

國立交通大學  
土木工程研究所  
碩士論文

雙圓型潛盾隧道案例研究-以機場捷運  
台北三重段為例

Double-O-Tube Shield Tunneling in Taipei Basin  
for Airport Access MRT



研究生：徐育芬  
指導教授：方永壽 博士

中華民國九十九年七月

雙圓型潛盾隧道案例研究-以機場捷運  
台北三重段為例

**Double-O-Tube Shield Tunneling in Taipei Basin  
for Airport Access MRT**

研究生：徐育芬                      Student：Yu-Fen Shiu  
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

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

# 雙圓型潛盾隧道案例研究- 以機場捷運台北三重段為例

研究生：徐育芬

指導教授：方永壽 博士

國立交通大學土木工程研究所

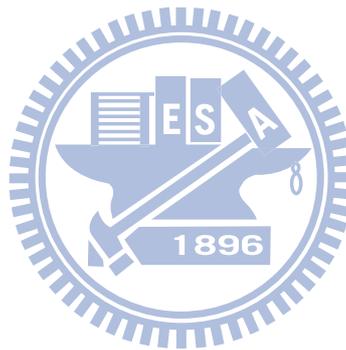
## 摘要

本論文依據桃園國際機場捷運台北三重段 CA450A 標 DOT 潛盾隧道施工案例，探討 DOT 潛盾機施工遭遇之問題及解決方法。本研究探討主題包含滾轉問題與控制方法、DOT 潛盾施工造成之地表沉陷槽、及 DOT 與單圓雙孔潛盾施工工期與成本比較，並獲得以下各項結論與建議。

1. 施工之實測數據顯示，DOT 潛盾機盾身最大滾轉角度為 0.38 度，小於滾轉量的設計極限值 0.6 度。CA450A 標使用之滾轉修正方法包含：切刃盤反向旋轉、環片灌漿、及超挖刀修正，其中又以切刃盤反向旋轉最常被使用於修正微小角度滾轉之修正。
2. 本研究建議以疊加法及等面積法兩種經驗方法，預估 DOT 潛盾施工造成之沉陷槽。結果顯示，疊加法及等面積法求出之沉陷槽非常相近，預估沉陷槽與實測沉陷槽之趨勢大致吻合。
3. 國內外沉陷實測數據顯示，沉陷槽之最大沉陷量皆偏離 DOT 隧道中間點，6 個監測斷面測得最大沉陷量介於 12 mm~34 mm 之間，DOT 施工引致之地盤漏失率範圍為 0.23 %~1.19 %之間，平均值為 0.76 %。
4. 於出發段 DOT 潛盾隧道之預估施工速率，為 2.0 m/day，而實測結果為 2.5m/day，較預估施工速率快 25%。於正式掘進段預估施工速率為 4.3 m/day，實際施工速率為 3.9 m/day。

5. 依設計單位評估，DOT 潛盾隧道進尺費為 84.93 萬元/公尺，單圓雙孔潛盾隧道進尺費為 58.56 萬元/公尺，昂貴的 DOT 潛盾機造價與複雜雙圓環片製造及組裝費用，為 DOT 潛盾隧道進尺費昂貴之主要原因。
6. 雖然 DOT 隧道段施工費用比單圓雙孔隧道者高出 4.5 億元，但是 DOT 潛盾隧道可免除在淡水河床下方設置三處聯絡通道之費用 3.3 億元。考量總工程費，DOT 潛盾隧道總工程費為 19.6 億元，單圓雙孔潛盾隧道總工程費 19.1 億元，兩種工法總工程費僅差大約 2.5%。

**關鍵字：**工期、工程費、沉陷、滾轉、隧道、雙圓型潛盾、疊加法



# Double-O-Tube Shield Tunneling in Taipei Basin for Airport Access MRT

Student : Yu-Fen Shiu

Advisor : Dr. Yung-Show Fang

Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

Based on the construction of Taoyuan International Airport access MRT with the Double-O-Tube (DOT) shield tunneling method, this thesis studies the difficulties encountered during construction. Major difficulties discussed included: rolling of the shield machine, ground settlement due to tunneling, and speed and cost of DOT shield tunneling. Based on this study, the following conclusions are made.

1. Field data indicated that the maximum rolling angle was  $0.38^\circ$ , which was less than the limiting design rolling angle of  $0.6^\circ$ . The measures adopted by the contractor to correct the rolling angle included: reverse rotation of the cutter disc, grouting through holes on lining segments, and overcut of ground with the copy cutter. The reverse rotation of the cutter disc was use most often to correct the rolling angle.
2. The superposition method and the equal-area method were proposed to estimate the ground settlement due to DOT shield tunneling. It was found that the settlement troughs determined with the two methods were similar. The estimated settlement trough was in fairly good agreement with the measured settlement data.

3. The maximum ground settlements measured at six different sections varied from 12 to 34 mm. The ground loss due to DOT shield tunneling varied from 0.23 to 1.19%. The average ground loss was 0.76%.
4. In the departure section, the estimated speed of DOT excavation was 2.0 m/day. The measured speed of excavation was 2.5 m/day, which was 25% faster than the estimated speed. In the normal excavation section, the estimated speed of excavation was 4.3 m/day, and the measured speed was 3.9 m/day.
5. Based on the calculation of the Detail Design Consultant, the construction cost for the DOT tunnel is NTD 849,300 dollar/m. The construction cost for the traditional circular-section twin-tube shield tunnels is NTD 585,600 dollar/m. The DOT shield tunnel was more expensive to build mainly because of the expensive DOT shield machine, and the complex DOT ring manufacture and assembly.
6. Although the total cost for the DOT shield tunnel was NTD 450,000,000 higher than that for the circular-section twin-tube shield tunnels. However, with the DOT shield tunnel, the cost NTD 330,000,000 dollars to construct three cross-passages under the Danshuei River could be avoided. Consider the total cost of lot CA450A, the total cost with a DOT shield tunnel is NTD 1,960,000,000 dollars, and the total cost with traditional shield tunnels is NTD 1,910,000,000 dollars. With the two tunneling methods, the difference in total cost is only 2.5%.

**Keywords:** Duration, construction cost, Settlement, Rolling, Tunnel, Double-O-tube shield tunnel, superposition method.

# 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。同時並感謝潘以文老師、廖志中老師、黃安斌老師、林志平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，尚須感謝台灣世曦工程顧問股份有限公司、達欣/清水營造工程股份有限公司、三聯科技股份有限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，台北市捷運工程局北工處土木第六工務所易永輝主任、陳建旭工程師，台灣世曦工程顧問公司林恆次工程師、陳景功工程師，達欣/清水營造莊澤民經理、周祿卿工程師、梁志聰工程師，榮民工程股份有限公司廖銘洋主任等人，熱心提供相關資料與協助，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原大學馮道偉教授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。

研究期間，感謝林卓民同學、陳威廷同學在論文上給予諸多意見與鼓勵，讓我能堅持到最後一刻。以及黃閔邑學弟、黃亭淵學弟及陳冠宇學弟的熱心協助、義氣相挺，在此致上萬分的謝意。

另外，感謝同學陳培旻、黃秉濬、張子奕、江志鵬、方韻喬、蔡士銘於繪圖軟體及資料搜尋上的幫助，協助我論文順利完成。

最後，感謝在研究所階段一路支持我的家人、男友和所有關心我的親朋好友。特別謝謝一路栽培我到大的爸爸徐朝鐘，因為有他，才能讓我有今日的表現，願將此份榮耀與喜悅分享給我最愛的家人和所有關心我的朋友。

# 目錄

摘要.....	i
誌謝.....	v
目錄.....	vi
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
附錄.....	xiii
符號說明.....	xiv
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	1
1.3 論文組織.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 DOT 潛盾隧道工法之沿革.....	4
2.2 DOT 潛盾隧道工法施工原理.....	5
2.3 DOT 潛盾機型式.....	5
2.4 DOT 潛盾機構造.....	6
2.5 DOT 環片構造.....	7
2.6 DOT 環片組裝順序.....	8
2.7 DOT 潛盾隧道施工造成之滾轉.....	8
2.8 潛盾隧道施工引致地盤沉陷之原因.....	10
2.8.1 盾尾間隙閉合.....	11
2.8.2 襯砌變形.....	11
2.8.3 開挖面應力的改變.....	11

2.8.4 黏土層產生的壓密沉陷.....	12
2.8.5 曲線段掘進造成超挖.....	12
2.8.6 地下水位變化 .....	12
2.9 潛盾隧道施工引致地盤變位之估算.....	12
2.9.1 單圓潛盾隧道引致地表沉陷量之估算.....	13
2.9.2 Peck-Fujita 經驗式預估平行雙隧道引致之地表沉陷.....	14
2.9.3 Peck 經驗式模擬 DOT 潛盾隧道沉陷槽.....	16
第三章 國外 DOT 潛盾隧道施工案例.....	17
3.1 日本有明北地區供給管共同管道建設工程.....	17
3.1.1 工程概述.....	17
3.1.2 地質概況.....	18
3.1.3 選擇 DOT 潛盾工法之原因.....	18
3.1.4 潛盾機介紹.....	19
3.2 上海軌道交通八號線 DOT 潛盾隧道工程.....	19
3.2.1 工程概述.....	19
3.2.2 地質概況.....	20
3.2.3 潛盾機介紹.....	20
3.2.4 潛盾機滾轉實測分析.....	21
第四章 桃園機場聯外捷運 DOT 潛盾隧道台北三重段工程案例.....	22
4.1 工程概述.....	22
4.2 地質概況.....	23
4.3 潛盾機介紹.....	23
4.4 施工遭遇之困難及解決方法.....	24
4.4.1 滾轉實測分析.....	24
4.4.2 流木處理對策.....	25
4.4.3 環片組裝遭遇之困難.....	26

4.4.4 地盤沉陷處理對策.....	26
4.5 風險成本評估.....	28
第五章 以經驗方法評估 DOT 潛盾隧道施工引致之沉陷槽.....	29
5.1 以疊加法評估 DOT 潛盾隧道沉陷槽.....	29
5.1.1 實際案例疊加法沉陷評估.....	30
5.2 以等面積單圓隧道評估 DOT 潛盾隧道沉陷槽.....	31
5.2.1 實際案例等面積法沉陷評估.....	31
5.3 模擬結果.....	32
第六章 單圓雙孔與 DOT 潛盾隧道工期與成本比較.....	35
6.1 工期比較.....	35
6.1.1 單圓雙孔潛盾隧道工期評估.....	35
6.1.2 DOT 潛盾隧道工期評估.....	36
6.2 工程費比較.....	38
6.2.1 潛盾隧道段進尺費比較.....	38
6.2.2 潛盾隧道段總工程費比較.....	39
第七章 結論與建議.....	40
7.1 結論.....	40
7.2 建議.....	42
參考文獻.....	43
表.....	48
圖.....	58
附錄.....	92

# 表目錄

表 2-1	潛盾隧道工法比較表.....	48
表 2-2	單圓與 DOT 潛盾隧道環片比較表.....	49
表 2-3	沉陷槽寬度( $i/R$ )與隧道中心軸深度( $Z/2R$ )關係式之 $k \cdot n$ 值.....	49
表 3-1	DOT 潛盾隧道工法案例表.....	50
表 3-2	東京都有名北地區 DOT 潛盾隧道施工地層性質.....	53
表 3-3	上海軌道交通八號線工程翔殷路站至黃興綠地站土層工程特性.....	53
表 6-1	捷運單圓潛盾隧道平均掘進施工速率.....	54
表 6-2	DOT 潛盾隧道工法於直線段之施工速率.....	54
表 6-3	DOT 潛盾隧道工法於曲線段之工率修正係數.....	55
表 6-4	CA450A 標 DOT 與單圓潛盾工法預估工期比較.....	55
表 6-5	單圓雙孔及 DOT 潛盾隧道進尺費估價.....	56
表 6.6	單圓雙孔及 DOT 潛盾隧道施工總工程費比較.....	57

# 圖目錄

圖 2-1	DOT 潛盾隧道與單圓單線及單圓雙線潛盾隧道示意圖.....	58
圖 2-2	DOT 潛盾機切刃盤配置示意圖.....	58
圖 2-3	Schematic diagram of shield.....	59
圖 2-4	(a)為 X 型中折裝置示意圖 (b)為 V 型中折裝置示意圖.....	60
圖 2-5	DOT 潛盾機之環片組立設備.....	60
圖 2-6	DOT 潛盾機之切刃盤.....	61
圖 2-7	DOT 潛盾機之螺運機設備.....	61
圖 2-8	DOT 潛盾機之真圓保持器設備.....	62
圖 2-9	DOT 潛盾機千斤頂.....	62
圖 2-10	DOT 潛盾隧道使用之襯砌環片.....	63
圖 2-11	DOT 潛盾隧道環片錯縫拼裝圖.....	63
圖 2-12	DOT 潛盾隧道環片銜接之短直螺栓和預埋構件.....	64
圖 2-13	DOT 潛盾隧道環片與預埋構件安裝示意圖.....	64
圖 2-14	DOT 潛盾隧道環片組裝順序圖.....	65
圖 2-15	DOT 潛盾隧道滾轉造成之軸線偏差示意圖.....	66
圖 2-16	DOT 潛盾隧道修正千斤頂圖示.....	66
圖 2-17	DOT 潛盾隧道以修正千斤頂及單側加載環片修正 DOT 潛盾機滾轉...67	
圖 2-18	DOT 潛盾隧道以超挖刀修正滾轉.....	67
圖 2-19	DOT 潛盾隧道以盾撬修正滾轉.....	68
圖 2-20	DOT 潛盾隧道以環片灌漿修正滾轉.....	68
圖 2-21	以誤差函數(常態分佈曲線)模擬地表沉陷槽.....	69
圖 2-22	不同土層下沉陷槽寬徑比( $i/R$ )與隧道深徑比( $Z/2R$ )關係圖.....	69
圖 2-23	地下水以下砂質地盤潛盾施工引致之地表沉陷槽.....	70

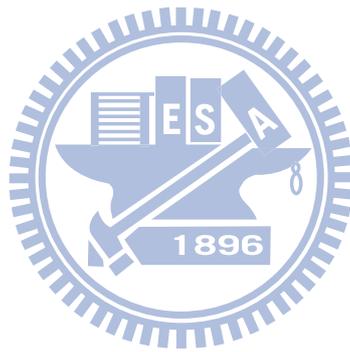
圖 2-24	軟弱土層隧道施工後所引致之土壤塑性範圍.....	70
圖 2-25	隧道周圍土壤塑性區最大水平寬度對隧道直徑比( $b/2R$ )與深度半徑比( $z/2R$ )之關係.....	71
圖 2-26	兩單圓潛盾隧道獨立引致之沉陷槽.....	71
圖 2-27	以兩個相交之單圓潛盾隧道疊加模擬 DOT 隧道引致之地表沉陷.....	72
圖 2-28	以等面積單圓潛盾隧道模擬 DOT 隧道造成之地表沉陷槽.....	72
圖 3-1	東京都有明北地區供給管共同管道建設工程使用之大直徑 DOT 潛..	73
圖 3-2	東京都有明北地區供給管共同管道建設工程 DOT 潛盾隧道路線圖....	73
圖 3-3	東京都有明北地區供給管共同管道新建工程地質剖面圖.....	74
圖 3-4	上海軌道交通八號線工程翔殷路站至黃興綠地站地質剖面圖.....	74
圖 3-5	上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站 DOT 潛盾機滾轉角度.....	75
圖 4-1	桃園國際機場聯外捷運系統路線圖.....	76
圖 4-2	桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道出發端隧道口.....	76
圖 4-3	桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道圖示.....	77
圖 4-4	桃園機場聯外捷運 CA450A 標三重台北段路線圖.....	77
圖 4-5	CA450A 標 DOT 潛盾隧道施工地質剖面圖.....	78
圖 4-6	CA450A 標 DOT 潛盾機切刃盤配置圖示.....	79
圖 4-7	CA450A 標 DOT 潛盾機同步背填灌漿孔.....	79
圖 4-8	CA450A 標潛盾隧道環片配置圖.....	80
圖 4-9	CA450A 標之 DOT 潛盾機滾轉角度實測分析.....	80
圖 4-10	CA450A 標 DOT 潛盾隧道環片內向外灌漿圖.....	81
圖 4-11	CA450A 標 DOT 潛盾機切刃盤上切刃齒圖示.....	81
圖 4-12	CA450A 標 DOT 潛盾隧道流木處理設備.....	82
圖 4-13	CA450A 標 DOT 潛盾隧道流木特殊處理設備.....	82
圖 4-14	CA450A 標 DOT 潛盾機掘進過程中遭遇之流木.....	83
圖 5-1	兩獨立單圓潛盾隧道引致之地表沉陷槽.....	84

圖 5-2	DOT 潛盾施工造成之單位長度沉陷槽體積.....	84
圖 5-3	疊加法估計 DOT 隧道引致之地表沉陷槽.....	85
圖 5-4	上海軌道交通六號線第九標工程第 100 環沉陷槽.....	85
圖 5-5	等面積法估計 DOT 隧道施工造成之地表沉陷槽.....	86
圖 5-6	DOT 潛盾隧道面積計算之圖示.....	86
圖 5-7	東京都有明北地區共同管道 DOT 潛盾隧道造成之沉陷槽.....	87
圖 5-8	上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 80 環沉陷槽.....	87
圖 5-9	上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 460 環沉陷槽.....	88
圖 5-10	上海軌道交通六號線第九標工程第 130 環沉陷槽.....	88
圖 5-11	桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道造成之沉陷槽.....	89
圖 6-1	曲率半徑與修正係數之關係.....	90
圖 6-2	DOT 潛盾隧道直徑及曲率半徑與施工速率關係圖.....	90
圖 6-3	桃園機場聯外捷運 CA450 標潛盾隧道工法工期與隧道長度關係圖.....	91



# 附錄

Table A Project Constructed with DOT shield Tunneling Method .....92



# 符號說明

$b$ ：隧道起拱線旁水平方向之塑性區寬度(m)

$G_l$ ：地盤漏失率(%)

$i$ ：沉陷槽寬度參數

$i/R$ ：沉陷槽寬徑比

$L_c$ ：曲線段掘進施工速率(m/day)

$L_s$ ：直線段掘進施工速率(m/day)

$R$ ：隧道半徑(m)

$r$ ：曲率半徑(m)

$S(y)$ ：隧道中心線水平距離為  $y$  處之地表沉陷量(mm)

$S_{\max}$ ：隧道中心線上方之最大地表沉陷量(mm)

$V_s$ ：單位長度之地表沉陷槽體積( $m^3/m$ )

$V_t$ ：單位長度之隧道體積( $m^3/m$ )

$y$ ：測點至隧道中心線之水平距離(m)

$Z$ ：隧道中心線深度(m)

$Z/R$ ：隧道之深度半徑比

$Z/2R$ ：隧道深徑比

$\theta$ ：潛盾機滾轉角度

$\alpha$ ：不同曲率半徑之施工速率修正係數

# 第一章

## 緒論

### 1.1 前言

在經濟快速成長下，都會區人口集中、交通繁忙、作業空間狹小，潛盾隧道施工已成為地下構築隧道之主流。隨著地下化空間越來越小，潛盾隧道施工由原來的單圓技術發展至雙圓(Double O Tube)，簡稱 DOT 潛盾隧道。

為了減小地下開挖面積、降低周邊建物影響、縮短工期等，日本於 1989 年發明了 DOT 潛盾隧道工法。其工法發展至今約二十年，成功完成 19 個案例，包括日本 13 個、大陸 6 個。於 2009 年，台灣首次引進 DOT 工法，於桃園國際機場聯外捷運系統隧道施工。

桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫，與「台北地區捷運系統」及「台灣高速鐵路」系統聯結。正在進行之桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫台北三重段「CA450A 標工程」，為國內首宗 DOT 潛盾隧道施工案例。該標工程之隧道段穿越淡水河河床、兩側堤防、及環快高架橋基礎，需考慮在淡水河底施作隧道逃生安全需求之連絡通道，三處連絡通道之工程費昂貴，故設計單位建議採用 DOT 潛盾隧道工法施工。

### 1.2 研究動機與目的

桃園機場聯外捷運 CA450A 標為國內首次使用 DOT 潛盾隧道工法之案例，國內對此工法之設計與施工較為陌生，相關資料較為缺乏，故本研究對 DOT 潛盾隧道進行研究探討。

本論文著重探討 DOT 潛盾工法遭遇之問題與解決對策，例如 DOT 潛盾機開挖掘進時之盾身滾轉、潛盾機遭遇流木問題、DOT 潛盾施工造成之沉陷槽評

估、及 DOT 施工工期、成本與單圓雙孔潛盾隧道比較。針對上述研究主題，本研究蒐集國內外資料與文獻，並藉由至 CA450A 標工地參訪拍照、及訪談設計單位台灣世曦顧問公司及承包商達欣/清水建設之工程人員，獲得豐富的 DOT 相關資訊。

DOT 潛盾機施工過程中，由於潛盾機周圍土體不均勻、於曲線段施工、機體本身構造差異、及施工技術欠佳，皆可能造成盾身滾轉(rolling)問題，將會影響隧道斷面施工品質。本研究利用桃園機場聯外捷運 CA450A 標現地資料，報告實測之 DOT 潛盾機滾轉角度，並於論文中敘述實際控制滾轉角度之方法。針對台灣首次使用 DOT 工法，本研究對於施工遭遇之困難，例如環片組裝之難處及對策，依實際訪談結果，於論文中報告。

本研究蒐集國內外 DOT 施工造成沉陷之資料，建議以 Fang et al.(1994)提出之沉陷疊加方法、及張統立(2007)提出之等面積單圓隧道方法，推估 DOT 施工引致之地表沉陷槽，以上述經驗方法求出沉陷槽及地盤漏失之範圍，以供日後設計及施工參考。

最後，從實用角度考量，本研究引用台灣世曦顧問公司設計階段之資料比較 DOT 潛盾與單圓雙孔潛盾隧道之工期與成本，進行分析，供業主及設計單位參考。

### 1.3 論文組織

本論文共分七章。第一章為緒論。第二章為文獻回顧，蒐集 DOT 潛盾隧道工法沿革、DOT 潛盾機與環片構造、隧道施工造成之潛盾機滾轉及地表沉陷之相關文獻。第三章為國外 DOT 潛盾隧道施工案例介紹，本論文介紹日本東京都明北地區 DOT 共同管道建設工程及上海軌道交通八號線 DOT 潛盾隧道工程。第四章介紹桃園國際機場聯外捷運台北三重段 DOT 潛盾隧道工程案例，說明施工遭遇之困難及解決方案。第五章介紹 2 種經驗方法，評估 DOT 潛盾隧道施工

引致之沉陷槽。第六章探討單圓雙孔與 DOT 潛盾隧道施工工期與成本比較。第七章則為結論與建議。



# 第二章

## 文獻回顧

本章將對 DOT 潛盾隧道工法之沿革、施工原理、潛盾機型式、潛盾機與環片構造、環片組裝順序、DOT 潛盾隧道施工造成之滾轉與解決方案、及 DOT 潛盾隧道施工造成之地表沉陷等相關文獻加以說明。DOT 潛盾隧道施工造成的滾轉問題可能影響隧道線型，是工程考量的重要因素。而施工引致之地表沉陷對鄰近地表結構物、結構基礎及地下管線等造成潛在威脅。因此本章將對單圓潛盾隧道引致地表沉陷之原因及 Peck 地表沉陷預估經驗式加以介紹，並於本論文第五章引用 Peck 經驗式預估 DOT 潛盾隧道施工造成之地表沉陷。

### 2.1 DOT 潛盾隧道工法之沿革

潛盾工法於西元 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矩形潛盾機。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，奠定今日單圓潛盾工法之基礎。國內於民國 65 年由蔡茂生引進潛盾工法以來，迄今已逾 34 年，所使用之潛盾機型式包括開放型手挖式潛盾機、機械式、泥水加壓式及土壓平衡式潛盾機，對單圓潛盾隧道技術已累積了不少經驗。

隨著地下化空間越來越小，潛盾隧道施工由原來的單圓技術發展至雙圓潛盾隧道，DOT 潛盾隧道可有效減少地下開挖面積。如圖 2-1 為 DOT 潛盾隧道、單圓單線(Single-tube single-track)潛盾隧道與單圓雙線(Single-tube double-track)潛盾隧道之示意圖。表 2-1 為日本潛盾工法技術協會介紹三種工法之差異性比較，表中顯示，地下開挖面積以 DOT 潛盾隧道最小，開挖寬度以單圓雙線及 DOT 潛盾隧道較窄、影響工區較小，工作井深度以 DOT 及單圓雙線潛盾隧道

較淺，成本則是 DOT 潛盾隧道最為便宜。根據上述結果，顯示 DOT 潛盾工法較為優越之施工方法。

DOT 潛盾工法 1987 年於日本取得專利，石川島重工業株式會社(IHI)製造世界上第一部 DOT 加泥土壓平衡式潛盾機，此台 DOT 潛盾機於 1991 年成功被應用在日本廣島 54 號國道系統工程建設。於 2002 年中國上海首次使用 DOT 潛盾隧道工法於上海軌道交通 M8 線，成為世界上第二個使用 DOT 潛盾隧道工法施工的國家。我國於 2009 年引進 DOT 工法興建桃園機場聯外捷運台北三重段工程，目前工程仍在進行中。至今，DOT 潛盾隧道工程已成功完成 19 個案例，我國是全世界第三個使用 DOT 潛盾隧道工法的國家。

## 2.2 DOT 潛盾隧道工法施工原理

DOT 工法為潛盾機同一開挖平面上，安裝兩個 6 輻之切刃盤，輻條形切刃盤交會處 6 組輻條像齒輪相互吻合、不互相影響，如圖 2-2。潛盾機掘進時 2 個切刃盤旋轉方向相反、旋轉速度相同，由操作員同步控制。DOT 潛盾工法施工原理與一般潛盾工法相同，為利用一較隧道外徑稍大、可向前移動之雙圓形鋼套筒（即潛盾機）於土層中挖掘前進，在設置永久襯砌(環片)前，利用盾殼支撐隧道洞口地盤。環片脫離潛盾機後，環片支撐地盤外在壓力，並以環片提供潛盾機向前推進之反力，逐步完成潛盾隧道之構築。

## 2.3 DOT 潛盾機型式

傳統潛盾機形式從開放式發展至密閉式，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）。

至目前為止，曾被使用的 20 台 DOT 潛盾機，皆為加泥土壓平衡式潛盾機。此類潛盾機前方設一密閉式土艙，潛盾機掘進時，土砂經切刃盤之取土口進入土

倉，在土倉內注入作泥材，以攪拌器將土渣和作泥材拌合，使其具有流動性，拌合後之土砂充滿貫穿隔板，連接土倉及機體內部之螺運機(screw conveyor)。當潛盾機掘進時，藉控制螺運機旋轉之排土速度控制土倉內之泥土壓力，並以土倉壓力平衡開挖面之土壓及水壓。DOT 潛盾機左右切刃盤共用一個排土土倉，但為提高排土能力，確保切削面左右土壓力平衡及穩定，於橫向雙圓潛盾機左右各設一套螺運機排土設備。

## 2.4 DOT潛盾機構造

目前DOT潛盾機製造商有三間，分別為日本的石川島重工業株式會社(Ishikawajima-Harima Heavy Industries, IHI)、三菱重工業株式會社(Mitsubishi Heavy Industries, MHI)、及川崎重工業株式會社(Kawasaki Heavy Industries, KHI)。DOT潛盾機依據施工條件、土質條件做為設計考量，以下對DOT潛盾機之構造及設備進行介紹。

### 1. 潛盾機本體

潛盾機型式為橫連式雙圓型斷面，潛盾千斤頂設置於盾殼鋼板內側。盾尾封圈為三段式，內側兩段可更換，用於防止土體或水流入潛盾機內部，影響潛盾機作業。土倉隔板上設有土壓計以及加泥材注入口，在土倉隔板上方設置人員進出口及作業空間。另外，潛盾機有裝配滾轉修正裝置及保持環片不變形之真圓保持裝置，如圖2-3。

### 2. 中折裝置

為急曲線施工所設置之中折裝置，如圖2-4，依機構分為X型中折式及V型中折式，左右及上下傾斜角度依不同工程而有不同設計。

### 3. 環片組立設備

分為單臂旋回式及門型式組立機，單臂旋回式組立機於潛盾機左右圓各一部，門型式組立機只設置於潛盾機一側，如圖2-5。

#### 4. 切刀盤

左右各設置一組切刀盤，一切刀盤為六支輪輻組成，其中兩支為輔助輪輻。兩切刀盤依相同速度、反方向同步控制，使其運轉時不干涉，切刀盤可正反方向迴轉，如圖2-6。左右切刀盤各設置兩副超挖刀，其中一副備用。超挖刀用途有兩方面，一為曲線段施工時一側需以超挖刀超挖，以利潛盾機前進；二為滾轉時調整潛盾機方向。

#### 5. 螺運機

左右各設置一部螺運機，可將切刀盤及螺運機內部之土砂同時作充填及排土，如圖2-7。最大容許通過粒徑依不同工程有不同設計。

#### 6. 環片真圓保持器

於潛盾機後部作業台上設置左右各一組真圓保持器，用於保持環片之真圓度，於環片脫離盾殼時、尚未同步背填灌漿前，以真圓保持器保持環片圓形，如圖2-8。

#### 7. 同步背填灌漿設備

為控制盾尾間隙所造成之沉陷量而設置同步背填灌孔，通常設於海鷗部上方兩處，及海鷗部下方一處，灌漿量和灌漿壓力依不同工程有不同規範。

#### 8. 潛盾機千斤頂

佈設於潛盾機盾首雙圓外周，數量及推力依不同工程設計而定，千斤頂可各別使用，調整水平及軸向位置，其中有修正千斤頂可用於滾轉修正，如圖2-9。

## 2.5 DOT 環片構造

DOT 與一般傳統潛盾隧道之環片不同，DOT 潛盾隧道每一環由 11 片環片組成，包括 A、B、C、D 四種類型環片，如圖 2-10。圓形襯砌部份由 8 片 A 型環片組成，兩圓交接處上下設置 1 片 B 型(大海鷗)及 1 片 C 型(小海鷗)環片，中間柱由 1 片 D 型環片分隔上下行線隧道。組合襯砌環片時，兩環間之 B 型及 C 型

