

國立交通大學  
土木工程學系  
碩士論文



礫石土層水平雙環塞灌漿地盤改良  
之案例研究

**Case study of Horizontal Double Packer  
Grouting in Gravelly Soils**

研究生：黃昱鉸  
指導教授：方永壽 博士

中華民國一〇一年九月

礫石土層水平雙環塞灌漿地盤改良  
之案例研究

**Case study of Horizontal Double Packer  
Grouting in Gravelly Soils**

研究生：黃昱鉸      Student：Yu-An Huang  
指導教授：方永壽 博士      Advisor：Dr. Yung-Show Fang

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to 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 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年九月

# 礫石土層水平雙環塞灌漿地盤改良之案例研究

研究生：黃昱鉸 指導教授：方永壽 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘要

本論文主題為高鐵桃園站與機場捷運系統 A18 車站間地下聯絡通道之地盤改良案例研究。本案例所使用之地盤改良工法為水平式雙環塞低壓灌漿工法，於回填礫石土中施灌水泥皂土漿(CB 漿)及超微粒水泥漿液(UFC 漿液)。除討論注入施工方法外，本研究根據施工單位所提供之監測資料，觀察施工造成之地盤變位。地盤改良工程結束後，研究團隊於隧道開挖期間，以相機記錄各個開挖斷面上的漿脈分佈狀況。依據所拍得的斷面照片，以小區域(單一注入孔周圍)、大區域(兩個或多個注入孔)，對 CB 漿脈及超微粒水泥漿脈的形狀進行探討，並歸納出水平式雙環塞灌漿在夯實礫石土中之改良機制，獲得以下各項結論。

- 1、開挖斷面上的漿脈呈現水平狀居多。其中 CB 漿液在土層中的流動區域較超微粒水泥漿廣。因 CB 漿在施灌時，礫石土層中的孔隙內只有水及空氣的存在，因此灌漿時 CB 漿便會在土層中朝四面流動填補孔隙。
- 2、當超微粒水泥灌入地層時，由於土壤中的孔隙已被 CB 漿所填滿，因此 UFC 灌漿壓力必須較灌注 CB 漿液注入壓力為高，才可以順利將超微粒水泥漿灌入地層中。因此，超微粒水泥除了填補地層中更小的孔隙外，也會在 CB 漿及土壤中形成水力劈裂。UFC 漿脈在斷面上的厚度明顯較 CB 漿脈的厚度為薄。
- 3、漿液自灌漿孔灌出後，在來自左右兩邊的壓力  $\sigma_h$  的作用下，漿液向上劈裂，在受到上一排灌漿形成上側堅實改良土的邊界束制時，漿液轉向水平方向發展，形成蕈狀型漿脈。若開挖面與注入孔位置錯開，在開挖斷面上看不到漿

脈與灌漿孔間的連結，形成一無梗葦狀型漿脈。

- 4、地盤內之垂直應力為  $\sigma_v$ ，填土之夯實造成地盤內水平土壓力增加，假設水平灌漿孔周圍水平向土壓力增大並大於垂直向壓力，當灌漿壓力  $p$  大於垂直向壓力  $\sigma_v$  時，依水力破裂理論，注入漿液向灌漿孔兩側水平劈裂。

關鍵字：地盤改良、礫石土、水平式、雙環塞灌漿、CB 漿、超微粒水泥漿、水力破裂



## Case study of Horizontal Double Packer Grouting in Gravelly Soils

Student : Yu-An Huang      Advisor : Dr. Yung-Show Fang

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

### ABSTRACT

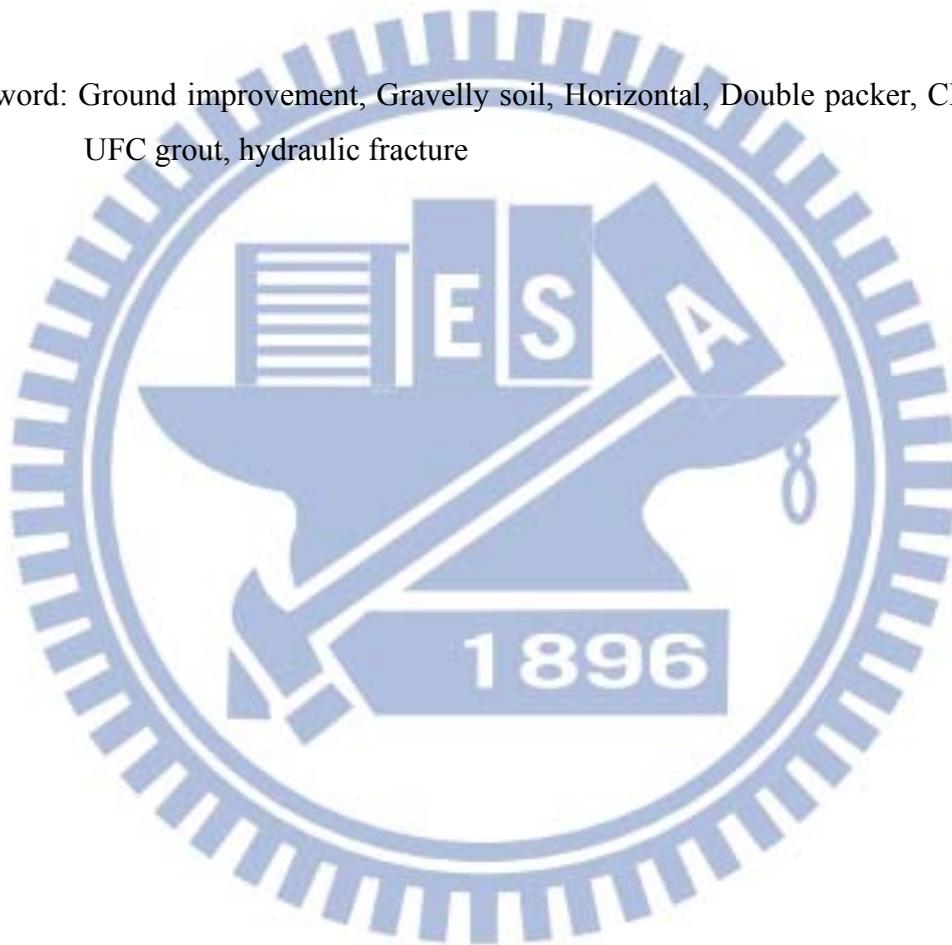
This thesis is a case study of the ground improvement for the tunneling of a cross-passage between the (HSR) Taoyuan station and the A18 station of the Airport mass rapid transit MRT system. The horizontal double-packer grouting method was conducted in the compacted gravelly fill. The injected grout included cement-bentonite (CB) grout and ultra-fine cement (UFC) grout. Based on the field monitored data, grout movements due to grouting and tunnel excavation were investigated. During the tunnel excavation, the grout permeation and fracture in the ground at specific sections, near different grouting holes, were observed and recorded. Based on the pictures taken, the flow of CB grout and UFC grout near a grout hole, between two holes, and among several holes were carefully studied. Based on thesis data, several typical model of grout flow and its mechanism were established, and the following conclusions were made.

- 1、 During the injection of CB grout, the void occupied by air and water in the compacted gravelly soil was replaced by the compressed CB grout. The CB grout was used to fill the voids in the ground near the injection pipe.
- 2、 After the CB grout injection, the voids in the ground were filled with CB grout. The grouting pressure for UFC grouting was higher than that for CB grouting. The UFC grout was used to fill the ultra-fine voids, the hydraulic fracture of the UFC grout in the grout can be observed.
- 3、 After the grout was pushed out of the injection hole, the smaller horizontal stress  $\sigma_h$  (assuming  $\sigma_h < \sigma_v$ ) acts in the horizontal direction, and a vertical fracture could

develops near the injection hole. Under the boundary restraint of its grouted stiff layer, the grout seeps in horizontal direction, and a mushroom-shaped grout pattern was formed.

- 4 · Assuming the horizontal stress  $\sigma_h$  in the compacted gravelly soil, was greater than the vertical stresses  $\sigma_v$ , if the grouting pressure  $p$  was greater than  $\sigma_h$ , the injected grout would cause hydraulic fracture in the horizontal direction.

Keyword: Ground improvement, Gravelly soil, Horizontal, Double packer, CB grout, UFC grout, hydraulic fracture



## 誌謝

感謝指導教授 方永壽博士在學生研究過程中，給予悉心的指導與教誨，學習如何以有效的研究方法找出問題之答案，並在研究進行時出面與施工單位進行協調，使學生能夠更順利的進行研究；同時亦感謝潘以文博士、廖志中博士、黃安斌博士、單信瑜博士以及林志平博士，在學期間之知識傳授與指導。

口試期間，承蒙張惠文博士及馮道偉博士的細心指導及寶貴建議，特此深表謝忱。感謝交通部高鐵局捷工處張文城處長及中壢工務所郭林堯主任的支持，中鼎工程股份有限公司黃銘裕主任及劉志義組長、泛亞工程股份有限公司賴建良組長、曾維英領班、任開善領班於進出工地時全力配合。另外，需特別感謝泛亞工程股份有限公司方梅生技師，於施工進行期間對於工程上的講解及教導，及施工資料的取得使得本論文更加完整。駿馳股份有限公司劉益宏經理及工地主任邱銘仁、灌漿師傅蔡奇恩及灌漿團隊於灌漿工程上的指導，北勝企業羅順煌主任在隧道開挖期間拍攝斷面相片的協助，特此致謝。研究期間，大地組同學及本門同學劉政，學弟易昌、湘銘、承佑之協助，使本論文得以順利完成，在此一併致謝。

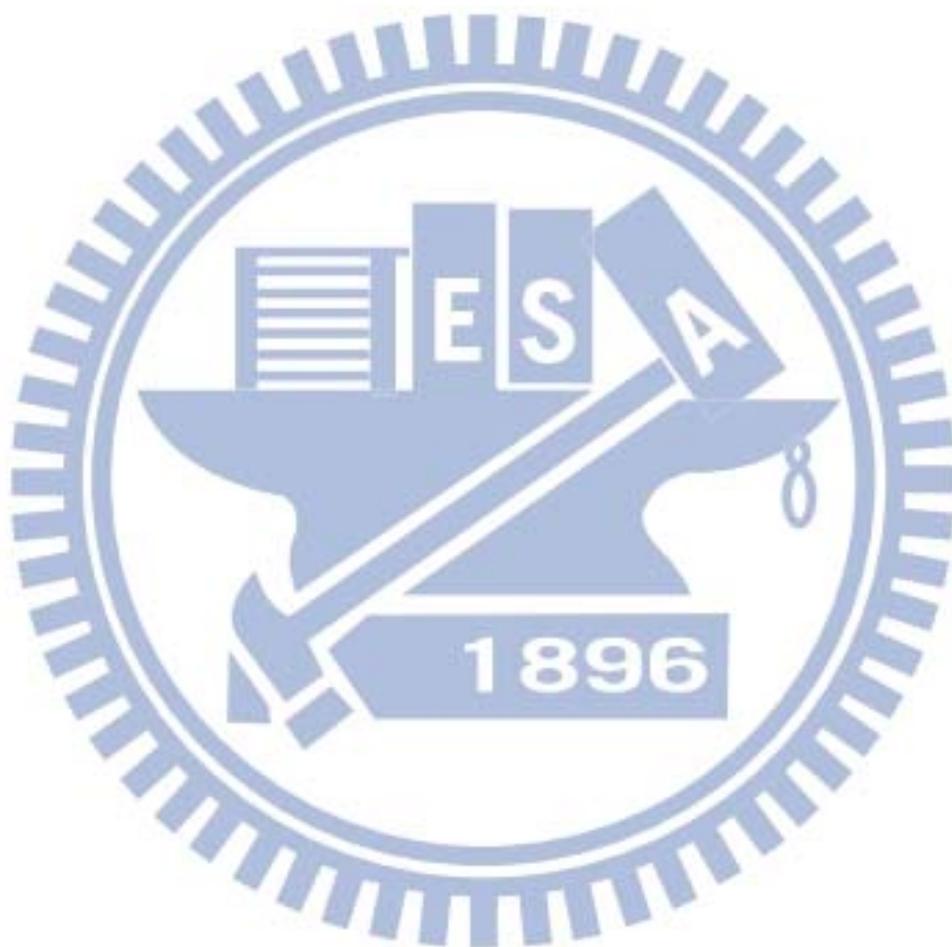
最後，感謝父母及家人在精神上的支持，以及交大棒球隊教練黃杉楹老師這幾年對我不只是球技上的指導，面對困難時亦予我建議及分析，日常生活中教導我做人最基本的道理，在我的交大生涯扮演良師兼益友的角色，使我了解比讀書更重要的處事態度，也感謝我的隊友及經理，學長邱子長、邵俊賓、江政達、杜堃、范銘隆、陳昱丞、黃顯堂、林士涵、李蔚庭、郭上懷、殷立煒及其他學長們，同學林育聖、張為淳、李世豪、謝旻翰、丁志宏、曾鈞麟、邱怡婷、邱靜好、學弟妹黃柏峯、宋俊緯、邱若綾、林淳縈、陳宣佑、吳晟煒、徐子揚、邱澤淮、姜閱翔及其他學弟妹們。除了少部分隊友，你們對於我的功課除了揶揄外並沒有任何實質上的幫助，功課上遇到困難時，找你們解決根本就是異想天開，但因我們同在一個團體，使我能盡速完成手邊的功課來球場和你們打球，和你們見面聊天便能使我因功課而疲乏的心情有了抒發的管道。我在交通大學已過了七年，在即將要離開學校的時刻，我想念與你們在球場上奮鬥的情景，贏球時的喜悅與輸球時的淚水，獨樹一格的講話模式、處事態度及打球方式。我在交大的回憶是你們寫的。離開學校後，我將永遠想念這兩千五百多個日子裡的點點滴滴，謝謝你們。

# 目錄

摘要.....	i
誌謝.....	v
表目錄.....	ii
圖目錄.....	x
符號說明.....	xv
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	1
1.3 研究方法.....	2
1.4 論文內容.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 地盤改良介紹.....	3
2.2 灌漿工法.....	3
2.2.1 灌漿機制.....	3
2.2.2 灌漿壓力.....	4
2.2.3 灌漿順序.....	4
2.2.4 漿液混合方式.....	5
2.2.5 灌漿材料.....	6
2.3 雙環塞灌漿工法.....	6
2.3.1 工法發展.....	6
2.3.2 施工步驟.....	7
2.3.3 施工管理重點.....	7
2.3.4 實驗室試驗.....	10
2.3.5 案例介紹.....	10
2.4 T-P-Q 曲線圖.....	11
2.5 水力破裂法.....	12
第三章 機場捷運 A18 車站與高鐵桃園站間聯絡通道施工.....	14

3.1 機場捷運 A18 車站 .....	14
3.2 高鐵桃園站 .....	15
3.3 聯絡通道 .....	16
3.3.1 地層概述 .....	16
3.3.2 施工簡介 .....	17
3.3.3 監測 .....	18
第四章 聯絡通道雙環塞灌漿施工與地盤改良成果 .....	20
4.1 施工機具及灌漿材料 .....	20
4.2 施工方法及灌漿管理 .....	20
4.2.1 注入率 .....	22
4.2.2 封堵材灌注 .....	22
4.2.3 CB 漿填充土壤空隙 .....	22
4.2.4 超微粒水泥漿土壤加勁 .....	23
4.3 施工遭遇之困難 .....	23
4.4 試水作業 .....	24
4.5 鑽孔取樣 .....	24
4.6 灌漿造成之地盤變位 .....	24
第五章 聯絡通道開挖 .....	26
5.1 施工機具及人員配置 .....	26
5.2 施工方法 .....	26
5.3 開挖造成之地盤變位 .....	27
5.4 開挖斷面之漿液流動觀察 .....	27
5.4.1 斷面 1 至斷面 12 之漿脈分布 .....	27
5.4.2 斷面 14 之漿脈分布 .....	28
5.4.3 斷面 16 之漿脈分布 .....	29
5.4.4 斷面 18 之漿脈分布 .....	30
5.5 地盤改良機制探討 .....	30
5.5.1 A 型(四周填充型)漿液流動 .....	32
5.5.2 B 型(蕈狀型)漿液流動 .....	32
5.5.3 C 型(水平劈裂型)漿液流動 .....	32

第六章 結論及建議.....	33
6.1 結論.....	33
6.2 建議.....	34
參考文獻.....	35
表.....	38
圖.....	43



## 表目錄

表 4.1 灌漿工程機具設備一覽表.....	38
表 4.2 CB 漿配比表 .....	38
表 4.3 超微粒水泥漿配比表.....	39
表 4.4 灌漿壓力管理表.....	39
表 4.5 注入率.....	40
表 5.1 隧道開挖工程施工機具一覽表.....	41
表 5.2 隧道開挖工程施工人員配置.....	42



## 圖目錄

圖 1.1 由機場捷運 A18 車站聯絡通道前往高鐵桃園站 B1 穿堂層之動線圖	43
圖 2.1 各種灌漿機制	44
圖 2.2 上昇式施灌法	44
圖 2.3 下降式施灌法	45
圖 2.4 垂直方向跳階式施灌法	45
圖 2.5 漿液混合方式示意圖	46
圖 2.6 懸濁型漿液滲透路徑阻塞示意圖	46
圖 2.7 雙環塞灌漿工法施工步驟	47
圖 2.8 雙環塞灌漿管	48
圖 2.9 荷蘭 Delft 大學灌漿實驗設備裝置圖	49
圖 2.10 漿液在砂土中的劈裂行為	49
圖 2.11 臺北市某重要道路地下道工程地盤改良之俯視圖	50
圖 2.12 臺北市地下道工程推進坑灌漿孔位圖	51
圖 2.13 臺北市地下道工程到達坑灌漿孔位圖	52
圖 2.14 開挖後距推進坑 2 m 處之漿液分佈和孔位關係圖	53
圖 2.15 開挖後距推進坑 23 m 處之漿液分佈和孔位關係圖	53
圖 2.16 開挖後距推進坑 44 m 處之漿液分佈和孔位關係圖	54
圖 2.17 A 型 T-P-Q 曲線圖	54
圖 2.18 B 型 T-P-Q 曲線圖	55
圖 2.19 C 型 T-P-Q 曲線圖	55
圖 2.20 D 型 T-P-Q 曲線圖	56
圖 2.21 E 型 T-P-Q 曲線圖	56
圖 2.22 水力破裂	57
圖 2.23 Location fo critical points around the borehole used for hydraulic fracture	58
圖 3.1 由機場捷運 A18 車站聯絡通道前往高鐵桃園站穿堂層之動線側視圖	59
圖 3.2 臺灣高鐵路線圖與桃園國際機場聯外捷運路線圖	59
圖 3.3 機場捷運 A18 車站	60
圖 3.4 高鐵桃園站	60

圖 3.5 鑽孔位置圖.....	61
圖 3.6 A1 鑽孔試驗土壤類別與深度關係圖.....	61
圖 3.7 A2 鑽孔試驗土壤類別與深度關係圖.....	62
圖 3.8 A1 鑽孔土壤取樣岩心相片.....	62
圖 3.9 A2 鑽孔土壤取樣岩心相片.....	63
圖 3.10 地盤改良區地層剖面側視圖.....	63
圖 3.11 篩分析試驗結果.....	64
圖 3.12 明挖覆蓋施工及隧道開挖施工工區俯視圖.....	64
圖 3.13 地下廣場開挖區與高鐵桃園站間施作微型樁.....	65
圖 3.14 微型樁後近車站前緣所設置支預壘樁.....	65
圖 3.15 地下廣場開挖區周邊之 H 型鋼樁擋土措施.....	66
圖 3.16 開挖地下廣場時所架設的兩層水平鋼梁支撐.....	66
圖 3.17 地盤改良之雙環塞灌漿孔位圖.....	67
圖 3.18 高鐵站風柱安裝監測垂直位移量的稜鏡.....	68
圖 3.19 高鐵站外用於監測風柱稜鏡位移量的全測站儀器.....	68
圖 3.20 高鐵站玻璃帷幕安裝監測垂直位移量的稜鏡.....	69
圖 3.21 高鐵站內監測玻璃帷幕稜鏡位移量的全測站.....	69
圖 3.22 人工式傾斜儀.....	70
圖 3.23 電子式傾斜儀.....	70
圖 3.24 高鐵桃園站一樓大廳及站外風上所配置的監測儀器分布圖.....	71
圖 3.25 施工單位於隧道內量測隧道之收斂.....	72
圖 4.1 水平雙環塞灌漿施工機具佈置圖.....	73
圖 4.2 儲水桶.....	73
圖 4.3 漿液快速攪拌機.....	74
圖 4.4 漿液慢速攪拌機.....	75
圖 4.5 灌漿泵浦.....	75
圖 4.6 流量壓力記錄器.....	76
圖 4.7 流量壓力記錄器.....	76
圖 4.8 灌漿分流計.....	77
圖 4.9 水平雙環塞灌漿施工步驟.....	78

圖 4.10 鑽機進行水平鑽孔作業.....	79
圖 4.11 鋼套管.....	79
圖 4.12 鑽桿前端.....	80
圖 4.13 灌漿外管(TAM).....	80
圖 4.14 灌漿內管(雙環塞管).....	81
圖 4.15 灌漿內管及塑膠套被拔除的灌漿外管.....	81
圖 4.16 灌漿孔位分布圖.....	82
圖 4.17 試水作業之鑽取孔位前視圖.....	83
圖 4.18 試水作業流程圖.....	84
圖 4.19 試水孔鑽孔作業.....	85
圖 4.20 鑽孔取樣孔位分布圖.....	86
圖 4.21 施工人員正在進行鑽孔取樣作業.....	87
圖 4.22 施工人員正在將試體取出.....	87
圖 4.23 BH1 鑽孔改良土取樣岩心相片.....	88
圖 4.24 BH2 鑽孔改良土取樣岩心相片.....	88
圖 4.25 BH3 鑽孔改良土取樣岩心相片.....	89
圖 4.26 BH4 鑽孔改良土取樣岩心相片.....	89
圖 4.27 車站內玻璃帷幕稜鏡沉陷觀測稜鏡歷時曲線圖.....	90
圖 4.28 人工傾斜儀之測量方向.....	91
圖 4.29 車站內結構柱人工傾斜儀歷時曲線圖.....	92
圖 5.1 隧道開挖區及地盤改良區前視俯視圖.....	93
圖 5.2 怪手破除預壘樁準備開挖聯絡通道開挖.....	94
圖 5.3 怪手破除預壘樁後的微型樁準備開挖聯絡通道.....	94
圖 5.4 怪手開挖隧道壁面.....	95
圖 5.5 怪手吊放鋼梁準備組立隧道斷面鋼支堡.....	95
圖 5.6 開挖區頂部施作噴凝土.....	96
圖 5.7 第2開挖斷面.....	96
圖 5.8 第3開挖斷面.....	97
圖 5.9 第10開挖斷面.....	97
圖 5.10 第10開挖斷面左半部.....	98

圖 5.11 第 10 開挖斷面右半部.....	99
圖 5.12 第 10 開挖斷面左下方施作噴凝土作業.....	100
圖 5.13 CB 漿脈在第 11 斷面上的分佈情形.....	101
圖 5.14 第 12 開挖斷面右側部 CB 分漿脈呈水平狀分布.....	102
圖 5.15 第 14 開挖斷面.....	103
圖 5.16 第 14 開挖斷面 12 號孔周圍漿液分布情形.....	104
圖 5.17 第 14 開挖斷面 13 號孔周圍漿液分布情形.....	105
圖 5.18 第 14 開挖斷面 11、12 號孔周圍漿液分布情形.....	105
圖 5.19 第 14 開挖斷面 12、13 號孔周圍漿液分布情形.....	106
圖 5.20 第 14 開挖斷面 4 號孔周圍漿液分布情形.....	106
圖 5.21 第 14 開挖斷面 5 號孔周圍漿液分布情形.....	107
圖 5.22 第 14 開挖斷面 6 號孔周圍漿液分布情形.....	108
圖 5.23 第 14 開挖斷面 22 號孔周圍漿液分布情形.....	108
圖 5.24 第 16 開挖斷面 11 號孔周圍漿液分佈情形.....	109
圖 5.25 第 16 開挖斷面.....	110
圖 5.26 第 16 開挖斷面 12 號孔周圍漿液分布情形.....	111
圖 5.27 第 16 開挖斷面 13 號孔周圍漿液分布情形.....	112
圖 5.28 第 16 開挖斷面 11、12 號孔附近漿液分布情形.....	112
圖 5.29 第 16 開挖斷面 12、13 號孔附近漿液分布.....	113
圖 5.30 第 16 開挖斷面 6 號孔周圍漿液分布情形.....	113
圖 5.31 第 16 開挖斷面 5 號孔周圍漿液分布情形.....	114
圖 5.32 第 16 開挖斷面 5、6 號孔附近漿液分布情形.....	114
圖 5.33 第 16 開挖斷面 4 號孔周圍漿液分布情形.....	115
圖 5.34 第 16 開挖斷面漿液通過 4 號孔後的匯集情形.....	115
圖 5.35 第 16 開挖斷面 3 號孔上方之漿液分布情形.....	116
圖 5.36 第 16 開挖斷面 2 號孔下方知漿液分布情形.....	117
圖 5.37 第 18 開挖斷面.....	118
圖 5.38 第 18 開挖斷面 6 號孔周圍漿液分布情形.....	119
圖 5.39 第 18 開挖斷面 5、6 號孔附近之漿液分布情形.....	120
圖 5.40 第 18 開挖斷面 5 號孔周圍漿液分布情形.....	120

圖 5.41 第 18 開挖斷面 4 號孔周圍漿液分布情形.....	121
圖 5.42 第 18 開挖斷面 4 號孔右邊漿液和 5 號孔間的連結.....	122
圖 5.43 第 18 開挖斷面 4 號孔左邊部分之漿脈匯流情形.....	122
圖 5.44 第 18 開挖斷面 3 號孔上方之漿脈劈裂情形.....	123
圖 5.45 CB - A 型 CB 漿脈四周擴散型.....	124
圖 5.46 第 14 開挖斷面 13 號孔.....	124
圖 5.47 CB - B 型 CB 漿脈向上滲流水平擴散(斷面與注入孔重合).....	125
圖 5.48 第 16 開挖斷面 19 號孔.....	125
圖 5.49 CB - B 型 CB 漿脈水平擴散(斷面與注入孔錯開).....	126
圖 5.50 第 16 開挖斷面 11 號孔.....	126
圖 5.51 CB - B 型(水平雙孔漿脈連結).....	127
圖 5.52 第 14 開挖斷面 11、12 號孔.....	127
圖 5.53 CB - B 型(雙孔 CB 漿脈交錯).....	128
圖 5.54 第 16 開挖斷面 18、24 號孔.....	128
圖 5.55 UFC - B 型(UFC 漿脈向上及水平水力破裂).....	129
圖 5.56 第 16 開挖斷面 5 號孔.....	129
圖 5.57 UFC - B 型(水平方向破裂)開挖面與注入孔錯開.....	130
圖 5.58 第 18 開挖斷面 5 號孔.....	130
圖 5.59 UFC - B 型 UFC 漿脈水平方向水力破裂(水平三孔漿脈連結).....	131
圖 5.60 第 14 開挖斷面 4、5、6 號孔.....	132
圖 5.61 UFC - C 型(UFC 漿脈水平方向水力破裂).....	133
圖 5.62 第 14 開挖斷面 22 號孔.....	133
圖 5.63 UFC - C 型(UFC 漿脈多重水平方向水力破裂).....	134
圖 5.64 第 18 開挖斷面 4 號孔.....	134
圖 5.65 CB 漿液流動填充四周土壤孔隙.....	135
圖 5.66 漿液自灌漿孔流出示意圖 (a)俯視圖 (b)前視圖.....	136
圖 5.67 漿液受壓造成水平方向水力破裂.....	136

## 符號說明

C：與灌漿階段有關，第一序組孔  $C = 1$ ，第二序組孔  $C = 1.25$ ，第三序組孔  $C = 1.5$

D：改良範圍上方基礎深度(m)

EL：絕對高程(m)

h：地面至灌漿段的深度(m)

J：工程主體重要度，通常採 100%，對於重要建物保護或高水壓止水等狀況採 120%。

K：由上而下灌注時  $K = 0.8$ ，由下而上灌注時  $K = 0.6$

k：滲透系數(cm/sec)

n：土壤之空隙率(porosity)

p：灌漿壓力( $N/m^2$ )

$p_{c1}$ ：第一次開裂時水壓( $N/m^2$ )

$p_{c2}$ ：第二次開裂時水壓( $N/m^2$ )

$p_s$ ：水力破裂法試驗之平衡水壓( $N/m^2$ )

Q：總灌漿量( $m^3$ )

$T_0$ ：岩石張力強度( $N/m^2$ )

V：改良區域體積( $m^3$ )

$\alpha$ ：漿液填充率，一般  $\alpha = 0.4 - 0.95$

$\lambda$ ：地層係數， $0.5 < \lambda < 1.5$ ，地層結構疏鬆、滲透性高者取低值；結構緊密、滲透性低者取高值

$\sigma_{h,min}$ ：地盤中最小主應力( $N/m^2$ )

$\sigma_{h,max}$ ：地盤中最大主應力( $N/m^2$ )

$\sigma_r$ ：徑向壓力( $N/m^2$ )

$\sigma_v$ ：垂直土壓力( $N/m^2$ )

$\sigma_\theta$ ：切線方向壓力( $N/m^2$ )

$\omega$ ：注入率，於礫石層  $\omega = \alpha \times n$

# 第一章

## 緒論

### 1.1 前言

由於人口的成長以及都市的發展，重要工程如大眾捷運系統、高速鐵路、地下鐵路及衛生下水道工程等，均需配合民生需求持續興建，惟因用地取得困難，許多路線施工常需經過地質狀況欠佳之軟弱地盤，故土壤的穩定性便成為決定工程品質與安全的重要因素。

簡單而言地盤改良 (Ground improvement) 是用於改良建築基地的地層工程性質，以提高其強度、減小其變形、改善其阻水性或降低其液化潛能為目的。較常用之施工方法如攪拌工法、灌漿工法及排水預壓工法等 (中國土木水利工程學會 1995)。於前述常用工法之中，灌漿工法因為具有如噪音低、振動小、施工速度快、工作空間小等多項優點，而且能夠明顯地改善土層之強度及透水性，因此近年來常被工程界所採用。本論文主要探討於礫石土層進行水平雙環塞灌漿 (Double packer grouting) 地盤改良之案例研究。

### 1.2 研究動機

雙環塞灌漿工法自法國引進國內已有多年。近年來，台北市捷運系統的地下工程及地下聯絡通道工程均曾採用雙環塞灌漿工法對軟弱地層進行改良。廖洪鈞等人(1994)，曾介紹在台北市之透水性粉土質砂土以垂直及水平方式進行雙環塞灌漿在地下道開挖面造成之漿脈分佈。

陳瑞禾等人(2006)，也曾探討在桃園中壢地區之礫石土層以垂直雙環塞灌漿進行地下電纜管路工隧道外部止水工程。繼臺北市及高雄市之後，臺中市也開始著手規劃捷運路線，臺中市地盤多屬礫石層，與本研究之桃園地區礫石土層性質相似，希望本研究可為日後卵礫石地層地盤改良提供有用的參考資料。

### 1.3 研究方法

雙環塞灌漿工法屬於低壓灌漿。由於施灌時無法觀看漿液在土層中的流動情形，只能依據電磁流量計顯示的壓力讀數，對於灌漿作業進行調整。本研究案例，施工目的為在高鐵桃園站擋土壁外側興建一條地下聯絡通道，使旅客可以便利的往返機場捷運 A18 車站及高鐵桃園站之間，如圖 1.1 所示。為了增加開挖聯絡通道時地層的穩定性，施工單位在隧道開挖前先以雙環塞灌漿進行地盤改良工程。也因此聯絡通道開挖時有機會可以目視地盤改良的改良土斷面，進而依據漿脈分佈探討漿液的流向及地盤改良機制。為瞭解漿脈在土壤中分佈情形，本研究於聯絡通道進行開挖時，以相機記錄大部分的開挖斷面，拍攝大量的照片以利研究。在和施工單位協調後，研究團隊於晚間聯絡通道停止施工期間，對各個開挖斷面改良土上的漿脈分布情形進行詳盡的記錄。

### 1.4 論文內容

本論文之內容，第一章為緒論，敘述研究動機及研究方法；第二章為文獻回顧，介紹雙環塞灌漿工法的發展、原理、施工步驟、及工法特性；第三章為桃園國際機場聯外捷運系統 A18 車站及高速鐵路桃園站的介紹，並說明監測儀器的原理及其分布位置；第四章介紹捷運 A18 車站與高鐵桃園站間聯絡通道之地盤改良之；第五章介紹聯絡通道開挖及支撐工程的介紹，並展示隧道開挖時各個開挖斷面及所拍攝之漿脈於土層中分佈的相片，並探討 CB 漿填充礫石土孔隙及超微粒水泥漿以水力破裂方式加勁地層之機制；第六章為結論及建議。

## 第二章

### 文獻回顧

#### 2.1 地盤改良介紹

當工程遭遇軟弱地層或地下水時，常須增加土壤的強度和減少地層透水性使工程得以順利進行，增進地層特性的方法稱為地盤改良。地盤改良目的為減少土體受壓之變形量、增加土壤的剪力強度、及減少土壤滲透性的特性等(Das, 2007)。地盤改良方法有很多種，例如夯實工法、振動擠壓工法、排水固結法、灌漿工法、冰凍工法等，本案例使用灌漿工法進行地盤改良。

#### 2.2 灌漿工法

大地工程發展至今，已研究出許多種類的灌漿工法來因應各種地層狀況。可依灌漿機制、灌漿壓力、灌漿順序，漿液混合方式及灌漿材料來進行分類。

##### 2.2.1 灌漿機制

###### 1、滲透灌漿：

如圖 2.1c 所示，在灌漿過程中，漿液以低壓灌入土層中，在不改變土壤顆粒間排列方式的情況下，填充顆粒間的縫隙，此工法適用於砂土層。

###### 2、脈狀灌漿：

如圖 2.1d 所示，又稱為劈裂灌漿，灌漿壓力稍微高於滲透灌漿，漿液侵入土層內形成樹枝狀、脈狀之改良體，主要是用來增加滲透性低的土壤之剪力強度及承載力，此方法適用於黏土層。

###### 3、擠壓灌漿：

如圖 2.1b 所示，美國土木工程師學會(ASCE 1980)建議將坍度小於 1 英吋(25.4 mm)之濃稠漿液灌入土層內，形成球狀固結體以擠壓、夯實周圍土壤。

此種灌漿因漿液在土層中擠壓通常會造成地層隆起，故多被用來扶正已傾斜之建物。

#### 4、高壓噴射灌漿：

如圖 2.1a 所示，在預定深度中，以高壓噴射水或水泥漿液切割、攪拌及取代土層。被切割之土壤與水泥漿液攪拌混合而膠凝硬化。或將被切削之土壤排出地表面，以漿液取代被排出之土壤。

### 2.2.2 灌漿壓力

#### 1、低壓灌漿：

低壓灌漿工法所採用的壓力一般小於  $10 \text{ kgf/cm}^2$ (廖洪鈞，1994)，其基本原理為在不改變土壤結構的原則下，將漿液以低壓的方式緩慢注入並滲透進入土壤孔隙間，將空氣及水趕出土壤孔隙，固結土壤以達到止水、強化、及穩定地盤的目的。

#### 2、高壓灌漿：

利用鑽桿末端鑽頭所噴射出之垂直方向水流，以向下鑽孔。在鑽桿緩緩向上旋轉及提升的同時，在水平方向的噴嘴中噴出水、空氣或水泥漿以形成堅硬不透水的改良柱體。其所形成的改良土之強度高、透水性低，故應用範圍甚廣。灌漿壓力一般高於  $200 \text{ kgf/cm}^2$ (廖洪鈞，1994)。

### 2.2.3 灌漿順序

漿液在地下施灌的方式可分為：(1)上升式；(2)下降式及(3)跳接式施灌，簡單說明如下。

#### 1、上升式：

如圖 2.2 所示，在鑽孔完成後，由底部開始向上施灌漿液材料。

#### 2、下降式

如圖 2.3 所示，施灌順序是由上往下，此種施灌方式可防止下部漿液往上逆流。但此種方法可能破壞上部改良體，而且再次鑽孔送水也可能造成漿液稀釋。

### 3、跳階施灌

如圖 2.4 所示，此種方式則是綜合上述兩種施灌方式。例如在改良土層上部為高滲透性土層時，即可先在上部施灌，再由下往上施灌，一方面可防止漿液向上溢流，一方面也不必重複多次送水。

## 2.2.4 漿液混合方式

漿液的混合方式(倪志寬, 2010)可分為 1 徑法( 1.0 shot )、1.5 徑法( 1.5 shot )與 2 徑法( 2.0 shot )，分別說明如下。

### 1、1 徑法：

如圖 2.5a 所示，泵送前先將 A 及 B 灌漿材料拌合，再將已混合之漿液經由泵浦送進灌漿管，灌入土層中，此法適用於膠凝時間較長之化學藥液。

### 2、1.5 徑法：

如圖 2.5b，A 液與 B 液分別拌合均勻之後，由泵浦運送至灌漿管入口處方才混合，再經由灌漿管注入土層內，此法適用於膠凝時間較短(數分鐘之內)之化學藥液。灌漿時須注意灌漿泵浦之流量，避免發生 A、B 液混合比例不對，影響膠凝時間與膠凝強度。

### 3、2 徑法：

如圖 2.5c，A 液與 B 液分別拌合均勻之後，由不同灌漿泵浦運送至不同灌漿管，直到地下灌漿管出口端才進行混合，此法適用於瞬結型藥液，膠凝時間以秒為單位，須注意藥液可能因混合不均，導致無法完全反應形成膠凝體。

## 2.2.5 灌漿材料

目前國內常用的灌漿大致可分為溶液型漿液與懸濁性漿液。溶液型漿液多具高度滲透性，只要凝結時間調配得當，多無注入困難現象發生；但懸濁型漿液由於顆粒不大，於灌注期間常發生堵塞現象，故以下將針對懸濁性漿液應用於砂礫石層灌漿進行初步探討。一般而言，當灌漿材料之顆粒小於砂礫石層的有效孔隙，漿液均可順利滲入孔隙中，應無灌注困難之狀況發生，但於實際灌漿時，尤其是懸濁型漿液，灌漿材料顆粒易產生團粒狀況(Flocculation)，材料往往無法以單一顆粒方式滲入孔隙，造成滲透路徑於灌漿初期便已堵塞(圖 2.6)，嚴重影響有效改良範圍，懸濁型漿液須滿足下式方能滿足施工需要(平岡成明，2003)。

$$D_{15}/G_{18} > 15$$

$$D_{10}/G_{98} > 8$$

$D_{15}$ 、 $D_{10}$ ：土體力境曲線通過 15%及 10%對應之粒徑

$G_{18}$ 、 $G_{98}$ ：漿材粒徑曲線通過 85%及 95%對應之粒徑

### 1、懸濁型灌漿材料：

泛指水泥(Cement)、黏土或皂土(Bentonite)等混合而成的懸濁型材料。

### 2、溶液型灌漿材料：

泛指水玻璃等無機性材料及各種高分子化合物灌漿材料。

## 2.3 雙環塞灌漿工法

### 2.3.1 工法發展

雙環塞灌漿工法為法國 Soletanche 公司首創，故又名 Soletanche 工法。該公司於 1932 年著手研發二重管之雙環塞灌漿工法，日本於 1971 年自法國引進該工法，並自行發展出類似的工法，如封套管(Sleeve grout)和雙柵管(Double strainer)等灌漿工法。

民國 71 年雙環塞灌漿工法首度出現於國內，由榮工處和國 Bachy Soletanche 公司合作來處理東線鐵路拓寬工程自強隧道之落盤，施工單位採取逐段漸進的方

式改良地層和阻止滲水。民國 80 年代初期由日本引進的封套管灌漿法，最先應用於臺北捷運潛盾隧道發進井、到達井、聯絡通道、集水井及建物保護作業。

### 2.3.2 施工步驟

雙環塞灌漿工法在地盤改良工程中被廣泛的運用，此工法可以水平和垂直的方式施灌，可以因應不同的實際狀況進行調整。如圖 2-8 所示，垂直式雙環塞灌漿工法為一般較常見的方式。由於鑽孔及 TAM 管的插入都是由上往下，坍塌的風險較小。以下為陳瑞禾等(2006)報告之垂直式雙環塞灌漿工法施灌步驟：

- 1、套管鑽孔：如圖 2.7a 所示，鑽機定位，使用鋼套管鑽孔至預定深度。
- 2、灌注封堵材：如圖 2.7b 所示，套管內灌注封堵材(通常為 CB 漿)至預定高度。
- 3、埋設灌漿外管：如圖 2.7c 所示，將灌漿外管(見圖 2.8a, 又名 TAM、sleeve pipe)插入孔內封堵材中，並於外管固定之後拔除鋼套管。
- 4、植入灌漿內管：如圖 2.7d，待封堵材養護完成後，將內灌漿管(見圖 2.8b, injection pipe, 又名雙環塞管)插入灌漿外管至設計底部深度，膨脹上下環塞(packer)準備灌漿。
- 5、開環：如圖 2.7e，灌漿內管植入後，以水或空氣膨脹環塞使其與灌漿外管閉合，再加大泵浦壓力使水頂開外管的橡皮膜，並擠破封堵材，即為開環。
- 6、灌注灌漿材：開環後，將施工計畫中所配比的漿液灌入土層中。同開環步驟，先將環塞膨脹後加大泵浦壓力，使漿液頂開橡皮膜並擠破封堵材進入土層中，當達到預定灌漿體積後，洩出環塞內的水或空氣，將內管拉至下一個預定灌漿高度並重複此步驟。

### 2.3.3 施工管理重點

陳瑞禾等(2006)介紹雙環塞灌漿之施工管理重點，簡單說明如下。

- 1、封堵材：其主要功能為封閉灌漿外管與孔壁間的環狀空間，避免灌漿時漿液

到處流竄。在內灌漿管的上下環塞限制下，迫使漿液在一個深度範圍內進入地層。封堵材的破碎程度越高，灌漿效率越好。

2、開環：待封堵材養護 5-7 天後，通過灌漿泵浦施加水壓力將封堵材擠破，為漿液打出通路。然而施工期間仍可能出現不理想的開環狀況（張作瑁，1982）：

- a、封堵材內形成縱向貫穿裂縫，始漿液不能沿預定路線擴散。
- b、只產生局部開環，使地層無法得到充分漿液灌注。
- c、即使加大壓力仍無法完成開環，亦為經常發生的不利狀況。

理想的開環狀況應具有以下特徵：

- a、封堵材在未破裂前，灌漿壓力隨時間而增大，流量始終為零。
- b、封堵材破裂後，壓力快速下降。
- c、當繼續施加壓力時，與前階比較，在較小壓力時即可獲得較大的注入量。

3、容許灌漿壓力：與其相關的因素有土層密度、強度、初始應力、鑽孔強度及灌漿順序等。由於這些因素難以預知，因此宜進行現場試灌來確定最佳灌漿壓力。進行試驗時，一班採用逐步提高灌漿壓力的方式進行，以求得灌漿壓力與瞬間流量的關係。當壓力上升至某一數值而流量突然增大時，表示地層中可能發生水力破裂現象，因此可將此壓力是為最大灌漿容許壓力。張作瑁(1988)建議，於礫石層中可依下列經驗公視進行初步計算：

$$P = C \times (0.75 \times D + K \times \lambda \times h) \quad (2.1)$$

P：容許灌漿壓力(kgf/cm<sup>2</sup>)

C：與灌漿階段有關，第一序組孔 C = 1，第二序組孔 C = 1.25，第三序組孔 C = 1.5

D：改良範圍上方基礎深度(m)

h：地面至灌漿段的深度(m)

K：由上而下灌注時 K = 0.8，由下而上灌注時 K = 0.6

λ：地層係數，0.5 < λ < 1.5，地層結構疏鬆、滲透性高者取低值；結構緊密、滲透性低者取高值

4、灌漿量計算：一般灌漿量的決定，經參考日本「藥液注入工」設計資料(2003)，建議可由下式估算：

$$Q = V \times \omega \times J \quad (2.2)$$

Q：總灌漿量(m<sup>3</sup>)

V：改良區域體積(m<sup>3</sup>)

$\omega$ ：注入率，於礫石層  $\omega = \alpha \times n$

$\alpha$ ：漿液填充率，一般  $\alpha = 0.4 - 0.95$

n：土壤之空隙率(porosity)

J：工程主體重要度，通常採 100%，對於重要建物保護或高水壓止水等狀況採 120%。

土體孔隙(void)被漿液填滿的程度稱為填充率，一般填充率越大，改良土層的強度也越高。膠凝時間與泌水現象容易對填充率造成影響，灌漿作業結束後，若膠凝時間過長，將造成未凝結漿液隨著區域水流或重力作用而流失，使得原本已填滿的孔隙重新出現空洞。而灌漿時採用易沉澱泌水的漿材，於灌漿完成後，改良體將因漿液泌水而產生新的空洞。

5、漿液材料的選擇要求：

- a、漿液的穩定性，在常溫常壓下存放不發生化學變化。
- b、漿液黏滯性低、流動性佳、滲透性高，並能滲透到微小細縫中。
- c、漿液膠凝時間在一定範圍內可調整，並可準確控制。
- d、漿液固化時無收縮或泌水現象，固化後與原地層具有一定的黏結性。
- e、漿液固化後具有一定強度、不易龜裂、低透水性、不易沖刷等，且不受濕度、溫度變化的影響。

6、灌漿施工控管重點：

- a、灌漿施工順序：礫石層灌漿時須採隔孔施作，同時須採逐漸加密的原則。一般情況下先灌外圍孔，後灌中間孔方式施做。但若灌漿區域內有區域水流情況，建議先灌下游孔，待外圍孔灌漿完成後，再行施作中間區域。

- b、定量管控：當改良半徑決定後，灌漿量也同時確定。在地層均勻無空洞的情況下，調整灌漿壓力，將灌漿量達到設計值。在多排孔灌漿時，外圍孔應以定量管控為宜，其目的為避免漿液擴散至預定區外的距離。
- c、壓力管控：由於漿液可對土體擠壓，使土體的力學性質提高，因此灌漿最終壓力對於改良體品質具有相當大的影響。但壓力提升速率應以不造成土層擾動產生新裂縫，而又能使土層孔隙充分被填充為原則。多排孔灌漿時，中間孔建議採壓力管控，控管目的是期望漿液能將為圍孔灌注不均勻處加以補強。

### 2.3.4 實驗室試驗

為了瞭解在土層底下的灌漿情形，Kleinlugtenbelt(2005)在荷蘭 Delft 大學在實驗室以直徑 900 mm、高 1080 mm 的圓柱形的鋼槽裝滿標準砂(圖 2.9)，以水平 TAM 進行雙環塞灌漿。在進行一連串的試驗後，Bezuijen et al.(2011)推斷出漿液在砂土層中的漿脈擴散分為三種類型：

- 1、平面破裂：圖 2.10a，表示漿液在土壤中沿水平方向平面擴散，造成平面式破裂。
- 2、途徑破裂：圖 2.10b，漿液在土層中劈裂並同時往水平方向滲透擴散。
- 3、組合式破裂：圖 2.10c，漿液在土層中劈裂，造成樹枝狀之途徑破裂。

### 2.3.5 案例介紹

雙環塞灌漿工法在國內也有施工案例可以依循，例如廖洪鈞(1994)臺北市某重要道路下方之地下道工程，為了減少地下道挖掘所造成之地表沉陷，特以管幕工法來降低沉陷量，此工程在管幕到達坑及推進坑之外側都以灌漿方式構築止水壁對抗地下水，如圖 2.11 所示。此工程除了使用高壓噴射灌漿灌注一般水泥漿和水玻璃之混合液外，還採用超微粒水泥和水玻璃混合液雙環塞灌漿的材料。圖

