



國立臺灣大學生物資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所博士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

應用滲透灌漿技術於地下水現地生物整治

基質注入之研究

The Study of Applying Permeation Grouting Technology

for Substrates Injection of In-situ Groundwater

Bioremediation

劉文堯

Wen-Yao Liu

指導教授/共同指導教授：胡明哲 博士/范正成 博士

Advisor/Co-Advisor: Dr. Ming-Che Hu/ Dr. Jen-Chen Fan

中華民國 107 年 2 月

February 2018

國立臺灣大學博士學位論文
口試委員會審定書



應用滲透灌漿技術於地下水現地生物整治
基質注入之研究

The Study of Applying Permeation Grouting
Technology for Substrates Injection of In-situ
Groundwater Bioremediation

本論文係劉文堯君(學號 D00622003)在國立臺灣大學生物環境系統工程學系完成之博士學位論文,於民國 107 年 1 月 11 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:

胡明哲 范正成 (簽名)
(指導教授)

李進源

張尊國

高志明

柯宏遠

系主任、所長

林錫村 (簽名)

謝 誌

首先謹呈上我最誠摯之謝忱，感謝恩師范正成教授於就學期間在論文研究方向給予的指導與協助，方使本研究得以順利完成。再者於文稿初成時，感謝口試委員張尊國教授、李達源教授、高志明教授、林宏達教授及胡明哲副教授，不吝斧正並提供寶貴的意見，使本文稿得以更加充實且完善。

研究過程中，感謝林高弘博士在基質黏滯度試驗上的協助，感謝陳慎德副總和李宗明總經理無償提供試驗基質樣品，也感謝王智澤博士在研究方向上提供寶貴意見，更感謝謝佑昀先生在統計與逐級迴歸分析上給予的協助，同時也非常感謝學長黃建霖博士、學弟楊智翔博士、譚允維先生及郭嘉峻先生於實驗上的幫忙與資料彙整，尤其是譚允維學弟花了兩年的時間，分批完成實驗室試驗工作，才能夠有完整的數據做為本研究的分析基礎，也才使得此研究可以順利完成。

最後，我要感謝偉大的母親許昭美女士以及我的太太游淑倫小姐在就學過程中陪伴著我，給予我精神上最大的支持與鼓勵，僅以此論文獻給摯愛的妳們，並共同分享這份的榮耀與喜悅。

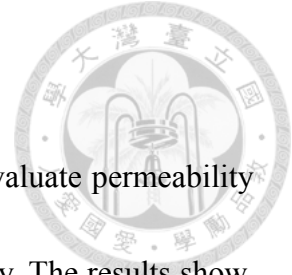
摘要

本研究設計模擬滲透灌漿技術之實驗室設備進行試驗砂柱之灌注試驗，以渥太華標準砂依不同比例配製成 8 種不同粒徑分佈之試驗砂柱，再以市面上常用之 3 種不同基質進行灌注。由灌注試驗結果顯示，當試驗砂粒徑越大、基質黏滯度越小，則灌注效果越好；若試驗砂含 5% 以上之細料則對灌注結果有明顯影響。

36 組滲透灌注試驗結果以 Spearman 等級相關係數計算及參數迴歸，得到試驗砂有效粒徑(D_{10})與基質黏滯度(μ)對灌注高度、灌注時間及流失率之關係式。研究結果對於擬應用滲透灌漿技術於地下水現地生物整治，在現場進行中細砂地層基質灌注試驗提供可預測性之灌注結果。

關鍵字:滲透灌漿、基質、滲透性、地下水生物整治

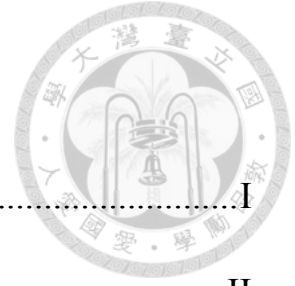
Abstract



This study design the sand column tests in the laboratory to evaluate permeability and efficiency of substrates by using permeation grouting technology. The results show, the coarser the test sand and the lower the substrates viscosity, the better the grouting effect. If more than 5% fines added will affect the grouting results significantly. Spearman's rank correlation coefficient and stepwise regression method were applied to analysis 36 sets of sand columns testing results. The relationships among the effective size of test sand (D_{10}), the viscosity of substrates (μ) and grouting height, grouting time, grouting rate and outflow rate were obtained. The results of this study might be helpful for applying the permeation grouting technology to remedy the contaminated groundwater in the field.

Keywords: Permeation grouting, Substrate, Permeability, Groundwater bioremediation

目錄



口試委員會審定書.....	I
謝誌.....	II
摘要.....	III
Abstract.....	IV
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XI
第一章 前言.....	1
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 滲透灌漿工法.....	3
2.1.1 灌漿材料的選擇.....	7
2.1.2 室內滲透灌漿試驗.....	9
2.1.3 滲透灌漿方式.....	14
2.2 滲透灌漿可灌性評估方法.....	18
2.3 現地生物整治技術.....	24
2.3.1 生物整治技術原理與反應機制.....	24
2.3.2 常見市售生物基質.....	27
2.3.3 常用之基質注入工法.....	29
2.4 砂柱試體製作與準備.....	31



2.5 基質管柱滲透試驗.....	32
第三章 研究方法.....	34
3.1 試驗材料.....	34
3.1.1 試驗砂及其性質.....	34
3.1.2 試驗砂土基本性質試驗.....	36
3.1.3 基質材料及其性質.....	39
3.1.4 試驗砂柱使用之濾材.....	42
3.2 滲透灌注管柱試驗.....	43
3.2.1 灌注試驗設計.....	43
3.2.2 滲透灌漿模擬試驗設備.....	45
3.3 滲透灌漿模擬試驗步驟.....	50
第四章 結果與討論.....	56
4.1 基質於砂柱試體中之滲透性試驗.....	56
4.1.1 滲透性試驗之結果.....	56
4.1.2 滲透性試驗之綜合討論.....	58
4.2 基質於砂柱試體中之持續性試驗.....	60
4.2.1 重量烘乾濃度之結果.....	60
4.2.3 試體中殘留率之結果.....	62
4.3 試驗砂及基質特性與灌注結果關係式分析.....	65

第五章 結論與建議.....	71
5.1 結論.....	71
5.2 建議.....	72
第六章 參考文獻.....	75
附錄 A 滲透灌漿模擬砂柱試驗結果.....	80



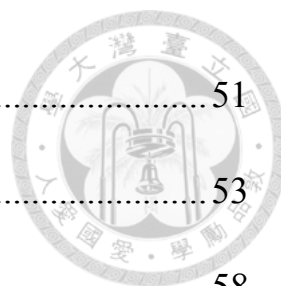
圖目錄



圖 2.1 土層灌漿型式示意圖(摘自 Ni and Lin, 2006).....	5
圖 2.2 底端灌漿球形理論示意圖(摘自 地基處理手冊, 1988).....	5
圖 2.3 聲波分析截面位置圖(摘自 Perret et al., 2002).....	6
圖 2.4 斷面 D(水平)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002).....	6
圖 2.5 斷面 B(垂直)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002).....	7
圖 2.6 各種不同灌漿材料之滲透範圍(摘自 Ni and Lin, 2006).....	8
圖 2.7 砂柱灌漿試驗示意圖(摘自 Zebovitz et al., 1989).....	10
圖 2.8 砂柱化學灌漿試驗示意圖(摘自 Ozgurel et al., 2005).....	11
圖 2.9 可灌度試驗設備示意圖(摘自 Ni and Lin, 2006).....	12
圖 2.10 柱灌漿試驗示意圖 (摘自 Schwarz and Chirumalla, 2007).....	13
圖 2.11 氣體滲透量測設備示意圖(摘自 Saiyouri et al., 2008).....	14
圖 2.12 馬歇爾管低壓灌漿示意圖.....	15
圖 2.13 二重管低壓灌漿圖.....	16
圖 2.14 細顆粒含量與灌漿壓力.....	20
圖 2.15 水灰比-N 值對可灌性關係圖(摘自 Axelsson et al., 2009).....	21
圖 2.16 雙曲型函數門檻值(s)的敏感度分析(摘自 Huang et al., 2013)	22
圖 2.17 ANN 模式的預測結果(摘自 Tekin and Akbas, 2011).....	23

圖 2.18 雙曲型函數門檻值(s)的敏感度分析(摘自 Liao et al., 2011)....	24
圖 2.19 微生物處理有機污染物之概念示意圖 (摘自環保署, 2008)....	25
圖 2.20 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖.....	25
圖 2.21 生物整治法現地施作示意圖 (摘自環保署, 2008).....	26
圖 2.22 好氧直接氧化作用反應機制示意圖 (摘自環保署, 2008).....	27
圖 2.23 注入井之現地地下水生物處理法示意圖.....	30
圖 2.24 砂柱製作過程 (摘自 Dano et al.2004).....	32
圖 2.25 不同砂柱準備程序 (摘自 Saiyouri et al.,2008).....	32
圖 2.26 一維管柱傳輸試驗 (摘自 林靜齡等, 2011).....	33
圖 3.1 本研究所使用之試驗砂.....	35
圖 3.2 試驗砂攪拌機(30QT MIXER).....	35
圖 3.3 試驗砂粒徑分佈曲線.....	39
圖 3.4 本研究所使用 3 種基質外觀.....	41
圖 3.5 一般砂柱試驗所使用之濾材.....	42
圖 3.6 本研究規劃試驗流程圖.....	46
圖 3.7 本研究主要試驗設備照片.....	48
圖 3.8 本研究滲透灌注試驗設計圖(修改自 Sze and Fan, 2008).....	49
圖 3.9 乾式實降法施作照片.....	51
圖 3.10 砂柱試體示意圖.....	51

圖 3.11 砂柱試體之劈裂現象.....	51
圖 3.12 滲透灌注試驗主要設備及操作照片.....	53
圖 4.1 砂柱 A 至 F 滲透灌注時間與高度關係圖.....	58
圖 4.2 砂柱 A 至 F 殘留率試驗結果.....	63



表目錄



表 2.1 灌漿工法之類型 (摘自 Henn, 1996)	4
表 2.2 灌漿材料的分類	4
表 2.3 一般飽和土壤滲透係數 (摘自 Coduto et al., 1998)	8
表 2.4 土壤滲透性分類 (摘自 Terzaghi and Peck., 1948)	8
表 2.5 各種灌漿材料之性質	9
表 2.6 不同配比與凝結時間關係表	12
表 2.7 超微粒水泥之基礎物理性質	12
表 2.8 不同輸入因子之預測結果(摘自 Huang et al., 2010)	22
表 2.9 RBFNN 之預測結果(摘自 Liao et al., 2011).....	23
表 3.1 土壤不同尺度範圍名稱之定義 (摘自 Wentworth ,1992).....	35
表 3.2 本研究使用之試驗砂種類.....	36
表 3.3 試驗砂比重、粒徑及 AASHTO 分類結果	39
表 3.4 本研究所使用 3 種基質之基本性質	41
表 4.1 滲透灌注試驗與殘留率計算結果.....	66
表 4.2 不同試驗變數間 Spearman 等級相關係數計算結果.....	67
表 4.3 單獨 D_{10} 參數與加入黏滯度參數逐級迴歸結果比較表	69


第一章 前言



地下水受含氯有機溶劑污染一直是被關注的重要環境污染議題。含氯有機溶劑常被廣泛應用於工業製程中，若工廠未能妥善處理製程產生之廢棄物或是將廢水任意棄置排放，將導致土壤及地下水受到含氯有機物污染(Kao et al., 2003)。針對地下水含氯有機物污染問題而發展的現地生物整治法(in-situ bioremediation)，係利用基質及營養鹽添加的方式，促進現地微生物生長、加強生物降解反應並達到分解污染物的效果，進而達成整治的目的(Zhang and Yang 2007; Jian and Kao 2009; Huang and Kao 2012)。

一般現地生物整治方法多以重力流方式直接將基質或營養鹽注入整治井中，使其自然沈降擴散至欲整治之地下含水層(Borden 2007; Hayashi et al., 2006)，或是使注入基質在飽和土壤含水層中形成生物攔柵(bio-barrier)(Kao et al., 2003; Kim and Kim, 2004)，讓通過的污染地下水可以與生物攔柵中的微生物群反應而達到整治的效果。然而，以重力流方式注入基質較難確認其能否有效均勻的散佈於欲整治的範圍內，及評估其是否可以達到預期整治目標(Lin et al., 2012)；而以生物攔柵的方式則易於土壤孔隙中形成生物膜，降低整治的成效。如何有效將基質注入至欲整治之地下含水層則是現地生物整治法的成敗關鍵(Nyer and Gregory, 2004)。因此本研究擬嘗試應用大地工程中常用之低壓滲透灌漿技術於現地基質之灌注，並先於實驗室進行砂柱試驗以評估其可行性。

低壓滲透灌漿技術已被廣泛使用在許多大地工程施工中，例如橋梁結構的修復(Khayat et al., 1997; Perret et al., 2002)，缺陷土壩的補強(Chun et al., 2006)，或是土壤性質的改善等(Huang et al., 2007)。工程上所使用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較高，因此可先由室內灌漿試驗之方式，觀察其灌注成果，作為現地試驗之參考。本研究設計實驗室管柱試驗，模擬滲透灌漿技術在不同土壤質地地下灌注不同之基質，並由試驗結果評估其可行性。



本研究參考 Sze and Fan (2008)所提出之室內滲透灌漿試驗設備與流程，經修改設計後建置一套滲透灌注試驗設備。研究材料方面，選用市面上常用之 3 種不同特性之基質，包含乳化油基質(Emulsified Oil Substrate, EOS®)、釋氫物質 HRC® 系列產品(Regenesis Inc. USA)與 EcoClean (ECOCYCLE Inc. Japan)。試驗砂柱則使用渥太華標準砂 250 型(中砂)、403 型(細砂)及 A101 型(細粒料、坩土)，以不同之混合比例製作 8 種不同的砂柱試體，用以模擬不同之地層條件。在固定的壓力下將 3 種基質分別灌注於不同砂柱試體中，記錄其灌注高度與灌注時間，在注入完預定灌注的基質體積後，接續以定水頭模擬地下水流流經試驗砂柱，在不同的時間於試驗砂柱頂部出口收集出流液，同時量測出流液之 pH 值並記錄時間。

在完成所有的砂柱試驗後，本研究以 Spearman 等級相關係數計算及參數迴歸方法，分析 36 組滲透灌注試驗結果，建立試驗砂有效粒徑 D_{10} 與基質黏滯度 μ 對灌注高度、灌注時間及流失率之關係式，期能做為後續應用滲透灌漿技術於現地生物整治基質注入之參考依據。



第二章 文獻回顧

本研究主要目的為將大地工程常用之滲透灌漿技術，評估其應用於受含氯有機物污染地下水以現地加強式生物整治法進行整治時，採用該工法進行基質灌注之可行性，並建立灌注參數間之關係式。本研究參考多篇文獻，彙整前人研究之資料，依內容分為滲透灌漿工法、滲透灌漿可灌性評估方法、現地生物整治技術、砂柱試體製作與準備及基質管柱滲透試驗。

2.1 滲透灌漿工法

在不同提升砂質土壤抗液化能力之工法中，滲透灌漿工法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，藉由灌漿的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 所示；其中在土層灌漿部分依漿液性質及灌入土壤方式、理論的不同，大致可區分為滲透灌漿 (Permeation Grouting)、劈裂 (脈狀) 灌漿 (Fracturing Gouting)、擠壓灌漿 (Compaction Grouting) 及噴射灌漿 (Jet Grouting) 等四種，如圖 2.1 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。

滲透灌漿係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 2.2 所示。



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 (Cellular Grouting)
	接觸灌漿 (Contact Grouting)
	埋置灌漿 (Embedment Grouting)
	預壓灌漿 (Prestressing Grouting)

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	
		水玻璃+酸性反應劑	
	非鹼性系	懸濁型	矽膠溶液+水泥
		溶液型	水玻璃+鹼性反應劑(如：鋁酸鈉 NaAlO_2)
			水玻璃+金屬鹽反應劑(如：氯化鈣 CaCl_2)
			水玻璃+酸性反應劑

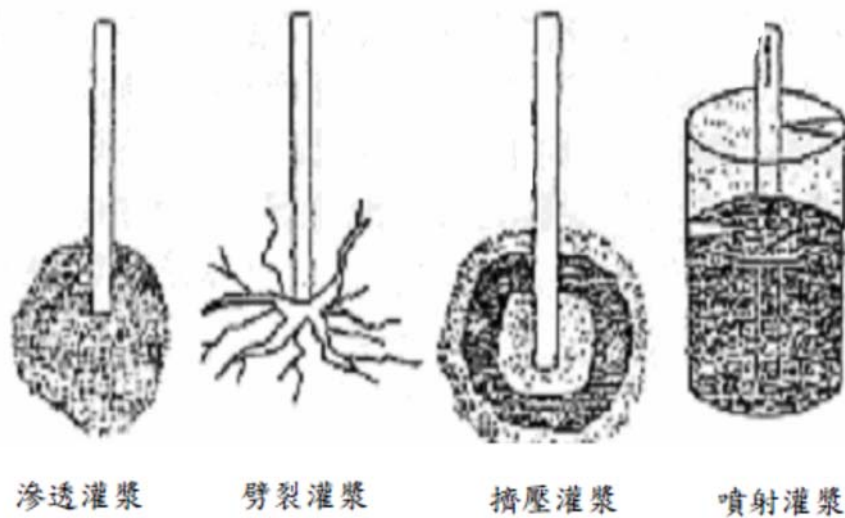


圖 2.1 土層灌漿型式示意圖(摘自 Ni and Lin, 2006)

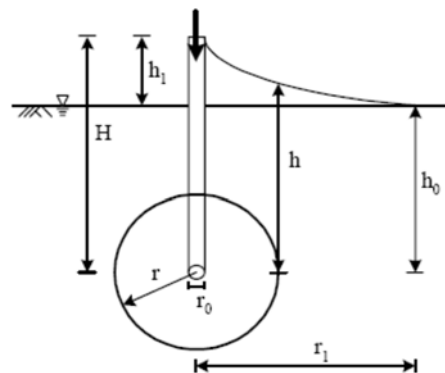


圖 2.2 底端灌漿球形理論示意圖(摘自 地基處理手冊，1988)

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 2.3 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 2.4 及圖 2.5 所示。



Huang et al. (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。結果顯示以超微粒水泥漿體進行地質改良對於工址抗液化能力之提升有相當之幫助。

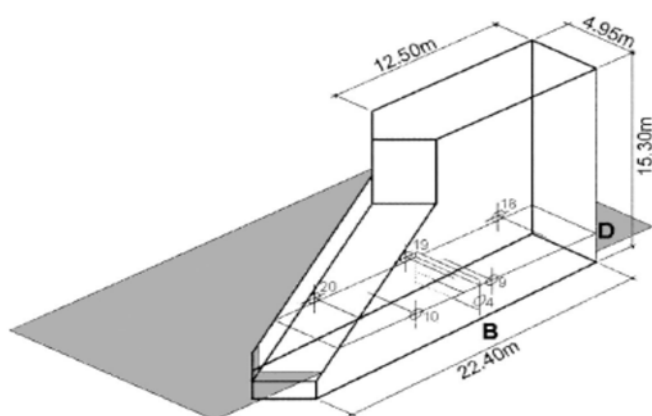


圖 2.3 聲波分析截面位置圖(摘自 Perret et al., 2002)

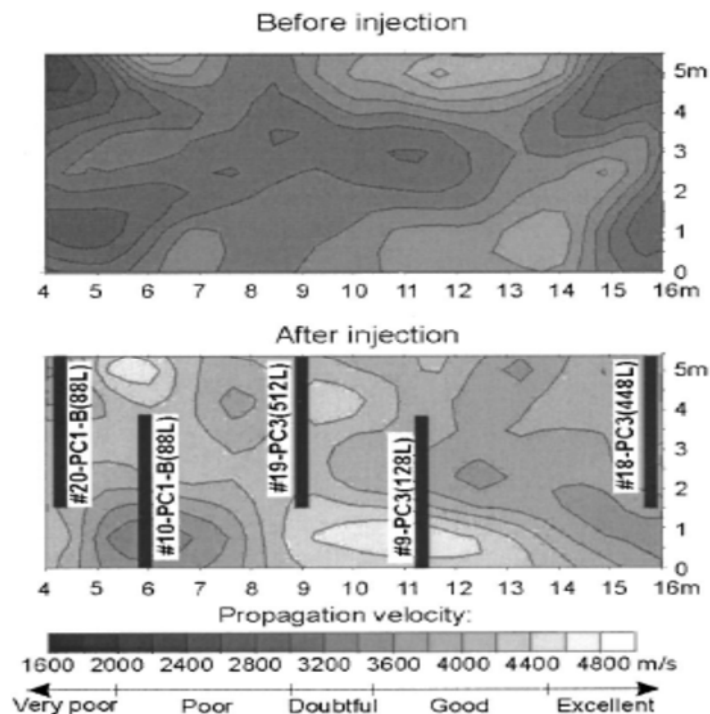


圖 2.4 斷面 D(水平)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002)