環片上下交錯排列，見圖 2-11，如此錯縫拼裝環片可避免弱面連續並增加隧道襯砌勁度。常用之 DOT 環片寬度為 1.2 m，厚度為 300 mm。DOT 潛盾隧道環片之環與環間，由一個孔的預埋構件以短直螺栓連接，如圖 2-12a，片與片間由三個孔的預埋構件以短直螺栓連接，如圖 2-12b。DOT 潛盾隧道環片與預埋構件示意如圖 2-13。單圓潛盾隧道環片形狀分為 A、B、K 型，以弧形螺栓連接環片，一般環片寬度為 1.0 m、厚度為 250 mm。兩者隧道環片比較，參閱表 2-2。

## 2.6 DOT 環片組裝順序

DOT 潛盾隧道環片組裝順序如圖 2-14 所示，由雙圓交界處之下方海鷗部 C 型(或 B 型)環片吊放至正確位置後，於 C 型環片左右同步組裝 A 型環片，A 型環片組裝完成後，以 B 型(或 C 型)環片吊放於雙圓交界處之上方海鷗部，最後插入 D 型環片。D 型環片尚未組裝前，A、B、C 型環片間之螺栓不可以鎖死，預留彈性空間以便插入最後一片 D 型環片，B、C 環片採錯縫拼裝。若第一環以 C 環片設置於雙圓交界處下方，則第二環此處以 B 型環片設置，如此 B 型與 C 型環片交錯，可避免弱面連續，增加環片勁度。

## 2.7 DOT 潛盾隧道施工造成之滾轉

DOT 潛盾機施工，對平面及高程軸線控制措施與單圓隧道者相似，兩者之間最大差異在於潛盾機滾轉控制技術。單圓潛盾隧道發生滾轉時，不會對隧道斷面造成直接影響，但雙圓潛盾隧道一但發生滾轉(如圖 2-15)，會影響潛盾機及環片姿態(例如左右環片的高低差及立柱傾斜)，造成潛盾機設備使用困難，直接對隧道軸線造成影響。因此控制潛盾機滾轉為 DOT 潛盾隧道施工主要技術難點。

張矚(2004)及 Shen et al. (2009)提出，導致 DOT 潛盾隧道滾轉的原因，分為 DOT 潛盾機周圍土體不均勻、DOT 潛盾機於曲線段施工、DOT 潛盾機本身構造差異、及施工技術欠佳。以下共分別對各項因素探討。

### 1. DOT 潛盾機周圍土體不均勻

DOT 潛盾隧道掘進過程中，由於開挖面土體不均勻，使得切刀盤在切削土體時，左右切刀盤力矩不同，對潛盾機產生一個力矩差，造成潛盾機滾轉。另外，承載潛盾機的下方土體性質不同，地基承載力也不同，也可能造成潛盾機滾轉。

### 2. DOT 潛盾機於曲線段施

DOT 潛盾機於曲線段施工時，潛盾機左右兩側所受的力和方向的差異，可能使潛盾機發生滾轉。另外，切刀盤外側若存在局部超挖現象，盾身亦容易發生滾轉。

### 3. DOT 潛盾機本身構造差異

DOT 潛盾機本體左右結構和設備配置的差異，例如圖 2-5 中，左右環片組立設備的結構不同，左邊組立設備僅有懸臂式組裝機，右邊有懸臂式組裝機及門型式組裝機，因此造成潛盾機左右重量不平衡，而導致滾轉。

### 4. 施工技術欠佳

DOT 潛盾機施工時，因施工人員技術尚未純熟，左右螺運機排土速率不平衡，多支潛盾千斤頂推力不完全平衡，或環片組裝精度欠佳，組裝完成之環片未能左右完全平衡，而引致潛盾機滾轉。

DOT 潛盾隧道施工很可能會遭遇潛盾機滾轉之問題，因此滾轉控制方式為施工單位之主要課題。上述已針對造成滾轉之原因進行介紹，據張矚(2004)、易永輝等人(2008)及 Shen et al. (2009)對 DOT 潛盾滾轉之修正方法進行研究，以下將介紹控制滾轉方法之各項對策。

#### 1. 千斤頂修正

潛盾機之推力千斤頂(shield jack)中，有數個配有斜向伸縮功能之千斤頂(Transfer jack)，可調整推力千斤頂伸出之角度，產生縱向分力進行盾體滾轉之修正，如圖 2-16 及圖 2-17。

## 2. 超挖修正

利用超挖刀(Copy cutter)進行局部超挖(over-excavation)切削使土體鬆弛，以降低土體抵抗，降低 DOT 盾體之滾轉角度，如圖 2-18 所示。

## 3. 側向加載環片

掘進時被升高之一側利用單邊環片組立機機抓取環片，使一側向加載重量而產生反方向之滾轉，如圖 2-17 所示。

## 4. 盾撬頂出

圖 2-19 顯示於 DOT 盾首斜下方設置盾撬(shield pry)，盾撬之使用條件，為潛盾機下方土壤能提供足夠反力。於盾身下陷之一側，盾撬向外頂出，利用土體對潛盾機產生之反作用力修正盾體之滾轉角度。

## 5. 控制出土量

利用左右螺運機排土量不同，將被抬高一側增加排土速率，使該側土壤鬆弛，而修正滾轉角度。

## 6. 灌漿

如圖 2-20 所示，當潛盾隧道發生滾轉時，可利用環片孔灌漿，在地盤與隧道環片外側之間施加壓力，修正 DOT 隧道滾轉角度。

## 7. 切刃盤反向旋轉

潛盾機在掘進過程中，開挖土質不均勻可能造成左右切刃盤承受力矩大小不同，因此對潛盾機造成滾轉。可結合潛盾機的偏轉方向，透過改變切刃盤旋轉方向，平衡左右切刃盤承受之力矩達成修正隧道滾轉的目的。

## 2.8 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、選用之潛盾機型式、潛盾機直徑及隧道中心線深度等因素，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。潛盾隧道施工引致地盤沉陷的原因，可分為以下六大項。

### 2.8.1 盾尾間隙閉合

潛盾機通過之後，潛盾機盾殼外緣與襯砌環片外緣所形成之空隙稱為盾尾間隙 (Tail void)，除了盾殼厚度外，可依據環片變形量、環片製作精度、環片組裝誤差、及盾殼之變形量決定盾尾間隙。盾尾間隙通常採背填灌漿 (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，盾尾間隙呈無支撐狀態，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。此項因素為潛盾隧道施工引起地盤沉陷的最主要原因。



### 2.8.2 襯砌變形

隧道環片組裝完成，本應呈現圓環狀，但因作用於環片上方之垂直覆土壓力  $\sigma_v$  通常大於水平土壓力  $\sigma_h$ ，故隧道環片略呈現橢圓狀。在軟弱土層中，因地下水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，隧道承受向下之摩擦力，可能使環片產生變形。一般而言，襯砌環片的設計強度遠大於所承受之垂直土壓力，故此項因素造成之地表沉陷量不致於過大。

### 2.8.3 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，以維持開挖面之穩定。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。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，此時土體趨於主動土壓力狀態，會向開挖面擠入，同時發生地盤漏失的情形，並造成地盤沉陷。

#### 2.8.4 黏土層產生的壓密沉陷

潛盾隧道施工過程中，軟弱土壤因隧道面之推進及開挖，導致土壤超額孔隙水壓增加。隨時間的增加，推進造成之超額孔隙水壓逐漸消散，地盤因而產生長期壓密沉陷。

#### 2.8.5 曲線段掘進造成超挖

潛盾隧道於曲線段施工時，潛盾機一側可能造成土壤超挖，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，潛盾機切刃盤的阻力及千斤頂之壓力可能呈不均勻分佈，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，一般情形下較難以量化估算。

#### 2.8.6 地下水位變化

潛盾隧道大部份於地下水位以下施工，為抵抗開挖面之土壓力及水壓力，須視狀況使用排水工法以利工程進行。地下水位下降，可能造成土體有效應力增加，進而產生土壤壓密現象，造成地盤沉陷。

### 2.9 潛盾隧道施工引致地盤變位之估算

地表沉陷量之估算，主要方法分別為數值分析、理論解分析、經驗公式、及離心機試驗法等，四種方法之特性如以下介紹。

1. 有限元素法可充分反應土體性質之影響，可考慮地層損失、及複雜工程條

- 件，但計算較為複雜。
2. 理論解分析求得之地盤變位精度高，但解題範圍有限，只有少數簡單邊界條件下可得到理論解析解。
  3. 經驗公式使用方便，且廣泛的應用在地盤變位之估算。潛盾隧道施工所引致之地表沉陷，受土壤條件、覆土深度、施工技術、潛盾機型式等影響很大，不易以定量的方式來預估地表沉陷量之大小。因此預估沉陷量大小，以實際經驗為依據之分析法為一種可靠方法。本論文以經驗公式預估 DOT 潛盾隧道造成之地表沉陷槽。
  4. 離心機試驗法利用人造離心力模擬重力，將大地工程結構模型的應力狀態提高到與原型相同的狀態，達到相似性較高的模型模擬。

### 2.9.1 單圓潛盾隧道引致地表沉陷量之估算

Peck (1969) 依據現地觀測資料指出，以傳統潛盾工法開挖隧道，施工所引致之地表沉陷槽可以用誤差函數 (error function) 或常態分佈曲線 (normal distribution curve) 來加以模擬，沉陷槽之方程式可表示如下：

$$S(y) = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.1)$$

$y$ ：測點至隧道中心線之水平距離

$S(y)$ ：至隧道中心線水平距離為  $y$  處之地表沉陷量

$S_{\max}$ ：隧道中心線上方之最大地表沉陷量

$i$ ：隧道中心線到沉陷槽反曲點的水平距離 (代表沉陷槽寬度之參數)

上述之常態分佈曲線可用圖 2-21 以說明，常態分佈沉陷曲線反曲點相對應之沉陷量為  $0.61 S_{\max}$ 。由(2.1)式積分可得地表沉陷槽單位長度內之體積  $V_s$  為：

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max} \approx 2.5 \cdot i \cdot S_{\max} \quad (2.2)$$

Peck (1969) 根據隧道在不同土質條件下施工所引致之地表沉陷槽，求取反曲點位置  $i$ ，作為代表沉陷槽寬度之參數。Peck 將隧道半徑 ( $R$ )、隧道中心線深度 ( $Z$ )、及寬度參數 ( $i$ ) 之關係，繪製成圖 2-22。圖中顯示，在同一深度開挖隧道 ( $Z/2R$  值固定) 軟弱黏土層內所引致之  $i$  值，顯然比硬質黏土之  $i$  值為大。若在地下水位以下之砂土層內開挖潛盾隧道，因地盤漏失之控制特別困難，故其沉陷槽將可能更寬。

Attewell (1981) 根據不同土層開挖潛盾隧道的監測結果，歸納出沉陷槽寬徑比 ( $i/R$ ) 與隧道深徑比 ( $Z/2R$ ) 之關係，表示如下：

$$i/R = k(Z/2R)^n \quad (2.3)$$

式中  $k$  值及  $n$  為參數，依當地之地質特性而定，如表 2-3

Clough and Schmidt (1981) 對黏土層內潛盾隧道施工造成之地表沉陷進行研究，研究發現沉陷槽寬徑比 ( $i/R$ ) 與隧道深徑比 ( $Z/2R$ ) 之關係，可表示如下：

$$i/R = (Z/2R)^{0.8} \quad (2.4)$$

陳秋宗 (1988) 收集台北市衛生下水道採用潛盾工法所引致之地表沉陷，依據監測資料分析，建議於台北盆地之潛盾隧道施工 ( $i/R$ ) 與 ( $Z/2R$ ) 之關係如下。

$$i/R = (Z/2R)^{0.94} \quad (2.5)$$

## 2.9.2 Peck-Fujita 經驗式預估平行雙隧道引致之地表沉陷

預估潛盾隧道施工引致之地表沈陷方法，主要係針對單隧道施工來進行研究。隨著國內捷運系統之興建，平行雙隧道潛盾施工在國內也日漸普及。因此，對於平行雙隧道施工造成的地表沈陷，亦需加以探討。

Peck (1969) 指出，第二條隧道如果相當靠近第一條隧道，則由於第一條隧道施工時，可能造成第二條隧道周圍及上方土壤之應力-應變狀態的改變，因此，第二條隧道施工所引致的沈陷，將比第一條為大（如圖 2-23）。Peck 建議計算雙隧道施工所造成的總沈陷槽時，可將雙隧道視為一直徑為"二隧道中心線水平距離加上隧道直徑"之大型單一隧道，再以常態分佈曲線來模擬。

Schmidt (1974) 整理加拿大 Toronto 捷運系統的監測資料，認為第二條隧道施工引致的地表沈陷，受第一條隧道的影響非常明顯，且第二條隧道施工所造成的沈陷，也較第一條隧道施工所造成的沈陷量大得多。並指出，雙隧道施工所引致的沈陷曲線幾乎對稱於雙隧道中心線，且由資料可知最大沈陷量亦發生在中心線上。

Som and Narayan (1985) 根據印度 Clacutla 地鐵施工案例之結果，與常態分佈曲線比較，發現平行雙隧道施工所引致的沈陷槽曲線，能夠以常態分佈曲線來模擬。且由監測數據上得知，雙隧道的影響範圍相當於兩條單隧道影響範圍之疊加。

Hoyaux and Ladanyi (1970) 以有限元素法分析軟弱土層隧道周圍應力的分佈，並且求得非靈敏性和靈敏性粘土層隧道周圍塑性區域之分佈範圍（如圖 2-24）。圖中顯示隧道周圍之塑性區域大小，除了與土壤性質有關外，與隧道深度（即代表覆土層厚度）對半徑比（ $Z/R$ ）亦有密切關係。故將隧道起拱線旁水平方向之塑性區寬度（ $b$ ）與隧道直徑（ $2R$ ）之比值對  $Z/R$  值作圖（如圖 2-25 所示）。圖 2-25 顯示對一般非靈敏性粘土層而言，若隧道之深度半徑比（ $Z/R$ ）大於 2（一般潛盾隧道皆能符合此要求），則  $b/2R$  值將低於 0.18，表示塑性區寬度甚為有限。

Fang et al. (1994) 以隧道周圍塑性區域之分佈範圍討論雙隧道互相干擾之影響，並引用 Hoyaux and Ladanyi (1970) 之結論，認為若雙隧道間之距離夠遠（如  $L > 2.72R$ ， $L$  為雙隧道中心軸之水平距離）則隧道周圍土壤之塑性區便不至重疊。因此，可藉由其所提出之 Peck-Fujita 經驗方法，分別估算單一隧道施工

所引致的長期地表沈陷曲線範圍，再以疊加（Superposition）的方式，求出平行雙隧道潛盾施工所引致的地表總沈陷量。

### 2.9.3 Peck 經驗式模擬 DOT 潛盾隧道沉陷槽

張統立(2007)依據 Peck 經驗式，提出模擬 DOT 潛盾施工引致地表沉陷之方法。分析方法分別為兩個單圓潛盾隧道沉陷量疊加模擬及 DOT 潛盾隧道視為等面積大圓隧道加以模擬，分別說明如下。

#### 1. 雙單圓隧道沉陷量疊加模擬

如圖 2-26 及圖 2-27 所示，假設 DOT 潛盾隧道引致之地表沉陷為兩個單圓潛盾隧道疊加(superposition)作用之結果，DOT 潛盾隧道引致之地表沉陷槽為兩個相交之單圓潛盾隧道獨立引起之地表沉陷量疊加。

#### 2. DOT 隧道視為等面積大圓隧道模擬

假設 DOT 潛盾隧道地表沉陷槽符合常態分布，如圖 2-28 所示，將 DOT 潛盾隧道視為等面積之單圓潛盾隧道進行模擬，依照 Peck 經驗式計算地表沉陷。

# 第三章

## 國外 DOT 潛盾隧道施工案例

本研究蒐集國內外 DOT 潛盾隧道工程共 20 個案例，其中包括日本 13 個、大陸 6 個，及台灣 1 個案例，表 3-1 為各案例之基本資料與地層狀況。表中顯示，20 個案例中，地下鐵捷運工程共 18 件、下水道 1 件及共同管溝 1 件，潛盾機外徑最小為  $\Phi 2.5 \text{ m} \times 4.19 \text{ m}$ ，最大為  $\Phi 9.36 \text{ m} \times 15.86 \text{ m}$ ，覆土深度 2.2 m~26 m，DOT 潛盾機製造商分別為日本的 IHI、MHI、及 KHI，其中 IHI 有 15 台、MHI 有 4 台、KHI 有 1 台。所有案例中，施工遭遇最大坡度為 5.9%，最小曲率半徑為 102 m。

以下分別介紹日本有明北地區供給管共同管道建設工程，及大陸上海軌道交通八號線 DOT 潛盾隧道工程案例。

### 3.1 日本有明北地區供給管共同管道建設工程

本章介紹日本東京都將東區，有明北地區供給管共同溝建設工程之 DOT 潛盾隧道案例。以下分別介紹案例之工程概述、地質概況、選擇 DOT 潛盾工法之原因、及潛盾機介紹。

#### 3.1.1 工程概述

東京都政府為了將一集中型都市結構轉換為多心型結構，於東京灣濱海處興建東京都第七處副都心，為建設可容納水電、瓦斯管線等生命線之共同管道 (Common Conduit) 而採用 DOT 潛盾工法。此項工程於 1990 年開始推動，為表 3-1 所列 20 個 DOT 潛盾隧道工程案例中最大斷面之潛盾隧道，使用 MHI 公司製造  $\Phi 9.36 \text{ m} \times 15.86 \text{ m}$  斷面之 DOT 潛盾機，如圖 3-1。圖 3-2 顯示，工程路線由

江東區有明路二段前方發進坑出發，下坡度 4%，隧道路線經過東電人孔、臨海高速鐵路及東雲共同溝下方，最後以 3.5% 坡度上升至到達坑，隧道施工全長僅 249 m。因施工路線鄰近存在現有結構物、洞道及共同溝，故採用超高壓噴射灌漿工法(Column Jet-Grout)及化學灌漿進行地盤改良以保護鄰近建物。此工程業主為東京臨海副都心建設公司，DOT 潛盾隧道施工期間為 1990 年 11 月至 1994 年 8 月。

### 3.1.2 地質概況

潛盾隧道共同管道施工工址位於海埔新生地，如圖 3-3 顯示，地層最上層為回填層，其下地層由上而下分別為沖積層、丘層、東京層及江戶川層，自然地下水位於 GL-12 m，各土層分佈及其性質說明如下：

1. 沖積層(Alluvial layer)：為黏質土層(Yuc 層)，與砂質土層(Yus 層)之互層，沖積層底端深度在 GL-12 m。
2. 丘層：由上而下分別為壤土層(btc 層)、有機土層(btp 層)、及砂礫層(btg 層)，此層僅出現於潛盾隧道段發進坑之一小段。
3. 東京層：為砂質土層(Tos 層)、粉土質黏土(Toc 層)、及粉土質砂礫層(Tog 層)所構成，此層為潛盾隧道施工經過之主要土層。
4. 江戶川層：其頂部為 3 m 厚之黏土層(Edc 層)、下部為砂土層(Eds 層)所構成。本工程之 DOT 潛盾隧道施工掘進遭遇丘層及東京層，其工程特性詳見表 3-2。

### 3.1.3 選擇 DOT 潛盾工法之原因

濱海副都市中心生命線共同管道穿越寬 100 m 之國道 357 號線，此區段選擇 DOT 潛盾工法之原因，綜合如以下四點：

1. 施工路線需穿越既有東雲共同溝、東電洞道(東京電力公司之地下輸配電電纜

管道)等重要地下管道，且於濱海高速鐵路正下方施工。使用 DOT 工法開挖共同管道，無效用斷面較單圓隧道小，且 DOT 隧道寬度較窄，施工影響區域較小與現有地下結構物交錯時較易處理。

2. 使用 DOT 工法符合施工深度淺、大斷面之設計條件，可以減少地下開挖面積。
3. 與單圓雙孔隧道相比，施工斷面較小，施工深度可減小，符合廢土處理設備及發進基地規模小之需求。
4. 使用 DOT 工法施工期短，可以減少總工期時間。

### 3.1.4 潛盾機介紹

東京都有明北地區供給管共同管道建設工程採用之 DOT 潛盾機，為三菱重工業株式會社(Mitsubishi Heavy Industries, MHI)製造之泥土壓平衡式潛盾機。潛盾機外徑為  $\Phi 9.36 \text{ m} \times 15.86 \text{ m}$ ，千斤頂共 46 支(上部 24 支各 300 tf，下部 22 支各 350 tf)，採用直徑為  $\Phi = 900 \text{ mm}$  之兩組螺運機排土。每環隧道由 13 個襯砌環片(10A + 1B + 1C + 1D)以短直螺栓組成。為控制環片脫出盾尾時尾隙閉合造成之沉陷量，潛盾機海鷗部上、下分別各設兩個同步背填灌漿孔，以填滿原地盤與環片間之間隙，控制沉陷量。

## 3.2 上海軌道交通八號線 DOT 潛盾隧道工程

本節介紹上海市軌道交通揚浦線(M8 線)DOT 潛盾隧道工程案例，以下分別介紹工程概述、地質概況、潛盾機介紹、及潛盾機滾轉實測分析。

### 3.2.1 工程概述

上海城市空間不斷開發，地面及地下空間都越來越小，依據線路選線和控制土建規模的要求，上海地鐵建設公司選擇使用開挖斷面較小之 DOT 潛盾工法。

上海軌道交通八號線 DOT 潛盾工法範圍：由開魯路站、嫩江路站、翔殷路站至黃興綠地站，分三段施工，案例 14 及 15 全長共 2,688 m。工程業主為上海地鐵建設有限公司，施工時間由 2003 年 4 月至 2004 年 10 月。開魯路站至嫩江路站 929 m，、嫩江路站到翔殷路站 893 m，本章主要介紹翔殷路站至黃興綠地站(如圖 3-4)，全長 866 m，隧道最大坡度為 2.8%，最小曲率半徑  $R = 495$  m，隧道覆土厚度 5.2~12.0 m。施工採用  $\Phi 6.52$  m  $\times$  11.12 m 斷面之 DOT 潛盾機，為中國引進的第一台 DOT 潛盾機，中國是世界上第二個引進 DOT 潛盾隧道工法的國家。

### 3.2.2 地質概況

由翔殷路站至黃興綠地站，地形尚屬平坦，地鐵隧道沿線遭遇較多地下管線，隧道兩側有較為密集之住宅。依據鑽探結果，DOT 潛盾隧道通過地層之剖面如圖 3-4，可分為五個層次，由上而下各層之土壤及厚度說明如下：

1. 第一層：為回填層，厚度約為 2 m。
2. 第二層：為褐黃色粉土質黏土，厚度約為 7m，土壤單位重為  $18.9 \text{ kN/m}^3$ 。
3. 第三層：為灰色黏土質粉土，厚度約為 3 m，土壤單位重為  $18.5 \text{ kN/m}^3$ 。
4. 第四層：為灰色砂質粉土，厚度約為 7m，土壤單位重為  $19.0 \text{ kN/m}^3$ 。
5. 第五層：為灰色粉土質黏土，厚度約為 6m，土壤單位重為  $17.1 \text{ kN/m}^3$ 。
6. 第六層：為灰色黏土，厚度約為 4m，土壤單位重為  $17.8 \text{ kN/m}^3$ 。
7. 第七層：為綠色粉土質黏土，厚度約為 4 m。

圖 3-4 顯示，本工程之 DOT 潛盾隧道施工位置在第三層至第五層內進行，各土層之工程特性詳見表 3-3。

### 3.2.3 潛盾機介紹

上海軌道交通八號線工程採用之 DOT 潛盾機為日本石川島重工業株式會社製造之泥土壓平衡式潛盾機。潛盾機外徑為  $\Phi 6.52$  m  $\times$  11.12 m，長度 12.745 m，

總共使用 32 支總推力為 68,632kN 之千斤頂，以兩組直徑為  $\Phi = 900 \text{ mm}$  之螺運機排土。每環隧道由 11 片襯砌環片( 8A + 1B + 1C + 1D )以短直螺栓組成。為控制尾隙閉合造成之地盤沉陷，DOT 潛盾機海鷗部上、下分別設置 2 個及 1 個背填灌漿孔，以填滿原地盤與環片間之盾間，控制沉陷量。

### 3.2.4 潛盾機滾轉實測分析

DOT 潛盾機掘進時造成滾轉之原因及滾轉修正方法已於第二章說明，在此對上海軌道交通八號線 DOT 潛盾隧道翔殷路站至黃興綠地站(以下簡稱此路段)之潛盾機滾轉角度實測結果及其控制操作方式加以介紹。

圖 3-5 為此路段潛盾機滾轉角度  $\theta$  實測數據，橫軸為環片編號，縱軸為滾轉角度，定義操作人員從隧道內向前看 DOT 潛盾機順時針滾轉為正，逆時針滾轉為負。圖中顯示第 110~131 環之滾轉實測，滾轉角度皆介於 0~0.3 度。操作人員使用修正千斤頂控制滾轉角度，使其 DOT 潛盾機之滾轉角度從 -0.29 度慢慢修正回 0 度。第 407~415 環，DOT 潛盾機滾轉角度皆維持在大約 0.33 度，操作人員增加左側螺運機之出土速率控制滾轉角度，使其自  $\theta=0.33^\circ$  慢慢修正至滾轉角度為 0 度。第 600~650 環之潛盾機滾轉角度實測資料，於第 624 環滾轉角度已到  $\theta=-0.58^\circ$ ，逼近設計可接受之最大極限滾轉量  $\theta= \pm 0.6^\circ$ ，操作人員立即運用修正千斤頂、右側螺運機增加出土速率、及右側加載環片進行滾轉修正，降低潛盾機滾轉角度，直至隧道中心軸線慢慢恢復至水平。

# 第四章

## 桃園機場聯外捷運 DOT 潛盾隧道台北三重段工程案例

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「高速鐵路桃園車站」等交通運輸樞紐，使國際航線與國內交通網路緊密結合。交通部高速鐵路工程局捷運工程處施作「桃園國際機場聯外捷運系統」。

如圖 4-1 所示，本捷運系統路線起自桃園國際機場第二航廈(A13 站)，往東經第一航廈(A12 站)，沿線經過桃園縣蘆竹鄉、臺北縣林口鄉、桃園縣龜山鄉、臺北縣新莊市、泰山鄉、三重市後(A2 站)，進入臺北市臺北車站特定專用區(A1 站)。自第二航站往南經高鐵桃園車站至中壢市環北站(A21 站)，未來預計延伸至中壢火車站，並採分階段完工通車辦理。

此捷運系統路線全長約 51.03 公里，其中地下段約 10.92 公里，高架段約 40.11 公里。沿途共設 22 座車站(含 A14a 站)，其包括 15 座高架車站、7 座地下車站，並設置青埔與蘆竹兩處維修機廠。工程建設總經費約 1,138.5 億元。

本章將介紹「桃園國際機場聯外捷運系統」台北三重段，CA450A 標 A1 站至 A2 站間 DOT 潛盾隧道施工案例。此標工程隧道穿越淡水河下方，為避免於河下設置高風險、施工困難之傳統聯絡通道，台灣首次引進 DOT 潛盾工法施作隧道，如圖 4-2 及 4-3。以下分別說明工程概述、地質概況、潛盾機介紹、及施工遭遇之困難及解決方案。

### 4.1 工程概述

桃園國際機場聯外捷運 CA450A 標台北三重段 DOT 潛盾隧道工程，如圖 4-4 所示，施工路線從忠孝橋三重側之工作井出發，穿越淡水河河床及兩側堤防進入台北市，至捷運松山線北門站(G14)北端止，隧道全長約為 1,584 m。工程使用斷面為  $\Phi 6.42 \text{ m} \times 11.62 \text{ m}$  之 DOT 潛盾機，隧道上方覆土厚 7.6~26.0 公尺，隧道

最大坡度為 4.9%，最小曲率半徑  $R = 280\text{ m}$ 。此標工程之業主為台北市政府捷運工程北區工程處，承包廠商為達欣工程公司與日商清水營造工程公司共同承攬，設計單位為台灣世曦工程顧問公司，DOT 潛盾機製造商為日本石川島重工業株式會社(Ishikawajima-Harima Heavy Industries,IHI)。施工時間自民國 98 年 12 月 8 日起，至論文完成時工程仍在進行中。

## 4.2 地質概況

本案例 DOT 潛盾隧道施工路線均位於台北盆地，盆地內地質均屬第四紀沉積物以泥或砂礫為主。由上而下地層為松山層、景美層及新莊層，潛盾隧道通過位置於松山層區，地下水位約位於地表下 3~5 m。達欣/清水營造工程公司(2008)報告，本工程 DOT 潛盾機通過之地層剖面如圖 4-5，依據鑽探結果，地質概況可分為以下三個層次：

1. 第一層次：為表土回填層 (SF)，約於地表下 0~3 m，N 值為 1~5。
2. 第二層次：為松山層之粉土質黏土層(CL)及粉土質砂層(SM)互層，約於地表下 3m~50 m，N 值為 2~35。
3. 第三層次：為景美礫石層(GP)，約於 GL : 50 m~54 m 以下，N 值大於 50。

圖 4-5 顯示，本工程之 DOT 潛盾隧道施工，主要於第二層次(松山層)之粉土質砂與粉土質黏土內進行。

## 4.3 潛盾機介紹

本工程採用日本石川島重工業株式會社製造之加泥土壓平衡式潛盾機，潛盾機外徑為  $\Phi 6.42\text{ m} \times 11.62\text{ m}$ 。潛盾機千斤頂(shield jack)共 32 支(上部 20 支各 2,000 kN，下部 12 支各 2,500 kN)。DOT 潛盾機左右各設置一組切刃盤，採用輪輻式切刃轉盤，如圖 4-6，一切刃盤內之輪輻軸為 6 支，其中兩支為輔助用。左右切刃盤上各設置兩組超挖刀(一組備用)，超挖刀可伸長量為 150 mm，可供曲線段施工

