

台北地下鉄蘆洲線 700A 工区におけるシールドトンネル及び連絡通路の施工について

金丸 清人

正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部 シールド統括部(〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目 2-3)

台湾の首都台北では、1996 年に台北捷運(Taipei MRT:Mass Rapid Transit)最初の路線となる木柵線(新交通システム)開通を皮切りに新たな地下鉄路線が次々と建設されてきた。これらは既に市民にとって重要な交通手段となっており、現在も蘆洲線、新莊線、信義線、松山線、桃園国際機場線(空港線)が建設中である。今回報告する現在建設中の蘆洲線は本線である新莊線から分岐し、操車場・車庫である蘆洲機廠に至る全長 6.4Km の支線である。本稿は、蘆洲線 700A 工区において、2 台のシールド機を転用しながら行った総延長約 5Km のトンネル施工と、家屋の密集地で周囲の家屋変状を最小限に防止し、台湾初の圧入ケーソン工法により連絡通路を安全に施工した工事の概要を報告するものである。

キーワード：海外工事、リスク管理、シールド工法、圧入ケーソン工法

1. はじめに

台湾の首都台北では、1996 年に台北捷運 (Taipei MRT: Mass Rapid Transit) 最初の路線となる木柵線 (新交通システム) 開通を皮切りに新たな路線が次々と建設されてきた。今では、台北捷運の営業路線は 8 路線、総延長 75.8km になり市民の重要な交通手段となっている。現在も蘆洲線、新莊線、信義線、松山線、桃園国際機場線(空港線)が建設中であり、鉄道による都市交通網は充実の一途をたどっている。今回報告する現在建設中の蘆洲線は、本線である新莊線から、台北市と隣接する台北縣三重市の境界を流れる淡水河で分岐し、操車場・車庫である蘆洲機廠に至る全長 6.4Km(5 駅含む)の支線である。台北縣三重市は台北市に隣接するベッドタウンであり、経済の中心地である台北市に通勤する市民が多く、朝夕の交通渋滞と無縁の捷運開通が待たれているのが現状である。本稿は、蘆洲線 700A 工区において、2 台のシ-

ールド機を転用しながら行った総延長約 5Km のトンネル施工と、家屋の密集地で周囲の家屋変状を最小限に防止し、台湾初の圧入ケーソン工法により連絡通路を安全に施工した工事の概要を報告するものである。

2. 工事概要

(1) 台北地下鉄概要

蘆洲線及び本線である新莊線を中心とした路線図を以下に示す。特にシールドトンネルを含む各工区はすべて日本の建設会社と台湾の建設会社の共同企業体(J.V.)で現在施工されている。(太線本工区範囲 図-1 参照)



図-1 台北地下鉄路線図

(2) 700A 工区概要

工事名：

台北都會區捷運系統蘆洲線 CL700A 工區建設工事

工事場所：

中華民國(台湾)台北縣三重市

工期：

自 2001 年 12 月 4 日

至 2010 年 9 月 12 日 (3, 205 日)

工事内容：

トンネル築造工事

セグメント外径 $\phi=6,100\text{mm}$

セグメント内径 $\phi=5,600\text{mm}$

路線延長 $L=4,986\text{m}$

駅築造工事

三重國小駅幅 23m, 長さ 153m, 地下 2 層式

三和國中駅幅 21m, 長さ 305m, 地下 2 層式

共に建築内外装, 給排水設備, 空調設備, 消防設備

エレベーター, エスカレーター等を含む

ここで, 当工区の概略平面図を図-2 に示す. 本稿では 3. トンネル施工では隣接 700B 工区への到達部(一点鎖線の円部分), また 4. 連絡通路施工では CP1(二点鎖線の円部分)について報告する. なお, 駅主体構造, トンネルは基本的に幹線道路である三和路の路下に位置するが, A-3, B-3 トンネルは地上の道幅が狭いため官民境界を抵触しないよう, 三重國小駅を並進して出るとすぐに上下配置となる.(図-2 参照)

