

案例 6.2 砂礫層對擠壓灌漿之反應

一、工程概述

台北都會區捷運系統施工期間，曾在淡水線之 CT201A、新店線之 CH218、CH219、CH221 及中和線之 CC275 標等五施工標使用擠壓灌漿工法作為鄰近建築物之保護措施，並在正式施作之前，依照規範要求先作試灌以驗證其效益。前四標是在松山第五及第六次層中施作，在本文中僅引用其結果，以為佐証。CC275 標之擠壓灌漿是在堅硬礫石層中施作，而且最深達 15m，其結果與其他四標大不相同，是本文討論之重點。本文綜合各標驗證試驗之結果以分析土壤特性、施作方式對擠壓灌漿成效之影響，並分析土體反應模式及上舉機制。

二、設計與施工之問題點

2.1 CC275 標灌漿試驗

試驗地點在大台北盆地之內，灌漿孔及監測儀器配置見圖 6.2-1。如圖 6.2-2 所示，試驗區內，在地表有 1 公尺左右之回填土，其下是含小量礫石之砂土層，再下是一堅實的砂礫層。砂礫層之下，又是砂土層。試驗分 6 孔（皆為斜孔：與地表呈 75 度角）進行，各孔之施作時程及漿材之成分如右：

表 6.2-1 漿材成分與注入量

日期	灌漿孔	成分	含量
04/26/1993	A3	礫石	320 kg
04/27/1993	A1	沉泥質砂	1040 kg
04/28/1993	A2	水泥	160 kg
05/03/1993	B1	水	425~526 kg
05/05/1993	B3		
05/07/1993	B2		

A1 至 A3 三淺孔（深度 5m）所用漿材之坍度介於 15~40mm 間，B1 至 B3 三深孔（深度 15m）所用漿材之坍度介於 100~250mm 間（其中 B1 孔在深度 10~2.5m 使用漿材坍度為 40mm）。注入方式是將灌漿管伸至入預期深度，自下而上以高壓將漿材分球注入，每球間隔 0.5m。控制方法有三：（1）限制每一球之注入量，（2）限制注入壓力在 40kg/cm² 以內，但因壓力十分不穩，在最後數個衝程（stroke）很可能陡然超過上限，甚至達 70kg/cm²，或（3）限制每一球之地表隆起。灌注情形說明如下：

1. A1—每球定量注入 0.4m³，自深度 5m 起至深度 3m 止，總量 2.25m³。

頭兩球因為壓力太大所以注入量不足 0.4m³，因此在深度 4m 處，變通為壓力控制，注入量達 1.2m³。其後在深度 3.5m 處恢復以原先設定之 0.4m³ 限量注入，隆起量達 6mm。之後將灌漿管提升至深度 3m 處繼續灌注，此時隆起加快，而當注入量達 0.24m³ 時，漿材自 S5 處溢出地表，此時隆起量達 43mm，其後隆起迅速，此球最終注入量為 0.38m³，隆起量為 171mm。

2. A2—每球定量注入 0.2m³，自深度 5m 起至深度 1.5m 止，總量 1.4m³

除第一球不接受灌注外，其餘各球均照原定計畫進行，只是隆起量並不明顯，直至深度 2m 時，隆起才加快，在最後一球（深度 1.5m），隆起量增加 64mm。

3. A3—不限量注入，自深度 5m 起至深度 2.5m 止，總量 2.45m^3
 在深度 3.5m 以下，隆起量控制在每球 8mm 以內，深度 3.5m 以上，隆起量控制在 10mm 以內。在第一球完成後地面即出現裂縫，長達 3m。最後一球增加之隆起量為 14mm。
4. B1—每球以定量 0.4m^3 注入，自深度 15m 起至深度 2.5m 止，總量 5m^3
 在深度 10m 及 3m 處，變通為壓力控制。自深度 9m 起，地表有裂縫出現（在 L14 與 L47 之間）但無顯著隆起。
5. B2—壓力控制，範圍自深度 15m 起至深度 6.5m 止，總量 18.6m^3
 在深度 7.5m 注入時，地表原有裂縫開始加大。深度 6.5m 時最後一球增加之地表隆起量為 55mm。
6. B3—壓力控制，範圍自深度 15m 起至深度 6m 止，總量 12.2m^3
 一直到深度 7m 時，地表才有明顯隆起並出現裂縫，長約 4.3m，寬約 20mm。最後一球（深度 6m）增加之地表隆起量為 122mm。
- 試驗結束後之次日，測得地表回沉 1 至 5mm，約為隆起量之 2 至 5%，其後不再回沉。兩週後，曾將 A3 孔中試體之上半段（圖 6.2-3）挖出檢視。該試體呈柱狀，成形良好，直徑由上至下約為 0.5m 至 1m。其後並用怪手將其擊裂以觀察其斷面之組成。研判該試體之抗壓強度可能在 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上。

