潛盾隧道新技術之發展與應用

關鍵詞：潛盾隧道、潛盾機、環片

台北市政府捷運工程局／副局長／朱旭❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／李魁士❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／何泰源❸
潛盾隧道專家／石原金洋❹

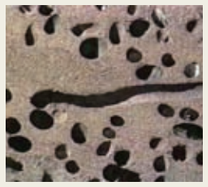
摘 要 SUMMARY

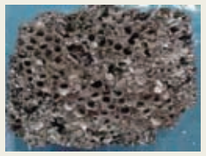
國內潛盾隧道工程施工迄今，已建立必要之基礎能力及經驗。隨都市之發展，大深度、長距離、變化斷面等特殊施工技術將逐步被運用。本文簡介以日本為主所發展之最新潛盾隧道掘進工法、環片發展新趨勢，及新技術運用場合與目的，以隨時掌握國外潛盾工法之最新發展現況，並確立國內未來施工方案採擇及技術發展之方向。

壹、潛盾隧道工法源起與型式

1798年倫敦泰晤士河河底隧道工程進行開挖，但未成功。1818年法國工程師M.I. Brunnel觀察鑿船蟲以身體前端所附貝殼齒囓嚼木材，並將木屑沿著「洞道」搬出，軀體推進同時並釋放出類似石灰質之分泌液，以固定內壁及支撐洞道，參見圖1，即以此靈感發明潛盾隧道工法並取得專利。1825年Brunnel開始採用潛盾工法進行泰晤士河河底隧道施工，參見圖2，但遭多次湧水事故致工程停滯7年，1840年泰晤士河河底隧道工程貫通使用至今。1869年英國人Greathead等採圓型潛盾機、鑄鐵環片、壓氣工法，成功完成泰晤士河第二條河底鐵路隧道工程，奠定今日潛盾隧道工法之基礎。迄今，針對潛盾機處理地盤穩定與地下水之基本功能，依不同地盤條件發展出各式工法，參見圖3。

貝殼齒


囓嚼木材


囓嚼石灰岩

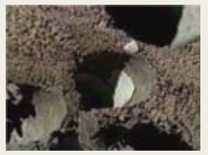
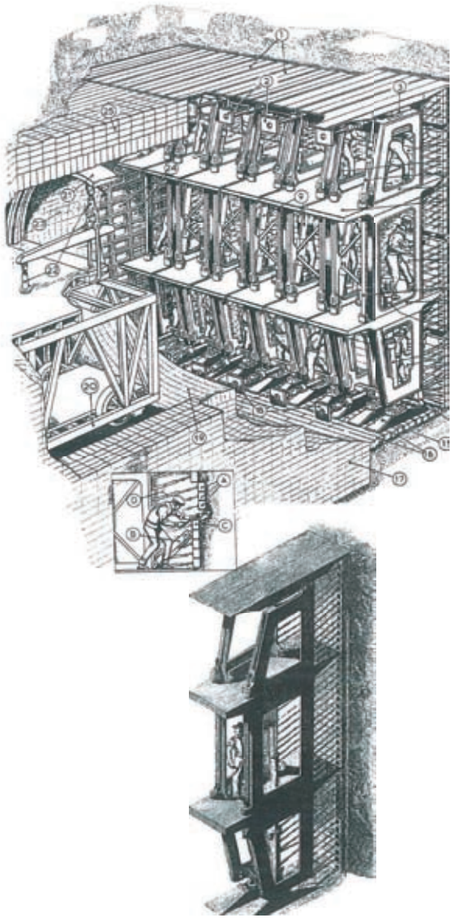
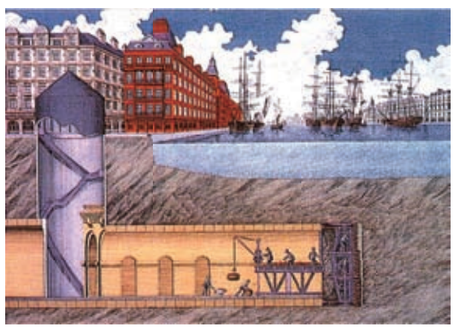

石灰質分泌物

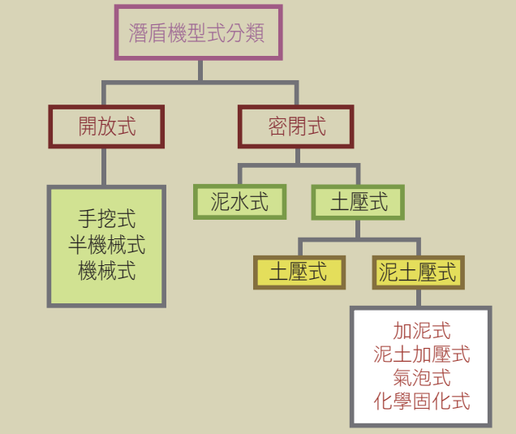
圖1 鑿船蟲囓嚼洞道示意





Brunnel潛盾隧道
（矩形鑄鐵外殼、總重90噸、斷面積80m²）

圖2 潛盾隧道工法初始構想



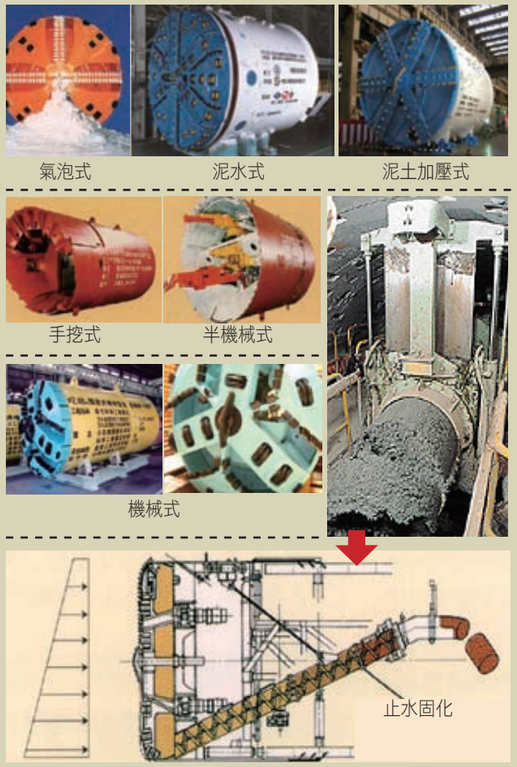


圖3 潛盾機型式分類

1976年台北衛生下水道工程引進潛盾隧道工法，1992年台北捷運開始直徑6m級潛盾隧道施工，2003~2006年高雄、台北捷運、台電、下水道等約50餘部潛盾機同時施工，亦已建立諸多相關專業(協力)廠商資源與執行能力。2003年台電完成外徑8.3m潛盾隧道，2006年桃園國際機場捷運採φ6,420mm×11,620mm之DOT雙圓潛盾發包施工穿越淡水河。國內潛盾隧道技術經30年發展，目前已能克服地表淺層之一般性施工問題，然隨都市發展需求，潛盾隧道仍需逐漸朝大深度、大斷面與變化斷面發展，以提高安全性、施工性及經濟性。

