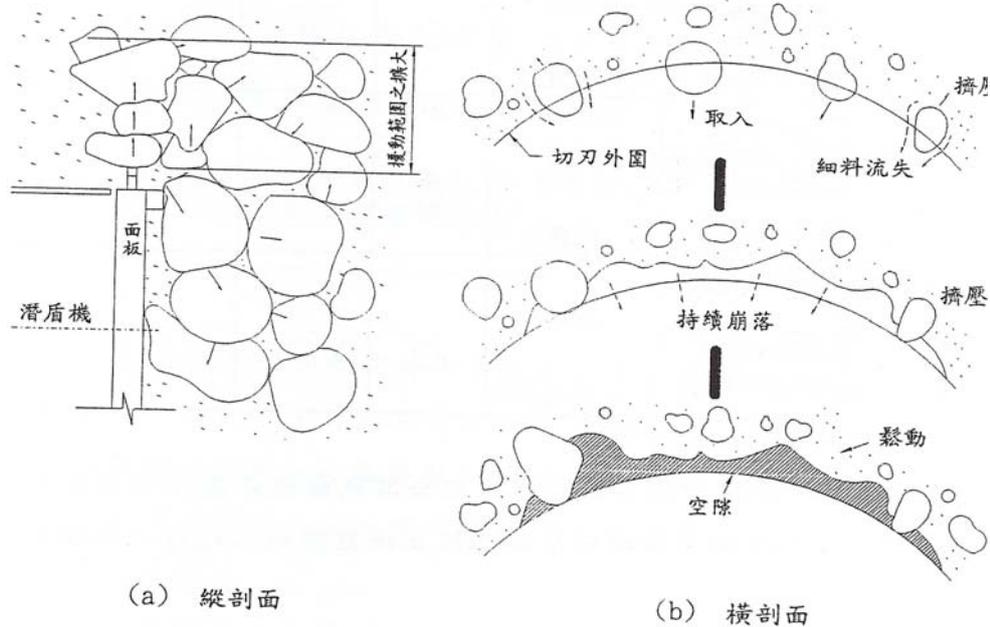
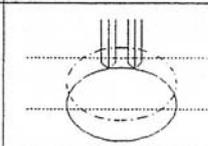
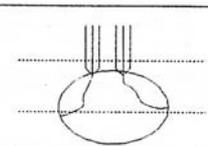
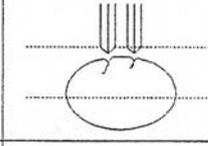
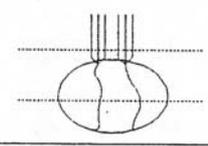
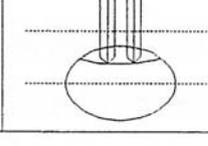
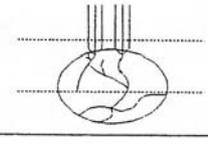
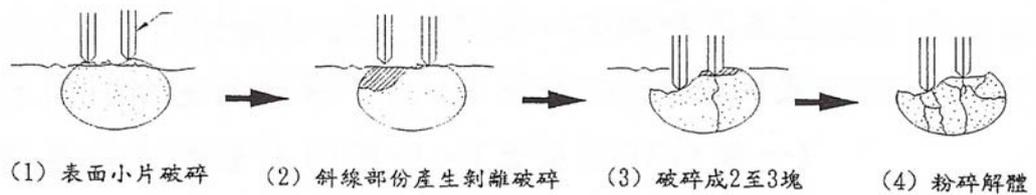


圖 56 卵礫石層潛盾機開挖造成周邊地盤鬆動之模式

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」在卵礫石層中進行一次破碎者，大多採用盤型切刃(Disc Cutter)，其切割卵礫石之型式如圖57所示。

種類	形狀	破碎狀況	種類	形狀	破碎狀況
(a)		卵礫石不產生破碎而被壓入地層中。	(d)		切刃之尖端所接觸之卵礫石外部產生剝離。
(b)		僅留下切刃之割痕。	(e)		破碎成2至3塊。
(c)		切刃在卵礫石表面造成小碎片，且產生剝離。	(f)		粉碎狀況。

(a) 小顆粒卵礫石之破碎型態



(b) 大顆粒卵礫石之破碎型態

圖 57 卵礫石之切割破碎型態

參考資料：圖 56-57 摘自中華顧問工程司 大地工程部，1996 年 7 月〔28〕

3. 當卵礫石直接或經1次破碎後進入潛盾機內後，再對大卵石施予壓力及剪力使卵礫石破碎之方式，稱為「2次破碎」，通常係在潛盾機之土倉內裝設碎石機(Crusher)處理，(如No. 2, 15, 18, 24, 26, 34, 45)詳圖58~圖60〔28〕。

