

第二章 文獻回顧

隨著工商業的快速成長下，許多重大的地下公共工程陸續興建，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。因明挖覆蓋工法對施工環境衝擊太大，除在建造車站站體及較淺之隧道採用明挖覆蓋工法外，大多採用潛盾工法施工。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，係於西元 1818 年，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碴料形成一隧道，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 年引進潛盾工法以來，迄今已逾 28 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，廖銘洋（1993）說明國內潛盾工程施工實績如表 2-1 所示。

2.2 潛盾工法施工原理

潛盾施工法為在軟弱土質中，開挖隧道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。潛盾施工可分為三個階段（朱旭，1984a），如圖 2-1 所示：

1. 開挖與掘進：旋轉潛盾機前方的切刀盤，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，切刀盤停止旋轉，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鑄鐵環片，各片襯砌之間以螺栓相結合，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）推進時盾首之切刀盤須以低速、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（即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）後，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（1989）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 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進入潛盾機內，如圖 2-5 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 2-6 至圖 2-8 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 2-2 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 2-3 所示。日本 Hitachi Zosen Corporation (1990), 也針對各種型式潛盾機適應土層, 以圖 2-9 及圖 2-10 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 2-4 所示。

2.5 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(保)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(機具損壞、障礙物卡住等)，潛盾機無法倒退，只得停機待修。

2.6 潛盾施工輔助工法

以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，需採用輔助工法配合施工，來達成止水或強固地盤之目的。以下各節將潛盾隧道施工時常用之輔助工法加以介紹：

2.6.1 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（1989）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，僅就開挖面施以壓氣之施工法。配合此方法之出土設備，需使用氣密式之排土設備。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) 僅在開挖面作業室加壓，可避免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。

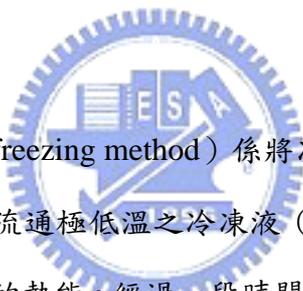
採用壓氣工法可能之缺點為：

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

近年來因潛盾隧道開挖大多使用密閉式潛盾機（close shield）施工，較少採用壓氣工法作為施工時之輔助工法。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。

2.6.2 地盤凍結工法

2.6.2.1 凍結工法的原理



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。經過一段時間後，凍結管周圍的土壤亦隨之冷卻，待土層內溫度降至水的凍結點以下時，土壤中的土顆粒和孔隙中的水逐漸凍結成固體，即形成所謂的凍土（frozen soil）。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，如果多支凍結管加以適當的間隔排列，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。

2.6.2.2 凍結方式

凍結土層的方法依冷凍液之差異可分為液態氮 (LN_2) 凍結法 (圖 2-11) 和鹽水 (Brine) 凍結法 (圖 2-12) 兩種，分別說明如下。

1. 液態氮凍結法

液態氮凍結法又稱為直接凍結法，是將裝有液態氮的液罐車開到現場，用導管把沸點溫度為 -196°C 的液態氮儲存於儲槽內，直接灌入凍結管內，利用液態氮汽化吸收的汽化熱來冷卻土層，於土層中汽化的氮氣則滲入土中或排放於大氣之中。如果是在隧道或者是密閉空間內施作時，使用液態氮凍結法所產生的廢氣必須以排氣管接到一個可以進行安全處理的地方。雖然氮氣沒有毒性，但是由於氮氣比空氣重，而且在空氣中佔了 $4/5$ 的量，氮氣會取代隧道或密閉空間內的氧氣，可能造成工作人員窒息的現象。

Shuster and Spoko (1989) 曾指出，使用液態氮來凍結土層，讓地層內每單位熱釋出的價格超過使用不凍液循環的鹽水凍結法所花費的 1000 倍以上。所以雖然液態氮凍結法的凍結速度很快，可以縮短工期、減少凍結隆起現象的發生，凍結溫度可以到達 -150°C ，且不受地下水流的影响，根據Shuster (1972) 的研究，即使在地下水流流速高達 50 m/day 的情況下亦可施工。但是由於此方法成本十分昂貴，所以施工案例比使用不凍液循環的鹽水凍結法要少很多。一般來說，液態氮凍結法使用於較為急迫或凍結體積在 $150 \sim 300 \text{ m}^3$ 以下的小區域工程。

2. 鹽水凍結法

鹽水凍結法是使用氯化鈣 (CaCl_2) 水溶液 (比重 1.286，凍結溫度 -55°C) 做為循環液。施工單位首先將不凍液冷卻到 $-20^\circ\text{C} \sim -30^\circ\text{C}$ ，以循環泵浦送到凍結管內，冷卻土層溫度。土層放出的熱能則藉由不凍液的循環帶走，如此一直循環下去，鄰近土層就被完全凍結。

鹽水凍結法的凍結方式主要包含不凍液循環系統、冷媒循環系統和冷卻水循環系統 (如圖 2-13)，這三個系統主要的功用在於將土層中的熱能傳遞並散發到大氣之中，使土層溫度下降並凍結起來，分別說明如下。

