

國立交通大學
土木工程研究所
碩士論文

以經驗方法評估潛盾隧道施工引致
之地表沉陷

An Empirical Evaluation of Ground Settlement due
to Shield Tunneling

研究生：張皓禎
指導教授：方永壽 博士

中華民國九十六年九月

國立交通大學
土木工程研究所
碩士論文

以經驗方法評估潛盾隧道施工引致
之地表沉陷

An Empirical Evaluation of Ground Settlement due
to Shield Tunneling



研究生：張皓禎
指導教授：方永壽 博士

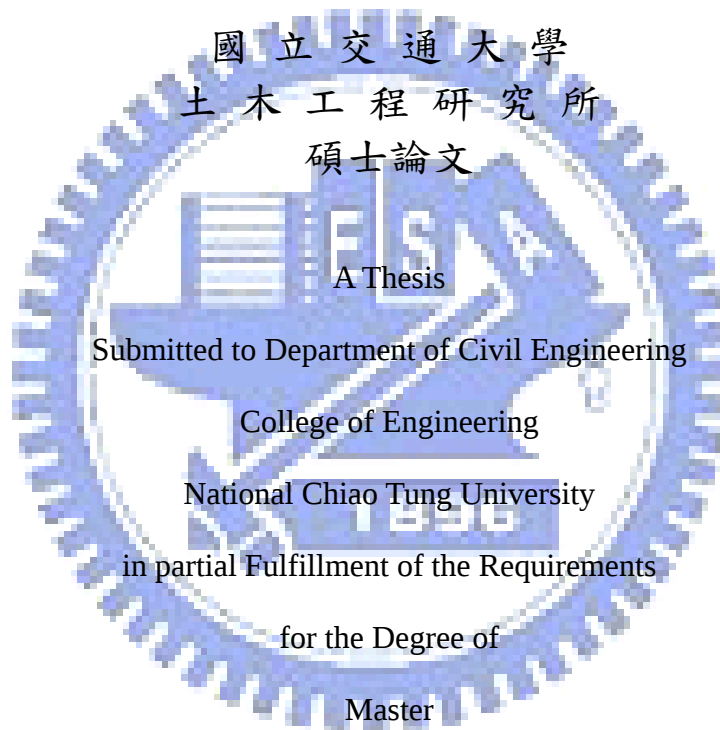
中華民國九十六年九月

以經驗方法評估潛盾隧道施工引致 之地表沉陷

An Empirical Evaluation of Ground Settlement due to Shield Tunneling

研究生：張皓禎
指導教授：方永壽 博士

Student：Hao-Chen Chang
Advisor：Dr. Yung-Show Fang



in

Civil Engineering

September 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年九月

以經驗方法評估潛盾隧道施工引致之地表沉陷

研究生：張皓禎 指導教授：方永壽 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

依據國內外 151 個潛盾隧道施工之監測結果，本研究提出一簡單的經驗方法，評估單一潛盾隧道施工引致之地表沉陷。Peck (1969) 建議隧道施工引致之地表沉陷槽可以常態分佈曲線加以模擬，其主要參數為沉陷槽寬度參數 i 及地表最大沉陷量 S_{max} ，其中 S_{max} 可由現地測得之地盤漏失量 G_l 求出。本研究收集自 1971 年至 2005 年間台灣、日本、英國及美國等國家之潛盾隧道施工案例，針對寬度參數 i 與地盤漏失 G_l 進行案例分析，並獲得以下各項結論。

- (1) 隧道中心線深度越深，潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽寬度則越寬。本研究依潛盾機型式與土壤種類將寬度參數案例分為六類，各類之隧道深度 Z_0 與寬度參數 i 之關係可以 $i = k \cdot Z_0$ 之經驗公式表示。
- (2) 開放式潛盾機於粒狀土壤中施工時，常採用壓氣工法或化學藥液灌漿抑制地下水，此舉亦有效降低地盤擾動。故開放式潛盾機引致之沉陷槽寬度參數 i 與地盤漏失 G_l 較小。
- (3) 於非凝聚性土壤中採用土壓平衡式潛盾機施工引致之沉陷槽寬度參數 i 值，較過去學者建議之 i 值為大。這可能由於土壓平衡式潛盾機之密閉式開挖面無地下水入侵之問題，故較少於開挖面附近採用輔助工法，因此潛盾機掘進時對鄰近地盤造成之擾動較大。
- (4) 除選擇性能優良的潛盾機外，設計人員於施工前充份了解開挖土壤性質，及施工人員之技藝水準，為判斷地盤沉陷表現良劣之重要因素。
- (5) 本經驗方法依據國內外已完成之施工案例評估採用不同機型、隧道深度、及隧道

直徑於不同土層條件開挖潛盾隧道造成之地表沉陷槽，故其結果具實用價值。

關鍵詞：潛盾、隧道、沉陷、寬度參數、地盤漏失、案例分析



An Empirical Evaluation of Ground Settlement due to Shield Tunneling

Student : Hao-Chen Chang

Advisor : Dr. Yung-Show Fang

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

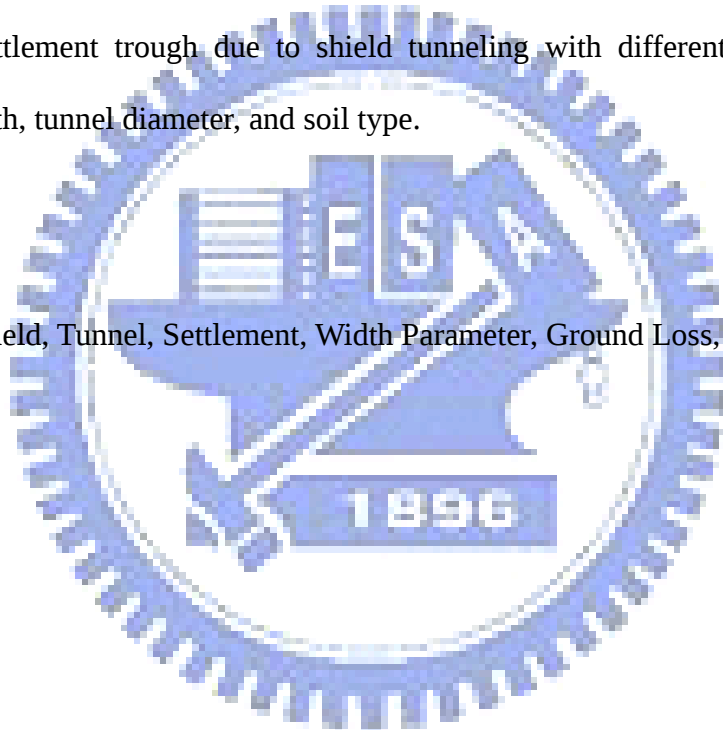
Based on the field measurement data, this study proposed an empirical procedure to evaluate the surface settlement induced by shield tunneling. Peck (1969) suggested that the surface settlement trough due to tunneling can be approximated by normal distribution curve. The main parameters associated with the function are the trough width parameter (i) and maximum surface settlement (S_{max}), which can be calculated by the measured ground loss (G_l). This research collected shield tunneling cases in different countries reported from 1971 to 2005. Based on the case studies of width parameter i and ground loss G_l , the following conclusions are drawn.

1. The settlement trough width increases with the increasing tunnel depth. This study classified the tunneling cases into 6 categories according to the soil type encountered and the shield machine used. The relationship between the tunnel depth Z_0 and the width parameter i can be approximated by the simple empirical equation $i = k \cdot Z_0$.
2. In granular soils, because the compressed-air method and chemical grouting method were commonly adopted at the cutting face of an open shield, the ground disturbance in front of an EPB shield would be greater than that in front of an open shield. As a result, the ground loss G_l and the settlement trough width parameter i due to the EPB

shield were larger compared with those due to the open shield.

3. For tunneling with the closed EPB shield, the groundwater intrusion problems are not encountered, and the auxiliary methods were generally not adopted. The absence of additional measurement at the cutting face caused greater ground disturbance during tunneling.
4. The understanding of in-situ ground properties and workmanship of the tunneling crew are important factors to estimate the surface settlement due to tunneling.
5. Based on the 151 tunneling cases, an empirical method was proposed to evaluate the surface settlement trough due to shield tunneling with different shield machines, tunnel depth, tunnel diameter, and soil type.

Keywords: Shield, Tunnel, Settlement, Width Parameter, Ground Loss, Case Study



誌謝

本論文得以完成，首先要感謝吾師 方永壽博士平日之悉心教導。無論在研究方向、治學態度、或待人處事上，均給予諸多的指導與關懷。在恩師的殷切指導與協助下，本論文才得以順利完成，在此致上萬分的謝意與由衷的感激。同時並感謝潘以文老師、廖志中老師、黃安斌老師、單信瑜老師及林志平老師於在學期間所給予之指導及協助。

口試期間，承蒙國立成功大學黃景川教授、國立台灣大學林美聆教授的細心指導及寶貴的建議，使論文得更加完整，在此致上最深的謝意。

研究期間，感謝同學許仕達、簡煜倫平日的諸多幫忙與加油打氣，共同奮戰到最後一刻。以及同門學弟妹吳俊德、鄭詠誠、黃聖峰、陳柏碩與江奕蓁的熱心幫忙與協助。在此一併致上萬分的敬意與謝意。

於兩年的研究所生活期間，感謝室友郭文鳴與林嘉正，習以為常的打鬧與玩笑，讓我在最後衝刺階段能以較輕鬆的心情上場應戰，以我們多年朋友的默契，隊伍競技場永遠會是我們三個人的天下。

最後，感謝支持我的家人與朋友，感謝你們於這段研究期間不斷支持我，讓我得以順利通過最後的挑戰，願將本論文獻給我敬愛的家人與所以關心我的朋友。

目錄

摘要.....	i
英文摘要(ABSTRACT).....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
符號說明.....	xi
第1章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	1
1.3 論文組織.....	3
第2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
2.4 各型式潛盾機適用土層.....	6
2.5 潛盾隧道施工引致地盤變位之原因.....	6
2.5.1 盾尾間隙閉合.....	6
2.5.2 襯砌變形.....	7
2.5.3 潛盾機蛇行或超挖.....	7
2.5.4 開挖面應力的改變.....	7
2.5.5 地下水位變化.....	8
2.5.6 黏土層受擾動所造成的壓密沉陷.....	8
2.6 單一隧道施工引致之地盤變位.....	8
2.6.1 沉陷槽寬度估算.....	9
2.6.2 最大沉陷量估算.....	12
2.6.3 預估沉陷槽.....	13
第3章 沉陷槽寬度及地盤漏失之案例分析.....	16
3.1 分析方法介紹.....	16
3.1.1 參數定義.....	16
3.1.2 常態分佈沉陷槽.....	17
3.2 沉陷槽寬度之案例分析.....	17
3.2.1 非凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工.....	19
3.2.2 凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工.....	19
3.2.3 非凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工.....	20
3.2.4 凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工.....	20

3.2.5 非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工.....	20
3.2.6 凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工.....	21
3.3 地盤漏失之案例分析.....	21
3.3.1 非凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工.....	22
3.3.2 凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工.....	22
3.3.3 非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工.....	23
3.3.4 凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工.....	23
第4章 以經驗方法評估潛盾隧道施工引致之地表變位.....	24
4.1 評估範例.....	24
4.2 非凝聚性土壤中開放式潛盾機施工.....	25
4.3 凝聚性土壤中開放式潛盾機施工.....	26
4.4 非凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施.....	27
4.5 凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施工.....	28
4.6 經驗評估方法的優點與限制.....	30
第5章 結論與建議.....	32
5.1 結論.....	32
5.2 建議.....	33
參考文獻.....	34
表.....	40
圖.....	61
作者簡介.....	116



表目錄

表 2.1 潛盾機分類與特性.....	40
表 2.2 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍.....	41
表 2.3 潛盾機型式與適用土質、輔助工法之關係.....	42
表 2.4 沉陷槽寬徑比 ($i/2R$) 與隧道深徑比 ($Z_0/2R$) 關係之 k 、 n 值.....	43
表 2.5 地表最大沉陷量之預測值.....	44
表 2.6 地表最大沉陷量之預測範圍.....	45
表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料.....	46
表 3.2 各學者與本研究建議之沉陷槽寬度參數 i 估算公式.....	59
表 3.3 不同潛盾隧道工程類型之地盤漏失評等邊界點座標.....	60
表 3.4 地盤漏失之 5 等評分.....	60



圖目錄

圖 2.1 潛盾施工作業循環示意圖.....	61
圖 2.2 開放式潛盾機.....	62
圖 2.3 擠壓式潛盾機.....	63
圖 2.4 土壓平衡式潛盾機.....	64
圖 2.5 加泥土壓平衡式潛盾機.....	65
圖 2.6 泥水式潛盾機.....	66
圖 2.7 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍.....	67
圖 2.8 黏土受擾動所引起之壓密.....	68
圖 2.9 以誤差函數曲線（或常態分佈曲線）近地表沉陷槽.....	69
圖 2.10 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係.....	70
圖 2.11 β 角與沉陷槽寬度之關係.....	71
圖 2.12 沉陷槽寬徑比 ($i/2R$) 與隧道深徑比 ($Z_0/2R$) 之關係.....	72
圖 2.13 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係.....	73
圖 2.14 以 Peck-Fujita 經驗方法預測潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽 分析範例.....	74
圖 3.1 潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽示意圖.....	75
圖 3.2 非凝聚性土壤中開放式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖.....	76
圖 3.3 凝聚性土壤中開放式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與 隧道深度 Z_0 之關係圖.....	77
圖 3.4 非凝聚性土壤中泥水加壓式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖.....	78
圖 3.5 凝聚性土壤中泥水加壓式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖.....	79
圖 3.6 非凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖.....	80
圖 3.7 凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖.....	81
圖 3.8 地盤漏失 G_l 與隧道深度 Z_0 及隧道直徑 $2R$ 之無因次關係.....	82
圖 3.9 非凝聚性土壤中開放式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等.....	83
圖 3.10 凝聚性土壤中開放式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等.....	84
圖 3.11 非凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等.....	85
圖 3.12 凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等.....	86
圖 4.1 案例 EC13 實測地表沉陷槽之評估.....	87
圖 4.2 案例 OS1 實測地表沉陷槽之評估.....	88
圖 4.3 案例 OS2 實測地表沉陷槽之評估.....	89

圖 4.4 案例 OS3 實測地表沉陷槽之評估.....	90
圖 4.5 案例 OS4 實測地表沉陷槽之評估.....	91
圖 4.6 案例 OS5 實測地表沉陷槽之評估.....	92
圖 4.7 案例 OC1 實測地表沉陷槽之評估.....	93
圖 4.8 案例 OC2 實測地表沉陷槽之評估.....	94
圖 4.9 案例 OC3 實測地表沉陷槽之評估.....	95
圖 4.10 案例 OC4 實測地表沉陷槽之評估.....	96
圖 4.11 案例 ES1 實測地表沉陷槽之評估.....	97
圖 4.12 案例 ES2 實測地表沉陷槽之評估.....	98
圖 4.13 案例 ES3 實測地表沉陷槽之評估.....	99
圖 4.14 案例 ES4 實測地表沉陷槽之評估.....	100
圖 4.15 案例 EC1 實測地表沉陷槽之評估.....	101
圖 4.16 案例 EC2 實測地表沉陷槽之評估.....	102
圖 4.17 案例 EC3 實測地表沉陷槽之評估.....	103
圖 4.18 案例 EC4 實測地表沉陷槽之評估.....	104
圖 4.19 案例 EC5 實測地表沉陷槽之評估.....	105
圖 4.20 案例 EC6 實測地表沉陷槽之評估.....	106
圖 4.21 案例 EC7 實測地表沉陷槽之評估.....	107
圖 4.22 案例 EC8 實測地表沉陷槽之評估.....	108
圖 4.23 案例 EC9 實測地表沉陷槽之評估.....	109
圖 4.24 案例 EC10 實測地表沉陷槽之評估.....	110
圖 4.25 案例 EC11 實測地表沉陷槽之評估.....	111
圖 4.26 案例 EC12 實測地表沉陷槽之評估.....	112
圖 4.27 案例 EC14 實測地表沉陷槽之評估.....	113
圖 4.28 案例 EC15 實測地表沉陷槽之評估.....	114
圖 4.29 案例 EC16 實測地表沉陷槽之評估.....	115

符號說明

A_s ：地表沉陷槽之斷面積

A_t ：隧道開挖面之斷面積

G_l ：單位長度內地表沉陷槽體積與隧道開挖體積之比值，即 $G_l = V_s / V_t = A_s / A_t$

$G_{l,AB}$ ：A 等與 B 等之地盤漏失量界面值

$G_{l,BC}$ ：B 等與 C 等之地盤漏失量界面值

$G_{l,CD}$ ：C 等與 D 等之地盤漏失量界面值

$G_{l,DD}$ ：D 等與 E 等之地盤漏失量界面值

i ：地表沉陷槽之反曲點（Inflection point）至對稱中心之距離，即寬度參數

k ：隧道中心線深度與寬度參數的經驗關係式之待定係數

R ：隧道開挖面半徑

S_{max} ：地表最大沉陷量

$S_{max,AB}$ ：A 等與 B 等之地表最大沉陷量界面值

$S_{max,BC}$ ：B 等與 C 等之地表最大沉陷量界面值

$S_{max,CD}$ ：C 等與 D 等之地表最大沉陷量界面值

$S_{max,DE}$ ：D 等與 E 等之地表最大沉陷量界面值

V_s ：單位長度內地表沉陷槽之體積

V_t ：單位長度內隧道開挖之體積

Z_0 ：隧道中心線之深度

第 1 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：捷運交通系統、衛生下水道、鐵路地下化、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）及潛盾隧道工法（Shield tunneling method）。從事明挖覆蓋施工，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。潛盾隧道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，及隧道開挖引致地表沉陷可能損害鄰近結構物等。

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中之主流施工方法。

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，皆促成了隧道鄰近土壤變位。潛盾施工所引致之地盤沉陷，可能直接對鄰近建築物之安全造成威脅，且可能導致鄰近地下管線之破壞並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。

雖潛盾隧道工法為都會區隧道施工之主要方式，但仍缺乏評估隧道施工造成之地盤沉陷的可靠方法。現有之經驗方法，如 Peck (1969) 引用之案例僅有 17 筆，不但皆為美國之施工案例，且年代較為久遠，Attewell (1981) 與 O'Reilly and New (1982) 多引用英國開放式潛盾機施工案例，Clough and Schmidt (1981) 多引用美國之施工案例建立經驗公式，Fujita (1982) 依據 94 筆日本潛盾施工案例建立之最大地表沉陷量之經驗表格。上述學者之研究，引用案例個數有限且侷限於特定地區、部份年代較久遠且施工方法較舊，使得其可用性較低。

本研究收集自 1971 年至 2005 年間，於台灣、日本、英國及美國等國家之 151 筆潛盾隧道施工案例，根據兩類土壤種類（非凝聚性與凝聚性）與三種潛盾機型式（開放式潛盾機、泥水式潛盾機、與土壓平衡式潛盾機）分類後進行分析，並提出一經驗評估方法評估潛盾隧道施工引致之地表沉陷。本研究採用 Peck (1969) 建議之常態分佈曲線來模擬隧道施工造成之地表沉陷槽，並針對寬度參數（Width parameter）與地盤漏失（Ground loss）進行案例分析。根據開挖土壤種類與採用之潛盾機型式，81 筆寬度參數 i 現地量測值分為六類進行回歸分析。106 筆地盤漏失實測值分為四類（不包含泥水式潛盾機），並將各類潛盾隧道工程之案例分等，以評估潛盾隧道施工引致之地盤漏失。本經驗評估方法援用寬度參數與地盤漏失之分析結果，以 Peck (1969) 建議之常態分佈曲線評估採用不同潛盾機類型、隧道直徑、與隧道深度於不同土層條件下施工引致之地表沉陷槽，最後引用 29 筆國內外單隧道施工案例之監測結果，審視所建議方法之可行性。

1.3 論文組織

本文第二章收集相關重要文獻，對潛盾工法沿革及施工原理、潛盾機型及其適用土層、地表沉陷之來源、單隧道施工引致之地表沉陷預估，進行有系統之整理。第三章收集國內外潛盾施工案例，對潛盾施工引致之沉陷槽之寬度及地盤漏失量進行分析。第四章介紹一簡易之經驗評估方法，用以評估潛盾工程品質，並對多筆國內外已完成之施工案例進行評述。第五章為結論與建議。



第 2 章

文 獻 回 顧

由於潛盾隧道施工所引致之地盤變位對於地表結構物、結構基礎及地下管線等造成潛在威脅，因此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其施工原理、潛盾機型式、造成地盤變位的原因及單一隧道之地表沉陷估計等加以說明。

2.1 潛盾工法沿革

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）。潛盾隧道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，被迫停工七年後再復工，所幸於 1841 年到達對岸工作井，完成此劃時代之創舉。爾後 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潛盾機。

2.2 潛盾工法施工原理

潛盾工法為在軟弱土質中開挖隧道之一種主要方式。其原理為利用一較隧道外徑為大，可向前移動之鋼套筒（即潛盾機）於土層中挖掘前進，並在設置永久支撐前，利用盾殼支撐隧道周圍地盤，使在潛盾機內部，一方面無慮地盤崩坍

而安全迅速地進行隧道開挖，一方面進行永久襯砌的組立。由於所有施工動作均在盾殼內完成，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。一般的潛盾施工作業循環可分為三個階段（朱旭，1984），如圖 2.1 所示：

- (1) 開挖與掘進：旋轉潛盾機前方的切刀盤，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，切刀盤停止旋轉，並依次收回千斤頂，以空出的空間作為安裝襯砌之用。
- (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 (a)與(b)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 2.6 所示。

2.4 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，並對各型式潛盾機之適用土層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 (a)及(b)。日本造船株式會社（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」列出潛盾機型式、適用土層及輔助工法關係，如表 2.3 所示。

2.5 潛盾隧道施工引致地盤變位之原因

潛盾隧道施工造成的土層及地表位移，與土壤種類、選用的潛盾機、潛盾機直徑、開挖深度、施工狀況與地下水狀況等息息相關。Peck（1969）、Schmidt（1974）、Cording and Hansmire（1975）、Hanya（1977）等學者均曾提出相關研究成果。綜合以上各研究成果，可將潛盾隧道施工引致的地盤變位原因歸納為以下六大項。

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 至 80mm。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（Ground loss）可用下式來表示：

$$V(\%) = 200 \cdot \frac{t}{a} \quad (2.1)$$

式中，

V ：地盤漏失（以開挖體積的百分比計）

t ：盾尾間隙寬度

a ：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，故受壓後略呈扁平狀。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，隧道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。若開挖面推力小於原土層之靜止土壓力。隧道開挖面土壤將產生應力釋放。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趨向被動土壓力狀態，此時的地層因受壓而產生推擠，可能導致地表的隆起。

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 2.8 (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) 之孔隙比變化因受隧道施工擾動，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進行探討。

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：

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

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 2.9 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：

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

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_0) 及寬度參數 (i) 值之關係，繪製成圖 2.10。該圖中顯示，同直徑之潛盾機於相同深度開挖隧道 (即 $Z_0/2R$ 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。

Cording and Hansmire (1975) 以 β 角表示沉陷槽寬度的參數，如圖 2.11(a)，並求出沉陷槽寬度 ($2W$) 與 β 角之關係。圖 2.11 (b) 顯示 β 角與 Peck 所定義之土壤特性的比較。

Attewell (1981) 依不同土層監測之結果，歸納出沉陷槽寬徑比 (i/R) 與隧道深徑比 ($Z_0/2R$) 之關係如下：

$$\frac{i}{R} = k \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^n \quad (2.4)$$

式中， k 與 n 為參數，依現地之地質特性而定，如表 2.4 所示。

Clough and Schmidt (1981) 針對於凝聚性土層中開挖隧道所造成之地表沉陷槽進行研究，將 (i/R) 與 ($Z_0/2R$) 繪於雙對數圖中如圖 2.12，其關係如下：

$$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^{0.8} \quad (2.5)$$

陳秋宗 (1988) 收集台北市衛生下水道採用潛盾工法所引致之地表沉陷之資料，並建立台北盆地之地表沉陷的影響範圍模式，建議 (i/R) 與 ($Z_0/2R$) 關係如下：

$$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^{0.94} \quad (2.6)$$

O'Reilly and New (1982) 收集 19 筆黏土層及 16 筆砂土層潛盾隧道施工造成之地表沉陷資料，得到沉陷槽反曲點位置 i 與隧道中心線深度 Z_0 之線性關係如下：

對凝聚性土層：

$$i = 0.43 \cdot Z + 1.1 \quad (2.7)$$

對非凝聚性土層：

$$i = 0.28 \cdot Z - 0.12 \quad (2.8)$$

式中，

i ：沉陷槽反曲點距隧道中心線水平距離（m）

Z ：隧道中心線深度（m）

因其線性回歸結果接近原點，O'Reilly and New 將上式簡化如下：

$$i = k \cdot Z \quad (2.9)$$

k 為因地質狀況而異之參數。於非凝聚性土壤中， k 為 0.25；地下水位以上之砂土層 k 為 0.2 至 0.3。凝聚性土壤中 k 為 0.5；硬黏土層 k 為 0.4，軟黏土層則為 0.7。

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

$$\frac{i}{z_0} = 0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) \quad (2.10)$$

式中，

z_0 ：隧道中心線深度

z ：地表下深度 z 處

對於地表沉陷槽而言（ $z = 0$ ），將之代入式(2.10)，化簡之可得：

$$i = 0.5 \cdot z_0 \quad (2.11)$$

此結果與 O'Reilly and New (1982) 建議之簡化公式(2.9)相同。

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/R) 與 ($H/2R$) 之關係如下：

$$\frac{i}{R} = 1.15 \left(\frac{H}{2R} \right)^{0.9} \quad (2.12)$$

式中，

H ：隧道中心線深度

式(2.12)所估得之 i 值，稍較 Clough and Schmidt (1981) 所得之 i 值為大。

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 ($2i/D$) 與 (z/D) 之關係如下：

$$\frac{2i}{D} = 0.58 \left(\frac{z}{D} \right) + 1.0 \quad (2.13)$$

式中，

D ：隧道直徑

z ：隧道中心線深度

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：

$$0.5\% < \frac{V_s}{A_t} (\%) < 2.5\% \quad (2.14)$$

(2) 於凝聚性土壤中：

$$0.2\% < \frac{V_s}{A_t} (\%) < 10\% \quad (2.15)$$

(3) 於非凝聚性土壤中：

$$3\% < \frac{V_s}{A_t} (\%) < 10\% \quad (2.16)$$

由已知之開挖隧道斷面積 A_t ，便可根據式(2.14)至式(2.16)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)積分並化簡後可得下列式(2.17)，將估算得之 V_s 代入即可得到地表最大沉陷量。

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \quad (2.17)$$

Fujita (1982) 收集日本國內自 1965 年以降 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：

$$\frac{S_{max}}{a} = \frac{1.25V_L}{0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)} \cdot \frac{a}{z_0} \quad (2.18)$$

式中，

a ：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 處

z_0 ：隧道中心線深度

針對地表沉陷槽， z 等於 0，將之代入式(2.18)並化簡可得：

$$S_{max} = 2.5V_L \cdot \frac{a^2}{z_0} \quad (2.19)$$

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：

$$\frac{S_{max}}{D} = 0.00327 \left(\frac{z}{D}\right)^{-0.43} \cdot V_L \quad (2.20)$$

式中，

D ：隧道直徑

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/R) 與 $(Z_0/2R)$ 關係，並在其極右側加上一邊界曲線，如圖 2.13 所示，再依隧道中心線深度 (Z_0)、隧道半徑 (R) 與土壤種類，即可由圖 2.13 得沉陷槽寬度參數 (i) 之範圍 (i_{low} 、 i_{avg} 、 i_{high})。並根據 Fujita (1982)

所建議之地表最大沉陷量（表 2.6），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，即可估算長期地表沉陷曲線。

為便於了解 Peck-Fujita 經驗方法，以下引用英國之 Haycroft 衛生下水道潛盾施工（Glossop and O'Reilly，1982）為例，逐步說明 Peck-Fujita 經驗方法之分析步驟。

《分析範例》

案例名稱：Haycroft Relief Sewer, Array C, U.K.

隧道中心線深度（ Z_0 ）：6.5 m

隧道直徑（ $2R$ ）：3.0 m

潛盾機型式：開放型（手挖式）潛盾機

開挖土壤種類：黏土

《分析步驟》

- (1) 由已知之隧道中心線深以（ $Z_0 = 6.5$ m）與隧道直徑（ $2R = 3.0$ m），得到其深徑比（ $\frac{Z_0}{2R} = 2.17$ ）。
- (2) 將深徑比（ $\frac{Z_0}{2R} = 2.17$ ）之值代入 Peck（1969）所提出之圖中，可得到該土層狀況（黏土層）之 $\frac{i}{R}$ 值範圍（ $\frac{i_{low}}{R} = 1.58$ 、 $\frac{i_{avg}}{R} = 2.00$ 、 $\frac{i_{high}}{R} = 2.42$ ）。再由已知之隧道半徑（ $R = 1.5$ m），進而求得該土層狀況之沉陷槽寬度參數 i 值： $i_{low} = 2.37$ m、 $i_{avg} = 3.00$ m 及 $i_{high} = 3.63$ m。
- (3) 根據所採用之潛盾機型式（開放式）、土層狀況（黏土層），由 Fujita（1982）所歸納之表 2.6 求得最大地表沉陷量 S_{max} 範圍： $(S_{max})_{low} = 70$ mm、 $(S_{max})_{avg} = 100$ mm、 $(S_{max})_{high} = 130$ mm。
- (4) 將所求得之 i 值與 S_{max} 範圍代入 Peck（1969）所引用之地表沉陷常態分佈曲線（式 2.2）則由 i_{low} 與 $(S_{max})_{low}$ 可得估算之小地表沉陷曲線，由 i_{avg} 與 $(S_{max})_{avg}$

可得到平均地表沉陷曲線，由 i_{high} 與 $(S_{max})_{high}$ 可得到大地表沉陷曲線。再將現地監測結果繪入，如圖 2.14，即可探查 Peck-Fujita 經驗方法之可靠性。



第 3 章

沉陷槽寬度及地盤漏失之案例分析

本章廣泛收集國內外潛盾施工案例，提出一方法評估潛盾隧道施工所造成之地表沉陷槽。本研究建議結合 Peck (1969) 所提議之地表沉陷常態分佈曲線，與依據國內外多個案例資料分析所獲得之沉陷槽寬度參數 (i) 及地盤漏失 (G_l) 結果，提出一簡易之經驗方法，對潛盾施工所引致之地表沉陷槽進行評估。

本章內容分為三節，第一節介紹本研究方法及重要參數定義。第二節與第三節收集國內外潛盾施工案例，分別對於沉陷槽寬度參數與地盤漏失分類後進行分析。

3.1 分析方法介紹

3.1.1 參數定義

為便於了解，參照圖 3.1，先將相關之重要參數定義如下：

A_s ：地表沉陷槽之斷面積

A_t ：隧道開挖面之斷面積

G_l ：單位長度內地表沉陷槽體積與隧道開挖體積之比值 ($G_l = \frac{V_s}{V_t} = \frac{A_s}{A_t}$)

i ：地表沉陷槽之反曲點 (Inflection point) 至對稱中心之距離，即寬度參數

R ：隧道開挖面半徑

S_{max} ：地表最大沉陷量

V_s ：單位長度內地表沉陷槽之體積 ($V_s = A_s \cdot 1$)

V_t ：單位長度內隧道開挖之體積 ($V_t = A_t \cdot 1$)

Z_0 ：隧道中心線之深度

3.1.2 常態分佈沉陷槽

本研究採用 Peck (1969) 建議，以下式(2.2)之常態分佈曲線來模擬隧道施工造成之地表沉陷槽：

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

由上式可知，欲模擬地表沉陷槽，寬度參數 i 與地表最大沉陷量 $S_{\max}$ 為兩主要參數。其中地表最大沉陷量 $S_{\max}$ 則可由單位長度內地表沉陷槽體積 V_s 與寬度參數 i 求出，如式(2.17)所示，

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \quad (2.17)$$

上式中 V_s 可由現地測得之地盤漏失 G_l 求得 ($V_s = G_l \cdot V_t$)，故本研究以寬度參數 i 與地盤漏失 G_l 為主要分析對象。本經驗評估方法首先依據 81 組現地資料建立沉陷槽寬度參數 i 值與隧道中心線深度 Z_0 之關係式。再根據 106 組現地監測資料，按開挖土壤種類及潛盾機類型建立隧道深度 Z_0 與地盤漏失 G_l 的關係圖，案例分析時，由施工條件利用經驗關係圖找出對應之地盤漏失 G_l 值範圍及沉陷槽寬度參數 i ，由 G_l 值結果求得施工造成之 V_s ，以求得之 V_s 與 i 值利用式(2.17)計算出 $S_{\max}$ ，至此已得到兩主要參數 i 值與 $S_{\max}$ ，便可由式(2.2)模擬地表沉陷槽。

本研究收集國內外已完成之施工案例，根據土壤種類（凝聚性與非凝聚性）與不同潛盾機型式（開放式、泥水加壓式與土壓平衡式）分類，計寬度參數有資料 81 筆分為 6 大類，地盤漏失有資料 106 筆分為 4 大類（不包含泥水加壓式潛盾機），逐一進行分析。

3.2 沉陷槽寬度之案例分析

為估算潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽寬度參數，本研究分析國內外工程案例實測之 81 筆寬度參數 i 值資料，各案例基本資料如表 3.1 所列。根據不同土壤種類與潛盾機型式，本研究將 81 筆工程案例分為下列 6 大類：（1）非凝聚性土

壤中之開放式潛盾機施工；(2) 凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工；(3) 非凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工；(4) 凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工；(5) 非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工；(6) 凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工。

潛盾隧道施工之實測沉陷點可以線性回歸方法得到該沉陷槽之寬度參數，其推導過程如下：

式(2.2)移項可得：

$$\frac{S(y)}{S_{\max}} = \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (3.1)$$