貳、潛盾隧道新技術展望

為適應社會環境變遷及施工經濟性之要求，(1)大深度化、(2)大斷面化(道路隧道地下化)、(3)長距離化(市區無直井用地、大深度)、(4)斷面多樣化(佔用寬度小、斷面運用效率化)等，是近年來潛盾隧道工程新技術發展之方向。結合潛盾新技術之運用計畫構想安排如圖4~圖6所示。因應「A.高速施工」、「B.特殊線形施工」、「C.大斷面與斷面多樣化」及「D.分歧及合流」等特殊施工需求而開發出相關對應特殊潛盾工法，參見圖7。

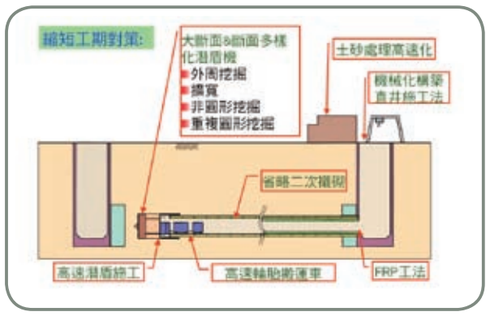


圖4 縮短工期潛盾新技術之運用

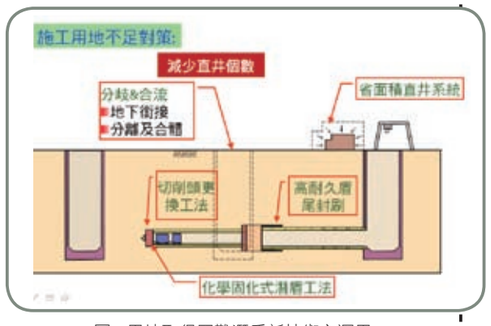


圖5 用地取得困難潛盾新技術之運用

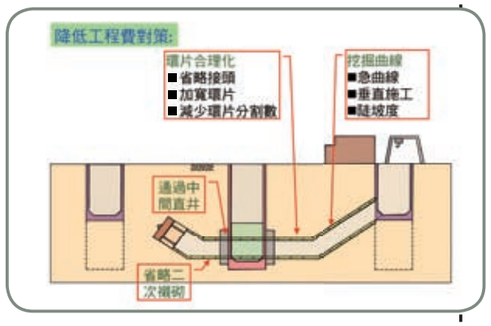


圖6 降低工程費潛盾新技術之運用

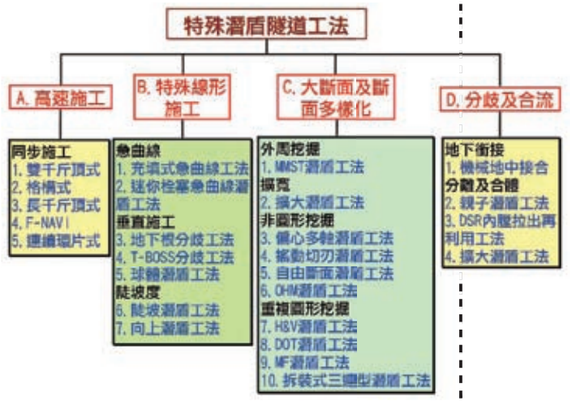


圖7 特殊潛盾隧道工法一覽

叁、多樣化之潛盾隧道工法

(A)高速施工

為縮短大深度與長距離施工期程，並降低潛在風險，因應發展出自動化之高速施工。而高速潛盾施工之必要條件包括：(1)土砂處理高速化系統，如採超高速過濾器提升掘削土砂脫水處理能力、並追求處理脫水土餅再利用，參見圖8。(2)環片輸送後勤設備與環片組裝自動高速化，參見圖9。(3)潛盾機掘進高速化等。

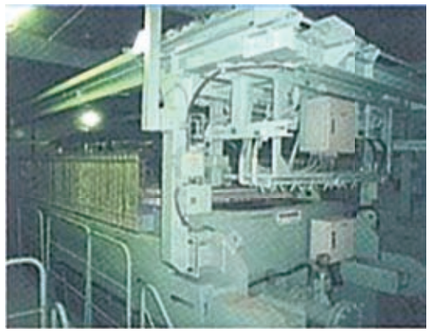


圖8 超高速過濾器土砂處理

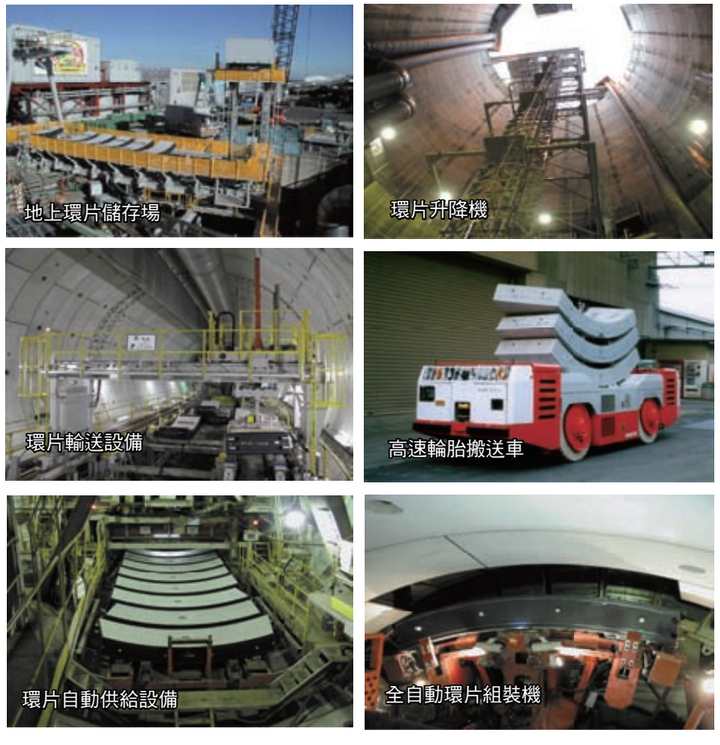


圖9 環片輸送、組裝高速化

然如僅強化此等機械性能，高速化施工仍有瓶頸。為此遂發展出(A.1)雙千斤頂式、(A.2)格構式、(A.3)長千斤頂式、(A.4)F-NAVI、(A.5)連續環片等各種潛盾掘進與環片同步組裝施工法，可大幅加快工進。

