日本地下空間技術觀摩心得報告

摘 要 ABSTRACT

藉由觀摩日本近年施築之都會區地下高速道路、潛盾隧道開口銜接交流道、世界最具規模地下防洪儲流設施、採用壓氣沉箱與親子潛盾機施築排洪道設施等特殊技術，探究國外最新發展現況以汲取相關技術及經驗，供構思國內未來建設方案研擇及技術發展參考。

關鍵詞：交流道、蓄洪道、親子潛盾、壓氣沉箱、快速接頭

台灣世曦工程顧問股份有限公司／董事長／李建中 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／總工程師／周功台 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／業務經理／李魁士 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／水環部／副理／陳志方 ❹
台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／副理／劉珊 ❺
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／計畫工程師／蔡立盛 ❻

壹、前言

東京都住宅，鐵路、道路密集，日本正興建多樣化之地下高速道路克服環境及用地限制，此外，隨著日本東京首都圈的人口擴張開發，在埼玉縣春日部市區域因為被數條大河流所貫穿，如容器般地形在地勢低窪區容易積水，自古以來就一直飽受水患，因此興建世界最具規模之地下儲流設施及排水道治水。另，東京都江東區大島地區運用親子潛盾機因應排水隧道流通量於上游較小、下游漸大的特性以構築不同斷面達減量開挖。水道匯流處採壓氣沉箱施築抽水站，具施工精度高、鄰近沉陷量小、且無抽降地下水可降低對環境、水文之衝擊。潛盾施工遇地中構造物，因應受限腹地狹窄環境，遂採DO-Jet特殊高壓噴射地盤改良工法予以保護並排除基樁障礙物。茲彙整及略述該等工程建設之參訪觀摩心得，提供工程界參考。

貳、都會區地下道路

日本近年來於都會中開始興建地下道路，包括東京之中央環狀新宿線(2003～2010)、中央環狀品川線(2009～2015)、外環線(2014～2020)、大阪大和川線(2013～2016)及橫濱環狀北線(2011～2016)。高速道路過去多採高架橋方式立體化，為何中央環狀新宿線改採成本高且救難防災較困難之地下道路方式興建？由東京首都圈外環線興建經歷演進，或可窺知構造物型式除技術考量外，亦受社會人文接受度所影響。

圖1 東京都會區高速道路圖
(圖片來源：維基百科網站)

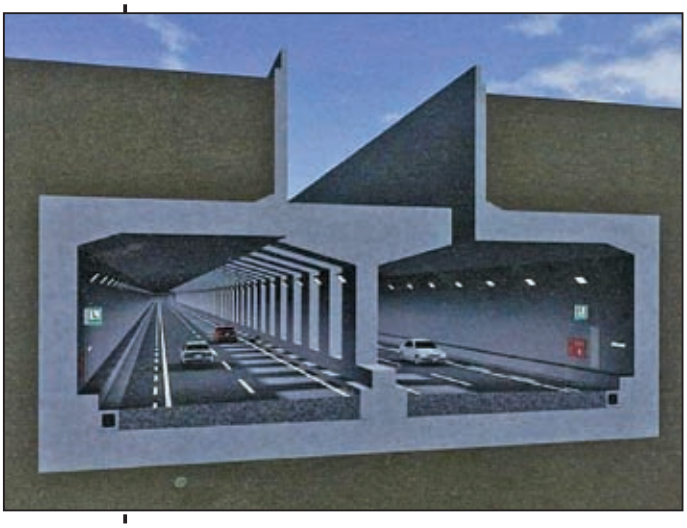


圖2 高谷交流道至三鄉南交流道間之明挖半覆蓋地下道路

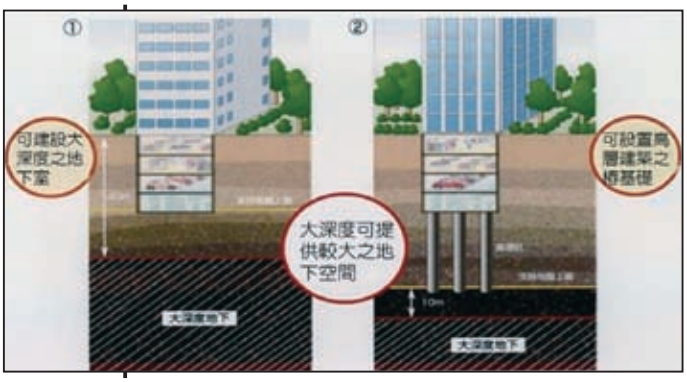


圖3 日本大深度地下為公共使用目的之特別措置法

一、日本高速道路(株)NEXCO東京都外環線構造型式演進

第一階段：最早採高架橋方式興建外環自動車道，並已完成三鄉南交流道至美女木交流道間之路段(圖1)。

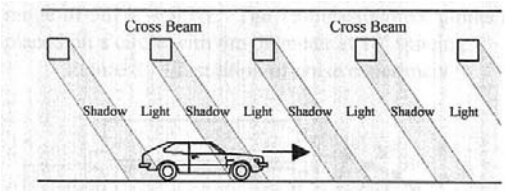
第二階段：於美女木交流道至大泉交流道銜接關越自動車道間目前亦已通車，採明挖與明挖覆蓋間隔配置方式興建可以避免道路地下化所需之通風設施需求，該計畫之隧道通風模式曾於本公司高雄隧道風洞試驗場進行模擬驗證。惟此路段於興建執行過程中，附近居民因期盼自家門前採覆蓋段而不願意面對明挖段致常引起爭議。

