

< 案例 5.18 >

新莊線 CK570H 區段標多條隧道交叉重疊之規劃設計

林金成¹ 胡庭豪² 陳俊宏³ 朱旭⁴ 冀樹勇⁵

1 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

2 中興工程顧問股份有限公司眾運部協理

3 臺北市政府捷運局科長

4 臺北市政府捷運局副局長

5 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

一、工程概述

捷運新莊線 CK570H 區域標施工範圍中，新莊線潛盾隧道部分南起臺北市羅斯福路二段與杭州南路二段交會口之新店線古亭站 (O15/G10) 東北端，北行沿杭州南路東轉至信義路，經金山南路至麗水街附近之東門站 (O14/R10) 西端為止，全長約 1.3km。信義線潛盾隧道部分則南起羅斯福路一段與寧波東街交會口，新店線中正紀念堂站 (G11/R11) 東南端，路線往東再轉東北方，穿越金華街、愛國東路後，東轉沿信義路至東門站 (O14/R10) 西側止，全長約 1.2km。潛盾隧道規劃設計在中正國中旁的杭州南路下方交叉重疊施工，其相鄰隧道最接近處約 3m，為國內罕見在狹小區域進行多條隧道交疊近接施工案例，如圖 1 所示。

本區段標內除施作捷運工程外，另外還有兩項由臺北市政府工務局新工處負責設計之共同管道工程：(1) 隧道段共同管道標 (IKVX01 標) 是愛國東路及杭州南路口至

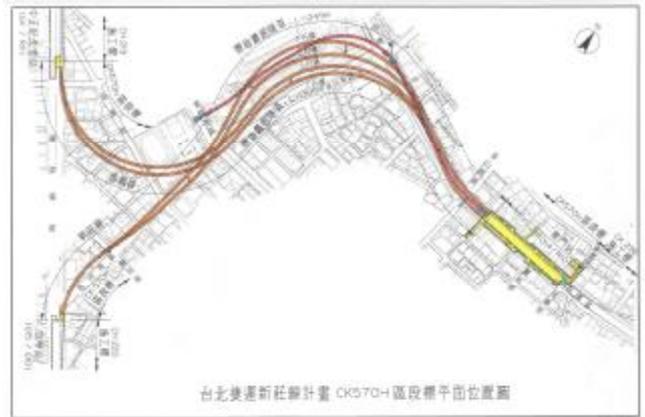


圖 1 CK570H 區段標工程範圍圖

捷運東門站 (O14/R10) 西側，外徑 540cm、長約 822m 之潛盾隧道，連接設施及自杭州南路至東門站 (O14/R10) 道路兩側約 755m 之電纜溝；(2) 明挖段共同管道標 (IKVX02 標) 是捷運東門站 (O14/R10) 上方之共同管道，總長約 204m，含長約 129m、斷面 560cm×385cm 之二孔箱涵，及二個特殊部 (地下兩層結構)，另有二處預留長約 432m 之潛盾工作井電纜溝。在此會對共同管道特別敘述原因是，其隧道不但深度比捷運隧道淺並與捷運隧道也有交叉重疊段，故捷運隧道掘進亦須將此部分考量在

內。

本文從捷運系統路網規劃需求說明捷運四條隧道交會之成因，並完整說明從規劃、分析、設計、施工到施工管理過程之考量因素與成果，希藉由本文之探討，能獲國內工程先進指教，讓工程順遂進行，並將此難得的案例經驗與國內工程界分享。

二、設計與施工之問題點

2.1 線形規劃評估

如圖 2 所示，原規劃案 CK570H 區段標之鑽掘隧道為新莊線(橘線)東門站(O14/R10)至古亭站(O15/G10)間之上、下行隧道與信義線(紅線)東門站(O14/R10)至中正紀念堂站(G11/R11)間之上、下行隧道，共計四條單向鑽掘隧道，內徑為 5.6m，將採潛盾工法施工。其中，新莊線隧道間並設有聯絡通道 3 座。而信義線隧道間並設有聯絡通道 2 座。

原規劃方案穿越建物共計 119 棟，分別為信義線潛盾隧道地下穿越建物 85 棟，新莊線潛盾隧道地下穿越建物 34 棟。原規劃路線方案雖係符合工程設計標準與營運需求之線形規劃，惟潛盾隧道地下穿越民房範圍較大，民眾抗爭激烈致使推行上遭遇到極大困難。