2.2 破壞模式與機制

根據 CT201A、CH218、CH219 及 CH221 標之試驗結果，地盤對擠壓灌漿之反應可歸納成兩個模式：(1) 膨脹模式，(2) 錐狀破壞（圖 6.2-4）。在注入初期，漿球之作用只是擠壓其周遭之土壤，地表隆起有限。當漿球之壓力足夠頂起其上之土錐時，地表才会有顯著的隆起。但此時錐體內會產生伸張裂縫，而漿液也可能自裂縫逸出地表，此現象有別於脈狀破壞，有必要加以區分。臨界條件可以表示如下：

$$\begin{aligned} \text{上頂力} &= \pi r^2 p > \text{圓錐體之重量} \\ &= \frac{\pi \gamma}{3k^2} ((D + kr)^3 - k^3 r^3) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

- 其中 p = 漿球之液壓
 r = 漿球半徑（如團塊呈繭狀，取頭部半徑）
 D = 球心深度
 k = 破壞面斜率
 γ = 單位土重

此式說明在臨界狀況時，漿球之液壓、大小與深度之關係。如圖 6.2-5 所示，在松山第五次層中，公式(1)顯然適用，並據此推估 $k=1.5\sim 2$ ， p 在 $30\sim 40\text{kg}/\text{cm}^2$ 之間。

CC275 標試灌地層之地質狀況與松山第五次層不大相同，式(1)之適用性值得探討。由圖 6.2-5 可見，臨界狀況下，漿球之半徑與注入深度同樣有明確之關係。但破壞時機與在松山第五次層中施作略有不同。在礫石層中需要更大的注入量（即較大半徑）方能將漿球上方之土錐舉起，這可能是因為砂礫石層透水度高，水壓迅速消散，因此漿球之液壓，即公式(1)中之 p 值，較小之故。

2.3 綜合研判

1. 地表荷重之影響

在 B2 孔與 B3 孔灌漿時曾於該孔前側方配置挖土機以探討荷重對隆起之影響，B2 孔位置及灌漿所導致之隆起量，詳圖 6.2-6。該挖土機之總重約 32 噸，其下以兩片 1.2m×2.4m 之鐵板墊襯。B2 孔中最近地表的之團塊（紡錘狀）在深度 7.5m 之處灌漿時地表裂縫加大，顯示土體出現破壞，因為該孔傾角為 75°，因此團塊中心偏離鑽孔位置約 2m。團塊之腹部半徑約為 0.84m，而由圖 6.2-6 估計，在地表之影響半徑約為 6m，與 $k=1.5$ 之假設相符。以公式(1)求得土錐重 593 噸，而挖土機重僅 32 噸，因此推論挖土機對錐狀破壞形成之時機影響不大。但地表隆起等量線之中心很明顯地偏離挖土機，挖土機上之兩測點 W4 及 W5 之隆起量（分別為 20mm 及 3mm）遠較其緊鄰之地表隆起量為小，顯示荷重對局部地區對隆起有壓抑之作用。

B3 孔之情況亦相似。團塊上方圓頂半徑約 0.6m，在深度 7m 之處灌漿時地表出現裂痕，以 75° 傾角推估其平面位置應距灌漿口 1.6m，在地表影響半徑約為 5m，與 $k=1.5$ 之假設相去不遠，但隆起等量線之偏心現象更為明顯。挖土機上測點 W2 僅有 2mm 之隆起量，而其相鄰之地面測點 L19 則有 53mm 之隆起。

2. 漿材坍度之影響

A 區之三孔使用低坍度（15mm 至 40mm）漿材，而 B 區之三孔使用高坍度（100mm 至 250mm）漿材，但由表一看不出每球注入量與漿材坍度間之關係。這原因可能有二：(1) 漿材之坍度在現場不易控制，如第三節所述，每立方公尺漿材中之含水量由 426 kg 增加為 475 kg 時，坍度即由 25mm 增加為 205mm。即使嚴格控制每立方公尺漿材所添加之水量，原有骨材（礫石、砂）中本就含有某些水份，其多寡亦會影響漿材之坍度，因此即使在同一孔中，每球之坍度變化就很大，(2) 土壤之壓縮性對注入量之影響遠較坍度為大。

A、B 兩區之地表裂縫如圖 6.2-1 所示。由試驗結果也看不出坍度與破壞之相關性，在 A 區使用低坍度漿材，地表一樣產生裂縫。如上所述，低坍度與高坍度漿材中之含水量相差無幾，而在砂礫石層中，水份迅速逸失，漿材中原有水量之些微差異對土壤之反應無足輕重，因此以前人們對使用高坍度漿材之顧慮似嫌多餘。

三、解決方案

1. 試驗證實在砂礫石層中施作擠壓灌漿可以造成地表隆起，有效地扶正原已傾斜之建築物。惟建築物荷重之影響須列入考量。
2. 在深層灌注有必要使用高坍度之漿材以增加注入量，而高坍度不至導致脈狀破壞。主要的破壞模式是錐狀破壞。
3. 小區域荷重對錐狀破壞發生之時機影響不大，但在荷重區及其相鄰地區會明顯地抑制地表隆起。