(a) 不凍液循環系統

不凍液循環系統是由不凍液循環泵浦、蒸發器 (Evaporator) 和凍結管所組成的。在這個循環中，由蒸發器將不凍液冷卻後，經由不凍液循環泵浦將不凍液送到凍結管中。凍結管發揮和土層做熱交換的功能，以凍結管中的不凍液吸收土層的熱，再將已吸收熱能的不凍液送回蒸發器中經由低溫低壓的冷媒液體加以冷卻，如此一直循環將土層內之熱能帶出，直到土層完全被凍結為止。

(b) 冷媒循環系統

冷媒循環系統是由壓縮機 (Compressor)、凝縮器 (Condenser) 和蒸發器所組成的。經由壓縮機將冷媒 (Coolant, 如 R22) 壓縮成高溫高壓的冷媒氣體，進入凝縮器降溫，凝縮器將高溫的冷媒氣體的熱發散，使之成為低溫高壓的冷媒液體，通過膨脹閥 (Expansive valve) 減壓後變成低溫低壓的冷媒液體，然後再由蒸發器將不凍液自土層帶回來的熱能吸收，又成為冷媒氣體後，再次進入壓縮機進行下一次循環。

(c) 冷卻水循環系統

冷卻水循環系統是由冷卻水循環泵浦、凝縮器和冷卻水塔所組成的。在這個循環中，經由冷卻水循環泵浦使冷卻水循環流動進入凝縮器進行熱交換，把凝縮器在冷媒循環中將高溫高壓的冷媒氣體變成低溫高壓的冷媒氣體時所發散的熱，由冷卻水吸收後帶到冷卻水塔中將熱能發散到大氣之中。

雖然鹽水凍結法所使用的機具設備較多、較為複雜、凍結速度比較慢，因此完成凍結所需要的時間較使用液態氮凍結法所需要的時間來得長。但是所使用的不凍液為氯化鈣水溶液，是由氯化鈣粉末沖泡而成，其價格十分便宜，且不凍液可以循環使用，不像液態氮打入地下後即形成氮氣而散失在土中或大氣中，就工程成本的考量來說，使用鹽水凍結法要比液態氮凍結法要經濟得多，加上鹽水凍結法的凍結效率頗高，所以一般需要凍結的大面積區域大都是使用鹽水凍結法來進行凍結施工。

2.6.2.3 凍結管型式

由於凍結工法有不凍液不可以滲流到凍結土層的嚴格限制，以免因土層內含有不凍液而造成一塊永不凍結區，因此凍結管的內外管都是使用碳素無縫鋼管，也就是一般使用的瓦斯鋼管（Steel Gas Pipe, SGP）。施工常用的凍結管有以下四種型式：

1. 單管式凍結管

單管式凍結管由一根凍結管所構成（如圖 2-14），不凍液由凍結管一端進入，再從凍結管另一端流出，其主要目的是當做貼附板來使用，以保持凍結區外圍介面的溫度和凍土的溫度相當，不至於因為邊界溫度過高而影響到凍結區內凍土的維持。

2. 二重管式凍結管

二重管式凍結管由內管（通常外徑 3/4 in.）和外管（通常外徑 3-1/2 in.）所構成（如圖 2-15），不凍液從內管進入，在流經外管時和地盤進行熱交換。此種凍結管通常都用於垂直凍結土層，以等間隔的排列方式，把二重管式凍結管埋設至地下欲凍結的深度，利用凍結的管列效應形成凍土牆。

3. 限定管式凍結管

限定管式凍結管由內管（通常外徑 3/4 in.）、限定管（通常外徑 1-1/4 in.）和外管（通常外徑 3-1/2 in.）所構成（如圖 2-16），此種凍結管和二重管式凍結管均屬於同型凍結管，也是用於垂直凍結，但兩者的差別只在於當凍結區範圍並不需要從地表開始往下凍結，而僅需要凍結某深度之區域時，為了避免能源的浪費，把凍結管不需發揮功能的部份填充隔熱材，此即所謂的限定管。在土層凍結時，不凍液從內管進入，在流經未被隔熱材包覆的外管時和地盤進行熱交換，然後不凍液從內管和限定管之間流出。

4. 鑽孔式凍結管

鑽孔式凍結管通常在水平方向凍結土層時使用，亦是由內管（通常外徑 3/4

in.) 和外管 (通常外徑 3-1/2 in.) 所構成 (如圖 2-17), 但是由於此種凍結管需要穿過如連續壁等較厚實的結構體, 必須使用套管以防止水平鑽孔時發生坍塌的現象。由於連續壁外面的水壓力、土壓力可能十分大, 故施作時均需要安裝止水裝置, 以防止地下水湧入工作區造成施工危險, 所以裝置鑽孔式凍結管的施作過程比埋設垂直凍結管更困難、更危險。因為上述原因, 在拔除水平凍結管時亦可能會造成外圍土砂隨地下水湧入, 所以在凍結完成後, 水平凍結管通常不拔除, 而凍結管內鹽水移除後, 以水泥皂土漿 (CB 漿) 回填, 再切斷鋼管頭部以鐵板封口焊接即完成工作。