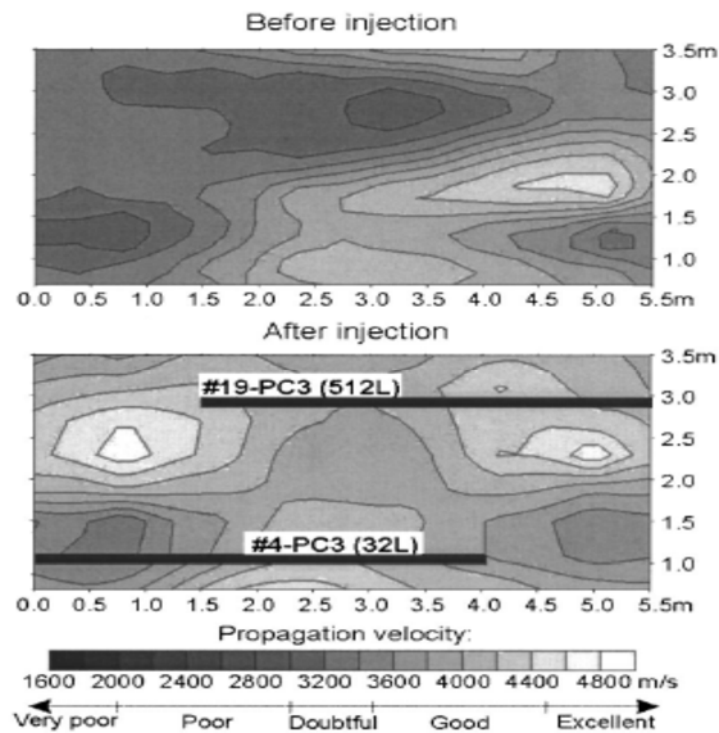


圖 2.5 斷面 B(垂直)聲波分析結果(摘自 Perret et al., 2002)

2.1.1 灌漿材料的選擇

因現地地層種類的複雜，並非每種灌漿材料均能有效的滲透灌入土體中，也並非每種灌漿材料均可以達到預定的改良目標；此外，滲透灌漿時也為了避免劈裂灌漿的情況發生，除了灌漿壓力的掌控外，灌漿材料的選擇也是非常重要的課題。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，由前人文獻中可知，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係數降至 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2.6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

表 2.3 一般飽和土壤滲透係數

土壤種類	滲透係數, K (cm/sec)
乾淨礫石 (Clean gravel)	1~100
砂-礫石混合 (Sand- gravel mixtures)	10^{-2} ~10
粗顆粒砂 (Clean coarse sand)	10^{-2} ~1
細砂 (Fine sand)	10^{-3} ~ 10^{-1}
粉土質砂 (Silty sand)	10^{-3} ~ 10^{-2}
黏土質砂 (Clay sand)	10^{-4} ~ 10^{-1}
粉土 (Silt)	10^{-8} ~ 10^{-3}
黏土 (Clay)	10^{-10} ~ 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} ~ 10^{-3}	10^{-3} ~ 10^{-5}	10^{-5} ~ 10^{-7}	$< 10^{-7}$

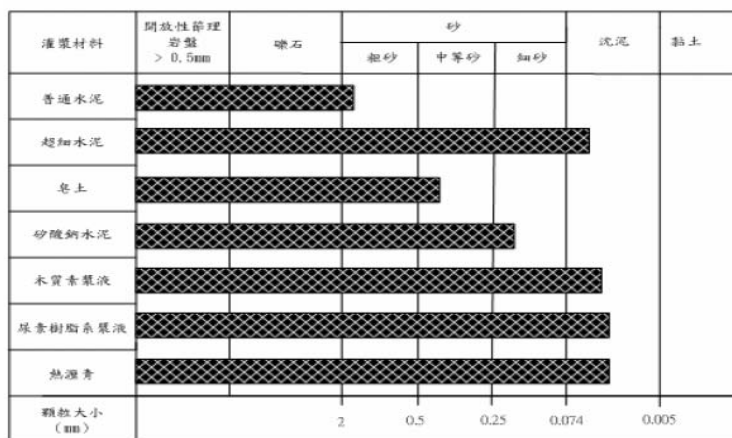


圖 2.6 各種不同灌漿材料之滲透範圍(摘自 Ni and Lin, 2006)

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，且化學灌漿材料除了水玻璃系外，其他的化學混合物質，可能有毒性的問題(Ozgurel and Vipulanandan, 2005)。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。參考(U.S. Army Corps of Engineers, 1995)工程手冊，將各種灌漿材料之性質，整理如表2.5所示。

表 2.5 各種灌漿材料之性質

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

2.1.2 室內滲透灌漿試驗

工程上所使用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較高，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。

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响，其灌注試驗與滲透試驗設備如圖2.7所示。

Ozgurel et al. (2005) 建立之室內灌注模擬設備，如圖2.8所示。利用此設備進行砂柱試體的灌注改良，其採用的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。

Ni and Lin (2006) 利用研究室建置的可灌度設備製作直徑3.78公分，高度36.8公分的試體，並以不同水灰比(0.8、1.2及3)與不同灌漿壓力(0.5(kg/cm²)、1(kg/cm²)與2(kg/cm²))共九種組合，以超細水泥進行一連串基本性質之試驗，包括

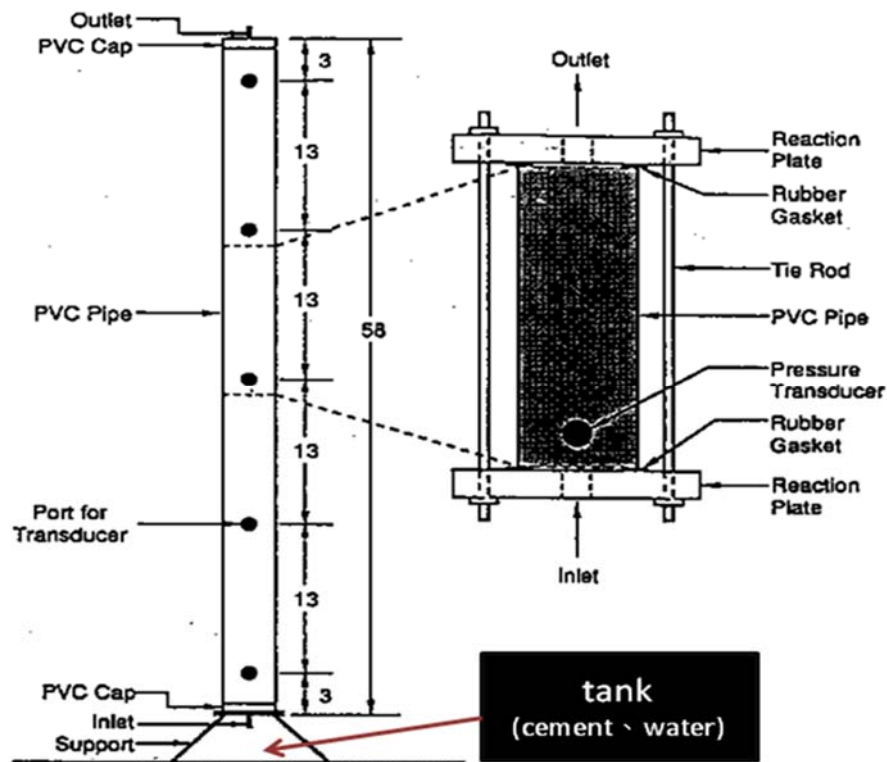


圖 2.7 砂柱灌漿試驗示意圖(摘自 Zebovitz et al., 1989)

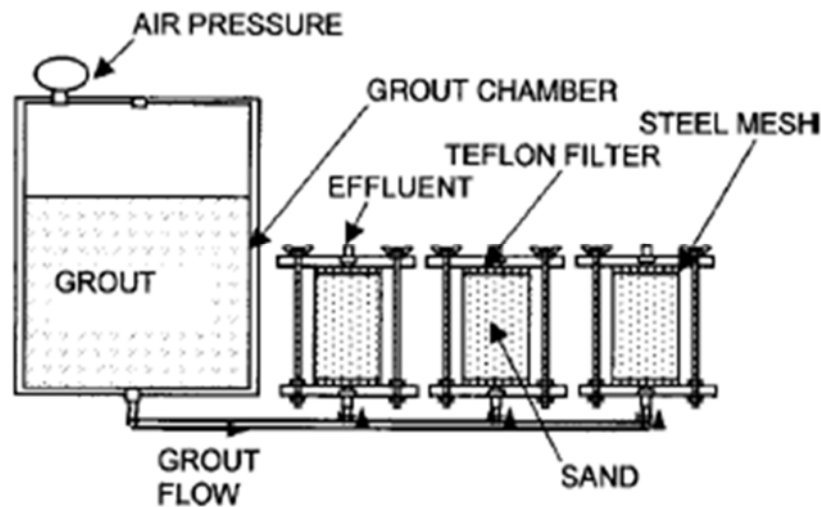


圖 2.8 砂柱化學灌漿試驗示意圖(摘自 Ozgurel et al., 2005)

比重試驗、凝結時間試驗以及泌水試驗。其實驗結果顯示，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，Ni and Lin (2006) 依據基礎實驗以及相關之前人研究，訂立一灌漿使用之建議實驗程序，用以作為漿體可灌度之實驗依據。其建議的試驗程序如以下之說明：

1. 藉由土壤的物理試驗求得土壤的基本性質以及土壤的粒徑分佈曲線，並求得適合的漿材粒徑大小：利用可灌度比初步決定何種灌漿材料在此地盤中可以滲透灌漿。
2. 漿材的物理與流變性質試驗：可以瞭解灌漿材料在不同配比下的單位重、凝結時間、析離量、黏滯度及降伏應力，作為灌漿施作時之參考。
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 2.9 所示。

表 2.6 不同配比與凝結時間關係表(摘自 Ni and Lin, 2006)

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
1.2	1	68	110
	2	76	115
	3	82	120
3	無法檢測初凝及終凝時間		

表 2.7 超微粒水泥之基礎物理性質(摘自 Ni and Lin, 2006)

密度 Bulk density(g/cm ³)	比表面積 Blaine(m ² /kg)	最大析離 Bleeding maximum(%)	顏色 Color
2.8~3.2	>800	1	灰色(grey)

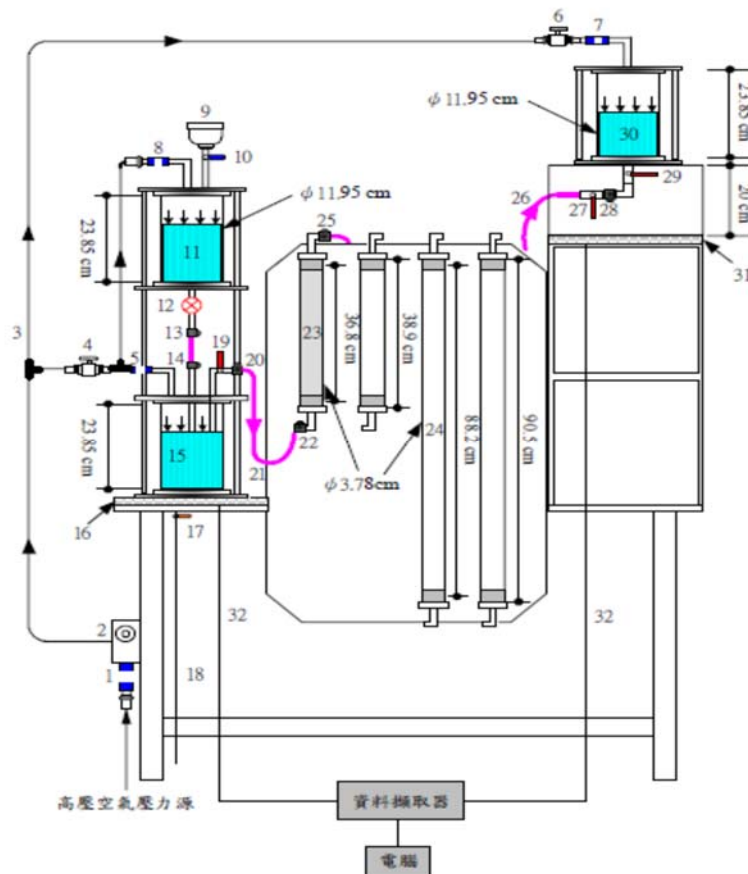


圖 2.9 可灌度試驗設備示意圖(摘自 Ni and Lin, 2006)

Schwarz and Chirumalla (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主要是來自於土壤與水泥粒子之間彼此的膠結程度，其效能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 2.10 所示。

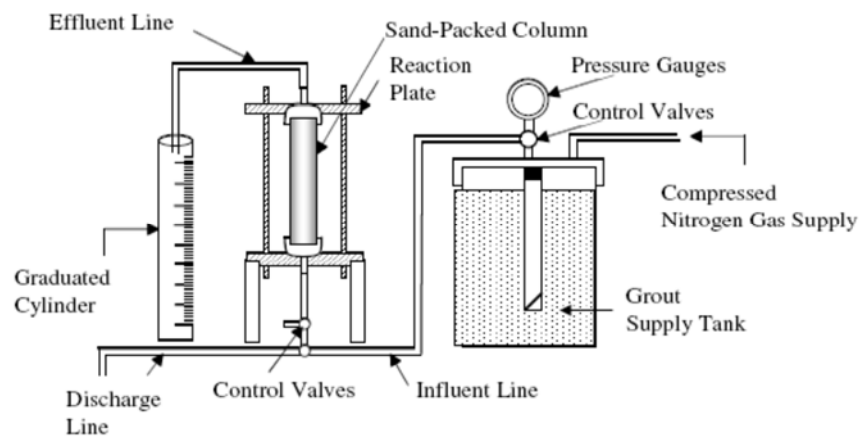


圖 2.10 柱灌漿試驗示意圖 (摘自 Schwarz and Chirumalla, 2007)

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 $10^{-4}(\text{m/s})$ 改善到 $10^{-7}(\text{m/s})$ 左右，其灌注設備如圖 2.11 所示。

Sze and Fan (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。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孔隙體積倍數。此外，超微粒水泥漿體於較高水灰比下，漿體保水性

相對較差，易離析成不穩定的漿體，故會有較多的水藉由持續壓力灌漿而排出原來的孔隙，因此所需的灌注量較多。試驗結果顯示，水灰比對水泥漿體的灌注量及流動行為有很大的影響，在灌注試驗過程中，水灰比較低的漿體所需灌注的時間較長。

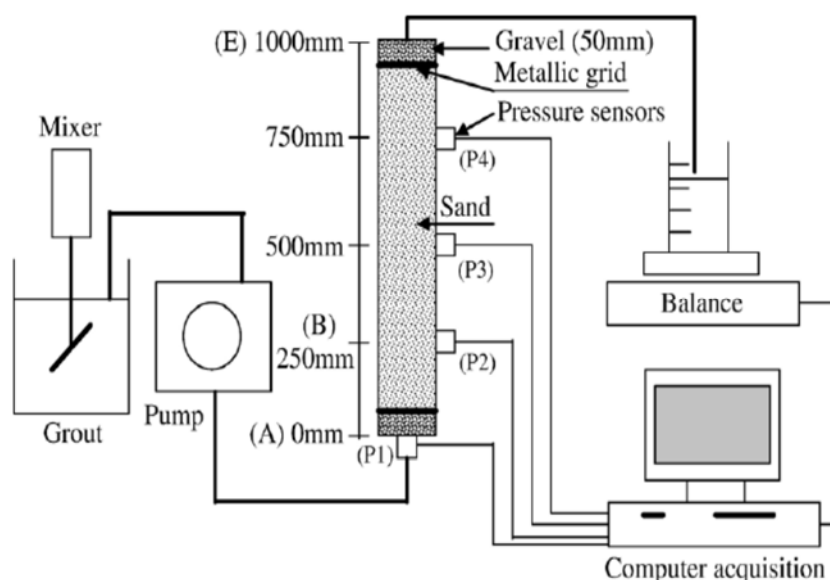


圖 2.11 氣體滲透量測設備示意圖(摘自 Saiyouri et al., 2008)

2.1.3 滲透灌漿方式

灌漿工法中的滲透灌漿是於劈裂壓力下以漿體去取代孔隙中的水並加以填充而非擾動土壤的一種灌漿技術，可用於降低土壤的滲透性、提高土壤強度、增加土壤抗液化能力及基礎承載力，並能在不破壞土體結構的情況下進行施灌。而現地灌漿於判斷是否可灌，主要是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。

目前常用於現地之低壓滲透灌漿工法為馬歇爾管(Tube-A-Manchette)灌漿工法及二重管低壓灌漿方式。其中馬歇爾管工法係為一種預埋灌漿導管並配合雙環塞(Double Packer)作業之低壓灌漿工法，可於地層中不同位置，藉由雙環塞的上下移動，不需要重鑽孔亦可重複進行灌漿。原則上每一等級採用逆級灌漿法(Upstage

Grouting Method) ，自灌孔之最下級以雙環塞(Double Packer)隔開後進行灌漿；灌漿孔段內之孔口壓力於設計壓力下並達其設計注入量後，等待一段時間，再將雙環塞移至次級位置進行灌漿(如圖 2.12 所示)。

二重管低壓灌漿方面，於灌注位置以傳統鑽機或手提氣動式鑽機，採用 40.5mm 二重鑽桿進行鑽孔，首先以 2 徑混合方式將瞬結型漿液注入鑽桿周圍形成迫卡(PACKER)，是為一次灌漿，然後再使用相同的鑽桿切換成 1.5 徑混合的緩結漿液實施二次灌漿(如圖 2.13 所示)。此種灌漿方式，不僅服了一般灌漿工法中漿液易由鑽桿周圍逸出地面及向地盤疏鬆部分流逸的缺點，而且藉著緩結型漿液滲透到土粒子間加以固結而達到止水和強化的效果。

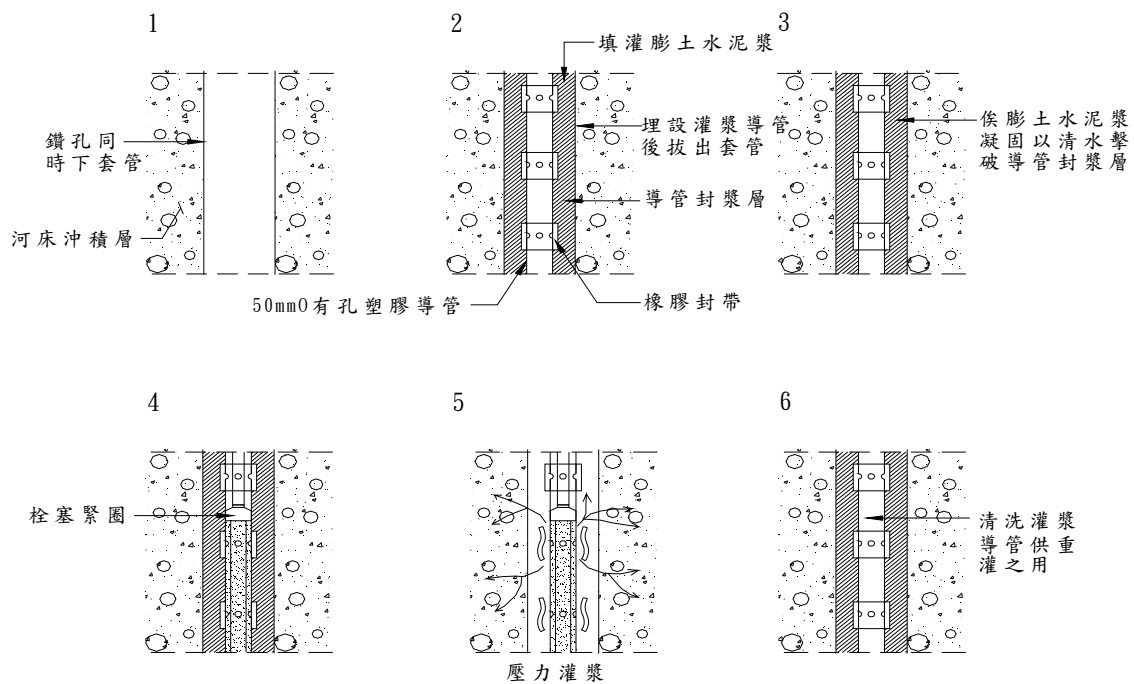


圖 2.12 馬歇爾管低壓灌漿示意圖

雙環塞灌漿工法最早是由法國 Soletanche 公司於 1932 年著手研發，1971 年由日本開始引進其工法，1978 年首度被使用新北市三峽鳶山堰基礎沉箱接縫灌漿，1982 年由榮工處和法國 Bachy Soletanch 公司合作以該工法進行東線鐵路拓寬工程自強隧道之落盤，採逐段前進灌漿方式改良地層和阻止滲水。近年來台灣之捷運地下工程，由於其規模和深度都較過去之工程要求更高，地層改良之效果要求也更為

