

隧道鑽掘機與潛盾之技術演進

李魁士／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部經理

三井隆／日本鹿島建設株式會社海外土木支店工學博士

Ruben Duhme／德國海瑞克公司亞洲總部研發部主管

摘要

19世紀初潛盾開發之概念係利用盾構隔絕並支承開挖地盤。而硬岩 TBM 則是在開挖面穩定良好之岩盤，於無盾構下滾動切刃盤以壓碎、裂解岩盤，達到掘削之目的，兩者各有適用場域。然自 1969 年開發密閉式 TBM，及 1983 年開始在潛盾機頭配置滾輪式切刃，並經潛盾與硬岩 TBM 兩者技術融合、精進後，TBM 已可鑽掘軟弱土層至岩層之所有地盤。此時，潛盾已被定位為 TBM 之一種。1990 年後，近代 TBM 技術則朝大斷面、大深度、長距離、快速施工、非圓形等多樣化精進。

Abstract

The concept of the “shield tunneling technique”, which was invented in the early 19th century, adopts a shield in order to support the excavated ground, while the “hard rock Tunnel Boring Machine (TBM) technique” normally excavates under stable ground and uses a disk cutter to split the rock in order to dig faster. These two different types of techniques are suited for different types of situations. However, since the “closed type shield machine” was developed in 1969, an additional roller cutter has now been adopted for the closed type shield machine beginning in 1983. As both the shield and hard rock TBM techniques have gradually been making advancements over the years, the TBM can now excavate from soft ground to hard rock. In fact, in this day and age one could say that the shield machine can be considered as a type of TBM, and recently, since the year 1990, a variety of TBM techniques have been developed and implemented for larger cross sections and for deeper, longer distance, quicker progress rate, and non-circle shape tunneling.

前言

人類自古就鑿洞而居，掘洞方法也由利用石器漸次進步到用青銅與鐵器等，直至 18 世紀止，仍靠人力以鑿子或鐵錐等工具挖掘具自立性之土層，並漸擴延到岩層地盤。

隧道鑽掘 (tunnel excavation) 一般指以 (1) 人力開挖；(2) 爆破挖掘；以及 (3) 機械鑽掘等方式進行隧道鑽掘。在機械技術發達之現代，採用隧道鑽掘機 (Tunnel Boring Machine) 施工案例日增。這種全斷面隧道鑽掘工法 (Full-Face Tunnel Boring Machine Method)，就廣義而言，無論鑽掘對象為土層或岩盤，隧道鑽掘機的總稱即為 TBM。

茲探究自 19 世紀初期發展的潛盾與 TBM 的源起歷史，及 20 世紀後期至 21 世紀初期之快速發展的技術演進，俾能全面性理解潛盾與 TBM 之技術內涵 (見表 1)。

18 世紀末至 19 世紀初，於英國之工業革命後，水力廣被利用做為動力，相關物流效率越來越高，加上蒸汽火車之發明使得鐵路交通的必要性提高，都市與都市間的聯結開始藉由鐵路來替代馬車 (註：列車尺寸規格參引馬車，俾利銜接)。

因鐵路縱坡小及曲率線形大之需求，常須利用隧道以克服地形限制，都市隧道與山岳隧道的鑽掘技術在土木技術史上幾乎在同時期受到迫切需求，而在同一個時代 (1866 年) 也發明爆破岩盤所需要的炸藥，顯示人類技術史上不可思議的因果關係。

潛盾發展歷史

潛盾的源起

工業革命的發源地英國倫敦因物流量躍升，在泰晤士河 River Thames 上已興建了 30 幾座橋梁，但橋梁卻防礙船隻往來，衍生河底隧道的需求。1798 年 Ralph Dodd、1802 年 Robert Vazie、及 1804 年開發蒸汽火車之 Richard Trevithick 等，皆嘗試興建河底隧道，惟均以失敗告終。