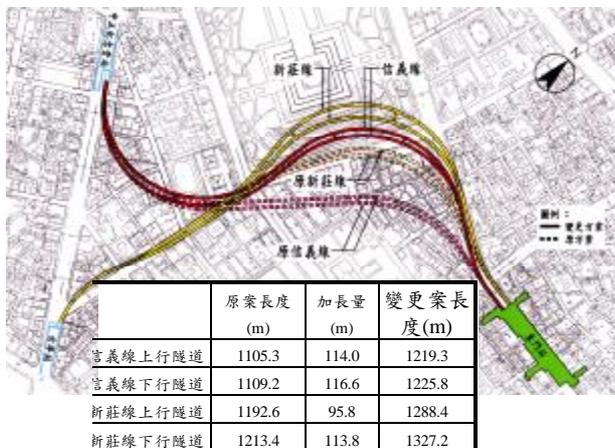


圖 2 新莊線 CK570H 區段標原規劃與調整後隧道線形方案平面圖

經進一步收集到中正紀念堂園區內的建築、基礎等相關資料，並考量採納民眾之建議，若能使用更多中正紀念堂園區空地下方土地、隧道間淨距拉近、線形上相關限制條件用到極限(最小轉彎半徑 $R=200m$)，以及對應所衍生出來之設計施工上的問題，可透過技術上配套方法來設法解決等之前題下，以大幅減少地下穿越建物數量為優先努力目標，並期降低對建物影響及儘量避免新增潛盾隧道地下穿越民宅之調整原則。最終調整出較佳之線形方案，如圖二所示。此建議案在最小曲率半徑 $R=200m$ 限制下，已大幅地減少了信義線與新莊線潛盾隧道地下穿越建物數量，地下穿越棟數已從 119 棟降至 42 棟，分別為新莊線 16 棟及信義線 26 棟。

建議案由於較原案已大幅減少地下穿越民房數量，共計 77 棟(減少率為 64.7%)。然為避免穿越建物，導致部分隧道距離過近，增高了隧道結構受行為複雜度以及施工上之困難與風險性；又因隧道路線調整及加長衍生出隧道通風、緊急發電機容量、月台門壓力增大、聯絡通道增設、聯絡通道高差加大、集水井設置位置及與共同管道衝突協調等問題。基本上經初步評估技術上仍可設法予以解決，考量捷運局當時所遭遇到之阻力，本建議案確為一較佳解決方案。

2.2 數值分析

本文主要針對 CK570H 標捷運四條重疊隧道工程，為了解隧道近接施工之力學行為與研擬適當之地盤灌漿改良對策及評估其成效，因此，設計階段進行精細的三維數值分析，以及施工階段之變更灌漿改良分析，過程說明如下：

2.2.1 三維模擬施工狀況

交叉段之潛盾隧道其分析模擬狀況包含：

(a) 狀況一：地盤未進行改

(b) 狀況二：地盤進行改良-----改良範圍如圖 3 所示。

考慮隧道工進之工率與延時，於分析區域

內各隧道開挖工進並未重疊且模擬順序採：信義線下行線開挖、信義線上行線開挖、新莊線下行線開挖、新莊線上行線開挖之次序。

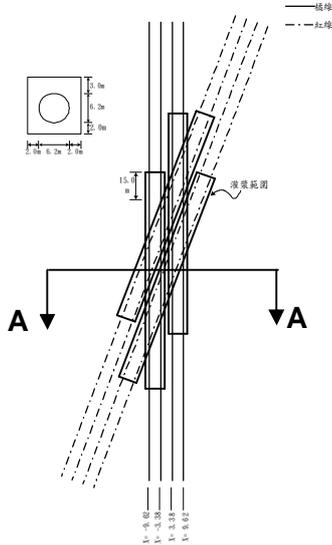


圖 3 三維分析模擬交叉區灌漿改良範圍示意圖

2.2.2 三維分析模式

本項分析採用 **FLAC3D** 分析程式辦理。其分析假設與模擬之程序如下所述：

(i) 現地應力

本分析採垂直覆土壓力 $s_v = rH$ 及水平靜止土壓力 $s_H = K_0 s'_v + g_w H_w$ ，其中 K_0 由羅斯福路至信義路新生南路口地質鑽探資料所得值約為 **0.47**。

