

軟弱粘土中管幕工法之設計與分析

An Introduction to Design and Analysis of Pipe Roof in Soft Clay

姚大鈞¹

吳志宏²

張郁慧³

¹ 亞新工程顧問股份有限公司正工程師

² 亞新工程顧問股份有限公司工程師

³ 台北市工務局新建工程處復北工務所主任

摘要

都會區內隧道施工時為降低對地面活動及其他地面下設施與管線之影響，使用管幕工法作為輔助工法已廣泛為工程界接受並成為選擇方案之一。對於軟弱粘土中使用管幕工法，並且於土體變形及地表沉陷之要求較為嚴格的工程中，其管幕設計及管幕內開挖支撐之施工順序與步驟，影響工程成敗甚鉅。分析評估土體變形及地表沉陷，符合設計條件要求，為工程設計及分析上之挑戰。本文介紹於軟弱粘土中設計與分析管幕工法之要點及方法，並以台北市復興北路穿越松山機場車行地下道工程中管幕隧道段之監測結果進行回饋分析，驗證設計與分析之結果。

ABSTRACT

The pipe roofing method has been widely accepted as an auxiliary technique or one of the alternatives for tunnel construction in urban areas to minimize the impact on activities and facilities on the ground surface as well as to reduce adverse effects on underground utilities. In those tunneling projects through soft clay where the requirements for ground deformation and surface settlements are stringent, design of pipe roof as well as excavation sequence and supporting systems are the keys to a successful project execution. This paper serves as a general guide for the design and analysis of tunneling through soft clay with pipe roofing method. The monitoring data from the vehicle tunnel construction with pipe roofing method along the Fuhsing North Road passing through the Taipei International Airport is used to validate the presented design and analytical method.

關鍵字：管幕工法，軟弱粘土，隧道

Key Words: pipe roofing method, soft clay, tunnel,

一、前言

為降低對地面活動及其他地下設施與管線之影響，管幕(Pipe Roofing Method)工法於近年來都會區內之隧道施工中，已廣泛為工程界接受成為選擇方案之一。於世界許多地方如美國的亞特蘭大(East Line Subway Extension crossing Interstate Highway 285)及洛杉磯(Flood Control Tunnel passing Union Pacific Railroad)，德國(Fahrlach Tunnel, Mannheim)，葡萄牙(Alameda Station in Lisbon, Portugal)，日本(橫濱高速鐵路穿越東名高速公路箱涵)，及台灣(台北市復興北路穿越松山機場車行地下道及高雄市中山路連接博愛路地下道)等皆有成功使用管幕工法之施工案例。然此些工程大多施作於非凝聚性之土壤如砂土或卵礫石中，亦有部分於岩層中。於軟弱粘土中成功完成之大型管幕工程則僅有台灣台北市復興北路穿越松山機場車行地下道工程。

管幕工法嚴格來說應為隧道施工之輔助工法，其目的主要為隧道開挖時之臨時擋土設施，並減少施工時對地面活動及其他地下設施與管線之影響，必要時亦可提供施工時之止水功能。相對於常見之隧道工法如潛盾工法(Shield Tunnel Method)或新奧工法(New Austrian Tunneling Method, NATM)，管幕工法之優點為於開挖區之開挖面無法自立的地質中進行隧道施工時提供臨時擋土及止水設施，隧道斷面幾何形狀可依設計需要變化，及於長度較短之隧道施工上，費用較潛盾工法節省。於隧道施工處覆土厚度較小但無法以明挖覆蓋(Cut-and-Cover)方式施工之工程，管幕工法具有以上其他工法無法替代之優勢。

於軟弱粘土中之隧道工程若無法以明挖覆蓋方式施工，且對於土壤變形(地表沉陷)之限制較嚴格，及隧道之幾何形狀不利於潛盾工法情形下，管幕工法可能為唯一選擇。此時管幕之構築如推管精度、管幕閉合及隧道開挖時之土體穩定、沉陷控制及支撐架設與結構體構築與工程之成敗有密切之關係。土壤與管幕結構及支撐之互制行為需於設計及分析時作詳細考量，並於施工中進行監測與設計回饋分析，根據分析結果隨時修正設計與施工，方可順利完成工程。本文將介紹於軟弱粘土中管幕工法設計與分析之要點及方法。

