

臺中卵礫石層地下工程 施工經驗分享

顏君行 台灣德國萊因技術監護顧問股份有限公司 - 工業服務與資訊安全部 / 大地技師

一、臺中都會區發展概述

臺中都會區近年來在都市開發與交通運輸均有大幅成長，於 2017 年 8 月更成為臺灣人口數第二大城，僅次於新北市，近幾年不僅捷運綠線已經完工使用，備受矚目之臺灣大道捷運藍線，臺中市政府交通局亦已在 2022 年 12 月底同步啟動「基本設計作業」與地質鑽探調查作業，並已於 2023 年 2 月通過交通部臺中捷運藍線綜合規劃審查，臺中市政府將依據委員建議修正後，轉呈最後一步的行政院審查階段。

目前臺中捷運藍線路線全長約 24.78 公里，並設置 20 座車站及 1 座機廠，其中高架段約 10.30 公里，設有 8 座高架車站；地下段約 14.48 公里，設有 12 座地下車站。地下段之路段相當長，目前地下段規劃將沿著臺灣大道由臺中車站後方之臺糖生態園區延伸至東海大學後轉高架段，而未來捷運地下段與站體施工將是臺中都會區最大規模之潛盾洞道與深開挖工程案例。

臺中都會區並非缺乏卵礫石大口徑潛盾施工與深開挖之案例，於 2008 年即有內徑 2.4 公尺，全長達 20,898 公尺的中部科學園區放流管線工程案例，其路線沿中科福雅路、福科路、安和路、忠勇路、學田路、中山路（台 1 乙線）、沙田路至溪洲路接入大肚溪，其中工程之明挖段 6,643 公尺，約佔 31.78%；推進段 5,975 m，約佔 28.60%；潛盾段 8,280 m，約佔

39.62%，免開挖管線（推進與潛盾）佔比達 68.22%。

另於深開挖工程案例方面，除了臺中各類高樓層商辦與住宅大樓之深開挖之外，臺中捷運綠線場站開發時，為增加地下停車與使用空間，決定採深開挖方式施工以符合功能需求。其中市政府 G9-1 站總開挖深度為 36.75 公尺（地下 8 層，含筏基），更為全國最深之建築工程開挖案例；而位於河南路與市政路口之臺中銀行總部大樓 - 臺中之鑽開挖深度也達 34.7 公尺（含開挖底 0.1 m PC 層），深開挖案例相當豐富。

臺中卵礫石屬複合地層材料，具高剪力強度與高透水性，筆者曾參與中科放流管工程與臺中捷運 G9-1 站深開挖工程，本文將分享臺中卵礫石層潛盾與深開挖施工經驗，說明施工挑戰與因應對策，希望可藉由相關案例與經驗分享，讓未來臺中捷運藍線地下潛盾段與站體深開挖施工更為順利。

二、放流管施工經驗

臺中都會區之礫石層乃是由一些膠結不佳之填充材料和堅硬之卵礫石所組成之複合性地層，隨著不同區域的礫石分布工程變異性仍大，影響因子如粒徑分佈、粗細料含量、礫石成分、組成比例與地下水位等物理性質，由於此不均勻性，故其工程特性與一般土壤或岩石地層有明顯之不同。

在以往臺中盆地的卵礫石層中採用推進或潛盾工法時，經常遭遇粒徑較大之卵礫石，而基本上潛盾機型式以可排出的礫石徑尺寸，以水式為例，是排管內徑能通過的最大礫石徑，土壓式則以旋輸送機能通過的最大礫石徑，作為礫石潛盾機的機型。

中科放流管線全線管頂之覆土深度約從 2.45 m ~ 20 m，設計階段進行五處明挖試坑（深度 5 m）與全套管基樁工法探勘（深度 20 m），調查報告顯示，大肚山分區卵礫石層母岩主要均為石英岩，且沿線卵礫石單壓強度可達 89 ~ 210 MPa，不僅强度高，顆粒與顆粒之間的互鎖效應也是免開挖施工的一大難題。地質工程性質以統一土壤分類（USCS）為不良級配礫石（GP）及不良級配礫石 - 粉土質礫石（GP-GM），卵石比例含量均超過 50% 以上，地下水位約在 GL-2.6 m ~ -13.1 m。實際放流管工程與深開挖工程期間也曾遭遇面盤無法轉動，而開艙檢查時發現大粒徑礫石卡住而無法持續破碎之情形，如下圖 1 機頭破碎艙遭礫石卡住現況。圖 2 為中科放流管福雅路工作井開挖之巨石，另外圖 3 為臺中捷運綠線站體開挖之巨石，巨石尺寸達 110 cm × 65 cm。

