

國立交通大學
土木工程學系
碩士論文

雙圓型潛盾隧道開挖造成之地盤沉陷
Ground Settlement Due to Double-O-Tube
Shield Tunneling



研究生：黃閔邑
指導教授：方永壽 博士

中華民國一百年九月

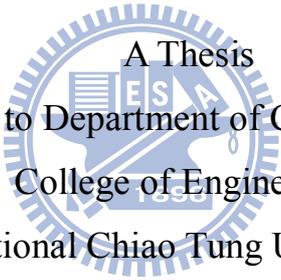
雙圓型潛盾隧道開挖造成之地盤沉陷

Ground Settlement Due to Double-O-Tube

Shield Tunneling

研究生：黃閔邑 Student：Min-Yi Huang
指導教授：方永壽 博士 Advisor：Dr. Yung-Show Fang

國立交通大學
土木工程學系
碩士論文



A Thesis
Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Civil Engineering
September 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China
中華民國一百年九月

雙圓型潛盾隧道開挖造成之地盤沉陷

研究生：黃閔邑

指導教授：方永壽 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

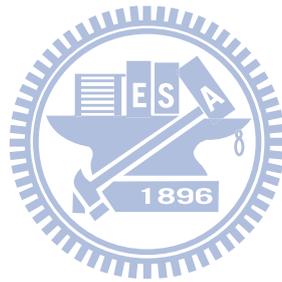
摘要

本論文依據桃園國際機場捷運台北三重段，CA450A 標雙圓型 (Double-O-Tube, DOT) 潛盾隧道施工案例，探討 DOT 潛盾工法之施工、監測、工期與施工造成之沉陷。本研究依據現地監測資料探討以雙曲線模式(hyperbolic model)模擬地表沉陷歷時曲線之適用性。根據國內外 11 筆 DOT 潛盾隧道施工之地表沉陷資料，本研究探討 DOT 潛盾機施工引致之地表沉陷槽寬度 i 值，及最大地表沉陷量 S_{max} ，並獲得以下各項結論。

1. 施工之實測數據顯示，CA450A 標 DOT 潛盾機施工造成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。只要盾身滾轉量大於行動值 0.2 度，施工單位即視實際狀況以切刀盤反向旋轉、背填灌漿、及以超挖刀擴挖來修正潛盾機滾轉角度。
2. 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 2.5 m/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 4.55 m/day，較預估速率快 5.8 %。於到達段預估施工速率為 2.0 m/day，實際施工速率為 4.3 m/day，較預估施工速率快 115 %。
3. DOT 潛盾隧道總工期預估 400 天，實際掘進總工期為 360 天，較預估工期減少 10 %。
4. 國內外 11 筆 DOT 潛盾隧道施工造成地表沉陷槽監測數據顯示，DOT 施工引致之地盤漏失率範圍為 0.21 % ~ 1.34 % 之間，平均值為 0.85 %。

5. 以土壓平衡式 DOT 潛盾機施工，引致隧道中心線上方之地表沉陷歷時曲線，可以使用雙曲線關係加以模擬。
6. 本研究建議以 Peck(1969)提出之常態分佈曲線，預估 DOT 潛盾施工造成之地表沉陷槽。現地監測沉陷資料顯示，以常態分佈曲線預估之沉陷槽與實測沉陷槽之分佈大致吻合。

關鍵字：DOT 潛盾機、滾轉、工期、地表沉陷槽、沉陷歷時曲線



Ground Settlement Due to Double-O-Tube Shield Tunneling

Student : Min-Yi Huang

Advisor : Dr. Yung-Show Fang

Department 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 ground settlement due to tunneling. Based on the field data, the hyperbolic model is proposed to simulate the settlement-time relationship due to DOT shield tunneling. Peck(1969) suggested that the surface settlement due to shield tunneling can be described with a normal distribution curve. Based on the field data, measured at 11 different cases in 3 different countries, this study analyzes the settlement trough width parameter i and maximum surface settlement S_{\max} due to DOT shield tunneling. Based on this study, the following conclusions are made.

1. Field data indicated that the maximum rolling angle was 0.38° , which was less than the limiting design rolling angle of 0.6° . As the rolling angle became greater than the management value of 0.2° , action would be taken. The measures adopted by the contractor to correct the rolling angle included: reverse rotation of the cutter disc, backfill grouting, and overcut of ground with the copy cutter.
2. 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 4.55 m/day, which was 5.8 % faster than the estimated speed. In the arrival section, the estimated speed of excavation was 2.0 m/day, and the measured speed was 4.3 m/day, which was 115 % faster than the estimated speed.

3. The estimated total duration for DOT shield tunneling was 400 days. The actual excavation duration was 360 days, which was 10 % shorter than the estimated duration.
4. The ground loss due to DOT shield tunneling varied from 0.21 to 1.34 %, and the average ground loss was 0.85 %.
5. Field monitored data indicated that the settlement-time relationship induced by DOT shield tunneling can be properly described by the hyperbolic model.
6. Field monitored settlement data indicated that the settlement trough monitored in the field was in fairly good agreement with the normal distribution estimation proposed by Peck.

Key Words: DOT shield, Rolling, Duration, Ground settlement,
Settlement-time relationship

誌謝

本論文得以完成，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、治學態度或待人處世上，均給予諸多的指導及關懷。在恩師的殷切指導與協助下，本論文才得以順利完成，在此致上萬分的謝意與由衷的感激。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予之指導及協助。

在論文撰寫過程中，尚須感謝台北市捷運工程局北工處土木第六工務所、台灣世曦工程顧問股份有限公司、及達欣/清水營造工程股份有限公司，提供相關施工及監測資料，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陳建旭工程師、李萬鈞主辦工程師，台灣世曦工程顧問公司林恆次工程師、陳景功工程師，達欣/清水營造周祿卿工程師、廖銘洋工程師，孟韋工程股份有限公司陳州位工程師等人，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國立高雄第一科技大學范嘉程教授給予諸多寶貴的建議與指正，使本論文更加完整，在此致上最深的謝意。

研究期間，感謝黃亭淵同學、陳冠宇同學在論文上給予諸多意見與鼓勵，共同奮戰到最後一刻。以及黃昱鉞學弟、劉政學弟及戴家豪學弟的熱心協助，在此一併致上萬分的謝意。

最後，感謝我親愛的父母、家人、女友和所有關心我的親朋好友。因為有他們的支持和鼓勵，才能讓我有今日的表現，願將此份榮耀與喜悅與你們一起分享。

目錄

摘要	i
誌謝	v
目錄	vi
表目錄	x
圖目錄	xi
附錄	xv
符號說明	xvi
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 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 環片構造	6
2.5 DOT 潛盾隧道施工造成之滾轉	6
2.6 潛盾隧道施工引致地盤沉陷之原因	8
2.6.1 盾尾空隙閉合	9
2.6.2 襯砌變形	9
2.6.3 開挖面應力的改變	10
2.6.4 曲線段掘進造成超挖	10
2.6.5 地下水位變化	10
2.7 地表沉陷歷時曲線	11

2.7.1	沉陷對數時間模式.....	11
2.7.2	雙曲線模式.....	12
2.8	潛盾隧道施工引致之地盤變位.....	13
2.8.1	沉陷槽寬度估算.....	13
2.8.2	最大沉陷量估算.....	15
2.8.3	Peck-Fujita 經驗式預估平行雙隧道引致之地表沉陷.....	16
2.8.4	Peck 經驗式模擬 DOT 潛盾隧道沉陷槽.....	17
第三章	DOT 潛盾隧道施工案例.....	19
3.1	千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程.....	19
3.1.1	工程概述.....	19
3.1.2	地質概況.....	20
3.1.3	選擇 DOT 潛盾工法之原因.....	20
3.1.4	潛盾機介紹.....	21
3.1.5	防止地盤位移採用之輔助工法.....	21
3.2	名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程.....	22
3.2.1	工程概述.....	22
3.2.2	地質概況.....	22
3.2.3	潛盾機介紹.....	23
3.2.4	潛盾機滾轉實測分析.....	23
3.2.5	土壓力管理.....	23
第四章	桃園國際機場聯外捷運台北三重段 DOT 潛盾隧道工程案例.....	25
4.1	工程概況.....	25
4.2	地質概況.....	26
4.3	鑽孔地質調查.....	26
4.4	CA450A 標 DOT 潛盾隧道施工介紹.....	27

4.4.1 潛盾機介紹.....	27
4.4.2 開挖面土倉壓力管理.....	28
4.4.3 盾首加泥注入管理.....	29
4.4.4 同步背填灌漿.....	30
4.4.5 環片背填灌漿.....	32
4.4.6 環片背填灌漿注入率之案例比較.....	33
4.4.7 二次灌漿.....	34
4.4.8 潛盾機滾轉及俯仰角度管理.....	34
4.5 監測系統介紹.....	36
4.5.1 地表沉陷釘之佈置.....	36
4.6 單圓雙孔與 DOT 潛盾隧道工期比較.....	37
4.6.1 單圓雙孔潛盾隧道施工速率.....	37
4.6.2 DOT 潛盾隧道施工速率.....	37
4.6.3 工期比較.....	38
第五章 CA450A 標 DOT 潛盾隧道工程監測資料分析.....	40
5.1 橫斷面地表沉陷槽.....	40
5.2 地表沉陷與時間之關係.....	42
第六章 DOT 潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽.....	45
6.1 常態分佈沉陷槽理論.....	45
6.1.1 如何決定 DOT 潛盾施工造成之 i 值.....	46
6.2 常態分佈曲線與監測沉陷資料之比較.....	47
6.3 如何預估沉陷槽寬度參數 i	49
6.4 如何預估地表最大沉陷量 S_{max}	50
第七章 結論與建議.....	53
7.1 結論.....	53

7.2 建議.....	54
參考文獻.....	55
表.....	61
圖.....	74
附錄.....	138



表目錄

表 1-1 地表最大沉陷量之預測值.....	61
表 2-1 雙曲線參數 a 值建議表.....	62
表 2-2 雙曲線參數 b 值建議表.....	63
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.....	64
表 3-1 DOT 潛盾隧道工程案例表.....	65
表 4-1 同步及環片背填灌漿材料之基本配比表.....	68
表 4-2 同步及環片背填灌漿材料之基本特性.....	68
表 4-3 DOT 潛盾隧道工法於直線段之施工速率.....	69
表 4-4 DOT 潛盾隧道工法於曲線段之工率修正係數.....	69
表 4-5 CA450A 標 DOT 與單圓潛盾工法預估工期比較.....	70
表 6-1 DOT 潛盾機開挖隧道引致地表沉陷槽.....	71
表 6-2 單圓潛盾隧道開挖造成之地表最大沉陷量 S_{max} 建議表.....	73

圖目錄

圖 1-1 CA450A 標路線平面圖	74
圖 2-1 DOT 潛盾機切刀盤配置示意圖	75
圖 2-2 DOT 潛盾隧道使用之襯砌環片	75
圖 2-3 DOT 潛盾隧道環片錯縫拼裝圖	76
圖 2-4 DOT 潛盾隧道環片銜接之短直螺栓和預埋構件	76
圖 2-5 DOT 潛盾隧道環片與預埋構件安裝示意圖	77
圖 2-6 DOT 潛盾隧道滾轉造成之軸線偏差示意圖	77
圖 2-7 DOT 潛盾隧道修正千斤頂圖示	78
圖 2-8 以修正千斤頂及單側加載環片修正 DOT 潛盾機滾轉	78
圖 2-9 以超挖刀修正 DOT 潛盾隧道滾轉	79
圖 2-10 DOT 潛盾隧道以盾攙修正滾轉	79
圖 2-11 DOT 潛盾隧道以環片灌漿修正滾轉	80
圖 2-12 潛盾機掘進所引致之沉陷歷時曲線	81
圖 2-13 潛盾隧道施工導致地表沉陷歷時曲線	82
圖 2-14 現地沉陷歷時曲線推求雙曲線參數 a 及 b	82
圖 2-15 以誤差函數（常態分佈曲線）模擬地表沉陷槽	83
圖 2-16 不同土層下沉陷槽寬徑比（ i/R ）與隧道深徑比（ $Z/2R$ ）關係圖	83
圖 2-17 沉陷槽寬徑比（ i/R ）與隧道深徑比（ $Z/2R$ ）之關係	84
圖 2-18 地下水以下砂質地盤潛盾施工引致之地表沉陷槽	85
圖 2-19 軟弱土層隧道施工後所引致之土壤塑性範圍	85
圖 2-20 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	86
圖 2-21 兩單圓潛盾隧道獨立引致之沉陷槽	86
圖 2-22 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	87

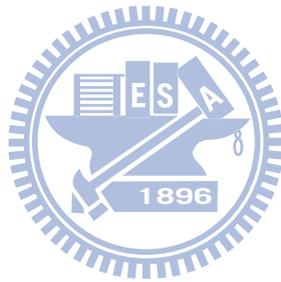
圖 2-23 以等面積單圓潛盾隧道模擬 DOT 隧道造成之地表沉陷槽.....	87
圖 3-1 千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程使用之 DOT 潛盾機	88
圖 3-2 千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程 DOT 潛盾隧道路線圖 ..	89
圖 3-3 千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程地質剖面圖	90
圖 3-4 穿越 JR 總武線下方的 DOT 隧道防護工法	91
圖 3-5 穿越京城電鐵鐵路於 DOT 隧道施作之防護工法	92
圖 3-6 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區 DOT 潛盾隧道路線圖.....	92
圖 3-7 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程地質剖面圖	93
圖 3-8 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區 DOT 潛盾機滾轉角度.....	94
圖 3-9 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區 DOT 潛盾機管理土壓力	95
圖 4-1 桃園國際機場聯外捷運系統路線平面圖	96
圖 4-2 桃園國際機場聯外捷運三重台北段 CA450A 標地質剖面圖	97
圖 4-3 CH-5、CH-8、及 CH-17 調查孔取得之粒徑分佈曲線	98
圖 4-4 CA450A 標 DOT 潛盾機切刀盤配置圖示	98
圖 4-5 CA450A 標 DOT 潛盾機超挖刀裝置	99
圖 4-6 (a) CA450A 標 DOT 潛盾機上海鷗部同步背填灌漿孔	100
圖 4-6 (b) CA450A 標 DOT 盾身外側之灌漿管	100
圖 4-7 CA450A 標 DOT 潛盾機下海鷗部同步背填灌漿孔.....	101
圖 4-8 CA450A 標 DOT 潛盾隧道出發端隧道口	101
圖 4-9 CA450A 標潛盾隧道環片配置圖	102
圖 4-10 CA450A 標 DOT 潛盾隧道	102
圖 4-11 CA450A 標 DOT 潛盾機管理土壓力	103
圖 4-12 CA450A 標 DOT 潛盾隧道自環片背填灌漿	104
圖 4-13 環片背填灌漿率與直徑之關係	105
圖 4-14 環片背填灌漿率與深徑比 $Z/2R$ 之無因次關係	106

圖 4-15 CA450A 標二次灌漿施作圖	107
圖 4-16 CA450A 標二次灌漿位置示意圖	107
圖 4-17 CA450A 標二次灌漿施作範圍圖	108
圖 4-18 CA450A 標 DOT 潛盾機滾轉角度實測分析	109
圖 4-19 CA450A 標 DOT 潛盾機俯仰角度實測分析	110
圖 4-20 地面型沉陷觀測點構造圖(SM).....	111
圖 4-21 地表沉陷點(SSI).....	111
圖 4-22 CA450A 標淺式地表沉陷觀測點 (SSI)	112
圖 4-23 CA450A 標監測儀器佈置圖	113
圖 4-24 曲率半徑與修正係數之關係	115
圖 4-25 DOT 潛盾隧道直徑及曲率半徑與施工速率關係圖	115
圖 4-26 CA450 標 DOT 潛盾隧道工期與隧道長度關係	116
圖 4-27 CA450A 標 DOT 潛盾隧道到達端隧道口	116
圖 5-1 測陣 SSI3 斷面與隧道斷面之相關位置.....	117
圖 5-2 測陣 SSI6 斷面與隧道斷面之相關位置.....	118
圖 5-3 SSI3 斷面地表沉陷槽.....	119
圖 5-4 SSI6 斷面地表沉陷槽.....	119
圖 5-5 東京都有明北地區共同管道 DOT 潛盾隧道斷面地表沉陷槽.....	120
圖 5-6 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 80 環斷面地表沉陷槽.	120
圖 5-7 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 455 環斷面地表沉陷槽	121
圖 5-8 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 460 環斷面地表沉陷槽	121
圖 5-9 上海地鐵六號線第九標工程第 100 環橫斷面地表沉陷槽.....	122
圖 5-10 上海地鐵六號線第九標工程第 130 環橫斷面地表沉陷槽.....	122
圖 5-11 上海地鐵六號線雲山路站至博興路站第 280 環斷面地表沉陷槽	123
圖 5-12 上海地鐵六號線雲山路站至博興路站第 580 環斷面地表沉陷槽	123

圖 5-13 上海地鐵十號線同濟大學站至大連路站第 24 環斷面地表沉陷槽	124
圖 5-14 DOT 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	125
圖 5-15 CA450A 標現地監測資料及以雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線	126
圖 5-16 地表沉陷歷時曲線雙曲線參數	126
圖 5-17 雙曲線參數 a、b 之物理意義	127
圖 6-1 DOT 潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽	128
圖 6-2 CA450A 標 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之比較	129
圖 6-3 CA450A 標 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定	129
圖 6-4 日本有明北地區 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之	130
圖 6-5 日本有明北地區 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定	130
圖 6-6 上海地鐵六號線 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之比較	131
圖 6-7 上海地鐵六號線 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定	132
圖 6-8 上海地鐵八號及十號線 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之比較	133
圖 6-9 上海地鐵八號及十號線 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定	134
圖 6-10 沉陷槽寬度參數 i/R 與隧道深度 $Z/2R$ 之無因次關係	135
圖 6-11 最大沉陷量 S_{max}/R 與隧道深度 $Z/2R$ 之無因次關係	136
圖 6-12 EPB DOT 潛盾機及單圓潛盾機開挖隧道造成之最大沉陷量 S_{max}	137

附錄

Table A Project Constructed with DOT Shield Tunneling Method.....138



符號說明

a 、 b ：雙曲線參數

D ：潛盾隧道襯砌外側直徑 (m)

G_1 ：地盤漏失率 (%)

i ：隧道中心線到地表沉陷槽反曲點的水平距離 (m)

i/R ：沉陷槽寬徑比

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)

S_c ：壓密沉陷量 (mm)

S_{max} ：隧道中心線上方的地表最大沉陷量 (mm)

$S(t)$ ：隧道中心線上方之地表沉陷量 (mm)

$S(y)$ ：距隧道中心水平距離 y 處之地表沉陷量 (mm)

S_{10} ：潛盾機盾首通過後第十天之沉陷量 (mm)

t ：潛盾機首通過測點後之時間 (day)

y ：測點至隧道中心線之水平距離 (m)

Z ：隧道中心線深度 (m)

$Z/2R$ ：隧道深徑比

$1/a$ ：初始沉陷速率 (mm/day)

$1/b$ ：最大沉陷量 (mm)

θ ：潛盾機滾轉角度 (度)

α ：潛盾機俯仰角度 (度)

第一章

緒論

1.1 前言

隨著台灣人口成長與經濟快速發展，都市交通建設對都市發展及民眾生活環境扮演著一個影響深遠的重要角色，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：捷運交通系統、衛生下水道、鐵路地下化、自來水幹管、電力及電信管線隧道等。

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，多採用潛盾施工，潛盾隧道施工往往以平行雙孔或多孔隧道形式出現，且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型技術發展至雙圓型(Double-O-Tube)，簡稱 DOT 潛盾隧道。

為了減小地下開挖面積、降低對周邊建物之影響、縮短工期等，日本於 1989 年發明了 DOT 潛盾隧道工法。其工法發展至今超過二十年，成功完成 19 個案例，包括日本 13 個、及大陸 6 個案例。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台北三重段隧道施工。我國是全世界第三個使用 DOT 潛盾隧道工法的國家。

為改善桃園國際機場聯外交通，並連結「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，交通部高速鐵路工程局施作「桃園國際機場捷運系統建設計畫」。其中「桃園國際機場聯外捷運系統 CA450A 標工程」，為國內首宗 DOT 潛盾隧道施工案例。

如圖 1-1 所示，CA450A 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，因考慮在淡水河底施作隧道逃生安全需求之三條連絡通道(cross passage)，風險性高且工程費昂貴，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

桃園機場聯外捷運台北三重段之 CA450A 標為國內首次使用 DOT 潛盾隧道工法開挖之案例，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 潛盾工法之施工、監測、工期與施工造成之沉陷。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，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 潛盾隧道設計及施工相關資訊。

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)及俯仰(pitching)問題，將會影響隧道斷面施工品質。本研究分析桃園機場聯外捷運 CA450A 標現地資料，報告實測之 DOT 潛盾機滾轉及俯仰角度。

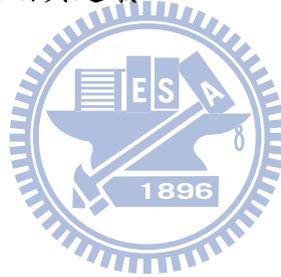
本研究藉由收集分析機場捷運台北三重段 CA450A 標的監測資料及國外相關資料，探討以 DOT 潛盾機開挖隧道所引致之地表沉陷及沉陷與時間的關係，以提供 DOT 潛盾施工時對鄰近結構物保護之參考依據。本研究依據 Fang et al. (1993)所建議之雙曲線模式(hyperbolic model)，模擬 CA450A 標雙圓型潛盾隧道開挖造成之地表沉陷歷時曲線。

Fujita (1982) 依據 94 筆日本潛盾施工資料，提出潛盾隧道施工造成地表最大沉陷 S_{max} 之預估表(表 1-1)，表中開挖機具包含開放式、擠壓式、泥水式、及土壓平衡式潛盾機，但缺少 DOT 雙圓潛盾機開挖造成之 S_{max} 沉陷資料。故本研究收集國內外 DOT 雙圓潛盾隧道之案例資料，依據 Peck(1969)之建議，探討如何以經驗方法預估 DOT 潛盾隧道施工造成之最大地表沉陷量 S_{max} 及沉陷槽寬度參數 i 。

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、施工原理、DOT 潛盾機型式與環片構造、隧道施工造成之潛盾機滾轉及隧道施工導致地表沉陷之相關文獻。第三章為 DOT 潛盾隧道施工案例介紹，本論文介紹日本千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程及日本名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程。

第四章介紹桃園國際機場聯外捷運 CA450A 標潛盾隧道工程之地盤反應監測系統，及單圓雙孔與 DOT 潛盾隧道施工工期比較。第五章對前述測陣獲得之監測資料進行分析整理，探討 DOT 潛盾隧道施工引致地表沉陷槽，及沉陷與時間關係。第六章探討 DOT 雙圓潛盾隧道施工造成之最大地表沉陷量 S_{max} 及沉陷槽寬度參數 i 。第七章為結論與建議。



第二章

文獻回顧

DOT 潛盾隧道施工所引致之地盤變位對於鄰近地表結構物、建物基礎、及地下管線造成潛在威脅。本章將對 DOT 潛盾隧道工法之沿革、施工原理、潛盾機型式、環片構造、施工造成之機身滾轉與解決方案、及施工引致之地盤沉陷之相關文獻加以說明。

2.1 DOT 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矩形斷面潛盾機。於1869年，英國人Greathead等採用其所發明之圓型斷面潛盾機、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。

我國自民國65年台北衛生下水道工程引進潛盾工法(蔡茂生, 1989)以來，迄今已逾35年，所使用之潛盾機自最簡單的開放型手挖式潛盾機至機械式、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。

隨著地下化可用空間越來越小，潛盾隧道施工由原來的單圓技術發展至雙圓潛盾隧道，桃園國際機場捷運「三重站至台北車站」段CA450A標，採用雙圓型潛盾工法，於民國98年12月開始施工穿越淡水河。基於隧道逃生安全需求，傳統單圓雙孔潛盾隧道必須在淡水河下設置連絡通道，其施工較困難且風險較高，因此引進DOT潛盾隧道工法，可避免在河底下開挖三條聯絡通道降低施工風險。

DOT 潛盾工法 1987 年於日本取得專利，石川島播磨重工業株式會社 (Ishikawajima-Harima Heavy Industries, 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 年成功地應用在日本廣島 54 號國道系統工程建設。2002 年中國上海首次使用 DOT 潛盾隧道工法於上海軌道交通八號線，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 工法於桃園機場聯外捷運台北三重段工程，該標工程之隧道段已於 99 年 12 月掘進完畢。

2.2 DOT 潛盾隧道工法施工原理

如圖 2-1 所示，CA450A 標使用之潛盾機，於同一開挖平面上，設置兩組各 6 輻之切刃盤，輻條形切刃盤交會處兩組輻條像齒輪般相互吻合，不互相影響運行。潛盾機掘進時由操作員同步控制，兩組切刃盤以相同速度、相反方向做旋轉開挖。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、可向前移動之雙圓型鋼套筒（即潛盾機）於土層中挖掘前進，且在設置永久襯砌前，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

傳統潛盾機型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）、與泥水式潛盾機（slurry shield）及雙圓型潛盾機。

至目前為止，於工程建設上被使用的 20 台 DOT 潛盾機，皆為土壓平衡式潛盾機。此類潛盾機前方設一密閉式土倉，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和，使其具有流動性，拌和後之土砂經隔板上的取土口，進入連接土倉及機體內部之螺運機(screw conveyor)。當潛盾機掘進時，控制螺運機旋轉之排土速度控制土倉內之泥土壓力，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，為提高排土能力，確保切削面左右土壓力平衡及穩定。橫向雙圓型潛盾機左右各設一套螺運機排土設備。

2.4 DOT 環片構造

如圖2-2所示，DOT潛盾隧道每一環由11片襯砌環片組成，包括A、B、C、D四種類型環片。圖2-3顯示左右兩邊圓型襯砌部分各由4片A型環片組成，於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，中間柱設置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，如此錯縫拼裝環片可避免弱面連續，並增加隧道襯砌勁度。DOT隧道襯砌環片寬度為1.2 m，厚度為300 mm。DOT潛盾隧道襯砌之環與環間，以單孔的預埋構件以短直螺栓連接，如圖2-4 (a)所示，片與片間由三孔的預埋構件以短直螺栓連接，如圖2-4 (b)。Koyama (2003)顯示典型的 DOT潛盾隧道環片與預埋構件的示意圖，如圖2-5。一般單圓潛盾隧道之襯砌環片形狀分為A、B、K型，環片相互常以弧形螺栓連接環片，一般環片寬度通常為1.0 m，厚度為250 mm。

2.5 DOT 潛盾隧道施工造成之滾轉

潛盾機施工會造成盾身滾轉之問題，因此對其兩圓心連線平面及高程軸線須加以控制，DOT 潛盾機施工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，較不會對隧道斷面造成直接影響，但雙圓潛盾隧道一旦發生滾轉(如圖 2-6)，將影響潛盾機和造成左右環片的高低差及中間柱傾斜，會使得環片間應力重新分配，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 潛盾隧道施工之主要難題。

張曠(2004)及 Shen et al.(2009)提出，導致 DOT 潛盾隧道滾轉的原因，包含 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、及施工技術欠佳等。以下分別對上述各項因素探討。

(1) DOT 潛盾機周圍土體不均勻

DOT 潛盾隧道於掘進過程中，由於開挖面土體不均勻，使得切刃盤在切削土體時，左右切刃盤產生之力矩大小不同，對潛盾機產生力矩差，造成潛盾機滾轉。此外，承載潛盾機下方土體性質及地基承载力不同，也可能造成潛盾機滾轉。

(2) DOT 潛盾機於曲線段施工

DOT 潛盾機於曲線段施工時，潛盾機左右兩側受力大小和方向的差異，可能使潛盾機發生滾轉。此外，切刃盤外側若發生局部超挖現象，盾身亦容易發生滾轉。

(3) DOT 潛盾機本身構造和設備配置差異

潛盾機於左右環片組立設備的結構不同，通常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(組立中間柱 D 環片)，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，因施工人員技術欠佳，導致左右螺運機排土速率不平衡，多支潛盾千斤頂推力不平衡，環片組裝精度欠佳，皆可能引致潛盾機滾轉。

針對造成 DOT 潛盾機滾轉問題，張矚(2004)、易永輝與林建華(2008)及 Shen et al.(2009)研究 DOT 潛盾滾轉之修正方法，並介紹控制盾身滾轉問題之各項對策。

(1) 修正千斤頂

潛盾機配置的數個推力千斤頂(shield jack)側面，配有伸縮功能之修正千斤頂(correction jack)，如圖 2-7 所示，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 2-8。

(2) 單邊加載環片

掘進時如發生盾體滾轉，則被升高之一側可利用單邊環片組立機抓取環片，使一側加載重量，產生反方向之滾轉，降低滾轉之角度，如圖 2-8 所示。

(3) 超挖刀修正

利用切刀盤側面的超挖刀(copy cutter)進行局部超挖(over-excavation)，造成局部土體鬆弛，降低土體抵抗，減少 DOT 盾體之滾轉角度，如圖 2-9 所示。

(4) 盾撬頂出

圖 2-10 顯示 DOT 盾首斜下方設置之盾撬(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) 控制螺運機出土量

利用左右螺運機排土量差異，於被抬高之一側增加排土速率，使該側土壤鬆弛，修正滾轉角度。



(6) 背填灌漿

如圖 2-11，當潛盾隧道發生滾轉時，可於環片孔背填灌漿，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) 切刀盤反向旋轉

潛盾機在掘進過程中，開挖土質不均勻可能造成左右切刀盤承受力矩大小不同，因此造成潛盾機滾轉。可結合潛盾機的滾轉方向，透過改變切刀盤旋轉方向，平衡左右切刀盤承受之力矩，達成修正隧道滾轉的目的。

2.6 潛盾隧道施工引致地盤沉陷之原因

潛盾隧道施工所造成之地盤沉陷，與開挖土壤的種類、選用的潛盾機型式、潛盾機直徑及隧道中心線深度等，均有密切的關係。Peck (1969)、Schmidt

(1974)、Cording and Hansmire (1975)、Hanya (1977)、Attewell (1981)、Mori and Akagi (1985)、Fang et al. (1994)、Chou and Antonio (2002)、Eric (2006) 等學者，均曾經提出相關的研究成果。綜合上述研究成果，潛盾隧道施工引致地盤沉陷的原因，可分為以下五大項。

2.6.1 盾尾空隙閉合

潛盾機盾殼通過之後，原地盤與隧道襯砌環片外緣之間所形成之空隙稱為盾尾空隙 (tail void)，一般盾尾空隙約為 50 到 80 mm。通常採背填灌漿 (backfill grouting) 將盾尾空隙填滿，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，容易引起周圍地層的應力釋放，造成土壤的彈塑性變形，導致隧道周圍土壤往此空隙移動。盾尾空隙閉合為潛盾隧道施工引起地盤沉陷的最主要原因。

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

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

式中，

V_L ：地盤漏失率（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。

2.6.2 襯砌變形

隧道襯砌組裝完成之際，本應呈現圓環狀，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，不均勻之外側壓力使環片受壓後略呈扁平狀。在軟弱土層中，因地下水位降低或土壤受擾動等原因，可能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，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，故造成之變形量不致於過大。

2.6.3 開挖面應力的改變

潛盾機開挖掘進時，須自潛盾機內部向開挖面施予一推力，以維持開挖面之穩定。若此推力小於原土層之靜止土壓力，則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，土體會向開挖面擠入，同時發生地盤漏失的情形，導致地盤沉陷。但若此推力恰等於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，可能導致地盤的隆起。



2.6.4 曲線段掘進造成超挖

潛盾隧道於曲線段施工時，為使潛盾機可順利轉向，潛盾機一側可能以超挖刀造成土壤超挖，導致盾殼周圍土體之空隙擴大而產生地盤漏失。在此施工狀態下，潛盾機切刀盤的阻力及千斤頂之壓力可能呈不均勻分佈，可能造成機體上下蛇行（pitching）或左右蛇行（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，通常為難以量化估算的。

2.6.5 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，其土體有效應力可

能增加，進而產生土壤壓密現象，造成地盤沉陷。

2.7 地表沉陷歷時曲線

日本土木學會 (Japan Society of Civil Engineers, 1996) 介紹，在一般砂土層與黏土層執行潛盾機開挖，依沉陷發生時機，伴隨潛盾隧道施工所產生之地盤沉陷區分為 5 大階段，如圖 2-12 所示，其沉陷行為說明如下：

- (1) 先行沉陷：發生於距潛盾機到達前方相當距離之沉陷。
- (2) 開挖面前方之沉陷或隆起：發生於開挖面前之沉陷或隆起，主要因潛盾機操作時，開挖面推擠前方土層造成土壓不平衡所致。
- (3) 通過時沉陷：發生於潛盾機通過時之沉陷，其產生之主要原因為盾殼表面與地盤間之摩擦，及伴隨超挖產生之地盤擾動所造成。
- (4) 盾尾空隙閉合沉陷：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，稱為盾尾空隙閉合。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：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擾動及壓密沉陷。

2.7.1 沉陷對數時間模式

Hwang et al. (1995) 的研究指出，由沉陷歷時曲線中，可明確區分立即沉陷 (immediate settlement) 與壓密沉陷 (consolidation settlement)。圖 2-13 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 10 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)

2.7.2 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 2-14 所示，可用下列之雙曲線模式加以描述：

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

式中，

$S(t)$ ：隧道中心線正上方之地表沉陷量 (mm)

t ：潛盾機盾首通過後的時間 (day)

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 $t/S(t)$ 與 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 2-14 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 2-1 與表 2-2。依據上述兩表之參數 a 及 b，配合 (2.4 式) 之雙曲線模式，可以模擬出潛盾隧道施工造成之沉陷歷時曲線。

2.8 潛盾隧道施工引致之地盤變位

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、及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。

2.8.1 沉陷槽寬度估算

Peck (1969) 依現地觀測資料研究發現，以傳統潛盾工法開挖隧道，施工所引致之地表沉陷槽可用誤差函數 (error function) 或常態分佈曲線 (normal

distribution curve) 來加以模擬，沉陷槽上各點之沉陷量可由下式計算：

$$S(y) = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.6)$$

式中，

$S(y)$ ：距隧道中心水平距離 y 處之地表沉陷量 (mm)

y ：測點至隧道中心線之水平距離 (m)

S_{\max} ：隧道中心線上方的地表最大沉陷量 (mm)

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)

圖 2-15 之常態分佈曲線反曲點所對應之沉陷量為 $0.61 S_{\max}$ 。地表沉陷槽單位長度內之沉陷體積 V_s 為：

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max} \approx 2.5 \cdot i \cdot S_{\max} \quad (2.7)$$

Peck (1969) 分析於不同土層狀況下施工所引致之地表沉陷槽得到其 i 值，作為代表沉陷槽寬度之參數。並將隧道半徑 (R)、隧道中心線深度 (Z) 及寬度參數 (i) 值之關係，繪製成圖 2-16。圖中顯示，相同直徑之潛盾機於相同深度開挖隧道 ($Z/2R$ 值固定)，於軟弱黏土層所得到之 i 值，顯然較硬質黏土層之 i 值為大。若在地下水位以下之砂土層內開挖隧道，因難以控制地盤漏失的情況，故其造成之沉陷槽將可能更寬。

Attewell (1981) 依不同土層監測之結果，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：

$$i/R = k(Z/2R)^n \quad (2.8)$$

式中， k 與 n 為參數，依現地之地質特性而定，如表 2-3 所示。

Clough and Schmidt (1981) 針對於凝聚性土層中開挖隧道所造成之地表沉陷槽進行研究，將沉陷槽寬徑比 (i/R) 與隧道深徑比 ($Z/2R$) 之關係繪於圖 2-17 中，其關係如下：

$$i/R = (Z/2R)^{0.8} \quad (2.9)$$

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

$$i/R = (Z/2R)^{0.94} \quad (2.10)$$

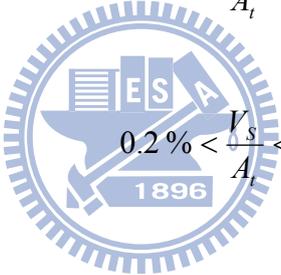
2.8.2 最大沉陷量估算

Kanji (1979) 依據現地監測結果，將單位長度地表沉陷槽體積 V_s 表示為土層特性與隧道斷面積 A_t 之函數，各土層中 V_s 估計方法如下

1. 於堅硬的凝聚性土壤中：

$$0.5\% < \frac{V_s}{A_t} < 2.5\% \quad (2.11)$$

2. 於一般凝聚性土壤中：

$$0.2\% < \frac{V_s}{A_t} < 10\% \quad (2.12)$$


3. 於非凝聚性土壤中：

$$3\% < \frac{V_s}{A_t} < 10\% \quad (2.13)$$

由已知之開挖隧道斷面積 A_t ，便可依據式(2.11)至式(2.13)估計所得之沉陷槽體積 V_s 。對 Peck (1969) 所提出之常態分佈曲線式 (2.6) 積分並化簡後，可進一步依下列公式估算地表最大沉陷量 S_{\max} ：

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \times i} \quad (2.14)$$

Fujita (1982) 收集日本國內自 1965 年以來，共 94 筆潛盾隧道施工案例之現地監測資料，依潛盾機型式、土層狀況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，為預估潛盾隧道施工引致之地表最大沉陷量的依據。

Mair et al. (1993) 以離心機模型試驗，模擬若在黏土層隧道施工，於地表

下深度 Z 處之沉陷槽最大沉陷量 S_{\max} 如下：

$$S_{\max} = \frac{1.25G_l}{0.175 + 0.325\left(1 - \frac{Z_0}{Z}\right)} \times \frac{R^2}{Z} \quad (2.15)$$

式中，

G_l ：地盤漏失率 (%)

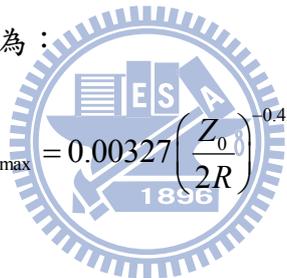
Z ：隧道中心線深度 (m)

Z_0 ：地表下深度 z 處 (m)

針對地表沉陷槽， Z 等於 0，將之代入式(2.15)並簡化可得：

$$S_{\max} = 5V_s \times \frac{R^2}{Z_0} \quad (2.16)$$

Wu and Lee (2003) 透過離心機模型試驗，模擬隧道在黏土層中隧道施工，得地表之最大沉陷量 S_{\max} 為：



$$S_{\max} = 0.00327 \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^{-0.43} \times G_l \times 2R \quad (2.17)$$

2.8.3 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沉陷方法，主要係針對單隧道施工來進行研究。然而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沉陷，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沉陷，將比第一條為大 (如圖 2-18)。Peck 建議計算雙隧道施工所造成的總沉陷槽時，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。

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(圖 2-19)。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(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 2-20 所示)。圖 2-20 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 0.1，表示塑性區寬度甚為有限。

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沉陷，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沉陷，也較第一條隧道施工所造成的沉陷量大。Schmidt 指出，雙隧道施工所引致的沉陷曲線幾乎對稱於雙隧道中心線，且由資料可知最大沉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引致的沉陷槽曲線，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。

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致重疊。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沉陷曲線範圍，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沉陷量。

2.8.4 Peck 經驗式模擬 DOT 潛盾隧道沉陷槽

孫統立(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。分析方法分別以兩個單圓潛盾隧道沉陷量疊加模擬及 DOT 潛盾隧道視為等

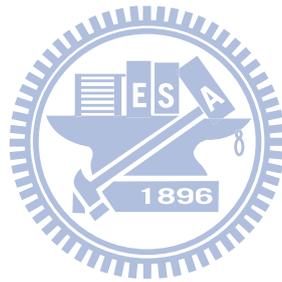
面積大圓隧道加以模擬，分別說明如下。

(1) 沉陷疊加法

如圖 2-21 所示，假設 DOT 潛盾隧道引致之地表沉陷各自獨立，不會互相影響，因此 DOT 潛盾隧道引致之地表沉陷槽可以兩個單圓潛盾隧道引起之地表沉陷相互疊加，如圖 2-22。

(2) 等面積替代法

假設 DOT 潛盾隧道開挖造成之地盤沉陷與等面積單圓潛盾隧道開挖造成之地盤沉陷相同，因此 DOT 潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽亦呈常態分佈，如圖 2-23 所示，依此可以依照 Peck 經驗式計算隧道施工造成之地表沉陷槽。



第三章

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，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、共同管溝 1 件及下水道 1 件，潛盾機外徑最小為 $\Phi 2.5 \text{ m} \times W 4.19 \text{ m}$ ，最大為 $\Phi 9.36 \text{ m} \times W 15.86 \text{ m}$ ，隧道中心線深度 4.38 m ~ 35.56 m，施工遭遇最大坡度為 5.9 %，最小曲率半徑為 102 m，最長之隧道總長為 2,497 m。20 台 DOT 潛盾機製造商分別為日本的 IHI、MHI、及 KHI 公司，其中 IHI 製造 15 台、MHI 4 台、KHI 1 台。

以下分別介紹採用 DOT 潛盾隧道工法施工之千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程(case 2)，及名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程(case 11)。

3.1 千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程

橫山博一(1994)介紹日本千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程之 DOT 潛盾隧道施工案例。以下分別說明本案例之工程概述、地質概況、選擇 DOT 潛盾工法之原因、潛盾機介紹、及防止地盤位移採用之輔助工法。

3.1.1 工程概述

千葉縣習志野市津田沼地區，為東京都市郊經濟開發區，近年來正快速地朝城市化方向開發。因為其地形特性之因素，每在多雨季節，往往使民宅成為嚴重受水浸害的區域。

本下水道工程建造最大目的為消除津田沼地區的雨季浸水受害，DOT 潛盾隧道施工期間為 1990 年 11 月至 1994 年 3 月，使用 IHI 公司製造 $\Phi 4.45 \text{ m} \times W 7.65$

m 斷面之 DOT 潛盾機，如圖 3-1。圖 3-2 顯示，隧道工程路線由津田沼一丁目附近的發進井出發，潛盾機掘進的路線途中，不但須穿越 JR 總武線及京成電鐵等鐵路路線，而且還要經過覆土厚度僅有 2.15 m ($0.5D$, $D = \text{潛盾機縱徑} = 4.45 \text{ m}$) 之區段，施工條件之困難不言而喻，其平面線形還含有七處 $R = 200 \text{ m}$ 之曲線段。隧道施工全長為 703 m，自發進井出發向下游之到達井掘進 586 m，抵達到達井後即將潛盾機拆解、吊起後，運回發進井，予以重新組裝，再往上游側掘進 117 m。

3.1.2 地質概況

潛盾隧道下水道工程之地質概況如圖 3-3 顯示，發進井附近地質為洪積層之成田砂層，下游區段則為沖積砂層與腐殖土之互層。成田砂層由均勻係數約為 2 之細砂所組成，標準貫入試驗之 N 值介於 10~30 之間，腐殖土含水量高達 160~380 %，屬於易因含水量下降而沉陷的土層。