表 1 TBM 技術演進軌跡

	1798	1843	1939	1969	1990~
Shield	試驗階段時代	改良與磨研時代	實用化與扎根時代	密閉式TBM實用化時代	多樣化時代
軟土潛盾	<ul style="list-style-type: none"> 1776 Watt改良蒸汽機 1798年Ralph Dodd嘗試建Thames河底隧道 1804 Richard Trevithick開發蒸汽火車 1805~1809以岩盤挖礦方式開挖Thames河底隧道導坑至305m因湧水失敗 1818 Brunel發明潛盾工法 1825~1843 Brunel首座Thames河底隧道 	<ul style="list-style-type: none"> 1865 Barlow發明鑄鐵環片 1869 美國Beach首探潛盾油壓式千斤頂 1869 Greathead探圓形潛盾興建第2座Thames河底隧道 1887 Greathead南倫敦鐵道採手挖壓氣式潛盾法 1896 發明泥水盾構專利 1890 倫敦~布達佩斯地鐵首採電氣化列車 1914 美國首探RC環片 	<ul style="list-style-type: none"> 1931 莫斯科地鐵探潛盾 1939 日本鐵路關門隧道首座海底隧道 1948 莫斯科開發基輔型機械式潛盾機 	<ul style="list-style-type: none"> 1969 日本首部泥水式TBM 1974 日本首部土壓式TBM 1983 日本首部密閉式土、岩複合式TBM 1985 德國首部Mixshield 1988~1991 英法海峽Channel tunnel探雙盾開放式、Mixshield、土壓式/單盾之雙模式、土壓式等計11部TBM 	<ul style="list-style-type: none"> 1990s 大深度、大斷面、形狀不侷限為圓形、分歧、快速施工 1994 東京灣橫貫道路8部 § 14.14m 1996 大阪3連TBM站通車 1997 德國 § 14.2m第4 Elb河隧道 1998 東京地鐵 § 14.18m親子TBM 2000 東京4心圓雙層車站通車 2006 西班牙馬德里 § 15.2m公路EPB TBM 2004~ 中國陸續進行17件 § 14.27m~15.76m隧道 2011 加拿大Niagara分洪隧道 § 14.4m開放式(最大)TBM 2014 美國Lake Mead Tunnel § 7m Mixshield承受17bar(最大)操作壓力 2015 土耳其Bosphorus海面下106.4m § 13.2m Mixshield 2013~ 西雅圖SR99公路 § 17.45mEPB(最大)TBM施工中 2013~ 香港屯門赤鱗角最大TBM § 17.56m Mixshield施工中 2014~ 東京外環道路4部 § 16.1m EPB TBM施工中
硬岩TBM	<ul style="list-style-type: none"> 1875 美國運用黃色炸藥完成Hoosac隧道 1866 Nobel發明黃色炸藥 1857~1870 人力及黑色火藥挖通Frejus隧道 1853 美國麻州以stone-cutting machine挖Hoosac隧道9.9ft，故障後廢棄 1845 Maus為Frejus隧道設計Mountain Slicer 	<ul style="list-style-type: none"> 1960s 德國Wirth TBM實用化 1957 Robbins 改良Modle 131-106, 採disk cutter 1952 Robbins製造Modle 910-106 TBM 	<ul style="list-style-type: none"> 1972 雙盾式TBM以兼顧工進 1970s TBM採單盾式以強化保護 		
密閉式TBM					
試驗階段時代	試驗階段時代	改良與磨研時代	實用化與扎根時代	密閉式TBM實用化時代	多樣化時代

Marc Isambard Brunel 緣此環境，構思建造隧道用的潛盾工法，並於 1818 年取得「Forming Tunnels or Drifts Under Ground」的專利權（圖 1）。1825 年 6 月開始進行豎井的施工，1843 年 3 月 25 日隧道開始供人通行（圖 2），1863 年起改供鐵路使用。該工程的豎井為直徑 15 m 圓形磚砌構造，而這也是首座利用自重沉設之開放式沉箱工法，計耗時 5 個月成功地沉設 13 m 深。

雖然 Brunel 以圓形潛盾取得專利權，但泰晤士河的河底隧道最初用途係規劃為複線的馬車與人行隧道，因此以寬 10.5 m × 高 6.5 m 的矩形斷面潛盾施工（圖 3）。由寬 0.9 m × 高 6.5 m × 長 1.8 m 的鑄鐵製潛盾單元橫向連結成 12 排，每 1 排有 3 層，總共有 36 個單元的鑽掘作業區。鑽掘時由奇數排先鑽，偶數排後挖，將開挖面的擋板一片片拆下，同時以人力挖掘，並使用手搖螺旋千斤頂推進，以磚頭堆砌做為隧

道襯砌，扣除因發生事故造成工程中斷期間，平均鑽掘速度約為每日 15 cm 左右。

這項工程可稱潛盾工法的開端，其間曾面臨粉塵、缺氧、湧水等課題，甚至在 1828 年發生第二次坍塌事故時，Brunel 的兒子 Isambard Kingdom Brunel 還身負重傷，工程中斷達 7 年之久。整個施工期間據非正式的記錄顯示共有 200 人以上不幸身亡。