大粒徑與高強度之卵礫石將造成潛盾施工期間加劇刀刃磨損情況，此外，卵礫石層因為顆粒性材料，其材料不均質，礫石還會跟隨機頭面盤旋轉一起滾動，此狀況對面盤鋼材之耐久度更為不利。透過機具控制電腦紀錄若是發現推進



圖 1 機頭破碎艙遭礫石卡住現況



圖 2 中科放流管福雅路工作井開挖之巨石

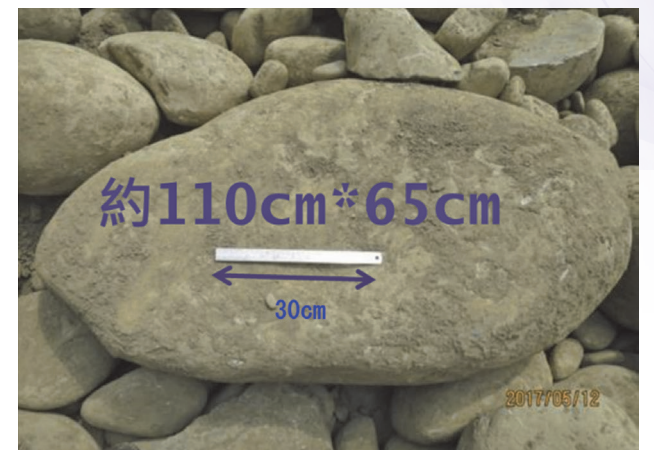


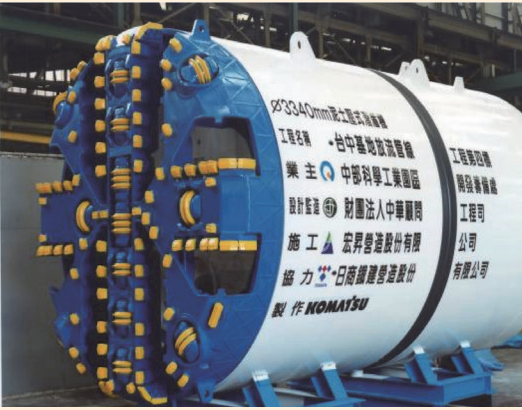
圖 3 臺中捷運綠線站體開挖之巨石

力、面盤扭力突然有明顯之上升或是在出碴材料上發現金屬之碎片即可推斷已有刀刃損壞之情況發生，若是沒有上述情況發生，也應在固定距離開啟內外艙門來檢查面盤刀刃之狀況，若有需要則更換刀刃，確保掘進順利。

三、潛盾機經驗回饋

潛盾工程的重要施工要點與周邊配合介面項目相當繁多，例如從潛盾機的型式選擇（開放式、土壓式、泥水式、泥濃式）、刀盤的型式與開口、螺旋出土機的選擇、作泥材料與土艙壓力控制、泥水系統、出土作業與監控作業…等等，每一個課題都是施工成敗舉足輕重的關鍵。本文以中科放流管三、四標潛盾施工經驗，從面盤開口、遭遇巨石與刀刃磨損等方面來分享施工經驗，其中案例所選用之潛盾機主要規格如下表 1：

表 1 中科放流管三、四標潛盾機規格（來源：台灣世曦）

照片		照片	
規格	第三標 -- 加泥型土壓平衡式 製造：日本 川崎重工（Kawasaki） 尺寸：外徑 3,380 mm、總長度 6,700 mm 規格：總重量 81 T、總推力 11,772 KN	規格	第四標 -- 密閉型泥土壓式 製造：日本 小松公司（Komatsu） 尺寸：外徑 3,340 mm、總長度 7,747 mm 規格：總重量 65 T、總推力 11,760 KN