3.1.3 選擇 DOT 潛盾工法之原因

橫山博一(1994)指出，習志野市菊田川 2 號幹線下水道建設工程選擇 DOT 潛盾工法之原因，綜合為如以下三點：

- (1) 作為雨季排水的下水道涵管，其必要的管道斷面積約 18 m^2 ，若採用單圓潛盾排水隧道其斷面內側直徑要求必須為 $\Phi 4,750 \text{ mm}$ ，但施工路線上 DOT 隧道最淺的覆土厚度只有 2.15 m，如果選擇單圓潛盾工法，則其覆土厚度不再存有。
- (2) 線路下游的雨水泵房溢流堰高度受到潮位的影響，其要求之管底高度不能太低。
- (3) 施工作業的土地使用上，DOT 工法所需場地面積較少，對於防噪音的隔離設備規模要求也比較小。

3.1.4 潛盾機介紹

本下水道工程採用之 DOT 潛盾機，為日本石川島播磨重工業株式會社(IHI)製造之泥土壓平衡式潛盾機。潛盾機外徑為 $\Phi 4.45 \text{ m} \times \text{W } 7.65 \text{ m}$ ，盾殼內共 24 支千斤頂(上部 16 支，每支推力 120 tf，下部 8 支，每支推力 150 tf)，採用直徑為 520 mm 之兩組螺運機排土。每環隧道由 9 個襯砌環片(6A + 1B + 1C + 1D) 以短直螺栓組成。

3.1.5 防止地盤位移採用之輔助工法

(1) 穿越 JR 總武線鐵路下方區段

於掘進前經過有限元素法(FEM)分析下水道開挖造成之地盤沉陷，依據分析結果，承包商施行圖 3-4 所示之雙重管雙層封堵壓注工法地盤改良，以減少 DOT 隧道開挖造成之地盤沉陷量，確保 JR 總武鐵路之安全。地盤改良後，監測得 DOT 隧道掘進過程所造成之地盤位移先行隆起 1~2 mm，盾尾通過後沉陷約 2 mm，隆起及沉陷量均小於 JR 鐵路軌道容許之位移量。

(2) 穿越京成電鐵鐵路下方區段

為了保護京成電鐵鐵路之平交道，施作圖 3-5 所示之管幕工法及雙重管雙層封堵壓注工法地盤改良，結果本區段在 DOT 隧道掘進過程中僅發生 2 mm 之沉陷，對京成鐵路軌道幾乎沒有任何不良影響。

(3) 於超薄覆土區段掘進

潛盾機上方覆土層最淺處僅 2.15 m，為防止潛盾機掘進時可能拖動地盤，在潛盾機上方施行厚 1.0 m 之 CJG(column jet grout)高壓噴射灌漿，另於隧道與民房之間施作排樁以確保鄰近民房之安全。結果本區段於潛盾機掘進時，雖發生 5~15 mm 之先行隆起，潛盾機通過時僅發生大約 10 mm 之地盤隆起或

沉陷，對周邊建物無危險影響，安然完成 DOT 隧道掘進。

3.2 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程

石原俊造等(2003)介紹名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程之 DOT 潛盾隧道工程案例。以下分別介紹該案例之工程概述、地質概況、潛盾機介紹、潛盾機滾轉實測分析、及土倉土壓力管理。

3.2.1 工程概述

石原俊造等(2003)說明，名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區是從名古屋市中心向周邊的城市地區呈放射型的地下鐵建設。捷運線路網和已設置的車站連接，將名古屋及周邊地區據點形成網狀系統的路線結構，達到地鐵乘用者長期以來的願望。

名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區，施工期間為 2001 年 2 月至 2002 年 5 月，使用 $\Phi 6.52 \text{ m} \times \text{W } 11.12 \text{ m}$ 斷面之 DOT 潛盾機。圖 3-6 顯示，隧道工程路線由清水岡車站工作井出發，先於道路下方的直線區段掘進約 350 m，剩餘的曲線路線長度為 675 m，隧道掘進都在民宅底下進行，通過兩個曲率半徑 $R = 300 \text{ m}$ 的路線，形成一個 S 型線型，最後到達八事車站，隧道施工全長為 1,025 m，隧道中心線深度約 12.96~23.36 m。

3.2.2 地質概況

潛盾隧道開挖之地質概況如圖 3-7，其地質為「八事・唐山層」的第四紀洪積層，是以混雜黏土的砂礫為主體的地質層，其粒徑為 40 mm 以下的砂礫顆粒主體中，粒徑大約 100 mm 的粗礫分佈在其中。

3.2.3 潛盾機介紹

名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程採用之 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 $\Phi 6.52 \text{ m} \times W 11.12 \text{ m}$ ，長度 7.915 m，總共配置 32 支總推力為 68,600 kN 之千斤頂，採用直徑為 700 mm 之兩組螺運機排土。

3.2.4 潛盾機滾轉實測分析

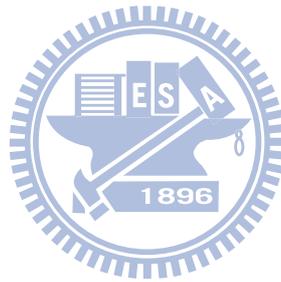
DOT 潛盾機掘進時造成滾轉之原因及滾轉修正方法已於第二章說明，在此對名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程(以下簡稱此路段)之潛盾機滾轉角度實測結果，及其控制盾身滾轉量之操作方式加以介紹。

圖 3-8 為此路段潛盾機滾轉角度 θ 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開挖面看，DOT 潛盾機順時針滾轉為正，逆時針滾轉為負。圖中顯示潛盾機於第 1 環至第 398 環掘進時，有五處其滾轉角度皆大於 0.3 度，最大值為 0.37 度，操作人員使用超挖刀、修正千斤頂、及在潛盾機內設置重量平衡塊控制滾轉角度，降低滾轉角度至極限範圍(正負 0.6 度)。潛盾機於第 399 環逐漸修正至 0 度，之後維持在 ± 0.1 度內。隧道持續掘進至第 850 環期間，共有兩處超過規定之修正值(正負 0.2 度)，兩處滾轉角度分別為 -0.29 度和 -0.27 度，操作人員減輕左側隧道原本加設置之平衡塊重量，控制降低其負滾轉角度，DOT 隧道安全順利掘進至到達車站。

3.2.5 土壓力管理

隧道開挖前，施工單位根據覆土厚度和地質鑽探資料，設定了管理土壓力(如圖 3-9)，圖中以“有效靜止土壓力+水壓力+20 kPa”作為管理土壓力的上限，“有效主動土壓力+水壓力+20 kPa”作為管理土壓力的下限，設計管理土壓力的上限

值約為 70~220 kPa，下限值約為 50~170 kPa。如圖 3-9 所示，掘進測得的實際土壓力值介於 90~240 kPa 之間，從第 1 環至第 850 環間之土壓力管理，幾乎都控制在管理值的上下範圍內，但於第 100 環至第 240 環及第 600 環附近，其兩處的覆土厚度皆很小，且隧道掘進區間地層大多為民宅或其它建築物，雖然選擇上限管理值較高的土壓力值做掘進，但在掘進過程開挖對周邊建築物未發生明顯不利影響。



第四章

桃園國際機場聯外捷運台北三重段 DOT 潛盾隧道工程案例

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。交通部高速鐵路工程局推動施作「桃園國際機場捷運系統」(Taoyuan International Airport Access MRT System)。

圖 4-1 顯示，此系統將與台北地區捷運系統及台灣高速鐵路連結，於台北車站(A1)、五股工業區站(A3)、及高鐵桃園站(A18)提供預辦登機及行李拖運服務。本工程路線全長約 51.03 km，其中地下段約 10.92 km，高架段約 40.11 km。沿途共設 22 座車站，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。

本章介紹「桃園國際機場聯外捷運系統」台北三重段，CA450A 標三重站(A2 站)至台北捷運 G14 車站間之 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、且施工困難之三處聯絡通道，台灣首次引進 DOT 潛盾工法施作隧道。以下分別說明 CA450A 標工程概況、地質概況、潛盾隧道施工介紹、及佈設之監測系統。

4.1 工程概況

桃園國際機場聯外捷運台北三重段，CA450A 標 DOT 潛盾隧道工程，如圖 1-1 所示，施工路線從台北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區，經台北市第十三號公園(玉泉公園)，沿市民大道南側地下，到達捷運松山線北門站(G14 站)北端，隧道全長約為 1,584 m。此標工程之業主為台北市政府捷運工程北區工程處，設計單位為台灣世曦工程顧問公司，承包廠商為達欣工程公司與日商清水營造工程公司聯合承攬。CA450A 標工程施工時間自民國

98 年 12 月 8 日起，DOT 潛盾隧道已於民國 99 年 12 月全線貫通。

4.2 地質概況

依據地質探查結果，本工址 DOT 潛盾隧道通過之地層剖面如圖 4-2 所示，路線所經地區均位於台北盆地內，地質分佈皆屬於第四紀沉積物，以泥或砂礫為主。依據鑽探結果研判，DOT 潛盾隧道施工有關之地質概況可分為以下三層次：

1. 第一層次：為表土回填層 (surface fill, SF)，厚度約為地表下 0~3 m，標準貫入試驗 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，厚度約為地表下 3 m~50 m，N 值為 2~35。
3. 第三層次：為景美礫石層(GP)，厚度約為地表下 50 m~54 m 以下，標準貫入試驗 N 值大於 50。

地下水位約位於地表下 3~5 m，圖 4-2 顯示，本工程之 DOT 潛盾隧道施工，主要在第二層次(松山層)之粉土質砂與粉土質黏土內進行。

4.3 鑽孔地質調查

為進行 DOT 潛盾隧道施工，必須了解隧道開挖路線遭遇土層之粒徑分佈狀況，施工單位針對本案例 DOT 潛盾隧道施工路線，採用傳統鑽探取樣並對取出之土樣進行篩分析試驗。本研究在隧道長 1,584 m 範圍內，選擇三處鑽孔位置來探討 DOT 潛盾隧道遭遇土壤的粒徑分佈情形，三處鑽探孔位置距離出發段分別約 70 m、1,126 m、及 1,460 m，鑽孔編號分別為 CH-17、CH-8、及 CH-5，實際位置如圖 4-2 所示，將調查所獲得之結果簡單說明如下：

- (a) CH-17 鑽孔：地表下 0 m~46 m 為粉土質黏土層及粉土質砂層互層，圖 4-3 顯示深度於 13.1~13.5 m 及 16.1~16.5 m 之粉土質砂(SM)及粉土質黏土(CL)粒徑分佈曲線，其中 SM 之粗砂含量為 0%，中等砂含量為 36.5%，細砂之含量

為 39.5 %。CL 土壤之粉土及黏土含量為 1.5 %。

(b) CH-8 鑽孔：地表下 0 m~42 m 為粉土質黏土層及粉土質砂層互層，圖 4-3 顯示深度於 28.1~28.5 m 及 31.1~31.5 m 之粉土質砂(SM)及粉土質黏土(CL)粒徑分佈曲線，其中 SM 之粗砂含量為 0 %，中等砂含量為 33 %，細砂之含量為 36 %。CL 土壤之粉土及黏土含量為 2 %。

(c) CH-5 鑽孔：地表下 1 m~47 m 為粉土質黏土層及粉土質砂層互層，圖 4-3 顯示深度於 23.5~24.0 m 之粉土質砂粒徑分佈曲線，其中粗砂含量為 0 %，中等砂含量為 36 %，細砂之含量為 36 %。

4.4 CA450A 標 DOT 潛盾隧道施工介紹

4.4.1 潛盾機介紹

CA450A 標工程採用日本石川島播磨重工業株式會社(IHI)製造之土壓平衡式 DOT 潛盾機，斷面為 $\Phi 6.42 \text{ m} \times W 11.62 \text{ m}$ ，潛盾機全長為 12.65 m，隧道上方中心線深度 10.81~29.21 m，最大坡度為 4.9 %，最小曲率半徑 $R_{\min} = 280 \text{ m}$ 。潛盾機上部使用 20 支千斤頂，每支推力 2,000 kN，潛盾機下部使用 12 支千斤頂，各支推力 2,500 kN，32 支千斤頂總推進力為 70,000 kN。

DOT 潛盾機左右各設置一組輪輻式切刀轉盤，如圖 4-4，使用同步控制使兩切刀轉盤運轉時互不干涉。每切刀盤內之輪輻軸為六支，其中兩支為外周部輔助輪軸。左右切刀盤上各設置兩組超挖刀(一組備用)，如圖 4-5 所示，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使用。為控制環片脫出盾殼時盾尾空隙閉合造成之沉陷量，製造商於盾身上下雙圓重疊處均裝設同步背填灌漿(simultaneous grouting)裝置，分別在上方海鷗部設置兩灌漿孔(如圖 4-6)，及下方海鷗部設置一灌漿孔(如圖 4-7)。潛盾機向前掘進，為環片脫出盾殼保護時，執行同步背填灌漿，將環片與地盤間之空隙以灌漿液填滿，控制地盤沉陷量。

圖 4-8 所示為 CA450A 標 DOT 潛盾隧道出發端隧道口，DOT 潛盾機由此路

段開始做掘進開挖。圖 4-9 所示，每環隧道襯砌以短直螺栓和 11 片環片(8A + 1B + 1C + 1D)連接組成，環片外徑為 6,200 mm，寬度為 1,200 mm，厚度為 300 mm。DOT 潛盾隧道內部環片組裝完成之情形如圖 4-10 所示。

4.4.2 開挖面土倉壓力管理

隧道開挖前須決定土倉壓力(chamber pressure, P_{ch}) 之管理值，主要是依據沿線之鑽孔取樣結果，依所得之地層鑽探資料(如土壤內摩擦角 ϕ 、凝聚力 C 、及土壤單位體積重 γ)，施工單位考量現場情況，選用側向土壓力計算方式，依施工規範決定每段隧道開挖應控制土倉壓力上下限之範圍。潛盾機掘進時，開挖面應維持土壓平衡，使機體前方土壤保持在主動土壓 p_a 至靜止土壓 p_0 間。本標工程使用之開挖面壓力計算方式如下：

(1) Rankine 主動土壓力計算公式說明如下：

主動土壓係數 K_a ：

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.1)$$

主動土壓力 p_a ：

$$p_a = K_a(q + \sum \gamma h) - 2C \times K_a^{1/2} \quad (4.2)$$

(2) 靜止土壓力之計算公式說明如下：

靜止土壓係數 K_0 (Jaky 公式)：

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (4.3)$$

靜止土壓力 P_0 ：

$$p_0 = K_0(q + \sum \gamma h) \quad (4.4)$$

其中：

p_a ：主動土壓力 (kPa)

p_0 ：靜止土壓力 (kPa)

ϕ ：土壤內摩擦角

q ：土壓超載重 (tf/m^2)

γ ：土壤單位體積重

h ：隧道上方覆土厚度(7.6~26.0 m)

C ：土壤凝聚力

隧道開挖前，施工單位經由式 4.2 及 4.4 計算，設定了管理土壓力(如圖 4-11)，圖中以”靜止土壓力”作為管理土壓力的上限值，”主動土壓力”作為管理土壓力的下限，設計管理土壓力的上限值約為 110~332 kPa，下限值約為 74~245 kPa。

如圖 4-11 所示，圖中橫軸為環片號數，縱軸為土壓力數值，掘進測得的實際土壓力值介於 93~236 kPa，從第 1 環至第 990 環間之土壓力管理，幾乎都控制在管理值的上下範圍內，但於第 40 環至第 220 環，因潛盾機遭遇 P64 橋墩進行托底工法施工之因故，所以潛盾機經過時選擇較管理下限值較小的壓力做掘進，以避免發生危險。第 991 環開始，因潛盾機開挖鄰近範圍皆有建築物，為避免因開挖面的掘進壓力太大，可能導致潛盾機掘進施工造成地盤隆起使建物損壞之可能性，因此選擇比管理下限值更小的壓力做掘進。DOT 潛盾機從出發井安全的掘進至到達端(台北捷運 G14 車站)，而潛盾機開挖對周邊建築物未造成任何重大的災害影響。

4.4.3 盾首加泥注入管理

為維持土倉內部開挖土壤之塑性流動及減少土渣與切刀盤之摩擦以降低切刀扭力，並使開挖土壤在土倉攪拌後產生泥土壓力與地層土壓及水壓抗衡，以保持開挖面穩定，DOT 潛盾機掘進時利用盾首切刀盤上之加泥注入口，將適量之高分子溶液加泥材注入開挖面。加泥材注入主要目的：

1. 與掘削土均勻混合，使土倉形成不透水性並易於控制土倉內壓力。

2. 防止掘削面滲水及崩塌，並有止水效果，螺運機排土不致噴出。
3. 減少摩擦降低潛盾機切刀扭力，降低掘削土與土倉壁及螺運機之摩擦力。
4. 防止鑽掘土砂附著土倉。

本案例施工單位在盾首以高分子溶液進行灌注，注入管理值預定之注入率為 10%，會隨著現地土壤之含水量做調整。

每環盾首加泥注入率計算：

$$\begin{aligned} &= \text{潛盾機斷面積} \times \text{環片寬度} \times \text{注入率} \\ &= 61.54 \text{ m}^2 \times 1.2 \text{ m} \times 10 \% = 7.38 \text{ m}^3 / \text{Ring} \end{aligned}$$

4.4.4 同步背填灌漿

潛盾機推進造成周圍土體因局部應力解除及盾尾空隙閉合形成地盤漏失，使原來處於平衡狀態之土層逐漸在隧道周圍形成塑性區，造成地盤沉陷。DOT 潛盾施工同步背填灌漿作業目的，是在隧道開挖引致土壤漏失之鬆弛效應尚未向盾身四周傳遞前，於開挖土體之自立時間內，即時以漿液順暢流入填充盾尾空隙，快速凝固並獲得強度，以減少尾隙閉合造成之地盤沉陷。

本工程灌漿方式為同步背填灌漿，施工單位利用設置於盾身雙圓重疊處之同步灌漿裝置（如圖 4-6 及圖 4-7），於潛盾機向前掘進之同時，利用自動同步背填灌漿設備於盾尾空隙形成之瞬間，以壓力同步將背填材料及自動注入形成之地下空間，使用之漿液材料及注入壓力說明如下。

1. 同步背填灌漿材料

如表 4-1 所示，本工程所使用之注入材料為雙液性(A 液+B 液)注入材，A 液成分為水泥系硬化材加入流動材，B 液為有助於硬化材凝結之純液體材（水玻璃），同步背填灌漿及環片背填灌漿注入材料之基本配比如表 4-1 所示，漿液要

求之固化時間及單軸壓縮強度如表 4-2 所示。

2. 漿液注入率及注入壓力

同步背填灌漿注入率受地質狀況、曲線施工、超挖、及背填注入材的種類影響。背填灌漿注入率定義如下：

$$\text{漿液注入率} = \frac{\text{每環注入漿液之體積}}{\text{每環盾尾空隙之體積}} \times 100\% \quad (4.5)$$

本案例 DOT 潛盾隧道，開挖土壤為粉土質砂與粉土質黏土。DOT 潛盾機之外徑為 6.42 m，襯砌環片外徑為 6.20 m，當環片脫離潛盾機盾尾時，環片外側與開挖土體間將產生 110 mm 盾尾空隙，必須即時以同步背填灌漿方式填充。

理論盾尾空隙量定義如下：

單圓潛盾隧道每 m 之盾尾空隙面積

$$= \frac{\pi}{4} (6.42)^2 - \left[\frac{\pi}{4} (6.20)^2 = 30.19 \text{ m}^2 \right] = 2.18 \text{ m}^2$$

$$2 \text{ 單圓盾尾空隙} = 2.18 \text{ m}^2 \times 2 = 4.36 \text{ m}^2$$

$$4 \text{ 片 A 型環片佔全圓} = \frac{256^\circ}{360^\circ} = 0.711 = 71.1\%$$

大及小海鷗佔 8.0 %

$$\text{每 m 長度 DOT 盾尾空隙} = 4.36 \text{ m}^2 \times (71.1\% + 8.0\%) \times 1 \text{ m} = 3.45 \text{ m}^3 / \text{m}$$

$$\text{每環盾尾空隙量} = 3.45 \text{ m}^3 / \text{m} \times 1.2 \text{ m} / R = 4.14 \text{ m}^3 / R$$

$$\text{每環注入量} = 4.14 \times 130\% = 5.38 \text{ m}^3 / R$$

依上述計算出之結果，台北捷運局規定施工灌漿注入量(包含同步背填及環片背填灌漿)以 130 % 之注入率計劃之，同步背填灌漿每環注入漿液 5.38 m³。

同步背填灌漿壓力以地下水壓加 100~200 kPa 為原則。例如以測線 SSI3 之

點位為例，測線 SSI3 從地表面至隧道中心線深度 $Z = 20.85 \text{ m}$ ，地下水位在地下表下 2.9 m ，地下水壓 $u = \gamma_w \times Z = (9.81)(20.85 - 2.9) = 176 \text{ kPa}$ ，地下水壓 u 加 $100 \sim 200 \text{ kPa}$ 範圍為 $276 \sim 376 \text{ kPa}$ 。測線 SSI6 地表面至隧道中心線深度 $Z = 28.47 \text{ m}$ ，地下水位深 0 m ，地下水壓 $u = \gamma_w \times Z = (9.81)(28.47 - 0) = 279 \text{ kPa}$ ，地下水壓 u 加 $100 \sim 200 \text{ kPa}$ 範圍為 $379 \sim 479 \text{ kPa}$ 。施工單位以 $200 \sim 400 \text{ kPa}$ 為同步背填壓力管理值，設定以不超過 400 kPa 為同步背填灌漿之灌注壓力極限值。若漿液注入率無法達到要求之注入率 130% 時，則可適度提高同步背填灌漿壓力 50 kPa ，至少注入量達到 130% 以上。

4.4.5 環片背填灌漿

環片背填灌漿之灌注方式，為利用環片上之灌入口插入背填灌漿管（如圖 4-12），於潛盾機向前掘進之同時，進行環片背填灌漿作業，使用之灌漿材料漿液及灌漿壓力與同步背填灌漿相同，背填及同步背填灌漿材料之基本配比，如表 4-1 所示，漿液要求之固化時間及強度如表 4-2 所示。環片與同步背填灌漿作業之差別為環片背填灌漿乃以人工方式，於環片上之灌入口採取環片背填灌漿（如圖 4-12），而同步背填灌漿則於盾身雙圓重疊處（圖 4-6 及圖 4-7）利用機器自動施作灌漿作業，DOT 盾身外側之灌漿管如圖 4-6 (b) 所示。

本案例 DOT 潛盾機開始掘進時，利用機器同步背填灌漿及人工環片背填灌漿同時施作，填補因潛盾機向前開挖推進造成之盾尾空隙，使用之背填灌漿率為 130% 。同步背填灌漿設備運轉時，同步背填灌漿管線出口出現土壤阻塞之現象，每隔一段時間潛盾機就必須暫停掘進施工，清理同步背填灌漿管線出口的淤塞土質，以確保機器同步背填灌漿能順利施作，施工廠商考慮若繼續採取機器同步背填灌漿，將因此消耗太多時間於清理工作，所以於 DOT 潛盾機掘進至三重堤防後，停止同步背填灌漿作業，只採取人工環片背填灌漿來填補潛盾機造成之盾尾

空隙，停止同步背填灌漿作業，有可能造成在淡水河底及台北側地盤較大之沉陷量。潛盾機經三重堤防後，掘進經過淡水河至到達井，施工使用之背填灌漿率保持在 130 %~150 %。

4.4.6 環片背填灌漿注入率之案例比較

為了瞭解 DOT 潛盾機施工掘進，與使用環片背填灌漿率高低的相對關係，探討兩者間是否有一定的關連性，本研究蒐集 8 筆國內外 DOT 潛盾案例環片背填灌漿注入率資料，如表 3-1 所示。案例包含廣島市國道 54 號新交通體系鯉城潛盾工程(case 1)、千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程(case 2)、東京有名北地區供給管共同管道建設工程(case 3)、名古屋高速鐵道 4 號線砂田橋東工區土木工程(case 5)、名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程(case 11)、上海市軌道交通楊浦線(M8 線)嫩江路站至黃興綠地站建設工程(case 14)、上海市軌道交通楊浦線(M8 線)開魯路站至嫩江路站建設工程(case 15)、及桃園機場聯外捷運 CA450A 標潛盾隧道工程(case 20)，上述 8 個案例皆採用 DOT 雙圓型潛盾機掘進施工。

本研究根據表 3-1 各案例使用之環片背填灌漿率、及隧道直徑繪於圖 4-13，圖中實線為 8 筆資料之灌漿率範圍，其中環片背填灌漿率使用之最小值為 109 %，最大值為 200 %，灌漿率平均值為 153 %，加減一個標準差之範圍為 125 %~180 %。圖中顯示，並未因為 DOT 潛盾機直徑大小，而影響環片背填灌漿率。例如 case 2 潛盾機直徑為最小時($2R = 4.45 \text{ m}$)，環片背填灌漿率為 145~150 %，而 case 3 潛盾機直徑最大($2R = 9.36 \text{ m}$)時，其環片背填灌漿率範圍為 150~170 %，沒有一定規律性存在。

依據表 3-1 之各案例環片背填灌漿率、斷面隧道半徑 R 、及隧道中心線深度 Z 資料，繪入以環片背填灌漿率為橫坐標與以深徑比($\frac{Z}{2R}$)為縱座標之無因次關係圖中(圖 4-14)。圖中環片背填灌漿率與隧道深度 Z 之相關性並不明顯。

4.4.7 二次灌漿

依設計圖說及建物保護評估需求，施工單位於三重端忠孝橋橋墩、環河高架橋、台北防洪牆、台北衛工處前處理設施、玉泉公園、及台北醫院等建物保護區段下方施作兩扇形二次灌漿(secondary grouting)以改良 DOT 隧道上方土質，穩固地質(如圖 4-15)，以減少隧道開挖造成之地表建物沉陷。二次灌漿施作位置在環片脫離盾殼第 8 環至第 15 環範圍內最佳，必要時可延至第 20 環(如圖 4-16)，需在環片脫離盾殼 24 小時內完成二次灌漿。二次灌漿材料與背填灌漿材料相同(如表 4-1 所示)，分為 A 液及 B 液混合後注入。如圖 4-17 所示，在需保護之建物下方，於潛盾機內部之環片灌漿孔，利用手動鑽孔機進行 2 m 長之鑽孔，鑽孔作業前必須在環片灌漿孔上安裝止水箱，以防止地下水及土砂流入隧道內，減少地層之漏失，再從隧道環片上之灌漿孔伸出灌漿管，以每 0.5 m 為一灌注階段，總共為四灌注階段。從最外圍 2 m 處先行灌注，之後再依序拔出灌漿管 0.5 m，繼續灌注漿液至最內側接近環片為止。二次灌漿完成後，隧道上方會形成兩扇形灌漿區域，每一階段施工單位將灌漿壓力設定在 400 kPa。

4.4.8 潛盾機滾轉及俯仰角度管理

DOT 潛盾隧道施工，操作員要時常監視潛盾機開挖面壓力、推進速度、超挖量、方位、俯仰及滾轉等數據，充分了解潛盾機狀況，以保持潛盾機前進時之穩定及隧道線形之準確，若有線形偏差時應採逐環漸進方式修正之。本節將對 CA450A 標工程 DOT 潛盾機開挖過程之滾轉及俯仰角度進行介紹。

CA450A 標遭遇主要困難為潛盾機之滾轉問題，潛盾機滾轉造成之原因及修正方法已於第二章說明，徐育芬(2010)依據潛盾機掘進日報進行滾轉數據分析，其數據起始自 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，本論文接續分析 2010 年 6 月 2 日第 538 環至 2010 年 12 月 5 日完工的第最後一環 1316 環。

圖 4-18 (a)圖定義滾轉角 θ ，以操作人員由隧道內向開挖面看，順時針滾轉為正，逆時針滾轉為負，滾轉值超過正負 0.2 度為管理目標即需要修正偏差，警戒值為正負 0.3 度，設計滾轉極限值為正負 0.6 度。潛盾機滾轉角度實測結果如圖 4-18 (b)，圖中橫軸為環片號數，縱軸為潛盾機滾轉角度。本標工程 DOT 潛盾機掘進之過程，曾使用之滾轉控制方式包含潛盾機反向旋轉、背填灌漿、千斤頂修正、超挖刀修正，其中，較常使用之滾轉修正方式為前兩項。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，自環片內向外背填灌漿(如圖 4-12)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 4-18 (b)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 ± 0.1 度以內。自第 538 環開始至第 855 環之滾轉角度皆未超過 0.2 度，所以施工單位未作修正，於第 856 環開始至第 866 環其滾轉角度大於 0.2 度，其中最大值為 0.23 度，施工單位採用反向旋轉及環片灌漿方法修正滾轉角度，第 867 環至第 1203 環其滾轉角度皆小於 0.2 度。於第 1204 環至第 1210 環滾轉角度略大於 0.2 度，最大值為-0.22 度，施工單位亦採用反向旋轉及環片灌漿方法修正滾轉角度。第 1211 環到 1316 環潛盾機滾轉量皆控制於 ± 0.1 度以內。DOT 潛盾機於滾轉問題上，未遭遇重大的災害困難，安全的掘進施工完畢。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。

圖 4-19 (a)定義俯仰角 α ，以水平線為基準，如潛盾機向上坡路段掘進時其俯仰角度為正，潛盾機向水平線之下坡路段掘進時角度為負。圖 4-19 (b)為潛盾機俯仰角度 α 實測結果，橫軸為環片號數，縱軸為潛盾機俯仰角度，潛盾機於第

1 環至第 200 環的初期掘進路線上，即遭遇 4.9 %下坡路段，故俯仰角度於-0.28 度上下擺動，經過 200 環後潛盾機俯角漸趨平緩，自 350 環後水平推進於淡水河床下方。經過第 940 環後，潛盾機掘進遭遇爬坡路段，仰角遂漸上升到第 1050 環，仰角從 0 度升高至 0.12 度。第 1050 環至 1316 環之掘進路線為爬升段，故俯仰角一樣維持在 0.12 度，最後潛盾機掘進至到達端(G14 車站)後，其仰角最終也回歸於 0 度。

4.5 監測系統介紹

潛盾機開挖施工時，為了觀察開挖對地盤造成之位移，有必要進行客觀而完整的監測。並可依推監測資料，作為對鄰近結構物進行保護措施之依據。以下介紹為桃園國際機場聯外捷運 CA450A 標潛盾隧道工程，所佈設之地表沉陷釘系統。



4.5.1 地表沉陷釘之佈置

地表沉陷釘為潛盾隧道監測系統中，最簡單且最經濟之一種監測設備，用以監測潛盾隧道縱斷方向及橫斷方向之地表沉陷行為。其監測原理如同一般之水準測量，利用各測點沉陷釘高程的變化，得知因潛盾隧道施工所造成之地表隆起或沉陷量。

CA450A 標所設置之地表沉陷儀主要有二種，一為地面沉陷釘(surface marker, SM)如圖 4-20 所示。另一種為地表沉陷觀測點 (surface settlement indicator, SSI)，本論文研究主要分析為 SSI 量測的沉陷數據。如圖 4-21 及圖 4-22 所示，地表沉陷觀測點是沿著隧道橫斷面方向，在敲除道路鋪面後，將長度大於 1,000 mm 之沉陷鋼樁打入土壤中，測點上部並加套筒及鐵蓋保護，套筒與鋼樁之空隙以混凝土回填。CA450A 標裝設 SSI 監測斷面之平面位置 SSI3 及 SSI6，共有兩組監測斷面，如圖 4-23 所示。

4.6 單圓雙孔與 DOT 潛盾隧道工期比較

土木工程建設主要考量項目不外乎工期、品質、安全、成本四大項，本節將介紹桃園機場聯外捷運 CA450A 標 DOT 潛盾隧道之工期，並與傳統單圓雙孔潛盾隧道施工之工期比較。

單圓雙孔潛盾隧道與 DOT 潛盾隧道工法，於施工技術、風險、及儀器設備考量上差異甚大，掘進完工所需的總工期天數亦不同。為避免兩條隧道發進施工時造成干擾，單圓潛盾隧道於第一條隧道初始掘進大約 50 m 後，其第二條隧道初始掘進才可開始施工，而 DOT 潛盾隧道卻是同時掘進上下行線。本研究依據蒐集到兩種工法之工期資料，進行分析比較。

4.6.1 單圓雙孔潛盾隧道施工速率

CA450A 標潛盾隧道工程於初期掘進段，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段(60 m)及到達段(60 m)直線段之施工速率為 2.5 m/day。CA450A 標之正式掘進段(1,464 m)包含直線段及 $r=280$ m 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。

4.6.2 DOT 潛盾隧道施工速率

台灣首次使用 DOT 潛盾機於隧道上開挖，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 4-3，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。日本潛盾隧道協會(2004)建議，DOT 潛盾隧道於曲線段施工之施工速率較慢，曲線段掘進施工速率可依直線段之施工速率加以修正推算，其估算方式如下式(4.6)：

$$L_c = \alpha \times L_s \quad (4.6)$$

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)

α : 修正係數 (如表 4-4)

徐育芬(2010)建議表 4-4 所示為曲率半徑 r 與修正係數 α 之關係，可以畫為一圖，如圖 4-24。圖中日本潛盾隧道協會(2004)建議之 α 與 r 呈階梯函數(step function)關係，在各階之間 α 值呈現劇烈變化。徐育芬(2010)建議當曲率半徑 r 介於 60 m 至 300 m 之間，可採用圖 4-24 所示之連續曲線，決定不同曲率半徑下之修正係數 α 。

依據日本潛盾隧道協會(2004)建議的表 4-3 及表 4-4，徐育芬(2010)建議可以圖 4-25 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。

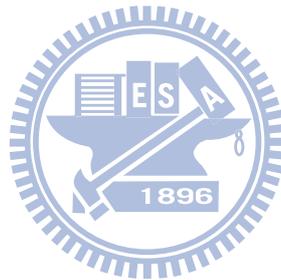
桃園機場聯外捷運 CA450A 標之 DOT 潛盾隧道施工，設計單位依據隧道直徑、隧道曲率半徑、坡度、及每月工作日數等因素納入考量，求得初始掘進段、正式掘進段、及到達段之施工速率分別為 2.0 m/day、4.3 m/day、及 2.0 m/day。

4.6.3 工期比較

表 4-5 為 CA450A 標台北三重段 DOT 潛盾隧道於出發段、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，與單圓雙孔潛盾隧道施工速率預估值進行比較。表中隧道全長為 1,584 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 273 天，由於 DOT 工法施工技術較為複雜，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 4-5，在已完成之 DOT 隧道中，60 m 長出發段之實測施工速率為 2.5 m/day，略高於設計工率 2.0 m/day。於 1,464 m 長正式掘進段隧道之施工速率為

4.55 m/day，略低於設計之施工速率 4.3 m/day。60 m 長到達段之實測施工速率為 4.3 m/day，高於設計施工速率 2.0 m/day。本研究將表 4-5 之資料繪製於圖 4-26 中，圖中 DOT 潛盾隧道一開始 0 至 200 m，由於缺 DOT 潛盾隧道施工經驗，施工速率明顯低於設計之施工速率，200 m 至 760 m 隧道長度追上預估長度，760 m 至 1,060 m 之施工速率和設計之施工速率一致，超過 1,060 m 長度之後，掘進速率已逐漸超越預期之施工速率。總長為 1,584 m 的隧道工期，總共費時 360 天完成掘進，略低於預估之 400 天。DOT 潛盾機成功開挖至到達井(G14 車站)的照片，如圖 4-27 所示。



第五章

CA450A 標 DOT 潛盾隧道工程監測資料分析

依據監測儀器測得之資料，本研究探討台北三重段 CA450A 標以 DOT 潛盾機開挖隧道造成的地表沉陷槽及沉陷-時間關係。

5.1 橫斷面地表沉陷槽

本研究共收集 2 組地表沉陷觀測點(SSI)斷面之監測資料，如圖 5-1 之 SSI3 斷面（測點 SSI3-1 至 SSI3-11）和圖 5-2 之 SSI6 斷面（測點 SSI6-1 至 SSI6-9）。監測儀器與隧道斷面的相關位置，如圖中所示。

SSI3 斷面隨時間發展的地表沉陷槽，顯示於圖 5-3。圖中縱軸的正值代表地表沉陷量，負值代表地表隆起量。由圖 5-3 可看出，在潛盾機到達前 4 天，沉陷尚未發生。切刀盤到達測線時，呈現不對稱之沉陷，最大沉陷約 4 mm，最大沉陷量偏往右側之下行線(down track, DT)，待潛盾機盾尾通過後(t = 5 day)，最大沉陷量變成 10 mm，最大沉陷仍偏向右側下行線。潛盾機開挖第 6 天後，造成 15 mm 之沉陷量，最大沉陷慢慢修正至隧道中心點。潛盾機通過第 473 天所造成之最大沉陷量為 22 mm，與第 10 天測得之最大沉陷量相似。根據圖 5-3 潛盾機開挖造成之長期地表沉陷槽，可計算出地表沉陷槽面積 $A_s = 0.799 \text{ m}^2$ ，再求出 DOT 潛盾機斷面積 $A_t = 61.62 \text{ m}^2$ ，地盤漏失率(ground loss, G_l)之定義及計算如下

$$\text{Ground loss} = G_l = \frac{A_s}{A_t} = \frac{\text{地表沉陷槽斷面積}}{\text{潛盾機斷面積}} \times 100\% = \frac{0.799}{61.62} \times 100\% = 1.30\%$$

圖 5-4 所示為 SSI6 斷面的地表沉陷槽，於潛盾機到達前 4 天，地表發生 2 mm 之沉陷，切刀盤到達沉陷量繼續增加 4 mm，盾尾通過後，沉陷量增大為 11 mm。

於潛盾開挖面通過第 12 天與第 271 天造成之地表沉陷量幾乎相同，可見大部份沉陷於 12 天內完成。271 天之最大沉陷量為 27 mm，地盤漏失率為 1.34 %。

本案例 2 組斷面顯示，最終沉陷槽呈現左右對稱之分佈。圖 5-3 及圖 5-4 中，潛盾機通過大約第 10 天及第 12 天，SSI3 及 SSI6 之最大地表沉陷量，與長期監測到的最大沉陷量大致相同，施工造成之地表最大沉陷量分別為 22 mm 及 27 mm，地盤漏失率分別為 1.30 % 及 1.34 %。

本研究並收集日本及大陸使用 DOT 潛盾施工造成橫斷面地表沉陷槽的 9 組數據來做比較，如圖 5-5 至圖 5-13。圖 5-5 所示為東京都有明北地區共同管道，以 DOT 潛盾隧道施工造成之橫斷面地表沉陷槽，測得之最大的沉陷量為最小，僅有 11 mm，地盤漏失率為 0.21 %。

圖 5-6 顯示為上海軌道交通八號線，翔殷路站至黃興綠地站第 80 環測得之地表沉陷槽，盾身通過測線造成大約 6 mm 的地表隆起，測得之最大的沉陷量為 28 mm，地盤漏失率為 0.71 %。圖 5-7 顯示為上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站，第 455 環橫斷面地表沉陷槽監測結果，其最大的沉陷量為 23 mm，地盤漏失率為 0.43 %。圖 5-8 顯示上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站，第 460 環橫斷面地表沉陷槽監測結果，DOT 潛盾施工造成之沉陷呈現左右不對稱，最大沉陷量為 30 mm，地盤漏失率為 0.69 %。圖 5-9 顯示為上海地鐵六號線第九標工程，第 100 環測得之地表沉陷槽，測得之最大的沉陷量為 34 mm，地盤漏失率為 0.95 %。圖 5-10 顯示為上海地鐵六號線第九標工程，第 130 環橫斷面地表沉陷槽監測結果，其最大沉陷量偏往右側之下行線，為 27.5 mm，地盤漏失率為 0.80 %。圖 5-11 顯示上海地鐵六號線雲山路站至博興路站間，第 280 環橫斷面地表沉陷槽，沉陷槽中央部分之沉陷量較為集中，隧道施工造成之最大的沉陷量達 41 mm，地盤漏失率為 0.87 %。圖 5-12 為上海地鐵六號線雲山路站至博興路站間，第 580 環上方測得之地表沉陷槽，最終沉陷量為 32 mm，地盤漏失率為 0.87 %。圖 5-13 所示為上海地鐵十號線，同濟大學站至大連路站間，第 24 環地

表沉陷槽，測得之最大的沉陷量為 33 mm，地盤漏失率為 1.13 %。

圖 5-6 至圖 5-13 顯示，中國大陸使用 DOT 潛盾施工造成之橫斷面沉陷槽的數據，DOT 潛盾施工造成最大沉陷量介於 23 mm~41 mm 之間。台灣使用 DOT 潛盾施工造成的橫斷面沉陷槽，最大沉陷量介於 22 mm~27 mm(圖 5-3 及圖 5-4)。以日本早期(1994)案例之沉陷槽最大沉陷量為最小只有 11 mm(圖 5-5)，而 DOT 潛盾施工造成之沉陷量明顯較小。DOT 潛盾施工造成之地盤漏失率以日本案例為最小，只有 0.21 %，中國大陸地盤漏失率範圍為 0.43~1.13 %，本案例之地盤漏失率範圍較大為 1.30~1.34 %

5.2 地表沉陷與時間之關係

根據 DOT 隧道中心線上方地表沉陷對時間之關係，可以瞭解主要沉陷及後續發展次要沉陷量與其所需要之時間，做為建物及地下管線保護之依據。

如圖 5-14，為便於說明 DOT 潛盾隧道施工造成隧道中心上方之地表沉陷歷時關係，本研究將相關重要參數定義如下：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。

林照順 (1992) 收集國外土壓平衡式潛盾機於粘土層施工之案例，發現在潛盾機通過測陣 40 天後，地表沉陷漸趨穩定。Fang et al. (1993) 建議，於凝聚性粘土內以 EPB 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。本研究嘗試以雙曲線模式來模擬 DOT 雙圓型潛盾隧道開挖造成之沉陷對時間關係，藉由改寫式 (2.4)，

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

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，利用線性迴歸找出直線關係，求出參數 a (截距) 和參數 b (斜率)，如圖 2-14。利用求出的雙曲線參數 a、b，代入雙曲線公式 (2.4) 內，繪製於圖上，即可模擬出一條雙曲線地表沉陷歷時曲線。

以下依據圖 5-15 之監測資料，說明如何由地表沉陷歷時曲線，決定雙曲線參數 a、b。圖 5-15 (a) 顯示 CA450A 標工程 SSI3-6 測點測得 0 至 500 天之地表沉陷歷時數據。將現地監測數據繪於以 $t/S(t)$ 為縱軸，時間 t 為橫軸之圖 5-16 (a) 中，圖中顯示監測數據呈一近似線性關係，利用線性迴歸求出線性方程式為 $Y = 0.0481 * X + 0.1701$ ，可得雙曲線參數 a (截距) 為 0.1701 day/mm，參數 b (斜率) 為 0.0481 l/mm。將雙曲線參數 a、b 值，代入雙曲線公式(2.4)，即可模擬本案例之地表沉陷歷時曲線，如圖 5-15 (a) 所示。圖中顯示本案例監測數據與雙曲線模式吻合性良好。