2.12a、圖 2.12b 為推進坑處之推管外側及內側水平雙環塞灌漿孔分布圖，圖 2.13a、圖 2.13b 為到達坑處之推管外側及內側水平雙環塞灌漿孔分布圖。在開挖後，所呈現的斷面漿液分佈圖如圖 2.14、圖 2.15、及圖 2.16 所示。圖中絕大多數的漿脈均朝水平方向發展。此乃由於灌漿孔多以水平方式排列有關，相鄰 2 孔往水平發展之漿脈會串聯在一起，而待得漿液流動方向由初始的輻射狀變成主要是朝水平方向流動。

## 2.4 T-P-Q 曲線圖

為了能有效的控制灌漿的品質，灌漿紀錄表上漿液壓力與流量 Q 的歷時 T 曲線，可成為施工管理上對於灌漿注入情況的判斷資料。實際之灌漿作業的 T-P-Q 曲線，根據島田俊介(1979)所整理的資料，可分成下列幾種型態。

### 1、A 型

如圖 2.17 所示，當灌漿開始後某一時間後，流量 Q 保持穩定，壓力 P 呈現有反應之上昇，此種情形為砂質土之有效滲透灌漿。此為理想型，實際上不易獲得。

### 2、B 型

如圖 2.18 所示，壓力雖然上昇但速度緩慢不易達到目標灌漿壓，此類情形藥液灌漿，可能狀況為黏性土之脈狀灌漿，效果正在提高，或為砂質土之滲透灌漿，但一部分脈狀化。

### 3、C 型

如圖 2.19 所示，壓力完全沒有上昇，甚至呈現下降傾向，為不理想之型態，但在現場常常可以看到。可能狀況為黏性土之脈狀灌漿，藥液逸流範圍廣，也有可能藥液流入地表面附近多空隙之土層。

### 4、D 型

如圖 2.20 所示，上昇之灌漿壓 P 在某一時間突然下降而不恢復，可能是因為

灌注速度過快，擾動地盤，而呈現脈狀灌漿；或是灌注管周圍之環塞破損，漿液開始逸流

## 5、E 型

如圖 2.21 所示，重複呈現 D 型之上昇下降之型態，此種情況最常見於膠凝時間短之藥液(如水玻璃等)，已膠凝之藥液被後續藥液壓破造成。

## 2.5 水力破裂法

為了估算地層中一定深度岩石的強度，可以採用水力破裂(Hydraulic fracture)現地試驗。本研究中雙環塞漿液衝破周圍堅實已改良土體的現象與水力破裂試驗中水壓力造成岩石開裂之行為相似，故於此解釋水力破裂法試驗的步驟及原理。

水力破裂此試驗先在地表鑽一圓孔至預定深度，泵浦施加壓力用以類似雙環塞灌漿工法的灌漿內管將水灌入孔洞中，上下用環塞隔出欲試驗之深度，使孔洞中充滿受壓水，並用儀器紀錄各個時間點的壓力變化，繪製時間對壓力的關係圖。如圖 2.22a 所示，當孔內水加壓至  $p_{c1}$  後壓力瞬間下降，代表圓孔壁周圍某處的裂縫已形成，裂縫以垂直圓孔孔壁的方向開裂，水由裂縫流出，壓力減小至穩定狀態  $p_s$ 。接著關掉泵浦使水壓降回  $p_0$  後，再一次施加孔內水壓力至  $p_{c2}$ ，裂縫再度形成，接著壓力又開始下降直到穩定狀態  $p_s$ 。第二次水壓不會到達  $p_{c1}$ ， $p_{c2}$  是位在  $p_{c1}$  與  $p_s$  之間，因為岩石之裂縫在壓力達到  $p_{c1}$  時已形成，裂縫間已無張力強度存在，第二次水壓力並不需要克服岩石張力強度即可使裂縫再度打開。岩石的張力強度  $T_0$  可以下式求出：

$$T_0 = p_{c1} - p_{c2} \quad (2.3)$$

上式中

$T_0$  = 岩石張力強度

$p_{c1}$  = 第一次開裂時水壓

$p_{c2}$  = 第二次開裂時水壓

若要以數學方法計算水力破裂法以得到岩石的張力強度，在此必須做一些簡化及假設。Goodman(1989)假設經由泵浦灌入圓孔內的水對圓孔周圍岩石的最初應力沒有造成影響，並且假設地層為均質均向以便於使用 Kirsch 解來計算圓孔周圍的壓力。圖 2.23 圓孔上點 A 及 A' 處之應力  $\sigma_{\theta}$  為：

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_{h,\min} - \sigma_{h,\max} \quad (2.4)$$

當水被灌入圓孔內後即對孔壁造成壓力  $p$ ，開始擠壓孔壁，當壓力達到  $p_{c1}$  時裂縫形成此時 A、A' 點的應力狀態方程式為：

$$3\sigma_{h,\min} - \sigma_{h,\max} + T_0 = p_{c1} \quad (2.5)$$

上二式中

$\sigma_{h,\min}$  = 地盤中最小主應力

$\sigma_{h,\max}$  = 地盤中最大主應力

$T_0$  = 岩石張力強度

$p_{c1}$  = 第一次開裂時水壓



## 第三章

### 機場捷運 A18 車站與高鐵桃園站間聯絡通道施工

為了使旅客能夠便利的往返桃園國際機場聯外捷運系統 A18 車站與臺灣高速鐵路桃園站之間，因此交通部高鐵局在機場捷運 A18 車站與高鐵桃園站間建立一聯絡通道。如圖 3.1 所示，旅客在 A18 車站三樓月台層(platform level)下車後便能自二樓穿堂層(concourse level)搭乘電梯或手扶梯，直接下降到高鐵桃園站地下一樓穿堂層，再經由驗票口到達穿 B2 月台層，往來旅客不用穿梭於 2 車站間車輛穿梭的馬路，兼顧便利與安全。本章將介紹桃園國際機場捷運 A18 車站及高鐵桃園站，及聯絡通道之施工。

#### 3.1 機場捷運 A18 車站

為了改善桃園國際機場聯外交通，連結「台北都會區大眾捷運系統」與「高速鐵路桃園車站」2 項交通運輸樞紐，使國際航線與國內交通網路緊密結合。交通部高速鐵路工程局捷運工程處施作「桃園國際機場聯外捷運系統」。

如圖 3.2 所示，本捷運系統路線起自桃園國際機場第二航廈(A13 站)，往東經第一航廈(A12 站)，沿線經過桃園縣蘆竹鄉、臺北縣林口鄉、桃園縣關山鄉、臺北縣新莊市、泰山鄉、三重市後(A2 站)，進入臺北市臺北車站特定專用區(A1 站)。自第二航廈(A13 站)往南經高鐵桃園車站(A18 站)至中壢市環北站(A21 站)，延伸至中壢火車站，並採取分階段完工通車辦理。

此捷運系統路線全長約 51.03 公里，其中地下段約 10.92 公里，高架段約 40.11 公里。沿途共設 22 座車站(含 A14a 站)，其中包括 15 座高架車站、7 座地下車站，並設置青浦與蘆竹兩處維修機廠。

桃園國際機場捷運建設 CE03B 標自 A17 車站至 A20 車站，屬於高架段。本工程所在地為 A18 車站，如圖 3.3 所示，三樓是月台層，月台設計為側式月台，

旅客下車後，可前往二樓穿堂層，旅客可經由穿堂層所設置的手扶梯及電梯，往地下廣場及聯絡通道前往高鐵桃園站地下一樓穿堂層，搭乘高鐵。若未計畫搭乘高鐵的旅客，可由 A18 車站電梯或樓梯前往桃園高鐵站一樓之接送區。

## 3.2 高鐵桃園站

臺灣高速鐵路是服務臺灣人口最密集的西部地區之高速鐵路系統，路線全長 345 公里。於 2007 年 1 月 5 日通車後，逐漸成為臺灣西部最重要的長途運輸工具之一。臺灣高鐵日平均載客量可達 12 萬人，周末更可達到 15 萬人，目前累積載客量已突破一億人次，顯示高鐵的速度及服務品質已獲得國內民眾的肯定。

臺灣高鐵是臺灣第一個採取由民間興建、營運，並於特許營運期滿後，移轉給政府的民間興建營運後轉移模式的公共工程，建設成本約為 4,600 億新台幣。臺灣高鐵目前共有八個車站由北到南依序為臺北、桃園、新竹、台中、嘉義、臺南、左營等站，另外南港、苗栗、彰化、雲林等地的高鐵站正在建設當中，預計 2015 年啟用。

本工程所在地桃園高鐵站(圖 3.4)位於桃園縣大園鄉，鄰近的交通系統包含機場捷運 A18 車站及國道二號大竹交流道。高鐵桃園站共分三層，分別為車站一樓大廳、地下一樓穿堂層以及地下二樓月台層，其中一樓大廳設置有售票處、自動售票機、洗手間、旅遊服務櫃台及商店，站外則有停車場、客運轉運站及計程車排班區。地下一樓穿堂層設有等候區、育嬰室及便利商店。地下二樓月台層分為南下及北上月台，兩邊皆為側式月台。高鐵局捷工處正在桃園高鐵站下方建立一地下聯絡通道，方便旅客往返於機場捷運 A18 車站與高鐵桃園站。以下介紹聯絡通道的施工概況。

## 3.3 聯絡通道

### 3.3.1 地層概述

本工程基地位於桃園縣大園鄉機場捷運 A18 車站及高鐵桃園站之間。高鐵桃園站興建時採取明挖工法，完工後，以級配礫石土進行夯實回填，因此本工程所在地靠近地表附近的土壤大多為級配回填土。本基地土壤鑽探工程共 6 孔，鑽孔位置如圖 3.5 所示。鑽探作業以兩部鋼索式鑽機進行現場作業，鑽探方式採用旋轉法全程連續取樣方式進行，於地表面下 1.05 公尺深度起，每隔 1.5 至 3 公尺或在土層變化處以分裂式標準取樣器取劈管土樣。但因基地土層大多為級配回填層，僅局部區域夾含砂薄土層，因此無法取得薄管土樣提供做土壤性質試驗之用。每一鑽探孔完成鑽探後，即埋設水位觀測井，以供地下水位量測之用。由於鑽探工程的 6 個鑽探孔中只有 A1、A2 位於灌漿區，其中 A1 位於隧道開挖區，其餘四孔因距離灌漿區太遠，與灌漿工程較無太大關係，故在此只介紹 A1 及 A2 兩孔附近的地層狀況。圖 3.6、圖 3.7 為 A1 及 A2 地層剖面圖，而取得之岩心箱照片如圖 3.8、3.9 所示。

依據鑽探結果，聯絡通道灌漿區與開挖區之地層剖面如圖 3.10，可分為六個層次，由上而下各層之土壤厚度說明如下：

- 1、第一層：水泥鋪面及混凝土層夾卵礫石、細砂層，厚度約為 1.3 m。
- 2、第二層：級配層；卵礫石夾棕黃色粉土質細砂，厚度約為 3 m。
- 3、第三層：混凝土層，厚度約為 0.55 m。
- 4、第四層：級配層；卵礫石夾棕黃色粉土質細砂，厚度約為 2.45 m。
- 5、第五層：卵礫石夾灰色及棕黃色粉土質細砂層，厚度約為 9.3 m。
- 6、第六層：棕黃色風化砂岩及砂質泥岩層，厚度約為 3.5 m。

為了得到灌漿區土壤的粒徑曲線，作者於施工單位進行鑽孔與灌漿工程時，取了約二十公斤的土樣回實驗室進行篩分析試驗，以下為篩分析實驗步驟，實驗

結果如圖 3.11 所示：

將烘乾後土壤通過網眼由大而小之不同篩號，分別計算停留在各篩上之土壤重量百分比，再以土壤粒徑為橫坐標，累積通過重量百分比為縱座標，繪於半對數座標紙上，求取粒徑分佈曲線。本試驗所用之篩網為 2"、1"、1/4"、#4、#20、#100 及 #200 號篩。

### 3.3.2 施工簡介

如圖 3.12，本聯絡通道的興建工程分為三部分，第一部分為高鐵桃園站前地下廣場開挖，第二部分為聯絡通道的灌漿地盤改良工程，第三部分為聯絡通道開挖，以下介紹三部分的施工方式：

- (1)、明挖覆蓋施工：高鐵桃園站前廣場區之地下廣場施工，開挖深度約 7.4 m(機坑部分開挖深度約 8.9m)。施工前於明挖覆蓋區與桃園站間打設微型樁(圖 3.13)，藉以阻絕及降低開挖施工對高鐵站之影響。接下來於微型樁前近車站前緣設置預壘樁(圖 3.14)。其餘部分之擋土支撐採用 H 型鋼樁及木質橫擋板(wood lagging)(圖 3.15)。開挖時共架兩層水平鋼梁支撐(圖 3.16)。待開挖完成後，繼續進行後續之地下廣場結構體、水電環控、電(扶)梯等工程。
- (2)、聯絡通道灌漿工程：為了確保聯絡通道在開挖時，開挖區土壤具有一定強度，並且將地下水滲入的問題降至最小，施工單位在隧道開挖前對隧道及周邊之夯實回填礫石土進行為期約三個月的水平方向雙環塞灌漿工程，垂直向的施作必須要在高鐵站一樓大廳進行工程，對車站營運將造成影響，故以水平向進行施工。地盤改良深度為地下 1.35 m 至 7.2 m，寬度 16.3 m。灌漿工程共分五排灌漿孔，如圖 3.17 所示，每一排孔垂直間距約為 1.25 m，為了方便灌漿鑽孔時機具之架設，地下廣場工程的開挖深度將會配合灌漿鑽孔工程施工要求。
- (3)、隧道開挖工程：當灌漿工程結束後，即開始進行連絡通道的隧道工程開挖，

開挖一條長度 18 m 寬度約 8.1m 高度約為 4.75 m 的長方形隧道。施作襯砌後，聯絡通道之寬度為 6.2 m，高度為 3.25 m。由於高鐵桃園站開挖區之間設置有預壘樁及微型樁，必須先用兩天的時間破除預壘樁之後，再進行開挖工程。開挖採取方式為全斷面輪進開挖，以 0.5 m – 0.8 m 為一輪進。預計每天進行一個輪進的開挖，共 23 個輪進，施作數日後再依據開挖面的穩定度做調整。鄰近高鐵桃園站之地盤改良灌漿或隧道開挖工程都可能對於高鐵結構物造成一定程度的影響，在為了確保高鐵營運的情況下進行施工，施工單位於高鐵桃園站內部及外部都設置監測儀器，下一節將針對施工監測進行做討論。

### 3.3.3 監測

在重要建築物附近進行施工作業，為了瞭解施工對於建築物的影響，並把影響控制在安全範圍內，通常必須進行監測系統的佈署。本工程於高鐵桃園站內外進行監測系統的安裝，並定期觀測以防止施工對於高鐵站造成影響。本論文重點著重於高鐵站之下方灌漿工程及隧道開挖對高鐵的影響，以下簡單介紹高鐵桃園站的相關監測布置：

#### (1)、 監測儀器介紹

- A、稜鏡：圖 3.18 及圖 3.20 所示，稜鏡被架設於高鐵站一樓大廳玻璃帷幕上及車站外風柱上，用來觀測施工造成之玻璃帷幕及車站外風柱的沉陷量。
- B、全測站：量測稜鏡之沉陷量，全測站架設於固定位置，每隔一段固定時間(約 52 分鐘)自動掃描裝設於欲量測物上的稜鏡。因為全測站與稜鏡的距離是固定的，故量測全測站稜鏡連線與水平線之夾角就可以知道稜鏡的沉陷量。本工程共設置兩台全測站，一台設於車站外監測風柱(圖 3.19)，另一台於車站內一樓大廳商店高處，監測玻璃帷幕之位移(圖 3.21)。
- C、傾斜儀：本工程使用人工式傾斜儀(圖 3.22)與電子式傾斜儀圖(3.23)，安裝於車站外之風柱上與高鐵內結構柱，用以量測結構物的傾斜量。

D、沉陷點：安裝於聯絡通道地盤改良及隧道開挖區上方、車站內大廳地板上、結構柱及車站外風柱上，用來量測因灌漿及隧道開挖造成之垂直位移量。

## (2)、灌漿監測

為避免在高鐵站下方進行的雙環塞灌漿會對高鐵建築物造成破壞，施工單位於高鐵站建築物安裝各式監測儀器，並且設立警戒值與行動值，來避免意外的發生。如圖 3.24 所示，灌漿及隧挖區上方為一樓大廳地板，施工單位安裝了許多沉陷點，玻璃帷幕上也安裝了監測稜鏡。除了監測垂直位移量，傾斜儀也被安裝於結構柱上以確保建物的穩定，灌漿時所造成位移量、傾斜量之監測結果將於第四章詳細介紹。

## (3)、隧道開挖監測

為確保開挖的安全，及開挖過程中對鄰近建物的影響，施工單位監測儀器的配置著重於下列 2 個部分。

A、隧道開挖支堡系統安全觀測：施工單位於支堡配置收斂觀測點(圖 3.25)，以觀測支保框架位移現象。以及在隧道開挖區頂部周邊地盤設置沉陷點，以觀測周邊地盤位移狀況。

B、高鐵站結構安全觀測：於隧道開挖區頂部周邊高鐵站室外風柱、玻璃帷幕、高鐵大廳及結構柱上，以稜鏡、人工及電子式傾斜儀，觀測隧挖對於高鐵站結構的影響。

## 第四章

### 聯絡通道雙環塞灌漿施工與地盤改良成果

本工程所使用的地盤改良雙環塞灌漿，是屬於低壓灌漿的一種工法，雙環塞工法又可依施作方式分為水平及垂直式，本案例屬於水平式。本章將介紹水平雙環塞灌漿工法的施工步驟，所使用的施工機具及灌漿材料，以及灌漿時所遇到之困難。

#### 4.1 施工機具及灌漿材料

本工程所使用的鑽孔機具及灌漿機具與一般雙環塞灌漿工程並無太大差異，使用施工機具如表 4.1 所示。施工單位於地下廣場開挖區上方架設一平台，擺放施工機具如圖 4.1，使用機具包含儲水桶(圖 4.2)、漿液快速攪拌機(圖 4.3)、漿液慢速攪拌機(圖 4.4)、灌漿泵浦(圖 4.5)、漿液流量及壓力記錄器(圖 4.6 及圖 4.7)及灌漿分流計(圖 4.8)。灌漿材料之 CB 漿(Cement + bentonite)及超微粒水泥(Ultra fine cement, UFC)漿液的配置方式如表 4.2 和表 4.3 所示。施工單位要求 CB 漿之配比：水:水泥:皂土 = 3.5 : 1 : 0.2。超微粒水泥漿之配比：水:水泥:添加劑 = 2 : 1 : 0.02。

#### 4.2 施工方法及灌漿管理

水平雙環塞施作工法已於第二章簡單介紹，本節將針對現場人員配置及灌注封堵材、一次 CB 漿、二次超微粒水泥的施作進行更詳細的討論。

在人員配置方面，由於灌漿作業須時時注意灌漿壓力及灌漿流量，完成一階的灌漿後，必須由一名現場施工人員將灌漿內管拉出 0.33 m。此外，拌合漿液需要第二名施工人員；壓力與流量紀錄器需要第三名施工人員，依照灌漿管理表(如表 4.4)對於注入壓力進行控管；操作灌漿分流器需要第四名施工人員，因此雙環

塞灌漿作業至少需要四名工作人員才能順利進行。圖 4.9 說明雙環塞水平式施灌的 5 個步驟：

#### 1、鑽孔

如圖 4.9a，在預定高度架設鑽機(圖 4.10)後，使用鋼套管(圖 4.11)進行鑽孔，施工單位在鋼套管內部插入鑽桿(圖 4.12)，鑽桿尾端連接水管，水經由鑽桿至鑽孔面，排出孔內土壤顆粒。

#### 2、插入灌漿外管

如圖 4.9b，鑽孔至預定深度後，拔除鑽桿，開始組裝灌漿外管(TAM, 圖 4.13)並插入鑽孔至底部。其後拔除鋼套管，並使用快乾水泥封住鑽孔的洞口。

#### 3、注入封堵材

如圖 4.9c，將內灌漿管(圖 4.14 及圖 4.15)插入灌漿外管內，膨脹環塞使得環塞貼緊 TAM 內側管壁，開始進行封堵材(CB 漿)灌漿，將封堵材填滿 TAM 與鑽孔壁間的空隙。由於重力的影響，TAM 不會恰好位在鑽孔的正中間，而可能是稍微落於圓心的下方。

#### 4、開環

如圖 4.9d，封堵材養護完成之後，以清水進行開環作業。先將 2 環塞充滿水，受壓膨脹頂住灌漿外管內壁，將水由泵浦加壓後經過灌漿分流計進入內灌漿管。由灌漿分流計上的壓力計可知道開環狀況，當清水尚未衝破封堵材時，壓力計上壓力顯示慢慢增加，當壓力突然下降表示清水已衝破封堵材，開環成功。

#### 5、灌漿

開環作業結束後，開始 CB 漿(圖 4.9e)的施灌。同樣的，先將環塞充滿水頂住灌漿外管內壁後，加大泵浦壓力使 CB 漿液衝出橡皮膜經封堵材進入土層中。當達到預定灌漿量時，停止輸入漿液。將環塞中的水洩出，並將灌漿內管拉至下一預定灌漿處，重複上述步驟。

### 4.2.1 注入率

圖 4.16 顯示隧挖區(C區)地盤改良注入率設定為 25%，隧挖區旁設定為 40%(A、B、D、E 區)。高鐵桃園站下方填土為夯實礫石土，其孔隙率較高。C 區灌漿目的主要為固結開挖鏡面，防止鏡面土方滑落影響開挖工作，但固結強度不宜過高，以免增加開挖土心困難，故 C 區注入率設定為 25%。A、B、D、E 區灌漿目的主要為固結開挖面兩旁地盤，提高地盤自立性，支撐隧道開挖，故 A、B、D、E 區注入率設定為 40%。

### 4.2.2 封堵材灌注

在水平鑽孔完畢之後，於灌漿孔插入灌漿外管(TAM)，用快乾水泥封口後，在灌漿外管與孔壁間灌入封堵材(CB 漿)，灌注封堵材的目的為固定灌漿外管，避免施灌時灌漿管移動造成漿液無法順利衝出灌漿外管。

### 4.2.3 CB 漿填充土壤空隙

在封堵材填充完成並劈裂開環後，開始進行一次 CB 漿的灌注，灌注 CB 漿的主要目的為填充地層中較大的空隙。以下介紹施灌時漿液所流經的機器順序：

- 1、漿液快速攪拌機：將卜特蘭 1 號水泥及水依表 4.2 之比例倒入快速攪拌機中攪拌，攪拌完成後將漿液送入慢速攪拌機(圖 4.3)。
- 2、漿液慢速攪拌機：漿液由導管自快速攪拌機流入慢速攪拌機(圖 4.4)，慢速攪拌機上置一濾網，以過濾流入漿液內顆粒較大的雜質。漿液在慢速攪拌機中緩慢流動以避免凝結。
- 3、灌漿泵浦：泵浦(圖 4.5)把漿液自慢速攪拌機抽出後由機器底部流入，加大壓力送出，流入流量計。CB 漿之注入壓力為 6 至 12 kgf/cm<sup>2</sup> (超微粒水泥漿之注入壓力為 12 至 17 kgf/cm<sup>2</sup>)。

- 4、壓力流量紀錄器：流量計(圖 4.6)為紀錄灌漿壓力及流量的機器，儀表板上(圖 4.7)顯示灌漿壓力、灌漿流量、灌漿壓力及流量自動記錄表及開始、停止按鈕。CB 漿之灌漿流量範圍為 8 - 10 ℓ/min (超微粒水泥漿液之流量為 5 - 6 ℓ/min)通常會有一名操作員在此觀察並記錄，若灌漿壓大於 20 kgf/cm<sup>2</sup>，則按下停止送漿鈕並通知操作員提階。
- 5、灌漿分流計：漿液自壓力流量紀錄器流出，經過灌漿分流計(圖 4.8)後，由灌漿管灌入地層中。灌漿分流計由一名有灌漿經驗的師傅操作，當流量紀錄器儀表板上顯示灌漿量已達到預設灌漿量時，流量紀錄器操作員會通知灌漿師傅，將灌漿分流計上控制送漿的開關關掉，並把漿液回流開關打開，漿液便經灌漿管流回慢速攪拌機中。

#### 4.2.4 超微粒水泥漿土壤加勁

在完成灌注 CB 漿的程序後，也意味著地盤中的大部分空隙已被 CB 漿填滿，接下來將灌注超微粒水泥。灌注超微粒水泥的目的是希望可以填補地盤內更細小的孔隙，並且增加土壤的勁度及強度，固結地盤，使得隧道開挖能夠更安全。由於超微粒水泥的灌注程序和注入 CB 漿的程序相同，故不在此贅述。

### 4.3 施工遭遇之困難

本工程於施作第二排孔(見圖 4.16 之#9 至#14 及#C, #F)CB 漿灌漿時，施工單位於地盤改良區上方高鐵站一樓大廳所設置的沉陷點及電子傾斜儀顯示監測數據異常，灌漿區上方地表隆起，接近警戒值。本案高鐵桃園站施工造成地表隆起沉陷之警戒值為 4.65 mm，地表傾斜角度警戒值為 240 sec(0.067 度)。承包商立刻停止灌漿工程，並開會檢討。施工單位依照灌漿紀錄及監測紀錄推斷，第一排孔的灌漿工程已將改良區上部土壤灌至飽和狀態，因此為了改善此狀況，施工單位將地盤注入率降低約一半，隧道挖(C 區)之注入率降為 12%，其餘各區之注入

率降為 20%。如表 4.5 所示，自第二排孔以下，所有的雙環塞灌漿都將依照此注入率進行施工。自此至灌漿工程結束，都未發生沉陷及傾斜監測數據異常之現象，由此可知注入率的計算對於灌漿工程的重要性。

#### 4.4 試水作業

為了檢視地盤改良的成效，施工單位於灌漿工程結束後進行試水試驗。如圖 4.17 所示，地下水位之高程為 EL78.271，因此施工單位於地下水位面以下鑽 3 個直徑為 42 mm 的試水孔，進行試水作業，試水時間為一分鐘。試水作業步驟如圖 4.18 所示。各個孔位試水後之滲透係數都低於要求標準之滲透係數  $k \leq 1 \times 10^{-5}$  cm/sec。圖 4.19 為試水作業情況。

#### 4.5 鑽孔取樣

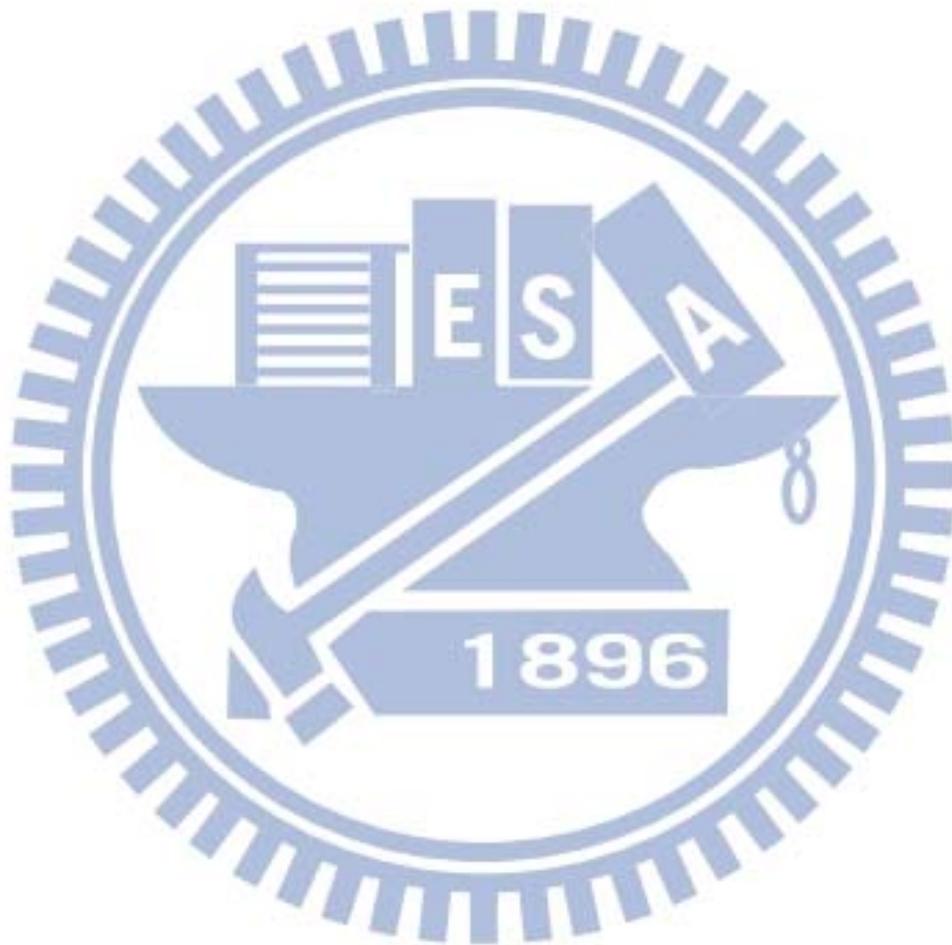
為了瞭解改良土的完整性，瞭解灌漿工程漿液的滲透範圍，經施工單位的配合，於三個灌漿孔的交界處鑽孔取樣(圖 4.20)，共鑽四孔，深度為 6 m。但是由於本工程地層為夯實礫石回填土，以低壓灌漿改良之地盤很難取出一個完整適合進行強度試驗的試體。圖 4.21 為取樣施工情況，圖 4.22 施工人員正在取出試體。圖 4.23 至圖 4.26 為四個鑽孔所取出的試體照片。不同於高壓噴射灌漿，低壓灌漿所取出的試體，幾乎都是碎石及細粒料。

#### 4.6 灌漿造成之地盤變位

由於灌漿工程在高鐵桃園站下方施作，因此灌漿及隧挖對於高鐵結構物的影響亦為臺灣高鐵公司及高鐵局所關心的重點之一。為確保施工品質，有關地盤變位警戒值與行動值之訂定亦為監測計畫中相當重要的一環。圖 4.27 為施工單位所提供之灌漿區上方玻璃帷幕稜鏡沉陷觀測之垂直位移量歷時曲線圖。在灌漿工程開始後(2011 年 10 月底)垂直位移量開始增加，到了 2011 年 12 月 ATS-I-

05 - Z 之地表隆起量相當接近警戒值(4.65 mm)，但未超過。

圖 4.28 為人工傾斜儀所測量之方向及站內儀器分佈，當灌漿工程開始時，TI-L02 及 TI-L03 分別往 Y 的正方向及負方向傾斜，但亦未超過警戒值(240 Sec)及行動值(360 Sec)，如圖 4.29，顯示，灌漿工程對於地層雖會造成位移，若做好灌漿之品質控管，則可減少地盤位移對結構物的影響。



## 第五章

### 聯絡通道開挖

在高鐵桃園站下方進行水平雙環塞灌漿的主要目的是為了增進該地區的地盤強度以及止水，以利聯絡通道開挖及後續工程。隧道開挖位置為地盤改良區的中間部分，如圖 5.1 所示。本章將介紹聯絡通道開挖，所使用的施工機具及人員配置、施工方法及開挖斷面。本章主要部分為開挖斷面上所呈現地盤改良時灌入地層的漿液流向，並依據現之觀察建立雙環塞灌漿之地盤改機制。

#### 5.1 施工機具及人員配置

圖 5.1b 聯絡通道開挖位於高鐵站一樓大廳下方，隧道長 18 m 開挖寬度 8.1 m 高度 4.75 m。由於聯絡通道開挖需要先敲除洞口預壘樁(圖 5.1b)，隧道開挖時需要怪手將改良區土壤挖除，架設支撐鋼梁，吊掛側壁鋼線網及施作噴凝土等，需要的施工機具及施工人員需經過仔細安排，方能發揮最大效益，並且維護工地安全。表 5.1、表 5.2 分別為所需之施工機具以及施工人員的配置。

#### 5.2 施工方法

在地盤改良工程結束，施工單位進行連絡通道開挖工程。施工順序如下：

- 1、破除預壘樁及微型樁：如圖 5.2 所示，以怪手先破壞預壘樁外部，再將預壘樁內鋼筋拉除，接著破壞後排微型樁(圖 5.3)。此工程大概需要兩天時間。當預壘樁破除後，即可進行連絡通道斷面的開挖。
- 2、斷面開挖：開挖作業使用怪手挖土機進行(圖 5.4)，開挖的渣料由另外一台挖土機及鏟土機往後運至堆置區。並且隨時清理散落於路面上的廢土。
- 3、架設鋼支堡：土心開挖完成後即開始架設鋼支保，如圖 5.5 所示。在架設鋼支保的同時在側壁及頂部掛上鋼線網。架設鋼支保的目的是為了確保噴凝土

達到足夠支撐地盤的強度前，支保可以支撐地盤，增加開挖區的穩定性。

4、噴凝土：本工程噴凝土採用濕拌濕式噴塗，噴凝土強度為  $210\text{kgf/cm}^2$ 。圖 5.6 為開挖區頂部施作噴凝土時的狀況。開挖區之側壁(鋼線網)及開挖斷面亦施作噴凝土

### 5.3 開挖造成之地盤變位

由圖 4.27 可看出在灌漿工程進行時，玻璃帷幕的位移有隆起的趨勢。隧道開挖期間，由於地表下方土壤被挖除，因此位移量曲線呈現下降趨勢，地盤隆起量減少 1.1 mm。圖 4.29 顯示人工傾斜儀在開挖後，本來向高鐵站南方傾斜之 TI-L02，其傾斜量在隧道開挖工程進行後已逐漸自 190 sec 回正至 130 sec。

### 5.4 開挖斷面之漿液流動觀察

本工程地盤改良的目的為鞏固高鐵桃園站下方的地盤，增加隧道開挖時的穩定性及安全。隧道開挖長度為 18 m，共分為 23 個輪進掘進，作者利用開挖工程結束，還未施做噴凝土前的夜間空檔，拍攝相片，探討開挖斷面上的漿液流動情形。本節共分四部分討論，第一部分從破除預壘樁之第 1 斷面開始至第 12 斷面。其他三部分探討為第 14、16、18 斷面，在得到施工單位業主高鐵局捷工處及泛亞工程公司的允許下，於各斷面開挖結束後，詳細的將斷面上的漿脈分布情形記錄下來，說明如下。

#### 5.4.1 斷面 1 至斷面 12 之漿脈分布

(1) Section 2：圖 5.7 為第 2 開挖斷面，圖中高鐵站風柱基礎已露出。

(2) Section 3：圖 5.8 為第 3 開挖斷面，此時高鐵站風柱下半部已被切除，可明顯看到灌漿外管(TAM)分布於斷面上，也可看到 TAM 周圍的封堵材。

(3) Section 10：圖 5.9 顯示第 10 開挖斷面，由此斷面更可以清楚的看出 CB grout 的漿脈分布情形。在第一排孔(Hole 4, 5, 及 6)的上方，CB 漿脈水平且向上填補了灌漿管上方土層上方的孔隙。在第二排孔，CB grout 自 11 及 12 號孔流出後，大範圍的填充了第二排孔周圍的孔隙。推斷此地層的中間及上部大顆粒礫石所佔的比例較大，因而漿液在中上部分水平擴散分佈，充分發揮了 CB grout 填補土層中較大孔隙的功用。圖 5.10、圖 5.11 為左半及右半部斷面近照。圖 5.11 顯示開挖區右側之鋼支堡及鋼線網。圖 5.12 為鋼線網安裝完成後，施工單位進行噴凝土作業。

(4)Section 11：圖 5.13 為第 11 開挖斷面，可清楚的顯示 CB 漿脈在 11、12、13 號孔呈水平擴散，和第 10 斷面有相似的行為，可推斷 CB 漿液自灌漿管流出後在土體中以水平方向擴散，因此在前後相鄰的斷面上都可看出相似的漿脈分布情形。

(5)Section 12：圖 5.14 為第 12 開挖斷面之右側，和第 10 及第 11 斷面相比，第 11、12、13 號灌漿孔周圍的漿脈分佈十分相似，推斷漿液在流出後平行 TAM，在 3 度空間中呈平面擴散。

#### 5.4.2 斷面 14 之漿脈分布

圖 5.15 為第 14 開挖斷面。藉由近距離拍攝的相片，連深色細小的超微粒水泥漿脈都可清楚的呈現在圖中。觀察重點為 11、12、13 號孔上方的 CB 漿脈，及 4、5、6 號孔上方的超微粒水泥漿脈。

圖 5.16 為漿脈在 12 號孔周邊的分佈情形，圖中可清楚看出 CB 漿自 12 號孔流出後往上及水平擴散，CB 漿中偏黑色的樹枝狀漿脈為超微粒水泥(UFC)漿脈，在土層中呈水平方向劈裂。圖 5.17 為漿液在 13 號孔周邊情形，此孔較為特別的是漿液直接以灌漿孔為中心往水平方向擴散，在 CB 漿中也可看見後灌之超微粒水泥漿脈的痕跡。圖 5.18、圖 5.19 為 11、12、13 號孔周圍的漿脈分布情形，

推斷 CB 漿液自這三孔流出後在水平方向流動彼此匯合，填充當初夯實填土之層與層間弱面中，形成了圖中的漿脈樣貌。

圖 5.20、圖 5.21、圖 5.22 顯示 4、5、6 號孔周圍的漿脈分布情形。圖中可見超微粒水泥漿脈自孔中流出後，劈裂已被 CB 漿填充脂土層，在近乎同一高程匯合，UFC 在土壤中形成類似加勁的功用。此外在圖 5.23 中，也可看出超微粒水泥漿脈自 22 號孔流出後向側方水平劈裂地盤的情形。

### 5.4.3 斷面 16 之漿脈分布

圖 5.24 顯示第 16 開挖斷面，如同第 14 斷面，在 4、5、6 號孔上方及 11、12、13 號孔周圍都出現明顯的帶狀漿脈。

圖 5.25 顯示漿液在 11 號孔周圍的分佈情形，孔上方有 CB 漿脈水平向右延伸，下方有少許超微粒水泥漿脈。然而，和 12 號孔(圖 5.26)比較起來，11 號孔周圍的漿脈明顯較少，推測在該區域地盤的孔隙較少，因此漿液在孔隙被填滿後流往其他方向發展。看了 12、13 號孔(圖 5.27)後，發現這兩孔周圍的漿液分布範圍既廣且具有連續性。再根據圖 5.28 及圖 5.29，推斷漿液自 11、12、13 號孔流出後水平往左右流動，填補了此區域大部份的孔隙。

圖 5.30 顯示 6 號孔超微粒水泥漿液自孔中流出後，往左右方向水平劈裂。其上方亦可見到 CB 漿脈。圖 5.31 顯示超微粒水泥漿脈流出 5 號孔 TAM 後，往上破裂一小段距離才開始水平向劈裂，如圖 5.32 所示，UFC 劈裂高程和 6 號孔幾乎相同。圖 5.33 顯示 4 號孔，上方有兩條超微粒水泥漿脈，推測下面這條漿脈為 4 號孔所貢獻，上面的漿脈可能是 5、孔之 UFC 漿脈往左劈裂所形成。圖 5.34 顯示 4 號孔上方的兩條超微粒水泥漿脈在過了該孔後，漸漸匯集成一條，並繼續往左邊劈裂，接下來漿脈經過 3 號孔上方(圖 5.35)。除了超微粒水泥漿脈外，此 UFC 漿脈上下方也可發現 CB 漿脈的存在。在經過 3 號孔後來到 2 號孔(圖 5.36)下方，還是可清楚看見超微粒水泥漿脈繼續往左劈裂，並伴隨著 CB 漿脈的出

現。

由以上相片可觀察出，超微粒水泥漿脈周圍都可發現 CB 漿脈，非常符合當初雙環塞低壓灌漿先以 CB 漿填補大孔隙，再以超微粒水泥漿填補更小的孔隙並將地盤加勁的設計理念。另外還可發現一個有趣的現象，當 CB 漿灌入填充土層後，接著再以較高壓力灌入超微粒水泥漿時，超微粒水泥漿會在 CB 漿的漿脈中劈裂。推測當 CB 漿還未完全凝結時強度較低，因此後來灌入的超微粒水泥漿在水利劈裂時，選擇壓力較小的方向，所以會在 CB 漿脈中出現。

#### 5.4.4 斷面 18 之漿脈分布

圖 5.37 顯示第 18 開挖斷面，此斷面上較為明顯的漿脈出現在 2、3、4、5、6 號孔周圍。

圖 5.38 顯示 6 號孔流出之超微粒水泥漿脈水平向左右劈裂。根據圖 5.39，向左方的漿脈流至 5 號孔(圖 5.40)上方。5 號孔超微粒水泥漿脈在封堵材下半部也劈裂出一條水平向漿脈。在 4 號孔(圖 5.41)周圍可觀察到三條漿脈，最上方一條為 5、6 號孔灌出之超微粒水泥漿延伸至此，中間一條應為 4 號孔本身所貢獻，4 號孔下方一條 UFC 漿脈推測為超微粒水泥漿自 4 號孔流出後往左右劈裂，其中右邊部分和 5 號孔下半部之超微粒水泥漿脈匯合(圖 5.42)。圖 5.43 顯示 4 號孔左半部，4 號孔右側三條漿脈在此逐漸匯集成一條繼續向左劈裂，UFC 漿脈旁也可發現 CB 漿脈的存在。圖 5.44 顯示在，在經過 3 號孔上方時，UFC 漿脈伴隨著 CB 漿脈轉向左上方繼續水平劈裂。

### 5.5 地盤改良機制探討

在開挖斷面上可看出 CB 漿通常呈現大範圍水平擴散，因 CB 漿在灌入土層後，即開始填補灌漿孔周圍的孔隙。在此將 CB 漿脈在灌漿孔周圍的流動形狀分成以下二型：

(1) CB 漿脈 A 型：圖 5.45，由於土層內水平方向之壓力小於垂直方向，因此 CB 漿液以灌漿孔為中心水平向擴散，如第 14 斷面 13 號孔周邊之漿脈(圖 5.46)。

(2) CB 漿脈 B 型：如圖 5.47，漿液往上發展後，水平擴散成蕈狀，如第 16 斷面 19 號孔(圖 5.48)。圖 5.49 為此類型的另一種型態，由於開挖斷面與 TAM 上的注入孔錯開，因此無法看到上部水平片狀漿脈和注入孔間的連結，漿脈形狀類似無梗蕈類，如第 16 開挖斷面 11 號孔(圖 5.50)。若將觀察斷面擴大，而兩灌漿管在同一水平上(圖 5.51)，則可發現兩灌漿孔流出之水平片狀漿脈在灌漿孔上方匯合，如第 14 開挖斷面 11、12 號孔(圖 5.52)。若 2 個灌漿孔不在同一水平上(圖 5.53)，所灌出之漿脈形狀類似兩顆交錯的蕈類，如第 16 開挖斷面 18、24 號孔(圖 5.54)。

當超微粒水泥灌入地層時，由於土壤中的孔隙已被 CB 漿所填滿，因此 UFC 灌漿壓力必須較灌注 CB 漿時為高，才可以順利將超微粒水泥漿灌入地層中。因此，超微粒水泥除了填補地層中更小的孔隙外，也會在 CB 漿及土壤中形成水力劈裂。由於土壤中較大的孔隙已被 CB 漿占據，UFC 漿脈在斷面上的厚度明顯較 CB 漿脈的厚度為薄。在此將超微粒水泥漿脈的形狀分成以下二型：

(1)、UFC 漿脈 B 型：如圖 5.55，UFC 漿液在灌漿孔上方發展成蕈狀，如第 16 斷面 5 號孔(圖 5.56)。若開挖面與注入孔錯開，UFC 漿脈在斷面上和灌漿孔間將看不到任何連結(圖 5.57)，如地 18 開挖斷面 5 號孔(圖 5.58)。若同時觀察三個灌漿孔(圖 5.59)，則可發現各孔流出之水平超微粒水泥漿脈，在灌漿孔附近匯合成一條細長漿脈，如第 14 開挖斷面 4、5、6 號孔(圖 5.60)。

(2)、UFC 漿脈 C 型：如圖 5.61，UFC 漿液以水平披裂方式自灌漿孔流出，如第 14 斷面 22 號孔(圖 5.62)。另一種情況如圖 5.63 所示，UFC 漿脈在灌漿孔上方形成 2 條水平劈裂漿脈，如第 18 斷面 4 號孔(圖 5.64)。

綜上所述，本研究將歷時土水平雙環塞灌漿造成之漿脈流動分為以下三種型式。

### 5.5.1 A 型(四周填充型)漿液流動

在觀察完開挖斷面之漿液分布後，本研究發現開挖斷面上的漿脈呈現水平狀居多。而 CB 漿液在土層中的流動區域較超微粒水泥漿廣。因為 CB 漿在施灌時，礫石土層中的孔隙內只有水及空氣的存在，因此灌漿時 CB 漿便會在土層中朝四面發展填補孔隙，此即為 A 型(四周填充型)，如圖 5.65 所示。

### 5.5.2 B 型(蕈狀型)漿液流動

圖 5.66 為漿液自 TAM 流出後在三度空間土體內形成一蕈狀漿脈之俯視圖及前視圖。漿液自灌漿孔灌出後，在來自左右兩邊的壓力  $\sigma_h$  的作用下，漿液向上劈裂，在受到上一排灌漿形成堅實改良土的邊界束制，漿液向水平方向發展，形成蕈狀型漿脈。若開挖面與注入孔錯開，在開挖斷面上看不到漿脈與灌漿孔間的連結，形成一無梗蕈狀型漿脈。

### 5.5.3 C 型(水平劈裂型)漿液流動

依據水力破裂法理論(Goodman 1989)，若  $\sigma_r$  向力量大於  $\sigma_\theta$  向時，岩體會沿  $\sigma_r$  向並形成一以  $\sigma_\theta$  向為法向量的開裂面。但 Goodman 水力破裂法為水平向，本研究將此理論應用於此雙環塞灌漿工程，地盤內之垂直應力為  $\sigma_v$ ，假設因填土夯實造成水平土壓力增加(Chen and Fang 2008)，假設灌漿孔周圍水平向壓力增大並大於垂直向壓力，當灌漿壓力  $p$  大於垂直向壓力  $\sigma_v$  時，漿液可能往灌漿孔兩側左右水平劈裂(如圖 5.67)。

