

高壓噴設灌漿在岩土工程之應用
APPLICATION OF JET GROUTING IN
GEOTECHNICAL ENGINEERING

黃立煌，Shirlaw，高祥生
L.W. Wong, J.N.Shirlaw and H.S. Kao

原著載於結構與地基國際學術研討會,1994年

*Reprinted from Proceedings of
International Symposium on Structures and Foundations in Civil
Engineering ,
Hangzhou, China, 1994*

Application of Jet Grouting in Geotechnical Engineering

Wong , L. W.

Shirlaw , J. N.

Kao, H. S.

Proceedings of International Symposium on Structures and Foundations in Civil Engineering, October 1994, Hangzhou, China.

Abstract

Jet grouting uses high speed water jet to undermine soils, then replaces and mixes the disturbed soils with cement grout. This ground treatment technique has been extensively applied in deep excavations and tunneling works to improve soil strengths, watertightness and for maintaining the integrity of adjacent structures. However, injection pressures of the order of 20 or 40 MPa would induce soil failure and the subsequently heave and settlement. This paper describes the 3 types of jet grouting techniques and studies the attributing factors for ground movements of which the impact is illustrated by case histories.

高壓噴射灌漿在岩土工程之應用

黃立煌

計畫經理

(亞新工程顧問公司)

J.N.Shirlaw

Associate

(Golder Associates, Consulting Engineers)

高祥生

正工程師

(亞新工程顧問公司)

摘要：高壓噴射灌漿之特點為以高壓噴射液挖掘土體，同時將挖掘之土體與水泥漿混合及置換，增加土壤之強度及止水性，在岩土工程中廣泛採用於深開挖及隧道工程，作為施工安全措施；亦採用於維護鄰近結構物之完整性。由於高壓噴射灌漿施作時因採用高達20至40MPa之壓力，施工時極易因灌漿孔內壓力高於覆土壓力而導致土體破壞，繼而產生地盤之隆起及沉陷。本文敘述高壓噴射灌漿之三類施工方法，探討導致隆起之因素，並以案例說明高壓噴射灌漿施工所導致地面位移及其影響。

關鍵字：高壓噴射灌漿、水力破裂、隆起、沉陷

一、概述

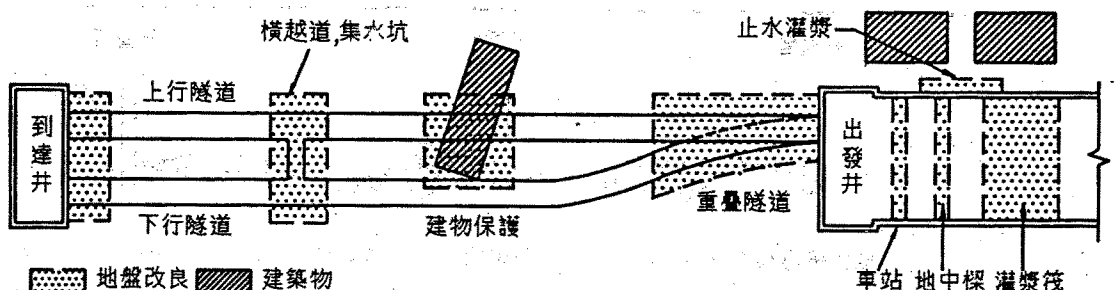
近年來大都市因人口稠密，公共交通需求日益增加，為解決公共交通運輸需求，紛紛籌劃及興建捷運系統，東亞地區已有捷運系統，計有北京、香港、漢城、星加坡、台北等都市。而都市捷運系統特色之一為地下化，包括地下車站及隧道。以台北捷運系統為例，地下結構之深度係位於地面下15至35m深，施工時無論採取深開挖工程或隧道工程，皆遭遇甚高之土壓力及水壓力，往往需要對開挖區及鄰近範圍之土壤進行處理，藉灌漿增加土壤之抗壓強度，或降低其透水係數，以達到安全施工之目的。另一方面，都市地區因已高度開發，捷運系統沿線皆有建物，甚至因路線所需及受現有地物限制，捷運隧道必需於現有建物下方通過。為避免沿線鄰近結構物之損壞，施工時亦有採用地盤改良作為保護措施。

