

淺談高壓噴射灌漿工法

HIGH PRESSURE GROUTING

王 劍 虹

亞新工程顧問股份有限公司大地工程師

CHIEN-HONG WANG

Geotechnical Engineer

Moh and Associates, Inc.

Taipei

原載於地工技術雜誌第8期，

73年10月，第88-93頁

Reprinted from

Sino-Geotechnics, No. 8

Oct. 1984, pp. 88-93

ABSTRACT

The paper presents a brief description on the basic principle, characteristics, design and construction method of grouting with high pressure.

淺談高壓噴射灌漿工法

王劍虹*

一、前言

高壓噴射灌漿工法(High Pressure Jet Grouting)亦有稱為高壓噴流注入工法,噴射注入工法等,係屬於地盤改良灌漿工法中之一種,國內目前採用此工法者據筆者所知者有JSP, CCP, JOG等等,本工法發展之時間至今約有十數年,其開發之動機則係欲彌補一般灌漿工法所不易達成的目標,即常因土層之變異性及其中含有裂縫或空隙,致灌漿時藥劑易流向抵抗力較小之處。

本工法係以高壓泵將水及空氣灌入並藉一特製的小口徑噴嘴使產生高壓噴射流以切削地層,切削的同時並將硬化劑(主要為水泥)注入,使與被切削的地層混合或取代之,以達成預定範圍內地層之強化或有止水效果之目的。

根據柴琦光弘(1981)以上述技術於切削土壤時所需之噴射流吐出壓力大約在200至600 kg/cm²,於切削岩盤時則需約2,000至6,000 kg/cm²(如翡翠水庫採用之水刀、水鑽),於切削卵石時則需達20,000 kg/cm²以上,本文內容係限定於討論使用於土壤狀況。

高壓噴射灌漿工法以種類而言亦可分為三種:(1)柱狀噴流工法。(2)節間噴流工法。(3)翼狀噴流工法。本文主要討論為柱狀噴流工法,所謂“柱狀”,想像上是以鑽桿等速旋轉上升致同一平面上改良之範圍相等,惟實際上由於施工的控制、土層之變異性存在等原因,往往使其週邊成參差不齊之形狀,故在應用時需先具備此基本觀念。

二、工法原理

關於本工法原理目前尚無定論,惟對高壓

噴射流在土層中產生的破壞現象,基本上可概略說明如下:

(1)噴流之動壓

因噴流而產生之動水壓超過土層之應力,使土層內之土粒子強制分離而再重新組合。

(2)噴射流之脈動

噴射流流體間歇地衝擊地盤時,在表面上因積蓄流體負荷所產生的殘留應力,因而促進如圖一之破壞現象。

(3)渦凹現象

當土層內沒有空隙時,受噴射流衝擊,在衝擊面將發生壓力之變動或當土層內有裂隙時使得噴射流產生亂流現象如圖二所示。

(4)水劈效果

乃因噴射流的反力作用在噴軸垂直方向,而產生推開土層的力量,其發生之運動現象示於圖三。

以上現象均將使土粒子剝離,而促進土層之破壞且各種破壞力並不是單獨存在,而常以重複或交錯方式出現。

三、工法之特性

與其他灌漿工法比較,本工法之特性如下:

(1)噴嘴與噴射流

噴嘴的構造斷面如圖四所示仍為使本工法能發揮其特殊效力的主要部份。根據Shavlovsky(1972)提出在高壓($P=200\text{kg/cm}^2$ 以上)領域,噴嘴的噴出口徑、出口徑長及其內面的傾角等與噴流能射達之距離之關係如圖五及圖六所示噴嘴的材質應能承受此高壓力而不變形。此外在空氣中噴射噴流時,以噴嘴噴流中心軸而言,可分為三區域(圖七),即噴嘴出口能量能保持原來狀況之初期區

* 亞斯工程顧問公司大地工程師

域，噴流充分發揮之主要區域及噴流體成不連續狀態即不能發揮原來噴射效果的末期區域。一般而言，土壤切削之有效範圍，可達至主要區域，雖然亦有達到末期區域者，惟效果不高。

