

南京三江口穿越長江隧道工程

賴慶和 張勝旺 鍾毓東

萬鼎工程服務股份有限公司

關鍵詞：潛盾施工、隧道

一、前言

西氣東輸工程是將大陸西部豐富的天然氣資源輸送到經濟發達，能源相對缺乏的長江三角洲地區，管道始於新疆維吾爾自治區，最終到達上海市，管道全長 4000 公里，行經之自然地形及施工條件極為複雜，總共穿越中大型河流共 68 次，其中，延水關黃河、鄭州黃河及南京長江三次穿越，並稱三大控制工程。南京三江口穿越長江段係採用潛盾隧道，延水關黃河採山岳隧道挖掘施工、鄭州黃河採推管施工，而江南水網廣泛採用導向鑽(HDD)施工。

南京三江口穿越長江處江面寬、地質條件複雜、地下水壓更高達 $62.5t/m^2$ ，隧道內徑 3.8m 全長為 1992m，在此之前尚無任何隧道穿越長江及黃河這兩條孕育中華文化的大河，故此一工程堪稱為世紀隧道工程，中鼎集團經由激烈的國際競標，於 2001 年 8 月 31 日取得此一世紀隧道工程之統包承攬權，2002 年 8 月 25 日潛盾機開始掘進，2003 年 7 月 17 日潛盾隧道順利貫通。

二、工程概要

2.1 地形及地層狀況

三江口位於屬長江下游沖積平原，長江水域及河漫灘寬度約 1690m，北岸為江蘇省儀征市青山鎮，南岸為江蘇省南京市棲霞區靖安鎮。

長江兩岸均為人工堤，採用水泥砂漿及片石砌成。河漫灘低平，向長江水域傾斜，地表以粉砂、粉土為主，柳樹成林，生長茂盛，汛期江水淹沒，枯期呈陸地；水下地形呈不對稱“V”字型，南坡平緩，北坡近深槽處坡稍陡，其上平緩；深槽略偏北，最大深度 40.95m。規劃之隧道線型及地層剖面圖詳圖 1，隧道行經地層複雜多變，包括為粉質粘土層，粉質細砂層、卵石層及鈣質粉砂、細砂岩，最大水壓需 $62.5t/m^2$ ，線型及地層參數詳表 1。

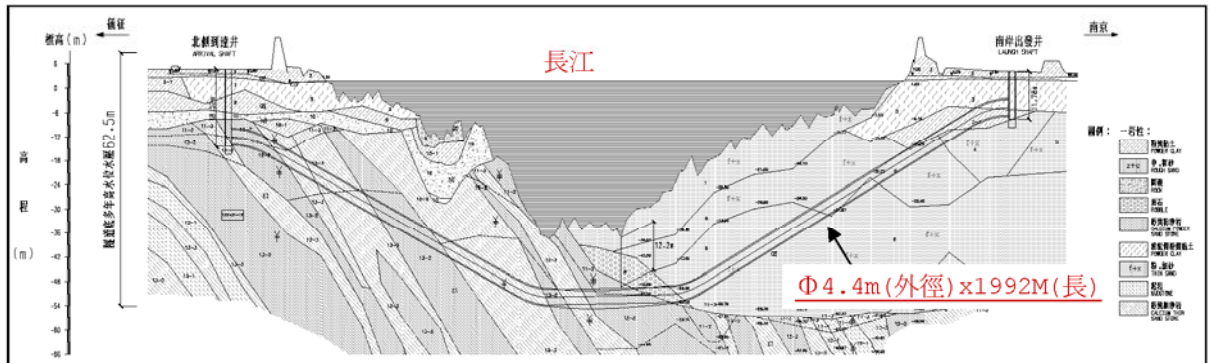


圖 1 隧道線型及地層剖面

2.2 計畫需求及條件

本計畫以統包(設計及施工併標)方式發包，功能性要求如下：

1. 隧道內須容納 $\phi 1016$ 的輸氣管道、 $\phi 813$ 輸氣複線及 $\phi 508$ 輸油管線三條管道及三條 $\phi 50$ 光纜套管，同時考慮維護檢修空間，隧道內徑不應小於3.8m。
2. 本工程必須採用潛盾工法施工。
3. 潛盾隧道江底的最小覆土深度不小於12m，江底水平段長度不應小於300m。
4. 北岸豎井最大深度不得大於30m，距長江大堤外坡角應大於100m。南岸工作井距長江大堤外坡角則應大於200m。
5. 隧道縱斷面上改變方向時，其曲率半徑不能小於1500m。
6. 隧道防水要求二級：不允許漏水、管片有少量、偶見的濕漬。
7. 環片的抗滲壓力應不小於隧道埋深水壓力2-3倍，監理單位要求2Mpa(20kg/cm²)

表 1 隧道線型之參數表

項 目	參 數 值
(1) 隧道條件	
a. 全長	1,992m
b. 最大坡度	6%
c. 最大縱向曲率半徑	1,500m
d. 隧道內徑	3.8m
e. 隧道外徑	4.4m
(2) 隧道行經地質條件	
第一段粉質粘土層(I)	80m 長(N 值: 6)
第二段粉質細砂層(I)	750m 長(N 值: 9-26)
第三段卵石層(I)	60m 長($\phi 2-6\text{cm}$ 、max 8cm)
第四段鈣質粉砂、細砂岩(II)	1,094m 長(平均單軸抗壓強度 3.2Mpa，最大 9.6Mpa)
(3) 覆土深	7-33m
(4) 水壓力	Max.62.5 t/m ²