超挖及盾身滾轉修正時使用。DOT潛盾機之盾尾間隙為110 mm，為控制環片脫出盾殼時盾尾間隙閉合造成之沉陷量，於盾身雙圓重疊處設置同步背填灌漿孔，分別在上方海鷗部設置兩個(如圖4-7)，及下方海鷗部設置一個，潛盾機向前掘進，環片脫出盾殼時，同步背填灌漿將環片與地盤之間隙以灌漿液填滿，控制地盤沉陷量。每環隧道襯砌由11片環片(8A+1B+1C+1D)以短直螺栓組成，如圖4-8，環片外徑為 $\Phi$  6.20 m $\times$  11.40 m，環片厚度為300 mm，寬度為1,200 mm。

## 4.4 施工遭遇之困難及解決方案

DOT 潛盾隧道施工遭遇主要困難為潛盾機之滾轉問題，造成滾轉的原因、影響、及控制方法已於第二章文獻回顧中討論。本章對 CA450A 標工程 DOT 潛盾機滾轉角度進行探討。依據訪談現地工程師之結果，將潛盾機滾轉之控制方式於論文中說明。CA450A 標 DOT 潛盾隧道施工可能遭遇地層暗藏流木問題，針對可能發生之流木問題，介紹設計單位之處理對策。最後，本研究對於 CA450A 標 DOT 潛盾隧道之環片組裝遭遇之困難，及地盤沉陷處理對策簡單加以說明。

### 4.4.1 滾轉實測分析

潛盾機滾轉造成之原因及修正方法已於第二章說明，以下對台灣首次使用 DOT 潛盾隧道工法施工造成之滾轉量及其控制操作方式進行介紹。數據起始自 2009 年 12 月 14 日之第 1 環，截止於 2010 年 6 月 2 日施工的第 537 環。

本研究依據潛盾機掘進日報進行滾轉數據分析，潛盾機滾轉角度實測結果如圖 4-9，圖中橫軸為環片號數，縱軸為潛盾機滾轉角度，其中定義由操作人員從隧道內向前看順時針滾轉為正，逆時針滾轉為負，滾轉值超過 0.2 度即需要修正偏差，設計滾轉極限值為 0.6 度。DOT 潛盾機掘進至目前為止，已使用之滾轉控制方式包含潛盾機反向旋轉、環片灌漿、超挖刀修正，其中，較常使用之滾轉修正方式為前述兩項。反向旋轉是潛盾機滾轉時最常使用之修正方式，用於控制些

微滾轉量。此外，自環片內向外灌漿(如圖 4-10)對於施工上的技術困難度較低，且較容易控制，故採用率較高。圖 4-9 顯示，自第 86 環開始滾轉角度慢慢增大，於第 96 環產生-0.25 度滾轉。施工單位採用反向旋轉及環片灌漿方法修正滾轉角度。此外，第 271 環到 285 環潛盾機滾轉量皆大於 0.3 度，其中第 278 環為圖 4-9 發生之最大滾轉量 0.38 度，施工單位採用反向旋轉、環片灌漿及超挖刀超挖相互配合，將滾轉角度修正至 $\pm 0.1$  度以內。造成潛盾機滾轉之原因，乃是因為環片組裝精度欠佳或施工技術尚未純熟，而導致之滾轉，並非因潛盾機於曲線段掘進側方向超挖造成較大滾轉量。實際上圖中之最大滾轉角度為 0.38 度，明顯小於設計極限值 0.6 度。

#### 4.4.2 流木處理對策

日本及中國大陸 DOT 潛盾隧道 19 個完工案例尚未遭遇流木問題，但是於台灣單圓潛盾隧道遭遇流木問題頻繁(朱旭等, 2009)。依過去河床土層存在流木之狀況，研判 DOT 潛盾機在淡水河過河段可能遭遇流木問題。依據施工計劃書(達欣/清水建設, 2008)，針對 CA450A 標工程 DOT 潛盾機若遭遇流木之處理方式如下：

1. 上密集配置鋼製先行切刃齒或一般切齒(如圖 4-11)，以先行切刃齒將流木切成小段後取出。
2. 若無法以切刃盤切削排除流木，需以作業人員直接排除時，其步驟如圖 4-12 所示。
  - a. 首以灌漿地盤改良，穩定開挖面。
  - b. 以壓氣設備壓氣對抗開挖面地下水壓。
  - c. 將潛盾機盾簷(movable hood)伸出、防止開挖面上方土壤崩落。
  - d. 作業人員由潛盾機盾首人孔出來，直接將流木取出。

CA450A 標工程 DOT 潛盾機全斷面地盤改良設備，針對處理流木而設置的

特殊裝備如圖 4-13 所示。

1. 切刀盤增設流木切削用各式切齒。
2. 盾首增設地盤改良漿液注入管(潛盾機外周 120 處及土倉 44 處)，以備改良開挖面土壤。
3. 盾首裝設鑽頭(drill bit)，用鑽頭破碎流木。

依據實地訪談工程師，得知本案例施工遭遇流木頻繁，但皆為小尺寸流木，如圖 4-14 所示，使用潛盾機切刀盤即可順利切除，尚未遭遇需以作業人員自潛盾機人孔外出清除流木之狀況。潛盾隧道施工過程中僅遭遇流木堵塞螺運機，以人工清除後即可繼續向前掘進。

#### 4.4.3 環片組裝遭遇之困難

由於台灣首次引進 DOT 潛盾隧道工法，施工技術尚未達純熟，經由訪談工程師，本研究將組裝環片時遭遇之困難於此簡單說明如下。

1. DOT 潛盾隧道工法使用之環片間無橡膠質墊片，因此無法均勻傳遞環片間之受力，環片角落易應力集中，使環片受壓邊緣破碎崩落。
2. 隧道襯砌環片與環片間以短直螺栓組立，可能發生微小誤差，組立 10 片環片累積之誤差，使大海鷗及小海鷗環片相對位置產生錯位，造成一環最後組裝之第 11 片中間柱 D 環片因餘留空間不足，無法插入，必須將中間柱環片上下之材料磨損一些，使能將環片組裝完成。

#### 4.4.4 地盤沉陷處理對策

採用 DOT 潛盾隧道工法施工，除了需考量潛盾機滾轉之控制外，另外需考量地盤沉陷的控制方式。潛盾施工造成地盤沉陷之原因已於第二章介紹，在此對 CA450A 標設計時擬定之沉陷處理對策進行介紹，並說明實際施工時所選用之控制方式。設計單位建議之沉陷處理對策為如下五點：

1. 潛盾機開挖面應維持土壓平衡，使機體前方土壤保持在主動  $K_a$  至靜止  $K_0$  間之狀態，即靜止土壓+水壓+20kPa $\geq$ 土倉壓力 $\geq$ 主動土壓+水壓+ 20kPa。
2. 採用中折式潛盾機，以減少曲線段因潛盾機超挖造成之沉陷。
3. 盾尾間隙採同步背填灌漿，設定灌漿率為 130%、灌漿量為 4.4 m<sup>3</sup>/m、灌漿壓力為靜止土壓+0.2MPa，灌漿率或灌漿壓力達到設定值即停止灌漿。
4. 於超過允許值之沉陷處，可採二次灌漿以抑制沉陷量。
5. 為防止 DOT 潛盾隧道開挖造成鄰近建物不均勻沉陷，而導致建物傾斜，可採雙環塞低壓灌漿工法，以預灌或補灌之方式，保護臨近建物或隧道上方之建物。

CA450A 標施工至目前為止，沉陷控制方式除雙環塞低壓灌漿工法尚未使用外，其餘 4 項控制方式皆已於施工中使用。因雙環塞低壓灌漿工法之目的為控制建物沉陷及傾斜，至目前為止，隧道完工路段鄰近皆無建物，故尚未使用此方法控制沉陷。

DOT 潛盾隧道工法沉陷控制方式與單圓潛盾隧道大致相同，盾尾間隙閉合為造成沉陷量之主要原因。為控制環片脫出時盾尾間隙閉合造成之沉陷量，IHI 於盾尾設置三個同步灌漿孔(simultaneous grouting hole)，其中兩個位於海鷗部上方(如圖 4-7)，另一個灌漿孔位於海鷗部下方。

盾尾間隙閉合造成之沉陷量，除了於海鷗部同步背填灌漿外，可以機器或人工由環片內向外進行背填灌漿(如圖 4-10)。本案例開始掘進時，使用機器背填灌漿，灌漿率平均為 130%。潛盾機掘進至三重堤防下，灌漿量達增加至 150%。而為了控制潛盾機滾轉，掘進至淡水河後皆採用人工背填灌漿。雖然過去經驗顯示，以機器背填灌漿較為方便、效果也較好，但是為了便於控制潛盾機滾轉，DOT 潛盾機在淡水河下方施工，選擇使用人工方式，於環片脫出盾尾時背填灌漿。

## 4.5 風險成本評估

台北市捷運局(2008)指出，CA450A 標潛盾隧道因捷運隧道逃生安全需求，需於淡水河河床下方設置連絡通道，施工難度及風險極高。為確保工程進行之安全與品質，設計單位進行風險與成本評估，主要結果說明如下。

1. 設計單位參考過去施工經驗，潛盾隧道遭遇流木以盾首灌漿處理，單圓潛盾隧道工程費為 800 萬元。考量 DOT 潛盾機之處理困難度為單圓潛盾機兩倍以上，處理流木工程費以 2,000 萬元估算。
2. 鏡面破除若發生地表沉陷或局部滲水，常採用灌漿工法處理，造成成本損失，單圓隧道以破鏡一處 500 萬元計，DOT 以單圓隧道範圍之兩倍計算，成本損失為 1,000 萬元。
3. DOT 潛盾機滾轉角度過大造成環片破碎、成本損失，預估修復費用一次 200 萬元。
4. 若於淡水河床下方連絡通道意外塌陷，單圓雙孔隧道流入土砂破壞，設計單位估算修復成本為 15.0 億元，延誤工期大約 3 年，造成營運損失 14.2 億元，受隧道塌陷影響利息等成本損失 9.3 億元，意外事件造成總成本增加高達 38.5 億。

上述評估可得知，雖 DOT 潛盾隧道工法於遭遇流木處理、鏡面破除、及滾轉之風險成本皆較單圓潛盾隧道略高，但若單圓潛盾隧道於河中設置聯絡通道時隧道塌陷，可能增加風險成本高達 38.5 億。因此設計單位評估結果，採用 DOT 潛盾隧道工法施工可降低風險與成本。

# 第五章

## 以經驗方法評估 DOT 潛盾隧道施工引致之沉陷槽

DOT 潛盾隧道工法於 1987 年日本取得專利後，至今共完成 19 個案例。其中，包括日本 13 個案例、大陸 6 個案例。台灣於 2009 年首次引進 DOT 工法於桃園機場聯外捷運 CA450A 標台北三重段，2010 年 7 月本論文完成時，工程仍在進行中。

本研究嘗試將所蒐集之 DOT 潛盾隧道沉陷資料，以二種經驗方法模擬沉陷槽。第一種經驗方法，根據 Fang et al. (1994)建議之疊加法(superposition method)，將 DOT 潛盾隧道視為兩平行單圓潛盾隧道獨立引致之沉陷槽疊加，探討其可行性。第二種方法，依據張統立(2007)之建議以等面積單一圓隧道模擬 DOT 潛盾隧道施工造成之沉陷。

至目前為止 DOT 潛盾隧道工程案例全世界僅有 20 個，可以蒐集得到之沉陷槽斷面資料極少，本研究僅能以蒐集到的六筆資料進行初步探討。本章蒐集 DOT 潛盾隧道工程案例，包括日本東京都有明北地區供給管共同管道建設工程、上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站工程、上海軌道交通六號線第九標工程、及桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道工程之地表沉陷資料。

### 5.1 以疊加法評估 DOT 潛盾隧道沉陷槽

Fang et al. (1994)建議以 Peck-Fujita 經驗方法，分別估算單一隧道施工所引致之地表沉陷曲線範圍，如圖 5-1，再以疊加法(Superposition method) 求出平行雙隧道潛盾施工引致之地表總沉陷量。

本方法假設 DOT 潛盾隧道施工引致之地表沉陷，可以兩個大小尺寸相等、不相互影響之單圓潛盾隧道，單獨施工引致之地表沉陷槽相互疊加。依據 DOT

潛盾隧道現地監測資料，可以求出單位長度之地表沉陷槽體積  $V_{s, DOT}$ ，如圖 5-2，圖中曲線為隧道施工導致之沉陷槽。忽略兩單圓潛盾隧道之互制作用，施工造成之地盤漏失(ground loss)由左右隧道各負擔 50%，可估出單圓潛盾隧道單位長度之沉陷槽體積，即為  $0.5 \times V_{s, DOT}$ 。所謂地盤漏失率即為單位長度沉陷槽體積  $V_s$  與單位長度隧道體積  $V_t$  之比值。Peck(1969)提出，單圓潛盾隧道造成之地表沉陷曲線可以下列常態分布曲線描述：

$$S(y) = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.1)$$

上式最大地表沉陷量  $S_{\max}$  與單位長度沉陷槽體積  $V_s$  有下列關係：

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max} \approx 2.5 \cdot i \cdot S_{\max} \quad (2.2)$$

左右單獨隧道之沉陷槽寬度參數  $i$  可以依據圖 2-22, Peck(1969)提出之  $Z/2R$  與  $i/R$  之關係求出。將單隧道造成之沉陷槽體積  $0.5 \times V_{s, DOT}$  與沉陷槽寬度參數  $i$  代入(2.2)式，即估出單圓潛盾施工造成之最大沉陷量  $S_{\max}$ 。將所求得之  $i$  及  $S_{\max}$ ，代入(2.1)式即可求出單圓隧道之沉陷槽曲線，如圖 5-3 所示。

### 5.1.1 實際案例疊加法沉陷評估

以上海軌道交通六號線第九標工程第 100 環之地表沉陷槽為例，如圖 5-4，以現地監測之測點沉陷量可求出各測點間之沉陷槽體積，將各塊體積加總即為單位長度沉陷槽體積  $V_{s, DOT} = 0.576 \text{ m}^3/\text{m}$ ，單圓潛盾隧道單位長度之沉陷槽體積為  $0.5 \times V_{s, DOT} = 0.288 \text{ m}^3/\text{m}$ 。此標工程之隧道中心點到地表之深度  $Z = 14.36 \text{ m}$ ，潛盾機直徑  $2R = 6.52 \text{ m}$ ，亦即  $Z/2R = 2.20$ ，對照圖 2-22，得  $i/R = 1.8$ (取軟黏土至硬黏土範圍內之平均值)，即可求出沉陷槽寬度參數  $i = 5.87 \text{ m}$ 。利用所求出之單隧道單位長度沉陷體積  $0.288 \text{ m}^3/\text{m}$  與反曲點  $i = 5.87 \text{ m}$  代入式(2.2)，可求出  $S_{\max} = 0.0196 \text{ m}$ 。將求得之  $i$  及  $S_{\max}$  值代入(2.1)式中，即可求出單一隧道造成之沉陷槽，再以疊加方式可評估 DOT 隧道造成之地表沉陷槽，如圖 5-4 所示。目前 DOT 潛

盾隧道施工案例少，不易於施工前得知單位長度之沉陷槽體積  $V_{s, DOT}$ ，未來可依據現地施工資料之累積，以 Peck 提出之地盤漏失率  $G_l$  公式求取沉陷槽單位體積  $V_s$ 。

$$G_l = V_s/V_t = A_s/A_t \quad (5.1)$$

其中， $G_l$  為單位長度內地表沉陷槽體積與隧道開挖體積比值

$V_s$  為單位長度沉陷槽體積 ( $V_s = A_s \cdot l$ )

$V_t$  為單位長度內隧道開挖體積 ( $V_t = A_t \cdot l$ )

## 5.2 以等面積單圓隧道評估 DOT 潛盾隧道沉陷槽

張統立(2007)建議，將 DOT 潛盾隧道視為一等面積(equal area)單圓潛盾隧道，以估算施工引致之地表沉陷槽。如圖 5-5，圖中曲線為 DOT 隧道施工導致之單位長度沉陷槽體積  $V_{s, DOT}$ ，本研究假設等面積單圓潛盾隧道造成之單位長度沉陷槽體積亦為  $V_{s, DOT}$ 。

根據圖 2-22，Peck(1969)提出之  $Z/2R$  與  $i/R$  之關係，可以求出等面積單圓隧道造成之沉陷槽寬度係數  $i$ 。依據等面積單圓隧道造成之單位長度沉陷槽體積  $V_{s, DOT}$ ，與沉陷槽寬度係數  $i$  代入(2.2)式，可推估出等面積單圓潛盾造成之最大地表沉陷  $S_{max}$ 。將求得之  $i$  及  $S_{max}$ ，代入(2.1)式，即可估算等面積單圓隧道造成之地表沉陷曲線。

### 5.2.1 實際案例等面積法沉陷評估

以上海軌道交通六號線第九標工程第 100 環之地表沉陷槽為例，以現地各測點沉陷量及測點距離，可算出測點間沉陷槽之體積，將各塊體積加總即為單位長度沉陷槽體積  $V_{s, DOT} = 0.576 \text{ m}^3/\text{m}$ ，假設等面積單圓潛盾隧道之單位長度沉陷槽體積亦為  $0.576 \text{ m}^3/\text{m}$ 。兩相交之單圓潛盾隧道面積計算如圖 5-6，一單圓直徑

$2R=6.52\text{ m}$ ，兩圓之寬度為  $11.12\text{ m}$ ，中心距為  $4.6\text{ m}$ 。

因 DOT 潛盾隧道左右對稱，故僅計算右側面積，再將結果乘以 2 即可求出 DOT 隧道面積，計算步驟如下：

Step 1：左側單圓面積  $\text{Area}=\pi R^2=3.14\times(3.26)^2=33.37\text{ m}^2$ 。

Step 2：將圖中之 QAB 三角形分成上下兩塊，以上半三角形 QAC 為例，已知斜邊 QA 為半徑  $R=3.26\text{ m}$ ，底 QC 為中心距一半  $0.5\times 4.6=2.3\text{ m}$ ，由三角關係  $\cos\theta=2.3/3.26$  可求出  $\theta=45.1^\circ$ ，接著求三角形 QAC 之高 AC 為  $2.3\times\tan 45.1^\circ=2.31\text{ m}$ 。三角形 QAB 之面積為  $2.31\times 2.3=5.31\text{ m}^2$ 。

Step 3：扇形面積為  $(2\theta/360^\circ)\times$ 總面積  $(33.37\text{ m}^2)=(2\times 45.1^\circ/360^\circ)\times 33.37=8.361\text{ m}^2$ 。

Step 4：扇形面積-三角形 QAB 面積= $1/2$  兩圓相交面積= $8.361-5.31=3.051\text{ m}^2$ ，兩圓相交面積= $3.051\times 2=6.10\text{ m}^2$ 。

Step 5：兩單圓面積減相交面積，即為 DOT 隧道面積。 $33.37\times 2-6.10=60.64$ 。

Step 6：等面積圓  $\text{Area}=\pi(\text{Req})^2$ ， $\text{Req}=(60.64/\pi)^{0.5}=4.39\text{ m}$ 。

此標工程之隧道中心點到地表之深度  $Z=14.36\text{ m}$ ，等面積單圓潛盾機直徑  $2\text{Req}=8.78\text{ m}$  故  $Z/2\text{Req}=1.635$ ，對照圖 2-22，開挖土壤為黏土即可求出  $i/\text{Req}=1.53$  (取軟黏土至硬黏土範圍內之平均值)，反曲點  $i=6.72\text{ m}$ 。利用等面積單圓單位長度沉陷體積  $V_s=0.576\text{ m}^3/\text{m}$  與反曲點  $i=6.72\text{ m}$  代入式(2.2)，可求出地表最大沉陷量  $S_{\max}=0.033\text{ m}$ 。將求得之  $i=6.72\text{ m}$  及  $S_{\max}=33\text{ mm}$  代入(2.1)式中，即可求出以等面積單圓潛盾隧道造成之沉陷槽，如圖 5-4 所示。

### 5.3 模擬結果

為探討沉陷量以疊加法及等面積法估計 DOT 施工造成沉陷槽之實用性，本研究將現地監測之地表沉陷資料，與疊加法及等面積法評估結果，繪入同一圖中以便相互比較，其結果如圖 5-7 至圖 5-11。

圖 5-7 為日本東京都有明北地區共同溝建設工程案例，將現地觀測所得之沉

陷資料繪於圖中，並與兩種經驗方法評估沉陷槽比較。此案例之 DOT 隧道直徑達 9.36m，隧道深度達 20.68m，但是日本承包商經驗較為豐富，此案例之地盤漏失率僅 0.23%，在本研究所收集之 6 個 DOT 沉陷斷面中，此斷面之地盤漏失最小。圖 5-7 顯示，將 DOT 潛盾隧道視為兩單圓潛盾隧道獨立引致之沉陷槽疊加，所得沉陷槽之  $S_{max}$  較實測值大。以等面積法評估沉陷槽，求得最大沉陷量與實測值相同，但沉陷槽位置不同。

圖 5-8 為上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站 DOT 潛盾隧道第 80 環之沉陷實測分析及兩種經驗方法模擬結果。圖中顯示，疊加法及等面積法評估結果，最大沉陷量皆較實測值高約 7 mm，但沉陷槽寬度大致相同。此斷面之地盤漏失率為 0.71%。

圖 5-9 為上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站 DOT 潛盾隧道第 460 環測得之沉陷槽，此斷面之地盤漏失率為 0.67%。圖中實測沉陷槽趨勢近似 W 形狀，與一般常態分佈曲線不同，與以 2 種經驗方法分析結果皆不相同，此特殊沉陷槽形狀於六個斷面中僅出現一次。

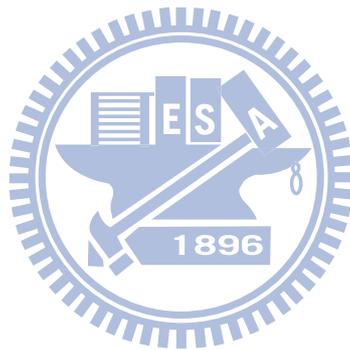
圖 5-10 為上海軌道交通六號線第九標第 130 環測得之地表沉陷槽，此斷面實測得之地盤漏失率為 0.8%。圖中顯示，疊加法及等面積法評估結果，最大沉陷量皆較實測值略高，但實測沉陷槽與 2 種方法評估之沉陷槽大致符合良好。

圖 5-11 為桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道工程，測線 SSI-3(圖) 測得之地表沉陷槽。圖中現地監測結果，地表沉陷並不對稱，最大沉陷量偏往左側之下行線。以等面積法及疊加法推估之結果，評估最大沉陷量約為實測值的 1.48 倍、沉陷槽寬度較實測寬度為窄，預測結果占實測結果符合性欠佳。此斷面之地盤漏失率為 1.19%。

上述各案例現地監測結果顯示，以疊加法及等面積法評估沉陷槽，最大沉陷量大於實測值，但沉陷槽與實測值趨勢大致吻合，此問題有待收集更多現地資料，並進行進一步的數值分析探討。

於本研究收集的 6 個沉陷斷面，DOT 施工造成地盤漏失率最高為 1.19%，最低為 0.23%，平均地盤漏失為 0.76%。張皓禎(2007)指出，以單圓 EPB 潛盾機在凝聚性土壤內施工，造成之地盤漏失範圍為 0.12%~7.48%，其上限值 7.48%，顯

然大於 DOT 造成之最大地盤漏失 1.19%。



# 第六章

## 單圓雙孔與 DOT 潛盾隧道工期與成本比較

土木工程建設主要考量項目不外乎工期、成本、品質、安全四大項，本章將介紹桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道之工期與成本，並與傳統單圓雙孔潛盾隧道施工之工期與成本比較。

### 6.1 工期比較

單圓雙孔潛盾隧道與 DOT 潛盾隧道工法在設備、風險考量、施工技術上差異甚大，總工期的長短亦不同。為避免兩條隧道發進施工相互干擾，單圓潛盾隧道第二條隧道初始掘進，須距離第一條隧道初始掘進後大約 50 m 才可開始施工，而 DOT 潛盾隧道卻是同時掘進上下行線。於下一小節，本研究依據蒐集到兩種工法之工期資料，進行分析比對。

#### 6.1.1 單圓雙孔潛盾隧道工期評估

單圓潛盾隧道作業工班，國內多採 2 班制之方式日夜施工。廖銘洋(2010)統計，國內潛盾隧道日曆天平均一天可掘進大約 7 m。依隧道初始或正式掘進、隧道曲率半徑大小、隧道傾斜坡度、隧道直徑與深度、及遭遇地質狀況不同，造成之掘進速度快慢亦不同，本論文僅以黏土及砂土地層之施工案例進行分析。如表 6.1，本節將依據所蒐集到之掘進潛盾隧道工期(日曆天)進行平均統整，收集案例包括台北捷運中和線 CC275 標、CC276 標、CC277 標、南港線 CN257 標、蘆洲線 CL700A 標、土城線 CD551 標及高雄捷運橘線 CO3 標之單圓潛盾隧道工期。捷運潛盾隧道初期掘進段，平均一天推進大約 3.7 m，正式掘進段施工速率平均約為 7.3 m/day，總掘進工率為 6.65 m/day，但分析資料僅 9 筆，可靠性較低。

CA450A 標潛盾隧道工程之初期掘進段即遭遇 4.9%的向下掘進陡坡，若採用單圓雙孔潛盾施工，設計單位建議初始掘進直線段之施工速率為 2.5 m/day。CA450A 標之正式掘進包含直線段及 r=280m 之曲線段施工，設計單位建議正式掘進之施工速率為 6.5 m/day。

## 6.1.2 DOT 潛盾隧道工期評估

台灣首次採用 DOT 潛盾隧道工法，有關工期資料，本研究引用台北市政府捷運工程局(2008)，於桃園機場聯外捷運 CA450A 標，設計時評估之工期資料進行比較。日本潛盾隧道技術協會(2004)對不同直徑之 DOT 潛盾隧道直線段掘進施工速率進行介紹，如表 6-2，表中初期掘進段之施工速率大約是正式掘進直線段工率的一半。日本隧道協會(2004)建議，DOT 潛盾隧道於曲線段施工之工率較慢，曲線段掘進工率可依直線段工率加以修正推算，其估算方式如式(6.1)：

$$L_c = \alpha \times L_s \quad (6.1)$$

其中  $L_c$ : 曲線段之掘進施工速率(m/day)，

$L_s$ : 直線段之掘進施工速率(m/day)

$\alpha$ : 修正係數 (如表 6-3)

表 6.3 所示之曲率半徑 r 與修正係數  $\alpha$  之關係，可以畫為一圖，如圖 6-1。圖中日本隧道協會建議之  $\alpha$  與 r 呈階梯函數(step function)關係，在各階之間  $\alpha$  值呈現劇烈變化。本研究建議當曲率半徑 r 介於 60m 至 300m 之間，可採用圖 6-1 所示之連續曲線，決定不同曲率半徑下之修正係數  $\alpha$ 。

依據日本隧道協會建議的表 6.2 及表 6.3，本研究建議可以圖 6.2 來估算不同隧道直徑 2R 的 DOT 潛盾機，於不同曲率半徑 r 狀況下的施工速率。

桃園機場聯外捷運 CA450A 標之 DOT 潛盾隧道施工，設計單位依據隧道直徑、隧道曲率半徑、坡度、及每月工作日數等因素納入考量，求得初始掘進段及正式掘進段之施工速率。

桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道直徑  $2R=6.6\text{ m}$ ，由圖 6.2 求得隧道直線段施工速率  $L_s=6.0\text{ m/day}$ 。因 CA450A 標最小曲率半徑為  $280\text{ m}$ ，由圖 6-1 可得曲線段掘進修正係數  $\alpha$  為  $0.8$ ，將所求得之直線段施工速率  $L_s=6\text{ m/day}$  與曲線段掘進修正係數  $\alpha=0.8$  代入(6.1)式，得到曲線段施工速率  $L_c$  為  $4.8\text{ m/day}$ ，再考量工作日一個月  $25$  天，則施工速率為  $4\text{ m/day}$  ( $4.8 \times 25/30 = 4\text{ m/day}$ )。但因潛盾隧道施工後半段沒有曲率半徑  $R=280$ ，設計單位總考量結果，正式掘進施工速率  $4.3\text{ m/day}$ 。

CA450A 標隧道半徑  $R=6.6\text{ m}$ ，由圖 6-2 可得初期掘進之施工速率為  $3\text{ m/day}$ ，考量出發段即遇到  $4.9\%$  之向下陡坡，將施工速率乘上修正係數  $0.8$ ，可得初期掘進施工速率為  $2.4\text{ m/day}$  ( $3 \times 0.8 = 2.4\text{ m/day}$ )，最後納入工作日考量，即可得設計階段之初期掘進施工速率  $2\text{ m/day}$  ( $2.5 \times 25/30 = 2\text{ m/day}$ )。

表 6-4 為 CA450A 標 DOT 潛盾隧道台北三重段之出發段、正式掘進段、及到達段之施工速率，表中將 DOT 潛盾隧道施工速率之預估值、實際值，與單圓雙孔潛盾施工速率預估值進行比較，表中隧道全長為  $1,580\text{ m}$ ，以 DOT 工法施工預估需施工  $400$  天，以傳統單圓雙孔隧道施工預估需要  $323$  天，由於 DOT 工法施技術較為複雜，例如環片組立較為困難，因此施工工期較傳統單圓雙孔隧道為長。於表 6-4，在已完成之 DOT 隧道中， $60\text{ m}$  長出發段之實測施工速率為  $2.5\text{ m/day}$ ，略高於設計工率  $2.0\text{ m/day}$ 。在  $584\text{ m}$  長已完工之正式掘進段隧道之施工速率為  $3.9\text{ m/day}$ ，略低於設計之施工速率  $4.3\text{ m/day}$ 。本研究將表 6-4 之資料繪製於圖 6-3 中，圖 6-3 顯示，於 2010 年 7 月本論文完成時( $t=177\text{ day}$ )，DOT 潛盾隧道已完工之隧道長度  $L=644\text{ m}$  略低於 DOT 潛盾隧道  $t=177$  天之預估長度  $L=692\text{ m}$ 。

