

第六章 SJM 噴射灌漿工法介紹

噴射灌漿 (Jet grouting) 乃利用高壓硬化材料 (如水泥漿)，配合低壓空氣 (或高壓水) 之噴射，切削破壞地盤之組織，並與原土壤混合或取代之，同時藉由灌漿桿的旋轉與提升，在土層中形成堅硬不透水的改良土柱體。國內常用的噴射灌漿工法包含JSP (Jumbo Special Pile)、CCP (Chemical Churning Pile)、JSG (Jumbo-jet Special Grout)、及CJG (Column Jet Grout) 等方法。上述傳統的地盤改良工法形成之改良土樁徑較小，若遇大規模之地盤改良，所需要的施工時間較長。為提昇地盤改良施工效率，日本發展出Superjet-Midi地盤改良工法 (簡稱SJM工法)。SJM工法之特色為改良土直徑大 (約 2.4 ~ 3.5 m)、施工效率高，可縮短工期、降低成本。民國 92 年 6 月，台北捷運板橋線CD266 標隧道復舊工程，首度在國內使用SJM工法進行地盤改良作業。為確保SJM工法施工品質，施工單位進行現地鑽心取樣、單軸壓縮試驗、及現地透水試驗以檢核地盤改良成效。本章將介紹SJM工法之施工，如何以測音作業確認改良土之樁徑，並對SJM改良土之各項工程性質 (如取樣率、RQD、單軸壓縮強度 q_u 、彈性模數 E_{50} 、及滲透係數 k) 進行探討，並與國內常用之CCP、JSG及CJG噴射灌漿工法相互比較，做為工程界設計時之參考。

6.1 SJM 工法之施工

SJM工法施作原理與傳統之JSG噴射灌漿工法頗為相似，不同的是，SJM工法使用直徑約 14 ~ 18 cm之外套管，以水洗方式先進行削孔後，再將灌漿二重管置入地盤中之預定灌漿深度 (如圖 6-1 所示)。拔除外套管後，自灌漿管末端兩側噴嘴，以高壓 (300 kgf/cm^2) 噴射出大量漿液，灌漿管一面旋轉一面向上提昇，噴射漿液一邊切削周圍土壤，一邊與土壤攪拌混合，快速形成大直徑 (2.4 ~ 3.5 m) 之改良土樁體。

民國 92 年 6 月，板橋線CD266 標隧道工程首度在國內使用SJM工法進行地

盤改良作業，以下藉由該標工程之施工照片介紹SJM工法之施工。圖 6-2 顯示SJM 施工設備配置，施工設備佔地達 180 m²。圖中使用 50 噸之輪型油壓式吊車，協助吊裝外套管及二重灌漿管。SJM鑽孔灌漿機 (CLH220S型) 長 2.50 m、寬 1.676 m、高 2.045 m。來自硬化材儲存槽的固化主材與來自儲水槽的水，在攪拌機內拌合成漿液。超高壓幫浦以 300 kgf/cm²的壓力，每分鐘 400 公升的大流量將漿液噴入地盤。空氣壓縮機將受壓 7.0 ~ 10.5 kgf/cm²的空氣送入灌漿二重管。

如圖 6-1 所示，典型的 SJM 施工順序如下：

- (1) 鑽孔下套管，以水洗法將直徑 18 cm 的外套管鑽至預定深度。
- (2) 將直徑 9 cm 的灌漿二重管下降至預定灌漿深度。
- (3) 以吊車將外套管逐段拔除。由於外套管直徑大於二重管直徑，拔除外套管後，在二重管外側形成一環形之迴漿溢流通路。
- (4) 定速旋轉並提升灌漿二重管 (如圖 6-3 所示)，噴射漿液在地下形成改良土樁體，迴漿池內之迴漿利用強力抽水幫浦抽送至迴泥槽 (見圖 6-2)。二重管末端的高壓噴嘴如圖 6-4 所示。
- (5) 停止噴射漿液，拔除二重管並回填鑽孔。
- (6) 清洗二重管及移動機具，結束地盤改良工作。

表 6-1 顯示單管 (CCP)、雙管 (JSG及SJM)、及三重管 (CJG) 噴射灌漿工法施工條件之比較。與常用之JSG工法相比較，SJM工法使用直徑較粗的二重灌漿管 (90.0 mm > 60.5 mm)、較高之噴漿壓力 (300kgf/cm² > 200 kgf/cm²)、較大的噴嘴直徑 (5.0 mm > 2.0 mm)、及較大的漿液吐出量 (400 l/min > 60 l/min)，因此在地下形成大直徑 (2.4 ~ 3.5 m) 的改良土樁體。

