

高壓噴射灌漿工法及試灌案例探討
JET GROUTING AND FIELD TRIALS

蘇鼎鈞，王劍虹
Ting-Chiun Su and Chien-Hong Wang

原著載於地工技術雜誌第47期，
1994年9月，71-83頁

Reprinted from Sino-Geotechnics Magazine,
No.47,
September, 1994,
pp.71-83

高壓噴射灌漿工法及試灌案例探討

蘇鼎鈞 王劍虹

亞新工程顧問公司

關鍵字：高壓噴射灌漿、試灌、改良土、土質改良。

摘要

本文由流體力學理論觀點來探討高壓噴射灌漿中之高壓幫浦功率、灌漿流量與噴射速率間的關係。高壓噴射灌漿形成的改良土與混凝土有些類似，但其不確定因素更多，文中就改良土之特性予以說明。為確保高壓噴射灌漿之施工品質，試灌檢核是相當重要的，本文介紹一個位於台北天母地區的施工案例，其灌漿的目的在要求土壤強度，從試灌的過程、取樣評估的結果以選擇全面灌漿時採用的灌漿壓力、提升速率、迴轉速率以及水泥、添加劑用量等，供地工界類似工程案例之參考。

JET GROUTING AND FIELD TRIALS

SU TING-CHIUN WANG CHIEN-HONG

Moh and Associates, Inc.

KEY WORDS : jet grouting, field trials, soilcrete, soil improvement

ABSTRACT

This article presents the relationship among pump characteristics, outflow rate and jetting velocity in jet grouting. The constituents of soilcrete are similar to concrete, however, there exists more uncertainties for the quality control of soilcrete. The major factors which affect the quality of soilcrete are presented, as well as the major uncertainties in predicting the insitu soilcrete. To assure the quality of soilcrete, field trials and sampling are necessary. A case study of field trial to make sure the strength of soilcrete in Tienmu, Taipei is addressed. Both field procedures and sample evaluation are addressed. These can help engineers to choose the pump pressure, lifting speed, rod rotation speed, cement consumption and admixtures for other similar projects.

一、前言

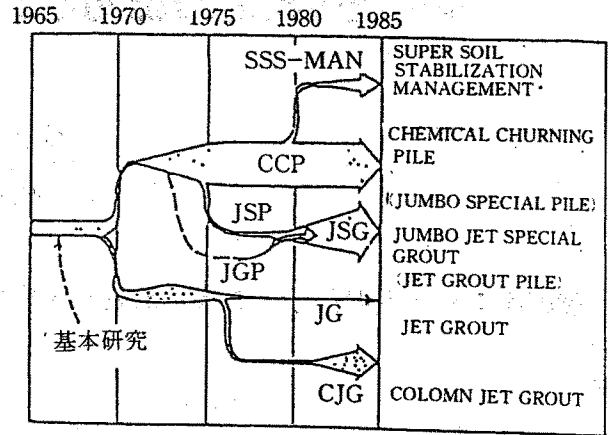
高壓噴射灌漿工法係屬於地盤灌漿改良工法之一種，據筆者所瞭解，本工法發展迄今約有二十多年之時間，因不同之灌漿流體、使用材料和灌漿方式所改良出來之灌漿工法至少在十數種以上，由於本工法之施作均在地底下，工程人員肉眼不能清楚掌握，故其品質之良窳常受土層之變化性、施工機具之能力、施工人員之專業素質、施工方式及使用材料等因素之影響，而有相當大之差異，以致於改良效果往往與預期不同，使得工程師對其成效存疑，於是在設計時便採用較保守之態度，甚或避免不用而改採用其他方式。此外，試灌為高壓噴射灌漿改良工程中確認成效之不可或缺的工作項目。基於上述之現存問題，本文就高壓噴射灌漿工法之流體力學原理作一介紹，並以台北市天母地區某一工地之試灌工作取樣結果為例，提供地工界類似工程執行之參考。

二、工法理論及特性

高壓噴射灌漿工法之理念主要係起源於美國之採礦工程，即以高壓噴射水流切削地層以利採礦工作之進行，在1970年代早期由日本首先推展，現今則已推廣至歐洲、美洲及東南亞各地。

高壓噴射灌漿工法之發展過程詳圖一所示，Kauschinger, J.L. 和 Welsh, J.P. (1989) 整理得高壓噴射灌漿工法之標準施工控制參數則詳表一。

有關高壓噴射灌漿工法之原理，王劍虹(民國73年)於地工技術雜誌第八期已有專文敘及，本工法係以高壓噴射流切削



圖一 高壓噴射灌漿工法之發展
(摘自 Miki and Nakanishi 1984)

、置換、同時以水泥攪拌土壤，本文將從流體力學理論方面來探討。

高壓噴射灌漿由字面上的認知，最基本的關係為噴射壓力、灌漿流量與噴射速度等。對於單管 CCP 工法，國內一般採用之壓力達 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ ，此值對於水灰比為 1 比 1 的漿液有相當於 1300 公尺的水頭。對於如此高的水頭，若高壓幫浦的位置與噴嘴的所在距離不遠，則經由灌漿管道的水頭損失可以忽略不計；此外，鑽桿中漿液流動速度不大，對於一般的鑽桿長度而言，水頭損失由旋轉軸 (Swivel) 至噴嘴亦可以忽略不計；在上述情形下，噴射流的速度便可由大家熟悉的 Bernoulli 公式計算而得：

$$\text{即 } V_j = \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (1)$$

式中 V_j ：噴嘴之噴射速度 (在空氣中或水中)

g ：重力加速度 ($9.8\text{m}/\text{sec}^2$)

H ：高壓幫浦的水頭，即高壓幫浦的壓力與漿液密度的比值 (當水灰比為 1 比 1 時，即 1 公斤水泥對 1 公斤水時，漿液之密度大約 $1.5\text{t}/\text{m}^3$)

在壓力為 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，理論上噴嘴

表一 高壓噴射灌漿工法之標準施工控制參數表 (摘自Kauschinger, J. L. and Welsh, J. P. (1989))

