

國立台灣大學生物資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

應用禁忌演算法於超微粒水泥漿體滲透灌漿

之可灌性研究

Using Tabu Search Algorithm

to Study the Groutability of Permeation Grouting

with Microfine Cement Grout

連琮勛

Tsung-Hsun Lien

指導教授：范正成教授

Advisor : Dr. Jen-Chen Fan

中華民國 99 年 6 月

June, 2010

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

應用禁忌演算法於超微粒水泥漿體滲透灌漿之
可灌性研究

Using Tabu Search Algorithm to Study the
Groutability of Permeation Grouting with
Microfine Cement Grout

本論文係連琮勛君 (R97622005) 在國立臺灣大學生物
環境系統工程學系、所完成之碩士學位論文，於民國 99 年
06 月 09 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

范正茂

(簽名)

陳肇河 (指導教授)

黃政汎

張國仁

詹國偉

系主任、所長

(簽名)

謝誌

論文終於順利完成了，我最先要感謝我的指導教授 范正成 老師，讓碩一的我能專心修課，以致於碩二能專注在自己的研究上，途中遇到一些辛苦與困難也勞煩老師的幫忙與指導，從老師身上學到很多專業知識，讓我獲益良多！也感謝口試委員們指點迷津，幫我找到論文的盲點，以及讓我的論文口試順利通過。其次要感謝智翔與哲欣學長，一個是幫忙我想到論文可以應用的方法，一個是在我做計畫時鼎力相助，我非常感動也感謝他們。而建霖學長是激勵我向上又提供很多意見給我的人，如果沒有他我可能還不清楚研究的方向，是一位值得我學習的對象。然後非常開心跟雯雯在同一個小房間相處兩年，她總是提供我許多有趣的想法以及穩定我不安的心，常讓我不再害怕之前害怕的所有事情！也很感謝聖修、偉成學長以及亭瑋學姊，在我還是碩一時教導我們許多事情，也在我做研究時提供不少寶貴的意見；也謝謝映潔、綸纖這兩位活潑可愛的學妹，剛進研究室就幫忙了我們許多事情，她們依然能開心度過，真是太了不起了！！系上的明裕、軍廷技士、秀美姐、老師的助理純妮都幫了我許多忙，像技士不怕我煩他幫我解答所有問題，秀美姐讓我碩一時能在系辦工作而不會沒有助學金可以領，純妮幫我們印東西以及跟老師約時間等，都讓我輕鬆不少！

最後我要感謝我媽媽還有我外婆，一路扶養我長大到現在碩士要畢業了，這種辛苦是無人能敵的，有她們才有我跟論文；還有最好的朋友以婷，不管是課業、研究還是生活上都受她幫助不少，而嘉穗也在瑞典遠遠的支持我，讓我有動力前進下去，高中同學智錦在我碩二最害怕的時候考上台大讓我有訴苦的對象，研究所同學舒晶在我遇到困難時給我意見跟打氣，這些人我都非常感謝他們，感謝在精神上及實質上幫助我的人，謝謝興睿、詩憫、嘉慧用神的話語警醒我，謝謝宜珍、如真、元風、維均提供我許多意見，希望妳們都能一切順利。

摘要

本研究藉由所收集之 240 筆現地資料，以傳統相對粒徑比可灌性經驗公式，與禁忌演算法，進行可灌性之預測分析。傳統經驗公式之預測準確率為 45% 至 68%，明顯可看出其對於超微粒水泥滲透灌漿於砂性粉土層無法有效預測。而禁忌演算法以傳統可灌性公式裡的土壤有效粒徑(d_{10})、土壤有效粒徑(d_{15})、超微粒水泥粒徑(D_{85})、超微粒水泥粒徑(D_{95})重新定義公式的 N 值範圍，建構一適合台灣地區高細粒料含量之砂性粉土層超微粒水泥滲透灌漿可灌性的預測公式。依據本研究之分析結果顯示，以 Krizek et al. (1992)公式修正得知 $N_1 > 2$ 且 $N_2 > 1$ 時為可灌，且此預測公式有較佳的預測能力，準確率高達 90.83%。

此外，為瞭解資料參數的不確定性，本研究利用拔靴法做不確定性分析，結果顯示 N_1 門檻值與 N_2 門檻值，其 1000 組拔靴樣本的平均值與標準差皆符合禁忌演算法推估模式求得之結果，顯示參數不確定性極小，且本預測公式應為可行的。

本研究亦進行室內滲透灌漿試驗，採用與現地資料相同之水灰比(3.34、4.0 及 4.65)、水泥之爐石含量 50% 及不同細粒料含量(0%、10%、20%、30%、40%) 之砂柱試體，用以針對預測公式進行驗證，結果顯示，其可灌性預測準確率可達 80%。

由本研究之可灌性預測公式及結果分析，前人所提出之經驗公式，對於超微粒水泥滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性，明顯無法有效的推估。而應用禁忌演算法來建立可灌性預測公式，重新訂定公式的門檻值為相當可行之方法。

關鍵字：禁忌搜尋演算法、可灌性、超微粒水泥、滲透灌漿、拔靴法。

Abstract

In this study, 240 sets of field data were collected and analyzed to evaluate the groutability by using two methods, namely the conventional formula with relative particle size ratio and the tabu search algorithm (TS). The accuracy of the conventional formula method ranged from 45% to 68%, i.e., this method can not be successfully used to predict the groutability. Tabu search algorithm used four factors : the effective soil particle size ,(d₁₀), the soil particle size ,(d₁₅), the microfine cement partical size ,(D₈₅) and the microfine cement partical size ,(D₉₅) to redefine the groutability limits of the conventional empirical formula. These factors were used to establish a suitable prediction formula which can predict the groutability of permeation grouting with microfine cement grout to the sandy silt soils with high fines content in Taiwan. From the obtained results, it was found that the microfine cement could grout to the sandy silt soils while N₁>2 and N₂>1, and the prediction formula showed a better forecast ability with an accuracy as high as 90.83%.

Aside from these, in order to realize the parameter uncertainty, this study used bootstrap method to carry out uncertainty analysis. The results revealed that the mean values and the standard deviations of 1000 bootstrap samples of the groutability limits fit the results derived from tabu search algorithm model. It indicated that the parameter uncertainty can be neglected and the prediction formula is feasible.

In this study, the permeation grouting experiments were also conducted in the laboratory. The water-to-cement ratio were controlled to be 3.34, 4.0 and 4.65, which were the same as the value used in the field. The slag content of the microfine cement was 50% and five different contents of fines, namely, 0%, 10%, 20%, 30% and 40%, were used. Using the data obtained from the permeation grouting experiments, the prediction formula were verified and its accuracy reached 80%.

According to the results of this study, the conventional formula method could not be successfully used to predict the groutability of the permeation grouting with microfine cement grout to sandy silt soils. However, using tabu search algorithm to construct the prediction formula by redefining the groutability limits showed its superiority and practicality.

Keywords: tabu search algorithm (TS), groutability, microfine cement, permeation grouting, bootstrap method.

目 錄

謝誌.....	I
摘要.....	II
ABSTRACT.....	III
目 錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	X
第一章 研究動機與目的	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
第二章 文獻回顧	4
2.1 水泥相關材料之應用與成分配比的影響	4
2.1.1 水泥相關材料之應用	4
2.1.2 水泥成分配比的影響	5
2.2 超微粒水泥研磨攪拌技術發展	12
2.3 滲透灌漿工法.....	13
2.3.1 灌漿材料的選擇	19
2.3.2 室內滲透灌漿試驗	19
2.4 滲透灌漿可灌性評估	27
2.5 禁忌演算法.....	30
第三章 研究方法	33
3.1 現地灌漿資料.....	33
3.2 可灌性預測分析	34
3.2.1 傳統可灌性經驗公式	34

3.2.2 超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式	38
3.2.3 禁忌演算法 (TABU SEARCH)	38
3.3 不確定性分析.....	42
3.3.1 拔靴法 (BOOTSTRAP METHOD)	44
3.4 室內滲透灌漿試驗	45
3.4.1 灌漿材料及性質	45
3.4.2 試驗砂土.....	47
3.4.2.1 試驗砂土基本性質試驗	51
3.4.3 超微粒水泥滲透灌漿模擬試驗	58
3.4.3.1 滲透灌漿模擬試驗設計	58
3.4.3.2 滲透灌漿模擬試驗設備	59
3.4.4 滲透灌漿模擬試驗步驟	66
4.1 傳統可灌性經驗公式	71
4.2 超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式	76
4.2.1 以禁忌演算法建立推估模式	76
4.2.2 拔靴法分析結果	83
4.3 現地資料分析結果	85
4.4 室內滲透灌漿模擬試驗結果與分析	86
4.5 綜合比較	89
第五章 結論與建議	92
5.1 結論	92
5.2 後續建議	94
參考文獻	95
附錄	102
附錄一：MCF-GM8000 之八大重金屬溶出檢驗報告	103

附錄二：地下水污染管制標準	104
附錄三：現地資料	107
附錄四：符號表	109
附錄五：MATLAB 程式碼	110

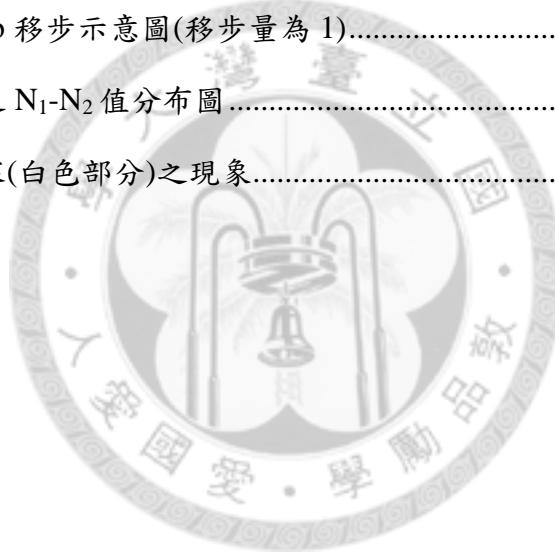


圖 目 錄

圖 2.1 CemillR Process 示意圖(摘自 Paoli et al.,1992).....	6
圖 2.2 灌漿前後孔隙填充示意圖(摘自 Helal et al., 1992)	6
圖 2.3 超微粒水泥抗壓強度總比較 (摘自 徐明顯, 2007).....	9
圖 2.4 超微粒水泥抗彎強度總比較 (摘自 徐明顯, 2007).....	9
圖 2.5 水灰比、水玻璃濃度與單壓強度關係圖(摘自 Krizek et al., 1992).....	9
圖 2.6 超微粒水泥與減水劑搭配方式(摘自 Perret et al., 2000)	10
圖 2.7 超微粒水泥之流體性質(左)及終凝時間(右)(摘自 Perret et al., 2000).....	10
圖 2.8 漿液黏滯度與靜置時間關係圖(摘自 倪至寬等人, 2006).....	11
圖 2.9 漿液降伏應力與靜置時間關係圖(摘自 倪至寬等人, 2006).....	11
圖 2.10 高剪力膠體攪拌機示意圖(摘自 Thiessen Team., 1998).....	14
圖 2.11 粒徑分佈比較圖(摘自 Naudts et al., 2003).....	14
圖 2.12 土層灌漿型式示意圖(摘自 倪至寬等人, 2006).....	15
圖 2.13 底端灌漿球形理論示意圖(摘自 地基處理手冊, 1988).....	17
圖 2.14 聲波分析截面位置圖(摘自 Perret et al., 2002)	17
圖 2.15 斷面 D(水平)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002).....	18
圖 2.16 斷面 B(垂直)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002).....	18
圖 2.17 各種不同灌漿材料之滲透範圍比較圖(摘自 倪至寬, 2006).....	20
圖 2.18 砂柱灌漿試驗示意圖(摘自 Zebovitz et al., 1989).....	21
圖 2.19 砂柱化學灌漿試驗示意圖(摘自 Ozgurel et al., 2005).....	21
圖 2.20 可灌度試驗設備示意圖(摘自 倪至寬等人, 2006).....	23
圖 2.21 柱灌漿試驗示意圖 (摘自 Schwarz et al., 2007).....	25
圖 2.22 氣體滲透量測設備示意圖(摘自 Saiyouri et al.,2008)	25
圖 2.23 滲透灌漿模擬試驗設備示意圖(摘自 施國琅, 2008).....	26
圖 2.24 砂柱灌漿試驗示意圖 (摘自 Akbulut et al., 2002).....	29

圖 2.25 細顆粒含量-可灌壓力關係曲線圖(摘自 Ozgurel and Vipulanandan, 2005)	29
圖 2.26 水力傳導度的設計分區情形 (摘自 Tung et al., 2002)	32
圖 3.1 研究架構圖	32
圖 3.2 台北捷運新莊線灌漿作業範圍(摘自 勤岩工程)	32
圖 3.3 中山高速公路關廟高雄段沿線橋工圖(摘自 勤岩工程)	35
圖 3.4 禁忌演算法演算流程圖	41
圖 3.5 鄰近解取點示意圖	41
圖 3.6 超微粒水泥與一般卜特蘭水泥粒徑分布曲線圖	48
圖 3.7 一般卜特蘭水泥(a)與超微粒水泥(b)電子顯微圖	48
圖 3.8 渥太華標準砂 403 型(左)與 A101 型(右)外觀	49
圖 3.9 試驗砂之比重試驗	53
圖 3.10 相對密度試驗儀器設備	54
圖 3.11 最小乾土單位重試驗	56
圖 3.12 最大乾土單位重試驗	56
圖 3.13 標準砂及混合砂之粒徑分佈曲線圖	56
圖 3.14 滲透灌漿模擬試驗流程圖	57
圖 3.15 滲透灌漿模擬試驗設備示意圖	61
圖 3.16 高速渦流攪拌機	63
圖 3.17 循環式攪拌路徑示意圖	63
圖 3.18 壓力供應系統	63
圖 3.19 壓力微調系統	63
圖 3.20 濾層與濾網	64
圖 3.21 砂柱試體之三通管路	64
圖 3.22 儲漿桶	65
圖 3.23 滲透灌漿模擬試驗之試驗流程	65

圖 3.24 試體模之製作	67
圖 3.25 砂柱試體之製作(置入圓形塑膠套膜).....	67
圖 3.26 砂柱試體之製作(裝砂至所需高度).....	67
圖 3.27 管線與試體飽和情形	67
圖 3.28 超微粒水泥(左)、助流劑(中)與超微粒爐石(右)	69
圖 3.29 漿液以高速拌合情形	69
圖 3.30 漿液製作流程圖(摘自 施國琅, 2008)	70
圖 3.31 灌注過程中紀錄之情況	70
圖 4.1 目標函數值與迭代次數的關係(移步量為 1).....	79
圖 4.2 最佳解 a, b 移步示意圖(移步量為 1).....	80
圖 4.3 現地資料之 N_1-N_2 值分布圖	88
圖 4.4 細顆粒阻塞(白色部分)之現象.....	91



表目錄

表 2.1 灌漿工法之類型 (摘自 henn., 1996)	15
表 2.2 灌漿材料的分類	17
表 2.3 一般飽和土壤滲透係數 (摘自 Coduto et al., 1998)	20
表 2.4 土壤滲透性分類 (摘自 Terzaghi and Peck., 1948)	20
表 2.5 各種灌漿材料之性質(摘自 U.S army corps of engineers,1995).....	21
表 2.6 不同配比與凝結時間關係表	23
表 2.7 超細水泥之基礎物理性質	23
表 2.8 超微粒水泥灌注量與孔隙體積之關係	26
表 3.1 孔位資料組數表	36
表 3.2 禁忌演算法檢定與測試組數表	43
表 3.3 不確定性之型態與來源 (摘自 U.S.EPA, 1992)	43
表 3.4 超微粒水泥基本定義	46
表 3.5 超微粒水泥、爐石基本性質表	46
表 3.6 超微粒水泥灌漿材料與一般水泥之基本性質比較表	46
表 3.7 八大重金屬檢測結果	49
表 3.8 Wentworth grade scale (Wentworth ,1992)	50
表 3.9 蒸餾水溫度 4°C ~30°C 之間時水之相對密度及校正係數(K).....	53
表 3.10 相對密度與砂土緊密程度之關係	54
表 3.11 相對密度與液化潛能之評估(摘自 Seed and Peacock ,1970).....	54
表 3.12 試驗砂土標準砂 403 型及混合砂基本物理性質	57
表 3.13 滲透灌漿模擬試驗規劃表	60
表 3.14 滲透灌漿模擬試驗設備名稱	61
表 3.15 各水灰比漿體配比	69

表 4.1 Burwell et al. (1958)公式預測之結果	73
表 4.2 Krizek et al. (1992)公式之預測結果	73
表 4.3 Incecik and Ceren(1995)公式預測之結果	73
表 4.4 黃建霖等人(2007)公式之預測結果	75
表 4.5 Axelsson et al. (2009)公式之預測結果	75
表 4.6 傳統可灌性經驗公式之綜合比較	75
表 4.7 禁忌演算法檢定與測試之孔位資料組數表	77
表 4.8 禁忌演算法搜尋結果(移步量為 1).....	79
表 4.9 禁忌演算法搜尋結果(移步量為 0.5、0.1).....	80
表 4.10 禁忌演算法預測公式測試結果	80
表 4.11 禁忌演算法預測公式之預測結果	84
表 4.12 可灌性預測公式於各灌注情形之預測結果	84
表 4.13 不同細顆粒含量砂柱試體飽和後之基本物理性質表	87
表 4.14 滲透灌漿模擬試驗結果	87
表 4.15 各可灌性預測公式之驗證	91

第一章 研究動機與目的

1.1 研究動機

灌漿工法普遍使用於捷運、高鐵、隧道及水庫等工程，近年也有許多國內外學者對灌漿工法進行研究，而其主要用來穩固地層，隔幕止水或提升土壤抗液化能力。一般而言，灌漿工法依漿液性質、漿液擴散機制、注入方式以及灌漿的行為，大致可區分為滲透灌漿 (Permeation grouting)、填充灌漿(Filling grouting)、劈裂灌漿 (Fracturing grouting)、擠壓灌漿 (Compaction grouting) 及電誘化學灌漿 (Electro-osmosis chemical grouting) 等五種(徐至鈞等人，2005)。然而，灌漿工法中的滲透灌漿，因其為低壓滲透，常用來提升既有構造物基礎下方土壤抗液化的能力(陳正勳等人，2001)。

由於低壓滲透灌漿工法技術性較高，加上台灣地層狀況複雜，經常導致灌漿成效難以掌控，進而導致基礎開挖失敗。以高雄捷運工程隧道開挖導致坍塌為例，其坍塌原因的報告指出，可能造成的主因為地層細料含量甚高與土壤、地下水均存在明顯鹽化的現象。這些因素都顯示一般使用的卜特蘭水泥或化學性灌漿材料會有灌注效果不彰以及耐久性不佳的問題，而且根據黃建霖等人(2009)及韓國 Sangyong 水泥公司之研究，利用砂質試體進行試驗，得知傳統水泥系灌漿材難以滲入細砂及粉土質細砂層。有鑑於此，國外已生產兼具耐久性及滲透性佳之超微粒水泥灌漿材料(Zebovitz et al., 1989)。除此之外，國外學者提出超微粒水泥滲透灌漿尚必須滿足土壤和超微粒水泥之相對粒徑比的要求，即滿足 $(d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout} \geq 15$ 且 $(d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout} \geq 8$ 之要求(Krizek et al., 1992)。

黃建霖等人(2007)評選一合適的試灌工址，參照地質調查結果選用合適的超微粒水泥材料，以特殊的膠體攪拌機將超微細水泥漿液充分攪散，並配合低壓限量複灌的方式進行試驗灌漿，提昇土壤抗液化能力，以達到耐震補強的效果。研究發現，使用 MFC-GM8000 超微細水泥，在水灰比 4.0 至 4.65 下添加 1% 之助流劑、配合高速渦流攪拌機攪拌三分鐘，當 $(d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout} \geq 9$ 或 $(d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout} \geq 4$ 即有不錯的滲透灌漿效果。

通常漿液的穩定性與流動性會受到水灰比高低的影響，所以超微粒水泥於砂質土壤的灌漿技術中，水灰比是一個很重要的指標；除此之外，不同水灰比漿液之基礎物理性質(如穩定性與流動性)亦有顯著的差異(徐名顯等人，2007)。

根據國內外的現地灌注案例與室內滲透模擬的研究中顯示，在不同水灰比的條件下，大多皆以土壤及水泥之相對粒徑比為其設計可灌性公式的依據(Burwell., 1958；Krizek et al., 1992；Incecik and Ceren., 1995；Akbulut and Saglamer., 2002；Huang and Fan., 2007；Axelsson et al., 2009)。而適用於高細粒料含量(Finer content, 粒徑 $< \#200$ 即 0.074mm)之砂性粉土層，高水灰比(即水灰比大於 3)的超微粒水泥漿體可灌性預測公式仍極為缺乏，目前只有黃聖修(2009)利用倒傳遞類神經網路進行前述條件下之可灌度預測分析。

所以，考慮高水灰比情況，於砂性粉土層可灌性之研究仍相當必要。本研究藉由收集台灣地區(台北及高雄)超微粒水泥現地實際灌漿資料，利用前人所提出之可灌性經驗公式，進行現地土層可灌性預測的評估。並應用禁忌演算法(Tabu Search Algorithm)建立現地土層可灌性預測公式，與經驗公式之預測結果進行比較。而使用禁忌演算法的理由是禁忌演算法的記憶結構特性(禁忌名單)，能找到欲解決問題之全域最佳解(global optimum)，避免重複搜尋及落入循環；本研究針對 Krizek 於 1992 年提出的可灌性公式，進行 N 之門檻值修改，所需的資料筆數大小及二維可行解空間特性(低維度)皆為禁忌演算法的適用條件。

接著針對所建立的禁忌演算法預測公式進行不確定性分析，探討參數不確定性對於預測公式可信度的影響。最後搭配室內滲透灌漿模擬試驗，以試驗之結果進行預測公式之驗證，並作一綜合比較。本研究所得之成果，可為後續應用超微粒水泥於地質補強工程，其施工時評估可灌性、設計水灰比與超微粒水泥細度的參考。

1.2 研究目的

隨著水泥材料的顆粒大小愈加精細、攪拌設備的改善、高水灰比漿體的使用以及砂性粉土層其土壤孔隙較小等因素，使得傳統之經驗公式在可灌性的預測上，成果不甚理想。因此，本研究蒐集 240 筆現地灌漿資料，進行傳統經驗公式的分析，並使用禁忌演算法建立一可灌性預測公式，對可灌性預測能力進行比較。此外，使用不確定性分析之拔靴法(Bootstrap)進行參數不確定性分析，以評

估禁忌演算法建立之可灌性預測公式的可信度，最後配合室內滲透灌漿模擬試驗之結果，進行可灌性預測公式的驗證，並綜合分析其結果。

研究材料方面則是利用超微粒水泥進行灌漿，參考徐名顯(2007)所建議之爐石配比進行漿體拌製，並參考施國琅(2008)所建立開發之室內滲透灌漿設備，以低壓滲透灌漿的方式進行灌漿試驗。

室內試驗使用渥太華標準砂 403 型(細砂)與 A101 型(細粒料、粉土)，進行砂柱試體的製作，並添加不同之細顆粒含量，來改變砂柱試體各項基本參數，用以模擬不同情況之地層條件，驗證禁忌演算法建立之可灌性預測公式的準確性；並探討室內滲透灌漿模擬試驗之實用性。

本論文在第二章文獻回顧中，整理及介紹國內外有關超微粒水泥的物理特性、滲透灌漿工法、禁忌演算法等相關研究。第三章介紹現地灌漿資料及可灌性評估之方法，並介紹室內滲透灌漿試驗之實驗材料、儀器設備、實驗流程與步驟及相關試驗之原理。第四章針對所得之結果，分析數據並做相關之探討。第五章為結論與建議，旨在對研究結果進行總結，並建議未來可行之研究方向。



第二章 文獻回顧

本研究參考多篇文獻，彙整前人研究之資料，依內容分為水泥相關材料之應用與成分配比的影響、超微粒水泥研磨攪拌技術發展、滲透灌漿工法、滲透灌漿可灌性評估、禁忌演算法共五大類，茲就其內容分述如下。

2.1 水泥相關材料之應用與成分配比的影響

2.1.1 水泥相關材料之應用

Paoli et al. (1992)研發出一種研磨製程，並將其定名為 CemillR Process，其技術主要是使用膠體攪拌機將卜特蘭水泥加以研磨至超微粒水泥之細度，其製程如圖 2.1 所示，其中流程 a 未添加班脫土，而流程 b 則有添加班脫土。結果顯示流程 a 以及流程 b 皆可成功製備超微粒水泥，而在現地使用時，流程 a 製造之漿體較不穩定，易產生析離，但有較好之滲透效果；流程 b 生產之漿體則有較好之穩定性，但滲透效果則劣於前者。

Helal et al. (1992)以電子顯微鏡觀察土壤孔隙在經過超微粒水泥灌漿前後之差異，圖 2.2 為孔隙被漿體填滿之示意圖，文中結論指出灌漿後漿體填滿原有土壤孔隙之佔有率與漿體之水灰比成正比，水灰比 1、2 以及 3 時佔有率分別為 98%、85% 以及 65%。而研究結果也顯示水灰比越大之漿液可以滲入更細微之裂縫，但相對的，高水灰比的漿體也會產生更多的析離而造成更大之孔隙。

米倉亮三等人(2002)為克服水泥系灌漿材料難以滲入砂質土壤孔隙，以及水玻璃系灌漿材料耐久性不佳之問題，故開發了一兼具恆久性及高滲透性之恆久性灌漿材，並探討其對於灌漿砂土抗液化能力的提升效果。整體而言，雖然恆久性灌漿材料之膠體強度不高，但是經恆久性灌漿材料灌漿後之砂土，卻能具備抵抗地震引致的建築物基礎下方土壤液化問題。在應用方面也有許多可期待之處，包括了既有基礎結構物的加強、河川和水壩在壩底或壩身基礎之加固、防止土壤的液化以及工業廢棄物之儲蓄池等。

黃亦敏等人(2002)在國內研發了一具有優良級配且具經濟性的地質改良材料，其利用爐石耐磨之特性而將爐石磨製成高細度粉末，用以控制成品之顆粒特性，並添加助流劑進行調配，以達到地質改良之效果。並實際施作於一位於台北

內湖之工址，以改良材料填充土壤空隙使土壤顆粒固化，以提高土壤強度。施工結果顯示，其材料在阻水性、強度以及耐久性各方面皆優於一般傳統水泥，且施作於沉泥質軟弱土壤中亦能發揮良好之功效，且使用爐石等工業廢料做為材料原料，亦符合國內工程界大力提倡之環保減廢再生的綠營建觀念。

Perret et al. (2001)收集了許多不同之工程案例，工程涵蓋防水、修補以及水下建物等。作者將許多成功工程之漿體配比予以整合，這也間接指出超微粒水泥在這些案例中確實達到了工程預期之成效。

Naudts et al. (2003)以其研發之行動式研磨機，將一般卜特蘭水泥研磨至超微粒水泥之細度。並指出其生產之漿液具有較低之內聚力，故非常適合用於滲透灌漿，其漿體之滲透效果優於一般膠體攪拌機所生產相同粒徑之漿體。

Schwarz et al. (2006)為了研究以超微粒水泥密封汽油汙染物是否可行，對混合了最高含量達 20% 汽油之超微粒水泥進行穩定性、單壓強度以及電子顯微鏡觀測等實驗。結果顯示混合了汽油之後超微粒水泥各方面之表現皆會劣化，但文中仍提出了相應之解決之道，指出以超微粒水泥包覆處理汽油汙染物目前雖尚不可行，但仍具有改進空間，假以時日，將有成功的可能性。

2.1.2 水泥成分配比的影響

不同配比成份的漿體所顯現出來的特性是不一樣的，有水灰比、水泥含量、添加劑與分散劑等控制變因，若能用適當的配比進行拌合，可使漿體展現出來的性質更好，有效提升灌漿工法之施作性及改良成效。於許多研究中指出水泥材料添加卜作嵐物質(pozzolan)如爐石、飛灰、高嶺石和矽灰等，能有效增加水泥晚期強度，提升其耐久性、減少滲透率以及降低用料成本。

黃兆龍(1985)指出卜作嵐物質主要成份為不定型矽、鋁氧化物之物質，本身不具有膠結性，但會與水泥水化產物，也就是氫氧化鈣反應，生成 C-S-H 及 C-A-H 膠體。上述膠體與卜特蘭水泥中的矽酸鈣礦物水化產生之 C-S-H 膠體近似，也會凝結並發展強度，故可用來取代混凝土中部份之水泥，亦可用來減少混凝土內部因反應所產生的溫度。

卜作嵐材料會與水泥水化反應產物中的氫氧化鈣(簡稱 CH)進行反應，生成 C-S-H 膠體，水泥水化反應與卜作嵐反應之簡單示意反應式如下：

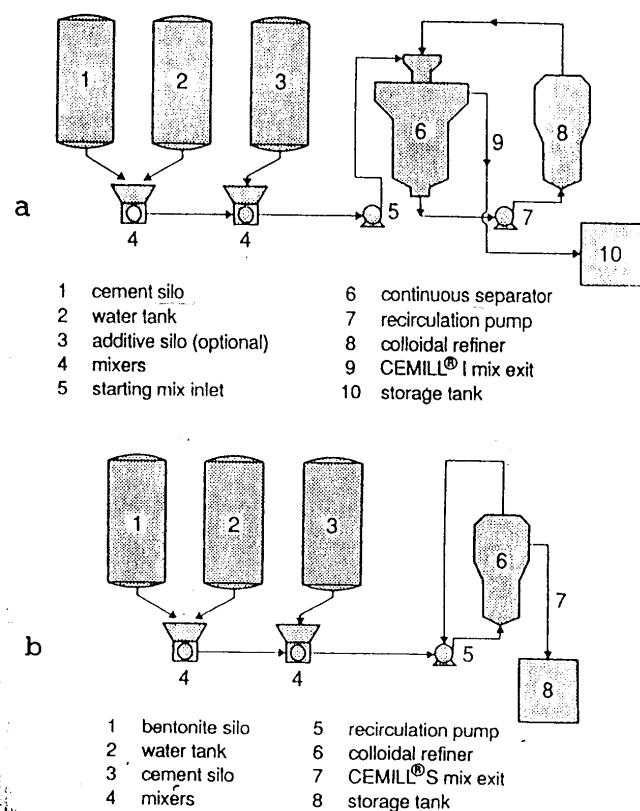


圖 2.1 CemillR Process 示意圖(摘自 Paoli et al., 1992)

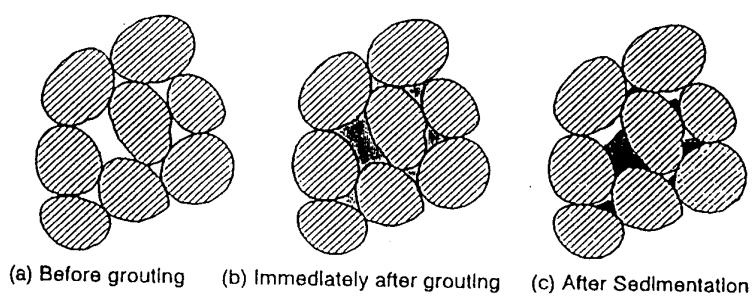


圖 2.2 灌漿前後孔隙填充示意圖(摘自 Helal et al., 1992)

水泥水化反應： $C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH$ (快速)

卜作嵐反應： $Pozzolan + CH \rightarrow C-S-H$ (緩慢)

或： $CH + (A/S) + H \rightarrow C-(A/S)-H$ (緩慢)

卜作嵐反應的發生主要是在水泥水化反應之後，消耗水泥水化產物中的 CH 。卜作嵐反應的進行，使混凝土整體性質的發展歷程有延緩、拉長的趨勢，在較長齡期時，混凝土的發展仍可因卜作嵐反應而持續成長。水泥的水化產物中， CH 是相對較弱的部份，不僅其機械性質較低，同時 CH 也可能溶於混凝土中的水氣或游離水，並隨之析出，而卜作嵐反應的發生，則會明顯降低可水解的 CH 成份，並以緻密的 $C-S-H$ 膠體來取代，故卜作嵐反應可使混凝土孔隙更加緻密化，且齡期越長，卜作嵐反應程度越高，則混凝土孔隙率越低。整體而言，卜作嵐物質對混凝土在耐久性及阻水性的提昇有相當正面的效果。

Chengzhi et al. (1996)以實驗結果說明，水泥中添加卜作嵐物質，因卜作嵐反應的發生，使膠體孔隙間的水減少，並增加表面層的水，進而降低水泥中的孔隙，使透水性降低，並能使強度有所提升。

Clarke et al. (1992)提出超微粒爐石系水泥(MC-100)應同時搭配超微粒卜特蘭系水泥(MC-300)使用，方能產生更高之強度，並可藉由不同之爐石添加量，進一步控制水泥之初終凝時間。

文中以不同水泥含量搭配方式與攪拌時間，測定漿體析離量與養護齡期 28 天之單壓強度，並進行現地灌漿及壩體修復等測試。其實驗結果顯示，爐石系水泥在添加卜特蘭系水泥後強度有顯著的提升，此現象在高水灰比時更為顯著。

Hu et al. (2002)以超微粒水泥搭配爐石、石膏、膨脹劑與飛灰等添加物成為“超微細高性能混合水泥”簡稱 MHPCC。雖然超微粒水泥僅含有 MHPCC 的 45%，但呈現出來的強度卻比超微粒水泥淨漿的結果來的高，而爐石在 MHPCC 則是扮演重要角色。