嚴格，傳統灌漿工法無法克服之問題也就逐一浮現，而取而代之之工法即為雙環塞
灌注工法。

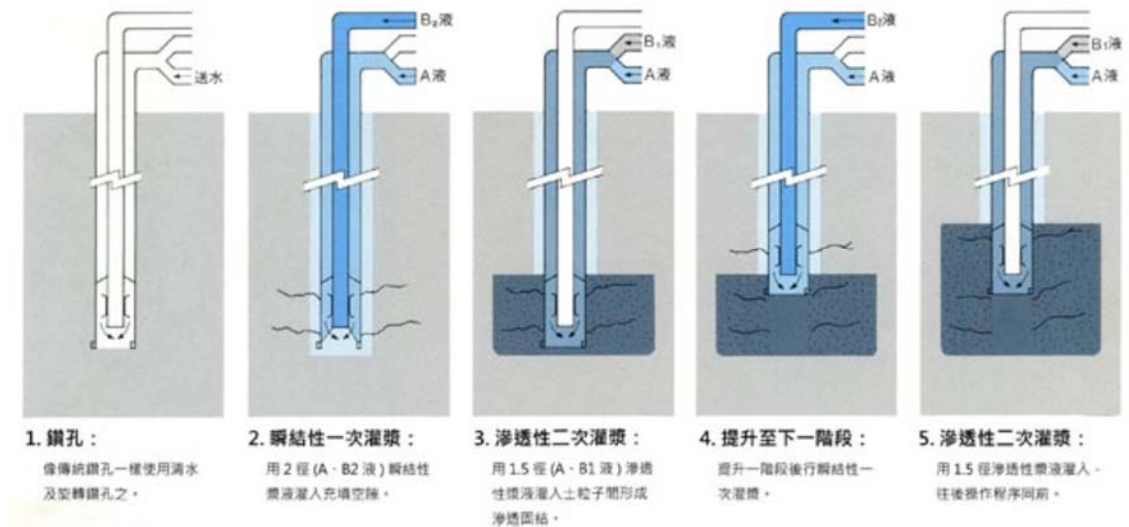
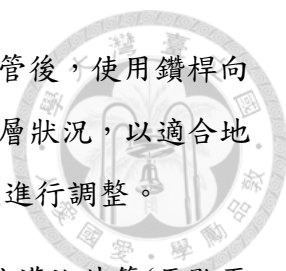


圖 2.13 二重管低壓灌漿圖

雙環塞灌漿工法之概念為先行填充灌漿，使得複雜地層中之透水性下降，再以緩慢低壓的方式將灌注漿材滲透灌注於地層之中，與傳統灌漿方法較不同的是，雙環塞灌注工法可以利用封套管將灌注漿材以水平之方向注入含水地層中，利用其低壓滲透灌漿之特性可以有效地將灌注漿材均勻地散布至欲灌注地層之中，可確保漿材不易滲透至其他地層而造成灌注成本上的增加。另外，有別於傳統灌漿方法需要較多之灌注井，雙環塞灌注工法之最大優點為只需單一鑽井即可進行，利用其可重複灌注之特性可省去大量之鑽井成本。雙環塞灌注工法於地工領域為較成熟之技術，然而其灌注材料方面有相當大之差異，工法上皆為考量如何將灌漿材料滲透於特定目標區域，因此可參考其技術及經驗，規劃設計成適用之施工程序如下所示：

1. 測量放樣：配合施工設計圖進行樁位放樣，並標示於地表，由現場工程師校對其正確性。
2. 管線探勘試挖：確認既有管線位置及深度，再以人工方式進行試挖，待確定無地下障礙物後始進行鑽孔，防止鑽孔機破壞或誤擊既有地下結構物。

- 
3. 鑽孔：將鑽堡移至定位，並校正其水平及垂直度，預埋套管後，使用鑽桿向下鑽掘至預定深度；為確保鑽孔之精度，鑽孔過程中視地層狀況，以適合地質條件的鑽孔速度鑽孔，並隨時量測鑽孔角度是否偏移並進行調整。
 4. 埋設灌注外管：鑽孔至預定深度後，取出鑽桿，依順序銜接灌注外管(馬歇爾管)植入套管內，灌注外管於預定灌注深度區段每 0.5 公尺開 4 處出漿孔。
 5. 灌注封堵材：將封堵材-水泥皂土液(CB 液)灌入鑽孔用套管，以作為填封套管與灌注外管間材料，拔除套管，並視 CB 液陷降情形逐漸填補至溢滿孔口為止。
 6. 開裂封漿層：俟 24 小時皂土水泥漿凝固後，將灌漿內管(雙環塞管)插入外管內並膨脹上下環塞，以加壓水破壞預定灌注深度區段之封漿層，均勻開裂注入通路。
 7. 灌注整治藥劑：灌注整治藥劑前，各工區第一孔，先以壓力水注入，探測可能漏水及滲水區域，進而估定土層之滲透率、每分鐘水之試水量 $Q(L/min)$ ，以作為注入整治藥劑之參考；而後將水轉換為整治藥劑，依設計速率與劑量注入藥劑；灌注時出藥口所反應之壓力會顯示於壓力錶上，依現場實際施作狀況調整；灌注方式採逆級灌漿法 (Upstage Grouting Method)，自灌孔之最下級以雙環塞 (Double Packer) 隔開進行灌漿；俟灌妥孔段內之漿液孔口壓力至設計壓力或其規定後，等待一段時間，再將雙栓塞移至其次級進行灌漿，準此作業程序由下往上逐級施灌，以迄全孔深灌漿完成為止。
 8. 成效監測：定期監測場址之主要監測物濃度，藉以評估基質滲透性之成效。
 9. 重複灌注：可依據其成果進行重複灌注。



2.2 滲透灌漿可灌性評估方法

由於滲透灌漿是指土壤結構在不被破壞的條件下進行漿體的滲透，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基本條件。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。因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：

$$R = D_p / d \quad (2.1)$$

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 採用土層中最小孔隙， d 採用灌漿材料的最大顆粒，理論上就能確定其漿體的可灌性，但這樣做就要採用細度很高的灌漿材料，進而造成研磨技術和成本控制上的問題；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：



$$N_1=(d_{15})_{soil} / (D_{85})_{grout} \quad (2.2)$$

$$N_2=(d_{10})_{soil} / (D_{95})_{grout} \quad (2.3)$$

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：

$$N=(d_{10})_{soil} / (D_{90})_{grout} \quad (2.4)$$

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。

Huang et al. (2007)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，進行粉土質砂層的試驗灌漿，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(Akbulut and Saglamer, 2002)、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。

Akbulut and Saglamer (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，經由實驗結果建立一套新的可灌性經驗公式：

$$N = \frac{d_{10}}{D_{90}} + k_1 \frac{w/c}{FC} + k_2 \frac{P}{D_r} \quad (2.5)$$

其中若 N 大於28時則為可灌，反之則為不可灌；且預測公式中之細顆粒含量

(FC)、水灰比(W/C)與灌漿壓力(P)尚須在以下之限制當中(即 $0\% < FC < 6\%$ 、 $0.8 < W/C < 2$ 與 $50 < P < 200$ 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 2.14所示。

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：

$$b_{fic} = 0.15 \cdot d_{50} \quad (2.6)$$

$$N = b_{fic} / D_{95} \quad (2.7)$$

當 N 值小於 3 為不可灌，N 值大於 5 為可灌，並針對 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。其水灰比及 N 值對可灌性之影響如圖 2.15 所示。

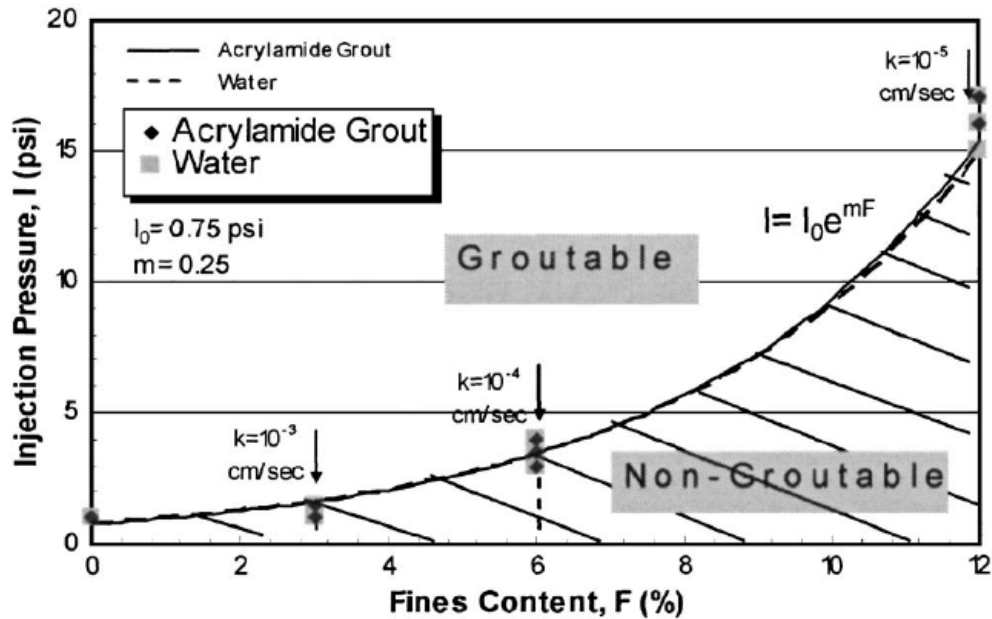


圖 2.14 細顆粒含量與灌漿壓力(摘自 Ozgurel and Vipulanandan, 2005)

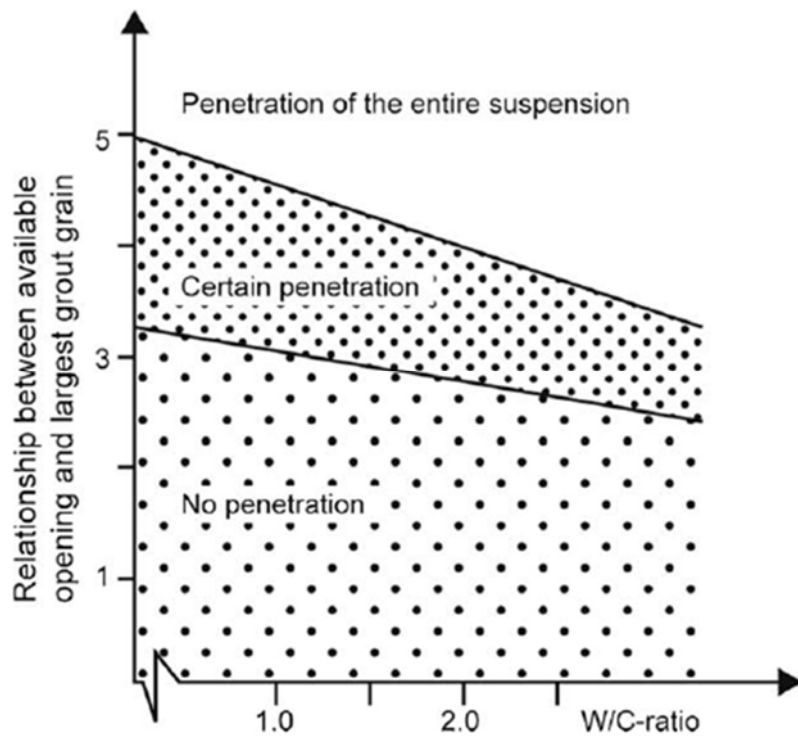


圖 2.15 水灰比-N 值對可灌性關係圖(摘自 Axelsson et al., 2009)

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粉土質砂層與高水灰比的超微粒水泥灌漿。

此外，Huang et al. (2013) 蒐集 240 筆現地資料，應用倒傳遞類神經網路配合雙曲型函數(Sigmoid function)進行可灌性預測分析，以土壤有效粒徑(d_{10})、土壤粒徑(d_{15})、孔隙比(Void ratio, e)、細粒料含量(FC)、土壤均勻係數(Uniformity coefficient, C_u)、土壤級配係數(Coefficient of gradation, C_z)與水灰比(W/C)，共七個因子作為輸入層神經元，建構一適合台灣地區高細粒料含量之粉土質砂層超微粒水泥滲透灌漿可灌性的網路預測模式。結果顯示，以六個因子(即Case8之土壤粒徑(d_{15})、孔隙比(e)、細粒料含量(FC)、土壤均勻係數 (C_u)、土壤級配係數(C_z)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95.6%，如表 2.8所示。此外，針對雙曲型函數進行門檻值的敏感度分析(Sensitivity of s value)，由其結果得知此網路預測模式是很穩健的(Stable and Robust)，如圖 2.16所示。

表 2.8 不同輸入因子之預測結果(摘自 Huang et al., 2013)

BPNN			training		testing	
Cases	N_a	Input factors	Correct No.	Accuracy%	Correct No.	Accuracy%
Case1	4	D_{10}	175/195	89.7%	44/45	97.8%
Case2	4	D_{15}	176/195	90.3%	44/45	97.8%
Case3	6	$D_{10} \cdot D_{15}$	182/195	93.3%	45/45	100%
Case4	8	$D_{10} \cdot D_{15} \cdot w/c$	187/195	95.9%	44/45	97.8%
Case5	7	$D_{10} \cdot D_{15} \cdot w/c \cdot e$	192/195	98.5%	43/45	95.6%
Case6	9	$D_{10} \cdot D_{15} \cdot w/c \cdot e \cdot FC$	193/195	99.0%	44/45	97.8%
Case7	8	$D_{10} \cdot w/c \cdot e \cdot FC \cdot C_x \cdot C_u$	193/195	99.0%	42/45	95.6%
Case8	5	$D_{15} \cdot w/c \cdot e \cdot FC \cdot C_x \cdot C_u$	195/195	100%	43/45	95.6%
Case9	4	$D_{10} \cdot D_{15} \cdot w/c \cdot e \cdot FC \cdot C_x \cdot C_u$	192/195	98.5%	44/45	97.8%

Tekin and Akbas (2011) 蒐集87筆實驗室的資料，應用類神經網路(Artificial Neural Network) 建構一適合粒狀土壤普通水泥滲透灌漿可灌性的網路預測模式。分析結果顯示，以五個影響可灌度的因子土壤粒徑(d_{15})、水泥粒徑(D_{85})、相對密度(Relative Density, D_r)、灌漿壓力(P)與水灰比(W/C)作為輸入層之神經元，可得到一個非常好的相關性，其準確率為95.4%，其結果如圖 2.17所示。

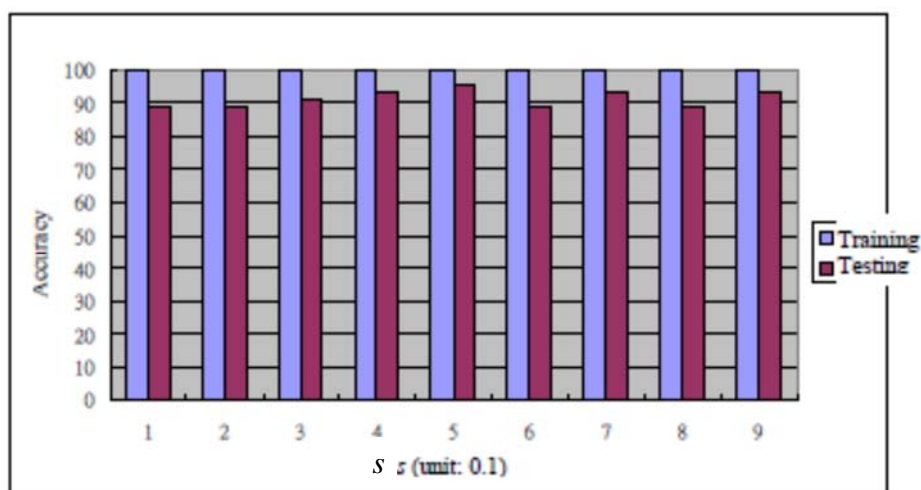


圖 2.16 雙曲型函數門檻值(s)的敏感度分析(摘自 Huang et al., 2013)

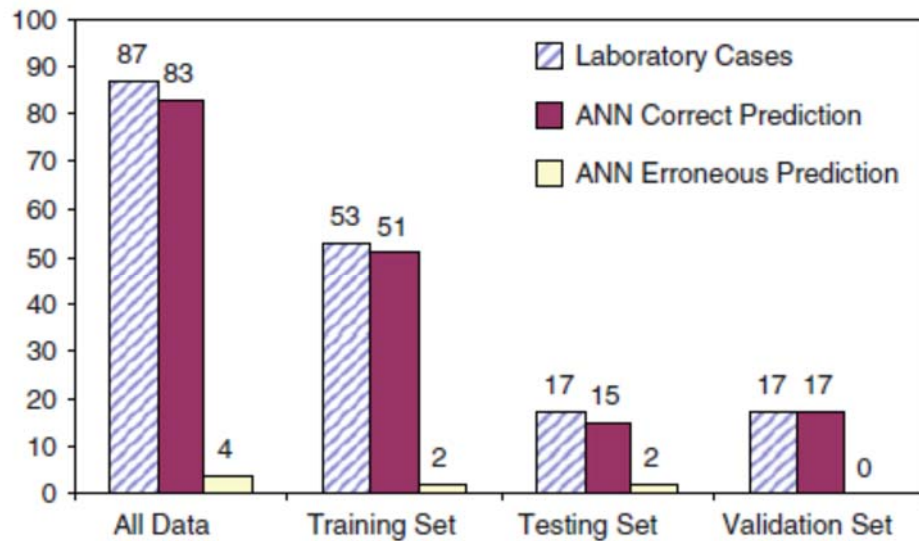


圖 2.17 ANN 模式的預測結果(摘自 Tekin and Akbas, 2011)

Liao et al. (2011) 以相同的240筆現地資料，應用幅狀基底函數類神經網路(RBFNN)高維度空間優越的分類特性(Pattern classification)，利用垂直最小平方法(Orthogonal Least Square, OLS)與K-means聚類法進行隱藏層幅狀基底函數中心點的選取，並交叉配合最小平方法(Least Square, LS)與加權最小平方法(Weighted Least Squares, WLS)進行連結權重向量的修正，提供一台灣地區高細粒料含量之粉土質砂層超微粒水泥滲透灌漿可灌性的網路預測模式。分析結果顯示，以土壤有效粒徑(d_{10})、土壤粒徑(d_{15})、孔隙比(e)、細粒料含量(FC)、土壤均勻係數 (C_u)、土壤級配係數(C_z)與水灰比(W/C)，共七個因子作為輸入層之神經元，於OLS與WLS之組合下可得到較佳的預測能力，其準確率為95.8%，如表 2.9所示。

表 2.9 RBFNN 之預測結果(摘自 Liao et al., 2011)

Model	Results from field	Results from RBFNN		Accuracy	Overall accuracy
		√ ^a	X ^a		
RBFNN	√	149	1	0.993	0.958
	X	9	81	0.900	

^a X denotes non-groutable, √ denotes groutable.

