

國立交通大學
土木工程研究所
碩士論文

潛盾隧道施工遭遇卵礫石地盤引致之地
盤沉陷案例研究

**Case Study of Ground Settlement due to Shield
Tunneling in Gravelly Soils**



研究生：陳柏碩
指導教授：方永壽 博士

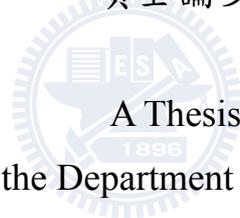
中華民國九十八年九月

潛盾隧道施工遭遇卵礫石地盤引致之地
盤沉陷案例研究

**Case Study of Ground Settlement due to Shield
Tunneling in Gravelly Soils**

研究生：陳柏碩 Student：Po-Shou Chen
指導教授：方永壽 博士 Advisor：Dr. Yung-Show Fang

國立交通大學
土木工程研究所
碩士論文



A Thesis

Submitted to the Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

in

Civil Engineering

September 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年九月

潛盾隧道施工遭遇卵礫石地盤引致之 地盤沉陷案例研究

研究生：陳柏碩

指導教授：方永壽 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

本研究蒐集國內外遭遇卵礫石地盤之潛盾隧道施工案例，探討潛盾機於高透水及高強度卵礫石地盤施工之特殊考量。依據現地監測資料評估潛盾隧道於卵礫石地盤施工引致之最大地表沉陷量 S_{max} 。本研究並探討以雙曲線模式於卵礫石層潛盾施工造成地表沉陷歷時曲線之適用性，獲得以下各項結論與建議。

- (1) 新竹新工高壓電纜線洞道工程與桃園國際機場捷運工程施工案例皆發現，潛盾機切刀轉盤嚴重磨損位置皆發生於面盤中心向外約 $2/3R$ 處，研判其原因，卵礫石受切刀盤旋轉切削掘進之影響，導致開挖面上部周圍卵礫石向下崩落，由於螺運機取土口位於切刀盤中心線之後方，崩落之卵礫石逐漸向切刀盤中心線集中，並造成切削切刀嚴重磨損。建議在日後設計切刀旋轉盤時可加入考量此特殊之切刀盤磨耗行為。
- (2) 於所蒐集之 17 個案例中，潛盾隧道施工遭遇卵礫石地盤造成之最大地表沉陷範圍僅為 11~28 mm，明顯小於 Fujita 提出潛盾機在砂土層與黏土層開挖造成之最大地表沉陷範圍。
- (3) 採用密閉式潛盾機（泥水式與土壓平衡式潛盾機）施工，本研究所蒐集 15 個案例之深徑比 (Z/D) 介於 1.17 至 3.44 間，隨著潛盾隧道深徑比 Z/D 之逐漸增加，正規化最大地表沉陷量 S_{max}/D 有逐漸減小之趨勢。這是由於當潛盾隧道位置愈深，隧道上方覆土層之拱效應愈強烈，因此開挖對隧道周

圍土體所造成的擾動，傳遞至地表面者明顯減少，因此施工導致地表沉陷量越小。此外，本研究發現開挖地盤之含卵礫石量越高，隧道直徑 D 越小，潛盾施工所導致之地表沉陷量越小。

(4) 依據密閉式潛盾機於卵礫石地盤之施工案例，本研究提出下列經驗式評估施工造成之最大地表沉陷 S_{\max} ： $(S_{\max}/D) \times 100 = 0.62 - 0.12 (Z/D)$ 。當設計者得知潛盾隧道深度 Z 與隧道直徑 D 時，可依此經驗公式初步預估在卵礫石地盤潛盾施工造成之最大地表沉陷量 S_{\max} 。沉陷量可作為評估隧道沿線建物保護設計之參考。

(5) 由國內案例之監測地表沉陷對時間資料得知，潛盾機在卵礫石地盤施工引致隧道中心線上方之地表沉陷歷時曲線，可以下列雙曲線關係 $S(t) = \frac{t}{a + bt}$ 加以模擬，其中 a 及 b 為雙曲線參數。

(6) 潛盾隧道案例之國內現地監測資料顯示，土壓平衡式潛盾機在卵礫石地盤施工造成之地表沉陷，大部分在潛盾機盾首通過後 10 天至 30 天內完成。

關鍵詞：卵礫石層、雙曲線模式、最大沉陷量、沉陷歷時曲線、潛盾隧道

Case Study of Ground Settlement due to Shield Tunneling in Gravelly Soils

Student : Po-Shou Chen

Advisor : Dr. Yung-Show Fang

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

This paper investigated the difficulties encountered during the construction of shield tunnels through gravelly soils. Case histories reported in the literature were studied. Recommendations were made regarding how to solve difficulties associated with tunneling through gravelly soils with high permeability, high stiffness and high shear strength in gravelly soils. Based on the field monitored data, this study analyzed the maximum surface settlement S_{max} above the centerline of the tunnel. The hyperbolic model was used to simulate the surface settlement-time relationship due to shield tunneling constructed. Base on this study, the following conclusions were made.

- (1) The contraction of the high-voltage cable tunneling Hsinchu industrial Park , and the mass Rapid Transit tunnel of Taoyuan international Air port were investigated for both cases tunnel was drives with a shield machines through gravelly soils, It was found that the cutter disc was seriously worn at a location $2R/3$ (R =radius) from the center of the cutter disc. It was speculated that during the rotation and pushing of the disc, the gravelly soil at the upper part of the face was cut and disturbed and dropped. The soil intake of the screw conveyor

was located right behind the centerline of the disc. The have gravel and cobble particles gradually moved toward the centerline of the disc at $2R/3$ from the center of the disc, causing the major worn away of the disc at this special position.

- (2) The maximum surface settlement measured was between 11 to 28 mm, which was much the smaller than S_{max} due tunneling in sand and clay suggested by Fujita (1982) .
- (3) It was found that the maximum surface settlement S_{max} increased with increasing tunnel diameter D . It is also found that S_{max} decreased with increasing depth Z of the tunnel centerline.
- (4) Base on the field data, an empirical relationship between the maximum surface settlement trough parameter Z/D and S_{max}/D ,. It was established as follows:
$$(S_{max}/D) \times 100 = 0.62 - 0.12 (Z/D) .$$
- (5) Field monitored data indicated that the surface settlement-time relationship induced by shield tunneling in gravelly soils can be properly described with the hyperbolic model.
- (6) Field monitored data indicated that maximum surface settlement S_{max} was reached in about 10 days to 30 days after the passage of the tunnel face.

Keywords: Gravelly Soils, Hyperbolic model, Maximum Surface Settlement, Settlement-Time Relationship, Shield Tunneling.

誌 謝

本論文之完成，首先要感謝吾師 方永壽博士平日之悉心教導。無論在研究方向或治學態度上，均給予諸多的指導及關懷，在此致上萬分之謝意。同時並感謝林志平老師、潘以文老師、廖志中老師、黃安斌老師及單信瑜老師於在學期間所給與之指導及協助。

在論文之撰寫過程中，尚須感謝中華顧問公司、中興顧問、介興/清水營造與榮民/奧村公司提供相關珍貴之施工及監測資料，使本研究能夠順利進行。研究期間，台灣世曦工程顧問公司何泰源經理、李魁士經理、吳慶輝正工程師、葉信宏正工程師、陳景功正工程師，介興營造郭乃丰副組長、陳昕詮工程師，豐順營造馬春源經理，德克皇工程公司吳敏揚工程師等人，熱心提供資料與協助，特此一併致謝。

口試期間，承蒙國立中央大學張惠文教授與中興顧問陳滄江博士給予諸多寶貴的建議與指正，使本論文更加完整，特在此致上最深的謝意。

在論文撰寫及口試期間，感謝黃聖峯同學、江奕蓁同學、徐育芬學妹、林卓民學弟、陳威廷學弟的熱心協助，在此一併致謝。

最後，將感謝在研究所階段一路支持我的親愛的父母、家人、女友玫芳和所有關心我的親友，以及所有的好友。

目錄

摘要.....	i
誌謝.....	v
目錄.....	vi
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
符號說明.....	xiii
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
1.3 論文組織.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 潛盾隧道工法之沿革.....	4
2.2 潛盾隧道工法施工原理.....	4
2.3 潛盾機型式.....	5
2.3.1 各型式潛盾機適用土層.....	6
2.3.2 卵礫石層之工程特性.....	6
2.4 潛盾施工之輔助工法.....	7
2.4.1 壓氣工法.....	7
2.4.2 地盤凍結工法.....	7
2.4.3 灌漿工法.....	8
2.4.4 降水工法.....	8
2.5 潛盾隧道施工引致地盤沉陷之原因.....	9
2.5.1 盾尾空隙閉合.....	9
2.5.2 襯砌變形.....	10
2.5.3 潛盾機蛇行或超挖.....	10
2.5.4 開挖面應力的改變.....	10
2.5.5 地下水位變化.....	11
2.6 地表沉陷歷時曲線.....	11
2.6.1 沉陷對數時間模式.....	12
2.6.2 雙曲線模式.....	12
第三章 國外卵礫石潛盾隧道施工案例.....	14
3.1 開放式潛盾機案例.....	14
3.2 泥水式潛盾機案例.....	15
3.3 土壓平衡式潛盾機案例.....	17

第四章 新竹科學園區污水下水道潛盾工程案例.....	20
4.1 竹科第二加壓站至污水處理廠隧道工程案例.....	20
4.1.1 工程概述.....	20
4.1.2 地質概況.....	21
4.1.3 掘進路線變更.....	22
4.1.4 遭遇卵礫石地盤開放型潛盾機施工.....	22
4.2 竹科三期之二放流管線潛盾案例.....	23
4.2.1 工程概述.....	23
4.2.2 地質概況.....	24
4.2.3 卵礫石地盤潛盾施工.....	25
4.3 竹科三期之三放流管線潛盾案例.....	26
4.3.1 工程概述.....	26
4.3.2 地質概況.....	27
4.3.3 卵礫石地盤潛盾施工.....	27
第五章 新竹湖口台電六輸潛盾工程案例.....	29
5.1 新工~湖北電纜線路洞道工程案例.....	29
5.1.1 工程概述.....	29
5.1.2 地質概況.....	30
5.1.3 卵礫石地盤潛盾施工.....	30
5.1.4 穿越國道高速公路下方避開障礙物.....	31
5.1.5 S 曲線隧道避開私有地.....	31
5.1.6 急曲線潛盾隧道避開鄰房.....	32
5.2 新工超高壓變電所電纜線路洞道工程案例.....	32
5.2.1 工程概述.....	32
5.2.2 地質概況.....	33
5.2.3 卵礫石地盤潛盾施工.....	33
5.2.4 切刃轉盤磨損.....	34
5.2.5 工作井施作.....	34
5.2.6 氣泡加泥工法.....	35
第六章 桃園國際機場聯外捷運系統潛盾工程案例.....	36
6.1 工程概述.....	36
6.2 地質概況.....	36
6.3 大口徑鑽孔地質調查.....	37
6.4 遭遇卵礫石潛盾機之設計考量.....	37
6.5 路面沉陷.....	38
6.6 潛盾機掘進發生異常.....	40
6.7 灌漿改良機上地盤.....	40
6.8 切刃轉盤磨損.....	41

第七章 潛盾機遭遇卵礫石之設計與施工考量.....	42
7.1 卵礫石最大粒徑調查.....	42
7.2 大顆粒卵石及巨石處理方式.....	43
7.2.1 直接排除方式.....	43
7.2.2 破碎排除方式.....	44
7.3 潛盾機切刀轉盤特殊考量.....	44
7.4 開挖面穩定處理.....	46
7.4.1 泥水式潛盾機開挖面穩定處理.....	46
7.4.2 土壓平衡式潛盾機開挖面穩定處理.....	47
7.5 輔助工法.....	47
7.5.1 灌漿工法.....	47
7.5.2 冰凍工法.....	48
7.5.3 化學藥液灌漿.....	48
第八章 卵礫石地盤潛盾隧道開挖引致之沉陷案例分析.....	49
8.1 地表最大沉陷量範圍.....	49
8.1.1 卵礫石含量對地表最大沉陷量之影響.....	50
8.2 最大地表沉陷量分析.....	51
8.2.1 隧道中心線深度對地表最大沉陷量之影響.....	51
8.2.2 隧道直徑對地表最大沉陷量之影響.....	52
8.2.3 深徑比對地表最大沉陷量之影響.....	52
第九章 地表沉陷歷時曲線與雙曲線模式.....	54
9.1 雙曲線模式介紹.....	54
9.1.1 決定雙曲線參數 a 及 b	55
9.1.2 參數 $1/a$ 之物理意義.....	56
9.1.3 參數 $1/b$ 之物理意義.....	57
9.2 以雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線.....	57
9.3 卵礫石地層地表初始沉陷速率探討.....	59
第十章 結論與建議.....	60
10.1 結論.....	60
10.2 建議.....	62
參考文獻.....	63
表.....	72
圖.....	94

表目錄

表 1-1 地表最大沉陷量之預測值	72
表 2-1 潛盾機之分類與特性	73
表 2-2 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍	74
表 2-3 潛盾機型式與適用土質、輔助工法之關係	75
表 2-4 灌漿材料之分類	75
表 2-5 雙曲線參數 a 值建議表	76
表 2-6 雙曲線參數 b 值建議表	77
表 3-1 國外卵礫石地盤開放式潛盾機施工案例	78
表 3-2 國外卵礫石地盤泥水式潛盾機施工案例	79
表 3-3 國外卵礫石地盤土壓平衡式潛盾機施工案例	80
表 3-3 國外卵礫石地盤土壓平衡式潛盾機施工案例(續).....	81
表 5-1 新工超高壓變電所隧道工程使用潛盾機規格	82
表 6-1 桃園國際機場捷運 1 號潛盾機切刀轉盤磨損統計表	83
表 7-1 國內外遭遇卵礫石潛盾施工案例	84
表 7-2 泥水加壓式(排泥管內排除方式)潛盾機之可排除最大粒徑	87
表 7-3 土壓式潛盾機(帶式螺運機)之可排除最大粒徑	87
表 8-1 開放式潛盾機遭遇卵礫石施工案例	88
表 8-2 泥水式潛盾機遭遇卵礫石施工案例	88
表 8-3 土壓平衡式潛盾機遭遇卵礫石施工案例	89
表 8-4 卵礫石地盤地表最大沉陷量建議表	91
表 9-1 潛盾隧道於卵礫石層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例	92

圖目錄

圖 1-1 潛盾機掘進所引致地盤變位之分類	94
圖 2-1 潛盾施工作業循環示意圖	95
圖 2-2 開放式潛盾機	96
圖 2-3 擠壓式潛盾機	97
圖 2-4 土壓平衡式潛盾機	98
圖 2-5 加泥土壓平衡式潛盾機	99
圖 2-6 泥水式潛盾機	100
圖 2-7 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍	101
圖 2-8 凍結工法	102
圖 2-9 灌漿工法改良強化範圍示意圖	103
圖 2-10 降水工法示意圖	103
圖 2-11 潛盾隧道施工導致地表沉陷歷時曲線	104
圖 2-12 現地沉陷歷時曲線推求雙曲線參數 a 及 b	104
圖 3-1 潛盾隧道施工造成之地表沉陷相關符號示意圖	105
圖 3-2 大阪防洪計畫 (Tennohji-Benten Giant Trunk Sewer)	106
圖 3-3 Tennohji-Benten 地下水主幹管 Block 2 沿線及土層斷面	107
圖 3-4 泥水加壓式潛盾機示意圖	107
圖 3-5 日本神奈川縣川崎市下水道潛盾隧道工程路線高程與地質剖面圖	108
圖 3-6 Hiranogawa 地下儲水管道位置及剖面圖	109
圖 3-7 日本廣島縣瀨野川下水道潛盾機構造示意圖	110
圖 3-8 南灣海上放流管位置及剖面圖	111
圖 3-9 日本廣島縣瀨野川下水道潛盾隧道施工路線圖	112
圖 3-10 日本廣島縣瀨野川下水道潛盾工程採用之土壓平衡式潛盾機	112
圖 3-11 日本廣島縣瀨野川下水道潛盾隧道路限高程與地質剖面	113
圖 4-1 第二加壓站至污水處理廠潛盾路線平面圖	114
圖 4-2 日本日機裝置株式會社製造之開放式機械型潛盾機	114
圖 4-3 第二加壓站至污水處理廠地質鑽探柱狀圖	115
圖 4-4 地下水位變化前後管線高程示意圖	116
圖 4-5 變更方案之地下管線與潛盾路線平面圖	116
圖 4-6 污水管線水利剖面圖	116
圖 4-7 竹科三期之二園區污水處理廠放流管工程平面圖	117
圖 4-8 竹科園區三期之二污水處理廠放流管工程之高程及地質剖面圖	118
圖 4-9 園區三期之二污水處理廠採用之土壓平衡式潛盾機	119
圖 4-10 竹科園區三期之二污水放流管襯砌環片斷面	119

圖 4-11 機頭滾輪切刀磨損比較	120
圖 4-12 食品路 508 號前路面塌陷情形	120
圖 4-13 潛盾機頭遇大粒徑卵礫石	120
圖 4-14 潛盾施工遭遇之大顆粒卵礫石 ($\phi=400\text{ mm}$)	121
圖 4-15 潛盾機推至 911 環路面塌陷情形	121
圖 4-17 竹科園區污水處理廠三期之三放流管工程之高程及地質剖面圖	123
圖 4-18 竹科園區三期之三污水處理廠採用之土壓平衡式潛盾機	124
圖 4-19 三號潛盾機螺運機螺旋葉片遭遇地下舊有鋼軌樁嚴重磨損及斷裂	124
圖 4-20 一號潛盾機螺運機出土閘門開啟產生大量湧水情形	125
圖 5-2 新工~湖北電纜線路潛盾隧道地質剖面示意圖	127
圖 5-3 新工~湖北電纜線路工程採用之加泥式土壓平衡潛盾機	128
圖 5-4 寬 500mm 之鋼環片	128
圖 5-5 潛盾機開挖面遭遇含礫量 90% 以上	129
圖 5-6 急曲線潛盾隧道完工圖	129
圖 5-7 新工超高壓變電所潛盾隧道路線平面圖	130
圖 5-8 新工超高壓變電所潛盾隧道地質剖面圖	131
圖 5-9 新工超高壓變電所潛盾隧道採用之加泥式土壓平衡潛盾機	132
圖 5-10 潛盾機採用無軸式螺運機之土倉進土口	133
圖 5-11 潛盾機到達#6A 直井破鏡出土狀況	133
圖 5-12 潛盾機切刀轉盤磨損情況(半徑 $R=6.24\text{ m}$)	134
圖 5-13 潛盾機切刀磨損情況	135
圖 5-14 潛盾機出發與到達工作井示意圖	136
圖 5-15 沉箱工法初期施作情況	137
圖 5-16 沉箱主體未澆置混凝土情況	138
圖 5-17 沉箱主體(工作井)完成圖	138
圖 5-18 泡沫工法試驗比較	139
圖 6-1 桃園國際機場聯外捷運系統路線平面圖	140
圖 6-2 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾工程路線平面圖	141
圖 6-3 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾工程地質剖面圖	142
圖 6-4 現場大口徑鑽孔地質調查情形	143
圖 6-5 調查孔 LBS-1 卵礫石粒徑分佈曲線	143
圖 6-6 調查孔 LBS-2 卵礫石粒徑分佈曲線	144
圖 6-7 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾隧道施工採用之泥土壓潛盾機	144
圖 6-8 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾工程採用之鋼筋混凝土環片	145
圖 6-9 潛盾機切刀轉盤結構示意圖	146
圖 6-10 潛盾機切刀轉盤各切刀形狀與配置圖	147
圖 6-11 切刀轉盤切刀切削地盤順序示意圖	148
圖 6-12 潛盾隧道路面沉陷示意圖	149

圖 6-13 路面沉陷實際情況	150
圖 6-14 潛盾機切刀轉盤與土倉阻塞位置圖	151
圖 6-15 增設切刀盤及隔倉攪拌棒位置圖	152
圖 6-16 機上灌漿示意圖	153
圖 6-17 1 號潛盾機出土時切刀轉盤磨損情形	154
圖 6-18 棍子式切刀磨損情形	155
圖 7-1 卵礫石最大粒徑推估法示意圖	156
圖 7-2 無軸式螺運機示意圖	157
圖 7-3 卵石之破碎型態	157
圖 7-4 切削切刀與滾輪切刀種類實際圖	158
圖 7-5 機內破碎方式所採碎石機	159
圖 7-6 經切刀轉盤切削之卵石及流木	160
圖 7-7 切刀轉盤之切刀維修與更換情形	160
圖 7-8 卵礫石層潛盾隧道開挖造成周邊地盤鬆動模式	161
圖 7-9 螺運機後方排土狀況	161
圖 8-1 各種土層地表最大沉陷量範圍	162
圖 8-2 隧道中心線深度與地表最大沉陷量之關係	163
圖 8-3 隧道直徑與地表最大沉陷量之關係	164
圖 8-4 深徑比與地表最大沉陷量之關係	165
圖 9-1 單一潛盾隧道施工造成之隧道中心線上方地表沉陷歷時曲線示意圖 ...	166
圖 9-2 地表沉陷歷時曲線雙曲線參數	167
圖 9-3 雙曲線參數 a 、 b 之物理意義	168
圖 9-4 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線	169
圖 9-5 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線	171
圖 9-6 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線	172
圖 9-7 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線	173

符 號 說 明

V_L ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）

S_{max} ：隧道中心線正上方的地表最大沉陷量

L ：隧道施工長度

Z ：隧道中心線深度

D ：隧道直徑

R ：潛盾機半徑

$S(t)$ ：隧道中心線正上方之地表沉陷量

t ：潛盾機盾首通過後的時間

a 、 b ：雙曲線參數

$1/a$ ：初始沉陷速率（mm）

$1/b$ ：最大沉陷量（ S_{max} ）

S_c ：壓密沉陷量（mm）

S_{10} ：潛盾機盾首通過後第十天之沉陷量（mm）

α ：壓密沉陷指數（mm）



第一章

緒論

1.1 前言

隨著經濟之快速成長，都市不斷擴充及膨脹，人口不斷增加與集中，在市區內可資運用之土地有限的情況下，導致越來越多公共建設，逐漸往地下發展。其中常見的都市隧道工程包括：鐵路地下化、捷運交通系統、衛生下水道、自來水管、電力及電信管線地下化等。

由於都會區人口集中、交通繁忙、作業空間狹小，以致於都市地區進行隧道工程，受到嚴格限制。為克服上述問題，世界各國不斷研究發展各種工法以符施工需要。一般在已經相當發展的都市道路下方構築隧道，最常用之施工方法有兩種，即明挖覆蓋工法（Cut-and-cover method）及潛盾工法（Shield tunneling method）。從事明挖施工，所遇困難甚多，例如影響地面繁忙交通、妨害沿路商店營業及房屋結構安全、地下已埋設管線遷移、挖掘道路所產生之噪音及空氣污染與路上修復等。潛盾工法在盾殼及支撐系統保護下施工，可將對周圍環境衝擊降至最小，且可日夜不斷施工，不受天候與交通影響。其缺點為造價高、施工技術問題較多及引致地表沉陷損害鄰近結構物等。

台灣地狹人稠，近年來使用土地之需求不斷增加，高壓電塔用地取得困難，加上颱風和地震等各項外在環境因素，易造成高壓電纜線之損壞。台電公司輸變電計畫為回應社會大眾對市容觀瞻要求、輸電線安全距離疑慮及提昇輸電系統可靠度，陸續推動輸電線地下化工程，於交通繁忙道路下計劃採取潛盾隧道工法施工以降低對交通之衝擊影響。計劃將全台高壓電纜線路由北向南逐步地下化，台電輸變電工程處中區施工處於民國 94 年 4 月推動「新工～湖北 161kV 電纜線路隧道暨附屬機電設備設計及施工統包工程」，此工程已完工進入營運階段。現階段於新竹湖口施作「竹工超高壓變電所出口 161kV 電纜線路洞道統包工程」，於民國 97 年 10 月開工，目前尚處於施工階段。

另外，交通部高速鐵路工程局推動「桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫」，此計畫將與台北地區捷運系統及高速鐵路聯結。目前進行「桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CU02A 標工程」，為國內首宗在卵礫石層潛盾隧道穿越機場下方之案例。

由於台灣西部桃園至台中地區，地層多屬於卵礫石地盤，隨著台灣重大工程陸續推動，對於目前與將來潛盾隧道施工遭遇卵礫石地盤之案例也逐漸增加，唯有從案例中吸取經驗並檢討改進，使國內潛盾隧道工程技術日益增進及純熟。

1.2 研究動機與目的

近年來潛盾隧道施工遭遇卵礫石層之工程逐漸增加。在潛盾隧道施工過程中，由於潛盾機之掘進引致隧道開挖面之應力改變、盾尾空隙閉合、擾動土壤之壓密、襯砌環片變形及潛盾機曲線施工或方向控制不當造成之超挖等因素，皆促成了土層變位。特別以潛盾施工所引致之地表沉陷，將直接對鄰近建築物之安全造成威脅，且可能導致鄰近隧道地下管線破壞而危及民眾財產及安全，因此潛盾隧道工程之施工品質為眾人所關切之主題。

本論文蒐集國外潛盾工程遭遇卵礫石層施工案例，另外介紹桃園國際機場聯外捷運 CU02A 標、台電竹工超高壓變電所電纜線路洞道工程、台電新工～湖北電纜線路隧道工程及新竹科學工業園區污水放流延伸工程，以上潛盾工程在卵礫石層地盤之施工遭遇問題與地表沉陷分析，探討潛盾隧道施工在卵礫石地盤與一般土層之差異。

如表 1-1 所示，Fujita (1982) 提出潛盾隧道施工所造成之最大地表沉陷預估表，表中土層包含砂土、黏土與軟弱粘土，但卻缺少卵礫石層這方面之資料。有鑒於國內遭遇卵礫石潛盾施工案例逐漸增多，除了目前桃園與新竹潛盾工程外，未來還有台中地區地下潛盾隧道之施工，因此本研究主要目的收集國內外潛盾隧道遭遇卵礫石之施工案例，以評估在卵礫石層潛盾隧道施工所造成之最大地

表沉陷量，作為往後施工上參考之依據。

如圖 1-1 所示 (Japan Society of Civil Engineers, 1996)，潛盾隧道施工造成地盤沉陷，地表沉陷量會隨著潛盾機通過的時間增加而增加，若能於施工前對潛盾隧道施工引致之地盤沉陷歷時關係加以預測，對於沿線建物之沉陷量可能超過警戒值或行動值的區域，在潛盾機通過之前做必要之處理，例如地盤改良等，對建物保護之工作必有相當之助益。本研究廣泛蒐集國內外遭遇卵礫石潛盾施工案例，將最大地表沉陷量 S_{max} 和潛盾機機型、隧道深度、隧道直徑之關係圖做有系統之分析，另外藉由蒐集台灣潛盾隧道施工案例之監測資料，對於隧道施工造成之地表沉陷歷時時間之關係，加以分析歸納。本研究建議利用雙曲線模式 (Hyperbolic model) 模擬、預估在卵礫石層地盤潛盾隧道施工引致之地表沉陷歷時曲線，整理得雙曲線參數 a 值建議表與地表最大沉陷量 S_{max} 值建議表，以供評估潛盾工程地表沉陷歷時曲線之用。



1.3 論文組織

本論文共分十章。第一章為緒論。第二章為文獻回顧，蒐集潛盾工法沿革與隧道施工導致地表沉陷之相關文獻。第三章為國外施工案例，介紹在日本與美國遭遇卵礫石地盤潛盾機施工方式。第四章為介紹新竹科學園區污水下水道潛盾施工工程案例。第五章為新竹湖口台電六輸潛盾施工工程案例。第六章為桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫潛盾施工工程案例。第七章為潛盾機遭遇卵礫石之設計與施工考量，針對卵礫石最大粒徑調查、潛盾機之特殊性能、開挖面穩定處理與輔助工法做介紹。第八章為卵礫石地盤潛盾隧道開挖引致之沉陷案例分析，將蒐集國內外案例進行分析整理，討論潛盾機遭遇卵礫石地層在不同型式、不同隧道直徑及不同深度開挖引致之最大沉陷量。第九章為地表沉陷歷時曲線與雙曲線模式，針對卵礫石層地表歷時曲線以雙曲線模式進行模擬，其可行性並加以討論。第十章則為結論與建議。

第二章

文獻回顧

卵礫石層潛盾隧道施工所引致之地盤變位對於地表結構物、結構基礎及地下管線等造成潛在威脅。因此本章將針對潛盾工法之沿革、施工原理、潛盾機型式、潛盾施工之輔助工法、卵礫石工程特性、潛盾隧道施工引致地盤變位之原因及地表沉陷歷時曲線等相關文獻加以說明。

2.1 潛盾隧道工法之沿革

潛盾工法係於西元 1818 年由法國人 Brunnel 首先取得發明專利，於 1825 年英國倫敦泰晤士河底雙線隧道工程，正式啟用人類有始以來的第一部潛盾機（矩形斷面）。初期施工期間困難重重，於 1828 年造成了一次嚴重坍方導致機毀人亡之嚴重挫折，所幸被迫停工七年後再復工，並於 1841 年到達對岸工作井，完成此劃時代之創舉。而隨後於 1869 年，英國人 Greathead 等採用其所發明之圓形斷面潛盾機、鐵鑄弓形支堡及壓氣工法，成功地完成泰晤士河第二條河底鐵路隧道工程，奠定今日潛盾工法之基礎。國內自民國 65 年引進潛盾工法（蔡茂生，1989）以來，迄今已逾 31 年，所使用之潛盾機自最簡單的開放型手挖式潛盾機，至陸續引進的機械式、泥水加壓式及土壓平衡式潛盾機。

2.2 潛盾隧道工法施工原理

潛盾工法原本是針對強度較弱、自立性較差之土層，進行開挖隧道的一種主要方式，但近年來在卵礫石地盤也逐漸採用。其原理為利用一較隧道外徑稍大，可向前移動之圓形鋼套筒（即潛盾機）於土層中挖掘前進，並在設置永久襯砌前，利用盾殼支撐隧道洞口地盤。使潛盾機內部，一方面無虞地盤崩坍，可安

全迅速地進行隧道開挖作業，另一方面進行永久襯砌之組立。由於所有施工均在機殼內完成，無需反覆架設臨時性支撐，在安全性、便利性及施工速度上皆可大幅提升。朱旭（1984）指出，一般的潛盾施工作業循環可分為三個階段，如圖 2-1 所示：

（1）開挖與掘進：

旋轉潛盾機前方的切刃盤，將土壤切削入機體土倉內，再以螺旋輸送機或輸泥管將廢土運出，同時利用機內的千斤頂，以安裝完成的襯砌作為反力座，向前推擠前進。

（2）停止挖掘：

開挖約大於一個襯砌的寬度後，切刃盤停止旋轉，並依次收回千斤頂，以空出的空間作為安裝隧道襯砌環片之用。

（3）安裝襯砌：

以機內之旋轉式襯砌組立機安裝弓型 RC 支堡或鐵鑄環片，各片襯砌間以螺栓相結合，組立成一完整之環片斷面，並準備下一循環。

2.3 潛盾機型式

採用潛盾工法，潛盾機的選擇將直接影響工程成敗。因此欲使潛盾工法能達到工程所需，且具安全、經濟的原則，須對潛盾機型式、適用性及特點作一了解，以便找出最合適的施工方式。蔡茂生（1989）依潛盾機的施工方式，將潛盾機分類並說明如下：

（1）開放式潛盾機（Open shield）：

包括手挖式（Hand mining shield）、半機械式（Semi-mechanical shield）與機械式（Mechanical shield），如圖 2-2 所示。

（2）擠壓式潛盾機（Blind shield）：

擠壓式潛盾機以機首隔板推擠前方土壤，使土壤經隔板上方開口進入機

內，如圖 2-3 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 soil pressure balance shield) 與泥水式潛盾機 (Slurry shield)，如圖 2-4 至圖 2-6 所示。

2.3.1 各型式潛盾機適用土層

蔡茂生 (1985) 將潛盾機構造、適用土層及特性整理如表 2-1，對各型式潛盾機之適用土層以及是否需要輔助工法以表格說明之。朱旭 (1984) 將潛盾機機型及其適用土層整理如表 2-2。日立造船株式會社 (Hitachi Zosen Corporation, 1990) 亦對各型式潛盾機適用土層以圖 2-7 表示之。日本土木學會「隧道標準規範潛盾篇」(1987) 列出潛盾機型式、適用土層及輔助工法關係，如表 2-3。

2.3.2 卵礫石層之工程特性

在土壤統一分類上，粒徑 4.75 mm~75 mm 者為礫石 (Gravel)，粒徑 75~300 mm 者為卵石 (Cobble)，粒徑大於 300 mm 者為巨石 (Boulder)。進一步分類，可依礫石含量及粒徑分佈情形，分為優良級配礫石 (GW)、不良級配礫石 (GP)、粉土質礫石 (GM)、黏土質礫石 (GC)、或粉土-黏土質礫石 (GM-GC) 等。洪如江等 (1978) 之研究，卵礫石粒徑 (粒徑大於 4 號篩) 含量大於 75% 之土壤，其工程特性由卵礫石控制。反之若卵礫石部份小於 75% 之土壤，其工程特性由粒徑小於 4 號篩之材料所決定。所以卵礫石含量的多寡及小於 4 號篩材料含量的多寡，為影響卵礫石層材料工程特性重要之因素。

一般礫石 (粒徑小於 75 mm) 在潛盾隧道施工上並不造成特殊問題，施工上較棘手者為遭遇卵石 (粒徑大於 75mm) 含量高、且通過 4 號篩顆粒 (砂+粉土+黏土) 含量小於 15%~30% 之卵礫石層。因此在於地層中卵礫石之顆粒大小、含

量（出現頻率）、形狀、硬度、基質（Matrix）之性質及地下水情況等，成為潛盾隧道施工調查之重點，作為將來設計與遭遇卵礫石處理對策之依據。

2.4 潛盾施工之輔助工法

採用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沉陷過大，常需採用輔助工法配合施工，來達成止水或強固地盤之目的。以下各節將介紹潛盾隧道施工時常用之輔助工法。

2.4.1 壓氣工法

壓氣工法（Compressed-air method）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，壓氣工法為一可靠工法，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（1985）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的健康造成傷害。

2.4.2 地盤凍結工法

地盤凍結工法（Ground freezing method）係將凍結管（freezing pipe）埋設於欲處理的土層內，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，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，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。冷凍工法施作情形如圖 2-8 所示，冷凍液之差異、凍結土層的方法可分為液態氮（LN₂）凍結法和鹽水（Brine）凍結法兩種。

2.4.3 灌漿工法

灌漿工法（Grouting method）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，減少地盤沉陷量及其影響範圍。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，如圖 2-9。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，如表 2-4 所示。目前最常用於卵礫石地盤隧道工程之灌漿工法，則為二重管雙環塞（Double Packer）低壓灌漿工法，灌入卵礫石地盤之材料為半懸濁液，其中包含水玻璃、水泥及皂土。

2.4.4 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 2-10 所示，降水工法（Dewatering method）通常適用於透水性較高之卵礫石層與砂質土壤。蔡茂生（1985）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，造成鄰近地盤下陷，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。在降水工法之選擇上，必須考慮之因素如下：

- (1) 地質構造、透水係數、地下水位分佈等地層基本物理性質。
- (2) 預估湧水量湧水區範圍。
- (3) 鄰近地上與地下結構物覆蓋厚度。
- (4) 周圍地下水利用情形及隧道外排水設施。

2.5 潛盾隧道施工引致地盤沉陷之原因

潛盾隧道施工所造成的地盤沉陷，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)、Mori and Akagi (1985)、Fang et al. (1994) 等學者，均曾經提出相關的研究成果。綜合各項研究成果，潛盾隧道施工引致地盤沉陷的原因，大致可分為以下五大項。

2.5.1 盾尾空隙閉合

潛盾機通過之後，原地盤與襯砌環片外緣所形成之空隙稱為盾尾空隙 (Tail void)，一般約為 50 到 80 mm。盾尾空隙通常採以背填灌漿 (Backfill grouting) 將其填滿，但在環片脫離盾殼保護至施作背填灌漿期間，盾尾空隙呈無支撐狀態，極易引起周圍地層的應力釋放，造成土壤的彈塑性變形，導致隧道上方及周圍土壤往此空隙移動。此項為潛盾隧道施工引起地盤沉陷的最主要原因之一。

Schmidt (1974) 假設，若整個盾尾空隙被崩落土壤所填滿，則最大地盤漏失量可用下式來表示：

$$V_L(\%) = 200 \times \frac{t}{R} \quad (2.1)$$

式中，

V_L ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）

t ：盾尾空隙寬度

R ：潛盾機半徑

盾尾空隙造成地盤漏失的情形，依土壤之自立時間、土壤暴露於盾尾空隙之長度及採用之輔助工法（如壓氣工法及灌漿工法）而定。

2.5.2 襯砌變形

隧道襯砌環片組合完成之際，本呈圓環狀，但因作用於環片上方之垂直覆土壓力通常大於水平土壓力，故略呈扁平狀。尤其在軟弱土層中，因地下水位降低或土壤受擾動等因素，使黏土產生壓密現象，隧道周圍的黏土層因此發生垂直向的收縮，進而使襯砌環片產生變形。一般而言，襯砌環片的設計強度均遠大於所承受之垂直土壓力，故此變形量不致於過大。

2.5.3 潛盾機蛇行或超挖

潛盾隧道於曲線施工時，為使潛盾機可順利轉向，機體一側可能發生土壤超挖，另一側則可能產生壓縮，導致盾殼周圍土體之空隙擴大而產生地盤漏失。於此施工狀態下，潛盾機切刃口的阻力及千斤頂之壓力呈不均勻分佈，或潛盾機自重亦可能造成機體上下或左右蛇行（pitching or yawing）。此漏失量與潛盾機操作技術及土質狀況有極密切的關係，一般情形下是難以量化估算的。

2.5.4 開挖面應力的改變

潛盾機開挖掘進時，須自機體內部向開挖面施予一推力，以推持開挖面之穩定。若此推力小於原土層之靜止土壓力，隧道開挖面將產生應力釋放。此時土層趨於主動土壓力狀態，土體會向開挖面擠入，同時發生地盤漏失的情形。但若此推力恰為原土層之靜止土壓力，則隧道開挖面呈靜止狀態。若此推力大於原土

層的靜止土壓力，則開挖面前方的土壤因受推力而呈被動土壓力狀態，此時的地層因受壓而產生推擠，導致地表的隆起。在卵礫石地層，潛盾機切削面(Cutter Face)及外周地層之鬆動範圍與卵礫石顆粒大小有關，開挖時由於卵礫石間之嚙合作用，引起潛盾外周地層之鬆動及超挖量增大，此為導致地表沉陷之主因。

2.5.5 地下水位變化

潛盾隧道大部分均於地下水位以下施工，為抵抗開挖面上之土壓力及水壓力，須視狀況使用排水工法以利工程進行，若地下水位下降，土體有效應力增加，進而產生壓密現象，造成地盤沉陷。

2.6 地表沉陷歷時曲線

依沉陷發生時機，將伴隨潛盾隧道施工所產生之地盤沉陷區分為五大階段 (Japan Society of Civil Engineers, 1996)，如圖 1-1 所示，其沉陷行為詳述如下：

- (1) 先行沉陷：係發生於距潛盾機到達之相當距離前方之沉陷。
- (2) 開挖面前方之沉陷或隆起：係發生於潛盾開挖面即將到達時之沉陷或隆起，主要因潛盾機操作時，開挖面推擠前方土層土壓不平衡所致。
- (3) 通過時沉陷：係發生於潛盾機通過時之沉陷，其產生之主要原因為潛盾機四周表面與地盤間之摩擦，以及伴隨超挖產生之地盤擾動所造成。
- (4) 盾尾空隙沉陷：係發生於潛盾機尾部通過後不久之沉陷，其產生之主要原因為襯砌環片外側與地盤間之縫隙，稱為盾尾空隙 (Tail Void) 閉合。在環片脫離機身因地盤應力釋放造成沉陷。一般而言，地盤產生之最大沉陷量係於此一階段所造成。
- (5) 後續沉陷：係在極軟弱之黏性土層可發現之現象，主要起因於潛盾機推進所引起整體性之地盤鬆弛及擾動。

2.6.1 沉陷對數時間模式

Hwang et al. (1995) 的研究指出，可以由沉陷歷時曲線中明確區分立即沉陷 (Immediate settlement) 與壓密沉陷 (Consolidation settlement)。圖 2-11 將沉陷量與時間繪於半對數座標圖上。Hwang et al. 建議將潛盾機盾首通過後第十天之累積沉陷量 S_{10} 視為開挖所引致的立即沉陷，後續發生的沉陷視為壓密沉陷。他們並定義潛盾機盾首通過後第 100 天與通過後第 10 天之沉陷量差值為壓密沉陷指數 α 。隧道施工造成之地表壓密沉陷量 S_c 可由下式求得：

$$S_c = \alpha \cdot \log\left(\frac{t}{10}\right) \quad (2.2)$$

式中，

S_c ：壓密沉陷量 (mm)

α ：壓密沉陷指數 (mm)

t ：潛盾機盾首通過後的時間 (day)

通常假設潛盾機盾首通過一年後壓密沉陷終止，則總沉陷量為：

$$S_t = S_{10} + 1.56\alpha \quad (2.3)$$

式中，

S_t ：總沉陷量 (mm)

S_{10} ：潛盾機盾首通過後第 10 天之沉陷量 (mm)

2.6.2 雙曲線模式

Fang et al. (1993) 收集國內外案例之沉陷與時間關係，並加以分析，發現以土壓平衡式潛盾機在黏土層內開挖之沉陷時間曲線，如圖 2-12 所示，可用以下列之雙曲線模式 (Hyperbolic model) 加以描述：

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.4)$$

式中，

$S(t)$ ：隧道中心線正上方之地表沉陷量

t ：潛盾機盾首通過後的時間

a 、 b ：雙曲線參數

式 (2.4) 可改寫成下式：

$$\frac{t}{S(t)} = bt + a \quad (2.5)$$

式 (2.5) 為 $t/S(t)$ 之斜截式。將施工案例的監測資料繪於以 $t/S(t)$ 為縱軸與以 t 為橫軸之圖中，可以線性迴歸方法找出直線關係，求出常數 a (截距) 和 b (斜率)，如圖 2-12 所示。

簡明同 (1998) 與吳俊德 (2008) 蒐集國內外以土壓平衡式、泥水加壓式及開放式潛盾機於凝聚性及非凝聚性土壤中，開挖隧道引致之地表沉陷與時間監測資料案例，將由雙曲線模式推估得來的參數 a 及參數 b ，製作建議表為表 2-5 與表 2-6。依據上述 2 表之參數 a 及 b ，配合 (2.4 式) 之雙曲線模式，可以模擬出沉陷歷時曲線。由於上述表中並沒有卵礫石層之 a 與 b 值參數，因此雙曲線模式將成為本研究推導在卵礫石層潛盾隧道中心線上方沿線 地表面任一點沉陷量與時間關係之基礎。

第三章

國外卵礫石潛盾隧道施工案例

本研究收集國外18組遭遇卵礫石潛盾隧道施工案例，各案例隧道掘進之區段開挖面含卵礫石量皆大於50%。根據統一土壤分類法（USCS）之定義，通過4號篩（4.75 mm）之土壤含量大於50%為卵礫石（G）地層，粒徑4.75 mm～75 mm者為礫石（Gravel），粒徑75～300 mm者為卵石（Cobble），粒徑大於300 mm者為巨石（Boulder）。表3-1至表3-3為各潛盾隧道案例之基本資料與地層狀況，如圖3-1所示，D表示潛盾隧道之外部直徑，Z代表隧道中心線之深度，L表示潛盾隧道施工長度。

潛盾機型之選擇，必須綜合考量土層狀況、周圍施工環境、隧道直徑、施工長度及經濟性等因素，在卵礫石層以潛盾機施工時必須特別考慮潛盾機型之適用性，以下分別敘述國外開放式、泥水式及土壓平衡式潛盾機在卵礫石層施工之案例。

3.1 開放式潛盾機案例

由於開放型（手挖或半機械開挖式）潛盾機之開挖面屬於開放，其優點為在施工過程中遭遇大粒徑之卵礫石較容易排除，但所遭遇之主要問題為卵礫石層高透水性及如何保持開挖面之穩定，通常必須採用壓氣工法、藥液灌漿工法或降水工法等數種輔助工法，否則即無法施工。

表3-1之案例O1，大阪防洪計劃（Kitamura and Ohbayashi 1981）於1974年在大阪市東方建造長8.8 km之下水道。在下水道

施工前，如圖3-2所示，大雨所降之雨水直接由地面流向Hiraro河，地表逕流造成大阪市東方許多地區洪水氾濫。大阪防洪計劃使原先地面逕流的部分直接流入下水道內（Tennohji-Benten Giant Trunk Sewer），然後直接流至Benten抽水站，最後排至Ohkawa河，以解決大阪市東方區域的水患。本計劃共分為7個Block，其中Block 2即採用手挖式潛盾機施工。

Block 2全長1.6 km，以手挖式潛盾機配合壓氣工法施工。由轉轍井（switching shaft）至到達井（terminal shaft）之400 m潛盾隧道部分，其地質層次交錯複雜，如圖3-3所示，可分為砂土、沖積黏土以及礫石三個部分。在D段部分，長度為35 m，整個開挖面全為卵礫石地層，含卵礫石量大於60%，施工單位採用化學灌漿降低卵礫石土層之滲透性，減少地下水滲流至開挖面，造成開挖面湧水及穩定的問題。

雖然採用輔助工法後，於大部份卵礫石層皆可採開放型潛盾工法施工，但是由於輔助工法之施工期長、費用龐大，且藥液灌漿工法可能造成水源污染之疑慮，壓氣工法則易產生缺氧空氣及施工人員健康等問題，在採用上必須特別注意。近年來潛盾隧道開挖工程中較少採用開放式潛盾工法施工。

3.2 泥水式潛盾機案例

泥水式潛盾機屬於密閉式潛盾機的一種，典型設備如圖3-4所示（表3-2之案例S5），皂土液經由輸泥管到達開挖面後方的土倉中。開挖面被切削之土體排入土倉後，與皂土液經由攪拌器混合後，經排泥管排出潛盾機之外，皂土液與土渣分離後仍可循環繼續使用。泥水加壓潛盾機在地面上必須有相當大之空間放置

泥水處理設備和堆置皂土，較不利於都市空間擁擠地區施工。

泥水式潛盾機遭遇卵礫石地層時，必須以切刃轉盤上之切刃（Cutter bit）或滾輪切刃（Roller bit）等切刃裝置先將大粒徑之卵礫石切削成可進入土倉之尺寸，並可以通過排泥管，切削之土體才可以順利的排出潛盾機外。

表3-2之案例S1，日本神奈川縣川崎市下水道潛盾隧道工程（深沢洋三 1979），採用泥水式潛盾機施作，隧道外徑（D）為2,950 mm，覆土深度（Z）約為8.5~10 m，隧道全長（L）為1,300 m。如圖3-5所示，潛盾機掘進通過地層主要為卵礫石層與砂岩層，卵礫石層之卵礫石含量約74~87%，滲透係數為 $1.4\sim4\times 10^{-1}\text{cm/sec}$ ，地下水壓達 2.19 kgf/cm^2 。由於卵礫石層之高透水性與高水壓，且卵礫石之孔隙率約為20~50%，開挖面自立性不佳，因此本工程全線施工前先行採用化學灌漿改良土層，以防止開挖面滲水狀況發生。潛盾機掘進沿線遭遇直徑600 mm以上之堅硬巨石與流木，與當初切刃轉盤所設計可排除最大粒徑 $\phi 350\times 400\text{ mm}$ 差距甚大，加上切刃遭遇堅硬卵礫石嚴重磨損，導致施工工期延誤了6個月。本工程所引致之地表最大沉陷量約為12 mm。

表3-2之案例S5，日本Hiranogawa地下儲水管道（Hashimoto 1989）為了處理大阪市之洪水而建造之地下儲水設施。在豪雨時期，河水面會超過地表面，若只靠原先沿著河面建築的堤防來預防洪災，只能達阻擋成的作用。地下儲水管道是利用疏導的方式來達成預防洪水的效果，將雨水經由數條主要下水道引至地下儲水管道，儲存多餘之雨水。地下儲水管道在豪雨期間可儲存 $140,000\text{ m}^3$ 的水量，可避免大阪市區淹水的危險，地下儲水管線

位置及剖面如圖3-6所示。本工程以泥水式潛盾機施作直徑10 m的大口徑儲水管道，管道長度達1.9 km。隧道開挖面的地質為砂土、卵礫石以及硬黏土，其中卵礫石的粒徑多在4.75 mm至20 mm，最大粒徑達100 mm，含卵礫石量約為60%。在泥水式潛盾機開挖卵礫石時，因卵礫石強度甚高，導致切刀轉盤上的切削齒嚴重磨損。本工程隧道長度達1.9 km，在設計潛盾機時，即賦予切刀轉盤在開挖過程中，可更換切刀的功能，才使潛盾機得以順利推進。由於卵礫石高透水性，加上開挖面地下水壓達2 kgf/cm²，雖然封閉式泥水潛盾機可以藉加壓皂土液來平衡開挖面前方之高水壓，即使如此，本案例仍額外使用化學灌漿改良土層，使開挖面無滲水之情況。施工單位並採用迅速的背填灌漿以填補大直徑潛盾機所衍生之較大盾尾空隙。地下儲水管道工程所引致之地表沉陷，除了在出發井附近約發生20 mm，其餘管線中心線上方處均未測得明顯之地表沉陷。