此研究指出添加爐石是使強度提高的主要原因，並以 15% 作為最佳添加量。同時以電子顯微鏡觀察漿體之細部結構，發現添加膨脹劑後藉由晚期的水化過程

中會形成一緻密類似纖維之三維結構，也直接提高了漿體的單壓強度。

徐名顯(2007)針對超微粒水泥(A 料)與超微粒爐石(B 料)之最佳配比進行研究，指出適當的爐石添加量可有效的提升水泥漿體之抗壓及抗彎強度，但添加量存在一最佳配比，並不是爐石添加量越大，漿體強度就越大，如圖 2.3 及圖 2.4 所示。漿體中爐石含量多寡亦會影響漿體之穩定性，爐石含量越多時，漿體之總析離量則越少，即有越高之穩定性。爐石添加量對凝結時間之影響較為單純，爐石含量越高則凝結時間越長，水灰比亦為影響凝結時間之關鍵。而添加速凝劑能明顯的減少凝結時間，可視實際需求調整速凝劑之添加量。

依據研究結果，作者建議低水灰比(1、2)時，爐石添加量以 70%為宜，而在高水灰比(3、4、5)的情況時，則以 50%為較佳之添加量。此外，依漿體用途不同，可視需要增減爐石之添加量。

Krizek et al. (1992)針對超微粒水泥及水玻璃溶液的混合應用做了一系列的研究，探討不同配比的水玻璃對漿體性質所產生之影響。此研究分為兩大部分，一為淨漿試驗，一為砂漿試驗。針對不同配比之試體施作黏滯性試驗、膠凝時間測定、單壓強度試驗、張力試驗以及三軸試驗。

實驗結果顯示不同水玻璃添加量對漿體之影響程度有限，漿體之性質主要還是受到水灰比所控制。由圖 2.5 可看出，水灰比所造成之強度差異遠大於不同水玻璃添加量所造成之影響。

Perret et al. (2000)針對不同的超微粒水泥及減水劑，進行室內實驗研究各配比間漿體性質之差異，試驗內容以流體性質及凝結時間為主。實驗中以六種水泥(卜特蘭系三種 P1、P2、P3，爐石系三種 S1、S2、S3)及四種減水劑(N1、N2、N3、M1)互相搭配，並以兩種配比方式探討各種情形下，水泥、減水劑、配比方式、組成等所造成之影響，並以初終凝時間及流動性質作為主要判釋標準。

研究結果顯示在相同粒徑分佈下，爐石系水泥會有較佳的流動性，而在粒徑分佈不同時卜特蘭水泥性質改變較爐石系水泥為大，並具有較快的終凝時間。其試驗配比及結果如圖 2.6 及圖 2.7 所示。

28天抗壓強度總比較

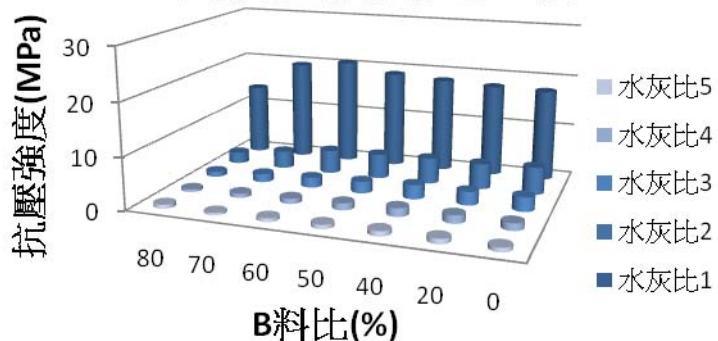


圖 2.3 超微粒水泥抗壓強度總比較 (摘自 徐明顯, 2007)

28天抗彎強度總比較

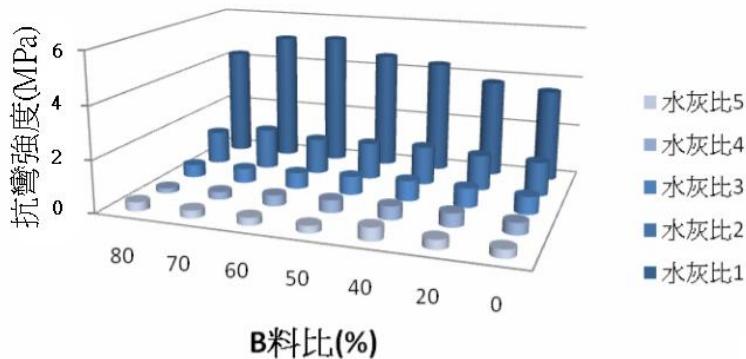


圖 2.4 超微粒水泥抗彎強度總比較 (摘自 徐明顯, 2007)

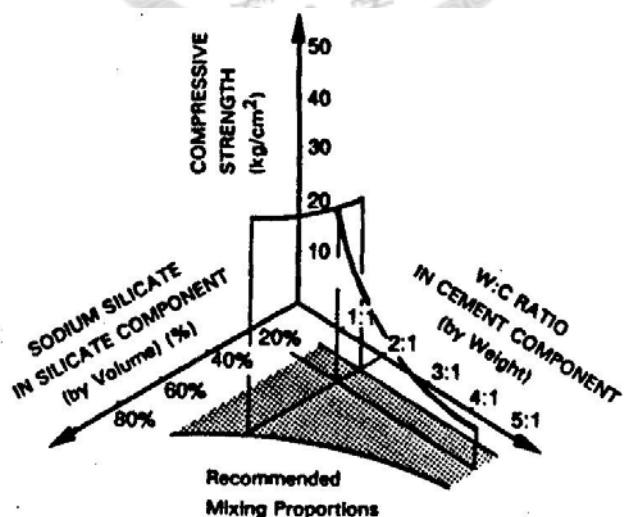


圖 2.5 水灰比、水玻璃濃度與單壓強度關析圖(摘自 Krizek et al., 1992)

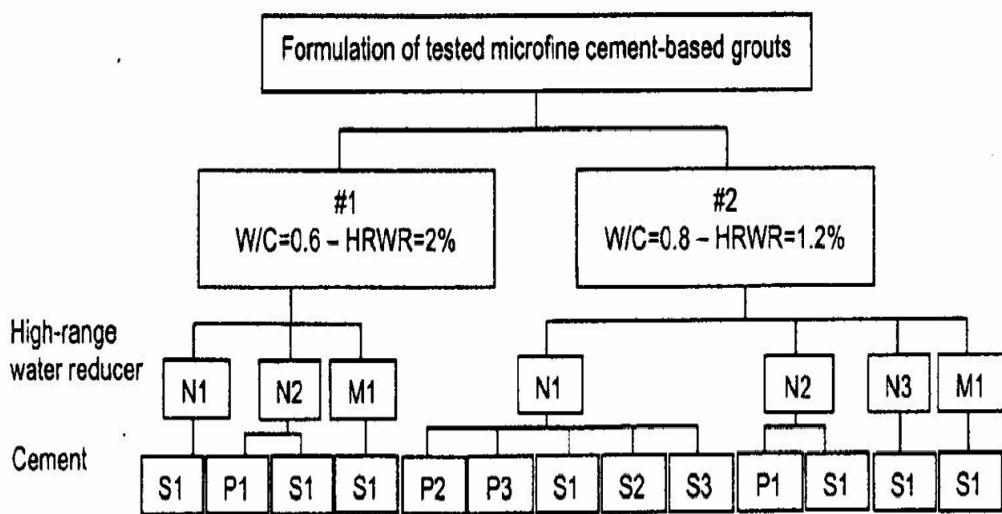


圖 2.6 超微粒水泥與減水劑搭配方式(摘自 Perret et al., 2000)

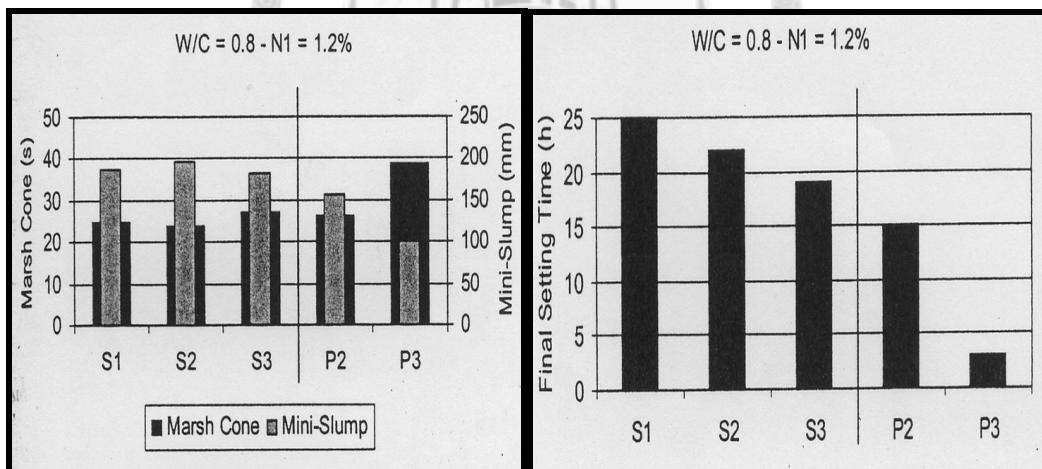


圖 2.7 超微粒水泥之流體性質(左)及終凝時間(右)(摘自 Perret et al., 2000)

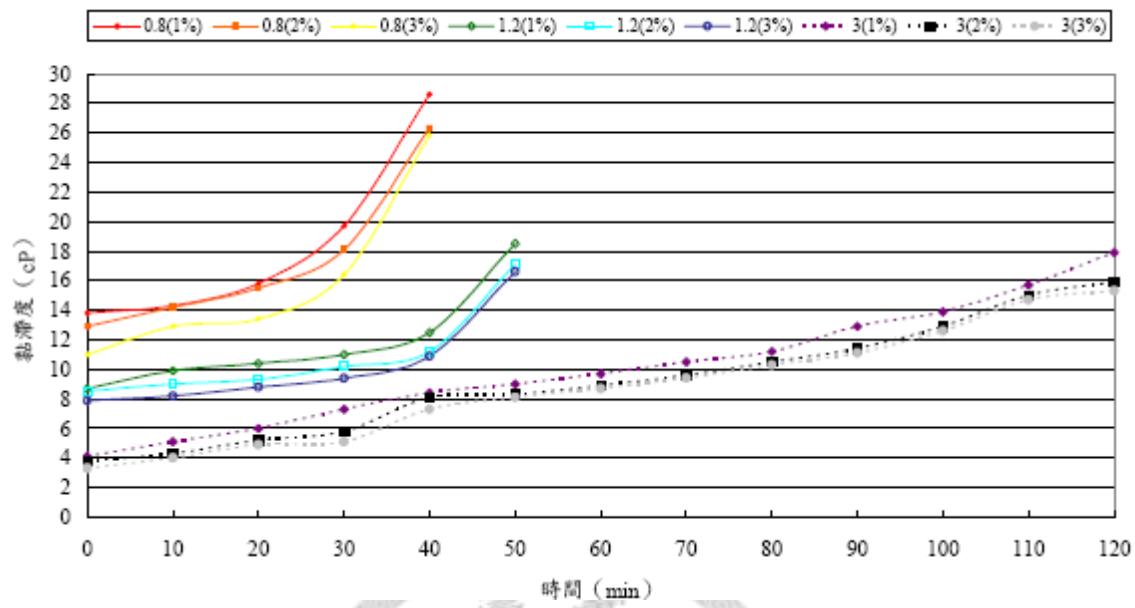


圖 2.8 漿液黏滯度與靜置時間關係圖(摘自 倪至寬等人, 2006)

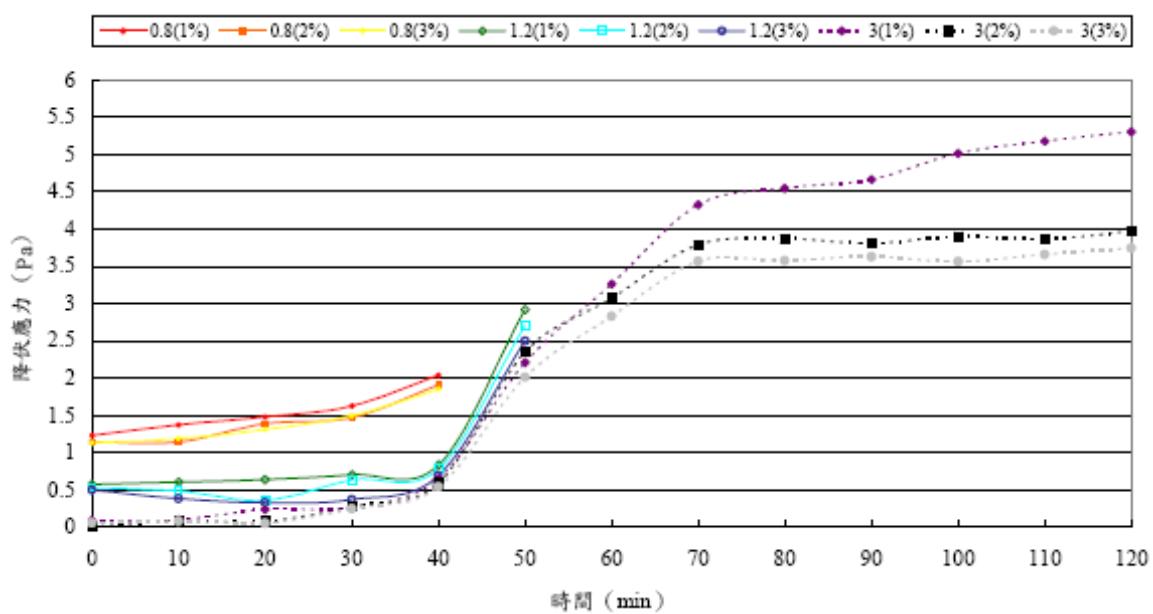


圖 2.9 漿液降伏應力與靜置時間關係圖(摘自 倪至寬等人, 2006)

倪至寬等人(2006)以 Brookfield RVDV-II+黏滯度儀測試了不同配比下漿液的流變行為。藉著改變水灰比以及分散劑的添加量，，觀察漿體黏滯度及降伏應力與靜置時間之關係，如圖 2.8 及圖 2.9 所示。由圖中可知當分散劑含量大於 2% 時所造成之影響，與添加 2% 分散劑情況下差異很輕微，故作者建議添加 2% 之分散劑已可有效減少漿液的黏滯度以及降伏應力。

2.2 超微粒水泥研磨攪拌技術發展

超微粒水泥於 1980 年代發展至今，其粒徑大小已達到準奈米的程度，此外，由於超微粒水泥在細度上之重大突破、攪拌技術的改進及高水灰比的使用，使得水泥灌漿工法之適用性大幅提升，尤其在細砂及砂性粉土層此類以往難以有效進行灌漿改善補強之地層，可藉由超微粒水泥灌漿材料加以克服。而超微粒水泥灌漿之應用範圍非常廣泛，以往許多難以突破的問題如防堵滲漏、裂縫補強、基礎加固等皆可使用。

Schwarz et al. (1992)等人以五種攪拌設備：Paddle、Blender、Morehouse、Colcrete、CTC 攪拌四種水泥：Portland type I、MC-100、MC-300、MC-500，並以沉降量、黏滯性、凝結時間以及單壓強度各項基本性質一同判斷攪拌設備之優劣及適用性。

實驗結果顯示，經過 Colcrete 以及 CTC 兩種大型攪拌機攪拌之後的漿體會有較少的析離，而攪拌時間十分鐘的漿體較攪拌時間僅一分鐘之漿體析離更快速(析離速率大，但總量不變)。

關於黏滯性的部份作者則發現，攪拌時間越長，漿體的黏滯性會越高，尤其是在低水灰比的部份，此一現象會更為顯著。

作者也指出，凝結時間以及單壓強度也會受攪拌器之影響，整體來說，強度仍是以 Colcrete 以及 CTC 兩種攪拌設備能得到最好之效果，而 CTC 所得之漿液有最長之凝結時間。

Thiessen Team. (2000) 對膠體攪拌機進行設計改良，如圖 2.10 所示，此攪拌

機分為三部份：膠體研磨區，混合區以及注料區。水泥以及水由不同之注料口注入混合區，混合區為一大型垂直之料斗，料斗內之漿體持續著漩渦式之轉動，而水泥料即以料斗之切線方向注入漩渦旋轉中，藉由旋轉之離心力將細粒料分離於外圈並帶入膠體研磨區，接著以選料器決定漿體是否已達需求粒徑，達到者就直接使用，而剩餘部份則送回混合區進一步磨細。

Naudts et al. (2003)研製一行動式濕式研磨機，簡稱 PASREM，可將一般卜特蘭水泥研磨至超微粒水泥之細度，且因其可移動至現地使用，可提升現地之工作效率。並指出其生產之超微粒水泥漿液具有較低之內聚力，故非常適合用於滲透灌漿，其漿體之滲透效果優於一般膠體攪拌機所生產相同粒徑之漿體。

此行動式濕式研磨機同時具有多個料槽，而各料槽均設置攪拌桿，不同之料槽可以不同轉速、不同攪拌棒之攪拌曲線及不同攪拌速率控制槽內之漿體性質。當料槽中之漿體粒料研磨至一定細度時即由選料器選入下一個料槽，反之，若料槽中漿體粒料粒徑過大則送回上一個槽，如此不斷重複，最後當粒料達到需求粒徑大小時則送往一震動儲存槽以備立即使用，圖 2.11 即為 PASREM 生產之漿液粒徑與卜特蘭水泥和他牌超微粒水泥之比較圖。

此外，配合現地砂土之粒徑大小，計算出最佳之灌漿粒徑以及預計灌漿量，由於此研磨機可控制漿體粒徑大小，配合上述資料可有效降低漿體的浪費。

2.3 滲透灌漿工法

在諸多提升砂質土壤抗液化能力之工法中，土壤灌漿是最適合用來處理既有建築物基礎下方土壤抗液化能力的方法。為降低灌漿過程對土壤結構之擾動，並減少土壤位移和對既有結構物、埋設物之損害，低壓滲透灌漿方式是比較適合的選擇，藉由非液態之灌漿膠體來取代存在於砂土孔隙的水，可大量地提高砂土之抗液化能力。

一般而言，依照灌漿對象的不同，灌漿大致可分為土層之灌漿、岩盤灌漿和結構物灌漿，依灌漿工法之類型整理如表 2.1；其中在土層灌漿部分依漿液性質

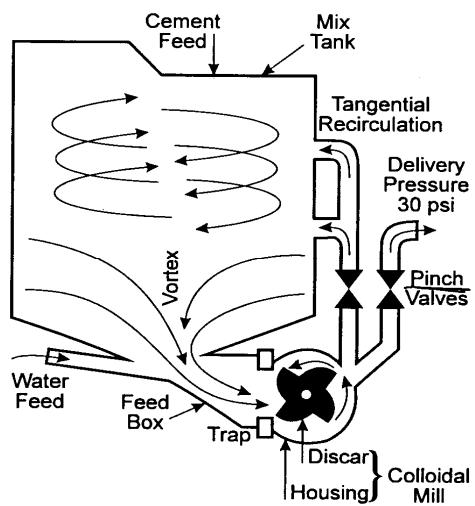


圖 2.10 高剪力膠體攪拌機示意圖(摘自 Thiessen Team., 1998)

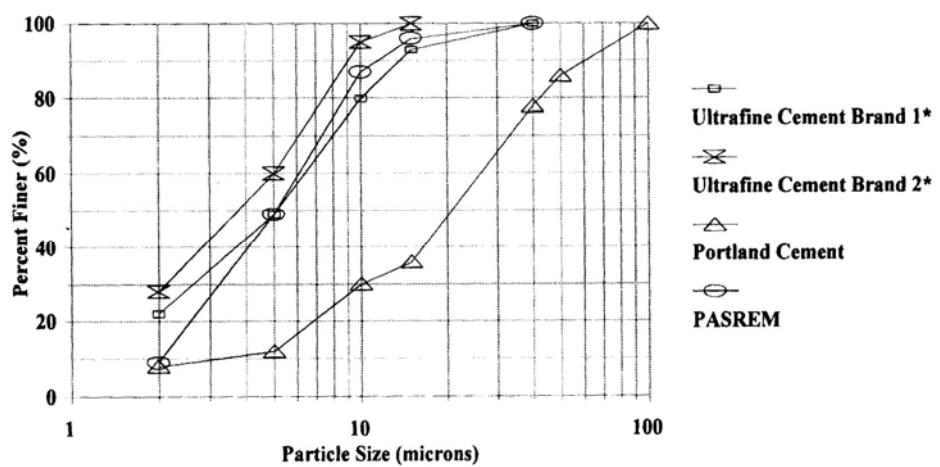


圖 2.11 粒徑分佈比較圖(摘自 Naudts et al., 2003)

表 2.1 灌漿工法之類型 (摘自 henn., 1996)

分類	項目
土層灌漿 (Grouting in Soil)	噴射灌漿 (Jet Grouting)
	擠壓灌漿 (Compaction Grouting)
	滲透灌漿 (Permeation Grouting)
	劈裂(脈狀)灌漿 (Fracturing Grouting)
岩盤灌漿 (Grouting in Rock)	固結灌漿 (Consolidation Grouting)
	隔幕灌漿 (Curtain Grouting)
結構物灌漿 (Structural Grouting)	回填灌漿 (Celluar Grouting)
	接觸灌漿 (Contact Grouting)
	埋至灌漿 (Embedment Grouting)
	預壓灌漿 (Prestressing Grouting)

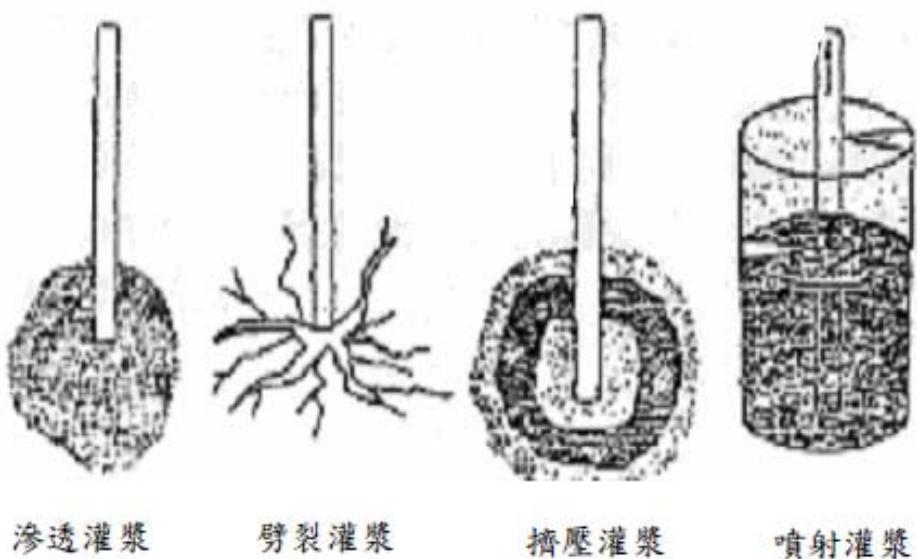


圖 2.12 土層灌漿型式示意圖(摘自 倪至寬等人, 2006)

及灌入土壤方式、理論的不同，大致可區分為滲透灌漿（permeation grouting）、劈裂（脈狀）灌漿（fracturing grouting）、擠壓灌漿（compaction grouting）及噴射灌漿（jet grouting）等四種，如圖 2.12 所示。

此外，在灌漿工程上使用的灌漿材料主要可分為藥液型與非藥液型材料兩類。藥液型材料以化學材料為主，可分為水玻璃系、特殊矽膠系等，目前以水玻璃系灌漿材料最為普遍；而非藥液型的材料以水泥、皂土為主，灌漿材料分類如表2.2所示。

滲透灌漿意指在不明顯改變砂土結構和體積情況下採用低壓灌注的方式，使漿體滲透填充土壤孔隙，最終凝結成固狀體，其目的為加固基礎地盤的強度、耐久性及降低其滲透性，以改善既有構造物下方基礎地質之工程性質。

Magg. (1938)指出水泥漿體在土層中的滲透範圍受到許多因素影響，例如：漿材種類、漿液黏滯度、漿液膠凝時間、土層的種類、土層的滲透係數、土壤孔隙率、灌漿壓力、灌漿速度及灌漿孔直徑等。而且Magg提出的球型擴散理論為近幾十年來最具代表性的灌漿原理，其滲透灌漿理論之模型圖，如圖2.13所示。

目前有許多使用超微粒水泥進行滲透灌漿工法的實際案例，其成果皆相當不錯，如：

Perret et al. (2002)使用超微粒與卜特蘭水泥修復加拿大 1887 年的一座橋墩，也藉由環氧樹脂來比較水泥漿體呈現的情況，並在灌漿前後於橋墩部分進行一般力學試驗以及非破壞性之聲波掃描檢測，如圖 2.14 所示，藉以了解施工前後之差異以及工程效益。工程中將不同配置成份之漿體滲入橋墩不同區塊之中，並以聲波斷層掃描驗收工程成果，結果顯示在灌注後聲波傳遞的速度平均增加了 50% 到 80%左右，如圖 2.15 及 2.16 所示。

黃建霖、范正成(2007)應用超微粒水泥於高雄某試灌工址，並使用特殊之膠體攪拌機提高漿體之工作性。施工前後則以地電阻影像剖面、下孔式速度井測以及標準貫入試驗檢測灌漿之效果。結果顯示超微粒水泥對於工址抗液化能力之提升有相當之幫助。

表 2.2 灌漿材料的分類

灌漿材料種類				主要成分
非 藥 液 型	懸濁型			水泥淨漿
				水泥砂漿
				水泥 + 黏土
				水泥 + 皂土
藥 液 型	水 玻 璃 系	鹼 性 系	懸濁型	水玻璃 + 水泥 (LW)
				水玻璃 + 水泥爐石
				水玻璃 + 石膏
		溶液型	懸濁型	水玻璃 + 酸性反應劑
				水玻璃 + 鹼性反應劑(如：鋁酸鈉 $NaAl_2O_3$)
				水玻璃 + 金屬鹽反應劑(如：氯化鈣 $CaCl_2$)
		非 鹼 性 系	溶液型	矽膠溶液 + 水泥
				矽膠溶液 + 鹼性反應劑
				水玻璃 + 酸性反應劑

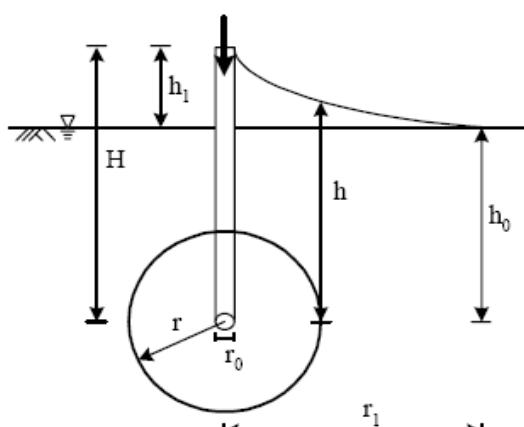


圖 2.13 底端灌漿球形理論示意圖
(摘自 地基處理手冊, 1988)

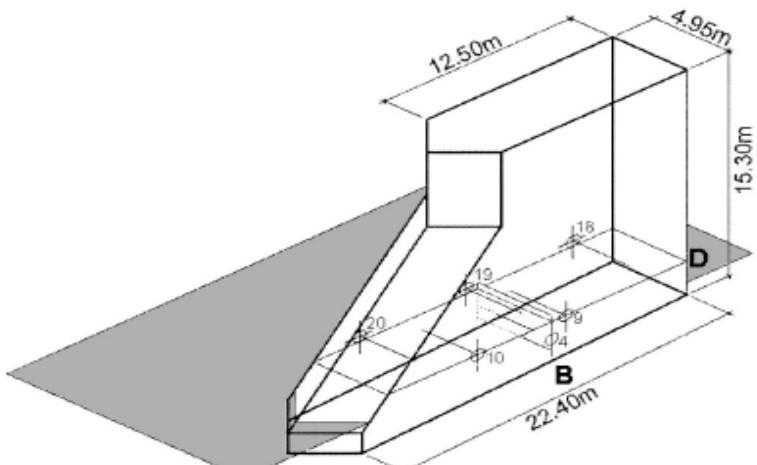


圖 2.14 聲波分析截面位置圖
(摘自 Perret et al., 2002)

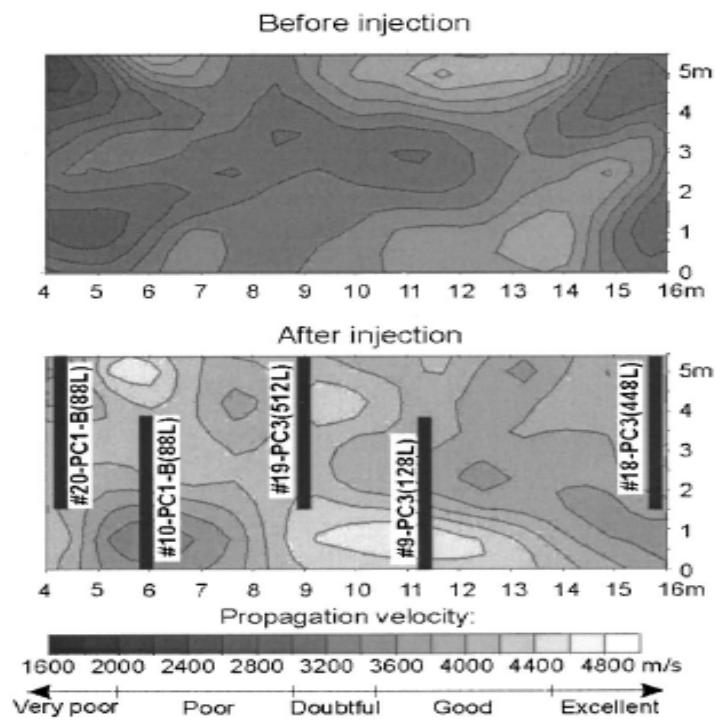


圖 2.15 斷面 D(水平)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002)

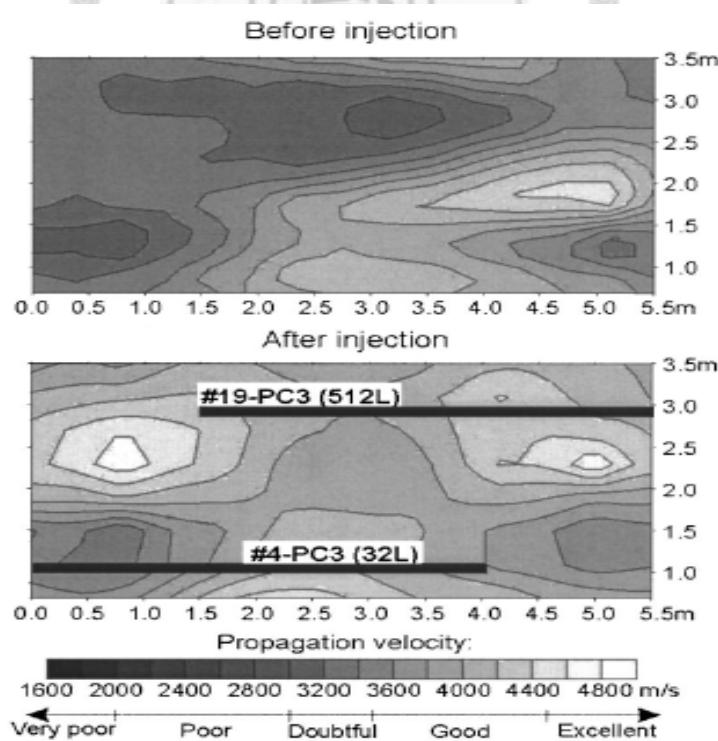


圖 2.16 斷面 B(垂直)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002)

2.3.1 灌漿材料的選擇

現地地層種類複雜，為避免劈裂情況產生，並非每種灌漿材料均能有效滲透灌入，也並非每種灌漿材料均可以達到預定的改良目標。一般地質改良在灌漿材料的選取上，主要考量的因素有強度性質、阻水性質與漿體滲透性質。在過去研究中，非藥液型的一般水泥，其強度往往大於藥液型灌漿材料，且於2.1.2文獻中可知，爐石的添加不但降低水泥的使用成本，同時也能提昇其晚期強度；此外，在開挖工程中，為防止地下水或土壤滲流在基礎開挖階段，由開挖壁面侵入造成開挖失敗等危害，經常在施工範圍內進行地質改良，以降低土壤透水性。如表2.3與表2.4所示，滲透係數在 10^{-7} 以下可視為不透水，而一般地下開挖工程的要求需將土壤滲透系數降至 10^{-5} 以下，以符合工作性。

灌漿材料的滲透範圍亦是在材料選擇上重要的指標，如圖2.17所示，可推測一般卜特蘭水泥因其顆粒粒徑較大，對於較小孔隙之土壤或微細裂縫的岩盤其灌注效果不佳；化學灌漿材料方面(藥液型)，因其為溶劑之特性，可滲入較細的裂縫，以往常用來克服一般水泥無法滲入之工址，但因其部分有溶解性(米倉亮三, 2002)，長期下來可能產生體積及形狀之改變，因而有耐久性不佳的問題，且化學灌漿料除水玻璃系外，其他的化學混合物質，可能有毒性的問題(Ozgurel, 2005)，各種灌漿材料之性質，如表2.5所示。對於超微粒水泥而言，由於其顆粒粒徑非常細小，具有良好的滲透性，且材料性質與卜特蘭水泥相同，較無耐久性不佳與毒性之問題，因此相當適合作為滲透灌漿時所選用的材料。