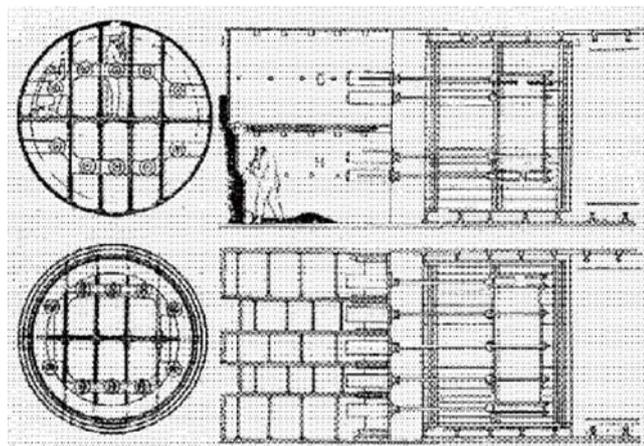


圖 1 Brunel 的圓形潛盾專利申請圖

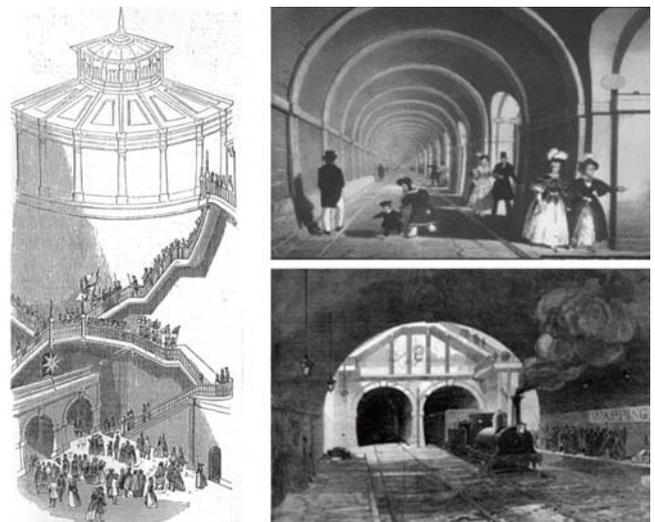


圖 2 Brunel 隧道、出入豎井、1963 轉駛鐵路



圖 3 Brunel 矩形潛盾與鑽掘施工

現代潛盾工法的發展演進

1865 年 P.W. Barlow 發明鑄鐵製環片，1869 年 J.H. Greathead 建設第 2 條穿越泰晤士河隧道，開發真正的圓形潛盾（圖 4），並首次使用壓氣穩定開挖面。



圖 4 Greathead 圓形潛盾機

其後 J.H. Greathead 於 1887 年南倫敦鐵路隧道工程採用壓氣式潛盾工法，為現在的壓氣手挖式潛盾工法奠定基礎。而 1890 年倫敦到布達佩斯地鐵首採電氣化列車開通，減少蒸氣濃煙排氣課題，使隧道得以趨深。

1805 ~ 1809 年，包括 Richard Trevithick 等人以岩盤挖礦方式開挖泰晤士河底隧道導坑（寬 61 ~ 91 cm 高 1.5 m）至 305 m（總長 366 m），經 2 次湧水而失敗。1825 年由 Brunel 以潛盾傳承，至 J.H. Greathead 再精進並確立壓氣手挖式潛盾工法為止，歷經 80 年，但仍未超出以盾殼隔絕開挖地盤，即所謂盾構（shield）的概念範疇。

法國、德國、美國，隨後亦採用手挖式潛盾工法施工，1869 年美國 Beach 開始使用油壓式潛盾千斤頂。此外，1914 年美國克里夫蘭的自來水隧道使用鋼筋混凝土環片，為現在 RC 環片的原型。

在日本，1917 年國鐵羽越折渡隧道與 1926 年的丹那導水隧道皆採用潛盾工法，然均以失敗告終。1939 年採用直徑 7 m 的壓氣手挖式潛盾工法完成世界第一條海底鐵路隧道國鐵關門隧道（長 725.8 m，圖 5）。