6.2 SJM 工法之設計原則

日本 Superjet 研究會在 2002 年 7 月出版了一本“Superjet 工法技術資料”，詳細介紹 Surperjet-Midi 及 Superjet 的設計與施工考慮。表 6-2 顯示 SJM 工法可以施作於砂質土，黏性土及砂礫，深度在 30 m 以內形成之改良土樁徑達 2.8 m ~ 3.5 m，即使施作深度超出 30 m，也可以形成樁徑 2.4 m ~ 3.2 m 的改良土。表 6-2 對深度超過 30 m 之 SJM 工法有效改良深度並未加以界定，Superjet 研究會對 SJM 工法在砂質土內可有效改良之標準貫入試驗最大 N 值也未界定，可知此新工法尚有不少可進一步研究之空間。SJM 工法使用的四種漿液配比如表 6-3 所示，其中 SJ-1 漿液適用於砂質土，SJ-2 及 SJ-3 漿液適用於黏性土，SJ-4 漿液適用於腐植土，表中之水灰比即水重與 SJ 主材重量之比值。

板橋線 CD266 標隧道工程 SJM 地盤改良區域之地層為粉土質黏土，地盤改良目的為止水，因此 SJM 超高壓噴射灌漿施工使用材料包含：(1) 水：使用自來水；(2) 固化材：採用 SJ-2 號主材。很遺憾，SJ 主材成分為專業承包商之 know how，其成分有待進一步研究。據瞭解 SJ-2 號主材屬特殊水泥系材質，其特性為泌水 (Bleeding) 量非常少，故可確保改良強度，且不會污染地下水，無公害問題。板橋線隧道工程之 SJM 工法地盤改良配置如圖 6-5 所示，總共計畫施灌 68 支改良土樁，被改良黏性土之 N 值介於 9 至 11，改良深度為 8.9 ~ 35.67 m，依表 6-2 預估改良土之有效直徑為 2.8 m，實際改良土直徑將以現地測音作業驗證。

6.2.1 SJM 工法的優點與缺點

SJM 工法除具有一般噴射灌漿工法之優點 (Kauschinger and Welsh, 1989) 外，相較於表 6-1 所列之其他噴射灌漿工法，SJM 工法具有下列各項優點：

1. 造成超大直徑之固結樁體：可形成直徑達 3.5 m 之巨大改良土樁體。
2. 施工效率高：SJM 灌漿噴嘴射出大流量噴射流，高壓漿液同時進行切削與填充地盤，因樁體巨大可減少改良土樁體施工數量，能縮短工期，增

加效率。

3. 降低地表隆起問題：拔除外套管後，在二重管外側形成環形漿液溢流通路，於高壓噴射漿液時，此通路有助於受壓迴漿之排出，因此宣洩地下改良區之壓力，降低地盤隆起問題。

SJM 工法地盤改良的各項缺點，分別說明如下：

1. SJM 施工需要較大的工作腹地 (180 m^2)，來安置地盤改良所需設備（見圖 6-2）。
2. 由於採用吊車作業，SJM 工法施工垂直淨空需求較大（見圖 6-3）。
3. 若硬化主材中含有化學藥劑，噴射漿液可能污染地下水。
4. SJM 工法是以高壓噴射漿液，在地下以大量液體漿液置換土壤，由於置換量大且置換速度快，在漿液初凝前可能造成地盤沈陷，此問題有待進一步研究。



6.3 改良土樁徑之確認

本論文介紹以「測音作業」確認 SJM 工法在地下形成改良土樁體之有效半徑。灌漿工作都是在地下施作，無法以肉眼直接看到改良土在地下的形狀與尺寸，如何確認改良成效及改良土直徑是一個另人困擾的問題。

為確保 SJM 施工改良土樁徑之要求，在本次台北捷運之地盤改良工程中，首次將測音技術引入國內，施工人員於灌漿的同時進行噴射音確認作業。本項工程 SJM 施工預期之改良土樁直徑為 2.8 m。如圖 6-6 所示，測音作業於灌漿前設置測音管（直徑 2 英吋之鋼管）於灌漿孔之徑向範圍（ $R=1.2 \text{ m}$ 、 1.4 m 、 1.6 m 及 1.75 m ）。如圖 6-7 所示，於高壓噴射灌漿時，利用置入測音管內的麥克風在地下收音，經喇叭擴大機研判是否出現噴射到達音，以驗證是否達成預定之改良樁徑。測音設備是由麥克風、喇叭擴大機、及錄音機所組成。這個方法雖然很質樸、很簡單，但是很有效。由表 6-4 的測音結果可知，第 68 號改良樁之改良半

