

## 統計方法建立瀝青混凝土含油量容許界限

陳建旭<sup>\*</sup>、王慶雄<sup>\*\*</sup>

### 摘要

瀝青混凝土為瀝青膠漿和礦物粒料組成的鋪面材料，當粒料被瀝青膠漿完全包裹，使得粗細粒料黏結成一體，提供足夠強度供車輛通行，為了使瀝青混凝土具有良好的成效，在添加瀝青含量時，必須同時考慮粒料級配必須有足夠瀝青膠漿包裹，防止水及空氣侵入，降低日後鋪面加速老化；相對地，過多的瀝青含量，可能造成鋪面發生冒油現象，甚至影響其剪力強度，造成車轍、推擠及波浪等鋪面損壞情形。國內現行鋪面品質管理可分為施工廠商的品質管制(quality control, QC)；另外，為確認品質工程主辦機關亦需進行品質保證(quality assurance, QA)。對於瀝青混凝土鋪面品質之檢驗項目，大致有瀝青含量、粒料級配及性質、出廠溫度及施工技術等；關於瀝青混凝土之瀝青含量之容許界限標準，綜觀目前國內各道路主管機關規範瀝青含量各有不同認定標準，瀝青含量之驗收標準亦有必要進一步探討合理範圍。

本研究參考國外案例，應用不同專案計畫品質試驗資料，發展使用試驗標準差來重新建議鋪面各性質之規範容許界限，有鑑於此，本研究取自 2007~2008 年期間國內公路之鋪築路段之多孔性瀝青混凝土試驗數據，參考 AASHTO R9-05 驗收抽樣計畫以統計方法分析試驗數據，建立製程標準差及目標值偏移標準差之典型結合標準差，並考量依 AASHTO R42-06 在常態分布 90%時品質允收水準，建議合理瀝青含量試驗容許界限。

關鍵字：瀝青含量、容許界限、製程標準差、目標偏移值標準差

### 一、前言

瀝青混凝土為瀝青膠漿和礦物粒料（粗、細粒料及填縫料）組成的鋪面材料，係按配合設計所定之配合比例，經由適當加熱並充分均勻拌和，使得粒料被瀝青膠漿完全包裹，方能將粗細粒料黏結成一體，提供足夠強度供車輛通行，基於上述因素的考量，為了使瀝青混凝土具有良好的

---

<sup>\*</sup> 國立成功大學土木工程系教授

<sup>\*\*</sup> 國立成功大學土木工程系博士班學生

成效，在添加瀝青含量時，必須同時考慮到拌和出的瀝青混凝土，其粒料級配必須有足夠瀝青膠漿包裹，使水及空氣不致侵入，防止日後鋪面老化；相對地，過多的瀝青含量，可能造成鋪面發生冒油(Bleeding)現象，甚至影響其剪力強度，造成車轍、推擠及波浪等鋪面損壞情形【1】。

在工程實務上，國內之鋪面品質管理可分為施工廠商的品質管制(quality control, QC)；另外，為確認品質工程主辦機關亦需進行品質保證(quality assurance, QA)。對於瀝青混凝土鋪面品質之檢驗項目，大致有瀝青含量、粒料級配及性質、出廠溫度及施工技术等；另外，再生瀝青混凝土加強檢驗瀝青之黏度試驗，其目的主要管控瀝青混凝土品質，期望日後能提供較佳鋪面服務績效。目前大部份公共工程品質制度執行，除了第一層級品質管制 QC 取樣試驗結果外，往往在政府部門人力不足及預算緊縮之情況下，第二層級品質保證 QA 大部份並沒有對材料品質作獨立抽樣試驗來，進一步與 QC 試驗結果比對。因此，QC 及 QA 試驗數據之相互驗證性往往無法確立；另關於瀝青混凝土之瀝青含量之容許界限標準，綜觀目前國內各道路主管機關規範瀝青含量各有不同認定標準，瀝青含量之驗收標準亦有必要進一步探討合理範圍【2】。

國外已發展品質管制及品質保證(QC/QA)的品質驗收方法近 20 年，美國阿拉巴馬州高速公路局在 1990 年到 1992 年期間針對瀝青混凝土施工實施品質管制及品質保證程序，結果顯示施工品質、技術人員取樣及檢驗技術獲得改善後，可增加品質量測的精準度；在 1997 年起該州遵循著 ASTM 及 AASHTO 參考標準，彙集不同施工期間的 QC/QA 全部資料，在鋪面拌和公式瀝青混凝土性質，經統計分析得到施工廠商檢驗準確性及變異性，經常比該州主辦機關檢驗之準確性及變異性佳【3、4】。美國喬治亞州對於瀝青混凝土鋪面實施 QC/QA 品質檢測，藉由同步取樣及檢驗瀝青含油量及級配料篩分析，利用統計分析 2003 年期間 QC/QA 計畫性試驗結果，發現二者試驗數據的平均值及變異數大部份有顯著差異性存在，而且 QA 的變異性通常較高【5】；另外，美國加州交通廳要求施工廠商必須使用其規定瀝青混凝土配合設計法，並進行 QC/QA 試驗，再利用統計方法分析 QC/QA 的試驗結果，若雙方的檢驗結果無顯著差異，建議使用 QC 試驗結果作為評估工程品質；反之，必須進一步檢定 QC/QA 試驗，若仍具有顯著差異性則以 QA 的結果當作最終驗收依據，並停止生產直至產生變異的問題獲得解決，在這種互相監督和合作的關係下，能對於工程提出有助益的回饋，加強品質的改善【6】。再據美國南卡羅來納州應用 39 個不同專案計畫歷史品質試驗資料，發展一個適當使用試驗標準差定義規範容許界限，以瀝青混凝土品質特性試驗資料，建立新的評估規範界限，結果顯示新建立規範界限較初始規範容許界限更為嚴謹【7】。

本研究取自 2007~2008 年期間國內鋪築路段之多孔性瀝青混凝土(porous asphalt concrete, PAC)試驗數據，選定該計畫 4 標案之不同拌和廠，工程標案拌和廠分別編號為 A、B、C 及 D 廠所生產的 PAC，各廠瀝青混合料同步進行 QA 及 QC 瀝青含量試驗，其試驗數據各 70 組共計 140 組。本研究整理計畫道路鋪築時品質管制及品質保證之瀝青含量之數據，首先以品質管制及品質保證角度來探討各廠間之二者試驗是否有差異性，進而再以統計方法分析試驗數據之製程標準差及目標值偏移標準差，再參考 AASHTO R9-05 驗收抽樣計畫建議適當結合標準差，並考量依

AASHTO R42-06 在常態分布 90%時品質允收水準，使用樣本標準差建立規範上下限(Upper Specification Limits & Lower Specification Limits, USL & LSL)重新定義合理瀝青含量試驗容許界限。研究目的包括下列各項：

1. 彙整各道路主管機關瀝青含量規範標準。
2. 以管制圖探討 QC 及 QA 之差異性。
3. 檢定 QC 及 QA 試驗瀝青含量之常態分佈。
4. 分析 QC 及 QA 試驗瀝青含量製程標準差及目標值偏移水準。
5. 建立 QC 及 QA 試驗瀝青含量驗收標準差。
6. 以統計方法建立瀝青含量容許界限範圍。

## 二、研究材料及統計分析方法

### 2.1 瀝青混凝土規格說明

#### 2.1.1 資料收集

多孔性瀝青混凝土之材料選用是採用改質瀝青與添加木質纖維、加熱之粗骨材、細骨材與填充料，依工作拌和公式(job mix formula, JMF)拌和均勻後，依設計圖要求坡度與厚度鋪築施工。目前鋪面工程都在底層或不具排水功能之底層上鋪設多孔性瀝青混凝土，使得落於面層上方雨水快速往路緣側排水，以免雨水滲入路基降低原有強度；同時因雨水快速排流，對鋪面頂層與輪胎間摩擦力影響降低，具有確保雨天行車安全性及提高路面抗滑能力，同時兼具降低行車噪音等優點。

本研究使用多孔性瀝青混凝土以目標孔隙率為 20%，粒料標稱最大粒徑為 3/4"之級配，各廠施工廠商必須依表 1 規定，提供用於多孔性級配瀝青混凝土之工作拌和公式，送交工程主辦機關認可，始得開始生產瀝青混凝土拌和料。由於 PAC 為新材料，各施工廠商需進行廠拌和試鋪，俟技術成熟後，方可至主線正式鋪築。各項材料性質試驗的瀝青含量及粒料級配篩分析，與工作拌和公式比較之差異，亦要符合表 1 中容許界限範圍規定，以維品質。本研究各廠採用瀝青含量目標值皆控制為 5.1%；依規範要求容許界限範圍為  $JMF \pm 0.3\%$ 。

本研究多孔性瀝青混凝土 QA/QC 試驗數據取自 2007~2008 年期間國內公路之鋪築路段，選定該計畫 4 標案之不同拌和廠，編號分別為 A、B、C 及 D 廠所生產的 PAC，試驗取樣頻率則是以當日拌和廠如有多孔性瀝青混凝土出料，就取樣一次視為一批次，每批次試驗筆數 4 個作為一組代表數據；取樣時間位置是在卡車裝載瀝青拌和料運送至現地時，拌和料卸載至鋪裝機後，在鋪裝機料斗內取得 QC 及 QA 試驗用料，分別各 70 組 QC 與 QA 試驗數據總共 140 組。QC 試驗用料則交由拌和廠試驗室人員，QA 試驗則由本研究人員獨立試驗，二者分別進行拌和料抽油試驗及級配粒料篩分析試驗，篩號尺寸分級 10 個包括 3/4"、1/2"、3/8"、No.4、No.8、No.16、No.30、No.50、No.100 及 No.200；取得收集的 QC/QA 試驗數據再以客觀統計方法分析及評估其結果，目的在驗證品質是否差異性存在，及瞭解整體製程標準差及目標值標準差之水準。

表 1 PAC 瀝青混凝土粒料級配及瀝青含量規範表

篩號 (mm)	標稱最大粒徑 3/4 吋 通過重量百分率(%)	容許界限範圍(%)
19.0(3/4 吋)	95~100	±6
12.5(1/2 吋)	64~84	±6
4.75(No.4)	10~31	±4
2.36(No.8)	10~20	±4
0.075(No.200)	3~7	±2
<b>瀝青含量</b>	<b>5.1</b>	<b>±0.3</b>

### 2.1.2 國內瀝青含量規範檢驗標準

國內各道路主管機關對於瀝青混凝土鋪面混合材料、生產相關規定及要求、瀝青混凝土鋪面之施工及檢驗等相關規定，在各機關所屬施工規範或施工說明書皆有明確規定，就施工層面而言，包含工程材料性質規定、瀝青混合料配合設計程序、廠拌生產、鋪築、滾壓等，以供施工廠商依循及達到鋪面應有品質。各道路主管機關對於瀝青混凝土鋪面混合料作業機制，首先，要求施工廠商應提供用於瀝青混凝土之工作拌和公式送交機關工程司認可，未經工程司認可前，不得開始生產瀝青混凝土拌和料。為控制瀝青拌和料之品質，在拌和廠正常運轉作業情況下，工地檢驗頻率應依各機關施工技術規定範疇辦理，且瀝青拌和料抽油試驗所得瀝青含量及粒料級配，與工作拌和公式比較之差異，不得超過各機關之規定允許差異值。本研究摘錄國內各道路主管機關針對瀝青混凝土瀝青含量之容許界限百分比規定彙整於表 2，由表 2 可得知目前國內對於瀝青含量與工作拌和公式差容許界限值，大致有三類之區別，區分第 I 類為高速公路局與國工局之  $JMF \pm 0.3\%$ 、第 II 類為交通部公路總局與台北市政府之  $JMF \pm 0.4\%$ ，最後第 III 類為內政部營建署與高雄市政府之  $JMF \pm 0.5\%$ 【8-12】。

綜觀目前國內各道路主管機關規範瀝青含量各有不同認定標準，瀝青含量之驗收標準亦有必要進一步探討合理範圍。

### 2.2 結合標準差(combined standard deviation)

計畫各標案每批次試驗之製程變異性，這些試驗數值變異性以綜合方式獲得一個代表標案標準差，稱為製程標準差( $\sigma_{\text{process}}$ )；另外，目標值偏移(target miss)間變化性為施工廠商技術是否能接近規範訂定目標值，稱為目標偏移值標準差( $\sigma_{\text{center}}$ )。將製程標準差及目標偏移值標準差結合使用，以建立每個計畫允收特性的結合標準差【6、13】。

表 2 國內各道路主管機關現行瀝青含量允收規定

道路機關	允許誤差	允收標準	隨機取樣方式
交通部高速公路局及國工局	JMF±0.3%	若工程司認為需要時，承包商應從已完成之路面取樣，以供試驗；對於不合格品之處理則需改善至合格後，方可驗收。	若工程司認為需要時，承包商應從已完成之路面取樣，以供試驗。
交通部公路總局	JMF±0.4%	瀝青含量超過許可差 0.1%之減價 3 點數，以該批數量按契約單價計算，每點減價 0.5%。 該批瀝青混凝土總減價點超過 20 點時，應挖除重鋪。	每批材料數量定為同一拌和廠同一天供應本工程之同一種瀝青混凝土數量，每批抽驗二件。
內政部營建署	JMF±0.5%	當瀝青含量檢驗值與設計值之差，在±0.5%(含)之間者，視為合格。 檢驗值與設計值之差，在±0.5%~±1.00%之間者，依契約單價扣減所代表區域瀝青混凝土價款之 10%。 檢驗值與設計值之差，在±1.00%~±1.50%之間者，依契約單價扣減所代表區域瀝青混凝土價款之 15%。 檢驗值與設計值之差，在±1.5%~±2.00%之間者，依契約單價扣減所代表區域瀝青混凝土價款之 20%。 檢驗值與設計值之差，超過±2.00%者，應挖除重鋪，其一切工料費由施工廠商負責。	瀝青拌和料每天至少要抽樣試驗乙次。
台北市政府	JMF±0.4%	每超過驗收標準 0.1%減 3.0 點，並以該批數量按契約單價計算，每點減價 0.5%。 該批瀝青混凝土總減價點超過 20 點時，應挖除重鋪。	試驗頻率同一拌和廠廠商同一天供應之同一種瀝青混凝土數量抽驗二次。
高雄市政府	JMF±0.5%	瀝青含量每超出允許誤差 0.1%減 3.0 點，未滿 0.1%者按比例計算減價點數(計算至 0.1 點)。以該批數量按合約單價計算(含工料價款)，每點減價百分之一	每批材料數量定為同一拌和廠商同一天供應本工程之同一種瀝青混凝土數量。每批抽驗二次。

備註：瀝青含量為瀝青混合料總重量百分率。

如何同時考量試驗製程及目標偏移值變異，作為規範容許範圍修正之標準差，首先以圖 1 說明表示，在圖形裡有完整的常態曲線表示一個母體集中在目標偏移值標準差  $\sigma_{center}$  及包含各批次製程標準差  $\sigma_{process}$ ，各批次製程標準差的離散界限表示在符號 **Process**，如果考量目標偏移值標準差  $\sigma_{center}$ ，表示在上方圖形實際常態曲線，就是計畫母體平均變化，虛曲線在圖 5 下方表示計畫母體在製程及目標偏移值分佈的上限及下限，但當同時考慮，符號 **Process** 加上 **Center** 即表示離散界限。因此，二個變異數可結合得到一個變異數，這個結合變異數均方根是合成後使用的標準差數值。以公式(1)作為結合標準差( $\sigma_{combined}$ )，以作為釐訂規範容許上下界限之依據。

$$\sigma_{combined} = \sqrt{\sigma_{process}^2 + \sigma_{center}^2} \quad (1)$$

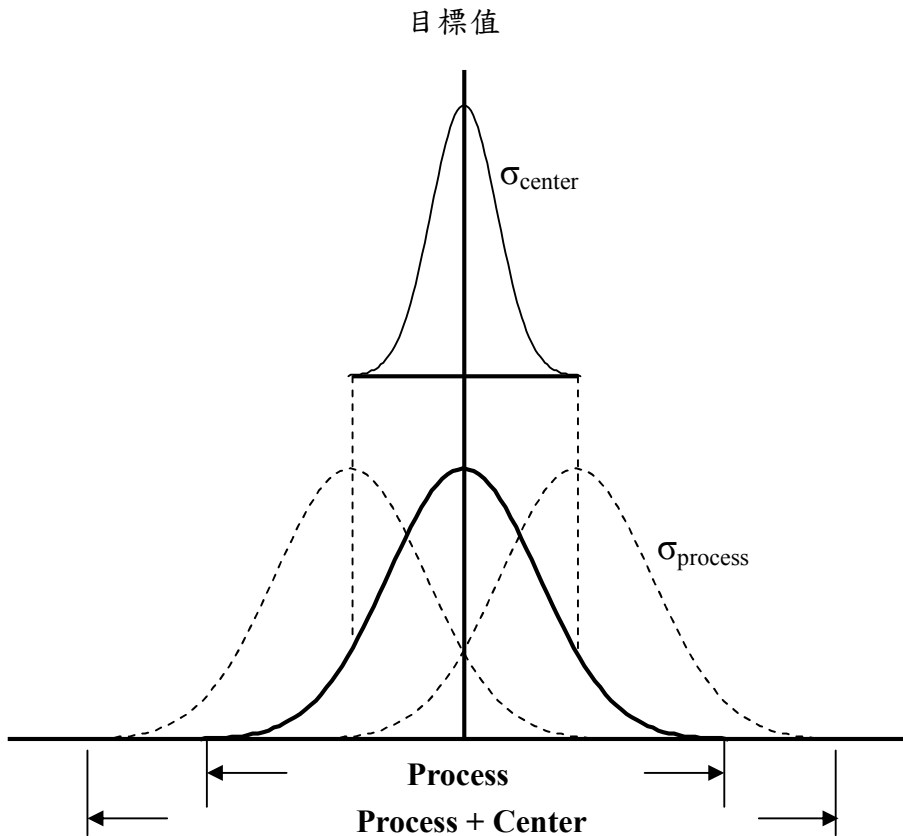


圖 1 考量目標偏移值及製程變異之結合標準差

### 2.2.1 製程標準差( $\sigma_{\text{process}}$ )

各次試驗組內批次變異數可藉由綜合個別批次製程變異定義為製程標準差( process standard deviation,  $\sigma_{\text{process}}$ ), 樣本變異是一個不偏的母體變異估計, 因此, 個別批次變異可以綜合以提供一個不偏估計, 綜合變異是一個權重平均, 根據樣本數量伴隨著個別批次變異, 綜合各次試驗變異的均方根是使用組內批次製程標準差, 其公式如式(2)所示。

$$\sigma_{\text{process}} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2 + \dots + (n_k - 1)S_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_k - k}} \quad (2)$$

其中  $\sigma_{\text{process}}$  = 製程標準差

$S_i$  = 第  $i$  組的標準差,  $i = 1, 2, 3, \dots, k$

$n_i$  = 第  $i$  組的試驗次數

$k$  = 總共有  $k$  組資料

### 2.2.2 目標偏移值標準差( $\sigma_{\text{center}}$ )

通常對於瀝青拌和料之瀝青含量及過篩百分率品質控制, 除了要求試驗本身變異情形不能太大外, 也會根據每批材料試驗平均值對於拌和公式目標偏移值的達成率, 但事實上, 試驗平均值與拌和公式目標偏移值都會有差異的情形發生, 這是難以避免的。因此, 容許上下限標準差發展也必須考量到目標偏移值標準差。目標偏移值計算, 如下列式(3)所示。

$$\Delta_{\text{TM}} = X - X_T \quad (3)$$

其中  $X$  = 試驗值

$X_T$  = 目標值

$\Delta_{\text{TM}}$  = 目標偏移值

之後再計算目標偏移值標準差, 如下式(4)所示。

$$\sigma_{\text{center}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_{\text{TM}i} - \bar{\Delta}_{\text{TM}})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

其中  $\Delta_{TMi}$  = 第 i 組試驗的目標偏移值， $i = 1, 2, 3, \dots, n$

$\bar{\Delta}_{TM}$  = 所有試驗目標偏移值的平均值

$\sigma_{center}$  = 目標偏移值標準差

### 2.3 常態檢定

一般統計方法都假設資料的分布適合常態分布。由於瀝青含量試驗數據尚未深入探討，此一假設需要經過檢定，本研究使用皮爾斯卡方 (Pearson  $\chi^2$ ) 適合度 (goodness of fit) 來檢定所得分布是否服從常態分布【14、15 及 16】。適合度檢定如式(5)，統計量應服從自由度 (degree of freedom, df) 為  $k-1-m$  的卡方 ( $\chi^2$ ) 分布，卡方分配只能用於大樣本，當  $n$  夠大時， $\sum (O_i - E_i)/E_i$  才會趨近於  $\chi_{k-1-m}^2$ ，因此所謂大樣本是使每個類別的期望次數  $np$  大於等於 5。當  $E_i \geq 5$  時，式(5)才會成立，因此當  $E_i < 5$  時，則必須與下一組合併直至  $E_i \geq 5$  為止，此時組數亦必須相對地減少。另外，當卡方分配自由度  $k-1-m = 1$  時，必須作連續性的調整，調整公式如式(6)：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \sim \chi_{k-1-m}^2 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k \frac{\left[ |O_i - E_i| - \frac{1}{2} \right]^2}{E_i} \sim \chi_{k-1-m}^2 \quad (6)$$