圖 5-15 (b) 顯示 CA450A 標潛盾工程，於 SSI6-5 測線隧道中心線上方監測點之地表沉陷監測資料，利用圖 5-16 (b) 線性迴歸求出線性方程式為 $Y = 0.0371 * X + 0.0151$ ，可得雙曲線參數 a (截距) 為 0.0151 day/mm，參數 b (斜率) 為 0.0371 l/mm。將雙曲線參數 a、b 值，代入雙曲線公式(2.4)，雙曲線模擬結果如圖 5-15 (b)，圖中顯示監測資料與雙曲線模式吻合良好。

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。將雙曲線公式對時間 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 (5.1) 所示，曲線之初始切線斜率為：

$$\left. \left(\frac{dS(t)}{dt} \right) \right|_{t \rightarrow 0} = \left. \frac{(a+bt) - t(b)}{(a+bt)^2} \right|_{t \rightarrow 0} = \frac{a}{a^2} = \frac{1}{a} \quad (5.1)$$

如圖 5-17 所示， $1/a$ 的物理意義為潛盾機開挖於潛盾隧道中心線上方所造成

之初始地表沉陷量， $1/a$ 的公制單位為 (mm/day)。參數 $1/a$ 愈大，表示隧道開挖造成之初始沉陷速度較大。反之若參數 $1/a$ 愈小，則初始沉陷速度愈小。

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， $S(t)$ 的極限值將會趨近於 $1/b$ ，如下式 (5.2)。

$$S(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{a + bt} = \frac{1}{b} \quad (5.2)$$

如圖 5-17 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 (即最大沉陷量 S_{\max}) 為影響地表沉陷歷時曲線重要參數。

藉由雙曲線模式模擬地表沉陷歷時關係，得到雙曲線參數 a 及 b 值，將雙曲線參數 a 、 b 值取其倒數為 $1/a$ 及 $1/b$ 值，SSI3-6 測點及 SSI6-5 測點求出 $1/a$ 值範圍為 5.88~66.22 mm/day， $1/b$ 值範圍為 20.79~26.95 mm。本研究之 2 筆現地監測資料顯示，以土壓平衡式 DOT 雙圓型潛盾機開挖造成之沉陷對時間的關係，亦可以雙曲線模式加以描述。

第六章

DOT 潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽

如表 6-1 所示，本章蒐集 11 筆國內外 DOT 潛盾案例資料，包含日本東京有明北地區供給管共同管道建設工程、上海地鐵六號線第 9 標工程、上海地鐵六號線第 11 標工程、上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站工程、上海地鐵十號線第 3 標工程、及桃園機場聯外捷運 CA450A 標潛盾隧道工程，上述 6 個案例皆採用 DOT 雙圓型潛盾機掘進施工。

Peck(1969)建議，可以用常態分佈曲線來模擬因單圓潛盾隧道施工所引致之地表沉陷槽。依據現地量測資料，Peck 分析於不同土層狀況下單圓潛盾施工所引致之地表沉陷槽，得到代表沉陷槽寬度之參數 i 值。本章依據 11 筆國內外 DOT 雙圓型潛盾案例監測資料，探討是否也可以用 Peck 建議之常態分佈曲線來模擬 DOT 潛盾施工造成之地表沉陷槽，如果答案是肯定的，如何以經驗方法預測分析 DOT 雙圓潛盾隧道施工造成沉陷槽之寬度參數 i 值及地表最大沉陷量 S_{max} 。

6.1 常態分佈沉陷槽理論

為便於說明 DOT 潛盾隧道開挖造成之地表沉陷槽，參照圖 6-1，本研究先定義相關重要參數如下：

R：隧道襯砌環片外側半徑 (m)

Z：隧道中心線深度 (m)

S_{max} ：地表最大沉陷量 (mm)

i ：隧道中心線到地表沉陷槽反曲點 (inflection point) 的水平距離 (m)

Peck (1969) 建議以式(2.6)之常態分佈曲線，來模擬潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽。

$$S(y) = S_{\max} \times \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.6)$$

式(2.6)中，

y ：測點至隧道中心線的水平距離 (m)

$S(y)$ ：距隧道中心線水平距離 y 處之地表沉陷量 (mm)

由式(2.6)可知，欲模擬地表沉陷槽，寬度參數 i 及地表最大沉陷量 S_{\max} 為兩主要參數。隧道施工完成之後，依據監測斷面各測點之實測資料，可以得到現地最大沉陷量 S_{\max} ，及以線性迴歸方式得到該沉陷槽之寬度參數 i 。

以下說明沉陷槽寬度參數 i 之計算方式，將式 (2.6) 等號兩側取自然對數，經整理後可得下式：


$$\ln S(y) = \left(-\frac{1}{2i^2}\right) \cdot y^2 + \ln S_{\max} \quad (6.1)$$

將監測斷面上各監測點的沉陷資料繪於以 $\ln S(y)$ 為縱軸，以 y^2 為橫軸之圖上，使用線性迴歸方法，求取直線方程式，由直線之斜率 $\left(-\frac{1}{2i^2}\right)$ 可求得 i 值。利用上述方法求出的沉陷槽寬度參數 i 和現地實測地表最大沉陷量 S_{\max} ，代回式 (2.6)，即可繪出常態分佈之地表沉陷槽。

6.1.1 如何決定 DOT 潛盾施工造成之 i 值

本研究假設 DOT 潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽亦可以常態分佈曲線加以模擬。本研究並以 11 筆國內外 DOT 潛盾施工案例測得之地表沉陷槽驗證前述假

設。

本小節舉例說明如何依據現地監測之地表沉陷 $S(y)$ 與距離 y 資料，決定地表沉陷槽參數 i 。圖 6-2 (a) 顯示桃園國際機場聯外捷運系統，CA450A 標工程 SSI3 測線之地表沉陷監測結果。將現地監測數據繪於以 $\ln S(y)$ 為縱軸，以 y^2 為橫軸之圖中，圖 6-3 (a) 顯示監測數據 $\ln S(y)$ 與 y^2 之關係，利用線性迴歸找出線性方程式為 $Y = -0.0023 * X + 3.0632$ ，由斜率： $-0.0023 = (-\frac{1}{2i^2})$ 可求得沉陷槽參數 i 為 14.74 m，依據圖 6-2 (a) 現地實測地表最大沉陷量 S_{\max} 為 22 mm。將求出之沉陷槽參數 i 和最大沉陷量 S_{\max} 值，代回地表沉陷槽公式(2.6)，即可模擬本案例之地表沉陷槽，如圖 6-2 (a) 所示，圖中顯示實測沉陷槽較往預估值之左側偏移，吻合性尚可。國內外 11 個 DOT 潛盾隧道施工案例求出之 i 及現地量測之最大地表沉陷量 S_{\max} 匯整於表 6-1。

6.2 常態分佈曲線與監測沉陷資料之比較

依據 6.1 節所述之方法，本研究將現地監測獲得之地表沉陷資料及常態分佈曲線繪入同一圖中，以便相互比較。

圖 6-2 顯示之案例為桃園國際機場聯外捷運 CA450A 標潛盾工程。圖 6-2 (b) 為 SSI6 監測斷面測得之地表沉陷監測資料，及常態分佈沉陷槽模擬。圖 6-3 (b) 求得地表沉陷槽參數 i 為 17.15 m，現地量測最大沉陷量 S_{\max} 為 27 mm，將上述求出之 i 值及現地量測之 S_{\max} 參數代回 (2.6) 式，結果如圖 6-2 (b) 所示，本案例監測沉陷槽寬度比常態分佈模擬之沉陷槽寬度略窄。

圖 6-4 顯示日本有明北地區 DOT 潛盾施工造成之地表沉陷槽。隧道外徑高達 9.36 m，隧道中心深度為 20.68 m，但地表最大沉陷僅 11 mm。由圖 6-5 求出之沉陷槽參數 i 僅 5.29 m，將上述 i 及 S_{\max} 參數代回 (2.6) 式，其結果如圖 6-4 所示，圖中顯示實測沉陷槽呈非對稱之沉陷，中心線左側之沉陷量較大。預測結果與實測結果符合性欠佳，實測沉陷槽之寬度大於預估值。

圖 6-6 (a) 顯示上海地鐵六號線第九標工程第 100 環的實測地表沉陷槽。DOT 隧道外徑為 6.52 m，隧道中心深度為 14.36 m。由圖 6-7 (a)求得沉陷槽寬度參數 i 為 8.57 m，測得之最大地表沉陷量 S_{\max} 為 34 mm，將 i 及 S_{\max} 參數代回式 (2.6)，結果如圖 6-6 (a)所示，圖中顯示監測數據與常態分佈沉陷槽吻合性良好。

圖 6-6 (b)顯示之案例為上海地鐵六號線第九標工程第 130 環的監測地表沉陷槽。DOT 隧道外徑為 6.52 m，隧道中心深度為 14.86 m。圖 6-7 (b)求得沉陷槽寬度參數 i 為 7.50 m，實測地表最大沉陷量 S_{\max} 為 27.5 mm，將 i 及 S_{\max} 參數代回 (2.6)式，結果如圖 6-6 (b)所示，圖中監測數據與常態分佈曲線沉陷槽吻合頗為良好。

圖 6-6 (c)顯示案例為上海地鐵六號線，雲山路站至博興路站建設工程，監測斷面第 280 環的實測地表沉陷槽及模擬結果。圖 6-6 (c)顯示監測沉陷槽之寬度較模擬結果為窄。

圖 6-6 (d)顯示案例為上海地鐵六號線，雲山路站至博興路站建設工程，監測斷面第 580 環的地表沉陷槽監測數據。圖 6-6 (d)顯示監測沉陷槽略呈不對稱，但實測結果與常態分佈沉陷槽吻合良好。

圖 6-8 (a)顯示上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站建設工程，第 80 環的實測地表沉陷槽。隧道外徑為 6.52 m，隧道中心深度為 10.76 m。由圖 6-9 (a)求得地表沉陷槽參數 i 為 7.76 m，地表最大沉陷量 S_{\max} 為 28 mm。圖 6-8 (a)顯示右側監測資料與常態分佈沉陷槽吻合略佳，實測沉陷槽寬度較模擬值為窄。

圖 6-8 (b)顯示上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站建設工程，監測斷面為第 455 環的地表沉陷槽監測數據。隧道外徑為 6.52 m。圖 6-8 (b)顯示監測沉陷槽於 DOT 潛盾機上方呈現雙峰，實測沉陷槽和模擬值大致吻合良好。圖 6-8 (c)顯示為上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站建設工程，監測斷面為第 460 環的地表沉陷槽。圖中顯示監測沉陷槽在中心線左右亦呈現雙峰式沉陷，求得之沉陷槽與實測沉陷槽大致相符。

圖 6-8 (d)顯示上海地鐵十號線，同濟大學站至大連路車站建設工程，監測斷面第 24 環的監測地表沉陷槽。DOT 隧道外徑為 6.52 m，隧道中心深度為 17.45 m。圖 6-9 (d)求得沉陷槽參數 i 為 5.08 m，量得之最大沉陷量 S_{\max} 為 33 mm。圖 6-8 (d)顯示，在隧道兩側以常態分佈預測結果與實測結果符合性欠佳。

以上各案例之現地監測資料顯示，以 Peck(1969)建議之常態分佈曲線模擬 DOT 雙圓型潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽，其模擬結果與實測結果符合性大致良好。

於下一節中，本研究依據國內外 DOT 潛盾開挖造成之地表沉陷資料，加以統計分析，介紹如何預估 DOT 潛盾開挖造成沉陷槽參數 i 值及最大沉陷量 S_{\max} 值。

6.3 如何預估沉陷槽寬度參數 i

Peck (1969) 分析單圓型潛盾機於不同土層狀況下開挖，所引致之地表沉陷槽寬度參數 i 。Peck 依據 17 組監測數據建立隧道半徑 R 、隧道中心線深度 Z 及沉陷槽寬度參數 i 值之關係(如圖 2-16)。本研究蒐集 11 組國內外 DOT 潛盾施工遭遇黏土層地盤之沉陷槽斷面，依 6.1.1 小節說明的方法分析求得各沉陷槽寬度參數 i 值，匯整於表 6-1。

本研究根據表 6-1 之各斷面隧道半徑 R 、隧道中心線深度 Z 、各斷面之寬度參數 i 繪入以寬徑比($\frac{i}{R}$)與以深徑比($\frac{Z}{2R}$)為縱座標之無因次關係圖中(如圖 6-10)，圖中虛線為 11 筆監測資料之最外側範圍。對相同直徑 R 之 DOT 潛盾機，隧道中心線深度 Z 愈深，隧道施工造成之地表沉陷槽寬度愈寬。圖中亦顯示 Peck(1969)所提出，單圓潛盾隧道在地下水位以上之砂土層、黏土層和在地下水位以下之軟弱至堅硬黏土層及在地下水位以下之砂土層開挖，造成的沉陷槽寬度參數 i 值範圍。由於兩種潛盾機(單圓和 DOT)，於直徑 R 、斷面形狀、環片形狀、潛盾機斷面積及施工方法之定義上皆不同，故無法直接互相比較。因桃園國際機

場聯外捷運 CA450A 標(case 20)之 DOT 潛盾隧道掘進經過淡水河下方(圖 1-1)，隧道中心線深度因為須考量淡水河河水深度及足夠覆土厚度，所以表 6-1 case 20 之隧道中心線深度，比其它收集到之 9 筆資料的隧道中心線深度為深，且沉陷槽寬度參數 i 值也高達 14.74 m 及 17.15 m。例如 case 20 的 SSI6 斷面，隧道深度達 28.47 m，約為 case 16 第 100 環斷面深度 14.36 m 的 1.98 倍，故 SSI6 斷面寬度參數 $i = 17.15$ m，約為 case 16 第 100 環斷面 $i = 8.57$ m 的 2 倍。

圖 6-10 的虛線顯示 11 筆監測資料匯成之範圍，可作為預估 DOT 潛盾隧道施工造成地表沉陷槽寬度參數 i 值範圍時參考使用。在此必須說明，圖 6-10 僅限以土壓平衡式 DOT 潛盾開挖土質隧道時使用。由表 6-1 可知，6 個案例共 11 個斷面開挖之土壤頗為複雜，包含礫石、砂、粉土、及黏土，由於目前全球僅有 20 個 DOT 潛盾施工案例，本研究僅收集 11 個沉陷斷面，資料證據有限，因此圖 6-10 無法對開挖土層加以區分，有待未來進一步研究。

6.4 如何預估地表最大沉陷量 S_{max}

本研究蒐集國內外 DOT 潛盾施工案例資料，依據現地監測資料獲得 11 筆隧道中心線上方地表最大沉陷量 S_{max} ，如表 6-1 所示。表中地表最大沉陷量範圍介於 11~41 mm 之間。

圖 6-11 顯示 DOT 潛盾隧道中心線深度 Z 與地表最大沉陷量 S_{max} 之無因次關係，圖中縱座標為隧道中心線深度 Z 對隧道直徑 $2R$ 正規化之比值 $Z/2R$ ，橫座標為地表最大沉陷量 S_{max} 對隧道半徑 R 正規化之比值 S_{max}/R 。兩條虛線為 11 筆資料之界限。監測資料顯示隨著隧道深度 Z 增加，DOT 潛盾開挖造成之地表最大沉陷量 S_{max} 呈減小之趨勢。推測其原因，如圖 6-11 所示，隨著隧道深度 Z 增加，覆土層厚度增加，隧道上方地盤拱效應(arching soil)作用越加明顯。

表 6-1 case 20 之 CA450A 標 SSI6 斷面隧道中心線深度達 17.15 m，但是 S_{max} 僅為 27 mm，比 case 16 的第 100 環的 $S_{max} = 34$ mm 更小。大深度($Z = 28.47$ m)

之 DOT 潛盾隧道開挖，造成大寬度($i = 17.15 \text{ m}$)之地表沉陷槽，但是隧道中心線上方之地表最大沉陷量($S_{\max} = 27 \text{ mm}$)反而較小。11 筆監測資料匯成之虛線範圍，可作為預估 DOT 潛盾隧道開挖造成最大沉陷量 S_{\max} 參考使用。例如當 $\frac{Z}{2R} = 2.0$ 時，隧道施工造成最大沉陷量 S_{\max} 之範圍為 $0.0044R \sim 0.0126R \%$ 。

根據本案例收集 11 筆土壓平衡式(EPB)DOT，施工造成最大沉陷量 S_{\max} 之監測資料(表 6-1)，及 Fujita(1982)和吳俊德(2008)所收集以土壓平衡式單圓潛盾機，開挖隧道造成地表最大沉陷量 S_{\max} ，來探討兩種不同型式(DOT 和單圓)之土壓平衡式潛盾機，於不採取輔助工法狀況下開挖隧道造成的沉陷量範圍。

表 1-1 顯示 Fujita(1982)蒐集日本國自 1965 年內共 94 筆單圓潛盾隧道施工案例，建立之現地監測資料預估表。表 6-2 為吳俊德(2008)蒐集國內外 167 筆單圓潛盾隧道施工案例，建立現地監測資料建議表。表中包含採用土壓平衡式潛盾機不採用輔助工法開挖之資料為 81 筆。將表 1-1、表 6-1、及表 6-2 以土壓平衡式潛盾機開挖，不採用輔助工法造成的沉陷量數值匯整於圖 6-12。

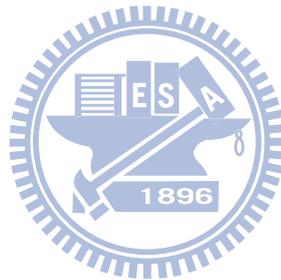
圖 6-12 顯示，Fujita(1982)建議以 EPB 單圓潛盾機，於黏土層內造成之地表最大沉陷量為 $35 \sim 85 \text{ mm}$ 。吳俊德(2008)建議採用 EPB 單圓潛盾機於黏土層內開挖造成之地表最大沉陷量為 $13 \sim 31 \text{ mm}$ ，於砂土層為 $13 \sim 36 \text{ mm}$ 。

本案例收集以 EPB DOT 潛盾機開挖造成之 11 筆現地監測資料(如表 6-1)。圖 6-12 中 2 筆資料為 EPB DOT 潛盾機於黏土層內開挖造成之地表最大沉陷量，為 $11 \sim 37 \text{ mm}$ ，其餘 9 筆資料為 EPB DOT 潛盾機於砂土層掘進造成之最大沉陷量，為 $22 \sim 41 \text{ mm}$ 。

圖 6-12 顯示，Fujita(1982)依據 1965 年至 1982 年監測資料建議 EPB 單圓潛盾機開挖造成之沉陷量為最大值 S_{\max} ，於黏土層平均 S_{\max} 為 60 mm 。吳俊德(2008)依據 1980 年至 2008 年監測資料建議 EPB 單圓潛盾機，於黏土層開挖之平均 S_{\max} 22 mm 。EPB DOT 潛盾機於黏土層開挖造成之最大沉陷量平均 S_{\max} 為 24 mm 。由圖 6-12 可知早期(1965 年至 1982 年)之 EPB 單圓潛盾機施工造成之沉陷量 S_{\max}

較大。近期(1980 年至 2008 年)EPB 單圓及 DOT 潛盾機施工造成之最大沉陷量 S_{\max} 較早期者為小，可能是由於近年來單圓及 DOT 潛盾機於隧道施工機具及施工技術之進步與成長所導致。單圓及 DOT 潛盾隧道開挖造成之 S_{\max} (22 及 24 mm) 相差不遠。

Fujita(1982)並未報告 EPB 單圓潛盾機在砂土層開挖造成之 S_{\max} 。吳俊德(2008)建議 EPB 單圓隧道在砂土層開挖造成之平均 $S_{\max} = 24.5 \text{ mm}$ ，EPB DOT 潛盾機於砂土層開挖造成之平均 $S_{\max} = 31.5 \text{ mm}$ ，較近期(1980-2008)以 EPB 單圓潛盾機施工造成之平均 $S_{\max} = 24.5 \text{ mm}$ 大，推測其原因可能是因為 DOT 潛盾斷面積較單圓潛盾斷面積為大，故潛盾機開挖造成之沉陷量也相對較大。但本研究所蒐集之 DOT 潛盾隧道案例僅有 11 筆，資料證據有限，有待未來收集更多資料進一步研究。



第七章

結論與建議

本論文依據國內外 DOT 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、比較 DOT 與單圓雙孔潛盾施工工期、評估潛盾隧道開挖引致之地表沉陷槽、地表沉陷歷時曲線、沉陷槽寬度參數、及最大地表沉陷量，獲得以下各項結論與建議。

7.1 結論

1. 桃園機場聯外捷運 CA450A 標之 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，小於設計極限滾轉量 0.6 度。只要滾轉量大於行動值 0.2 度，施工單位即視實際狀況以切刃盤反向旋轉、背填灌漿及超挖刀擴挖來修正潛盾機滾轉角度。
2. 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 2.5 m/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，其實際施工速率為 4.55 m/day，較預估速率快 5.8 %。DOT 潛盾隧道到達段之評估施工速率為 2.0 m/day，其實際施工速率為 4.3 m/day，較評估施工速率快 115 %。
3. DOT 潛盾隧道總工期預估 400 天，實際掘進總工期為 360 天，較預估工期減少 10 %。
4. 根據國內外 11 筆 DOT 潛盾隧道施工造成地表沉陷槽監測數據，DOT 潛盾隧道施工引致之地盤漏失率範圍為 0.21 % ~ 1.34 % 之間，平均值為 0.85 %。
5. CA450A 標案例之地表沉陷對時間的監測資料顯示，以土壓平衡式 DOT 潛盾機施工引致之地表沉陷歷時曲線，可以雙曲線關係加以模擬。

6. 根據國內外 11 筆 DOT 案例之現地監測資料顯示，施工造成之地表沉陷槽可使用常態分佈模擬沉陷槽。
7. 依據現地監測資料，本研究建立地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z 的無因次關係圖，圖中顯示隧道中心線深度 Z 愈深，隧道施工造成之地表沉陷槽寬度愈寬。
8. 依據國內外現地監測資料統計，本研究建立地表最大沉陷量 S_{\max} 與隧道深度 Z 之無因次關係圖。圖中顯示隨著隧道深度 Z 增加，DOT 潛盾開挖造成之地表最大沉陷量 S_{\max} 呈減小之趨勢。推測其原因，隨著深度 Z 增加，覆土層厚度亦增加，因此隧道上方地盤拱效應作用越加明顯。

7.2 建議

1. 本論文僅探討國內 CA450A 標，DOT 潛盾隧道開挖之地表沉陷歷時監測資料，期望未來能廣泛收集更多國內外施工沉陷歷時資料進行模擬，以增大案例樣本之空間。
2. 由於目前全球僅有 20 個 DOT 潛盾施工案例，本研究僅收集 11 個沉陷斷面，資料證據有限，因此在決定沉陷槽寬度 i 及最大沉陷量 S_{\max} 時，無法依開挖土層加以區分，有待未來收集更多資料進行研究。
3. 本論文僅評估潛盾隧道施工造成之地表沉陷影響，未來可繼續對深層沉陷、水平位移等主題進行分析探討。
4. 本論文依據現地沉陷監測結果以經驗方法進行評估，未來研究可考慮利用數值分析或實驗方法加以討論，進行全面性的研究。

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設計計畫 CA450A 標土建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設計計畫 DA115A 標-補充地質調查報告”。
7. 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”, 地工技術, 第 118 期, 第 37-46 頁。
8. 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。
9. 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。
10. 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。
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)間路線段土建工程補充地質鑽探試驗

工作報告”。

13. 周文波、顧春華(2004),“雙圓盾構施工技術”,現代隧道技術,第4期。
14. 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。
15. 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。
16. 林照順(1992),“以 Peck-Fujita 經驗方法估算潛盾隧道施工所引致之地表沉陷”碩士論文,國立交通大學土木工程研究所。
17. 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。
18. 陳秋宗,(1988).“台北市潛盾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。
19. 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。
20. 馬華明(2004),“雙圓盾構掘進施工過程中的地面沉降控制”,建築施工,第26卷,第4期,第424-426頁。
21. 張兆達、鄭堅、蔡豐錫、沈水龍(2006),“雙圓盾構隧道施工中的沉降控制”,建築施工,第28卷,第2期,第151-158頁。
22. 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。
23. 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。
24. 孫統立(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。
25. 孫統立、李浩、呂虎、韋良文(2009),“雙圓盾構施工擾動引起的地表位移

- 特性分析”，土木工程學報，第 42 卷，第 6 期，第 108-114 頁。
26. 孫統立、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。
 27. 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。
 28. 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。
 29. 徐育芬(2010)，“雙圓型潛盾隧道案例研究-以機場捷運台北三重段為例”碩士論文，國立交通大學土木工程研究所。
 30. 鄭宜楓(2007)，“雙圓隧道盾構推進對周圍環境影響的現場監測”，地下空間與工程學報，第 3 卷，第 7 期，第 1349-1353 頁。
 31. 蔡豐錫、沈水龍、朱建明(2006)，“雙圓盾構掘進時的方向控制”，地下空間與工程學報，第 2 卷，第 2 期，第 298-301 頁。
 32. 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。
 33. 騰麗(2005)，“雙圓盾構推進引起地表變形理論分析及試驗研究”，上海國際隧道工程研討會文集，第 567-572 頁。
 34. 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設計劃 CA450A 標土木工程潛盾隧道掘進施工計劃書”。
 35. シールド工法技術協會(2007)，“DOT 工法技術資料”，2007 年 6 月。
 36. 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。
 37. 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。
 38. 近藤紀夫(1994)，“DOT 工法の開発と施工実績”，建設機械，第 30 卷，第

9 號，第 37-47 頁。

39. 尾田俊雄、米井勇雄(1993)，“超大断面 DOT の施工計画”，トンネルと地下，第 24 卷，第 4 期，第 39-46 頁。
40. 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。
41. 横山博一(1994)，“超小土被り下を複断面(重合圓形)泥土壓シールドで掘る--習志野市菊田川幹線 DOT 工法”，下水道協會誌，第 31 卷，第 374 號，第 67-75 頁。
42. Attewell, P. B., Yeares, J. and Selby, A. R. (1986). “Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects in Pipelines and Structures,” Blackie and Son Ltd., London.
43. Chou, W. and Antonio, B. (2002). “Prediction of ground deformations in shallow tunnels in clay.” Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 17, pp. 3-19.
44. Chow, B. (2006). “Double-O-tube shield tunneling technology in the Shanghai Rail Transit Project.” Tunnelling and Underground Space Technology 21, pp. 594-601.
45. 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.
46. 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.
47. Eric, L. and Barry, N. (2006). “Settlement Induced by Tunneling in Soft Ground.” Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 119-149.
48. 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
49. Fang, Y. S., Lin, S. J. and Lin, J. S. (1993). "Time and Settlement in EPB Shield Tunneling, "Tunnels and Tunneling, November, vol.25, No. 11, November, pp.27-28.
 50. Fujita, K. (1982). “Prediction of Settlements by Shield Tunnelling.” Proceedings of International Conference on Soil Mechanics, Vol. 1, pp. 239-246.
 51. Hanya, T. (1977). “Ground Movements due to Construction of Shield-Driven Tunnel.” Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, A. A. Balkema, pp. 759-789.
 52. Hoyaux, B. and Ladanyi, B. (1970). "Gravitational Stress Field Around a Tunnel in Soft Ground," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, pp. 54-61.
 53. 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.
 54. Japan Society of Civil Engineers (1996) ,“Japan standard for shield tunneling”, The Third Edition.(in Japanese)
 55. Kanji, M. A. (1979). “Surface Displacement as a Consequence of Excavation Activities.” General Report of International Congress in Rock Mechanics, Montreal, Vol. 3.
 56. Koyama, Y. (2003). “Present status and technology of shield tunneling method in Japan.” Tunnelling and Underground Space Technology 18, pp. 145-159.
 57. Mair, R. J., Taylor, R. N. and Bracegirdle, A. (1993). “Subsurface Settlement Profiles above Tunnels in clays.” Geotechnique, Vol. 43, No. 2, pp. 13-16.
 58. 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.
59. 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.
 60. 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.
 61. 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.
 62. Shui-Long Shen , Suksun Horpibulsuk , Shao-Ming Liao , Fang-Le Peng (2009), "Analysis of the behavior of DOT tunnel lining caused by rolling correction operation" , Tunnelling and Underground Space Technology 24, pp. 84-90.
 63. Som, N. and Narayan, V. (1985). "Ground Settlement Shield Tunnelling through Soft Clay." 11th ICSMFE, San Francisco, pp. 2133-2136.
 64. Wu, B. R. and Lee, C. J. (2003). "Ground Movements and Collapse Mechanisms Induced by Tunneling in Clayey Soil." International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Tokyo, Vol. 4, No. 4, pp 15-29.

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

Additional Measures	Type of Soil	Predicted Maximum Surface 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，“*”為沉陷量較大之一類)

表 2-1 雙曲線參數 a 值建議表 (摘自吳俊德, 2008)

Recommended parameter a (day/mm)				
		Type of shield machine		
Additional methods	Type of soil	Open shield	Slurry shield	EPB shield
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 2-2 雙曲線參數 b 值建議表 (摘自吳俊德, 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 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

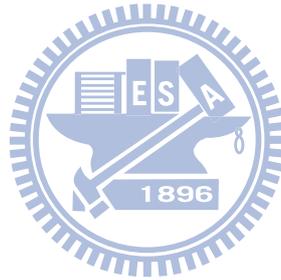


表 3-1 DOT 潛盾隧道工程案例表 (摘自徐育芬, 2010)

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)	隧道中心線深度 (m)	最小曲率半徑 R_{min} (m)	最大坡度 (%)	環片背填灌漿率 (%)	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.	$\Phi 2.5$ $\times W4.19$	79	N.A.	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	$\Phi 6.09$ $\times W10.69$	850	8.05~11.35	135	1.8	150~180	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	$\Phi 4.45$ $\times W7.65$	703	4.38~11.23	1,600	4.0	145~150	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	$\Phi 9.36$ $\times W15.86$	249	18.68~21.68	1,600	3.5	150~170	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	$\Phi 5.48$ $\times W9.75$	304	14.24~18.24	1,500	0.8	N.A.	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	$\Phi 6.52$ $\times W11.12$	752	13.57~19.86	500	2.3	109~126	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	$\Phi 6.52$ $\times W11.12$	1,007	14.26~35.40	500	3.3	N.A.	IHI	1999~2002	台北市政府 捷運局 2008

表 3-1 DOT 潛盾隧道工程案例表(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)	隧道中心線深度(m)	最小曲率半徑R _{min} (m)	最大坡度(%)	環片背填灌漿率(%)	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 ×W11.12	1,238	12.56~35.56	300	2.7	N.A.	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 ×W11.12	876	14.76~24.56	200	3.1	N.A.	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 ×W11.12	782	22.26~27.26	180	0.9	N.A.	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 ×W11.12	957	13.26~19.86	165	3.3	N.A.	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 ×W11.12	1,025	12.96~23.36	300	3.1	110~150	MHI	2001~ 2002	
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 ×W11.43	904	10.37~18.37	102	5.9	N.A.	IHI	N.A.	
13	愛知縣東部丘陵線建設 工程	地下鐵	黏土、砂	Φ6.7 ×W11.43	123	15.37~16.37	102	N.A.	N.A.	IHI	N.A.	

表 3-1 DOT 潛盾隧道工程案例表(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)	隧道中心線深度 (m)	最小曲率半徑 R_{min} (m)	最大坡度 (%)	環片背填灌漿率 (%)	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)嫩江路車站至黃興路車站	地下鐵	粉土質砂、粉土質黏土、黏質粉土	Φ6.52 ×W11.12	1,759	8.46~15.26	495	2.8	180~200	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)開魯路車站至嫩江路車站	地下鐵		Φ6.52 ×W11.12	929	8.46~15.26	495	2.8	140~200	MHI	2003~2004	
16	上海地鐵 6 號線第 9 標	地下鐵		Φ6.52 ×W11.12	1,713	7.26~24.26	300	N.A.	N.A.	IHI	2004~2005	
17	上海地鐵 6 號線第 10 標	地下鐵		Φ6.52 ×W11.12	2,497	9.26~16.26	990	1.5	N.A.	IHI	2004~2005	
18	上海地鐵 6 號線第 11 標	地下鐵		Φ6.52 ×W11.12	1,096	9.26~13.26	420	2.7	N.A.	IHI	2004~2006	
19	上海地鐵 10 號線第 3 標	地下鐵		Φ6.52 ×W11.12	1,459	15.56~23.06	N.A.	N.A.	N.A.	IHI	~2009	
20	桃園國際機場聯外捷運台北三重段 CA450A 標	捷運線	粉土質砂、粉土質黏土	Φ6.42 ×W11.62	1,584	10.81~29.21	280	4.9	130~150	IHI	2009~2010	台北市政府 捷運局 2008

表 4-1 同步及環片背填灌漿材料之基本配比表
(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)

		品 名	每 1m ³ 漿液用量
A 液	固化材	水 泥	250 kg
	助 材	皂 土	30 kg
	安定劑	BS	3.0 l
	水	水	820 l
B 液	凝結材	水玻璃	85 l

$$A \text{ 液} + B \text{ 液} = 1 \text{ m}^3$$

表 4-2 同步及環片背填灌漿材料之基本特性
(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)

固化時間 (秒)	單軸壓縮強度 (kgf/cm ²)	
		1 小時
3~12	0.1 以上	2 以上

表 4-3 DOT 潛盾隧道工法於直線段之施工速率
(摘自日本潛盾隧道協會, 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

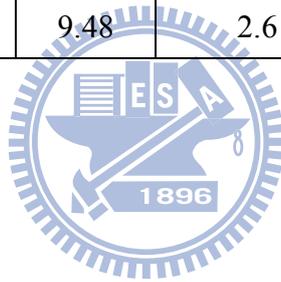


表 4-4 DOT 潛盾隧道工法於曲線段之工率修正係數
(摘自日本潛盾隧道協會, 2004)

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 α	0.30	0.55	0.65	0.70	0.80	1.00

表 4-5 CA450A 標 DOT 與單圓潛盾工法預估工期比較
(摘自台灣世曦工程顧問公司, 2009)

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	1,464	60	1,584
	施工速率 (m/day)	2.5	6.5	2.5	4.9
	施工天數 (day)	24	225	24	273
DOT 潛盾 隧道工法 (預估值)	隧道長度 (m)	60	1,464	60	1,584
	施工速率 (m/day)	2.0	4.3	2.0	4.0
	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	1,464	60	1,584
	施工速率 (m/day)	2.5	4.55	4.3	4.4
	施工天數 (day)	24	322	14	360

表 6-1 DOT 潛盾機開挖隧道引致地表沉陷槽

Case No.	Case	Section or Ring No.	Soil Type	Depth of Tunnel Axis Z (m)	Shield Size	Ground Loss (%)	Estimated Surface Settlement Trough Width Parameter i (m)	Measured Maximum Surface Settlement S_{max} (mm)	Reference
3	Ariakekita common conduit, Tokyo	N.A.	Clay, Gravel	20.68	$\Phi 9.36$ $\times W15.86$	0.21	5.29	11	Hirokazu et al. (1993)
14	Line 8 Shanghai Metro	80	Silty sand, Silty clay, Clayey silt	10.76	$\Phi 6.52$ $\times W11.12$	0.71	7.76	28	Zhou et al. (2005)
		455		13.00		0.43	7.04	23	Teng (2005)
		460		15.26		0.69	5.20	30	Zhou et al. (2005)
16	Lot 9, line 6, Shanghai Metro	100	Silty sand, Silty clay, Clayey silt	14.36	$\Phi 6.52$ $\times W11.12$	0.95	8.57	34	Sun (2007)
		130		14.86		0.80	7.50	27.5	
18	Lot 11, line 6, Shanghai Metro, China	280	Silty sand, Silty clay, Clayey silt	13.31	$\Phi 6.52$ $\times W11.12$	0.87	8.28	41	Sun et al. (2009)
		580		13.03		0.87	7.45	32	Sun (2007)

表 6-1 DOT 潛盾機開挖隧道引致地表沉陷槽(續)

Case No.	Case	Section or Ring No.	Soil Type	Depth of Tunnel Axis Z (m)	Shield Size	Ground Loss (%)	Estimated Surface Settlement Trough Width Parameter i (m)	Measured Maximum Surface Settlement S_{max} (mm)	Reference
19	Lot 3, line 10, Shanghai Metro	24	Silty sand, Silty clay, Clayey silt	17.45	$\Phi 6.52$ $\times W11.12$	1.13	5.08	33	Chen and Zhu (2010)
20	Lot CA450A, Taoyuan Airport MRT, Taiwan	SSI3	Silty clay,	20.85	$\Phi 6.42$ $\times W11.62$	1.30	14.74	22	CECI (2010)
		SSI6	Silty sand	28.47		1.34	17.15	27	

表 6-2 單圓潛盾隧道開挖造成之地表最大沉陷量 S_{max} 建議表 (摘自吳俊德, 2008)

Predicted Maximum Surface Settlement S_{max} (mm)				
		Type of shield machine		
		Open shield	Slurry shield	EPB shield
Additional methods	Type of soil			
Not adopted	Sand	-	14 ± 7 (14 cases)	23 ± 13 (29 cases)
	Clay	24 ± 12 (9 cases)	7 ± 3 (20 cases)	22 ± 9 (27 cases)
	Soft clay	-	-	37 ± 11 (25 cases)
Adopted	Sand	22 ± 11 (7 cases)	-	43 ± 15 (12 cases)
	Clay	31 ± 13 (10 cases)	-	30 ± 3 (5 cases)
	Soft clay	84 ± 28 (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 °

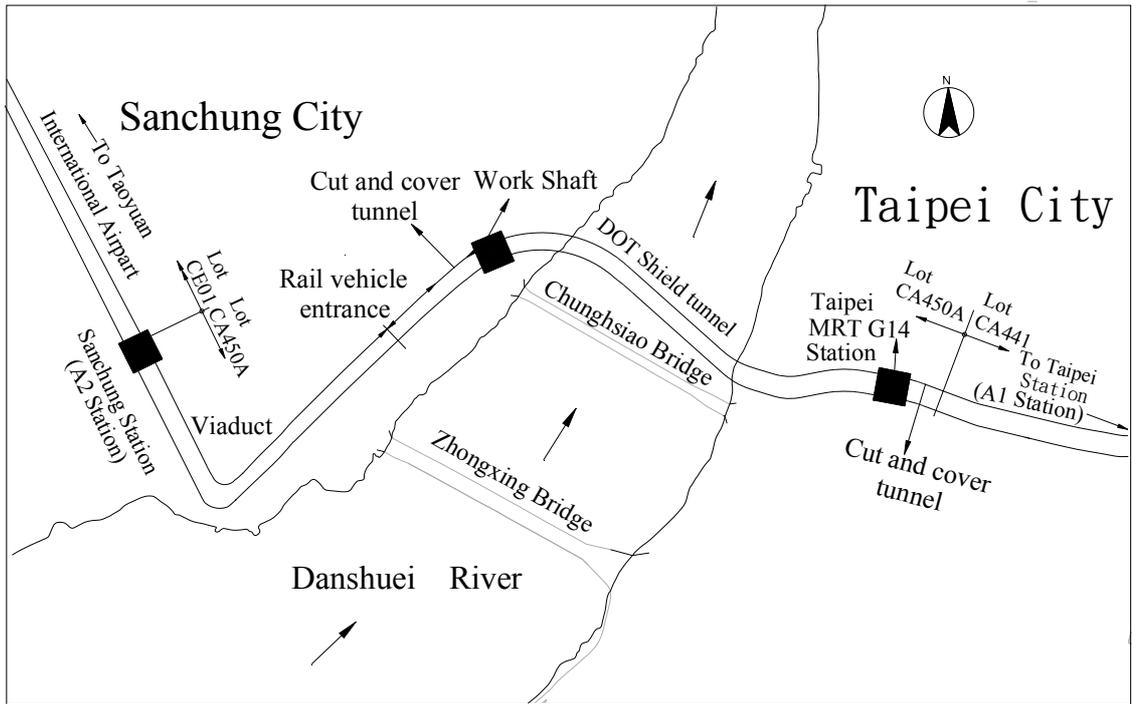


圖 1-1 CA450A 標路線平面圖



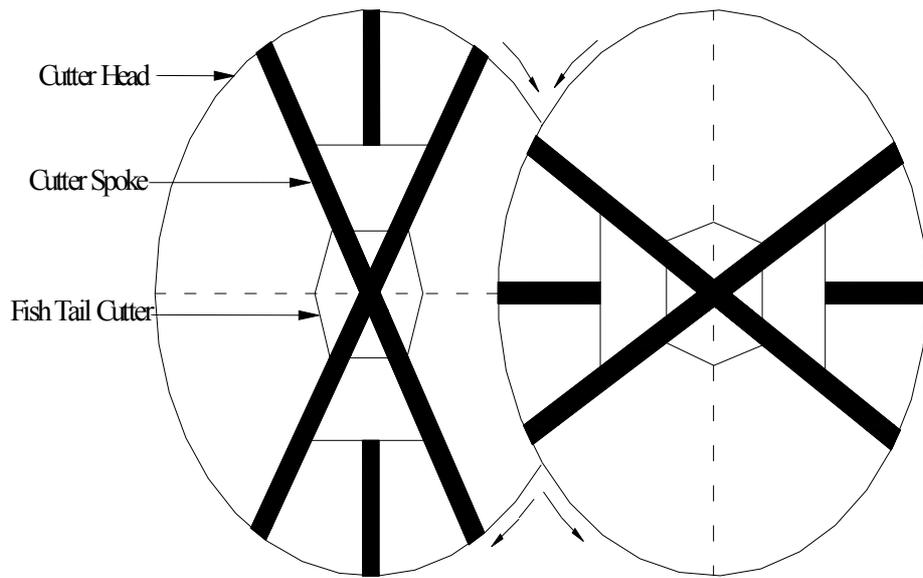
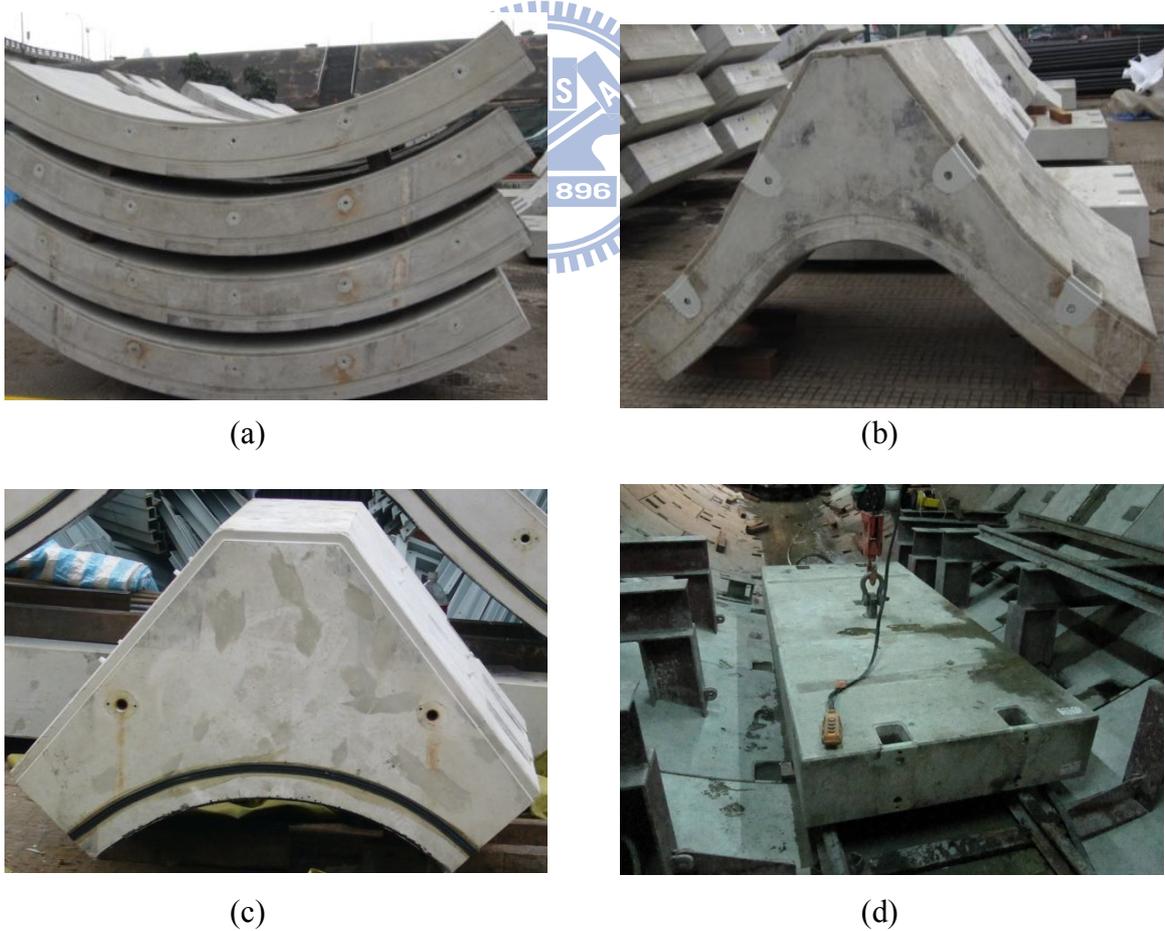


