

第二章 文獻回顧

隨著工商業的快速成長，都市地面上的空間多已到達飽和的狀態，許多新興的必要公共工程陸續由地面轉於地下興建，地下開挖所採用之施工方式一般以明挖覆蓋工法及潛盾工法為主流。考慮明挖覆蓋工法對施工環境衝擊性，除建造車站站體及較淺之隧道採用明挖覆蓋工法外，捷運地下開挖多以採用潛盾工法施工。本章將針對潛盾工法之沿革及施工原理、潛盾機之型式、潛盾機適用土層、潛盾工法之優缺點、潛盾施工時之輔助工法、潛盾工法造成地表沈陷之原因，及潛盾破鏡之輔助工法等主題加以說明。

2.1 潛盾工法之沿革

潛盾工法用於隧道施工技術，係法國人 Brunnel 在乘船橫渡英國倫敦泰晤士河時，觀察木殼船上之蛀船蟲(ship worm)，發現蛀船蟲利用其前蛀齒鑿入木殼船之木材內，並分泌一種石灰質固化液，用以固結齒削物及穩定開挖面，再藉由身體之蠕動前進與排出渣料形成一隧道，此一靈感提供了潛盾施工法的肇始。

Brunnel 於西元 1818 年首先取得發明專利後，於西元 1825 年正式於英國泰晤士河底雙線隧道施工時，啟用了人類有史以來的第一部潛盾機（矩形斷面）。此隧道斷面為高度 6.6 m，寬度 11.3 m，長度為 452 m，於河床下 4 m 處穿越，其結構為磚塊襯砌，是在無壓氣狀態下以人工挖掘而成，自 1825 年開工，施工期間曾因開挖面發生湧水災變中斷數年，該隧道於 1841 年完工。

國內自民國 65 年引進潛盾工法，迄今已逾 29 年。所使用之潛盾機型式自最簡單之開放型手挖式潛盾機開始，其後陸續引進機械式、擠壓式、土壓平衡式、及泥水式潛盾機等。

2.2 潛盾工法施工原理

潛盾施工法為在軟弱土質中利用潛盾機(shield machine)進行開挖及隧道襯砌環片構建的一種主要施工方式。其原理為利用一較隧道外徑大，並且可向前推進之鋼套管（即潛盾機）在土層中挖掘前進，在設置永久支撐前，利用盾殼支撐隧道四周之地盤壓力，使潛盾機內部一方面無虞地盤崩坍，安全迅速的進

行隧道的開挖，一方面進行永久襯砌的組立。由於施工動作均在潛盾機機殼內完成，可免除臨時性支撐重複架設、拆除的缺點，在安全性、便利性及施工速度可大幅提升。潛盾施工作業循環可分為三個階段（朱旭，1984a），如圖 2-1 所示：

1. 開挖與掘進：旋轉潛盾機前方的切刃盤，將土壤切削入機體土倉內，再以螺運機或排泥管將廢土運出，同時利用機內的千斤頂，以安裝好的襯砌做為反力座，向前推擠前進。
2. 掘進終止：開挖約一個襯砌的寬度之後，切刃盤停止旋轉，並依次收回千斤頂，以空出的空間作為安裝襯砌之用。
3. 安裝襯砌：以潛盾機內部之旋轉襯砌組立機，安裝鋼筋混凝土襯砌環片或鋼環片，各片襯砌之間以螺栓相互結合，組立成完整的環片斷面，並且為下一循環作準備。

潛盾機在初期掘進時期，係以千斤頂推頂機尾後方假組立之臨時襯砌環片（圖 2-2 及圖 2-3），臨時環片再將推力傳至反力座，臨時環片藉由反力座產生之反作用力推動潛盾機向前掘進。在初期掘進時，環片及隧道內所需之各項材料，均由臨時環片後方的反力座開口運入。高宗正（2003）指出，潛盾機初期掘進施工之注意事項如下：

- (1) 推進時盾首之切刃盤須以低速、低扭力掘進，使潛盾機能準確進入地盤改良區內（如圖 2-3）。
- (2) 防止假組立環片因受力不均，而受損破裂。
- (3) 防止扭力造成潛盾機之機體滾動情況。
- (4) 隨時監控反力座受力之狀況。
- (5) 監控鏡面逆止鋼蹠片及止水墊圈狀況。
- (6) 當潛盾機完全進入鏡面之止水墊圈時（止水墊捲包住環片時），須進行背填灌漿，以保持環片的固定與鏡面的止水。

潛盾機初期掘進時，潛盾機之後續台車本應是設置於潛盾機後方，但是因為都市道路下工程之工作井作業空間受限，後續設備一般皆臨時設置在地面上，油壓及電氣系統設備配線由地面上配線下接至潛盾機。待隧道初期掘進至足夠環數，環片與背填灌漿所產生的摩擦力足以抵抗潛盾機掘進時所產生的推

力時，即停機進行後續設備轉換，及假組立環片與反力座拆除，在轉換期間須注意保持土倉壓力及防止千斤頂退縮。

2.3 潛盾機型式

採用潛盾施工法，潛盾機的選擇將直接影響到工程的成敗關鍵，因此要使用潛盾施工法能達到工程之所需，且能達到安全、經濟的原則，必須對潛盾機的型式、適用性、及特點加以瞭解，以便找出最合適的施工方式。蔡茂生（1988）將各型式潛盾機說明如下：

1. 開放式潛盾機（open shield）：包括手挖式（hand mining shield）、半機械式（semi-mechanical excavation shield）及機械式（mechanical shield）等，以上各機型的構造如圖 2-4、2-5 及 2-6 所示。
2. 擠壓式潛盾機（blind shield）：擠壓式潛盾機以機首之隔板推擠盾首前方土壤，使土壤經隔板上開口(window)擠壓進入潛盾機內，如圖 2-7 所示。
3. 密閉式潛盾機（closed shield）：包括土壓平衡式潛盾機（earth pressure balance shield，EPB shield）、加泥土壓平衡式潛盾機（muddy pressure balance shield）及泥水式潛盾機（slurry shield），如圖 2-8 至圖 2-10 所示。

2.4 各型式潛盾機適用土層

蔡茂生（1985），將潛盾機之構造、適用土質及特性整理如表 2-1 所示，對各種型式之潛盾機所適用土層狀況以及是否需要輔助工法以表格說明之。朱旭（1984a）將潛盾機機型與適用土質整理如表 2-2 所示。日本造船株式會社（Hitachi Zosen Corporation，1990），也針對各種型式潛盾機適應土層，以圖 2-11 表示之。日本土木學會「隧道標準規範潛盾篇」（1987）列出潛盾機類型與適用土質、輔助工法之關係，如表 2-3 所示。

2.5 潛盾施工輔助工法

採用潛盾隧道工法施工時，為克服地下水壓維持開挖面之穩定，及避免地盤變位過大，常需採用輔助工法配合施工，來達成止水或強固地盤之目的。以下各節將介紹潛盾隧道施工時常用之輔助工法。

2.5.1 壓氣工法

壓氣工法原理方法是利用壓縮空氣注入隧道內部，以壓縮空氣之壓力抑制地下水壓，阻止地下水滲入開挖面，而維持開挖面的穩定。一般而言，其適用於孔隙小，細粒料較多，透氣性小及滲透係數較低之地質狀況。對於工作面地下水的排除，在完善的施工管理下，壓氣工法為可靠的工法，因壓氣對地下水、環境及地表結構物影響最小，施工中不需先行降水，不受開挖斷面大小、形狀的限制，亦不會造成先期沉陷，且不會遺留下永久之地下擋水物。蔡茂生（1985）說明，壓氣工法施工時，需注意防範漏氣、噴發等事故，並需經常檢測施工範圍之空氣狀況，避免發生施工人員缺氧等事故。進出壓氣施工區時，四周壓力的快速上升或下降，可能造成人員罹患潛水夫病（the bends），若未予適當之管制，此輔助工法可能對經常出入壓氣區域之工作人員造成傷害。