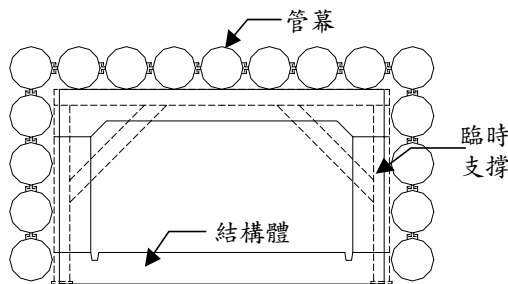
二、管幕工程簡介

管幕工法係以單管推進為基礎，將各單管以樁頭(Key)於鋼管側緣相接形成管排，並於接樁空隙注入止水填劑以達管排止水要求。管排形狀可為線型、半圓型、圓型或拱型，再以管排單元之組合形成馬蹄型管幕、口字型管幕及門字型管幕(如圖一)，其中以口字型及圓型管幕之止水性及結構完整性較佳。

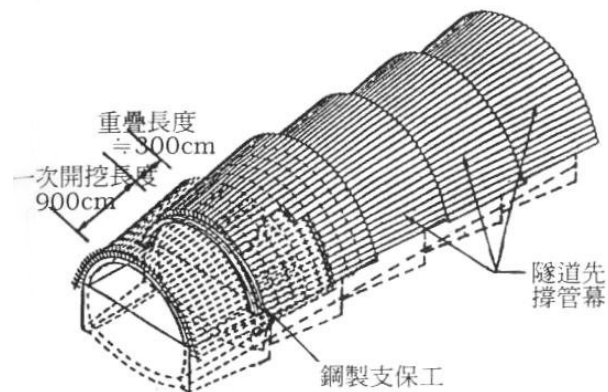
管幕藉由高剛性的鋼管形成臨時擋土設施減少開挖時對鄰近土體之擾動及

降低土體之變形，達到開挖時不影響地面活動之進行且維持上部結構體與管線正常功能之目的。對於管幕內隧道開挖方式亦可依設計條件對於土體變形之要求及工程費用而有不同選擇，一般可使用人工或配合機械挖掘及架設支撐的方式，若對於土體變形限制之要求較高，則可配合地盤改良或其他工法如無限自走工法(Endless Self Advance Method, ESA)等進行開挖(熊谷鎰，1997；Moh 等人，1999)。

本文所介紹之管幕工法與所謂先撐管幕(Forepoling Method，圖二)工法並不相同。雖然管幕工法與先撐管幕工法皆以鋼管先行植入隧道開挖面之前端，並配合架設支撐維持隧道頂拱及開挖時之穩定，然其鋼管植入方式及鋼管之力學變形行為卻不相同。二者分析與設計方式亦異。於不同地層中作為隧道施工之輔助工法之適用性須個案考量。



圖一 管幕工法示意圖



圖二 先撐管幕工法示意圖(郭奇正等，1998)

三、設計要點

3.1 軟弱粘土之工程特性與設計考量

一般而言，軟弱粘土含水量較高，於施工中較易因擾動而變形造成強度折減，或因壓密行為產生體積變化。於工程進行中常見因施工不慎造成軟弱粘土之擾動，產生粘土塑性流及變形過大之案例。且由於粘土強度隨變形量增加而降低，其變形速率隨變形量增加而增加之特性，於施工時除必須降低對於軟弱粘土之擾動外，亦必須考量因擾動所產生之超額孔隙水壓消散後所造成之長期壓密變形。於管幕構築推管之過程中應注意推管速率與排土量之平衡外，滑材之使用可減少推管過程中對土壤之擾動，並以背填灌漿及二次灌漿方式降低地表沉陷。由於管幕係以管排組成，單管推管時造成之地表沉陷可因管排之疊加效應，於地表產生數倍於單管推管造成之地表沉陷量，而推管之施工技術與精度可降低地表沉陷量。

