

潛盾隧道海下到達接合技術探討

廖銘洋¹ 黃志清²

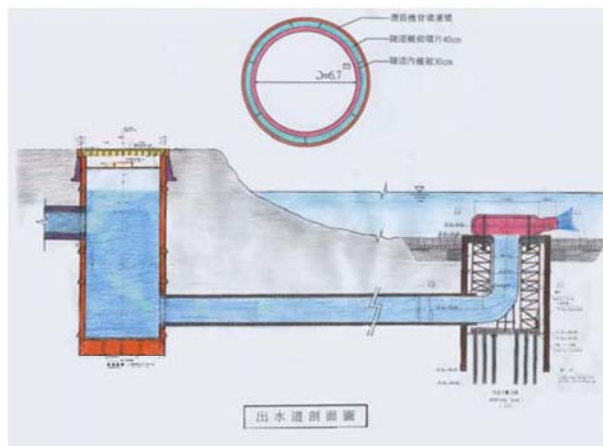
關鍵字：灌漿、冷凍工法。

摘要

龍門(核四)計畫循環冷卻水出水道工程到達井位於海上，有別於以往到達井位於陸地側可較易施作到達防護工作，本工程之海下到達作業有其特殊性，於潛盾到達時採用灌漿及冷凍工法併用之輔助工法，以確保其接合作業之安全性。

一、工程概要

本工程為核能四廠建廠工程之一，負責核能電廠反應爐之溫排水。有別於以往核電廠之近岸排水方式，於國內首次採用將冷卻排放水經由海底隧道排放至外海，並藉由海流快速散熱之方式，使出水口一定範圍之海水溫昇能達嚴格法規之要求。本工程即包括陸地上之進水暗渠、陸上出發井(兩座)，陸地及海床下之潛盾隧道(兩條)，及海中之到達井(兩座)、排水四噴頭(兩座)。之引至設置於海面下之到達工作井後，利用鋼製排水頭上之噴嘴將冷卻水排放。潛盾隧道部分，本工程採用兩部 $\phi 8.28$ 公尺之泥水加壓式潛盾機同時進行開挖，其開挖斷面為53.85平方公尺，開挖完成後隨即安裝外徑8.1公尺，內徑7.3公尺之預鑄鋼筋混凝土環片，於開挖到達後再覆以0.3公尺厚之場鑄鋼筋混凝土襯砌。隧道完成內徑為6.7公尺，每條長度約為1,320公尺，其剖面如圖一所示。



圖一 出水隧道剖面圖

二、隧道地質概述

出水隧道沿線地質基本上可分為兩段，岩盤段與非岩盤段。岩盤段自陸地起約930公尺，地質特性除剪裂帶外較單純，岩層由厚砂岩及頁岩所組成，厚砂岩共計6段，最厚有18公尺；頁岩亦有20公尺厚，岩質大致良好。剪裂帶之RQD平均值在20以下。非岩盤段之地質主要為礫石層上覆黏土、細砂，其界限多略低於隧道底部，約有50公尺為礫石層，其餘於約350公尺之黏土、細砂層掘進。

¹榮工公司明湖施工處龍門分處主任

²龍門分處潛盾施工所站長

本工程於掘進過程中所經歷之地質，簡述如下表一所示：

表一 隧道沿線地質分佈

掘進距離(m)	地質狀況	單壓強度
0 →500	中硬度砂岩	70~100MPa
500 →930	頁岩	15~30MPa
930 →980	礫石層	--
980 →1330	黏土層及到達部混凝土	--

三、海下到達施工說明

本工程之特色為利用潛盾隧道掘進至已預先設置好之海上到達工作井之到達室內。到達室為到達井J型肘管之一部分，到達井利用鋼管版樁圍堰方式開挖完成後，於底部打設支承樁，並將J型肘管與到達井之鋼結構部分吊放至設計之方向位置，並以水中混凝土澆置使之穩固於設計之方位與高程，作為潛盾隧道之設計掘進路線。到達室之照片如照片一、二所示，待水中混凝土澆置完畢後，再將排水用之四噴頭(如照片三)吊放並固定之。