灌漿控制參數	單管	雙重管	三重管
噴射壓力			
水壓力 (bars)	PW	PW	300-550
灌漿壓力 (bars)	300-550	300-550	10-40
壓縮空氣壓力 (bars)	NA	7-17	7-17
流速			
水壓力 (l/min)	PW	PW	70-100
灌漿壓力 (l/min)	60-150	100-150	150-250
壓縮空氣壓力 (m ³ /min)	NA	1-3	1-3
噴嘴尺寸			
水壓力 (mm)	PW	PW	1.8-2.6
灌漿壓力 (mm)	1.8-3.0	2.4-3.4	3.5-6
噴嘴數目 (水)	PW	PW	1-2
噴嘴數目 (灌漿用)	2-6	1-2	1
水灰比 W : C		0.80 : 1 to 2 : 1	
水泥使用量 (kg/m)	200-500	300-1000	500-2000
(kg/m ³)	400-1000	150-550	150-650
鑽桿旋轉速率 (rpm)	10-30	10-10	3-8
提升速度 (min/m)	3-8	3-10	10-25
改良體之樁徑			
粗粒土壤 (m)	0.5-1	1-2	1.5-3
細粒土壤 (m)	0.4-0.8	1-1.5	1-2
改良體強度			
砂性土壤 (kg/cnf)	100-300	75-150	100-200
黏性土壤 (kg/cnf)	15-100	15-50	15-75

註：PW代表僅在鑽孔時施加水壓力。

的噴射速度將達160公尺/秒，在靜止水中的狀況，噴嘴處的水頭壓力正好等於水深，噴流的過程中之其中一項機制便是噴流的速度在克服水頭壓力後仍能達到音速以上的沖蝕能力。如果在土層中，此沖蝕力將使土壤產生水力破裂 (Hydraulic Fracture) 的情形而造成地盤的隆起及土層中孔隙水壓的增加。因此高壓噴射灌漿必須控制得宜，使地盤隆起及孔隙水壓增加達到最小。在噴嘴處的漿液有路徑可以達到地表的情況下，從流體力學的觀點，此時噴嘴附近的水頭壓力可視為漿體的自重。但如果此路徑被阻隔，例如在軟弱粘土層中鑽桿附近的土層易產生潛變而包裹住鑽桿，此時噴嘴附近的壓力接近高壓幫浦輸出的壓力水頭。此種路徑被阻隔的情

形，一般不能維持太久，因為鑽桿周遭的土壤會有隆起現象，或者灌漿操作會因其他的影響如鄰房基礎產生龜裂等而被迫停止。

Kauschinger and Welsh (1989) 建議由式(1)中的噴射速度可以估算流量

$$Q = C_c \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \times C_v \times V_j \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_{total} = n \times Q \dots\dots\dots(3)$$

式中 C_c：噴流縮減係數，0.95至1.00

D：噴嘴口徑 (mm)

C_v：速度係數，0.8至0.98

Q：單噴嘴的流量 (l/min)

n：噴嘴數量

Q_{total}：總流量 (l/min)

而高壓幫浦所需的引擎功率則可以式

(4)計算之

$$H_p = Q_{total} \times P \dots\dots\dots(4)$$

式中 Q_{total} ：總流量 (l / min)

P：高壓幫浦壓力 (kg / cm^2)

H_p ：高壓幫浦所需的引擎能力 (馬力)

1馬力：550英呎一磅 / 秒 (英制)
= 75公尺一公斤 / 秒 (公制)

實際需要的引擎功率應比計算所得大15%。於水灰比為1比1，壓力為200kg / cm^2 ，2個噴嘴且口徑均為2.0mm的狀況下，理論上的噴嘴速度為160公尺 / 秒，流量約24公升 / 分鐘，需要的引擎能力應至少為25馬力。若幫浦之壓力達500kg / cm^2 ，則需要的引擎能力將達100馬力。

三、影響改良土的因素

改良土係水泥硬化劑和土壤顆粒的混合體，與混凝土有些類似，改良土之特性大致有下列數項：

1. 水灰比：當水灰比增加時改良土之強度會降低。
2. 水泥用量：改良土之強度隨其單位體積內之水泥量增加而增加。
3. 土壤種類：砂及礫石改良土之強度較高，粘土和粉土改良之強度較弱。
4. 養治時間：改良土之強度隨養治時間增加而增高，但增加之速率小於混凝土。
5. 灌漿的方式：單管、雙重管及三重管的灌漿方式對改良土的影響甚大。

改良土亦有許多與混凝土不同之處，特別是改良土面臨的是變化甚大的土層，而且灌漿噴流同時切削、置換土壤顆粒與攪拌水泥使其和土壤顆粒混合。改良土剛形成時具有粘滯性，但當改良柱體較深時

改良土之顆粒亦可能因自重而產生沉降，影響了改良土的均質性與品質。由於上述的原因，改良土有下列的被確定的因素：

1. 改良土的顆粒成份：改良土與現地土層狀況有很大的關係，改良土的顆粒分佈一般來說與原狀土不同，因為細料（粉土及粘土）在噴流時被沖走，移除了細料增加了改良土的強度。

2. 改良土的含水量：相同的水泥用量在土壤的自然含水量愈高的情形下，改良土的水灰比愈高，故高含水量的土壤可以低水灰比來增加強度。改良土的含水量與漿液的水灰比、土層的透水係數及溼改良土於液狀時的自重沉降有關。

3. 改良土的水泥含量：改良土的水泥含量與水泥用量、土層特性及改良土有效徑有關，在現場較能控制的是水泥用量。

4. 改良土的均質性：改良土是一個非均質的混合體。由於對於噴射的參數控制不易，例如不同的噴射壓力、不同口徑的噴嘴、提升速度、提升方式等，因此顯示出現場正確記錄的重要性。其次土壤顆粒與漿液無法有充份的拌合，不充份的攪拌將使改良柱體中間較強、邊緣較弱，特別是粘土層中亦可能在改良土中發現有粘土塊等。

其他對改良土影響較小的還有地下水的化學性質及地下水流速等，現場可以取地下水樣進行試驗以及將地下水流速在計算中列入考慮，對於水流速較快的情形，可以在灌漿時採用速凝劑如水玻璃等。

四、試灌案例探討

台北市天母地區某工地之地下有一厚粘土層且極為軟弱，其下方之砂土層又屬於受壓水層。經評估當基礎開挖時，擋土

連續壁變形所引致之鄰近地表沉陷，可能危及鄰近結構物之安全，故考慮於基地內進行地質改良以減少連續壁之側向位移，為確保未來基地內土質改良之品質能達到設計之要求，乃於全面改良前先進行前期試驗工作。以下僅就試灌之過程和效果評估作一詳細之介紹。