3.2 推管及管幕結構

除上述推管之施工技術與精度可降低地表沉陷量外，高品質之推管技術與精度可保證閉口管幕之閉合，達到以管幕止水的功能及結構完整性。且隧道主結構體均於管幕內構築，於設計時為降低管幕尺寸及主結構體外與管幕間之填充料，其內緣僅預留所需最小空間，推管精度若不嚴格控制，可能發生管幕構件侵入主結構體或結構體與管幕間隙過大現象，造成結構缺陷。

於主結構體構築完成後，管幕各鋼管內應回填混凝土。至於以混凝土填充後之鋼管管幕是否可以考量作為永久結構之一部分或經由設計修改結構作為永久結構之一部分，至今尚未有工程實例或分析結論報告。

3.3 地盤改良之必要性

鑑於上述軟弱粘土之工程特性與設計考量，於軟弱粘土中使用管幕工法進行隧道開挖，為降低地表沉陷及管幕上方之土壤擾動，並提供管幕內開挖面之穩定與降低管幕之側向變形，管幕內之軟弱土壤視需要可藉由地盤改良以增加強度，提供開挖時及支撐架設前開挖區中開挖面之穩定。然由於地盤改良所需費用高，地盤改良之必要性除於設計條件及工程安全之考量外，亦需就工程之經濟性作整理評估。地盤改良若無法於管幕構築前以垂直灌漿方式完成，則必須以水平地改方式於管幕構築後完成。若因隧道長度過長，限於水平地改之長度與精度無法一次完成，可於每階段開挖面前方進行水平地改以逐步漸進方式完成。

3.4 分析之參數選擇

於管幕工程分析時土層設計參數之評估，係以地質鑽探所取土樣進行試驗室試驗所得之試驗結果為主，並輔以經驗公式及配合分析使用之數值模擬程式作為選用之依據。試驗室數量多組時，則依統計方式進行歸納後決定之，並於統計前先行判斷分組，刪除異常值，避免影響評估結果，若遇地層較厚而其土層性質深淺有別時，則將該層次再予以分層，以反映不同之土壤強度性質；另亦參酌經驗公式及於類似地層中回饋分析之結果，進行綜整且合理修正而得。

3.5 施工步驟與分析

軟弱粘土中之管幕工程主要施工步驟依序為：(1)工作井施工開挖及垂直鏡面地盤改良，(2)管幕構築(推管)，(3)水平管幕內地盤改良，(4)隧道開挖及臨時支撐架設，(5)支撐拆除及結構體構築至隧道完成。與管幕工程設計分析直接相關之步驟中較為重要者包括：管幕構築(推管)、隧道開挖及臨時支撐架設、及支撐拆除及結構體構築。各施工步驟中之土體變形，及各構件之應力與應變皆隨時間變化，故於軟弱粘土中之管幕工程，施工時程之掌握與施工品質之良窳，將影響土體及構件之變形甚鉅。

一般而言，管幕構築(推管)時之土體變形，於軟弱粘土中較易直接反映於地表沉陷上。除增加推管精度、減少土壤擾動，及於施工時以背填灌漿與二次灌漿方式減少地表沉陷外，設計分析時可以 Peck(1969)所提出之沉陷槽計算方式，並配合 Clough and Schmidt (1981)使用之修正方式及線性疊加，以預估地表沉陷情形。若產生之地表沉陷過大，於管幕上方覆土厚度較小狀況下，可以管幕內二次灌漿方式補償部分因土壤漏失造成之地表沉陷。

隧道開挖及臨時支撐架設時所產生之土體變形，及所引致之地表沉陷相較於其他施工步驟為大。且易因施工管理及技術不良造成危險。影響土體變形及構件應力變化主要因素包括架設支撐時機、開挖時無支撐長度、支撐間距、管幕之水密性及管幕內水平地盤改良品質及強度等。於分析時可使用套裝軟體程式(如 FLAC 等)模擬連續性之開挖架撐步驟，進行土壤結構互制分析，並得到土壤與各構件之應力與應變情形，並參考所得結果進行隧道開挖之臨時支撐系統檢核與設計。若於此步驟分析結果產生之地表沉陷過大，於管幕上方覆土厚度較小狀況下，亦可於開挖面前方以管幕內二次灌漿方式減少地表沉陷，但應特別注意灌漿壓力對於開挖面穩定及支撐應力之影響。於此項分析時應考慮粘土之應力應變關係可能隨時間變化之特性，於設計分析與施工管制上取得最佳化之結果。