圖 2-1 DOT 潛盾機切刃盤配置示意圖
(摘自徐育芬, 2010)



(a) A 型環片、(b) B 型環片、(c) C 型環片、
(d) D 型環片

圖 2-2 DOT 潛盾隧道使用之襯砌環片



圖 2-3 DOT 潛盾隧道環片錯縫拼裝圖
(摘自徐育芬, 2010)



(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 2-4 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)

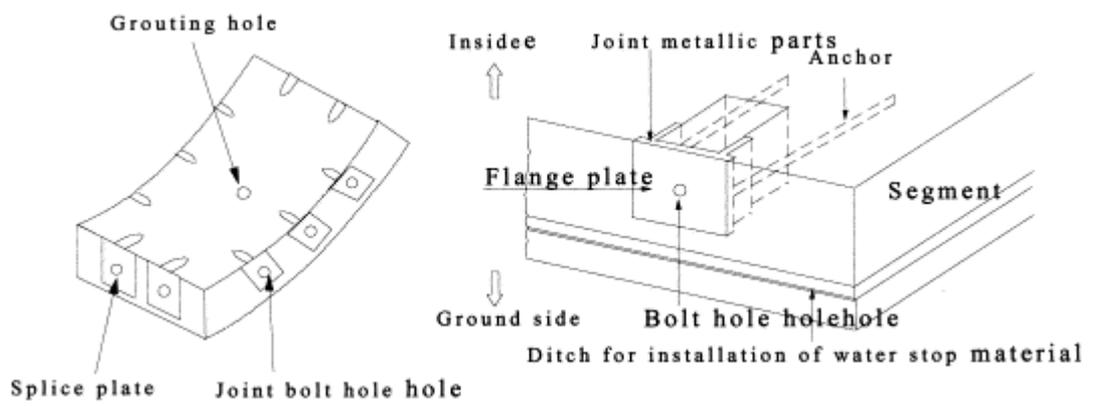


圖 2-5 DOT 潛盾隧道環片與預埋構件安裝示意圖
(after Koyama, 2003)

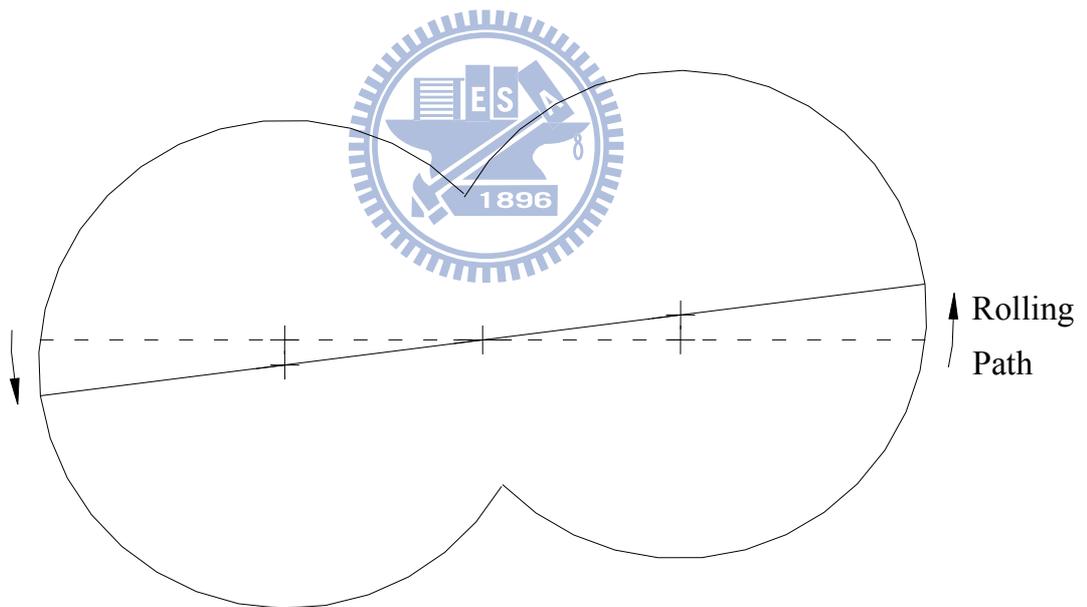


圖 2-6 DOT 潛盾隧道滾轉造成之軸線偏差示意圖
(摘自徐育芬, 2010)

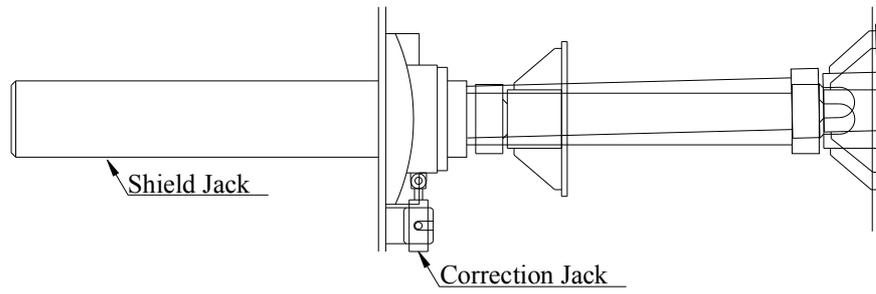


圖 2-7 DOT 潛盾隧道修正千斤頂圖示 (摘自達欣/清水營造股份有限公司, 2008)

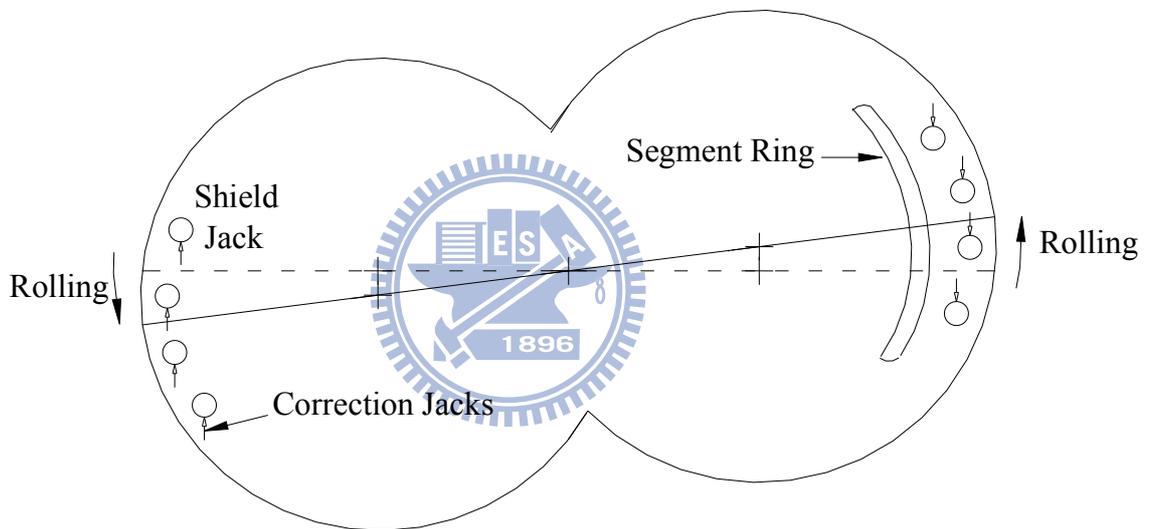


圖 2-8 以修正千斤頂及單側加載環片修正 DOT 潛盾機滾轉
(摘自徐育芬, 2010)

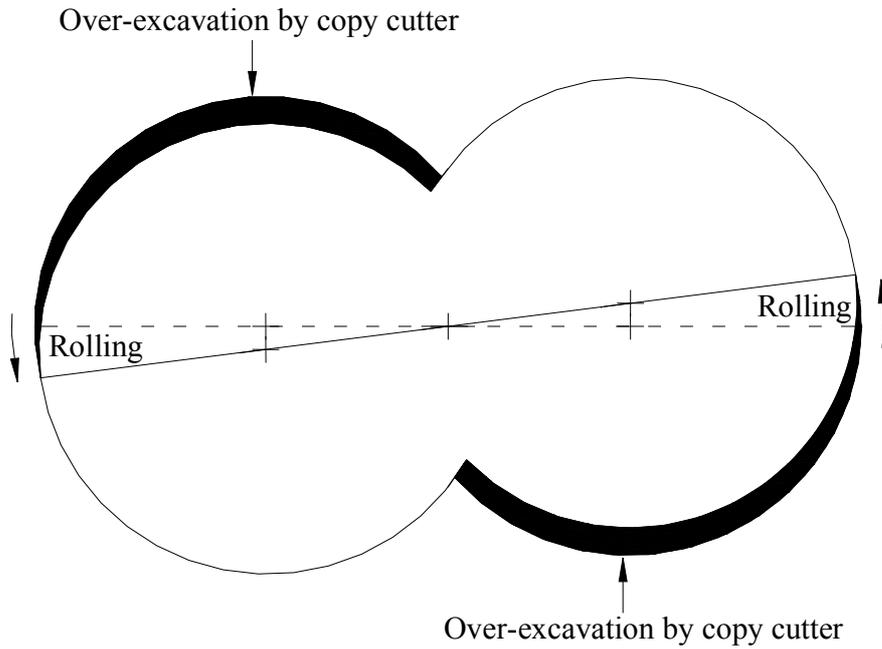


圖 2-9 以超挖刀修正 DOT 潛盾隧道滾轉
(摘自徐育芬, 2010)

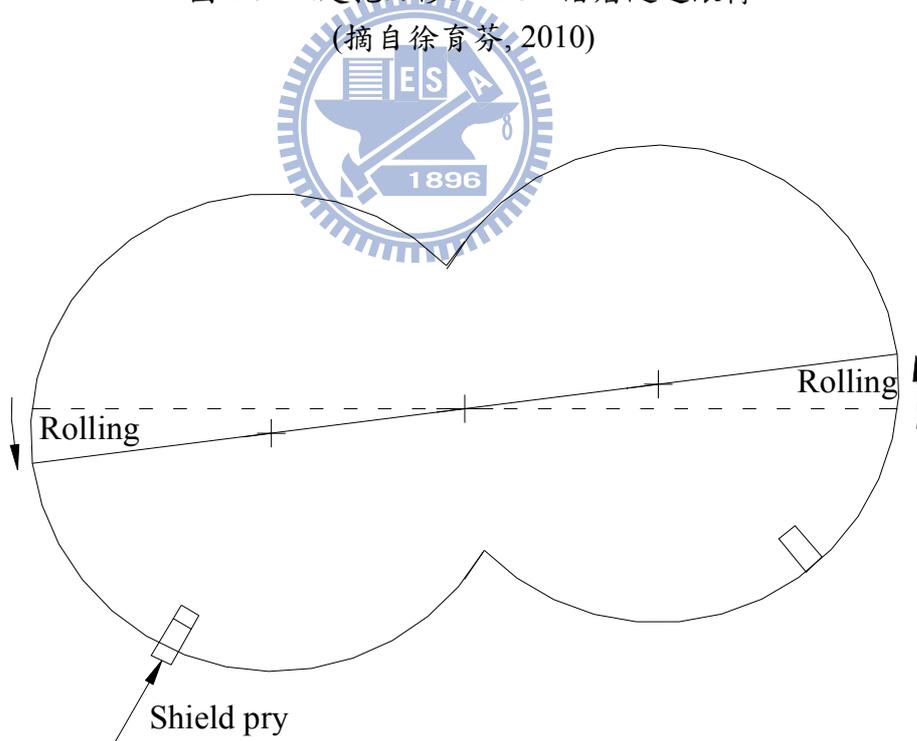


圖 2-10 DOT 潛盾隧道以盾撬修正滾轉
(摘自徐育芬, 2010)

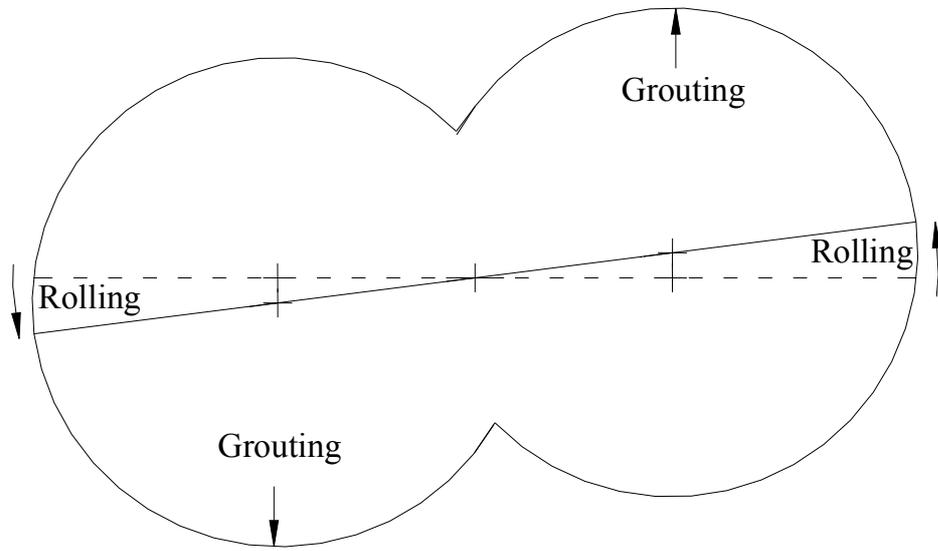


圖 2-11 DOT 潛盾隧道以環片灌漿修正滾轉
(摘自徐育芬, 2010)



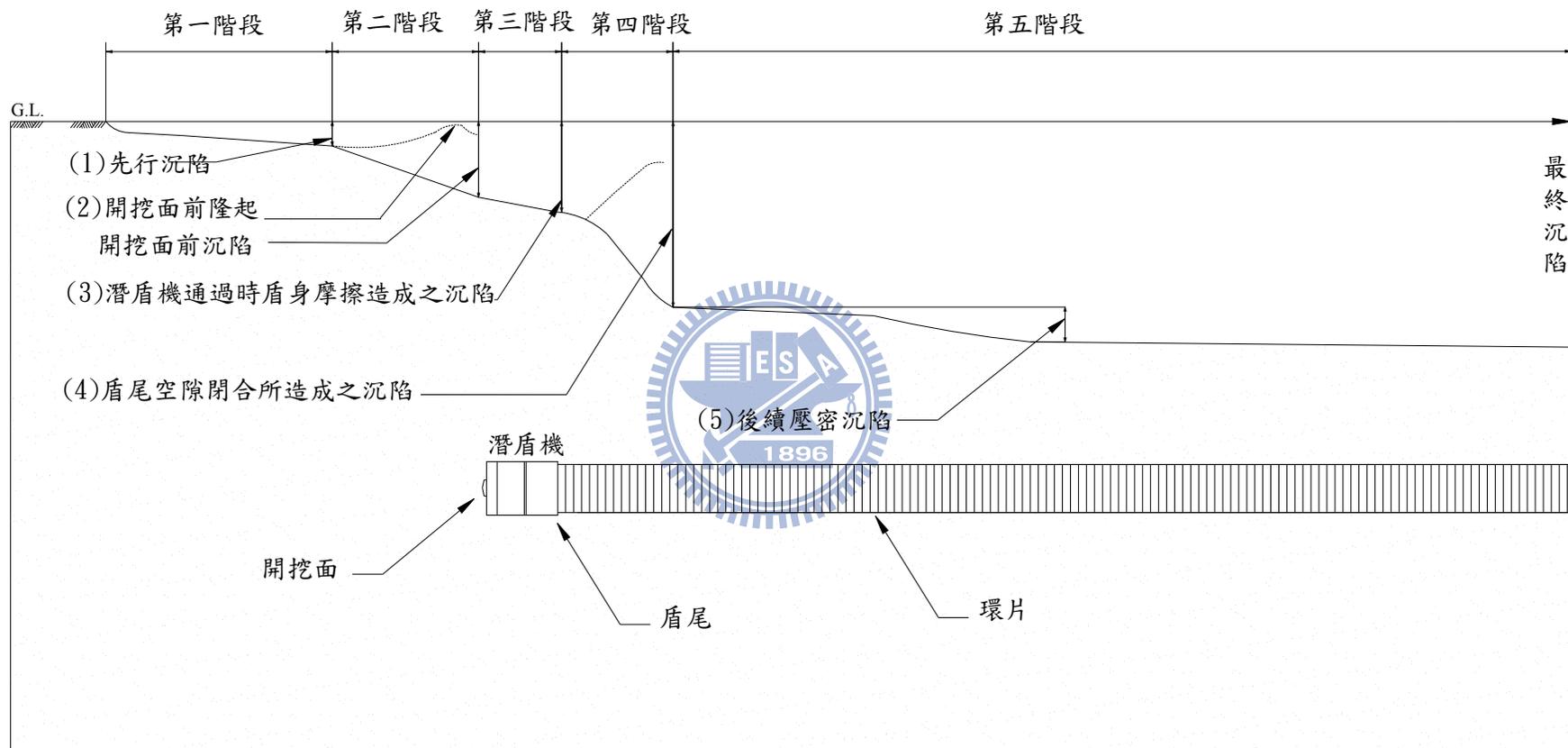


圖 2-12 潛盾機掘進所引致之沉陷歷時曲線 (after Japan Society of Civil Engineers, 1996)

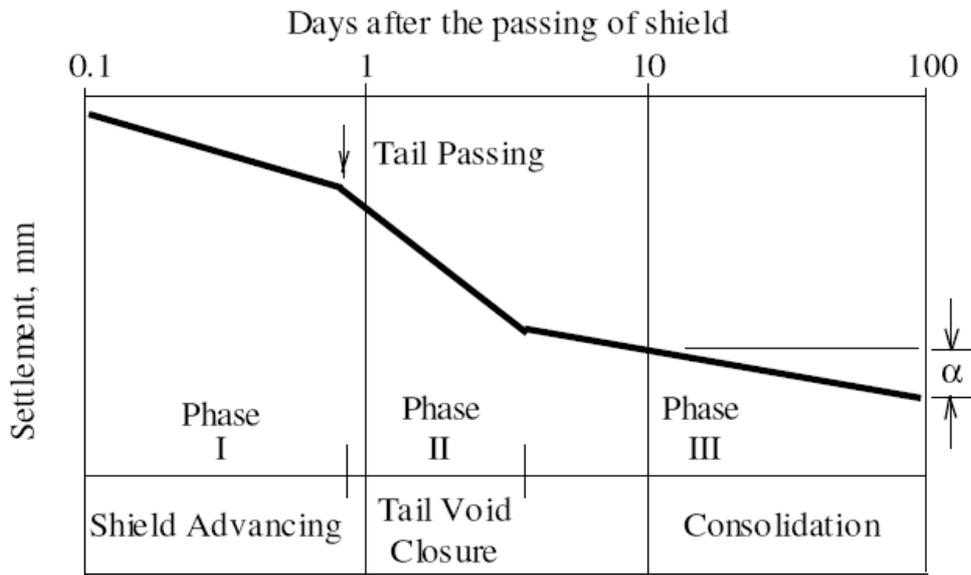


圖 2-13 潛盾隧道施工導致地表沉陷歷時曲線 (after Hwang et al., 1995)

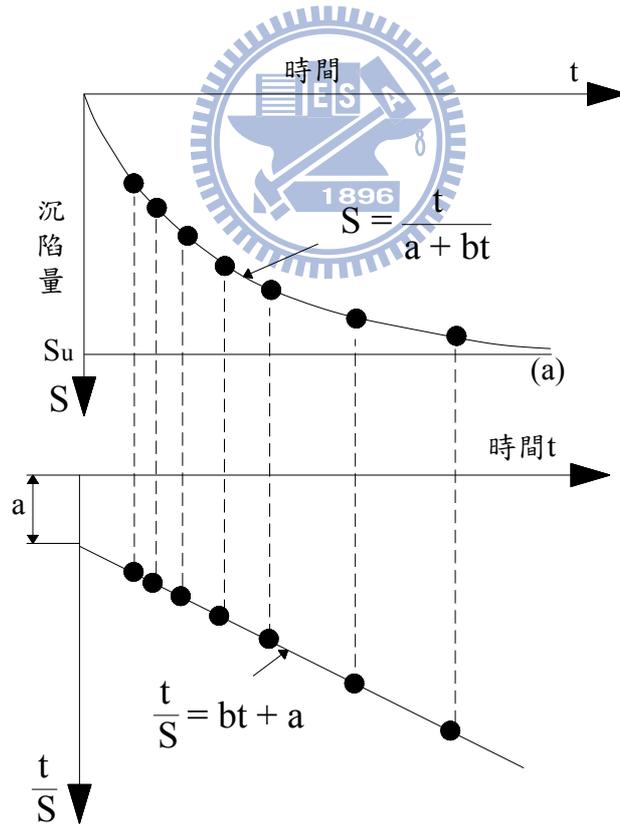


圖 2-14 現地沉陷歷時曲線推求雙曲線參數 a 及 b (after Fang et al., 1993)

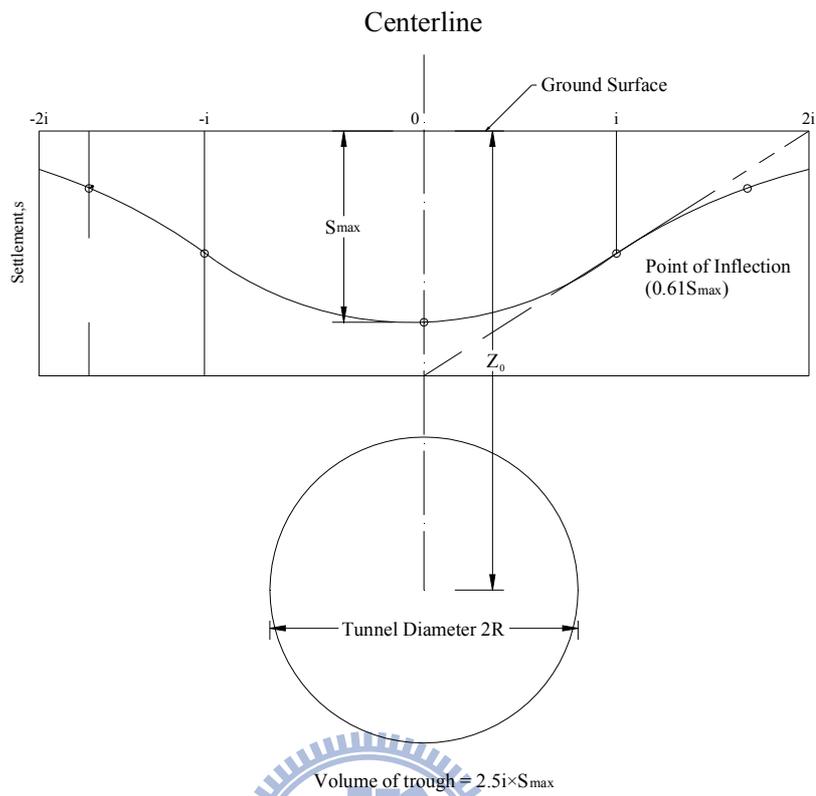


圖 2-15 以誤差函數（常態分佈曲線）模擬地表沉陷槽（after Peck, 1969）

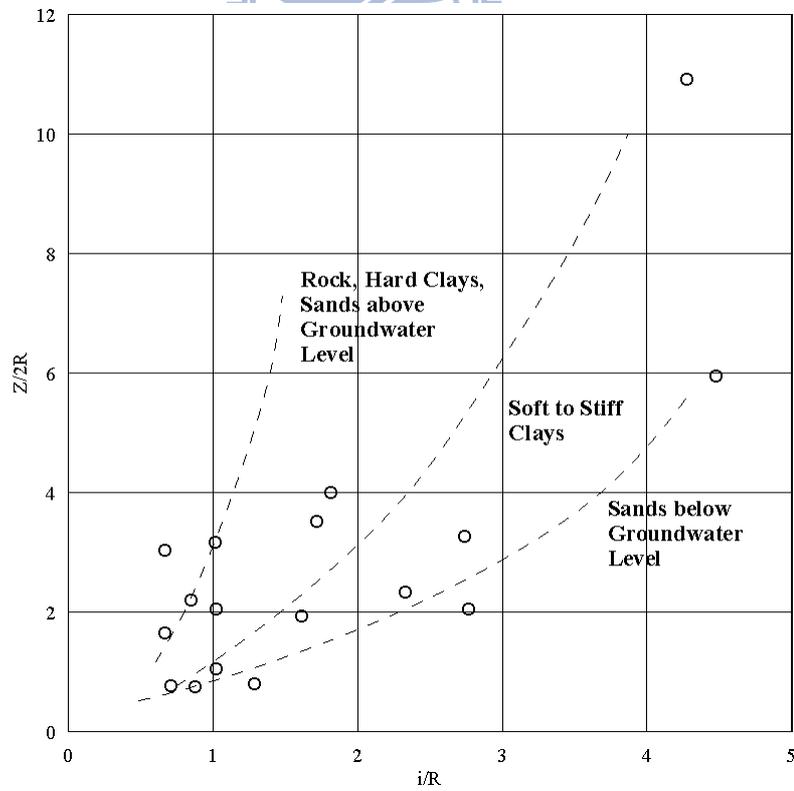


圖 2-16 不同土層下沉陷槽寬徑比 (i/R) 與隧道深徑比 ($Z/2R$) 關係圖
(after Peck, 1969)

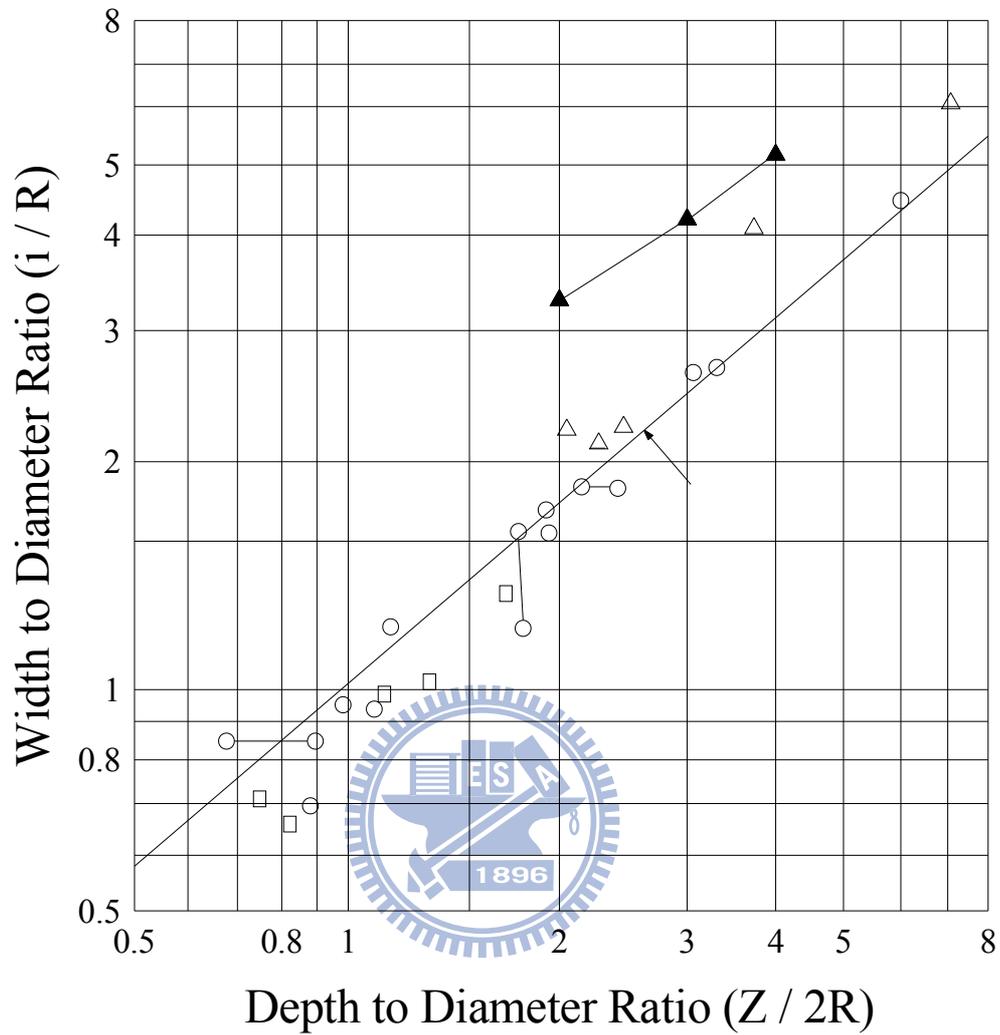
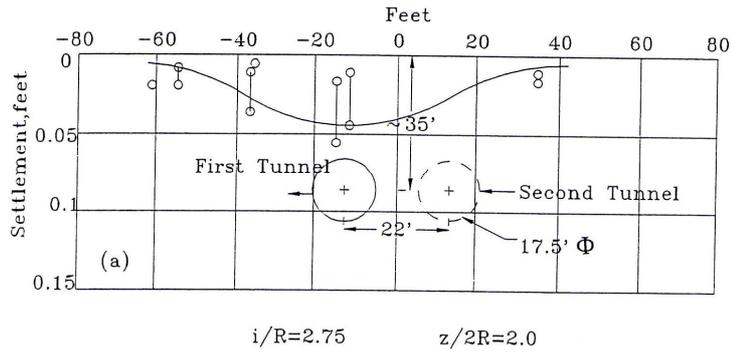
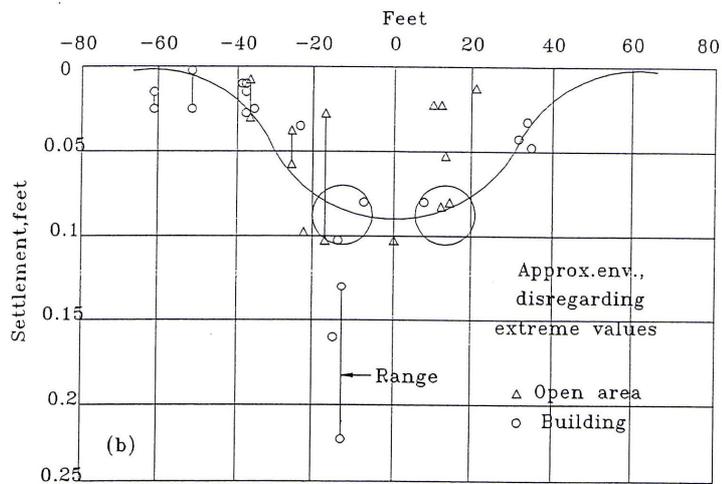


圖 2-17 沉陷槽寬徑比 (i/R) 與隧道深徑比 ($Z/2R$) 之關係
(after Clough and Schmidt, 1981)



(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 2-18 地下水以下砂質地盤潛盾施工引致之地表沉陷槽
(after Peck, 1969)

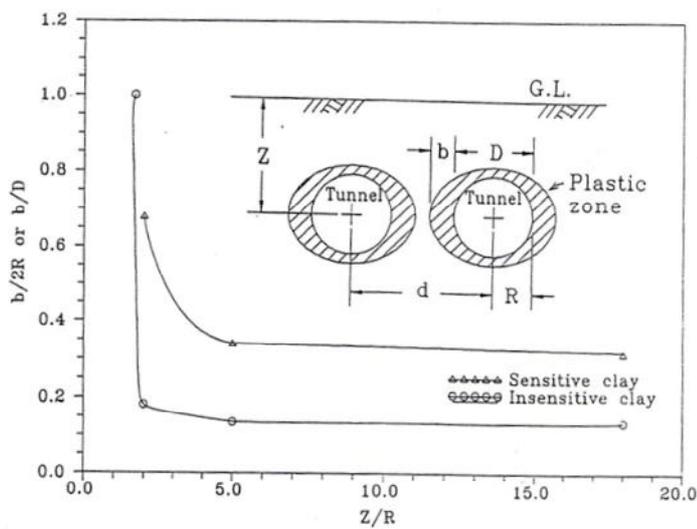


圖 2-19 軟弱土層隧道施工後所引致之土壤塑性範圍
(after Hoyaux and Ladanyi, 1970)

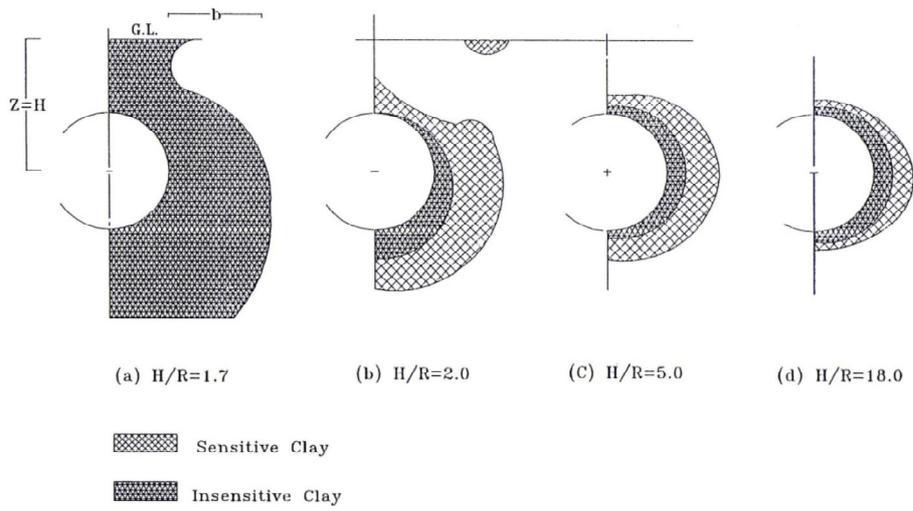


圖 2-20 隧道周圍土壤塑性區最大水平寬度對隧道直徑比($b/2R$)與深度半徑比($z/2R$)之關係(after Hoyaux and Ladanyi, 1970)

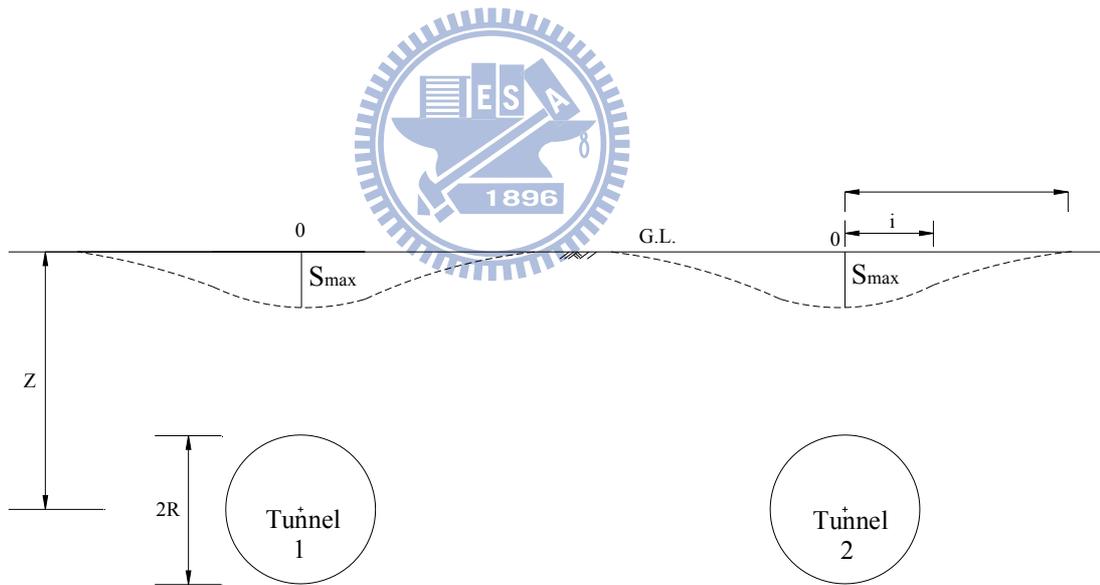


圖 2-21 兩單圓潛盾隧道獨立引致之沉陷槽
(摘自徐育芬, 2010)

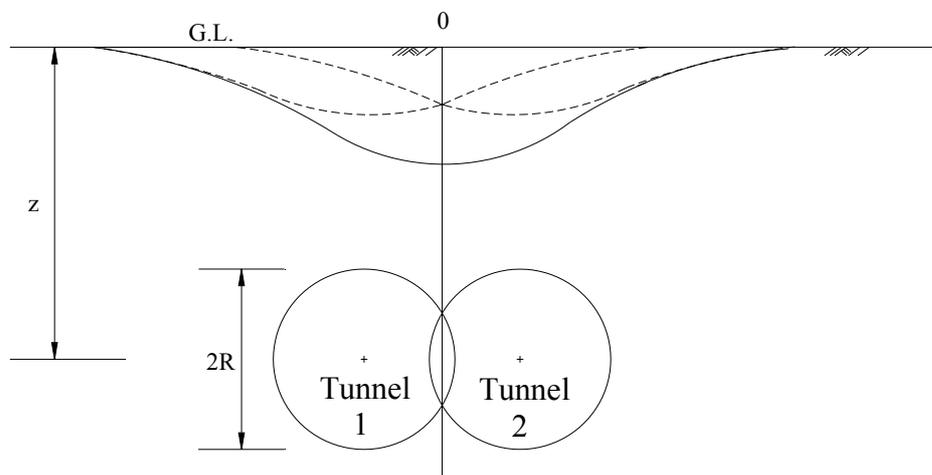


圖 2-22 以兩個相交之單圓潛盾隧道疊加模擬 DOT 隧道引致之地表沉陷槽
(摘自徐育芬, 2010)

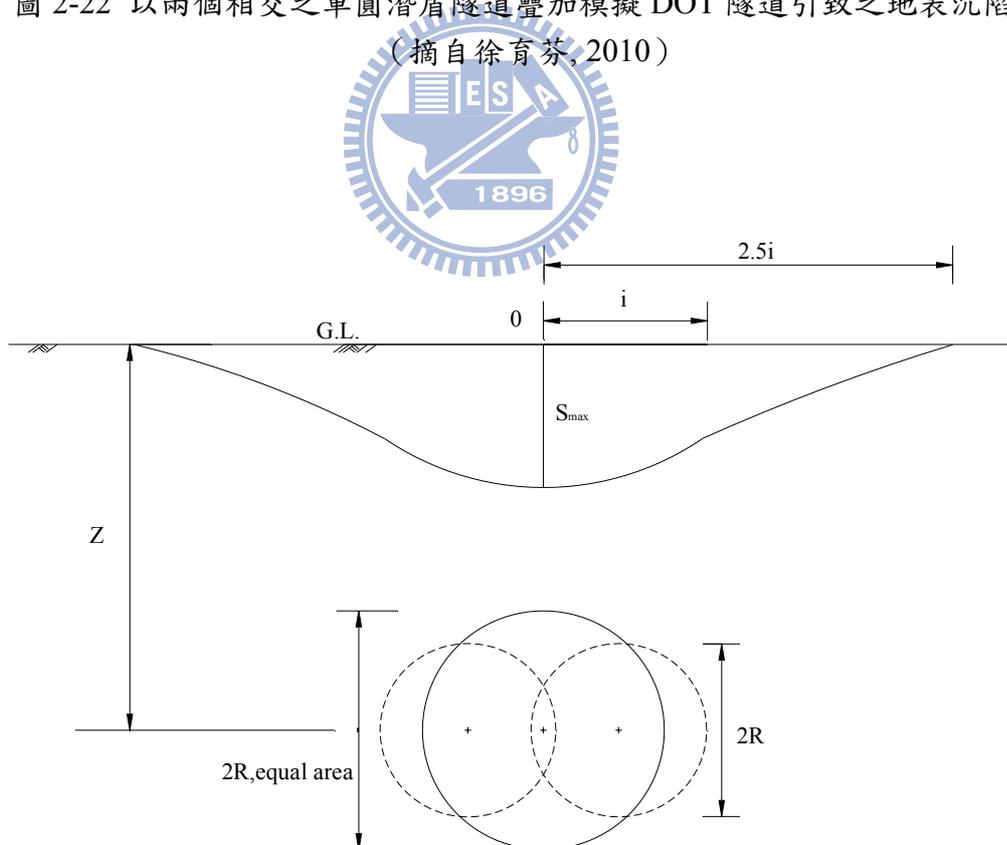


圖 2-23 以等面積單圓潛盾隧道模擬 DOT 隧道造成之地表沉陷槽
(摘自徐育芬, 2010)



圖 3-1 千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程使用之 DOT 潛盾機
(摘自日本潛盾工法技術協會, 2004)