第三階段：目前施工中(預定2017年通車)之千葉縣區間(高谷交流道至三鄉南交流道)，由1969年規劃之高架橋型式歷經27年之爭議，於1996年定案改採明挖半覆蓋型式構築地下道路(圖2)。

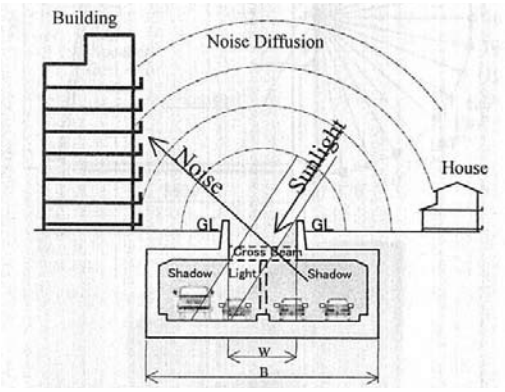
第四階段：2014～2020年興建之大泉交流道至東名交流道區間，因經過地價更高、更都市化之區域，經歷數十年無法順利徵收土地，於2001年日本通過地表40m下大深度地下為公共使用目的之特別措置法施行(圖3)，而採雙孔各三車道之潛盾隧道(直徑16m)興建16.2km之地下道路，僅需取得出入口部分用地。

二、外環線千葉縣區間(高谷交流道至三鄉南交流道)

外環線千葉縣區間設計速率80km/hr，道路範圍內用地取得及搬遷後，採用明挖半覆蓋方式構築地下車道(圖2)，由於半覆蓋結構間隔性開口可提供地下道路自然換氣需求，免設通風機房可減少對鄰近居民住宅之影響。然全長約



隔梁造成閃爍影響



視覺環境與減噪評析

圖4 半覆蓋式隧道內日照駕駛影響與噪音模擬

圖5 鋼便橋跨越車道銜接高速道路

12km間隔性開口所引入之光線對車輛駕駛則有負面影響，間隔梁之梁深與開口寬尺寸要考量行車速度並經噪音、日照太陽分析(圖4)，避免陽光直射駕駛員。

由於明挖半覆蓋隧道開挖深度淺，屬一般性施工技術，然工址因應居民要求施工物料運輸不經社區道路，因此所有物料、土方輸運動線全在計畫路線用地上，並設多處鋼便橋跨越地區道路且直接通行至高速道路上，反為本工程施工特色(圖5)。

三、首都高速道路中央環狀新宿線、品川線

為改善東京市中心之交通，興建以都心為中心，半徑約5km的中央環狀線(C2)，通車後新宿至羽田機場可由現況40分鐘縮短至20分鐘，效益顯著。新宿線及品川線皆為地下化段，隧道主線設計速率60km/hr，雙向各二車道，並採地下車行方向與地面車行相反之方式配置(圖6)以簡化地面道路銜接地下道路之出入口。另富谷出入口採大管徑迴線工法予以容納兩線路匯流(圖7～8)。此外，大橋交流道利用環狀繞圈的環形構造，連通中央環狀線與3號高架橋道路兩路線間上下高差約70m之銜接，外表有如羅馬競技場，內併設換氣所(圖9)。地下隧道往新宿側進入大橋交流道長約200m之岔出與匯入段，於隧道側先施作直井，將雙向呈垂直分布之二隧道側壁拆除及補強，使土中隧道壁體所受應力能順利轉換，並將二車道漸次變為三車道接入交流道，以利車流之岔出與匯入(圖10～11)。大橋交流道往大井方向之岔出與匯入段，其中主隧道內徑11.5m，連絡道直徑9.5m，兩潛盾隧道須於地底銜接，將水平併行之二圓形隧道斷面整合成一可連通之似大橢圓隧道斷面，使車流能夠於此出入口路段岔出或匯入(圖12)。而五反田出入口於兩隧道間進行出入口銜接(圖13)，其出口段潛盾隧道開口長約400m，入口段開口長約620m。銜接之交流匝道主要採明挖工法，部分路段因交通或地下管線障礙因素等採管冪工法開挖(圖14)。

中央環狀線潛盾隧道內徑11.5m，外徑為12.3m，混凝土環片寬度為2m，於出入口處之潛盾隧道需大範圍開口，故採用混凝土合成環片與鋼環片搭配使用，經彙整其值得參考借鏡之潛盾工程特色如圖15所示。

新宿線與品川線地下道路設置完整之防災安全配置，包括消音裝置、進氣、排氣、獨立避難通路、自動火災偵側器、水噴霧設備、交通文字情報板等。因應周邊居民對環境之反映及為容納足夠之設備空間需求，部分排氣塔高達45m，並聳立於道路中，形成特殊之街景(圖16)。