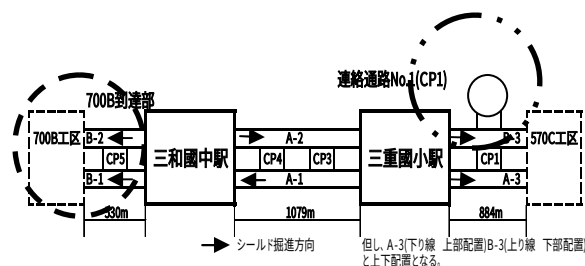


図-2 700A 工区概略平面図

(3) 土質状況

当工区は松山層, 景美層と呼ばれる沖積層が厚さ約 250m 堆積した台北盆地に位置し, 台北市と台北縣三重市, 蘆洲市の境界を流れる淡水河の側近にある. 土質状況を表-1 に示す.

表-1 土質状況

土質名	概要	層厚(m)
松山層	第6層 埋土(SF), シルト質粘土(CL)	2
	第5層 シルト質細砂(SM)	14
	第4層 シルト質粘土(CL)	13
	第3層 シルト質細砂(SM)	11
	第2層 シルト質粘土(CL), 粘土質シルト(ML)	17
	第1層 シルト質細砂(SM)	3
景美層	砂礫	60

(4) 施工環境

当工区の施工範囲である台北縣三重市の幹線道路三和路沿いには老朽化した集合住宅が密集し, 住居戸数の多い 15 階程度の集合住宅も散見される. また, 道路の交通量も多く朝晩のラッシュアワー時には日常的に交通渋滞が発生する. 特に路線内に高速道路へのインターチェンジ取り付け道路があり特に渋滞が著しいなど, 施工環境としては厳しい条件下にあった.

3. トンネル施工

(1) トンネル施工順序

海外工事では, 高価なシールド機を複数回使用することが一般的である. 本工区では 2 台のシールド

機を組み立て・解体を繰り返すことにより転用しながら掘進を行った。施工順序は表-2 に示すとおりである。隣接 700B 工区では工程上の理由から到達部連壁は築造されているが、内部が掘削されていないため連壁前面に到達したシールド機は地盤改良体内で解体し、鋼殻のみを残置し、他の装備品を再利用する必要があった。本稿では特にこの部分を報告する。(図-2 内 一点鎖線の円部分参照)

表-2 施工順序

シールド機	トンネル名	内容
シールド機A	A-1	新造機投入後A-1掘進、到達後A-2側へ転回
	A-2	転回後A-2掘進、到達後解体しA-3へ投入
	A-3	投入組立後A-3掘進、到達後鋼殻のみ残置、装備品は解体搬出
シールド機B	B-1	新造機投入、到達後鋼殻のみ残置、装備品は解体搬出しB-2へ投入
	B-2	新造鋼殻(No.1)内へ装備品再組付後B-2掘進、到達後鋼殻のみ残置、装備品は解体搬出しB-3へ投入
	B-3	新造鋼殻(No.2)内へ装備品再組付後B-3掘進、到達後鋼殻残置、装備品は解体搬出

(2) シールド機への工夫

トンネル掘削は外径φ6,240mm 泥土圧シールド機を使用した。また、掘削範囲の主体である松山層第 4 層では土質調査で多くの流木が認められた。このためシールド機への工夫として、先行カッタービットで流木を裂いて撤去出来るように、強化型先行ビット 8 個を配置し、その高さをメインビットより 50mm 高く 200mm とした。さらに、スクリーコンベアが流木で閉塞した場合に備えハッチの増設や注泥バルブ、およびマンロックを装備した。また、A シールド機の総掘進距離は 3,042m と長距離になるため、摩耗によるビット交換が不要となるように、外周先行ビット 7 個及び最外周及び外周部メインビット計 36 個には耐摩耗性に優れた E3 材を使用した。(表-3 参照)

表-3 シールド機掘削距離

シールド機	トンネル名	距離(m)
A	A-1	1,079
	A-2	1,079
	A-3	884
	計	3,042
B	B-1	530
	B-2	530
	B-3	884
	計	1,944
合計		4,986