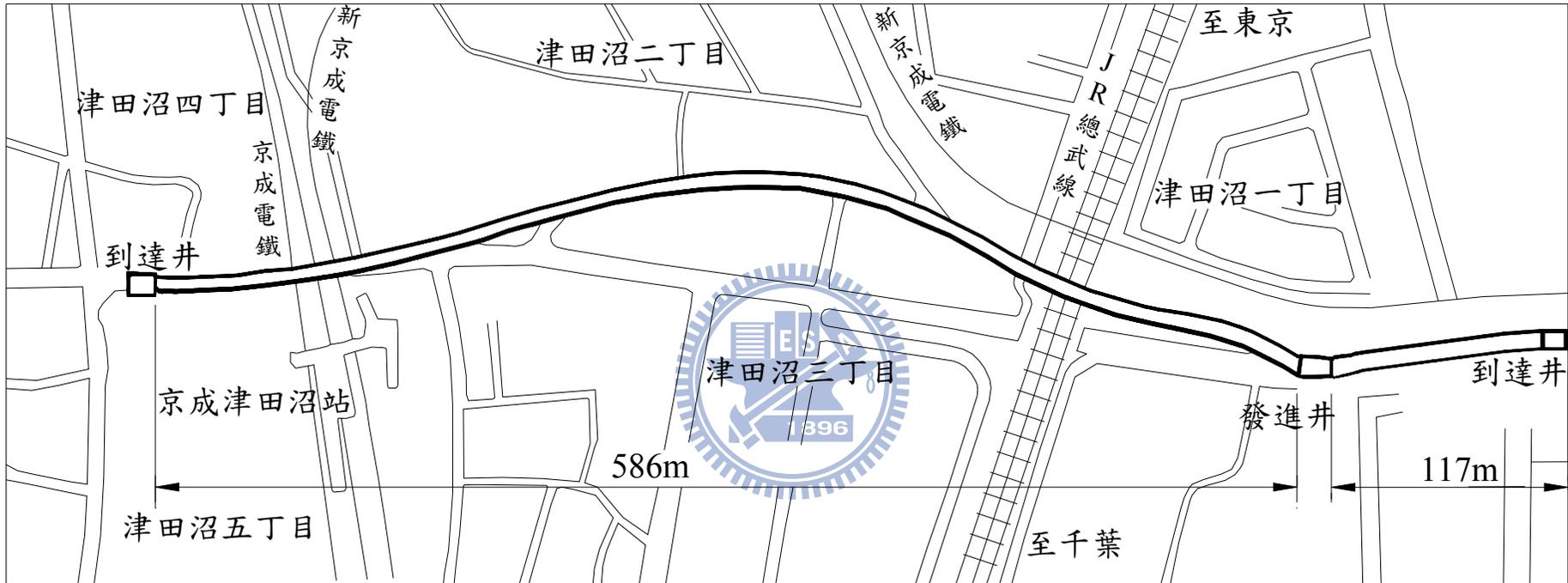
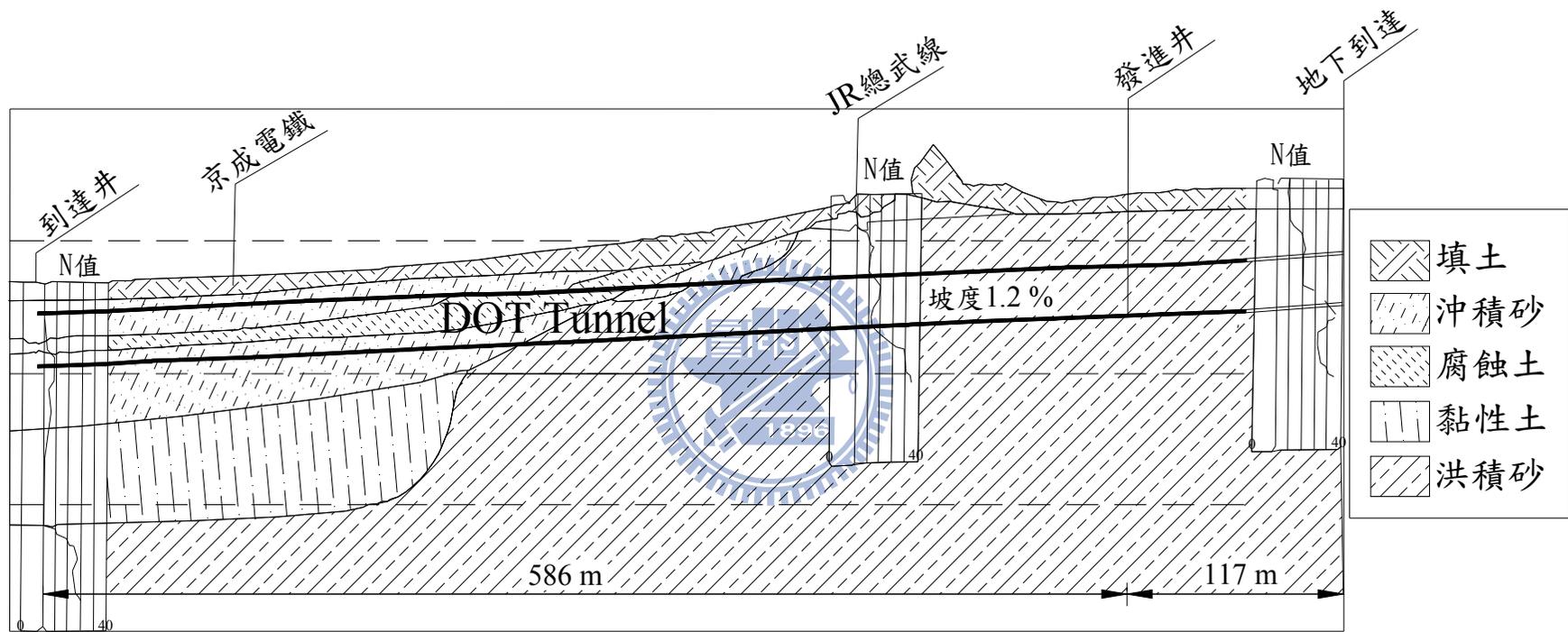


圖 3-2 千葉縣習志野市菊田川 2 號幹線管渠建設工程 DOT 潛盾隧道路線圖
 (摘自橫山博一, 1994)



GL

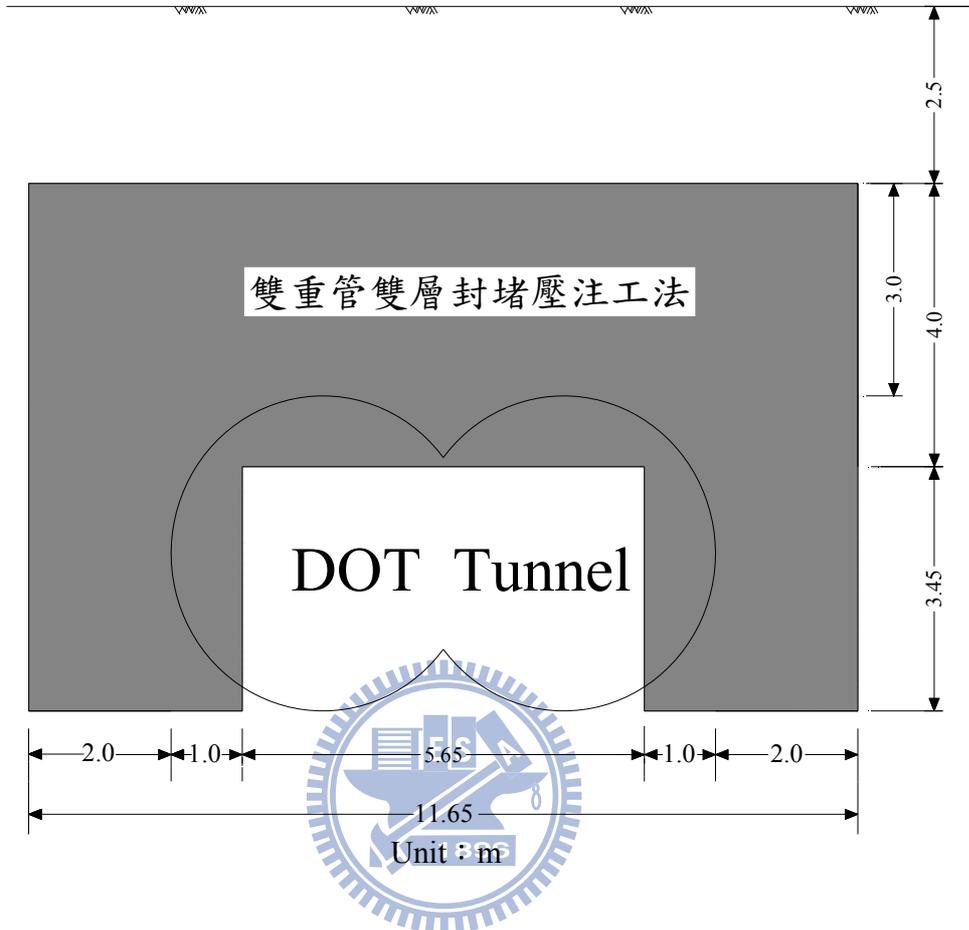


圖 3-4 穿越 JR 總武線下方的 DOT 隧道防護工法
(摘自橫山博一, 1994)

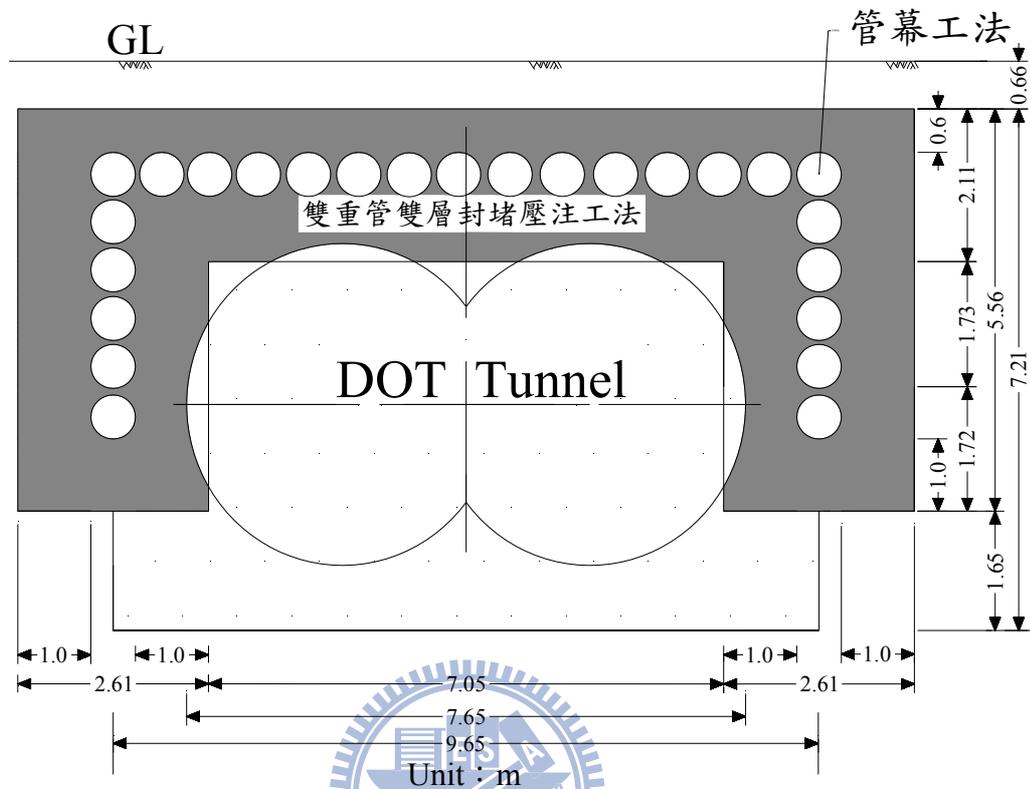


圖 3-5 穿越京城電鐵鐵路於 DOT 隧道施作之防護工法
(摘自橫山博一, 1994)

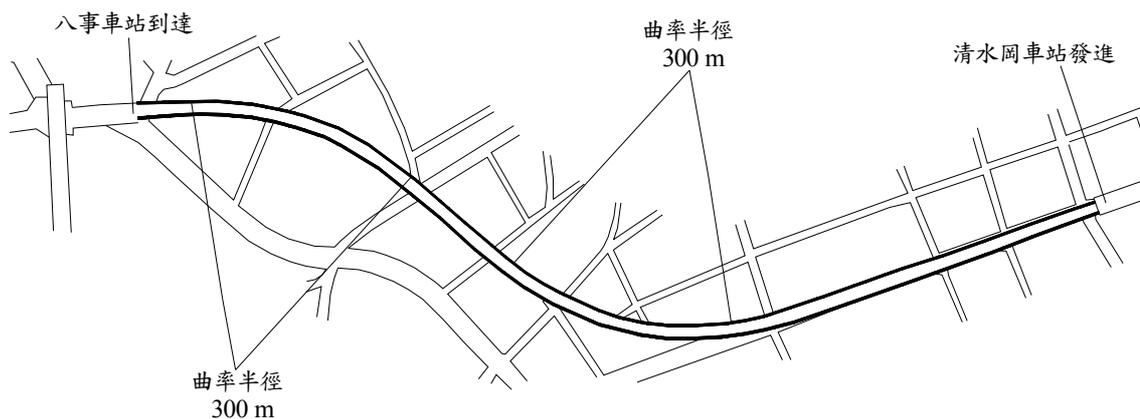


圖 3-6 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區 DOT 潛盾隧道路線圖
(摘自石原俊造 et al., 2003)

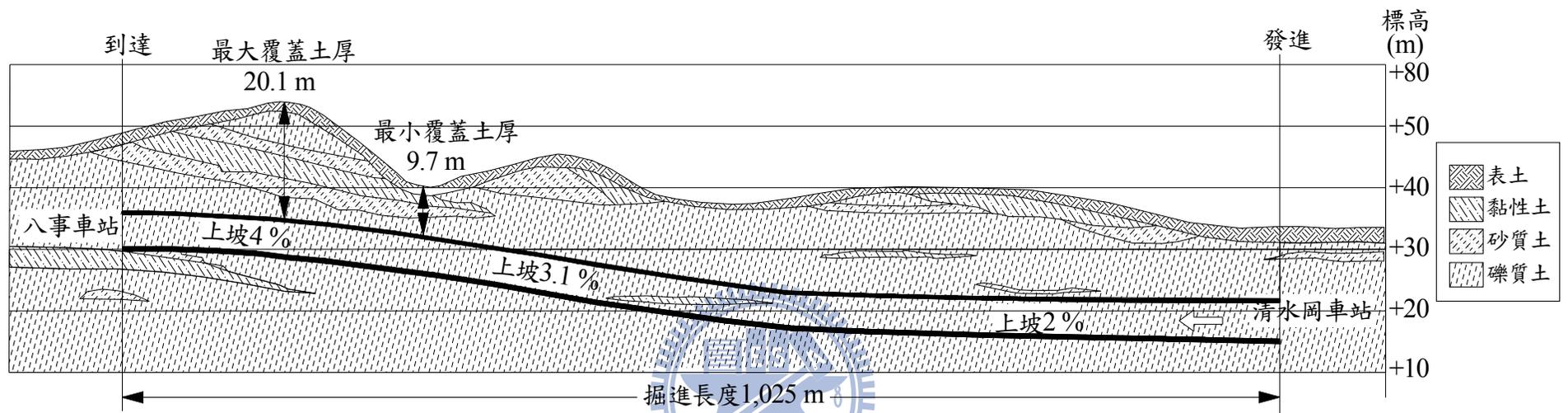


圖 3-7 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區建設工程地質剖面圖
(摘自石原俊造 et al., 2003)

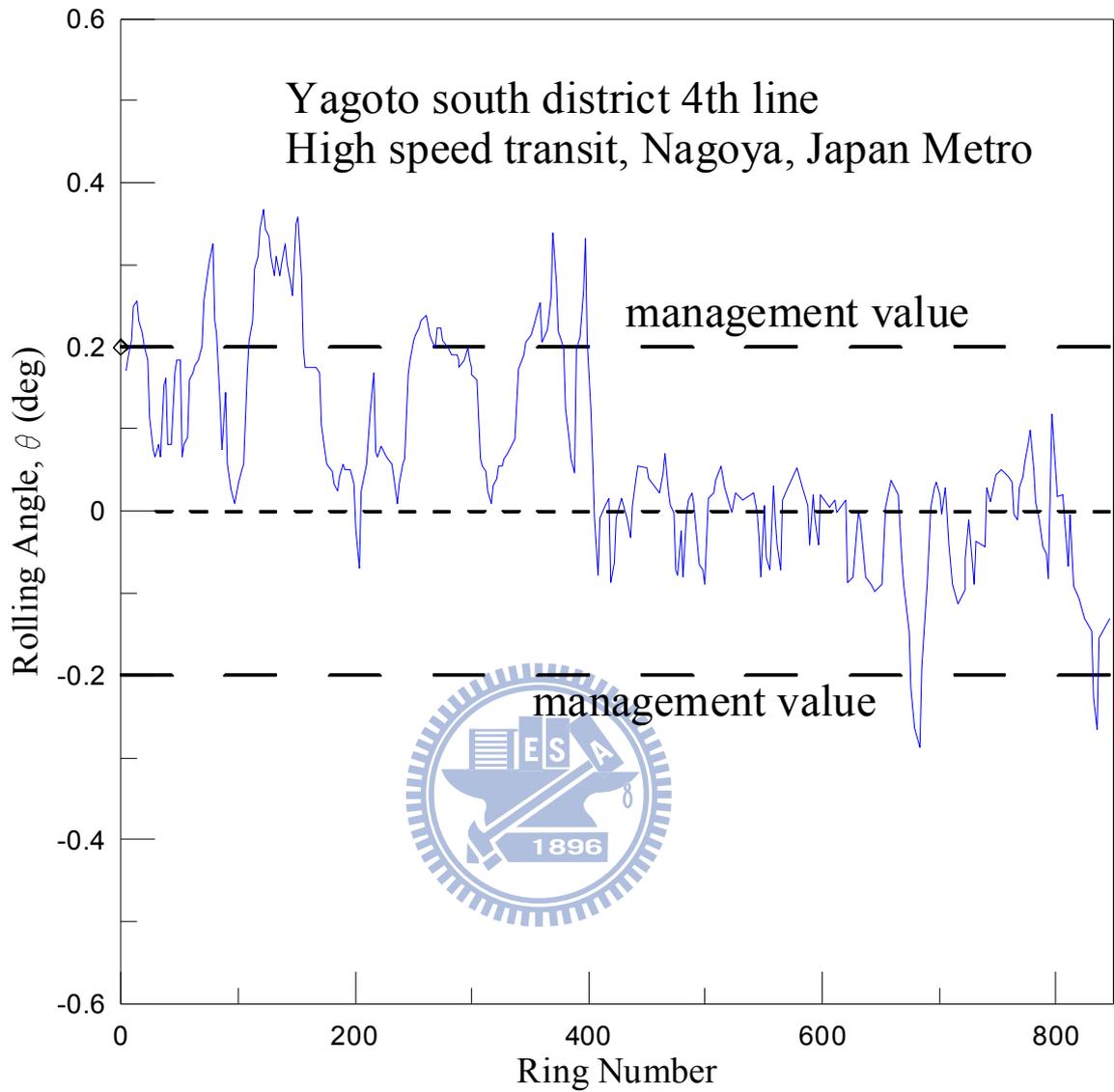


圖 3-8 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區 DOT 潛盾機滾轉角度
(摘自石原俊造 et al., 2003)

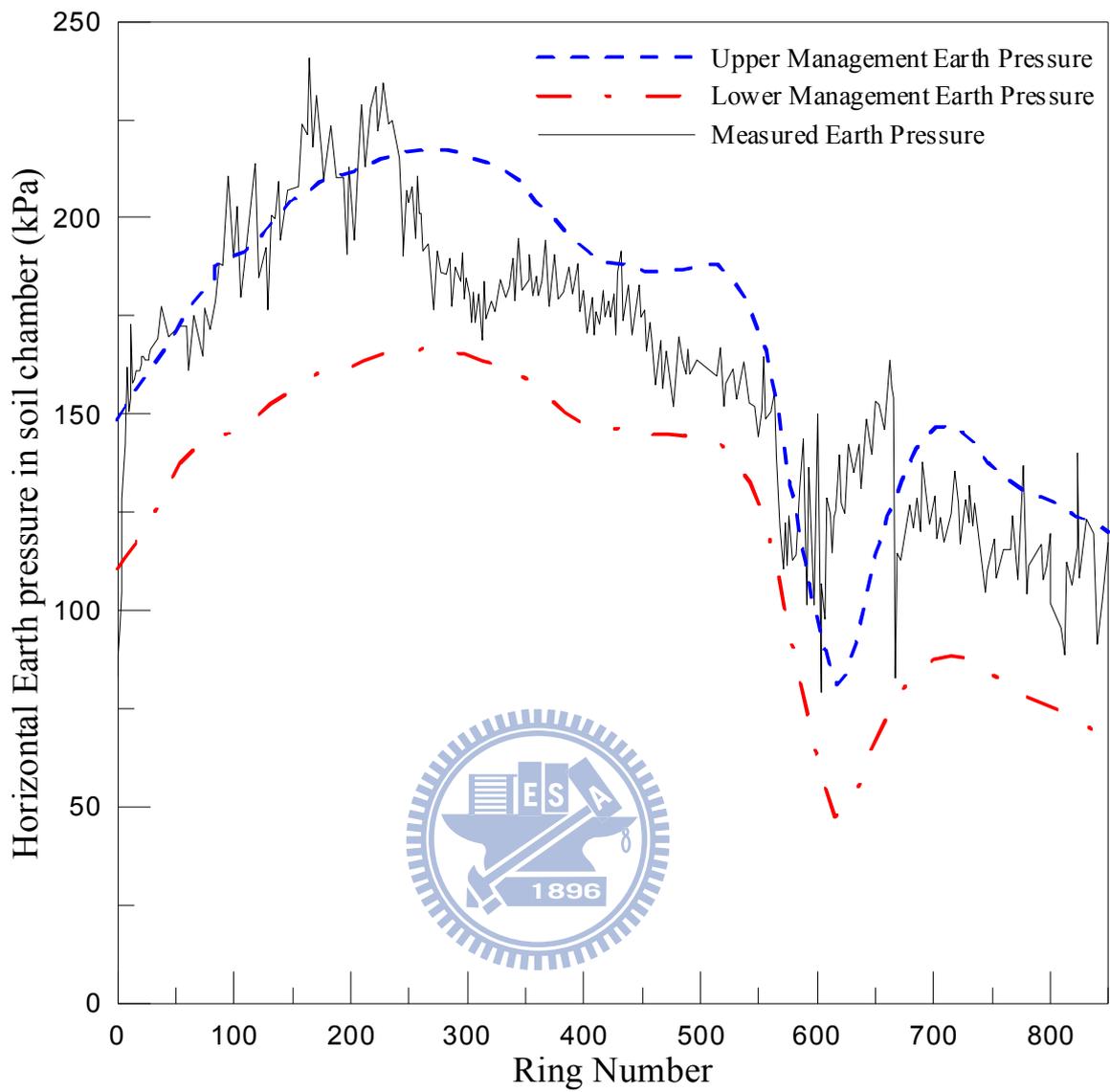


圖 3-9 名古屋高速鐵道 4 號線八事南工區 DOT 潛盾機管理土壓力
(摘自石原俊造 et al., 2003)

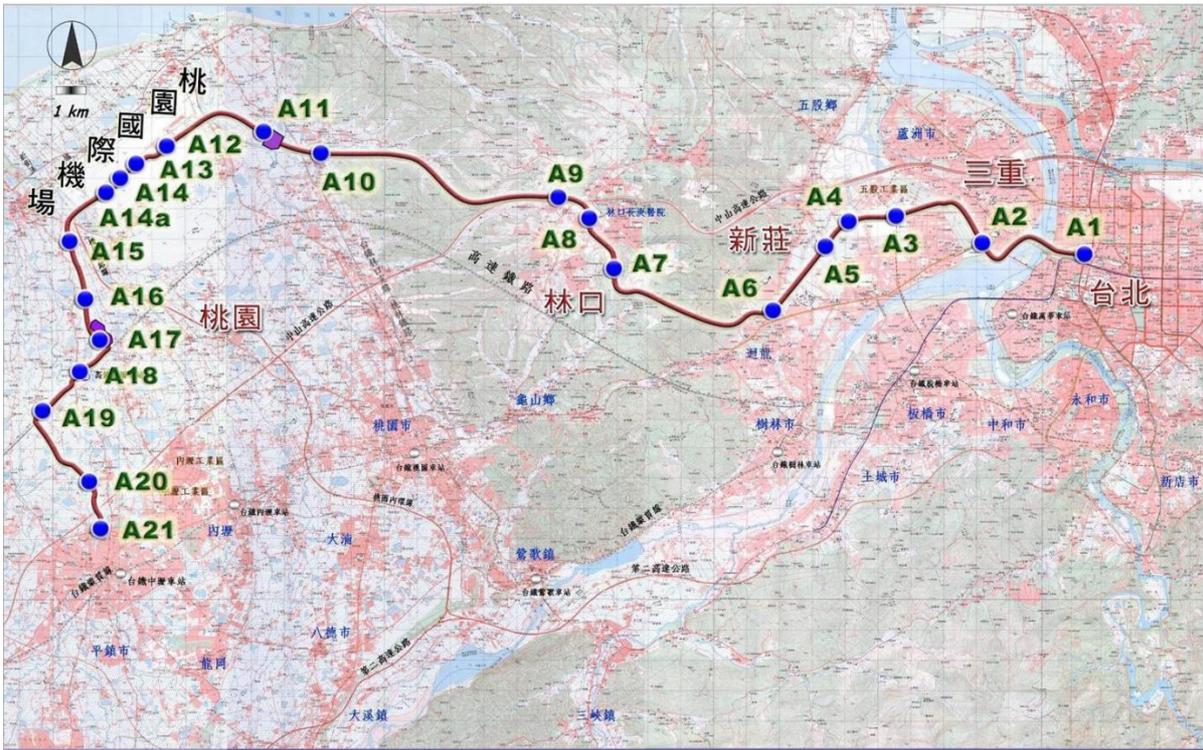


圖 4-1 桃園國際機場聯外捷運系統路線平面圖
 (摘自台灣世曦工程顧問公司, 2009)



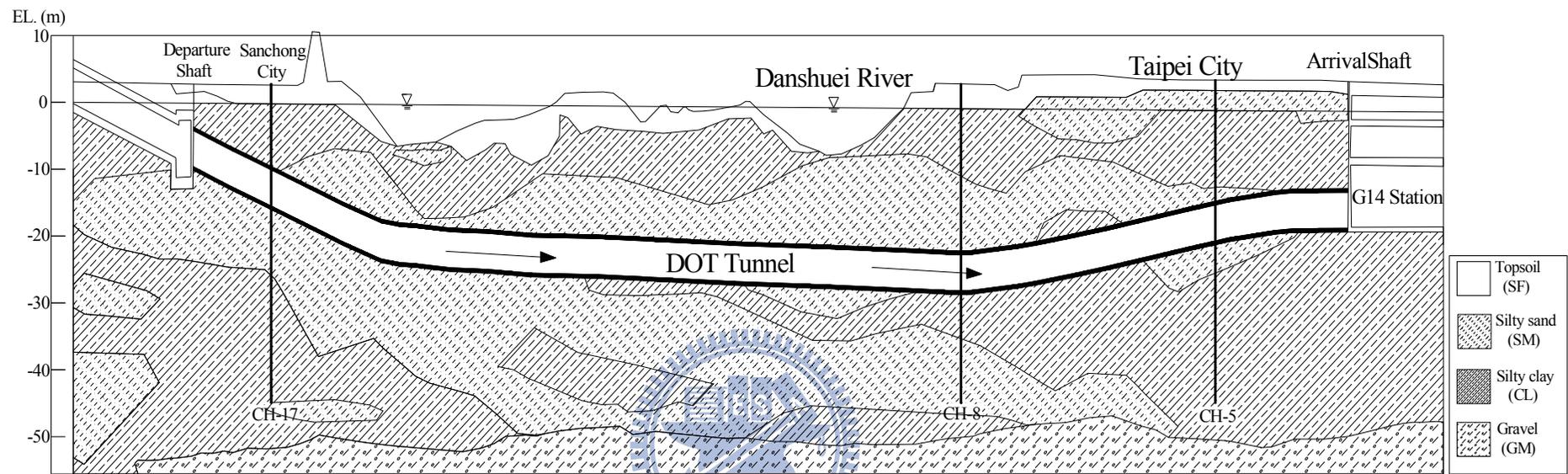


圖 4-2 桃園國際機場聯外捷運三重台北段 CA450A 標地質剖面圖

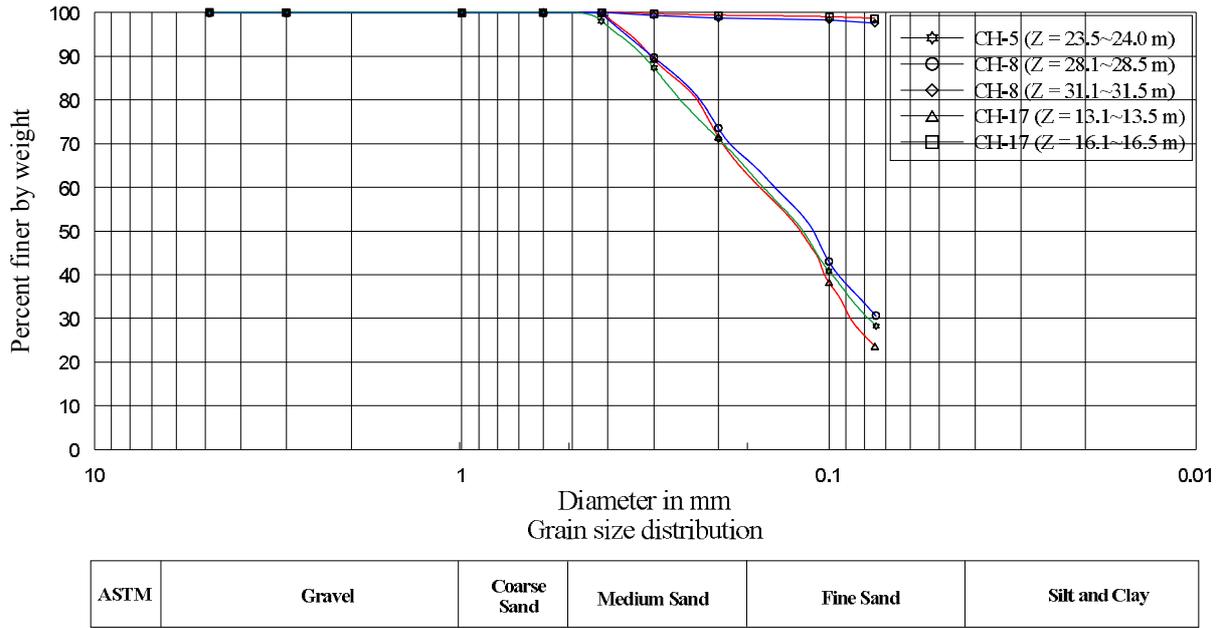


圖 4-3 CH-5、CH-8、及 CH-17 調查孔取得之粒徑分佈曲線(摘自達欣/清水建設, 2009)



圖 4-4 CA450A 標 DOT 潛盾機切刃盤配置圖示
(摘自台灣世曦工程顧問公司, 2009)

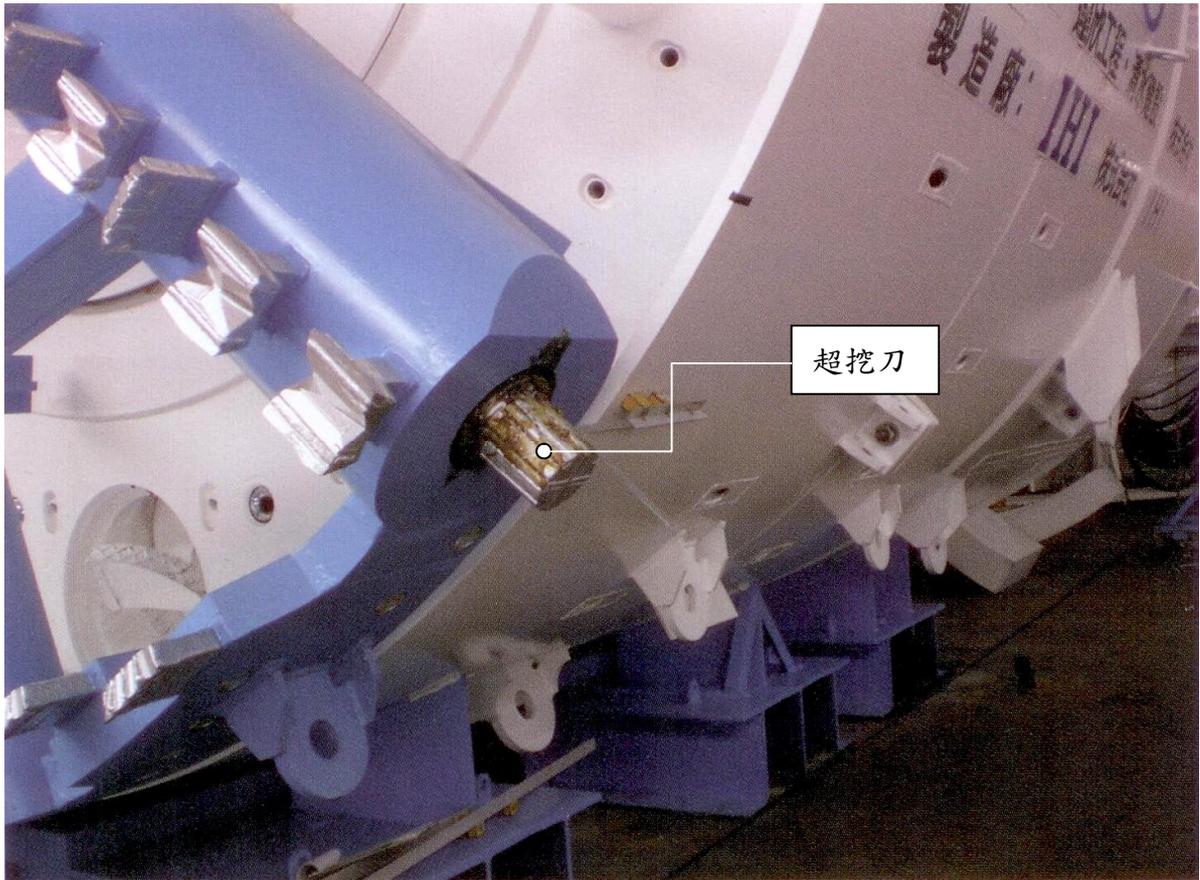


圖 4-5 CA450A 標 DOT 潛盾機超挖刀裝置

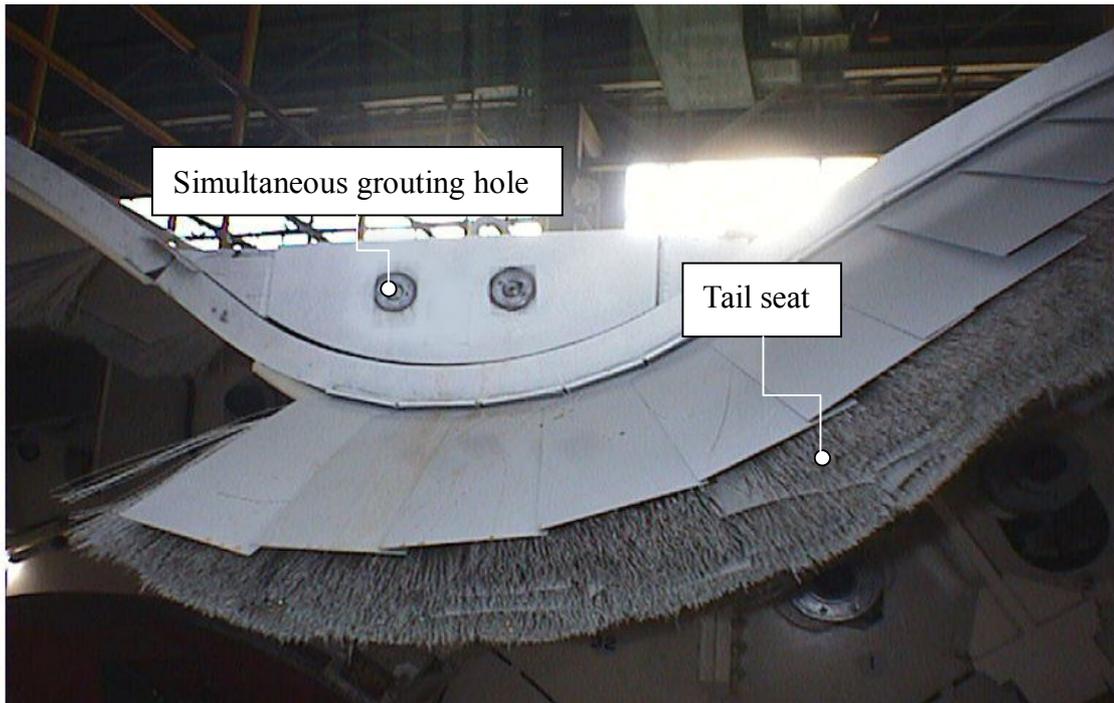


圖 4-6 (a) CA450A 標 DOT 潛盾機上海鷗部同步背填灌漿孔(摘自吳沛軫, 2010)

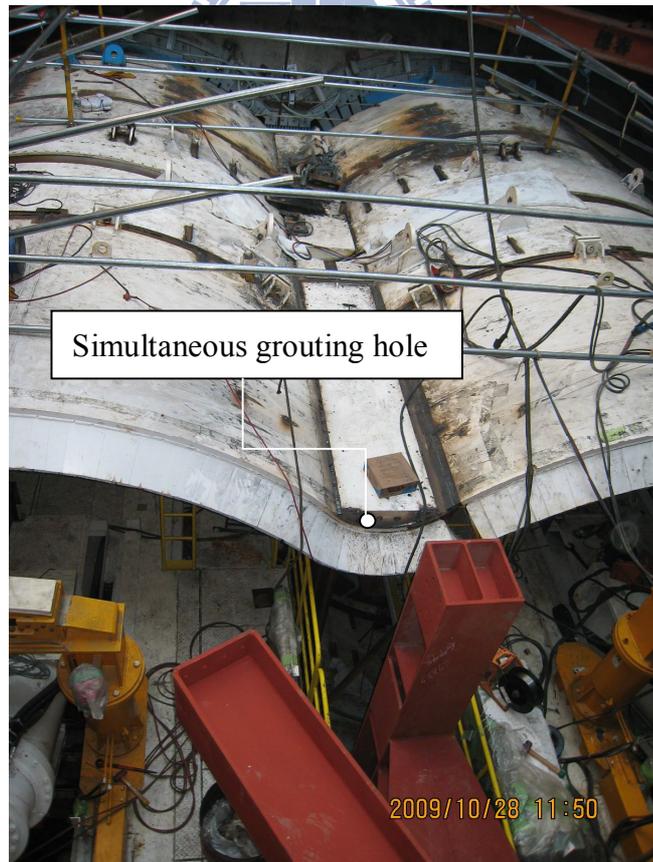


圖 4-6 (b) CA450A 標 DOT 盾身外側之灌漿管
(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)

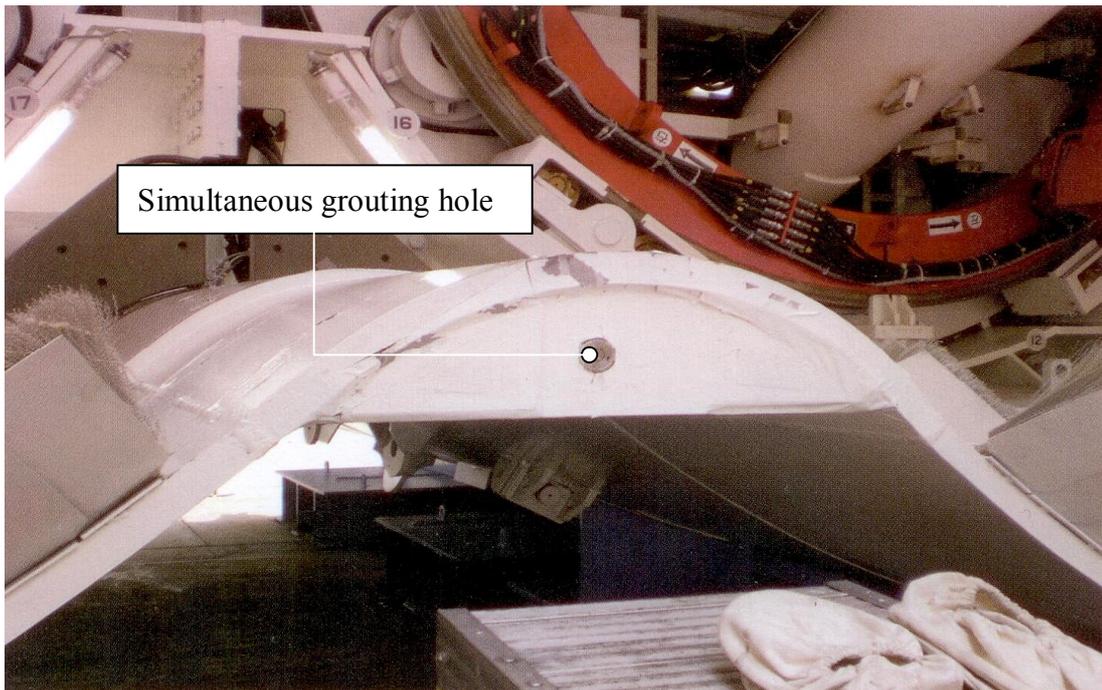


圖 4-7 CA450A 標 DOT 潛盾機下海鷗部同步背填灌漿孔
(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)



圖 4-8 CA450A 標 DOT 潛盾隧道出發端隧道口

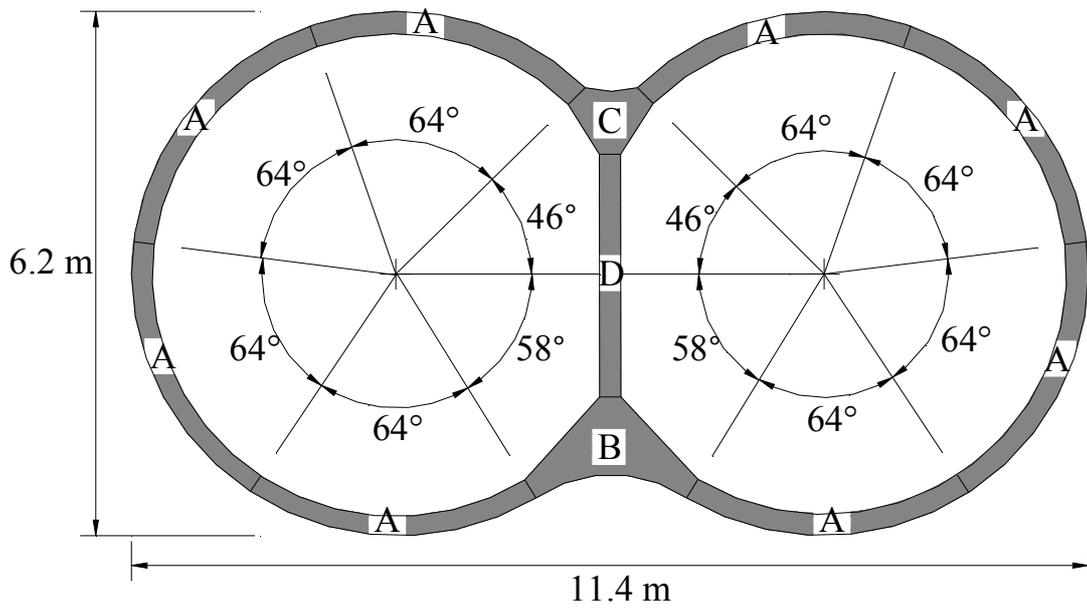


圖 4-9 CA450A 標潛盾隧道環片配置圖(摘自台灣世曦工程顧問公司, 2008)