2.6.2.4 凍土之監測

在凍土成長過程中, 可以經由判讀監測儀器所測得的資料來了解凍土成長是否達到要求。在淺層的凍結區域可以挖掘一試坑 (Test pit) 或使用簡易凍結指示器 (simple frost indicator) 來了解凍土成長的情形。如果欲更為精確的了解深層凍結區域或者凍土成長範圍和溫度, 則可以埋設測溫管, 由測溫管內不同深度的測溫素子 (thermocouple) 測得該位置不同深度土層的溫度及凍土成長狀況。

1. 試坑

施工單位在淺層凍結區域上方開挖一個試坑, 經由開挖裸露出來的土層剖面, 可以直接判定被凍結區域的範圍, 以肉眼即可觀察到凍土成長的區域和凍土的品質。

2. 簡易凍結指示器

簡易凍結指示器是以一直徑約為 25 mm 的塑膠管做為外管, 另一直徑較小的透明內管則填充水和亞甲基藍 (methylene blue) 的混合液, 利用亞甲基藍的化學性質, 當混和液凝結時, 混合液會由藍色變成白色。此種指示器不但成本相當低, 還可以根據量測液顏色發生變化的位置, 獲得凍土範圍的剖面。

3. 測溫管

測溫管使用和凍結管相同構造的無縫碳素鋼管, 可分為垂直測溫管和水平

測溫管兩種（圖 2-18 及圖 2-19）。當外管埋入土層後，將測溫素子插入測溫管內預定之高程，為防止測溫管的凍結，並於管內填充不凍液，管口上方加裝蓋子後，即完成測溫管的埋設作業。加裝蓋子是為了防止雨水或露水侵入測溫管內。

2.6.2.5 凍結工法之優缺點

范陳柏與趙際禮（1997）說明凍結工法在設計、施工以及管理上具有下列 9 大優點，也就是使用此工法的考量重點。

1. 強度優越性：土層經過凍結後，其強度激增。一般軟弱土壤的單軸壓縮強度大約為 0.3 kgf/cm^2 ，當凍結溫度下降至 -10°C 時，相同土壤單軸壓縮強度即可能變大約 150 倍（ 45 kgf/cm^2 ），因此凍土具有明顯的強度優越性。
2. 完整的止水性：根據 Burt and Williams（1976）所發表凍土滲透度試驗結果，當凍結溫度自 0°C 下降到 -0.5°C 時，黏土的滲透係數從 10^{-9} m/sec 降低成為 10^{-11} m/sec ，砂土的滲透係數則從約 10^{-6} m/sec 減小為 10^{-12} m/sec 。因此可以得知凍土壁體具有良好的止水性。
3. 緊密性：凍土具有和相鄰結構物的密接性，凍土與鋼筋混凝土之間的凍著力極大，因此可以和相鄰材料緊密連接。
4. 一體性：無論是在異質的土層，或者在成層的土層中，都可以使用凍結工法。在凍結之後，不同土層均可凝結形成一道連續的凍土牆。
5. 安全性：凍土的自然解凍過程十分的緩慢，因此若是在凍土維持階段發生短期停電或機械故障，造成冷凍液循環停止，凍土仍然可以保持原來的狀態，不致立刻就發生融解的現象。
6. 復原性：凍結工法施作完成凍土解凍之後，凍土可以恢復成為原來的土層，不會成為永久性地下障礙物。
7. 安定性：凍結工法是利用天然材料的熱傳導性質，因為熱量有自高溫傳至低溫的特性，所以無論土層是否均勻，經過凍結即可形成均勻的凍土壁體，因此屬於安定性高的施工方法。

8. 施工確實性：土層凍結情況可以依照地下溫度的監測加以掌握，對於凍土的形成範圍及強度亦可以確定，所以在施工管理上可以安全確實的執行。
9. 無公害性：凍結工法是以電力為冷凍液循環之能源，其冷凍液使用液態氮或者是氯化鈣水溶液，氮氣無色、無味、無毒，而氯化鈣則可用為食品添加物，不會造成污染，也不會有振動、噪音等公害發生。

除了上述優點之外，凍結工法的施作亦有其缺點和限制，分別說明如下：

1. 因為凍結工法是利用材料熱傳導的特性，以循環的不凍液在凍結管中與地盤進行熱交換，逐漸將地盤溫度降低至水的凍結點以下，慢慢將土層凍結起來，所以形成凍土牆需要一段較長的時間。
2. 地盤中地下水流的溫度和地盤原始溫度一樣，若凍結區有大量流動或流速太快的地下水流，凍結區會因為地下水流帶進來的熱能而造成溫度升高，可能使得凍結管間的凍土無法互相連結。通常地下水流速在 1 m/day 以下時，對凍結幾乎是沒有影響，但是若流速大於此值，則需要另外施作減低地下水流速的工法（如灌漿），以達成凍結效果。
3. 含有細顆粒成分的土層（如粉土），在凍結時可能發生凍結膨脹的現象，凍土隆起對於周圍的結構物、鋪面以及土層中埋設的公共管線會產生擠壓造成破壞。在解凍期間或解凍之後亦可能會產生土壤含水量升高及脫水壓密的現象，造成地盤的沈陷。
4. 凍結工法是以電力循環低溫之不凍液，將地盤熱能帶出，凍結期間每月耗費之電費可能高達新台幣數十萬元，加上地盤凍結所需之機具設備也頗昂貴，因此整體支出費用較高，亦為採用此工法不利之處。