地盤改良所採用之施工技術，與處理之土層性質有密切關係。水泥漿灌注技術已有近百年之歷史，但土壤顆粒愈細則水泥漿灌注方法愈受限制。由於土壤阻止水泥顆粒之入滲，因而發展化學灌漿。即使如此，土壤透水係數低時，採用化學灌漿將需時甚長，以致影響施工之可行性。在實際應用上，滲透式灌漿僅適用於細顆粒（粉質土）低於15%之砂土，黏土則無法以滲透式進行灌注。

在砂性土或黏性土之地盤改良方法，近年來工程界廣泛採用高壓噴射灌漿工法。此工法之特點為鑽桿底部有小口徑垂直及水平方向之噴嘴，在灌漿時鑽桿一面旋轉，一面提升，同時於水平孔噴出水泥漿，與鑽孔中擾動之土壤混合，形成改良土壤，達到增加強度及減低透水性之目標。然而噴射灌漿施工需採用高壓力灌注，常造成地表之隆起及沉陷，影響鄰近結構物之安全。高壓噴射灌漿所採用之噴射流，其壓力高達20至40MPa，如壓力未能宣洩，其所造成之破壞及隆起範圍甚大。本文將以台北捷運施工經驗，探討高壓噴射灌漿導致隆起之機制，以便研議施工控制方法；同時以案例說明高壓噴射灌漿施工對鄰近結構物之影響。

二、岩土工程之應用

一般而言，土壤經地盤改良後，其性質有以下三項改善：抗壓強度增加、透水性減低，及彈性模數增強。達到類似岩體之性質。在工程之應用上，經改良後之土壤於開挖時可無需支撐而維持陡峻之開挖面，使土壤具有足夠之自立時間以裝設臨時或永久性之支撐。其止水性可避免開挖時漏水所導致之管湧及沖刷破壞。進一步而言，地盤改良後之土壤因較為堅硬，在應力作用下其變形量減少。因而地面之開挖施工或隧道挖掘所導致之沉陷或側位移皆可降低，達到保護地下工程鄰近結構物基礎因不均勻沉陷所引致之結構損壞。



圖一. 捷運工程地盤改良應用範圍示意圖

以台北捷運工程為例，利用高壓噴射灌漿進行地盤改良之工程有下列各項：

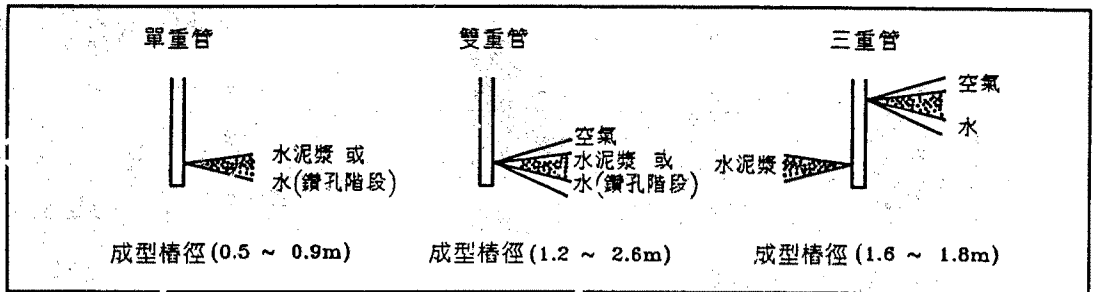
- (1) 隧道工作井。
- (2) 隧道連絡通道及集水坑，因採人工挖掘，需先進行地盤改良。
- (3) 重疊隧道段減少上下方隧道挖掘時相互之變形影響。
- (4) 車站擋土結構接縫止水。
- (5) 擋土結構缺口之補強及止水。
- (6) 擋土結構地中樑或筏式地盤改良以減少變形。
- (7) 開挖區底部止水幕或止水版。
- (8) 現有基礎之補強或托底。
- (9) NATM隧道施工前改良。