次に、組み立て解体を繰り返すため、カッターヘッドの支持方式は極力単純なセンターシャフト方式とした。また、トンネル線形の最小曲率は R=260m であり、シールド工事に不慣れなローカルエンジニアの技量を装備で補うため中折れを装備すべきだが、構造の単純化を優先した。さらに、到達時の鋼殻周囲の裏込注入、及び前胴周辺の補足注入のために円周 7 箇所 3 列及び放射状 42 箇所の補助注入管を装備した。

(3) シールド機解体組立方法

B-1, 2 の到達時に隣接 700B 工区は、到達部分の連壁内側が工程上の理由で未掘削の状態であった。したがって、連壁外面に到達したシールド機で再利用予定のカッタービットの付いたスポークは土中で解体せざるを得ない。到達深度は GL-29.5m であり、また地下水位が高く約 0.3MPa と大きな水圧が作用するため、連壁前面には事前に地盤改良を行い、この中でシールド機で掘進し、解体を行う計画とした。(図-3 参照)

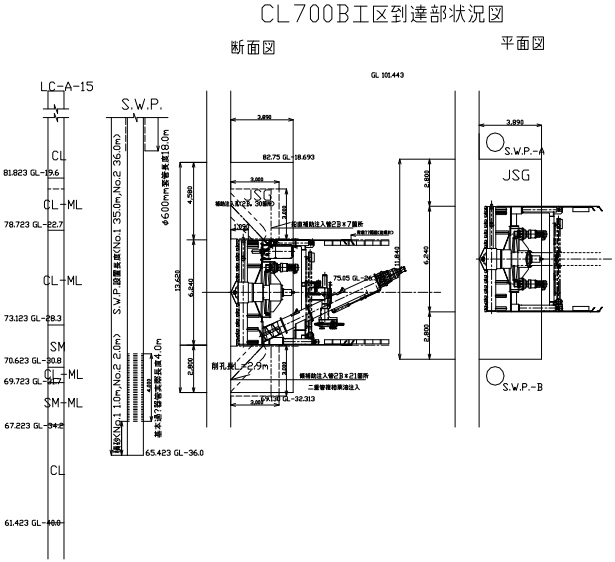


図-3 700B 工区到達部

高水圧が作用する場合、地盤改良には改良強度が大きく、置換工法のため改良品質が安定した高压噴射工法 (CJG 工法) の採用が一般的である。しかし、当時は CJG 工法が台湾では一般的ではないため、施工実績が多くかつ経済的な JSG 工法を採用した。当

該地点は幹線道路の直下であり地下埋設が非常に輻輳しているため、埋設管の切り回しなど地上路面よりの地盤改良は困難を極めた。

先端部(フィッシュテール)が到達したシールド機の鋼殻と連壁とは 1,090mm の離隔があるため、カッタスポーク外周のカタリングは残置し、かつ連壁までの範囲は[-300 を円形に加工した鋼製リングを支保工として使用し、JSG 改良体表面の肌落ちや、漏水防止を図った。なお、改良体と一体化させるため鋼製リング背面にはセメント系材料により充填を行った。

ここで重要な点は、圧力隔壁(バルクヘッド)より前面部分の解体は JSG 改良体の止水性が確認されて初めて施工可能となることである。さらに、バルクヘッドやカッタスポーク等を切断している期間、この止水性が維持されることも要求される。したがって図-4 到達フローに示すように各ステップで止水性を確認し漏水の有無を把握、問題が判明した場合、補足注入を行うこととした。次に海外特有の問題としては日本国内と比べ選択できる工法が少なく、また技術力のある専門業者も少ないため、計画時にリスク分析を綿密に行い、採用が不可欠と考えられる工法や材料は、早期計画、手配する必要があった。計画に当たり、当該国の施工技術レベルを考慮し、極力複数の専門業者で一般的に施工可能かつ施工経験が豊富な工法を選択することが必要である。もし、新工法の採用が不可避であれば、専門業者を国外より招聘する必要もある。当然のことながら上述の項目は経済性、かつ対費用効果も考慮し総合的に判断する必要もあることは言うまでもない。