(A.1)雙千斤頂式工法與(A.2)格構式工法：均利用雙組千斤頂交替作業，參見圖10-圖11。

(A.3)長千斤頂式工法：將潛盾推進千斤頂衝程設定為2環圈環片寬度以上，故可掘進、組裝同步施工，參見圖12。

(A.4)F-NAVI (Front-NAVIgate)工法：係以拖車運轉方法為原理開始研發，即不靠潛盾千斤頂控制潛盾機方向，可迅速進行方向控制。本工法適用中小口徑隧道之泥土壓式或泥水式潛盾機，惟因機器成本高，隧道長度在1.5km以上時較具經濟性，參見圖13。

(A.5)連續環片同步施工法：整圈都採同形狀且可任意順序組立之環片。可分為(1)採環片分割成偶數，配合掘進組裝半環之方式，於軸向插入

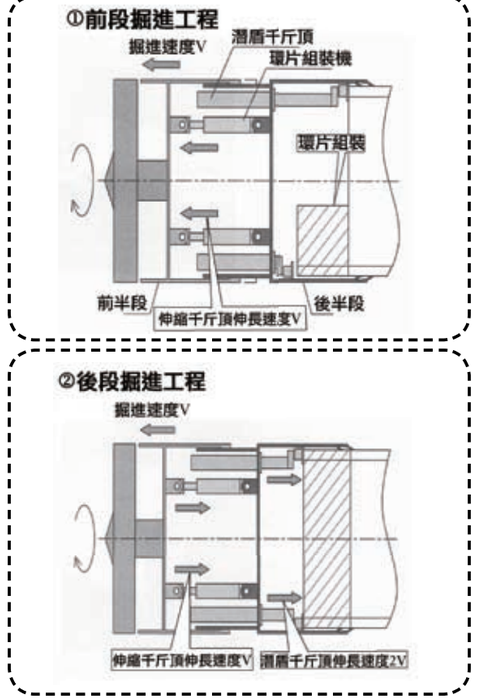


圖10 雙千斤頂式同步施工法

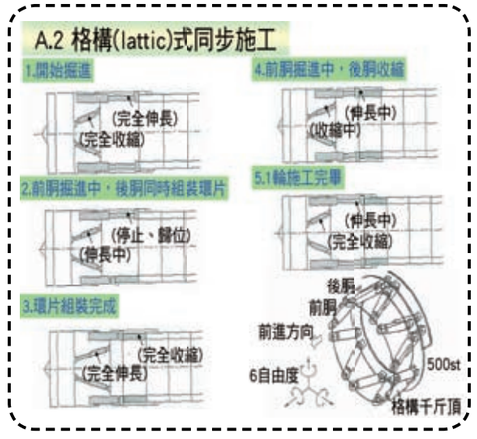


圖11 格構式同步施工法

環片組立後端面呈凹凸狀，三邊固定，組立後可直接承載推力，參見圖14，然其有環片承受千斤頂推力、控制方向課題。另(2)採環片連續

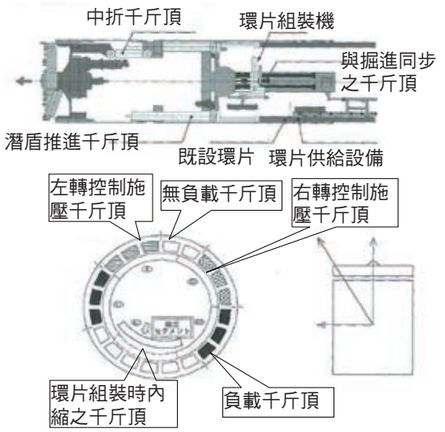
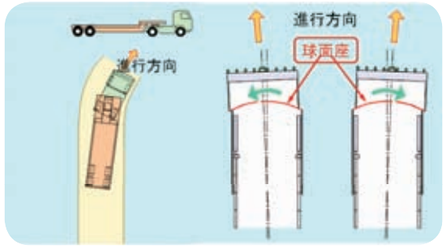


圖12 長千斤頂式同步施工法



方向控制原理

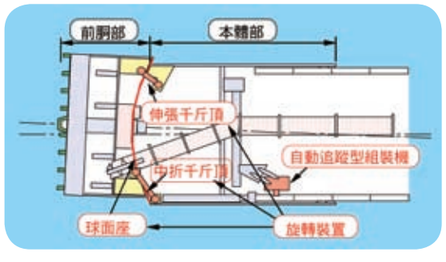


圖13 F-NAVI同步施工法

組裝施工法，參見圖15，其亦有方向控制、環片供應組立作業繁雜須妥善安排之課題。

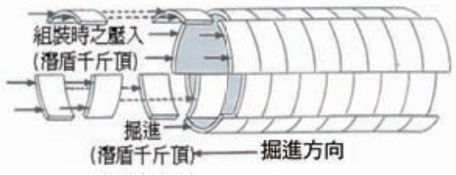


圖14 導槽鎖環片連續同步施工法

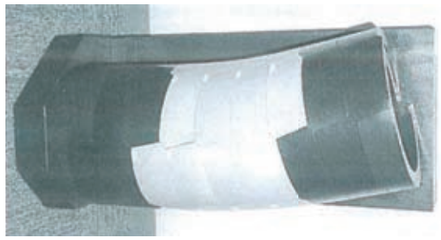


圖15 螺旋環片連續同步施工法

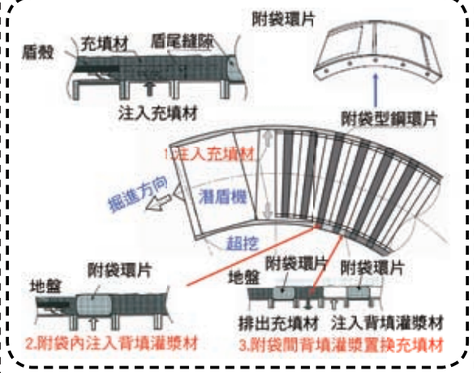


圖16 充填式急曲線潛盾工法

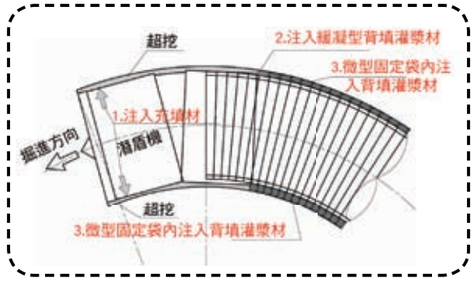


圖17 迷你栓塞急曲線潛盾工法

(B)特殊線形施工

為適應特殊線形需求(如急曲線、垂直施工、分歧、陡坡度等)，以減少設置工作井及縮短工期，並減少如曲線超挖引起之地表沉陷，近年已積極發展特殊線形施工技術，包括：急曲線之(B.1)充填式急曲線潛盾工法、(B.2)迷你栓塞急曲線潛盾工法；垂直施工之(B.3)地下根分歧潛盾工法、(B.4)T-BOSS分歧潛盾工法、(B.5)球體潛盾工法；陡坡度之(B.6)陡坡潛盾工法、(B.7)向上潛盾等工法。