3.3 土壓平衡式潛盾機案例

土壓平衡式潛盾機屬密閉式潛盾機的一種，如圖3-7所示（表3-3之案例E11）藉由潛盾機前方設一密閉式土艙，潛盾機推進時，土砂經切刀轉盤之取土口進入土艙，土砂充滿貫穿隔板，連接土艙及機體內部之螺運機。當潛盾機開挖前進時，藉控制螺運機旋轉之排土速度及土艙內之泥土壓力，並以土艙壓力平衡開挖面之土壓及水壓，因而稱之為土壓平衡式潛盾機。

土壓平衡式潛盾機通過卵礫石地層，需要用切刀轉盤上的切刀以及滾輪切刀將卵礫石刮除及切磨成較小粒徑的碎屑，以便順利通過直徑有限之螺運管。若是切刀轉盤上的切刀數目不夠或是

硬度不足，可能因為切刃快速磨損耗盡，使得切刃盤之切削能力下降，此時大粒徑的卵石隨著切刃轉盤的旋轉而跟著被帶動，但是無法順利通過切刃盤之取土口進入土艙內，盾首前方堆積的許多大顆粒卵石造成切刃轉盤旋轉之阻力，甚至可能因切刃轉盤轉動遭受阻力太大而造成潛盾機旋轉的現象。

表3-3之案例E9為美國聖地牙哥市南灣海洋放流計畫（South Bay Ocean Outfall），放流前將由處理廠處理過之廢水，經南灣陸上放流管、豎井，經欲興建之海放管隧道及豎井（riser），排入大海（Stephen et al. 1996），如圖3-8所示。隧道開挖所遭遇之地層為聖地牙哥層（San Diego formation），其中主要含有大量的礫石、卵石、巨石，其中粒徑大於4.75 mm者超過70%。潛盾機在遭遇此卵礫石層，施工單位在切刃轉盤上裝設滾輪式切刃，用以破除最大達910 mm之巨石，將其切削成小直徑之顆粒以便順利通過螺運機。切刃轉盤上的切刃表面加以特殊硬化處理，使其抗磨損能力增加。施工單位並採用泡沫工法注入泡沫潤滑切刃與卵礫石之間的切削介面，以增加切刃之耐用程度，泡沫潤滑並可以避免細粒料堵塞土艙之效用。如圖3-8所示，潛盾機在海平面以下約57 m的卵礫石層中推進，地下水壓平均高達6.02 kgf/cm²，潛盾機必須能夠抵抗高地下水壓並達成土壓平衡狀況，隧道襯砌環片之設計也因為高地下水壓狀況必須加強環片的水密性及強度。

表3-3之案例E10為日本都營地下鐵路12號線豐島園潛盾隧道（日本財團法人土木學會，1996），該工程採用土壓平衡式潛盾機施作，隧道外徑為8.5 m，覆土深度約為14~24.1 m，隧道總長約1,240 m。隧道主要通過卵礫石層，卵礫石含量約64%，卵礫

石之滲透係數為 $1.5\sim 3.6\times 10^{-1}$ cm/sec，地下水壓為 1.47~2.45 kgf/cm²，卵礫石顆粒粒徑以 100~150 mm 之卵石為主，並夾雜部份 300~450 mm 之巨石。本工程主要特色為沿途穿越密集住宅區，除了與建物基樁最近距離僅 2.8 m 外，並穿越既有直徑 2.6 m 下水道幹管下方 1 m 處。本工程所引致之地表最大沉陷量僅為 5 mm。

表 3-3 之案例 E11 為日本廣島縣瀨野川下水道潛盾隧道工程（砂本信雄 et al. 1998），其施工路線如圖 3-9 所示，本工程採用泥土壓式潛盾機（圖 3-9），隧道外徑為 2.18 m，全長為 962 m。圖 3-10 所示，潛盾隧道主要通過卵礫石層，前段部分為卵礫石（GP），透水係數為 3×10^{-2} cm/sec，後段為卵礫石層夾砂與黏土層（GM），透水係數為 5×10^{-4} cm/sec，含卵礫石量約 70%，覆土深為 6.5~13.4 m，顆粒粒徑以 30~90 mm 之卵礫石為主，並夾雜部分 270~450 mm 之卵石及巨石。圖 3-11 所示，潛盾機採用無軸式（絲帶式）螺運機（Ribbon Screw-Converyor），切刃開口率為 31%。本工程所遭遇困難為潛盾隧道通過國道 2 號線下方遭遇急曲線 R=30 m，以及於 JR 山陽本線下方 R=20 m 之急曲線段施工。為此急曲線隧道施工，本工程採用中折式潛盾機，並且在排土量方面加強監控管理，以設計出土量之 120% 作為排土管理值。隧道全線施作 3 處人孔，以便施作更換切刃轉盤上之磨損切刃與滾輪切刃。本工程所引致之地表最大沉陷量約為 12 mm。

第四章

新竹科學園區污水下水道潛盾工程案例

本章介紹台灣新竹科學園區污水下水道潛盾施工工程，本工程包含三個案例，分別為：(1) 竹科第二加壓站至污水處理廠隧道工程案例；(2) 竹科三期之二放流管線潛盾案例；與 (3) 竹科三期之三放流管線潛盾案例。以下分別介紹各案例之工程概述、地質概況與潛盾隧道施工所遭遇之問題及解決方案。

4.1 竹科第二加壓站至污水處理廠隧道工程案例

4.1.1 工程概述

如圖 4-1 所示，此工程由第二加壓站之發進井 (M1 工作井) 沿園區一路，左轉新安路再右轉工業東二路，再左轉科技五路最後到污水處理廠到達井 (M3 工作井)，全長 1,934 m。此工程為自新竹科學園區既有之第一、二加壓站之進流污水管線截流後，分別埋設直徑 $\phi 700$ mm 及 $\phi 1200$ mm 鋼筋混凝土管 (RCP) 導入新設之污水管線，順流入污水處理廠之前處理設施。新設污水管線採潛盾掘進工法施工，完工後隧道內部直徑為 1.65 m，第一次襯砌為鋼製環片 (外徑 2.35m，內徑 1.95m)，二次襯砌為無筋混凝土 (II 型水泥) 加設耐酸鹼內襯 PVC 防蝕軟片，沿線並作臨時地盤改良，並設置匯流井與污水處理廠前處理設施銜接，至於第一、二加壓站則設置 C1~C3 人孔及 C4 接合井以連接現有進流污水管線。圖 4-1 顯示，沿線中間設置 M2 人孔一座，由於本管線採重力排放方式，管線埋設深度最深達 19 m。為縮短施工時程，此工程同時啟用二部潛盾機施作，並分別自 M1 及 M2 工作井分別掘進。此工程所選擇的潛盾機採用開放型-機械式潛盾機，其外徑為 2.48 m，如圖 4-2 所示。竹科第二加壓站至污水處理廠隧道工程，

業主為行政院國科會之新竹科學工業園區管理局，承包商為建豐工程股份有限公司，設計監造單位為中華顧問工程司。

4.1.2 地質概況

本調查基地位於新竹科學工業園區內，依據現場鑽探結果研判主要為紅土礫石地層，由棕紅色黏土及其下數十公尺之卵礫石砂土所組成。圖 4-3 顯示，現場鑽探最大深度為 25 m 之 8 個鑽孔柱狀圖，以下就本調查基地其地層分佈及其性質簡單說明如下：

- (1) 第一層次：表土紅土層，從 0.0 m~ 約 3.35 m 間，主要由黏土、粉砂、細砂及粗砂夾小礫石所組成之地層，色呈棕紅色。根據土壤統一分類法則，本層次之土壤分類為 SM。
- (2) 第二層次：棕黃色卵礫石層，厚度在 10.5 m 至 24.35 m 之間，主要由卵礫石及具有膠結性之紅土與砂之混合填充物所組成之地層，色呈棕黃色。礫石由圓形至次圓形之石英岩或砂岩礫石組成，直徑由數公分至數十公分，平均礫石量約在 50%~60% 之間，土壤密度平均為 2.22 t/m^3 。根據土壤統一分類法則，本層次之土壤分類為 GM。本工程潛盾隧道施工均位於本層次內，圖 4-3 顯示地下水位與潛盾路線之相互關係。
- (3) 第三層次：為黃色風化砂岩層，僅出現在 CH-8 號鑽孔，鑽探最大深度 15m 止於此層，研判風化岩層厚度 1.5 m 以上。主要係由風化泥質砂岩所組成之地層，色呈棕黃色。

4.1.3 掘進路線變更

此工程原設計之污水管線高程位於地下水位之上，如圖 4-4 所示。因實際開挖後，地下水位高於預期，因此潛盾隧道高程低於地下水位。圖 4-3 顯示隧道全線均行經卵礫石層(粒徑 600~700 mm 以上之大卵石佔約 10%，粒徑 300~500 mm 之卵石佔約 45%)之情況，卵礫石之滲透係數甚高，高水位的地下水不斷流入開放式潛盾機之開挖面，造成出水量大。潛盾隧道開挖時勢必全線點井抽水，嚴重影響交通，且易造成路面沉陷及建物龜裂之危險。圖 4-5 顯示地下管線與潛盾路線之平面圖，設計單位變更方案將管線高程提昇 4~5 m，可避開大量地下水滲入隧道之困擾，增加土壤穩定，降低施工潛在之風險。污水管線高程提昇後配合地下管線修正部分路線如圖 4-6，經試挖及召開管線協調會後。得知提昇污水管線高程及修正部分路線，與既有管線不相衝突，且無須全線以點井降低地下水位，不會發生路面塌陷及建物龜裂之危險。圖 4-6 顯示污水管線工程變更在水利功能方面不影響，符合原設計要求。

4.1.4 遭遇卵礫石地盤開放型潛盾機施工

此工程潛盾掘進斷面遭遇卵礫石地層，且部分曲線段之曲率半徑 R 小於 30 m，潛盾掘進機械之選擇十分困難。若潛盾切刃盤 (Cutter-head) 之取土口 (Slit) 開口率太小，則砂泥質不易取入土艙，若開口太大則大顆粒卵礫石進入土艙後，通過螺運輸送機 (Screw-convery) 時容易阻塞。經衡量上述土質因素，此工程潛盾掘進機械，採用「開放式機械型」中折式潛盾機，其構造能力及施工特別注意事項說明如下：

(一)潛盾機主體構造分三大部分：

1. 切刃盤：面版式構造如圖 4-2 所示，裝置滾輪式切刃 (Roller-Bit) 及切刃 (Cutter-Bit) 兩種以切削卵礫石，其開口率為 32%。
2. 潛盾機主體架構：鋼板以焊接方式作成圓筒狀，內裝油壓千斤頂、驅動

馬達、減速箱、排土機、環片架設機、超挖刀、土壓計及泥土注入等裝置。

3. 盾尾部 (Tail)：內裝二層式防水鋼刷及盾尾油注入孔。

(二)潛盾機能力特點：

1. 潛盾機之切刀盤上安裝裝置滾輪切刀及刮削切刀，可以破碎大粒卵石及岩盤，取土口可取入 $\phi 250$ mm 以下之小粒卵石。

2. 潛盾掘進機可由潛盾機內部更換已磨耗之滾輪切刀及刮削切刀。

3. 潛盾機裝置有超挖刀 (Copy Cutter) 及中折千斤頂，可以克服曲率半徑 $R=30$ m 之急曲線段隧道施工。

(三)施工特別注意事項：

圖 4-3 顯示，潛盾機掘進施工時，因由上游往下游施工，故需加強工作井之防水措施，工作井及隧道內必須準備污水高揚程抽水機，以避免下雨造成工作井及隧道內淹水，影響潛盾機之掘進施工。下水道污水之流動多為重力流 (gravity flow)，因此施工期間應特別注意隧道高程及方向控制，避免隧道曲線蛇形及高低起伏過大，路線之斜率須維持正確或規範值容許範圍內。

此下水道工程之潛盾施工，在辦理變更設計後，開挖範圍在地下水位以上，且採用開放式機械型中折式潛盾機，易於將卵礫石自地層中開挖。因未遇到地下水層，卵礫石層自立性良好，且距地表有足夠的覆土厚度，故施工時未遇到特殊難以處理之狀況。

4.2 竹科三期之二放流管線潛盾案例

4.2.1 工程概述

本工程為新竹科學園區竹科污水放流專屬管線，銜接污水放流管第一階段管線終點。圖 4-7 顯示，M27 為出發工作井，沿線行經新竹市南大路轉食品路，

至寶山路龍泉寺旁，M26 為到達井，汙水放流管施工全長約 1,970 m。為避免妨礙市區道路交通，全線採用潛盾隧道施工，採用之機型為土壓平衡式潛盾機。本管線內汙水採重力排放方式，管線埋設深度最深達 22 m。竹科三期之二放流管線工程，業主為行政院國科會之新竹科學工業園區管理局，承包商為永偉營造工程有限公司承攬，設計單位為中華顧問工程司。施工期間為民國 89 年 10 月至 92 年 9 月。

4.2.2 地質概況

圖 4-8 顯示，汙水放流管全線主要地質狀況包含礫石層、砂岩、粉土質細砂，管線覆土深度最淺約 4 m，最深約 22 m，地下水位深度約 4.5 m。現場鑽探 9 個鑽孔最大深度為 35 m，其地質狀況主要可分為四個層次，相關位置與地質剖面，如圖 4-8 所示。

1. 第一層次：由表土 (SF)、回填土及回填棕紅色粉土質砂夾礫石，厚度約為 0~1.6 m，回填土層標準貫入試驗 N 值約為 16。
2. 第二層次：為灰色粉土質中細砂 (SM) 及卵礫石夾砂 (GM)，本土層標準貫入試驗 N 值均大於 50，屬極緊密之砂土，含水量約為 18.4%~19.7%，土壤密度平均為 2.08 t/m³，厚度約為 1.6 m 至 7.7 m。
3. 第三層次：為卵礫石夾棕黃色粉土質細砂 (GM)，厚度約為 7.7 m 至 23 m。本土層標準貫入試驗 N 值均大於 50。含水量約為 12.5%~13.9%，土壤密度平均為 2.11 t/m³。
4. 第四層次：為棕黃色風化砂岩，本層次由於鑽探時鑽孔止於本層或其上方，所以厚度未知。

圖 4-8 顯示，本工程之潛盾隧道施工主要是在第二及第三層次之粉土質砂及卵礫石內進行。

4.2.3 卵礫石地盤潛盾施工

本工程採用土壓平衡式潛盾機開挖，潛盾機由日本三菱重工業株式會社所製造，如圖 4-9，潛盾機外徑為 2.48 m，於切刀轉盤上設置固定切刀與滾輪切刀。圖 4-10 顯示，完工後隧道內部直徑為 1.65 m，第一次襯砌施作鋼製環片，厚度為 150 mm，長度為 900 mm，二次襯砌為無筋混凝土(II 型水泥)加設耐酸鹼內襯 PVC 防蝕軟片，厚度為 200 mm。在潛盾機切刀轉盤後設置作泥室，由切刀盤所掘削之土體經取土口進入作泥室，以攪拌翼片強力拌合，使掘削之土體成為具不透水性及塑性流動之泥土，充滿作泥室與螺運輸送機內，以維持螺運機內泥土壓、開挖面上之土壓力及地下水壓之平衡。本工程潛盾施工遭遇卵礫石地層，以下針對潛盾機施工所遭遇之困難、原因探討與處理對策加以說明。

(a) 事故一 路面塌陷

民國 91 年 2 月 20 日潛盾機掘進遭遇大卵石，導致潛盾機推進進度緩慢。遭遇大顆粒卵礫石造成切刀磨損，切刀盤上之滾輪切刀在施工前與施工後之照片，如圖 4-11 所示。因潛盾機無法順利推進而造成停滯，造成土壓平衡式潛盾機開挖面之土壓力鬆弛，於民國 91 年 3 月 23 日在食品路 508 號前發生路面塌陷情形，如圖 4-12 所示。推測其原因，可能是因為潛盾機上方覆土深度不足 1.5 倍潛盾機直徑深度，加上潛盾機為切削大顆粒卵石停滯時間過長，因而導致塌陷的發生。施工單位隨即在路面下陷坍孔灌入 20 m³ 混凝土，實施透地雷達偵測路面下是否存在空洞狀況，並實施路面下低壓灌漿地盤改良。

(b) 事故二 滾輪切刀嚴重磨損

潛盾機掘進至 0K+575 m 處，因機頭遭不明障礙物及螺運機出口大量湧水難以關閉，導致潛盾機停機，自機首人孔開艙進入土艙檢查，經檢查後發現遭遇 $\phi=750$ mm 之巨石，如圖 4-13 至 4-14 所示，造成潛盾機滾輪切刀磨損嚴重。

(c) 事故三 路面塌陷

於民國 91 年 6 月 28 日潛盾機掘進至 911 環時，發生螺運機出土閘門大量

湧水，在兩天後 6 月 30 日發生路面塌陷，如圖 4-15 所示。推測其原因為原有污水管線年久老舊，接頭處銹蝕發生漏水，造成地層已有部份掏空之情況。潛盾機掘進施工經過掏空處下方時，大量地下水與土砂湧入螺運機出口閘門，造成土石流失及擴大已掏空之孔洞，導致發生路面下陷。施工單位隨即以混凝土直接灌漿修復路面，並在機頭土倉內灌注皂土以改善穩定地質。經設計及施工單位檢討後，往後施工前，先行裝設傾斜變位儀及沈陷點定期加強監測地盤變位，在施工中遇地下水時，放慢潛盾機施工速度，加速後續鋼環片組裝及先行背填灌漿，以避免發生路面塌陷。另外土壓平衡潛盾機持續推進施工，避免停滯，減少潛盾機停機時間過久，因盾首開挖面壓力逐漸鬆弛而導致地盤沉陷。

4.3 竹科三期之三放流管線潛盾案例



4.3.1 工程概述

此工程為新竹科學園區竹科污水處理廠主要污水排放管線。圖 4-16 顯示，放流管行經路段自東起園區污水處理廠之污水匯合井，放流管線往西穿越中山高速公路路堤南下，再轉向西沿新安路北側，沿途經過一、二號工作井，最後延伸至寶山路北側前進，接至龍泉寺前之三號工作井與上節介紹之竹科三期之二放流管線工程銜接，污水放流管全長約 3,546 m，共施作 4 座工作井。本管線內污水採重力排放方式，管線埋設深度最深達 41 m。全線採用潛盾隧道法施工。為縮短施工時程，此工程同時啟用三部潛盾機施作，分別從匯合井、一號工作井與二號工作井出發。竹科三期之三放流管線工程，業主為行政院國科會之新竹科學工業園區管理局，承包商為泛亞工程建設公司，設計單位為中華顧問工程司。施工期間為民國 90 年 11 月至 93 年 5 月。

4.3.2 地質概況

本調查基地位於新竹科學工業園區內，依據現場鑽探結果研判主要為紅土礫石地層，由棕紅色粘土及其下數十公尺之卵礫石砂土所組成。圖 4-17 顯示，現場鑽探最大深度為 50 m 試驗 15 個鑽孔，地下水位深度為 4.5~13 m。以下就本調查基地其地層分佈及其性質簡單說明如下：

1. 第一層次：表土紅土層，從 0 m~約 4 m 間，主要係由沉泥質粘土、粉砂、細砂及粗砂夾小礫石所組成之地層，色呈棕紅色。
2. 第二層次：為卵礫石層 (GM)，厚度在 4m 至 45m 之間，主要由卵礫石及具有膠結性之紅土與砂之混合填充物所組成之地層，卵礫石含量約為 60%，色呈棕黃色。本土層標準貫入試驗 N 值均大於 50。
3. 第三層次：為黃色風化泥岩層，出現於地表下約 25 m 之後，本土層標準貫入試驗 N 值均大於 100。

圖 4-17 顯示，本工程之潛盾隧道之施工位置主要在第二層次卵礫石與第三層次泥岩層內進行。

4.3.3 卵礫石地盤潛盾施工

本工程潛盾機採用土壓平衡式潛盾機開挖，共使用三台潛盾機，由日本三菱重工業株式會社所製造，如圖 4-18。圖 4-10 顯示，潛盾機外徑為 2.48 m，完工後隧道內部直徑為 1.65 m，第一次襯砌施作鋼製環片，厚度為 150 mm，長度為 900 mm，二次襯砌為無筋混凝土(II 型水泥)加設耐酸鹼內襯 PVC 防蝕軟片，厚度為 200 mm。為切削地盤內之卵礫石，圖 4-18 潛盾機之切刀轉盤上設置固定切刀與滾輪切刀。以下針對對潛盾機施工所遭遇之困難、原因探討與處理對策加以說明。

(a) 事故一螺運機螺旋葉片斷裂

於民國 91 年 9 月 13 日，三號潛盾機掘進突然發生異常無法出土，經檢查

發現因遭遇地盤內未移除之鋼軌樁等尖銳鐵材，損害螺運機之無軸式螺旋葉片 (Shaftless Spiral Coil)，導致螺旋葉片斷裂無法繼續出土，如圖 4-19。

(b) 事故二潛盾機遭遇泥岩層掘進困難

民國 91 年 9 月 30 日，一號潛盾機掘進時遭遇大粒徑且堅硬密集之卵石及堅硬泥岩 ($N>100$) 之複合地層，導致潛盾機掘進至 267 環 (0k+241m) 時千斤頂推力異常，無法掘進，其地質變化及千斤頂負載程度皆超出預期狀況。推測原因可能是由於潛盾機掘進時，中途有部分地層由卵礫石層進入泥岩層，由於泥岩層甚為堅硬 ($N>100$)，切削十分困難，潛盾機推進緩慢，卵礫石落入土艙速度緩慢，螺運機閘門出渣極為緩慢。泥岩堅硬影響千斤頂推進速率，掘進能力無法發揮。施工單位之處理對策為採用加入顆粒狀膨脹性皂土充填土艙，在土艙內形成土栓 (Soil plug) 及提高推力施工。施工單位將 10 支千斤頂全推，總推力達 4000 KN，推至第 278 環時速度已有改善，合計從 267-278 環共 11 環 (約 9.9 m) 共推了 25 天。

(c) 事故三螺運機出土閘門大量湧水及潛盾機盾尾滲水

民國 92 年 5 月 7 日，三號潛盾機於 2k+090m 處潛盾機掘進受阻，螺運機出土閘門大量湧水 (如圖 4-20)，因此螺運機無法順利出土，此外因遭遇地下水盾尾刷 (Tail seal) 無法阻擋地下水自盾尾空隙滲入機內，因此施工單位決定停機進行處理。推測原因為潛盾機離開出發段地盤改良區域遭遇高壓湧水層 (潛盾機掘進位置約於地下水位下 24 m)，導致地下水大量湧入螺運機出土閘門與盾尾。在潛盾機停機後，施工單位對地盤進行化學灌漿，增加土壤密度、填充孔隙，使潛盾隧道順利通過已故地區。

第五章

新竹湖口台電六輸潛盾工程案例

本章介紹台灣新竹湖口台電六輸潛盾施工工程，本研究介紹二個案例，分別為(1)新工~湖北電纜線路洞道工程案例；(2)竹工超高壓變電所電纜線路洞道工程案例。以下分別介紹各案例之工程概述、地質概況與潛盾隧道施工所遭遇之問題及解決方案。

5.1 新工~湖北電纜線路洞道工程案例

5.1.1 工程概述

為提昇新竹工業區供電容量及供電品質，台電輸變電工程處中區施工處於民國 94 年 4 月推動「新工~湖北 161 kV 電纜線路隧道暨附屬機電設備設計及施工統包工程」。如圖 5-1 所示，考量長期系統及配電線路之安全及供電品質，本工程採潛盾隧道工法施工。設計單位於新工變電所~湖北變電所間規劃 2 座直井，潛盾機施工由 1 號直井（湖北變電所旁）出發（以 S 曲線 $R=100\text{ m}$ 進入工業二路），沿著工業二路以急曲線（ $R=28\text{ m}$ ）右轉文化路至 2 號直井（新工變電所旁），中途穿越國道 1 號中山高速公路下方，以及遭遇曲率半徑 $R=28\text{ m}$ 之急曲線施工，隧道全長為 544 m。新工變電所隧道內共需容納 161 kV 電纜 4 迴線複導體及 22 kV 配電線路 18 饋線，另須預留 161 kV 電纜 2 迴線複導體之擴充空間。此工程業主為台灣電力公司，統包廠商為豐順營造公司，設計單位為財團法人中華顧問工程司。施工時間為民國 94 年 7 月 23 日至民國 96 年 5 月 3 日，共 650 天。

5.1.2 地質概況

本工址位於湖口交流道附近，此區屬湖口台地，圖 5-2 顯示，地形尚屬平坦，地下水位約位於地表下 8~11 m，附近出露地層包含楊梅層、店子湖層、中壢層及現代沖積層。本工址潛盾隧道通過之地層剖面如圖 5-2，依據鑽探結果研判，可分為以下三個層次：

1. 第一層次：為回填層 (SF)，約於地表下 0~1.45 m，N 值為 5，土壤平均密度為 1.88 t/m^3 。
2. 第二層次：為卵礫石層充填粉質細砂及粘土 (GP)，厚度約為 0.8 m~14.8 m，N 值大於 50，平均密度為 1.9 t/m^3 。其含卵礫石量約為 60%。
3. 第三層次：為砂岩層，厚度約為 12.8 m~20.0 m，N 值為 11，砂岩平均密度為 1.85 t/m^3 。

圖 5-2 顯示，本工程之潛盾隧道之施工位置主要在第二層次之卵礫石層內進行。



5.1.3 卵礫石地盤潛盾施工

本工程採用中折式加泥式土壓平衡潛盾機，見圖 5-3，潛盾機由三菱重工業株式會社製造，潛盾機外徑為 4.54 m，完工後隧道外部直徑為 4.40 m，內部直徑為 3.90 m，採用鋼筋混凝土環片及鋼環片襯砌，環片厚度為 250 mm，見圖 5-4。鋼筋混凝土環片之長度為 1000 mm，鋼環片之長度為 500 mm。圖 5-3 顯示潛盾機之切刀轉盤採輪輻軸型，由於隧道開挖之第二次層含卵礫石量頗高，因此施工單位訂製潛盾機面盤上設置主切刀、滾輪切刀、先行切刀、輔助切刀與擴挖刀，為了便利大顆粒卵石通過螺運機，採無軸式螺旋葉片。

圖 5-5 顯示，潛盾機在實際鑽掘施工時，原本研判卵礫石之含礫量約為 60%，但在局部路段潛盾開挖遭遇含礫量 90% 以上之地層，導致嚴重磨耗潛盾機切刀盤，因此必須時常停機，自機首人孔開艙檢查。經設計與施工單位檢討後，

決定於地中更換磨損之切刃並提高檢查之頻率，使得工程得以順利完成，但也因此導致工程進度受阻。

5.1.4 穿越國道高速公路下方避開障礙物

圖 5-2 顯示，根據管線調查發現，潛盾機掘進沿線上方有既設 $\phi=800$ mm 自來水管穿越高速公路，考量自來水管線推管工程因推管施工所需，切除並殘留長度 9 m 之鋼板樁於地中，此類地中障礙物並未註記於管線調查之圖資。為降低施工對交通之衝擊影響，及預留較大隧道覆土以確保自來水管線及高速公路之安全，潛盾隧道施工路線頂部高程，採配置於鋼板樁下 0.5 m 以避開此一地中障礙物。

5.1.5 S 曲線隧道避開私有地

受限 1 號直井尺寸，並配合潛盾機利用反力座推進發進，隧道發進後需一直線段使潛盾機完全駛出直井後，才能開始進行曲線施工。圖 5-1 顯示，由於台電變電所用地有限，隧道需採 S 曲線轉入道路，以避免隧道穿越鄰房施工。潛盾機遭遇急曲線一般採鋼環片襯砌施工，為縮減成本，本工程為國內首採以長度 1000 mm 之異形混凝土環片於 $R=100$ m 之曲線施工。採用大寬度之環片施工，可能遭遇環片組裝精度如何提高，以及如何避免環片受損與環片組裝錯位過大導致之漏水問題。當潛盾機曲線施工時，潛盾機之姿勢屬內側超挖情況，無法直接扭轉成另一側之超挖。因此一般潛盾機在開挖兩反向轉彎之 S 曲線，須預留約至少 1~2 環片寬度加潛盾機身長之直線段（圖 5-1 所示），以方便潛盾機進行姿勢之調整，以減少潛盾機方向控制不準之風險。本工程 1 號直井前 S 曲線段之直線段長度為 5 m，長於本工程所採中折型潛盾機之前膛長為 2.94 m。右轉 S 曲線施工後，即當潛盾機前膛姿勢駛回直線後，即可進行另一方向之左轉曲線施工。

5.1.6 急曲線潛盾隧道避開鄰房

圖 5-1 顯示，於仁和路與文化路的交叉口，受限於道路寬度，本計畫隧道設計採 $R=28\text{ m}$ 之急曲線施工以避免隧道侵入民房。不同於一般潛盾施工採寬度 300 mm 之鋼環片，本工程採寬度 500 mm 鋼環片施工（圖 5-4），預期可精簡環片端版數量，降低成本並減少施工輪進數目以縮短工期。可惜在施工過程中，仍有少數環片螺栓因受力集中而導致剪裂，須耗時焊接結合補強，雖然順利完成隧道工程並符合功能需求，但在整體評估發現，使用寬度 500 mm 之鋼環片施工後並未達成降低成本與縮短工期之目的。圖 5-6 顯示在急曲線潛盾機施工完成後隧道內之實際狀況。

5.2 新工超高壓變電所電纜線路洞道工程案例

5.2.1 工程概述

為回應社會大眾對市容觀瞻要求，輸電線安全距離之疑慮以及提昇輸電系統可靠度，台電公司輸變電計畫陸續推動輸電線地下化工程。在交通繁忙道路下計劃採潛盾隧道工法施工以降低對交通之衝擊影響。如圖 5-7 所示，本工程地點起自新竹縣湖口鄉竹工 E/S 出口之竹工直井（台一省道里程約 53.5 K 處），沿台一省道往南通過老湖口，至山崎路橋旁之山崎直井（台一省道里程約 62.2 K 處）間，總長約 $8,390\text{ m}$ ，沿途施作 9 處直井與 8 段潛盾隧道。本工程以 4 台加泥式土壓平衡式潛盾機施工，每台潛盾施作 2 段隧道，竹工直井至畚箕窩直井隧道段潛盾機外徑為 6.70 m ，隧道內徑為 6.0 m ，畚箕窩直井至山崎直井隧道段潛盾機外徑為 6.24 m ，隧道內徑為 5.6 m 。此工程業主為台灣電力公司，統包廠商為介興營造公司與日商清水營造工程股份有限公司共同承攬，設計單位為中興工程顧問公司，施工時間為民國 97 年 10 月至論文完成尚在施工進行中。

5.2.2 地質概況

本案例施工所經過地層，包含楊梅層、店子湖層、中壢層及現代沖積層。現場鑽探 13 個鑽孔最大深度為 35 m，地下水位於地表下約 0~6.3 m，其地質狀況主要分為以下三個層次，直井及鑽孔相關位置與地質剖面如圖 5-8 所示。

1. 第一層次：為回填層（SF）以紅棕色土壤為主，於地表下 0~3 m，標準貫入試驗之 N 值為 7，屬於中等緊密之砂土層。
2. 第二層次：為黃棕色砂質粉土（SM）與粘土夾卵礫石，厚度約為 3~7 m，N 值為 10，土壤密度平均為 2.62 t/m³。
3. 第三層次：為卵礫石層（GP），由卵礫石夾黃棕色粗細砂、粉土及粘土，厚度最深為 30 m，N 值大於 100，土壤密度平均為 2.62 t/m³。

圖 5-11 顯示，本工程之潛盾隧道開挖，主要在第三層次之卵礫石層內進行。

5.2.3 卵礫石地盤潛盾施工

本工程採用中折式加泥式土壓平式潛盾機，共使用 4 台潛盾機，如圖 5-9(a) 和圖 5-9 (b)，由川崎重工業株式會社製造。為方便隧道之排水，圖 5-8 顯示隧道由低向高，由西向東開挖。圖 5-7 顯示，從山崎直井至畚箕窩直井，隧道內徑為 5.6 m，2 台潛盾機外徑皆為 6.24 m；從畚箕窩直井至竹工直井，隧道內徑為 6.0 m，2 台潛盾機外徑為 6.7 m。表 5-1 說明 2 種潛盾機之相關設計與規格。潛盾隧道採用鋼筋混凝土環片襯砌，環片厚度為 250 mm，部分曲線段環片長度為 750 mm，其餘路段環片長度皆為 1200 mm。圖 5-10 為潛盾機採用無軸式螺運機之土倉進土口。

此工程目前正在進行，其中從山崎直井至#6 A 直井之潛盾隧道已貫通，全長約 341 m，此段隧道於民國 97 年 11 月開挖至民國 98 年 3 月 27 日到達，歷時約 4 個月，此段潛盾機上方覆土深約為 10 m，隧道開挖造成之最大地表沉陷量約為 10 mm。在潛盾機掘進過程遭遇卵礫石地盤，並經過 R=150 m 曲線段路

段，施工過程中並未遭遇重大困難，工期與預估相符。

5.2.4 切刀轉盤磨損

圖 5-11 為潛盾機到達#6A 直井破鏡出土狀況；圓中鏡面出現之垂直 PVC 管為到達段地盤改良使用之雙環塞工法外灌漿管。潛盾機到達後檢視發現，潛盾機切刀轉盤磨損比預期嚴重。圖 5-12 顯示虛線圈位置，於面盤中心向外約 2.08 m 處，切刀磨損的狀況特別嚴重。研判卵礫石受切刀盤旋轉切削刮除，導致開挖面上部卵礫石崩落，經由切刀盤帶動，卵礫石向切刀盤中央線集中，卵礫石堆積於集中在距切刀盤中心位置之 $2/3R$ (2.08 m) 處。圖 5-13 顯示潛盾機固定切刀和滾輪切刀磨損情況，經由設計與施工單位檢討後，更新所有損壞之滾輪切刀與固定切刀，在第二段隧道掘進過程中，隨時注意潛盾機推進時切刀盤承受之推力與扭力是否異常，並固定頻率自盾首人孔開艙做檢查潛盾機切刀盤磨損情況。

5.2.5 工作井施作

傳統工作井施工多以順打或逆打等工法，其施工時間相當長，影響工程施工工期，經評估後決定採用新工法—沉箱工法施作。圖 5-14 (a) 與 (b) 顯示為山崎直井、#4A、#5A 與#6A 直井之頂視圖和側視圖，中間為反力作之架設位置，圓形工作井外側直徑為 19.6 m，內側直徑為 1.7 m，沉箱厚度為 1.3 m。圖 5-15 顯示工作井施作初期怪手開挖情形，圖 5-16 顯示為沉箱壁體尚未澆置混凝土實際狀況，圖 5-17 顯示沉箱主體（工作井）施作完成之情形。施做沉箱工法，預期能降低工程成本、縮短工時，並且提升施工之能力，但可能遭遇箱體沉降力量不均勻、沉箱垂直度偏移與扭曲難以修正，導致產生沉箱節塊接合處額外受力或滲漏。本工程採用沉箱工法施作至完工進度與情況良好，可當作將來遭遇卵礫石工作井工法採用之選擇。

5.2.6 氣泡加泥工法

加泥式土壓平衡潛盾工法，主要將加泥材加壓注入開挖面以提高開挖面土層之止水性，並塑造開挖面土層之塑性及流動性。在同時維持開挖面壓力的狀態下，一方面驅動潛盾機之切刃機頭進行隧道之鑽掘作業。加泥系統為加泥式土壓平衡潛盾機之基本配置，根據過去施工經驗，在卵礫石層採用加泥的措施效果並不佳，土倉內切削土體經常堵塞導致潛盾機無法正常掘進，若加泥量過大則導致掘進速率降低，施工成本增加。有鑒於此，採用在加泥的基礎系統上增加泡沫系統，利用加入泡沫改善土體粒狀構造，吸附在土體顆粒之間的氣泡可以減少土體顆粒的摩擦，增加切削土體的黏聚力。圖 5-18 顯示由實際試驗中，加泡沫 100%、30%與未加泡沫土壤比較，發現加入泡沫後土壤坍塌度明顯增加。在實際施工時，可依據地質的變化，加泥、加泡沫或同時加入，以求達到最佳之施工效果。



第六章

桃園國際機場聯外捷運系統潛盾工程案例

為改善桃園國際機場聯外交通，連結「台北都會區大眾捷運系統」與「高鐵桃園車站」等交通運輸樞紐。圖 6-1 所示，交通部高速鐵路工程局計畫於施作「桃園國際機場捷運系統」，此系統將與台北地區捷運系統及高速鐵路連結。本章介紹「桃園國際機場捷運聯外系統」潛盾隧道施工案例（簡稱桃園機場捷運），以下分別說明工程概述、地質概況與潛盾機施工所遭遇之問題及解決方案。

6.1 工程概述

本工程為桃園機場捷運 CU02A 標潛盾隧道工程，如圖 6-2 所示，潛盾隧道工程路線主要從南崁溪東側工作井（A11-P1），沿途經過機場航廈下方，到達埔心溪西側工作井（A14-P2），共分為 5 段隧道施工，隧道全長約為 3,605 m。此標工程之業主為交通部高速鐵路工程局，承包廠商為榮民工程股份有限公司與日商奧村組股份有限公司共同承攬，設計單位為台灣世曦工程顧問股份有限公司。CU02A 標工程施工時間自民國 97 年 4 月 23 日起，至論文完成時尚在施工進行中。

6.2 地質概況

圖 6-3 標示，本案例潛盾隧道施工所經過之地層，包含桃園層（礫石層）與大南灣層（風化砂岩層），地下水位約位於地表下 3~10 m。本工址潛盾隧道通過之地層剖面如圖 6-3，依據鑽探結果研判，地質概況可分為以下三層次：

- (1) 第一層次：為表土紅土層（SF），約於地表下 0~3.5 m，N 值為 8，土壤平均密度為 1.85 t/m^3 。

(2) 第二層次：為黃棕色礫石層 (GP) (桃園層)，厚度約為 3.5 m~25 m，
N 值大於 50，土壤平均密度為 2 t/m^3 。

(3) 第三層次：為大南灣風化砂岩層 (大南灣層)，厚度約為 20 m~50 m，
N 值大於 50，砂岩平均密度為 2.1 t/m^3 。

圖 6-3 顯示，本工程之潛盾隧道之施工，主要在第二層次之卵礫石層與第三層次之風化砂岩層內進行。

6.3 大口徑鑽孔地質調查

為進行潛盾隧道施工，必須了解桃園層卵礫石之最大粒徑與卵礫石粒料含量，除了採用傳統鑽探取樣外，本案例另外採用大口徑鑽孔取樣與現地篩分析試驗。圖 6-4 為大口徑鑽孔調查現場施工狀況，施工單位以全套管鑽掘樁 (直徑 1.2 m) 為維持鑽孔穩定的套管 (深度 25 m)，以鯊魚頭取樣器進入套管挖抓取在預訂深度之卵礫石土樣，並就取出之卵礫石土樣進行篩分析與粒徑量測。大口徑鑽孔調查針對卵礫石層調查共施作二處 (圖 6-3 所示)，分別為編號 LSB-1 與 LSB-2，調查結果 (圖 6-5 及圖 6-6) 簡單說明如下：

(a) LSB-1：由地表下 16~17 m 處為卵礫石層 (GP)，卵石最大粒徑為 160~600 mm，含卵礫石量約為 85%。

(b) LSB-2：由地表下 13~14 m 處為卵礫石層 (GP)，卵石最大粒徑為 180~320 mm，含卵礫石量約為 80%。

6.4 遭遇卵礫石潛盾機之設計考量

本工程採用加泥式土壓平衡潛盾機，1~6 號潛盾機由日本奧村機械公司製造 (如圖 6-7)，7~8 號由日立造船株式會社製造，8 台潛盾機外徑皆為 6,240 mm，環片外徑 6100 mm，盾尾空隙，70 mm，環片內直徑為 5600 mm，採用鋼筋混凝土環片襯砌 (如圖 6-8)，環片厚度為 250 mm，寬度為 1,000 mm。圖 6-9 顯示，

潛盾機採用輪輻式切刀轉盤，轉盤內之輪輻軸為 6 支。切刀轉盤設計開口率為 50%，主要目的為潛盾機掘進遭遇卵礫石層時，大多數卵礫石能在不被破碎情況下進入土倉內，經由螺運機順利排出，潛盾內螺運機之直徑為 850 mm，可排除最大卵石則為 700×600 mm，如遭遇巨大卵石時，於輪輻軸間設置之中間限制環及中間限制塊，以阻止超出容許範圍（650 mm 以上）之大卵石通過切刀轉盤，無法進入土倉之大卵石經由切刀盤上之滾輪切刀及刮削切刀加以破碎，再進入土倉內。

圖 6-10 顯示潛盾機切刀轉盤之切刀形狀及配置位置，當潛盾機掘進遭遇卵礫石時，粒徑小於 650 mm 之卵礫石，經由圓柱式（棍子式）切刀及先行切刀擾動及切削後，再經刮削切刀經取土開口推進土倉內；粒徑大於 650 mm 之卵石被阻於切刀盤外，則由滾輪式切刀於開挖面前破碎後，再經刮削切刀推進土倉內。

圖 6-11 顯示切刀切削地盤之順序為：(1) 由圓柱式切刀先對地盤做第一次切削；(2) 滾輪式切刀破碎顆粒較大之卵石；(3) 由先行切刀對地盤做第二次切削；(4) 由刮削切刀將土石推入土倉內。

6.5 路面沉陷

事件發生於 97 年 4 月 26 日，當 1 號機潛盾機推進上行線第 10 環時(0k+010 m)，圖 6-12 所示，路面突然發生下陷。路面沉陷實際狀況如圖 6-13 (a) 及 (b) 所示。事件發生前潛盾機於第 8~10 環掘進時，已發生潛盾機推進阻力急速增大和出土量增加的情況，施工單位當時研判潛盾機可能遭遇地層空洞部分（卵礫石土層之細粒料部分已流失只剩卵礫石顆粒殘留之狀態），施工單位原本預定在 4 月 28 日施作地盤補充灌漿作業，但是在 4 月 26 日已發生路面沈陷狀況。設計及施工單位針對意外事件之原因如下說明。

- (1) 本工程出發工作井 (A11-P1) 之擋土設施為全套管基樁及噴凝土，因地下水位在地層下 1.2 m，因此部分工作井外之土砂細粒料隨地下水流

滲流進入工作井底部，因而工作井周邊卵礫石土層產生空洞。雖然在潛盾機掘進前，施工單位已於工作井外部周邊自地面施作補充灌漿，但並未完全填補完卵礫石土層內之空洞。

- (2) 在潛盾機初期掘進，考慮潛盾機之背填灌漿恐影響到潛盾機頭之縱坡向下角度及工作井之擋土壁，施工單位無法升高背填灌漿壓力，因此潛盾機掘進通過之地盤（卵礫石土層內空洞部分）無法立即以背填灌漿有效填補，防止路面沉陷發生。
- (3) 潛盾機於卵礫石層開挖，切刀盤切削卵礫石造成之震動與超挖量相對較切削其他土層大，又因此段潛盾機掘進之覆土厚度（約為 8 m）小於 1.5 倍潛盾機直徑（ $D=6.24\text{ m}$ ），導致潛盾機掘進時產生地表之沉陷。

針對上述發生原因，施工單位採取之因應對策如下：

- (1) 於開挖期間，加強對出發工作井地下水位之管制，採用抽水馬達持續抽水，以防止卵礫石間之細粒料流失。
- (2) 於工作井周邊及潛盾隧道沿線位置，自地表施作探查鑽孔及透地雷達，以確認地盤內是否存在空洞，如確認有空洞，則可自探查鑽孔施作補充灌漿填補空洞。
- (3) 加強土壓力、加泥材、背填灌漿及排土量之監控管理，其中土倉內土壓以推進土壓+水壓+預備壓（0.02 MPa）為管理值下限。以設計出土量之 120%作為排土管理值。背填灌漿壓力以介於 0.5 MPa~0.4 MPa 為管理區間。背填灌漿量以達 150%設計量為目標值。並嚴格控管出土作業，當出土量發生異常時，立即檢討並採取補救措施，以防止發生地表沉陷。
- (4) 潛盾機掘進之覆土厚度避免小於 1.5 倍潛盾機直徑（ $D=6.24\text{ m}$ ），當覆土深度不足 1.5D（9.36 m），施工單位需採用輔助工法以防止潛盾機掘進造成地表沉陷。

6.6 潛盾機掘進發生異常

1 號潛盾機於掘進至 65 環 (0k+065 m)，完成初期掘進，進行停機並辦理設備轉換，約兩星期後重新開始掘進。當掘進至第 74 環時，發生潛盾機掘進速率下降、排土溫度上升、扭力及推力增大之狀況，導致掘進困難，最後因扭力達到極限仍完全無法推進。施工單位決定停機打開土艙檢查，結果發現潛盾切刀轉盤遭到卵礫石嚴重堵塞，如圖 6-14 所示。原因探討如下說明。

- (1) 潛盾機由於在 65 環停機進行設備轉換，因停機時間 14 天過久，導致土艙內之土石阻塞產生固結 (Cementing) 情形，因原本受切削擾動疏鬆之卵礫石土壤隨時間增加 (Aging) 趨於緊密，故無法順利排出。
- (2) 灌注加泥材於開挖面之注入孔因遭固結卵礫石阻塞而無法發揮應有功能，導致土艙內之土石攪拌因缺乏加泥材以致於流動性差。

針對上述發生原因，施工單位之因應對策說明如下：

- (1) 當後續潛盾機停機時間較長時，必須持續實施一天一次以上切刀轉盤之轉動，以保持開挖面及土艙內土石處於擾動疏鬆狀態。同時將加泥材灌注於開挖面及土艙內，以保持開挖面及土艙內土石之流動性，避免土石黏著於切刀盤及土艙內。
- (2) 如圖 6-15 所示，施工單位於切刀轉盤內側增設可隨切刀轉盤旋轉之攪拌棒；此外並於隔艙壁上裝設固定攪拌棒，以將土艙內之土石與加泥材充分攪拌，增加其流動性，避免土艙內部之土石逐漸固結，使切刀盤之轉動掘進遭到束制。

6.7 灌漿改良機上地盤

桃園國際機場捷運潛盾隧道工程接近機場塔台與航道，因潛盾機掘進時，必然造成地表沉陷，故施工單位通過敏感區地盤時格外謹慎。除了以採用之背填灌漿外，在經過航道與塔台附近時，本工程採用機上灌漿工法施作，其主要

目的在潛盾隧道急曲線超挖部充填灌漿以防止地盤沈陷。圖 6-16 顯示，機上灌漿與潛盾機推進時同步進行，其灌漿位置在潛盾機內上方，不同於背填灌漿在盾尾施作灌漿。在卵礫石層施作機上灌漿可防止卵礫石崩落所造成之空洞，以減少沉陷發生。本工程潛盾機於未施作機上灌漿所造成沉陷量約為 3~10 mm，潛盾機於航道下方掘進時施作灌漿改良機上地盤後，所造成之沉陷量僅約為 2 mm。

6.8 切刀轉盤磨損

相對於一般土層在卵礫石層地盤之潛盾隧道施工中，切刀盤磨損之狀況嚴重。在桃園捷運潛盾隧道工程中，1 號潛盾機總共掘進了 1205 m。圖 6-17 虛線顯示，於面盤中心向外半徑約 2.08 m 處 ($R=3.12$ m)，切刀盤遭到卵礫石磨損出現明顯之凹痕。切刀轉盤主要磨損位置與台電六輸潛盾隧道案例相同，其位置皆約位於離潛盾機中心位置之 $2/3R$ 處。研判其原因卵礫石受切刀盤旋轉切削掘進之影響，導致開挖面上部周圍卵礫石向下崩落，由於螺運機取土口位於切刀盤中心線之後方，崩落之卵礫石逐漸向切刀盤中心線集中，建議在往後設計面盤時可加入考量此特殊之切刀盤磨耗行為。表 6-1 為 1 號潛盾機預估與實際磨損量之比較，圖 6-18 顯示，棍子式切刀齒磨損嚴重超出預估範圍，其餘切刀種類皆在預估之內。

第七章

潛盾機遭遇卵礫石之設計與施工考量

本研究藉由蒐集國內外 24 組遭遇卵礫石潛盾施工之案列，如表 7-1 所示，其中 O1 至 O3 案例採用開放式潛盾機施工，S1 至 S5 案例採用泥水式潛盾機施工，E1 至 E16 案例採用土壓平衡式潛盾機施工，整理歸納出潛盾機遭遇卵礫石地層時設計與施工上特殊考量與對策。以下針對卵礫石最大粒徑調查、大顆粒卵石及巨石處理方式、潛盾機切刀轉盤之特殊考量、開挖面穩定處理與輔助工法等五項加以說明。

7.1 卵礫石最大粒徑調查

於卵礫石層之地質調查中，以卵礫石之最大粒徑 (D_{max}) 最不易推估，而此項資料對潛盾機設計切刀轉盤開口率 (開口大小)、設計排除卵礫石螺運機直徑大小尺寸、切刀磨損速率與潛盾機掘進速率均相關。由於大粒徑卵石及巨石之尺寸遠超出一般鑽孔之直徑，故為求得卵礫石之最大粒徑，除了一般地質調查外，設計單位另外施作大口徑鑽孔調查 (案例 E4,E6,E16)，以全套管方式設置直徑約 1 m 以上之大口徑鑽孔，將調查地點之土樣以抓斗 (Grab) 夾取而出，在現場進行大型篩分析及直接量測試驗，以確認卵礫石之最大粒徑，如案例 E16 之圖 6-4 ($D=1.2$ m) 所示。