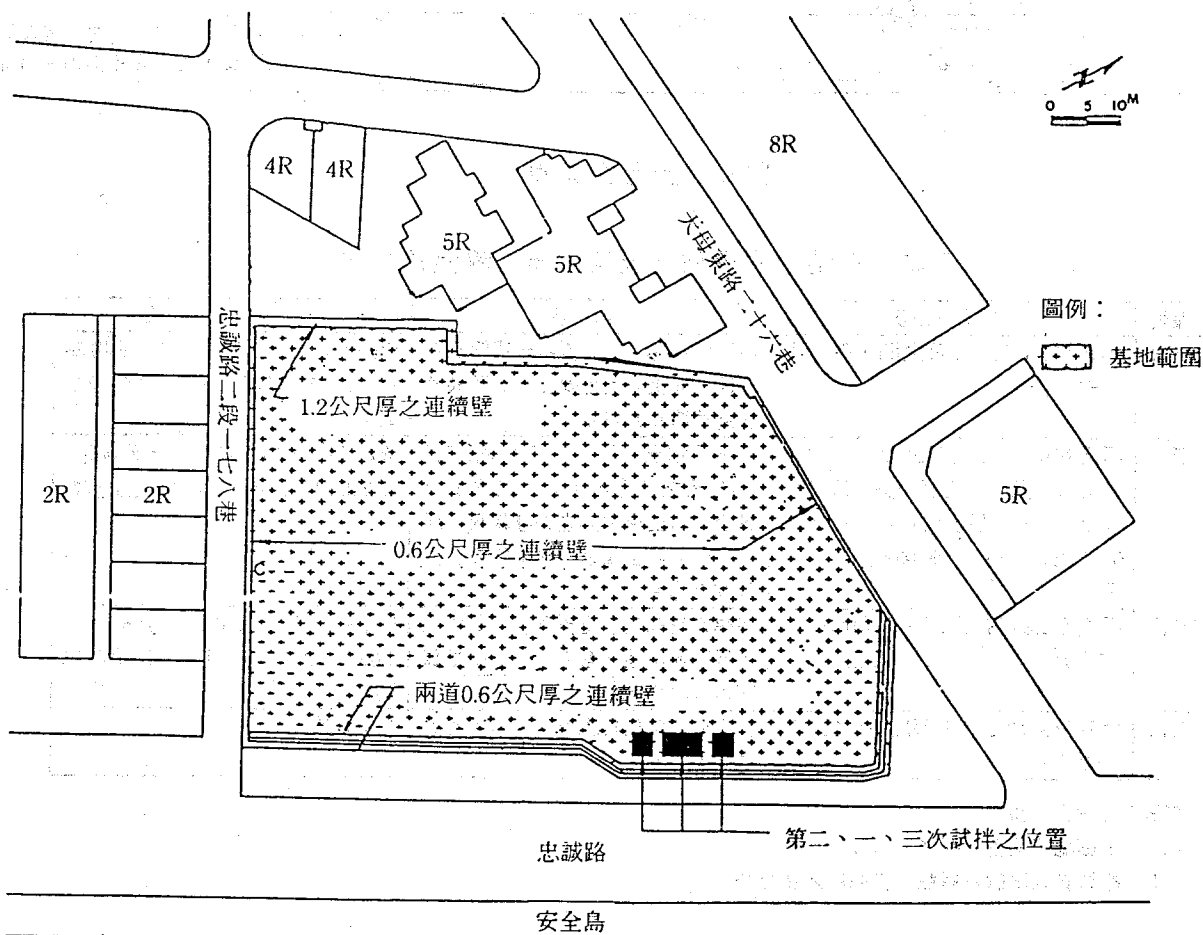
4.1 基地現場及土層概況

本基地位於台北市天母忠誠路，面積約4660平方公尺，除東側臨忠誠路外，其餘各側均鄰近或隔小巷有2~8層樓之鄰房，其平面位置如圖二所示。

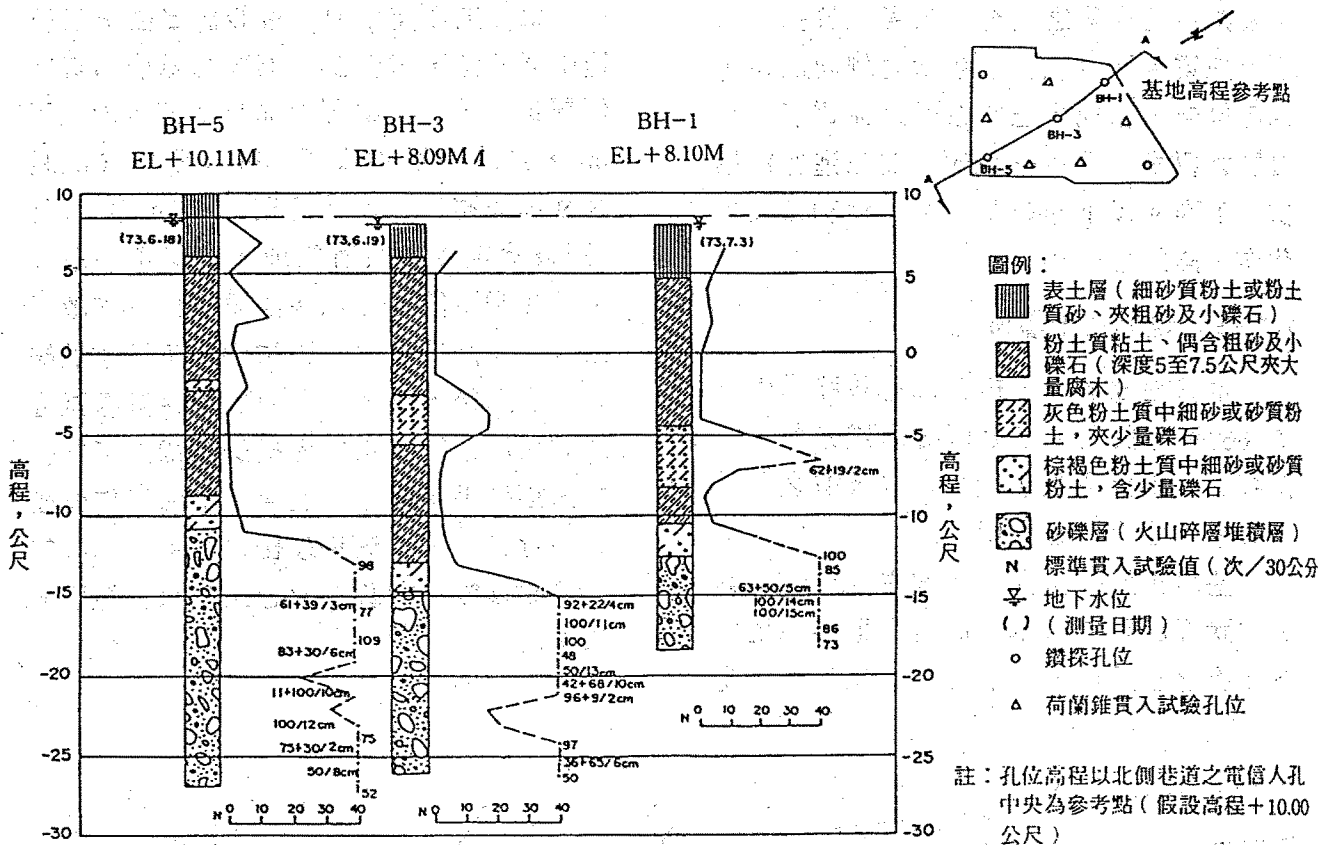
基地土層可概分為四個主要層次，其分佈狀況詳圖三所示，而表二則為基地內各層次之土層分佈狀況及主要工程性質說明。