(4) 補助工法

上述したフローについてあらかじめ配慮した項目は以下の通りである。

a) 補足注入

JSG 改良体の止水性に問題があった場合、補足注入を施工するが、再注入範囲は問題の原因となる改良不備部分と改良体が混在している状態なので凝結時間の差違による瞬結、緩結材が使い分けられる二重管複相注入の使用が必要である。これを事前に計

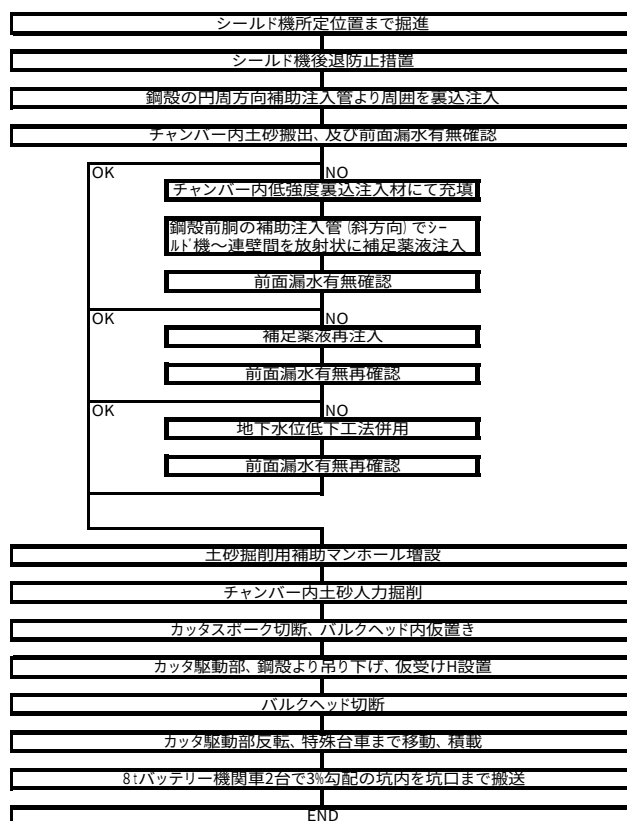


図-4 到達フロー

画、注入材及び専門業者の手配を行った。最終手段として次に述べる b) 地下水低下工法も計画するが、基本的には JSG 改良体+補足注入により可能な限り止水性の高い強固な改良体を施工することが原則である。

b) 地下水低下工法

補足注入を施工しても、漏水が認められる場合の最終手段として、2 箇所のバキュームウェルポイント(SWP 工法)を計画した。特に圧力隔壁(バルクヘッド)より前面に作業員が入りカッタスポーク等を切断する作業はシールド機と連壁間のきわめて狭い空間での作業であり、非常に危険である。この際、わずかな漏水でも崩壊に繋がる危険性が大きい。更に、24 時間連続作業でも予定工期は 14 日間必要であり、この期間止水性が保持されることが要求される。この様な困難な条件のため、シルト質細砂であっても高い揚水性能が発揮できる SWP 工法(井戸長 L=36m)を採用した。解体作業を行う揚水が必要な土層は松山層第3層であり、それより上部砂層の松山層第5層の

地下水位を不用意に低下させ、沈下等を発生させないためφ650mm 止水用ケーシング L=18.0m を鞘管として併用し、揚水範囲を限定する方法を採用した。

(5) 施工状況

地盤改良(JSG)を厳格な施工管理の下で行ったが、シールド機到達時に漏水が認められ、図-4 到達フローに従い補足注入を行った。しかし、シールド機内から既施工 JSG 改良体の不良部分を特定し補足注入するのは困難であった。複数回にわたる補足注入後も、約 4L/分の漏水がシールド機内のバルブより認められたため、地下水低下工法(SWP)の施工に踏み切った。