2.3.2 室內滲透灌漿試驗

目前所知的灌漿工法與灌漿材料種類繁多，為了能選定適用之灌漿材料與灌漿工法，一般皆會進行現地灌漿試驗以評估改良成效。然而，由於現地試驗的成本過高，因此可藉助室內灌漿試驗之方式，以觀察其灌注成果，作為現地試驗之參考。以下將介紹文獻中各個學者所設計的室內灌漿試驗。

表 2.3 一般飽和土壤滲透係數 (摘自 Coduto et al., 1998)

土壤種類	滲透係數 · K (cm/sec)
乾淨礫石 (Clean gravel)	$1 \sim 100$
砂-礫石混合 (Sand- gravel mixtures)	$10^{-2} \sim 10$
粗顆粒砂 (Clean coarse sand)	$10^{-2} \sim 1$
細砂 (Fine sand)	$10^{-3} \sim 10^{-1}$
粉土質砂 (Silty sand)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
黏土質砂 (Clay sand)	$10^{-4} \sim 10^{-1}$
粉土 (Silt)	$10^{-8} \sim 10^{-3}$
黏土 (Clay)	$10^{-10} \sim 10^{-6}$

表 2.4 土壤滲透性分類 (摘自 Terzaghi and Peck., 1948)

滲透性	高	中等	低	極低	視為不透水
滲透係數 K(cm/sec)	$> 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	$< 10^{-7}$

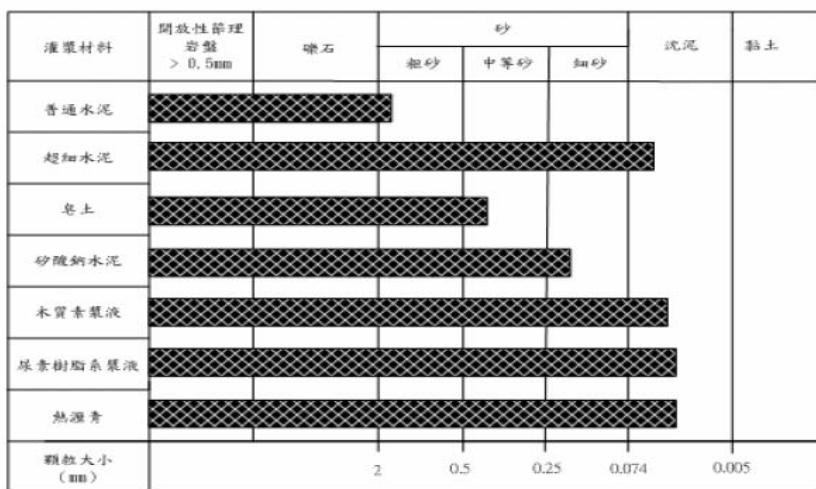


圖 2.17 各種不同灌漿材料之滲透範圍比較圖(摘自 倪至寬, 2006)

表 2.5 各種灌漿材料之性質(摘自 U.S army corps of engineers,1995)

灌漿材料		材料性質					
		滲透性	耐久性	操作性	毒性	易燃性	成本
懸濁型	卜特蘭系水泥	低	高	中等	低	非易燃	低
溶液型	水玻璃	高	中等	高	低	非易燃	低
	丙烯胺 醯酸	高	中等	高	中等	低	高
	胺基鉀 酸酯系	中等	高	中等	高	高	高
	樹脂系	低	高	中等	高	中等	高

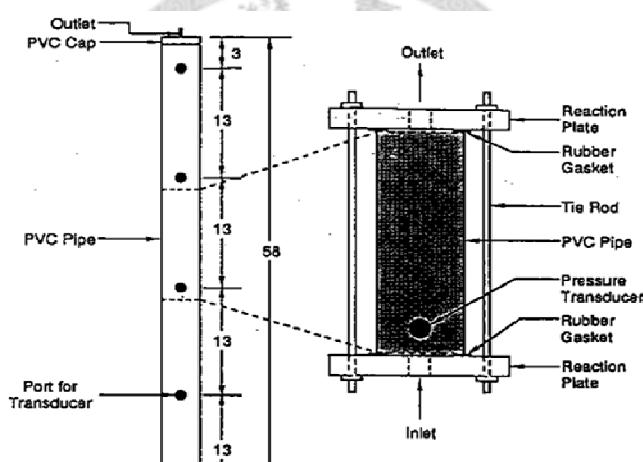


圖 2.18 砂柱灌漿試驗示意圖(摘自 Zebowitz et al., 1989)

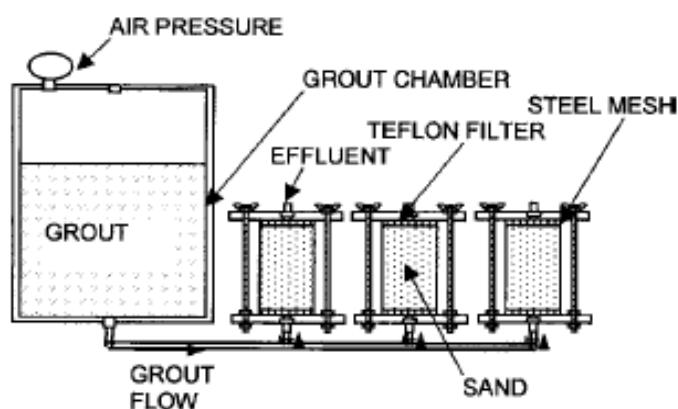


圖 2.19 砂柱化學灌漿試驗示意圖(摘自 Ozgurel et al., 2005)

Zebovitz et al. (1989) 使用 MC-500 型之超微粒水泥灌漿材料，進行三種不同種類砂之灌注模擬試驗，並在砂中加入粒徑小於 #200(0.074mm) 之細粒料 (Silt)，以研究細粒料含量與不同粒徑分佈之砂對漿體可灌性之影響；試驗結果顯示，灌注前後砂柱試體皆獲得明顯的改善，此外，細料的添加量只需 5%，對可灌性即有顯著的影響，其灌注試驗與滲透試驗設備如圖 2.18 所示。

Ozgurel et al. (2005) 建立之室內灌注模擬設備，如圖 2.19 所示。利用此設備進行砂柱試體的灌注改良，灌漿材料為化學灌漿材料「Acrylamide Grout」，作者分別於灌注前後進行強度與滲透性的試驗，並研究空氣中、水中與密閉中三種養護狀態以及灌注過程中漿體稀釋對其改良成果的影響；試驗結果顯示，養護形式與灌注過程中之稀釋現象對化學性灌漿材料 Acrylamide Grout，並無明顯之影響。

倪至寬等人(2006)利用研究室建製的可灌度設備製作直徑 3.78 公分，高度 36.8 公分的試體，以不同水灰比(0.8、1.2 及 3)與不同灌漿壓力($0.5(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、 $1(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 與 $2(\text{kg}/\text{cm}^2)$)共九組試樣對超細水泥進行了一連串基本性質之試驗，包括比重試驗、凝結時間試驗以及泌水試驗。其實驗結果求得，超細水泥比重約為 3.025，比表面積約為 $800\text{m}^2/\text{kg}$ ，其初凝時間如表 2.6 所示，其他材料基本性質如表 2.7 所示。

此外，根據倪至寬等人依據基礎實驗以及相關之前人研究，訂立一建議使用之實驗程序，用以作為漿體可灌度之實驗依據。其建議的試驗程序如下：

1. 地盤的物理試驗、土壤分類及漿材粒徑大小：利用可灌度比初步決定何種漿材在地盤中可以滲透灌漿。
2. 漿材的物理與流變性質試驗：可以瞭解漿材在不同配比的單位重、凝結時間、泌水量、黏滯度及降伏應力，作為灌漿時之參考。
3. 漿液可灌度試驗：可用來評估不同配比的漿液，在使用不同的灌漿壓力時，漿液在地盤中的滲透距離。同時評估改良土壤的滲透性及抗壓性，試驗設備如圖 2.20。

表 2.6 不同配比與凝結時間關係表

水灰比	分散劑添加量 (%)	初凝時間 (min)	終凝時間 (min)
0.8	1	47	65
	2	49	75
	3	53	90
0.3	1	68	110
	2	76	115
	3	82	120
3	無法檢測初凝及終凝時間		

表 2.7 超細水泥之基礎物理性質

Bulk density(g/cm ³)	Blaine(m ² /kg)	Bleeding maximum(%)	color
2.8 ~ 3.2	>800	1	grey

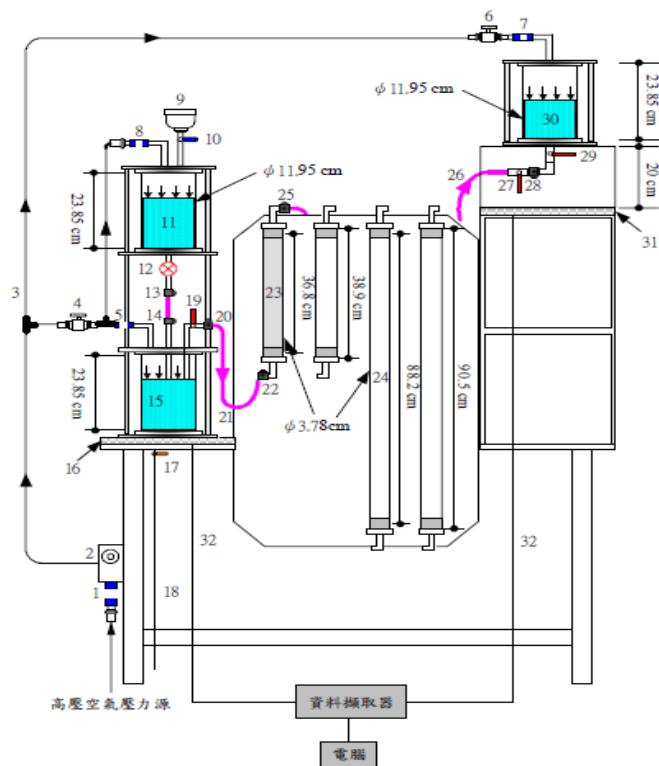


圖 2.20 可灌度試驗設備示意圖(摘自 倪至寬等人, 2006)

Schwarz et al. (2007)利用定壓、穩定加壓與週期性震盪加壓等三種加壓方式，探討使用超微粒水泥 MC-800，灌注砂柱試體後，不同加壓方式對其試體改良後之水泥含量、滲透係數與單壓強度的影響；結果顯示，同樣條件下以穩定加壓的方式所改良出來的成效最佳；此外，從試驗結果中，作者提出影響改良成效的主要因素，土壤與水泥粒子之間彼此的膠結程度比灌注的漿量來得重要，即砂柱試體的改良成效與水泥的灌漿量不成比例，其建立之室內灌注試驗設備如圖 2.21 所示。

Saiyouri et al.(2008) 以 3 種不同水灰比之超微粒水泥漿體灌注於不同相對密度之砂柱試體並利用氣體傳導度之方式進行本質滲透性係數(*Intrinsic coefficient of permeability*)之量測，其結果顯示灌注前後試體之本質滲透性從 10^{-4} (m/s)改善到 10^{-7} (m/s)左右，其灌注設備如圖 2.22 所示。

施國琅(2008)設計一套滲透灌漿模擬試驗之設備，並建立試驗流程與步驟，其灌漿試驗設備如圖 2.23 所示。

在試驗中發現，超微粒水泥漿體於同一灌注條件下，水灰比 1 至水灰比 5 之漿體在達到預定改良之試體高度時，所需的灌注量介於 1.16 倍至 1.63 倍的孔隙體積，如表 2.8 所示。於同一水灰比、不同級配之砂柱試體情況下，超微粒水泥漿體所需之灌注量有相近的孔隙體積倍數。

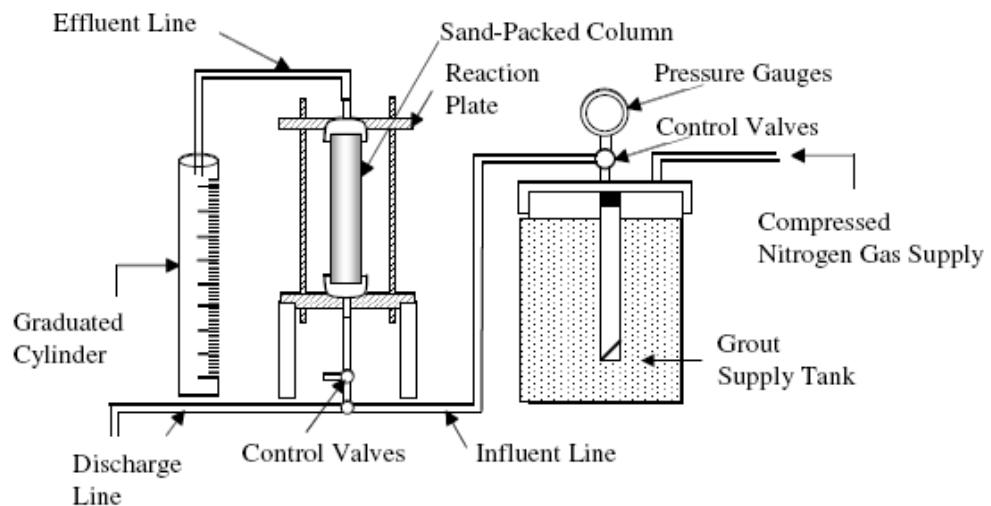


圖 2.21 柱灌漿試驗示意圖 (摘自 Schwarz et al., 2007)

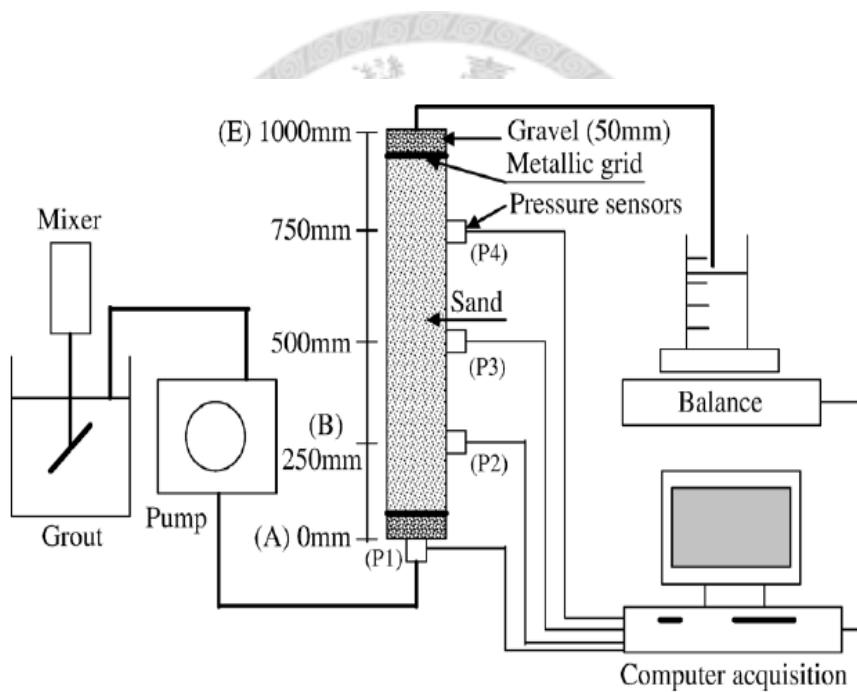


圖 2.22 氣體滲透量測設備示意圖(摘自 Saiyouri et al.,2008)

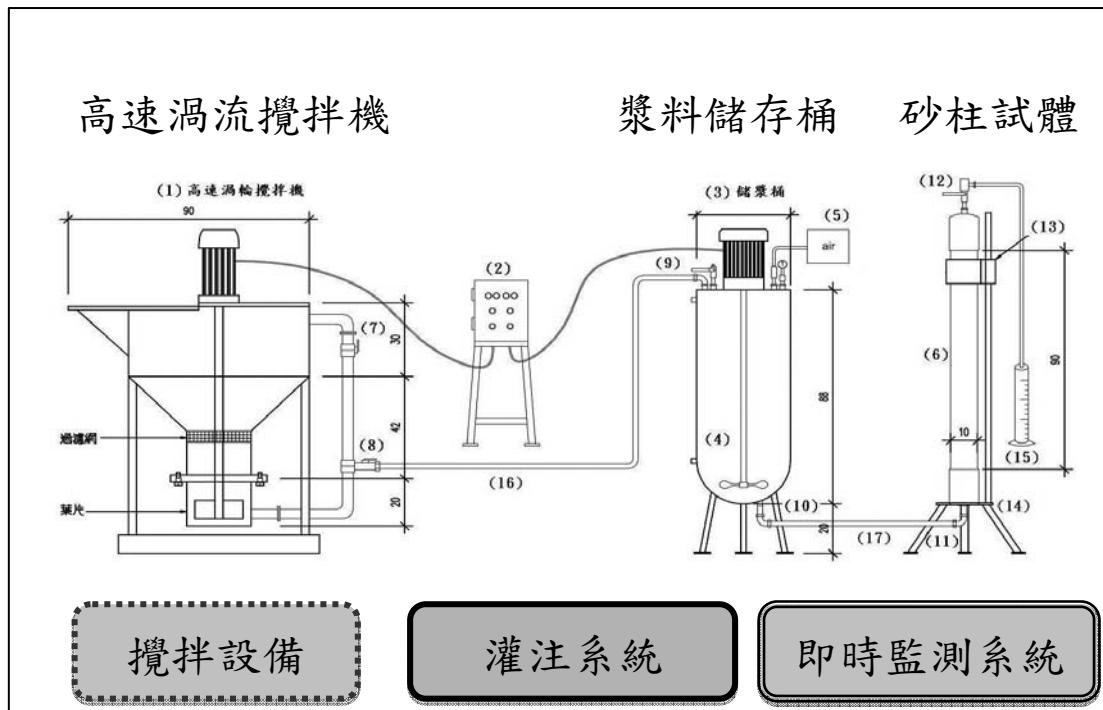


圖 2.23 滲透灌漿模擬試驗設備示意圖(摘自 施國琅, 2008)

表 2.8 超微粒水泥灌注量與孔隙體積之關係

渥太華砂	403型(細砂)	250型(中等砂)
水灰比(w/c)	孔隙體積之倍數	孔隙體積之倍數
1	-	1.17
2	1.16	1.22
3	1.35	1.35
4	1.44	1.44
5	1.59	1.63

2.4 滲透灌漿可灌性評估

由於滲透灌漿是在土壤結構不被破壞的條件下進行滲透，因此灌漿材料的顆粒尺寸必須至少小於土壤的孔隙尺寸，才能達到能夠滲入地層的條件。滿足灌漿材料對地層的可灌性條件，是進行滲透灌漿的前提。

緣此，當地層的有效孔隙或裂隙尺寸 D_p 大於灌漿材料的顆粒尺寸 d ，其比值 R 大於 1 時，漿體才是可灌的：

$$R = D_p / d$$

但在灌漿過程中，當漿液的濃度較大時，材料往往以兩粒或多粒的形式同時進入孔隙或裂隙，故而導致土壤孔隙的阻塞。因此，僅滿足 $R > 1$ 的條件是不夠的，還必須考慮由群粒堵塞作用帶來的附加影響。

此外，多數地層其粒徑都是不均勻的分佈，含有大小不等的孔隙，灌漿材料的顆粒尺寸也很不均勻。如 D_p 採用土層中的最小孔隙以及 d 採用灌漿材料的最大顆粒，理論上就能確定其可灌性，但這樣做就要採用細度很高的灌漿材料，從而造成技術和經濟上的困難；反之，若選用的 D_p 偏大和 d 值偏小，就可能使過多的灌漿材料無法通過土壤孔隙，使灌漿效果降低甚至無效。

因此，在設計灌漿材料時，除應滿足 R 值要求外，還必須根據既有構造物和基礎地層的具體條件，設定該地層孔隙尺寸選取的程度，即確定一個相對合理的灌漿標準。然而，當前的技術條件還難以準確的測出砂土的天然孔隙尺寸，所以在確定砂土可灌性時提出以下三點假設：

1. 當 R 等於或大於 2~3 時，可以防止群粒的堵塞；
2. 砂土有效孔隙尺寸 D_p 與顆粒直徑 D 關係為： $D_p = D \times e_e$ ， e_e 為有效孔隙比；
3. 可以土壤有效粒徑 d_{10} 或 d_{15} 代替 D ，而以水泥粒徑 D_{85} 代替 d ；

在許多文獻中均以類似上述之砂土的有效粒徑與水泥粒徑比，建立水泥漿體滲透灌漿可灌性的評估公式。其中 d_{10} 與 d_{15} 代表土壤通過百分比 10% 與 15% 之粒徑大小，而 D_{85} 則是灌漿材料其通過百分比 85% 之粒徑大小。

Burwell et al. (1958) 提出水泥漿體之可灌性經驗公式為：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

以砂土及水泥顆粒之相對粒徑比所組成，當 N_1 值大於 25 時則為可灌， N_1 值小

於 11 則為不可灌， N_1 值介於 11 與 25 之間則為無法有效灌注。上述評估準則當 N_1 大於 25 時，尚需以 N_2 進行交叉驗證，即若 N_2 亦大於 11 時則為可灌， N_2 小於 5 則為不可灌。

Krizek et al. (1992)研究建議，滲透灌漿必須滿足土壤和超微細水泥漿體之相對粒徑比的要求，即 $(d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout} > 15$ 且 $(d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout} > 8$ 時為可灌；反之，則漿體為不可灌。

Incecik and Ceren (1995)建議之水泥漿體可灌性公式為：

$$N = (d_{10})_{soil} / (D_{90})_{grout}$$

以砂土粒徑 d_{10} 及水泥粒徑 D_{90} 之比值，作為水泥漿體可灌性評估的依據，其中若 N 大於 10 則為可灌，反之則為不可灌。

黃建霖等人(2007) 使用 MFC-GM8000 超微細水泥，在高水灰比下(4.0 至 4.65)添加 1%之助流劑、配合高速渦流攪拌機，進行砂性粉土層的試驗灌漿，結果發現當 $N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout} > 9$ 或 $N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout} > 4$ 時，即有不錯之灌漿效果。

此外，影響可灌性的因素除土壤和水泥之粒徑有關外，亦跟灌漿壓力(Kutzner, 1996)、水灰比(Akulut., 1999 ; Peter et al., 2000)、土壤之粒徑分佈特性(Zebovitz et al., 1989)及土壤細粒料含量(Herndon and Lenahan., 1976)等因素有關。

Akulut et al. (2002)提出以往的可灌性經驗公式往往只考慮被灌注砂土之粒徑與灌漿材料的顆粒大小是不足的，作著藉由相同緊密程度、不同細顆粒含量之砂柱試體進行灌注模擬試驗，其室內灌注模擬設備如圖 2.24 所示，經由實驗結果建立一套新的可灌性經驗公式：

$$N = \frac{d_{10}}{D_{90}} + k_1 \frac{w/c}{FC} + k_2 \frac{P}{D_r}$$

其中若 N 大於 28 時則為可灌，反之則為不可灌；且式中之細顆粒含量(FC)、水灰比(W/C)與灌漿壓力(P)尚須在以下之限制當中， $0\% < FC < 6\%$ 、 $0.8 < W/C < 2$ 及 $50 < P < 200$ (kPa)，在此條件下此公式較為準確。

Ozgurel and Vipulanandan (2005)針對不同細顆粒含量之砂土，以化學灌漿材料 Acrylamide Grout 進行滲透灌漿，研究中指出細顆粒含量與灌漿壓力均會對漿體可灌性造成影響，並提出一細顆粒含量-可灌壓力的關係，如圖 2.25 所示。

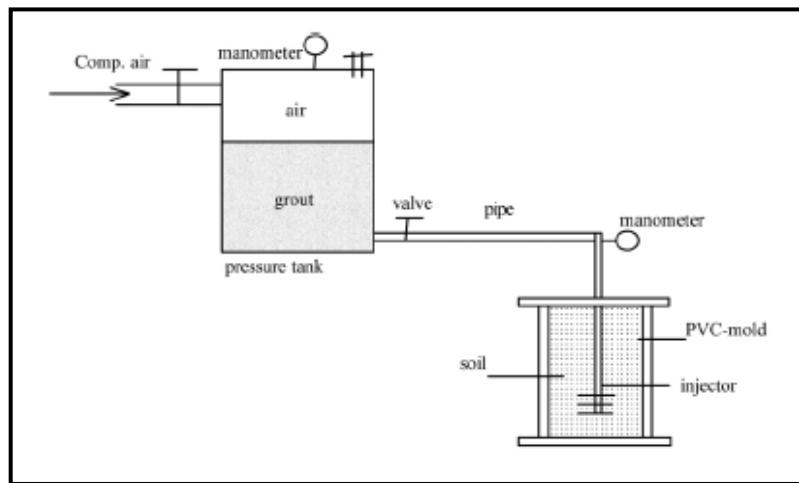


圖 2.24 砂柱灌漿試驗示意圖 (摘自 Akbulut et al., 2002)

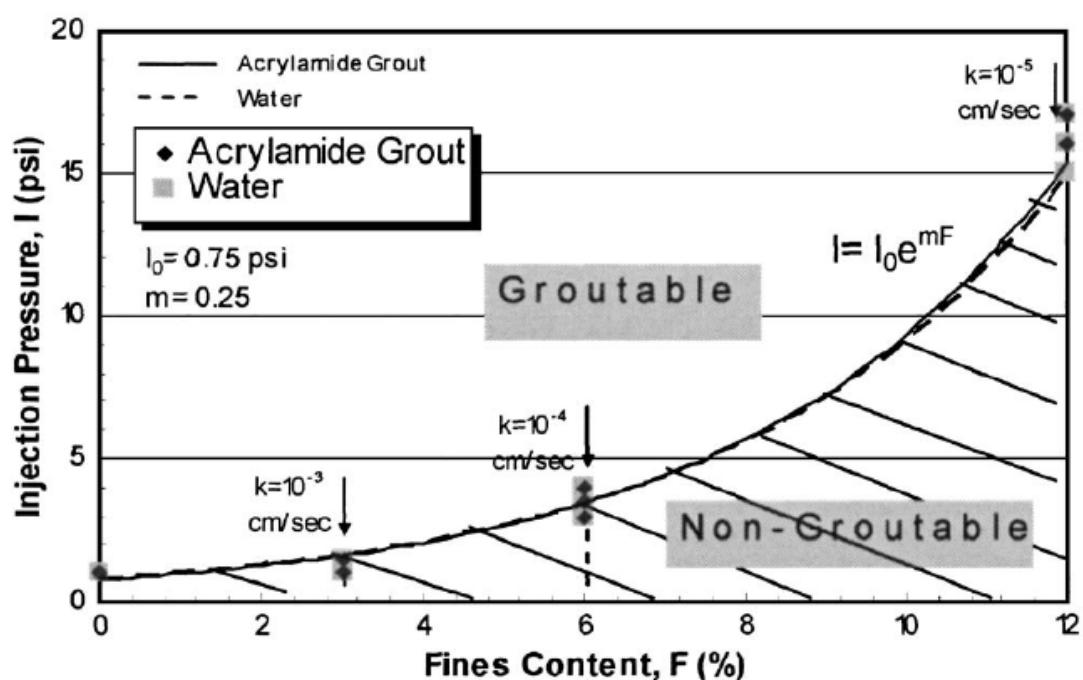


圖 2.25 細顆粒含量-可灌壓力關係曲線圖(摘自 Ozgurel and Vipulanandan, 2005)

Axelsson et al. (2009)指出砂土的孔隙(Fictitious aperture)與土壤有效粒徑 d_{50} 有關，並用其與水泥粒徑大小 D_{95} 之比值評估其可灌性，其運算公式如下：

$$b_{fic} = 0.15 \cdot d_{50}$$

$$N = b_{fic} / D_{95}$$

當 N 值小於 3 為不可灌， N 值大於 5 為可灌，並針對而 N 值在 3 至 5 之間，此種介於可灌與不可灌之間的情形進行探討，指出在此情形下，會發生過濾的現象，即土壤孔隙大小不足以讓水泥顆粒有效通過，逐漸發生阻塞的現象，尤以低水灰比時更為明顯。

綜合上述所建議的可灌性推估公式，大多以土壤及水泥之相對粒徑比為其評估的基準。只有 Akbulut and Saglamer (2002)的研究中，將水灰比及細粒料含量等影響因子納入可灌性的推估公式中。惟其細粒料含量及水灰比有其限制範圍，並不適用於高細粒料含量之砂性粉土層與高水灰比的超微粒水泥灌漿。

黃聖修 (2009)應用倒傳遞類神經網路進行可灌性預測分析，以土壤有效粒徑 (d_{10})、土壤有效粒徑 (d_{15})、孔隙比 (e)、細粒料含量 (FC)、土壤均勻係數 (Cu)、土壤級配係數 (Cz) 與水灰比 (W/C) 作為輸入層神經元，建構一適合台灣地區高細粒料含量之砂性粉土層超微粒水泥滲透灌漿可灌度的網路預測模式。分析結果顯示，以土壤有效粒徑 (d_{15})、孔隙比 (e)、細粒料含量 (FC)、土壤均勻係數 (Cu)、土壤級配係數 (Cc) 與水灰比 (W/C) 作為輸入層之神經元，可得到較佳的預測能力，其準確率為 96%。

2.5 禁忌演算法

禁忌演算法為啟發式演算法 (Heuristic Algorithm) 之一，為 Glover 於 1997 年所提出，其最大的特色在於蒐尋過程中具有記憶的功能，透過禁止某些行為，達到更有效率及正確搜尋之目的。禁忌演算法的核心精神在於其具有彈性的記憶體結構，即禁忌名單 (Tabu List) 之設計，而禁忌名單主要的功能是避免搜尋過程落入循環及重複搜尋相同的解，且能跳脫區域最佳解 (Local Optimum) 並找到全域最佳解 (Global Optimum) 或近似全域最佳解 (Du et al., 1998)。禁忌演算法已被廣泛應用於地下水復育、配水管網設計、推估降雨量、排程、通訊、字元辨識、TSP、圖形著色、積體電路設計、時間表設計與類神經網路等組合最佳化方面，皆有良好的表現。

因此，本研究利用禁忌演算法來修正前人之經驗公式，建立新的可灌性預測公式來預測超微粒水泥漿體滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性。

Khaled et al. (1995)利用禁忌演算法來解決群集問題(Cluster Problem)，如決定郵差分配信件之區域問題，其解決成效良好，不輸給 k-means 與模擬退火演算法。

吳泰熙 (1997)以途徑建構法獲得推銷員旅行問題(traveling salesman problem)之初始途徑，然後利用禁忌演算法進行路徑改善，以獲得一近似(或最佳)巡迴路徑，並得到禁忌名單大小會影響最終解的品質的結論。

Tung et al. (2002)應用禁忌演算法去搜尋最佳的地下水分區參數，首先將一個區域分為許多分區，並假設在各分區內的參數值都相同，結果顯示禁忌演算法能找到最佳的分區情形，且有最佳的地下水模擬數值(水力傳導度)，其分區假設情形如圖 2.26 所示。

黃室毓 (2008)為了建立地下水資源管理機制及規劃評估地下水資源之永續利用，於管理機制方面結合禁忌演算法進行觀測井網佈置之最佳化分析，作為研究區域內觀測井網之架設依據，結果顯示禁忌演算法能於不同情境設定之下，找到不同的觀測井網最佳佈置方式。

張永佳 (2009) 提出一混合式禁忌搜尋法求解整合生產與配送的排程問題。此演算法以禁忌搜尋法為基礎，在其中利用模擬退火法的機制收集解品質較好的精英名單，作為強化禁忌搜尋法的策略，當禁忌搜尋法所找到的解無法改進系統最佳解時，即將精英名單的解作為新迭代的起始解，使得演算法能從品質較佳的解重新搜尋，以提昇禁忌搜尋法的效率與求解品質。經過測試問題顯示此研究的演算法能在合理的時間內求得品質不錯的最佳近似解，最後並驗證了整合生產與配送方式的求解品質是優於分開考量的順序式方式，平均相對差距為 43.26%，因此此研究的結果也可以作為相關產業在整合生產與配送排程上的參考，以達到最大化整體利潤的目的。

1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	①	5	4	4	4	4	④	4	4	4
1	1	1	5	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4
1	1	5	5	5	⑤	4	4	4	4	4	4
1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3
2	2	5	5	5	5	3	3	3	③	3	3
2	2	②	5	5	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	5	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3

圖 2.26 水力傳導度的設計分區情形 (摘自 Tung et al., 2002)