此外，文中亦針對雙曲型函數進行門檻值的敏感度分析(Sensitivity of s value)，其結果如圖 2.18所示，因RBFNN於前階段是屬於非監督式的學習(Unsupervised



learning)，所以此預測模式在訓練階段即已決定幅狀基底函數的中心點；相對於訓練階段而言，門檻值於測試階段有較大的影響，但即使門檻值(s)為0.9時，此預測模式仍然有85%的準確率。

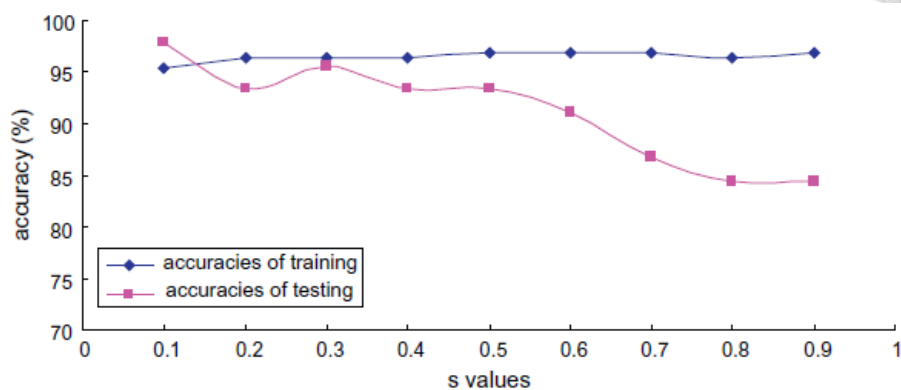


圖 2.18 雙曲型函數門檻值(s)的敏感度分析(摘自 Liao et al., 2011)

2.3 現地生物整治技術

現地生物整治 (in-situ bioremediation) 乃自然界反應過程，藉由碳源(電子接受者)及微生物有機降解，去除或降低污染物的毒性，或轉成無毒性的型態，以達到整治之效果，所以微生物的特性是關鍵要素。微生物包括單細胞與多細胞生物，常見的菌種有細菌、真菌、光合成微生物和微小蟲類等。根據能量來源，細菌可分為光合成菌(phototrophs)、異營菌(heterotrophs)及化學自營菌(chemoautotrophic bacteria)等。有些細菌可同時以有機及無機物為其營養鹽，處理外來人工污染物(如鹵化物)；另外，在生物整治中，異營菌為主要降解有機污染物的菌種，光合成菌常應用於處理土壤中重金屬污染物或毒性污染物之生物轉化機制。因此，整治上多利用異營菌降解有機污染物，處理地下水污染問題。以下針對生物整治技術之原理與反應機制，以及常用之基質進行介紹。

2.3.1 生物整治技術原理與反應機制

生物整治法(bioremediation)是一種以自然程序來分解或去除環境中有害化學物質的方法。生活在土壤及地下水中的微生物會吃某些特定的有害化學物質，當微生物消化完這些化學物質後，便將它們轉化為水、無害氣體與二氧化碳等，如圖

2.19所示。生物整治法在反應的過程中，以微生物將污染物降解或轉移成較低毒性或無毒性的型態，藉此降低污染物之濃度，達到污染整治之目的。

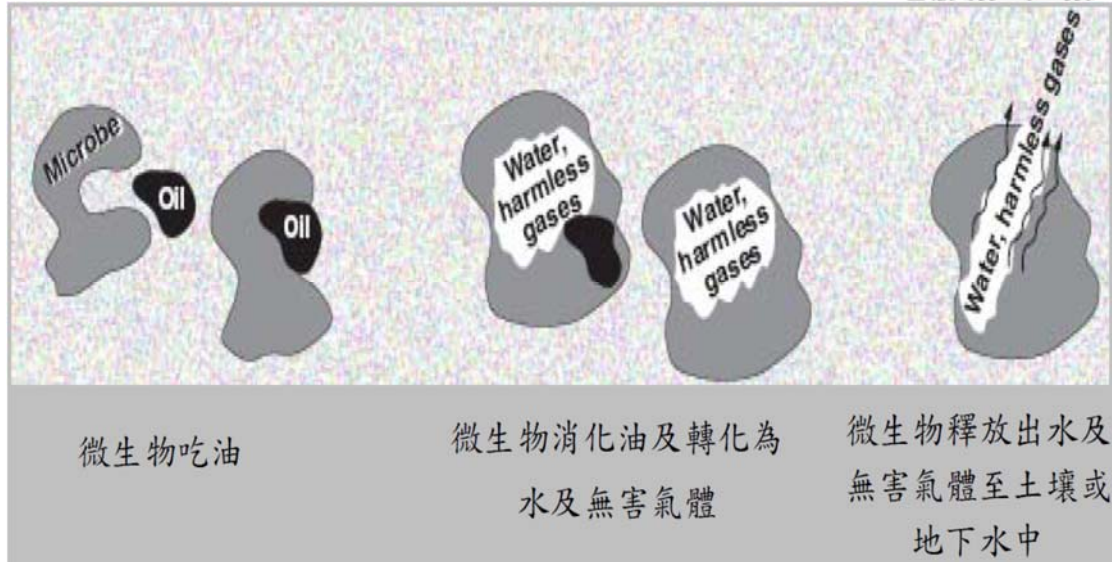


圖 2.19 微生物處理有機污染物之概念示意圖 (摘自環保署, 2008)

在其反應機制方面，利用添加外在碳源或氮源等營養源於受污染的土壤或地下水體，使存在於地下環境中之具毒性之污染物因自然界微生物代謝反應產生降解，轉為毒性較低的物質。以含氯有機化合物為例，其可以將四氯乙烯污染物脫氯降解為三氯乙烯，再依序降解為二氯乙烯、氯乙烯及乙烯，其還原脫氯降解過程如圖 2.20 所示；現場的施作方式示意圖如圖 2.21 所示。

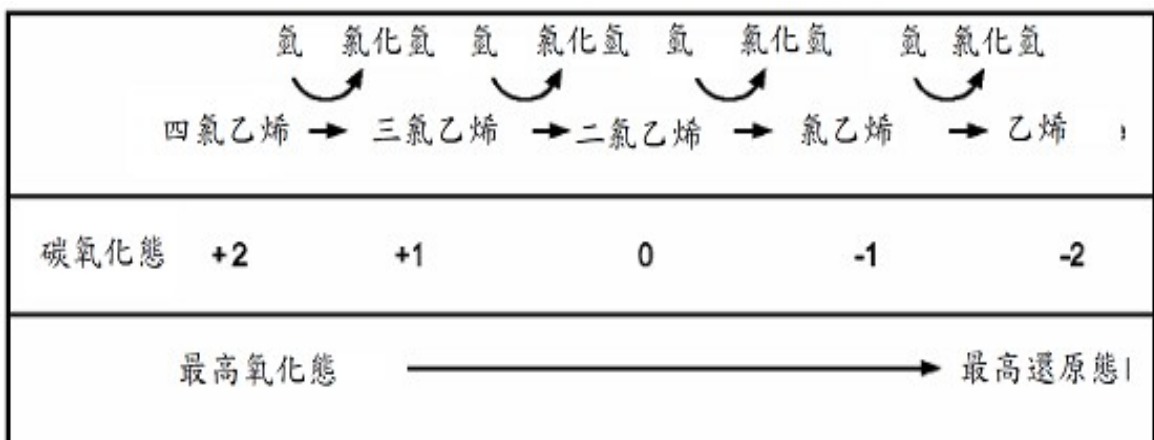


圖 2.20 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖 (摘自環保署, 2008)

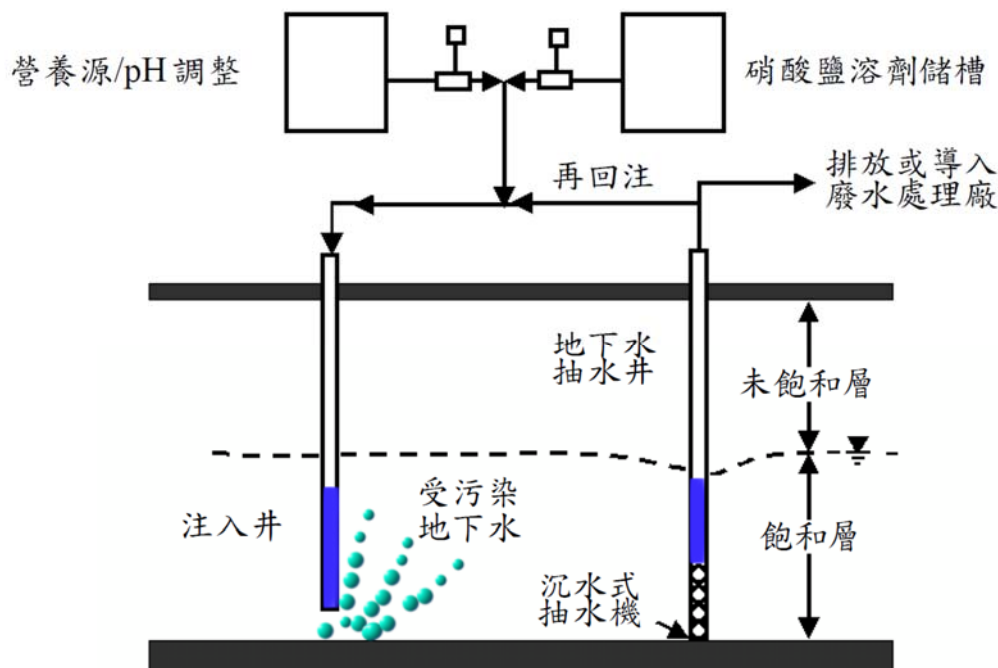


圖 2.21 生物整治法現地施作示意圖 (摘自環保署, 2008)

微生物雖然能夠清除有害化學物質，但必須有適當的溫度、營養物及充分的氧或無氧環境。這些條件使微生物能夠生長與繁殖，並進而消化更多的化學物質。當生長條件不對時，微生物生長得非常緩慢，甚至死亡，並可能產生更多的有害化學物質。

現場以生物整治法處理含氯有機物方式，一是透過天然的機制，將污染物還原脫氯為毒性較小或是無毒性的物質；另外一種是透過添加對微生物有利的物質，活化生物系統中的微生物，以達到強化自然衰減的目的。而若以其反應機制而言，則可區分為兩大類：好氧氧化作用(aerobic oxidation)：好氧氧化作用又分為好氧直接氧化作用與好氧共代謝(cometabolic)氧化作用；厭氧還原脫氯作用(anaerobic reductive dechlorination)。針對好氧氧化作用兩種反應機制分別說明如后。

1. 好氧直接氧化作用

好氧直接氧化作用係將污染物利用生物分解的方式降解，污染物同時作為電子供給者和主要生長基質。污染物氧化所產生的電子，傳遞至電子接受者(例如氧)，而污染物本身則被氧化成二氧化碳，同時則將氧還原為水(如圖



2.22所示)。在地表下有氧存在的好氧環境中，含氯芳香烴化合物(CAHs)中僅氯乙烯(VC)可以直接氧化的方式，被氧化成二氧化碳、水。

2. 好氧共代謝氧化作用

好氧共代謝氧化作用係利用微生物之酵素分解某一種污染物的代謝過程中，該酵素可同時附帶地將另一種污染物氧化。微生物在以此種方式將污染物氧化的過程中，並不會伴隨著能量的產生。在好氧狀況下，三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯、三氯乙烷、二氯乙烷與氯仿等，可以利用此種微生物共代謝機制降解。

可做為好氧共代謝作用之電子供應者，包括乙烯、甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、芳香烴化合物(如甲苯、酚)和氨。在好氧狀況下，單氧化酶(mono-oxygenase)，例如甲烷分解菌中的甲烷氧化酶(methanemonooxygenase, MMO)，可催化電子供給者提供電子，使得污染物轉化為不穩定環氧化物(epoxides)，該不穩定環氧化物會在水中快速地被降解為醇類和脂肪酸。

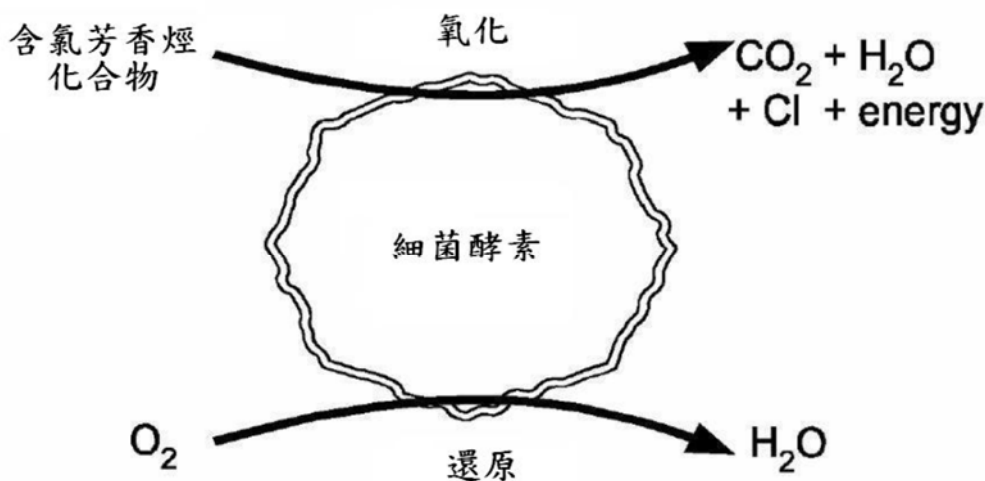


圖 2.22 好氧直接氧化作用反應機制示意圖 (摘自環保署, 2008)

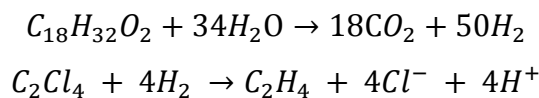
2.3.2 常見市售生物基質

1. 浮化油基質 EOS[®]

乳化油基質EOS[®]為美商Solutions-IES公司於2002年所開發處理土壤及地下水污染之產品，屬於低黏性液體。EOS[®]乳化油滴均勻粒徑大約為500~700奈米且單一均勻，容易乳化分散於水溶液中，因此較易與污染物質接觸，油滴表面具有負電荷可減少被土壤沉積物捕捉避免阻塞。

EOS[®]主成份包括有：食品級大豆油(49.9~59.8±2%)、乳酸鹽(4~8±0.2%)、維他命(部份產品外添有維他命B12)及微量營養素等。其中大豆油利用有機溶劑易溶於油之特性可將污染物溶出，而乳酸鹽為微生物可立即分解之快速釋外型碳源；大豆油為微生物可長期利用之慢速釋外型碳源；維他命與微量營養素(礦物質等)的添加則是為能提供微生物最佳成長環境所需之物質。


生物降解的過程中，乳化油基質EOS[®]中的大豆油(C₁₈H₃₂O₂)為大量電子供給者，大豆油本身會經由發酵反應生成氫氣及低分子有機物，生成的氫氣可作為高氧化數TCE的電子提供者，進而還原脫氯成低氧化態的乙烯，其反應式如下所示。



EOS[®]屬於長效性低黏性流體基質，單次注入效果約可持續3~5年，與非持效性基質相較，可大幅減少重複注入所衍生的材料費與操作成本；EOS[®]黏性低且易於注入與散佈的特性，可將油滴遠佈於含水層污染區域，一般而言，影響半徑約設計在3~5公尺，但在特定地質條件下，經妥善工程設計亦可能達數十公尺，與黏性流體基質相較，容易由注入井向外推開，影響半徑大小之設計較不受限。

EOS[®]使用天然無害的植物油及食品級介面活性劑、對含水層所造成的滲透率損失亦極低、持續效果長、每單位質量的電子供給量多，對自然環境友善且有高的經濟效益，為此產品之優點。EOS[®]在美國已是廣獲現場科學實證的技術與方法專利，且廣泛使用於世界諸多先進國家。

2. 釋氫物質 HRC



HRC為Regenesis公司之產品，同樣屬於食品級之基質，主要成分有甘油及乳酸鹽類(Glycerol, Tripoly lactate)，外觀則類似蜂蜜狀的黏性液體。其注入地下環境之後，藉由乳酸鹽類物質發酵作用產生氫氣，作為電子提供者而驅動還原脫氯反應，使多氯有機物(如三氯乙烯)依序還原脫氯為低氯有機物(如二氯乙烯或氯乙烯)，最終降解為無害之乙烯等物質。

HRC可以搭配直接灌入設備注入至受含氯有機物污染之含水層中，由於其具有黏性的特性，可以停留在土壤孔隙中較長的時間，使乳酸發酵所產生之氫氣可以持續的釋出，而達到長效的整治效果，最長可達24個月甚至更長的時間。

3. 水溶性機質 EcoClean

EcoClean產品為日本ECOCYCLE公司所研發之產品，為現地厭氧生物復育之整治藥劑。該產品主要成分包括維生素、氨基酸及礦物質等，在日本已經有超過150處場址整治成功案例，並逐漸擴展應用至美國及亞州其他國家。EcoClean適用於含氯有機物之厭氧生物整治，可直接溶於水中並經由灌注或淋洗方式輸送至受污染之地下水含水層中，能促進可分解含氯有機物之微生物快速繁殖、活化，進而去除污染物質。

由實場之試驗印證，EcoClean可以在3-12個月即看到明顯的整治成效，且適用於高濃度三氯乙烯之污染場址，且其中、低濃度的降解副產物(如順1,2-二氯乙烯或氯乙烯)亦均能持續降解至符合法規標準。由於EcoClean原料屬於食品級材料，除可以將有機污染物直接破壞分解為無害化合物，如二氧化碳和水，EcoClean最終亦會自然分解且無殘留之問題。

2.3.3 常用之基質注入工法

依污染物質、環境條件及營養鹽添加之內容，可採用下列不同的注入方法。

1. 直接注入系統

將微生物、營養鹽、電子供應者或是電子接受者直接注入受污染的地下



水體中，以增強生物分解作用。

2. 地下水循環系統

地下水循環系統可將受污染的地下水抽至地表，添加營養鹽或質基並經處理後，再回注到污染帶的上游端；也可在地表下形成一個內部循環，將所必須加入之物質，直接加到此循環系統中，再回注到污染帶的上游端。循環系統示意圖如圖 2.23 所示。

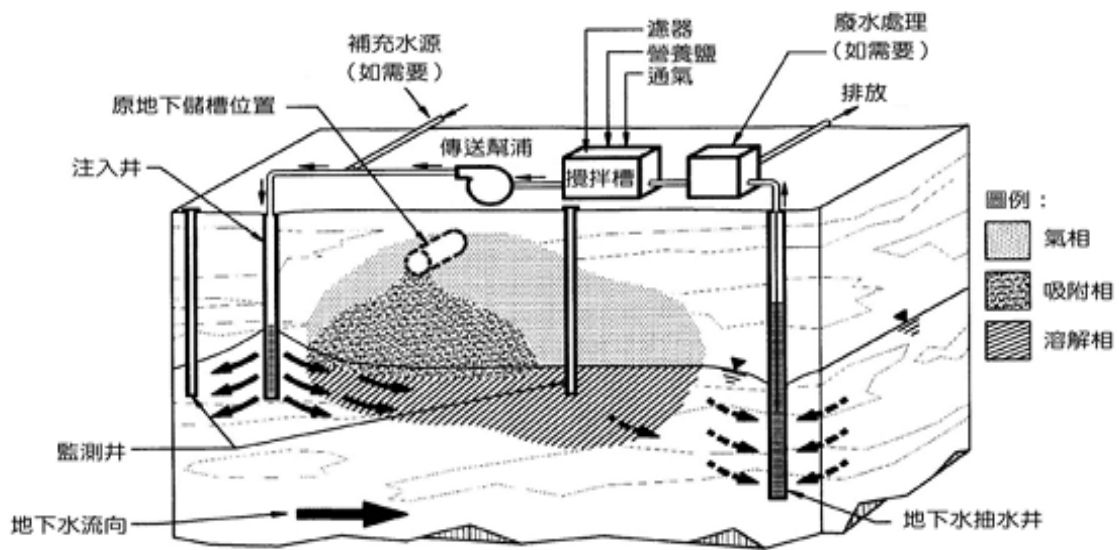


圖 2.23 注入井之現地地下水生物處理法示意圖 (摘自環保署, 2008)

3. 透水性反應牆處理系統

透水性反應牆是在地下水污染帶下游設置一人工的回填物（例如釋氮化合物、釋氧化合物或營養鹽等），而當地下水流經該反應區時，污染物與透水性反應牆產生離子交換反應去除污染物之毒性。

綜合前述文獻回顧可知，現地生物整治技術係利用大自然之力量，由地層中存在之微生物破壞分解或轉化污染物型態而達到整治目的，具有整治成本費用低，且低耗能等之優點，為受含氮有機物污染地下水常用之現地整治技術工法。惟單靠自然界作用，其自然衰減速率常不如預期，或無法在規劃的期程內達到整治目標，因此添加適當營養鹽或是基質，加速微生物之生長與降解作用，有效完成整治工作，



亦為目前整治應用之發展趨勢。

然而，一般基質注入皆以重力流之方式，直接將基質注入整治井中，使其自然沈降並擴散。此種方式是否能將基質有效傳輸至預定深度，且均勻的散佈在欲整治的範圍內，是生物整治技術是否成功的重要關鍵。因此，如何選用合適的注入技術及工法為現地生物整治技術重要之課題。

2.4 砂柱試體製作與準備

砂柱試體的製作因為灌注材料不同可分為超微粒水泥與化學灌漿兩種，依照預期相對密度的大小其製作方式又有所差異，以下將介紹有關室內滲透灌漿的砂柱試體製作相關文獻資料。

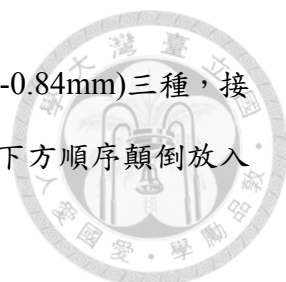
Ladd(1978)指出不同試體準備方式會造成土壤顆粒分離程度的不同、顆粒之間接觸方向的不同、試體孔隙比的不同。Mohamed (1981)根據疏鬆砂及緊密砂之條件，將Ottawa 20-30的標準砂採用不同的方式進行準備，並放入直徑為7cm、長度為17cm之試體模，以配置不同相對密度之砂柱試體。

Mohamed (1981)根據疏鬆砂及緊密砂之條件，將Ottawa 20-30的標準砂採用不同的方式進行準備，並放入直徑為7公分、長度為17公分之試體模，以配置不同相對密度之砂柱試體。

Ishihara(1993)指出一般砂柱試體的製作為以下四種方法最為常見:乾式實降法(Dry Deposition Method)、溼式實降法(Dry Tamping Method)、溼搗法(Wet Tamping Method)、水中沉降法(Sedimentation Method)。