蘇聯在 1931 年莫斯科地下鐵工程使用英國製與蘇聯製潛盾機，1948 年開發基輔型機械式潛盾機，使用於地下鐵工程。

台灣 1975 年首部引入台北衛生下水道則是輔以壓氣之手挖式潛盾機（圖 6）。

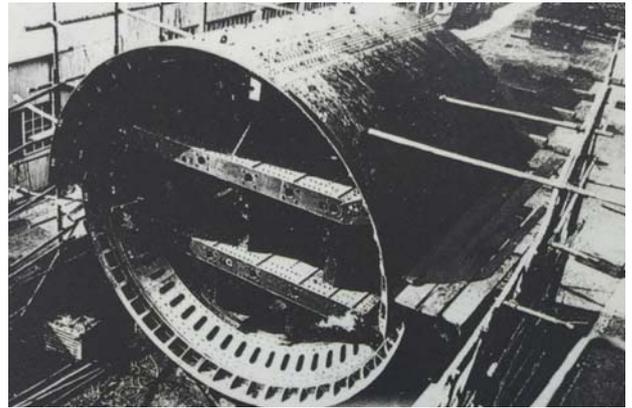


圖 5 世界首條海底隧道（關門）潛盾機



圖 6 台灣首部潛盾機（手挖式）

密閉式潛盾工法的發展（由 Shield → TBM）

要進化到像現今在維持開挖面的穩定下鑽掘，接著組裝環片之所謂密閉型潛盾機（Shield → Soft ground TBM），其第一個英國與德國之泥水盾構機專利要追溯到 1896 年，而 1961 年法國則構思壓力水密閉式潛盾（原理與泥水加壓式潛盾工法相同）。在 1969 年日本東京的鐵路隧道京葉線（長 865 m，直徑 7.29 m，圖 7），為世界首次施工的泥水式潛盾工法。



圖 7 世界首例泥水式潛盾機（羽田隧道）

接著在 1974 年日本開發出土壓式 (EPB) 潛盾工法沿用至今。1960 年代以後，潛盾可說已進化為具有 TBM 功能的隧道鑽掘機械 (Soft ground TBM = TBM with shield)。

多樣化近代潛盾技術

由都市軟弱地層發展起的潛盾工法也因應高度複雜化之社會環境需求，1990 年代以後，大深度、大斷面、形狀不侷限為圓形 (3 心圓、矩形、橢圓形)、分歧等日益多樣化，地質也由複合地層到岩盤 (圖 8)，1983 年日本開發於泥水式機頭配置掘削硬岩之滾輪式切刀之首部土、岩複合式 TBM。此外，大深度、大斷面、長距離、快速施工已成為現代潛盾工法常見的關

鍵字。於歷經近 20 年的技術開發與越來越普遍之施工實績，也使得潛盾與 TBM 之分界線已不明顯。

由世界潛盾史來看，1989 年日本神田川調整池潛盾隧道 (外徑 13.94 m，圖 9) 開始大斷面潛盾工程，以及 1991 年開始的東京灣橫貫道路潛盾工程 (8 部外徑 14.14 m，圖 10)，確立了大斷面潛盾的設計與施工技术。接著 1998 年東京地鐵的白金高輪車站到麻布十番車站之間的隧道，以一部外徑 14.18 m 之「懷抱式親子泥水潛盾機」鑽掘含避車線之 3 線斷面後 (區間長 363.8 m)，再推出子機潛盾機 (外徑 9.70 m) 做為複線潛盾機鑽掘至白金高輪車站。

德國也在 1997 年進行直徑 14.2 m 的第 4 艾爾貝河 (Elb，圖 12) 隧道施工，與日本同期進入大斷面潛盾時代。

TBM 種類	穩定機制	土		砂	岩		盤		
		軟弱土	硬質土	複合土質	卵礫石土	複合岩盤 (土砂 破碎帶)	硬岩		
TBM 軟土潛盾 複合條件 硬岩 TBM	開放式	手挖式			輔助工法				
		盲式							
	密閉式	機械式			輔助工法				
		土壓式							
		泥水式							
		開放式	單盾						
			雙盾						
			撐靴式 Gripper						

圖 8 硬岩 TBM 與軟土潛盾技術發展與融合



圖 9 神田川 $\phi 13.94$ m



圖 10 東京灣 $\phi 14.14$ m



圖 11 東京地鐵親子潛盾 $\phi 14.18$ m



圖 12 第 4 艾爾貝河 (Elb) 隧道 $\phi 14.2$ m

就潛盾機的種類來看，幾乎皆以泥土壓式潛盾工法與泥水式潛盾工法施作，不過德國則另於 1985 年開發出在泥水壓之土艙內以壓氣進行壓力調整之方式，稱為混合式潛盾 (Mixshield)。

大斷面潛盾係由泥水加壓式潛盾工法開始發展，代表性的施工案例有日本東京灣橫貫道路、外郭放水路工程、德國第 4 艾爾貝河隧道、日本首都高速道路中央環狀線 (新宿線山手線)。其後的大斷面潛盾隧道則隨著切刃、驅動部、排土裝置、耐久性提昇等技術的進步亦採用泥土壓式潛盾工法施工以期減少施工場地需求，例如 2014 年通車之東京港隧道則是在海底下以泥土壓式潛盾工法施作而成。而 2015 年通車之日本首都高速路中央環狀線 (品川線，圖 13) 為 9 km 的長距離快速施工。