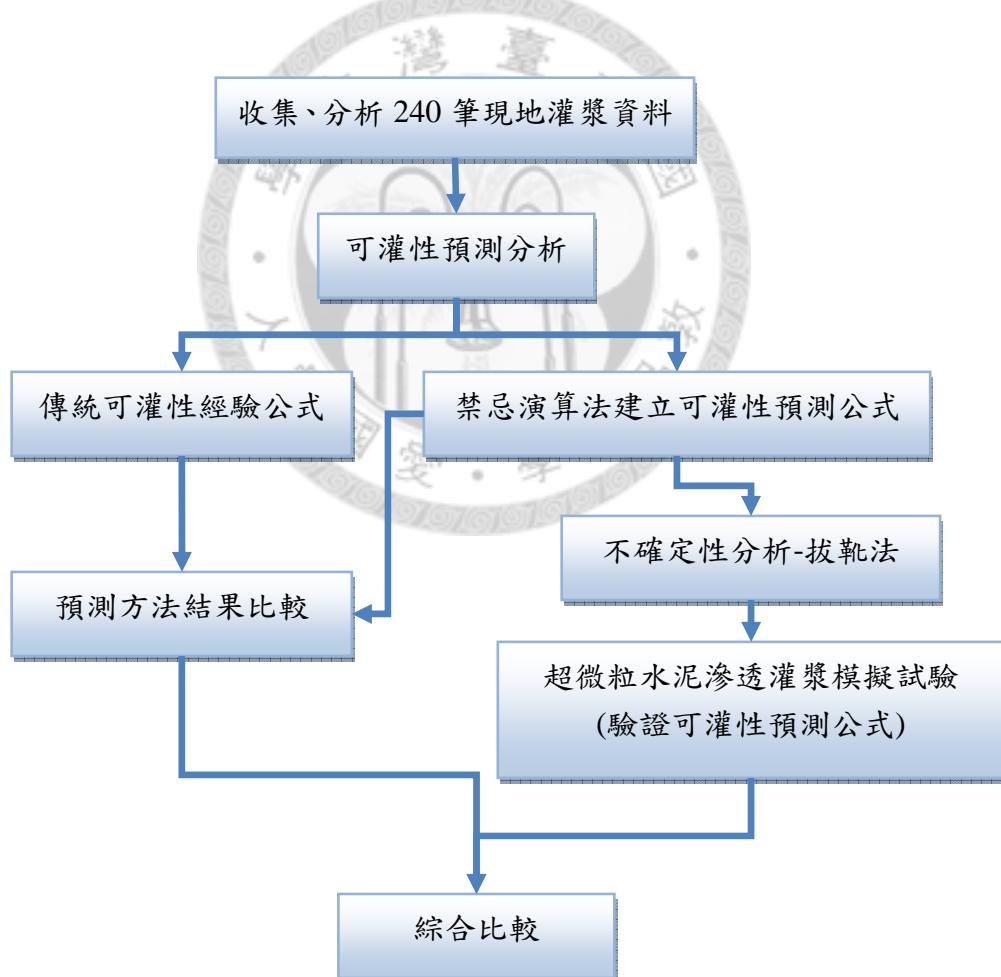


圖 3.1 研究架構圖

第三章 研究方法

本章將介紹研究中所需之現地灌漿資料，說明在應用禁忌演算法建立可灌性預測公式時，檢定與測試資料的選取方式；利用前人提出之可灌性經驗公式與本研究中應用禁忌演算法所建立的可灌性預測公式，作為評估可灌性之方法。此外，以拔靴法(Bootstrap Method)進行預測公式之不確定性分析。最後，介紹本研究中各項試驗所需之試驗材料及設備，並說明試驗流程以及內容。其中包含試驗材料基本性質試驗與滲透灌注模擬試驗。其研究架構如圖 3.1 所示

3.1 現地灌漿資料

研究使用的現地灌漿資料有 240 筆，主要來自台北和高雄兩個地區，合計有 25 個不同地點之鑽探孔位(每個孔位約有 4~12 筆不同深度的灌漿資料)。其中台北地區有 4 個孔位、20 筆灌漿資料，為捷運新莊線(CK570H)潛盾隧道防止液化灌漿工程，其預定施灌範圍如圖 3.2 所示；高雄地區則有 21 個孔位，220 筆灌漿資料，主要為「中山高速公路員林至高雄拓寬關廟高雄段第 571 標工程」，孔位分布在中山高速公路沿線橋樑位置，部分現地照片如圖 3.3 所示。

於現地所使用之超微粒水泥為 MFC-GM8000A(水泥)與 MFC-GM8000B(爐石)，並使用 50% 之爐石添加量(即水泥與爐石比例為一比一)，超微粒水泥 MFC-GM8000 之相關性質，將於 3.4 節詳細介紹。而現地鑽探資料可得知各鑽探孔於不同深度的粒徑分布、現地密度、比重、孔隙比等土壤性質；資料中顯示，現地灌漿地區之地層，大多為砂性粉土層，其細顆粒含量約在 7% 至 50% 之間，因土壤特性及水泥水灰比的差異，可灌性亦有所不同；而細顆粒含量超過 50% 之土層大多以達黏土程度，均不可灌。影響可灌性的因素除了細顆粒含量外，亦有其他原因。

在現地灌漿使用的工法為低壓滲透灌漿，且現地灌漿工程均施作於既有結構物下方基礎，主要是低壓滲透灌漿能有效增加土壤抗液化能力、基礎承載力及降低透水性，並能在不破壞土體結構的情況下施灌。而現地灌漿是否可灌，主要受到灌漿壓力大小以及漿體流量的穩定性影響，其定義為：在現地以固定壓力的方式灌漿，在未超過劈裂壓力的情況下，其漿體流量可穩定施灌者，則視為可灌；反之則為不可灌。

240 筆現地資料中，用來使用在禁忌演算法的參數有土壤有效粒徑(d_{10})、土壤有效粒徑(d_{15})以及水灰比(W/C)，以下茲介紹各參數其範圍大小、平均值和標準差，各參數分布之情形，如附錄三所示。

(1)土壤有效粒徑(d_{10})：範圍大小由 $0.1\mu\text{m}$ 至 $85\mu\text{m}$ ，平均為 $20.07\mu\text{m}$ ，標準差為 $20.83\mu\text{m}$ 。

(2)土壤有效粒徑(d_{15})：範圍大小由 $0.2\mu\text{m}$ 至 $125\mu\text{m}$ ，平均為 $32.01\mu\text{m}$ ，標準差為 $27.54\mu\text{m}$ 。

(3)水灰比(W/C)：依照孔位的不同，使用不同之水灰比，分別有水灰比 3.34、4.0 及 4.65，其中台北地區 4 個孔位皆為使用水灰比 3.34，在高雄地區則分別有 12 個孔位及 9 個孔位使用水灰比 4.0 及 4.65。各孔位之資料組數及所使用水灰比的詳細情形，如表 3.1 所示。

3.2 可灌性預測分析

將已蒐集到的 240 筆現地灌漿資料，用來驗證前人研究之可灌性經驗公式其對於可灌性的預測準確度，以其預測結果分析傳統可灌性公式，對於超微粒水泥 MFC-GM8000 滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性的適用性。此外，本研究亦針對現地資料，嘗試以禁忌演算法建構一可灌性預測公式，並測試此一公式之準確性。

3.2.1 傳統可灌性經驗公式

整理多篇文獻中前人所提出之可灌性公式，多數以土壤及水泥之相對粒徑比為其評估的基準。但是在 Akbulut and Saglamer (2002)的研究裡，還將水灰比、細粒料含量及相對密度等影響因子都納入可灌性的推估公式中，只是所蒐集的現地資料有部分缺失，沒有公式所需參數的值，且其細粒料含量及水灰比等參數有其限制範圍，故此公式在本研究中並未採用。

本研究所蒐集之現地資料，為高細粒料含量之砂性粉土層以高水灰比的超微粒水泥進行低壓滲透灌漿，此情況為過去傳統公式建立時所未考量的，因此將以 240 筆現地灌漿資料驗證傳統公式之準確性及適用性。以下將介紹本研究中所採用的可灌性公式：

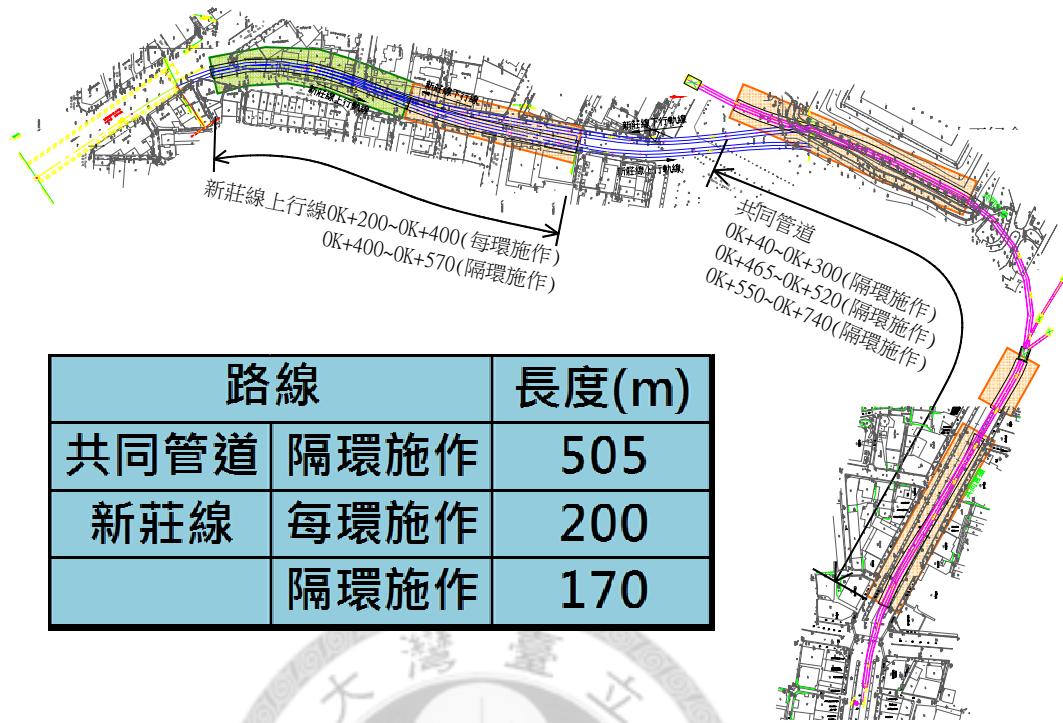


圖 3.2 台北捷運新莊線灌漿作業範圍(摘自 勤岩工程)



圖 3.3 中山高速公路關廟高雄段沿線橋工圖(摘自 勤岩工程)

表 3.1 孔位資料組數表

台北-捷運新莊線					
孔位	資料組數	水灰比	孔位	資料組數	水灰比
新莊線 CK570H-1	5	3.34	新莊線 CK570H-2	7	3.34
新莊線 KA-03	4	3.34	新莊線 KA-08	4	3.34
高雄-中山高速公路					
孔位	資料組數	水灰比	孔位	資料組數	水灰比
旗楠路 355K+255	11	4	旗楠路 355K+325	11	4
經建路 356K+825	12	4	經建路 356K+861	12	4
鳳楠路 357K+079	12	4	鳳楠路 357K+139	12	4
水管路 358K+723	11	4	水管路 358K+768	12	4
後勁溪 358K+834	10	4	後勁溪 358K+870	10	4
本館路 364K+137	7	4	本館路 364K+175	7	4
塊厝溝 353K+565	12	4.65	塊厝溝 353K+616	12	4.65
典寶溪 354K+116	12	4.65	典寶溪 354K+187	6	4.65
興楠路 356K+002	11	4.65	興楠路 356K+050	12	4.65
八德路 359K+509	10	4.65	八德路 359K+534	11	4.65
旗楠路 355K+290	7	4.65			

(1) Burwell et al. (1958)

提出水泥漿體之可灌性經驗公式為：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

以土壤及水泥顆粒之相對粒徑比所組成，有三種情況：

- a. 當 N_1 值大於 25 時則以 N_2 進行交叉驗證，若 N_2 亦大於 11 時則為可灌， N_2 小於 5 則為不可灌。
- b. N_1 值小於 11 則為不可灌。
- c. N_1 值介於 11 與 25 之間則為無法有效灌注。

(2) Krizek et al. (1992)

指出滲透灌漿必須滿足土壤和超微粒水泥漿體之相對粒徑比的要求，並將 Burwell 提出之公式 N 值進行修正，公式如下：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

當 $N_1 > 15$ 且 $N_2 > 8$ 時為可灌；反之，則漿體為不可灌。

(3) Incecik and Ceren (1995)

建議之水泥漿體可灌性公式為：

$$N = (d_{10})_{soil} / (D_{90})_{grout}$$

以土壤粒徑 d_{10} 及水泥粒徑 D_{90} 之比值，作為水泥漿體可灌性評估的依據，其中若 N 大於 10 則為可灌，反之則為不可灌。

(4) 黃建霖等人(2007)

針對使用 MFC-GM8000 超微粒水泥、在高水灰比下(4.0 至 4.65)添加 1% 之助流劑、配合高速渦流攪拌機，所進行的砂性粉土層試驗灌漿結果，用以修正可灌性公式之 N 值。其使用之公式為：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

其結果發現，當 $N_1 > 9$ 或 $N_2 > 4$ 時，即為可灌；反之則為不可灌。

(5) Axelsson et al. (2009)

指出砂土的孔隙(Fictitious aperture)與土壤有效粒徑 d_{50} 有關，並用其與水泥粒徑大小 D_{95} 之比值評估其可灌性，其運算公式如下：

$$b_{fic} = 0.15 \cdot d_{50}$$

$$N = b_{fic} / D_{95}$$

當 N 值小於 3 為不可灌， N 值大於 5 為可灌，而 N 值在 3 至 5 之間，土壤孔隙大小不足以讓水泥顆粒有效通過，會發生阻塞的現象，而無法有效灌注。

3.2.2 超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式

本研究將參考 Krizek et al. (1992)提出的滲透灌漿必須滿足土壤和超微細水泥漿體之相對粒徑比的要求，修正其公式的 N 值，以禁忌演算法進行 N 值範圍的推估，如下式所示：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

當 $N_1 > a$ 且 $N_2 > b$ 時為可灌；反之，則漿體為不可灌。

其中 a 、 b 為待定係數，且 a 、 $b > 0$ 。

3.2.3 禁忌演算法 (Tabu Search)

(1) 禁忌演算法理論概述

禁忌演算法為啟發式演算法(Heuristic Algorithm)之一，其最大的特色在於蒐尋過程中具有記憶的功能，透過禁止某些行為，達到更有效率及正確搜尋之目的。在搜尋過程中所使用之策略可分為多樣性(Diversification)及強化性(Intensification)兩種，前者乃期望針對尚未搜尋的解空間進行搜尋，而後者則期能針對較佳解之鄰近區域進行地毯式搜尋 (Glover, 1997)。禁忌演算法的核心精神在於其具有彈性的記憶體結構，即禁忌名單 (Tabu List) 之設計，而禁忌名單主要的功能是避免搜尋過程落入循環及重複搜尋相同的解，且能跳脫區域最佳解 (Local Optimum) 並找到全域最佳解 (Global Optimum)。

禁忌演算法的記憶能力，與人類大腦中的記憶功能類似，可以記憶搜尋過的路徑，以避免重複搜尋和跳脫區域最佳解。通常記憶能力的優劣，常會影響禁忌演算法的搜尋效率及效能，有效率的記憶方式可以精簡記憶結構避免耗費過多的記憶體，而繁雜的記憶結構則會讓記憶體負荷過重，使搜尋效率大打折扣。禁忌演算法之記憶體形式分為短期記憶(short-term memory)與長期記憶(long-term memory)，短期記憶之功能在於避免重複搜尋及搜尋過程落入循環，而長期記憶

能記錄過去搜尋過區域的頻率，以供未來方向參考；禁忌演算法的記憶屬性分為四種 (Glover, 1997)：

- a. 「新近式記憶」在記錄最近之變動方式，功能在避免重複搜尋相同解；
- b. 「頻率性記憶」在記錄解或變動出現之頻率，為均勻搜尋可行解空間頻率小之變動應有較大機率於後續變動中被採用；
- c. 「品質式記憶」在於能夠區別與記錄搜尋過的解好與壞，如於搜尋過程中記錄曾經找到之最好解；
- d. 「影響式記憶」則考慮在搜尋過程中所選擇變動方向對搜尋結果之影響，對解有較佳改善效果之變動應較容易被選擇，反之，對解有較差改善效果之變動應被盡量禁止選擇。

上述中「新近式記憶」可屬於短期記憶，而「頻率性記憶」則屬於長期記憶，本研究的記憶形式為短期記憶，且將針對新近式記憶部分進行模式最佳解的演算，以獲得超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式。

禁忌演算法在應用上，需根據求解問題本身將調適性記憶 (adaptive memory) 與回應性探索 (responsive exploration) 具體化，前者的特性是在執行過程中確保決策更有效率與具正確性；後者強調在搜尋過程中，根據記憶環境特性與鄰近環境特性，選擇比隨機選取好的決策，以提供更多的訊息。例如登山者在登山時必須記住幾個過去重要的點避免走回頭路(調適性記憶)，也必須沿路作決策往更好的方向前進(回應性探索)。

整體而言，禁忌演算法有五項演算流程，分別為初始解(Initial Solution)、移步(Move)、禁忌名單(Tabu List)、破禁原則(Aspiration Level)及停止搜尋原則(Stopping Criterion)，茲將分別說明如下。

1. 初始解(Initial Solution)

一般禁忌演算法初始解之選取，是由已知之可行解空間中，隨機從可行解空間選取一組解作為搜尋之起點，此解即是初始解；本研究之可行解空間未知，將隨機選取一組初始解來驗證禁忌演算法能跳脫區域最佳解，並找到全域最佳解。

2. 移步(Move)

移步係指由目前解移動到鄰近解之動作，而移步量之大小不同也代表搜尋過

程解精度之不同。移步量較大，可行解空間較小，搜尋效率較高，表示在搜尋過程中著重多樣性，能搜尋可行解區域內較多之範圍，但搜尋過程中有可能因移步幅度過大而錯失全域最佳解的位置，搜尋正確性較低；反之，移步量若較小，可行解空間較大，解空間精密度高，能針對較佳解的附近做強化性之搜尋，即有較大的機率搜尋至全域最佳解，其搜尋正確性較高，但解空間的提升將使搜尋效率降低。針對不同的問題，移步量之設計皆不盡相同，甚至在同一問題中，也可階段性的調整移步量大小，藉以達到增加搜尋效率及效能之目的。

3. 禁忌名單(Tabu List)

禁忌名單之概念係為禁忌演算法中最主要之精神所在，其內容包括禁忌名單的長度及形式。禁忌名單的長度於初始設定時應為多少，目前尚無明確之定論，而本研究擬採用 Glover(1990)所建議之魔術數字 7，其後再根據搜尋過程中，解是否落入循環及其循環之次數，做適當之調整。

禁忌名單之定義視問題而定，以禁忌名單之形式來說，如決策變數可變動範圍不大，可將禁忌名單定義為記錄整組解集合之形式；若決策變數較多，問題維度較高時，可將名單形式設定為記憶該次移步所移動之決策變數與變數值，避免記憶體使用過多且有效的避免搜尋落入循環。本研究擬採用記錄最近幾次演算的最佳解所在位置，即為記錄移步之屬性，此種記憶方式屬新近式記憶，目的在於避免重複搜尋相同解以及落入區域最佳解。

4. 破禁原則(Aspiration Level)

在進行求解搜尋的過程中，若某一次移步所造成最佳解比記錄的最佳解為佳，但該次最佳解的位置被記錄於禁忌名單之中，該移步將被限制，故將該移步從禁忌名單中移除，使該移步可以作為下一次迭代之初始解，即為破禁。但於本研究中係採用記錄完整解的屬性之方式，故可確保不會移至同一解，因此不需破禁原則。

5. 停止搜尋原則(Stopping Criterion)

設定停止原則之目的，即在於給予搜尋過程一停止之依據，如何設定停止原則，亦是因問題不同而異，而一般常見之停止原則有：(1)預設允許之最大迭代次數、(2)預設目標函數值持續未改善之最大迭代次數以及(3)預設可接受之目標函數值等。於本研究中選擇第一種停止原則進行求解。

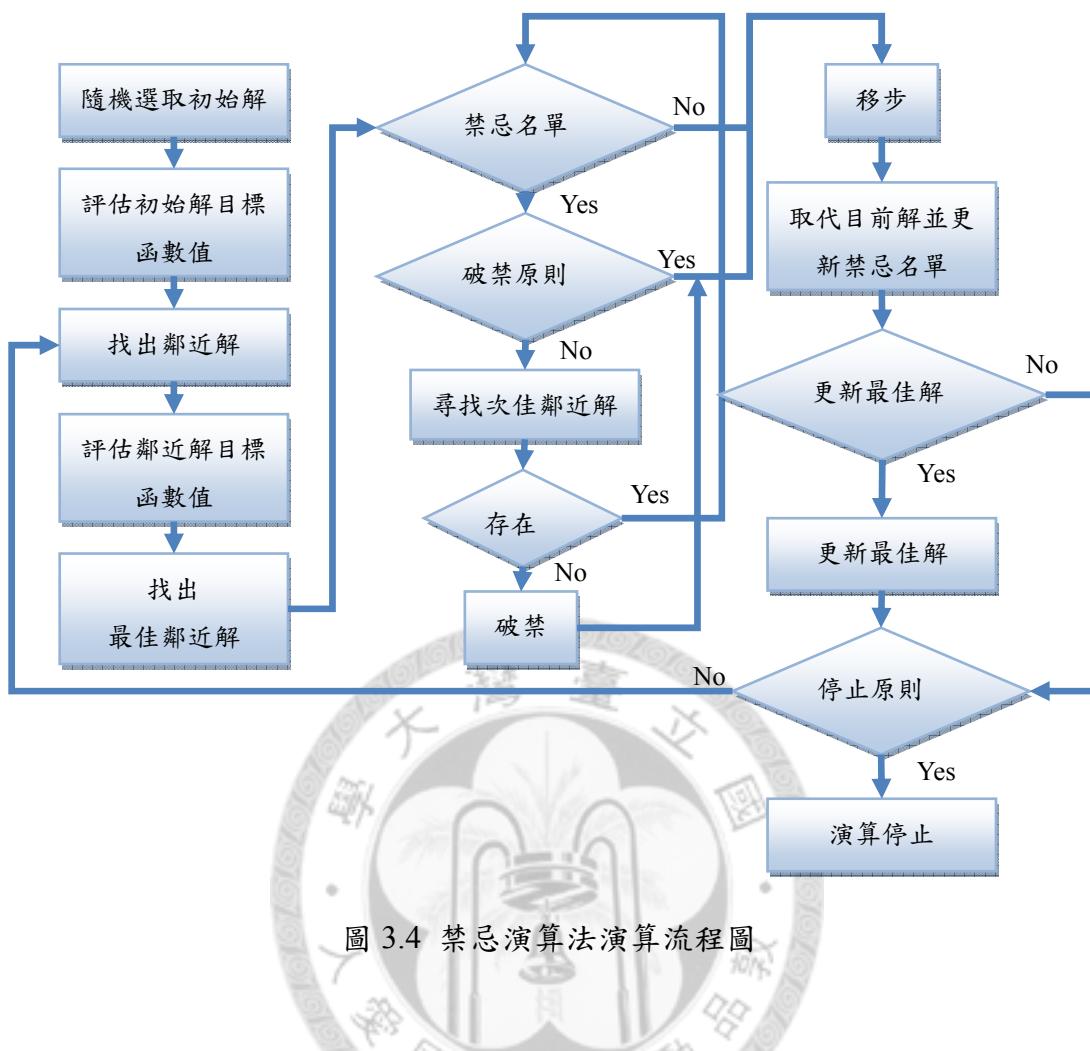


圖 3.4 禁忌演算法演算流程圖

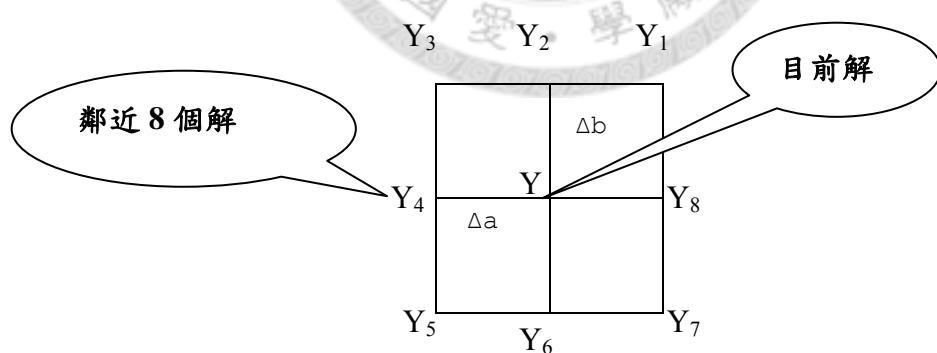


圖 3.5 鄰近解取點示意圖

(2) 禁忌演算法輸入參數

依據前人研究的結果發現，可灌度與土壤有效粒徑 (d_{10})、土壤有效粒徑 (d_{15})、孔隙比(e)、細粒料含量 (FC) 與水灰比(W/C)等因子有關。而本研究因為是參考 Krizek et al. (1992)提出的滲透灌漿必須滿足土壤和超微細水泥漿體之相對粒徑比的要求，修正其公式的 N 值，所以只需要輸入土壤有效粒徑 (d_{10})、土壤有效粒徑 (d_{15})這兩個參數(超微粒水泥粒徑 $D_{85}=4.46\mu\text{m}$ 、 $D_{95}=7.32\mu\text{m}$ 為定值)。

(3) 超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式

本研究應用禁忌演算法建立超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式，研究中利用 240 筆現地實際灌漿資料進行禁忌演算法的檢定及測試，其灌漿資料共有 25 個孔位，其中台北地區有 4 個孔位，20 筆灌漿資料；高雄地區有 21 個孔位，220 筆灌漿資料。其中，有關禁忌演算法檢定資料的部分，選取不同水灰比 20 處灌漿孔位，共 195 筆(約佔 80%)灌漿資料；於測試部分，則選取不同水灰比 5 處灌漿孔位，共 45 筆(約佔 20%)灌漿資料，其資料組數整理如表 3.2 所示。

根據 3.2.2 超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式的建立是將 Krizek et al. (1992)的公式 N 值進行修改，而傳統可灌性公式，其 a、b 值(參照 3.2.2)皆為整數，在應用上比較方便簡潔，因此本研究將隨機挑選一組整數初始解，所使用之移步量為 1，禁忌名單長度設為 7，鄰近解個數為 8 個，如圖 3.5 所示。又設定之停止原則為迭代次數達 100 次停止，固將搜尋最多 800 個解。

本研究建構完成之超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式，將與前述之傳統可灌性公式作一比較，亦將配合室內滲透灌漿試驗之結果，進行預測公式的驗證。

3.3 不確定性分析

量子物理大師 Heisenburg 於1927 年曾提出不確定性的主要原則，強調不確定性存在於各種物理過程，不確定性只能消滅，不能消除(McKay ,1988)。根據 U.S.EPA (1992) 於「暴露評估準則」中指出，不確定性的來源有情境的 (scenario)、參數的 (parameter) 及模式的 (model) 區分，整理如表3.3所示。

本研究使用 240 筆現地實際灌漿資料，欲由這些資料建立適用於超微粒水泥漿體滲透灌漿在砂性粉土層之可灌性預測公式，而禁忌演算法能達到上述的要求，只是建立出來的可灌性預測公式是否正確或可完全信賴則無法得知。為了解禁忌演算法所建立之超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式的可信度，本研究將採

表 3.2 禁忌演算法檢定與測試組數表

地點	台北-捷運新莊線	高雄-中山高速公路		總計
水灰比	3.34	4.0	4.65	
孔位個數	4	12	9	25
資料組數	20	127	93	240
檢定組數(孔位數)	13(3)	107(10)	75(7)	195(20)
測試組數(孔位數)	7(1)	20(2)	18(2)	45(5)

表 3.3 不確定性之型態與來源 (摘自 U.S.EPA, 1992)

不確定性之型態	來源	說明
情境	錯誤描述	不正確或不充足之資訊
	錯誤聚集	空間或時間上之概略估計
	錯誤判斷	選取不正確模式
	不完整的分析	忽略了重要的思考途徑
參數	錯誤測量	不精確或偏頗之度量
	錯誤取樣	取樣太小或不具代表性
	變異性	於時間、空間或活動中產生
	代用之資訊	例如使用有相似結構之化學品
模式	錯誤關係	在相關性中不正確引用關係
	錯誤模式	排除了相關變數

用拔靴法 (Bootstrap Method) 進行不確定性分析，分析參數不確定性是否存在(了解現地灌漿資料是否具有代表性)，進而評估可灌性預測公式的可行性。

3.3.1 拔靴法 (Bootstrap Method)

拔靴法是 Efron(1979)所提出的一項應用電腦的統計分析方法，在資料來源分配未知的情況下，可運用拔靴法去做估計及統計推論，本研究即利用拔靴法來進行不確定性分析。

拔靴法的概念是利用樣本以重複取出、放回的方式模擬出一個隨機樣本，再由模擬出的隨機樣本之統計量進行估計與檢定。其優點為即使樣本資料不多，也可估計其統計量之平均值與標準差。

設 x_1, \dots, x_n 為來自未知分配的母體 F 中的隨機樣本，利用取出放回的方式從 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 中隨機抽取 n 個隨機樣本 $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ ，則 x^* 稱為拔靴樣本，因為以取出放回的方式取得，所以 $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ 之間互相獨立且分配相同。

所以拔靴法可以產生互相獨立的拔靴樣本 $X^{*1}, X^{*2}, \dots, X^{*B}$ ，每組樣本大小皆為 n，B 為拔靴樣本組數。而我們希望去估計一個重要的參數 $\theta = t(F)$ ，計算出 θ 的拔靴複製(bootstrap replication of θ) $\hat{\theta}^* = s(x^*)$ 。

而本研究所要估計的 θ 值有兩個，即 3.2.2 所提到的 a、b 值，則 $\theta = (a, b)$ 。利用 240 筆現地灌漿資料，隨機抽取 50 筆資料 ($n = 50$)，將這 50 筆資料帶入禁忌演算法的演算模式中，得出 a^* 、 b^* 值，重複做 1000 次 ($B = 1000$)，即得到 1000 組的拔靴複製 $\hat{\theta}^{*1}, \hat{\theta}^{*2}, \dots, \hat{\theta}^{*1000} = (\{a^{*1}, a^{*2}, \dots, a^{*1000}\}, \{b^{*1}, b^{*2}, \dots, b^{*1000}\})$ ，並求出

$\{a^{*1}, a^{*2}, \dots, a^{*1000}\}$ 之平均值 $\mu_a^* = \frac{\sum_{i=1}^{1000} a^{*i}}{1000}$ 、標準差 $\sigma_a^* = \sqrt{\frac{1}{(1000-1)} \sum_{i=1}^{1000} (a^{*i} - \mu_a^*)^2}$ 還

有 $\{b^{*1}, b^{*2}, \dots, b^{*1000}\}$ 之平均值 $\mu_b^* = \frac{\sum_{i=1}^{1000} b^{*i}}{1000}$ 、標準差 $\sigma_b^* = \sqrt{\frac{1}{(1000-1)} \sum_{i=1}^{1000} (b^{*i} - \mu_b^*)^2}$

並根據其結果來分析可灌性預測公式的參數不確定性。

3.4 室內滲透灌漿試驗

本研究參考施國琅(2008)所提出之室內滲透灌漿試驗流程及步驟，藉由自行設計的高速渦流攪拌機及氣壓式灌漿設備進行砂柱試體的製備及滲透灌漿的施作。

3.4.1 灌漿材料及性質

(1) 灌漿材料之種類

本研究所使用之主要實驗材料為懸濁型超微粒水泥漿液，此 MFC-GM8000 型之超微粒水泥灌漿材料，為超微粒水泥 MFC-GM8000A(以下簡稱 A 料)與超微粒爐石 MFC-GM8000B(以下簡稱 B 料)以 1：1 比例混合而成，此材料為 Taiwan Hard Rock Eng. Co.,Ltd 所研發，並由中國江門市中建科技開發有限公司生產的高性能超微粒水泥灌漿材料。它具備與有機化學灌漿漿液相似的良好滲透性與可灌性，以及高強度、耐久度、環保性與無汙染的優點。

超微粒水泥之基本定義，如表 3.4 所示，本研究所使用之超微粒水泥 MFC-GM8000 符合超微粒水泥定義標準。MFC-GM 8000A 與 MFC-GM 8000B 之物理性質如表 3.4 所示；其細度與比重分別依據 ASTM C188-95 與 ASTM D854-02 求得。

MFC-GM8000A 型超微粒水泥，為卜特蘭水泥經特殊設備研磨至微米與奈米細度，比表面積大於等於 $8500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，平均粒徑約 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ ，最大粒徑 $\leq 20 \mu\text{m}$ ，其 70% 以上粒徑小於 $1 \mu\text{m}$ 達到準奈米級。超微粒水泥與一般水泥之基本及化學性質比較，如表 3.5 所示。

MFC-GM8000B 型超微粒爐石為水淬高爐爐渣粉，主要由煉鐵時產生的高爐爐渣製成；水淬高爐爐渣是高爐爐渣中煉鐵同時生成之熔融物，用水、水蒸汽或空氣予以劇冷使成為粒狀玻璃質材料，屬非金屬產物，主要成份為矽酸鈣或鋁矽酸鈣並包含許多化合物，其詳細之成分配比如表 3.6 所示。高爐爐石本身不具有凝結能力，唯在水泥發生水化反應之後，會伴隨發生卜作嵐反應，又由於爐石粉具耐磨與硬度高的特性，因此經過特殊設備可被研磨至微米與奈米之細度，用以搭配 MFC-GM8000A 型灌漿材料使用。

表 3.4 超微粒水泥基本定義

超微粒水泥基本定義	粒徑大小 (μm)	比表面積 (cm^2/g)
ACI Committee 522	< 15	-
歐盟	< 20	> 8000

表 3.5 超微粒水泥、爐石基本性質表

項目		MFC-GM8000A	MFC-GM8000B
外觀		深灰色粉末	淺灰色粉末
比重		3.0 ± 0.20	2.8 ± 0.20
氣味		無	無
毒性		無	無
細度	比表面積 (cm^2/g)	≥ 8500	≥ 8500
	平均粒徑 (μm)	約 $0.1 \sim 1$	約 $0.1 \sim 1$
	最大粒徑 D_{\max} (μm)	≤ 20	≤ 20