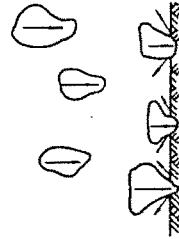
(2)噴射流壓力之衰減

在空氣中噴射噴流，其噴流中心軸上的壓力經過一段距離即達到末期區域，壓力衰減，在水中噴射時由於水分子之阻力，在更短距離內便已達到末期區域，若在水中併用空氣噴射噴流時，則可增加主要區域的距離，惟仍較空氣中為低。根據柴琦光弘(1981)的資料，於使用2mm口徑之噴嘴及噴出口壓力達200kg/cm²，不同介質(空氣或水中)中，噴流中心軸上的壓力與距離的關係如圖八所示。又根據柴琦光弘(1983)建議，於水中併用空氣時，空氣的輸送速度，以大於一半音速始能有較佳的效果。

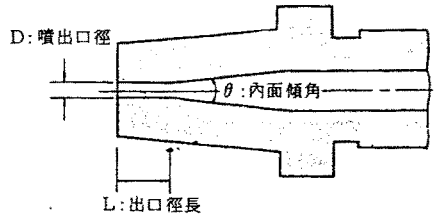
(3)硬化劑的噴射方向

於黏土層中噴流噴射的結果將使被切削後之塊狀土壤不易被沖洗至地面，故噴射硬化劑時係由水平方向噴射以使土塊可被其取代或混合。至於於砂土層中時，則不受此限制，惟由於土層中常有變異存在，故一般之噴嘴其硬化劑之噴射方向常採用水平方向。

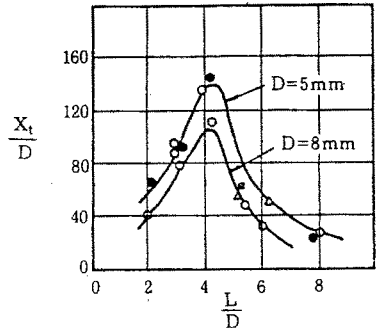
表一係列出日本現有之高壓噴射工法及所採用之機械設備等供讀者參考。



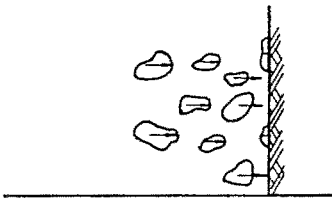
圖三 水劈效果



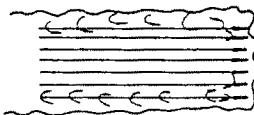
圖四 噴嘴斷面



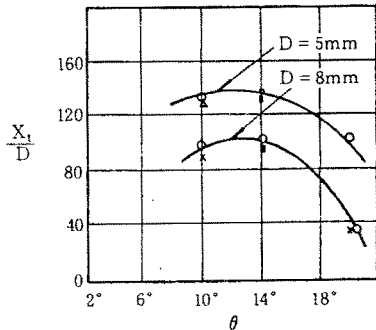
圖五 噴流距離與出口徑長之關係(取自 Shavlovsky)



圖一 振動現象



圖二 渦凹現象



圖六 噴流距離與噴嘴內面傾角之關係(取自 Shavlovsky)

四、工法設計

本工法在國內近年之應用甚多，但設計仍無一定途徑可循，建議設計者應考慮下列諸項：

(1) 土壤調查

當噴流噴射壓力為一定時，則因土層的種類不同所能達成改良土壤的直徑與強度亦異，故本工法受土壤種類的影響最大。設計前必須要有詳盡的土壤調查資料，建議土壤調查的項目及重要程度如表二所示，其中有關土壤之描述對於含礫石、腐木等的多寡及有機物的含量應予特別注意。

(2) 設計採用數值

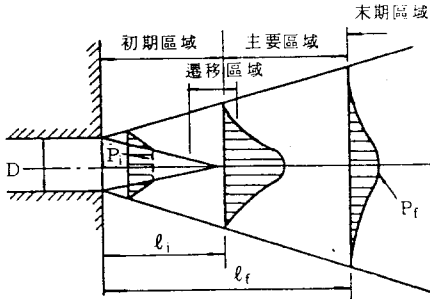
由於目前尚缺乏理論之推演，故現有一般設計時均參考現場試驗結果或以往經驗數值。表三係列出柴琦光弘(1981)所提供的設計參考值。由於影響改良效果的原因甚多，故實際採用時仍應進行現場試驗予以檢核。