兩邊取自然對數：

$$\ln\left(\frac{S(y)}{S_{\max}}\right) = -\frac{y^2}{2i^2} \quad (3.2)$$

再化簡可得：

$$\ln(S(y)) = \left(-\frac{1}{2i^2}\right)y^2 - \ln(S_{\max}) \quad (3.3)$$

將各實測沉陷點繪入 $\ln(S(y))$ 與 y^2 之關係圖中，以線性回歸方法，求取直線方程式，由直線之斜率即可求得 i 值。

如圖 3.2 至 3.7 所示，將各類潛盾隧道工程之實測寬度參數值繪入寬徑比 $\left(\frac{i}{R}\right)$ 與深徑比 $\left(\frac{Z_0}{2R}\right)$ 之無因次關係圖中。採用 Attewell (1981) 與 Mair (1993) 建議之直線關係式 $(i = k \cdot Z_0)$ ，回歸各類型潛盾隧道工程之寬徑比與深徑比的案例資料點與原點連線之斜率取其平均值。經化簡後便可得到估算寬度參數 i 之經驗關係式 $\frac{i}{R} = 2k \cdot \left(\frac{Z_0}{2R}\right)$ ，或簡化如下式：

$$i = k \cdot Z_0 \quad (3.4)$$

其中，

i 為寬度參數

k 為待定係數，依潛盾機型式與土壤種類而定

Z_0 為隧道中心線深度

最後將分析結果與過去學者已完成之寬度參數研究作一比較，今分類分析討論如下。

3.2.1 非凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工

對於非凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工，本研究共收集得 27 筆工程案例之實測寬度參數值，此 27 筆資料經分析所得之方程式如下：

$$i = 0.28 \cdot Z_0 \quad (3.5)$$

本類潛盾隧道工程之案例資料，27 筆資料深徑比與寬徑比之斜率標準差 (Standard deviation) 為 0.63，變異係數 (Coefficient of variance) 為 0.35。圖 3.2 將現地資料與學者建議之經驗公式比較，圖中顯示本類型之工程之監測數據，與 O'Reilly and New (1982) 之建議曲線極為相近。各位學者建議之經驗公式皆列於表 3.2。

3.2.2 凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工

對於凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工，本研究共收集得 14 筆工程案例之實測地表沉陷資料，如圖 3.3 所示，分析後得到下列之經驗關係方程式如下：

$$i = 0.58 \cdot Z_0 \quad (3.6)$$

本類潛盾隧道工程之案例資料，14 筆深徑比與寬徑比之斜率標準差為 0.18，變異係數為 0.21。圖 3.3 為現地監測資料與先前學者研究結果之比較，圖中顯示，在相同之深徑比 (即 $\frac{Z_0}{2R}$ 為定值) 之下，依式(3.6)所求得之寬度參數 (i) 雖均較過去學者之研究稍大，但亦相去不遠。

比較式(3.5)與式(3.6)可發現，相同深徑比下，式(3.6)所得到的 i 值較式(3.5)者為大，意即開放式潛盾機在相同隧道直徑及深度下施工，於黏性土層中施工所造成之寬度參數 i 值比於砂質土層中施工所得之 i 值大。其原因可能是於砂質土

層中施工時，須考量砂質土壤之高透水性，故常為抑制地下水壓而採用壓氣工法或化學藥液灌漿等工法作為輔助，這些輔助工法具提高地盤穩定性減少沉陷之功用。

3.2.3 非凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工

對於非凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工，本研究共收集 5 筆工程案例之實測寬度參數值如圖 3.4 所示，5 筆資料經分析所得之經驗關係式如下：

$$i = 0.39 \cdot Z_0 \quad (3.7)$$

本類之潛盾隧道工程案例資料，其深徑比與寬徑比之斜率標準差為 0.18，變異係數為 0.14。圖 3.4 顯示分析結果與其它學者研究結果之差異，可發現式(3.7)求出之 i 值稍大於各學者之建議值，但是泥水加壓式潛盾機施工案例較為少見，因為資料之樣本空間較小（5 筆），其經驗關係僅供參考。

3.2.4 凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工

對於凝聚性土壤中之泥水加壓式潛盾機施工，本研究共收集 8 筆工程案例之實測寬度參數值如圖 3.5 所示，依此 8 筆資料經分析所得之關係式如下：

$$i = 0.56 \cdot Z_0 \quad (3.8)$$

本類之潛盾隧道工程案例資料，其深徑比與寬徑比之斜率標準差為 0.13，變異係數為 0.15。於圖 3.5 顯示本研究分析結果與其它學者研究結果之差異，使用式(3.8)求得之 i 值稍大於各學者之建議值。

3.2.5 非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工

對於非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工，本研究共收集 9 筆工程案例之實測沉陷槽寬度參數值，此 9 筆資料經回歸分析得到之關係式如下：

$$i = 0.50 \cdot Z_0 \quad (3.9)$$

本類之土壓平衡式潛盾機於砂質土壤中施工之工程案例資料，其深徑比與寬徑比之斜率標準差為 0.19，變異係數為 0.19。圖 3.6 顯示式(3.9)與學者研究結果之比較，可發現式(3.9)求出之 i 值與學者之建議值差異甚大，這可能由於土壓平衡式潛盾機於砂質土壤中施工為較新穎之工法，早期學者之研究對象多為開放式潛盾機，開放式開挖面於砂質土壤中施工時多採用壓氣工法或化學藥液灌漿以抵抗地下水壓，同時穩定開挖周圍地盤；而土壓平衡式潛盾機之密閉式開挖面則無地下水自開挖面入侵之問題，故較少於開挖面附近採用輔助工法，使得潛盾機掘進時對周圍土壤造成之擾動較大，因此早期之工程案例無法提供一有效之預測方法。

3.2.6 凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工

對於凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工，本研究共收集 18 筆工程案例之實測沉陷槽寬度參數值，如圖 3.7 所示，經線性回歸得到之關係式如下：

$$i = 0.44 \cdot Z_0 \quad (3.10)$$

本類之潛盾隧道工程案例資料，其深徑比與寬徑比之斜率標準差為 0.26，變異係數為 0.23。圖 3.7 顯示式(3.10)與學者研究結果之比較，圖中發現，式(3.10)介於學者建議之線性關係之間。

3 種不同潛盾機型式於 2 種不同土層中施工造成地表沉陷槽寬度參數 i 值的 6 種經驗估算式與 6 位學者之建議式，整理如表 3.2。

綜合以上分析結果，若已知隧道中心線深度 Z_0 、潛盾機機型與開挖土層條件，可利用表 3.2 中之經驗公式，估算該潛盾隧道工程引致之地表沉陷槽的寬度參數 i 值。

3.3 地盤漏失之案例分析

為評估潛盾隧道施工引致之地盤漏失量，本研究對所收集之 106 筆潛盾隧道

施工造成的地盤漏失之案例進行分析，各案例之基本資料彙整如表 3.1。如圖 3.8 所示，將 106 筆實測之地盤漏失值繪入地盤漏失 (G_l) 與深徑比 ($\frac{Z_0}{2R}$) 之無因次關係圖，可以訂定潛盾隧道施工之最小深徑比 (a-f 線) 與地盤漏失極限值 (o-f 線) 兩邊界線，如圖 3.8 所示，a 點、f 點及 o 點之點座標列於表 3.3。本研究將所收集之案例根據不同潛盾機型式與地層條件分為下列 4 大類：(1) 非凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工；(2) 凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工；(3) 非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工；(4) 凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工。由於採用泥水式潛盾機施工之案例較不多見，本研究對該型潛盾機於凝聚性土壤中施工案例僅得 5 筆，於非凝聚性土壤中者僅得 4 筆，各案例之基本資料列於表 3.1。因案例實測值太少，故暫不將之列入分析範圍。

如圖 3.9 所示，將分類後之案例實測地盤漏失值繪入 G_l 與深徑比 ($\frac{Z_0}{2R}$) 關係圖後，對施工造成之地盤漏失分 5 等進行評等，各評等之案例數均佔該潛盾隧道工程類型總案例數之 20%，分為 5 等評分如表 3.4 所示。

以下將 4 大類潛盾機隧道工程引致之地盤漏失案例分析分別討論如下。

3.3.1 非凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工

對於非凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工，本研究共收集得 12 筆工程案例之地盤漏失值。圖 3.9 顯示地盤漏失資料之評等，圖中 o、a、b、c、d、e 與 f 各點座標顯示於表 3.3。開放式潛盾機於砂質土壤中施工所造成的地盤漏失並不大，其原因可能如前所述，工程中為抑制開挖面的水壓力而採用壓氣工法及化學藥液灌漿等作為輔助，此舉亦具降低地盤漏失之效。

3.3.2 凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工

對於凝聚性土壤中之開放式潛盾機施工，本研究共收集得 31 筆工程案例之

地盤漏失值。圖 3.10 顯示地盤漏失資料之評等，圖中各點座標亦顯示於表 3.3，各評等包含 6 至 7 個案例不等。從圖中可發現，於黏土層中使用開放式潛盾機施工造成之地盤漏失難以控制。由於開挖面並非封閉，盾首周圍土壤的高度不穩定與盾尾間隙所造成的地盤漏失，以及地層條件的差異，皆是造成地盤漏失量增大的原因。

3.3.3 非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工

對於非凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工，本研究共收集得 24 筆工程案例之地盤漏失值。圖 3.11 顯示地盤漏失資料之評等，圖中各點座標請參考表 3.3，各評等各佔有 4 到 5 個案例不等。由圖中可以發現，土壓平衡式潛盾機於顆粒性土壤中施工，其封閉式開挖面之穩定性良好，因砂質土層中施工，為了防止地下水壓發展而常採用多種輔助工法，亦可降低施工造成之地盤擾動。

3.3.4 凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工

對於凝聚性土壤中之土壓平衡式潛盾機施工，本研究共收集得 30 筆工程案例之地盤漏失值。圖 3.12 顯示地盤漏失資料之 5 分評等，各評等分別佔有 6 個案例。與早期的開放式潛盾機施工比較可以發現，封閉式的土壓平衡式潛盾機可以控制盾首開挖面的土壓力，因此有效降低地盤漏失，但 G_I 值散亂的現象仍在，除了工藝技術品質等人為因素之外，亦可能是由於各地域的黏土工程性質不一所致。

第 4 章

以經驗方法評估潛盾隧道施工 引致之地表沉陷

本章運用所收集之國內外已完成之潛盾隧道施工造成的地表沉陷槽監測資料，利用第三章所述之經驗方法來評估該工程施工造成地表沉陷量之等級。但如前所提及，由於泥水加壓式潛盾機之採用案例較不多見，相關監測資料數量不足故在本章不納入討論。

本章內容共分為四節，第一節為評估範例，為方便了解此經驗評估方法之使用，於本節將引用一工程案例來逐步說明其計算流程。第二節至第四節針對不同潛盾機型式與土層條件之工程案例進行評估討論。

4.1 評估範例

本節所引用之案例為台北捷運 CN258 標 (Wu and Lee, 2003)，今將評估步驟逐步說明如下：

《評估範例》

案例名稱：台北捷運 CN258 標 (346 斷面)，案例編號 EC13

隧道中心線深度 (Z_0): 12.4 m

隧道直徑 ($2R$): 6.04 m

潛盾機型式：土壓平衡式潛盾機

開挖土壤種類：黏土

《評估步驟》

(1) 由已知的隧道中心線深度 ($Z_0 = 12.4$ m) 與隧道直徑 ($2R = 6.04$ m)，得到其

深徑比 ($\frac{Z_0}{2R} = 2.05$)。

(2) 將已知之隧道中心線深度，依不同潛盾機型（土壓平衡式）及開挖土層條件（黏土層），由表 3.2 之經驗公式即可計算得寬度參數 i 值 ($i = 0.44Z_0 = 5.46$ m)。

(3) 根據所採用之潛盾機型式（土壓平衡式）與土壤條件（黏土層），由已求得之深徑比 ($\frac{Z_0}{2R} = 2.05$) 查圖 3.12 得到地盤漏失參數： $G_{l,AB} = 0.92\%$ 、 $G_{l,BC} = 1.34\%$ 、 $G_{l,CD} = 2.43\%$ 與 $G_{l,DE} = 3.18\%$ 。

(4) 由所得之地盤漏失 $G_{l,AB}$ 、 $G_{l,BC}$ 、 $G_{l,CD}$ 與 $G_{l,DE}$ 值與寬度參數 i 值 ($i = 5.46$ m)，代入式(2.17)，可得地表最大沉陷量： $S_{max,AB} = 19.5$ mm、 $S_{max,BC} = 28.4$ mm、 $S_{max,CD} = 51.5$ mm 與 $S_{max,DE} = 67.5$ mm。

(5) 由已求得的寬度參數 i 值與最大沉陷量 $S_{max,AB}$ 、 $S_{max,BC}$ 、 $S_{max,CD}$ 與 $S_{max,DE}$ 值，代入式(2.2)即可得 4 條地表沉陷曲線，如圖 4.1 所示。將 CN258 標 346 斷面現地監測結果繪入圖 4.1。其結果顯示施工造成之地表沉陷量評等落於 B 區，表示該潛盾隧道施工造成之地盤沉陷高於一般水準。

4.2 非凝聚性土壤中開放式潛盾機施工

依據上述之評估方法，本節探討開放式潛盾機於砂質土壤內施工造成之地表沉陷，本研究共收集得到 5 筆工程案例，分別將各案例評述如下：

(1) 案例 OS1：其評比結果如圖 4.2 所示，可發現其評比結果落於 B 區，其隧道施工品質在水準之上。Eadie (1977) 指出，於工程期間，為防止地下水壓發展，採用壓氣工法作為輔助，此舉亦具有穩定開挖面周圍地盤，進而降低地盤漏失之效。

(2) 案例 OS2：其評比結果如圖 4.3 所示，其評比結果落於 B 區。本案例亦採用壓氣工法防止地下水壓，較小的地盤漏失量是可以預期的。

(3) 案例 OS3：其評比結果如圖 4.4 所示，其評比結果落於 B 區。O'Reilly et al.

(1980) 指出，本案例在隧道施工前已先降低地下水位，並在潛盾掘進時採用化學藥液灌漿穩定地盤。在多重輔助工法之下，有效降低地盤漏失量。

(4) 案例 OS4：其評比結果如圖 4.5 所示，圖中可發現地表沉陷評比結果已落於 E 區。O'Reilly et al. (1980) 提及，雖本案例亦在隧道施工前降低地下水位，但並無採用任何輔助工法。因此造成較大之地盤漏失量。

(5) 案例 OS5：其評比結果如圖 4.6 所示，其評比結果落於優於一般水準的 B 區。蔡茂生與林國濬 (1989) 指出，本案例在潛盾掘進時，同時採用壓氣工法及化學藥液灌漿作為輔助。在多重防範過大地盤沉陷的作用下，有效抑制地盤沉陷量。

由以上案例可以發現，在砂質土壤中之開放式潛盾機施工，常採用壓氣或化學藥液灌漿等輔助工法來對抗地下水壓，亦因此有效減少地盤漏失量並落於理想範圍內。

4.3 凝聚性土壤中開放式潛盾機施工

本研究共收集獲得四筆工程案例，以下分別將各工程案例評述如下：

(1) 案例 OC1：其評比結果如圖 4.7 所示，圖中可發現隧道施工造成之地表沉陷槽落於 D 區，為低於一般水準，且其寬度亦大於平均值。

(2) 案例 OC2：其評比結果如圖 4.8 所示，實測地表沉陷槽穿越 A、B、C、D 及 E 區，其原因乃是地盤漏失 G_l 除受地表最大沉陷量 S_{max} 影響外，亦受沉陷槽寬度參數 i 所控制。本案例現地量得沉陷槽寬度參數 i 值為 3.0 m，故 S_{max} 值甚大。

(3) 案例 OC3：其評比結果如圖 4.9 所示，圖中可發現，實測沉陷槽寬度明顯大於估算值，其過寬之沉陷槽使得其地盤漏失量過大，地盤漏失實測值高達 13.1%。

(4) 案例 OC4：其評比結果如圖 4.10 所示，實測地表沉陷槽皆落於 E 區，雖其沉

陷槽寬度值為合理，但由於過大之地表沉陷量，使得地盤漏失實測值高達 14.8%。

由上述四項工程案例可以發現，開放式潛盾機之施工，造成之地盤變位難以控制，這是因盾首開放式的開挖面應力無法控制，造成周圍地盤極度不穩定所致。

4.4 非凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施工

本研究共收集獲得 4 筆工程案例，各案例之地盤沉陷評述如下：

- (1) 案例 ES1：其評比結果如圖 4.11 所示，監測所得結果皆落於 E 區，沉陷槽又寬又深。雖本案例於開挖面附近採用高壓噴射灌漿（Jet grouting），但由於地表為約深 3.5 m 之回填土層，該層包含粉土、黏土、石灰岩塊、砂土、礫石及磚石碎片等回填材料（Abdrabbo, 1999），推測可能因表層鬆軟且地質不均勻，故造成過大之地盤漏失。
- (2) 案例 ES2：其評比結果如圖 4.12 所示，實測地表沉陷值落於 E 區，本案例與案例 ES1 為相同地質條件與施工，可能因表層之地質不均勻造成過大之地盤漏失。
- (3) 案例 ES3：其評比結果如圖 4.13 所示，其監測結果皆落於 E 區，本案例與案例 ES1 為相同地質條件與施工，故可能因表層之地質不均勻造成過大之地盤漏失。
- (4) 案例 ES4：其評比結果如圖 4.14 所示，沉陷監測值落於 A 區，為地表沉陷量表現極優異之工程案例。本案例工址之地質為第三紀土層（Tertiary layer），該層為極堅硬、高度過壓密之地層，而潛盾機通過該層中一堅硬之砂土次層（Gonzalez and Sagaseta, 2001），堅實的地層條件為本案例傑出之主要原因。

由以上 4 個案例可發現，施工前充分了解隧道開挖地區之地質狀況為潛盾隧道工程中的重要一環。

4.5 凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施工

本類型之潛盾隧道造成之地盤沉陷，本研究共獲得 16 筆工程案例，各案例評述如下：

- (1) 案例 EC1：其評比結果如圖 4.15 所示，圖中可發現，雖地表最大沉陷量落於 B 區，但沉陷槽寬度明顯大於預測平均值。該工程開挖土壤為極軟弱黏土，雖在開挖斷面施作門型化學藥液灌漿 (Kitamura et al., 1981)，此舉有效降低地表沉陷，但施工之影響範圍仍偏太寬。
- (2) 案例 EC2：其評比結果如圖 4.16 所示，其實測沉陷槽並不對稱且部份落於 E 區。本案例乃於極軟弱之海積黏土 (Marine clay) 地層中施工 (Balasubramanian, 1987)，隧道開挖引致之地盤擾動難以控制。圖中亦可發現其沉陷槽左右並不對稱，可惜原論文並未對造成此現象之原因加以解釋。
- (3) 案例 EC3：其評比結果如圖 4.17 所示，實測沉陷皆落於 E 區，且實測之沉陷槽寬度略大於平均值。本案例亦於軟弱海積黏土層施工 (Balasubramanian, 1987)，故引起較大的地盤漏失 $G_l = 3.9\%$ 。
- (4) 案例 EC4：其評比結果如圖 4.18 所示，監測結果皆落於 E 區，圖中可發現雖沉陷槽寬度接近平均值，但由於過大之地盤漏失， $G_l = 7.2\%$ ，使得地表沉陷問題較為嚴重。
- (5) 案例 EC5：其評比結果如圖 4.19 所示，圖中發現實測沉陷槽極為巨大，此乃因背填灌漿約在潛盾機通過測站 200 ft 後才施作，缺乏時效性，再加上開挖面上有超挖現象，導致完工 554 天後之地表最大沉陷量達到 115 mm (Ilsley et al., 1991)，遠遠超出評估範圍。
- (6) 案例 EC6：其評比結果如圖 4.20 所示，地表沉陷落於 E 區，本案例亦因潛盾機通過測站 8 小時後才施作背填灌漿 (Ilsley et al., 1991)，使得地盤漏失較為嚴重。
- (7) 案例 EC7：其評比結果如圖 4.21 所示，地表沉陷槽落於 E 區。本案例之工址

位於不排水剪力強度較低之黏土層 ($S_u = 20 \sim 60 \text{ kPa}$)，且中間夾一極靈敏之中等緊密砂土薄層，該砂土層受一微小擾動即可能導致劇烈的強度下降 (Rowe and Lee, 1993)，可能受較不良之地層條件影響而造成較大之地盤漏失。

- (8) 案例 EC8：其評比結果如圖 4.22 所示，監測結果落於 A 區。該案例工址位於堅硬黏土層且夾雜少量砂礫石 (Ledesma and Romero, 1997)，優良的地層條件是造就本案例優異表現的主要原因。
- (9) 案例 EC9：其評比結果如圖 4.23 所示，監測結果落於 B 區，沉陷量為優於一般水準之工程案例。本案例雖位於長江三角洲之軟弱黏土層，但潛盾機內之螺運機 (Screw auger) 以較切刀盤削土速度慢的速率輸送土渣，此舉使得開挖面周圍土壤微向外突出，進而抵擋擠向開挖面之土壤。且潛盾機向前推進時，盾尾間隙施作補償灌漿 (Compensation grouting)，灌漿壓力達 300 kPa (Lee et al., 1999)，多重輔助工法使得本案例地盤沉陷量控制良好。
- (10) 案例 EC10：其評比結果如圖 4.24 所示，沉陷監測結果落於 D 區，在一般水準之下。雖本案例與案例 EC9 為同一工程標，套用相同之施工方式，但其工作人員對於潛盾機操作較無經驗 (Lee et al., 1999)，較差之工作技藝 (Workmanship) 使得本案例地盤沉陷表現欠佳。
- (11) 案例 EC11：其評比結果如圖 4.25 所示，監結果落於 E 區。Wannipa and Supot (1999) 指出，工程期間環片曾經移除，故隧道上方之覆土壓力並非由環片承擔，但文獻中並未詳細說明該事件。可能因此之故，使本案例產生較大之地盤漏失。
- (12) 案例 EC12：其評比結果如圖 4.26 所示，地表沉陷落於 B 區。圖中可發現，沉陷槽右側之沉陷量明顯較大，可惜文獻中並未詳述其原因。
- (13) 案例 EC13：其評比結果如圖 4.1 所示，監測結果落於 B 區，本案例之地表沉陷表現於水準之上。
- (14) 案例 EC14：其評比結果如圖 4.27 所示，監測結果落於 C 區，本案例施工造

成之沉陷值為一般水準。

(15) 案例 EC15：其評比結果如圖 4.28 所示，監測結果穿越 C、D 及 E 區，圖中實測之沉陷槽寬度大於預值平均值。

(16) 案例 EC16：其評比結果如圖 4.29 所示，監測結果落於 B 區，本案例之沉陷量表現於水準之上。

由以上案例得知，相較於較早期之開放式潛盾機，土壓平衡式潛盾機的確可有效降低地盤漏失。欲降低隧道開挖造成之地盤下陷，除潛盾機之機具性能之外，施工土層之性質及施工人員之技藝水準亦是重要因素。

4.6 經驗評估方法的優點與限制

以本經驗方法評估潛盾施工所引致之地表沉陷時，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。以下列出本經驗方法之各項優缺點：

一、優點：

(1) 評估結果具實用性：地質條件、輔助工法採用與否及施工人員技藝等皆為影響潛盾隧道工程施工品質之重要因素，但均難以量化分析。本方法以國內外已完成之工程案例作為分析基礎，分五種等級對潛盾工程造成之地盤漏失評等，因使用世界各國之隧道工程現地監測結果為依據，故評估結果相當具有實用價值。

(2) 過程簡單：只需輸入簡單的參數，即可迅速地計算得地表沉陷評估曲線再輸入現地監測結果即可得到評估結果。此方法操作容易，且不需複雜設備，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工程，地盤沉陷評等可用於工程前之施工品質要求；而已竣工者，則可用於評估其工程品質良劣。

(4) 可考慮不同因素之影響：此方法可充分考慮不同潛盾機型、土層種類、隧道深度及隧道直徑對地表沉陷之影響。

- (5) 未來仍可使用：隨施工機具與技術進步，沉陷槽寬度與最大沉陷量可能會漸減小，未來可再收集更多實測資料以進行本方法之修正及更新。

二、限制：

- (1) 本方法僅能考慮單一土層，對於多層土壤則無法評估。
- (2) 本方法僅能評估地表沉陷曲線，對於深層沉陷、水平位移與水壓變化等情形，無法進行評估。
- (3) 本方法之基本假設為地表沉陷曲線是對稱，故無法考慮邊界條件為非對稱之情形。



第 5 章

結 論 與 建 議

為評估潛盾隧道施工所引致之地表沉陷，本研究提出一簡易之經驗方法，評估隧道施工造成之長期地表沉陷槽，作為潛盾施工控制之依據，並獲得如下之結論與建議。

5.1 結論

依據探討國內外 151 筆潛盾隧道施工案例，與建議以經驗評估方法評估單隧道施工引致之地表沉陷槽，本研究得到以下結論：

- (1) 隧道中心線深度越深，潛盾隧道施工造成之地表沉陷槽寬度則越寬。本研究依潛盾機型式與土壤種類將寬度參數案例分為六類，各類之隧道深度 Z_0 與寬度參數 i 之關係可以 $i = k \cdot Z_0$ 之經驗公式表示。
- (2) 開放式潛盾機在相同隧道直徑 R 及深度 Z_0 下施工，於黏性土層中施工所造成之寬度參數 i 值比於砂質土層中施工所得之 i 值大，且造成較大之地盤漏失。其原因可能是於砂質土層中施工時，為抑制開放式開挖面之地下水壓而採用壓氣工法或化學藥液灌漿等工法作為輔助，這些輔助工法具提高地盤穩定性降低地盤漏失之功用。
- (3) 開放式潛盾機於凝聚性土層中施工，由於開放式的開挖面使得地盤穩定性欠佳，因此造成地盤漏失 G_I 偏大。
- (4) 相較於早期之開放式潛盾機，土壓平衡式潛盾機採用密閉式開挖面施工，施工人員可控制開挖面上之土壓力，對鄰近地盤之擾動較小，可有效降低因施工造成之地盤漏失。
- (5) 於非凝聚性土壤中採用土壓平衡式潛盾機施工引致之沉陷槽寬度參數 i 值，

較過去學者建議之 i 值為大。這可能由於土壓平衡式潛盾機之密閉式開挖面無地下水入侵之問題，故較少於開挖面附近採用輔助工法，因此潛盾機掘進時對鄰近地盤造成之擾動較大。

- (6) 除選擇性能優良的潛盾機外，設計人員於施工前充份了解開挖土壤性質，及施工人員之技藝水準，為判斷地盤沉陷表現良劣之重要因素。
- (7) 本經驗方法依據國內外已完成之施工案例評估採用不同機型、隧道深度、及隧道直徑於不同土層條件開挖潛盾隧道造成之地表沉陷槽，故其結果具實用價值。

5.2 建議

- (1) 由於所收集之案例有限，本文未能詳加探討泥水式潛盾機施工，建議未來努力收集泥水式潛盾機施工之案例，可更加詳盡對其加以評估。
- (2) 本文僅評估地表垂直沉陷曲線，未來可繼續對深層深陷、水平位移及水壓變化等影響作探討。
- (3) 本文僅以經驗方法進行評估，未來可配合數值分析進行全面性更詳細的研究。
- (4) 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。

參考文獻

1. 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。
2. 陳秋宗 (1988), “台北市潛盾隧道施工對地盤沉陷之影響”, 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所, 新竹。
3. 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。
4. 蔡茂生, 林國濬 (1989), “台北地施潛盾施工案例檢討”, 中日都會區大地工程技術研討會。
5. 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.
6. Attewell, P. B. and Farmer, I. W. (1974). “Ground Deformations Resulting from Shield Tunnelling in London Clay.” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 380-395.
7. Attewell, P. B. (1978). “Ground Movements Caused by Tunnelling in Soil.” *Proceedings of International Conference on Large Movements and Structures*, Pentech Press, London, pp. 812-948.
8. Attewell, P. B., Glossop, N. H. and Farmer, I. W. (1978). “Ground Deformations Caused by Tunnelling in a Silty Alluvial Clay.” *Ground Engineering*, Vol. 11, No. 8, pp. 32-41.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Barratt, D. A. and Tyler, R. G. (1976). “Measurements of Ground Movement and Lining Behavior on the London Underground at Regents Park.” *Laboratory Report 684*, Transport and Road Research Laboratory, Department of the

Environment, Department of Transport, London.

13. Boden, J. B. and McCaul, C. (1974). "Measurement of Ground Movements during a Bentonite Tunnelling Experiment." Laboratory Report 653, Transport and Road Research Laboratory, Department of the Environment, Department of Transport, London.
14. Butler, R. A. and Hampton, D. (1975). "Subsidence over Soft Ground Tunnel." *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101, No. 1, pp. 35-49.
15. Chambosse, G. (1972). "Das Verformungsverhalten des Frankfurter Tons biem Tunnel. (In German.)" *Mitt. Versuchanstalt Bodenmech. Grundbau, Tech. Hochschule Darmstadt*, No. 10, pp. 103.
16. Chen, C. T. (1988). "Ground Settlements in Taipei Basin due to Shield Tunneling." Master's Thesis, National Chiao Tung University, Hsinchu.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Eadie, H. S. (1977). "Settlement Observed above a Tunnel in Sand." *Tunnels and Tunnelling*, Vol. 9, No. 5, pp. 93-94.
21. El-Nahas, 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.
22. 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.
23. Fujita, K. (1982). "Prediction of Settlements by Shield Tunnelling." *Proceedings of International Conference on Soil Mechanics*, Vol. 1, pp. 239-246.
24. Gonzalez, C. and Sagaseta, C. (2001). "Patterns of Soil Deformations around Tunnels: Application to the Extension of Madrid Metro." *Computers and Geotechnics, Elsevir Science Ltd.*, Vol. 28, No. 6-7, pp. 445-468.
25. 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.

26. 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.
27. Hitachi Zosen Corporation, (1990). Shield Tunneling Menu, Japan.
28. 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.
29. Kanji, M. A. (1979). "Surface Displacement as a Consequence of Excavation Activities." General Report of International Congress in Rock Mechanics, Montreal, Vol. 3.
30. Kawamura, N. (1997). "Shield Tunnelling in Chicago Clay." Research Proposal, University of Illinois.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. MacPherson, H. H. (1978). "Settlements around Tunnels in Soils: Three Case Histories." Final Report by University of Illinois to Department of Transportation, Washington D.C., Report No. UMTA-IL-06-0043-78-1.
37. 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.

38. Maynar, M. M., Rodriguez, L. M. (2005). "Predicted versus Measured Soil Movements Induced by Shield Tunnelling in the Madrid Metro Extension." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 1160-1172.
39. McCaul, C. (1978). "Settlements Caused by Tunnelling in Weak Ground at Stockton-on-Tees." Transport and Road Research Laboratory Supplementary Report 383: Crowthorne, Department of the Environment, Department of Transport, London.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. Murad, Y. A. F. and George, Z. V. (1999). "Computational Model for the Simulation of the Shield Tunneling Process in Cohesive Soils." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 23-44.
44. Muir Wood, A. M. and Gibb, F. R. (1971). "Design and Construction of the Cargo Tunnel at Heathrow Airport." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, Vol. 48, Paper 7357, pp. 11-34.
45. 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.
46. Norgrove, W. B., Cooper, I. and Attewell, P. B. (1979). "Site Investigation Procedures adopted for the Northumbrian Water Authority Tyneside Sewerage Scheme, with Special Reference to Settlement Prediction When Tunnelling through Urban Areas." *Proceedings of Tunnelling '79*, Institution of Mining and Metallurgy, London, London, pp. 79-184.
47. 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.
48. 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.
 49. 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.
 50. 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.
 51. Palmer, J. H. L. and Belshaw, D. J. (1979). “Long-Term Performance of Machine-Bored Tunnel with use of an unreinforced, Precast, Segmented Concrete Lining in Soft Clay.” Proceedings of Tunnelling '79, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 165-170.
 52. 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.
 53. 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.
 54. 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.
 55. Thongyot, T. (1995). “Ground Movement Sssociated with 11km Water Transmission Bored Tunnel in Bangkok Subsoil.” Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
 56. Tsai, M. S., (1985). “The Treatment Methods of Underground Water during Performing the Shield Tunneling Works. (In Chinese.)” Sino-Geotechnics, Taipei, Taiwan, Vol. 12, September, pp. 68-79.
 57. Tsai, M. S. (1989). “The Selection of Shield Machine. (In Chinese.)” Sino-Geotechnics, Taipei, Taiwan, Vol. 23, September, pp. 55-71.
 58. Tsai, M. S. and Lin, G. J. (1989). “Case Study for Shield Tunneling in Taipei Area. (In Chinese.)” Proceedings of Sino-Japan Metropolitan Area Geotechnical

Technology Workshop, Taipei, Taiwan.

59. Toombs, A. F. (1980). "Settlement Caused by Tunnelling beneath a Motorway Embankment." Supplementary Report 547. Transport and Road Research Laboratory, Department of the Environment, Department of Transport, London.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. Yoshikoshi, W., Watanabe, O. and Takagi, N. (1978). "Prediction of Ground Settlements Associated with Shield Tunnelling." Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 47-59.