三、規劃與設計

3.1 隧道線型之考量條件

1. 考量日後維護維修，工作井及隧道洞口不宜過深。南岸豎井深度規劃為11.78m，隧道頂距地面6.63m(約1.51倍隧道外徑)；北岸豎井深度規劃為18.52m，隧道頂距地面13.37m(約3.04倍隧道外徑)。
2. 兩豎井間長度1992m；河道內最小覆土深12.2m；江底水平段長301m；縱坡曲率半徑1500m。
3. 南岸工作井之隧道鏡面位於粉質粘土地層，避開易發生漏水、湧砂之粉質砂層。
4. 北岸豎井隧道鏡面位於鈣質粉砂及細砂岩且隧道頂距圓礫卵石層2m，以避開透水性高的圓礫卵石層。

3.2 潛盾環片

本工程潛盾環片組成爲三片A環片，二片B環片及一片K環片，寬度爲1公尺，厚度30公分，內徑3.8公尺。各環片相對位置爲最底部三片爲A環片依次往上爲B環片頂部最後組裝爲K環片。K環片以頂拱爲中心左右以一定角度錯齒排列組成一管狀隧道如圖2所示。有關潛盾環片分析模式採用較能反應環片錯齒及螺栓接頭力學行爲之雙環模式，如圖3所示。在周圍土壤係以法線及切線方向之彈簧模擬。切線方向彈簧勁度可以調整，以模擬環片與周圍土壤間介於滑動與不滑動之界面情況。

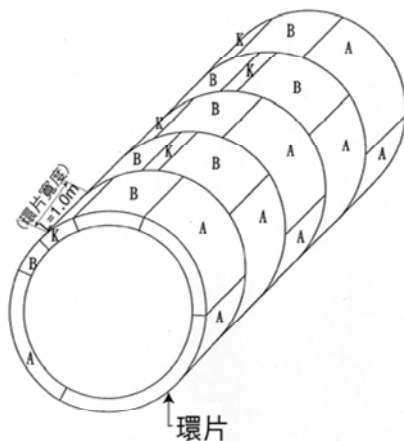


圖 2 管狀隧道

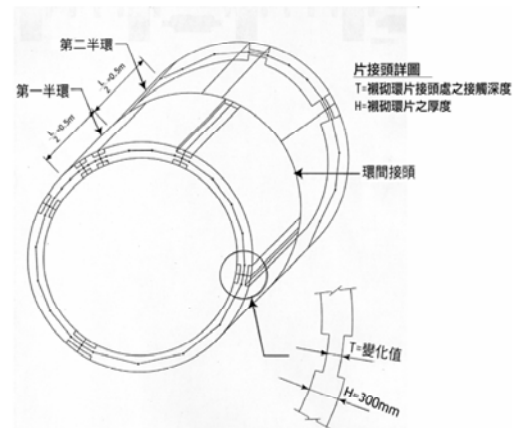


圖 3 雙環模式

3.3 隧道排水設施

依據規劃線型，管道內最低點位於距離南岸豎井 1174.5m 處，需於隧道內修建永久性隧道排水設施。若於潛盾隧道下方施作集水井，則需在環片上開孔，再向下挖掘以施築集水井井壁。雖然集水井已於砂岩地層，但水位達 65m 以上，開挖過程中有江水湧入的風險。為降低風險計畫於隧道中央最低處內部直接修築集水井，並於隧道內設置排水溝將隧道內入滲水導入集水井，以兩台沉水泵浦交替運轉將水排出。並採用液位控制泵浦馬達，將訊號傳回監控盤，隧道內控制盤均採防水防爆機型，以符合功能需求。集水井設置方式詳圖 4。

3.4 隧道通風措施

為保證隧道內日後空氣流通、保障後續項目人員施工安全，隧道內需建立良好的通風系統。考慮通風效益、施工可行性、工程成本及維修便利性，於到達井井口各設置 2 組軸流式風機(1 組備用)，風機風量 7.75CMS，風壓 500Pa 具，採用 7.5kw 馬達及 3PH/380V/50Hz 電源。通風系統方案詳圖 5。

