


國立交通大學
土木工程研究所
碩士論文

潛盾隧道施工引致之地表沉陷歷時曲線
及深層沉陷槽

Surface Settlement-Time Relationship and
Subsurface Settlement Troughs due to
Shield Tunneling



研究生：吳俊德
指導教授：方永壽 博士

中華民國九十七年九月

潛盾隧道施工引致之地表沉陷歷時曲線
及深層沉陷槽

Surface Settlement-Time Relationship and
Subsurface Settlement Troughs due to
Shield Tunneling

研究生：吳俊德 Student：Chun-Te Wu
指導教授：方永壽 博士 Advisor：Dr. Yung-Show Fang

國立交通大學
土木工程研究所



Submitted to the Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering
in
Civil Engineering
September 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年九月

潛盾隧道施工引致之地表沉陷歷時曲線 及深層沉陷槽

研究生：吳俊德

指導教授：方永壽 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

本論文第一部分探討潛盾隧道施工引致之地表沉陷歷時曲線。本研究蒐集自 1980 年至 2008 年間，世界各國共 198 筆潛盾隧道施工案例之監測資料，利用雙曲線模式 $S(t) = \frac{t}{a + bt}$ 模擬於不同性質土層內、以不同型式之潛盾機施工引致之地表沉陷歷時曲線。本研究整理獲得初始沉陷速率 $1/a$ 之建議表及地表最大沉陷量 $S_{max} = 1/b$ 建議表，可用來檢核潛盾隧道施工引致之地表沉陷歷時曲線。本研究獲得以下 3 點結論：

- (1) 由世界各國案例監測沉陷對時間資料得知，潛盾施工引致隧道中心線正上方之地表沉陷歷時曲線，可以雙曲線關係 $S(t) = \frac{t}{a + bt}$ 加以模擬。
- (2) 由初始沉陷速率 $1/a$ 之建議表得知，在非凝聚性土層中開挖之初使沉陷速率比在凝聚性土層中開挖為快。在凝聚性土層中開挖隧道，隨土層強度越弱，初使沉陷速率越快。
- (3) 由地表最大沉陷量 $S_{max} = 1/b$ 建議表得知，與開放式潛盾機及土壓平衡式潛盾機相比，泥水加壓式潛盾機開挖隧道所引致之 S_{max} 為最小。

本論文的第二部分探討潛盾隧道施工引致的深層沉陷。藉由分析國內外已發表的 21 筆施工監測深層沉陷結果，歸納出地表沉陷槽和深層沉陷槽的關係。並

依據 Peck (1969) 提出的常態分佈曲線，建議一經驗方法檢核由潛盾隧道施工所引致的深層沉陷槽。本論文獲得以下 3 點結論：

- (1) 本研究依據現地深層沉陷監測數據驗證，Peck (1969) 建議的常態分佈曲線式可以描述地表及深層沉陷槽。
- (2) 本研究建議深層與地表沉陷槽寬度參數 i_z/i_s 與深層與地表最大沉陷量 $S_{max,z}/S_{max,s}$ 的關係圖。研究結果顯示隨著沉陷槽深度越深，沉陷槽之寬度越窄，沉陷槽之最大沉陷量 $S_{max,z}$ 越大。
- (3) 本研究將所蒐集的國內外 21 組監測資料與本研究建議之經驗法預測範圍比較，得知本研究建議之經驗方法可以用來評估開放式、泥水式及土壓平衡式潛盾機於凝聚性土層中開挖隧道造成之深層沉陷。

關鍵詞：沉陷歷時曲線、深層沉陷、潛盾、隧道、雙曲線模式



Surface Settlement-Time Relationship and Subsurface Settlement Troughs due to Shield Tunneling

Student : Chun-De Wu

Advisor : Dr. Yung-Show Fang

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The first part of this paper analyzes the surface settlement-time relationship due to shield tunneling. This study collects 198 sets of field measurement data due to shield tunneling cases reported in different parts of the world from 1980 to 2008. A hyperbolic model $S(t) = \frac{t}{a + bt}$ is proposed to simulate the surface settlement-time relationship due to shield tunneling constructed in different types of soils with different shields. Based on the collected data, this paper suggests empirical tables to estimate initial rate of settlement $1/a$ and the maximum surface settlement $S_{max} = 1/b$ to estimate the surface settlement-time relationship. Base on this study, the following conclusions are made.

- (1) Field monitored data indicate that the surface settlement-time relationship induced by shield tunneling can be properly described by the hyperbolic model.
- (2) The initial rate of ground settlement $1/a$ in the empirical table, it is found that the initial rate of settlement in sandy soil is faster than that in clayey soil. For soft clays, the initial rate of ground settlement is faster than that in clayey soil.
- (3) Base on the maximum surface settlement $S_{max} = 1/b$ table suggested in this thesis indicate, when compared with S_{max} due to tunneling with an open shield and an

EPB shields, the slurry shield induces the smallest S_{max} .

The second part of this paper analyzes the subsurface settlement due to shield tunneling. Based on 21 sets of field cases, the relationship between surface and subsurface settlement troughs has been established. Based on the normal distribution curve suggested by Peck(1969), an empirical method is suggested to evaluate the subsurface settlement trough due to shield tunneling. Base on this study, the following conclusions are made.

- (1) Field monitored data indicate that subsurface settlement trough can be described by the distribution curve.
- (2) This study established the relationship between the surface and subsurface settlement trough parameter i_z/i_s and $S_{max,z}/S_{max,s}$. It is concluded that at a deeper elevation, the width of settlement trough is narrower and the maximum settlement is larger.
- (3) The suggested empirical method can successfully estimate the subsurface settlement trough in clayey soil induced by shield tunneling.

Keywords: Settlement-Time Relationship, Subsurface Settlement, Shield Tunneling, Tunnel, Hyperbolic model

誌 謝

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

口試期間，承蒙國立中央大學李崇正教授與國立高雄第一科技大學范嘉程副教授給予諸多寶貴的建議與指正，使本論文更加完整，特在此致上最深的謝意。

在論文撰寫及口試期間，感謝鄭詠誠同學、陳柏碩學弟、江奕蓁學妹、黃聖峯學弟、陳威廷學弟的熱心協助，在此一併致謝。

最後，將感謝再研究所階段一路支持我的親愛的父母、家人和所有關心我的親友，以及所有的好友。



目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
致謝.....	v
目錄.....	vi
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
符號說明.....	xii
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
1.3 論文組織.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 潛盾工法沿革.....	4
2.2 潛盾工法施工原理.....	4
2.3 潛盾機型式.....	5
2.3.1 各型式潛盾機適用土層.....	6
2.4 潛盾施工之輔助工法.....	6
2.4.1 壓氣工法.....	6
2.4.2 地盤凍結工法.....	7
2.4.3 灌漿工法.....	7
2.4.4 降水工法.....	8
2.5 潛盾隧道施工引致地盤變位之原因.....	8
2.5.1 盾尾間隙閉合.....	8
2.5.2 襯砌變形.....	9
2.5.3 潛盾機蛇行或超挖.....	9
2.5.4 開挖面應力的改變.....	10
2.5.5 地下水位變化.....	10
2.5.6 黏土層受擾動所造成的壓密沉陷.....	10
2.6 單一隧道施工引致之地盤變位.....	11
2.6.1 沉陷槽寬度估算.....	11
2.6.2 最大沉陷量估算.....	13
2.6.3 預估沉陷槽.....	14
2.7 地表沉陷歷時曲線.....	15
2.7.1 立即沉陷與壓密沉陷.....	15
2.7.2 雙曲線模式.....	16
2.8 深層沉陷之估計.....	17

第三章	研究方法.....	20
3.1	雙曲線模式.....	20
3.1.1	雙曲線模式介紹.....	20
3.1.2	如何決定雙曲線參數 a 及 b	21
3.1.3	參數 $1/a$ 之物理意義.....	22
3.1.4	參數 $1/b$ 之物理意義.....	23
3.2	國內外潛盾隧道施工案例蒐集.....	23
3.2.1	案例蒐集.....	23
3.2.2	案例列表.....	24
3.3	以雙曲線模式模擬沉陷歷時曲線.....	25
3.4	初始沉陷速率 $1/a$ 建議表.....	27
3.4.1	潛盾機型式對初始沉陷速率 $1/a$ 之影響.....	28
3.4.2	開挖土層種類對初始沉陷速率 $1/a$ 之影響.....	28
3.4.3	輔助工法對初始沉陷速率 $1/a$ 之影響.....	29
3.5	地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表.....	30
3.5.1	潛盾機型式對地表最大沉陷量 S_{max} 之影響.....	30
3.5.2	開挖土層種類對地表最大沉陷量 S_{max} 之影響.....	31
3.5.3	輔助工法對地表最大沉陷量 S_{max} 之影響.....	31
3.5.4	地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表之比較.....	32
第四章	以雙曲線模式檢核地表沉陷歷時曲線.....	33
4.1	評估範例.....	33
4.2	潛盾隧道施工案例之沉陷時間關係評估.....	34
4.2.1	開放式潛盾機.....	35
4.2.2	泥水式潛盾機.....	35
4.2.3	土壓平衡式潛盾機.....	36
4.2.3.1	土壓平衡式潛盾機開挖砂土層.....	36
4.2.3.2	土壓平衡式潛盾機開挖黏土層.....	37
4.2.3.3	土壓平衡式潛盾機開挖軟弱黏土層.....	37
4.3	評估方法之優點與限制.....	38
第五章	以經驗方法檢核潛盾隧道施工引致之深層沉陷.....	40
5.1	經驗方法介紹與案例蒐集.....	40
5.1.1	常態分佈之深層沉陷槽.....	40
5.1.2	沉陷槽寬度 i 與最大沉陷量 S_{max} 之求法.....	42
5.1.3	國內外深層沉陷案例蒐集.....	42
5.2	如何決定深層沉陷參數 i_z 及 $S_{max,z}$	43
5.2.1	O'Reilly and New 方法決定 i_z	43
5.2.2	Mair et al. 方法決定 i_z	44
5.2.3	Fang and Wu 方法決定 i_z 及 $S_{max,z}$	44

5.2.3.1	建立 i_z 與 i_s 之關係.....	44
5.2.3.2	建立 $S_{max,z}$ 與 $S_{max,s}$ 之關係.....	45
5.3	以經驗方法預估深層沉陷槽之範例.....	45
5.4	以不同方法決定參數 i_z	46
5.5	以經驗方法評估深層沉陷案例.....	48
5.5.1	開放式潛盾機造成之深層沉陷.....	48
5.5.2	泥水式潛盾機造成之深層沉陷.....	49
5.5.3	土壓平衡式潛盾機造成之深層沉陷.....	49
5.6	經驗方法之優點與限制.....	50
第六章	結論與建議.....	52
6.1	結論.....	52
6.1.1	地表沉陷歷時曲線.....	52
6.1.2	深層沉陷槽.....	53
6.2	建議.....	53
參考文獻	54
表	61
圖	100



表目錄

表 2-1 潛盾機之分類與特性.....	61
表 2-2 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍.....	62
表 2-3 潛盾機型式與適用土質、輔助工法之關係.....	63
表 2-4 灌漿材料之分類.....	63
表 2-5 地表最大沉陷量.....	64
表 2-6 地表最大沉陷量之預測值.....	65
表 2-7 雙曲線參數 a 值建議表.....	66
表 3-1 開放式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表.....	67
表 3-2 開放式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表.....	68
表 3-3 開放式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表.....	71
表 3-4 泥水加壓式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表.....	72
表 3-5 泥水加壓式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表.....	74
表 3-6 泥水加壓式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線 之案例列表.....	77
表 3-7 土壓平衡式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線 之案例列表.....	78
表 3-8 土壓平衡式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線 之案例列表.....	83
表 3-9 土壓平衡式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線 之案例列表.....	86
表 3-10 雙曲線參數 a 值建議表.....	89
表 3-11 雙曲線模式初始沉陷速率 $1/a$ 建議表.....	90
表 3-12 雙曲線參數 b 值建議表.....	91
表 3-13 地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表.....	92
表 3-14 地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表與 Fujita 之 S_{max} 建議表相差百分比.....	93
表 5-1 潛盾隧道施工案例與沉陷槽寬度參數 i_z	94
表 5-2 潛盾隧道施工案例與隧道中心線正上方最大沉陷量 $S_{max,z}$	97

圖目錄

圖 1-1 潛盾機掘進所引致地盤變位之分類.....	100
圖 1-2 潛盾隧道施工引致的深層沉陷對地下管線之影響.....	101
圖 2-1 潛盾施工作業循環示意圖.....	102
圖 2-2 開放式潛盾機.....	103
圖 2-3 擠壓式潛盾機.....	104
圖 2-4 土壓平衡式潛盾機.....	105
圖 2-5 加泥土壓平衡式潛盾機.....	106
圖 2-6 泥水式潛盾機.....	107
圖 2-7 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍.....	108
圖 2-8 凍結工法.....	109
圖 2-9 灌漿工法改良強化範圍示意圖.....	110
圖 2-10 降水工法示意圖.....	110
圖 2-11 黏土受擾動所引起之壓密.....	111
圖 2-12 以誤差函數曲線(或常態分佈曲線)模擬地表沉陷槽.....	112
圖 2-13 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係.....	113
圖 2-14 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係.....	114
圖 2-15 潛盾機掘進所引致地盤變位之分類.....	115
圖 2-16 潛盾隧道施工導致地表沉陷歷時曲線.....	116
圖 2-17 地表及深層沉陷沉陷槽.....	116
圖 2-18 沉陷槽寬度參數與深度之關係.....	117
圖 3-1 單一潛盾隧道施工造成之隧道中心線上方地表沉陷歷時曲線示意圖.....	118
圖 3-2 由現地沉陷歷時曲線推求雙曲線參數 a 及 b	119
圖 3-3 如何決定潛盾隧道施工引致地表沉陷歷時曲線之雙曲線參數.....	120
圖 3-4 雙曲線參數 a 、 b 之物理意義.....	121
圖 3-5 以雙曲線模式模擬開放式潛盾機在各式土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	122
圖 3-6 以雙曲線模式模擬泥水加壓式潛盾機在各式土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	123
圖 3-7 以雙曲線模式模擬土壓平衡式潛盾機在各式土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	124
圖 4-1 案例 ES 31 實測地表沉陷歷時曲線與預估值之比較.....	125
圖 4-2 以雙曲線模式評估開放式潛盾機在各式土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	126
圖 4-3 以雙曲線模式評估泥水式潛盾機在各式土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	127

圖 4-4 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在砂土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	128
圖 4-5 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在黏土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	130
圖 4-6 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在軟弱黏土層開挖造成之 地表沉陷歷時曲線.....	132
圖 5-1 以常態分佈曲線模擬 Mexico City 案例之地表與深層沉陷槽.....	134
圖 5-2 以常態分佈曲線推估 Mexico City 案例之沉陷槽寬度 i_z	135
圖 5-3 本文案例點及 O'Reilly and New(1982) i_z 與 Z_0 、 Z 之線性關係.....	136
圖 5-4 本文案例點及 Mair et al.(1993) i_z/Z_0 與深度正規化 Z/Z_0 之線性關係.....	137
圖 5-5 深層沉陷槽寬度 i_z 對隧道深度 z 正規化關係.....	138
圖 5-6 深層最大沉陷量 $S_{max,z}$ 與對隧道深度 z 正規化關係.....	138
圖 5-7 以經驗方法評估現地 N.W.A. Sewerage Scheme, Hubburn, U.K. 深層沉陷槽監測案例.....	139
圖 5-8 以經驗方法評估開放式潛盾機造成之深層沉陷槽監測案例.....	140
圖 5-9 以經驗方法評估泥水式潛盾機造成之深層沉陷槽監測案例.....	142
圖 5-10 以經驗方法評估土壓平衡式潛盾機造成之深層沉陷槽監測案例.....	143

符 號 說 明

V_L ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）

V_s ：地表沉陷槽體積

σ_o' ：未擾動土壤之垂直有效應力

σ_r' ：施工擾動後土壤之垂直有效應力

Δe ：孔隙比之改變量

$S(y)$ ：距隧道中心水平距離 y 處的地表沉陷量

S_{max} ：隧道中心線正上方的地表最大沉陷量

i ：隧道中心到反曲點的水平距離

$S_{(z,y)}$ ：距隧道中心線水平距離 y 處，深度為 z 處的沈陷量

$S_{max,s}$ ：距隧道中心線正上方地表最大沉陷量

$S_{max,z}$ ：距隧道中心線正上方深度為 z 處的最大沈陷量

i_s ：隧道中心線到地表沉陷曲線反曲點的距離

i_z ：深度為 z 處，隧道中心線到深層沉陷曲線反曲點的距離

Z ：隧道中心線深度

Z_0 ：隧道中心線深度（深層沉陷槽）

z ：深層沉陷槽深度（深層沉陷槽）

T ：地表到隧道頂拱（crown）的深度

D ：隧道直徑

R ：潛盾機半徑

A_t ：單位長度隧道開挖之體積

$S(t)$ ：隧道中心線正上方之地表沉陷量

t ：潛盾機盾首通過後的時間

a 、 b ：雙曲線參數

S_c ：壓密沉陷量 (mm)

S_{10} ：潛盾機盾首通過後第十天之沉陷量 (mm)

α ：壓密沉陷指數 (mm)



第一章

緒論

1.1 前言

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

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

台灣地狹人稠，主要大城市多位於軟弱沖積平原及盆地，在此人煙稠密之都市內從事地下隧道工程，除應顧及施工安全外，為避免影響或破壞人們生活品質及都市景觀，更須兼顧環境及公害防止。台灣地區自民國 65 年引進潛盾工法（蔡茂生, 1989），已施工之案例中以大台北都會區衛生下水道系統工程及捷運系統工程為主，潛盾施工技術已成為我國都市隧道施工之主流施工方法。

1.2 研究動機與目的

都市潛盾隧道工址之地質狀況大都為軟弱土層。在潛盾隧道施工過程中，由於潛盾機之掘進引致隧道開挖面之應力改變、盾尾間隙閉合、擾動土壤之壓密、襯砌環片變形及潛盾機曲線施工或方向控制不當造成之超挖等因素，皆促成了土層變位 (Peck, 1969; Schmidt, 1974; Cording and Hansmire, 1975; Hanya, 1977; Mori and Akagi, 1985; Fang et al., 1994)。特別以潛盾施工所引致之地表沉陷，將直接對鄰近建築物之安全造成威脅，且可能導致鄰近隧道地下管線之破壞而危及民眾財產及安全，因此潛盾隧道工程之施工品質為眾人所關切之主題。

如圖 1-1 所示 (Japan Society of Civil Engineers, 1996)，潛盾隧道施工造成地盤沉陷，地表沉陷量會隨著潛盾機通過的時間增加而增加，若能於施工前對潛盾隧道施工引致之地盤沉陷歷時關係加以預測，對於沿線建物之沉陷量可能超過警戒值或行動值的區域，在潛盾機通過之前做必要之處理，例如地盤改良等，對建物保護之工作必有相當之助益。本研究藉由蒐集世界各國共 198 筆潛盾隧道施工案例之監測資料，對於隧道施工造成之地表沉陷歷時之關係，加以分析歸納。本研究建議利用雙曲線模式 (Hyperbolic model) 模擬、預估於不同性質土層內、不同型式之潛盾機與輔助工法使用與否等施工引致之地表沉陷歷時曲線，整理得初始沉陷速率 $1/a$ 之建議表與地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表，以供評估潛盾工程地表沉陷歷時曲線之用。

如圖 1-2 所示，由於潛盾隧道施工引致的深層沉陷 (Subsurface settlement)，可能引致隧道上方結構物基礎、衛生下水道、自來水管線等地下結構物之破壞。因此在本研究的第二主題，為藉由分析國內外已發表的 21 筆施工監測結果，歸納出地表沉陷槽和深層沉陷槽的關係，本研究建議以常態分佈曲線 (Normal distribution curve) 為依據，建議一經驗的方法以預估由潛盾隧道施工所引致的深層沉陷。

1.3 論文組織

本論文共分六章。第一章為緒論。第二章為文獻回顧，蒐集潛盾工法沿革與隧道施工導致地表、深層沉陷之相關文獻。第三章為雙曲線模式模擬單一潛盾隧道施工引致地表沉陷歷時間曲線，以蒐集世界各國案例驗證雙曲線模式之適用性，並整理得初始沉陷速率 $1/a$ 之建議表與地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表。第四章以雙曲線模式評估分析潛盾隧道施工監測案例。第五章為以經驗方法估算潛盾隧道施工引致之深層沉陷，並以國內外監測資料驗證其可行性。第六章則為結論與建議。



第二章

文獻回顧

潛盾隧道施工所引致之地盤變位對於地表結構物、結構基礎及地下管線等造成潛在威脅，曾有許多學者針對此一問題進行研究。本章將針對潛盾工法之沿革及施工原理、潛盾機型式、潛盾施工之輔助工法、引致地盤變位的原因、單一隧道引致地盤變位、地表沉陷歷時曲線以及深層沉陷等相關文獻加以說明。

2.1 潛盾工法之沿革

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

2.2 潛盾工法施工原理

潛盾工法是針對強度較弱，自立性較差之土層中開挖隧道一種主要方式。其原理為利用一較隧道外徑稍大，可向前移動之圓形鋼套筒（即潛盾機）於土層中挖掘前進，並在設置永久襯砌前，利用盾殼支撐隧道洞口地盤。使在潛盾機內部，一方面無虞地盤崩坍安全迅速地進行隧道開挖作業，另一方面進行永久襯砌

之組立。由於所有施工均在機殼內完成，無需反覆架設臨時性支撐，在安全性、便利性及施工速度上皆可大幅提升。朱旭（1984）指出，一般的潛盾施工作業循環可分為三個階段，如圖 2-1 所示：

（1）開挖與掘進：

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

（2）停止挖掘：

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

（3）安裝襯砌：

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



2.3 潛盾機型式

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

（1）開放式潛盾機（Open shield）：

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

（2）擠壓式潛盾機（Blind shield）：

擠壓式潛盾機以機首隔板推擠前方土壤，使土壤經隔板上方開口進入機內，如圖 2-3 所示。

(3) 密閉式潛盾機 (Closed shield)：

包括土壓平衡式潛盾機 (Earth pressure balance shield, EPB shield)、加泥土壓平衡式潛盾機 (Muddy soil pressure balance shield) 與泥水加壓式潛盾機 (Slurry shield)，如圖 2-4 至圖 2-6 所示。

2.3.1 各型式潛盾機適用土層

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

2.4 潛盾施工之輔助工法

採用潛盾隧道工法施工時，為克服地下水壓維持開挖面之穩定，及避免地盤變位過大，常需採用輔助工法配合施工，來達成止水或強固地盤之目的。以下各節將介紹潛盾隧道施工時常用之輔助工法。

2.4.1 壓氣工法

壓氣工法 (Compressed-air method) 原理方法是利用壓縮空氣注入隧道內部，以壓縮空氣之壓力抑制地下水壓，阻止地下水滲入開挖面，而維持開挖面的穩定。一般而言，其適用於孔隙小，細粒料較多，透氣性小及滲透係數較低之地質狀況。對於工作面地下水的排除，在完善的施工管理下，壓氣工法為可靠的工法，因壓氣對地下水、環境及地表結構物影響最小，施工中不需先行降水，不受開挖斷面大小、形狀的限制，亦不會造成先期沉陷，且不會遺留下永久之地下擋水物。蔡茂生 (1985) 說明，壓氣工法施工時，需注意防範漏氣、噴發等事故，

並需經常檢測施工範圍之空氣狀況，避免發生施工人員缺氧等事故。進出壓氣施工區時，四周壓力的快速上升或下降，可能造成人員罹患潛水夫病 (The bends)，若未予適當之管制，此輔助工法可能對經常出入壓氣區域之工作人員的健康造成傷害。

2.4.2 地盤凍結工法

地盤凍結工法 (Ground freezing method) 係將凍結管 (freezing pipe) 埋設在欲處理的土層內，並在管內流通極低溫之冷凍液 (如氯化鈣、液態氮等)，利用冷凍液的循環來吸收地盤中的熱能，被凍結的土壤乃是以凍結管為中心呈年輪狀 (同心圓狀) 成長，利用相鄰的凍土柱之管列效應，可在地盤中形成任意形狀及大小的凍土牆，達到支撐外部壓力，以及發揮阻隔地下水的效用。地盤凍結工法可廣泛應用於各種不同的土質，土壤經凍結後具有相當強度；但值得注意的是，若需凍結之土壤水分十分稀少，其凍結效果將不理想，因為凍結的主體是水，所以足夠水分為土壤凍結之必要條件。冷凍工法施作情形如圖 2-8 所示，冷凍液之差異，凍結土層的方法依可分為液態氮 (LN_2) 凍結法和鹽水 (brine) 凍結法兩種。

2.4.3 灌漿工法

灌漿工法 (Grouting method) 係於土層內灌入適當的材料 (化學藥液、水泥漿或黏土液等) 填塞土壤顆粒間之空隙，使其結成一體。灌漿工法除可阻斷地下水滲流途徑外，亦可提高土壤的強度，減少地盤沉陷量及其影響範圍。灌漿工法為潛盾隧道施工時最常使用的輔助工法，如潛盾機發進及到達段的保護、隧道周邊地盤的保護、潛盾隧道穿越鐵路下方的保護、潛盾隧道穿越河川下方的保護，及潛盾隧道施工沿線之地表建築物的保護等圖 2-9。林耀煌 (1994) 說明，灌漿材料之分類依材料性質、反應形式、施工方式而異，常用之分類方式，如表

2-4 所示。一般最常用於軟弱地盤隧道工程之灌漿工法，約可概分成藥液灌漿與高壓噴射灌漿兩大項。

2.4.4 降水工法

為避免地下水滲入隧道之開挖面，在隧道開挖之前，事先以點井或深井將地下水降低，如圖 2-10 所示，降水工法（Dewatering method）通常適用於透水性較高之砂質土壤。蔡茂生（1985）指出，抽水時造成土層有效應力改變，可能對地盤產生壓密作用，造成鄰近地盤下陷，甚至危害鄰近之建築物。必要時，應併用灌漿工法或遮斷壁工法，阻隔抽水之影響線，以減少其影響。在降水工法之選擇上，必須考慮之因素如下：

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



2.5 潛盾隧道施工引致地盤變位之原因

潛盾隧道施工所造成的地盤變位，與開挖土壤的種類、選用的潛盾機型式、潛盾機直徑及開挖深度等，均有密切的關係。Peck（1969）、Schmidt（1974）、Cording and Hansmire（1975）、Hanya（1977）、Mori and Akagi（1985）、Fang et al.（1994）等學者，均曾經提出相關的研究成果。綜合各項研究成果，潛盾隧道施工引致地盤變位的原因，大致可分為以下六大項。

2.5.1 盾尾間隙閉合

潛盾機通過之後，原地盤與襯砌環片外緣所形成之空隙稱為盾尾間隙（Tail void），一般約為 50 到 80 mm。盾尾間隙通常採以背填灌漿（Backfill grouting）

將其填滿，但在環片脫離盾殼保護至施作背填灌漿期間，盾尾間隙呈無支撐狀態，極易引起周圍地層的應力釋放，造成土壤的彈塑性變形，導致隧道上方及周圍土壤往此空隙移動。此項為潛盾隧道施工引起地盤變位的最主要原因之一。

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

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

式中，

V_L ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）

t ：盾尾間隙寬度

R ：潛盾機半徑

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



2.5.2 襯砌變形

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

2.5.3 潛盾機蛇行或超挖

潛盾隧道於曲線施工時，為使潛盾機可順利轉向，機體一側可能發生土壤超挖，另一側則可能產生壓縮，導致盾殼周圍土體之空隙擴大而產生地盤漏失。於此施工狀態下，潛盾機切刃口的阻力及千斤頂之壓力呈不均勻分佈，或潛盾機自重亦可能造成機體上下或左右蛇行（pitching or yawing）。此漏失量與潛盾機操

作技術及土質狀況有極密切的關係，一般情形下是難以量化估算的。

2.5.4 開挖面應力的改變

潛盾機開挖掘進時，須自機體內部向開挖面施予一推力，以推持開挖面之穩定。若此推力小於原土層之靜止土壓力。隧道開挖面將產生應力釋放。此時土層趨於主動土壓力狀態，土體會向開挖面擠入，同時發生地盤漏失的情形。但若此推力恰為原土層之靜止土壓力，則隧道開挖面呈靜止狀態。若此推力大於原土層的靜止土壓力，則開挖面前方的土壤因受推力而呈被動土壓力狀態，此時的地層因受壓而產生推擠，導致地表的隆起。

2.5.5 地下水位變化

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



2.5.6 黏土層受擾動所造成的壓密沉陷

潛盾隧道施工過程中，軟弱土壤因隧道面開挖、潛盾機剪動、盾尾間隙附近土體應力釋放及背填灌漿之擾動，使得孔隙水壓逐漸消散，因而產生壓密沉陷。其原理如圖 2-11 (Mori and Akagi, 1985) 所示，圖中之曲線 *a* 為施工前未擾動土壤 (Undisturbed soil) 之壓密曲線，曲線 *b* 為施工擾動後之土壤行為，而曲線 *c* 則為重模土壤 (Remolded soil) 之孔隙比變化，因受施工擾動，土層狀態由曲線 *a* 之點 1 (在相同孔隙比 *e* 下) 往曲線 *b* 之點 2 移動，同時垂直有效應力由 σ'_o 減小為 σ'_r ，隨著土體內超額孔隙水壓消散，有效應力增加，土體狀況沿曲線 *b* 到達點 3，自點 1 至點 3 的過程中，有效應力值不變而土壤的孔隙比減少 Δe ，因此造成壓密沉陷。

2.6 單一隧道施工引致之地盤變位

潛盾隧道施工引致之地盤變位，受地層條件、施工機具與施工技術影響頗大且難以量化。至目前為止，以工程累積經驗為主要參考，並以實際工程沉陷資料之分析，仍不失為一可靠之方法。以下將分別對沉陷槽寬度、最大沉陷量與沉陷槽之估算作一探討。

2.6.1 沉陷槽寬度估算

Peck (1969) 依現地觀測資料研究發現，以傳統潛盾施工法開挖隧道，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) 來模擬，沉陷槽上各點之沉陷量可由下式計算：

$$S(y) = S_{\max} \times \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.2)$$

式中，

$S(y)$ ：距隧道中心水平距離 y 處的地表沉陷量

S_{\max} ：隧道中心線正上方的地表最大沉陷量

i ：隧道中心到反曲點 (Inflection point) 的水平距離

圖 2-12 中常態分佈曲線反曲點所對應的沉陷量為 0.61 倍之 S_{\max} ，曲線之最大曲率點位於距中心線 $\sqrt{3}i$ 處，其對應之沉陷量為 0.22 倍 S_{\max} 。地表沉陷槽單位長度內之體積 V_s 為：

$$V_s = \sqrt{2\pi} \times i \times S_{\max} \approx 2.5 \times i \times S_{\max} \quad (2.3)$$

Hanya (1977) 檢測數種較新型之潛盾機 (如土壓平衡式及泥水式潛盾機) 施工所導致之地表沉陷槽曲線，其結果顯示 Peck (1969) 所建議之常態分佈曲線依然適用。

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，以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 2-13。該圖中顯示，同直徑之潛盾機於相同深度開挖隧道（即 $Z/2R$ 值固定），軟弱土層所得到之 i 值（代表沉陷槽之寬度）顯然較堅硬土層為大。若於地下水位以下之砂土層開挖隧道，則因難以控制地盤漏失的情況，故其沉陷槽可能更寬。

Mair et al. (1993) 透過離心機模型試驗，模擬若在黏土層隧道施工，於地表下深度 Z 處之沉陷槽反曲點位置 i 如下：

$$\frac{i}{Z_o} = 0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{Z}{Z_o} \right) \quad (2.4)$$

式中，

Z_o ：隧道中心線深度

Z ：地表下深度 Z 處

對於地表沉陷槽而言，即 Z 為 0，將之代入式 (2.4) 並化簡之可得：

$$i = 0.5 \times Z_o \quad (2.5)$$

Loganathan and Poulos (1998) 利用等值地盤漏失 (Equivalent ground loss) 的觀念，以解析方法求得 $i/2R$ 與 $Z/2R$ 之關係如下：

$$\frac{i}{R} = 1.15 \left(\frac{Z}{2R} \right)^{0.9} \quad (2.6)$$

式中，

Z ：隧道中心線深度 (m)

Wu and Lee (2003) 透過離心機模型試驗，模擬在黏土層中隧道施工，得 $2i/D$ 與 Z/D 之關係如下：

$$\frac{2i}{D} = 0.58 \left(\frac{Z}{D} \right) + 1.0 \quad (2.7)$$

式中，

D ：隧道直徑 (m)

Z ：隧道中心線深度 (m)

2.6.2 最大沉陷量估算

Kanji (1979) 曾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：

$$0.5\% < \frac{V_s}{A_t} (\%) < 2.5\% \quad (2.8)$$

(2) 於凝聚性土壤中：

$$0.2\% < \frac{V_s}{A_t} (\%) < 10\% \quad (2.9)$$

(3) 於非凝聚性土壤中：

$$3\% < \frac{V_s}{A_t} (\%) \leq 10\% \quad (2.10)$$

由已知之開挖隧道斷面積 A_t ，便可根據式 (2.8) 至式 (2.10) 估計沉陷槽體積 V_s 。對 Peck (1969) 所提出之常態分佈曲線式 (2.2) 積分並化檢後，可進一步依下列公式估算地表最大沉陷量：

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \times i} \quad (2.11)$$

Fujita (1982) 蒐集日本國內自 1965 年以來 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 2-5 及表 2-6 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) 透過離心機模型試驗，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：

$$\frac{S_{\max}}{R} = \frac{1.25V_L}{0.175 + 0.325\left(1 - \frac{Z}{Z_o}\right)} \cdot \frac{R}{Z_o} \quad (2.12)$$

式中，

R ：開挖隧道半徑

V_L ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）（%）

Z ：地表下深度

Z_o ：隧道中心線深度

針對地表沉陷槽， Z 等於 0，將之代入式 (2.12) 並化簡可得：

$$S_{\max} = 2.5V_L \times \frac{R^2}{Z_o} \quad (2.13)$$

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

$$\frac{S_{\max}}{2R} = 0.00327 \left(\frac{Z}{2R}\right)^{-0.43} \cdot V_L \quad (2.14)$$

式中，

R ：開挖隧道半徑

Z ：隧道中心線深度

V_L ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）（%）

2.6.3 預估沉陷槽

Fang et al. (1994) 提出 Peck-Fujita 經驗方法，用以估算於不同機型、地質條件、隧道深度及隧道直徑下施工引致之地表沉陷曲線。此方法為引用 Peck (1969) 所建議之 $i/2R$ 與 $Z/2R$ 關係，並在其極右側加上一邊界曲線，如圖 2-14 所示，再依隧道中心線深度 Z 、隧道半徑 R 與土壤種類，即可由圖 2-14 得沉陷槽寬度參數 i 之範圍 i_{low} 、 i_{avg} 、 i_{high} 。並根據 Fujita (1982) 於表 2-6 所建議之地表最大沉陷量，可依不同機型、土壤種類與輔助工法採用與否得到隧道中心上方

之地表最大沉陷量 S_{max} 範圍 $(S_{max})_{low}$ 、 $(S_{max})_{avg}$ 、 $(S_{max})_{high}$ 。將所得之 i 與 S_{max} 代入 Peck(1969) 之常態分佈方程式，即可估算潛盾隧道施工造成之長期地表沉陷槽。

2.7 地表沉陷歷時曲線

依沉陷發生時機，將伴隨潛盾隧道施工所產生之地盤變位區分為五大階段 (Japan Society of Civil Engineers, 1996)，如圖 2-15 所示，其變位現象詳述如下：

- (1) 先行沉陷：係發生於距潛盾機到達之相當距離前方之沉陷。
- (2) 開挖面前方之沉陷或隆起：係發生於潛盾機開挖面即將到達時之沉陷或隆起，主要因潛盾機操作時，開挖面之土壓、水壓不平衡所致。
- (3) 通過時沉陷或隆起：係發生於潛盾機通過時之沉陷或隆起，其產生之主要原因為潛盾機四周表面與地盤間之摩擦，以及伴隨超挖產生之地盤擾動所造成。
- (4) 盾尾空隙沉陷或隆起：係發生於潛盾機尾部通過後不久之沉陷或隆起，其產生之主要原因為環片與地盤間之潛盾機殼厚度之縫隙，稱為盾尾空隙 (Tail Void)，在環片脫離機身時使地盤應力釋放造成沉陷。一般而言，地盤變位主要產生最大之沉陷量係由於此一階段所造成。
- (5) 後續沉陷：係在極軟弱之黏性土層可發現之現象，主要起因於潛盾機推進所引起整體性之地盤鬆弛及擾動。

2.7.1 立即沉陷與壓密沉陷

Hwang et al. (1995) 的研究指出，可以由沉陷歷時曲線中明確區分立即沉陷 (Immediate settlement) 與壓密沉陷。圖 2-16 將沉陷量與時間繪於半對數座標圖上，Hwang et al. 建議將潛盾機盾首通過後第十天之累積沉陷量 S_{10} 視為因潛盾機盾尾閉合所引致的立即沉陷，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：

$$S_c = \alpha \cdot \log\left(\frac{t}{10}\right) \quad (2.15)$$

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：

$$S_t = S_{10} + 1.56\alpha \quad (2.16)$$

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) 收集國內外案例的沉陷與時間關係加以分析，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，可用以下列之雙曲線模式 (Hyperbolic model) 加以描述：

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.17)$$

式中，

$S(t)$ ：隧道中心線正上方之地表沉陷量

t ：潛盾機盾首通過後的時間

a 、 b ：雙曲線參數

式 (2.17) 可改寫成下式：

$$\frac{t}{S(t)} = bt + a \quad (2.18)$$

式 (2.18) 為 $t/S(t)$ 之斜截式。將施工案例的監測資料繪於以 $t/S(t)$ 為縱軸與

以 t 為橫軸之圖中，可以線性迴歸方法找出直線關係，求出常數 a （截距）和 b （斜率）。

簡明同（1998）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共四十例，將由雙曲線模式推估得來的參數 a ，製作建議表為表 2-7，輔以 Fujita 於表 2-6 所建議之地表最大沉陷量 S_{max} ，配合經驗法則推估，即模擬出雙曲線預估曲線。上述雙曲線模式將成為本研究推導潛盾施工隧道中心線上方沿線地表面任一點沉陷量與時間關係之基礎。

2.8 深層沉陷之估計

潛盾隧道施工引致之地表沈陷與時間關係已經詳述於前，然而在都市地區地下潛盾隧道與地面之間，常存在有自來水管線、瓦斯管線、衛生下水道及結構基礎等管線設施，為避免地下沉陷損害這些地下結構物，必須探討潛盾隧道施工引致的深層沈陷。

Cording and Hansmire（1972）整理美國華盛頓捷運系統潛盾施工的監測資料，發現沈陷槽的形狀隨深度的增加而更呈尖銳，且沈陷槽的寬度隨深度的增加而減小。

O'Reilly and New（1982）分析已有的施工案例，並和 Mair（1979）的離心機模型試驗結果相互驗證。他們發現，潛盾施工引致的深層沈陷槽的寬度，由地表面往隧道冠狀點（Crown）逐漸的減小，即 i 值隨深度之增加而減小，而隧道中心正上方的沈陷量 S_{max} 卻隨深度的增加而逐漸的增大，因此，沈陷槽形狀會隨深度的增加而更加尖銳，如圖 2-17 所示。

O'Reilly and New 根據觀測的資料指出，隧道施工造成之深層沈陷也可用誤差函數（Error function）加以描述，如下式：

$$S_{(z,y)} = S_{\max,z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i_z^2}\right) \quad (2.19)$$

