

地工技術

高壓噴射灌漿引致之地層變位案例

鍾毓東 謝百鍾 陳迪生 余明山

中鼎工程股份有限公司 萬鼎工程服務股份有限公司

關鍵字：高壓噴射灌漿、地層位移、單管、雙重管、三重管。

摘要

本文整理中和地區某一潛盾隧道工程於粘土層中施行高壓噴射灌漿環試灌之案例探討單管、雙重管及三重管灌漿施工過程引致之地層變位特性包括隆起、沉陷、側向變位等。由試灌結果顯示高壓噴射灌漿所引起之地層位移受地層條件、灌漿柱體配置、施工方法及其所採用之工作參數、灌漿順序及施工技術、品質等影響，無一定之模式，很難以學理方法或經驗作定量之預測。

GROUND MOVEMENT CAUSED BY JET GROUTING

CHUNG Y.T., SHIEH B.J.

CTCI Corporation

CHEN DIXON, YU M.S.

Resources Engineering Services Inc.

KEY WORDS : jet grouting, ground movement, single tube, double tube, triple tube system.

ABSTRACT

A test grouting work was carried out in the clay layer in Chungho area where a shield tunnelling work will be constructed. The single tube, double tube and triple tube system were used in this jet grouting test program and the ground movement caused by jet grouting was monitored. The result of this test grouting suggested that the ground movement caused by jet grouting might be affected by soil condition, layout of the grouting columns, grouting methods, grouting parameters, grouting sequence and construction quality. There is no certain model can be used to predict the ground movement cause by jet grouting.

一、前言

大地工程師常利用高壓噴射灌漿方法以改良土壤強度及透水性，但高壓噴射灌

漿施工時常造成地層隆起。地工界在應用高壓噴射灌漿作地盤改良時，常有的經驗是尚未達到改良目的前，即先在施工時因地盤隆起造成鄰近結構物及地下管線之損害。這類隆起受地層構造、土壤特性、覆

土壓力、灌漿方法、施工程序、灌漿作業參數、灌漿體配置等因素之影響，非常不規則。由於缺乏實際監測資料及理論分析依據，大地工程師對高壓噴射灌漿造成的隆起量大小、分佈趨勢、影響範圍等都無法預測及研判。

本文介紹在中和地區施工之高壓噴射灌漿環試灌案例，在此案例中分別應用單管直灌、單管斜灌、雙重管斜灌及三重管斜灌方式進行試灌，以瞭解灌漿環成環之有效性及灌漿施工過程引致之地層變位特性包括隆起、沉陷、側向變位等。由於案例特殊，國內外都極為罕見，乃整理本案例之施工記錄並探討監測結果，供地工同仁參考。

二、地層概況

中和地區位於台北盆地南緣，其地層構造主要為中和老沖積層粘土與一般熟知之台北盆地松山層不同。地工界對中和老沖積層粘土所做之研究不多，但是楊麗文(1991)等人曾利用圓錐貫入試驗(CPT)、平鈹膨脹儀試驗(DMT)及十字片剪試驗(VST)等現地試驗再配合傳統室內試驗深入研究本區粘土層之工程性質，本案例之地層特性可直接參考其研究結果。

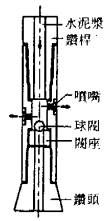
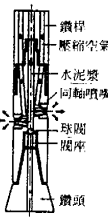
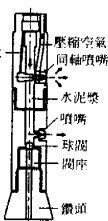
本案例灌漿深度最深達23m深，在此深度內之土壤均為中和老沖積層粘土。本層粉質粘土自然含水量在30%~40%之間，液性限度及塑性指數分別介於25%至50%及7%至24%間，為低至中塑性之粘土，而其過壓密比(OCR)則大致隨深度遞減，於6公尺深內均大於5，6公尺至24公尺深則約由4減為1.5，24公尺以下則介於1.0至1.5間。不排水剪力強度 S_u 大約

在2~5 t/m²間，相對於現地有效覆土壓之體積壓縮係數 M_v 則介於 20×10^{-3} cm²/kg至 60×10^{-3} cm²/kg間，大致隨深度遞減。

三、灌漿環施工

3.1 施工方法與施工機械

本次試灌之灌漿機械及技術係自義大利引進，機械體積相當龐大，且操作自動化與國內習見之輕巧型灌漿機械大不相同。高壓噴射灌漿管分為單管、雙重管及三重管三種，分別為RODINJET 1(R1)、RODINJET 2(R2)及RODINJET 3(R3)如圖一，詳細之施工程序亦說明於

項目種類	鑽桿及噴嘴構造	施工程序
單管 R-1		<ol style="list-style-type: none"> (1) 向下鑽掘 (2) 至固定深度放入鑽桿 (3) 從鑽桿下端二水平孔灌出水泥漿劑，作為削割及混合，昇鑽桿 (4) 重複提昇鑽桿至指定深度
雙重管 R-2		<ol style="list-style-type: none"> (1) 以外套管向下鑽掘 (2) 至固定深度放入鑽桿 (3) 從鑽桿下端二水平孔中噴灌水泥漿及空氣，作為削割、混合，並旋轉提昇鑽桿 (4) 重複提升鑽桿至指定深度
三重管 R-3		<ol style="list-style-type: none"> (1) 以外套管向下鑽掘 (2) 至固定深度放入鑽桿 (3) 從鑽桿之上水平孔，噴射高壓水流及空氣削割土層，然後在下水平孔內灌注水泥漿液混合已被削割土體。逐漸提昇鑽桿並旋轉，形成圓柱體 (4) 重複提升鑽桿至指定深度後停止

圖一 鑽管噴嘴構造及施工程序

圖一中。

主要施工機械為：

(1)鑽桿R1、R2及R3三種。

(2)Casagrande-8型(C8)油壓履帶式鑽機，此型鑽機操作時套管與鑽桿拆卸及安裝都不須藉助人工，機械總重達15ton。

(3)高壓泵浦，採用RODINJET PUMP，總重達9.5ton，可輸送壓力為270kg/cm²至900kg/cm²，R1及R2係以此泵浦輸送水泥漿，而R3則以此泵浦輸送水流，另以中壓泵浦輸送水泥漿。

(4)空壓機與流量計。水泥漿或水流以泵浦輸出，經流量計計量後，再配合空壓機送出空氣。

3.2 灌漿環施工概況與工作參數

灌漿環試灌共有A、B、C、D四個環，其施灌順序，依次為A、B、C、D。灌漿環與灌漿孔位之配置如圖二所示，各環的內容分別為：

環	施工方式	施工支數	預估樁徑	樁心間距	施灌角度
A 全環	單管直灌	32支 (2排×16支/排)	90cm	50cm、 70cm、 80cm	0°、 垂直
B 全環	雙重管斜灌	9支	150cm	地表30cm	44°~59°
C 全環	三重管斜灌	9支	160cm	地表30cm	44°~59°
D 非全環	單管斜灌	6支	90cm	地表30cm	52°~60°

各環施工前，曾於同一基地進行單支之試灌，試灌深度為地下1.5m~5.5m，試灌過程曾造成地表極大之隆起情形，並以單管最大約40cm。灌漿後挖掘各灌漿樁體，再實測各樁體之直徑及傾角。綜合各樁體之工作參數，如噴嘴口徑、噴射壓力、注漿率、提昇速度、轉速等及實測樁徑與傾角後訂定各環施工時之各項控制參數

如表一。

3.3 迴漿特性

高壓噴射灌漿施工時，地表都有大量迴漿。由於施工者常僅注意於迴漿之收集、處理及運棄造成的衛生安全及環保問題，而未能考慮迴漿特性及影響，故對迴漿之特性如粘滯性、強度等所知有限。有鑑於此，在正式試灌前所做的單支試驗即曾採取迴漿體製作5公分立方試體，並進行強度試驗，結果如下：

灌漿方法	水泥用量	迴漿強度	傾角
R1	220kg/m	50kg/cm ² ~57kg/cm ²	0°
R2	450kg/m	20kg/cm ² ~41kg/cm ²	45°
	500kg/m	82kg/cm ² ~106kg/cm ²	45°
R3	700kg/m	20kg/cm ² ~33kg/cm ²	0°

在正式試灌時，也曾採取迴漿製作試體，試驗結果，再次確認迴漿強度甚高介於20kg/cm²~60kg/cm²之間。

此外，現場施工時也於灌漿孔邊採取迴漿測試其密度及粘滯性，其結果整理如表二，表中的密度及粘滯性都是平均值。由表二可瞭解，三重管灌漿(R3)之迴漿密度及粘滯性都遠低於單管(R1)及雙重管(R2)，此點與現場目視觀察之R3迴漿較R1及R2順暢相符。

由於迴漿的密度及粘滯性直接影響迴漿的順暢與否，而迴漿若不順暢將使壓力累積於灌漿孔內，進而造成地層隆起，所以現場施工時若能減低迴漿之密度及粘滯性必能有助於減輕地層隆起量，此一方向值得灌漿從業人員考慮。此外，加裝套管避免崩孔阻塞迴漿也是很有效的方法。

本案例是在粘土層中施工，所得迴漿體已具相當強度，若是在砂性地層中施工，可以預見迴漿體強度必然更高，但應注意前述強度是指5公分立方試體強度與一

表一 灌漿環施工參數表

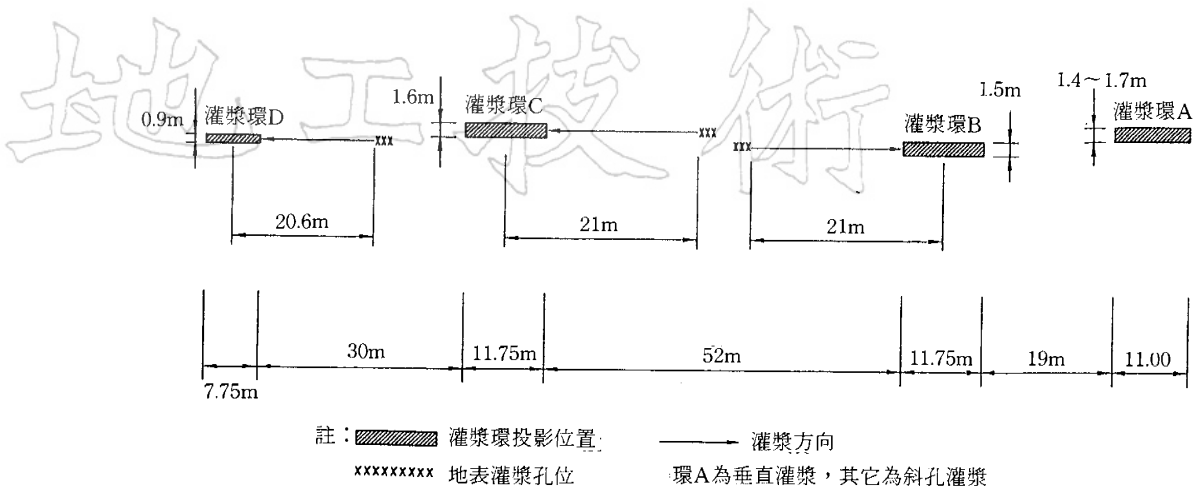
項目	A (單管)	B (雙重管)	C (三重管)	D (單管)
套管(146mm ϕ)	套管長12m~14m	套管長20.5m	套管長22.5m	套管長9.5m
鑽頭直徑(mm)	120mm(有套管) 180mm(無套管)	120	120	120
鑽桿直徑(mm)	90	90	90	90
噴射注漿 噴嘴口徑(mm)	3.0/2.4	2.4	9.0	2.4
噴射壓力(bar)	400	400	26	400
水泥漿液 水灰比	1.1:1	1.1:1	1.1:1	1.1:1
注漿量, l/m	200/270	615/689	861	200
水泥使用量, kg/m	160/220	500/560	700	160
空氣 噴嘴面積(mm ²)	—	56	56	—
噴射壓力(bar)	—	8	8	—
注氣率(l/sec)	—	28	28	—
水 噴嘴口徑(mm)	—	—	2.6	—
噴射壓力(bar)	—	—	400	—
注水率(l/sec)	—	—	2.68	—
提昇速度 (sec/4cm step)	2.8/4.5 (注漿量200l/m) 3.7/5.8 (注漿量270l/m)	13.1 (注漿量615l/m) 14.7 (注漿量689l/m)	15	5
轉速(rpm)	17/27 (注漿量200l/m) 13/20 (注漿量270l/m)	6 (注漿量615l/m) 5 (注漿量689l/m)	10	17