其中：

$O_i$  = 第 i 組的觀察得次數；

$E_i$  = 第 i 組的期望次數；

$k$  = 組數；

$m$  = 估計的參數個數。

卡方適合度檢定中，虛無假設 ( $H_0$ ) 為瀝青含油量試驗數據之分布為常態，對立假設 ( $H_1$ ) 則是數據不為常態分布。在顯著水準條件下，當計算之  $\chi^2$  值小於查表  $\chi_{k-1-m}^2$  值時，則接受  $H_0$ ，反之則反。



### 三、結果分析與討論

#### 3.1 品質執行結果管制圖比較

在產製過程中，瀝青拌和料的品質變異很難避免，因此在品質管制方面，通常會利用品質管制圖來做管制的工作，管制圖中的目標偏移值為配合設計拌和公式所要求的值，容許上下限為施工規範規定的容許百分比，繪製品質管制圖可以了解 QC 和 QA 逐次試驗的品質控制情形，並可探討其變異的原因。

圖 2 至圖 5 為各廠多孔性瀝青混凝土瀝青含量管制圖。在品質保證曲線與品質控制曲線比較上，A 廠 QA 曲線於中心線有較大幅度跳動，且第 10 次試驗值低於容許下限，而 QC 曲線均落於中心線下方，但未超出容許範圍；B 廠 QC 曲線落在中心線附近，而 QA 曲線有過低趨勢；C 廠 QC 曲線與 QA 曲線有較大差異，且第 4、5 次試驗值超出容許範圍外，沒有過高或過低趨勢；D 廠 QA 曲線在第 7 次之後之試驗值接近容許下限，與 QC 試驗值有明顯差異，表示 D 廠在第 7 次之後試驗值差異性有較明顯增加趨勢。

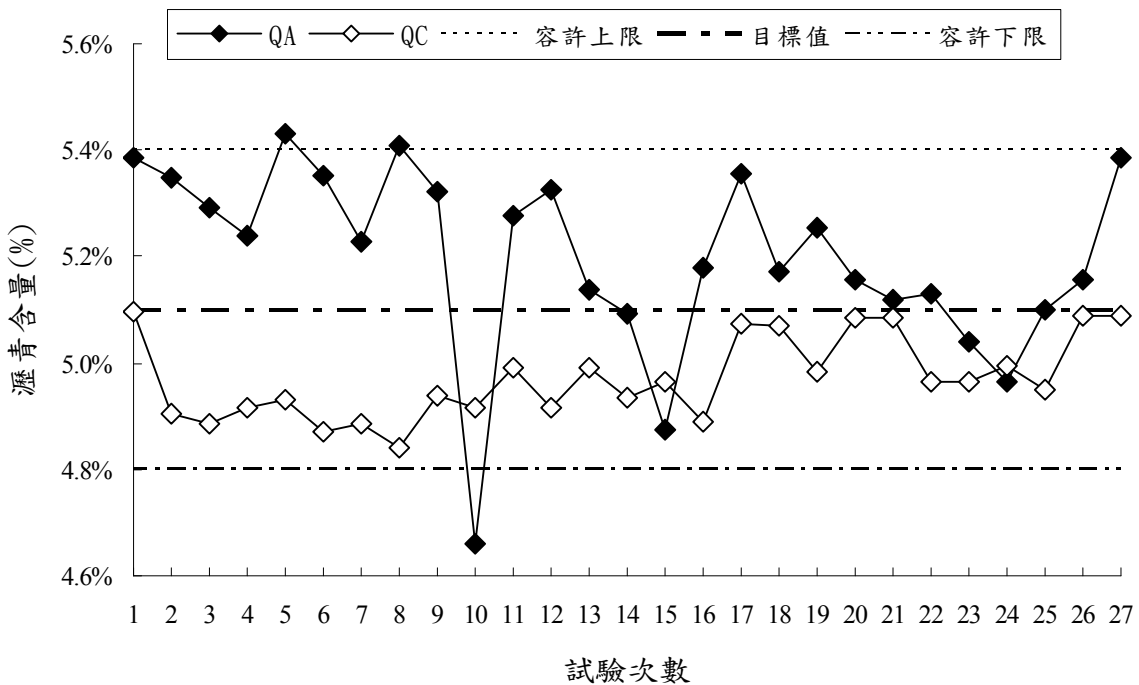


圖 2 A 廠 QC/QA 瀝青含量管制圖

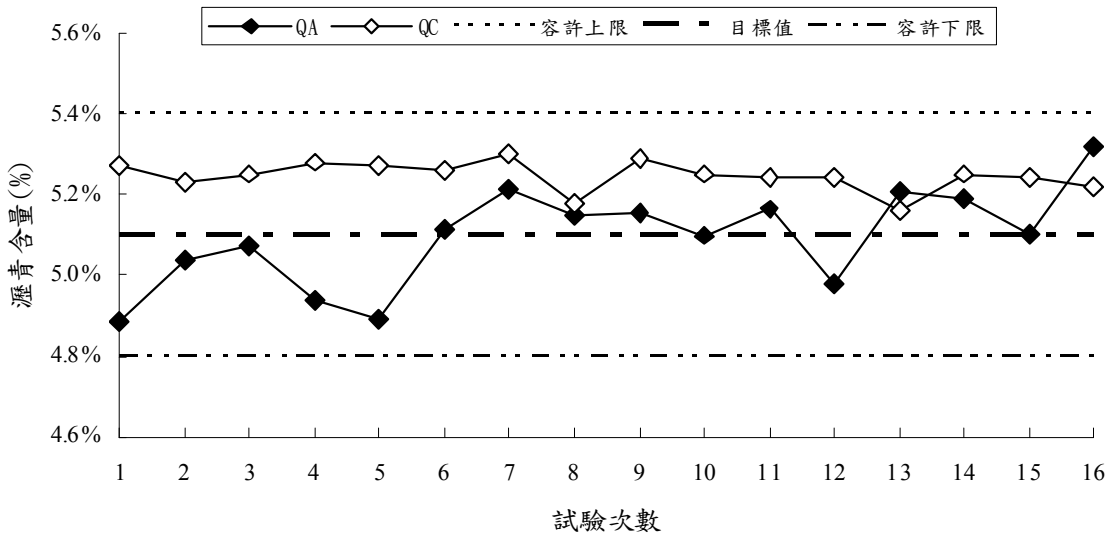


圖 3 B 廠 QC/QA 瀝青含量管制圖

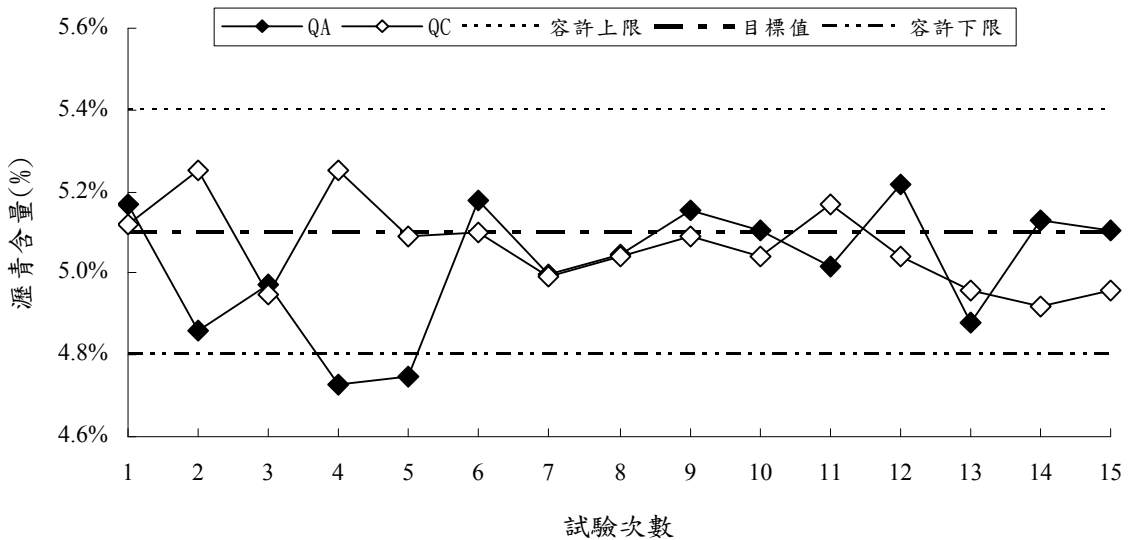


圖 4 C 廠 QC/QA 瀝青含量管制圖

由以上結果得知，C 廠在第 3、4 次瀝青含量有低於容許下限狀況之外，其餘試驗值皆與品質控制試驗值沒有太大差異，顯示 C 廠在瀝青含量部分有較佳控制能力；A 廠品質保證與品質控制曲線有出現較大差異，可能與樣本取得方式有關；C、D 廠有部分試驗值超出容許範圍或實驗值有顯著差異，必須調整兩條曲線落在目標偏移值附近，並縮小差異性，獲得穩定的品質。

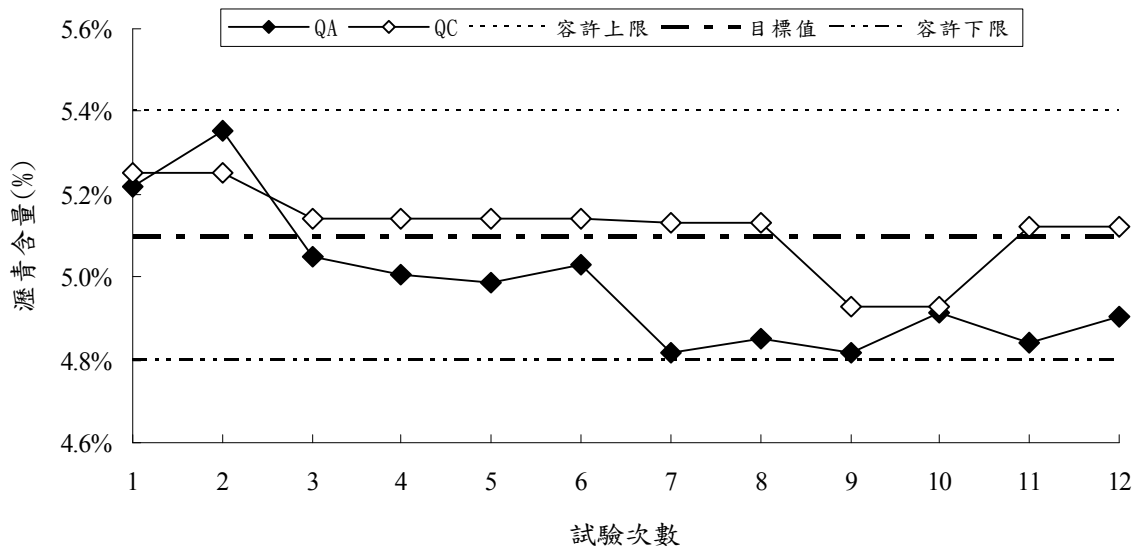


圖 5 D 廠 QC/QA 瀝青含量管制圖

進一步以統計檢定分析各廠間 QC/QA 瀝青含量試驗平均數是否相等，在顯著水準  $\alpha=0.05$  水準下，進行各廠每批次 QC/QA 試驗平均數檢定，檢定結果以 A 廠為例，QC/QA 試驗值出現顯著差異比例為 37%，表示試驗值有較大差異性產生；B 廠則第 1、3、5、12 次試驗值有顯著差異，其顯著差異比例為 25%；C 廠則第 5 次有顯著差異，其顯著差異比例為 6.7%；D 廠則第 7、11 試驗值有統計顯著差異，其顯著差異比例為 16.7%，總結以 A 廠而言，瀝青含量試驗值 QC/QA 有較大差異性存在。

### 3.2 QA 及 QC 常態分布探討

本研究鋪築路段 2007 至 2008 年 QC 及 QA 瀝青含量數據分別各 70 組，為瞭解全部數據是否符合常態分布，本研究採用皮爾斯卡方 (Pearson  $\chi^2$ ) 適合度 (goodness of fit) 來檢定瀝青含量試驗數據分布是否服從常態分布，首先，檢定 QA 各廠所有數據，在顯著水準 0.05 下，經由公式(5)演算結果，類別數合併後為  $k=6$  組，但因母體平均數及標準差未知，故自由度為 3，所以  $\chi_{3,0.05}^2=7.8147$ ，另計算出統計量為 4.1573，因為  $4.1573 < 7.8147$ ，故不能拒絕  $H_0$ ，也就是接受  $H_0$ ：符合常態分配；另外，再檢定 QC 各廠所有數據，分析後統計量為 7.2672 亦小於  $\chi_{3,0.05}^2=7.8147$ ，滿足常態分配的假定。

如果將所有 QA 及 QC 數據進行常態分配檢定，全部數據 140 組，在顯著水準 0.05 下，經由公式(5)演算結果如表 3 所示，由表 3 得知檢定統計量  $\chi^2=8.5378$ ，該值小於卡方臨界值  $\chi_{4,0.05}^2=9.4877$ ，表示落在接受域，因此，不拒絕虛無假設；故 QA 及 QC 全部檢測量得之瀝青含量分

布為常態分布。本研究繪製 QA 及 QC 數據直方圖之分佈曲線，如圖 6 可觀察出分佈曲線呈現一般常態分布之特性。

表 3 QA 及 QC 瀝青含量試驗數據之 Pearson  $\chi^2$  檢定法計算表

組號	下組界 (L)	上組界 (U)	觀察次數 (O)	機率值	期望次數 E	(O-E) <sup>2</sup>	(O-E) <sup>2</sup> /E
1	4.617%	4.703%	1	0.0068	0.9567		
2	4.703%	4.789%	2	0.0207	2.9001	0.8850	0.0741
3	4.789%	4.875%	8	0.0577	8.0839		
4	4.875%	4.961%	23	0.1201	16.8121	38.2900	2.2775
5	4.961%	5.047%	21	0.1864	26.0903	25.9112	0.9931
6	5.047%	5.133%	28	0.2158	30.2158	4.9098	0.1625
7	5.133%	5.219%	21	0.1865	26.1157	26.1702	1.0021
8	5.219%	5.305%	25	0.1203	16.8448	66.5067	3.9482
9	5.305%	5.391%	9	0.0579	8.1075		
10	5.391%	5.477%	2	0.0277	3.8730	0.9614	0.0802
合計			140	1	140		8.5378

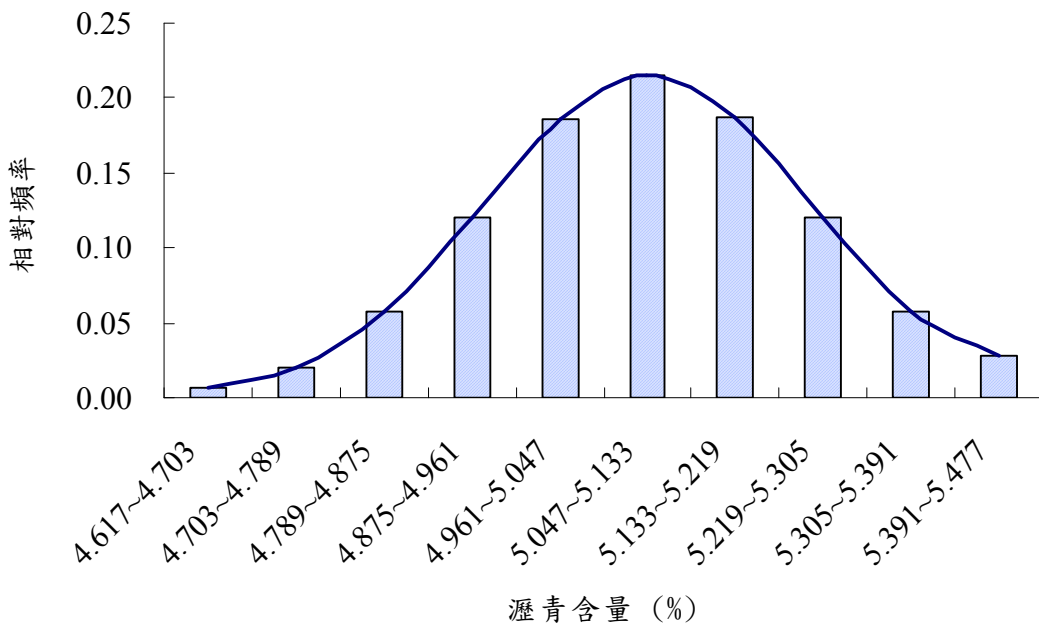


圖 6 QA 及 QC 瀝青含量直方圖

### 3.3QC 及 QA 試驗值變異數分析(ANOVA)

首先，分別針對計畫標案各廠 QC 及 QA 之瀝青含量數據分別進行變異數分析，瞭解各標案各廠 QC/QA 瀝青含量平均值是否有其差異性。變異數分析的基本假設為每個廠 QC 及 QA 試驗數據的母體均為常態分布，且抽自各母體的各組隨機樣本互為獨立，而本研究採用單因子變異數分析(Analysis of Variation, ANOVA)，是指一個自變數來解釋反應變數變異來源的一種方法，使用單因子變異數分析可同時檢定三個或三個以上的母體平均數是否相等的方法。因此，若有 k 個母體資料時，欲比較此 k 個母體的母體平均數( $\mu_i, i=1,2,\dots, k$ )是否相等，假設檢定：虛無假設 (null hypothesis)  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$  所有研究族群平均值皆相等；對立假設(alternative hypothesis)  $H_1: \mu_i \neq \mu_j (i \neq j)$  所有研究族群平均值不全部相等，所以變異數分析可視為驗證樣本平均值之差是否達到顯著性水準的一種程序。本研究以變異數分析檢定各廠間 QA/QC 瀝青含量之平均值是否有差異，經檢定結果輸出於表 4 及表 5。根據表 4 及表 5 分析顯示，以 QA 試驗數據而言，在顯著水準 0.05 下，各廠 QA 試驗數據檢定  $P=0.000384$ ，小於顯著水準 0.05，表示各廠間 QA 數據有所差異性；另外，各廠 QC 試驗數據檢定  $P=1.03E-14$ ，更有顯著性差異，亦表示各廠間 QC 數據亦有所差異性。這個差異性來源可能各廠間來自拌和材料、抽樣程序、試驗標準及製造/施工等因素所造成，因此，應建立標準作業程序，以期各廠間變異性降至最低。

表 4 品質保證(QA)瀝青含量試驗之變異數分析( $\alpha = 0.05$ )

組別	個數	總和	平均	變異數
A 廠(QA)	27	1.403897	5.200%	3.09E-06
B 廠(QA)	16	0.815022	5.094%	1.5E-06
C 廠(QA)	15	0.753016	5.020%	2.42E-06
D 廠(QA)	12	0.597972	4.983%	2.75E-06

ANOVA						
變源	SS	自由度	MS	F	P-值	臨界值
組間	5.28E-05	3	1.76E-05	6.96517	0.000384	2.743711
組內	0.000167	66	2.53E-06			
總和	0.00022	69				

表 5 品質管制(QC)瀝青含量試驗之變異數分析( $\alpha = 0.05$ )

組別	個數	總和	平均	變異數
A 廠(QC)	27	1.3422	4.971%	6.11E-07
B 廠(QC)	16	0.8393	5.246%	1.35E-07
C 廠(QC)	15	0.7597	5.065%	1.06E-06
D 廠(QC)	12	0.6142	5.118%	9.8E-07

ANOVA						
變源	SS	自由度	MS	F	P-值	臨界值
組間	7.8E-05	3	2.6E-05	39.41043	1.03E-14	2.743711
組內	4.36E-05	66	6.6E-07			
總和	0.000122	69				

進一步探討所有廠 QC 與 QA 全部數據，表示檢定 QA 及 QC 試驗數據是否有差異性。以變異數 F 檢定樣本標準差，在顯著水準 0.05 下，變異數檢定  $P=0.0075$ ，代表標準差有顯著差異性，亦表示 QC 及 QA 之標準差有顯著差異；另外，再檢定 QC 與 QA 所有廠之全部數據平均值 t 檢定，在顯著水準 0.05 下，平均值檢定  $P=0.437$ ，大於顯著水準 0.05，亦表示 QC 及 QA 之所有廠平均值沒有差異，結果如表 6 所示。

表 6 QA 及 QC 所有廠之瀝青含量試驗檢定結果( $\alpha = 0.05$ )

變異數 F 檢定	QC 組數	QA 組數	QC 標準差	QA 標準差	P-Value	顯著性
	70	70	0.1327%	0.1784%	0.0075	有差異
平均值 t 檢定	QC 組數	QA 組數	QC 平均值	QA 平均值	P-Value	顯著性
	70	70	5.079%	5.100%	0.437	無差異

再將所有廠之 QC 及 QA 試驗平均值以等值法繪製散佈圖如圖 7 所示，由圖發現各點間均勻散佈，點位在等值線上下幾乎均各占 50%，可說明表 6 平均值 t 檢定結果，二者是無差異性，如將各廠 QC 及 QA 結合分析的話，可更具試驗代表性。