地盤改良之應用範圍如圖一所示。

三、施工方法

高壓噴射灌漿之種類，往往因各專業承商之專利或特殊施工機具、施工步驟，而有不同之名稱。於工程界所採用者，計有由日本所發展之CCP、JSP、JGP、JSG、JG、CJG、SHJG，及意大利發展之RODINJET 1,2,3等方法。但基本上可以依灌漿管之型式分為單重管、雙重管、三重管三種工法。

單重管工法灌漿管內只有一個管道，削孔用水流及灌漿用水泥漿均採用同一管道。施工時鑽孔水壓約2MPa，灌漿壓力採用20至40MPa，所形成之改良灌漿體直徑0.6m至0.9m。



圖二. 高壓噴射灌漿工法比較

雙重管工法之灌漿管由雙層同軸圓管構成，高壓水及水泥漿經由中央之管道輸送，而包圍此中央管道之第二層同心管用以輸送空氣。鑽孔階段僅用水作沖削，壓力1至3MPa。灌漿階段則改為水泥漿及空氣，水流或水泥漿採用壓力為20至40MPa，空氣壓力為0.7MPa。由於水泥漿之噴射流外裹壓縮空氣，噴流可達較遠距離，其切削及攪拌土壤能力較佳，改良灌漿體之直徑可達2m以上。

三重管工法之灌漿管由三層同軸圓管構成，底部具有二個水平方向噴嘴，水泥漿噴嘴位於下方，水及空氣之噴嘴在水泥漿噴嘴上方約300mm處。鑽孔階段另由一般鑽孔機具先行預鑽。灌漿階段上下兩噴嘴同時操作，分別噴出水泥漿、水及空氣。此三重管設計之主要考慮為灌漿階段灌漿管向上提升時，位於上方噴出之水及空氣，將有預先切割土壤之效果，達到更佳土壤及水泥漿之混合、置換及攪拌之成效。本工法採用水壓為35至40MPa，空氣壓力0.8MPa，水泥及皂土漿之壓力為2至4MPa。改良樁體之直徑可達1.8m。

表一 台北捷運高壓灌漿施工參數綜合表

工法	工法名稱	改良樁徑 公尺	壓力MPa			鑽桿鑽速 rpm	提升速率 分鐘/公尺	水泥漿流量 公升/分
			水	水泥漿	空氣			
單重管	CCP、JG	0.6-0.9	-	18-20	-	10-12	1-2	160
	RODINJET 1		-	20-40	-	30		170
雙重管	JSG、JSP	1.2-1.8	-	20	0.8	5-10	16-35	60
	SJG、UHPG、 RODINJET 2	1.2-2.6	-	30-45		5-15		6-18
三重管	CJG、RODINJET 3	1.6-1.8	35-40	2-4	0.7-0.8	5-10	6-20	140-180

圖二為上述三種灌漿工法之示意圖。上述三種灌漿工法之基本施工程序大致相同。首先由鑽桿及噴嘴組成之灌漿管以水或穩定液進行鑽孔；三重管工法則另行以鑽機先行鑽孔，再放置灌漿管至孔底。隨後灌漿管旋轉及緩慢提升，同時噴射漿液。灌漿液噴射期間廢漿沿鑽桿周圍之環狀空間向上流出，於地面以溝槽或廢漿池收集。三種工法之詳細施工參數如表一所示。此外，為增加黏土層改良樁之成型性，施工者有時採用預先切削技術，於鑽孔階段採用約20MPa之水壓，對黏土先行切削擴大，以便漿液易於混合而增加其改良樁徑。

四、地盤改良效果

高壓噴射灌漿對土壤改良成效之檢查，通常採用鑽心取樣。所採得之土樣進行單軸抗強度試驗以量取抗壓強度及彈性模數，同時在鑽孔階段進行現場透水試驗，以量測其透水係數。根據台北捷運工程15個施工標之試驗結果，經改良後之鑽心取樣抗壓強度，統計如表二所示。一般於砂土層進行之高壓灌漿高於黏土層所得之結果。改良後砂土層及黏土層之平均抗壓強度分別為4.8MPa及1.6MPa，皆可達到設計強度1至1.2MPa之要求。於砂土層之灌漿能獲得較黏土層為高之抗壓強度，主要之原因可能是砂土透水性較高，同時顆粒較粗，水泥漿易於滲透混合，而形成類似混凝土之材料。