2.6.3 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）填塞土壤顆粒間之空隙，使其結合成一體。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，減少地盤沈陷量及其影響範圍。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。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，如圖 2-20 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，分述說明之：

2.6.3.1 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，如表 2-5 所示。藥液灌漿之施工法，一般最常見之分類，則如表 2-6 所示。藥液灌漿各工法之特徵及比較，如表 2-7 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 (Labires 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 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。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 灌漿之標準配比，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 6 至 8 kgf/cm²，其滲透係數約下降至 10^{-6} 至 10^{-7} cm/sec。以台北捷運CD266 標意外事故搶救地面止水灌漿為例，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。具有填充土層之效果。該灌漿材料之配比，以台北捷運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，水泥為 250~350 kg，皂土為 50~60 kg，其餘為水。
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。該灌漿可調整材料之配比來控制凝固時間，以台北捷運 CP262 標復舊工程之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 硬化劑及 22 kg 及水 191 公升，其凝固時間 7~8 秒。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 液包括 CW1 硬化劑及 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。該灌漿材料之配比，以台北捷運中和線 CC276 標連絡通道開挖前之地盤改良為例，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。該灌漿材料之配比，以台北捷運 CP262

標隧道到達段潛盾機背填補充灌漿為例，每組漿液包含 polyisocyanate 20 kg，及 polyole 38 kg。

2.6.3.2 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噴出，並將土壤切割混和後土壤硬化。鑽桿以定速旋轉及提升使改良土體成圓柱狀。

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 (Chemical Churning Pile, 簡稱 CCP 工法)：利用單管噴射高壓水泥漿液切割地層混合土壤為單管工法，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 (Jumbo Special Grout, 簡稱 JSG 工法)：雙重管係採用漿液及壓縮空氣以同心雙重管傳遞，同孔噴出以增加切割能力，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。台北捷運 CD266 標復舊工程所使用之 SJM 噴射灌漿工法，即為雙重管工法。
3. 三重管工法 (Column Jet Grout, 簡稱 CJG 工法)：利用高壓清水及壓縮空氣切割土層後，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，切割周圍土體，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)

高壓噴射灌漿所使用的施工機具(噴嘴)，如圖 2-21 所示。中國土木水利工程學會 (1995) 建議常用之施工參數如表 2-8 所示。

高壓噴射灌漿工法的典型的施工順序如圖 2-22 所示，日本 JSG 協會 (1986) 建議之工法施工步驟如下：

1. 安裝：將施灌地點以測量方法定位，並將高壓噴射灌漿專用機具移置施灌位置上方，同時在施灌位置挖一沉澱池沉澱泥漿，以免迴漿流出造成環境污染。
2. 削孔：以高壓之清水沖洗土層至預定深度。沖洗時，出水口向下，並旋轉鑽桿以切削鑽孔。
3. 噴射試驗：削孔完成後，將鑽桿之下方出水口以鋼珠堵住，以高壓清水配合低壓空氣作水平方向噴射，以檢查鑽桿接頭部分是否密接良好。
4. 定位置噴射：以水泥系硬化材料代替清水，在固定深度做水平方向噴射，並以設定之鑽桿回轉速率旋轉鑽桿。由於剛開使噴射水泥漿時，其流量不甚穩定，若此時立刻提昇鑽桿，可能會造成改良土拌合不均。故待硬化材料流量穩定後，方能提昇鑽桿。
5. 形成改良樁：上述步驟完成，即可依設定的鑽桿提昇速度及回轉速率，噴射高壓水泥漿及低壓空氣以形成高壓噴射改良樁。
6. 拔出鑽桿並沖洗乾淨：灌漿完成後，將鑽桿拔出並以清水沖洗，確實做好保養工作，以免影響灌注品質及器材使用壽命。

2.6.3.3 SJM 噴射灌漿工法 (Superjet-Midi)

傳統的噴射灌漿工法，最早是在 1970 年左右由日本所發展出來，利用高壓硬化材料（如水泥漿），配合低壓空氣（或高壓水）之噴射，切削破壞地盤之組織，並與原土壤混合或取代之，同時藉由灌漿桿的旋轉與提升，在土層中形成堅硬不透水的改良土柱體。噴射灌漿工法發展至今已推展到歐洲、美洲、大陸、及東南亞各地，其應用範圍包含軟弱地層之地盤改良、增加結構物之止水性及防止土壤液化等。對於都市中地下公共建設及軟弱地層之開挖，助益良多。但因傳統的地盤改良工法（如 CCP、JSG、JSP 等）所形成之改良土樁徑較小，若遇大規模之地盤改良，所需要的施工時間較長。為提昇地盤改良施工效率，日本發展出 Superjet-Midi 地盤改良工法（簡稱 SJM 工法）。SJM 工法之特色為改良土直徑大（約 2.4 ~ 3.5 m）、施工效率高，可縮短工期、降低成本。圖 2-23 為在日本進行

試灌後之開挖照片。民國 92 年 6 月，台北捷運板橋線 CD266 復舊工程，首度在國內使用 SJM 工法進行地盤改良作業。SJM 工法之各項施工性質敘述如下。

