

# 臺灣大地工程近三十年之發展與回顧——潛盾隧道之發展與研究趨勢

熊彬成 國立中興大學土木工程學系 / 教授、大地技師

## 一、前言

所謂的潛盾隧道工程，即主要使用潛盾機進行隧道挖掘之工程。而潛盾機（Tunnel Boring Machine；或稱 Shield Machine）（如圖 1）是一種以鋼構筒體為主體之隧道施工機具，其鋼製外殼可在隧道開挖過程中承受並平衡地下水壓與土壓，因此施工較不易受到地層與地下水條件影響。依施工方式不同，潛盾機可分為密閉式與開放式兩類。施工時藉由刀盤切削前方土體，並配合土艙控制開挖與出土量，以維持開挖面穩定，避免坍塌發生。此外，以密閉式潛盾機挖掘隧道，尚分為泥水加壓式或土壓平衡式，其差別在於泥水式利用泥水壓力平衡挖掘所遭遇的土壓力，土壓平衡式則是直接在潛盾機機首的後方，用油壓千斤頂加壓的方式，提供與前方土壓類似的壓力，在二者達平衡之後，讓潛盾機向前掘進。

潛盾機在往前掘進的過程中，主要依靠前端刀盤旋轉進行土體或岩體切削，刀盤（如圖 2），由驅動系統帶動持續旋轉，並利用配置於刀盤表面不同類型的刀具（例：碟刀或刮刀等等）破碎前方地層使整體盾體向前推進。被切削下來之破碎土體會進入土艙內，再透過螺旋輸送機或泥水循環系統排出至後方，以維持開挖面之穩定與壓力平衡。刀盤的轉速、推進速度及排土量需依據地層條件進行調整。

近年來，潛盾工法已成為都市地下工程中最重要且最常見的隧道開挖技術之一，尤其台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界帶，地質環境多變，工程常遭遇軟弱夾層、高塑性黏土、含礫層甚至岩層等複雜地層。在台灣高密度的都市開發下，潛盾機將持續為地下開挖之主力機具。而隨著潛盾機的廣泛運用，潛盾隧道工程之施工效率與成本控制，已成為其核心問題之一。切刀刀具的磨耗行為與壽命管理機制，對於潛盾工法的效率與成本深具影響力。

刀盤為潛盾機中直接負責岩層破碎與切削的重要構件，其使用壽命及刀具更換頻率，對整體施工效率、工期控制與經濟效益皆具有重要影響。在硬岩地層掘進過程中，刀具會持續與岩石表面接觸並產生摩擦，岩體材料在應力作用下會產生塑性變形；當應力集中達到較高程度時，亦可能因衝擊能作用而導致岩石發生脆性破壞，以達成切削效果。

過去台灣都會區中的潛盾隧道同質性較高，多是在軟弱土壤中掘進，加上用地與路權較容易取得，所以多著重在直線／接近直線隧道所導致的地表／建物沉陷，以及相關的建物保護措施。然由於近年來地上／地下環境複雜、用地與路權取得不易、新都會區的地層條件不同、加上必須考慮永續與節能減碳的議題，以致會衍生出新的研究議題，以下就一一探討。

## 二、刀具磨損探討與評估

在軟弱地層的掘進，潛盾機面盤上的刀具磨損通常較為輕微，故過去較少予以探討，但若在較硬地盤進行切削，如礫石或岩層，刀具磨耗大，刀具磨損的程度與相關議題就變成需要探討的議題。刀具磨耗型態一般可分為正常磨耗與異常磨耗兩大類（如圖 3 和圖 4 所示）。正常磨耗主要為沿刀具徑向方向所產生之均勻磨損；而異常磨耗則包含平面磨損、開裂、開口環脫落以及剝落等形式。上述磨耗現象除會降低刀具切削效率外，亦可能增加刀具更換頻率與施工風險，因此刀具磨耗行為之分析與預測，對潛盾施工管理具有重要意義。

影響刀具磨耗的主要因素，包含地質條件（如土體成分、粒徑分布）與操作參數（如掘進速度、刀盤轉速與壓力控制）。目前針對潛盾機掘進性能與刀具磨耗預測，已有多種相關模型與概念被提出。其中較具代表性的方法為：Teale（1965）提出「比能」概念，定義為鑽掘工具破壞單位體積岩石所需消耗之能量，該指標常用於評估施工效率、刀具磨耗以及成本效益。