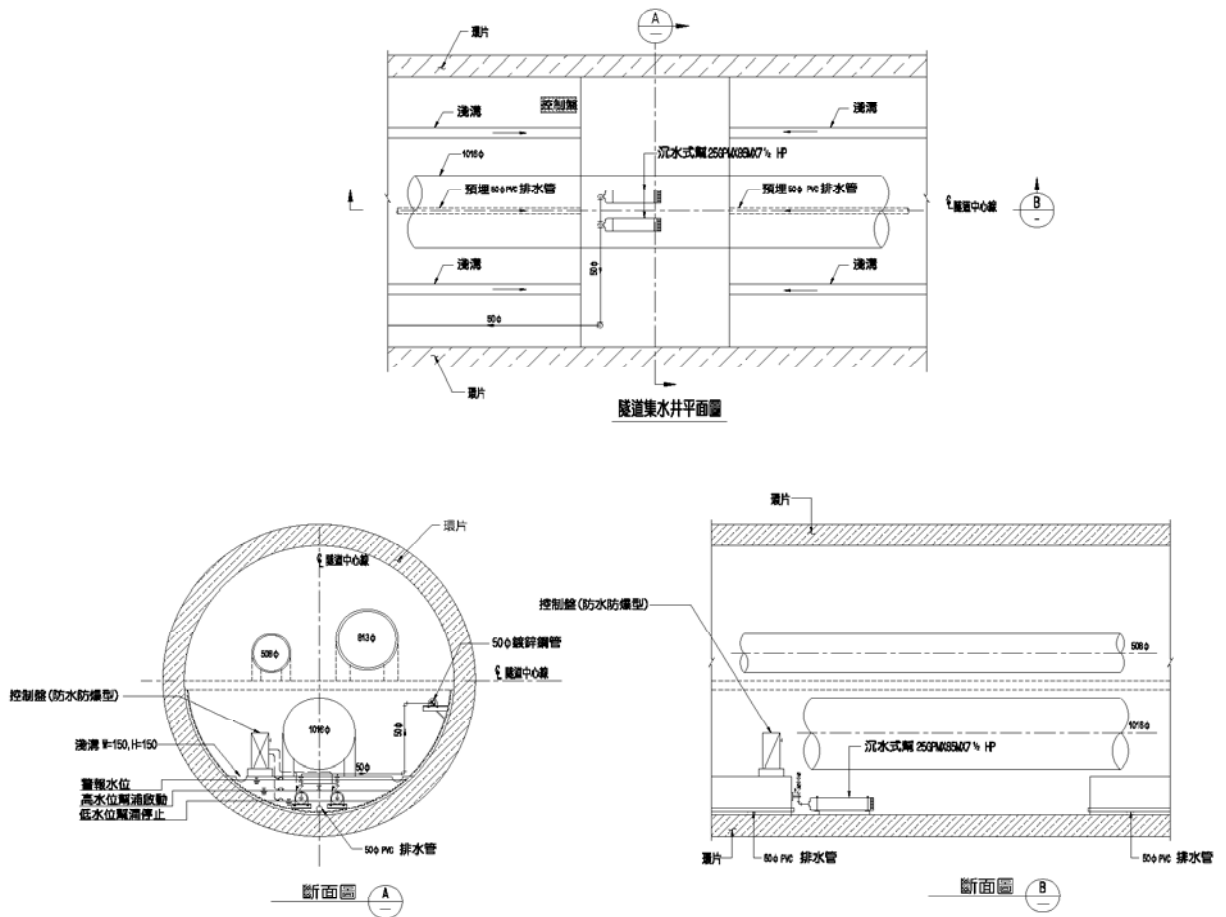


圖 4 集水井配置

風扇規格表									
編號	位置	風量 CMS	性能數據		型式	馬達數據		備註	
			靜壓 Pa	最大轉速 RPM		電源 PH / V / HZ	功率 kW		效率 %
EAF-01	GROUND FLOOR	7.75	500	1500	直結擋軸流式	3PH/380V/50Hz	7.5	60	互為備用, 戶外型
EAF-02	GROUND FLOOR	7.75	500	1500	直結擋軸流式	3PH/380V/50Hz	7.5	60	互為備用, 戶外型

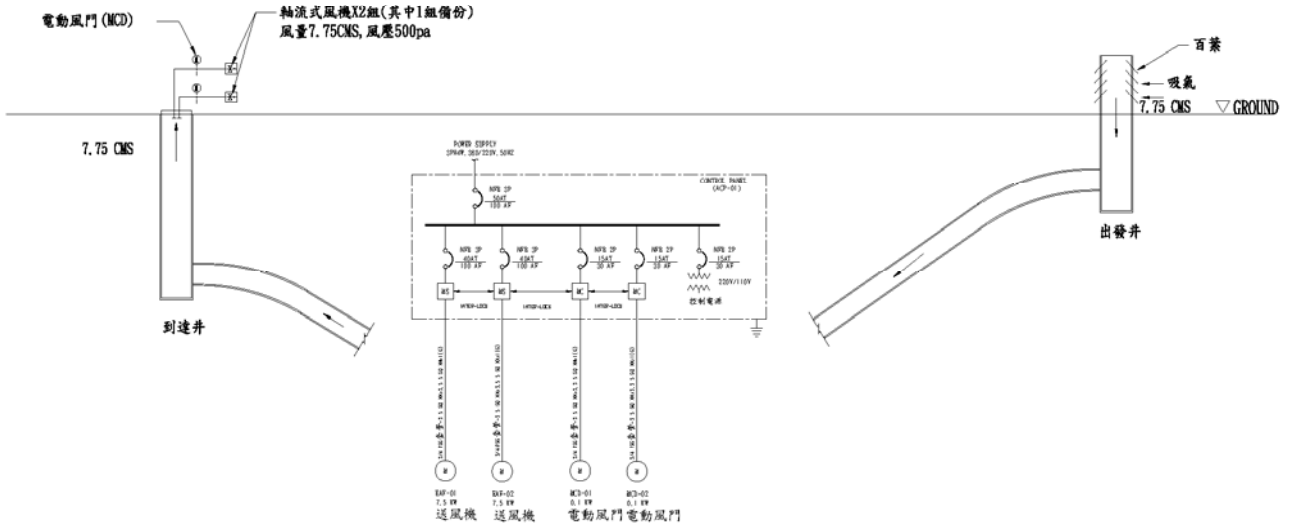


圖 5 通風系統規劃

3.5 隧道照明措施及配電

為維持隧道內足夠亮度以供輸氣管道佈設施工人員正常施工，同時亦便於工程質量檢驗及維修，隧道內部需裝設完善的照明設施。將於隧道內每隔 10m 設置一盞 40W 日光燈，平均照度 20LUX，其中三分之一燈具附有容量 60 分鐘備用電池。由南、北兩岸同時供電。於南北豎井地面層機械室內各設置動力分電主盤，外接 3 相 4 線 380/220V 300A 電源至動力分電主盤電源側，於隧道中點作分界，分別由動力分電主盤提供隧道內相關設施之用。為考量維修工程之便利性，隧道內每隔 200m 設置 3 相 380V 100A 電焊插座，另每 100m 設置 200V 16A 維修插座一處。設置接地母線兩條，連接南北兩岸，豎井外空地同時考量接地電阻及土壤電阻係數(接地電阻為 4 歐姆以下；土壤電阻係數以 100 歐姆一米計算)，各設置一接地網，如此隧道內之照明系統將更具安全保障。隧道內電氣設備位置詳圖 6。