式中，

$S_{(z,y)}$ ：距隧道中心線水平距離 y 處，深度為 z 處的沈陷量

$S_{\max,z}$ ：距隧道中心線正上方深度為 z 處的最大沈陷量

i_z ：深度為 z 處，隧道中心線到沈陷曲線反曲點的距離

在地表的沈陷槽中，沈陷槽的體積經積分可如式 (2.11)，假設地表與深層沈陷槽的體積相同，故原式 (2.19) 可改寫成如下式：

$$S_{(z,y)} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i_z^2}\right) \quad (2.20)$$

式中，

V_s ：地表沈陷槽體積 (m^3)

依土層狀況分為凝聚性及非凝聚性土壤，O'Reilly and New 將觀測資料經回歸分析，得到下列估算沈陷槽寬度參數 i_z 的經驗關係：

凝聚性土壤：

$$i_z = 0.43(Z_o - Z) + 1.0 \quad (2.21)$$

非凝聚性土壤：

$$i_z = 0.28(Z_o - Z) - 0.1 \quad (2.22)$$

Z_o 與 z 之定義如圖 2-17 所示。

Mair et al. (1993) 認為深層的沈陷曲線和地表的沈陷曲線相似，皆可用常態分佈曲線來模擬。他們根據已有的於倫敦粘土 (London clay) 內的施工案例，加上以離心模型所做試驗的結果，將所得的值繪於 Z/Z_o 和 i_z/Z_o 座標圖中，如圖 2-18 所示。由圖中的資料，Mair et al. 建議 i_z/Z_o 與深度之線性關係如下：

$$\frac{i_z}{Z_o} = 0.175 + 0.325\left(1 - \frac{Z}{Z_o}\right) \quad (2.23)$$

經假設深層沈陷槽的體積與地表沈陷槽的體積相同，Mair et al. 等將隧道開

挖所造成的體積損失率 V_L 經過修正，得到一估算隧道中心正上方某深度之最大沈陷量 $S_{max,z}$ ，如下式：

$$V_L = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot i_z \cdot S_{max,z}}{\pi/4 \cdot D^2} \quad (2.24)$$

$$S_{max,z} = 0.313 \frac{V_L D^2}{i_z} \quad (2.25)$$

式中的體積損失率定義為隧道施工引致的地表沈陷槽體積和隧道開挖體積的比值，Mair et al.等建議用一經驗值 $V_L = 1.4\%$ 代替。

上述深層沉陷槽理論將成為本研究推導預估潛盾施工沿線任一點橫斷面深層沉陷槽曲線之基礎。



第三章

研究方法

本章廣泛蒐集國內外潛盾施工案例，提出一評估潛盾隧道施工所造成之地表沉陷歷時曲線。本研究依據 Fang et al. (1993) 所建議之雙曲線模式，模擬現地潛盾單一隧道中心線上方之地表沉陷歷時曲線。依據國內外多個案例資料分析獲得雙曲線參數，製作雙曲線參數建議表。

本章內容分為五節。第一節介紹本經驗方法所使用之雙曲線模式、參數。第二節為國內外案例之蒐集。第三節為以雙曲線模式模擬潛盾隧道引致之地表沉陷歷時曲線案例。第四節為建立初始沉陷速率 $1/a$ 建議表，並對 $1/a$ 進行分析與討論。第五節為建立地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表，並對 S_{max} 進行分析與比較。



3.1 雙曲線模式

3.1.1 雙曲線模式介紹

為便於說明單一潛盾隧道施工造成之隧道中心上方之地表沉陷，參照圖 3-1，本研究先將相關重要參數定義如下：

R ：隧道開挖面半徑

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

本研究採用 Fang et al. (1993) 所建議於凝聚性黏土層內以土壓平衡式潛盾機開挖造成之沉陷對時間關係，可用雙曲線模式 (Hyperbolic model) 加以描述。簡明同 (1998) 在蒐集了國內外現地開挖潛盾隧道地表沉陷歷時曲線案例 40 筆，驗證雙曲線模式亦可模擬於開放式、泥水加壓式潛盾機以及在非凝聚性土層內之

開挖。依 2.7.2 小節所述，以式 (2.17) 模擬地表沉陷對時間的關係：

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.17)$$

式中，

$S(t)$ ：隧道中心線正上方之地表沉陷量

t ：潛盾機盾首通過後的時間

a 、 b ：雙曲線參數

3.1.2 如何決定雙曲線參數 a 及 b

藉由改寫式 (2.17)，得到 $t/S(t)$ 之斜截式，如式 (2.18)。

$$\frac{t}{S(t)} = bt + a \quad (2.18)$$

將現地監測之地表沉陷對時間的資料繪於以 $t/S(t)$ 為縱軸，時間 t 為橫軸之圖中，利用線性回歸找出直線關係，求出參數 a (截距) 和參數 b (斜率)，如圖 3-2。利用所求出的雙曲線參數 a 、 b ，代回原雙曲線公式內，繪製於圖上，即可模擬出一條由雙曲線模式推估之地表沉陷歷時曲線。

依據圖 3-3 (a) 至圖 3-3 (c) 舉例說明如何由潛盾隧道施工引致地表沉陷歷時曲線，決定雙曲線參數 a 、 b 。以圖 3-3 (a) 採用開放式潛盾機在軟弱黏土層內開挖為例。本案例為英國 Haycroft 的衛生下水道潛盾工程，監測陣列 C 的地表沉陷歷時曲線監測數據 (Attewell et al., 1986)。將其地表沉陷歷時曲線的監測數據，繪於 $t/S(t)$ 為縱軸，時間 t 為橫軸之圖中。圖中顯示監測數據呈一線性關係，利用線性回歸找出線性方程式 $Y = 0.0103 * X + 0.1263$ ，可得雙曲線參數 a 為 0.1263，雙曲線參數 b 為 0.0103。將雙曲線參數 a 、 b 值，代回雙曲線公式 (2.17)，即可得模擬本案例之地表沉陷歷時雙曲線，將於 3.3 節中依據案例加以描述。

圖 3-3 (b) 為採用泥水加壓式潛盾機在砂土層內開挖之案例。本案例為台北捷運系統 CH218 標，監測點 SM583 的地表沉陷歷時曲線監測數據 (Song,

1995)。將監測數據繪於 $t/S(t)$ 對 t 的座標圖中，可得一完整線性關係，利用線性回歸求得線性方程式 $Y = 0.0368 * X + 0.4269$ ，得雙曲線參數 a 為 0.4269，雙曲線參數 b 為 0.0368。圖 3-3 (c) 為採用土壓平衡式潛盾機在砂土層內開挖之案例。本案例為愛爾蘭 Limerick 市下水道的船塢路隧道 (Dock Road Tunnel)，監測點 TA18 的地表沉陷歷時曲線監測數據 (Tonkin, 2005)。依照上述方法將其繪入 $t/S(t)$ 對 t 的座標圖中，得線性方程式 $Y = 0.0207 * X + 0.1031$ ，即雙曲線參數 a 為 0.1031，雙曲線參數 b 為 0.0207。

由圖 3-3 (a) 至圖 3-3 (c) 之案例，顯示三種不同型式潛盾機施工引致地表沉陷歷時曲線數據，皆可代入 $t/S(t)$ 斜截式 (2.18) 之圖中，得一完整線性關係，決定雙曲線參數 a 、 b 。將於 3.3 節中依據案例之雙曲線參數 a 、 b ，模擬地表沉陷歷時雙曲線。



3.1.3 參數 $1/a$ 之物理意義

雙曲線參數 $1/a$ ，可由雙曲線公式 (式 2.17) 加以推求。

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.17)$$

對雙曲線公式進行微分，可求出沉陷歷時曲線斜率 $dS(t)/dt$ 。當 $t \rightarrow 0$ 時， $dS(t)/dt$ 則為時間為 0 之切線斜率，如下式 (3.1) 所示，曲線初始切線斜率等於 $1/a$ 。

$$\left(\frac{dS(t)}{dt} \right) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(a + bt) - t(b)}{(a + bt)^2} = \frac{a}{a^2} = \frac{1}{a} \quad (3.1)$$

$1/a$ 代表的物理意義為當潛盾機盾首通過測點第一天，潛盾隧道中心線上方所造成之地表沉陷量，公制單位為 (mm/day)。如圖 3-4 所示。

參數 $1/a$ 愈大，表示隧道開挖造成之初始沉陷速率較快。反之若參數 $1/a$ 愈小，初始沉陷速率愈慢。參數 $1/a$ 之大小與土層種類、開挖速度、潛盾機型式等因素有關，將於 3.4 節依據案例加以說明。

3.1.4 參數 $1/b$ 之物理意義

雙曲線參數 $1/b$ 之物理意義，亦可由雙曲線公式(2.17)推得，根據 L'Hopital's Rule，在式 (2.17) 中，當 $t \rightarrow \infty$ 時， $S(t)$ 將會趨近於 $1/b$ ，如下式 (3.2)。

$$S(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{a + bt} = \frac{1}{b} \quad (3.2)$$

因此參數 $1/b$ 的物理意義代表地表沉陷歷時曲線之長期最終沉陷量，即上述 2.6.2 節所提及最大沉陷量 S_{max} ($S_{max}=1/b$)，參數 $1/b$ 的公制單位為 (mm)，如圖 3-4 所示。

故參數 $1/b$ 之大小為影響地表沉陷歷時曲線中重要之一環，與隧道中心線深度 Z 、隧道直徑 $2R$ 、潛盾機型式、輔助工法等因素有關，將於 3.5 節中依據案例加以說明。

3.2 國內外潛盾隧道施工案例蒐集

3.2.1 案例蒐集

本經驗評估方法乃是依據潛盾隧道施工現地案例監測資料，藉由監測沉陷歷時關係，獲得雙曲線參數 a 、 b ，進而代入雙曲線模式，繪製地表沉陷歷時曲線，故蒐集現地案例為本研究之首要課題。

基於雙曲線參數 $1/b$ 之物理意義為地表最大沉陷量 S_{max} ，本研究能藉由現地潛盾隧道施工引致地表沉陷歷時曲線，獲得雙曲線參數 a 、 b ；亦能由目前已廣泛討論之潛盾隧道施工引致地表最大沉陷量 S_{max} ，獲得雙曲線參數 b 。藉由增加雙曲線參數 b 之案例值，提高雙曲線模式之精確性。

為考慮本經驗方法的適用性，本研究將不限定某特定區域或特定土壤之潛盾工程之監測結果。相對於近年潛盾施工方法與技術之進步，沉陷資料年代已相距久遠之沉陷資料，較缺乏作為參考依據之實用性。為使預估結果具可靠性、適用性與實用性，本研究所蒐集之潛盾施工案例，僅針對 1980 年之後的國內外各

潛盾隧道工程案例，即僅分析近三十年發展世界各國之監測資料，總共有 198 筆資料，獲得參數 a 為 92 筆、參數 b 為 198 筆。

本研究將所蒐集到的 198 筆潛盾案例，根據 3.1.2 小節所述之方法與雙曲線參數 $1/b = S_{max}$ 之物理意義，依潛盾工法開挖時使用之潛盾機型式、土層狀況及輔助工法加以分類。施工使用之潛盾機型式分為 3 類：分別為土壓平衡式 (EPB shield) 縮寫為 E、泥水加壓式 (Slurry shield) 縮寫為 S 與開放式 (Open shield) 縮寫為 O。開挖土層狀況分為 3 類：黏土層 (clay) 縮寫為 C、軟弱黏土層 (soft clay) 縮寫為 sC 及砂土層 (sand) 縮寫為 S。以及依是否使用輔助工法 (Additional Method) 加以分類。

3.2.2 案例列表

表 3-1 至表 3-9 為本研究引用潛盾隧道開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表，依照潛盾機型式與土層狀況分類，並依文獻年代順序依序排下。

表 3-1 為開放式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 OS 為代號，代表 Open shield in the sand。案例數為 9 筆，其中雙曲線參數 a 為 2 筆，參數 b 為 9 筆。表 3-2 為開放式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 OC 為代號，代表 Open shield in the clay。案例數為 27 筆，其中雙曲線參數 a 為 1 筆，參數 b 為 27 筆。表 3-3 為開放式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 OsC 為代號，代表 Open shield in the soft clay。案例數為 10 筆，其中雙曲線參數 a 為 4 筆，參數 b 為 10 筆。

表 3-4 為泥水加壓式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 SS 為代號，代表 Slurry shield in the sand。案例數為 18 筆，其中雙曲線參數 a 為 4 筆，參數 b 為 18 筆。表 3-5 為泥水加壓式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 SC 為代號，代表 Slurry shield in the clay。案例數為 24 筆，其中雙曲線參數 a 為 2 筆，參數 b 為 24 筆。表 3-6 為泥水加壓式潛盾

隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 SsC 為代號，代表 Slurry shield in the soft clay。案例數為 6 筆，其中雙曲線參數 a 為 4 筆，參數 b 為 6 筆。

表 3-7 為土壓平衡式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 ES 為代號，代表 EPB shield in the sand。案例數為 44 筆，其中雙曲線參數 a 為 26 筆，參數 b 為 44 筆。表 3-8 為土壓平衡式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 EC 為代號，代表 EPB shield in the clay。案例數為 31 筆，其中雙曲線參數 a 為 24 筆，參數 b 為 31 筆。表 3-9 為土壓平衡式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例，以 EsC 為代號，代表 EPB shield in the soft clay。案例數為 29 筆，其中雙曲線參數 a 為 25 筆，參數 b 為 29 筆。

案例列表中顯示，開放式潛盾隧道開挖引致地表沉陷歷時曲線案例，雙曲線參數 a 僅為 7 筆。由文獻年代得知大部分案例為 1990 年以前，表示開放式潛盾機距今年代久遠，由於隧道開挖面呈開放式，常輔以壓氣工法穩定開挖面，對施工人員安全有所顧慮，近年來已不再使用。泥水加壓式潛盾隧道開挖引致地表沉陷歷時曲線案例，雙曲線參數 a 僅為 10 筆。此式潛盾機施工採用皂土等材料作為泥水，填充地層中之空隙，需較大工程腹地及費用設置泥水處理設備，故不常使用。將以近年使用較為廣泛的土壓平衡式潛盾機為分析之主流，進行討論。

3.3 以雙曲線模式模擬沉陷歷時曲線

依據 3.1.2 小節所述之方法，藉由潛盾隧道開挖引致之地表沉陷歷時曲線案例，決定雙曲線參數 a 、 b 。將雙曲線參數 a 、 b 數值代回雙曲線公式 (2.17)。

$$S(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (2.17)$$

繪製於地表沉陷 $S(t)$ 對時間 t 之座標圖上，即可模擬出一條由雙曲線模式推估之地表沉陷歷時曲線。將潛盾案例監測之地表沉陷歷時曲線，一併繪入圖中相互比較，結果如圖 3-5 至圖 3-7 所示。

以 3.1.2 小節所述之案例，說明如何以雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線。

舉圖 3-5 (e) 為例，本案例代號為 OsC 9，即 Open shield in the soft clay。為英國 Haycroft 的衛生下水道潛盾工程，監測陣列 C 的地表沉陷歷時曲線監測數據 (Attewell et al., 1986)。隧道直徑 3.0 m，隧道中心深度 6.5 m，採用壓氣工法。雙曲線參數 a 為 0.1263，雙曲線參數 b 為 0.0103，將參數代回雙曲線公式 (2.17)，結果如圖 3-5 (e) 所示。圖中顯示本案例監測點之初始沉陷速率略快於雙曲線模式，隨後即與雙曲線模式吻合，推測與開挖土層為軟弱黏土層有關。圖 3-5 (a) 至圖 3-5 (e) 為以雙曲線模式模擬開放式潛盾機，在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線，圖中顯示大部分案例皆與雙曲線模式吻合良好。

舉圖 3-6 (b) 為例，本案例代號為 SS 13，即 Slurry shield in the sand。為台北捷運系統 CH218 標，監測點 SM583 的地表沉陷歷時曲線監測數據 (Song, 1995)。隧道直徑 6.05 m，隧道中心深度 12.0 m，採用灌漿工法。雙曲線參數 a 為 0.4269，雙曲線參數 b 為 0.0368。將參數代回雙曲線公式 (2.17)，結果如圖 3-6 (b) 所示，圖中顯示本案例監測點與雙曲線模式吻合良好。圖 3-6 (a) 至圖 3-6 (f) 為以雙曲線模式模擬泥水加壓式潛盾機，在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線，圖中顯示大部分案例皆與雙曲線模式吻合。惟案例 SC 24 模擬差距較大，將於 4.2.2 依據案例加以說明。

舉圖 3-7 (b) 為例，本案例代號為 ES 26，即 EPB shield in the sand。為愛爾蘭 Limerick 市下水道的船塢路隧道 (Dock Road Tunnel)，監測點 TA18 的地表沉陷歷時曲線監測數據 (Tonkin, 2005)。隧道直徑 2.82 m，隧道中心深度 11.0 m，採用灌漿工法。雙曲線參數 a 為 0.1031，雙曲線參數 b 為 0.0207。將參數代回雙曲線公式 (2.17)，結果如圖 3-7 (b) 所示，圖中顯示本案例監測點與雙曲線模式吻合良好。圖 3-7 (a) 至圖 3-7 (f) 為以雙曲線模式模擬土壓平衡式潛盾機，在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線，圖中顯示大部分案例皆與雙曲線模式吻合良好。

由圖 3-5 至圖 3-7 可以看出，對不同的潛盾機型式、不同的土壤狀況與使用

輔助工法與否，潛盾隧道中心線上方之地表沉陷歷時曲線，皆可使用雙曲線模式加以描述，本研究依據現地監測資料，驗證了以雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線的可行性。

藉由雙曲線模式模擬地表沉陷歷時曲線，雙曲線參數 a 、 b 即為地表沉陷歷時曲線之控制變因，而沉陷機制行為與施工採用之潛盾機型式、開挖土層種類、使用之輔助工法、開挖深度及潛盾機直徑等因素相關。本研究將依據所蒐集的 198 筆潛盾案例，潛盾機型式、開挖土層種類、是否採用輔助工法，建立與雙曲線參數 a 、 b 的關係，作為預估地表沉陷歷時曲線的基礎。

3.4 初始沉陷速率 $1/a$ 建議表

本研究所蒐集之潛盾施工案例，僅針對 1980 年之後的國內外各潛盾隧道工程案例，即僅分析近三十年發展世界各國之監測資料，共有 198 筆資料。藉由 3.1.2 小節如何決定雙曲線參數 a 及 b 之方法，取得雙曲線參數 a 為 92 筆。其案例資料依照潛盾機型式與土層狀況分類，依文獻年代順序依序排下，見表 3-1 至表 3-9。

將 92 筆雙曲線參數 a 依施工使用潛盾機型式、開挖土層種類與輔助工法使用與否予以分類，製作成為一表格。施工使用之潛盾機型式分為 3 類：分別為土壓平衡式、泥水加壓式與開放式。開挖土層分為 3 類：砂土層、黏土層及軟弱黏土層；以及是否使用輔助工法。本表格為雙曲線參數 a 值建議表，如表 3-10 所示。表格中雙曲線參數 a 值範圍乃採取多組案例 a 值之平均值加減一個標準誤差 (Standard deviation) 所得。並將兩個標準誤差以外之 a 值案例予以刪除，避免因個別案例施工品質不良影響 a 值範圍，故雙曲線參數 a 值建議表內所評估之案例為 75 筆。

依 3.1.3 小節所述，雙曲線參數 $1/a$ 之物理意義為當潛盾機盾首通過測點第一天，潛盾隧道中心線上方所造成之地表沉陷量，公制單位為 (mm/day)，即代

表潛盾隧道開挖造成地表的初始沉陷速率。將所蒐集 92 筆雙曲線參數 a 案例，取其倒數為 $1/a$ ，依照雙曲線參數 a 值建議表之格式，建立初始沉陷速率 $1/a$ 建議表，如表 3-11 所示。初始沉陷速率 $1/a$ 建議表中顯示，在不同潛盾機型式、開挖土層種類與採用輔助工法與否下，有各自的 $1/a$ 範圍，代表有各自相對應的地表初使沉陷速率，以下將對此進行分析及討論。

3.4.1 潛盾機型式對初始沉陷速率 $1/a$ 之影響

初始沉陷速率 $1/a$ 建議表中，土壓平衡式與泥水加壓式潛盾機在不採用輔助工法下，開挖三種土層初始沉陷速率之比較。泥水加壓式在砂土層開挖的初始沉陷速率為 16.67 mm/day，土壓平衡式為 16.67 ± 8.33 mm/day。泥水加壓式在黏土層開挖的初始沉陷速率為 1.45 ± 0.17 mm/day，土壓平衡式為 7.73 ± 3.38 mm/day。泥水加壓式在軟弱黏土層開挖的初始沉陷速率為 7.57 ± 4.93 mm/day，土壓平衡式為 20 ± 13.33 mm/day。從數據中顯示，泥水加壓式潛盾機在黏土層與軟弱黏土層內開挖，所造成之沉陷速率均遠小於土壓平衡式。其原因應與泥水加壓式潛盾機開挖時，使用皂土等材料穩定地層間之空隙，造成變形沉陷較小。

在採用輔助工法的砂土層開挖下，三種潛盾機的比較。開放式潛盾機的初始沉陷速率為 11.72 ± 8.28 mm/day，泥水加壓式為 1.80 ± 0.53 mm/day，土壓平衡式潛盾機為 15 ± 10 mm/day。從數據中顯示，泥水加壓式潛盾機在採用輔助工法的砂土層開挖下，第一天所造成之地表沉陷僅為 1.8 mm，對土層造成變形沉陷為最小，適用於須高度保護建物之潛盾工程。開放式潛盾機的初始沉陷速率則略小於土壓平衡式。

3.4.2 開挖土層種類對初始沉陷速率 $1/a$ 之影響

初始沉陷速率 $1/a$ 建議表中，土壓平衡式潛盾機在不採用輔助工法下，三種土層開挖之比較。砂土層之初始沉陷速率為 16.67 ± 8.33 mm/day，黏土層為 7.73

± 3.38 mm/day，軟弱黏土層為 20 ± 13.33 mm/day。從數據中顯示，初始沉陷速率快慢依次為，軟弱黏土層、砂土層、黏土層。在土壓平衡式潛盾機採用輔助工法下，在砂土層與黏土層開挖之比較。砂土層仍快於黏土層。由此可知土壓平衡式潛盾機於黏土層開挖，造成之地表初始沉陷速率為最小。

在泥水加壓式潛盾機不採用輔助工法下，三種土層開挖之比較。砂土層內之初始沉陷速率為 16.67 mm/day，黏土層為 1.45 ± 0.17 mm/day，軟弱黏土層為 7.57 ± 4.93 mm/day。可得在泥水加壓式之初始沉陷速率快慢依次為，砂土層、軟弱黏土層、黏土層。數據中顯示，泥水加壓式潛盾機在凝聚性土層中開挖造成之初始沉陷速率遠小於在非凝聚性土層中開挖。

在開放式潛盾機採用輔助工法下，砂土層與軟弱黏土層之比較，由數據可得知砂土層之初始沉陷速率大於軟弱黏土層。由於開放式潛盾機多採用壓氣工法予以輔助，可推得壓氣工法在凝聚性土層中，抑制初始沉陷速率效果較為良好。

由以上之結果得知，在非凝聚性土層中開挖之初始沉陷速率比在凝聚性土層中開挖來的快，且在凝聚性土層中隨土層強度越弱，初始沉陷速率越快。

隨著潛盾機開挖通過測點，非凝聚性土層因土層滲透性較高，潛盾機通過擾動土層所造成之超額孔隙水壓消散較快，所以初始沉陷速率偏大、較快；反之，初始沉陷速率偏小、較慢，則為在凝聚性土層開挖之情況；而隨土層強度越低，土層受擾動產生壓密沉陷量將會越大。上述土壤的基本特性與案例分析結果相符。

3.4.3 輔助工法對初始沉陷速率 l/a 之影響

初始沉陷速率 l/a 建議表中，土壓平衡式潛盾機在砂土層與黏土層中開挖，輔助工法採用與否之比較。在砂土層中不採用輔助工法的初始沉陷速率為 16.67 ± 8.33 mm/day，採用輔助工法為 15 ± 10 mm/day。在黏土層中不採用輔助工法為 7.73 ± 3.38 mm/day，採用輔助工法為 2.30 ± 1.15 mm/day。可得知土壓平衡

式潛盾機在採用輔助工法下，可降低開挖造成之地表初始沉陷速率。

在泥水加壓式潛盾機於砂土層內開挖，輔助工法採用與否之比較。在砂土層中不採用輔助工法的初始沉陷速率為 16.67 mm/day，採用輔助工法為 1.8 ± 0.53 mm/day。由數據中顯示，泥水加壓式潛盾機採用輔助工法下，可大幅降低開挖造成之初始沉陷速率，同於土壓平衡式。此結果證明輔助工法確實有降低初始沉陷速率之功效。

3.5 地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表

本研究所蒐集之潛盾施工案例，僅針對 1980 年之後的國內外各潛盾隧道工程案例，即僅分析近三十年發展世界各國之監測資料，共有 198 筆資料。藉由 3.1.2 小節如何決定雙曲線參數 a 及 b 之方法，以及雙曲線參數 $1/b$ 之物理意義為地表最大沉陷量 S_{max} ，取得雙曲線參數 b 為 198 筆。其案例資料依照潛盾機型式與土層狀況分類，依文獻年代順序依序排下，見表 3-1 至表 3-9。

將 198 筆雙曲線參數 b 依照雙曲線參數 a 值建議表之格式，將案例製作成為一表格。本表格為雙曲線參數 b 值建議表，如表 3-12 所示。表格中雙曲線參數 b 值範圍乃採取多組案例 b 值之平均值加減一個標準誤差 (Standard deviation) 所得。並將兩個標準誤差以外與五筆案例以下之 b 值案例刪除，避免因個別案例施工品質不良影響 b 值範圍，故雙曲線參數 b 值建議表內所評估之案例為 167 筆。

將所蒐集 198 筆雙曲線參數 b 案例，取其倒數為 $1/b$ ，依照雙曲線參數 b 值建議表之格式，建立地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表，如表 3-13 所示。地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表中顯示，在不同潛盾機型式、開挖土層種類與採用輔助工法與否下，有各自相對應的 S_{max} 範圍。以下將對此進行分析及討論。

3.5.1 潛盾機型式對地表最大沉陷量 S_{max} 之影響

地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表中，在不採用輔助工法於砂土層內開挖，土

壓平衡式潛盾機與泥水加壓式之比較。土壓平衡式潛盾機的地表最大沉陷量為 23 ± 13 mm，泥水加壓式為 14 ± 7 mm。以及在不採用輔助工法於黏土層內開挖，三種潛盾機之比較。由數據得知，泥水加壓式潛盾機所引致之地表最大沉陷量為最小。探討其原因應於其開挖方式使用皂土等材料穩定地層間之空隙，造成變形沉陷較小有關。

在採用輔助工法於砂土層與黏土層內開挖下，土壓平衡式與開放式潛盾機之比較。土壓平衡式潛盾機於砂土層的地表最大沉陷量為 43 ± 15 mm，開放式為 22 ± 11 mm。土壓平衡式於黏土層內為 30 ± 3 mm，開放式為 31 ± 13 mm。由數據得知，開放式潛盾機於砂土層中，採用輔助工法將可以有效地抑制沉陷量，但其工法因常採壓氣工法輔助，易對施工人員之健康造成損害，近年已不再使用。

3.5.2 開挖土層種類對地表最大沉陷量 S_{max} 之影響

地表最大沉陷量 $S_{max}=l/b$ 建議表中，土壓平衡式潛盾機在不採用輔助工法開挖下，三種開挖土層之比較。砂土層的地表最大沉陷量為 23 ± 13 mm，黏土層為 22 ± 9 mm，軟弱黏土層為 37 ± 11 mm。數據中顯示，土壓平衡式潛盾機在軟弱黏土層內開挖，造成之地表最大沉陷量為最大。推測原因應為土壓平衡式潛盾機在開挖推進時，造成隧道周圍之軟弱黏土層擾動，產生壓密沉陷有關。

在開放式潛盾機採用輔助工法下，三種開挖土層之比較。砂土層的地表最大沉陷量為 22 ± 11 mm，黏土層為 31 ± 13 mm，軟弱黏土層為 84 ± 28 mm。數據中顯示，開放式潛盾機在軟弱黏土層內開挖，造成之地表最大沉陷量為最大，與土壓平衡式之結果相同。由此結果得知，於軟弱黏土層內開挖，所造成之地表最大沉陷量為最大。

3.5.3 輔助工法對地表最大沉陷量 S_{max} 之影響

地表最大沉陷量 $S_{max}=l/b$ 建議表中，土壓平衡式潛盾機於砂土層與黏土層開

挖，輔助工法採用與否之比較。不採用輔助工法於砂土層內之地表最大沉陷量為 23 ± 13 mm，黏土層為 22 ± 9 mm。採用輔助工法在砂土層內之地表最大沉陷量為 43 ± 15 mm，黏土層為 30 ± 3 mm。從數據中顯示，採取輔助工法所造成之地表最大沉陷量之案例均大於未使用之案例。此現象推測原因應為採用輔助工法的潛盾隧道工程，多是在惡劣的施工條件下進行，故採用輔助工法已降低了開挖隧道所造成之沉陷量，但仍大於一般不需採用輔助工法的潛盾隧道工程。

在開放式潛盾機不採用輔助工法，於黏土層內開挖，其結果與上述相同。

3.5.4 地表最大沉陷量 $S_{max}=l/b$ 建議表之比較

Fujita 蒐集自 1965 年至 1982 年，日本國內 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 2-5 及表 2-6 所示。本研究為蒐集自 1980 年至 2008 年，發表自國內外世界各國 167 筆潛盾隧道施工案例之現地監測資料，建立地表最大沉陷量 $S_{max}=l/b$ 建議表，如表 3-12。

本研究建議表的潛盾資料年代為銜接 Fujita 之建議表，考慮 Fujita 建議表內各種條件下所蒐集之案例，普遍不多。本研究為求預估準確性，將案例少於五例者以及 S_{max} 範圍超過兩個標準誤差之案例，給予刪除。本研究並增加近年來使用較為頻繁之土壓平衡式潛盾機案例，包括採用輔助工法之案例，彌補 Fujita 建議表內所不足，提供學者或施工單位作為評估參考依據。

將本研究建立之地表最大沉陷量 $S_{max}=l/b$ 建議表與 Fujita 之地表最大沉陷量 S_{max} 建議表相比，把兩表之 S_{max} 相差值除以 Fujita 建議表之 S_{max} ，得本建議表與 Fujiat 建議表之相差百分比，如表 3-14 所示。可以得知潛盾隧道施工造成之地表最大沉陷量 S_{max} 在開放式潛盾機中平均小 61%、泥水式潛盾機 83% 了、土壓平衡式 69%，可以見得近年來潛盾機、隧道施工與輔助工法之進步與成熟。

第四章

以雙曲線模式檢核地表沉陷歷時曲線

本章利用蒐集自國內外已完成的，潛盾隧道施工引致隧道中心線地表沉陷歷時曲線資料，採用第三章雙曲線模式所歸納出之雙曲線參數 a 、 b 建議表，推估地表沉陷歷時雙曲線，評估所建議雙曲線模式於預估潛盾隧道施工造成沉陷歷時曲線之適用性。

本章內容共分為三節。第一節為評估範例，藉此詳細說明預估方法之應用。第二節介紹世界各國共 45 個不同型式潛盾機於不同土層開挖造成之沉陷歷時曲線與預估曲線之比較。第三節指出本研究建議評估方法的優點與限制。

4.1 評估範例



本節為利用第三章建議之雙曲線參數 a 建議表（表 3-10），及雙曲線參數 b 建議表（表 3-12），以雙曲線模式評估愛爾蘭 Limerick 市的 Dock Road Tunnel 潛盾隧道施工下水道案例，測點標號 TA26（Tonkin, 2005）測得之沉陷歷時關係。評估步驟條例說明如下：

《評估範例》

案例編號：ES 31

案例名稱：Limerick Drainage Scheme, Dock Road Tunnel TA26 in Ireland.

隧道中心線深度 Z ：11.0 m

隧道直徑 $2R$ ：2.82 m

潛盾機型式：土壓平衡式潛盾機（EPB）

開挖土壤種類：砂土層

使用之輔助工法：灌漿工法

《評估步驟》

- (1) 依據雙曲線參數 a 建議表 (表 3-10)，找出使用之潛盾機型式 (土壓平衡式潛盾機)，開挖土層條件 (砂土層) 與採用輔助工法的參數 a 值範圍，為 0.12 ± 0.08 day/mm，可推求出 a 值之上下限分別為 $a_{max} = 0.20$ day/mm 及 $a_{min} = 0.04$ day/mm。
- (2) 根據潛盾機型式、開挖土層與輔助工法，由雙曲線參數 b 之建議表 (表 3-12)，找出 b 值範圍為 0.03 ± 0.01 1/mm，得 $b_{max} = 0.04$ 1/mm 與 $b_{min} = 0.02$ 1/mm。
- (3) 搭配 (a_{max} 值與 b_{max} 值) 及 (a_{min} 值與 b_{min} 值) 代入雙曲線模式 (2.17)，分別繪圖求出地表沉陷歷時曲線的最大值與最小值，代表預估值之上下限，如圖 4-1 所示。
- (4) 將案例所監測之沉陷時間資料，一併繪入圖中，如圖 4-1 所示。

圖中的結果顯示，案例測得之地表沉陷值，均座落於雙曲線上下限的範圍內，可以看出該潛盾隧道施工品質控制符合預期。此潛盾工程在砂土層開挖，使用化學灌漿工法加以輔助，有達到預期之效果。由監測沉陷值可發現，在 70 天後沉陷量仍有著些許增加，建議應加長監測時間，以探討地盤長期沉陷行為。

4.2 潛盾隧道施工案例之沉陷時間關係評估

藉由雙曲線模式，本研究 4.1 小節介紹如何估算地表沉陷歷時曲線的最大值與最小值，以評估國內外潛盾工程造成之地表沉陷。本節將依潛盾機型式分類，探討國內外 45 個施工案例造成之沉陷行為。在所蒐集的案例中，開放式與泥水加壓式潛盾機現在較少被採用，其案例只占全部案例之兩成，近年國內外潛盾隧道施工，以土壓平衡式潛盾機為施工機具之主流。

4.2.1 開放式潛盾機

在潛盾機盾殼之保護下，開放式潛盾機為以人工或機械至開挖面進行挖掘，開挖面呈開放狀態，以半月型、面型千斤頂為主要擋土措施，較適用於自立性高之地盤、硬質黏土及緊密砂層，常須配合壓氣、抽水、灌漿等輔助工法。本文所評估之案例共 5 筆，分別為台北市、埃及開羅與英國的下水道案例。採用開放式潛盾機的 5 個案例，皆使用壓氣工法輔助，以下依圖 4-2 (b) 案例 OS 9 為例，進行分析討論。

OS 代表開放式潛盾機 (Open shield) 於砂土層 (sand) 開挖。本監測案例為埃及開羅 (Cairo) 的下水道開挖 (EI-Nahas et al., 1991)，隧道直徑 5.15 m，隧道中心深度 14 m，開挖土層屬於地下水位以下的尼羅河粉土質砂沖積層 (alluvial Nile silty sand)。隧道施工採取壓氣工法，配合襯砌支撐與背填灌漿加以輔助。圖 4-2 (b) 顯示，實測之地表沉陷值皆座落於雙曲線預估範圍內偏上方。以開放式潛盾機施工而言，施工單位將地表沉陷量控制的符合預期，推測這與本案例施工年代 (1991) 較新，施工品質較佳有關。圖 4-2 (a) 至 (e) 所顯示之 5 個案例，大部份沉陷資料皆落於預測範圍之內。

4.2.2 泥水式潛盾機

泥水加壓式潛盾機為密閉式潛盾機，利用比重大、黏性高之白皂土等材料作成泥水，以填充地層中之間隙而達安定之效果。並以流體運輸方式用淡水將開挖地盤之土渣排出，適用儲水性砂層、砂礫層水壓較高之地層。開挖時依地質狀況調整泥水比重及壓力，可精確的控制開挖土量。由於作用之泥水壓幾乎未改變原有地盤構造，故其開挖造成地盤變形沉陷現象最小，對輔助工法的需要性最低。

所評估之 4 筆案例，分別為英國衛生下水道、日本東京下水道及法國地鐵隧道，4 個案例皆未使用輔助工法。由圖 4-3 (a) 至 (d) 可以看出，除了圖 4-2 (b) 案例 SS 2 外，其它案例之實測沉陷值皆落於評估區間之外，且沉陷量有大

有小，缺乏規律性。歸咎其原因應為以泥水式潛盾機施工之案例數太少，樣本空間太小，使評估範圍不能精準所致。以下對圖 4-3 (d) 之案例 SC 24 進行討論。

SC 代表泥水式 (Slurry) 潛盾機於黏土層 (clay) 開挖。本案例為法國 Lyon-Vaise sector 的地下鐵隧道工程，監測點標號為 EX31 (Dias and Kastner, 2000)，捷運隧道直徑 6.27 m，隧道中心深度 13.6 m，開挖土層灰色黏土為 (Grey clay)，使用背填灌漿填滿襯砌與土層間的空隙。如圖 4-3 (d)，圖中可以發現此案例泥水式潛盾機開挖隧道造成之施工品質相當良好，沉陷量僅在 2 mm 左右，但其監測時間只維持 8 天，應僅為短期地表沉陷。圖 4-3 (a) 至 (d) 之監測期限僅 7 天至 33 天，缺乏長期沉陷監測資料。

4.2.3 土壓平衡式潛盾機

土壓平衡式潛盾機為密閉式潛盾機，運用切刀盤之切削齒掘削地層，以貫穿隔板之螺旋輸送機，將開挖壤排出。潛盾機掘進時須使開挖面內側與外側之土壓及水壓保持平衡。砂、砂礫層及其互層均可適用土壓平衡式潛盾機，原則上不需要以輔助工法維持開挖面之自立性。土壓平衡式潛盾機開挖隧道之案例甚多，本節將對三種被開挖土層分別討論。

4.2.3.1 土壓平衡式潛盾機開挖砂土層

土壓平衡式潛盾機在砂土層內開挖造成之沉陷時間，評估案例為 12 筆，分別如圖 4-4 (a) 至 (l) 所示，其中包含台北捷運、愛爾蘭下水道及高雄捷運的案例，以下依圖 4-4 (e) 案例 ES 26 為例討論。

ES 代表土壓平衡式 (Earth-pressure-balance) 潛盾機於砂土層 (sand) 開挖。本監測案例為愛爾蘭 Limerick 市下水道的船塢路隧道 (Dock Road Tunnel)，監測點標號 TA18 (Tonkin, 2005)。此工程設立多個監測斷面，分別為案例編號 ES 25 至 ES 31，如圖 4-4 (d) 至 (j)。隧道直徑為 2.82 m，隧道中心深度 11 m，由

於開挖土層為砂土層，滲透係數較大，故在開挖前施工單位先以灌漿工法將皂土漿及水泥漿灌入開挖土層，改良地盤，阻止地下水壓力入侵。施工單位進行局部的降水工法，並同時監測水壓與地表沉陷值。圖 4-4 (e) 顯示，實測地表沉陷歷時曲線恰好落在預估區間之中，雖在潛盾機到達測陣時造成些許的地盤隆起，但此工程施工造成之沉陷控制仍在水準之上。圖 4-4 (a) 至 (l)，實測沉陷值與預估沉陷範圍大致符合良好。