支撐拆除及結構體構築至結構體完成之分析設計，亦可使用套裝軟體程式進行模擬評估。一般而言，此階段所引致之地層變形及地表沉陷較低，若需於此階段內進一步降低地表沉陷，可考量調整結構體構築順序(如分階段構築施工)，以降低拆撐時，管幕內之無支撐間距。此外，施工期間管幕之止水工作、結構體分段構築之止水縫及地下結構之防水設計與施工處理，亦需詳細配合考量評估。

3.6 其他設計考量

除上述設計考量外，管幕工程設計中必須將監測系統規劃、工期等課題加以考慮評估。管幕工程分析設計中包含許多不確定因素，因此必須依賴現場觀測資料來做監控及必要的調整以確保施工安全。另對於土體變形及沉陷要求較為嚴苛的工程，為求進一步的優化設計及工程經濟性考量，可藉由回饋分析進行設計修正。而回饋分析之基礎須建立於施工監測結果上，故監測系統規劃亦是管幕工程設計時不可或缺之環節。一般而言，管幕工程之監測規劃應包含兩部份：(1)一般性施工監測：包含地下水位、水壓觀測，地層變形與地表沉陷觀測，及鄰近結構物安全監測等。(2)管幕內施工監測：包含管幕沉陷觀測與應力量測、臨時支撐軸力量測、及隧道收斂觀測等。而監測頻率應根據施工進度及資料重要性進行調整，以提供足夠與充分之資料，藉以研判施工之安全性，並作為設計回饋分析之用。

根據以往施工經驗，管幕工程中以推管作業為整個工程之要徑，如何有效縮短推管之工期亦為設計要點之一。而考量推管作業所需之空間與精度要求，過度增加作業推管機組，將無法有效縮短工時且導致成本之不經濟，故設計時需評估使用合理之推管機組數目，輔以施工作業流程安排與管制(如工作井之開挖支撐配置或灌漿作業配合推管施作)，以達到縮短工期之目的。

四、施工監測與回饋分析

本節將以台北市復興北路穿越松山機場車行地下道工程中管幕隧道段之監測結果進行回饋分析，以驗證本設計分析模式與評估結果。

4.1 復興北路穿越松山機場地下道工程概述

復興北路穿越松山機場地下道工程，南由復興北路與民權東路路口，往北穿越松山機場下方，在機場北側之濱江街口前出地面而與大直橋引道銜接，為全長 592m 之雙孔車行地下道，結構斷面寬度為 22.2m，高度為 7.8m。本工程地下道施工之平面圖與剖面圖，如圖三所示，其中以管幕工法施工之部份包括工作井 C 至 D 間之傳統支撐開挖隧道，與工作井 E 至 D 間位於跑道下方之無限自走工法(ESA)開挖隧道。本分析將就工作井 C 至 D 間管幕工法之傳統支撐開挖隧道段進行，其配置之管幕由 83 支長度為 77m、外徑 812.8mm、壁厚 12.7mm 之鋼管所組成，管幕上方之平均覆土深度約 5.8m，地表以機場草坪為主，隧道分為上、下斷面方式開挖，先進行上半斷面開挖，待上半斷面貫通後，再進行下半斷面開挖以完成整個隧道斷面，每一開挖輪進為 4m，開挖面設計坡度需維持 60°，配合架設 H 型鋼支撐，有關本工程之管幕配置與隧道開挖支撐施工，如圖四所示。

4.2 回饋分析模式

限於篇幅，本分析僅包括於隧道開挖與支撐架設時所產生之管幕變形，並使用二維套裝軟體程式 FLAC 4.0 版(Itasca, 2000)，利用外顯有限差分法(explicit finite difference method)法求解。假設土壤為均質、等向條件下，土壤強度採用 Mohr-Coulomb 破壞準則，應力應變關係為線彈性完全塑性模式，模擬管幕內進行隧道開挖支撐作業時，所引致之管幕沉陷。以 FLAC 程式建立之分析網格與模擬隧道支撐開挖方式，如圖五、圖六所示，其中開挖共區分為 37 個階段(上半斷面開挖為 18 階；下半斷面開挖為 19 階)，臨時支撐以結構元素 beam 模擬之。