## 6.2 工程費比較

單圓雙孔與 DOT 潛盾隧道之潛盾機、附屬設備、環片型式及人力成本等皆不同，所需編列工程費的金額也不同。本研究引用台灣世曦顧問公司評估分析之工程費，對兩種隧道工法施工之進尺費及總工程費進行比較。

### 6.2.1 潛盾隧道段進尺費比較

因台灣尚無 DOT 潛盾工法估價經驗，台灣世曦顧問公司依據具有 DOT 施工經驗之日本五家營造廠，提供單圓雙孔及 DOT 潛盾工法之進尺費進行評估，求得平均進尺費，如表 6-5。依據清水、西松、鹿島、大豐及大林組五家施工廠商報價評估，單圓單孔潛盾隧道段之平均進尺費為 29.28 萬元/公尺，單圓雙孔潛盾隧道平均進尺費為 58.56 萬元/公尺。表 6-5 亦列出五家承包商所列 DOT 潛盾隧道段之各項目費用，五家承包商之平均進尺費為 84.93 萬元/公尺。由表 6-5 可知，DOT 潛盾隧道工法之進尺費大約為單圓雙孔潛盾隧道工法進尺費的 1.45 倍，建造 DOT 潛盾隧道單位長度之工程費比建造傳統單圓雙孔隧道單位長度工程費高出大約 45%。台北市捷運局(2008)的資料顯示，一台 DOT 潛盾機之平均價格高達為 3.07 億元，大約佔隧道段工程費 13.47 億元的 23%，DOT 隧道襯砌環片平均費用為 7.08 億元，佔隧道段工程費的 53%。昂貴的 DOT 潛盾機及複雜的雙圓型襯砌環片製造及組立，乃是 DOT 潛盾隧道進尺費較高之主要原因。

台北市捷運局(2008)指出，依日本經驗，DOT 工程費約為單圓雙孔隧道工程費用之 1.3 倍。CA450A 標因屬國內首次採用，經單價詳細分析，在施工勞務費以日本人操作、環片相關配件進口及環片模組不考慮折舊等考量條件下，再參考日本製造商之估價，DOT 施工費預算達 84.76 萬/m，約為單圓雙孔隧道不含聯絡通道費用時之 1.5 倍。若單圓雙孔隧道包含聯絡通道施工費用 3.34 億元，則 DOT 隧道進尺費為傳統單圓雙孔隧道進尺費之 1.09 倍。

## 6.2.2 潛盾隧道段總工程費比較

台灣世曦顧問公司(2008)將單圓雙孔及 DOT 潛盾隧道之工程費項目，分成出土段、隧道段、通風豎井、鏡面地盤改良、連絡通道、橋墩托底、件物保護及穿越補償費八項進行評估比較，如表 6-6。

單圓雙孔潛盾隧道總工程費為 190,740 萬元。其中，隧道段工程費為 89,316 萬元/公尺，佔總工程費 47%。若採用傳統單圓雙孔隧道，CA450A 標隧道工程須於淡水河河床下設置三處聯絡通道，聯絡通道工程費用包括冰凍工法凍結費、連絡通道鋼環片、臨時安全門、開挖及結構體之工程費、及四道隔壁(Bulkhead)費用，聯絡通道工程費高達 33,379 萬元。

表 6.6 顯示，DOT 潛盾隧道總工程費為 195,535 萬元。其中，隧道段工程費為 134,654 萬元，佔總工程費 69%，約為單圓雙孔潛盾隧道段工程費 89,316 萬元的 1.5 倍。但是 DOT 潛盾隧道可免除在淡水河床下方設置三處聯絡通道之費用，因此可省下 33,379 萬元。由單圓雙孔及 DOT 潛盾隧道工程總費比較，兩種工法總工程費只差大約 2.5%。

# 第七章

## 結論與建議

本論文依據國內外潛盾隧道施工案例，探討 DOT 潛盾機施工時遭遇之滾轉問題與控制方法、DOT 潛盾施工造成之地表沉陷槽、及 DOT 與單圓雙孔潛盾施工工期與成本比較，獲得以下各項結論與建議。

### 7.1 結論

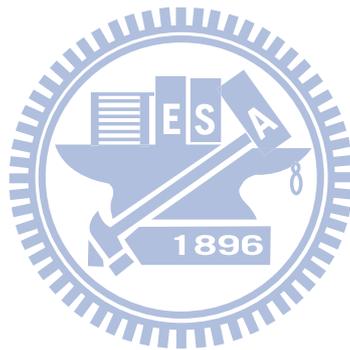
1. 依據日本隧道協會建議，DOT 曲線段曲率半徑  $r$  與工率修正係數  $\alpha$  有階梯函數關係，但是在各階之介面  $\alpha$  值呈現劇烈變化。本研究建議當曲率半徑  $r$  介於 60m 至 300m 之間，可採用平滑連續曲線，決定不同曲率半徑下之施工速率修正係數  $\alpha$ 。
2. 依據桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道施工之滾轉實測數據顯示，盾身最大滾轉角度為 0.38 度，小於滾轉量的設計極限值 0.6 度，但施工單位仍須依實際狀況修正潛盾機滾轉角度。控制滾轉角度的方法包含採用修正千斤頂、超挖刀超挖、單側加載環片、盾撬頂出、控制螺運機出土量、自環片內向外灌漿、及切刃盤反向旋轉七種方法。CA450A 標使用之滾轉修正方法僅為切刃盤反向旋轉、環片灌漿、及超挖刀修正，其中又以切刃盤反向旋轉最常被使用於微小角度滾轉之修正。
3. 本研究以疊加法及等面積法兩種方法，評估 DOT 潛盾施工造成之沉陷槽。結果顯示，疊加法及等面積法求出之沉陷槽非常相近，評估沉陷槽與實測沉陷槽之趨勢大致吻合。
4. DOT 潛盾隧道沉陷實測數據顯示，最大沉陷量皆偏離 DOT 隧道中間點，6 個監測斷面最大沉陷量介於 12 mm~34 mm 之間，DOT 施工引致之地盤漏失

率範圍為 0.23%~1.19%之間，平均值為 0.76 %。張皓禎(2007)指出，單圓土壓平衡式潛盾機在凝聚性土壤內施工，造成之地盤漏失範圍 0.12%~7.48%，其上限值 7.48%，顯然大於採 DOT 施工造成之最大地盤漏失量 1.19%。

5. DOT 潛盾隧道出發段之評估施工速率為 2.0 m/day，而實測結果為 2.5m/day，較評估施工速率快 25%。DOT 正式掘進段之預估施工速率為 4.3 m/day，略高於實際施工速率 3.9 m/day。
6. DOT 潛盾隧道總工期預估 400 天，單圓雙孔潛盾隧道總工期預估 323 天，採用單圓雙孔隧道段設計之工期較採 DOT 施工短 77 天。
7. 依設計單位評估，DOT 潛盾隧道進尺費 84.93 萬元/公尺，單圓雙孔潛盾隧道進尺費 58.56 萬元/公尺。一台 DOT 潛盾機之平均價格高達為 3.07 億元，1,580 公尺長 DOT 隧道襯砌環片總費用為 7.08 億元，昂貴的潛盾機造價與複雜雙圓環片製造及組裝費用，為 DOT 潛盾隧道進尺費昂貴之主要原因。
8. DOT 隧道段施工費用比單圓雙孔隧道者高出 4.5 億元，但是 DOT 潛盾隧道可免除在淡水河床下方設置三處聯絡通道之費用 3.3 億元。考量工程總費，DOT 潛盾隧道總工程費為 19.6 億元，比單圓雙孔潛盾隧道總工程費 19.1 億元，略貴 0.5 億元，兩種工法總工程費僅差大約 2.5%。
9. DOT 潛盾隧道工法於遭遇流木處理、鏡面破除、及滾轉之風險成本皆較單圓潛盾隧道略高，但若單圓潛盾隧道於河中設置聯絡通道時隧道塌陷，可能增加風險成本高達 38.5 億。因此採用 DOT 潛盾隧道工法施工可降低風險與成本。

## 7.2 建議

1. 探討潛盾隧道施工造成沉陷之方法包括：理論解分析、數值模擬、經驗方法、及離心機試驗法等，本論文僅採用經驗方法評估沉陷槽，建議未來可以採數值模擬等研究方法來評估 DOT 造成之地表沉陷。
2. 本研究僅蒐集到 6 個 DOT 潛盾隧道施工造成之沉陷槽數據，資料較少，建議未來研究可蒐集更多資料比對，增加研究結果之可靠性。



# 參考文獻

1. 中華民國隧道協會 (2000), “隧道工程用語詞彙”, 中華民國隧道協會系列叢書 3。
2. 中華民國隧道協會研究發展委員會 (2004), “軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊”。
3. 台北市政府捷運工程局 (2008), “機場線雙圓潛盾隧道規劃設計”, 捷運工程叢書 30。
4. 台北市政府捷運工程局 (2009), “機場線雙圓潛盾機與環片製作實務”, 捷運叢書 36。
5. 台灣世曦工程顧問有限公司 (2008), “台灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CA450A 標土木工程潛盾機設計及製造計畫書”。
6. 台灣世曦工程顧問有限公司 (2009), “台灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 DA115A 標-補充地質調查報告”。
7. 吳沛軫 (2010), “機場捷運計畫三重至台北段雙圓潛盾(DOT)過河隧道及環快高架橋梁托底工法”, 中華民國隧道協會 99 年年會手冊。
8. 朱旭、段紹緯、黃南輝 (2009), “地下流木對台北捷運工程之影響” 土工技術叢書之八, 第 7 章。。
9. 朱旭、陳俊宏、林建華、姚賜麟 (2008), “簡論台北捷運雙圓型潛盾隧道之分析”, 土工技術, 第 118 期, 第 37-46 頁。
10. 朱洪高、鄭宜楓、陳昊(2006), “雙圓盾構隧道土體地表沉降特性”, 建築科學與工程學報, 第 23 卷, 第 2 期, 第 62-67 頁。
11. 宋博(2004), “地下隧道雙圓盾構施工技術研究”, 建築施工, 第 26 卷, 第 2 期, 第 150-152 頁。
12. 宏鼎工程股份有限公司 (2007), “台灣桃園國際機場聯外捷運系統 CA450A

標三重站(A2)尾軌(不含)至台北站(A1)間路線段土木工程補充地質鑽探試驗工作報告”。

13. 李魁士、曾逸舟、陳福勝(2003)，“潛盾隧道工法常見問答集-3 潛盾篇”，中華技術電子書，第 60 期。
14. 周文波、顧春華 (2004)，“雙圓盾構施工技術”，現代隧道技術，第 4 期。
15. 易永輝、林建華(2008)，“雙孔潛盾隧道(DOT)首次應用於捷運隧道之施工規劃”，捷運技術半年刊，第 38 期，第 196-213 頁。
16. 林萍、沈健 (2005)，“雙圓隧道的經濟技術分析”，上海隧道，第二期，第 12-14 頁。
17. 翁承顯、張慶賀、朱繼文、陳勇(2006)，“軟土地區雙圓盾構施工引起的地降分析”，地下空間與工程學報，第 2 卷，第 1 期，第 124-127 頁。
18. 張明海(2009)，“雙圓盾構掘進中的地面沉降控制技術”，中國市政工程，第 5 期，第 54-55 頁。
19. 張海、沈秀芳(2001)，“多圓形盾構工法與地鐵工程建設”，地下工程與隧道，第 4 期，第 2-5 頁。
20. 張統立 (2007)，“多圓盾構施工擾動土體位移場特性及其控制技術研究”，碩士論文，同濟大學。
21. 張統立、張慶賀、胡向東、朱繼文(2005)，“雙圓盾構隧道施工土壤擾動特性及實測分析”，岩石力學與工程學報，第 24 卷，第 2 期，第 5950-5955 頁。
22. 張皓禎 (2007)，“以經驗方法評估潛盾隧道施工引致之地表沉陷”，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所。
23. 張榮仁、陳俊宏(2007)，“引進雙圓潛盾工法-開創捷運新里程碑”，捷運技術半年刊，第 36 期，第 21-24 頁。
24. 張矚 (2004)，“雙圓盾構施工中轉角成因及修正措施”，上海隧道，第 3 期，第 8.27-8.30 頁。
25. 陳宇、朱繼文 (2010)，“雙圓盾構隧道的流固耦合分析”，地下空間及工程

- 學報，第 6 卷，第 1 期，第 21-27 頁。
26. 陳秋宗, (1998). “台北市捷運隧道施工對地盤沉陷之影響” 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
  27. 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。
  28. 陳福勝、李魁士、邱志榮(2005), “潛盾隧道工法常見問答集-7 潛盾隧道施工篇”, 中華技術季刊, 第 66 期。
  29. 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。
  30. 達欣/清水營造股份有限公司 (2009), “台灣桃園國際機場聯外捷運系統建築設計 CA450A 標土建工程潛盾隧道掘進施工計劃書”。
  31. シールド工法技術協会(2007), “DOT 工法技術資料”, 2007 年 6 月。
  32. シールド工法入門編集委員會 (1992), “シールド工法入門”, 土質工學會。
  33. 中嶋大、三木孝信(2004) “DOT シールド機の海外工事への 1 号機適用”, 石川島播磨技報, Vol.44, No.1, 第 1-6 頁。
  34. 石原俊造、原田知成、速水正樹 (2003), “DOT シールドの姿勢制御と近接施工”, トンネルと地下, 第 34 卷, 第 7 號, 第 35-43 頁。
  35. 尾田俊雄、米井勇雄(1993), “超大断面 DOT の施工計畫”, トンネルと地下, 第 24 卷, 第 4 期, 第 39-46 頁。
  36. 榊原勝則、渡邊祐一 (2001), “地下鐵を DOT シールド施工”, トンネルと地下, 第 32 卷, 第 11 號, 第 25-33 頁。
  37. Attewell, P. B. (1981). “Engineering Construct, Site Investigation and Surface Movements in Tunneling Works, Soft-Ground Tunneling-Failures and Displacement.” A. A. Balkema, pp. 5-12.
  38. Chow, B. (2006). “Double-O-tube shield tunneling technology in the Shanghai Rail Transit Project.” Tunnelling and Underground Space Technology 21, pp.

594-601.

39. Clough, G. W. and Schmidt, B. (1981). "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay." A State-of-the-Art Paper, International Symposium on Soft Clays, Bangkok.
40. Cording, E. J. and Hansmire, W. H. (1975). "Displacement around Soft Ground Tunnels." Proceeding, 6th Pan American Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering, Buenos Aires, pp. 571-633.
41. Fang, Y. S., Lin, J. S. and Su, C. S. (1994). "An Estimate of Ground Settlement due to Shield Tunneling by the Peck-Fujita Method." Can. Geotech. J. Vol. 31, No.3, pp. 431-443.
42. Fujita, K. (1982). "Prediction of Settlements by Shield Tunnelling." Proc., Int. Conf. of Soil Mech., Mexico, Vol.1, pp. 239~246.
43. Hanya, T. (1977). "Ground Movements Due to Construction of Shields-Driven Tunnel." Proceedings of the Ninth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, pp. 759-789.
44. Hoyaux, B. and Ladanyi, B. (1970). "Gravitational Stress Field Around a Tunnel in Soft Ground," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, pp.54-61.
45. Koyama, Y. (2003). "Present status and technology of shield tunneling method in Japan." Tunnelling and Underground Space Technology 18, pp 145-159.
46. Mori, A. and Akagi, H. (1985). "Effects of Backfilling at Shield Work in Soft Cohesive Soil." Proceeding, 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 3, pp. 1667-1670.
47. Peck, R.B. ( 1969 ) , "Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground," ( State-of-the-Art Report ) Proc., 7th Int. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp. 225-290.
48. Schmidt, B. (1974). "Prediction of Settlements Due to Tunnelling in Soil: Three

Case Histories.” Proc., 2nd Rapid Excavation Tunnelling Conf., San Francisco, Vol. 2, pp. 1179-1199.

49. Shen, S. L., Horpibulsuk, S., Liao, S. M. and Peng, F. L. (2009). “Analysis of the behavior of DOT tunnel lining caused by rolling correction operation.” Tunnelling and Underground Space Technology 24, pp 84-90.
50. Som,N. and Narayan,V.(1985).”Ground Settlement Shield Tunnelling thro-ugh Soft Clay.”11th ICSMFE,San Francisco, pp.2133~2136.

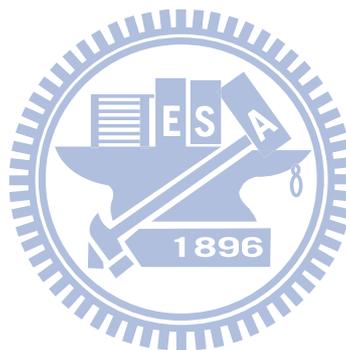
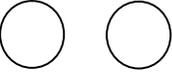
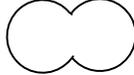


表 2-1 潛盾隧道工法比較表(摘自日本隧道協會, 2004)

No	Item	Single-tube Double-track Tunnel (For R = 11.62 m)	Single-tube Single-track Tunnel (For R = 6.42 m)	DOT shield tunnel (For 6.42 m*11.62 m)
	Shape of Tunnel			
1	Area of Excavation	Upper and lower space unused Area = 105.99 m <sup>2</sup>	Medium Area = 64.7 m <sup>2</sup>	Least unused area Area = 61.617m <sup>2</sup>
				
2	Width of Excavation	For R = 11.62 m Width=11.62 m	For R=6.42 m and clearnce=2R Width=23.24 m Space between tunnels disturbed but unused	For 6.42 m*11.62 m Width=11.62 m
3	Depth of Shaft	Deep shaft needed for large circular excavation	Work Shaft shallower (2.60 m shallower)	Work Shaft shallower (2.60 m shallower)
				
4	Cost			

Evaluation :  : Fair ;  
 : Better ;  
 : Best

表 2-2 單圓與 DOT 潛盾隧道環片比較表

Segment	Single-Tube Single-track Tunnel	DOT Shield Tunnel
Type and Number	A*several B*2( or*1 ) K*1	A*8( or*11 ) B*1 C*1 D*1
Joint	Arc shaped bolts ( Diameter is generally between 16 ~ 36 mm)	Short bolts and Cast-iron Bolt Hole Embedded Component
Thickness (mm)	250	300
Width (m)	1.0	1.2

表 2-3 沉陷槽寬度 ( $i/R$ ) 與隧道中心軸深度 ( $Z/2R$ ) 關係式之  $k$ 、 $n$  值  
(After Attewell, 1981)

Soil classification	Soil volume loss ratio, $V_s/V_t$	$k$	$n$	remark
Clay	1.3%~2.5%	1	1	
Sand	0.15%~13%	0.82	0.36	above groundwater
		0.74	0.90	below groundwater
		0.63	0.97	ignore groundwater

$V_s$  : surface settlement troughs volume

$V_t$  : tunnel excavated volume

表 3-1 DOT 潛盾隧道工法案例表

案例編號	工程名稱	施工用途	地質狀況	潛盾機外徑 (m)	隧道總長 (m)	潛盾機上方覆土厚 (m)	最小曲率半徑 $R_{\min}$ (m)	最大坡度 (%)	潛盾機製造商	施工期間	參考文獻
0	DOT 潛盾証實實驗工程	証實實驗	N.A.	$\Phi 2.5 \times 4.19$	79	N.A.	N.A.	N.A.	IHI	1989~1994	台北市政府 捷運局 , 2008
1	廣島市國道 54 號新交通體系鯉城潛盾工程	地下鐵	黏土、砂	$\Phi 6.09 \times 10.69$	850	5.0~8.3	135	1.8	IHI	1989~1994	
2	千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程	下水道	細砂、黏土、腐植土	$\Phi 4.45 \times 7.65$	703	2.15~9.0	1,600	4.0	IHI	1990~1994	
3	東京有明北地區供給管共同管道建設工程	共同管溝	黏土、礫石	$\Phi 9.36 \times 15.86$	1,249	14~17	1,600	3.5	MHI	1990~1994	尾田俊雄、 米井勇雄 , 1993
4	神戶市高速鐵道海岸線新長田停車場及地下線路工程	地下鐵	黏土、礫石	$\Phi 5.48 \times 9.75$	304	11.5~15.5	1,500	0.8	MHI	1995~1998	台北市政府 捷運局 , 2008
5	名古屋高速鐵道 4 號線砂田橋東工區土木工程	地下鐵	砂礫、黏土、粉土	$\Phi 6.52 \times 11.12$	752	10.31~16.6	500	2.3	IHI	1999~2002	榊原勝則、 渡邊祐一 , 2001
6	名古屋高速鐵道 4 號線茶屋阪公園工區	地下鐵	粉土、砂	$\Phi 6.52 \times 11.12$	1,007	11.0~32.1	500	3.3	IHI	1999~2002	台北市政府 捷運局 , 2008

表 3-1 DOT 潛盾隧道工法案例表(續)

案例編號	工程名稱	施工用途	地質狀況	潛盾機外徑(m)	隧道總長(m)	潛盾機上方覆土厚(m)	最小曲率半徑 Rmin(m)	最大坡度(%)	潛盾機製造商	施工期間	參考文獻
7	名古屋高速鐵道 4 號線 本山北工區	地下鐵	砂、黏土、 砂礫	Φ6.52×11.12	1,238	9.3~32.3	300	2.7	IHI	1999~ 2002	台北市政府 捷運局 , 2008
8	高速鐵道 4 號線名古屋 大學南工區	地下鐵	黏土、 砂礫、 粉土夾砂	Φ6.52×11.12	876	11.5~21.3	200	3.1	IHI	1999~ 2002	
9	名古屋高速鐵道 4 號線 八事北工區	地下鐵	黏土、砂礫	Φ6.52×11.12	782	19.0~24.0	180	0.9	KHI	1999~ 2002	
10	名古屋高速鐵道 4 號線 山下通南工區	地下鐵	砂礫	Φ6.52×11.12	957	10.0~16.6	165	3.3	MHI	1999~ 2003	
11	名古屋高速鐵道 4 號線 八事南工區	地下鐵	黏土夾砂礫	Φ6.52×11.12	1,025	16.2	300	3.1	MHI	1999~ 2003	
12	愛知縣道路新建改良工 程東部丘陵線建設工程	地下鐵	砂質土	Φ6.73×11.43	904	15.0	102	5.9	IHI	N.A.	
13	愛知縣東部丘陵線建設 工程	地下鐵	黏土、砂	Φ6.73×11.43	123	12.0~13.0	102	N.A.	IHI	N.A.	

表 3-1 DOT 潛盾隧道工法案例表(續)

案例編號	工程名稱	施工用途	地質狀況	潛盾機外徑(m)	隧道總長(m)	潛盾機上方覆土厚(m)	最小曲率半徑 Rmin(m)	最大坡度(%)	潛盾機製造商	施工期間	參考文獻
14	上海市軌道交通楊浦線(M8線)嫩江路站至黃興線地站	地下鐵	粉土質砂、粉土質黏土、黏質粉土	Φ6.52×11.12	1,759	5.2~12.0	495	2.8	IHI	2003~2004	台北市政府捷運局, 2008
15	上海市軌道交通楊浦線(M8線)開魯路站至嫩江路站	地下鐵		Φ6.52×11.12	929	5.2~12.0	495	2.8	MHI	2003~2004	
16	上海地鐵6號線第9標	地下鐵		Φ6.52×11.12	1,713	4.0~21.0	300	2.7	IHI	2004~2005	
17	上海地鐵6號線第10標	地下鐵		Φ6.52×11.12	2,497	6.0~13.0	990	1.5	IHI	2004~2005	
18	上海地鐵6號線第11標	地下鐵		Φ6.52×11.12	1,096	6.0~10.0	420	2.7	IHI	2004~2006	
19	上海地鐵10號現第3標	地下鐵		Φ6.52×11.12	1,459	12.3~19.8	N.A.	N.A.	IHI	~2009	
20	桃園國際機場聯外捷運CA450A標台北三重段	捷運線	粉土質砂、粉土質黏土	Φ6.42×11.62	1,584	7.6~26.0	280	4.9	IHI	2009~2011	台北市政府捷運局, 2008

表 3-2 東京都有名北地區 DOT 潛盾隧道施工地層性質 (摘自尾田俊雄及米井勇雄, 1993)

Soil Type	SPT blow count N	Soil density $\rho$ (t/m <sup>2</sup> )	Cohesion c (tf/m <sup>2</sup> )	Internal Friction angle $\phi$ ( $^{\circ}$ )	Partical distribution				
					Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Gravel (%)	Max Particle diameter (mm)
Silty Clay (btc)	2~5	1.4	3.0	-	45	42	11	0	2.0
Sandy gravel (btg)	5~50	1.8	-	30	2	7	41	50	50.0
Sandy soil(Tos)	30	1.9	-	35	6	5	62	7	10.0
Silty clayey (Toc)	3~14	1.6	7.0	-	54	45	1	0	2.0

表 3-3 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站土層特性 (摘自周文波及顧春華, 2004)

Layer No.	Soil Type	Water Content,w (%)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Void Ratio,e	Liquid Limit, W <sub>L</sub> (%)	Liquidity Lndex, LI	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Internal Frictionl Angle (degree)	Coefficient of Compressibility	Coefficient of Earth Pressure at rest, Ko
1	Silty clay	30.1	18.9	0.874	35.2	0.66	17.0	31	0.31	0.44
2	Clayey silt	32.2	18.5	0.930	-	-	29.6	7	0.21	0.38
3	Sandy silt	27.8	19.0	0.824	-	-	31.1	8	0.17	0.35
4	Silty clay	47.7	17.1	1.374	44.1	1.17	9.0	14	1.04	0.55
5	Clay	37.2	17.8	1.120	38.3	0.93	11.4	16	0.65	0.51

表 6-1 捷運單圓潛盾隧道平均掘進施工速率

	施工標號	站名	隧道 長度 (m)	初始掘進 施工速率 (m/day)	正式掘進 施工速率 (m/day)	總掘進 天數 (day)	總掘進 施工速率 (m/day)
台北捷運 中和線	CC275 上行線	VS~16	1087	----	----	109	10.0
	CC275 下行線	VS~16	1107	----	----	95	11.7
	CC276 上行線	16~17	988	----	----	214	4.6
	CC276 下行線	16~17	984	----	----	112	8.8
	CC277 上行線	17~18	871	----	----	236	3.7
	CC277 下行線	17~18	877	----	----	251	3.5
台北捷運 南港線	CN257 上行線	----	----	----	----	100	5.2
	CN257 下行線	----	----	----	----	90	5.7
台北捷運 蘆洲線	CL700A	----	----	4	7	----	----
台北捷運 土城線	CD551	----	----	3	8	----	----
高雄橋線 捷運	CO3	----	----	4	7	----	----
平均				3.7	7.3		6.65

表 6-2 DOT 潛盾隧道工法於直線段之施工速率 (摘自日本隧道協會, 2004)

NO	隧道直徑 2R (m)	潛盾機 直徑 (m)	初期掘進段 施工速率 (m/day)	正式掘進直線段 施工速率 (m/day)
1	2.35	2.49	3.8	7.6
2	3.35	3.49	3.6	7.2
3	4.30	4.48	3.2	6.4
4	5.40	5.58	3.2	6.3
5	6.30	6.50	3.1	6.2
6	7.30	7.52	2.9	5.7
7	8.25	8.51	2.7	5.4
8	9.20	9.48	2.6	5.1

表 6-3 DOT 潛盾隧道工法於曲線段之工率修正係數 (摘自日本隧道協會, 2004)

曲率半徑 r (m)	r<60	60<r<100	100<r<150	150<r<200	200<r<300	r>300
修正係數 $\alpha$	0.30	0.55	0.65	0.70	0.80	1.00

表 6-4 CA450A 標 DOT 與單圓潛盾工法預估工期比較 (台灣世曦顧問公司, 2008)

工法	項目	出發段	正式掘進	到達段	Total
單圓雙孔潛盾隧道工法 (預估值)	隧道長度 (m)	60	1,460	60	1580
	施工速率 (m/day)	2.5	6.5	2.5	N.A.
	施工天數 (day)	24	225	24	323
DOT 潛盾隧道工法 (預估值)	隧道長度 (m)	60	1,460	60	1580
	施工速率 (m/day)	12.06	4.3	2.0	N.A.
	施工天數 (day)	30	340	30	400
DOT 潛盾隧道工法 (實測值)	隧道長度 (m)	60	584	N.A	N.A
	施工速率 (m/day)	2.5	3.9	N.A	N.A
	施工天數 (day)	24	150	N.A	N.A

表 6-5 單圓雙孔及 DOT 潛盾隧道進尺費估價比較

(摘自台灣世曦顧問公司, 2008)

廠商 項目	清水	西松	鹿島	大豐	大林	平均* (萬元)
DOT 潛盾機	30,000	45,547.6	31,340	30,800	30,000	30,713
反力座/環片組立	309.0	546	311.4	276	300	296
鑽掘工資	4,345.6	3,631.7	6,514.2	6,145.9	5,897.6	6,186
發進支架	142	90	225.8	216	200	214
潛盾機/附屬組立	12,767.2	520	1,320	1,080	1,000	1,133
背填灌漿	2,933.3	1,496.1	2,560.8	2,328	3,880	2,923
建物保護	900	-	1,200	1,200	2,000	1,467
潛盾機/附屬拆除	576	280	980	756	500	745
門型吊車	570	954	450	400	300	383
工作平台	80	100	44	43.5	50	46
襯砌環片	28,479.2	133,206.7	78,376	74,496	69,840	74,237
皂土漿材料	384.9	3,720.1	776	776	776	776
隧道清理	186.2	186.2	589.8	620.8	465.6	559
運輸設備	4,400	3,543.5	4,795	4,567.5	4,000	4,454
祛水系統	450	561.1	155	75	100	110
餘土處理	4,636.9	5,342.5	7,056.1	6,964.6	7,560.2	7,194
雜項費用	2,734.8	3,974	413.2	298.3	394.7	369
DOT 平均進尺費 (萬元/m)	60.50	131.25	88.34	84.44	82.00	84.93
單圓單孔隧道平均 進尺費(萬元/m)	22.8	23.7	31.2	32.7	36.0	29.28
單圓雙孔隧道平均 進尺費(萬元/m)	45.6	47.4	62.4	65.4	72.0	58.56