4.2.3.2 土壓平衡式潛盾機開挖黏土層

土壓平衡式潛盾機在黏土層內施工案例共 12 筆，分別如圖 4-5 (a) 至 (l) 所示，其中包含日本下水道、台北捷運及舊金山捷運的案例，以下依圖 4-5 (l) 之案例 EC 27 為例討論。

EC 代表土壓平衡式潛盾機於黏土層開挖。本監測案例為在日本東京的江東區 (Koto-ku) 所做的現地監測試驗 Case C (Komiya et al., 2001)，隧道直徑 3.0 m，隧道中心深度 14.3 m。實驗目的為在潛盾隧道頂拱上方附近進行灌漿，形成一保護層，以減少地表沉陷，並於地表與深層安裝監測儀器測陣讀取地表及深層沉陷值。案例 EC 25 至 EC 27 分別顯示不同型式灌漿造成之地表沉陷情形。本例 EC 27 為在離隧道頂拱上方 2 m 處注入水泥漿，在隧道上方形成一個內角夾 135 度、厚度 2 m 的扇形水泥保護層，開挖土層為高塑性、不排水剪力強度高的沖積黏土層。圖 4-5 (l) 顯示，在土壓平衡式潛盾機盾首到達測點時造成地表隆起，且實測沉陷值的初始沉陷速率發生時間較評估曲線略晚，推測其原因可能因為水泥改良土保護層的阻滯，使初始沉陷延緩發生，實測中長期沉陷量仍位於預估範圍內。

4.2.3.3 土壓平衡式潛盾機開挖軟弱黏土層

土壓平衡式潛盾機在軟弱黏土層中開挖造成的地表沉陷，如圖 4-6 (a) 至 (l)，大部分案例來自新加坡捷運工程、東京地鐵、美國密爾瓦基下水道、台北

捷運及上海地鐵，以下以圖 4-6 (d) 之案例 EsC 7 為例討論。

EsC 代表土壓平衡式潛盾機於軟弱黏土層開挖。本監測案例是新加坡捷運工程 C301B 區段標的西線 (Shirlaw and Copsey, 1987)，隧道直徑 5.3 m，隧道中心深度 18.9 m。開挖土層為新加坡軟弱海積黏土 (Singapore marine clay)，此黏土因長期處於海面以下，易受到擾動而產生大量壓密沉陷。該區段標使用土壓平衡式潛盾機開挖，比起其他區段標使用開放式潛盾機與新奧工法開挖隧道，此區段標使用密閉式潛盾機施工，不需藉由輔助工法來穩定地盤。將雙曲線評估模式加入沉陷監測值，其結果如圖 4-6 (d)，圖中可以看出地表沉陷量均落於預估的範圍中，大約在潛盾機盾首通過監測斷面 10 天後，沉陷量就漸趨於穩定。因為本案例潛盾西線為第一條施工隧道，本文僅討論單一隧道引致之地表沉陷歷時曲線，在 30 天後為東線潛盾隧道推進開挖，將不列入本文討論範圍。圖 4-6 (a) 至 (l)，現地測得之地表沉陷值大部份皆落於雙曲線模式預估之沉陷範圍內。

4.3 評估方法之優點與限制

以本研究方法評估潛盾施工所引致之地表沉陷歷時曲線時，大地工程師必須先充分了解此方法之優缺點，才能適切地使用此方法。以下列出本研究建議雙曲線模式經驗方法之各項優缺點：

一、優點：

- (1) 評估結果具實用性：潛盾機型式、地質條件、輔助工法及施工品質等皆為潛盾工程之重要因素，但均難以量化分析。本方法依據世界各國已完成之隧道工程現地監測沉陷行為作為分析基礎，因此，此經驗方法頗具使用價值。
- (2) 估算過程簡單：只需依建議表格，輸入簡單的參數 a 及 b ，即可迅速地計算得地表沉陷歷時範圍。此經驗方法操作容易、快速，不需複雜軟體及設備，一般個人電腦即可執行。

- (3) 使用範圍廣：對於尚未開挖之潛盾隧道工程，預估之沉陷對時間的關係可於工程前列為施工品質標準；已竣工者，則可用於評估其施工品質優劣。
- (4) 考慮多種因素之影響：此經驗方法可清楚的顯示不同潛盾機型、土層種類及輔助工法對地表沉陷之影響。
- (5) 未來仍可使用：隨施工機具與技術進步，施工造成之沉陷速率及終極地表沉陷量可能日趨減縮，未來可再蒐集更多實測資料，進行本方法 a 及 b 參數之修正及更新。

二、限制：

- (1) 本經驗方法僅能考慮潛盾機開挖單一土層，對於開挖多層土壤則無法評估。
- (2) 本方法僅能評估隧道開挖是否使用輔助工法，無法針對各類不同之輔助工法（例如壓氣工法、灌漿工法和降水工法等）效果做評估。
- (3) 本方法並未考慮土層強度（例如凝聚力 c 、內摩擦角 ϕ ）之影響。
- (4) 本方法並未對潛盾隧道本身直徑、覆土深度等因素進行討論。



第五章

以經驗方法檢核潛盾隧道 施工引致之深層沉陷

潛盾隧道施工引致的地盤變位，可能造成地表下衛生下水道、瓦斯管線、自來水管及結構基礎等地下結構物之損害，因此有其必要性探討潛盾施工所引致的深層沉陷。O'Reilly and New (1982) 及 Mair et al. (1993) 提議深層沉陷亦可以 Peck (1969) 建議之常態分佈曲線加以描述，本章提出一經驗方法，預估單一潛盾隧道施工引致的深層沉陷。此經驗法乃是蒐集國內外已施工完成的潛盾隧道監測資料，建立地表沉陷和深層沉陷之關係，求得某一深度 z 之深層常態分佈沉陷槽參數 i_z 及 $S_{max,z}$ ，可容易且正確的預估潛盾施工所引致的深層沉陷槽。

本章的內容共分成六節。第一節介紹此經驗方法之常態分佈曲線基本原理與案例蒐集。第二節介紹如何求得深層沉陷槽參數 i_z 及 $S_{max,z}$ 。第三節說明以經驗方法預估深層沉陷槽之範例。第四節為以 O'Reilly and New 及 Mair et al. 之方法決定參數 i_z 。第五節引用潛盾隧道施工實例深層沉陷驗證所建議之經驗方法。第六節詳述此經驗法的各項優缺點。

5.1 經驗方法介紹與案例蒐集

5.1.1 常態分佈之深層沉陷槽

本研究建議以 Peck (1969) 所建議之常態分佈曲線來描述潛盾隧道施工引致之深層沉陷。為便於說明單一潛盾隧道開挖造成之隧道上方之深層沉陷，參照圖 5-1，本研究先將相關重要參數定義如下：

R ：隧道開挖面半徑

z ：深層沉陷槽深度

Z_0 ：隧道中心線深度

T ：地表到隧道頂拱（crown）的深度

i_s ：隧道中心線到地表沉陷曲線反曲點的水平距離

i_z ：深度為 z 處，隧道中心線到深層沉陷曲線反曲點的水平距離

$S_{max,s}$ ：地表最大沉陷量

$S_{max,z}$ ：距隧道中心線正上方深度為 z 處的最大沈陷量

本研究所建議之經驗方法，主要以 Peck（1969）建議的常態分佈曲線式為依據，描述地表及深層沉陷槽。

地表沉陷槽：
$$S_{(0,y)} = S_{max,s} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i_s^2}\right) \quad (2.2)$$

深層沉陷槽：
$$S_{(z,y)} = S_{max,z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i_z^2}\right) \quad (2.19)$$

式中，

$S_{(0,y)}$ ：距隧道中心線水平距離 y 處，地表沈陷量

$S_{(z,y)}$ ：距隧道中心線水平距離 y 處，深度為 z 處的沈陷量

本研究以墨西哥市中央截流隧道（Mexico City Central Interceptor Tunnel）潛盾施工所獲之現地監測數據（Schmitter et al., 1981）驗證常態分佈函數的可行性。如表 5.1 之案例 6 所示，本工程採用開放式潛盾機進行開挖，隧道直徑 3.5 m，隧道中心深度 23.5 m，開挖土壤為粉土質黏土。圖 5-1 以常態分佈曲線式（2.19）來模擬本工程地表與地下 6 m 處的沉陷監測值，圖中資料顯示常態分佈曲線的確可以用來描述地表與深層沉陷槽。（2.19）式中用來描述深層沉陷槽的沉陷槽寬度參數 i_z 與深層最大沉陷量 $S_{max,z}$ 的求法將在 5.2 節加以說明。

5.1.2 沉陷槽寬度參數 i 與最大沉陷量 S_{max} 之求法

O'Reilly and New (1982) 指出沉陷槽的寬度參數 i_z 隨深度的增加而減小，隧道中心線上方的最大沉陷量 $S_{max,z}$ 隨深度的增加而增大，如圖 5-1 所示。本經驗方法將建立地表沉陷槽與深層沉陷槽的關係，求取深層沉陷槽之重要參數 i_z 與 $S_{max,z}$ 。

對於沉陷槽寬度參數 i 值之計算，依據 Peck (1969) 建議的常態分佈曲線式 (2.2)，對其等號兩側取自然對數，經整理之後可得下式：

$$\ln S = \left(-\frac{1}{2i^2} \right) \cdot y^2 + \ln S_{max} \quad (5.1)$$

若將沉陷資料繪於以 $\ln S$ 為縱軸，以 y^2 為橫軸之圖上，則式 (5.1) 成為 $\ln S$ 與 y^2 的斜截式，如圖 5-2 所示， $\ln S_{max}$ 代表截距， $-1/2i^2$ 為斜率。

將潛盾隧道工程沉陷監測陣，各監測斷面測得之地表與深層的沉陷監測值代入圖 5-2，經線性回歸分析，可得直線之斜率 $-1/2i^2$ ，求得該斷面地表及深層沉陷槽寬度參數 i_s 與 i_z 。

隧道中心線上方地表最大沉陷量 $S_{max,s}$ ，可直接從監測案例中的水準測量，測得地表最大沉陷量 $S_{max,s}$ 。對於地表下於不同深度之最大沉陷量 $S_{max,z}$ ，則是利用現地埋設的伸縮儀或傾斜管內的磁性環等儀器於現地測得。

5.1.3 國內外深層沉陷案例蒐集

本研究蒐集從 1974 年至 2004 年國內外已完成之潛盾隧道施工引致之深層沉陷監測資料，整理案例位置、土層狀況、潛盾機型式、隧道深度、隧道半徑及不同深度沉陷槽寬度參數 i_z ，如表 5-1。各案例隧道中心線上方不同深度處最大沉陷量 $S_{max,z}$ 整理列於表 5-2。案例編號乃依照文獻發表年代距今由遠而近編排。

由表 5-1 及表 5-2 內潛盾施工案例可以發現，發表在 1981 年以前的文獻，隧道開挖多使用開放式潛盾機，表示開放式潛盾機屬於較傳統式的工法。因為開挖面呈開放式，常須配以壓氣工法穩定土層，但壓氣工法可能對施工人員之健康

造成損害。基於安全的考量，近年來已較少使用。表 5-1 及表 5-2 中之潛盾隧道施工案例，大多為衛生下水道工程或隧道中心深度較淺之案例，推測其原因應為潛盾隧道開挖深度較淺，較易造成地層變位損壞地下結構物及地下管線，因此常於現地埋設伸縮儀或深層沉陷磁性環，密切觀察地表及深層沉陷量以確保工程安全。

表 5-1 及表 5-2 所蒐集之案例，除美國華盛頓的捷運案例(Washington Metro)與台北衛生下水道第 2 段 (Taipei sewerage sec.2) 兩例，潛盾隧道開挖土層為砂土與黏土互層外，大多案例隧道開挖土層均為黏土層，故本研究所建議之經驗方法較適合用於凝聚性土層之深層沉陷預估。

5.2 如何決定深層沉陷槽參數 i_z 及 $S_{max,z}$

深層沉陷槽之寬度參數 i_z 可以三種方法決定：(1)O'Reilly and New 方法；(2) Mair et al.方法；及 (3) Fang and Wu 方法，以下分別加以說明。

5.2.1 O'Reilly and New 方法決定 i_z

O'Reilly and New (1982) 分析已完成的潛盾隧道施工案例，建議依據隧道中心線深度 Z_o 、深層沉陷槽深度 Z ，以下列經驗關係式 (2.21) 及式 (2.22) 來估算深層沉陷槽寬度參數 i_z ：

凝聚性土壤：

$$i_z = 0.43(Z_o - Z) + 1.0 \quad (2.21)$$

非凝聚性土壤：

$$i_z = 0.28(Z_o - Z) - 0.1 \quad (2.22)$$

本研究將表 5-1 及表 5-2 所示之潛盾施工的 16 個深層沉陷監測案例資料，代入 O'Reilly and New (1982) 的模式中，如圖 5-3 所示。

圖 5-3 顯示，對於凝聚性土壤而言，O'Reilly and New 所建議的公式與本研

究所蒐集的深層沉陷槽寬度參數 i_z 符合良好，依此本研究可以下結論，O'Reilly and New 所建議的公式可以用來預估潛盾隧道於凝聚性土壤開挖造成之深層沉陷槽寬度參數 i_z 。因為本研究所蒐集之資料較缺乏於非凝聚土壤開挖潛盾隧道之案例，因此無法判斷 O'Reilly and New 所建議式 (2.22) 之適用性。

5.2.2 Mair et al. 方法決定 i_z

Mair et al. (1993) 根據於倫敦粘土 (London clay) 內的施工案例，加上以離心模型所做試驗的結果，將所得的值繪於 Z/Z_o 和 i_z/Z_o 座標圖中，如圖 2-18 所示。依據圖中的資料，Mair et al. 建議深層沉陷槽參數 i_z/Z_o 與深度 Z 之線性關係如下式 (2.23)：

$$\frac{i_z}{Z_o} = 0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{Z}{Z_o} \right) \quad (2.23)$$

將本研究潛盾施工的深層沉陷監測案例表 5-1 之 i_z 、 Z 及 Z_o 值，代入 Mair et al. (1993) 所建議的 Z/Z_o 和 i_z/Z_o 座標圖中，如圖 5-4 所示。由圖 5-4 可知，本研究所蒐集之案例 i_z 參數與 Mair et al. 所建議的公式 (2.23) 符合良好，只是案例資料頗為分散。依此研究可以下結論，Mair et al. 所建議的公式 (2.23) 也可以用來預估潛盾隧道施工造成深層沉陷槽的寬度參數 i_z 。

5.2.3 Fang and Wu 方法決定 i_z 及 $S_{max,z}$

本研究依據潛盾施工造成的深層沉陷監測資料表 5-1 及表 5-2，建立地表沉陷槽參數 i_s 、 $S_{max,s}$ 與深層沉陷槽參數 i_z 、 $S_{max,z}$ 的經驗關係，如圖 5-1 所示。將求出 i_z 及 $S_{max,z}$ 代入常態分佈曲線，即可預估潛盾隧道施工可能引致的深層沉陷槽。

5.2.3.1 建立 i_z 與 i_s 之關係

本節探討深層與地表沉陷槽寬度參數 i_z/i_s 的關係。依據表 5-1 內之深層監測

案例資料，繪於以 i_z/i_s 為縱座標，以 z/T 為橫座標的圖中，如圖 5-5 所示。圖中的案例資料顯示，案例數據皆座落於某一特定區域中，且隨著沉陷槽深度 z 越深，呈現 i_z/i_s 比值越小的趨勢。即代表沉陷槽深度越深，沉陷槽之寬度越窄。本研究將依據圖 5-5 顯示 i_z/i_s 關係，由地表沉陷槽寬度 i_s 推求在地下某一深度處沉陷槽的寬度參數 i_z 。

5.2.3.2 建立 $S_{max,z}$ 與 $S_{max,s}$ 之關係

本節建立深層與地表最大沉陷量的關係。依據表 5-2 之監測案例資料，繪於以 $S_{max,z}/S_{max,s}$ 為橫座標，以 z/T 為縱座標的圖中，如圖 5-6 所示。圖中案例資料顯示，案例數據皆位於某一特定區間，且隨著沉陷槽深度 z 越深， $S_{max,z}/S_{max,s}$ 比值越大的趨勢。即代表沉陷槽深度越深，沉陷槽之最大沉陷量 $S_{max,z}$ 越大。本研究將依據圖 5-6 求出之 $S_{max,z}/S_{max,s}$ 關係，由地表最大沉陷量 $S_{max,s}$ 推求地下某一深度隧道施工造成之深層最大沉陷量 $S_{max,z}$ 。

以常態分佈模式經驗方法推估深層沉陷曲線與案例深層沉陷值之比較，將於 5.4 節依據案例加以說明。必須說明表 5-1 及表 5-2 所列之潛盾隧道施工案例，大部分隧道為開挖凝聚性土層，故本經驗方法較適合預估在凝聚性土層中的潛盾隧道開挖。

5.3 以經驗方法預估深層沉陷槽之範例

為便於讀者了解，本節將詳述以本經驗方法預估已施工完成之潛盾隧道案例。以下以一潛盾隧道案例來說明，深層沉陷的分析過程。

《評估範例》

範例名稱：N.W.A. Sewreage Scheme Tyneside, Hubburn. (Attewell et al., 1975)

隧道直徑 $2R$ ：2.01 m

隧道中心深度 Z_o ：7.5 m

沉陷槽的深度 z : 2.6 m

地表到隧道頂拱 (crown) 的覆土厚度 T : 6.5 m

開挖土壤種類 : clay

地表的沉陷槽寬度參數 i_s : 4.60 m (以圖 5-2 顯示之方法求出 i_s)

隧道中心線上方地表的_{最大}沉陷量 $S_{max,s}$: 7.86 mm (直接測得)

《評估步驟》

- (1) 已知地表到隧道頂拱的覆土層厚度 T 為 6.5 m，所求沉陷槽深度 z 為 2.6 m，計算得 $z/T = 0.4$ 。
- (2) 將所得的 z/T 值，代入由各國案例歸納出圖 5-5 及圖 5-6。查出相對於 $z/T = 0.4$ ，地表與深層沉陷槽參數的關係分別為 $i_z/i_s = 0.60 \sim 0.82$ ， $S_{max,z}/S_{max,s} = 1.13 \sim 1.43$ 。
- (3) 將地表的沉陷槽參數 $i_s = 4.6$ m； $S_{max,s} = 7.86$ mm 代入 $i_z/i_s = 0.60 \sim 0.82$ ， $S_{max,z}/S_{max,s} = 1.13 \sim 1.43$ 。可求得深層沉陷槽參數範圍分別為 $i_z = 2.76 \sim 3.77$ m， $S_{max,z} = 8.88 \sim 11.24$ mm。
- (4) 將所求得 i_z 及 $S_{max,z}$ 值代入常態分佈曲線方程式 (2.19) 中，則由 $(i_z)_{low} = 2.76$ m 及 $(S_{max,z})_{low} = 8.88$ mm 可得到估算較小的深層沉陷曲線，由 $(i_z)_{high} = 3.77$ m 與 $(S_{max,z})_{high} = 11.24$ mm 可估算得到較大的深層沉陷曲線，如圖 5-7 中所示的二條實線。
- (5) 將現地監測的深層沉陷結果繪於圖 5-7 中，圖中顯示監測值均落於預測的範圍內，表示此經驗方法的可行性。

5.4 以不同方法決定參數 i_z

本節將依據英國 N.W.A. Sewreage Scheme Tyneside, Hubburn 案例，討論以下列三種不同方法決定 i_z 參數：(1) O'Reilly and New (1982) 方法，(2) Mair et al. (1993) 方法，及並與 (3) 本經驗方法 (Fang and Wu method) 預估之潛盾隧道

施工造成深層沉陷槽寬度參數 i_z 範圍比較。

第三章述及 O'Reilly and New (1982) 分析已完成的潛盾隧道施工案例，得到下列估算深層沉陷槽寬度參數 i_z 的經驗關係式 (2.21) 及式 (2.22)：

凝聚性土壤：


$$i_z = 0.43(Z_o - Z) + 1.0 \quad (2.21)$$

非凝聚性土壤：

$$i_z = 0.28(Z_o - Z) - 0.1 \quad (2.22)$$

根據案例 Hubburn 之現地監測資料，開挖土層種類為黏土層，隧道中心深度 $Z_o = 7.5$ m，沉陷槽的深度 $Z = 2.6$ m。將上述 Z 及 Z_o 代入經驗式 (2.21)，得到 (1) O'Reilly and New 方法預估深層沉陷槽寬度參數 $i_z = 3.11$ m。

Mair et al. (1993) 根據已完成於倫敦黏土 (London clay) 的潛盾隧道施工案例，加上以離心模型所做試驗的結果，建議正常化 i_z 與深度 Z 之線性關係如下式：


$$\frac{i_z}{Z_o} = 0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{Z}{Z_o} \right) \quad (2.23)$$

根據案例 Hubburn 之現地監測資料，隧道中心深度 $Z_o = 7.5$ m，沉陷槽的深度 $Z = 2.6$ m，得深度正規化 $Z/Z_o = 0.35$ 。將 Z/Z_o 代入 Mair et al. 的經驗式 (2.23)，求得 $i_z/Z_o = 0.39$ 。將此比值乘以隧道中心深度 $Z_o = 7.5$ m，可以得 (2) Mair et al. 方法預估深層沉陷槽寬度參數 $i_z = 2.93$ m。

本論文 5.3 節述及以 (3) 本經驗方法預估深層沉陷槽寬度參數 i_z 的範圍為 2.76~3.77 m。與 O'Reilly and New 經驗公式預估 i_z 值為 3.11 m 以及 Mair et al. 預估 i_z 值為 2.93 m 相比，O'Reilly and New 與 Mair et al. 所預估的 i_z ，皆落於本經驗方法預估的 i_z 參數範圍中，表示本經驗方法的可行性佳。對於尚未施工的潛盾隧道，因缺乏地表沉陷槽參數 i_s ，無法以本經驗方法估深層沉陷槽參數 i_z ，本研究建議可採用 O'Reilly and New 與 Mair et al. 所建議之 i_z 經驗式，估算深層沉陷槽。

5.5 以經驗方法評估深層沉陷案例

以下將已發表的潛盾隧道施工造成之深層沉陷與以本研究法建議經驗法估算之深層沉陷範圍相互比較，以驗證本文所建議經驗方法的可信度。由於國內外文獻對於深層沉陷監測資料較為少見，在此僅以本研究所蒐得之 21 組深層沉陷監測結果，以三種施工潛盾機型式加以討論。

5.5.1 開放式潛盾機造成之深層沉陷

圖 5.8 (a) 至 (j) 顯示，本文所評估之開放式潛盾機開挖隧道造成之深層沉陷案例共 10 筆，其中除了華盛頓捷運系統 (Washington Metro) 開挖土層為砂黏土互層外，其餘案例開挖之土層皆為黏土層。將案例監測獲得之深層沉陷值與以本經驗方法評估之深層沉陷槽範圍相比，結果如圖 5-8 (a) 至圖 5-8 (j) 所示。以下對圖 5-8 (e) 及圖 5-8 (f) 英國 Willington Quay Sewerage 案例進行討論。

Willington Quay Sewerage 案例為位於英國威靈頓的衛生下水道工程，隧道直徑 4.25 m，隧道中心深度 13.37 m (Attewell et al., 1976)。本案例採用開放式潛盾機施工，採用壓氣式輔助工法施工 (壓力 90 kN/m^2)，並分三個時期實施背填灌漿：襯砌環片脫離潛盾機時，施行第一次背填灌漿。潛盾機通過測陣 23 天後，實施第二次背填灌漿。第三次背填灌漿則於氣壓解除之後 (潛盾機通過測陣 71 天) 實施。潛盾機通過測陣 149 天後，地表監測的最大沉陷量為 65 mm。本研究將於深度 z 為 2.75 m 及 8 m 處所得之深層沉陷值與預估的沉陷範圍比較。圖 5-8 (e) 顯示，深度 2.75 m 處的實測沉陷值皆落於預測的範圍內。圖 5-8 (f) 顯示深度 8 m 處，隧道中心線上方的最大沉陷量稍小於預測範圍。圖 5-8 (a) 至圖 5-8 (j) 的 10 組案例顯示，大部分實測深度沉陷資料皆落於預測範圍之內。

5.5.2 泥水式潛盾機造成之深層沉陷

圖 5-9 (a) 至 (f) 顯示本文所評估之泥水式潛盾機開挖隧道造成之深層沉

陷之 6 筆案例，圖中將案例監測所獲之深層沉陷值與本經驗方法評估之深層沉陷槽範圍相比。以下依圖 5-9 (c) 至圖 5-9 (f) 對墨西哥市衛生下水道 A 線及 B 線 (Mexico City Sewer, Line A 及 B) 案例進行討論。

Mexico City Sewer, Line A and B 為墨西哥市東南部的下水道系統工程，隧道直徑 4.0 m，隧道中心線深度 13.0 m (Romo, 1997)。本案例採用泥水式潛盾機開挖隧道。經現地取樣及圓錐貫入試驗 (CPT) 得知開挖土層為極軟弱的黏土層，當隧道襯砌安裝完畢後，潛盾隧道施工採用背填灌漿填滿襯砌與土層間之空隙。本案例監測系統設有地表沉陷釘及傾斜儀 (inclinometer)，監測地表、深層垂直變位與深層的水平變位。本研究將此案例 Line A 及 Line B 深度為 5 m 及 10.15 m 處所測得之深層沉陷值與預估的沉陷範圍比較。圖 5-9 (c) 顯示，Line A 之深度 5 m 處，隧道中心線上方的最大沉陷量稍小於預測範圍；圖 5-9 (d) 顯示深度 10.15 m 處的隧道中心線兩側之沉陷值稍小於預測的範圍。圖 5-9 (e) 顯示，Line B 之深度 5 m 處，實測深層沉陷值落於預測的範圍內；圖 5-9 (f) 顯示深度 10.15 m 處測得的深層沉陷值亦皆落於預測的範圍內。圖 5-9 (a) 至圖 5-9 (f) 所顯示 6 組案例，以泥水式潛盾機開挖隧道所測得之大部分深層沉陷資料皆落於預測範圍之內。

5.5.3 土壓平衡式潛盾機造成之深層沉陷

本文評估土壓平衡式潛盾機施工造成之深層沉陷案例共 5 筆，本研究將案例監測所得之深層沉陷值與本經驗方法評估之深層沉陷範圍相比較，如圖 5-10 (a) 至圖 5-10 (e) 所示。以下依據圖 5-10 (b) 至圖 5-10 (d) 對 Shanghai Furongjiang Sewer 案例資料進行討論。

Shanghai Furongjiang Sewer 為中國上海的芙蓉江下水道工程案例，隧道直徑 4.2 m，隧道中心深度 5.6 m (Yi et al., 1993)。本案例採用土壓平衡式潛盾機施工，潛盾機推進時配合背填灌漿施作，開挖土層為地下水位以下的飽和軟弱黏土層。

本工程隧道開挖鄰近地表 ($Z_0 = 5.6 \text{ m}$)，且開挖土層為飽和軟弱黏土層，隧道開挖極易擾動軟弱土層造成地表與深層沉陷，故施工單位設置水壓計與伸縮儀等監測儀器，並進行地表水準監測。本研究將深度為 0.91 m、1.8 m 及 2.5 m 處所測之得深層沉陷值與預估的沉陷範圍比較。圖 5-10 (b) 顯示，深度為 0.91 m 處隧道中心線的最大沉陷量稍小於預測範圍。圖 5-10 (c) 及圖 5-10 (d) 顯示深度 1.8 m 及 2.5 m 處的沉陷值落於預測的範圍內。圖 5-10 (a) 至圖 5-10 (e) 5 組案例顯示，大部分土壓平衡式潛盾機施工造成之實測深層沉陷資料皆落於預測範圍之內。

基於圖 5-8 至圖 5-10 的 21 組實測深層沉陷資料與經驗方法預測範圍之比較可知，本經驗方法可以用來評估開放式、泥水式及土壓平衡式潛盾機於凝聚性土層中開挖隧道造成之深層沉陷。在此必須加以說明，本經驗方法所建議之深層沉陷槽參數 i_z 及 $S_{max,z}$ (圖 5-4 及圖 5-5)，即依據這些案例所建立，因此實測值與經驗值符合良好，並不令人驚訝。



5.6 經驗方法之優點與限制

本研究介紹一種經驗的方法預測由潛盾隧道施工引致的深層沉陷。土木工程師對於此法的優缺點必須充份的了解，才能更適切的使用此法，以下詳細列出此經驗方法的各項優缺點：

一、優點：

- (1) 結果可靠：本研究以經驗方法所估算的深層沉陷預測值和實際監測值相比較，發現不同深度之深層沉陷監測值大都能落於預測的範圍內。
- (2) 分析過程簡單：只要知道地表的沉陷槽參數 i_s 及 $S_{max,s}$ ，便可藉地表與深層沉陷參數的關係圖，得到地表下某深度的沉陷槽參數 i_z 、 $S_{max,z}$ 。將上述參數代入常態分佈曲線式，即可得深層沉陷預測範圍，不須要複雜的計算。
- (3) 預測範圍為一區域：以經驗的方法預測深層沉陷所得到的預估結果為一區

域，此種結果較其他學者（O'Reilly and New, 1982；Mair et al., 1993）所提出的單一預測曲線，更能描述實際施工造成的深層沉陷行為。

- (4) 未來仍可使用：隨施工機具與技術進步，施工造成之地表及深層沉陷可能日趨減縮，未來可再蒐集更多近年施工實測資料進行本方法之修正及更新。

二、限制：

- (1) 本研究建議的經驗方法採用間接方法，分析地表沉陷槽參數 i_s 及 $S_{max,s}$ ，再藉著地表與深層沉陷參數的關係圖，間接求出深層沉陷槽參數 i_z 與 $S_{max,z}$ ，所幸有現地監測資料來驗證經驗法的預測結果。
- (2) 由於已發表的實測深層沉陷監測資料不夠多，因此 i_z/i_s 的關係圖（圖 5-5）及 $S_{max,z}/S_{max,s}$ 的關係圖（圖 5-6），無法依潛盾機型式、開挖土層及輔助工法加以區分。
- (3) 無法考慮與施工品質有關的施工因素（例如背填灌漿、超挖）對深層沉陷的影響。
- (4) 本經驗方法只能針對垂直方向之土層位移進行預估，對於水平位移及水壓變化等情形，無法預測。

第六章

結論與建議

為評估潛盾隧道施工所引致之地表沉陷歷時曲線與深層沉陷槽，本研究蒐集世界各國潛盾工程案例之沉陷資料並予以整理分析。本研究建議以雙曲線模式預估潛盾隧道施工造成之地表沉陷歷時曲線，並建議以常態分佈曲線來描述潛盾施工造成之深層沉陷槽與經驗公式分別驗證討論，並獲得以下之結論與建議。

6.1 結論

6.1.1 地表沉陷歷時曲線

- (1) 由世界各國案例監測沉陷對時間資料得知，潛盾施工引致隧道中心線正上方之地表沉陷歷時曲線，可以雙曲線關係 $S(t) = \frac{t}{a + bt}$ 加以模擬。
- (2) 本研究整理分析各國潛盾施工監測所獲得之沉陷歷時資料，歸納出初始沉陷速率 $1/a$ 之建議表。參數 $1/a$ 之物理意義為當潛盾機盾首通過測點第一天，潛盾隧道中心線上方所造成之地表沉陷量。
- (3) 由初始沉陷速率 $1/a$ 之建議表得知，在非凝聚性土層中開挖之初使沉陷速率比在凝聚性土層中開挖為快。在凝聚性土層中開挖隧道，隨土層強度越弱，初使沉陷速率越快。
- (4) 由地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表得知，與開放式潛盾機及土壓平衡式潛盾機相比，泥水加壓式潛盾機開挖隧道所引致之 S_{max} 為最小。
- (5) 本研究建立之地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表與 Fujita 建議之地表最大沉陷量 S_{max} 建議表相比，可以得知近年（1980 年至 2008 年）潛盾隧道施工造成之地表最大沉陷量 S_{max} 較過去（1965 年至 1982 年）測得之 S_{max} ，在開放式潛盾機中平均小 61%、泥水式潛盾機 83% 了、土壓平衡式 69%，可見得

近年來潛盾機、隧道施工與輔助工法之進步與成熟。

6.1.2 深層沉陷槽

- (1) 本研究依據現地深層沉陷監測數據驗證，Peck (1969) 建議的常態分佈曲線式可以描述地表及深層沉陷槽。
- (2) 本研究建議深層與地表沉陷槽寬度參數 i_z/i_s 與深層與地表最大沉陷量 $S_{max,z}/S_{max,s}$ 的關係圖。研究結果顯示隨著沉陷槽深度越深，沉陷槽之寬度越窄，沉陷槽之最大沉陷量 $S_{max,z}$ 越大。
- (3) 本研究將所蒐集的國內外 21 組監測資料與本研究建議之經驗法預測範圍比較，得知本研究建議之經驗方法可以用來評估開放式、泥水式及土壓平衡式潛盾機於凝聚性土層中開挖隧道造成之深層沉陷。

6.2 建議

- (1) 本論文依據現地沉陷監測結果建立經驗方法，未來可考慮利用數值分析方法加以討論，以進行更全面性更詳細之研究。
- (2) 本文僅探討圓形斷面單隧道施工，未來可透過更多工程案例針對雙隧道或非圓形斷面隧道進行評估。
- (3) 在研究中建議以經驗方法預估深層沉陷，因蒐集深層沉陷監測資料不易，故無法將不同的潛盾施工方式及開挖土層狀況分開討論。未來若能蒐集更多深層沉陷資料，則可探討本研究所建議經驗法在不同施工機型及於不同土層的適用性。



參考文獻

1. 中華民國隧道協會叢書 (2004), “潛盾隧道施工技術規範之研討”, 民國 93 年 8 月。
2. 日本土木學會 (1987), “隧道標準規範潛盾篇”。
3. 日本土木學會 (1997), “日本隧道工程標準規範及解說-潛盾工法篇”。
4. 日本土質工學會 (1992), “シールド工法入門”。
5. 方永壽、陳秋宗, (民國 77 年) “潛盾隧道施工盾尾間隙所引致之地盤沉陷” 中華民國第十二屆力學研討會議論文集, 第 707-716 頁。
6. 朱旭 (1984), “潛盾施工法在國內應用之探討”, 中國土木水利學會七十三年年會論文集, 第 1 卷, 第 51~69 頁, 民國 73 年 11 月。
7. 林照順, (1992) “以 Peck-Fujita 經驗方法估算潛盾隧道施工所引之地表沉陷” 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所, 新竹。
8. 林照順 (1993), “台北捷運隧道施工引至之地表沉陷 (III)”, 行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告, 民國 82 年 7 月。
9. 林耀煌 (1994), “高層建築基礎開挖施工法與設計實例”, 民國 83 年 2 月。
10. 林冠州, 柯武德, 江慶堂, (2006) “雙曲線函數、對數函數在一般廢棄物掩埋構造體沉陷預測之應用” 中華民國第八屆結構工程研討會, 九月 1-3 號, pp.Q-012
11. 陳勝峰 (1994), “潛盾隧道施工引致之地表及深層沈陷” 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
12. 章仁發, (1993) “捷運工程大地監測系統之應用” 台北都會區捷運系統工程研討會論文集, 第 324-340 頁。
13. 曾紀緯 (1998), “地盤凍結工法在地下開挖工程之應用”, 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
14. 楊國榮, 楊慕泉, 趙際禮 (Yang et al.) (1996), “泥水加壓式潛盾機施工導致之地表沉陷探討”, 現代營建, 197 期。
15. 蔡茂生 (1985), “潛盾施工地下水處理方法之檢討”, 地工技術雜誌, 第 12 期, 第 68-79 頁。
16. 蔡茂生 (1989), “潛盾機型式之選擇”, 地工技術雜誌, 第 23 期, 第 55-71 頁, 9 月。
17. 蔡茂生、林國濬 (1989), “台北地區潛盾施工案例檢討”, 中日都會區大地工程科技研討會。
18. 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。
19. 蕭達鴻, 劉一信 (Xiao and Liu) (2007), “高雄地區潛盾隧道沉陷之研究”, 12th

大地工程研討會，8月。

20. Abdrabbo, F. M., El-Nahhas, F. M. and Abd El-Lateef, H. A. (1999). "Field Measurements during Construction of a Sewerage Tunnel." *Geo-Engineering for Underground Facilities: Proceedings of the 3rd International Conference*, University of Illinois at Urbana-Champaign, ASCE, pp. 879-887.
21. Abu-Farsakh, M. Y. and Voyiadjis, G. Z. (1999), "Computational Model for the Simulation of the Shield Tunneling Process in Cohesive Soil" *Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol. 23 No. 1, January 1999, pp. 23-44.
22. Attewell, P. B., Farmer, I. W. and Glossop, N. H (1975). "Ground Deformations Resulting from Shield Tunnelling in London Clay." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 380-395.
23. Attewell, P. B., Glossop, N. H. and Farmer, I. W. (1976). "Ground Deformations Caused by Tunnelling in a Silty Alluvial Clay." *Ground Engineering*, Vol. 11, No. 8, pp. 32-41.
24. Attewell, P. B. (1981). "Engineering Contract, Site Investigation and Surface Movements in Tunneling Works, Soft-Ground Tunneling-Failures and Displacement." A. A. Balkema, pp. 5-12.
25. Attewell, P. B., Yeates, J. and Selby, A. R. (1986). "Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects in Pipelines and Structures." Blackie and Son Ltd., London.
26. Balasubramanian, K. (1987). "Construction of Effluent Outfall Pipeline in Tunnel, Using Earth Pressure Balance Shield." *Proceedings of 5th International Geotechnical Seminar on Case History in Soft Clay*, Nanyang Technological Institute, Singapore, pp. 17-36.
27. Bernat, S. & Cambou, B. (1998). "Soil-structure Interaction in Shield Tunnelling in Soft Soil." *Computers and Geotechnics*, Vol. 22, No. 3/4, pp. 221-242.
28. Cassinis, C., Nisio, P., Capata, V., (1985). "Settlement and face stability boring a large tunnel." *Proc. of the 11th International Conf. on soil Mech. and Found. Eng.* San Francisco 12-16, August.
29. Cater, R. W. et al. (1984). "Tunnels Constructed for the Hong Kong Mass Transit Railway." *Hong Kong Engineer* 16th, 37-49, October.
30. Chi, S. Y., Chern, J. S. and Lin, C. C. (2001). "Optimized Back-Analysis for Tunneling-Induced Ground Movement Using Equivalent Ground Loss Model." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier Science Ltd., Vol. 16, No. 3, pp. 159-165.
31. 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.

32. Clough Wayne G., Fellow, ASCE, and Eric Leca. (1993). "EPB Shield Tunneling in Mixed Face Conditions. " *Journal of Geotechnical Engineering* , Vol. 119, No. 10, pp 1640-1656.
33. 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.
34. Dias D., and Kastner R. (2000). "Slurry Shield Tunneling: Comparison between in situ data and Three Dimensional Numerical Simulations." *Geotech-Year 27-30 Nov. 2000*, Bangkok, Thailand.
35. Elias, V. H. and Mizuno, A. (1990). "Tunnelling with Earth Pressure Balance Shields."
36. El-Nahhas, F. M., Ahmed, A. A. and Esmail, K. A. (1997). "Prediction of Ground Subsidence above Tunnels in Cairo." *Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, A. A. Balkema, Vol. 3, pp. 1453-1456.
37. El-Nahhas, F., EL-Kadi, F. and Shalaby, A. (1991), "Field Measurements During Construction of a Compressed Air Tunnel in Cairo." *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 6, No.1, pp. 123-127.
38. Fang, Y. S., Lin, S. J. and Lin, J. S. (1993), "Time and Settlement in EPB Shield Tunneling, " *Tunnels and Tunneling*, November, 1993, pp.26~27.
39. 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.
40. Flint, G. R. (1992), "Tunnelling Using Earth Pressure Balance Machines for the Boulac Spine Sewers of the Greater Cairo Wastewater Project. " *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 415-424
41. Fujita, K. (1982). "Prediction of Settlements by Shield Tunnelling." *Proceedings of International Conference on Soil Mechanics*, Vol. 1, pp. 239-246.
42. Glossop, N. H. & Farmer, I. W. (1977). "Settlement associated with removal of compressed air pressure during tunnelling in alluvial clay." *Geotechnique* 29, No. 1, 67-72.
43. Glossop, N. H. and O'Reilly, M. P. (1982). "Settlement Caused by Tunnelling through Soft Marine Silty Clay." *Tunnels and Tunnelling*, Vol. 14, No. 9, pp. 13-16.
44. 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.
45. Hitachi Zosen Corporation, (1990). *Shield Tunneling Menu*, Japan.