表二 迴漿密度與粘滯性

灌漿方法	噴嘴口徑	水泥用量	提昇速率 (sec/4cm step)	轉速 (rpm)	迴漿密度 (kg/l)	粘滯性
R1	3.0mm	160kg/m	2.8	27	1.56	不具流動性
		220kg/m	3.7	20	—	不具流動性
	2.4mm	160kg/m	4.5	17	1.60	不具流動性
		220kg/m	5.8	13	1.61	不具流動性
R2	2.4mm	500kg/m	13.1	6	1.62	不具流動性
		560kg/m	14.7	5	1.58	不具流動性
R3	2.4mm(水) /9.0mm(漿)	700kg/m	15	10	1.32	30sec

註：(1)粘滯性是以March 500C.C. funnel 測定。

(2)純水泥漿之密度為1.55kg/l，粘滯性為30sec。



圖二 灌漿環與灌漿孔位配置圖

般鑽心取樣試體不宜直接比較。迴漿體既然具有相當強度，設計時似乎可以考慮將迴漿體視為一種工程材料，而不僅是一項令人困擾的廢棄物而已。

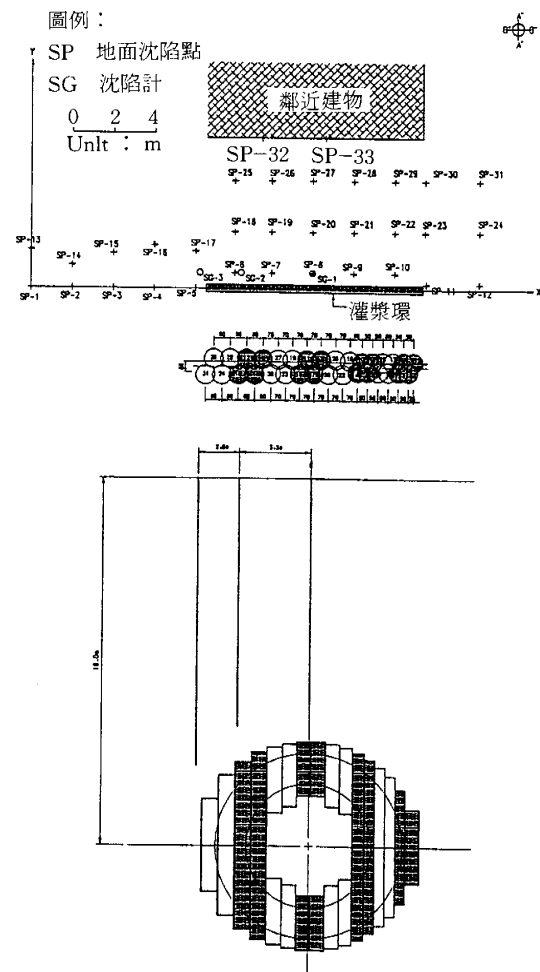
3.4 各環施工概要

(1) 灌漿環 A

單管噴射灌漿環是由32支高壓噴射灌漿樁所組成，如圖三，共分成兩排，每排16支，預估樁徑為90cm，擬形成一縱向厚度1.5公尺之灌漿環。樁心間距則分為50cm、70cm及80cm三種以測試不同樁距對於灌漿環之成型性及強度的影響。

本次試灌水泥漿之配比，水灰比採用1.1：1，注漿量為200l/m及270l/m兩種，相對應之水泥使用量分別為160kg/m及220kg/m。噴嘴口徑先採用3.0mm，第15支開始則變更為2.4mm的噴嘴，噴射壓力400kg/cm²，其他之主要工作參數詳見表一。

由於灌漿環之鑽孔相當密集，且地表為一回填碎石層，為防止地表崩孔造成迴漿阻塞，於試灌之前，在灌漿區使用C8型鑽機，鑽22個孔，每孔深度約80cm，然後在定點灌注水泥漿，灌漿壓力為



圖三 單管灌漿環及監測系統平面配置圖

100kg/cm²，灌漿量為每孔40kg水泥。高壓噴射灌漿環施工時，前14支使用3.0mm的噴嘴及較快的提昇速度與轉速，第15支至第32支則使用2.4mm的噴嘴及較慢的提昇速率與轉速。由迴漿試驗顯示3.0mm噴嘴之迴漿密度較小，平均為1.56kg/l，以目視觀察，迴漿顆粒較粗，偶有直徑約2cm之粘土塊。使用2.4mm噴嘴時，迴漿密度較大，平均為1.61kg/l，迴漿較細，相當均勻，也沒有小粘土塊。整體而言灌漿過程迴漿相當平順，僅NO.4(φ3.0mm)及NO.19(φ2.4mm)兩孔，曾在灌漿中途有2分鐘無迴漿情形發生。

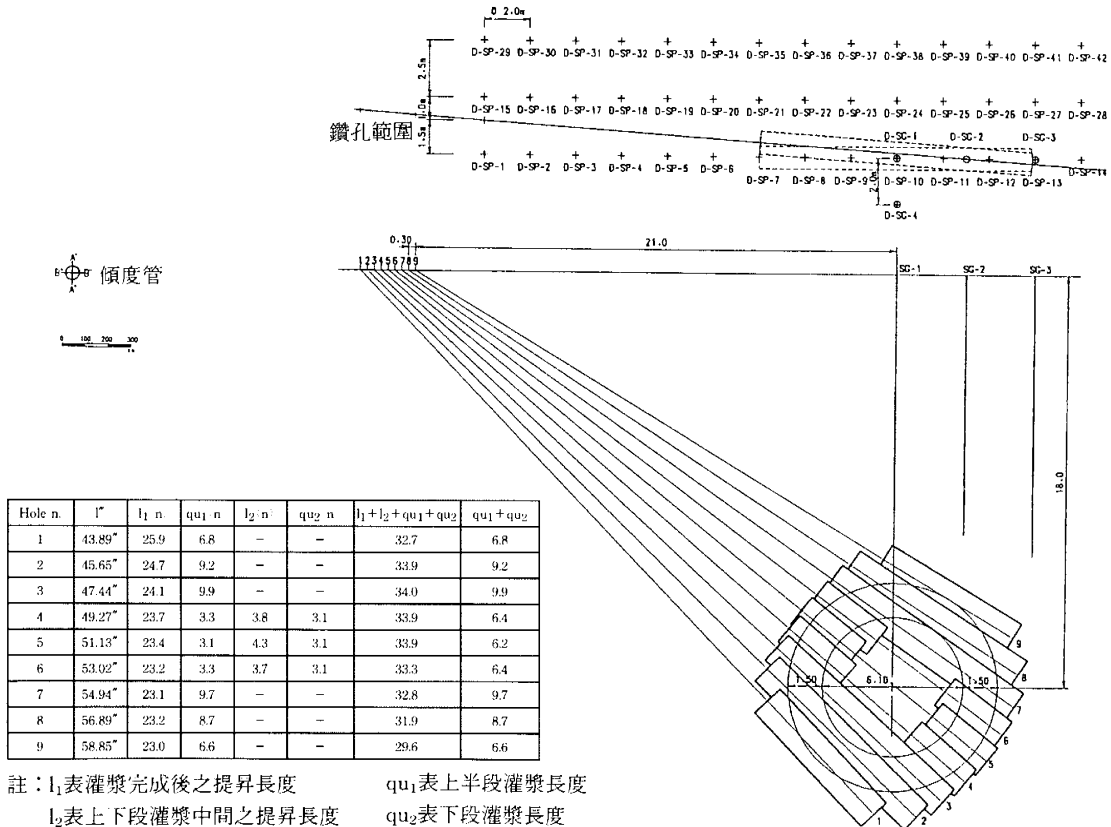
(2)灌漿環 B

雙重管灌漿環B是由9支以44°~59°的角度斜灌形成的單排灌漿環如圖四所示。

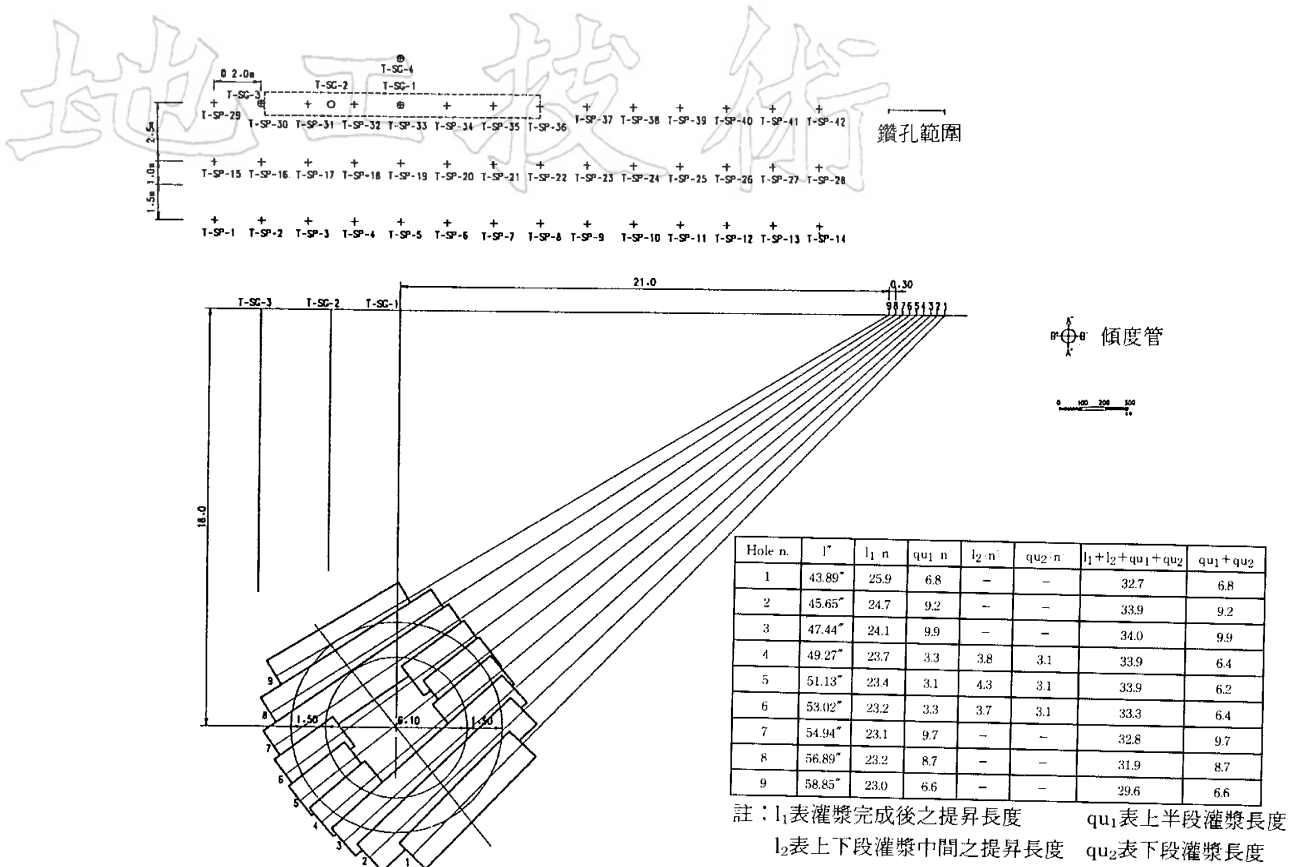
預估樁徑為1.5公尺，位於地表之灌漿孔間距則為30cm。

施灌時各孔都下套管，套管長度如表一所示。水灰比仍為1.1:1，注漿量為615l/m及689l/m兩種，相對應之水泥使用量分別為500kg/m及560kg/m，噴嘴口徑都採用2.4mm，噴射壓力400kg/cm²。雙重管使用空氣輔助切割土壤，空氣噴嘴面積為56mm²，噴射壓力8kg/cm²注氣率為28l/sec。相關工作參數詳見表一。

在試灌過程中，由於雙重管使用加壓空氣，灌漿時之迴漿回流之情形十分不穩定，迴漿間歇噴出，噴出之距離約達5公尺，迴漿十分粘稠，含有粘土塊(φ2cm)。在進行第二孔灌漿時(No.6)，