1. 面盤開口率與尺寸：為使推進開挖面穩定，刀轉盤取土孔寬 與開口 是相當重要的，開口率一般指面盤開口面積與刀盤面積的比值。同時由於刀盤中心周邊因為角速度較低，作泥材（如皂土等高分子材料）與細粒料（粉砂土或黏土）容易在中心位置沉積，形成固結的泥餅，因此可適當加大面盤中心周邊之開口率。但開口過大恐有開挖面不穩定與大卵礫石的進入而堵塞排土的危險性。故開口應透過隔板產生單一開口來限制過大之礫石進入土艙，若採用螺旋出土機則必須確認其輸送粒徑能力與最大之開口可以符合，確保礫石可以被順利帶出。
而開口寬度狹窄也將造成滾輪式切削刀所承受負荷較大，阻力也大，掘進速率將因而變慢；相反地，開口寬度增大時，負荷減小，速率增快，因此挑選潛盾機時應加以考量。另為防止卵礫石可能造成之排土口或排土泵阻塞，可於土艙或潛盾機體後裝設破碎機，以利卵礫石碎解後再排送出坑。
2. 卵礫石層粒徑評估：從地質調查報告中記載最大卵石的外徑為四十七公分。但是實際的掘進經常有大於 47 公分以上巨石。依照潛盾機設計，通常應假設最大粒徑為進行地質

- 調查最大粒徑的 2 ~ 3 倍卵石。
- 也因為經常性的遭遇巨大礫石，中科放流管第四標潛盾機施工中（R24 ~ R26），預定與實際之刀刀更換距離差異甚大，原施工計畫評估 500 ~ 680 公尺更換一次面盤刀刀，但在實際施工過程中，最短刀刀更換距離為 88 公尺，最長更換也僅 330 公尺。因此刀刀之損耗程度比原評估嚴峻，刀刀更換更應審慎評估，並預先備妥更換備品，避免延誤工期。
3. 刀盤的對應：刀盤除了破碎開挖與穩定之外，還有透過刀刀轉動攪拌製造土碴流動性之功能。為了有效破碎卵石，選定具有粉碎力和耐力高的旋轉刀刀成為非常地重要課題。
而在刀盤中心部份至外圈周邊應安裝滾輪式切削刀，以利將可能無法直接排出之粒徑過大卵礫石先加以切削、破碎後排出。刀盤除刀刀耐磨強度設計也相當重要，依中科放流管施工經驗，國外原廠之刀盤耐磨性皆須再透過現場補強，建議可在刀盤面板與周邊外緣銲上網狀耐磨條與耐磨鈑，若刀盤內側有設攪拌棒（翼），亦可於表面堆銲耐磨條。另外必須特別注意相關面盤上之補強構件必須滿銲與確實牢固，避免在施工過程掉落，

反而造成損壞面盤的主因。若耐磨型不足，則會在面盤、刀座與外圍周邊造成嚴重的磨損。下圖 4 為中科汙水放流管推進施工照片，因面盤推進力大增無法做動，故開啟艙門檢查，筆者親自爬出艙外巡視開挖面，發現因擴挖需求，外徑應略大於機身外徑的刀刀面盤，但在施工後面盤外圍已嚴重磨損，造成面盤外徑已小於機身外徑之情形，導致推力大增無法推進之情形。

4. 刀刀損壞與更換：潛盾機推力以刀刀破碎卵石，但因卵石不若岩盤穩固，會因顆粒狀的卵石材料將持續滾動而導致刀刀無法直接施力破裂卵石，導致刀刀磨耗加劇，刀刀的損壞等情形。以中科放流管施工為例，其刀具損壞情形如圖 5 至圖 7 刀具磨損更換照片。



圖 4 刀刀面盤外徑已小於機身外徑



（來源：台灣世曦）
圖 5 放流管第四標刀具磨損更換照片（1/2）

- 經施工觀察主要損壞情形可大致分為以下三種情形：
- a. 刀刀單側磨損：刀刀只隨面盤旋轉而無自身轉動，在單一刀具發生此狀況時，會迅速地導致周邊鄰近的刀刀負擔增大，而導致加速破壞的情形，在施工過程若有發現面盤參數異常應及時檢查刀具。
 - b. 刀刀變形與斷裂：在卵礫石層中掘進的刀刀可經常發現此類型破壞，因刀刀與礫石持續的接觸與碰撞，導致刀刀產生局部應力集中現象而發生變形，若無及時更換刀刀，也可能持續產生單側磨損，直到刀圈磨耗殆盡而產生斷裂的狀況。
 - c. 刀刀軸承破壞：在維修刀刀時經常發現不僅刀具磨損嚴重，也經常有軸承裂損與崩壞的情形，導致刀刀油封漏油，引入泥砂最終卡住而無法轉動的情形，若再無更換刀刀，則會發生刀刀解體的情形，面盤旋轉過程中嚴重損壞到其他刀刀。