4.2 試灌過程

試灌工作開始前，按設計單位施工規範中之規定，試灌工作應包括單樁和羣樁兩部份，其中單樁部份係自地表至地表下5m，並開挖至地表下2.5m以檢視其改良尺寸和完整性，而羣樁則由9支單樁以3行3列彼此重疊方式所組成，並以鑽心取樣進行無圍壓縮試驗以確認重疊情形和改良強度，且承商須先提送試灌施工計畫並經審查通過後方可開工。由於現場實際試灌之評估結果與承商原先提送試灌施工計畫之預期結果有差距，使得本試灌工作先後共進行三次，以決定最佳之材料配比和施工控制參數，有關三次之試灌過程扼要分述如后。



圖二 基地平面位置



圖三 土層剖面圖

表二 基地土層分佈狀況及主要工程性質說明

層次編號	土層分佈狀況	土層描述	土壤主要工程性質
第一層次	厚度在1.8至5.5公尺之間，平均厚度約3.2公尺。	棕褐色或灰褐色砂質粉土或粉土質細砂，夾粗砂及小礫石，表面夾草根及磚塊等回填物。	W_n 平均為 $29 \pm 13\%$ ， γ_t 平均為 $1.83 \pm 0.13t/m^3$ ，N 值在 1 至 12 之間。
第二層次	厚度在8.5至19公尺之間，平均厚度約14公尺。本土層中央（深度約12公尺）夾一粉土質砂層，厚度在0至3.8公尺之間，平均厚度為1.8公尺。	粉土質粘土，約於地表下深度5至7.5公尺之間含極大量之腐木及有機物。本土層中間之夾層為灰色或棕灰色之粉土質砂，含小礫石及少量有機物。	W_n 平均為 $46 \pm 12\%$ ， γ_t 平均為 $1.67 \pm 0.22t/m^3$ ，N 值在 1 至 9 之間。
第三層次	厚度在1.8至3.0之間，平均厚度為2.3公尺。	棕褐或灰褐色粉土質砂或砂質粉土，低至無塑性，含粗細砂、少量礫石與有機物。	W_n 平均為 $23 \pm 12\%$ ， γ_t 平均為 $2.03 \pm 0.20t/m^3$ ，N 值在 3 至 39 之間。
第四層次	大致分佈於地表下深度17至22.8公尺以下。	棕褐或棕黃色粉土質中細砂，含大量之礫石。	N 值大於 50。

*註： W_n ：自然含水量，%

γ_t ：土壤總單位重，噸/立方公尺

N：標準貫入試驗打擊數，打擊數/30公分

1. 第一次試灌：

現場進行兩組不同水泥（台灣水泥和進口水泥）之試灌工作，每組均包括單樁一支和羣樁9支，其中單樁深度為地表至地表下5公尺，而羣樁係由9支單樁以3行3列彼此重疊方式所組成，深度則由地表至地表下15公尺止。

2. 第二次試灌：

進行兩組不同水泥配比和添加劑之試灌工作，每組均為3支單樁以彼此重疊方式所組成，深度自地表至地表下15公尺止。

3. 第三次試灌：

進行一組羣樁9支之試灌工作，深度和配置與前者同。

上述三次試灌之平面佈置，以及每支高壓噴射改良樁之水泥用量、灌漿壓力、提升速度、迴轉速度和添加劑用量等詳圖四和表三所示。其中第一、二次試灌係採用純高壓噴射之灌漿工法，而第三次試灌則採用攪拌加高壓噴射之灌漿工法。有關本試灌所採用之機具種類和性能如下：

(1) 高壓灌漿泵一部—常用壓力 200 kg/cm^2 ，電功率為50HP。

(2) 鑽機一部，附有自動控制上升裝置—油壓式KH-76型。

(3) 鑽孔泵—電功率為3HP，壓力約 $0\sim 30\text{ kg/cm}^2$ 。

(4) 鑽桿—直徑為40.5公厘，噴嘴內徑為2.5mm。

(5) 高壓輸送管—直徑為3/4英吋，耐壓力為 600 kg/cm^2 。

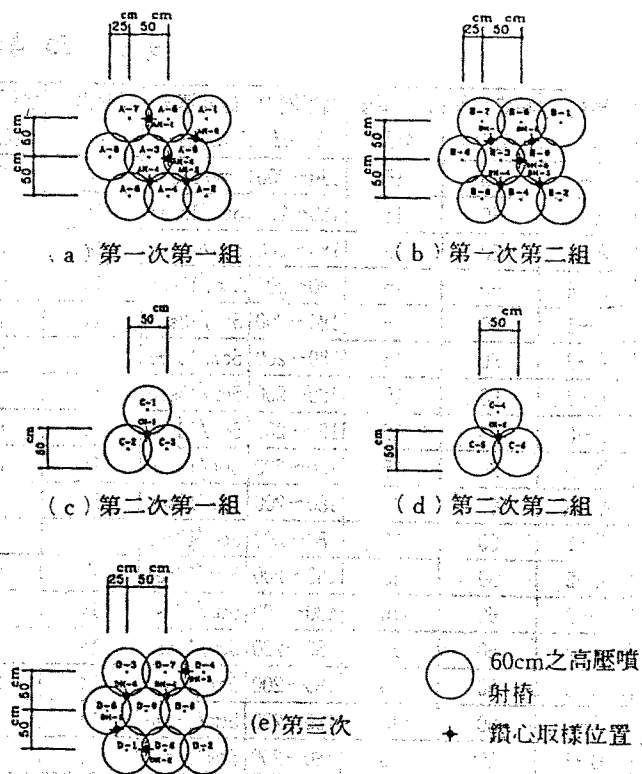
(6) 鑽頭攪拌翼—直徑約20公分。

(7) 自動流量計。

(8) 其他必備裝置—抽水機、儲水槽及硬化漿液拌合設備等。

4.3 取樣評估

試灌完成後之評估係以鑽心取樣並配



圖四 現場試拌改良樁及鑽心取樣之相關位置

合試驗室試驗方式進行。其中鑽心工作係由承商自行負責，以三套岩心管進行取樣，而取樣之位置則由監造工程師依實際之灌漿過程選定。本次鑽心取樣依三次試灌總共完成16孔，其位置主要選擇在二支或三支改良樁之重疊處。