照片一 潛盾機到達室



照片二 到達井鋼構吊放情況



照片三 四噴頭吊裝

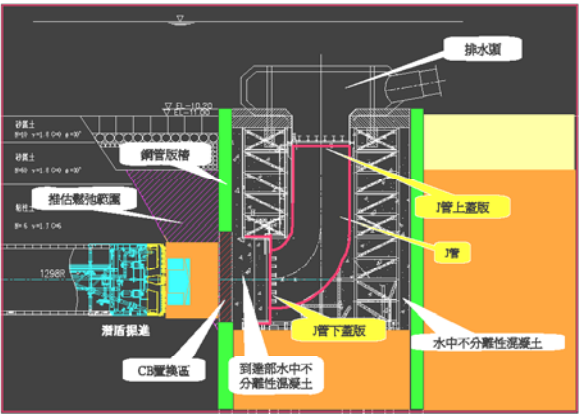
本工程之海下到達接合之成功關鍵，即在於接合時如何避免潛盾機外部之土砂及海水湧入隧道內，且在最後到達掘進階段如何利用潛盾機之掘進管理，避免造成對J管及鋼構的破壞即是最大成功因素。因屬海下接合作業，針對海下之高水壓情況，故接合作業必須要求之百分之百安全及不允許失敗之前提。本工程於到達接合作業中，採用灌漿工法與冷凍工法併用作為輔助措施，以完全阻絕土砂及海水之進入，此一施工過程值得參考，並以此經驗，期能作為類似工程施工之參考。

四、接合步驟說明及輔助工法之應用

潛盾之掘進作業將通過如表一所列之地質，同時於岩盤中遭遇若干之剪裂帶，為克服此一複層地質，故本潛盾機採用泥水加壓式潛盾機，並於切刀轉盤上配置不同之切削刀以因應此一非均質之地層。同時為確保接合作業之高度安全性，於潛盾機製造時即已預埋到達止水封圈於潛盾機外週部以為止水之用。以下即針對本工程於到達接合作業之重點：到達掘進及輔助工法之運用做一說明，分述如后。

4.1 到達掘進

潛盾隧道到達掘進部分之鋼管版樁以水泥皂土(CB)充填固結後，於掘進到達前已事先拔除，故潛盾之到達掘進所經歷之地質主要係包括黏土細砂層，CB及到達部之混凝土，其示意圖如圖二。因到達掘進屬最後階段之十餘公尺，且鋼管版樁拔除之部分屬於鬆弛帶，故針對鬆弛帶之開挖部分，需隨時檢視開挖面之泥水壓力是否有驟降及開挖乾砂量遽增之趨勢，並需隨時調整開挖方式。另位於到達室內之3m厚混凝土之掘削作業，因需充分考量潛盾機於掘削混凝土時可能對J管下蓋版產生過大之擠壓力，故需先將上蓋版之閥門予以打開以使洩壓，並同時管控潛盾機之掘進推、扭力是否於計算範圍內。此一管理標準列如表二。



圖二 潛盾到達掘進示意圖

表二 到達掘進之各項管理值

環數 NO.	管理項目				
	開挖面壓力 (kPa)	掘進速度 (mm/min)	推力(t)	地盤性狀	備註
1298(1303)	320	20	2,200	鬆弛地盤	中繼切刀更換
1299~1304	320	20	2,200	鬆弛地盤	
1305	320	10	2,200	鋼管樁拔除位置	CB 填充區
1306	320	5~10	2,500	混凝土段切削	
1307	320	5~10	2,500	混凝土段切削	
1308	320	5~10	2,500	混凝土段切削	
1309(1314)	320	2~5	2,500	混凝土段切削	J 管到達室
到達	320	2~5	2,500	混凝土段切削	J 管到達室

掘進到達至預定位置停機後，為避免潛盾機因開挖面壓力而後退，需在最後一環環片與盾殼間焊接鋼製鐵鉸，以固定潛盾機後即可進行後續之接合作業。

4.2 潛盾接合作業輔助工法運用

當初於潛盾製造時，即針對接合之輔助措施作一評估，經表三之考量預估各種施工法之成效後，選擇將到達輔助工法之施作由潛盾機內部進行，其最主要原因仍係考量海面下大深度之施工，其安全及品質仍有疑慮，故選擇由潛盾機內施作為宜。且因接合作業係於高水壓之海下進行，為避免接合作業時潛盾機外之土壤崩塌及海水湧入，同時考量灌漿工法及冷凍工法之優點(表四)後，決定以兩者併用之方式施作，以期能更確保接合作業之安全無虞。