## 第六章

### 結論與建議

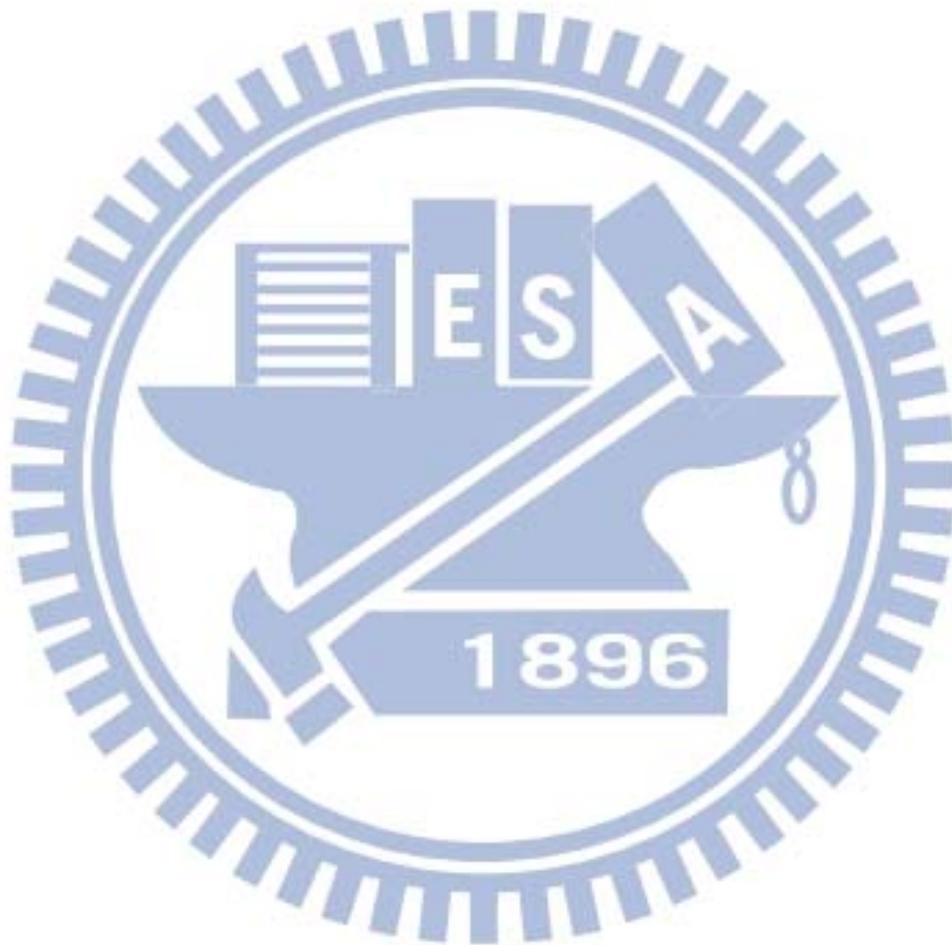
#### 6.1 結論

本研究探討水平雙環塞低壓灌漿之漿液在高鐵桃園站下方回填礫石土層中的分布情形，漿液注入後在隧道開挖，於現場記錄開挖斷面上的水泥皂土(CB 漿液)及超微粒之水泥(UFC 漿液)漿脈分佈狀況。依據所拍得的斷面照片，對小區域(灌漿孔周圍)、大區域(兩個或多個孔)將 CB 漿脈及超微粒水泥漿脈進行探討，獲得以下各項結論的形狀。

- 1、開挖斷面上的漿脈呈現水平狀居多，其中 CB 漿液在土層中的流動區域較超微粒水泥漿廣。因為 CB 漿在施灌時，礫石土層中的孔隙內只有水及空氣的存在，因此灌漿時 CB 漿便會在土層中朝四面流動填補孔隙。
- 2、當超微粒水泥灌入地層時，由於土壤中的孔隙已被 CB 漿所填滿，因此 UFC 灌漿壓力必須較灌注 CB 漿液注入壓力為高，才可以順利將超微粒水泥漿灌入地層中。因此，超微粒水泥除了填補地層中更小的孔隙外，也會在 CB 漿及土壤中形成水力劈裂。UFC 漿脈在斷面上的厚度明顯較 CB 漿脈的厚度為薄。
- 3、漿液自灌漿孔灌出後，在來自左右兩邊的壓力  $\sigma_h$  的作用下，漿液向上劈裂，在受到上一排灌漿形成上側堅實改良土的邊界束制時，漿液轉向水平方向發展，形成蕈狀型漿脈。若開挖面與注入孔位置錯開，在開挖斷面上看不到漿脈與灌漿孔間的連結，形成一無梗蕈狀型漿脈。
- 4、地盤內之垂直應力為  $\sigma_v$ ，填土之夯實造成地盤內水平土壓力增加，假設水平灌漿孔周圍水平向土壓力增大並大於垂直向壓力，當灌漿壓力  $p$  大於垂直向壓力  $\sigma_v$  時，依據水力破裂理論，注入之漿液向灌漿孔兩側水平劈裂。

## 6.2 建議

本研究的重點在於探討斷面上的漿液流動的機制，根據現場拍攝照片以及水力破裂理論解釋雙環塞低壓漿液在土層中行為，並無法精確的判斷斷面上的漿脈是由哪一個灌漿孔所貢獻，且未能對注入壓力、流量、時間進行更深入的研究。未來可以再蒐集更多的雙環塞灌漿地盤改良案例進行比較，以便更了解注入漿液在土層中的行為。



## 參考文獻

1. 中國土木水利工程學會(1995)，“基礎工程施工規範解說之研訂”，127-135。
2. 中鼎工程股份有限公司(2011)，“A18 車站地下連通到風險評估說明”。
3. 方永壽、林俊次、許仕達、鄭國雄、周黎明、蘇啟鑫、陳滄江(2006)，“聯絡通道的地盤改良與施工”，地工技術雜誌，第 108 期，第 81-90 頁。
4. 王振培(2007)，“水平灌漿地盤改良工法應用於軟弱黏土隧道之研究”碩士論文，中原大學。
5. 平岡成明(2003)，“地盤改良工法”，山海堂。
6. 泛亞建設工程股份有限公司(2011a)，“臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CE03B 施工標 A18 車站與高鐵桃園站聯通道工程補充地質調查報告”。
7. 泛亞建設工程股份有限公司(2011b)，“臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CE03B 施工標 A18 車站與高鐵桃園站站連通道隧挖區地盤改良施工計畫書”。
8. 泛亞建設工程股份有限公司(2011c)，“臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CE03B 施工標 A18 車站與高鐵桃園站聯通道觀測儀器工程計畫書”。
9. 泛亞建設工程股份有限公司(2011d)，“臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CE03B 施工標 A18 車站與高鐵桃園站地下聯通道工程隧挖段開挖施工計畫書”。
10. 泛亞建設工程股份有限公司(2011e)，“臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CE03B 施工標 A18 車站與高鐵桃園站站連通道隧挖區地盤改良灌漿檢討報告”。
11. 泛亞建設工程股份有限公司(2012)，“臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CE03B 施工標 A18 車站連通到工程觀測儀器安全監測系統 101 年 6 月報告”。
12. 倪志寬(2010)，“地盤灌漿工程實務”，詹氏書局。
13. 島田俊介、兼松陽(1979)，“最新地盤注入工法”，理工叢書。

14. 張作瑁(1982), “論砂礫石土的可灌性”, 水利學報第10期。
15. 張作瑁(1988), “地基礎曆手冊”, 中國建材工業出版社, 地304頁。
16. 郭林堯(2001), “以高壓噴射灌漿工法改良土壤之工程性質” 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所。
17. 陳瑞禾、林書田、吳以超(2006) “雙環塞灌漿應用於卵礫石層之初步探討”, 地工技術雜誌, 第108期, 第53-62頁。
18. 黃南輝、高祥生、郭國振、張兆麟(1994), “砂礫層對擠壓灌漿之反應”, 地工技術雜誌, 第47期, 第23-33頁。
19. 楊建西(1985), “現代灌漿技術在國內應用之探討”, 土木水利, 第十一卷, 第四期, 地25-34頁。
20. 楊國榮、王錦伍、詹榮鋒、黃敏祥、趙際禮(2006), “水平式雙環塞灌漿工法應用於臺北捷運聯絡通道開挖之案例”, 地工技術雜誌, 第108期, 第71-80頁。
21. 廖洪鈞、潘信宏、盧錫煥(1992), “建築物下陷傾斜之灌漿處理對策”, 地工技術雜誌, 第40期, 第62-76頁。
22. 廖洪鈞(1994), “土壤灌漿於水位下管幕地下道工程之應用”, 地工技術雜誌, 第47期, 第35-54頁。
23. 趙基盛、陳福勝、何泰源(1994), “藥液灌漿工法之設計”, 地工技術雜誌, 第47期, 第5-21頁。
24. 臺灣世曦工程顧問有限公司(2008), “臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 CA450A 標土建工程潛盾機設計及製造計畫書”。
25. Au, S. K. A., Soga, K., Jafari, M. R., Bolton, M. D., and Komiyama, K. (2003). “Factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clay.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(3), 254–262.
26. Bezuijen, A., Kleinlugtenbelt, R., and van Tol, A. F. (2006). “Laboratory tests compaction or compensation grouting.” *Proc., 6th Int. Conf. on Physical Modeling, Hong Kong*, 1245–1251.
27. Bezuijen, A., Sanders, M. P. M., den Hamer, D., and van Tol, A. F. (2007). “Laboratory tests on compensation grouting, the influence of grout bleeding.” *Proc., 33<sup>rd</sup> World Tunnel Congress, Prague*, 395–401.
28. Bezuijen, A., and van Tol, A. F. (2007). “Compensation grouting in sand,

- fractures and compaction.” Proc., XIV European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, 1257–1262.
29. Bezuijen, A., van Tol, A. F., and Sanders, M. P. M. (2008). “Mechanisms that determine between fracture grouting and compaction grouting in sand.” Proc., 6th Int. Symp. On Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Shanghai, 267–271.
  30. Bezuijen, A., Te Grotenhuis, R., van Tol, A.F., Bosch, J.W., and Haasnoot, J.K. (2011). “Analytical Model for Fracture Grouting in Sand.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 137, No. 6, 611-620.
  31. Das, Braja. M., (2007). “Principles of Foundation Engineering.” sixth edition, Nelson, United States.
  32. Gebhart, Lloyd R., (1980). “Preliminary Glossary of Terms Relating to Grouting,” Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.106, No.7, 803-815.
  33. Goodman, Richard. E., (1989). “Rock Mechanics.” second edition, John Wiley, New York.
  34. Kleinlugtenbelt, R., (2005). “Compensation grouting, laboratory tests in sand.” M. Sc. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
  35. Murdoch, L. C. (1992). “Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part I. Methods and observations.” Geotechnique, 43(2), 255-265.
  36. Sanders, M. P. M. (2007). “Hydraulic fracture grouting, laboratory experiments in sand.” M.Sc. thesis, Delft Univ. of Technology, Netherlands.

表 4.1 機具設備一覽表

(摘自泛亞工程, 2011b)

編號	機具名稱	型號/規格	數量
1	鑽孔機	D2-JS	3 台
2	兩液灌漿機	SP-4	3 台
3	單筒拌合機	300 L	2 台
4	雙筒拌合機	200 L×2	1 台
5	漿液儲存桶	500 L	1 台
6	雙環塞管	∅=0.5"	3~4 組
7	TAM 管	∅=37 mm	200 支
8	流量計	GPF-001	3 台
9	壓力表	35 kg/cm <sup>2</sup>	10 個
10	抽水機	50 mm	1 組
11	發電機	150 KVA	1 組
12	自動記錄器	0~30 L/min, 0~60 kgf/cm <sup>2</sup>	3~4 台

表 4.2 CB 漿配比表

(摘自泛亞工程, 2011b)

材料	配比
卜特蘭第一型水泥 (kg)*	150~250
皂土 (kg)**	50~65
水 (L)	900
小計 (L)	1000

\*符合 CNS 61 R2001 或 CNS 3654IS 型

\*\*符合 API 13A 2004

表 4.3 超微粒水泥漿配比表

(摘自泛亞工程, 2011b)

材料	配比
超微粒水泥 (kg)	431
添加劑 (kg)	8 (約水泥量 2%)
水 (L)	862
小計 (L)	1000

表 4.4 灌漿壓力管理表

(摘自泛亞工程, 2011b)

編號	項目	灌漿壓力	備註
1	一次灌漿 (CB 漿)	$\geq$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$	灌漿量達設定量時，若該階壓力 $P \geq$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 則提階。
		$<$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$	灌漿量設定量時，該階壓力 $P <$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 則提階。
		$>$ 灌注初始壓力 $+15 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$	若灌漿初始壓力為灌注初始壓力 $+15 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 則灌漿 10 L，若壓力未下降則提階。
2	二次灌漿 (超微粒 水泥漿)	$\geq$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$	灌漿量設定量時，若該階壓力 $P \geq$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 則提階。
		$<$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$	灌漿量設定量時，該階壓力 $P <$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 則灌漿量提昇 1.5 倍，若該階壓力 $P \geq$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 則提階。
		$<$ 灌注初始壓力 $+2 \text{ kg/cm}^2$	灌漿量設定量時，該階壓力 $P <$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 則灌漿量提昇 1.5 倍，該階持續壓力 $P <$ 灌注初始壓力 $+0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 則待全部孔位各位階灌漿完成後再補灌該階。
		$>$ 灌注初始壓力 $+15 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$	若灌漿初始壓力為灌注初始壓力 $+15 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 則灌漿 10 L，若壓力未下降則提階。

表 4.5 注入率  
(摘自泛亞工程, 2011b)

項目	一次灌注 CB 漿	二次灌注 超微粒水泥漿	合計
隧挖區(C 區)	6%	6%	12%
隧挖區旁(A、B、D、E 區)	10%	10%	20%

表 5-1 隧道開挖工程施工機具一覽表  
(摘自北勝企業, 2011)

機具名稱	數量 (台)
經緯儀	1
水準儀	1
吊卡車(21 T)	1
挖土機(PC-100)	1
挖土機(PC-45)	1
鏟裝機	1
挖土機(PC-300 以上)	1
發電機(60 KVA)	1
抽水機	2~3
傾卸卡車(8 m <sup>3</sup> )	2~3
噴漿機(濕式)	1
空壓機(450 HP)	1
送風機(60 C.M.M)	2

表 5-2 隧道開挖工程施工人員配置表  
(摘自泛亞工程, 2011d)

人員名稱	數量(名)
現場工程師	3
物料管理	3
機具操作手	2
擋土支撐工	1
一般工	1

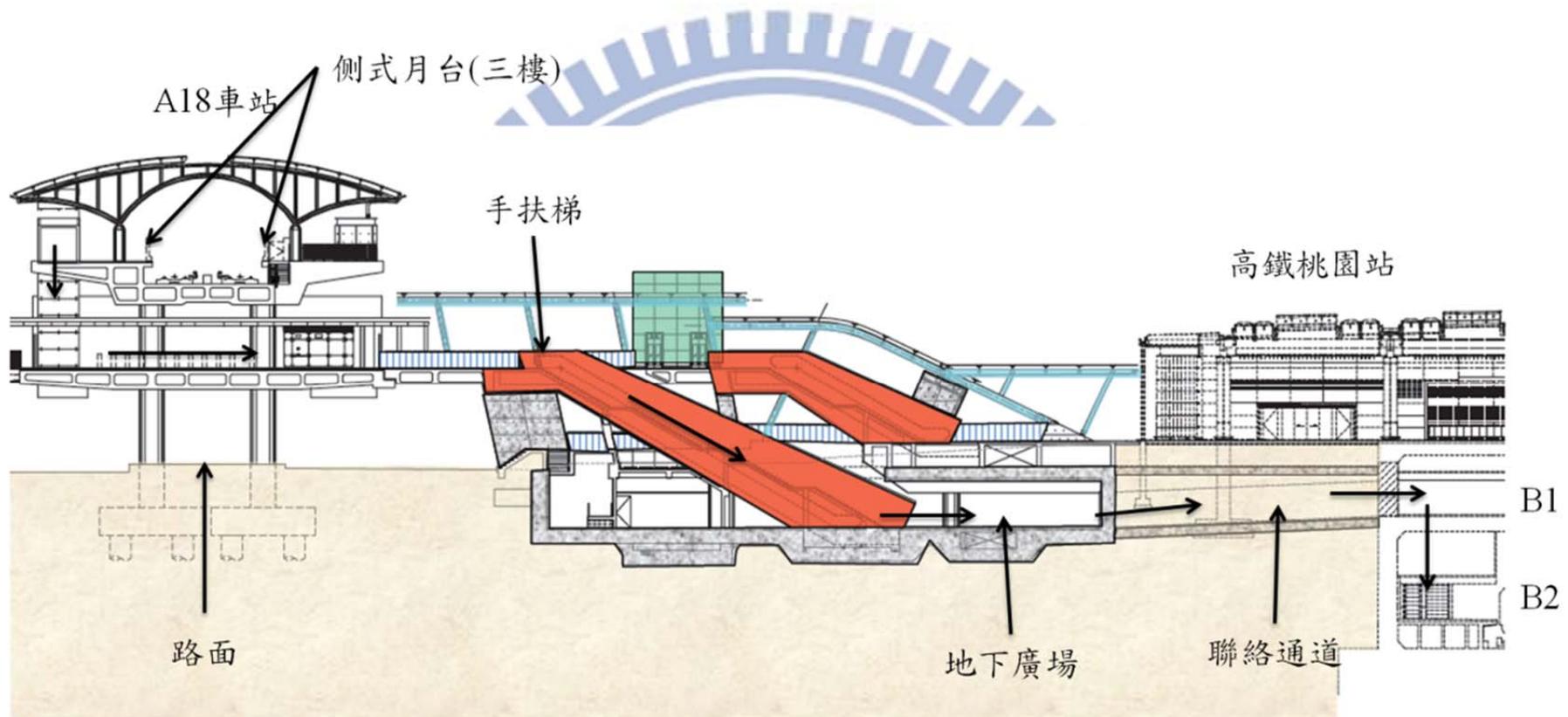
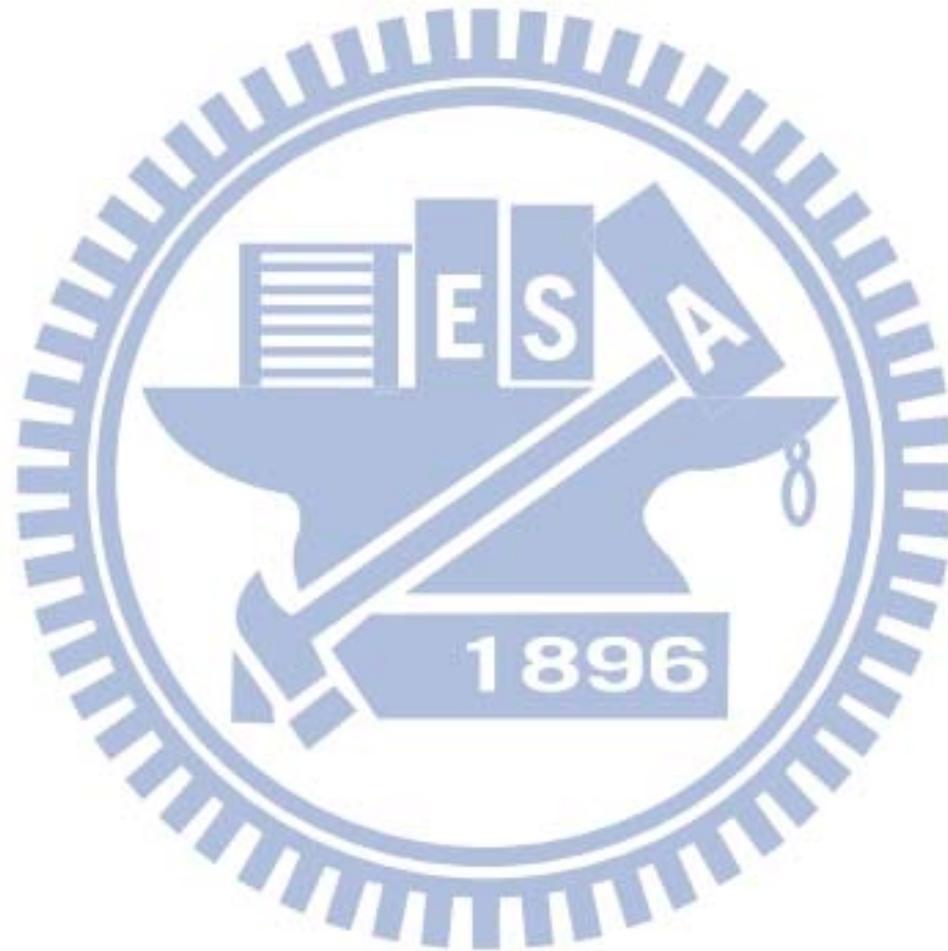
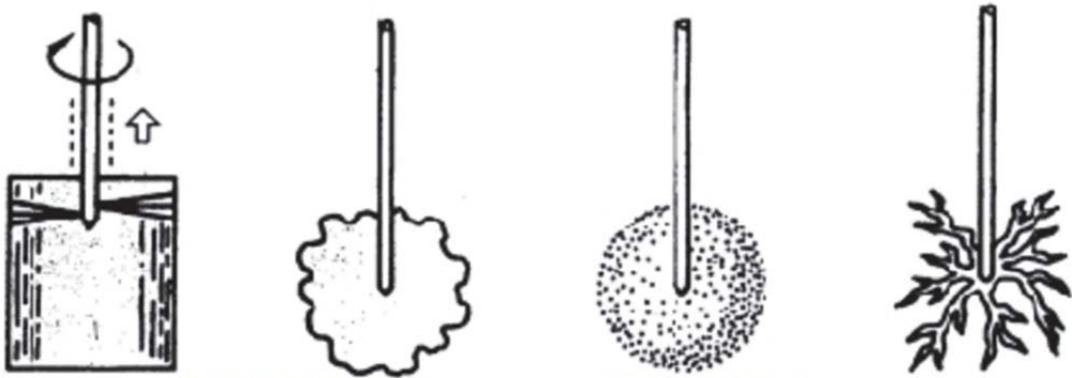


圖 1.1 由機場捷運 A18 車站聯絡通道前往高鐵桃園站 B1 穿堂層之動線側視圖

(摘自中鼎工程, 2011)





(a) 高壓噴射灌漿 (b) 擠壓灌漿 (c) 滲透灌漿 (d) 脈狀灌漿

圖 2.1 各種灌漿機制

(摘自倪至寬, 2010)

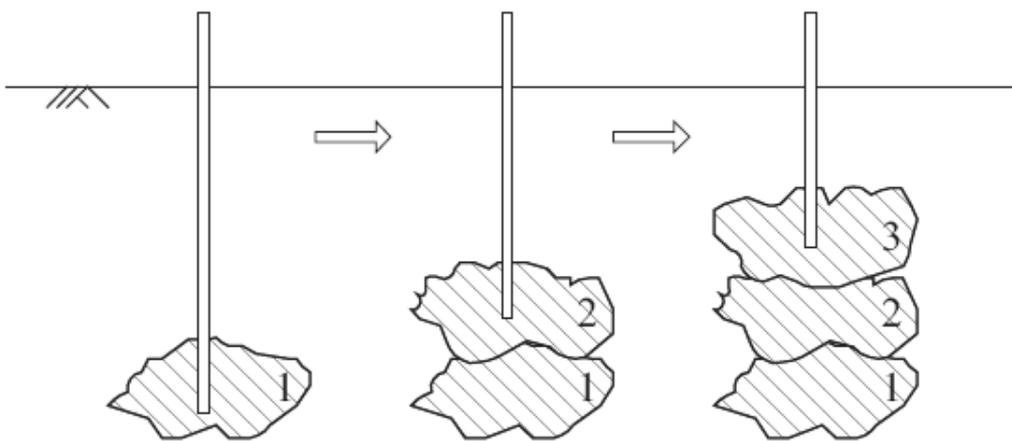


圖 2.2 上升式施灌法

(摘自倪至寬, 2010)

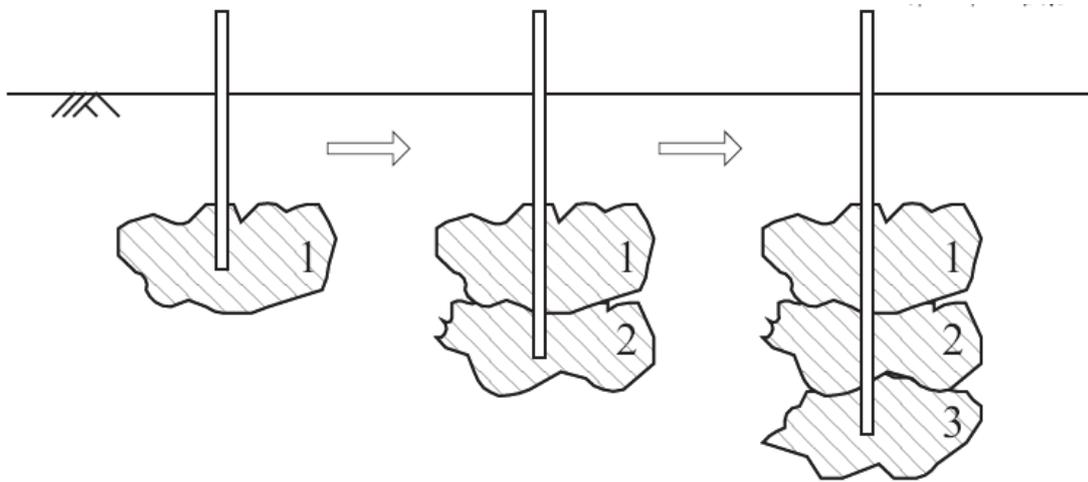


圖 2.3 下降式施灌法  
(摘自倪至寬, 2010)

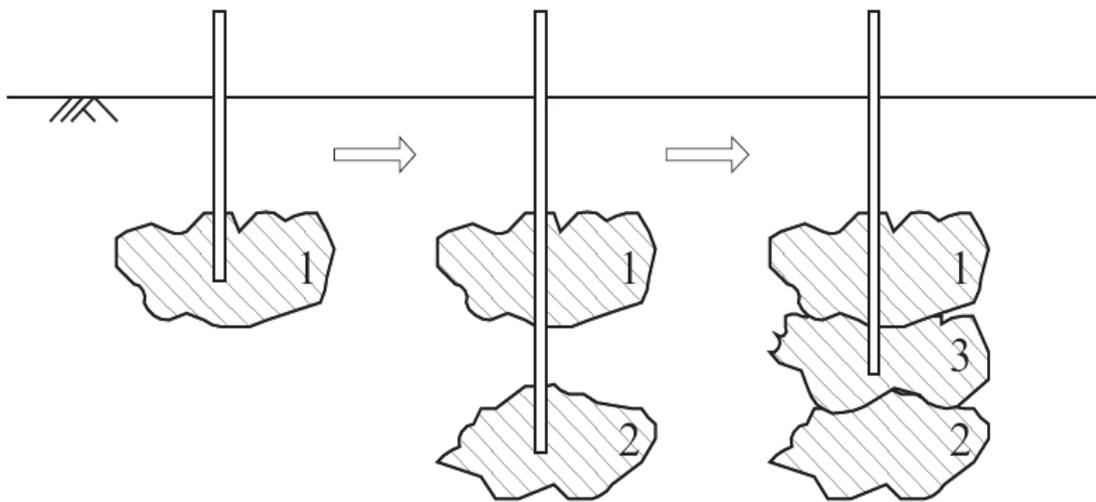


圖 2.4 垂直方向跳階式施灌法  
(摘自倪至寬, 2010)

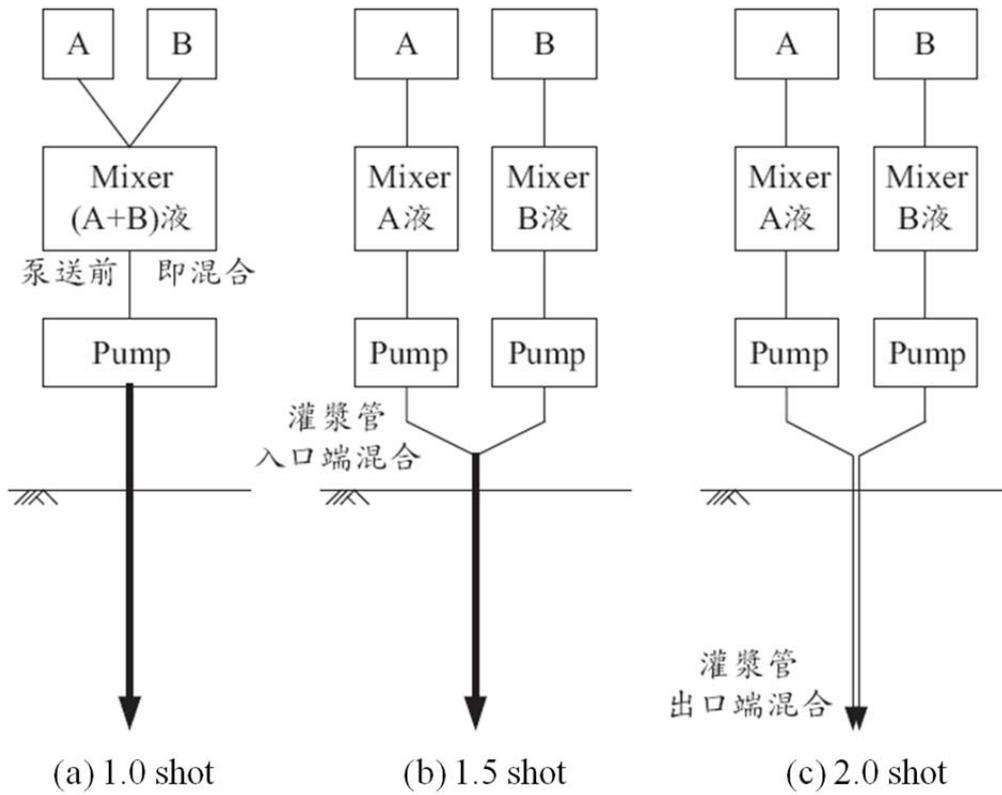


圖 2.5 漿液混合方式示意圖  
(摘自倪至寬, 2010)



圖 2.6 懸濁型漿液滲透路徑阻塞示意圖  
(摘自陳瑞禾, 2006)

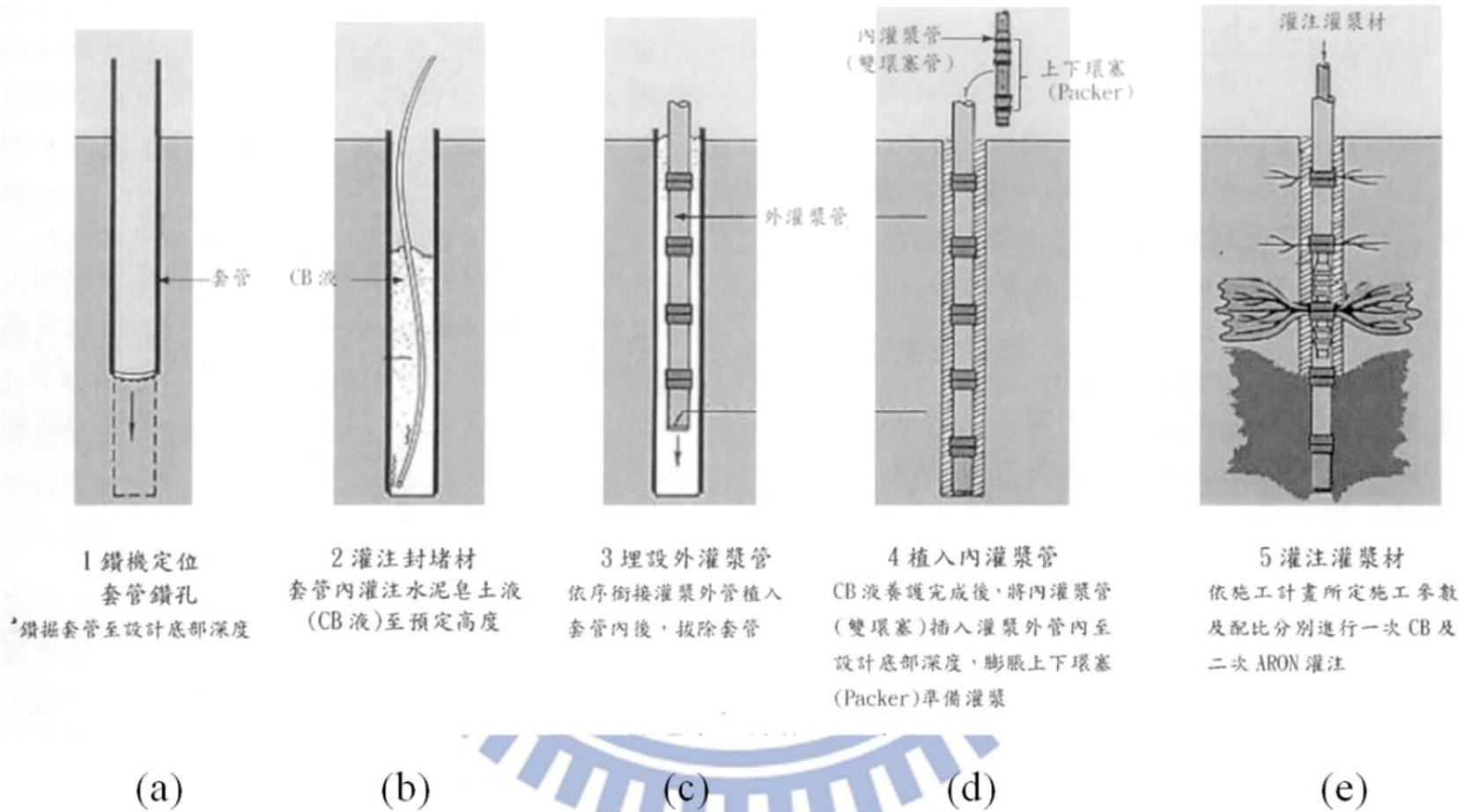
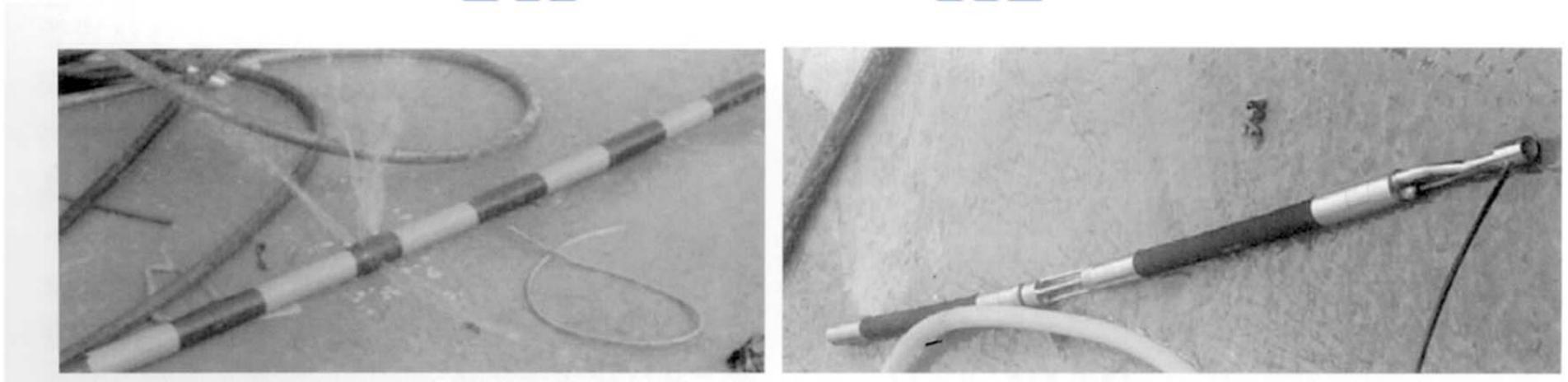


圖 2.7 雙環塞灌漿工法施工步驟 (a)套管鑽孔 (b)灌注封堵材 (c)埋設灌漿外管 (d)植入灌漿內管 (e)灌注灌漿材  
(摘自陳瑞禾等, 2006)



(a)外灌漿管(sleeve pipe)

(b)內灌漿管(雙環塞管)

圖 2.8 雙環塞灌漿管 (a)外灌漿管(sleeve pipe) (b)內灌漿管(雙環塞管)

(摘自陳瑞禾, 2006)

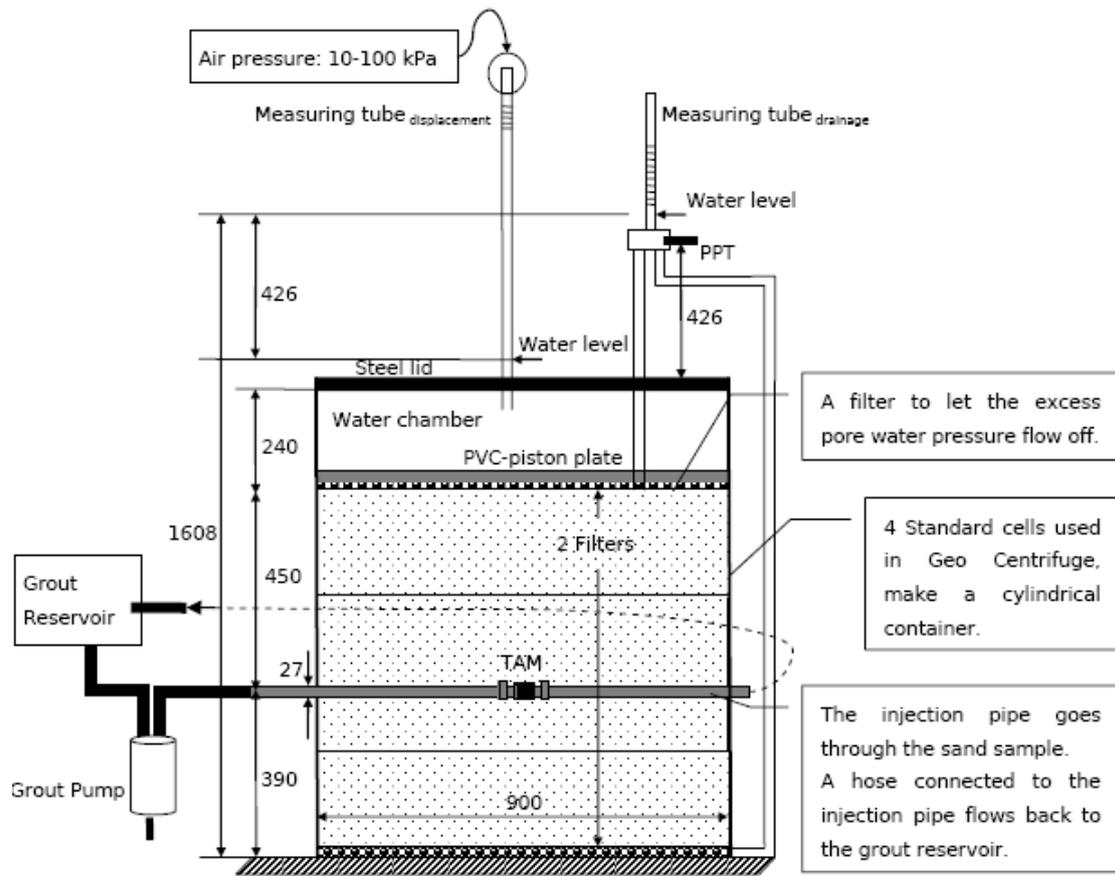
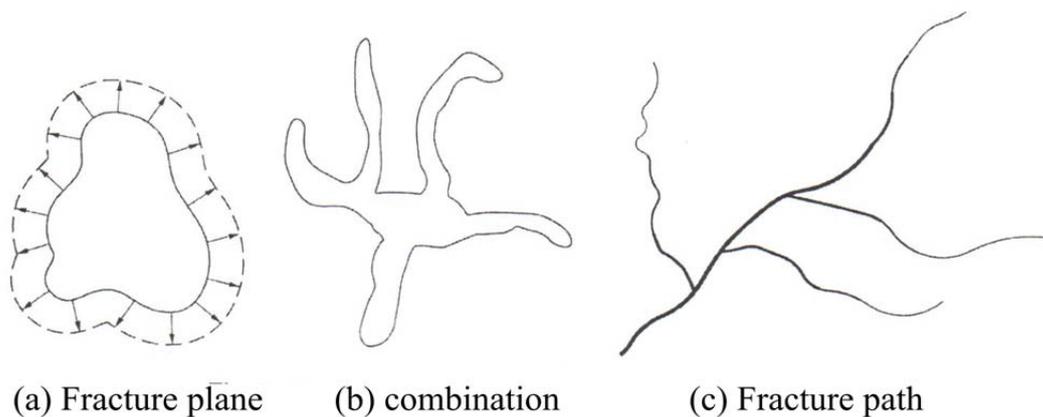


圖 2.9 荷蘭 Delft 大學灌漿實驗設備裝置圖  
(after Kleinlugtenbelt, 2005)



(a) Fracture plane      (b) combination      (c) Fracture path

圖 2.10 漿液在砂土中的劈裂行為 (a) 漿液在土壤中沿水平方向平面擴散 (b) 漿液在土層中劈裂並同時往水平方向滲透擴散 (c) 漿液在土層中劈裂宛如樹枝狀  
(after Bezuijen et al., 2011)

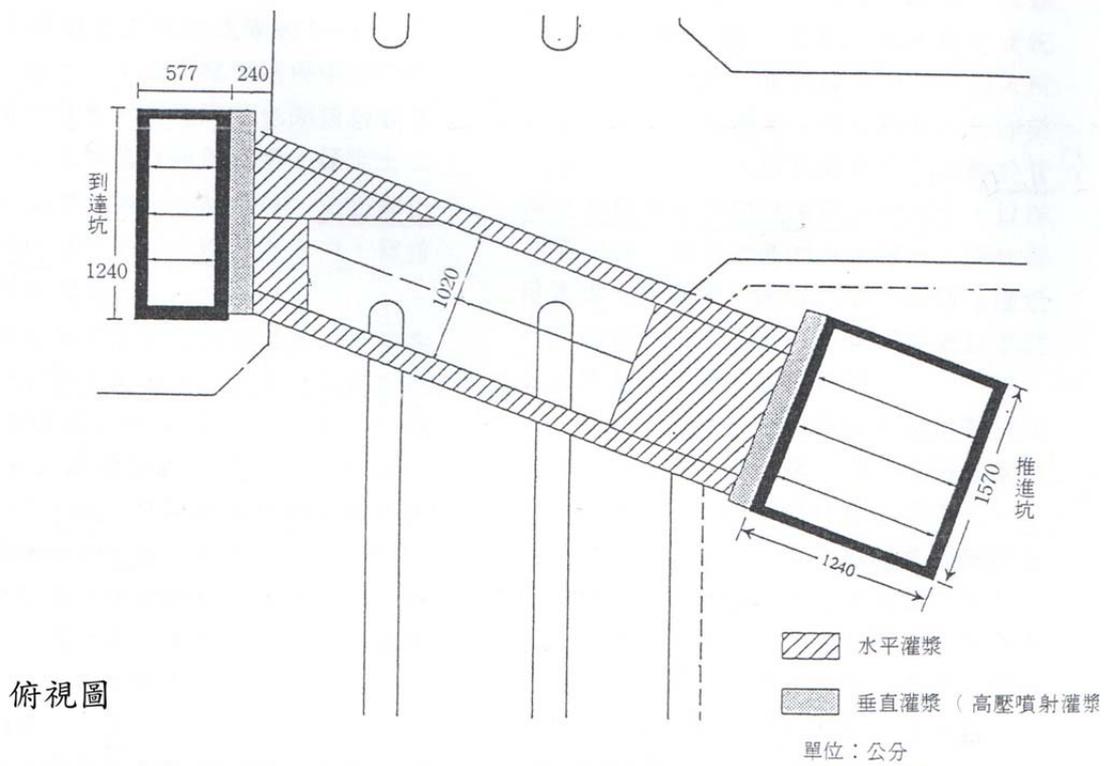
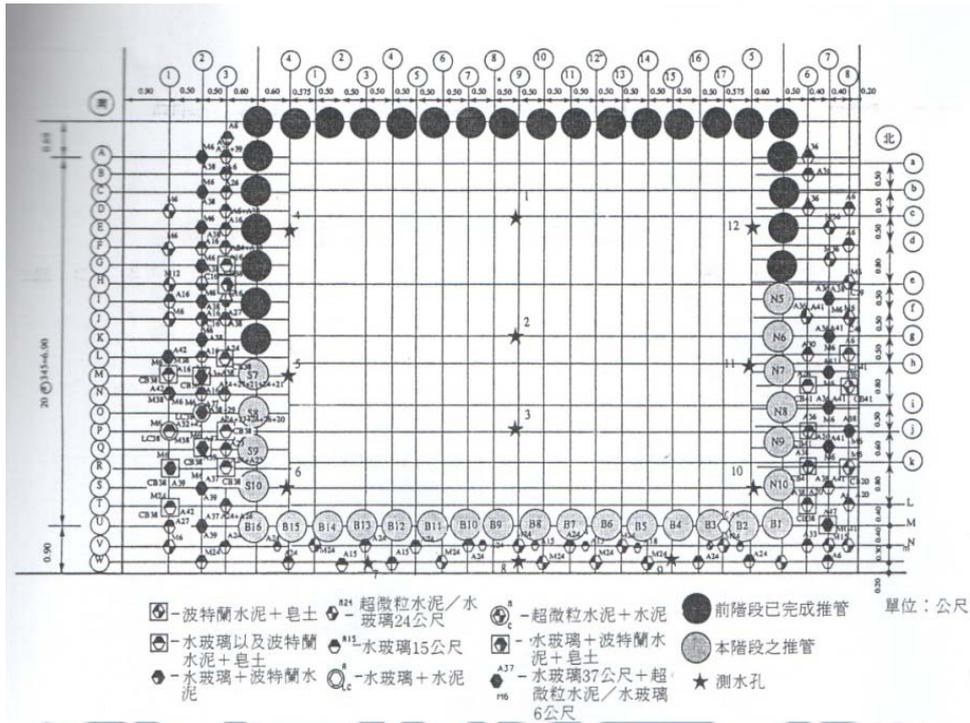
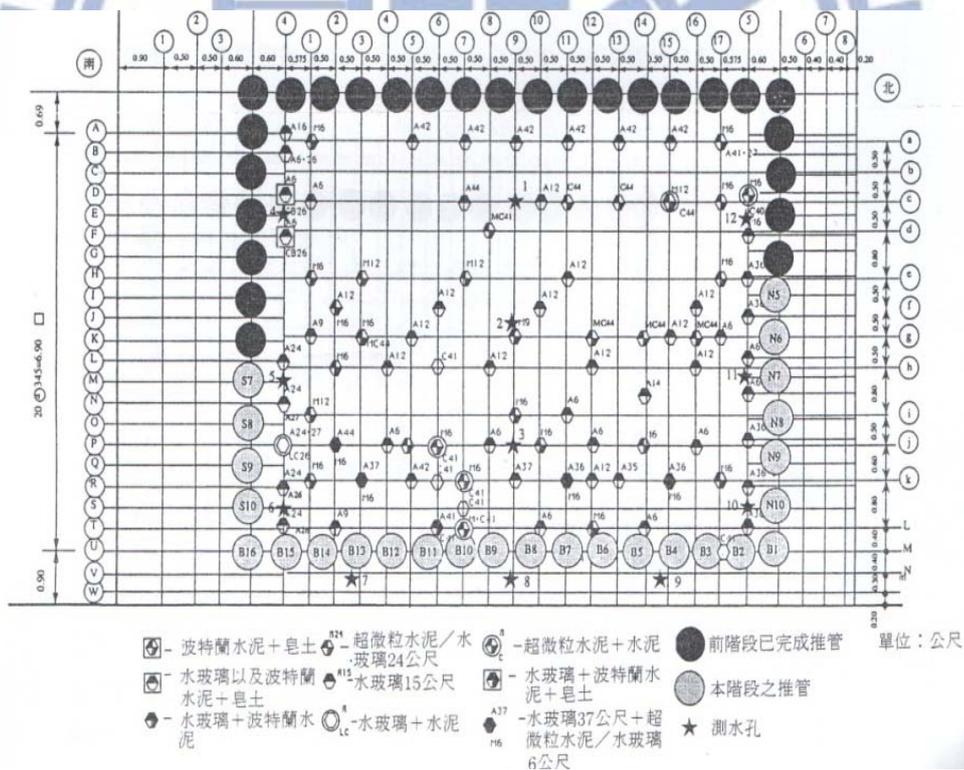


圖 2.11 臺北市某重要道路地下道工程地盤改良之俯視圖  
(摘自廖洪鈞, 1994)