廖銘洋（1989）指出，依壓氣工法之運作及壓氣施作之區域，大致可分為下列三種方式：

1. 隧道開挖區全體壓氣

為最具代表性之壓氣方式，在隧道壓氣區設置隔艙及氣閘室，使開挖側之隧道充份壓氣。氣閘室之設置可依隧道斷面之大小，將材料與人員氣閘室分開或共同使用。使用本方法之特徵敘述如下：

- （1）隨著隧道之掘進壓氣部分容積增大，因漏氣量增加將使輸氣量激增，有引起隧道內部壓力變化安全問題之可能。
- （2）隧道周圍土壤因壓氣作用，有止水與安定地盤之效果，將有助於背填灌漿及減少地層沉陷。
- （3）可減少盾尾封圈之湧水及流砂現象，有利於環片之組裝。
- （4）若在中小斷面施作，人員與材料共用氣閘室，進出時間受到限制，將使作業效率嚴重降低。

2. 潛盾機盾首限制壓氣

本方法需在潛盾機盾首處設置一隔艙，僅就盾首開挖區域施以壓氣之施工法，如圖 2-12 所示。通常在盾首隔艙裝設一小型氣閘室，做為緊急、障礙物排除或維修之用。使用本方法之特徵敘述如下：

- (1) 在開挖面作業室加壓，可避免全體隧道施工人員暴露於壓氣環境下，提高施工人員之安全性。
- (2) 因壓氣範圍侷限於潛盾機開挖面，壓氣儲蓄之容積較小，在地層漏氣量增大時，易使壓氣壓力急遽下降，有湧水或流砂之危險。

3. 工作井壓氣

於工作井中設置一樓板或密閉構造之氣閘室，將工作井形成一壓氣環境，做為隧道發進或潛盾機發進或到達之輔助工法，可減少對於周圍地盤之擾動及有效止水及擋土，增加破除鏡面時之安全性。

採用壓氣工法作為潛盾施工輔助工法時之優點為：

- (1) 可減少襯砌漏水情況。
- (2) 在隧道防水工作未完成前，可減少滲漏水及地盤沈陷量。
- (3) 施工費用較灌漿工法經濟。

採用壓氣工法可能之缺點為：

- (1) 施工前準備時間較長。
- (2) 施工人員須在高壓環境下工作。
- (3) 施工人員有缺氧之顧慮，可能對健康造成損害。

近年來潛盾隧道開挖大多使用密閉式潛盾機 (closed shield) 施工，因此較少採用壓氣工法作為輔助工法。壓氣工法一般較常使用在 NATM 隧道施工、潛盾隧道復舊施工，及聯絡通道開挖時之輔助工法。

2.5.2 地盤凍結工法

地盤凍結工法 (ground freezing method) 係將凍結管 (freezing pipe) 埋設在欲處理的土層內，並在管內流通極低溫之冷凍液 (如氯化鈣、液態氮等)，利用冷凍液的循環來吸收地盤中的熱能，被凍結的土壤乃是以凍結管為中心呈年輪狀 (同心圓狀) 成長，利用相鄰的凍土柱之管列效應，可在地盤中形成任

意形狀及大小的凍土牆，達到支撐外部壓力，以及發揮阻隔地下水的效用。地盤凍結工法可廣泛應用於各種不同的土質，土壤經凍結後具有相當強度；但值得注意的是，若需凍結之土壤水分十分稀少，其凍結效果將不理想，因為凍結的主體是水，所以足夠水分為土壤凍結之必要條件。冷凍工法施作情形如圖 2-13 所示，冷凍液之差異，凍結土層的方法依可分為液態氮 (LN_2) 凍結法和鹽水 (brine) 凍結法兩種。圖 2-14 顯示土城線 CD266 標潛盾隧道復舊工程，採用鹽水冷凍工液進行地盤凍結施工狀況。

2.5.3 灌漿工法

灌漿工法係於土層內灌入適當的材料（化學藥液、水泥漿或黏土液等）填充土壤顆粒間之空隙，使其結成一體。灌漿工法除可阻斷地下水滲流途徑外，亦可提高土壤的強度，減少地盤沉陷量及其影響範圍。灌漿工法為潛盾隧道施工時最常使用的輔助工法，如潛盾機發進及到達段的保護、隧道周邊地盤的保護、潛盾隧道穿越鐵路下方的保護、潛盾隧道穿越河川下方的保護，及潛盾隧道施工沿線之地表建築物的保護等(圖 2-15)。林耀煌 (1994) 說明，灌漿材料之分類依材料性質、反應形式、施工方式而異，常用之分類方式，如表 2-4 所示。一般最常用於軟弱地盤隧道工程之灌漿工法，約可概分成藥液灌漿與高壓噴射灌漿兩大項，分述說明如下。

2.5.3-1 藥液灌漿工法

藥液灌漿工法即將藥液以低壓注入地盤中，藉其膠結土壤顆粒之凝固作用，以減少地盤透水性，增加地盤強度。林耀煌 (1994) 說明，藥液灌漿材料之種類相當繁多，所採用之主劑除水玻璃系列藥液外，尚有尿素、尿脂、木質等高分子系列藥液。藥液灌漿之施工法，一般最常見之分類，則如表 2-5 所示。在台北捷運潛盾隧道施工中，常見的藥液灌漿工法包含以下幾種：

1. LW (Labres Wassergias) 灌漿：主要漿液材料為水玻璃加水泥漿。除可用於止水外，另兼有填充及固結土層之效果。該灌漿材料之配比，以台北捷運板橋線 CP261 標意外事故，凹陷區回填級配之孔隙填充灌漿為例，水玻璃：水泥：水 = 250 公升：250 公升：671 公升。土城線 CD266 標意外事故

搶救隧道區周圍地盤填充、路面凹陷區填充及建物保護填充灌漿所採用之配比，水玻璃：水泥：水 = 200~250 公升：250 公升：645 公升。

2. SL (Silicalizer) 灌漿：亦稱無機溶液型地盤灌漿，屬矽膠系藥液灌漿。主要漿材為水玻璃（比重為 1.4，pH 值為 11.5）系藥液加 SL 反應劑（比重為 1.5~1.7，酸性）。SL 灌漿之典型配比，每 1 m³ 所使用之材料，水玻璃為 250 公升，SL 反應劑為 40~60 公升，水為 690~705 公升。此灌漿之膠化機構，主要利用上述三者之化學反應，形成矽酸單分子水溶液，該溶液隨時間之增長，分子量亦逐漸的增加而膠化。改良土體之強度及滲透係數，以在標準砂（未改良狀況下無單壓強度，滲透係數約為 10⁻² cm/sec）為例，以 SL 灌漿固結後砂土之單壓強度約達 600 至 800 kPa，其滲透係數約下降至 10⁻⁶ 至 10⁻⁷ cm/sec。圖 2-16 所示以台北捷運 CD266 標意外事故，承商搶救地盤沉陷止水灌漿為例，漿液配比為水玻璃：SL 反應劑：水 = 250 公升：50 公升：700 公升。
3. CB (Cement Bentonite) 灌漿：主要漿液為皂土、水泥及水，漿液具有填充土層孔隙之效果。以新店線 CH221 標通風豎井意外事故復舊工程之隧道填充灌漿為例，每 1 m³ 漿液所使用之材料配比，水泥為 250 ~ 350 kg，皂土為 50 ~ 60 kg，其餘為水。內湖線 CB420 標 CP-2 聯絡通道地盤改良作業亦使用 CB 灌漿。
4. CW1 灌漿：為 A 液（水玻璃及水）及 B 液（CW1 硬化劑及水）二液型灌漿，具有填充土壤內較小空隙之效果。可藉調整灌漿材料之配比來控制凝固時間，以板橋線 CP262 標復舊工程之潛盾機到達段地盤改良為例，A 液包括水玻璃 75 公升及水 125 公升，B 液包括 CW1 硬化劑 22 kg 及水 191 公升，其凝固時間為 7 ~ 8 秒。土城線 CD266 標意外事故搶救地面止水灌漿所採用之配比，A 液包括水玻璃 75 ~ 100 公升及水 100 ~ 125 公升，B 液包含 CW1 硬化劑 22 kg 及水 191 公升。
5. ARON 灌漿：為 A 液（水玻璃及水）及 B 液（ARON-SR-B2 硬化劑及水）二液型灌漿。ARON-SR-B2 硬化劑比重約 0.8，pH 值為 6。以中和線 CC276 標連絡通道開挖前之地盤改良為例，該灌漿材料之配比 A 液包括水玻璃 100 公升及水 100 公升，B 液包括 ARON-SR-B2 硬化劑 12 kg 及水 200 公升。