濱田和人 (1986) 建議由大型篩分析結果求得顆粒分佈之雙對數曲線，如圖 7-1 所示。假設圖 7-1 之卵礫石粒徑對數與重量通過百分比對數呈線性關係，經通過重量百分比 60% 以上之範圍，推估最大粒徑 (D_{max}) 可以用 7.1 式進行外插：

$$D_{max} = \frac{d_1}{(P_1)^{1/no}} \quad (7.1 \text{ 式})$$

$$n_0 = \frac{\log(P_2/P_1)}{\log(d_2/d_1)} \quad (7.2 \text{ 式})$$

P_1 : d_1 (mm) 之通過百分比

P_2 : d_2 (mm) 之通過百分比

n_0 : 粒度指數 (斜率)

例如圖 7-1 中，由大型篩分析結果得 $d_1=150$ mm， $d_2=300$ mm， $P_1=61.1\%$ ， $P_2=82.6\%$ ，依據 (7.2 式) 求得此卵礫石土層粒度指數 (斜率) $n_0=0.435$ ，代回 (7-1 式) 中求得 $D_{\max}=466$ mm，此即為計算所推估之最大粒徑，迴歸小於實地測得之最大粒徑 $D_{\max}=497$ mm。上述濱田和人 (1986) 建議預估卵礫石最大粒徑之方法，仍有待大量現地資料之驗證。

7.2 大顆粒卵石及巨石處理方式

潛盾機開挖面所出現之卵礫石之處理方式有二種，即直接排除 (取入) 方式與破碎排除方式。以下分別做說明。

7.2.1 直接排除方式

「直接排除方式」為將出現於開挖面之卵礫石不加以破碎，而直接經由潛盾機土艙內排土口輸送至機內加以排除之方式。

密閉型潛盾機可處理之卵礫石粒徑大小則視泥水加壓式或土壓平衡式而異。泥水加壓式潛盾機之排礫方式主要分為泥水艙內排除方式 (案例 S2) 與排泥管內排除方式 (案例 S1,S4)。表 7-2 所示，採排泥管內排除方式之潛盾機，依照不同直徑，對應可排除之卵礫石粒徑大小。另外採泥水加壓式艙內排除方式，則可排除最大粒徑可達潛盾機外徑之 1/9~1/10。

針對土壓平衡式潛盾機螺運機種類與可排除最大粒徑，如表 7-3 所示，依照

不同直徑，對應可排除之卵礫石粒徑大小。圖 7-2 為土壓平衡式潛盾機帶式（無軸式）螺運機示意圖。根據國內外案例發現，土壓式潛盾機型以採用帶式（無軸式）螺運機案例為多（案例 E1,E4,E8,E9,E12,E13,E14,E15,E16）。

7.2.2 破碎排除方式

「破碎排除方式」指將開挖面前方出現之卵礫石加以破碎，分解成潛盾機土艙排土口可排除之粒徑大小加以排除。當卵礫石於開挖面前方（尚未進入潛盾機內）即予以破碎者，稱為「一次破碎」，通常在面板上裝設滾輪式切刀，在大卵石尚未進入潛盾機內前即予破碎。如圖 7-3 所示，由滾輪切刀在卵石表面產生破碎與裂痕，再進一步壓碎變成數塊較小卵礫石，最終粉碎解體排入土艙內。圖 7-4 則為切削切刀與滾輪式切刀之種類，分成齒輪型、刀頭植入型與盤型三種。

當卵礫石直接或經一次破碎後排入潛盾機內後，再對卵礫石施予壓力及剪力使卵礫石破碎之方式，稱為「二次破碎」。圖 7-5 顯示為泥水式潛盾採用機內碎石機（Crusher），當大顆粒卵礫石經由潛盾機推進排入土艙內，卵礫石在碎石機內加以破碎後，由攪拌翼排至潛盾機後方出土。

根據國外施工案例，一般泥水加壓式潛盾工法在一次破碎階段即將大粒徑卵石破碎切割成 70~80 mm 左右之尺寸，進入潛盾機內再由碎石機壓碎成 30 mm 左右之粒徑，再由排泥管出碴（案例 S1,S4）。而土壓式潛盾工法通常在一次破碎後，將大顆粒卵石破碎切割成 200~300 mm 左右直接出碴。

7.3 潛盾機切刀轉盤特殊考量

於卵礫石層施工所採用之潛盾機，必須具有切割及破碎大顆粒堅硬卵礫石之功能，通常必須具備較強之機械能力（例如切刀之抗磨損能力），其規格及設計考量異於一般之潛盾機。經由國內外施工案例，本研究整理歸納說明如下：

- (1) 潛盾機掘進開挖面遭遇卵礫石時，潛盾機需具備切割及刮削卵礫石能力

之切刀轉盤，並於轉盤上裝設切刀與滾輪式切刀等切刀裝置，例如案例 E16 之圖 6-10 所示。

- (2) 切刀盤上之切刀裝置須具抗磨損能力，一般切刀裝置材料採用耐久性高的超硬合金，藉此增強切刀前端之磨損與耐久性。超硬合金由鎢鋼碳化物和鈷元素之粒子混合燒結而成，其性質韌性較差對耐衝擊性較弱，因在切刀轉盤上之切刀配置位置需加入考量。
- (3) 切刀盤上之切刀裝置須具可更換性。圖 7-6 所示，當潛盾機遭遇含礫量較高之開挖面與流木等障礙物時，其更換頻率需要增加（案例 S1,S4, E2,E7,E12,E13,E14,E15,E16）。圖 7-7 (a) 顯示維修人員可經切刀盤上之維修人孔到達開挖面，圖 7-7 (b) 維修人員於開挖面維修與更換切刀之情形。E14 案例中，潛盾機掘進遭遇大量卵礫石，部分斷面含卵礫石量達 90% 以上，導致潛盾機切刀磨損嚴重。經施工單位檢討後，最後採取每掘進 300 m 之距離，即開艙檢查切刀磨損狀況與更換切刀，直到工程完工。E16 案例設計以聯絡通道作為檢查與更換切刀之地點，平均約每 400 m 更換切刀設備一次，以避免因切刀快速磨耗導致切刀轉盤之切削能力下降。
- (4) 潛盾機切刀轉盤之開口寬度與開口率（開口率=開口面積/切刀盤面積），將影響開挖面之穩定和掘進速率。潛盾機遭遇卵礫石層時，若切刀轉盤開口寬度比較狹窄，細粒土壤經開口進入土艙，但大顆粒卵石及巨石被阻於土艙外，則切刀轉盤所承受扭力較大，且掘進阻力大，使掘進速率下降。相反地，開口寬度增大時，大小顆粒土壤經開口皆湧入土艙，會造成開挖面不穩定之危險。根據國內外施工案例經驗，各施工案例之潛盾機切刀盤開口率介於 18%~50% 之間，潛盾機切刀轉盤之開口尺寸大致為潛盾機的排土裝置所能通過的粒徑的尺寸。案例 E16 於大口徑鑽孔地質調查測得最大粒徑為 650 mm，因此在設計切刀轉盤開口寬度，依據地質調查測得之最大粒徑（圖 6-9 所示），以 $d=880$ mm（外側）

及 $d=731\text{ mm}$ (內側) 作為可排除卵礫石之最大粒徑，此切刀盤之開口率為 50%，螺運機則設計直徑 800 mm 為可排除之最大粒徑。

7.4 開挖面穩定處理

圖 7-8 所示，卵礫石層中之大顆粒卵石受切刀盤旋轉推進之影響，使潛盾機外周之地層因應力釋放及震動而產生鬆動，破壞原本卵礫石排列方式，因而造成開挖面不穩定。卵礫石層中之細粒料經切刀盤開口迅速排入土艙內，而卵石則因面板之推擠作用，堆積集中於潛盾機前方，增加潛盾機掘進之困難。

7.4.1 泥水式潛盾機開挖面穩定處理

泥水加壓式潛盾機主要以泥水壓管理與開挖土量管理維持開挖面之穩定，在卵礫石層施工時，因卵礫石滲透係數甚為高且開挖面如圖 7-8 所敘述開挖面地盤鬆動且持續崩落，導致地盤無法形成泥膜，造成潛盾機開挖面逸失泥水問題。另外當卵礫石層所含之細料為膠結疏鬆、自立性不佳之砂質土時，由於泥水壓無法阻擋比重較大之卵礫石崩落，因而導致開挖面不穩定。案例 S5 (大阪市地下儲水池) 因卵礫石開挖面逸泥問題而提高泥水比重至 1.3~1.4 左右改善處理，施工單位另外施作藥液灌漿改良開挖面，降低透水係數防止細粒料流失，增加自立性防止開挖面卵礫石崩落。案例 S1 (川崎市下水道) 在潛盾隧道掘進上方覆土層皆為卵礫石層(延伸至地表)，由於缺乏可形成覆蓋層之不透水層，容易產生開挖面鬆動及卵礫石崩落之危險，因而全線採用藥液灌漿工法改良開挖地盤，降低地盤之透水係數 (改良至滲透係數小於 10^{-5} cm/sec)，以防止逸泥，維持開挖面之穩定。

7.4.2 土壓平衡式潛盾機開挖面穩定處理

土壓式潛盾機主要藉由螺運機進行排土量控制，以獲得開挖面穩定所須之泥土壓及止水性。圖 7-9 與圖 4-20 案例 E12（新竹竹科污水下水道）顯示潛盾機掘進於卵礫石層中，由於螺運機內部卵石、礫石及砂土之顆粒大小不一，不易形成連續性之土塊，造成空隙產生，使土塊壓縮效果減小，於高壓與透水卵礫石地帶不易阻止地下水，且容易從螺運機排土口滲出，影響潛盾機開挖面之穩定。施工單位於土艙與螺運機入土口處添加水泥漿液，減少空隙之產生，降低地下水滲出同時使排土形成連續性之土塊。

7.5 輔助工法

針對在卵礫石地層潛盾機施工常見採用之輔助工法，以下分成灌漿工法、冰凍工法與化學藥液灌漿作說明。



7.5.1 灌漿工法

潛盾機之盾尾推離襯砌環片時產生之空隙，須以背填須灌漿材料迅速填充，其目的在防止地盤沉陷、提高襯砌止水性及使土壓均勻加載於襯砌等。在卵礫石層中，因潛盾機外周大粒徑卵礫石隨著潛盾機掘進而排入機內，擾動範圍之土砂持續崩落造成潛盾機外周土層形成較大空隙（見圖 7-8 b），導致盾尾空隙較一般地層為大。根據國內外施工案例，在卵礫石層之背填灌漿量以大於 150% 作為管理值，例如案例 E16（桃園機場捷運）於卵礫石層灌漿率為 150%，岩盤層灌漿率則為 120%。

案例 E12（新竹竹科污水下水道）潛盾機掘進遭遇地層空洞（細粒料流失），導致路面塌陷之發生（圖 4-12 所示），經施工單位檢討後，沿線施作低壓灌漿將地層空洞部分填滿以防止沉陷再次發生。

案例 E16（桃園機場捷運）潛盾隧道因穿越機場航道下方，為了確保潛盾施工不造成地表沉陷，影響飛機起降之安全，除了在盾尾施作背填灌漿外，另外於潛盾機機頭間隙施作機上灌漿輔助工法。

7.5.2 冰凍工法

在卵礫石層中以密閉型潛盾機進行開挖時，開挖面地層之緊密程度(強度)將影響潛盾機切刃轉盤切割及破碎之效果。當潛盾機切刃轉盤上之切刃切割卵石時，為使卵石不隨切刃轉盤之轉動，地層必須有足夠之地盤承載力（約大於 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ ）。案例 O1（Tenohji-Benten Giant Sewer）與 S4（大阪地下鐵）因地盤之承載力不足（孔隙率過大），且卵礫石層滲透係數大，因此施工單位採用冰凍等工法方式處理，增加地盤之承載力與止水性。

7.5.3 化學藥液灌漿

由於卵礫石層之高透水性與高水壓，案例中顯示其滲透係數介於 $10^{-1}\sim 5\times 10^{-3}$ cm/sec 之間，加上土層孔隙率過大時，容易造成卵礫石地層自立性不佳，使潛盾機開挖面不穩定且容易發生滲水狀況。案例 S1（川崎市下水道）與 E1（兵庫下水道）卵礫石層滲透係數分別為 $1.4\sim 4\times 10^{-1}$ cm/sec 與 $10^{-1}\times 10^{-2}$ cm/sec，為了使潛盾機能順利在此高透水性地層下掘進施工，施工單位採用化學灌漿改良土層，降低其滲透係數（改良至滲透係數小於 10^{-5} cm/sec）與增加自立性，使潛盾隧道工程得以順利完工。



第八章

卵礫石地盤潛盾隧道開挖引致之沉陷案例分析

本研究所蒐集到 1979 年至 2009 年卵礫石地盤潛盾施工之國內外案例，如表 8-1 至表 8-3 所示。表 8-1 至 8-3 分別蒐集開放式潛盾機 2 案例、泥水式潛盾機 3 案例、及土壓平衡式潛盾機 12 案例遭遇卵礫石地盤之 17 個施工案例，其中包括日本（11 案例）、美國（1 案例）及國內（5 案例）潛盾隧道共 17 組最大地表沉陷量資料。開挖隧道之功能包含捷運隧道、衛生下水道、地下鐵路、高壓電纜隧道及地下儲水庫。隧道直徑之範圍為 2.18 至 10.0 m，隧道深度之範圍為 3.8 至 30.0 m。表 8-1 至 8-3 所蒐集之施工案例，除少數特例外，各案例隧道掘進之區段開挖面含卵礫石量（Gravel Content）皆超過 50% 以上。

本研究嘗試建立得到地表最大沉陷量（ S_{max} ）與 Fujita（1982）提出在黏土及砂土內開挖潛盾隧道造成之最大地表沉陷量進行比較。本研究依據各案例監測資料 S_{max} 進行統計分析，建立 S_{max} 與地層礫石含量、潛盾機機型、隧道深度（ Z ）、隧道直徑（ D ）之關係， S_{max} 、 D 及 Z 之定義如圖 3-1 所示。

8.1 地表最大沉陷量範圍

圖 8-1 為本研究蒐集之潛盾施工造成最大沉陷 S_{max} 與地層卵礫石含量之關係圖，圖中縱座標為最大地表沉陷量 S_{max} ，橫座標為開挖地層之含卵礫石量（%），橫座標右半部為含卵礫石量 50% 以上為卵礫石地層範圍，圖中顯示各型式潛盾機施工在卵礫石層開挖造成之最大地表沉陷量在 11~28 mm 之間。隨著卵礫石含量之升高， S_{max} 略為減小。

Fujita（1982）蒐集自 1965 年至 1982 年，日本國內 94 筆潛盾隧道施工造成之最大地表沉陷現地監測資料。Fujita 依潛盾機型式、土層狀況（黏土及砂土）及輔助工法採用與否，建議施工造成之地表最大沉陷量值，如表 1-1 所示。圖 8-1

顯示本研究所得潛盾機於卵礫石層內施工造成之 S_{\max} 僅 11~28 mm，明顯小於開放式潛盾機在黏土層造成之最大地表沉陷範圍 200 ± 20 mm，泥水式潛盾機在砂土與黏土層沉陷量範圍 90 ± 30 mm，及土壓平衡式潛盾機在黏土層沉陷量範圍 150 ± 35 mm，由圖 8-1 發現在卵礫石層潛盾施工造成之地表沉陷為最小，這是因為卵礫石地層强度高自立性佳，潛盾掘進時造成地表沉陷發生相對其他土層較小。

本研究將 17 筆卵礫石潛盾施工案例之 S_{\max} 監測資料，依據潛盾機型式及輔助工法採用與否，歸納出潛盾機於卵礫石地層內挖面造成最大地表沉陷 S_{\max} 值建議表（表 8-4），例如土壓平衡式潛盾機於卵礫石地層內開挖，若不採用輔助工法，造成之最大地表沉陷為 17 ± 6 mm。表中預測值採取各案例之平均值加減一個標準誤差（Standard deviation）所得。並將兩個標準差以外之案例予以刪除，以避免因特殊案例影響地表最大沉陷評估範圍。由於卵礫石內潛盾施工困難，案例蒐集不易，故表 8-4 內之案例數量較為不足，僅供使用者參考。

圖 8-1 地表最大沉陷量顯示各式潛盾機在遭遇卵礫石層施工所導致之地表最大沉陷量皆不超過 28 mm，採用潛盾機形式（開放式潛盾機、泥水加壓式或土壓平衡式潛盾機）對造成之地表最大沉陷量 S_{\max} 之影響並不明顯。

表 8-4 最大地表沉陷量建議表中，以土壓平衡式潛盾機進行比較，未採用輔助工法之地表最大沉陷量約在 17 ± 6 mm 範圍內，採用輔助工法之地表最大沉陷量約在 16 ± 6 mm 範圍內，採用輔助工法所引致之地表最大沉陷量與未採用輔助工法並無明顯差異。推測其原因為在卵礫石層潛盾施工本身所造成之沉陷量相較其他土層為小，因此沉陷量之差異相對不明顯。

8.1.1 卵礫石含量對地表最大沉陷量之影響

圖 8-1 顯示，卵礫石含量與最大地表沉陷 S_{\max} 之關係，圖中發現隨著地盤卵礫石含量增加，地表最大沉陷量呈現略為減少之趨勢。推測其原因可能與卵礫

石特性有關，洪如江（1978）發現，當地盤之卵礫石（粒徑大於 4 號篩，4.75mm）含量大於 75%，此地盤工程特性由大顆粒卵礫石控制，地層剪力強度增加。Lambe and Whitman (1969)與 Matheson (1986) 提出當卵礫石含量愈高時，其卵礫石之尖峰摩擦角 ϕ 越大，隨著摩擦角與剪力強度增加隧道上方土層之拱效應更強烈，因而減少潛盾施工所造成之地表沉陷。

8.2 最大地表沉陷量分析

表 8-1 至表 8-3 顯示開放式潛盾機 2 個 S_{\max} 監測值，泥水式潛盾機 3 個 S_{\max} 監測值，及土壓平衡式潛盾機 12 個 S_{\max} 監測值。由於開放式開挖面難以抵擋卵礫石層內之高地下水壓及高滲透性，為顧及工作人員之安全近年採用開放式潛盾機於卵礫石層施工案例較少，以採用密閉式（泥水式與土壓式）潛盾機施工案例居多，因此開放式潛盾機之施工案例將不列入分析範圍，表 8-2 至表 8-3 採用共 15 組最大地表沉陷量監測值進行分析。

以下將上述兩種型式潛盾機於卵礫石層施工導致之最大地表沉陷 S_{\max} 與隧道中心線深度（Z）及隧道直徑（D）之關係進行分析及討論。

8.2.1 隧道中心線深度對地表最大沉陷量之影響

圖 8-2 顯示隧道中心線深度 Z 與地表最大沉陷量 S_{\max} 之關係，圖中縱座標為地表最大沉陷量 S_{\max} ，橫座標為隧道中心線深度 Z。由圖 8-2 可知，當隧道覆土深度逐漸增加 10 m 以上時，最大地表沉陷量有逐漸減小之趨勢。潛盾隧道開挖造成地盤內之應力釋放，隧道上方之覆土層發生拱效應（Arching），當潛盾隧道開挖對隧道周圍土體造成擾動，隨著隧道深度越大，在拱效應作用下對淺層地盤之影響相對較少，使深層潛盾施工導致地表沉陷量相對減少。

8.2.2 隧道直徑對地表最大沉陷量之影響

圖 8-3 顯示隧道直徑與地表最大沉陷量之關係，圖中縱座標為地表最大沉陷量 S_{\max} ，橫座標為隧道直徑 D 。圖 8-3 顯示，隨著隧道直徑增加，最大地表沉陷量有增大之趨勢。推測其原因可能為當潛盾隧道開挖面增大，造成周圍體地盤之擾動區域及震動程度相對較大，因此導致地表沉陷量偏大。如表 8-3 之案例 E3 與 E4 顯示，隧道中心線深度 Z 分別為相近之 8.8 m 與 8.7 m，但是兩者隧道直徑分別為 3.08 m 與 7.45 m，施工造成之最大地表沉陷量分別為 11 mm 與 24 mm。由圖 8-3 可以發現，在隧道深度大致相同處，直徑較大潛盾隧道施工造成之地表沉陷相對偏大。

8.2.3 深徑比對地表最大沉陷量之影響

圖 8-4 顯示潛盾隧道深徑比與地表最大沉陷量之關係，圖中縱座標為最大地表沉陷量 S_{\max} 對隧道直徑 D 正規化之比值 (S_{\max}/D)，橫座標為隧道中心線深度 Z 對隧道直徑 D 正規化之值 Z/D 。由圖 8-4 可知，各案例深徑比介於 1.17 至 3.44 間，圖中隧道深徑比 Z/D 逐漸增加，正規化最大地表沉陷量 S_{\max}/D 有逐漸減小之趨勢。推測其原因，如 8.2.1 小節所述，隨著隧道深度 Z 增大，覆土層厚度增加，地盤拱效應作用越明顯。

將圖 8-4 各案例數據進行線性迴歸，可得到下列線性方程式：

上限範圍：

$$(S_{\max}/D) \times 100 = 0.78 - 0.12 (Z/D) \quad (8.1)$$

平均值：

$$(S_{\max}/D) \times 100 = 0.62 - 0.12 (Z/D) \quad (8.2)$$

下限範圍：

$$(S_{\max}/D) \times 100 = 0.46 - 0.12 (Z/D) \quad (8.3)$$

上式中

S_{\max} = 潛盾隧道與卵礫石地層施工所造成最大地表沉陷

(限制含卵礫石量 50%~90%)

D = 隧道外側直徑 (限制 $D = 2.18\sim 10.0$ m)

Z = 隧道中心線深度 (限制 $Z = 3.8\sim 26.0$ m)

圖 8-4 中虛線範圍為各案例最大沉陷量平均值加減一個標準差 (Standard deviation) 所得。線性回歸線之範圍顯示，多數施工案例造成之 S_{\max} 皆落於此範圍內。由此發現，此範圍可作為遭遇卵礫石潛盾施工預估最大沉陷量範圍之參考。

S_{\max} 預估範例：

以表 8-3 案例 E2(神奈川下水道左岸幹線 52 工區)為例，得知此案例隧道深度為 $Z = 7.8$ m，隧道直徑為 $D = 4.84$ m，代入經驗公式 8.2 式 $(S_{\max}/D) \times 100 = 0.62 - 0.12 (Z/D)$ 中，求得預估平均最大沉陷量為 $S_{\max} = 20.6$ mm，其預估沉陷範圍為 12.9~28.3 mm 之間，表 8-3 中此施工案例實際沉陷則為 21 mm，落於預估範圍區間，符合預期。圖 8-4 及公式 (8.2) 乃基於表 8-3 之資料建立，二者相互符合也並不令人意外。

由上述案例得知，8-1 至 8-3 經驗公式可作為往後設計者參考之經驗式，當設計者得知潛盾隧道深度 Z 與隧道直徑 D 時，可依據此經驗式初步預估在卵礫石地盤潛盾施工造成之最大地表沉陷量 S_{\max} 。

第九章

地表沉陷歷時曲線與雙曲線模式

依據 Fang et al.(1993)所建議之方法，本研究嘗試以雙曲線模式(Hyperbolic model)模擬潛盾隧道在卵礫石層地層開挖造成之地表沉陷歷時曲線(Time-settlement curve)。

如表 9-1 所示，本章蒐集國內 2004 年至 2009 年潛盾施工遭遇卵礫石層之案例，其中包含新竹科學園區第三期之二污水下水道工程、新竹湖口工業區電纜線洞道工程、新竹工業區超高壓變電所工程、及桃園國際機場捷運工程案例，上述 4 個案例全部採用土壓平衡式潛盾機施工，依據現地監測資料共獲得 20 筆地表沉陷歷時資料。以下分別介紹為雙曲線模式、以雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線及初始沉陷速率分析。



9.1 雙曲線模式介紹

為便於說明單一潛盾隧道施工造成隧道中心上方之地表沉陷，參照圖 9-1，本研究首先定義相關重要參數如下：

D ：隧道襯砌外側直徑 ($D = 2R$)

Z ：隧道中心線深度

t ：潛盾機盾首通過測點後之時間

$S(t)$ ：隨時間變化之地表沉陷量

Fang et al. (1993) 建議，於凝聚性黏土層內以土壓平衡式潛盾機開挖造成之沉陷對時間關係，可用雙曲線模式加以描述。簡明同 (1998) 與吳俊德 (2008) 在蒐集國內外潛盾開挖造成之隧道地表沉陷歷時曲線案例，發現雙曲線模式亦可用來模擬潛盾機在非凝聚性土層內開挖造成之沉陷歷時關係。惟上述案例研究中，缺乏潛盾卵礫石地層於施工案例。因此本研究依據雙曲線模式，嘗試模擬此

模式在卵礫石層之適用性。依 2.6.2 小節所述，以式 (2.4) 模擬地表沉陷對時間的關係：

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.4)$$

上式中，

$S(t)$ ：隧道中心線正上方之地表沉陷量 (mm)

t ：潛盾機盾首通過後的時間 (day)

a ：雙曲線參數 (day/mm)

b ：雙曲線參數 (1/mm)

9.1.1 決定雙曲線參數 a 及 b

改寫式 (2.4)，得到以 $t/S(t)$ 為縱座標，以 t 為橫座標之斜截式，如式 (2.5)。

$$\frac{t}{S(t)} = bt + a \quad (2.5)$$

將現地監測之地表沉陷對時間的資料，繪於以 $t/S(t)$ 為縱軸，時間 t 為橫軸之圖中，利用線性回歸找出直線關係，求出參數 a (截距) 和參數 b (斜率)，如圖 2-12。利用上述方法求出的雙曲線參數 a 、 b ，代回雙曲線 (2.4) 公式內，繪製於圖上，即可模擬出一條地表沉陷歷時曲線。

如圖 9-2 (a)，本研究舉例說明如何由現地監測之地表沉陷 $S(t)$ 與時間 t 資料，決定雙曲線參數 a 、 b 。本案例 E1 為新竹科學園區第三期之二污水下水道工程，監測點為 SM101 (Surface Marker) 之地表沉陷監測數據 (中華顧問 2004)。將本研究監測數據，繪於 $t/S(t)$ 為縱軸，時間 t 為橫軸之圖中，圖 9-2 (a) 中顯示監測數據呈現線性關係，利用線性回歸找出線性方程式 $Y = 0.0394 * X +$

0.0922，可得雙曲線參數 a 為 0.0922，參數 b 為 0.0394。將雙曲線參數 a 、 b 值，代回雙曲線公式 (2.4)，繪入圖 9-2 (a) 即可模擬本案例之地表沉陷歷時曲線。

圖 9-2 (b) 至圖 9-2 (d) 之案例，顯示潛盾隧道施工遭遇卵礫石地層引致地表沉陷歷時數據，皆可代入圖中並獲得一線性關係，由圖中直線之截距及斜率決定雙曲線參數 a 、 b 。

9.1.2 參數 $1/a$ 之物理意義

雙曲線參數 $1/a$ 之物理意義，可由雙曲線公式 (式 2.4) 加以推求。

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.4)$$

雙曲線公式對時間 t 進行微分，可求出沉陷歷時曲線之斜率 $dS(t)/dt$ 。當 $t \rightarrow 0$ 時， $dS(t)/dt$ 則為時間為 0 之初始切線斜率，如下式 (9.1) 所示，曲線初始切線斜率等於 $1/a$ 。

$$\left(\frac{dS(t)}{dt} \right)_{t \rightarrow 0} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(a + bt) - t(b)}{(a + bt)^2} = \frac{a}{a^2} = \frac{1}{a} \quad (9.1)$$

如圖 9-3 所示， $1/a$ 代表的物理意義為當潛盾機盾首通過測點第一天，潛盾隧道中心線上方所造成之地表沉陷量，公制單位為 (mm/day)。參數 $1/a$ 愈大，表示隧道開挖造成之初始沉陷速率較快。反之若參數 $1/a$ 愈小，則初始沉陷速率愈慢。潛盾施工遭遇卵礫石層雙曲線參數 $1/a$ 之大小，將於 9.3 節依據案例加以說明。

9.1.3 參數 $1/b$ 之物理意義

雙曲線參數 $1/b$ 之物理意義，亦可由雙曲線公式(2.4)推得，根據 L'Hopital's Rule，在式 (2.4) 中，當 $t \rightarrow \infty$ 時， $S(t)$ 將會趨近於 $1/b$ ，如下式 (9.2)。

$$S(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{a + bt} = \frac{1}{b} \quad (9.2)$$

如圖 9-3 所示，參數 $1/b$ 之物理意義代表地表沉陷歷時曲線之長期最終沉陷量，即最大沉陷量 S_{max} 之倒數 ($S_{max}=1/b$)，參數 $1/b$ 的公制單位為 (mm)。參數 $1/b$ 之大小 (即為最大沉陷量 S_{max}) 為影響地表沉陷歷時曲線重要參數， S_{max} 與潛盾隧道中心線深度 Z 、及隧道直徑 D 等因素有關，於第八章節探討。

9.2 以雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線

依據 9.1.1 小節所述之方法，藉由潛盾隧道開挖引致之地表沉陷監測資料，決定雙曲線參數 a 及 b ，再將雙曲線參數 a 、 b 代回下列雙曲線公式。

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.4)$$

繪製於地表沉陷 $S(t)$ 對時間 t 之座標圖上，即可模擬出一條依據雙曲線模式推估之地表沉陷歷時曲線。本研究將現地監測獲得之地表沉陷資料，一併繪入圖中以便相互比較，其結果如圖 9-4 至圖 9-7 所示。

圖 9-4 (a) 顯示之案例 E1 為新竹科學園區污水下水道潛盾隧道工程，監測點 SM101 的地表沉陷歷時監測數據 (中華顧問 2004)。隧道外側直徑為 2.48 m，隧道中心深度為 4.3 m。圖 9-2 (a) 求得雙曲線參數 a 為 0.0922 (day/mm)，雙曲線參數 b 為 0.0394 (1/mm)，將 a 及 b 參數代回雙曲線公式 (2.4)，結果如圖

9-4 (a) 所示，圖中顯示本案例監測數據與雙曲線模式吻合頗為良好。圖 9-4 (b) 至圖 9-4 (j) 顯示新竹科學園區污水下水道潛盾施工不同監測斷面之地表沉陷監測資料及雙曲線模擬，圖中顯示大部分監測資料皆與雙曲線模式吻合良好。

圖 9-5 (a) 顯示之案例 E2 為新竹湖口工業區電纜線洞道潛盾隧道工程，監測點 SG13 的地表沉陷歷時監測數據(中華顧問 2007)。隧道外徑直徑為 4.54 m，隧道中心深度為 9.51 m。圖 9-2 (b) 求出之雙曲線參數 a 為 0.1218 (1/mm)，雙曲線參數 b 為 0.1278 (day/mm)，將 a 即 b 參數代回雙曲線公式 (2.4)，結果如圖 9-5 (a) 所示，圖中顯示本案例監測數據與雙曲線模式吻合良好。圖 9-5 (b) 至圖 9-5 (e) 顯示新竹湖口工業區電纜線洞道潛盾施工之地表沉陷監測資料，圖中顯示大部分監測資料皆與雙曲線模式吻合良好。

圖 9-6 (a) 顯示之案例 (E3) 為新竹新工超高壓變電所洞道工程，監測點 SM03 的地表沉陷歷時監測數據(介興/清水營造 2009)。隧道直徑為 6.24 m，隧道中心深度 12.4 m。雙曲線參數 a 為 0.058 (1/mm)，參數 b 為 0.1073 (day/mm)，將參數代回雙曲線公式 (2.4)，其結果如圖 9-6 (a) 所示，圖中顯示本案例監測結果與雙曲線模式吻合尚稱良好。圖 9-6 (b) 為新竹工業科學園區超高壓變電所洞道潛盾施工造成之地表沉陷監測資料及雙曲線模擬，圖中顯示大部分現地監測值皆與雙曲線模式吻合良好。

圖 9-7 (a) 顯示之案例 (E4) 為桃園國際機場捷運潛盾隧道工程，監測點 SSL1008 測得的地表沉陷歷時數據(台灣世曦顧問 2009)。潛盾隧道外側直徑 6.24 m，隧道中心深度 7.72 m。雙曲線參數 a 為 0.0542 (1/mm)，參數 b 為 0.0887 (day/mm)，將參數 a 及 b 代回雙曲線公式 (2.4)，其結果如圖 9-7 (a) 所示，圖中顯示本案例監測結果與雙曲線模式吻合良好。圖 9-7 (b) 至圖 9-7 (c) 為桃園國際機場捷運潛盾施工地表沉陷監測結果及雙曲線模擬，圖中顯示大部分監測皆與雙曲線模式吻合良好。

上述各案例現地監測資料顯示，潛盾隧道中心線上方之地表沉陷歷時曲線，皆可使用雙曲線模式加以描述，本研究以大量現地監測資料驗證以雙曲線模

式應用於模擬隧道施工造成卵礫石層地表沉陷歷時曲線之可行性。

9.3 卵礫石地層地表初始沉陷速率探討

如 9.1.1 小節所述，雙曲線參數 $1/a$ 之物理意義為當潛盾機盾首通過測點第一天，潛盾隧道中心線上方所造成之地表沉陷量，其公制單位為 (mm/day)， $1/a$ 即代表潛盾隧道開挖造成的初始地表沉陷速率。本研究蒐集國內潛盾機遭遇卵礫石層之施工案例，藉由雙曲線模式模擬地表沉陷歷時關係，得雙曲線參數 a 值共 20 筆數據，將雙曲線參數 a 取其倒數為 $1/a$ ，計算出 $1/a$ 值範圍為 11.9 ± 5.2 mm/day。其範圍乃採取多組案例 $1/a$ 值之平均值加減一個標準誤差所得。

圖 9-4 至 9-7 顯示，在卵礫石層潛盾施工造成之地表沉陷，大部分在潛盾機盾首通過後 10 天至 30 天之內完成。



第十章

結論與建議

本論文依據國內外潛盾隧道施工遭遇卵礫石層地盤之案例，探討潛盾機於高透水及高強度卵礫石地盤施工之特殊考量，評估潛盾隧道施工遭遇卵礫石地盤引致之最大地表沉陷量 S_{max} 及地表沉陷歷時曲線，並獲得以下之結論與建議。

10.1 結論

- (1) 為求得卵礫石之最大粒徑，桃園國際機場捷運工程於卵礫石地盤進行地質調查中，施作大口徑鑽孔調查，以利於設計潛盾機切刀轉盤開口率（開口尺寸大小）、排除卵礫石螺運機直徑大小尺寸。
- (2) 在 1979 年至 2009 年潛盾機施工遭遇卵礫石地盤案例中，多數案例（67%）採用土壓平衡式潛盾機，且螺運機多採用無軸式（絲帶式）輸送切削土體。其餘 21% 案例採用泥水式潛盾機施工，12% 案例採用開放式潛盾機施工。
- (3) 當含卵礫石量過高時（卵礫石含量超過 75%），為增加潛盾機開挖面土層之塑性及流動性，除了加泥材外，亦可採用泡沫工法，利用注入泡沫改善土體顆粒間之介面行為，吸附在土體顆粒間之氣泡可以降低土體顆粒間之摩擦力，增加切刀之耐用性與切削土體之流動性。
- (4) 新竹新工高壓電纜線洞道工程與桃園國際機場捷運工程施工案例皆發現，潛盾機切刀轉盤嚴重磨損位置皆發生於面盤中心向外約 $2/3R$ 處，研判其原因，卵礫石受切刀盤旋轉切削掘進之影響，導致開挖面上部周圍卵礫石向下崩落，由於螺運機取土口位於切刀盤中心線之後方，崩落之卵礫石逐漸向切刀盤中心線集中，並造成切削切刀嚴重磨損。建議在日後設計切刀旋轉盤時可加入考量此特殊之切刀盤磨耗行為。

- (5) 於所蒐集之 17 個案例中，潛盾隧道施工遭遇卵礫石地盤造成之最大地表沉陷範圍僅為 11~28 mm，明顯小於 Fujita 提出潛盾機在砂土層與黏土層開挖造成之最大地表沉陷範圍。
- (6) 採用密閉式潛盾機（泥水式與土壓平衡式潛盾機）施工，本研究所蒐集 15 個案例之深徑比（Z/D）介於 1.17 至 3.44 間，隨著潛盾隧道深徑比 Z/D 之逐漸增加，正規化最大地表沉陷量 S_{\max}/D 有逐漸減小之趨勢。這是由於當潛盾隧道位置愈深，隧道上方覆土層之拱效應愈強烈，因此開挖對隧道周圍土體所造成的擾動，傳遞至地表面者明顯減少，因此施工導致地表沉陷量越小。此外，本研究發現開挖地盤之含卵礫石量越高，隧道直徑 D 越小，潛盾施工所導致之地表沉陷量越小。
- (7) 依據密閉式潛盾機於卵礫石地盤之施工案例，本研究提出下列經驗式評估施工造成之最大地表沉陷 S_{\max} ：

$$(S_{\max}/D) \times 100 = 0.62 - 0.12 (Z/D) \quad (8.2)$$

此經驗公式可作為設計者評估施工造成沉陷及隧道沿線建物保護設計之參考。當設計者得知潛盾隧道深度 Z 與隧道直徑 D 時，可依 (8.2) 此經驗公式初步預估在卵礫石地盤潛盾施工造成之最大地表沉陷量 S_{\max} 。

- (8) 由國內案例之監測地盤沉陷對時間資料得知，潛盾在卵礫石地盤施工引致隧道中心線正上方之地表沉陷歷時曲線，可以下列雙曲線關係加以模擬。

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.4)$$

- (9) 國內潛盾隧道案例之現地監測資料顯土壓平衡式潛盾機在卵礫石地盤施工造成之地表沉陷，大部分在潛盾機盾首通過後 10 天至 30 天內完成。

10.2 建議

- (1) 對於潛盾機於卵礫石地盤施工導致之最大地表沉陷 S_{\max} 之預估範圍，本研究僅對被蒐集到之監測資料進行分析。因此，若施工遭遇之特殊狀況列如隧道施工造成大型坍孔，沉陷行為和收集案例差異甚大時，即無法資據經驗公式來評估最大地表沉陷量。
- (2) 本論文僅探討國內地表沉陷歷時監測資料與雙曲線模式關係，未來可蒐集更多國外施工沉陷歷時資料進行模擬，以增加案例樣本之多元性。
- (3) 本論文依據現地沉陷監測結果建立經驗方法，未來研究可考慮利用數值分析方法加以討論，以進行更全面性之研究。



參考文獻

1. 大亞土壤技術顧問有限公司 (2003), “新竹科學工業園區第三期開發工程第三期給水污水增設工程配合工程之三--放流管線第三階段延伸工程地質鑽探報告”, 民國 91 年。
2. 大森喜三雄、伴邊正裕、高平秀樹、添田伸一 (1992), “使用不同切刃機頭之兩部泥土壓式潛盾機並進行穿越河川”, Tunnel 月刊, 日本隧道技術協會。
3. 大倉利武 (1989), “高被圧水下大礫混じり洪積礫層を貫く大阪市地下鉄 7 号線京橋シールド”, トンネル地下, Vol.20, No.7, 第 49-58 頁。
4. 小型正博 (1980), “巨礫($\psi 1,000$ mm)が点在する礫層の加泥シールド”, 土圧系シールドの可能性と問題点, 第 81-102 頁。
5. 水上清 (1983), “流木の多い粗大礫層での高濃度泥水(加泥式)シールドの施工”, 最近の土圧系シールド(掘進用添加剤併用方式)-技術動向と課題, 第 58-71 頁。
6. 介興/清水營造股份有限公司 (2008), “竹工超高壓變電所出口 161kv 電纜線路洞道統包工程潛盾施工計劃書”, 民國 97 年 8 月。
7. 介興/清水營造股份有限公司 (2008), “竹工超高壓變電所出口 161kv 電纜線路洞道統包工程潛盾安全觀測系統計劃書”, 民國 97 年 5 月。
8. 介興/清水營造股份有限公司 (2008), “竹工超高壓變電所出口 161kv 電纜線路洞道統包工程潛盾洞道發進端與到達端地質改良計劃書”, 民國 97 年 9 月。
9. 介興/清水營造股份有限公司 (2009), “竹工超高壓變電所出口 161kv 電纜線路洞道統包工程潛盾施工計劃書”, 民國 97 年 8 月。
10. 中華顧問工程司 (2000), “新竹科學工業園區第三期開發工程三期給水污水增設工程配合工程之二放流管線第二階段延伸工程施工計畫書”, 民國 89 年

- 10 月。
11. 中華顧問工程司 (2001), “新竹科學工業園區第三期開發工程三期給水污水增設工程配合工程之三放流管線第三階段延伸工程施工計畫書”, 民國 90 年 11 月。
 12. 中華顧問工程司 (2002), “新竹科學工業園區第三期開發工程三期給水污水增設工程配合工程之三放流管線第三階段延伸工程潛盾穿越高速公路施工計畫書”, 民國 91 年 4 月。
 13. 中華顧問工程司 (2003), “新竹科學工業園區第三期開發工程三期給水污水增設工程配合工程之二放流管線第二階段延伸工程安全監測系統工程施工計畫書”, 民國 92 年 9 月。
 14. 陳德華 (2004), “竹科潛盾工程第一次變更設計簡報”, 中華顧問, 民國 92 年 10 月。
 15. 中華顧問工程司 (2004), “新工~湖北 161KV 電纜線路洞道暨附屬機電設備設計及施工統包工程潛盾施工計畫書”, 民國 95 年。
 16. 中華民國隧道協會叢書 (2004), “潛盾隧道施工技術規範之研討”, 民國 93 年 8 月。
 17. 中華民國隧道協會叢書 (2007), “潛盾隧道設計及施工準則”。
 18. 日本土木學會 (1987), “隧道標準規範潛盾篇”。
 19. 日本土質工學會 (1992), “シールド工法入門”。
 20. 日本土木學會 (1997), “日本隧道工程標準規範及解說-潛盾工法篇”。
 21. 日本財團法人土木學會 (1996), “都市新興工法與潛盾工法之境界領域—設計方法之現狀與課題”。
 22. 方永壽、陳秋宗, (民國 77 年), “潛盾隧道施工盾尾間隙所引致之地盤沉陷”, 論文集中華民國第十二屆力學研討會議, 台北市, 第 707-716 頁。
 23. 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2007), “台灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計劃細部設計及施工監造顧問服務 DU01 標-補充地質調查報告”。

24. 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2009), “台灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計劃 CU02A 標施工計劃書”。
25. 有吉螢二 (1980), “滯水礫層を含む複層下の土圧シールド掘削に伴うトラブルの解明とその諸対策”, シールドトンネル工法の設計と施工技術第 9 卷, KA-1-10。
26. 交通部高速鐵路工程局 (2003), “中正國際機場聯外捷運系統建設計劃規劃報告書”。
27. 朱旭 (1984), “潛盾施工法在國內應用之探討”, 中國土木水利學會七十三年年會論文集, 第 1 卷, 第 51~69 頁, 民國 73 年 11 月。
28. 宇賀客夫、安部介三 (1984), “礫層用ダブルロールクラツシヤ内蔵型シールドの開発と施工”, 建設機械, Vol.20, No.10, 第 85-94 頁。
29. 吳文隆、何泰源、林俊良 (1995), “台灣地區卵礫石層之工程特性”, 國際卵礫石層地下工程研討會論文集, 第 1.61-1.72 頁。
30. 吳俊德 (2008), “潛盾隧道施工引致之地表沉陷歷時曲線及深層沉陷槽”碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
31. 吳慶輝 (2006), “下水道潛盾施工遭遇礫石層案例探討與防災對策研究”碩士論文, 國立交通大學工程技術與管理組在職專班。
32. 佐藤工業株式會社 (1993), “卵礫石層潛盾隧道施工論文集”, 日本東京。
33. 林照順 (1992), “以 Peck-Fujita 經驗方法估算潛盾隧道施工所引之地表沉陷”, 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
34. 林照順 (1993), “台北捷運隧道施工引至之地表沉陷 (III)”, 行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告, 民國 82 年 7 月。
35. 林耀煌 (1994), “高層建築基礎開挖施工法與設計實例”, 長松出版社, 台北, 民國 83 年 2 月。
36. 林冠州, 柯武德, 江慶堂, (2006)“雙曲線函數、對數函數在一般廢棄物掩埋構造體沉陷預測之應用”, 中華民國第八屆結構工程研討會, pp.1-012。

37. 秋山中禧、宮本和也 (1987), “土圧系シールドで大礫砂礫層を克服札幌市地下鉄 2-3 号連絡線”, トンネル地下, No.12, 第 7-14 頁。
38. 砂本信雄、三角衡一郎、伊藤孝之(1998), “小口径泥土圧シールド工法で巨礫混じり砂礫層を掘進”, JTA 施工體驗發表會。
39. 洪如江(1978), “複合土工程性質之初步研究”, 台大工程學刊, 第 23 期, 第 1-12 頁。
40. 高宗正、陳俊宏 (2008), “捷運潛盾隧道穿越機場下方之沉陷控制”, 地工技術, 第 118 期, 第 5-18 頁。
41. 深沢洋三 (1979), “泥水シールドによる崩壊性滯水大礫層掘進の実績と問題点”, シールドトンネル工法の設計と施工技術第 8 卷, HA-1-14。
42. 陳正勳、何泰源、陳福盛 (2007), “卵礫石層潛盾隧道設計考慮研析”, 第六屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會, 第 273-277 頁。
43. 陳正勳、何泰源、陳福盛 (2008), “卵礫石層潛盾隧道遭遇之最大卵石粒徑推估”, 台灣世曦工程顧問公司。396
44. 陳福勝、周功台、何泰源、侯嘉松、吳文隆、林俊良 (1996), “都會區卵礫石地層鑽掘隧道與深開挖工程專題研究報告-期末報告書”, 中華顧問工程司大地工程部, 第二~三章, 第 2-3~2-4、3-1 頁, 民國 85 年 7 月。
45. 陳勝峰 (1994), “潛盾隧道施工引致之地表及深層沈陷”碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
46. 湯程傑 (2000), “潛盾隧道於混合地盤開挖之案例研究”碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
47. 曾紀緯 (1998), “地盤凍結工法在地下開挖工程之應用”, 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
48. 葉信宏 (2003), “竹科三期之三放流管第二階段延伸工程工期展延簡報”, 民國 92 年 12 月。
49. 褚炳麟、張義隆、吳家城、簡振源(1994), “現地推石材料之完整應力彎曲

- 線及抗剪強度包絡線”，94 岩盤工程研討會，第 89-100 頁。
50. 楊長義、陳建仲(1997)，“卵礫石因開挖引致之拱效應”，中國土木水利工程學刊，第 9 卷，第三期。
 51. 楊國榮、楊慕泉、趙際禮(1996)，“泥水加壓式潛盾機施工導致之地表沉陷探討”，現代營建，197 期。
 52. 廖文彬 (2002)，“竹科三期之三放流管第三階段延伸工程拍攝施工相片”，民國 91 至 92 年。
 53. 趙基盛、陳福勝、何泰源，“卵礫石工址調查方式探討與調查案例”，中華技術，25 期。
 54. 廖繼仁、吳文隆 (2008)，“高雄捷運潛盾隧道穿越中山高速公路沉陷分析與實測成果探討”，地工技術，第 118 期，第 19-26 頁。
 55. 榮民工程股份有限公司/日商奧村組營造股份有限公司台灣分公司(2007)，“機場捷運 CU02A 標潛盾機製造計劃書”。
 56. 蔡茂生 (1985)，“潛盾施工地下水處理方法之檢討”，地工技術雜誌，第 12 期，第 68-79 頁。
 57. 蔡茂生 (1989)，“潛盾機型式之選擇”，地工技術雜誌，第 23 期，第 55-71 頁，9 月。
 58. 蔡茂生、林國濬 (1989)，“台北地區潛盾施工案例檢討”，中日都會區大地工程科技研討會。
 59. 鄧屬予 (1996)，“台灣礫石層的地質背景”，地工技術，第 55 期，第 5-24 頁。
 60. 簡明同 (1998)，“潛盾隧道施工引致之地表沉陷速率”，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所。
 61. 盧協成、童念遠 (2008)，“捷運潛於桃園卵礫石層之設計與施工案例探討”，地工技術，第 118 期，第 59-68 頁。
 62. 環島工程有限公司 (2004)，“竹科污水處理廠第三期擴建工程第二加壓站至

污水處理廠污水收集管線工程地質鑽探報告”，民國 92 年 5 月。

63. 榎本ぬつし、安藤次郎 (1986)，“仙台地下鉄南北線なべ田公区施工概要大口径加泥シールド”，建設の機械化，No.433，第 27-34 頁。
64. 篠辺貢 (1983)，“崩壊性滯水礫層における密閉加泥シールドの切羽安定対策とその実際”，最近の土圧系シールド(掘進用添加剤併用方式)-技術動向と課題，第 125-142 頁。
65. 濱田和人 (1986)，“巨礫層におけるシールド工事について取込み型から破砕型シールドの計画と施工実績について”，厳しい施工環境に望む最近の土圧系シールド，第 34-61 頁。
66. 蕭達鴻，劉一信 (2007)，“高雄地區潛盾隧道沉陷之研究”，第 12 屆大地工程研討會，南投，8 月。
67. Attewell, P. B., Farmer, I. W. and Glossop, N. H (1975). “Ground Deformations Resulting from Shield Tunnelling in London Clay.” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 3, pp. 380-395.
68. Attewell, P. B., Glossop, N. H. and Farmer, I. W. (1976). “Ground Deformations Caused by Tunnelling in a Silty Alluvial Clay.” Ground Engineering, Vol. 11, No. 8, pp. 32-41.
69. Attewell, P. B. (1981). “Engineering Contract, Site Investigation and Surface Movements in Tunneling Works, Soft-Ground Tunneling-Failures and Displacement.” A. A. Balkema, pp. 5-12.
70. Attewell, P. B., Yeates, J. and Selby, A. R. (1986). “Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects in Pipelines and Structures.” Blackie and Son Ltd., London.
71. Clough, G. W., Baker, W. H. and Mensah-Dwumah, F. (1979). “Ground Control for Soft Ground Tunnel Using Chemical Stabilization – A Case History Review.” Proc. Rapid Excavation and Tunnelling Conf., Vol.1, pp. 395-415.