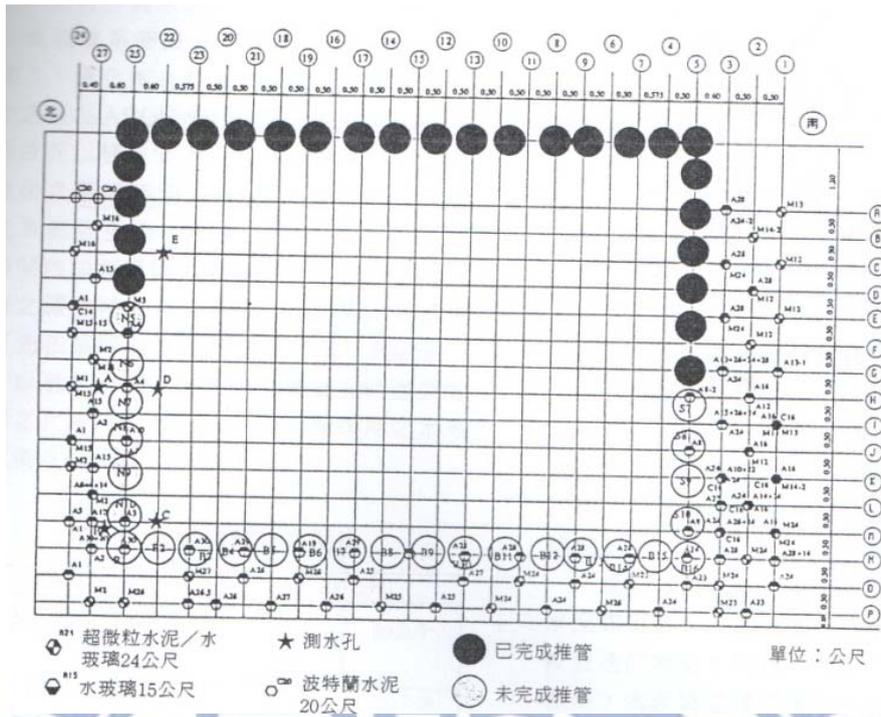
(a) 推進坑處推管外側水平止水灌漿孔位圖



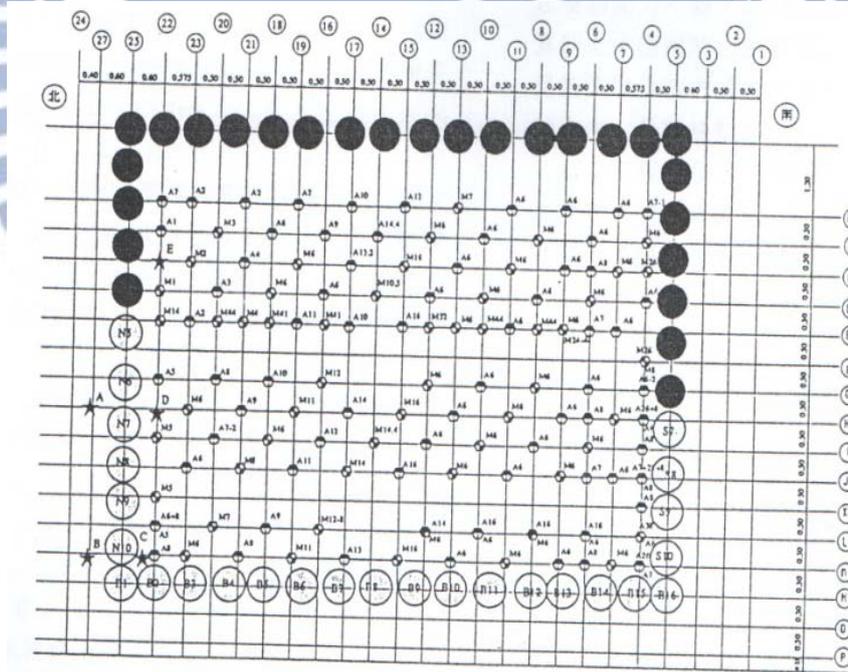
(b) 推進坑處推管內側灌漿孔位圖

圖 2.12 臺北市地下道工程推進坑灌漿孔位圖

(摘自廖洪鈞, 1994)



(a) 到達坑處推管外側灌水平止水漿孔位圖



(b) 到達坑處推管內側灌漿孔位圖

圖 2.13 臺北市地下道工程到達坑灌漿孔位圖  
(摘自廖洪鈞, 1994)

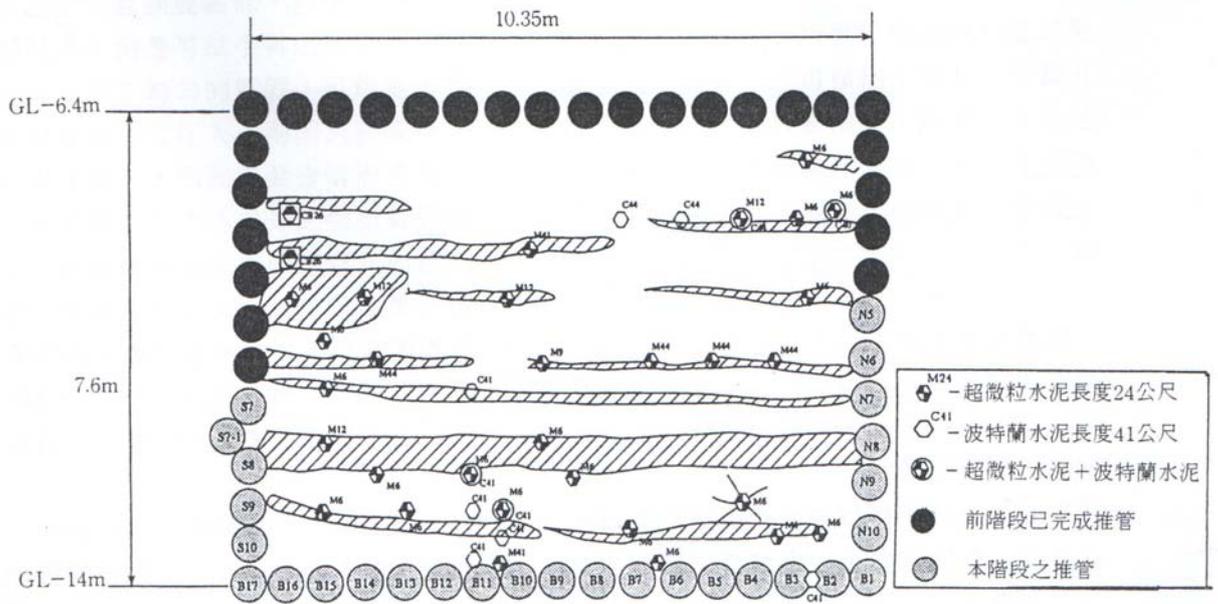


圖 2.14 開挖後距推進坑 2 m 處之漿液分佈和孔位關係圖  
(摘自廖洪鈞, 1994)

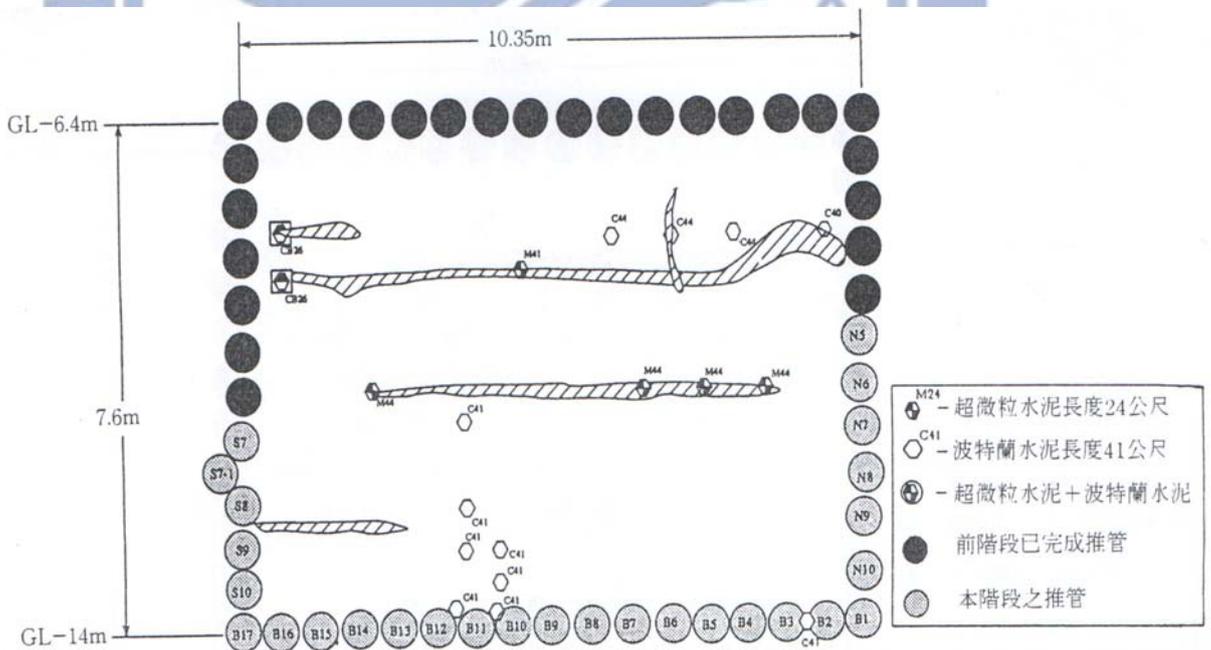


圖 2.15 開挖後距推進坑 23 m 處之漿液分佈和孔位關係圖  
(摘自廖洪鈞, 1994)

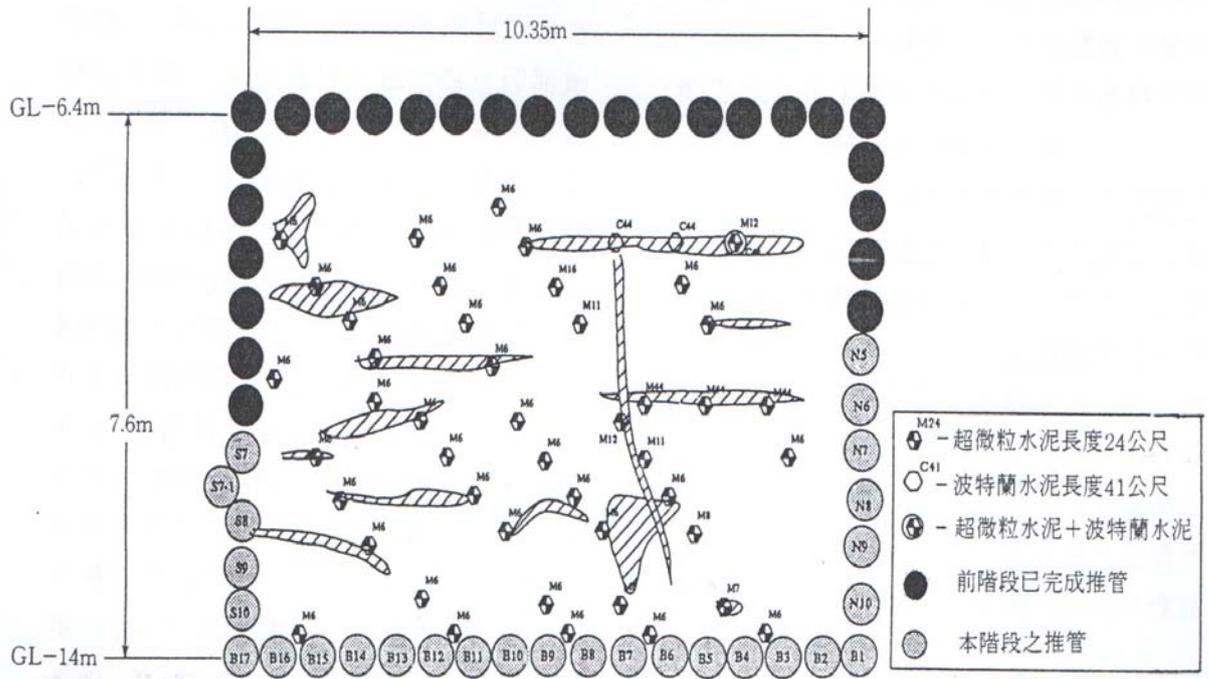


圖 2.16 開挖後距推進坑 44 m 處之漿液分佈和孔位關係圖  
(摘自廖洪鈞, 1994)

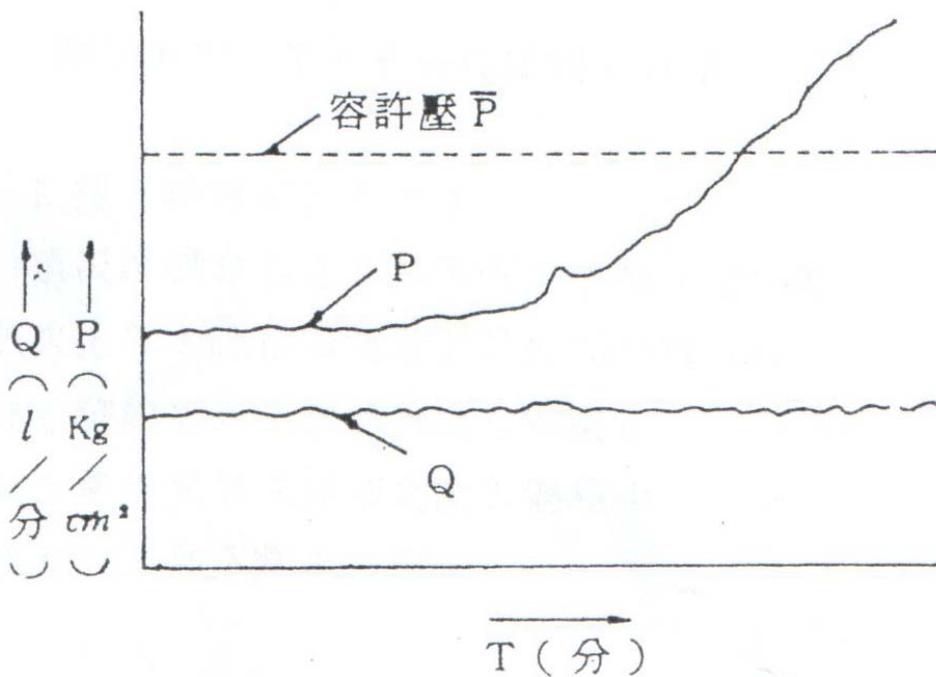


圖 2.17 A 型 T-P-Q 曲線圖  
(摘自島田俊介, 1979)

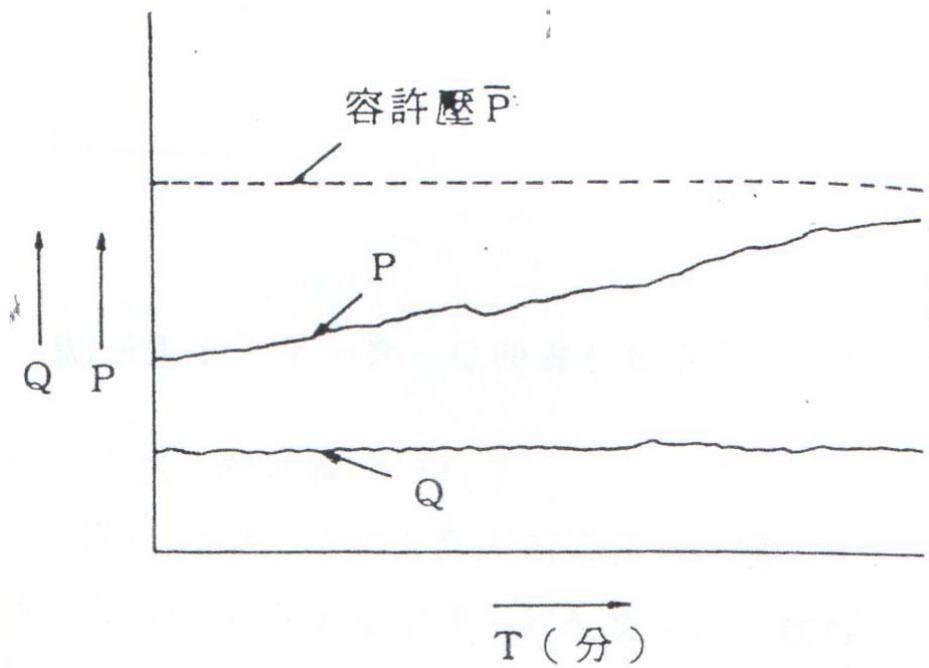


圖 2.18 B 型 T-P-Q 曲線圖  
(摘自島田俊介, 1979)

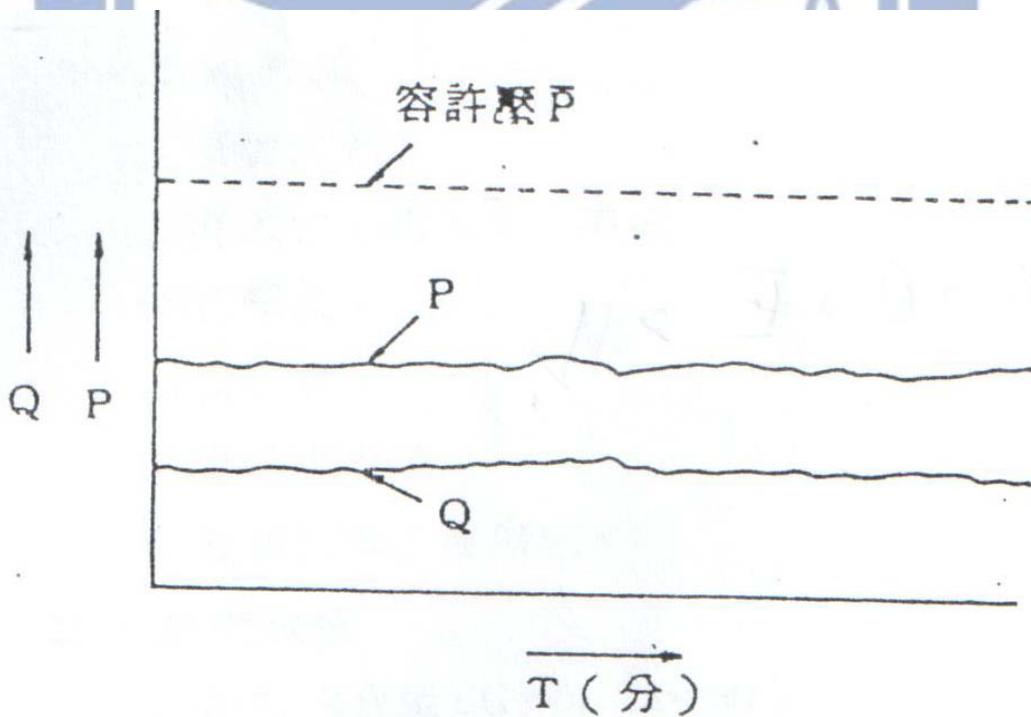


圖 2.19 C 型 T-P-Q 曲線圖  
(摘自島田俊介, 1979)

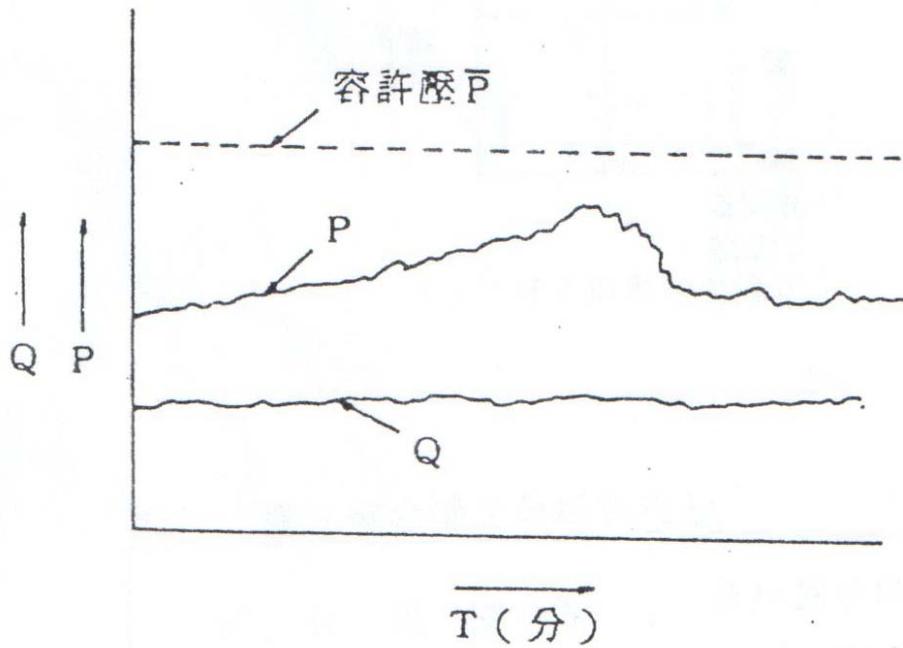


圖 2.20 D 型 T-P-Q 曲線圖  
(摘自島田俊介, 1979)

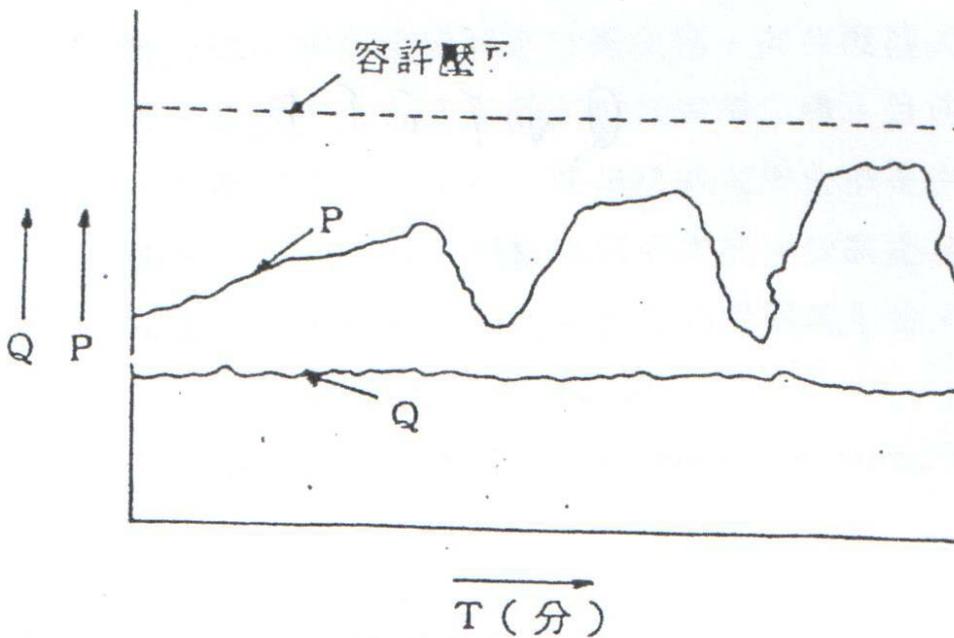


圖 2.21 E 型 T-P-Q 曲線圖  
(摘自島田俊介, 1979)

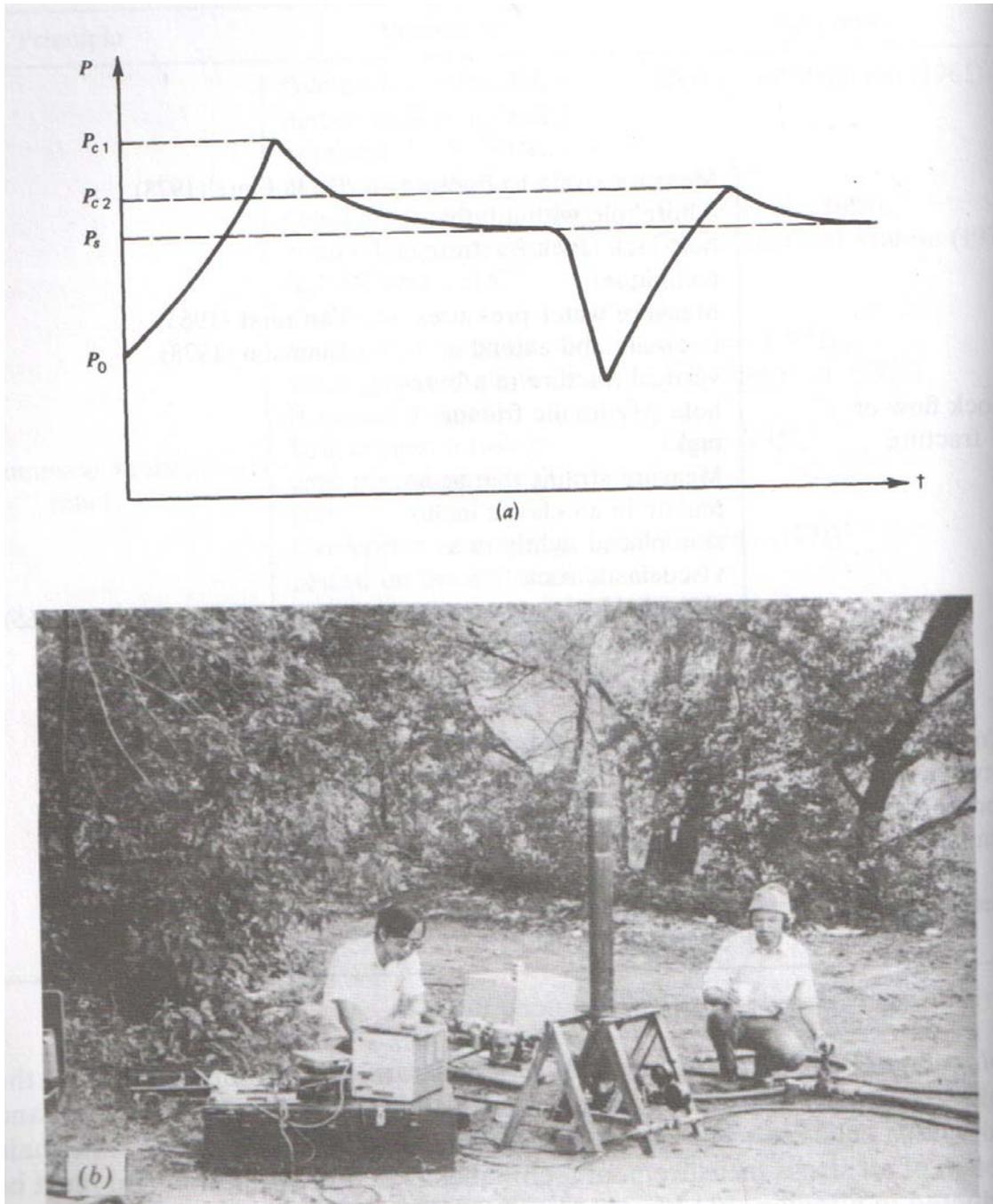


圖 2.22 水利破裂 (a)壓力歷時曲線及 (b)施工相片  
(after Goodman, 1989)

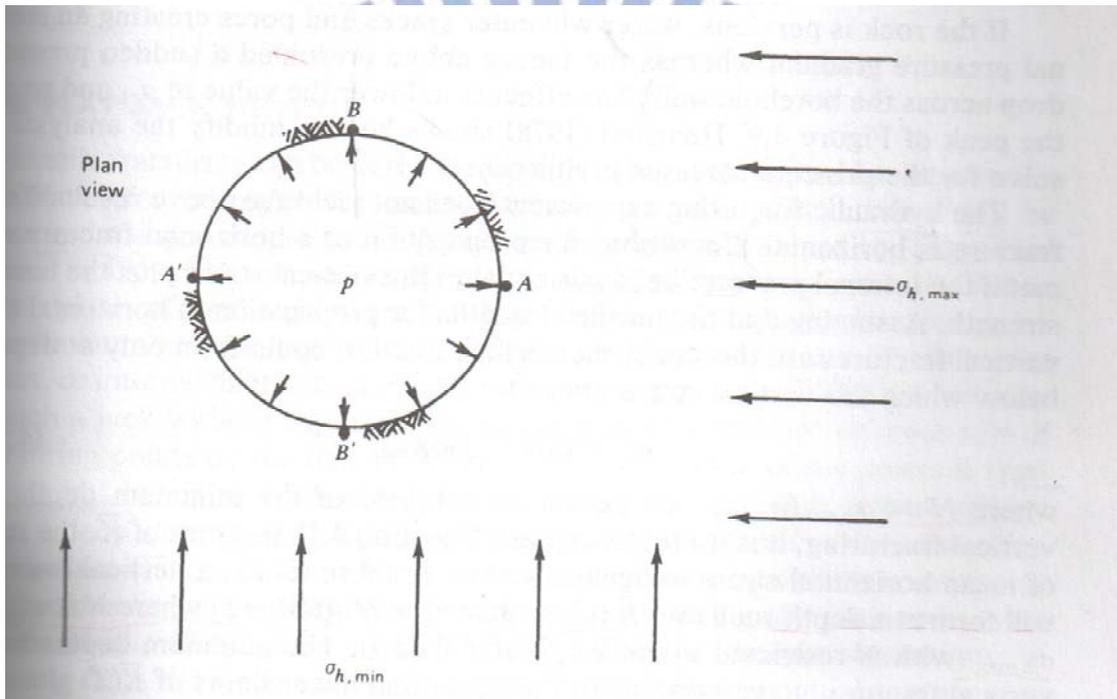


圖 2.23 Location of critical points around the borehole used for hydraulic fracture (after Goodman, 1989)

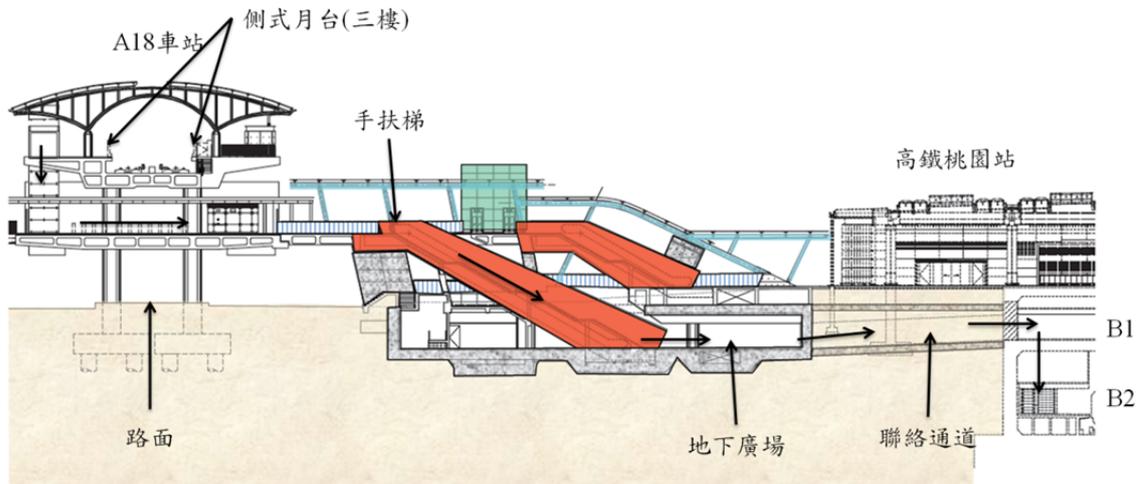


圖 3.1 由機場捷運 A18 車站聯絡通道前往高鐵桃園站 B1 穿堂層之動線側視圖  
(摘自中鼎工程, 2011)

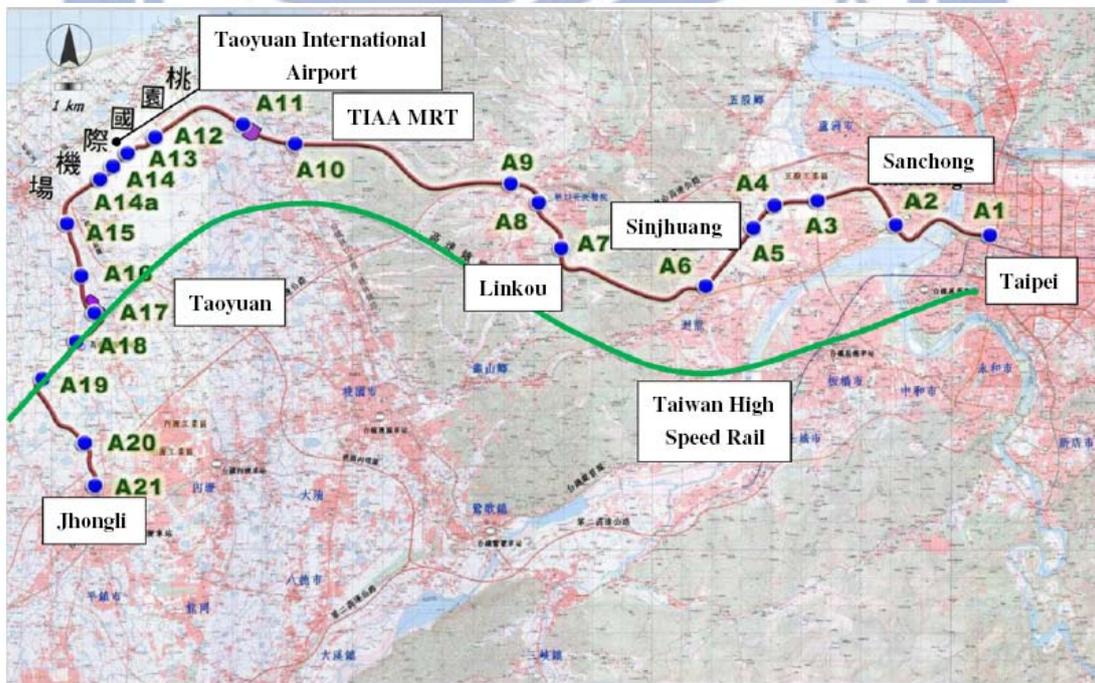


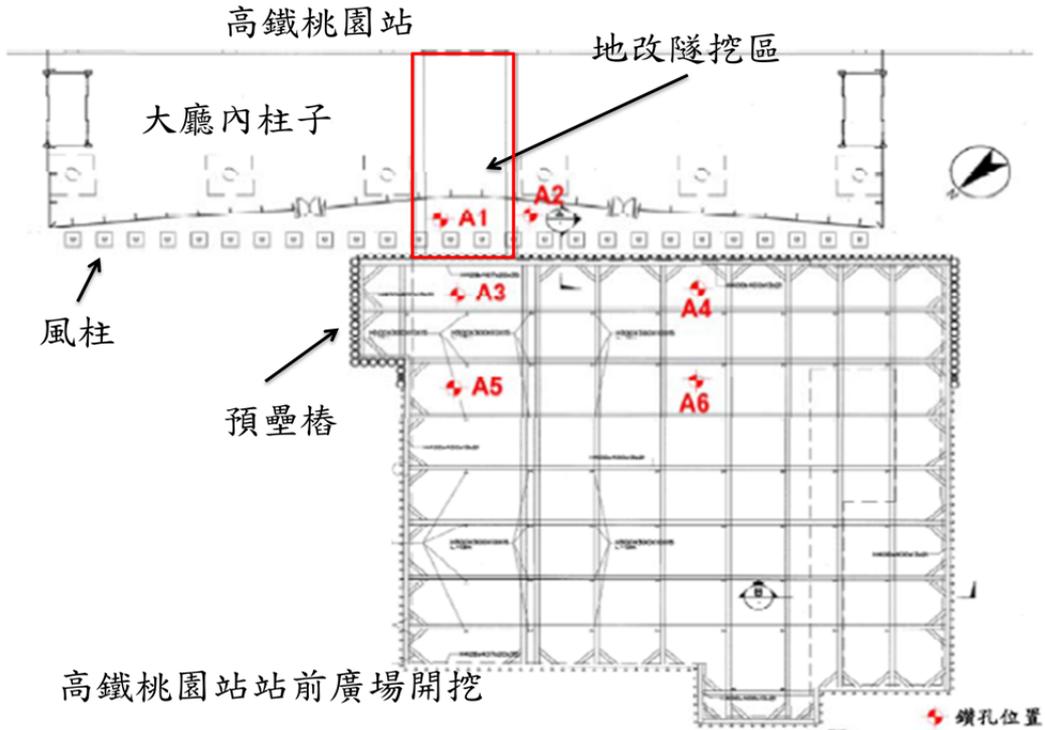
圖 3-2 臺灣高鐵路線圖與桃園國際機場聯外捷運路線圖  
(摘自臺灣世曦顧問公司, 2008)



圖 3-3 機場捷運 A18 車站



圖 3-4 高鐵桃園站



高鐵路園站站前廣場開挖

圖 3-5 鑽孔位置圖

(摘自泛亞工程, 2011a)

大亞土壤技術顧問有限公司 GREAT ASIA ENGINEERING CONSULTANT INC.		地層鑽孔柱狀圖			
孔號:A-1		地下水位: -6.80 m			
深度: 20.1m		日期:100.06.24-06.28			
		工程名稱: 機場捷運系統建設CE03B施工標A18 站地下連通道補充地質鑽探工程			
深度 (m)	柱狀圖	N 值 (Recovery %)	土樣 編號 (RQD%)	土壤 分類	地層狀況說明
1		(80) 100/13cm	- S-1-0	-	水泥鋪面及混凝土夾卵礫石、細砂 (0-0.5m水泥面, 0.5-0.8m混凝土, 0.8-1.0m為卵礫石夾細砂, 1.00-1.10m為混凝土) 1.10m
2		(86)	-	-	
3		41	S-2-0	-	
4		(50) 100/8cm	- S-3-0	-	級配層; 卵礫石夾棕黃色粉 土質細砂及混凝土 4.30m
5		(87)	-	-	混凝土 4.80m
6		(45) (85)	- S-4-0	-	級配層; 卵礫石夾棕黃色粉土 質細砂及混凝土 7.30m
7		(82) 100/12cm	- S-5-0	-	
8		(98) 100/5cm	- S-6-0	-	卵礫石夾灰色粉土質細砂 8.40m

圖 3.6 A1 鑽孔試驗土壤類別與深度關係圖

(摘自泛亞工程, 2011a)

 大亞土壤技術顧問有限公司 GREAT ASIA ENGINEERING CONSULTANT INC.		地層鑽孔柱狀圖			
孔號:A-2		地下水位: -6.80 m			
深度: 20.12m		日期:100.06.20~06.23			
工程名稱: 機場捷運系統建設CE03B施工標A18 站地下連通道補充地質鑽探工程					
深度 (m)	柱狀圖	N 值 (Recovery %)	土樣編號 (RQD%)	土壤分類	地層狀況說明
1		14	S-1-0	-	水泥鋪面 0.50m
2		(81)	-	-	棕黃色粉土質細砂, 中等緊密 1.50m
3		48	S-2-0	-	級配層; 卵礫石夾棕黃色粉土質 細砂偶夾混凝土、磚塊
4		100/12cm	S-3-0	-	4.30m
5		(91)	-	-	混凝土 4.90m
6		30-100/12cm	S-4-0	-	級配層; 卵礫石夾棕黃色粉土質 細砂
7		(78)	-	-	7.30m
8		100/11cm	S-5-0	-	7.30m
		(96)	-	-	卵礫石夾灰色粉土質細砂
		100/12cm	S-6-0	-	8.35m

圖 3.7 A2 鑽孔試驗土壤類別與深度關係圖  
(摘自泛亞工程, 2011a)

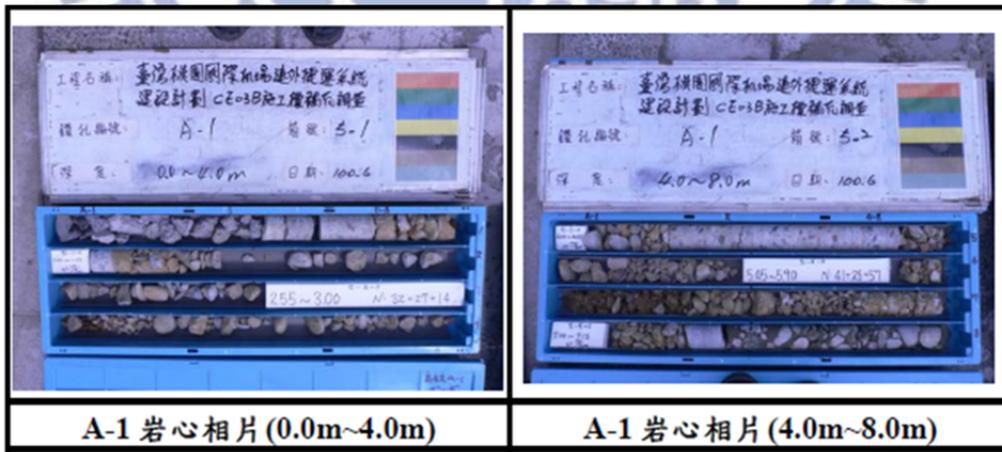


圖 3.8 A1 鑽孔土壤取樣岩心相片  
(摘自泛亞工程, 2011a)

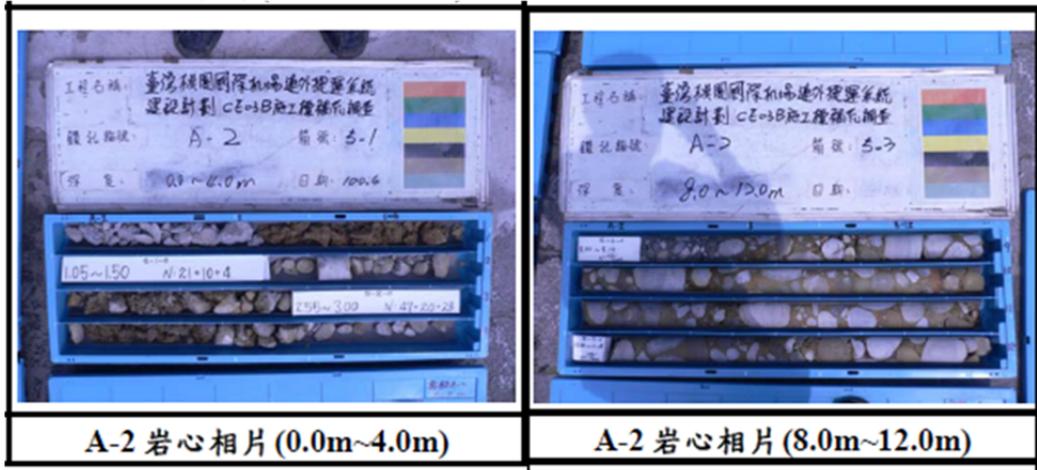


圖 3.9 A2 鑽孔土壤取樣岩心相片  
(摘自泛亞工程, 2011a)

地表高程

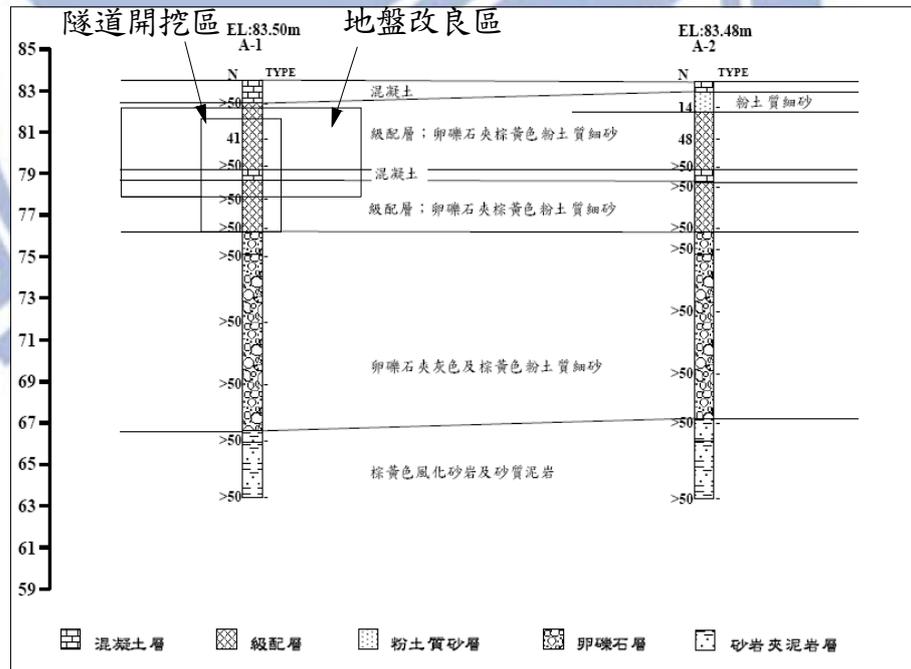


圖 3-10 地盤改良區地層剖面側視圖  
(摘自泛亞工程, 2011a)

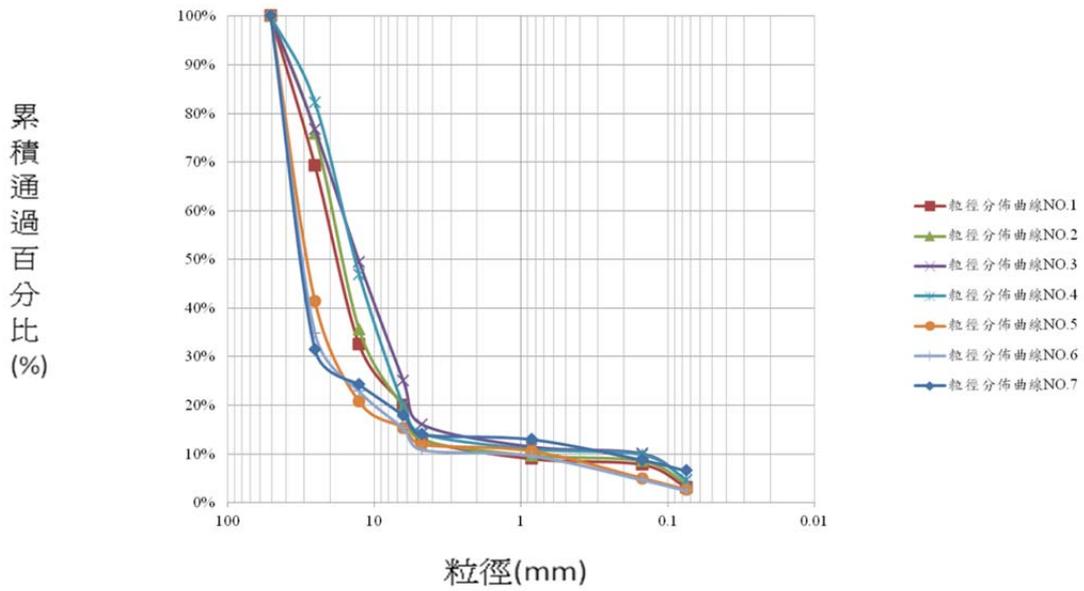


圖 3.11 篩分析試驗結果

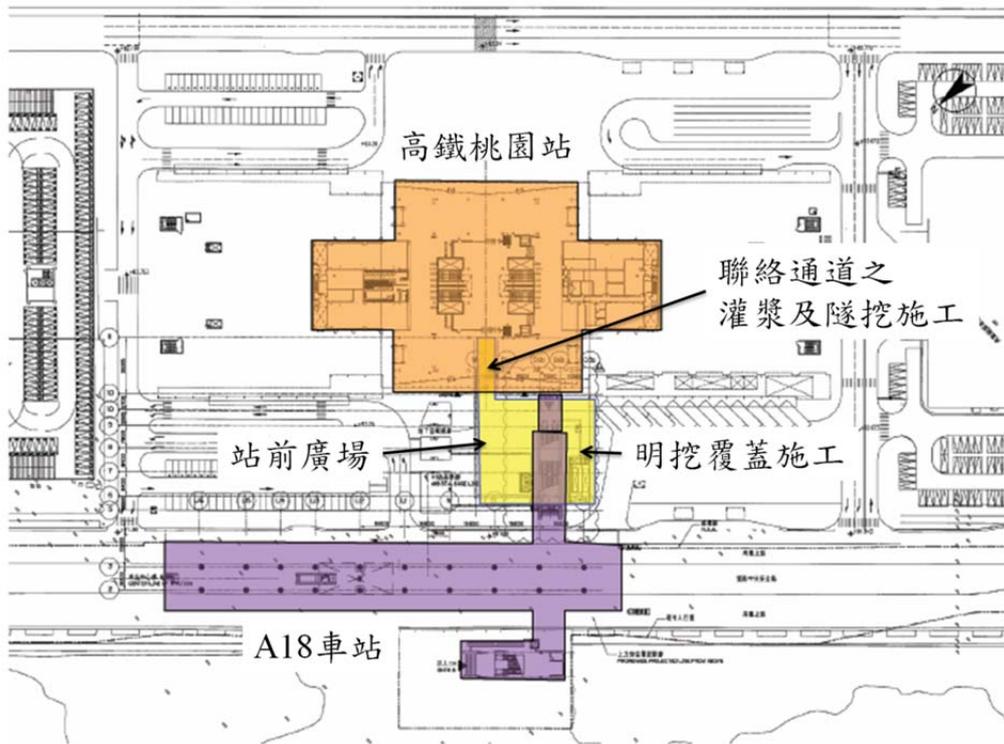


圖 3.12 明挖覆蓋施工及隧道開挖施工工區俯視圖  
(摘自中鼎工程, 2011)