6. 泡沫凝固 (set foam)：為尿脂 (urethane) 高分子系列，可調整凝固時間之二液 (polyisocyanate 與 polyole) 混合型之注入材料，可填充土壤內較小之孔隙後膨脹而凝固，其止水性佳。以板橋線 CP262 標隧道到達段潛盾機背填補充灌漿為例，該灌漿材料之配比每組漿液包含 polyisocyanate 20 kg，及 polyole 38 kg。

2.5.3-2 高壓噴射灌漿工法

高壓噴射灌漿工法 (jet grouting) 係指鑽機鑽孔至指定深度後，從鑽桿下端之特殊噴嘴，以高壓幫浦將固化漿液水平噴出，將土壤切割混和後改良土硬化。鑽桿以定速旋轉及提升使改良土體成圓柱狀。中國土木水利工程學會 (1995) 建議常用之施工參數如表 2-6 所示。

目前國內高壓噴射灌漿工法常用者可分為單管、雙重管、三重管工法，分別敘述如下：

1. 單管工法 (例如 Chemical Churning Pile, 簡稱 CCP 工法)：利用單管噴射高壓水泥漿液，切削地層混合土壤，此工法之特點為漿液經幫浦加壓後，由噴嘴直接橫向噴射並破壞土體。
2. 雙重管工法 (例如 Jumbo Special Grout, 簡稱 JSG 工法)：此工法係採用高壓漿液及壓縮空氣以同心雙重管傳遞，同孔噴出以增加切削能力(圖 2-17)。此工法與單管工法的差別係利用雙層同心管，將內管的高壓水泥漿及外管的空氣經同心環狀噴嘴同時橫向噴射，水泥漿外圍形成空氣膜，使噴射範圍加大。土城線 CD266 標復舊工程所使用之 SJM 噴射灌漿工法，以及聯絡通道地盤改良工程使用 JSG 工法，皆為雙重管工法
3. 三重管工法 (例如 Column Jet Grout, 簡稱 CJG 工法)：利用高壓清水及壓縮空氣切削土層後，以低壓漿液混合現地土壤，稱為三重管工法。此工法是經由同心三重管，將高壓水、空氣同時橫向噴射，切削周圍土體，藉空氣之上升力將部分泥漿由鑽孔排出，同時在鑽孔之較下端，將水泥漿以低壓注入殘餘泥漿中，混合凝固成樁體。(胡邵敏 1994)

2.5.4 降水工法

為避免地下水滲入隧道之開挖面，在隧道開挖之前，事先以點井或深井將地下水降低，如圖 2-18 所示，此工法通常適用於透水性較高之砂質土壤。蔡茂生（1985）指出，抽水時造成土層有效應力改變，可能對地盤產生壓密作用，造成鄰近地盤下陷，甚至危害鄰近之建築物。必要時，應併用灌漿工法或遮斷壁工法，阻隔抽水之影響線，以減少其影響。在降水工法之選擇上，必須考慮之因素如下：

1. 地質構造、透水係數、地下水位分佈等地層基本物理性質；
2. 預估湧水量湧水區範圍；
3. 鄰近地上與地下結構物覆蓋厚度；
4. 周圍地下水利用情形及隧道外排水設施。

2.5.5 遮斷壁工法

此工法在潛盾開挖斷面外側施作連續壁、預壘樁、深層攪拌樁或打設鋼板樁等地下壁體(圖 2-19)，此遮斷壁(cut-off wall)一方面可以阻斷地下水流，另一方面亦能藉牆體本身之勁度限制地盤鬆弛之範圍，以防止地盤變位傳遞至遮斷壁外側。遮斷壁型式抉擇之首要條件，在於依地層條件選擇施工可行之擋土壁種類，及壁體勁度與周遭環境允許之地盤變位。

2.5.6 拖底工法

本工法乃將可能因潛盾施工影響範圍所危及之結構物基礎予以補強或臨時支撐。將建築物之載重經新建之基礎而改由沈陷槽外之地盤支撐，惟此類方法之施工成本甚高而較少被採用。典型之潛盾隧道鄰近結構物托底工法如圖 2-20 所示。

2.6 潛盾工法之優缺點

依據潛盾施工法之特徵，朱旭（1984b）將潛盾施工法之優點分別敘述如下：

1. 潛盾工法之優點：

- (1) 除了發進與到達工作井範圍及地面輔助工法之施工用地外，其餘各項作業均在地面下進行，故對於地面上之影響或干擾，可降至最低程度。
- (2) 對地下各種管線及鄰近建物之影響較小，可免除施工中拆除、遷移等困擾。
- (3) 震動與噪音之公害較小。
- (4) 以適當之防護措施下，可於河川或其他結構物之下方穿越施工。
- (5) 施工時不須佔用大規模地面用地，對用地徵收、地上物補償費及道路修復費用較節省。
- (6) 於地面下施工，受天候影響較小，可日夜施工，並能縮短工期。
- (7) 依一定之步驟循環施工，對於作業管理可簡單化與自動化。
- (8) 全斷面開挖隧道，並採隨挖隨襯，安全迅速。
- (9) 施工全由機械與電腦操控，施工較為精確並可節省作業人力需求。

2. 潛盾工法之缺點：

- (1) 施工時若遇覆土較淺時，對於土壓及沉陷量之控制較不易掌控。
- (2) 較難達到全無地盤沉陷之狀態。
- (3) 施工前必須對沿線地質、地下埋設物及結構物作徹底詳細之調查，以研擬可能遭遇問題之因應措施。
- (4) 對於半徑短急之曲線段隧道，施工時較為困難。
- (5) 必須配合採用適當之輔助工法，工程費略高。
- (6) 工作井範圍用地須長期使用，並有噪音、震動之影響。
- (7) 每部潛盾機僅有一個工作面進行，施工中若遇意外(如機具損壞、被障礙物卡住等)，潛盾機無法倒退，只得停機待修。

2.7 潛盾掘進管理

潛盾隧道掘進之施工管理項目包含：土倉壓力管理、盾首加泥注入管理、排土管理、背填灌漿管理，及掘進線形管理，其中以開挖面土倉壓力管理最為重要。若開挖面失去應力平衡狀態，地盤變位便會產生。當土倉壓力太大時地盤便會隆起，反之則發生沉陷。因此保持開挖面穩定，有必要保持適當的土倉壓力。以下介紹主要的施工管理項目。

2.7.1 土倉壓力管理

隧道開挖前須決定之土倉壓力(chamber pressure, P_{ch})管理值，主要是依據沿線之鑽孔取樣結果，分段後，依所得之地層性質資料(如土壤內摩擦角 ϕ 、凝聚力 c 、總單位重 γ_t)，施工單位考量現場情況，選用學者提出之側向土壓力計算方式，將覆土壓力乘上該處主動土壓力係數 K_A ，計算出該處頂拱及仰拱側向土壓力($\sigma_{t,c}$ 及 $\sigma_{t,i}$)並依施工規範決定每段隧道開挖應控制土倉壓力上下限值之範圍。常使用之開挖面壓力計算方式如下：