4.3 分析參數

分析之土壤參數選用係根據 3.4 節之原則，茲就台北市復興北路穿越松山機場車行地下道工程回饋分析時所使用之原狀土層參數列於表一中。

除表一列原狀土層之參數外，為確實模擬實際狀況，凡地盤改良區之土壤強度(如推管鏡面地盤改良區域、管幕內水平地盤改良區域等)及管幕鋼管之勁度參數(EI , E 為楊式模數, I 為慣性矩), 亦參照原設計及試驗室試驗結果歸納整理所得使用於本分析中。

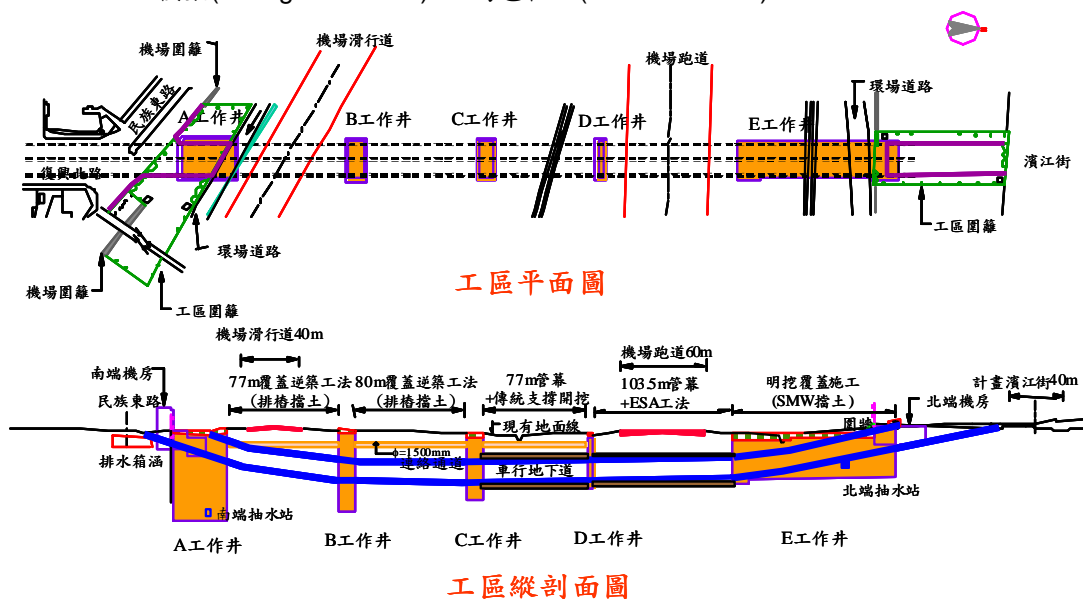
4.4 監測結果與回饋分析之比較

本工程區段(工作井 C 至 D 間)之施工監測項目包括：地面沉陷觀測點、管幕應變計、管幕連通管式沉陷計與隧道內空收斂觀測點等，其中管幕連通管式沉陷計之配置情形，如圖七所示，圖八則為隧道開挖時上層管幕沉陷監測結果與回饋分析之比較。由圖八之比較結果顯示數值分析可將施工時土壤與管幕結構之變形行為適當的加以模擬外，對於變形量之預估亦能達到令人滿意的結果。配合本分析所完成之參數研究(Parametric Study)雖已參考變形量之現場監測結果，然由於分析結果於施工進行中及推管完成後之模擬，均能與現場監測結果吻合，本數值分析方式對於工程中實際土壤與結構體互制機制、土壤和管幕結構之變形行為及參數之選用應具有代表性。