(3) 設計改良範圍

原則上仍視其目的為止水或強化地盤或防止變形而定與一般灌漿工法大致相同，讀者有興趣可參考林耀煌(民國72年)“藥液灌漿施工法設計之探討”一文，於此不再贅述。

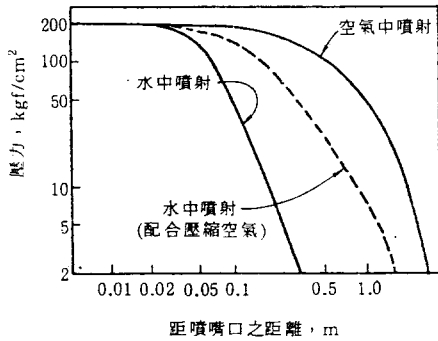
(4) 灌漿用量計算

灌漿使用量與土層N值及本工法產生之有效徑等有密切之關係，柴琦光弘(1983)建議，可大概以下列經驗式估算之。



D: 噴嘴口徑 P_i: 初期區壓壓力
P_f: 末期區域壓力

圖七 噴流噴射情形示意圖



圖八 不同介質中噴流射距離與壓力關係 (取自柴琦光弘, 1981)

表一 日本高壓噴射工法及其設備一覽表(取自千田昌平等, 1979)

| 工法 | CCP工法 | JMM工法 | JSP工法 | JGP工法 | Column Jet Grout工法 |
|-------|--|---|--|---|---|
| 適用地盤 | N > 10 黏性土 N < 15 砂質土 | N < 5 黏性土 N < 10 砂質土 | N < 20 黏性土 N < 30 砂質土 緊密砂 | N < 5 黏性土 N < 40 砂質土 緊密砂 | N < 10 黏性土 N < 50 砂質土 |
| 注入劑 | 懸濁型藥液 | 水泥系硬化劑 | 水泥水玻璃 | 水泥水玻璃 | 水泥水玻璃 |
| 常用壓力 | 200 kg/cm ² | 200 kg/cm ² | 200 kg/cm ² | 200 kg/cm ² | 400 kg/cm ² |
| 吐出量 | 25 l/min | 75~80 l/min | 60 l/min | 60 l/min | 70 l/min |
| 噴嘴口徑 | 1.2mm | 3.2mm | 3.0mm | 3.2mm | 1.8~2.3mm |
| 鑽桿型式 | φ40.5mm 單孔管 | φ40.5mm 單孔管 | φ40.5mm 雙重管 | φ73.1mm 雙重管 | φ90.0mm 三重管 |
| 空氣 | 不使用 | 不使用 | 7kg/cm ² 約 4m ³ /min | 7kg/cm ² 1~2m ³ /min | 7kg/cm ² 3~4m ³ /min |
| 鑽桿回轉數 | 20 rpm | 20 rpm | 5~10 rpm | 6 rpm | 5 rpm |
| 造成徑 | 40~50cm | 沉泥·黏土 80cm 砂 50~60cm | 80~120cm | 80~150cm | 1.5~3.0m |
| 改良強度 | 黏性土 25~30kg/cm ² 砂質土 30~40kg/cm ² | 沉泥·黏土 10kg/cm ² 砂 30~70kg/cm ² | 黏性土 20kg/cm ² 砂質土 40~100kg/cm ² | 40~90kg/cm ² | 黏性土 10~50kg/cm ² 砂質土 50~150kg/cm ² |

表二 高壓噴射施工法所需要之土質調查項目及需要程度

| 試驗項目 | 土層種類 | |
|----------|------|-----|
| | 砂性土 | 黏性土 |
| 標準貫入試驗 | 1 | 1 |
| 現場透水試驗 | 2 | 3 |
| 單位重 | 1 | 1 |
| 土粒比重 | 3 | 3 |
| 孔隙比 | 3 | 3 |
| 飽和度 | 3 | 3 |
| 顆粒分佈 | 2 | 3 |
| 自然含水量 | 1 | 1 |
| 液性限度 | — | 2 |
| 塑性限度 | — | 2 |
| 無圍壓縮強度 | — | 1 |
| 靈敏度 | — | 3 |
| 凝聚力 | — | 3 |
| 摩擦角 | 3 | — |
| 最大預壓密壓力 | — | 3 |
| 壓縮指數 | — | 3 |
| 壓密係數 | — | 3 |
| 透水係數 | 2 | 3 |
| 地下水位分佈狀況 | 1 | 3 |