Dano et al. (2004)提出使用Fontainebleau NE34砂與三種Seine River砂共四種砂之灌漿前製作砂柱試驗。文獻中指出將砂子放入漏斗管內，在緩緩倒入90cm高、直徑10cm之PVC管，漏斗管拉高的同時使用夯錘壓密砂柱，最後得到砂柱之相對密度皆大於90%。製作過程如圖 2.24所示。

Schwarz et al. (2007)提出在灌漿前之砂柱試體製作，試體模為直徑5.1cm、長91.4cm之PVC管。先在PVC管下方先放入尼龍網，再依序為7.7cm高的濾層分為別



1.3cm(粒徑4.74-2mm)、1.3cm(粒徑2.0-1.18mm)、5.1cm(粒徑1.18-0.84mm)三種，接者將乾密度1.81kg/cm²之砂子填入管內，最後在PVC管上方依照下方順序顛倒放入濾層與尼龍網，而完成製作。

Saiyouri et al. (2008)提出灌漿試驗前之砂柱試體準備，利用夯錘法能精確量測出緊密度。作者在高度100cm、直徑10cm之PVC管中，以不同的夯錘次數製作出五支不同相對密度之試體。而不同砂柱準備的程序如圖 2.25所示。結果得知A到E試體之相對密度分別為14.1%、50.8%、63.5%、82.5%與95%。

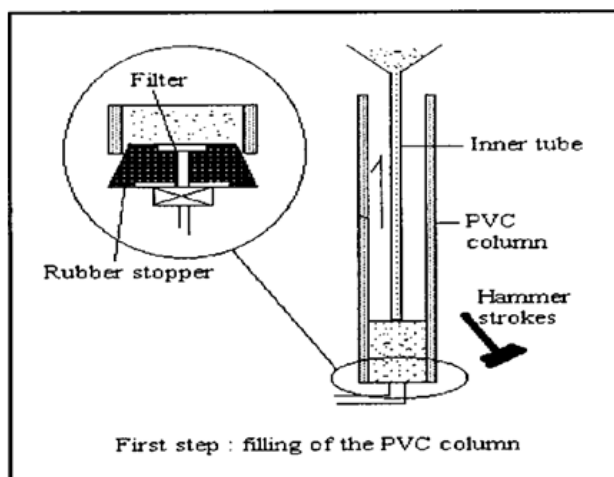


圖 2.24 砂柱製作過程 (摘自 Dano et al.2004)

Procedure	A	B	C	D	E
Top		3	3	18	75
1m	No blows hammer	3	4	19	
		3	4	19	
		3	5	20	
		3	5	20	
		3	6	21	
		3	6	21	
Bottom		3	7	22	
			7	22	

圖 2.25 不同砂柱準備程序 (摘自 Saiyouri et al.,2008)

2.5 基質管柱滲透試驗

為了進行室內以基質為灌注材料的管柱實驗，本研究針對前人所做基質管柱實驗收集相關文獻，並整理說明如后。

June et al. (2006)發表相關EOS管柱滲透試驗之論文，根據其實驗理論，油滴顆粒在注入含水層後會與土壤堆積物碰撞，表面帶有負電荷的特性會吸附於土壤表面的正電位置，而隨著正電荷位址被填滿的同時，油滴會因為電荷同性相斥減少儲流而繼續向前散佈至其他孔隙。倘若乳化液注入孔隙較小的土壤，由於可傳遞空間減小，油滴顆粒滯留現象會因此而增加，甚至無法達到預期的灌注效果，此種造成傳輸水頭上的損失會因為土壤孔隙、土壤粒徑而有所不同。

Chang et al. (2014) 針對利用砂土、粉土與黏土所製作之不同砂柱試體進行乳化油灌注試驗，製作管柱試體長100cm，並採用油性染料將乳化液之油相染色，觀察波前的前進速度來評估在不同砂試體中乳化油基質的傳遞難易度。並在管柱內以固定濃度(10~1000mg/L)之三氯乙烯流入，用以模擬受污染的土壤，而後注入乳化液於模擬受污染的管柱，每15分鐘採樣一次推球乳化油在三氯乙烯試體中濃度的變化，用以作為效益評估的依據

Lin and Lin(2010)等人也針對乳化液之穩定性以及乳化液於飽和含水層之傳輸能力，進行一維管柱傳輸試驗，如圖 2.26所示。使用長度30cm、直徑1英吋之玻璃管柱為實驗模型，出流液則由105°C 高溫烘乾秤重得殘留固體用以分析樣品濃度。

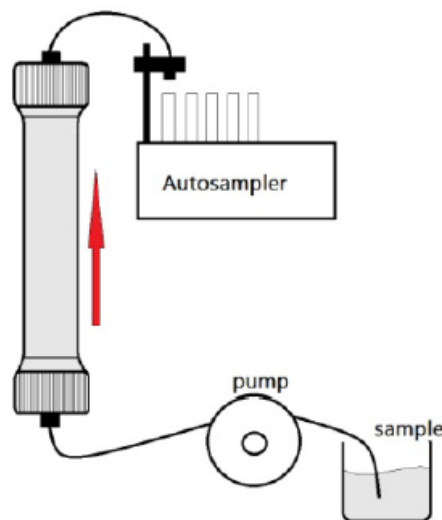


圖 2.26 一維管柱傳輸試驗 (摘自 Lin and Lin, 2010)

第三章 研究方法



綜合上述前人研究文獻顯示，滲透灌漿技術已廣泛應用於大地工程領域，除了藉由實驗室試驗取得現地灌漿所需要的參數外，亦由參數間關係探討可灌或不可灌。雖然已有研究以基質進行實驗室砂柱試驗，但至目前為止則尚未有文獻將滲透灌漿技術應用在基質的灌注和相關參數間關係的研究。

本研究嘗試將滲透灌漿技術應用於地下水污染現地整治，並首次以實驗室砂柱試驗評估應用此技術將基質灌注至地下含水層之可行性，主要的目標為探討土壤性質和基質性質對滲透灌漿之影響，並由試驗結果提出土壤和基質性質對滲透灌漿效果之關係式，而基質注入地下含水層之後的傳輸分布以及對污染物的整治效果則不在本研究探討的範圍內。

本研究以 3 種標準砂依不同比例配製 8 組不同粒徑分布的砂柱做為基質灌注的試體，並以地下水污染現地生物整治中較常使用的 3 種基質分別進行灌注試驗。以下就砂柱試體、基質特性、灌注試驗設計與操作流程進行說明。

3.1 試驗材料

3.1.1 試驗砂及其性質

本研究進行所使用之土料為渥太華標準砂 250 型、渥太華標準砂 403 型及渥太華標準砂 A101 型，其外觀分別為黃褐色、褐色及白色(如圖 3.1 所示)，其粒徑大小則依據 Wentworth (1992)之定義(如表 3.1 所示)。為模擬現地使用時所遇到的情況，除了選用渥太華標準砂 403 型其範圍介於中等砂與細砂之間外，亦選用渥太華標準砂 250 型，其粒徑介於粗砂與中等砂之間，及渥太華標準砂 A101 型則是用來模擬坩土之特性。

本研究將上述 3 種不同粒徑的渥太華標準砂，依不同比例配製成 8 組不同粒徑分布之試驗砂，各試驗砂所使用之標準砂種類及混合比例如表 3.2 所示。試驗砂混合方式為將依重量比例計算之標準砂以分層置入方式置於攪拌機中(30QT-MIXER，如圖 3.2)，並以 91RPM 之轉速攪拌 20 分鐘，使兩種砂體能充分均勻地混合。



A. 渥太華標準砂 250 型



B. 渥太華標準砂 403 型



C. 渥太華 A101 型

圖 3.1 本研究所使用之試驗砂

表 3.1 土壤不同尺度範圍名稱之定義

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	0.0625 μ m	0.0025-0.0049in	極細砂
8 to 4	3.90625 μ m	0.0015-0.0025in	粉砂
>8	<3.90625 μ m	<0.00015in	黏土



圖 3.2 試驗砂攪拌機(30QT MIXER)

表 3.2 本研究使用之試驗砂種類

種類	名稱	說明
A 土	渥太華標準砂 250 型	粒徑介於粗砂與中等砂之間($D_{50}=0.55\text{mm}$)
B 土	渥太華標準砂 250 型 渥太華標準砂 403 型	250 型與 403 型依重量比例 2 : 1 均勻混合
C 土	渥太華標準砂 250 型 渥太華標準砂 403 型	250 型與 403 型依重量比例 1 : 2 均勻混合
D 土	渥太華標準砂 403 型	粒徑介於 0.2 中等砂細砂之間($D_{50}=0.2\text{mm}$)
E 土	渥太華標準砂 A101 型 渥太華標準砂 403 型	A101 型與 403 型依重量比例 1 : 20 均勻混合
F 土	渥太華標準砂 A101 型 渥太華標準砂 403 型	A101 型與 403 型依重量比例 1 : 10 均勻混合
G 土	渥太華標準砂 A101 型 渥太華標準砂 403 型	A101 型與 403 型依重量比例 1 : 1 均勻混合
H 土	渥太華標準砂 A101 型	渥太華標準砂 A101 型($99\%<0.074\text{mm}$)

3.1.2 試驗砂土基本性質試驗

1. 試驗砂土之比重

比重(specific gravity)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，可求得試驗細砂與中砂之比重分別為 2.65 與 2.64，試驗儀器與步驟詳述如下：

(1)參考資料：美國材料試驗學會 (ASTM D854-02)

試驗儀器與設備：

比重瓶：須附有瓶塞，瓶塞須附有通氣小孔。

容量為 500ml 之比重瓶。

烘箱 (Oven)：可以維持溫度在 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) 之恆溫烘箱。

溫度計 (Thermometer)。

加熱設備：用以將比重瓶內土壤所含空氣驅除。

(2)試驗步驟：

A. 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。

B. 比重瓶至於加熱器將水煮沸 10 分鐘以上，並將其緩緩轉動以使土樣



中之空氣排除，煮沸以後冷卻至室溫。

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

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

- 式中
- W_s ：土樣乾重，g
 - W_a ：比重瓶+水重 ($T_x^{\circ}\text{C}$)，g
 - W_b ：比重瓶+土樣+水重 ($T_x^{\circ}\text{C}$)，g
 - T_x ：量測 W_b 時之溫度， $^{\circ}\text{C}$

2. 試驗砂土之篩分析

(1) 參考資料：美國材料試驗學會 (ASTM D421-85)

試驗土壤主要由渥太華標準砂 250 型、渥太華標準砂 403 型及渥太華標準砂 A101 型依不同比例混合調配。粒徑分析以 ASTM D421-85 之試驗方法及步驟可求得試驗砂顆粒大小之分佈。

(2) 試驗步驟：

- A. 將適量之烘乾土樣稱重(W_s)，至 0.1% 精確度。
- B. 將此土樣，置於容器中，加水淹沒並靜置二小時以上。
- C. 攪動浸於水中之土樣，並將此含有懸浮細料濁水倒入一套重疊篩上。此套篩是 16 號篩在上，200 號在下。
- D. 再將清水倒入容器內，重覆上述步驟，直到傾出之水清澈為止。
- E. 將停留於整套篩上之試樣倒回容器內，再將此帶有土樣、水分之容器置入烘箱，以 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) 之溫度烘乾至重量不變為止。然後取出，冷卻，並稱重。精確度達 0.1%。
- F. 將標準篩(蓋，4，10，20，40，100，200 號篩及底盤)(100 號篩網如圖 3.11 所示)刷乾淨，並依序從上至下組合。將試樣置入最上層之篩內，蓋上篩蓋，用手作水平旋轉搖篩，或以電動式搖篩機搖之，直到任何篩號通過之量，在一分鐘內不超過留存篩上重量之 1% 時停止。
- G. 搖篩之後，量稱停留在各篩上之試樣重。



3. 試驗砂土之鮑氏比重計分析法

(1)參考資料：美國材料試驗學會 (ASTM D422-63)

(2)試驗步驟：

- A. 取正好 50.00g 之烘乾搗碎且通過 200 號篩之土樣(如果篩分析試驗結果顯示通過 200 號篩之土壤超過 10% 的話)。將此土樣置入一容量為 250ml 之燒杯，然後將 125ml 之 4% 之六偏磷酸鈉溶液倒入此杯中。此 4% 溶液之準備，可將 40g 的乾燥六偏磷酸鈉置入 1000ml 之水中，充分攪拌。此分散劑溶液必須新鮮，不得放置一個月以上。
- B. 用一玻璃棒將燒杯中之土樣及溶液充分攪拌後，使其浸潤 12 個小時以上。將燒杯中之土樣及溶液倒入懸浮液攪拌杯(Dispersion Cup)，將清水加入攪動杯中直到 1/2 或 2/3 滿。然後，啟動攪散器約一分鐘。
- C. 將這杯中所有的混合物倒入沉澱用量筒，加清水或蒸餾水到 1000ml 之刻劃。並且注意不損失任何物質。
- D. 另外準備一與沉澱用量筒相同之量筒，當作控制用量筒(Control Jar)。將 125ml 之 4% 六偏磷酸鈉溶液倒入其中，加蒸餾水或清水至 1000ml 之刻劃並攪拌均勻。
- E. 用手掌或 No.12 之橡皮蓋封住量筒口。將量筒正倒緩緩搖動，直到量筒底端沒有土樣附著。然後，用雙手各執量筒之一端，左右水平迅速搖動一分鐘，搖幅約 30cm，搖動來回 100~120 次。迅速將量筒放置在桌上，以跑錶記錄時間，且用兩手拿著比重計之柄的上端小心的將比重計放入量筒內。
- F. 最初讀數之時間為 15s，然後是 30s，1 分，2 分記讀比重計讀數。
- G. 在記讀 2 分鐘時之讀數後，再重覆步驟(5)和(6)，直至連續兩次之所有讀數幾近相同為止。然後將量筒置放在恆溫水槽內，以跑錶記錄時間。記讀 2 分鐘時之比重計讀數後，將比重計取出，放入盛有蒸餾水之量筒內，待要記讀時間之前 25 到 30s 重行放入。通常記讀時間為 5，15，30，60，120，240，和 1440 分。記讀比重計讀數時，同時亦記讀恆溫水槽之水溫溫度。

本研究透過機械式篩分析、鮑氏比重計分析及比重試驗得到各試驗砂之比重、AASHTO 分類結果及粒徑分布曲線分別如表 3.3 與圖 3.3 所示。另外參考 Hazen



(1930)所建議對於非常均勻的砂，其滲透係數的經驗式為：

$$k = cD_{10}^2$$

其中：c 為一常數，由 1~1.5； D_{10} 為有效粒徑，單位 mm。取 c 為 1.25，計算各試驗砂之滲透係數列如表 3.3 所示。

表 3.3 試驗砂比重、粒徑及 AASHTO 分類結果

試驗砂	比重	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	AASHTO 分類	統一分 類系統	滲透係數 (cm/sec)
A	2.65	0.35	0.45	0.55	A-1-b(砂)	SP	1.5×10^{-1}
B	2.65	0.2	0.3	0.52	A-1-b(砂)	SW	5×10^{-2}
C	2.65	0.16	0.22	0.33	A-3(細砂)	SW	3.2×10^{-2}
D	2.65	0.13	0.18	0.22	A-3(細砂)	SP	2.1×10^{-2}
E	2.63	0.07	0.25	0.3	A-4(粉土)	SP-SM	6.1×10^{-3}
F	2.63	0.02	0.19	0.3	A-4(粉土)	SM	5×10^{-4}
G	2.62	0.004	0.013	0.2	A-4(粉土)	ML	2×10^{-5}
H	2.61	0.003	0.007	0.012	A-4(粉土)	ML	1.1×10^{-5}

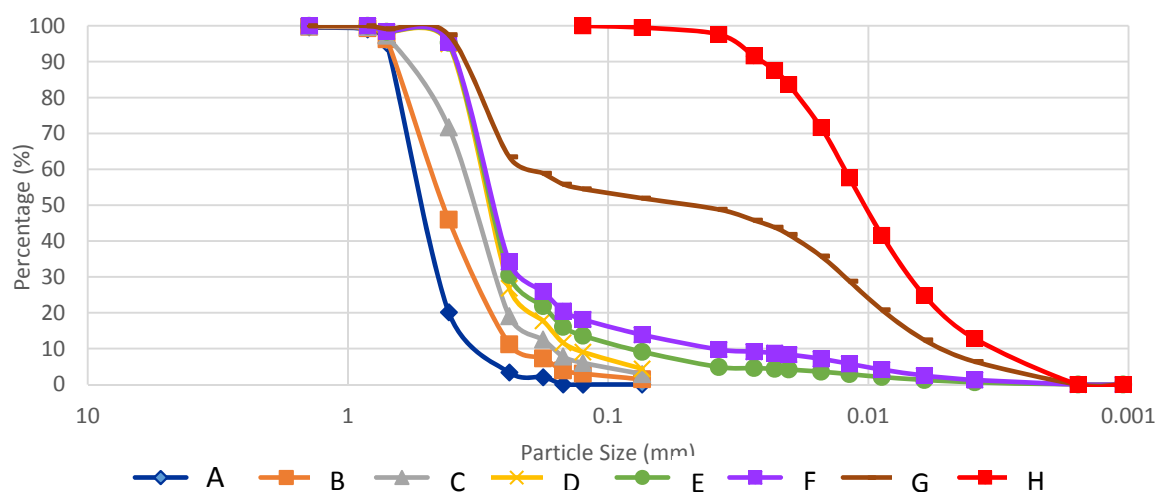


圖 3.3 試驗砂粒徑分佈曲線

3.1.3 基質材料及其性質

針對高氯數之含氯烯類污染物質欲進行厭氧脫氯反應時，必須有足夠之電子供應者，但一般在地下水環境中均缺乏足夠之生長基質與電子供應者。近年來針對厭氧菌呼吸反應之研究顯示，具有厭氧發酵能力之微生物必須將此電子供應者先行發酵成氫氣之後，藉由不同物種微生物間氫氣傳遞，將氫氣提供給厭氧菌呼吸菌群進行厭氧脫氯反應。

而目前在市場上已經有許多類似可以作為釋氫氣的基質商品，例如：乳化油基質(Emulsified Oil Substrate, EOS[®])、釋氫物質 HRC 系列產品(Regenesis Inc. USA)、PermeOx[®]系列產品(FMC Corporation, USA)，以及 EcoClean 系列產品(ECOCYCLE Inc. Japan)等，均為食品級之生物整治常用的基質。在國內亦有學者自行研發出相關的商品，包括以結合蔬菜油、台糖二級砂糖及生物可分解界面活性劑(Simple Green 和卵磷脂)之乳化型基質(陳逸明，高志明等，2010)，以及劉嘉庭與高志明等人(2011)所研發之包含大豆油(慢速分解基質)、乳酸鹽(快速分解基質)、生物可分解界面活性劑(Simple Green 及卵磷脂)以及維他命之乳化型基質，並實際應用於受 TCE 污染的場址(郭育嘉，高志明，2013)。本研究預計採用的三種不同基質之性質列表如表 3.4，並簡要敘述如后。

1. 乳化油基質(Emulsified Oil Substrate, EOS[®])

乳化油基質 (Emulsified Oil Substrate, EOS[®]) 產品的主成份包括有：食品級大豆油 (49.9~59.8±2%)、乳酸鹽 (4~8±0.2%)、維他命 (部份產品另外添加維他命 B12) 及微量營養素等。其中乳酸鹽為微生物可立即分解之快速釋出型碳源；大豆油為微生物可長期利用之慢速釋出型碳源；維他命與微量營養素 (礦物質等) 的添加則是為能提供微生物最佳成長環境所需之物質。

EOS 外觀為乳白色、黏稠狀液體(如圖 3.4 所示)，無毒、具有類似樹脂之味道，其比重介於 0.96~1.00 g/ml，20°C 時期黏滯性約為 370~380 centipoise；乳化油球之粒徑均一，液滴粒徑(1μm)小於大部分含水層孔隙(一般粉土及黏質砂質地土壤之孔隙約為 20~100μm)，且球體表面帶有負電荷，除了可減少被土壤沉積物過量捕捉以避免浪費之外，亦可使乳化物質保持安定懸浮狀態，避免凝絮結塊所導致之孔隙阻塞現象，故可有效散佈於整治區域深入滲透於土壤孔隙中。

2. 釋氫物質 HRC 系列產品(Regenesis Inc. USA)

HRC 為 Regenesis 公司之產品，同樣屬於食品級之基質，主要成分為甘油及乳酸鹽類(Glycerol, Tripolylactate)，其利用乳酸鹽類物質發酵作用產生氫氣，而氫氣之氫原子可使四氯乙烯、三氯乙烯進行脫氯取代反應，進而將毒性較強之四氯乙烯、三氯乙烯降解為毒性較低之氯乙烯。HRC 其外觀類似蜂蜜狀之黏性液體(如圖 3.4 所示)，無毒、具有油品味，其比重約為 1.3(g/mL)，其黏