(ii) 地下水位

依地質鑽探與試驗工作報告之地下水位觀測結果，分析之地下水位深度在地表下 **2.5m** 處。

(iii) 地表荷重

鄰近建築物之地表荷重採最小設計荷重為 **5T/m²**。

(iv) 開挖與支撐模擬

隧道採分段開挖模擬，並考慮前進面之土壓平衡，施加 **1.1** 倍水平應力於前進面，環片間隙影響採當開挖頂拱收斂 **7cm** 後架設支撐環片。

2.2.3 分析參數

(i) 土層參數

根據隧道交叉段之土層分佈及特性資料，工址土層分為 **6** 個層次為黏土與砂土之互層及礫石層。

(ii) 支撐環片參數

根據捷運線之隧道支撐環片設計，支撐環片厚度為 **25cm** (襯砌寬度為 **1.0m**，襯砌混凝土強度 **45N/mm²**)，襯砌之彎曲勁度依 **Muir Wood(1975)** 定義為 **EI_e**。其結構參數之決定如下：

$$E = 4700 \sqrt{fc'} = 3.15 \times 10^4 \text{ (MPa)}$$

$$= 3.15 \times 10^7 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (1)$$

$$A = 0.25 \text{ m}^2/\text{m} \quad (2)$$

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 I$$

$$= 9.53 \times 10^{-4} \text{ m}^4/\text{m} \quad (3)$$

其中 **I_j**：襯砌環片接頭處之慣性矩。

N：每一環之接頭數目。

I：環片全斷面之慣性矩。

(iii) 交叉段灌漿處理

地盤改良成效依日本高壓灌漿協會建議之改良體設計基準強度，其單軸壓縮強度為 **20 kgf/cm²**；彈性係數為 **2000 kgf/cm²**。

綜合上述說明，於數值分析中採有效應力參數，分析之參數如表一所示。

表 1 土層及環片參數綜合表

	深度 (m)	土層分類	單位重 T/m ³	摩擦角 deg.	凝聚力 T/m ²	變形模數 T/m ²
土層參數	0.0~5.0	CL	1.92	30.0	0.0	1000
	5.0~16.0	SM	2.02	34.0	0.0	1500
	16.0~19.0	CL	1.92	32.0	0.0	1900
	19.0~30.0	SM	1.98	34.0	0.0	2500
	30.0~35.0	CL	1.95	35.0	0.0	3600
	35.0~45.0	ML	1.95	34.0	0.0	4000
	45.0~50.0	GRAV.	2.20	42.0	0.0	11500
灌漿改良		灌漿		-	400	20000
支撐環片	實際環片厚度		等效環片厚度		彈性模數	
	25 cm		22.5 cm I _e =9.53 × 10 ⁻⁴ m ⁴ /m		3.17 × 10 ⁶ T/m ²	

2.2.4 分析結果

針對狀況一、二捷運潛盾隧道開挖引起信義線下行線隧道變位及地表沉陷結果如表 2 所示，四條捷運隧道開挖後，地表沈陷變位分佈分別如圖 4 及圖 5 所示。由分析結果顯示，當捷運潛盾隧道開挖，地盤未進行灌漿改良，交叉段地表最大沈陷約為 5.7cm，而當地盤進行灌漿改良後，潛盾隧道開挖交叉段灌漿範圍內之地表沈陷則約降為 1.6cm 左右。改良後之地表沉陷已低於施工技術規範要求的 35mm 範圍內，有效降低對鄰近結構物之影響。

另就分析之兩種狀況，針對圖 3 中交叉段之 A-A 剖面位置而言，於四條隧道開挖完成後地表總沉陷凹槽分別如圖 6 及圖 7 所示。結果顯示，當地盤灌漿改良處理後開挖，則地表沉陷降低至僅約 1.6cm 且差異沉陷造成之角變量小於 1/500，可符合臺北捷運土木工程設計手冊(CEDM) 之規定，而地盤漏失量亦約降低為 0.35(m³/m)，可見地盤灌漿改良可有效降低地表沉陷並確保隧道施工與鄰房結構之安全。

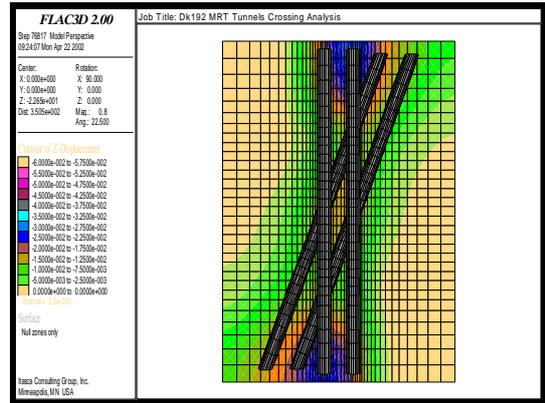


圖 5 交會區隧道開挖地表沉陷分布(地盤改良)