(1) Rankine 主動土壓法-砂土黏土均適用，如圖 2-21 (a) 所示。

主動土壓係數 K_A ：

$$K_A = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2-1)$$

頂拱側向主動土壓力，砂質土為水土分離狀態 $\sigma_{t,c}$ ：

$$\sigma_{t,c} = (\gamma_t H_1 + \gamma'_t H_2) K_A - 2c\sqrt{K_A} \quad (2-2)$$

頂拱處側向水壓力：

$$P_{w,c} = \gamma_w \times H_2 \quad (2-3)$$

隧道仰拱處側向主動土壓力 $\sigma_{t,i}$ ：

$$\sigma_{t,i} = \sigma_{t,c} + \gamma'_t \times D \times K_A \quad (2-4)$$

隧道仰拱側向水壓：

$$P_{w,i} = p_{w,c} + (\gamma_w \times D) \quad (2-5)$$

其中：

c ：土壤凝聚力

D ：潛盾機直徑

H_1 ：地表至地下水位深度

H_2 ：地下水位置潛盾機頂拱深度

ϕ ：土壤內摩擦角

γ_t ：濕土單位體積重量

γ'_t ：土壤有效單位重

γ_w ：水單位體積重量

頂拱及仰拱水平土壓力分別為式(2-2)之 $\sigma_{t,c}$ 加上式(2-3)之 $P_{w,c}$ 及式(2-4)之 $\sigma_{t,i}$ 加上式(2-5)的 $P_{w,i}$ 為求潛盾機開挖面穩定，土倉壓力必須抗衡開挖面之土壓。

潛盾機開挖面若能維持土壓力平衡狀態，原地層將不受到擾動且保持穩定。土倉壓力管理目標即在維持開挖面穩定，使擾動程度降至最低，確保工程品質與鄰近結構物的安全。為判斷開挖面之穩定，必須於潛盾機裝設測量側向土壓、排渣量、切刃扭矩、潛盾機推進千斤頂推力計測儀、及探查崩塌裝置等。

土倉壓力之大小是由裝設在土倉隔版(bulkhead)的壓力計 (pressure cell)量測，但土壓力計測量之土倉壓力(P_{ch})為作用於土倉隔版之壓力，並不等於實際作用於開挖面的側向土水壓力。當潛盾機掘進時，土倉隔版擠壓土倉內土渣，所測得壓力會大於實際至開挖面之壓力。潛盾機停機時，壓力計所量測之壓力會逐漸降低，甚至小於開挖面壓力，也就是土倉內會有壓力梯度的效應(M. Mohkam & A. Reda, 1994)。

潛盾機掘進土倉壓力管理值設定之三種基本模式，朱旭與楊穆良等(1997)說明。

1. 設定管理土壓

依據現地質鑽探及水位量測資料，推算之靜止側向土壓+水壓+預備壓(一般經驗值為 $2t/m^2$)，分區設定管理值，並分別以主動土壓和被動側向土壓加上水壓作為管理值的上限及下限值。

日本隧道工程標準規範及解說(1997)，以極力抑制地面下陷為施工目的者，控制土倉內的壓力，係以採靜止土壓作為上限值情形較多。以保持開挖面穩定為目的，容許若干地盤下陷者，則以採取主動土壓作為其下限值之情形較多。

2. 開挖面土壓力與土倉壓力

施工時可利用設於土倉隔版上的土壓力計，量測土倉內之壓力，由於切刃盤開口率不同、及盾殼的屏蔽，所造成的軸向壓力損失難以正確量化，因此土倉壓力施工管理設定值仍需憑經驗視情況進行修正。

3. 試誤法

根據相關資料推算側向土壓力並參考類似之施工案例經驗而得知管理值。依據實際掘進獲得之成果，包含地表沉陷紀錄及潛盾機運作狀況，隨時調整土倉壓力。

2.7.2 盾首加泥注入管理

盾首加泥材能改善較黏稠開挖土壤之透水性、流動性及增加塑性，與土倉內及螺運機內充滿改良土後，保持開挖面之壓力與側向土壓及地下水壓抗衡。以內湖線 CB420 標為例，加泥材包含水和皂土(bentonite)、及高分子添加材。潛盾機於具凝聚力的黏土層及粉土層中開挖，可藉由切刀盤的切削作用維持土倉內土渣流動性，但常發生土渣黏附於土倉壁，導致排土效率降低，影響排土量。於內摩擦角較大之砂土層或礫石層中，開挖渣料切削進入土倉經擠壓後，有強度提高、流動性降低的現象，將會發生排土不順暢，並導致切刀盤扭力過高及螺運機排土功能效率降低的問題。為改善這些問題，須於切削面設置加泥材注入口，注入添加劑來調整切削土壤之流動性，並達到抑制地下水的效果。

加泥材除達到上述效果外，另外可減低切刀盤及面板與土渣間的摩擦力，減輕切刀盤及螺旋輸送運機之扭矩等次要效果。

加泥材灌注量與配比係根據地盤顆粒組成情形設定。實際施工時之灌注量依每一區段開挖面穩定狀況、開挖渣料性質狀況及潛盾機運轉情形，確認施灌效果後反應至下一區段施工。盾首加泥灌注量之控制，通常配合潛盾機推進速度進行，加泥材由地面攪拌槽經泵浦壓送至坑內，再由潛盾機操作員依潛盾機推進速度自動增減灌注量，以達到良好土倉壓力管理及排土量管理。灌注壓力設定控制，按照切刀盤的扭矩、加泥材對地盤之滲透性、排渣狀態、及土倉壓力等狀況進行控制。

2.7.3 排土管理

為維持開挖面的壓力平衡，潛盾隧道施工時，控制土倉壓力控制及排土量掌控皆為重要管理項目。最基本的排土管理方式即開挖土量等於排土量，若排出量超出開挖土量，可能造成開挖面前土體沉陷反之，若排土量不及開挖土量，可能造成隆起。從潛盾機控制項目區分，排土量控制可分為變化掘進速度控制、螺運機轉速控制及排土閘門開口大小之控制。當潛盾機以設定速率掘進

時，應以螺旋輸運機等排土裝置調節排出之土碴量，單位時間內切削土量與排土量應達到平衡。

為保持排出土碴適當的流動性，排土管理應與盾首加泥材之添加量配合，漿盾首加泥與開挖土砂拌合成塑性流動物質，提高土碴之不透水性、穩定開挖面，避免發生開挖面崩壞或排土口阻塞的情形。

排土方式有以管泵送方式，此方式有採流量計與壓送泵浦計數器等兩種方式計算排土量。採吊運方式出土者，有利用測定螺運機轉速，或根據出土台車數推算出土量者，亦有以紅外線及聲納測量排碴量者。以 CB420 標穿越機場段為例，每環排土量是以電子流量計紀錄，並計算壓送至地面棄土槽內之土碴體積以此兩種排土量計算方式進行管理。以螺運機轉速計算排量之方式如下。

$$Q = 60 \times \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) \times L \times n \times \alpha \quad (2-6)$$

其中：

D1：螺運機內轉軸軸徑

D2：螺運機直徑

L：螺距

n：螺運機迴轉速度

α ：土砂充填率



2.7.4 背填灌漿管理

潛盾鑽掘施工使用背填灌漿之目的，為填充盾尾間隙避免導致地表沉陷（如圖 2-22）、防止地下水滲漏進入環片內，使開挖受擾動之土層能及早穩定，防止隧道蛇行，及防止隧道環片變形。背填灌漿宜使用施灌漿後體積變化較小，且能儘早達到相當於地盤強度以上之瞬凝型漿液。背填灌漿必須選擇適合於地盤土質及潛盾機型式之漿液，漿液必須具有如下特性：

1. 填充性佳，除盾尾間隙外不易滲流至週遭土壤；
2. 材料不分離，不易受到地下水稀釋；
3. 流動性佳，長距離壓送材料不分離；
4. 灌漿後體積變化少；
5. 早期達到地盤強度以上之強度；

6. 水密性佳。

背填灌漿時機通常可分為同步灌漿及即時灌漿。同步灌漿係在環片推出盾殼同時，自設於盾殼外側灌漿管及環片灌漿孔同時進行背填灌漿的一種方式，即時灌漿則是指環片推出後立刻自環片灌漿孔進行背填灌漿之方式。為防止背填灌漿施灌後，漿液回灌開挖面，亦有承商採用於環片背面裝設袋膜，限制灌漿注入袋內，避免回灌開挖面之做法。背填灌漿管之理項目可分為灌注量與灌漿壓力，分別說明如下。

1. 背填灌漿壓力

日本隧道工程標準規範(1997)建議，管理壓力一般採 100 ~ 300 kPa(1 ~ 3 kgf/cm²)，視現地狀況與灌漿量的變動做適當調整，目的在使灌漿順利進行，且不致造成土層及環片產生擠壓變形為原則。台北捷運潛盾施工背填灌漿之注入壓力以地下水壓加 100 ~ 200 kPa(1 ~ 2 kgf/cm²)，且灌漿孔壓力不可超過 360 kPa(3.6 kgf/cm²)建議並考量地層性質、環片承受範圍等因素，在現場依業主掘進指示施作。