この結果、揚水量は 60L/分とわずかではあったが、漏水は止まり、安全な解体作業を達成した。引き続き、シールド機内で重量 46t の駆動部を反転、特殊台車に積載し 3%上がり勾配の坑口まで搬送し、新造鋼殻内へ再組立を行った。なお、揚水影響範囲は水位観測井戸の測定結果より約 46m であった。これは、事前に行った被圧地下水重力揚水計算を参考に設定した。地上建物強化観測範囲 90m 以内であり、沈下最大値は揚水井戸直上路面の 8mm であった。

4. 連絡通路施工

(1) 連絡通路概要

台北捷運では米国国家防火協会(NFPA)の基準に基づき、約 300m 毎に、トンネル坑内災害発生時に乗客を反対線トンネルに避難させるための連絡通路の設置が義務づけられている。A-3(下り線 上部配置、B-3(上り線 下部配置)の 2 本のトンネルは上下配置となることから、連絡通路も上下トンネルに沿ったシャフト状構造物と、それぞれのトンネルと連結する洞道とで構成される構造物となる。(図-2 内二点鎖線円部分参照)

(2) 当初設計及び設計変更

当初設計でシャフトの山留め壁は SECANT PILE WALL 工法と呼ばれる外形φ1,200mm の現場打ち杭を互いに 90mm ずつラップさせて円形に囲い、内部に避

難階段が設置されたシャフトを築造する設計であった。ところがトンネルが上下配置で B-3(上り線 下部配置)は GL-30m の深度となり杭長が L=44m と長い。ため鉛直精度の問題から、漏水、陥没の危険性は容易に推測できた。さらに、当初の連絡通路施工予定地では住民の反対から連絡通路の位置変更を求める声が大きくなり、代替候補地は狭隘でこの工法自体の採用が困難となった。

以上の理由から、狭隘地でもジャッキの反力調整で正確な圧入が可能であり、かつ品質の高い躯体が期待できる圧入ケーソン工法を台湾で初めて採用することに設計変更を行った。なお、それぞれのトンネルとシャフトを接続する洞道は、従来通り地盤改良体内を支保工を使用して人力掘削する方法とした。(図-5 参照)

(3) 補助工法

a) 周辺建物への変状防止

現地は幹線道路の脇道で極めて狭隘であり、特に周囲には老朽化した建物が密接しているため、それら建物に対する変状防止対策が不可欠であった。変状防止杭として鋼矢板の採用が一般的ではあるが、当時台湾では入手可能な鋼矢板長が 13m 前後であった。安全のためケーソン刃口深度である GL-30m までの杭長が必要と考え、L=13m のⅢ型鋼矢板とφ150mm マイクロパイル(心材として鉄筋使用)L=33m を抱かせて施工した。また、マイクロパイル頭部と鋼矢板は梁で連結し、かつケーソン圧入時の引き込まれ防止策として、マイクロパイルは一本おきに 3° 傾斜させた。一方、ケーソン躯体には沈設時の周面摩擦低減を図りかつ周辺地盤変状防止のため、NF シート(シート状の薄鉄板)やエア噴出口を考慮した。(図-6 参照)

b) 補足注入

トンネルとシャフトを接続する洞道は、掘削前に地盤改良が必要なので 3. トンネル施工と同様の理由で高圧噴射工法(JSG 工法)を採用した。なお、JSG はケーソン圧入に支障とならぬようにケーソン壁体