為了能夠模擬刀盤磨耗，Shu *et al.* (2026) 利用分離元素法（Discrete Element Method；DEM），模擬刀盤切削礫石所產生前述的比能（Specific Energy；SE），再利用 SE 去協助評估刀盤所造成的磨耗，並搭配小型實驗室實驗予以部分驗證。同樣利用 DEM，筆者亦嘗試建立一套合理的數值模擬分析模型；首先是先利用單壓試驗結果，在數值模型中建立微觀參數以模擬大地材料，接著再以潛盾隧道施工時，潛盾機的實際操作參數作為輸入參數，在模型中置入簡化後的潛盾機刀盤，並加入現地地層條件，模擬刀具與地層交互下的磨耗反應（如圖 5）。由於潛盾隧道掘進作業的效率與設備磨損的情形將直接受刀盤－地層交互行為的影響，了解刀具於推進過程中所承受的應力與能量是有必要進行的研究。

誠如前文所言，本分析採用 DEM 作為數值模擬的基礎工具，將現實試驗數據所獲得的岩石力

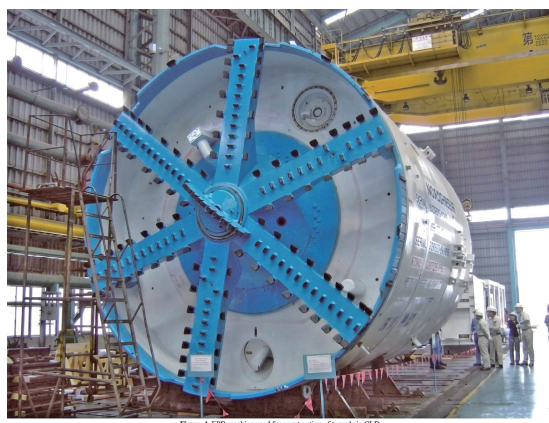


圖 1 潛盾機



圖 2 潛盾機刀盤



圖 3 正常磨損刀具



圖 4 潛盾數值模擬模型

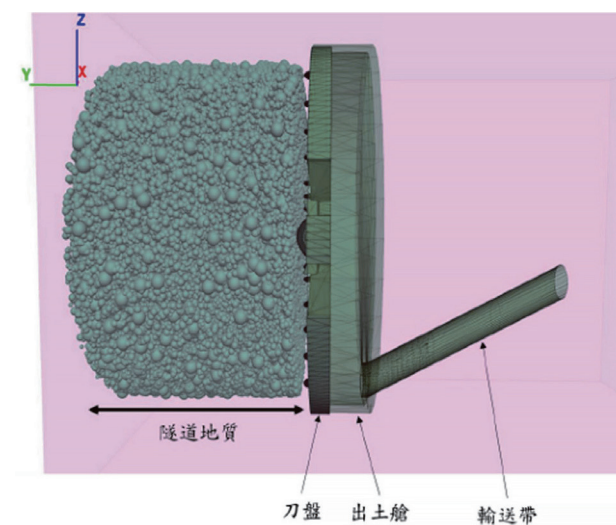


圖 5 異常磨損刀具

學性質（宏觀參數），在軟體裡進行微觀參數校正與模擬分析，以建立能夠反映刀盤與地層間真實互制行為之數值模型。利用校正後之模型，可更有效模擬刀具於掘進過程中的受力、破岩機制及磨耗行為。另外，結合現地施工監測資料（如：潛盾機推力、刀盤扭矩），作為模型驗證依據，並進一步評估刀具的磨耗量。透過數值分析與現地資料的相互比對，不僅能更有效評估刀具磨耗程度，也有助於掌握刀盤於施工期間的運作狀態。期待能作為提升磨耗預測能力與精進工程設計的工具。

而近年來，人工智慧與機器學習技術於土木工程領域中的應用日益廣泛，尤其在大數據分析、工程預測與數值模擬等方面展現出良好成效。相較於傳統經驗公式或理論分析方法，機器學習能夠透過大量資料訓練，自動建立輸入參數與工程行為間之非線性關係，進而提升預測效率與準確性。

為了建構一套能夠隨施工進度即時預測潛盾刀盤磨耗趨勢之模型，目前亦進一步導入機器學習技術於刀盤磨耗分析中。首先，將 DEM 數值模擬所得結果與現地施工監測資料進行比對，以驗證數值模型之合理性與準確性。完成模型驗證後，再利用已校正之數值模型模擬不同施工操作條件下之掘進行為，藉此獲取大量不同工況下的刀盤受力與磨耗結果。將上述數值模擬成果作為機器學習模型之訓練資料，透過大量樣本建立潛盾操作參數、地層條件與刀盤磨耗之間的關聯性。進一步建立具預測能力之刀盤磨耗模型，以即時推估切刃齒之磨耗趨勢與可能之磨耗程度。