圖6 地下隧道車行逆向配置順接至地面車道示意

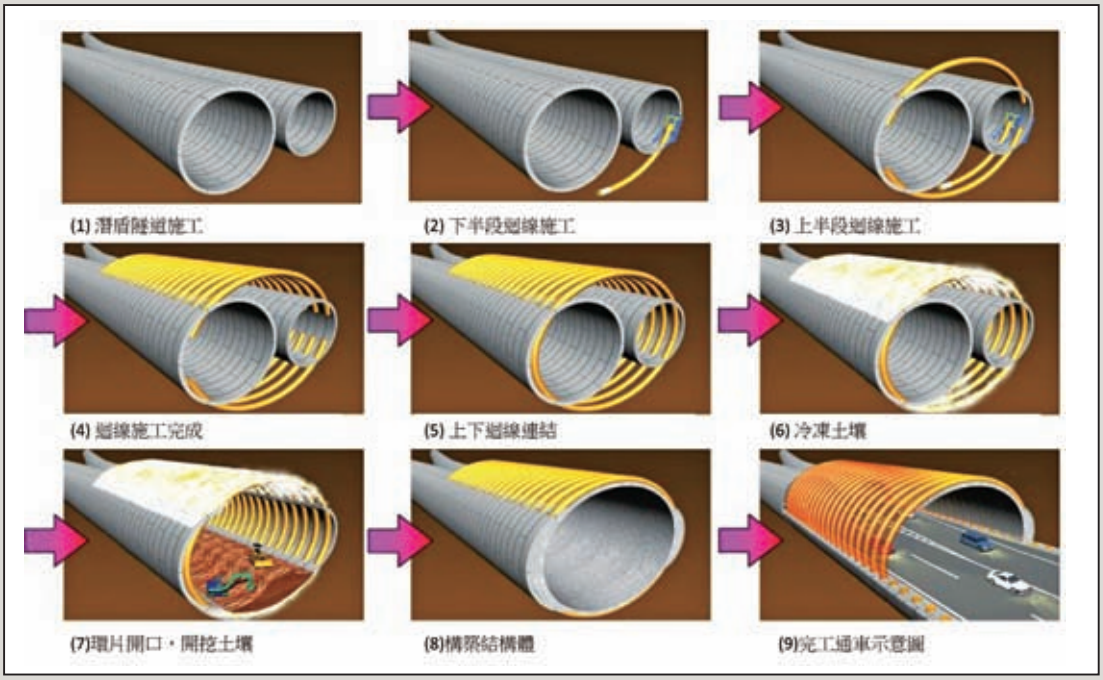


圖7 新宿線富谷出入口大管徑迴線工法匯集線路

圖8 新宿線富谷出入口施工

圖9 大橋交流道空拍

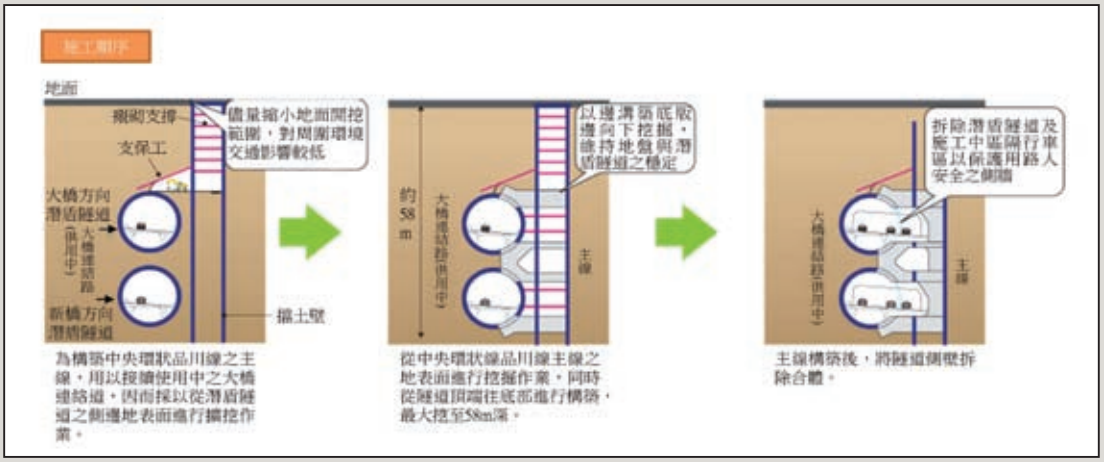