圖 3.13 地下廣場開挖區與高鐵桃園站間施作微型樁  
(摘自泛亞工程, 2011)



圖 3.14 微型樁後近車站前緣所設置支預壘樁



圖 3.15 地下廣場開挖區周邊之 H 型鋼樁擋土措施



圖 3.16 開挖地下廣場時所架設的兩層水平鋼梁支撐

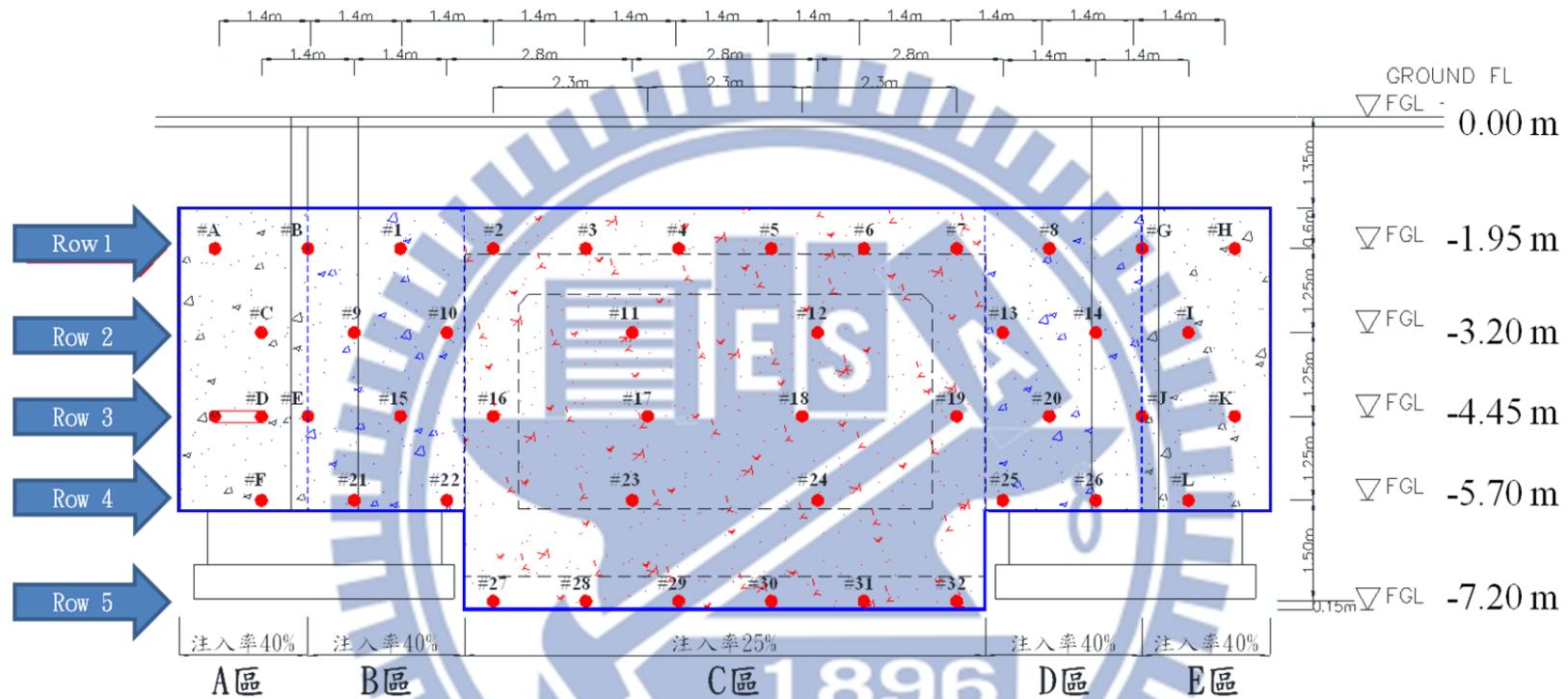


圖 3.17 地盤改良之雙環塞灌漿孔位圖  
(摘自泛亞工程, 2011b)



圖 3.18 高鐵路風柱安裝監測垂直位移量的稜鏡

圖 3.19 高鐵路外用於監測風柱稜鏡位移量的全測站儀器



圖 3.20 高鐵站玻璃帷幕安裝監測垂直位移量的稜鏡



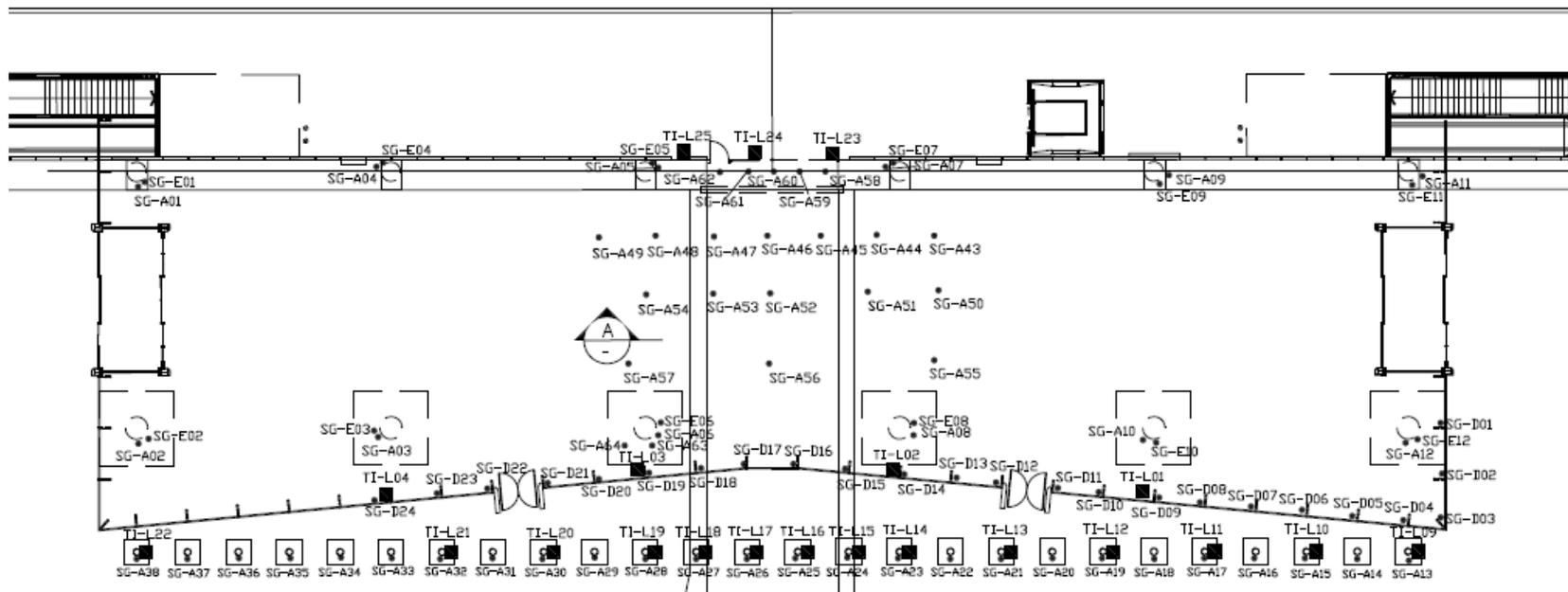
圖 3.21 高鐵站內監測玻璃帷幕稜鏡位移量的全測站



圖 3.22 人工式傾斜儀



圖 3.23 電子式傾斜儀



高鐵桃園站大廳層SG及TI位置圖

- SG: 沉陷點
- TI: 人工測傾斜計

圖 3.24 高鐵桃園站一樓大廳及站外風上所配置的監測儀器分布圖  
(摘自泛亞工程, 2011c)



圖 3.25 施工單位於隧道內量測隧道之收斂

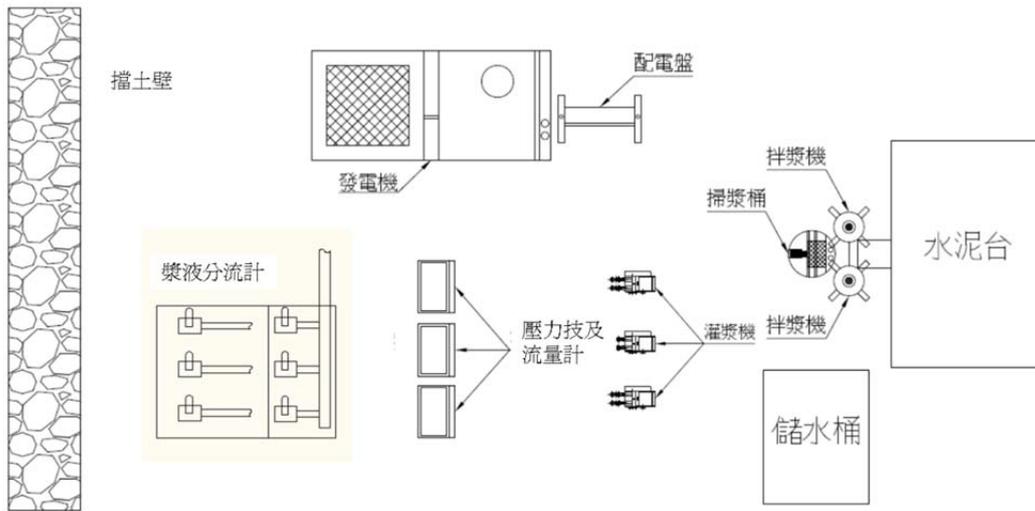


圖 4.1 水平雙環塞灌漿施工機具佈置圖  
(摘自泛亞工程, 2011b)



圖 4.2 儲水桶



圖 4.3 漿液快速攪拌機



圖 4.4 漿液慢速攪拌機



圖 4.5 灌漿泵浦



圖 4.6 流量壓力記錄器



圖 4.7 流量壓力記錄器



圖 4.8 灌漿分流計

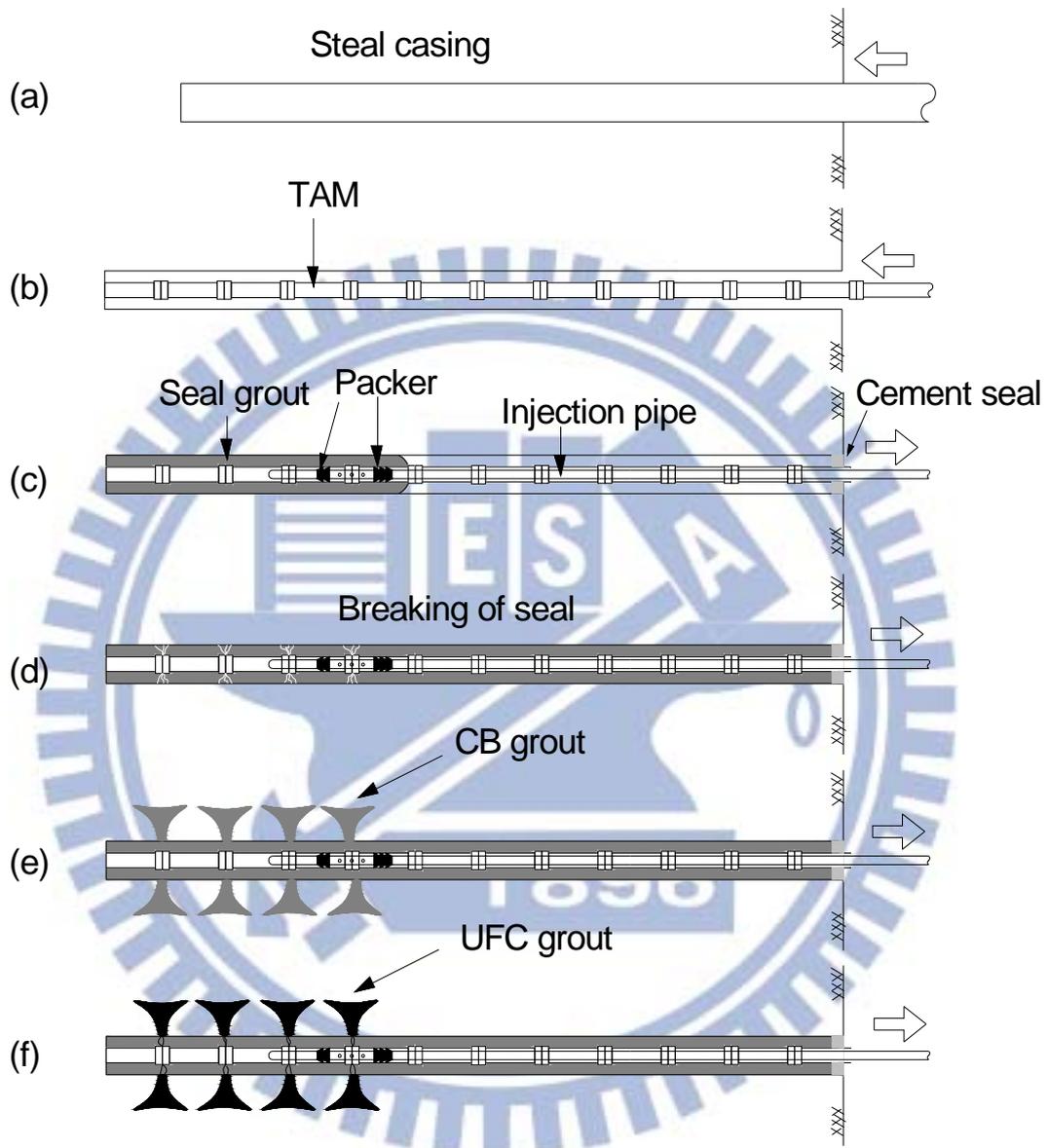


圖 4.9 水平雙環塞灌漿施工步驟 (a)鑽孔及置入鋼套管 (b)插入TAM 並移除鋼套管 (c)以快乾水泥封堵洞口即以雙環塞管灌注封堵材 (d)受壓清水開環 (e)雙環塞管灌注CB漿 (f)雙環塞管注入超微粒水泥漿



圖 4.10 鑽機進行水平鑽孔作業



圖 4.11 鋼套管



圖 4.12 鑽桿前端



圖 4.13 灌漿外管(TAM)

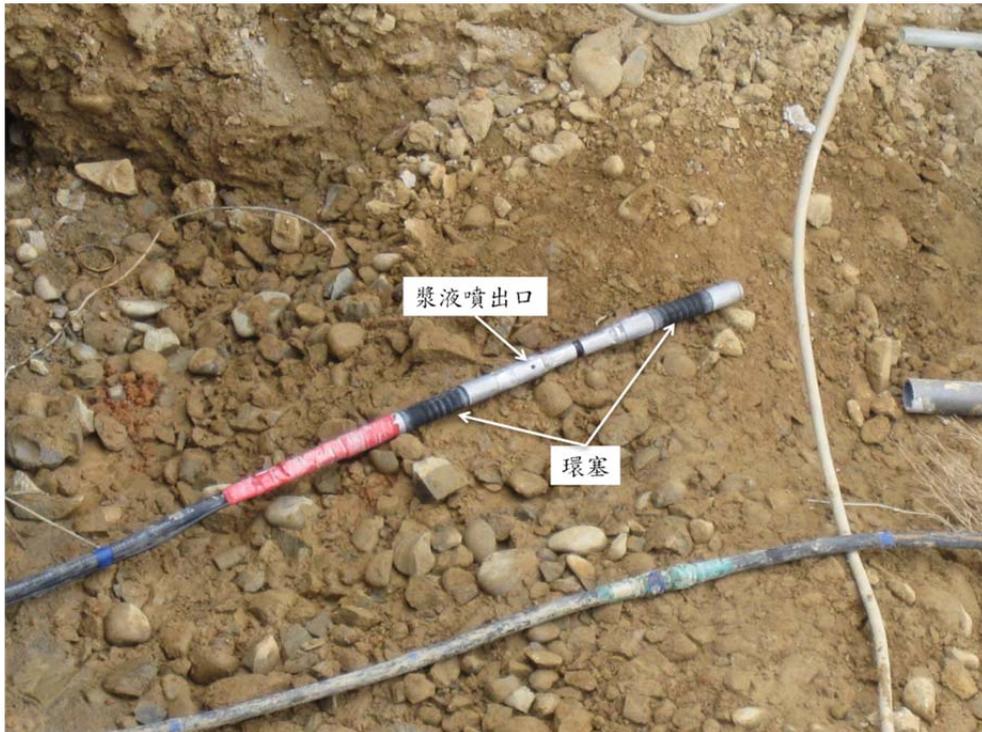


圖 4.14 灌漿內管(雙環塞管)



圖 4.15 灌漿內管及塑膠套被拔除的灌漿外管

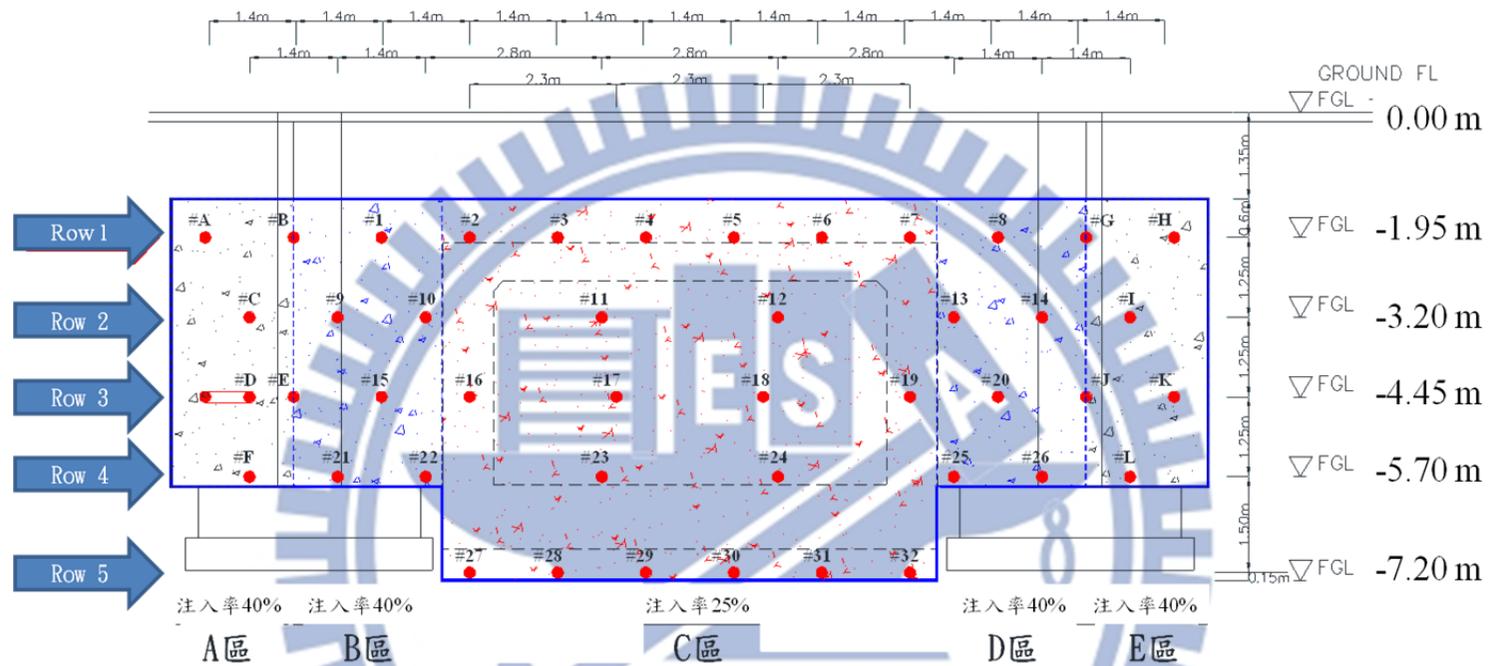


圖 4.16 灌漿孔位分布圖  
(摘自泛亞工程, 2011e)

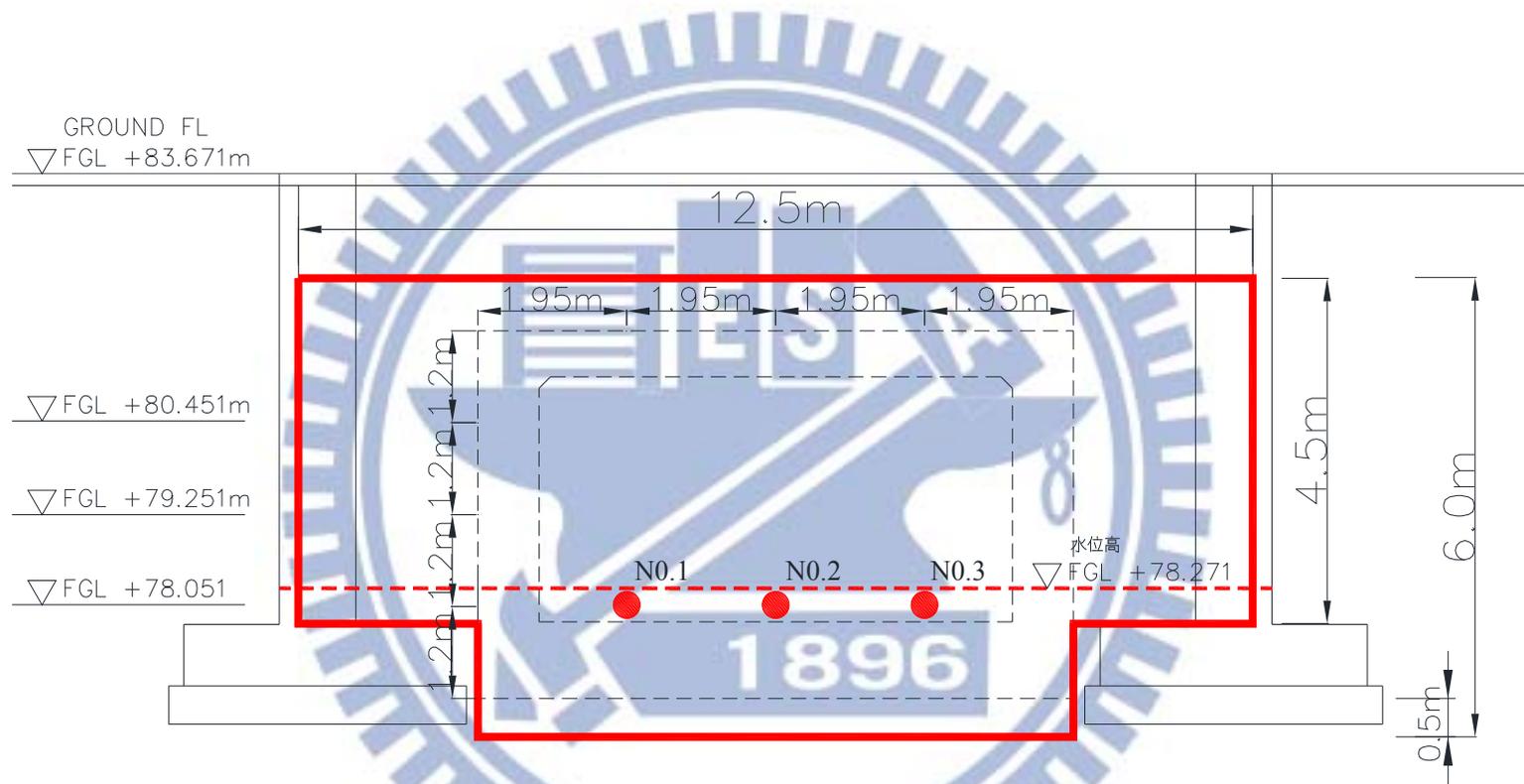


圖 4.17 試水作業之鑽取孔位前視圖  
(摘自泛亞工程, 2011a)

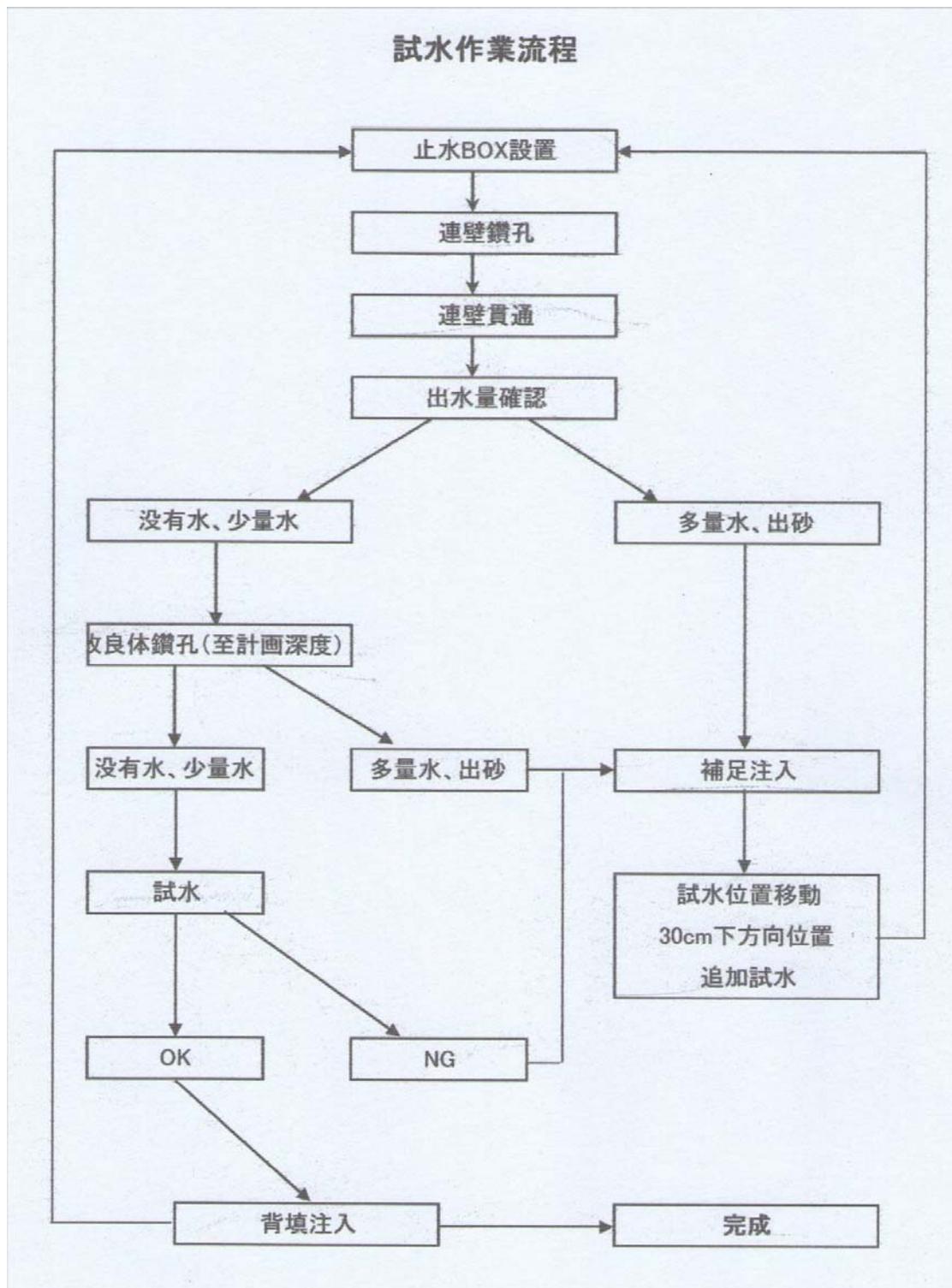


圖 4.18 試水作業流程圖  
(摘自泛亞工程, 2011b)



圖 4.19 試水孔鑽孔作業

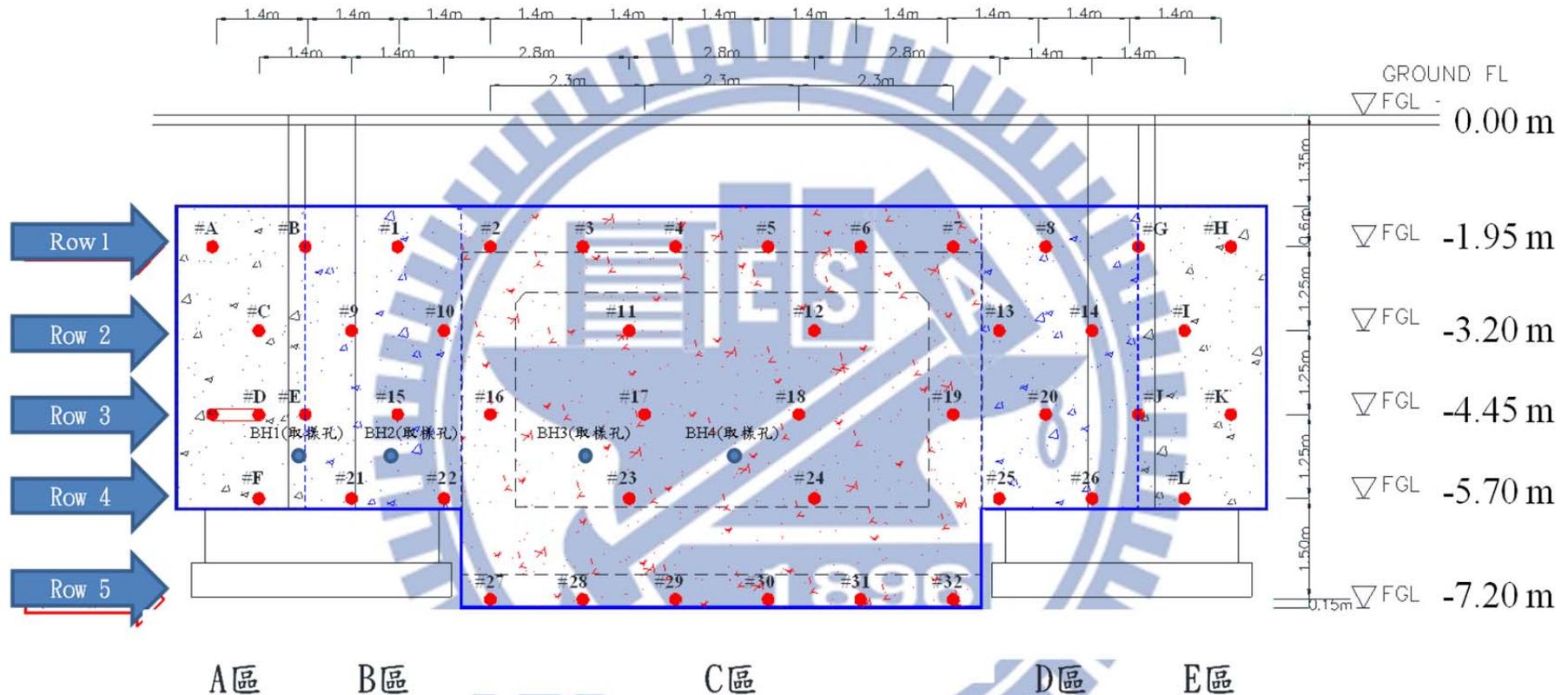


圖 4.20 鑽孔取樣於 A 區、B 區(注入率 20%處)取兩孔，於 C 區(注入率 12%處)取兩孔，鑽孔順序由左至右分別為 BH1、BH2、BH3、BH4  
 (摘自泛亞工程, 2011e)



圖 4.21 施工人員正在進行鑽孔取樣作業



圖 4.22 施工人員正在將試體取出



圖 4.23 BH1 鑽孔改良土取樣岩心相片



圖 4.24 BH2 鑽孔改良土取樣岩心相片



圖 4.25 BH3 鑽孔改良土取樣岩心相片



圖 4.26 BH4 鑽孔改良土取樣岩心相片

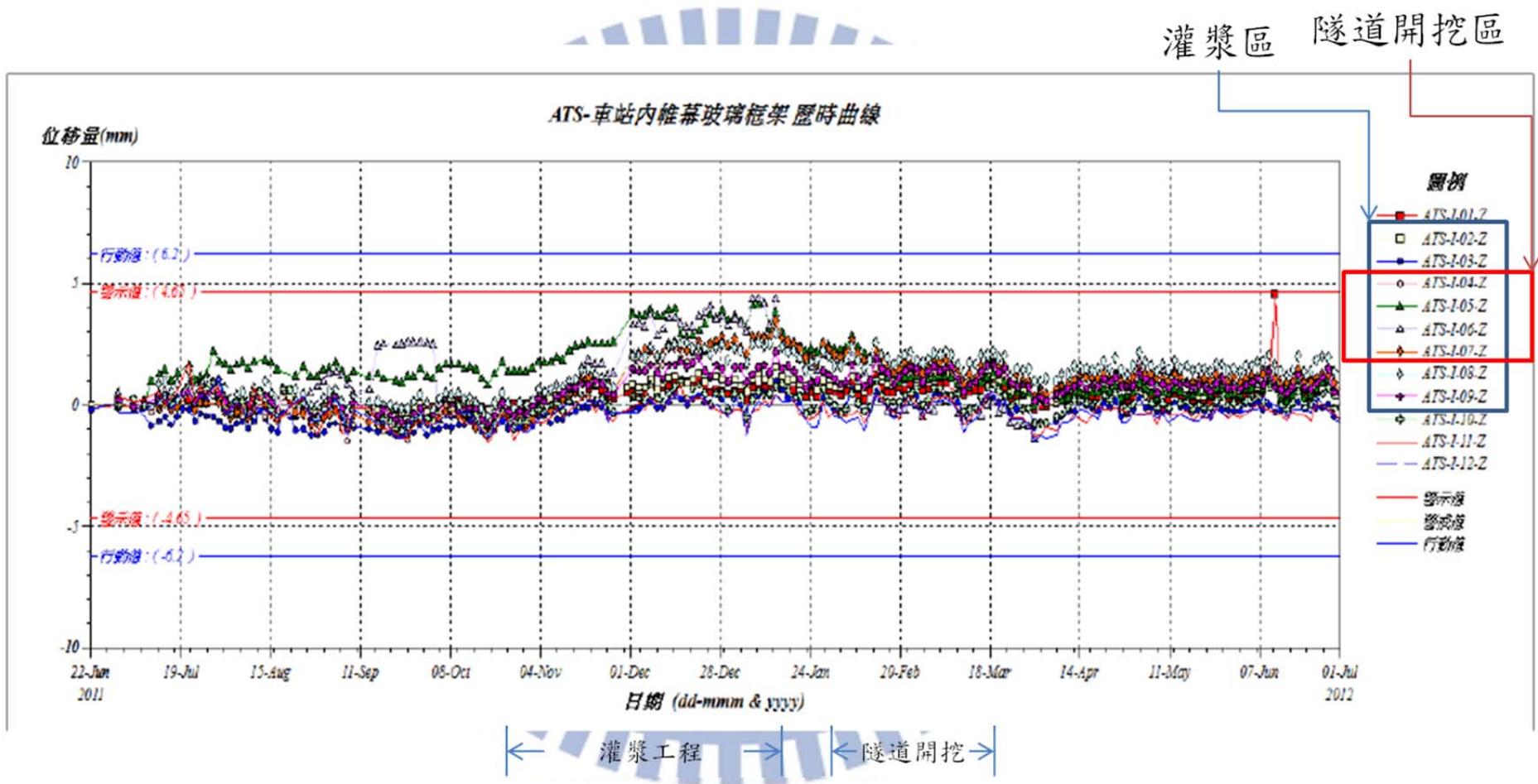


圖 4.27 車站內玻璃帷幕稜鏡沉陷觀測稜鏡歷時曲線圖  
(摘自泛亞工程, 2012)

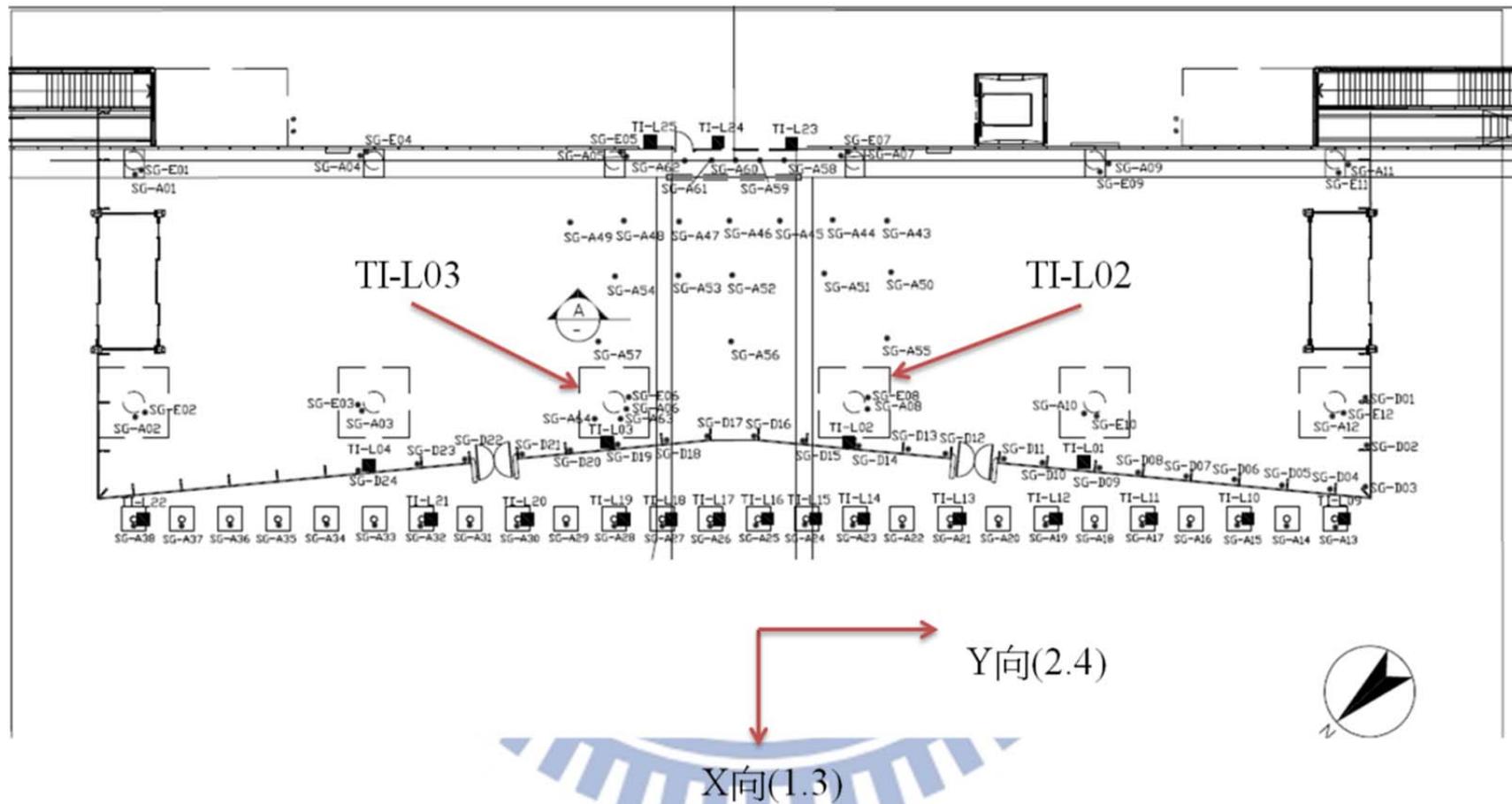


圖 4.28 人工傾斜儀之測量方向  
(摘自泛亞工程, 2012)

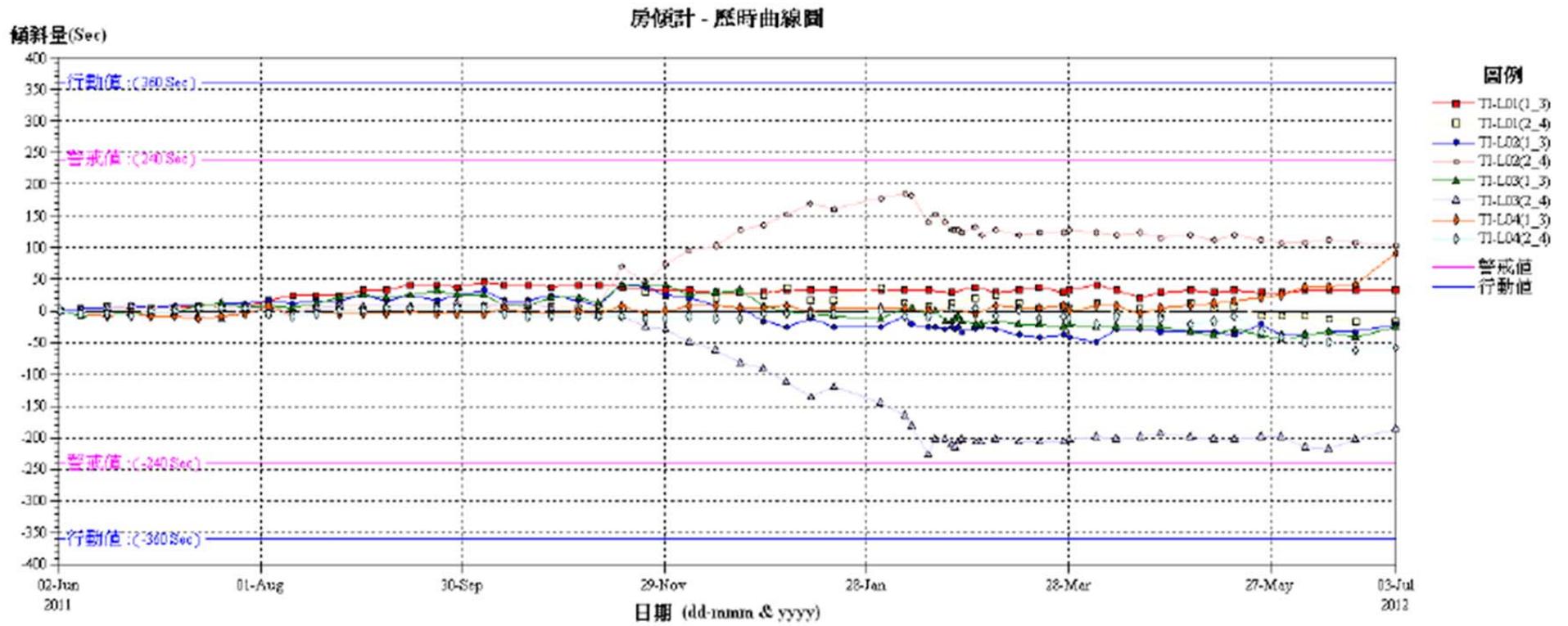


圖 4.29 車站內結構柱人工傾斜儀歷時曲線圖  
(摘自泛亞工程, 2012)

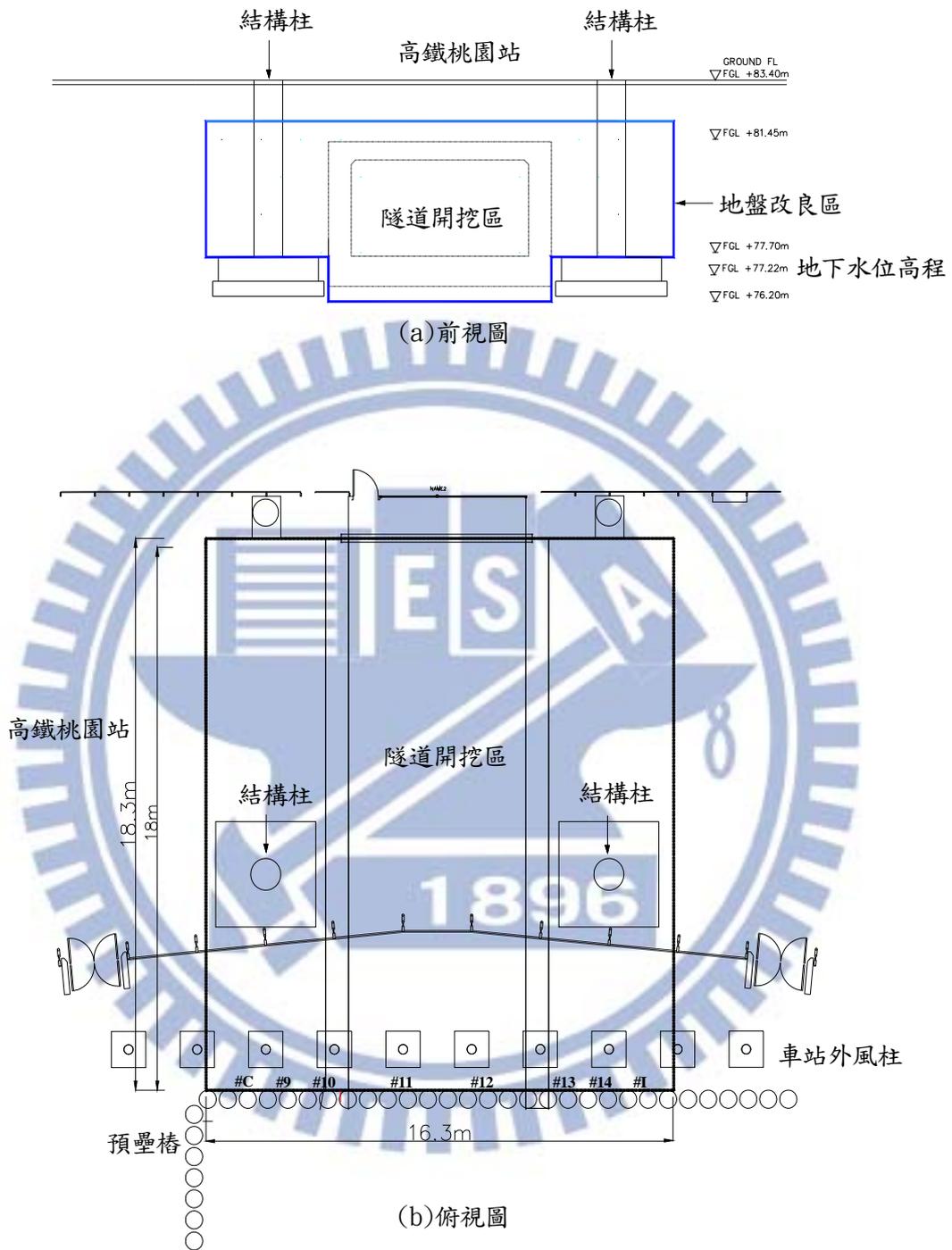


圖 5.1 (a)隧道開挖及地盤改良區前視圖 (b)隧道開挖區及地盤改良區俯視圖  
(摘自泛亞工程, 2011e)