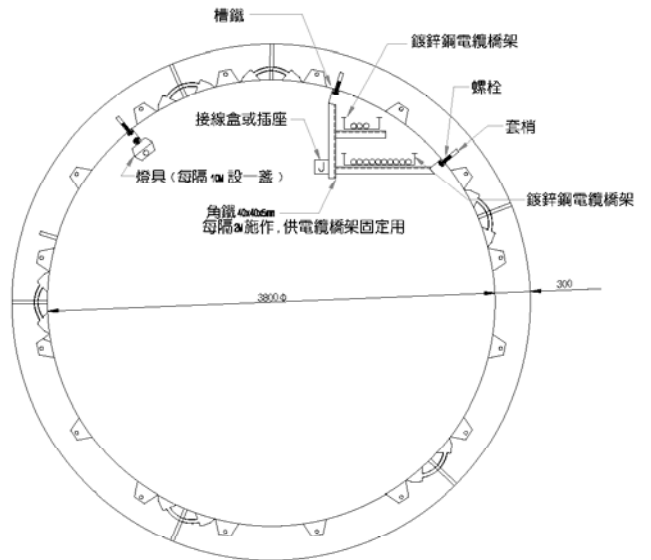


圖 6 隧道內電氣設備位置示意圖

四、施工

4.1 潛盾機選型

本工程隧道行經之地層約 750m 位於粉質細砂層(砂上顆料含量平均 75%)及 60m 位於卵石層(粒徑主要介於 2-6cm, max 8cm; 礫石含量 80%以上)且水壓力最大為 65.43t/m^2 。為避免江水將砂土湧入潛盾機內, 因此選擇密閉型泥水加壓式潛盾機, 潛盾機規格如表 2, 型式詳圖 7。除上述外, 潛盾機及相關設備研選時亦有各項因素考量, 如後所述。

1. 潛盾隧道施工, 必須經過一般土層、卵石層、岩盤。因此選用複合式切削盤。
2. 採用泥水加壓式潛盾機, 經計算本工程完成時切削頭磨損量為 12.91mm, 潛盾掘進過程中不須更換切削頭。
3. 卵石層之最大粒徑為 8cm, 其成份主要為石英砂岩, 考慮排泥的流暢性, 泥水加壓式潛盾機之排泥管尺寸採 25 公分($\phi 10''$)。
4. 江南粉細砂層是隧道區的主要含水層, 富水性強, 單井出水量 $1628\text{m}^3/\text{d}$, 施工時要防止盾尾部滲水。
5. 最大下坡坡度為 6.0%, 最大上坡坡度為 5.5%。要充分考慮材料運輸牽引設備的爬坡能力和潛盾機在較大坡度條件下的姿態調整以及潛盾施工配套設備的防滑措施。