46. Hsiung B. B. C, and Lu K. L., (2008). "Case record of A Bored Tunnel on Kaohsiung Rapid Transit System, Contract CR2. " *Journal of GeoEngineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 41-48, April.
47. Hwang, R. N. and Moh, Z. C. (2006), "Prediction of Long-Term Settlements Induced by Shield Tunneling", *Journal of GeoEngineering*, Volume 1., no. 2, pp. 63~70, December, Taipei, Taiwan.
48. 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.
49. Ilsley, R. C., Hunt, S. H., Komurka, V. E., Doyle, B. R. and Ramage, J. (1991). "Ground Movements around Tunnels Excavated in Milwaukee, U.S.A., Using Slurry Shield and Earth Pressure Balance Methods." *Proceedings of 4th International Conference on Ground Movements and Structures*, Cardiff, Wales, Pentech Press, London, pp. 714-737.
50. Japan Society of Civil Engineers (1996), "Japanese standard for shield tunneling", The Third Edition.
51. Kawamura, N. (1997). "Shield Tunnelling in Chicago Clay." *Research Proposal*, University of Illinois.
52. Kitamura, M., Ito, S. and Fujiwara, T. (1981). "Shield Tunneling Performance and Behavior of Soft Ground." *Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, Osaka, Japan, Vol. 1, pp. 201-220.
53. Kobayashi, T., Kitagawa, S., Kubota, I., and Nishimatsu, Y. (1984) , "On The Settlement of Poor Cohesive Soil Ground Caused by Tunnel Driving with Slurry Shield Machine," *土木學會論文集* , 第 352 號/III-2 , pp. 71-77. (In Japanese)
54. Komiya, K., Soga, K., Akagi, H., Jafari, M. R. & Bolton, M. D. (2001). "Soil consolidation associated with grouting during shield tunneling in soft clayey ground. " *Geotechnique* 51, No. 10, 835-846.
55. Lake, L. M., Rankin, W. J. and Hawley, J. (1992). "Prediction and Effects of Ground Movements Caused by Tunnelling in Soft Ground beneath Urban Areas." *Project Report 30, Construction Industry Research and Information Association*, London.
56. Ledesma, A. and Romero, E. (1997) "Systematic Back-Analysis in Tunnel Excavation Problems as a Monitoring Technique." *Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, A. A. Balkema, Vol. 3, pp. 1425–1428.
57. Lee, C.C., Yau, S.L. and Ueng, B.(1990). "Shield tunneling and Ground Settlement," *Mining Technology*, Vol.28, No.1, Taiwan (in Chinese).
58. Lee, K. M., Ji, H. W., Shen, C. K., Liu, J. H. and Bai, T. H. (1999). "Ground

- Response to the Construction of Shanghai Metro Tunnel-Line 2.” Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 39, No. 3, pp. 113-134.
59. Loganathan, N. and Poulos, H. G. (1998) “Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 846-856.
 60. Mair, R. J. (1979) “Centrifuge Modelling of Tunnel Construction in Soft Clay.” Ph.D.Thesis, Cambridge University.
 61. Mair, R. J., Taylor, R. N., and Bracegirdle, A. (1993). “Subsurface Settlement Profiles above Tunnels in Clays.” Geotechnique, Thomas Telford, Vol. 43, No. 2, pp. 315-320.
 62. Melis, M., Arnaiz, M., Mendana, F., Reyes, R. F. and Oteo, C. S. (1999). “Experience Gained in Madrid during the Construction of Tunnels Crossing Urban Fills with T.B.M.” Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Proceedings of 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, A. A. Balkema, Amsterdam, Vol. 3, pp. 2065-2071.
 63. Miyazaki, W., Hatakeyama, T., Komori, M., (1988) “Countermeasures for Ground Displacement in Earth Pressure Balance Shield Tunneling. ” 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Sakurai ed. 917-926.
 64. Moh, Z. C., Ju, D. H. and Hwang, R. N. (1996). “Ground Movements around Tunnels in Soft Ground.” Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, pp. 36-42.
 65. Moh Z.C., Daniel H.Ju and Hwang R. N. (1996) “Ground movements around tunnels in soft ground” Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. April 15-17, London, UK.
 66. Moh, Z. C., Hulme, T. W. and Hwang, R. N. (1995), “Soft Ground Tunneling for Singapore and Taipei MRT System” Bengt B. Broms Geotechnical Symposium, Singapore, December, 1995, pp.1-8.
 67. 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.
 68. New, B. M., Wild, P. T. and Bishop, C. J. (1980). “Bentonite Tunnelling beneath Major Services in Loose Sand.” Tunnels and Tunnelling, Vol. 12, No. 5, pp. 14-16.
 69. O’Reilly, M. P., Riley, M. D., Barratt, D. A. and Johnson, P. E. (1980).

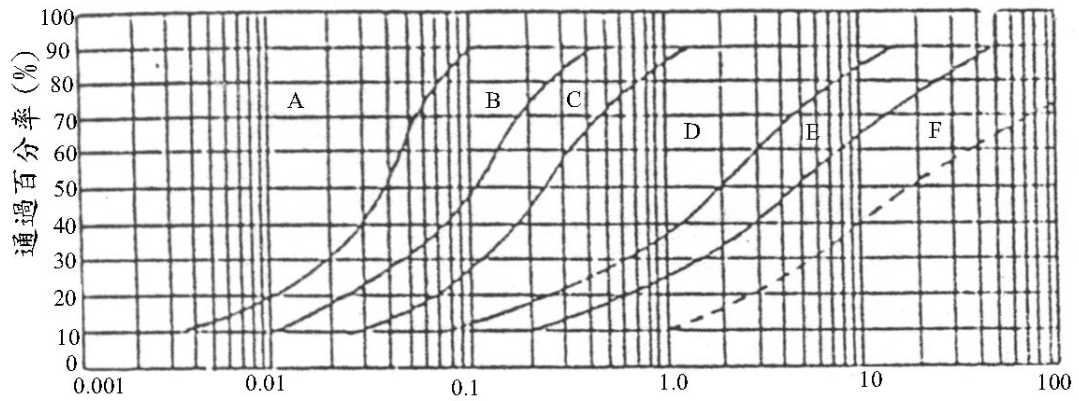
- “Comparison of Settlements Resulting from Three Methods of Tunnelling in Loose Cohesionless Soil.” Proceedings of 2nd International Conference on Ground Movements and Structures, Cardiff, Wales, Pentech Press, London, pp. 359-376.
70. O’Reilly, M. P. and New, G. M. (1982). “Settlements above Tunnels in the United Kingdom: Their Magnitude and Prediction.” Proceedings of Tunnelling ’82, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 173-181.
 71. Ou, C. Y., Hwang, R. N. and Lai, W. J. (1998). “Surface Settlement during Shield Tunnelling at CH218 in Taipei.” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, No. 1, pp. 159-168.
 72. Palmer, J.H.L. and Belahaw, D.J. (1980) "Deformation and Pore Pressures in The Vicinity of a Precast, Segmented, Concrete-Lined Tunnel in Clay." Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, pp. 174-184.
 73. Park, K.H., (2004). Elastic solution for tunnelling-induced ground movements in clays. Int. J. Geomech. ASCE 4 (4).
 74. 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, A. A. Balkema, pp. 225-290.
 75. Phienweij, N., (1997). “Ground movements in shield tunneling in Bangkok soils. ” Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 3, 1469-1472.
 76. Romo, M. P. (1997). “Soil Movements Induced by Slurry Shield Tunneling.” Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, A. A. Balkema, Vol. 3, pp. 1473–1481.
 77. Rozsa, L., (1981). “Settlement above Air-Pressure Constructed Tunnels in Soft Soils.” X ICSMFE, Stockholm, Vol. 1, pp. 361-364.
 78. Saiz Perez, A., Garami, J., Arcones, A., Soriano, A., (1981). “Experience Gained through Tunnel Instrumentation.” Proc., 5th International Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., Stockholm, Vol. 1, pp 345-352.
 79. 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.
 80. Schmitter, J.M., Farjeat, P.D., Canseco, A.H., (1981). Soft-ground tunneling in Mexico City. Proceedings of the 1981 Rapid Excavation and Tunneling Conference, San Francisco, CA, pp. 801-812.
 81. Shirlaw, J. N. and Copsey, J. P. (1987), "Settlements over Tunnels in Singapore Marine Clay." Proc., Int. Conf. Seminar, 'Case Histories in Soft Clay', NTI, Singapore, pp. 59-71.

82. Shirlaw, J. N. (1995), "Observed and calculated pore pressure and deformations induced by an earth balance shield: Discussion." *Can. Geotech. J.*. Vol. 32, pp. 181-189.
83. Sigl, O. and Atzl, G. (1999). "Design of Bored Tunnel Linings for Singapore MRT North East Line C706. " *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 481-490.
84. Som, O., Narayan, V., (1985). "Ground Settlement in Shield Tunnelling through Soft Clay. " *Proc. 12th International Conf. on SMFE.*, Vol. 4, pp. 2133-2136.
85. Sugiyama, T., Hagiwara, T., Nomoto, T., Masaaki, N., Ano, Y., Mair, R. J., Bolton, M. D. and Soga, K. (1999). "Observations of Ground Movements during Tunnel Construction by Slurry Shield Method at the Docklands Light Railway Lewisham Extension-East London." *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 39, No. 3, pp. 99-112.
86. Tonkin, M. (2005). "Consolidation by under-drainage in Limerick." *Tunnels & Tunnelling International*, Vol. 37, No. 10, pp. 26-29.
87. Thongyot, T. (1995). "Ground Movement Sassociated with 11km Water Transmission Bored Tunnel in Bangkok Subsoil." *Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.*
88. Toombs, A. F. (1995). "Settlement Caused by Tunnelling beneath a Motorway Embankment." *Supplementary Report 547. Transport and Road Research Laboratory, Department of the Environment, Department of Transport, London.*
89. Wannipa, T. and Supot, T. (1999). "Prediction of Settlement in Bangkok Ground due to Tunnel Excavation." *Geo-Engineering for Underground Facilities: Proceedings of the 3rd International Conference, University of Illinois at Urbana-Champaign, ASCE*, pp. 1070-1079.
90. 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.
91. Yi, X. Rowe, R. K. and Lee, K. M. (1993). "Observed and Calculated Pore Pressures and Deformations Induced by an Earth Pressure Balance Shield." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 476-490.

表 2-1 潛盾機之分類與特性 (蔡茂生, 1985)

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

表 2-2 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍 (朱旭, 1984)



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

註：◎表示最適用。 ○表示適用。 △表示適用但不經濟

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

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

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

表 2-4 灌漿材料之分類 (林耀煌, 1994)

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

表 2-5 地表最大沉陷量 (after Fujita, 1982)

Type of Shield	Type of Soil	Additional Measures	Maximum Surface Settlement (cm)				Cited Cases
			S _{max}	S _{min}	Average	Errors	
Open Shield	Clay	Not Adopted	12	6.8	10	±3	4
		Not Adopted	20	20	20	0	2
	Clay and Sand	Not Adopted	13	7	10	±3	5
	Sand	Adopted	7	1.3	4	±3	7
Adopted		25	15	20	±5	3	
Blind Type	Clay	Adopted	5	0.7	3	±2	6
		Not Adopted	5.7	2	4	±2	10
		Not Adopted	11.2	7.5	10	±2.5	4
Slurry Type	Clay	Not Adopted	5	3.5	4	±1	2
	Clay and Sand	Not Adopted	12	6	9	±3	3
	Sand	Both	6.4	2.1	4	±2.5	4
EPB Shield	Clay	Not Adopted	8.5	3.5	6	±2.5	3
		Not Adopted	18.6	12	15	±3.5	2
	Clay and Sand	Not Adopted	2.5	1	2	±1	3
	Sand	Adopted	6	3	4.5	±1.5	4
Not Adopted		2.4	1	2	±1	3	

表 2-6 地表最大沉陷量之預測值 (after Fujita, 1982)

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

(黏土層中之實測值又依沉陷量之大小分成兩類， “*” 為沉陷量較大之一類)

表 2-7 雙曲線參數 a 值建議表 (簡明同, 1998)

雙曲線模式 a 值建議表 (day/mm)

		潛盾機型式		
輔助工法	土壤種類	土壓平衡式	泥水加壓式	開放式
不採用	粘土	0.15~0.25 (13 例)	0.19~0.57 (4 例)	-
	軟弱粘土	0.05~0.09 (5 例)	-	0.19 (1 例)
	砂土	0.05~0.11 (6 例)	0.06 (2 例)	-
採用	粘土	0.16~0.36 (2 例)	-	0.73 (1 例)
	軟弱粘土	-	-	0.11~0.21 (2 例)
	砂土	-	0.35~0.87 (2 例)	0.01~0.33 (2 例)

註：軟弱粘土：標準貫入試驗 N 值 < 4、Marine clay、Sensitive clay。

表 3-1 開放式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
OS 1	Lumb Brook Sewer Willow Drive, U.K.	3.6	4.7	78	N/A	N/A	0.0128	C.G.	O'Reilly et al., (1980)
OS 2	Lumb Brook Sewer Hollow Drive-1, U.K.	3.6	6.48	15	N/A	N/A	0.0667	C.A.	O'Reilly et al., (1980)
OS 3	Lumb Brook Sewer Hollow Drive-2, U.K.	3.6	6.48	20	N/A	N/A	0.0500	C.A.	O'Reilly et al., (1980)
OS 4	Lumb Brook Sewer Chester Rd., U.K.	3.6	6.48	7	N/A	N/A	0.1429	C.A.	O'Reilly et al., (1980)
OS 5	Warrington Mersey St. to Howley Sewer, U.K.	2.0	8.4	28	N/A	N/A	0.0357	C.A.	O'Reilly et al., (1980)
OS 6	Caracas Metro Section 4, Venezuela	5.6	11.2	19	N/A	N/A	0.0526	C.G.	Saiz et al., (1981)
OS 7	Ouseburn Valley Northumbrian Sewer, U.K.	3.47	13	81	N/A	N/A	0.0123	N/A	O'Reilly and New (1982)
OS 8	Taipei Sewer Main Line B, Taiwan	4.52	8.8	44	17.92	0.0558	0.0193	C.A.	Cai (1989)
OS 9	Greater Cairo Sewer, Egypt	5.15	14.0	20.6	3.47	0.2879	0.0605	C.A.	El-Nahhas et al., (1991)

Note : C.G. : Chemical grouting ; C.A. : Compressed-Air ◦

表 3-2 開放式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
OC 1	Lumb Brook Sewer Greenfield Av., U.K.	3.6	9.0	19	N/A	N/A	0.0526	C.G.	O'Reilly et al., (1980)
OC 2	Bristol City Avonmouth 2 Sewer, U.K.	3.4	6.0	20	N/A	N/A	0.0500	C.A.	Toombs (1980)
OC 3	York Way, U.K.	4.1	14.1	3	N/A	N/A	0.3333	N/A	West et al., (1981)
OC 4	Caracas Metro Section 2, Venezuela	5.6	15	6.5	N/A	N/A	0.1538	C.G.	Saiz et al., (1981)
OC 5	Budapest Metro, Hungary	5.5	30	34	N/A	N/A	0.0294	C.A. D.W.	Rozsa (1981)
OC 6	Regents Park, London, U.K.	4.2	34	5	N/A	N/A	0.2000	N/A	O'Reilly and New (1982)
OC 7	Regents Park, London, U.K.	4.2	20	7	N/A	N/A	0.1429	N/A	O'Reilly and New (1982)
OC 8	Thames Water Authority Sutton Sewer, U.K.	1.78	17.1	3.8	N/A	N/A	0.2632	N/A	O'Reilly and New (1982)
OC 9	Thames Water Authority Sutton Sewer, U.K.	1.78	3.4	3.7	N/A	N/A	0.2703	N/A	O'Reilly and New (1982)

Note : C.G. : Chemical grouting ; C.A. : Compressed-Air ; D.W. : Dewatering Method °

表 3-2 開放式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
OC 10	Thames Water Authority Sutton Sewer, U.K.	1.52	4.9	7.1	N/A	N/A	0.1408	N/A	O'Reilly and New (1982)
OC 11	Newcastle Tyne and Wear tunnel, U.K.	5.2	14.2	7.5	N/A	N/A	0.1333	C.A.	O'Reilly and New (1982)
OC 12	Belfast Sewer Sydenham, Northern Ireland	2.7	4.9	16	N/A	N/A	0.0625	C.A.	O'Reilly and New (1982)
OC 13	Belfast Sewer Sydenham, Northern Ireland	2.7	4.5	20	N/A	N/A	0.0500	C.A.	O'Reilly and New (1982)
OC 14	Hong Kong MRT S1, China	5.5	28.5	43	N/A	N/A	0.0233	D.W.	Cater et al., (1984)
OC 15	Hong Kong MRT S2(L), China	5.5	28.5	47	N/A	N/A	0.0213	C.A. D.W.	Cater et al., (1984)
OC 16	Hong Kong MRT S3(L), China	5.5	28	19	N/A	N/A	0.0526	C.A. D.W.	Cater et al., (1984)
OC 17	Metro C301A E.B. TA97, Singapore	6.3	16	34.4	1.17	0.0858	0.0273	C.G. C.A.	Shirlaw et al., (1988)
OC 18	Southbound tunnel Line7, Malaysia	6	20	6	N/A	N/A	0.1667	N/A	Shirlaw et al., (1988)

Note : C.G. : Chemical grouting ; C.A. : Compressed-Air ; D.W. : Dewatering Method .

表 3-2 開放式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	l/a (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
OC 19	Northbound tunnel Line7, Malaysia	6	12	24	N/A	N/A	0.0417	N/A	Shirlaw et al., (1988)
OC 20	Southbound tunnel Line7, Malaysia	6	20	19	N/A	N/A	0.0526	N/A	Shirlaw et al., (1988)
OC 21	Northbound tunnel Line7, Malaysia	6	12	39	N/A	N/A	0.0256	N/A	Shirlaw et al., (1988)
OC 22	Singapore Metro C104 S.B., Singapore	6.5	13	53	N/A	N/A	0.0189	C.G. C.A.	Shirlaw et al., (1988)
OC 23	Gateshead, U.K.	1.5	5.3	37	N/A	N/A	0.0270	N/A	Lake et al., (1992)
OC 24	Heathrow Express Tunnel, U.K.	8.5	19	39	N/A	N/A	0.0256	N/A	Deane and Bassett (1995)
OC 25	Bangkok, GBC5, Thailand	2.7	18.5	13	N/A	N/A	0.0769	N/A	Thongyot (1995)
OC 26	Bangkok Sewer, Thailand	2.67	18	12	N/A	N/A	0.0833	N/A	Phienwej (1997)
OC 27	Chicago, U.S.A.	3.7	10.7	24	N/A	N/A	0.0417	N/A	Kawamura (1997)

Note : C.G. : Chemical grouting ; C.A. : Compressed-Air ; D.W. : Dewatering Method .

表 3-3 開放式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter $2R$ (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
OsC 1	Mexico City Central Interceptor Section6	6.28	27	122	N/A	N/A	0.0082	C.A.	Schmitter et al., (1981)
OsC 2	Calcutta Metro Section 1, India	5.1	13.8	65	N/A	N/A	0.0154	C.A.	Som and Narayan (1985)
OsC 3	Calcutta Metro Section 2, India	5.1	13.2	60	N/A	N/A	0.0167	C.A.	Som and Narayan (1985)
OsC 4	Calcutta Metro Section 3, India	5.1	13.5	110	N/A	N/A	0.0091	C.A.	Som and Narayan (1985)
OsC 5	Calcutta Metro Section 4, India	5.1	13.6	125	N/A	N/A	0.0080	C.A.	Som and Narayan (1985)
OsC 6	Calcutta Metro Section 5, India	5.1	14.1	40	N/A	N/A	0.0250	C.A.	Som and Narayan (1985)
OsC 7	Haycroft Sewer Array A, UK	3.00	8.0	94.0	5.27	0.1899	0.0105	N/A	Attewell et al., (1986)
OsC 8	Haycroft Sewer Array B, UK	3.00	5.3	60.0	5.10	0.1961	0.0166	C.A.	Attewell et al., (1986)
OsC 9	Haycroft Sewer Array C, UK	3.00	6.5	95.0	7.92	0.1263	0.0103	C.A.	Attewell et al., (1986)
OsC 10	Case B (by Attewell), UK	4.30	13.4	81.0	1.37	0.7324	0.0108	C.A.	Farmer (1997)

表 3-4 泥水加壓式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
SS 1	Action Grange Sewer Section A, UK	2.87	6.0	25.0	16.58	0.0603	0.0351	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 2	Action Grange Sewer Section B, UK	2.87	5.6	18.5	16.10	0.0621	0.0434	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 3	Warrington Acton Grange Sewer, U.K.	2.87	6.8	19.9	N/A	N/A	0.0503	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 4	Warrington Acton Grange Sewer, U.K.	2.87	6.8	14.2	N/A	N/A	0.0704	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 5	Warrington Acton Grange Sewer, U.K.	2.87	6	42.2	N/A	N/A	0.0237	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 6	Warrington Acton Grange Sewer, U.K.	2.87	6	18.6	N/A	N/A	0.0538	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 7	Warrington Acton Grange Sewer, U.K.	2.87	5.8	25.3	N/A	N/A	0.0395	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 8	Warrington Acton Grange Sewer, U.K.	2.87	6.9	2.2	N/A	N/A	0.4545	N/A	O'Reilly et al., (1980)
SS 9	Acton Grange Trunk Sewer, Ellemere Road, U.K.	2.87	6.5	20	N/A	N/A	0.0500	N/A	New et al., (1980)

Note : C.G. : Chemical grouting ; C.A. : Compressed-Air ◦

表 3-4 泥水加壓式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter $2R$ (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	l/a (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
SS 10	Rome tunnel Section P, Italy	10.6	35.3	7	N/A	N/A	0.1429	N/A	Cassinis et al., (1985)
SS 11	Rome tunnel Section Q, Italy	10.6	35.3	12	N/A	N/A	0.0833	N/A	Cassinis et al., (1985)
SS 12	Rome tunnel Section R, Italy	10.6	35.3	14	N/A	N/A	0.0714	N/A	Cassinis et al., (1985)
SS 13	Taipei MRT CH218 SM583, Taiwan	6.05	12.0	27.6	2.34	0.4269	0.0368	C.G.	Song (1995)
SS 14	Taipei MRT CH218 SM587, Taiwan	6.05	12.0	18.2	1.27	0.7884	0.0574	C.G.	Song (1995)
SS 15	Cairo Metro, Egypt	9.48	16	10	N/A	N/A	0.1000	N/A	Ata (1996)
SS 16	Cairo Metro Tunnel Line 2, Egypt	9.43	18.0	15	N/A	N/A	0.0667	C.A.	El-Nahhas et al., (1997)
SS 17	Lyon-Vaise Metro D Line Section S1, France	6.27	16.9	10.8	N/A	N/A	0.0926	N/A	Bernat and Cambou (1998)
SS 18	Lyon-Vaise Metro D Line Section P2, France	6.27	13.3	2.5	N/A	N/A	0.4000	N/A	Bernat and Cambou (1998)

Note : C.G. : Chemical grouting ; C.A. : Compressed-Air ◦

表 3-5 泥水加壓式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
SC 1	Tokyo Sewer Section D, Japan	7.35	13.6	14.1	1.61	0.6217	0.0510	N/A	Kobayashi et al., (1984)
SC 2	Rome tunnel Section C, Italy	10.6	30.3	7	N/A	N/A	0.1429	N/A	Cassinis et al., (1985)
SC 3	Rome tunnel Section H, Italy	10.6	30.3	4.5	N/A	N/A	0.2222	N/A	Cassinis et al., (1985)
SC 4	Rome tunnel Section I, Italy	10.6	30.3	6.5	N/A	N/A	0.1538	N/A	Cassinis et al., (1985)
SC 5	Rome tunnel Section L, Italy	10.6	30.3	8	N/A	N/A	0.1250	N/A	Cassinis et al., (1985)
SC 6	Rome tunnel Section E, Italy	10.6	17.3	7	N/A	N/A	0.1429	N/A	Cassinis et al., (1985)
SC 7	Rome tunnel Section F, Italy	10.6	17.3	6	N/A	N/A	0.1667	N/A	Cassinis et al., (1985)
SC 8	Taipei EII-Chorng Sewer, Taiwan	4.83	12	14	N/A	N/A	0.0714	C.G.	Lee et al., (1990)
SC 9	Mexico Sewerage Line A, Mexico	4.0	13.0	23	N/A	N/A	0.0435	N/A	Romo (1997)
SC 10	Mexico Sewerage Line B, Mexico	4.0	13.0	29	N/A	N/A	0.0345	N/A	Romo (1997)

Note : C.G. : Chemical grouting °

表 3-5 泥水加壓式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
SC 11	London DLR tunnel S.B. MS-1, U.K.	5.85	17.4	5.4	N/A	N/A	0.1852	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 12	London DLR tunnel S.B. MS-3, U.K.	5.85	17.4	5.4	N/A	N/A	0.1852	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 13	London DLR tunnel S.B. MS-4, U.K.	5.85	16.4	6.7	N/A	N/A	0.1493	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 14	London DLR tunnel S.B. MS-5, U.K.	5.85	13.8	5.5	N/A	N/A	0.1818	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 15	London DLR tunnel S.B. MS-6, U.K.	5.85	13.8	5.5	N/A	N/A	0.1818	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 16	London DLR tunnel S.B. MS-7, U.K.	5.85	16.4	6.4	N/A	N/A	0.1563	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 17	London DLR tunnel S.B. MS-8, U.K.	5.85	14.5	10.6	N/A	N/A	0.0943	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 18	London DLR tunnel N.B. MS-1, U.K.	5.85	17.4	4.5	N/A	N/A	0.2222	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 19	London DLR tunnel N.B. MS-2, U.K.	5.85	12.4	4.1	N/A	N/A	0.2439	N/A	Sugiyama et al., (1999)

Note : C.G. : Chemical grouting ◦

表 3-5 泥水加壓式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
SC 20	London DLR tunnel N.B. MS-3, U.K.	5.85	17.4	8.4	N/A	N/A	0.1190	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 21	London DLR tunnel N.B. MS-5, U.K.	5.85	13.8	8.3	N/A	N/A	0.1205	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 22	London DLR tunnel N.B. MS-6, U.K.	5.85	13.8	7.7	N/A	N/A	0.1299	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 23	London DLR tunnel N.B. MS-7, U.K.	5.85	16.4	12.0	N/A	N/A	0.0833	N/A	Sugiyama et al., (1999)
SC 24	VAISE Subway Lyon Vaise sector EX31, France	6.27	13.6	2.1	1.28	0.7797	0.3851	N/A	Dias and Kastner (2000)

Note : C.G. : Chemical grouting °

表 3-6 泥水加壓式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
SsC 1	Tokyo Sewer Section A, Japan	7.35	13.6	32.0	4.00	0.2500	0.0259	N/A	Kobayashi et al., (1984)
SsC 2	Tokyo Sewer Section B, Japan	7.35	13.6	23.9	2.25	0.4447	0.0339	N/A	Kobayashi et al., (1984)
SsC 3	Milwaukee Sewer Section CT-7, USA	3.57	7.4	55.2	4.49	0.2229	0.0181	N/A	Ilsley et al., (1991)
SsC 4	Milwaukee Sewer Section CT-8-1, U.S.A.	3.18	15.98	114.7	59.17	0.0169	0.0089	N/A	Ilsley et al., (1991)
SsC 5	Taipei Metro CH221 1A Tunnel, Taiwan	6.25	27	9.5	N/A	N/A	0.1053	N/A	Yang et al., (1996)
SsC 6	Taipei Metro CH221 1B Tunnel, Taiwan	6.25	12.5	12	N/A	N/A	0.0833	N/A	Yang et al., (1996)

表 3-7 土壓平衡式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
ES 1	Tennohji-Benten Giant Sewer No.94, Japan	6.75	7.9	60.0	8.48	0.1179	0.0156	N/A	Kitamura et al., (1981)
ES 2	Tennohji-Benten Giant Sewer No.103, Japan	6.75	7.9	43.8	9.06	0.1104	0.0223	N/A	Kitamura et al., (1981)
ES 3	Taipei MRT CN256 SM175, Taiwan	6.00	12.9	34.0	18.94	0.0528	0.0287	N/A	Moh et al., (1995)
ES 4	Taipei MRT CP262 SM66, Taiwan	6.25	14.2	30.0	17.01	0.0588	0.0300	N/A	Moh et al., (1995)
ES 5	Taipei MRT CP262 SM35, Taiwan	6.25	13.6	41.0	17.92	0.0558	0.0221	N/A	Moh et al., (1995)
ES 6	Great Cairo Wastewater N150, Egypt	3.24	15.5	37	N/A	N/A	0.0270	N/A	Flint (1992)
ES 7	Great Cairo Wastewater N259, Egypt	3.24	15.5	40	N/A	N/A	0.0250	N/A	Flint (1992)
ES 8	Great Cairo Wastewater N605, Egypt	3.24	15.5	23	N/A	N/A	0.0435	N/A	Flint (1992)
ES 9	Great Cairo Wastewater N677, Egypt	3.24	14	18	N/A	N/A	0.0556	N/A	Flint (1992)

Note : C.G. : Chemical grouting ◦

表 3-7 土壓平衡式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
ES 10	Great Cairo Wastewater N852, Egypt	3.24	14	21	N/A	N/A	0.0476	N/A	Flint (1992)
ES 11	Great Cairo Wastewater N1371, Egypt	3.24	14	40	N/A	N/A	0.0250	N/A	Flint (1992)
ES 12	Great Cairo Wastewater N1575, Egypt	3.24	14	27	N/A	N/A	0.0370	N/A	Flint (1992)
ES 13	Great Cairo Wastewater N2350, Egypt	3.24	12.5	33	N/A	N/A	0.0303	N/A	Flint (1992)
ES 14	Great Cairo Wastewater N2450, Egypt	3.24	12.5	38	N/A	N/A	0.0263	N/A	Flint (1992)
ES 15	Great Cairo Wastewater N2568, Egypt	3.24	12.5	28	N/A	N/A	0.0357	N/A	Flint (1992)
ES 16	Great Cairo Wastewater N2661, Egypt	3.24	12.5	41	N/A	N/A	0.0244	N/A	Flint (1992)
ES 17	Great Cairo Wastewater N2080, Egypt	3.24	12.5	87	N/A	N/A	0.0115	N/A	Flint (1992)
ES 18	Great Cairo Wastewater N2186, Egypt	3.24	12.5	89	N/A	N/A	0.0112	N/A	Flint (1992)

Note : C.G. : Chemical grouting ◦

表 3-7 土壓平衡式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
ES 19	Taipei MRT CH218 SM139, Taiwan	6.05	18.0	28.5	13.14	0.0761	0.0349	N/A	Moh et al., (1996)
ES 20	Taipei MRT CH218 A-A SM33, Taiwan	5.90	16.0	35.1	9.66	0.1035	0.0280	N/A	Ou et al., (1998)
ES 21	Taipei MRT CH 218 Section A.A., Taiwan	6.04	16.0	35	N/A	N/A	0.0286	N/A	Ou et al., (1998)
ES 22	Alexandria Section A, Egypt	2.86	13.0	23	N/A	N/A	0.0435	C.G.	Abdrabbo et al., (1999)
ES 23	Alexandria Section B, Egypt	2.86	13.0	21	N/A	N/A	0.0476	C.G.	Abdrabbo et al., (1999)
ES 24	Alexandria Section C, Egypt	2.86	13.0	17	N/A	N/A	0.0588	C.G.	Abdrabbo et al., (1999)
ES 25	Limerick Drainage Scheme Dock Road Tunnel TA16, Ireland	2.82	11.0	26.1	3.66	0.2731	0.0360	C.G.	Tonkin (2005)
ES 26	Limerick Drainage Scheme Dock Road Tunnel TA18, Ireland	2.82	11.0	46.1	9.70	0.1031	0.0207	C.G.	Tonkin (2005)

Note : C.G. : Chemical grouting .

表 3-7 土壓平衡式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
ES 27	Limerick Drainage Scheme Dock Road Tunnel TA20, Ireland	2.82	11.0	50.6	4.32	0.2317	0.0188	C.G.	Tonkin (2005)
ES 28	Limerick Drainage Scheme Dock Road Tunnel TA22, Ireland	2.82	11.0	47.9	7.97	0.1254	0.0196	C.G.	Tonkin (2005)
ES 29	Limerick Drainage Scheme Dock Road Tunnel TA24, Ireland	2.82	11.0	52.5	5.56	0.1797	0.0171	C.G.	Tonkin (2005)
ES 30	Limerick Drainage Scheme Dock Road Tunnel TA25, Ireland	2.82	11.0	63.5	11.09	0.0902	0.0150	C.G.	Tonkin (2005)
ES 31	Limerick Drainage Scheme Dock Road Tunnel TA26, Ireland	2.82	11.0	55.2	10.67	0.0937	0.0175	C.G.	Tonkin (2005)
ES 32	Madrid Metro Extension, Control Section 4, Spain	9.4	6.3	5.6	N/A	N/A	0.1786	N/A	Melis et al., (2005)
ES 33	Kaohsiung Metro CO4 LUO17 SM18, Taiwan	6.10	18.5	55.8	83.33	0.0120	0.0168	C.G.	Xiao and Liu (2007)
ES 34	Kaohsiung Metro CO4 LUO17 SM19, Taiwan	6.10	18.5	60.1	73.53	0.0136	0.0154	C.G.	Xiao and Liu (2007)
ES 35	Kaohsiung Metro CR2 LUR10-MCS02, Taiwan	6.34	19.5	5.7	11.51	0.0869	0.1873	N/A	Hsiung and Lu (2008)

Note : C.G. : Chemical grouting ◦

表 3-7 土壓平衡式潛盾隧道於砂土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
ES 36	Kaohsiung metro CR2 LUR11-MCS06, Taiwan	6.34	12.7	7.7	55.56	0.0180	0.1337	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 37	Kaohsiung metro CR2 LUR12-MCS12, Taiwan	6.34	21.9	22.5	11.99	0.0834	0.0439	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 38	Kaohsiung metro CR2 LUR13-MCS15, Taiwan	6.34	28.7	3.8	0.13	7.6608	0.2741	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 39	Kaohsiung metro CR2 LUR13-MCS16, Taiwan	6.34	21.9	4.9	1.30	0.7710	0.2322	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 40	Kaohsiung metro CR2 LUR10-MCS04, Taiwan	6.34	14.3	6.5	13.97	0.0716	0.1535	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 41	Kaohsiung metro CR2 LUR12-MCS10, Taiwan	6.34	23.9	11.0	1.44	0.6923	0.0791	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 42	Kaohsiung metro CR2 LUR12-MCS11, Taiwan	6.34	29.5	6.7	6.48	0.1543	0.1443	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 43	Kaohsiung metro CR2 LUR13-MCS14, Taiwan	6.34	23.9	10.2	1.03	0.9686	0.0966	N/A	Hsiung and Lu (2008)
ES 44	Kaohsiung metro CR2 LUR13-MCS17, Taiwan	6.34	20.3	3.2	4.09	0.2443	0.3323	N/A	Hsiung and Lu (2008)

Note : C.G. : Chemical grouting ◦

表 3-8 土壓平衡式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
EC 1	Tennohji-Benten Giant Sewer No.82, Japan	6.75	11.5	33.0	5.20	0.1922	0.0285	C.G.	Kitamura et al., (1981)
EC 2	Tennohji-Benten Giant Sewer No.80, Japan	6.75	11.5	26.9	3.06	0.3266	0.0343	C.G.	Kitamura et al., (1981)
EC 3	Taipei MRT CH218 SM33, Taiwan	6.05	12.0	32.5	8.66	0.1155	0.0279	N/A	Zhang (1993)
EC 4	Taipei MRT CH218, SM84, Taiwan	6.05	12.0	32.5	6.50	0.1538	0.0298	N/A	Zhang (1993)
EC 5	Taipei MRT CH218, SM94, Taiwan	6.05	12.0	28.0	8.75	0.1143	0.0354	N/A	Zhang (1993)
EC 6	Taipei MRT CH218, SM99, Taiwan	6.05	12.0	29.0	5.46	0.1831	0.0336	N/A	Zhang (1993)
EC 7	Taipei MRT CN254 SM13, Taiwan	6.00	14.3	37.0	4.46	0.2240	0.0257	N/A	Lin (1993)
EC 8	Taipei MRT CN254 SM61, Taiwan	6.00	14.0	19.5	7.02	0.1425	0.0511	N/A	Lin (1993)
EC 9	Taipei MRT CN256 SM143, Taiwan	6.00	12.2	29.2	3.57	0.2800	0.0296	N/A	Moh et al., (1995)
EC 10	Taipei MRT CN256 SM14, Taiwan	6.05	18.9	9.8	1.27	0.7880	0.088	N/A	Moh et al., (1995)
EC 11	Taipei MRT CN256 SM27, Taiwan	6.05	17.7	8.3	0.81	1.2321	0.1020	N/A	Moh et al., (1995)
EC 12	Taipei MRT CN256 SM156, Taiwan	6.05	12.7	28.1	3.69	0.2713	0.0308	N/A	Moh et al., (1995)

Note : C.G. : Chemical grouting °

表 3-8 土壓平衡式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
EC 13	Taipei MRT CN256 SM175, Taiwan	6.05	29.1	32.9	17.21	0.0581	0.0270	N/A	Moh et al., (1995)
EC 14	Taipei MRT CN262 SM52, Taiwan	6.25	13.6	31.7	61.35	0.0163	0.0311	N/A	Moh et al., (1995)
EC 15	Taipei MRT CH218 SM34, Taiwan	6.04	17.3	28.4	6.86	0.1458	0.0336	N/A	Moh et al., (1995)
EC 16	Taipei MRT CH218 SM35, Taiwan	6.04	18.2	34.4	13.12	0.0762	0.0281	N/A	Moh et al., (1995)
EC 17	Taipei MRT CH218 SM37, Taiwan	6.04	19.8	20.2	9.20	0.1087	0.0481	N/A	Moh et al., (1995)
EC 18	Taipei MRT CH218 SM39, Taiwan	6.04	21.2	22.5	7.09	0.1411	0.0434	N/A	Moh et al., (1995)
EC 19	Taipei MRT CH218B1 SM139, Taiwan	6.1	18.5	27.3	4.03	0.2484	0.0338	N/A	Moh et al., (1996)
EC 20	San Francisco N-2 Tunnel, USA	3.70	11.0	28.8	4.65	0.2152	0.0330	N/A	Abu-Farsakh et al., (1999)
EC 21	Taipei MRT CC277 SM322, Taiwan	6.27	22.7	34.3	1.69	0.5905	0.028	C.G.	Chien (1999)

Note : C.G. : Chemical grouting .