表 2 隧道變位與地表沉陷結果

隧道開挖		RD 開挖	RU 開挖	OD 開挖	OU 通過交叉段
隧道變位 (cm)					
狀況一 地盤 沉陷 改良	地表最大沉陷	1.28	2.8	4.7	5.7
	RD 頂拱沉陷	7.7	8.2	8.1	8.1
	RU 頂拱沉陷		8.1	7.9	8.2
	OD 頂拱沉陷			8.3	8.4
	OU 頂拱沉陷				8.6
狀況二 地盤 沉陷 改良 後	地表最大沉陷 (灌漿區)	0.5	1.1	1.4	1.6
	RD 頂拱沉陷	2.5	2.5	2.5	3.2
	RU 頂拱沉陷		2.8	2.7	2.9
	OD 頂拱沉陷			2.6	2.9
	OU 頂拱沉陷				3.0

* 信義線下行線 (RD)、信義線上行線 (RU)、新莊線下行線 (OD)、新莊線上行線 (OU)

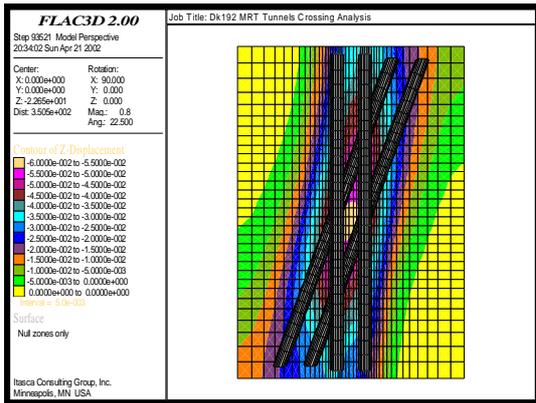


圖 4 交會區隧道開挖地表沉陷分布(無地盤改良)

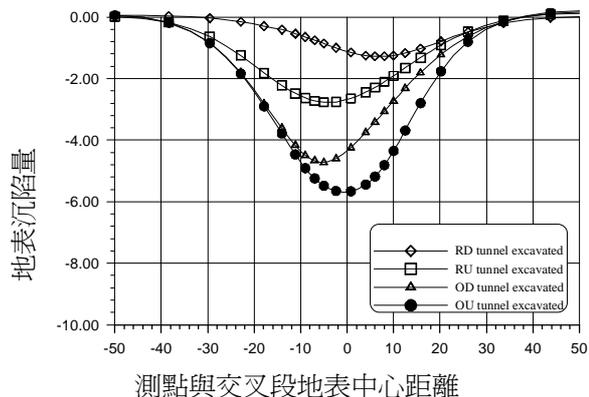
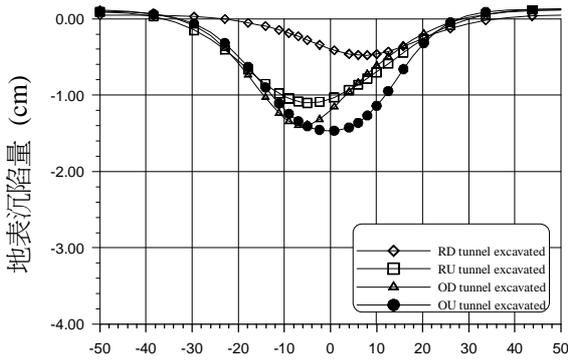


圖 6 A-A 剖面地表沉陷槽圖(無地盤改良)



測點與交叉段地表中心距離
圖 7 A-A 剖面地表沉陷槽圖(地盤改良)

而針對於交叉段區信義線下行線潛盾隧道環片應力(軸力及彎矩)於各階段隧道開挖之變化加以探討，其結果如表三所示。

表三 交叉段信義線下行線支撐環片應力分析結果

狀況	若無地盤改良	信義線下行線交叉段環片彎矩 (kN-m)		信義線下行線交叉段環片軸力 (kN)	
		頂拱	側壁	頂拱	側壁
一	RD 開挖	161.0	93.0	1417	1811
	RU通過交叉段	162.8	94.2	1506	1934
	OD通過交叉段	166.5	97.8	1503	1933
	OU通過交叉段	119.1	68.2	1281	1607
二	地盤改良後				
	RD 開挖	123.6	68.7	1410	1828
	RU進入交叉段	121.4	62.0	1472	1880
	OD通過交叉段	125.5	67.5	1457	1872
	OU通過交叉段	82.8	36.1	1372	1661