(B.1)充填式急曲線潛盾工法：適用於急曲線無法由地表進行地盤改良路段。其作業包括：(1)於掘進同時併行由機身將適當強度之膠狀充填材灌注在急曲線段超挖部分，以穩定空隙。(2)於部分環片外側配置之特殊附袋內注入背填灌漿，防止背填材流往機首，並將推進反力傳達至地盤。(3)其後再於附袋間以背填灌漿材置換膠狀充填材，參見圖16。

(B.2)迷你栓塞(mini packer)急曲線潛盾工法：與(B.1)充填式工法雷同，(1)於掘進同時自潛盾機前膛注入高黏性可塑性充填材，防止超挖段地盤應力釋放，並減少推進阻力。(2)於盾尾灌注緩凝型背填材且將高黏性可塑性充填材擠出，(3)再以背填灌漿材灌注裝設於環片灌漿孔之微型固定袋內，以固定環片於地層中，確保推進所需之反力，參見圖17。

(B.3)地下根分歧潛盾工法，由主隧道內出發分歧隧道，參見圖18。分歧隧道中心線宜規劃與主線隧道等高且垂直，以利出發段之止水作業。

(B.4)T-BOSS(T-type basement Branch Off Shield System)分歧潛盾工法：將切削鑽頭鋼環收納於較小之分歧隧道潛盾機內，到達定位後旋轉切刃轉盤直接切削貫入既有隧道，以機械銜接主線隧道，參見圖19。

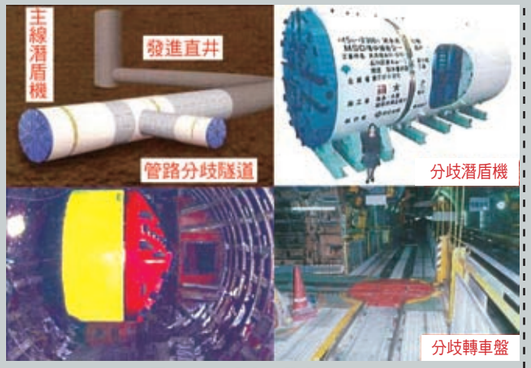


圖18 地下根分歧潛盾工法

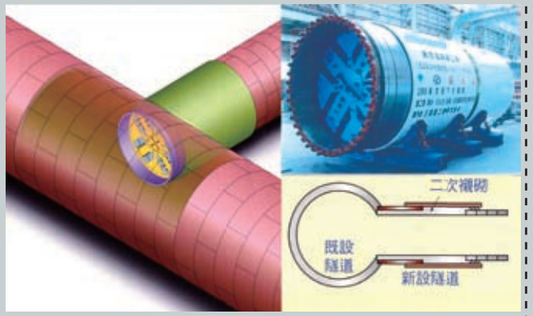


圖19 T-BOSS分歧潛盾工法

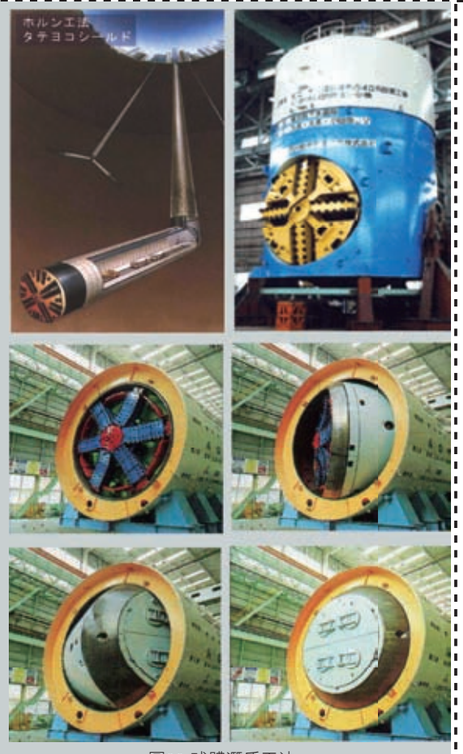
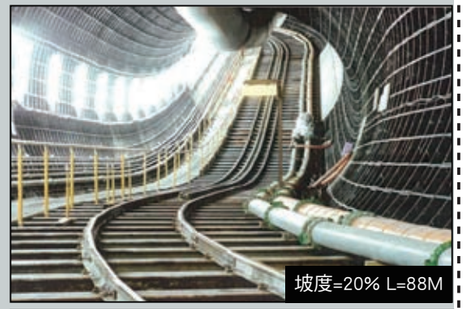


圖20 球體潛盾工法

(B.5)球體潛盾工法：潛盾機或切刃盤內藏自由轉動之球狀體，可於隧道內自由轉換行進方向，參見圖20。適用於狹窄之直井基地、主線與支線可共用一台機，其直徑比約為1.6:1。止水性佳，具備可直角開挖，且可作刀刃更換之優點。惟機械設備費極高，通常僅於特殊條件下採用，一般適用於泥水式潛盾機。

(B.6)陡坡潛盾工法：其後續台車須有防止脫軌措施，並須探討自潛盾機牽引台車之方法，且隧道內需設搬運止墜設備，參見圖21。

(B.7)向上潛盾工法：潛盾機自隧道內向上掘進構築直井。切刃盤採外周支承方式，土艙呈漏斗狀取土，採緊壓閥方式依挖掘面壓力變化排土。施工並須支承地盤自重，土壓及加泥