鑽心樣品之描述係由監造之大地工程師針對現場實際之取樣情形所作之研判，原則上將鑽心樣品按其膠結之程度區分為膠結良好、膠結尚可、膠結差、未改良者及失樣（Loss）等五個等級，而其基本定義分述如下：

1. 膠結良好

土質改良效果佳，取樣結果為一完整之改良土心樣，局部呈餅狀或塊狀斷裂，其中完整之改良土心樣可進行單軸抗壓強度試驗者。

2. 膠結尚可

土質改良效果尚可，改良土心樣大部

表三 現場試拌記錄總表

樁號	預定樁徑 公分	改良深度 公尺	灌漿壓力 kg/cm ²	提升速度 cm/sec	迴轉速度 r.p.m.	水泥用量 包/支	添加劑	水灰比	完成日期	鑽孔編號	鑽心取樣日期
A-1	60	15	180~200	5cm/13sec	14	64	-	1:1	3月29日	AH-1	4月27日~5月4日
A-2	60	15	180~200	5cm/13sec	14	68	-	1:1	3月29日	AH-2	5月8日~5月11日
A-3	60	15	180~200	5cm/13sec	14	66	-	1:1	3月31日	AH-3	5月12日~5月14日
A-4	60	15	180~200	5cm/13sec	14	66	-	1:1	3月30日	AH-4	-
A-5	60	15	180~200	5cm/13sec	14	76	-	1:1	3月30日	AH-5	4月28日~5月2日
A-6	60	15	180~200	5cm/13sec	14	70	-	1:1	3月30日		
A-7	60	15	180~200	5cm/13sec	14	80	-	1:1	3月28日		
A-8	60	15	180~200	5cm/13sec	14	66	-	1:1	3月28日		
A-9	60	15	180~200	5cm/13sec	14	64	-	1:1	4月3日		
A-10	60	5	180~200	5cm/13sec	14	23	-	1:1	4月3日		
B-1	60	15	180~200	5cm/13sec	14	72	-	1:1	4月1日	BH-1	5月21日~5月21日
B-2	60	15	180~200	5cm/13sec	14	60	-	1:1	4月1日	BH-2	5月5日~5月7日
B-3	60	15	180~200	5cm/13sec	14	60	-	1:1	4月1日	BH-3	5月8日~5月10日
B-4	60	15	180~200	5cm/13sec	14	62	-	1:1	4月2日	BH-4	5月11日~5月14日
B-5	60	15	180~200	5cm/13sec	14	62	-	1:1	4月2日	BH-5	5月2日~5月4日
B-6	60	15	180~200	5cm/13sec	14	78	-	1:1	4月2日		
B-7	60	15	180~200	5cm/13sec	14	55	-	1:1	4月3日		
B-8	60	15	180~200	5cm/13sec	14	54	-	1:1	4月3日		
B-9	60	15	180~200	5cm/13sec	14	58	-	1:1	4月3日		
B-10	60	5	180~200	5cm/13sec	14	30	-	1:1	4月3日		
C-1	60	15	180~200	5cm/13sec	8	75	7.5包	1:1.07	4月22日	CH-1	5月15日~5月19日
C-2	60	15	180~200	5cm/13sec	8	75	7.5包	1:1.07	4月22日	CH-2	5月16日~5月19日
C-3	60	15	180~200	5cm/13sec	8	75	7.5包	1:1.07	4月22日		
C-4	60	15	180~200	5cm/18sec	8	39	585公升	1:1	4月23日		
C-5	60	15	180~200	5cm/18sec	8	38	585公升	1:1	4月23日		
C-6	60	15	180~200	5cm/18sec	8	38	585公升	1:1	4月23日		
D-1	60	15	180~200	5cm/16sec	8	96	200公升	1:1	5月22日	DH-1	6月4日~6月7日
D-2	60	15	180~200	5cm/16sec	8	107	30公升	1:1	5月24日	DH-2	6月7日~6月10日
D-3	60	15	180~200	5cm/16sec	8	114	140公升	1:1	5月24日	DH-3	6月11日~6月12日
D-4	60	15	180~200	5cm/16sec	8	65	300公升	1:1	5月28日	DH-4	6月13日~6月14日
D-5	60	15	180~200	5cm/16sec	8	72	265公升	1:1	5月29日	DH-5	6月15日~6月16日
D-6	60	15	180~200	5cm/16sec	8	78	187公升	1:1	5月30日		
D-7	60	15	180~200	5cm/16sec	8	80	202公升	1:1	5月30日		
D-8	60	15	180~200	5cm/16sec	8	90	244公升	1:1	5月31日		
D-9	60	15	180~200	5cm/16sec	8	90	58公升	1:1	6月1日		
備註	1. 除B-1、B-2、B-3、B-7和B-8採中東水泥，B-4、B-5、B-6、B-9和B-10採大陸水泥外，其餘均採台灣水泥，每包水泥為50公斤重。 2. 樁號C-1~C-3之添加劑係採用路透樂透防水材料，而樁號C-4~C-6和D-1~D-9係採用1:2稀釋後之水玻璃。 3. 自動流量計之讀數維持在48~50公升/分鐘左右。 4. 完成日期之年份均為民國80年。										

份呈餅狀或塊狀斷裂、完整之改良土心樣
長度不足以進行單軸抗壓強度試驗者。

3. 膠結差

土質改良效果差，改良土心樣呈小塊

之破碎狀。

4. 未改良者

看不出有土質改良之跡象，與原土樣
幾乎無異。

5. 失樣 (Loss)

取樣過程中，因加水沖洗之故，造成改良土心樣之流失，而無任何改良土心樣可供研判者。

有關三次試拌之取樣情形詳圖五，評估結果則分別說明如下：

1. 第一次試拌

本次試拌工作係分兩組進行，一組採用台灣水泥，另一組採用進口水泥，試拌過程中均未參加任何添加劑，平均每支15公尺改良樁之水泥用量分別為69包及62包，而第一組4個鑽孔之平均取樣率均不及施工規範中取樣率須超過90%之規定，且改良效果不佳，多處仍為未改良之粘土；第二組5個鑽孔之平均取樣率除了BH-5孔達到規範之要求外，餘皆不符規定，改良效果亦以BH-5孔大部份屬膠結良好為最佳。