【作者：黃南輝、金全鑫】

【服務單位：亞新工程顧問股份有限公司】

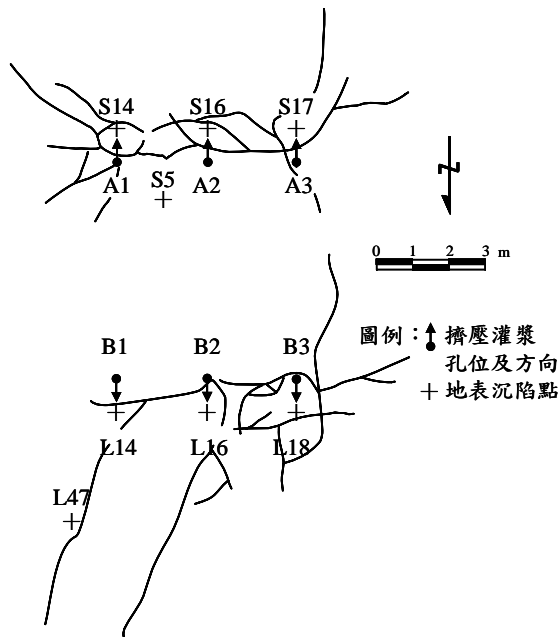


圖 6.2-1 擠壓灌漿試灌監測儀器平面配置與地面裂縫分佈示意圖

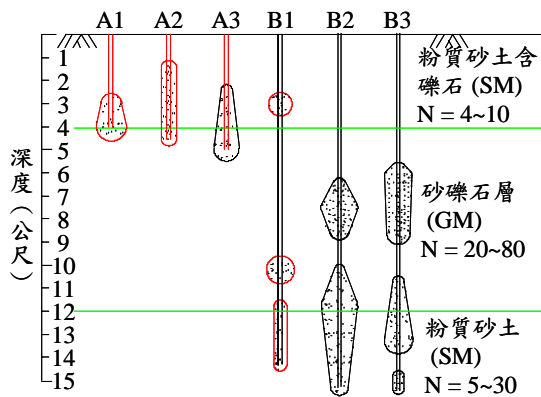


圖 6.2-2 地質剖面圖與圖塊示意圖



圖 6.2-3 擠壓灌漿試體圖片 (A3 孔)

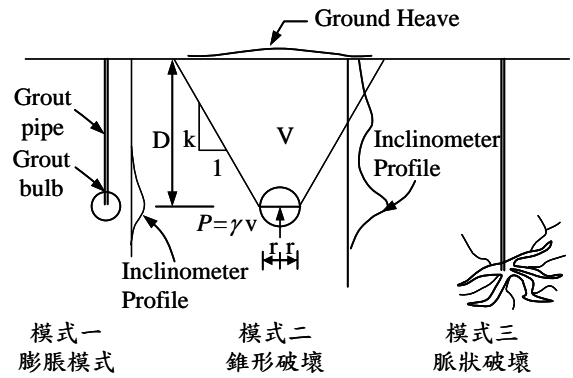


圖 6.2-4 土壤行為與破壞模式

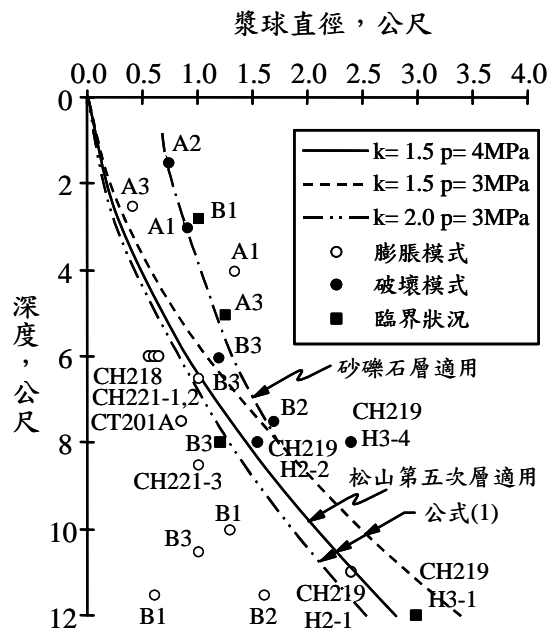


圖 6.2-5 松山第五次層與砂礫石層錐狀破壞之臨界條件

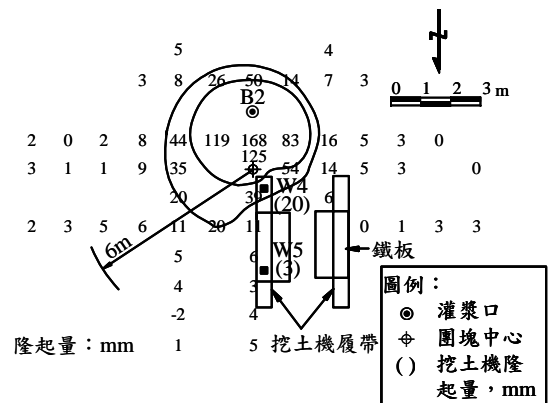


圖 6.2-6 B2 孔灌漿所造成之地表隆起量