徑符合設計半徑 $R = 1.4 \text{ m}$ 之要求。

6.4 SJM 工法施工案例

以下依據板橋線 CD266 標隧道工程之 SJM 工法地盤改良為例，介紹改良土的取樣率、RQD、單軸壓縮強度、彈性模數及滲透係數等各項 SJM 改良土工程性質。

6.4.1 土層概況

大陸工程 (2003) 說明，該標工程位於臺北盆地之西南方，地質構造分區屬一典型湖積地質，根據地質鑽探孔 SB-01 及 SB-02 之物理及力學試驗，此區域地層上部為沖積層，亦即為松山層，其厚度約 50 m，SJM 地盤改良皆於松山層內進行。松山層各次層之性質分述如下：(1) 松六層為粉土質黏土或黏土質粉土 (CL)，深度約在地表下至 6 m 處，SPT-N 值約在 2 ~ 7。地下水位在地表下約 5.3 m 處。(2) 松五層為粉土質中細砂 (SM)，深度約在地表下 6 m 至 19 m，SPT-N 值約在 12 ~ 18。(3) 松四層為粉土質黏土 (CL)，深度約在地表下 19 m 至 28 m，SPT-N 值約為 8 ~ 11。(4) 松三層為粉質細砂 (SM)，深度約在地表下 28 m 至 35 m，SPT-N 約為 12 ~ 26。SJM 地盤改良之深度介於 8.9 m 至 35.67 m 之間，主要改良松三到松五層之土壤。

6.4.2 工程概況

台北捷運系統板橋線 CD266 標工程潛盾隧道下行線與府中站接頭處，於 92 年 2 月 1 日發生漏水事故，導致路面及周邊建物下陷、隧道內環片受損。為避免災情擴大，施工單位即時將隧道封閉，並以砂漿、水泥漿及 SL 漿回填受擾動地盤以穩定隧道結構。

由於工程範圍內之地盤已受擾動，且於進行隧道內填充材料開挖及環片更換

時須防止土砂流入隧道，捷運局與專業顧問及承包廠商研討評估後，決定自地面施作 SJM 地盤改良。如圖 6-5 所示，該計畫之工程內容包含於隧道兩側及上方施作直徑 2.8 m 之 SJM 超高壓噴射改良土樁 68 支。主要的 SJM 施工參數如表 6-5 所示。

6.4.3 施工檢驗標準

日本 Superjet 研究會(2002)建議，以 SJ-2 號漿液改良砂質土要求單軸壓縮強度 $q_u \geq 3 \text{ MN/m}^2$ ，彈性模數 $E_{50} \geq 300 \text{ MN/m}^2$ ；以 SJ-2 漿液改良黏性土要求單壓強度 $q_u \geq 1 \text{ MN/m}^2$ ，彈性模數 $E_{50} \geq 100 \text{ MN/m}^2$ 。

施工單位（大陸工程公司，2003）對 SJM 改良土設定的施工檢驗目標值為：
（1）試體取樣率（core recovery）80% 以上；（2）4 週單軸抗壓強度平均值：砂土層要求 $q_u = 30 \text{ kgf/cm}^2$ （ 3 MN/m^2 ）以上；黏性土： $q_u = 10 \text{ kgf/cm}^2$ （ 1 MN/m^2 ）以上；及（3）變水頭滲透試驗求出之改良土滲透水係數 $k = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 以下。
本施工案例所設定之改良土強度檢驗標準與日本 Superjet 研究會的建議值一致。

SJM 灌漿 30 至 59 天後承包商進行取樣，取樣之位置由監造工程師依實際灌漿過程選定，分別為 7、8、17 號，48、49、58 號及 54、62、63 號改良樁之重疊處（如圖 6-5 所示），共計取出 11 支直徑為 51 mm 的圓柱形改良土試體。

6.4.4 取樣率

此標工程取出之典型 SJM 改良土試體如圖 6-8 所示，取樣率介於 90% 至 99% 之間，改良土壤之取樣率明顯高於施工單位設定之檢驗標準 80%。與南港線 CN254 標 JSP 改良土壤之取樣率 53%~ 90% 相比較，本標 SJM 改良土之取樣率頗高。SJM 改良土之岩心品質指標 RQD 介於 79%~ 97% 間，其平均值達 88%，顯示改良土品質良好。

6.4.5 單軸壓縮強度

由工地鑽取之SJM改良土圓柱試體，被送往中華顧問工程司的台北試驗室進行無圍壓縮強度試驗。由強度試驗可獲得改良土之軸向應力-應變關係曲線，曲線的尖峰應力即為單軸抗壓強度 q_u ；曲線 $q_u/2$ 處的切線斜率即為試體之切線彈性模數 E_{t50} 。有關參數的詳細說明，請參考Fang et al. (1994a及1994b)。