1. SJM 工法之特徵

- (1) 可快速形成超大改良樁體：如圖 2-24 所示，SJM 工法利用灌漿二重管噴射出高壓之漿液 (300 kgf/cm^2) 及低壓空氣 (7 kgf/cm^2)，可快速形成大直徑 (2.4 ~ 3.5 m) 之改良樁體。
- (2) 固化材之使用量減少：在不影響施工品質之條件下，在漿液配比中，大幅的減少固化材的使用量，降低迴漿中之固化材量，以減少廢棄物之產生。
- (3) 土壤置換效果提升：SJM 工法利用內藏之特殊整流裝置之二重灌漿管，水平對向高壓噴射漿液及空氣 (圖 2-24)，可減少壓力之損失及提高土壤之置換效果。
- (4) 低噪音、低震動：利用高壓噴嘴進行土壤之切削及置換作業，可減少噪音及震動之產生。



2. SJM 工法之適用範圍

SJM 工法之適用範圍與一般噴射灌漿工法相似，皆可用於軟弱地層之地盤改良、防止土壤液化、加強基礎之強度與耐震性等，但因 SJM 工法之特色為改良土直徑大、施工速度快，可運用於大範圍地盤改良或復舊工程中，以縮短工期、降低成本。

SJM 適用範圍如圖 2-25 所示，分別說明如下：

(1) 地盤改良、地中樑

在開挖工程中，以減少擋土壁底端灌入土壤之深度，和防止開挖區底部隆起為目的之地盤改良，及能建造以減輕於擋土牆所產生之應力為目的之地中樑。

(2) 潛盾機出發、到達之保護

在潛盾隧道工程中，SJM 改良土能適用於保護潛盾機出發及到達井。

(3) 擋土牆缺口部位之保護

在開挖工程中，改良體對擋土牆不連續部位具有止水及補強效果。

(4) 既有大型結構物之保護

SJM 改良土就像地層中開挖空間屋頂一樣，能抵抗水壓，來保護地下大型結構物。

(5) 土壤液化之防止

在水邊區域等軟弱地盤之改良，具有防止因土壤液化而使地下建築物產生上浮之現象。可只對容易土壤液化之部分進行地盤改良，且能夠依據狀況與地下樁併用。

(6) 既有基礎之耐震補強

SJM 地盤改良能在高架橋下等受高度空間限制之地方施工，適用既有基礎之耐震補強。

(7) 人工基礎地盤之建造

SJM 工法不僅可以改良軟弱地盤，也可預先建造穩定地盤，強化基礎之承载力，執行更安全之地下工程施工



3. SJM 工法之施工

(a) SJM 工法施工機具及規格

依日本Superjet研究會（2002）建議，SJM工法施工機具標準配置如圖 2-26 所示，機具設備約占地 180 m²。施工機具規格如表 2-9 所示。

(b) SJM 工法施工步驟

SJM 工法為二重管工法，其工法施作原理與傳統之 JSG 噴射灌漿工法頗為相似，但 SJM 工法先利用外套管進行削孔後，再將灌漿二重管至入套管中，拔除外套管後，利用灌漿二重管進行水平對向噴射漿液及土壤置換作業。

SJM 典型的施工順序如圖 2-27 所示：

- (1) 鑽孔下套管，以水洗法將外套管鑽至預定深度。
- (2) 將灌漿二重管下降至預定灌漿深度。
- (3) 以吊車將外套管逐段拔除。
- (4) 定速旋轉並提升灌漿二重管，噴射漿液在地下形成改良土樁體。
- (5) 停止噴射漿液，拔除二重管並回填鑽孔。
- (6) 清洗灌漿二重管及移動機具，結束地盤改良工作。

Superjet 研究會 (2002) 提出不同漿液 (SJ-1 ~ SJ-4) 配比 (表 2-10) 所適用之土層，及在不同土層形成之單軸抗壓強度 (表 2-11)。SJM 工法常用之施工參數依據 Superjet 研究會 (2002) 如表 2-12 所示。SJM 工法灌漿孔位置之配置則依照不同地盤改良目的 (表 2-13)，設計出四種不同灌漿孔位之配置安排。

4. SJM 工法地盤改良之優缺點

SJM 工法除具有一般噴射灌漿工法之優點 (Kauschinger and Welsh, 1989) 外，相較於表 2-14 所列之其他噴射灌漿工法，SJM 工法具有下列各項優點：

- (1) 造成超大直徑之固結樁體：可形成直徑達 3.5 m 之巨大改良土樁體。
- (2) 施工效率高：SJM 灌漿噴嘴射出大流量噴射流，高壓漿液同時進行切削與填充地盤，因樁體巨大可減少改良土樁體施工數量，能縮短工期，增加效率。
- (3) 降低地表隆起問題：拔除外套管後，在二重管外側形成環形漿液溢流通路，於高壓噴射漿液時，此通路有助於受壓迴漿之排出，因此宣洩地下改良區之壓力，降低地盤隆起問題。

SJM 工法地盤改良的各項缺點，分別說明如下：

- (1) SJM 施工需要較大的工作腹地 (180 m²)，來安置地盤改良所需設備。

- (2) 由於採用吊車作業，SJM 工法施工垂直淨空需求較大。
- (3) 若硬化主材中含有化學藥劑，噴射漿液可能污染地下水。
- (4) SJM 工法是以高壓噴射漿液，在地下以大量液體漿液置換土壤，由於置換量大且置換速度快，在漿液初凝前可能造成地盤沉陷。