結果顯示當捷運潛盾隧道開挖，地盤未進行灌漿改良，信義線下行線交叉段環片軸力最大約為 **1934kN**，彎矩約為 **166kN-m**；而當地盤進行灌漿改良，分析結果顯示信義線下行線交叉段環片軸力最大僅約為 **1880kN** 左右，彎矩約為 **125kN-m**。

分析結果顯示地盤改良對降低地表沈陷與環片內之彎矩頗具成效。

2.2.5 灌漿變更設計分析

於施工階段，原灌漿方案依據施工廠商之施工經驗，考量隧道開挖面之全斷面地盤改

良，雖可增加地盤之穩定性及降低隧道兩兩之間之相互擾動，但為減小隧道施工對地盤之影響、降低切削盤之耙齒(**drag-bit**)受損、降低鑽掘所需推進力及提高鑽掘施工效率，因此採用如圖 8 之框型斷面做為本標堆疊式隧道近接段之地盤改良斷面，並以此斷面為設計條件進行二維之數值模擬分析。

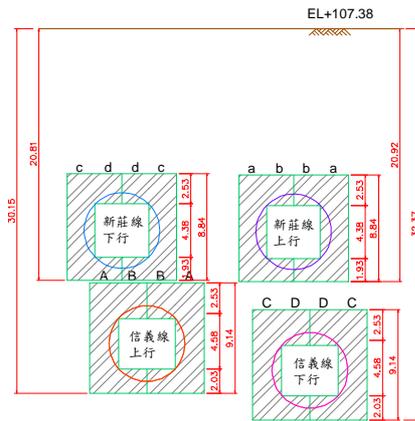


圖 8 四條交會區地盤改良斷面圖

經分析後於地盤改良狀態，四條潛盾隧道開挖後襯砌環片之軸力，最先開挖之信義線下行隧道最大軸力值最大，達 **1.717MN**，引致襯砌應力值為 **6.87MPa**，最後開挖之新莊線上行隧道最大軸力值最小，為 **6.37MN**，引致襯砌應力值為 **3.21MPa**。分析結果顯示，由軸力引致之襯砌壓應力皆遠小於其抗壓強度值。另外最先開挖之信義線下行隧道最大彎矩值為 **280.4kN-m**，引致襯砌應力為最大值為 **26.92MPa**；最後開挖之新莊線下行隧道最大彎矩值為 **115.1kN-m**，引致襯砌應力為最大值為 **11.06MPa**。由彎矩引致之襯砌應力亦小於其強度值，且由軸力與彎矩兩者引致之襯砌應力之合仍小於其強度值。

另分析結果顯示，地表沉陷最大值僅為 **12.80mm**，地表最大沉陷仍在施工規範要求的範圍內。綜合分析結果顯示，已改良方案之支撐應力及地表沉陷皆較未改良方案數值減少許多，且地表沉陷量亦在施工技術規範要求的 **35mm** 範圍內，顯示地盤改良對降低地表沈陷與環片內之彎矩頗具成效。而變更

之地盤改良方案對交叉道隧道開挖仍具有安全性及可行性。引此 CK570H 標於實際施工時採用如圖 8 之框型斷面做為本標堆疊式隧道近接段之地盤改良斷面。

三、隧道施工與線形控制

本工程施工最為複雜也是最大特色之處在於四條隧道交會區段，交會區域及斷面分別如圖 9 及圖 10 所示。為降低相近隧道間施工之影響，以達到保護先行隧道之目的，隧道施工順序為：位於四條交會區下方之信義線下行線優先鑽掘通過，再由信義線上行線鑽掘通過後，再由位於四條交會區上方之新莊線下行線鑽掘通過，最後為新莊線上行線鑽掘施工。（參考圖 11）