圖 4-10 CA450A 標 DOT 潛盾隧道

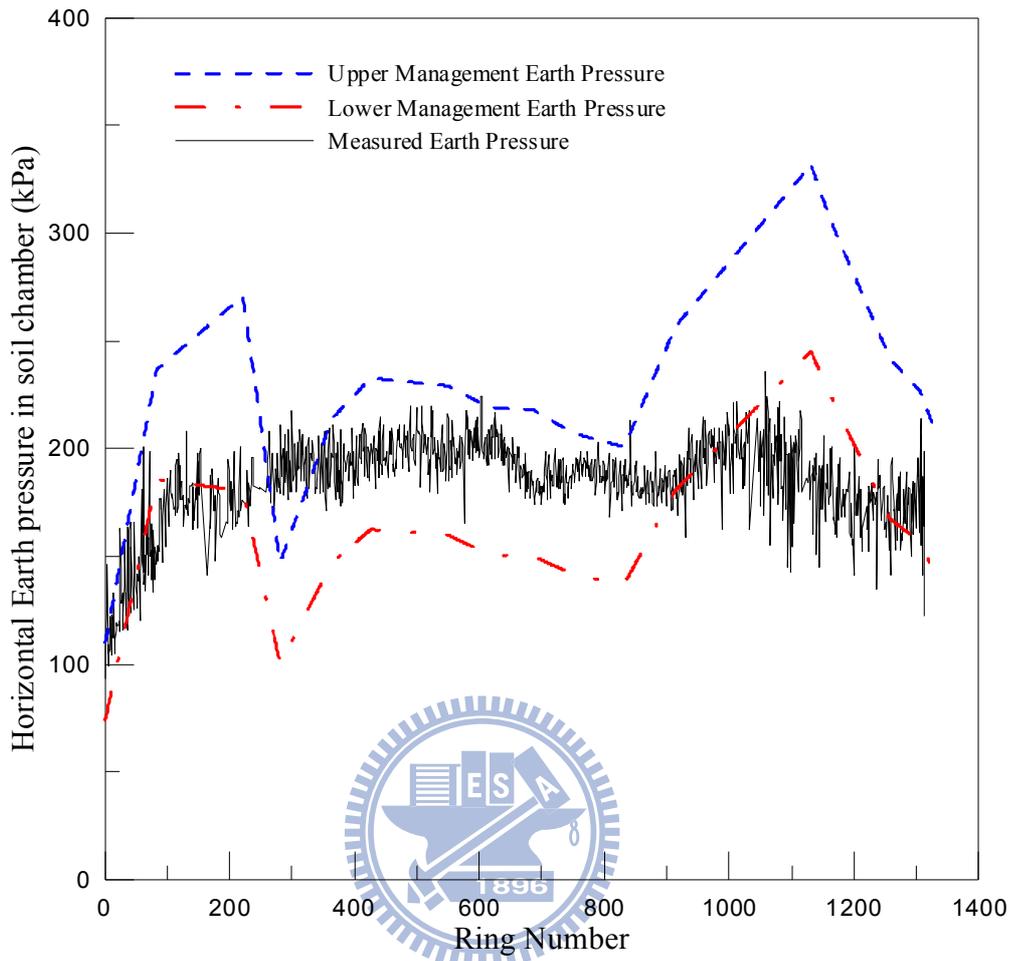


圖 4-11 CA450A 標 DOT 潛盾機管理土壓力



圖 4-12 CA450A 標 DOT 潛盾隧道自環片背填灌漿



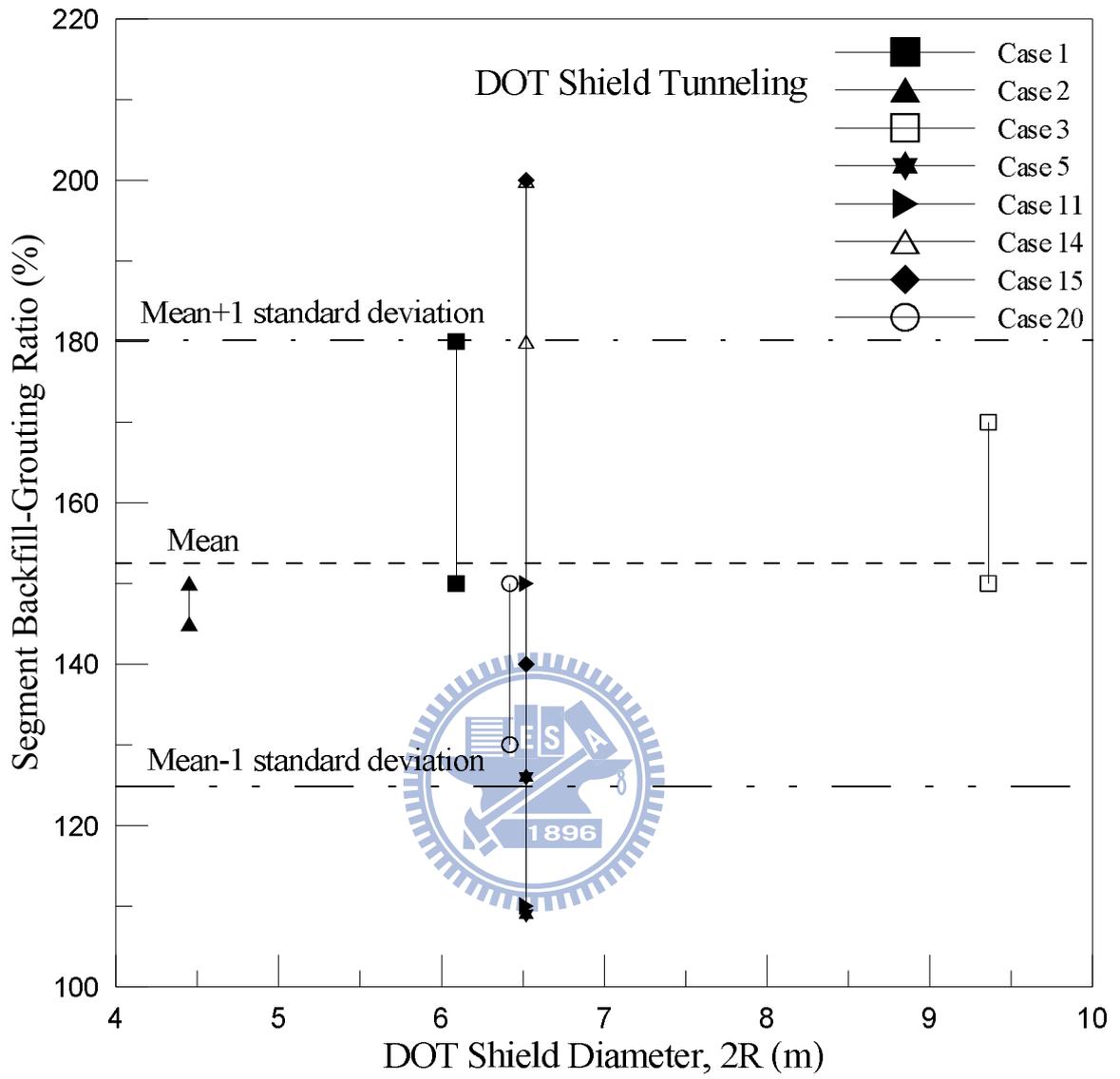


圖 4-13 環片背填灌漿率與直徑之關係

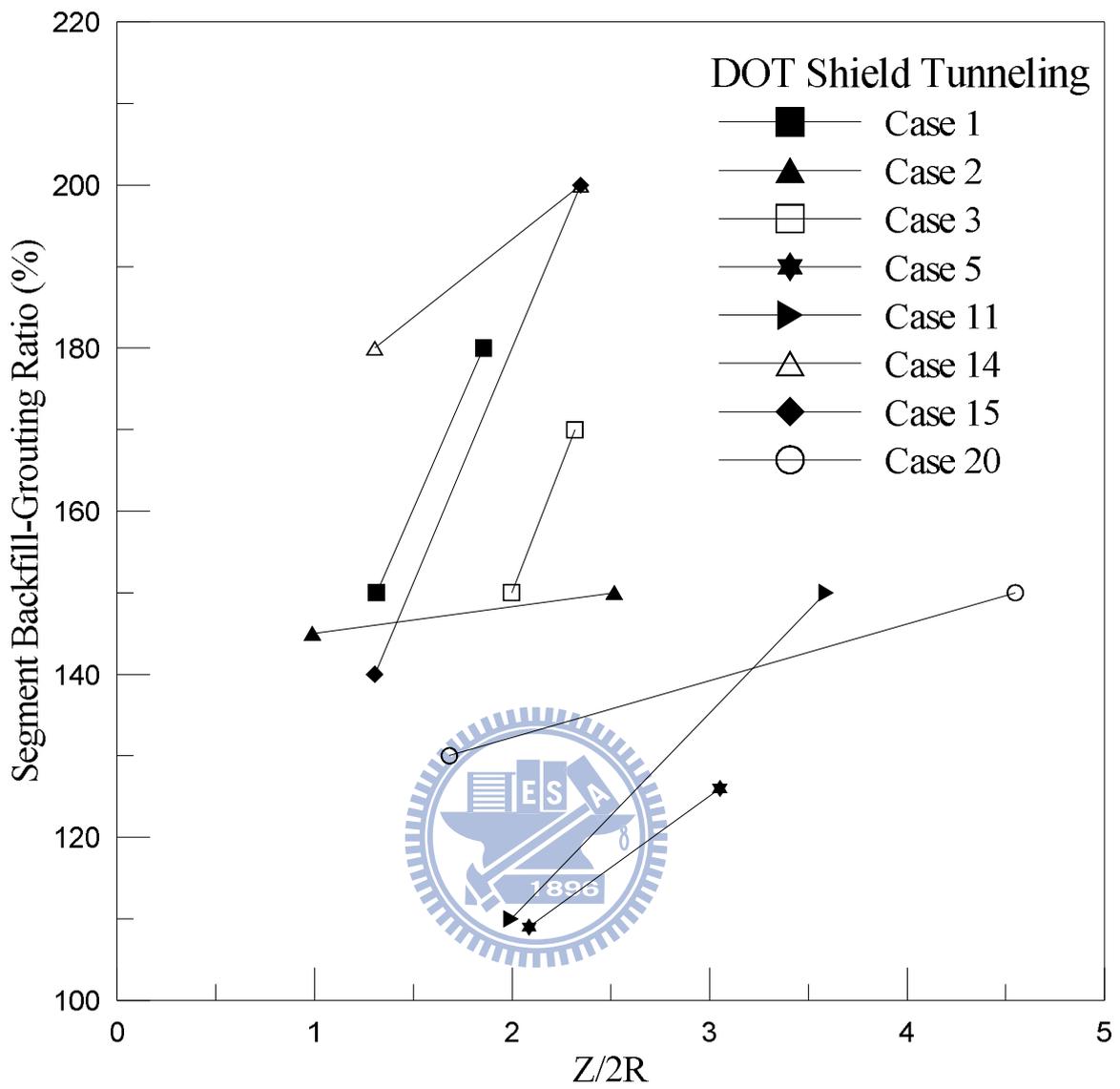


圖 4-14 環片背填灌漿率與深徑比 $Z/2R$ 之無因次關係

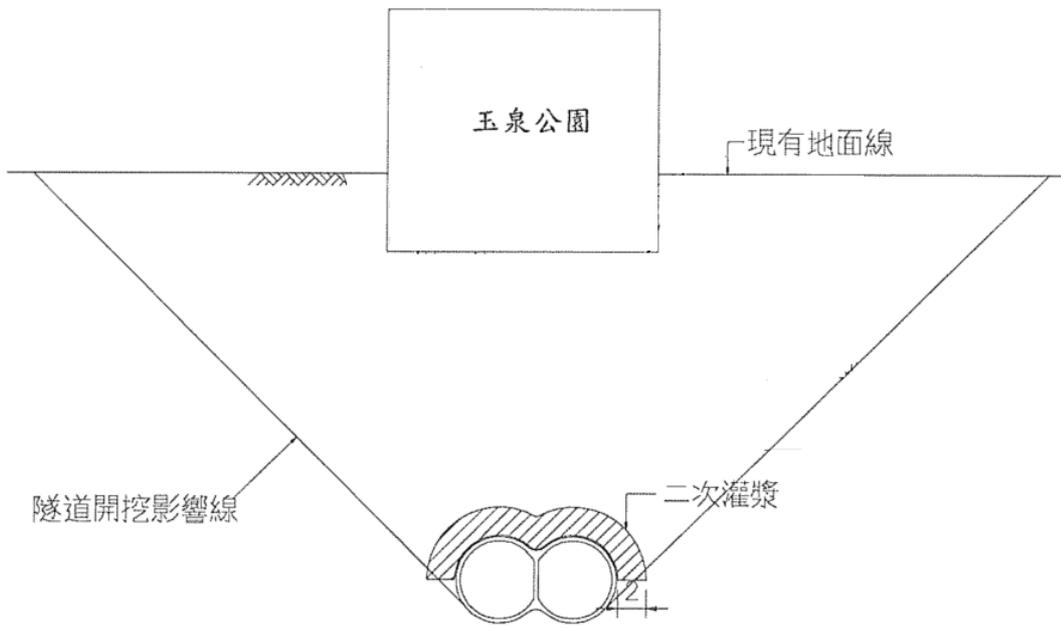


圖 4-15 CA450A 標二次灌漿施作圖(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)

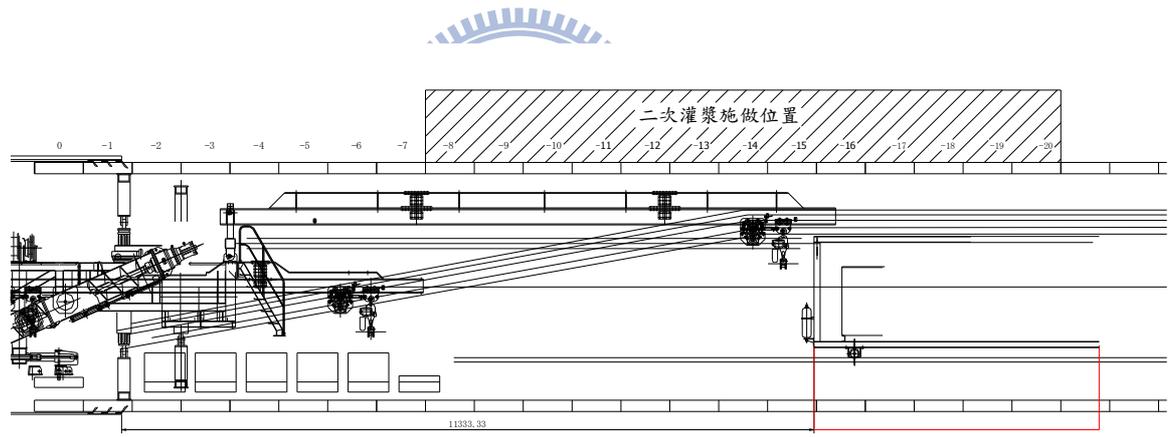


圖 4-16 CA450A 標二次灌漿位置示意圖(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)

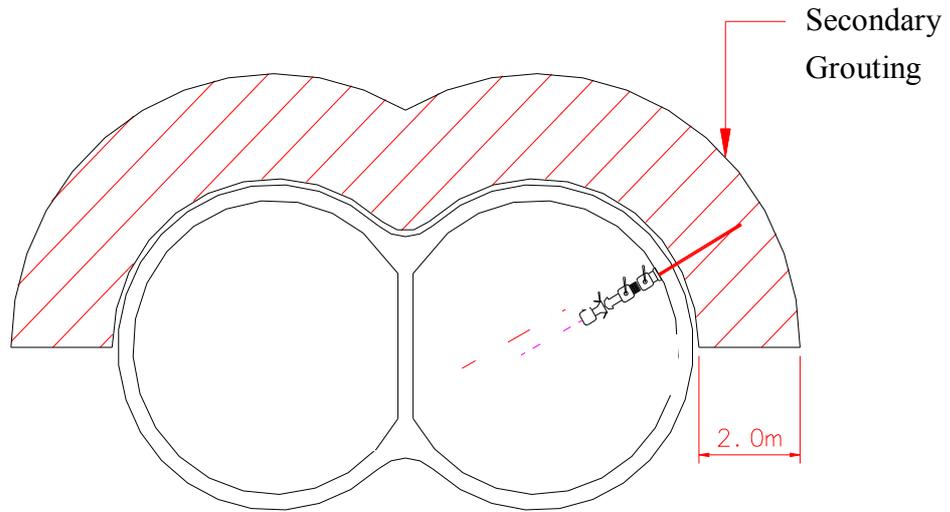
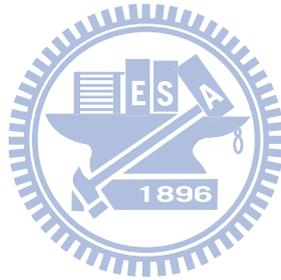
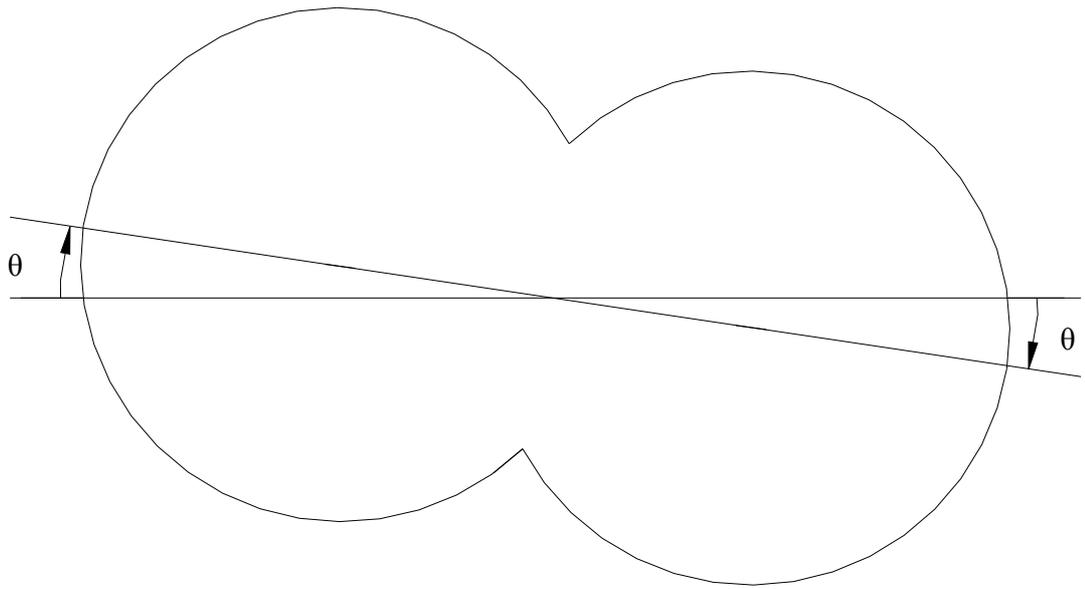
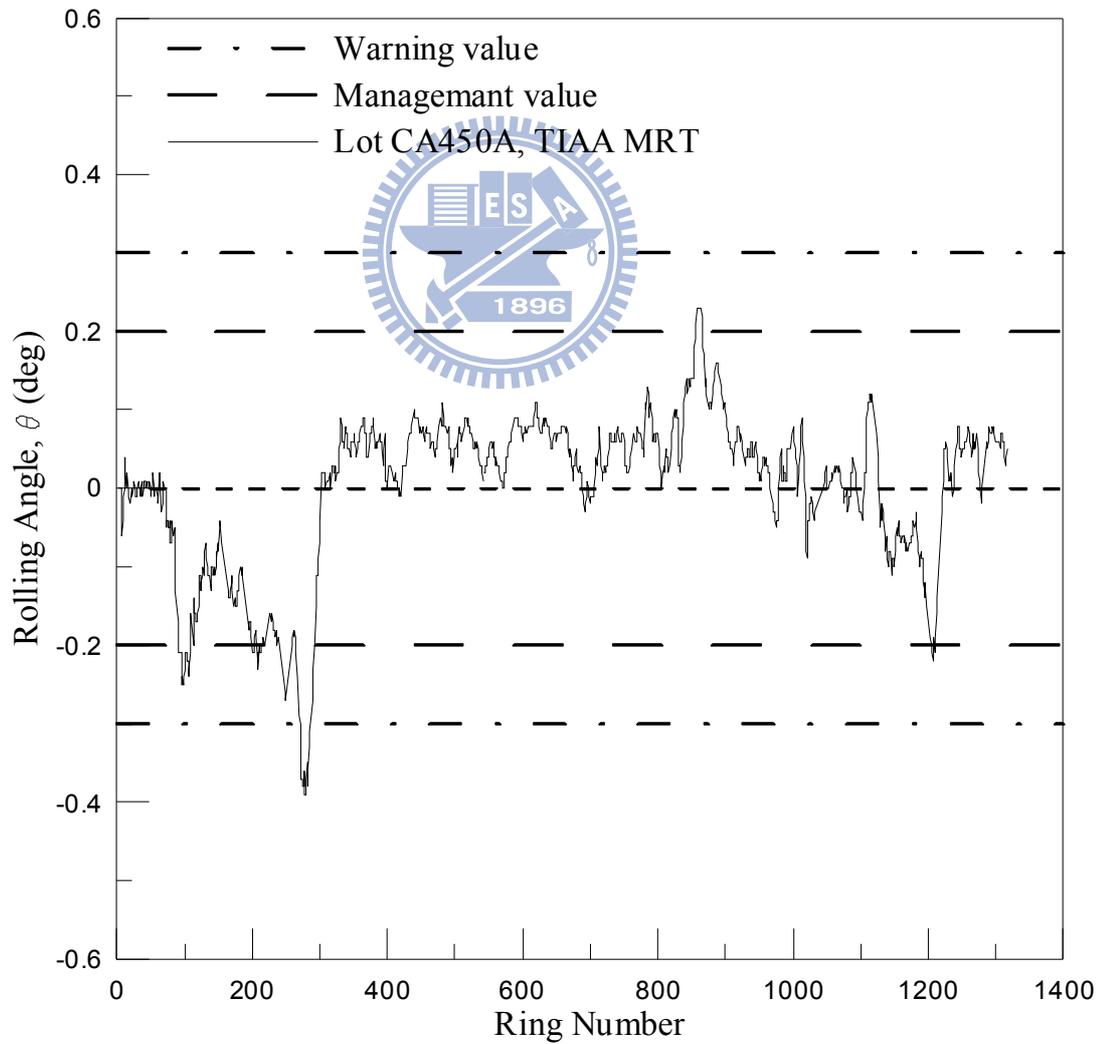


圖 4-17 CA450A 標二次灌漿施作範圍圖(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)



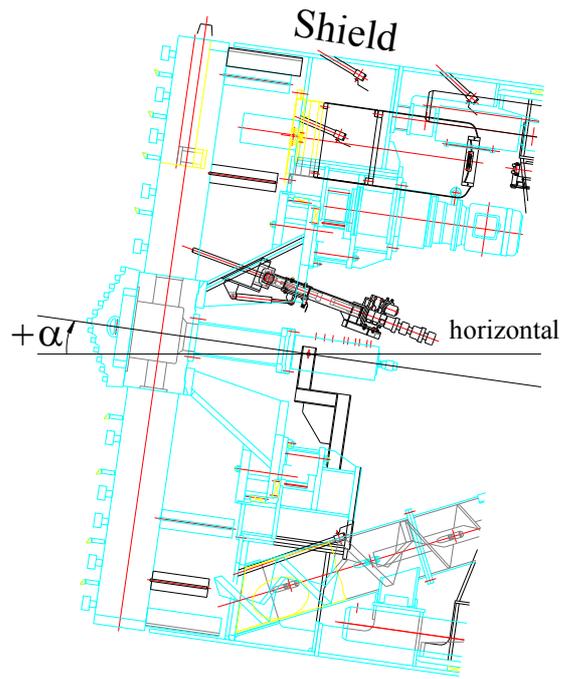


(a)

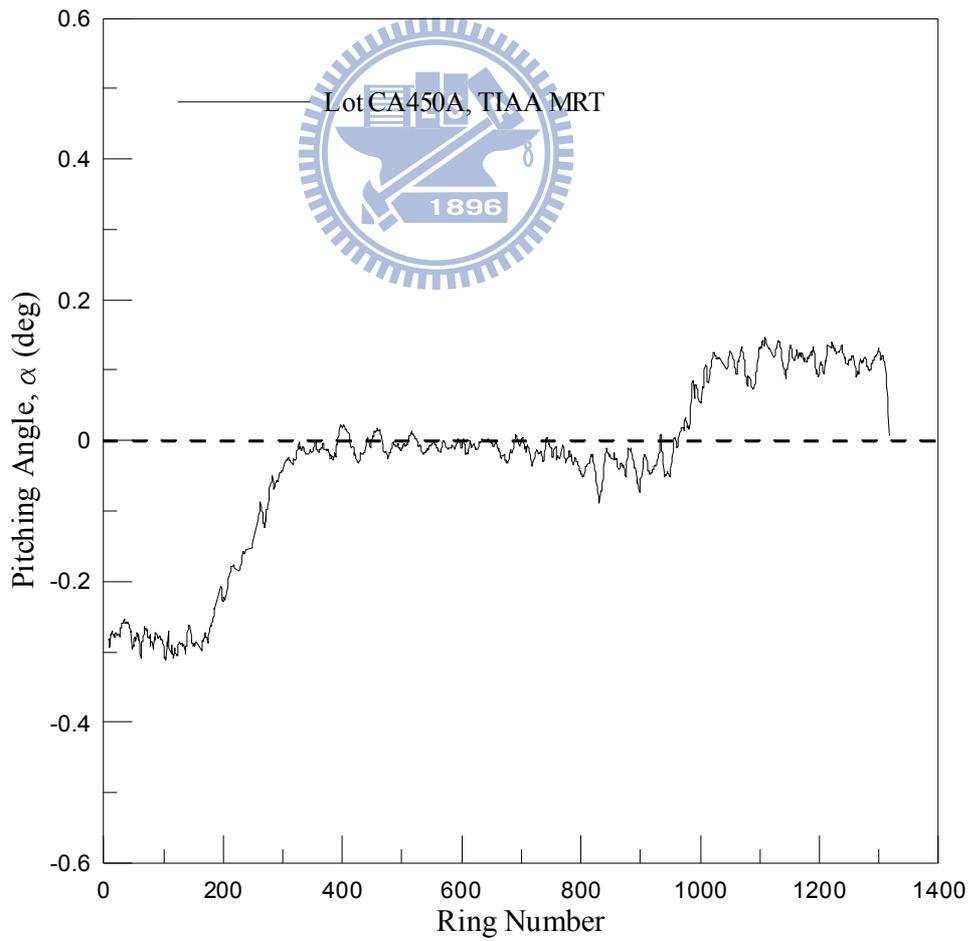


(b)

圖 4-18 CA450A 標 DOT 潛盾機滾轉角度實測分析



(a)



(b)

圖 4-19 CA450A 標 DOT 潛盾機俯仰角度實測分析

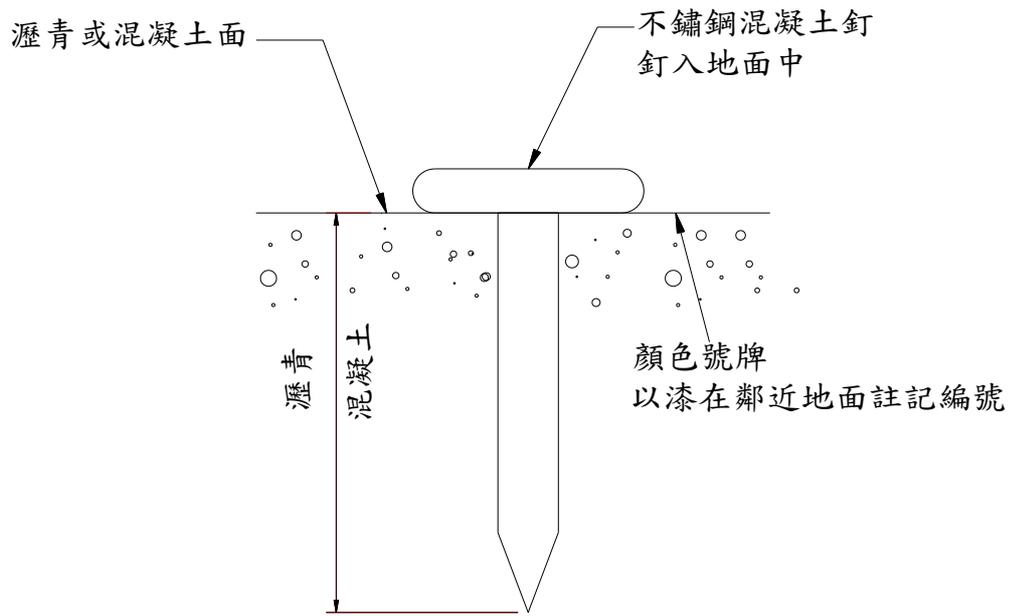


圖 4-20 地面型沉陷觀測點構造圖(SM)
 (摘自台灣世曦工程顧問公司, 2009)

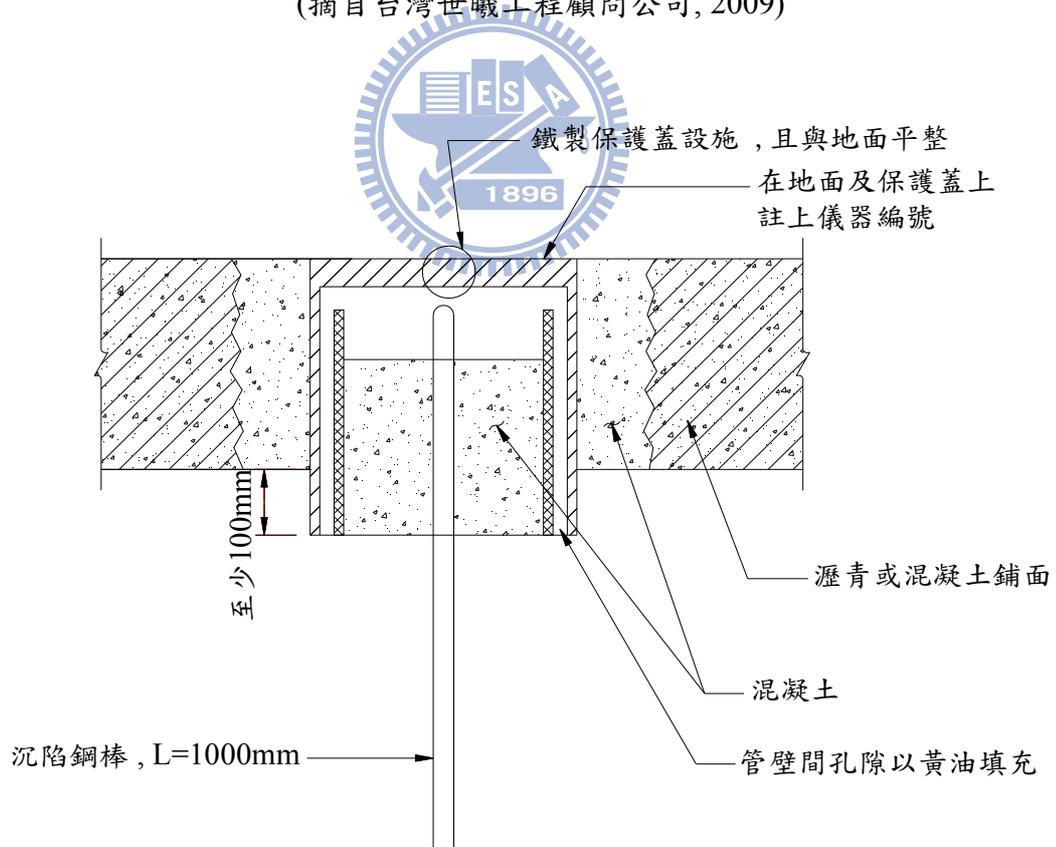


圖 4-21 地表沉陷點(SSS)
 (摘自台灣世曦工程顧問公司, 2009)



圖 4-22 CA450A 標淺式地表沉陷觀測點 (SSI)
(摘自達欣/清水建設, 2009)



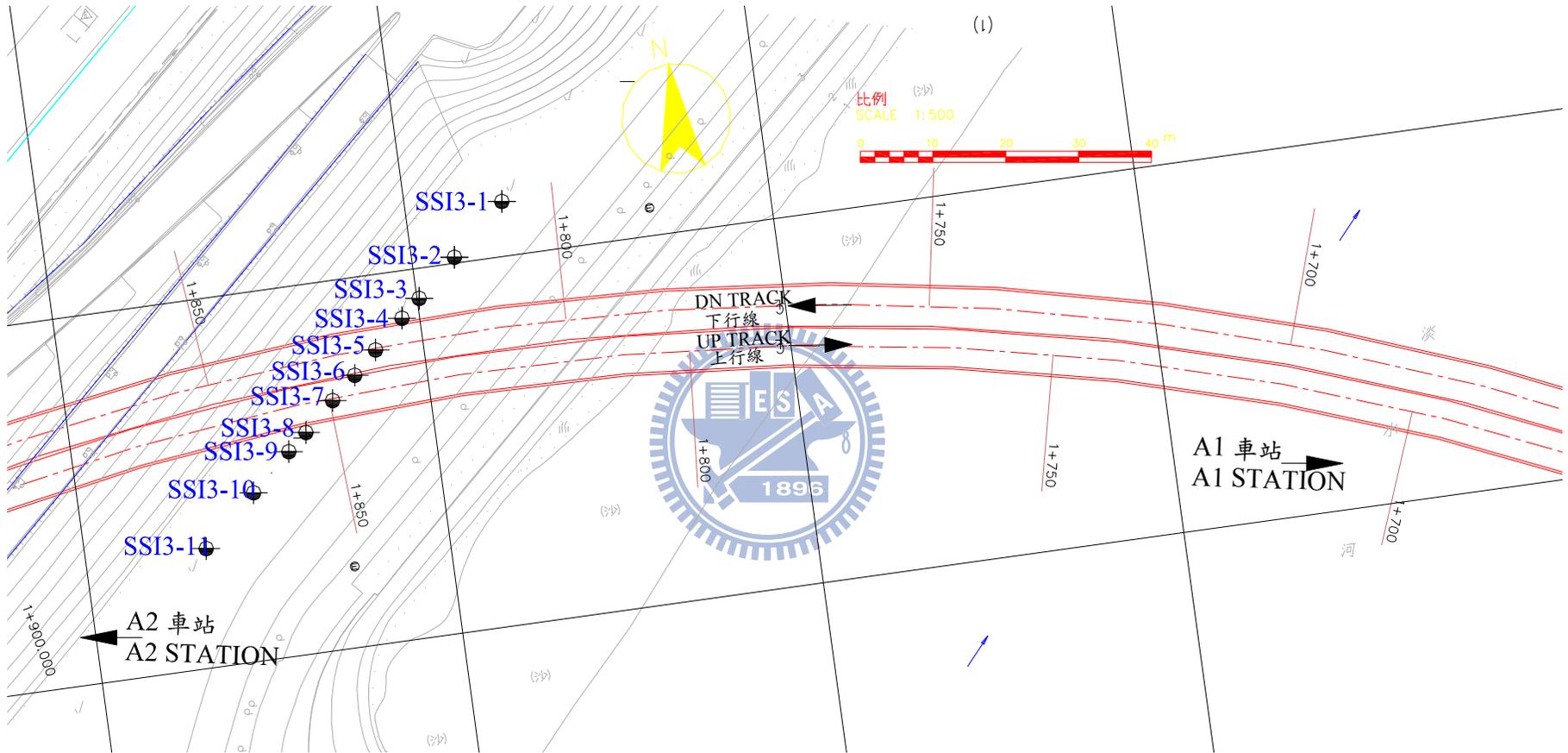


圖 4-23 (a) CA450A 標監測儀器佈置圖
 (摘自台北市政府捷運工程局, 2009)

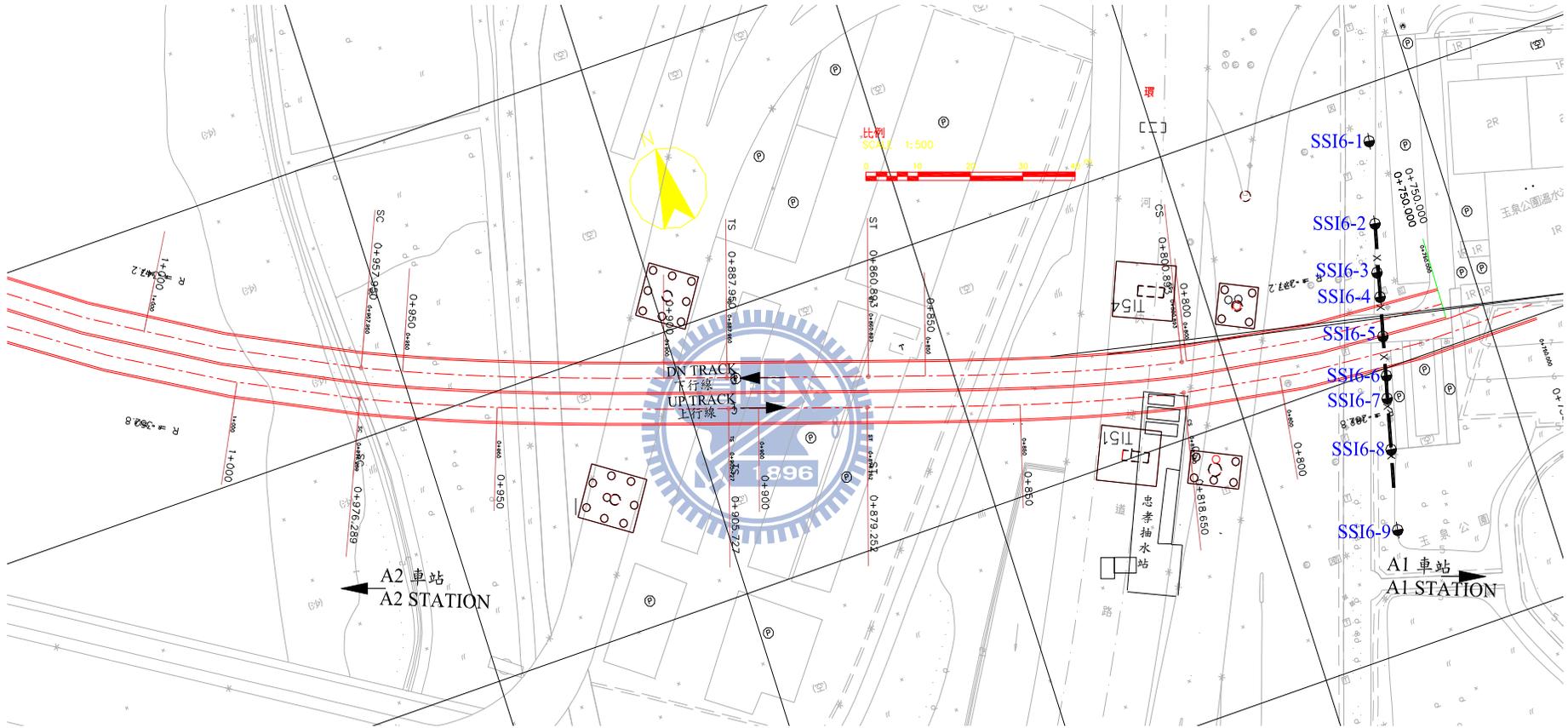


圖 4-23 (b) CA450A 標監測儀器佈置圖
(摘自台北市政府捷運工程局, 2009)

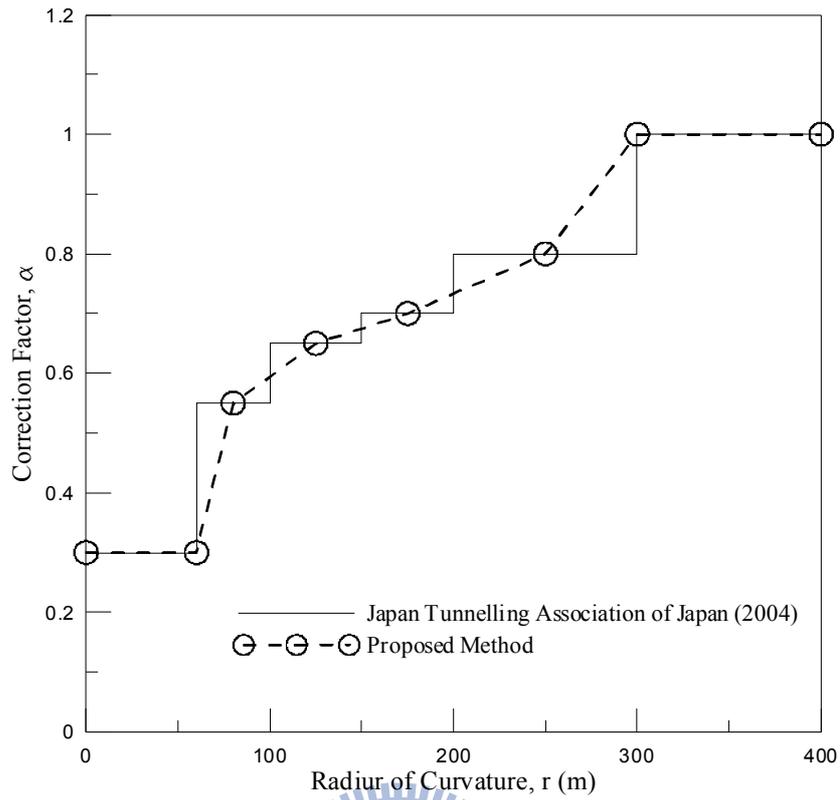


圖 4-24 曲率半徑與修正係數之關係
(摘自徐育芬, 2010)

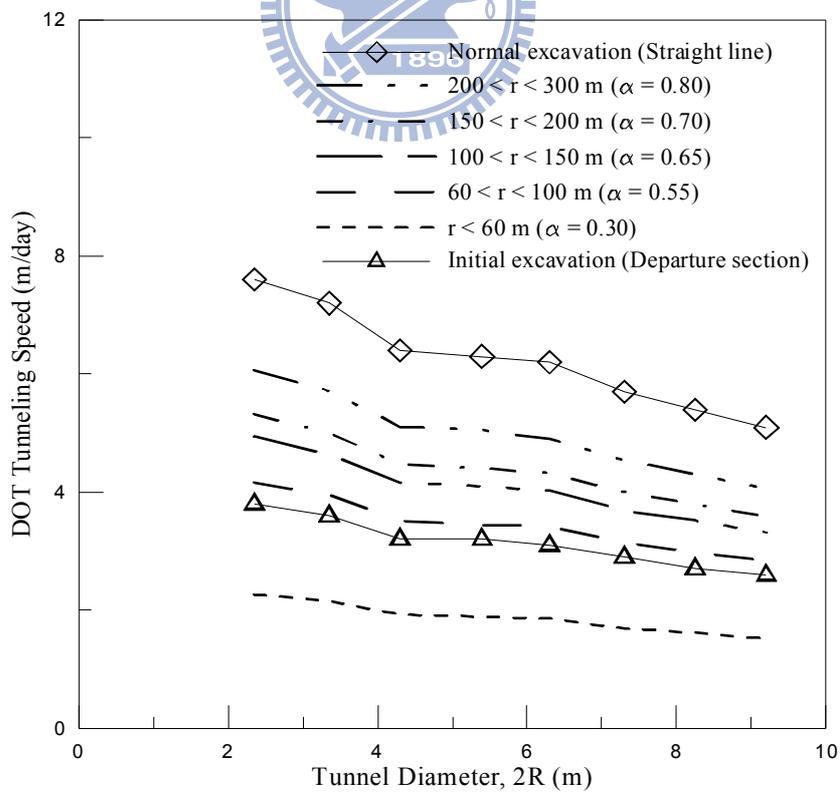


圖 4-25 DOT 潛盾隧道直徑及曲率半徑與施工速率關係圖
(摘自徐育芬, 2010)