經上述討論，可以發現密閉式之潛盾機在卵礫石層施工所遭遇之困難，工程經費勢必也將相當高昂，故在地下水位較深或地下水量較小的工區也可採用開放式潛盾機，開放式機型（如圖 8 所示）在大顆卵礫石的地層中將有著大幅的進度優勢，可提升工程進度並節省鉅額之工程經



（來源：台灣世曦）
圖 6 放流管第四標刀具磨損更換照片（2/2）



圖 7 放流管第一標刀具磨損更換照片

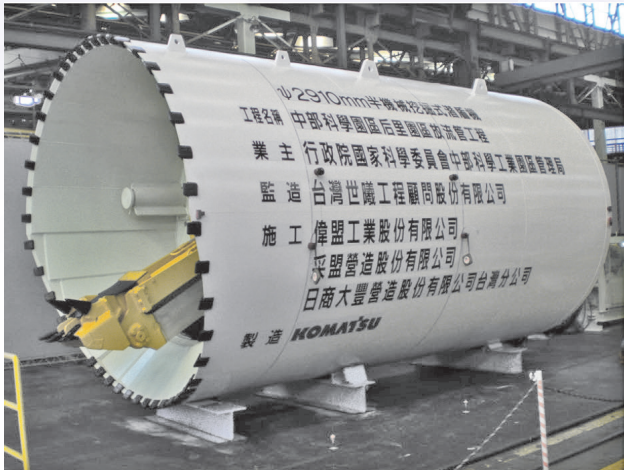


圖 8 開放式潛盾機（資料來源：大豐營造）



圖 9 臺中捷運綠線 G9-1 站開挖完成空拍圖



圖 10 臺中捷運綠線 G9-1 站 36.75 m 開挖完成

費，以下參考中部科學工業園區后里園區放流管線工程潛盾隧道施工說明會簡報，分享開放式與密閉式潛盾工法評估及處理對策，如下表 2。

四、深開挖施工經驗回饋

臺中捷運 G9-1 站卵礫石深開挖達 36.75 公尺，為目前全國建築最深建築基地開挖工程案例，開挖完成時之空拍照片及基地底部照片如圖 9、圖 10 所示。因卵礫石層的自持性良好，最大之施工困難點為祛水作業，為了達成開挖降水的目的，最大抽水的總流量約達 40 m³/min。未來各捷運站站體施工開挖期間，除開挖支撐之外，

每階段開挖均須將地下水降至開挖面下 1 m 處，藉以獲得乾燥、穩定之開挖面，供施工作業使用，並確保開挖區穩定。

而祛水技術之困難處在於如何依據地質材料與滲透係數精準地分配抽水井位置、深度與抽水馬達能量，可在最經濟的狀況下完成祛水任務。為消除潛在之開挖危害因子，深開挖應注意下列要點：

- 1. 抽水試驗：為更進一步瞭解基地地層之水理特性，以進行抽水井數量之規劃，可於開挖前規劃施作單井及群井抽水試驗，經由抽水試驗得知地層水理參數後，採取導水係數及