2. 第二次試拌

有鑑於第一次試拌之改良效果不彰，承商研判係因未添加添加劑所致，故於第二次試拌時分兩組進行，一組添加路透樂之透水材料，另一組則添加水玻璃。水泥均採用台灣水泥，平均每支15公尺改良樁之水泥用量分別為75包及38包，而2個鑽孔之平均取樣率亦未達施工規範之要求。

3. 第三次試拌

本次試拌工作係使用台灣水泥並添加水玻璃，平均每支15公尺改良樁之水泥用量達88包，超過承商所提試拌計劃書中之預定值60包甚多。5個鑽孔之平均取樣率除DH-4孔較低外，其餘皆符合規範之要求。按土質改良施工規範之規定，本次試拌之取樣結果頗接近規範之要求，惟其水泥用量大幅超過原先之預定值。

有關第一、二次試拌之鑽心取樣率偏低，初步研判可能之原因可歸納為兩個：

第一為土質改良效果不良：有關土質改良之效果較預期為差，改良部份吃漿量不均，部份為土壤與水泥之混合體、部份土壤被置換而完全由水泥固化物所替代，而部份則呈未經改良之情形，此外土壤與水泥間之膠結情形也不一，因此造成土質改良後之強度不均，忽軟忽硬而導致取樣技術上之困擾。

第二為鑽機操作技術不佳：由於改良後之土質強度不均勻，因此鑽心取樣工作更需高技術來加以克服，有關鑽機定平、鑽進速度、每次提取之長度及用水量大小等均是影響取樣率之重要因素，彼此間如何配合操作才能獲得較高之取樣率，則須要熟練之鑽探領班來負責。

對於第三次試拌之改良效果較佳，研判水泥用量之大幅增加應是最主要的原因，此外於鑽桿末端加裝攪拌翼，亦有加強水泥硬化劑與軟弱土壤間充分攪拌混合之效果，而水玻璃之添加則有早凝之作用，阻止水泥漿之不斷向外擴散而遭稀釋或粗顆粒沉降而使改良土體不均勻等等，因此本次之改良效果較前兩次有明顯之改善現象。

另第一次試拌中有施灌2支深度5m之單樁，經挖掘檢視其改良之樁徑及完整性情形，結果發現兩支單樁之樁徑均大於60cm，超過原本預期之單樁直徑，然整支單樁之形狀並非呈理想中之圓柱狀，而是部份頸縮，部份外凸之現象。

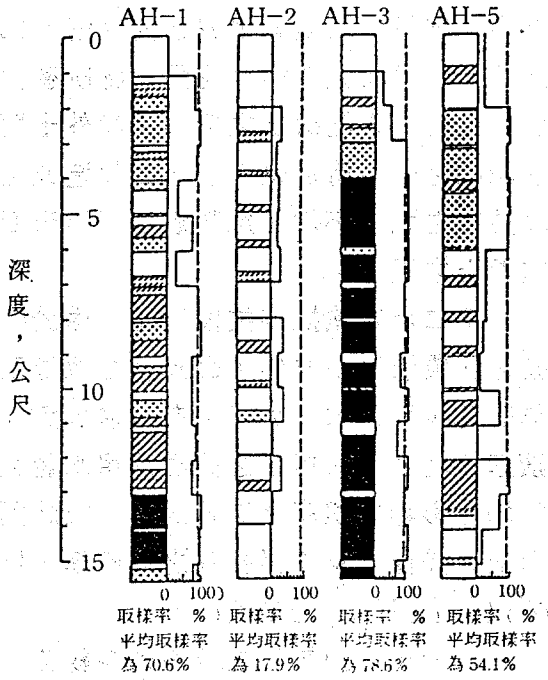
4.4 試驗結果評估

所有鑽心取得之改良土樣均送至實驗室進行單軸抗壓強度試驗，總共計46組。其中除2組之單軸抗壓強度為13.2kg/cm²及14.8kg/cm²，未達規範之規定（qu值須超過15kg/cm²以上）外，其餘皆符合要