大斷面化的潮流就這樣在中國、紐西蘭、俄羅斯、義大利等世界各地施工，用途也包括鐵路、公路以及鐵路共構的雙層隧道，範圍日趨廣泛 (圖 14)，就泥水式潛盾 (TBM) 而言，2004 年起在中國陸續進行 17 件直徑 14.27 m ~ 15.76 m 之大斷面隧道，在 2016 年 3 月的現在，香港屯門赤鱗角則有目前世界最大直徑的 17.56 m 潛盾機正進行鑽掘。此外在土耳其的博斯普魯斯海峽 (Bosphorus，圖 15)，以外徑 13.2 m 的 Mixshield 於海面下 106.4 m 施作鐵路隧道，已於 2015 年 8 月貫通。

在泥土壓系 TBM 方面，2006 年西班牙馬德里有直徑 15.2 m 的公路隧道 (圖 16)，日本 2014 年起以 4 部外徑 16.1 m 的土壓式 TBM 建造總長 16 km 的東京外郭環狀道路隧道。現在施工中之美國西雅圖的 SR99 公路隧道則是目前世界最大直徑 17.45 m 的土壓式 TBM (圖 17)。

總計到 2016 年為止，世界上比 1994 年的東京灣橫貫道路隧道 14.14 m 還大的 TBM 製造數量已達 50 台之多 (圖 14)。

當城市的地下空間與地底下既有結構物衝突或道路可利用寬度受限時，不依靠明挖而建造鐵路或地下車站的必要性升高，因此開發出多重切削面 (2 連、3 連 Multi-Face、4 心圓) 的 TBM 並達到實用化 (圖 18 和圖 19)。台灣桃園機場捷運於 2011 年亦完成雙圓形潛盾 (圖 20)。為更進一步減少使用的路幅，另開發出矩形與橢圓形 TBM (圖 21)，且實際應用於道路及地下鐵工程之施作。



圖 13 首都高速道路中央環狀線 (品川線) ϕ 12.55 m

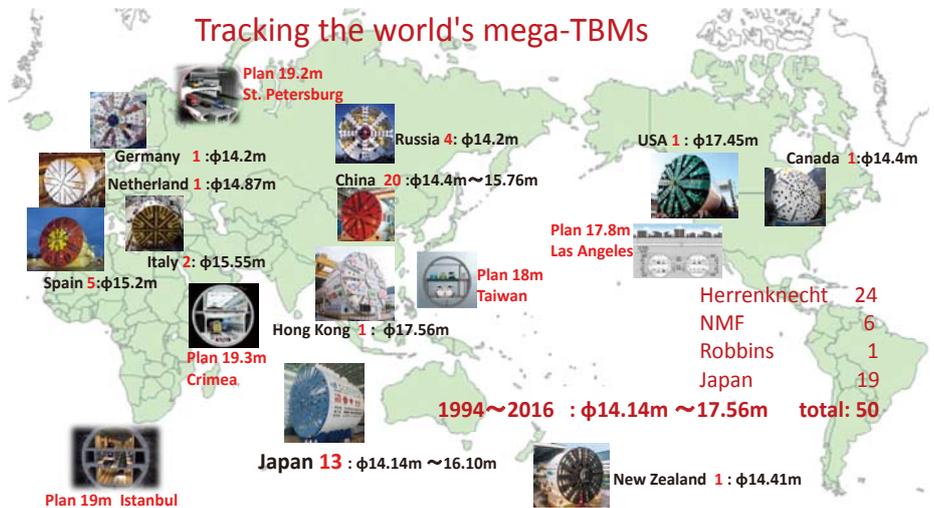


圖 14 大斷面 TBM 在世界上之分佈



圖 15 土耳其博斯普魯斯 ϕ 13.2 m Mixshield



圖 16 西班牙馬德里 EBP ϕ 15.2 m



圖 17 美國西雅圖 $\phi 17.45$ m EPB TBM



圖 18 世界首部 3 連 MF TBM 及 Osaka Business Park 車站 1996 通車



圖 19 4 心圓 TBM 施築車站



圖 20 台灣桃園機場捷運 DOT 型 TBM



圖 21 日本京都六地藏地下鐵隧道

TBM 的發展歷史

硬岩 TBM 的源起

有關鑽掘機械最初的原型，據說是 1845 年比利時的工程師 Henri-Joseph Maus 奉薩丁尼亞（Sardinia）國王之命建設一條貫穿阿爾卑斯山聯結法國與義大利的 Frejus 鐵路隧道時，所設計出的鑿山機（Mountain Slicer, 圖 22）。Maus 於 1846 年在義大利 Torino 附近的工廠製造這台機器。