圖 5.2 怪手破除預壘樁準備開挖聯絡通道開挖



圖 5.3 怪手破除預壘樁後的微型樁準備開挖聯絡通道



圖 5.4 怪手開挖隧道壁面



圖 5.5 怪手吊放鋼梁準備組立隧道斷面鋼支堡



圖 5.6 開挖區頂部施作噴凝土



圖 5.7 第 2 開挖斷面

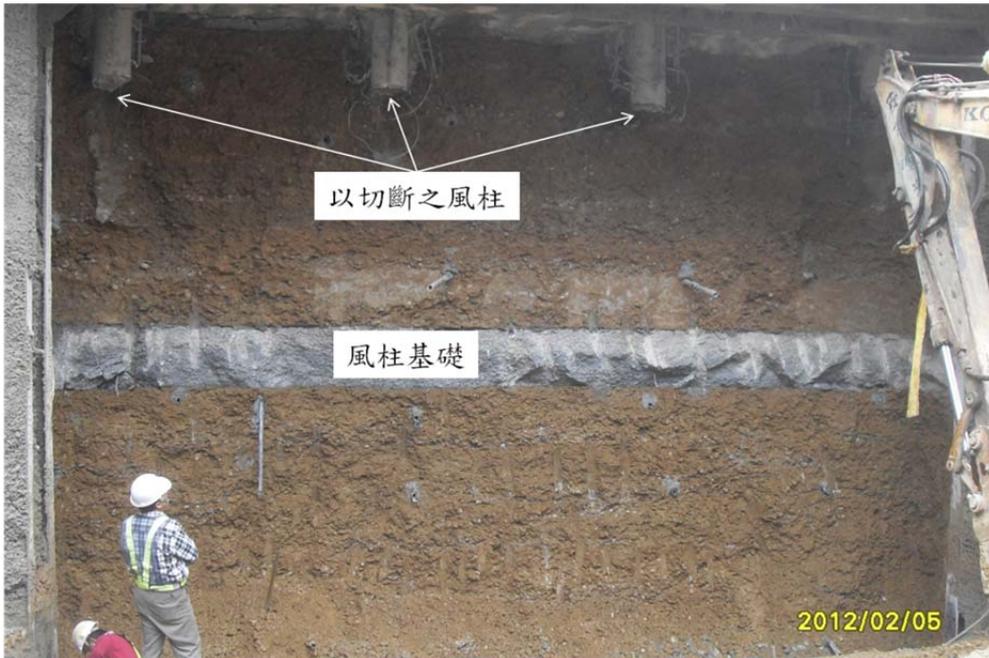


圖 5.8 第 3 開挖斷面

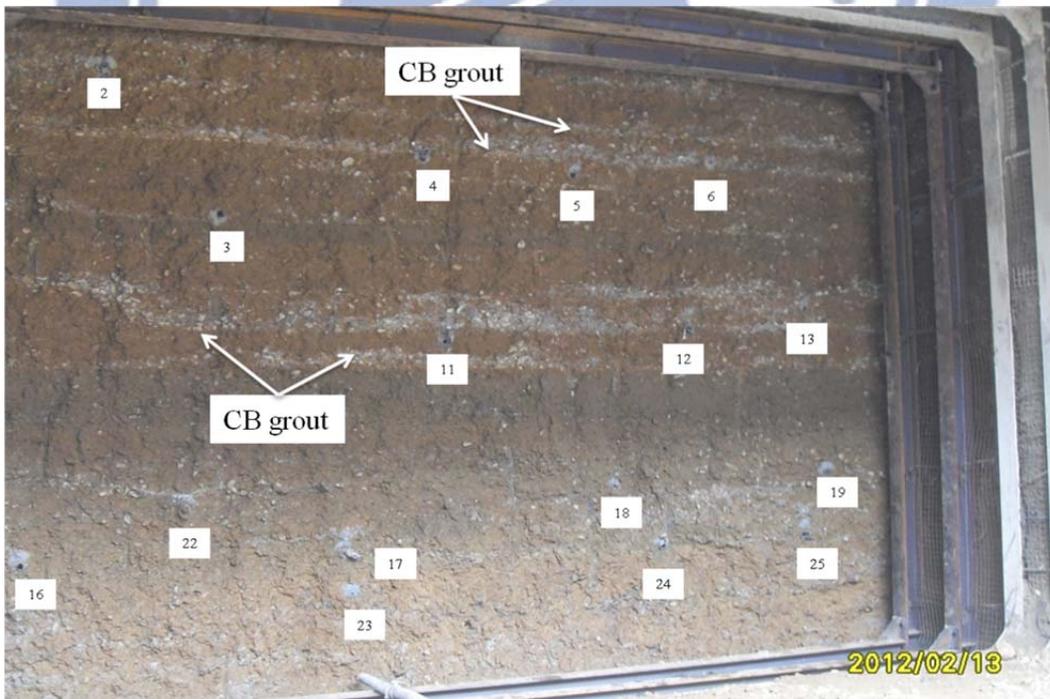


圖 5.9 第 10 開挖斷面

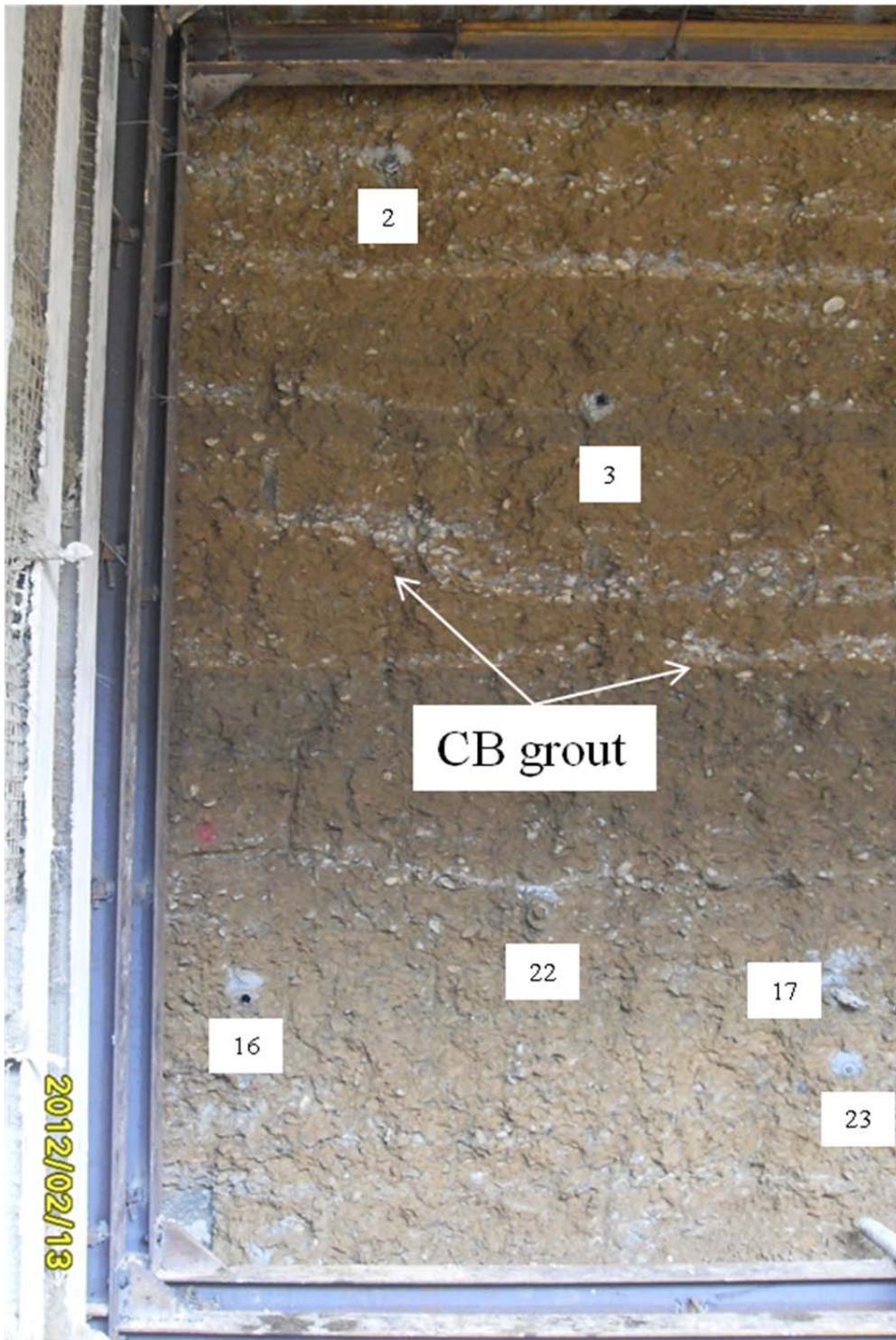


圖 5.10 第 10 開挖斷面左半部

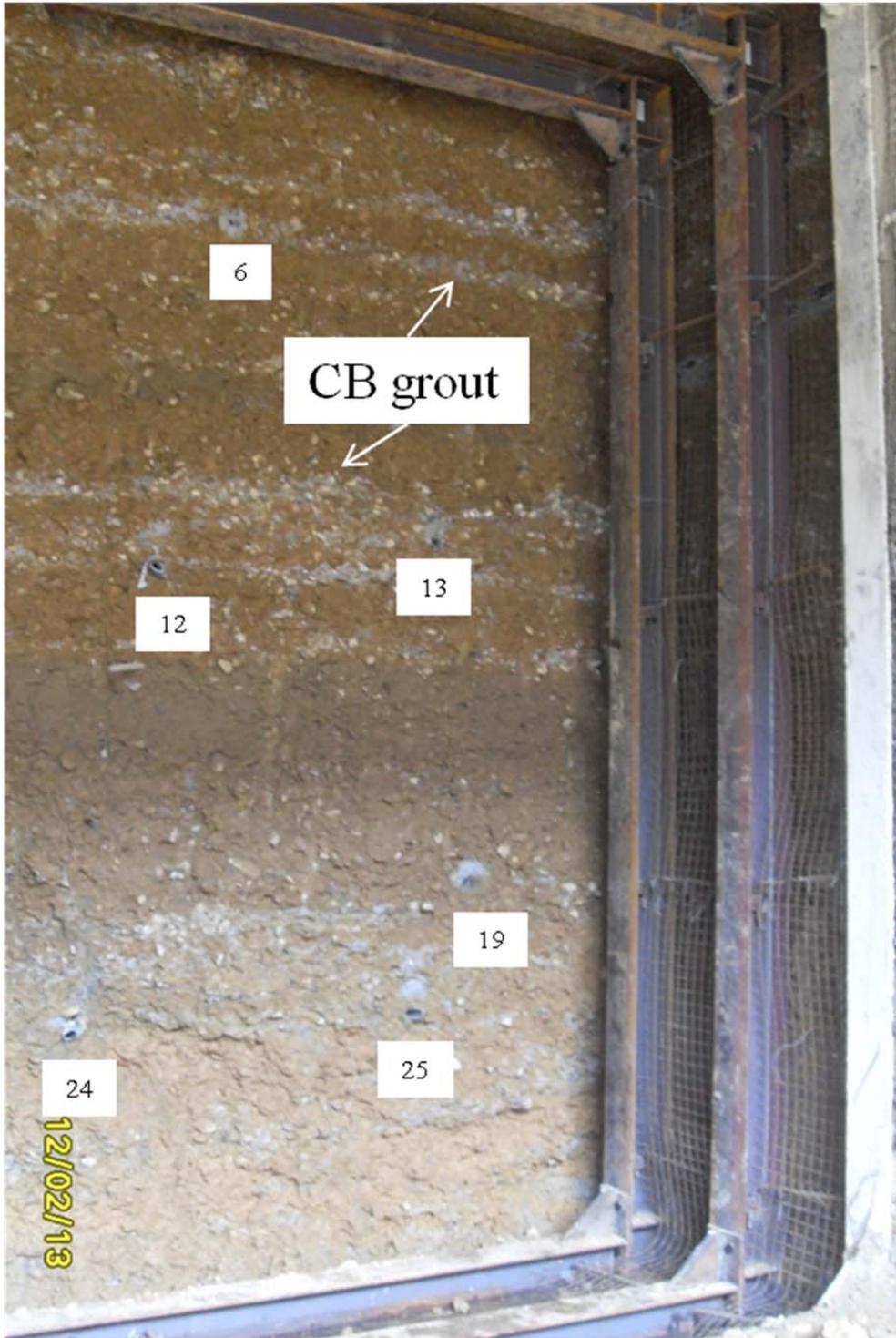


圖 5.11 第 10 開挖斷面右半部



圖 5.12 第 10 開挖斷面左下方施作噴凝土作業

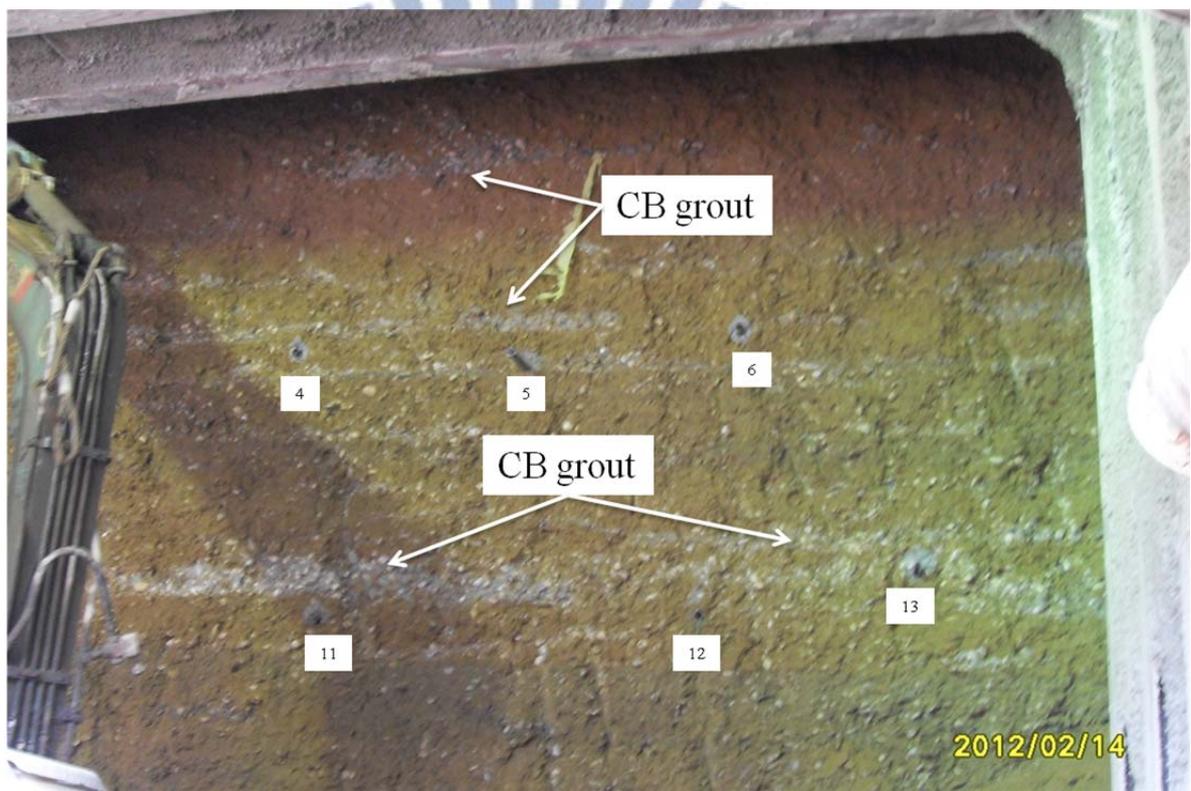


圖 5.13 CB 漿脈在第 11 斷面上的分佈情形

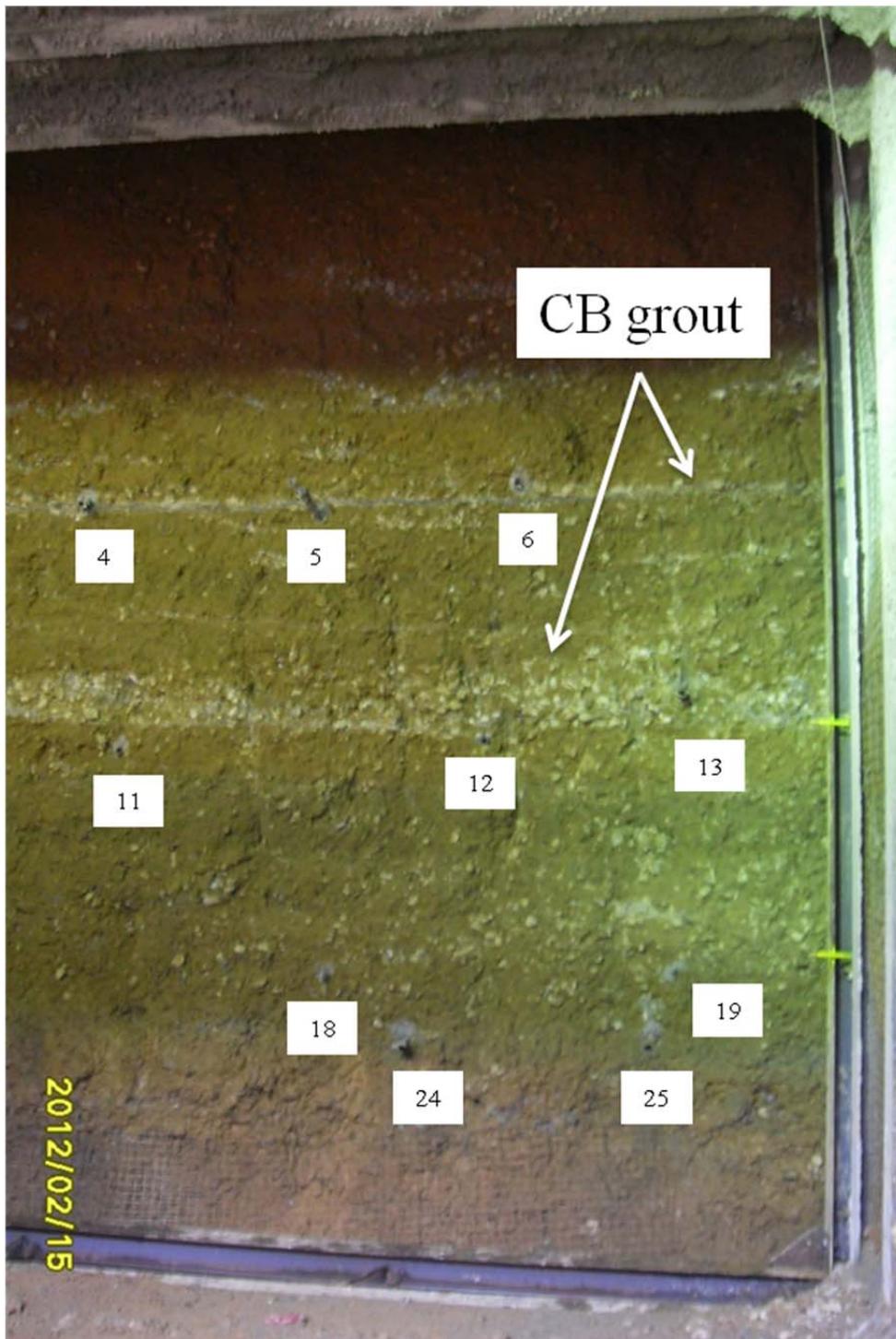


圖 5.14 第 12 開挖斷面右側部 CB 分漿脈呈水平狀分布

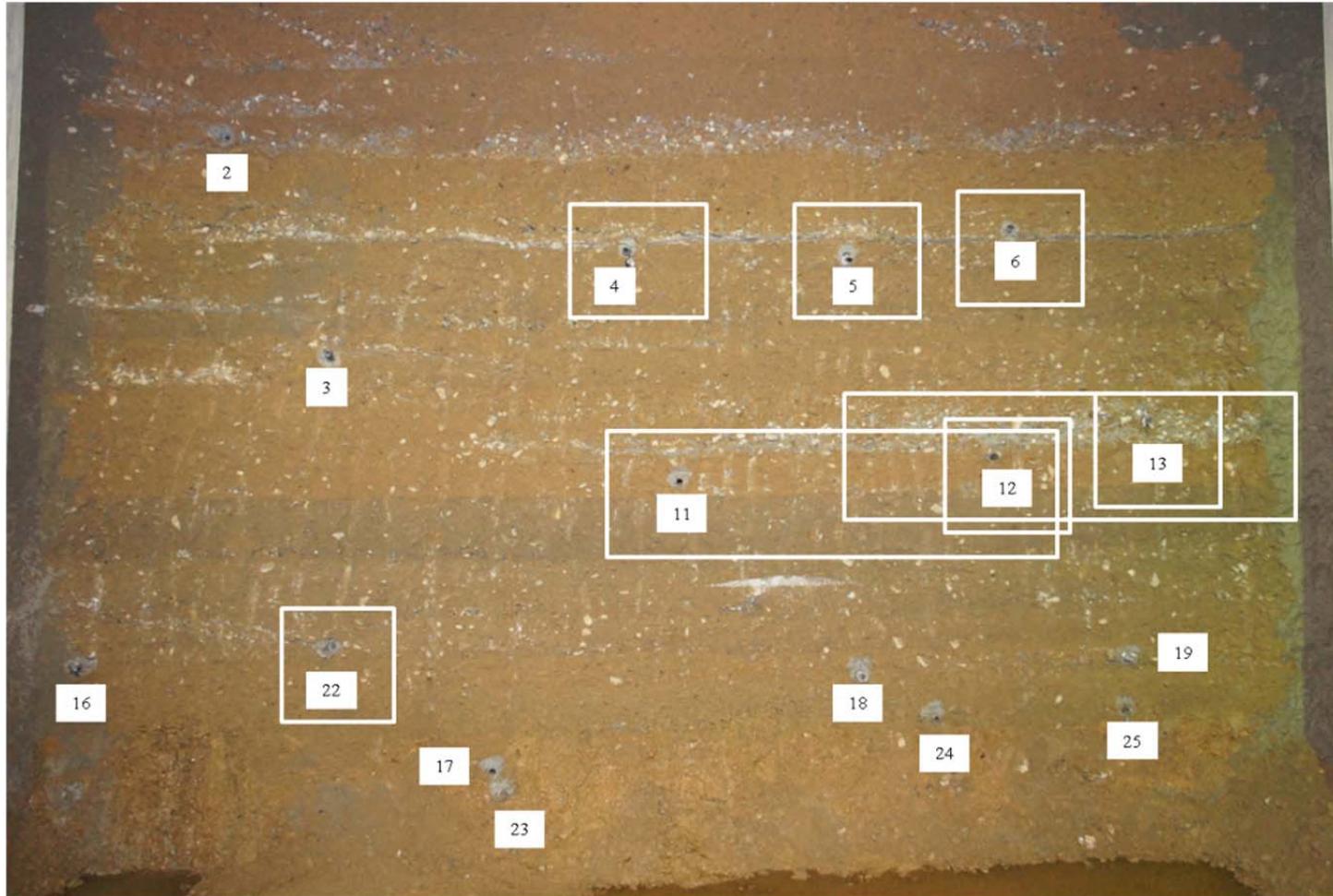


圖 5.15 第 14 開挖斷面

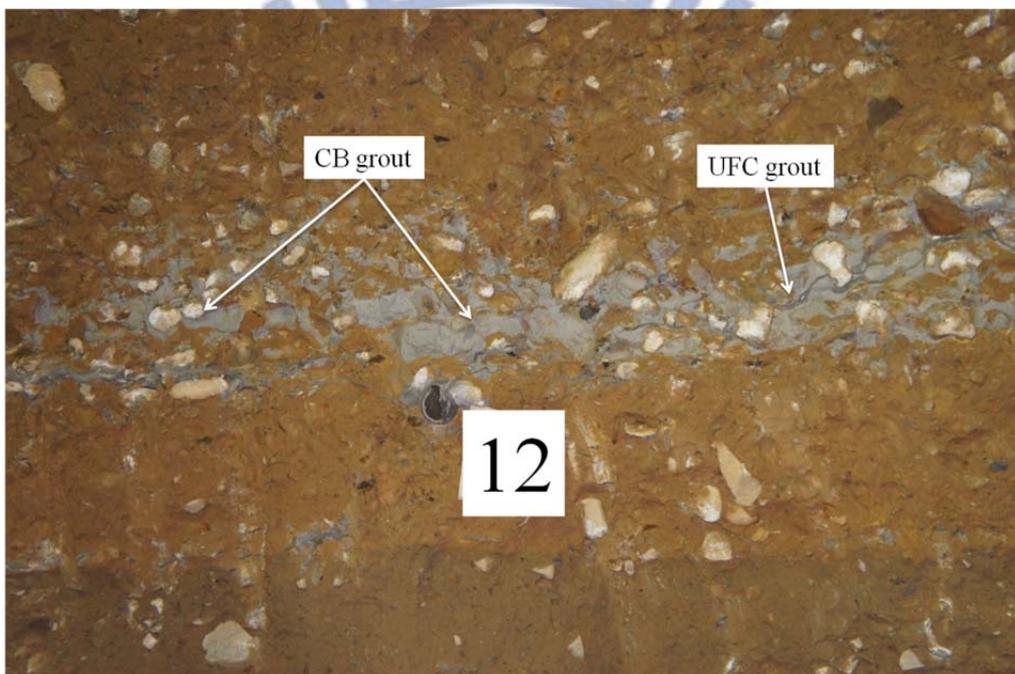


圖 5.16 第 14 開挖斷面 12 號孔周圍漿液分布情形

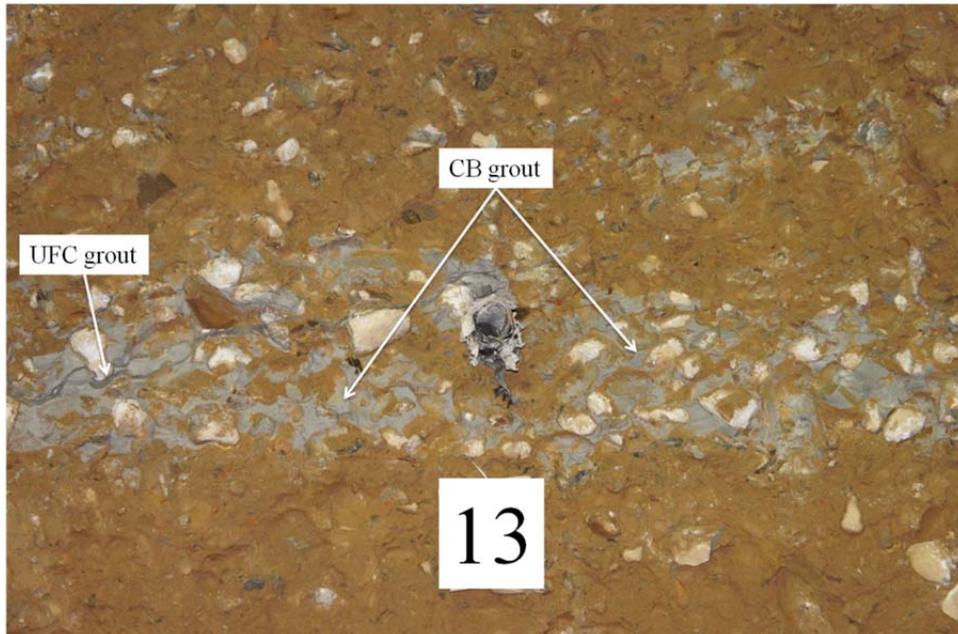


圖 5.17 第 14 開挖斷面 13 號孔周圍漿液分佈情形

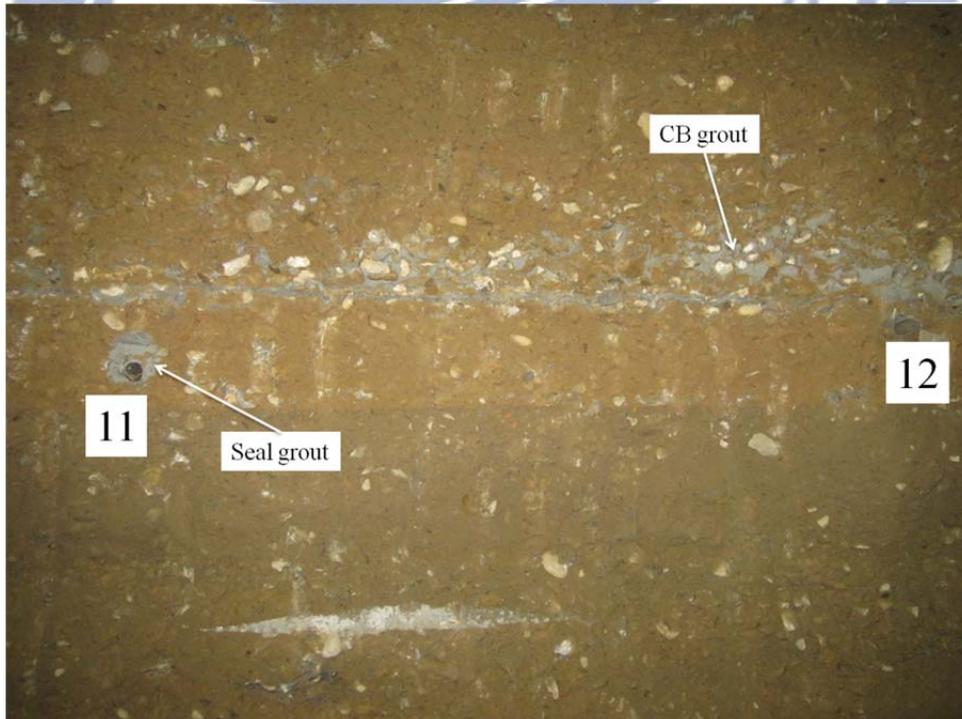


圖 5.18 第 14 開挖斷面 11、12 號孔周圍漿液分佈情形

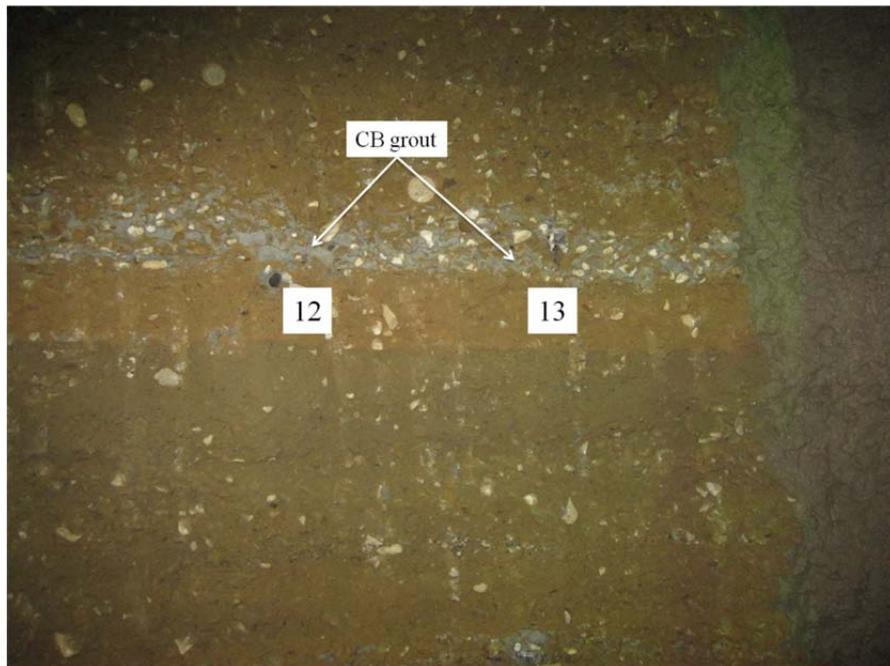


圖 5.19 第 14 開挖斷面 12、13 號孔周圍漿液分布情形

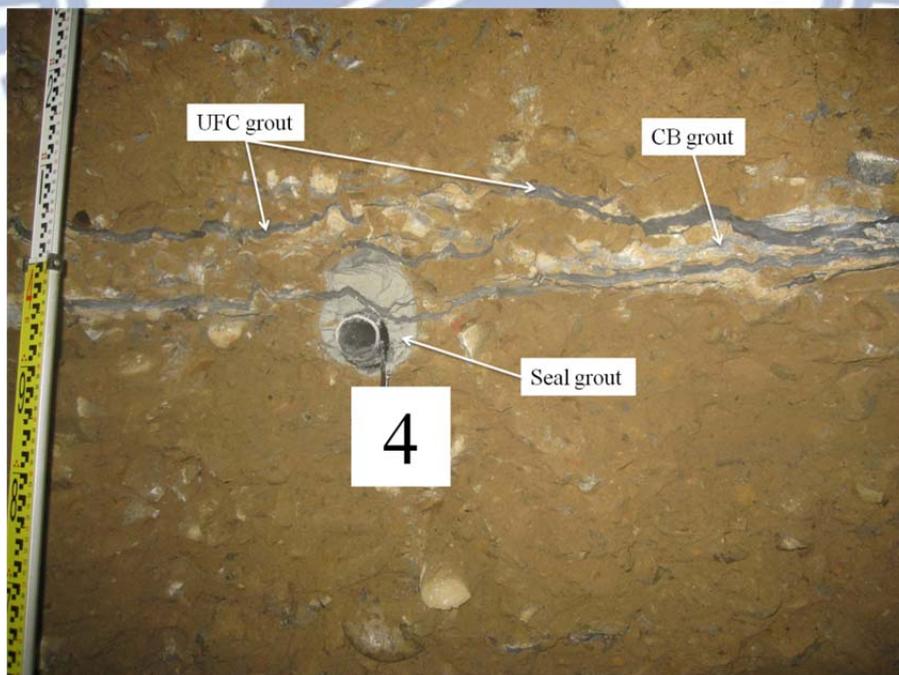


圖 5.20 第 14 開挖斷面 4 號孔周圍漿液分布情形

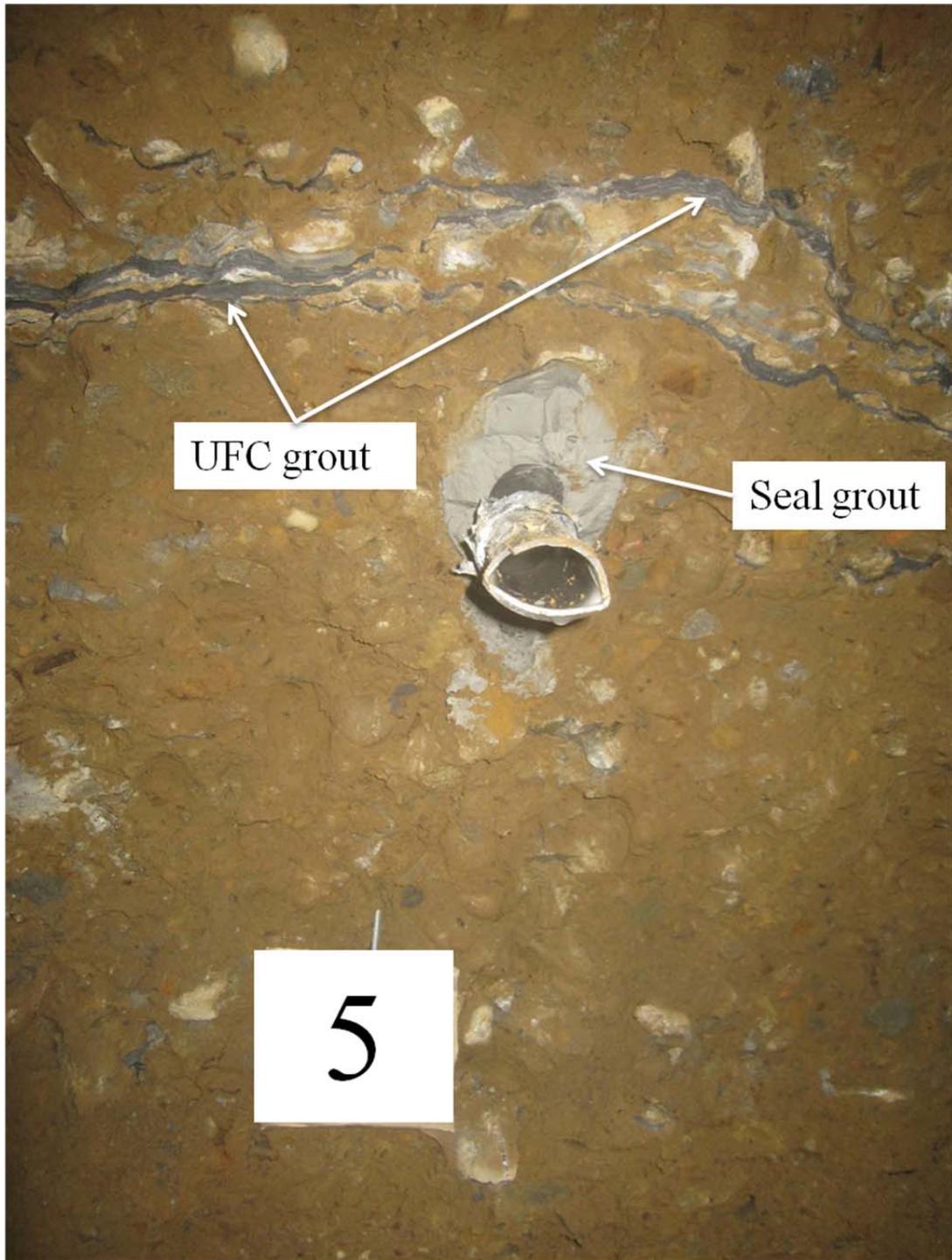


圖 5.21 第 14 開挖斷面 5 號孔周圍漿液分布情形

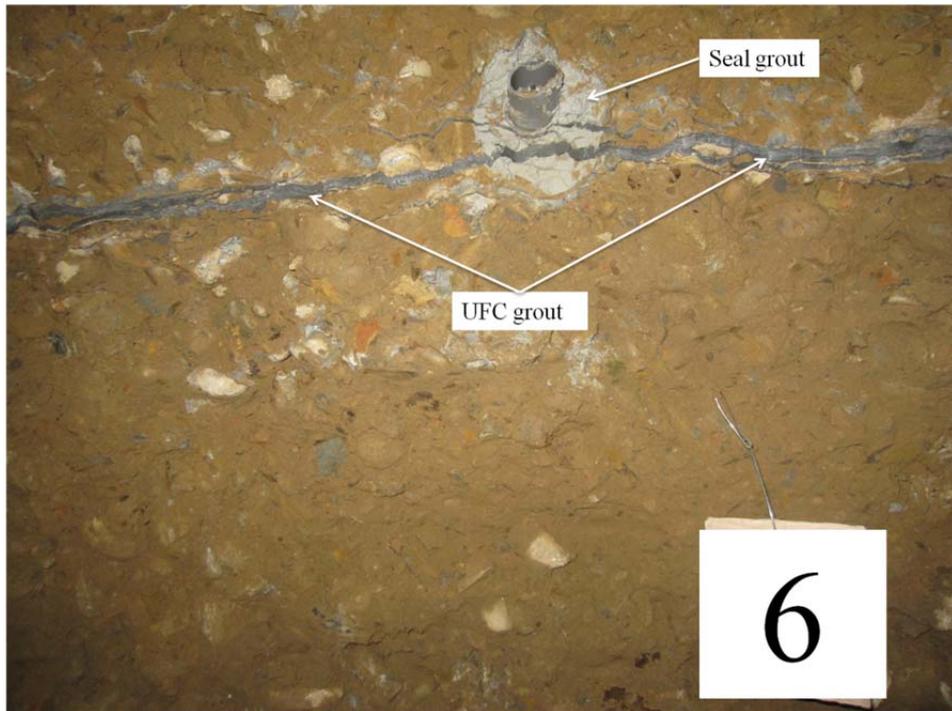


圖 5.22 第 14 開挖斷面 6 號孔周圍漿液分布情形

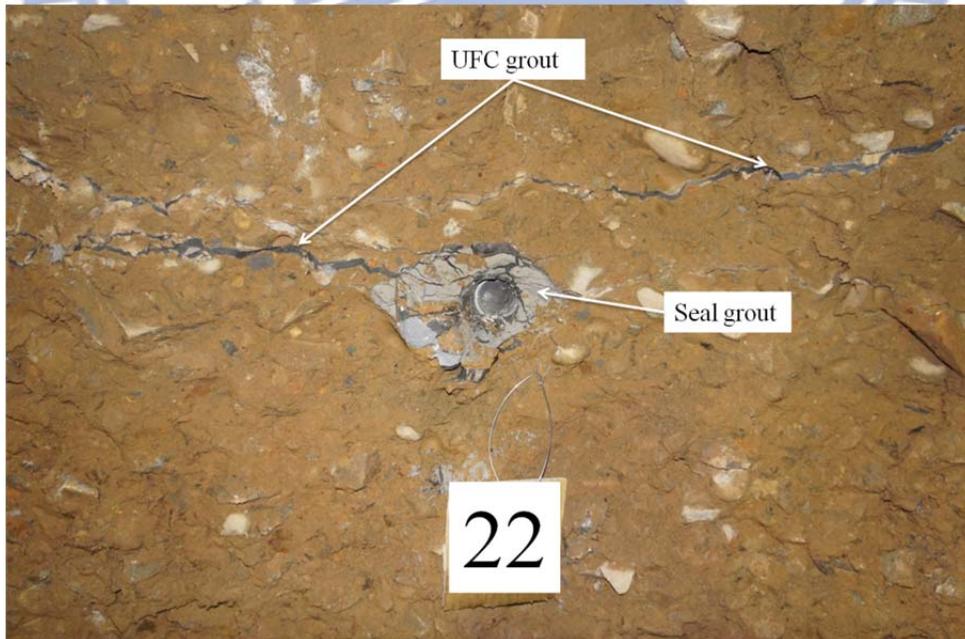


圖 5.23 第 14 開挖斷面 22 號孔周圍漿液分布情形

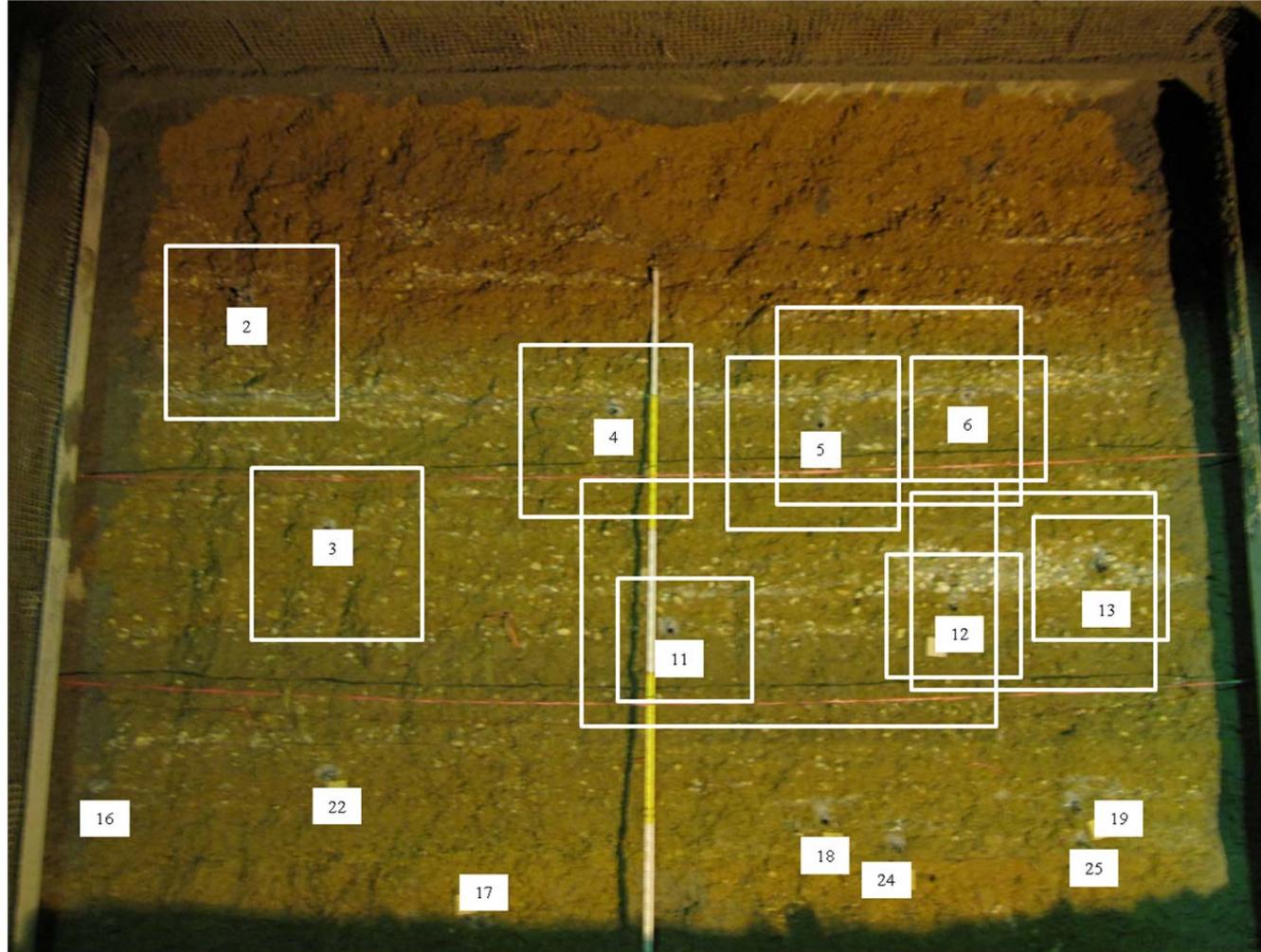


圖 5.24 第 16 開挖斷面

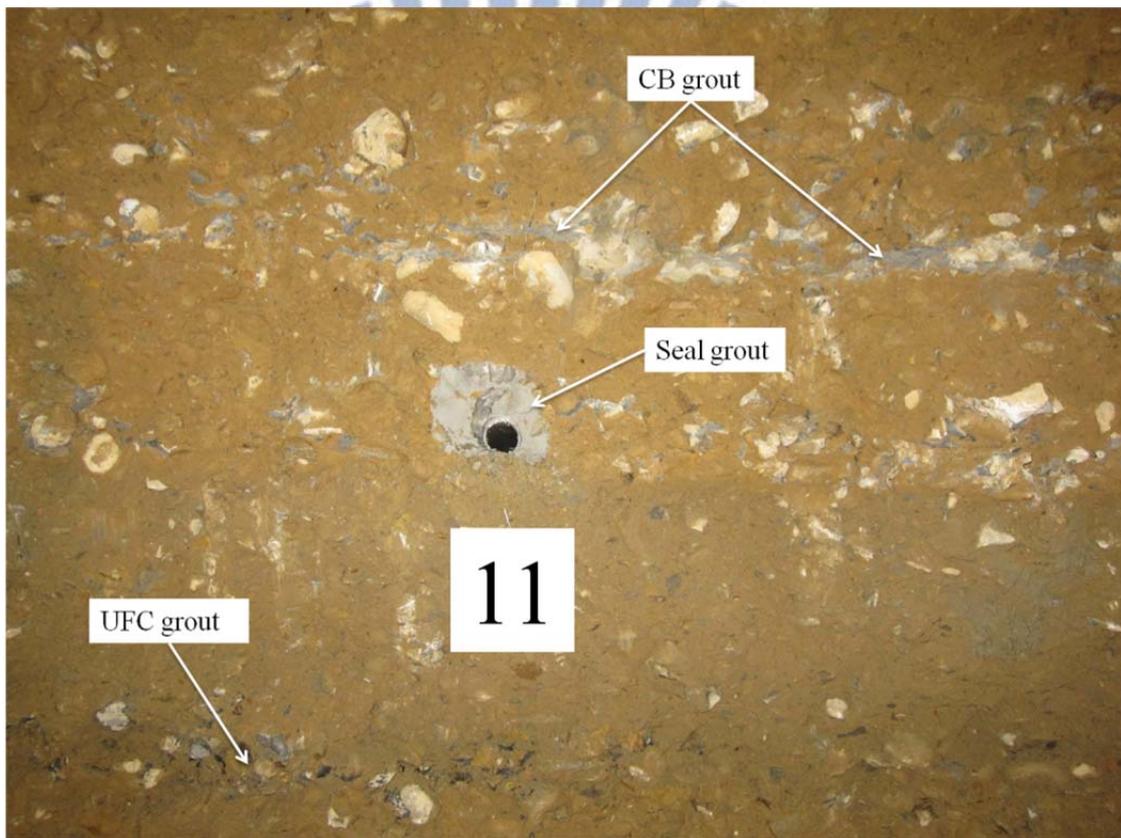


圖 5.25 第 16 開挖斷面 11 號孔周圍漿液分佈情形

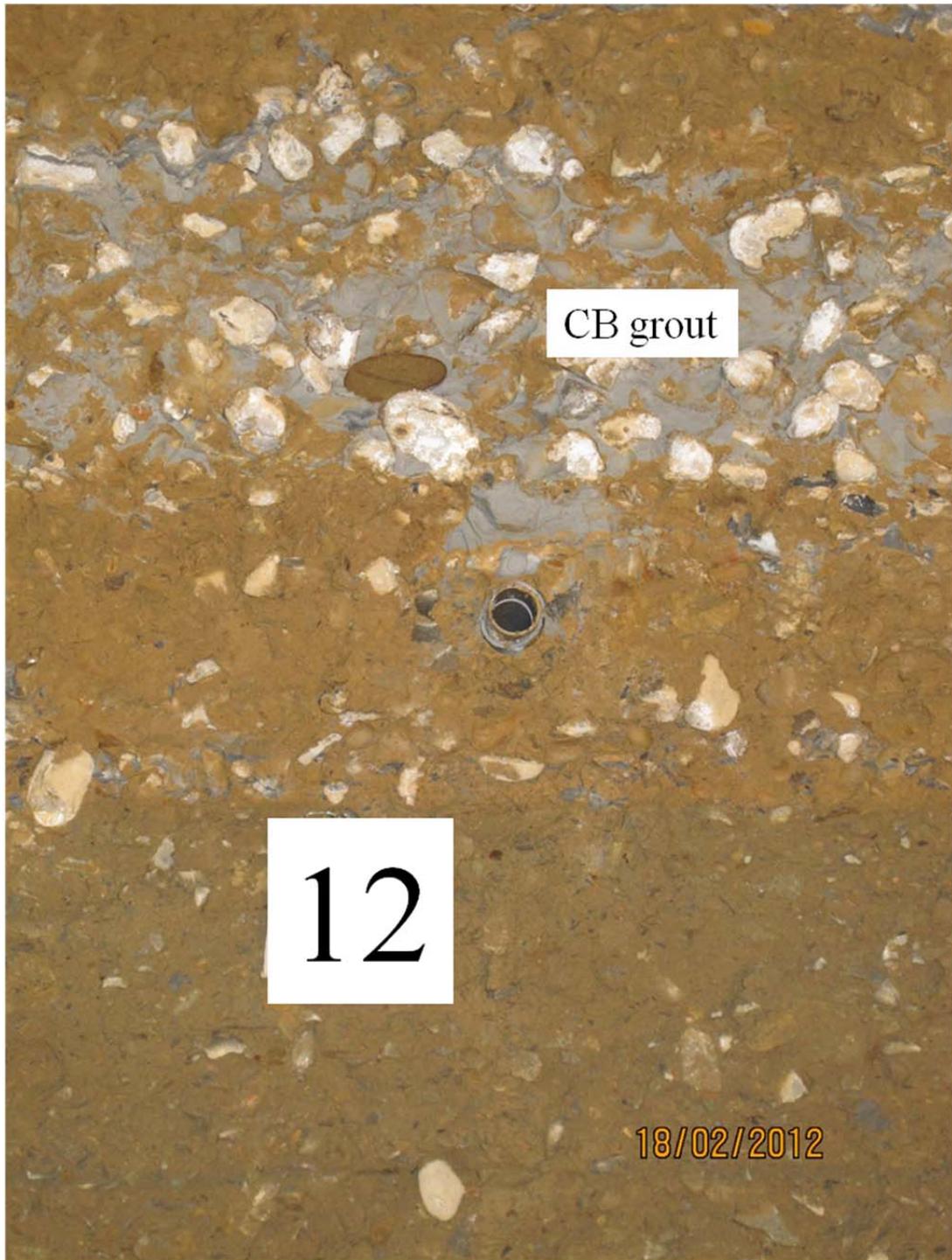


圖 5.26 第 16 開挖斷面 12 號孔周圍漿液分布情形

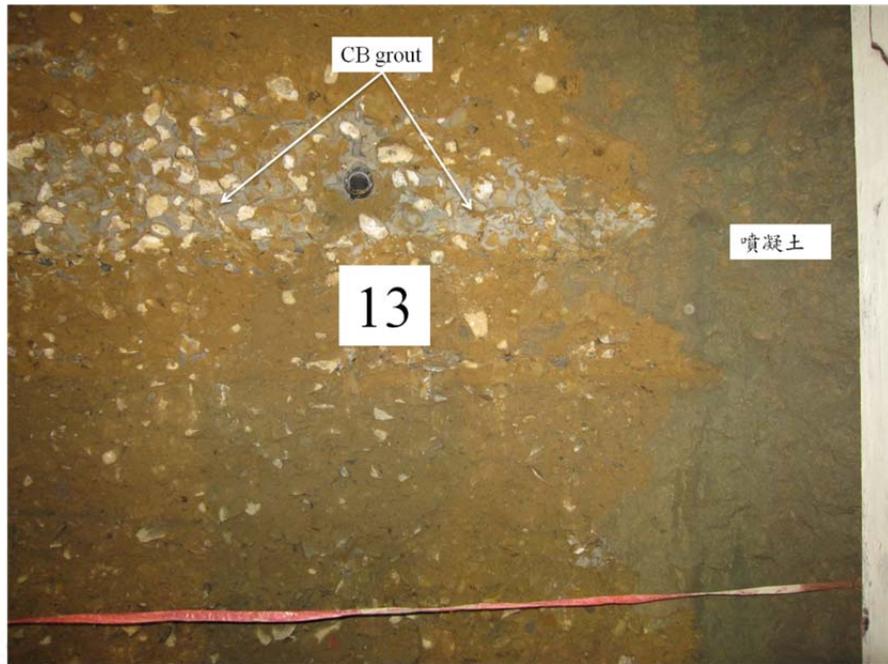


圖 5.27 第 16 開挖斷面 13 號孔周圍漿液分布情形