表 3-8 土壓平衡式潛盾隧道於黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
EC 22	MRT C706, Singapore	6.3	18.3	9	N/A	N/A	0.1111	N/A	Sigl and Atzl (1999)
EC 23	Bangkok, Thailand	3.06	18.66	12	N/A	N/A	0.0833	N/A	Wannipa and Supot (1999)
EC 24	Taipei CN 257-1 SM139, Taiwan	6	13	20	N/A	N/A	0.0500	N/A	Chi et al., (2001)
EC 25	Tokyo Koto-ku Case A, Japan	3.0	14.3	22.4	0.97	1.0320	0.0344	N/A	Komiya et al., (2001)
EC 26	Tokyo Koto-ku Case B, Japan	3.0	14.3	27.7	1.19	0.8404	0.0276	C.G.	Komiya et al., (2001)
EC 27	Tokyo Koto-ku Case C, Japan	3.0	14.3	28.6	1.07	0.9344	0.0276	C.G.	Komiya et al., (2001)
EC 28	Bangkok MRT Blue Line, Thailand	6.45	21.8	14	N/A	N/A	0.0714	N/A	Lin et al., (2002)
EC 29	Bangkok Water Transmission Project, Thailand	2.77	18.5	12	N/A	N/A	0.0833	N/A	Lin et al., (2002)
EC 30	Madrid Metro Extension, Control Section 1, Spain	9.4	14.2	4.6	N/A	N/A	0.2174	N/A	Melis et al., (2005)
EC 31	Madrid Metro Extension, Control Section 3, Spain	9.4	17.7	4.4	N/A	N/A	0.2273	N/A	Melis et al., (2005)

Note : C.G. : Chemical grouting °

表 3-9 土壓平衡式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
EsC 1	Pipeline CH1480m, Singapore	3.75	10.6	30.0	5.09	0.1963	0.0303	N/A	Balasubramanian (1987)
EsC 2	Pipeline CH2830m, Singapore	3.75	10.6	61.7	5.44	0.1838	0.0137	N/A	Balasubramanian (1987)
EsC 3	Pipeline CH350m, Singapore	3.75	10.6	56.7	78.74	0.0127	0.0186	N/A	Balasubramanian (1987)
EsC 4	Pipeline CH1600m, Singapore	3.75	10.6	28.8	38.02	0.0263	0.0354	N/A	Balasubramanian (1987)
EsC 5	Pipeline CH2860m, Singapore	3.75	10.6	56.9	8.08	0.1237	0.0170	N/A	Balasubramanian (1987)
EsC 6	Metro C301B W.B. TA158, Singapore	5.3	18.9	43.5	23.75	0.0421	0.0205	N/A	Shirlaw and Copsey (1987)
EsC 7	Metro C301B W.B. TA151, Singapore	5.3	18.9	32	18.18	0.0550	0.0290	N/A	Shirlaw and Copsey (1987)
EsC 8	Tokyo Subway Shinjuku Line No.11, Japan	7.45	15.8	35.3	0.89	1.1235	0.0176	N/A	Miyazaki et al., (1988)
EsC 9	Tokyo Subway Shinjuku Line No.12, Japan	7.45	15.8	40.9	1.05	0.9541	0.0154	N/A	Miyazaki et al., (1988)

Note : C.G. : Chemical grouting ◦

表 3-9 土壓平衡式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
EsC 10	Metro C301B W.B. 177A, Singapore	5.3	18.9	36.4	10.80	0.0926	0.0222	N/A	Elias and Mizuno (1990)
EsC 11	Metro C301B W.B. CH32600, Singapore	5.3	18.4	15.7	61.73	0.0162	0.0632	N/A	Elias and Mizuno (1990)
EsC 12	Milwaukee Sewer Section CT-8-2, U.S.A	3.17	13.0	72.3	7.40	0.1352	0.0138	N/A	Ilsley et al., (1991)
EsC 13	Milwaukee Sewer Section CT-5/6, U.S.A	3.22	10.7	40.0	4.32	0.2313	0.0253	N/A	Ilsley et al., (1991)
EsC 14	Milwaukee Sewer Section NS-10-U, U.S.A	2.25	7.9	83.1	4.79	0.2086	0.0118	C.G.	Ilsley et al., (1991)
EsC 15	Milwaukee Sewer Section NS-10-R, U.S.A.	2.25	7.56	74.6	0.58	1.7204	0.0109	N/A	Ilsley at al., (1991)
EsC 16	Washington Metro F4 SSI4, U.S.A.	5.7	15	113.8	6.43	0.1555	0.0086	N/A	Clough et al., (1993)
EsC 17	Taipei MRT CN254 SM34, Taiwan	6.00	14.3	40.0	3.47	0.2886	0.0222	N/A	Lin (1993)
EsC 18	Taipei MRT CN254 SM66, Taiwan	6.00	14.0	26.5	12.97	0.0771	0.0355	N/A	Lin (1993)
EsC 19	Taipei MRT CN254 SM157, Taiwan	6.00	14.0	36.0	28.99	0.0345	0.0266	N/A	Lin (1993)

Note : C.G. : Chemical grouting °

表 3-9 土壓平衡式潛盾隧道於軟弱黏土層開挖引致地表沉陷歷時曲線之案例列表 (Cont'd)

Case No.	Site Location	Diameter 2R (m)	Depth Z (m)	S_{max} (mm)	$1/a$ (mm/day)	a (day/mm)	b (1/mm)	Additional Method	Reference
EsC 20	Taipei MRT CH218 SM73, Taiwan	6.05	12.0	55.3	13.62	0.0734	0.0178	N/A	Zhang (1993)
EsC 21	Taipei MRT CH218 SM79, Taiwan	6.05	12.0	41.3	10.98	0.0911	0.0237	N/A	Zhang (1993)
EsC 22	Shanghai Furongjiang Sewer Tunnel, China	4.20	5.6	76.4	N/A	N/A	0.0131	N/A	Yi et al., (1993)
EsC 23	Taipei MRT CN262 SM59, Taiwan	6.25	13.8	48.9	25.32	0.0395	0.0189	N/A	Moh et al., (1995)
EsC 24	Taipei MRT CH218 SM36, Taiwan	6.05	16.0	31.5	10.94	0.0914	0.0312	N/A	Moh et al., (1995)
EsC 25	Barcelona Subway Extension Tunnel, Spain	8.00	10.0	24	N/A	N/A	0.0417	N/A	Ledesma and Romero (1997)
EsC 26	Mexico City Sewer, Mexico	4	12.8	30	N/A	N/A	0.0333	N/A	Romo (1997)
EsC 27	Shanghai Metro Line2 S19, China	6.20	15.0	46.7	3.37	0.2966	0.0181	N/A	Lee et al., (1999)
EsC 28	Shanghai Metro Line2 S2, China	6.20	15.0	20.6	6.09	0.1643	0.0496	N/A	Lee et al., (1999)
EsC 29	Taipei CH 218B1 SM127, Taiwan	6.04	18.5	24	N/A	N/A	0.0417	N/A	Chi et. al., (2001)

Note : C.G. : Chemical grouting ◦

表 3-10 雙曲線參數 a 值建議表

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 3-11 雙曲線模式初始沉陷速率 $1/a$ 建議表

Recommended initial rate of settlement $1/a$ (mm/day)				
		Type of shield machine		
Additional methods	Type of soil	Open shield	Slurry shield	EPB shield
Not adopted	Sand	-	16.67 (2 cases)	16.67 ± 8.33 (13 cases)
	Clay	-	1.45 ± 0.17 (2 cases)	7.73 ± 3.38 (16 cases)
	Soft clay	-	7.57 ± 4.93 (4 cases)	20 ± 13.33 (18 cases)
Adopted	Sand	11.72 ± 8.28 (2 cases)	1.80 ± 0.53 (2 cases)	15 ± 10 (9 cases)
	Clay	-	-	2.30 ± 1.15 (5 cases)
	Soft clay	6.48 ± 1.21 (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 3-12 雙曲線參數 b 值建議表

Recommended parameter b (1/mm)				
		Type of shield machine		
Additional methods	Type of soil	Open shield	Slurry shield	EPB shield
Not adopted	Sand	-	0.10 ± 0.05 (14 cases)	0.06 ± 0.04 (29 cases)
	Clay	0.06 ± 0.03 (9 cases)	0.18 ± 0.08 (20 cases)	0.05 ± 0.02 (27 cases)
	Soft clay	-	-	0.03 ± 0.01 (25 cases)
Adopted	Sand	0.06 ± 0.03 (7 cases)	-	0.03 ± 0.01 (12 cases)
	Clay	0.04 ± 0.02 (10 cases)	-	0.03 ± 0.003 (5 cases)
	Soft clay	0.01 ± 0.004 (9 cases)	-	-
P.S.: Additional methods: including Grouting method; Compressed-Air method and Dewatering method。 Soft clay: $N < 4$ for SPT; Marine clay and Sensitive clay。				

表 3-13 地表最大沉陷量 $S_{max}=1/b$ 建議表

Predicted Maximum Surface Settlement $S_{max}=1/b$ (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。				

表 3-14 地表最大沉陷量 $S_{max}=I/b$ 建議表與 Fujita 之 S_{max} 建議表相差百分比

Comparison of S_{max} (%)				
		Type of shield machine		
		Open shield	Slurry shield	EPB shield
Additional methods	Type of soil			
Not adopted	Sand	-	-	-
	Clay	-76%	-83%	-63%
	Soft clay	-	-	-75%
Adopted	Sand	-45%	-	-
	Clay	-	-	-
	Soft clay	-	-	-
Average		-61%	-83%	-69%

表 5-1 潛盾隧道施工案例與沉陷槽寬度參數 i_z

Case No.	Case Location	Ground Condition	Shield type	Tunnel Depth Z_0 (m)	Tunnel Diameter $2R$ (m)	Width Parameter				Reference
						z (m)	i_z (m)	z (m)	i_z (m)	
1	N. W. A Sewerage Scheme Tyneside, Hubburn, U.K.	Clay	N/A	7.50	2.01	0	4.6	2.6	3.8	Attewell et al., (1975)
						4.0	3.4	5.22	3.0	
2	Washington D. C. Metro Project A-2, Line c, U.S.A.	Silt Sand & Silt Clay	Mechanical Shield	14.6	6.40	0	5.9	0.7	5.6	Cording & Hansmire, (1975)
						2.32	4.7	4.4	3.5	
						7.6	2.8	10.8	2.4	
3	N. W. A. Sewerage Tyneside, Willington Quay Siphon, U.K.	Silt Alluvial Clay	Hand-excavated in Shield	13.37	4.25	0	8.0	1.0	7.5	Attewell et al., (1976)
						2.75	6.2	8	4.1	
4	Belfast Sewerage Scheme, Ireland	Organic Silt	Hand-excavated in Shield	4.55	2.70	0	3.08	0.9	2.4	Glossop & Farmer, (1977)
						1.6	2.3	N/A		
5	Thunder Bay Sanitary Trunk Sewerage Array 2, Canada	Clay	Use a Full-face Boring Machine	10.50	2.47	0	3.4	4.5	2.2	Palmer & Belshaw, (1980)
						6	1.8	7.5	1.7	
6	Mexico City Central Interceptor	Silty Clay	Open Shield	23.5	3.5	0	17.7	6	12.3	Schmitter et al., (1981)
						12	11.2	N/A		
7	Taipei Sewerage Sec. 1, Taiwan	Clay	EPB Shield	9.0	4.00	0	4.1	2.9	3.0	Fang & Chen, (1990)
						6.1	2.5	N/A		
8	Taipei Sewerage Sec. 2, Taiwna	Silt Clay & Silt Sand	Slurry Shield	14.4	4.83	0	9.4	3.5	6.8	Fang & Chen, (1990)
						9.6	5.1	N/A		

表 5-1 潛盾隧道施工案例與沉陷槽寬度參數 i_z (Cont'd)

Case No.	Case Location	Ground Condition	Shield type	Tunnel Depth Z_0 (m)	Tunnel Diameter $2R$ (m)	Width Parameter				Reference
						z (m)	i_z (m)	z (m)	i_z (m)	
9	Taipei Ell-Chorng Flood Way, Taiwan	Silty Clay	Slurry Shield	12.0	4.83	0	9.9	5	4.6	Lee et al., (1990)
						11	4.3	N/A		
10	Furongjiang Sewer Tunnel, China	Clay	EPB Shield	5.6	4.2	0	3.18	0.91	2.5	Yi et al., (1993)
						1.8	2.3	N/A		
11	London Bank Station, U.K.	London Clay	EPB Shield	41.0	7.8	0	11.2	5.3	9.8	Mair et al., (1993)
						25.7	5.2	33.3	3.7	
12	Japan	Clay	N/A	16.9	3.63	0	4.6	4.3	3.6	Toombs (1995)
						6.1	3.2	9.1	2.5	
						12.3	1.8	N/A		
13	Taipei MRT CH218B1 RE33, Taiwan	Clay	EPB Shield	18.5	6.0	0	8.9	10	5.9	Moh et al., (1996)
14	Mexico Sewerage System, LineA	Soft Clay	Slurry Shield	13.0	4.00	0	9.8	5	6.8	Romo, (1997)
						10.15	3.7	N/A		
15	Mexico Sewerage System, Line B	Soft Clay	Slurry Shield	13.0	4.00	0	10.0	5	6.9	Romo, (1997)
						10.15	3.8	N/A		

表 5-1 潛盾隧道施工案例與沉陷槽寬度參數 i_z (Cont'd)

Case No.	Case Location	Ground Condition	Shield type	Tunnel Depth Z_0 (m)	Tunnel Diameter $2R$ (m)	Width Parameter				Reference
						z (m)	i_z (m)	z (m)	i_z (m)	
16	Bangkok Sewer Tunnel, Thailand	Soft to Stiff Clay	EPB Shield	18.5	2.66	0	4.62	2	4.97	Park, (2004)
						4	4.49	6	3.96	
						8	3.50	10	3.05	
						12	2.62	14	2.09	



表 5-2 潛盾隧道施工案例與隧道中心線正上方最大沉陷量 $S_{max,z}$

Case No.	Case Location	Ground Condition	Shield type	Tunnel Depth Z_0 (m)	Tunnel Diameter $2R$ (m)	Maximum Settlement				Reference
						z (m)	$S_{max,z}$ (mm)	z (m)	$S_{max,z}$ (mm)	
1	London Transport Fleet Line, Green PK, y1, U.K.	London Clay	Hand-excavated in Shield	29.3	4.146	0	6	9.5	7	Attewell & Farmer, (1974)
						15.4	8	22.0	10	
						25.2	11	27.1	15	
2	London Transport Fleet Line, Green PK, z1, U.K.	London Clay	Hand-excavated in Shield	29.3	4.146	0	6	8.5	7.7	Attewell & Farmer, (1974)
						14.9	8	20.9	8	
						26.5	15	N/A		
3	Washington D. C. Metro Project A-2, Line c, U.S.A.	Silt Sand & Silt Clay	Mechanical Shield	14.6	6.40	0	150	2.32	207	Cording & Hansmire, (1975)
						7.1	255	10	304	
						10.8	333	N/A		
4	N. W. A Sewerage Scheme Tyneside, Hubburn, U.K.	Clay	N/A	7.50	2.01	0	8	2.6	10	Attewell et al., (1975)
						4.0	11	5.22	12	
5	N. W. A. Sewerage Tyneside, Willington Quay Siphon, U.K.	Silt Alluvial Clay	Hand-excavated in Shield	13.37	4.25	0	65	2.75	69	Attewell et al., (1976)
						8	97	N/A		
6	Japan Subway, Case B-2	Soft Cohesive Soil	Mechanical Shield	27.5	7.06	0	67	10.3	76	Hanya, (1977)
						20.4	118	N/A		

表 5-2 潛盾隧道施工案例與隧道中心線正上方最大沉陷量 $S_{max,z}$ (Cont'd)

Case No.	Case Location	Ground Condition	Shield type	Tunnel Depth Z_0 (m)	Tunnel Diameter $2R$ (m)	Maximum Settlement				Reference
						z (m)	$S_{max,z}$ (mm)	z (m)	$S_{max,z}$ (mm)	
7	Thunder Bay Sanitary Trunk Sewerage Array 2, Canada	Clay	Use a Full-face Boring Machine	10.5	2.47	0	52	4.5	59	Palmer & Belshaw, (1980)
						6	69	7.9	102	
						8.5	109	N/A		
8	Mexico City Central Interceptor	Silty Clay	Open Shield	23.5	3.5	0	122	6	140	Schmitter et al., (1981)
						12	150	N/A		
9	Taipei Sewerage Sec. 1, Taiwan	Clay	EPB Shield	9.0	4.00	0	204	3.0	277	Fang & Chen, (1990)
						6.2	336	N/A		
10	Taipei Ell-Chorng Flood Way, Taiwan	Silty Clay	Slurry Shield	12.0	4.83	0	144	5	138	Lee et al., (1990)
						11	121	N/A		
11	Milwaukee Sewer Section CT-8-1, U.S.A	Silt Clay	EPB Shield	16.0	3.20	0	69	13.3	98	Ilseley et al., (1991)
12	Milwaukee Sewer Section NS-10-U, U.S.A	Organic Clay	Slurry Shield	7.94	2.25	0	22	6.0	47	Ilseley et al., (1991)
13	Milwaukee Sewer Section CT-7, U.S.A	Organic Clay	EPB Shield	7.44	3.57	0	19	4.9	27	Ilseley et al., (1991)
14	Taipei MRT CH218, Taiwan	Silt Clay	EPB Shield	12.5	6.00	0	9	4.6	10.8	Chang, (1993)
						7.7	12.6	8.7	14.7	

表 5-2 潛盾隧道施工案例與隧道中心線正上方最大沉陷量 $S_{max,z}$ (Cont'd)

Case No.	Case Location	Ground Condition	Shield type	Tunnel Depth Z_0 (m)	Tunnel Diameter $2R$ (m)	Maximum Settlement				Reference
						z (m)	$S_{max,z}$ (mm)	z (m)	$S_{max,z}$ (mm)	
15	Furongjiang Sewer Tunnel, China	Clay	EPB Shield	5.6	4.2	0	76	0.91	77	Yi et al., (1993)
						1.8	74	2.5	74	
16	London Bank Station, U.K.	London Clay	EPB Shield	41.0	7.8	0	11	5.3	11	Mair et al., (1993)
						25.7	19	33.3	32	
17	Japan	Clay	N/A	16.9	3.63	0	6	4.3	8	Toombs (1995)
						6.1	9	9.1	10	
						12.3	16	N/A		
18	Taipei MRT CH218B1 RE33, Taiwan	Clay	EPB Shield	18.5	6.0	0	20	10	27	Moh et al., (1996)
19	Mexico Sewerage System, Line A	Soft Clay	Slurry Shield	13.00	4.00	0	25	5	36	Romo, (1997)
						10.15	48	N/A		
20	Bangkok Sewer Tunnel, Thailand	Soft to Stiff Clay	EPB Shield	18.50	2.66	0	5	2	12	Park, (2004)
						4	14	6	16	
						8	18	10	22	
						12	25	14	35	

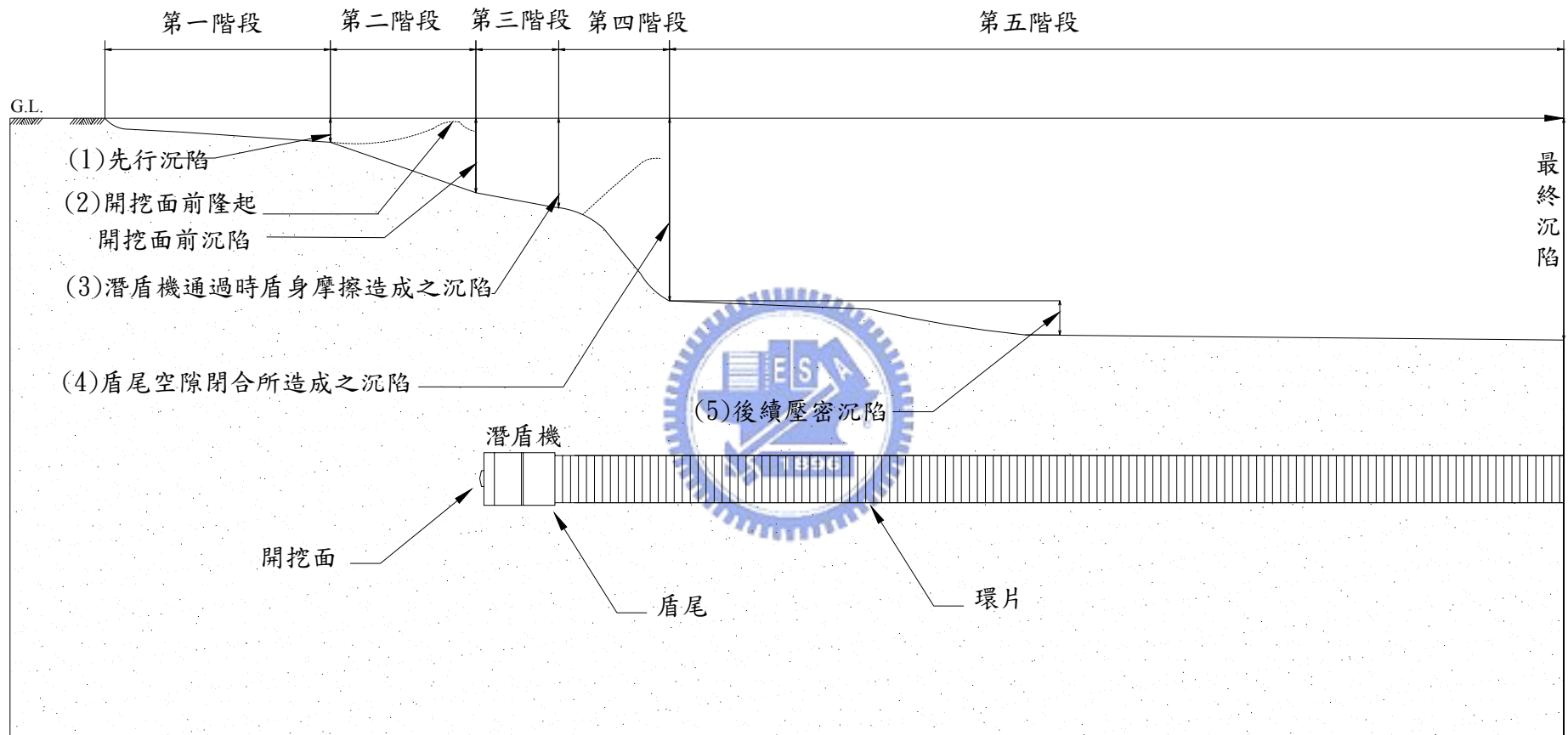


圖 1-1 潛盾機掘進所引致地盤變位之分類 (after Japan Society of Civil Engineers, 1996)

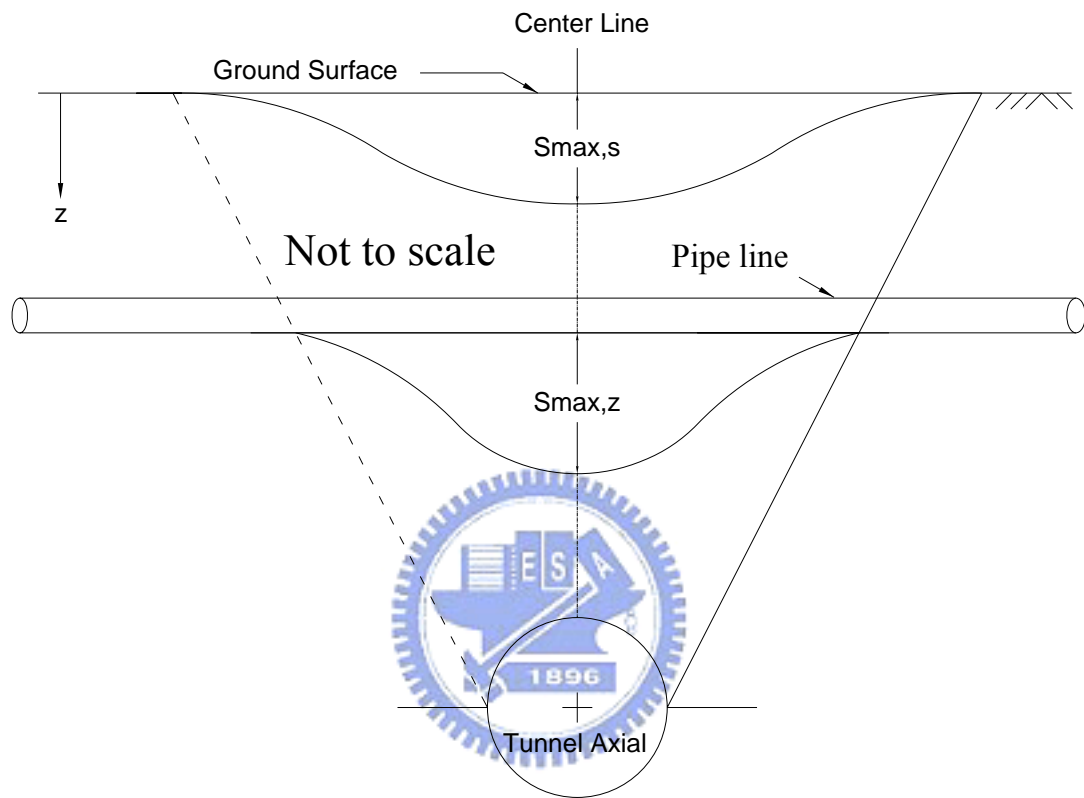


圖 1-2 潛盾隧道施工引致的深層沉陷對地下管線之影響
 (after O'Really and New, 1982)

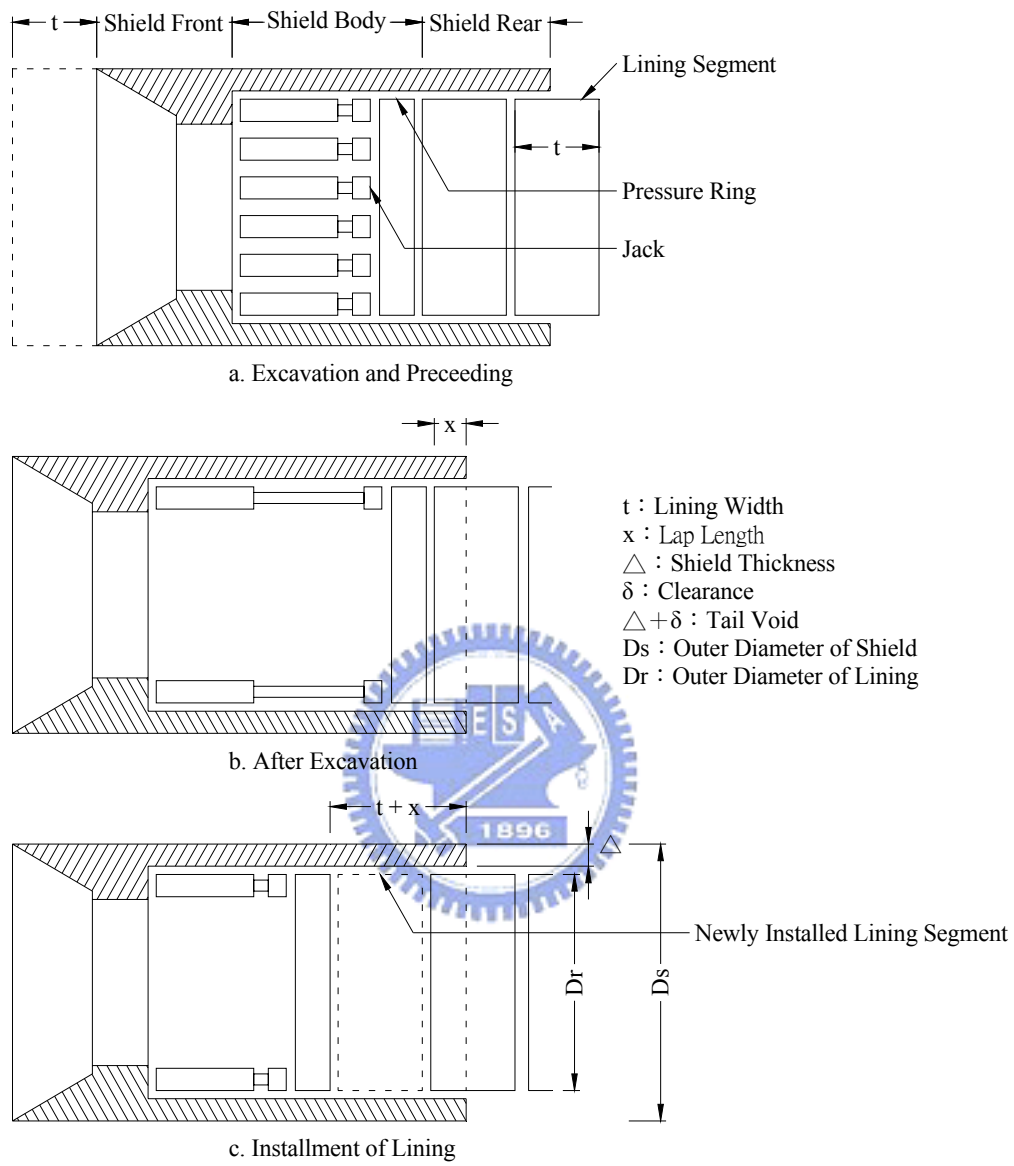
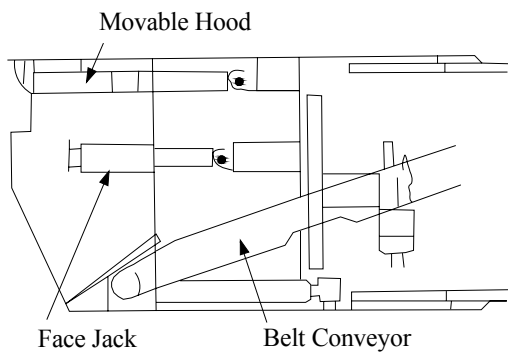
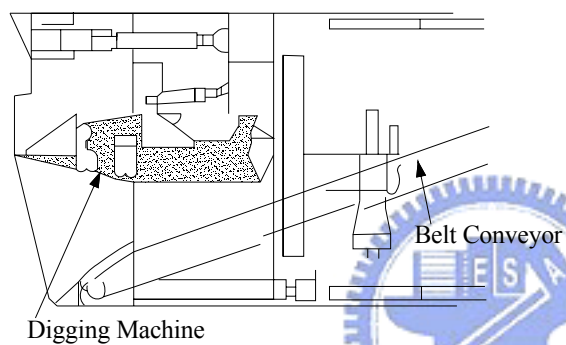


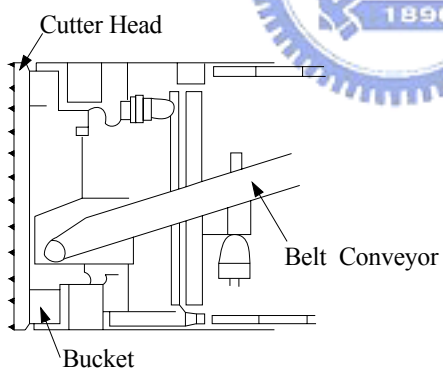
圖 2-1 潛盾施工作業循環示意圖 (朱旭, 1984)



(一) Hand-Excavated Shield

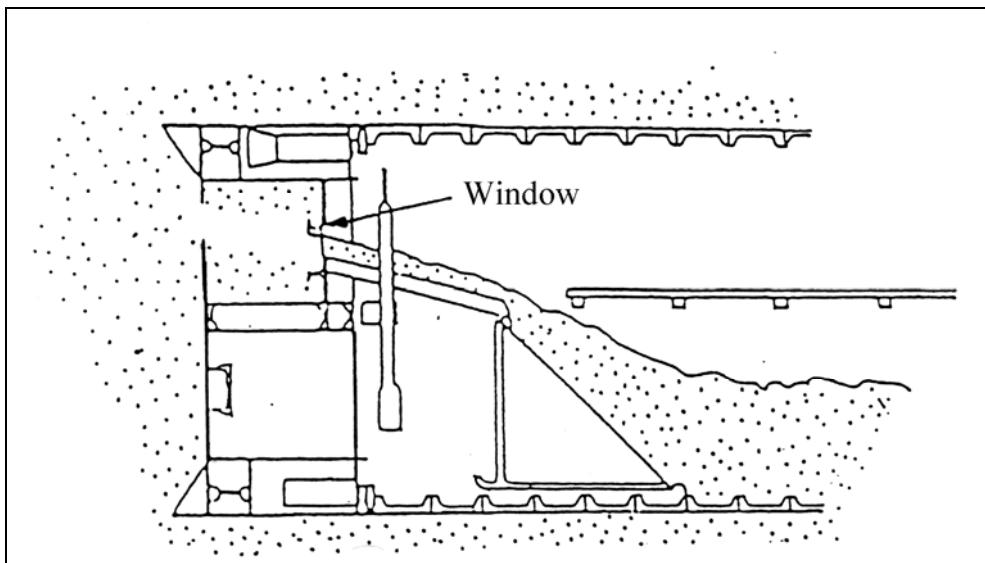


(二) Semi-Mechanical Shield



(三) Mechanical Shield

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

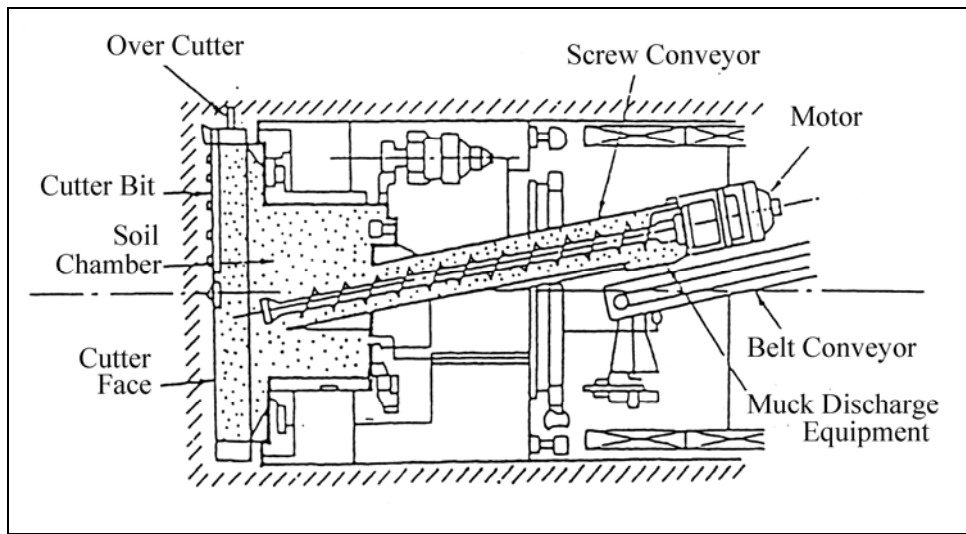


(a)



(b)

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

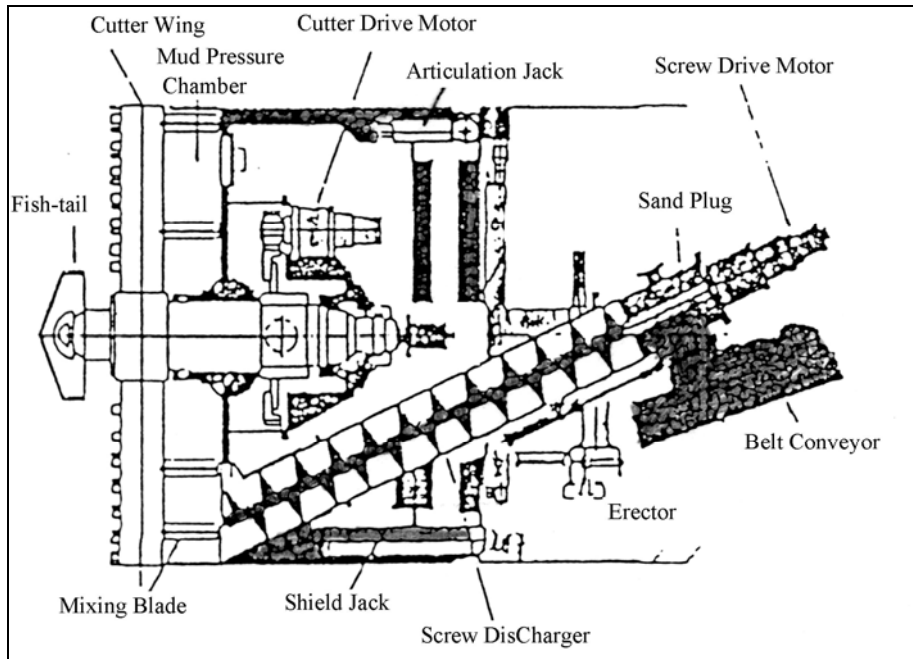


(a)



(b)

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

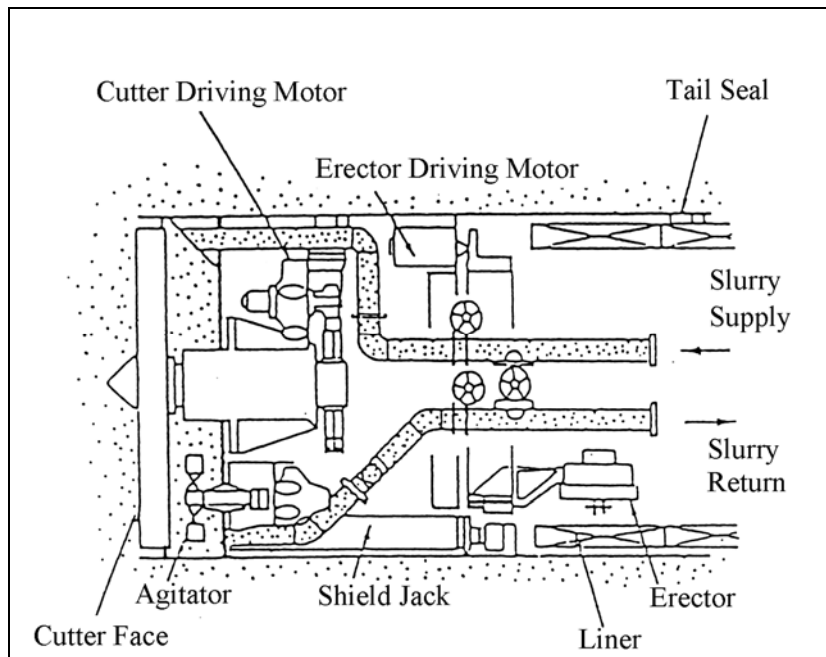


(a)



(b)

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



(b)