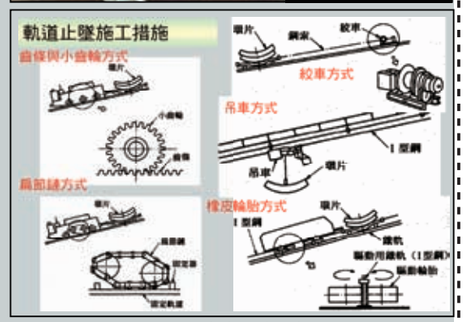


圖21 陡坡潛盾工法

材管理尤為重要。出發段需採可挖掘、可補強之襯砌。適用幹管直徑約2～4m，向上最大直徑為幹管之60%，施工深度可達70m，參見圖22。

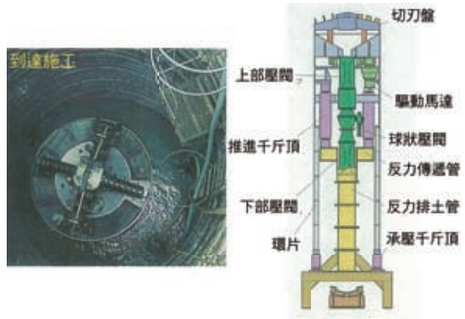


圖22 向上潛盾工法

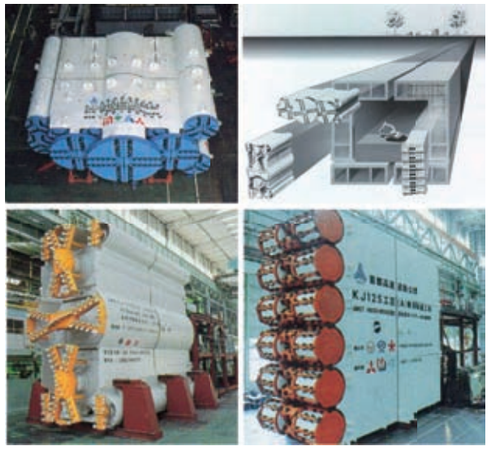


圖23 MMST潛盾工法

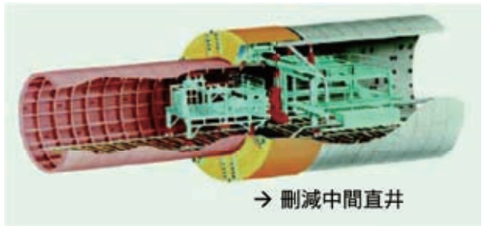


圖24 擴大潛盾工法

(C)大斷面與斷面多樣化

因應使用目的不同，有時需要較大之內空斷面，有時需異於圓形之斷面，以達隧道之使用功能目的，或擬縮小用地寬度及開挖面積等而開發新技術。因一般中小口徑至大口徑潛盾隧道技術已趨成熟，可在既有基礎上繼續追求經濟性並提昇施工性，遂發展出許多大斷面及斷面多樣化技術。特殊斷面潛盾機大致分為組合圓形之複圓形潛盾機、與矩形、橢圓型等非圓形潛盾機，各樣式工法包括：

(C.1)MMST (Multi-Micro Shield Tunnel)潛盾工法，以數個小斷面潛盾機先挖掘外殼，並彼此接續構成隧道外殼主體後，挖掘內部土砂，構築大斷面隧道，進而提高淺覆土條件下之大斷面隧道施工性，且可變異隧道斷面形狀，參見圖23。適用泥土壓式或泥水式潛盾機。

(C.2)擴大潛盾工法：於潛盾隧道任一位置出發擴挖，以圓形潛盾機施工使隧道斷面擴大之潛盾施工法，參見圖24。具備於隧道掘進途中擴大開挖斷面，依目的可任意延長擴大段、與避免開挖不必要斷面之優點。適用於土質地層開挖擴大斷面，可擴挖至原直徑之1.5倍(如由6m擴挖至9m)。惟僅適用於開放型潛盾機，須採輔助工法穩定地盤，且因機具無法重覆使用，1處須採1部擴大機。擴孔潛盾機之機長宜短以縮小發進基地規模。環片分割數須探討於小隧道內之搬運性，與在出發基地組裝所需之大小及重量。挖掘面之作業空間影響潛盾機挖掘作業效率，故須考慮其作業性後決定之。另環片組裝拆除機構須具有組裝擴孔環片與拆除既有小隧道環片之功能。

(C.3)偏心多軸潛盾工法：潛盾機切刃偏心裝設，以數個驅動軸部進行切刃平行且連動運轉，可開挖多樣性斷面形狀(矩形、橢圓、馬蹄形等)，參見圖25。其優點包括可開挖各種斷面形式，切刃摩耗較平均，可長距離施工。惟因機頭偏心運動致機體於發進時、或軟弱地層中易晃動，且切刃下方易先發生摩耗等課題。最小直徑為圓形2.0m、矩形2.5m。適用泥土壓式潛盾機。

圖25 偏心多軸潛盾工法

(C.4)搖動切刃(Wagging Cutter)潛盾工法：潛盾機可小型化、縮短機身長，有利急曲線施工，已有外徑D=5,100mm，R=8m (R/D=1.6急曲線)之案例，參見圖26。搖動機構與伸縮切刃之組合，可因應各種挖掘斷面形狀(尤其矩形)，惟須較圓形提高潛盾遮緣與盾尾勁度。以泥土壓式為主流，泥水式潛盾機亦可行。

(C.5)自由斷面潛盾工法：(Flexible Section Shield Tunneling Method)採用行星式切刃盤，以主切刃公轉切削圓形斷面，同時使行星切刃自轉挖掘周邊非圓形斷面，參見圖27。於狹窄道路下可施工大容量下水道，惟掘進效率較差。隧道形狀僅限為橢圓形，因側壓恐致隧道變形，橫(側)/縱比=1:1.5是極限。適用於泥土壓式潛盾機。

(C.6)OHM (Omni-Sectional Hedge tunneling Method)潛盾工法，一面使3輻式切刃旋轉，一面將設備整體依所定偏心量，與切刃旋轉方向