72. Clough, G. W. and Schmidt, B. (1981). "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay." *Soft Clay Engineering*, Elsevier Science Ltd., Amsterdam, pp. 569-634.
73. Clough W. G., and Leca, E. (1993). "EPB Shield Tunneling in Mixed Face Conditions. " *Journal of Geotechnical Engineering* , ASCE, Vol. 119, No. 10, pp 1640-1656.
74. Cording, E. J. and Hansmire, W. H. (1975). "Displacement around Soft Ground Tunnels." *Proceedings of 6th Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, pp. 571-633.
75. Edgers, L., Thompson, D. E., Mooney, J. S. and Yang, Jr. L. W. (1984). "Movements around Transit Tunnels in Mixed Ground." *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Vol. 3, pp. 1351-1359.
76. Fang, Y. S., Lin, S. J. and Lin, J. S, (1993), "Time and Settlement in EPB Shield Tunneling, " *Tunnels and Tunneling*, November, 1993, pp.26~27.
77. Fang, Y. S., Lin, J. S and Su, C. S. (1994). "An Estimation of Ground Settlement due to Shield Tunnelling by the Peck-Fujita Method." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 431-443.
78. Fujita, K. (1982). "Prediction of Settlements by Shield Tunnelling." *Proceedings of International Conference on Soil Mechanics*, Vol. 1, pp. 239-246.
79. Hashimoto, K. (1989) "Underground Stormwater Reservoir Saves Osaka from Flooding." *Tunnels and Tunnelling*, October, pp. 31-32.
80. Hitachi Zosen Corporation(1990), "Shield Tunneling Menu" Japan.
81. Hwang, R. N. and Moh, Z. C. (2006), "Prediction of Long-Term Settlements Induced by Shield Tunneling", *Journal of GeoEngineering*, Volume 1., no. 2, pp. 63~70, December, Taipei, Taiwan.

82. Hwang, R.N., Ju, D. H., Tsai, M. S. and Fang, Y. S. (1995) , "Soft Ground Tunneling in Taiwan," Proceedings, US/Taiwan Geotechnical Engineering Collaboration Workshop, Taipei, pp.77-90.
83. Indraratna. B., Wijewardena, L. S. S., and Balasubramaniam, A. S., (1993), "Large-Scale Triaxial Testing of Greywacke Rockfill", *Geotechnique*,43, No.1,pp.37-51.
84. Japan Society of Civil Engineers (1996), "Japanese standard for shield tunneling", The Third Edition.
85. Kitamura, M. and Ohbayashi, G. (1981). "Shield Tunneling Performance and Behavior of Soft Ground, Osaka, Japan." Proc., Rapid Excavation and Tunnelling Conf., Vol.1, pp. 201-220.
86. Kobayashi, T., Kitagawa, S., Kubota, I., and Nishimatsu, Y. (1984) , "On The Settlement of Poor Cohesive Soil Ground Caused by Tunnel Driving with Slurry Shield Machine," *土木學會論文集*，第 352 號/III-2，pp. 71-77. (In Japanese)
87. Lock, J.(1988). "Japanese Mole Crunches through 30cm Boulders." *Tunnels and Tunnelling*, May, pp. 41-42.
88. Matheson, G. M. (1986). "Relationship between Compacted Rockfill Density and Gradation. " *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.112, No12, pp.1119-1124.
89. Mori, A. and Akagi, H. (1985). "Effects of Backfilling at Shield Work in Soft Cohesive Soil." Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, A. A. Balkema, Vol. 3, pp. 1667-1670.
90. O'Reilly, M. P., Riley, M. D., Barratt, D. A. and Johnson, P. E. (1980). "Comparison of Settlements Resulting from Three Methods of Tunnelling in Loose Cohesionless Soil." Proceedings of 2nd International Conference on

Ground Movements and Structures, Cardiff, Wales, Pentech Press, London, pp. 359-376.

91. O'Reilly, M. P. and New, G. M. (1982). "Settlements above Tunnels in the United Kingdom: Their Magnitude and Prediction." Proceedings of Tunnelling '82, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 173-181.
92. Peck, R. B. (1969). "Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground." (State-of-the-Art Report), Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, pp. 225-290.
93. Schmidt, B. (1974). "Prediction of Settlements due to Tunnelling in Soil: Three Case Histories." Proceedings of 2nd Rapid Excavation Tunnelling Conference, San Francisco, Vol. 2, pp. 1179-1199.
94. Stephen, J. N., Jon, Y. K., Larry, J. S. and Gregory, E. K. (1996). "Tunneling under Pressure." Civil Engineering, ASCE, February, pp. 64-67.
95. Sugiyama, T., Hagiwara, T., Nomoto, T., Masaaki, N., Ano, Y., Mair, R. J., Bolton, M. D. and Soga, K. (1999). "Observations of Ground Movements during Tunnel Construction by Slurry Shield Method at the Docklands Light Railway Lewisham Extension-East London." Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 39, No. 3, pp. 99-112.
96. T. William Lambe., Robert V. Whitman. "Soil Mechanics, SI Version."

表 1-1 地表最大沉陷量之預測值 (after Fujita, 1982)

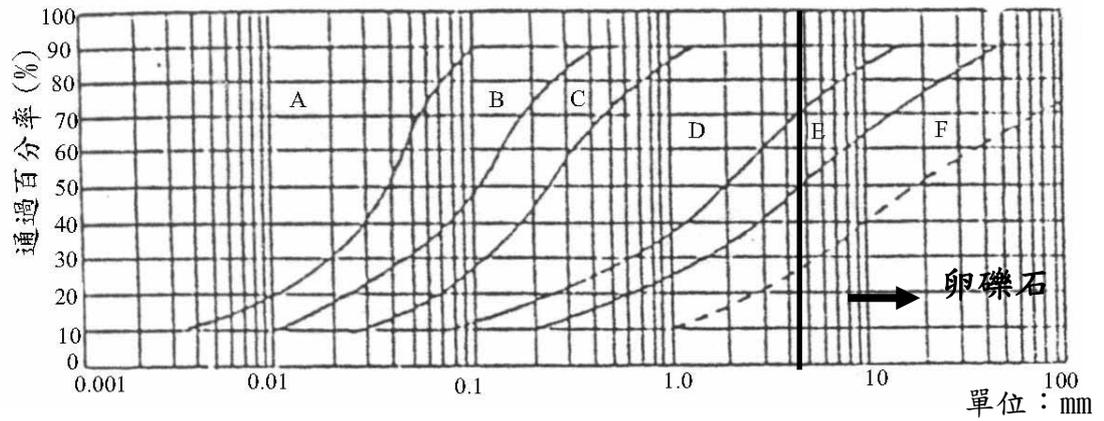
Additional Measures	Type of Soil	Predicted Surface Maximum Settlement and Errors (mm)			
		Open Shield	Blind Shield	Slurry Shield	EPB Shield
Not Adopted	Clay	100±30	40±20	40±10	60±25
	Clay (*)	200±20	100±25	-	150±35
	Clay and Sand	100±30	-	90±30	20±10
	Sand	-	-	-	-
Adopted	Clay	-	30±20	-	-
	Sand	40±30	-	-	-
	Sand (*)	200±50	-	-	-

(黏土層中之實測值又依沉陷量之大小分成兩類，“*”為 Diluvial clays)

表 2-1 潛盾機之分類與特性 (蔡茂生, 1985)

機 型		構 造		適 用 土 質	特 性
開放式	手挖式	以人工至開挖面進行挖掘，開挖面呈開放狀態，以半月型、面型千斤頂為主要擋土措施。		適用於自立性高之地盤、硬質黏土及緊密砂層。	(1)構造簡單，機具費最低。 (2)對開挖土質之變化及障礙物清除等應變能力最強。(3)開挖面不安定時，需採用壓氣工法，祛水工法，或灌漿等輔助工法。
	半機械式	將手挖部分加以機械化，依據土質狀況需採用機械臂或旋轉切土器等以提高工作效率。		與手挖式相同。	比人力開挖效率較佳，縮短後續作業時間。
	機械式	在機身前方設置面鈸(Disk)，其上裝設切刃齒(Cutter Bit)以切刃盤之迴轉對開挖面進行連續之開挖。土渣由取土口進入土倉(Chamber)，再經由輸送帶排至機身後方。		適用於較手挖式及半機械式軟弱之土層。	(1)面鈸可對開挖地層提供擋土之效果，並依地質狀況決定取土口開口率之大小，以控制開挖土量，安全性較高。 (2)簡單機械式常須配合壓氣、抽水、灌漿等輔助工法。
擠壓式		在潛盾機前方裝設隔鈸(Bulkhead)，其上方開設取土口，當潛盾機推進時，推力經由隔鈸傳遞至開挖地層，使土壤受擠壓而自取土口流入機內。		軟弱略具流動性(L.L.=80%以上)含砂量低(30%以下)之沉泥質地盤。	(1)依地質狀況決定開口位置及大小，以調整排土量及推進方向。 (2)開挖面施行輔助工法之需要性較開放式低。
密閉式	土壓平衡式	傳統土壓平衡式	以切刃盤之切削齒掘削地層，將開挖之土壤堆積於面鈸與隔鈸間之土倉，以貫穿隔鈸之螺旋輸送機內之土壤排出，排土時須保持螺旋輸送機內充滿土壤，並使開挖面內側與外側之土壓及水壓保持平衡。	沉泥質砂至沖積層之砂、砂礫層及其互層均可適用。	原則上部需要以輔助工法維持開挖面之自立性。為使螺旋輸送機確實發揮壓力傳達及止水效果，必須使開挖土砂孔隙減少，在含砂量較高的地層，常須加入水、泥水、黏土等予以混合以提高開挖之安全性。
		加泥土壓平衡式	可由盾首的魚尾版(Fish Tail)將細顆粒之泥土漿或泡沫材料(Foam)注入開挖面，以提高土倉內土壤之流動性與止水性，土倉內之泥水壓(Mud Pressure)須與盾首之土壓及地下水壓平衡，並使土渣之粒徑分佈較均勻。	此機型適宜在砂質土含量甚高之地層。	(1)輔助工法之需要性較低。 (2)不需要泥水處理設備，但混入泥土增加排土量，其處理與價格有關。
	泥水加壓式	在盾首和切刃盤間設置土倉，於倉內以泥水(Slurry)填充，使開挖面加壓以平衡土壓和水壓作用而維持安全，以流體運輸方式將土渣排出。		儲水性砂層、砂礫層或穿越河川、湖泊等水壓較高之地層。	(1)以比重大、黏性高之白皂土等材料作成泥水以填充地層中之間隙而達安定之效果。 (2)依地質狀況調整泥水比重，壓力可精確地控制開挖土量，作用之泥水壓幾乎未改變地層中原有構造，故其變形沉陷現象最小。 (3)對輔助工法的需要性最低。

表 2-2 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍 (朱旭, 1984)



型式 輔助工法 粒徑分佈領域	密閉式潛盾機		手挖式、半機械式、機械式潛盾機		泥水加壓式 潛盾機	土壓平衡 式潛盾機
	壓氣	降低水位	壓氣	灌漿		
A 領域	◎ N<5		◎		△	○
B 領域			◎		△	○
C 領域		○	○		○	◎
D 領域		○	○	△	◎	◎
E 領域				△	○	○
F 領域				△		

註：◎表示最適用。 ○表示適用。 △表示適用但不經濟

表 2-3 潛盾機型式與適用土質、輔助工法之關係 (日本土木學會, 1987)

地質		潛盾機型式		手挖式潛盾機	半機械式潛盾機			機械式潛盾機			擠壓式潛盾機			土壓平衡式潛盾機						泥水加壓式潛盾機				
		分類	土質		N值	Wn (含水比)	輔助工法			輔助工法			輔助工法			輔助工法			輔助工法			輔助工法		
							無	有	種類	無	有	種類	無	有	種類	無	有	種類	無	有	種類	無	有	種類
沖積黏土層	腐植土	0	300以上	X	X		X	X		X	X		X	△	A	X	△	A	X	△	A	X	△	A
	粉土、黏土	0~2	100-300	X	△	A	X	X		X	X		○	-		X	△	A	△	○	A	△	○	A
	砂質粉土、黏土	0~2	80以上	X	△	A	X	X		X	X		○	-		△	○	A	△	○	A	△	○	A
	粉值砂土、黏土	0~5	50以上	△	○	A	X	△	A	△	○	A	△	○		○	-		△	○	A	△	-	
洪積黏土層	壩埠 (Load)、黏土	10~20	>50	○	-		○	-		△	-		X	X		○	-		○	-		○	-	
	砂質壩埠、黏土	15~25	>50	○	-		○	-		○	-		X	X		○	-		○	-		○	-	
	砂質壩埠、黏土	20以上	>50	△	-		○	-		○	-		X	X		○	-		○	-		○	-	
軟岩	泥岩	50以上	<20	X	-		△	-		○	-		X	X		-	-		○	-		-	-	
砂質土	粉土質砂、黏土質砂	10~15	<20	△	○	A	△	○	A	△	○	A	X	X		○	-		○	-		○	-	
	鬆砂層	10~30		X		A、B	X	X		X	△		X	X		△	△	A	○	-		△	○	A
	固結砂層	30以上		△	○	A、B	△	○		△	○		X	X		△	△	A	○	-		○	-	
砂礫石層	鬆砂層	10~40		X	△	A、B	X	△	A、B	X	△	A、B	X	X		△	△	A	○	-		△	○	A
	固結砂層	40以上		△	○	A、B	△	○	A、B	△	○	A、B	X	X		△	△	A	○	-		○	-	
	夾雜卵石之砂層			X	△	A、B	△	○	A、B	X	X		X	X		△	△	A	○	-		△	△	A
	卵石層			X	△	A、B	X	△	A、B	X	X		X	X		△	△	A	△	-		△	△	A

○：原則上適合之條件
 △：需檢討其適用性
 X：原則上條件不適用
 -：特殊情形外不使用
 無：未使用輔助工法時
 有：使用輔助工法時
 A：化學灌漿工法
 B：地下水降低工法
 手挖式、半機械式、擠壓式潛盾機原則上採用壓氣工法

表 2-4 灌漿材料之分類 (林耀煌, 1994)

灌漿材料	懸濁液型	懸濁液	砂漿、水泥漿系列
			水泥~黏土系列
			黏土系列
		半懸濁液	水玻璃~水泥(黏土)系列
			水玻璃~黏土~硬化劑系列
			溶液型
	尿脂系列		
	亞克力系列		
	尿素系列		

表 2-5 雙曲線參數 a 值建議表 (吳俊德, 2008)

Recommended parameter a (day/mm)				
		Type of shield machine		
		Open shield	Slurry shield	EPB shield
Additional methods	Type of soil			
Not adopted	Sand	-	0.06 (2 cases)	0.08 ± 0.04 (13 cases)
	Clay	-	0.70 ± 0.08 (2 cases)	0.16 ± 0.07 (16 cases)
	Soft clay	-	0.23 ± 0.15 (4 cases)	0.09 ± 0.06 (18 cases)
Adopted	Sand	0.17 ± 0.12 (2 cases)	0.61 ± 0.18 (2 cases)	0.12 ± 0.08 (9 cases)
	Clay	-	-	0.58 ± 0.29 (5 cases)
	Soft clay	0.16 ± 0.03 (2 cases)	-	-
P.S.: Additional methods: including Grouting method; Compressed-Air method and Dewatering method。 Soft clay: $N < 4$ for SPT; Marine clay and Sensitive clay。				

表 2-6 雙曲線參數 b 值建議表 (吳俊德, 2008)

Recommended parameter b (1/mm)				
		Type of shield machine		
Additional methods	Type of soil	Open shield	Slurry shield	EPB shield
Not adopted	Sand	-	0.10 ± 0.05 (14 cases)	0.06 ± 0.04 (29 cases)
	Clay	0.06 ± 0.03 (9 cases)	0.18 ± 0.08 (20 cases)	0.05 ± 0.02 (27 cases)
	Soft clay	-	-	0.03 ± 0.01 (25 cases)
Adopted	Sand	0.06 ± 0.03 (7 cases)	-	0.03 ± 0.01 (12 cases)
	Clay	0.04 ± 0.02 (10 cases)	-	0.03 ± 0.003 (5 cases)
	Soft clay	0.01 ± 0.004 (9 cases)	-	-

P.S.: Additional methods: including Grouting method; Compressed-Air method and Dewatering method。
Soft clay: $N < 4$ for SPT; Marine clay and Sensitive clay。

表 3-1 國外卵礫石地盤開放式潛盾機施工案例

Case NO.	工程名稱	工法	D (m)	Z (m)	L (m)	地質狀況	地表沉陷 (mm)	卵礫石含量 (%)	最大粒徑 (mm)	備註	參考文獻
O1	Tenohji-Benten Giant Sewer Block 2(Division D), Osaka	手挖式	7.25	16.6~ 21.6	35	gravel, sand,clay	N.A.	60	N.A.	壓氣、灌漿、 冰凍工法	Kitamura and Ohbayashi (1981)
O2	Rapid transit tunnels in Cambridge, Massachusetts	半機械式	7.1	30	4,960	glacial till (boulder,cobble, gravel,dense sand,clay)	1 st < 10.7mm, 2 nd < 15.8 mm	60	N.A.		Edgers et al. (1984)

表 3-2 國外卵礫石地盤泥水式潛盾機施工案例

Case NO.	工程名稱	工法	D (m)	Z (m)	L (m)	地質狀況	地表沉陷 (mm)	卵礫石含量 (%)	最大粒徑 (mm)	備註	參考文獻
S1	神奈川川崎市 下水道	slurry	2.95	8.5~10	1,300	boulder, gravel,sand	12	74~87	600	出現浮木、全 路線先行化學 藥劑灌漿	深沢洋三 (1979)
S2	兵庫下水道	slurry	4.2	11.85	557	gravel,sand,clay	13	65	500	雙滾軸碎石機 (機內)	宇賀客夫及 安部介三 (1984)
S3	Southern trunk scheme, England	slurry	2.15	18	1,200	Boulder, gravel,sand	N.A.	55	300		Lock (1988)
S4	大阪地下鐵	slurry	5.43	10.1~16	1,544	cobble,gravel, sand	N.A.	90	300	二重管灌漿工 法、冰凍工法	大倉利武 (1989)
S5	Hiranogawa underground reservoir, Osaka	slurry	10	23	1,900	gravel,sandy soil,stiff clay	< 20 mm (出發井附 近)	60	100	切削齒更換、 化學藥液灌 漿、冰凍	Hashimoto (1989)

表 3-3 國外卵礫石地盤土壓平衡式潛盾機施工案例

Case NO.	工程名稱	工法	D (m)	Z (m)	L (m)	地質狀況	地表沉陷 (mm)	卵礫石含量 (%)	最大粒徑 (mm)	備註	參考文獻
E1	兵庫下水道左岸第一幹線	EPB	2.28	6.2~8	877.7	gravel,sand,clay	13	83	1,000	推進時造成震動、噪音	小型正博 (1980)
E2	神奈川下水道左岸幹線 52 工區	EPB	4.84	7.8~8.5	891	cobble,gravel,sand	21	85	N.A.	藥劑灌漿 (門型改良範圍)	有吉螢二 (1980)
E3	新瀉信濃川下水道	EPB	3.08	8.8	916	boulder,cobble,gravel	11	70	300	高濃度泥水	水上清 (1983)
E4	愛知鐵路	EPB	7.45	5.0~10.0	1,003	boulder,cobble,gravel	24	74	350		篠辺貢 (1983)
E5	仙台市高速鐵道南北線鍋田工區新設工事	EPB	7.25	10	750	boulder, gravel, clay	22	71	600	高效率土渣處理設備	榎本ぬつし 安藤次郎 (1986)
E6	東京桂川下水道	EPB	6.44	6.0~17	1,150	boulder,cobble,gravel	26	74	500		濱田和人 (1986)
E7	北海道札幌市地下鐵	EPB	7.55	26	570	boulder,cobble,gravel	10.5	88	400	藥劑灌漿、機內灌漿設備	秋山中禧及 宮本和也 (1987)
E8	東豐線高速鐵路	EPB	6.56	N.A.	940	boulder,cobble,gravel ,sand	N.A.	62	500	無軸式螺運機	大森喜三雄 (1992)

表 3-3 國外卵礫石地盤土壓平衡式潛盾機施工案例(續)

Case NO.	工程名稱	工法	D (m)	Z (m)	L (m)	地質狀況	地表沉陷 (mm)	卵礫石含量 (%)	最大粒徑 (mm)	備註	參考文獻
E9	San Diego south bay ocean outfall	EPB	3.65	50	5,790	San Diego formation (boulders,cobbles,gravel,little fines)	N.A.	70	910	泡沫、切削齒 更換、硬化處理	Stephen et al. (1996)
E10	都營地下鐵 12 號線豐馬園	EPB	8.5	14~24.1	1,240	boulder,cobble,gravel,	5	64	450		日本財團法人土木學會(1996)
E11	廣島縣瀨野川 下水道	EPB	2.18	6.5~13.4	962	boulder,cobble,gravel,clay	12	70	450	急曲線施工,R=30m	砂本信雄 et al.(1998)

表 5-1 新工超高壓變電所隧道工程使用潛盾機規格
(介興/清水營造 2009)

分類	說明	規格	
潛盾機	外 徑	Φ6240 mm	Φ6700 mm
	全 長	9000 mm	9000 mm
	環片外徑	Φ6100 mm	Φ6550 mm
	盾尾空隙	70 mm	75 mm
推進千斤頂	推力/個	2000 kN	
	千斤頂數量	20 個	
	伸 長 量	1750 mm	
中折千斤頂	中折角度：	左右 4.5° 上下 1.0°	
	推力/個	2500 kN	
	千斤頂數量	12 個	
切刀盤	切削頭形式	輪幅軸(主要 6 幅、輔助 6 幅)	
	驅 動 方 式	電動馬達*5	
	設 備 扭 矩	7220 kN-m($\alpha=24.0$)	
螺運機	型 式	無軸式帶狀螺運機	
	外 徑 * 間 距	Φ1100 mm*P850 mm	
	搬 運 量	210m ³ /h (100%充填時)	

表 6-1 桃園國際機場捷運 1 號潛盾機切刀轉盤磨損統計表
 (台灣世曦顧問 2009)

	切刀磨耗量 (mm)			掘進速度及磨耗係數	
	棍子式 切刀齒	先行 切刀齒	刮削切刀	平均掘進 速度 (mm/min)	棍子式切刀 磨耗係數 (mm/Km)
總磨耗量 (mm) 計劃	40.06	17.7	17.7	2.4	0.052
總磨耗量 (mm) 實際	51.67	5.67	3.5	1.7	0.048
容許磨耗量 (mm)	50	40	30		

表 7-1 國內外遭遇卵礫石潛盾施工案例

Case NO.	工程名稱	D (m)	Z (m)	透水係數 (cm/sec)	地表沉陷 (mm)	卵礫石含量 (%)	最大粒徑 (mm)	開口率(%)	備註	參考文獻
O1	Tenohji-Benten Giant Sewer Block 2(Division D), Osaka	7.25	16.6~21.6	N.A.	N.A.	60	N.A.	N.A.	壓氣、灌漿、冰凍工法	Kitamura and Ohbayashi (1981)
O2	Rapid transit tunnels in Cambridge, Massachusetts	7.1	30	N.A.	15.8	45~65	N.A.	N.A.		Edgers et al. (1984)
O3	新竹竹科污水下水道第二加壓站	2.48	6~12	$3\sim 4\times 10^{-2}$	28	30~60	400	33		中華顧問 (2003)
S1	神奈川川崎市下水道	2.95	8.5~10	$1.4\sim 4\times 10^{-1}$	12	74~87	600	20	藥液灌漿	深沢洋三 (1979)
S2	兵庫下水道	4.2	11.9	N.A.	13	65	500	30	雙滾軸碎石機	宇賀客夫 安部介三 (1984)
S3	Southern trunk scheme, England	2.15	18	N.A.	N.A.	55	300	N.A.		Lock (1988)
S4	大阪地下鐵 7 號線	5.43	10.1~16	N.A.	N.A.	90~92	300	N.A.	冰凍工法 二重管灌漿工法	大倉利武 (1989)
S5	Hiranogawa underground reservoir, Osaka	10	23	N.A.	< 20 (出發井附近)	60	100	N.A.	藥液灌漿、切削齒更換	Hashimoto (1989)

表 7-1 國內外遭遇卵礫石潛盾施工案例 (續)

Case NO.	工程名稱	D (m)	Z (m)	透水係數 (cm/sec)	地表沉陷 (mm)	卵礫石含量 (%)	最大粒徑 (mm)	開口率 (%)	備註	參考文獻
E1	兵庫下水道左岸第一幹線	2.28	6.2~8	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	13	83	1,000	25	二重管灌漿工法	小形正博 (1980)
E2	神奈川下水道左岸幹線 52 工區	4.84	7.8~8.5	N.A.	21	85	N.A.	28	藥液灌漿 (門型改良範圍)	有吉螢二 (1980)
E3	新潟信濃川下水道	3.08	8.8	3.8×10^{-2}	11	70	300	N.A.	高濃度泥水	水上清 (1983)
E4	愛知鐵路	7.45	5.0~10.0	$3 \sim 6 \times 10^{-1}$	24	74	350	35	大口徑鑽孔調查	篠辺貢 (1983)
E5	仙台市高速鐵道南北線鍋田工區新設工事	7.25	10	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	22	71	600	N.A.	高效率土碴處理設備	榎本ぬつし 安藤次郎 (1986)
E6	東京桂川下水道	6.44	6~17	N.A.	26	74	500	25	大口徑鑽孔調查 藥液灌漿	濱田和人 (1986)
E7	北海道札幌市地下鐵	7.55	26	N.A.	10.5	88	400	N.A.	藥液灌漿	秋山中禧 宮本和也 (1987)
E8	東豐線高速鐵路	6.56	N.A.	N.A.	N.A.	62	500	N.A.	無軸式螺運機	大森喜三雄 (1992)

表 7-1 國內外遭遇卵礫石潛盾施工案例 (續)

Case NO.	工程名稱	D (m)	Z (m)	透水係數 (cm/sec)	地表沉陷 (mm)	卵礫石含量 (%)	最大粒徑 (mm)	開口率 (%)	備註	參考文獻
E9	San Diego south bay ocean outfall	3.65	50	N.A.	N.A.	70	910	N.A.	泡沫、切削齒更換、硬化處理	Stephen et al. (1996)
E10	日本都營地下鐵 12 號線	8.5	14~24.1	$1.5\sim 3.6\times 10^{-1}$	5	64	450	N.A.		日本財團法人 土木學會(1996)
E11	廣島瀨野川下水道	2.18	6.5~13.4	3×10^{-2}	12	70	450	31		砂本信雄 et al.(1998)
E12	新竹竹科 3 期之 2 污水下水道	2.48	3.2~20	$2.3\sim 2.7\times 10^{-3}$	25	30~80	800	18	灌漿工法	中華顧問(2004)
E13	新竹竹科 3 期之 3 污水下水道	2.48	4.5~23	$1\sim 3\times 10^{-3}$	18	55~80	600	28	灌漿工法	中華顧問(2001)
E14	新竹湖口工業區 電纜線洞道工程	4.54	8~12	$1\sim 1.5\times 10^{-3}$	11	60~90	750	N.A.	雙環塞工法	中華顧問(2007)
E15	新竹新工超高壓變電所 洞道工程	6.7 與 6.24	8~19	$1\sim 1.2\times 10^{-3}$	12	60~80	450	36	雙環塞工法	介興/清水營造 (2009)
E16	桃園國際機場捷運 CU02A 標	6.24	6.6~29.4	5×10^{-3}	11	80~85	650	50	大口徑鑽孔調查 機上灌漿 雙環塞工法	台灣世曦顧問 (2009)

表 7-2 泥水加壓式(排泥管內排除方式)潛盾機之可排除最大粒徑

(摘自 陳福盛 et al.,1996)

潛盾直徑 (m)	排泥(礫)管直徑(mm)	可排除最大粒徑(mm)
2.0~2.7	150	φ100×150l
2.7~3.5	200	φ150×250l
3.5~5.0	200~250	φ150×250l
5.0~6.0	250~300	φ200×300l
6.0以上	250~300	φ200×300l

註：φ 為短邊，l 為長邊

表 7-3 土壓式潛盾機 (帶式螺運機) 之可排除最大粒徑

(摘自 陳福盛 et al.,1996)

潛盾直徑 (m)	螺運機直徑 (mm)	可排除最大粒徑 (mm)	備註
2.0~2.7	500	φ350×350l	-
2.7~3.5	700	φ450×450l	-
3.5~5.0	900	φ600×600l	(有止水問題)
5.0~6.0	1000	φ700×700l	(有止水問題)
6.0以上	1000	φ700×700l	(有止水問題)

註：φ 為短邊，l 為長邊，為帶式螺運機

表 8-1 開放式潛盾機遭遇卵礫石施工案例

Case NO.	工程名稱	D (m)	Z (m)	S _{max} (mm)	Z/D	S _{max} /D(%)	卵礫石含量 (%)	參考文獻
O1	Rapid transit tunnels in Cambridge, Massachusetts	7.1	30	15.8	4.23	0.22	45~65	Edgers et al. (1984)
O2	新竹竹科污水下水道第二加壓站	2.48	6	28	2.42	1.13	30~60	中華顧問 (2003)

表 8-2 泥水式潛盾機遭遇卵礫石施工案例

Case NO.	工程名稱	D (m)	Z (m)	S _{max} (mm)	Z/D	S _{max} /D(%)	卵礫石含量 (%)	參考文獻
S1	神奈川川崎市下水道	2.95	6.5	12	2.20	0.41	74~87	深沢洋三 (1979)
S2	兵庫下水道	4.2	11.9	13	2.83	0.31	65	宇賀客夫 安部介三 (1984)
S3	Hiranogawa underground reservoir, Osaka	10	23	20	2.30	0.20	60	Hashimoto (1989)

表 8-3 土壓平衡式潛盾機遭遇卵礫石施工案例

Case NO.	工程名稱	D (m)	Z (m)	S _{max} (mm)	Z/D	S _{max} /D(%)	卵礫石含量 (%)	參考文獻
E1	兵庫下水道左岸第一幹線	2.28	3.8	13	1.67	0.57	83	小形正博 (1980)
E2	神奈川下水道左岸幹線 52 工區	4.84	7.8	21	1.61	0.43	85	有吉螢二 (1980)
E3	新潟信濃川下水道	3.08	8.8	11	2.86	0.36	70	水上清 (1983)
E4	愛知鐵路	7.45	8.7	24	1.17	0.32	74	篠辺貢 (1983)
E5	仙台市高速鐵道南北線鍋田工區 新設工事	7.25	10	22	1.38	0.30	71	榎本ぬつし 安藤次郎 (1986)
E6	東京桂川下水道	6.44	9.4	26	1.46	0.40	74	濱田和人 (1986)
E7	北海道札幌市地下鐵	7.55	26	10.5	3.44	0.14	88	秋山中禧 宮本和也 (1987)

表 8-3 土壓平衡式潛盾機遭遇卵礫石施工案例 (續)

Case NO.	工程名稱	D (m)	Z (m)	S _{max} (mm)	Z/D	S _{max} /D(%)	卵礫石含量 (%)	參考文獻
E8	廣島瀨野川下水道	2.18	4.1	12	1.88	0.55	70	砂本信雄 et al.(1998)
E9	新竹竹科 3 期之 3 污水下水道	2.48	4.5	18	1.81	0.73	55~80	中華顧問 (2001)
E10	新竹湖口工業區電纜線洞道工程	4.54	10.3	11	2.27	0.24	60~90	中華顧問 (2007)
E11	新竹新工超高壓變電所洞道工程	6.24	13.8	12	2.21	0.19	60~80	介興/清水營造 (2009)
E12	桃園國際機場捷運 CU02A 標	6.24	14.6	11	2.34	0.18	80~85	台灣世曦顧問(2009)

表 8-4 卵礫石地盤地表最大沉陷量建議表

Additional Measures	Type of Soil	Predicted Surface Maximum Settlement and Errors (mm)		
		Open Shield	Slurry Shield	EPB Shield
Not Adopted	Geavel Soils	22±6(2 cases)	13(1 case)	17±6(4 cases)
Adopted	Gravel Soils		20±8(2 cases)	16±6(8 cases)
P.S.: Additional methods: including Grouting method; Chemical grouting method; Ground freezing method 。 Gravel Soils: Gravel content > 50% 。				

表 9-1 潛盾隧道於卵礫石層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例

Case No.	Project Title	Monitored Section	Diameter D (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	l/a (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Reference
E1	新竹竹科 3 期之 2 污水下水道	SM101	2.48	4.30	25	10.85	0.0922	0.0394	中華顧問(2004)
		SM104	2.48	4.70	24	14.37	0.0696	0.0412	中華顧問(2004)
		SM107	2.48	4.75	26	13.68	0.0731	0.0382	中華顧問(2004)
		SM110	2.48	4.90	19	8.79	0.1138	0.0517	中華顧問(2004)
		SM113	2.48	4.90	24	9.69	0.1032	0.041	中華顧問(2004)
		SM116	2.48	5.15	13	23.87	0.0419	0.0765	中華顧問(2004)
		SM119	2.48	5.26	12	53.48	0.0187	0.0832	中華顧問(2004)
		SM122	2.48	5.30	14	12.33	0.0811	0.0706	中華顧問(2004)
		SM125	2.48	5.57	11	15.43	0.0648	0.0904	中華顧問(2004)
		SM128	2.48	5.64	12	19.08	0.0524	0.0904	中華顧問(2004)

表 9-1 潛盾隧道於卵礫石層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例 (續)

Case No.	Project Title	Monitored Section	Diameter D (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Reference
E2	新竹湖口工業區電纜線洞道工程	SG13	4.54	9.51	7.8	8.21	0.1218	0.1278	中華顧問(2007)
		SG15	4.54	9.86	8.6	15.06	0.0664	0.1157	中華顧問(2007)
		SG19	4.54	8.68	10.2	9.99	0.1001	0.098	中華顧問(2007)
		SG21	4.54	8.24	11.2	11.26	0.0888	0.0887	中華顧問(2007)
		SG27	4.54	9.20	6.8	67.57	0.0148	0.1473	中華顧問(2007)
E3	新竹新工超高壓變電所洞道工程	SM03	6.24	12.40	9.2	17.24	0.058	0.1073	介興/清水營造(2009)
		SM04	6.24	16.32	6.3	5.43	0.184	0.1544	介興/清水營造(2009)
E4	桃園國際機場捷運工程 CU02A 標	SSL1008	6.24	7.72	11.3	18.45	0.0542	0.0887	台灣世曦顧問(2009)
		SSL1021	6.24	16.34	7.6	7.03	0.1423	0.1335	台灣世曦顧問(2009)
		SSL1092	6.24	14.80	5.6	3.74	0.2673	0.1826	台灣世曦顧問(2009)

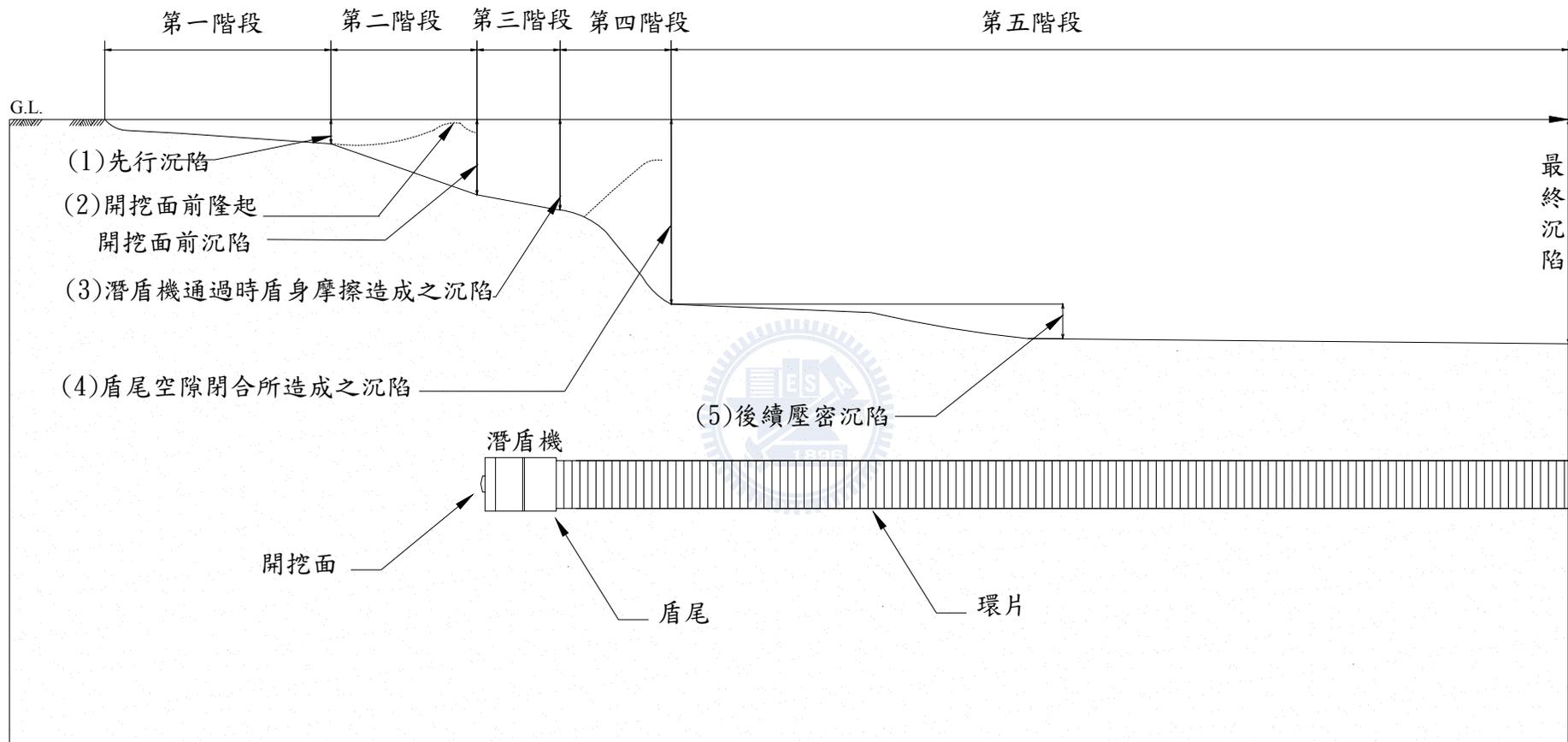


圖 1-1 潛盾機掘進所引致地盤變位之分類 (after Japan Society of Civil Engineers, 1996)

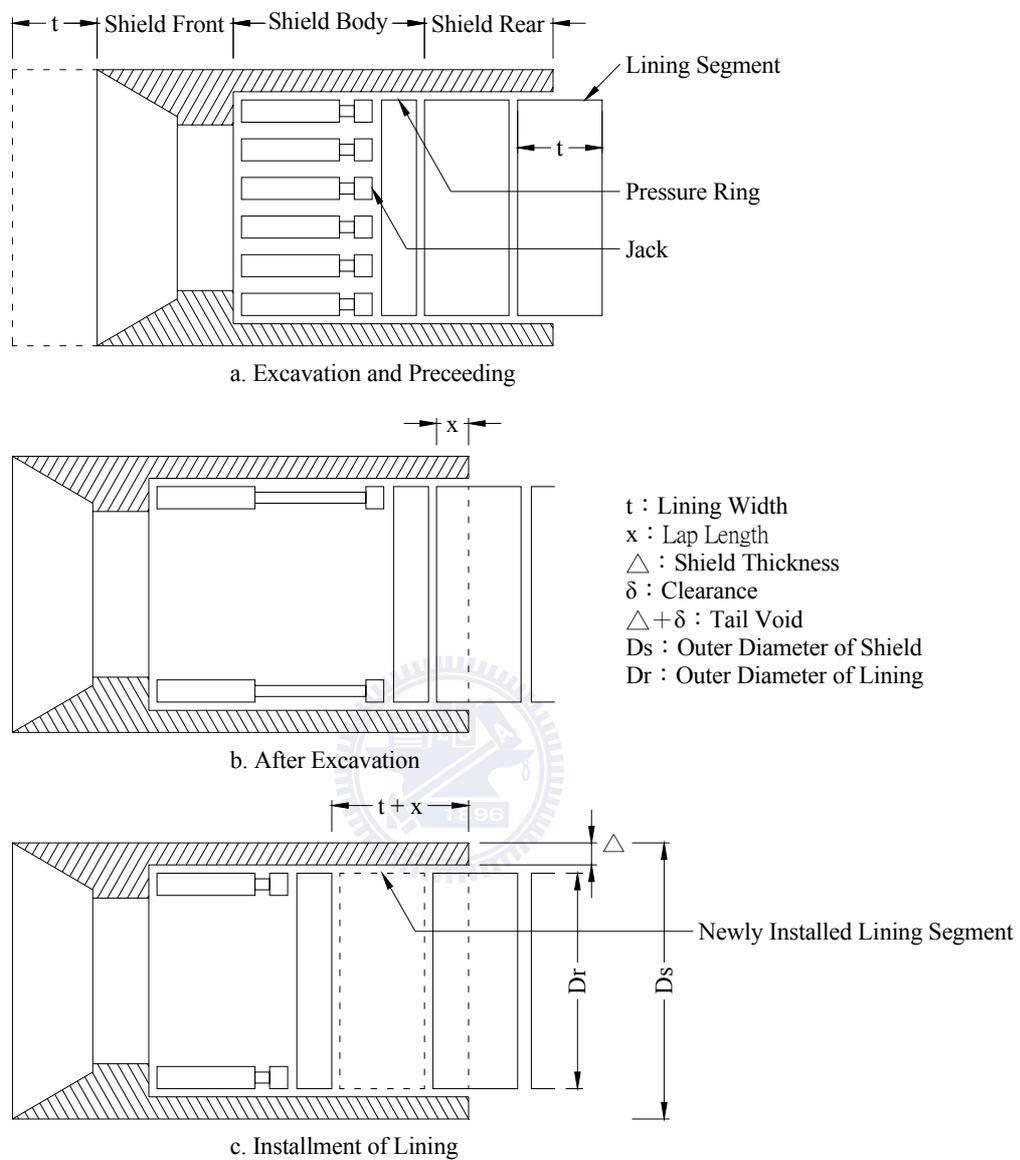
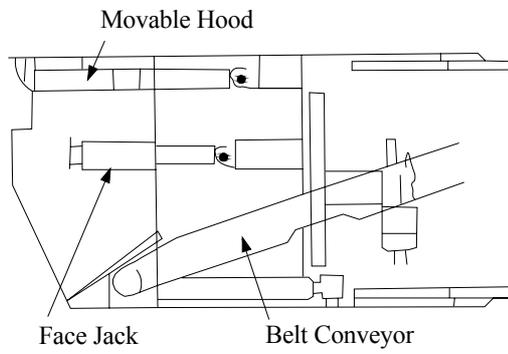
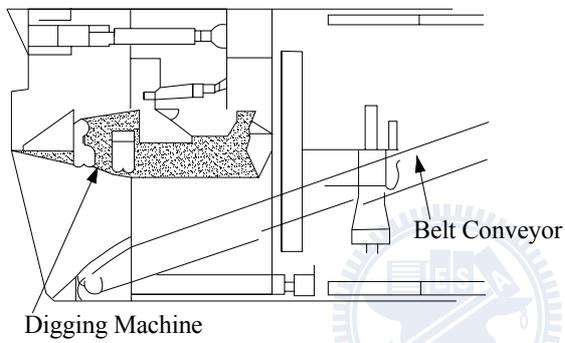


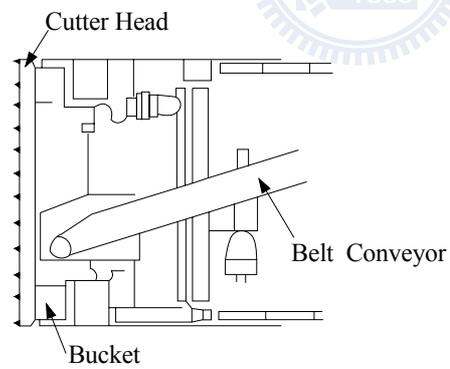
圖 2-1 潛盾施工作業循環示意圖 (朱旭, 1984)



(一) Hand-Excavated Shield

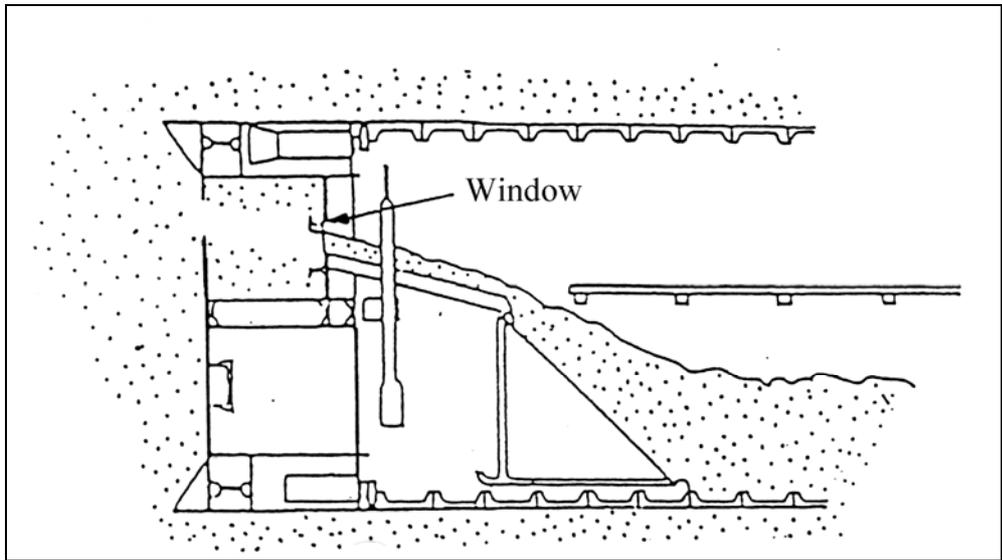


(二) Semi-Mechanical Shield

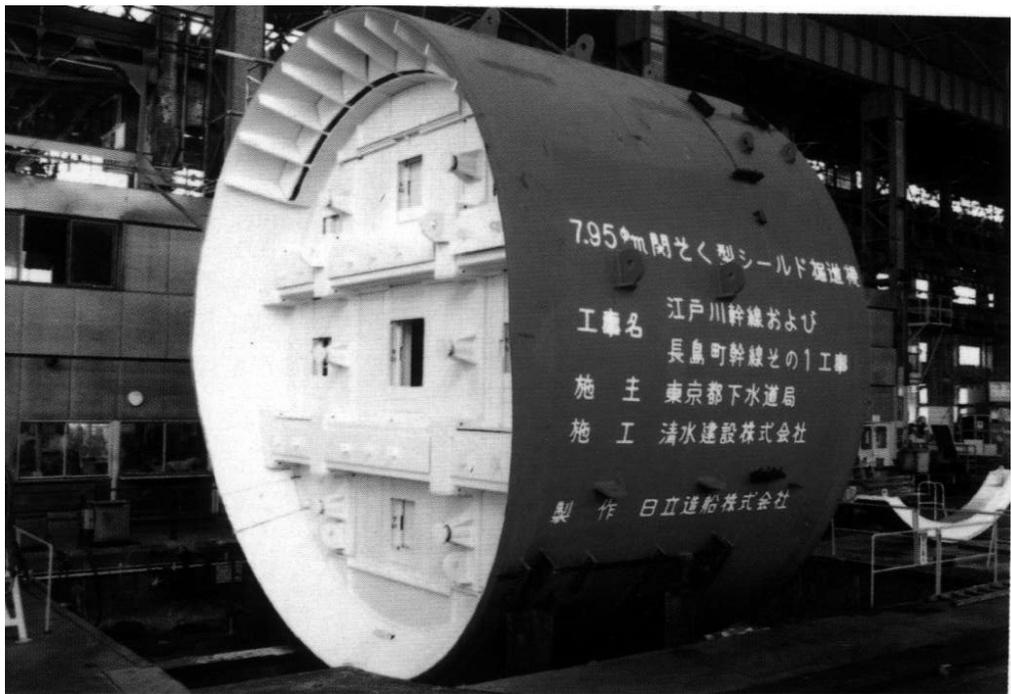


(三) Mechanical Shield

圖 2-2 開放式潛盾機 (IHI Tunneling Shields 型錄, 1987)