表二 台北捷運高壓噴射灌漿土壤性質統計表

工法	土層	改良樁徑 公尺	抗壓強度MPa		透水係數 公分/秒
			範圍	平均	
單重管	砂土	0.6-0.9	-	-	10^{-3} - 10^{-6}
	黏土		0.6-2.7	1.6	-
雙重管	砂土	1.2-2.6	1.2-16	4.8	10^{-3} - 10^{-6}
	黏土		1.0-16	4.6	-
三重管	砂土	1.6-1.8	1.9-19	8.6	10^{-6}
	黏土		3.9-7.7	6.0	-

改良後之土壤，無論砂土或黏土，其彈性模數介於150至1500MPa之間。現場透水試驗結果顯示砂土層於高壓灌漿改良後，其透水係數由原有之 10^{-4} cm/sec可減低到 10^{-5} 至 10^{-6} cm/sec，相當於黏土之透水係數，足以達到止水之工程要求。

雖然表二顯示改良後之土體最高抗壓強度可達19MPa，但必須注意此結果與採樣技術有關，通常能採擇作單軸抗壓強度試驗之土樣為直徑50mm，長度最少100mm之完整樣品，而水泥漿混合不良或含泥量高之土樣，則難以採樣進行單軸抗壓試驗；在此種情況下，所得之抗壓強度通常偏高。基本上，改良後之土體其特性類似具有節理及層面等不連續面之岩體，其含泥之弱面相當於岩石之節理面。在後續之改良成效評估，可能需進一步以岩石力學之分類方法，統計改良土體之岩心品質指數（RQD）供工程應用之參考。

五、隆起

灌漿作業導致隆起為工程界普遍面臨問題。於滲透型灌漿水泥顆粒受阻於土壤細粒料時，繼續灌注將導致膨脹或水力破裂。於高壓噴射灌漿方面，文獻[1]、[2]皆指出灌漿孔遭堵塞以致迴漿不能自由流動至地面時，將可能發生水力破裂，繼而發生土壤之隆起與側向位移。根據台北捷運工程多處工地現場之觀察，正常壓密黏土所需引致膨脹或破裂之壓力甚低。通常在1.05倍總覆土壓力時，可產生膨脹，而水力破裂約在1.1倍總覆土壓力時產生。其隆起機制如圖三所示。此低壓力即可導致破裂，主要是由於黏土之低剪力強度及其不排水性質。相對而言，砂或過壓密黏土所需引致膨脹或水力破裂之壓力則較高。

需特別說明者是高壓噴射灌漿雖然採用20至40MPa之高壓力，但並非土壤產生過量壓力之主要因素。灌漿管上之噴嘴直徑2.4mm至3.4mm，灌漿壓力於噴出後迅速消失，此高速噴射壓力主要用於切削土壤。因此高壓噴射灌漿如無鑽孔堵塞，其孔內壓力將遠低於20至40MPa之施灌壓力。

實際灌漿時孔內壓力 P ，可以採用流體力學原理及經驗式估計。影響孔內壓力之項目有兩部份，分別為迴漿壓力 P_{sl} 及鑽孔壁與迴漿間產生之摩擦力 P_f ，如下列計算式表示：