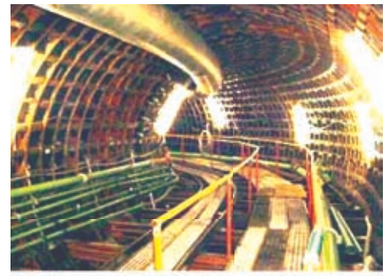


圖26 搖動切刃潛盾工法

圖27 自由斷面潛盾工法

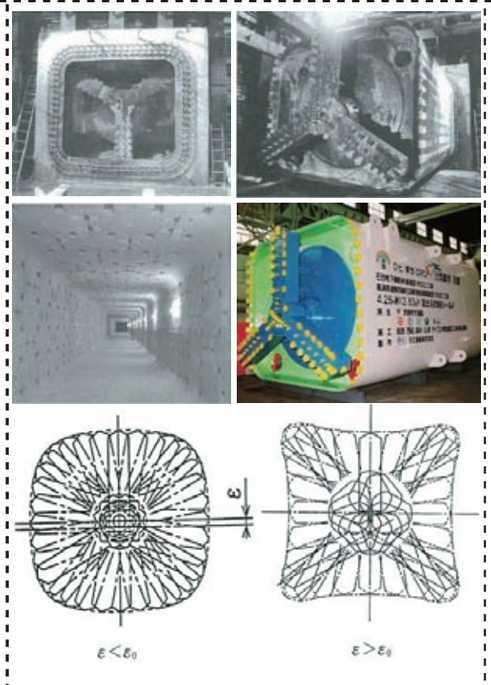


圖28 OHM潛盾工法

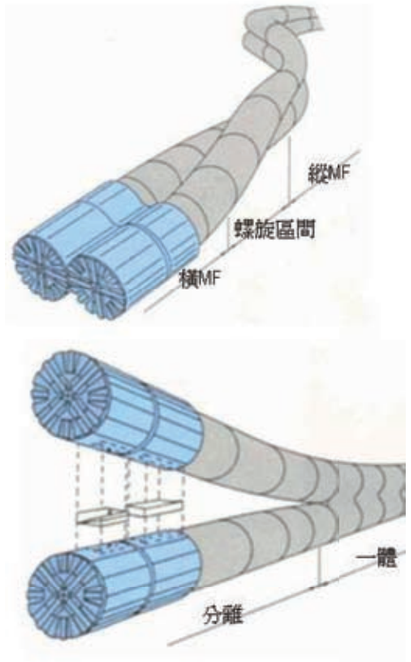


圖29 H&V潛盾工法

相反的3倍速度使其旋轉可挖掘矩形斷面，參見圖28。兼具「自由斷面」旋轉運動挖掘與「偏心多軸」旋轉之創意。切刃軌跡依循三角形理論，改變偏心量可變更各種斷面型狀，並控制切刃的旋轉使滾動易於修正。

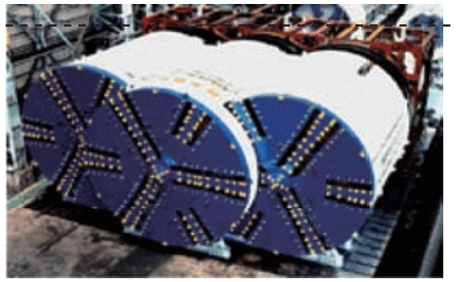
(C.7)H&V (Horizontal & Vertical variation)潛盾工法：組合圓形多樣化隧道斷面，可同時進行多種隧道構築掘進，亦可於主隧道掘進同時進行單圓型隧道之分歧施工，參見圖29。各潛盾機為獨立機器，以閉接合器機構控制滾動，可超近接、分歧、旋轉施工。適用泥土壓式或泥水式潛盾機。

(C.8)DOT (Double O Tube)潛盾工法：將數個輻狀切刃配置在同一平面組成齒輪狀，以構築複圓形隧道，使斷面合理化且可縮小開挖面積，參見圖30。由於切刃配置在同一平面，平

圖30 DOT潛盾工法

衡控制佳，但須防止相鄰輻狀切刃互相碰觸。將海鷗環片上、下組合，有交錯效果。適用泥土壓式潛盾機。

京葉都心線京橋工程



大阪地下鐵7號線商業公園站

圖31 MF潛盾工法

(C.9)MF(Multi-Circular Face)潛盾工法：數個圓形切刃盤前後配置，且部分機器重疊構築複圓形隧道斷面。挖掘面前後配置可使各切刃轉盤單獨旋轉，但在挖掘面將產生高低差，故須考慮防止挖掘面崩坍對策。圓形挖掘結構上較穩定，左右非對稱翼環片有交錯效果。適用泥土壓式或泥水式潛盾機，參見圖31。

(C.10)拆裝式三連型潛盾工法(Detachable Three-Section Shield Tunneling Method)：在車站兩端工作井改變潛盾機斷面，以1部潛盾機進行變化斷面、連續掘進、長距離施工，完成單圓-三連車站施工，參見圖32。除親子潛盾工法外，採拆裝式三連型潛盾工法施工，參見圖33。

上述大斷面與斷面多樣化開挖之潛盾機方向修正，因開挖掘進中滾動量較大，易造成無法組裝環片之課題。須考量中折機構、超挖設

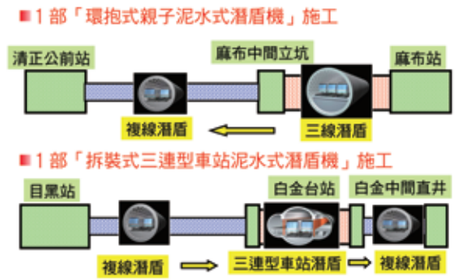


圖32 單圓～三連型潛盾工法

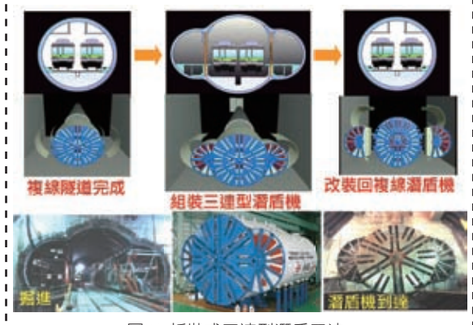


圖33 拆裝式三連型潛盾工法

備、滾動修正千斤頂，或配置推力不同之潛盾機千斤頂等對策因應。關於環片組裝設備，異於圓弧狀之環片或支柱等，有時也採手動操作，須考量組裝順序與施工性後，檢討適合之機構，或設置必要之環片輔助組立設備。亦須考慮地盤條件及土艙內挖掘土砂流動性選擇排土方式，並檢討排土口位置、大小等課題。關於盾尾封刷，尤其在複圓形潛盾機之彎曲變化段，或矩形潛盾機之角隅部，須採擇可確保止水性之形狀與材質。

(D)分歧及合流

為因應減少工作井或中途無法設置工作井之需求，開發出(D.1)機械地中接合、(D.2)親子潛盾工法、(D.3)DSR內膛拔出再利用潛盾工法、(D.4)擴大潛盾(圖24)等特殊工法，茲簡述如後：

接合部　　切刃面

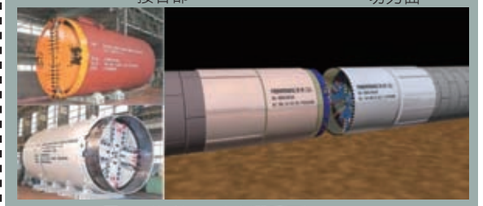


圖34 機械地中接合潛盾工法

(D.1)機械地中接合潛盾工法：兩部潛盾機於地中直接接合，參見圖34，無工作井，未影響周邊環境，可自由選擇銜接地點，惟不適合於巨礫及岩層地盤進行接合。適用泥土壓式或泥水式潛盾機，最小內徑約2.5m。