圖10 新宿側進入大橋交流道匯入

圖11 交流道匯入主線

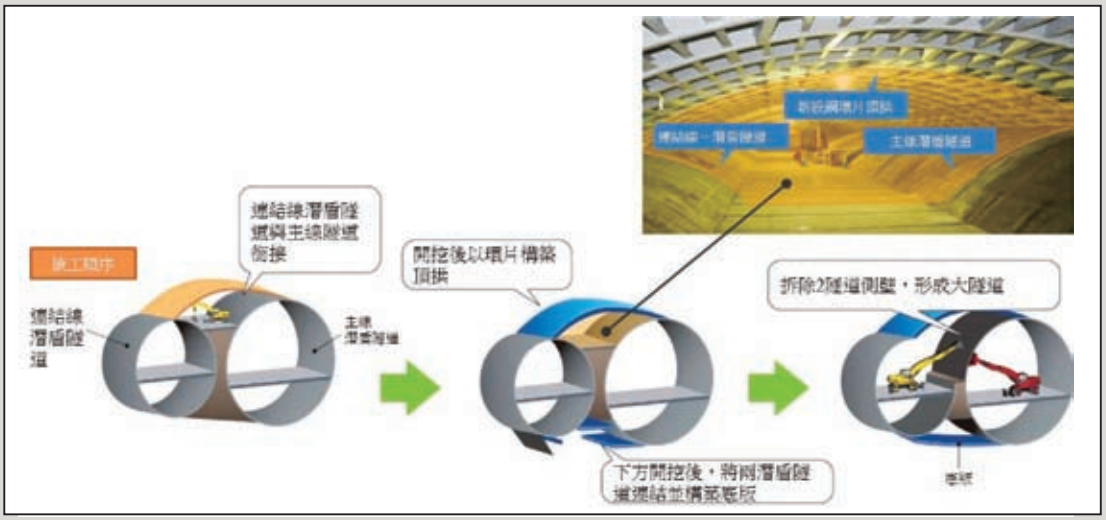


圖12 大橋交流道往大井方向匯入段

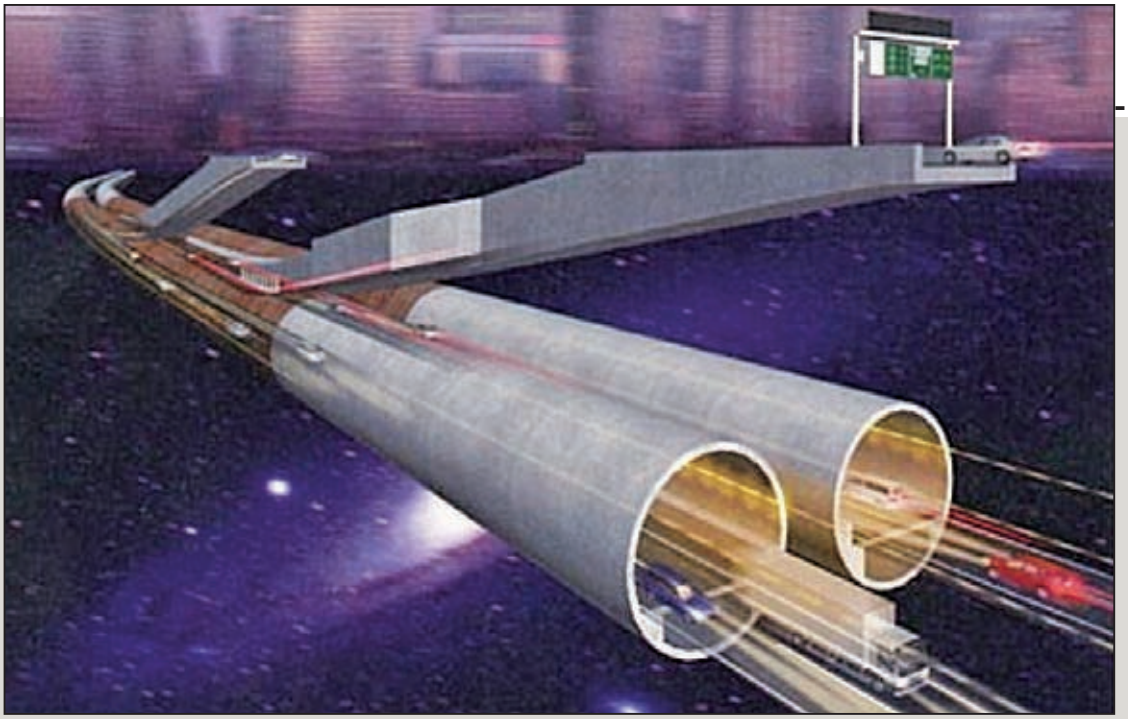
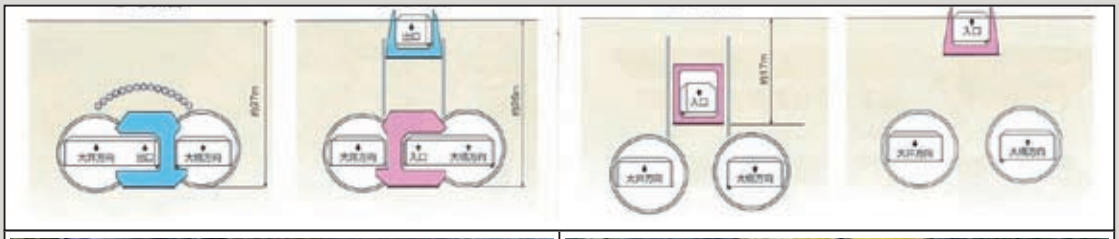