這台機器的樣式猶如在前面設置 100 台鑿岩機先行鑽孔後，藉著劈裂岩石達到鑽掘岩盤的目的。不過這台機械終究僅具有紀念碑的效果，而未實際使用到。

而這條 Frejus 鐵路隧道到 10 年後的 1857 年才開始施作，最初是以人力和黑色火藥挖掘，在 1857 年到 1860 年間的平均進度約為 14 m/月。其後增加運用壓縮空氣的鑿岩機（圖 23），使得效率為之提升。全長 12.22km 的隧道輔以導坑施工（圖 24），共耗 13 年才於 1870 年 12 月貫通。

約在同時，1851 年美國也在麻薩諸塞州（Massachusetts）著手建造長 7.64 km 的鐵路隧道（The Hoosac tunnel）。1853 年，使用 Charles Wilson 發明的削石機（Stone-Cutting Machine, 圖 25）開始進行鑽掘，但是僅僅鑽掘了 9.9 英尺（約 3 m）就因故障而失敗告終。

其後，這條以 TBM 鑽掘的隧道與機器都遭到放棄（圖 26 和圖 27），而另外在旁邊設置新的洞口，最初係以人力進行挖掘，之後因空壓鑿岩機的開發，再輔以黑色火藥進行鑽炸，俟 1866 年阿爾弗瑞德諾貝爾（Alfred Nobel）發明黃色炸藥之後，美國首先採用商業用炸藥挖掘隧道，耗時 20 餘年，終於在 1875 年完成隧道。

在這個年代有許多工程師設計了各種 TBM 或加以改良，遺憾的是一直沒有開發出可以實際鑽掘隧道的機器。無論如何，這個時代所設計的 TBM 皆以切削開挖面穩定且良好的岩盤為目的，而為開放式的 TBM。

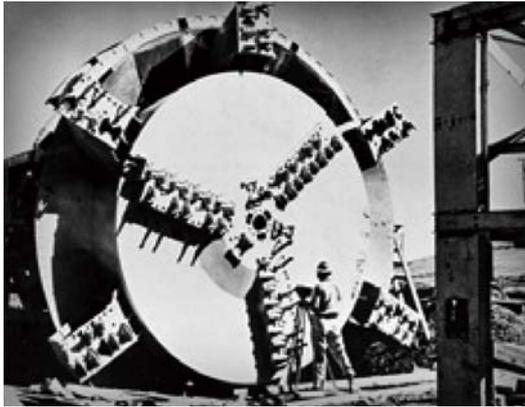


圖 28 Model 910-106 ϕ 8 m Oshe Dam

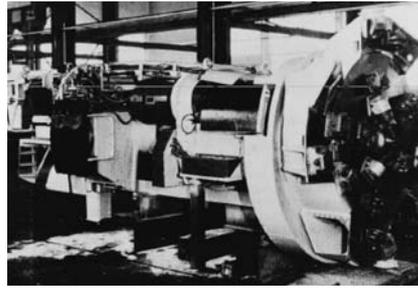


圖 29 Model 131-106 ϕ 3.27 m

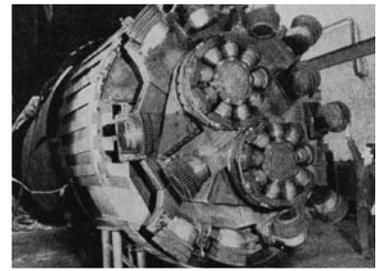


圖 30 歐洲最初的 TBM (Wirth 公司)

盤亦可達到掘削目的。至於其推進結構則是由推動切削盤的推進千斤頂，以及提供反力的反力撐座 (grripper shoe) 所構成。

然而開放式 TBM 最大的缺點是遭遇斷層破碎帶或軟弱土層時，容易發生切削盤或滾輪式切削刀無法旋轉，或是無法由反力撐座取得反力等問題。

到目前為止，做為硬岩 TBM 工法主流的開放式 TBM，當條件合適時，一個月鑽掘進度可達到令人驚訝的 1,000 m 左右，反之，若遭遇斷層破碎帶或軟弱土層，則可能陷入長期無法掘進甚或必須放棄 TBM 的困境，似乎具有一賭輸贏的意味。具備單盾 (Single Shield) 之 TBM 在 1970 年代在歐洲的許多山岳隧道的工程中運用發展，這種機型以犧牲掘進效率為代價而可在破碎岩層中提供更多的保護。為了平衡安全與速率兩者，1972 年，開發雙盾 double shield TBM 以加快掘進速度 (註：台灣雪山隧道之主坑與導坑則係採用雙盾式 TBM，圖 31)。