滯性於 20°C 時約為 190~200centipoise。

3. EcoClean 系列產品(ECOCYCLE Inc. Japan)

EcoClean 產品為日本 ECOCYCLE 公司所研發之產品，為現地厭氧生物復育之整治藥劑，該產品主要成分包括維生素、氨基酸及礦物質等，其外觀為白色液體(如圖 3.4 所示)，無毒、無特殊氣味，其黏滯性於 20°C 約為 40~45 centipoise。

表 3.4 本研究所使用 3 種基質之基本性質

項目	顏色	比重	氣味	平均粒徑	酸鹼值	黏滯性 (20°C,centipoise)	稀釋比例	黏滯性 (25°C,centipoise)
EOS	乳白色	0.96~1.00 (g/ml)	樹脂、油味	約 1.0μm	6-7	370~380	1:10	30.6
							1:20	23.5
HRC	琥珀色	1.3(g/ml)	油味	NA	3	190~200	1:10	175
							1:20	78
EcoClean	白色	NA	無味	NA	弱酸性	40~45	1:20	13.3



A. EOS®



B. HRC®



C. EcoClean

圖 3.4 本研究所使用 3 種基質外觀

為使基質能均勻的分散至水中，且經過長時間的靜置後基質不會發生析離，即產生油水分離的現象。本研究針對基質進行析離試驗，以選擇合適之拌合時間。析離試驗係使用均質機(homogenizer)進行，如圖 3.4 所示。依照不同濃度之乳化油與水及加入色料，並分別以 3 分鐘、5 分鐘、10 分鐘進行拌合後，將其靜置於常溫下。實驗發現，由於三種基質乳化的特性極易分散於水中，拌合時間的長短不會對乳化現象產生太大的變化，且儲漿桶有低速攪拌功能，可以降低析離的現象發生。因此，最後選定 3 分鐘為本研究之拌合時間。

依據此 3 種基質供應商提供的資料以及現地整治的經驗，除 EcoClean 稀釋比例為 1:20 外，EOS 及 HRC 則分別以 1:10 與 1:20 比例進行稀釋。因基質的黏滯度為灌注時重要的影響因子，因此本研究亦將稀釋後的基質以黏度計進行黏滯度測試，此 3 種基質稀釋比例、基本性質及稀釋後黏滯度列如表 3.4 所示。

3.1.4 試驗砂柱使用之濾材

本研究在砂柱試體之頂端及底端皆置入濾材(濾材如圖 3.5 所示)，濾材之功用是防止試體中之砂流出試體，而濾材是依據前人文獻之規格選取，濾材的評估主要分為兩個條件：

1. 濾材的孔隙率要夠小，讓試驗砂不至於從孔隙中流失
2. 濾材須具有較高的水力傳導特性以預防試體產生過大的壓力

Terzaghi and Peck(1948)根據條件(1)提出濾材之 D_{15} 與試驗砂之 D_{85} 之比值需小於等於 4 到 5 之間，及下式所示：

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}} \leq 4 \sim 5$$

又為了滿足條件(2)，其建議濾材之 D_{15} 與試驗砂之 D_{15} 之比值需大於 4 到 5 之間，如下式所示：

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} \geq 4 \sim 5$$

基於以上二式即可計算出所需濾材的粒徑大小。



圖 3.5 一般砂柱試驗所使用之濾材



3.2 滲透灌注管柱試驗

3.2.1 灌注試驗設計

本研究主要目的為評估能否應用灌漿技術於地下水污染現地生物整治之基質灌注，並先以實驗室規模之灌注試驗，以瞭解灌注材料、試驗砂柱體與灌注結果之關係，以進一步評估其實際應用的可行性。

因此本研究選擇 3 種常用於地下水污染現地整治之基質當做灌注材料，依現場實務經驗，將此 3 種基質以 1:10 或 1:20 比例進行稀釋後當做灌注之漿體，並以黏滯度(μ)代表基質之特性。參考前人研究與相關的案例(Helal and Krizek, 1992; Clarke et al., 1992; Zebowitz et al., 1989; Markou and Atmatzidis, 2002, 2003; Akbulut and Saglamer, 2002; Ozgurel and Vipulanandan, 2005; Schwarz and Chirumalla, 2007)，一般灌漿試驗所使用之漿體量為 1 倍或 2 倍孔隙體積做為灌注之漿量，故本研究以平均值 1.5 倍孔隙體積來設計預定灌注的基質體積量。

當流體流動時內部所產生阻力的程度，稱為「黏滯性或黏度」，即質點間產生內摩擦力(黏滯力)，抵抗其相對運動，這種性質稱為流體的黏滯度。黏滯度大小隨流體種類而不同，且隨壓力、溫度而變化。而溫度是影響黏滯度的主要因素；當溫度升高時，分子動能增加，分子之間的內聚力降低，因此液體的黏滯度減小，反之，若溫度降低則黏性升高。由於黏滯度會受到溫度之影響，因子本研究儘量保持在室溫(約 25 度)下進行。

在試驗砂柱的部分，則以 3 種 Ottawa 標準砂依不同的比例配置成粒徑大小屬中砂、細砂及粉土之試驗砂進行砂柱之製作，來模擬一般在現地進行地下水污染整治時之土壤質地條件，並以土壤粒徑參數(D_{10} , D_{30} , D_{60} , Uniformity Coefficient C_u , Coefficient of Curvature C_c)代表試驗砂柱體之特性。


本研究所決定之砂柱試體之孔隙率約為 38%，孔隙率決定後即可求得試驗砂在 PVC 圓柱模組中所需要之重量，並於砂柱試體之底端及頂端分別置入濾網與約 5cm 之濾材以防止試驗砂之流失，完成砂柱試體之製作後接著以壓力灌水的方式進行試體之飽和，飽和完成後即進行土壤之劈裂壓力試驗，在飽和之情形下持續增

加水壓，以測得砂柱試體不明顯變化情形下所能承受之最大灌注壓力。

由於灌注試驗進行時，基質灌注壓力過大可能會造成試驗砂柱產生劈裂效應，故為避免試驗中劈裂現象發生且讓基質可均勻分布在試驗砂柱中，本研究於灌注試驗前先進行不同試驗砂柱的劈裂壓力試驗。根據試驗結果得出 A、B、C 與 D 砂柱之劈裂壓力約為 4.5 psi，E、F、G 及 H 砂柱約為 4.2 psi。因此本研究在 A、B、C 及 D 試驗砂柱採用劈裂壓力 55%，約 2.5 psi 之灌注壓力進行灌注；而 E、F、G 及 H 砂柱之灌注壓力則為劈裂壓力之 50%，約 2 psi 做為灌注壓力。

表 3.5 灌漿體積量相關研究案例

作者	材料	試體	壓力 (kg/cm ²)	灌注量
Helal and Krizek	MC-500	標準砂 (Ottawa 20-30 sand) 直徑 2 英吋、長 6 英吋、相對密度 (Relative density, Dr) 為 65%±5%	0.7	兩倍孔隙 體積
Clarke et al.	50%MC-300 50%MC-100 混合	標準砂 (Ottawa 20-30 sand) 直徑 2 英吋、長 6 英吋、相對密度 (Relative density, Dr) 為 65%±5%	0.7	兩倍孔隙 體積
Zebovitz et al.	MC-500	三種不同的砂 (Torpedo I、II、 Evansion Beach)，直徑 4 英吋，長 55 英吋	<7	兩倍孔隙 體積
Markou and Atmatzidis	MC-100 MC-300 MC-500	緊砂、鬆砂相對密度(Relative density, Dr) 為 97%、34%，直徑 50 mm，長 112mm	<200 (kPa)	兩倍孔隙 體積
Akbulut and Saglamer	Portland cemet	Dr = 0.3、0.8，直徑 10cm， 高度 20cm	50-200 (kPa)	兩倍孔隙 體積
Ozgurel and Vipulanandan	Acrylamide Grout	直徑 3.8cm，高度 10.2cm	20psi	一倍孔隙 體積
Schwarz and Chirumalla	MC-800	Russellville, AL，粒徑在 0.595~0.089mm，直徑 5.1cm，長 91.4 和 15.2cm	<69 (kPa)	兩倍孔隙 體積
Ssangyong 水泥公司	Micem 8000	粗砂、中砂、細砂及粉土之飽和 試體，直徑 30 公分、長度為 100 公分	2.0 3.0 4.0	一倍孔隙 體積



決定灌注壓力後接著進行基質液之製作，本研究參考 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輪攪拌機(High speed votex colloidal mixer)以助於滲透灌漿模擬試驗之進行，此外，本研究亦在漿料儲存桶裝置了慢速攪拌設備，以預防漿體在灌注期間可能產生之稀離現象(bleeding)。

在前述條件下，本研究規劃共 24 組灌注試驗，每組在固定的灌注壓力下重覆 1 次試驗，共計 48 組，並記錄試驗過程中的灌注時間與基質上升高度，以瞭解基質特性與試驗砂體粒徑對於灌注結果之關係。

完成滲透灌注部分的試驗後，利用三通金屬閥之設計從原基質灌注口導入水流，該水流之壓差約為 1.5psi 以模擬地下水流，水流從試體底部進入後會逐漸將試體中之基質攜帶出，故於砂柱試體頂部出口收集出流液，利用重量烘乾法(Jung et al., 2006; Lin and Lin, 2010)及酸鹼值之測量即可得出流液所含之基質量，再加上出流液之流量記錄，即可推算出基質流出量與留在試體中基質殘留量，藉以推估基質在試驗砂柱體中之殘留率。本研究之試驗流程圖 3.6 所示。

3.2.2 滲透灌漿模擬試驗設備

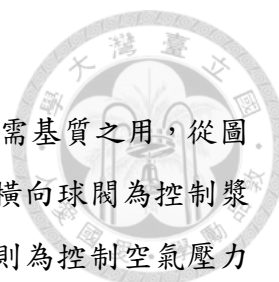
本研究參考 Sze and Fan(2008)所提出之室內滲透灌漿試驗流程與歐洲規範 NF P18-891，經修改設計後，建立一套滲透灌注之試驗設備。本研究之滲透灌漿模擬試驗設備主要分作高速渦輪攪拌機、儲漿桶、氣壓力調節灌注系統及砂柱模型等四個部分，各設備之說明分別如下：

1. 高速渦輪攪拌機(High speed votex colloidal mixer)

本研究在攪拌設備上參考 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輪攪拌機(High colloidal mixer)，如圖 3.7 所示，拌合轉速約為 1,780 rpm，設計上以循環式的攪拌路徑使基質得到充分的拌合。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。



圖 3.6 本研究規劃試驗流程圖



2. 儲漿桶

儲漿桶(如圖 3.7 所示)為灌注作業進行時，暫時存放所需基質之用，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葉，轉速約為一分鐘 30 轉，其目的在降低灌注試驗進行時基質所產生之稀離現象。

3. 氣壓力調節灌注系統(air compressor system)

此壓力系統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)，為提供試驗時所需之空氣壓力，如圖 3.7 所示。

4. 砂柱模型

本研究所選用的砂柱試體模型為高度 100 cm、直徑 10 cm 之透明 PVC 管，並計算研究中設計之相對密度(38%)於試體模內所需之砂土量，經量稱後分四等份，分別利用自製之長短漏斗以乾式賈降法方式，將試驗砂置入 PVC 管內後，在砂土上下放入各 5 cm 之鐵製濾網與濾材；試體放置完成後上下皆以 O 形橡膠環套入再將 PVC 之帽蓋上膠緊封，以確保試體於灌注階段為密封狀態，並於帽蓋上下加裝金屬閥，上端金屬閥與出流管連接，而下端金屬閥則設計一組三向通路，以便於試驗過程中基質不會逆流而進入注水系統中，如圖 3.7 所示。

本研究利用上述之滲透灌注設備如高速渦輪攪拌機、儲漿桶進行基質之製作與儲存之動作，而砂柱模型製作完畢後及利用三項管路與儲漿桶做管線之連結，連結完畢確認試體與各管線無漏水之問題後即可進行基質灌注之動作，滲透灌注試驗設計圖與各設備名稱如圖 3.8 所示。



A. 高速渦輪攪拌機



B. 儲漿桶



C. 空壓機



D. 空氣調節閥

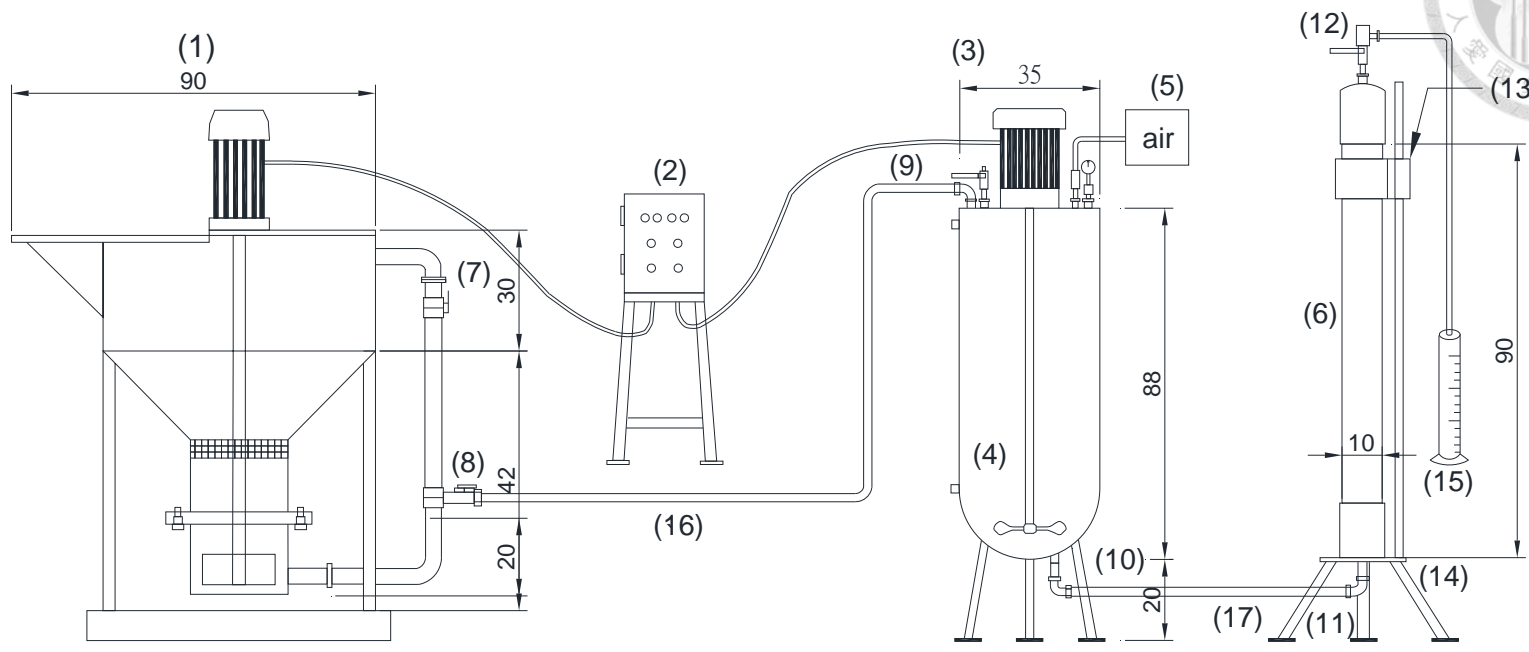


E. 砂柱試體帽蓋



F. 三向通路

圖 3.7 本研究主要試驗設備照片



Unit : cm

Equipment No.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)~(12)	(13)	(14)	(15)	(16)~(17)
Name	Highspeed vortex mixer	Power control system	Slurry tank	Slowspeed mixer	Air compressor	PVC mold	Ball valve	Adjustable pipe clip	A-frame	Measuring cylinder	Pipeline

圖 3.8 本研究滲透灌注試驗設計圖(修改自 Sze and Fan, 2008)



3.3 滲透灌漿模擬試驗步驟

本研究將基質滲透灌注試驗規劃為以下各個工作項目，分別為試驗前準備、試體製作、管線與試體飽和、劈裂壓力試驗、灌注基質製作、基質滲透階段與模擬地下水水流等，最後說明效益評估方式。

1. 試驗前準備

- (1) 使用扳手將止洩帶、螺絲、彎管、球閥、三通等五金材料，依設計連接於上下帽蓋。
- (2) 使用 PVC 膠片、O 型環將帽蓋與 PVC 透明管密封、連接。
- (3) 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. 試體製做

本研究將砂柱試體之孔隙率設定約為 38%，其相對密度約為 44%，計算試體模內所需之砂土量，針對需要混合的砂土，量秤好所需之重量後置入攪拌機中均勻攪拌，利用乾式實降法(Ishihara, 1993; Sze and Fan, 2008) (如圖 3.9 所示)分別量稱後分成四等份，以落距 30cm 緩慢將試驗砂倒入，前兩次為長漏斗，後兩次為短漏斗。分別利用自製之長短漏斗製作試體，於試體製作完成後並確認其試體長度為 90cm，試驗砂柱試驗示意圖如圖 3.10 所示。

3. 管線與試體飽和

利用三通管路設計，將管線與試體以 1.5psi 之水壓進行灌水飽和 2 小時。

4. 劈裂壓力試驗

砂柱試體完成飽和後持續增加水壓，直到灌水壓力大於試體所能承受之壓力時，即發生劈裂的現象(如圖 3.11 所示)。故為避免試驗中產生此種現象，本研究先進行劈裂壓力試驗。試驗結果得出 A 土、B 土、C 土與 D 土之劈裂壓力約為 4.5psi，E 土、F 土、G 及 H 土約為 4.2psi，研究即將此劈裂壓力記錄，做為往後灌注壓力之參考。

5. 灌注基質製做

- (1) 計算試體與基質所需的重量
- (2) 將量秤好之基質、水、染料(墨汁)慢慢倒入拌合 3~4 分鐘，如圖 3.12 圖

3.12 所示。

(3) 拌合完畢後，將基質送入儲料桶，並以低速攪拌機持續拌合。



圖 3.9 乾式實降法施作照片

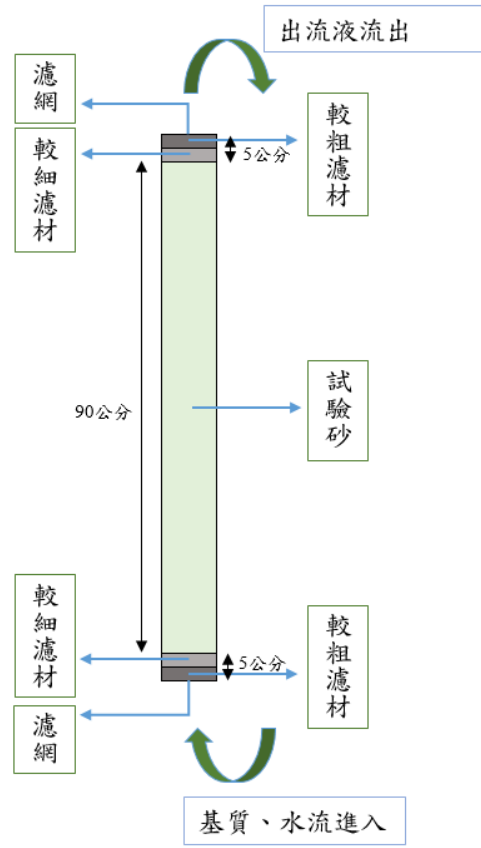


圖 3.10 砂柱試體示意圖



圖 3.11 砂柱試體之劈裂現象

依據所選定3種基質供應商提供的資料以及現地整治的經驗，除EcoClean稀釋比例為1:20外，EOS及HRC則分別以1:10與1:20比例進行稀釋。將所需基質之重量量秤好，並加入所對應稀釋比例之水重混合。

本研究將試驗分成二部分，第一部分為粒徑較大之A土、B土、C土及D土，第二部分為含有極細砂之E土、F土、G及H土，第一部分預計各基質之稀釋比例為：EOS以稀釋比例1:10進行滲透灌注、HRC以稀釋比例1:10進行滲透灌注、EcoClean以稀釋比例1:20進行滲透灌注。

第二部分之結果將參考第一部分之結果，倘若EOS、HRC與EcoClean分別以1:10、1:10及1:20之稀釋比例能在D土中有效滲透，則將維持不變之稀釋比例繼續進行滲透灌注於E土、F土、G及H土，反之，若EOS、HRC及EcoClean分別以1:10、1:10及1:20之稀釋比例無法在D土中有效滲透，將提高EOS、HRC及EcoClean稀釋比例至1:20。