$$P = P_{sl} + P_f \quad (1)$$

$$P_{sl} = H_{sl} \times \gamma_{sl} \quad (2)$$

$$P_f = \Delta H_f \times \gamma_{sl} \quad (3)$$

$$\Delta H_f = f \frac{LV^2}{2gD} \quad (4)$$

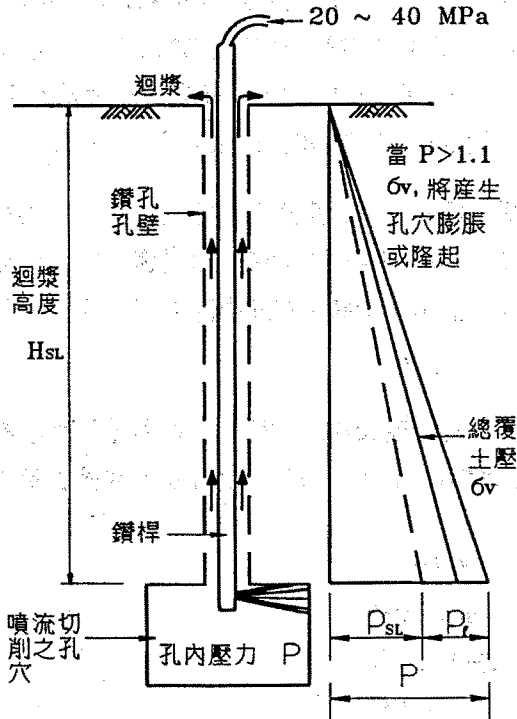
其中 H_{sl} 迴漿垂直高度
 γ_{sl} 迴漿單位重
 ΔH_f 流體摩擦水頭損失
 f 流體水頭損失係數
 V 迴漿於鑽孔內之流速
 g 重力加速度

公式4為計算管流水理經驗公式，其中 f 水頭損失係數除與管徑 D ，管長 L 有關外，並與管壁粗糙度、流體黏滯性、流速、流體密度等皆有關係。

根據台北捷運一處高壓噴射灌漿試驗量測得三重管工法之水泥漿配比1.1（水泥/水重量比），迴漿單位重平均 13.2KN/m^3 ，迴漿黏滯度約 40cp （Centipoise），鑽孔直徑 150mm ，鑽桿直徑 90mm ，鑽孔傾角 5° ，迴漿流速約 3m/sec ，可估計沿鑽孔壁之摩擦力損失最低為每公尺 4.8KN/m^2 ，則驗算在該黏土層工地進行高壓噴射灌漿時，其孔內壓力 P 約為總覆土壓力之1.1倍。同時該灌漿試驗進行時有約 28mm 之隆起現象。

表三 減低隆起發生措施綜合表

措施	原理
1. 減低灌漿速率及提升速率	<ul style="list-style-type: none"> 減低迴漿流速 減低迴漿密度
2. 鑽孔採用套管	<ul style="list-style-type: none"> 減低迴漿與鑽孔壁摩擦阻力 避免鑽孔壁崩塌堵塞
3. 斜孔灌漿時採用高角度傾角	<ul style="list-style-type: none"> 減低迴漿摩擦阻力
4. 採用三重管	<ul style="list-style-type: none"> 減低迴漿密度 減低迴漿黏滯度
5. 鑽孔階段採用高壓水預先切割	<ul style="list-style-type: none"> 三重管迴漿密度及黏滯度低於二重管及單重管之迴漿
6. 採用大孔徑鑽孔或大孔徑套管	<ul style="list-style-type: none"> 減低迴漿流速



圖三. 高壓噴射灌漿隆起機制

公式1至4顯示高壓噴射灌漿操作時，孔內壓力與施灌作業各項參數息息相關。文獻[1]曾報導星加坡捷運一處高壓噴射灌漿試驗，所探討之各項施工細節。一般而言，迴漿密度愈高，鑽孔內之壓力愈大；同時，漿液黏滯度愈高，流速愈大，鑽孔管徑愈小，或鑽孔長度愈長，則流動時之水頭摩擦損失愈大。

瞭解各項影響孔內壓力因素後，噴射灌漿導致隆起之情況方可加以控制。其改善措施主要為減低孔內壓力 P ，特別是孔壁摩擦損失導致之壓力 P_f 。綜合台北捷運之經驗及文獻[1]之報導，可行之措施及說明如表三所示，包括鑽孔徑加大，採用套管，避免傾斜孔，採用三套管及控制流量等等。雖然此等措施影響施工時間或灌漿作業之方便性，而減低生產效率，進