註：需要程度之優先次序依次為1,2,3

表三 (取自柴崎光弘, 1981)

| | 砂性土 | 黏性土 |
|--------|---------------------------------------|----------------------------|
| 單軸抗壓強度 | $q_u = 50 \text{ kg/cm}^2$ | $q_u = 10 \text{ kg/cm}^2$ |
| 凝聚力 | $c' = 5 \text{ kg/cm}^2$ | $c = 3 \text{ kg/cm}^2$ |
| 摩擦角 | 同原土 | — |
| 單位重 | 同原土 | 同原土 |
| 彈性模數 | 5000 kg/cm^2 | 1000 kg/cm^2 |
| 柏松比 | 0.3 | 0.3 |
| 透水係數 | $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/sec}$ | 10^{-7} cm/sec |

$$Q = \frac{H}{L_s} \times q_c \times (1 + \beta)$$

式中

Q: 硬化劑使用量

L_s : 鑽桿上升速度, (隨各種工法及土質而異)

H: 灌漿長度

q_c : 灌漿泵浦的吐量 (隨各種工法及土質而異)

β : 損失係數 (對於柱狀工法可採 0.03)

(5) 特殊情況考慮

遇有下列情況而欲採用高壓噴射工法時應謹慎檢討之。

- ① 含有瓦礫之回填土層。
- ② 有機物之含量甚高時。
- ③ 作為永久性之地盤改良時。
- ④ 地下伏流速度甚快時。
- ⑤ 欲使用於砂礫層時。
- ⑥ 作為永久支撐樁時。
- ⑦ 已發生湧水現象時之止水時。
- ⑧ 單獨作為擋土牆時。
- ⑨ 土質極為堅硬時。

五、施 工

本工法之施工順序大致如圖九所示。目前之應用在國內由於未能充分建立本工法與土壤性質關係, 工程常交由承包商以責任施工方式完成, 原則上亦無可厚非, 但仍應注意如下之問題, 以免產生負面之影響:

(1) 地盤之隆起

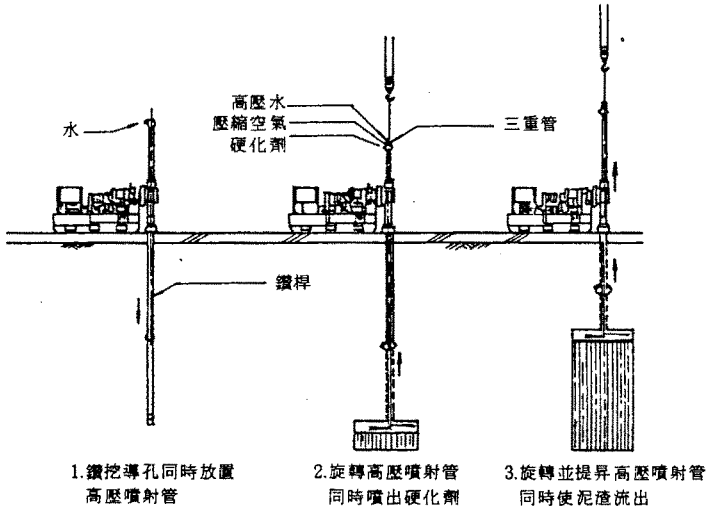
本工法之施工, 係於垂直方向鑽孔及排出泥渣, 硬化劑則橫向噴射以混合及攪拌, 基本上由於硬化劑之灌入土層, 佔據土層內之孔隙, 同時壓力之消散並非立即達成平衡, 故常易引起地表面之上升, 此現象於淺層覆蓋土時更形嚴重, 應特別注意。其防止之要點, 可於施工時隨時記錄隆起值, 若發現地表有隆起現象, 則立即設法加設解壓孔或挖槽溝, 以減少隆起影響。又鄰近有結構物特別是其基礎土壤屬疏鬆之砂層時, 施工宜考慮安全距離, 以免上部土壤崩坍引致結構物基礎破壞。