表 2 開放式與密閉式潛盾工法評估及處理對策

項 目	開放型	密閉型
確保開挖面的穩定	維持地盤的自立性，確保切剖面穩定（以 N 值作為評估） 1. N 值 8 以上黏土與無地下水 N 值 30 以上的砂質地盤 2. 有湧水現象 N 值 30 以上的砂礫地盤 3. 山岳隧道	藉由泥水加壓 泥土加壓支撐開挖面，適用在範圍較廣的各種土質
掘削、切削	設置怪手、掘挖巨石	藉由 Roller Bit 刀刃破碎礫石，再由面盤空隙取入機內
地下水的對應方式	以浸水式泵浦來抽水排出至工作井外	密閉型式 可確保水密性
切削面的安定性受到崩壞之情形	地質遇到細粒土、小礫石含量多、或軟弱地層時，較易發生下陷，保持連續鑽掘，加速前進，可藉由潛盾機身來支撐地層。	只有細粒土、小砂礫會被取入、無法破碎的巨石則持續滾動，長時間的擾動會導致沉陷
障礙物（流木）處理	因切剖面是開放式的，容易處理	實施補助工法，作業員需前進到切剖面以人工撤除。
地盤變化與湧水的對應	自機內頂拱注入高分子吸水劑或進行開挖面地盤改良	遇到地盤變化時容易應對
停機休息時的處置	長時間停止掘進時，為防止細粒料流出，應以布袋或其他材料蓋住開挖面，並以機身的千斤頂及怪手施加壓力穩定	以泥水加壓及泥土加壓方式維持開挖面穩定

儲水係數進行分析，推估工區最終開挖所需抽水量與配置抽水井。

- 2. 增加水位觀測井及自動化監測系統：為掌握抽水成效，工區可規劃自動化監測系統嚴密監控地下水位變化，並於基地內各抽水井分別投入電子式水壓計，採用自動化監測隨時瞭解基地內地下水位高程。

在本次施工過程中，因卵礫石層特性，其抽水下降地下水位對於地層下陷的影響極小，在中捷深開挖案例中，須將地下水位由 -6 m 降至 -38 m 深，期間對本工程對鄰近建物與

周邊道路進行連續性監測，在完工後皆無造成明顯之建物或是道路沉陷影響。

- 3. 落實開挖面紀錄：開挖期間並定期檢討基地開挖降水及施工狀況，並落實開挖面地質變化與地質條件比較驗證（geologic mapping），以回饋原設計與後續工程施工做為施工風險管理依據。
- 4. 增加發電設備：為預防斷電，應於工區準備備用發電設備及 ATS 自動轉換器，以供抽水設備及監測系統掌握地下水位變化，並確保開挖區地下水位穩定。

5. 周邊排水系統承容量：深開挖工程可能因抽水量大於基地外既有設施排水量，因及早規劃或增設基地外臨時排水設施。
6. 擋土柱施工方式：臺中卵礫石層深開挖多以人工擋土樁為主，而目前以人工擋土樁施作之地下室開挖約可達 25 m 深，為降低人工擋土樁施工人員依賴性及施工期間安全性，採取安全快速且成本較高之全套管擋土樁工法，近年來全套管擋土樁面對卵礫石層可施作深度也逐漸提升，可做為站體施工深開挖之擋土工法，擋土樁施工照片如圖 11 所示。
7. 開挖壁面保護：若擋土樁間有開挖裸露面，開挖後應盡速進行掛網與噴凝土的封面保護作業，擋土樁間開挖縫隙掛網與噴凝土保護施工情形如圖 12、圖 13 所示。若在地下水

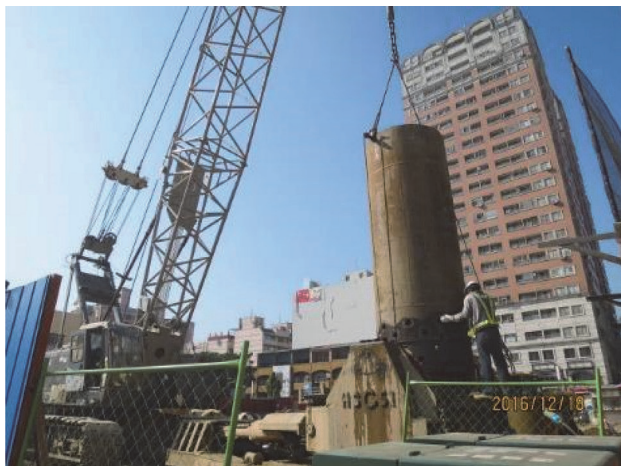


圖 11 臺中捷運綠線全套管擋土樁施工



圖 12 全套管擋土樁間掛網施工



圖 13 全套管擋土樁間掛網完成後噴凝土施工

- 無法全面下降情況下，應採鋼板組模與立即回填灌漿方式，立即降低開挖壁體細粒料流失風險，若無法立即進行壁面保護，應減少開挖面裸露，以鋼板組模方式如圖 14 所示。
8. 開挖期間水包處理：對於擋土樁間若仍有局部滲水，出水量在不影響施工開挖下，應不要採取封阻措施，而可採取直接於側壁插管導水至鄰近抽水井方式處理，或在開挖面挖掘集水溝統一導排，以解除側壁後方水壓力，開挖壁面設置排水管線導排情形如圖 15 所示。