圖四 灌漿環B配置圖

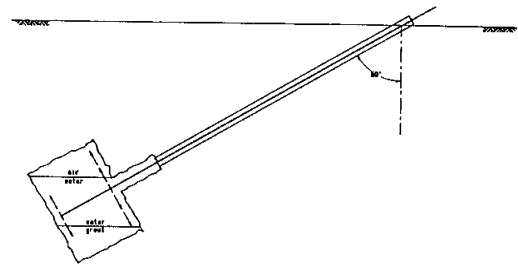


圖五 灌漿環C配置圖

當灌漿灌至2公尺之後，套管內迴漿停止，當灌漿剩下最後約1.5公尺時，迴漿由D-SG-1附近冒出地面，並造成D-SG-1附近地表之隆起。

(3) 灌漿環 C

三重管灌漿環C是由9支以44°~59°的角度斜灌形成的單排灌漿環如圖五所示。預估樁徑為1.6公尺，位於地表之灌漿孔間距則為30cm，與灌漿環B相同。灌漿時各孔之套管長度如表一所示，水灰比亦為1.1:1，注漿量為86l/m，水泥使用量為700kg/m。三重管(R3)灌漿是以高壓水及空氣切割土壤，水之噴嘴口徑為2.6mm，噴射壓力400kg/cm²，注水率為2.68 l/sec。空氣部份同灌漿環B。水泥漿之噴嘴口徑為9.0mm，噴射壓力為26kg



圖六 三重管斜孔灌漿高壓水沖洗泥漿示意圖

／cm²。相關工作參數詳見表一。

在試灌過程中，由於三重管使用高壓水切割土壤，灌漿時之迴漿比使用單管及雙重管灌漿者為稀，迴漿由套管內十分平順的流出。灌漿時，由迴漿之顏色及氣味判斷迴漿中含有多量之水泥漿，其造成原因示如圖六，當三重管灌漿之角度過大

時，上方噴嘴之高壓水會沖洗到由下方噴嘴噴出之水泥漿，使部份水泥漿隨著迴流流出。

(4)灌漿環 D

單管斜灌灌漿環D (R1) 是因為雙重管斜灌有迴漿不穩，三重管斜灌角度過大，有水泥漿被沖洗出之現象，因此嘗試以單管R1，配合 $52^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的角度斜灌，以評估單管斜灌之可行性。

D環並未形成全環，其配置為單排6孔，每孔之灌漿長度皆為6m，在地表下形成一近似矩形之灌漿環，如圖七所示。預估樁徑為90cm，位於地表之灌漿孔間距則為30cm。灌漿時各孔皆下9.5m長之套管，且使用2.4mm噴嘴及 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 噴射壓力，相關工作參數詳見表一。

在試灌過程中，迴漿十分粘稠，含少量粘土粒。比較環A與環D迴漿之回流情

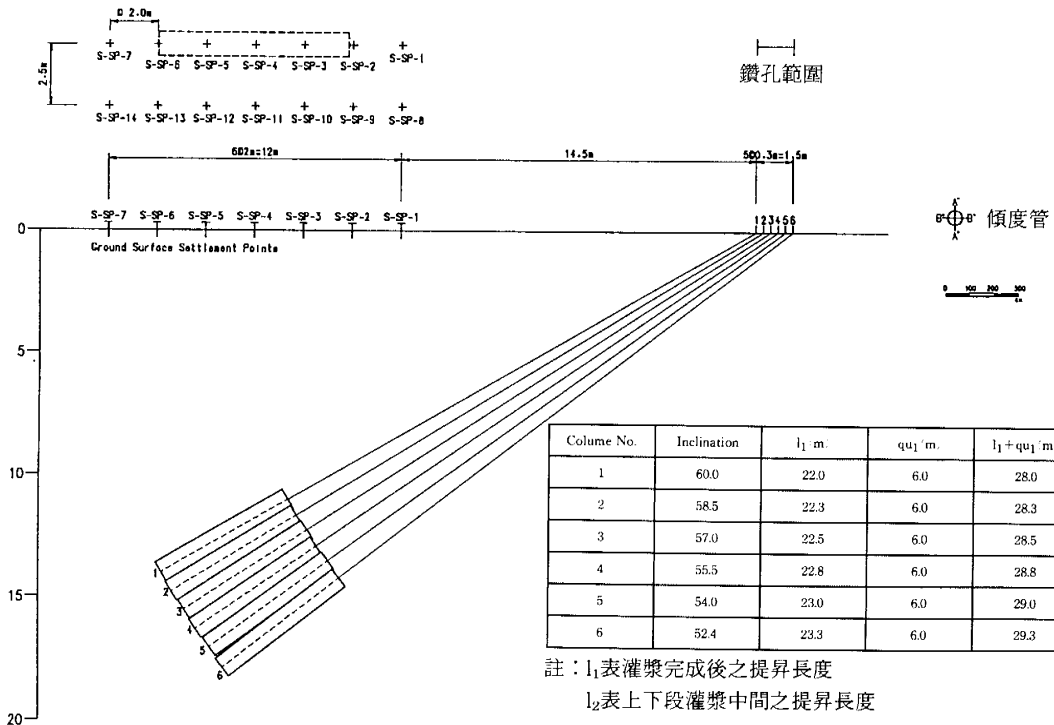
形，環D之量較少，有一孔在灌漿時沒有迴漿 (No.2)。

四、地層位移

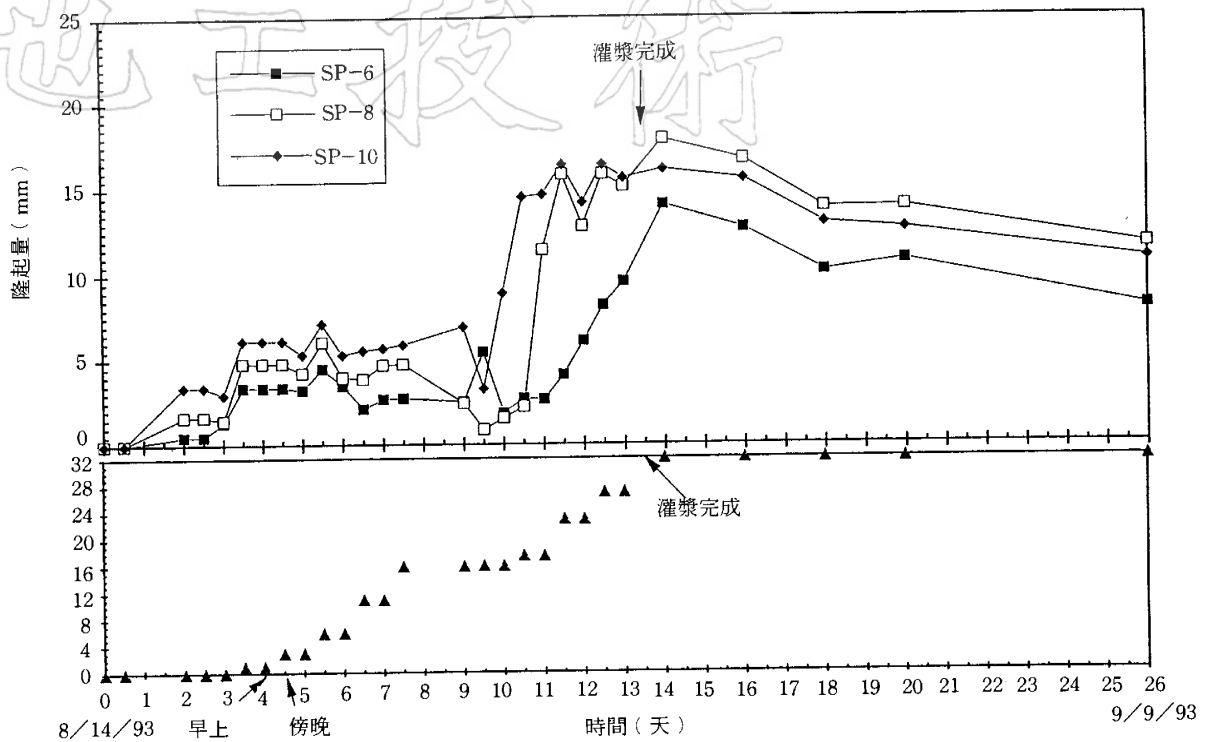
4.1 灌漿環 A

配合灌漿環施工，於灌漿區附近共佈設地面沉陷點32點，與Soundex沉陷計3支，以監測地層位移情形，其配置如圖三所示。於灌漿期間之監測頻率，每天量測2次，分別為早上灌漿施工前及傍晚各1次，灌漿完成後則每2天量測1次。圖中各樁體標示之號碼即為其施工順序，其配置為每八支為一羣，每羣每完成一支即跳至另一羣再施工。圖中陰影部份即為先行完成之16支。

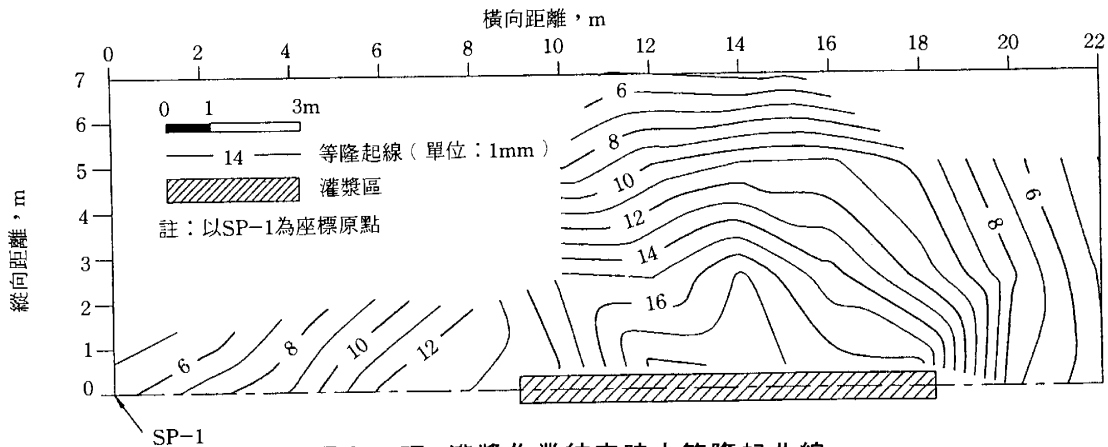
單管灌漿引致之地層變位以圖八所示



圖七 灌漿環D配置圖



圖八 環A正上方三個測點隨灌漿隆起情形



圖九 環A灌漿作業結束時之等隆起曲線

灌漿環正上方 SP-6, SP-8 及 SP-10 三個沉陷點隨灌漿作業隆起及沉陷的情形最具代表性。地層位移監測結果顯示，地表隨灌漿作業進行而逐漸隆起，灌漿作業結束後，原隆起的地層則逐漸下陷至12日後仍未停止，當時之最大沉陷量為 6.0mm，以灌漿環正上方之沉陷最大，沉陷速率

則於初期較快而後漸緩。灌漿環施工完成後，產生之隆起最大為18mm，位於灌漿環正上方，監測區內平均之隆起量約為9mm，圖九為灌漿作業結束後的等隆起量曲線圖，於灌漿環縱軸方向之隆起影響範圍最遠約達10公尺。