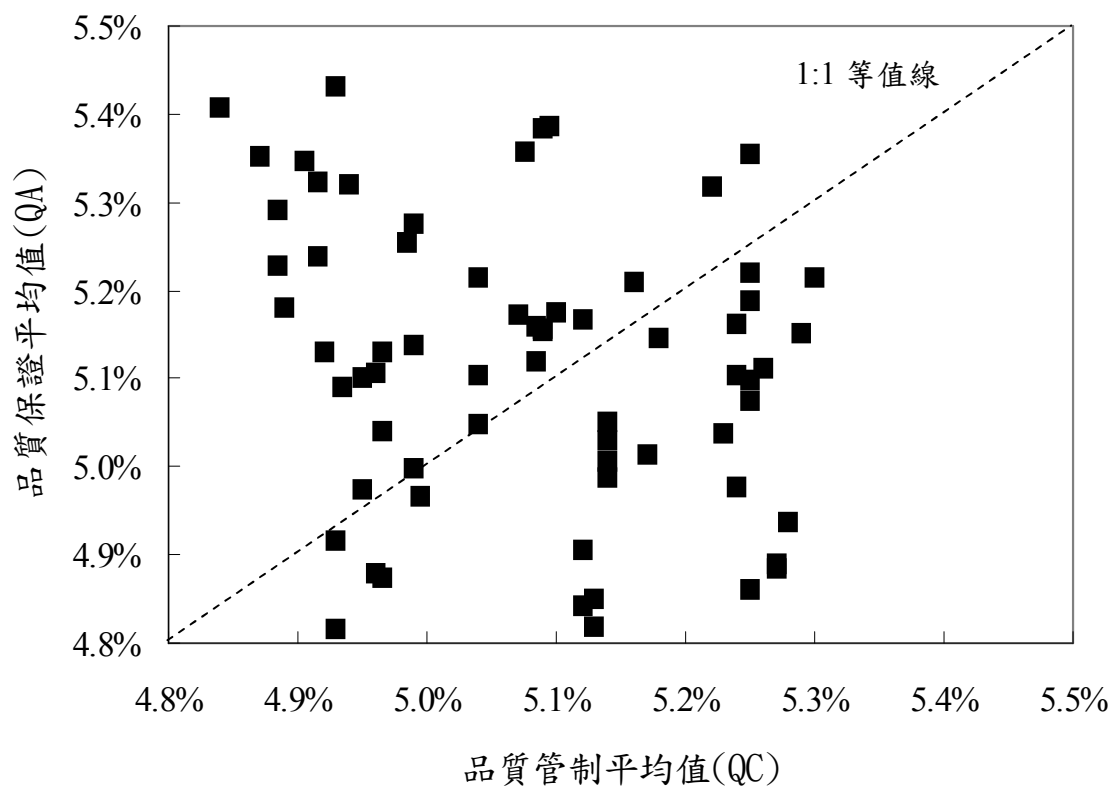


圖 7 QA 與 QC 瀝青含量計畫各批次平均值散佈圖

以散佈圖繪製 QC/QA 標準差比較性試驗結果的數值範圍，如圖 8 所示，來自本次比較性試驗數據共計 70 組試驗標準差，在圖 8 散佈圖中每點位表示 QC/QA 標準差比較性，從圖中觀測大部份點位都位於平等線上方側，得知有 87.14% QA 的標準差較 QC 為高，此現象與目前國外文獻研究結果有相同之處【3、4、5】。這種現象除了試驗過程變異的原因，需要建立所有試驗人員執行公認試驗步驟，以降低彼此間差異性變異存在之外；也反應出國內目前施工廠商與主辦機關對於材料品質認知上的差異，施工廠商的 QC 數據無法反應在主辦機關的 QA 上，如何將 QC 和 QA 的資料標準差一併考慮於容許界限，消除此一差距，是本研究的重點之一。

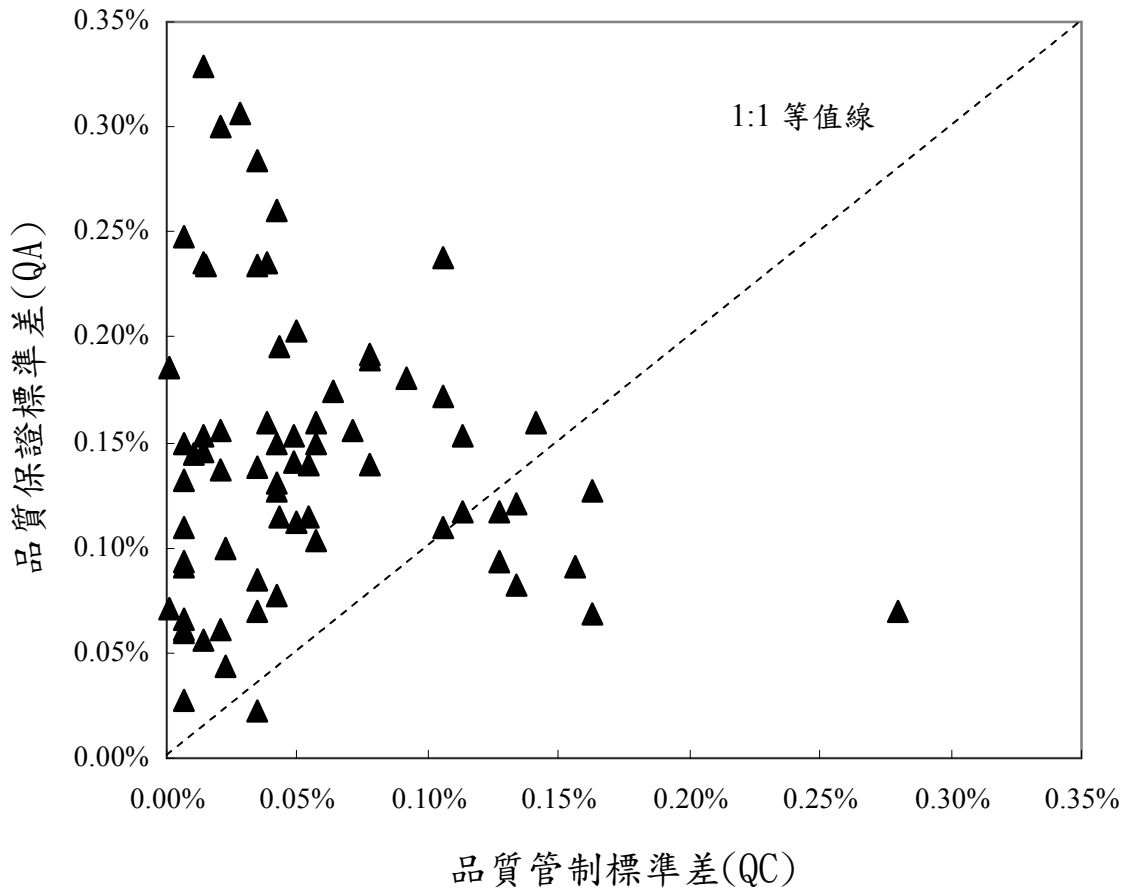


圖 8 QA 與 QC 瀝青含量計畫各批次標準差散佈圖

### 3.4 修正瀝青含量容許界限

國內瀝青混凝土品質檢驗方法，以工作拌和公式之上下誤差百分率方式建立容許上下界限，以觀察瀝青混凝土品質分佈狀態；在 AASHTO R42-06 使用樣本標準差建立規範上下限(Upper Specification Limits & Lower Specification Limits, USL & LSL)【17】；本研究將藉由實際收集 QC/QA 試驗資料來探討以 AASHTO 建議規範上下界限，並探討與初始使用容許上下界限之差異性。依據 AASHTO R42-06 建立規範界限，由經驗得知允收品質水準之合格率位於 95~90%之間。本研究採用合格率 90%作為允收品質水準，表示常態分布為 90%之信賴區間，分別建立出瀝青含量新的規範上限與規範下限，其公式如式(7)及(8)所示。



$$USL_S = JMF + Z_{\alpha/2} \times S \quad (7)$$

$$LSL_S = JMF - Z_{\alpha/2} \times S \quad (8)$$

$LSL_S$  =容許下限

$USL_S$  =容許上限

$JMF$  =工作拌和公式中瀝青性質之目標偏移值

$S$  =選定標準差

$Z_{\alpha/2}$  =90%對應之  $Z$  值

本研究嘗試選用 QA、QC 及 QA/QC 三種情況之各廠多孔性瀝青混凝土瀝青含量試驗值為例，分別探討以 AASHTO 建議規範建立上下界限與現行規定容許上下界限比較，以求合理瀝青含量容許範圍。將製程標準差之綜合標準差及目標目標偏移值標準差以公式(4)作結合，代表計畫典型結合標準差，再應用公式(7)及(8)代入樣本標準差，計算結果如表 8 所示 AASHTO 建議修正後規範上下界限。

### 3.4.1 QC 及 QA 製程標準差( $\sigma_{process}$ )

本研究嘗試選用 QA、QC 及 QA/QC 三種情況，每批次有各 4 筆試驗數據可分別求得每批次之平均值及標準差，再利用公式(2)計算出各種情況之製程標準差，彙整於表 7。由表 7 顯示 QA 試驗數據之製程標準差由 0.149%變化至 0.176%，QC 製程標準差由 0.065%變化至 0.086%，皆遠低於 QA 試驗數據之變異性；另外，當考量綜合 QA/QC 製程標準差，其數值介於獨立 QA 及 QC 之間，其製程標準差由 0.1173%變化至 0.1368%。

表 7 瀝青含量各廠製程標準差( $\sigma_{process}$ )

廠別	組數	QA 製程標準差	QC 製程標準差	組數	QA/QC 製程標準差
A 標案	27	<b>0.152%</b>	<b>0.065%</b>	<b>54</b>	<b>0.1173%</b>
B 標案	16	<b>0.156%</b>	<b>0.076%</b>	<b>32</b>	<b>0.1225%</b>
C 標案	15	<b>0.176%</b>	<b>0.080%</b>	<b>30</b>	<b>0.1368%</b>
D 標案	12	<b>0.149%</b>	<b>0.086%</b>	<b>24</b>	<b>0.1216%</b>

### 3.4.2 QC 及 QA 目標偏移值標準差( $\sigma_{center}$ )

為求結合標準差，需再求目標偏移值標準差，QA、QC 及 QA/QC 三種情況之目標偏移值偏差分別計算如表 8 所示，由表發現其目標偏移值偏差平均值幾乎接近，相差不大；另外，就 QA 目標偏移值標準差為 0.095%，QC 目標偏移值標準差為 0.115%，QA/QC 所有數據計算出之目標偏移值標準差更降為 0.058%。

表 8 瀝青含量各廠目標偏移值標準差( $\sigma_{center}$ )

廠別	組數	QA 目標偏移值	QC 目標偏移值	組數	QA/QC 目標偏移值偏差
A 標案	27	0.100%	-0.129%	54	-0.020%
B 標案	16	-0.006%	0.146%	32	0.070%
C 標案	15	-0.080%	-0.035%	30	-0.058%
D 標案	12	-0.117%	0.073%	24	-0.049%
目標偏移值 平均值		-0.0260%	-0.0001%	-0.0144%	
目標偏移值標準差		<b>0.095%</b>	<b>0.115%</b>	<b>0.058%</b>	

### 3.4.3 應用結合標準差建立規範界限

有了製程標準差( $\sigma_{process}$ )及目標偏移值標準差( $\sigma_{center}$ )，可應用公式(1)計算出結合標準差( $\sigma_{combined}$ )，一般製程標準差 AASHTO 建議選定各廠排列標準差之中位值。本研究為探討其差異性，製程標準差採用各廠間最小值及最大值範圍，按比例計列區分為五種情況作為探討，如表 9 所示，可瞭解不同製程標準差情況下，對於修正容許界限之差異性；經由表 9 可得知，當 QA 數據情況下其結合標準差為 0.182%-0.199%，而 QC 情況下其結合標準差為 0.132%-0.143%，較小於 QA 結果；另外，當 QA+QC 情況，其結合標準差為 0.133%變化至 0.152%，觀察結果介於 QA/QC 間。

表 9 結合標準差  $\sigma_{combined}$  結果，分別代入公式(7)及(8)計算標準差，重新建立之各情況容許界限表列於表 10，由表 10 結果可發現 QA 情況，容許界限可修正為  $JMF \pm 0.30\% \sim 0.33\%$ ，容許界限寬於原始規範  $JMF \pm 0.30\%$ ，使得施工廠商施工技術較易合格，而就 QC 情況，容許界限可修為  $JMF \pm 0.22\% \sim 0.23\%$ ，較原始規範  $JMF \pm 0.30\%$  為窄，表示施工廠商現行技術較易達到原始規範要求。因此，對於單採用 QA 或 QC 二者分析，其結果呈現二極化，為均衡合理訂定建議修正容許界限，將採用 QA/QC 整合數據所分析之容許界限，分析結果為  $JMF \pm 0.22\% \sim 0.25\%$ 。

表 9 結合製程標準差及目標偏移值標準差

編號	QA-case			QC-case			QA/QC-case		
	$\sigma_{process}$	$\sigma_{center}$	$\sigma_{combined}$	$\sigma_{process}$	$\sigma_{center}$	$\sigma_{combined}$	$\sigma_{process}$	$\sigma_{center}$	$\sigma_{combined}$
I	0.155%	0.095%	<b>0.182%</b>	0.065%	0.115%	<b>0.132%</b>	0.120%	0.058%	<b>0.133%</b>
II	0.160%	0.095%	<b>0.186%</b>	0.070%	0.115%	<b>0.134%</b>	0.125%	0.058%	<b>0.138%</b>
III	0.165%	0.095%	<b>0.191%</b>	0.075%	0.115%	<b>0.137%</b>	0.130%	0.058%	<b>0.142%</b>
IV	0.170%	0.095%	<b>0.195%</b>	0.080%	0.115%	<b>0.140%</b>	0.135%	0.058%	<b>0.147%</b>
V	0.175%	0.095%	<b>0.199%</b>	0.085%	0.115%	<b>0.143%</b>	0.140%	0.058%	<b>0.152%</b>

備註：製程標準差  $\sigma_{process}$  採用表 7 最小值及最大值按比例計列區分為五種情況。

表 10 標準差建立之各情況容許界限

編號	初始規範界限(%)	QA-case		QC-case		QA/QC-case	
		容許誤差 1.645 $\sigma$	建議 規範界限(%)	容許誤差 1.645 $\sigma$	建議 規範界限(%)	容許誤差 1.645 $\sigma$	建議 規範界限(%)
I	JMF $\pm$ 0.3%	0.30%	JMF $\pm$ 0.30%	0.22%	JMF $\pm$ 0.22%	0.22%	JMF $\pm$ 0.22%
II	JMF $\pm$ 0.3%	0.31%	JMF $\pm$ 0.31%	0.22%	JMF $\pm$ 0.22%	0.23%	JMF $\pm$ 0.23%
III	JMF $\pm$ 0.3%	0.31%	JMF $\pm$ 0.31%	0.23%	JMF $\pm$ 0.23%	0.23%	JMF $\pm$ 0.23%
IV	JMF $\pm$ 0.3%	0.32%	JMF $\pm$ 0.32%	0.23%	JMF $\pm$ 0.23%	0.24%	JMF $\pm$ 0.24%
V	JMF $\pm$ 0.3%	0.33%	JMF $\pm$ 0.33%	0.23%	JMF $\pm$ 0.23%	0.25%	JMF $\pm$ 0.25%

### 3.5 驗證修正容許界限之合理性

本研究由 QA、QC 及 QA/QC 三種情況分析之建議容許界限，分別為 JMF $\pm$ 0.30%~0.33%、JMF $\pm$ 0.22%~0.23%及 JMF $\pm$ 0.22%~0.25%，為瞭解各修正容許界限之允收情況，將修正容許界限彙整由 JMF $\pm$ 0.22%~0.33%，分別檢視原始全部試驗數據之允收合格率，經由分析結果呈現於表

11，由該表顯示當 JMF±0.22%時，允收合格率为 84.29%；而当容许界限渐增至 JMF±0.33%，允收合格率为 97.14%，其中当容许界限修正为 JMF±0.25%，允收合格率为 90%，符合 AASHTO 建议品质允收水准，因此，本研究归纳建议采用沥青含量范围应可修正为 JMF±0.25%，作为混凝土沥青含量检验标准范围参考值。

表 11 建議容許界限之合格率

建議容許界限	總組數	合格組數	不合格組數	允收合格率%
JMF±0.22%	140	118	22	84.29%
JMF±0.23%	140	123	17	87.86%
JMF±0.24%	140	124	16	88.57%
<b>JMF±0.25%</b>	140	<b>126</b>	<b>14</b>	<b>90.00%</b>
JMF±0.26%	140	131	9	93.57%
JMF±0.27%	140	131	9	93.57%
JMF±0.30%	140	135	5	96.43%
JMF±0.31%	140	136	4	97.14%
JMF±0.33%	140	136	4	97.14%

#### 四、結論與建議

本研究針對取自國內鋪築路段之 PAC 瀝青試驗數據，進行統計分析修正瀝青含量允收容許界限，得到下列結果及建議：

1. 國內對於瀝青含量與工作拌和公式差容許界限值，大致有三類之區別，區分第 I 類為高速公路局與國工局之 JMF±0.3%、第 II 類為交通部公路總局與台北市政府之 JMF±0.4%，最後第 III 類為內政部營建署與高雄市政府之 JMF±0.5%，各道路主管機關設定標準不同。
2. 以變異數分析(ANOVA)結果顯示，各廠區間 QC 及 QA 之數據平均值，在顯著水準 0.05 下呈現均有差異性存在，亦表示此差異性來源可能來自各拌和廠間之拌和材料、抽樣程序、試驗標準及製造/施工等因素所造成，因此，應建立標準作業程序，以期各廠間變異性降至最低。
3. 經由皮爾斯卡方 (Pearson  $\chi^2$ ) 適合度檢定瀝青含量試驗數據，在顯著水準 0.05 情況下，QA 及 QC 數據滿足常態分布特性。
4. 對於品質保證(QA)及品質管制(QC)進行成對檢定，在顯著水準 0.05 下，其結果發現 F 變異數

檢定，二者標準有差異性存在，並繪製散佈圖亦發現 QA 標準差值較高於 QC 標準差；另外，有關 t 平均值檢定，其結果二者是無差異性存在，由散佈圖來看，是均勻散佈呈現。

5. 以品質管制圖分析，發現品質管制試驗值與品質保證試驗值雖大部份材料性質符合管制圖上下界限要求，但二者於管制圖中有出現差異性。
6. 製程標準差( $\sigma_{\text{process}}$ )及目標偏移值標準差( $\sigma_{\text{center}}$ )總計之結合標準差( $\sigma_{\text{combined}}$ )，經計算分別為採用 QA 數據之結合標準差為 0.182%-0.199%，而採 QC 數據之結合標準差為 0.132%-0.143%，較小於 QA 結果；採 QA 及 QC 數據並計，其結合標準差為 0.133%~0.152%，介於 QA 與 QC 間。
7. 本研究採用 AASHTO 建議合格率 90%作為允收標準，經分析瀝青含量容許界限可由  $JMF \pm 0.30\%$ 修正為  $JMF \pm 0.25\%$ ，並經驗證此容許界限亦可滿足現行試驗數據，亦可提升鋪面工程品質。

## 五、參考文獻

1. 林桂儀，「不同添加料對瀝青膠漿特性之影響」，博士論文，國立成功大學土木工程研究所，臺南 (2006)。
2. 林建良，「鋪面品質檢驗與統計方法之評估」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，臺南，2009。
3. Parker, F., and Hossain, M.S., "Hot-Mix Asphalt Mix Properties Measure for Construction Quality Control and Assurance," *Transportation Research Record 1469*, pp.9-17 (1994).
4. Parker, F., and Hossain, M.S., "Statistics for Superpave HMA Construction QC/QA Data," *Transportation Research Record 1813*, pp.151-156 (2002).
5. Turochy, R.E., Willis, J.R., and Parker, F., "Quality Assurance of Hot-Mix Asphalt," *Transportation Research Record 1946*, pp.47-54 (2006).
6. Dobrowolski, J., and Bressette, T., "Development of Quality Control/Quality Assurance Specifications by Using Statistical Quality Assurance for Asphalt Concrete Pavements in California," *Transportation Research Record 1632*, pp. 13-21 (1998).
7. Burati, J.L., "Evaluating Specification Limits," *Transportation Research Record 1946*, pp.92-98 (2006).
8. 交通部高速公路局及國道新建工程局，「施工技術規範」，2009。
9. 交通部公路總局，「施工說明書」，2008。
10. 內政部營建署，「施工規範」，2004。
11. 台北市政府，「施工規範補充作業要點及瀝青道路施工規範」，2008。
12. 高雄市政府，「道路工程施工說明書彙編」，2003。

13. "Standard Recommended Practice for Acceptance Sampling Plans for Highway Construction, AASHTO Designation R9-05," American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C. (2005).
14. Benjamin, J. R. and Cornell, C. A., Probability, Statistics and Precision for Civil Engineering, McGraw-Hill, New York (1970).
15. Haldar, A. and Mahadevan., Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley & Sons, New York (2000).
16. Devore, J.L. (2004). Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, 6th ed., Duxbury Press, Canada.
17. "Standard Practice for Developing a Quality Assurance Plan for Hot-Mix Asphalt (HMA) R42-06," American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C. (2006).