台北捷運施工技術規範則(2004)建議，潛盾隧道開挖工法最大背填灌漿壓力不得超出頂拱上覆土壓力(假設復土單位重為 17 kN/m³)，即背填灌漿壓力不得超過頂拱覆土壓力，避免地盤隆起。

2. 背填灌注量

灌注量取決於孔隙體積的計算以及灌漿率的設定，灌漿率為實際灌漿量與理論盾尾孔隙(tail void)體積之比。注入量受地質狀況、曲線施工、超挖及背填注入材之種類等因素影響。直線段背填灌漿每環注入量 Q 計算方式如下。

$$Q = \frac{\pi}{4} \times (D_m^2 - D_s^2) \times B \times v \quad (2-7)$$

其中：

D_m ：切刀盤直徑

D_s ：環片外徑

B：環片寬度

v：規劃注入率

考慮灌漿材滲入土層、壓密、超挖及水泥乾縮等因素，一般背填灌漿之注入率為 120 ~ 200%，視地層狀況與施工條件而調整，台北捷運施工規範要求之灌漿注入量為盾尾間隙之 150%。背填灌漿施工管理方法分為壓力管理與注入量管理兩種。若採壓力管理，需經常保持上述設定壓力，故灌漿量不固定。若採用注入量管理，需經常以一定量體積施灌因此灌漿壓力會發生變化，故宜並用兩種方式實施綜合性管理。

施作二次灌漿(secondary grouting)有時亦為填補背填灌漿之作用而進行(如圖 2-23)，其目的如下：

- (1) 針對背填灌漿未能充填部分之填補
- (2) 背填漿液體積收縮之部分之補充
- (3) 因潛盾機推力造成之環片、漿液、及地盤相互間產生剝離狀態時予以填充。

於潛盾隧道內施作二次灌漿，其改良位置為隧道上半圓環片外圓 1 ~ 2 m 處施作，根據黃南輝、黃亦詳等(1997)及胡森、謝家麟(1997)表示：潛盾機通過 24 小時內施工引起之地表沉陷並不顯著，而於通過後第二天起逐漸產生沉陷，因此二次灌漿在 24 小時內施作對地表沉陷控制較有貢獻。捷運施工技術規範建議，如採二次灌漿其灌漿，注入率達土體之 12%（可依試灌結果因應不同地層經工程司核可後調整），或二次灌漿壓力達初始壓力加 200 kPa(2 kgf/cm²)或二次灌漿壓力達 500 kPa(5 kgf/cm²)時即可停止，如環片發生異常變形，應立即停止施灌。二次灌漿施作時機應於各環片離開潛盾機尾端 24 小時內，即 8 環內完成。

2.7.5 掘進線形管理

掘進管理之主要管理項目為：

1. 方向管理：時常監視潛盾機千斤頂伸長量、機身傾斜計、滾轉計，充分了解潛盾機狀況，以決定各位置千斤頂之推進量，必要時可使用切刀盤上的超挖刀，維持潛盾機依計畫路線推進。

2. 測量管理：潛盾機發進前進行基線測量，確認發進部至到達部中心線，掘進期間持續進行隧道測量。
3. 施工紀錄管理：每班掘進施工前，需先了解掘進指示書內各施工管理值，並依指示施工。每環施工完成後，依實際施工狀況填寫紀錄。

估算潛盾機千斤頂推進之總推力，應考慮各項推進阻力總和，安排所需之寬裕推力。並考量潛盾機之方向操控、襯砌環片形狀及強度等，進行適當之配置。千斤頂之安裝方式，須極力減少造成環片之偏心載重。潛盾機推進阻力 ΣF 係由下列六項因素組成：

$$\Sigma F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (2-8)$$

F_1 ：盾殼外側與土壤間之摩擦阻力或黏著阻力。

F_2 ：前端切刃之貫入阻力。

F_3 ：開挖面阻力。

F_4 ：曲線施工之變向阻力。

F_5 ：盾尾環片及盾殼間之摩擦阻力。

F_6 ：後續台車牽引阻力。



潛盾機切刃扭矩之總和 ΣT 係由下列因素組成：

$$\Sigma T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (2-9)$$

T_1 ：土壤對切刃之抵抗扭矩。

T_2 ：切刃盤前端及周圍地盤抵抗扭矩。

T_3 ：切刃盤攪拌抵抗扭矩。

T_4 ：機械損失抵抗扭矩。

在進行急轉彎曲線施工時，若發生隧道移動的情形，則必須定期檢測隧道內之基準點，控制潛盾機千斤頂推進位置，並配合掘進實施背填灌漿，以免發生環片變形及位移。進行曲線施工段時，可利用潛盾機中折裝置進行方向修正裝置。

2.8 潛盾隧道施工引致之地盤沉陷

2.8.1 地盤變位的原因

潛盾隧道施工所造成的地盤變位，與開挖土壤的種類、選用的潛盾機型式、潛盾機直徑及開挖深度等，均有密切的關係。Peck (1969)、Schmidt (1974)、Cording and Hansmire (1975)、Hanya (1977)、Fang et al. (1994) 等學者，均曾經提出相關的研究成果。綜合各項研究成果，潛盾隧道施工引致地盤變位的原因，大致可分為以下六大項。

1. 盾尾間隙閉合

潛盾機通過之後，原地盤和襯砌環片外緣間形成之空隙稱為盾尾間隙 (tail void)，一般約 50 至 80 mm。此間隙通常採用背填灌漿，以水泥砂漿等填充材料將其填滿，但在環片脫離盾殼保護後，尚未實施背填灌漿之前，盾尾間隙一時之間成為無支撐狀態，極易引起周圍地層的應力解放，而造成土壤的彈塑性變形，導致隧道上方及附近的土壤往此空隙移動，盾尾間隙閉合為潛盾隧道施工引起地盤變位的最主要原因。

Schmidt (1974) 假設，若整個盾尾間隙被崩落的土壤所填滿，則最大的地盤漏失量可用下式來表示：

$$V(\%) = 200 \times \frac{t}{a} \quad (2-10)$$

式中：

V ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）

t ：盾尾間隙厚度

a ：潛盾機的半徑

潛盾機盾尾間隙閉合造成地盤土壤漏失的情形，依土壤自立之時間、土壤暴露於盾尾間隙之長度及所採用之輔助工法（諸如壓氣工法，灌漿工法等）而定。

2. 潛盾機曲線施工或蛇行超挖

潛盾隧道於曲線施工時，為便利潛盾機之轉向，機體一側可能產生土壤超挖，因此導致盾殼周圍土體之空隙加大而產生地盤漏失。在此施工狀態下，潛盾切刃口的阻力及千斤頂的壓力皆為不均勻的分佈，或潛盾機不當操控亦可能

造成潛盾機上下或左右蛇行 (pitching or yawing)，此項漏失量與潛盾機操作技術及土質有密切的關係，難以量化估算。

3. 襯砌環片變形

隧道襯砌環片組合完成時，本來是成圓形，由於作用在環片上之垂直土壓力，通常大於水平土壓力，故隧道可能略成扁平狀。尤其在軟弱的土層中，因地下水位降低或土壤受擾動等因素，使粘土產生壓密現象，隧道周圍之粘土層因而發生垂直方向的收縮，亦可能造成襯砌環片變形。在一般的情形下，襯砌環片的設計強度通常遠大於所承受之垂直土壓力，故此變形量通常不是很大。