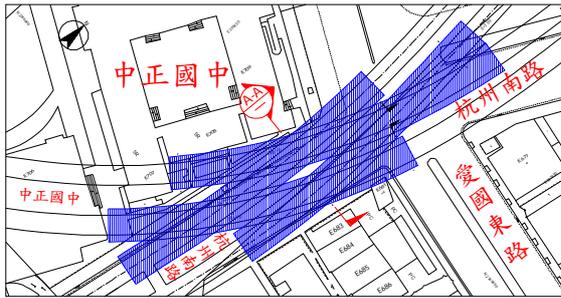


圖 9 四條隧道交會區位置

3.1 線形控制

由於本區段標潛盾隧道其間或堆疊或交錯並行，為確保潛盾隧道掘進中不偏離設計路線容許誤差之外，本標於潛盾機內部裝置高精度測量儀器，運用潛盾隧道掘進綜合管理系統(Total Station)，除可自動追蹤測量潛盾機目前於設計線形之位置及連續性的量測出其方位、高程、時間等相關數據，利用整合潛盾機操作時之各種資訊處理，更可透過顯示器畫面掌握感測土壓、推力、推伸速度等，以減輕現場工程師之作業量。另為確保潛盾機內部資料之正確性，仍於前進若干環或潛盾施工作業完成後，以人為進行潛盾機之方向檢校測量，以期迅速、有效管理施工品質。

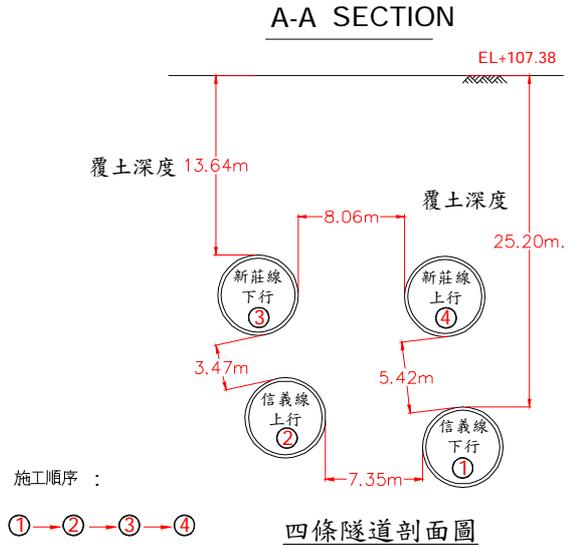


圖 10 四條隧道剖面圖

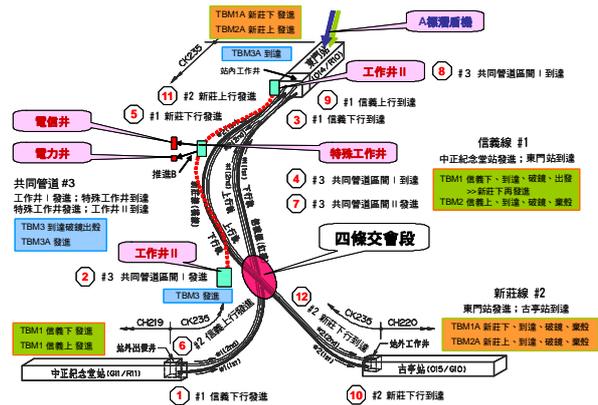


圖 11 CK570H 區段標多條隧道施工順序示意

3.2 施工注意要點

為保護建物避免沉陷量過大，於四條隧道交會區實施大範圍之地盤改良，不僅可減少四條隧道交會區地表之沉陷量，亦同時保護先行已施作之隧道，避免較晚施作之隧道，因開挖解壓及可能之施工控制不當，影響已先行完成之隧道而增加週圍建物之沉陷量，造成已完成隧道之環片襯砌損壞及隧道結構位移…等不利之情況發生。其施工管理應注意以下要點：

(a) 潛盾機鑽掘經過此區時，需特別注意建物及地表之沉陷量。而區域大範圍之地

盤改良亦將降低潛盾機掘進之速度及切刃刀齒較易受損。

(b) 新莊線隧道鑽掘通過(或接近)已完成之信義線隧道上方時，對下方隧道採取適當之支撐保護措施(參考圖 12)。

(c) 下方隧道鑽掘通過交會區段後，位於上方之隧道才可鑽掘前進，否則先行隧道若因施工不當造成損害，將造成整體潛盾工程完成時間之延誤。因此，隧道鑽掘通過此區之潛盾施工管理應更加嚴謹，而先行潛盾隧道掘進管理實績可以反映在後行潛盾隧道掘進管理，即可做為判斷基準。

(d) 施工上須注意當後行隧道在掘進時，需利用監測系統掌握對已先行隧道之影響及周邊地盤變化之狀況，再與預測值作比對，並以回饋的方式執行後續之管理，以達到隨時掌握現場狀況之目的。