園地公開  
歡迎投稿

## 剛性鋪面版底灌漿案例介紹

倪至寬\*、鄭文杰\*\*、江偉聖\*\*\*

### 摘要

國內剛性鋪面應用之範疇，如機場跑道、滑行道與高速公路路面等，大多已經到達維修之年限，但因交通量頻繁的情況下，全面翻修並不容易，所以可藉由鋪面版底灌漿來強化鋪面之承載力。

剛性鋪面主要破壞的原因為，版塊間之填縫料老化，無法與版塊緊密的接合產生之縫隙，使得地表水滲入級配料層，當飛機或車輛經過時造成唧水的現象，使級配料層之細粒料掏空，以及滲入之地表水無法排出致使路床軟化下陷，這些現象使得版塊下方充滿孔洞，降低版塊原有之承載力，當飛機或車輛重複經過時，版塊極易產生裂縫。

版塊填縫料因交通量不同之關係，老化的速度也有所不同，但養護工程方面則為定期施作，也許有些版塊下方已經有孔洞產生，剛性鋪面版底灌漿可配合定期之養護工程，先行以透地雷達偵查版塊底下之孔洞，再利用單環塞工法進行填充灌漿，將版塊底下之孔洞填塞，延長鋪面之使用年限。

本文之研究內容分為三大部分，一、灌漿配比實驗：在室內進行漿液泌水試驗、漿液凝結時間試驗、馬氏漏斗儀試驗、固結漿液抗壓強度試驗及固結漿液乾縮試驗來決定現場灌注的漿液配比，本文以無收縮水泥漿液為主要研究對象，二、工程案例：先利用透地雷達於現地版塊所偵查之孔洞，進行灌漿孔位佈設，以單環塞工法進行填充灌漿，填塞版塊底下之孔洞。三、非破壞性檢測：灌漿前藉由透地雷達偵測孔洞位置，並於灌漿後檢驗孔洞是否消失，驗證灌漿成效；灌漿前進行落重錘試驗，檢驗鋪面之承載力，並於灌漿後同點位再次施作落重錘試驗，比較灌漿後承載力之差異。

關鍵字：鋪面版底灌漿、填充灌漿、透地雷達、落重錘

---

\* 國立台北科技大學土木與防災研究所副教授

\*\* 國立台北科技大學土木與防災研究所博士生

\*\*\* 國立台北科技大學土木工防災研究所碩士生

## 一、灌漿配比試驗

### 1.1 試驗材料配比

試驗使用之材料為台灣水泥第一型卜特蘭水泥，添加 DENKA 低添加型無收縮混和材，拌合而成的無收縮水泥漿液，拌合材料如圖 1、圖 2 及表 1 所示，其試驗配比及試驗規劃如表 2 所示。

表 1 漿材比重試驗

材料	比重
台灣水泥第一型卜特蘭水泥	3.15
DENKA 低添加型無收縮混和材	2.62

表 2 水泥漿液配比及試驗規劃

W/C	無收縮劑添加量(%)	漿液泌水試驗	漿液凝結時間試驗	馬氏漏斗儀試驗	固結漿液抗壓強度試驗	固結漿液乾縮試驗
0.45	0	1				
	2	1				
	5	1				
	8	1				
0.6	0	1	1	1	3	1
	2	1	1	1	3	1
	5	1	1	1	3	1
	8	1	1	1	3	1
0.8	0	1	1	1	3	1
	2	1	1	1	3	1
	5	1	1	1	3	1
	8	1	1	1	3	1
1.0	0	1		1		1
	2	1		1		1
	5	1		1		1
	8	1		1		1





圖 1 台灣水泥第一型卜特蘭水泥

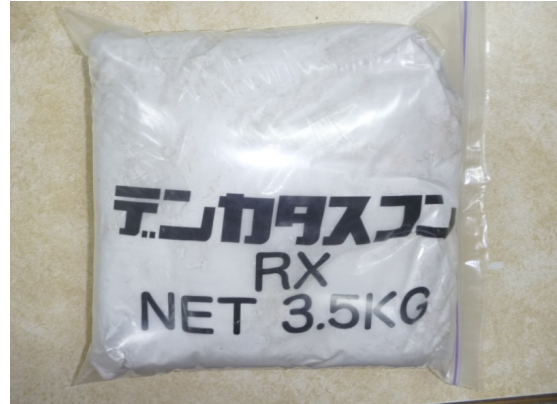


圖 2 DENKA 低添加型無收縮混和材

## 1.2 漿液泌水試驗

係根據 ASTM C940-98a 規範進行此試驗，將拌合完成之水泥漿液 800±10 ml 立即倒入 1,000 ml 玻璃量筒內，記錄其初始值（漿液體積與液面高度），第一小時內，每 15 分鐘記錄一次，之後每隔一小時記錄一次，直到連續兩次讀數相同時（表示試樣不再發生泌水現象），即可停止記錄，若泌水時間超過 4 小時，試驗應允已結束，泌水率(%)為  $\frac{V_2}{V_1} \times 100$  (如圖 8 所示)。試驗照片如圖 3 所示，試驗結果如圖 9 所示；結果顯示水灰比越大之漿材泌水量越多，漿液添加無收縮劑後泌水量明顯減少。



圖 3 泌水試驗照片



圖 4 凝結時間試驗照片

### 1.3 漿液凝結時間試驗

係根據 ASTM C191-99 規範進行此試驗，利用維克針將每個試樣依等間距時間，進行數次貫入度測試，並且記錄整個貫入試驗結果，繪製於貫入深度對時間的曲線上，再利用內插法求出維克針貫入深度為 25mm(初凝)與無明顯貫入深度(終凝)時，所對應之時間。試驗照片如圖 4 所示，試驗結果如圖 10 所示；依據工地灌漿之經驗，水灰比 0.45 之漿液輸送不易，所以，選擇水灰比 0.6 之漿液進行凝結時間試驗；結果顯示在溫度 23℃ 濕度 50% 的情況下，純水泥漿液初凝時間已長達 5 個小時，添加無收縮劑 8% 之漿液初凝時間更達到 10 個小時，因時間上已經足夠工地現場灌漿的工作時間，就不另外進行水灰比 0.8 與 1.0 之漿液試驗。

### 1.4 馬氏漏斗儀試驗

係根據 ASTM D6910/D6910M-09 規範進行此試驗，利用馬氏漏斗儀測定水泥漿液各配比較下一定體積 (946 ml) 之秒數，與水落下相同體積 (946 ml) 之秒數  $26 \pm 0.5$  s，做一相對黏滯度之比較。試驗照片如圖 5 所示，試驗結果如圖 11 所示；因添加無收縮劑之漿液有泡沫，計量體積容易有誤差，所以利用電子秤計算各配比 946c.c 之重量為讀值依據，結果顯示，水泥漿水灰比大時，無收縮劑之添加與否，對水泥漿流動性變化並不明顯，但是水泥漿水灰比越小時，無收縮劑之添加與否或添加多寡，影響流動性增加較明顯。



圖 5 馬氏漏斗儀試驗照片



圖 6 抗壓強度試驗照片

### 1.5 固結漿液抗壓強度試驗

係根據 CNS 1230 製作及養護固結漿液試體，並以 CNS1232 進行抗壓試驗，根據泌水試驗之結果，選取泌水量少漿體穩定性高之配比漿液進行抗壓試驗，試驗照片如圖 6 所示，試驗結果如圖 12 所示；添加無收縮劑之固結漿液初期強度並不高，可能是因為無收縮劑降低水泥水化速

度之關係,到了第七天,有添加無收縮劑固結水泥漿液之強度等於或大於固結純水泥漿液之強度。

### 1.6 固結漿液乾縮試驗

係根據 CNS A3217 規範進行此試驗,製作 2.5x2.5x28cm 試體,當試體到達 20 至 24 小時脫模,脫模後將試體在水中濕養 48 小時。於齡期為  $72 \pm 0.5$  小時(3 天)將試體取出,以濕抹布擦拭後即量測其長度  $l_3$  並以此為基準,量測試體乾養 7、14、21、28 天之長度  $l_7$ 、 $l_{14}$ 、 $l_{21}$ 、 $l_{28}$ ,以同一次拌合之水泥砂漿試體所製作之三個試體每單位長度之長度變化平均值即為該固結漿液之乾縮量  $\Delta_n = \frac{(l_n - l_3)}{l_3} \times 100\%$ 。試驗照片如圖 7 所示,將各發展曲線做線性迴歸可得到各配比之

極限乾縮量,如圖 13 所示,結果顯示水灰比 0.6,是否添加無收縮劑對於固結水泥漿液的乾縮影響並不大;水灰比 0.8 添加無收縮劑 2% 得到最小的乾縮量,但添加越多無收縮劑反而乾縮量大;水灰比 1.0,添加越多無收縮劑可得到較少之乾縮量;造成此種現象的可能原因為,水灰比 0.8 的配比下無收縮劑膨潤之效果最佳,並產生較大量之氣泡,試體製作時,僅能將較大的氣泡震動排出,較微小的氣泡會殘留於試體內,當漿液泌水量較大時,微小的氣泡可以隨著泌水現象排出試體,減少試體的乾縮量,但水灰比 0.8 各配比的泌水量又大幅小於水灰比 1.0 的各個配比,使得無收縮劑添加越多,導致殘留於試體內的微小氣泡量越多,乾縮量越大。

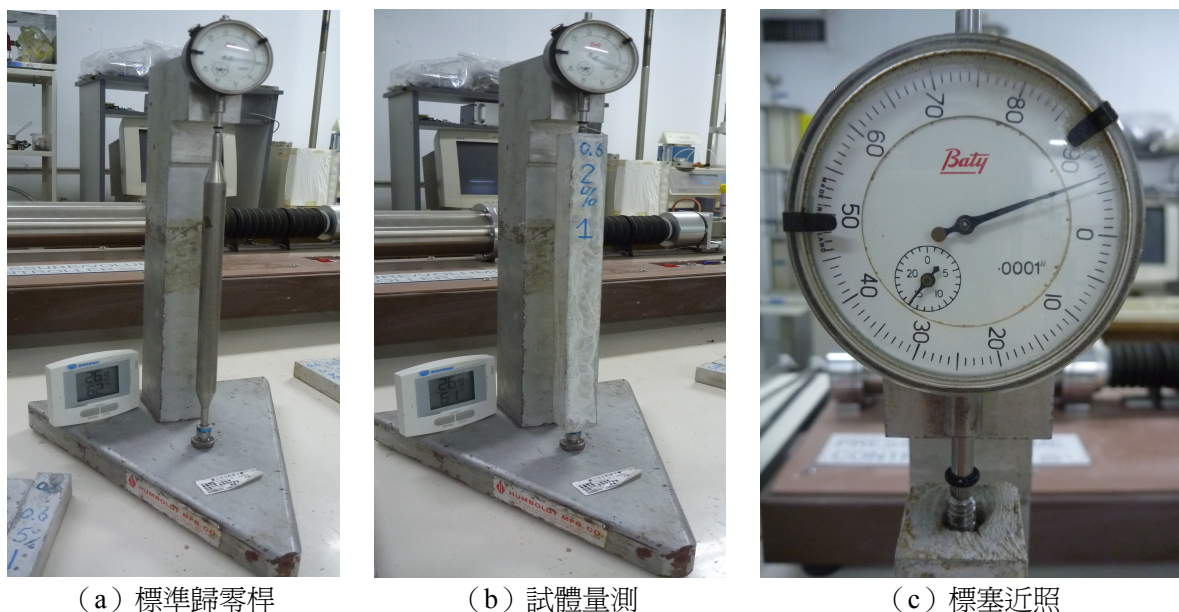
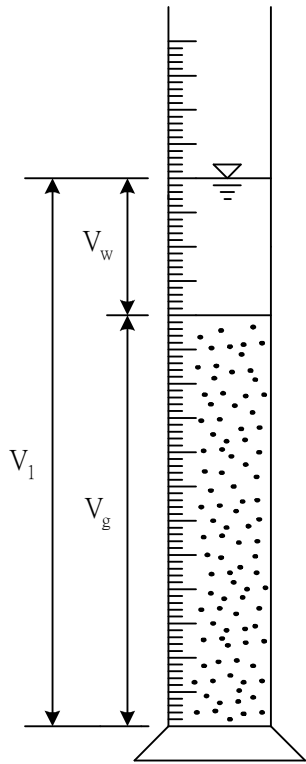


圖 7 固結漿液乾縮試驗照片



$V_1$  : 開始試驗之試樣體積 (ml)  
 $V_g$  : 於規定之記錄時間間隔內，  
 量測漿液部分之試樣體積 (ml)  
 $V_w$  : 泌水量 (ml)

圖 8 泌水量計算公式參數圖

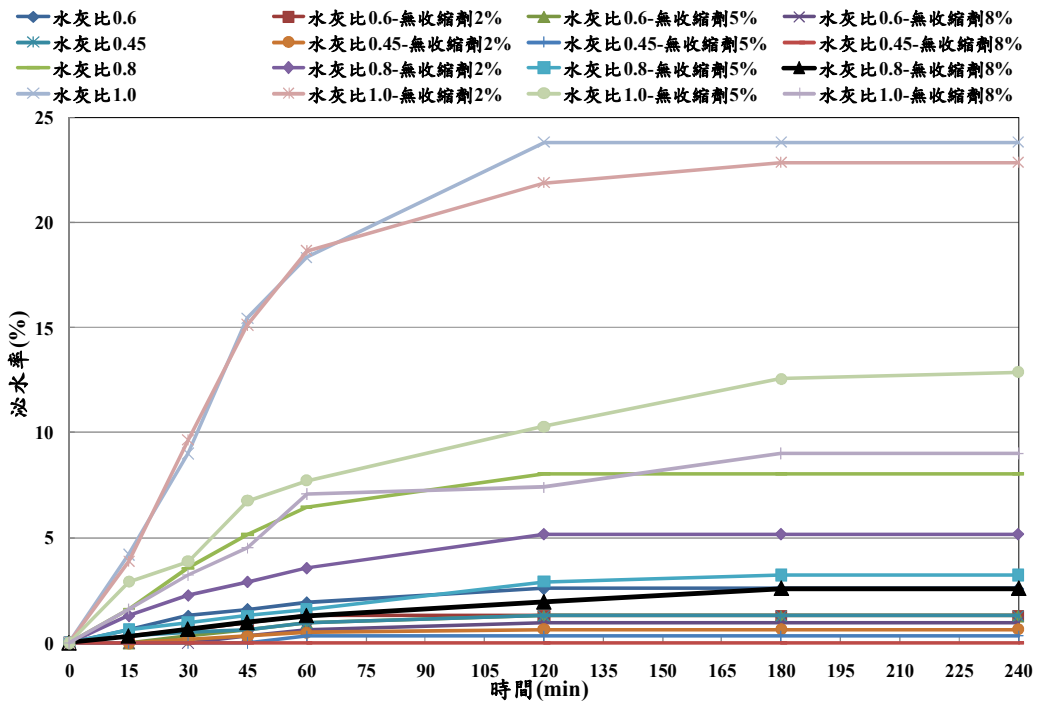


圖 9 水泥漿液泌水試驗結果

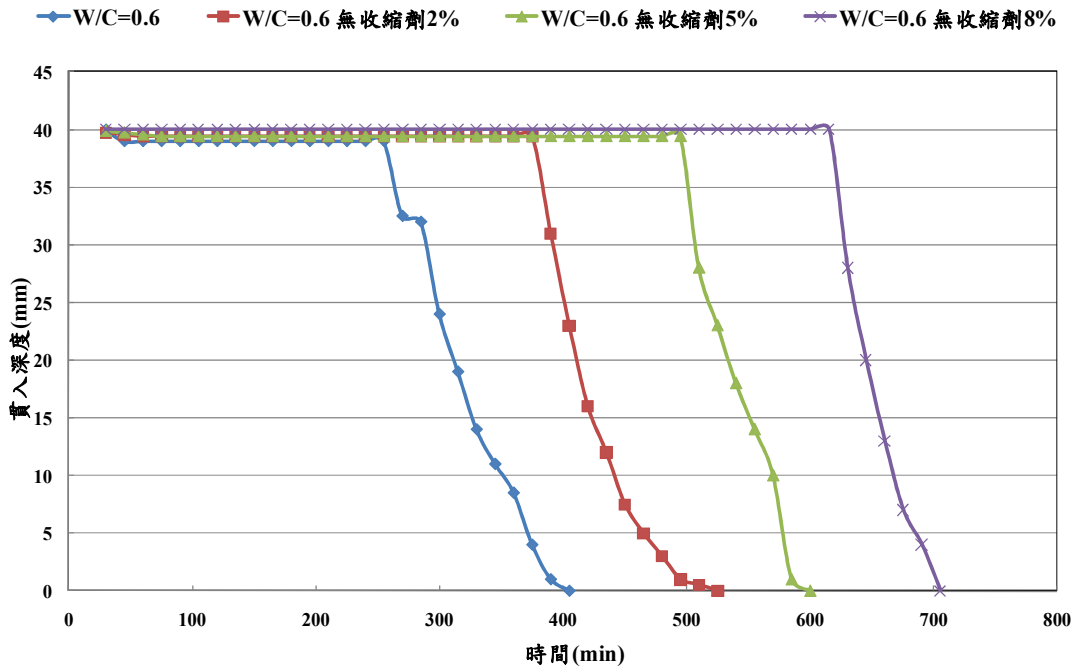


圖 10 水泥漿液凝結時間試驗結果

漿液配比與馬氏漏斗儀試驗結果關係圖

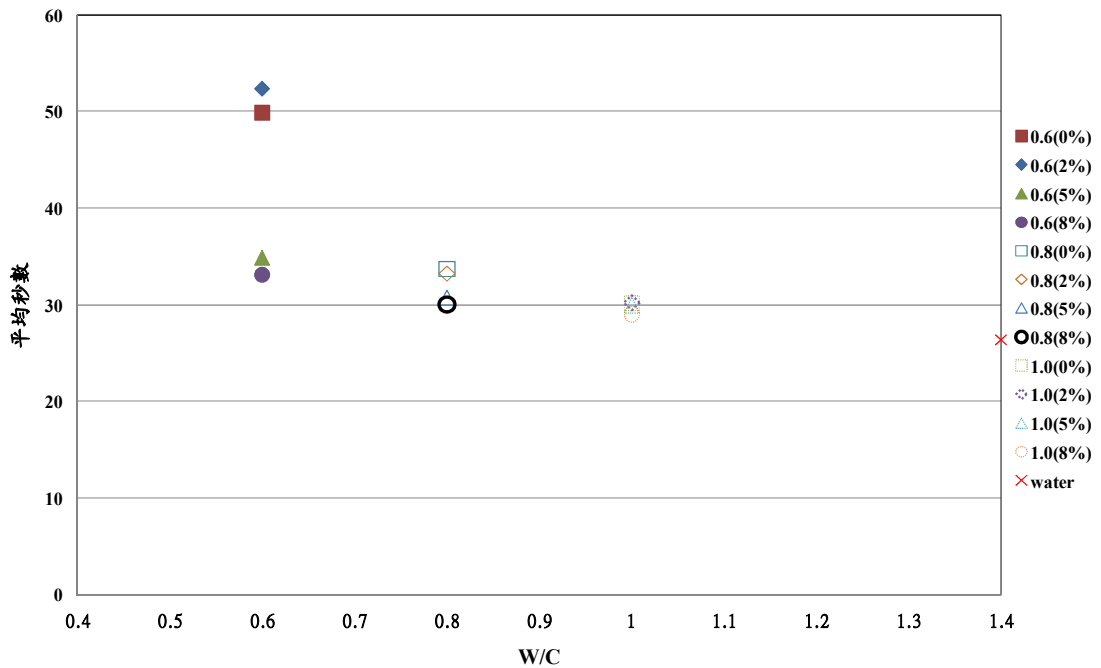


圖 11 水泥漿液馬氏漏斗儀試驗結果

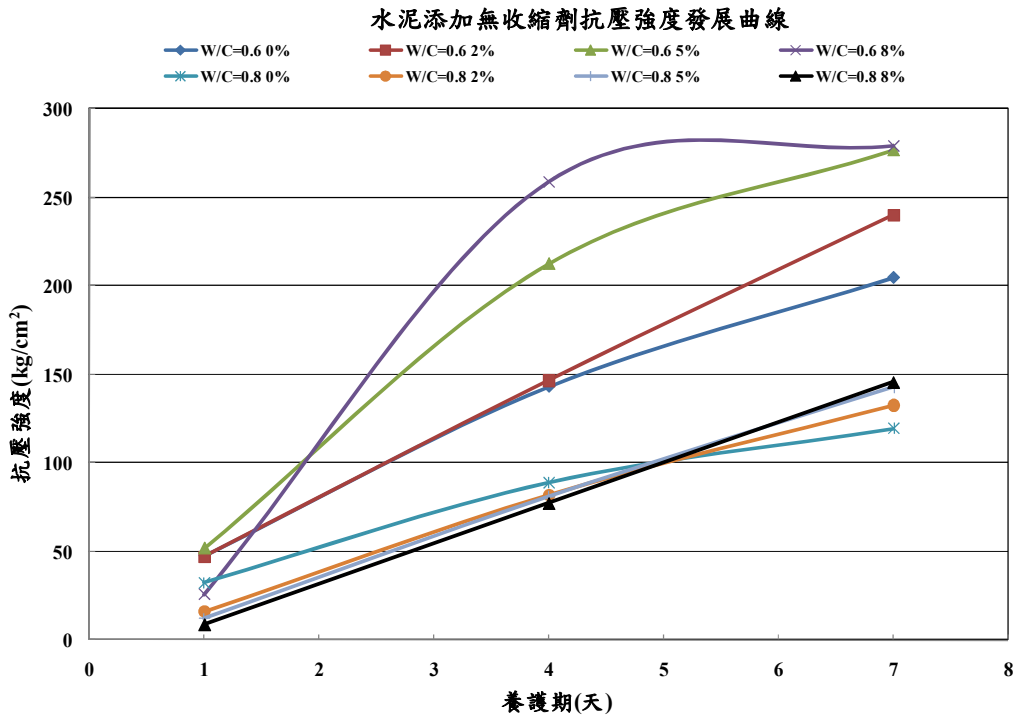


圖 12 固結水泥漿圓柱試體抗壓強度試驗結果

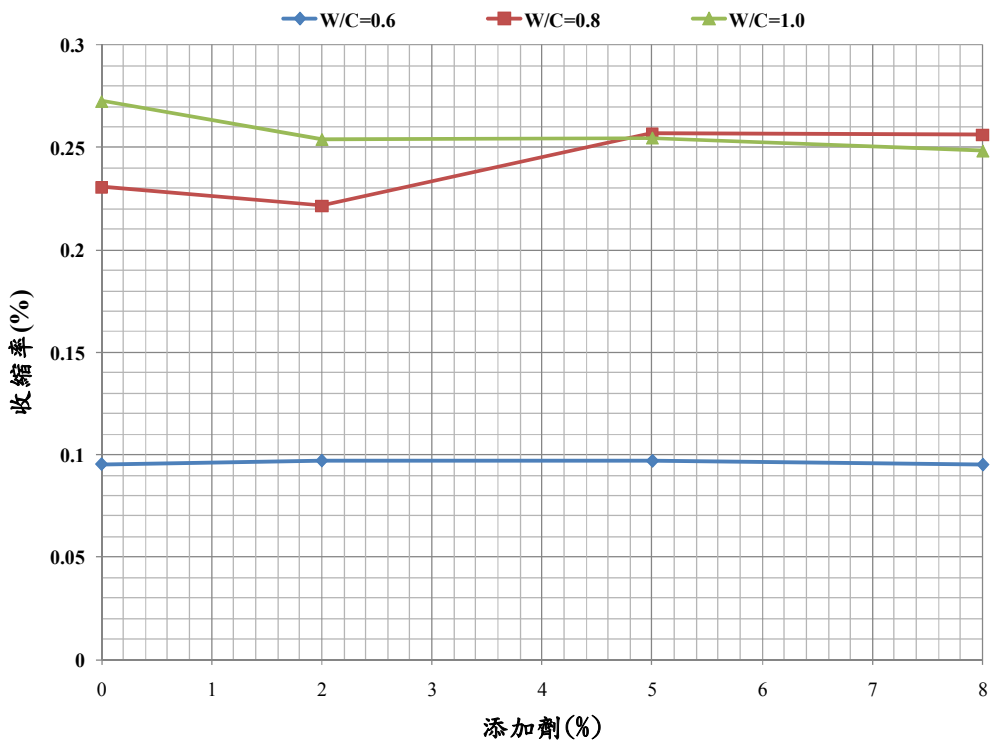


圖 13 極限乾縮率與配比之關係圖

## 1.7 漿液配比試驗綜合討論

本灌漿配比試驗之研究，目的為求泌水量小、工作時間長、流動度好及強度高之漿材，透過漿液泌水試驗、漿液凝結時間試驗、馬氏漏斗儀試驗及固結漿液抗壓強度試驗，來決定現地灌漿使用之漿材，並訂出品管標準。上述試驗結論整理如下：