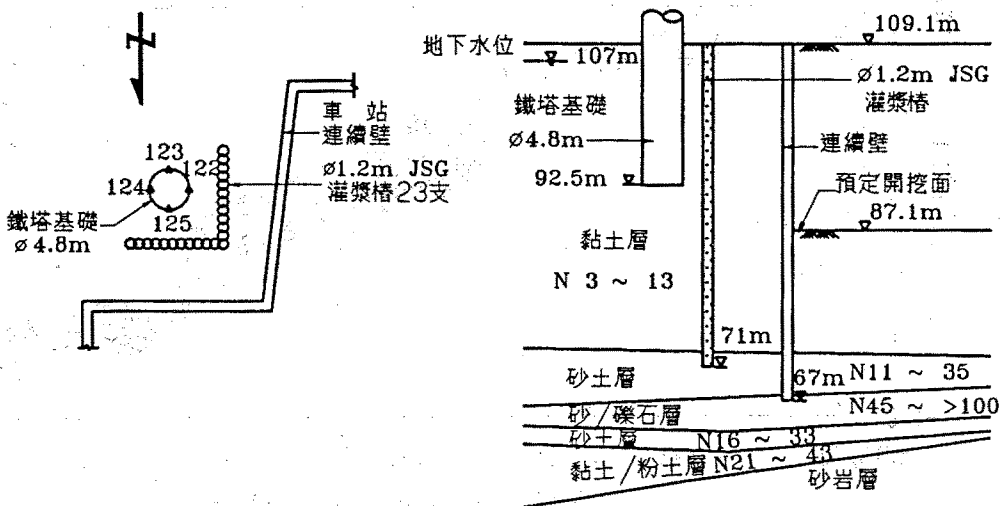
而影響施作費用，但在都市地區，特別是地下結構物直接位於建築物下方之情況下，仍有需要設法加以控制灌漿導致之隆起量。

六、沉陷

高壓噴射灌漿除導致隆起外，亦可造成沉陷。沉陷並非因灌漿作業所導致，而由鑽孔作業所造成，其影響因素為：

- (1) 鑽孔階段引致土壤鬆弛
- (2) 套管裝設引致土壤鬆弛
- (3) 鑽孔之振動引致土壤壓實
- (4) 灌漿區上方之空洞回填不良
- (5) 套管拔除擾動土壤

地面沉陷與灌漿孔之配置不良亦有關係。在地面有建築物或管線障礙時，施工者常採用傾斜孔及扇狀分佈之灌漿孔。在此情形下鑽孔及套管拔除作業所引致之土壤鬆弛將更為擴大。由於間距極近而鑽孔密集，近距離之鑽孔相互影響而土壤所受擾動益形嚴重。另一方面，高壓噴射灌漿鑽孔時，通常並不採用套管，而以水或泥漿維持孔壁避免崩坍。穩定液品質及鑽孔速率因而成為重要控制因素。沖洗過速能引致過量擾動及土壤流失，而沖洗過緩則造成鑽孔速率緩慢，影響施工進度。