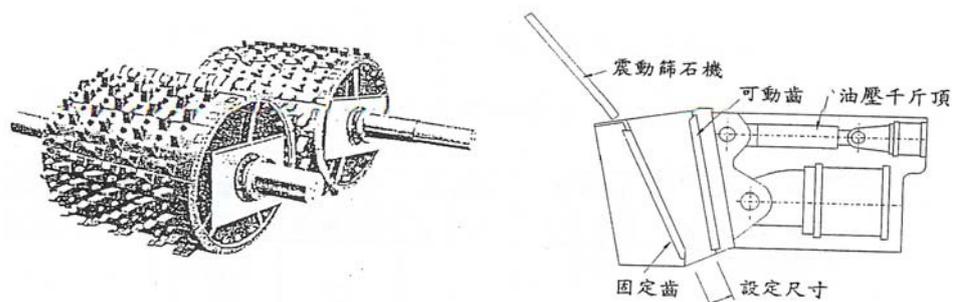


圖 58 機內破碎方式所採用潛盾機 (二次破碎)

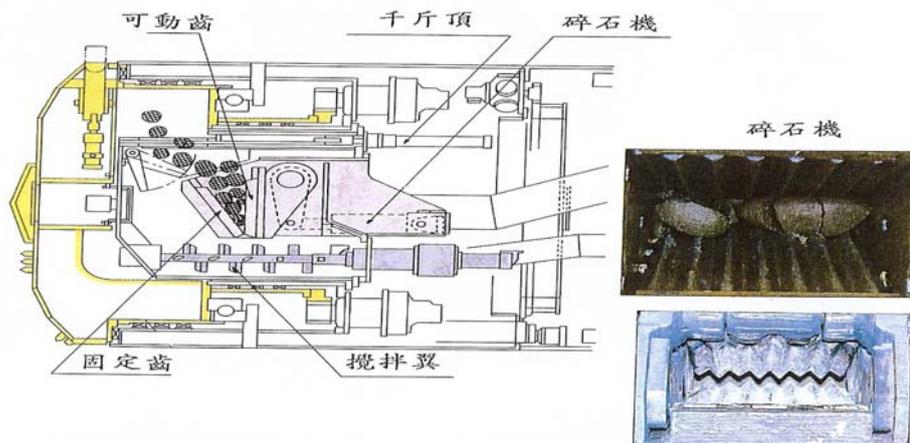
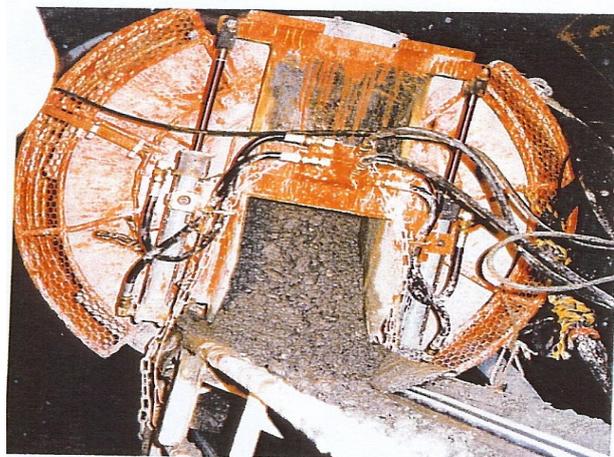


圖 59 採機內碎石機之潛盾機



卵礫石壓碎後之排渣情形

圖60 採機內碎石機之潛盾機（二次破碎）

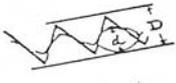
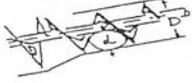
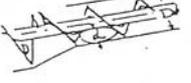
參考資料：圖 58-60 摘自中華顧問工程司大地工程部，1996 年 7 月〔28〕

4.3.4 卵礫石處理設備與螺運機案例問題解決與處理對策

根據日本文獻調查，採排除方式處理卵礫石時，一般多採土壓式潛盾機型，而潛盾機內以採用帶式螺運機(Ribbon Screw-Converyor)為多(No. 10, 12, 22, 23, 27, 30, 37, 42)，亦有採卵礫石分級處理之篩石機(Trommel)之案例(如No. 6, 34)。泥水加壓式潛盾機則採泥水倉內貯渣室處理(如No. 3)。