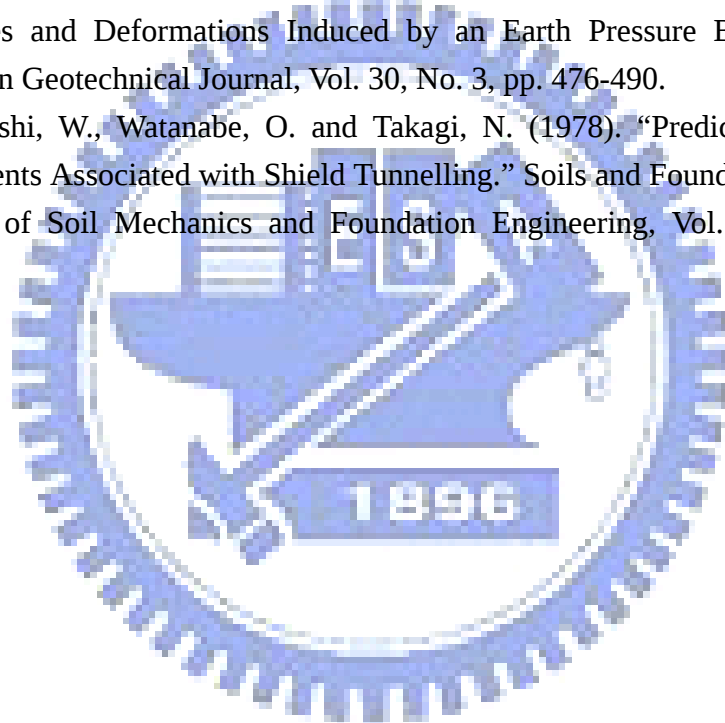
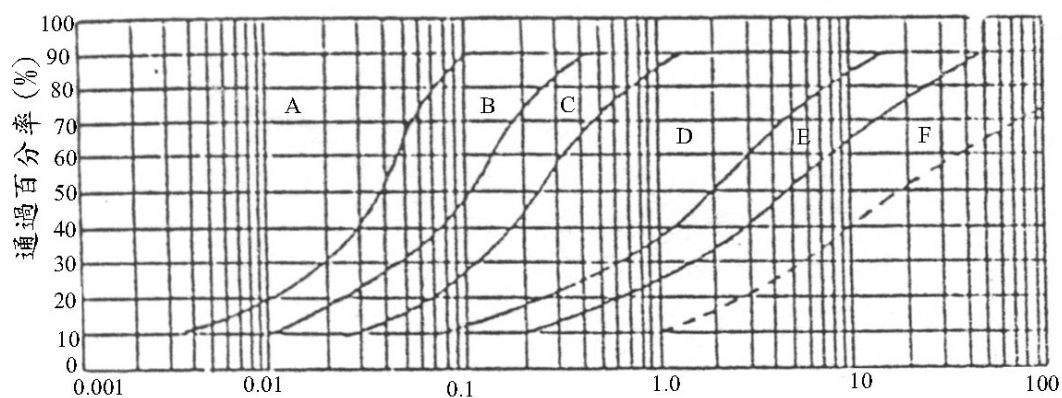


表 2.1 潛盾機分類與特性 (摘自蔡茂生, 民國 74 年)

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、面型千斤頂為主要檔土措施。	(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)開挖面不穩定時，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。	比人力開挖效率較佳，縮短後續作業時間。
	機 械 式	在機身前方設置面鉞(Disk)，其上裝設切刃齒(Cutter Bit)以切刃齒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。	(1)面鉞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鉞(Bulkhead)，其上方開設取土口，當潛盾機推進時，推力經由隔鉞傳遞至開挖地層，使土壤受擠壓而自取土口流入機內。		(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。
	傳 統 土 壓 平 衡 式	以切刃盤之切削掘削地層，將開挖之土壤推積於面鉞與隔鉞間之土倉，以貫穿隔鉞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。	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。
密 閉 式	土 壓 平 衡 式	此機型適宜在砂質土含量甚高之地層。	
	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。	(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		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，故其變形泥水現象最小。 (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（摘自 朱旭，民國 73 年）

(a)



(b)

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（摘自日本土工學會，1987）

潛盾機型式 地質				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		
																基本式			加泥式					
分類	土質	N值	Wn（含水比）	輔助工法			輔助工法			輔助工法			輔助工法			輔助工法			輔助工法			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
沖積黏土層	腐植土	0	300以上	X	X		X	X		X	X		X	△	A	X	△	A	X	△	A	X	△	A
	粉土、黏土	0~2	100-300	X	△	A	X	X		X	X		○	—		X	△	A	△	○	A	△	○	A
	砂質粉土、黏土	0~2	80以上	X	△	A	X	X		X	X		○	—		△	○	A	△	○	A	△	○	A
	粉值砂土、黏土	0~5	50以上	△	○	A	X	△	A	△	○	A	△	○		○	—		△	○	A	△	—	
洪積黏土層	壩埤 (Load)、黏土	10~20	>50	○	—		○	—		△	—		X	X		○	—		○	—		○	—	
	砂質壩埤、黏土	15~25	>50	○	—		○	—		○	—		X	X		○	—		○	—		○	—	
	砂質壩埤、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	40以上	X	△	A、B	X	△	A、B	X	△	A、B	X	X		△	△	A	○	—		△	○	A
	固結砂層			△	○	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 沉陷槽寬徑比 ($i/2R$) 與隧道深徑比 ($Z_0/2R$) 關係之 k 、 n 值 (after Attewell, 1981)

Type of Soil	Ground Loss (V_s / V_t)	k	n	Remark
Clay	1.3% ~ 2.5%	1	1	
Sand	0.15% ~ 13%	0.82	0.36	Above GWT
		0.74	0.90	Below GWT
		0.63	0.97	Neglect Groundwater

V_s : Volume of surface settlement trough per unit length

V_t : Volume of tunnel per unit length



表 2.5 地表最大沉陷量之預測值 (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
Blind Type	Sand	Adopted	7	1.3	4	±3	7
		Adopted	25	15	20	±5	3
	Clay	Adopted	5	0.7	3	±2	6
Slurry Type		Not Adopted	5.7	2	4	±2	10
		Not Adopted	11.2	7.5	10	±2.5	4
	Clay	Not Adopted	5	3.5	4	±1	2
EPB Shield	Clay and Sand	Not Adopted	12	6	9	±3	3
	Sand	Both	6.4	2.1	4	±2.5	4
	Clay	Not Adopted	8.5	3.5	6	±2.5	3
EPB Shield		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範圍 (after Fujita, 1982)

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

(黏土層中之實測值又依沉陷量之大小分成兩類，“*”為沉陷量較大之一類)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z ₀ (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G ₁ (%)	Reference
Heathrow Tunnel, UK	Stiff OC clay	Open	10.9	12.9	6.60	N.A.	Muir Wood and Gibb (1971)
Frankfurt, Germany	Sand with limestone	Open	6.5	12.4	4.90	N.A.	Chambosse (1972)
Frankfurt, Germany	Sand with limestone	Open	6.5	10.5	3.90	N.A.	Chambosse (1972)
Green Park, U.K.	Stiff OC clay	Open	4.2	29.3	12.60	N.A.	Attewell and Farmer (1974)
London, U.K.	Sands and gravels	Slurry	4.1	10.1	5.00	N.A.	Boden and McCaul (1974)
Washington D.C., U.S.A.	Gravel and silty sand	Open	6.4	14.4	2.90	N.A.	Butler and Hampton (1975)
Washington D.C., U.S.A.	Gravel and silty sand	Open	6.4	11.6	4.50	N.A.	Butler and Hampton (1975)
Washington D.C., U.S.A.	Sand and gravel	Open	6.4	14.6	5.40	N.A.	Cording and Hansmire (1975)
Washington D.C., U.S.A.	Sand and gravel	Open	6.4	14.6	4.20	N.A.	Cording and Hansmire (1975)
Washington D.C., U.S.A.	Sand and gravel	Open	6.4	14.6	4.50	N.A.	Cording and Hansmire (1975)
Washington D.C., U.S.A.	Sand and gravel	Open	6.4	11.6	1.90	N.A.	Cording and Hansmire (1975)
Regents Park, U.K.	Stiff OC clay	Open	4.2	34	15.30	N.A.	Barratt and Tyler (1976)
Regents Park, U.K.	Stiff OC clay	Open	4.2	20	10.30	N.A.	Barratt and Tyler (1976)
Ayrshire Sewer Tunnel, Location A, U.K.	Silty sand	Open	2.895	6.25	1.82	0.70	Eadie (1977)
Ayrshire Sewer Tunnel, Location B, U.K.	Silty sand	Open	2.895	6.09	1.31	1.00	Eadie (1977)
Hebburn, U.K.	Soft NC clay	Open	2.0	7.5	3.90	N.A.	Attewell (1978)
Howden, U.K.	Stiff boulder clay	Open	3.6	14.2	6.90	N.A.	Attewell (1978)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Tyneside, U.K.	Soft silty clay	Open	4.3	13.5	6.50	N.A.	Attewell et al. (1978)
Haycroft Relief Sewer, Grimsby Array B, U.K.	Marine Warp	Open	3	5.3	4.08	8.40	Attewell et al. (1978)
Japan Subway Tunnel, Case G-1	Soft cohesive soil	Slurry	7.5	21.8	10.52	3.17	Hanya (1978)
Stockton-on-Tees, U.K.	Soft clay	Open	2.16	5.86	4.57	N.A.	McCaul (1978)
Stockton-on-Tees, U.K.	Silty clay with sand	Open	1.3	6.3	3.50	N.A.	McCaul (1978)
Stockton-on-Tees, U.K.	Silty clay with sand	Open	1.3	5.9	3.70	N.A.	McCaul (1978)
Washington D.C., U.S.A.	Medium dense sand	Open	6.4	20.9	5.10	N.A.	MacPherson (1978)
Washington D.C., U.S.A.	Medium dense sand	Open	6.4	23.0	5.10	N.A.	MacPherson (1978)
Washington D.C., U.S.A.	Medium dense sand	Open	6.0	11.0	3.50	N.A.	MacPherson (1978)
Washington D.C., U.S.A.	Medium dense sand	Open	6.0	11.0	5.90	N.A.	MacPherson (1978)
Illinois, U.S.A.	Medium dense sand	Open	3.0	10.8	2.00	N.A.	MacPherson (1978)
Illinois, U.S.A.	Medium dense sand	Open	3.0	14.4	3.20	N.A.	MacPherson (1978)
Illinois, U.S.A.	Medium dense sand	Open	3.0	13.8	4.10	N.A.	MacPherson (1978)
Illinois, U.S.A.	Medium dense sand	Open	3.0	10.8	2.00	N.A.	MacPherson (1978)
Illinois, U.S.A.	Medium dense sand	Open	3.0	10.2	2.80	N.A.	MacPherson (1978)
Tokyo, Japan	Fine silty sand	Open	3.7	22.1	8.20	N.A.	Yoshikoshi et al. (1978)
Tokyo, Japan	Fine silty sand	Open	3.9	10.9	4.10	N.A.	Yoshikoshi et al. (1978)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Bristol Sewerage Scheme, U.K.	Clay	Open	3.4	6	N.A.	2.80	Norgrove et al. (1979)
Frankfurt Metro, Germany	Clay	Open	6.5	15	N.A.	1.20	Norgrove et al. (1979)
Lower Market BART, U.S.A.	Clay	Open	5.5	19	N.A.	2.70	Norgrove et al. (1979)
Oxford Trunk, U.K.	Clay	Open	2.8	11.7	N.A.	0.40	Norgrove et al. (1979)
Sabrook Sewer Tunnel, U.S.A.	Clay	Open	2.7	13	N.A.	2.60	Norgrove et al. (1979)
Sabrook Sewer Tunnel, U.S.A.	Clay	Open	2.7	13.1	N.A.	3.10	Norgrove et al. (1979)
Sabrook Sewer Tunnel, U.S.A.	Clay	Open	2.7	10.1	N.A.	4.70	Norgrove et al. (1979)
San Francisco, U.S.A.	Clay	Open	5.3	11	N.A.	0.20	Norgrove et al. (1979)
San Francisco, U.S.A.	Clay	Open	2.7	13.5	N.A.	7.40	Norgrove et al. (1979)
San Francisco, U.S.A.	Clay	Open	2.7	9.5	N.A.	2.00	Norgrove et al. (1979)
Sao Paulo, Brazil	Clay	Open	5.5	11.8	N.A.	5.00	Norgrove et al. (1979)
Thames Water Authority, U.K.	Clay	Open	1.5	4.9	N.A.	3.00	Norgrove et al. (1979)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Toronto Subway B4, Canada	Clay	Open	5.1	11.2	N.A.	1.20	Norgrove et al. (1979)
Toronto Subway B4, Canada	Clay	Open	5.3	13.1	N.A.	0.60	Norgrove et al. (1979)
Washington Metro, U.S.A.	Clay	Open	5.5	22.5	N.A.	0.80	Norgrove et al. (1979)
Washington Metro, U.S.A.	Clay	Open	5.5	22	N.A.	1.00	Norgrove et al. (1979)
Washington Metro, U.S.A.	Clay	Open	5.5	21.4	N.A.	1.30	Norgrove et al. (1979)
Wellington Siphon, U.K.	Clay	Open	4.3	13.4	N.A.	13.10	Norgrove et al. (1979)
Brussels Metro, Belgium	Sand	Open	10	16	N.A.	2.50	Norgrove et al. (1979)
Toronto Subway, Canada	Sand	Open	5.2	11.9	N.A.	1.00	Norgrove et al. (1979)
Toronto Subway, Canada	Sand	Open	5.2	10.4	N.A.	1.90	Norgrove et al. (1979)
Toronto Subway, Canada	Sand	Open	5.3	13.4	N.A.	3.80	Norgrove et al. (1979)
WNTDC Lumbrook, U.S.A.	Sand	Open	3.6	9	N.A.	1.20	Norgrove et al. (1979)
WNTDC Lumbrook, U.S.A.	Sand	Open	3.6	6.5	N.A.	0.90	Norgrove et al. (1979)
WNTDC Lumbrook, U.S.A.	Sand	Open	3.6	6.5	N.A.	0.40	Norgrove et al. (1979)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Thunder Bay Sanitary Trunk Sewer, Canada	Silty Clay	Open	2.47	10.5	N.A.	7.70	Palmer and Belshaw (1979)
Acton Grange Trunk Outfall Sewer, Ellemere Road, U.K.	Sands and gravels	Slurry	2.87	6.5	2.20	2.40	New et al. (1980)
Acton Grange Trunk Outfall Sewer, Section B, U.K.	Sands and gravels	Slurry	2.87	5.6	2.05	1.50	O'Reilly et al. (1980)
Acton Grange Trunk Outfall Sewer, Section A, U.K.	Sands and gravels	Slurry	2.87	6	2.44	1.30	O'Reilly et al. (1980)
Warrington, U.K.	Sand with some gravel	Open	3.6	9.0	2.50	N.A.	O'Reilly et al. (1980)
Warrington, U.K.	Loose sand	Open	2.0	8.4	3.20	N.A.	O'Reilly et al. (1980)
Lumb Brook Sewer, Hollow Drive, U.K.	Sand and gravels	Open	3.6	6.5	1.91	0.40	O'Reilly et al. (1980)
Lumb Brook Sewer, Willow Drive, U.K.	Sand and gravels	Open	3.6	4.7	2.09	4.60	O'Reilly et al. (1980)
Avonmouth, U.K.	Soft alluvial deposit	Open	3.4	6.0	4.80	N.A.	Toombs (1980)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z ₀ (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G ₁ (%)	Reference
Tennohji-benten Giant Trunk Tunnel, Japan	Firm clay with soft sandy silt	EPB	6.75	7.88	5.45	2.05	Kitamura et al. (1981)
Haycroft Relief Sewer, Grimsby Array C, U.K.	Marine Warp	Open	3	6.5	4.97	14.80	Glossop and O'Reilly (1982)
Wellington Quay Siphon, U.K.	Silty clay with sand	Open	5.9	4.25	N.A.	13.10	Glossop and O'Reilly (1982)
Ayrshire Drainage Scheme, IInd Tunnel, U.K.	Sand	Open	2.9	6.2	N.A.	0.90	O'Reilly and New (1982)
Belfast Sewer, UK	Clay	Open	2.7	4.9	N.A.	1.90	O'Reilly and New (1982)
Belfast Sewer, UK	Clay	Open	2.7	4.5	N.A.	2.00	O'Reilly and New (1982)
Green Park, London, U.K.	Clay	Open	4.2	29.3	N.A.	1.40	O'Reilly and New (1982)
Heathrow Tunnel, UK	Clay	Open	10.1	13.3	N.A.	0.20	O'Reilly and New (1982)
Regents Park, London, U.K.	Clay	Open	4.2	34	N.A.	1.40	O'Reilly and New (1982)
Regents Park, London, U.K.	Clay	Open	4.2	20	N.A.	1.30	O'Reilly and New (1982)
Sutton, U.K.	Firm to stiff clay	Open	1.8	3.4	2.00	N.A.	O'Reilly and New(1982)
Singapore Effluent Outfall Pipeline, CH 1480	Soft marine clay	EPB	3.754	10.6	5.80	2.44	Balasubramanian (1987)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Singapore Effluent Outfall Pipeline, CH 2380	Soft marine clay	EPB	3.754	10.6	3.58	3.88	Balasubramanian (1987)
Taipei Sewer, Taiwan	Silty sand	Slurry	4.522	8.75	1.31	N.A.	Tsai and Lin (1989)
Milwaukee Sewer, Section CT-7, U.S.A.	Soft organic clay	EPB	3.57	7.44	3.97	7.20	Ilsley et al. (1991)
Milwaukee Sewer, Section CT-8-1, U.S.A.	Silty clay with sand	EPB	3.18	15.98	5.36	N.A.	Ilsley et al. (1991)
Milwaukee Sewer, Section CT-5/6, U.S.A.	Silty clay with sand	EPB	3.23	10.74	4.49	7.60	Ilsley et al. (1991)
Milwaukee Sewer, Section NS-10-R, U.S.A.	Stiff organic silt	Slurry	2.25	7.56	4.53	8.60	Ilsley et al. (1991)
Gateshead, U.K.	Laminated firm clay	Open	1.5	5.3	3.70	N.A.	Lake et al. (1992)
Shanghai Furongjiang Sewer Tunnel, China	Clay	EPB	4.20	5.6	2.62	7.48	Yi et al. (1993)
Bangkok, GBC5, Thailand	Clay	Open	2.7	16.5	N.A.	2.10	Thongyot (1995)
Bangkok, GBC5, Thailand	Clay	Open	2.7	16.5	N.A.	1.70	Thongyot (1995)
Bangkok, GBC5, Thailand	Clay	Open	2.7	18.5	N.A.	2.30	Thongyot (1995)
Taipei, Taiwan	Silty sand	EPB	6.1	18.5	7.40	N.A.	Moh et al. (1996)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Barcelona Subway Extension Tunnel, Spain	Stiff clay with gravel	EPB	8.00	10.0	5.03	1.20	Ledesma and Romero (1997)
Chicago, U.S.A.	Silty clay	Open	3.7	10.7	5.00	N.A.	Kawamura (1997)
Cairo Metro Tunnel Line 2, Egypt	Very dense sand	Slurry	9.43	18.0	6.60	0.25	El-Nahhas et al. (1997)
Mexico Sewerage Line A, Mexico	Soft clay	Slurry	4.0	13.0	5.66	3.30	Romo (1997)
Mexico Sewerage Line B, Mexico	Soft clay	Slurry	4.0	13.0	7.27	4.72	Romo (1997)
Taipei MRT CH 218, Section A.A.	Silty sand	EPB	6.04	16.0	N.A.	2.58	Ou et al. (1998)
Alexandria, Egypt	Medium fine sand	EPB	2.86	13.0	7.73	7.82	Abdrabbo et al. (1999)
Alexandria, Egypt	Medium fine sand	EPB	2.86	13.0	8.12	7.70	Abdrabbo et al. (1999)
Alexandria, Egypt	Medium fine sand	EPB	2.86	13.0	8.18	6.50	Abdrabbo et al. (1999)
Madrid, Spain	Miga sand	EPB	9.38	16.8	6.60	N.A.	Melis et. al. (1999)
Madrid, Spain	Miga sand	EPB	9.38	21.7	9.30	N.A.	Melis et. al. (1999)
Madrid, Spain	Miga sand	EPB	9.38	19.0	11.20	N.A.	Melis et. al. (1999)
Madrid, Spain	Miga sand	EPB	9.38	32.0	15.30	N.A.	Melis et. al. (1999)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
San Francisco N2 Tunnel, U.S.A.	Bay mud	EPB	7.40	14.0	4.45	0.75	Murad and George (1999)
Shanghai Metro Tunnel, Line 2 Section 19, China	Soft clay	EPB	6.2	15	7.00	3.00	Lee et al. (1999)
Shanghai Metro Tunnel, Line 2 Section 2, China	Soft clay	EPB	6.2	15	5.40	1.00	Lee et al. (1999)
London, U.K.	Clay and sand	Slurry	5.85	16	9.70	0.45	Sugiyama et al. (1999)
London, U.K.	Clay and sand	Slurry	5.85	13.5	8.90	N.A.	Sugiyama et al. (1999)
London, U.K.	Clay and sand	Slurry	5.85	13.5	8.20	N.A.	Sugiyama et al. (1999)
London, U.K.	Clay and sand	Slurry	5.85	14.3	8.60	N.A.	Sugiyama et al. (1999)
Bangkok, Thailand	Medium clay	EPB	3.06	18.66	8.83	5.20	Wannipa and Supot (1999)
Taipei CN 257-1, Taiwan	Soft clay	EPB	6.04	18.5	7.49	1.50	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 201A Section F	Silty sand	EPB	6.04	13.5	N.A.	1.54	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 201A Section G	Silty sand with clay	EPB	6.04	15.5	N.A.	1.74	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 201A Section H	Silty sand with clay	EPB	6.04	17.0	N.A.	2.68	Chi et al. (2001)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Taipei MRT CH 201A Section I	Silty clay	EPB	6.04	19.0	N.A.	2.85	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 201A Section K	Silty sand	EPB	6.04	12.0	N.A.	1.28	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 201A Section L	Silty sand	EPB	6.04	12.5	N.A.	1.68	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 201A Section M	Silty sand	EPB	6.04	12.5	N.A.	1.92	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 201A Section N	Silty sand	EPB	6.04	12.5	N.A.	1.89	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 1	Silty sand	EPB	6.04	12.0	N.A.	2.67	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 2	Silty sand	EPB	6.04	12.0	N.A.	2.07	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 3	Silty sand	EPB	6.04	12.0	N.A.	1.49	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 4	Silty sand	EPB	6.04	12.0	N.A.	1.23	Chi et al. (2001)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Taipei MRT CH 218 Section 5	Silty sand	EPB	6.04	12.0	N.A.	1.33	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 6	Silty sand	EPB	6.04	13.0	N.A.	1.22	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 7	Silty sand	EPB	6.04	13.0	N.A.	1.25	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 8	Silty sand with clay	EPB	6.04	20.0	N.A.	2.90	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 9	Silty sand with clay	EPB	6.04	20.0	N.A.	3.37	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 10	Silty sand with clay	EPB	6.04	20.0	N.A.	3.41	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 11	Silty sand with clay	EPB	6.04	20.0	N.A.	2.71	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 12	Silty sand with clay	EPB	6.04	20.0	N.A.	2.66	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 13	Silty clay	EPB	6.04	22.0	N.A.	1.88	Chi et al. (2001)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Taipei MRT CH 218 Section 15	Silty clay	EPB	6.04	22.0	N.A.	1.96	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 16	Silty clay	EPB	6.04	22.0	N.A.	1.05	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 218 Section 17	Silty clay	EPB	6.04	22.0	N.A.	1.86	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 256 Section 1	Silty clay	EPB	6.04	12.5	N.A.	1.03	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 256 Section 3	Silty clay	EPB	6.04	15.0	N.A.	0.81	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 256 Section 4	Silty clay	EPB	6.04	15.0	N.A.	0.74	Chi et al. (2001)
Taipei MRT CH 256 Section 5	Silty clay	EPB	6.04	16.0	N.A.	1.17	Chi et al. (2001)
Madrid Metro Extension, Section 9, Line 9, Spain	Sand with clay	EPB	9.00	14.4	6.91	0.24	Gonzalez and Sagaseta (2001)
Taipei MRT CN 258-153	Silty clay	EPB	6.04	14.0	6.63	2.53	Wu and Lee (2003)
Taipei MRT CN 258-330	Silty clay	EPB	6.04	12.4	7.06	2.50	Wu and Lee (2003)
Taipei MRT CN 258-241	Silty clay	EPB	6.04	13.3	4.33	1.19	Wu and Lee (2003)

表 3.1 本研究引用之潛盾隧道施工案例之基本資料 (Cont'd)

Site Location	Ground Condition	Shield Type	Shield Diameter 2R (m)	Tunnel Depth Z_0 (m)	Width Parameter i (m)	Ground Loss G_1 (%)	Reference
Taipei MRT CN 258-346	Silty clay	EPB	6.04	12.4	6.16	1.37	Wu and Lee (2003)
Madrid Metro Extension, Control Section 1, Spain	Sandy clay	EPB	9.4	14.2	N.A.	0.39	Melis et al. (2005)
Madrid Metro Extension, Control Section 2, Spain	Loamy sand	EPB	9.4	14.9	N.A.	0.12	Melis et al. (2005)
Madrid Metro Extension, Control Section 3, Spain	Blue plastic clay with sand	EPB	9.4	17.7	8.00	0.13	Melis et al. (2005)
Madrid Metro Extension, Control Section 4, Spain	Loamy sand with clay	EPB	9.4	6.3	N.A.	0.15	Melis et al. (2005)

表 3.2 各學者與本研究建議之沉陷槽寬度參數 i 估算公式

Soil Type	Open Shield	Slurry Shield	EPB Shield	Reference
Granular Soils	$\frac{i}{R} = 0.74 \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^{0.9}$			Attewell (1981) (Below GWT)
	$\frac{i}{R} = 0.82 \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^{0.36}$			Attewell (1981) (Above GWT)
	$i = 0.28 \cdot Z_0 - 0.12$ (Unit: m)			O'Reilly and New (1982)
	$i = 0.28 \cdot Z_0$	$i = 0.39 \cdot Z_0$	$i = 0.50 \cdot Z_0$	This Study
	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^{0.8}$			Clough and Schmidt (1981)
Cohesive Soils	$i = 0.5 \cdot Z_0$			Attewell (1981)
	$i = 0.43 \cdot Z_0 + 1.1$ (Unit: m)			O'Reilly and New (1982)
	$i = 0.5 \cdot Z_0$			Mair (1993)
	$\frac{i}{R} = 1.15 \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^{0.9}$			Loganathan and Poulos (1998)
	$\frac{i}{R} = 0.58 \left(\frac{Z_0}{2R} \right) + 1.0$			Wu and Lee (2003)
	$i = 0.58 \cdot Z_0$	$i = 0.56 \cdot Z_0$	$i = 0.44 \cdot Z_0$	This Study

表 3.3 不同潛盾隧道工程類型之地盤漏失評等邊界點座標

Point	Open Shield in Clay		Open Shield in Granular Soils		EPB Shield in Clay		EPB Shield in Granular Soils	
	$Z_0/2R$	G_l (%)	$Z_0/2R$	G_l (%)	$Z_0/2R$	G_l (%)	$Z_0/2R$	G_l (%)
o	10.43	0	10.43	0	10.43	0	10.43	0
a	0.67	0	0.67	0	0.67	0	0.67	0
b	1.1	1.46	1.1	0.49	1.1	1.07	1.1	1.46
c	1.1	2.83	1.1	1.07	1.1	1.56	1.1	1.86
d	1.1	4.59	1.1	1.56	1.1	2.83	1.1	2.44
e	1.1	6.93	1.1	2.25	1.1	3.71	1.1	4.00
f	1.1	16.72	1.1	16.72	1.1	16.72	1.1	16.72

表 3.4 地盤漏失之 5 等評分

Class	Rating	Remark
A	Much better than average	20% cases with smallest G_l
B	Better than average	
C	Average	20% cases with average G_l
D	Worse than average	
E	Much worse than average	20% cases with largest G_l

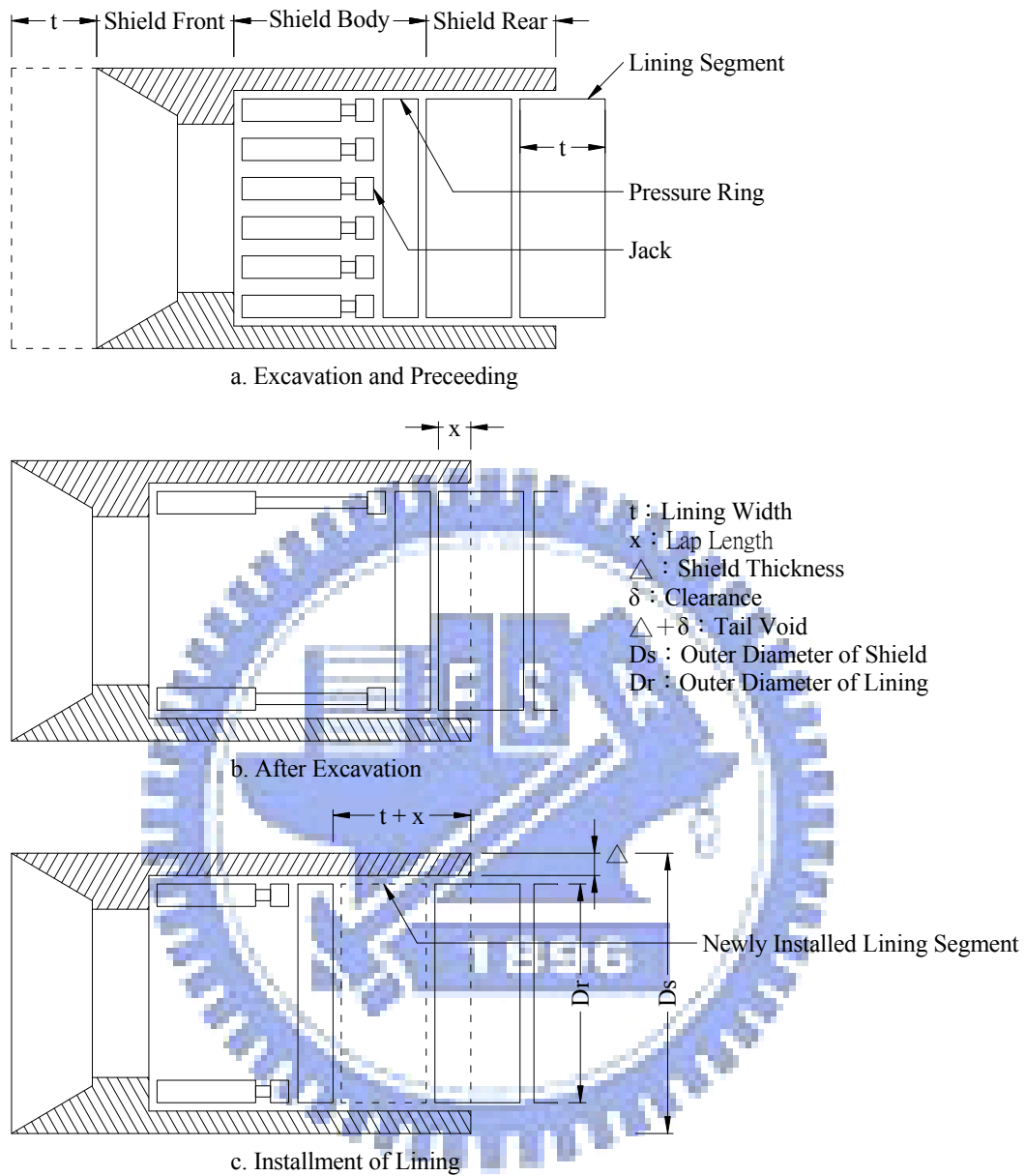
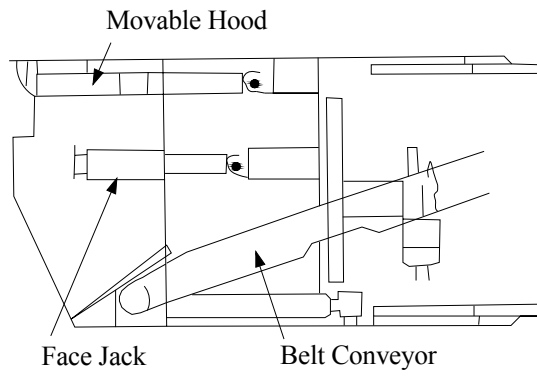
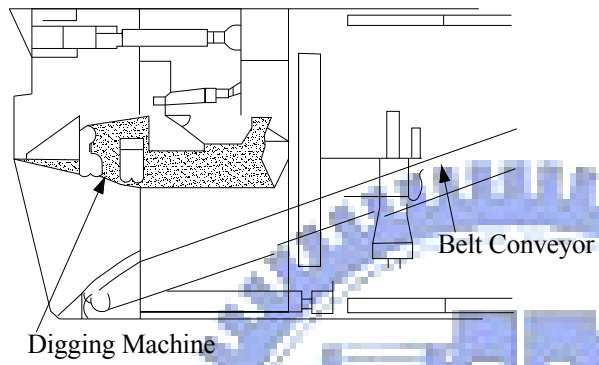


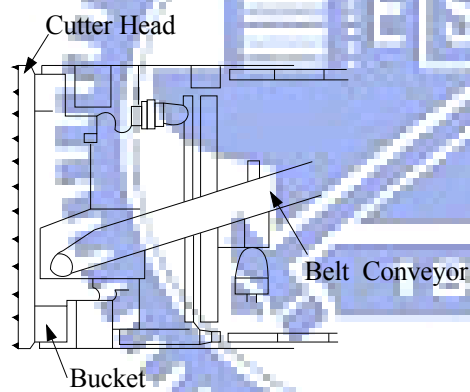
圖 2.1 潛盾施工作業循環示意圖（摘自 朱旭，民國 73 年）



(一) Hand-Excavated Shield

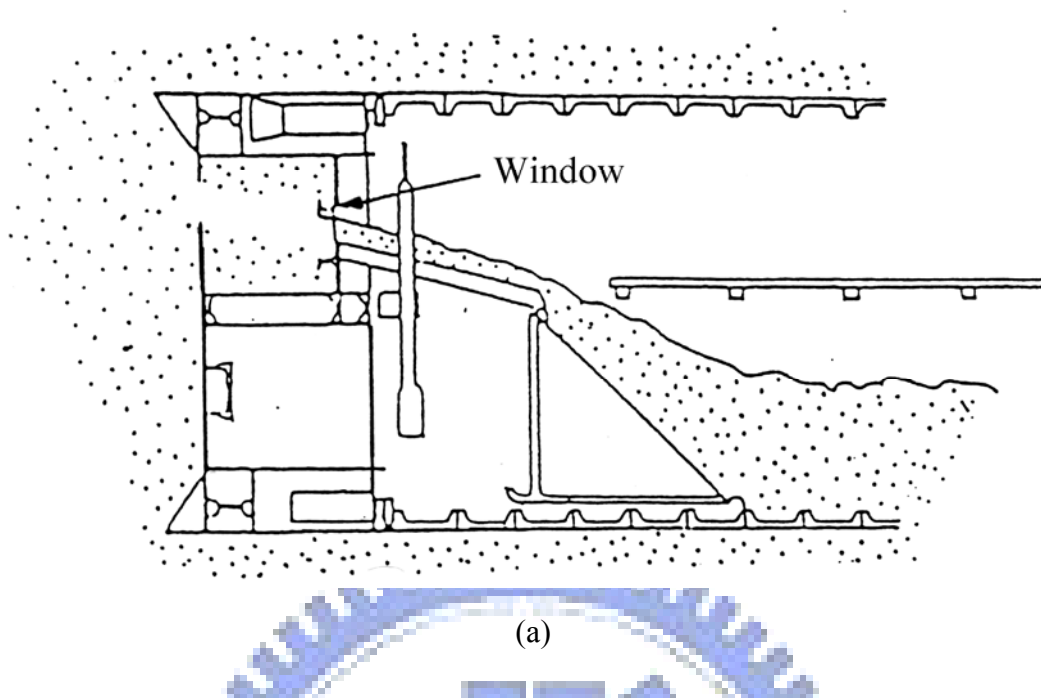


(二) Semi-Mechanical Shield



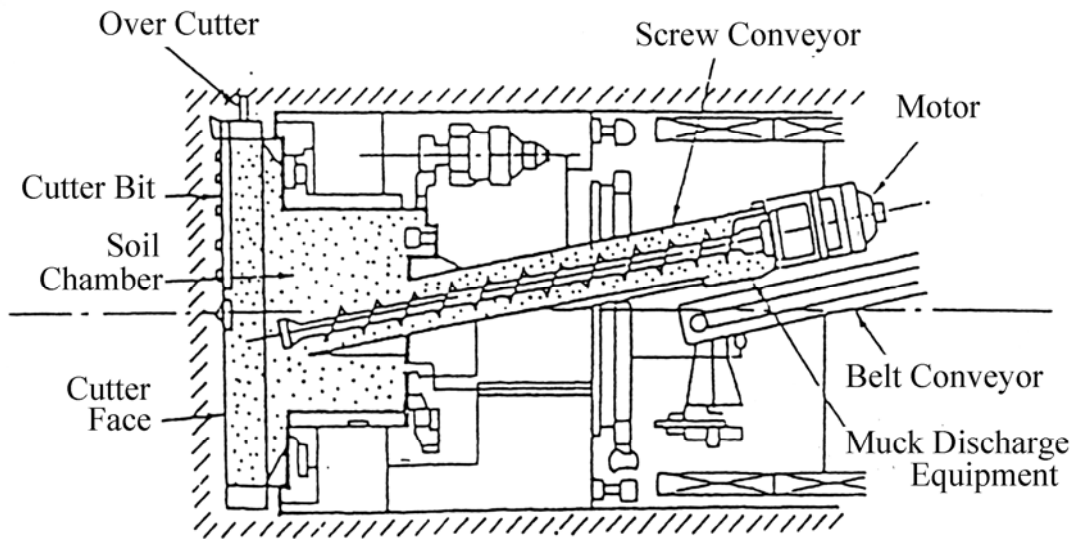
(三) Mechanical Shield

圖 2.2 開放式潛盾機 (摘自 IHI Tunneling Shields 型錄，1987)