表 3.6 超微粒水泥灌漿材料與一般水泥之基本性質比較表

類型		MFC-GM 8000A	MFC-GM8000B	OPC
物理性質	比重	3.0 ± 0.20	2.8 ± 0.20	3.15
	比表面積 (cm^2/g)	≥ 8500	≥ 8500	3180
	最大粒徑 (μm)	≤ 20	≤ 20	100
化學成分	SiO_2	26.28%	31.46%	20.4%
	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	11.21%	22.14%	8.9%
	$\text{CaO} + \text{MgO}$	54.19%	37.5%	66.2%
	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	-	-	0.9%
	SO_3	2.77%	3.15%	1.9%

超微粒水泥所添加之超微粒爐石爐渣粉細度需控制於 $8500\text{cm}^2/\text{g}$ 以上，才能有效填充土壤間之微細孔隙，達到低壓滲透改良地盤的功能。圖 3.6 為 A 料、B 料與卜特蘭水泥之粒徑分佈曲線，由 x-ray 自動化微粒粒徑分佈儀求得。圖 3.7 為電子顯微圖片，其中(a)圖為一般卜特蘭水泥，(b)圖為 MFC-GM8000 型超微粒水泥，圖中黑點為凹陷之坑洞，可發現 MFC-GM8000 型之超微粒水泥表面較平滑、坑洞較小，較一般卜特蘭水泥細緻。

(2) 灌漿材料之八大重金屬溶出檢測

本研究所使用之超微粒水泥與超微粒爐石 1:1 混合後，其試體先以蒸餾水浸置 24 小時後，再將此蒸餾水依據 ICP-OES 進行測驗，其測試結果如表 3.7 所示，各項重金屬檢測項目均符合環保署「地下水汙染管制標準」，故材料在使用上，不會造成環境重金屬危害。其檢驗報告與環保署「地下水汙染管制標準」詳見附錄一所示。

3.4.2 試驗砂土

Zebovitz et al. (1989) 研究得知一般卜特蘭水泥可成功的灌注到粗砂地層，進行地層改良，而部分中砂與細砂的地層，卜特蘭水泥漿體則無法滲入。因為粉磨技術的提升，選粉機及攪拌設備的改善(Naudts and Landry 2003)，超微粒水泥在細度上有所突破，使得過去認為不可灌之細砂地層，甚至是砂性粉土層，皆可望能成功灌注。因此本研究將模擬超微粒水泥灌注於砂性粉土層的情形，進行可灌性之探討。

本研究用來製作砂柱試體的材料為渥太華標準砂 403 型(細砂)與渥太華標準砂 A101 型(細粒料、粉土)，外觀為米白色及白色，如圖 3.8 所示，其粒徑大小依照 Wentworth (1992) 之定義，403 型範圍介於中等砂與細砂之間，使模擬之試驗符合超微粒水泥在現地使用時所遇到的情況；此外亦選用渥太華標準砂 A101 型，粒徑約落於粉土之範圍(皆小於#200，屬於細粒料)，主要用來添加於標準砂 403 型之中，依照添加含量的不同，可調配出不同粒徑分布、不同細顆粒含量及不同土壤有效粒徑(d_{10} 或 d_{15})等參數之砂柱試體，用以模擬不同情形之砂性粉土層。本研究擬以 0%、10%、20%、30% 及 40% 之細粒料含量砂柱試體，進行滲透灌漿試驗。Wentworth 之定義如表 3.8 所示；試驗砂土之基本性質將由以下試驗得知。

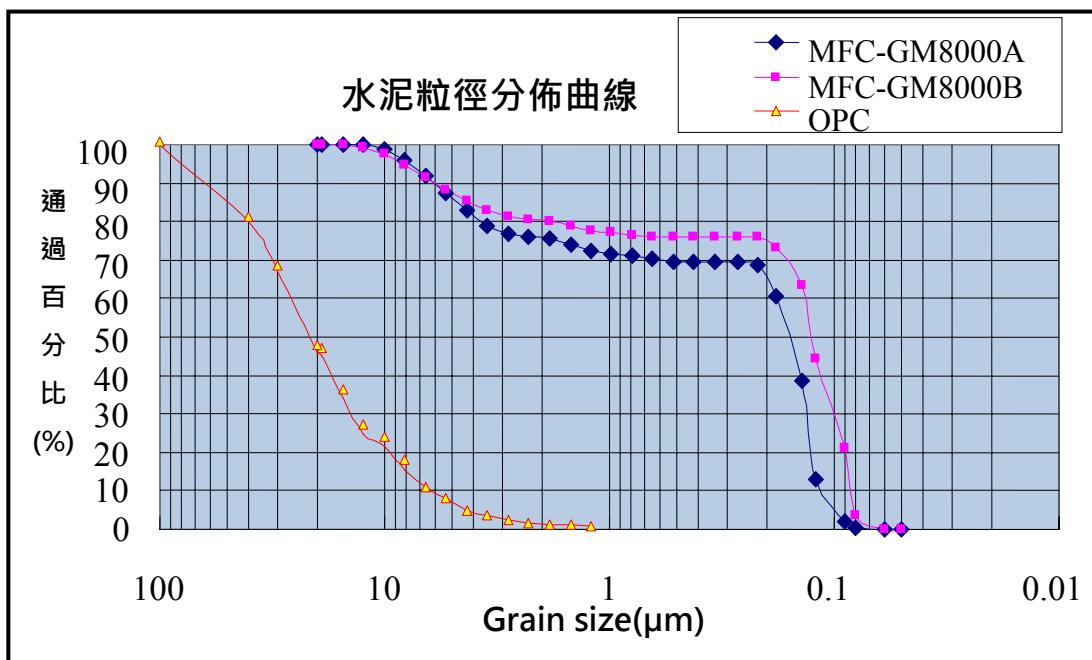
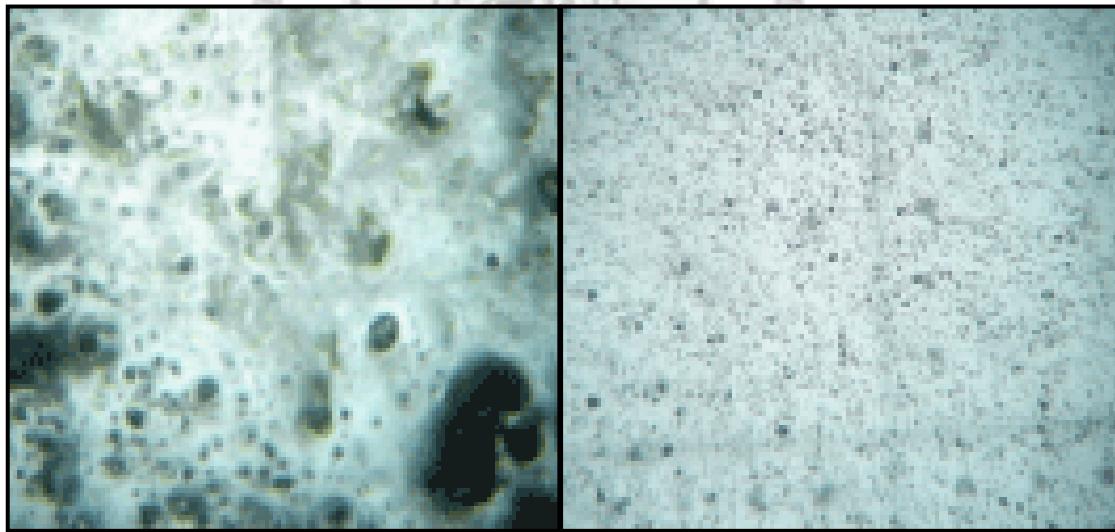


圖 3.6 超微粒水泥與一般卜特蘭水泥粒徑分布曲線圖



(a)一般卜特蘭水泥

(b)MFC-GM8000 超微粒水泥

圖 3.7 一般卜特蘭水泥(a)與超微粒水泥(b)電子顯微圖

表 3.7 八大重金屬檢測結果 (單位 : mg/L)

汙染物項目	檢測結果	第一類管制值	第二類管制值	是否達到標準
汞含量 (Hg)	0.0008	0.002	0.02	✓
砷含量 (As)	0.0034	0.05	0.5	✓
鎘含量 (Cd)	N.D	0.005	0.005	✓
鉻含量 (Cr)	N.D	0.05	0.05	✓
銅含量 (Cu)	N.D	1	10	✓
鉛含量 (Pb)	N.D	0.05	0.5	✓
鋅含量 (Zn)	<0.05	5	50	✓
鎳含量 (Ni)	N.D	0.1	1	✓

註 : N.D 為數值過小，無法測得數據



圖 3.8 濕太華標準砂 403

表 3.8 Wentworth grade scale (Wentworth ,1992)

尺度	大小範圍 (公制)	大小範圍 (吋)	名稱 (Wentworth 分級)
<-8	>256mm	>10.1in	岩石
-6 to -8	64-256mm	2.5-10.1in	大卵石
-5 to -6	32-64mm	1.26-2.5in	極粗礫
-4 to -5	16-32mm	0.63-1.26in	粗礫
-3 to -4	8-16mm	0.31-0.63In	中等粗礫
-2 to -3	4-8mm	0.157-0.31In	細礫
-1 to -2	2-4mm	0.079-0.157In	極細礫
0 to -1	1-2mm	0.039-0.079In	極粗砂
1 to 0	0.5-1mm	0.020-0.039In	粗砂
2 to 1	0.25-0.5mm	0.010-0.020In	中等砂
3 to 2	0.125-0.250mm	0.0049-0.010In	細砂
4 to 3	62.5-125 μ m	0.0025-0.0049In	極細砂
8 to 4	3.9-62.5 μ m	0.00015-0.0025In	粉土
>8	<3.9 μ m	<0.00015In	黏土

3.4.2.1 試驗砂土基本性質試驗

(1) 試驗砂土之比重

比重 (specific gravity, 簡稱 G_s) 定義為該材料的單位重與水的單位重之比值。一般土壤的比重在 2.6~2.9 之間，砂土比重約為 2.65 左右。

本研究參考 ASTM D854-02 之試驗方法與步驟，試驗儀器與步驟詳述如下。

(a) 參考資料

美國材料試驗學會 (ASTM D854-02)

(b) 試驗儀器與設備：

1. 比重瓶：須附有瓶塞，瓶塞須附有通氣小孔，且瓶塞之質料應與瓶體相同。容量為 500ml。
2. 磅稱：容量為 100ml 和 500ml 之比重瓶，需用靈敏度達 0.01g 者。
3. 烘箱 (Oven)：可以維持溫度在 $110+5^{\circ}\text{C}$ ($230+9^{\circ}\text{F}$) 之恆溫烘箱。
4. 溫度計 (Thermometer)：可讀且精確度達 1°C (1.8°F)，範圍 $0-50^{\circ}\text{C}$ ($32-122^{\circ}\text{F}$)。
5. 加熱設備：用以將比重瓶內土壤所含空氣驅除。

(c) 試驗步驟：

1. 將已稱重之烘乾土樣 W_s (如為自然含水量之土樣，俟試驗後再烘乾、冷卻、稱重)，置入比重瓶內，此時應注意，不使任何土壤顆粒漏失。使用容積比重瓶時加水至 $3/4$ 滿。有塞之比重瓶加水至 $1/2$ 滿。
2. 將水煮沸 10 分鐘以上，並將其緩緩轉動以使土樣中之空氣排除，如圖 3.9 所示，煮沸以後冷卻至室溫。
3. 將比重瓶添加蒸餾水至刻畫之標線，並將外面清洗及擦拭乾淨。量測比重瓶和內容物之重量， W_b ，和其溫度 T_x ($^{\circ}\text{C}$)。

最後以下式計算在溫度為 T_x ($^{\circ}\text{C}$) 時之土壤比重：

$$G_s(T_x^{\circ}\text{C}/T_x^{\circ}\text{C}) = \frac{W_s}{W_s + (W_a - W_b)} \quad —(1)$$

式中 W_s ：土樣乾重，g

W_a ：比重瓶+水重 (T_x °C)，g

W_b ：比重瓶=土樣=水重 (T_x °C)，g

T_x ：量測 W_b 時之溫度，°C

4. 除非有特別指定，應以 20°C 水之土壤比重為報告值，以下式計算之：

$$G_s(T_x \text{ } ^\circ\text{C} / 20 \text{ } ^\circ\text{C}) = K \times G_s(T_x \text{ } ^\circ\text{C} / T_x \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \text{---(2)}$$

其中：

$G_s(T_x \text{ } ^\circ\text{C} / 20 \text{ } ^\circ\text{C})$ = 在水為 20°C 時之比重值。

$K = T_x \text{ } ^\circ\text{C}$ 與 20°C 水之密度比值。如表 3.9 所示

(d) 試驗結果

經由試驗結果計算得知，標準砂 403 型之比重為 2.648，標準砂 A101 型之比重為 2.634，而添加 10%、20%、30% 及 40% 標準砂 A101 於標準砂 403 之混合砂(以下簡稱 FC-10%、FC-20%、FC-30%、FC-40%)，其比重分別為 2.647、2.645、2.644、2.643。

(2) 試驗砂土之相對密度

相對密度 (relative density，簡稱 Dr) 係指砂土最大孔隙比、現地土壤之孔隙比差，與砂土最大、最小孔隙比差之比值，一般用來表示現地粒狀土壤之鬆緊程度，定義如 (3.1 式) 所示。砂土的相對密度和緊密程度可由表 3.10 判斷，數值越大，表示越緊密，孔隙越少；而相對密度往往用來作為工地之壓實度控制或是做自然土層之液化分析。

因在實際運用上地質改良之地層，往往為疏鬆不穩定之土壤，且由 Seed and Peacock (1970) 所提出之相對密度與液化潛能之評估表，如表 3.11，顯示地表面最大加速度在 0.10g (國家地震重中心定義為強震)，砂土 $Dr \leq 33$ 時即可能發生液化，此時砂土緊密程度為鬆散，因此，本研究模擬試驗所選定的相對密度鬆散狀態 Dr 為 15-50% 之範圍。

表 3.9 蒸餾水溫度 $4^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 之間時水之相對密度及校正係數(K)

溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	水之相對密度	校正係數(K)	溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	水之相對密度	校正係數(K)
4	1.000000	1.00177	18	0.998624	1.00039
5	0.999992	1.00176	19	0.998435	1.00020
6	0.999968	1.00174	20	0.998234	1.00000
7	0.999930	1.00170	21	0.998023	0.99979
8	0.999877	1.00165	22	0.997802	0.99957
9	0.999809	1.00158	23	0.997570	0.99933
10	0.999728	1.00150	24	0.997329	0.99909
11	0.999634	1.00140	25	0.997077	0.99884
12	0.999526	1.00129	26	0.996816	0.99858
13	0.999406	1.00117	27	0.996545	0.99831
14	0.999273	1.00104	28	0.996265	0.99803
15	0.999129	1.00090	29	0.995976	0.99774
16	0.998972	1.00074	30	0.995678	0.99744
17	0.998804	1.00057			

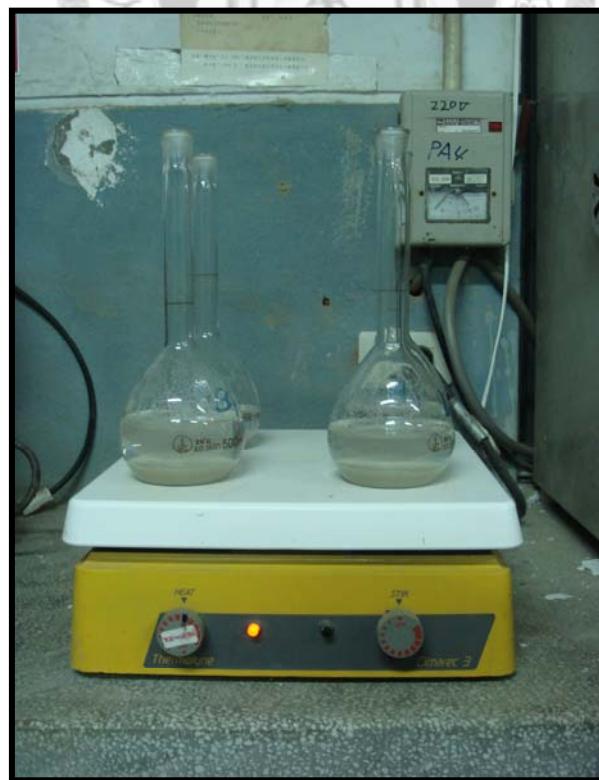


圖 3.9 試驗砂之比重試驗

表 3.10 相對密度與砂土緊密程度之關係

相對密度 Dr(%)	緊密程度
0-15	Very loose
15-50	Loose
50-70	Medium
70-85	Dense
85-100	Very dense

表 3.11 相對密度與液化潛能之評估(摘自 Seed and Peacock ,1970)

地表面最大加速度	極可能發生液化之 Dr(%)	不會發生液化之 Dr(%)
0.10 g	$Dr \leq 33$	$Dr > 54$
0.15 g	$Dr \leq 48$	$Dr > 73$
0.20 g	$Dr \leq 60$	$Dr > 92$



圖 3.10 相對密度試驗儀器設備

相對密度公式定義如下：

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\gamma_{d,\max}(\gamma_d - \gamma_{d,\min})}{\gamma_d(\gamma_{d,\max} - \gamma_{d,\min})} \quad (3.1)$$

式中

e ：土壤試體之孔隙比

e_{\max} ：土壤最疏鬆狀態之孔隙比

e_{\min} ：土壤最緊密狀態之孔隙比

γ_d ：土壤試體之乾土單位重

$\gamma_{d,\max}$ ：土壤最緊密狀態之乾土單位重

$\gamma_{d,\min}$ ：土壤最疏鬆狀態之乾土單位重

(a) 參考資料：

美國材料試驗學會 ASTM D4253-00、ASTM D4254-00

(b) 試驗儀器與設備：

1. 標準試模、套筒、超載重基板、超載重、天平、刻度尺，如圖 3.10 示。
2. 振動台：規格依規範所定。

(c) 試驗步驟：

1. 求取土壤最疏鬆狀態之乾土單位重($\gamma_{d,\min}$)，如圖 3.11 所示。
 - a. 選擇試模並稱重為 W_1 ，量出體積為 V 。
 - b. 將土樣利用杓子均勻的放置試模內。
 - c. 當試料澆置試模內超出模頂時，以直尺刮去試模頂端多餘試料，並稱重為 W_2 。
 - d. 疏鬆砂土重即為 $W_{\min} = W_2 - W_1$ 。
 - e. 計算 $\gamma_{d,\min} = \frac{W_{\min}}{V}$ 。



圖 3.11 最小乾土單位重試驗



圖 3.12 最大乾土單位重試驗

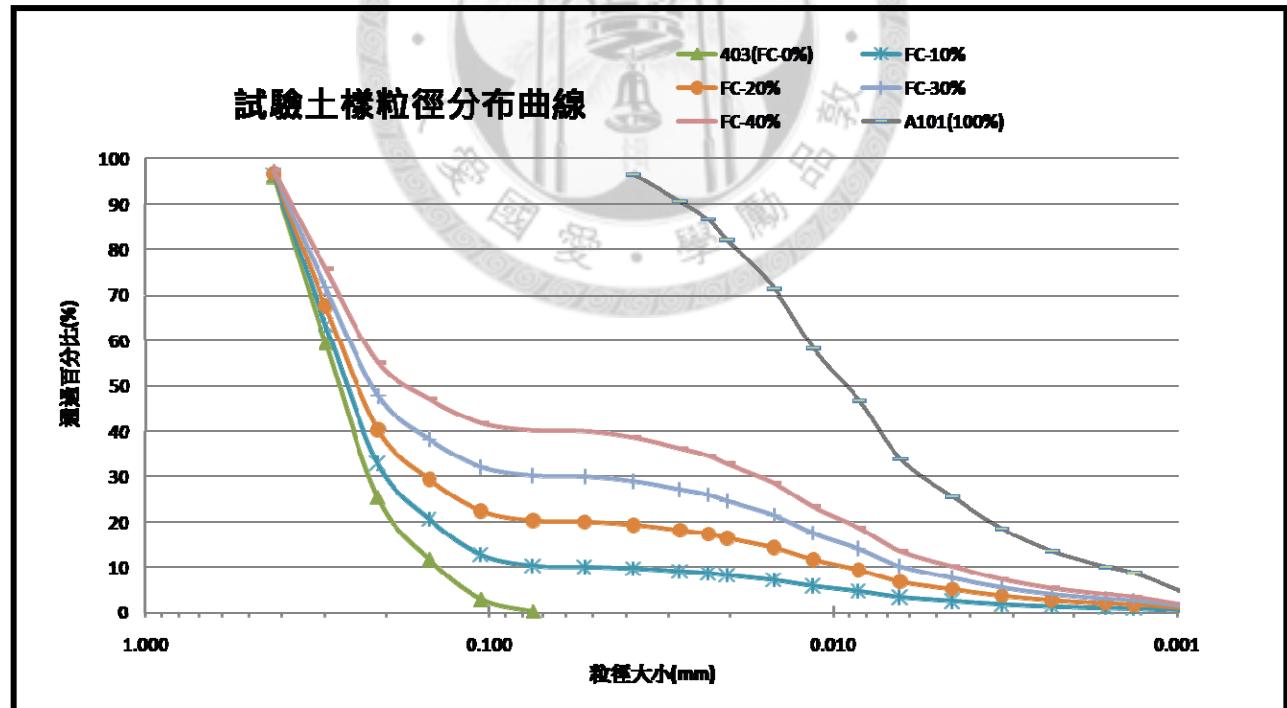


圖 3.13 標準砂及混合砂之粒徑分佈曲線圖

表 3.12 試驗砂土標準砂 403 型及混合砂基本物理性質

項目	403	FC-10%	FC-20%	FC-30%	FC-40%
最大乾密度 $\gamma_{d,\max}$ (g/cm ³)	1.659	1.813	1.780	1.835	1.650
最小乾密度 $\gamma_{d,\min}$ (g/cm ³)	1.471	1.437	1.439	1.379	1.300
最大孔隙比 e_{\max}	0.800	0.842	0.838	0.917	1.032
最小孔隙比 e_{\min}	0.596	0.460	0.485	0.441	0.602
比重	2.648	2.647	2.645	2.644	2.643
d_{10} (mm)	0.141	0.053	0.010	0.0063	0.0044
d_{15} (mm)	0.164	0.118	0.017	0.009	0.007
d_{30} (mm)	0.220	0.208	0.150	0.053	0.017
d_{60} (mm)	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22

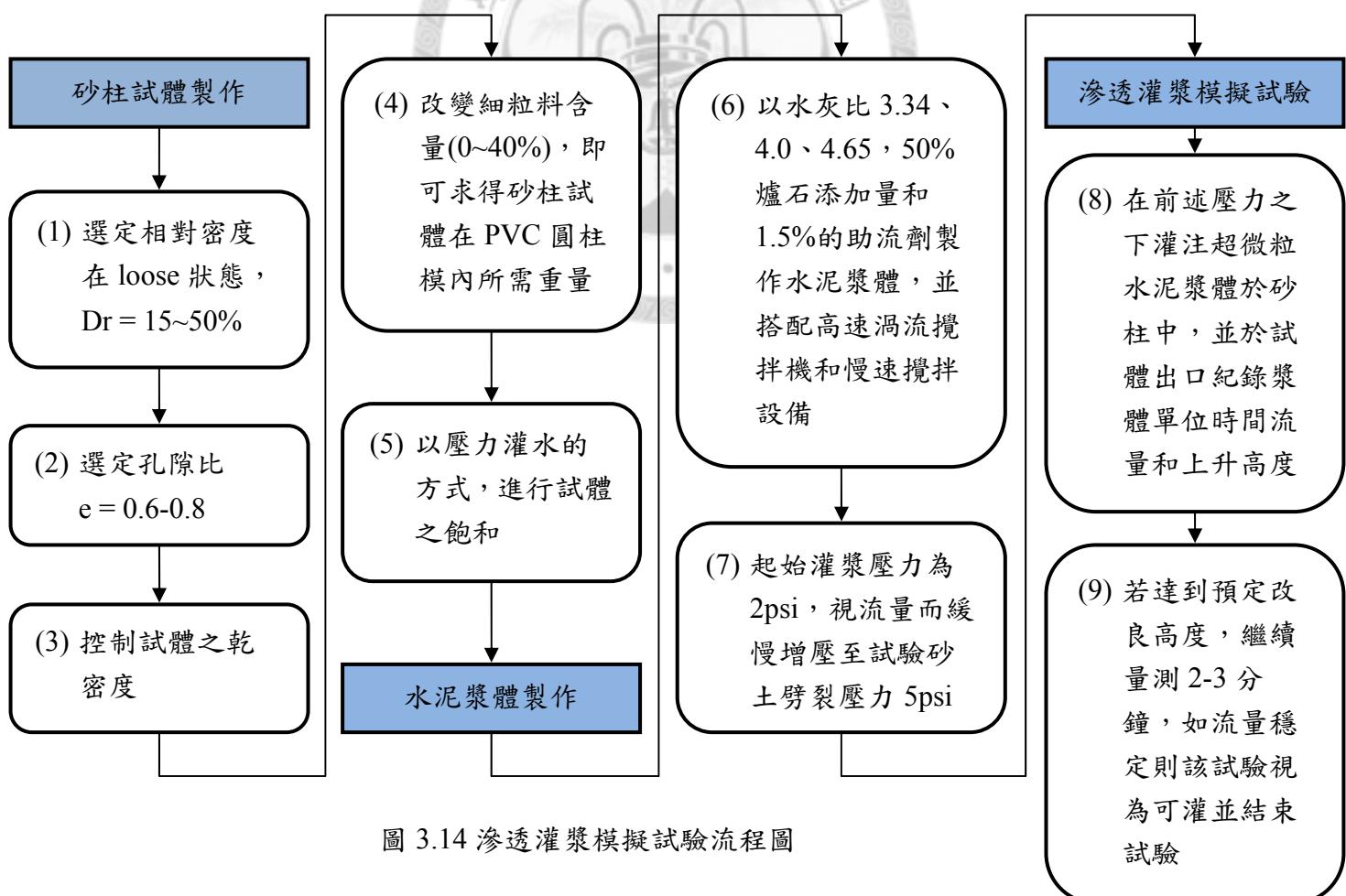


圖 3.14 滲透灌漿模擬試驗流程圖

2. 求土壤最緊密狀態之乾土單位重 ($\gamma_{d,\max}$)，如圖 3.12 所示。

- a. 將裝滿土樣之試模放置於振動桌上並以螺絲固定。
- b. 以測微尺量超載重基板厚度，並放入試模土樣上。
- c. 裝上套筒並固定，將超載重放在套筒內。
- d. 啟動振動桌振動約 8 分鐘，震動頻率約為 60Hz。
- e. 振動完畢後，量測砂土沉陷深度，以換算土樣之體積 V。
- f. 從振動桌取下試模(含土樣)，並稱重為 W_3 。
- g. 緊密砂土重即為 $W_{\max} = W_3 - W_1$ 。
- i. 計算 $\gamma_{d,\max} = \frac{W_{\max}}{V}$ 。

(3) 試驗砂土之粒徑分布曲線

本研究將試驗砂 403 型、A101 型、FC-10%、FC-20%、FC-30%、FC-40% 進行粒徑分析，參照 ASTM C136-06 及 D422-63 以篩分析法及鮑氏比重計法求得土壤的粒徑分佈曲線如圖 3.13 所示，試驗砂土之物理性質整理如表 3.12 所示。

3.4.3 超微粒水泥滲透灌漿模擬試驗

3.4.3.1 滲透灌漿模擬試驗設計

本研究的試驗流程如圖 3.14 所示，總共有 9 個步驟，茲說明如下。首先依據 3.4.2 的方法求得試驗砂土之最大乾密度與最小乾密度後，接著決定欲模擬砂體的相對密度；本研究選定相對密度為鬆散狀態， Dr 為 15-50% 之範圍，因 Seed et al.(1970)指出，在地表面最大加速度在 0.1g 條件下，土壤相對密度 < 33% 時，該土壤即有可能發生液化，此時砂土緊密程度為鬆散；並參考現地資料之情形，選定孔隙比(e)約在 0.6-0.8 之間。經由以上條件，並控制試體之乾密度，改變其細粒料含量(0%、10%、20%、30%、40%)，即可求得砂柱試體在固定體積(即 PVC 圓柱模之體積)下，所需放入砂之重量；接著以壓力灌水的方式，進行試體之飽和。

飽和完成後，以水灰比 3.34、4.0、4.65，50% 爐石添加量和 1.5% 的助流劑製作超微粒水泥漿體；Reschke(2000)指出，拌合設備對漿體的特性有著很大的影響，由於超微粒水泥粒徑較小，亦需特製的攪拌設備，使其漿體更能均勻且達到

充分的濕化，因此本研究在進行滲透灌漿模擬試驗時，使用高速渦流攪拌機(High speed votex colloidal mixer)，以助於滲透灌漿模擬試驗之進行。此外，本研究所用之漿料儲存桶亦有裝置一慢速攪拌設備，以預防漿體在灌注期間可能產生之稀離現象(bleeding)。

本研究進行之室內滲透灌漿模擬試驗所使用的壓力，主要以各砂柱不發生劈裂之壓力下進行超微粒水泥漿體之灌注(試驗砂土的劈裂壓力為 5psi)，並視流量來增加灌注壓力。於試體出口處藉由人工的方式記錄漿體的單位時間流量與漿體上升之高度，在達到預定改良高度時，繼續量測 2-3 分鐘，若流量穩定即將該試驗視為可灌並停止試驗。其試驗規劃如表 3.13 所示。

3.4.3.2 滲透灌漿模擬試驗設備

本研究所使用之滲透灌漿模擬試驗設備，是施國琅(2008)參考前人文獻與歐洲規範 NF P18-891，經修改設計後，所建立一套適用於超微粒水泥滲透灌漿模擬之試驗設備，如圖 3.15 所示，設備名稱如表 3.14 所示。此設備最大特點為拌合漿體時使用高速渦流攪拌機與以透明 PVC 管所構製而成的砂柱試體模型。

本研究之試驗設備主要分作攪拌設備、灌注系統與即時監測系統三部分，分別說明如下：

(1)攪拌設備，如圖 3.16 所示。

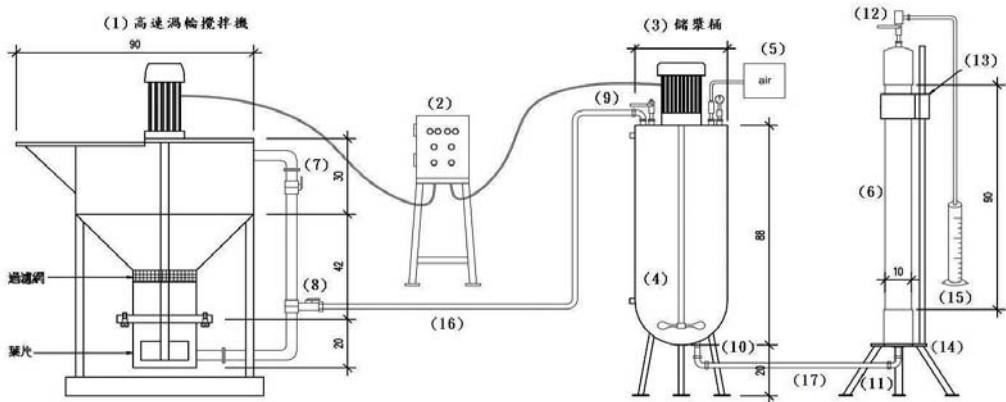
本研究在進行滲透灌漿模擬試驗時，因考量超微粒水粒之粒徑較為細小，使用一般攪拌設備不易使水泥顆粒間達到充分的分離，因此在攪拌設備上參考 Taiwan Hard Rock Eng. Co.,Ltd 之現地攪拌設備，規劃設計了一套實驗室使用之高速渦流攪拌機(High speed votex colloidal mixer)，拌合轉速約為 1780 rpm，且該攪拌機有循環式的攪拌路徑設計，加上助流劑之使用，能使超微粒水泥得到充分的濕化與拌合，如圖 3.17 所示。此外，攪拌設備上裝置有三個球閥，其功能分別為循環式的攪拌路徑之開關、使漿體輸送到儲漿桶之開關及清洗設備排水之開關。

表 3.13 滲透灌漿模擬試驗規劃表

程序	說明	
砂柱試體製作	製作方式	乾式套膜震降法
	相對密度	15-50%
	孔隙比	0.6-0.8
	砂重	約 11000 (g)
	飽和方式	以 1~2 psi 的水壓由下往上灌水
灌水壓力		每次增加幅度為 0.5psi
水泥漿體製作	水灰比	3.34、4.0、4.65
	爐石 (含量)	50 %
	助流劑	1.5 %
	高速膠體攪拌機	助流劑拌合 1 分鐘；漿液拌合 3 分鐘
	慢速攪拌設備	灌漿過程中於漿料桶內持續攪拌
滲透灌漿階段		
灌漿壓力		起始灌漿壓力 2psi，視流量緩慢增壓穩定流量，最高加壓至試驗砂土之劈裂壓力 5 psi
滲透灌漿模擬試驗	灌漿壓力 (psi)	以人工的方式記錄隨時間而變化的灌漿壓力、滲透高度與灌入量。
	滲透高度 (cm)	
	灌入量 (ml)	