不過，在經過汲取潛盾工程所培植而成的技術，不僅提昇 TBM 對地質的因應性，也進入可對應海底下的高水壓、長距離、大斷面化的時代。

TBM 的新技術

近年來，硬岩用 TBM 導入以軟弱地盤或黏性土、砂質土、砂礫土為對象的潛盾機械技術，使得密閉型 TBM 的技術日益進步，使用環片做為隧道襯砌的工程亦不斷增加。

得力於這些技術，TBM 不再僅止於硬岩，亦可因應高水壓、斷層破碎帶與軟弱土層。英法海峽隧道 (Channel tunnel) 因應不同地盤條件，分別採用雙盾開放式、土壓式、Mixshield、兼具土壓平衡式/單盾



圖 31 雪山隧道主坑與導坑雙盾式 TBM



式之雙模式等計 11 部 TBM 施工。很多高水壓山區或海底隧道設計在當遇穩定地層時，以開放式的 TBM 挖掘，但如果遇湧水量太大時，可以切換為密閉式以穩定開挖地盤。而台灣山區之曾文越域引水隧道也是採用泥水式/單盾式可切換之雙模式 TBM 施工。

同時，基於社會對環境保護之重視，工程被強烈要求必須避免排導地下水位與確保水質乾淨，即使是山岳隧道工程亦漸被要求採不排水隧道辦理。

此外，必須與水壓相抗衡的海底隧道的需求亦日漸增加，而 TBM 與潛盾技術的融合，使得海底下的長距離大斷面 TBM 施工變得尋常。

從 1939 年關門海峽隧道以潛盾開啟海底隧道施工以來，1991 年 TBM 完成英法海峽 channel 隧道工程，而 2015 年 8 月貫通的博斯普魯斯海峽隧道已成功地在 106 m 深的海底下鑽掘岩盤與土砂，並設置了可承受 13bar 之操作壓力克服了高水壓。

美國在胡佛水庫 Hoover Dam 攔阻之米德湖下興建第 3 取水隧道 (Lake Mead Intake Tunnel) 以提供拉斯維加斯之給水，於 2014 年 12 月貫通之 TBM 須穿越湖下的破碎岩盤以銜接湖底之取水口豎井。直徑 7m 的 Mixshield 設計了可承受高達 17bar (目前最大) 的操作壓力。

TBM 技術演進總論與展望

英國工業革命孕育了蒸汽機的發展，並為 19 世紀初船舶與鐵路的動力。因應鐵道網的建設對隧道之需

求日益升高。在都市方面有以潛盾工法施作泰晤士河隧道，在法國與美國則為了鑽掘山岳隧道而挑戰 TBM 的設計與製造。

從 1825 年到 1843 年共耗 18 年才完成首座潛盾隧道，其功能在於以盾殼隔絕開挖地盤的盾構。約在同年代，歐洲與美國皆嘗試開發鑽掘岩盤隧道用之 TBM，雖然製造出類似的機器，卻都無法達到有效鑽掘而放棄。

而實際上使用於山區岩盤開挖隧道則是以黑色火藥為主的人力鑽掘，其後於 1866 年發明炸藥及空壓鑿岩機之實用化，提昇岩盤的鑽炸技術影響迄今。

在 Brunel 發明潛盾的 19 世紀初期到 19 世紀後期這段期間，可謂「潛盾的試驗階段時代」而此時之鑽掘進度為 15 cm/日。經導入了環片及壓氣工法，到 20 世紀初的期間，則可稱為「潛盾的改良與鑽研時代」，而此時之鑽掘進度則是 1 m ~ 2 m/日。

從 20 世紀初期到 1960 年代是手挖式潛盾工法的實用化時代，已經達到複線鐵路用直徑約 9 m 斷面潛盾的實用化，可稱為「潛盾的實用化與扎根時代」。

到了 1970 年代，泥水式潛盾與土壓式潛盾都達到實用化，宣告正式進入「密閉式 TBM 實用化時代」。此時，潛盾機械已被定位為 TBM 的一種，1988 年到 1991 年間，英法海峽隧道依不同地盤也以不同型式計 11 部 TBM 施工完成。