圖四 案例一鐵塔基礎地盤改良

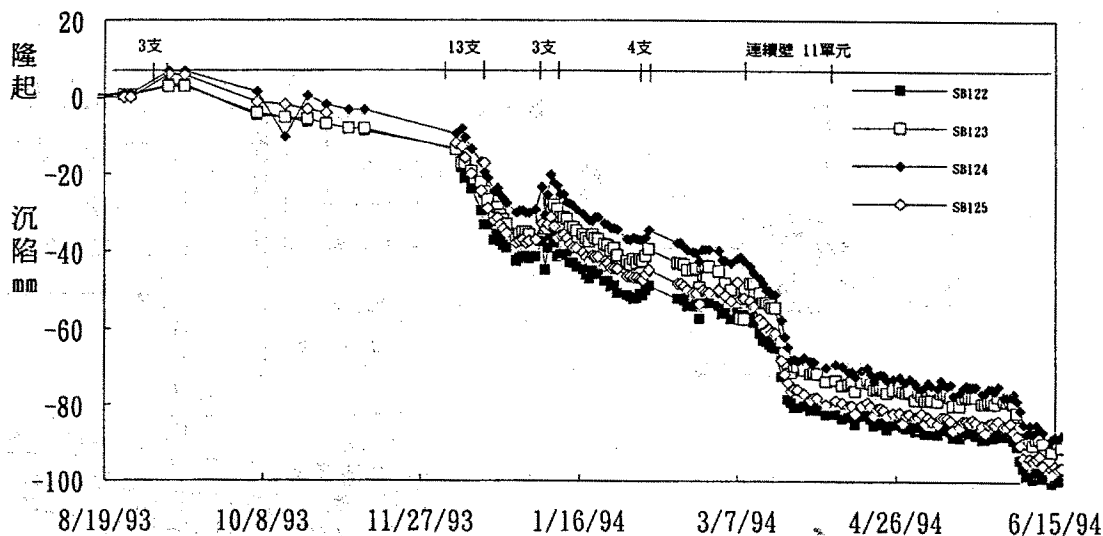
七、地面位移案例

本文敘述2個台北捷運採用高壓噴射灌漿施工之案例，均導致地面或鄰近結構物之垂直位移，包括隆起、沉陷，及側向位移，分別說明如下。

案例一

案例一位於台北盆地南緣，地層為厚約40m黏土層，標準貫入試驗N值3至13，黏土層下方為厚約6m砂土層。地下水位在地面下2m。捷運地下車站開挖深度為22m，以深42m連續壁作為擋土結構。車站角隅處有一輸電鐵塔，其基礎為直徑4.8m，深17m圓筒式沉箱基礎，距車站連續壁最近約10m。考慮連續壁溝槽挖掘施工可能導致鐵塔基礎損壞，承商於鐵塔基礎及連續壁間，先行施作一列直徑1.2m，間距1.0m，深38m之地盤改良樁共23支。其配置如圖四所示。承商採用JSG工法施作，灌漿壓力20MPa。

高壓噴射灌漿於1993年9月開始施作，施作3支後鐵塔基礎最大隆起約6mm，承商因而暫停施工，延至1993年12月至1994年2月期間分三梯次施作餘下之20支改良樁。1994年3月施作鐵塔基礎鄰近範圍之連續壁。上述施工作業曾導致鐵塔基礎隆起及沉陷，詳如圖五所示。依觀測顯示至1994年5月底，基礎總沉陷量最大為89mm。其中高壓噴射灌漿及連續壁施作導致



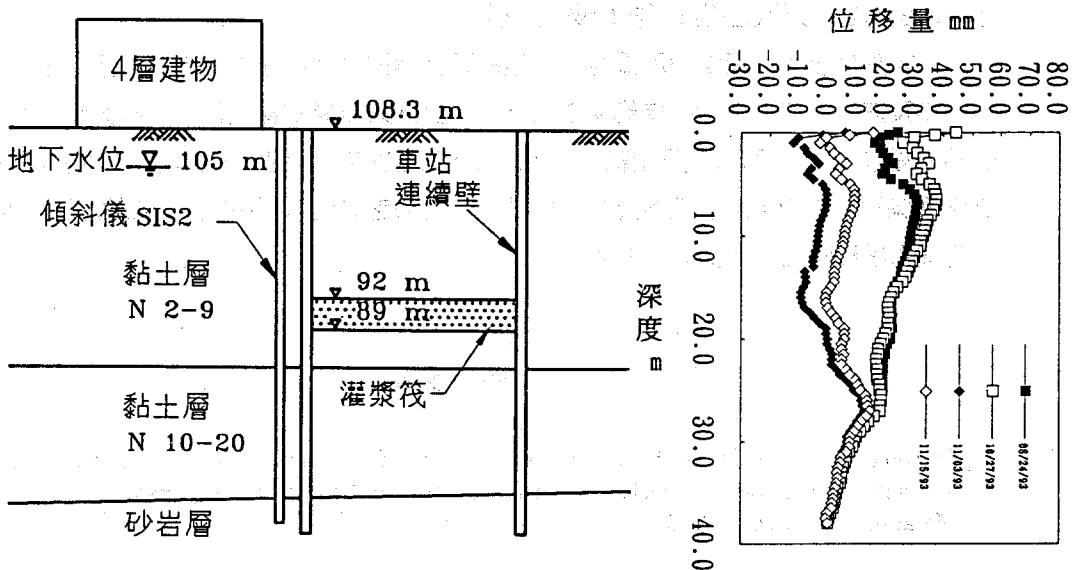
圖五 鐵塔基礎垂直位移情形

之沉陷分別為58mm及31mm。而每一梯次灌漿時鐵塔基礎隆起量最高約10mm。隆起後隨即發生沉陷，其中1993年9月至12月期間無其他施工因素，此期間持續沉陷之現象，顯示灌漿作業產生之超額孔隙水壓，因黏土層透水係數低而需長時間之消散。綜合計算至連續壁施工前平均每一支地盤改良樁引致之沉陷約為2.5mm。另一方面，連續壁溝槽挖掘導致沉陷亦為常見之現象。台北地區之經驗為連續壁施工可引致鄰近地面10至20mm沉陷。本案例承商於鐵塔基礎西側及北側施作連續壁，造成沉陷之累加效應共31mm。