(b)

圖 2.3 擠壓式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)

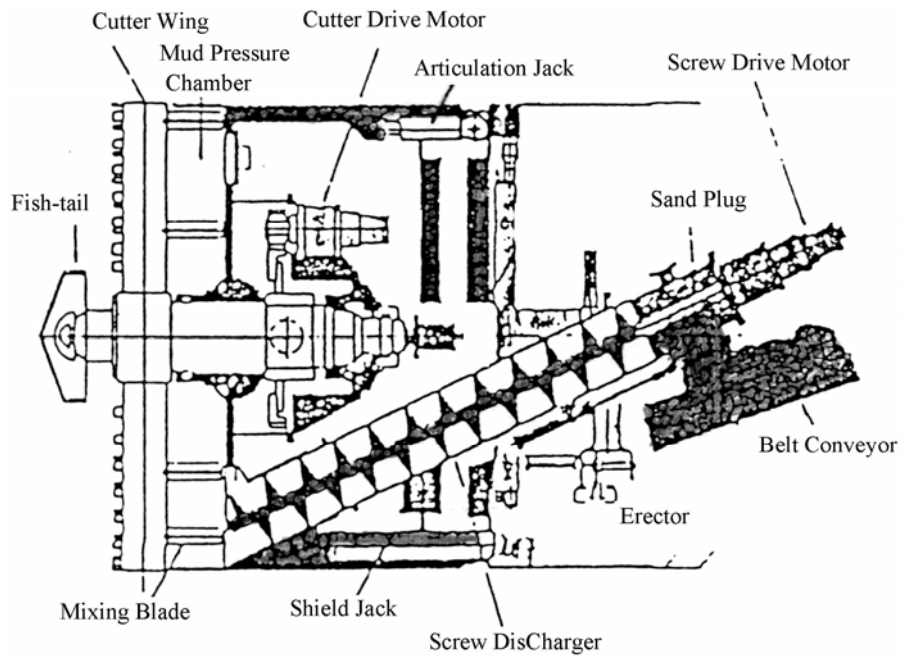


(a)



(b)

圖 2.4 土壓平衡式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)

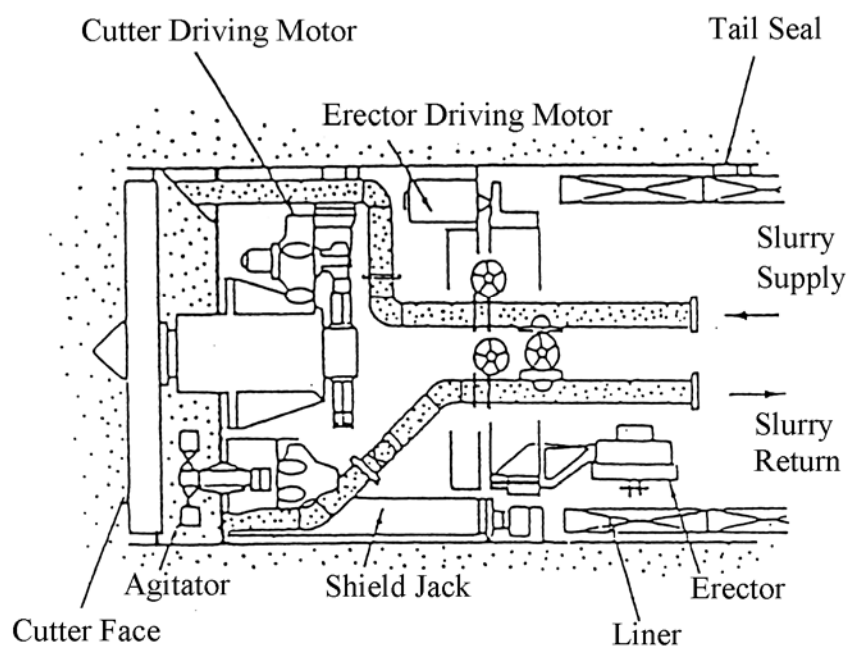


(a)



(b)

圖 2.5 加泥土壓平衡式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)



(a)



(b)

圖 2.6 泥水式潛盾機 (after Hitachi Zosen Corporation, 1990)

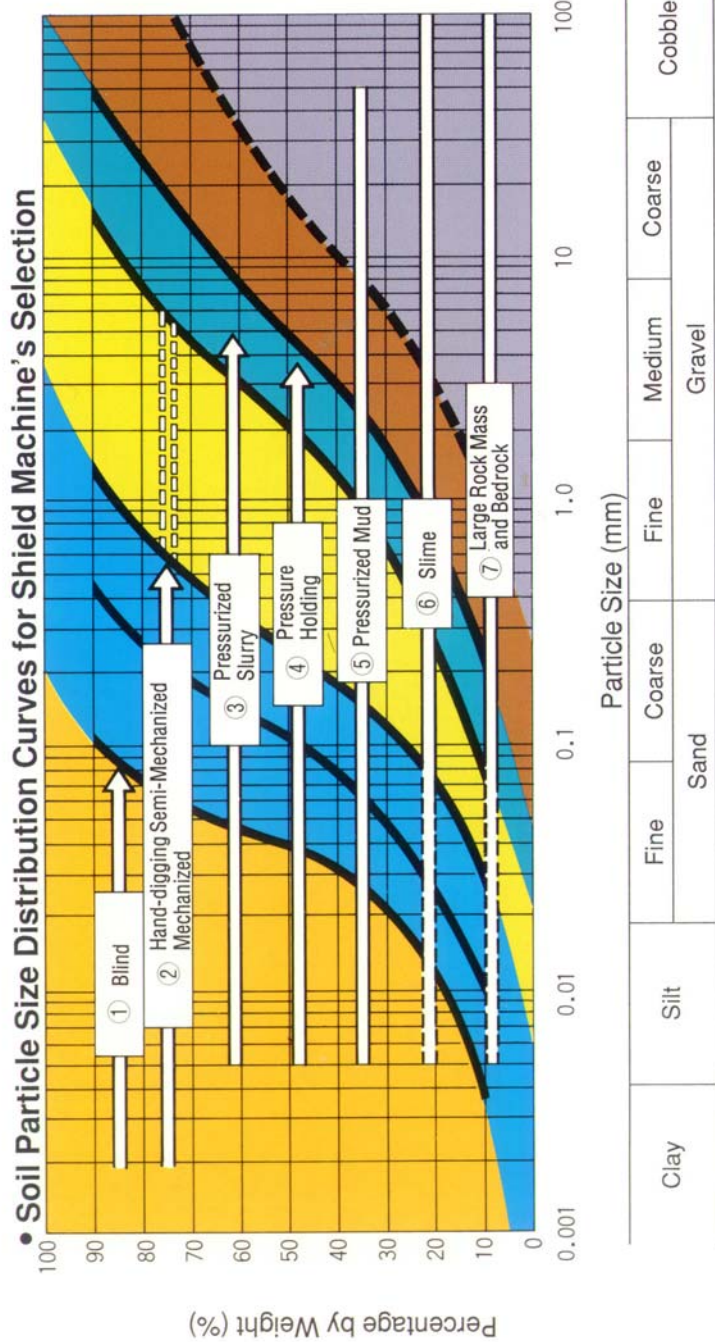


圖 2.7 土壤粒徑分佈與潛盾機適用範圍 (after Hitachi Zosen Corporation , 1990)

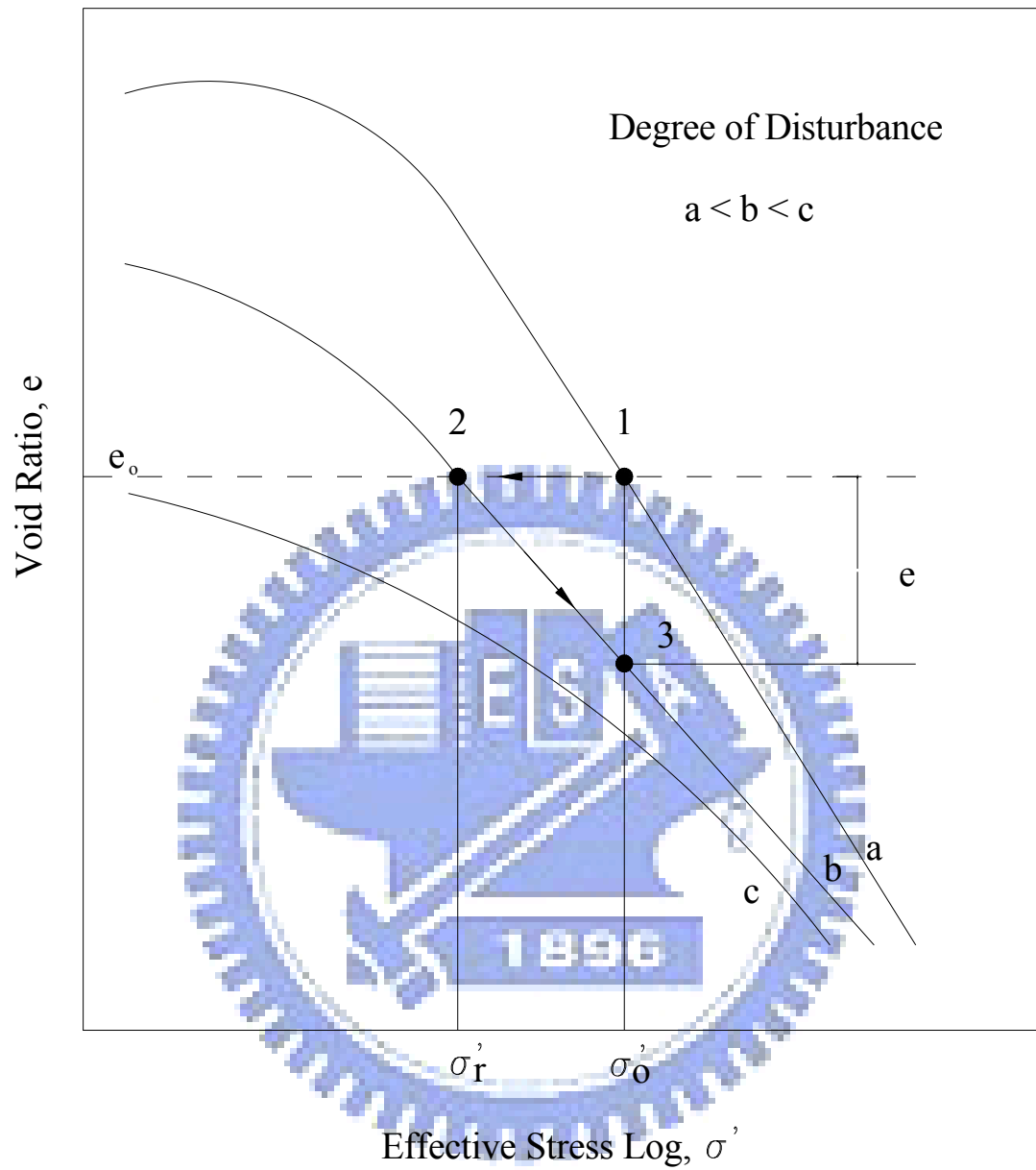


圖 2.8 黏土受擾動所引起之壓密 (after Mori and Akagi, 1985)

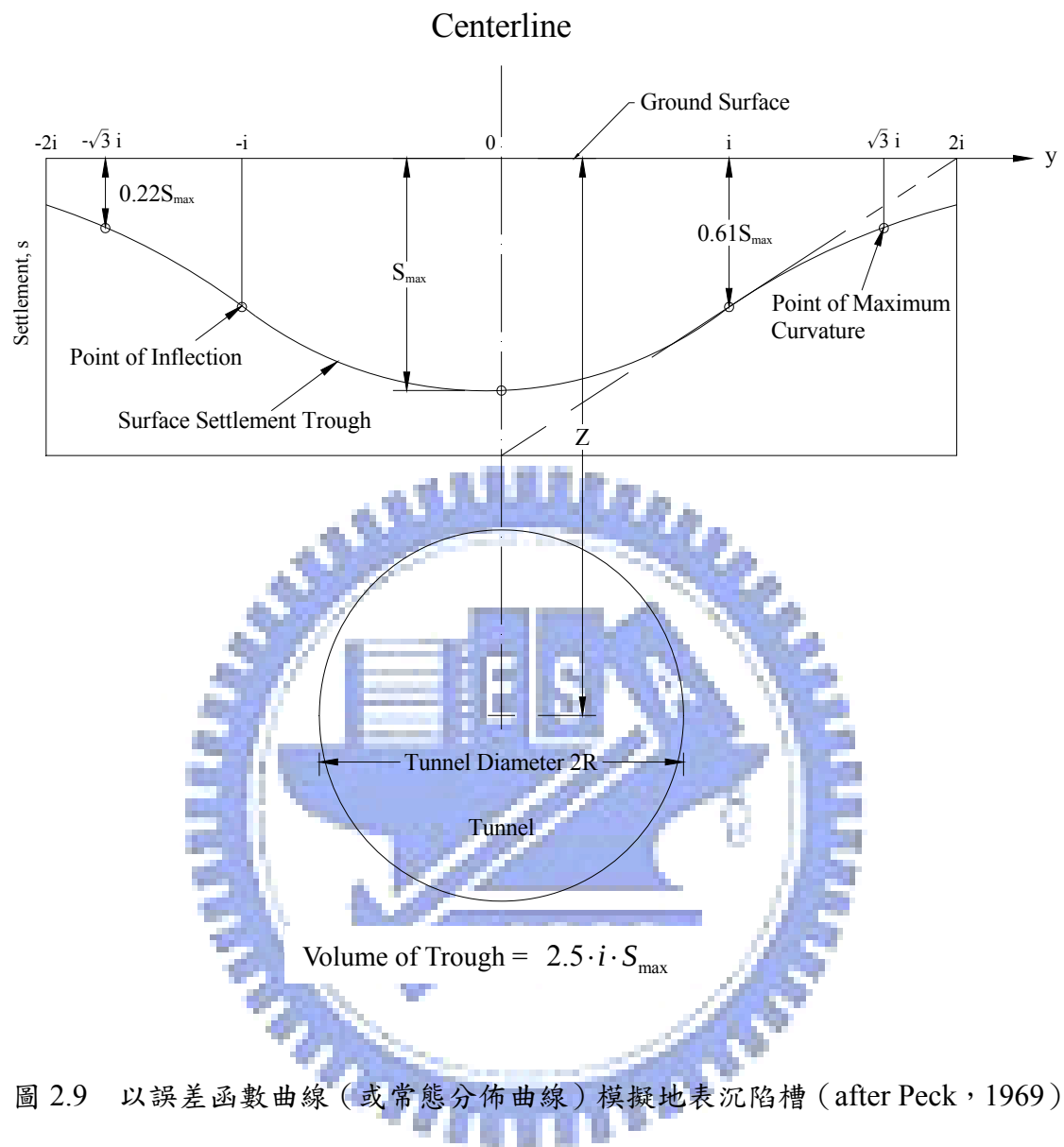


圖 2.9 以誤差函數曲線（或常態分佈曲線）模擬地表沉陷槽（after Peck，1969）

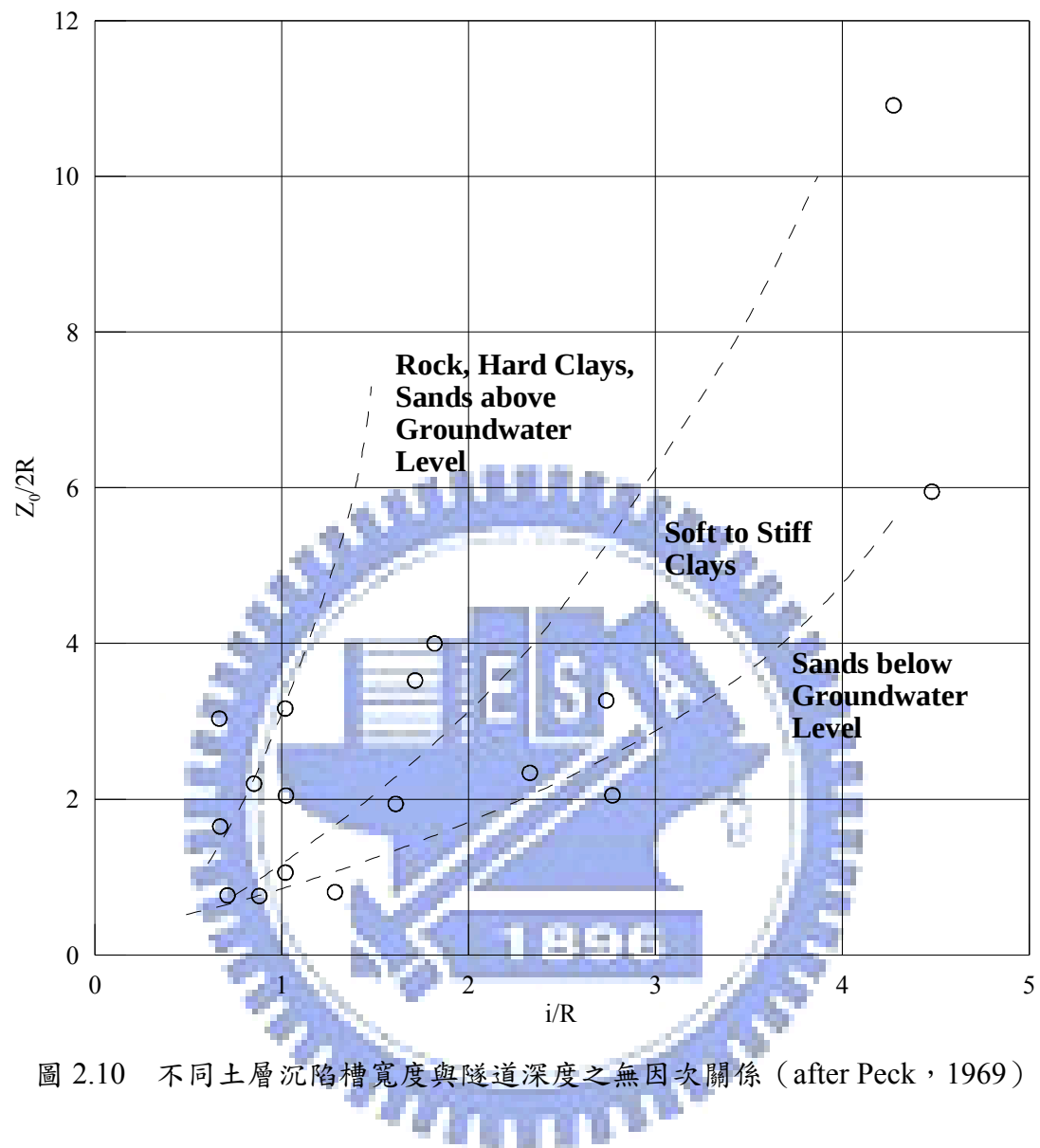


圖 2.10 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係 (after Peck, 1969)

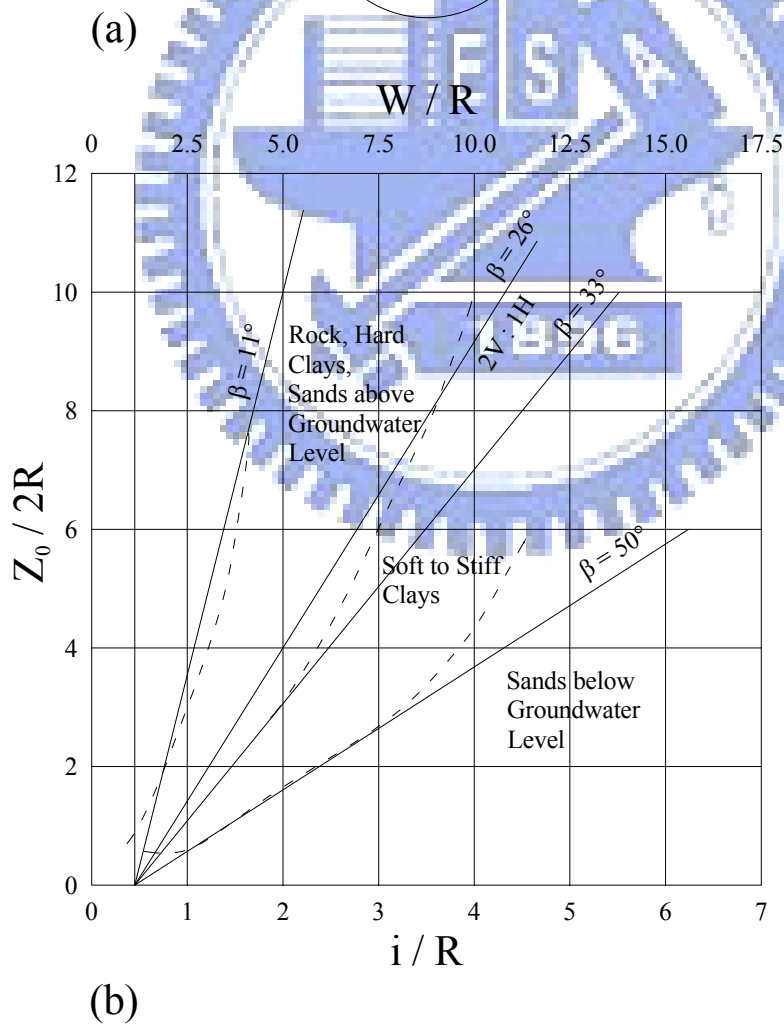
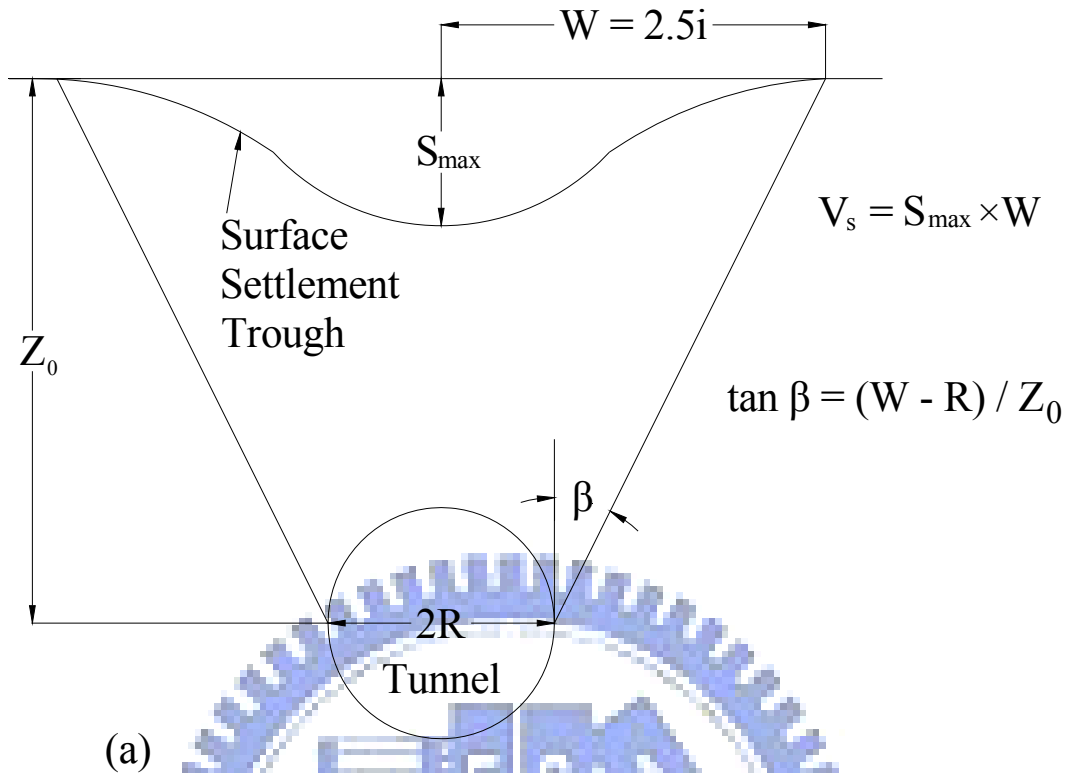


圖 2.11 β 角與沉陷槽寬度之關係 (After Cording and Hansmire, 1975)

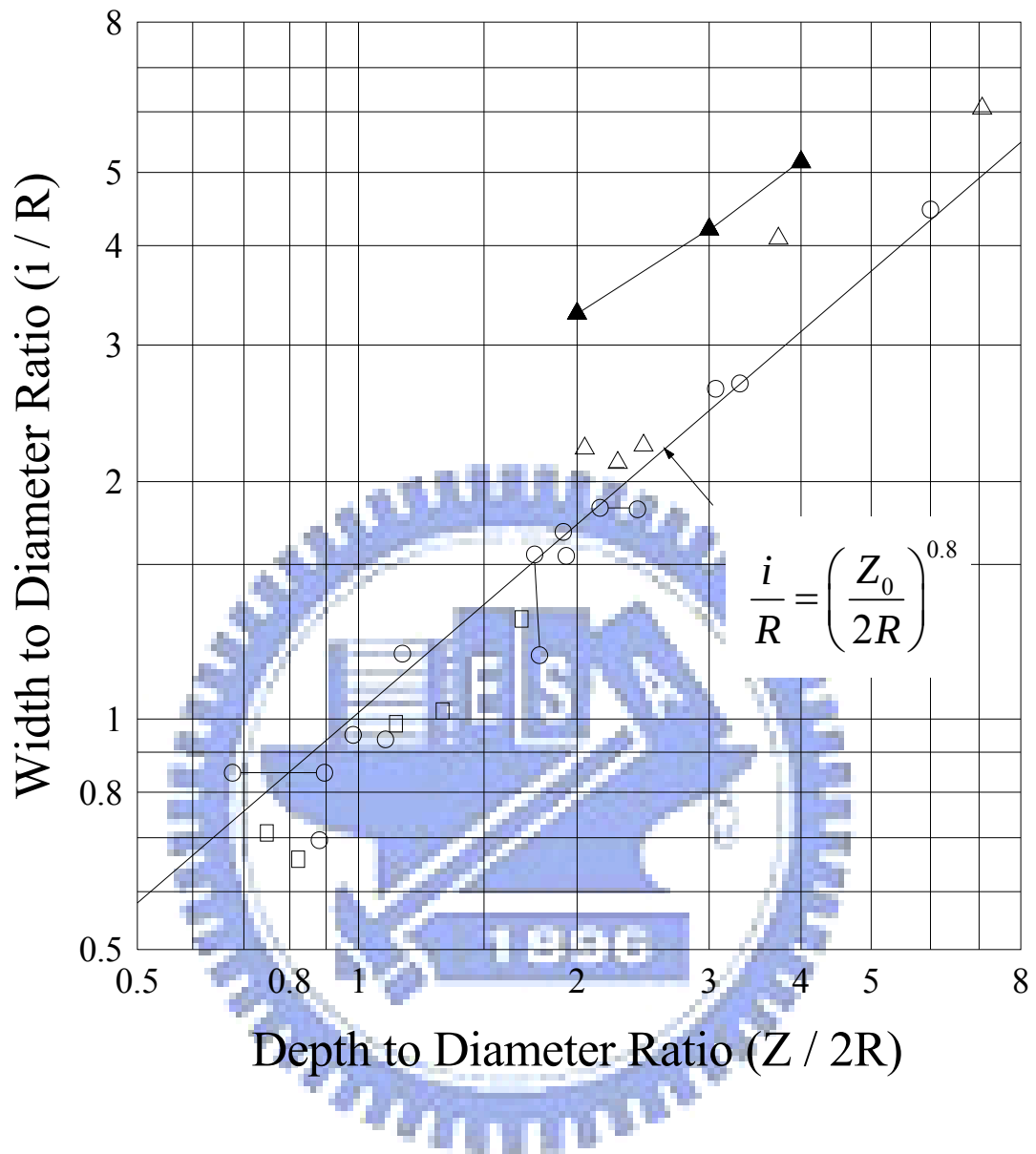


圖 2.12 沉陷槽寬徑比 ($i/2R$) 與隧道深徑比 ($Z_0/2R$) 之關係

(after Clough and Schmidt, 1981)

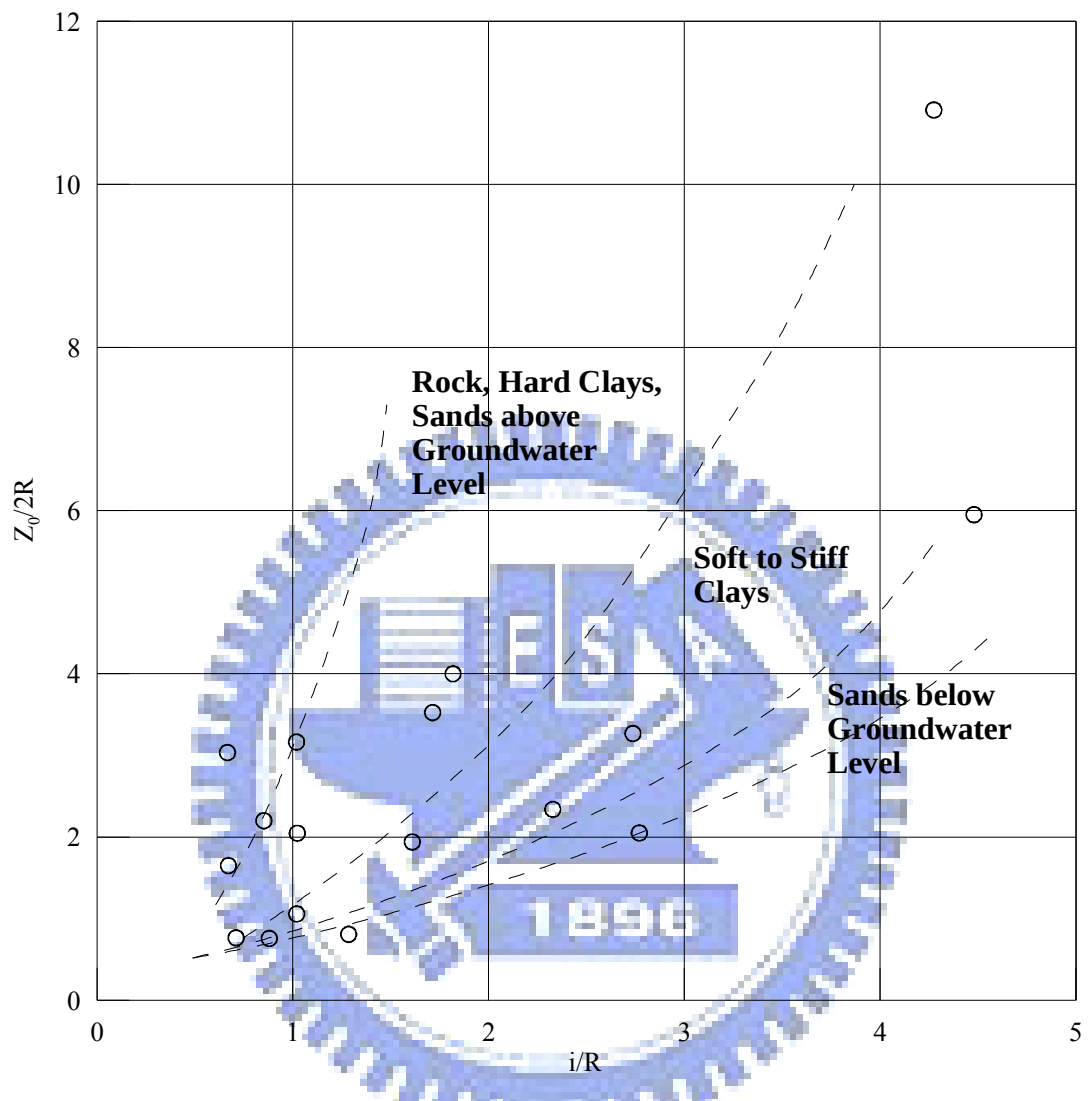


圖 2.13 不同土層沉陷槽寬度與隧道深度之無因次關係 (after Fang et al., 1994)

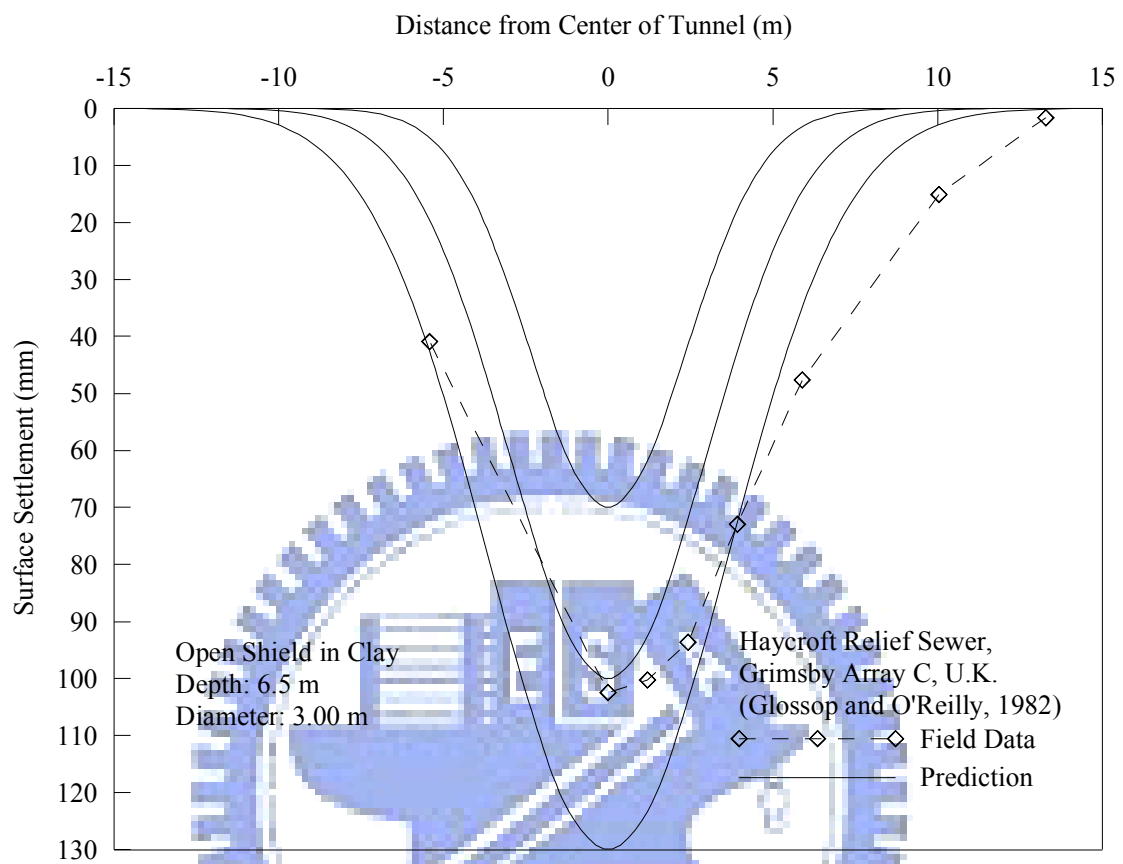


圖 2.14 以 Peck-Fujita 經驗方法預測潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽分析範例
(after Fang et al. , 1994)