表 6.6 單圓雙孔及 DOT 潛盾隧道施工總工程費比較 (摘自台灣世曦顧問公司, 2008)

NO.	項目	單圓雙孔潛盾隧道施工	工程費 (萬元)	DOT 潛盾隧道施工	工程費 (萬元)
1	出土段	明挖覆蓋工法； 連續壁 t=0.6m， depth=14~28 m	8,630	明挖覆蓋工法； 連續壁 t=0.6m， depth=14~28 m	8,510
2	隧道段	小計 1521.3m+1523.7m=3045m 斷面外徑 6.1m，環片厚 25 cm 採用二部潛盾機	89,316	共計 1552m 斷面 W*H=11.64m*6.4m； 環片厚 30cm，採用一部 DOT 潛盾機 增加流木處理設備 3,100 萬元	134,654
3	通風豎井	明挖覆蓋工法； 連續壁(含地中壁) t=1.5 m， depth=56 m	26,908	明挖覆蓋工法； 連續壁(含地中壁) t=1.5m， depth=56 m	26,708
4	鏡面地盤改良	共四處，兩處採用 CJG(or Super-Jet)， 另兩處採用 JSG 每處之厚 x 寬 x 高=2*(7m*11m*12m)	5,612	共四處，兩處採用 CJG(or Super-Jet)， 另兩處採用 JSG 每處之厚 x 寬 x 高=7m*17.5m*14m	4,432
5	連絡通道	連絡通道三處，採用冰凍工法 每處需用鋼環片 10 片，臨時安全門、 NATM 施工、4 道隔壁(Bulkhead)	33,379	3 處	350
6	橋墩托底	台北縣環快 P64 橋墩	4,000	台北縣環快 P64 橋墩	4,600
7	建物保護	穿越台北環快基礎保護 穿越建物二次灌漿	1,536	穿越台北環快基礎保護 穿越建物二次灌漿	1,241
8	穿越補償費	穿越之地上權補償率分別落於 20%(里程長 40m)、30%(里程長 80m)及 40%(里程長 50m)， E1、E2 公告現值約 18.7 萬元/m <sup>2</sup>	21,359	穿越之地上權補償率分別落於 20%(里程長 73m)、 30%(里程長 77m)及 40%(里程長 20m)， E1、E2 公告現值約 18.7 萬元/m <sup>2</sup>	15,040
總計			190,740		195,535

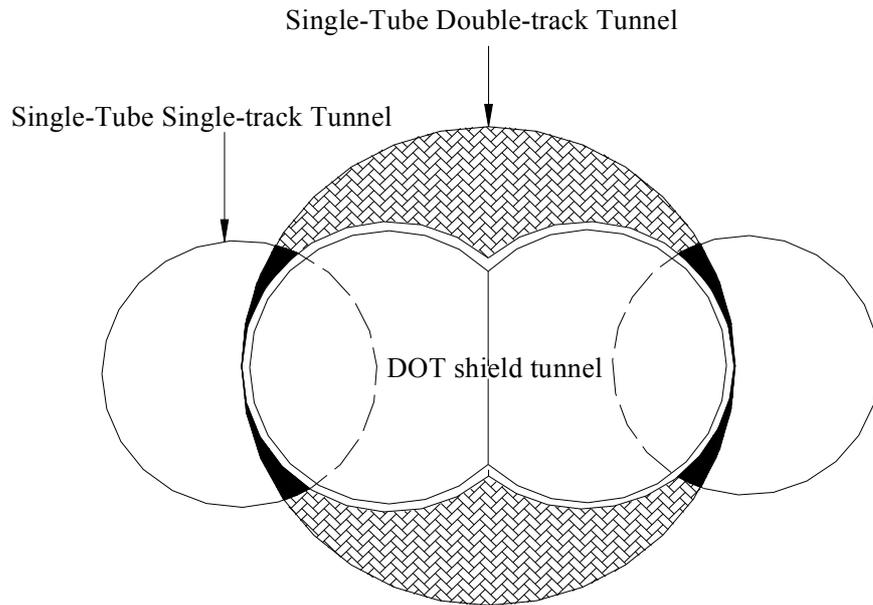


圖 2-1 DOT 潛盾隧道與單圓單線及單圓雙線潛盾隧道示意圖  
 (摘自日本隧道技術協會, 2007)

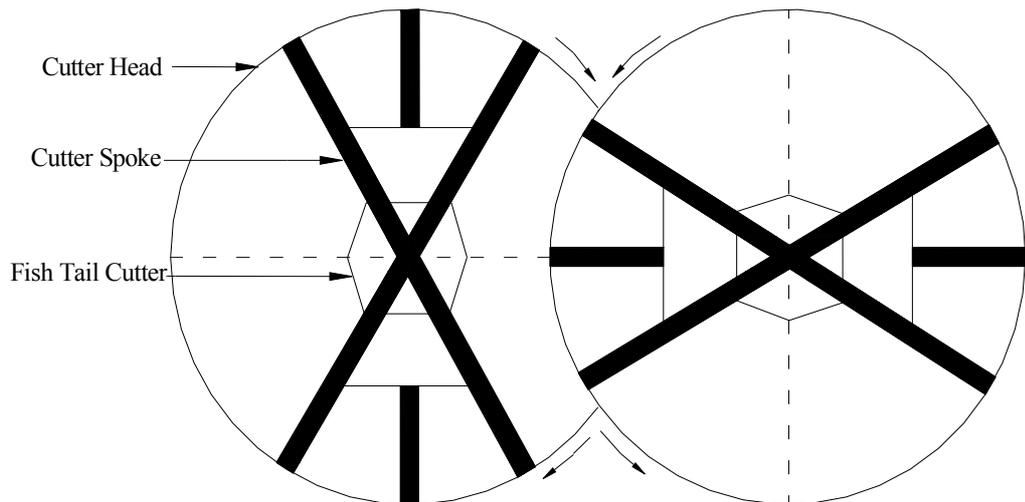


圖 2-2 DOT 潛盾機切刃盤配置示意圖

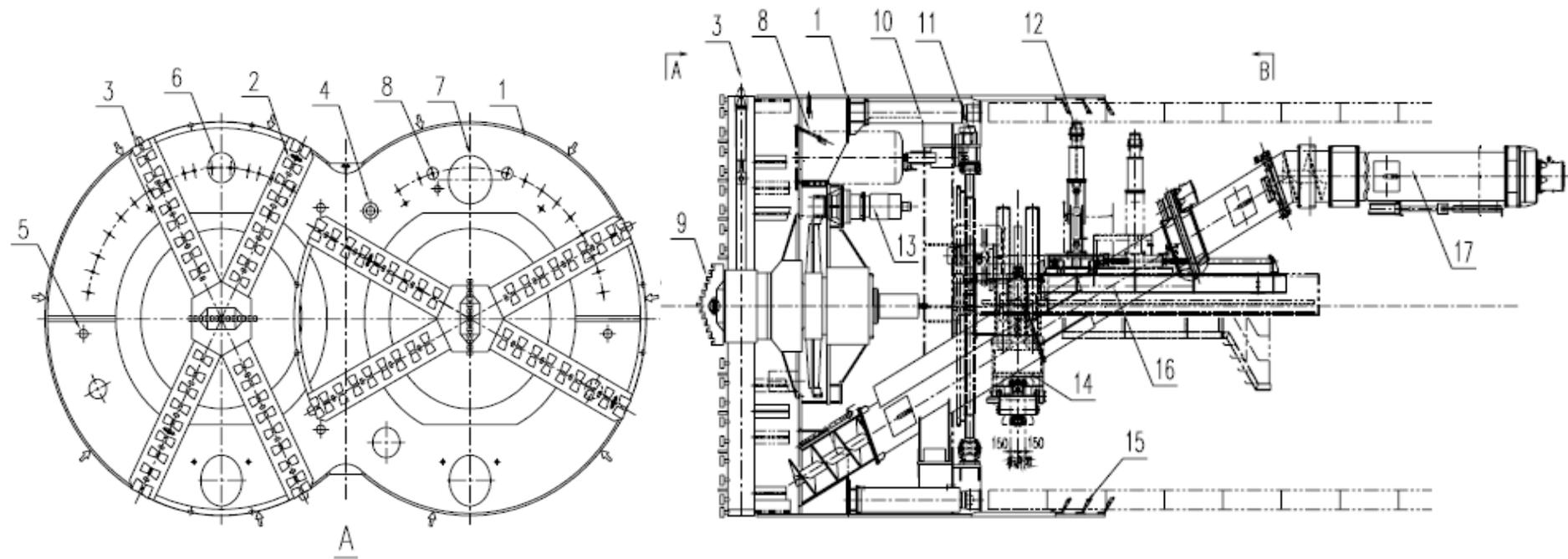


圖 2-3 Schematic diagram of shield. 1. Shield shell ; 2. Cutter head ; 3. Copy cutter ; 4. Replaceable earth pressure gauge ; 5. Fixed earth pressure gauge ; 6. Observation hole ; 7. Man lock ; 8. Globular injector ; 9. Central cutter ; 10. Thrust cylinder ; 11. Top segment support ; 12. Real circle retainer ; 13. Cutter head drive unit ; 14. Erector ; 15. Tail seal ; 16. No. 1 Screw conveyor ; 17. No. 2 Screw conveyor.  
(after Chow, B., 2006)

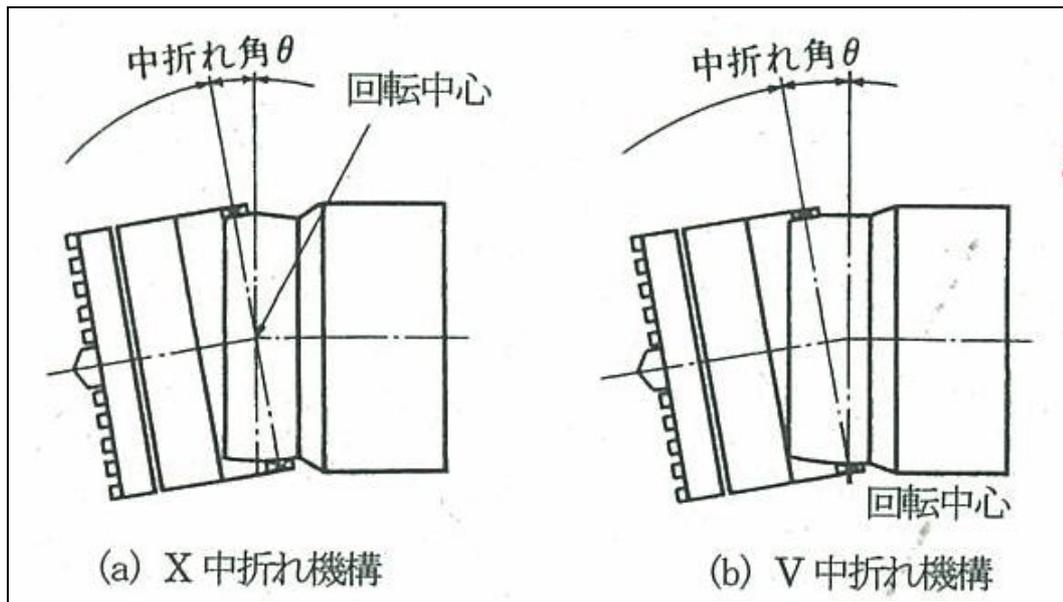


圖 2-4 (a)為 X 型中折裝置示意圖 (b)為 V 型中折裝置示意圖  
(摘自台灣世曦工程顧問公司, 2008)

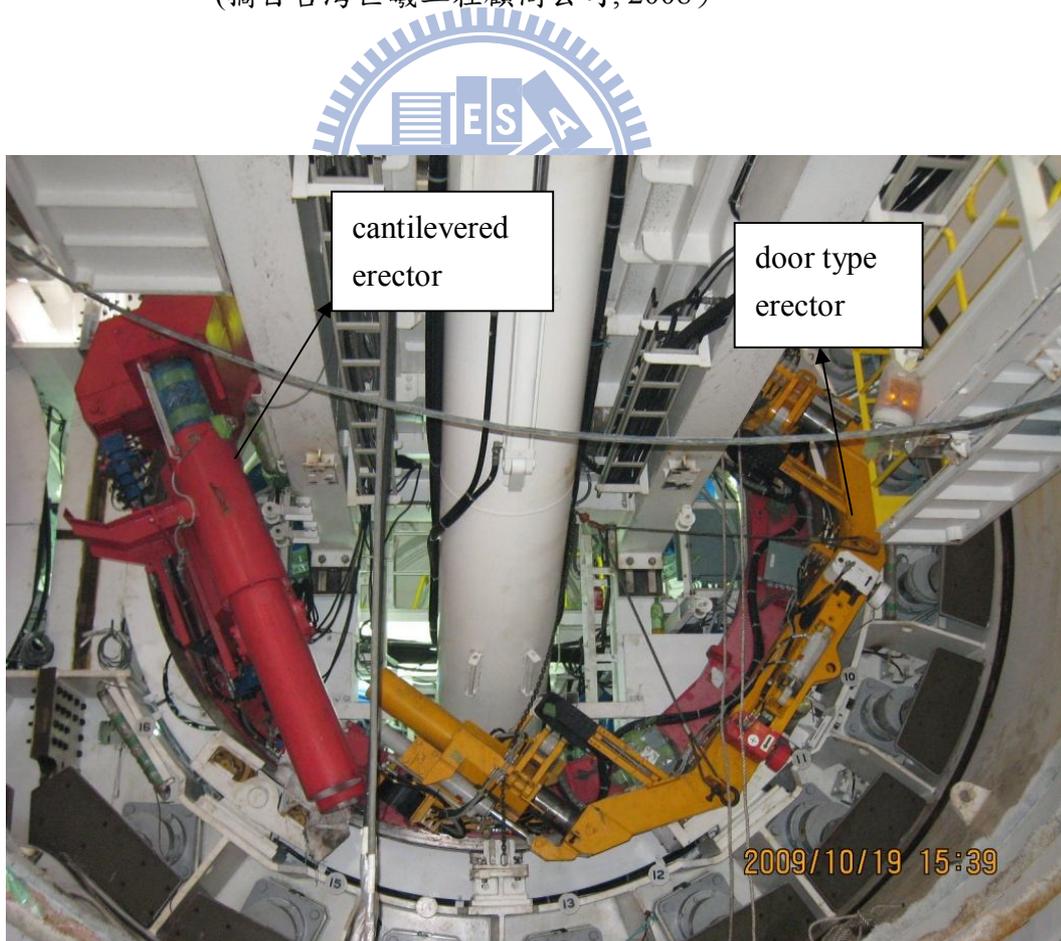


圖 2-5 DOT 潛盾機之環片組立設備(摘自台灣世曦工程顧問有限公司, 2009)



圖 2-6 DOT 潛盾機之切刃盤(摘自台灣世曦工程顧問有限公司, 2009)



圖 2-7 DOT 潛盾機之螺運機設備



圖 2-8 DOT 潛盾機之真圓保持器設備

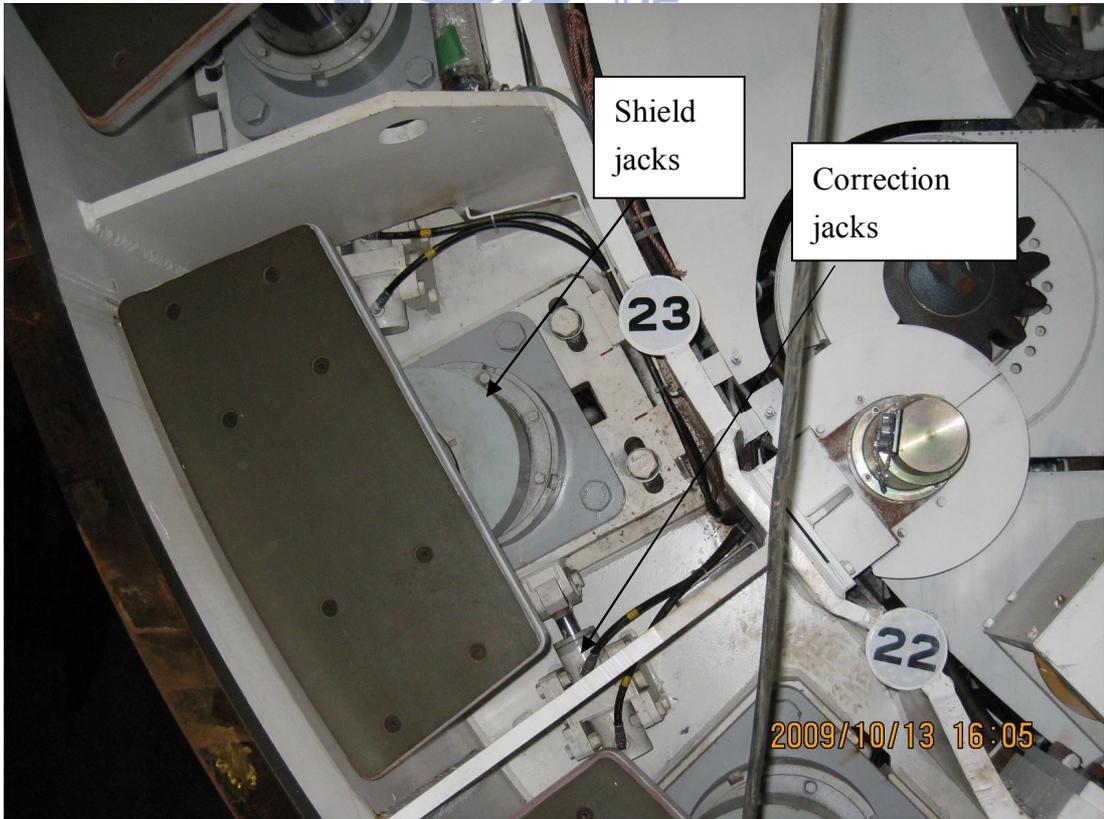


圖 2-9 DOT 潛盾機千斤頂



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2-10 DOT 潛盾隧道使用之襯砌環片：(a)C 型環片、(b)B 型環片、(c)A 型環片、(d)D 型環片

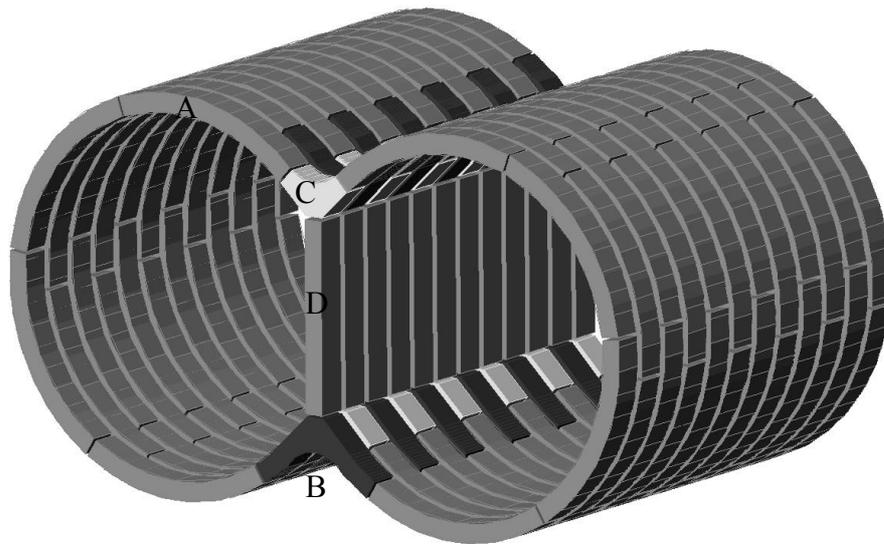


圖 2-11 DOT 潛盾隧道環片錯縫拼裝圖



(a) 環間(一孔)預埋構件及螺栓      (b) 片間(三孔)預埋構件及螺栓

圖 2-12 DOT 潛盾隧道環片銜接之短直螺栓和預埋構件

(摘自易永輝與林建華, 2008)

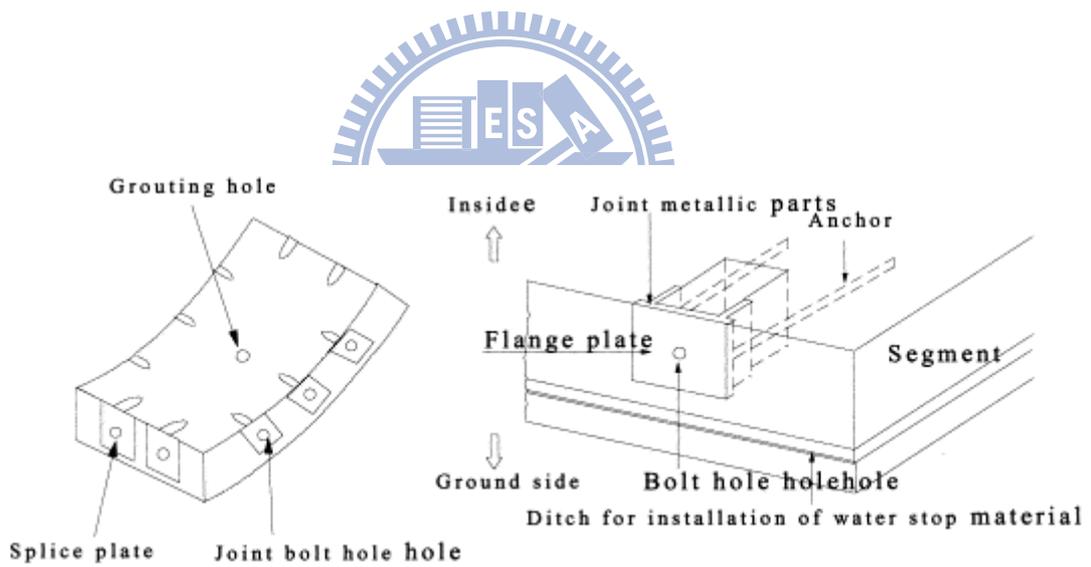


圖 2-13 DOT 潛盾隧道環片與預埋構件安裝示意圖

(after Yukinori Koyama, 2003)

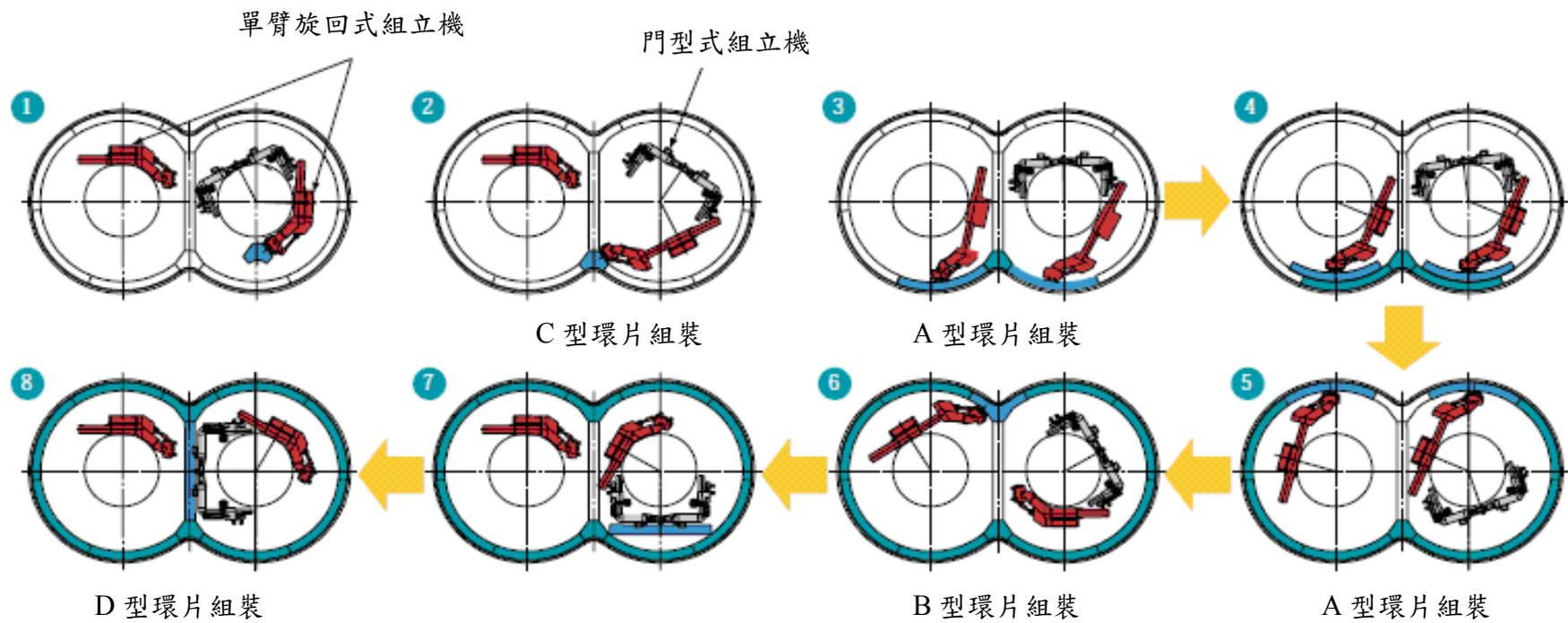


圖 2-14 DOT 潛盾隧道環片組裝順序圖(摘自中嶋大與三木孝信, 2004)

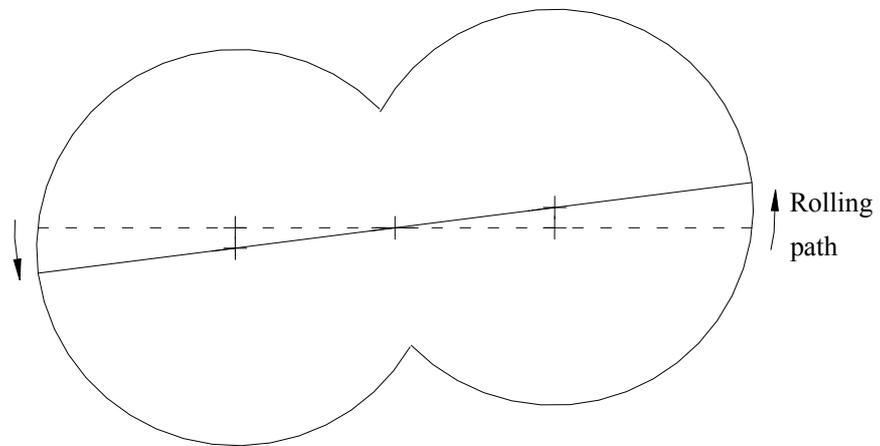


圖 2-15 DOT 潛盾隧道滾轉造成之軸線偏差示意圖

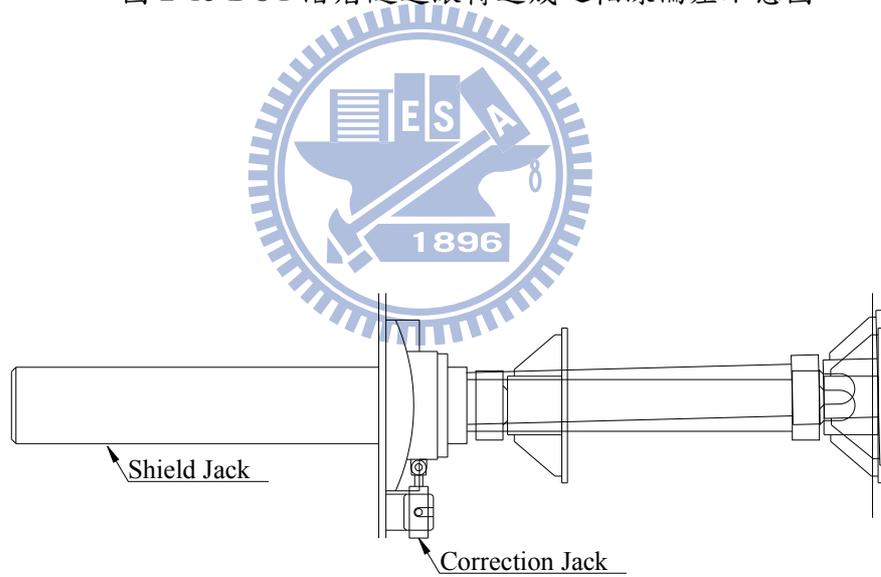


圖 2-16 DOT 潛盾隧道修正千斤頂圖示 (摘自達欣/清水營造股份有限公司, 2008)