高速渦流攪拌機

漿料儲存桶 砂柱試體



一.攪拌設備

二.灌注系統

三.即時監測系統

圖 3.15 滲透灌漿模擬試驗設備示意圖

表 3.14 滲透灌漿模擬試驗設備名稱

設備編號	名稱	(6)	PVC 模具
(1)	高速渦流攪拌機	(7) ~ (12)	開關球閥
(2)	電力控制系統	(13)	活動管夾
(3)	儲漿桶	(14)	三角支架
(4)	慢速攪拌機	(15)	量筒(500ml)
(5)	壓力控制置系統(空壓機)	(16)、(17)	管線

(2)灌注系統

(a)壓力供應系統(air compressor system)，如圖 3.18 所示。

本研究灌漿壓力來源為氣水轉換之壓力系統，包括四個壓力控制閥，壓力最高可達 12kg/cm^2 (約 170psi)，於試驗時提供所需之空氣壓力。並於儲漿桶上加裝一個壓力微調裝置，包含一個調壓閥及壓力計(最大壓力 15psi，最小刻度 0.25psi)，如圖 3.19 所示，用以微調灌注壓力，以防止加壓過大產生劈裂等問題。

(b)砂柱試體模

本研究所選用的砂柱試體模型為高度 100 cm、內徑 10 cm 之透明 PVC 管，並於 PVC 管內放入試驗砂土，並在試驗砂土上下各放入共 5 cm 厚 之塑膠濾網與三層濾層，三層濾層由下而上之粒徑大小分別為 12mm、5mm、2mm，如圖 3.20 所示；試體放置完成後上下皆以 PVC 之帽蓋上膠緊封，以確保試體於灌注階段為密封狀態，並於帽蓋上下加裝球閥，上端球閥與出流管連接，而下端球閥則為一組三向通路，以便於試驗過程中管路飽和、排水與排漿時不影響砂柱試體之灌注，如圖 3.21 所示。

(c)儲漿桶

儲漿桶，為灌漿作業進行時，暫時存放所需漿液之用，如圖 3.22 所示，從圖中可看到儲漿桶上蓋設置有三個球閥與一油壓式壓力計，橫向球閥為控制漿料從高速渦輪攪拌機進入此儲漿桶之用，而其他兩組球閥則為控制空氣壓力之進入與排洩，壓力計則是用以第一時間觀測壓力是否穩定輸入之用；此外，本研究設計儲漿桶時，於儲漿桶蓋內設置慢速攪拌機，轉速約為 30rpm，其目的在降低灌注試驗進行時，漿體隨著時間所產生的稀離現象。

(3)資料監測系統

根據施國琅(2008)研究顯示，水泥漿體之黏滯度會隨時間而改變，且本研究採取的灌漿方式為低壓滲透灌漿其流速頗為緩慢，易導致現行常見的流速式流量計產生極大的誤差，所以本研究觀測試驗過程中漿體之灌注量，採用的是人工收



圖 3.16 高速渦流攪拌機

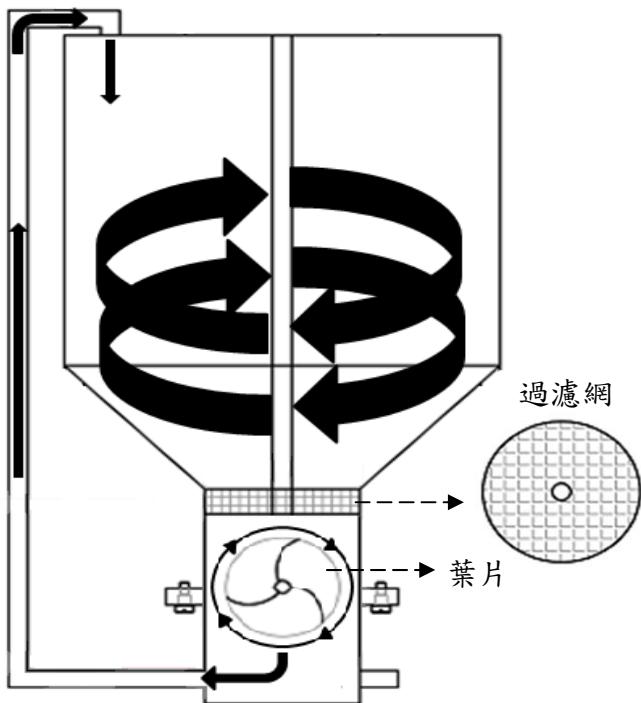


圖 3.17 循環式攪拌路徑示意圖



圖 3.18 壓力供應系統



圖 3.19 壓力微調系統



圖 3.20 濾層與濾網



圖 3.21 砂柱試體之三通管路



圖 3.22 儲漿桶

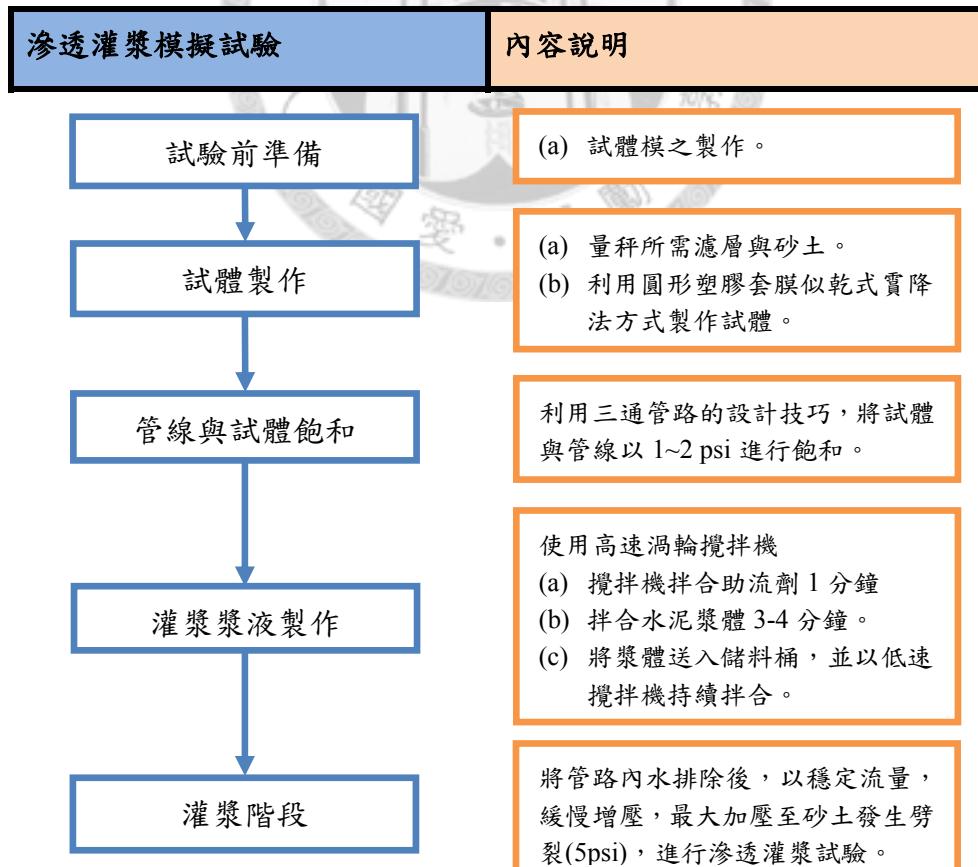


圖 3.23 滲透灌漿模擬試驗之試驗流程

集之方法，以量測在不同灌注壓力下，時間與水泥灌注量之關係。因砂柱試體為灌水之飽和狀態下進行灌漿，故以量筒於出口處所收集到之出水流量即為水泥漿體之灌入量。

3.4.4 滲透灌漿模擬試驗步驟

滲透灌漿模擬試驗之試驗流程，如圖 3.23 所示。

(1) 試驗前準備

(a) 試體模之製作：

1. 使用鉗子將止洩帶、螺絲、彎管、球閥、三通等五金材料，依設計連接於上下帽蓋。
2. 試驗前需使用大型砂輪機將 PVC 透明管裁切至所需長度(100cm)，如圖 3.24 所示。
3. 使用南亞 PVC 膠將帽蓋與 PVC 透明管密封、連接，如圖 3.24 所示。
4. 依據設計之灌注路徑，使用高壓管將試體模與儲料桶進行連接。

(2) 試體之製作

本試驗所用之砂柱試體材料為渥太華標準砂 403 型與 A101 型之混合砂，粒徑與基礎物理性質如 3.4.2 所述，並控制其試體乾重 11000 克之砂土量並以不同之細粒料含量 10%、20%、30%、40% 製作試體。砂土經量稱後利用自製之 120cm 長圓形塑膠套膜置入 PVC 管內，以杓子將砂土緩緩倒入套膜內，至砂土達所需高度，如圖 3.25 及圖 3.26 所示，將套膜緩慢提起，使下方之砂土保持一定之落距，似乾式震降法方式製作試體，此法之優點在於能夠有效避免細粒料之飛散，及提高砂柱試體之均勻性。於試體完成後確認其試體高度，若無達到所需高度(90cm)則將補砂至設計高度，並紀錄實際用砂重量。

(3) 管線與試體飽和

利用三通管路的設計，將管線與試體以 1~2psi 進行灌水飽和 3 小時，如圖 3.27 所示。



圖 3.24 試體模之製作

圖 3.25 砂柱試體之製作(置入圓形塑膠套膜)



圖 3.26 砂柱試體之製作(裝砂至所需高度)

圖 3.27 管線與試體飽和情形

(4)灌漿漿液製作

本研究所使用之灌漿材料為超微粒水泥 MFC-GM8000A(以下簡稱 A 料)與超微粒爐石 MFC-GM8000B(以下簡稱 B 料)以 1：1 混合，並搭配 1.5% 之助流劑，如圖 3.28 所示，漿液的拌合與製作內容詳述如下：

- (a) 估算可能所需之漿量，並依照各個水灰比換算成所需之水泥量、水量與助流劑使用量，研究中所設計水泥用量為 4 倍孔隙體積(90cm 之砂柱孔隙體積約為 3000 ml)，各水灰比之水泥用量、水重與助流劑重，如表 3.15 所示。
- (b) 先將水倒入高速攪拌機中，再將助流劑倒入拌合 1 分鐘。
- (c) 將量稱好之水泥(A 料與 B 料)緩慢倒入，並拌合 3~4 分鐘，如圖 3.29 所示。
- (d) 拌合完畢後，將漿體送入儲料桶，於儲料桶中將以低速攪拌機持續拌合。

漿液製作流程圖，如圖 3.30 所示。

(5)灌漿階段

將管內水排除後，以砂土之飽和壓力作為起始壓力進行滲透灌漿試驗，加壓過程則以穩定流量為條件下，於灌漿過程中視漿體的灌注情形而增加灌注壓力，當流量有明顯下降(下降達 10% 以上)時則加壓 0.25-0.5psi，當灌注高度超過 2/3 時一次加壓 0.125-0.25psi，並於達到改良高度後，持續觀測 2-3 分鐘，若流量穩定則視試體為可灌並停止試驗。

於灌注過程中，紀錄灌注壓力、單位時間內之灌入體積(每 1 分鐘紀錄一次)，確定流量是否穩定，以決定加壓時機，並於透明管外部以立可白刻劃漿體上升之高度，以助於了解漿體隨著時間與壓力增加情況下灌注過程中漿體上升之變化，如圖 3.31 所示。



圖 3.28 超微粒水泥(左)、助流劑(中)與超微粒爐石(右)

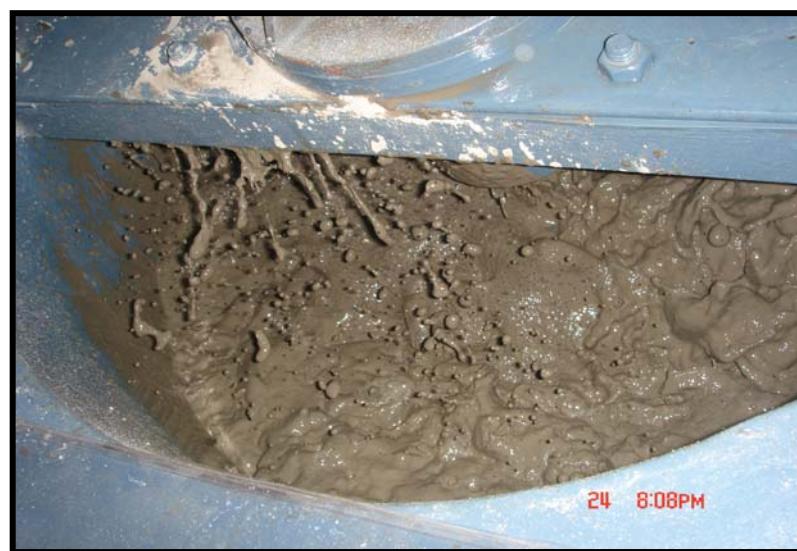


圖 3.29 漿液以高速拌合情形

表 3.15 各水灰比漿體配比

水灰比	超微粒水泥(g)	超微粒爐石(g)	助流劑(g)	水(g)
3.34	1650	1650	50	11000
4.0	1400	1400	42	11200
4.65	1200	1200	36	11160

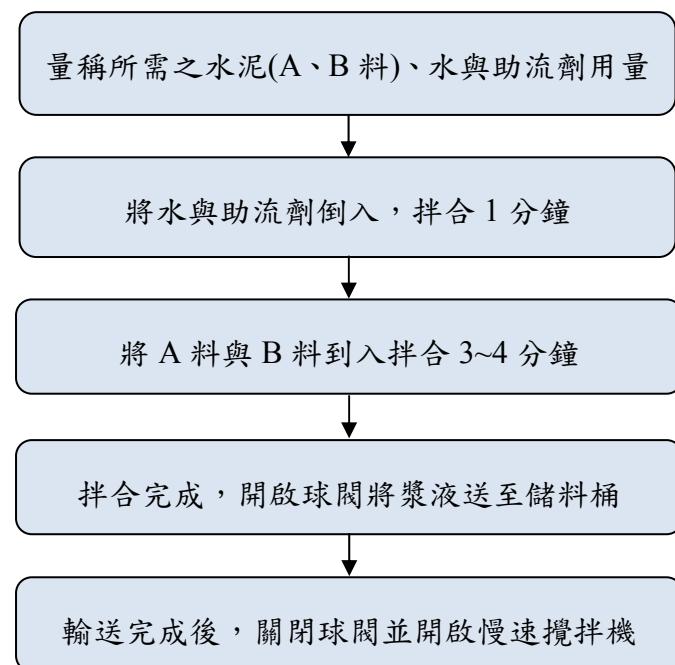


圖 3.30 漿液製作流程圖(摘自 施國琅，2008)



圖 3.31 灌注過程中紀錄之情況

第四章 結果與討論

本章將針對傳統可灌性公式及禁忌演算法預測之結果，進行分析與討論，藉此找出一合適推估可灌性之方法，以利日後在評估砂性粉土質地層改良時，漿體可灌與否之依據。此外，配合室內滲透灌漿模擬試驗之結果，進行可灌性預測公式之驗證。最後整合現地資料及室內試驗結果，分析可灌性預測公式之準確性及適用性，期對超微粒水泥滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性有更多的了解。

4.1 傳統可灌性經驗公式

本研究利用所收集的 240 筆現地實際灌漿試驗資料，以前人所提出之相對粒徑比可灌性公式，進行超微粒水泥滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性預測分析，分別利用 Burwell et al. (1958)、Krizek et al. (1992)、Incecik and Ceren(1995)、黃建霖等人(2007)及 Axelsson et al. (2009)所發展之經驗公式進行預測。

為了清楚了解經驗公式對於可灌資料與不可灌資料分別的預測結果，除了得出經驗公式的整體預測準確率之外，還分別計算下列四種準確率值：

由可灌性經驗公式推估為可灌或不可灌，其結果為正確的比例，算得

- (a) 可灌之推估準確率
- (b) 不可灌之推估準確率

由現地實際灌漿資料之可灌與不可灌的結果，來計算經驗公式的預測準確率，算得

- (c) 可灌之實際準確率
- (d) 不可灌之實際準確率

其相關公式預測結果分述如下，並整理於表 4.1 至表 4.6。

(1) Burwell et al. (1958)提出水泥漿體之可灌性經驗公式為：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

以砂土及水泥顆粒之相對粒徑比所組成，提出一門檻值用以評估其可灌性，有三種情況：

a、當 N_1 值大於 25 時則以 N_2 進行交叉驗證，若 N_2 亦大於 11 時則為可灌， N_2 小於 5 則為不可灌。

b、 N_1 值小於 11 則為不可灌。

c、 N_1 值介於 11 與 25 之間則為無法有效灌注。

其結果整理如表 4.1 所示，由表中可看出 5 個準確率值。可灌之推估準確率為 100%，顯示公式推估為可灌，而實際結果有 100% 資料是可以灌注的，推估情形良好；但在不可灌之推估準確率只有 48.39%，顯示公式推估為不可灌時，預測情形不佳。

於可灌之實際準確率部分，公式無法有效預測，只有 1.03%；而不可灌之實際準確率為 100%，預測情形良好。觀其總體預測準確率為 48.66%，明顯無法有效預測，並有 53 筆資料預測為無法有效灌注，此組資料難以比較其準確性，故並未考量。

(2) Krizek et al. (1992) 所提出之可灌性公式為：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

指出滲透灌漿必須滿足土壤和超微粒水泥漿體之相對粒徑的要求，所提出之公式 Burwell et al. (1958) 相同，只是針對使用超微粒水泥對 N 值進行修正，提出當 N_1 大於 15 且 N_2 大於 8 時，則視為可灌，反之則為不可灌。預測結果整理如表 4.2 所示。

其可灌與不可灌之推估準確率分別為 100% 及 40.91%，實際準確率分別為 13.33% 及 100%，總體預測準確率為 45.83%，預測情形欠佳。此公式雖針對超微粒水泥修正其 N 值，但超微粒水泥由 1992 年至今已有長足發展，其細度及品質均有所提升，故此公式亦無法有效預測。

(3) Incecik and Ceren (1995) 建議之水泥漿體可灌性公式為：

$$N = (d_{10})_{soil} / (D_{90})_{grout}$$

以砂土粒徑 d_{10} 及水泥粒徑 D_{90} 之比值，作為水泥漿體可灌性評估的依據，提出 N 值大於 10 為可灌，反之則為不可灌。其預測結果整理如表 4.3 所示，其可灌與不可灌之推估準確率分別為 100% 及 40.72%，實際準確率分別為 12.67% 及 100%，總體預測準確率為 45.42%，無法有效預測超微粒水泥灌注於砂性粉土層之可灌性。

表 4.1 Burwell et al. (1958)公式預測之結果

Burwell et al. (1958) 可灌性公式		可灌性公式預測結果		實際準確率
		可灌	不可灌	
現地實際 灌漿結果	可灌	1	96	1.03%
	不可灌	0	90	100%
推估準確率		100%	48.39%	
總體預測準確率： $91/187 = 48.66\%$ ，並有 53 筆資料預測為無法有效灌注。				

表 4.2 Krizek et al. (1992)公式之預測結果

Krizek et al. (1992) 可灌性公式		可灌性公式預測結果		實際準確率
		可灌	不可灌	
現地實際 灌漿結果	可灌	20	130	13.33%
	不可灌	0	90	100%
推估準確率		100%	40.91%	
總體預測準確率： $110/240 = 45.83\%$ 。				

表 4.3 Incecik and Ceren(1995)公式預測之結果

Incecik and Ceren(1995) 可灌性公式		可灌性公式預測結果		實際準確率
		可灌	不可灌	
現地實際 灌漿結果	可灌	19	131	12.67%
	不可灌	0	90	100%
推估準確率		100%	40.72%	
總體預測準確率： $109/240 = 45.42\%$ 。				

(4) 黃建霖等人(2007)所提出之可灌性公式為：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

針對使用 MFC-GM8000 超微細水泥、在高水灰比下(4.0 至 4.65)添加 1% 之助流劑、配合高速渦流攪拌機，所進行的砂性粉土層試驗灌漿結果，用以修正可灌性公式之 N 值。指出 N_1 大於 9 或 N_2 大於 4，使用超微粒水泥即有相當不錯的灌漿效果。

其預測結果整理如表 4.4 所示， N_1 之可灌與不可灌之推估準確率分別為 100% 及 54.22%，實際準確率分別為 49.33% 及 100%，總體預測準確率為 68%； N_2 之可灌與不可灌之推估準確率分別為 100% 及 48.39%，實際準確率分別為 36.00% 及 100%，總體預測準確率為 60%。此公式雖對於 N_1 及 N_2 之門檻值再度修改，其準確率雖較過去之公式有所提升，但仍無法有效預測其可灌性，推測其主要原因為該研究中所使用之資料組數不足，無法有效描述整體之情形。

(5) Axelsson et al. (2009) 提出之公式如下：

$$b_{fic} = 0.15 \cdot d_{50}$$

$$N = b_{fic} / D_{95}$$

指出砂土的孔隙(Fictitious aperture)與土壤粒徑 d_{50} 有關，並用其與水泥粒徑大小 D_{95} 之比值評估其可灌性，建議當 N 值小於 3 為不可灌，N 值大於 5 為可灌，而 N 值在 3 至 5 之間，土壤孔隙大小不足以讓水泥顆粒有效通過，會發生阻塞的現象，而無法有效灌注。

其預測結果整理如表 4.5 所示，公式可灌與不可灌之推估準確率分別為 90.48% 及 46.03%，實際準確率分別為 15.70% 及 97.75%，總體預測準確率為 50.48%。並有 30 筆資料預測為無法有效灌注，此組資料難以比較其準確性，故並未考量。

歸納以上五種經驗公式之預測結果，由推估準確率及實際準確率可看出，公式對於實際上可灌之情形，大多預測其為不可灌，對於可灌性無法有效推估。經驗公式之總體預測準確率如表 4.6 所示，由表中可看出傳統可灌性經驗公式，其總體預測準確率介於 45% 至 68% 之間，顯示其對於高水灰比之超微粒水泥，滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性預測已不適用，其門檻 N 值應進行修正及調整。

表 4.4 黃建霖等人(2007)公式之預測結果

黃建霖等人(2007) 可灌性公式			可灌性公式預測結果		實際準確率	
			可灌	不可灌		
現地實際 灌漿結果	可灌	N_1	74	76	49.33%	
		N_2	54	96	36.00%	
	不可灌	N_1	0	90	100%	
		N_2	0	90	100%	
推估準確率		N_1	100%	54.22%		
		N_2	100%	48.39%		
總體預測準確率： $N_1 = 164/240 = 68.33\% \cdot N_2 = 144/240 = 60.00\%$ 。						

表 4.5 Axelsson et al. (2009)公式之預測結果

Axelsson et al. (2009) 可灌性公式			可灌性公式預測結果		實際準確率	
			可灌	不可灌		
現地實際 灌漿結果	可灌		19	102	15.70%	
		不可灌	2	87	97.75%	
推估準確率		90.48%	46.03%			
總體預測準確率： $106/210 = 50.48\%$ ，並有 30 筆資料預測為無法有效灌注。						

表 4.6 傳統可灌性經驗公式之綜合比較

可灌性公式	可灌性評估準則	總體正確組數	總體預測準確率
Burwell et al. (1958)	$N_1 > 25$ 且 $N_2 > 11$	91/187	48.66%
Krizek et al. (1992)	$N_1 > 15$ 且 $N_2 > 8$	110/240	45.83%
Incecik and Ceren(1995)	$N > 10$	109/240	45.42%
黃建霖等人(2007)	$N_1 > 9$	164/240	68.33%
	$N_2 > 4$	144/240	60.00%
Axelsson et al. (2009)	$N > 5$	106/210	50.48%

4.2 超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式

本研究參考 Krizek et al. (1992)提出的滲透灌漿必須滿足土壤和超微細水泥漿體之相對粒徑比的要求，修正其公式的 N 值，以禁忌演算法進行 N 值範圍的推估，研究中利用 25 個鑽探孔位共 240 筆現地實際灌漿資料進行禁忌演算法的檢定及測試，其中台北地區有 4 個孔位，20 筆灌漿資料；高雄地區有 21 個孔位，220 筆灌漿資料。有關禁忌演算法檢定資料的部分，選取不同水灰比 20 處灌漿孔位，共 195 筆(約佔 80%)灌漿資料；於測試部分，則選取不同水灰比 5 處灌漿孔位，共 45 筆(約佔 20%)灌漿資料，其選取資料組數整理如表 4.7 所示。

建構完成之禁忌演算法可灌性預測公式，會配合拔靴法(Bootstrap Method)來進行參數不確定性分析，以了解禁忌演算法所建立之超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式的可信度，並與前述之傳統可灌性公式作一比較，亦將配合室內滲透灌漿試驗之結果，進行預測公式的驗證。

4.2.1 以禁忌演算法建立推估模式

通常在以禁忌演算法進行最佳化問題求解之過程中，常因為邊界條件或移步量之設定不當，造成解無法收斂之結果，因此需針對不同之問題，設定其合適的邊界條件及移步量。根據 3.2.2 所述，本研究期能建立超微粒水泥滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性預測公式，推估其修正 Krizek et al. (1992)可灌性公式的 N 值大小(a、b 係數)，如下式所示：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

當 $N_1 > a$ 且 $N_2 > b$ 時為可灌；反之，則漿體為不可灌。

其中 a、b 為待定係數，且 $a, b > 0$ 。

因此將模式建立為下式。依據 240 筆現地資料的數據，挑出 195 筆做檢定使用(其餘 45 筆為測試使用)，將目標函數設定如下。此外，禁忌名單的形式為記錄每個解中所有的變數值、長度則設定為 7，停止原則為到達設定之迭代次數為止。

表 4.7 禁忌演算法檢定與測試之孔位資料組數表

檢定資料					
孔位	資料組數	水灰比	孔位	資料組數	水灰比
台北新莊線 CK570H-1	5	3.34	台北新莊線 KA-08	4	3.34
台北新莊線 KA-03	4	3.34			
高雄旗楠路 355K+255	11	4	高雄旗楠路 355K+325	11	4
高雄經建路 356K+825	12	4	高雄經建路 356K+861	12	4
高雄鳳楠路 357K+079	12	4	高雄鳳楠路 357K+139	12	4
高雄水管路 358K+723	11	4	高雄水管路 358K+768	12	4
高雄本館路 364K+137	7	4	高雄本館路 364K+175	7	4
高雄塊厝溝 353K+565	12	4.65	高雄塊厝溝 353K+616	12	4.65
高雄興楠路 356K+002	11	4.65	高雄興楠路 356K+050	12	4.65
高雄八德路 359K+509	10	4.65	高雄八德路 359K+534	11	4.65
高雄旗楠路 355K+290	7	4.65	總計 20 孔	195 筆資料	
測試資料					
台北新莊線 CK570H-2	7	3.34	高雄後勁溪 358K+870	10	4
高雄後勁溪 358K+834	10	4	高雄典寶溪 354K+187	6	4.65
高雄典寶溪 354K+116	12	4.65	總計 5 孔	45 筆資料	

Model

$$Objective\ Function \quad Min\ Z = Min(RMSE) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{195} (V_i - X_i)^2}$$

s.t. $\begin{cases} a > 0 \\ b > 0 \end{cases}$, 其中 :

d_{15} ：土壤粒徑分佈曲線上相對應通過百分比為 15% 的粒徑大小。

d_{10} ：土壤粒徑分佈曲線上相對應通過百分比為 10% 的粒徑大小。

D₈₅：超微粒水泥粒徑分佈曲線上相對應通過百分比為 85%的粒徑大小，

在此為 $4.46\mu\text{m}$ 。

D₉₅：超微粒水泥粒徑分佈曲線上相對應通過百分比為 95%的粒徑大小，

在此為 $7.32\mu\text{m}$ 。

a、b：待定係數，且 a、b 皆大於 0。

i：資料筆數。

V_i 為實際可灌情形，1 為可灌、0 為不可灌。

X_i 為模擬可灌情形，1 為可灌、0 為不可灌。

RMSE 為均方根誤差。

模式的設定為邊界條件 $a, b > 0$ 的情況下，將 195 筆檢定資料進行禁忌演算法運算，若第 i 筆資料的 N_1 值大於 a 且 N_2 值大於 b 時，則第 i 筆資料判定為可灌資料，其表示為 $X_i = 1$ (不可灌則 $X_i = 0$)，而 195 筆資料都有其模擬可灌值 X 和實際可灌值 V ，由 X, V 值可計算其均方根誤差，也就是本模式的目標函數值，若目標函數值越小時則對應的解越佳。設定好初始解後，先計算其目標函數值，再計算鄰近解的目標函數值，挑選好最佳的鄰近解(目標函數值最小)後，此鄰近解就成為下次迭代的初始解並同時列入禁忌名單中，重複此一方方式進行迭代，直到迭代結束後，所紀錄最佳目標函數值對應的解，即為此次搜尋所得之最佳解。

表 4.8 禁忌演算法搜尋結果(移步量為 1)

迭代次數 100	a	b
初始解	6	9
移步量	1	
最佳解	1、2	1
最佳解位置	在迭代次數第 8、9 次	
禁忌名單長度	7	
資料數	195	
初始目標函數值 $\min(\text{RMSE})$	0.7579	
初始準確率	42.56%	
最佳目標函數值 $\min(\text{RMSE})$	0.3038	
預測正確組數	177/195	
檢定準確率	90.77%	

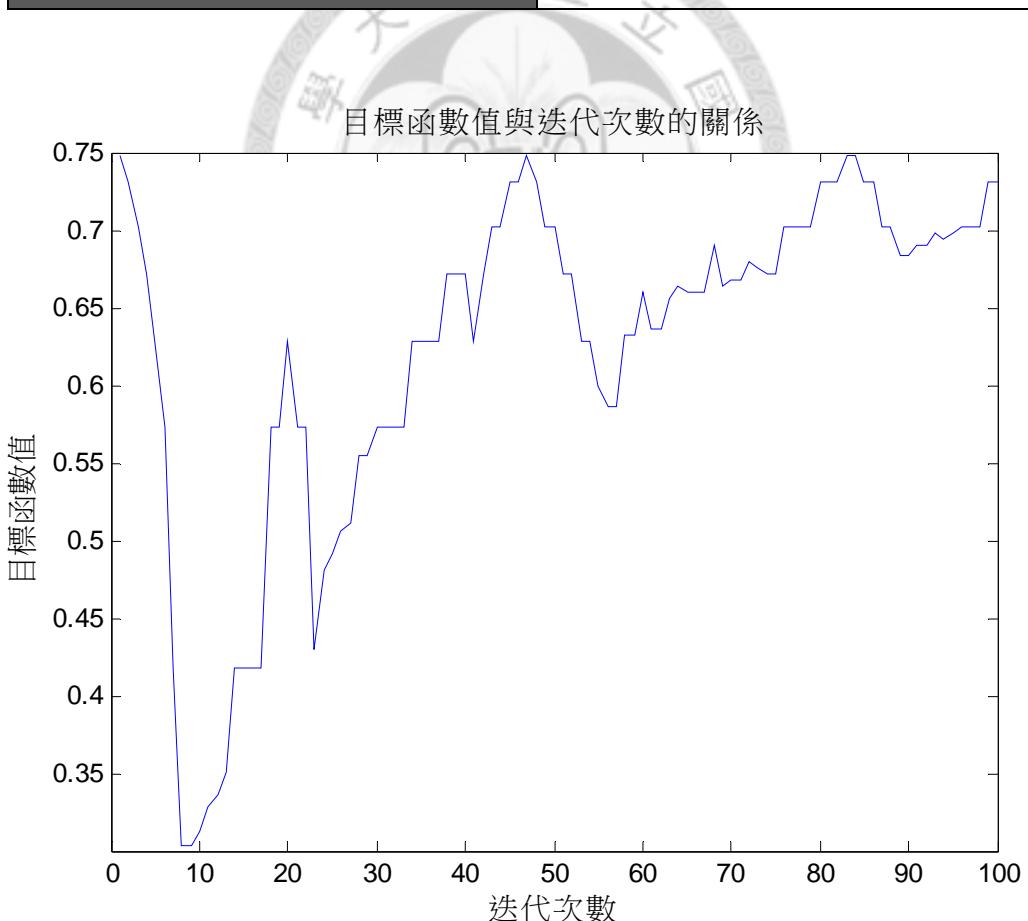


圖 4.1 目標函數值與迭代次數的關係(移步量為 1)

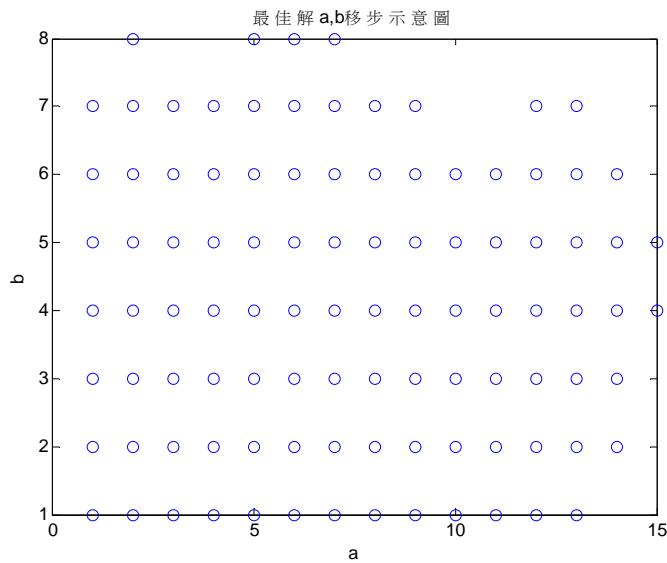


圖 4.2 最佳解 a, b 移步示意圖(移步量為 1)