### (1) 漿液泌水試驗

水灰比越大之漿材泌水量越多，漿液添加無收縮劑後泌水量明顯減少，決定以泌水量小於 5% 之漿材為選用之標準，並對泌水量小於 5% 之配比，進行固結漿液抗壓試驗。

### (2) 漿液凝結試驗

無收縮劑添加量越多，初凝時間越長，於使用水灰比 0.6 之純水泥漿液，初凝時間已長達 5 個小時，水灰比 0.6 添加無收縮劑 8% 之水泥漿液，初凝時間更達到 10 個小時；標準凝結試驗之水灰比為 0.2~0.3，但試驗所使用的水灰比 0.6，比標準凝結試驗高，故初凝時間延長，但水泥已經完全水化，長時間灌注恐影響灌漿成效，為求良好之灌漿品質，現場以漿液拌合均勻後兩個小時內，必需灌注完畢為品質管控基準。

### (3) 馬氏漏斗儀試驗

水泥漿水灰比大時，無收縮劑之添加與否，水泥漿流動性變化並不明顯，但是水泥漿水灰比小時，無收縮劑之添加與否或添加量多寡，增加漿液流動性較明顯；水灰比 1.0 之漿液不受無收縮劑添加量影響，漿液流動性較好，但泌水量過高，故不採用；相較於水灰比 0.6 之漿液，水灰比 0.8 之漿液可以得到較好的流動性，其中又以水灰比 0.8 無收縮劑添加 8% 之漿液配比最好。

### (4) 固結漿液抗壓強度試驗

因剛性鋪面版底灌漿之主要目的，為填充版塊下方之孔洞，同時提高路床承载力，考慮承載強度之因素，以泌水量小於 5% 之各灌漿材料配比，養護七天後，進行之固結漿液抗壓試驗的最低強度  $120 \text{ kgf/cm}^2$  為日後品質管控標準。

### (5) 固結漿液乾縮試驗：

水灰比 0.6 時，是否添加無收縮劑並不影響固結水泥漿液的乾縮，水灰比 0.8 時添加越多的無收縮劑，乾縮量越大，水灰比 1.0 時添加越多的無收縮劑乾縮量越小，但乾縮量小於泌水現象所造成之收縮幅度，故篩選漿液時還是以泌水量為主要考量，乾縮量為次要考量。

綜合上述之結論，選用水灰比 0.8 無收縮劑添加量 8% 之漿液，但為了施工上的方便，配合 DENKA 低添加型無收縮混和材之原廠包裝 (3.5 kg /包)，剛好為袋裝水泥 (50kg /袋) 之 7%，現場施灌時，均以水灰比 0.8 無收縮劑添加量 7% 之漿液，進行剛性鋪面版底灌漿。

## 二、工程案例介紹

### 2.1 工程簡介

版塊狀況：剛性鋪面版塊裂紋模式如圖 14 所示。

使用工法：單環塞填充灌漿。

使用漿材：添加無收縮劑之水泥漿液。漿液配比：W/C = 0.8，無收縮劑添加量 7%。

漿液物性：依據各試驗之結果進行內差，可得知此漿液配比之泌水率 3%、馬氏漏斗儀試驗 30 秒以及七天之抗壓強度 140 kgf/cm<sup>2</sup>。

灌漿設備：因灌注現場不能置放灌漿設備，所以採用不落地之漿液拌合設備及灌注設備進行施工，機具配置如圖 15 所示。



版塊1A:全無裂縫



第二版塊:角隅破壞



版塊1B:角隅破壞



第三版塊:角隅破壞+中央裂縫

圖 14 剛性鋪面版底灌漿前之現況



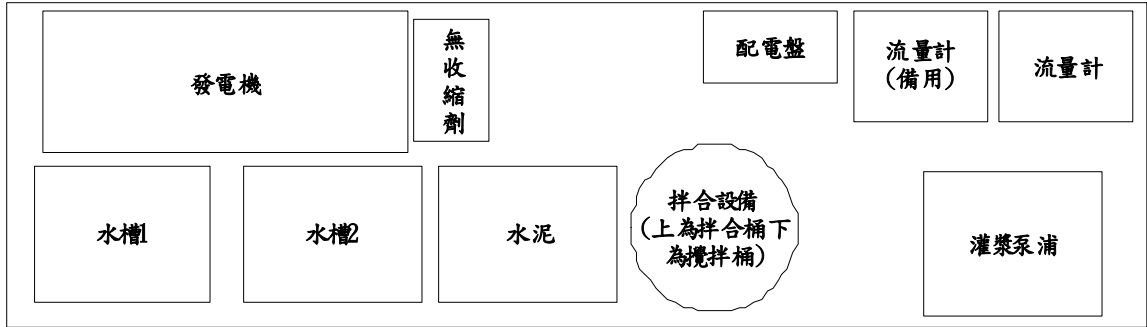


圖 15 灌漿設備平面配置圖及照片

## 2.2 灌漿孔位配置

這次剛性鋪面之灌漿，選擇了不同裂紋類型之版塊，分別為版塊 1A、版塊 1B、第二版塊、及第三版塊等四種版塊，每一版塊灌漿孔及監測點之配置，必須搭配版塊裂紋類型及版塊下孔洞位置而設置，分別敘述如下：

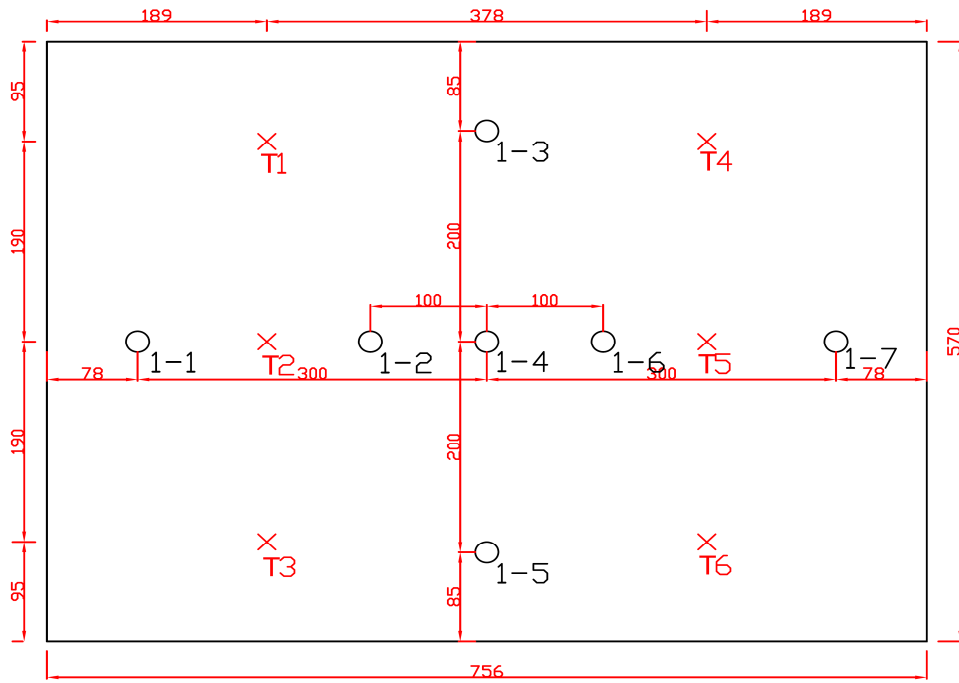
### 2.2.1 版塊 1A

選擇完全無裂縫之版塊 1A 如圖 16 所示，假設版底無孔洞，在版塊中間灌漿孔 1-4 注入漿液，並在距離灌漿孔 1m 處設置出漿口 1-2 與 1-6，距離灌漿孔 2m 處設置出漿口 1-3 與 1-5，距離灌漿孔 3m 處設置出漿口 1-1 與 1-7，藉此評估灌漿壓力與灌漿範圍對版塊抬升之影響。

### 2.2.2 版塊 1B

此版塊配置如圖 17 所示，共進行三種不同的灌注，試驗 2 測試透地雷達顯示有孔洞的地方，單孔的吃漿量；試驗 3 係針對多個孔洞進行灌注，3-1 測試離孔洞一段距離是否可以灌注，假設孔洞均有相通，3-2 與 3-3 孔用來填充大量孔洞，3-4 用來測試附近有孔洞也有裂縫時，漿液的流向；試驗 4 係沿著裂縫佈設灌漿孔，每個孔位與裂縫之垂直距離均不相同，觀察漿液從裂縫溢出

與佈孔距離之對應關係。



- 試驗灌漿孔 共計7孔
- × 監測點 共計6點

圖 16 1A 版塊灌漿孔位配置圖

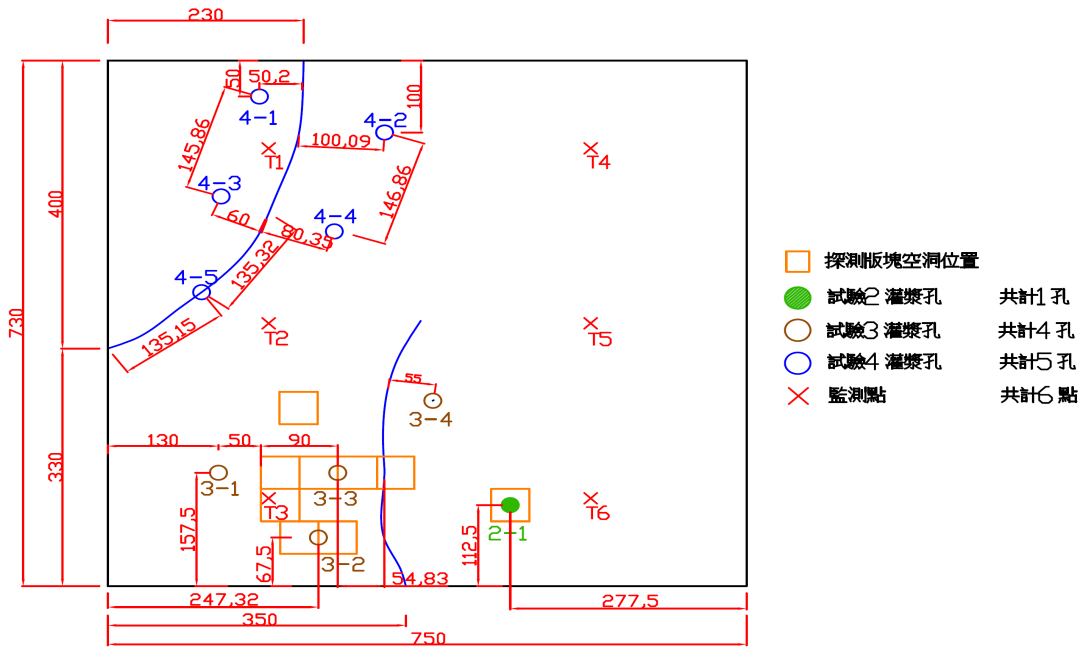


圖 17 版塊 1B 灌漿孔位配置圖

### 2.2.3 第二版塊

根據 1A 與 1B 版塊之灌漿結果來佈設灌漿孔位如圖 18 所示，以達到孔洞完全填充之效果，並於版塊表面有明顯裂縫或下陷處進行孔位配置，驗證有上述情況發生時漿液能否注入。

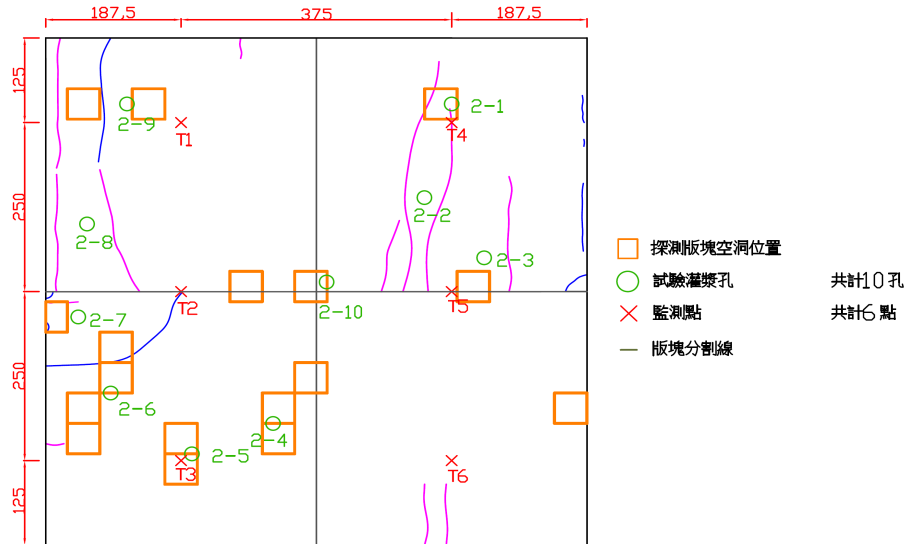


圖 18 第二版塊灌漿孔位配置圖

### 2.2.4 第三版塊

試驗孔位係根據 1A 與 1B 版塊之灌漿結果佈設灌漿孔位如圖 19 所示，以達到孔洞完全填充之效果。灌漿完成後，爲了驗證透地雷達掃描沒有孔洞的區域漿液是否能流入，因此鑽設六個驗證孔位。

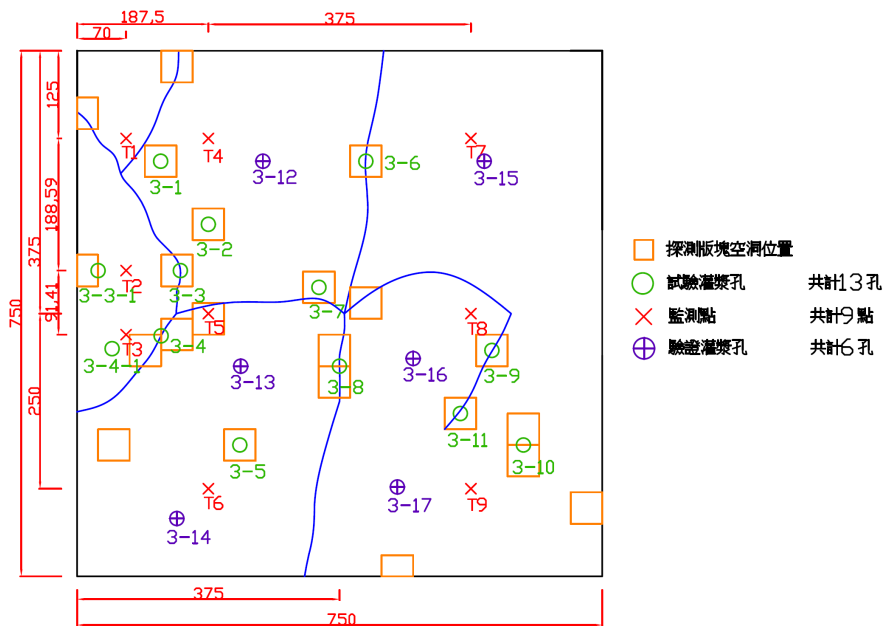


圖 19 第三版塊灌漿孔位配置圖

### 2.3 灌漿作業流程

本節將剛性鋪面灌漿工程作業編寫成流程圖(圖 20)，並配合流程圖順序放置施工照片(圖 21 至圖 32)，且為了防止版塊的上浮而導致之積水及水漂等問題，剛性鋪面版底灌漿工程作業是以灌漿壓力  $P_g$  為品管重點，再以灌漿量輔佐之，灌漿期間均以單 Packer 上之壓力錶為管控準則，剛性鋪面版底灌漿品管機制如圖 33 所示。