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

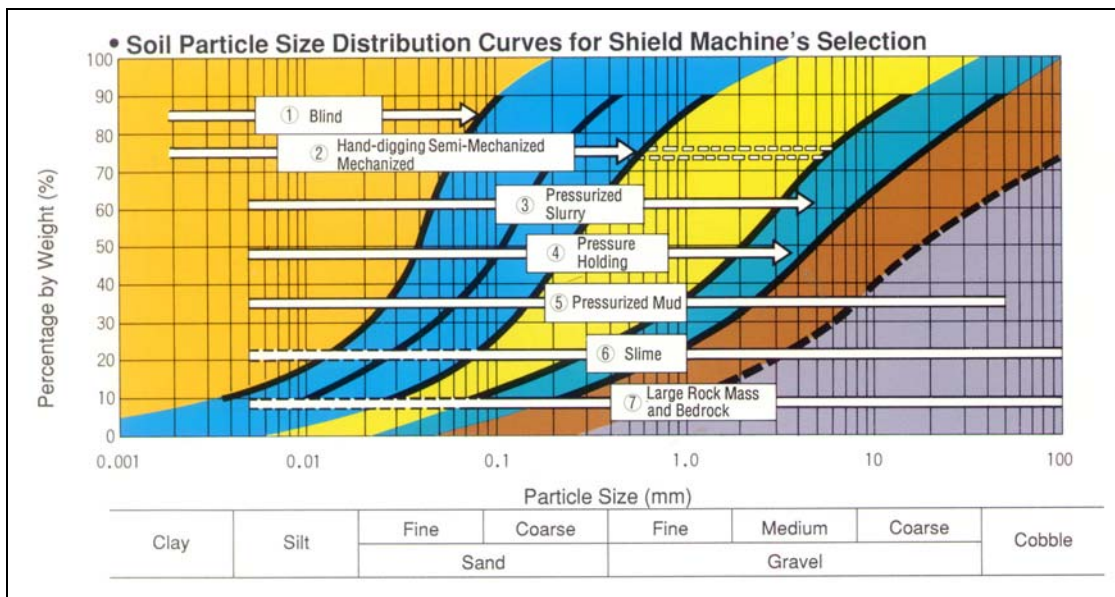
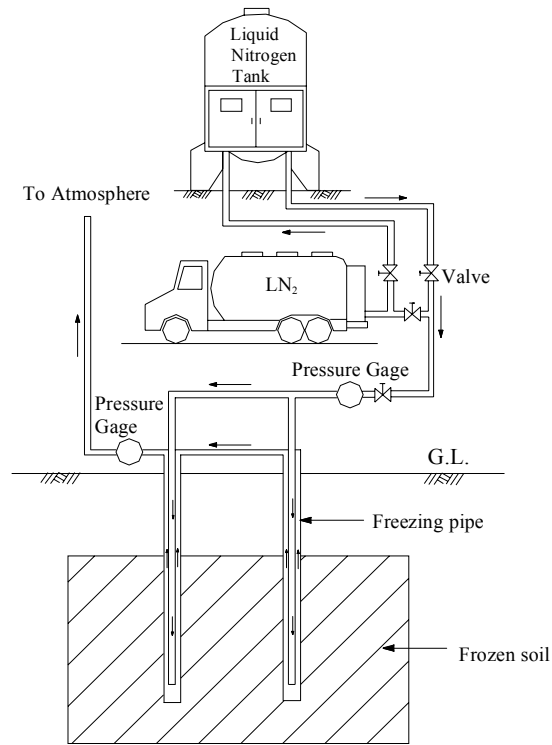
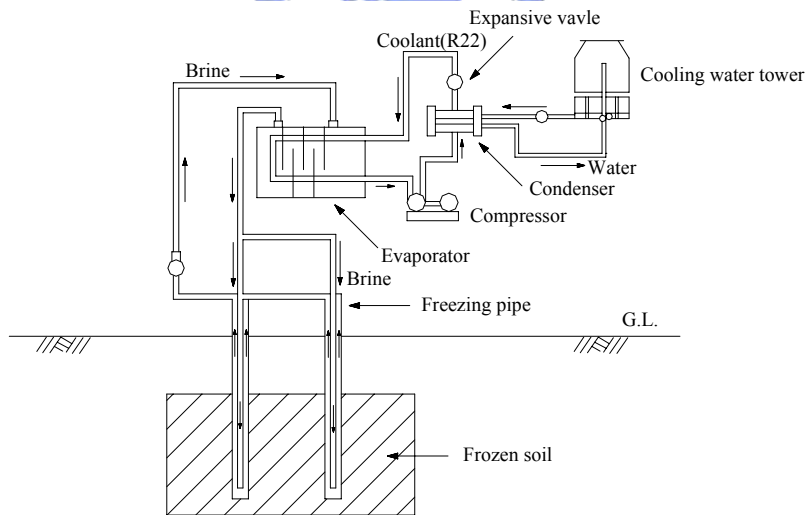


圖 2-7 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)



(a) 液態氮 (LN₂) 凍結工法



(b) 鹽水 (Brine) 凍結工法

圖 2-8 凍結工法 (曾紀偉, 1998)

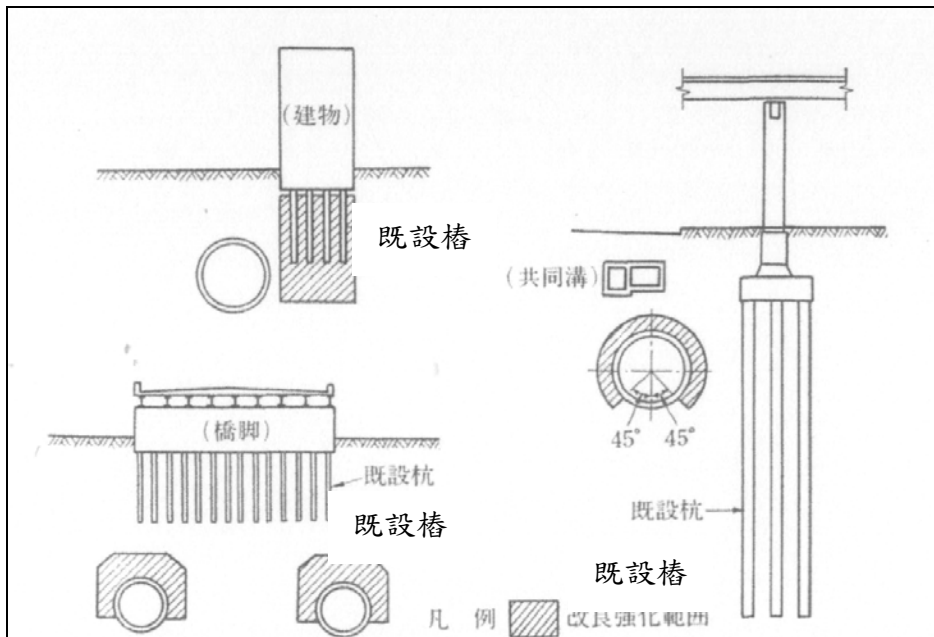


圖 2-9 灌漿工法改良強化範圍示意圖(ツールド工法入門, 1992)

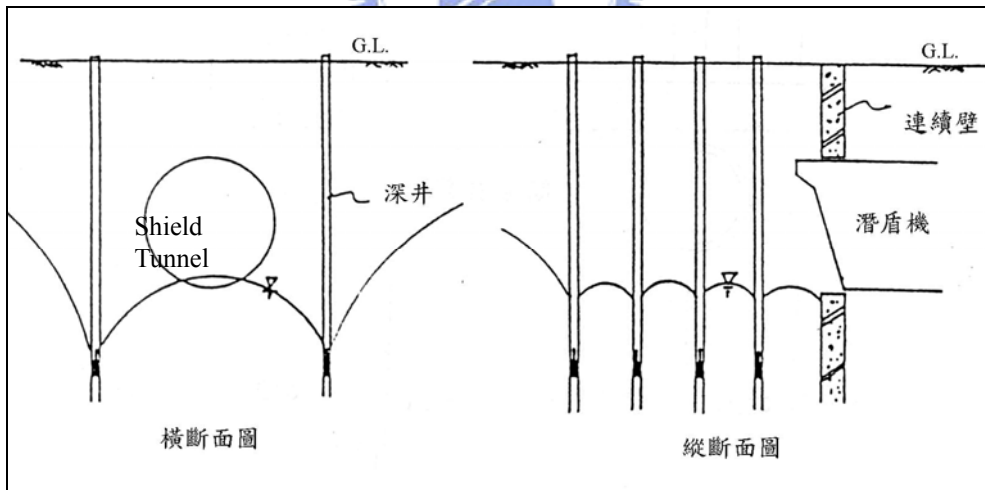


圖 2-10 降水工法示意圖 (林照順, 1992)

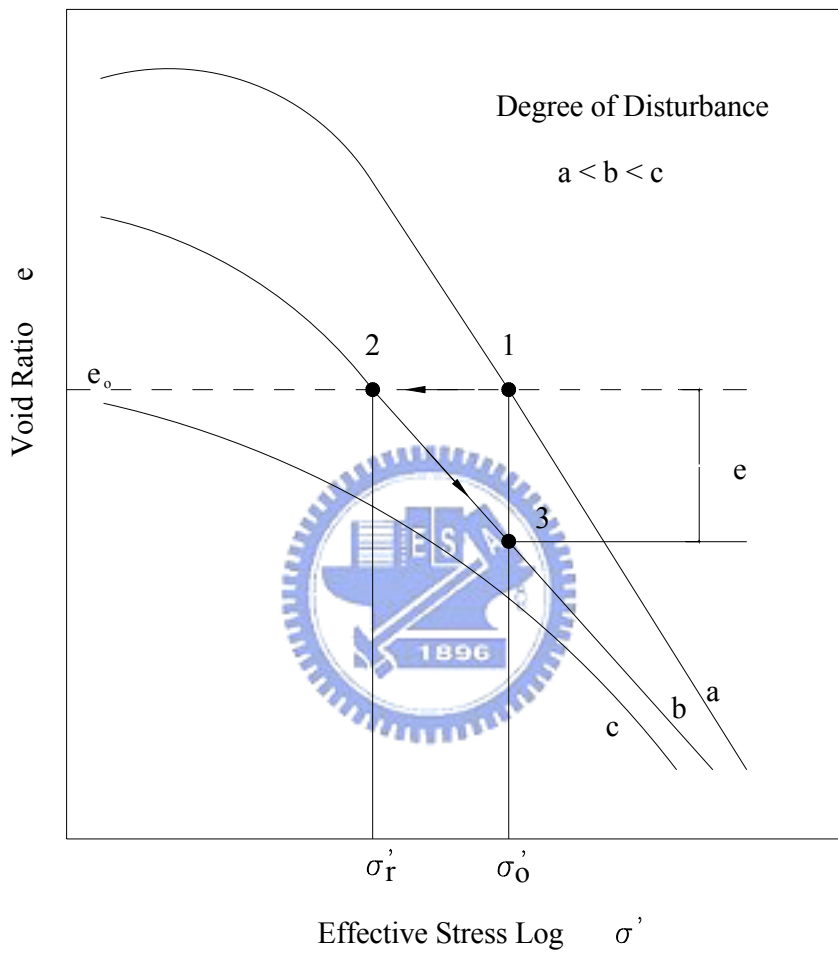
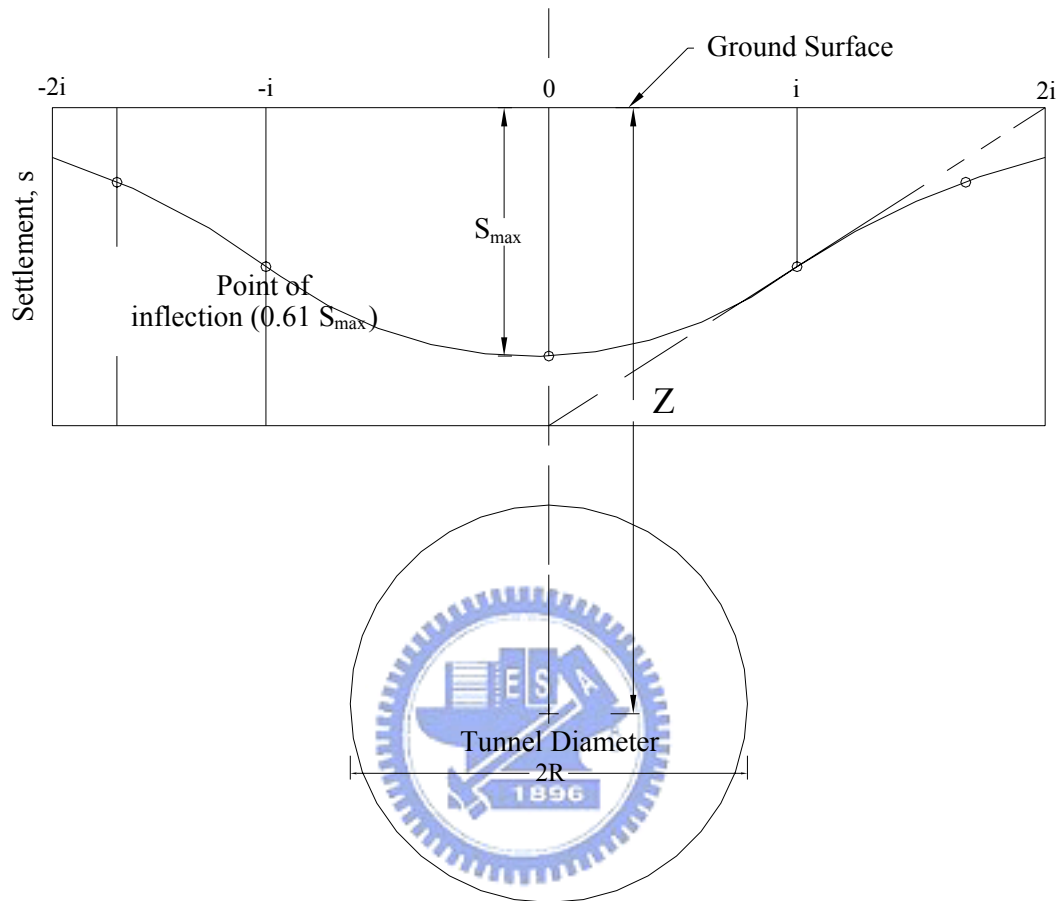


圖 2-11 黏土受擾動所引起之壓密 (after Mori and Akagi, 1985)



$$\text{Volume of trough} = 2.5i S_{max}$$

圖 2-12 以誤差函數曲線（或常態分佈曲線）模擬地表沉陷槽（after Peck, 1969）

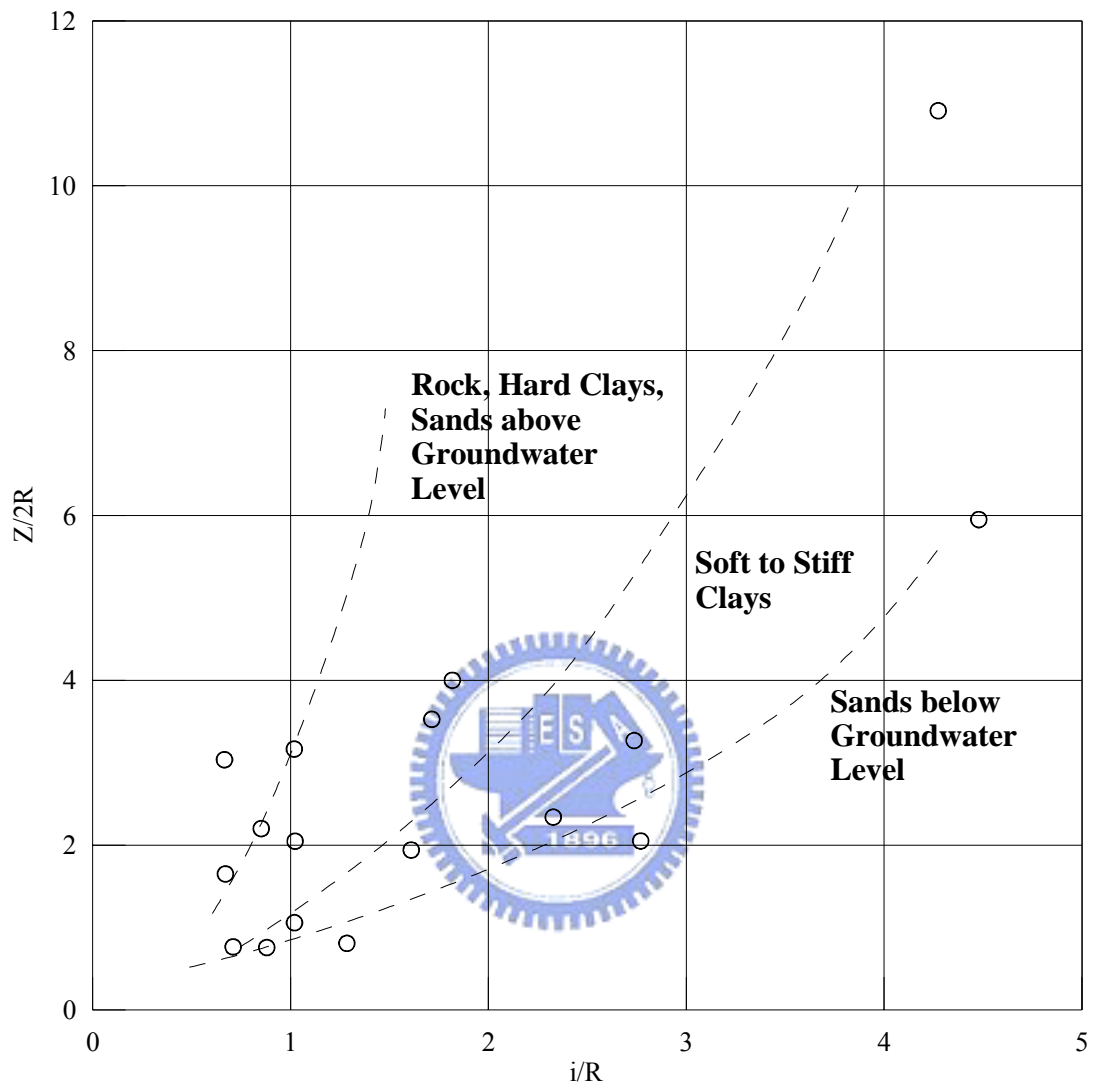


圖 2-13 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係 (after Peck, 1969)

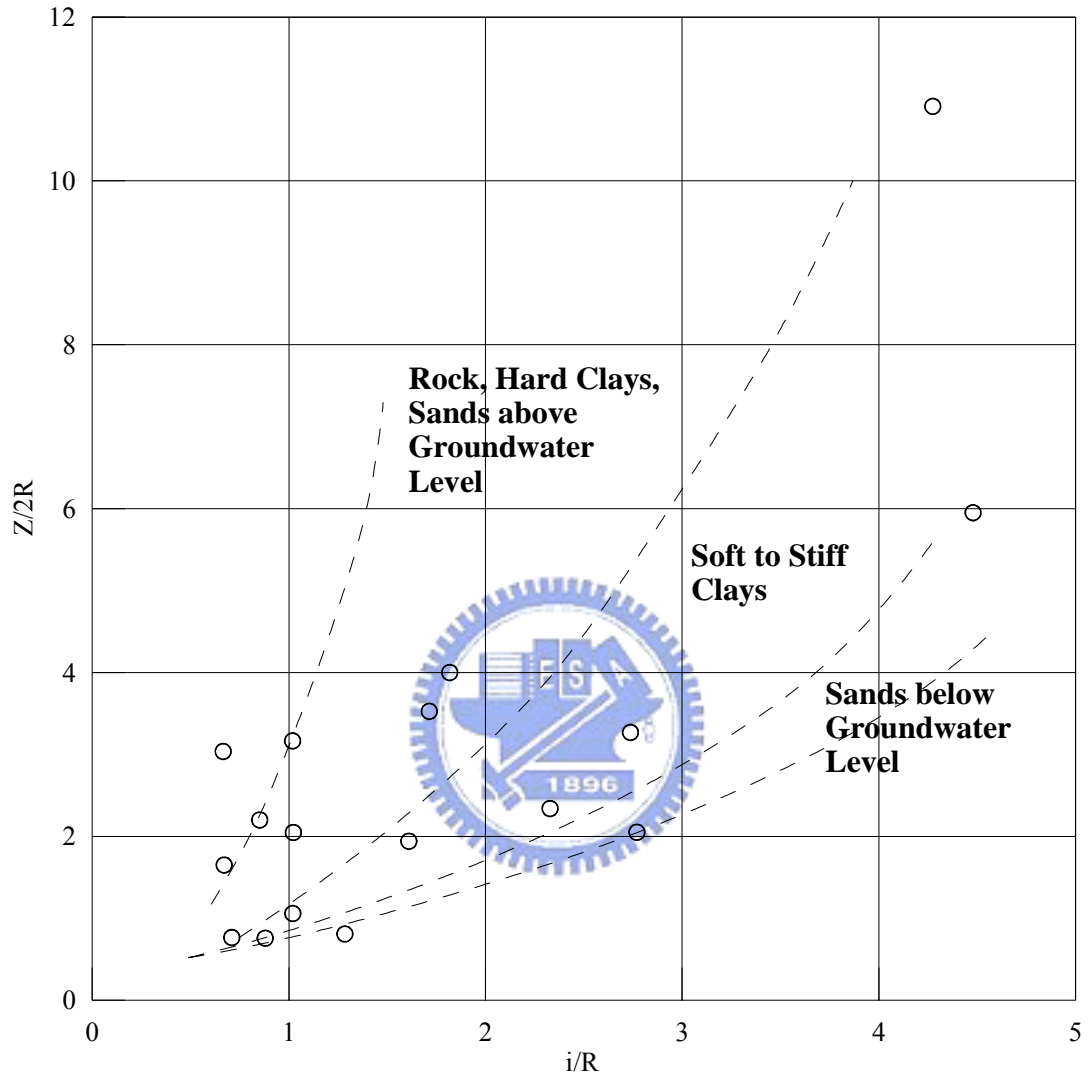


圖 2-14 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係 (after Fang et al., 1994)

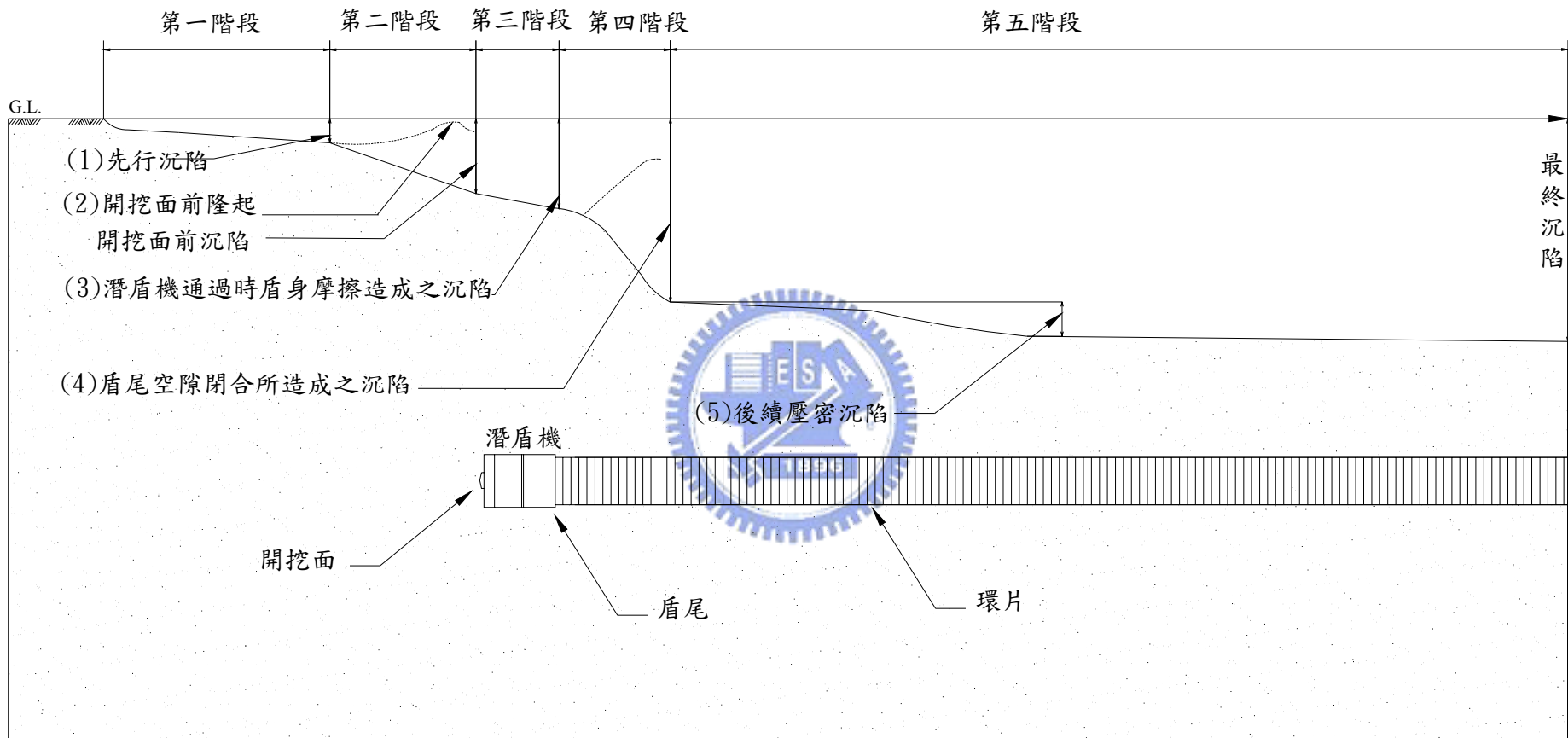


圖 2-15 潛盾機掘進所引致地盤變位之分類 (after Japan Society of Civil Engineers, 1996)

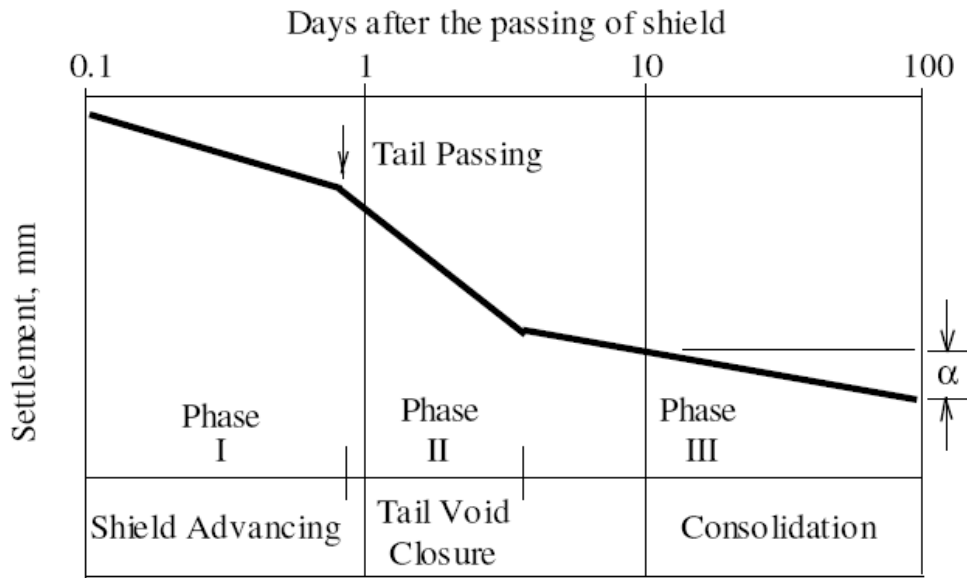


圖 2-16 潛盾隧道施工導致地表沉陷歷時曲線 (after Hwang, 1995)

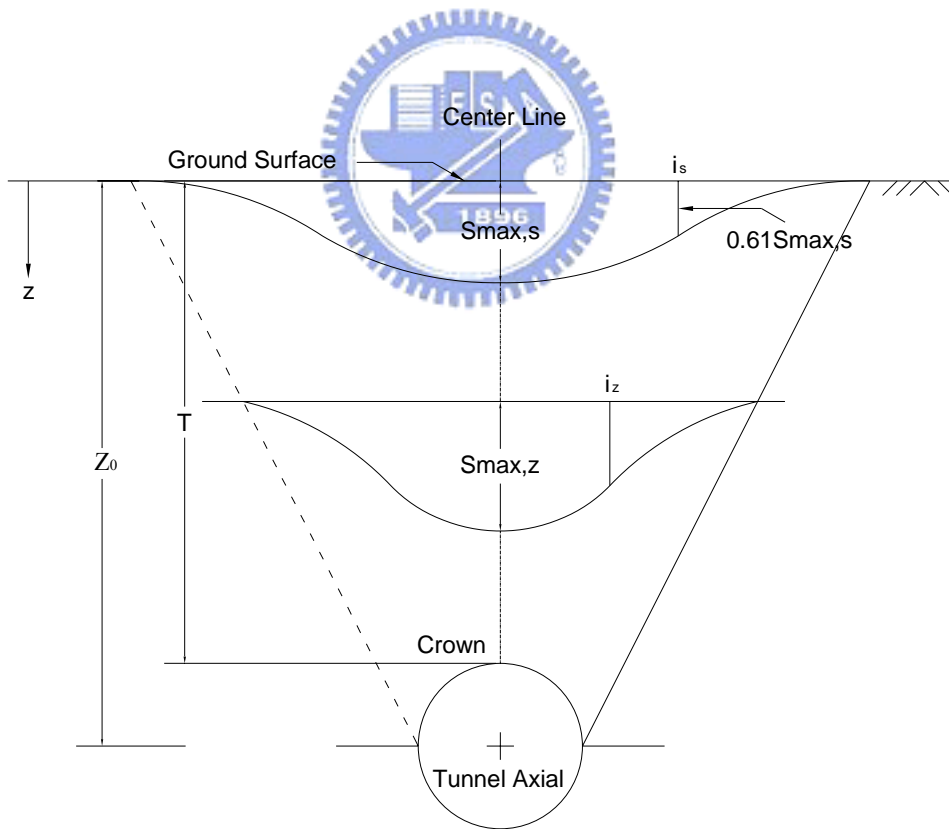
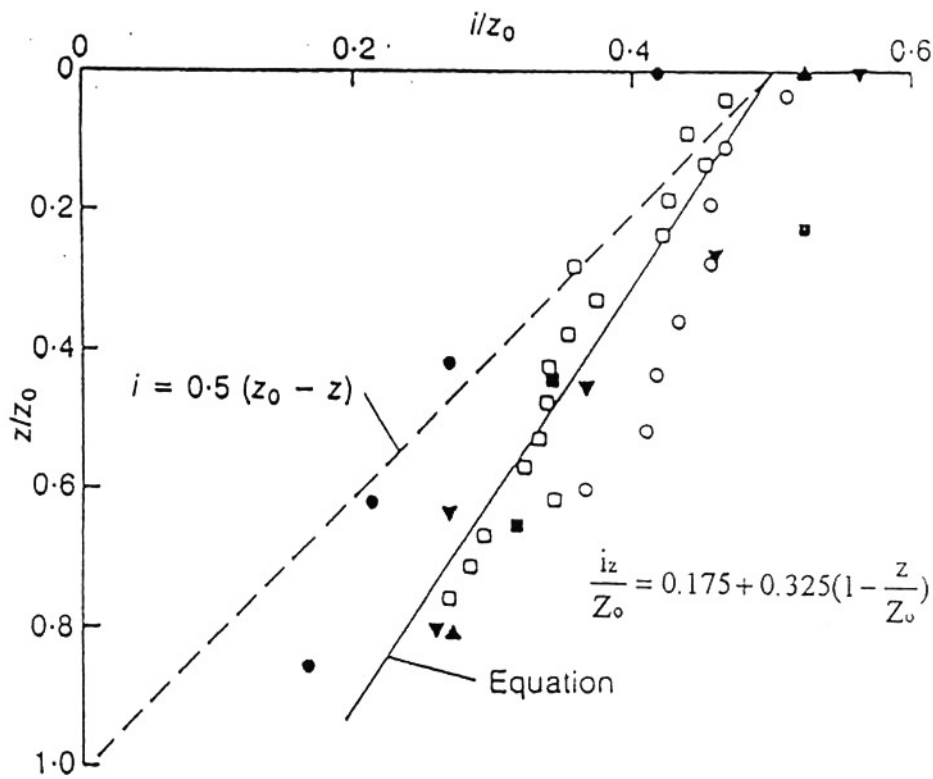


圖 2-17 地表及深層沉陷沉陷槽 (after O'Really and New, 1982)



Location	Soil type	D : m	z_0 : m	Reference
• Green Park	London Clay	4.1	29	Attewell & Farmer (1974)
▲ Regent's Park (northbound)	London Clay	4.1	20	Barratt & Tyler (1976)
▼ Regent's Park (southbound)	London Clay	4.1	34	Barratt & Tyler (1976)
■ Willington Quay	Soft clay	4.3	13.5	Glossop (1978)
○ Centrifuge* model 2DP	Soft clay	0.06	0.13	Mair (1979)
□ Centrifuge* model 2DV	Soft clay	0.06	0.22	Mair (1979)

*Models tested at 75g: equivalent full-scale $D = 4.5$ m, $z_0 = 9.8$ m (2DP), 16.5 m (2DV)

圖 2-18 沉陷槽寬度參數與深度之關係 (after Mair et al., 1993)

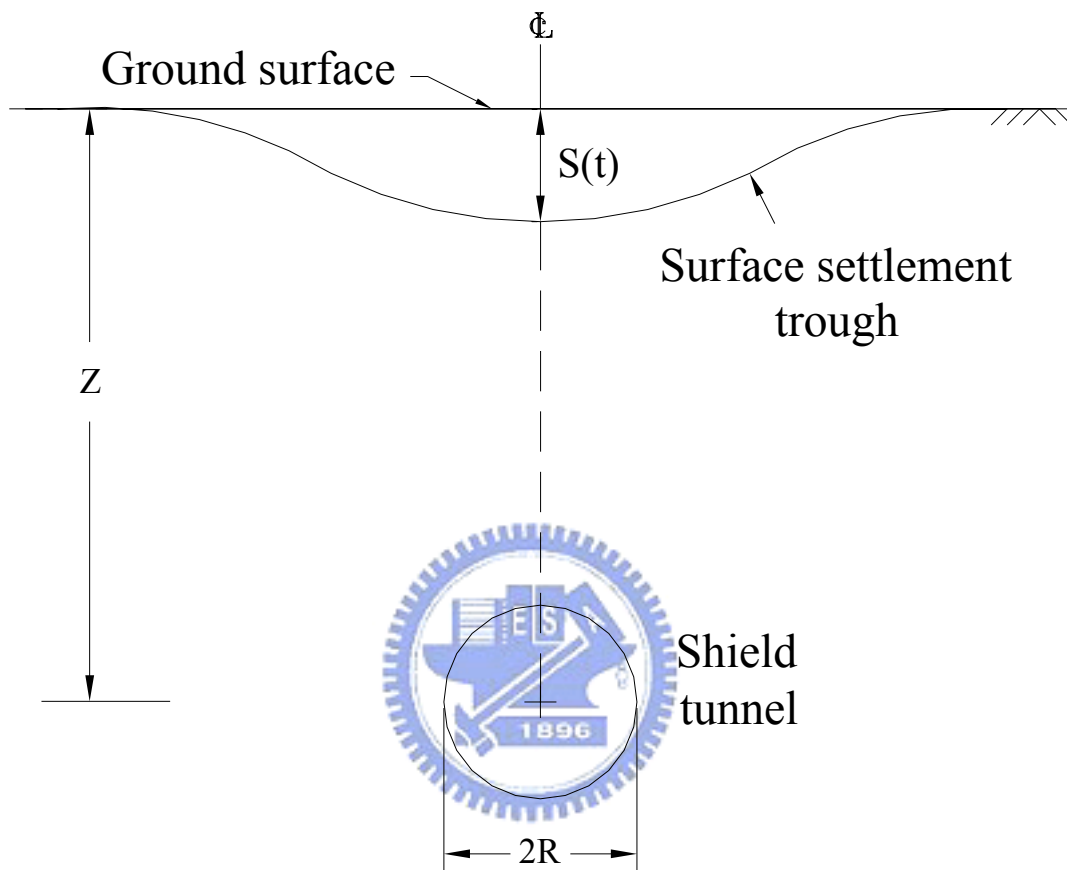


圖 3-1 單一潛盾隧道施工造成之隧道中心線上方地表沉陷歷時曲線示意圖

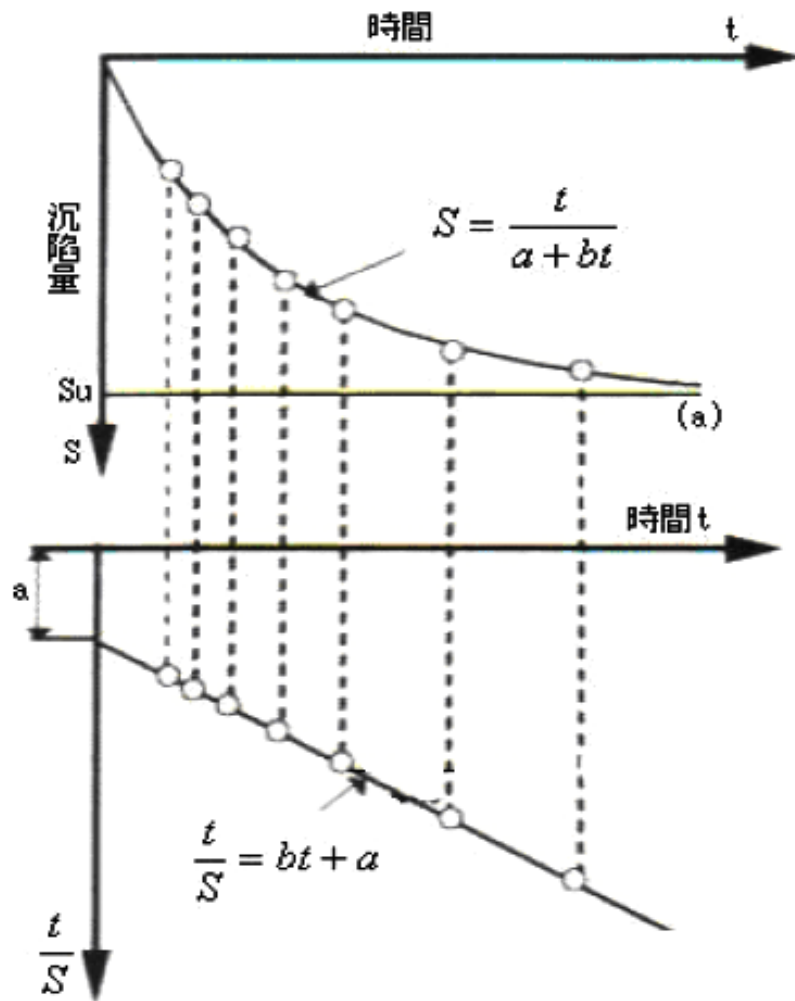
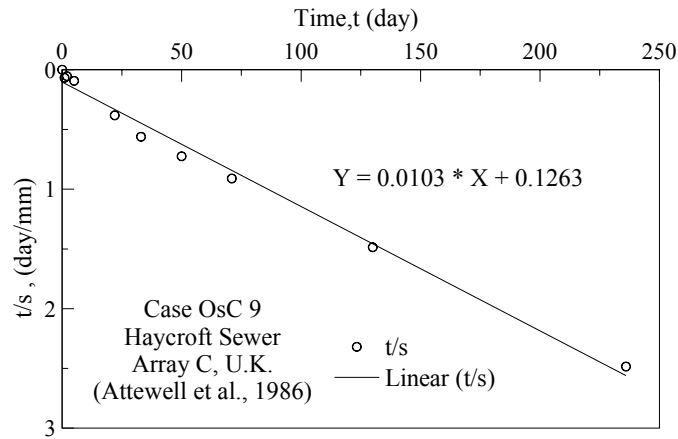
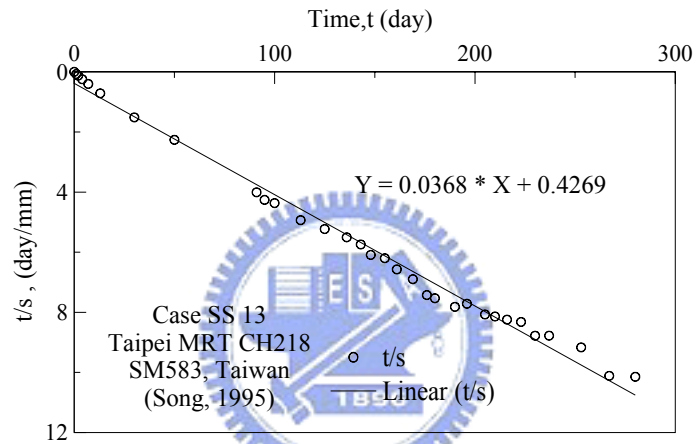