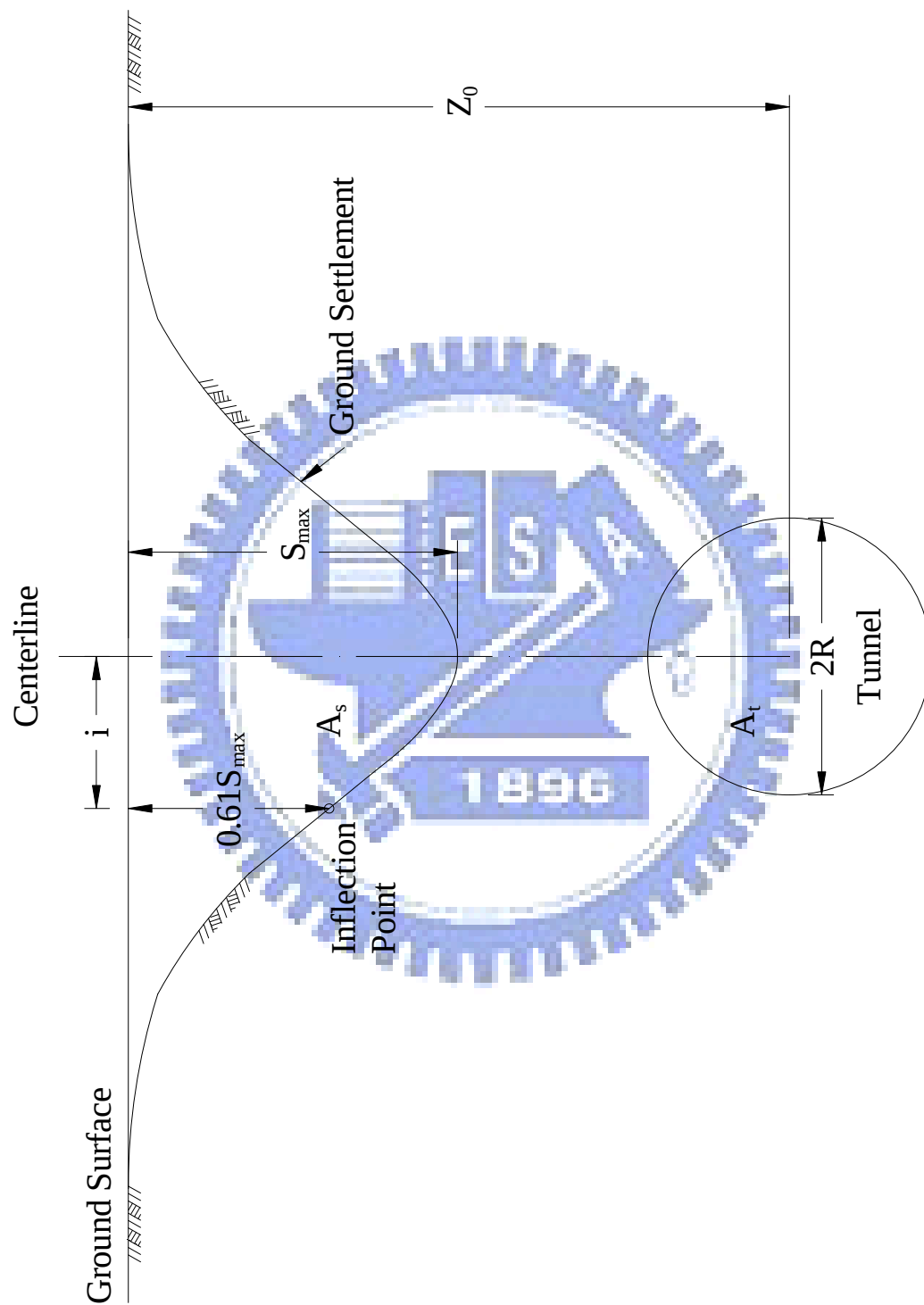


圖 3.1 潛盾隧道施工引致之地表沉陷槽示意圖

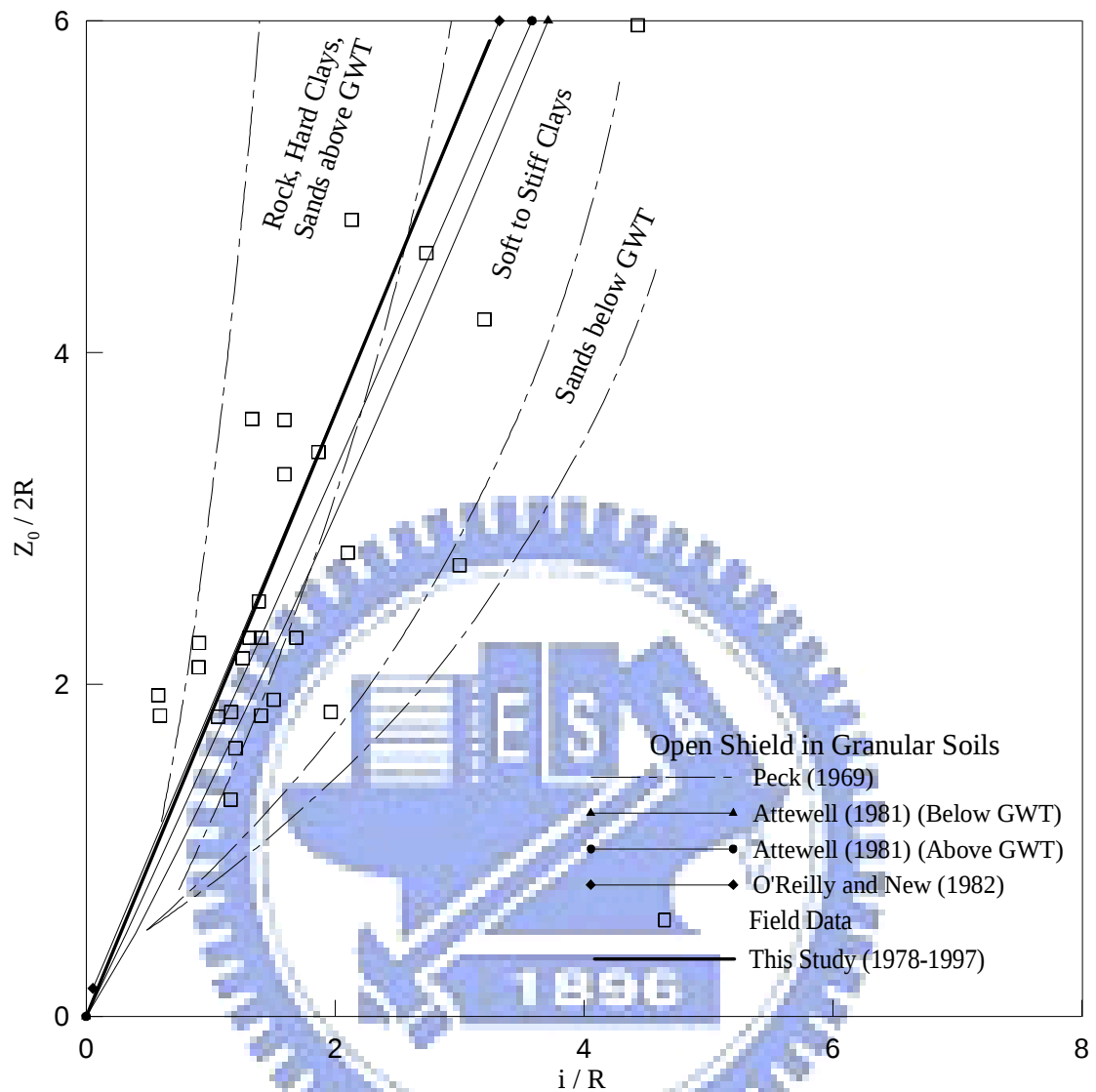


圖 3.2 非凝聚性土壤中開放式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖

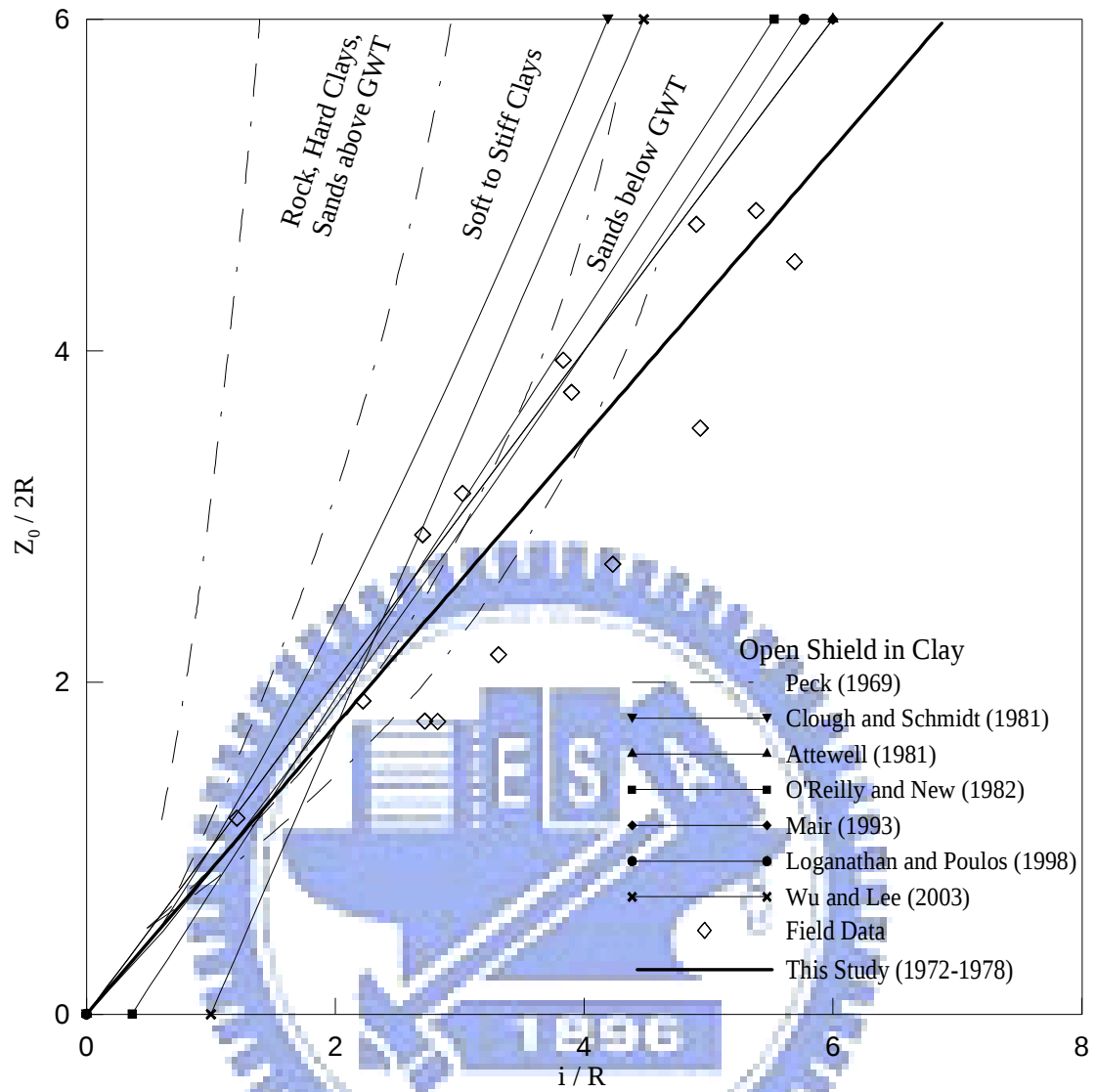


圖 3.3 凝聚性土壤中開放式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖

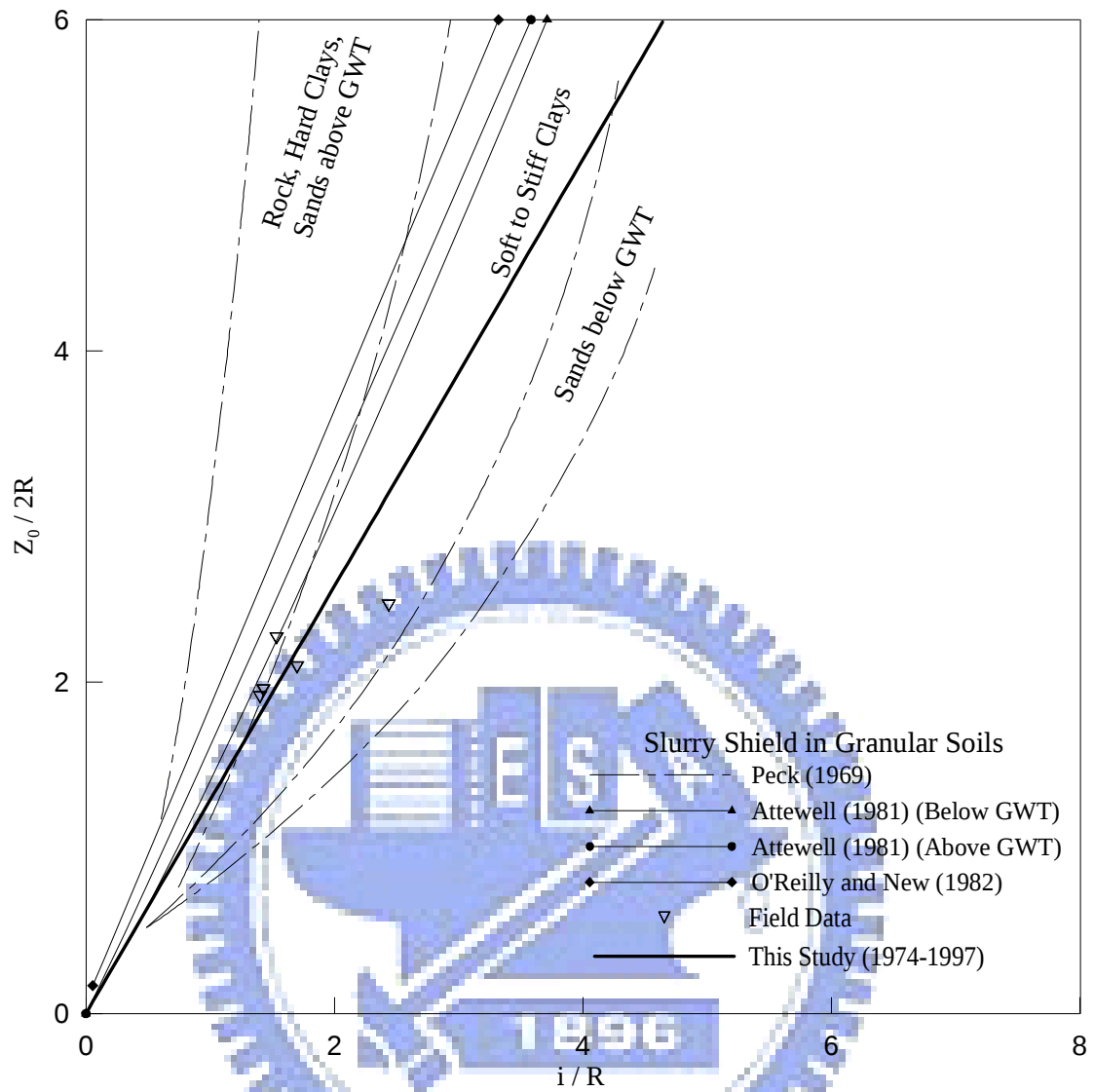


圖 3.4 非凝聚性土壤中泥水加壓式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖

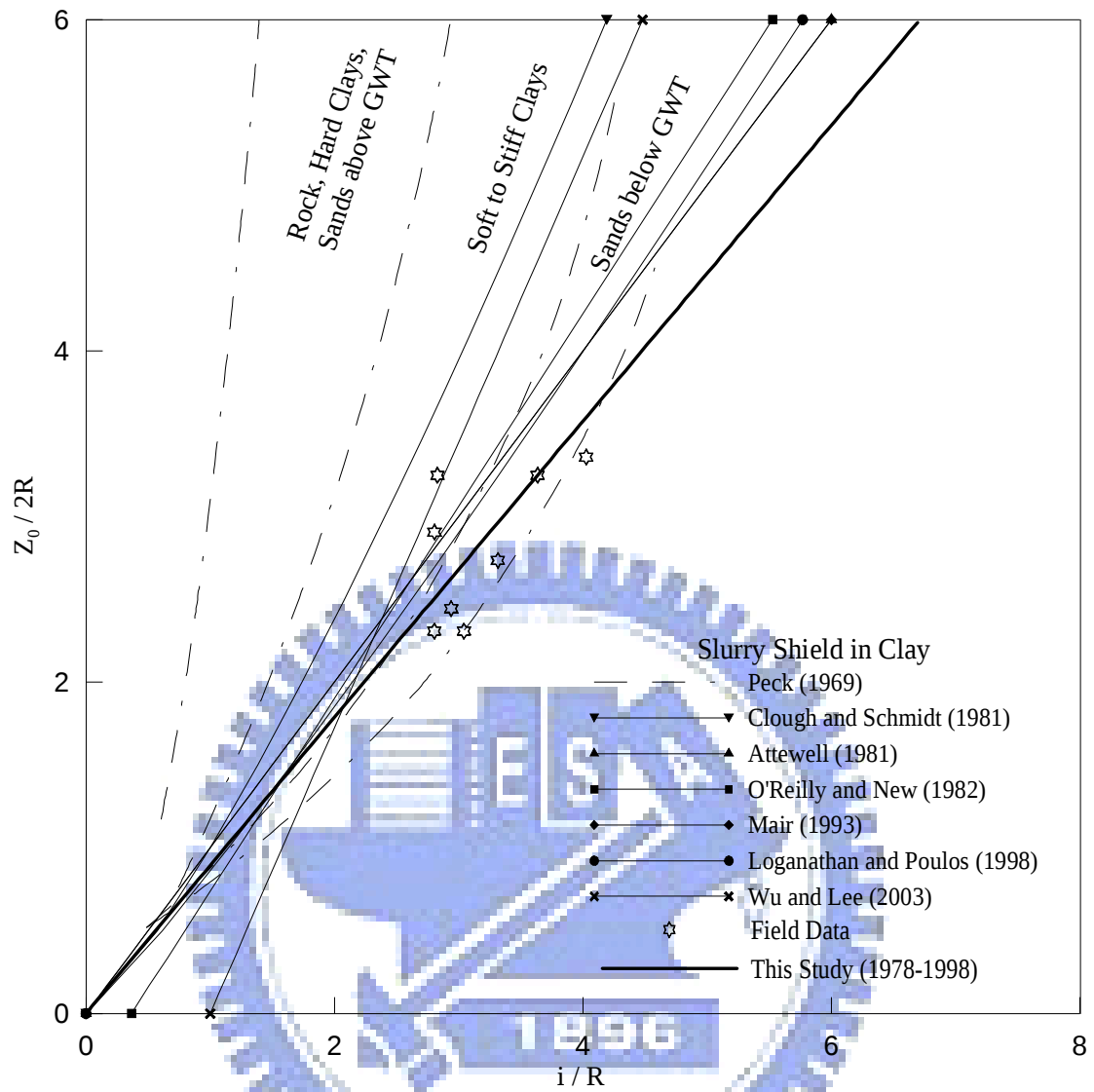


圖 3.5 凝聚性土壤中泥水加壓式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖

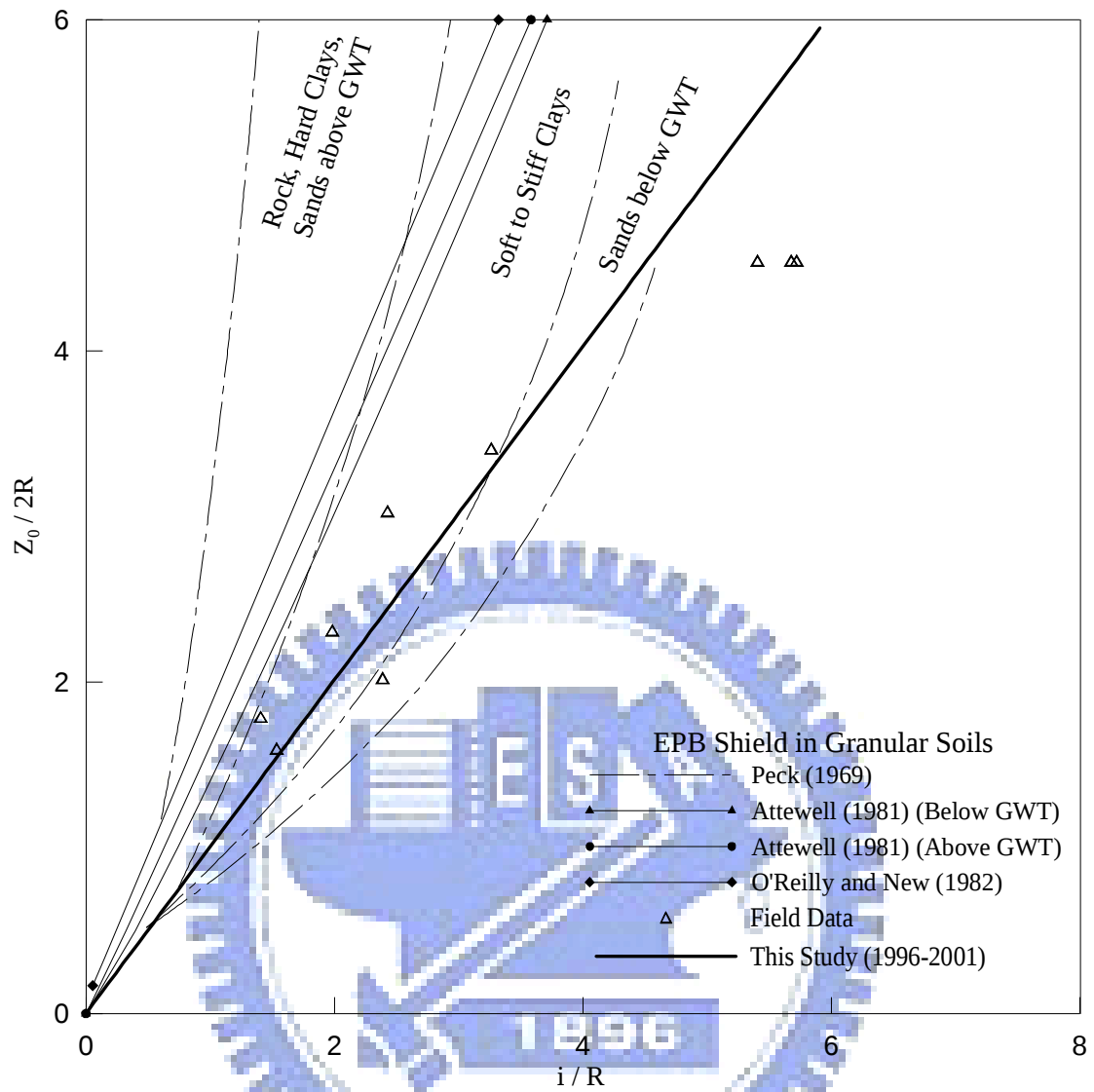


圖 3.6 非凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖

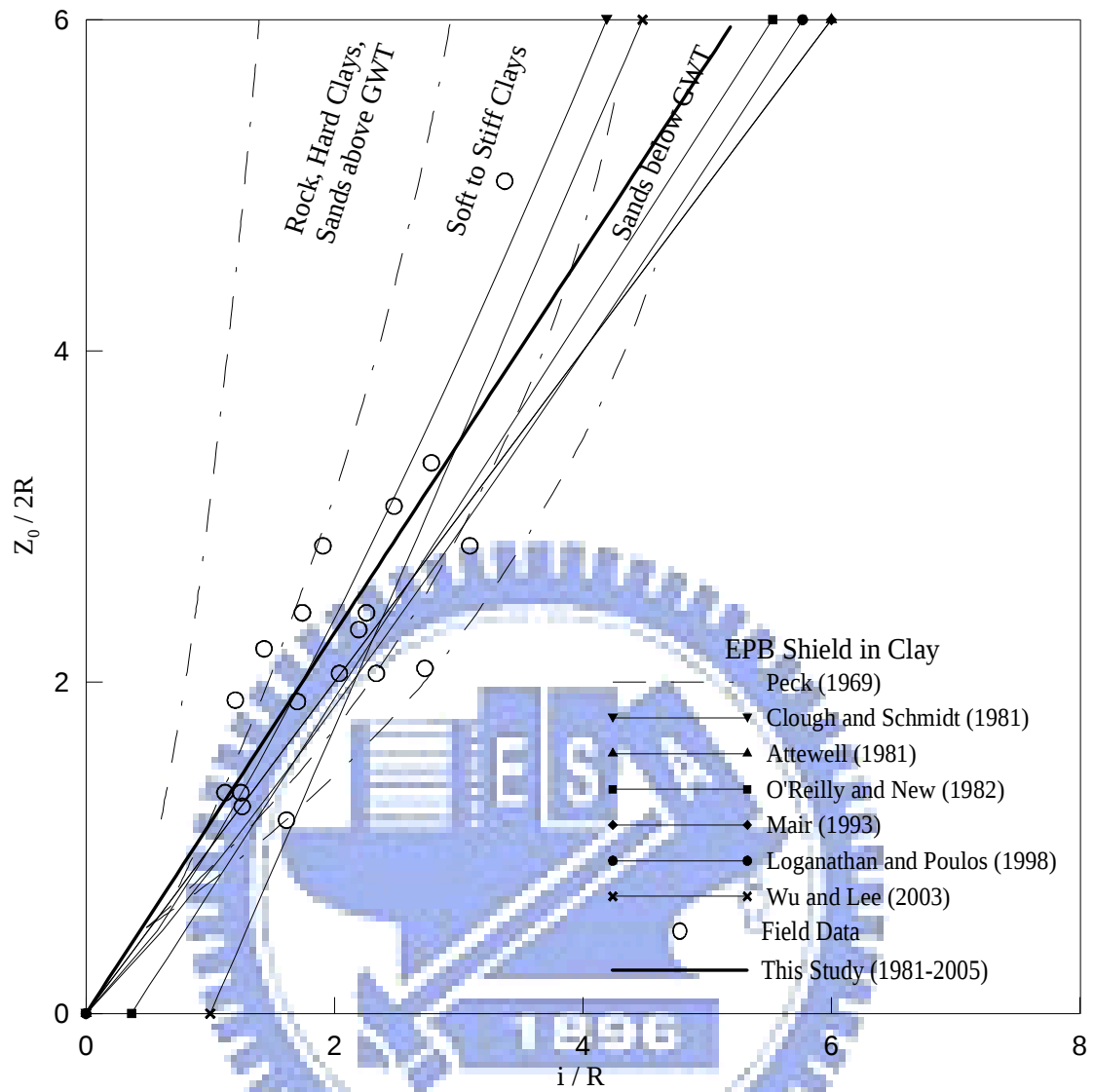


圖 3.7 凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾施工造成之地表沉陷槽寬度參數 i 與隧道深度 Z_0 之關係圖