表三 潛盾到達輔助工法施工位置之選擇

工法	灌漿工法(藥液注入)、置換工法(CJG)、凍結工法			
地點	海上作業		潛盾機內作業	
環境	海洋污染	×	無污染	○
安全	受氣象海象影響	×	隧道內作業無影響	○
品質	冷凍維持有問題	△	確保品質	○
工期	受氣象海象影響、海上保護工交錯作業	△	無影響	○
綜合	×		○	

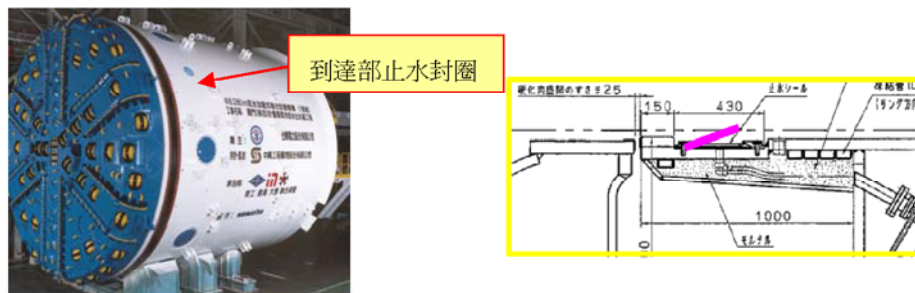
表四 潛盾到達輔助工法之選擇

	灌漿工法(化學灌漿)		置換工法(CJG)		冷凍工法	
效果	增加地盤強度、防止土水噴發。	○	攪拌混合產生有未改良區或不良區、因重力關係有坍塌或於複層地盤發生未固結情形。	×	孔隙水冷凍時體積膨脹冷凍效果顯著，凍土強度十分良好。	◎
	無法完全確保止水性。	△			孔隙水凍結完全可止水。	○
疑慮	單獨施工無法確保十分完全之止水面。		確保防護品質有問題。此工法不適合。		單獨施工時、海水之凍結品質、強度會降低。	
綜合判定	必須併用冷凍工法	◎	不能採用	×	必須併用灌漿工法	◎

以下針對上述兩項工法做一說明。

4.3 地盤改良灌漿作業

為避免潛盾機外周の間隙形成地下水流動，必須施作地盤改良以固結地盤。地盤改良灌漿部分分成兩部分，首先於潛盾到達後，撐起預先設置於潛盾機盾殼上之止水封圈(如照片四)，並利用潛盾機內預設之25支灌漿管進行瞬結式之灌漿，將到達井混凝土與潛盾機盾殼之間隙做第一次填充，以防止地盤內孔隙水進入潛盾機土艙。填充作業使用瞬結型之配比，使漿液於灌漿孔混合後4~15秒即能凝結，可避免漿料進入土艙內。



照片四 潛盾機之止水封圈

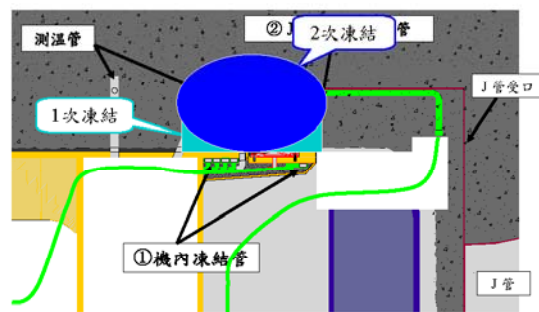
待盾首部灌漿作業完成後，再利用預設於潛盾機盾殼環圈上共38支之灌漿管進行灌漿作業，其注入之材料為水泥皂土(CB)漿液，使潛盾機與到達室之間隙能予填充以阻絕地盤中之水源進入，並避免潛盾機上方之鬆軟土層沈陷。灌漿作業之進行以灌漿壓力(P)及灌漿量(Q)做檢討，在理論之間隙上做最足量之施灌，同時並對每一灌漿處做灌漿前後之效果檢核，達完全止水或水壓力在 0.1kg/cm^2 以下即為施灌完成。灌漿作業施作完成後，為利後續潛盾機之接合作業及冷凍作業之進行，需先施作第一階段之潛盾機解體及後續台車撤除，將作業空間空出後，即可開始施作冷凍作業。