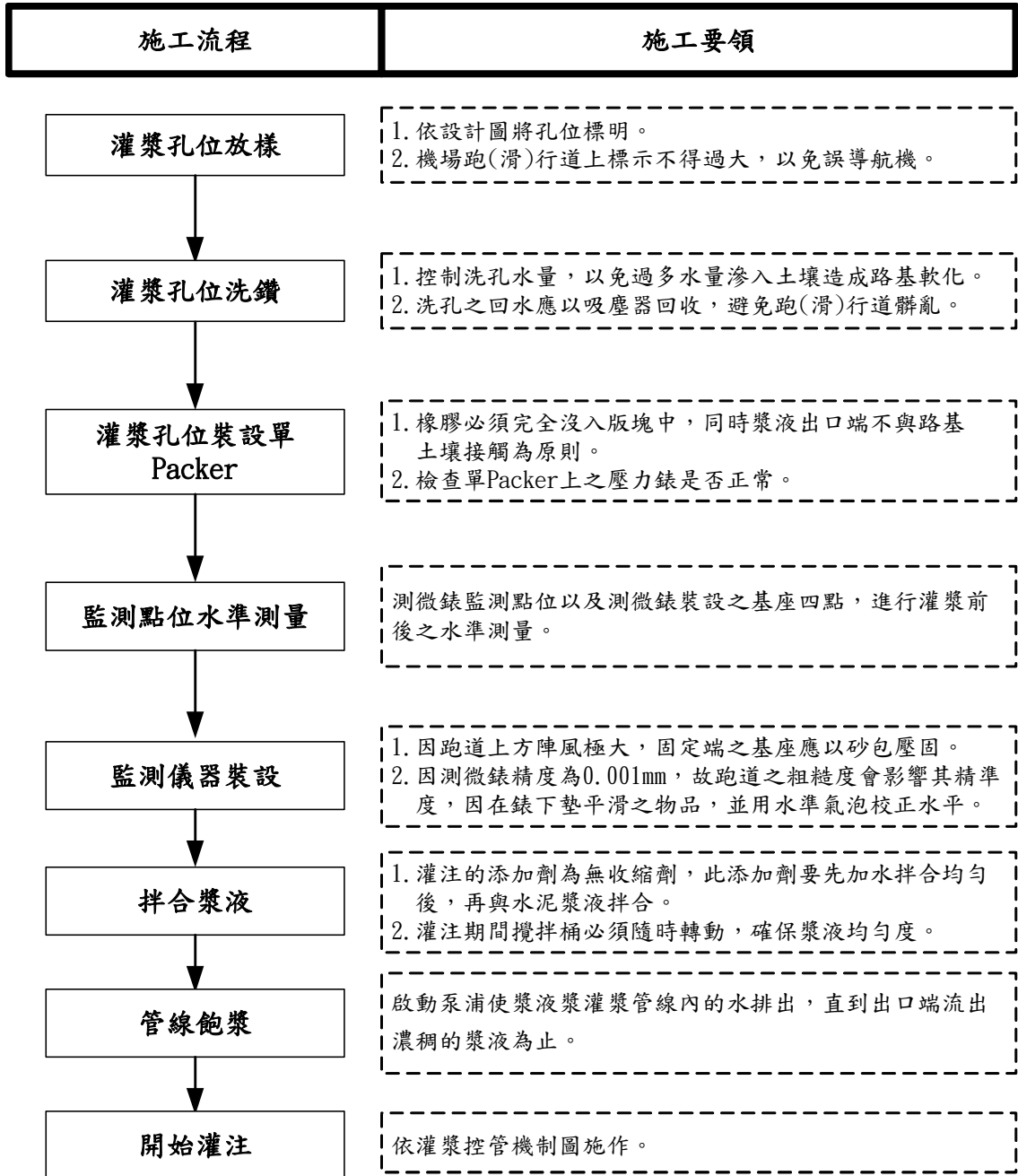


圖 20 剛性鋪面版底灌漿作業要領作業流程



圖 21 灌漿孔位放樣



圖 22 灌漿孔位洗鑽



圖 23 灌漿孔位鑽設全景圖



圖 24 灌漿孔位裝設單 Packer 及壓力錶

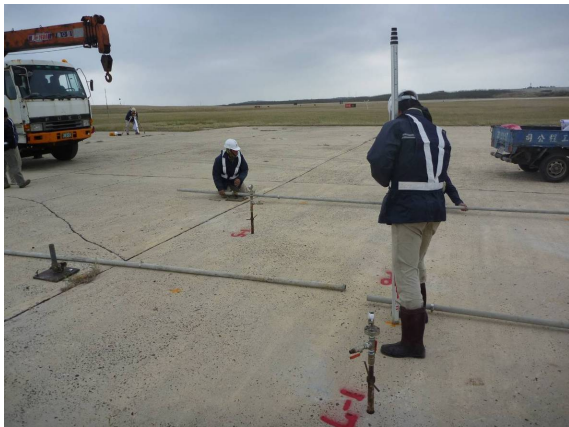


圖 25 監測點位水準測量



圖 26 監測點測微錶佈設



加水

再加無收縮劑後與水拌合均勻

再加水泥後拌合均勻

圖 27 拌漿過程



圖 28 下放漿液至攪拌桶



圖 29 管線飽漿



圖 30 灌漿管接上單 Packer



圖 31 漿液灌注情況



圖 32 灌漿記錄設備

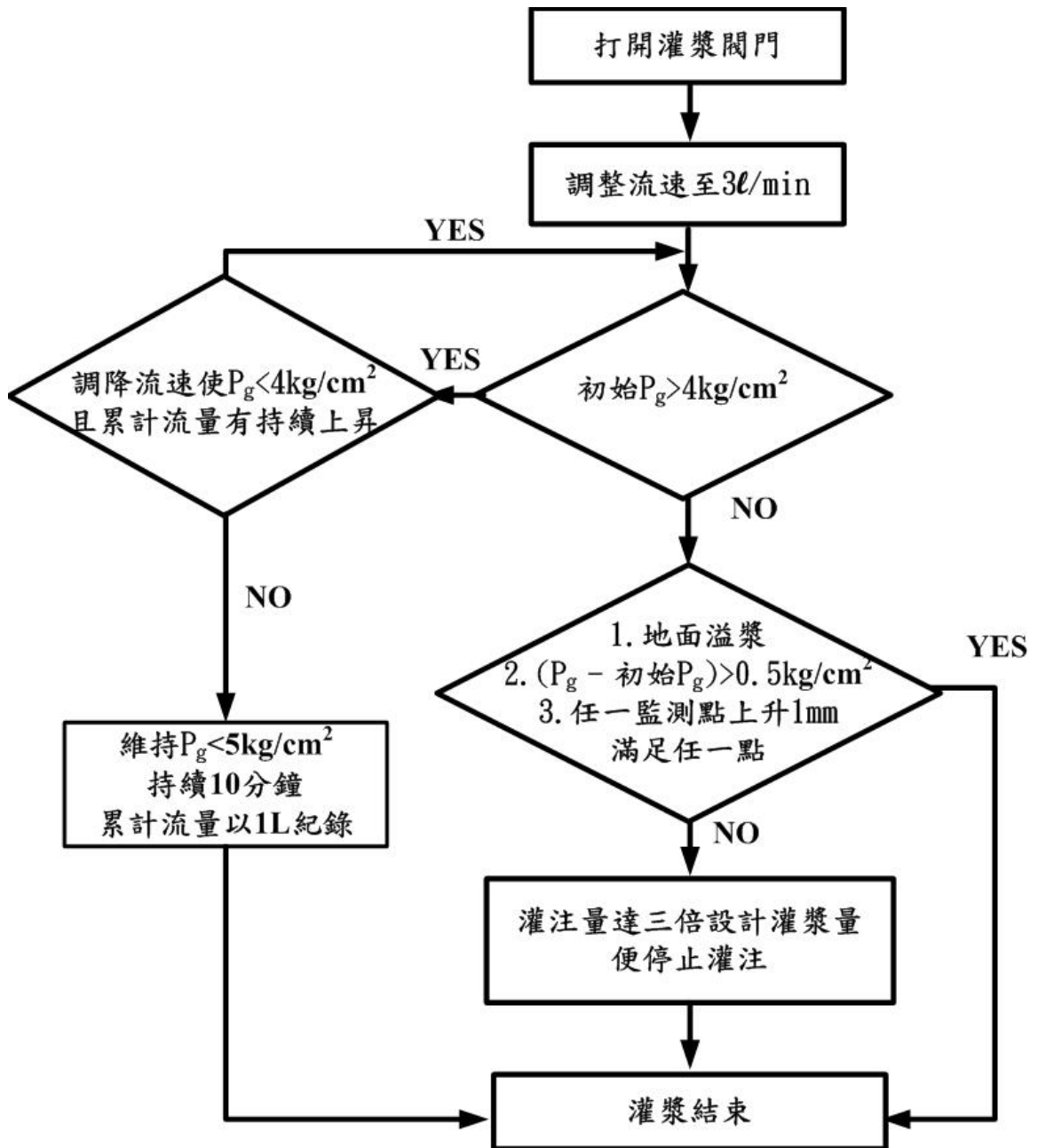


圖 33 剛性鋪面版底灌漿品管機制

## 2.4 灌漿成果

### 2.4.1 版塊 1A

由於版塊 1A 為閑置區域，因此灌漿之目的為觀察版塊上浮時之灌漿壓力，所以灌漿結束時，1A 版塊已出現因些微上浮而產生之裂紋，1A 版塊灌漿結果及裂紋如圖 34 及表 3 所示；1A 版塊

的灌漿範圍與隆起量關係如圖 35 所示，其上舉力推算如圖 36 所示，所以當灌漿範圍等同於直徑 2m 的圓形面積，且灌漿壓力為  $1\text{kg}/\text{cm}^2$  時版塊就會上舉。

表 3 版塊 1A 灌漿成果

灌漿孔編號	時間(開始~結束)	注入量(L)	初始 $P_g \sim P_g$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	備註
1-4	09:40 ~ 14:10	只對 1-4 孔灌注，觀察漿液從其他孔位溢出之灌漿量。		
1-2		23		
1-6		43	0.6	
1-5		127		
1-3		181		
		187		1-3 上方草地
1-7		288		
		430		產生裂縫
		495		1-5 下方版塊交接處溢漿
		754		1-7 右方草地

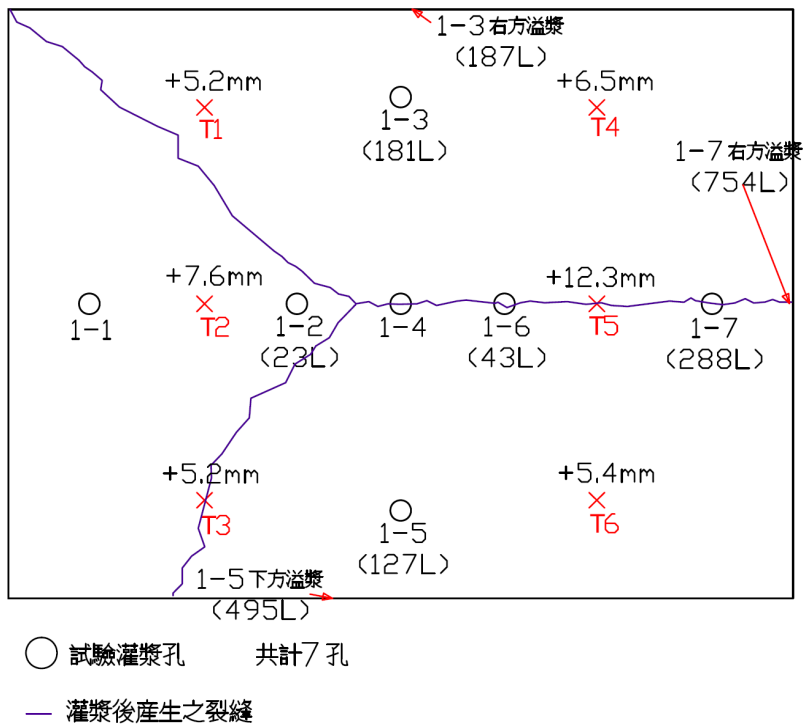


圖 34 版塊 1A 灌漿成果



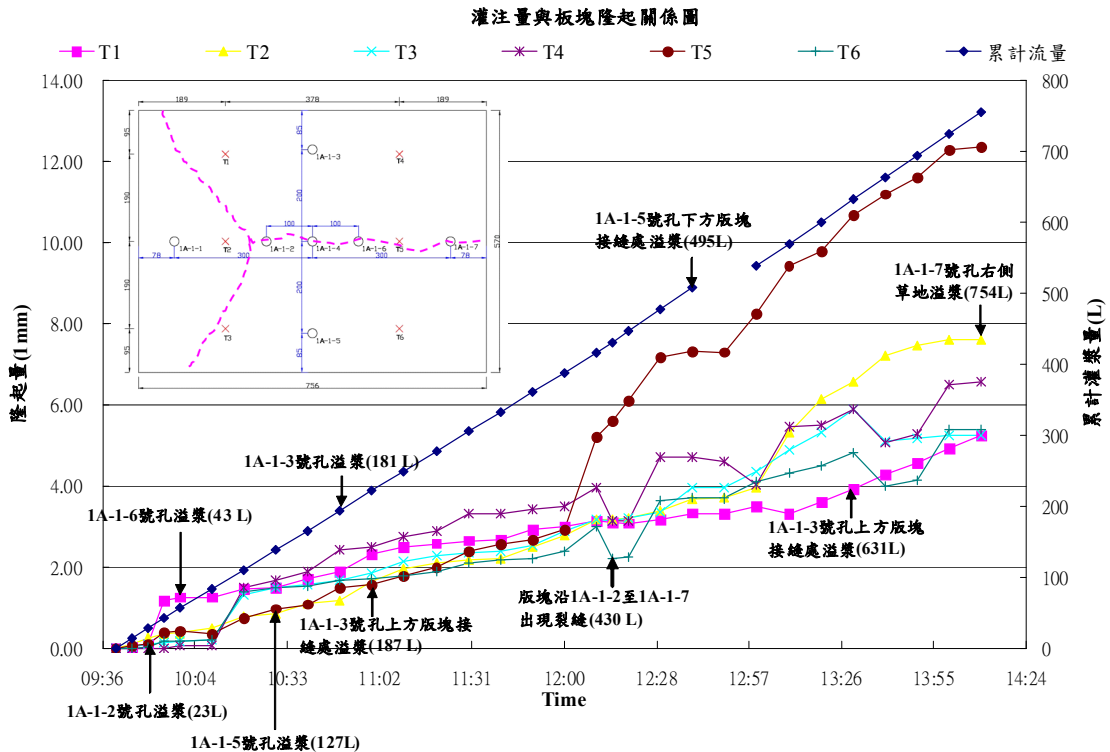


圖 35 灌漿範圍與隆起量關係

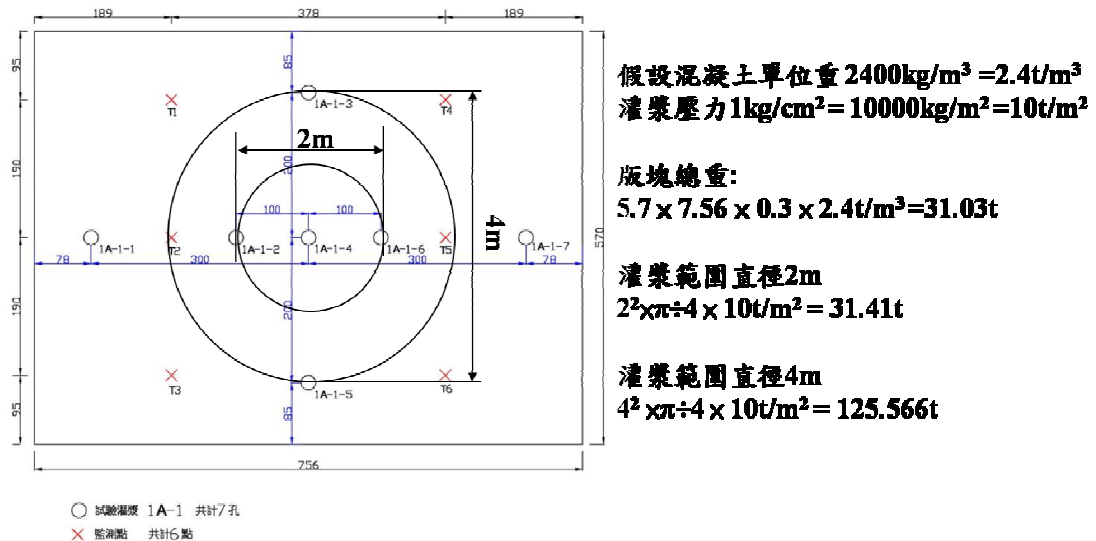


圖 36 灌漿範圍與上舉力推算

## 2.4.2 版塊 1B

版塊 1B 灌漿結果如圖 37 及表 4 所示，由 2-1 孔的灌漿結果我們可以得知，透地雷達掃描之孔洞單孔的注入量約為 6L；3-1 孔洞顯示，灌漿孔距離孔洞 50cm，漿液也可注入到孔洞內；3-2

孔發現版塊內部有孔洞，位置為版面下 10cm 處，直接以水泥漿注入孔洞內，回填共計 10L 水泥漿液；3-3 孔附近的孔洞甚多，但只灌注 6L，經由灌漿後之透地雷達掃描此區並無孔洞，且灌漿孔鑽設時，取出之混凝土圓柱並無孔洞，推測為孔洞已經在 3-1 灌注時填充完畢；3-4 孔無法注入，無法證實漿液之流向，但顯示出為有效填充孔洞，灌漿孔最好設置於孔洞上方；試驗 4 孔位全數無法注入，觀察灌漿孔鑽設時，取出之混凝土圓柱，為鋪面表面之裂縫，且鋪面無明顯下降，所以無法注入。

表 4 版塊 1B 灌漿成果

灌漿孔編號	時間(開始~結束)	注入量(L)	初始 $P_g \sim P_g$ ( $kg/cm^2$ )	備註
2-1	10:50~10:53	6	1.6~4.0	
3-1	10:55~11:20	20	1.0~1.6	
3-2	11:25~11:40	5	2.4~4.0	裂縫處(11:35~11:45 倒入量 10L)
3-3	13:25~13:30	6	2.0~4.0	此孔鑽孔深度 50cm,已鑽入級配層
3-4	13:35~13:40	1	max 5.0	無法注入
4-1	13:45~13:50	1	max 5.0	無法注入
4-2	13:55~14:00	1	max 5.0	無法注入
4-3	14:05~14:10	1	max 5.0	無法注入
4-4	14:15~14:20	1	max 5.0	無法注入

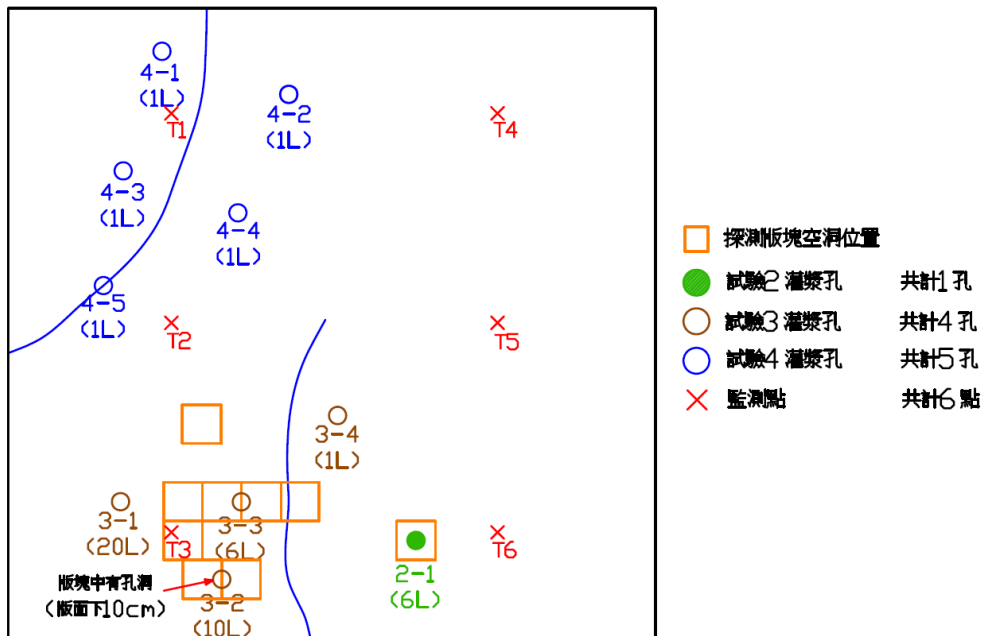


圖 37 版塊 1B 灌漿成果

### 2.4.3 第二版塊

第二版塊灌漿結果如圖 38 及表 5 所示,2-1 孔位雖有孔洞但無法注入,維持壓力小於  $5\text{kg}/\text{cm}^2$  十分鐘的情況下,經由透地雷達結果顯示仍可填充部分孔洞,使孔洞縮小;2-2 孔位位於版塊表面有明現裂縫但無下陷處,結果顯示此狀況下漿液並無法注入,與版塊 1B 之試驗 4 情況相同;2-3 孔位附近只有一個孔洞,依照版塊 1B 的試驗 2 之結果,設計灌漿量為單孔 10L,此孔位灌注量為 30L,已達設計灌注量的三倍,認定此孔位已經灌注完成;2-4 孔灌注 50L 後壓力開始攀升,認定此孔位已經灌注完成;2-5 孔位灌注 54L 後由左側版塊交接處開始溢漿,認定此孔位已經灌注完成;2-6 孔位於灌漿閥門開啓尙未啓動泵浦時,漿液就可由攪拌桶與地面之水頭差灌注入版塊下方,與 2-5 孔位相同地方溢漿;2-7 孔位灌注 12L 後左側版塊交接處溢漿,認定此孔位已經灌注完成;2-8 孔位位於版塊表面有裂紋,並且地表明顯下降處,此處灌注 21L 後由左側溢漿,由此孔位可證實,地表有明顯下降處,可能有範圍較大因地表已經沉陷,故厚度較薄之間隙,以至於透地雷達無法辨識出孔洞,日後灌注時應於此種地區配置灌漿孔灌注,2-9 與 2-10 孔位各灌注 38L 與 30L,灌漿壓力便快速攀升,認定已經灌注完成。

表 5 第二版塊灌漿成果

灌漿孔 編號	時間 (開始~結束)	注入量 (L)	初始 $P_g \sim P_g$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	備註
2-1	12:20~12:25	1	max5.0	無法注入
2-2	12:30~12:35	1	max 5.0	無法注入
2-3	12:40~12:50	30	2.4~4.4	達到預定灌漿量
2-4	12:55~13:15	50	0.6~1.2	超過初始 $P_g+0.5\text{kg}/\text{cm}^2$
2-5	13:20~13:41	54	0.0~0.0	左側版塊交接處溢漿
2-6	13:45~13:46	1	0.0~0.0	與 2-6 灌漿時相同位置版塊交接處溢漿
2-7	13:50~13:53	12	0.6~1.0	左側版塊交接處溢漿
2-8	14:00~14:07	21	0.0~0.0	左下 45° 版塊交接處溢漿
2-9	14:10~14:24	38	1.20~2.4	超過初始 $P_g+0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$
2-10	14:30~14:40	30	0.6~2.0	超過初始 $P_g+0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$

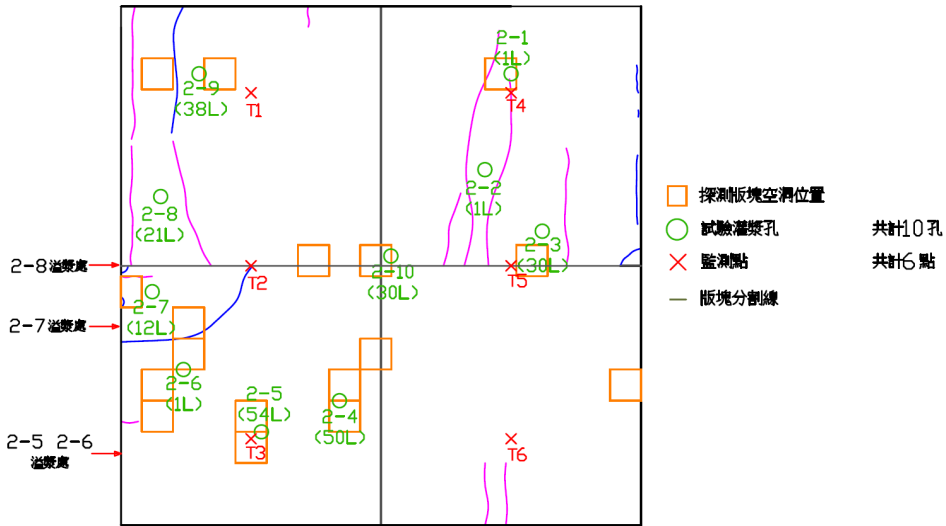


圖 38 第二版塊灌漿成果圖

### 2.4.4 第三版塊

第三版塊灌漿結果如圖 39 及表 6 所示，此版塊可見之裂縫大多從版頂裂到版塊底部，所以灌漿時漿液大多從灌漿孔位附近之裂縫滲出；因雨水從裂縫滲入碎石級配料層，造成路基與鋪面間有大範圍的間隙，於透地雷達掃描時，僅標出較明顯之孔洞為灌漿依據，故施做驗證孔位 3-12 ~17 時，附近雖無明顯孔洞但灌注量頗大的現象，於灌注 3-9~11 號孔位時，漿液隨著 3-9 和 3-11 之裂縫沿線微微滲出，並延伸至版塊中央之裂縫，可驗證版塊與路基存在著大範圍的間隙；版塊並存在著肉眼無法辨識的細微裂縫，於 3-10 孔與 3-15 孔灌注時有發現，初期灌注時會滲水出來，灌注一段時間後開始滲漿，這驗證了剛性鋪面版底灌漿會將排除版塊下方之積水，可避免路床因積水持續軟化。