在地表位移監測範圍內的地層隆起體

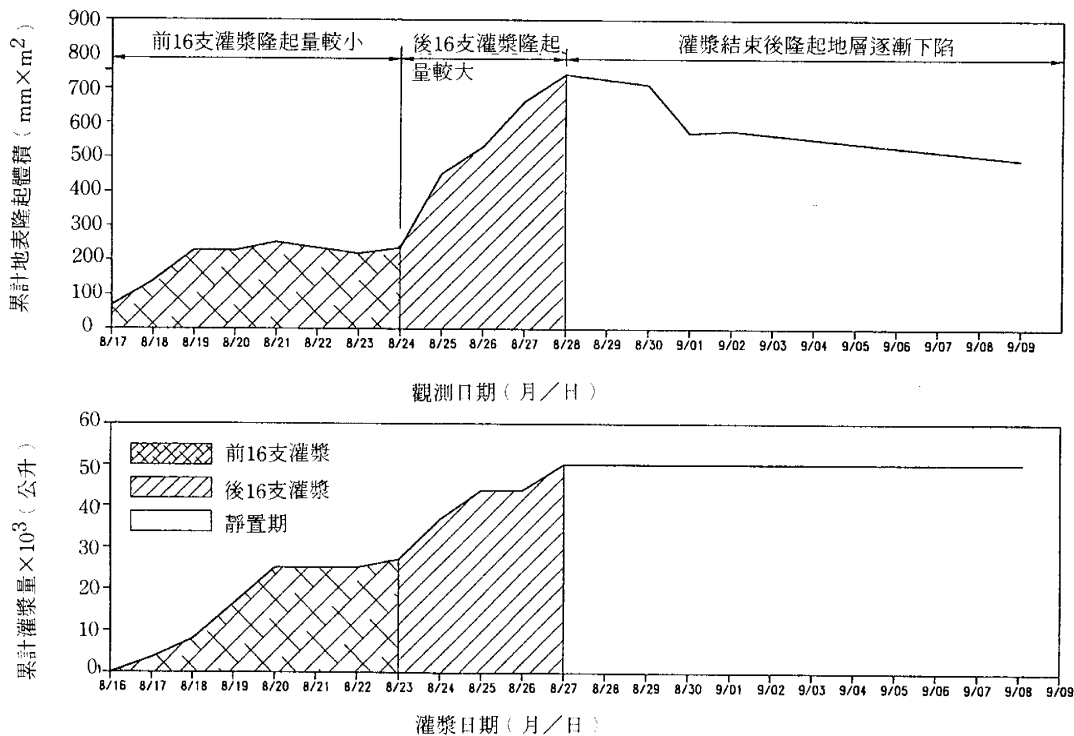
積與沉陷體積隨時間及灌漿量的變化情形如圖十，由於監測範圍並未涵蓋整個影響範圍，所以實際的隆起及沉陷體積，應較圖十所示為大。由圖十可知灌漿作業結束時的最大隆起體積為 $743\text{mm} \times \text{m}^2$ ，而結束後第12天的沉陷體積達 $249\text{mm} \times \text{m}^2$ ，沉陷體積約為最大隆起體積的33.6%。故可瞭解，隆起將隨時間逐漸回復，且回復量可達 $1/3$ 以上。

此外，由每日傍晚灌漿作業收工後與隔日早晨開工前之量測及灌漿作業全部結束後之連續監測，均可發現原隆起量在靜置一段時間後（約12小時），即有逐漸回復情形，研判應係高壓噴射灌漿作業，使地層內產生之超額孔隙水壓隨時間漸漸消散所形成之下陷。而有趣的是圖十一的側向變位量測結果，卻顯示靜置期內，地層的側向變位回復量極小，可予忽略。相較

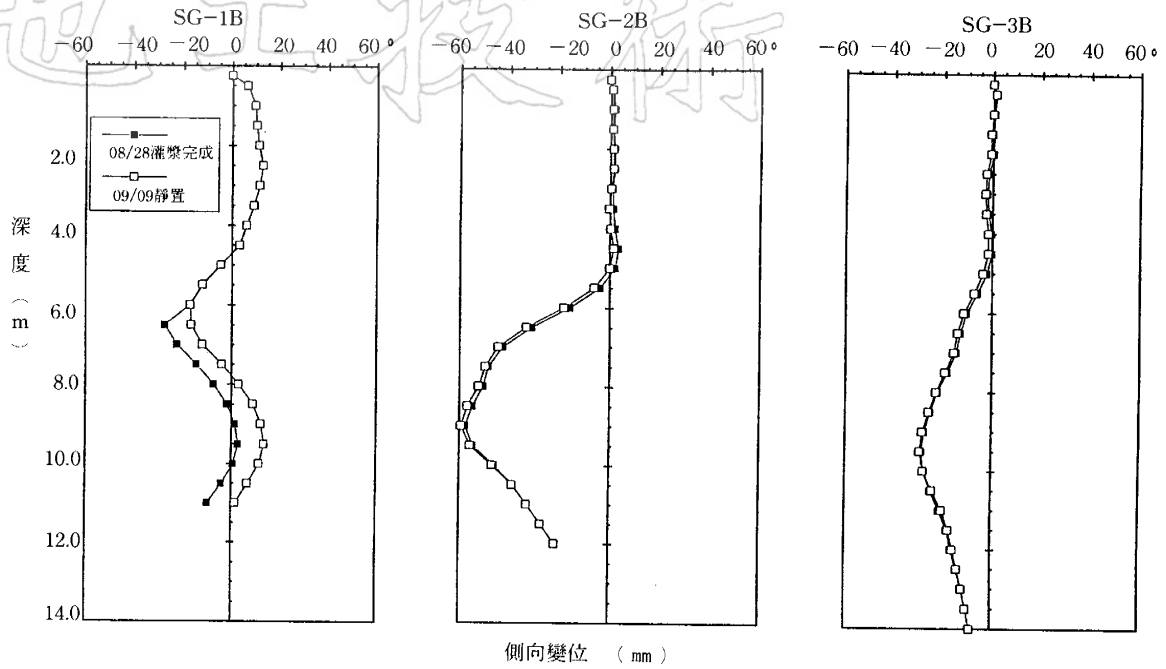
於前述，沉陷回復量約佔隆起體積的 $1/3$ ，顯示灌漿後的地層位回復是有方向性的，而且都發生在垂直向。

圖十二所示為灌漿環橫軸方向地表隆起量之分佈，由於受地層條件、施工順序及樁體配置等影響，並不規則，左右側隆起亦非呈對稱分佈；因而若假設為Error Function分佈，預測隆起量及其分佈情形並不適宜。由圖十二亦可發現灌漿作業完成後的沉陷情形，沉陷趨勢相當一致，而且沉陷區分佈相當廣，不限於灌漿環正上方，距離灌漿環邊緣約10m處仍有明顯之沉陷情形。圖十二中沉陷點SP-1至SP-6在完成後12天再呈隆起現象係由於受灌漿環B雙重管斜灌開始施工之影響所致。

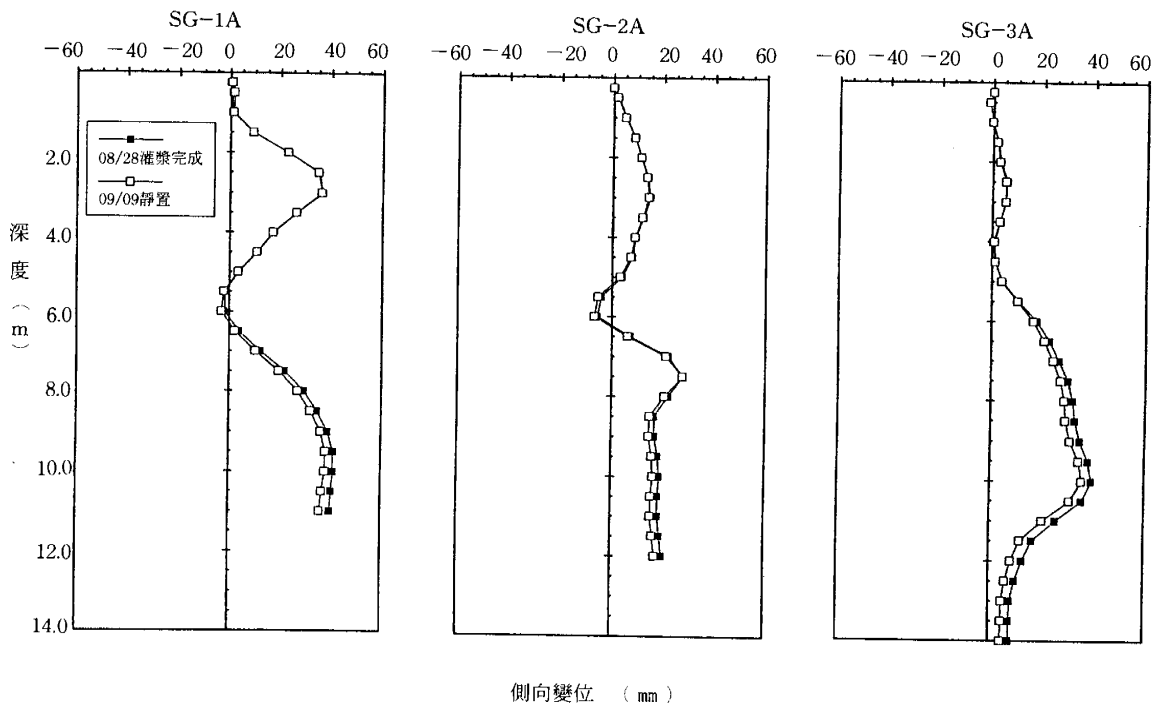
由圖八及圖十都可發現地層隆起量在前16支灌漿時的累積隆起量或隆起體積都很輕微，但是自第17支開始則極顯著的急



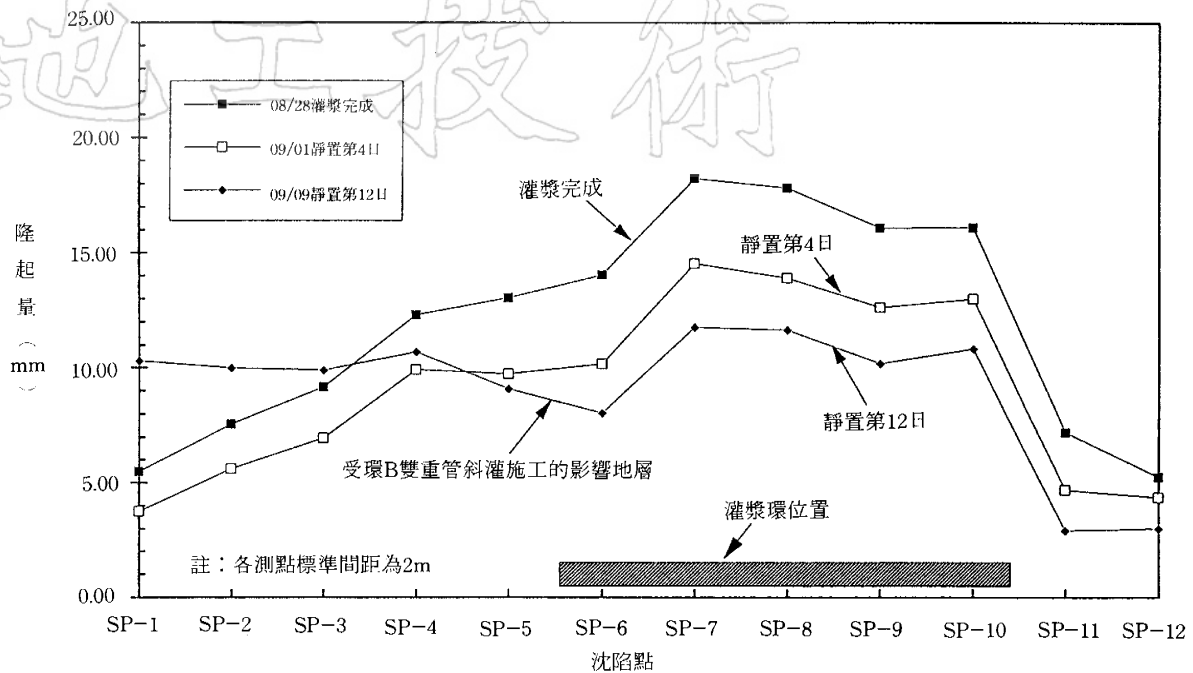
圖十 環A地表隆起體積與灌漿量一時間對應圖



圖十一(a) 環A之側向變位及其回復情形 (橫向)



圖十一(b) 環A之側向變位及其回復情形 (縱向)



圖十二 環A正上方地表隆起量橫向分佈

劇增加，其原因值得探討。實際上，前14支使用 $\phi 3.0\text{mm}$ 噴嘴，第15支起則改用 $\phi 2.4\text{mm}$ 噴嘴，後期使用較小的噴嘴使得迴漿顆粒較細，且迴漿也較使用 $\phi 3.0\text{mm}$ 時均勻順暢，造成的地層隆起理應較小，所以，地層顯著隆起不應是改用較小噴嘴所致。檢視圖三之灌漿體配置及施工順序可以瞭解，自第17支起是在X向（橫向）已完成的灌漿柱體圍束作用下進行高壓噴射灌漿作業，其時灌漿柱間之淨間距僅約60至120公分，噴漿壓力在X向（橫向）已完成柱體的阻隔作用下，只能由y向（縱向）發展，造成第17支以後的隆起效應非常明顯。此一研判可由圖十三之側向變位量測結果得到驗證，圖十三所示縱方向的側向變位在前16支灌漿體施工完成時尚小，後16支施工完成時則大幅增加。橫方向的側向變位則無此情形，前16支與後16支施工造成的側向變位差異有限。