除此之外，相關研究亦嘗試將潛盾機運行狀態與刀盤磨耗行為進行連結。以現地施工監測數據作為原始資料來源，包括潛盾機推力、刀盤扭矩、掘進速度、刀盤每分鐘轉速（rpm）等操作參數，並分別導入兩種不同之機器學習演算法進行模型訓練與結果比對（如圖 6 和圖 7 所示，分別採用 PCA+XGBoost+KMeans 與 Kernel PCA+KMeans 兩種不同的演算法；兩種演算都是以潛盾機實際操作參數，搭配不同權重來計算圖上的 PC1 跟 PC2 兩種指標）。

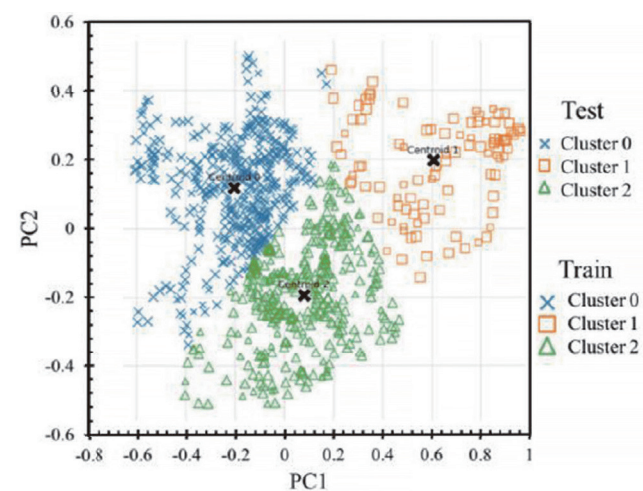


圖 6 機器學習應用於磨耗預測之模型(一)

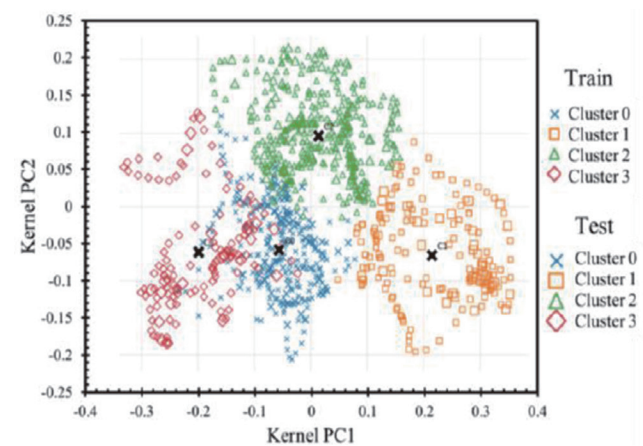


圖 7 機器學習應用於磨耗預測之模型(二)

透過演算法對大量施工資料之分析，可進一步找出影響刀盤磨耗之主要關鍵參數。並將潛盾機於不同施工階段之運行狀態進行分類，藉此了解不同工況下對刀盤磨耗所造成之影響程度。期望透過此機器學習模型，能更有效掌握潛盾機施工過程中的刀盤磨耗趨勢，並且找出其相對物理意義，以圖 7 為例，潛盾機在 Cluster 0 指在低掘進速率與高推力條件下，卻仍有適當／正常的（Moderate）刀具磨耗；Cluster 1 則指低掘進速率、高推力與高扭矩時，會有更多的刀具磨耗且掘進效率不佳；當潛盾機堵塞時（可能有類似 clogging 效應），導致刀盤旋轉不易，有較小的推力與接近平均的掘進速率，但承受更高的扭矩，造成刀具異常磨耗，就屬於 Cluster 2；若潛盾機有高掘進速率、低推力與高扭矩，代表此時效率較佳，可能是刀具剛更換或地層較軟，則屬於 Cluster 3。