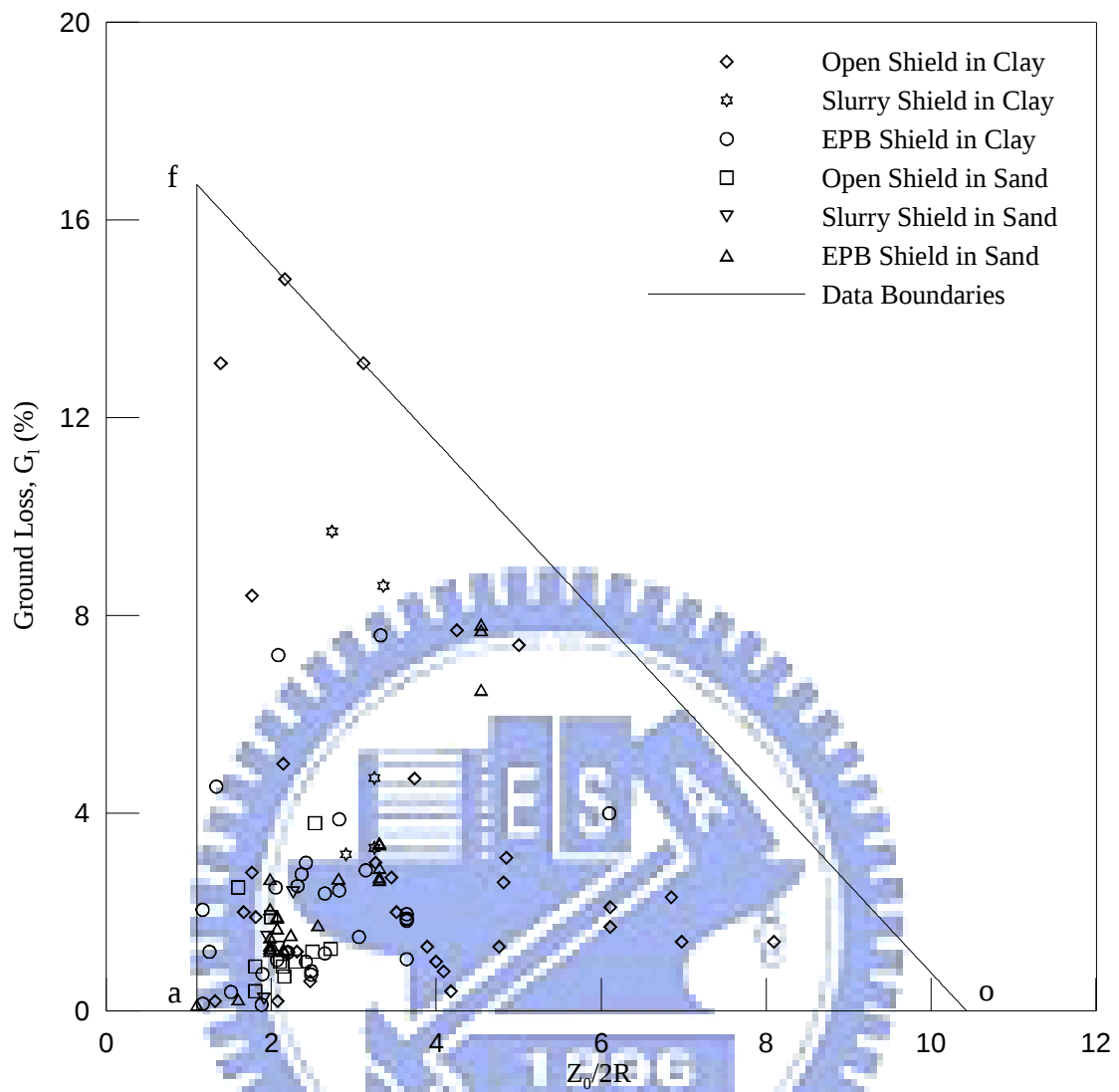


圖 3.8 地盤漏失 G_l 與隧道深度 Z_0 及隧道直徑 $2R$ 之無因次關係

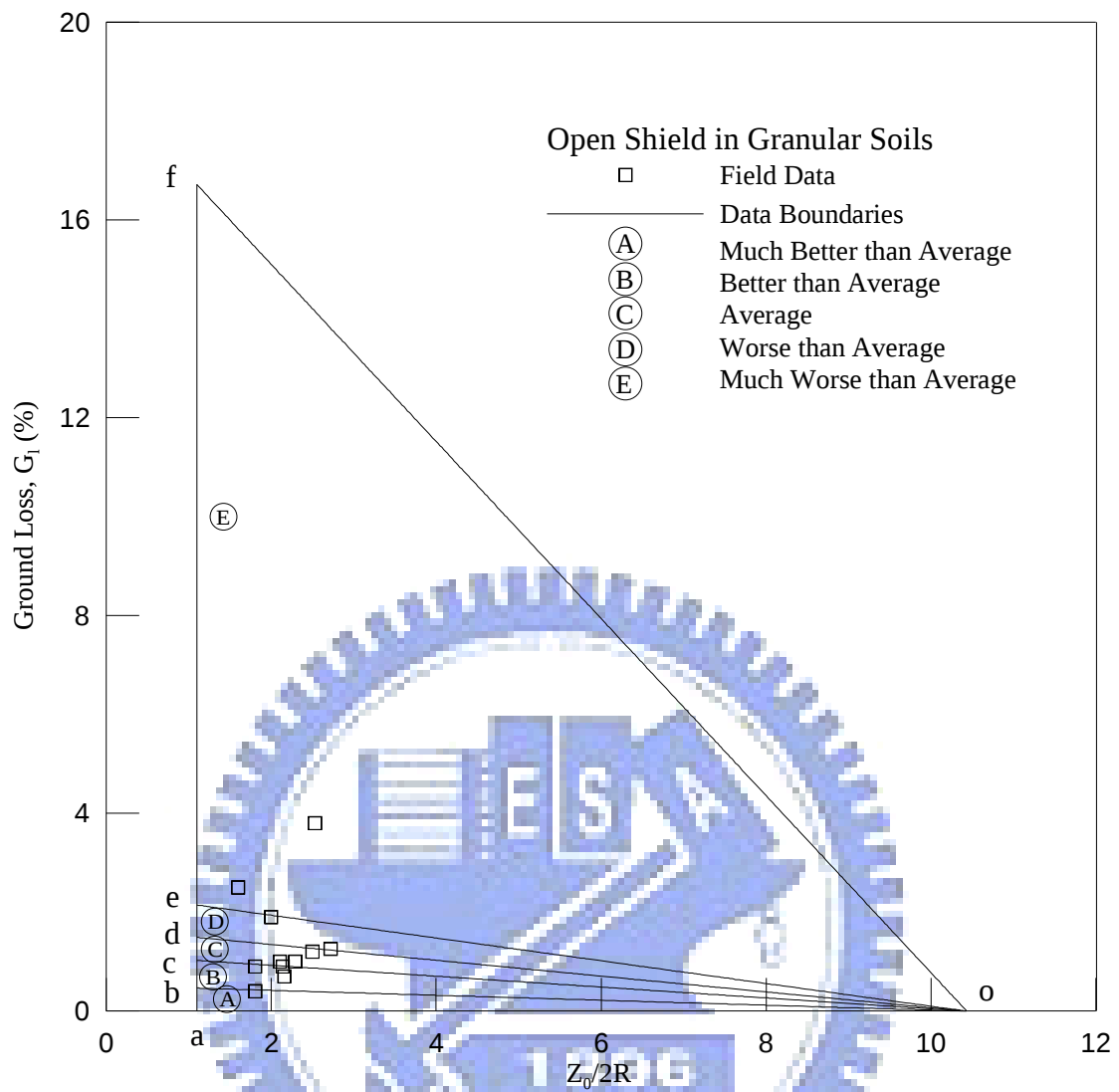


圖 3.9 非凝聚性土壤中開放式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等

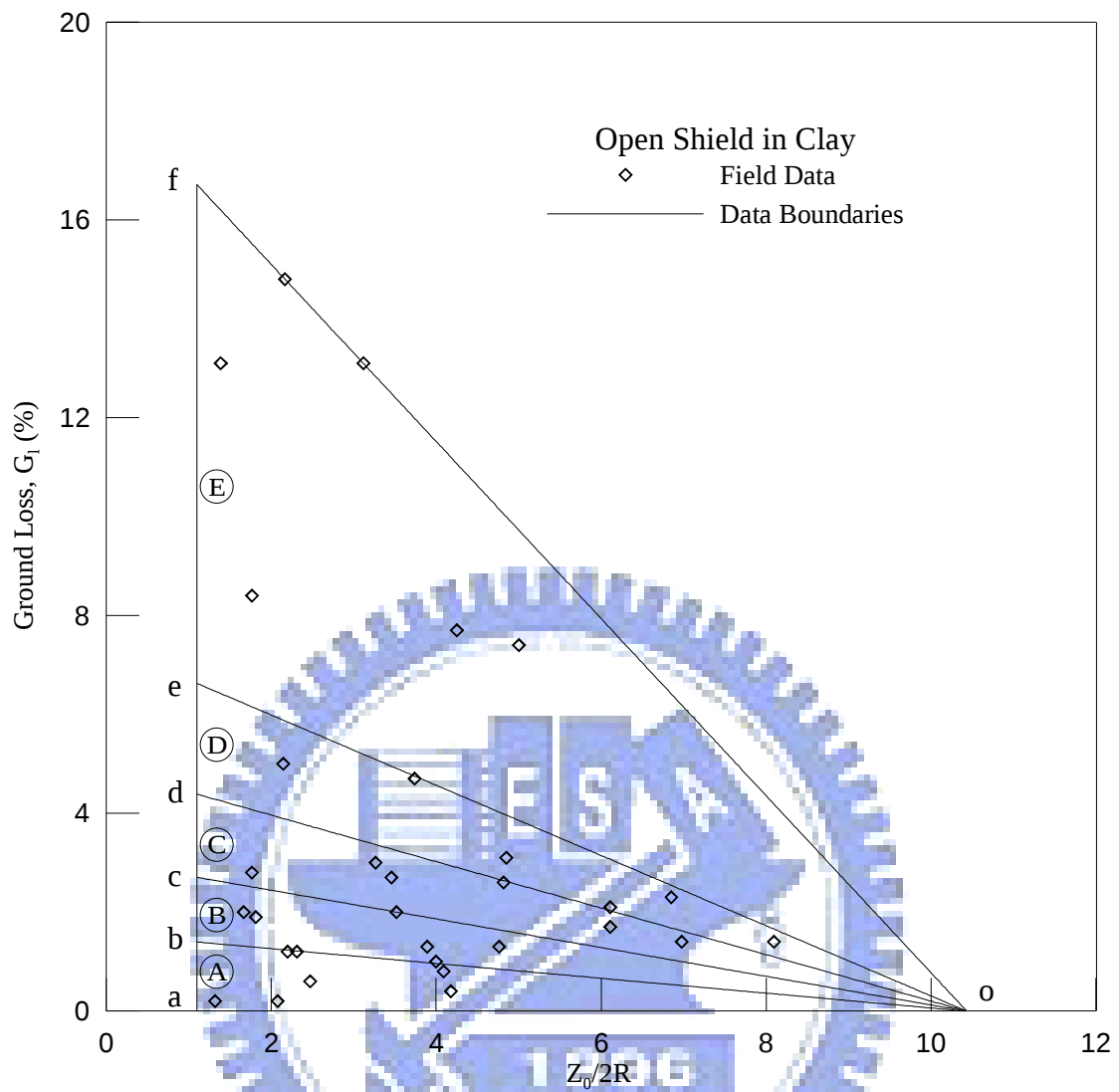


圖 3.10 凝聚性土壤中開放式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等

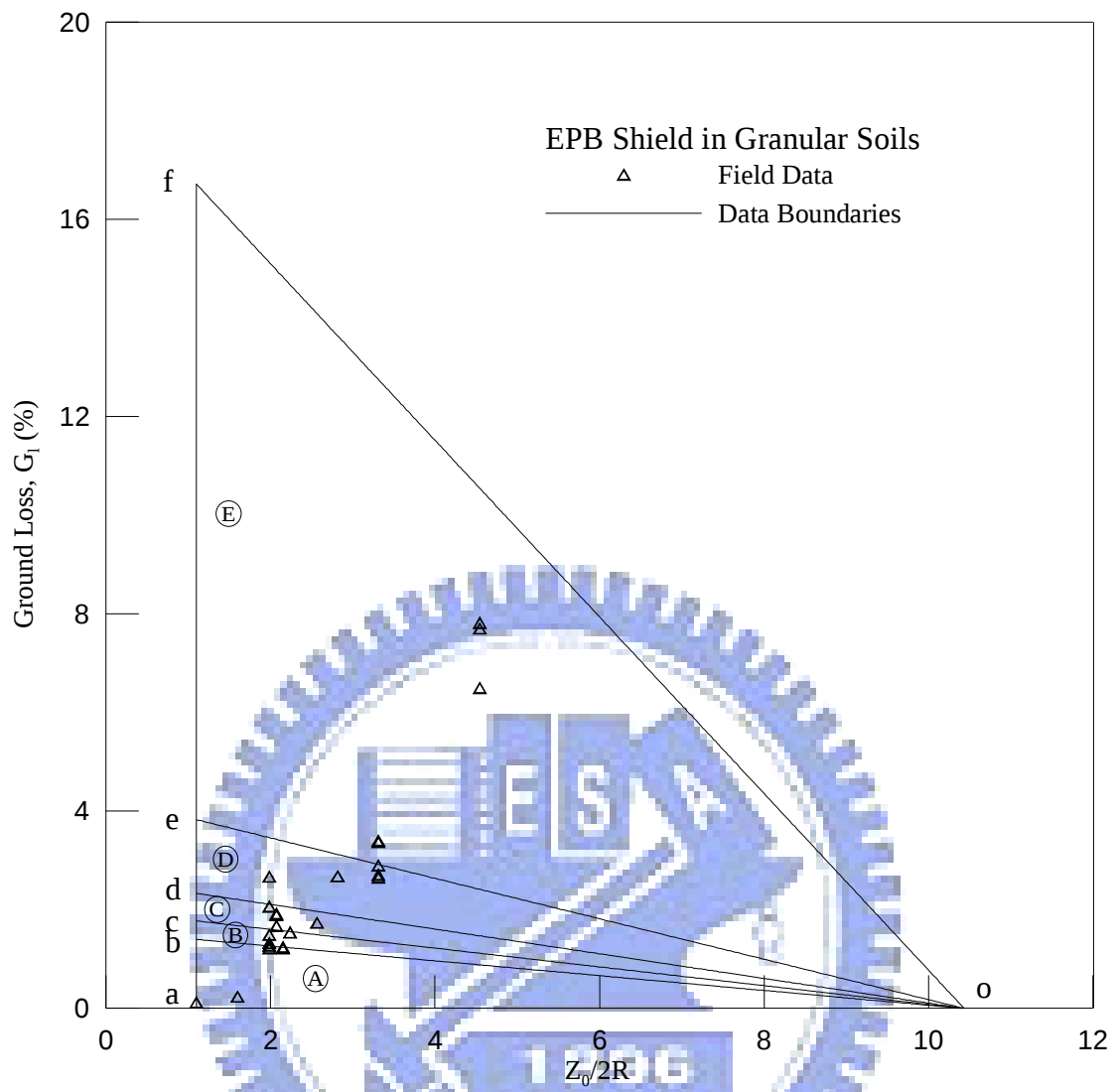


圖 3.11 非凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等

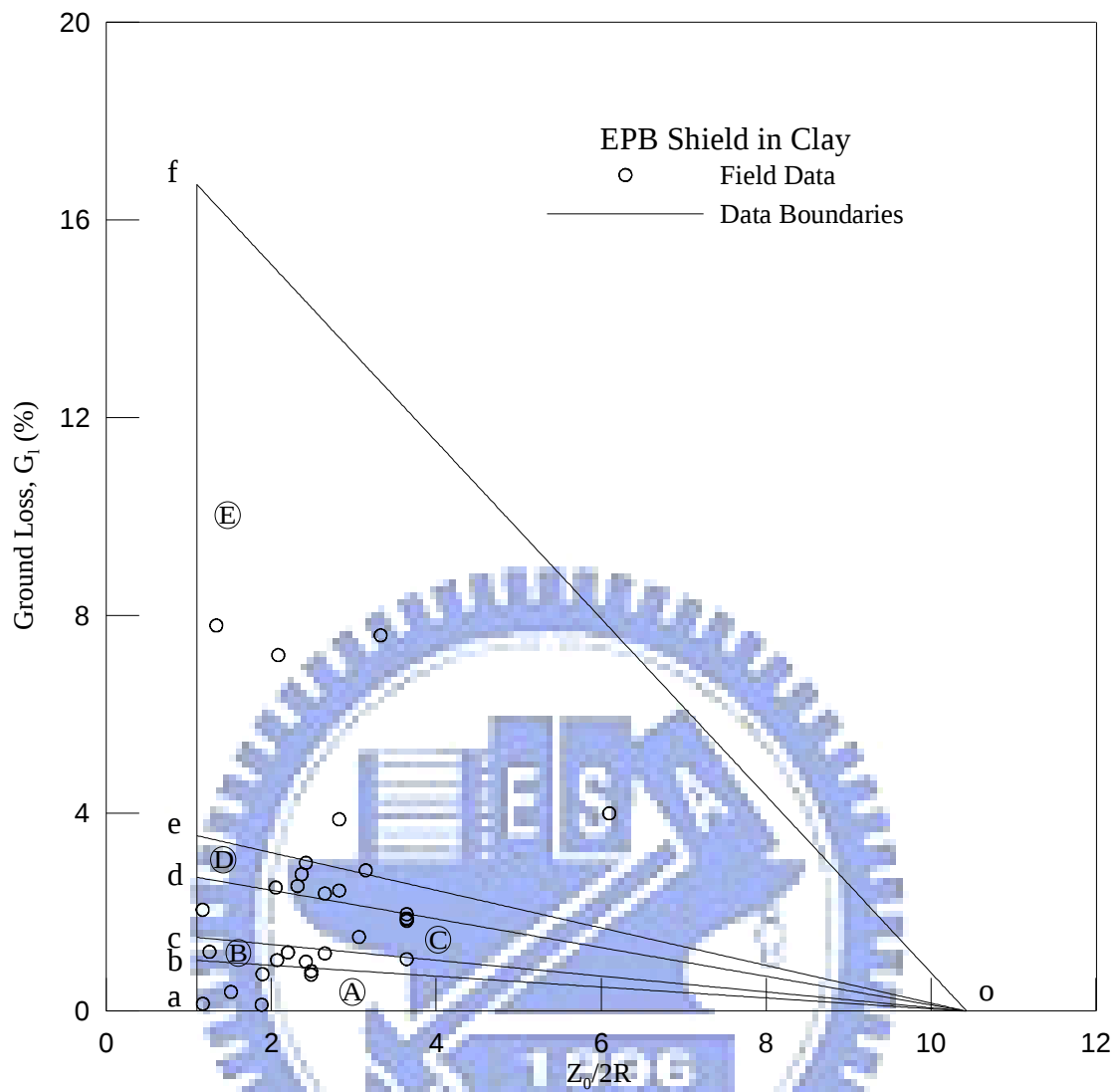


圖 3.12 凝聚性土壤中土壓平衡式潛盾機施工造成之地盤漏失 G_l 評等

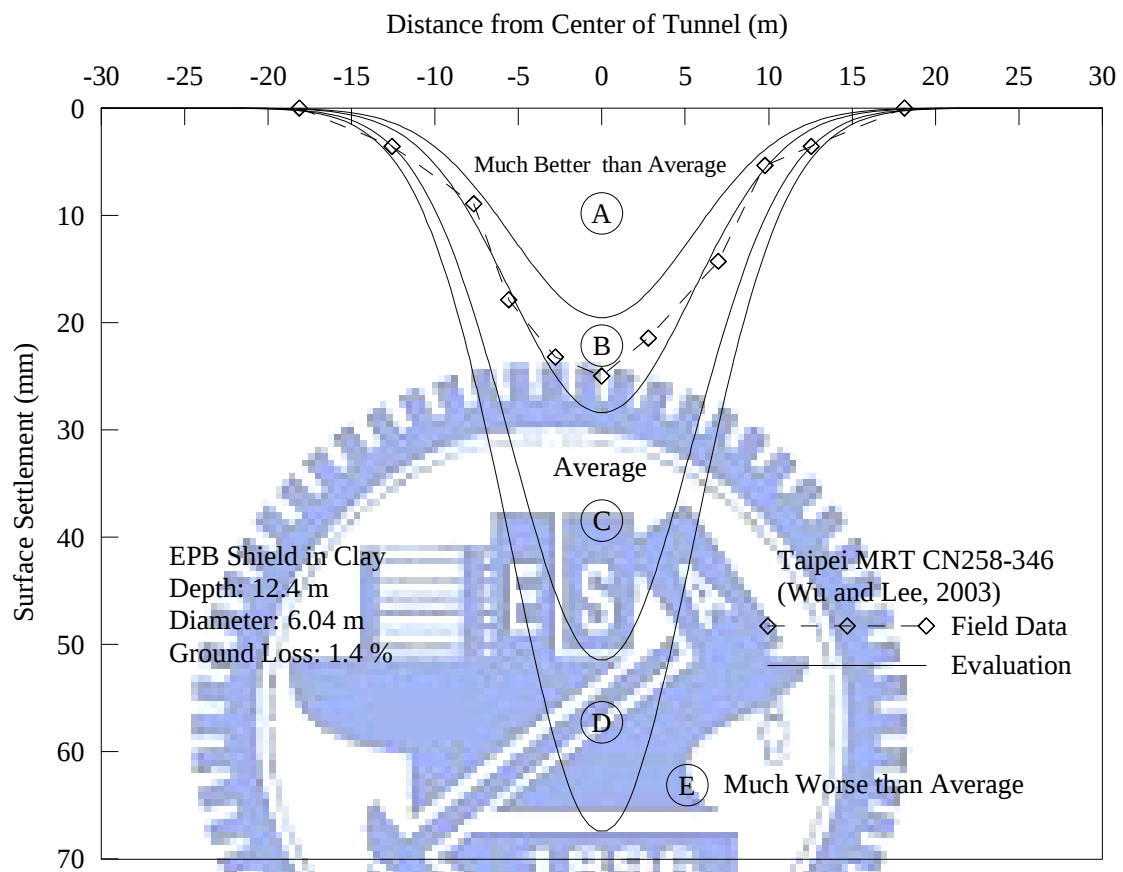


圖 4.1 案例 EC13 實測地表沉陷槽之評估

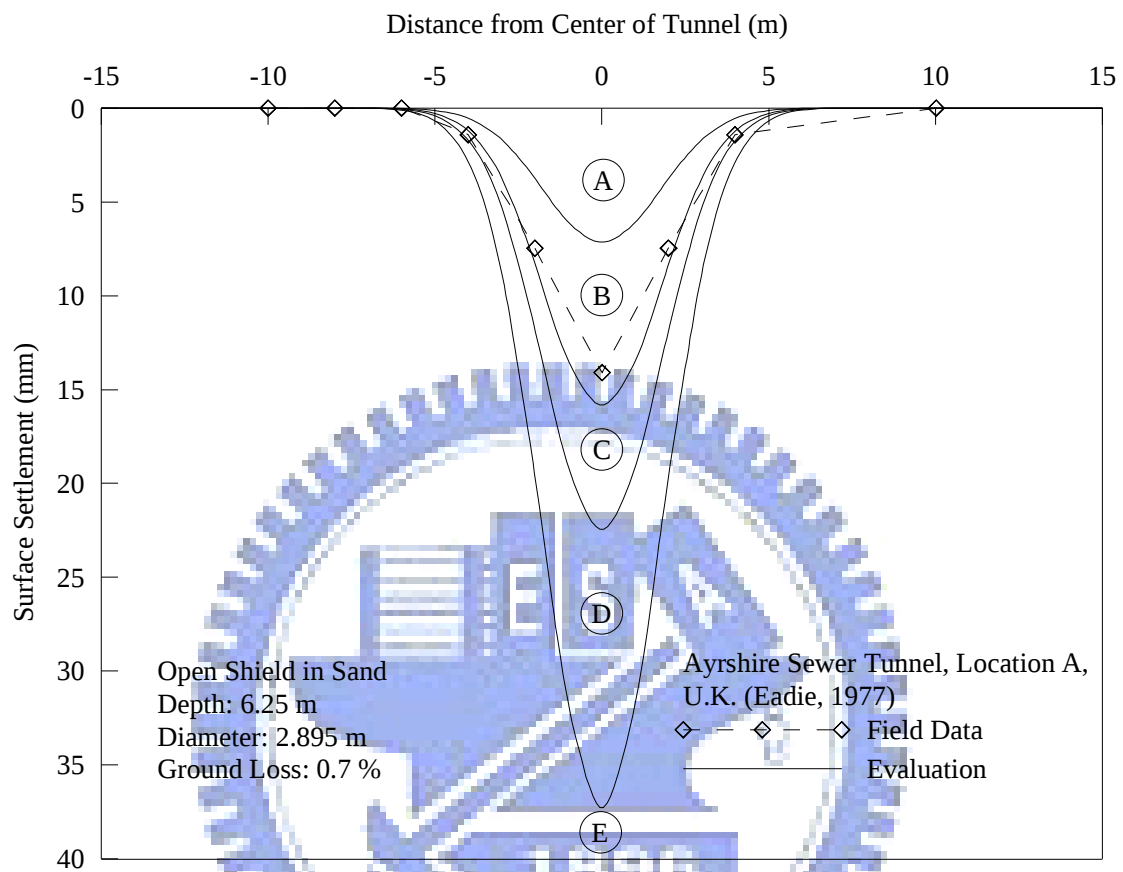


圖 4.2 案例 OS1 實測地表沉陷槽之評估

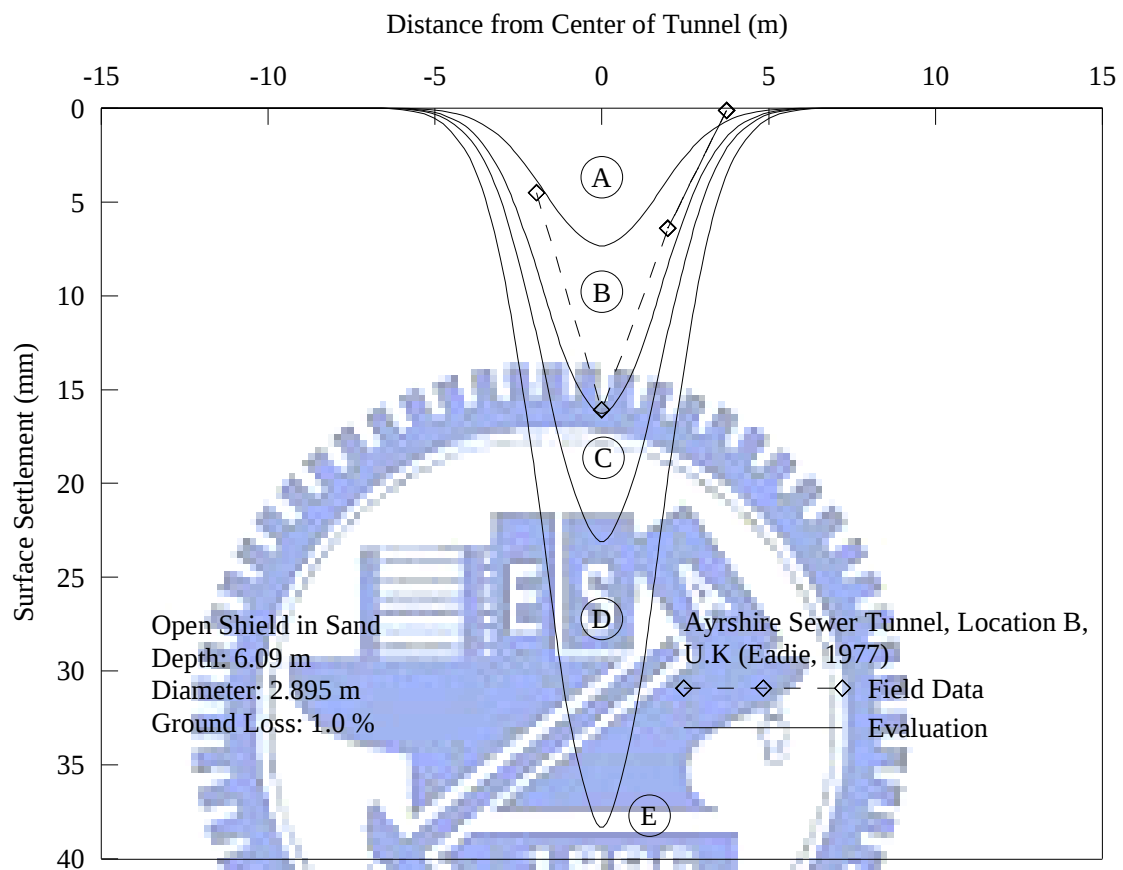


圖 4.3 案例 OS2 實測地表沉陷槽之評估

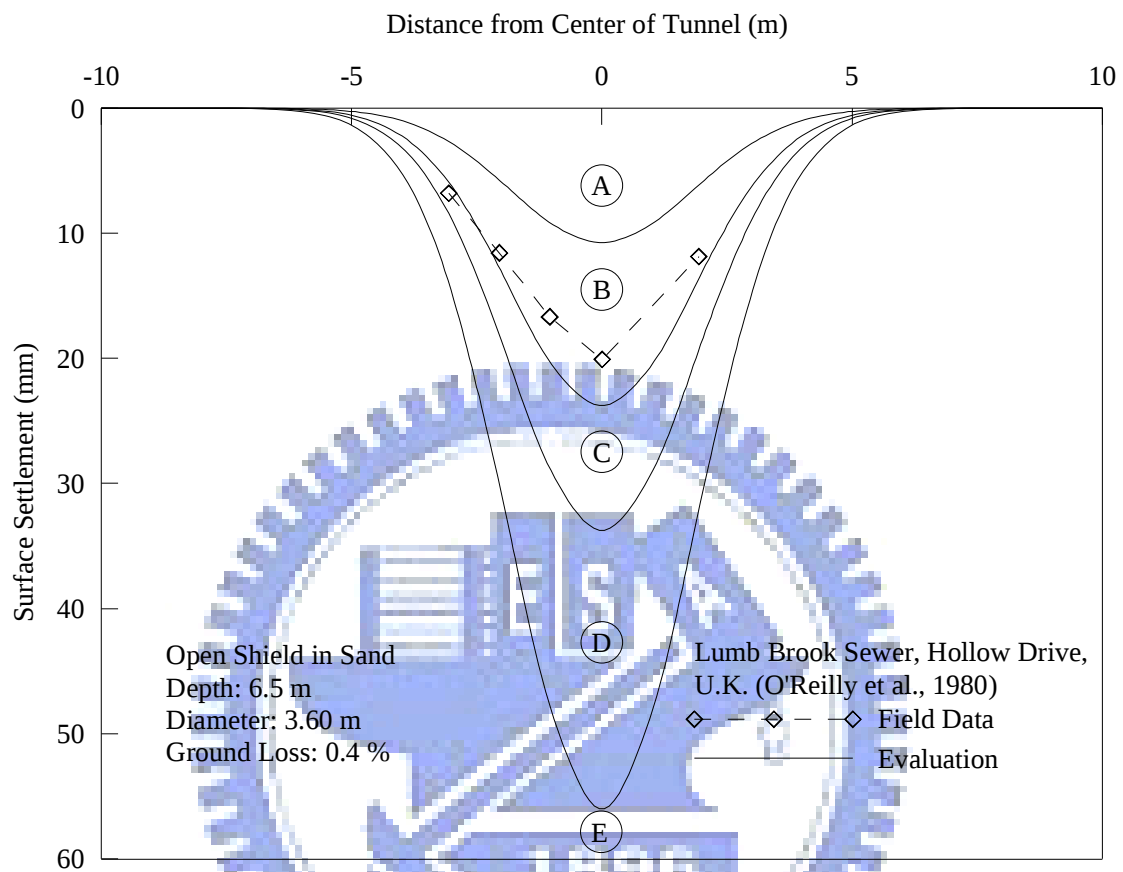


圖 4.4 案例 OS3 實測地表沉陷槽之評估

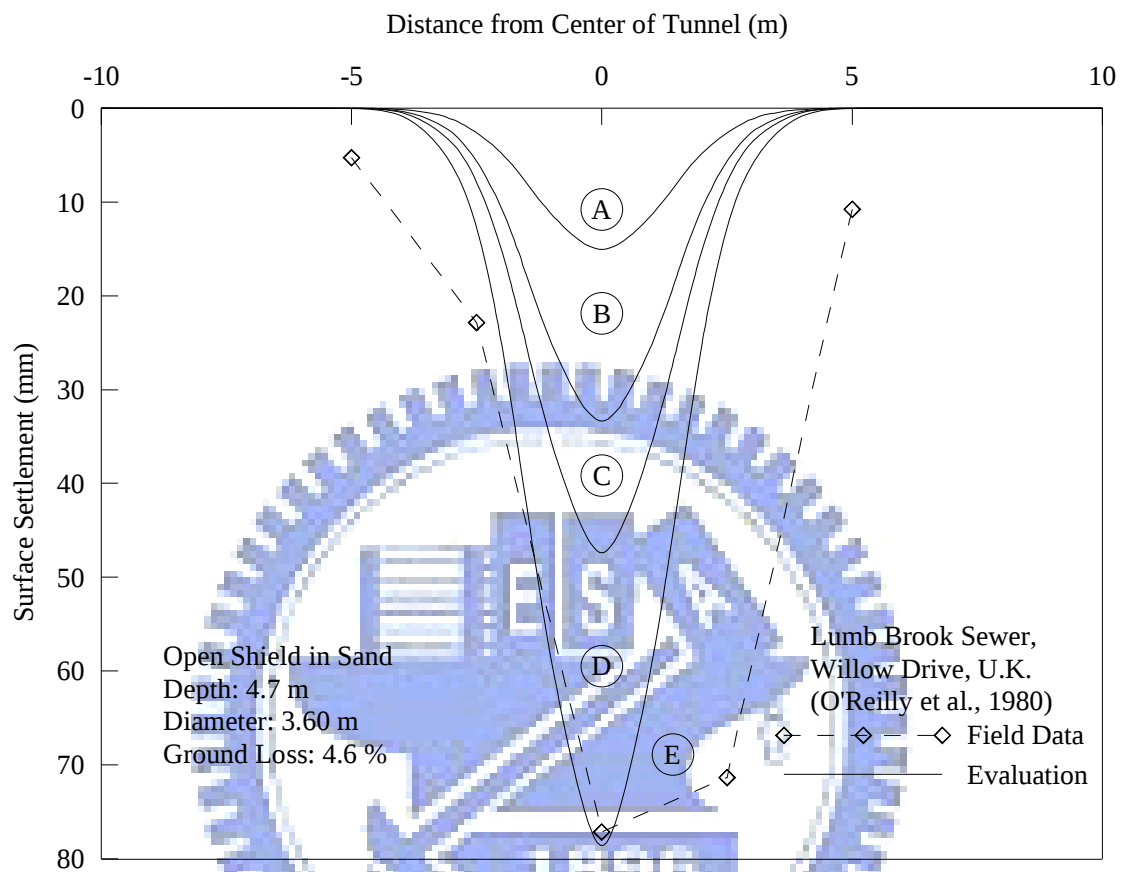


圖 4.5 案例 OS4 實測地表沉陷槽之評估