1994 年到 1996 年，東京灣橫貫道路隧道以 8 部直徑 14.14 m 的泥水式潛盾機 (TBM) 施工，則揭開了大斷面 TBM 時代的序幕。而與此同時並行的是陸續開發實際施工多圓形與矩形的 TBM。而進入到 2000 年代後，泥水式及泥土壓式等密閉式大斷面 TBM，同時開始進行長距離、快速施工的實用化，一台機器可鑽掘 8 km ~ 9 km，月進度創下可達 400 m ~ 500 m 的記錄。進入到 2010 年代後，TBM 的直徑更創下 17 m 以上的記錄。

另一方面，鑽掘硬岩用的 TBM 在 1950 年代時，由美國的 Robbins 公司開始實用化，揭開硬岩 TBM 時代的序幕。

硬岩用的 TBM 主要利用切削盤的旋轉伴隨著碟式切刃 (disk cutter) 的同心圓式滾動，以側邊裂解 (side break) 進行鑽掘，且由於開挖面自立性良好，所以無需具備盾殼設備，而採開放式構造，藉由反力撐座 (gripper shoe) 取得反力以向前推進的方式為主流。於 2011 年貫通之加拿大尼加拉瓜河 Niagara 分洪隧道是目前最大直徑 14.4 m 之 gripper 開放式 TBM。

而這種開放式 TBM 雖在地質良好的硬岩下可快速施工，但如果遭遇破碎帶、斷層帶湧水或軟弱土層則常發生問題，甚至無法鑽掘。惟近年來也導入潛盾工法所發展的技術，已可克服上述問題。

潛盾機 (TBM) 由防止開挖土崩塌的盾殼保護機能開始發展，歷經 180 年的歲月，已經進入可平衡土水壓下安全地鑽掘 17.56 m 之大斷面隧道的時代。而追求鑽掘硬岩效率的 TBM，為因應多變化的地質條件而導入潛盾相關技術，亦已精進到可對應高水壓及複合地層的 TBM。

進入 21 世紀的 TBM，在導入運用科技化及資訊化施工的新技術下，可鑽掘軟弱土層到岩盤之所有地層。同時國際上也有數件邁向 19 m 程度之大斷面 TBM 隧道計畫正在規畫研究中 (圖 14)，相關工程技術仍在持續進化。

參考文獻

1. 方永壽、李承祐、劉政、邱志榮、林摩西、李魁士 (2015)，大斷面潛盾隧道之發展與應用，地工技術，第 145 期。
2. 李魁士、許耀仁 (2013)，淺談多樣化潛盾機型式，地下管道 28 期。
3. 何泰源、李魁士 (2009)，「臺灣潛盾隧道技術發展現況與展望」，土木水利雙月刊，第 36 卷，第 6 期。
4. 台灣區國道新建工程局 (2006)，隧道工程施工技術解說圖冊。
5. 塚田等 (1980)，シールド工法の実際，鹿島出版會。
6. 日本土木学会 (1996)，都市 NATM とシールド工法との境界領域。
7. 土木工学社 (1995)，シールドトンネルの新技術。
8. 日経コンストラクション (1997)，東京灣橫斷道路のすべて。
9. 鹿島建設技術資料，Shield Driving Method。
10. 鹿島建設技術資料，Shield Tunneling Method。
11. 土圧式シールド工法その理論と応用 (2009)，鹿島出版會。
12. 佐藤健吉，ビクトリア時代の技術者ブルネル父子，千葉大学論文。
13. 三菱重工資料，MITSUBISHI TUNNELING MACHINES。
14. 川崎重工資料，SHIELD & TBM。
15. JTSC 資料，SHIELD MACHINES。
16. TUNNELING ACTIVITIES IN JAPAN，1996。
17. TUNNELING ACTIVITIES IN JAPAN，2000。
18. Hoosac Tunnel History，hoosactunnel.net。
19. NMF，TBM Tunneling Boring Machine Plus de 50 ans d'histoire。
20. Fred Hapgood，History of the Tunnel Boring Machine。
21. The Robbins Company History，therobbinscompany.com。
22. Herrenknecht Paper，herrenknecht.com。
23. Tunneling on Auckland's Waterview Connection Project: tunnelingonline.com。
24. Fritz Gruebl，"Segmental Ring Design," World Tunnel Congress 2012。
25. TBM to take on Bosphorus highway crossing，Herrenknecht news Release。
26. Mega TBMs，Tunnel Talk Reporting。
27. Wikipedia.org。
28. greathead.org。
29. dot.ca.gov。