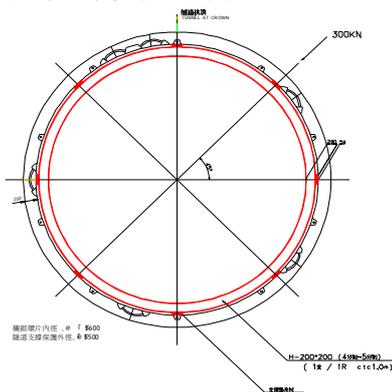


圖 12 先行下方隧道支撐保護措施

3.3 地盤改良

捷運新莊線 CK570H 區段標東門站目前正在執行的工程有車站連續壁工程、潛盾隧道鑽掘及地盤改良工程，因本標有四條隧道，且另有共同管道標隧道，交會段其複雜性及施工困難度均較高，尤其施工時之安全性，更需審慎處理，為能克服本路段之施工問題，必須進行該路段之地盤改良作業，使得隧道能在較穩定之地盤條件下鑽掘施工，以降低對地盤之擾動，並可降低各隧道間之相互影響及各隧道施工對地表及鄰近建物之影響程度。故地盤改良施工區間非常廣泛，除

明挖覆蓋段建物保護及工作井封底灌漿外，潛盾隧道總長約 6km，地盤改良區約 700m，占總長度約 12%。施工廠商採用之地盤改良工法可分為：高壓噴射灌漿、化學灌漿和滲透灌漿等三類。以強化土壤強度及不透水性，保障施工期間土壤的穩定度，進而防止鄰近結構物之沉陷及損壞，達到保護建物之效果。

台灣目前潛盾隧道之地盤改良以採用 JSG 高壓噴射工法(二重管)居多，惟 JSG 地盤改良於深度超過 25M 以上時，恐較無法期待其改良效果，本標之地盤改良深度最深約 41m，而四條交會段之地盤改良深度亦達到約 32m，故 JSG 工法不適用於本區段標。在考量地盤改良效果、施工精度及施工時程下，本區段標之地盤改良決定採用較先進之 RJP 高壓噴射工法施作。

地盤改良採用 RJP 高壓噴射工法施作，係利用三重管切削鑽孔達到所定深度，從前端的上部利用壓力 200kg/cm² 之水和空氣合併噴射出(參考圖 13)，並且進行補助切削，同時從前端下部使用壓力 400kg/cm² 之水泥漿和空氣合併進行高壓噴射而將地盤切削攪拌使其形成改良體，以增加高壓水泥漿與地層之混合膠結性，以增加地盤之強度及水密性。(RJP 施作方式參考照片 1)

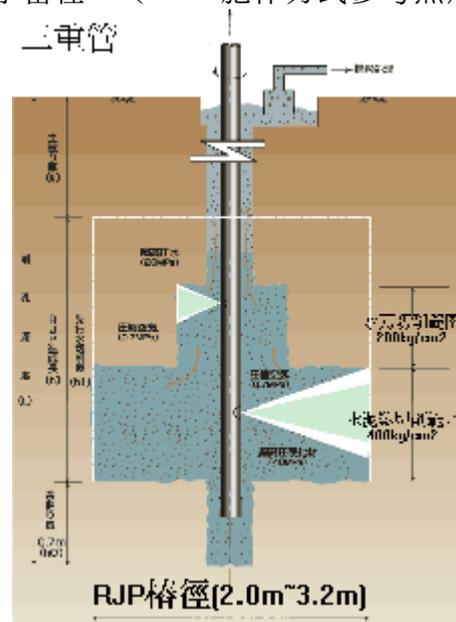


圖 13 RJP 地盤改良示意圖

本計畫採用框型斷面作為四條隧道交會處之地盤改良斷面，改良範圍里程分別為新莊上行線 0k+598~0k+695、新莊下行線 0k+563~0k+658、信義上行線 0k+825~0k+935、信義下行線 0k+842~0k+938。(參考圖 14)



照片 1 四條隧道交會段地盤改良

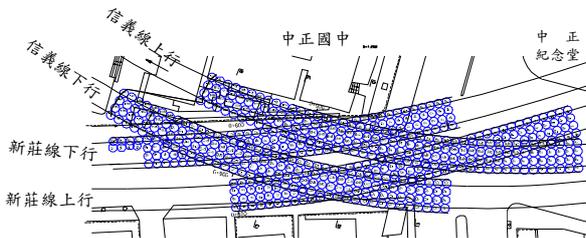


圖 14 四條隧道交會區地盤改良範圍示意圖

3.4 建物沉陷分析

為避免因潛盾施工產生鄰損問題，特於施工前評估施工時所可能引起之鄰近建物沉陷變形問題，並檢討其是否在容許值內，使總沉陷量符合建物保護基礎沉陷控制準則，據以決定建物保護工法。針對各鄰近建物斷面進行分析模擬，其分析成果說明如下：