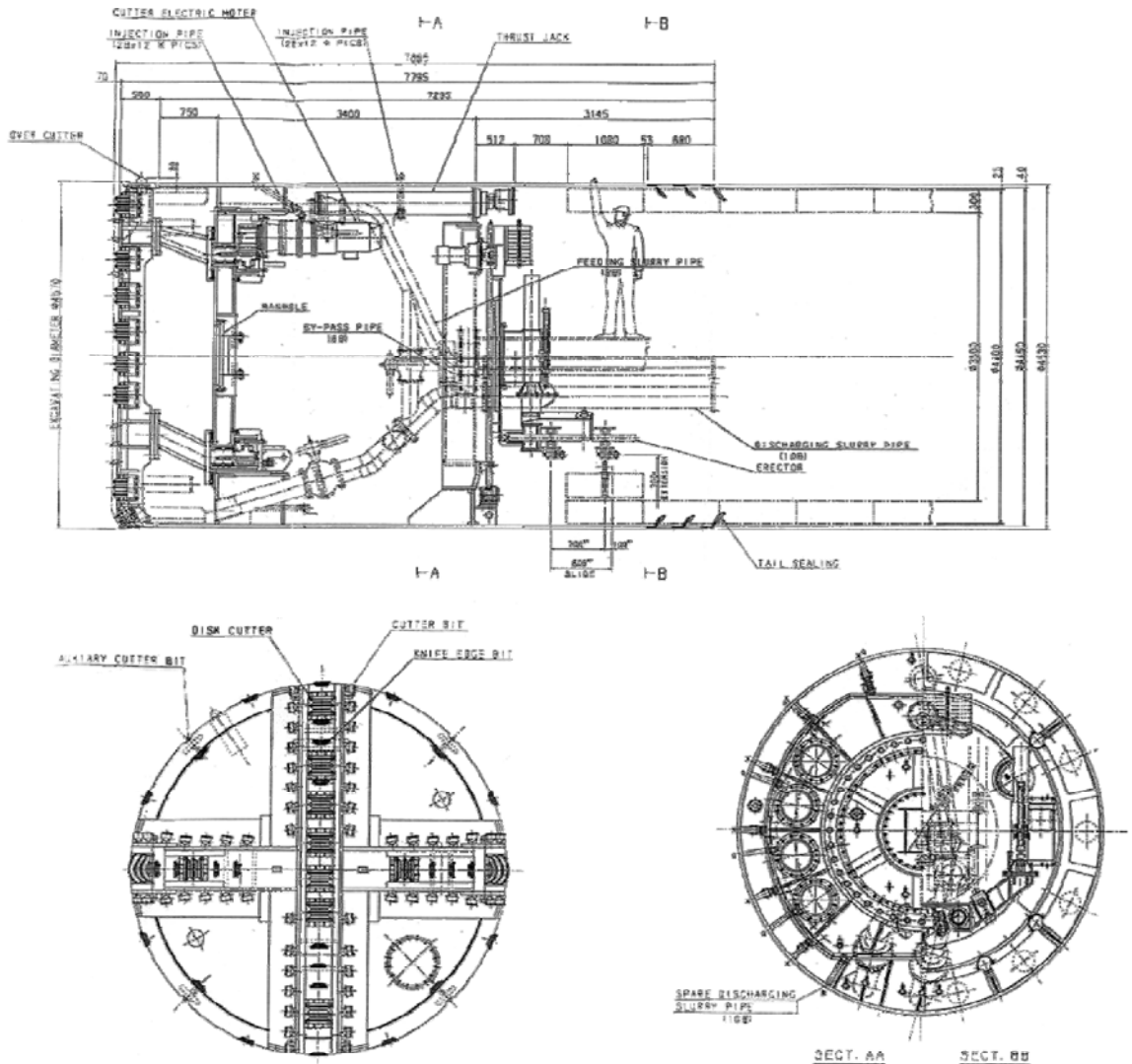


圖 7 潛盾機型式

表 2 適合的設備條件、規格

分類	說明	規格		
潛盾機組	潛盾機本體	外徑	φ 4,530mm	
		全長	7,795mm	
		驅動千斤頂	1,500kN×14 支=21,000kN	
	掘削盤	速度	0.92min ⁻¹	
		扭力	max. 3044 KN-m	
		驅動方式	油壓	
		掘削頭	複合式掘削頭	
	環片拼裝機	旋轉速度	1.2min ⁻¹	
		旋轉角度	±220°	
	盾尾刷		3 道，抗水壓 0.7Mpa	
各配套設備	進泥泵	揚程	41m	
		流量	3.8m ³ /分	
		葉片	kMTBCr27	
		馬達/馬力	變速/75kw	
		絕緣	F 級	
	排泥泵	揚程	77.6m×3=232.8m	
		流量	每台 3.8m ³ /分	
		葉片	kMTBCr27	
		馬達/馬力	變速×1/132kw；空速×2/132kw×2	
		絕緣	F 級	
		外殼	球狀鑄鐵	
	處理設備	泥漿除砂分離機	將 63microns 以上棄渣分離，保證放流水質	
	控制管理系統	控制方式	遠端控制(remote monitoring system)	
		掘削面穩定控制系統	盾面壓力控制	
			泥水量控制	
			參數優化設定	
		方向控制系統	二維方向顯示系統	
			掘進方向預測系統	
		操作控制系統	當前位置顯示	
			警告系統	
掘進趨勢顯示				
操作條件指引				
統計分析				
故障檢修系統	列印系統			
	故障診斷			
	恢復系統			
減壓艙		可供 2 人進出，利排除前方障礙或更換切削頭		

4.2 潛盾工作井

潛盾工作井在台灣的工程習慣都採用連續壁工法施工，但在大陸，都會區以外連續壁並不普遍成本也高，因此採用觸變泥漿護壁下沉方式之沈箱(沈井)工法施工，如圖 8。所謂觸變泥漿護壁下沉法即在沉箱外壁製成寬度 25cm 的台階作為泥漿槽，泥漿配比為陶瓷土 18%，純鹼 0.6%，甲基纖維素 0.05%，水 81.35%、比重 1.1。由井壁內塑膠管(φ55)將泥漿導入，藉以穩定開挖壁面，待沈箱沈到設計深度時，再以水泥砂漿置換觸變泥漿。為使沈箱施工過程中不致偏移，在沈箱外側設置寬 3.6m，深 2.4m 的套井，以控制沈箱下沉精度。

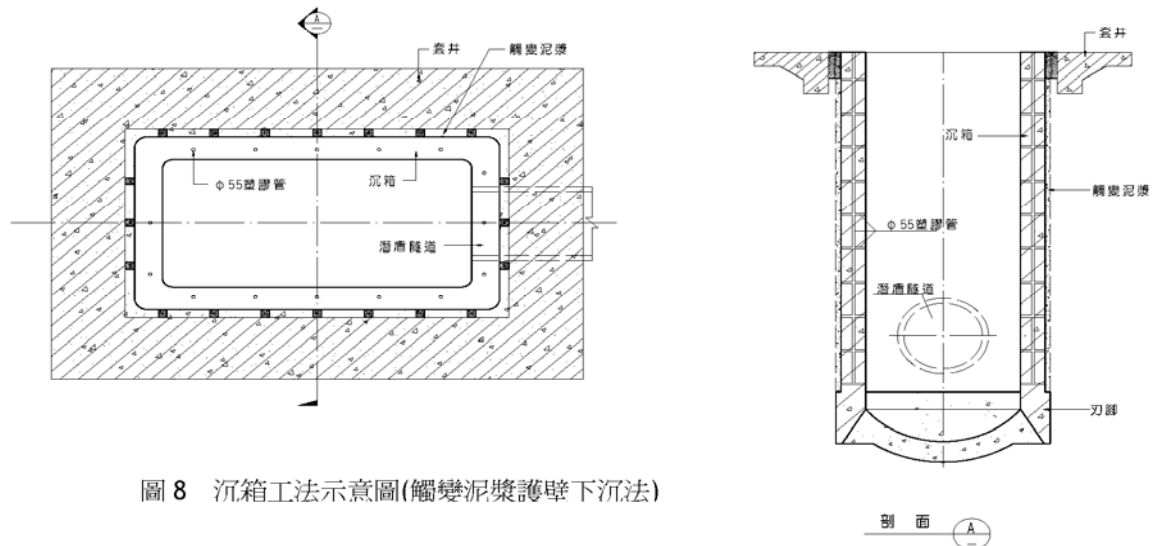


圖 8 沉箱工法示意圖(觸變泥漿護壁下沉法)