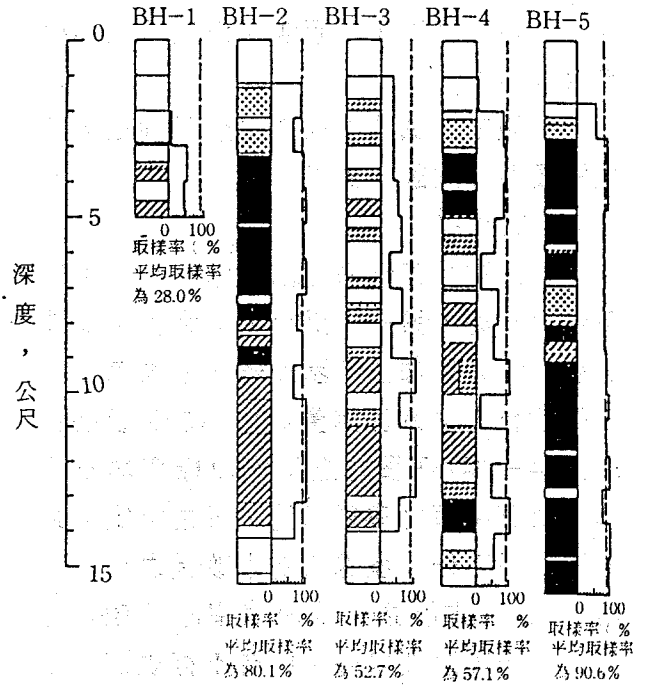
求。有關單軸抗壓強度試驗之結果詳圖六，經整理說明如下：

1. 單軸抗壓強度 q_u 值~試體數量

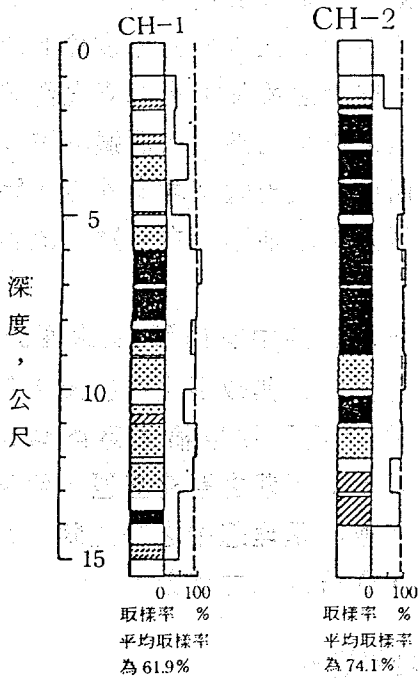
由圖六(a)可知，百分之九十以上



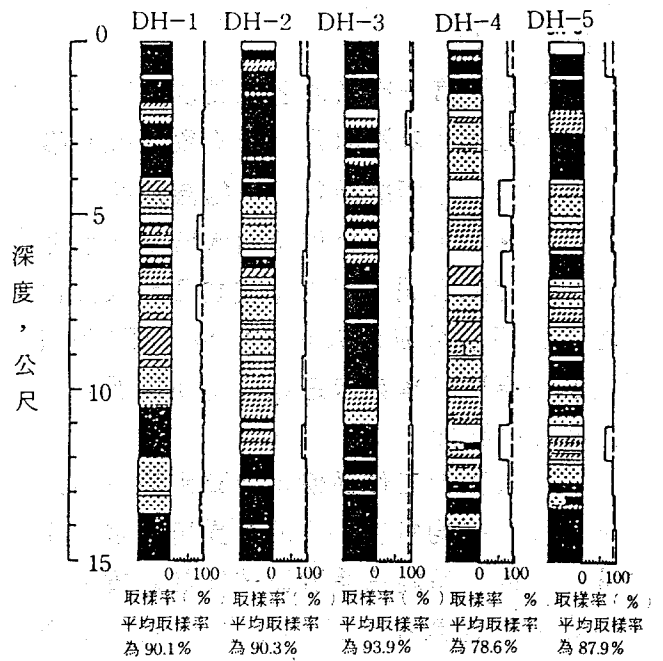
(a) 第一次第一組取樣結果



(b) 第一次第二組取樣結果



(c) 第二次取樣結果



(d) 第三次取樣結果

備註：虛線為規範中對取樣率之要求值90%

- 圖例：
 - 膠結良好
 - ▨ 膠結尚可
 - ▧ 膠結差
- ▩ 粘土(未改良部份)
 - 失樣(Loss)

圖五 現場試拌取樣結果

之試體，單軸抗壓強度 q_u 值超過 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 且大部份介於 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 至 $80\text{kg}/\text{cm}^2$ 間，符合規範之要求。

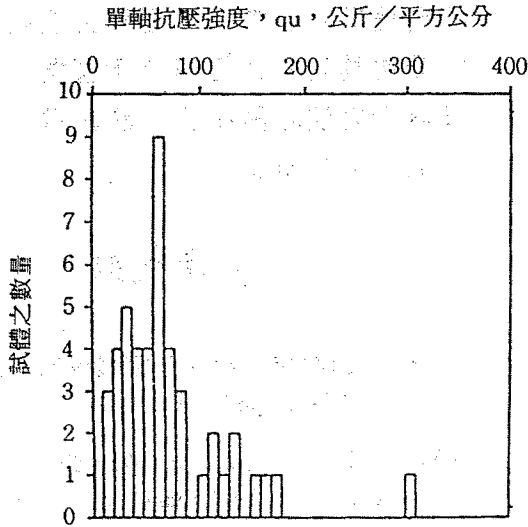
2. 單軸抗壓強度 q_u 值~深度

改良土樣之 q_u 值有隨深度而增加之趨勢，與土壤改良前不排水剪力強度 S_u 值隨深度而增加之情形大致相符，惟同一深度土質改良後之 q_u 值變化範圍甚大，主要原

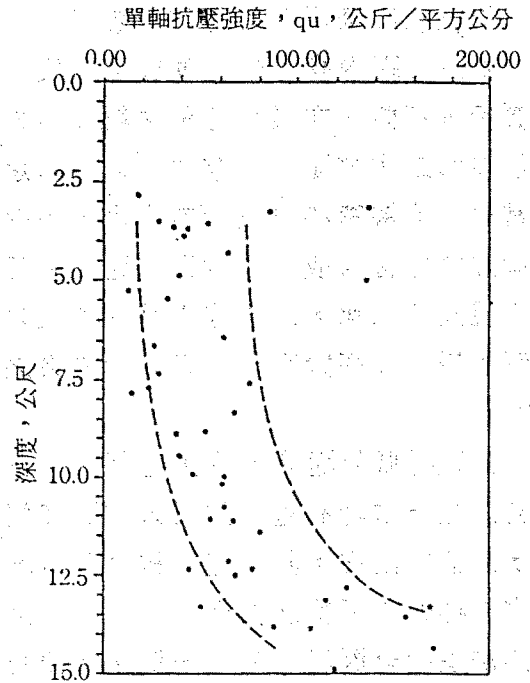
因研判係土質改良之品質很難控制所致。

3. 單軸抗壓強度 q_u 值~改良土含水量

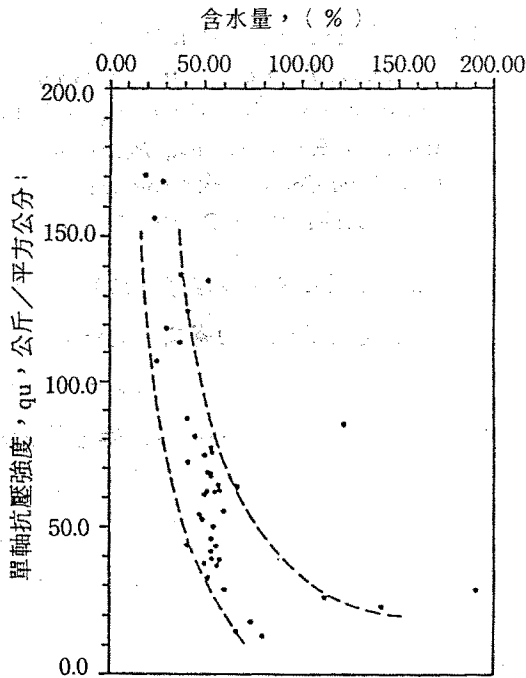
改良土樣之 q_u 值隨著含水量之增加有明顯之下降趨勢，而改良後試體之含水量大部份介於40%至60%之間，部份較原粘土