五、結論與建議

- 工法選擇：本次工程案例可供日後臺中都會區潛盾工程與深開挖抽水之參考案例，而未



圖 14 以鋼板組模回填灌漿穩定開挖壁面



圖 15 開挖壁面設置排水管線後集中排出

來捷運藍線潛盾施工，則可視地下水位狀況選擇開放式或密閉式潛盾機。惟卵礫石層特性，其大量抽水對於地層下陷的影響極小，在中捷深開挖案例中，需進行長時間抽水來維持開挖面乾燥，施工期間工程單位對鄰近建物與周邊道路之監測，皆無造成顯著之沉陷影響。建議可發揮卵礫石層地質特性，不會因抽降水導致明顯地層下陷之優勢，透過抽水工法降低地下水位，並增加選擇開放式潛盾機選擇的機會，可大幅加速工程進度並降低潛盾施工費。

惟大規模抽水之電費仍相當高昂，未來建議工程設計單位可再審慎比較評估抽水費用與密閉式潛盾機之設備與頻繁更換磨損刀刃…等相關工程費用，再來選擇最具備經濟性與效益性的潛盾工法。

- 前期刀刃試驗：由於臺中卵礫石層的特殊性，先前在中科放流管施工時刀刃損耗相當大，經過十餘年的技術與材料科技進步，新型態的刀具應該已有大幅的進步，建議可以進行不同刀刃的試驗來優化刀刃型式選擇與分布位置，以提高使用壽命與降低工程經費。
- 潛盾機面盤開口與巨石處理：對於卵礫石層施工與出土來說，建議以排為主，破碎為輔的原則來進行施工，並強化刀刃強度與耐磨技術。若遭遇巨石，應可從面盤異音或是推力、扭矩大增來判斷，此時應降低面盤轉數，增大推力以嘗試增加刀刃貫入量，並同

時利用反覆之正轉、反轉來破碎切削巨石。若仍無法破碎，且地下水位較低，人員可以出艙，則由人員出艙進行破碎；若地下水位高，亦可在精準判斷巨石位置後，由地面利用鑽機來進行輔助破碎。

- 刀刃維修：依據先前施工經驗，刀刃消耗總費用佔據以佔據潛盾施工零配件的成本的近三分之一，且刀刃修補的技術性相當高，建議工地現場可設有專門之刀刃維修團隊，確保刀具的安裝、檢測、維修與存放管理系統完善。
- 智慧抽水系統：捷運站體大規模的抽水作業在設備與電力費用皆相當龐大，建議可導入智慧抽水系統，配合水位高低可自動開關抽水馬達，並配合工程開挖需求精準掌握地下水位，避免多餘之抽水所產生電力浪費與工程經費支出。

參考資料

1. 藍啟榮（2008），「長距離推進在臺中卵礫石層中施工案例」，地工技術，第 115 期。
2. 臺中地區卵礫石層參觀野外手冊（2008），「臺中地區卵礫石層推管、潛盾、深開挖及擋土工程參觀活動」。
3. 中部科學工業園區后里園區放流管線工程潛盾隧道施工說明會簡報（2007.09.12）。
4. 林商裕（2003），「臺中都會區擋土柱工法與相關抽水井設計之探討」，地工技術，第 97 卷，第 15-34 頁。
5. 陳俊宏（2018），臺中卵礫石層深開挖與抽水施工挑戰，臺中卵礫石層深開挖與抽水施工挑戰，第十七屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。
6. 劉安德（2018），臺中卵礫石層半圓形全套管與改良型人工擋土樁施工案例，第十七屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。
7. 鄧建華（2017），「臺中捷運綠線聯合開發案於卵礫石層深開挖施工實務」，中華技術，第 116 期。