2.6.4 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 2-28 所示，此工法通常適用於透水性較高之砂質土壤。蔡茂生 (1989) 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。

此工法之優點為：

- (1) 在短期內可達降水效果。
- (2) 由觀測井可測出水位降低之情況。
- (3) 費用較低廉。



此工法之缺點為：

- (1) 需有足夠之場地及排水措施。
- (2) 抽水時間常容易因為水垢或管塞影響效果。
- (3) 地盤容易因為抽水造成之壓密而產生地盤下陷。

2.6.5 管幕工法

管幕工法的原理就是於隧道開挖面之頂拱周圍地盤中連續壓入鋼管，使鋼管呈輻射狀散佈在隧道之上半部，以維持開挖面的穩定。換言之，管幕工法，即利用鋼管本身之勁度，以防止隧道開挖面斜上方土壤擠壓湧入隧道內，並使開挖隧道時造成之擾動區不至於向上方擴散。

2.7 潛盾隧道施工引起地盤變位的原因

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. (1994b) 等學者，均曾經提出相關的研究成果。綜合各項研究成果，將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。

2.7.1 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 (Backfill grouting)，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，此項為潛盾隧道施工引起地盤變位的最主要原因。

Schmidt (1974) 曾假設，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：

$$V(\%) = 200 \times \frac{t}{a} \quad (2-1)$$

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

潛盾盾尾間隙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。

2.7.2 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之漏失。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。

2.7.3 襯砌環片變形

隧道襯砌環片組合完成時，本來是成圓形狀，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，而使襯砌環片變形。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。

2.7.4 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；其原理如 Mori and Akagi（1985）所提出之圖 2-29 所示，圖中之曲線 a 為施工前之未擾動土壤（undisturbed soil）之壓密曲線，曲線 b 為施工擾動後土壤之行為，而曲線 c 則代表重模土壤（remolded soil）之孔隙變化。因受施工擾動，土層狀態由曲線 a 之點 1（在相同的孔隙比 e 下）移向曲線 b 之點 2，同時垂直有效應力由 σ'_0 減小為 σ'_r ，隨著土體內超額孔隙水壓之消散，有效應力漸增，土體狀況沿曲線 b 到達點 3，自點 1 到點 3 的過程中，有效應力值相同而土壤的孔隙比減少 Δe ，因此，造成壓密沉陷。

2.7.5 開挖面應力改變

潛盾機開挖掘進時，必須自潛盾機內部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。但若所施推力剛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。

2.7.6 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，視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。



2.8 隧道破鏡之輔助工法

根據國內外之案例研究，潛盾機發進或到達時之鏡面破除作業，是潛盾隧道鑽掘工作中風險較高之施工步驟。傳統鏡面破除流程（圖 2-30）及鏡面工施工相

片如圖 2-31 至圖 2-36 所示，潛盾機到達前會在到達工作井連續壁外側進行地盤改良及鏡面止水成果確認（圖 2-32），鏡面破除（圖 2-33），連續壁內側安裝鏡面框（圖 2-34），並於框上設置止水墊圈（entrance packing）及逆止鋼蹠片（packing flapper）（圖 2-35），最後將潛盾機通過已改良之地盤內進入到達井（圖 2-36）。

傳統鏡面施工風險較高是因為鑿除鏡面連續壁時，多使用小型怪手（圖 2-33），或是手持鑽機振動鑿穿鏡面連續壁，地盤改良體與連續壁間可能因鑿穿鏡面連續壁產生之震動而產生裂縫，增加滲水機率。加上因地下管線、流木、及施工品質不良等因素之影響，導致地盤改良效果欠佳，容易形成滲水通路，讓受壓地下水夾雜土砂自鏡面湧入工作井中。一旦土砂湧入工作井，周圍地盤之土壤被淘空，引致可觀之地盤沉陷，造成鄰房沉陷及傾斜。為了避免災變發生，施工單位常事先採取適當之輔助工法，以降低潛盾機破鏡時之施工風險。



2.8.1 鏡面隔艙工法

此工法為到達鏡面破除作業之輔助工法，其作法為於到達井鏡面上加設可阻止土砂流入到達井之鋼製隔艙（bulkhead）。傳統地盤改良作業，理論上應可阻絕改良體內水分之流動，但實際上改良土經潛盾機掘進擾動及鏡面破除之震動後，改良土是否仍具完整止水成效不無疑慮。為施工安全考量，可考慮於到達井鏡面上加設隔艙（如圖 2-37 所示），預防土砂流入工作井，以降低破鏡施工風險。

隔艙為一圓型之鋼製結構，如圖 2-37 所示，其結構強度設計主要應考量安裝處之地下水壓及潛盾機推入時對水擠壓產生之力。為便於開挖作業人員及材料進出，可於隔艙面版上設置適當數量及尺寸之出入口，萬一鏡面發生湧水時，這些出入口可供注水加壓，以抑制出水量之用。朱旭（1997a）說明鏡面隔艙工法之作業流程如下。