6. 基質滲透階段

灌注壓力以砂土之劈裂壓力下進行滲透灌注試驗，為避免劈裂現象發生且讓基質均勻分布在砂柱試體中，A試體、B試體、C試體砂試體之劈裂壓力約為4.5psi，灌注壓力採用劈裂壓力之55%，相當於2.5psi進行灌注，而E土、F土及G試體之劈裂壓力約為4psi，灌注壓力採用劈裂壓力之50%，相當於2psi進行灌注，於灌注過程中在試體模上以粉筆紀錄上升之高度及時間，觀察基質隨著時間在不同粒徑分布之砂柱試體下，基質上升之變化(如圖3.12所示)，灌注完預設灌注量(1.5倍孔隙體積)後即結束灌注動作。

7. 模擬地下水流

基質溶液全數灌入之後，將以低壓水流模擬地下水並從基質灌入口處持續流入。定水頭模擬為自製的管柱平台(如圖3.12所示)，與砂柱試體高差約30cm，為了確保水壓穩定且一致，於水柱內持續注入水流且保持溢滿狀態下，水柱流至砂柱試體之壓力為固定值(1.5psi)，並於試體出口處收集出流液。

本研究於基質灌注試驗中，其成效評估包括兩部分，一為基質於砂柱試體中之滲透性；二則為基質於砂柱試體中之持續時間。



A. 基質高速拌合情形



B. 水質檢測儀器



C. 基質灌注過程



D. 定水頭模擬系統

圖 3.12 滲透灌注試驗主要設備及操作照片

滲透性部分，採用目視法(Zebovitz et al., 1989、Ozgurel et al., 2005、Sze and Fan, 2008)，直接於透明 PVC 管外部進行觀測，在打開閥門的時候即按下碼錶開始計時，記錄時間內基質上升之高度，同時亦記錄基質完全充滿砂柱試體之時間。然而，亦可能在特定試驗條件下，基質無法完全充滿整支砂柱試體，在此種情況下，即記錄其最終上升高度及時間，作為後續比較之參考。

在持續時間評估方面，於基質灌注完成後，給予試體一微量之水頭壓力，藉以模擬地下水之流動。其後採集試體流出之水樣進行分析，評估各基質在相同水流條件下被帶走的難易度，藉此判斷滯留於砂柱試體中之基質含量與持續時間。水樣分析方式的部分，根據前述前人文獻蒐集及彙整成果，主要採用

重量烘乾試驗並以 pH 測量為輔。



8. 效益評估

(1) 重量烘乾法

在持續性評估方面，於基質灌注完成後，給予試體一較低之水頭，模擬地下水之流動。其後對各試體之出流液進行分析，並利用出流液之流量推估試體中基質之殘留率。水樣分析的部分，使用重量烘乾法以 105°C、24 小時進行烘烤(林明德，2010；Borden,2006)。考慮到基質本身具有揮發性之特性，在烘乾的過程中基質的重量也就有可能因此減少，導致最後殘餘的基質重量與濃度會有低估的現象。

本研究進行多組烘乾試驗計算出揮發物質的比例。基質烘乾後之殘留物為黃褐色之油狀物。烘烤試驗中以固定體積在不同溫度及不同烘烤時間的條件下，得到 30~50 克之溶液，在溫度 105°C、時間 24 小時的情形下結果最為穩定一致，揮發比率分別是 EOS 為 62%、HRC 為 90%而 EcoClean 為 51%，其關係如下式所述：

$$W_x = \frac{W_y}{\alpha} \quad (1)$$

$$C = W_x \times \frac{1}{w_z} \times 100\% \quad (2)$$

W_x :推估後烘乾後基質重(公克)

W_y :實測烘乾後基質重(公克)

w_z :樣品重量(公克)

C:樣品濃度(%)

α :揮發率(EOS 為 62%、HRC 為 90%、EcoClean 為 51%)

利用出流濃度之變化推估砂柱試體中基質之殘餘量，將出流濃度與時間變化圖以線下面積的計算，並與模擬地下水之流量作乘積，可得到概算出之砂柱試體內基質之殘存量：

$$W_a = W_t - Q \times \sum_{k=0}^n \frac{1}{2} \times (C_{k+1} + C_k) \times (t_{k+1} - t_k) \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{W_a}{W_s} \times 100\% \quad (4)$$

W_a :砂柱試體內基質殘餘量(公克)



W_t :灌入基質量(公克)

Q :模擬地下水流流量(公克/分鐘)

C_k :第 k 組試驗所測得出流液之基質濃度(公克/公克)

t_k :第 k 組試驗之時間(分鐘)

γ :砂柱試體中基質殘留率(%)

W_s :基質重(公克)

(2) 酸鹼值變化

三種基質呈現中性或偏弱酸性，但根據文獻及試驗發現因基質稀釋於水中會釋放氫離子之現象，導致基質會呈現 pH 較低的情形，本研究利用 pH 值分別檢測基質稀釋液及試驗用水，藉此判出流液中含基質量之多寡，當 pH 值接近於水之 pH 值時，代表基質含量甚低，使用之水質檢測器如圖 3.12 所示。

第四章 結果與討論



4.1 基質於砂柱試體中之滲透性試驗

依據前述試驗設計，本研究分成兩階段，以 2 年的時間共進行 48 組砂柱之灌注試驗(將 3 種基質滲透灌注至 8 種不同粒徑的砂柱試體中(A 土、B 土、C 土、D 土、E 土、F 土、G 及 H 土)。其中砂柱 G 與 H 在設計的灌注壓力下，3 種不同基質以 1:20 稀釋比例均無法順利進行灌注，而其餘 36 組試則順利完成並取得灌注高度與灌注時間的連續紀錄資料，試驗結果與討論說明如后。

4.1.1 滲透性試驗之結果

為瞭解不同土壤質地條件下各基質之灌注效果，本研究在相同灌注壓力下，紀錄基質於試驗砂柱內之上升高度與所需要的時間。除了 G 與 H 砂柱之外，A~F 砂柱之灌注試驗結果如圖 4.1 所示。


1. A 土

A 土砂柱試驗中三種基質均能滲透至目標灌注高度(90cm)，其中又以 EcoClean 滲透之速度最佳，在滲透灌注開始後約 12 分鐘後即滲透至試體頂端；滲透性較佳者其次為 HRC，約需 13.5 分鐘滲透至砂柱試體頂端；而 EOS 相較其餘二者較差，約需要 21 分鐘才滲透至整根砂柱試體。

2. B 土

B 土砂柱試驗中在預定灌注量灌注完畢後，僅基質 EcoClean 可滲透至整根砂柱試體，故以 EcoClean 之滲透性最佳，在滲透灌注開始後約 18 分鐘後滲透至試體頂端；而 HRC 與 EOS 在預定灌注量全數灌入後均無法滲透至整根試體，其中 HRC 在預定灌注量全數灌注完畢後約需費時 23 分鐘，而滲透之最大高度為 87cm；EOS 在預定灌注量全數灌注完畢則約需費時 27 分鐘，顯示相滲透性較其餘二者差，而最大灌注高度大約為 88cm。

3. C 土



C 土砂柱試驗中在預定灌注量灌注完畢後，同樣僅基質 EcoClean 可滲透至整根砂柱試體，故以 EcoClean 之滲透性最佳，在滲透灌注開始後約需時 21 分鐘方可滲透至試體頂端；而 HRC 與 EOS 在預定灌注量全數灌入後均無法滲透至整根試體，HRC 在預定灌注量全數灌注完畢後約需費時 49.5 分鐘，而滲透之最大高度為 83cm；EOS 在預定灌注量全數灌注完畢則約需費時 60 分鐘，而最大灌注高度約為 84.5cm。

4. D 土

D 土砂柱試驗中在預定灌注量灌注完畢後，同樣僅基質 EcoClean 可滲透至整根砂柱試體，在滲透灌注開始後約需時 28 分鐘可滲透至試體頂端；而 HRC 與 EOS 在預定灌注量全數灌入後均無法滲透至整根試體，HRC 在預定灌注量全數灌注完畢後約需費時 58 分鐘，而滲透之最大高度為 72cm；EOS 在預定灌注量全數灌注完畢則約需費時 80 分鐘，最大灌注高度約為 60cm。

5. E 土

由試驗之結果可以發現，在 F 砂砂柱試體中，基質之滲透情形會大幅地下降，HRC 以 1:20 之稀釋比例灌注至 400 分鐘後，灌注高度約為 48 公分；而 EOS 以稀釋比例 1:20 灌注至 500 分鐘後，灌注高度約為 40 公分；而 EcoClean 以稀釋比例 1:20 灌注至 600 分鐘後，灌注高度約為 43 公分。

6. F 土

E 土砂柱試驗中在預定灌注量灌注完畢後，三種基質均無法滲透至整根砂柱試體。HRC 在預定灌注量全數灌入後約需時 360 分鐘，而滲透之最大高度約為 48cm；EOS 在預定灌注量全數灌注完畢後則約需費時 540 分鐘，而最大灌注高度約為 42.5cm；EcoClean 在預定灌注量全數灌入後則約需費時 600 分鐘，而滲透之最大高度約為 43.5cm。

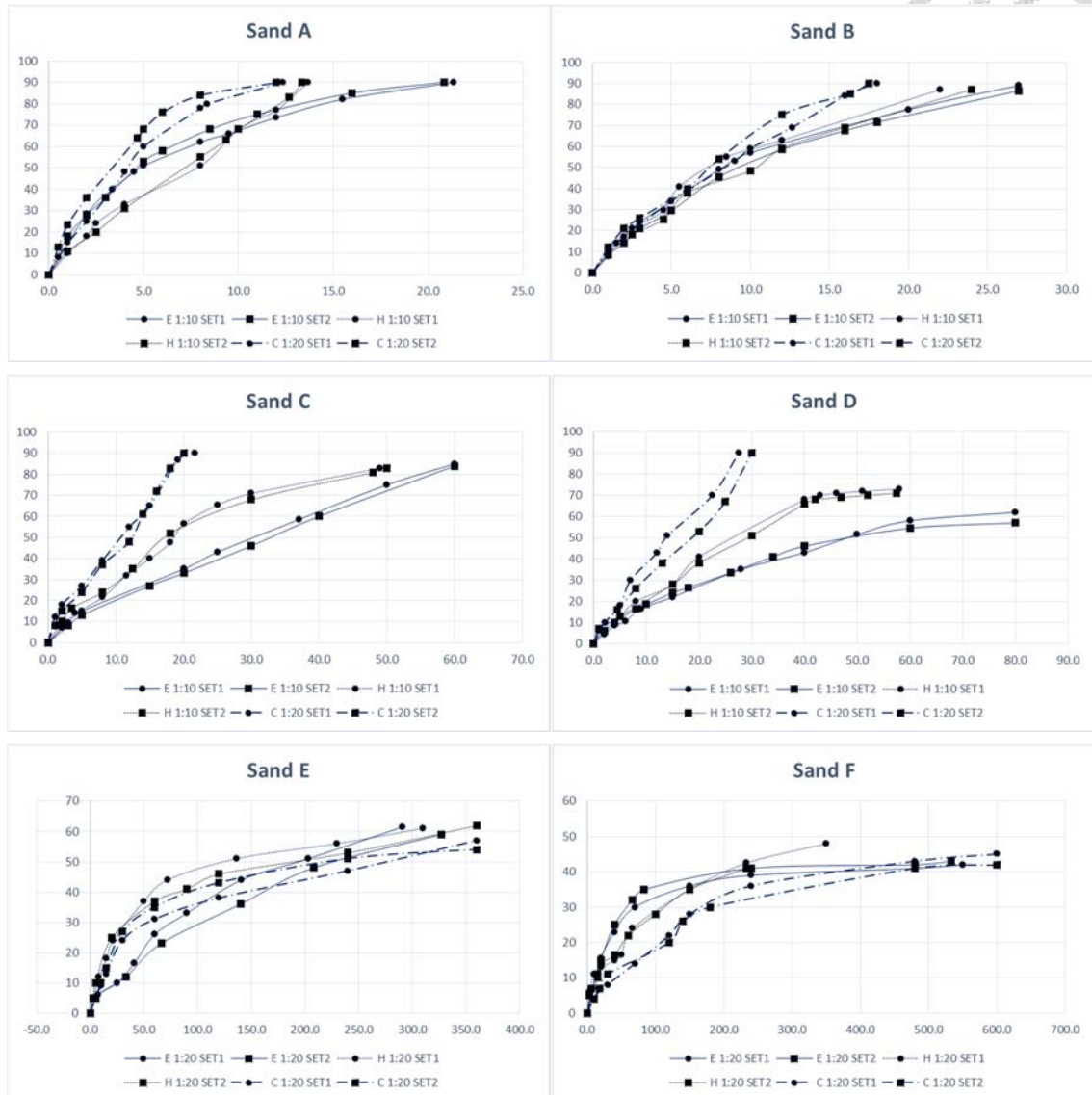


圖 4.1 砂柱 A 至 F 滲透灌注時間與高度關係圖

4.1.2 滲透性試驗之綜合討論

由灌注時間與灌注高度的關係圖顯示，A 砂柱中 3 種基質均能滲透至最大灌注高度(90 cm)，其中以 EcoClean 滲透速度最佳，在灌注開始後約 12 分鐘後即可滲透至砂柱頂端；滲透性次佳者為基質 HRC，約需 13.5 分鐘；而基質 EOS 則需要 21 分鐘才滲透至試驗砂柱頂端。而在砂柱 B、C 及 D 試驗結果中，僅有 EcoClean 可滲透至砂柱頂端，而 HRC 與 EOS 則無法滲透至最大高度 90cm，且灌注所需的時間也均較 EcoClean 要來得久。雖然 EcoClean 在中、細砂的試驗砂柱中，有優於



HRC 與 EOS 的灌注效果。但是在砂柱 E 及砂柱 F，則是以 HRC 的灌注效果最佳，不過 3 種基質在可滲透的灌注高度上並沒有很明顯的差別。

由試驗結果顯示，在同一種基質和稀釋比例下，在不同砂柱間的灌注高度變化與砂柱的粒徑大小有明顯相關性，當砂柱粒徑越大則灌注的高度越高(Chadi et al., 2015)，推論其原因為粒徑較大的砂柱體有較大的孔隙空間，故灌注之基質容易通過而達到較高的灌注高度。試驗結果亦顯示，在粒徑較小的砂柱中，欲達到同樣的灌注高度所需要的時間亦較久，其原因同樣為粒徑較小的砂柱孔隙相對較小，不利於基質通過，故需要花費較久的時間。

3 種基質在砂柱 A、B、C 及 D 能夠滲透的高度明顯比在砂柱 E 與 F 要來得高，尤其 HRC 與 EcoClean 更為明顯。由於砂柱 E 與 F 的粒徑比砂柱 A、B、C 及 D 要來得小，且當中分別含有 5% 及 10% 粒徑小於 0.074 mm 顆粒(Ottawa standard sand A101)，其能夠達到最高的灌注高度僅分別為砂柱 A 之 70% 及 50%。Zebovitz et al. (1989) 指出粒徑小於 0.074 mm 的細料(Fines)若添加超過 5% 即會對灌注結果有顯著之影響，平均滲透度會明顯下降，在本研究之灌注試驗結果亦反應出此一現象。

砂柱 G 與 H 在設計的灌注壓力下，3 種不同基質以 1:20 稀釋比例均無法順利進行灌注，本研究嘗試將稀釋比例調高至 1:30 仍無法進行灌注。Incecik and Ceren (1995) 指出滲透灌注需砂土粒徑之 d_{10} 及灌注液粒料之粒徑 D_{90} 之比值需大於 10 則視為可灌。而以本研究使用之基質 E 為例，其基質粒徑為均勻分布大約為 $1 \mu\text{m}$ ，而 G 砂與 H 砂之 d_{10} 分別為 0.004mm 與 0.003mm，計算其比值分別為 4 及 3 均小於 10，視為不可灌。由此結果顯示，在屬於試驗砂 G 與 H 的粒徑分布條件下，只能尋找粒徑更小之基質做為灌注材料，或是在不超過劈裂壓力下提高灌注壓力，才能順利進行灌注。



4.2 基質於砂柱試體中之持續性試驗

為了解不同土壤條件下各基質在砂柱試驗中之持續性，本研究將基質灌注後，以水壓 1.5psi 之水流持續地從基質注入口處注入，以模擬地下水流流動。水流進入試體後會將砂柱試體內基質帶出，收集該出流液並紀錄收集之時間，利用 pH 值、重量烘乾法來評估出流液之基質含量，並以流量推求計算試體中基質之含量及其殘留率，將各試驗結果詳述如下。

4.2.1 重量烘乾濃度之結果

1. A 土

A 土砂柱試驗之重量烘乾濃度顯示，水流剛進入試體測得 HRC 之出流液濃度約為 4%，而水流進入約 1 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 4.7%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入 6 小時後其出流液濃度已不到 1%，且之後維持穩定之低濃度；基質 EOS 方面，水流剛進入試體測得其出流液濃度約為 2%，而水流進入約 3 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 5%，而後出流液濃度開始下降，在水流進入 9 小時後其出流液濃度小於 1%，且之後維持穩定之低濃度狀態；基質 EcoClean 方面，水流剛進入試體測得出流液濃度約為 3.5%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入 24 小時後其出流液濃度已不到 1%。

2. B 土

B 土砂柱試驗之重量濃度烘乾結果顯示，水流剛進入試體測得 HRC 之出流液濃度約為 4.2%，而水流進入約 2 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 4.6%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入約 8 小時後其出流液濃度已小於 1%，且後維持穩定之低濃度；基質 EOS 方面，水流剛進入試體測得其出流液濃度約為 1.6%，而水流進入約 5 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 5.2%，而後出流液濃度開始下降，在水流進入 12 小時後出流液濃度小於 1%，且之後維持穩定之低濃度狀態；基質 EcoClean 方面，水流剛進入試體測得出流液濃度約為 3.4%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入 36 小時後其出流液濃度已不到 1%。



3. C 土

C 土砂柱試驗之重量濃度烘乾結果顯示，水流剛進入試體測得 HRC 之出流液濃度約為 3.2%，而水流進入約 4 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 4.7%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入約 13 小時後其出流液濃度已小於 1%，且後維持穩定之低濃度；基質 EOS 方面，水流剛進入試體測得其出流液濃度約為 1.1%，而水流進入約 8 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 5.2%，而後出流液濃度開始下降，在水流進入 15 小時後出流液濃度小於 1%，且之後維持穩定之低濃度狀態；基質 EcoClean 方面，水流剛進入試體測得出流液濃度約為 3.4%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入 36 小時後其出流液濃度已不到 1%。

4. D 土

D 土砂柱試驗之重量濃度烘乾結果顯示，水流剛進入試體測得 HRC 之出流液濃度約為 2.6%，而水流進入約 5 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 4.7%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入約 13 小時後其出流液濃度已小於 1%，且後維持穩定之低濃度；基質 EOS 方面，水流剛進入試體測得其出流液濃度約為 0.3%，而水流進入約 13 小時後，出流液之濃度達到最高點約為 4.5%，而後出流液濃度開始下降，在水流進入 20 小時後出流液濃度小於 1%，且之後維持穩定之低濃度狀態；基質 EcoClean 方面，水流剛進入試體測得出流液濃度約為 3.4%，而後出流液濃度逐漸下降，水流進入 40 小時後其出流液濃度已不到 1%。

5. E 土

由持續性之結果可以觀察到，在 F 土砂柱試驗中，三者出流液之濃度皆甚低，最大出流濃度約為 0.15%。

6. F 土

E 土砂柱試驗之重量濃度烘乾結果顯示，可發現 E 土試驗中三種基質之出流液濃度無明顯差別且出流液濃度皆甚低，水流剛進入試體測得 HRC 之出流液濃度約為 0.04%，而水流進入約 1 天後，出流液之濃度達到最高點約為 0.09%，而後出流液濃度逐漸下降；基質 EOS 方面，水流剛進入試體測得其出流液濃度約為 0.04%，而水流進入約 1.5 天後，出流液之濃度達到最高點約為



0.1%，而後出流液濃度逐漸下降；基質 EcoClean 方面，水流剛進入試體測得出流液濃度約為 0.05%，而水流進入約 1 天後，出流液之濃度達到最高點約為 0.1%，而後出流液濃度逐漸下降。

4.2.3 試體中殘留率之結果

以 A 土試驗為例，試驗中發現，HRC、EOS 雖然在試驗後期出流液之基質含量甚低，但這並非代表 HRC 與 EOS 完全被水流帶走，有可能基質本身吸附、殘留於砂土中之特性，試驗後水流仍無法將試體中所有基質帶走，而使得出流液的濃度較低，因此，由 4.2.2 節出流液在經重量烘乾濃度之計算結果，並無法直接反應出該基質之持續性。

故本節將利用 4.2.2 節重量烘乾濃度之結果與各砂柱試體之出流量計算各砂柱試體中基質之殘留率。砂柱試體會因為其粒徑大小之不同而有不同之水力傳導度，經試驗測得 A 土砂柱試體之 k 值約為 $2.3 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 、B 土砂柱試體之 k 值約為 $1.7 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 、C 土砂柱試體之 k 值約為 $8 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ 、D 土砂柱試體之 k 值約為 $7.7 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ 、E 土砂柱試體之 k 值約為 $3.6 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ 及 F 土砂柱試體之 k 值約為 $1.4 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ ，利用各砂柱試體之出流量與重量烘乾之結果配合 3.3 節式(3)及式(4)即可推算出各砂柱試體中各基質之殘留率。