高壓噴射灌漿施工引致的地層側向變

位，也是大地工程師所關切的問題，本次單管灌漿環量得的最大側向變位量為：

	1SG-1	SG-2	SG-3
量測位置	(11.0m深)	(12.0m深)	(14.0m深)
Y向(縱向)	42mm (GL.-11m)	27mm (GL.-7.5m)	40mm (GL.-10m)
X向(橫向)	25mm (GL.-6.5m)	60mm (GL.-9.0m)	25mm (GL.-9.5m)

但應注意，這些量測值都是在灌漿環上方的量測結果，並非在高壓噴射灌漿施工深度量測所得，於灌漿深度範圍的側向變位量研判應更大。

4.2 灌漿環 B

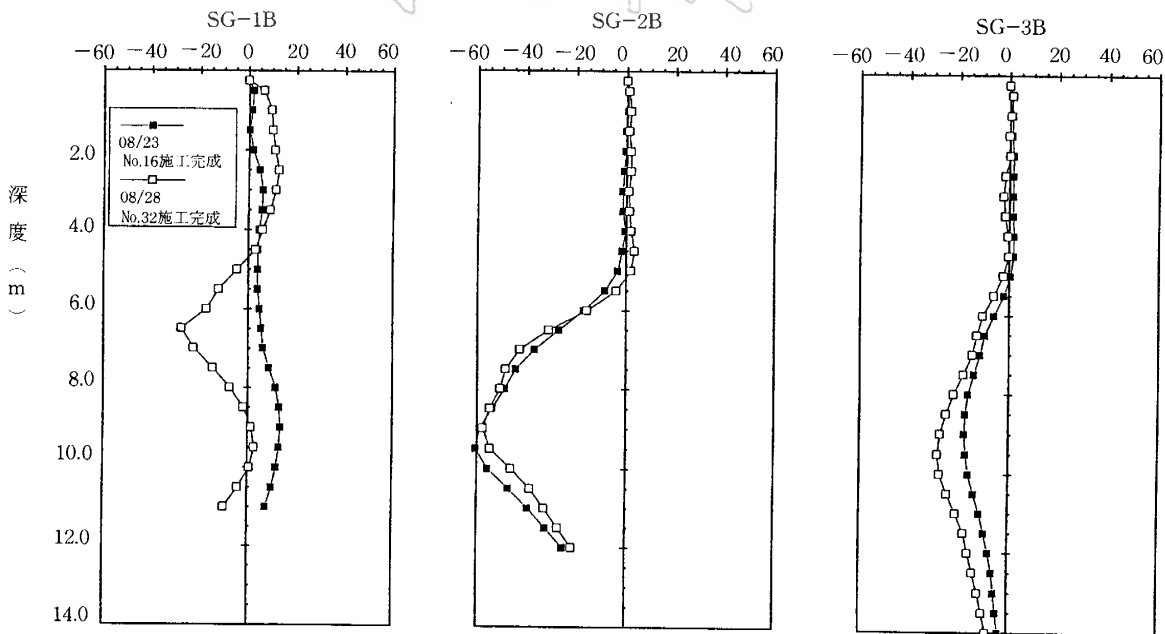
灌漿區附近共佈設地面沉陷點42點與Soundex沉陷計4支，以監測地層位移情形，配置如圖四所示。監測頻率則與環A相同。灌漿工作由1993年9月1日開始，9月7日完成。

灌漿第二日，即因迴漿不順，灌漿孔內無適當洩壓途徑，產生局部之異常隆起

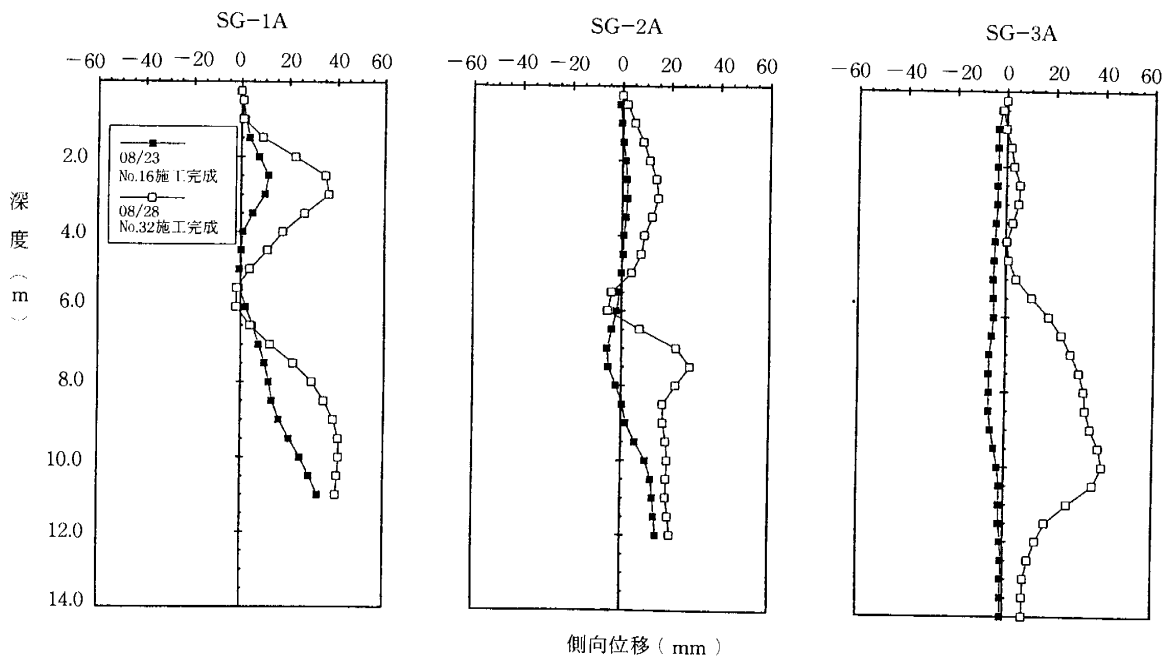
現象，最大隆起量達80mm。圖十四(a)為前3支完成的隆起等高線圖，圖十四(b)為所有9支灌漿完成後的隆起等高線圖，

由圖十四可知迴漿順暢後，異常隆起部份的後續增量極微。

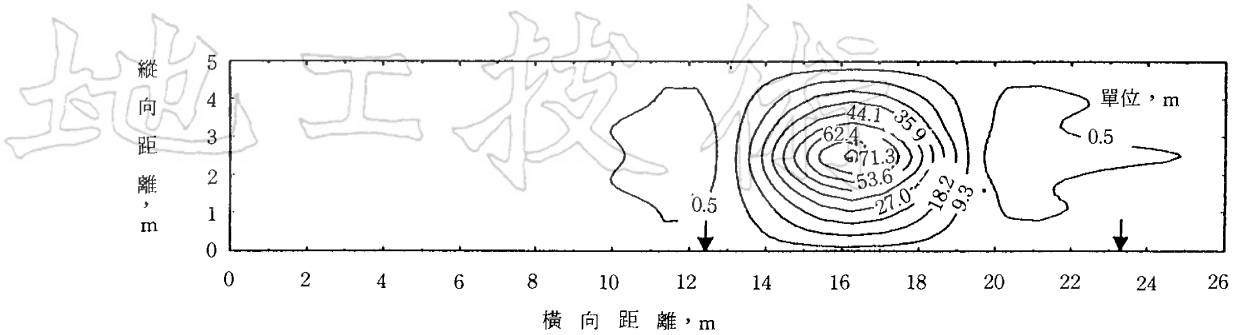
灌漿區正上方的地層變位隨時間變化



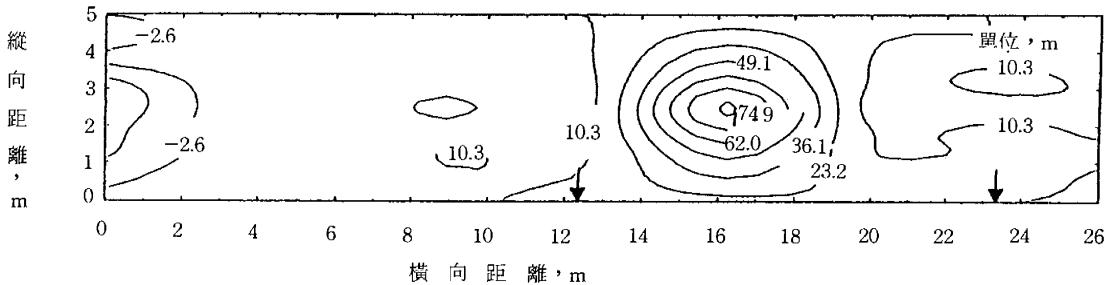
圖十三(a) 環A兩階段側向變位比較 (橫向)



圖十三(b) 環A兩階段側向變位比較 (縱向)



(a) 9月2日迴漿不順之地層變位等高線



(b) 9月8日灌漿完成後之地層變位等高線 註：以D-SP-1為座標原點

圖十四 環B之地層變位等高線

之關係如圖十五所示，地層變位量大約與單管灌漿環A相當，但稍大於環A測得之隆起量。比較灌漿期間每日傍晚及隔日清晨所做量測值，都發現有輕微的下陷情形，灌漿結束後，原隆起的地層即逐漸下陷，但下陷速率緩慢，下陷量輕微，總計9日內僅下陷2mm。圖十六為灌漿區正上方的地層變位橫斷面圖，分別為灌漿結束當日及結束後第9天的量測結果，由圖十五及圖十六可知雙重管灌漿隆起後的回復情形甚輕微，遠不及單管灌漿的33%回復量。此外，Soundex的傾斜變位量測結果如圖十七，也顯示灌漿完成後的傾斜變位並未發現有回復情形。

圖十四(b)及圖十六顯示在灌漿孔測距離12m處，即無隆起現象。但是在環A邊緣，距離19m處，仍可測得雙重管斜灌引致之隆起，顯見雙重管灌漿的影響範圍與斜灌有關。

由圖十六之地層變位橫斷面圖可看出

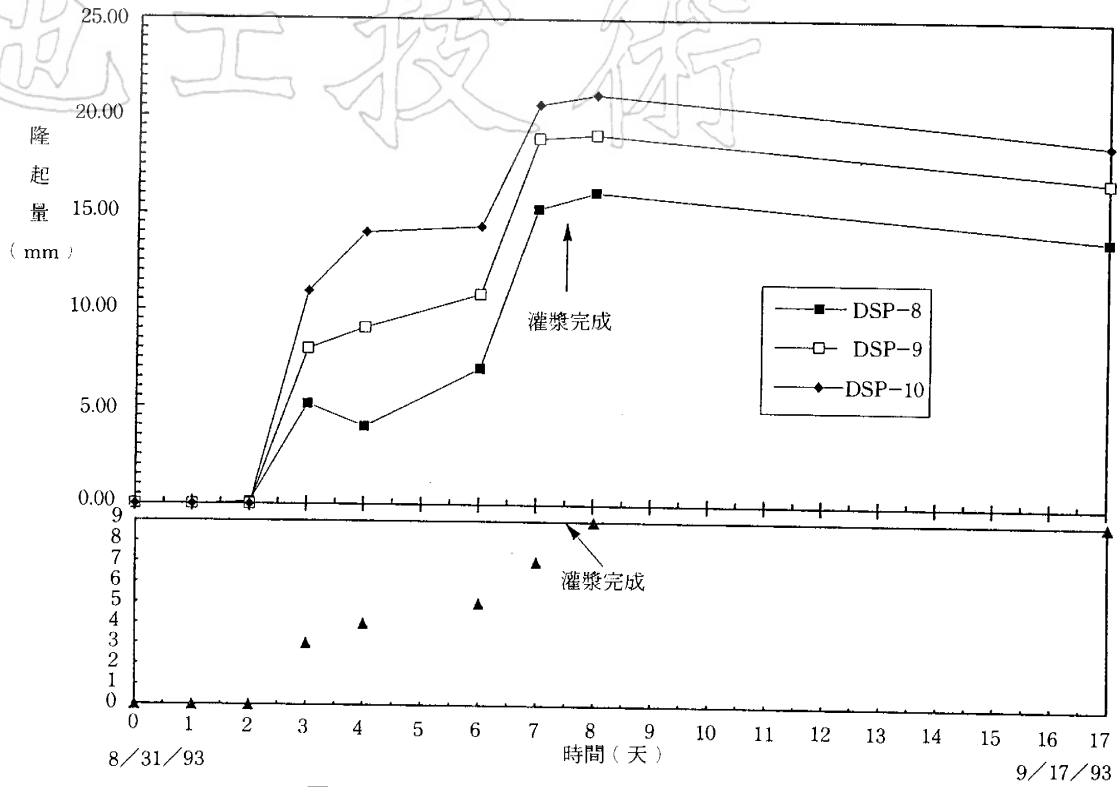
雙重管斜灌引致之地層隆起，其橫向分佈曲線並非呈常態曲線分佈。雙重管斜灌引致的最大側向變位量統計如下：