(2) 地下水之影響

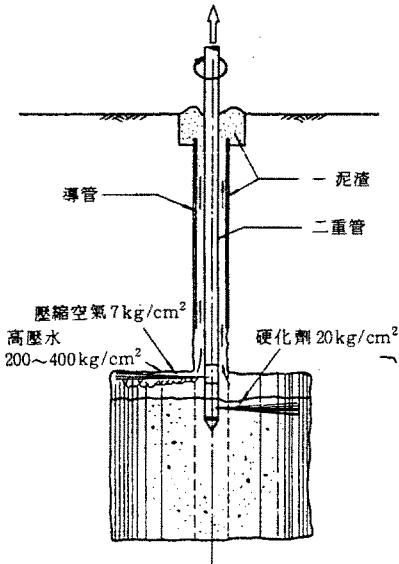
本工法採用之硬化劑, 大致上均採用水泥及泥水混合之灌漿液, 有時為達成速凝之目的亦使用其他化學藥劑為灌漿液, 惟此時使用之藥液一如其他工法, 應謹慎選擇, 以免污染地下水源或受地下水流動產生之稀釋作用致灌漿之效力被減弱。

(3) 鑽桿之控制

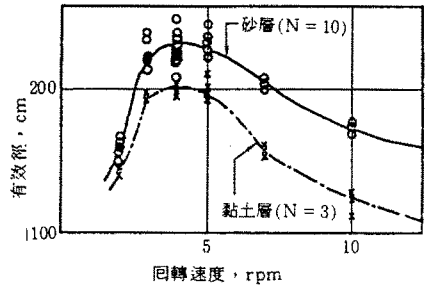
根據柴崎光弘(1981), 本工法在噴射硬化劑時鑽桿迴轉的速率與形成之有效徑之關係如圖十一所示在約 4 rpm 迴轉數時可發揮最大效果。至於鑽桿的上升速度若太快, 則



圖九 高壓噴射工法施工順序圖



圖十 高壓噴射基本圖



圖十一 鑽桿回轉速度與有效徑的關係
(取自柴琦光弘, 1981)

大小，可初步推測灌漿是否達成預定的效果，流量大往往表示有裂隙，流量小則應檢查鑽桿內有無發生塞住現象或再詳細檢討地層之變化及已改善之情形。至於拌合時應注意水泥、泥水及藥液是否有充份攪拌，以免灌入土層中造成某部份集中，而產生局部差異現象，此亦皆影響灌漿之效果。

六、後 語

噴射高壓灌漿工法只是藥液灌漿地盤改良工法中的一種，並非萬靈丹（即任何地盤改良例子均可使用），也並非一無是處——雖然也往

往往使得被切削的土壤與硬化劑不能充分混合或產生夾層情形，造成灌漿範圍內局部差異存在，此皆將影響灌漿之效果。

(4) 流量及拌合之控制

流量之控制，可採用流量計，由流量之

往聽說它造成地盤隆起或效果不彰，惟知者善用之。文內所提供之數值均係採自參考文獻，僅供參考，讀者應用時應予謹慎，必要時應進行現場試驗以檢核之。筆者才疏學淺，將本工法之大概就所知部份予以披露，疏漏之處，尚祈專家不吝指正。本文之撰寫承本公司歐晉德博士之鼓勵及同事孫一鴻君協助整理資料，得以完成在此特別感謝。

參 考 文 獻

- 林耀煌(1983)「藥液灌漿施工法設計之探討(上)」
現代營建37期，1月。
- 林耀煌(1983)「藥液灌漿施工方法之探討(下)」現
代營建41期，5月。
- 千田昌平(1979)「深層軟弱地盤改良工法の現況」
基礎工，Vol.7, No.3, p.16. 綜合土木研究所
，東京，日本。
- 柴崎光弘(1981)「高壓噴射注入工法」，土と基礎
，Vol.29 No.5。
- 柴崎光弘等(1983)ジェットグラウト工法，鹿島出版
會，4月。
- 祇園清定(1982)「CCP工法在穩定基礎地盤上之應
用(一)」，現代營建27期，3月。
- 祇園清定(1982)「CCP工法在穩定基礎地盤上之應
用(二)」，現代營建31期，7月。
- ジェットグラウト研究會(1982)JET GROUT 技術
資料，9月。
- M. Shibasaki and S. Ohta (1982) "A Unique under-
pinning of Soil Solidification Utilizing Super-
High Pressure Liquid Jet" *Proceedings of the
Conference on Grouting in Geotechnical Engi-
neering*. Orleans, Louisiana, U.S.A. Feb.