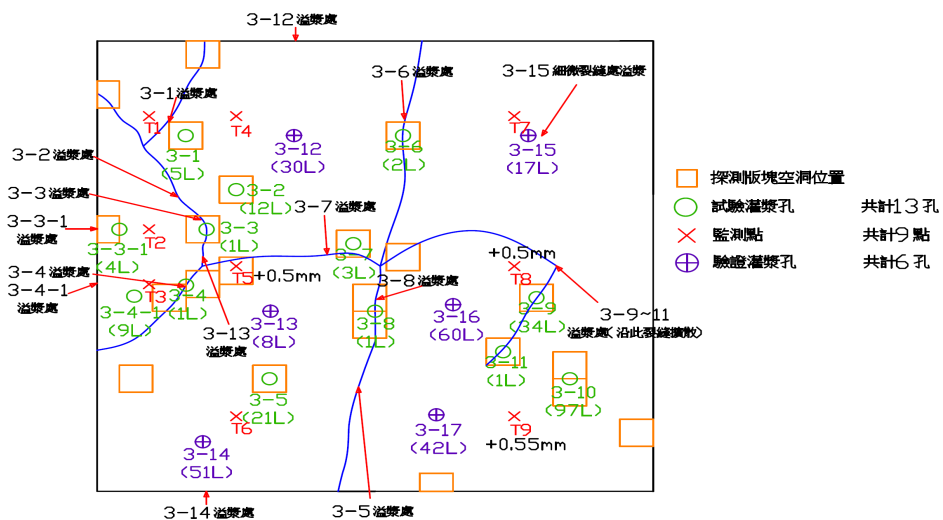


圖 39 第三版塊灌漿成果圖

表 6 第三版塊灌漿成果

灌漿孔 編號	時間 (開始~結束)	注入量 (L)	初始 $P_g \sim P_g$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	備註
3-1	00:55~00:57	5	1.0~1.0	左上 45° 裂縫溢漿
3-2	01:05~01:09	12	2.0~2.0	左側裂縫溢漿
3-3	01:10~01:10	1	0.0 ~0.0	立即沿裂縫溢漿,與 3-2 相通
3-3-1	01:20~01:22	4	1.0~1.0	左側版塊交接處溢漿
3-4	01:25~01:26	1	0.0 ~0.0	立即沿裂縫溢漿
3-4-1	01:30~01:3	9	2.0~2.0	左側版塊交接處溢漿
3-5	01:40~01:47	21	1.2~1.6	右側裂縫溢漿
3-6	02:10~02:11	2	1.0~1.0	沿上方裂縫溢漿
3-7	02:15~02:16	3	2.0~2.0	正下方裂縫溢漿
3-8	02:20~02:21	1	0.0~0.0	立即沿裂縫溢漿
3-9	02:25~02:36	34	0.2~0.2	周圍裂縫均有溢漿
3-10	02:40~03:20	97	2.0~2.0	同 3-9 周圍的裂縫溢漿
3-11	03:25~03:26	1	0.0-0.0	立即與 3-9、3-11 相通溢漿
3-12	22:10~22:21	30	1.0~1.0	上方版塊交接處溢漿
3-13	22:25~22:28	8	2.0~2.0	左上 45° 裂縫溢漿
3-14	22:35~22:52	51	0.0 ~0.0	下方版塊交接處溢漿
3-15	23:00~23:06	17	1.0~1.0	右側細微裂縫溢漿
3-16	23:15~23:40	60	0.0 ~0.0	超過初始 $P_g+0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ T5、T8 隆起 0.5mm
3-17	23:45~24:00	42	2.0~2.0	超過初始 $P_g+0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ T9 隆起 0.55mm

### 三、非破壞性檢測

#### 3.1 透地雷達原理

雷達檢測掏空是利用雷達波的折射-反射原理，產生的平面視圖可描述掏空的位置、形狀、地表下高濕度區域的面積，另外還可列表提供探測到的掏空面積和大概尺寸，試驗流程如圖 40 所示。

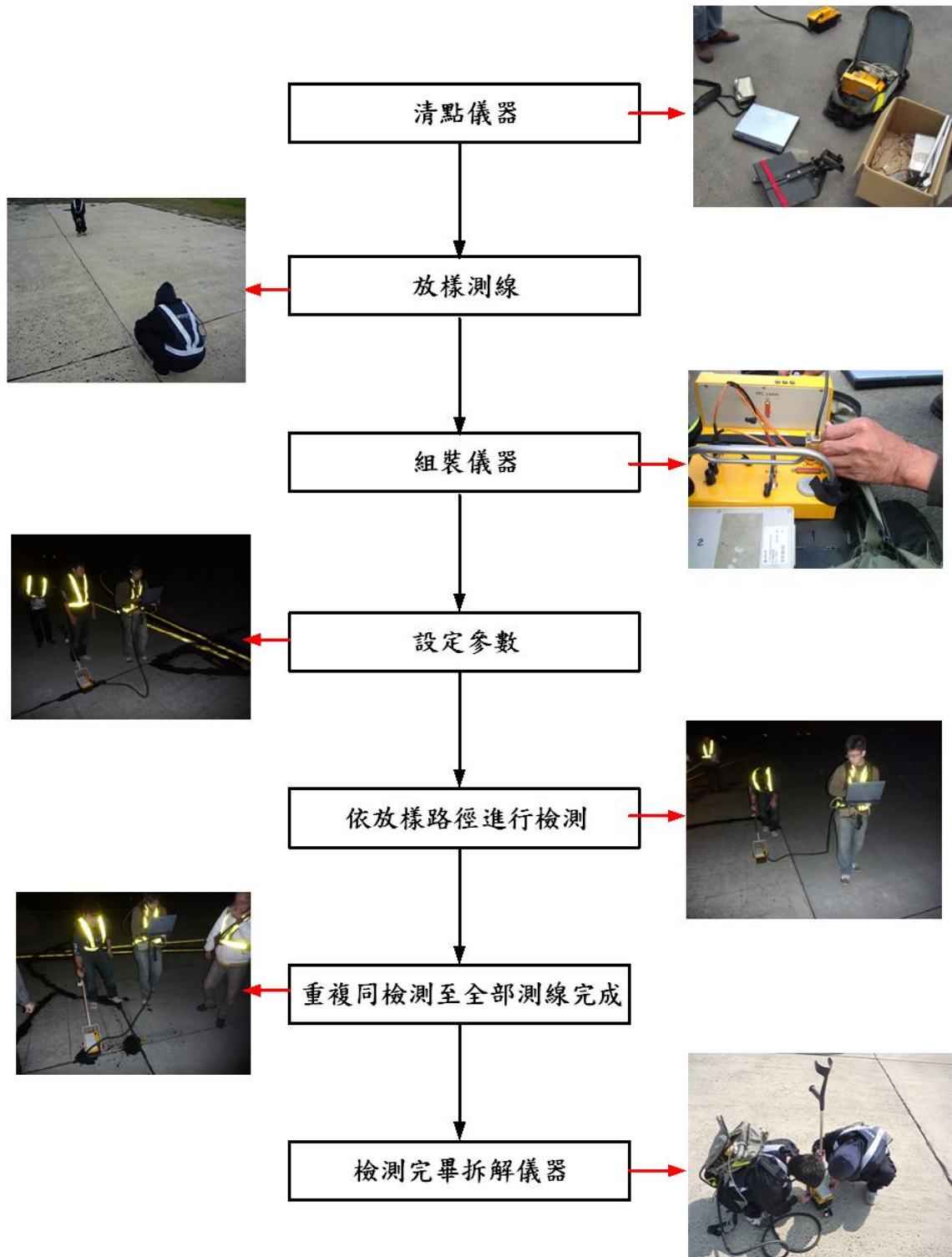


圖 40 透地雷達施作流程照片

### 3.2 透地雷達試驗結果

於灌漿前利用透地雷達尋找版塊下方可能孔洞位置，進而配置灌漿孔位，灌漿後也利用透地雷達來驗證灌漿成效，圖 41 呈現某一版塊灌漿成效的透地雷達測線圖，灌漿前後各版塊透地雷達掃描之結果顯示於圖 42~圖 44，由圖中可看出，版底灌漿可消除大部分的孔洞，成效顯著。

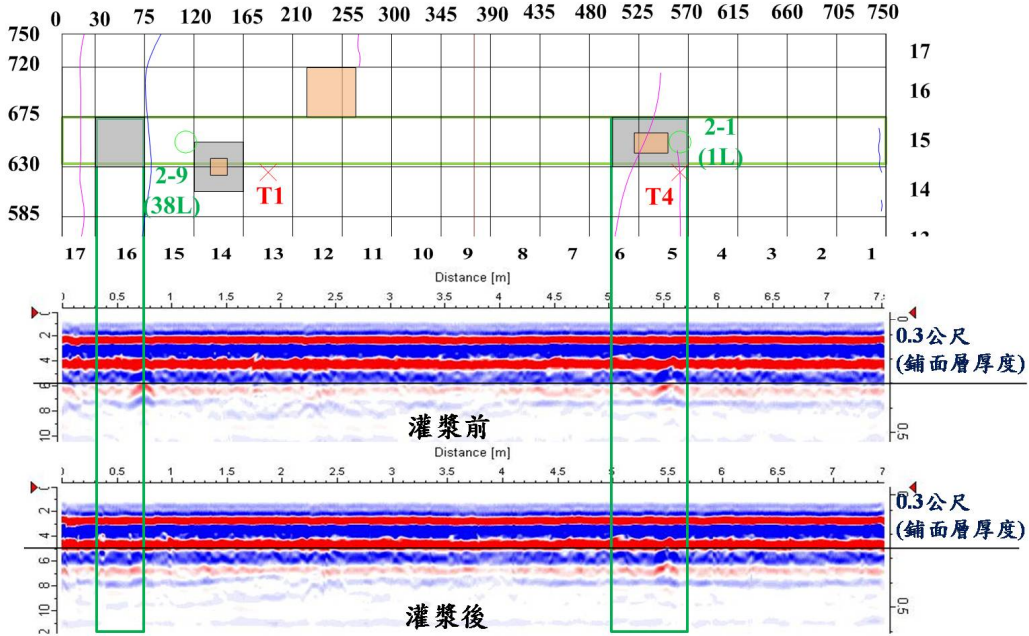


圖 41 透地雷達掃描成果

#### 3.2.1 版塊 1B

版塊 1B 透地雷達掃描結果如圖 42 所示，灌漿完成後孔洞已經完全消失。

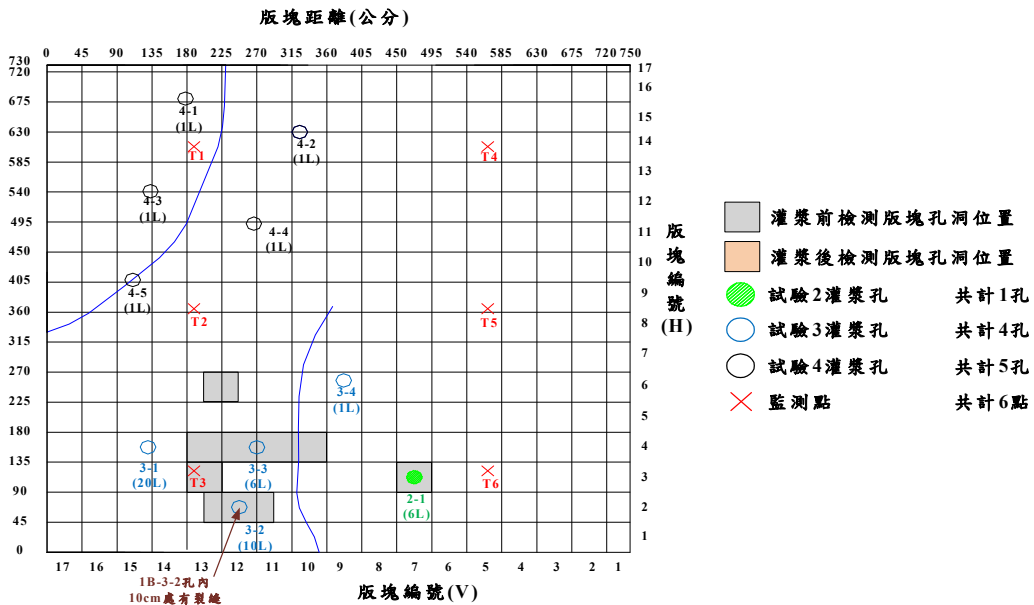


圖 42 版塊 1B 灌漿前後孔洞分佈

### 3.2.2 第二版塊

第二版塊透地雷達掃描結果如圖 43 所示，大部分孔洞位置已經被填充完畢，少部分孔洞仍然存在，但孔洞有明顯縮小，版塊上方有一灌漿前沒偵測到的孔洞。

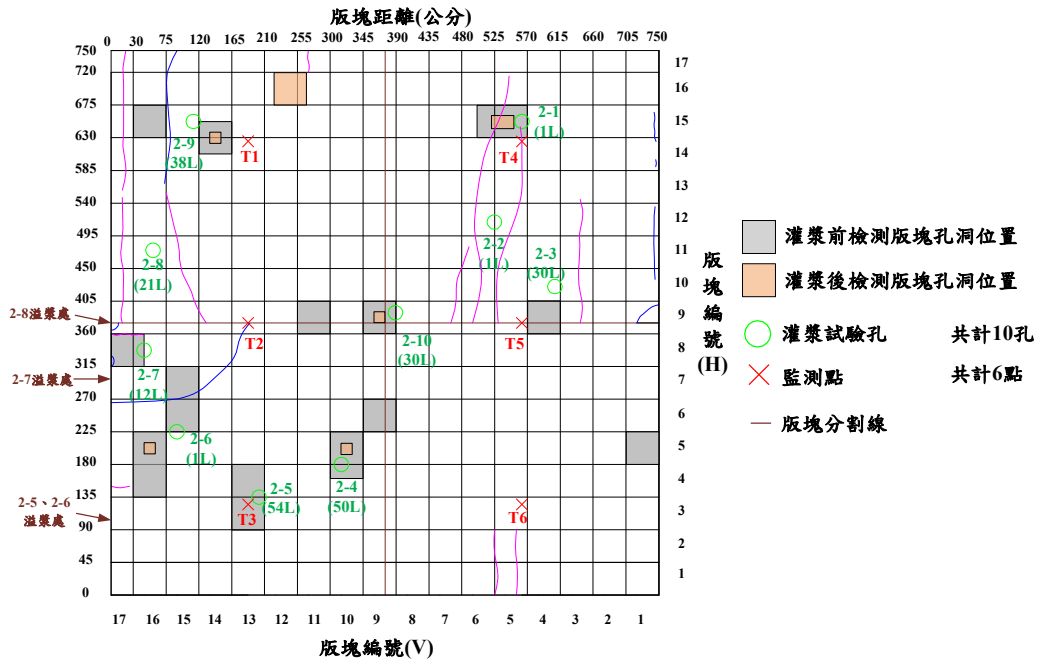


圖 43 第二版塊灌漿前後孔洞分佈

### 3.2.3 第三版塊

第三版塊透地雷達掃描結果如圖 44 所示，絕大部份孔洞位置已經被填充完畢，少部分孔洞仍然存在，但孔洞有明顯縮小。

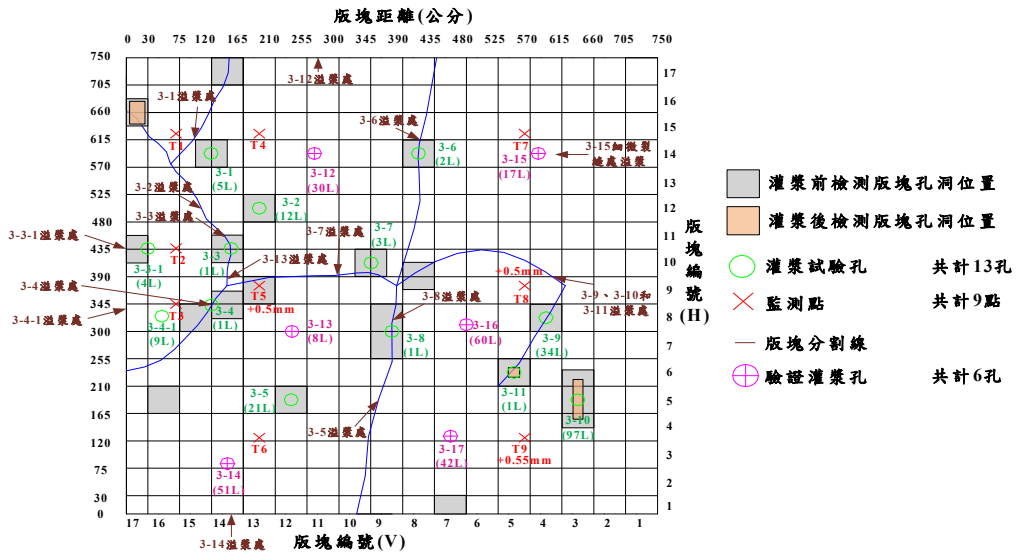


圖 44 第三版塊灌漿前後孔洞分佈



### 3.3 落重錘原理

係以重錘打擊道路表面，並同時量測路面瞬間變形（transient response），其屬暫態撓度值，相近於移動荷重所產生的撓度曲線，且可更換荷錘重量模擬不同荷重以評估鋪面材料的應力變化，故較可確實反應重車車輪及移動車輛對現地路面的影響，其荷錘施測原理如圖 45 所示，該類型儀器中最具代表性者乃是落錘式撓度儀。

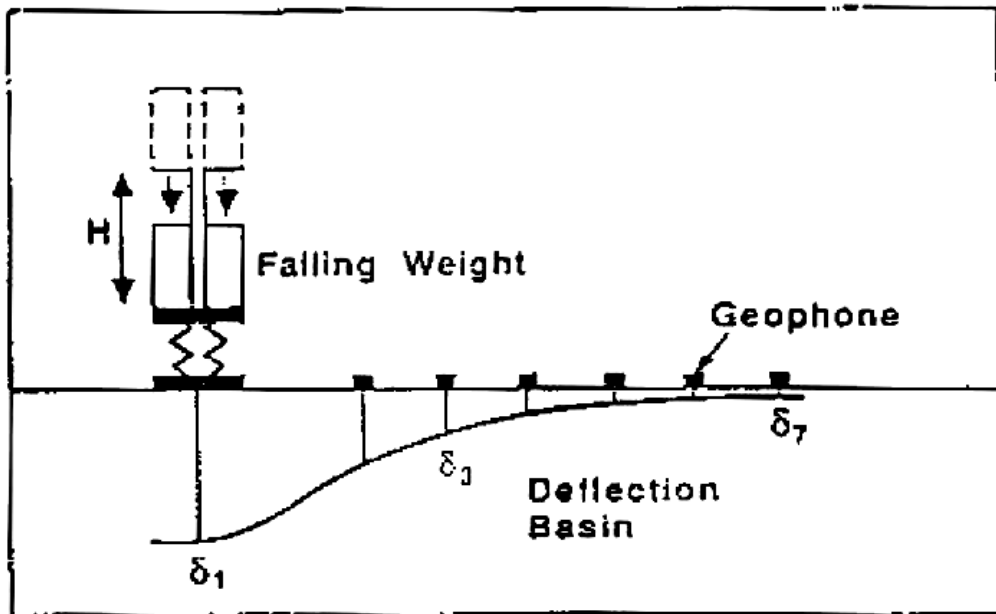


圖 45 落錘式撓度儀荷重示意圖

### 3.4 落重錘試驗結果

版塊掏空情況可用落重撓度儀於版塊接縫或角隅進行試驗，AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993 與 FAA AC 150/5370-11A "Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements" 均建議每一處至少以三級荷重施測，繪製荷重與最大撓度（ $d_0$  cm）關係圖，並利用線性迴歸分析求取在最大撓度軸上之截距，若截距接近零（迴歸線通過座標原點）則此處沒有掏空，AASHTO 建議，截距若大於 2 mils（ $50.8 \mu\text{m}$ ）則版塊有掏空之情形，FAA 建議版塊掏空截距門檻值則為 3 mils（ $76.2 \mu\text{m}$ ）。

#### 3.4.1 版塊 1 B 落重錘施測結果

灌漿補強前後落重錘施測位置，如圖 46 所示，將檢測結果繪製關係圖，如圖 47 所示。由圖中可知，當荷重為 0 kN 時，其撓度截距值從灌漿前之  $169 \mu\text{m}$  減小至灌漿後之  $86 \mu\text{m}$ ，版塊灌漿明顯補強版塊承載力。