	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4
量測位置	(11.0m深)	(12.0m深)	(13.0m深)	(11.0m深)
Y向(縱向)	24.0mm (EL.+1.0m)	36.0mm (EL.+12.0m)	40.0mm (EL.+12.0m)	15.0mm (EL.+11.0m)
X向(橫向)	8.0mm (EL.+9.0m)	5.0mm (EL.+12.0m)	20.0mm (EL.+11.0m)	小於2.0mm

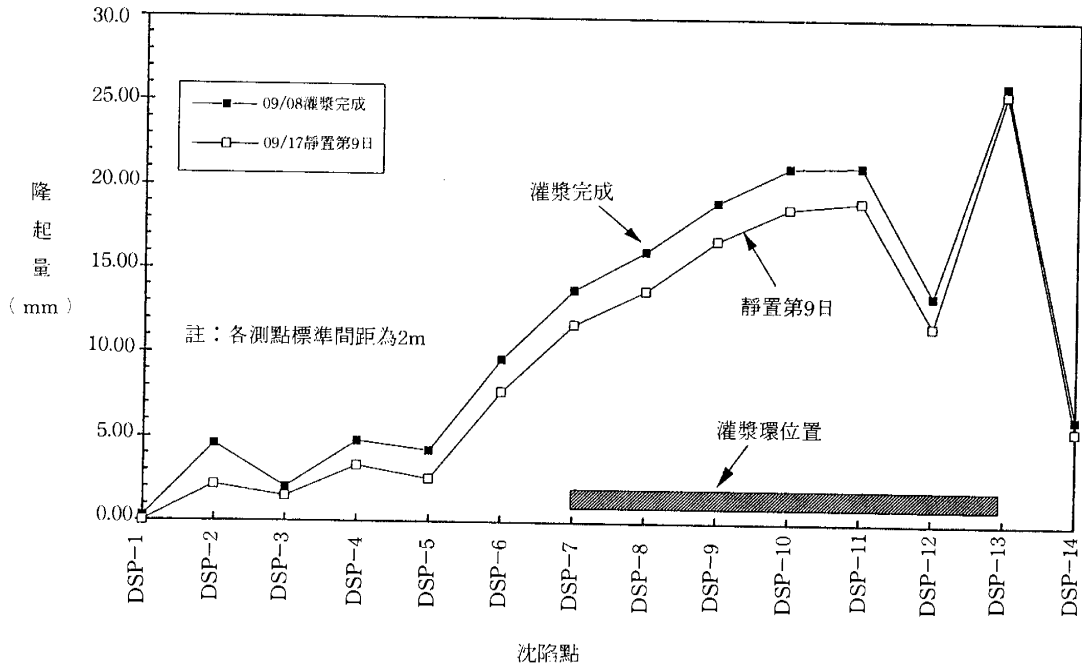
因此可知，縱向的水平變位量遠大於橫向的水平變位量，此點與環A類似，仍應提醒的是這些量測值都是在灌漿環正上方的量測結果，並非在高壓噴射灌漿施工深度量測所得，於灌漿深度範圍的側向變位量，研判應更大。此外，由於環B是斜孔灌漿對地層側向變位的方向性，也應有相當程度的影響。

4.3 灌漿環 C

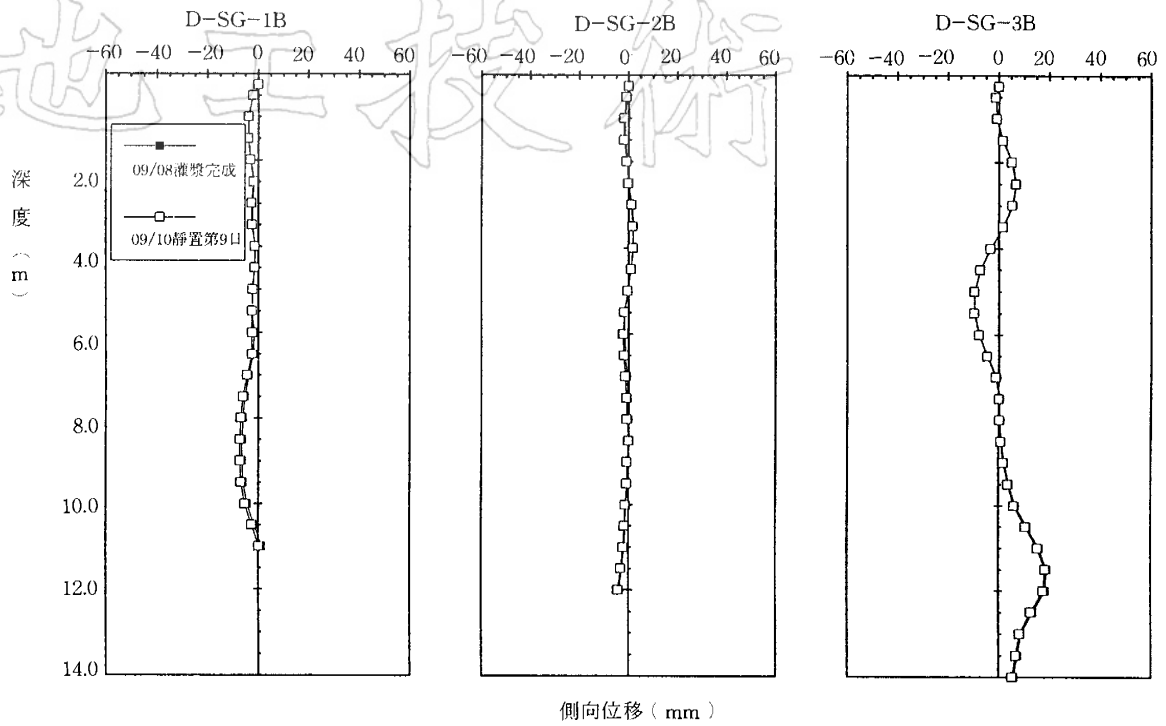
灌漿區附近共佈設地面沉陷點42點及



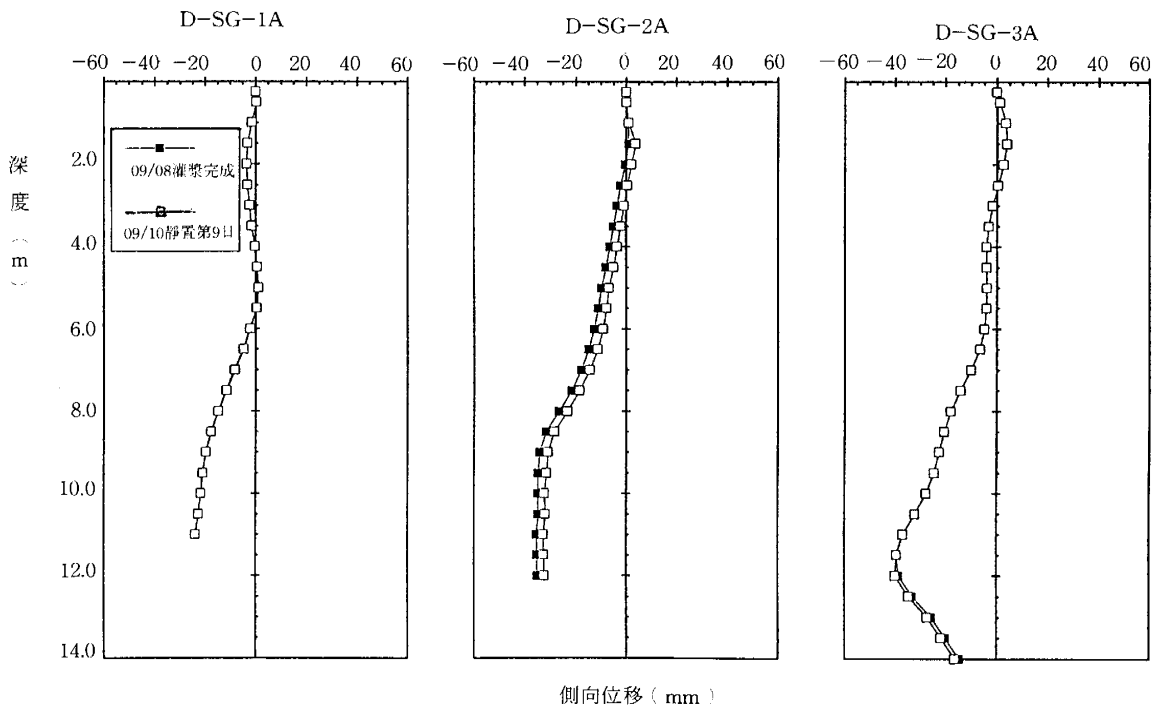
圖十五 環B正上方地隆起——時間關係



圖十六 環B正上方地表隆起量橫向分佈



圖十七(a) 環B側向變位 (橫向)



圖十七(b) 環B側向變位 (縱向)

Soundex沉陷計4支，以監測地層位移情形，配置如圖五所示。監測頻率仍與環 A 相同，灌漿工作由 1993年 9月 9日開始至 9月 20日完成。但在 9月 9日當天，三重管以 400kg/cmf 高壓水加空氣切割土壤後，未及灌漿，鑽桿（三重管）就損壞。並遲至 9月 13日才復工完成第一孔灌漿。圖十八（a）即為 9月 9日切割土壤後當日的地層隆起情形，最高為 6.8mm，圖十八（b）則為 9月 10日未及灌漿並靜置一天後的等高線，顯示原隆起的地層都已下陷、回復。在其後的灌漿作業中，地層變位量都很輕微而且都小於 5mm。

圖十九為灌漿區正上方 T-SP-31 至 T-SP-35 五個測點之地層變位隨灌漿作業變化情形。圖中說明三重管斜灌引致之地層變化量極輕微，而且兼有沉陷及隆起情形。此外，灌漿結束後，原隆起的地層仍有回復現象。

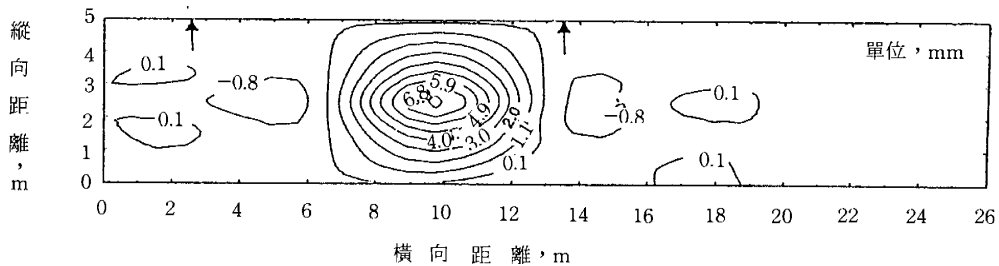
三重管斜灌的影響範圍（地層變位量大於 4mm），幾乎是在環區以外即無影響，但是因採斜灌，由灌漿孔至灌漿區間的地層，有較明顯的沉陷情形。