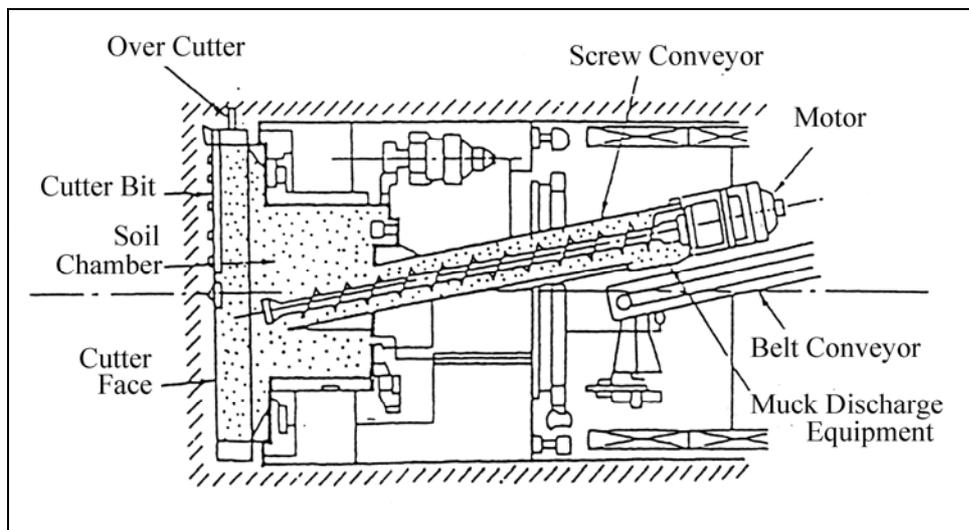


(a)



(b)

圖 2-3 擠壓式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)

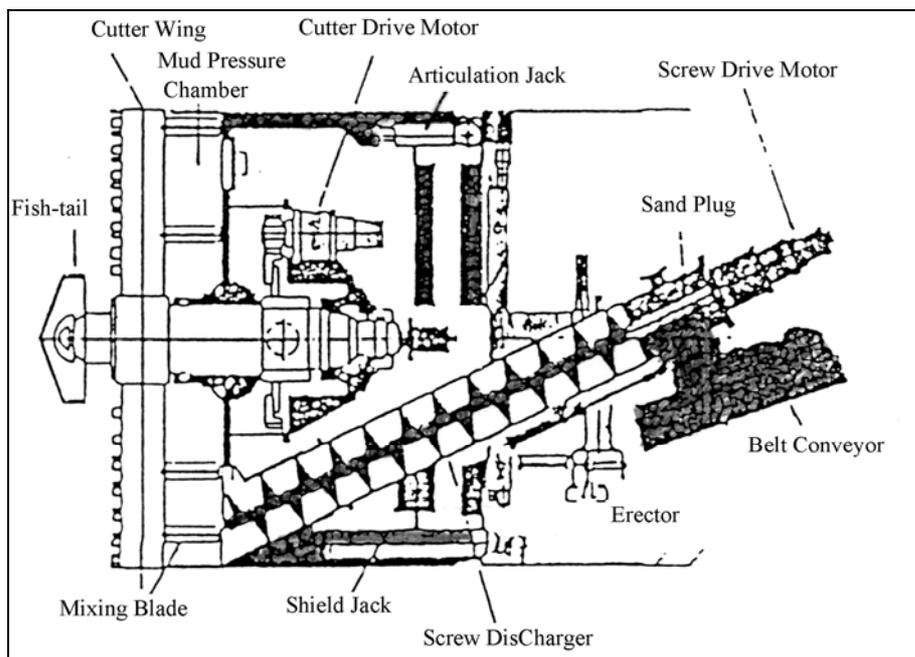


(a)



(b)

圖 2-4 土壓平衡式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)

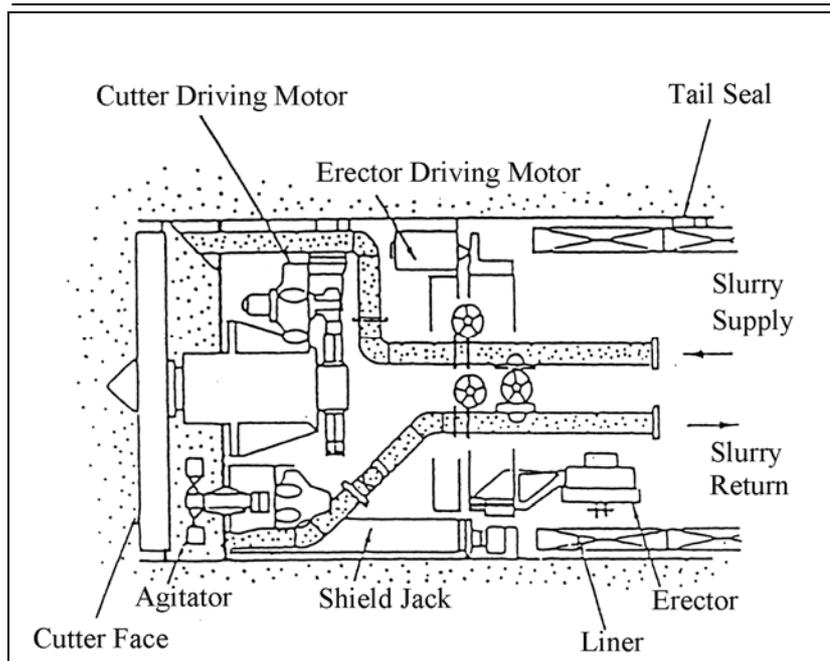


(a)



(b)

圖 2-5 加泥土壓平衡式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)



(a)



(b)

圖 2-6 泥水式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)

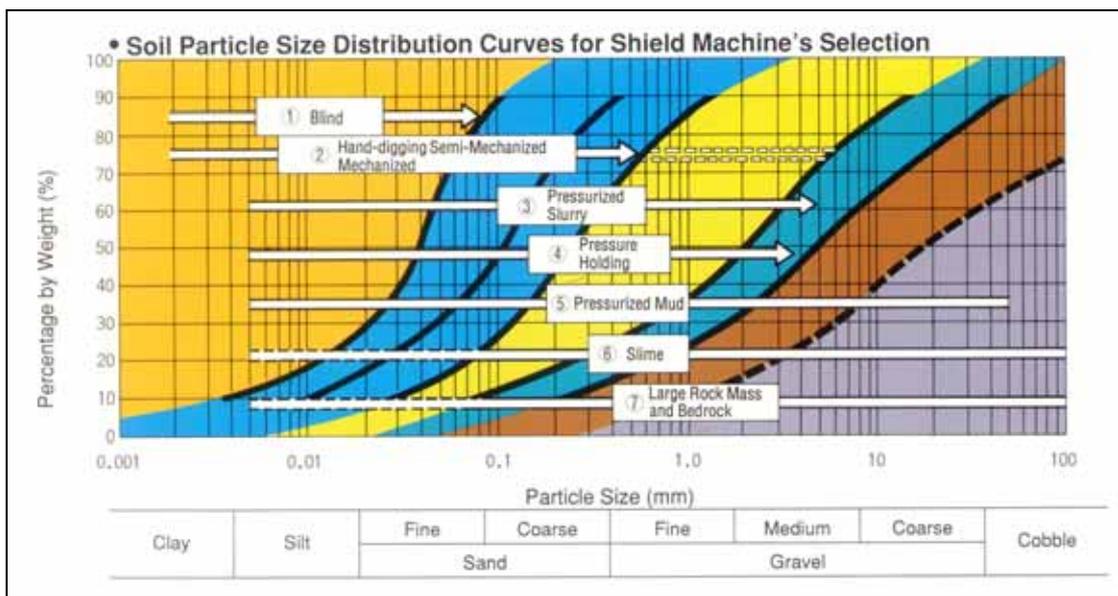
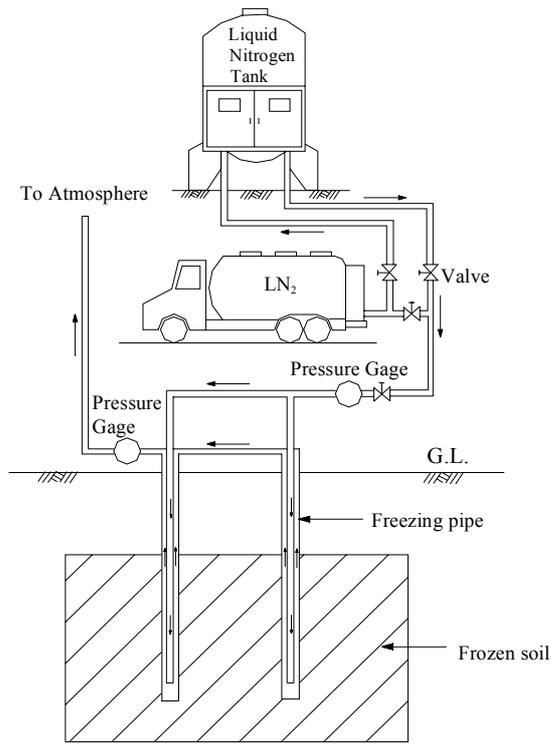
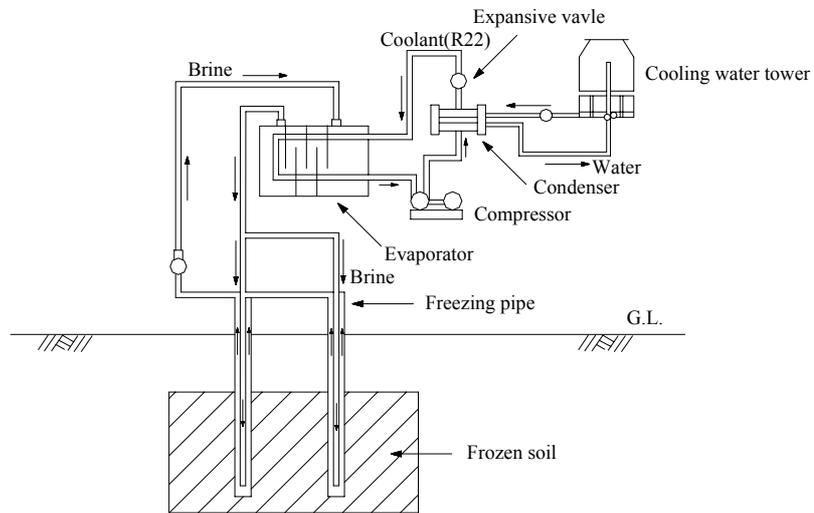


圖 2-7 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)



(a) 液態氮 (LN₂) 凍結工法



(b) 鹽水 (Brine) 凍結工法

圖 2-8 凍結工法 (曾紀偉, 1998)

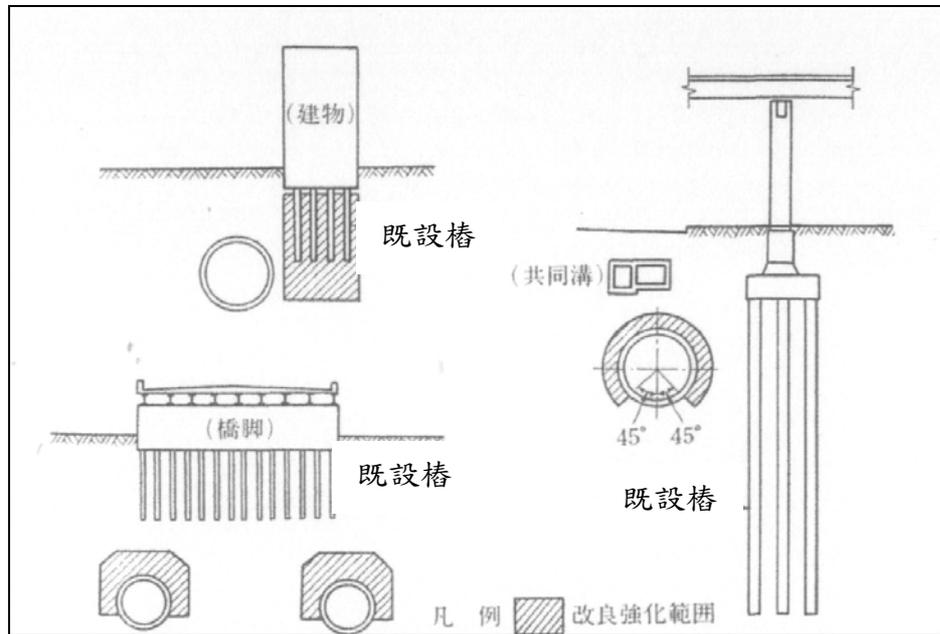


圖 2-9 灌漿工法改良強化範圍示意圖(ツールド工法入門, 1992)

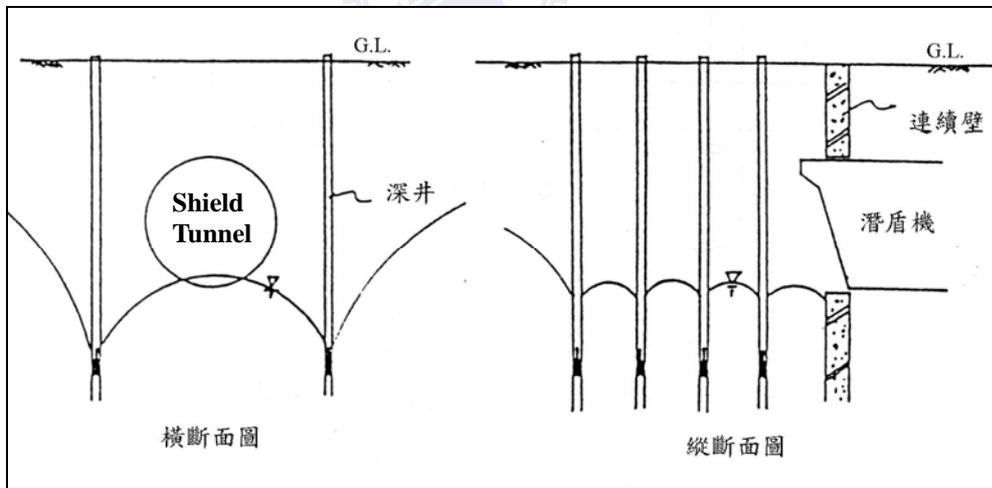


圖 2-10 降水工法示意圖 (林照順, 1992)

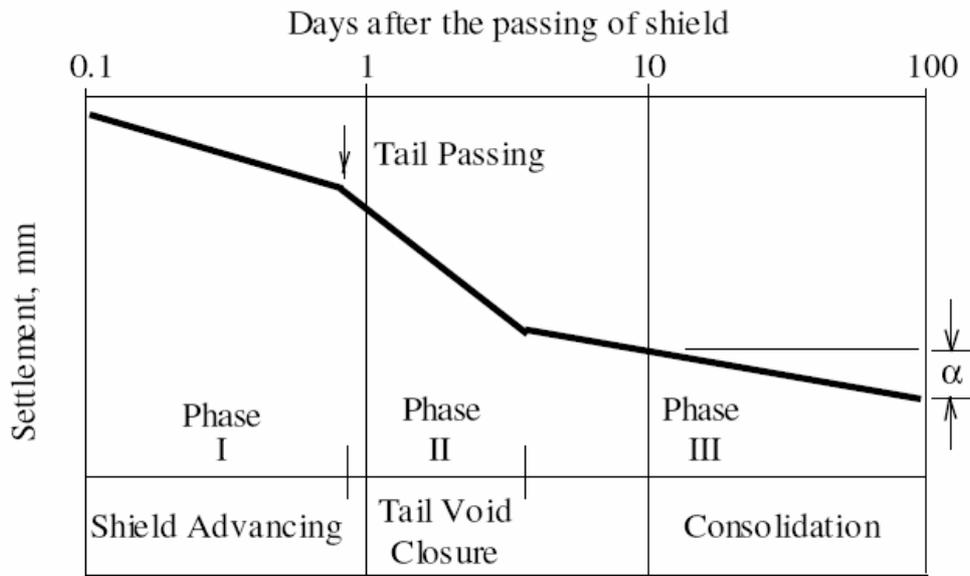


圖 2-11 潛盾隧道施工導致地表沉陷歷時曲線 (after Hwang et al., 1995)

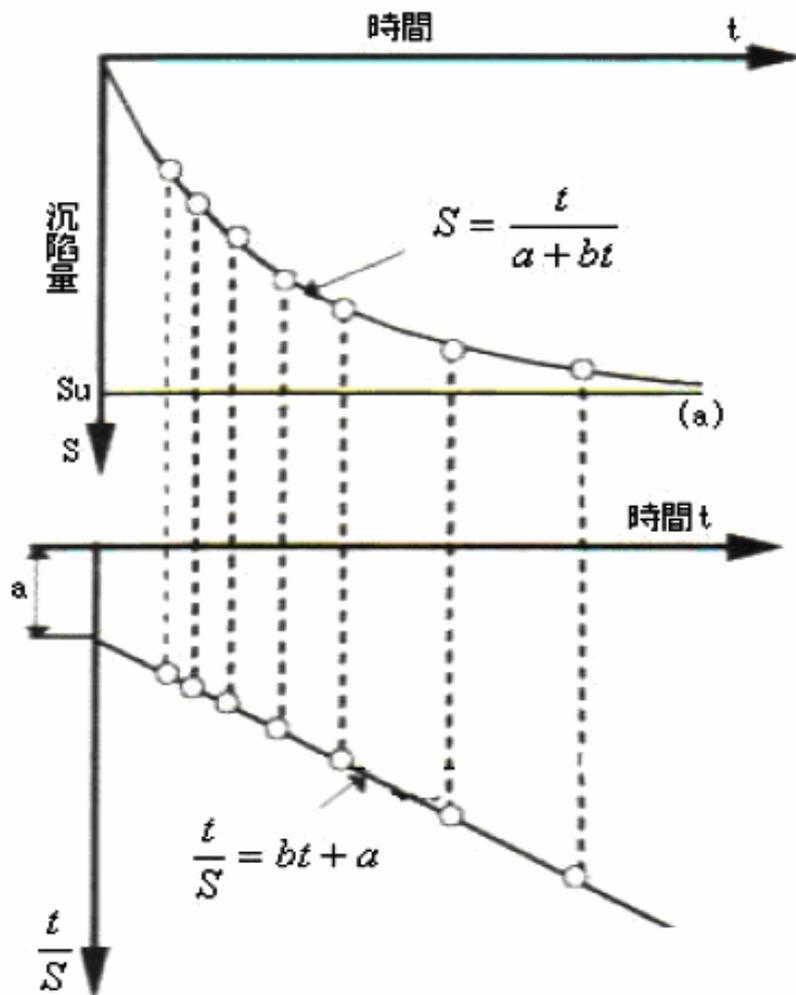


圖 2-12 現地沉陷歷時曲線推求雙曲線參數 a 及 b (Fang et al., 1993)

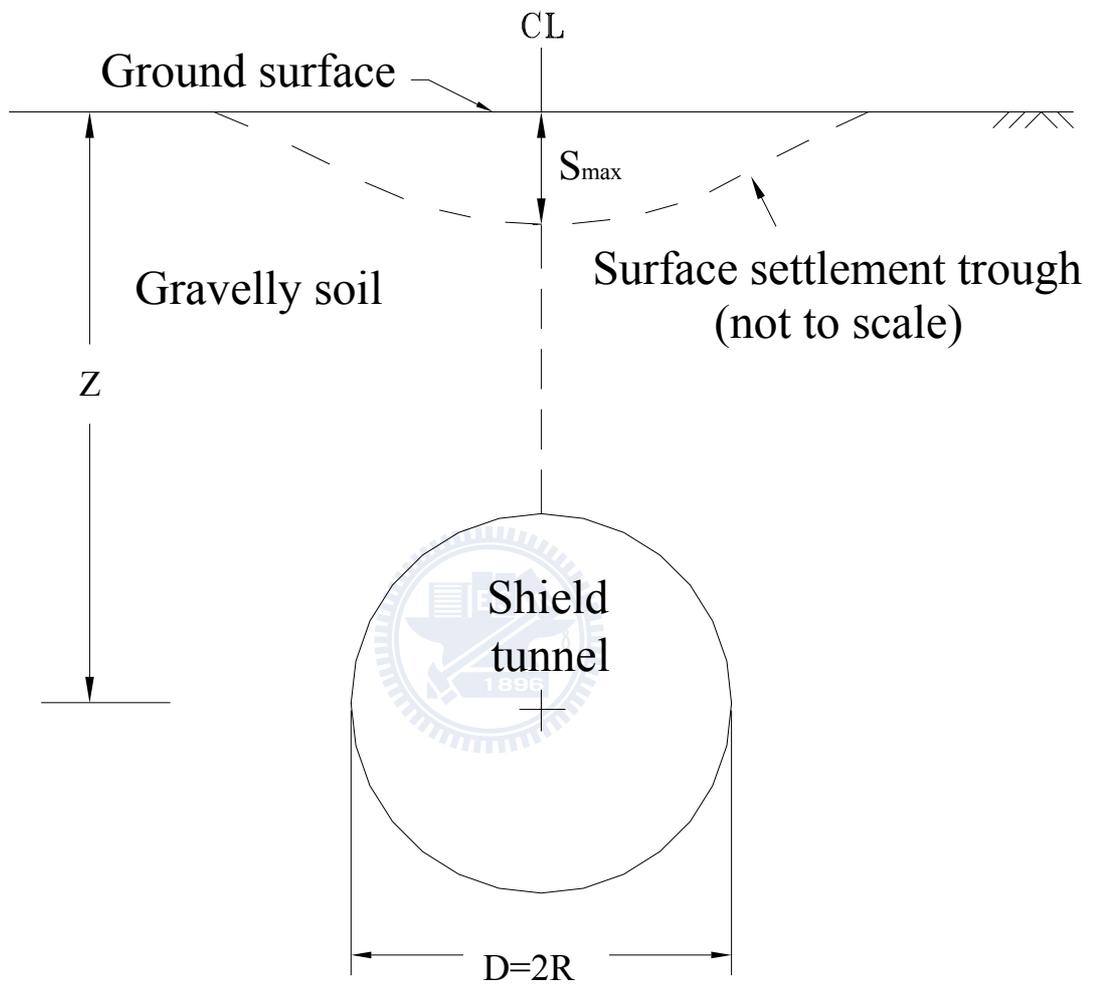


圖 3-1 潛盾隧道施工造成之地表沉陷相關符號示意圖

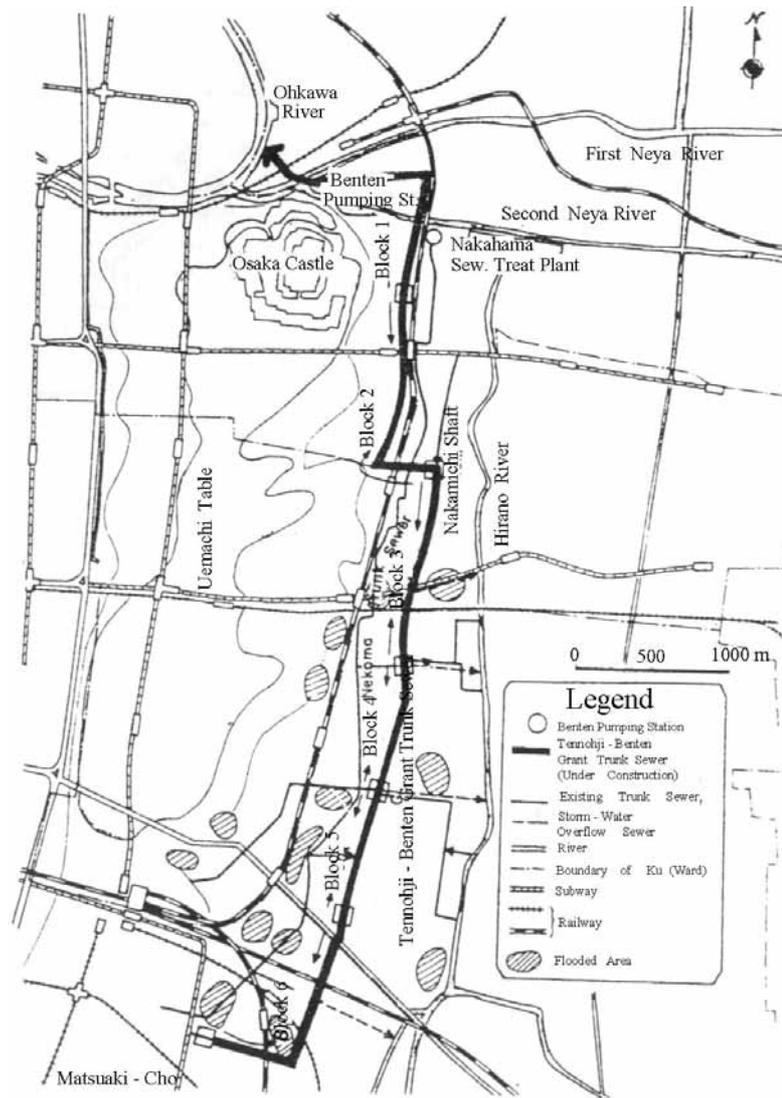


圖 3-2 大阪防洪計劃 (Tennomji-Benten Giant Trunk Sewer)
 (after Kitamura and Ohbayashi, 1981)

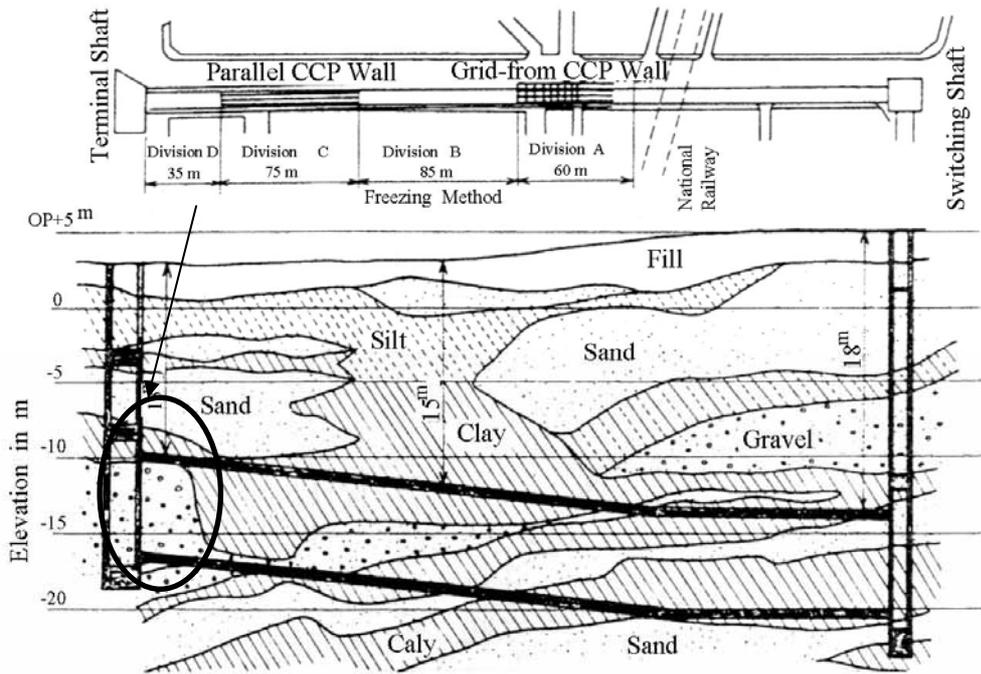


圖 3-3 Tennohji-Benten 地下水主幹管 Block 2 沿線及土層斷面
(after Kitamura and Ohbayashi, 1981)

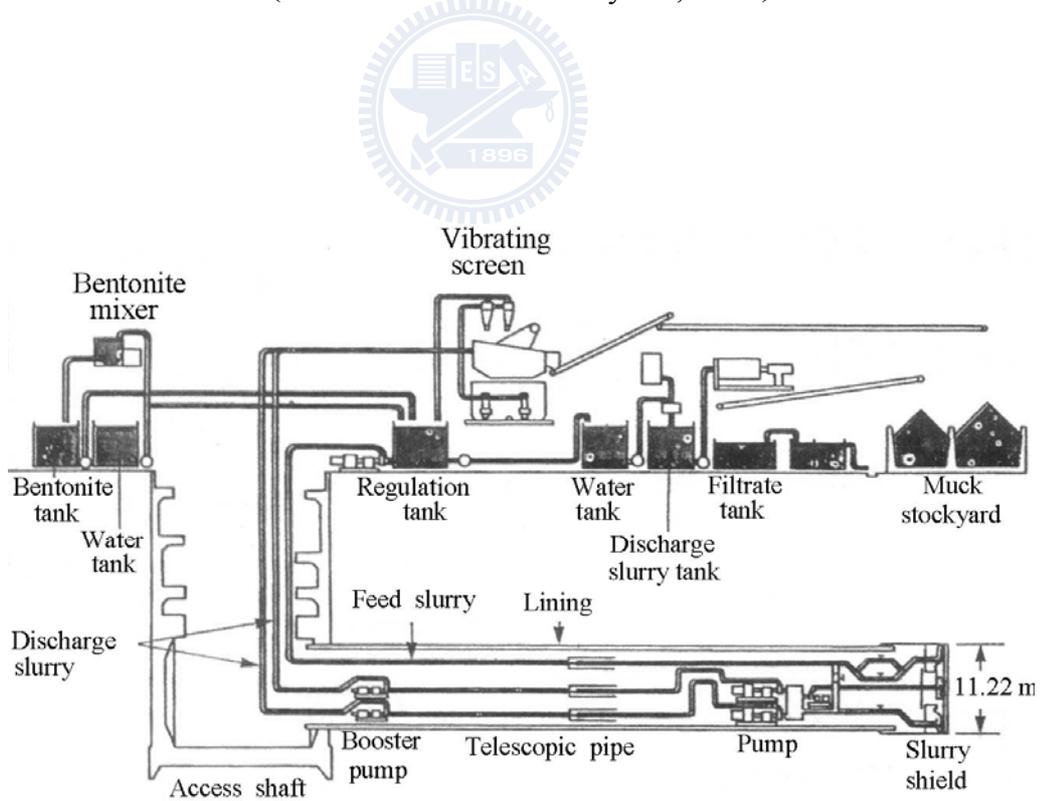


圖 3-4 泥水加壓式潛盾機示意圖 (after Hashimoto, 1989)

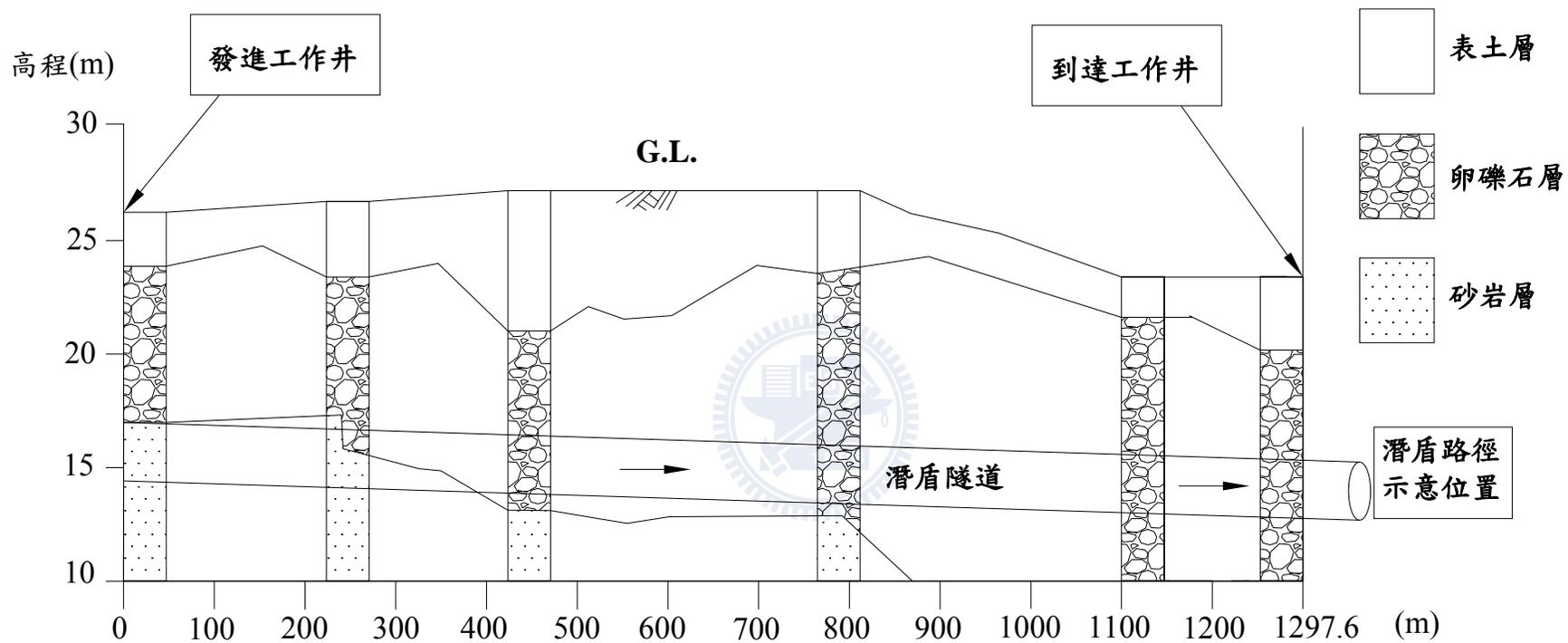


圖 3-5 日本神奈川縣川崎市下水道潛盾隧道工程路線高程與地質剖面圖

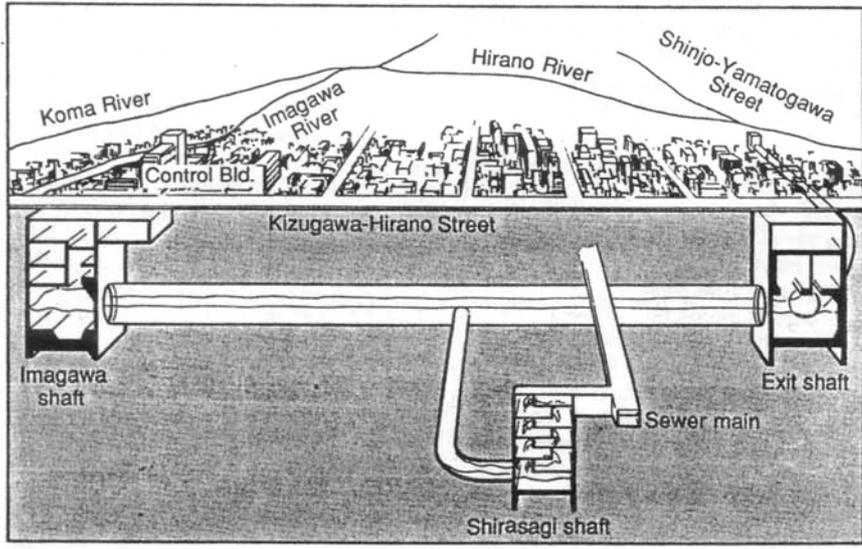
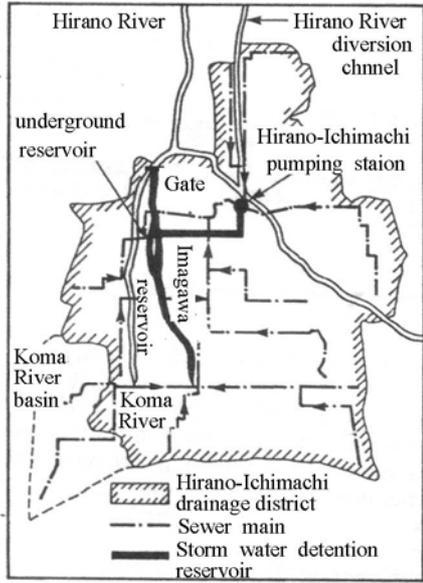
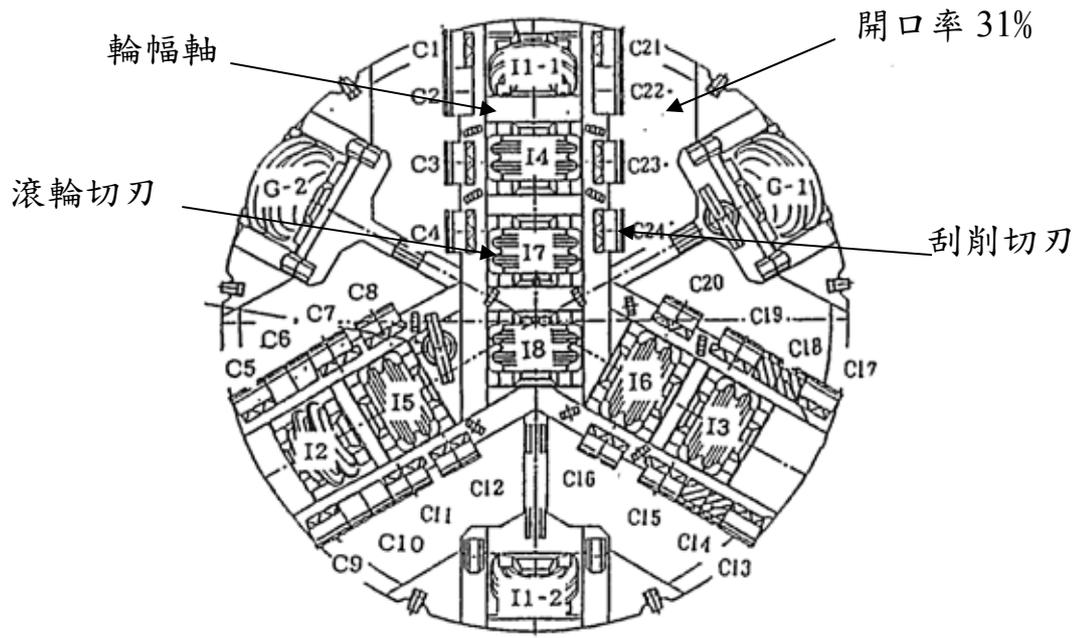
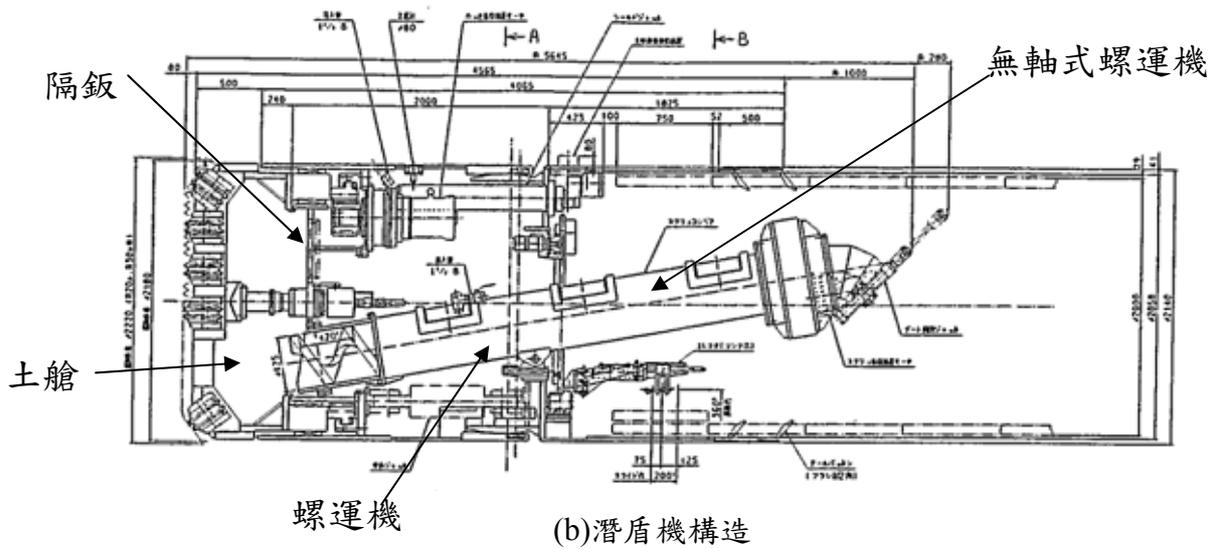


圖 3-6 Hiranogawa 地下儲水管道位置及剖面圖
(after Hashimoto, 1989)



(a) 切刀轉盤構造 (正視圖)



(b) 潛盾機構造

圖 3-7 日本廣島縣瀨野川下水道潛盾機構造示意圖
(after 砂本信雄 et al., 1998)

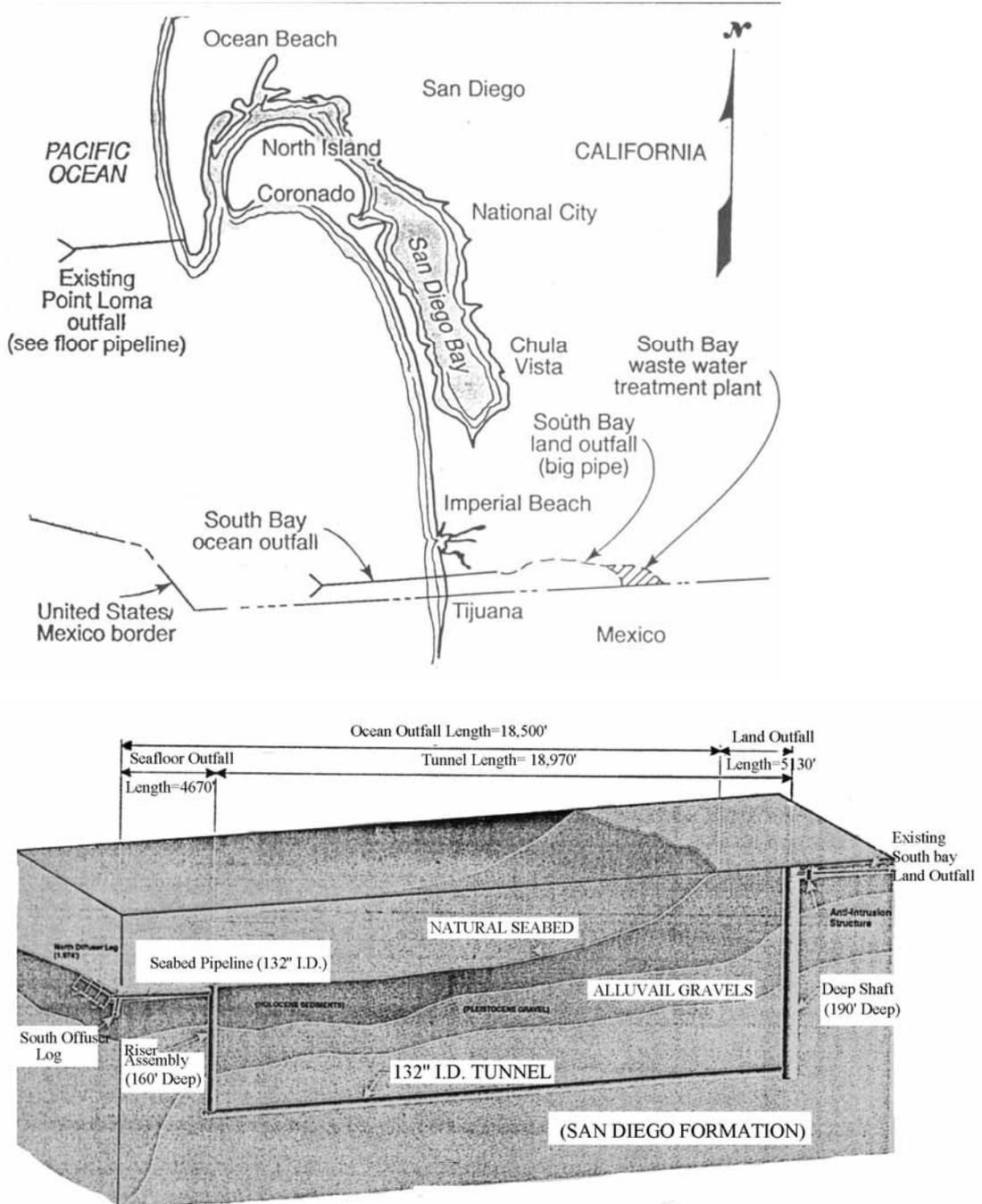


圖 3-8 南灣海上放流管位置及剖面圖

(after Stephen et al., 1996)

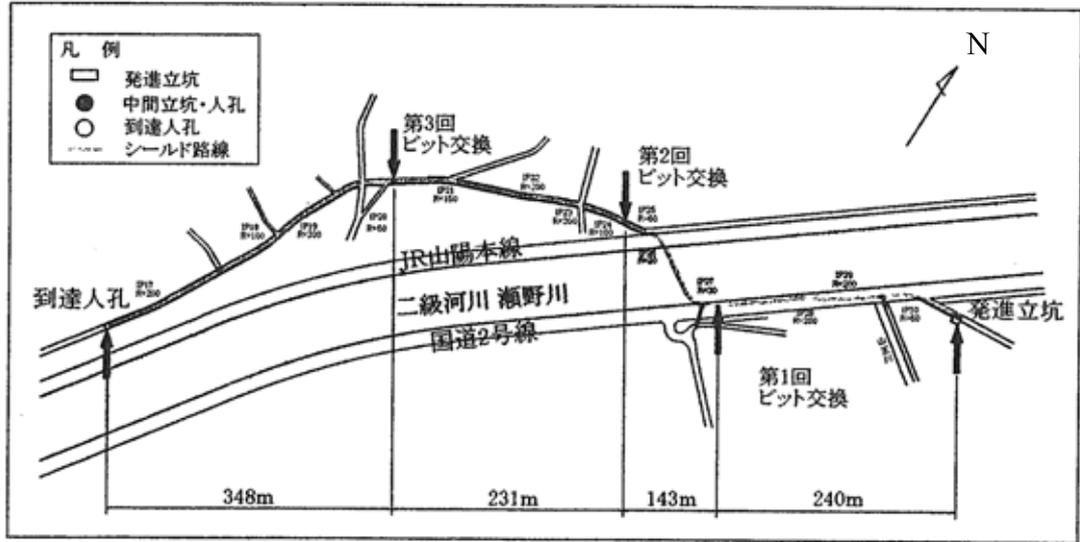


圖 3-9 日本廣島縣瀬野川下水道潛盾隧道施工路線圖
 (after 砂本信雄 et al., 1998)

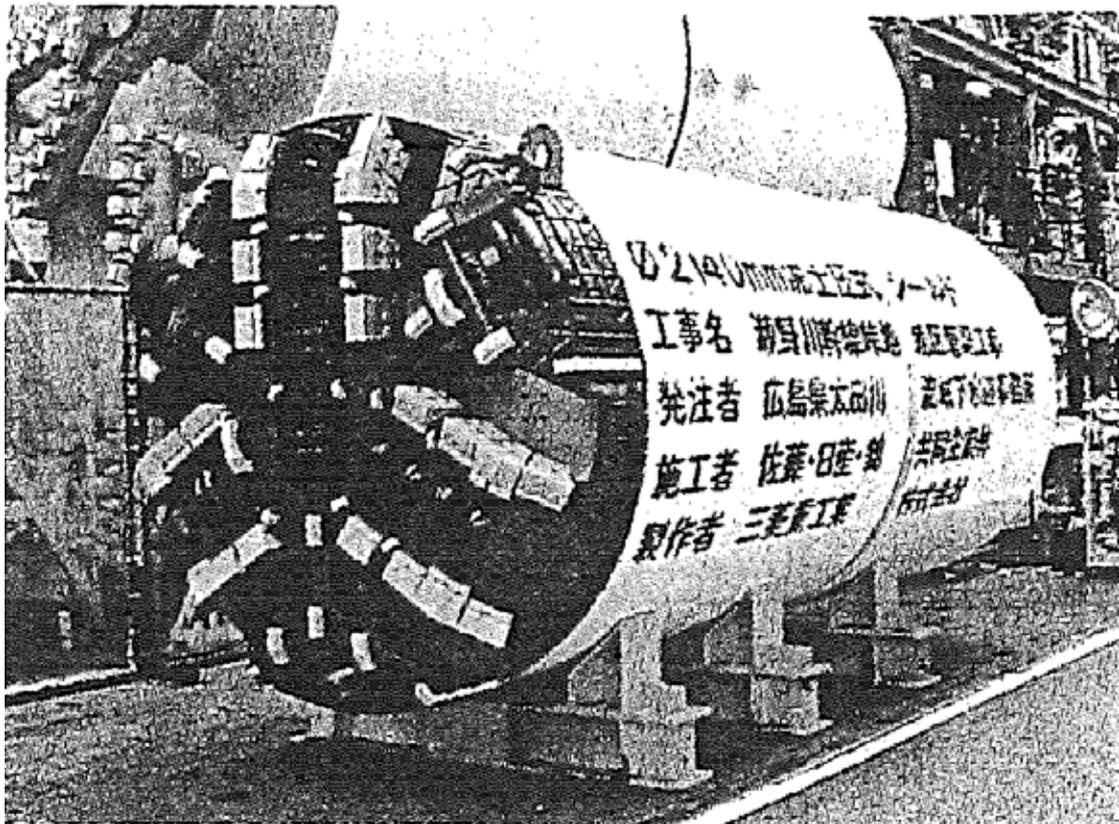


圖 3-10 日本廣島縣瀬野川下水道潛盾工程採用之土壓平衡式潛盾機
 (after 砂本信雄 et al., 1998)