(D.2)親子潛盾工法：子潛盾機在中間工作井組合擴大為母潛盾機，參見圖35。母潛盾機無需中間工作井可縮小為子潛盾機，參見圖36，可避免不必要之開挖。適用泥土壓式或泥水式潛盾機。因利用相同驅動軸部與輸土等後勤設備，子潛盾機直徑受母潛盾機設備尺寸影響。

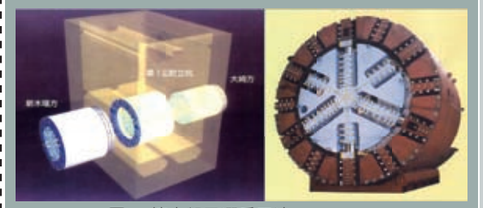


圖35 擴大親子潛盾工法

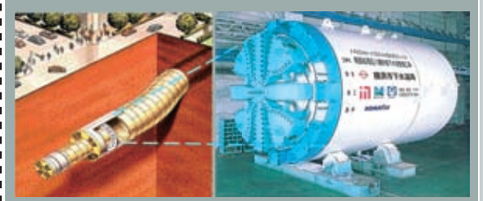


圖36 縮小親子潛盾工法

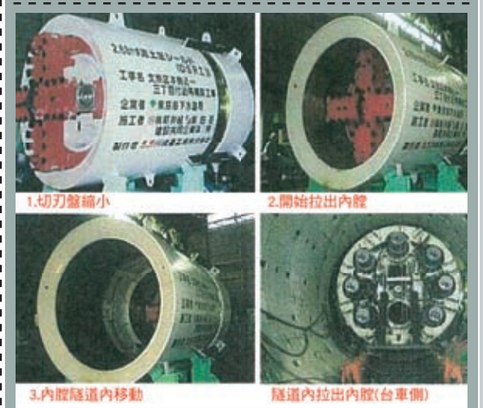


圖37 DSR內膛拉出再利用潛盾工法

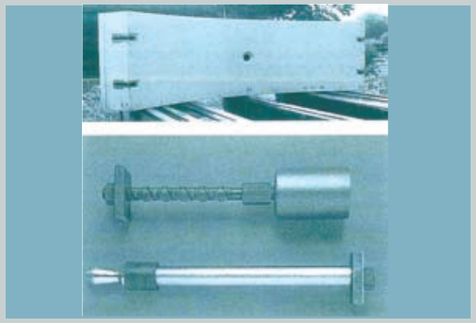


圖38 楔栓及快速接頭環片

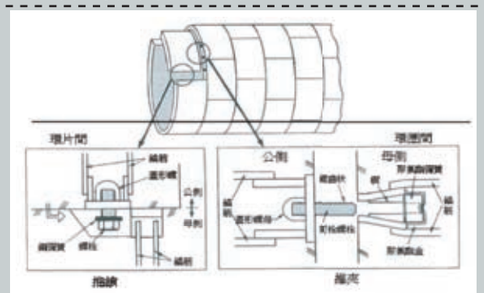


圖39 單程環片

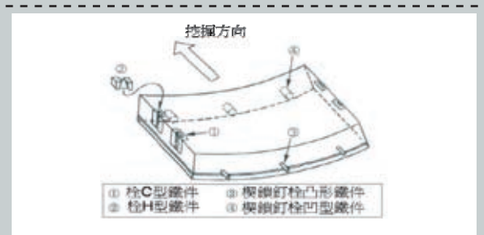


圖40 WB環片

(D.3)DSR (Draw a Shield for Recycle method)內膛拉出再利用工法：盾殼內側將驅動部等設備一體化(內膛)之潛盾機，以回收機拉出內膛機器，參見圖37。無到達工作井時亦可回收內膛設備再利用。

肆、環片發展新趨勢

近年研發之新環片技術多朝(1)環片組裝自動化及省力化、(2)高速施工、(3)降低製造成本、(4)省略二次襯砌、(5)因應特殊載重(內水壓、大載重)等趨勢發展，且新環片技術常兼具上述之數種特色。

為因應(1)環片組裝自動化及省力化：新技術幾乎均以環片「接頭」為對象、且環片品質與精度皆提高。而配合(2)高速施工：環片接合多採單觸式(one touch)技術，參見圖38-圖44之各種環片。另為配合潛盾機掘進可同時組立環片之機制，除圖14與圖15之方式外亦開發多種可同步施工之環片，參見圖45-圖48。為(3)降低製造成本：新技術多以降低環片接頭之費用為目標。為(4)省略二次襯砌：以內面平滑為主要對策，另針對腐蝕性環境難省略二次襯砌者，採環片內面舖特殊防腐蝕性材料辦理，參見圖

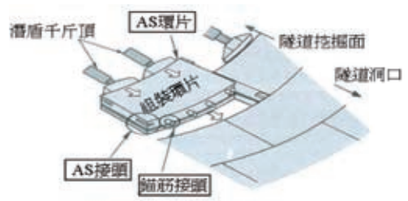


圖41 AS環片

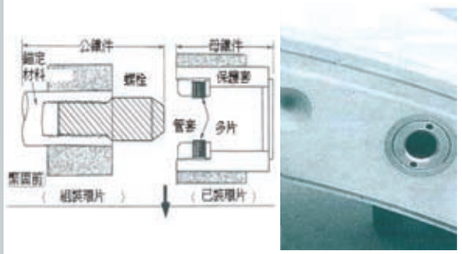


圖42 多片式接頭環片

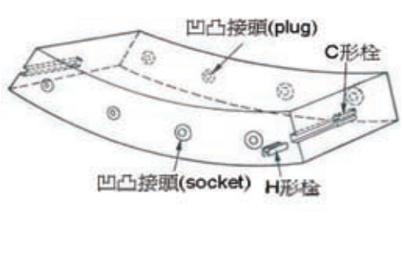


圖43 SPS簡程環片

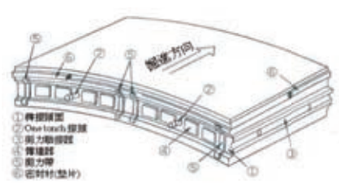


圖44 HOT環片

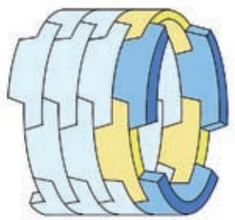


圖45 翼型環片

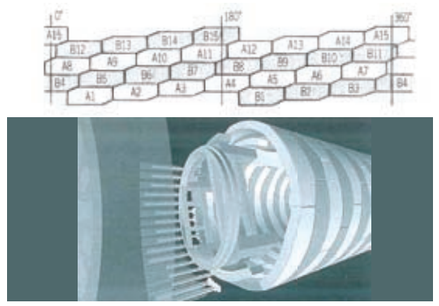


圖46 DNA環片

49。為(5)因應特殊載重，如矩型、橢圓型、大斷面隧道等大載重情形：多採合成環片；而輸水路、地下河川、調洪蓄水等隧道則需考量高內水壓，參見圖50~圖62之各式環片。