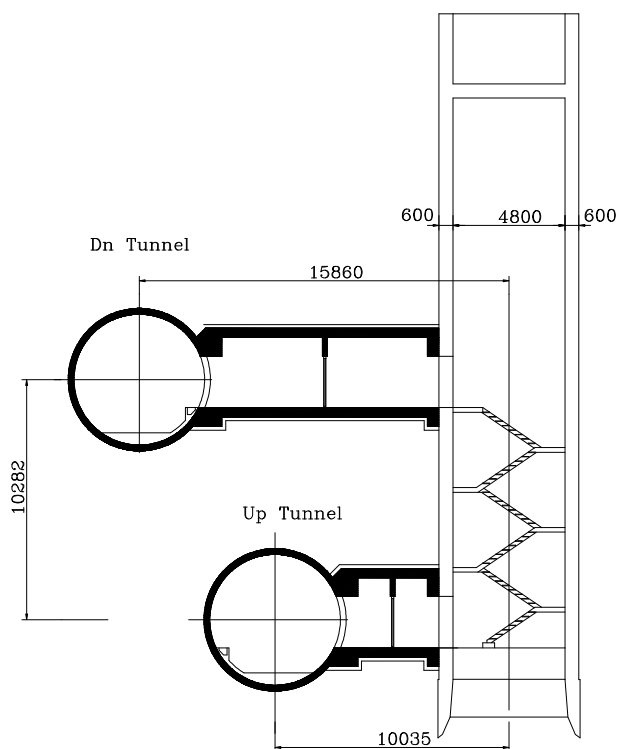


図-5 CP1 構造図

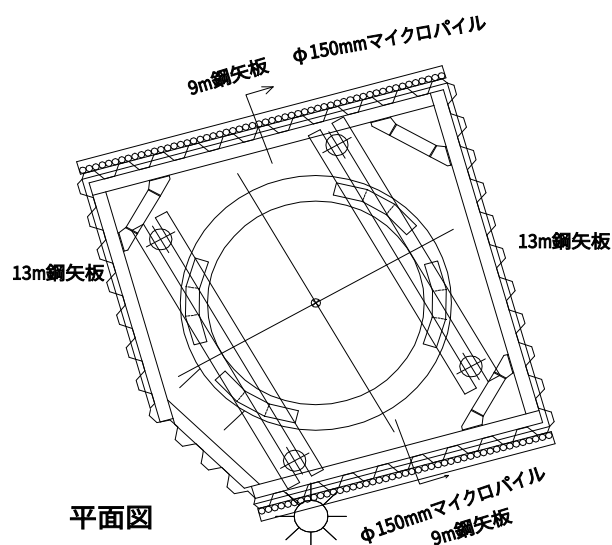


図-6 近接建物に対する変状防止措置図

前面1列は沈設が完了してから施工を行った。また、トンネル内、ケーソンシャフト内からチェックボーリング、補足注入が出来るようにケーソンには上下線各152箇所の補助注入孔を設置した。

(4) 施工状況

シャフトの圧入ケーソン施工に当たっては日本の専門業者に指導を仰ぎ、主たる油圧ジャッキ、ロッド、コントローラー、圧入主桁のみ輸入し、他の設備は現地で製作した。計画時は最大圧入力が9,523KNと試算し、3,000KN圧入ジャッキ4基を準備した。実際の総圧入力は10,380KNであった。圧入作業は順調に完了し、ケーソン偏心量は最大9.4mmと、懸念された周辺家屋にも変状は無かった。なお、刃口部分在水中コンクリートで閉塞する前に、本来ならば潜水夫にての土平落としや土砂付着有無確認が必要である。しかし、現地には経験者が居ないため、滞留しているケーソン内面の地下水に高分子沈降剤を添加し、水中ポンプで攪拌、土粒分を沈降させテレビカメラを入れ刃口付近の土砂付着程度を目視確認した。また、刃口の清掃はJSG工法の高圧噴射ノズルとH型鋼を組み合わせた簡易洗浄装置を製作、使用した。次にトンネルとシャフトを接続する洞道は、b)補足注入で述べたように補助注入孔を利用し、チェックボーリング、補足注入を繰り返し行い安全に施工を完了した。

5. おわりに

海外における建設工事は、最先端の建設技術を駆使して行われることばかりではない。むしろ、建設工事が行われる当該国の技術水準を考慮しながら、一般的で、かつ経験を有する施工業者が複数存在する工法を中心に吟味、選択することが、地味ではあるがリスク管理の大きなポイントである。また入念な検討により、新工法の採用が最適だと判断される場合でも、国外からの人的、物的応援を単に求めることだけではなく、当該国の既存技術を利用し、既成概念にとらわれない創意工夫も重要であると考えている。土木技術は人類の幸福に寄与すべきであるという本来の目的のため、経済の好不況に影響されることなく、絶え間ない国際貢献の一つとして移転されていくべきである。国際交流大使の役割を担う、若い土木技術者が今後も増えていくことを願ってやまない。