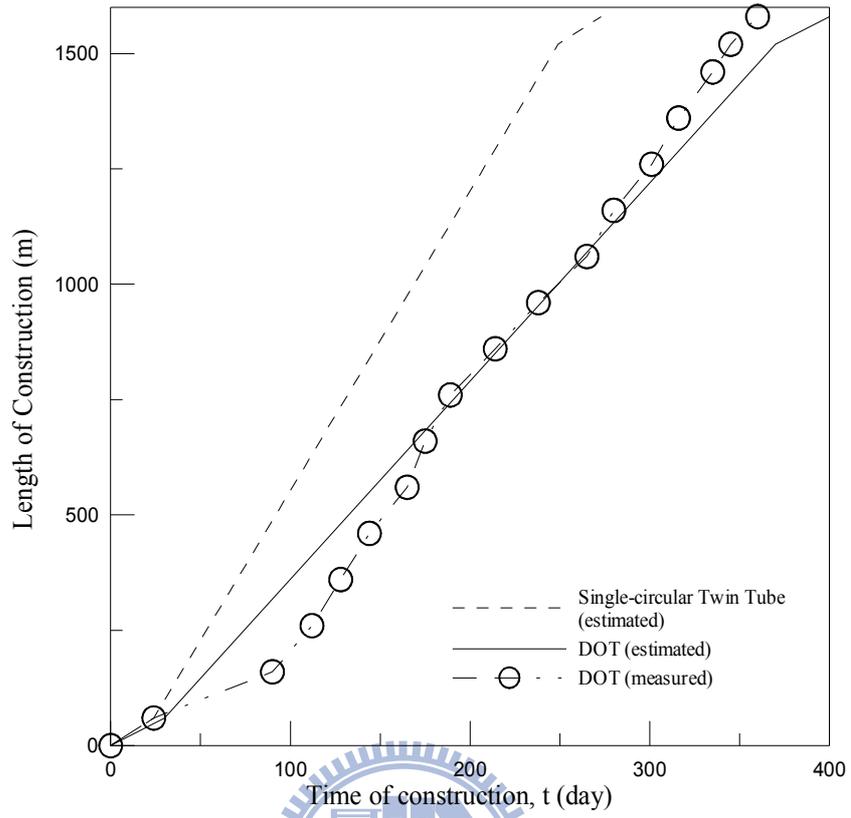


圖 4-26 CA450 標 DOT 潛盾隧道工期與隧道長度關係



圖 4-27 CA450A 標 DOT 潛盾隧道到達端隧道口

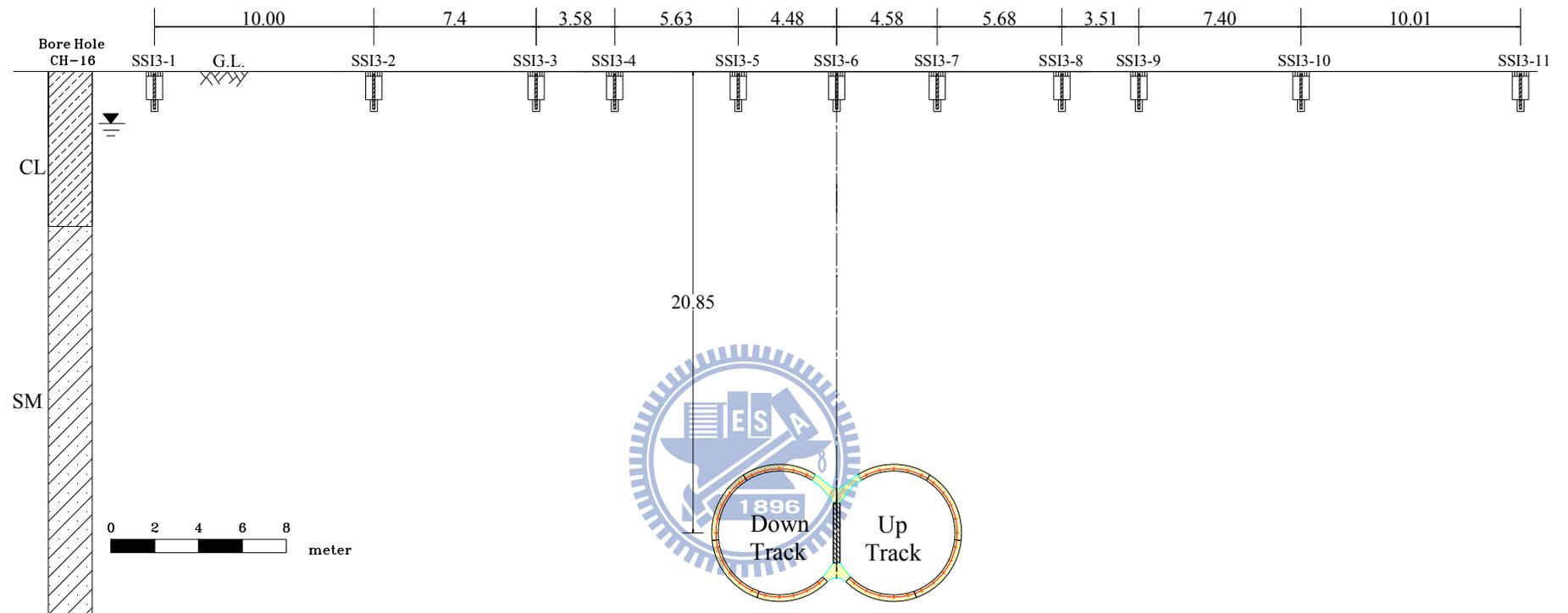


圖 5-1 測陣 SSI3 斷面與隧道斷面之相關位置

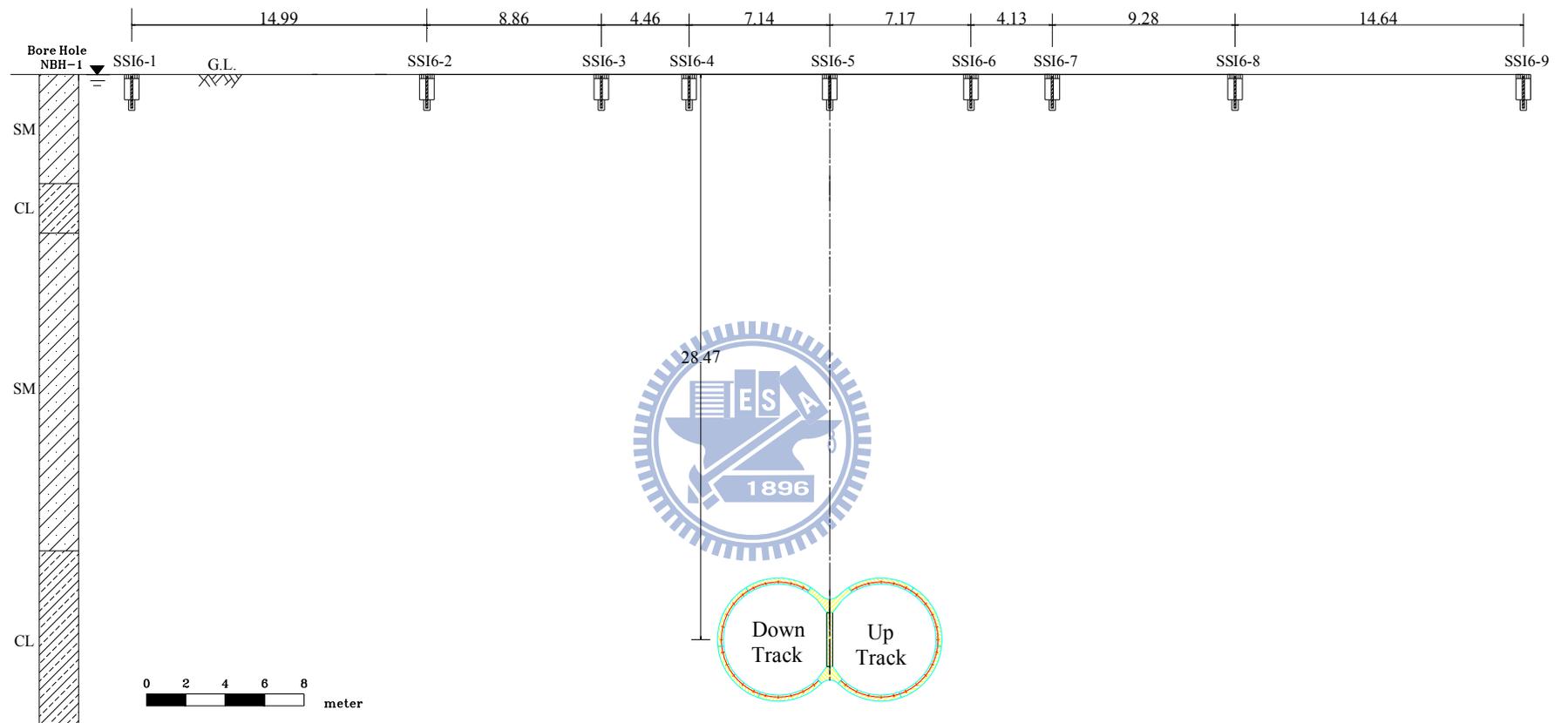


圖 5-2 測陣 SSI6 斷面與隧道斷面之相關位置

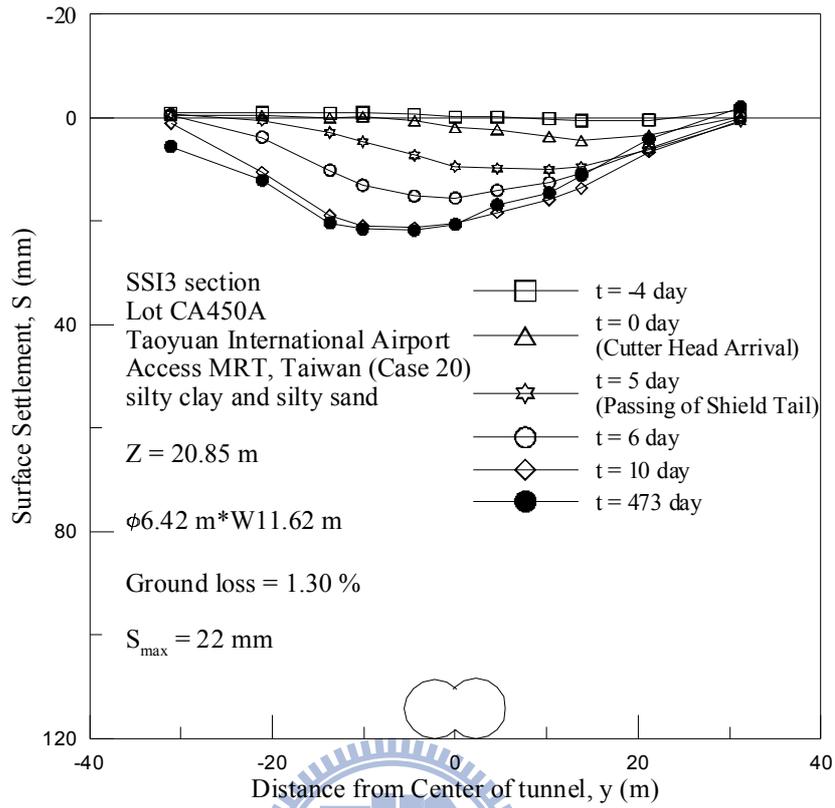


圖 5-3 SSI3 斷面地表沉陷槽

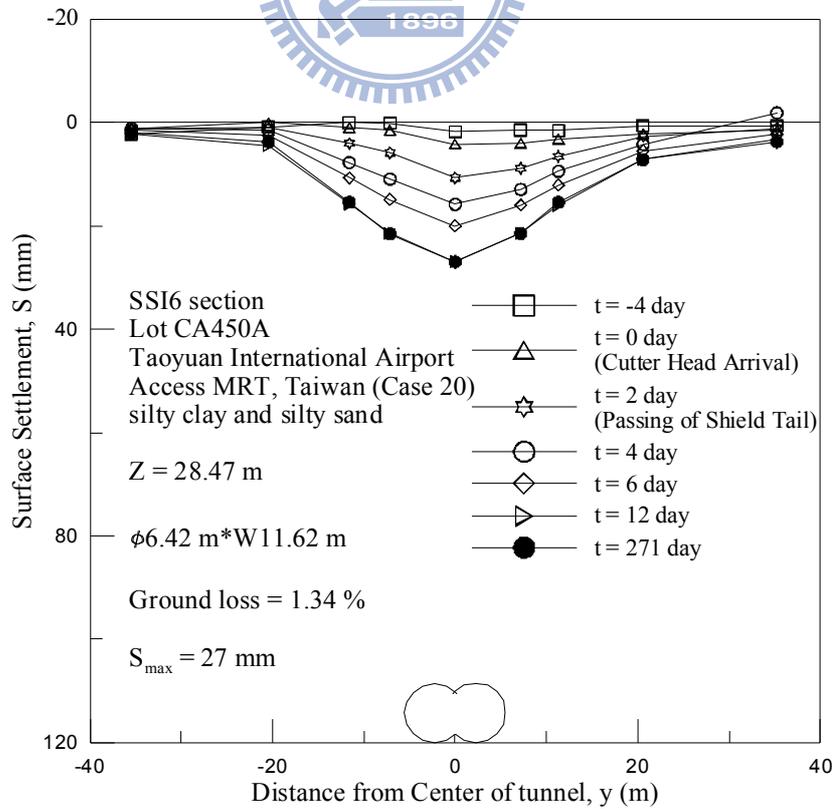


圖 5-4 SSI6 斷面地表沉陷槽

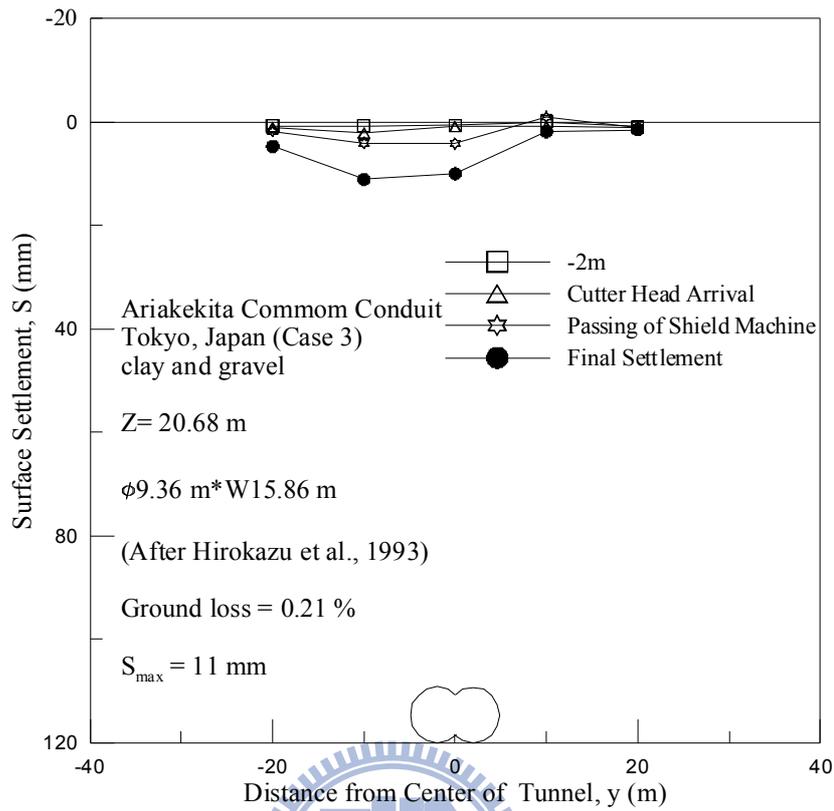


圖 5-5 東京都有明北地區共同管道 DOT 潛盾隧道斷面地表沉陷槽

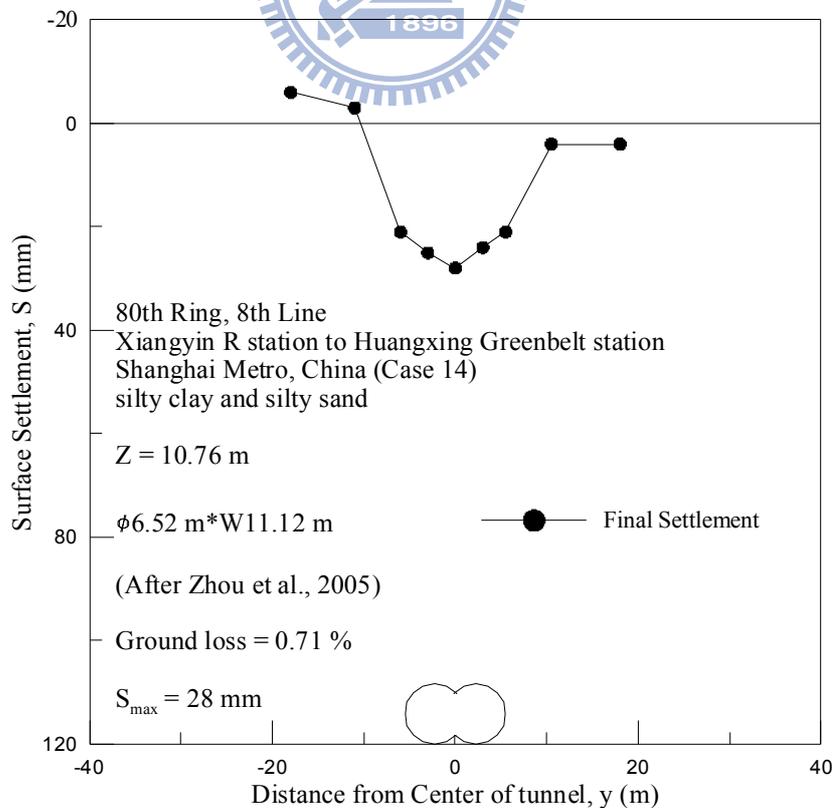


圖 5-6 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 80 環斷面地表沉陷槽

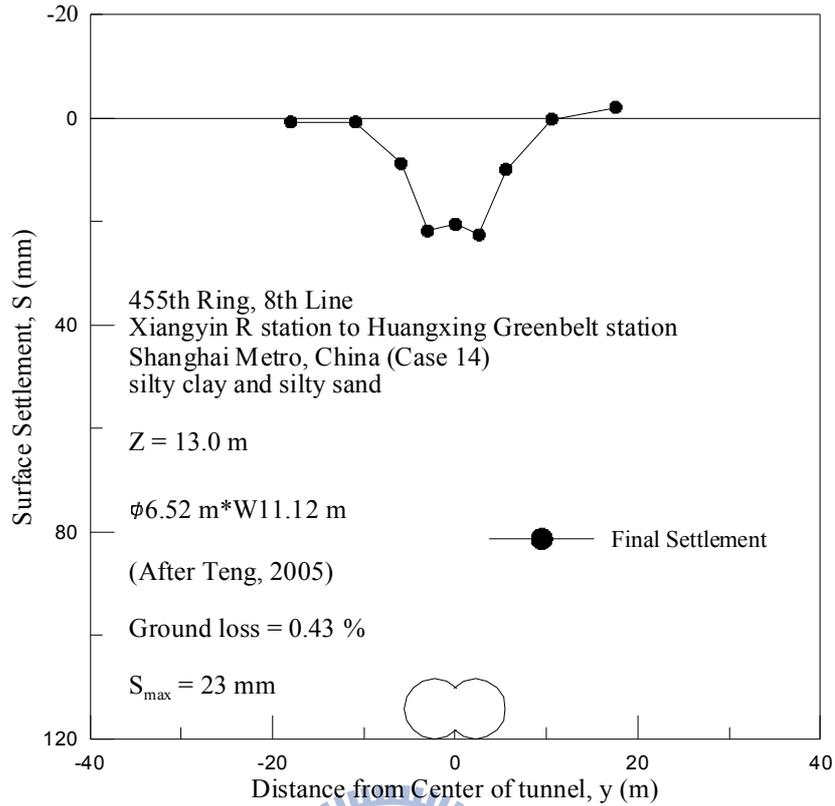


圖 5-7 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 455 環斷面地表沉陷槽

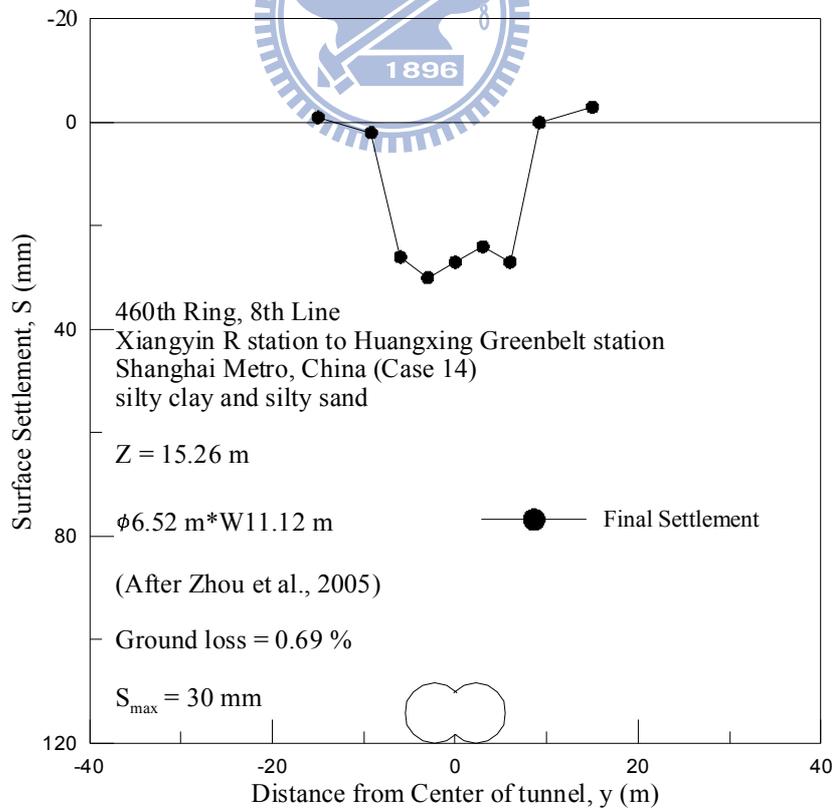


圖 5-8 上海軌道交通八號線翔殷路站至黃興綠地站第 460 環斷面地表沉陷槽

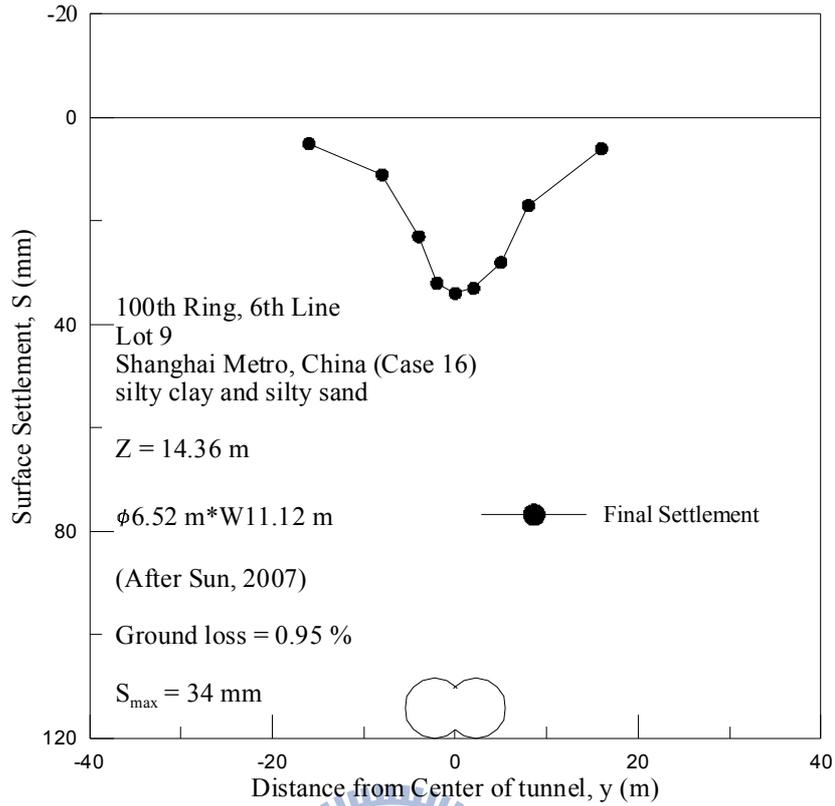


圖 5-9 上海地鐵六號線第九標工程第 100 環橫斷面地表沉陷槽

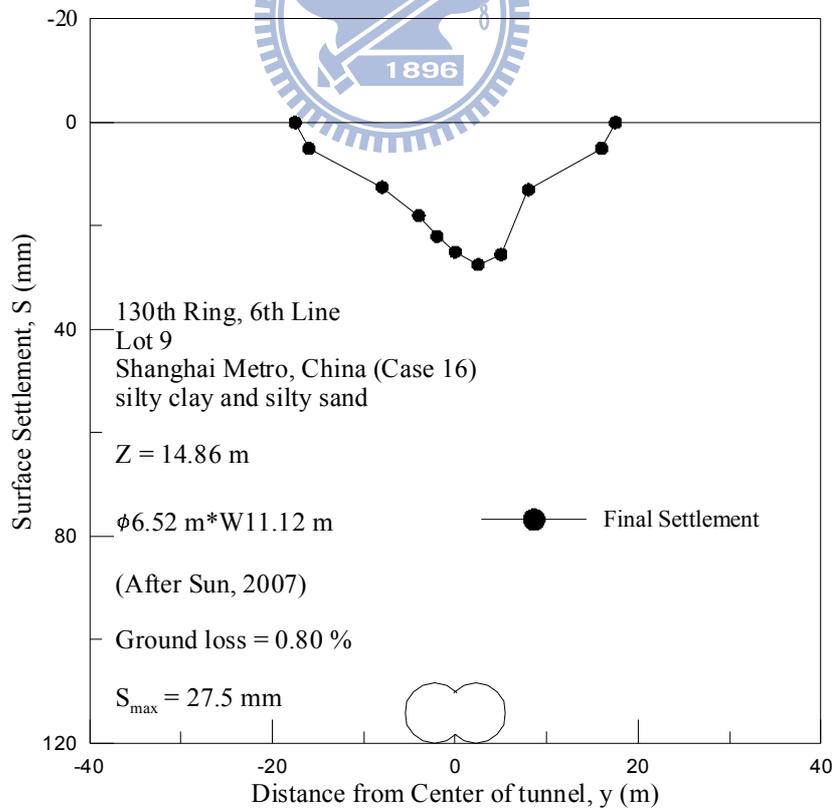


圖 5-10 上海地鐵六號線第九標工程第 130 環橫斷面地表沉陷槽

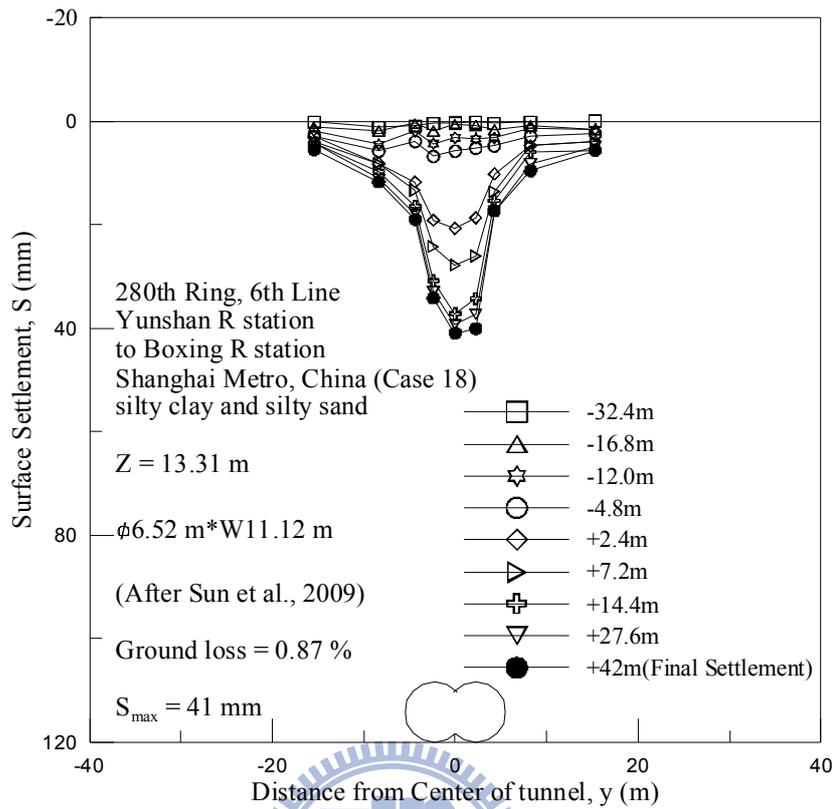


圖 5-11 上海地鐵六號線雲山路站至博興路站第 280 環斷面地表沉陷槽

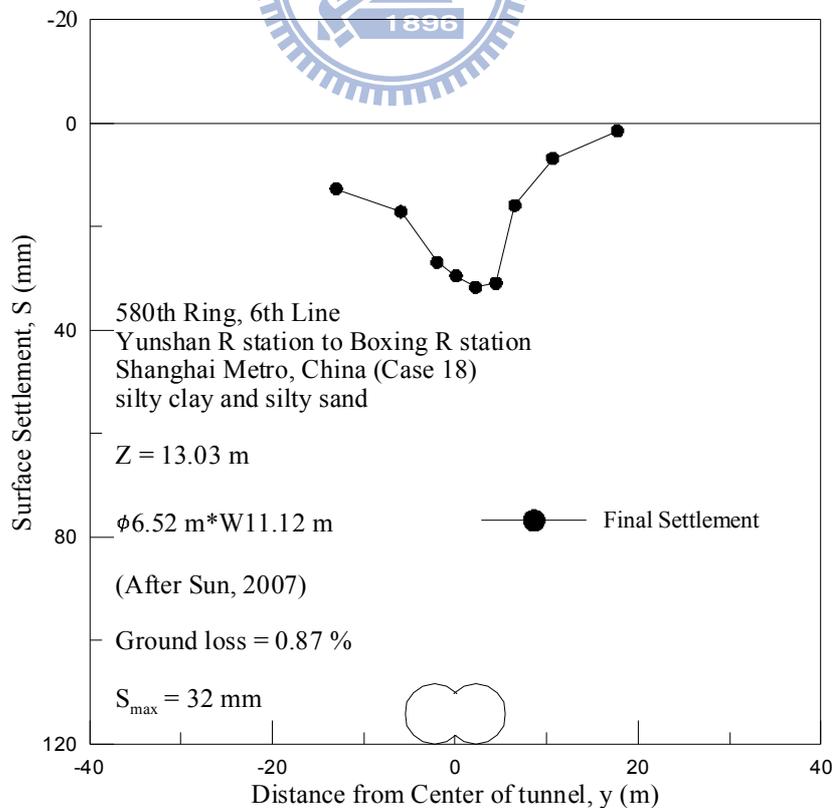


圖 5-12 上海地鐵六號線雲山路站至博興路站第 580 環斷面地表沉陷槽

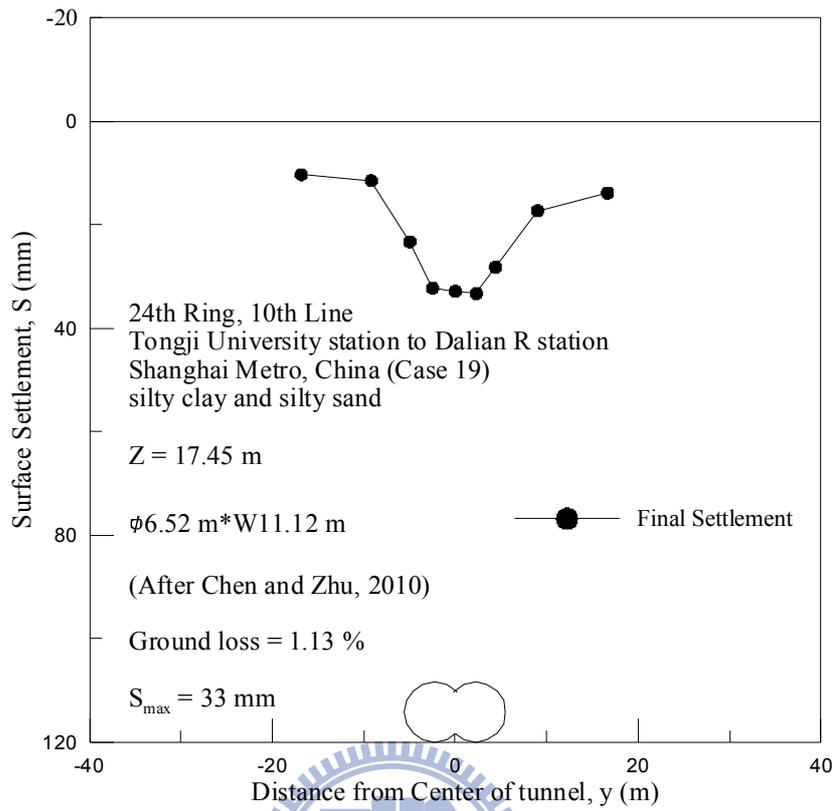


圖 5-13 上海地鐵十號線同濟大學站至大連路站第 24 環斷面地表沉陷槽

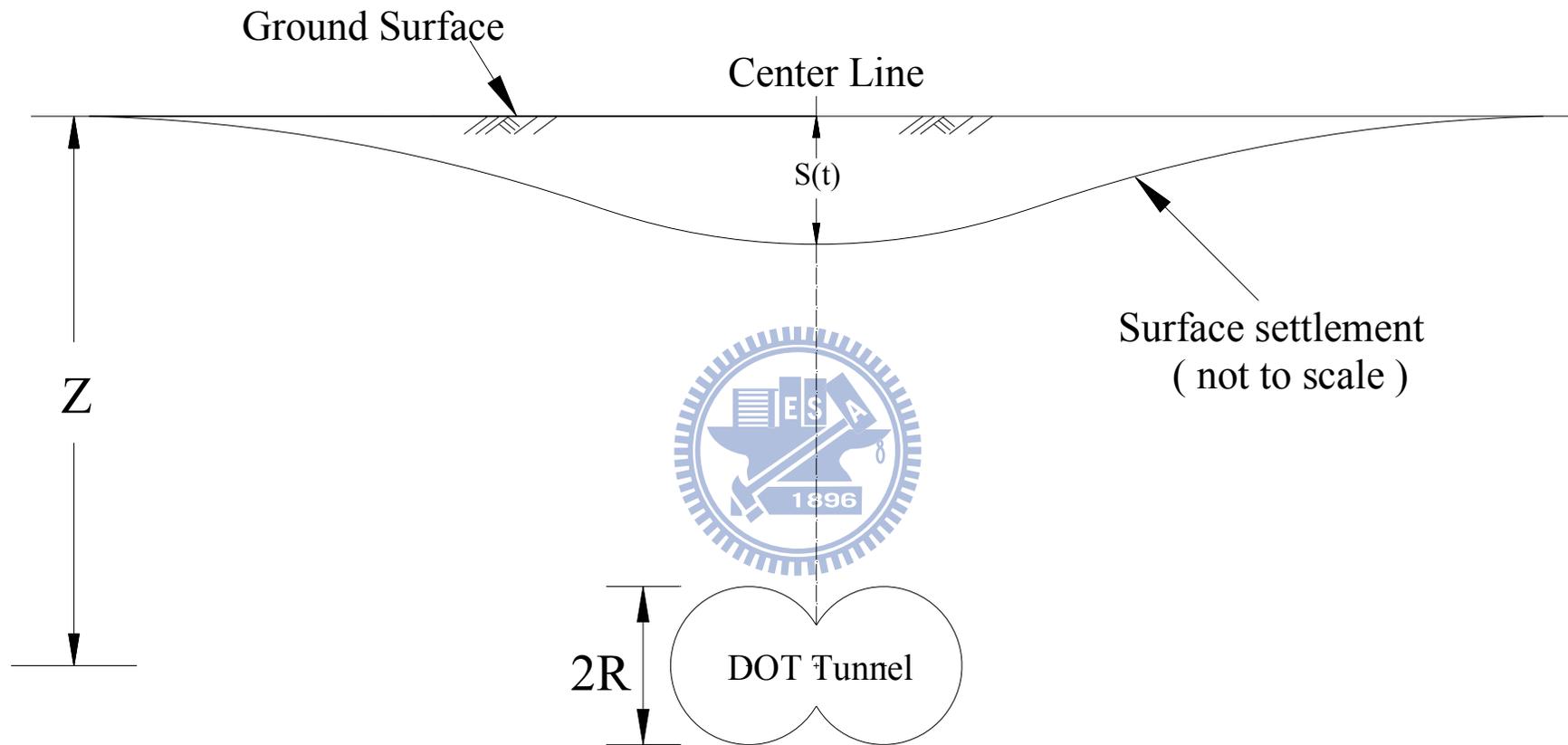
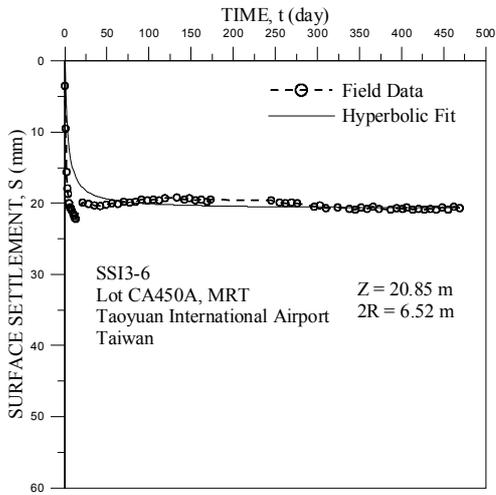
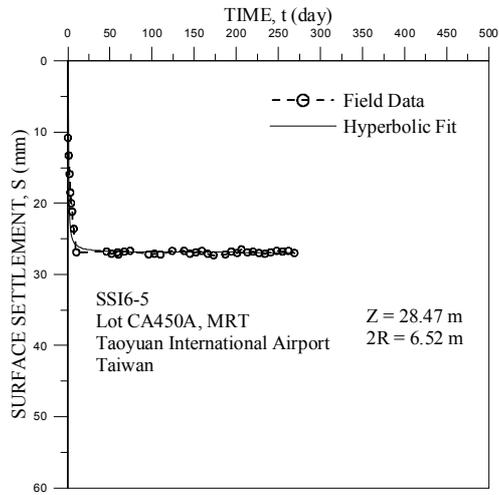


圖 5-14 DOT 潛盾隧道施工造成之隧道中心線上方地表沉陷歷時曲線示意圖

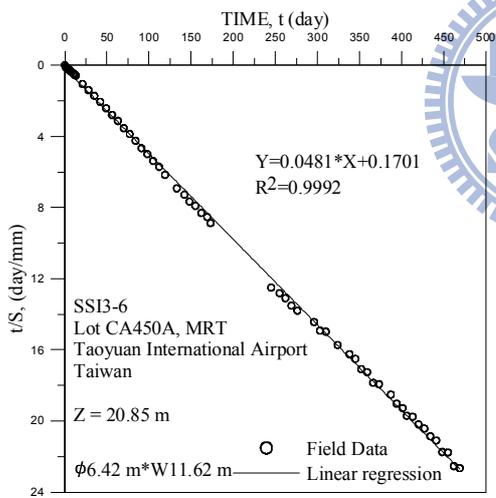


(a)

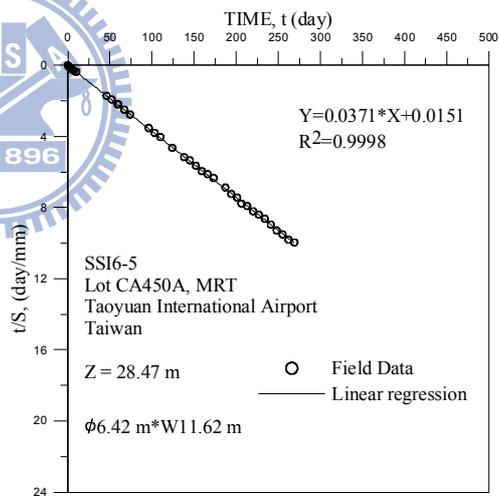


(b)

圖 5-15 CA450A 標現地監測資料及以雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線



(a)



(b)

圖 5-16 地表沉陷歷時曲線雙曲線參數

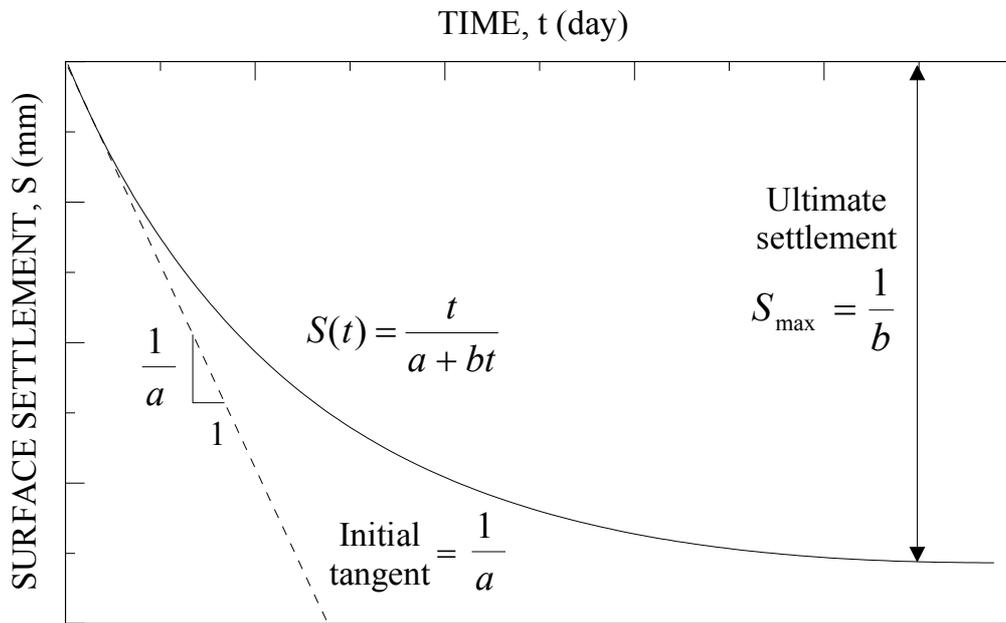
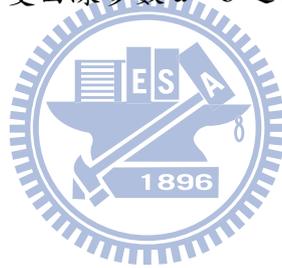