圖13 五反田出入口示意



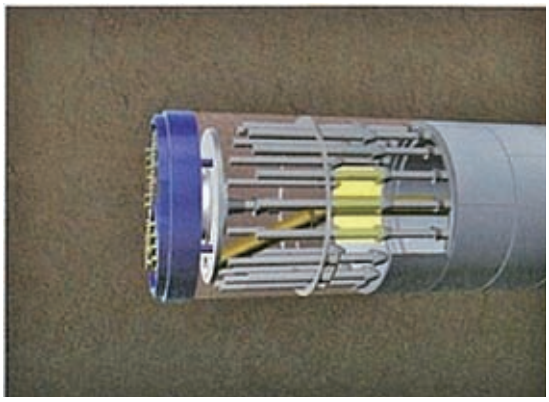
(1) 管冪打設施工

(2) 導坑開挖土方

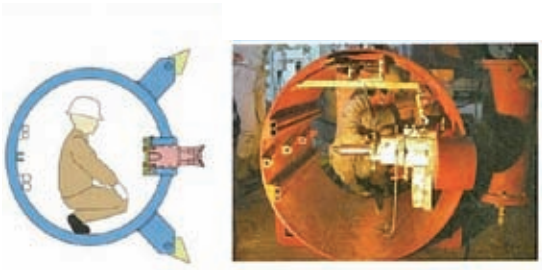
(3) 土方開挖完成之情況

(4) 隧道大範圍開口及施作軀體頂版

圖14 五反田出入口之施工

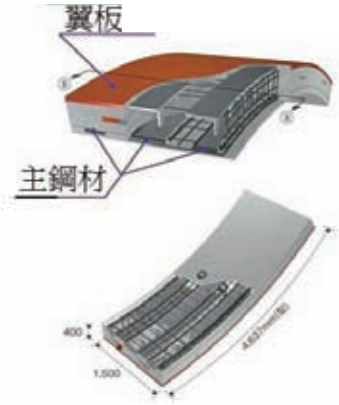


(1) 掘進與組裝同步快速施工，平均每環可節省22分鐘施工時間



(2) 輪輻管內切刃更換提升效率及確保作業安全

(3) 混凝土加聚丙烯纖維，增加耐火性，使混凝土不會爆裂



(4) 鄰近既有結構物或開口之應力集中區段採用合成環片

圖15 五反田出入口附近之合成環片及鋼環片切除作業

圖16 換氣塔街景

參、首都圈外郭放水路

日本埼玉縣春日部市區自古為低窪易淹水區域，因此首都圈外郭放水路目標係將颱風或豪大雨導致之暴漲河水導流至地下，以存儲超過河流容量的洪水，並將其排向下游之江戶川內，扮演洪水調節池的作用。首都圈外郭放水路位於國道16號下，主要由內徑10.6m排水隧道、豎井、調壓水槽及抽水站等設施組成，將大落古利根川、幸松川、倉松川、中川及第18號水路等河流的洪水導流至江戶川，於1993～

2006年施工，造價約為2,300億日圓，全線排水隧道長6.3km，為世界上最具規模之地下排水道，最大流量可達每秒200m³(圖17)，並由國土交通省關東地方整備局之江戶川河川事務所管理運轉。

一、排水隧道

連通各豎井間為內徑10.6m大斷面潛盾排水隧道，隧道之最深覆土為地表下50m，不同河川間分五個區段，各區段長度為380m～1,920m，組成總長6.3km之地下河流。為了提高施工性及配合此大口徑的內部水壓潛盾隧道，所運用隧道技術特點說明如下。