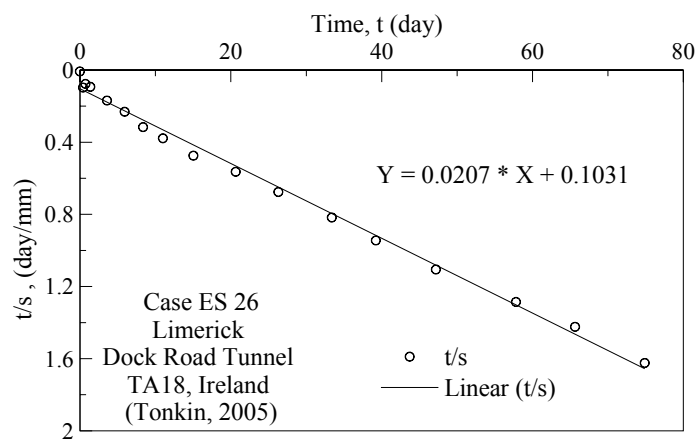
圖 3-2 由現地沉陷歷時曲線推求雙曲線參數 a 及 b (摘自林冠州等人, 2006)



(a)



(b)



(c)

圖 3-3 如何決定潛盾隧道施工引致地表沉陷歷時曲線之雙曲線參數

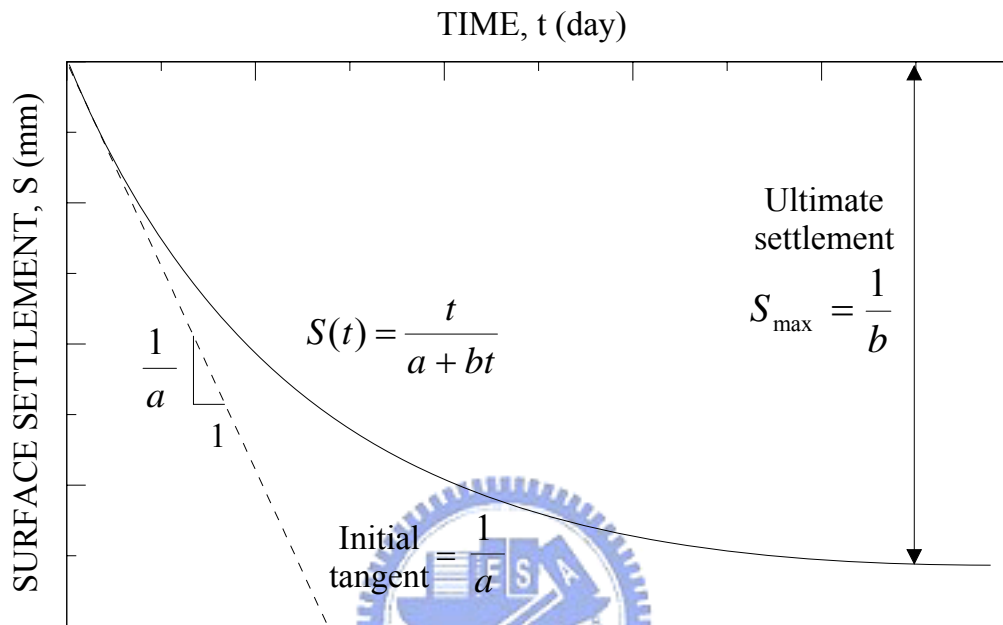
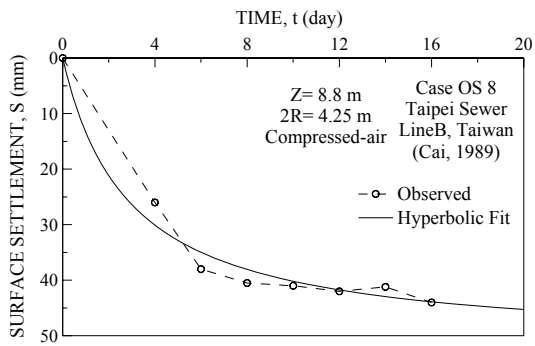
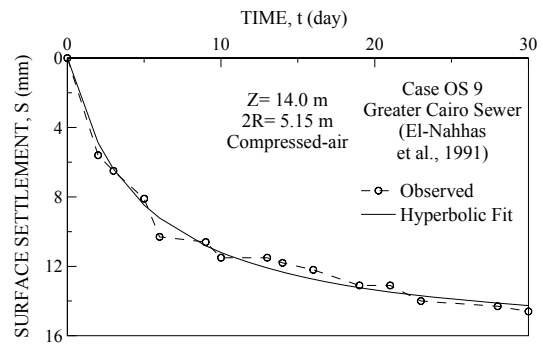


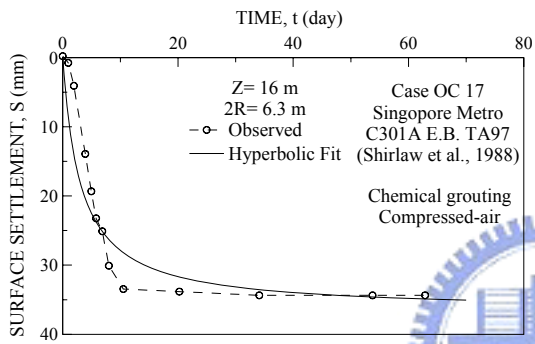
圖 3-4 雙曲線參數 a 、 b 之物理意義



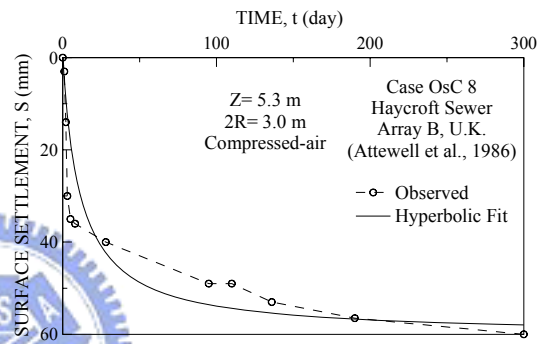
(a)



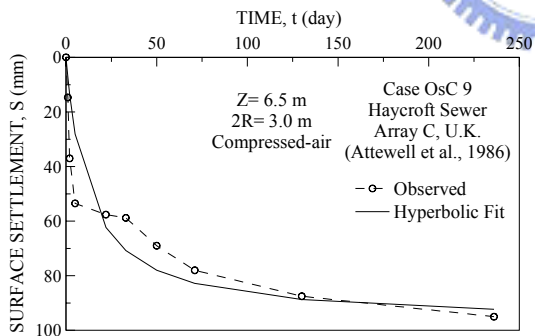
(b)



(c)

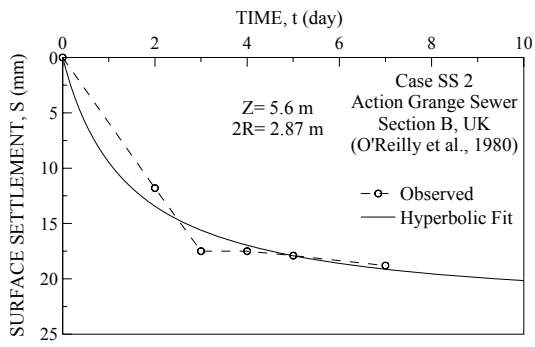


(d)

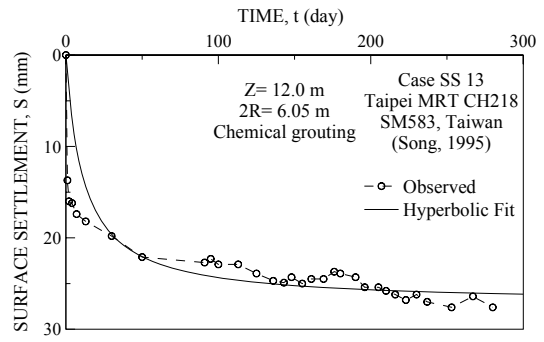


(e)

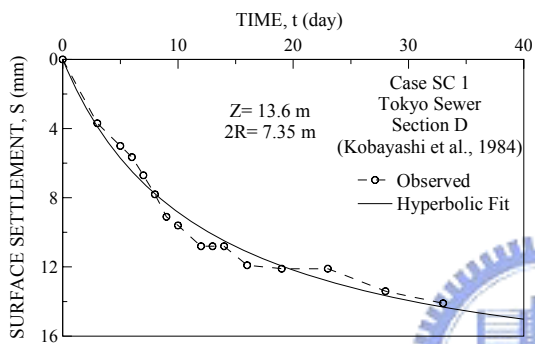
圖 3-5 以雙曲線模式模擬開放式潛盾機在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線



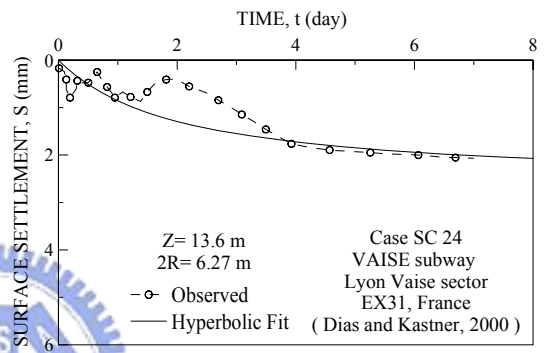
(a)



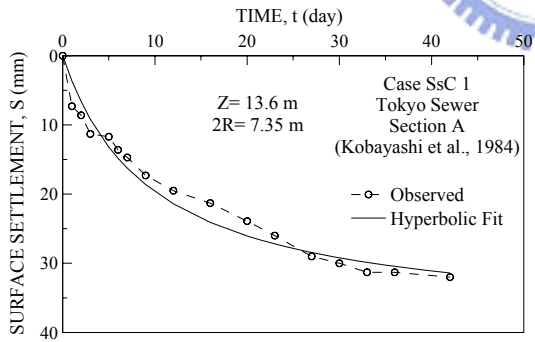
(b)



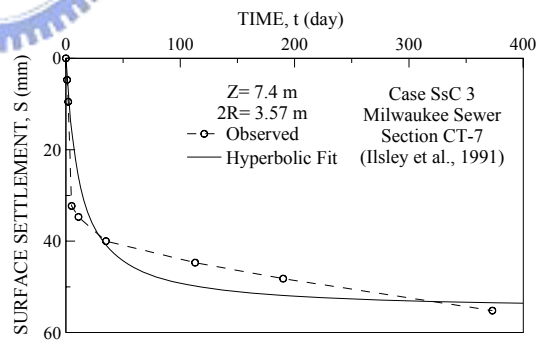
(c)



(d)

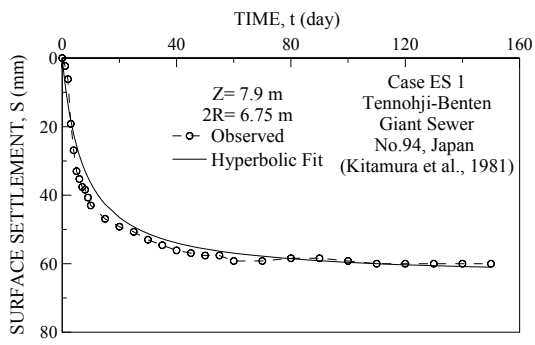


(e)

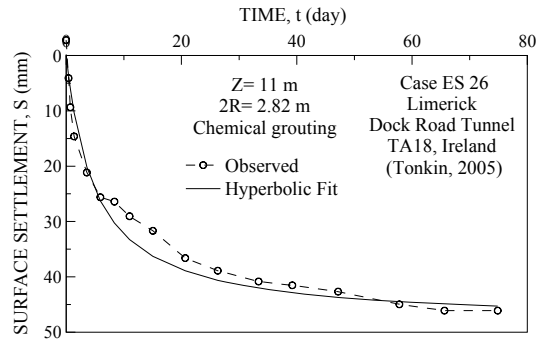


(f)

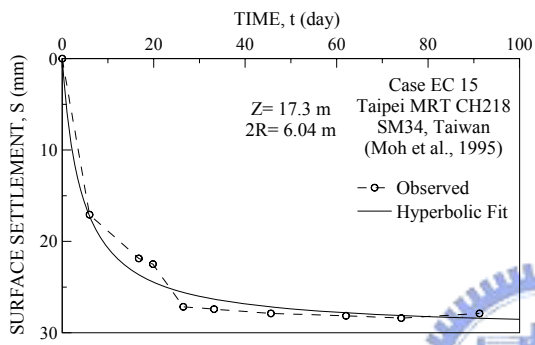
圖 3-6 以雙曲線模式模擬泥水加壓式潛盾機在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線



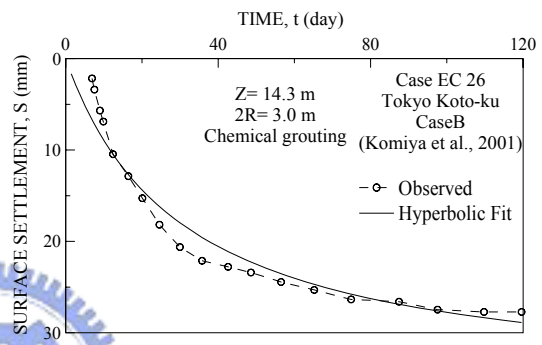
(a)



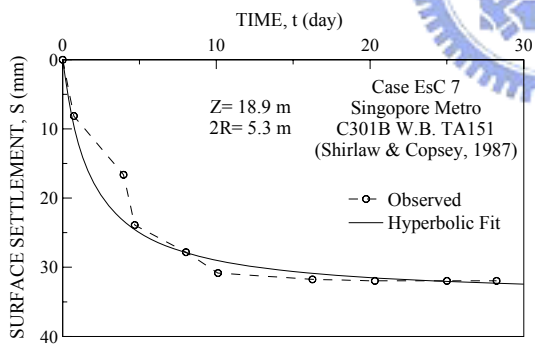
(b)



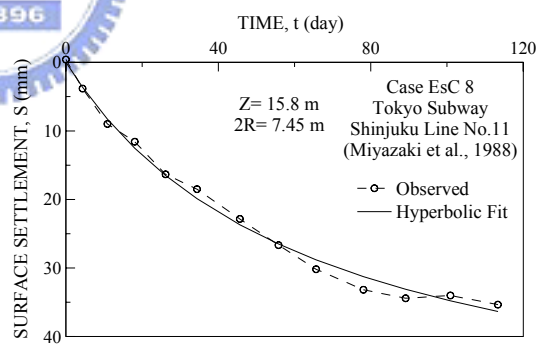
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 3-7 以雙曲線模式模擬土壓平衡式潛盾機在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線

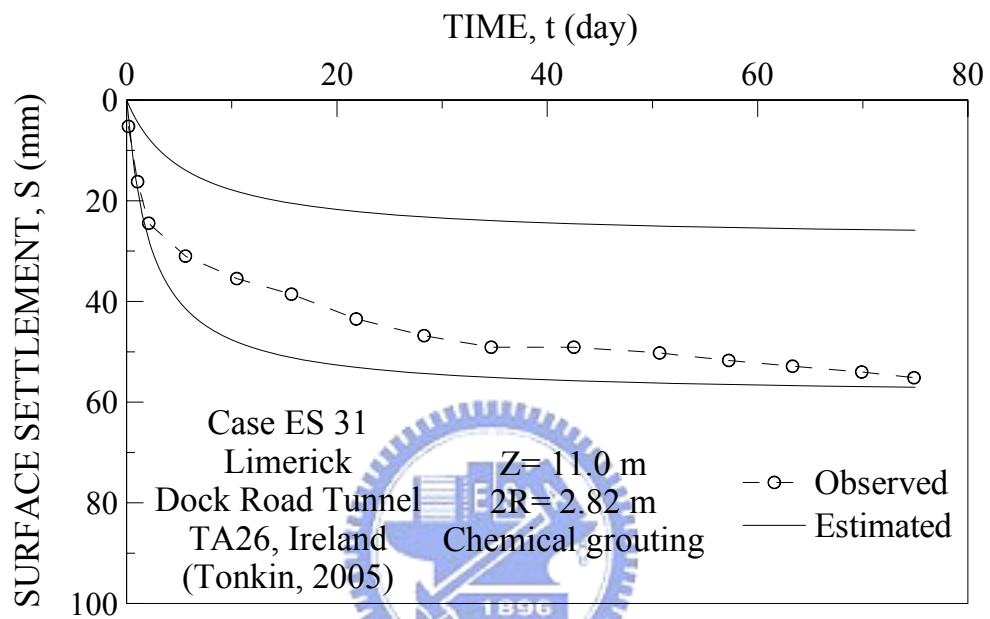
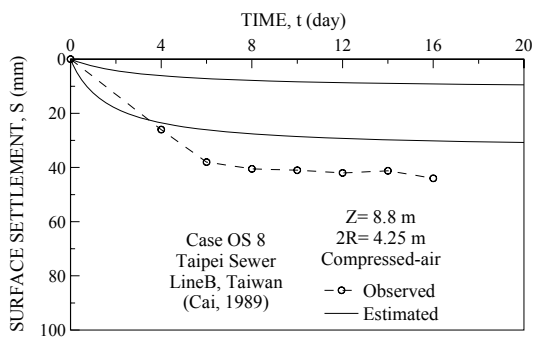
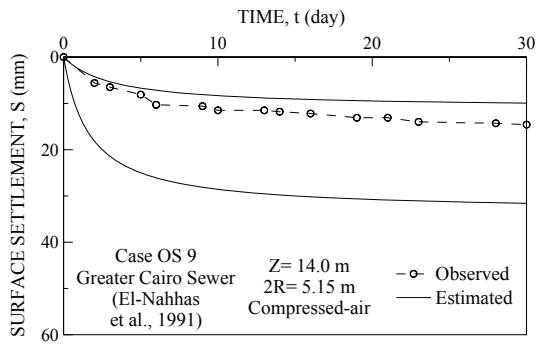


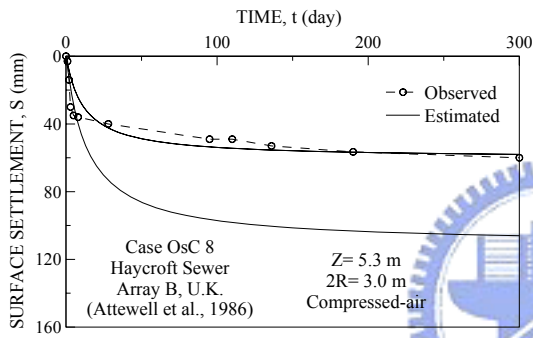
圖 4-1 案例 ES 31 實測地表沉陷歷時曲線與預估值之比較



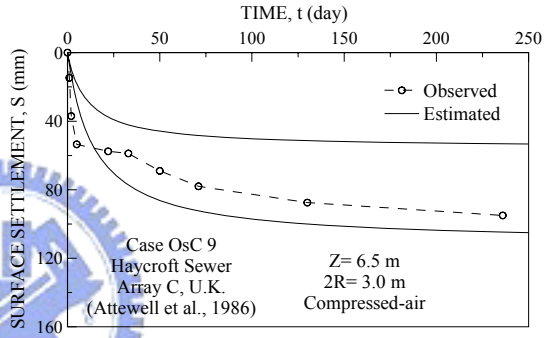
(a)



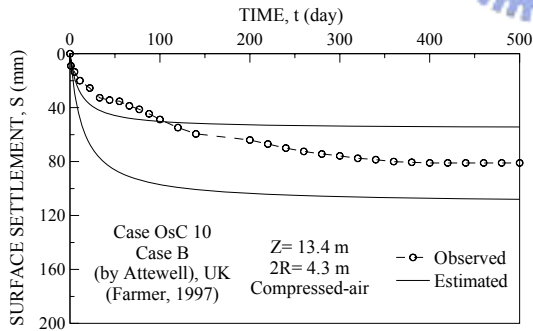
(b)



(c)

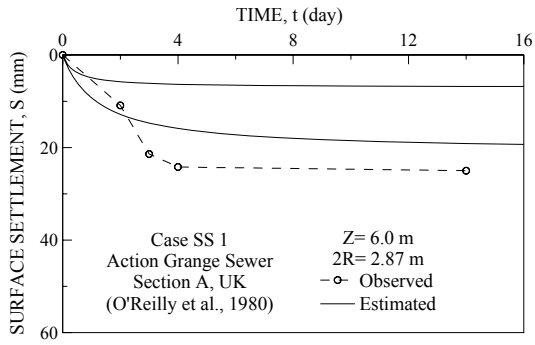


(d)

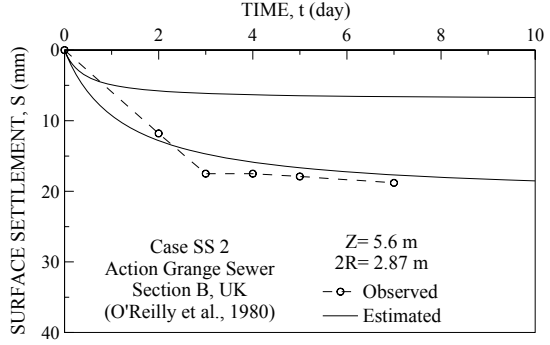


(e)

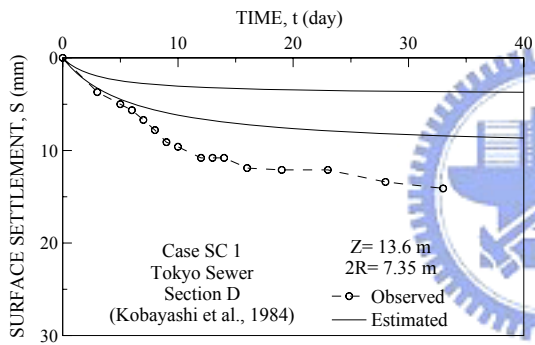
圖 4-2 以雙曲線模式評估開放式潛盾機在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線



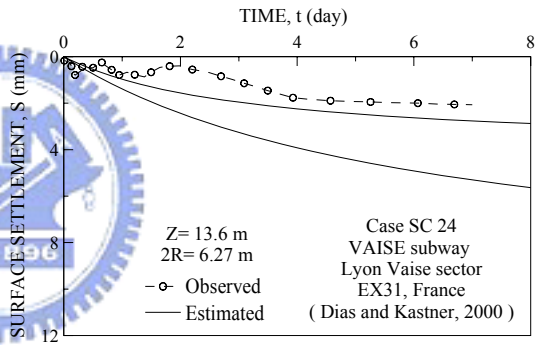
(a)



(b)

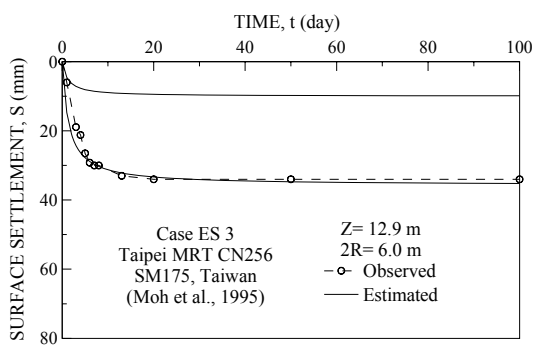


(c)

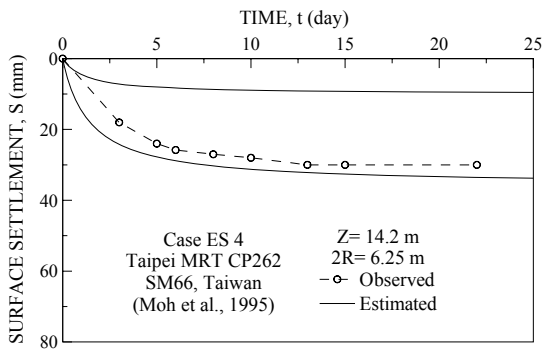


(d)

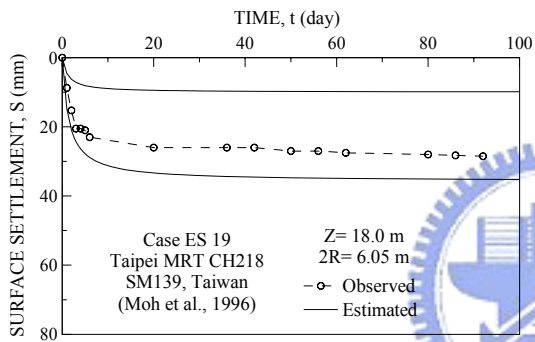
圖 4-3 以雙曲線模式評估泥水式潛盾機在各式土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線



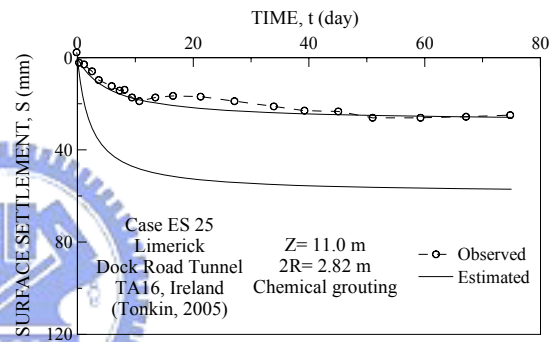
(a)



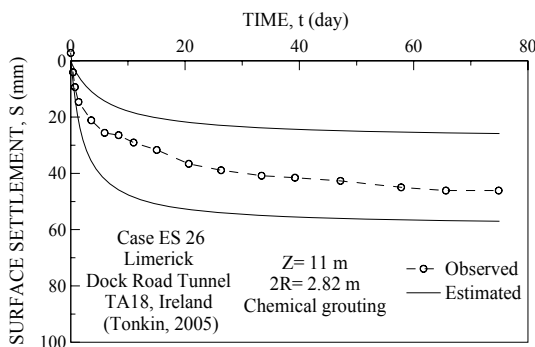
(b)



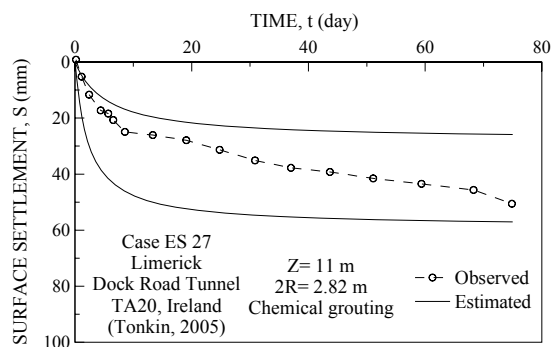
(c)



(d)

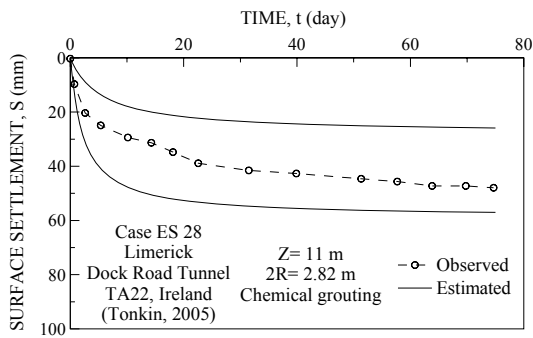


(e)

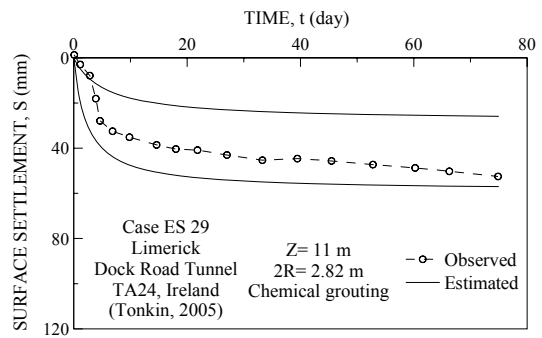


(f)

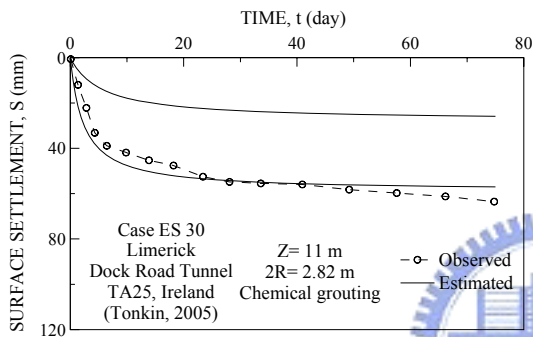
圖 4-4 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在砂土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線



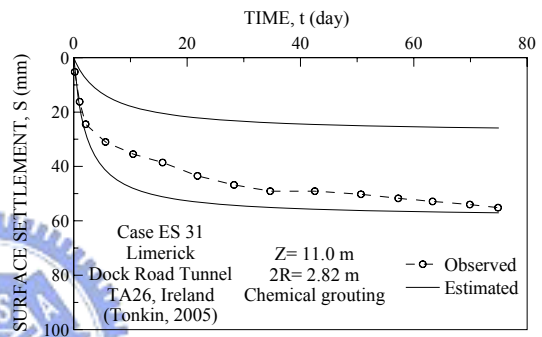
(g)



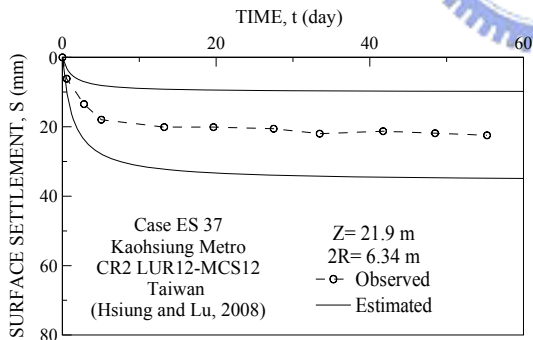
(h)



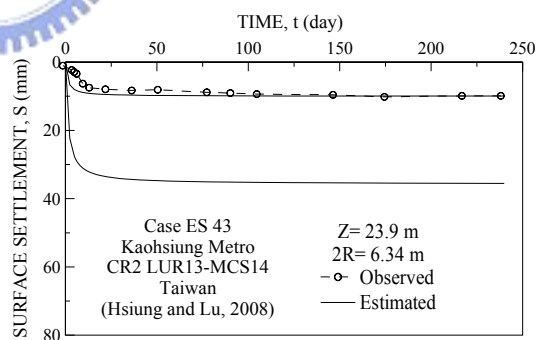
(i)



(j)

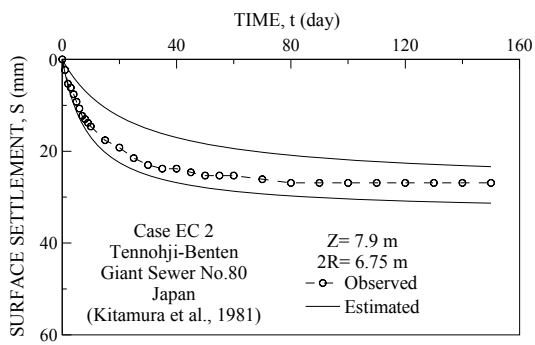


(k)

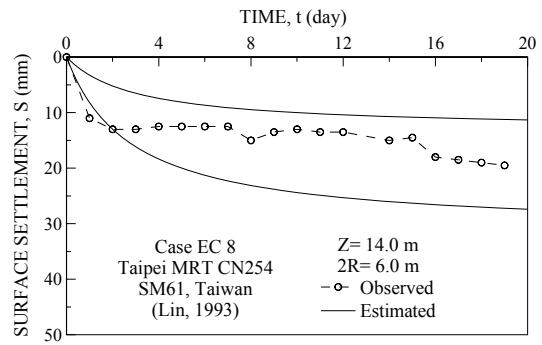


(l)

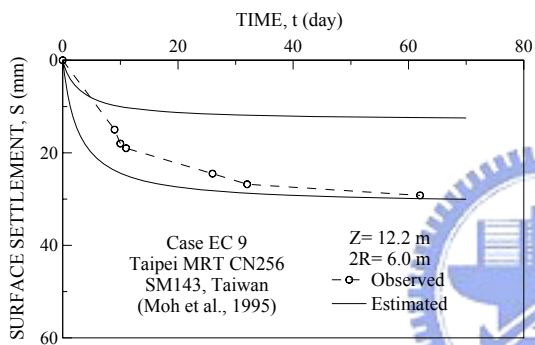
圖 4-4 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在砂土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線 (Cont'd)



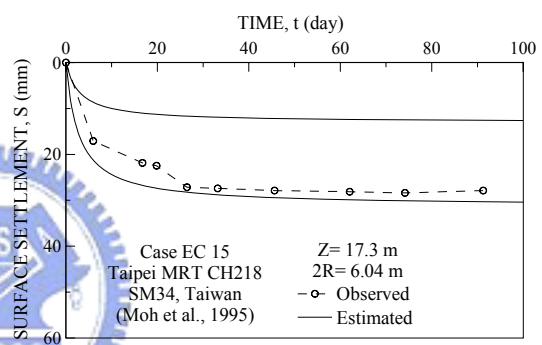
(a)



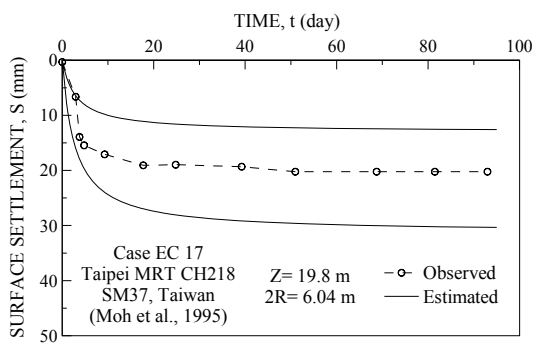
(b)



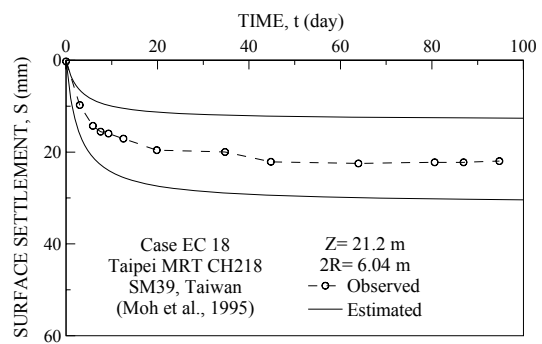
(c)



(d)

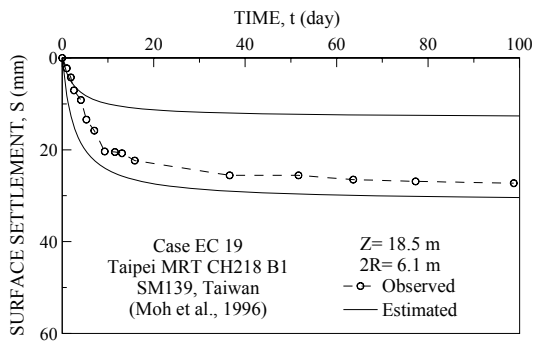


(e)

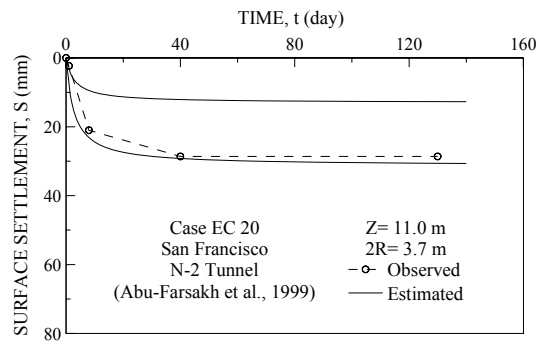


(f)

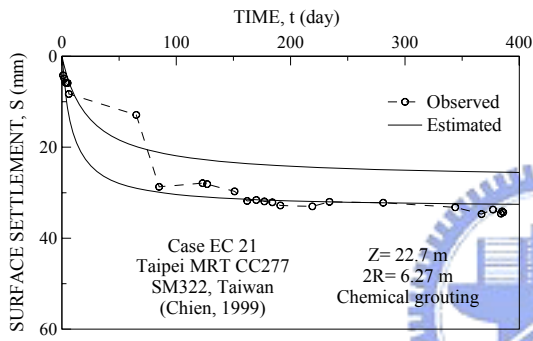
圖 4-5 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在黏土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線



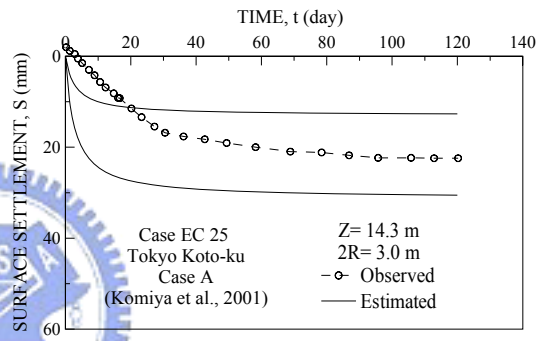
(g)



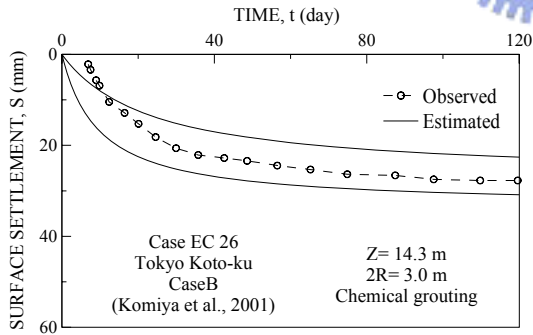
(h)



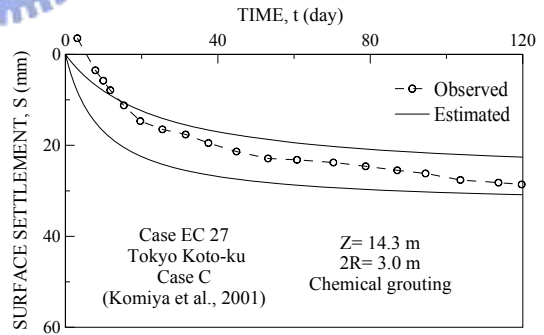
(i)



(j)



(k)



(l)

圖 4-5 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在黏土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線 (Cont'd)