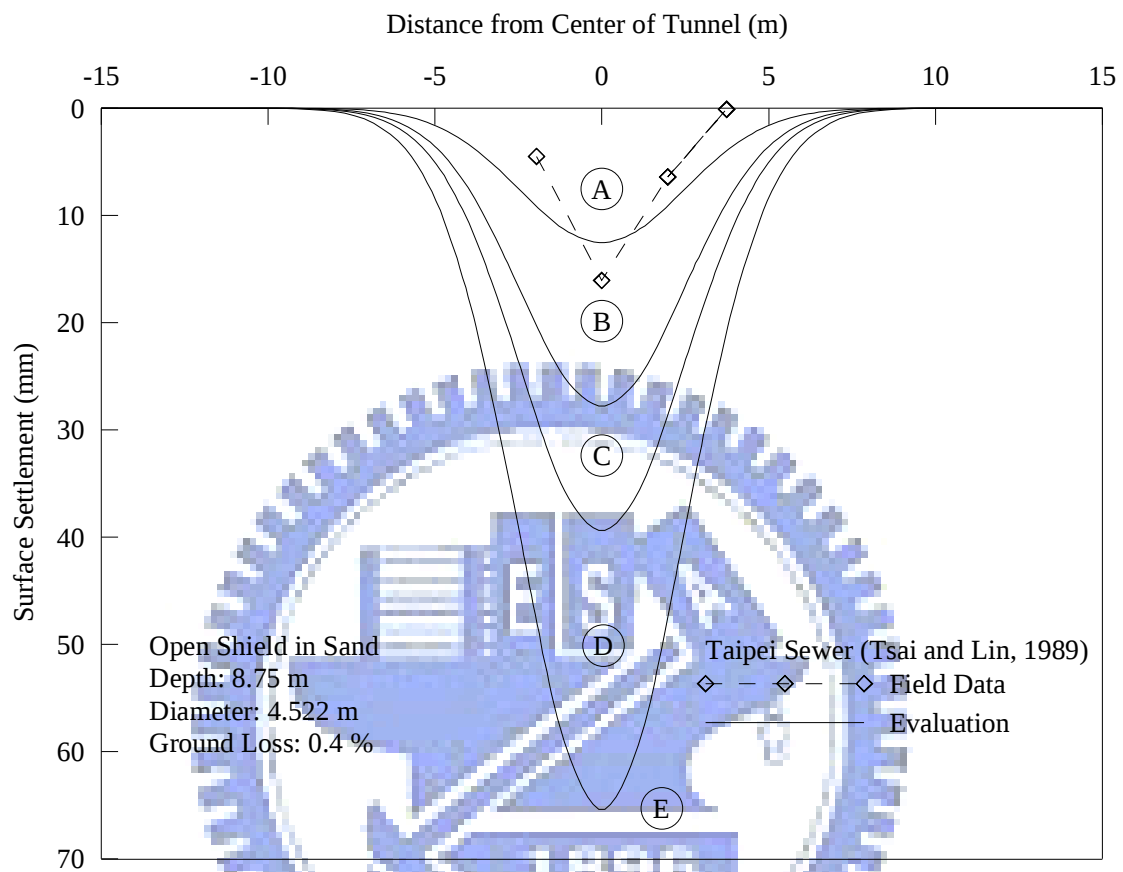


圖 4.6 案例 OS5 實測地表沉陷槽之評估

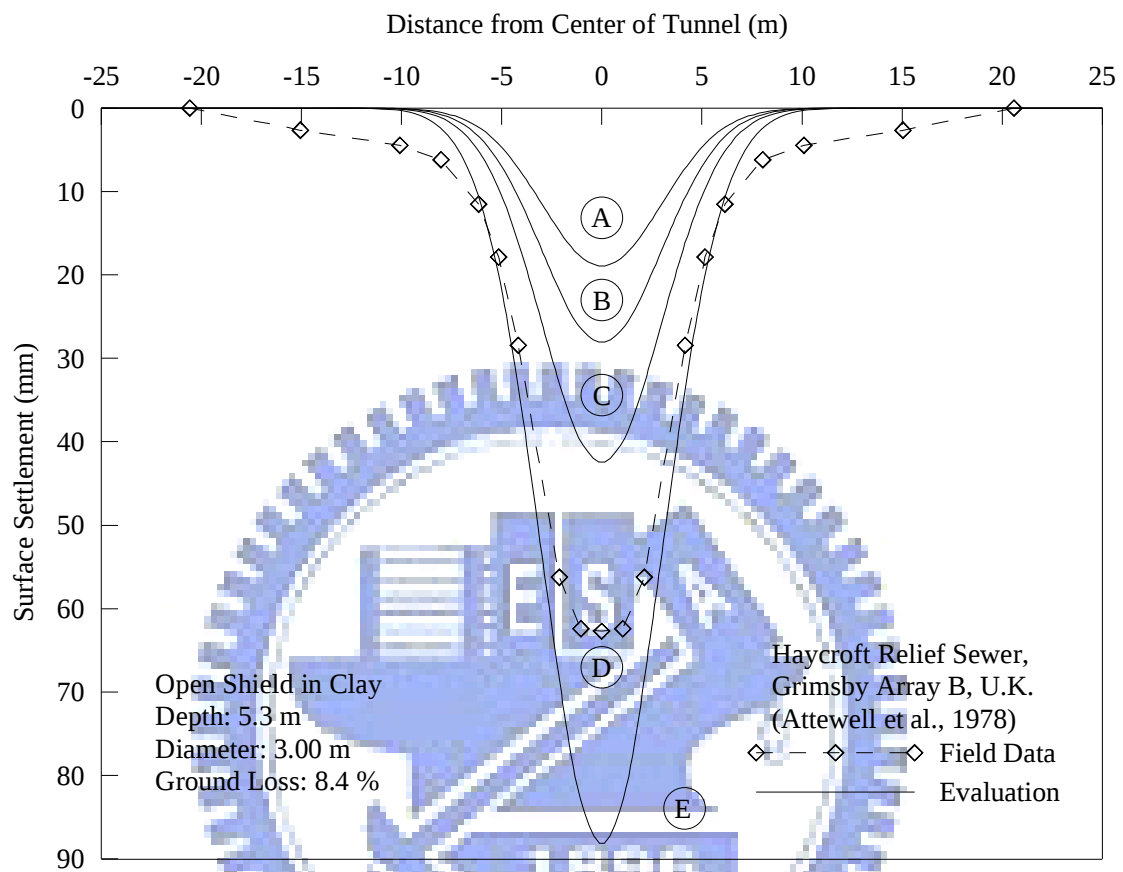


圖 4.7 案例 OC1 實測地表沉陷槽之評估

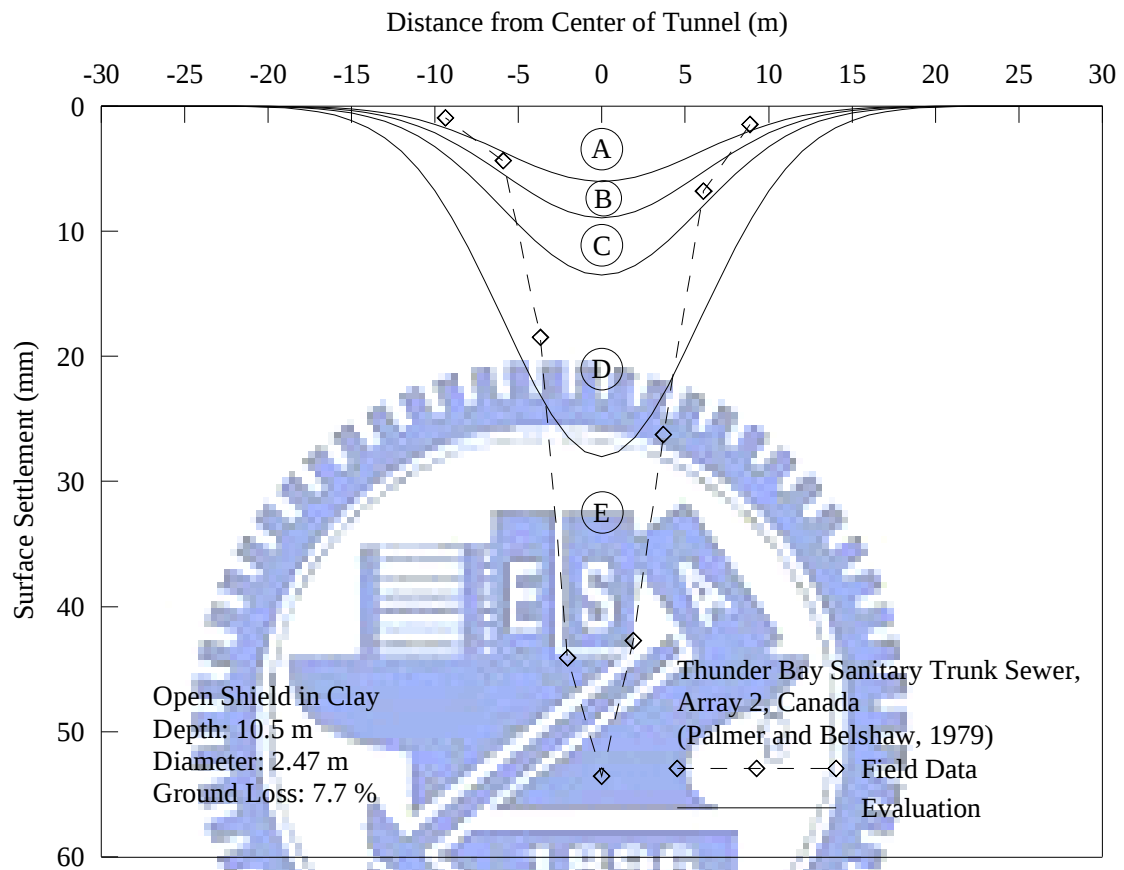


圖 4.8 案例 OC2 實測地表沉陷槽之評估

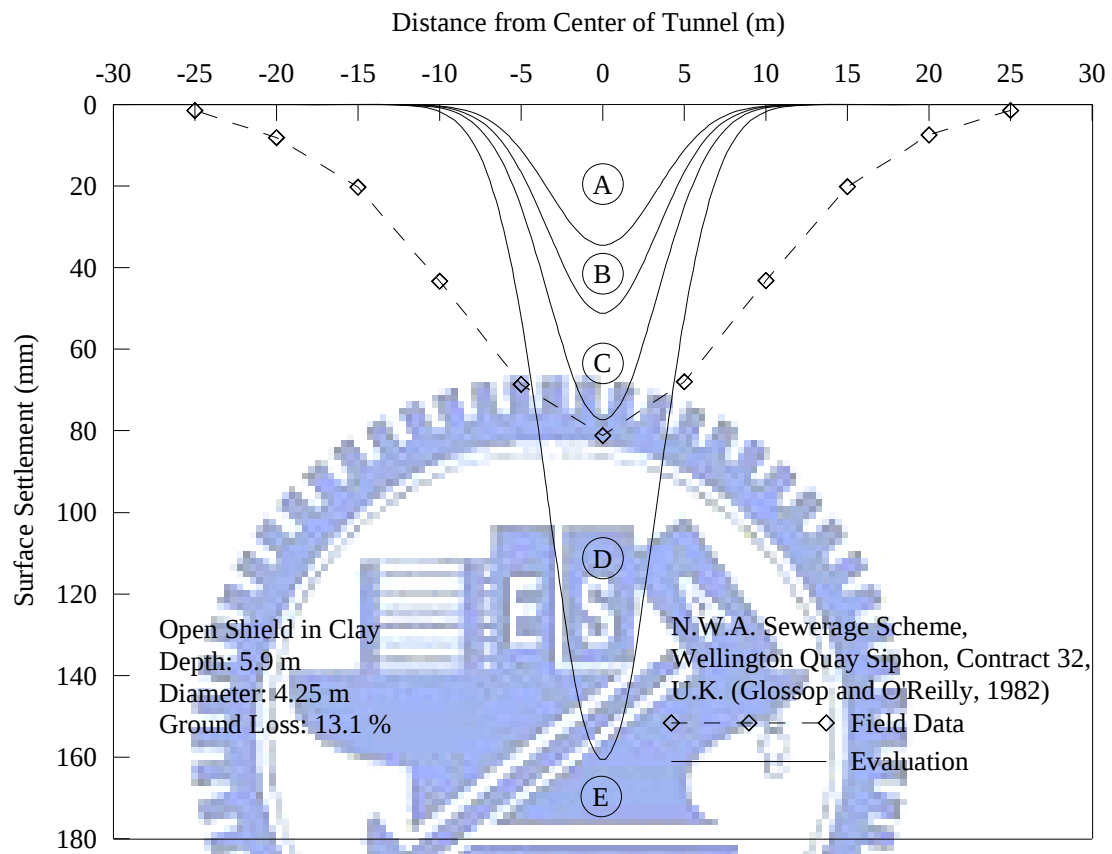


圖 4.9 案例 OC3 實測地表沉陷槽之評估

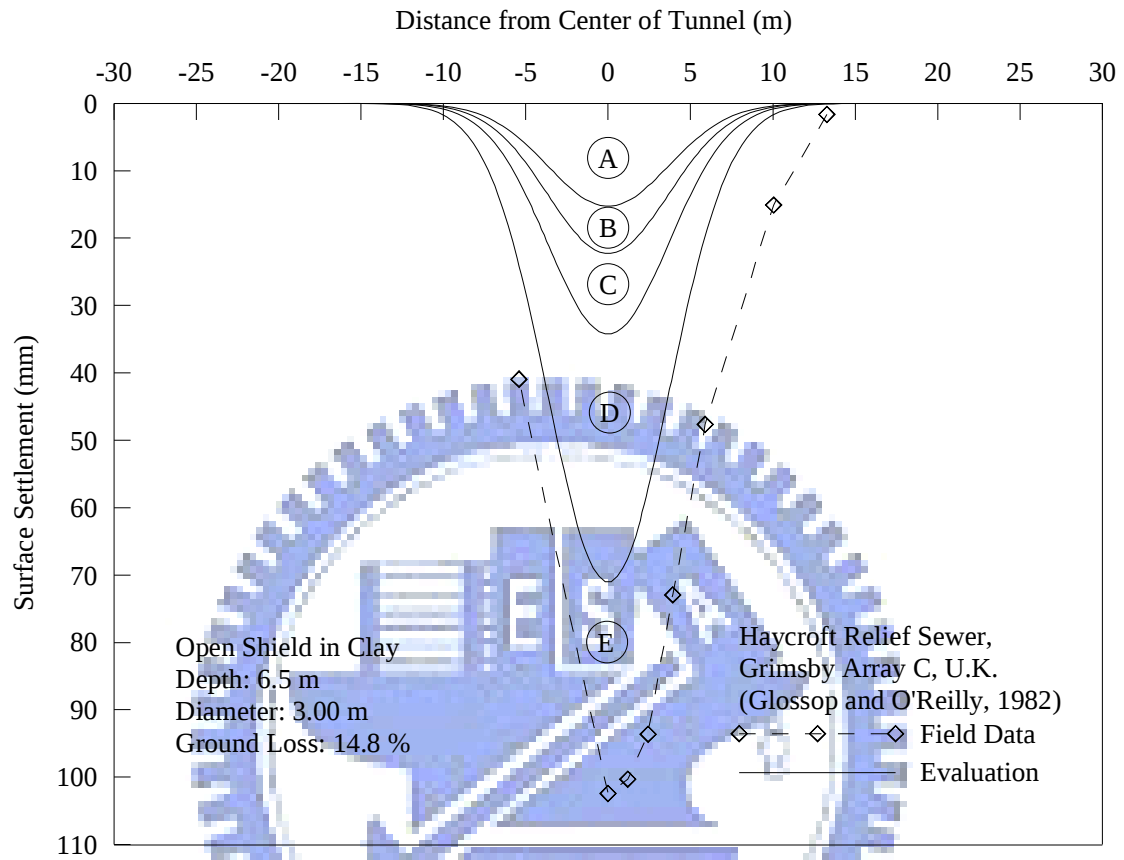


圖 4.10 案例 OC4 實測地表沉陷槽之評估

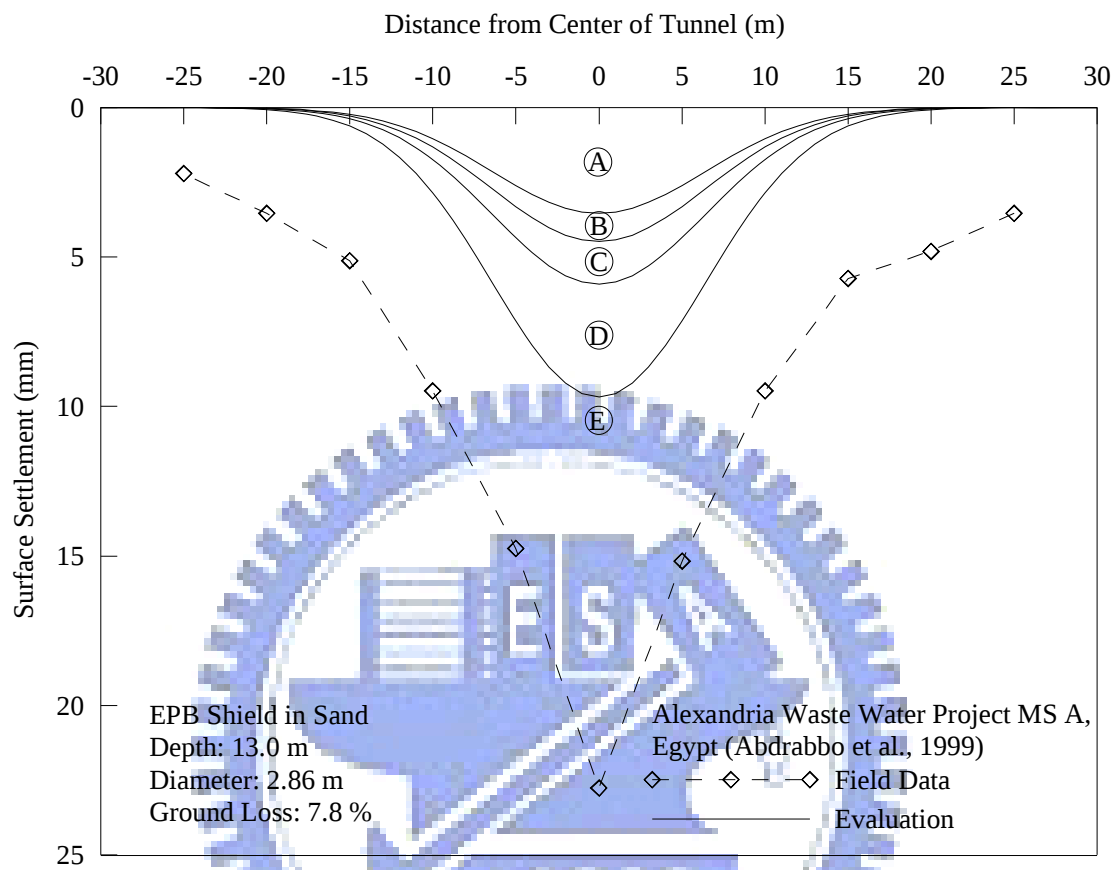


圖 4.11 案例 ES1 實測地表沉陷槽之評估

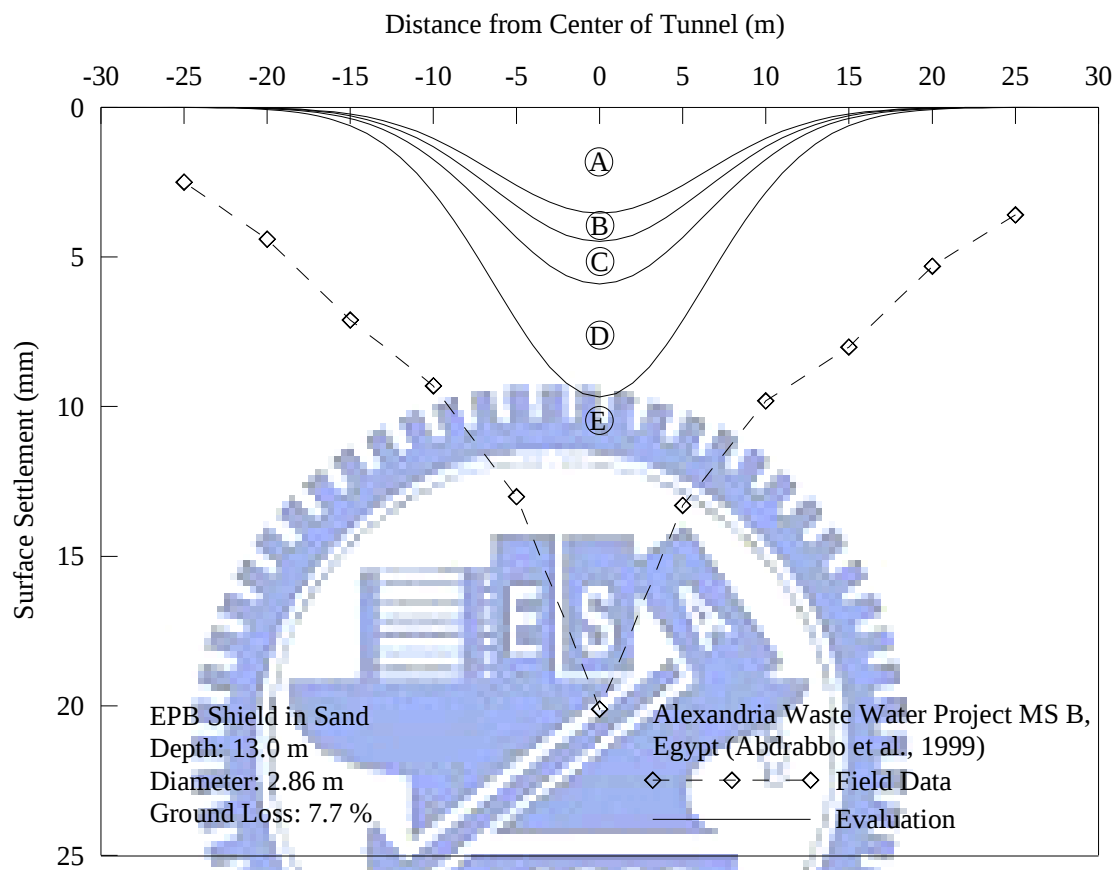


圖 4.12 案例 ES2 實測地表沉陷槽之評估

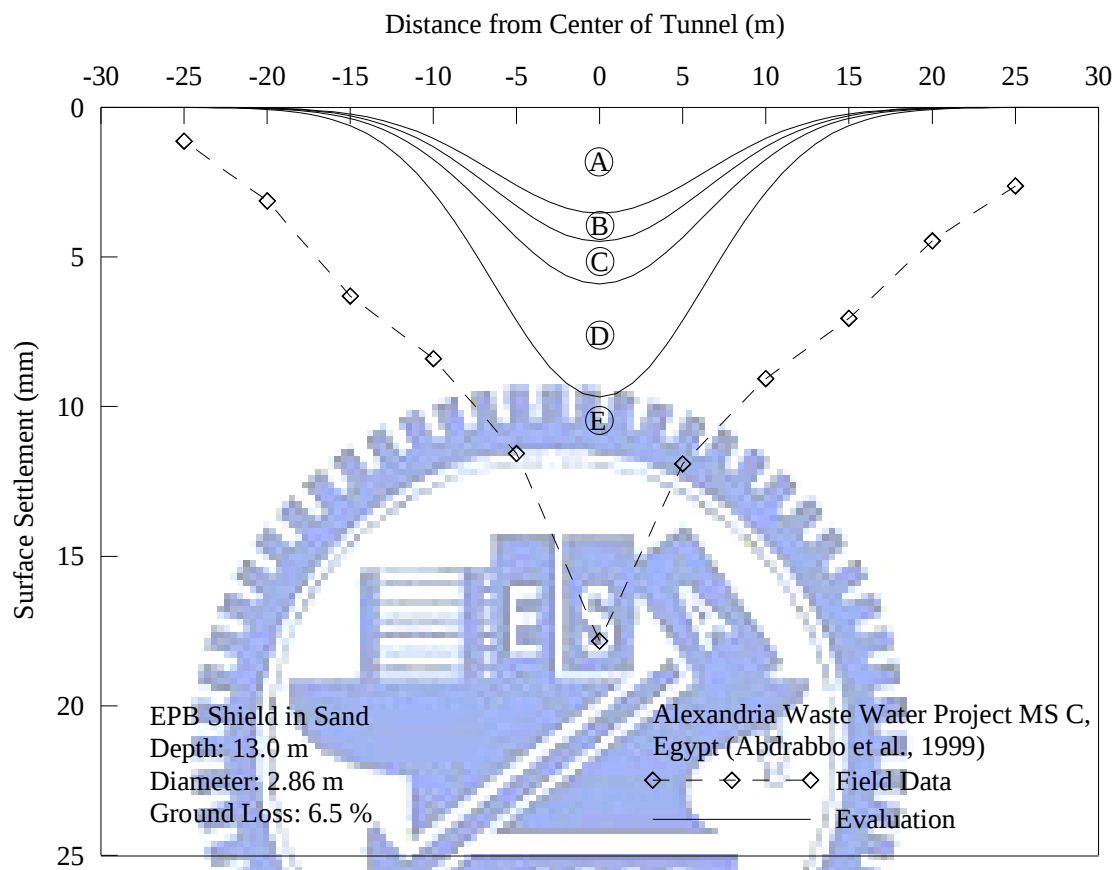


圖 4.13 案例 ES3 實測地表沉陷槽之評估

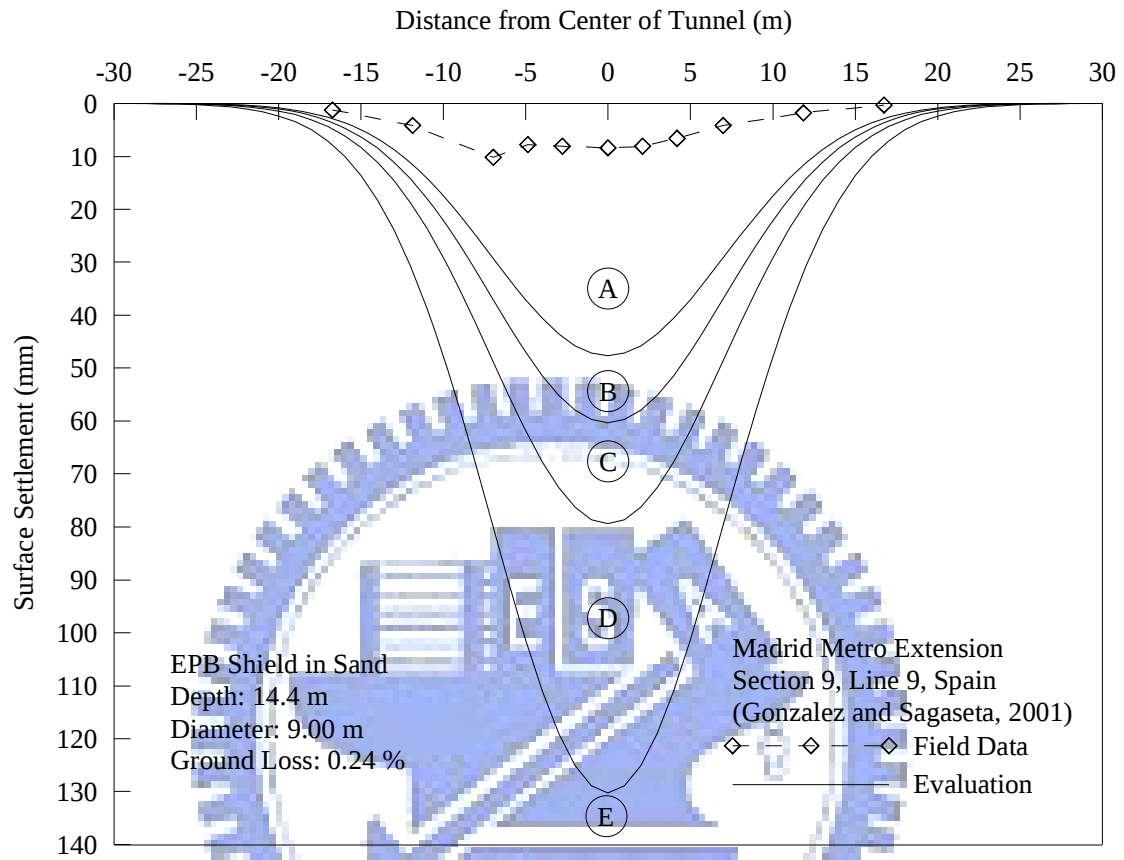


圖 4.14 案例 ES4 實測地表沉陷槽之評估

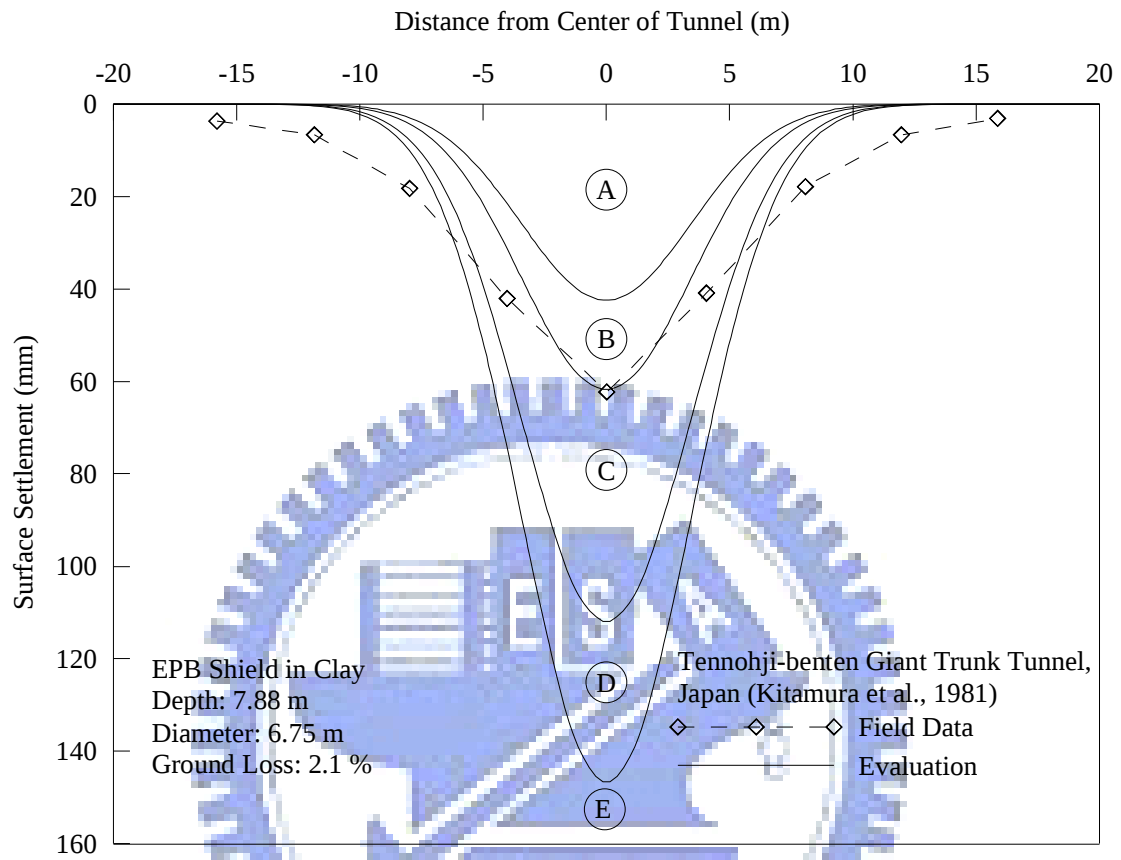


圖 4.15 案例 EC1 實測地表沉陷槽之評估

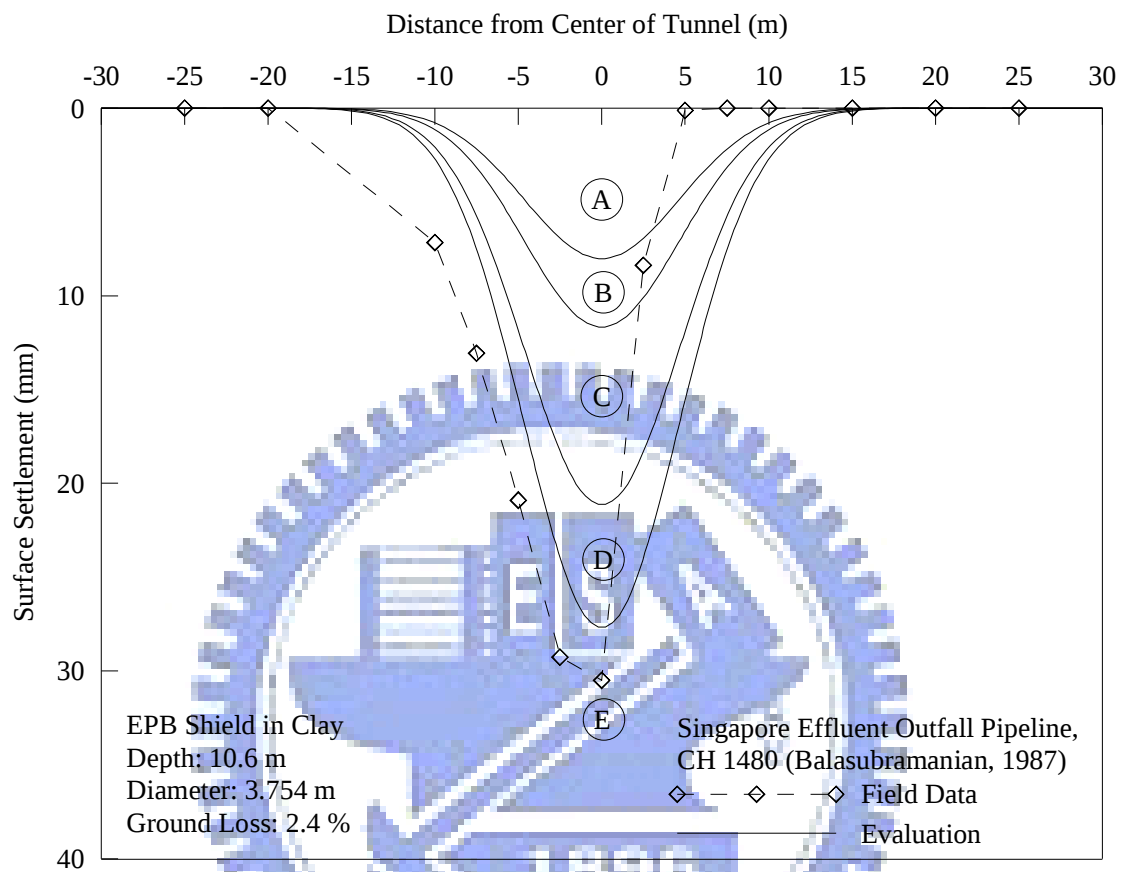


圖 4.16 案例 EC2 實測地表沉陷槽之評估

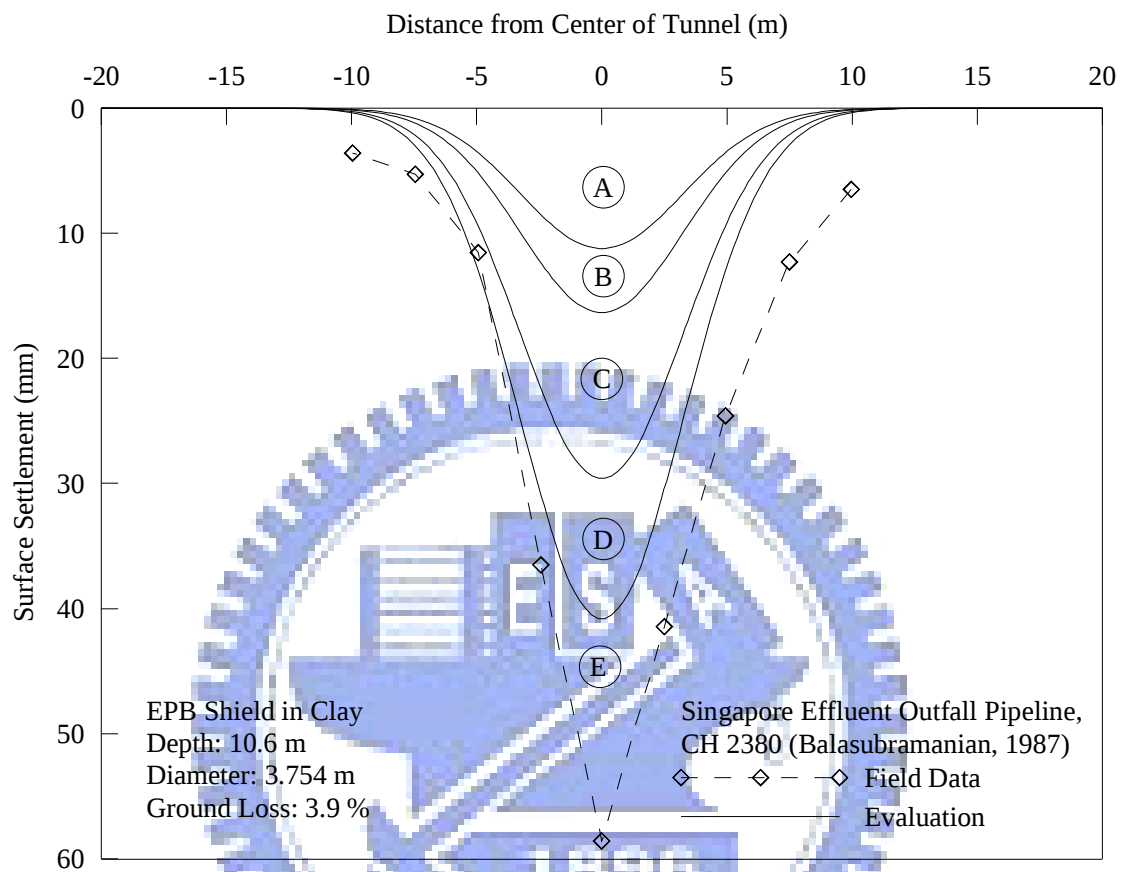


圖 4.17 案例 EC3 實測地表沉陷槽之評估

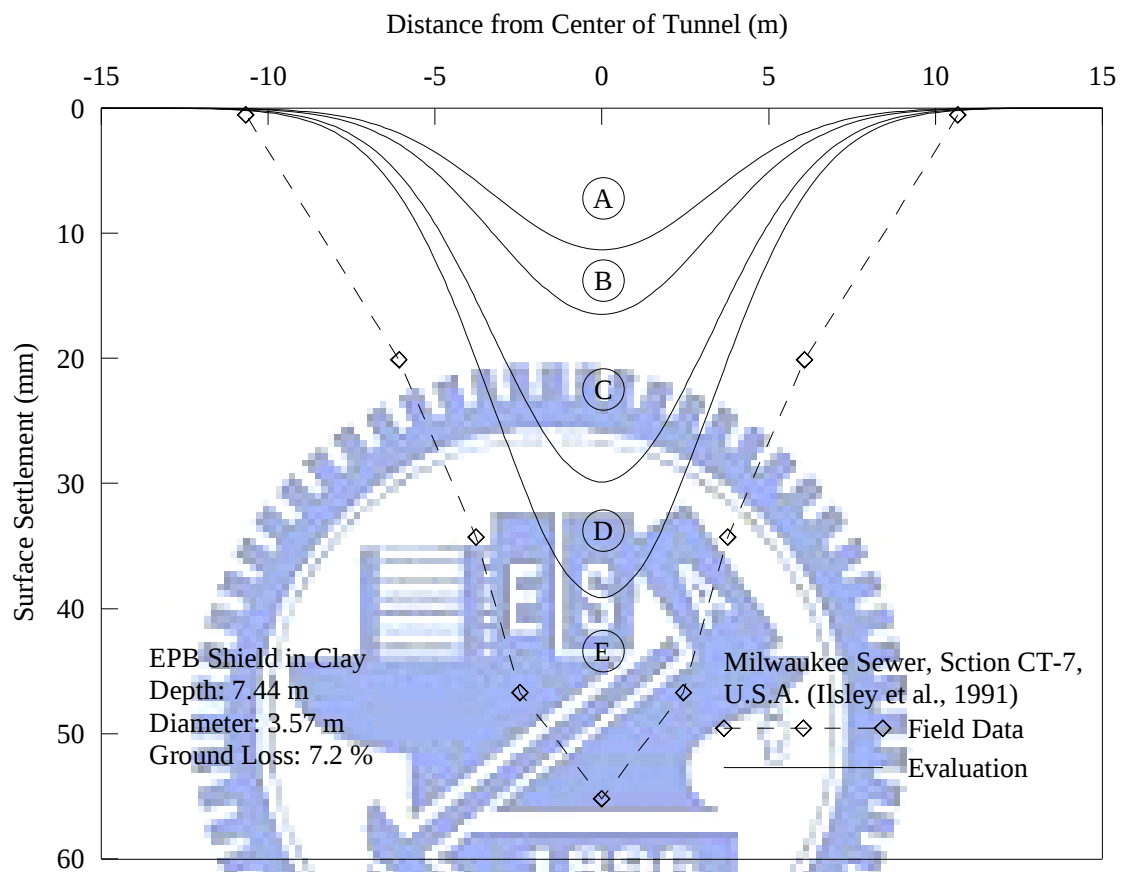