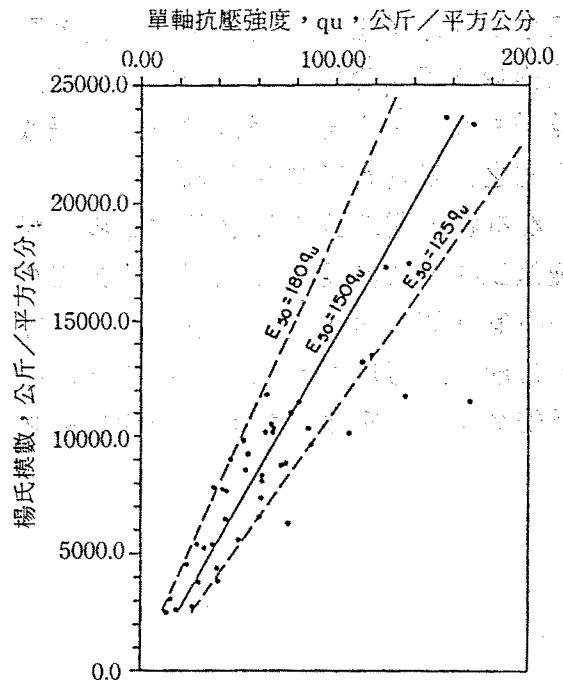
(a) q_u 值~試體數量關係圖



(b) q_u 值~深度關係圖



(c) q_u 值~含水量關係圖



(d) q_u 值~E50關係圖

圖六 改良土樣之試驗結果

先進行試灌工作以決定最佳之灌漿壓力、提升速度、迴轉速度、以及水泥和添加劑用量等，此外建議分為準備工作階段、前期試驗階段和施工階段等三個階段進行品質管制，茲列舉各階段應注意之事項如表四，以供工程師現場執行時之參考。

2. 由於國內高壓噴射灌漿之專業承商素質參差不齊，在價格考量之競標壓力下，往往造成劣幣驅逐良幣之惡象，而承商亦常以商業機密和專業知識為由，不欲公開添加劑之材料成份，故筆者建議地工界應正視此等問題，加強施工品質和成效之管制，期能提高對高壓噴射灌漿結果之信賴度。

3. 高壓噴射灌漿改良土之評估，目前最常用之方法計有電子錐貫入試驗和鑽心取樣評估等兩種。其中電子錐貫入試驗可能因局部改良區塊之強度過高，致中途停止無法進行全深度之品質檢測，而鑽心取樣也常因取樣之位置、試驗試樣之取決和改良效果之認定問題，造成業主或監造單位與承商間之爭議，筆者建議類似之改良工程應於施工規範中載明取樣評估之原則，並委由專業之大地工程師從整個工程改良目的之角度進行專業研判為宜。

4. 有關地質改良工法之種類繁多，而各種施工法均有其優點和限制，因此工法之選擇宜謹慎從事，而專業承商之評選亦不容忽視，另考慮地質改良之效果均埋在地下觀察不易，筆者建議宜採檢驗成果之

責任施工方式，即由承商負現場施工成敗之完全責任，業主則可委由大地專業人員進行現場督導和取樣評估工作，不合格者要求補充灌漿，以達規範之要求。

六、誌謝

本文撰寫過程承蒙新光保險股份有限公司提供寶貴資料、亞新工程顧問股份有限公司莫若楫總經理及潘國樑博士和黃南輝博士之鼓勵與指正，許如蕙小姐之鼎力幫忙，特此申謝。

參考文獻

- 王劍虹（民國73年），“談高壓噴射灌漿工法”，地工技術雜誌第8期，pp.88—93。
- KAUSHHINGER, J.L., and WELSH, J.P. (1989), “Jet Grouting for Urban Construction”, *Proceeding of the 1989 Seminar, Design, Construction, and Performance of Deep Excavations in Urban Area Seminar, M.I.T.*
- MIKI, G., and NAKANISHI, W., (1984), “Technical Progress of the Jet Grouting Method and Its Newest Type: Lecture notes”, *In-Situ Soil and Rock Reinforcement, Proceedings of the International Conference, Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, Paris, October 9—11, PP.195—200.*

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 7日接受

層之自然含水量 (W_n) 平均為 $46 \pm 12\%$ 為高，研判其原因可能係因將鑽心土樣置於水中養治期間吸水所致，浸水養治時鑽心土樣以保鮮膜包裹以防止水分散失。

4. 單軸抗壓強度 q_u 值 ~ E50

所謂 E50 係指單軸抗壓強度試驗所得之應力—應變曲線中，應力為尖峯強度之 50% 的座標點與原點連線之割線斜率。由

圖六 (d) 可知，E50 值有隨 q_u 值增加而呈線性增加之趨勢，惟其值分佈範圍較廣且分散。

五、結論與建議

1. 為確保土質改良之施工品質，基地在展開全面高壓噴射灌漿改良前，有必要

表四 高壓噴射灌漿工法之品質管制一覽表

(一) 準備工作階段

- (1) 建立水準點、導線點。
- (2) 施工機械之檢核 (含拌漿筒容量、空壓機馬力、自動流量計等配備之檢核)。
- (3) 儀器校正之檢核 (含壓力錶、流量計、旋轉速度 (r.p.m.) 及提昇速率等各項讀錶之檢核)。
- (4) 攪拌翼尺寸、高壓噴嘴之孔數及孔徑之確認。
- (5) 樁徑及強度之要求。
- (6) 灌漿孔數量、間距、深度及重疊部份之要求。

(二) 前期試驗階段

- (1) 試驗孔位置之選定。
- (2) 滲漏試驗。
- (3) 灌漿量之選擇。
- (4) 水灰比之選擇。
- (5) 提昇速率之選擇。
- (6) 旋轉速率之選擇。
- (7) 高壓噴射壓力之選擇。
- (8) 水玻璃等固化劑用量之選擇。
- (9) 多孔 PVC 管之埋設，以確認灌漿之影響距離。
- (10) 噴嘴於空氣中試噴，檢核定壓下之噴流量 (由試噴所量測之水平距離及落距可反推噴嘴處之速率)。
- (11) 灌漿時，確認多孔 PVC 管獲得注入之漿液。
- (12) 迴漿量之估算及其強度試驗 (可利用貫入儀測定之)。
- (13) 灌漿中隨時檢測各讀錶之變化情形。
- (14) 監測系統之配置及量測。
- (15) 檢核水泥及水玻璃之實際用量。
- (16) 開挖檢視不同水灰比之改良樁樁徑的大小。
- (17) 土質改良樁之鑽心取樣及試體製做。
- (18) 檢試改良土試體單軸抗壓強度。
- (19) 決定最佳水灰比、提昇速率、旋轉速度、水玻璃等固化劑用量、灌漿壓力及灌漿量等。

(三) 施工階段

- (1) 檢視機械之型式、數量並評估其施工之順序。
- (2) 檢視鑽孔時泵送之水壓力、速率及到達之深度。
- (3) 水灰比檢定。
- (4) 壓力與流量之紀錄。
- (5) 提昇速率之檢核。
- (6) 旋轉速率之檢核。
- (7) 水泥及水玻璃用量之檢核。
- (8) 檢視廢漿是否溢出及其處理對策。
- (9) 檢視機械廢油、廢漿及污水是否造成污染。
- (10) 檢視灌漿孔附近是否有隆起現象。
- (11) 取樣試驗。
- (12) 灌漿管內漿液之清洗。