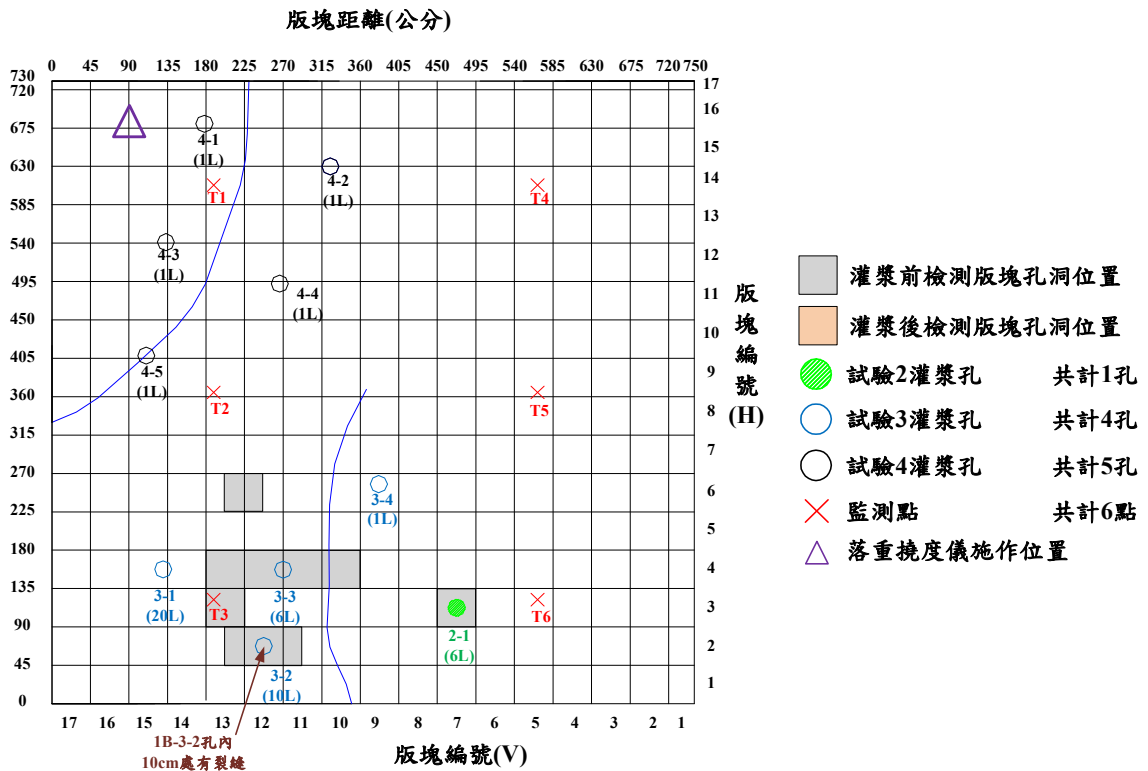


圖 46 版塊 1B 落重鉗檢測點位示意圖

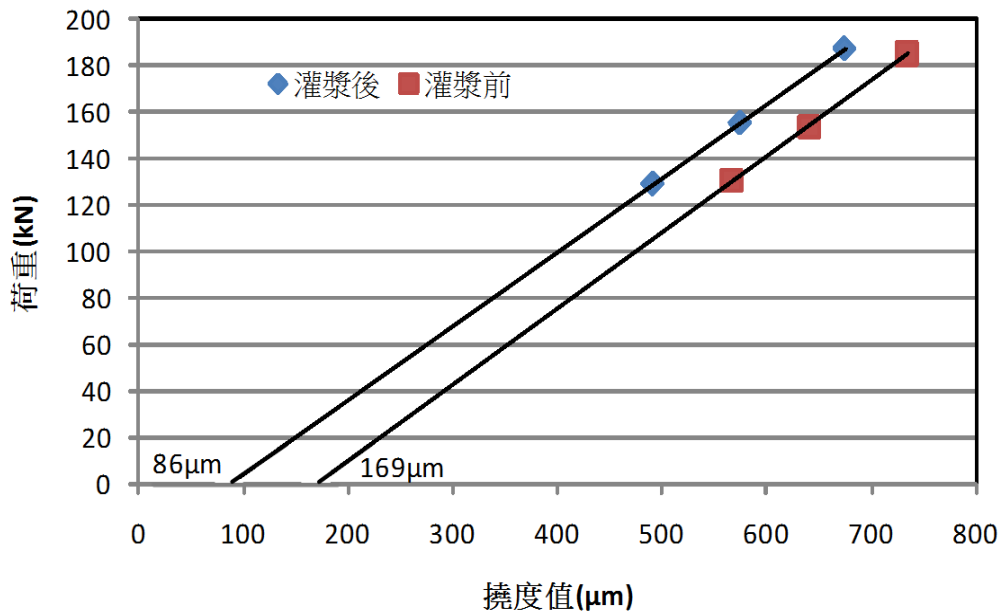


圖 47 版塊 1B 灌漿前後落重鉗檢測之荷重與撓度關係圖(儀衡)

### 3.4.2 第二版塊落重錘施測結果

灌漿補強前後落重錘施檢測位置，如圖 48 所示，將檢測結果繪製圖 49，當荷重為 0 kN 時，由灌漿前撓度截距值 294  $\mu\text{m}$  減小至灌漿後撓度截距值 99  $\mu\text{m}$ ，版塊灌漿明顯補強版塊承載力。

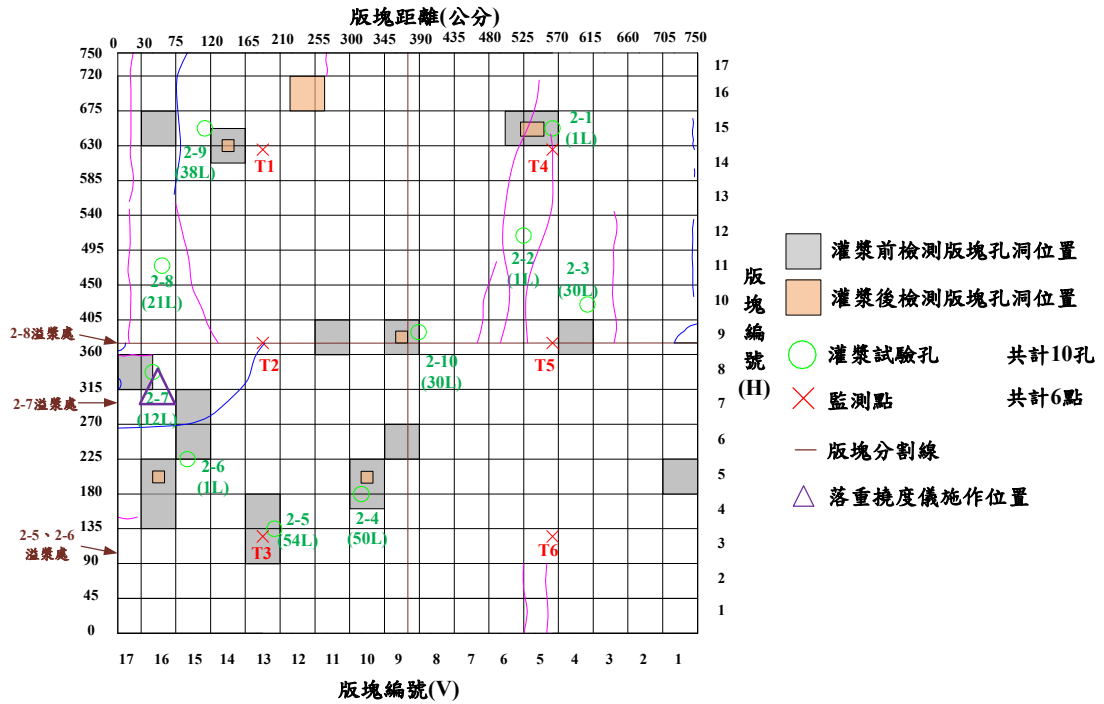


圖 48 第二版塊落重錘檢測點位示意圖

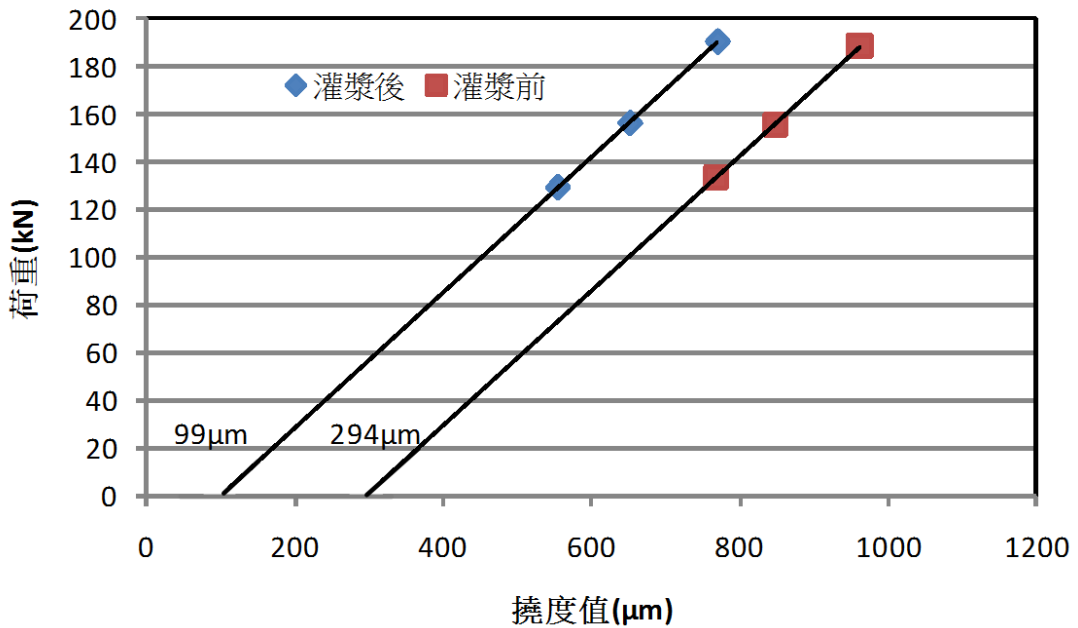


圖 49 第二版塊灌漿前後落重錘檢測之荷重與撓度關係圖(儀衡)

### 3.4.3 第三版塊落重錘施測結果

灌漿補強前後檢測位置如圖 50 所示，將灌漿補強前後檢測結果以撓度值為 X 軸、荷重為 Y 軸繪製關係圖，如圖 51 及圖 52 所示。由圖 51 中可知，點位 1 灌漿後之檢測撓度值明顯較灌漿前小，且當荷重為 0 kN 時，其撓度值亦從 348  $\mu\text{m}$  減小至 34  $\mu\text{m}$ 。而從圖 52 中可知，點位 2 灌漿後之檢測撓度值相對較灌漿前小；當荷重為 0 kN 時，其撓度值從 270  $\mu\text{m}$  減小至 24  $\mu\text{m}$ 。

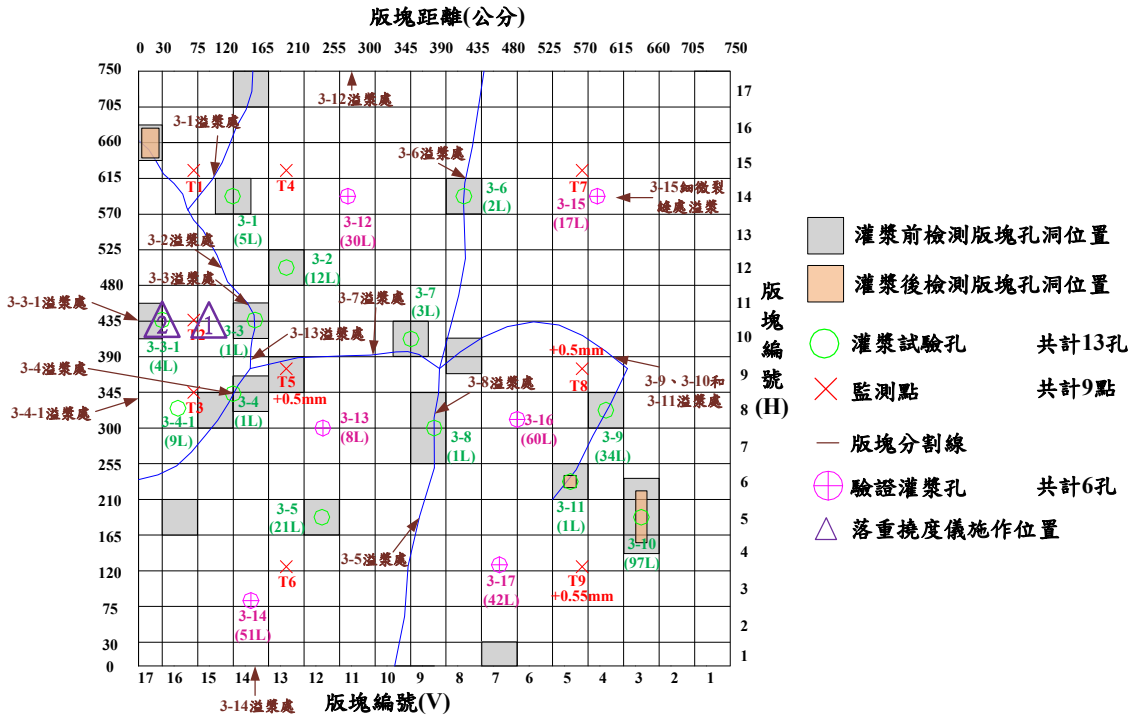


圖 50 第三版塊落重錘檢測點位示意圖

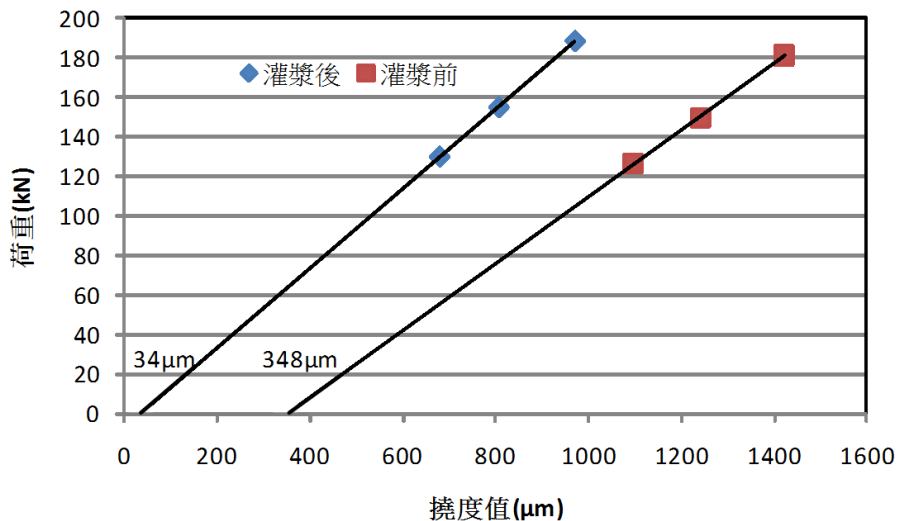


圖 51 第三版塊（點位 1）灌漿前後落重錘檢測之荷重與撓度關係圖(儀衡)

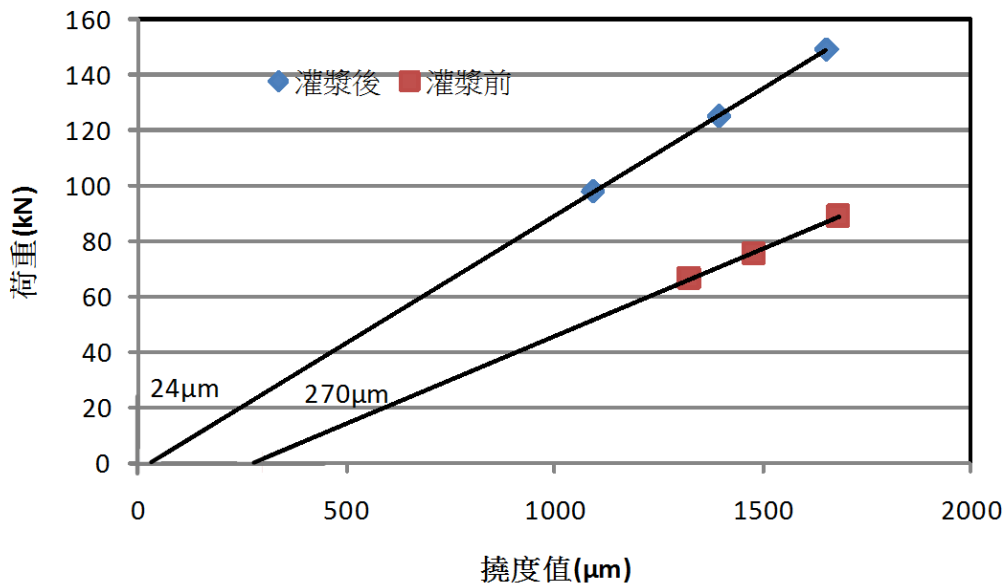


圖 52 第三版塊（點位 2）灌漿前後落重錘檢測之荷重與撓度關係圖(儀衡)

#### 四、結論與建議

##### 4.1 結論

###### (1) 水泥漿液品管標準之建立

爲了選擇泌水量小、工作時間長、流動度好及强度高之漿材，透過漿液泌水試驗、漿液凝結時間試驗、馬氏漏斗儀試驗及固結漿液抗壓強度試驗等品管檢驗，決定採用水灰比 0.8 無收縮劑添加量 7%之漿液，爲了維護漿液之適當工作度及支撐版塊之強度，水泥灌漿之品質必須滿足下列條件，泌水率小於 5%，馬氏漏斗儀試驗值介於 29 至 33 秒之間，固結水泥漿液之第七天強度至少爲  $120\text{kg}/\text{cm}^2$ ，拌和完成之水泥灌漿必須在 2 小時內使用，超過 2 小時則不可使用。

###### (2) 剛性鋪面版底灌漿機制與品管之建立

建立剛性鋪面版塊下方灌漿工程作業流程，包刮灌漿孔位放樣、灌漿孔位洗鑽、裝設單環塞、監測點位水準測量、監測儀器裝設、拌合漿液管線飽漿、開始灌注。爲了防止剛性鋪面版塊的上浮而導致之積水及水漂等問題，版塊下方灌漿工程作業是以灌漿壓力爲品管重點，再以灌漿量輔佐之，灌漿前後道面版塊高程相差不得超過 1mm。

###### (3) 非破壞性試驗檢測之建立

透地雷達檢測技術在版塊灌漿前，可以快速準確的找到孔洞位置，灌漿後可以快速評估孔洞填充的效果。超音波檢測技術，檢測過程繁複，檢測時間相對太長，不適合版塊孔洞之檢測。由於天寒地凍，紅外線熱像檢測技術這次未能發揮既有功能。落重錘施測結果進一步驗證版塊下方灌漿成果良好。整體來說，依據本研究結果顯示，透地雷達檢測技術在非破壞性試驗中，最適合檢測灌漿前後版塊下方孔洞的存在與否。

## 4.2 建議

### (1) 紅外線熱像檢測技術之建立

紅外線熱像儀可以感測物體所發射出來的輻射能量，進行遠距離的溫度量測，若版塊下方有孔洞產生時，孔洞內的空氣將阻絕版塊的熱能傳遞至碎石級配料層，所以版塊下方有孔洞處之溫度相對較高，因此可利用熱影像判讀孔洞位置。本研究執行期間，適逢寒流來襲，加以季風強勁，混凝土版面皆為均溫，無法辨識版塊下方孔洞的存在與否。依據本研究團隊過往之經驗，版塊下方孔洞偵測的效率與準確性，紅外線熱像檢測技術應超越透地雷達檢測技術，在不久之將來有機會能証實這點。

### (2) 剛性鋪面灌漿維護時機之建立

柔性鋪面瀝青混凝土的力學性質與瀝青的黏滯性有密切關係，所以柔性鋪面有各種裂紋時，可以採用不同維護方法，柔性鋪面新舊界面較易結合良好，承载力可快速恢復。剛性鋪面撓屈強度雖然很大，但是版塊下方掏空的孔洞，可以造成版塊龜裂而快速降低版塊承载力，由於水泥混凝土在新舊界面結合不易，無法採用柔性鋪面的維護方法，因此，建議剛性鋪面維護的時機，應該在版塊尚未發生龜裂前，利用紅外線熱像檢測技術或透地雷達檢測技術，在混凝土版塊下方灌漿，填充版塊下方之孔洞，如此，剛性鋪面的生命周期延長很多，也提高經濟性。

## 致謝

首先要感謝世曦運土部同仁的鼎力協助與現場管理單位的細心安排，其次也要感謝東榮營造提供阻攔設施，感謝由儀衡科技股份有限公司提供的落重錘檢測報告，感謝崧浩科技有限公司提供透地雷達測設備及技術，特別感謝台灣探勘股份有限公司戮力以赴，在寒流勁風的夜晚，完全配合剛性鋪面各種灌漿試驗及鑽孔檢驗。

## 參考文獻

1. 林任峰(2005)，超細水泥漿液滲透灌漿模式之研究，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，台北。
2. 林耀煌(1984)，地盤改良工法，地工技術雜誌，第八期，第 16-25 頁。
3. 倪至寬(2004)，基礎施工與品質，詹氏書局。
4. 蔡振裕(2001)，灌漿作業在災害預防與危機處理之應用機制及品質系統之研擬，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，台北。
5. 廖洪鈞、陳勝福(2006)，地盤改良工程設計與案例，中華民國大地工程協會。
6. 廖洪鈞、潘信宏、盧錫煥(1992)，”建築物下陷傾斜之灌漿處理對策.”，地工技術雜誌，第四十期，第 62-76 頁。
7. 簡璿宸(2002)，低壓灌漿工法之研究，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，台北。