採密閉型潛盾機種時，如地層中出現之卵礫石尺寸大於表25之可處理範圍，即須先採破碎方式處理。

表25 螺運機種類與可排除最大粒徑

螺運機種類	帶式螺運機	帶式螺運機(前方 偏心攪拌螺旋)	帶式螺運機(前 方攪拌螺旋)	雙螺運機
示意圖				
可排除最大 粒徑	$d \doteq 2/3D$	$d \doteq 1/2D$	$d \doteq 1/3D$	$d \doteq 1/3.5D$

註：D為螺運機直徑，d為可排除最大粒徑。

參考資料：摘自 中華顧問工程司大地工程部，1996年7月〔28〕

日本岩手縣下水道工程 (Hitachi Zosen Corporation 1990)〔40〕採直徑 2.88 m 泥漿式土壓平衡潛盾機，如圖61所示，以切刃盤上切削齒開挖沿線之礫石及流木，如圖62所示。潛盾機所採用的螺運機型式為螺旋式螺運機，礫石經由螺旋式螺運機運送排出之狀況如圖44所示。



圖61 經切削齒切削之礫石及流木

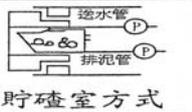
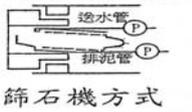
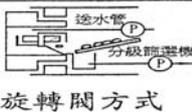
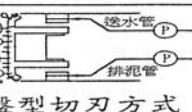


圖62 螺旋式螺運機及其後方排土狀況

參考資料：圖61~62摘自 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)〔40〕

根據日本施工經驗，一般泥水加壓式潛盾工法在 1 次破碎階段即將大粒徑卵石分割成 70~80mm 左右之尺寸，進入潛盾機內再由碎石機壓碎成 30mm 左右之粒徑，以利排泥管出碴。而土壓式潛盾工法通常在 1 次破碎階段即將大顆粒分割成 200~300mm 左右而直接出碴，少數以管線壓送方式出碴者須再經 2 次破碎成 100mm 左右之尺寸後出碴，以上各種卵礫石處理設備之優缺點比較詳如表 13 及表 14〔28〕。

表 26 各種卵礫石處理設備之優缺點比較(一)

潛盾機基本結構	卵礫石處理方式	開挖之連續性	大顆粒卵石處理	開挖面穩定性	設備之維護保養	潛盾機頭壓力之維持
 貯碴室方式	排除 (篩選)	×	○	△	○	○
 機內碎石機方式	破碎 (二次破碎)	○	△	△	△	○
 篩石機方式	排除 (篩選)	○	△	△	△	△
 旋轉閘方式	排除 (篩選)	○	△	△	△	△
 盤型切刃方式	破碎 (一次破碎)	○	○	○	○	○

註：1. 通常篩石機方式係配合其他卵礫石處理方式使用。
2. 通常卵礫石層施工均先採盤型切刃進行一次破碎。

表 27 各種卵礫石處理設備之優缺點比較(二)

卵礫石處理設備	優點	缺點
貯碴(礫)設備	<ul style="list-style-type: none"> 設備簡單 容易維持開挖面穩定所須壓力 實績多 	<ul style="list-style-type: none"> 大卵石比例多時，無法連續開挖掘進 配合採用顆粒分級篩選機，易被細料阻塞 排除卵石耗費人工及時間
碎石機	<ul style="list-style-type: none"> 大卵石比例多寡均可連續開挖掘進 不須搬運大卵石之設備 容易維持開挖面穩定所須壓力 	<ul style="list-style-type: none"> 大卵石不易移動至碎石機內 碎石處理量多寡可影響開挖速度 易產生碎石機及泥水幫浦之摩擦 易產生潛盾機之震動及噪音
旋轉閘	<ul style="list-style-type: none"> 大卵石比例多寡均可連續開挖掘進 可適應地質(粉土, 黏土)之變化 開挖過程中, 可觀察土碴之狀態 如無超過設計可處理最大粒徑之卵石出現, 不影響開挖速度 	<ul style="list-style-type: none"> 旋轉閘之摩擦產生漏水及開挖面壓力無法維持之狀況 必須具備出碴設備 送排泥系統複雜, 因此容易產生故障 無人孔之設計, 如土倉內產生故障時, 不易修護。