1. 潛盾機穿過地盤改良體後，於連續壁外側停機。

2. 試水後，第一階段鑿除鏡面（鑿除厚度約為連續壁厚度之 4/5）。
3. 組裝鏡面框（含止水墊圈）及鋼隔艙（含支撐系統）。
4. 人員於隔艙內進行第二階段鑿除鏡面（鑿除剩餘之 1/5 連續壁厚度）
5. 隔艙出入口封閉，艙內注水
6. 潛盾機緩緩推出，使機頭進入隔艙內。
7. 排除隔艙內存水，觀察有無漏水情況。
8. 拆除隔艙支撐系統及隔艙面版
9. 組立到達台架，推出潛盾機，機身置於到達台架上。
10. 將止水橡膠墊圈以鋼索束貼於最末環襯砌表面，拆除隔艙。

2.8.2 鏡面凍結工法

對於覆土深度大之之鏡面開挖作業，因地下水壓大，地盤改良成效堪慮，為確保改良體之止水功效，除以更高壓噴射灌漿工法進行地盤改良外，並輔以凍結工法固化改良土內之水分。朱旭（1997a）指出，在捷運工程中，最為普遍被採用之地盤改良工法為二重管高壓噴射灌漿工法（如 JSG），其改良之有效深度通常低於 20 m。當改良深度大時，噴射壓力必須增大以克服地下水壓，並衝擊土壤使注入漿液與土壤充分混合形成改良體。以捷運板橋線 CP262 標工程為例，其潛盾隧道工程通過新店溪河床，到達鏡面之地盤改良深度超過 35 m，故採用三重管高壓噴射灌漿（CJG）工法進行地盤改良。

地盤改良完成後，地下水仍可能因鏡面開挖擾動而自被振裂的改良土間隙滲出，鏡面凍結工法可避免此一缺失。如圖 2-38 所示在潛盾機發進及到達端分別施以垂直及水平冷凍工法，其目的在使鏡面開挖時，改良體內之水分凍結而不流動，使潛盾機順利掘進到達。

2.8.3 雙重鏡面工法

所謂雙重鏡面工法，即除了進行連續壁鏡面前之土壤改良作業外，並於改良體外側(即改良體與未改良體間)構築阻隔壁，使地下水完全阻絕於阻隔壁之外，因地下水受到雙重阻隔故稱之為雙重鏡面工法。朱旭等(1997a)說明，板橋線 CP261 標出發井雙重鏡面工法之施作方式如下(如圖 2-39 所示)：

1. 出發井連續壁外側 JSG 地盤改良。
2. 施作全套管鏡面保護排樁及阻隔排樁。全套管排樁之施工方式乃利用鑽掘機之套管挖掘出樁體大小及長度後，再以水泥皂土漿置換原土壤，形成樁體。樁與樁間部份重疊，構築成一排樁阻隔區。全套管排樁係將原有土壤全部以水泥皂土漿置換，故其樁體之止水及擋土成效良好。
3. 將鋼鈹樁打入阻隔排樁內，以加強阻隔排樁之止水及擋土效果。
4. 於連續壁鏡面與鏡面保護排樁之間填充 LW 低壓灌漿，使兩者間能切實的緊密結合。
5. 阻隔區底部施作 LW 低壓補強灌漿。其目的乃利用 LW 低壓灌漿，補強原已施作 JSG 區域之底部，以防堵阻隔區下部向上的水路。
6. 阻隔區內設置排水井以排除殘留在阻隔區內的水分，除可降低鏡面之水壓力外，亦可進一步測試阻隔區之止水效果是否良好。
7. 於工作井連續壁與鋼鈹樁間進行兩端雙柵管止水灌漿。由於工作井連續壁與鋼鈹樁之材質不同，該接頭處極可能發生漏水現象，故採用可重覆施灌之雙柵管灌漿工法，將接頭處予以灌注水泥皂土漿及 SL 漿液。
8. 阻隔區外部施作雙柵管補強灌漿。當潛盾機順利發進至阻隔排樁內之鋼鈹樁前時，機身一半以上已進入改良區內。此時阻隔排樁內之鋼鈹樁已可由潛盾機機身所取代，故拔除鋼鈹樁，以便潛盾機通過。潛盾機通過阻隔排樁後，為確保後續發進時之安全，故再於阻隔區之外部施以雙柵管灌漿。阻隔區外部之雙柵管灌漿，除可再增強原 JSG 改良體之止水性外，萬一潛盾機通過

阻隔排樁後發生湧水現象，則可利用雙柵管緊急施以灌漿。

板橋線 CP261 標潛盾再發進施工，利用雙重鏡面工法有效阻絕地下水，順利完成潛盾隧道發進施工。

2.8.4 玻璃纖維筋連續壁

李有豐(2001)指出自1960年代開始，FRP(Fiber-Reinforced Polymer)聚合纖維筋的概念即被提出，FRP隨後被用為RC結構補強之用。FRP材料過去曾大量應用於運動器材、造船、汽車及航太工業的次結構元件中，隨著大量實驗數據及設計、分析經驗的累積，加上聚合物材料的研發及製造技術逐漸成熟，FRP的功能不斷地被改良，近五年來逐漸廣為市場所接受。

纖維材料具有重量輕、強度高、具可變化性、耐腐蝕、不導電性、良好之抗疲勞強度及整體工作預算較經濟之優點，在結合具有耐溫、耐濕及抗化學反應的樹脂(Resin)系統之後，整體工作性質也隨之提升。