4. 黏土層受擾動產生的壓密沈陷

潛盾隧道的施工過程中，軟弱土壤因隧道面開挖，潛盾機身的剪動，盾尾間隙附近土壤應力釋放及背填灌漿之擾動，使得孔隙水壓逐漸消散，因而產生壓密沈陷。

5. 開挖面應力改變

潛盾機開挖掘進時，必須自潛盾機向開挖面施予一定之推力，以維持開挖面的穩定。若所施推力小於原土層的靜止土壓力，隧道開挖面將發生應力釋放，此時的土層趨於主動土壓力的狀態，土層會向開挖面擠入，同時發生地盤漏失 (ground loss) 的情況。但若所施推力恰好等於原土層的靜止土壓力，則隧道開挖面呈靜止的狀態。若所施加的推力大於原靜止時的土壓力，則開挖面前方的土壤因受推力而呈被動土壓力的狀態，此時的地層因受壓而產生推擠，因而造成地表的隆起。

6. 地下水位改變

潛盾隧道大部分皆在地下水位以下掘進，為抵抗開挖面的土壓力及水壓力，可能依狀況需使用排水工法以利工程之進行，若地下水位下降，土壤之有效應力將隨之增加，因而產生壓密的現象，造成地盤的變位。

日本土木工程師學會(1996)，依發生時機，將伴隨潛盾隧道施工所產生之地盤變位區分為五大階段，如圖2-24。其發生機制原因，及可能採取之對策彙整說明如表2-7所示。

2.9 新奧工法 (NATM) 於捷運工程應用

2.9.1 新奧工法之設計理念

新奧工法是由 Brunner 在 1958 年首先提出。奧地利 Rabcewicz 教授結合其長年從隧道工程之經驗及岩石力學理論，於 1962 年在第 13 屆國際岩石力學會議發表論文闡釋此項隧道施工理念。所謂的新奧工法就是在開挖施工過程中，利用各種方法使地盤能發揮自我強度，而達到經濟安全的目的，是一種施工理念和邏輯。傳統的設計理念是將隧道四周的岩體作為設計所需支撐系統的荷重，而 NATM 則認為四周岩體亦為支撐的一部份，藉由控制施工步驟、支撐種類和支撐時間，以較少的支撐達成地盤應力的重新分配和平衡。

2.9.2 新奧工法在軟弱地盤施工應注意之問題

當年 Brunner 所提出的 NATM 工法是使用在岩石隧道中，近幾年來，由於都市開發，導致在軟弱地盤（砂土和黏土）中的隧道開挖情形越來越多，如都市地下捷運、連絡通道及地下管線等，於是有人將 NATM 工法移轉至砂土和黏土中使用，本研究第三章所述土城線 CD266 標連絡通道即使用新奧工法進行開挖。但是當 NATM 由岩石移至砂土或黏土，由偏僻的山岳轉到熱鬧的都市，所遭遇到的問題更為複雜，所應該注意的事項也更多。孫麟與張兆麟（1991）提出在軟弱地盤之 NATM 施工應該注意下列問題：

1. 軟弱地盤抗剪強度較低，稍許地盤擾動極易使沉陷增加。
2. 隧道上方覆土厚度較小，不易形成拱效應。
3. 於都市內施工，為避免對鄰近建物影響，採用降水工法應受到限制。
4. 必須考慮開挖面土壤自立性，日本 NATM 施工手冊(1985)建議土壤單壓強度 $q_u \geq 98.1 \text{ kPa} (1 \text{ kgf/cm}^2)$ 及楊氏係數 $E_s \geq 9.81 \text{ Mpa} (100 \text{ kgf/cm}^2)$ 為適合施工之土層範圍。

5. 開挖面滲水量過大易造成開挖面不穩定，造成噴凝土對地盤附着力降低及減少錨定效果。
6. 隧道開挖造成之地盤沉陷受土壤性質、覆土厚度、開挖斷面及形狀所影響。
7. 土壤孔隙對透水性、透氣性之影響。
8. 決定隧道之最佳結構斷面及聯絡道位置的特殊斷面。
9. 噴凝土是否能於變化水頭下施作，否則需予導水、集水或以降水配合。
10. 土質是否有足夠自立時間完成噴凝土施作。
11. 隧道襯砌之設計載重，一般與潛盾隧道同，水壓則以靜水壓考量。
12. 灌漿、降水、冰凍等輔助工法是否需要。
13. 浮力對結構體之影響。
14. 輔助工法造成災害如壓氣、噴發、地表隆起及沉陷之防止。

2.9.3 新奧工法在軟弱地盤施工常用之施工方法

為了使 NATM 能成功的移植到軟弱的土質地盤裏，必須配合適當的開挖施工方法和步驟以確保安全，配合新奧工法於軟弱地盤內開挖常用的施工方法分別說明如下。

2.9.3-1 噴凝土支撐

由於軟弱的黏土、粉土和砂土中，地盤本身強度欠佳，無法使用岩栓、岩錨，故通常利用噴凝土（shotcrete）支撐，使隧道周圍之地盤保持穩定。當噴凝土被噴在隧道壁面或開挖面時，噴凝土會把被擾動而鬆弛的土壤顆粒凝結起來，不至於崩落。添加了速凝劑的噴凝土本身在短時間內就可獲得一定強度，配合施工使噴凝土形成一層緊貼土壤的薄殼支撐，可以減少開挖造成軟弱地盤的變形，並促使軟弱地盤能形成拱效應，充分發揮土壤自身的強度。

此外噴凝土施工不用模板，直接噴在隧道之壁面，施工快速，可以在受擾動的土壤尚未鬆弛崩壞前就給予及時支撐，這也是使用噴凝土另一個優點。一般的噴凝土內均含有水泥、砂、小石子和速凝劑，其中速凝劑的主要功能包含：(1) 在短時間內能發展噴凝土的強度；(2) 增強噴凝土黏性；(3) 在隧道開挖面及壁面遇到湧水時，具有止水效果。

2.9.3-2 分段開挖

由於軟弱地盤土壤之自立性不夠，所以當開挖斷面太大時，開挖面可能無法無法保持穩定，所以必須將開挖斷面分為幾個部份依序開挖，減小其開挖面，使開挖面能保持穩定，也使周邊土壤變形、受擾動的部份減小，以便能及時加以支撐。

2.9.3-3 台階式開挖

如圖 2-25 所示，通常將開挖面由上而下分為頂拱（Top heading）、台階（Bench）及底拱（Invert，或稱仰拱）三個部份，開挖時先挖頂拱，次挖台階，再挖底拱。頂拱開挖面領先台階之開挖面，而台階之開挖面又領先底拱的開挖面。如圖 2-25 所示，台階式開挖的目的是利用台階和底拱落後開挖面的土體形成被動土壓，來抵抗造成開挖面土壤湧入隧道的側向土壓，以維持開挖面穩定不至於湧土崩壞。

2.9.3-4 預先支撐

隧道開挖面湧土崩壞主要是因開挖面斜上方土壤擠壓湧入所造成的。為了避免此現象的產生，通常在隧道向前掘進之前，在頂拱周圍打入預先支撐（Pre-support）如圖 2-26 所示，使這些條形支撐物呈輻射狀散布在隧道上半部。預先支撐之功能為：（1）截斷隧道上方土壤的破壞面，並阻斷覆土壓力（Overburden pressure）向下之傳遞，因此減小開挖面前之側向土壓力；（2）為隧道前上方土壤提供支承力；（3）利用條形支承物本身之勁度，使開挖隧道時造成的擾動區不至於向上方擴散出去，因此縮小地盤沈陷量範圍。常被用來打入前方地盤的條狀支撐物包含鋼矢板(工字型鋼樑)、噴射灌漿樁(Jet grouted pile)、薄鋼板、及鋼管等。

2.9.3-5 輔助支撐系統

NATM 隧道在開挖施工時，除開挖後立即施做噴凝土形成薄殼狀支撐外，為了避免隧道周圍土體的變形量繼續增大，須使用更多樣、強度更高的支撐系統。NATM 隧道常用之輔助支撐系統如下：

1. 噴凝土及鋼絲網：利用施噴第二層、第三層或更多層之噴凝土，在隧道壁形成多層狀的薄殼來增強對土壓力及水壓力的支撐效果。鋼絲網常和噴凝土合併使用，結成強度和勁度更高的支撐系統。
2. 鋼支保：鋼支保常被使用在頂拱開挖區之及時支撐，其優點是架設迅速且本身強度、勁度甚高，可以在短時間內施工完成，達到補強支撐的效果。
3. 混凝土襯砌：通常利用活動鋼模在隧道內壁澆置襯砌混凝土，做為隧道最內層的支撐系統，除了可再次加強支撐效果外，也可使隧道壁面看起來更為潔淨平滑。
4. 防水膜：通常在噴凝土層與混凝土內襯砌之間設置，防水膜本身並不具支撐效果，但是卻能阻止地下水滲入隧道。