由於南京冬季最低氣溫在零度以下，因此在施工上必須依據國標 JGJ-104-97<建築工程冬期施工規程>中的有關規定考慮防凍方案，混凝土施工是冬期施工的關鍵項目，直接影響到沈箱施工品質，其具體作法為：

1. 對受凍後會影響施工品質的材料(如止水帶)應妥善保管。
2. 要求混凝土供應商按有關規程進行混凝土的熱工計算。當氣溫低於 5℃ 時，加入防凍劑或使用高效複合型的添加劑。
3. 混凝土澆築前，要清除模板和鋼筋上的冰雪及污垢。混凝土分層澆築時，分層厚度不大於 45cm，第一層混凝土溫度低於 2℃ 及混凝土未初凝前，就澆築下一層混凝土。否則，採取條布覆蓋的辦法保溫。
4. 考慮冬期最低溫為 -5℃，經熱工計算採用草被覆蓋混凝土表面時，混凝土實際內部最高溫度與混凝土表面溫度之差為 10.83℃，未超過 20℃ 的規定。施工中考慮到現場實際情況和草被的品質偏差，因此採用一層草被和一層條布的方案，確保沈箱混凝土品質。
5. 沉箱稜角部的草被保溫厚度為平面部位的 2-3 倍。
6. 氣溫低於 0℃ 時，對沈箱外壁的觸變泥漿外露部位採用條布覆蓋的辦法。
7. 採用組合標準鋼模板，當混凝土強度達到 1N/mm² 後，可使側模板輕輕脫離混凝土後，再合上繼續養護到拆模。

4.3 環片生產

環片在台灣是屬於成熟型商品，但在南京一帶則不同，中鼎集團與台灣專業環片公司合作，租借當地的工廠進行環片生產。以下是在當地生產環片的特殊經驗：

1. 鋼模

鋼模是委託台灣公司製作，以正式報關途經運抵南京。中國大陸對於新技術有免稅優待，但是必須保留鋼模 5 年不得拆解。因此，本鋼模目前尚存放在大陸的工廠內。

2. 抗滲要求

中國大陸對於混凝土品質有抗滲的要求，依據招標文件規定環片的抗滲壓力應不小於隧道埋設深 2-3 倍，且不小於 $0.8\text{Mpa}(8\text{kg}/\text{cm}^2)$ 。本工程長江多年高水位至隧道底部最長距離 62.5m，抗滲壓力為 $12.5\text{--}18.75\text{kg}/\text{cm}^2$ ，最後監理單位強烈要求採用抗滲壓力 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 。即依據大陸國家標準規範 GBJ82-85 普通混凝土長期性能耐久性能試驗方法抗滲檢測，2 小時之滲漏線不得超過環片厚度的 1/3(即 $1/3 \times 30 = 10\text{CM}$)

3. 混凝土強度

環片設計時混凝土強度採用歐美慣用的 28 天強度 $f_c' = 350\text{kg}/\text{cm}^2$ ，進行分析設計。但此一表示方式與大陸不同，其混凝土標號採 Cxx 表示，例如 C55 即表示，長寬高各為 15cm 的立方體抗壓強度為 $550\text{kg}/\text{cm}^2$ 。依據歐盟規範 EN206 的換算公式，圓柱體(直徑 15cm，高 30cm)試驗 $f_c' = 0.8 \times$ 立方體(長、寬、高為 15cm)試驗強度。因此，採用 C45 混凝土即可符合 $f_c' = 350\text{kg}/\text{cm}^2$ 的要求，但監理單位卻要求採用混凝土強度標準值軸心抗壓為 35.5MPa 之 C55 混凝土(混凝土結構設計規範 GB50010-2002)進行環片生產。

4.4 地面操作系統及遠端監視系統

本工程採用地面操作控制系統，潛盾機操作人員可於地面辦公室，藉由即時螢幕及信息傳送系統，立即掌握潛盾機各項參數值，而在良好的工作環境下，以降低發生誤判的機率，潛盾機操作人員並可隨時與工務主管討論施工情況提高工程施工的把握度，且遠端監視系統與潛盾機製造商之服務系統保持連繫，隨時監控潛盾機施工狀況，其優點如下所述。地面操作系統及遠端監視系統架構如圖 9 所示。

1. 掘進中之潛盾機發生異常時，潛盾機製造商經由電話回線即可進行異常原因之調查，測試以及直接進行軟體程式之修改或維修作業，可以節省時效。
2. 透過上述監測與維修作業，除了可在最短時間內將潛盾機故障予以排除外，尚可減少因此而產生之施工延宕與維修費用支出。
3. 所有掘進記錄全部記錄於施工現場之電腦中。必要時製造商可隨時於其母公司調閱過去之紀錄檔，進行掘進功能分析或異常原因之調查，以遠距方式提供服務。
4. 依照施工條件之變更，也可經由電話線從遠距直接施行『施工參數』與『潛盾機操控軟體程式』之變更作業。
5. 可依照使用者之需求，經由本遠端遙控監測系統提供最適合使用者所需的機械條件之設定與變更作業。