(一) 內部水壓對策：不僅是環片的外側土水壓，對於充滿水之地底下50m隧道內壓也須予以因應。

(二) 內面平滑：環片表面無螺栓盒不凹凸，流水順暢，免二次襯砌。

(三) 高剛性：環片接頭採用「楔型結構」，提高環片間之結合力(圖18)。

(四) 高速自動組裝：通過楔效接合，縮短組立時間。

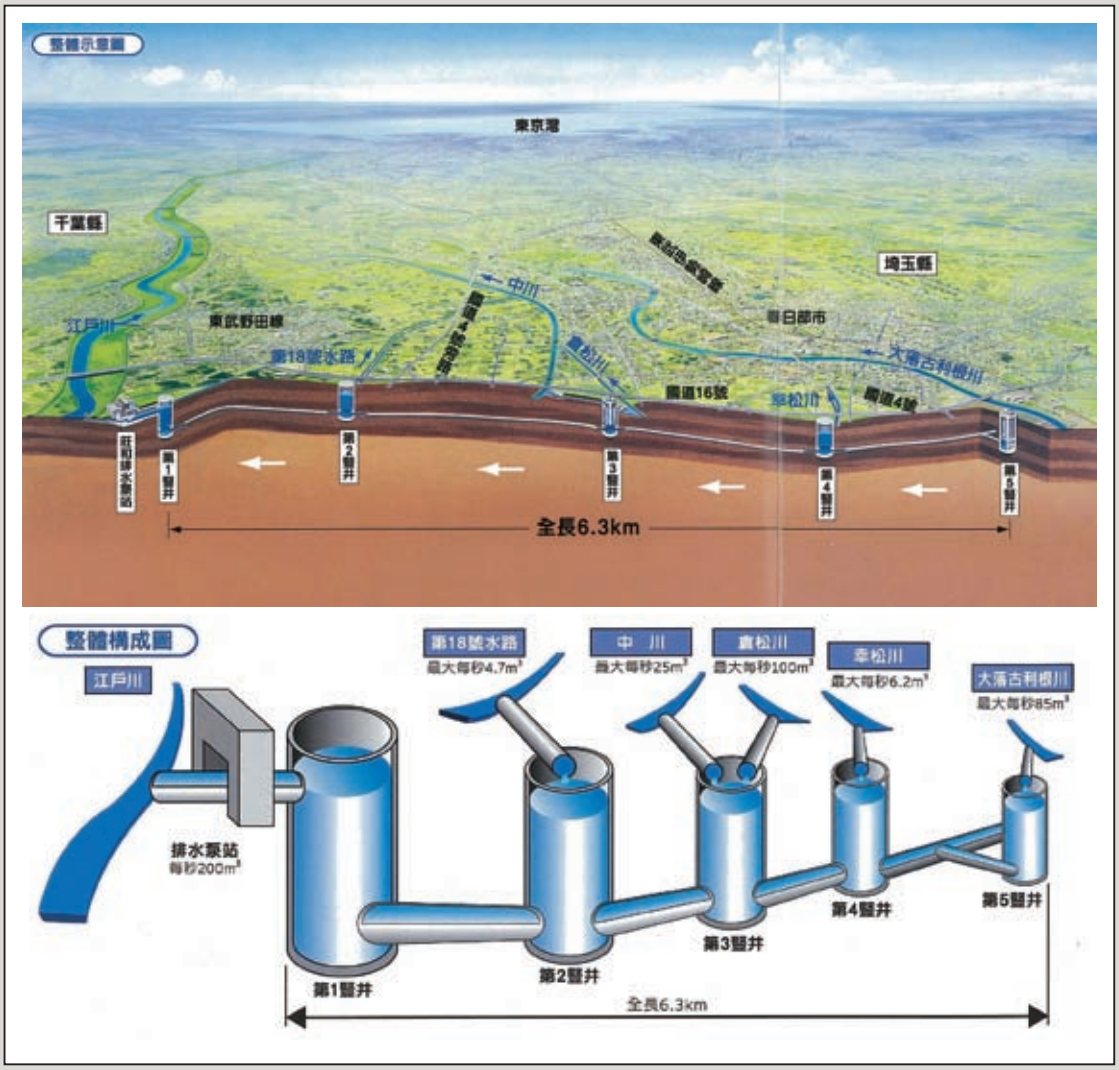


圖17 首都圈外郭放水路

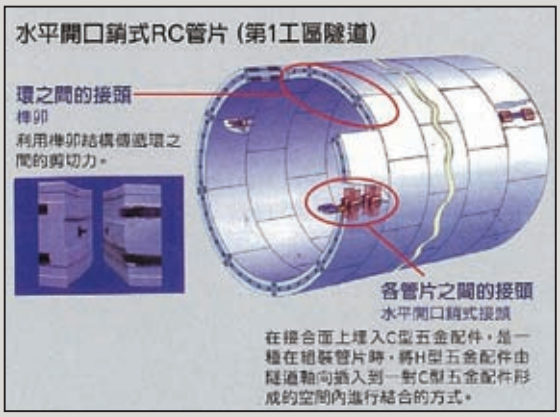


圖18 高接合性且內面平滑環片

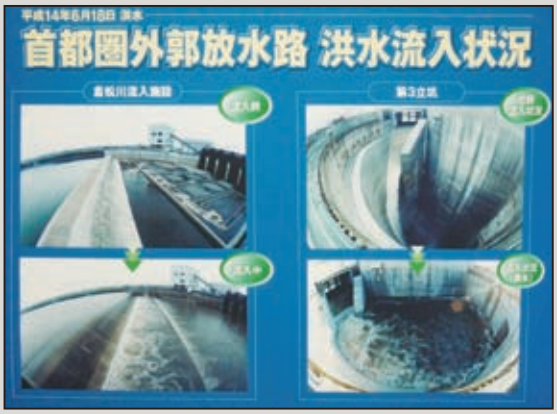


圖19 三號豎井倉松川流入設施

二、豎井

第1～5豎井通過排水隧道相連，各豎井之深度為69～74.5m，內徑約15～30m，壁厚為2.0～3.3m之巨大圓筒形構造物。豎井除了導入洪水之作用外，亦具備可容納搬運管理車輛、安裝通風設備等維護管理之機能。當大落古利根川、幸松川、倉松川、中川及第18號水路等河流水位上升、超過溢流堤的高度後，洪水會自然流進豎井(圖19)。溢流堤的高度與周圍的最低地面高度相近，因此即使是中小洪水情形下也能夠發揮防洪功用。

三、調壓水槽

為削減由地下隧道流出水之衝擊力，使水流順暢地抽排流入江戶川，在地底下深約22m處建造長177m、寬78m、高18m的巨大鋼筋混凝土之調壓水槽，並由59根長7m、寬2m、高18m之立柱支撐調壓水槽之頂版，宛如矗立於地底之神宮(圖20)。具有使抽水站穩定運行之作用和在緊急事件時調節劇烈水壓變化之作用。

(圖20a) 調壓水槽(地下神宮)

(圖20b) 實體模型

圖20 調壓水槽及抽水站

四、抽水站

調壓水槽內之水由抽水站通過6個5.4m×4.2m的排水暗渠水門流入江戶川。抽水站由4台50cms之立軸渦卷斜流式抽水機組成，總計容量200cms，每台設計揚程14m，原動機採用雙軸臥式渦輪機(由飛機之渦輪機改造)，額定功率10,300kw(14,000PS；圖21)。