圖 4.18 案例 EC4 實測地表沉陷槽之評估

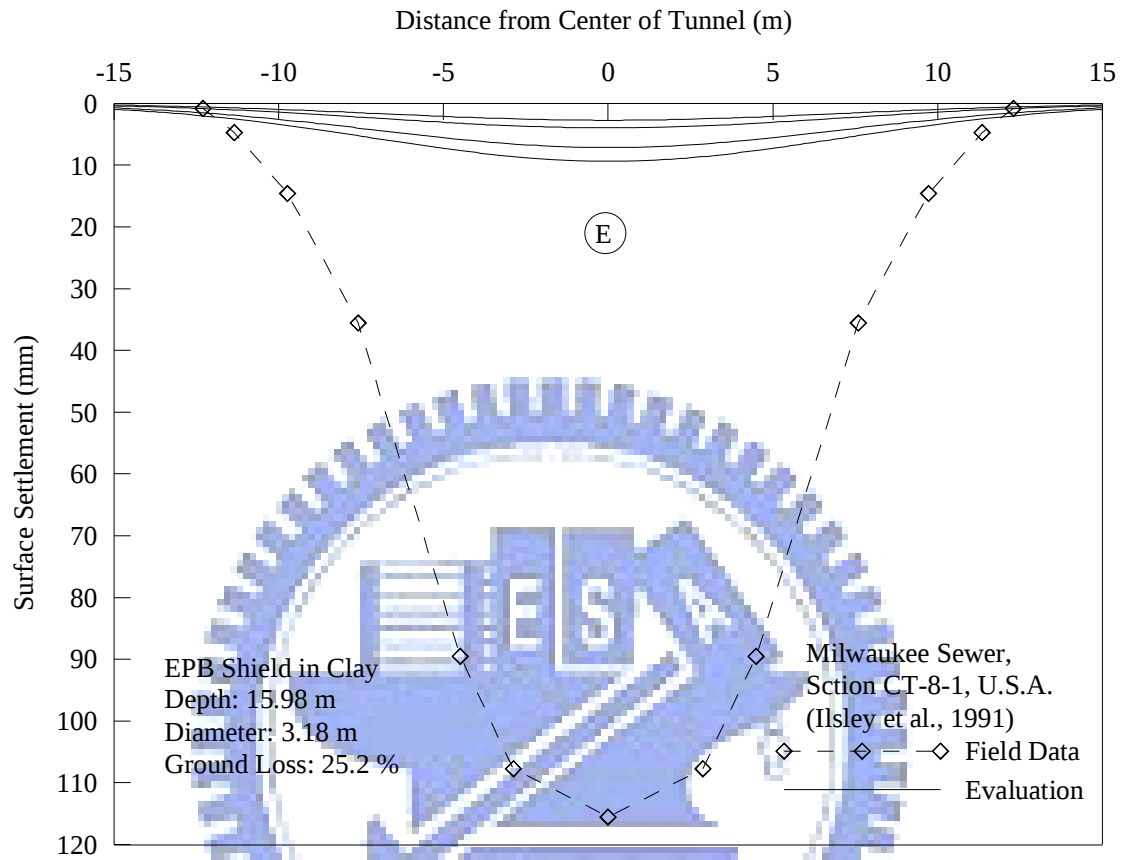


圖 4.19 案例 EC5 實測地表沉陷槽之評估

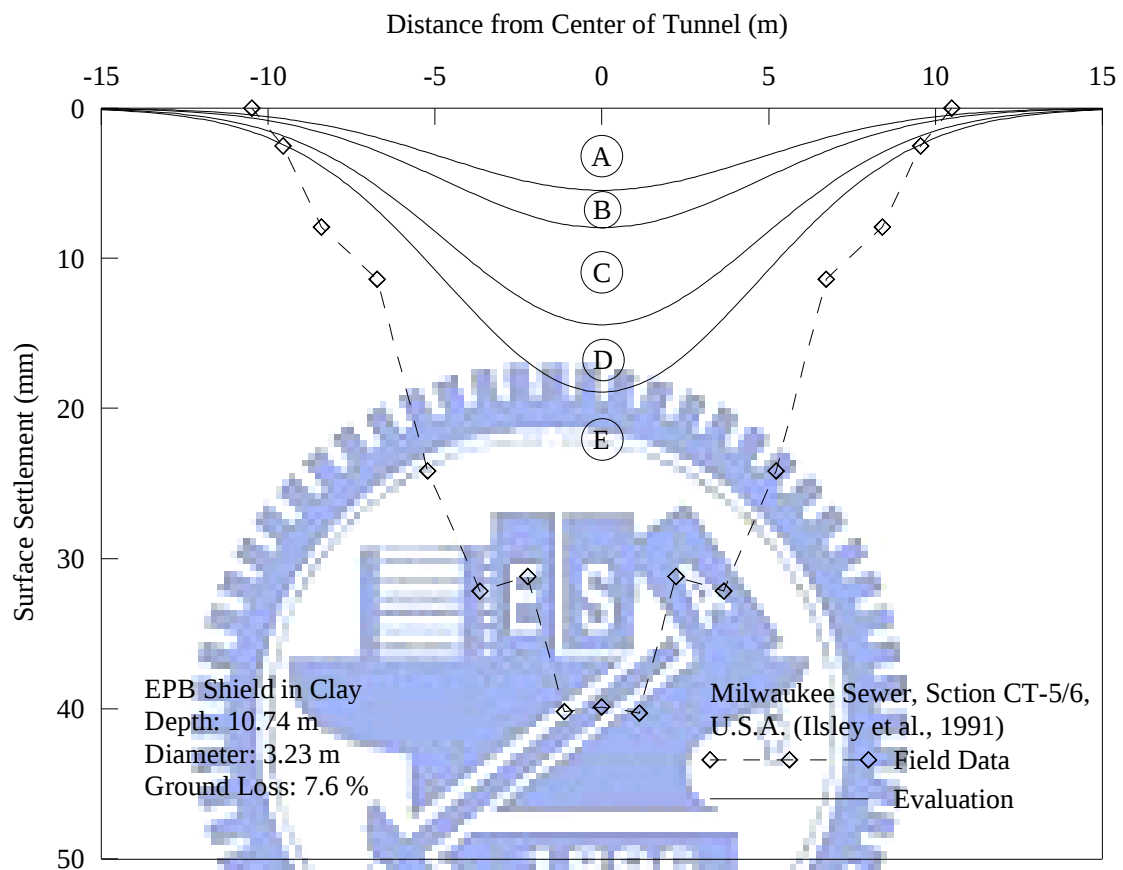


圖 4.20 案例 EC6 實測地表沉陷槽之評估

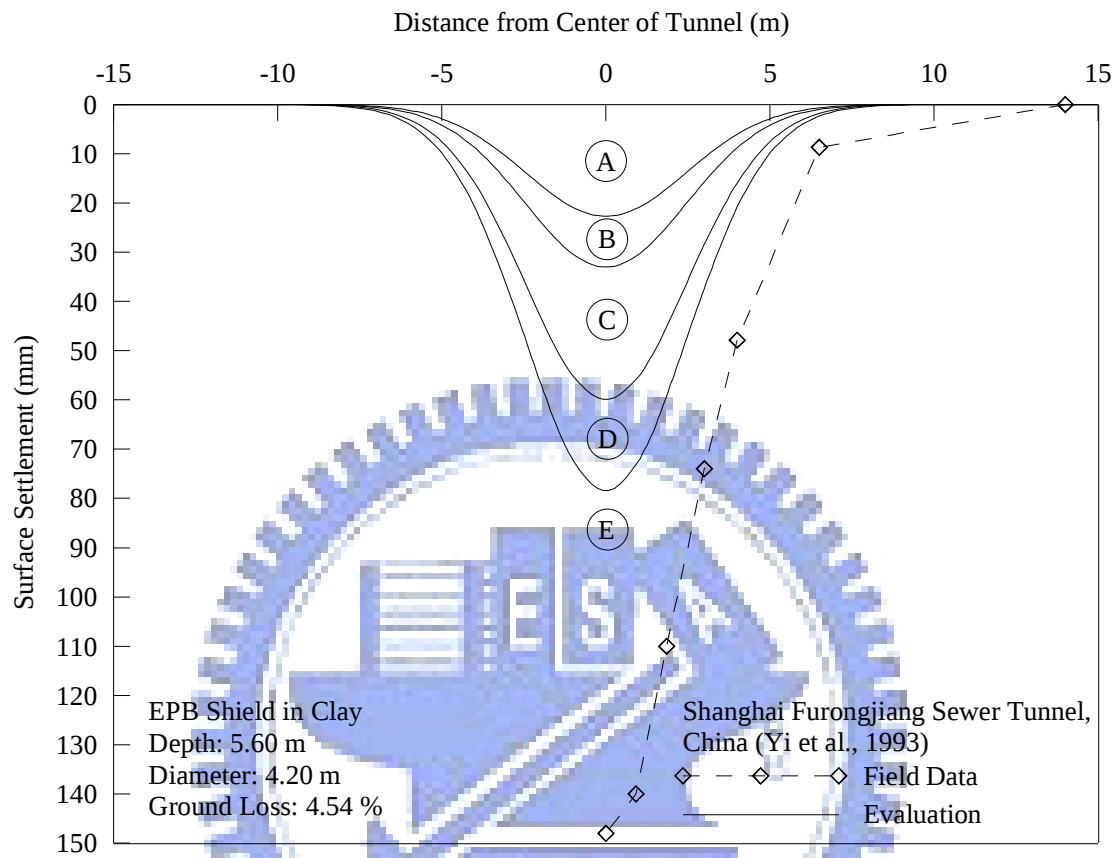


圖 4.21 案例 EC7 實測地表沉陷槽之評估

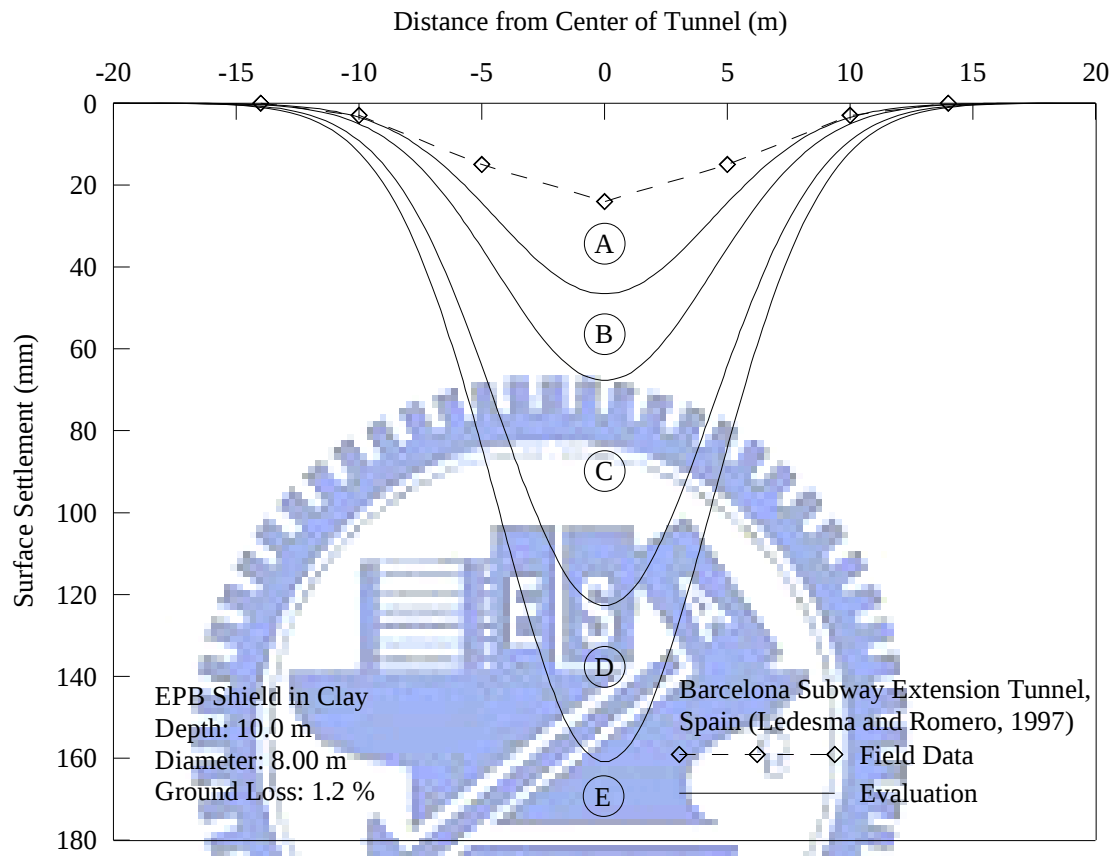


圖 4.22 案例 EC8 實測地表沉陷槽之評估

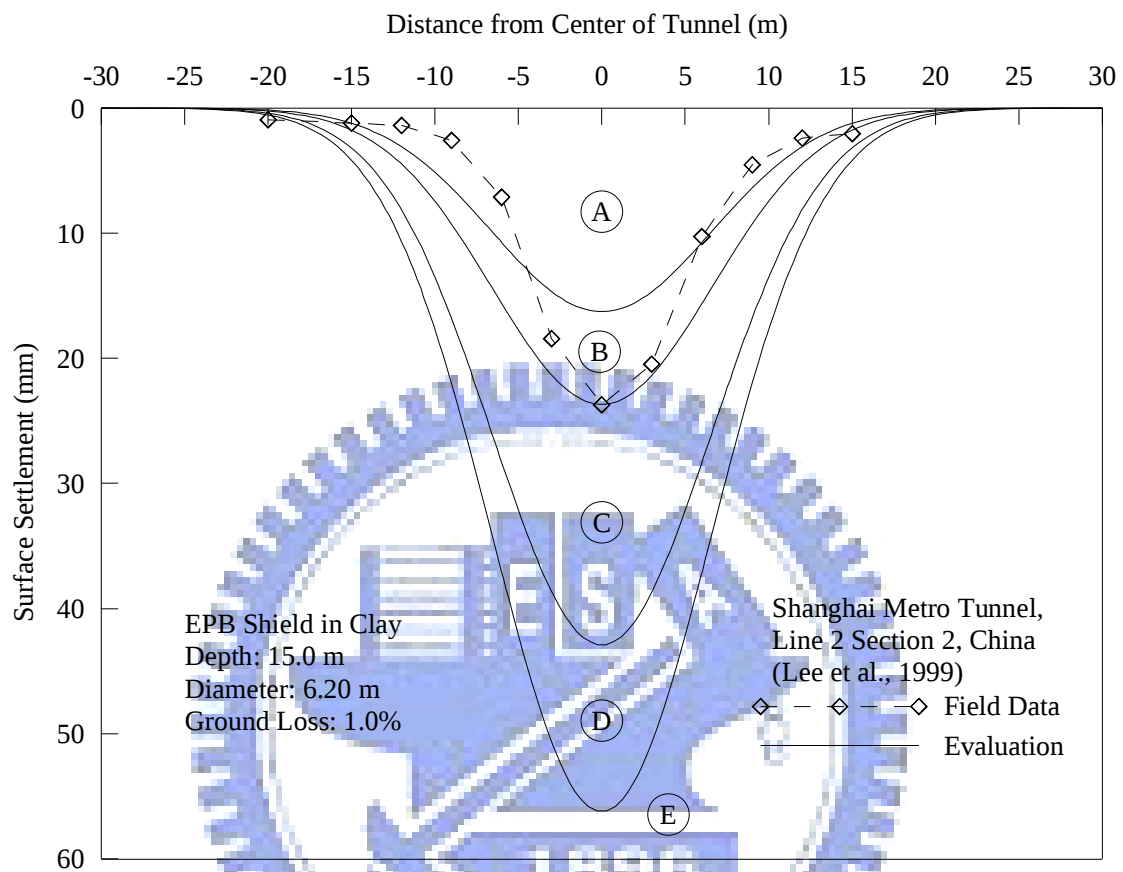


圖 4.23 案例 EC9 實測地表沉陷槽之評估

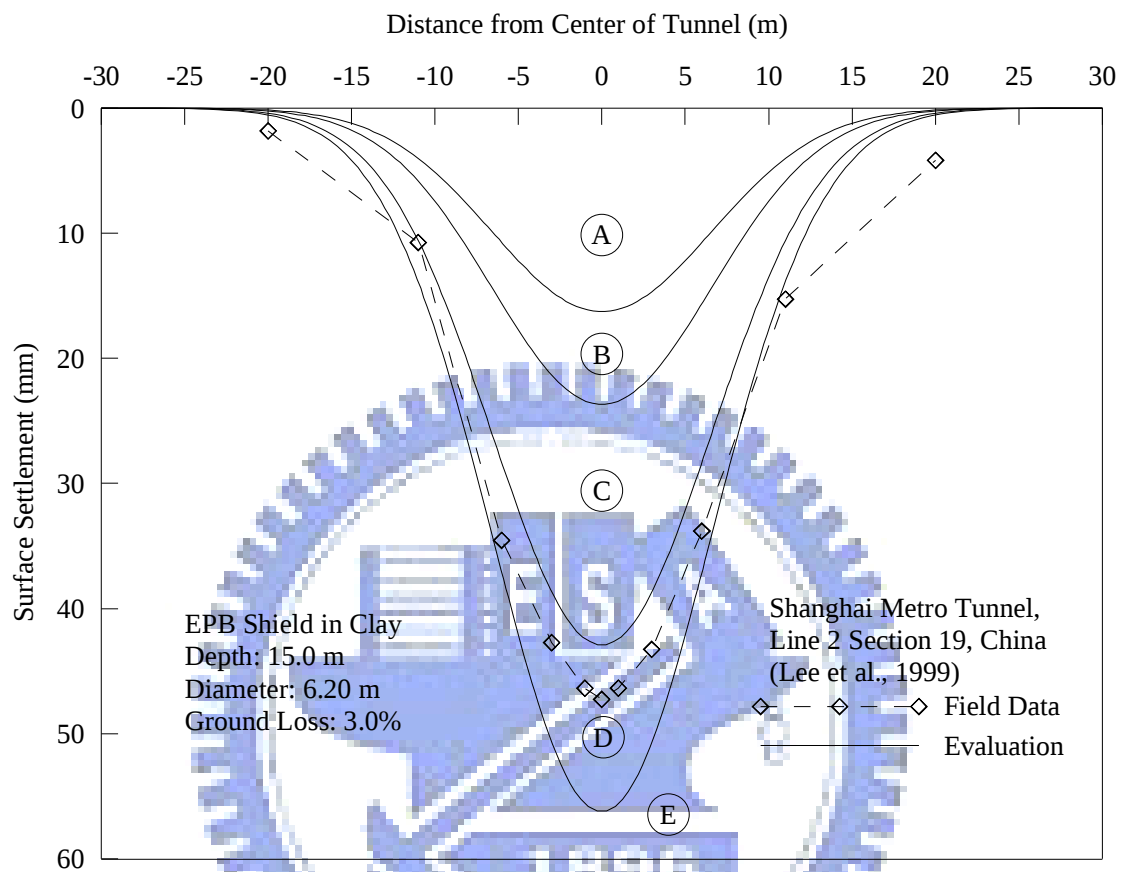


圖 4.24 案例 EC10 實測地表沉陷槽之評估

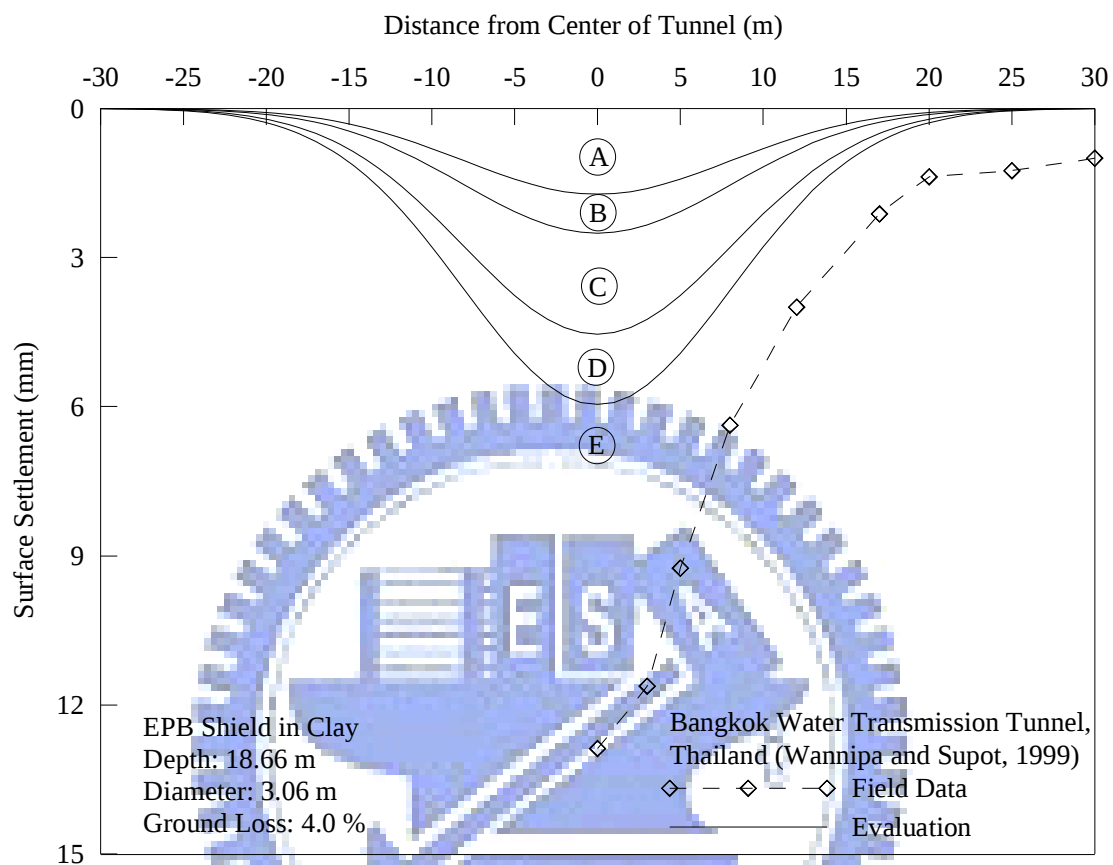


圖 4.25 案例 EC11 實測地表沉陷槽之評估

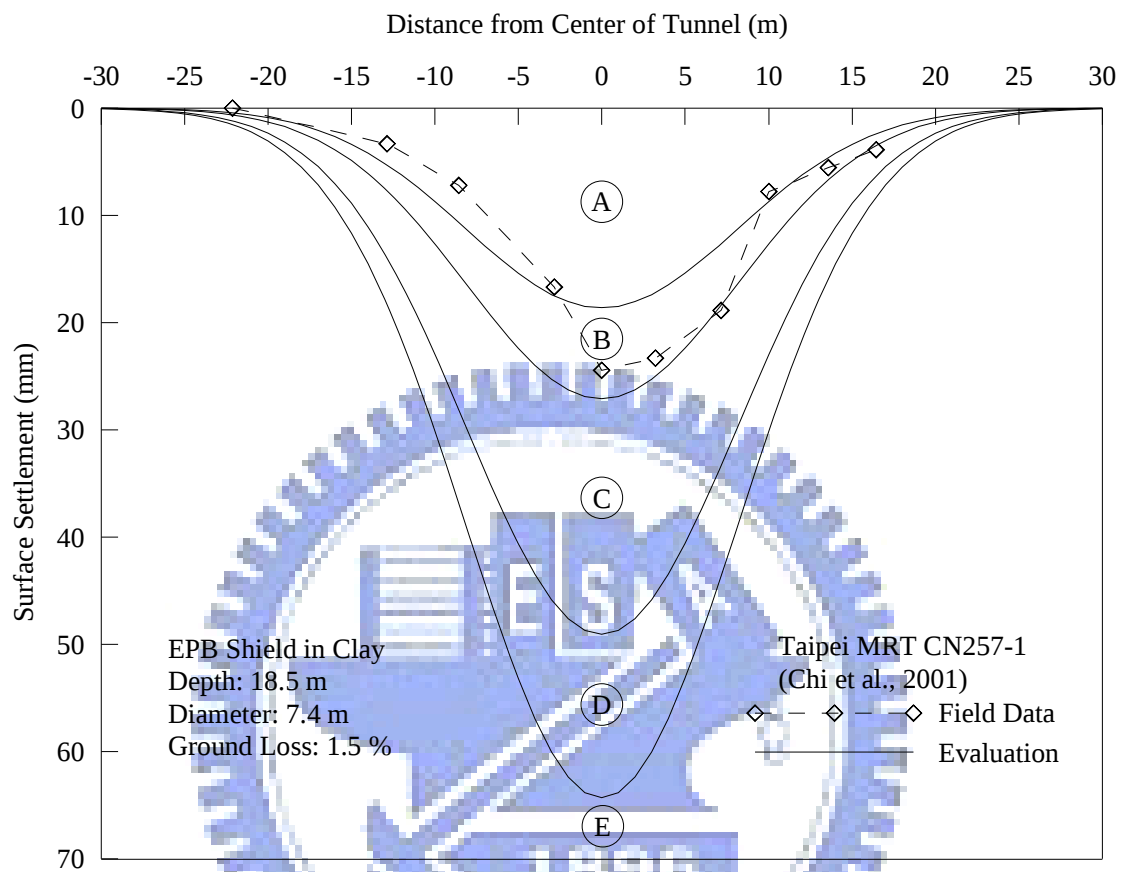


圖 4.26 案例 EC12 實測地表沉陷槽之評估

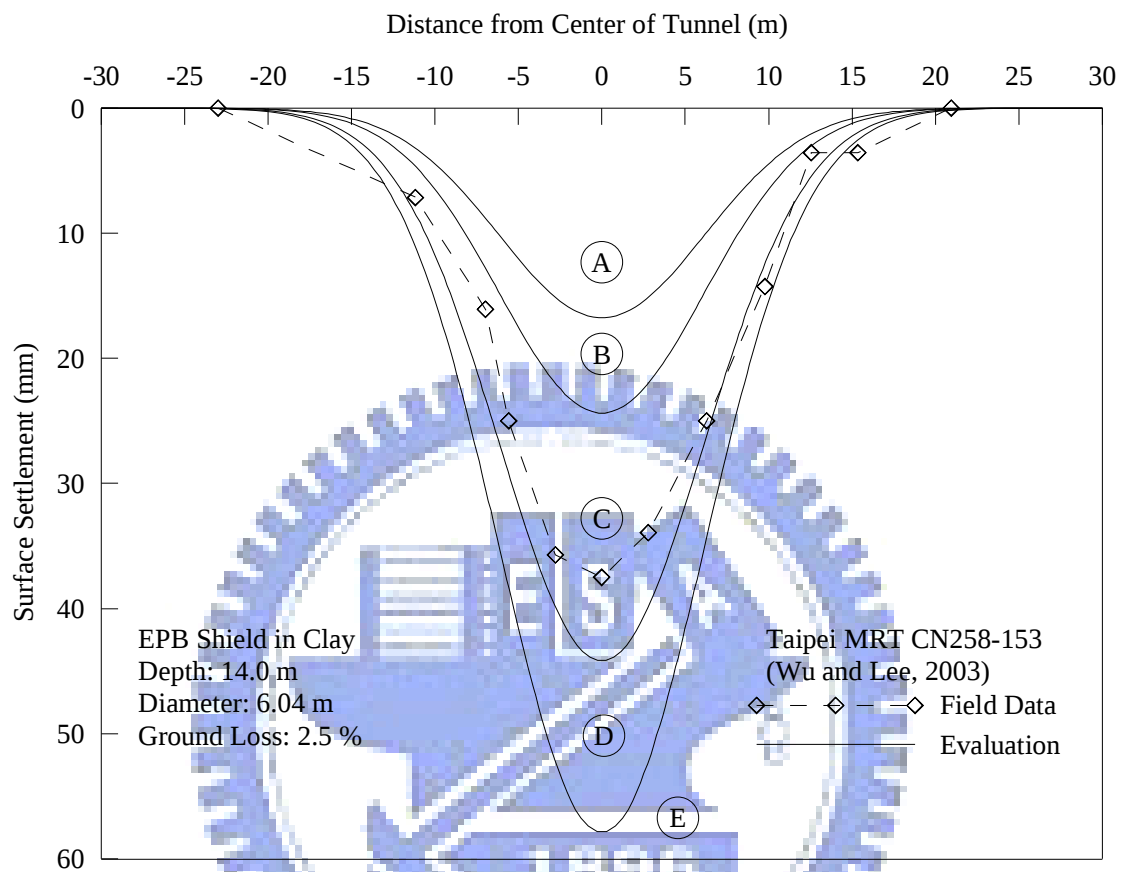


圖 4.27 案例 EC14 實測地表沉陷槽之評估

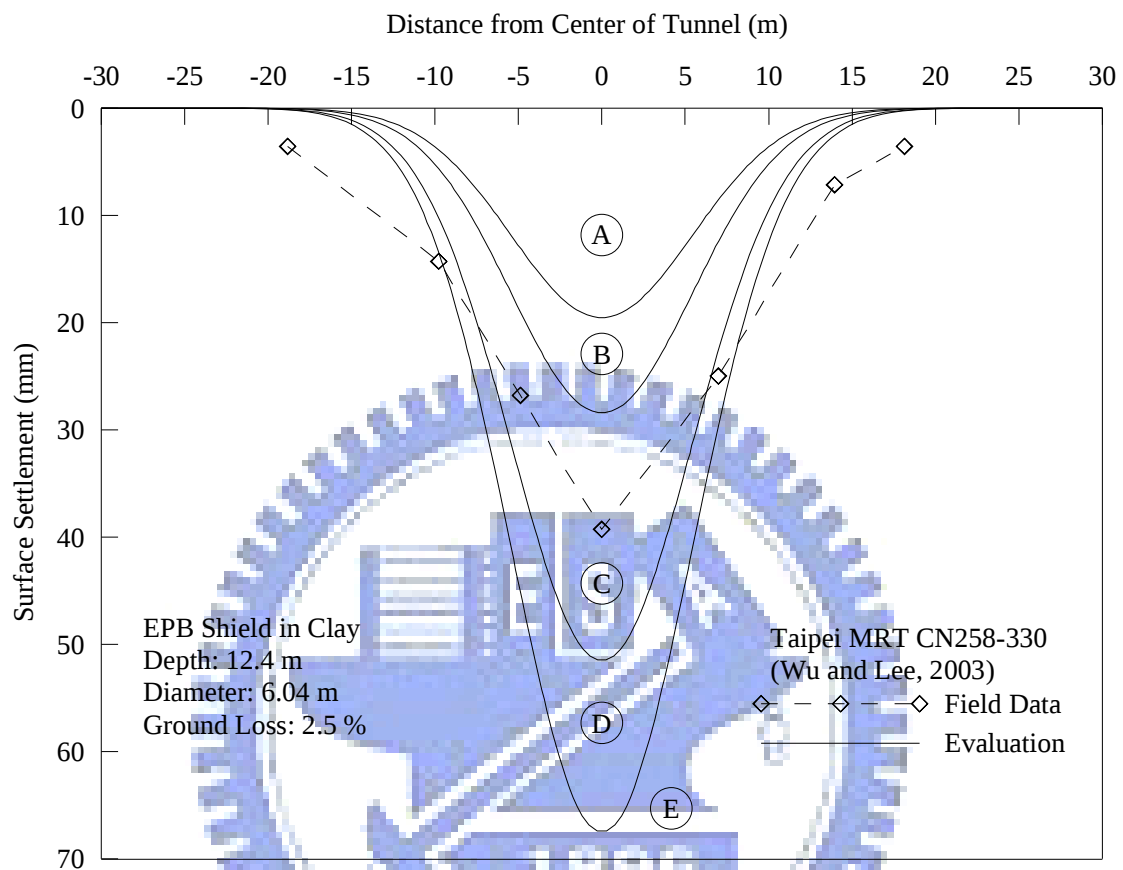


圖 4.28 案例 EC15 實測地表沉陷槽之評估

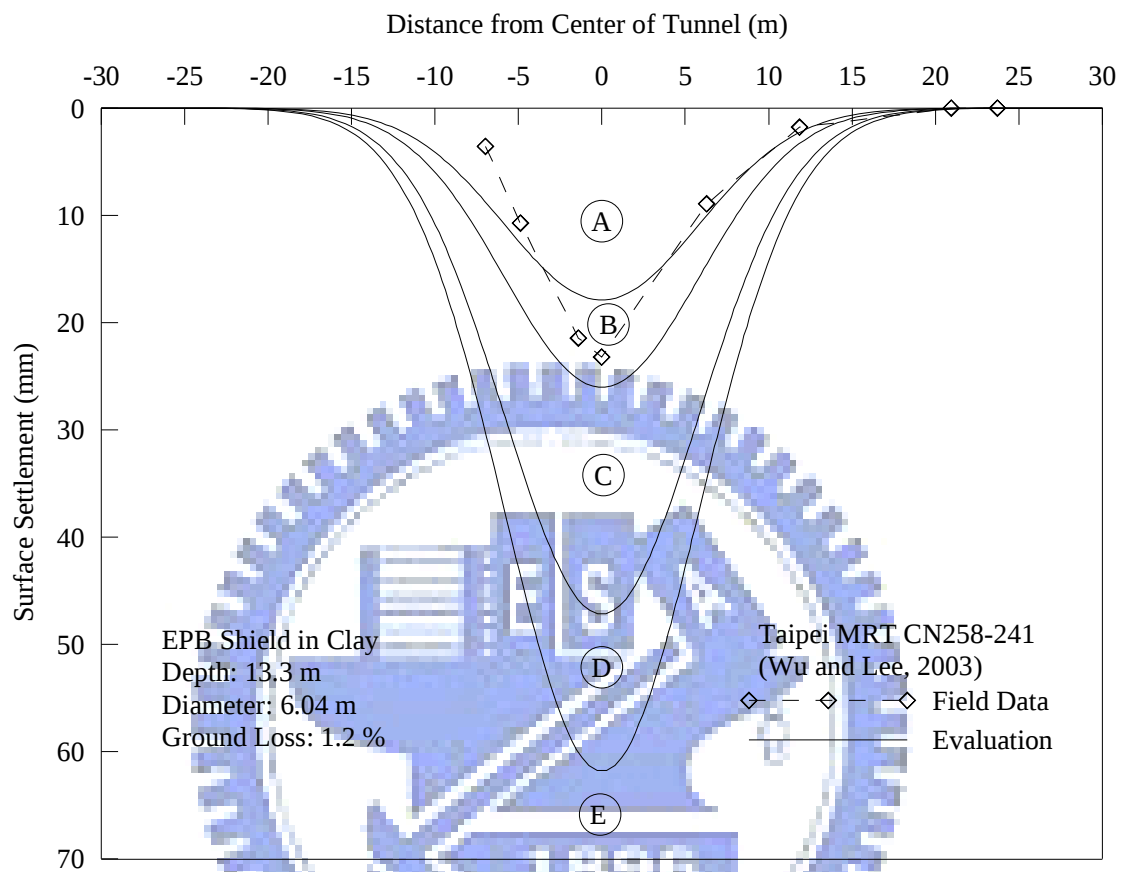


圖 4.29 案例 EC16 實測地表沉陷槽之評估

作者簡介

學生張皓禎，民國七十二年生，台灣省南投縣人。民國九十四年六月畢業於國立交通大學土木工程學系。