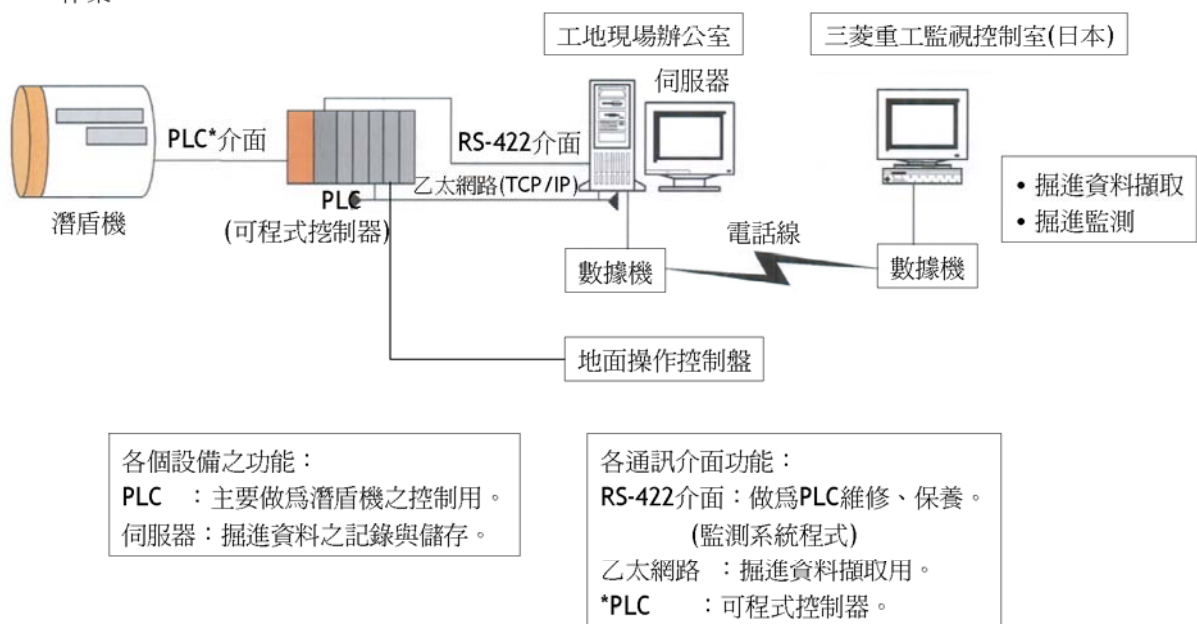


圖 9 地面操作系統及遠端監視系統架構

4.5 潛盾施工風險分析及因應策略

由於大陸潛盾經驗尚不普遍，有經驗的工班、後勤設備支援也有限，加以地質風險甚高，所以中鼎集團特別於施工前即針對潛盾施工可能引發之潛在風險進行危害程度評估及災害發生前之現象及預警判別方式進行檢討，擬定處理方案以供現場施工人員參考。處理方案包括事故預防方法及緊急處理對策，並研擬人員、機具動員進場計畫及備妥緊急狀態所須之材料。潛在風險分析與評估包括：

- 出發段到達段鏡面湧水
- 出現有害氣體
- 長江大堤沈陷
- 遭遇障礙物(流木、卵石…)
- 潛盾機盾尾滲漏
- 長江汛期或豪雨造成工區淹水
- 遭遇孔穴
- 切刀盤損壞

4.6 實際遭遇問題及處理方法

本工程施工過程中最主要的問題仍發生在設備及操作部份，分別是盾尾部漏水及排泥系統經常性阻塞，盾尾部在高水壓下的漏水狀況，較為驚險，以克服方式是即時補充油灰加以控制，而排泥系統經常性阻塞則是影響工期的主要因素，阻塞位置包括：

- 破碎機內，曾清出 50cm×20cm×20cm 石塊與黏土的混合硬塊。
- 分流器內，曾清出 23.5cm×15cm×10cm 石頭。
- 泵浦內，曾清出 13.8cm×10.5cm×5.0cm 石頭。
- 彎管處，曾被石塊磨穿約硬幣大小的孔。

為使阻塞可以順利排出乃於現場備妥充足的相關零組件，且現場工班也經充份訓練，可在短時間內迅速排除阻塞及故障。

4.7 潛盾隧道施工

發進工作井 2002 年 8 月 25 日完成後，即著手進行潛盾隧道施工。10 月 14 日完成 101 環初期掘進後，進行設備轉換於 2003 年 7 月 19 日全線貫通，隧道施築進度詳圖 10(各階段之施工進度及施工參數)說明如下：

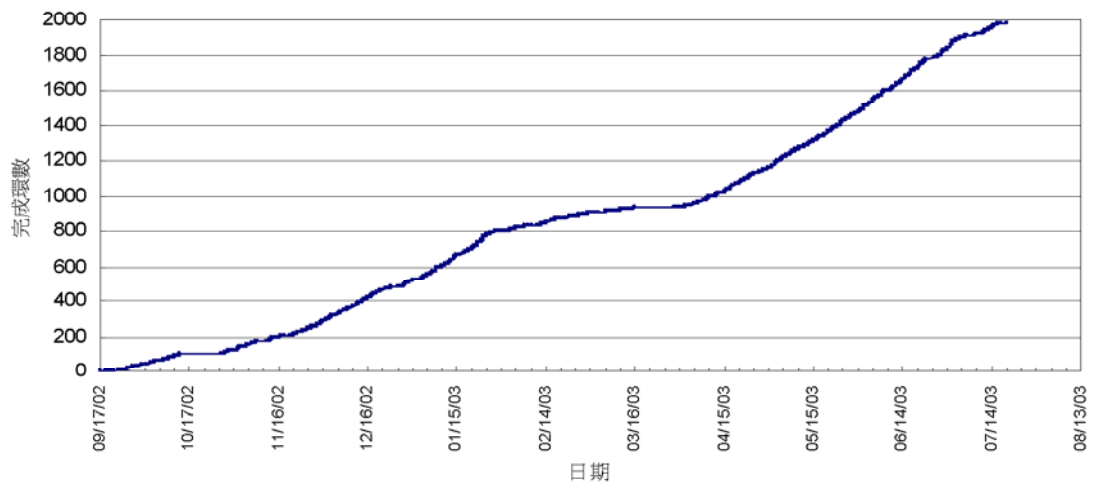


圖 10 三江口潛盾隧道施築進度

- 初期掘進：2002年9月8日-10月14日掘進101環，平均2.8m/day
- 一般土層主要掘進：2002年10月30日-2003年1月26日，掘進680環，平均7.6m/day。
- 卵礫石層主要掘進：2003年月26日-2003年4月9日，掘進194環，平均2.6m/day
- 岩盤主要掘進：2003年4月9日-2003年7月17日，掘進1005環，平均10.1m/day。