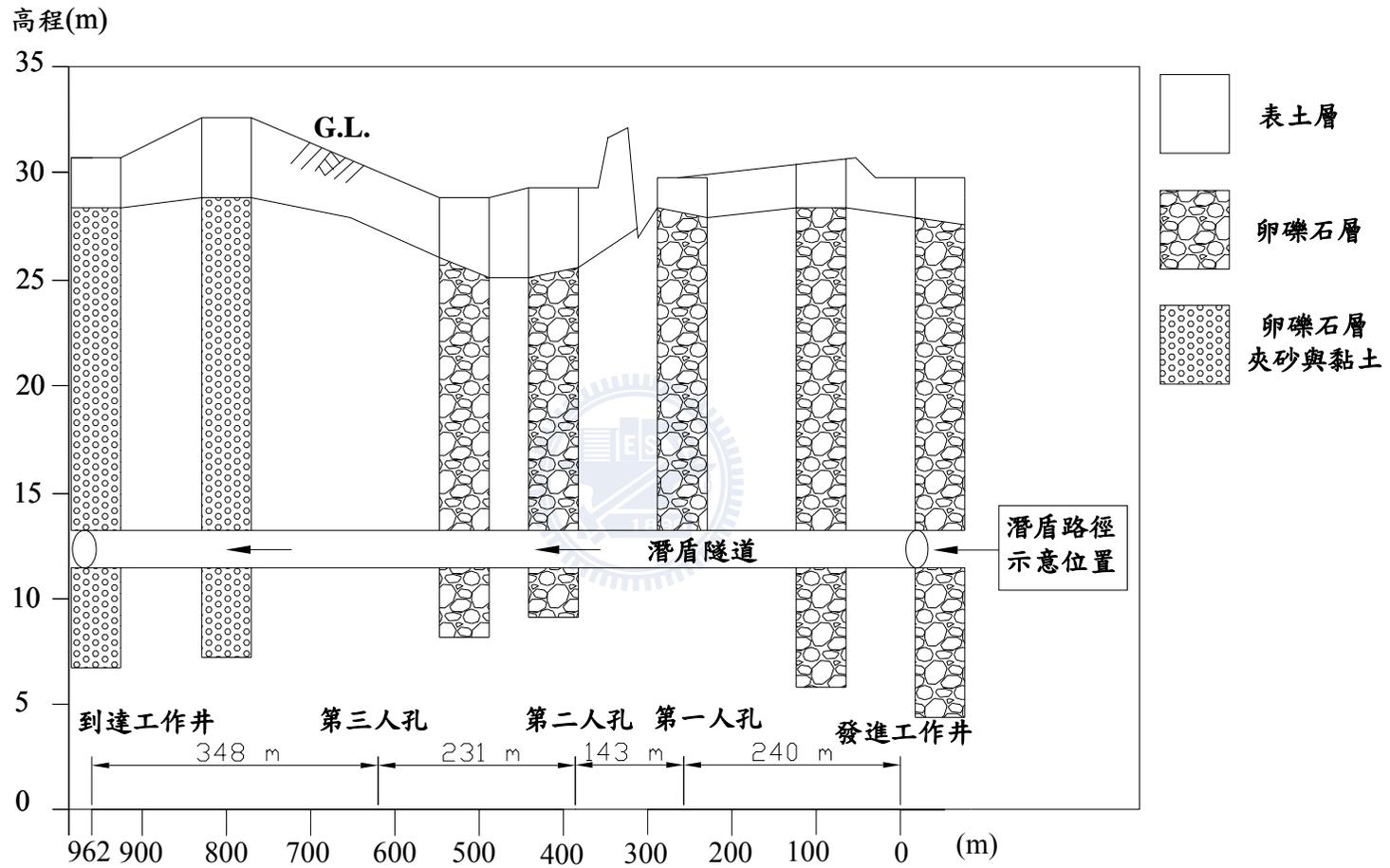


圖 3-11 日本廣島縣瀨野川下水道潛盾隧道路限高程與地質剖面

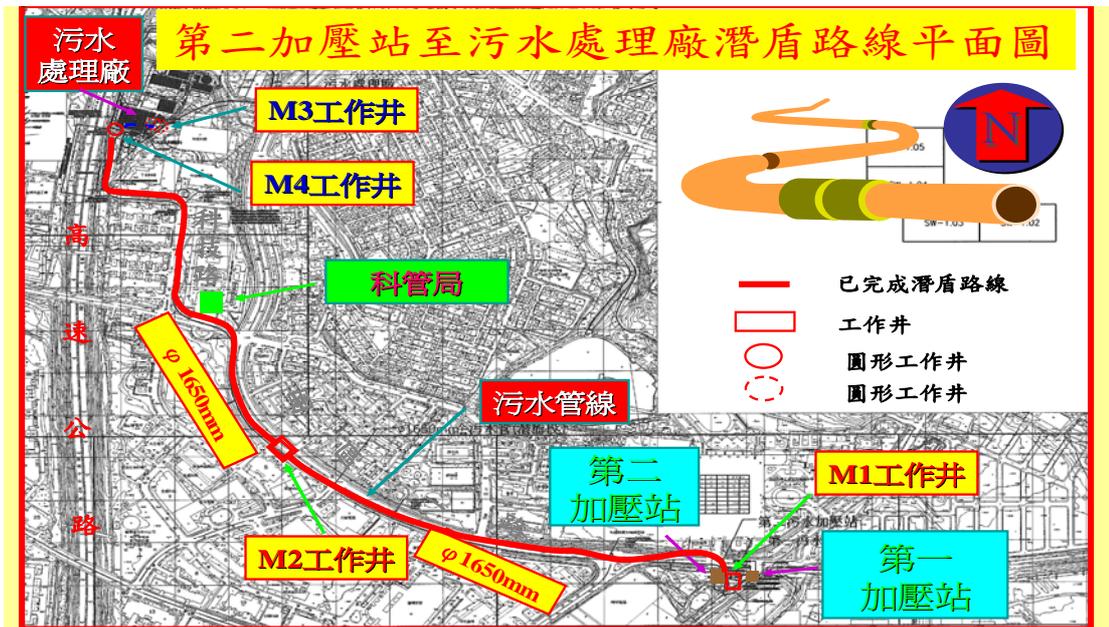


圖 4-1 第二加壓站至污水處理廠潛盾路線平面圖 (吳慶輝 1996)

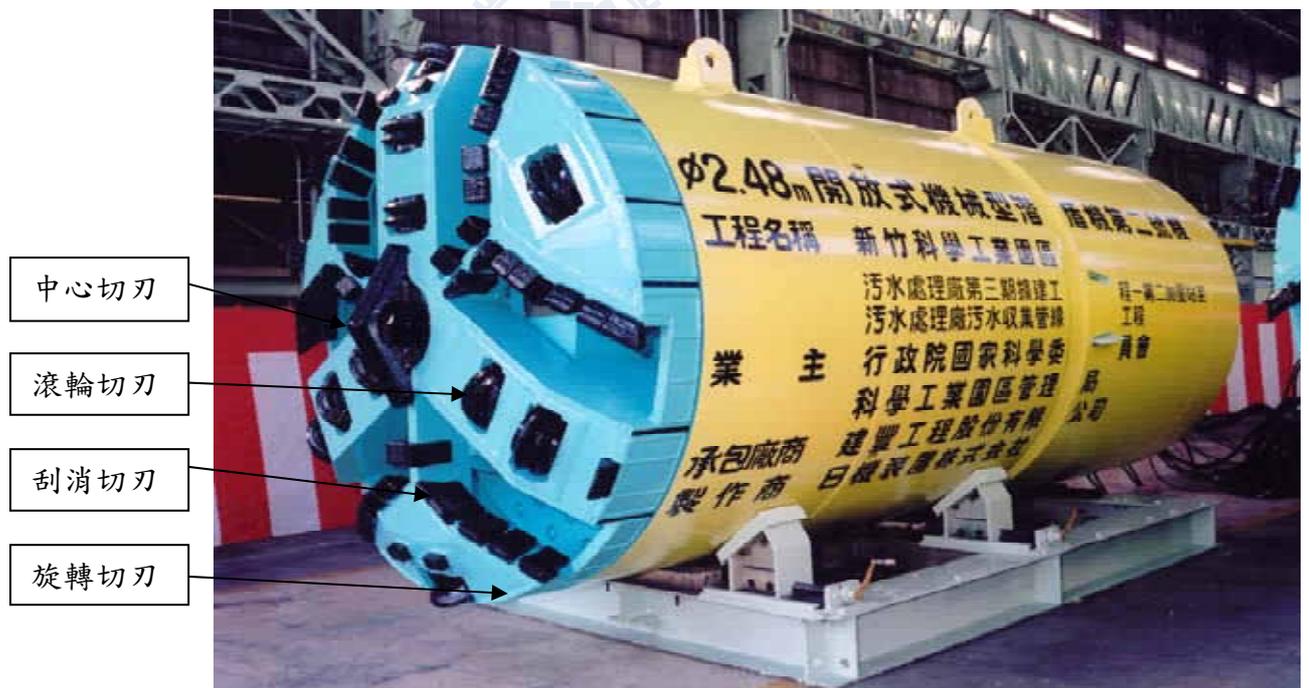


圖 4-2 日本日機裝置株式會社製造之開放式機械型潛盾機 (吳慶輝 1996)

高程(m)

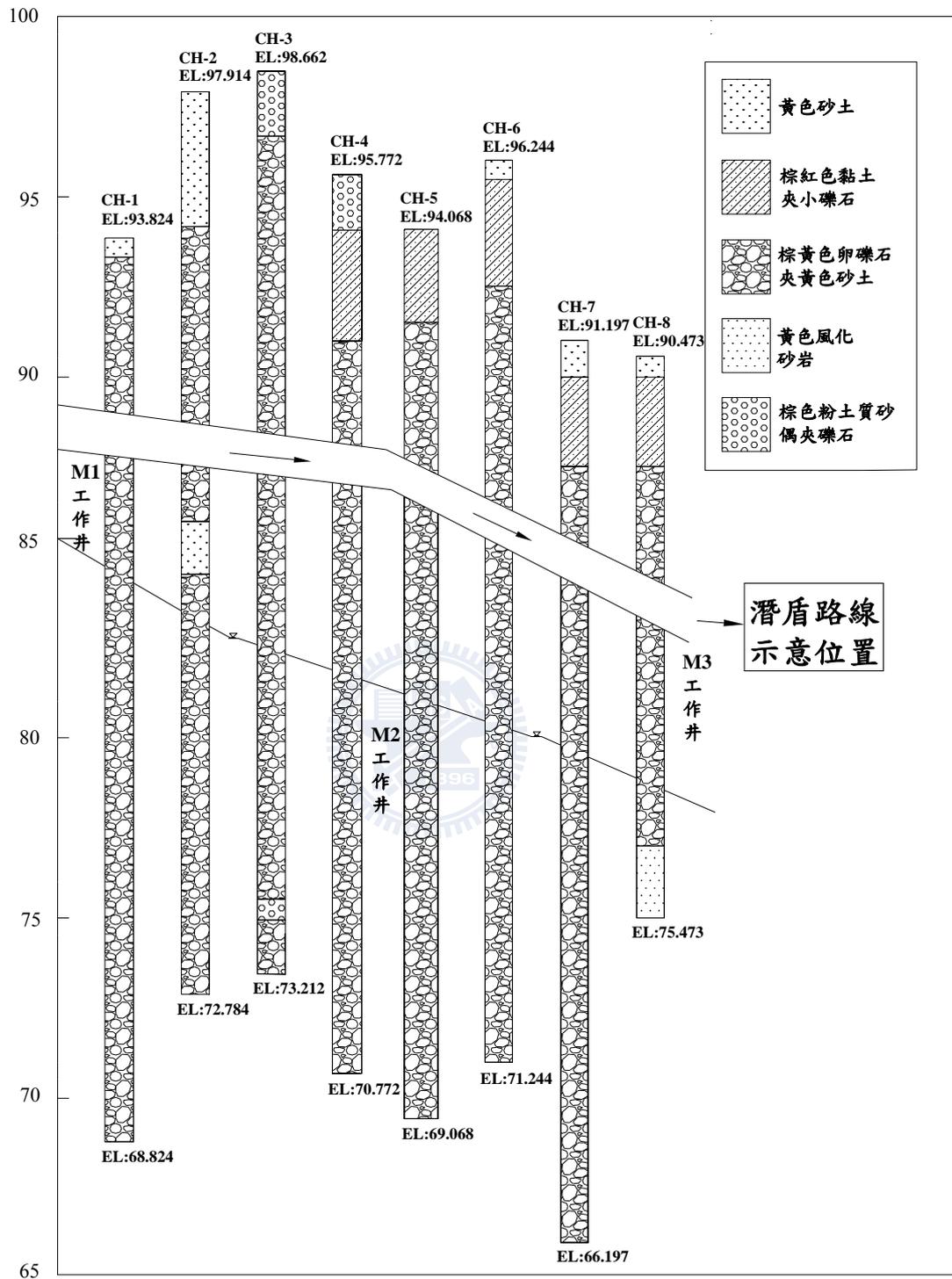


圖4-3 第二加壓站至污水處理廠地質鑽探柱狀圖

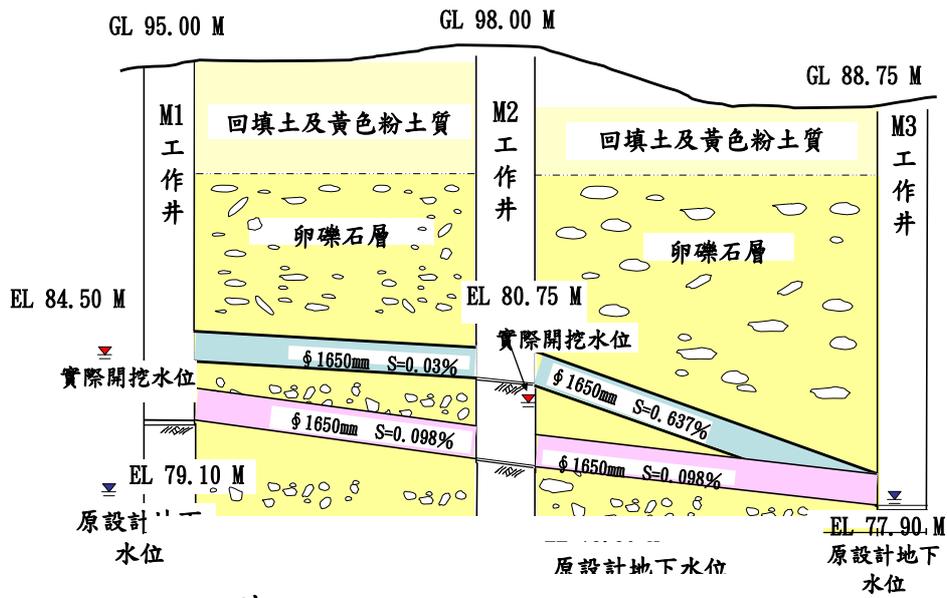


圖 4-4 地下水位變化前後管線高程示意圖(陳德華 2003)

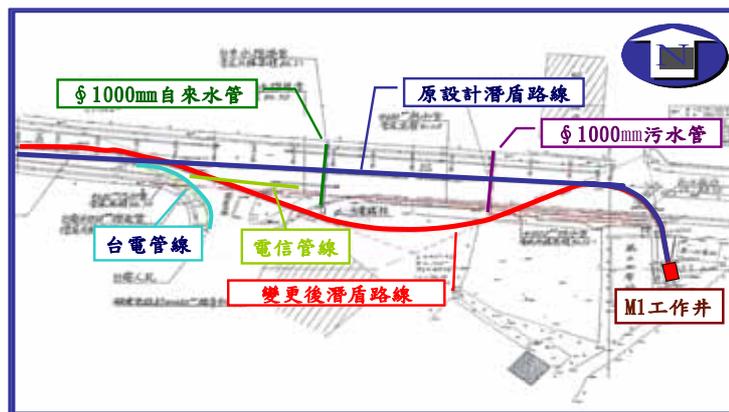


圖 4-5 變更方案之地下管線與潛盾路線平面圖(陳德華 2003)

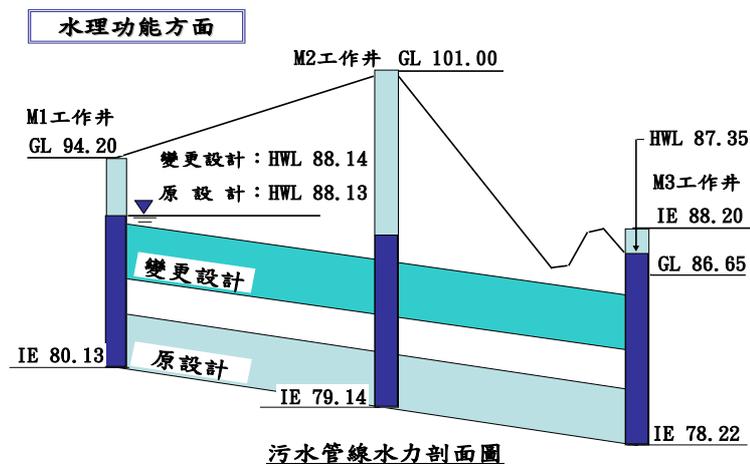


圖 4-6 污水管線水利剖面圖(陳德華 2003)

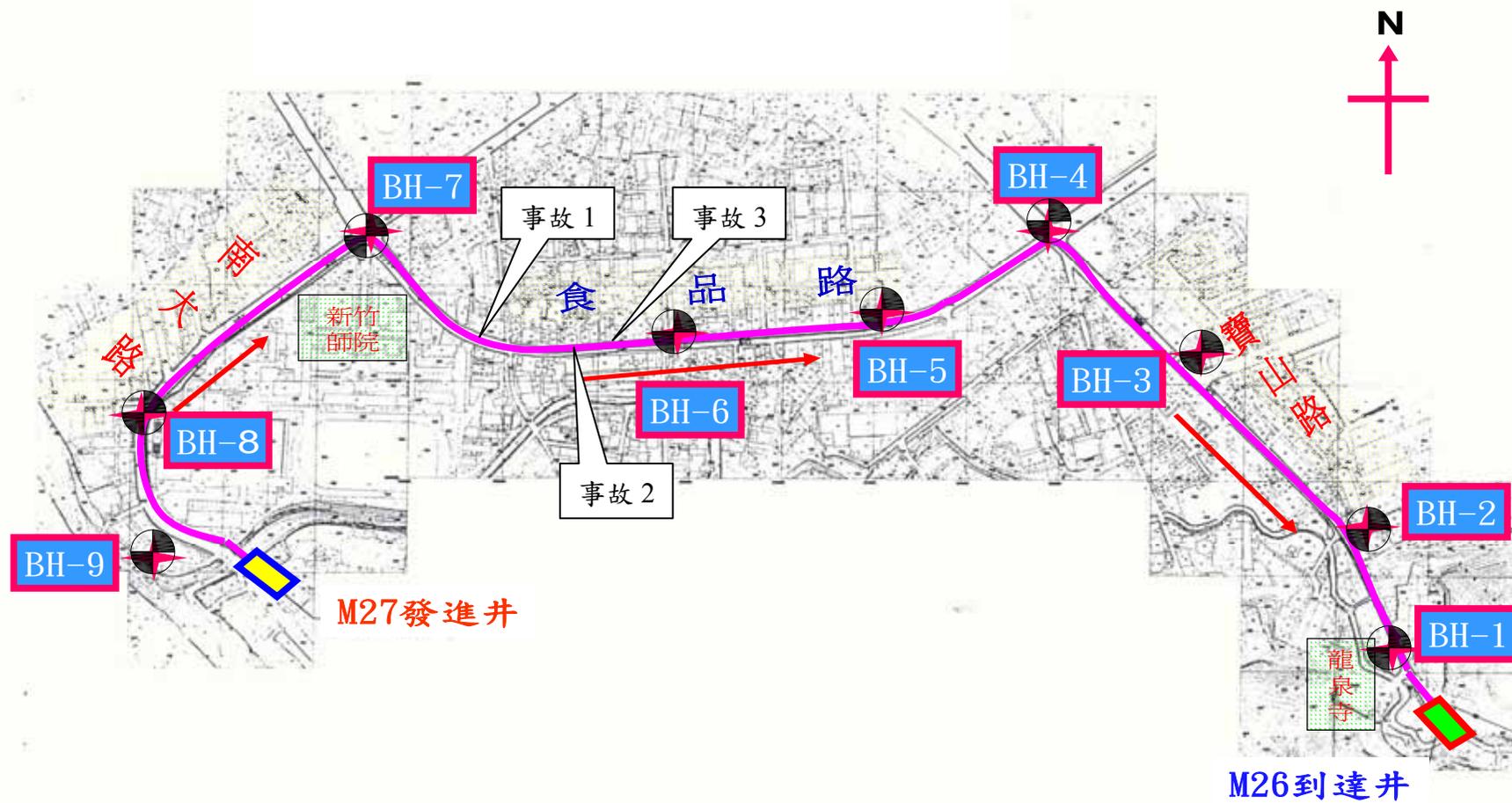


圖 4-7 竹科三期之二園區污水處理廠放流管工程平面圖 (中華顧問 2003)

高程(m)

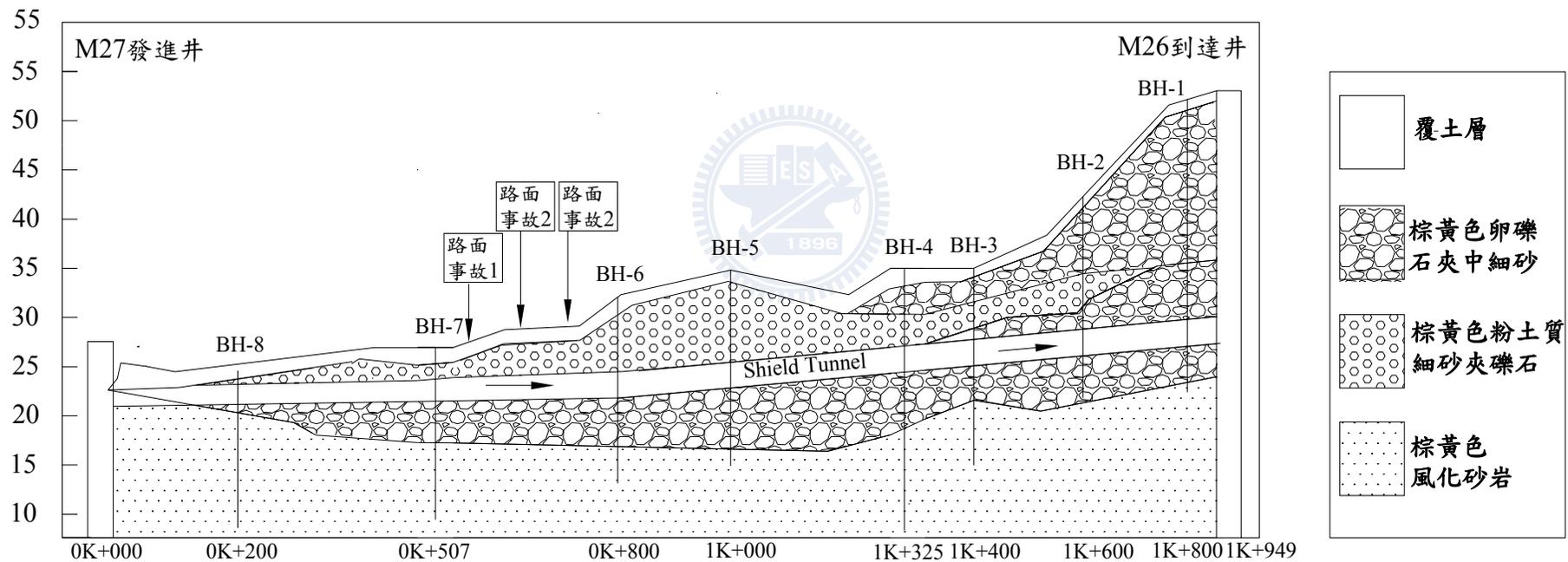


圖 4-8 竹科園區三期之二污水處理廠放流管工程之高程及地質剖面圖



圖 4-9 園區三期之二污水處理廠採用之土壓平衡式潛盾機 (中華顧問 2003)

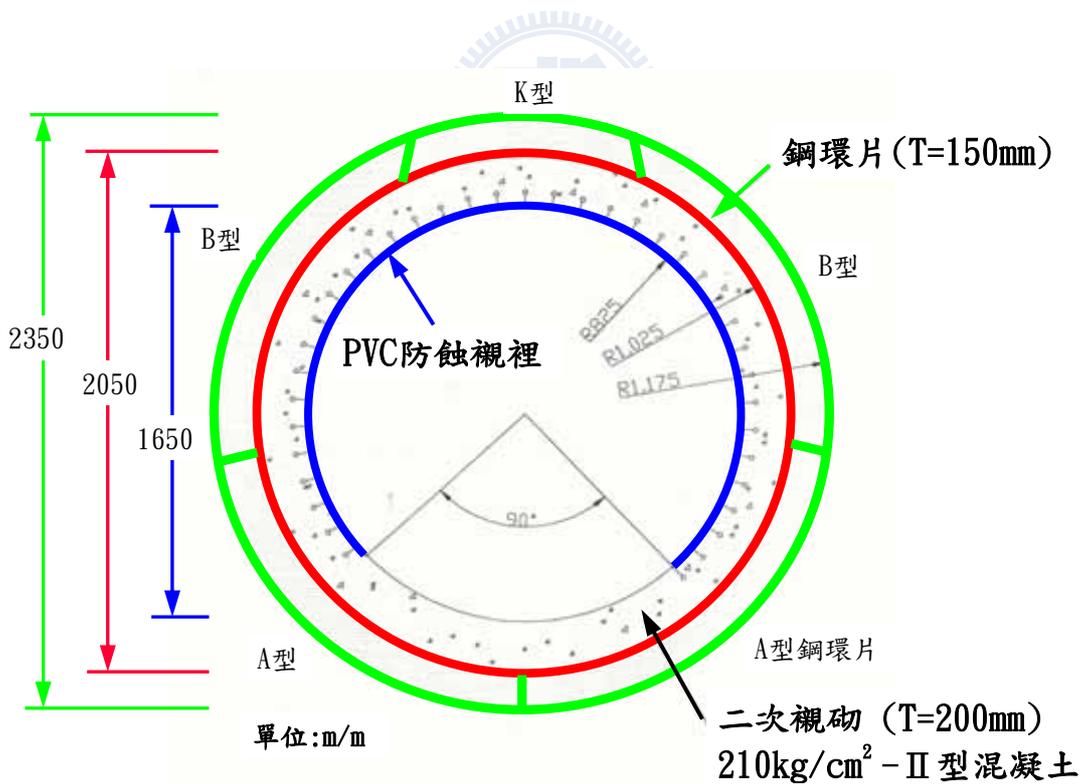


圖 4-10 竹科園區三期之二污水放流管襯砌環片斷面 (中華顧問 2003)



(a)施工前之滾輪切刀



(b)施工後之滾輪切刀

圖 4-11 機頭滾輪切刀磨損比較 (中華顧問 2003)



(a)路面塌陷



(b)塌孔內部狀況

圖 4-12 食品路 508 號前路面塌陷情形 (中華顧問 2003)

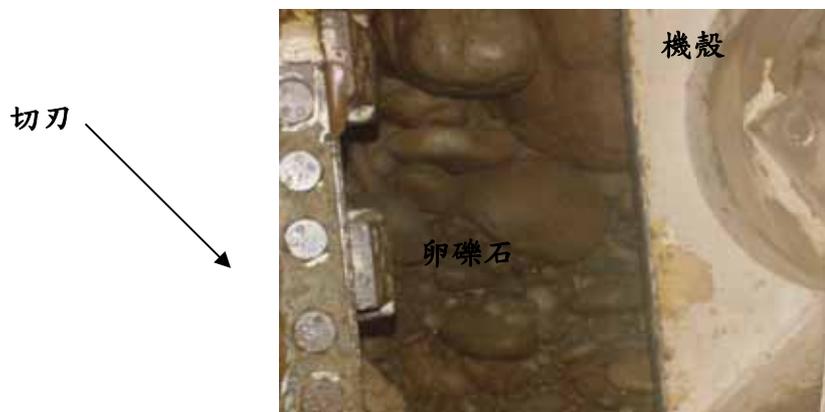


圖 4-13 潛盾機頭遇大粒徑卵礫石 (中華顧問 2003)



圖 4-14 潛盾施工遭遇之大顆粒卵礫石 ($\phi = 400 \text{ mm}$)
(中華顧問 2003)



(a) 塌孔內部狀況

(b) 塌孔內之自來水管

圖 4-15 潛盾機推至 911 環路面塌陷情形 (中華顧問 2003)

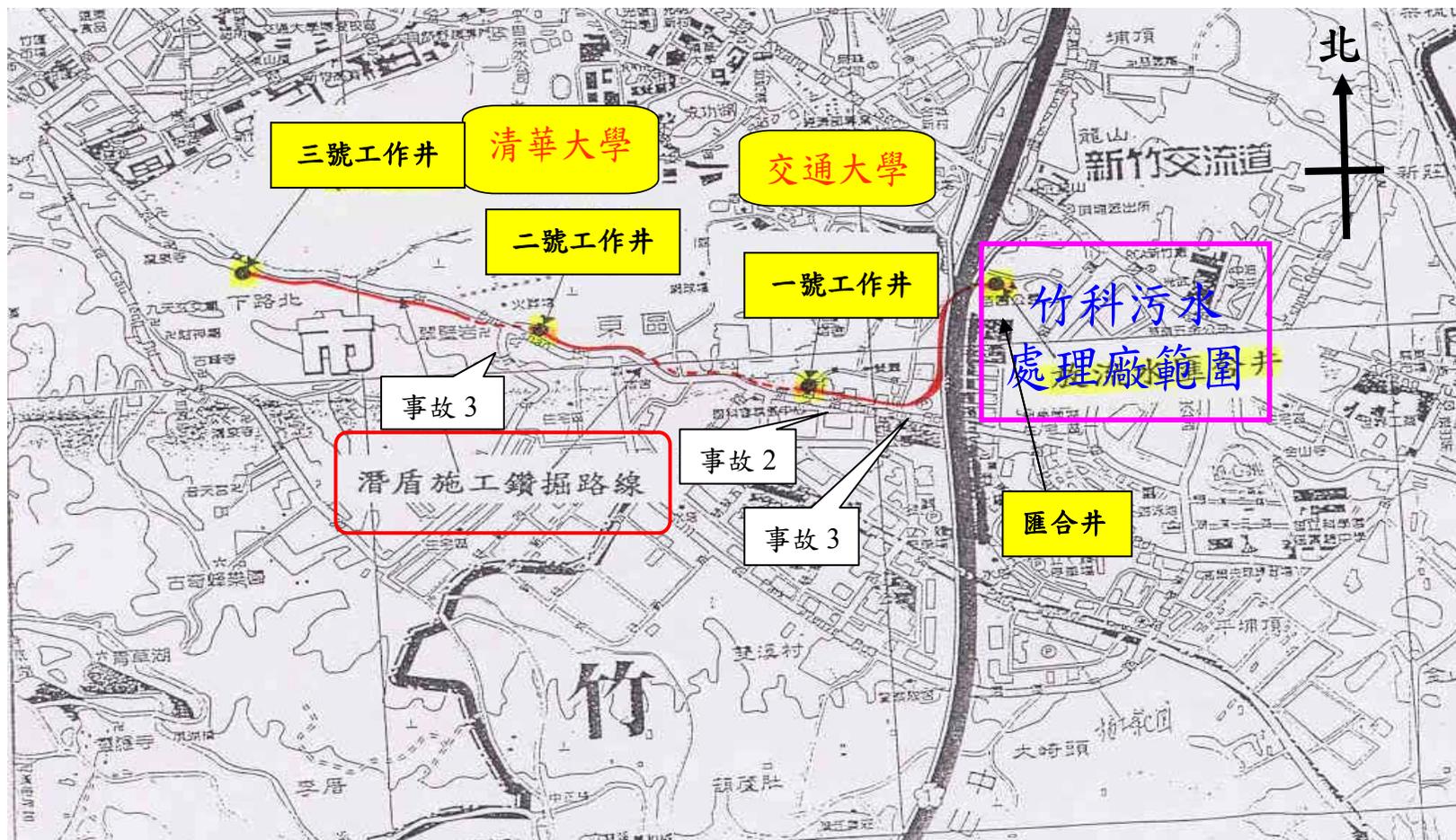


圖 4-16 竹科園區污水處理廠三期之三放流管工程平面 (吳慶輝 1996)

高程(m)

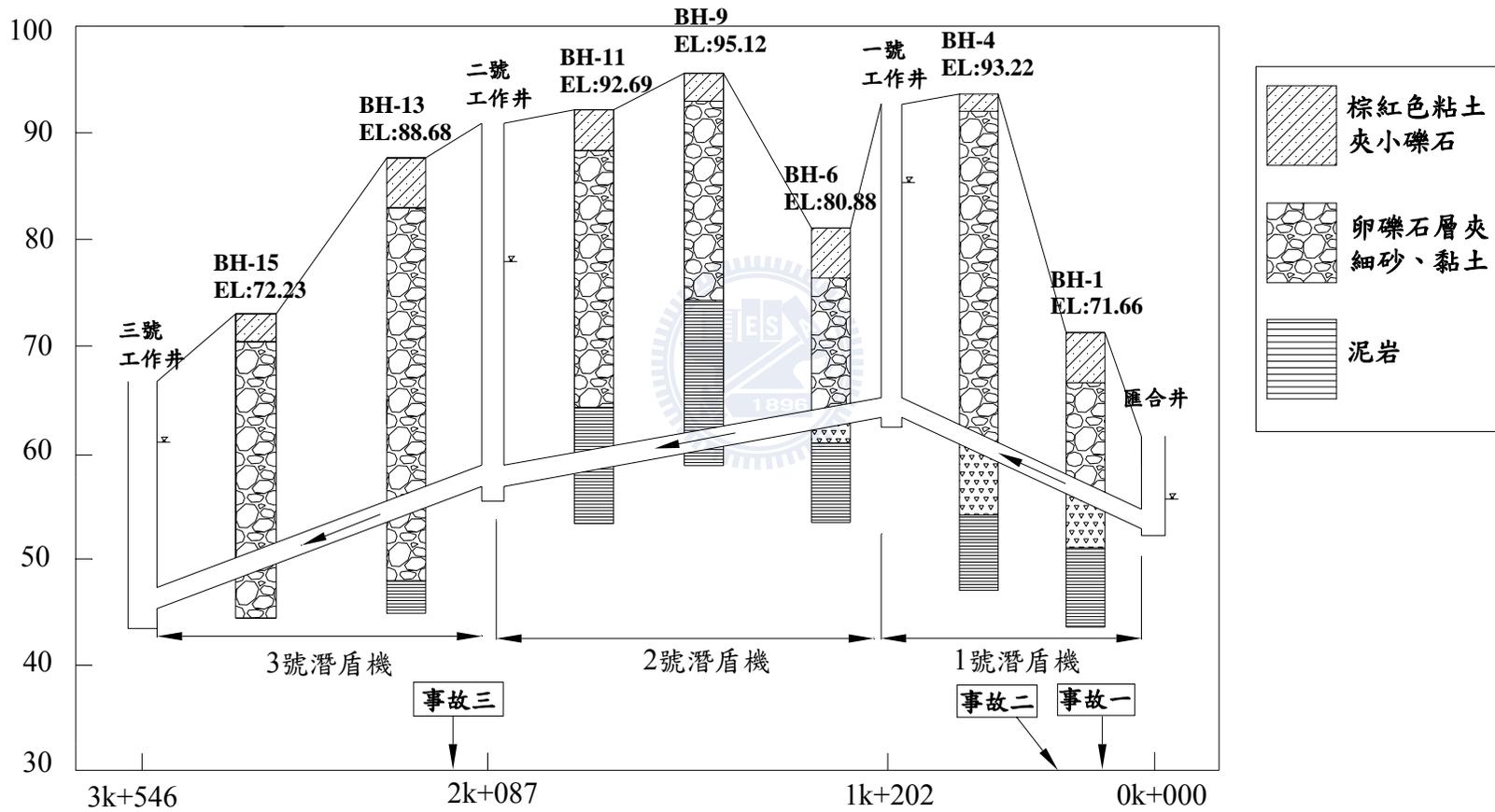


圖 4-17 竹科園區污水處理廠三期之三放流管工程之高程及地質剖面圖



圖 4-18 竹科園區三期之三污水處理廠採用之土壓平衡式潛盾機
(中華顧問 2002)



(a) 螺運機內無軸式螺旋葉片帶磨損

(b) 螺運機內螺旋葉片帶斷裂

圖 4-19 三號潛盾機螺運機螺旋葉片遭遇地下舊有鋼軌樁嚴重磨損及斷裂
(中華顧問 2002)



圖 4-20 一號潛盾機螺運機出土閘門開啟產生大量湧水情形
(中華顧問 2002)





圖 5-1 新工~湖北電纜線路潛盾隧道路線平面圖 (中華顧問 2004)

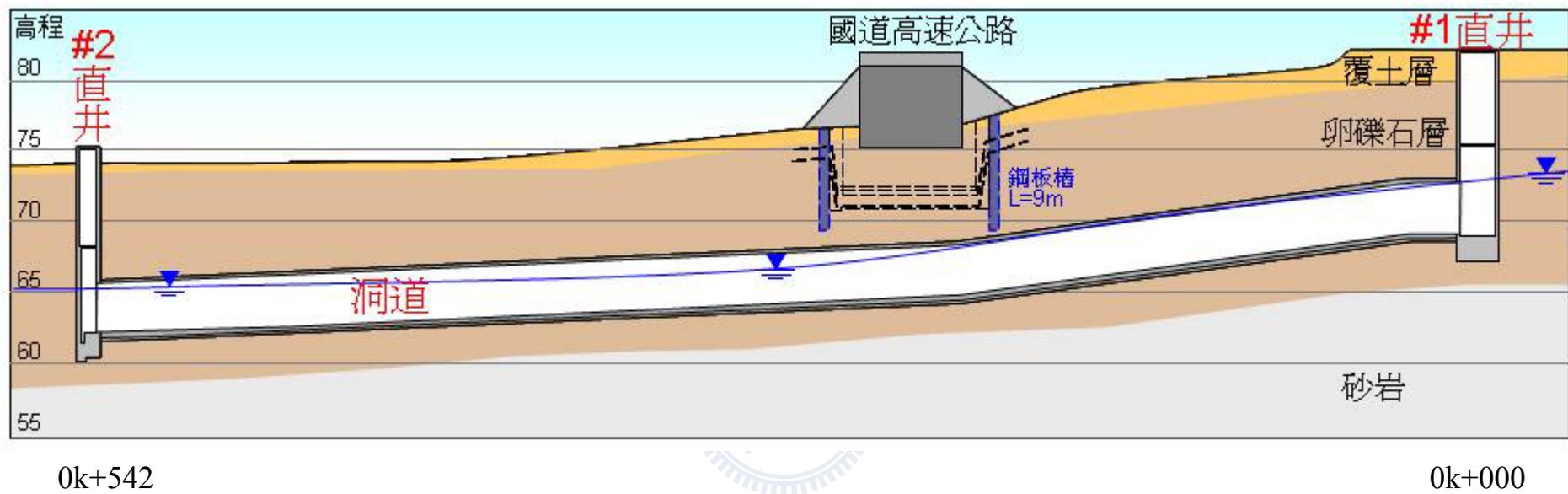


圖 5-2 新工～湖北電纜線路潛盾隧道地質剖面示意圖
(中華顧問 2004)



圖 5-3 新工～湖北電纜線路工程採用之加泥式土壓平衡潛盾機(中華顧問 2004)



圖 5-4 寬 500mm 之鋼環片 (中華顧問 2004)



圖 5-5 潛盾機開挖面遭遇含礫量 90%以上 (中華顧問 2004)



圖 5-6 急曲線潛盾隧道完工圖 (中華顧問 2004)

高程 (m)

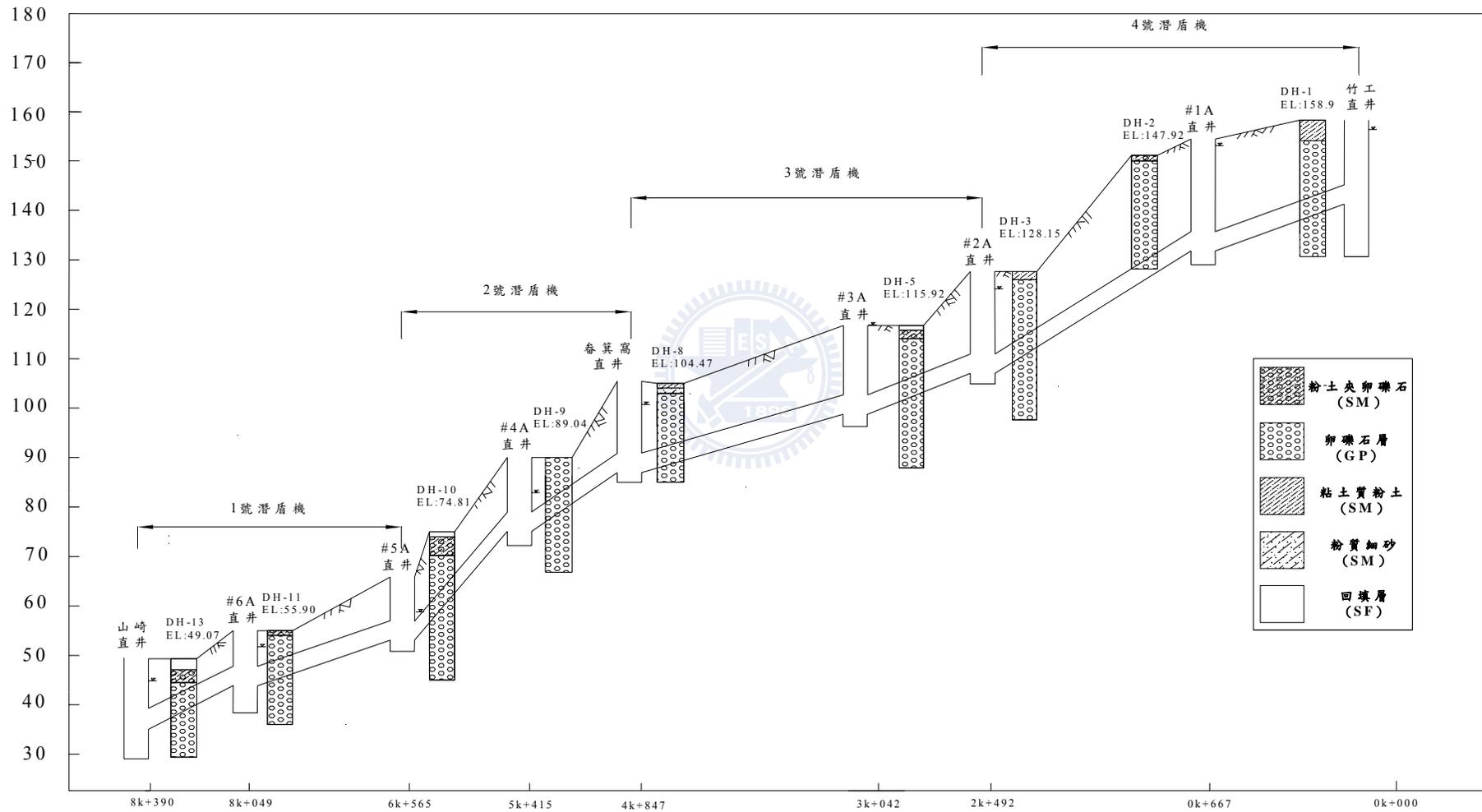


圖 5-8 新工超高壓變電所潛盾隧道地質剖面圖



(a) 立體圖



(b) 頂視圖

圖 5-9 新工超高壓變電所潛盾隧道採用之加泥式土壓平衡潛盾機
(介興/清水營造 2009)



圖 5-10 潛盾機採用無軸式螺運機之土倉進土口
(介興/清水營造 2009)



圖 5-11 潛盾機到達#6A 直井破鏡出土狀況 (介興/清水營造 2009)

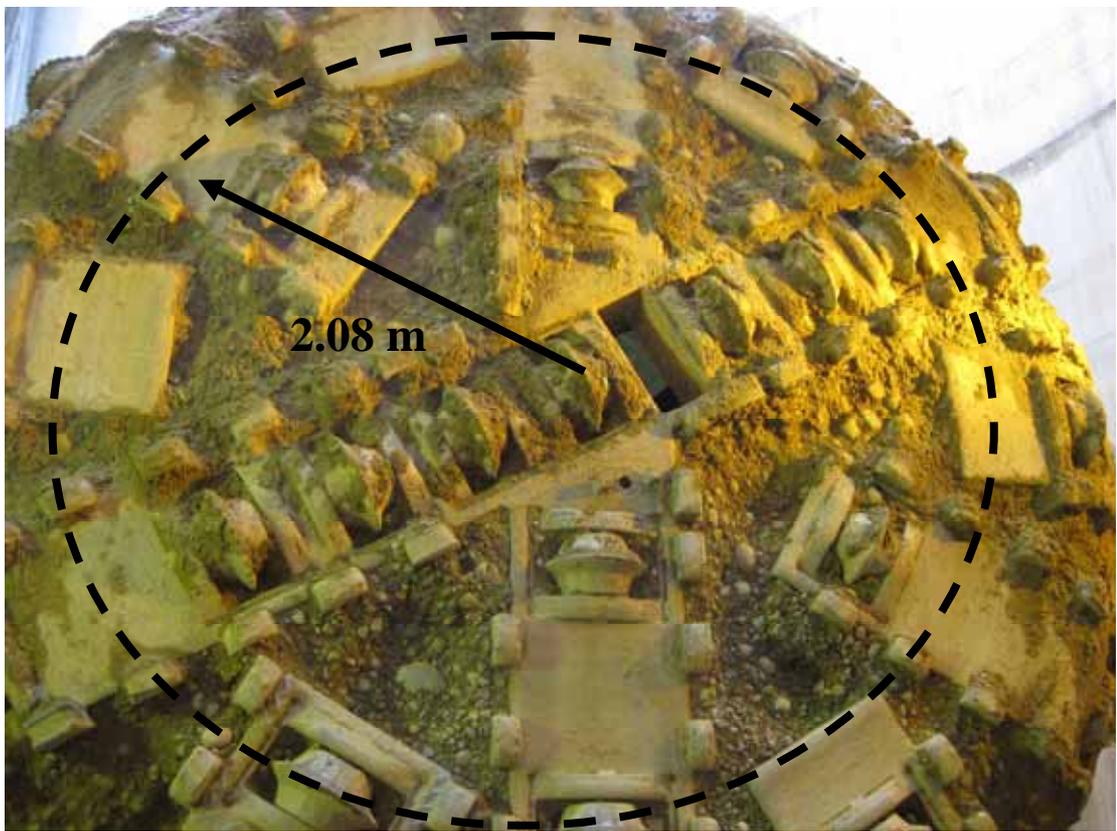


圖 5-12 潛盾機切刃轉盤磨損情況(半徑 $R=6.24\text{ m}$)



(a) 切刀轉盤上固定切刀之磨損



(b) 切刀轉盤上滾輪切刀之磨損

圖 5-13 潛盾機切刀磨損情況

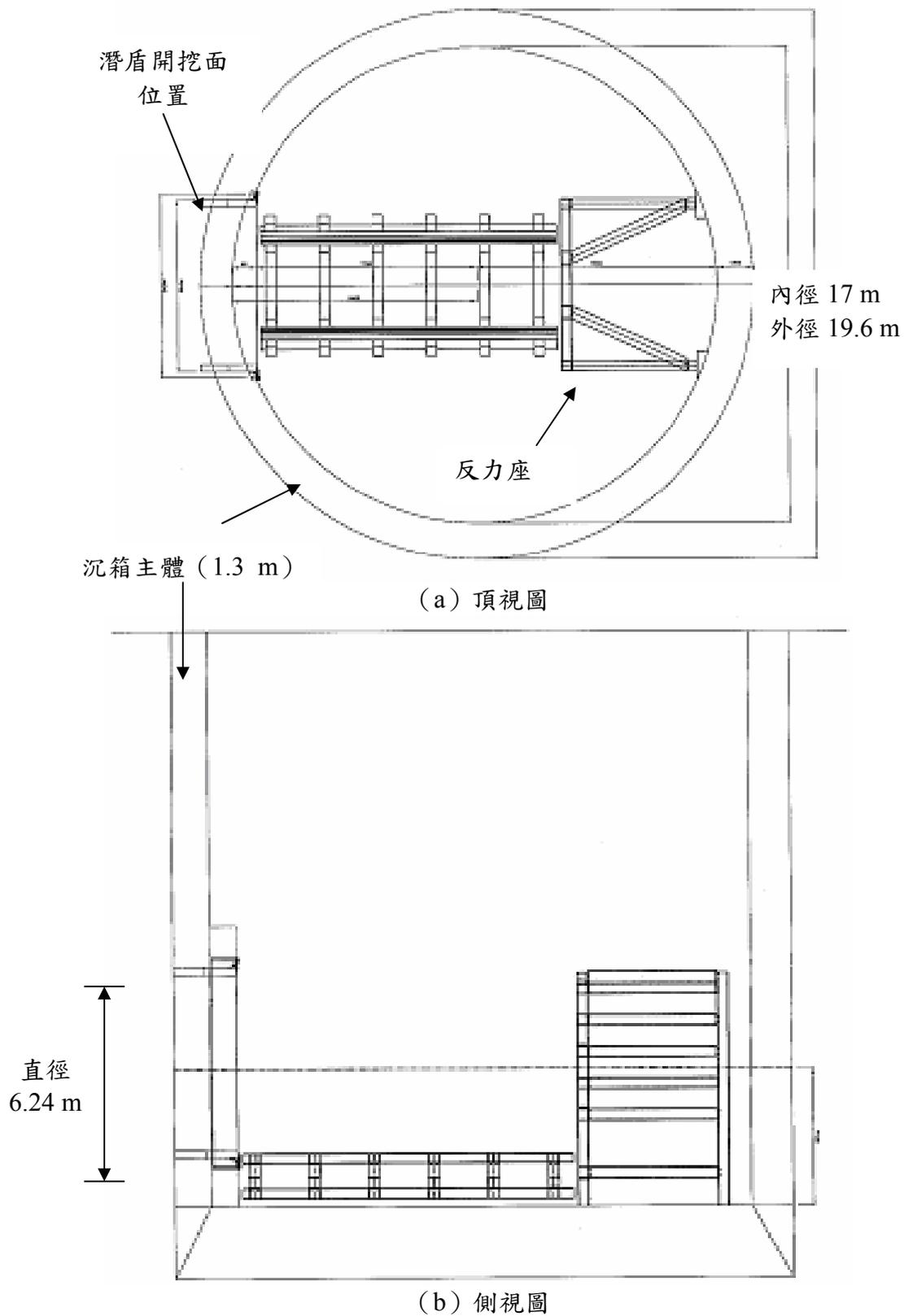


圖 5-14 潛盾機出發與到達工作井示意圖
(介興/清水營造 2009)