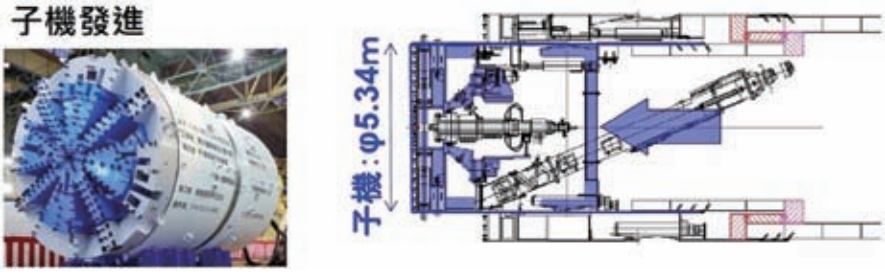
首都圈外圍排水道自2002年進行部分通水以來，至2014年2月共有85次洪水調節實績，治水效果顯著，大幅度減輕了日本埼玉縣春日部市區之淹水災害。

圖21 抽水站內部

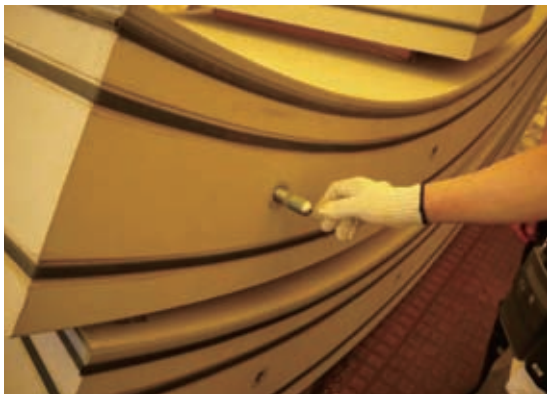
肆、大島幹線排洪系統

2012～2014年施工之東大島幹線及南大島幹線工程為因應日本東京都江東區及江戶區小松川流域防洪目的之地下排水隧道。排水隧道匯流至小松川第二抽水站，總長約為1,536m(圖22)。排水隧道配合上、下游集水區不同，所需排水斷面大小亦不同特性，採用一部親子潛盾機施工可減量開挖。其中第一階段(母機)潛盾洞道外徑7.1m，內徑6m，長度約705m稱為東大島幹線；第二階段(子機)潛盾洞道外徑5.34m，內徑4.5m，長度約831m稱為南大島幹線；此外抽水站(潛盾工作井)採壓氣沉箱工法避免抽降地下水，減緩對環境地下水文影響。另排水道遭遇地下構造物採DO-Jet地盤改良工法等特殊技術，亦分敘於后。

圖22 東大島幹線及南大島幹線路線示意



(1) 親子潛盾機示意圖及照片



(2) 30cm＋5cm二次襯砌(無筋)共構環片

(3) 親子潛盾隧道介面

圖23 親子潛盾隧道施工

一、親子潛盾機施工

親子潛盾機分離施工不同口徑之排水幹線(圖23)，親子潛盾機之造價約為一般潛盾機之1.5倍，但可替代二部潛盾機並減少開挖土方。工址運用混凝土環片、鋼環片及合成環片三種潛盾環片。混凝土環片之快速接頭型式與台電施工中大林～高港345kV電纜洞道工程相似。完成後隧道內面平滑有利排水。鋼環片應用於急曲線施工，而鋼環片內填混凝土之合成環片則運用於水道匯流之開口銜接部補強區段。此外，RC環片製造上一併考量防沖蝕與結構開口所需之二次襯砌厚度，以減少二次襯砌構築範圍。

二、壓氣沉箱工法施築抽水站

壓氣沉箱工法係於1841年由法國開發，利用壓縮空氣抵抗水壓，增加開挖壁面之自立性，防止地下水滲入導致地層軟化或湧水(圖24)；壓氣工法不抽降地下水，對環境及鄰近結構物影響小，並可目視確認承載地層條件，工法可靠，且箱體結構體於地面上構築品質佳。壓氣沉箱過去常運用於大橋之巨型基礎，過港沉埋隧道陸域端施工，近年來卻屢見其運用於東京抽水站計畫。本抽水站前池開挖深度約45m，因地質差，若採連續壁厚度大且深，並不

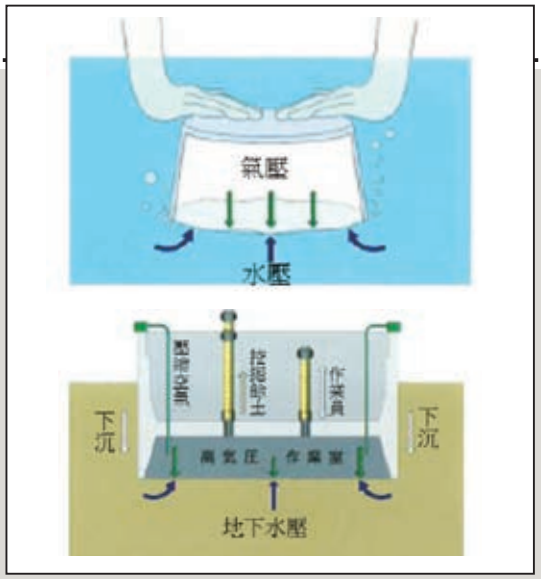


圖24 壓氣沉箱示意

圖25 小松川抽水站壓氣沉箱工法

經濟，且考量臨近河道，為克服高水壓與減少抽降水對環境影響，故採用壓氣沉箱構築抽水站。當壓氣＞1.8kg/cm²之環境下沉箱挖掘採遠端機械遙控方式之無人壓氣沉箱工法，以兼顧