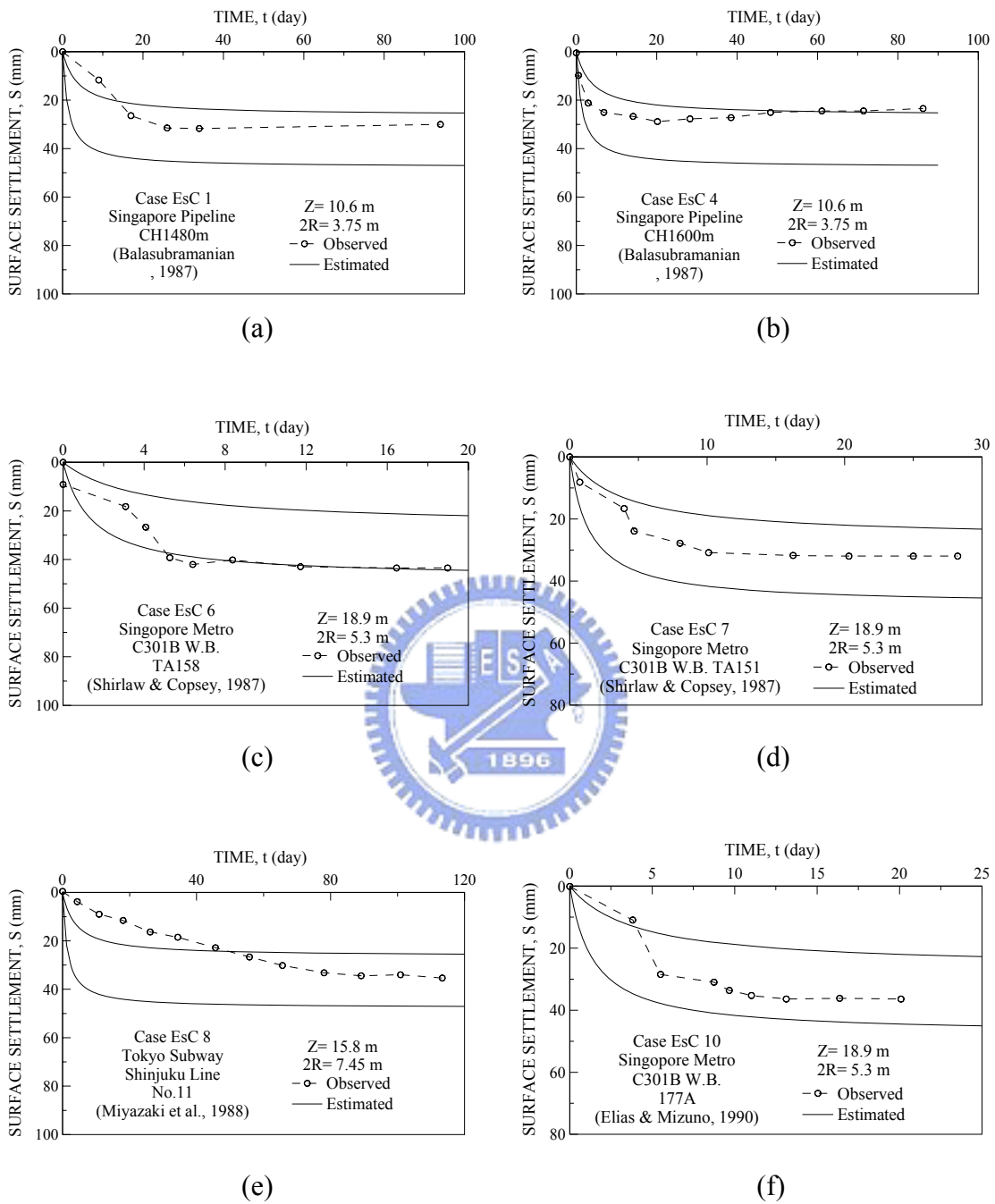
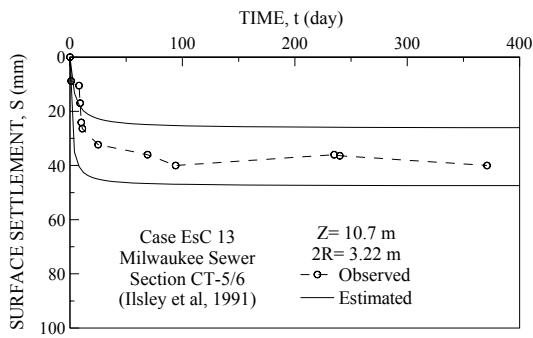
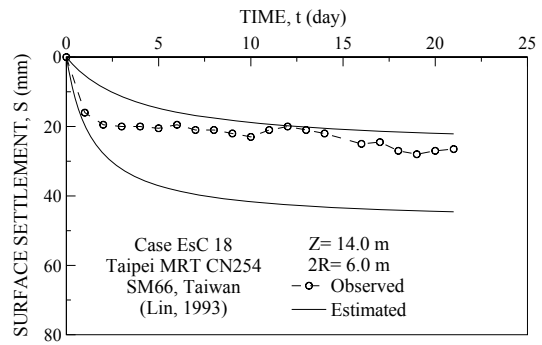


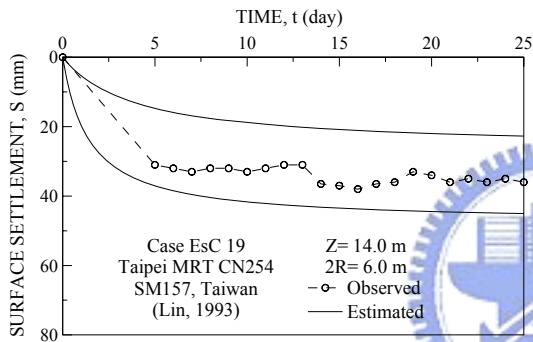
圖 4-6 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在軟弱黏土層開挖造成之地表沉陷歷時曲線



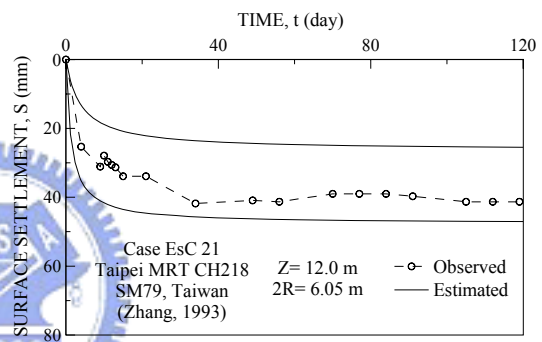
(g)



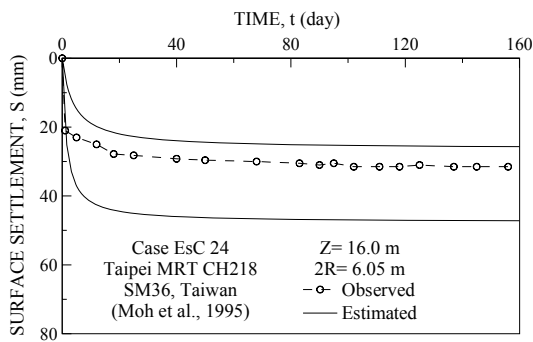
(h)



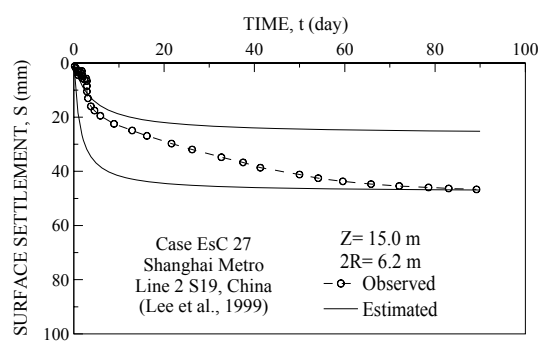
(i)



(j)



(k)



(l)

圖 4-6 以雙曲線模式評估土壓平衡式潛盾機在軟弱黏土層開挖造成之地表沉陷
歷時曲線 (Cont'd)

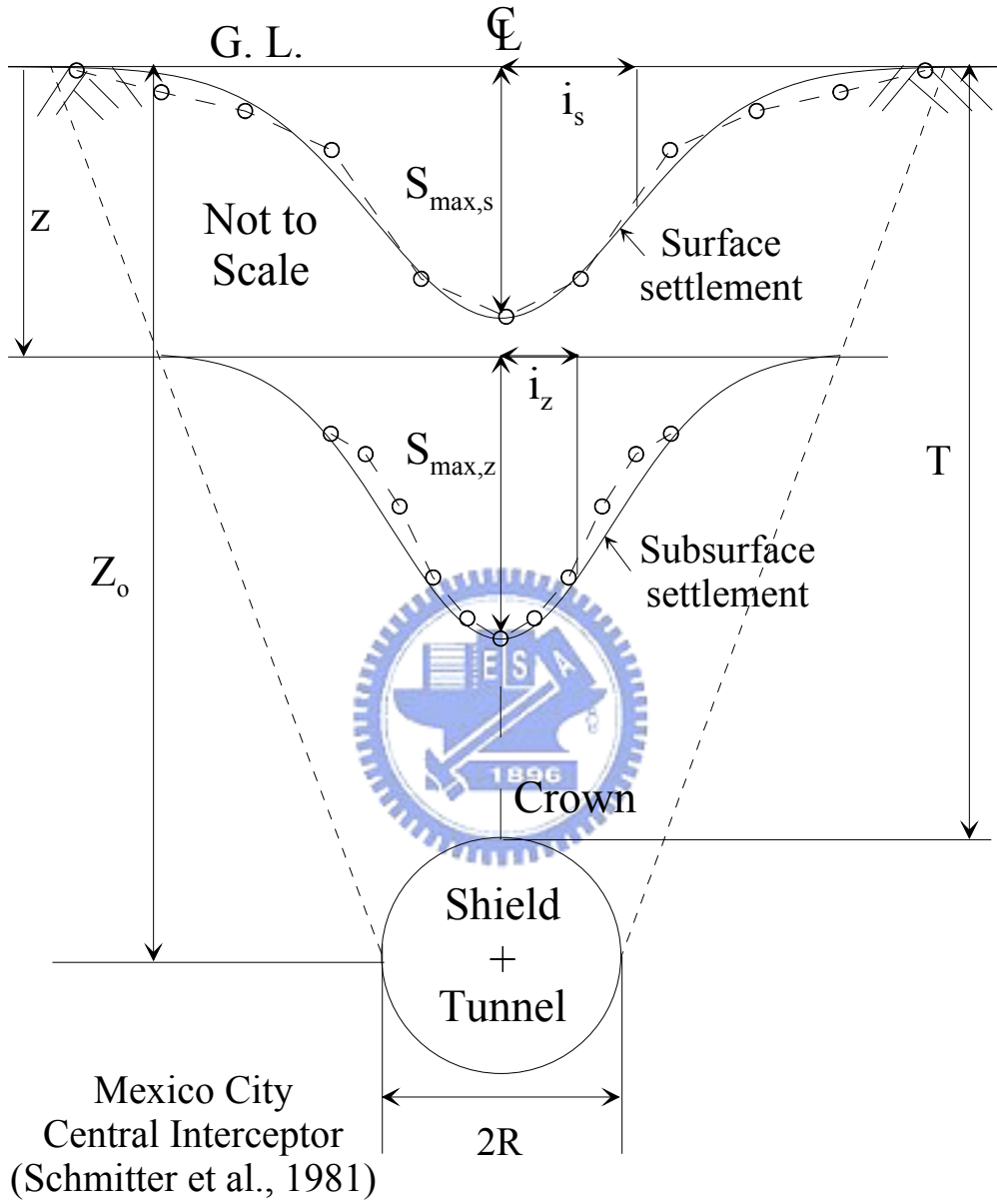


圖 5-1 以常態分佈曲線模擬 Mexico City 案例之地表與深層沉陷槽

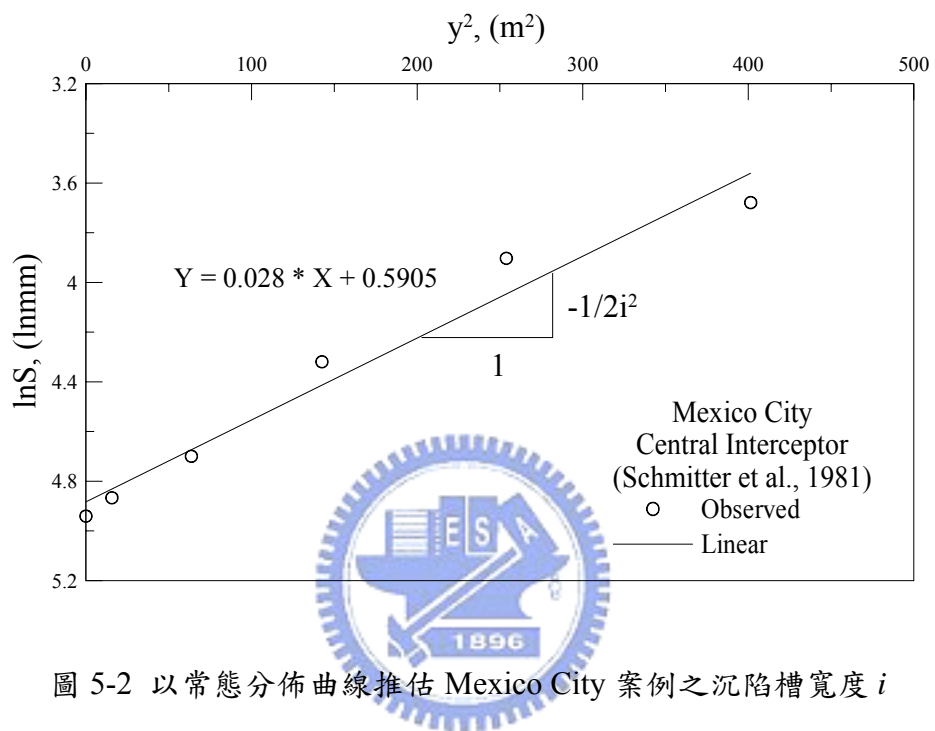


圖 5-2 以常態分佈曲線推估 Mexico City 案例之沉陷槽寬度 i

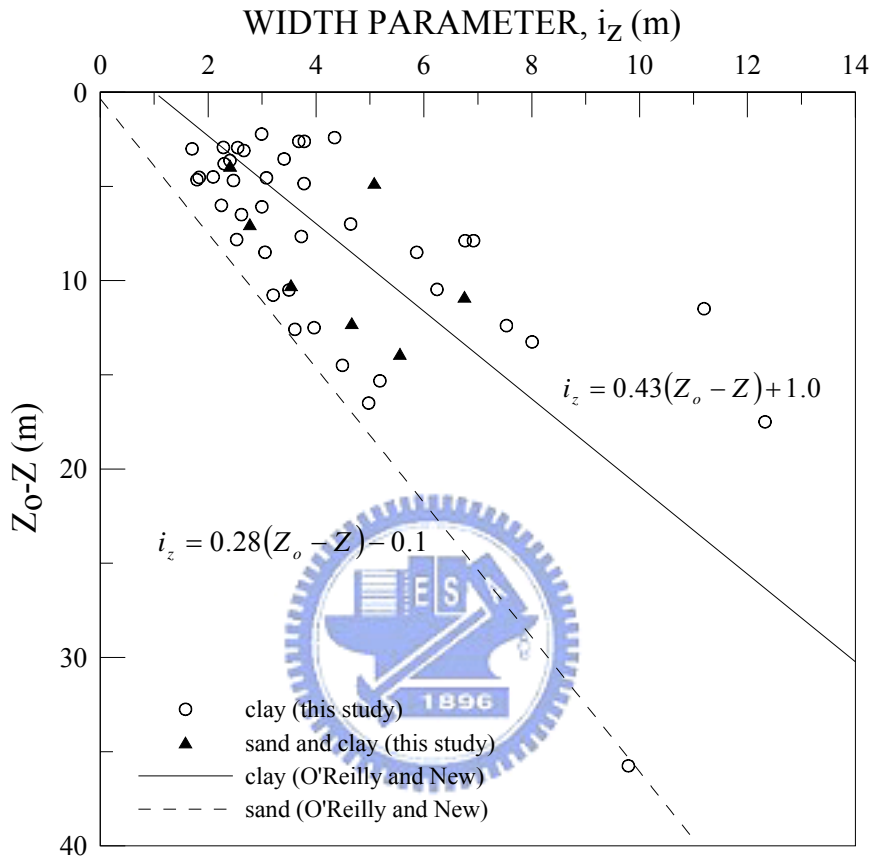


圖 5-3 本文案例點及 O'Reilly and New (1982) i_z 與 Z_0 、 Z 之線性關係

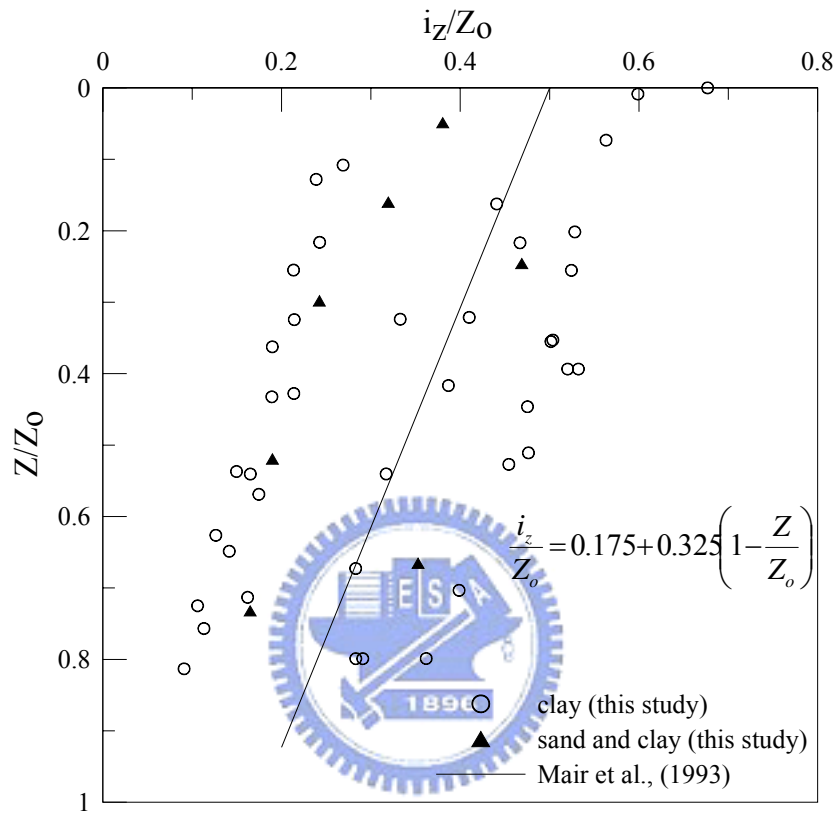


圖 5-4 本文案例點及 Mair et al. (1993) i_z/Z_0 與深度正規化 Z/Z_0 之線性關係

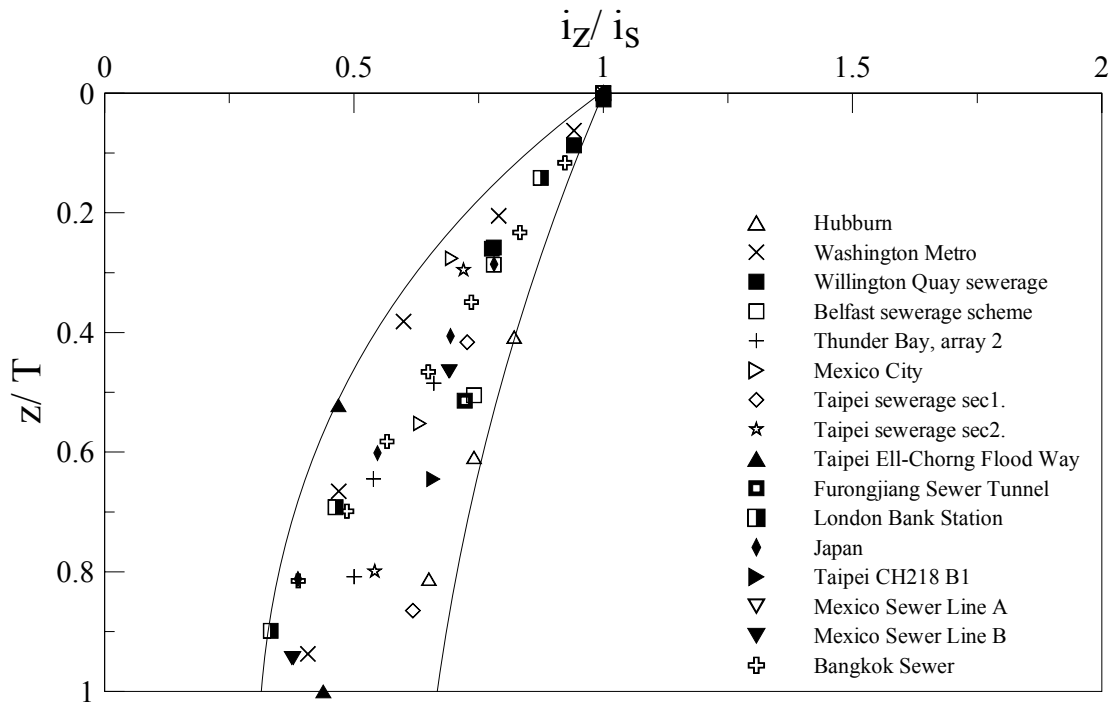


圖 5-5 深層沉陷槽寬度 i_z 對隧道深度 z 正規化關係

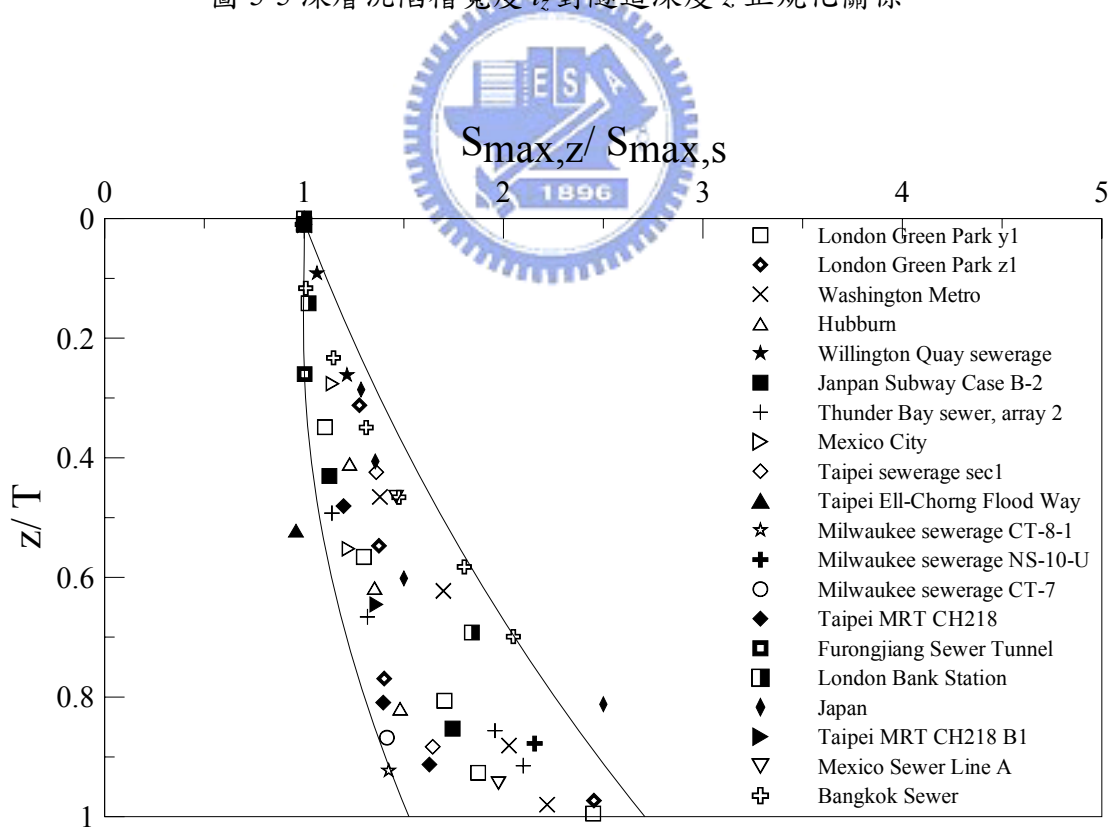


圖 5-6 深層最大沉陷量 $S_{max,z}$ 與對隧道深度 z 正規化關係

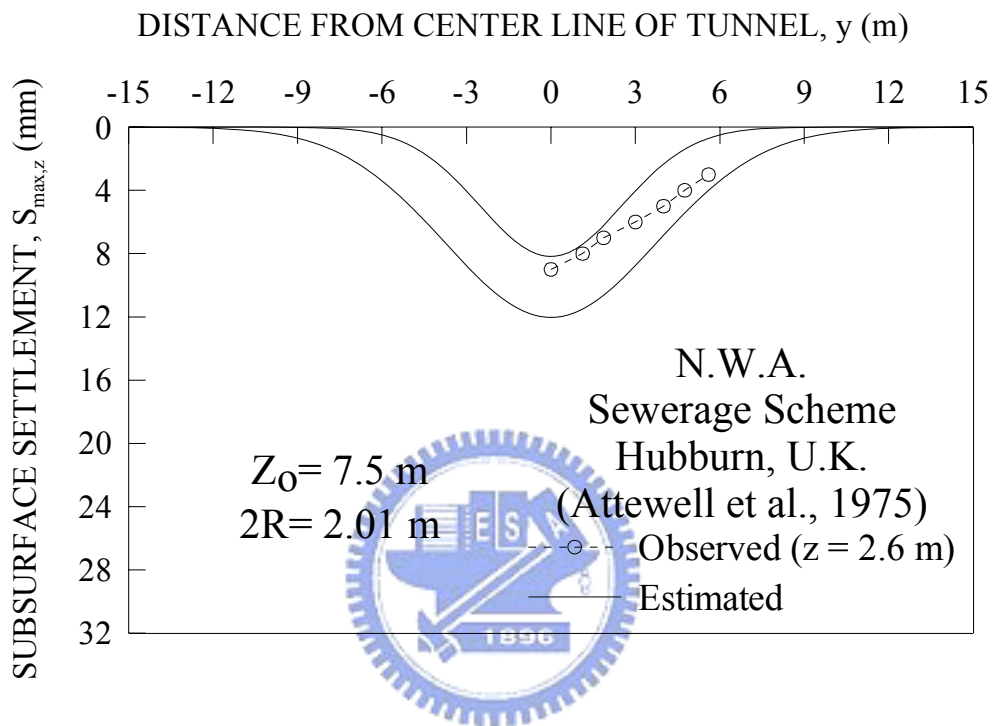
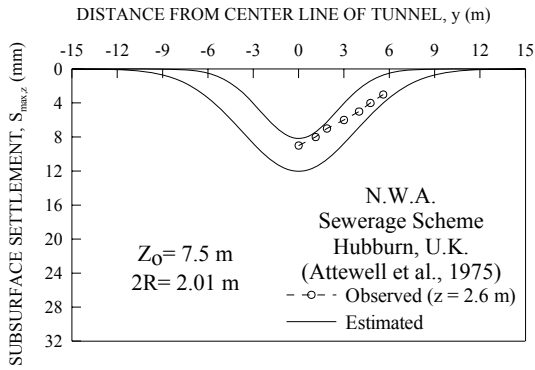
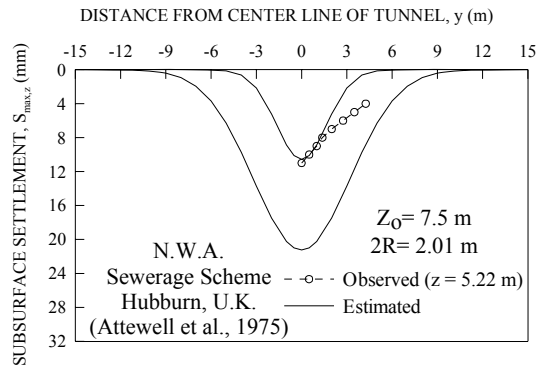


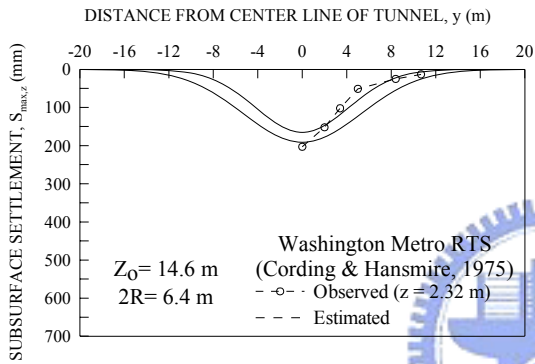
圖 5-7 以經驗方法評估現地 N.W.A. Sewerage Scheme, Hubburn, U.K. 深層沉陷槽
 監測案例



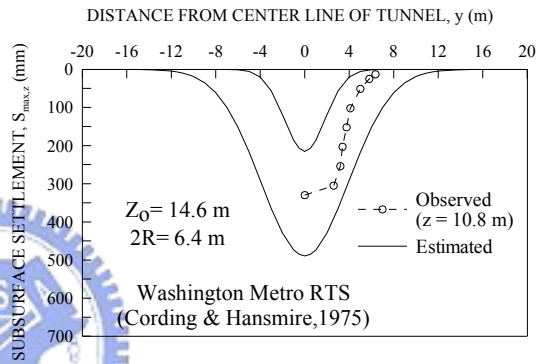
(a)



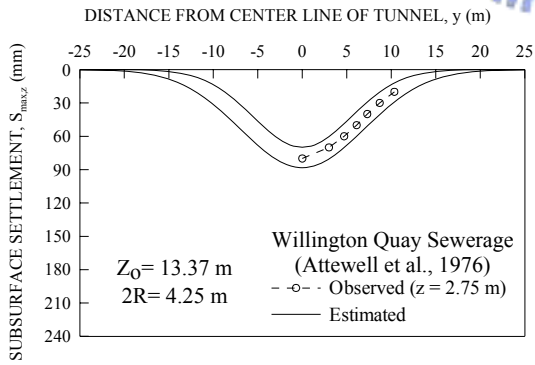
(b)



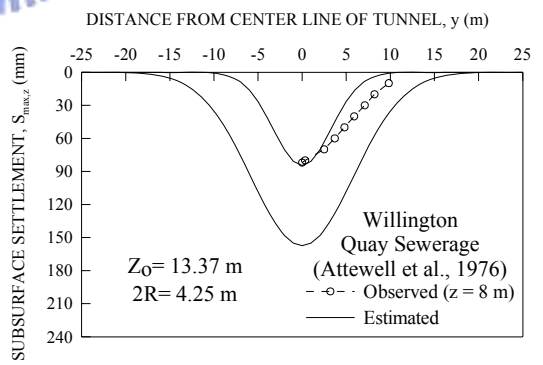
(c)



(d)

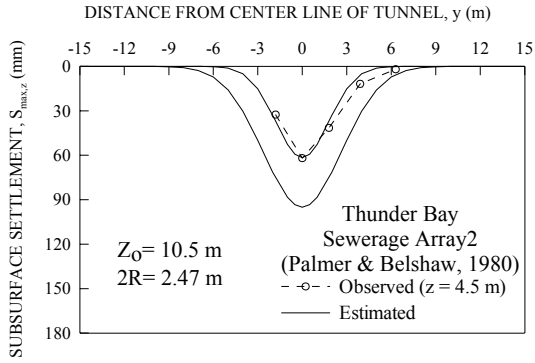


(e)

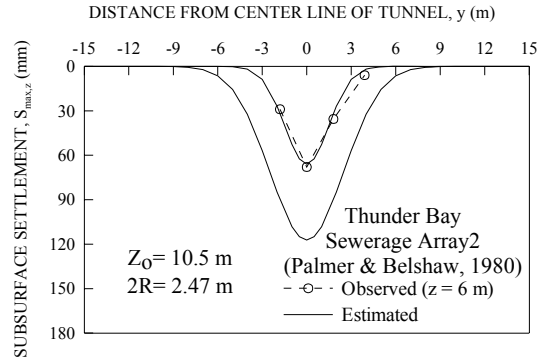


(f)

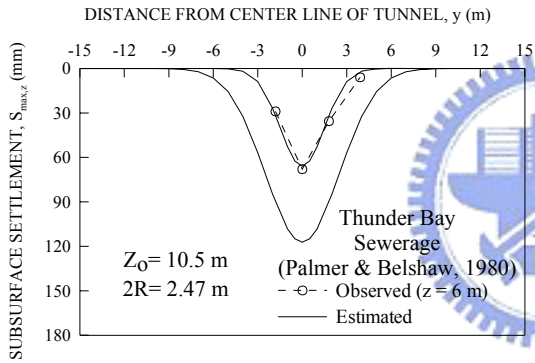
圖 5-8 以經驗方法評估開放式潛盾機造成之深層沉陷槽監測案例



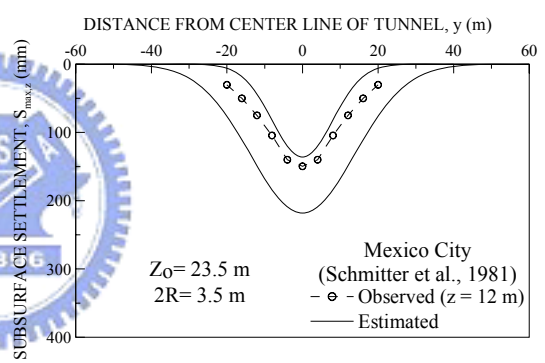
(g)



(h)



(i)



(j)

圖 5-8 以經驗方法評估開放式潛盾機造成之深層沉陷槽監測案例 (Cont'd)

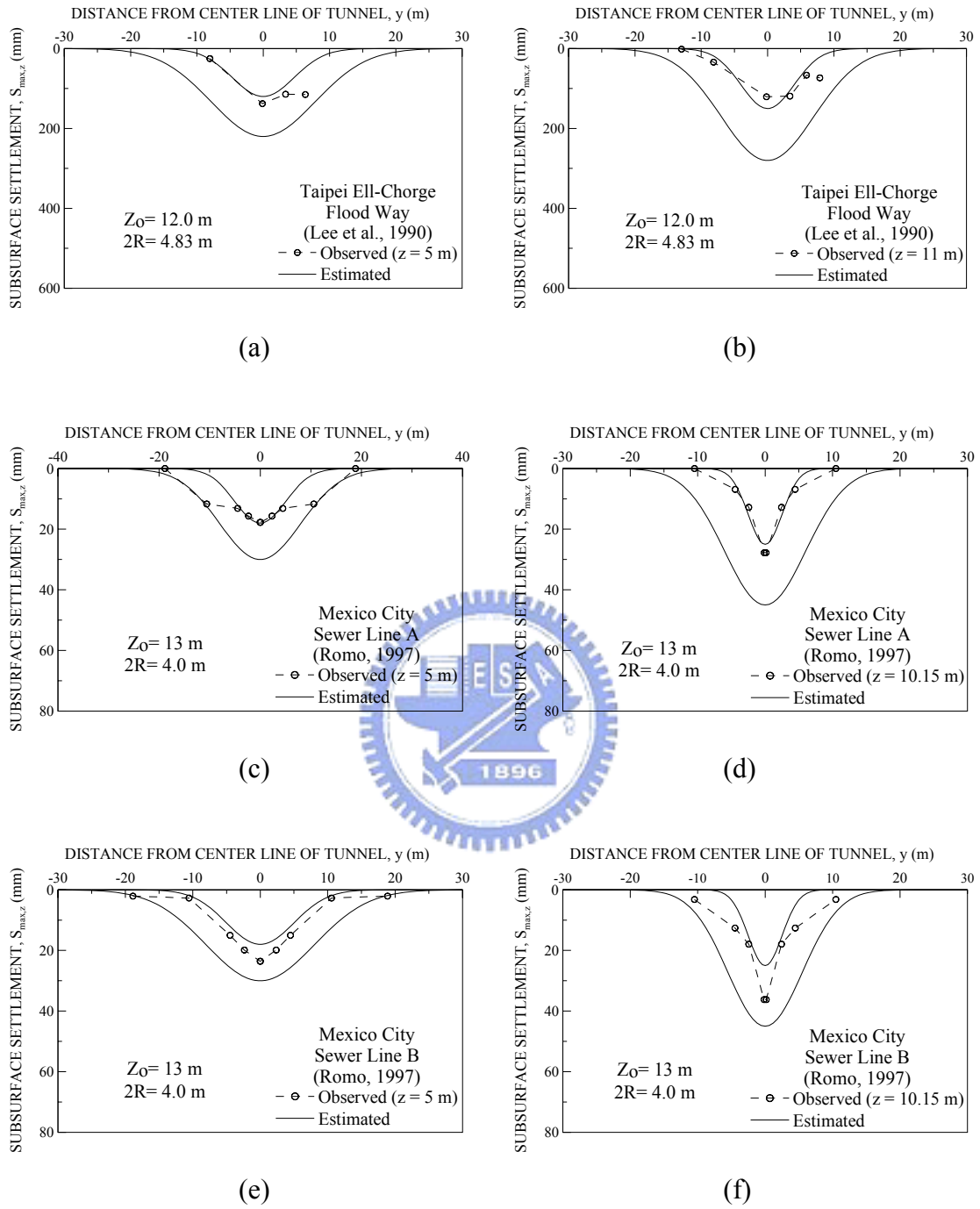


圖 5-9 以經驗方法評估泥水式潛盾機造成之深層沉陷槽監測案例

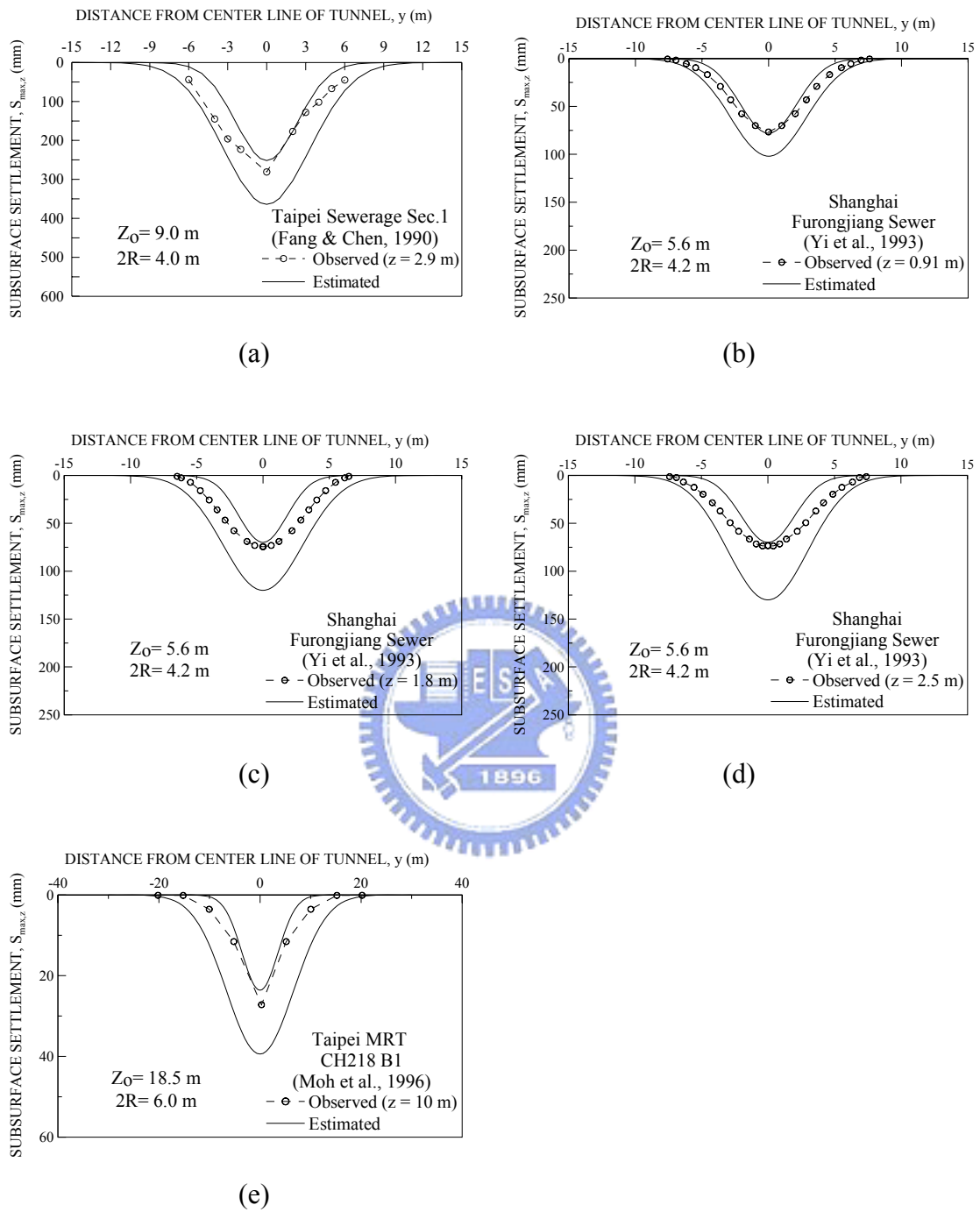


圖 5-10 以經驗方法評估土壓平衡式潛盾機造成之深層沉陷槽監測案例