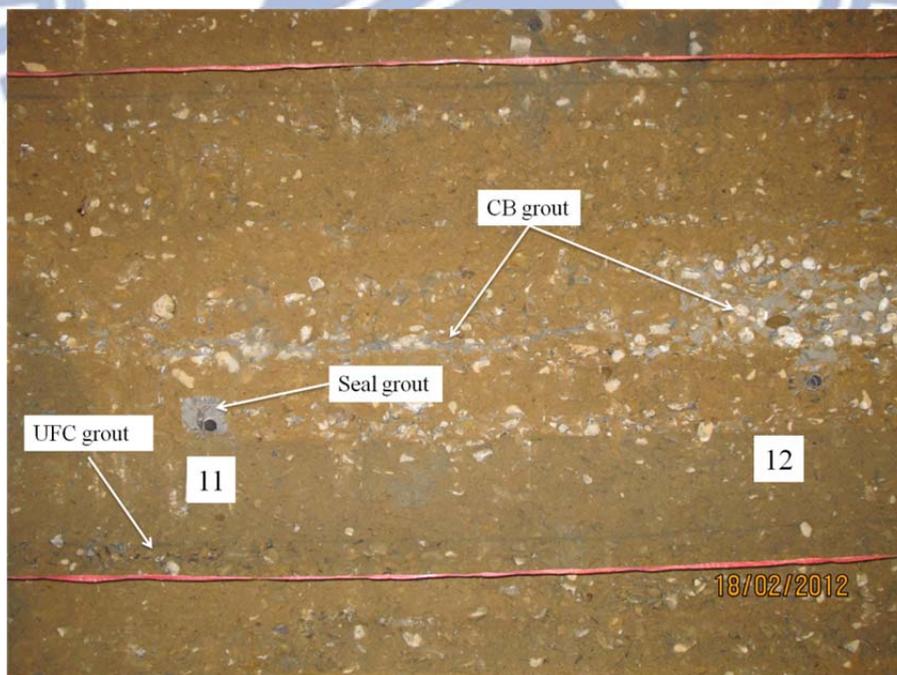


圖 5.28 第 16 開挖斷面 11、12 號孔附近漿液分布情形

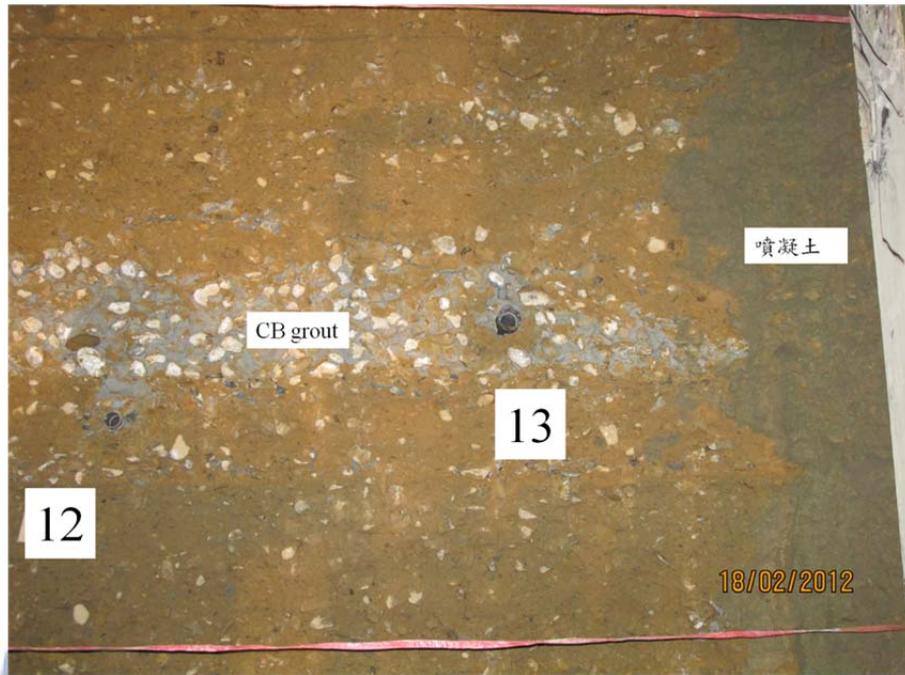


圖 5.29 第 16 開挖斷面 12、13 號孔附近漿液分布情形

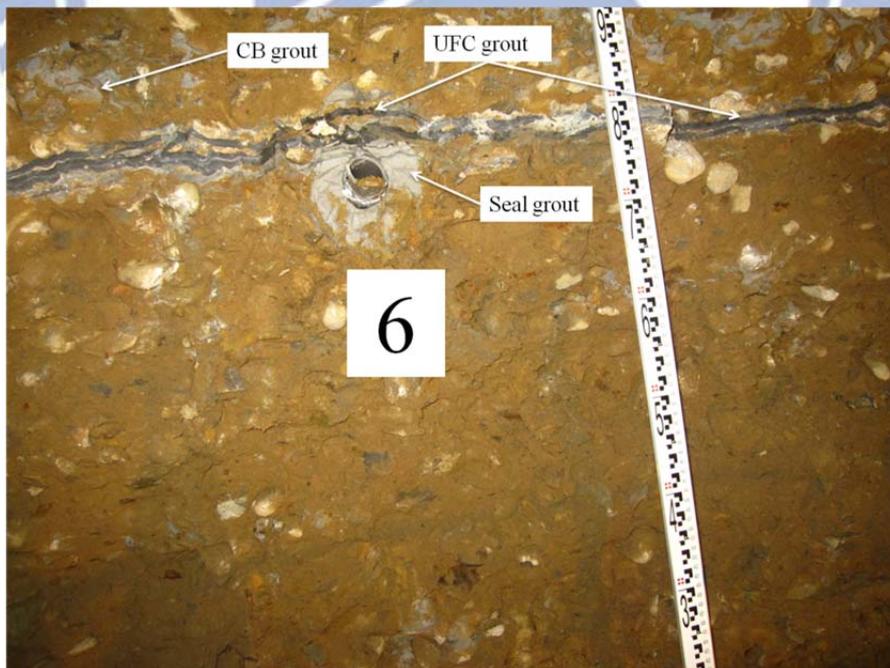


圖 5.30 第 16 開挖斷面 6 號孔周圍漿液分布情形

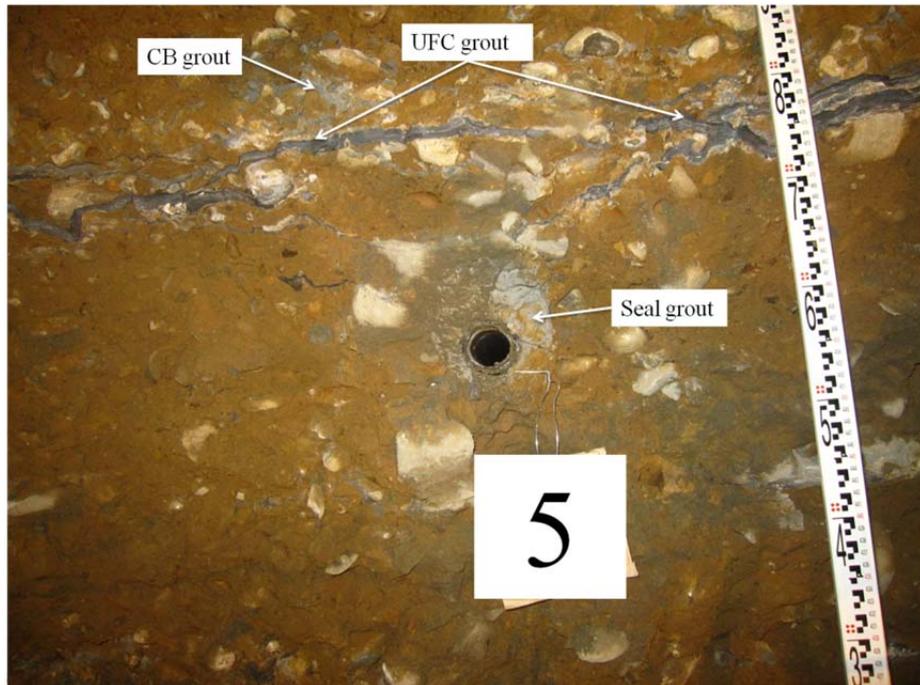


圖 5.31 第 16 開挖斷面 5 號孔周圍漿液分布情形

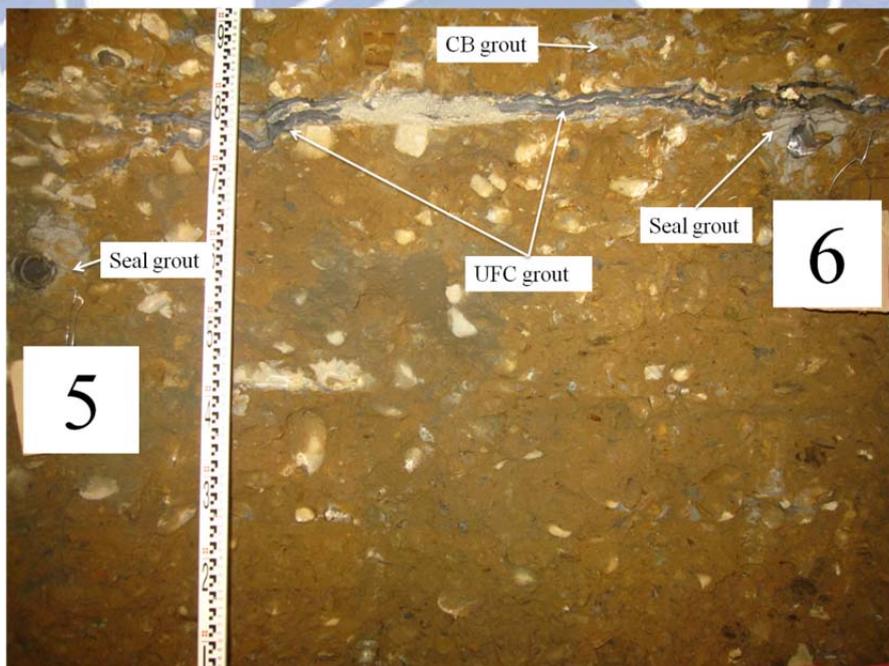


圖 5.32 第 16 開挖斷面 5、6 號孔附近漿液分布情形

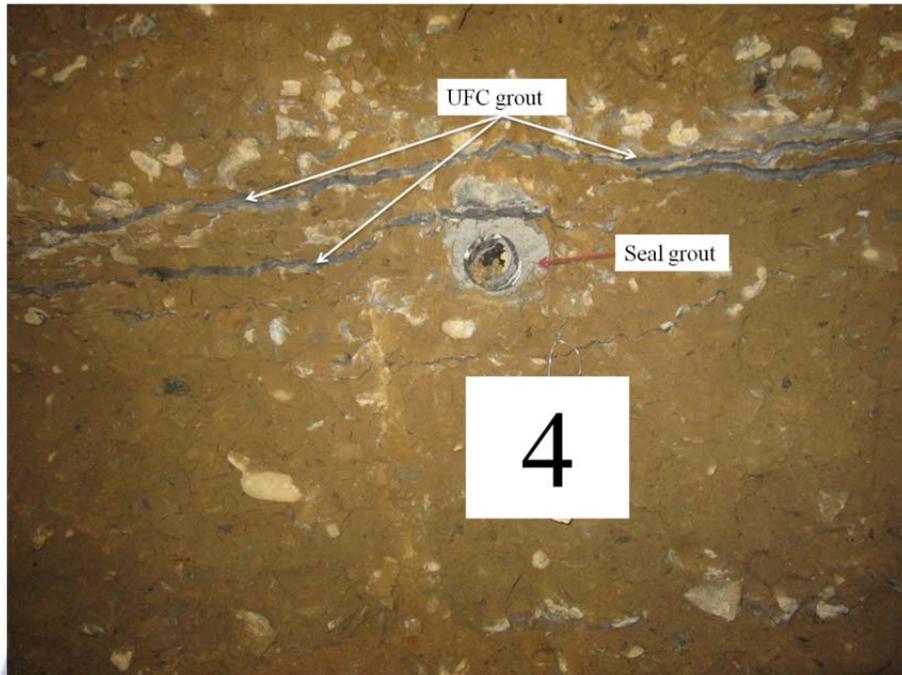


圖 5.33 第 16 開挖斷面 4 號孔周圍漿液分布情形

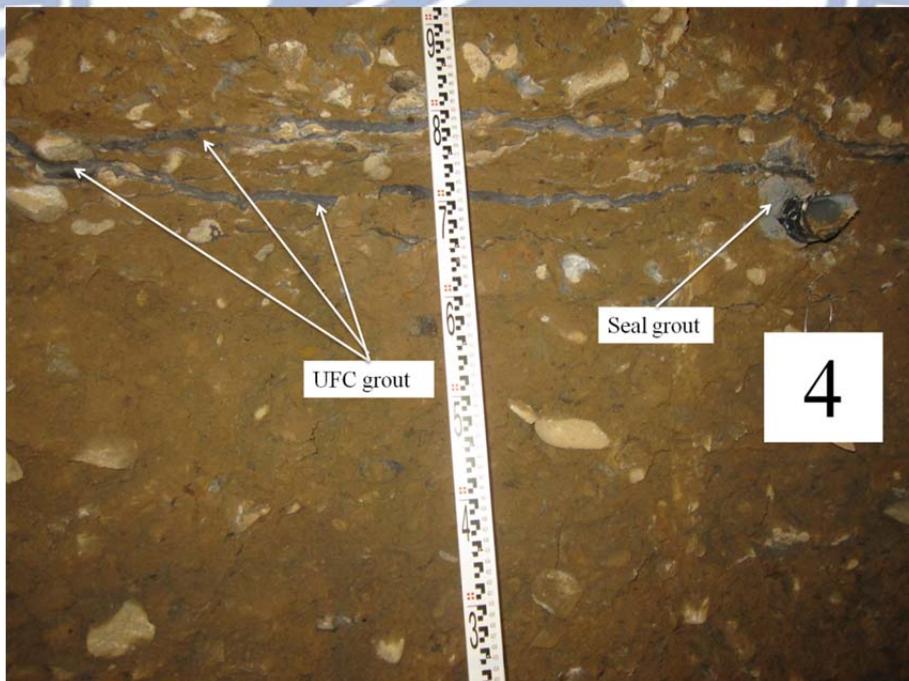


圖 5.34 第 16 開挖斷面漿液通過 4 號孔後的匯集情形

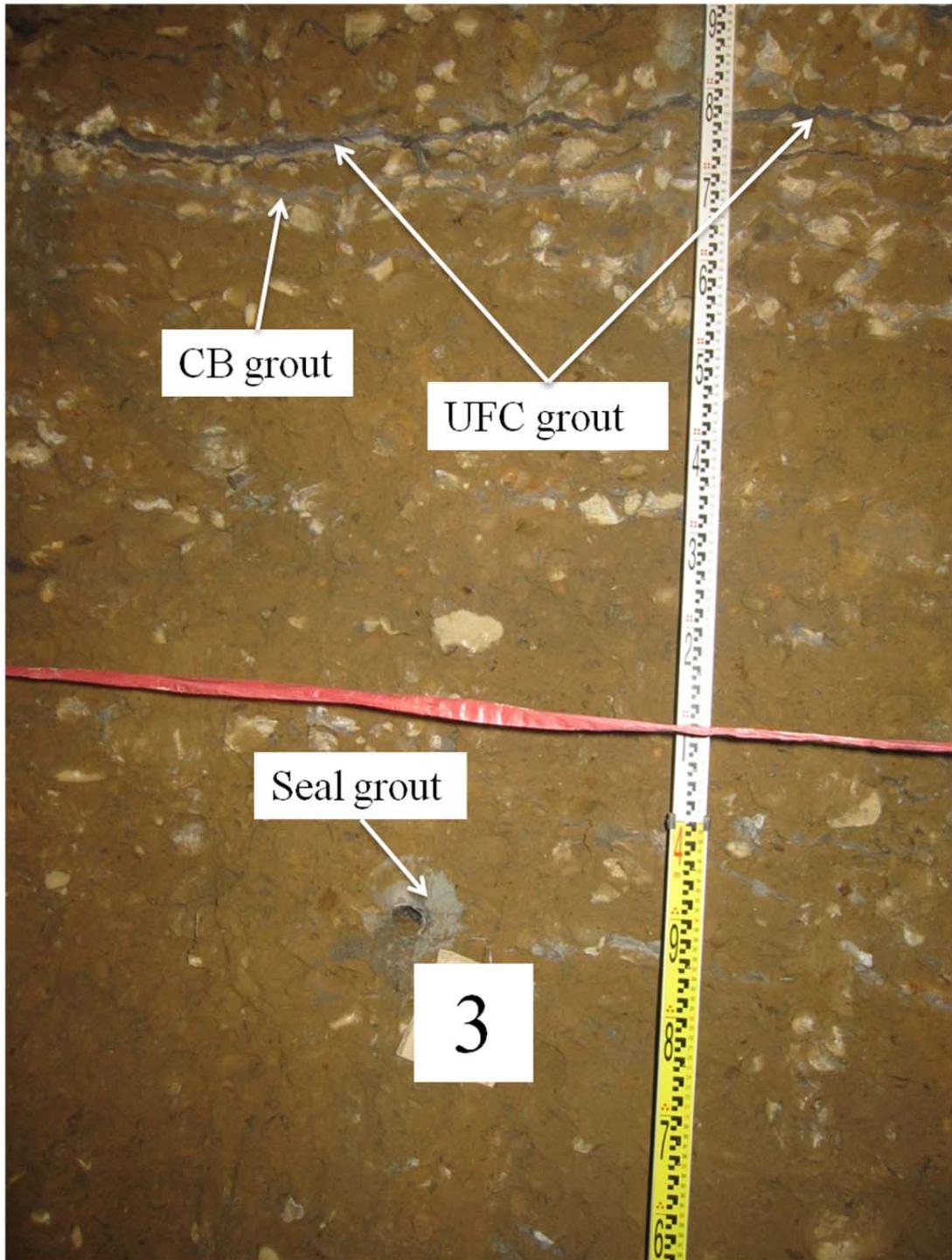


圖 5.35 第 16 開挖斷面 3 號孔上方之漿液分布情形

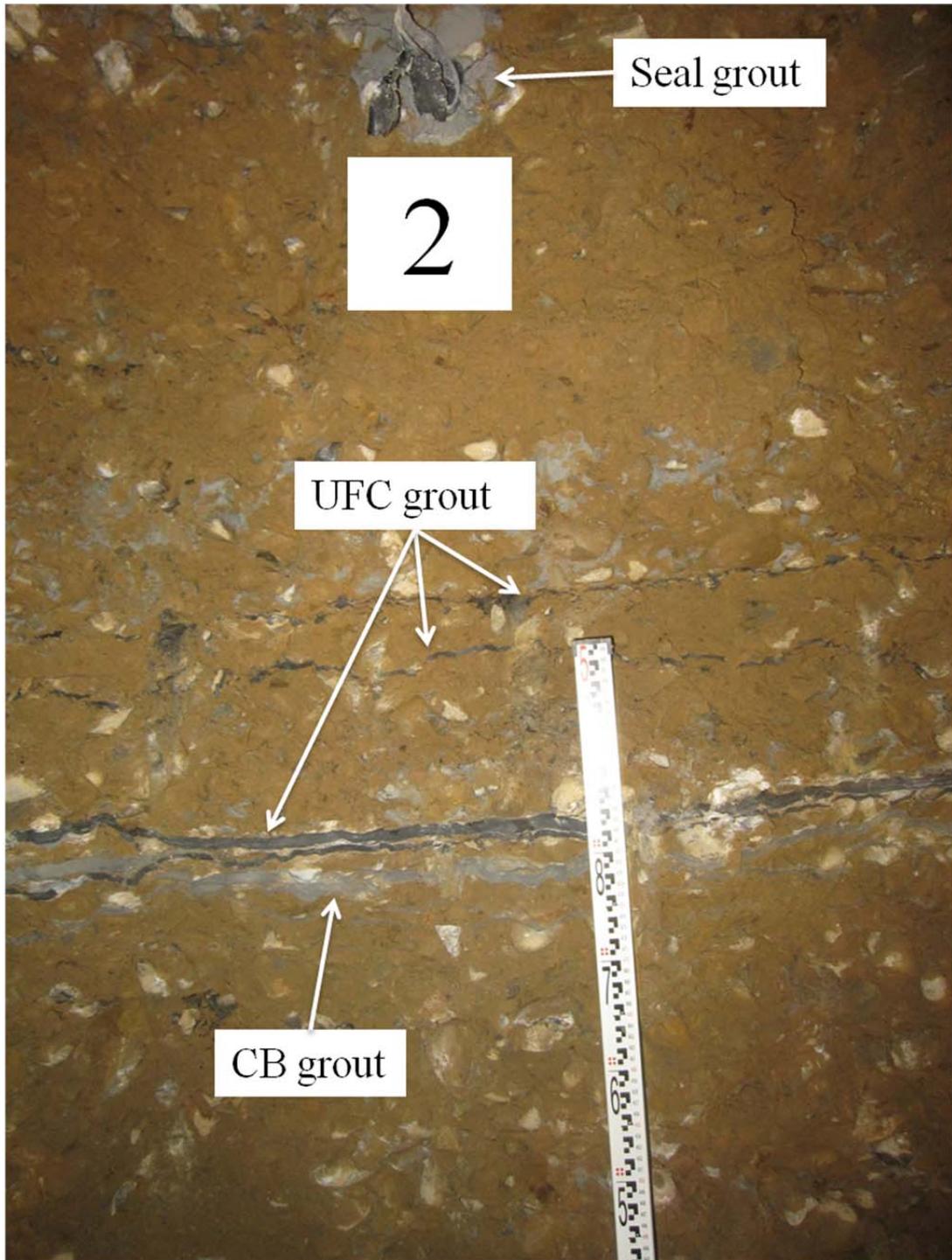


圖 5.36 第 16 開挖斷面 2 號孔下方知漿液分布情形

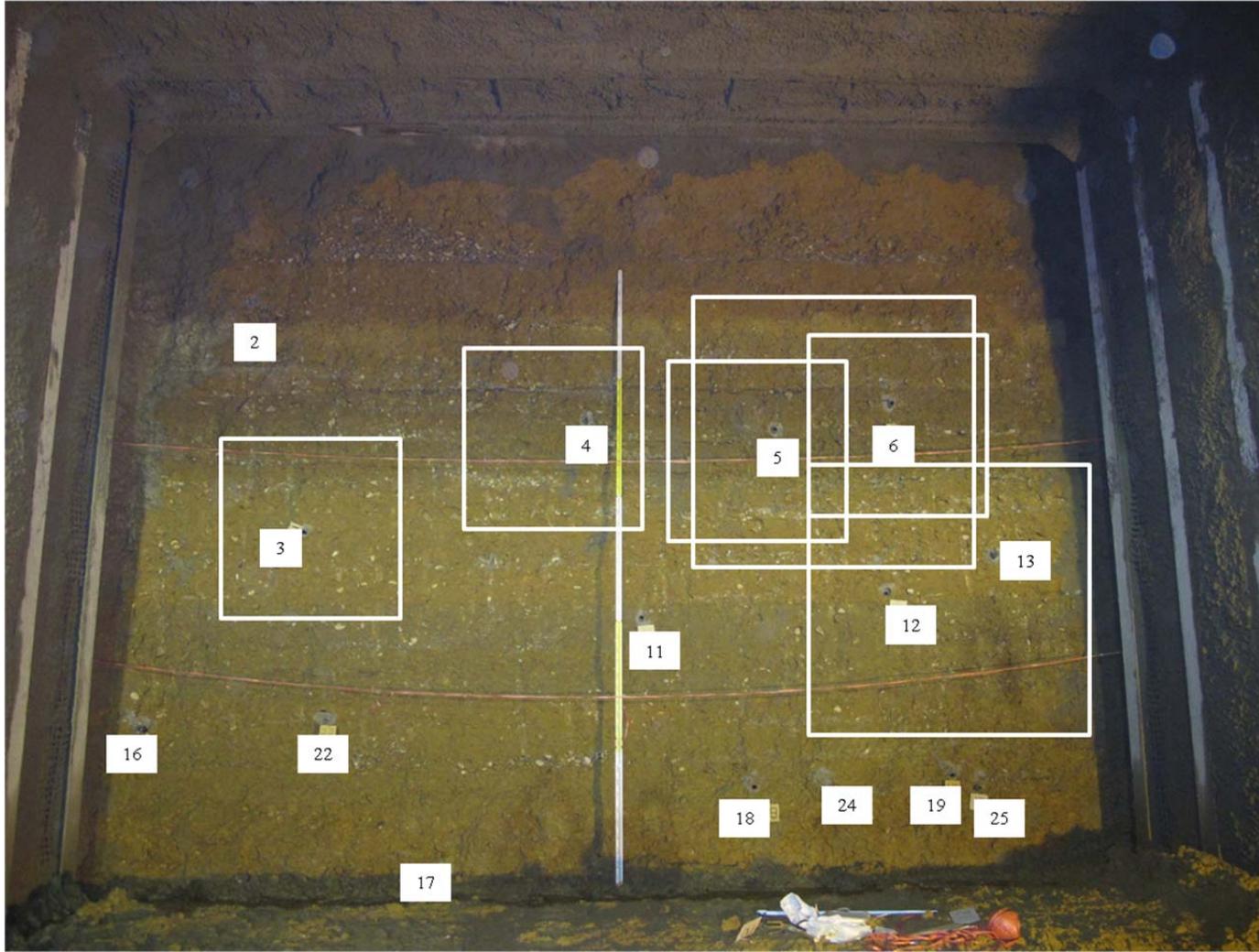


圖 5.37 第 18 開挖斷面

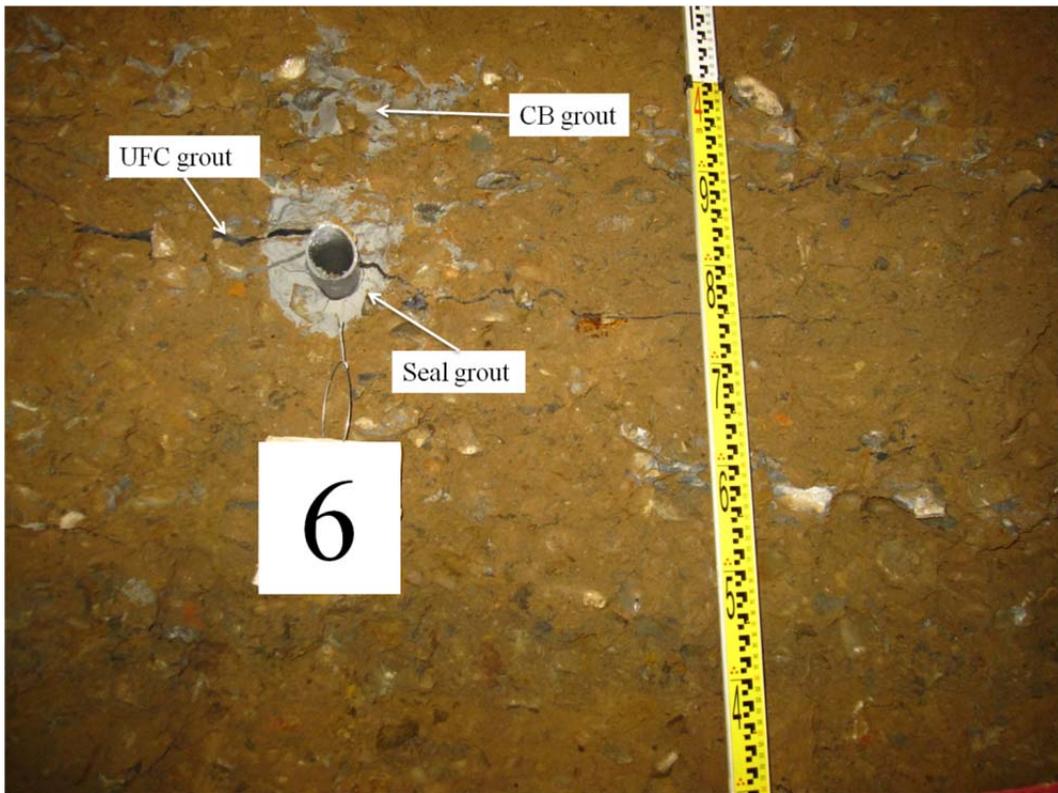


圖 5.38 第 18 開挖斷面 6 號孔周圍漿液分布情形

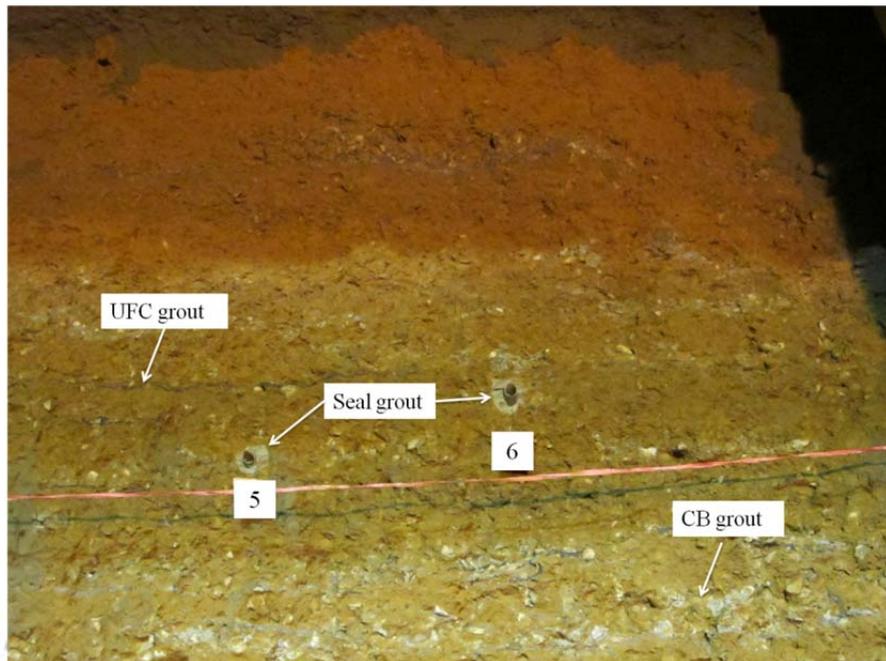


圖 5.39 第 18 開挖斷面 5、6 號孔附近之漿液分布情形

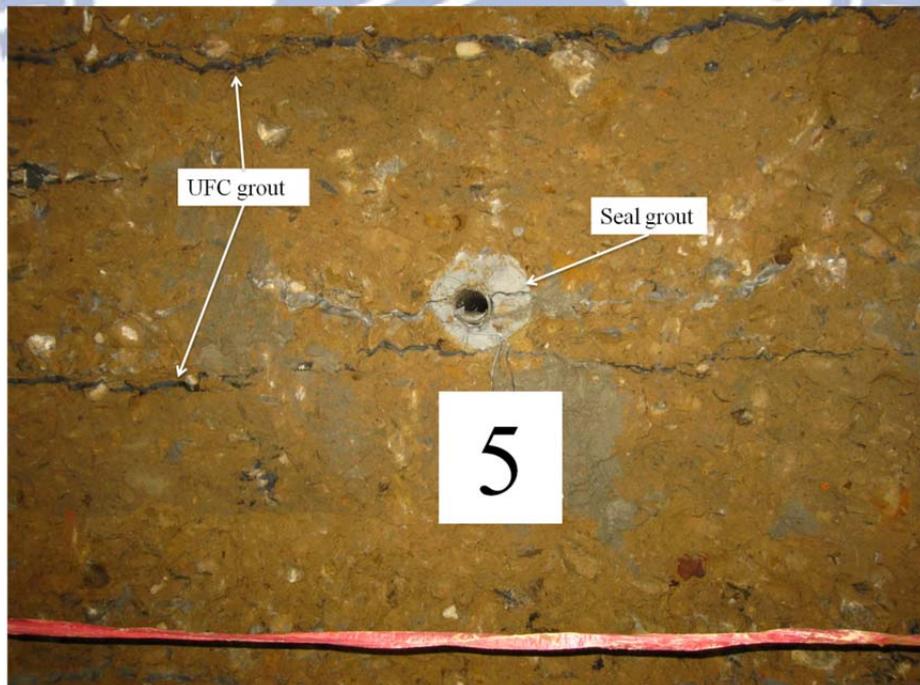


圖 5.40 第 18 開挖斷面 5 號孔周圍漿液分布情形

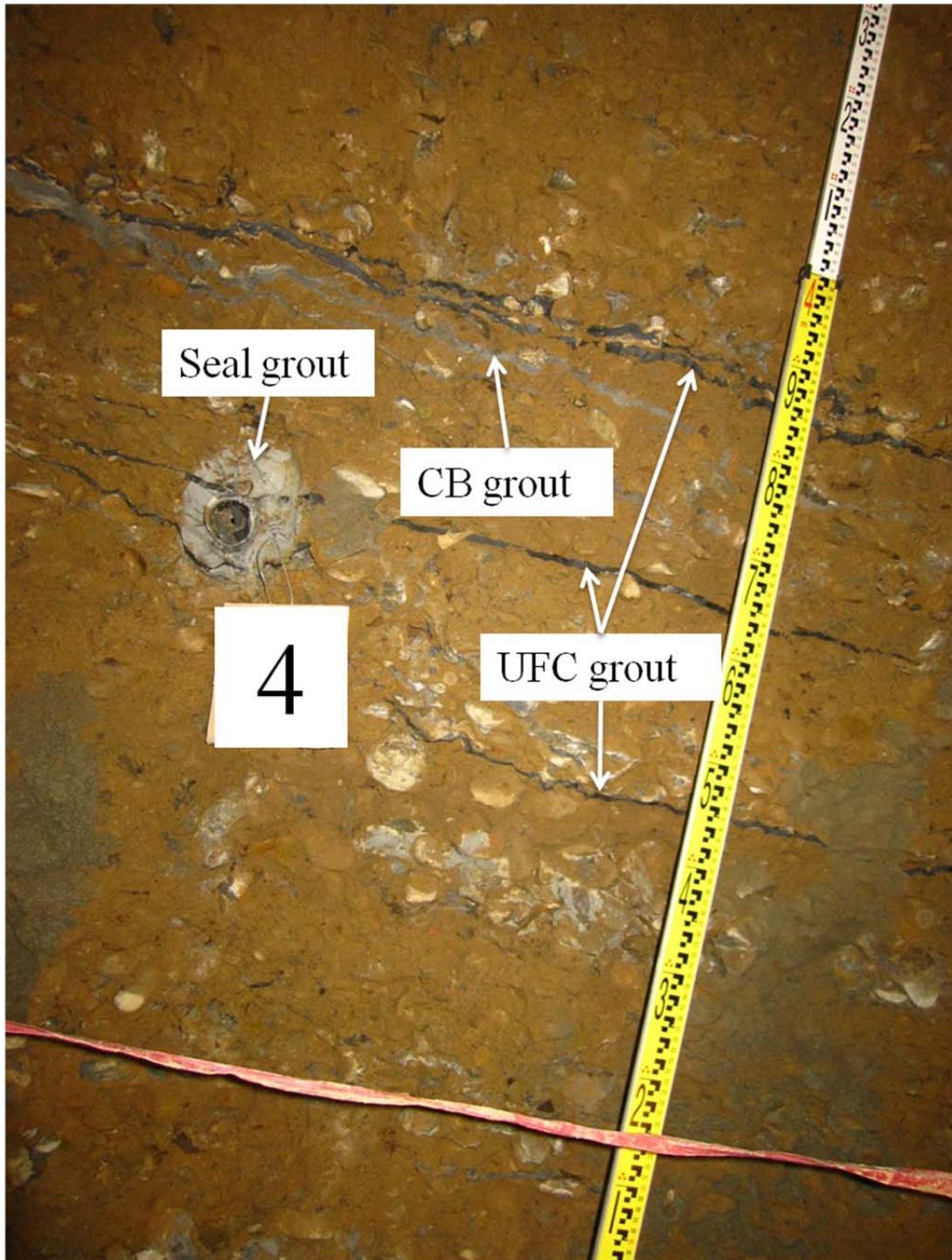


圖 5.41 第 18 開挖斷面 4 號孔周圍漿液分布情形

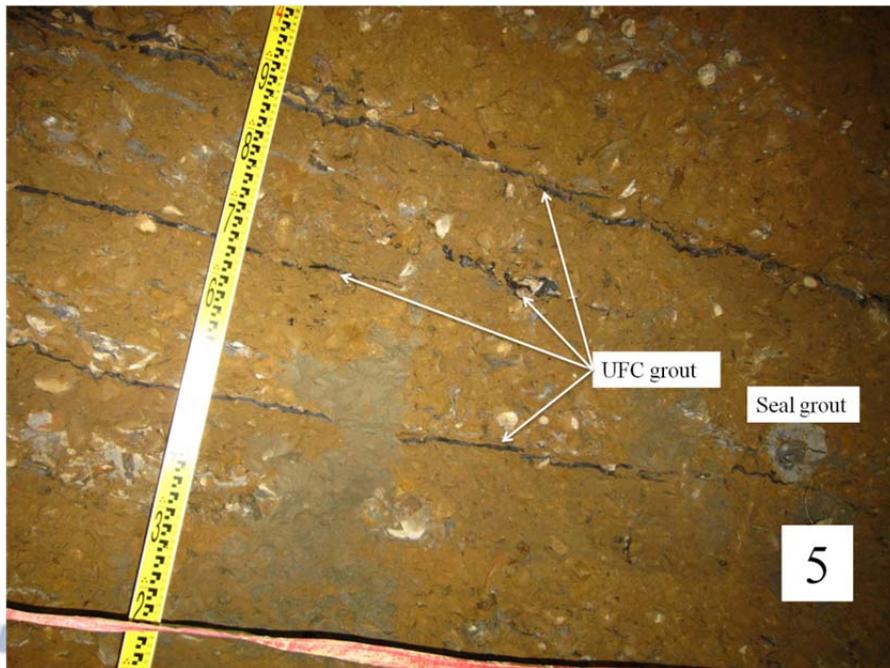


圖 5.42 第 18 開挖斷面 4 號孔右邊漿液和 5 號孔間的連結

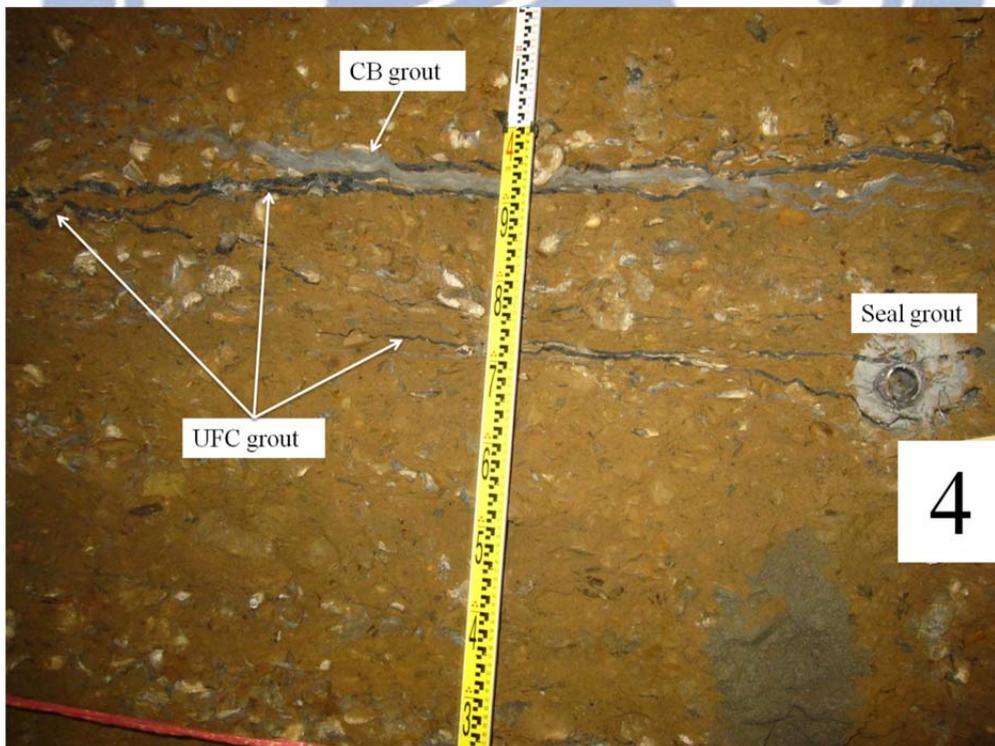


圖 5.43 第 18 開挖斷面 4 號孔左邊部分之漿脈匯流情形

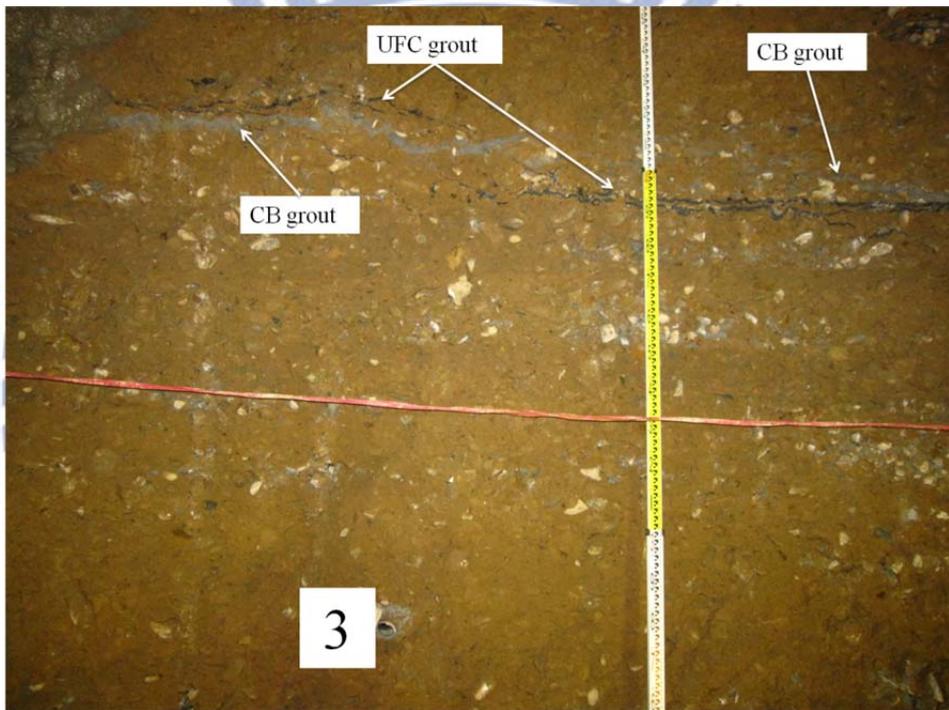


圖 5.44 第 18 開挖斷面 3 號孔上方之漿脈劈裂情形

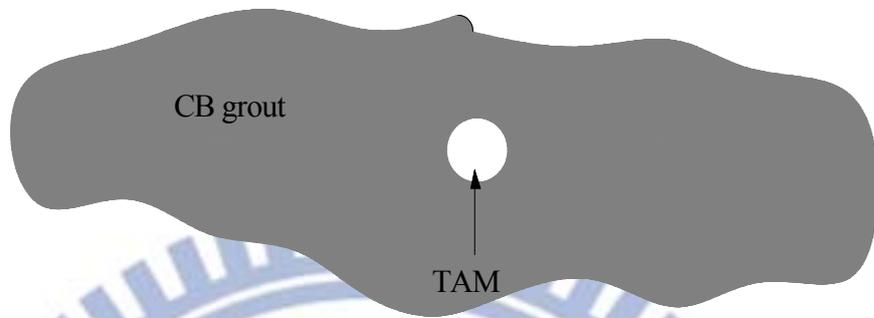


圖 5.45 CB - A 型 CB 漿脈四周擴散型

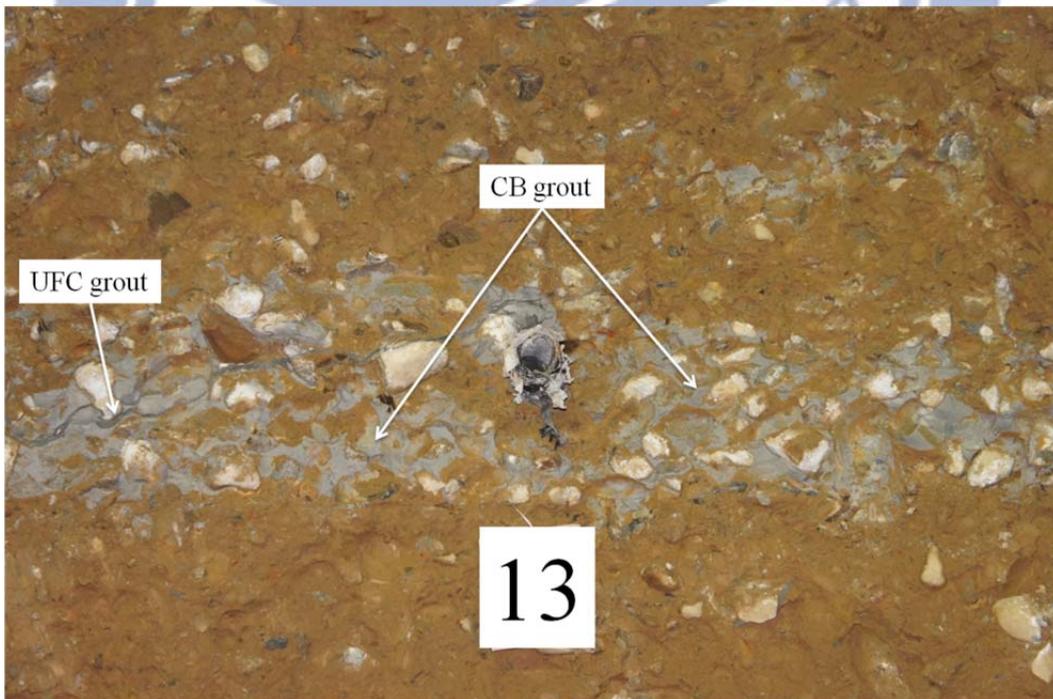


圖 5.46 第 14 開挖斷面 13 號孔

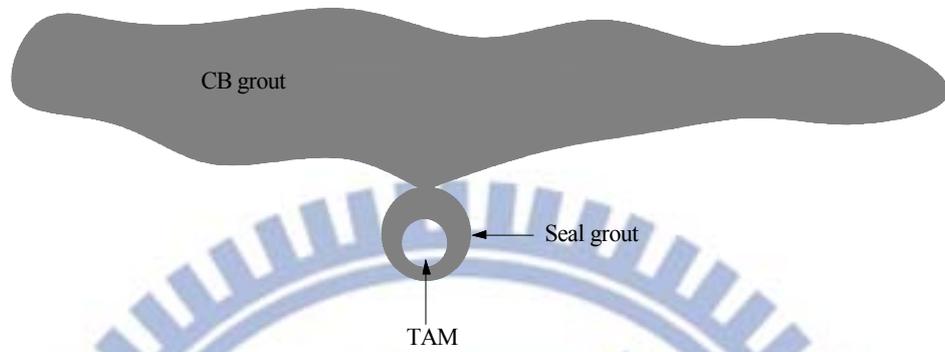


圖 5.47 CB - B 型 CB 漿脈向上滲流水平擴散(斷面與注入孔重合)