伍、結語

由於都市高密度發展致管線、鐵路、道路須予以地下化，因應穿越已密佈設施之道路下方而需發展諸多特殊新工法，亦已開始運用於台灣地區，如桃園機場捷運工程已採DOT複圓形潛盾工法發包施工，台電已有在軟弱地盤中採迷你栓塞急曲線潛盾工法完成φ3,730mm、R=20m(R/D=5.4)之急曲線施工。另台電在台北市區亦已規劃設計地下50m大深度、機械地中接合、地下根分歧、與月進度約300~400m之高速施工潛盾工程，預期未來將有更多新建工程因應特殊需求而採新技術施工。特殊新技術工法隨案例增加，技術亦持續進步中，然各工法發展亦有其限制性，採擇時須予以適當考量，且不可忽略潛盾機處理地盤穩定與地下水等基本功能之適用性。期待藉由擷取國外潛盾工程技術之精華，累積設計及施工經驗，逐步改良成為適用於國內之隧道工法。

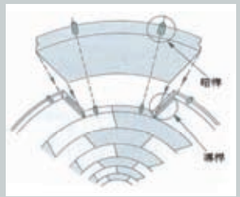


圖47 CONEX環片

圖48 蜂巢型環片

圖49 隧道襯砌內面被覆樹脂耐久化

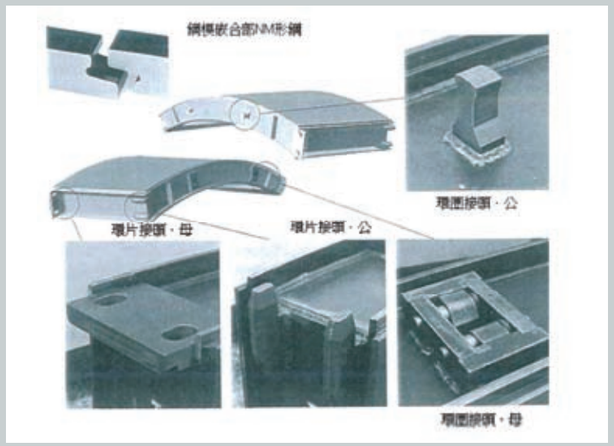


圖50 NM環片

圖51 薄型高強度SRC環片

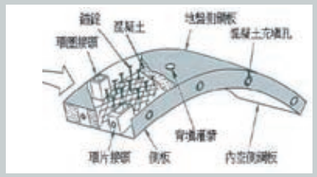


圖52 三明治型合成環片

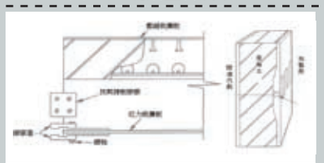


圖53 矩形隧道用合成環片

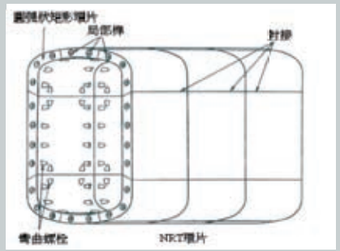


圖54 NRT矩形環片

圖55 拉弓環片

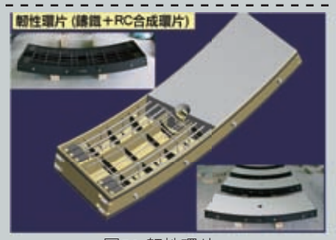


圖56 韌性環片

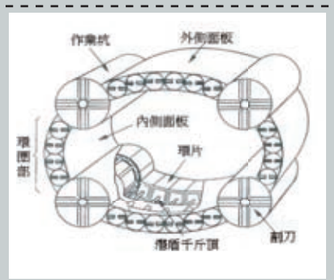


圖57 環狀潛盾工法用環片

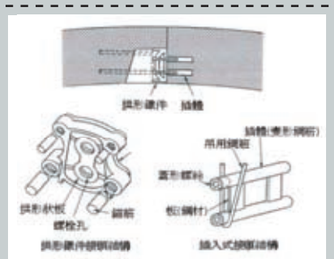


圖58 拱型插入式接頭環片

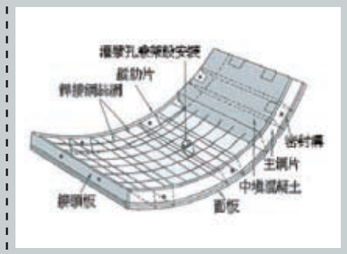


圖59 充填混凝土鋼製環片

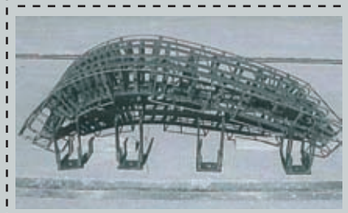


圖60 FBR平鋼RC環片

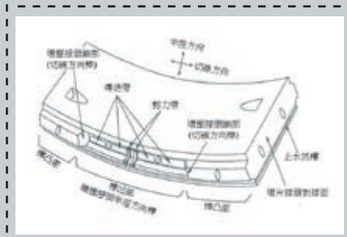


圖61 Ring Lock圈鎖環片

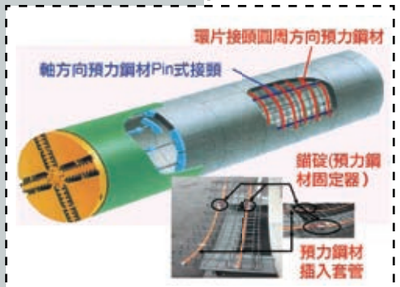


圖62 預力環片

參考文獻

1.朱旭，「潛盾隧道技術未來展望」，中華民國隧道協會主編「軟土潛盾隧道設計與實例手冊」，2004。

2.中華顧問工程司，「潛盾隧道環片型式與設計之探討」研發計畫成果報告，2005。

3.中華顧問工程司，「潛盾隧道設計及施工準則之研訂」研發計畫成果報告，2007。

4.日本潛盾工法技術協會，「多様化するシールド掘進技術」，日本土木工學社出版，2007。

5.日本潛盾工法技術協會，「建設研修」資料，2003、2004、2005、2006。