(1) 壓氣沉箱土方及人員進出(一)

(2) 壓氣沉箱土方及人員進出(二)

圖26／接下頁↓

(3) 土方開挖遠端遙控室(一)

(4) 土方開挖遠端遙控室(二)

(5) 完成沉箱品質佳、不漏水

(6) 抽水站工址與塔吊

圖26 壓氣沉箱施工

人員安全及工進效率。小松川抽水站壓氣沉箱施工運作模型詳圖25，施工情形詳圖26所示。

三、地下障礙物處理

排水幹線潛盾機遭遇地下構造物，採行DO-Jet工法進行地盤改良保護並切除廢棄版樁(圖27～28)。DO-Jet施工工率每三天雖約僅能改良前進0.8m，然可避免由地表施工，不影響地面交通，且人員無需出艙到潛盾機外切除障礙物，大幅提昇工安，此種改良工法運用於大深度潛盾工程時將更具經濟性。

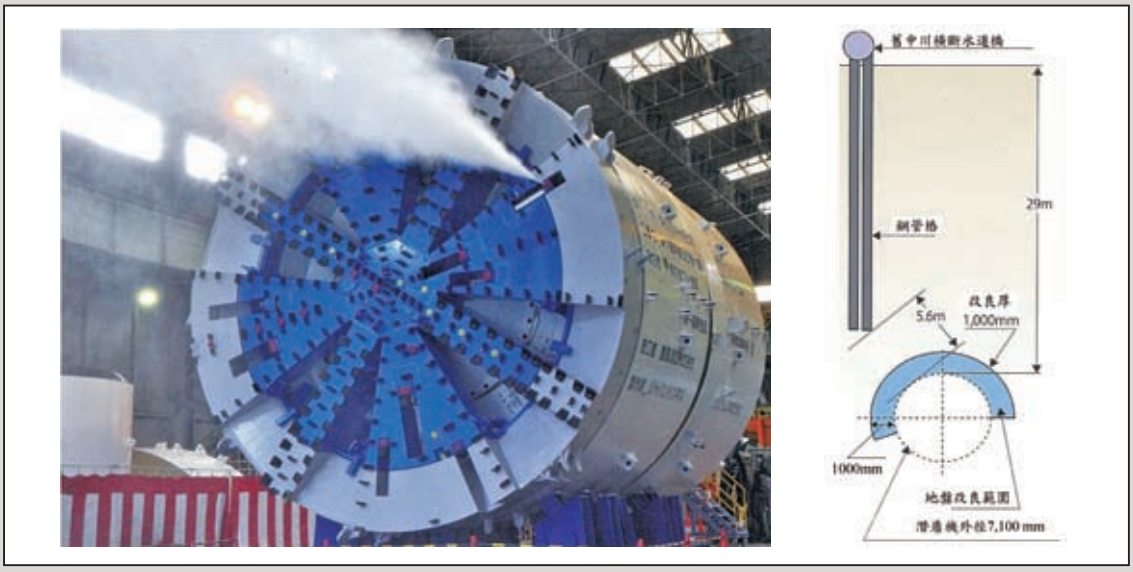


圖27 DO-Jet工法示意

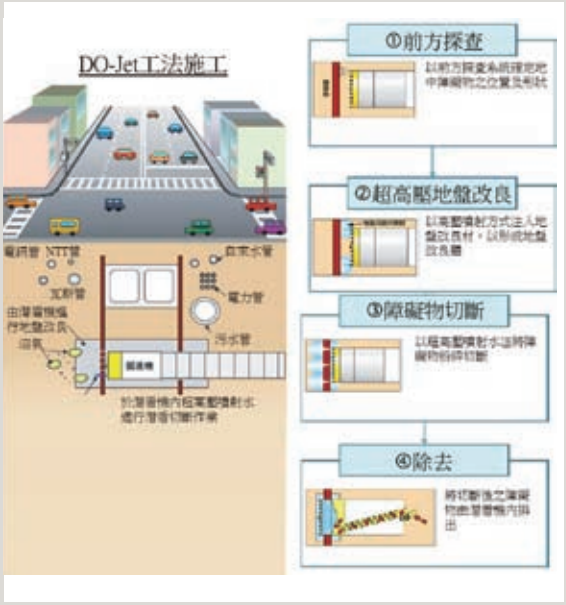


圖28 DO-Jet工法破除障礙物示意

伍、結語與心得

藉由參訪國外實績，更清楚大斷面潛盾隧道工法之應用已擴展至都會區地下道路，更衍生出交流道出入口與主線隧道大範圍環片開口銜接施工、潛盾快速施工、環片防火性能提昇、合成環片強化勁度等技術；親子潛盾減量開挖、壓氣沉箱施工免抽降地下水且能兼顧環境，以及地下蓄、排水道防範洪災等特殊技術構想，有利構思國內未來建設之推展方向。

參考文獻

1. 李建中等人，台灣世曦工程顧問股份有限公司「103年度東京地區重要工程案例參訪報告」，2014年7月。
2. 日本首都高速道路株式會社，「中央環狀品川線」型錄資料，2013年12月。
3. 日本國土交通省關東地方整備局，「首都外圍排水道」型錄資料，2014年。
4. 日本東京都下水道局，「東大島幹線及南大島幹線」型錄資料，2014年。