表 4.9 禁忌演算法搜尋結果(移步量為 0.5、0.1)

	Case 1		Case 2	
	a	b	a	b
迭代次數 100				
移步量	0.5		0.1	
最佳解	2	1	2.2	1.2
禁忌名單長度	7		7	
資料數	195		195	
初始目標函數值 min(RMSE)	0.3038		0.3038	
初始準確率	90.77%		90.77%	
最佳目標函數值 min(RMSE)	0.3038		0.2903	
預測正確組數	177/195		178/195	
檢定準確率	90.77%		91.28%	

表 4.10 禁忌演算法預測公式測試結果

$N_1 > a$ 且 $N_2 > b$ 為可灌	a	b
	2	1
資料數	45	
目標函數值 (RMSE)	0.2981	
預測正確組數	41/45	
測試準確率	91.11%	

根據傳統可灌性經驗公式，其 a 、 b 值皆為整數，在應用上比較方便簡潔，因此本研究將隨機選取整數初始解，設為 $Y(a_0, b_0)$ ，令 a_0, b_0 皆為個位數整數，則初始解隨機選取的結果為(6, 9)；禁忌演算法模式設定移步大小為 1，禁忌名單長度設為 7，鄰近解個數為 8 個，如圖 3.4 所示。又設定邊界條件為 a 、 b 皆大於 0，迭代次數為 100 次，故將搜尋最多 800 個解。其演算過程皆以 MATLAB 程式操作(參照附錄四)。

最後結果如表 4.8 所示，最佳解(a, b)有兩組，為(1, 1)與(2, 1)，即 $N_1 > 1$ (or 2)且 $N_2 > 1$ 時為可灌，此時由 195 筆檢定資料得到的準確率高達 90.77%。而由圖 4.1 可以看出，當迭代次數在第 8、9 次時能找到最佳解，顯示禁忌演算法若配合適當的初始解、邊界條件、移步量及禁忌名單的設定，有良好的全域最佳解搜尋能力。圖 4.2 則顯示，禁忌名單的設定能幫助我們在可行解空間內做充分的搜尋，且不會有重覆搜尋的現象(100 次迭代的解沒有重複)。

為了從兩組最佳解挑選一組作為本研究公式的門檻值，參考 2.4 提到可灌性公式的觀念，當地層的有效孔隙或裂隙尺寸 D_p 大於灌漿材料的顆粒尺寸 d ，其比值 R 大於 1 時，漿體才是可灌的($R=D_p/d$, $R>1$ 為可灌)。然而，當前的技術條件還難以準確的測出砂土的天然孔隙尺寸，所以在確定砂土可灌性時提出以下三點假設：

1. 當 R 等於或大於 2~3 時，可以防止群粒的堵塞；
2. 砂土有效孔隙尺寸 D_p 與顆粒直徑 D 關係為： $D_p=D \times e_e$ ， e_e 為有效孔隙比；
3. 可以土壤有效粒徑 d_{10} 或 d_{15} 代替 D ，而以水泥粒徑 D_{85} 代替 d ；

由第一及第三點假設我們可推測，當 $N_1=(d_{15})_{soil}/(D_{85})_{grout}$ 時，其門檻值 a 挑選為 2 比較適當，會比較能防止群粒的堵塞，因此我們的最佳解為 $a=2$ 、 $b=1$ 。

而為瞭解 a 、 b 值設定為整數值與其設定為非整數值的差異，本研究將前述找到的最佳解($a = 2$ 、 $b = 1$)設定為初始解，並改變移步量為 0.5 及 0.1，主要的目的是針對較佳解的附近作強化性之搜尋，且顯示禁忌演算法有能力能找到全域最佳解。其結果如表 4.9 所示，Case 1 為移步量設為 0.5 的搜尋結果，其最佳解依然是 $a = 2$ 、 $b = 1$ ；Case 2 為移步量設為 0.1 的搜尋結果，其最佳解變成 $a = 2.2$ 、 $b = 1.2$ ，預測正確組數增加 1 組，檢定準確率只增加了 0.51%，顯示應用非整數不會增加太多的預測率值，因此本研究認為 $a = 2$ 、 $b = 1$ 已有非常好的預測能力。根據禁忌演算法得到的檢定結果，可灌性預測公式修正如下所示：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

當 $N_1 > 2$ 且 $N_2 > 1$ 時為可灌；反之，則漿體為不可灌。

將 45 筆測試資料帶入上式，經過 MATLAB 計算(如附錄五)，結果如表 4.10 所示，其均方根誤差為 0.2981，與檢定階段的均方根誤差(0.3038)之差距不大，且測試準確率高達 91.11%，顯示測試結果相當良好。

禁忌演算法推估模式所建立的可灌性預測公式，不論是在檢定階段還是測試階段，其準確率皆高達 90% 以上，而將 240 筆資料代入預測公式得出的可灌與不可灌之推估準確率分別為 88.55% 及 95.95%，實際準確率分別為 98.00% 及 78.89%，總體預測準確率為 90.83% (如表 4.11 所示)，顯示此預測公式在超微粒水泥滲透灌漿於砂性粉土層的可灌性預測上，能比前人的經驗公式更加準確，約增加了 22.5% 至 45% 的總體預測準確率。

4.2.2 拔靴法分析結果

由於現地鑽探的資料取樣情形為未知，為了瞭解此 240 筆資料是否能完整描述真實可灌性情形，於是利用拔靴法來做預測公式的不確定性分析，確定禁忌演算法建立出來的可灌性預測公式為可行的可灌性預測方法。

從 240 筆現地灌漿資料，隨機抽取 50 筆(可重複抽取)，模擬出一個重複取出，放回的拔靴樣本，並將這 50 筆資料的拔靴樣本來進行禁忌演算法的公式推估，得到一組 4.2.1 所提到的 a、b 值(也就是 $N_1 > a$ 、 $N_2 > b$ 時為可灌，a、b 為可灌性預測公式的門檻值)，以同樣的方式運作 1000 次，取得 1000 組拔靴樣本，並得到每組拔靴樣本的 a、b 門檻值，共有 1000 筆資料。

將 1000 筆之 a、b 值作統計分析，得到 a 之平均值(μ_a)=2.642，標準差(σ_a)=1.7908；b 之平均值(μ_b)=1.041，標準差(σ_b)=0.2431。而後就 a、b 之平均值和標準差情形作不確定性分析，若這些統計值分析與 4.2.1 應用禁忌演算法建立可灌性預測公式的結果一致，我們即可推斷此預測公式的參數(d_{10} 、 d_{15})不確定性極小，則由禁忌演算法所建立的可灌性預測公式有其可信度存在。

以 $a = 2.642$ 、 $b = 1.041$ 代入 195 筆檢定資料，準確率為 90.77%，而 45 筆測試資料準確率 91.11%，其檢定與測試準確率皆和 $a=2$ 、 $b=1$ 時的情形一樣，而且拔靴法的結果顯示，a 的標準差(1.79)比 b 的標準差(0.24)大了許多。驗證了 4.2.1 禁忌演算法得到的結果：b 值為單一值，且 a 值在一小段範圍(1-2.642)內的準確率皆為最佳值，顯示參數不確定性較低。

雖然 $a = 2$ 與 $a = 2.642$ 的預測準確率一樣，但基於 4.2.1 提到，為了使用便利所以將門檻值設定為整數，且 $a=2$ 已具有相當效力的預測能力，因此本研究還是將 N_1 之門檻值定為 2。

表 4.11 禁忌演算法預測公式之預測結果

Tabu Search (2010) 可灌性公式		可灌性公式預測結果		實際準確率
		可灌	不可灌	
現地實際 灌漿結果	可灌	147	3	98.00%
	不可灌	19	71	78.89%
推估準確率		88.55%	95.95%	
總體預測準確率： $218/240 = 90.83\%$ 。				

表 4.12 可灌性預測公式於各灌注情形之預測結果

預測公式	準則	$d_{10} < 6.3\mu\text{m}$ $\text{X}^1 (66)$	6.3\mu\text{m} < d_{10} < 13\mu\text{m} (64)		$d_{10} > 13\mu\text{m}$ $\checkmark^1 (110)$
			$\checkmark^1 (40)$	$\text{X}^1 (24)$	
Burwell et al. (1958)	$N_1 > 25 \&$ $N_2 > 11$	100%	0%	100%	0.9%
			37.5%		
Incecik and Ceren (1995)	$N > 10$	100%	0%	100%	17.3%
			37.5%		
Krizek et al. (1992)	$N_1 > 15 \&$ $N_2 > 8$	100%	0%	100%	17.3%
			37.5%		
Huang et al., (2007)	$N_1 > 9$	100%	0%	100%	67.3%
			37.5%		
Axelsson et al. (2009)	$N > 5$	97%	2.5%	95.8%	16.4%
			37.5%		
Tabu Search (2010)	$N_1 > 2 \&$ $N_2 > 1$	100%	95%	25%	100%
			68.75%		

註 1: X 為不可灌, \checkmark 為可灌, 且括號內資料為資料筆數

4.3 現地資料分析結果

依據前述禁忌演算法預測公式與前人研究之經驗公式，建構超微粒水泥灌漿材料進行地質改良之可灌性預測之預測結果發現，禁忌演算法準確率可達90.83%，而前人經驗公式預測結果準確率為45%至68%之間，明顯不如禁忌演算法預測公式之預測結果，分析其可能之原因如下：

(1)本研究區域大部分為高細粒料含量之砂性粉土層，其土壤粒徑(d_{10})或土壤粒徑(d_{15})皆遠小於0.074mm，所求得與水泥粒徑之比值N皆偏低，致使無法滿足前人經驗公式門檻值的要求，而無法有效的推估可灌性。

(2)本研究中所採用的超微粒水泥漿體，其粒徑有70%以上小於1μm，已達奈米等級，且為經高速渦流攪拌機充分拌合之高水灰比漿體，工作性遠優於傳統的水泥漿體，推估傳統之可灌性經驗公式已無法適用於預測超微粒水泥於砂性粉土層之可灌性。

此外，由240筆現地資料及前人文獻中發現，可灌性主要是受到土壤孔隙大小影響，當孔隙大到某一程度時皆為可灌(如 $d_{10} > 13\mu\text{m}$ 皆為可灌)，反之則為不可灌(如 $d_{10} < 6.3\mu\text{m}$ 皆為不可灌)。但當孔隙大小介於中間(d_{10} 介於6.3~13μm之間)的情況下，水泥的流動性、土壤的緊密程度及粒徑分布等因素將會影響滲透灌漿的可灌性，視為可灌與不可灌的模糊地帶。

如表4.12所示，禁忌演算法建立的預測公式在可灌與不可灌地帶的預測率皆高達100%，比傳統經驗公式優秀很多。而在模糊地帶中，其預測率也有68.75%，比傳統公式增加了31.25%的預測率，整個預測率提升許多；又進一步觀察模糊地帶預測情形，禁忌演算法預測公式對於可灌資料的預測率也達到95%，突破以往經驗公式的預測瓶頸，只是於不可灌資料的預測率稍微偏低，推測原因是：本預測公式雖高達90.83%的準確率，但還是有9.17%的資料沒有預測成功，而這些資料剛好都落在模糊地帶，且大部分是預測不可灌的資料為可灌，所以才會使模糊地帶的不可灌資料預測率只有25%。

最後如圖4.3可看出240筆現地資料的整理結果，當 $N_1 > 6.502$ 且 $N_2 > 1.776$ 時，現地灌漿情形為一定可灌；當 $N_1 < 2.242$ 且 $N_2 < 0.861$ 時，現地灌漿為一定不可灌。若 $2.242 \leq N_1 \leq 6.502$ 且 $0.861 \leq N_2 \leq 1.776$ 時，則為無法判斷可灌性的模糊地帶，依照本研究所建立的可灌性預測公式表示 $N_1 > 2$ 且 $N_2 > 1$ 時為可灌，此結果

顯示本預測公式對於可灌資料的預測非常成功，由表 4.11 可看出可灌實際準確率高達 98%。而預測不成功的 22 筆資料有 20 筆是落在 $2.242 \leq N_1 \leq 6.502$ 、 $0.861 \leq N_2 \leq 1.776$ 的模糊地帶，顯示當 N_1 、 N_2 值落入此範圍時，對於可灌性的預測可能要考慮其他因素。

本研究應用禁忌演算法，建構超微粒水泥漿體於砂性粉土層的可灌性預測公式，乃利用禁忌演算法之記憶結構觀念，幫助逃脫區域最佳解而找到全域最佳解；而本研究所建立的預測公式的確也突破以往經驗公式的預測情形，在總體預測率提升了 22.5%至 45%，其預測之改善成效相當顯著。

4.4 室內滲透灌漿模擬試驗結果與分析

本研究欲模擬試驗之砂柱試體，藉由改變細顆粒含量使其土壤粒徑分布有所改變，細顆粒含量分別為 0%、10%、20%、30%及 40%，其孔隙比(e)介於 0.6-0.8，且相對密度(Dr)介於 15-50(%)之情況。

依據美國材料試驗學會 ASTM D854-02 及 ASTM D4253-00、ASTM D4254-00 規範進行渥太華標準砂細砂(403 型)與各細粒料含量混合土樣之比重試驗及相對密度試驗，以求得砂體之比重、最大及最小乾單位重，並利用自製之長圓形塑膠套膜搭配乾式震降法，將所需重量之砂土置入透明 PVC 管試體內，放入完成後量測其長度，確認其長度約 $90 \pm 0.1\text{cm}$ ，若不足則補砂至所需高度。試體完成後進行灌水飽和 3 小時，於試體飽和完成後，重新測量試體長度並計算飽和後試體之孔隙比及相對密度，重新計算試體飽和後之相關參數，如表 4.13 所示。

研究中使用三種水灰比(3.34、4.0 與 4.65)及 5 種細顆粒含量(0%、10%、20%、30%及 40%)，共 15 組試體進行滲透灌漿試驗，用以模擬不同土壤粒徑(d_{10})、土壤粒徑(d_{15})、水灰比(W/C)之情況，並以其試驗結果進行可灌性預測公式之驗證。滲透灌漿模擬試驗之結果如表 4.14 所示。其試體無法成功灌注的原因，推測於飽和或灌漿過程中，細顆粒漂散於水中，因水的搬運而移動，可能於試體某處因孔隙過小或細顆粒以群粒的方式移動，而於該處發生細顆粒阻塞堆積之現象，造成試體部分區域其細顆粒含量增加且土壤孔隙變小，使得超微粒水泥漿體無法有效通過，而導致滲透灌漿試驗失敗，且可能產生劈裂現象，如圖 4.4 所示。

表 4.13 不同細顆粒含量砂柱試體飽和後之基本物理性質表

砂種 項目	403(0%)	FC-10%	FC-20%	FC-30%	FC-40%
最大乾單位重 $\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	1.659	1.813	1.780	1.835	1.650
最小乾單位重 $\gamma_{d,min}$ (g/cm ³)	1.471	1.437	1.439	1.379	1.300
比重	2.648	2.647	2.645	2.644	2.643
高度(cm)	88	89	87.5	88	87.5
體積(cm ³)	7134.44	7215.51	7093.90	7134.44	7093.90
重量(g)	11000	11300	11350	11460	11100
相對密度 Dr(%)	37.7	34.3	47.1	49.8	75.5
孔隙率(e)	0.717	0.690	0.653	0.646	0.689
d_{10} (mm)	0.141	0.053	0.010	0.0063	0.0044
d_{15} (mm)	0.164	0.118	0.017	0.009	0.007
d_{30} (mm)	0.220	0.208	0.150	0.053	0.017
d_{60} (mm)	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22

表 4.14 滲透灌漿模擬試驗結果

水灰比 土樣	3.34	4.0	4.65
403(0%)	可灌	可灌	可灌
FC-10%	可灌	可灌	可灌
FC-20%	不可灌	不可灌	無法有效灌注
FC-30%	不可灌	不可灌	不可灌
FC-40%	不可灌	不可灌	不可灌

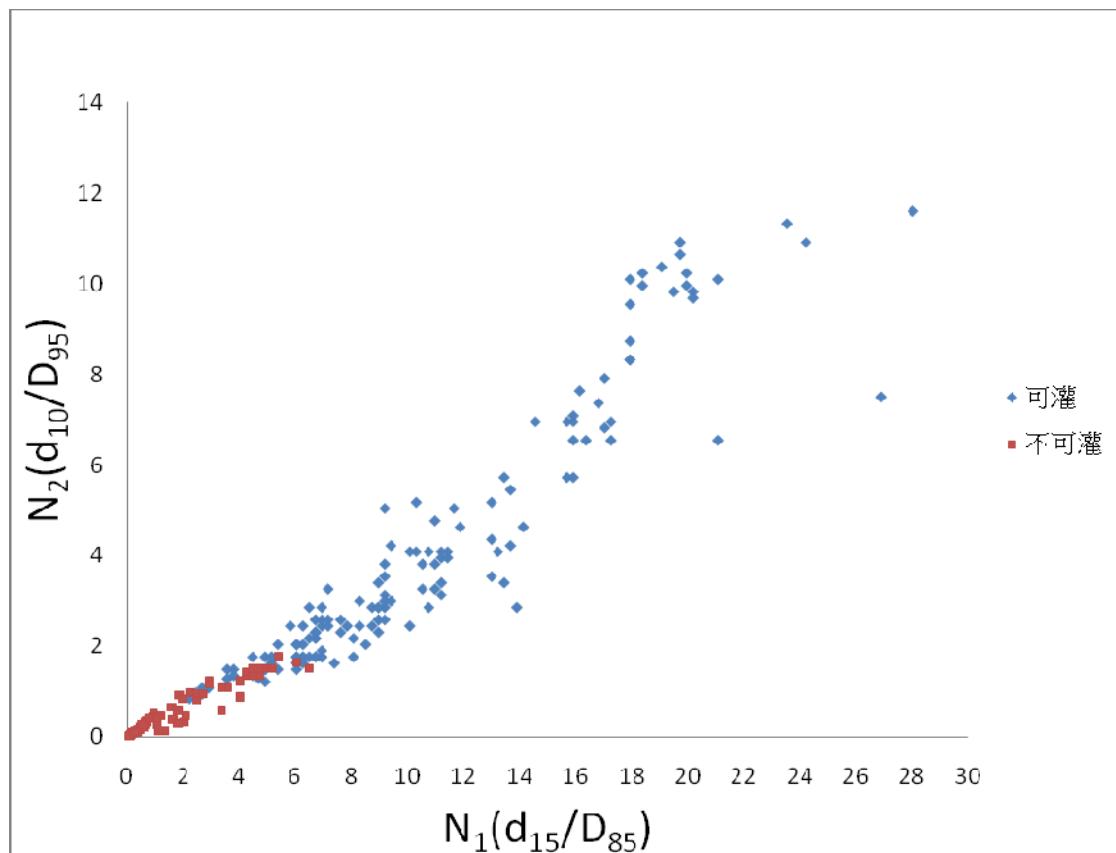
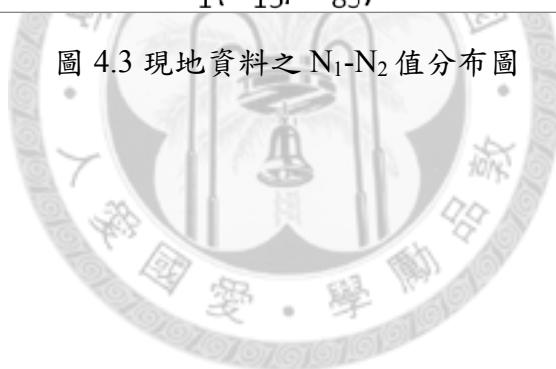


圖 4.3 現地資料之 N_1-N_2 值分布圖



禁忌演算法可灌性預測公式之驗證如表 4.15 所示。室內試驗結果中，預測公式之準確率為 $12/15=80\%$ ，超越其他經驗公式的準確率。惟細顆粒含量為 10%，水灰比為 3.34、4.0 及 4.65 此三組試驗，預測公式無法準確預測，公式預測其為不可灌，而試驗結果為可灌，推測其原因為：

(1)門檻值為整數：為了使預測公式方便使用，前人研究之相對粒徑比預測公式皆以整數值為門檻值，因此本研究在禁忌演算法的設定上也是如此，若將門檻值調整為非整數值，將可能提高室內試驗之預測能力。但以工程上的評估使用而言，可能沒有更大的幫助。

(2)現地砂土材質與室內試驗使用的標準砂不太一樣，因標準砂是經過粒徑篩選處理過的砂土，較乾淨，無雜質，在滲透灌漿方面阻塞的情形較小，也較能順利灌注成功，而現地灌漿的情況複雜，砂土的材質可能比較混雜，因此預測公式才會將室內試驗可灌的情形預測為不可灌。

此外，現地灌漿與室內灌漿其擴散機制不同，室內灌漿因受 PVC 管柱之限制為一維擴散，因此當部分區域阻塞即可能使漿體無法有效灌注，而現地灌漿以球型三維擴散，部分區域受阻還可往其他方向繼續擴散，但若產生此情況，雖仍可灌，但其灌漿範圍及地層改良之均勻性將會受到影響。

由此可知，室內試驗雖無法完全模擬現地灌漿情形，但可參考室內試驗之結果，對現地灌漿情形進行模擬。若於室內試驗可成功灌注，則於現地灌漿應可有效均勻的擴散，充分達到地層改良之功效。對於室內試驗無法成功灌注之情形，表示漿體無法有效的滲透或有部分砂土發生阻塞導致不可灌，則於現地灌漿應為不可灌，若可灌，則將因有部分甚至多處阻塞，使得漿體無法完全擴散分布於改良區域，而使地層改良之成效不佳。

4.5 綜合比較

綜合本章所探討應用超微細水泥灌漿材料，進行滲透灌漿地質改良之可灌性預測之相關預測方法分析結果，可知超微粒水泥在細度及滲透能力上皆較傳統卜特蘭水泥為佳，且研究區域多為高細顆粒含量之砂性粉土層，故此過去所提出之可灌性公式在適用性上還有待商確。

依據前人研究之經驗公式進行超微粒水泥之可灌性預測，由其預測結果發現，前人經驗公式預測結果之總體準確率介於 45% 至 68%，明顯對於超微粒水泥

於高細粒料含量之砂土無法有效評估預測其可灌性，公式應進行修正及調整。本研究以禁忌演算法，建立超微粒水泥漿體於砂性粉土層的可灌性預測公式，以 240 筆現地資料建構可灌性預測網路，可得到良好之預測結果，其準確率達 90.83%，比前人之經驗公式改善了 22.5% 至 45% 的準確率值。此外，以室內滲透灌漿試驗結果，進行禁忌演算法預測公式的驗證，其可灌性預測準確率可達 80%。而所建構之禁忌演算法於砂性粉土層的可灌性預測公式，其所使用之超微粒水泥為 MFC-GM8000，水灰比為 3.34、4 及 4.65，在此範圍下有相當好之準確性，若所使用之超微粒水泥其細度及水灰比與其差異越大，則模式之準確性將會受到影響。



表 4.15 各可灌性預測公式之驗證

可灌性預測公式	可灌性評估準則	預測公式	室內試驗
		整體準確率	驗證準確率
Tabu Search	$N_1 > 28 \& N_2 > 1$	0.9083	0.80
Burwell et al. (1958)	$N_1 > 25$ 且 $N_2 > 11$	0.4866	0
Krizek et al. (1992)	$N_1 > 15$ 且 $N_2 > 8$	0.4583	0
Incecik and Ceren(1995)	$N > 10$	0.4542	0
黃建霖等人(2007)	$N_1 > 9$	0.6833	0
	$N_2 > 4$	0.6000	0
Axelsson et al. (2009)	$N > 5$	0.5048	0

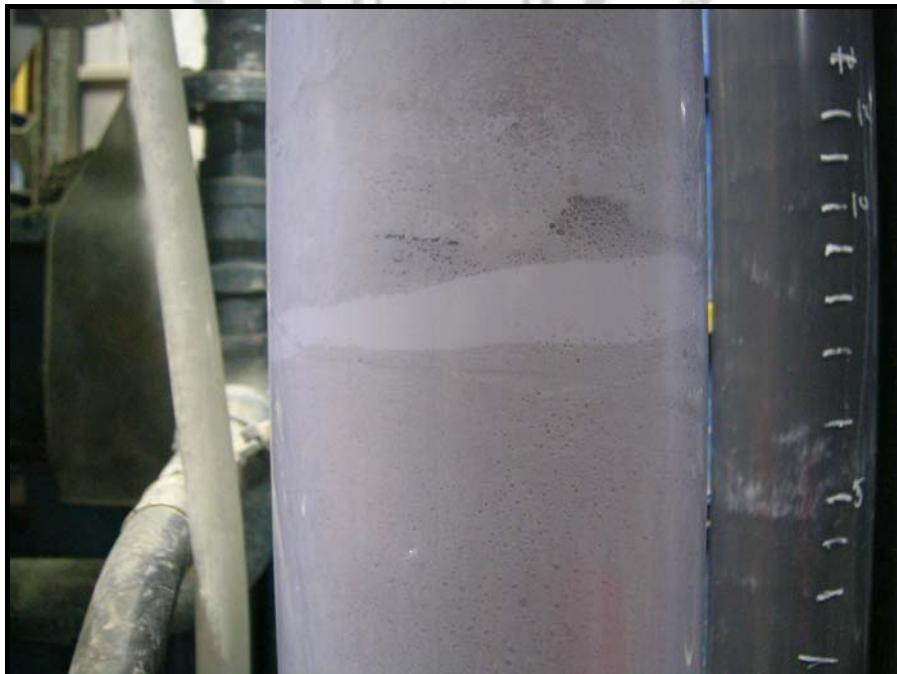


圖 4.4 細顆粒阻塞(白色部分)之現象

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究探討應用超微粒水泥漿體，以低壓滲透灌漿於砂性粉土層進行地層改良，其可灌性之預測情形。可灌性之預測推估，採用前人研究中所提出的土壤及水泥相對粒徑比之經驗公式；並運用禁忌演算法具有記憶體結構的特性，以及能逃脫區域最佳解並找到全域最佳解的優點，以現地實際灌漿資料建立可灌性之預測公式。此外，為了解禁忌演算法所建立之超微粒水泥滲透灌漿可灌性預測公式的可信度，本研究即採用拔靴法 (Bootstrap Method)，分析參數不確定性，進而評估可灌性預測公式的可行性。最後，進行室內滲透灌漿模擬試驗，採用與現地資料相同之水灰比(3.34、4.0 及 4.65)，水泥之爐石含量 50%，及不同細粒料含量(0%、10%、20%、30%及 40%)之砂柱試體，用來針對預測公式進行驗證，依據試驗結果及可灌性分析可得以下結論：

1. 本研究中所採用的超微粒水泥漿體，其粒徑有 70%以上小於 $1\mu\text{m}$ ，已達奈米等級，且為經高速渦流攪拌機充分拌合之高水灰比漿體，於細度及滲透能力皆遠優於傳統的卜特蘭水泥漿體，此外，現地資料之研究區域多為高細顆粒含量之砂性粉土層，其土壤粒徑(d_{10})或土壤粒徑(d_{15})皆遠小於 0.074mm(即 #200)，所求得與水泥粒徑之比值 N 皆偏低，致使無法滿足經驗公式門檻值的要求，而無法有效的推估可灌性。因此，可說明傳統之可灌性經驗公式，已無法適用於預測超微粒水泥滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性。
2. 依據前人研究之經驗公式進行超微粒水泥滲透灌漿之可灌性預測，由其預測結果發現，前人經驗公式之總體準確率介於 45%至 68%，明顯對於超微粒水泥於砂性粉土層之可灌性無法有效評估預測，公式所訂定之門檻 N 值應進行修正及調整。
3. 本研究選擇禁忌演算法進行門檻 N 值修正，因禁忌演算法的記憶結構特性(禁忌名單)，能找到欲解決問題之全域最佳解，避免重複搜尋及落入循環，且本研究針對 Krizek 於 1992 年提出的可灌性公式，進行 N 之門檻值修改，

所需的資料筆數大小及二維可行解空間特性(低維度)皆為禁忌演算法的適用條件。

4. 以禁忌演算法推估模式所得到的可灌性預測公式定義為：

$$N_1 = (d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout}$$

$$N_2 = (d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout}$$

當 $N_1 > 2$ 且 $N_2 > 1$ 時為可灌；反之，則漿體為不可灌。

5. 以 240 筆現地資料中的 195 筆資料進行禁忌演算法之檢定可得到良好之預測結果，其檢定準確率達 90.77%。以其餘 45 筆資料測試，其可灌性測試準確率可達 91.11%。總體預測率為 90.83%，預測公式的確也突破以往經驗公式的預測情形，在整體預測率提升了 22.5% 至 45%，其預測之改善成效相當顯著。
6. 為瞭解資料參數的不確定性，本研究利用拔靴法進行分析，結果顯示 N_1 門檻值 a 與 N_2 門檻值 b ，其 1000 組拔靴樣本的平均值與標準差符合禁忌演算法推估模式求得之結果，顯示參數不確定性極小，且本預測公式應為可行的。
7. 由 240 筆現地資料整理結果得知，當 $N_1 > 6.502$ 且 $N_2 > 1.776$ 時，現地灌漿情形為一定可灌；當 $N_1 < 2.242$ 且 $N_2 < 0.861$ 時，現地灌漿為一定不可灌；若 $2.242 \leq N_1 \leq 6.502$ 且 $0.861 \leq N_2 \leq 1.776$ 時，則為無法判斷可灌性的模糊地帶。
8. 可參考室內滲透灌漿試驗之結果推估現地灌漿情形，採用現地土樣進行室內試驗可成功灌注者，則於現地灌漿應可有效均勻的滲透擴散，充分達到地層改良之功效。對於室內試驗無法成功灌注之情形，表示漿體無法有效的滲透或有部分砂土發生阻塞導致不可灌，則於現地灌漿應為不可灌；若可灌，則將因有部分甚至多處土壤孔隙阻塞，使得漿體無法完全擴散分布於改良區域，而使地層改良之成效不佳。

5.2 後續建議

1. 本研究所建立之可灌性預測公式，其所使用之超微粒水泥為 MFC-GM8000，水灰比為 3.34、4.0 及 4.65，在此範圍下有相當好之準確性，若所使用之超微粒水泥其細度及水灰比與其差異越大，則公式之準確性將會受到影響。
2. 本研究所收集現地資料及室內試驗皆使用相同之超微粒水泥，所建立的預測公式是針對超微粒水泥 MFC-GM8000 在高水灰比下，於砂性粉土層滲透灌漿之可灌性預測，建議日後若能蒐集更多滲透灌漿資料，如使用不同超微粒水泥及不同水灰比之灌漿資料，將能建立不同條件之下的可灌性預測公式。
3. 由於現地資料蒐集不易，而本研究在室內滲透灌漿試驗方面，只使用了一種水泥及兩種不同級配分佈之砂，建議未來後續之研究可嘗試使用不同種類之水泥及砂體，來建立一套室內試驗之水灰比、灌漿材料與砂體材料的可灌性預測公式，用以作為現地灌漿參考之依據。
4. 建議於未來蒐集更多滲透灌漿之文獻及資料進行整彙，期望能成功推導出一具有明確物理意義，且準確性佳之可灌性預測公式。
5. 未來可針對現地灌漿(3-D)和室內灌漿試驗(1-D)，利用其實際灌漿之結果與灌漿理論之依據，找出兩者之間的關聯性。
6. 未來可蒐集現地灌漿之後的強度表現資料，將可灌性以 0~1 表示其強度的差異，並配合 Logistic Regression Model 來判斷其為可灌或不可灌，讓可灌性判斷具有更實質的經濟效益。

參考文獻

1. 米倉亮三、廖洪鈞、林英堂 (2002), “恆久性灌漿材料與其灌漿砂土之動態行為”，地工技術，第 93 期 5-12 頁。
2. 地基處理手冊編寫委員會 (1988), “地基礎理手冊”，中國建築工業出版社。
3. 林任峰 (2005), “超細水泥漿液滲透灌漿模式之研究”，碩士論文，台北科技大學土木與防災研究所。
4. 施國琅(2008), “超微粒水泥漿體滲透灌漿與灌注量之研究”，碩士論文，國立臺灣大學生物環境系統工程研究所。
5. 徐名顯 (2007), “爐石添加量對超微粒水泥漿體基礎物理性質影響之研究”，碩士論文，國立臺灣大學生物環境系統工程研究所。
6. 徐至鈞 (2005), “新編建築地基處理工程手冊”，中國建材工業出版社。
7. 倪至寬、林任峰 (2006), “超細水泥漿液滲透灌漿之研究”，臺北科技大學學報，95 年 09 號。
8. 黃亦敏、李維峰、林平全、張東源 (2002), “高細度地質改良材料研發與案例應用分析”，地工技術，第 93 期 13-22 頁。
9. 黃兆龍 (2003), “高性能混凝土理論與實務”，台北：詹氏書局。
10. 黃建霖、范正成、楊文仁 (2007), ”超微細水泥灌漿材料於砂性粉土層之應用“地工技術 ，第 111 期 71-82 頁。
11. 黃室毓 (2008), “地下水資源永續利用規劃與管理模式”，碩士論文，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所。
12. 黃建霖、范正成、施國琅、徐明顯(2009), ”超微粒水泥漿體滲透灌漿與灌注量之研究”，地工技術。
13. 黃聖修 (2009), ”超微粒水泥漿體滲透灌漿於砂性粉土層之可灌性研究”，碩士論文，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所。

14. 簡璿宸 (2002), “低壓灌漿工法之研究”, 碩士論文, 國立臺北科技大學土木與防災研究所。
15. 張永佳 (2009), “應用混合式禁忌搜尋法於整合生產與配送之排程問題”, 碩士論文, 國立交通大學工業工程與管理研究所。
16. 陳正勳、楊式昌、周功台、陳福勝 (2001), “既有跨越橋梁基礎之耐震補強工法探討”, 中華技術雜誌, 第 52 期。
17. 陳信州 (1994), “水泥混凝土添加爐石提高早期強度策略之研究”, 碩士論文, 國立中央大學土木工程研究所。
18. 陳界文 (2002), “細粒料特性對土壤抗液化強度之影響”, 碩士論文, 國立台灣大學土木工程研究所。
19. 陳嘉裕 (1999), “細粒料含量對砂土液化潛能之影響研究”, 碩士論文, 國立成功大學土木工程研究所。
20. 游起亨、廖瑞堂 (1980), “最小及最大乾土單位重之試驗規範研究比較”, 碩士論文, 國立成功大學土木工程研究所。
21. 吳泰熙 (1997), “以禁忌演算法則求解推銷員旅行問題”, 大葉學報, 第六卷, 第一期 : 87-99。
22. Akbulut, S., and A. Saglamer. (2002), “Estimating the groutability of granular soil: a new approach”, Tunnelling and Underground Space Technology ,v 17,n 4, pp. 371-380.
23. ASTM C136-06 (2006), “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.
24. ASTM D422-63 (2007), “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”, Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.
25. ASTM D4253-00 (2006), “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table”, Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.