4.4 地盤改良冷凍作業

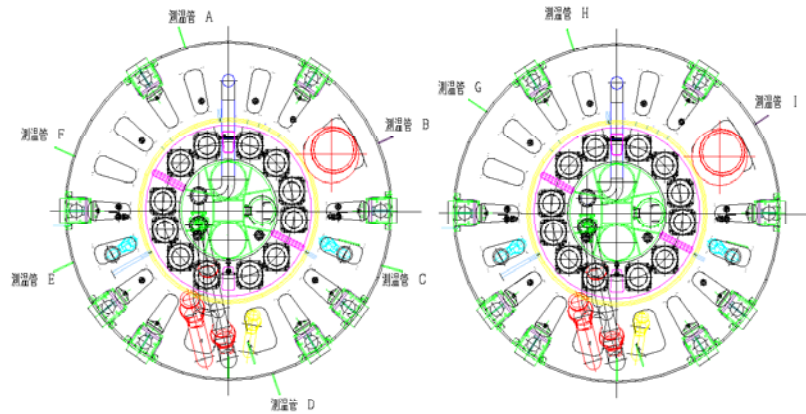
隧道內設置冷凍設備後，利用冷凍機將低溫之氯化鈣冷凍液注入預設於潛盾機機首外周部之環列式配管，使到達接合部之地盤冷凍成凍土，以凍結可能流動之孔隙水，並加強地盤改良之成效。另為隨時監視凍土之溫度變化情形，於潛盾機盾殼外周部設置9支測溫管共15個溫度測點(如圖三及圖四示意圖)，以瞭解凍土之成長情形。圖六為測溫管之設置位置圖。因海水之凍結溫度較淡水為低，且凍土之形成費時甚久，故於冷凍過程中，需注意機具本身之狀況，以避免因機具停機而作業中斷，需重新造成凍土之情形。冷凍作業分成二個階段，第一階段係當冷凍之溫度於測溫管位置A~F之200mm處達設定之低溫(-5°C)時，即可進行開挖面泥水及J管內排水之鑽孔準備作業。設定此溫度係考量作業空間之安全，為避免施工過程中因凍土解凍產生之滲流水進入土艙危及施工人員之安全，故於作業時需隨時監視凍土之溫度變化，如溫昇超過規定值則需先行撤離土艙並關閉所有人孔及閥門，待溫度再次降至-5°C以下時，始可再進入作業。

開始進行開挖面泥水及J管內之排水作業前，需先利用設置於土艙隔板部之5B閥門進行鑽孔作業。鑽孔作業將使鑽桿通過土艙，貫通到達部之混凝土並鑽過J管下盲蓋之鐵板為止。取下鑽桿並裝設排水用之2B鐵管(附1B之空氣注入管)，進行階段性排水，在預設之排水量及壓力下確認是否有滲流水自J管以外的地方進入，若排水量及壓力正常，則開始進行J管內及土艙之排水作業。若排水過程中顯示有滲漏水進入J管內，則安排潛水人員至海上到達井檢查其漏水情形，必要時以彈性填縫料予以修補後，再次進行排水作業。

待開挖面及J管內之海水排放完成後，需進入土艙，將原預埋於到達室之二條凍結管找出(如圖三)接續並注入低溫之氯化鈣溶液，作為第二階段冷凍作業，以加強潛盾機盾殼與到達室間隙之凍土效果。第二階段冷凍作業，其凍土之溫度需控制在A~F之400mm處溫度低於(-10°C)，才可進行切刀面版外周部之切除工作與J管下盲蓋之切除工作。同樣的，設定此溫度係考量作業空間之安全，故需隨時監視凍土之溫度變化(如圖五所示)，如溫昇超過規定值則需先行撤離土艙並關閉所有人孔及閥門，待溫度再次降至-10°C以下時，始可再進入作業，其施工情形如照片五所示。