複合強化纖維筋 (FRP rebar) 根據加入的纖維類型可大致分為兩種，一為CFRP rebar (Carbon Fiber Reinforced Polymer)碳纖維筋，而另一種為GFRP rebar (Glass Fiber Reinforced Polymer)玻璃纖維筋。一般而言，CFRP因為具有較高的張力強度以及彈性模數，主要用於結構補強，而GFRP纖維筋則是應用在需較佳抗腐蝕性之結構，例如海堤、碼頭、橋面版等工程應用上。也可能應用GFRP特性來興建特殊用途之結構物，例如醫院之MRI (磁共振造影) 室等。

因為GFRP纖維筋的張力強度較傳統鋼筋強，但重量卻僅有傳統鋼筋之四分之一。尤其重要的是，GFRP之硬度較低，潛盾機的高硬度切刃齒可以直接磨穿以GFRP纖維筋建造之連續壁，使得GFRP纖維筋也可以應用在潛盾工程中，也就是近年來所謂之柔軟性鏡面技術 (Soft eye technology)。柔軟性鏡面技術的概念是希望在貫穿鏡面時，盡量避免產生震動，以達到降低破鏡風險的目的。因此在組立潛盾出發與到達井之連續壁鋼筋籠時，於潛盾機通過之鏡面處，以GFRP纖

維筋替代傳統鋼筋，形成一複合鋼筋籠。因為使用GFRP建造之柔性鏡面，潛盾機能夠直接用盾首之切刀盤鑽穿連續壁，不必再使用小型怪手或是鑽機來鑿除鏡面，可順利安全地完成破鏡作業。與傳統潛盾機破鏡方式相比，鏡面連續壁應用GFRP纖維筋之優點如下：

1. 能大幅降低以振動方式破鏡之施工風險。
2. 因為 GFRP 重量較輕，連續壁施作較容易。
3. GFRP 材料雖然比鋼筋貴，但可以節省地盤改良範圍及費用。
4. 工期較傳統工法短。

國外已有成功應用GFRP纖維筋於潛盾破鏡作業之案例，例如香港捷運Kai Tsing 延伸線及LCC206標（圖2-40）與曼谷捷運工程（圖2-41）。2003年於英國高鐵Channel Tunnel Rail Link（CTRL）潛盾隧道工程中，也成功使用GFRP為鏡面材料，搭配隔艙壓氣，完成潛盾到達段破鏡作業（如圖2-42至圖2-44）。



2.8.5 強化纖維格網連續壁

強化纖維格網連續壁主要概念即是利用強化纖維格網 NEFMAC (New Fiber Composite Material for Reinforcing Concrete) 替代傳統鋼筋，形成新的連續壁構造。強化纖維格網是由玻璃纖維、人造纖維及碳纖維注入樹脂（聚酯、乙烯或環氧化物）相互融合而組成之格網（如圖 2-45）。依據格網摻入之纖維種類，大致可將強化纖維格網分為四種，第一種：(G type) 玻璃纖維、第二種：(C type) 碳纖維、第三種：(A type) 人造纖維、第四種：(H type) 混和玻璃碳纖維。上述四種強化纖維格網之性質如圖 2-46 及表 2-15 所示，格網間距有 50、100、150 mm 三種。一般而言，玻璃纖維類格網 (GFRP) 多用在非結構或次要結構之建築上，碳纖維類格網 (CFRP) 因為其力學強度及耐久性較佳，多用在主要結構上。

就潛盾工法之應用而言，強化纖維格網可以使用在潛盾機發進工作井與破鏡之鏡面連續壁中，於潛盾機出發與到達部位，利用強化纖維格網與鋼筋籠搭接，

形成複合材料之鋼筋籠，將其置入連續壁槽溝後，灌漿完成連續壁構築。連續壁使用強化纖維格網取代鋼筋，潛盾機可以切削盤直接磨穿連續壁，降低傳統工法破鏡時鑿除連續壁之風險，(圖 2-47 至圖 2-49)。典型之強化纖維格網連續壁出發與到達作業之施工步驟，如圖 2-50 及圖 2-51 所示。

2.8.6 碳纖維筋連續壁

使用含強化碳纖維塑膠束 (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 形成的模版，內部灌入輕質混凝土構築擋土壁，使潛盾的切刃盤能直接切削擋土壁鏡面。碳纖維筋連續壁之強化碳纖維束 (Carbon Fiber Cables) 是由 37 根較小之碳纖維條所組成 (如圖 2-52)，相關資料則如表 2-16 所示。圖 2-53 顯示以強化纖維束形成之模版，其主要功能為形成潛盾機破鏡時將直接穿透之連續壁，如圖 2-54 所示，藉以減輕破鏡時小型怪手或破碎機產生的震動。

碳纖維筋連續壁施作過程為首先將預鑄之擋土壁(強化碳纖維束模版+輕質混凝土)置入連續壁槽溝中，如圖 2-55 所示，安置於潛盾機到達深度，接著灌注水泥漿填滿槽溝，待連續壁澆置完成後，於破鏡位置安置發進座，發進座主要作用為確保潛盾機破鏡位置正確，並且阻擋水壓，安置發進座後即可進行潛盾機破鏡作業。