(a) 四條隧道交會段經高壓噴射地盤改良，潛盾掘進通過後，依分析地表沉陷最大僅約 12mm，可達建物保護之目的。

(b) 四條隧道交會段為減少隧道施工之互制行為，而進行之高壓噴射地盤改良，亦同時提供最佳之沉陷控制。而同步背填灌漿與二次注入灌漿，可減少初期之建物沉陷量

及潛盾通過後之繼續沉陷量，使總沉陷量控制在最小程度。四條隧道交會段之二次注入灌漿範圍如圖 15 所示。

上述之沉陷評估主要依據數值分析所獲得之成果，此成果屬推估值，待施工後需再藉由監測成果回饋檢討，期能藉由回饋分析方式，於施工中作安全監控，並預測潛盾隧道施工之沉陷行為，以達保護建物安全之目的。

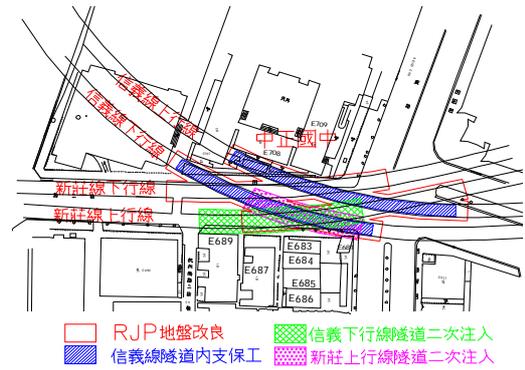


圖 15 四條隧道交會段二次注入灌漿範圍示意圖

四、結論

1. 原規劃路線雖符合工程設計標準與營運車站需求，惟潛盾隧道地下穿越民房範圍較大，遭遇激烈抗爭。後經重新調整線形，大幅減少穿越民房棟數，於符合捷運整體路網功能、營運需求、工程技術標準及施工可行性之考量，不但可大幅減少穿越戶減少民眾疑慮，有利於施工，且總工程費並無增加，具有正面意義。

2. 多條隧道近接施工，在立體交會處事前於地表施作之地盤改良對控制交會區附近地表沈陷、建物保護、隧道環片軸力及彎矩值在合理可接受程度內，頗具成效。

3. CK570H 區段標所採用之中折式潛盾機、中折角度變化最大上下為 0.5 度、左右 1.2 度，可適度減少超挖現象，另採同步背填灌漿、新式掘進測量管理軟體控制線形以及地盤施作改良灌漿的工法，以控制沉陷量並期能順利完成 CK570H 區段標多條隧道

重疊施工。

4. 多條隧道交會施工模擬分析，必須以三維數值分析方能確切掌握地盤變位行為，尤其在建物保護與地盤改良設計上，本工程之多條隧道交叉三維數值分析在工程設計上成功的扮演了輔助的角色，對於後續施工亦有相當助益。

參考文獻

- 臺北市政府捷運工程局（2002）：〈CK235 標東門站、古亭站至東門站及東門站至中正紀念堂站間隧道工程〉，合約規範，2002 年 11 月。
- 張志榮（1993）：〈赴日本研習隧道施工技術報告〉，臺北市政府捷運工程局，1993 年 3 月。
- 張志榮（1999）：〈都市捷運：規劃與設計（上）（下）〉，三民書局股份有限公司，1999 年 5 月。
- 張武訓、陳建宏（2005）：〈多條捷運潛盾隧道相接近與共同管道內襯砌施工考察報告〉，臺北市政府捷運工程局，2005 年 4 月。
- 山崎 系治、福島 健一、小林 隆、片岡 進（1996）：〈世界首次四條超近接移行隧道施工 京都市地下鐵 東西線〉，日本隧道技術協會，1996 年 2 月。
- 協立電機株式會社（2005）：〈潛盾隧道掘進綜合管理系統簡報資料〉，2005 年 7 月。
- 臺北市政府捷運工程局（2005）：〈新店線工程總報告書〉，2005 年 5 月
- Muir Wood, A.M. (1975) "The Circular Tunnel in Elastic Ground", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 1 PP. 115~127.