期望未來能建立潛盾施工管理與刀具維護決策的重要輔助工具，進一步提升施工效率、降低停機風險，並增進工程規劃與設計之可靠性。綜觀隧道工程之發展歷程，如今已逐步演進至高度機械化與智慧化之潛盾施工技術。隨著都市化快速發展與地下空間需求增加，潛盾工法已成為現代都市地下工程中不可或缺的重要施工技術。而在台灣複雜的地質條件下，刀盤磨耗的問題直接影響了施工效率、工程成本與施工安全性。因此，近代研究開始導入理論分析、數值模擬及大數據／機器學習／人工智慧資料分析技術，欲建立更具科學依據之刀具磨耗預測方法。另一方面，有效的預測刀具磨耗，避免無謂的浪費，亦可達到永續之目的。

隨著人工智慧與機器學習的興起，進一步推動地下工程分析模式之轉變。透過整合現地監測資料、施工參數與數值模擬結果，機器學習能有效建立複雜參數間之非線性關係，大幅提升刀具磨耗預測與模型校正效率。尤其在離散元素法建模方面，人工智慧技術的導入能提供更快速且系統性的道路。也期望未來能整合多項理論、技術，進一步朝向智慧化潛盾施工發展，建立兼具即時監測、數值分析與預測能力之整合系統，以提升地下工程施工效率、降低施工風險，並增進整體工程管理與設計品質。

### 三、潛盾機設備的改善

針對前述路幅／路權取得困難、加上所遭遇的地層可能又較過去案例複雜，捷運工程於地下隧道潛盾機的設備改善上，也作了以下的調整：首先是刀盤與中折設備的改變，以位在新北市的某案例來說明，由於隧道的曲率半徑僅有 51 公尺與 57 公尺，潛盾機採用雙中折設備，並適當的使用超挖刀，可有效降低在急轉彎的時候施工性，以及所引致的地表沉陷，由圖 8 可得知，在雙隧道開挖完成後所引致的最大地表沉陷，大約為 40 mm 左右（劉富傑，2024），較過去經驗公式所預估得來得小。此外，為了降低盾尾間隙所使用的背填灌漿設備，體積也大量減少，可完全置入機尾內，進行同步背填灌漿。

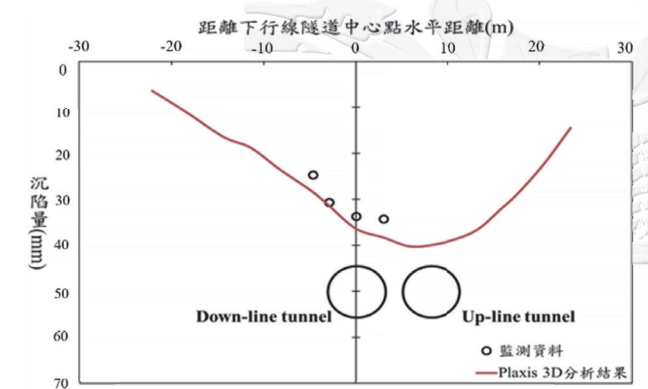


圖 8 捷運急曲線隧道施工所引起之地表沉陷

再者，因應長推進，甚至在較堅硬地盤掘進時，有較頻繁更換切刃齒之需求，目前各潛盾機製造商紛紛開始改用多增加了電子式感應計的面盤，以同步了解切刃齒在掘進時的磨耗。另外，更換切削齒的方式，也從過去僅能進行地改後出艙換齒，改成能由艙內進行換齒，以降低在更換切刃齒時可能產生的風險。

### 四、大圓潛盾機與 GFRP 鏡面的運用

以傳統的捷運潛盾隧道施工而言，大多採外徑為 6.2~6.25 公尺的標準圓潛盾機來施作；然由於車站位置的限制，在桃園綠線 G07-G10 車站中間的主線段，改採兩部外徑約 8 公尺的中圓潛盾機來施作隧道，並在接近車站的區域，利用額外的空間作為車站的月台，之後再以聯絡通道的方式與主車站區聯通，相關中圓潛盾機的捷運或軌道工程上之使用，在國內雖屬創舉，但在國外早就屢見不鮮（熊彬成，2021），故在國內仍有繼續推廣之必要。另外，為了能達成節能減碳的目的，世界各國開始紛紛接受所謂「再生（refurbishment）潛盾機」，也就是將使用過的潛盾機之重要配件更新、保養與維修之後，再重新使用。這不僅有減少採購潛盾機的空間，也降低處理廢棄舊機的成本，甚至達到節能減碳的目的。

另外，更有許多國家開始紛紛改採單一大圓（即直徑 10 m 以上）潛盾機，取代兩部傳統圓潛盾機，來進行捷運地下隧道的開挖；目前有相關經驗的計畫，包含西班牙巴塞隆納地鐵，以及新加坡地鐵正施工中的環島線（Cross-Island Line），其潛