2.9.3-6 壓氣工法

NATM 隧道在地下施工並沒有封閉式之盾殼保護，故當施工遇到隧道在地下水位以下之情形時，為防止地下水湧入隧道必須要用其它的降水或排水工法加以輔助，在和 NATM 配合的各項輔助工法中最常被使用的輔助工法就是壓氣工法，因為壓氣工法除了排水之功用外，也能提供隧道壁面一定程度的支撐力。

壓氣工法的基本原理就是利用隧道內的氣壓來平衡隧道外側地下水壓，使地下水不致自隧道開挖面和壁面湧入隧道內，以保持施工場所乾燥，方便工作人員施工。除此之外，噴凝土施工也可能因土質隧道壁面、開挖面湧入地下水而附著不良。在設計隧道壓氣大小時，通常依據該深度地下水靜水壓之大小來設計。但是壓氣工法之設計也有其困難，其中之一就是設計氣壓大小不易決定。

一般捷運隧道之直徑約 6 m，地下水之靜水壓力大小隨隧道開挖面各點深度不同而改變。若以隧道底部靜水壓力大小做為設計氣壓，則開挖面上方之靜水壓不足以抵抗氣壓，有可能在該處發生氣體外流之現象。若此隧道恰好位在透氣性較高的砂層內，氣體流散時可能帶走砂層中之細料，造成土層內發生類似管湧的現象，必須小心注意。反之若設計時以隧道中央或頂部之靜水壓做為設計氣壓，則隧道底部又可能發生湧水。

除了上述缺點外，由於施工空間使用高壓氣體，若在壓氣環境下工作時數太長或出坑時解壓太快，都可能使工作人員罹患潛水夫病，因此對於人員和工作環境管理必須格外注意。

2.9.4 國外 NATM 隧道施工案例

2.9.4-1 德國 Landsberg 停車場隧道

此隧道位於德國的觀光勝地 Landsberg (Wallis, 1990)，隧道全長 180 m，寬 18.9 m 高 16.4 m(圖 2-27)，主要目的是做為停車場，可容納 345 輛汽車，解決當地人民和觀光客的停車問題。此隧道建築在坡度約 35% 高約 30 m 的小山丘內，隧道上方只有一間學校和森林，並無其他建物。地層狀況主要分為三層，由上而下依次為 17 m 厚的礫石層，3 ~ 4 m 厚的不透水黏土層，最下層為第三紀中等堅硬的乾的含砂黏土層，其彈性模數為 120 ~ 170 MN/m²。地下水位在地表面下 1 m，隧道上方平均覆蓋層約 22 m。隧道北口附近有一封閉已久的防空洞，防空洞中充滿了水和爛泥，為了擔心此防空洞內之水和爛泥在隧道開挖時湧入隧道內，故在開挖前進 30m 後，鑽孔確定防空洞位置，再用 1000 kN/m² (10 bar) 之壓力灌入防空洞 180 m³ 的皂土-水泥液改良地盤，然後在繼續開挖前進。

隧道施工由北口和南口同時進行，隧道開挖分為 3 個斷面，分別為左導坑、右導坑、中間隧道，每個斷面又分為頂拱、台階、底拱三部份，施工時左右 2 個導坑同時施工，然後再開挖中間隧道部份(圖 2-28)。

隧道左右導坑在開挖之前，先在頂拱周圍斜斜地打入 2.5m 長的鋼管作為預先支撐，接著開挖頂拱部份 1 m 長，然後在外牆（將來不用拆除的部份）噴上第一層乾式噴凝土 200 mm 厚，在內牆噴上第一層乾式噴凝土 250 mm 厚，在底部噴上乾式噴凝土 100 mm 厚，架設格構橫樑做頂拱補強支撐後，在外牆部份掛上鋼絲網，噴上第二層噴凝土 200 mm 厚。直到頂拱開挖推進領先台階至少 300 mm 後開始開挖台階，台階一次開挖前進 2 m，然後在外牆部份噴上第一層乾式噴凝土 200 mm 厚，在內牆噴上乾式噴凝土 250 mm 厚，在底部噴上乾式噴凝土 100mm 厚，接著在外牆部份掛上鋼絲網後噴上第二層乾式噴凝土 200 mm 厚。在台階開挖推進領先底拱至少 30 m 後開始開挖底拱，底拱一次開挖 2 m，然後在外牆和底部噴上 200 mm 厚的乾式噴凝土，在內牆部份噴上 250 mm 厚的

乾式噴凝土，接著在外牆和底部掛上鋼絲網在噴上 200 mm 厚的第二層乾式噴凝土。當左右導坑的底拱開挖領先中間斷面頂拱部份至少 30 m 後，開使開挖中間斷面的頂拱部份，在開挖前先在頂拱上方打入 2.5 m 長之鋼管作為預先支撐，然後開挖 1m。接著在頂拱上方噴上 200 mm 厚的乾式噴凝土，在頂拱上方掛上鋼絲網，最後在噴上 200 mm 厚的乾式噴凝土。待中間隧道的頂拱開挖至少領先中間隧道的台階至少 30 m 後開始開挖台階(圖 2-28)。等台階開挖領先中間隧道的底拱至少 30 m 後，開始開挖底拱，底拱一次開挖前進 2 m，然後在底部噴上 200 mm 厚之噴凝土，接著在底部掛上鋼絲網，最後噴上 200 mm 厚的第二層噴凝土。等隧道斷面全部開挖完成後，澆置 450 mm 厚之混凝土作為最後襯砌。

在開挖隧道期間，開挖面曾出現 0.5 公升／秒的湧水，必須利用隧道內抽水集中處理。隧道北口的地表最大沉陷量為 80 mm，隧道南口地表沉陷約 30 ~ 40 mm。此隧道在 1988 年 3 月開始施工，在 1990 年 7 月隧道部份全部完工。

2.9.4-2 德國波昂捷運隧道

McWilliam (1991) 說明，此隧道位於德國波昂市的精華區內，連接 2 個以明挖覆蓋法施工的車站(圖 2-29)，全長僅 497 m，隧道高 7.8 m、寬 9 m，隧道上方有重要馬路、電車、下水道及許多建築物。隧道通過的地層是不規則的砂層和礫石層，主要為未夯實、鬆疏的萊因礫石層，其平均滲透係數為 0.008 m/s。地下水位平均在地表下 1.7 m。隧道的覆蓋層平均厚度約 3.5 m。以項工程亦採用壓氣工法來抵抗地下水壓，所使用之壓力約 70 kN/m^2 (0.7 bar)。

此隧道於南口和北口輪流施工。打樁人員先在南方隧道口施工，打設噴射灌漿樁做為預先支撐，噴射灌漿樁是利用鑽孔機將直徑 114mm 的灌漿管鑽入開挖面之外緣，在灌漿管旋轉撤回時，以高壓噴入水灰比 1:1 的水泥漿，可形成直徑為 0.6 m 的改良土樁，這些樁體長 12 m，向外伸展之角度約 10 度(圖 2-30)，而且各梯次預先支撐之間有 3 m 重疊，環繞著隧道頂部和側邊打設。各輪進的 31 枝預先支撐樁必須在 3 天內全部安裝完畢，然後打樁人員移到北方隧道打設預先支撐樁。

開挖組人員採用台階式開挖在南口施工，每輪進開挖時間共 3 天，須使開挖面前進 9 m。3 天過後，開挖組人員移到隧道北口，而打樁組人員移回隧道南

口打設預先支撐，如此反復進行。頂拱開挖每前進 1 m 就噴灑噴凝土 30 mm ~ 50 mm 厚。噴灑噴凝土後架設鋼絲網，然後再噴灑 150 mm 厚的噴凝土，表面清理後再架設第二層鋼絲網後，噴灑 50 mm 厚的噴凝土。此 NATM 隧道於 1990 年 11 月開始施工，在 1991 年 4 月順利完成。