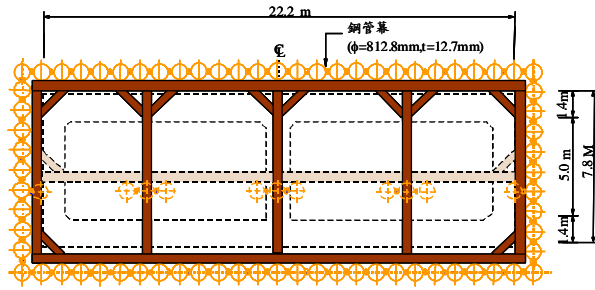
表一 回饋分析用之原狀土壤參數

層底深度 (m)	土層分類	γ_t (kN/m ³)	ϕ' (degree)	s_u (kPa)	K_0	E (MPa)	ν
4.4	CL	18.5	30	26	0.50	10.4	0.49
7.0	SM	19.2	32	-	0.47	7.0	0.30
16.2	CL	18.6	29	28	0.52	11.2	0.49
25.0	CL	18.6	29	38	0.52	15.2	0.49
35.0	CL	19.0	30	60	0.50	24.0	0.49
45.0	CL	19.0	31	80	0.48	32.0	0.49
56.0	CL	20.0	32	128	0.47	51.2	0.49

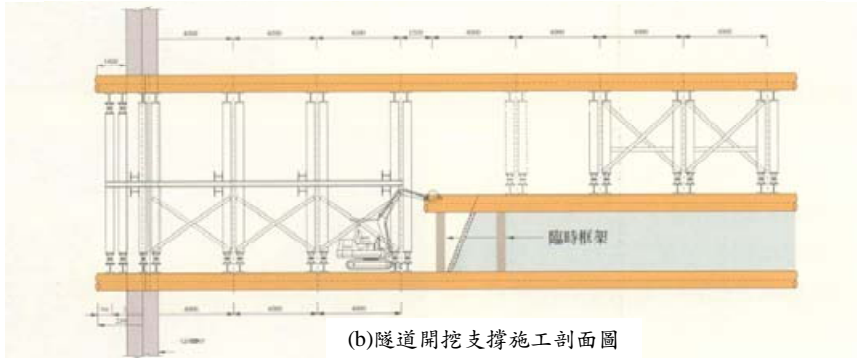
說明： ϕ' 為土壤有效摩擦角， s_u 為土壤不排水剪力強度， K_0 為靜止土壓力係數， E 為彈性模數(Young's modulus)， ν 為包松比(Poisson's ratio)。