盾機（如圖 9 所示）直徑達 12.2 m。其概念也是認為與兩部傳統圓潛盾機比較起來，僅採用一部大圓潛盾機，不論在製造或施工的碳排放量上，都會較低，可以達成永續的目的。另外，採用大圓潛盾機，減少出發到達次數，還有聯絡通道施作等高風險工項的施作，對降低工程風險，有一定的幫助。

GFRP（玻璃纖維增強聚合物）是一種複合材料，由玻璃纖維增強聚合物基體製成。玻璃纖維通常由二氧化矽、氧化鋁和鈣組成，嵌入聚合物基體中以增強材料的機械性能。由於 GFRP 能提供一定的抗拉強度，但在潛盾機破鏡時，會較傳統鋼筋容易切削，故可被使用在連續壁的鏡面上，不只潛盾機出發／到達時相對容易切削，地盤改良的成本也將大幅降低。

國內目前較常使用在以連續壁作為擋土結構上的鏡面（如圖 10），但國外也有將類似鏡面安裝在以排樁／切削樁式擋土結構上的經驗，未來在進行須採用樁式擋土結構之潛盾隧道之出發到達，亦可予以考慮。此外，由於該材料的製造，幾乎無碳排產出，也可符合減少碳排的需求。



圖 9 新加坡地鐵所使用的大圓潛盾機



圖 10 GFRP 鏡面

## 五、鋼纖維混凝土環片之使用

國內目前潛盾隧道所使用的預鑄環片，依使用材料區分，大致上有鋼筋混凝土、鑄鐵跟鋼三種環片。然實際上，以一般環片的受行為來說，大部分受壓，並非受拉，所需抵抗的張應力，應該相當的有限。再者，在台灣，混凝土環片所使用的鋼筋量與國外相較之下，量體高出許多。近幾年來不論是鋼筋本身的材料價格，或者是鋼筋綁紮所需要的人工價格，都大幅度提升，而環片製造時間長，產量有限，且國內需求量又大，確實是有開始研發具同等或更佳功能，價格卻可能相對低廉且生產速度較快的預鑄環片之必要性。

因此，針對前述需求，國內開始對國外已使用多年的鋼纖維混凝土環片，進行初步的研究。所謂的鋼纖維混凝土環片，即是以鋼纖維來取代鋼筋，使用在預鑄環片中。預鑄鋼纖維混凝土環片的生產，由於不需要進行鋼筋捆紮，應該能大幅減少鋼筋的用量，進而大幅縮短環片廠生產環片的時間，大量增加產線的產能，加上又有減少碳排，成本降低，延展性（韌性）較佳，生命週期較長（可達 120 年），甚至若有裂縫產生，還有進行修補的可能等等之優點。為了進一步驗證預鑄鋼纖維混凝土環片的強度與功能性，2024 年曾經在中部某預鑄廠試作了相關型式的環片，並且就抗彎試驗（如圖 11）、灌漿孔拉拔試驗與抗推試驗的結果，與預鑄鋼筋混凝土環片的試驗結果作比較，發現其差異不大，然鋼纖維的使用量，僅有每立方公尺混凝土 40 公斤而已，遠低於目前所使用的鋼筋量。另外，為考量或許預鑄環片在有額外側壓的環境下，可能會承受額外的張力，此時預鑄鋼纖維亦可搭配少量的鋼筋、甚至前述的 GFRP，形成所謂的複合環片（如圖 12），以滿足實際的工程需求。以圖 12 來進一步說明，可以看到僅在環片邊緣放置少量鋼筋或 GFRP（即有畫線條部分），其他部分的則全部為鋼纖維所取代，此即為所謂的複合環片。圖 13 則是環片的抗彎試驗結果，比較了純 SFRC（鋼纖維環片）跟複合環片（即 SFRC+GFRP），可以發現複合環片的抗彎能力（主要是抗拉能力）是大幅提升的。