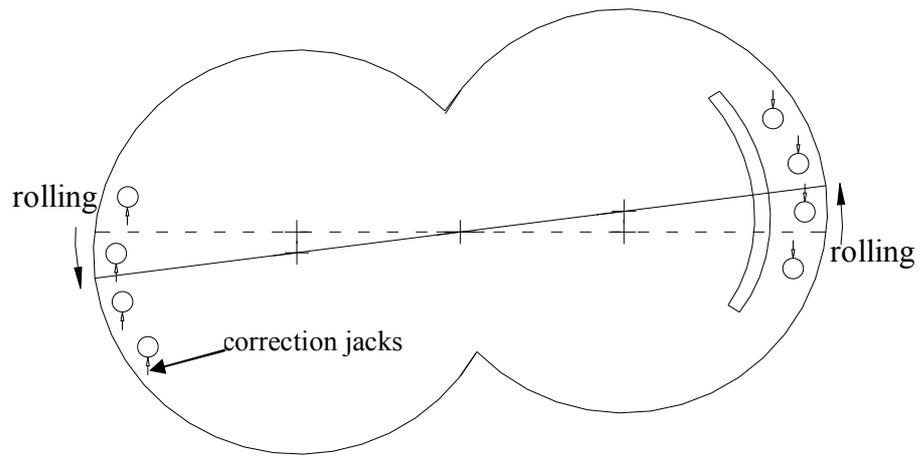


圖 2-17 DOT 潛盾隧道以修正千斤頂及單側加載環片修正 DOT 潛盾機滾轉

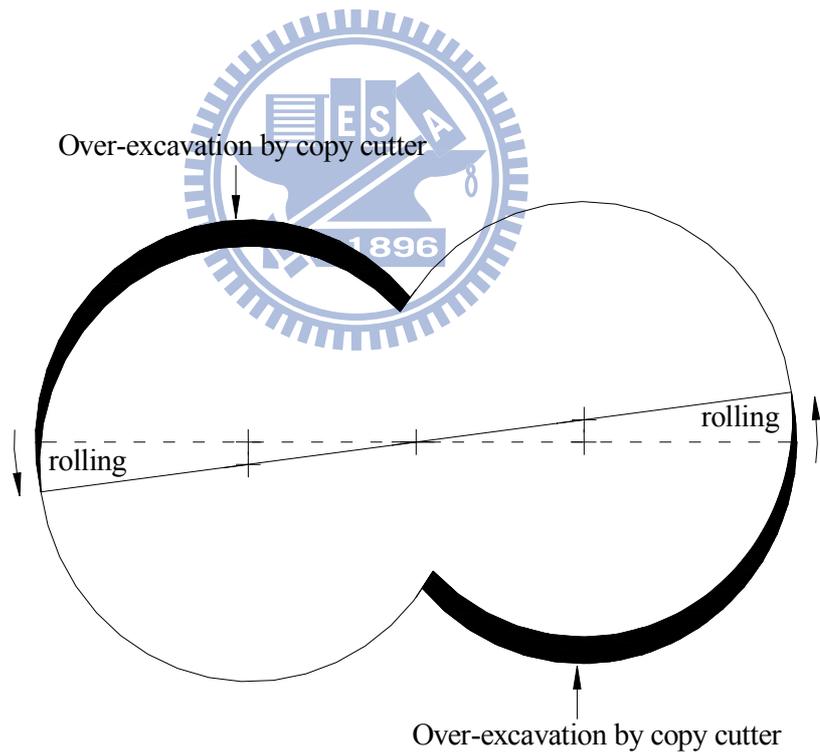


圖 2-18 DOT 潛盾隧道以超挖刀修正滾轉

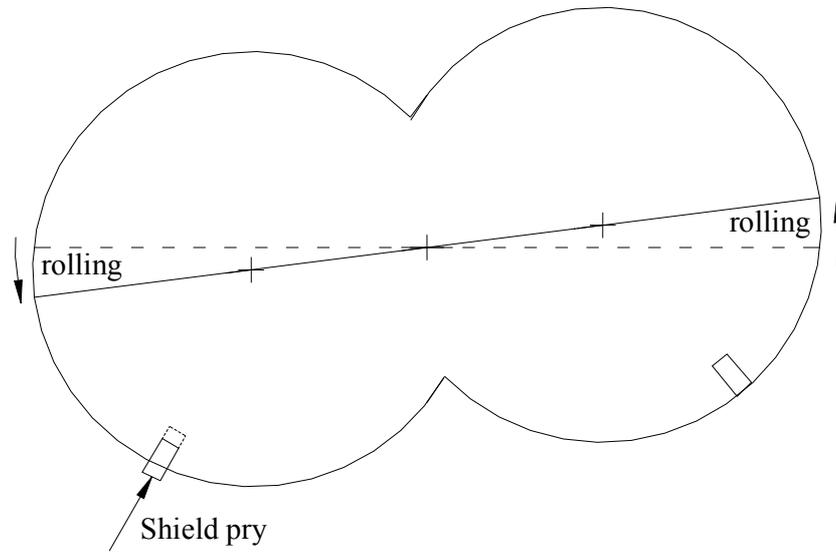


圖 2-19 DOT 潛盾隧道以盾撬修正滾轉

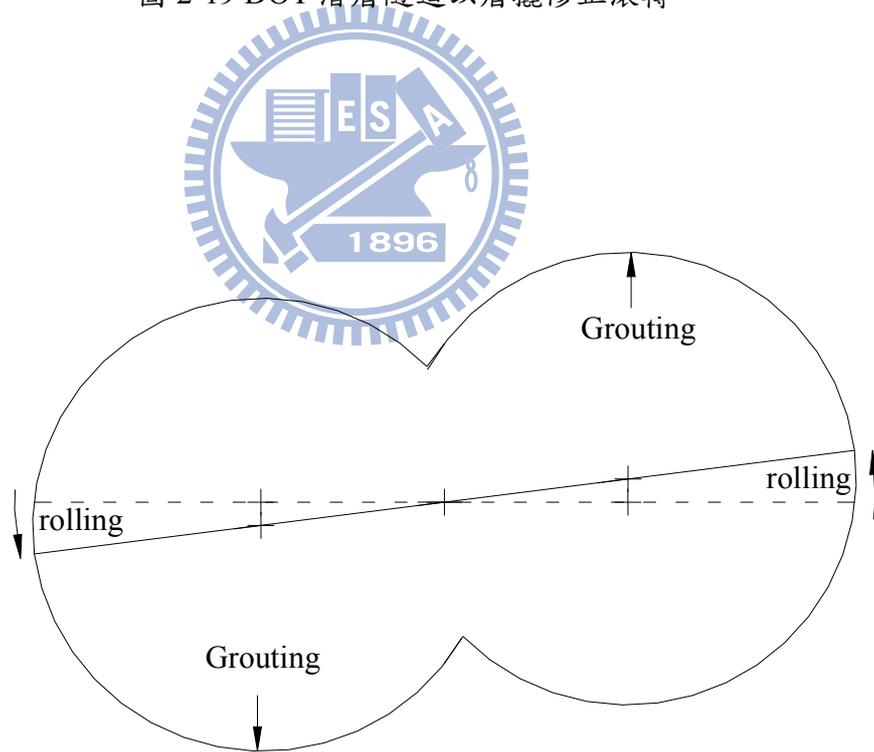


圖 2-20 DOT 潛盾隧道以環片灌漿修正滾轉

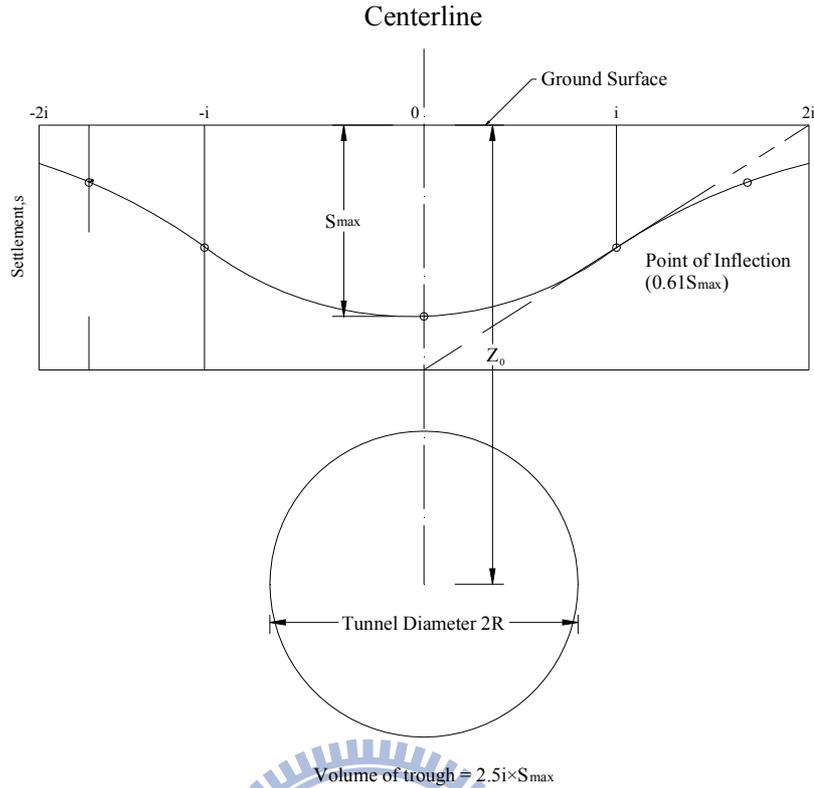


圖 2-21 以誤差函數（常態分佈曲線）模擬地表沉陷槽（after Peck, 1969）

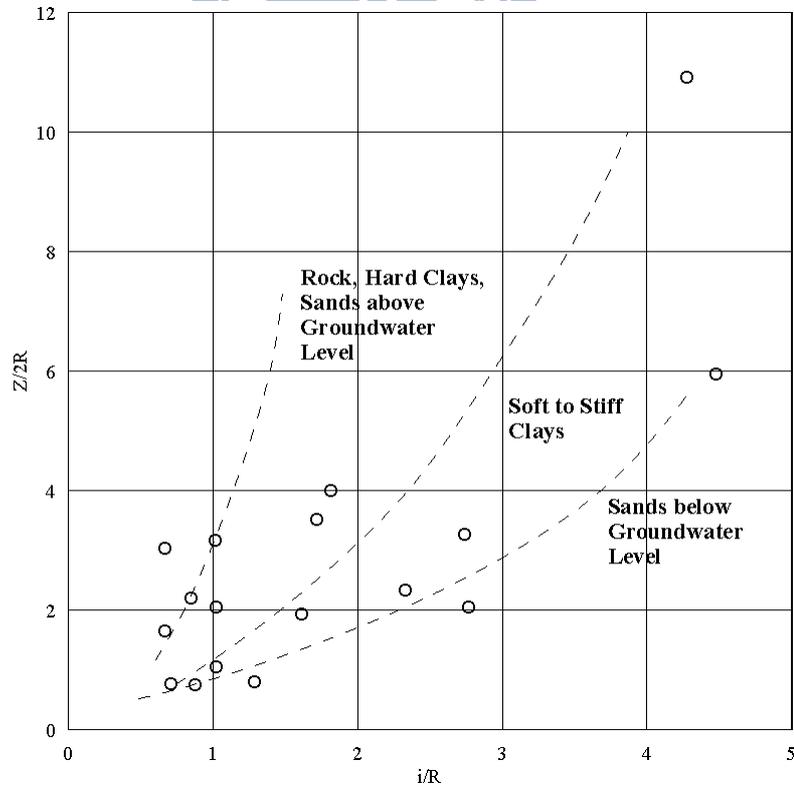
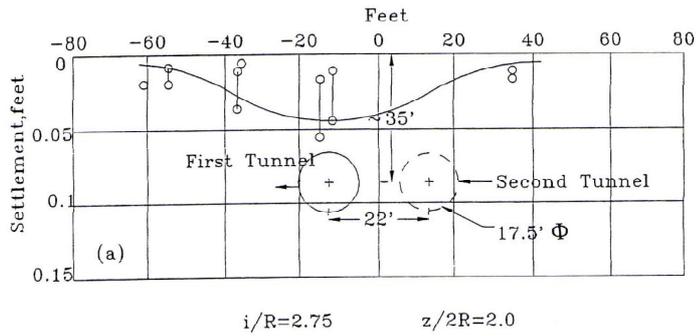
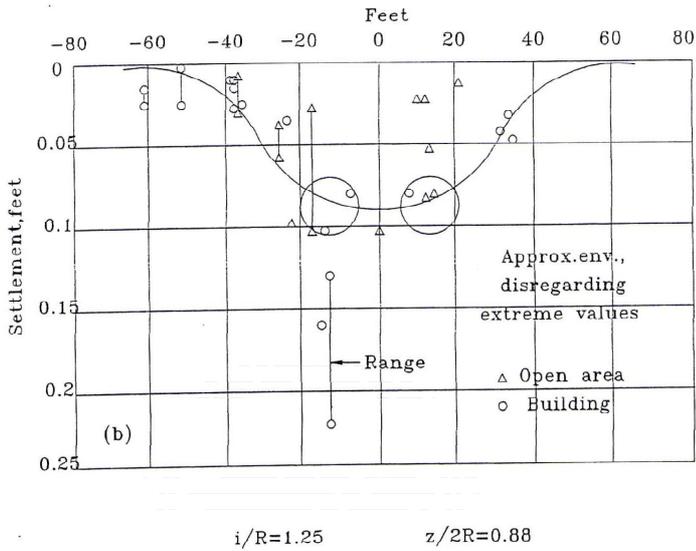


圖 2-22 不同土層下沉陷槽寬徑比 ( $i/R$ ) 與隧道深徑比 ( $Z/2R$ ) 關係圖 (after Peck, 1969)



(a) 第一條隧道施工引致之沉陷槽



(b) 雙隧道施工引致之總沉陷槽

圖 2-23 地下水以下砂質地盤潛盾施工引致之地表沉陷槽 (after Peck, 1969)

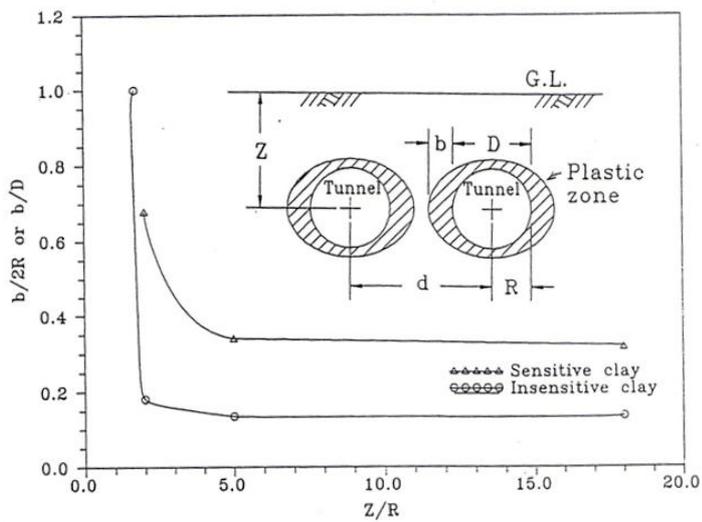


圖 2-24 軟弱土層隧道施工後所引致之土壤塑性範圍 (after Hoyaux and Ladanyi, 1970)

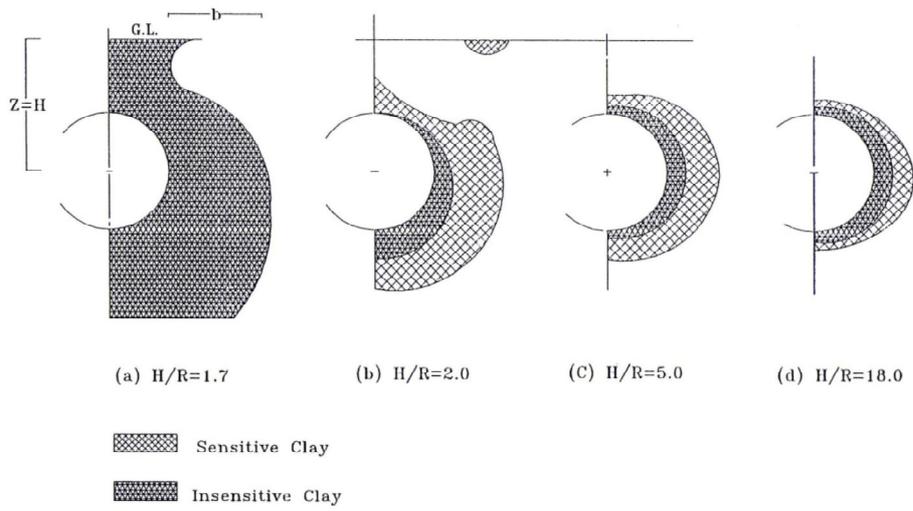


圖 2-25 隧道周圍土壤塑性區最大水平寬度對隧道直徑比( $b/2R$ )與深度半徑比( $z/2R$ )之關係(after Hoyaux and Ladanyi, 1970)

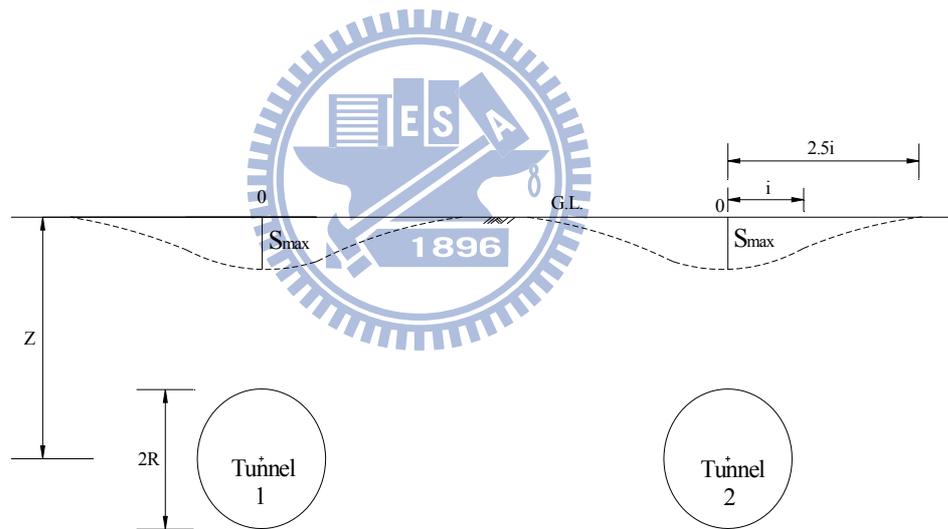


圖 2-26 兩單圓潛盾隧道獨立引致之沉陷槽

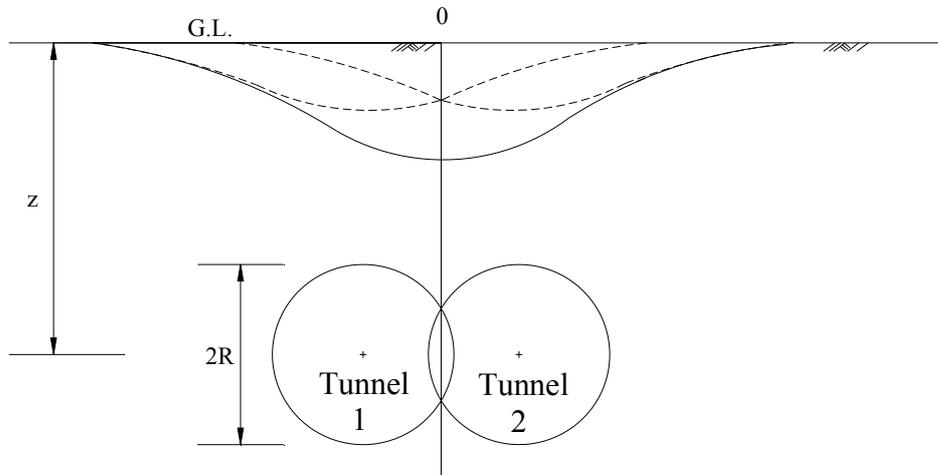


圖 2-27 以兩個相交之單圓潛盾隧道疊加模擬 DOT 隧道引致之地表沉陷槽

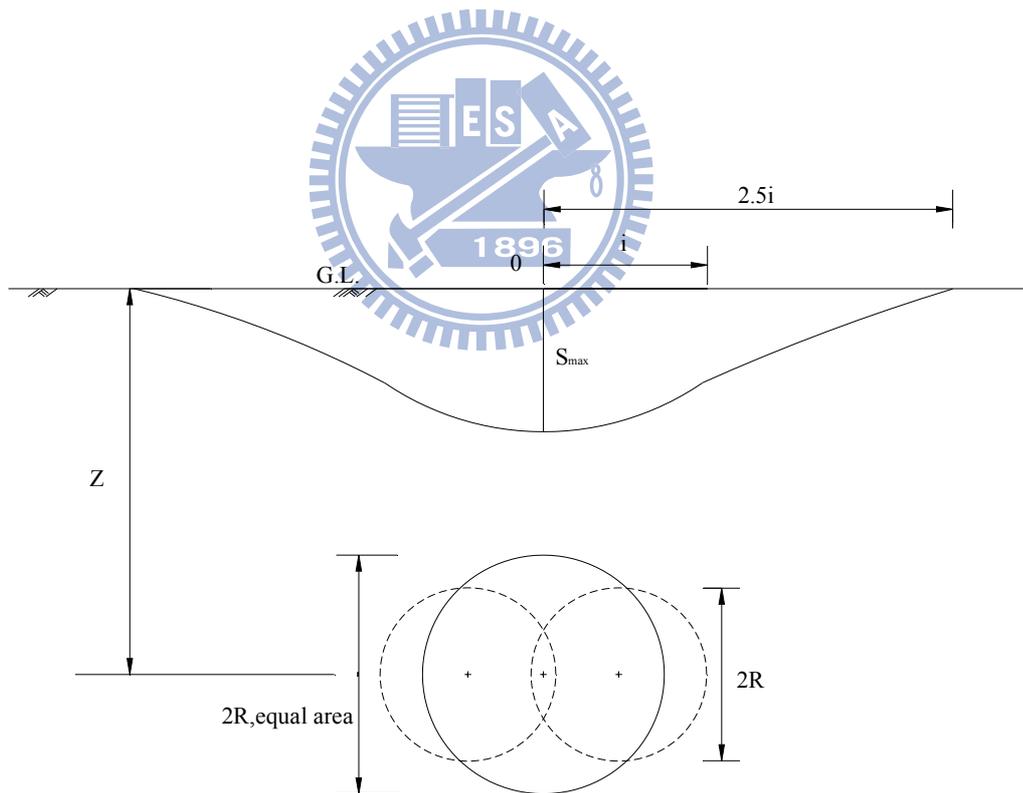


圖 2-28 以等面積單圓潛盾隧道模擬 DOT 隧道造成之地表沉陷槽



圖 3-1 東京都有明北地區供給管共同管道建設工程使用之大直徑 DOT 潛盾機  
 (摘自日本潛盾工法技術協會,2004)

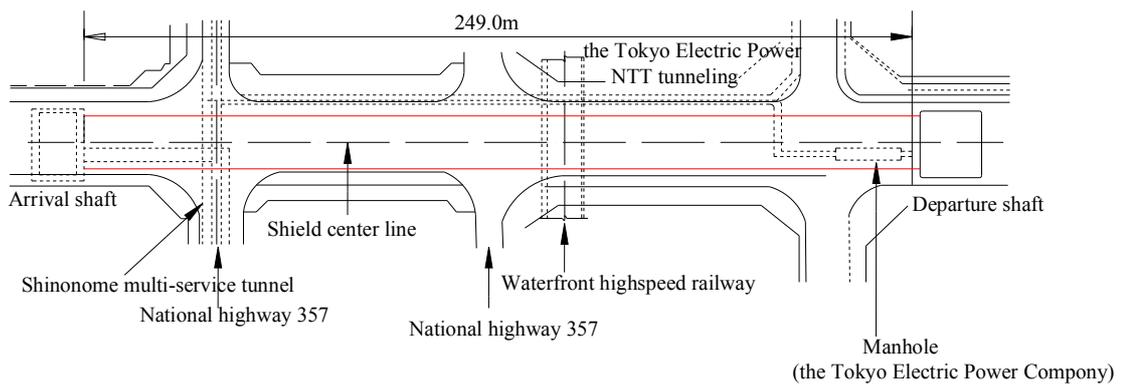


圖 3-2 東京都有明北地區供給管共同管道建設工程 DOT 潛盾隧道路線圖  
 (摘自尾田俊雄及米井勇雄, 1993)

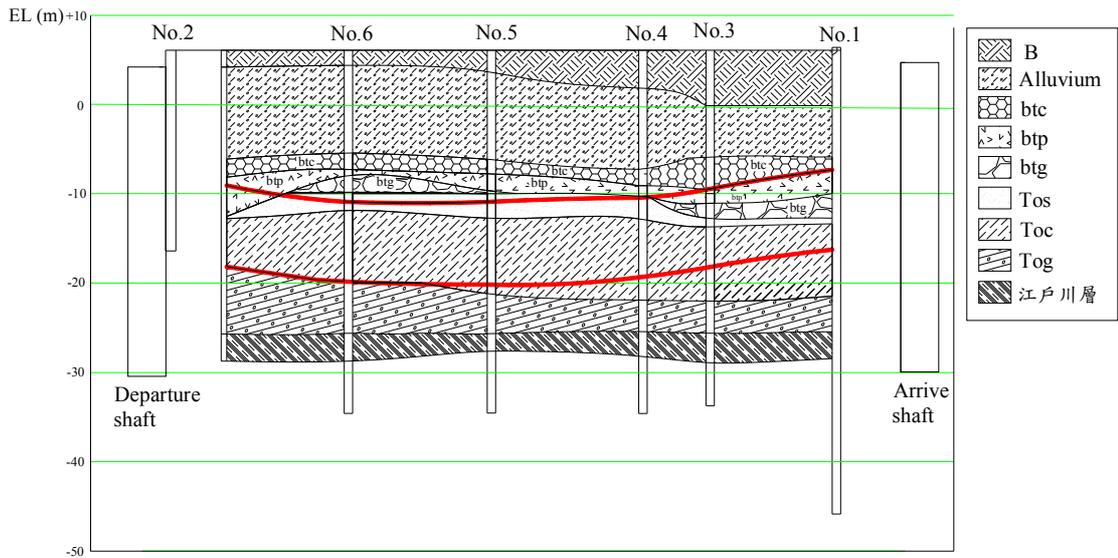


圖 3-3 東京都有明北地區供給管共同管道建設工程地質剖面圖  
(摘自尾田俊雄及米井勇雄, 1993)

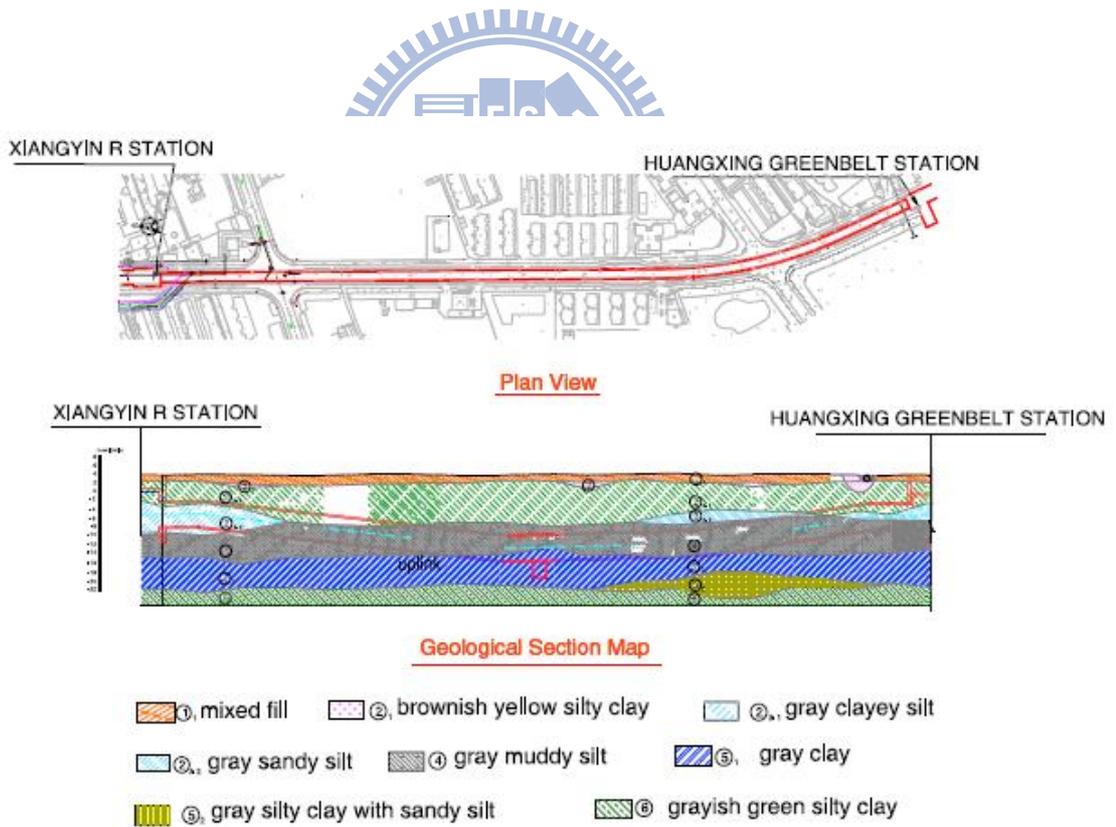


Fig. 5. Plan and sectional views of tunnel.