圖三 復興北路穿越松山機場地下道工程斷面圖

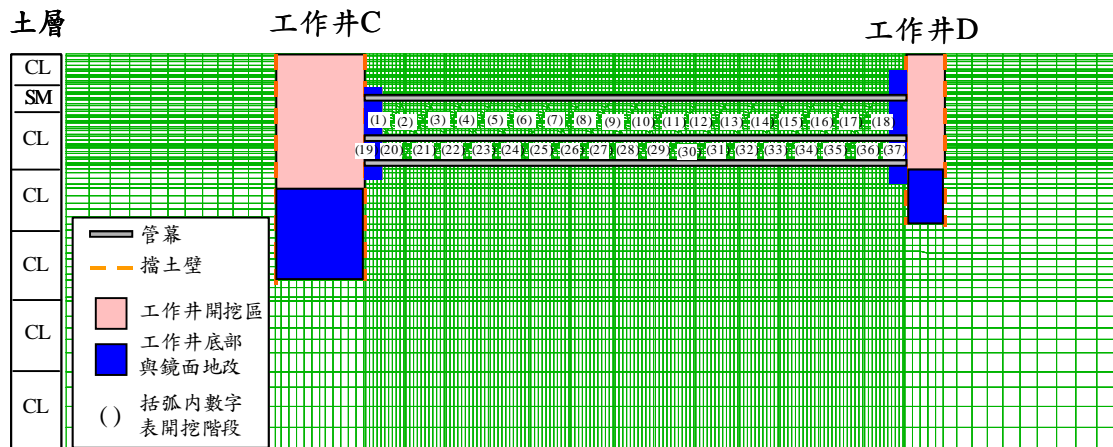


(a) 管幕與支撐配置斷面圖

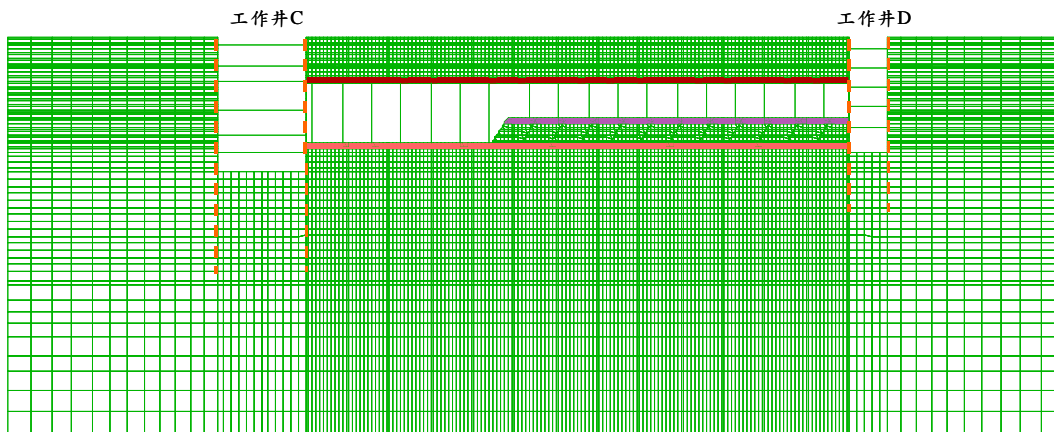


(b) 隧道開挖支撐施工剖面圖

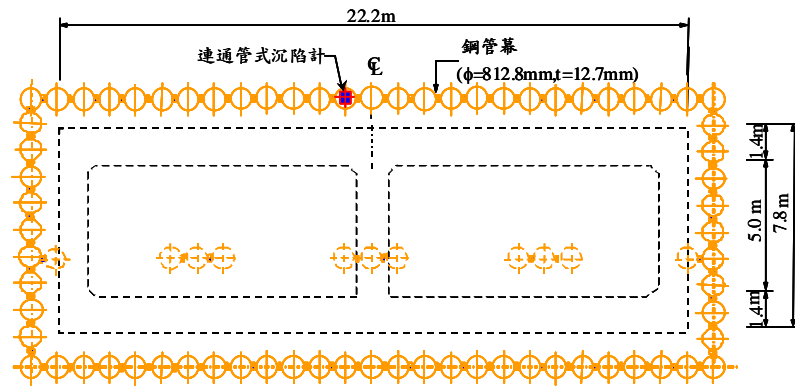
圖四 工作井 C 至 D 間之管幕配置與隧道開挖支撐施工示意圖



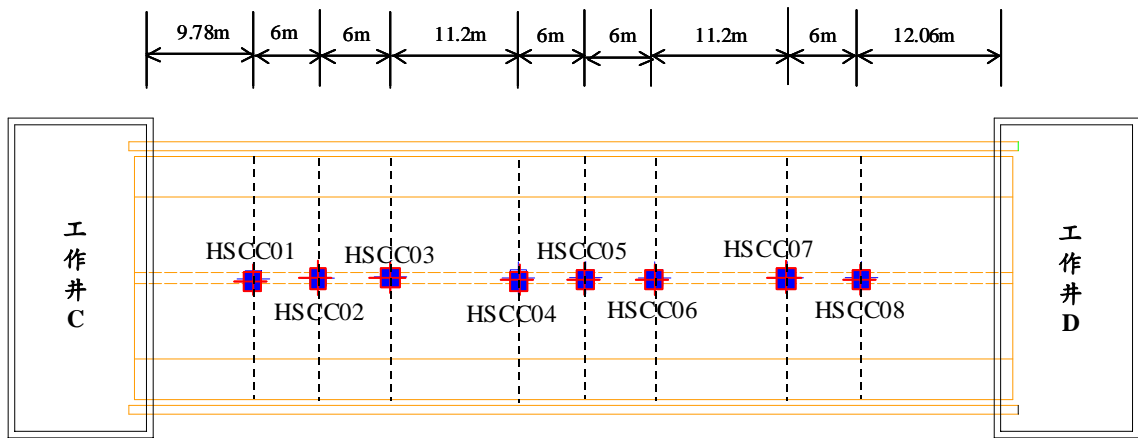
圖五 FLAC 之分析網格



圖六 FLAC 模擬管幕隧道支撐開挖過程

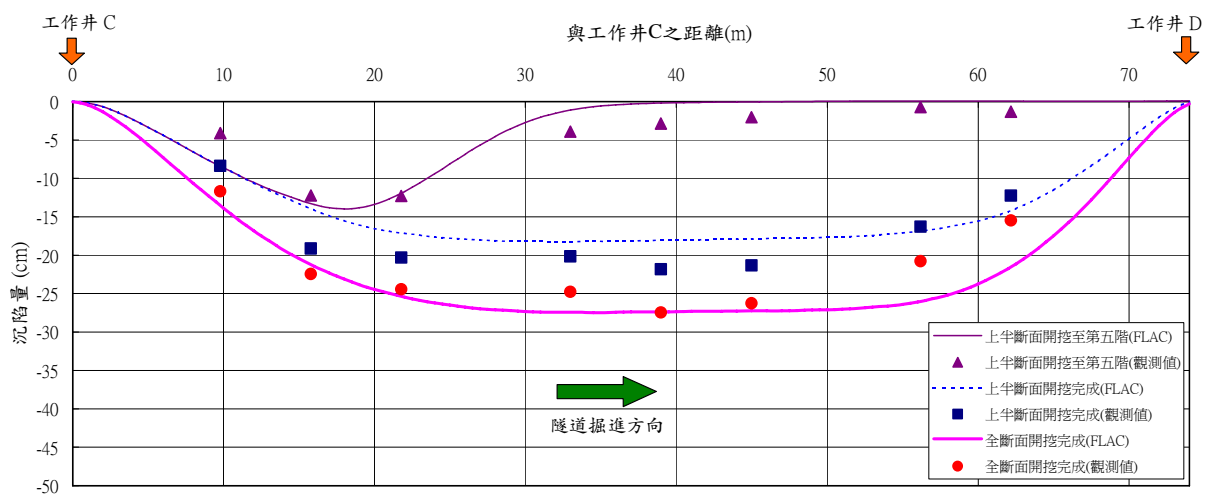


(a) 斷面圖



(b) 平面圖

圖七 工作井 C 至 D 間管幕連通管式沉陷計配置位置圖



圖八 管幕沉陷監測結果與回饋分析之比較

五、結語

於軟弱粘土中以管幕工法進行隧道工程，除需瞭解粘土與管幕結構互制以進行土壤變形分析，及開挖施工與支撐設計外，施工時之監測與回饋分析，及根據回饋分析結果修正設計與施工程序亦為不可或缺之要件。成功之管幕工程需設計、施工與監造單位相互配合方可達成。

本篇文章因篇幅限制，僅對於管幕工程於軟弱粘土中之設計與分析作概念性之介紹，有關工程回饋分析中所使用之參數研究、分析方式，與分析結果檢討將另於專文中討論。

六、誌謝

本文撰寫期間承蒙亞新公司莫若楫博士、宋騰烽副總經理、王劍虹經理提供卓見與不吝指正，復北營建專案之吳定恩組長、吳清南工程師提供寶貴之施工資料與經驗分享，另對業主台北市工務局新建工程處惠准發表，在此謹誌謝忱。

參考文獻

1. 郭奇正、劉弘祥(1998)「先撐管幕工法應用於台灣隧道工程案例探討」，*土工技術雜誌*，第66期，第25-36頁。
2. 熊谷鎰(1997)「台北市復興北路穿越松山機場地下道之規劃與設計」，*海峽兩岸城市規劃與建設學術會議論文集*，福州大學。
3. Clough, G.W. and Schmidt, B. (1981), "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay", *Soft Clay Engineering*, Elsevier, Amsterdam.
4. Itasca. (2000) *FLAC Version 4.0, User's Manual*. Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA.
5. Moh, Z. C., Hsiung, K. I., Huang, P. C., and Hwang, R. N. (1999), "Underpass beneath Taipei International Airport", *Proc. Conference on New Frontiers and Challenges*, Bangkok.
6. Peck, R.B. (1969), "Deep excavation and tunneling in soft ground." State of the Art Report, in *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, pp.225-290.