依據圖 11 潛盾施工紀錄顯示，潛盾施工於 4 月通過隧道中段時盾首最大水壓力達 0.573Mpa(5.73kg/cm²；11 月-4 月為長江低水位，7-8 月為長江高水位)。千斤頂速度於一般土層約 40mm/min。卵礫石層平均約 10mm/min，岩盤為 15-35mm/min。

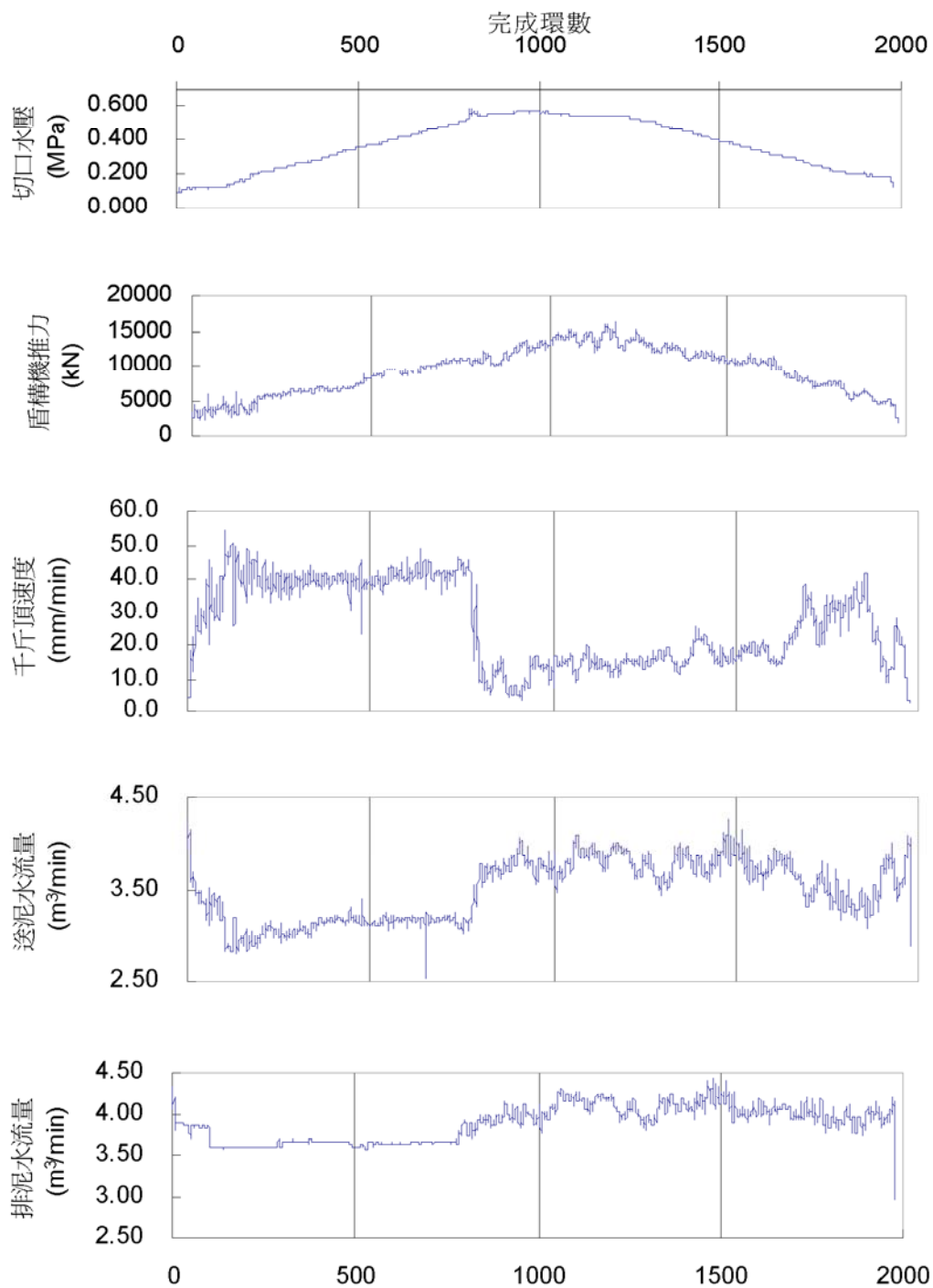


圖 11 施工紀錄

五、結語

中鼎集團已順利貫通穿越長江的第一條隧道，並從中取得技術、制度及管理等各方面的經驗。兩岸的潛盾隧道工程技術，正處於快速發展期，工程市場合作及技術交流更顯重要。日後，會有更多的隧道穿越長江及黃河，相信中鼎的經驗能有助於未來的隧道工程。

參考文獻

1. 西氣東輸工程通過長江三江口方案研究”工程質勘察報告”中國石油天然氣管道工程有限公司。
2. 西氣東輸管道工程長江南京三江口盾構法隧道工程標第二卷”技術建議及施工技術方案”。
3. 西氣東輸管道工程長江南京三江口盾構法隧道工程”設計及施工總承包招標文件”。