圖 3-4 上海軌道交通八號線工程翔殷路站至黃興綠地站地質剖面圖  
(after Chow, B., 2006)

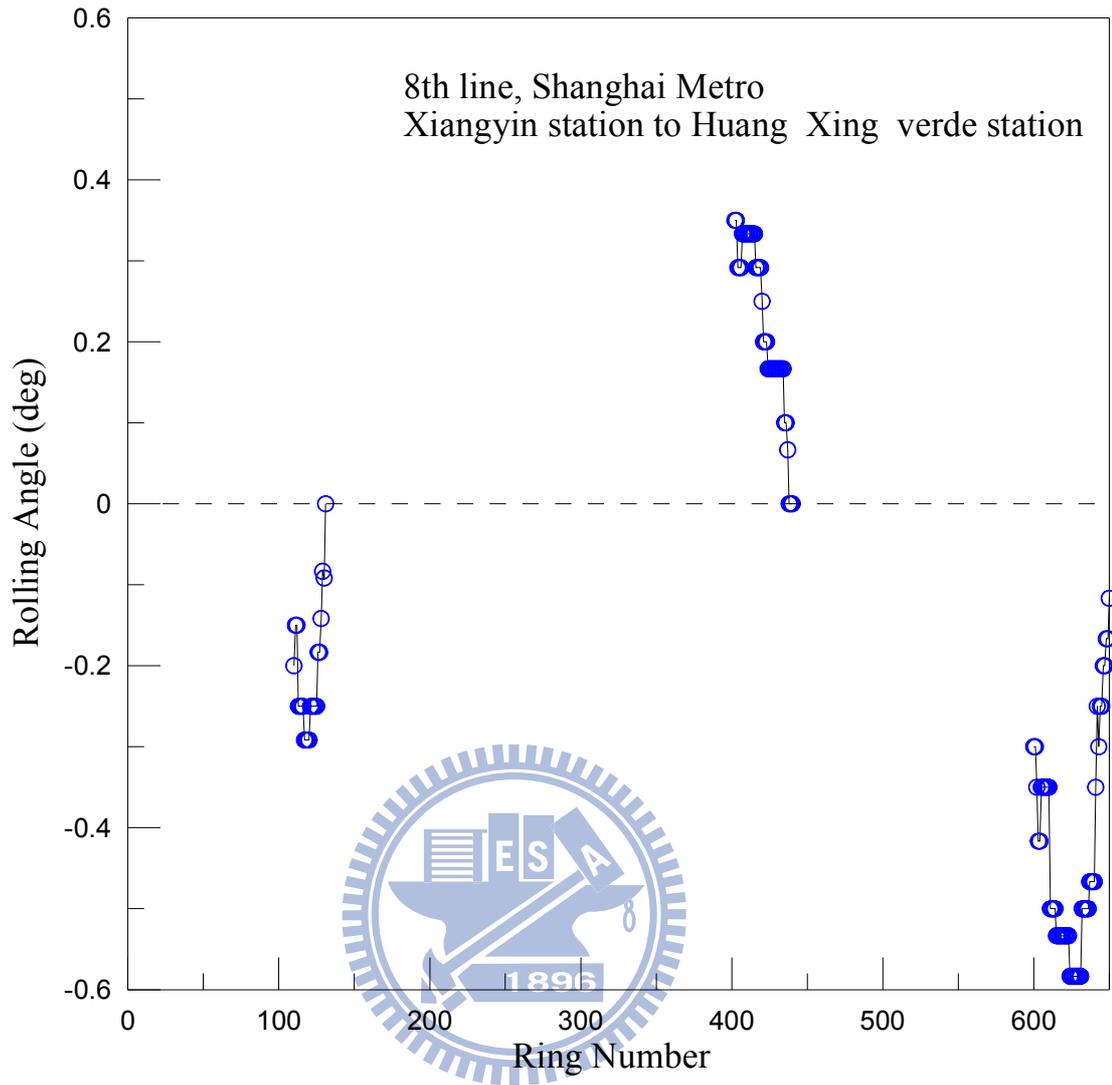


圖 3-5 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站 DOT 潛盾機滾轉角度  
(摘自張曠, 2004)

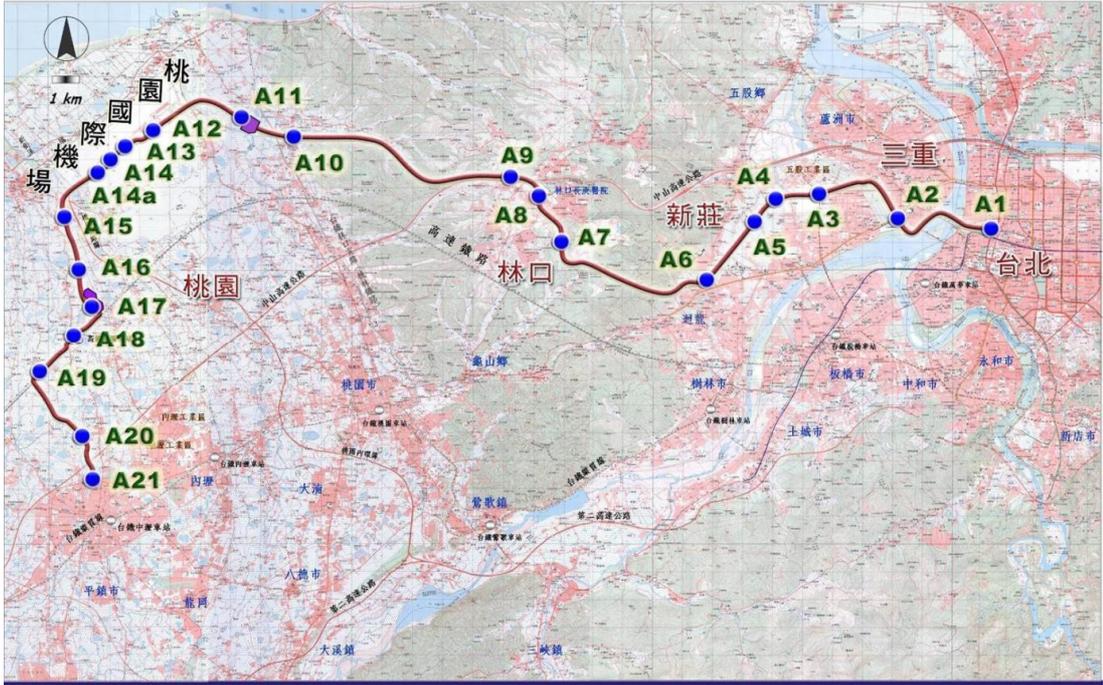


圖 4-1 桃園國際機場聯外捷運系統路線圖(摘自台灣世曦顧問公司, 2008)



圖 4-2 桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道出發端隧道口



圖 4-3 桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道

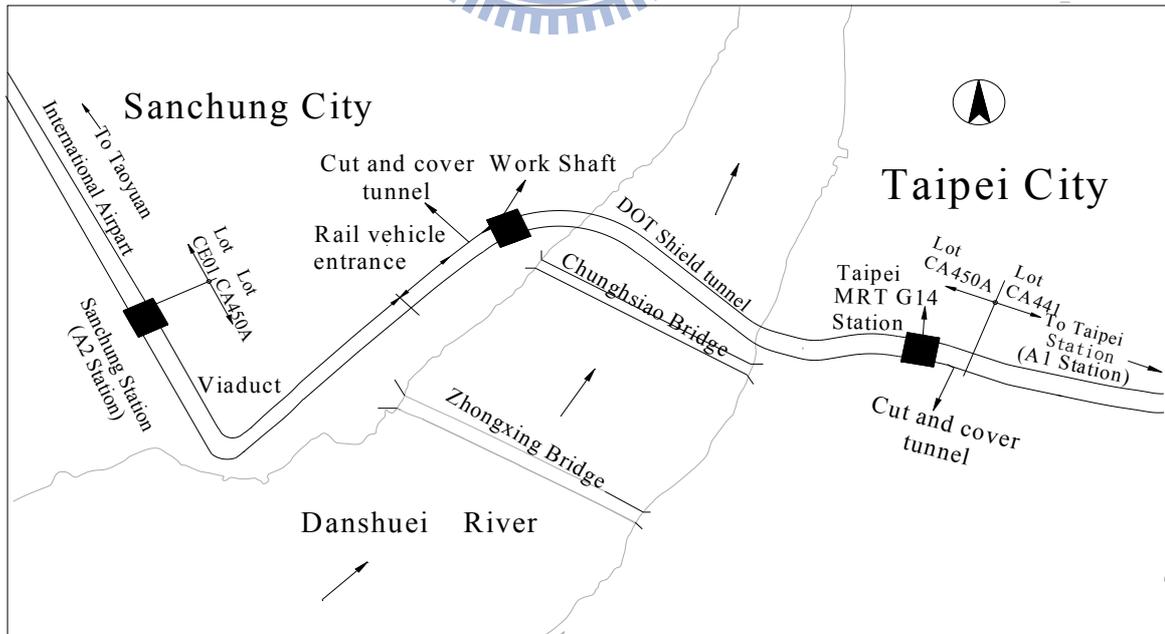


圖 4-4 桃園機場聯外捷運 CA450A 標三重台北段路線圖  
(摘自台灣世曦工程顧問公司, 2009)

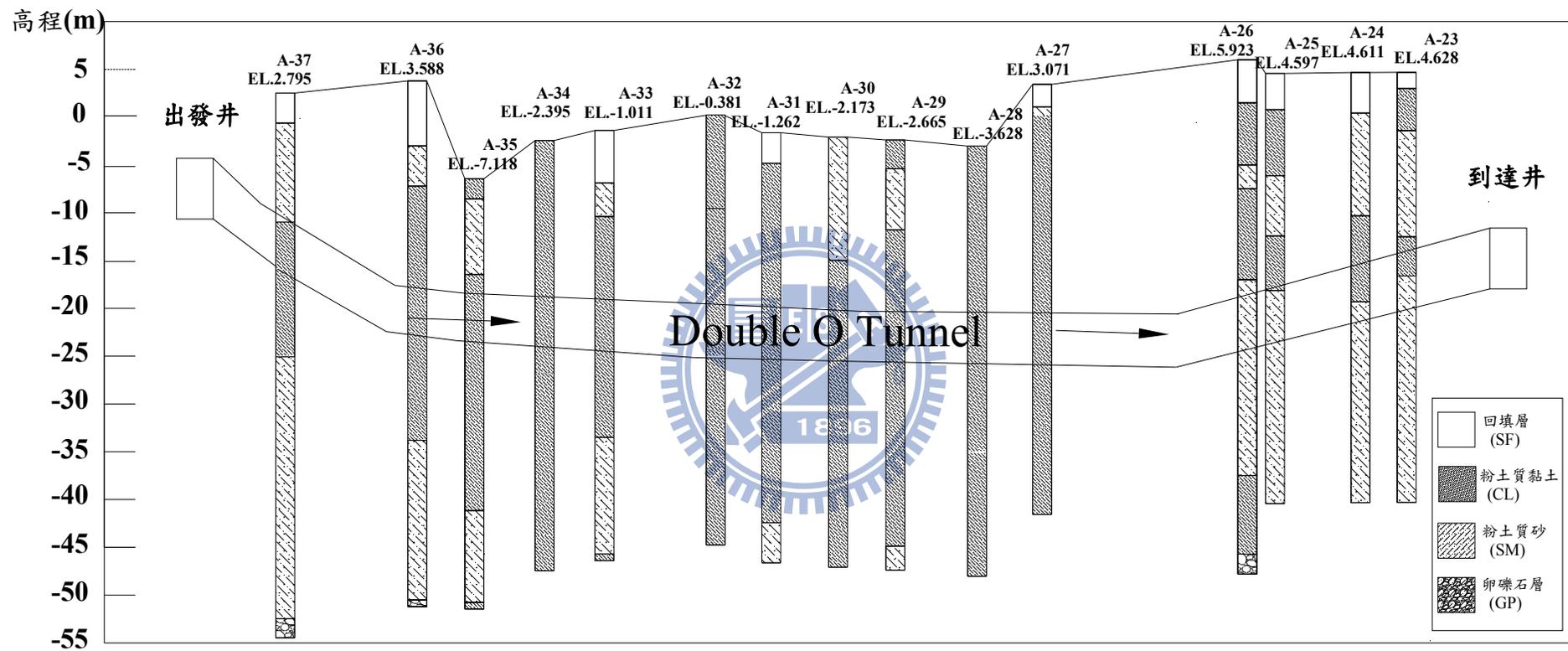


圖 4-5 CA450A 標 DOT 潛盾隧道施工地質剖面圖

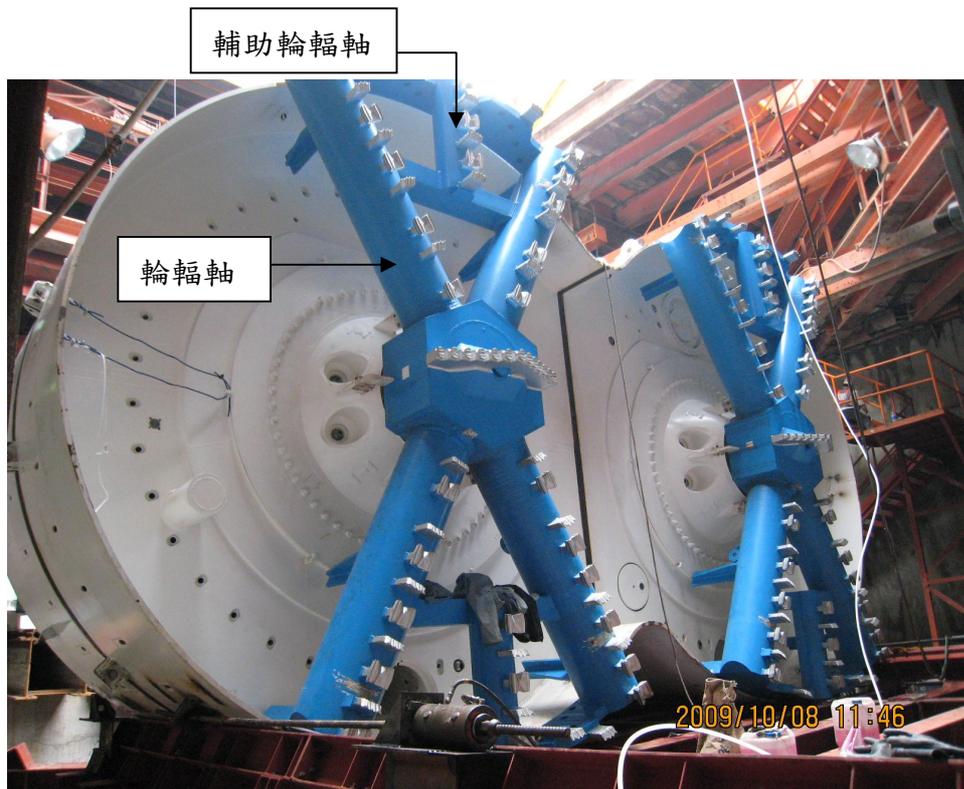


圖 4-6 CA450A 標 DOT 潛盾機切刃盤配置圖示  
(台灣世曦工程顧問有限公司, 2009)

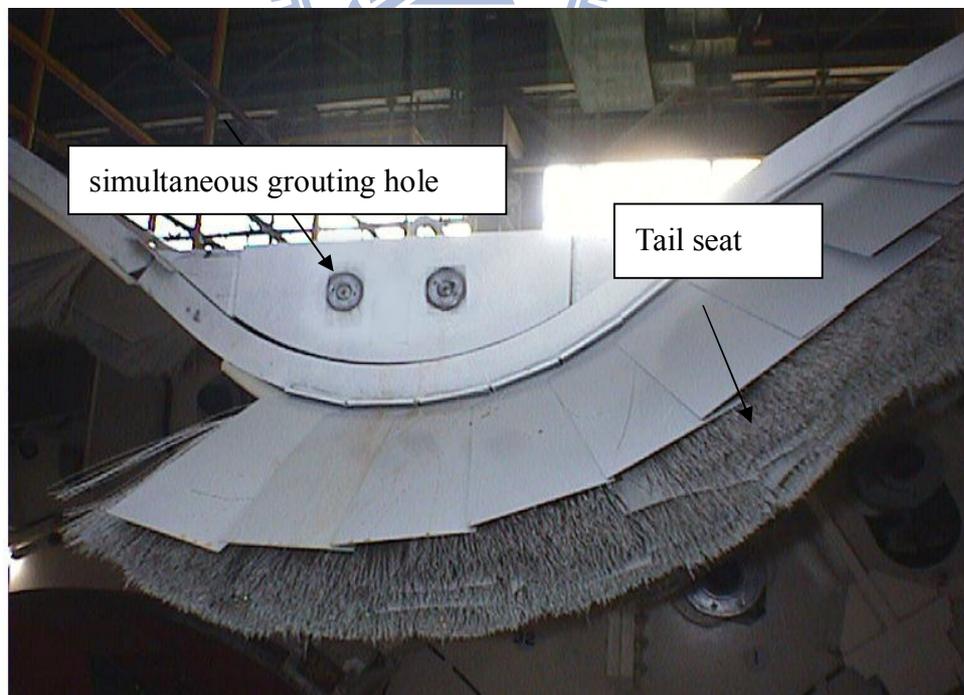


圖 4-7 CA450A 標 DOT 潛盾機同步背填灌漿孔(摘自吳沛軫, 2010)

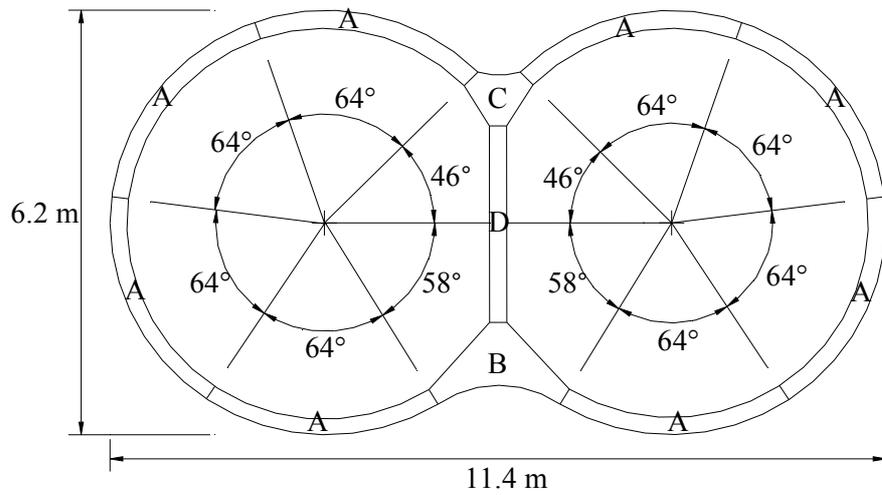


圖 4-8 CA450A 標潛盾隧道環片配置圖(摘自台灣世曦工程顧問有限公司, 2008)

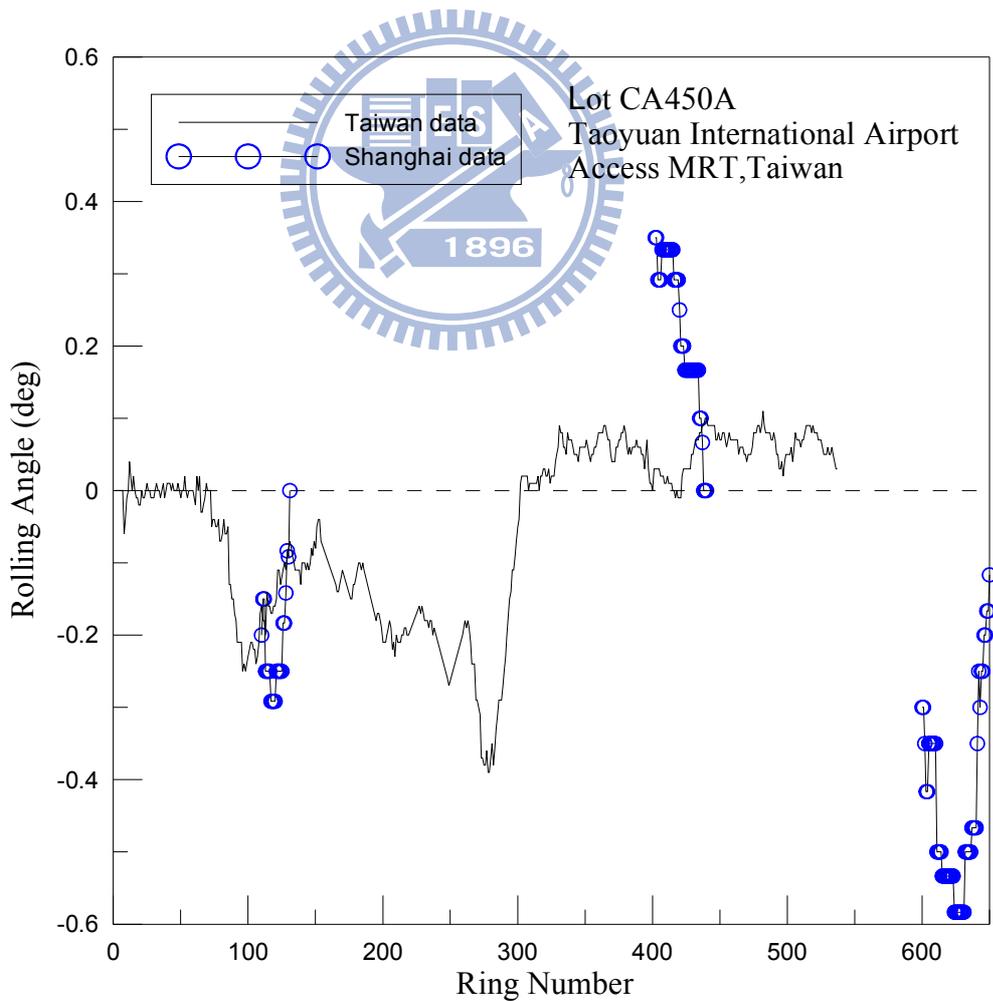


圖 4-9 CA450A 標之 DOT 潛盾機滾轉角度實測分析



圖 4-10 CA450A 標 DOT 潛盾隧道環片內向外灌漿圖



圖 4-11 CA450A 標 DOT 潛盾機切刀盤上切刀齒圖示

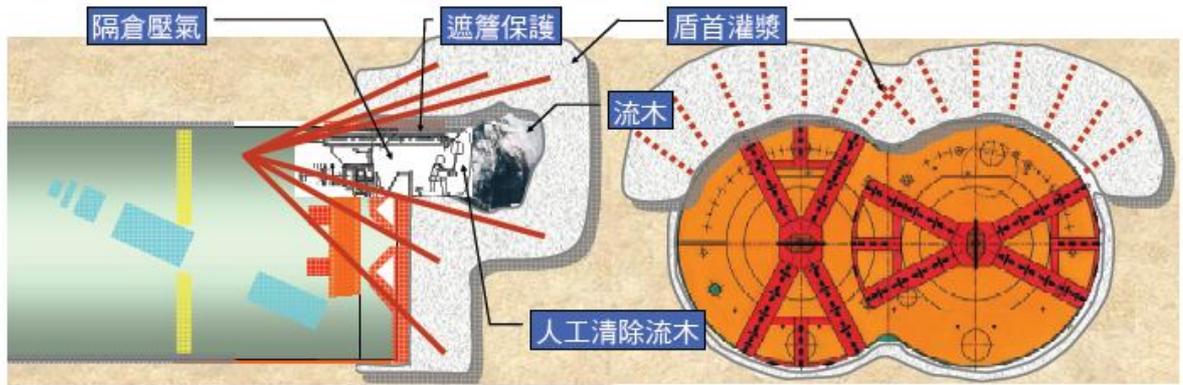


圖 4-12 CA450A 標 DOT 潛盾隧道流木處理設備  
(摘自台北市政府捷運工程局, 2008)

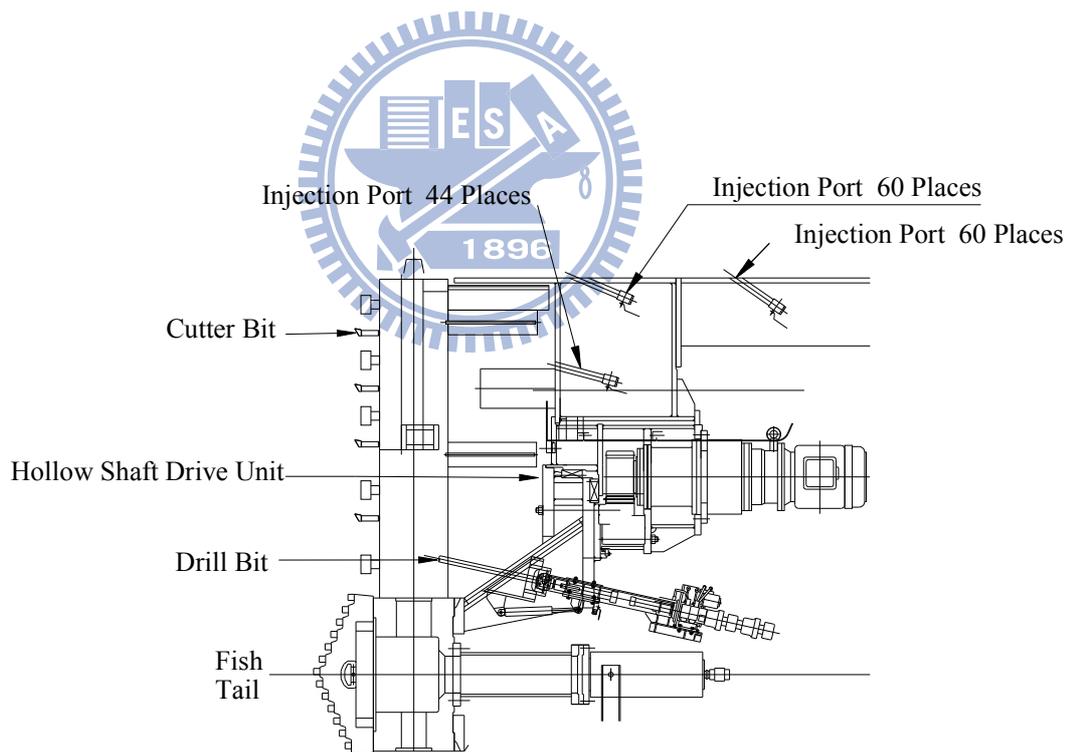
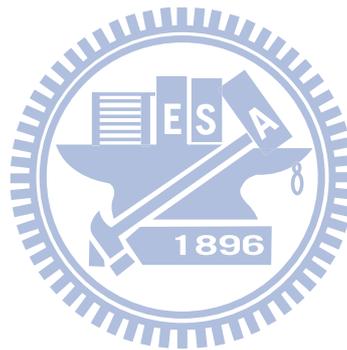


圖 4-13 CA450A 標 DOT 潛盾隧道流木特殊處理設備  
(摘台灣世曦顧問公司, 2008)



圖 4-14 CA450A 標 DOT 潛盾機掘進過程中遭遇之流木  
(摘自達欣/清水建設, 2010)