(a) 側視圖



(a) 上視圖

圖 5-15 沉箱工法初期施作情況
(介興/清水營造 2009)



圖 5-16 沉箱主體未澆置混凝土情況
(介興/清水營造 2009)



圖 5-17 沉箱主體（工作井）完成圖
(介興/清水營造 2009)



圖 5-18 泡沫工法試驗比較 (加泡沫百分比)
(介興/清水營造 2009)

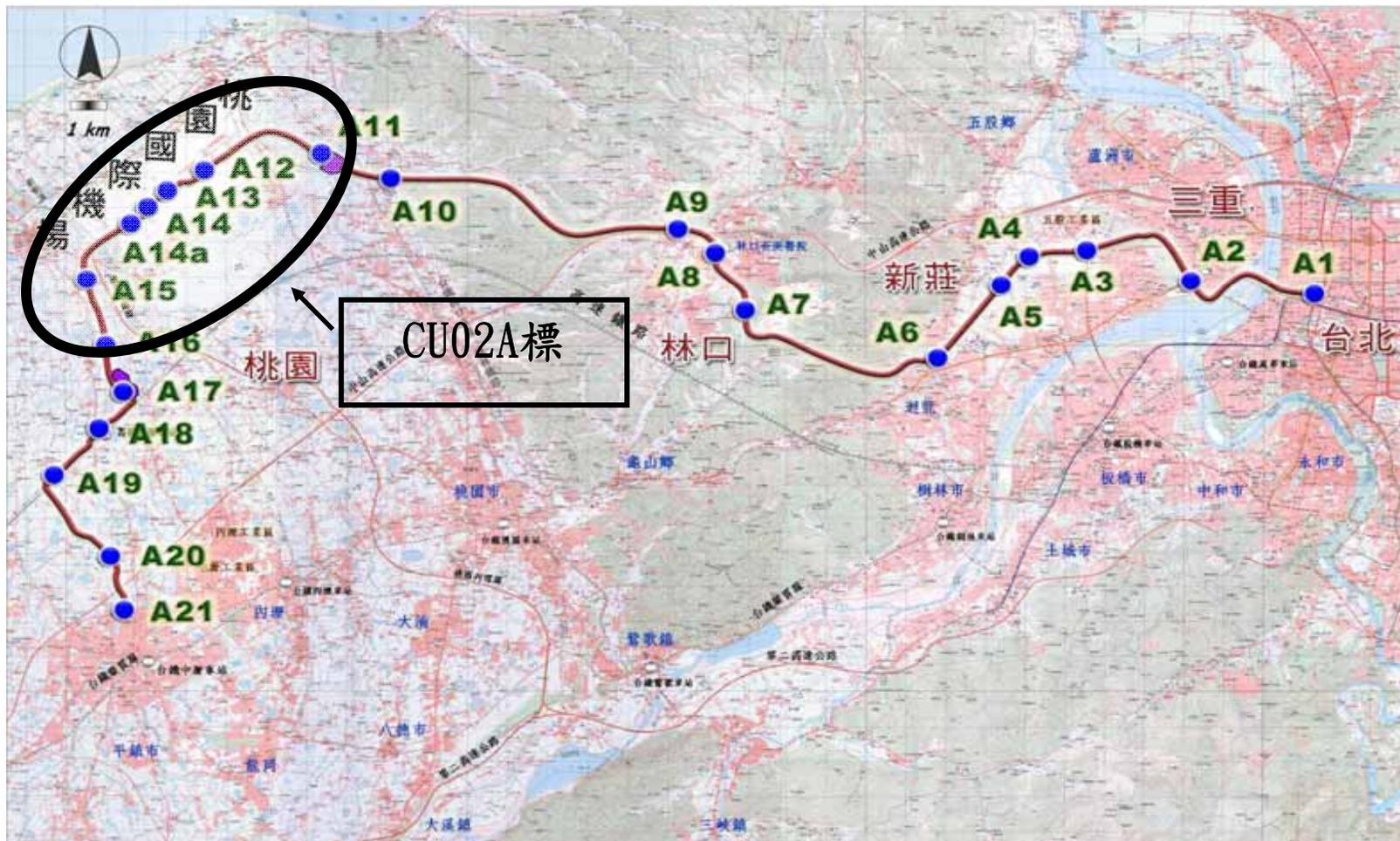


圖 6-1 桃園國際機場聯外捷運系統路線平面圖(摘自台灣世曦顧問 2009)

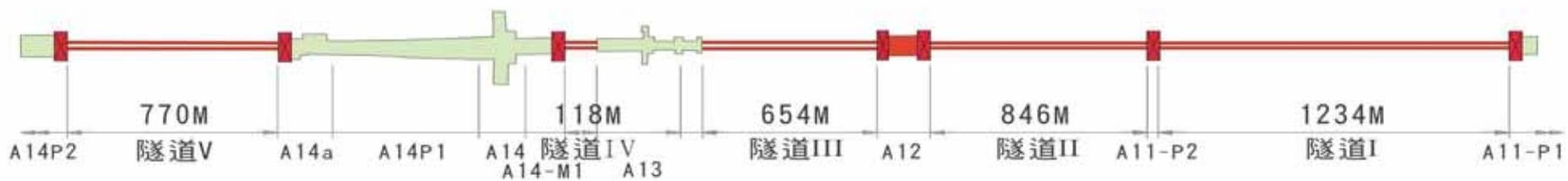
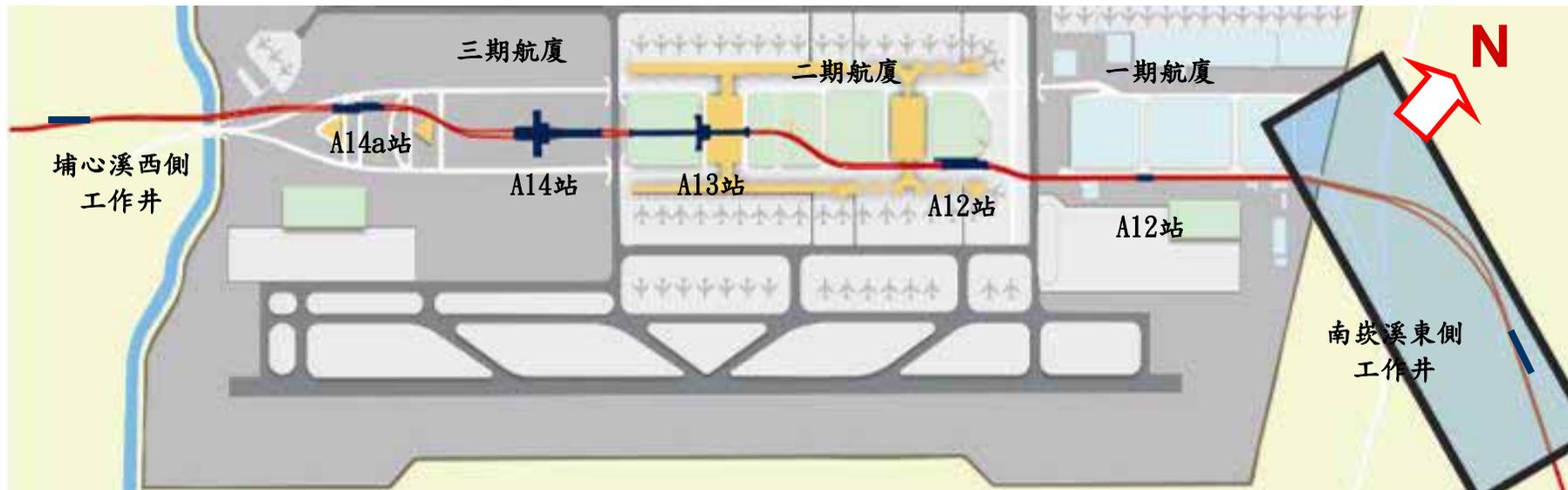


圖 6-2 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾工程路線平面圖(摘自台灣世曦顧問 2009)

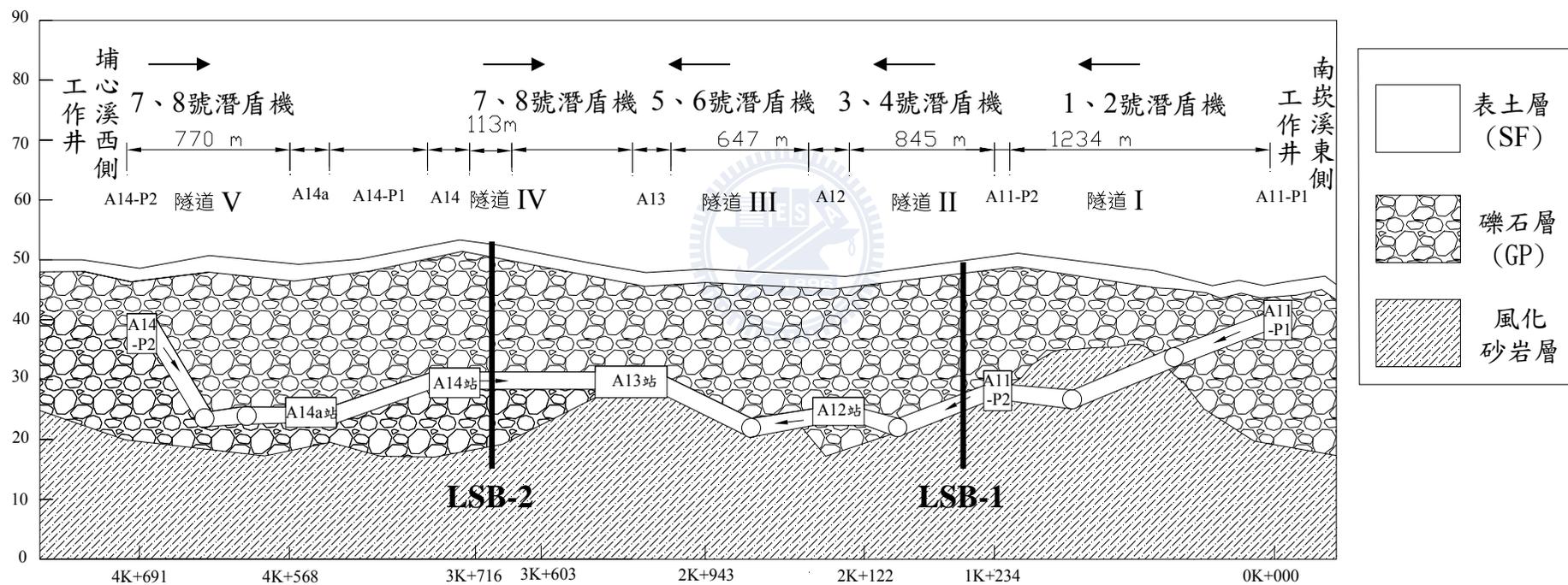


圖 6-3 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾工程地質剖面圖



圖 6-4 現場大口徑鑽孔地質調查情形(摘自台灣世曦顧問 2009)

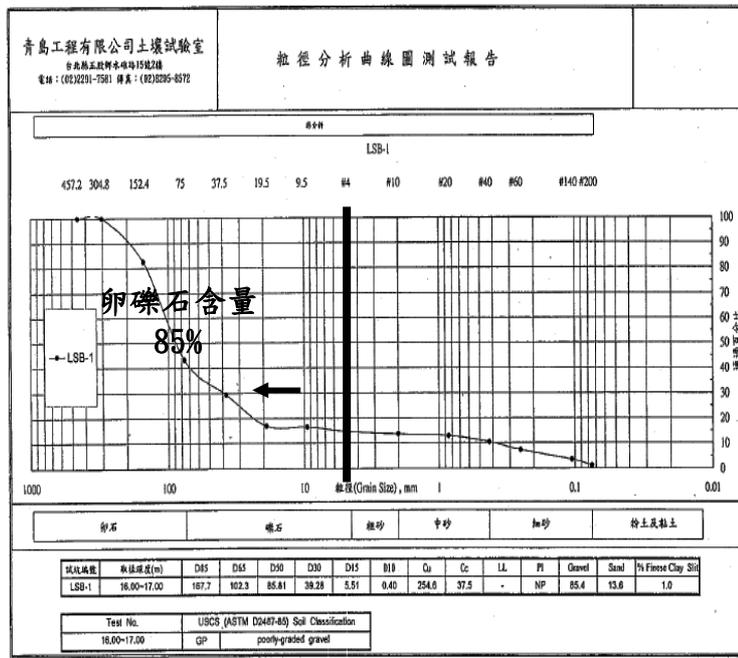


圖 6-5 調查孔 LBS-1 卵礫石粒徑分佈曲線(摘自台灣世曦顧問 2009)

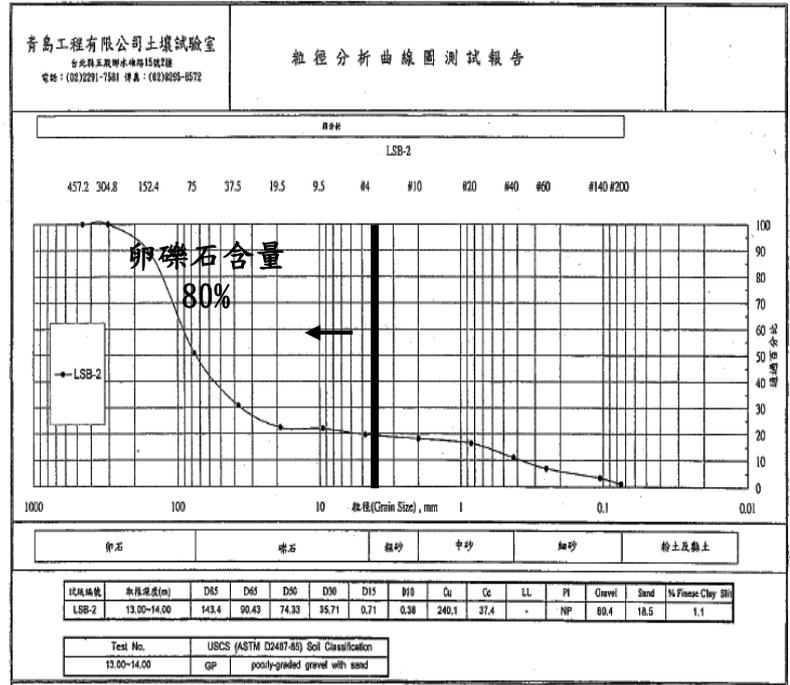


圖 6-6 調查孔 LBS-2 卵礫石粒徑分佈曲線(摘自台灣世曦顧問 2009)



圖 6-7 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾隧道施工採用之泥土壓潛盾機 (I 號機)
(摘自台灣世曦顧問 2009)

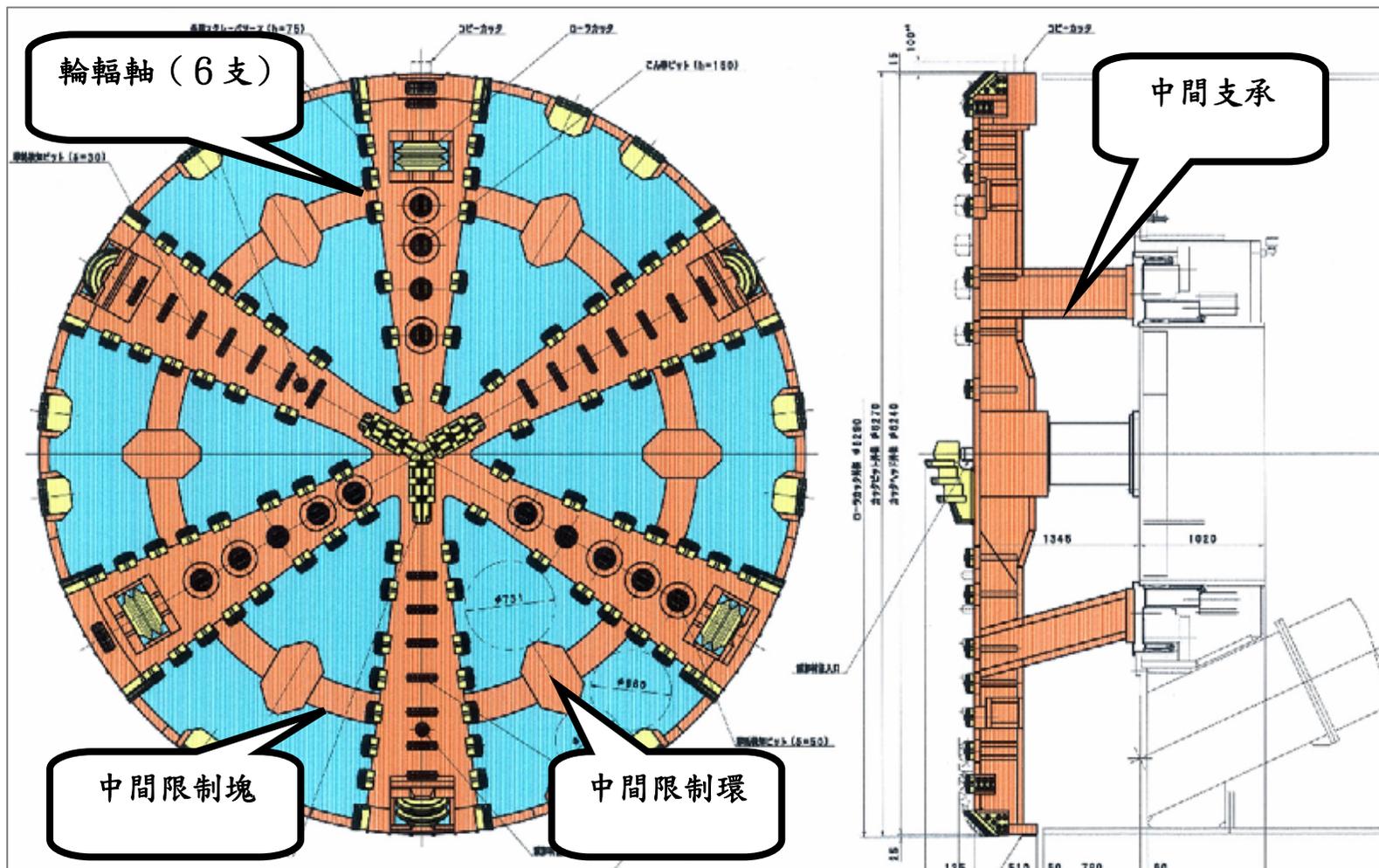


(a) 各型式鋼筋混凝土環片
(由下而上分別為 A 型、B 型、C 型與 K 型環片)



(b) 環片進場情形 (每環寬度 1,000 mm)

圖 6-8 桃園國際機場捷運 CU02A 標潛盾工程採用之鋼筋混凝土環片
(摘自台灣世曦顧問 2009)



輪輻軸 (6支)

中間支承

中間限制塊

中間限制環

圖 6-9 潛盾機切刃轉盤結構示意圖(摘自台灣世曦顧問 2009)

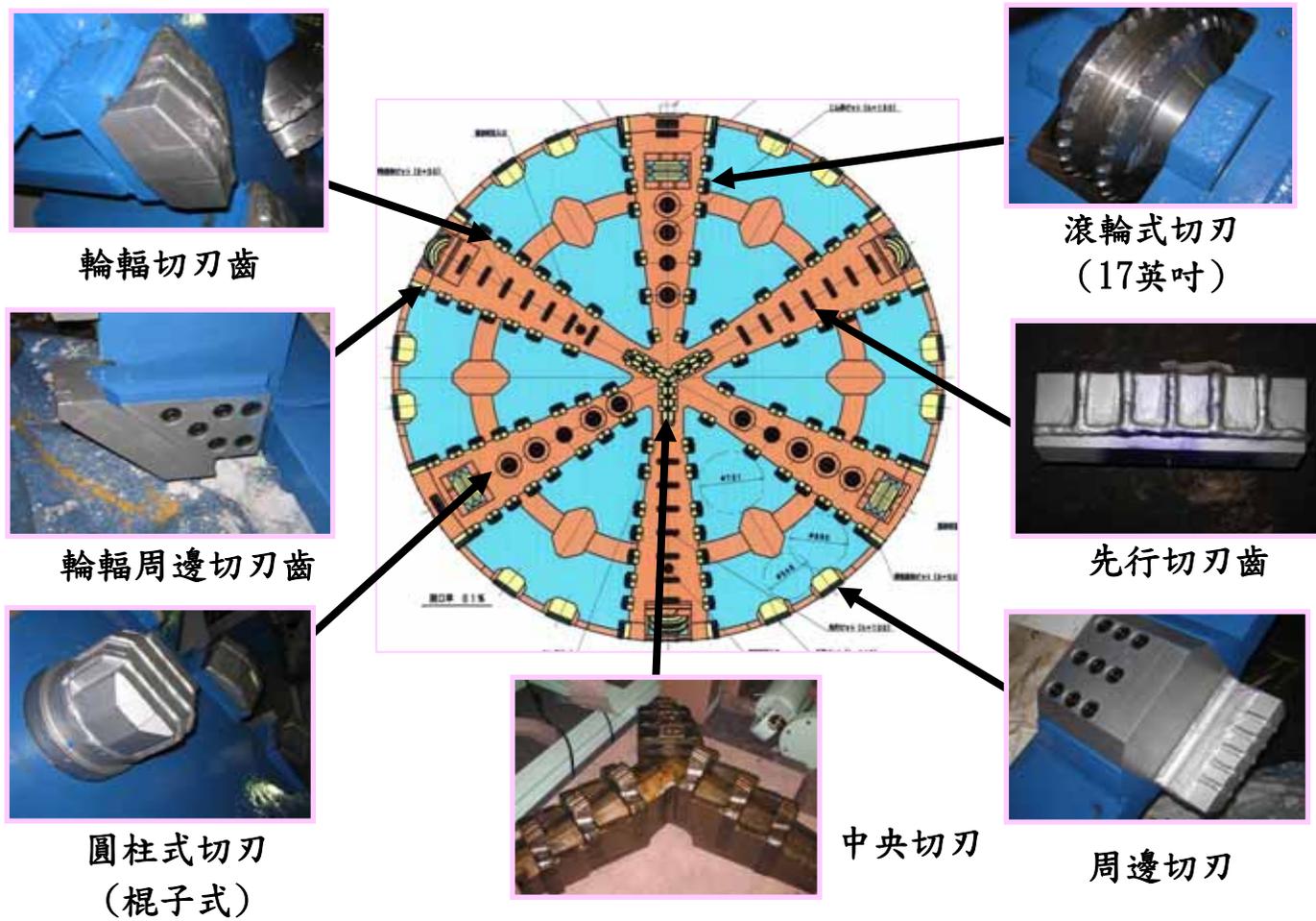


圖 6-10 潛盾機切刀轉盤各切刀形狀與配置圖(摘自台灣世曦顧問 2009)

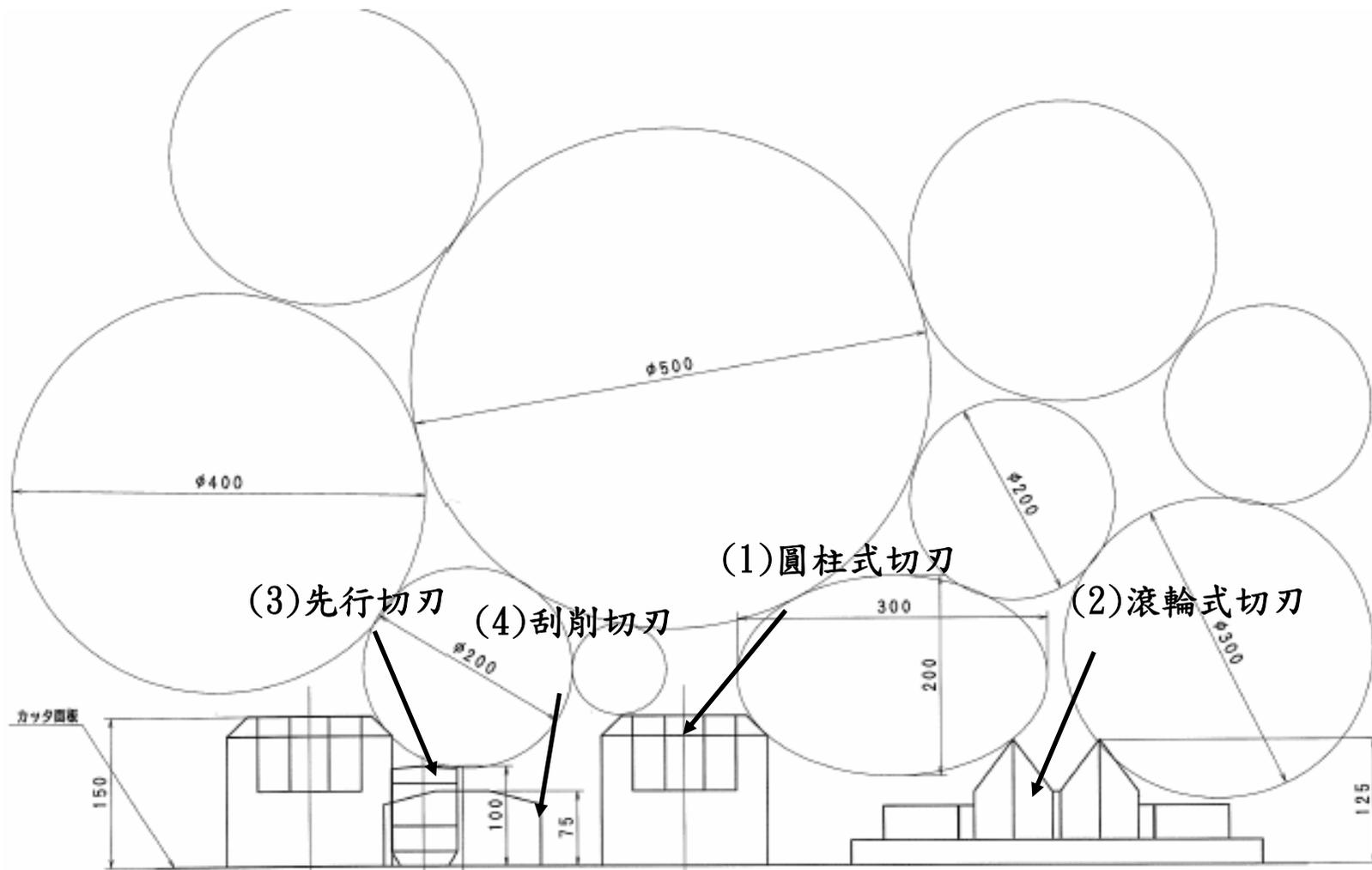


圖 6-11 切刀轉盤切刀切削地盤順序示意圖(摘自台灣世曦顧問 2009)

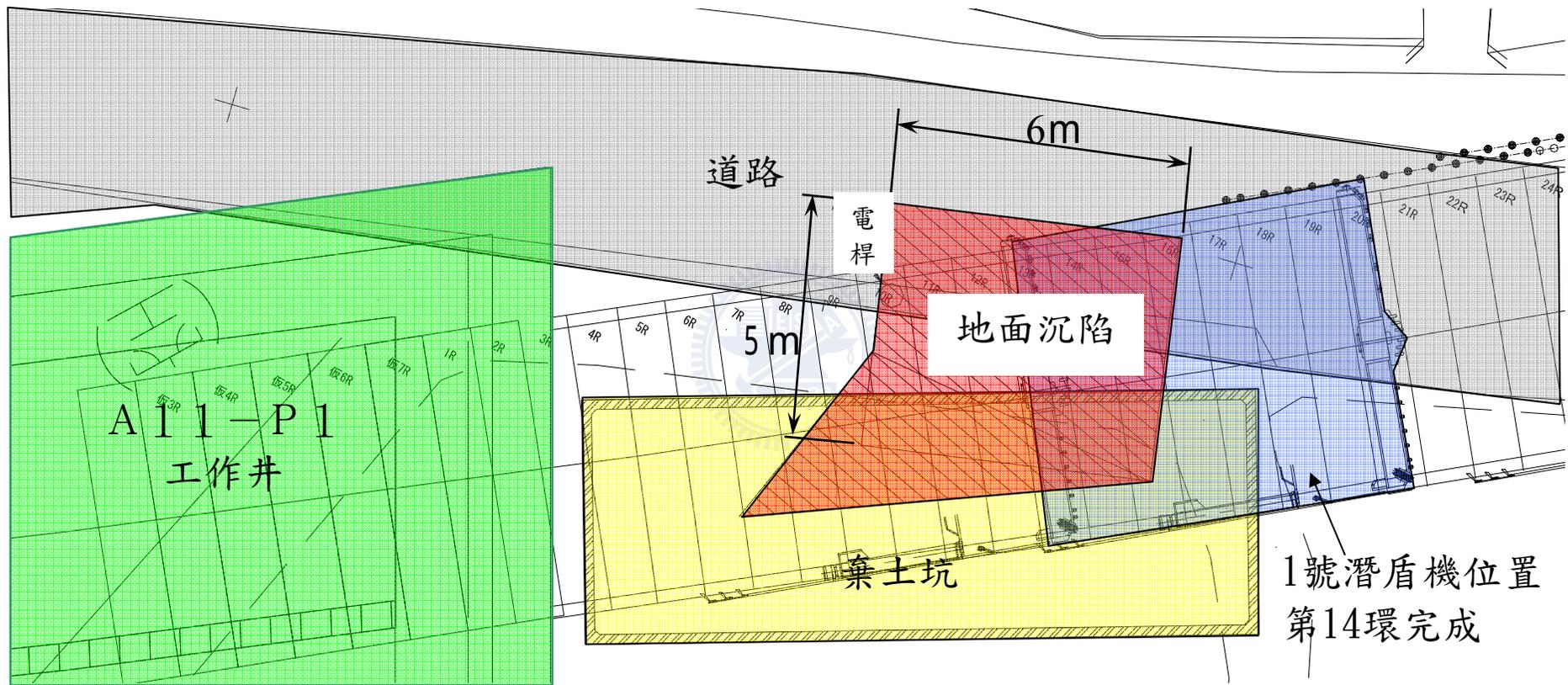


圖 6-12 潛盾隧道路面沉陷示意圖(摘自台灣世曦顧問 2009)



(a)路面沉陷 (遠照)



(b)路面沉陷 (近照)

圖 6-13 路面沉陷實際情況

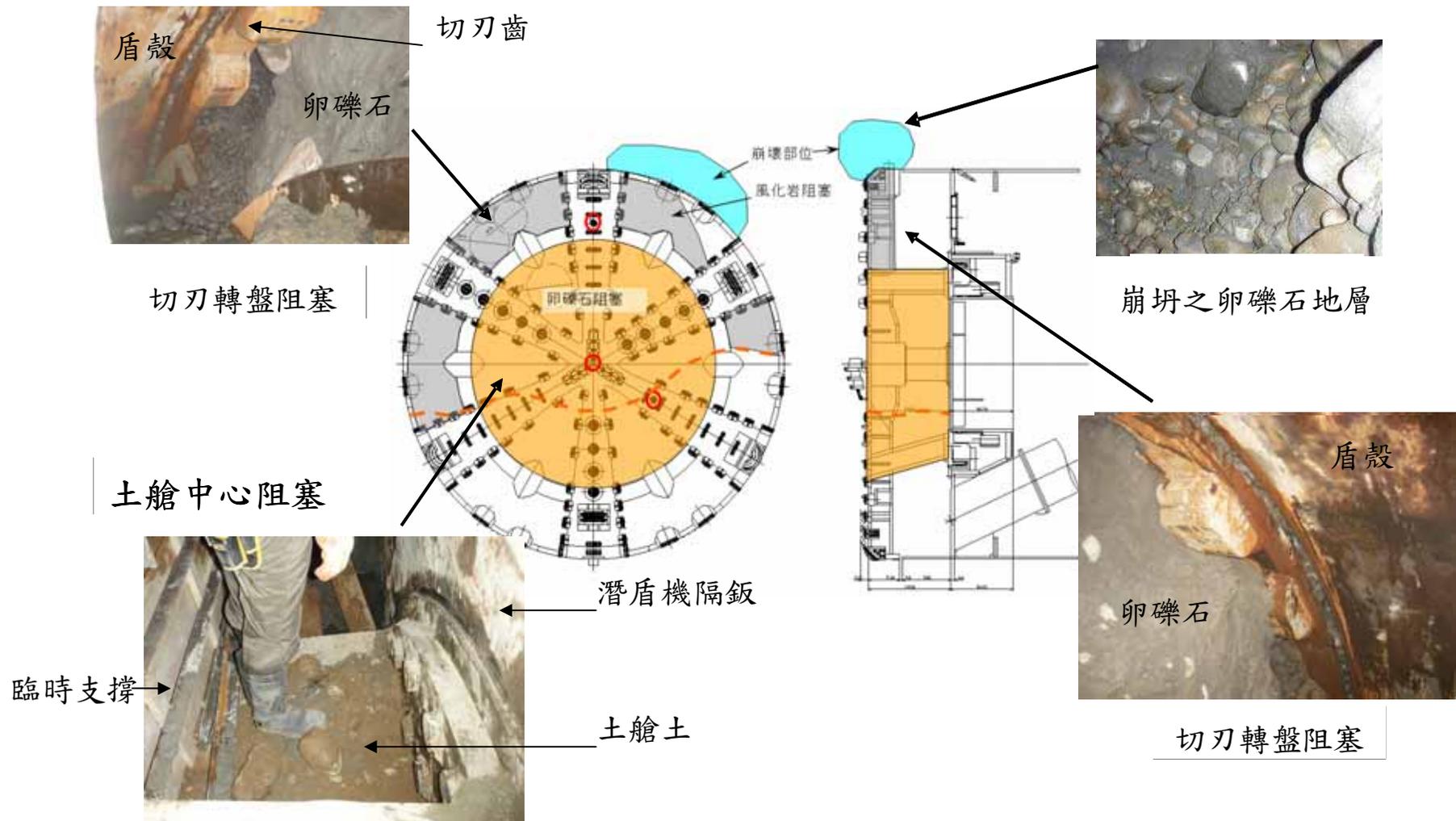


圖 6-14 潛盾機切刀轉盤與土倉阻塞位置圖(摘自台灣世曦顧問 2009)

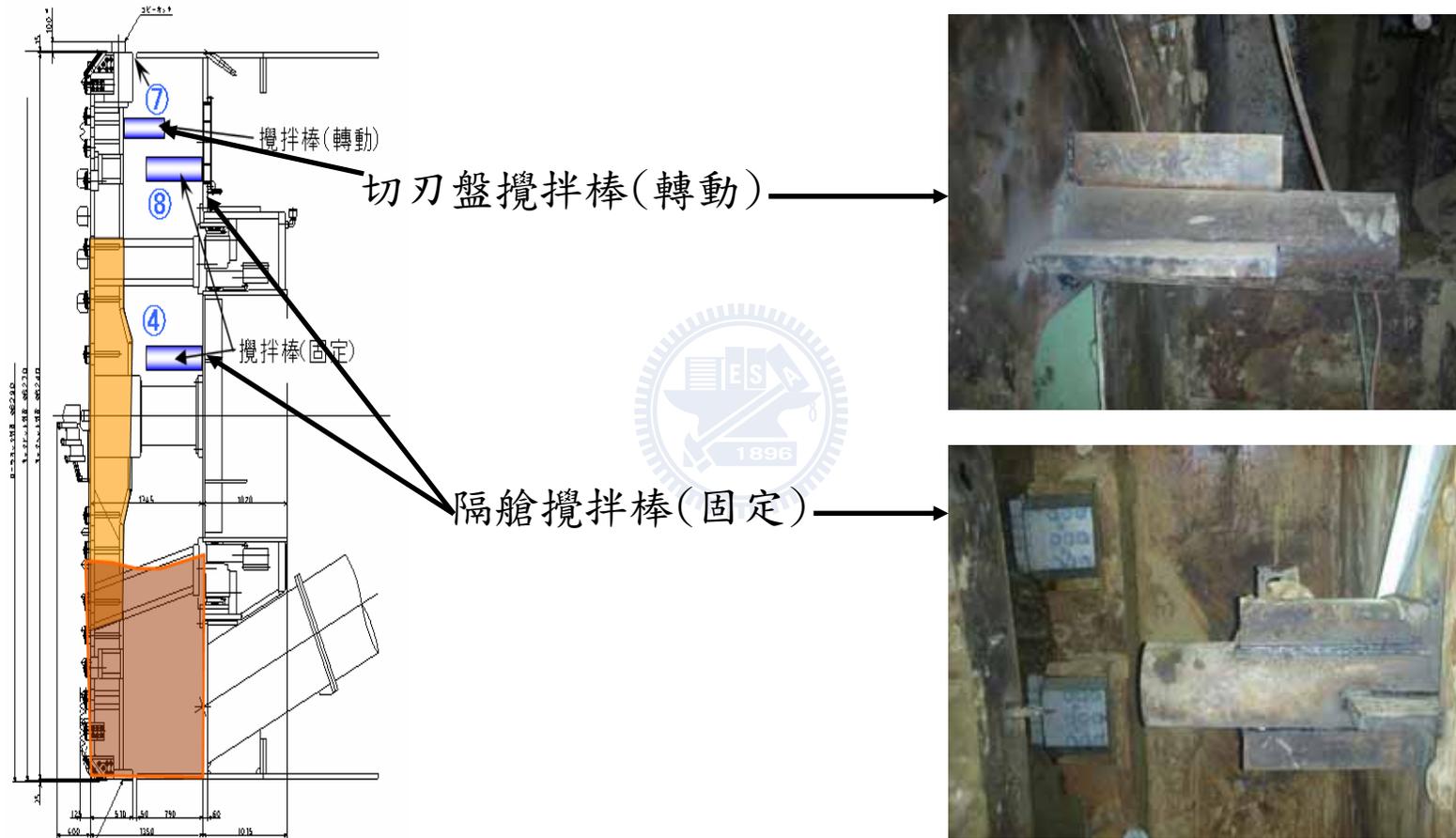


圖 6-15 增設切刀盤及隔艙攪拌棒位置圖(摘自台灣世曦顧問 2009)

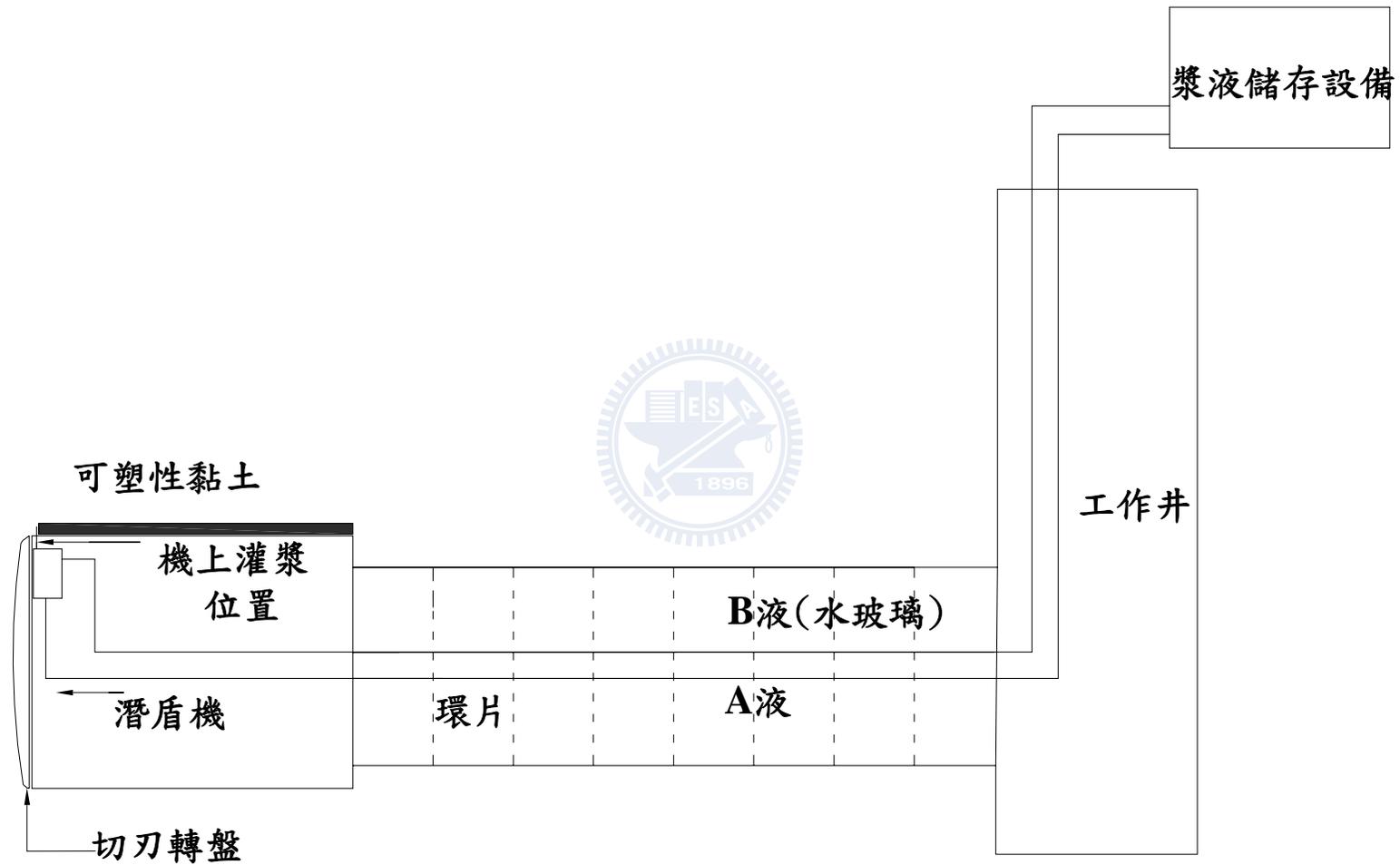


圖 6-16 機上灌漿示意圖

滾輪式切刀磨損



圓柱式切刀磨損



中間限制塊磨損



圖 6-17 1 號潛盾機出土時切刀轉盤磨損情形



(a)



(b)

圖 6-18 棍子式切刀磨損情形(摘自台灣世曦顧問 2009)

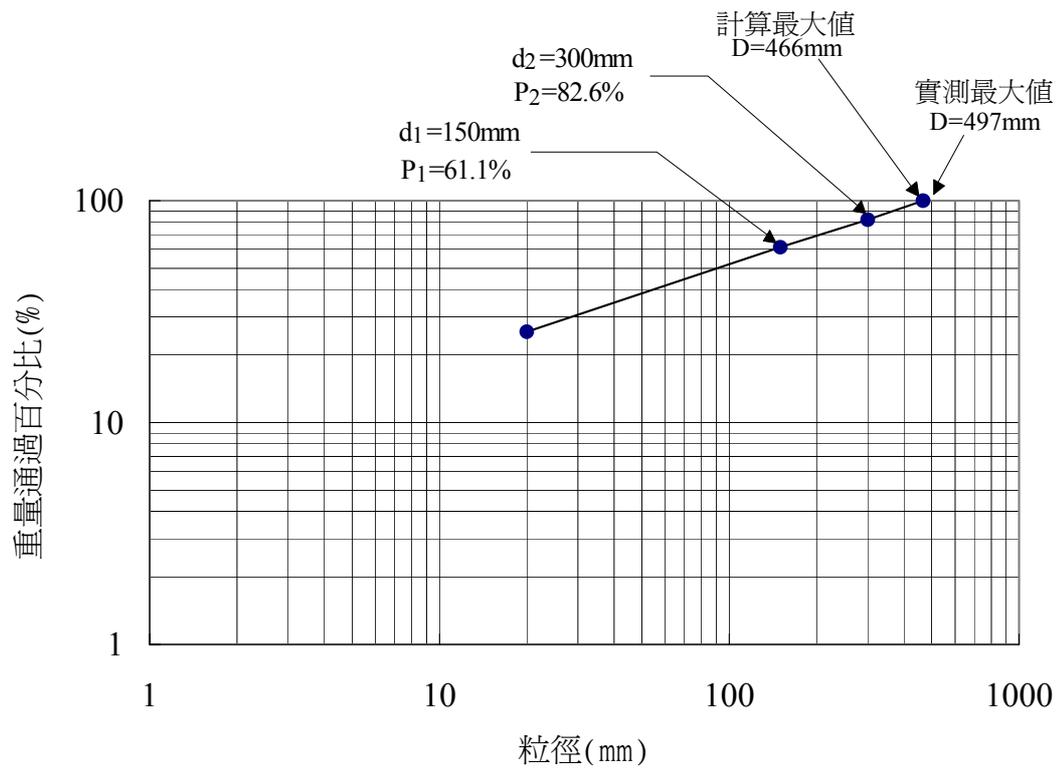
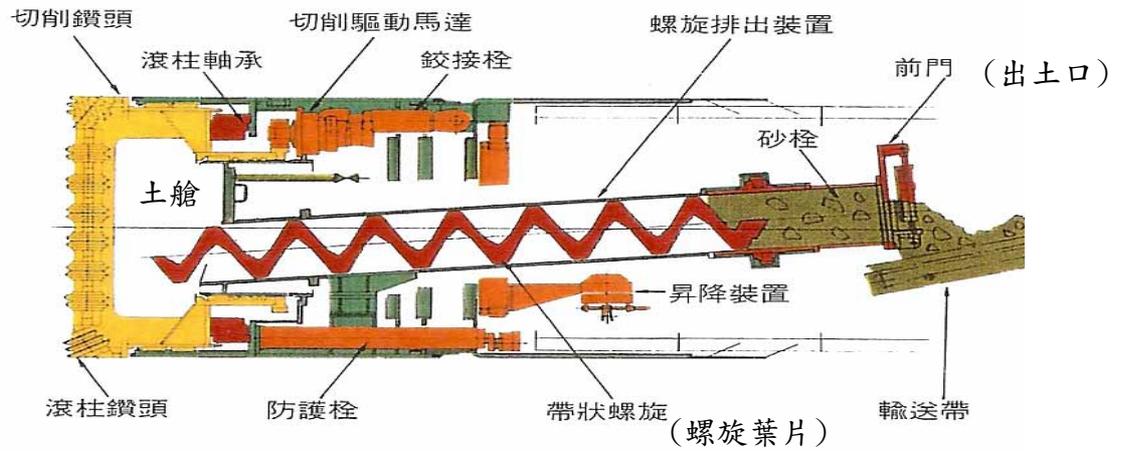


圖 7-1 卵礫石最大粒徑推估法示意圖 (濱田和人 1986)

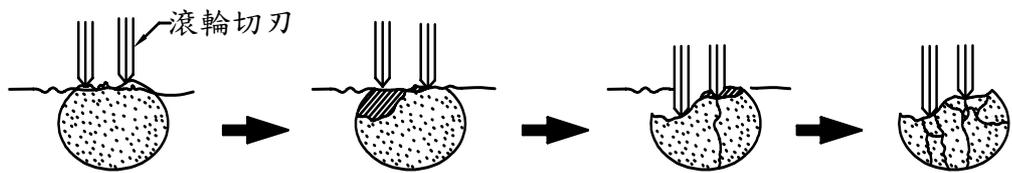


(a) 潛盾機內無軸式螺運機位置圖



(b) 螺旋葉片 (Spiral coil) 實際圖

圖 7-2 無軸式螺運機示意圖
(摘自 陳福盛 et al.,1996)



(1) 表面小片破碎 (2) 斜線部份產生剝離破碎 (3) 破碎成2至3塊 (4) 粉碎解體

圖 7-3 卵石之破碎型態
(摘自 陳福盛 et al.,1996)