2.9.5 國內 NATM 隧道施工案例

2.9.5-1 捷運南港線 CN256B 標

捷運系統南港線 CN256B 標係位於人口稠密及交通繁忙之台北市忠孝東路與基隆路口車行地下道下方之隧道工程，東接 CN257 標車站體，西接 CN256 標隧道，含上、下行隧道此隧道全長僅 99 m，其永久襯砌完成後之內徑為 5.4 m，因於 CN 256 與 CN256B 標邊界現場難覓足夠空間，供構潛盾機築迴轉到達井，且 CN256B 標隧道總挖掘長度不長，以潛盾機進行挖掘，不符經濟效益，因此採用新奧工法施工。

本工區位於台北盆地，屬粉土質砂及粉土質黏土沖積成層，此沖積層名為松山層。本工區近基隆河流域，自地表以下約 25 公尺深範圍內之松六及松四次層部份之粉土質黏土皆屬極軟弱至軟弱程度，標準貫入試驗 N 值小於 7，自然含水量接近或大於液性限度。因施作位置係屬軟弱地層且位於地下水位以下，故於施工前採用 JSG 高壓噴射地盤改良為輔助工法。

本工程因位處地下水位以下之軟弱地盤中，為提昇土體之強度及降低透水係數先行於隧道行經之路徑上採用地盤改良之輔助工法進行改良，而後再依序進行鏡面(連續壁)破除、隧道開挖、隧道初期支撐、防水膜、內部襯砌、步道及排水等作業。利用 CN257 標西側部份 BL13 站體空間作為工作井，由井底逐階開挖主隧道，每輪進 1 m 並安裝初期支撐而施作方式階段之次序成台階狀向前進行開挖及支撐。開初期支撐含間距 1 m 之 H100x100x6x8 鋼肋、兩層 5x5-100x100 熔接鋼線網，及三層總厚 250mm 之噴凝土。

本工程為提高施工安全性，故於每完成開挖及支撐 15m 後，即行停止開挖，而後逐項施作防水膜、內部襯砌、仰拱，本階段主體結構系統全部完成後，再繼續進行下階段開挖、支撐等作業。此隧道於 1996 年 7 月開工，已於 1999 年 4 月順利完工(圖 2-31)。

2.9.5-2 捷運新店線 CH221 標

新店線CH221屬於捷運初期網路之南北運輸動脈，隧道開挖經過之地盤接位於松山層內，施工所在位置主要土層為灰色粉土質砂層夾雜砂質粉土薄層，偶含有腐木及有機質，鑽孔中層出現中砂及礫石層。現場標準灌入試驗N值平均約在14~18之間，自然含水量約25%~27%，地下水位在地表下3至5m之間。

以NATM工法挖掘隧道，北起羅斯福路三段327號，南至台大傅園前止(圖2-32)，位於地下16m處本路段地面高程由北向南逐漸增加，變化約在4m內，共長222m。斷面採馬蹄型，施工時採用壓氣工法作為輔助工法，隧道內設有人員氣閘及材料氣閘(圖2-33)。

CH221標NATM隧道的坑道口被明挖覆蓋部分的連續壁所阻斷，此連續壁之厚度為1m，隧道開挖前必須拆除連續壁鏡面。自坑口起30m之內，以深井抽水降低開挖區之地下水位後方才著手施工，其後以壓氣功法補助開挖。採用此降水工法是為了防止未壓氣狀況下隧道開挖面可能因湧入地下水引起開挖之崩坍，此區間之開挖順序和在壓氣下之開挖並無差別。

如圖2-32所示，在壓氣補助下之開挖先挖橫坑(Cross drift)到達上行隧道(up track)位置，接著向公館站方向推進，直到開挖面到達公館站之連續壁後停止開挖，此時並未貫穿公館站之連續壁以避免壓氣漏失。然後返回橫坑向公館站方向挖下行隧道(down track)，掘進至公館站之連續壁後停止開挖，此時也不可貫穿連續壁。最後返回橫坑，開挖上行隧道往明挖覆蓋隧道這一段，在壓氣尚未解除壓氣之前，開挖不得貫穿明挖覆蓋隧道和公館站之連續壁，須待隧道內各項支撐及混凝土內襯砌全部完成解除氣壓後，才可貫穿隧道兩端之連續壁。開挖以人力與挖土機進行環狀型開挖，施工採用台階式開挖工法，支撐採格構桁樑鋪設鋼絲網，並施噴濕式噴凝土(圖2-34)。此隧道於1999年11月順利完工。

2.10 國外機場下潛盾隧道鑽掘案例

2.10.1 東京國際空港排水結構施工

東京羽田國際機場，為提升航空運輸之輸送能力以及根本消除影響附近之噪音問題，擬將羽田機場擴充至遠離海岸上之區域，如圖2-35所示。因此需要

增設排水道，設計規劃兩條總長 56 km 之排水道於使用中的 B 跑道(B 滑走到)下方。所規劃之排水道將通過使用中的航站滑行道下方土層。

施工區域地質為，1955 年至 1965 年間人工填土之基地，基地填土主要為砂質土及少部分軟弱黏性土回填，如圖 2-36。填土層下為細砂及微細砂所組成之沖積性砂土質，其 N 質介於 8 ~ 20 間。於出發井掘進時發現，初期掘進於切刃盤上部可發現非常軟弱之土層，地下水位幾乎與海水面同高。

潛盾施工由出發井至京浜運河旁之到達井間(圖 2-34)全長約 280 m，其間設置雙潛盾隧道，使用一台土壓平衡式潛盾機進行掘進，其外徑為 3.3 m，使用外徑 3.17 m、寬 1 m 之 RC 環片。先行隧道掘削完成後，潛盾機拆卸後於出發井再次組裝發進，進行第二條隧道掘進。自發進井掘進 90 m 之區間，進行傾斜度 40%，曲率半徑為 $R=120\text{m}$ 之曲線段後，以水平直線掘進進入滑行道下方。發進深度為地下 4.2 m，發進後 20 m 掘進進入航空管制區，隧道覆土層最深深度為 8.3 m，滑行道直線段維持兩隧道之間距為 3.3 m。

開挖土艙壓力以主動土壓+水壓(1.2 kgf/cm^2)至靜止土壓+水壓(1.2 kgf/cm^2)之間為基本管理，背填灌漿壓力依週遭地盤狀況及注入管內抵抗壓力損失進行修正，注入量設定為 150% 左右。注入壓力以環片背面之土壓力計測得之壓力驗證，灌漿壓力 1.8 kgf/cm^2 約達環片可承受壓力(2.8 kgf/cm^2)的 65%。本工程因為首例於機場滑行道下進行雙隧道之潛盾工程，為避免異常的施工狀況，確保機場建物及周遭設施之安全，計畫中規劃三個基本方針：

1. 以伸縮儀及傾斜儀來監控各重要之航空管制設施有無異常狀況發生。
2. 實施對周邊詳細之地盤變化偵測，並將其監測結果與潛盾管理值做比對，並迅速修正。進入使用中之跑道內設置監測儀器有嚴格限制，因此必須依據發進工作井到跑道間之監測值及管理參數，來決定最適當之掘進管理基準值，來決定掘進跑道下方潛盾機掘進使用管理值。
3. 潛盾機設備以安定開挖面及抑制地盤變行為基本目的，為排除人工疏失以及盡可能集中管理，本工程之監測機器設備均採自動化機器設備。

施工潛盾機採用如下之特殊設備：

1. 中折裝置：隧道曲線施工($R=120\text{ m}$)為降低曲線開挖之超挖量，潛盾機加設中折裝置(平面中折裝置：最大中折角度 1.9°)。此外，為了施作傾斜 40% 的陡坡，潛盾機亦能進行上方與下方 1° 之轉折。

2. 掘進同步注入裝置：掘進中產生之盾尾間隙，採用掘進同步注入裝置，填充瞬間產生之空隙，並採用自動洗管裝置來排除施工人為疏失。
3. 幫浦壓送系統：挖掘排出之土碴經由兩次幫浦壓送，為考慮壓送效果，盾首加泥不使用氣泡添加材。