圖 11 預鑄鋼纖維混凝土環片抗彎試驗

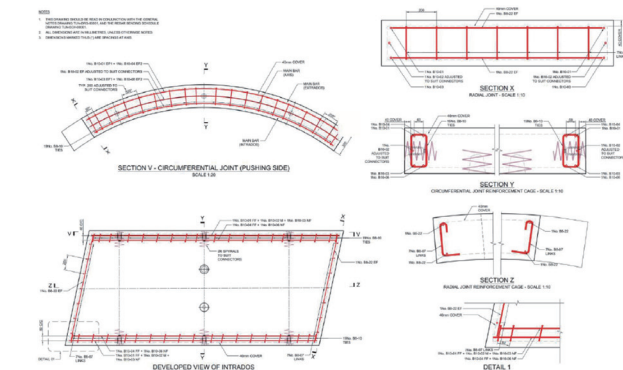


圖 12 複合式預鑄環片

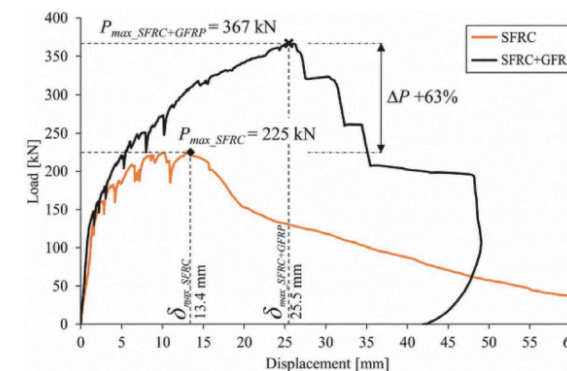


圖 13 複合式與純鋼纖維混凝土預鑄環片之 Load-Displacement 曲線差異

## 六、機械式聯絡通道開挖

在主隧道中間的聯絡通道開挖，由於目前在國內皆採地改後人工開挖，所以一向被視為高風險工項，國內最近較知名因聯絡通道開挖導致事故，當數 2005 年高雄捷運橘線隧道於中正路下方開挖聯絡通道之集水井時，產生大量湧水，然後演變成大規模的坍塌，雖所幸無人傷亡，但卻導致工期之延宕，以及額外新台幣 20 億工程費的支出。

有鑑於此，日本、德國與中國大陸的各專業廠商，紛紛推出可挖掘聯絡通道的小型潛盾機，以機械式挖掘的方式（如圖 14 所示），來

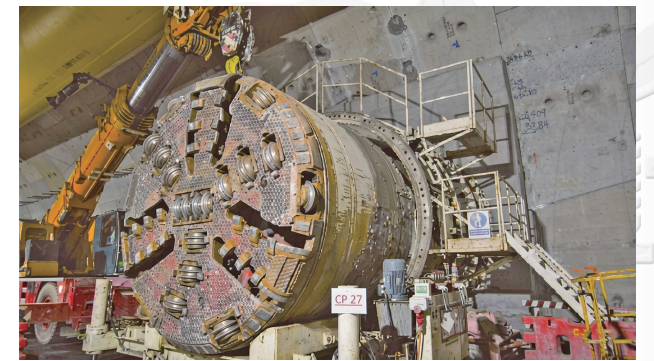


圖 14 機械式聯絡通道開挖

取代目前的人工挖掘的方法，且相關工法已被應用在國外的數個案例，已大幅降低聯絡通道施工之風險。然為了採用相關機械式開挖，潛盾隧道設計可能就必須配合調整，例如兩條主隧道間之距離跟可使用空間，必須符合小潛盾機的需求，且聯絡通道不得再作為集水井之用。因此，在相關應用上，仍有進一步探討的空間。

## 七、結論

本文從分析、設計、施工、機具設備與材料使用等不同面向，探討了潛盾隧道工程近年來的發展，尤其是與捷運或軌道工程相關的捷運隧道。預期在未來十年內，基於對環境、資源與工程風險的需求，國內對潛盾機或潛盾隧道的需求，將有增無減，本文所提及的各項議題，應該有更多的研究資源來投入，進行必要的分析與探討。

## 參考文獻

- Shu, P. Y., Chen, Y. F., Wang, T. T., Hsiung, B. C. B., Liao, C. Y. & Ge, L. (2026). Simulation of Cutter Wear in Gravel Using a Discrete Element Method Approach, *Geotechnical and Geological Engineering*, Volume 44, article number 85.
- Teale, R. (1965). The concept of specific energy in rock drilling, *In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 2, No. 1, pp. 57-73). Pergamon.
- 熊彬成 (2021)。海外大地工程經驗回顧兼漫談海外計畫管理，*地工技術* 169 期，第 91-102 頁。
- 劉富傑 (2024)。運用大數據與機器學習法預測捷運急曲線隧道施工所引致之最大地表沉陷，國立中興大學碩士論文。