三重管斜灌引致的地層側向變位如圖二十，除 G-1 A 方向（縱向）外，其餘的側向變位量都很小，幾乎可以忽略。側向變位量摘要如下：

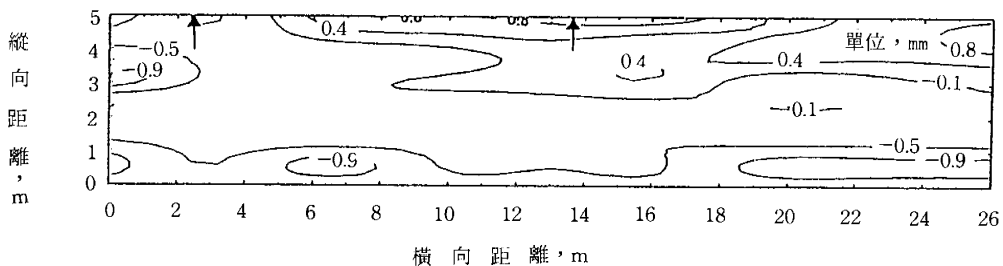
	3SG-1	SG-2	SG-3	SG-4
量測位置	11.0m深	12.0m深	13.0m深	11.0m深
Y向(縱向)	12.0mm	小於2mm	小於2mm	小於2mm
A向	EL.-11.0m			
X向(橫向)	5mm	5mm	小於2mm	小於2mm
B向	EL.-4.0m			

4.4 灌漿環 D

灌漿區附近共佈設地面沉陷點 14 點，但未佈設 Soundex 傾斜沉陷計，其配置如圖七所示。本區試灌由 9月 20日起至 9月 21日完成，共以單管斜灌方式完成 6 支樁



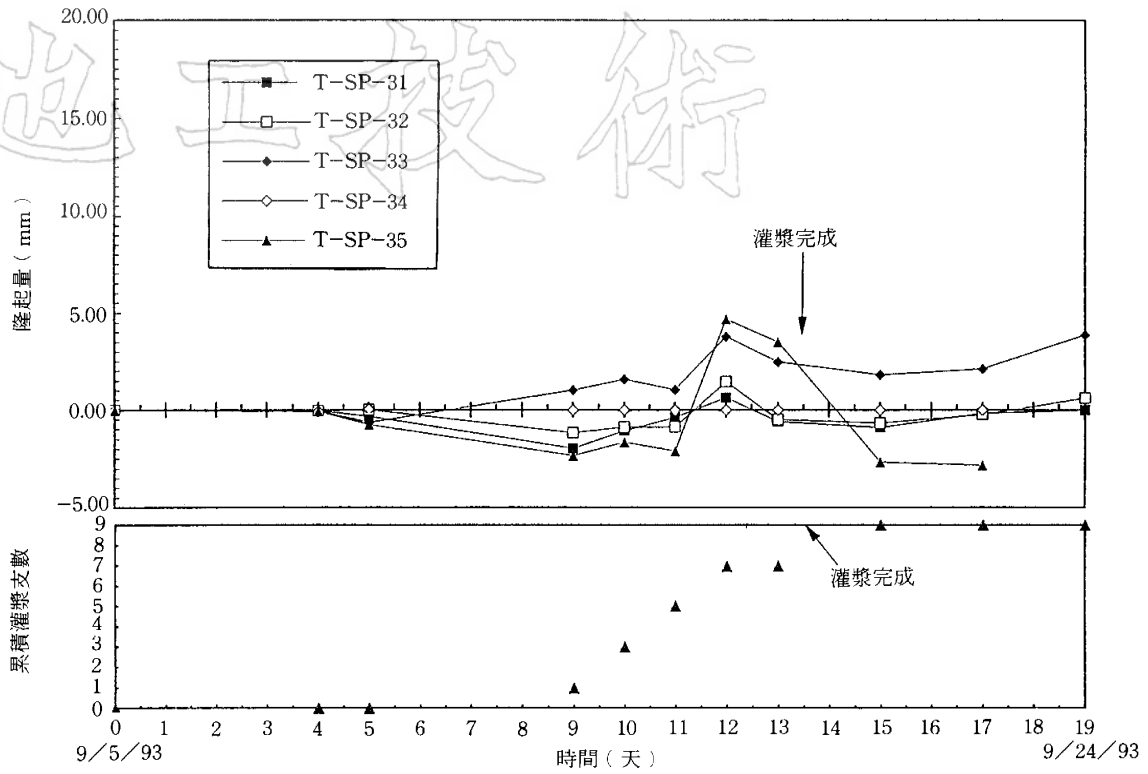
(a) 9月9日土壤切割後地層變位等高線



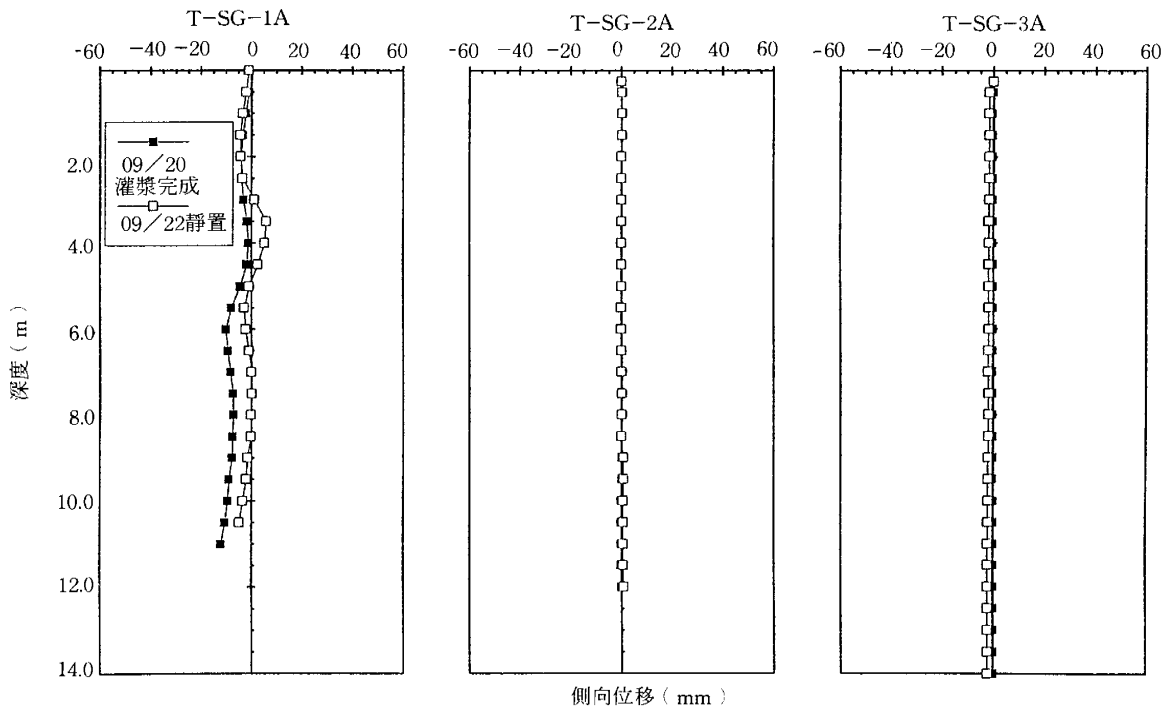
(b) 9月10日靜置期之地層變位等高線

- 註：(1)以 T-SP-1 為座標原點
- (2)9月9日土壤切割後未灌漿
- (3)灌漿環位置

圖十八 環 C 之地層變位等高線



圖十九 環C正上方地層變位隨灌漿作業變化情形



圖二十 環C側向變位比較(縱向)

體。

單管斜灌 6 支引致之最大隆起量為 9mm，圖二十一所示為環 D 正上方的地層變位與時間關係，由圖中可知，靠近灌漿孔側的隆起量大於另一側，且灌漿結束後原隆起的地層即迅速下陷，4 日內回復量幾乎達 70%~95%。回復程度遠高於環 A 之單管直灌。若依沉陷趨勢研判，監測停止後，沉陷仍可能持續甚至較原隆起量為大，亦即灌漿引致之淨地層變位量為沉陷而非隆起。

圖二十二之地層變位斷面圖，亦顯示單管斜灌引致之地層變位在橫向並非呈常態曲線分佈。

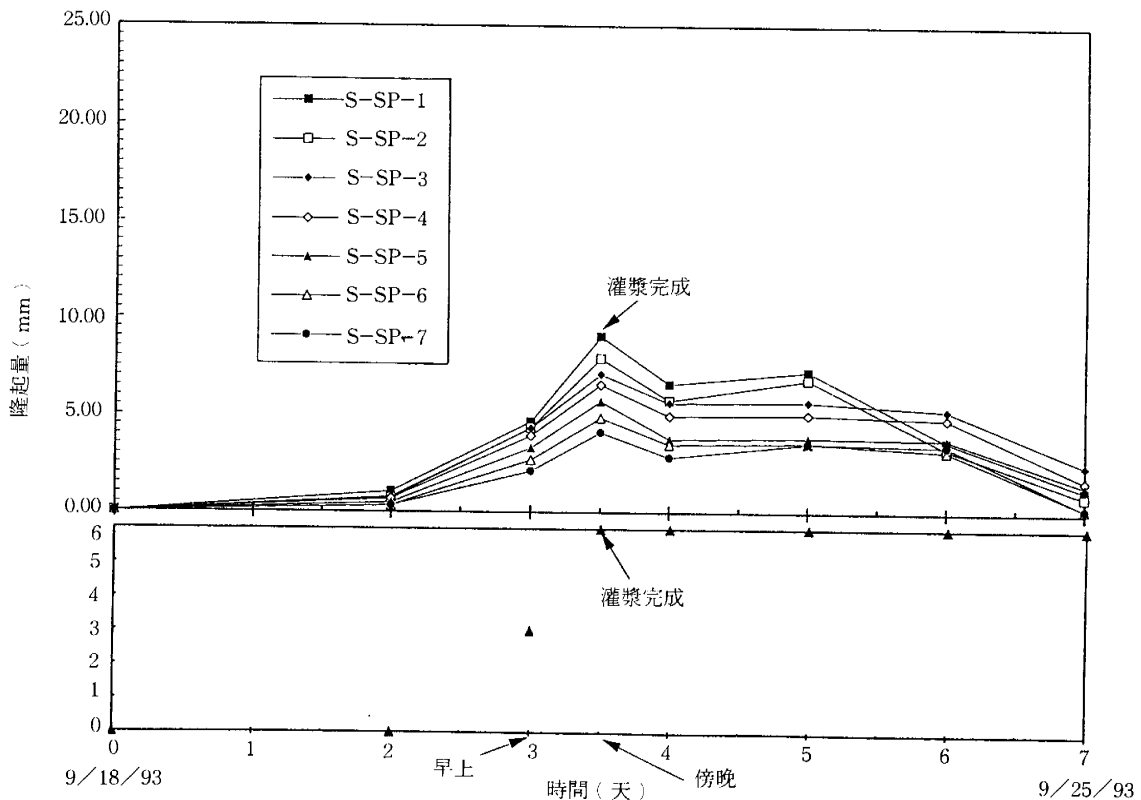
4.5 地層變位綜合討論

(1) 隆起量

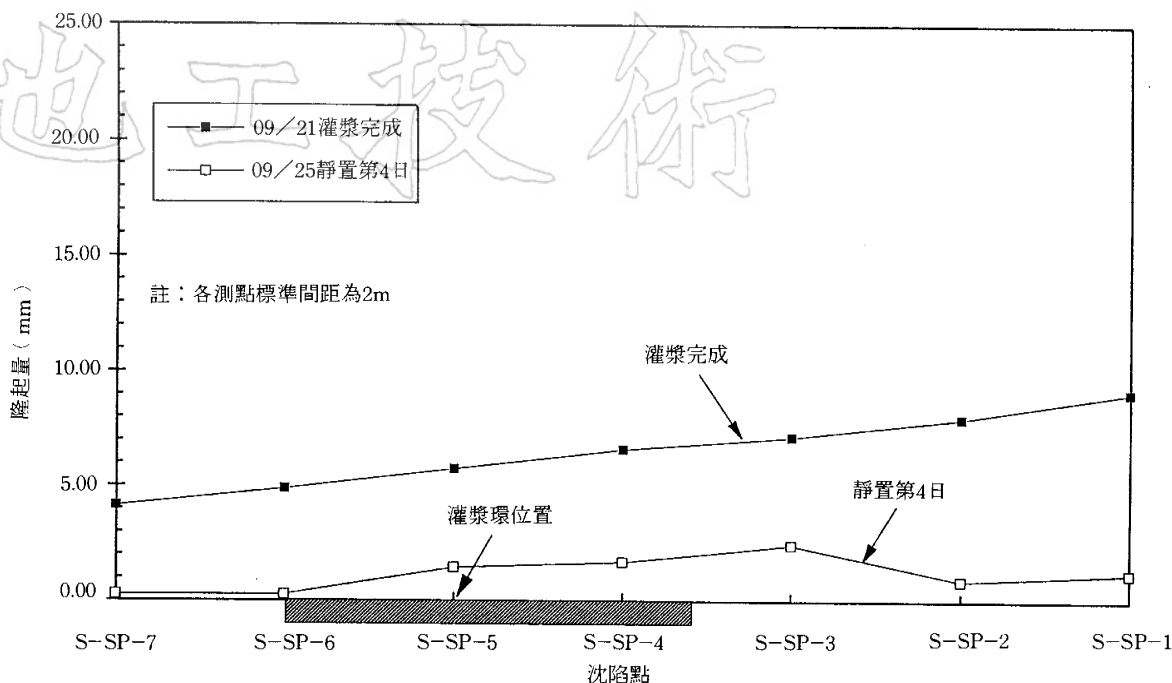
由本試灌案例發現除覆土深度，灌漿口徑規模及地層性質等客觀因素外，施工時之迴漿性質與狀況及灌漿順序是影響隆起量之主要因素：