圖 5-17 雙曲線參數 a 、 b 之物理意義



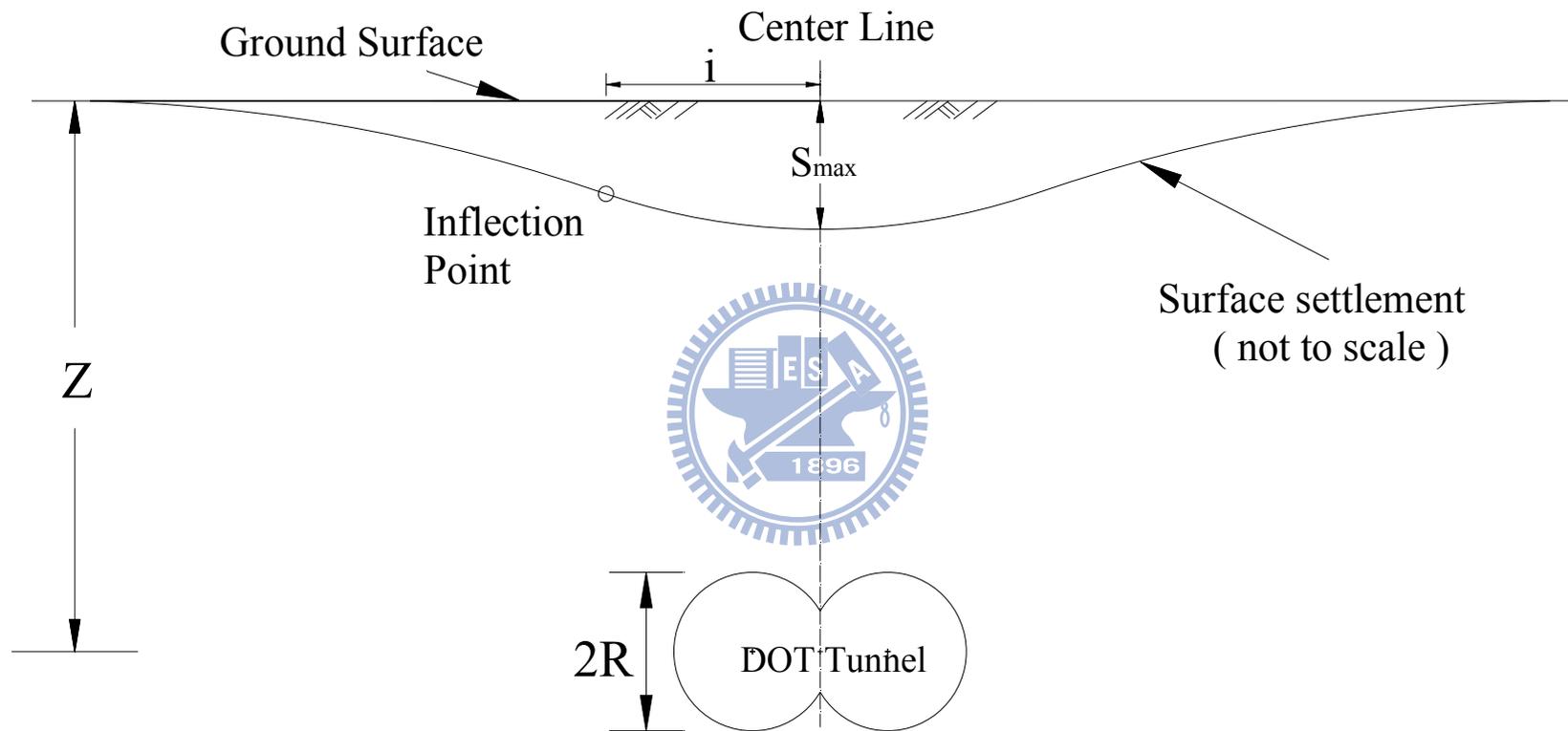


圖 6-1 DOT 潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽

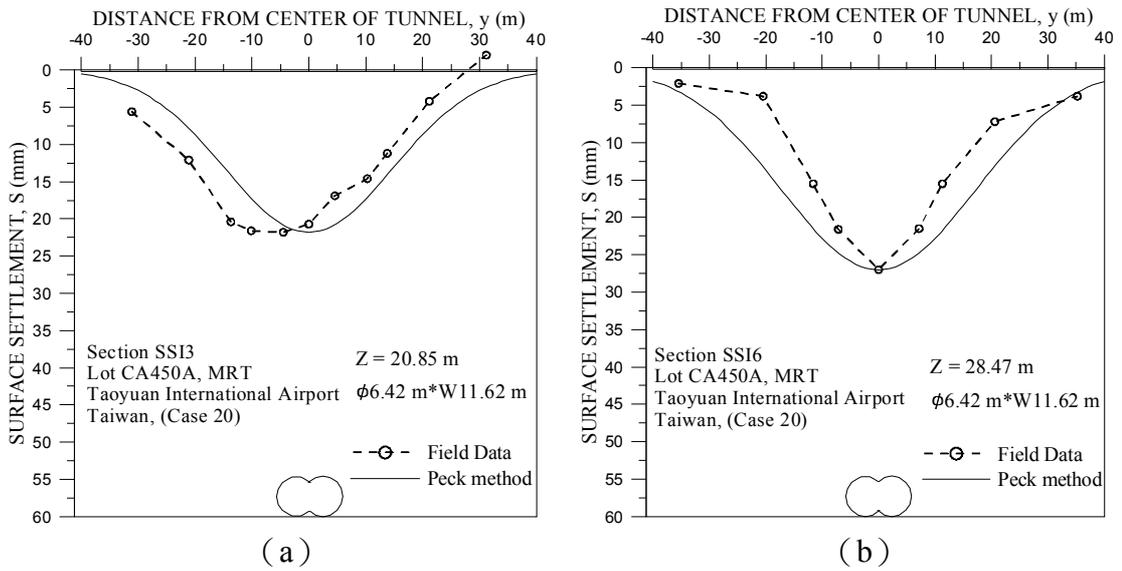


圖 6-2 CA450A 標 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之比較

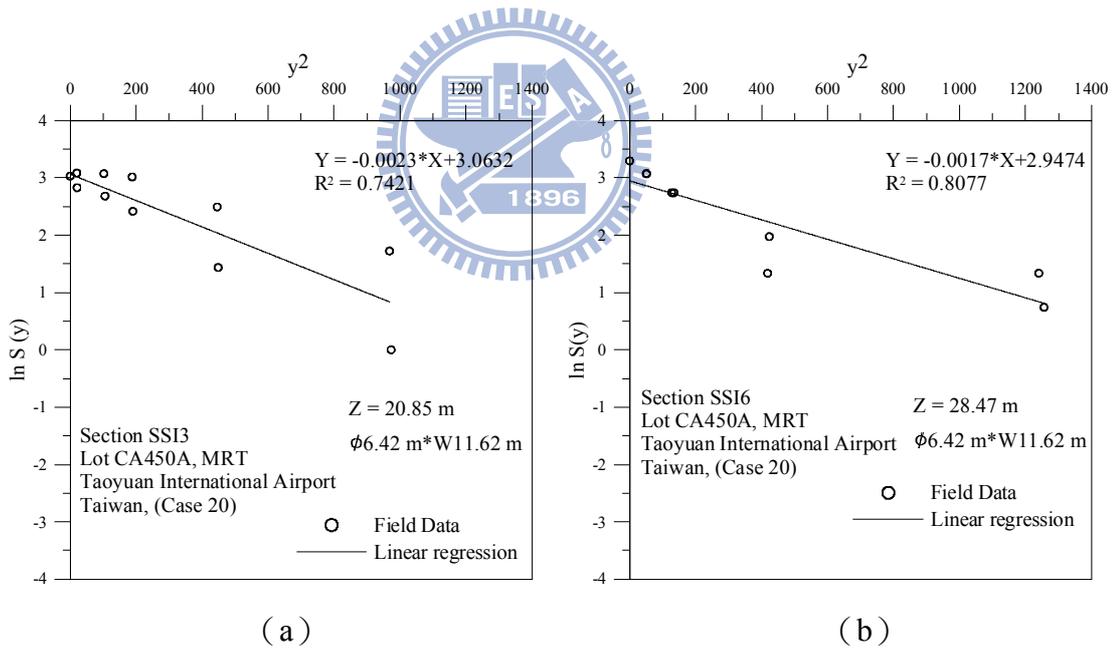


圖 6-3 CA450A 標 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定

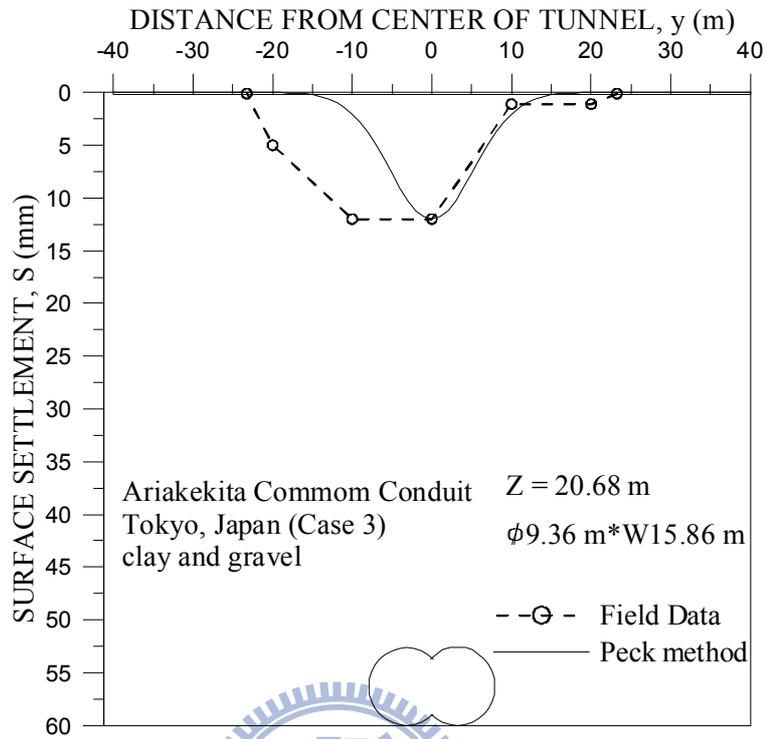


圖 6-4 日本有明北地區 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之比較

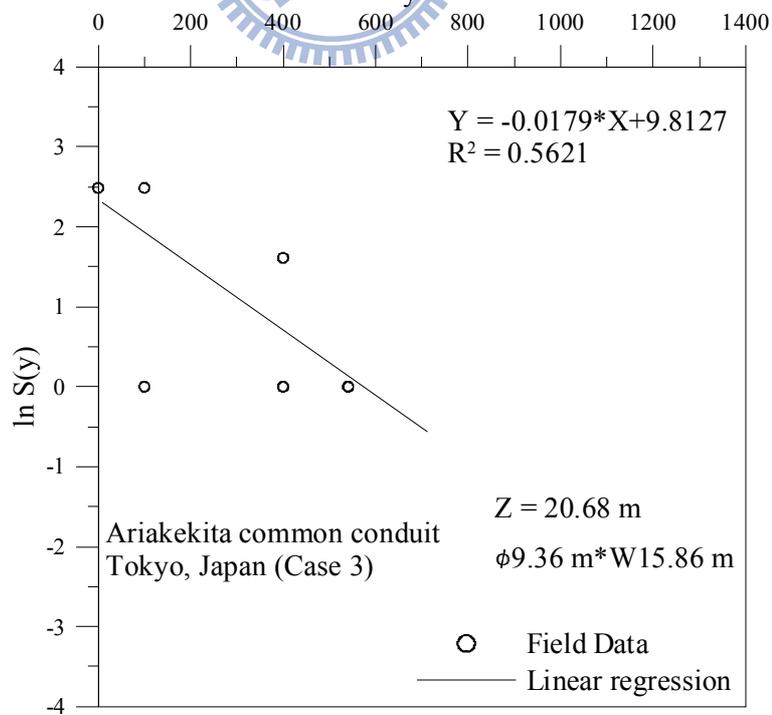


圖 6-5 日本有明北地區 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定

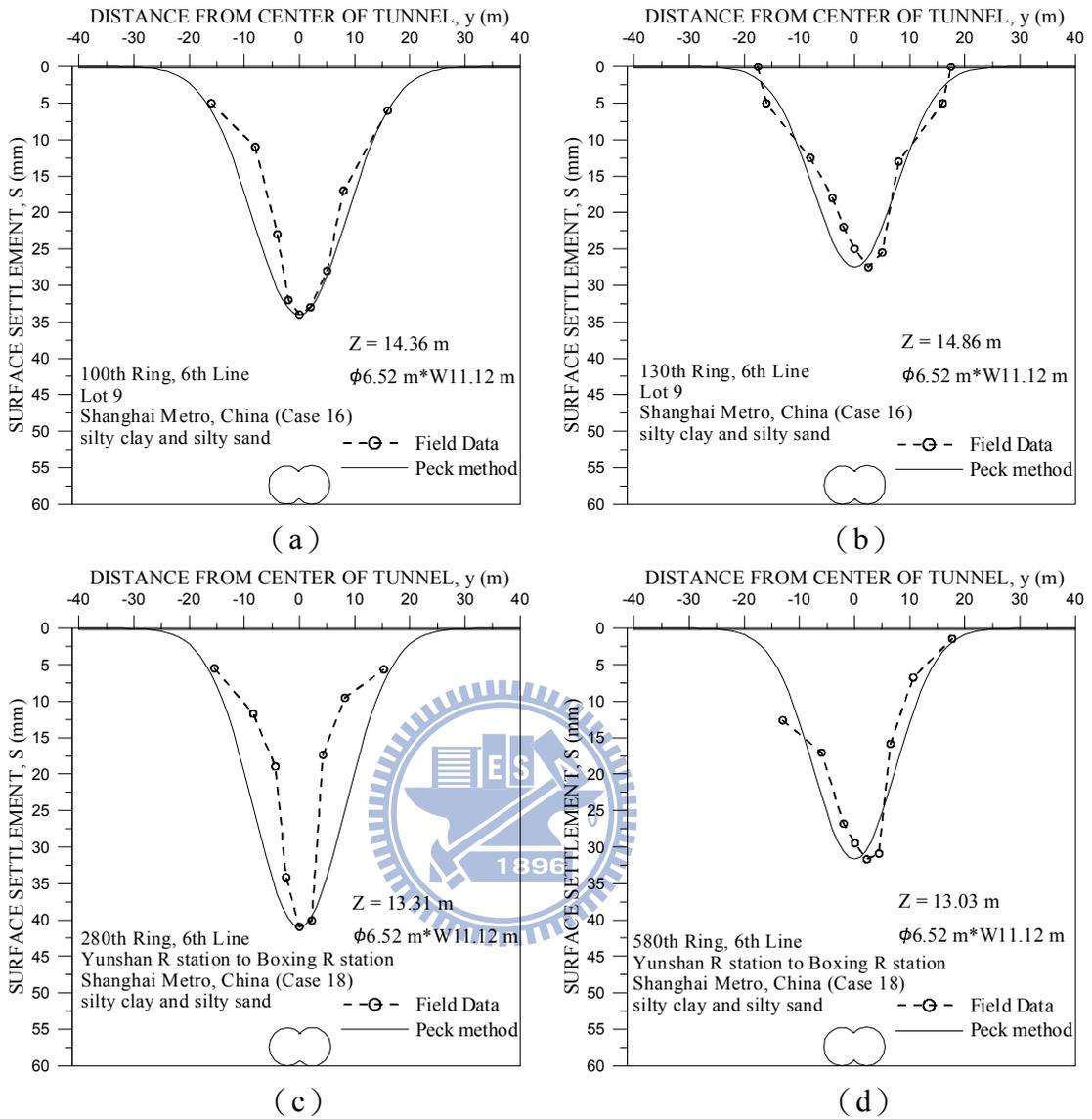


圖 6-6 上海地鐵六號線 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之比較

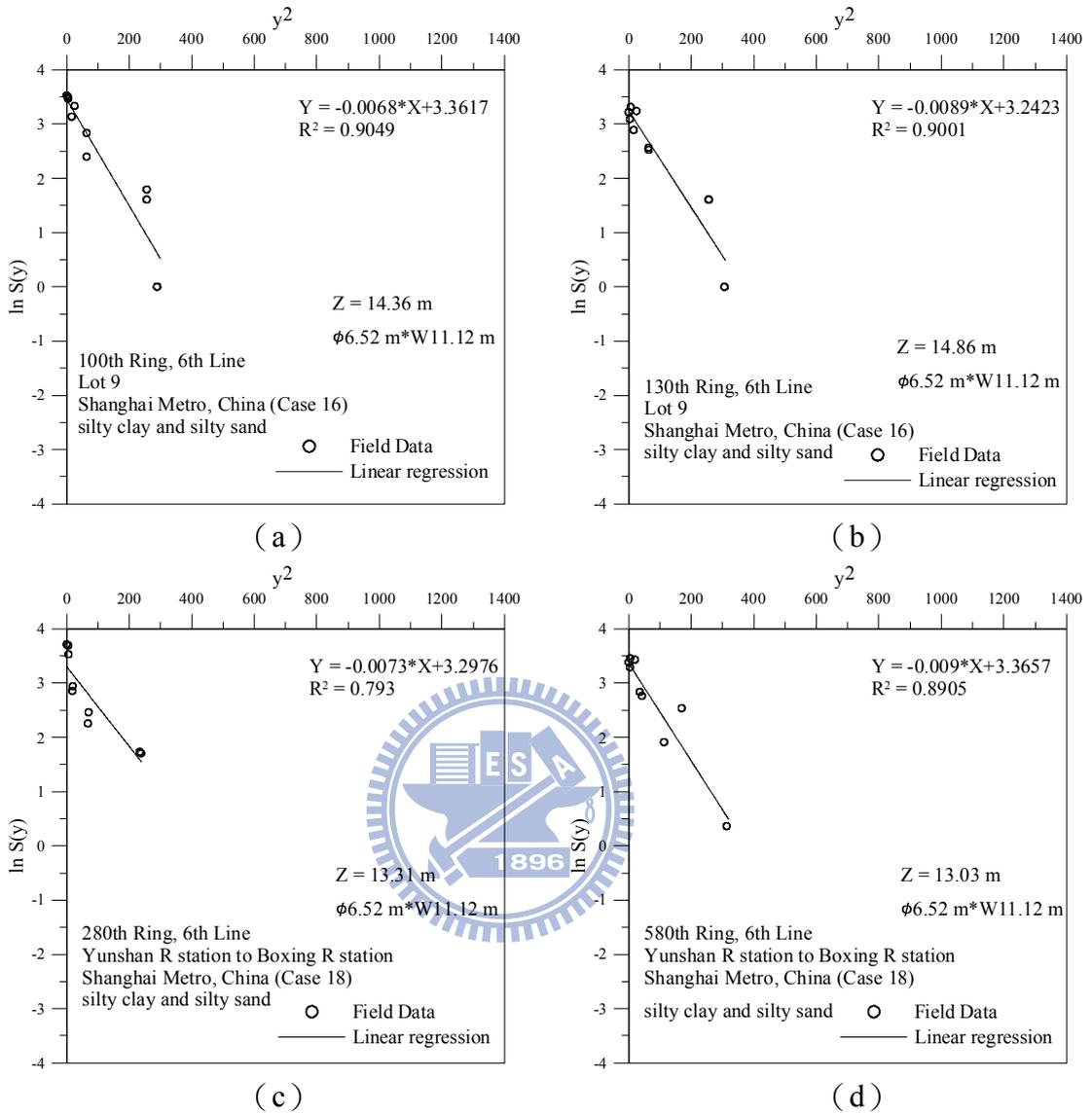


圖 6-7 上海地鐵六號線 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定

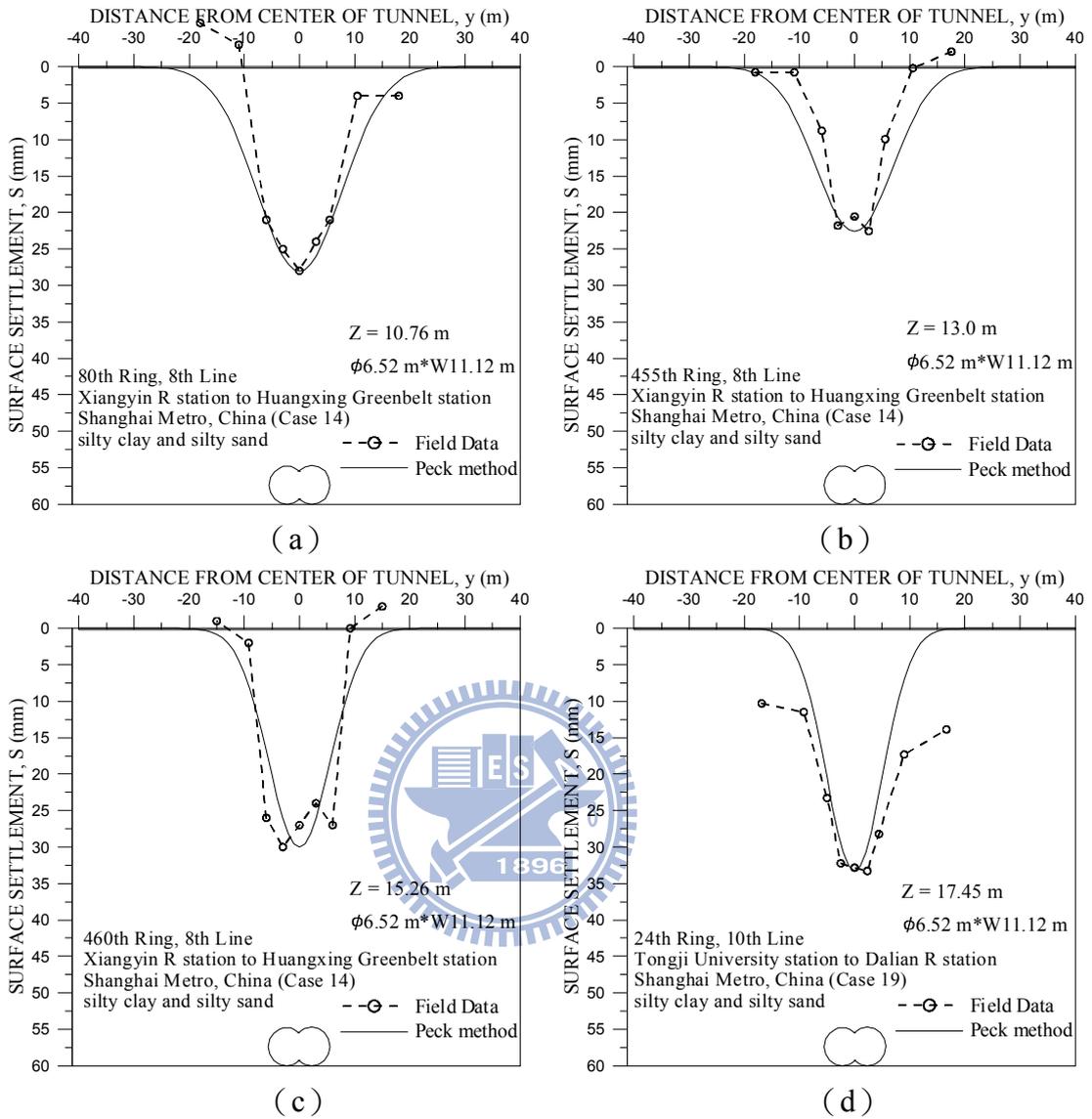


圖 6-8 上海地鐵八號及十號線 DOT 潛盾工程監測資料與模擬地表沉陷槽之比較

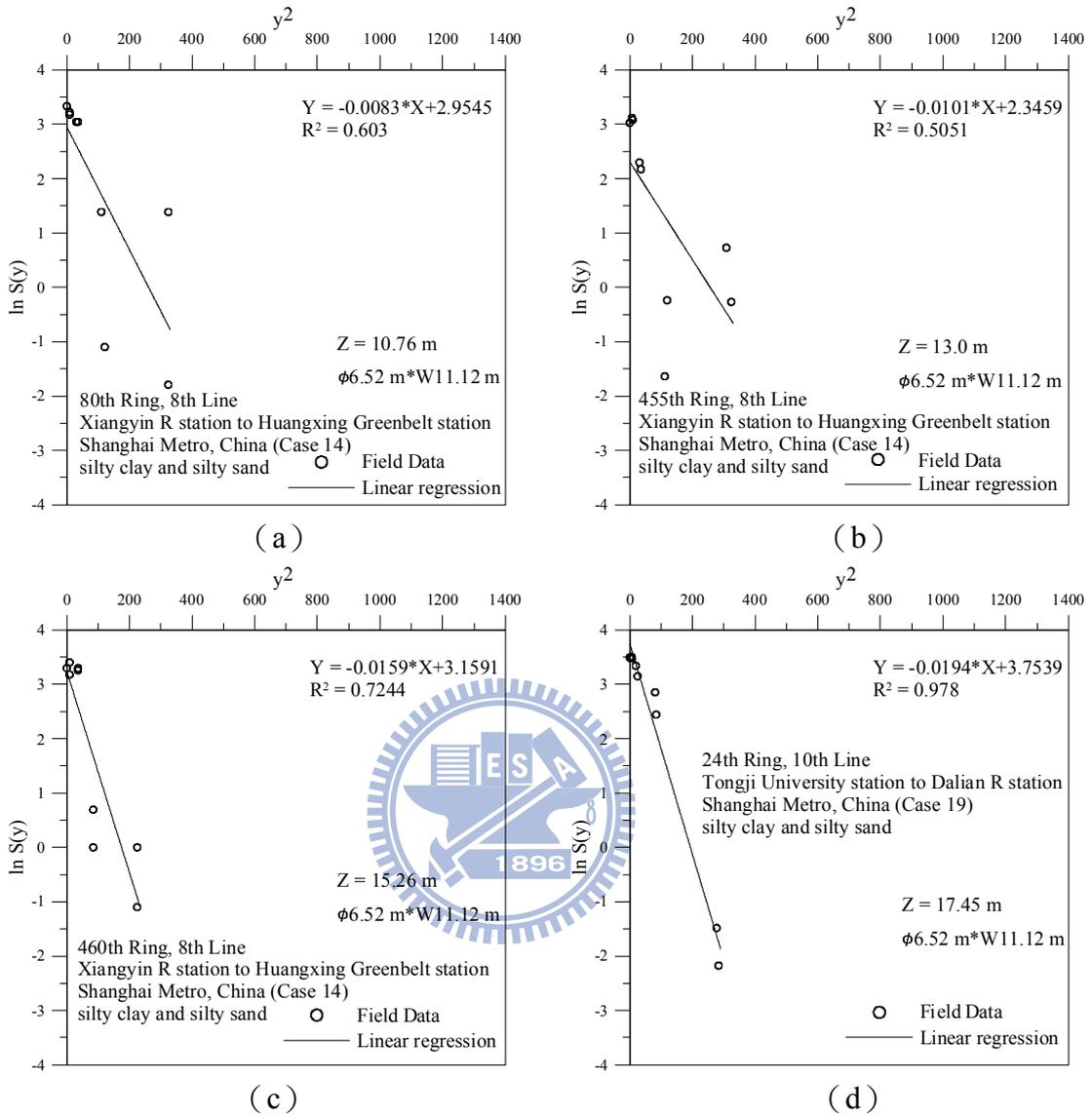


圖 6-9 上海地鐵八號及十號線 DOT 潛盾工程地表沉陷槽 i 參數之決定

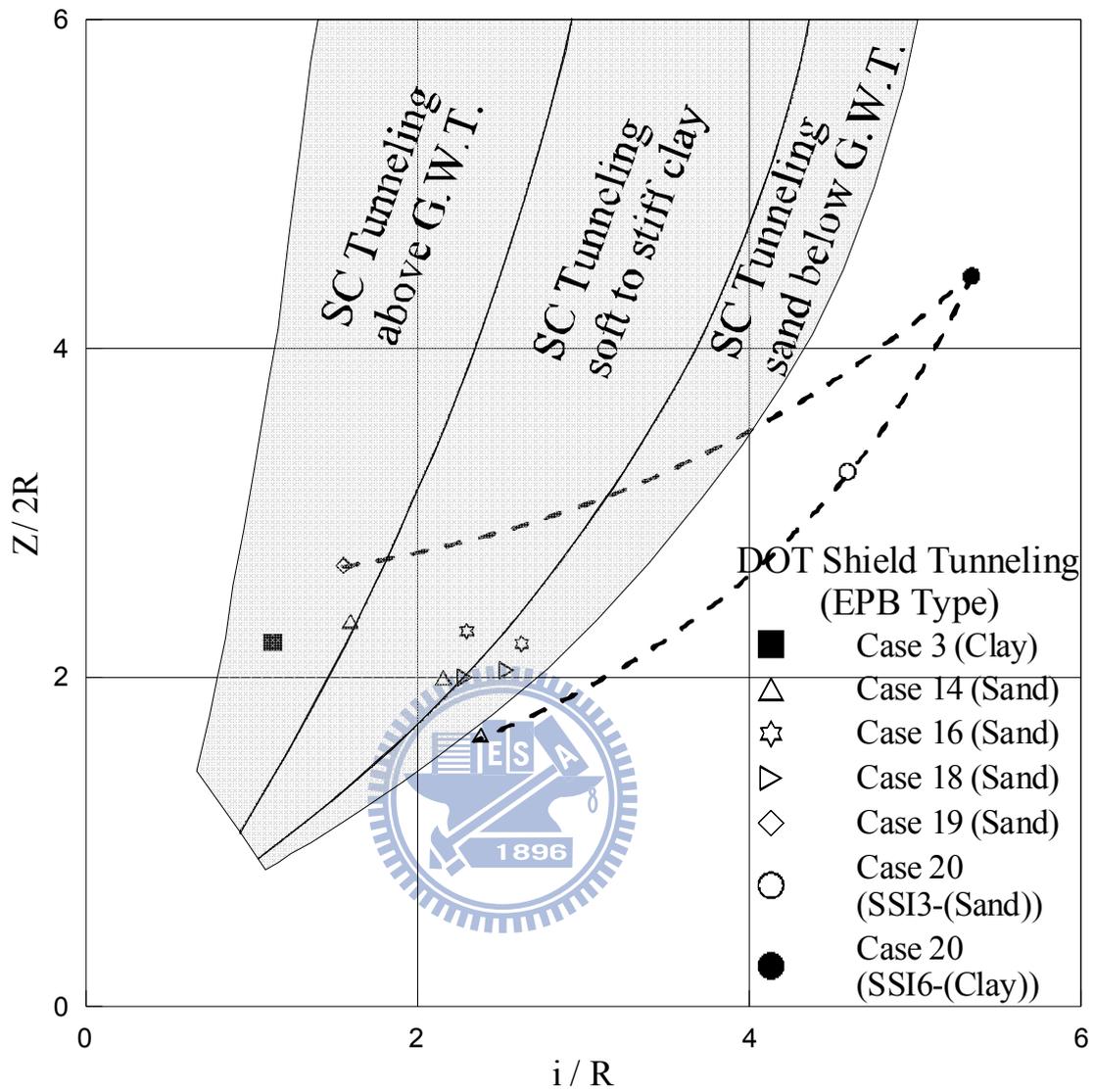


圖 6-10 沉陷槽寬度參數 i/R 與隧道深度 $Z/2R$ 之無因次關係

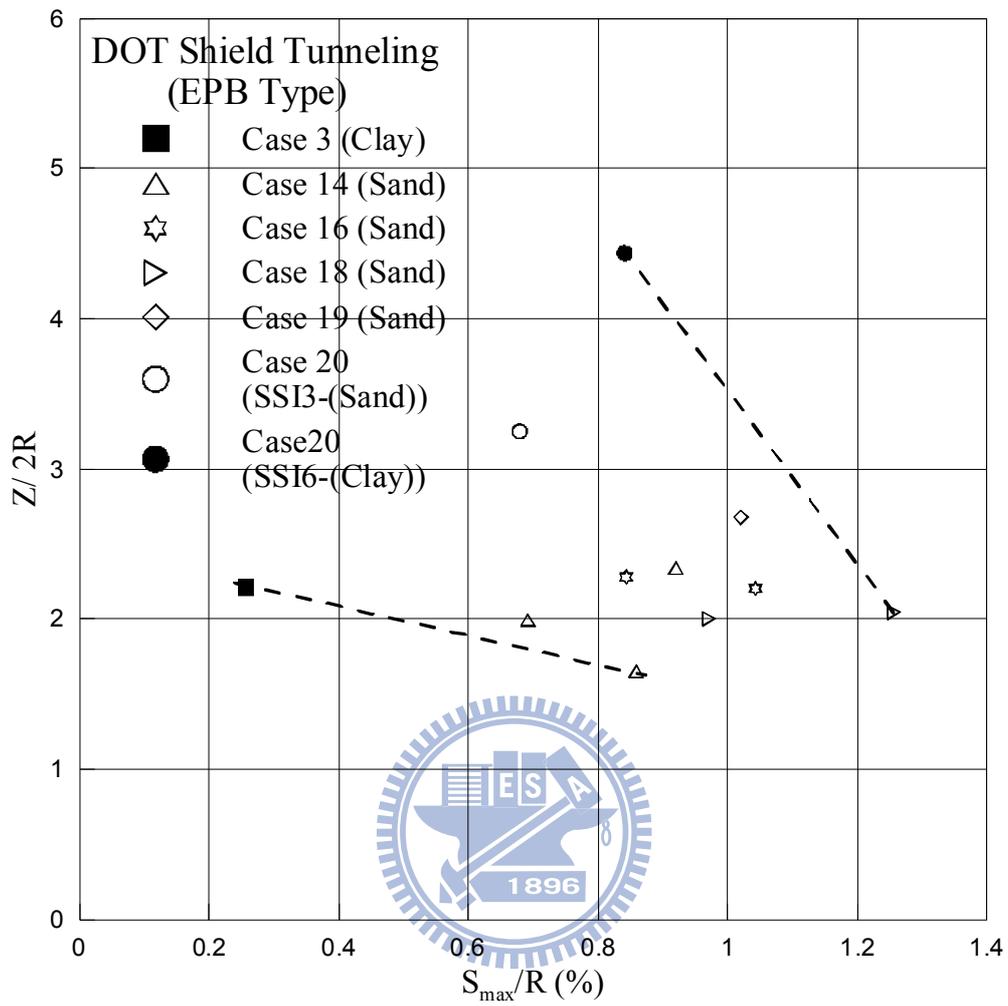


圖 6-11 最大沉陷量 S_{max}/R 與隧道深度 $Z/2R$ 之無因次關係

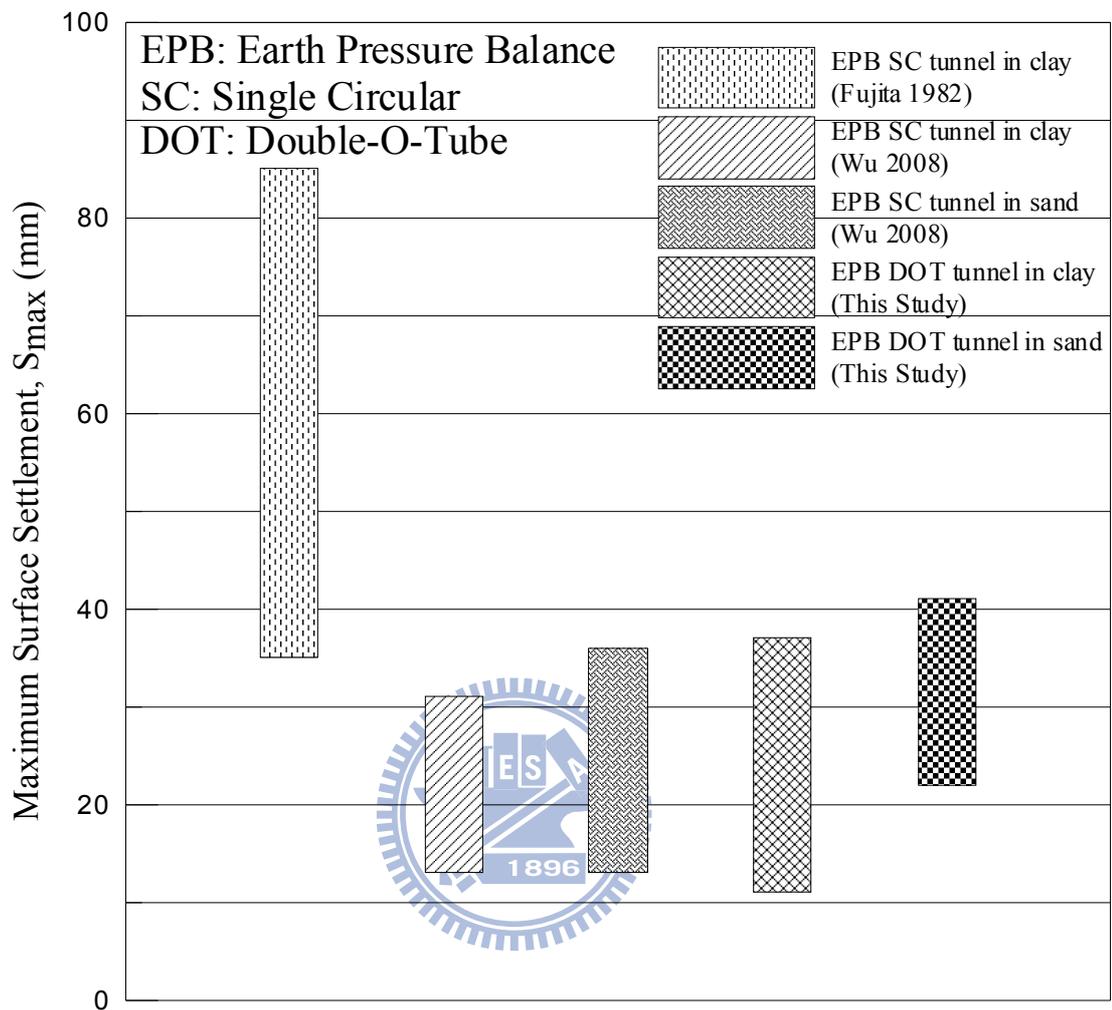


圖 6-12 EPB DOT 潛盾機及單圓潛盾機開挖隧道造成之最大沉陷量 S_{max}

Table A Project Constructed with DOT Shield Tunneling Method (after Shiu, 2010)

Case no.	Project name	Purpose of tunnel	Geological condition	External Dimensions of DOT shield (m)	Length of tunnel (m)	Depth of Tunnel Center line (m)	Minimum radius of curvature (m)	Maximum Gradient (%)	Segment Backfill Grouting Ratio (%)	Shield Manufacture	Period of construction
1	Rijo tunnel, 54 th national route Hiroshima, Japan	Subway	Clay, sand	Φ6.09×W10.69	850	8.05~11.35	135	1.8	150~180	IHI	1989~1994
2	Kikutagawa 2 nd sewer main Narashino, Chiba, Japan	Sewer main	Fine sand, clay, peat	Φ4.45× W7.65	703	4.38~11.23	1,600	4.0	145~150	IHI	1990~1994
3	Ariakekita common conduit Tokyo, Japan	Common conduit	Clay, gravel	Φ9.36× W15.86	249	18.68~21.68	1,600	3.5	150~170	MHI	1990~1994
4	Underground line, coastline high speed transit, Kobe, Japan	Subway	Clay, gravel	Φ5.48× W9.75	304	14.24~18.24	1,500	0.8	N.A.	MHI	1995~1998
5	East district of Sunadahashi, 4 th line high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	sandy gravel, silt, clay	Φ6.52× W11.12	752	13.57~19.86	500	2.3	109~126	IHI	1999~2002
6	Chayagasaka park district, 4 th line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Silt, sand	Φ6.52× W11.12	1,007	14.26~35.4	500	3.3	N.A.	IHI	1999~2002
7	Yamamoto north district, 4 th line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Clay, sand, sandy gravel	Φ6.52× W11.12	1,238	12.56~35.56	300	2.7	N.A.	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)	Depth of Tunnel Center line (m)	Minimum radius of curvature (m)	Maximum Gradient (%)	Segment Backfill Grouting Ratio (%)	Shield Manufacture	Period of construction
8	South district of Nagoya University, 4 th line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Clay, sandy silt, sandy gravel	Φ6.52× W11.12	876	14.76~24.56	200	3.1	N.A.	IHI	1999~2002
9	Yagoto north district, 4 th line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	Clay, sandy gravel	Φ6.52× W11.12	782	22.26~27.26	180	0.9	N.A.	KHI	1999~2002
10	Yamashitadori south district, 4 th line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	sandy gravel	Φ6.52× W11.12	957	13.26~19.86	165	3.3	N.A.	MHI	1999~2003
11	Yagoto south district 4 th line, high speed transit, Nagoya, Japan	Subway	clay, sandy gravel	Φ6.52× W11.12	1,025	12.96~23.36	300	3.1	110~150	MHI	1999~2003
12	East-terrain line, 1 st district, Aichi, Japan	Subway	Sandy soil	Φ6.73× W11.43	904	10.37~18.37	102	5.9	N.A.	IHI	N.A.
13	East-terrain line, Aichi, Japan	Subway	Clay, sand	Φ6.73× W11.43	123	15.37~16.37	102	0	N.A.	IHI	N.A.

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)	Depth of Tunnel Center line (m)	Minimum radius of curvature (m)	Maximum Gradient (%)	Segment Backfill Grouting Ratio (%)	Shield Manufacture	Period of construction
14	Nenjiang Rd. St. to Xiangyin Rd. St. to Huangxing greenbelt St., Line 8 Shanghai Metro, China	Subway	Silty sand, silty clay, clayey silt	Φ6.52× W11.12	1,759	8.46~15.26	495	2.8	180~200	IHI	2003~2004
15	Kairu Rd. St. to Nenjiang Rd. St., Line 8, Shanghai Metro, China	Subway			929	8.46~15.26	495	2.8	140~200	MHI	2003~2004
16	Lot 9, line 6, Shanghai Metro, China	Subway			1,713	7.26~24.26	300	2.7	N.A.	IHI	2004~2005
17	Lot 10, line 6, Shanghai Metro, China	Subway			2,497	9.26~16.26	990	1.5	N.A.	IHI	2004~2005
18	Lot 11, line 6, Shanghai Metro, China	Subway			1,096	9.26~13.26	420	2.7	N.A.	IHI	2004~2006
19	Lot 3, line 10, Shanghai Metro, China	Subway			1,459	15.56~23.06	N.A.	N.A.	N.A.	IHI	~2009
20	Lot CA450A, Taoyuan International Airport Access MRT, Taiwan	MRT	silty clay, silty sand	Φ6.42× W11.62	1,584	10.81~29.21	280	4.9	130~150	IHI	2009~2011