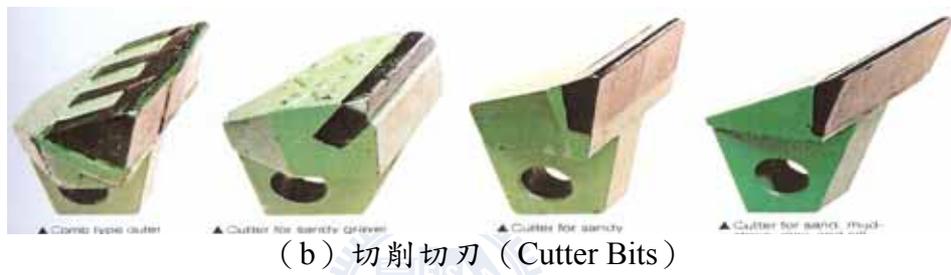
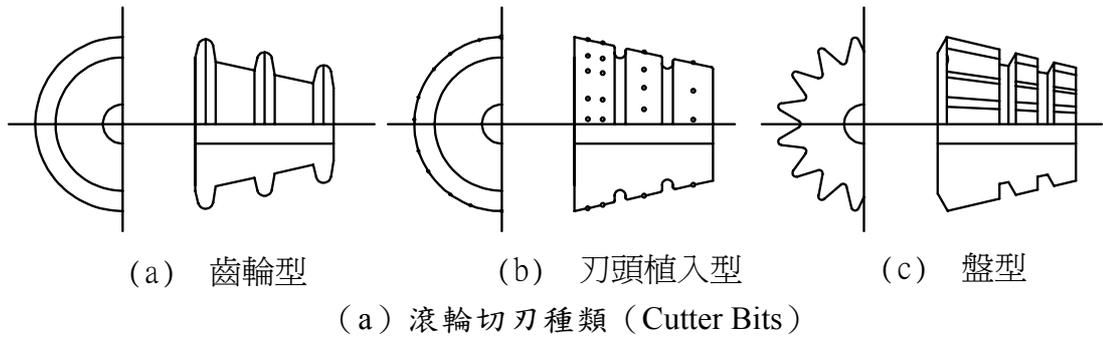
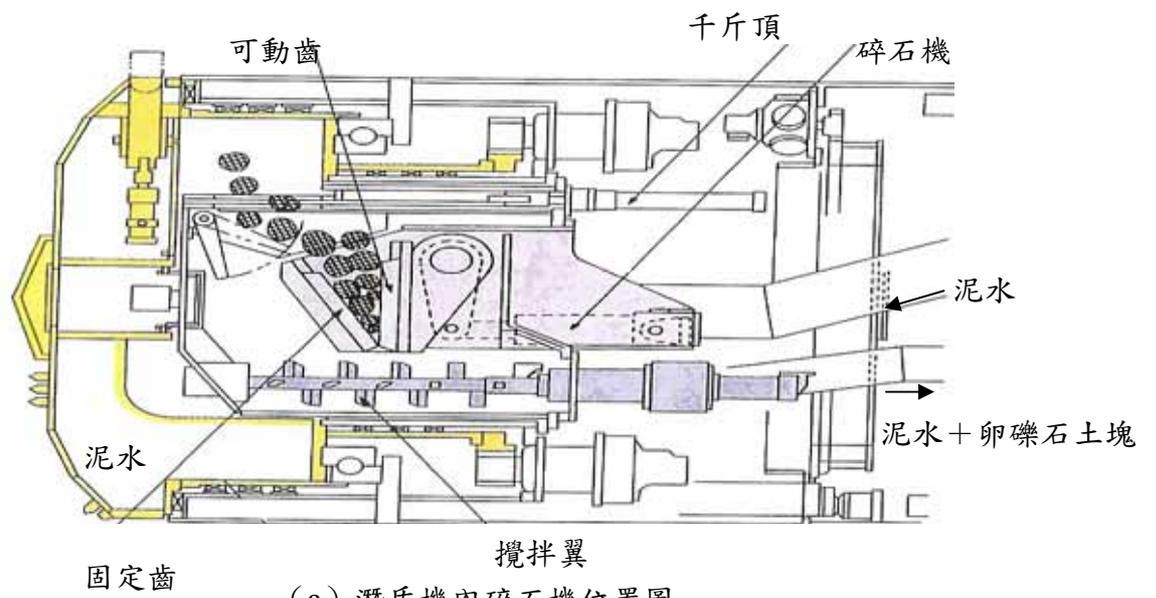
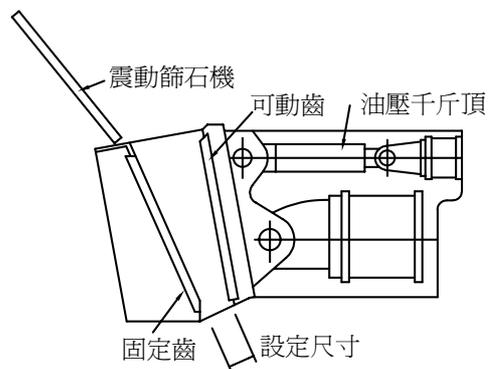


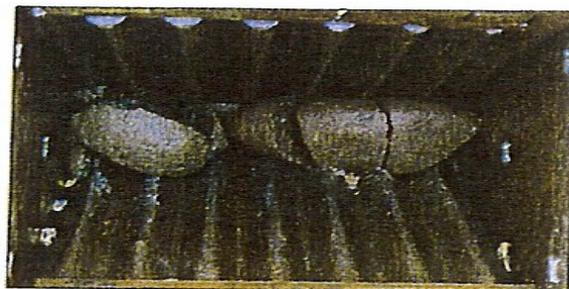
圖 7-4 切削切刀與滾輪切刀種類實際圖
(摘自 陳福盛 et al.,1996)



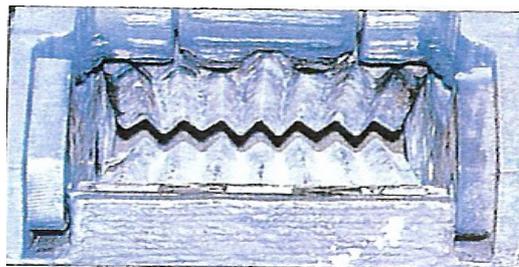
(a) 潛盾機內碎石機位置圖



(b) 碎石機構造圖



(c) 碎石機頂視圖 (張開)



(d) 碎石機頂視圖 (閉合)

圖 7-5 機內破碎方式所採碎石機 (摘自 陳福盛 et al.,1996)



圖 7-6 經切刃轉盤切削之卵石及流木
(after Hitachi Zosen Corporation, 1990)



(a) 切刃轉盤上之維修人孔



(b) 切刃頭維修與更換

圖 7-7 切刃轉盤之切刃維修與更換情形
(摘自 陳福盛 et al.,1996)

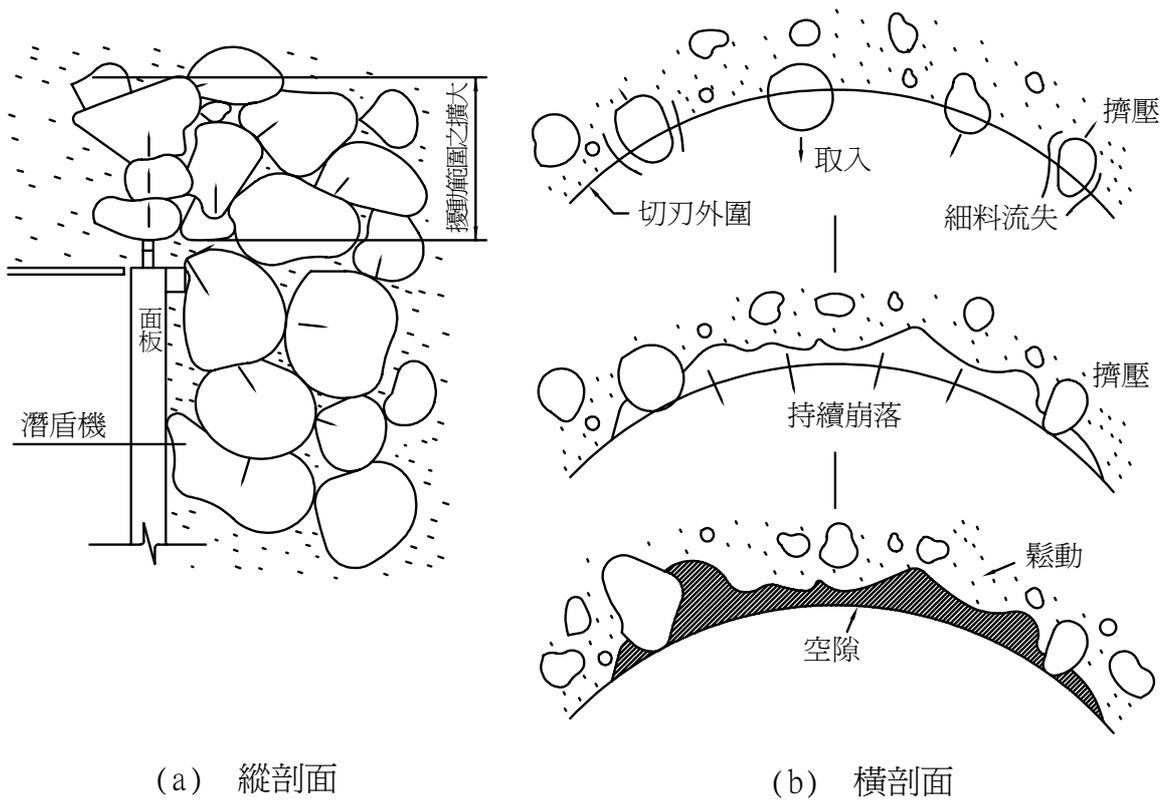


圖 7-8 卵礫石層潛盾隧道開挖造成周邊地盤鬆動模式
 (摘自 陳福盛 et al.,1996)

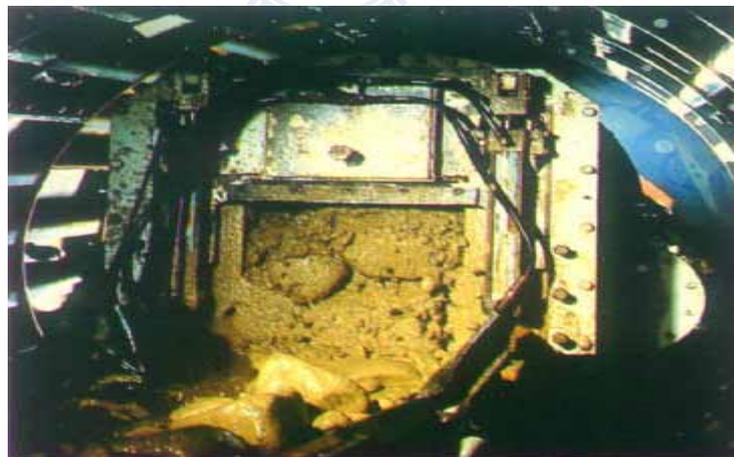


圖 7-9 螺運機後方排土狀況
 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)

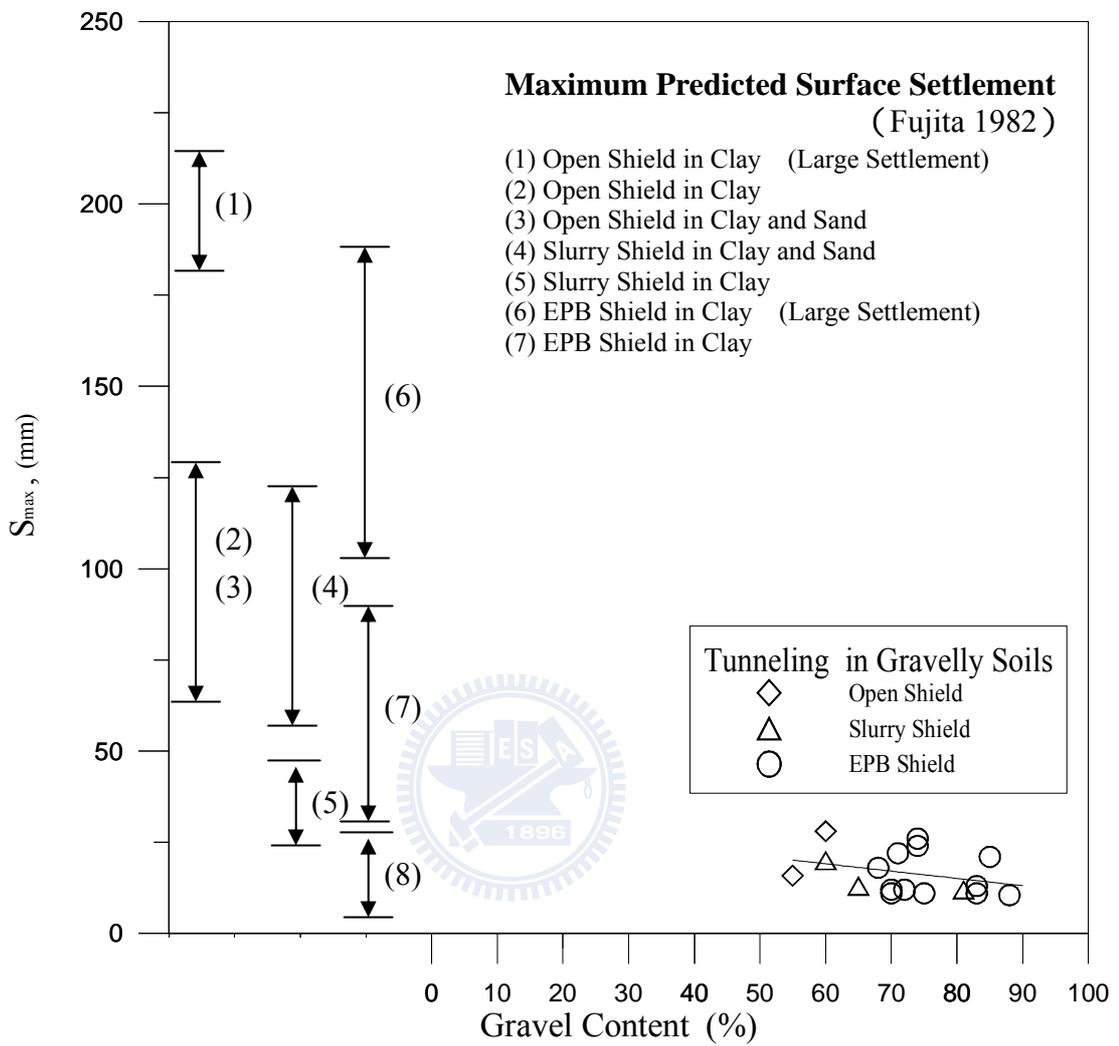


圖 8-1 各種土層地表最大沉陷量範圍

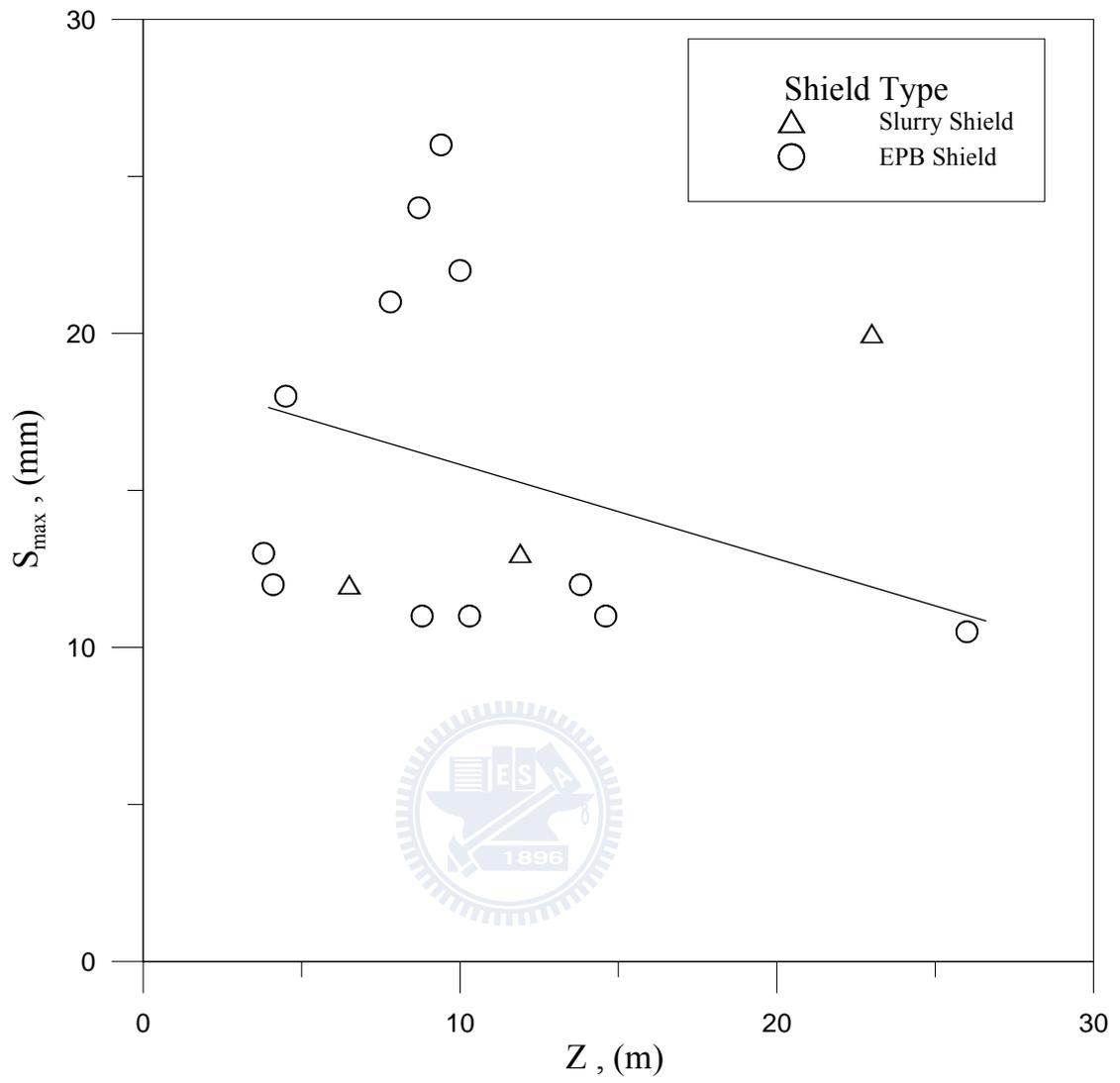


圖 8-2 隧道中心線深度與地表最大沉陷量之關係

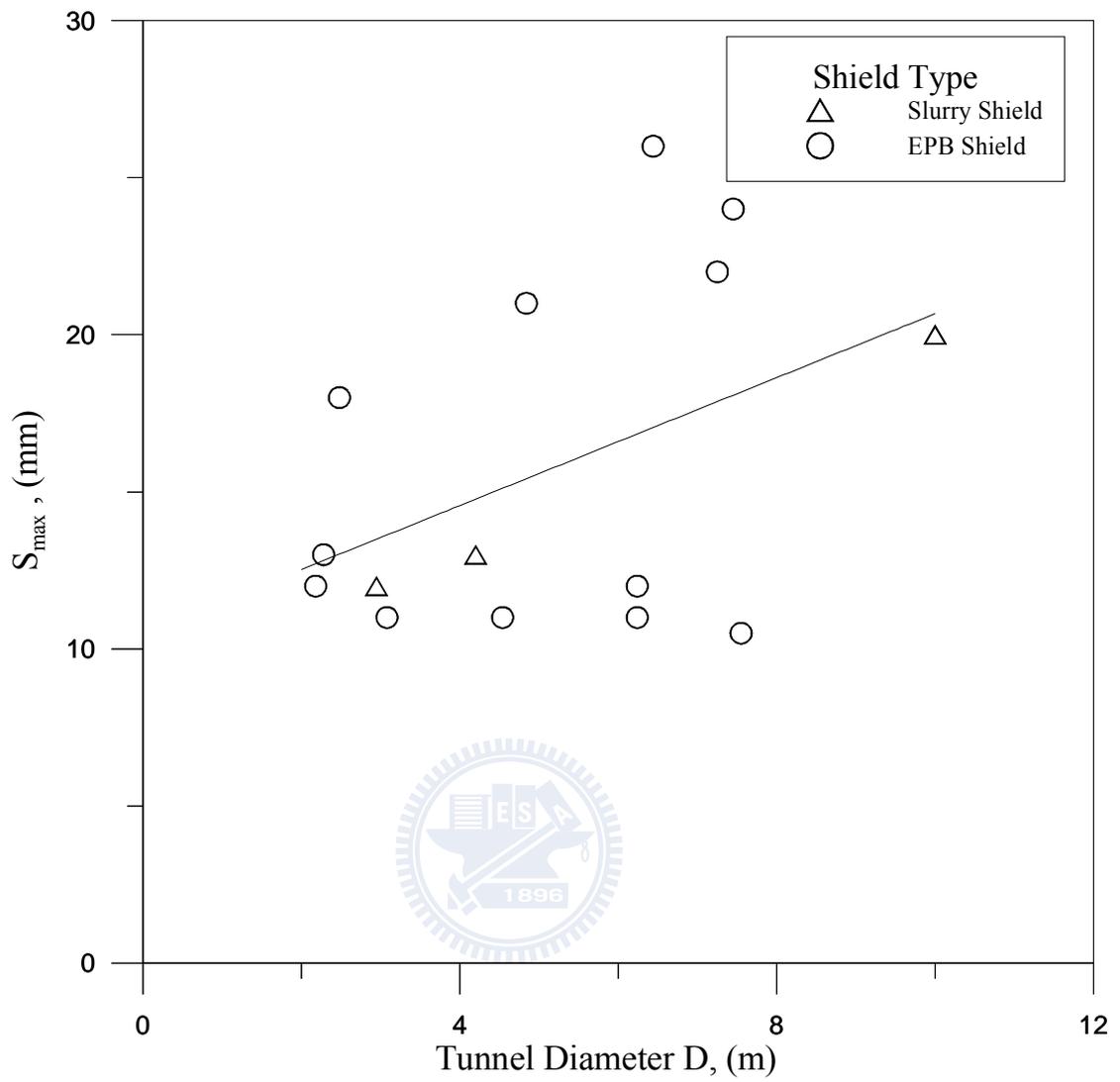


圖 8-3 隧道直徑與地表最大沉陷量之關係

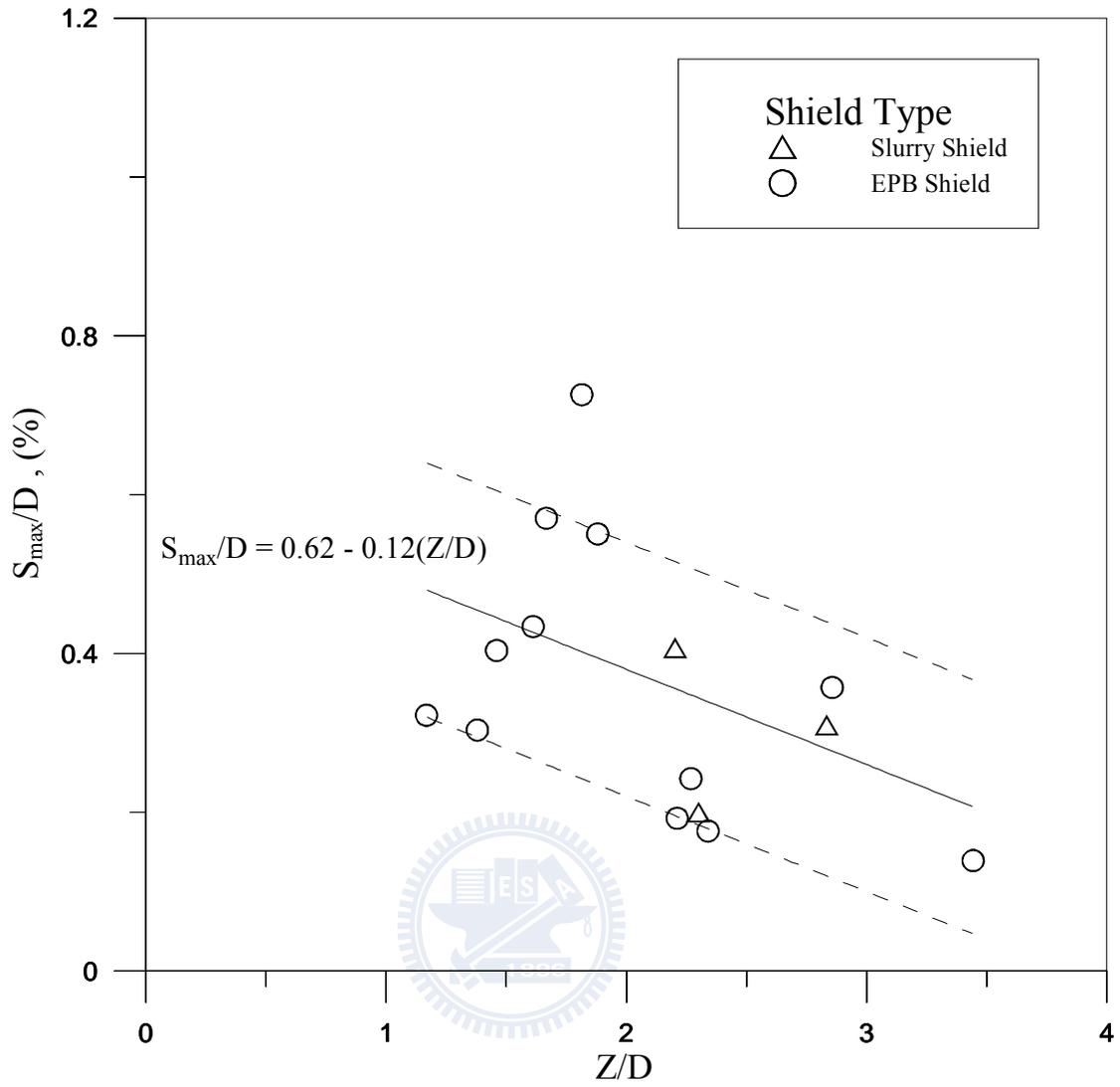


圖 8-4 深徑比與地表最大沉陷量之關係

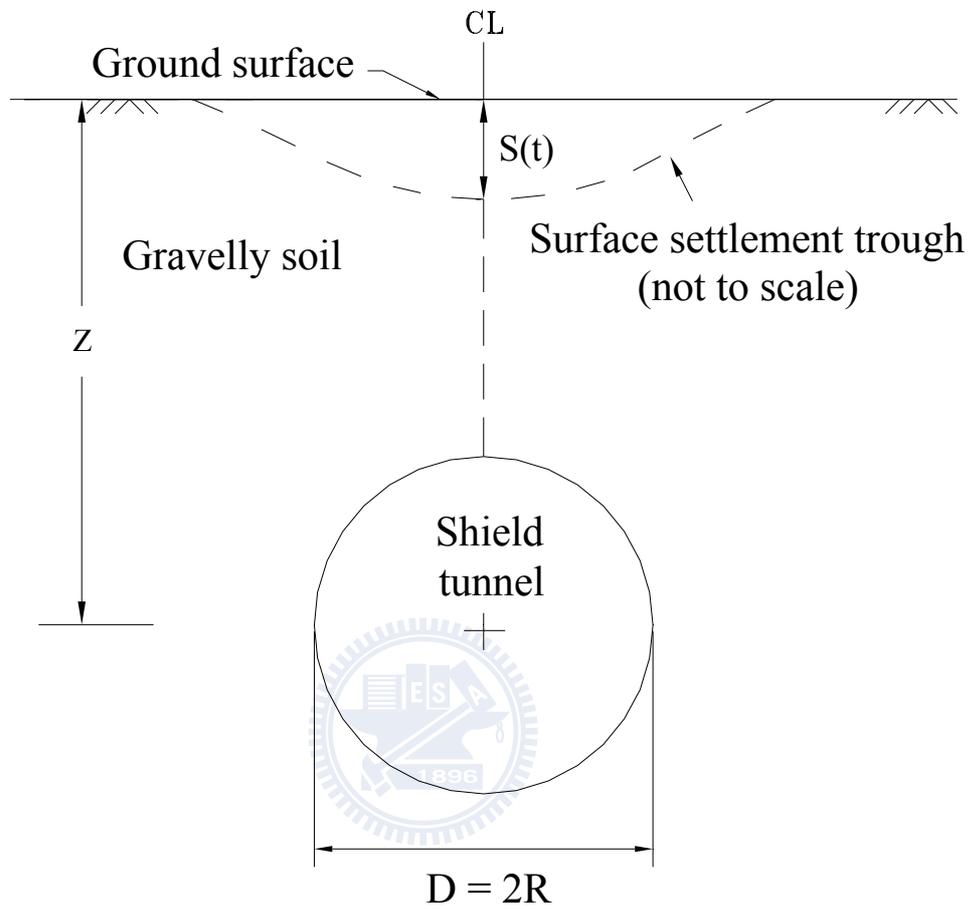
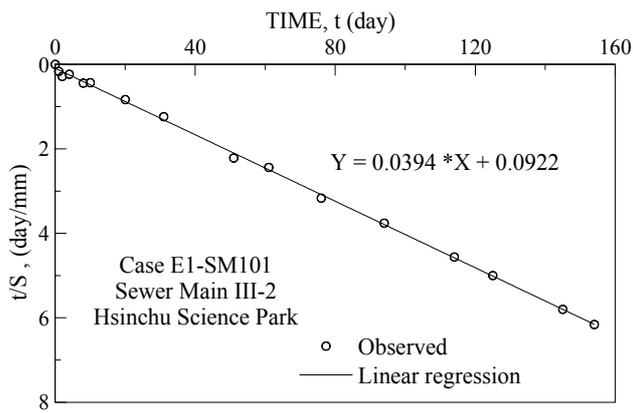
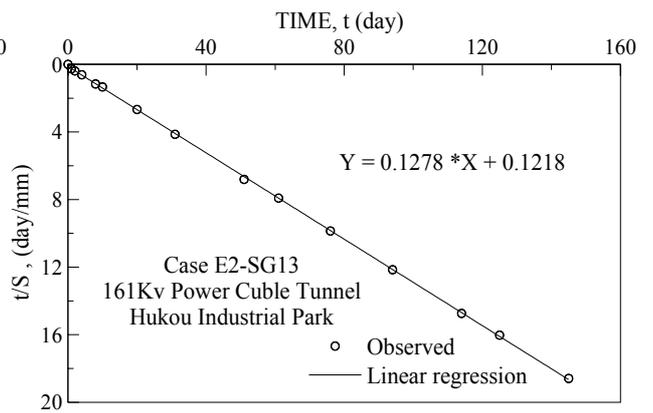


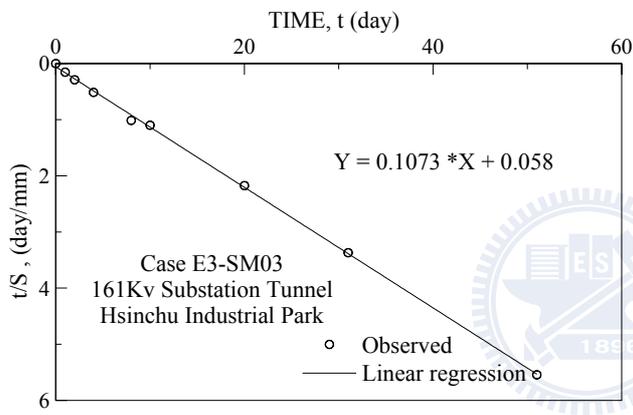
圖 9-1 單一潛盾隧道施工造成之隧道中心線上方地表沉陷歷時曲線示意圖



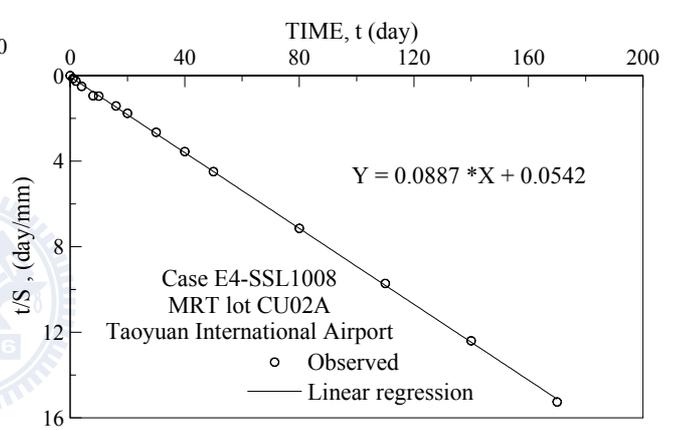
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 9-2 地表沉陷歷時曲線雙曲線參數

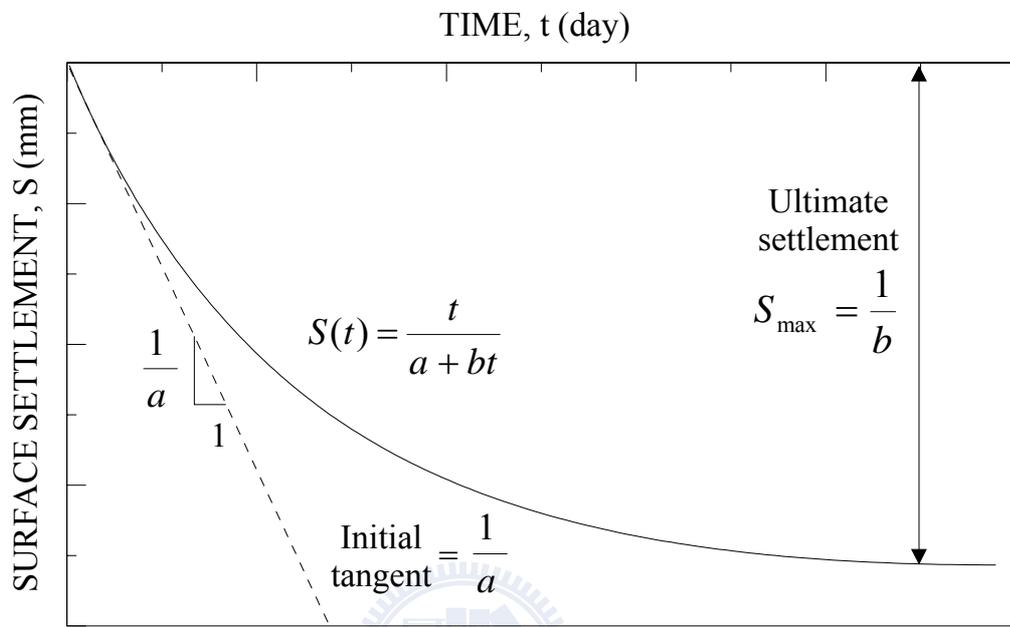
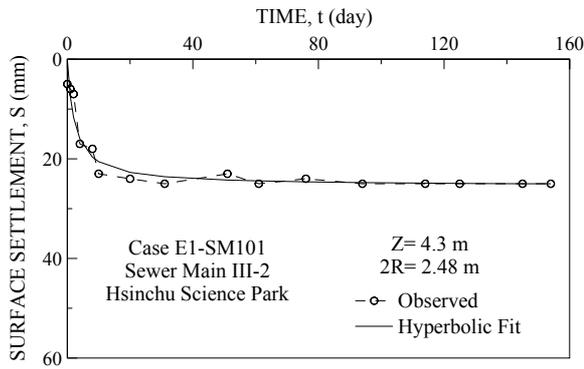
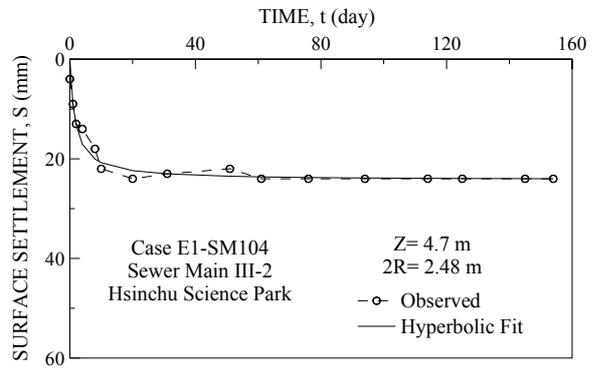


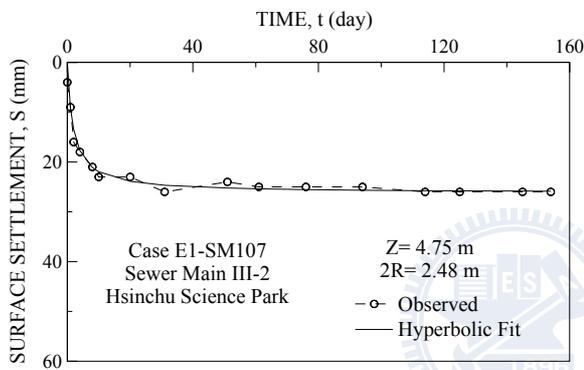
圖 9-3 雙曲線參數 a 、 b 之物理意義



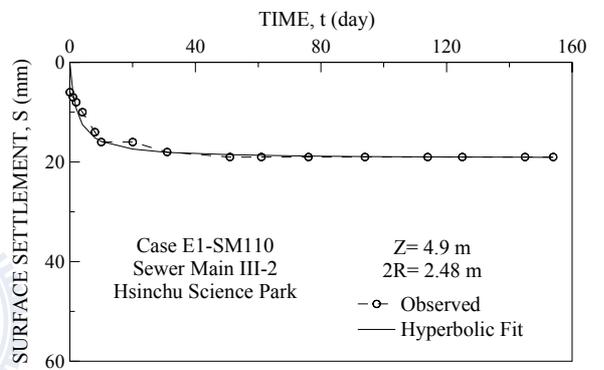
(a)



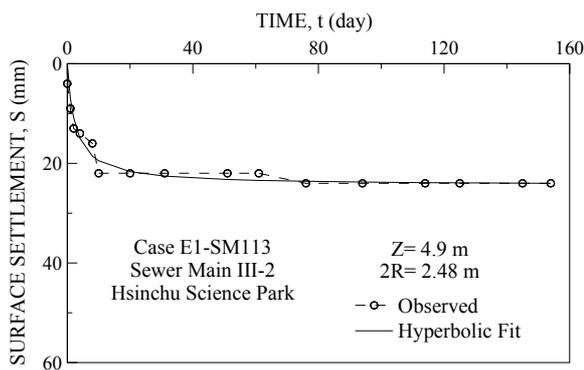
(b)



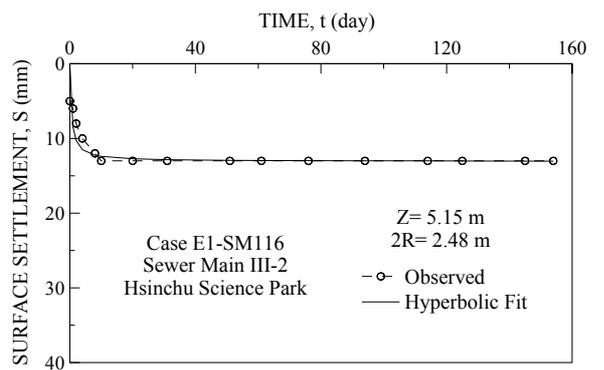
(c)



(d)

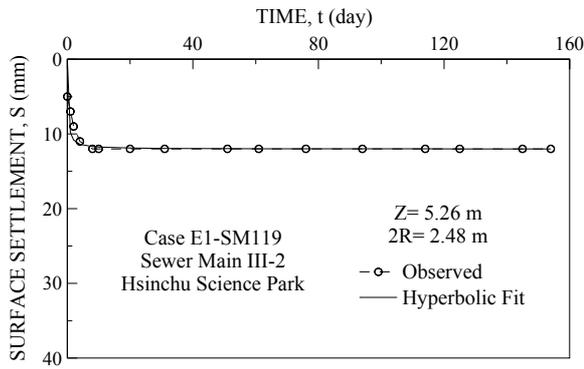


(e)

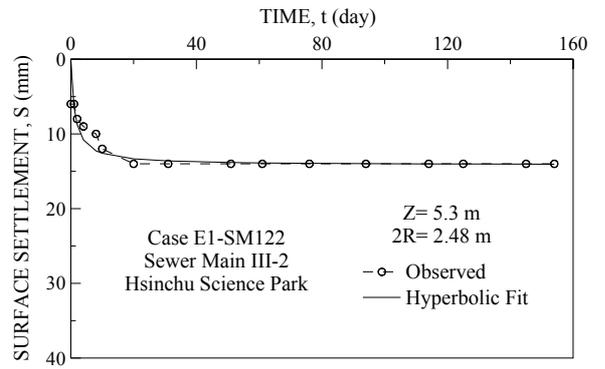


(f)

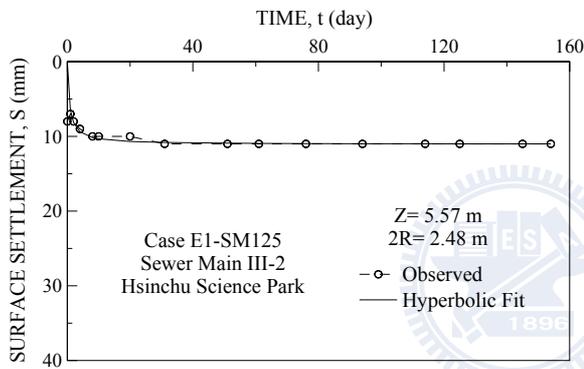
圖 9-4 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線
(新竹竹科 3 期之 2 污水下水道工程案例)



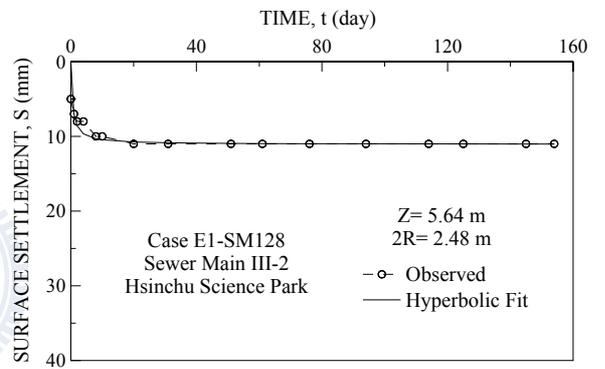
(g)



(h)

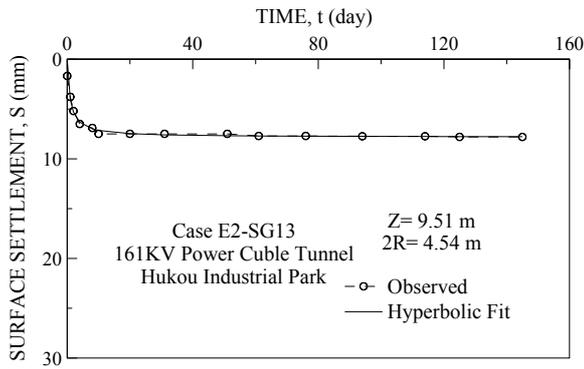


(i)

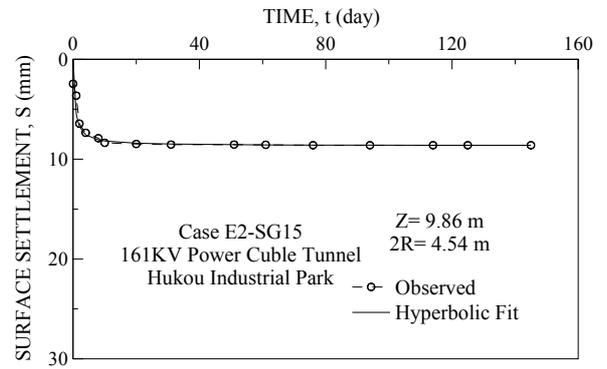


(j)

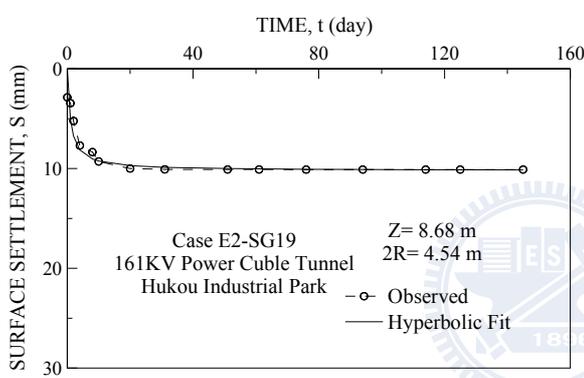
圖 9-4(續) 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線
(新竹竹科 3 期之 2 污水下水道工程案例)



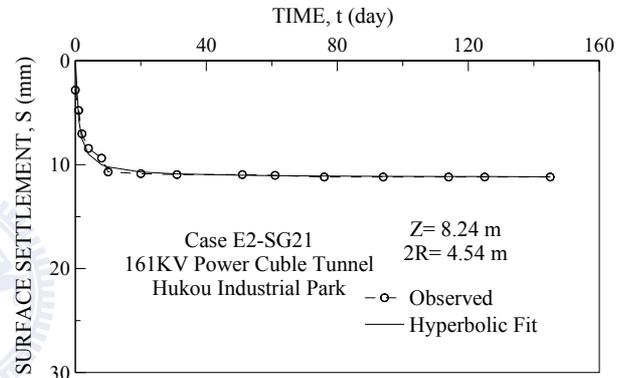
(a)



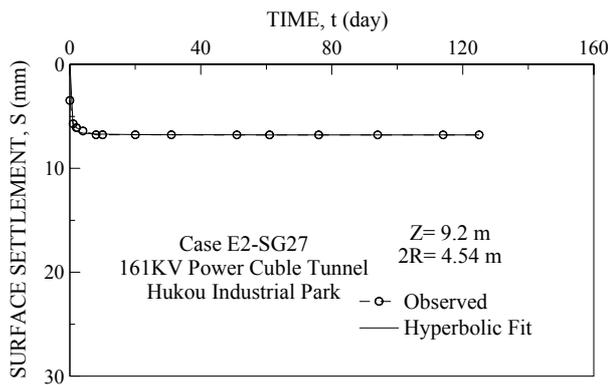
(b)



(c)

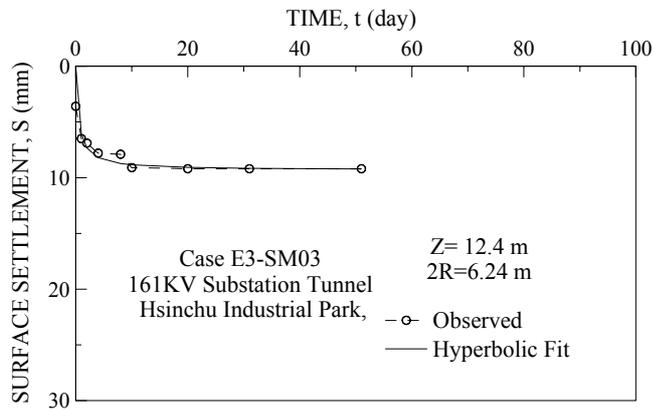


(d)

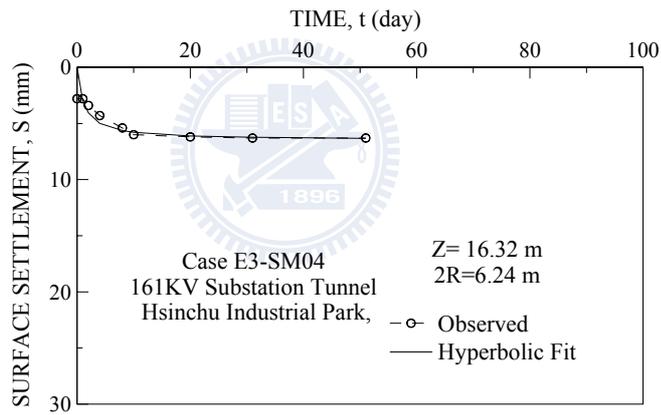


(e)

圖 9-5 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線
(新竹湖口工業區電纜線洞道工程案例)

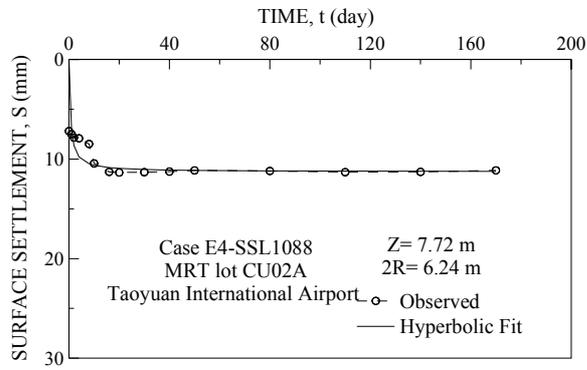


(a)

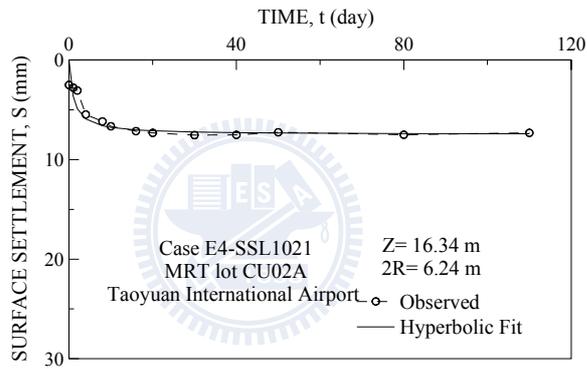


(b)

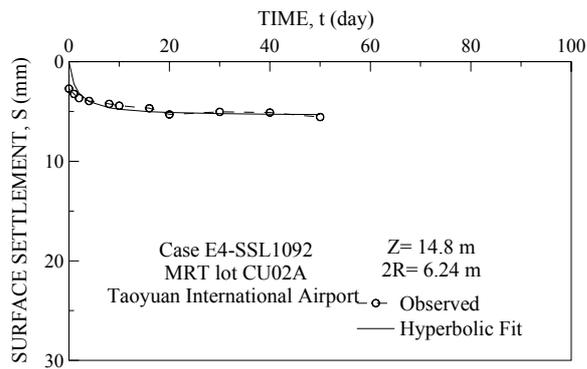
圖 9-6 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線
(新竹新工超高壓變電所洞道工程案例)



(a)



(b)



(c)

圖 9-7 現地監測及以雙曲線模式模擬之地表沉陷歷時曲線
(桃園國際機場捷運工程案例)