施工單位要求砂質土改良土4週單壓強度至少3.0 MPa，黏性土改良土4週單壓強度至少1.0 MPa。圖6-9顯示砂質土SJM改良土的單軸抗壓強度介於3.65至22.6 MPa之間，黏性土改良土之 q_u 介於1.88至10.0MPa之間，試驗結果皆符合設計之要求，圖6-9顯示改良土單壓強度頗為分散，其中某一砂土層SJM改良土單壓強度高達22.6 MPa，已超過混凝土強度20.7 MPa (3,000 psi)。圖中資料顯示砂土層形成之改良土強度大多高於黏土層改良土強度。為了方便比較，圖6-9亦顯示台北捷運CN254標JSG改良土之單壓強度，圖中JSG改良土 q_u 值與SJM改良土 q_u 值差異並不明顯。表6-6顯示國內外共13個案例的噴射灌漿改良土單壓強度 q_u ，表中SJM改良土之單壓強度分佈範圍很廣，與其他噴射灌漿改良土單壓強度並無太大不同。



6.4.6 彈性模數

圖6-10顯示本案例SJM改良土的彈性模數介於350至1,990 MN/m²之間，皆符合日本Superjet研究會要求的砂質土改良土 $E_{50} \geq 300$ MN/m²，黏性土改良土 $E_{50} \geq 100$ MN/m²。表6-7顯示國內外10個案例之噴射灌漿改良土彈性模數 E_{t50} 範圍，表中SJM改良土之彈性模數偏向 E_{t50} 範圍之低值。圖6-10顯示SJM改良土的強度 q_u 與勁度 E_{t50} 之關係，大致可以日本JSG學會建議之關係 $E_{50} = 100q_u \sim 300q_u$ 加以描述。

6.4.7 軸向破壞應變

進行單軸壓縮強度試驗當圓柱試體達到尖峰強度時，改良土試體之軸向應變即為試體之軸向破壞應變 $\varepsilon_{a,f}$ (axial failure strain)，由圖 6-11 及圖 6-12 的實驗結果可以知道，試體之軸向破壞應變與試體乾密度及深度之關係並不明顯。以下將試驗結果所得之破壞應變歸納如下：

軸向破壞應變

於SM土層 $\varepsilon_{a,f}=0.7\% \sim 1.5\%$

於CL土層 $\varepsilon_{a,f}=0.9\% \sim 1.3\%$

表 6-8 為SJM改良土與國內 5 個案例之噴射灌漿改良土軸向破壞應變 $\varepsilon_{a,f}$ 之比較，由表顯示SJM改良土之軸向破壞應變偏大。

6.4.8 滲透係數

本案例採用現場變水頭透水試驗檢測改良土之滲透係數，詳細試驗過程請參閱美國海軍部設計手冊(NAVFAC DM - 7.1, 1982)。圖 6-13 為SJM及JSG改良土之滲透係數比較圖，承包商在現場鑽 3 孔，求出SJM改良土之滲透係數介於 3.2 至 6.6×10^{-7} cm/sec之間，皆低於設計值 10^{-5} cm/sec，因此研判本案例SJM改良土止水效果良好。

6.5 試驗結果摘要

本研究探討 SJM 高壓噴射灌漿改良土的各项工程性質。施工人員在工地鑽取之 SJM 改良土圓柱試體，送往試驗室進行試驗，依據試驗結果獲得以下各項結論。

1. SJM 改良土取樣率介於 90%至 99%之間，改良土之取樣率明顯高於施工單位設定之檢驗標準 80%。SJM 改良土之岩心品質指標 RQD 介於 79%至 97%間，其平均值達 88%，顯示改良土品質良好。
2. 砂質土SJM改良土的單軸抗壓強度介於 3.65 至 22.6 MPa之間，黏性

土改良土之 q_u 介於 1.88 至 10.0MPa之間，試驗結果皆符合設計之要求。

3. SJM改良土的彈性模數介於 350 至 1,990 MN/m²之間，皆符合日本 Superjet研究會要求的砂質土改良土 $E_{50} \geq 300 \text{ MN/m}^2$ ，黏性土改良土 $E_{50} \geq 100 \text{ MN/m}^2$ 。
4. 改良土的強度 q_u 與勁度 E_{t50} 之關係，大致可以日本JSG學會（1986）建議之 $E_{50} = 100q_u \sim 300q_u$ 加以描述。
5. SJM改良土之滲透係數介於 3.2 至 $6.6 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 之間，明顯低於設計值 10^{-5} cm/sec ，可知改良土止水效果良好。