本案例顯示承商所採用之高壓噴射灌漿，並未達到原擬減少鐵塔基礎因連續壁施作所導致之沉陷。而且高壓噴射灌漿作業本身導致待保護之結構物產生58mm之額外沉陷。幸而沉陷量大致均勻，目前尚未影響鐵塔之安全。惟日後車站開挖施工階段仍需注意鐵塔之安全。

案例二

案例二位於台北盆地東側，地層為厚度約35m之黏土層，覆蓋於砂岩層上，開挖範圍內黏土之標準貫入試驗N值2至9。地下水位在地面下約3m。設計階段考慮車站開挖深度達19m，估計擋土結構外側地面沉陷可達105mm，將影響鄰近結構物之安全。為減少地面沉陷，設計時規定於連續壁開挖區內，開挖面下方設置厚3m之筏式地盤改良如圖六所示，以減少連續壁側位移及緊鄰之地面沉陷。



圖六. 案例二車站地盤改良及側向位移情形

施工階段承商採用SJG方法施工。噴射灌漿樁直徑2.6m，間距2.4m，灌漿壓力40MPa，施作面積涵蓋整個車站範圍。根據裝設於外側距連續壁2m之傾斜管SIS2，比較高壓噴射灌漿施工前後之1993.10.27及1993.11.3兩量測值，可見地盤改良施工導致大量之側位移。如圖六所示，於6m深位置灌漿作業導致地層反方向之位移量最高達40mm。同時由地面至17m深之變形曲線大致上均勻，研判該3m厚之灌漿筏施作所產生之壓力，把連續壁向外擠壓。為檢核連續壁之安全性，承商假設連續壁之位移量與SIS2之量測值一致，反推算連續壁所受之應力及彎矩，顯示最大之彎矩達2500KN-m/m，位於27m深度處。該灌漿引致之彎矩尚在原設計容許範圍內，惟日後開挖仍需注意。

八、結論

(1)高壓噴射灌漿為適用於黏土層之一項地盤改良工法，由於採用噴流切割、攪拌，與水泥漿混合，因此亦同時可採用於砂土層。

(2)一般而言，在砂土層所施作之高壓噴射改良樁，其抗壓強度較黏土層者為佳。

(3)於黏土層所進行之高壓噴射灌漿施工易產生地面隆起現象。主要原因為灌漿孔內壓力高於覆土壓力而產生水力破裂。灌漿孔內之壓力一般與迴漿密度、黏滯度、流速、鑽孔管徑、鑽孔長度等施工因素皆有密切關係。瞭解各項因素對都市地區施作噴射灌漿時，有利於控制地面隆起，以減低對鄰近結構物之影響。

(4)高壓噴射灌漿常採用為地下工程鄰近結構物安全之保護措施。此措施固然於地下工程開挖及施工時有助於減少結構物之位移量，但灌漿作業本身往往能導致大量之垂直及側向位移。灌漿所導致隆起或沉陷量甚至超過地下工程施工所產生之位移量。因此在選擇地盤改良作為保護措施前，應審慎衡量其利弊得失。在缺乏其他可行措施而必需採用地盤改良時，則應儘量設法限制隆起及沉陷之發生。

參考文獻

- [1] Buttling, S. and Shirlaw, J.N., "Review of Ground Treatment Carried out for Tunnels of the Singapore Mass Rapid Transit System". Proceedings, Tunnelling '88, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1988.
- [2] Kauschinger, J.L. and Welsh, J.P., "Jet Grouting For Urban Construction", Proceedings of the 1989 Seminar, Design, Construction and Performance of Deep Excavations in Urban Areas, MIT, 1989.