26. ASTM D4254-00 (2006), "Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.
27. ASTM D854-02 (2002), "Determination of Specific Gravity of Soils", Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.
28. Axelsson, M., G. Gustafson, and A. Fransson. (2009), "Stop mechanism for cementitious grouts at different water-to-cement ratio", Tunnelling and Underground Space Technology, 24, pp.390-397.
29. Burwell, E. B. (1958), "Cement and clay grouting of foundations", Practice of the corps of engineering, J. Soil Mech. Foundation Div., ASCE 84, 1551/1-1551/22.
30. Chengzhi, Z., W. Aiqin, and T. Mingshu. (1996), "The Filling Role of PozzolanicMaterial", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, pp.943-947.
31. Clarke, W. J., Millard, D . B. Maan Helal, A. M. (1992) , "Ultrafine cement Tests and Dam Test Grouting" Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics ASCE, Geotechnical Special Publication No. 30, pp. 626-637.
32. Du, D.-Z., and Panos M. Pardalos (1998), "Handbook of Combinational Optimization", Volume 3.
33. Engineer Manual (1995), "Engineering and Design-CHEMICAL GROUTING", Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
34. Efron, B., (1979), "Bootstrap methods : Another look at the Jackknife", Annals of Statistics, 7, 1-26.
35. Glover, F., (1990), "Tabu search: a tutorial". Interfaces, 20, pp.74-94.
36. Glover, F. a. L., M (1997), "Tabu Search", Boston, MA, USA, Kluwer Academic Publishers.
37. Helal, M., and R. J. Krizek. (1992), "Preferred orientation of pore structure in cement-grouted sand ", Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics ASCE, Geotechnical Special Publication No. 30,pp. 526-540.
38. Henn, R. W. (1996), " Practical guide to grouting of underground structures,"

- New York: ASCE Press, pp. 6-49.
39. Hu, S., X. Guan, and Q. Ding. (2002), "Research on optimizing components of microfine high-performance composite cementitious materials", *Cement and concrete Research*, Vol 32, pp. 1871-1875
 40. Incecik, M., and I. Ceren. (1995), "Cement grouting model tests", *Bulletin of The technical University of Istanbul*, Vol.:48, No.2, pp. 305-317.
 41. Khaled S., and Al-Sultan (1995), "Tabu search approach to the clustering problem", *Pattern Recognition*, Vol. 28, No. 9, pp. 1443-1451.
 42. Khayat, K. H., and M. Gaudreault. (1997), "High-performance cement grout for underwater crack injection", *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 24:405-418.
 43. Krizek, R. J., H. J. Liao, and R. H. Borden. (1992), "Mechanical Properties of Microfine Cement/Sodium Silicate Grouted sand", *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics ASCE, Geotechnical Special Publication No. 30*, pp. 688-699.
 44. Liao, H. J., R. H. Borden, and R. J. Krizek. (1992), "Microfine Cement/Sodium Silicate Grout", *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics ASCE, Geotechnical Special Publication No. 30*, pp. 676-687.
 45. Maag, E. (1938), "Ueber die Verfestigung und Dictung des Bangrundes (injektionen)", Course on soil mech., Zurich Tech. School.
 46. Maan Helal, A. M., and R. J. Krizek. (1992), "Preferred Orientation of Pore Structure in Cement-Grout Sand", *ASCE Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, pp.526-540.
 47. Markou, I. N., and D. K. Atmatzidis. (2003), "Mechanical Behavior of a Pulverized Fly Ash Grouted Sand", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.26, No.4, pp.1-11.
 48. Markou, I. N., and D. K. Atmatzidis. (2002), "Properties and Performance of a Pulverized Fly Ash Grout", *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.8, pp.682-691.
 49. McKay, M. D. (1988), " Sensitivity and uncertainty analysis using a statistical sample of input values", *Uncertainty Analysis*, 145-186. Y. Ronen, Ed. CRC

Press, Boca Raton, Florida.

50. Mori A., M. Tamura, H. Shibata, and H. Hayashi. (1992), "Some factors related to injected shape in grouting", ASCE Proc. Conf. Grouting, Soil Improvement and Geosynthetic, Geotechnical Special Publication No. 30, New Orleans, pp. 313-324.
51. Naudts, A., and E. Landry. (2003), "New On-site Wet Milling Technology for the Preparation of Ultrafine Cement-based Grouts", American Society of Civil Engineering, Vol. 127, pp. 1200-1207.
52. Ozgurel, H. G., and C. Vipulanandan. (2005), "Effect of Grain Size and Distribution on Permeability and Mechanical Behavior of Acrylamide Grouted Sand", Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering ASCE, Vol.131, No.12, pp.1457-1465.
53. Paoli, D., B. Bosco, R. Granata, and D. A. Bruce. (1992), "Fundamental Observations on Cement Based Grouts (2) : Microfine Cements and The Cemill Process", Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics ASCE, Geotechnical Special Publication No. 30,pp. 486-499.
54. Perret, S., D. Palardy, and G. Ballivy. (2000), "Rheological Behavior and Setting Time of Microfine Cement-Based Grouts", ACI MATERIALS JOURNAL, July-August 2000, pp. 472-477.
55. Perret, S., K.H. Khayat, E. Gagnon, and J. Rhazi. (2002), "Repair of 130-Year Old Masonry Bridge using High-Performance Cement Grout", JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING, Vol7 No.1, JANUARY 1, 2002. ASCE, ISSN, pp 31-38.
56. Reschke, A. E. (2000), "The Development of Colloidal Mixer Based CRF Systems", (presented at MINEFILL 98, Brisbane, Australia, 1998)Rev.Aug.2000. Page 11.
57. Roy, H. B., D. H. Robert, and J. Ilan. (1992), "Grouting soil improvement and geosynthetics", Geotechinal Special Publication, No.30, Vol.1.
58. Rumelhart, D. E., and J. L. McClelland. (1986), "Parallel Distributed Processing:

- Explorations in the Microstructure of Cognition”, Vol. 1. Cambridge, MA: MIT Press.
59. Saiouri, N., Bouasker, M. and Khelidj, A. (2008) ,“Gas permeability measurement on injected soils with cement grout” Cement and concrete Research, Vol. 38,n1,pp.95-103.
 60. Schwarz, L. G., and R. J. Krizek. (1992), “Effect of Mixing on Rheological Properties of Microfine Cement Grout”, ASCE Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, pp.512-525.
 61. Schwarz, L. G., and R. J. Krizek. (2000), “Evolving morphology of early age microfine cement grout”, Geotechnical Special Publication, n 104, 2000, pp. 181-199.
 62. Schwarz, L. G.,and R. J. Krizek. (2006), “Hydrocarbon Residuals and Containment in Microfine Cement Grouted Sand”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No.2, pp. 214-228.
 63. Schwarz, L. G., and M. Chirumalla. (2007), “Effect of injection pressure on permeability and strength of microfine cement grouted sand” , Grouting for Ground Improvement: GSP 168 Geo- Denver 2007: New Peaks in Geotechniques.
 64. Terzaghi, K., and R. B. Peck. (1948), “Soil Mechanics in Engineering Practice”, 1st edition, John Wiley & Sons, Inc,m N.Y.
 65. Thiessen Team. (2000), “The Development of Colloidal Mixer Based CRF Systems ”, Reschke ,A.E. The Development of Colloidal Mixer Based CRF Systems (present at MINEFILL’98, Brisbane,Australia,1988)Rev. Aug. 2000.
 66. Topcu, I. B., and V. B. Elgun. (2004), “Influence of concrete properties on bleeding and evaporation”, Cement and Concrete Research 34:275-281.
 67. Tung , C. P., Chou, C. A. (2002), “Application of tabu search to groundwater parameter zonation”, Journal of American Water Resources Association, Vol. 38, No. 4, pp.1115-1125.
 68. U.S. EPA. (1992b), “Guidelines for Exposure Assessment” , Office of Research

- and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington, DC.
69. Zebowitz, S., R. J. Krizek, and D. K. Atmatzidis. (1989), "Injection of Fine Sands with Very Fine Cement Grout", *Journal Geotechnical Engineering*, n12, pp.1717-1733.



附錄



附錄一：MCF-GM8000 之八大重金屬溶出檢驗報告

水質樣品檢驗報告：

採樣時間：97 年 02 月 20 日

收樣日期：97 年 02 月 21 日

報告日期：97 年 03 月 03 日

案件編號：WW97007

檢驗項目	檢驗值	分析方法	備註
* 汞 (mg/L)	0.0008	NIEA W330.52A	
* 鉻 (mg/L)	0.0034	NIEA W435.52B	
* 鉛 (mg/L)	ND	NIEA W306.52A	MDL=0.11
* 銅 (mg/L)	ND	NIEA W306.52A	MDL=0.023
* 鋅 (mg/L)	<0.05	NIEA W306.52A	
* 總鎘 (mg/L)	ND	NIEA W306.52A	MDL=0.029
* 錳 (mg/L)	ND	NIEA W306.52A	MDL=0.037
* 鎔 (mg/L)	ND	NIEA W306.52A	MDL=0.0061
以 下 空			白

備註：

- 本公司經環保署核可之報告簽署人如下：
無機檢測類-蔡俊銘(ETI-01)、潘樹德(ETI-02)、洪菁燕(ETI-03)
有機檢測類-潘樹德(ETO-01)、楊菊美(ETO-02)
- 本報告已由勾選之報告簽署人審核無誤，並簽署於內部報告文件。
- 檢驗項目有標示'*'者係指該檢驗項目本公司之檢驗能力已經行政院環保署認可，並依其公告之水質檢驗方法分析，未標示'*'者表示未經認可。
- 低於方法偵測極限之測定以'ND'表示，並註明其方法偵測極限值及單位(MDL)。
- 本樣品係由客戶自行送樣，樣品基本資料均為客戶提供，本報告僅對該樣品負責。
- 工程名稱：台北捷運新莊線CK570H區段標IKVX01標。
- 承包商：勤岩工程有限公司。

聲明書：

(一)茲保證本報告內容完全依照行政院環境保護署及有關機關之標準方法及品保品管等相關規定，秉持公正、誠實進行採樣、檢測。絕無虛偽不實，如有違反，就政府機關所受損失願負連帶賠償責任之外，並接受主管機關依法令所為之行政處分及刑事處罰。

(二)吾人瞭解如自身受政府機關委任從事公務，亦屬於刑法上之公務員，並瞭解刑法上圖利罪、公務員登載不實偽造公文書及貪污治罪條例之相關規定，如有違反，亦為刑法及貪污治罪條例之適用對象，願受最嚴厲之法律制裁。



負責人：



實驗室主任：

潘樹德



頁次(1/1)
115452

資料來源：勤岩工程有限公司。MCF-GM8000 之八大重金屬溶出檢驗報告引用
勤岩工程所提供之資料。

附錄二：地下水污染管制標準

中華民國九十年十一月二十一日（90）環署水字第○○七三六八○號

第一條 本標準依土壤及地下水污染整治法第五條第二項規定訂定之。

第二條 地下水中物質濃度達本標準所列污染物項目之管制值，如該物質非因外來污染所致者，不適用本標準。

第三條 地下水分為下列二類：

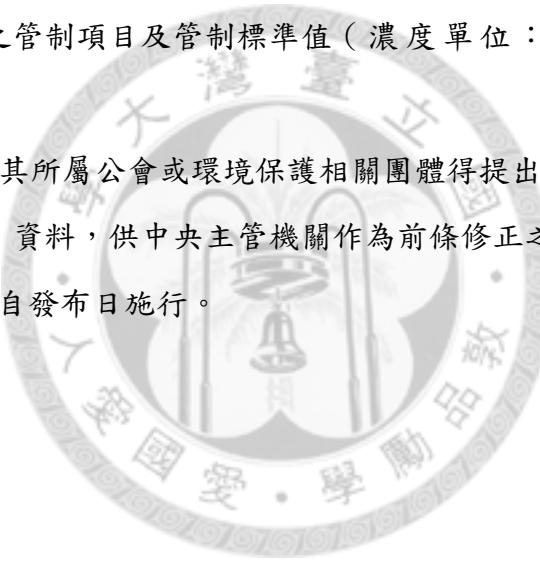
一、第一類：飲用水水源水質保護區內之地下水。

二、第二類：第一類以外之地下水。

第四條 污染物之管制項目及管制標準值（濃度單位：毫克／公升）如下表：

第五條 事業及其所屬公會或環境保護相關團體得提出具體科學性數據、資料，供中央主管機關作為前條修正之參考。

第六條 本標準自發布日施行。



(續)

污染物之管制項目及管制標準值表（濃度單位：毫克／公升）

污 染 物 項 目	管 制 值	
	第一類	第二類
單環芳香族碳氫化合物		
苯 (Benzene)	0.005	0.050
甲苯 (Toluene)	1	10
多環芳香族碳氫化合物		
奈 (Naphthalene)	0.04	0.40
氯化碳氫化合物		
四氯化碳 (Carbon tetrachloride)	0.005	0.050
氯苯 (Chlorobenzene)	0.1	1.0
氯仿 (Chloroform)	0.1	1.0
氯甲烷 (Chloromethane)	0.03	0.30
1,4-二氯苯 (1,4-Dichlorobenzene)	0.075	0.750
1,1-二氯乙烷 (1,1-Dichloroethane)	0.85	8.50
1,2-二氯乙烷 (1,2-Dichloroethane)	0.005	0.050
1,1-二氯乙烯 (1,1-Dichloroethylene)	0.007	0.070
順-1,2-二氯乙烯 (cis-1,2-Dichloroethylene)	0.07	0.70
反-1,2-二氯乙烯 (trans-1,2-Dichloroethylene)	0.1	1.0
總酚 (phenols)	0.014	0.140
四氯乙烯 (Tetrachloroethylene)	0.005	0.050
三氯乙烯 (Trichloroethylene)	0.005	0.050
氯乙烯 (Vinyl chloride)	0.002	0.020
農 藥		
2,4-地 (2,4-D)	0.07	0.70
加保扶 (Carbofuran)	0.04	0.40
可氯丹 (Chlordane)	0.002	0.020
大利松 (Diazinon)	0.005	0.050
達馬松 (Methamidophos)	0.02	0.20
巴拉刈 (Paraquat)	0.03	0.30
巴拉松 (Parathion)	0.022	0.220
毒殺芬 (Toxaphene)	0.003	0.030

(續)

污染物之管制項目及管制標準值表 (濃度單位：毫克／公升)

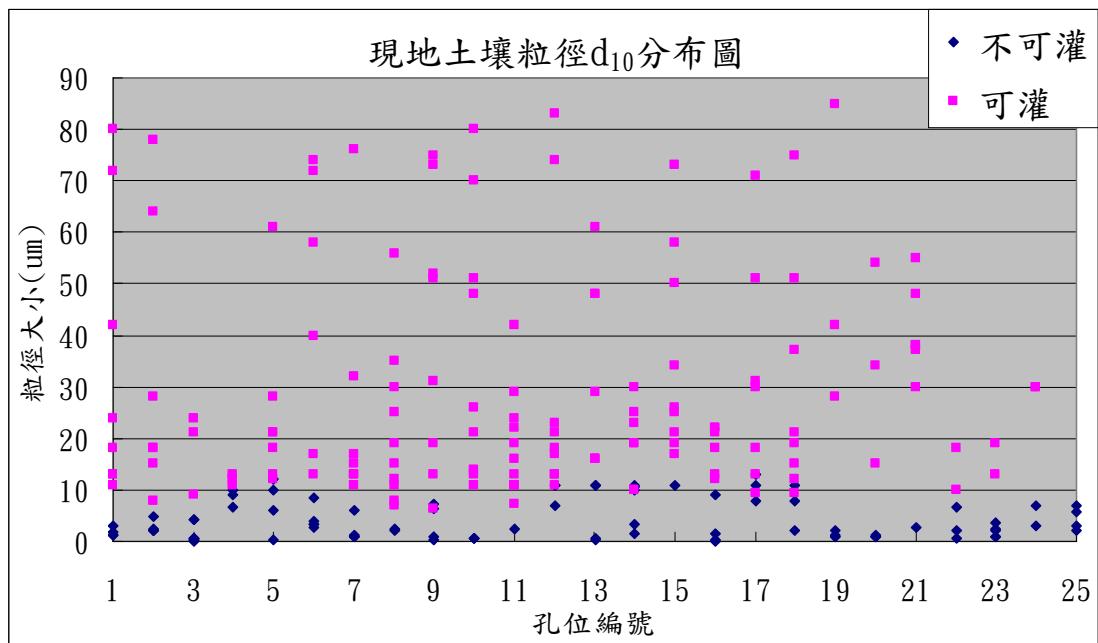
污 染 物 項 目	管 制 值	
	第一類	第二類
重 金 屬		
砷 (As)	0.05	0.50
鎘 (Cd)	0.005	0.050
鉻 (Cr)	0.05	0.50
銅 (Cu)	1	10
鉛 (Pb)	0.05	0.50
汞 (Hg)	0.002	0.020
鎳 (Ni)	0.1	1.0
鋅 (Zn)	5	50
一 般 項 目		
硝酸鹽氮 (以氮計) (Nitrate as N)	10	100
亞硝酸鹽氮 (以氮計) (Nitrite as N)	1	10

附錄三：現地資料

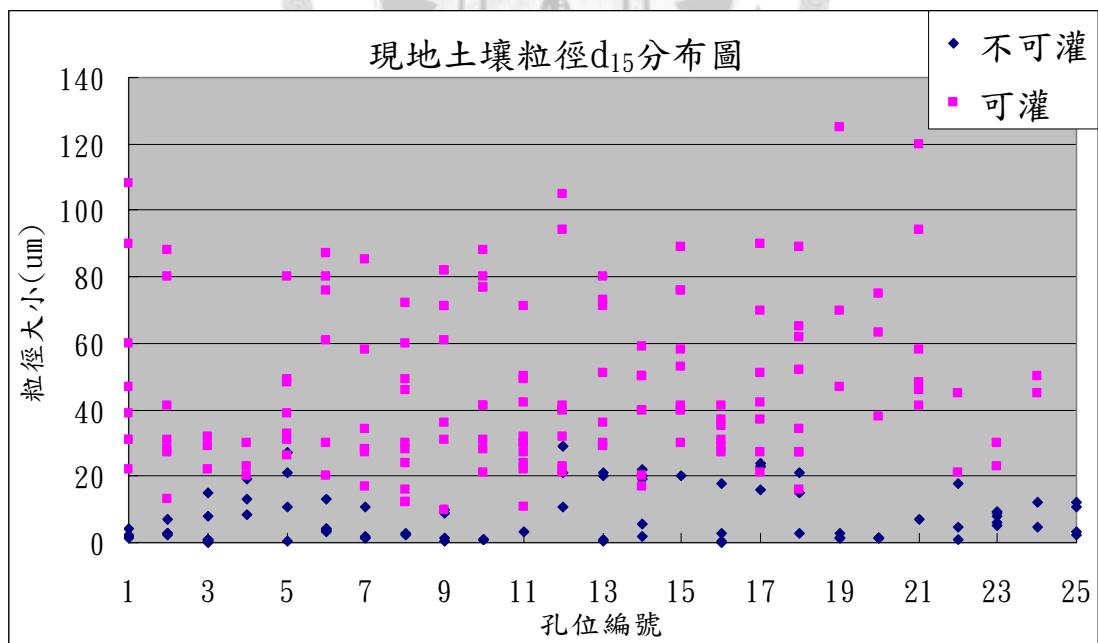
孔位編號及水灰比表

高雄-中山高速公路					
孔位編號	孔位	水灰比	孔位編號	孔位	水灰比
1	塊厝溝 353K+565	4.65	12	鳳楠路 357K+139	4.0
2	塊厝溝 353K+616	4.65	13	水管路 358K+723	4.0
3	典寶溪 354K+116	4.65	14	水管路 358K+768	4.0
4	典寶溪 354K+187	4.65	15	後勁溪 358K+834	4.0
5	旗楠路 355K+255	4.0	16	後勁溪 358K+870	4.0
6	旗楠路 355K+325	4.0	17	八德路 359K+509	4.65
7	興楠路 356K+002	4.65	18	八德路 359K+534	4.65
8	興楠路 356K+050	4.65	19	本館路 364K+137	4.0
9	經建路 356K+825	4.0	20	本館路 364K+175	4.0
10	經建路 356K+861	4.0	21	旗楠路 355K+290	4.65
11	鳳楠路 357K+079	4.0			
台北-捷運新莊線					
孔位編號	孔位	水灰比	孔位編號	孔位	水灰比
22	新莊線 CK570H-1	3.34	24	新莊線 KA-08	3.34
23	新莊線 CK570H-2	3.34	25	新莊線 KA-03	3.34

(續)



圖一 現地土壤粒徑 d_{10} 分布圖



圖二 現地土壤粒徑 d_{15} 分布圖

附錄四：符號表

b_{fic} 定義為 $0.15 \times d_{50}$ 。

d 灌漿材料的顆粒尺寸。

D 顆粒直徑。

D_p 地層有效孔隙尺寸。

D_r 相對密度。

d₁₀ 土壤通過百分比 10% 所對應的粒徑大小，單位為 μm 。

d₁₅ 土壤通過百分比 15% 所對應的粒徑大小，單位為 μm 。

d₅₀ 土壤通過百分比 50% 所對應的粒徑大小，單位為 μm 。

D₈₅ 灌漿材料通過百分比 85% 所對應的粒徑大小，單位為 μm 。

D₉₀ 灌漿材料通過百分比 90% 所對應的粒徑大小，單位為 μm 。

D₉₅ 灌漿材料通過百分比 95% 所對應的粒徑大小，單位為 μm 。

FC 細顆粒含量。

N 有三種情況：a. $N = d_{10}/D_{90}$ (Incecik and Ceren, 1995)

$$\text{b. } N = \frac{d_{10}}{D_{90}} + k_1 \frac{w/c}{FC} + k_2 \frac{P}{D_r} \text{ (Akbulut et al., 2002)} \quad \text{c. } N = b_{fic}/D_{95}$$

N₁ 相對粒徑比，定義為 d_{15}/D_{85} 。

N₂ 相對粒徑比，定義為 d_{10}/D_{95} 。

P 灌漿壓力。

R 地層有效孔隙與灌漿材料顆粒尺寸的比值， $R = D_p/d$ 。

W/C 水灰比。

附錄五：MATLAB 程式碼

禁忌演算法

```
clc
clear all
A = xlsread('final'); %讀取現地資料
s = size(A);
d85 = 4.46;
d95 = 7.32;
a0 = 6; %初始解
b0 = 9;
Y0 = [a0 b0];
p = 1; %p為移步大小

for i = 1:s(1)
    N1(i) = A(i,2)/d85; %可灌度公式N值計算
    N2(i) = A(i,1)/d95;
    if N1(i) > a0
        if N2(i) > b0
            X(i) = 1;
        else X(i) = 0;
        end
    else X(i) = 0;
    end
    Z0(i) = (X(i)-A(i,3))^2;
    W0(i) = abs(X(i)-A(i,3));
end
Z0 = (sum(Z0)/s(1))^0.5 %初始目標函數值
W0 = sum(W0);
initial_correct_rate = (s(1)-W0)/s(1) %初始準確率

c = 1; %第一次迭代

Y{1} = Y0 + [p p]; %鄰近八個解
Y{2} = Y0 + [0 p];
Y{3} = Y0 + [-p p];
Y{4} = Y0 + [-p 0];
Y{5} = Y0 + [-p -p];
```

```

Y{6} = Y0 + [0 -p];
Y{7} = Y0 + [p -p];
Y{8} = Y0 + [p 0];

for i = 1:s(1)
    for j = 1:8
        if N1(i) > Y{j}(1)
            if N2(i) > Y{j}(2)
                X(i) = 1;
            else X(i) = 0;
            end
        else X(i) = 0;
        end
    end

Z{c}(j,i) = (X(i)-A(i,3))^2;
W{c}(j,i) = abs(X(i)-A(i,3));
    end
end

ZZ(c) = min((sum((Z{c})')/s(1)).^0.5); %第一次迭代目標函數值
WW(c) = min(sum((W{c})'));
[v t] = min(sum((Z{c})'));
YY{c} = Y{t};

while c < 100
    c = c+1;
    Y{1} = YY{c-1} + [p p]; %鄰近八個解
    Y{2} = YY{c-1} + [0 p];
    Y{3} = YY{c-1} + [-p p];
    Y{4} = YY{c-1} + [-p 0];
    Y{5} = YY{c-1} + [-p -p];
    Y{6} = YY{c-1} + [0 -p];
    Y{7} = YY{c-1} + [p -p];
    Y{8} = YY{c-1} + [p 0];

    for i = 1:s(1)
        for j = 1:8
            if Y{j}(1) <= 0      %限制條件
                Y{j}(1:2) = NaN;
                Z{c}(j,i) = NaN;
            end
        end
    end
end

```

```

W{c}(j,i) = NaN;
end

if Y{j}(2) <= 0
    Y{j}(1:2) = NaN;
    Z{c}(j,i) = NaN;
    W{c}(j,i) = NaN;
end

if c >= 8    %禁忌名單長度為 c-1=7
    for g = 1:c-1
        OO(g) = sum(YY{g} == Y{j});
    end
    O{c-1} = OO;
    if max(O{c-1}(c-7:c-1)) == 2 %禁忌名單長度為 7
        Y{j}(1:2) = NaN;
        Z{c}(j,i) = NaN;
        W{c}(j,i) = NaN;
    end
end

if c >= 2
    for g = 1:c-1
        OO(g) = sum(YY{g} == Y{j});
    end
    O{c-1} = OO;
    if max(O{c-1}(1:c-1)) == 2
        Y{j}(1:2) = NaN;
        Z{c}(j,i) = NaN;
        W{c}(j,i) = NaN;
    end
end

for i = 1:s(1)
    for j = 1:8
        if N1(i) > Y{j}(1)
            if N2(i) > Y{j}(2)
                X(i) = 1;
            end
        end
    end
end

```

```

    else X(i) = 0;
    end
else X(i) = 0;
end
Z{c}(j,i) = (X(i)-A(i,3))^2;
W{c}(j,i) = abs(X(i)-A(i,3));
end
end
ZZ(c) = min((sum((Z{c})')/s(1)).^0.5); %第c次迭代目標函數值
WW(c) = min(sum((W{c})'));
[v t] = min(sum((Z{c})'));
YY{c} = Y{t};
end

MinZ = min(ZZ) %最佳目標函數值
MinW = min(WW);
[v t] = min(ZZ);
times = t
Best_Solution = YY{t} %最佳解
a = YY{t}(1);
b = YY{t}(2);
correct_number = s(1)-MinW %準確筆數
correct_rate = (s(1)-MinW)/s(1) %準確率

for i = 1:c
    x(i) = YY{i}(1);
    y(i) = YY{i}(2);
end

i = 1:c;
plot(i,ZZ(i)), xlabel('迭代次數') , ylabel('目標函數值') , title('目標函數值與迭代次數的關係')
figure, plot(x(i),y(i),'o') , xlabel('a') , ylabel('b') , title('最佳解a,b移步示意圖')

```

拔靴法演算

```
clc
clear all
A = xlsread('boot'); %讀取現地資料
s = size(A);

for li=1:1000 %重複作取樣的動作次數

rc = 50; %取樣次數 50次
for i=1:rc
r(i) = ceil(rand*s(1));
R(i,1:3) = A(r(i),1:3);
end

d85 = 4.46;
d95 = 7.32;
a0 = 5; %初始解
b0 = 5;
Y0 = [a0 b0];
p = 1; %p為移步大小

for i = 1:rc
N1(i) = R(i,2)/d85; %可灌度公式N值計算
N2(i) = R(i,1)/d95;
if N1(i) > a0
if N2(i) > b0
X(i) = 1;
else X(i) = 0;
end
else X(i) = 0;
end
Z0(i) = (X(i)-R(i,3))^2;
W0(i) = abs(X(i)-R(i,3));
end
Z0 = (sum(Z0)/rc)^0.5; %初始目標函數值
W0 = sum(W0);
initial_correct_rate = (rc-W0)/rc; %初始準確率
```



```

c = 1; %第一次迭代

Y{1} = Y0 + [p p]; %鄰近八個解
Y{2} = Y0 + [0 p];
Y{3} = Y0 + [-p p];
Y{4} = Y0 + [-p 0];
Y{5} = Y0 + [-p -p];
Y{6} = Y0 + [0 -p];
Y{7} = Y0 + [p -p];
Y{8} = Y0 + [p 0];

for i = 1:rc
    for j = 1:8
        if N1(i) > Y{j}(1)
            if N2(i) > Y{j}(2)
                X(i) = 1;
            else X(i) = 0;
            end
        else X(i) = 0;
        end
        Z{c}(j,i) = (X(i)-R(i,3))^2;
        W{c}(j,i) = abs(X(i)-R(i,3));
    end
end
ZZ(c) = min((sum((Z{c})'))/rc).^0.5; %第一次迭代目標函數值
WW(c) = min(sum((W{c})'));
[v t] = min(sum((Z{c})'));
YY{c} = Y{t};

while c < 30
    c = c+1;
    Y{1} = YY{c-1} + [p p]; %鄰近八個解
    Y{2} = YY{c-1} + [0 p];
    Y{3} = YY{c-1} + [-p p];
    Y{4} = YY{c-1} + [-p 0];
    Y{5} = YY{c-1} + [-p -p];
    Y{6} = YY{c-1} + [0 -p];
    Y{7} = YY{c-1} + [p -p];

```



```

Y{8} = YY{c-1} + [p 0];

for i = 1:rc
    for j = 1:8
        if Y{j}(1) <= 0      %限制條件
            Y{j}(1:2) = NaN;
            Z{c}(j,i) = NaN;
            W{c}(j,i) = NaN;
        end
        if Y{j}(2) <= 0
            Y{j}(1:2) = NaN;
            Z{c}(j,i) = NaN;
            W{c}(j,i) = NaN;
        end
    end

if c >= 8    %禁忌名單長度為 c-1=7
    for g = 1:c-1
        OO(g) = sum(YY{g} == Y{j});
    end
    O{c-1} = OO;
    if max(O{c-1}(c-7:c-1)) == 2 %禁忌名單長度為 7
        Y{j}(1:2) = NaN;
        Z{c}(j,i) = NaN;
        W{c}(j,i) = NaN;
    end
end

if c >= 2
    for g = 1:c-1
        OO(g) = sum(YY{g} == Y{j});
    end
    O{c-1} = OO;
    if max(O{c-1}(1:c-1)) == 2
        Y{j}(1:2) = NaN;
        Z{c}(j,i) = NaN;
        W{c}(j,i) = NaN;
    end
end
end

```

```

end

for i = 1:rc
    for j = 1:8
        if N1(i) > Y{j}(1)
            if N2(i) > Y{j}(2)
                X(i) = 1;
            else X(i) = 0;
            end
        else X(i) = 0;
        end
    end
    Z{c}(j,i) = (X(i)-R(i,3))^2;
    W{c}(j,i) = abs(X(i)-R(i,3));
    end
end

ZZ(c) = min((sum((Z{c})'))/rc).^0.5; %第c次迭代目標函數值
WW(c) = min(sum((W{c})'));
[v t] = min(sum((Z{c})'));
YY{c} = Y{t};
end

MinZ = min(ZZ); %最佳目標函數值
MinW = min(WW);
[v t] = min(ZZ);
times = t;
Best_Solution = YY{t}; %最佳解
% a = YY{t}(1);
% b = YY{t}(2);
correct_number = rc-MinW; %準確筆數
correct_rate = (rc-MinW)/rc; %準確率

BY(li,1) = YY{t}(1);
BY(li,2) = YY{t}(2);

end

m1 = sum(BY(1:li,1))/li
m2 = sum(BY(1:li,2))/li

```

```
s1 = STD(BY(1:li,1))  
s2 = STD(BY(1:li,2))
```