參考資料：表 26~27 摘自中華顧問工程司大地工程部，1996 年 7 月〔28〕

4.4 潛盾機型式選擇

依據中華顧問工程司大地工程部八十五年七月針對「都會區卵礫石層鑽掘隧道及深開挖工程專題研究報告期末報告書」〔28〕第五章報告中說明如下事項：

1. 潛盾機型之選擇，必須綜合檢討土層狀況、周圍施工環境、潛盾直徑、施工長度及經濟性等資料，而卵礫石層潛盾施工尤須檢討潛盾機型對處理卵礫石層之適用性。
2. 潛盾工法發展初期，一般在路線規劃上均避免遭遇卵礫石層，如無可避免時，則多採用開放型潛盾工法配合相當程度之輔助工法施工。惟通常卵礫石層透水係數較大，且地下水位較高，為顧及施工安全性及工作效率，近年來幾已全部採密閉型潛盾機型。
3. 密閉型潛盾工法，於卵礫石層或有孤石出現之地層中進行潛盾施工時，一般於潛盾機土倉隔板設一人孔，當孤石出現時，即將人孔打開以人工方式排除孤石。採上述方式施工時，潛盾機必須暫時開挖，開挖面亦須以壓氣工法或藥液灌漿工法維持穩定。目前，由於潛盾機型不斷改良，屬密閉型之泥水加壓式及土壓式潛盾機皆裝設卵礫石處理設備，不須長期停止開挖即可連續地出碴，並排除大顆粒卵石或孤石。
4. 潛盾機選擇考慮因素，係必須依設計尺寸大小、潛盾路線地質條件如圖 63 (Hitachi Zosen Corporation, 1990) 〔40〕土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍、環境、成本經濟性考慮、施工安全等條件下，配合工期要求等加以檢討，決定潛盾機型式。詳如廖銘洋〔15〕採用圖 64 潛盾機選擇評選之準則層級架構圖所示條件，慎選適合該地質狀況之潛盾機。
5. 鑽鑿機具之選擇詳如表 15 及功能：

潛盾機選擇評估因素：

潛盾機機種選擇一般依以下列項目進行考量：

(1)、對工址適應性：

1. 地質構造：地層構成、顆粒組成、工程性質
2. 地下水狀況：地下水高度、滲透係數。

(2)、施工性：

1. 設計條件：施工長度、施工隧道坡度、隧道最小曲線
2. 環境條件：地下埋設物、建物構造物狀況、對沉陷量控制
3. 施工條件：工程進度、安全與保證、土碴處理基地面積

(3)、經濟性：

1. 直接成本：潛盾機及附屬設備費
2. 間接費用：操作費用、輔助工法費用

表 28 潛盾機常用機種及特性表

潛盾機形式	構造	適用土質	特徵
泥水加壓式	在盾首和切刀間設置土倉，開挖面以泥水壓和切刀面板做為擋土措施，土砂以排泥管排至地面，必須作泥水處理。	湧水、滯水砂層 沈泥質砂層。	開挖土砂以流體輸送潛盾機內作業空間大，對處理礫石較為簡單，地面需要有泥水處理設備，覆土小時泥水壓管理困難。
土壓平衡式	以切刀面板之切齒開挖地層，以開挖之土壤堆積於面板與隔板間，以螺運機貫穿，並保持螺運機內充滿土壤，使開挖面在土壓平衡下開挖排土。	透水性低之粘土層 泥質砂層	不需泥水處理設備土質限定要素大要注意卵石層
加泥土壓平衡式	具泥水加壓式和土壓平衡式之綜合構造，在隔板內注入高濃度之泥化材料，而以螺運機出土。	軟硬岩外皆可適用	不需泥水處理設備，混入泥漿增加排水量。