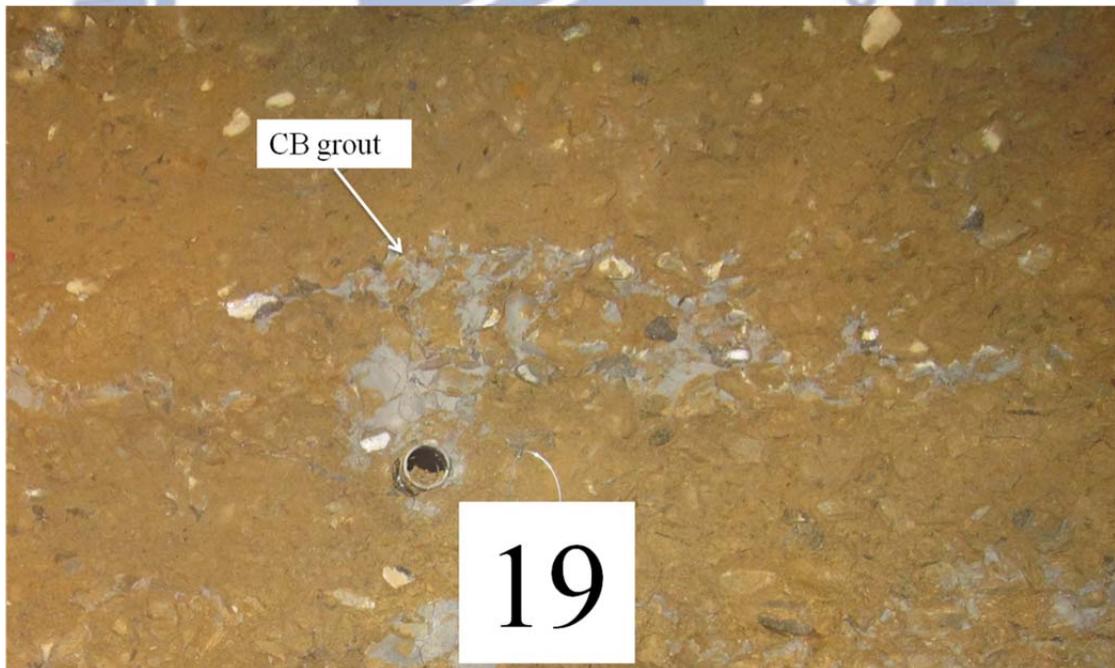


圖 5.48 第 16 開挖斷面 19 號孔



圖 5.49 CB - B 型 CB 漿脈水平擴散(斷面與注入孔錯開)

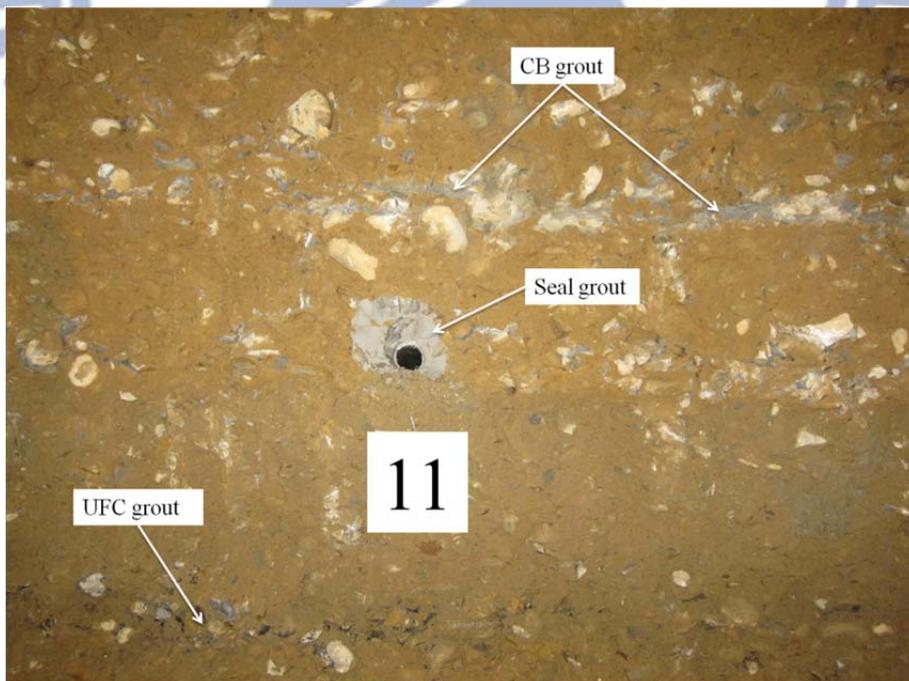


圖 5.50 第 16 開挖斷面 11 號孔



圖 5.51 CB - B 型(水平雙孔漿脈連結)

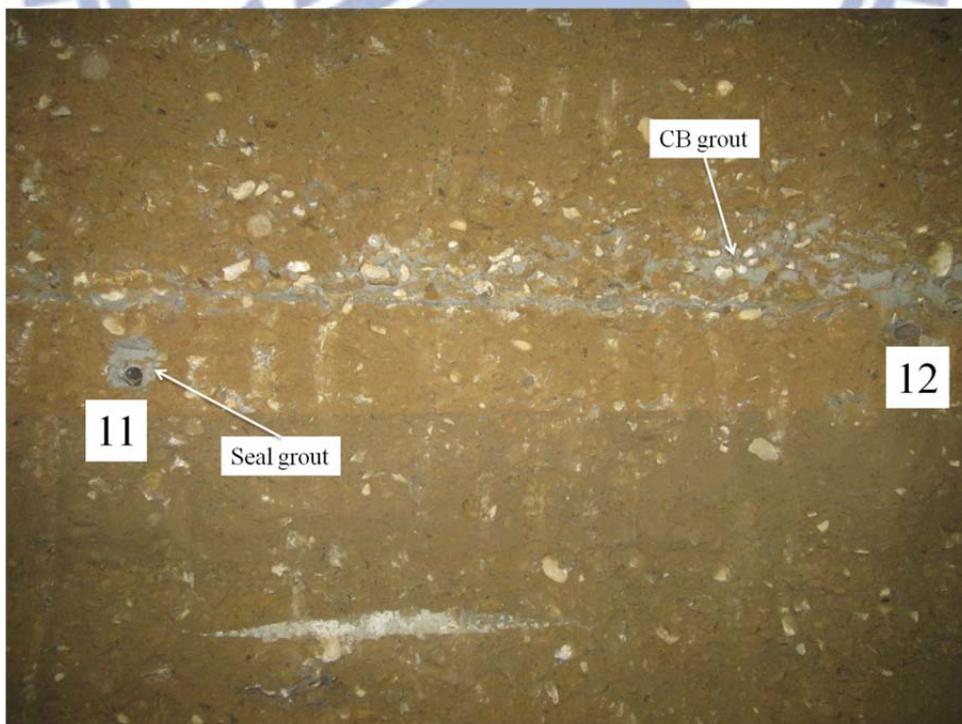


圖 5.52 第 14 開挖斷面 11、12 號孔

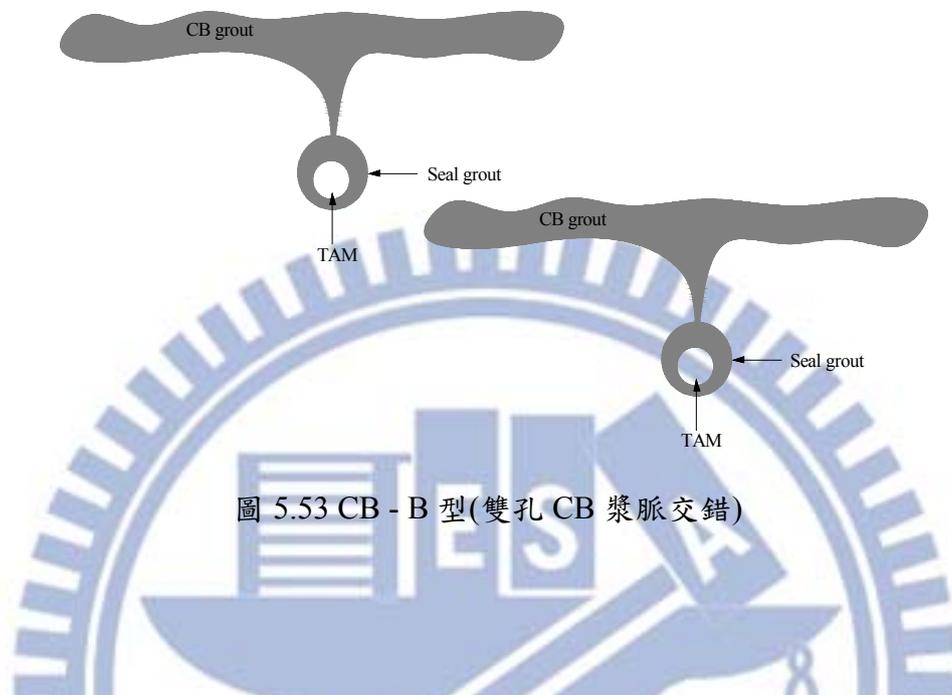


圖 5.53 CB - B 型(雙孔 CB 漿脈交錯)

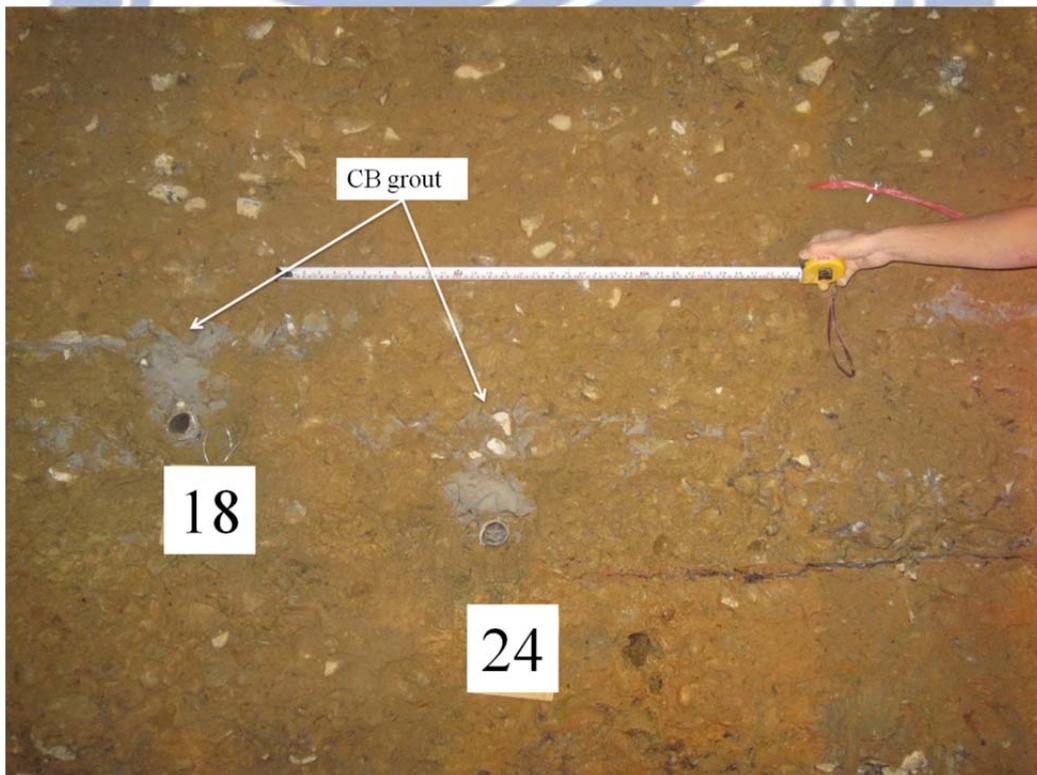


圖 5.54 第 16 開挖斷面 18、24 號孔

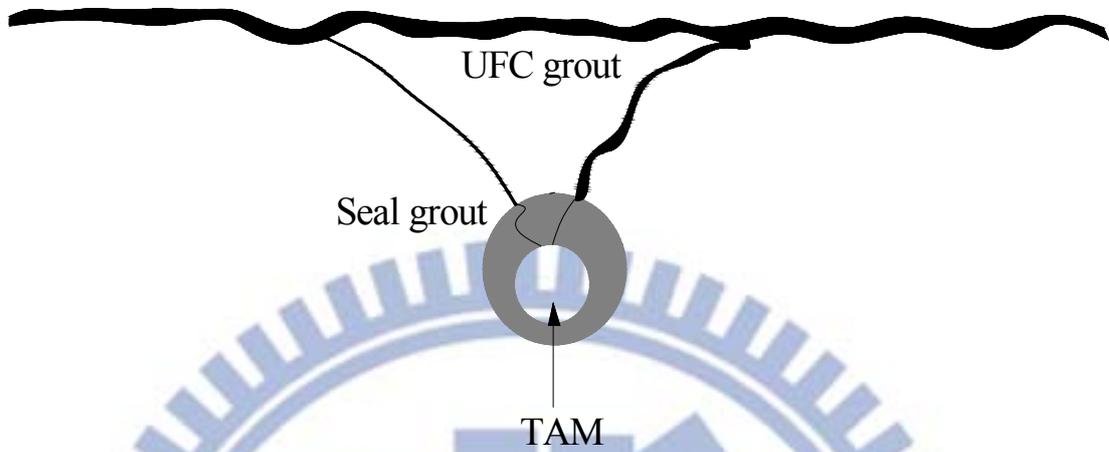


圖 5.55 UFC - B 型(UFC 漿脈向上及水平水力破裂)

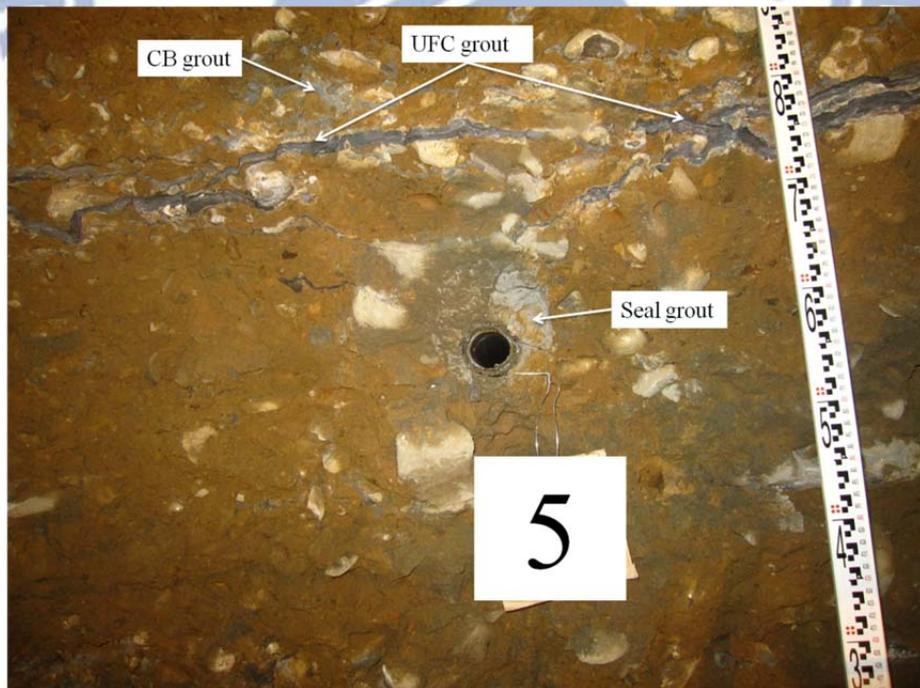


圖 5.56 第 16 開挖斷面 5 號孔

UFC grout

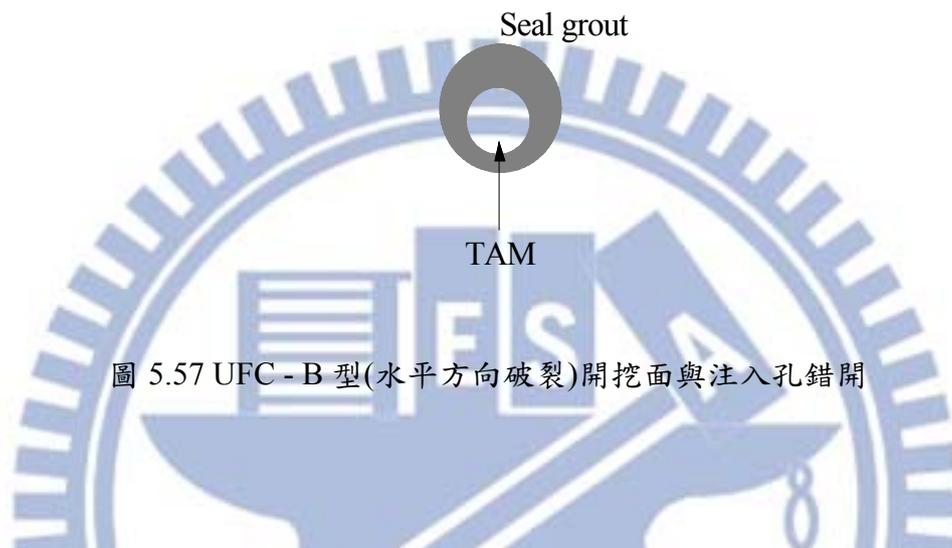


圖 5.57 UFC - B 型(水平方向破裂)開挖面與注入孔錯開

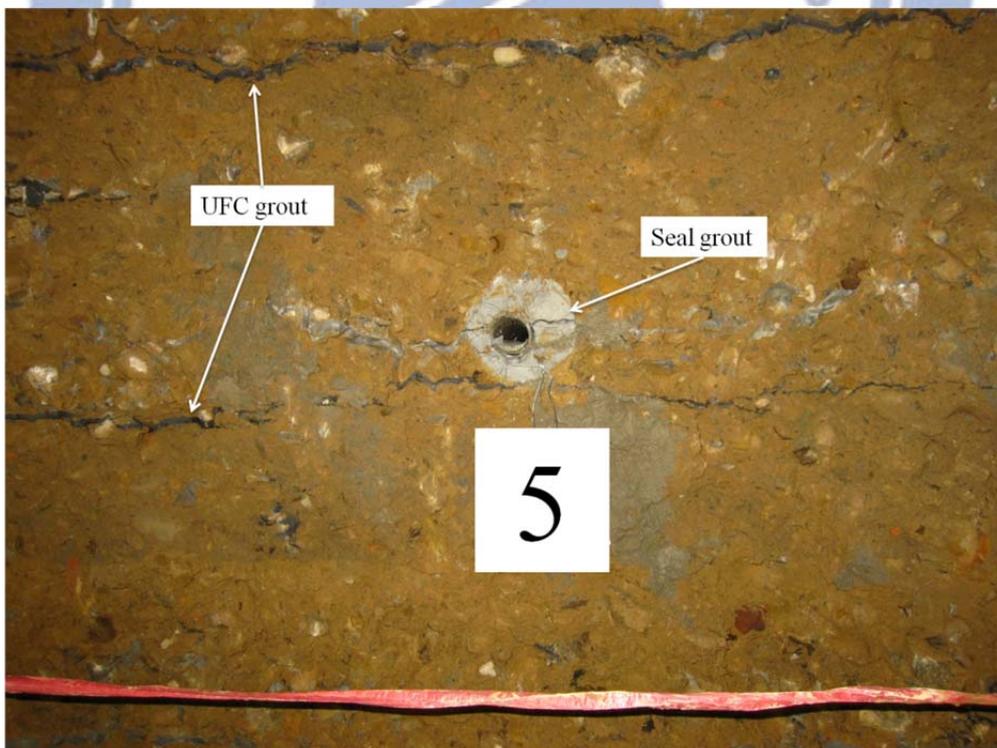


圖 5.58 第 18 開挖斷面 5 號孔

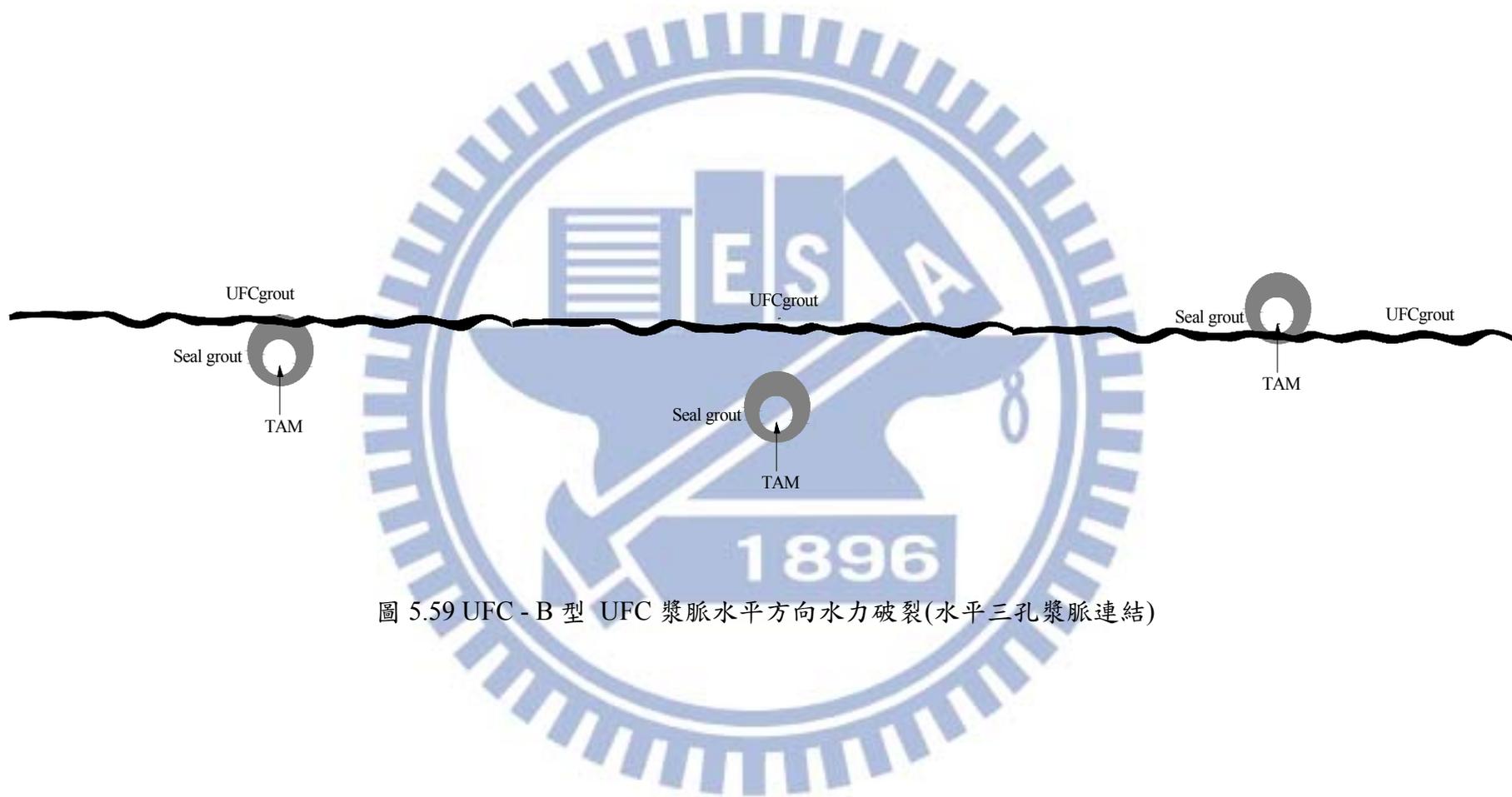


圖 5.59 UFC - B 型 UFC 漿脈水平方向水力破裂(水平三孔漿脈連結)

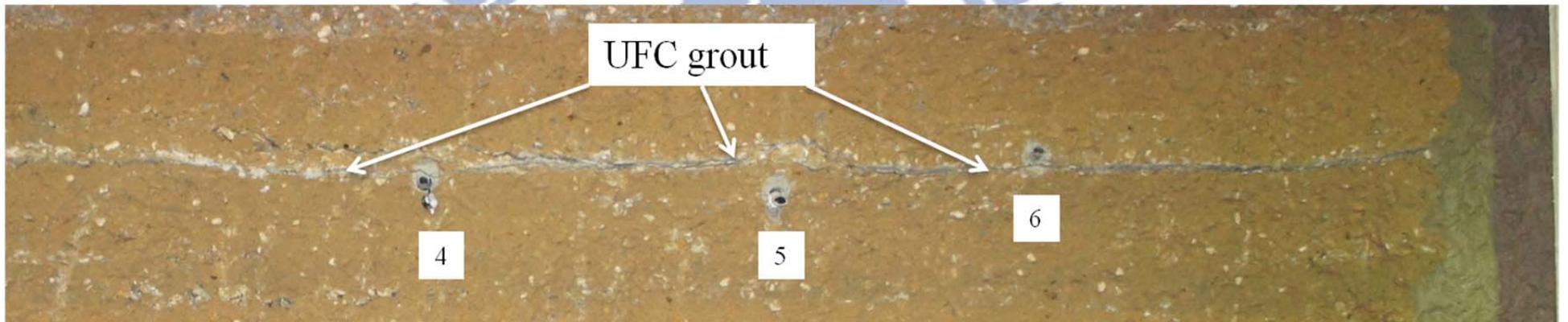


圖 5.60 第 14 開挖斷面 4、5、6 號孔

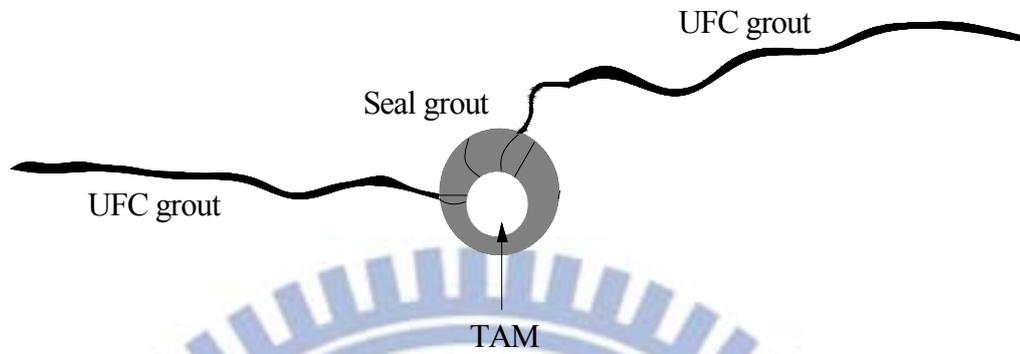


圖 5.61 UFC -C 型(UFC 漿脈水平方向水力破裂)

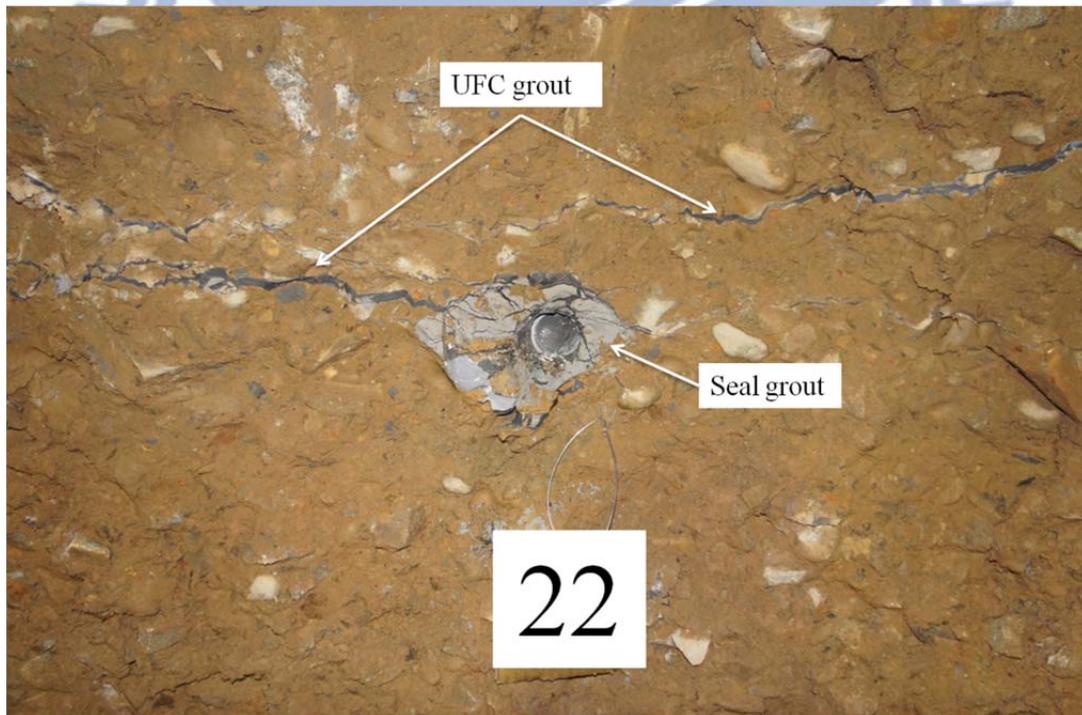


圖 5.62 第 14 開挖斷面 22 號孔

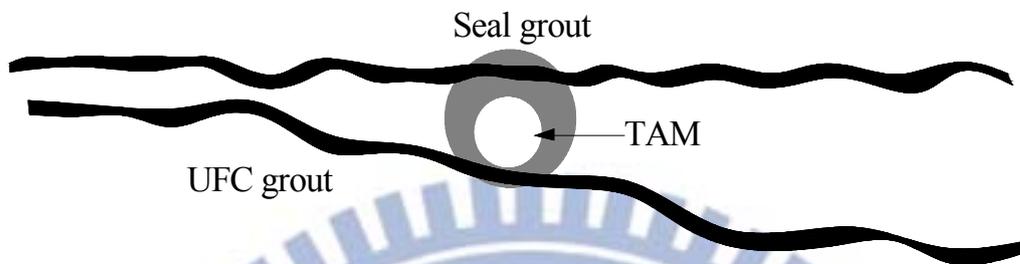


圖 5.63 UFC - C 型(UFC 漿脈多重水平方向水力破裂)

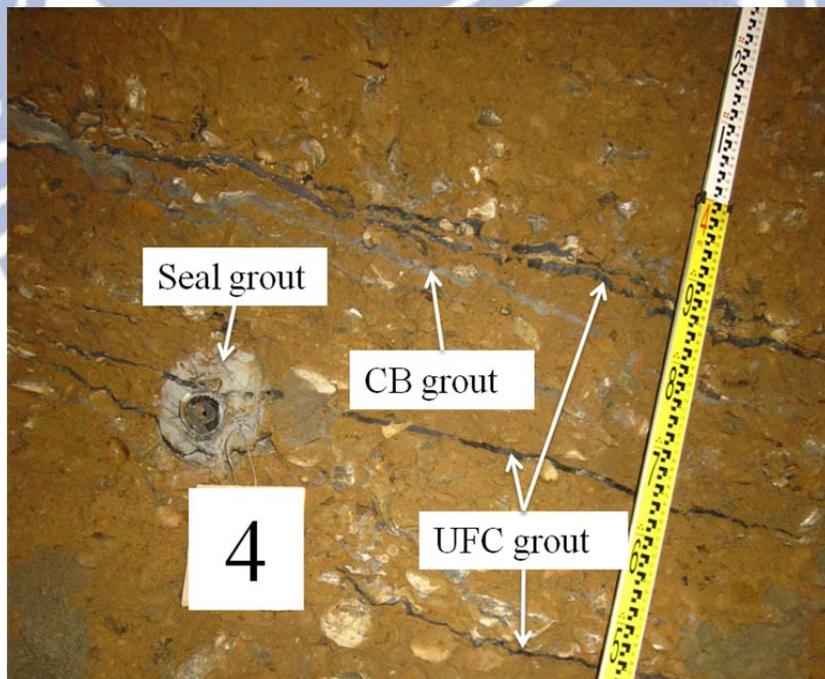


圖 5.64 第 18 開挖斷面 4 號孔

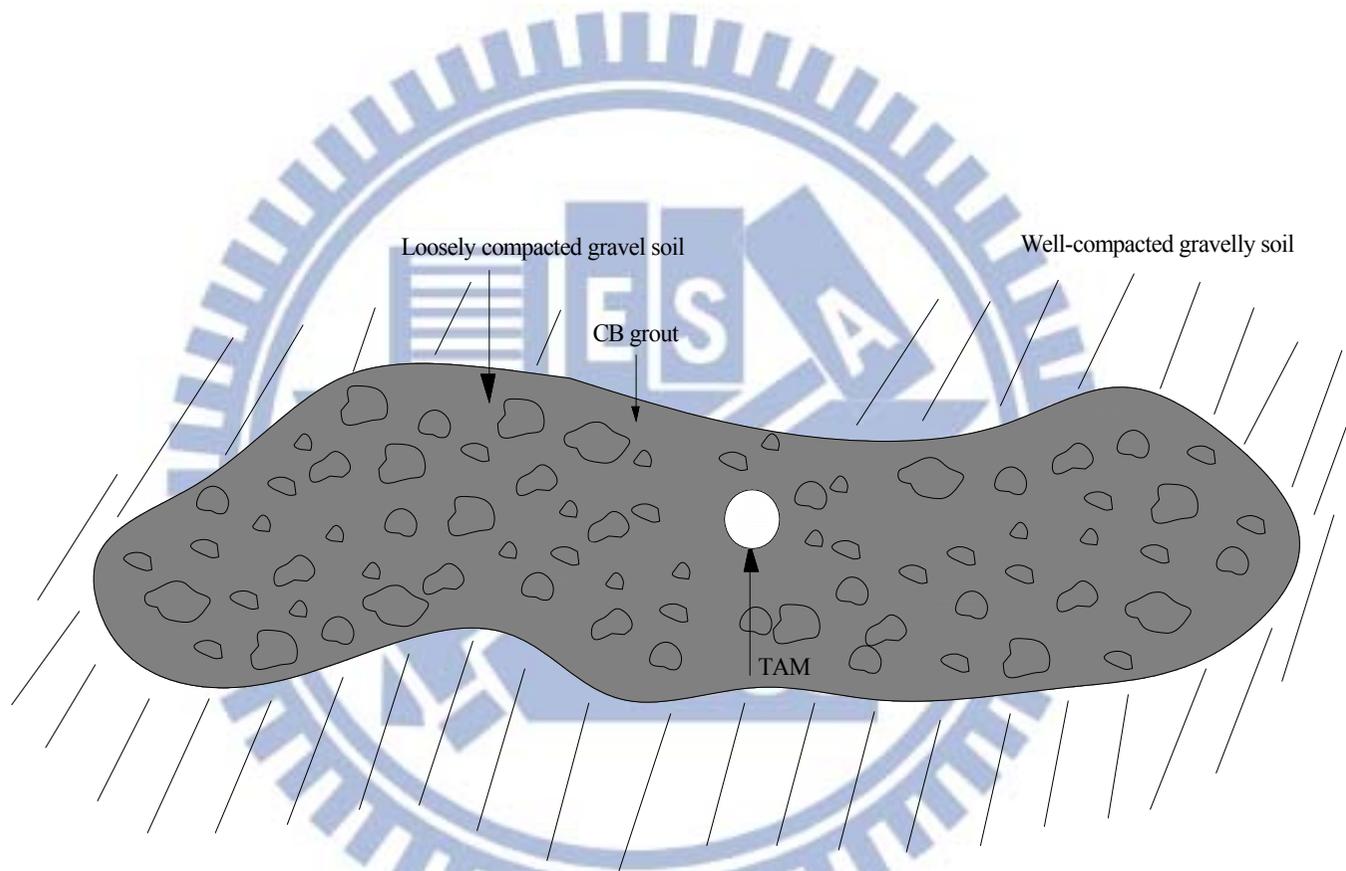


圖 5-65 CB 漿液流動填充四周土壤孔隙

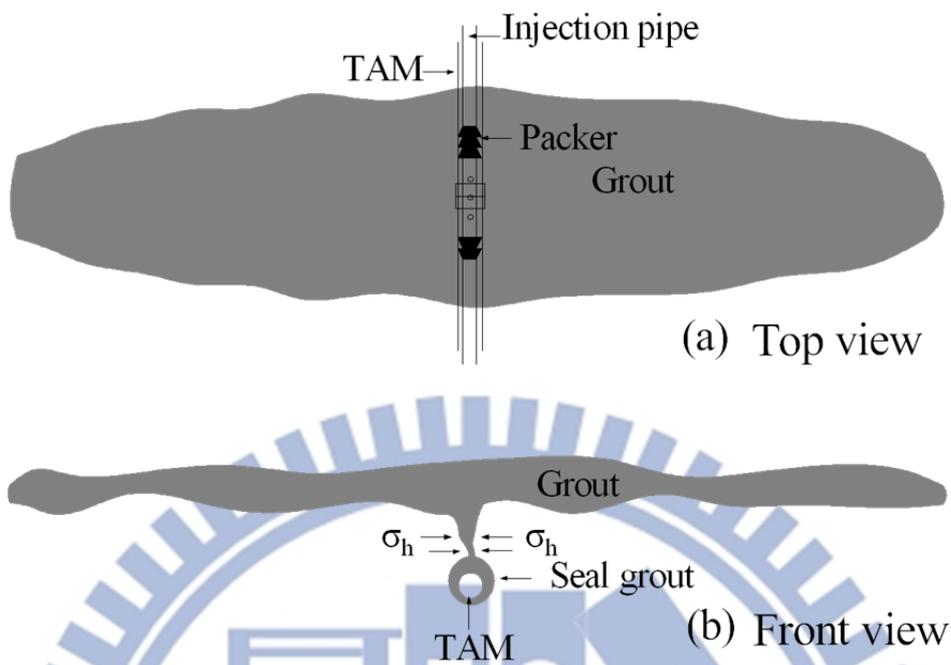


圖 5.66 漿液自灌漿孔流出示意圖 (a)俯視圖 (b)前視圖

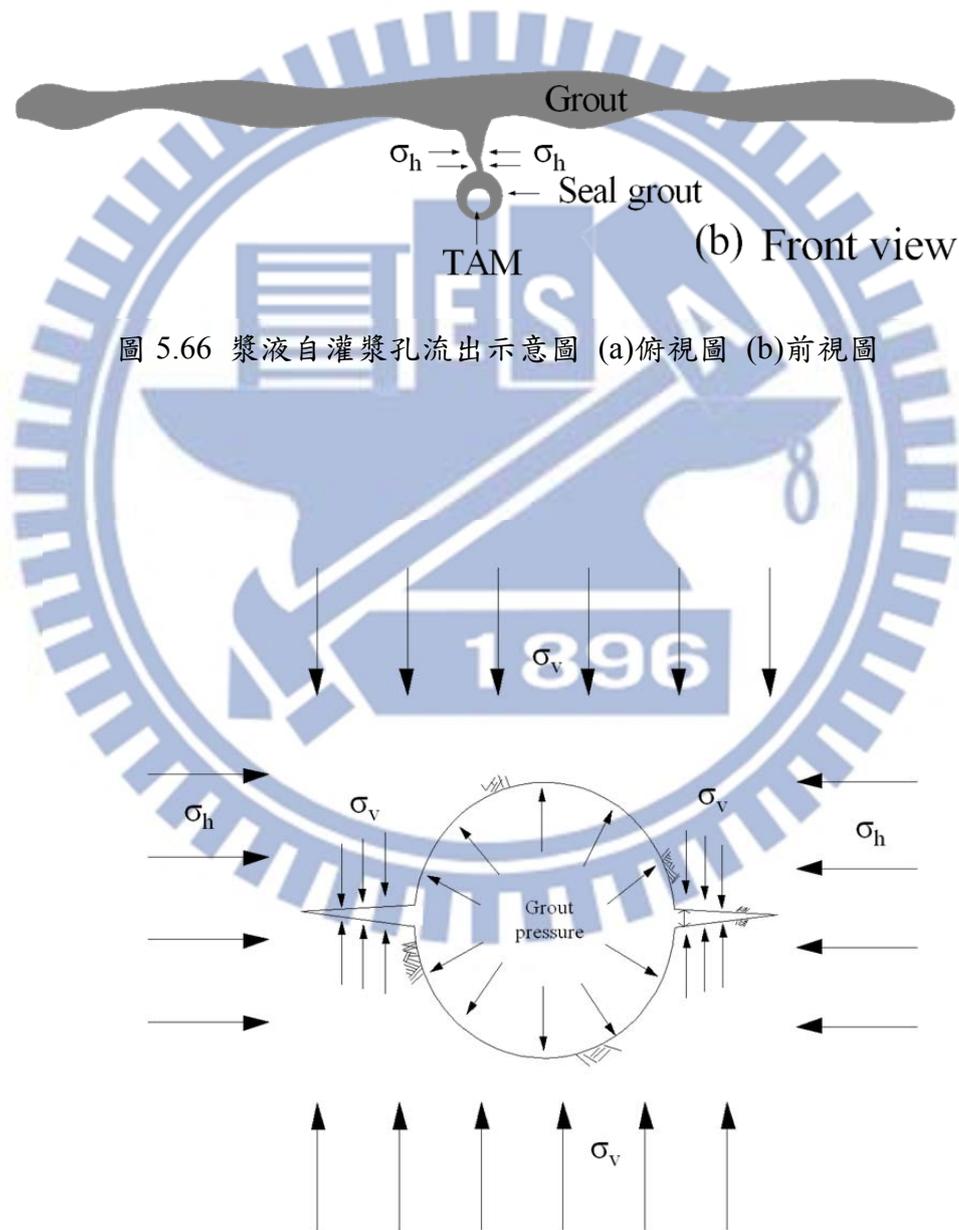


圖 5.67 漿液受壓造成水平方向水力破裂