(A) 迴漿性質及狀況

灌漿環 B 於進行第二孔灌漿時產生迴漿不順及停止情況，並造成局部隆起達 80mm，究其原因係因迴漿路徑遭阻塞時，灌漿壓力累積於灌漿孔內使土體受到擠壓而產生明顯之地表隆起現象。此外若不考慮上述之迴漿異常隆起現象；單管直灌與雙斜灌引起之隆起量相近約為 20mm，遠高於三重管斜灌之隆起量，而由表二之迴漿密度與粘滯性，顯示單管直灌及雙重



圖二十一 環 D 地層變位與時間關係



圖二十二 環C地層變位斷面圖

管斜灌迴漿密度及粘滯性相近，且均明顯高於三重管斜灌，由於較高之迴漿密度及粘滯性將使灌漿孔內存在較高之壓力，故可推論較高之迴漿密度及粘滯性將引起較大之地表隆起。

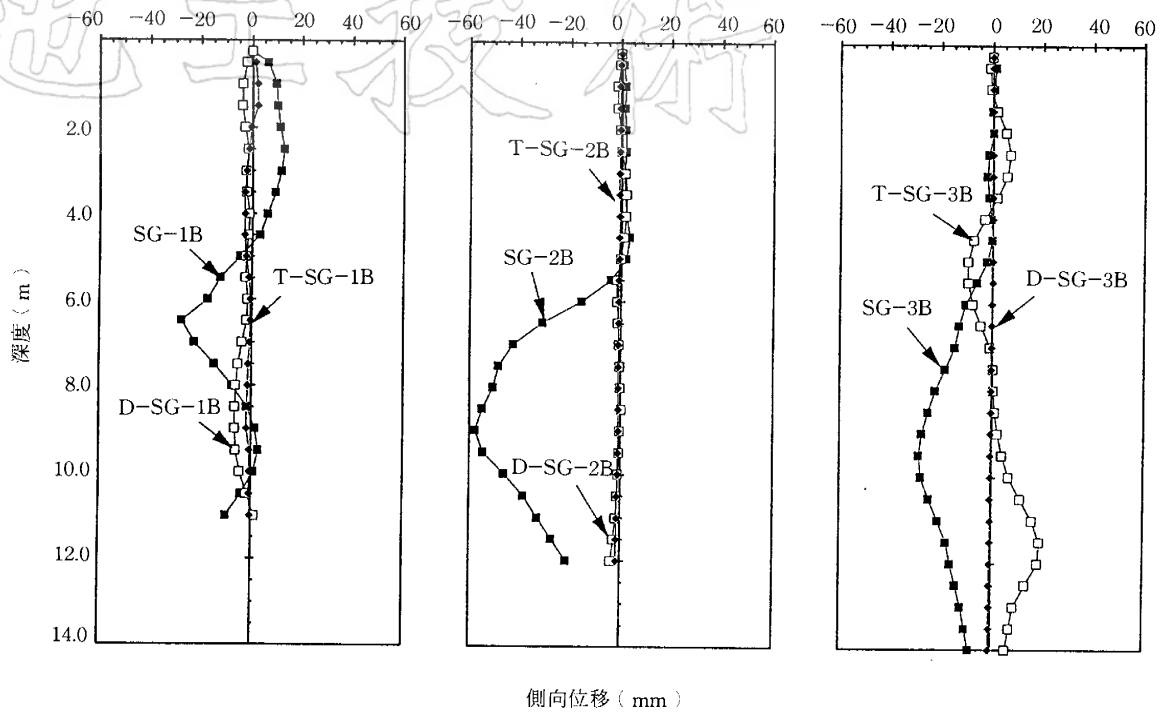
綜合上述，施工時若能降低迴漿密度及粘滯性，使迴漿順暢，將有助於地表隆起量之減小，而由本案例發現三重管灌漿方式具有上述優點。

(B) 灌漿順序

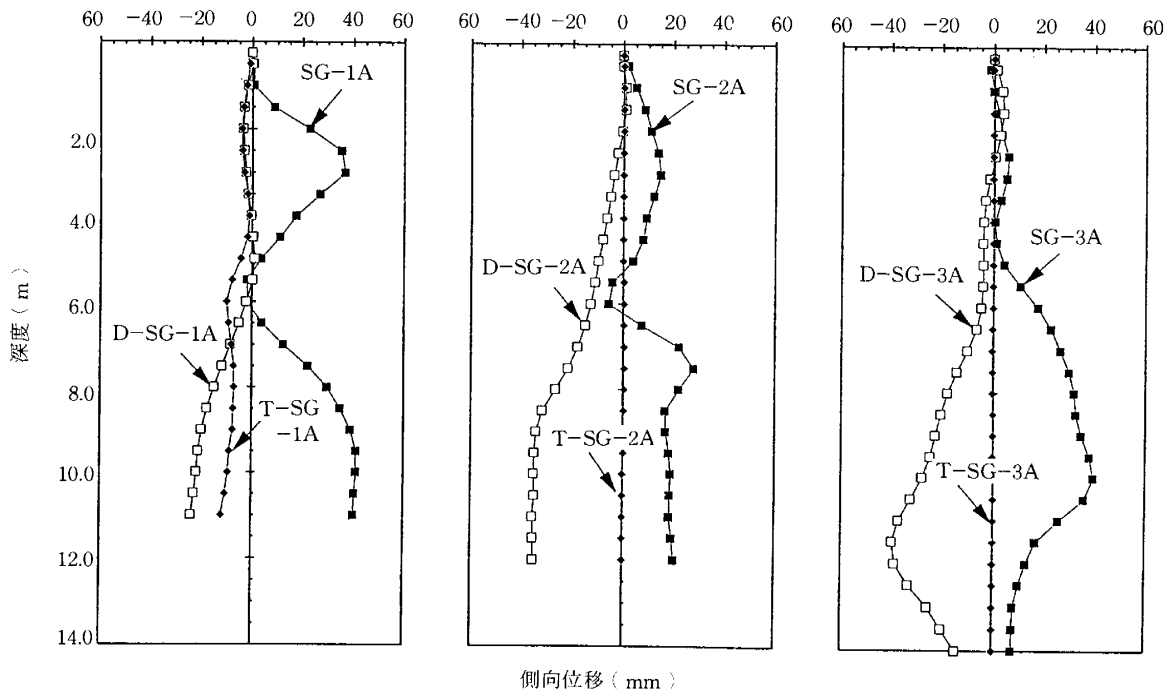
如 4.1 節之驗證，由於受到先前已完成灌漿柱體之阻隔，單孔直灌於後 16 孔灌漿時產生較大之地表隆起及沿無阻隔方向產生較大側向變位現象，顯示灌漿壓力有往無阻隔方向宣洩之現象，而造成該方向之地表隆起現象，故於灌漿時應妥善安排灌漿順序，如於靠近敏感區域先行施工，使形成阻隔作用，可減少後續灌漿作業對該區域之影響。

(2) 隆起一回復情形

高壓噴射灌漿在粘土層中施工的隆起一回復情形以單管施工的回復情形最為明顯，單管直灌 12 天的回復量約達 33%，單管斜灌 4 日內之回復量可達 70~95%，雙重管斜灌的回復很輕微，9 天僅回復 2mm，三重管斜灌則因隆起量很小，無從判斷其回復量。由於上述隆起回復量並無規則性，筆者尚未能究其原因，惟發現單管灌漿方式之回復速率甚快，推斷其係因粘土層受擠壓隆起時產生裂隙，而於灌漿完成後，其超額孔隙水壓往裂隙方向快速消散造成。至於雙重管斜灌之回復情況甚輕微，因其於灌漿時有漿液沿附近地面冒出情況，這些漿液可能將裂隙填塞而使回復情況較為輕微。此外，若上述之推論正確的話，則於正常情況下回復速率應甚為快速，而施工時應利用此項特性，採跳島式之灌漿，以減小累積之隆起量。



圖二十三 (a)環A, B, C橫向側向變位比較



圖二十三 (b)環A, B, C縱向側向變位比較

(3) 沉陷分析及影響距離

各灌漿環之隆起分佈曲線都不規則，不宜類比為土體漏失 (Ground Loss) 造成之地層變位行為，而假設為常態曲線分佈。至於地層變位分佈與斜灌方向是否有關，尚難研判。此外，單一灌漿環施工，引致地層變位的影響距離，若定義為變位超過 2mm 處，則影響距離大約為 10m 左右。由於隆起分佈曲線及影響距離受地層特性，灌漿深度、口徑、規模、灌漿方法、施工實際情況及施工順序等因素之影響甚為複雜，無法由本案例之成果據以研討，有待進一步研究。

(4) 側向變位

由於本案例側向變位管係埋設至預估灌漿體之正上方的 4 公尺處，由其量測之側向變位情況尚難完全掌握受影響區域土體之側向變位情況，惟由圖二十三之灌漿後地層側向變位情況，大致可發現以單管直灌最大，雙重管斜灌次之，而三重管斜灌。最小。至於側向變位的回復情形，各種施工法之回復量極小，難以察覺。

五、結論

1. 高壓噴射灌漿所引起之地層位移受地層條件、灌漿柱體配置、施工方法及其採用之工作參數、灌漿順序及施工技術、品質等影響，無一定之模式，很難以學理方法或經驗作定量之預測。

2. 本案例中，用單管以二排，每排 16 個垂直孔施灌，在地表下形成圓心在 GL-18.0 公尺，外徑 9.1 公尺，內徑 6.1 公尺，縱向厚度約 1.5 公尺之灌漿環，觀測所得之平均地表隆起量約 9mm，其中最大隆起量觀測值為 18mm，於灌漿環縱向之最大沉陷影響範圍約 10 公尺，至於灌漿環上

方地層之最大水平側向位移為 60mm。

3. 地表隆起量並非隨灌漿體積增加而呈線性增加，而與施灌順序及迴漿性質與順暢情況有密切關係。較低之迴漿密度與粘滯性，順暢之迴漿狀況，將引致較低之地表隆起量，由本案例發現三重管灌漿方式具有此些特點及現象。

4. 根據本案例地層位移監測結果顯示高壓噴射灌漿作業於粉土質粘土層內所引起之地表隆起量或地層內水平變位，於灌漿作業停止後，均有逐漸回復情形，尤以單管灌漿地表隆起量之回復最為明顯，直灌方式 12 日後隆起回復約 33.6%，斜灌方式於 4 日後回復達 70% 至 95%。

5. 本試灌工程中，以單管直灌工法所引起之側向變位為最大，雙重管斜灌次之，而三重管斜灌所產生者最小，惟此一結論至為粗略，因地層位移受灌漿工法影響外，亦受灌漿工法之工作參數及施工技術品質之影響。

參考文獻

楊麗文、陳敏雄、張瑞佳和謝百鍾 (民國 80 年) “以現地試驗調查中和地區粘土之工程性質”，地工技術雜誌第 36 期，P.20~P.32

BILFINGER + BERGER / 東怡 J.V. (民國 82 年) ，高壓灌漿改良環試灌報告書”。

鍾毓東、張兆麟和余明山 (民國 83 年) “灌漿作業引致粘土質地層位移之探討”，海峽兩岸土力學及基礎工程地工技術學術研討會，西安，1994 年 10 月。

本文之討論意見將在後期雜誌中刊出，請您將意見於三個月內寄交雜誌社編輯委員會。

83 年 8 月 16 日收稿

83 年 8 月 30 日修改

83 年 9 月 9 日接受