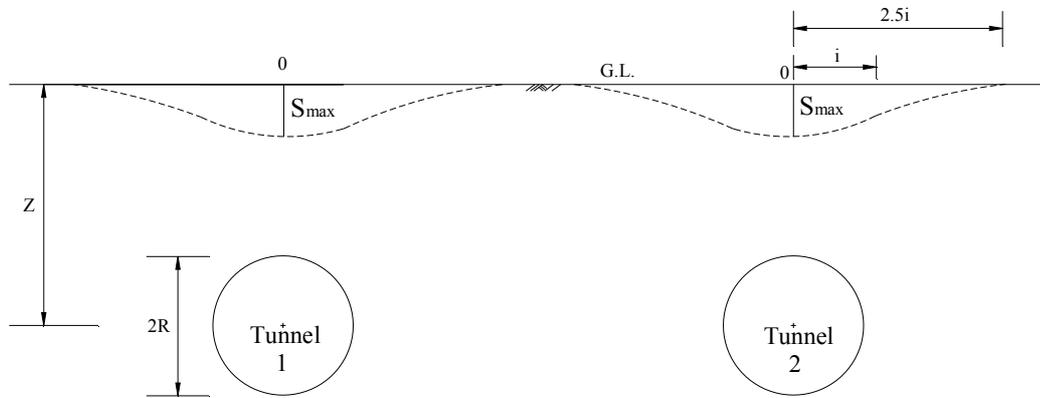


圖 5-1 兩獨立單圓潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽

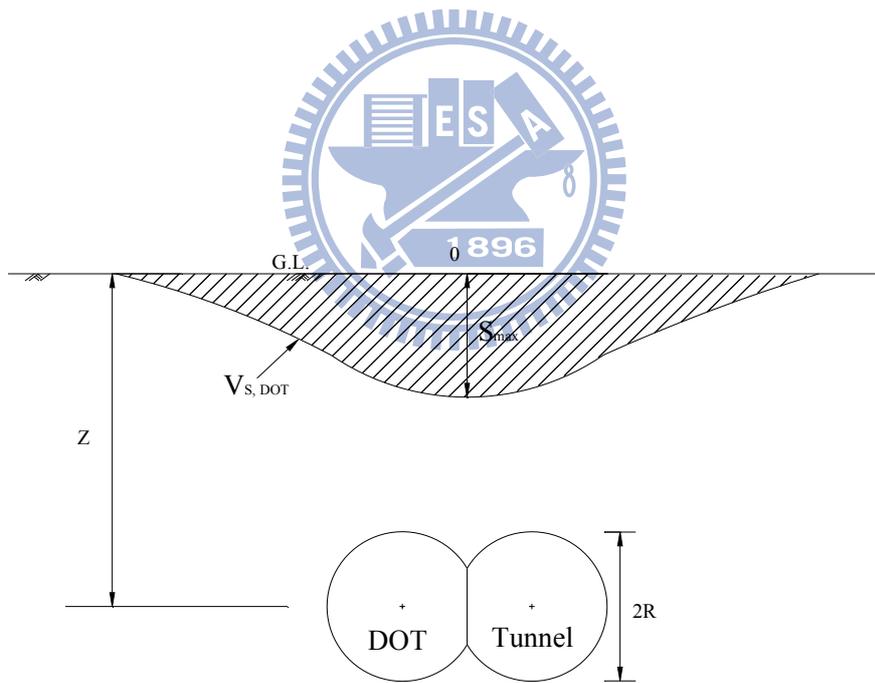


圖 5-2 DOT 潛盾施工造成之單位長度沉陷槽體積

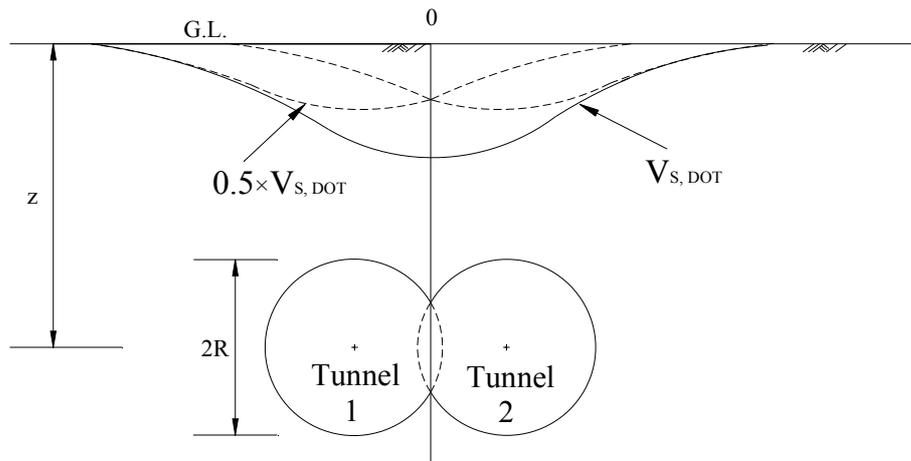


圖 5-3 疊加法估計 DOT 隧道施工引致之地表沉陷槽

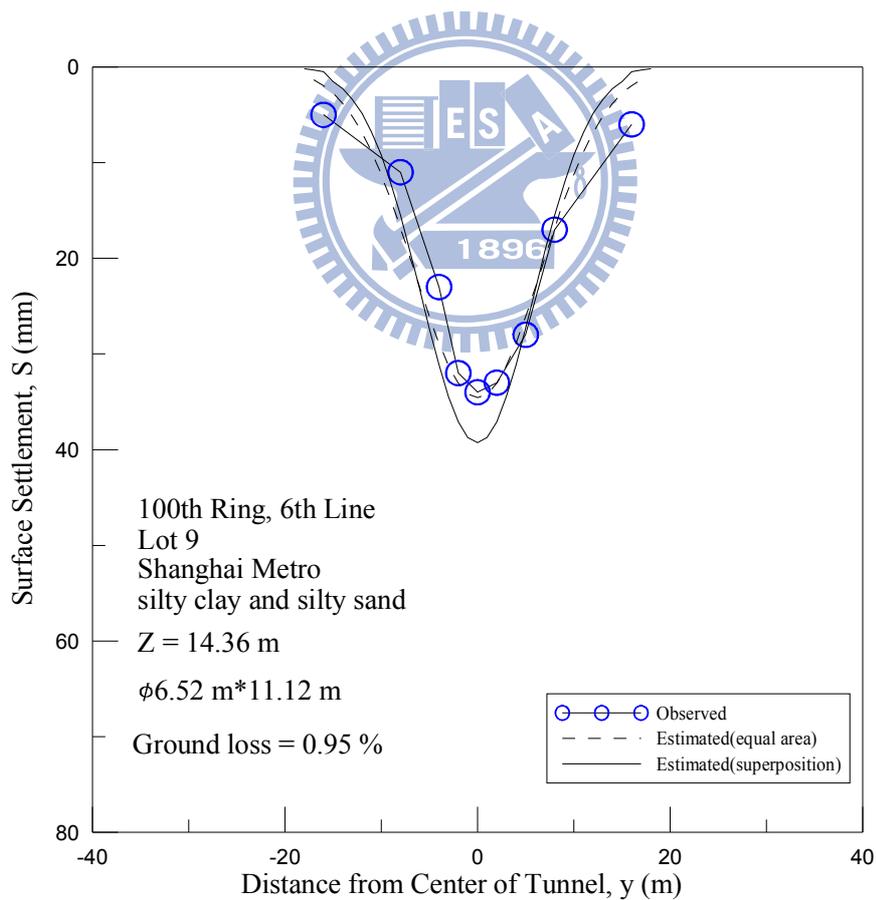


圖 5-4 上海軌道交通六號線第九標工程第 100 環沉陷槽

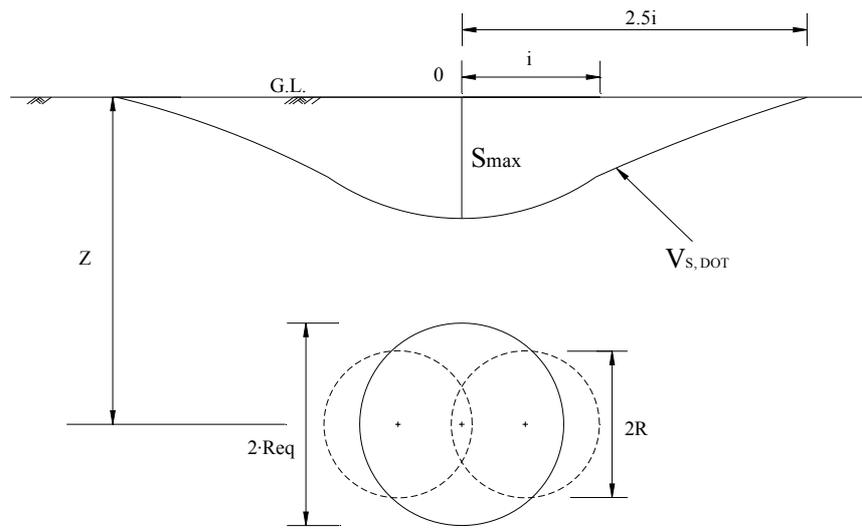


圖 5-5 等面積法估計 DOT 隧道施工造成之地表沉陷槽

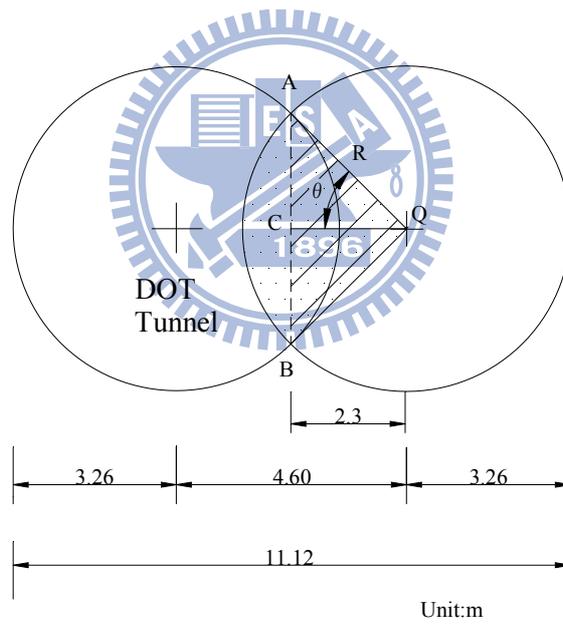


圖 5-6 DOT 潛盾隧道面積計算之圖示

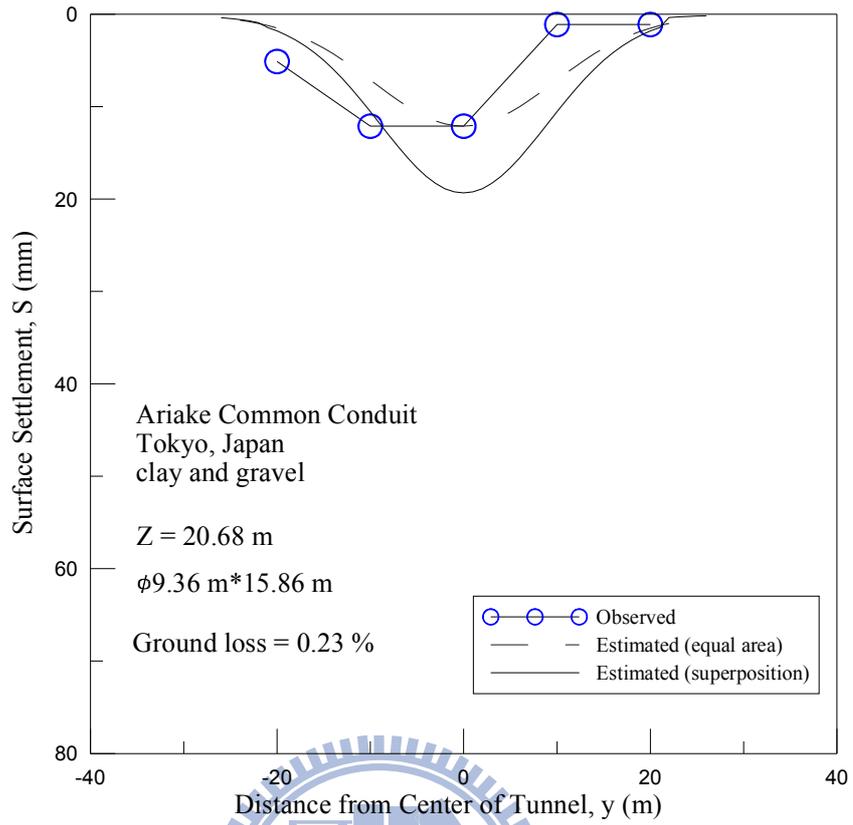


圖 5-7 東京都有明北地區共同管道 DOT 潛盾隧道之沉陷槽

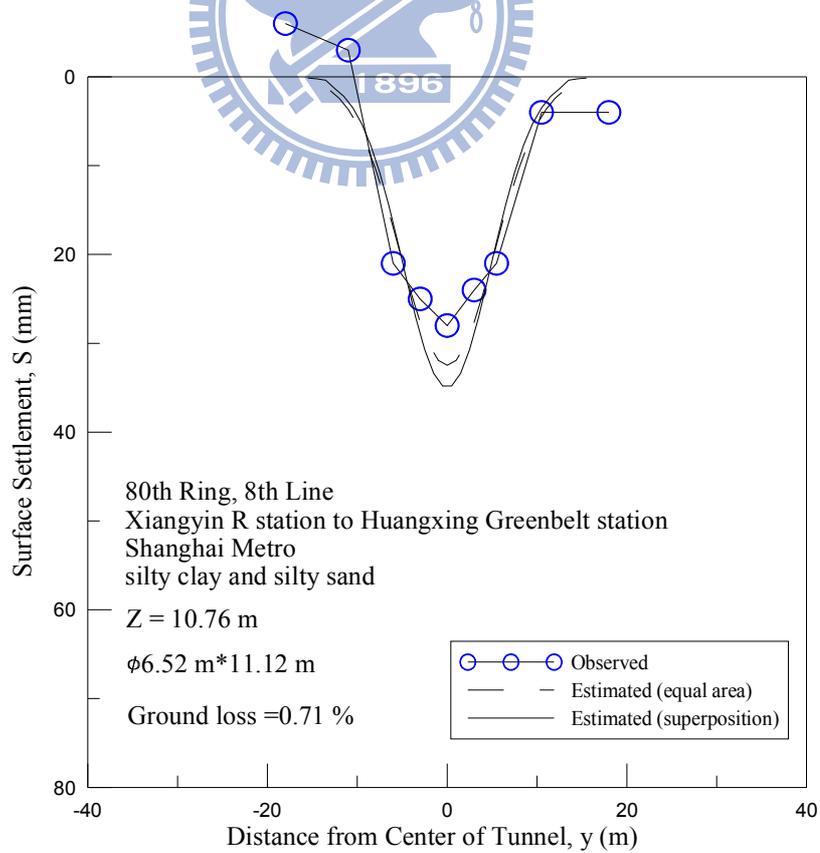


圖 5-8 上海軌道交通八號線翔殷路站段至黃興綠地站第 80 環沉陷槽

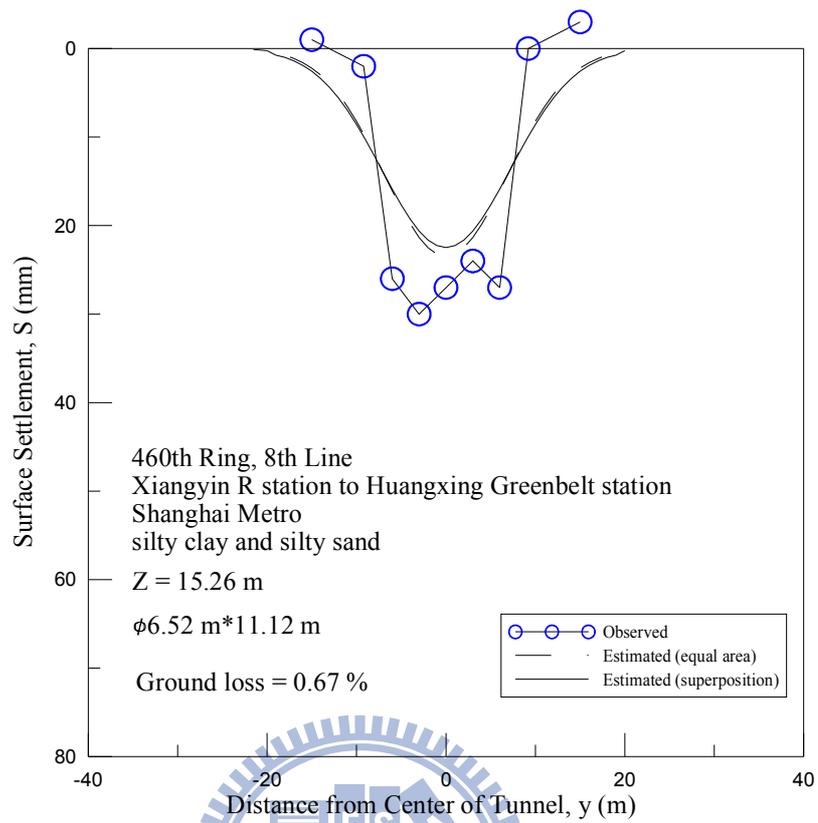


圖 5-9 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 460 環沉陷槽

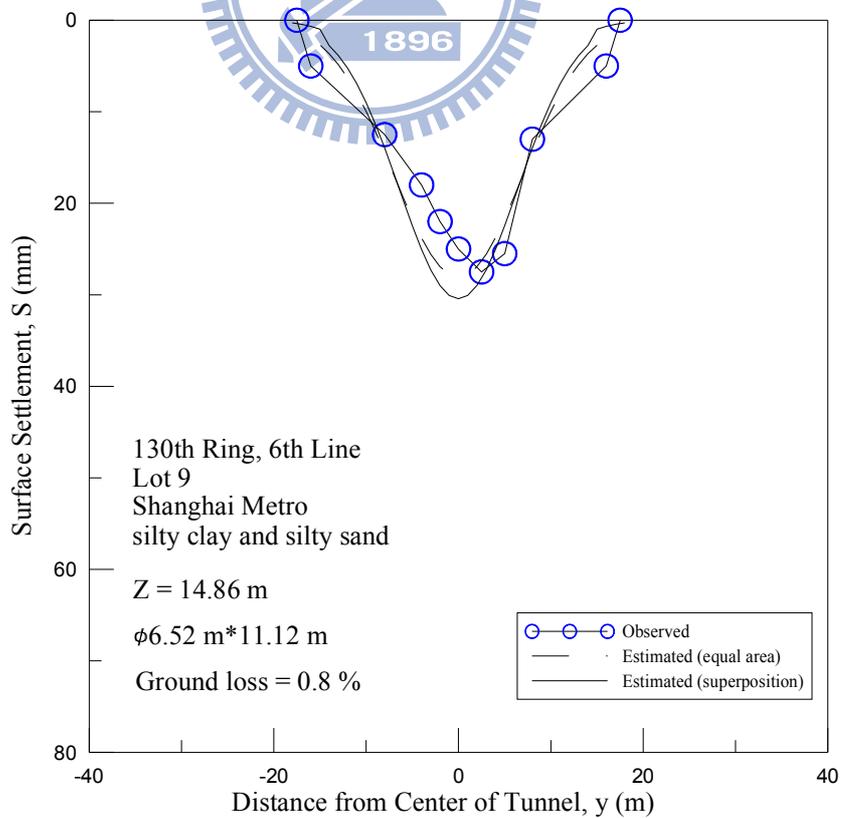


圖 5-10 上海軌道交通六號線第九標工程第 130 環沉陷槽

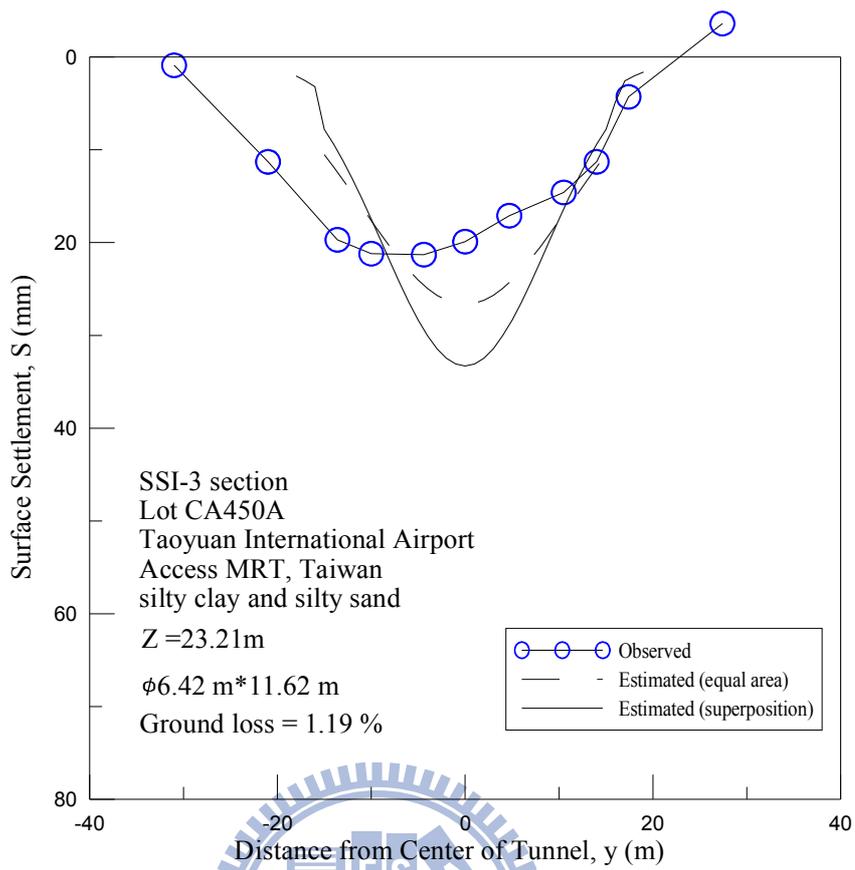


圖 5-11 桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道之沉陷槽

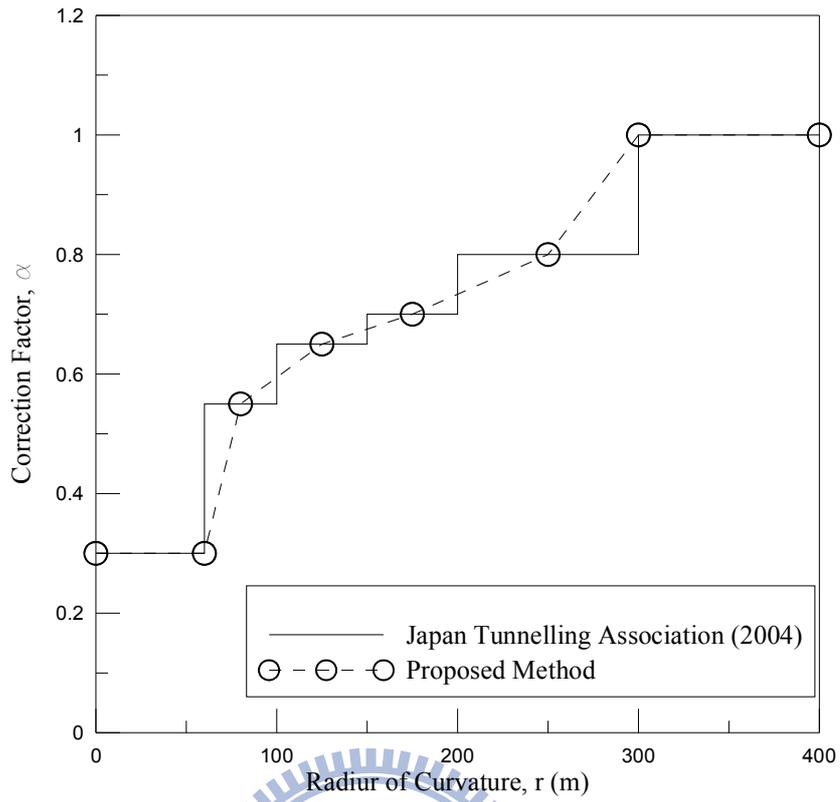


圖 6-1 曲率半徑與修正係數之關係

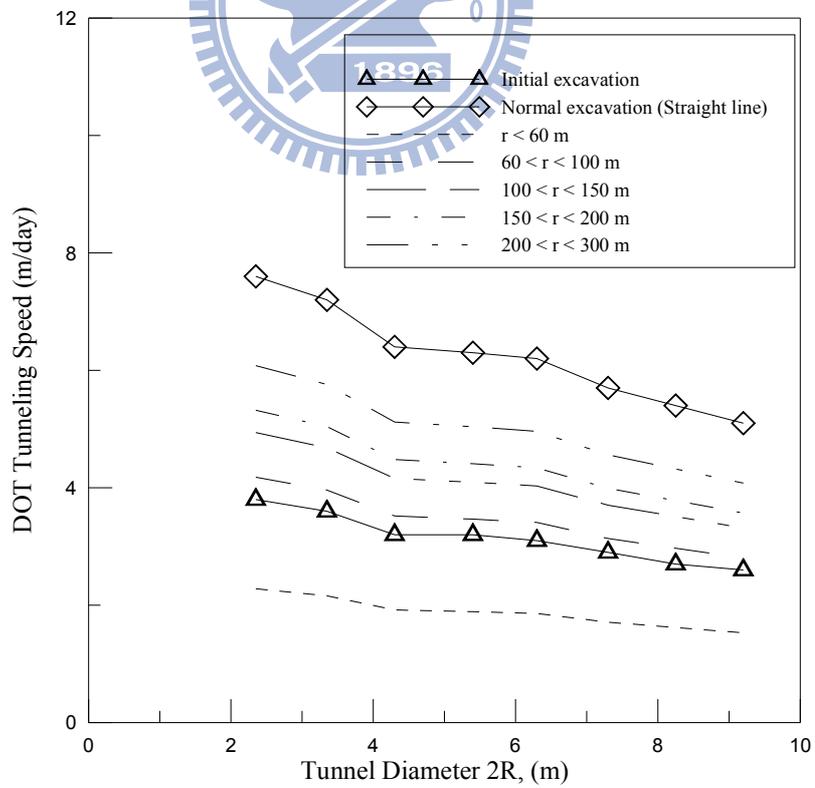


圖 6-2 DOT 潛盾隧道直徑及曲率半徑與施工速率關係圖

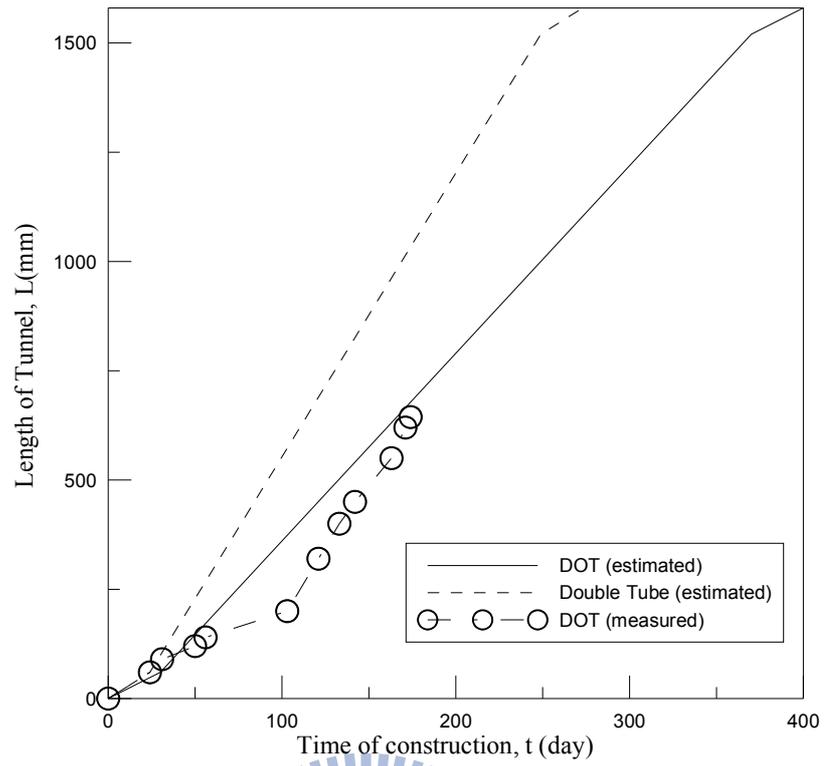


圖 6-3 桃園機場聯外捷運 CA450 標潛盾隧道工法工期與隧道長度關係圖



Table A Project Constructed with DOT Shield tunneling method

Case no.	Project name	Purpose of tunnel	Geological condition	External Dimensions of DOT shield (m)	Length of tunnel (m)	Thickness of overburden (m)	Minimum radius of curvature $r_{min}(m)$	Maxium gradient (%)	Shield manufacture	Period of construction
0	Proved experimental project of DOT shield tunnel	Proved experimental		$\phi 2.5 \times 4.19$	79				IHI	1989~1994
1	Rijo tunnel, 54 <sup>th</sup> national route Hiroshima, Japan	Subway	Clay, sand	$\Phi 6.09 \times 10.69$	850	5.0~8.3	135	1.8	IHI	1989~1994
2	Kikutagawa 2 <sup>nd</sup> sewer main, Narashino, Chiba, Japan	Sewer main	Fine sand, clay, peat soil	$\Phi 4.45 \times 7.65$	703	2.15~9.0	1,600	4.0	IHI	1990~1994
3	Ariakekita common conduit, Tokyo, Japan	Common conduit	Clay, gravel	$\Phi 9.36 \times 15.86$	249	14~17	1,600	3.5	MHI	1990~1994

Table A Project Constructed with DOT Shield Tunneling Method (continuous )

Case no.	Project name	Purpose of tunnel	Geological condition	External Dimensions of DOT shield (m)	Length of tunnel (m)	Thickness of overburden (m)	Minimum radius of curvature $r_{\min}$ (m)	Maxium gradient (%)	Shield manufacture	Period of construction
4	Underground line, coastline high speed transit, Kobe, Japan	Subway	Clay, gravel	$\Phi 5.48 \times 9.75$	304	11.5~15.5	1,500	0.8	MHI	1995~1998
5	East district of Sunadashi, 4th line high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Sandy gravel, silt, clay	$\Phi 6.52 \times 11.12$	752	10.31~16.6	500	2.3	IHI	1999~2002
6	Chayagasaka park district, 4 <sup>th</sup> line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Silt, sand	$\Phi 6.52 \times 11.12$	1,007	11.0~32.1	500	3.3	IHI	1999~2002
7	Yamamoto north district, of 4 <sup>th</sup> line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Clay, sand, sandy gravel	$\Phi 6.52 \times 11.12$	1,238	9.3~32.3	300	2.7	IHI	1999~2002

Table A Project Constructed with DOT Shield Tunneling Method(continuous )

Case no.	Project name	Purpose of tunnel	Geological condition	External Dimensions of DOT shield (m)	Length of tunnel (m)	Thickness of overburden (m)	Minimum radius of curvature $r_{\min}$ (m)	Maxium gradient (%)	Shield manufacture	Period of construction
8	South district of Nagoya University, 4 <sup>th</sup> line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Clay, sandy silt, sandy gravel	$\Phi 6.52 \times 11.12$	876	11.5~21.3	200	3.1	IHI	1999~2002
9	Yagoto north district, 4 <sup>th</sup> line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Clay, sandy gravel	$\Phi 6.52 \times 11.12$	782	19.0~24.0	180	0.9	KHI	1999~2002
10	Yamashitadori south district, 4 <sup>th</sup> line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	sandy gravel	$\Phi 6.52 \times 11.12$	957	10~16.6	165	3.3	MHI	1999~2003
11	Yagoto south district 4 <sup>th</sup> line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	clay, sandy gravel	$\Phi 6.52 \times 11.12$	1,025	16.2	300	3.1	MHI	1999~2003

Table A Project Constructed with DOT Shield Tunneling Method(continuous )

Case no.	Project name	Purpose of tunnel	Geological condition	External Dimensions of DOT shield (m)	Length of tunnel (m)	Thickness of overburden (m)	Minimum radius of curvature $r_{min}$ (m)	Maxium gradient (%)	Shield manufacture	Period of construction
12	Linimo 1 <sup>st</sup> distriction Aichi, Japan	Maglev transit	Sandy soil	$\Phi 6.73 \times 11.43$	904	15.0	102	5.9	IHI	N.A.
13	Linimo line Aichi, Japan	Maglev transit	Clay, sand	$\Phi 6.73 \times 11.43$	123	12.0~13.0	102	0	IHI	N.A.
14	Nenjiang Rd. st. to Xiangyin Rd. st. to Huangxing greenbelt st. , line 8 Shanghai Metro, China	Subway	Silty sand, silty clay, Clayey silt,	$\Phi 6.52 \times 11.12$	1759	5.2~12.0	495	2.8	IHI	2003~2004
15	Kairuan road station to Nenjiang road station , line 8 Shanghai Metro, China	Subway		$\Phi 6.52 \times 11.12$	929	5.2~12.0	495	2.8	MHI	2003~2004

Table A Project Constructed with DOT Shield Tunneling Method(continuous )

Case no.	Project name	Purpose of tunnel	Geological condition	External Dimensions of DOT shield (m)	Length of tunnel (m)	Thickness of overburden (m)	Minimum radius of curvature $r_{\min}$ (m)	Maxium gradient (%)	Shield manufacture	Period of construction
16	Lot 9, line 6, Shanghai Metro, China	Subway	Silty sand silty clay, Clayey silt,	$\Phi 6.52 \times 11.12$	1,713	4.0~21.0	300	2.7	IHI	2004~2005
17	Lot 10, line 6, Shanghai Metro, China	Subway		$\Phi 6.52 \times 11.12$	2,497	6.0~13.0	990	1.5	IHI	2004~2005
18	Lot 11, line 6, Shanghai Metro, China	Subway		$\Phi 6.52 \times 11.12$	1,096	6.0~10.0	420	2.7	IHI	2004~2006
19	Lot 10, line 3, Shanghai Metro, China	Subway		$\Phi 6.52 \times 11.12$	1,459	12.3~19.8	N.A.	N.A.	IHI	~2009
20	Lot CA450A, Taoyuau Airport Access MRT, Taiwan	MRT		silty clay and silty sand	$\Phi 6.42 \times 11.62$	1,584	7.6~26.0	280	4.9	IHI