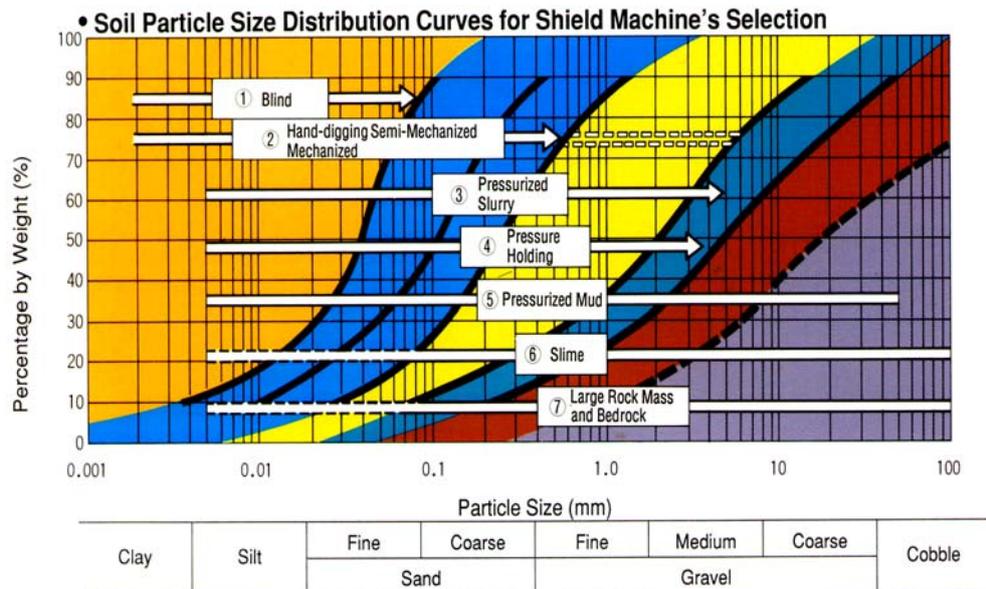


圖 63 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍

資料來源：(after Hitachi Zosen Corporation, 1990)〔40〕

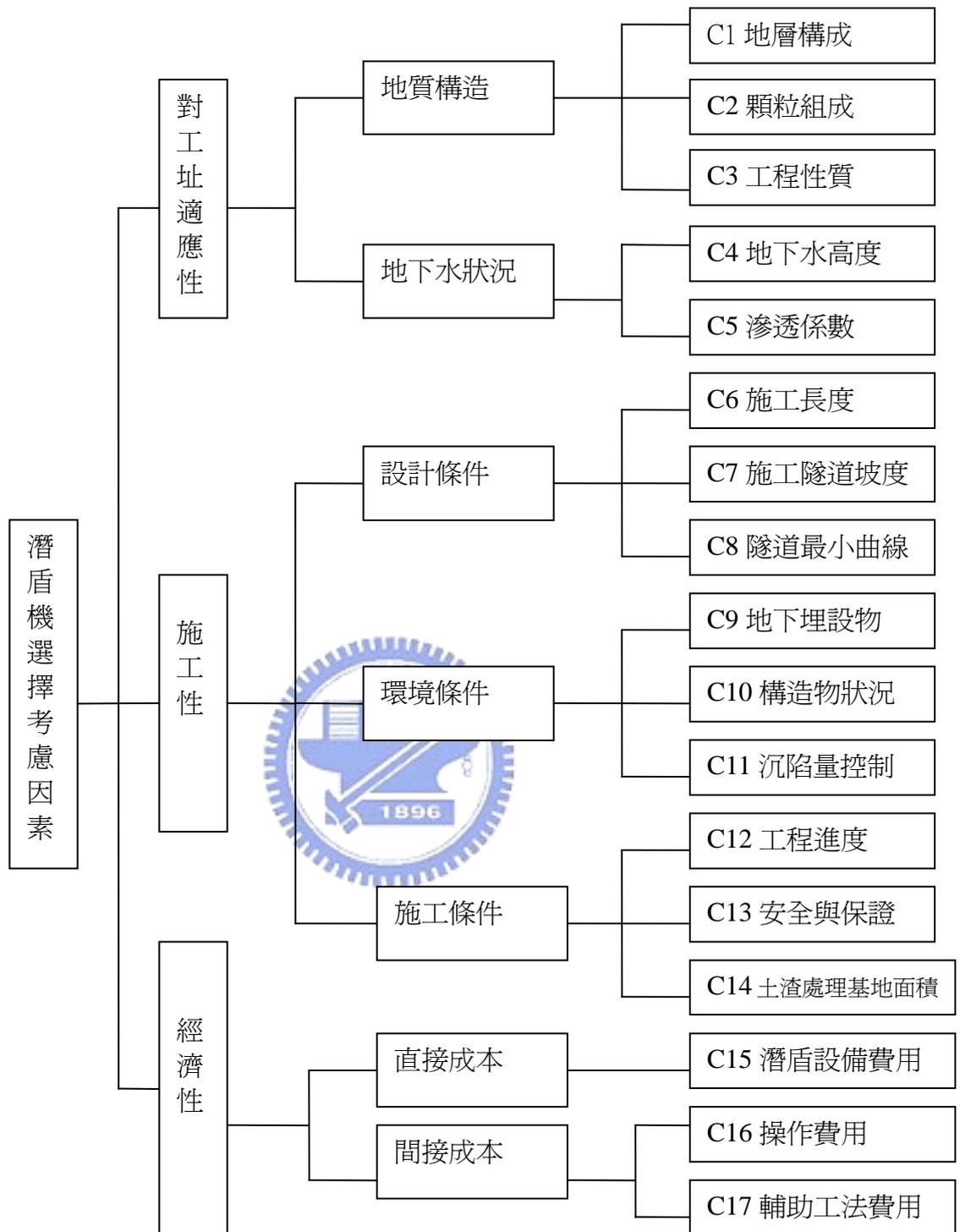


圖 64 潛盾機選擇評選之準則層級架構圖

資料來源：摘自 廖銘洋，2001〔15〕。