圖三 潛盾機冷凍管配置及測溫管設置示意圖

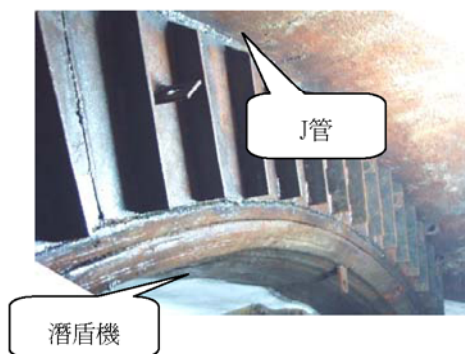


圖四 冷凍作業測溫管配置圖

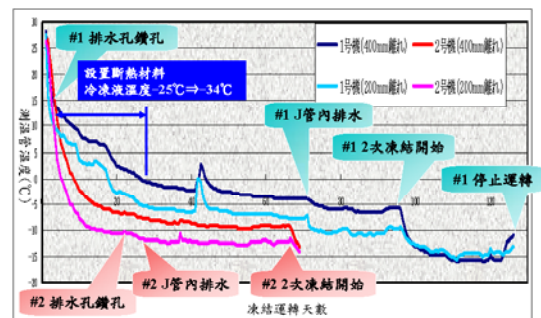


照片五 測溫管之配置及土艙內冷凍情形

第二階段冷凍作業達設定溫度後，即必須將到達室與潛盾機外殼以止水鐵板焊接，並進行氣密試驗確認無漏氣後，於止水鐵板背部注入灌漿材料，以達完全止水，如照片六所示。



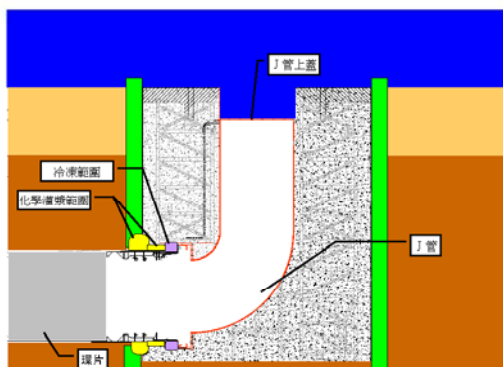
照片六 止水鐵板焊接作業



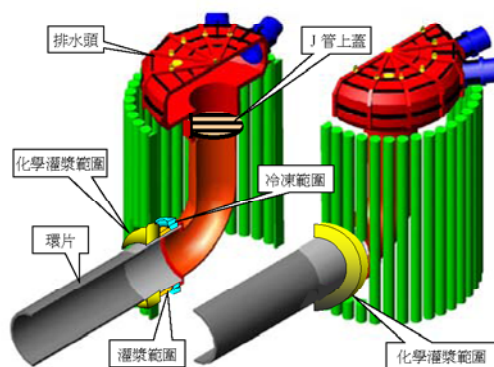
圖五 凍土溫度監測圖

4.5 接合作業

止水鐵板焊接完成確認無滲漏水後，即可解除冷凍運轉，將所有施工設備撤除後，進行潛盾機剩餘機體之拆解及J管下盲蓋鐵板之切除作業，即完成接合作業，圖六及圖七為輔助工法施作及到達接合完成之示意圖。



圖六 到達輔助工法施作示意圖



圖七 潛盾到達示意圖

五、結論

本工程因到達井之位置特殊，位於海面下，且因考量海象條件之作業安全與施工品質，故採用由潛盾機內施作到達輔助工法。由本工程實際施工之成功經驗顯示，在接合作業以最高安全考量原則下，可依工址現況採用適當之輔助工法。輔助工法非僅有單一選擇而需視實際需要選用。潛盾隧道之出發與到達為影響工程成敗之最重要關鍵，所有施工皆須兼顧安全與品質之前提，如此即可避免功虧一簣之憾。

參考文獻

1. 榮工、鹿島、大豐聯合承攬(2001)，龍門(核四)計畫循環冷卻水出水道工程「潛盾機製造計畫書」，台北。
2. 榮工、鹿島、大豐聯合承攬(2004)，龍門(核四)計畫循環冷卻水出水道工程「潛盾隧道施工計畫書」，台北。
3. 榮工、鹿島、大豐聯合承攬(2004)，龍門(核四)計畫循環冷卻水出水道工程「潛盾隧道到達施工計畫書」，台北。