1. A 土

A 土砂柱試驗之各基質殘留率如圖 4.2 所示，由圖中可發現 A 土試驗中三種基質之殘留率有明顯之差別。基質 HRC 之殘留率較高可達將近 60%，其次為 EOS，其殘留率大約為 40% 左右，而 EcoClean 之殘留率較差幾乎可完全被水流帶走。

2. B 土

B 土砂柱試驗之各基質殘留率如圖 4.2 所示，由圖中可發現 B 土試驗中三種基質之殘留率同樣具有明顯差別。基質 HRC 之殘留率仍然較高可達將近 60%，其次為 EOS，其殘留率大約為 40% 左右，而 EcoClean 之殘留率較差，

其殘留率大約為 10%。

3. C 土

C 土砂柱試驗之各基質殘留率如圖 4.2 所示，由圖中可發現 C 土試驗中三種基質之殘留率同樣具有明顯差別。基質 HRC 之殘留率仍然最高，可達到約 74%，其次為 EOS，其殘留率大約為 62%左右，而 EcoClean 之殘留率則較差，其殘留率大約為 13%。

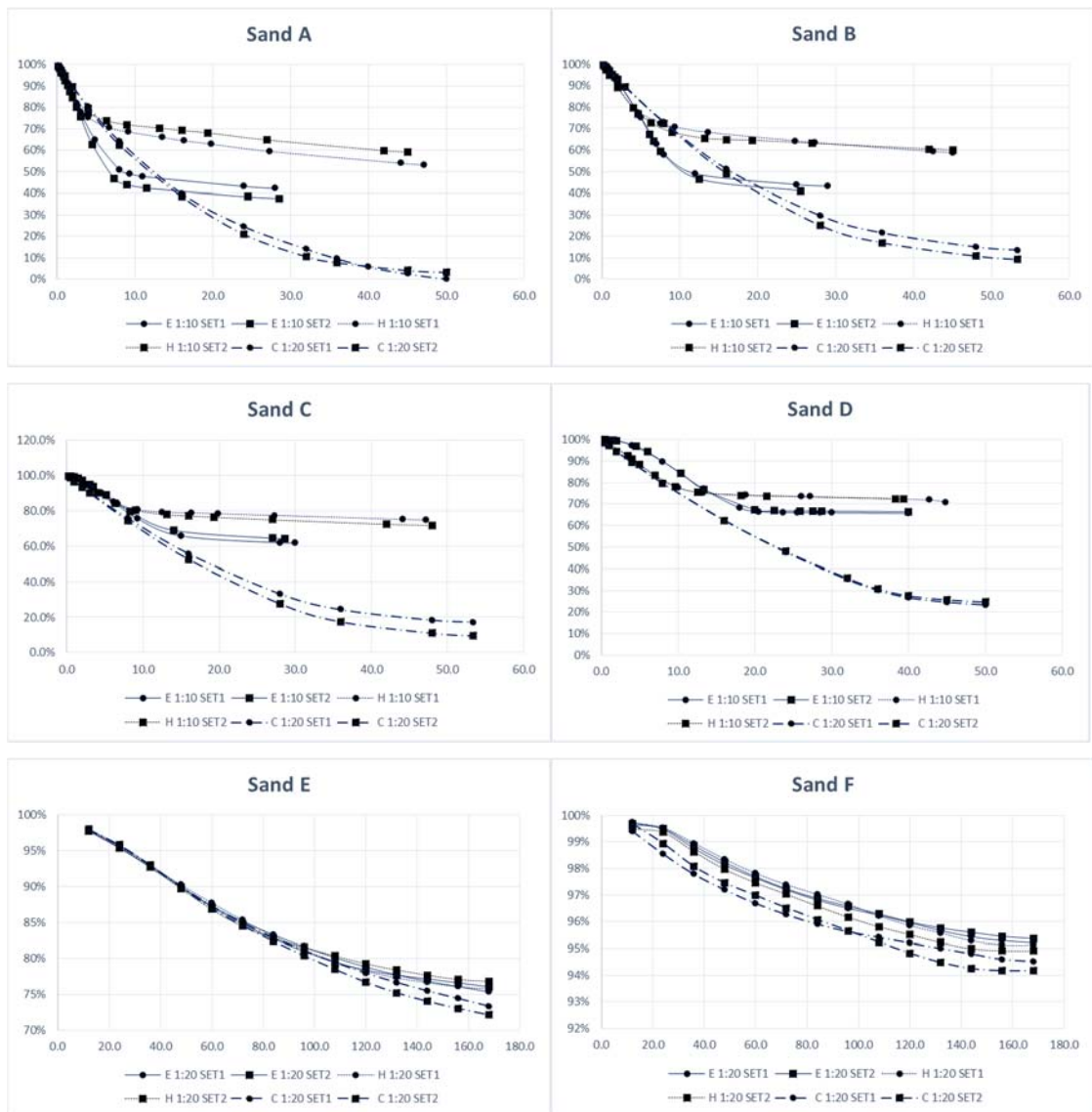


圖 4.2 砂柱 A 至 F 殘留率試驗結果



4. D 土

D 土砂柱試驗之各基質殘留率如圖 4.2 所示，由圖中可發現 D 土試驗中三種基質殘留率具有明顯差別。基質 HRC 之殘留率仍然最高，可達到約 71%，其次為 EOS，其殘留率大約為 65% 左右，而 EcoClean 之殘留率則較差，其殘留率大約為 23%。

5. E 土

F 土砂柱試驗之各基質殘留率如圖 4.2 所示，由圖中可發現 F 土試驗中三種基質之殘留率無明顯之差別，其殘留率皆可超過 94%。

6. F 土

E 土砂柱試驗之各基質殘留率如圖 4.2 所示，由圖中可發現 E 土試驗中三種基質之殘留率無明顯之差別，其中又以基質 HRC 與基質 EOS 之殘留率稍微良好，可超過約 95%，而 EcoClean 之殘留率仍可超過 94%。

綜合上述殘留率試驗結果，3 種基質在砂柱 A、B、C 及 D 的殘留率有明顯的差別。HRC 之殘留率均最高，在 4 種砂柱中可達 60%-70% 之殘留率；其次為 EOS，其殘留率約 40%-65% 左右；而 EcoClean 之殘留率則最低，在砂柱 A 中幾乎完全被注入之水流帶走而無殘留在砂柱中，最高僅在砂柱 D 中有 23% 之殘留率。

不過 3 種基質在砂柱 E 及 F 則有超過 70% 之殘留率，在砂柱 F 中甚至有近 95% 的基質仍殘留在砂柱中，3 種基質的殘留率則差異不大，不若砂柱 A、B、C 及 D 有明顯的差異。

根據上述試驗結果顯示，整體而言若砂柱試體之粒徑分布越小則其殘留率越大，而 EcoClean 在各砂柱中的殘留率均為 3 種基質中最低的，推測其原因可能為 EcoClean 的黏滯度最低，使得基質與土壤顆粒間吸附力最小，在灌注的過程中有較好的滲透效果，但也因為不易被吸附在試驗砂柱中，致其殘留率最低。

EOS 在稀釋後的黏滯度並不高，但其殘留率卻比 EcoClean 高出許多，推論其原因可能是因為 EOS 表面帶有負電荷的特性會吸附於土壤表面的正電位置，而隨

著正電荷位址被填滿時，基質才會因為電荷同性相斥減少吸附而繼續向前散佈至其他孔隙(Jung et al., 2006)，故能夠在灌注之後有較多的基質殘留在砂柱中。



4.3 試驗砂及基質特性與灌注結果關係式分析

本研究為進一步探討試驗砂性質、基質特性與灌注試驗結果之相互關係，首先將滲透性與殘留率試驗結束時，3種基質在不同的比例下於不同砂柱的最終灌注高度、最終灌注時間與最終殘留率進行比較，並計算其基質灌注率及基質出流率，其中基質灌注率為灌注高度除以滲透灌注試驗結束時間；基質出流率則為 1-殘留率百分比除以滲透灌注試驗結束時間，各試驗結果計算如表 4.1 所示。

本研究以土壤粒徑參數(D_{10} , D_{30} , D_{60} , Uniformity Coefficient C_u , Coefficient of Curvature C_c)代表試驗砂之特性，以黏滯度(μ)代表基質之特性。由於參數較多，為篩選出與試驗結果較具相關性之參數，首先以 Spearman 等級相關係數 (Spearman's rank correlation coefficient) 進行參數間的相關性分析。

Spearman 等級相關係數係以等級序位(rank value)之變動傾向來衡量變數間的相關程度，Spearman 等級相關係數屬於無母數統計方法 (nonparametric statistics)，適用於評估樣本數量小或是非屬常態分布之變數間的相關性，其定義如公式(5)所示。當某一變數之變量增加，且另一變數之變量亦趨向於增加時，則此兩變數間之 Spearman 等級相關係數將為正值，若數值愈接近 1，表示另一變數之變量完全趨向於增加，反之亦然。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (5)$$

其中， ρ ：Spearman 等級相關係數；

d_i ：兩變數間的等級序位差值， $d_i = x_i - y_i$ ， x_i 及 y_i 分別為該數值於其所屬數列由大至小排序之等級序位；

n ：樣本數。

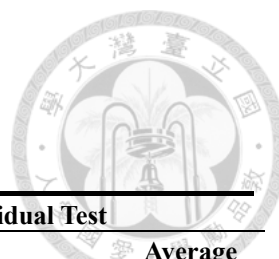


表 4.1 滲透灌注試驗與殘留率計算結果

Sand column	Substrate (dilute ratio)	Permeation Grouting Test			Residual Test		
		Ending Grouting Height (cm)	Ending Grouting Time (sec)	Average substrate grouting rate (cm/sec)	Ending test time (min)	Substrate residual percentage (%)	Average substrate outflow rate (%/min)
A	E (1:10)	90	1280	0.0703	1680	42.18%	0.3442
		90	1250	0.0720	1710	37.60%	0.3649
B	E (1:10)	89	1620	0.0549	1740	43.21%	0.3264
		86.5	1620	0.0534	1530	41.11%	0.3849
C	E (1:10)	85	3600	0.0236	1800	61.78%	0.2123
		84	3600	0.0233	1720	64.36%	0.2072
D	E (1:10)	62	4800	0.0129	2400	65.68%	0.1430
		57	4800	0.0119	2400	66.46%	0.1398
E	E (1:20)	61.5	17460	0.0035	10080	75.34%	0.0245
		59	19620	0.0030	10080	76.06%	0.0238
F	E (1:20)	42	33000	0.0013	10080	95.21%	0.0048
		43	32000	0.0013	10080	95.37%	0.0046
A	H (1:10)	90	820	0.1098	2830	53.19%	0.1654
		90	800	0.1125	2700	59.15%	0.1513
B	H (1:10)	87	1320	0.0659	2700	58.68%	0.1530
		87	1440	0.0604	2700	59.85%	0.1487
C	H (1:10)	83	2940	0.0282	2830	74.77%	0.0892
		83	3000	0.0277	2880	71.89%	0.0976
D	H (1:10)	73	3480	0.0210	2690	70.88%	0.1083
		71	3450	0.0206	2360	72.30%	0.1174
E	H (1:20)	61	18600	0.0033	10080	75.81%	0.0240
		62	21600	0.0029	10080	76.83%	0.0230
F	H (1:20)	48	21000	0.0023	10080	95.13%	0.0048
		41	14000	0.0029	10080	94.92%	0.0050
A	C (1:20)	90	740	0.1216	3000	0.10%	0.3330
		90	700	0.1286	3000	3.23%	0.3226
B	C (1:20)	90	1080	0.0833	3200	13.53%	0.2702
		90	1050	0.0857	3200	9.21%	0.2837
C	C (1:20)	90	1300	0.0692	3200	17.21%	0.2587
		90	1200	0.0750	3200	9.51%	0.2828
D	C (1:20)	90	1650	0.0545	3000	23.38%	0.2554
		90	1800	0.0500	3000	24.78%	0.2507
E	C (1:20)	57	21600	0.0026	10080	73.32%	0.0265
		54	21600	0.0025	10080	72.12%	0.0277
F	C (1:20)	45	36000	0.0013	10080	94.52%	0.0054
		42	36000	0.0012	10080	94.16%	0.0058

Note: Grouting rate is the ratio of grouting height to grouting time. The average outflow rate is the ratio of (1 – residual percentage) to outflow time.

表 4.2 列出不同試驗變數間之 Spearman 等級相關係數計算結果，其結果顯示 D₁₀、D₃₀、D₆₀、C_U 及 C_C 等 5 項參數均與灌注高度、灌注時間及灌注速率具有顯著之相關性。惟 D₁₀、D₃₀ 及 D₆₀ 等 3 項參數彼此之間亦具有顯著相關，表示這 3 項變數非為相互獨立之參數，倘同時作為迴歸分析之自變數，會產生多元共線性之現象，而造成整體迴歸模式的解釋能力達顯著，但個別迴歸係數之檢定不顯著的矛盾情形。意即，不需要將 D₁₀、D₃₀ 及 D₆₀ 等三項參數同時進行迴歸分析，而 C_U 亦是經由 D₁₀ 及 D₆₀ 兩項參數計算而得，C_C 則是經由 D₁₀、D₃₀ 及 D₆₀ 等三項參數計算而得，故僅選用與灌注高度和灌注時間相關性最佳之 D₁₀ 變數，作為試驗砂特性之代表參數，同時以黏滯度 μ 作為基質特性的代表參數。

表 4.2 不同試驗變數間 Spearman 等級相關係數計算結果

Parameter	Substrate		Soil				Grouting and Persistence test			
	Viscosity (μ)	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _U	C _C	Grouting Height	Grouting Time	Grouting Rate	Outflow Rate
Viscosity (μ)	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D ₁₀	0.155	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—
D ₃₀	0.039	0.714*	1.000	—	—	—	—	—	—	—
D ₆₀	0.079	0.812*	0.899*	1.000	—	—	—	—	—	—
C _U	-0.155	-0.771*	-0.257	-0.348*	1.000	—	—	—	—	—
C _C	-0.155	-0.829*	-0.486*	-0.638*	0.486*	1.000	—	—	—	—
Grouting Height	-0.088	0.876*	0.528*	0.621*	-0.758*	-0.749*	1.000	—	—	—
Grouting Time	-0.054	-0.929*	-0.598*	-0.718*	0.754*	0.769*	-0.927*	1.000	—	—
Grouting Rate	0.026	0.941*	0.623*	0.731*	-0.759*	-0.786*	0.947*	-0.994*	1.000	—
Outflow Rate	-0.175	0.869*	0.510*	0.605*	-0.716*	-0.784*	0.885*	-0.846*	0.859*	1.000

Note:

1. Grouting rate is the ratio of grouting height to grouting time. The average outflow rate is the ratio of (1-residual percentage) to outflow time.
2. The number of samples was 36 groups. Correlation coefficients were calculated as Spearman's rank correlation coefficients.
3. *: P<0.05, exceeding a confidence interval of 95%.

為了瞭解試驗砂特性(D₁₀)與黏滯度(μ)對於灌注效果之個別影響及共同效應，本研究以逐步迴歸(stepwise regression)方式進行分析。逐步迴歸是多元迴歸分析中挑選自變項加入迴歸方程式的一種方法，並由迴歸係數是否達顯著水準，決定該自



變數是否需要加入迴歸方程式中。本研究先以試驗砂特性 D_{10} 為自變數，針對灌注高度、灌注時間及灌注速率進行迴歸，再增加黏滯度 μ 參數進行迴歸，迴歸結果如公式(6)~(11)。

$$\text{Grouting Height}(cm) = 113.06 + 18.15 \times \ln D_{10} \quad (6)$$

$$\text{Grouting Time}(sec) = -15036 - 11233 \times \ln D_{10} \quad (7)$$

$$\text{Grouting Rate}(cm/sec) = -0.0109 + 0.333 \times D_{10} \quad (8)$$

$$\text{Grouting Height}(cm) = 113.84 - 0.0083 \times \mu + 18.28 \times \ln D_{10} \quad (9)$$

$$\text{Grouting Time}(sec) = -13525 - 15.91 \times \mu - 10988 \times \ln D_{10} \quad (10)$$

$$\text{Grouting Rate}(cm/sec) = 0.0092 - 0.0059 \times \ln \mu + 0.340 \times D_{10} \quad (11)$$

在公式(6)與公式(7)中，其迴歸模型之判定係數(R^2)分別為 0.847 與 0.806，且其自然對數 D_{10} 項之 P value 小於 0.05，顯示單獨以自然對數型態之 D_{10} 變數分別對於灌注高度及灌注時間進行迴歸時，其迴歸係數達顯著水準，表示試驗砂特性對於灌注高度及灌注時間均具有高度解釋力。而在加入黏滯度後進行迴歸(公式(9)與公式(10))，其 R^2 改變量分別僅提升 0.001 及 0.007，顯示在本研究之試驗設計下，試驗砂特性對於灌注高度及灌注時間即有較佳之解釋力。

若單獨以 D_{10} 變數對灌注速率進行迴歸時，其迴歸係數亦達顯著水準，逐步迴歸加入黏滯度後，其 R^2 改變量由 0.806 提升 0.022 至 0.828，代表基質特性可與土壤特性有效地共同解釋灌注速率。單獨以 D_{10} 變數對灌注速率進行迴歸，以及在加入黏滯度後之迴歸結果比較列如表 4.3 所示。

由公式(11)中，當 D_{10} 越大，代表試驗砂柱粒徑越大，有較大的孔隙率而使得灌注速率較大；而當黏滯度越小，在灌注的過程中亦受到土壤顆粒的摩擦阻力而降低灌注速率，由迴歸的公式結果亦符合其物理意義。

要特別留意的是，在應用公式(6)至公式(8)時，試驗砂有效粒徑 D_{10} 有其範圍限制， D_{10} 必須在 0.00197~0.26 mm 之間。而應用公式(9)至公式(11)時，除了 D_{10} 必

須在 0.0022~0.225 mm 之間外，基質黏滯度 μ 則必須介於 13~175 centipoise。

本研究量測灌注試驗後於砂柱體上端的出流液，以烘乾法計算基質重量，藉此評估基質於砂柱中的殘留情形，並以 100% 減去殘留率再和出流時間之比值作為平均流失率指標，公式(12)及公式(13)分別為單獨以自然對數型態之 D_{10} ，及加入黏滯度後的迴歸結果。

$$\text{Outflow Rate}(\%/min) = 0.392 + 0.108 \times \ln D_{10} \quad (12)$$

$$\text{Outflow Rate}(\%/min) = 0.468 - 0.00080 \times \mu + 0.121 \times \ln D_{10} \quad (13)$$


單獨以自然對數型態之 D_{10} 變數對平均流失率進行迴歸時，其迴歸係數雖達顯著水準，但公式(12)之判定係數僅 0.634，若加入黏滯度進行迴歸後，其 R^2 改變量提升達 0.161 至 0.795，表示基質特性可有效地配合試驗砂特性共同解釋平均流失率。

表 4.3 單獨 D_{10} 參數與加入黏滯度參數逐級迴歸結果比較表

Regression Models	Parameters	Regression Coefficients			R^2
		Constant	D_{10}	μ	
Grouting Height	Only D_{10}	113.06*	18.15*	-	0.847
	D_{10} and μ	113.84*	18.28*	-0.0083	0.848
Grouting Time	Only D_{10}	-15036*	-11233*	-	0.806
	D_{10} and μ	-13525*	-10988*	-15.91	0.813
Grouting Rate	Only D_{10}	-0.0109*	0.333*	-	0.806
	D_{10} and μ	0.0092*	0.340*	-0.0059*	0.828
Outflow Rate	Only D_{10}	0.392*	0.108*	-	0.634
	D_{10} and μ	0.468*	0.121*	-0.00080*	0.795

Note: *: $P < 0.05$, exceeding a confidence interval of 95%.

由流失率的迴歸結果顯示，若加入基質特性的黏滯度參數後，其模式之 R^2 改變量明顯較灌注高度與灌注時間的迴歸結果要來得大，意即在灌注高度與灌注時間的關係式上，試驗砂的特性相較於黏滯度明顯扮演更重要的角色，而在流失率的關係式中，基質的特性才反應出來。



因本研究之試驗設計，在應用滲透灌漿技術時，係以外加固定壓力將基質灌入試驗砂柱中，因為受到灌注壓力的影響，所造成的剪力則對於黏滯度造成影響(Jan et al. 2011)，因而減低灌入基質在試驗砂顆粒表面的附著度，此時土壤粒徑 D_{10} 扮演一個比較重要的角色。

而本研究在進行殘留試驗時，僅以很低壓力造成水頭模擬地下水流，此時基質易沒有受到額外壓力所造成的剪力影響，易被吸附於試驗砂顆粒表面而不被水流帶出，因此其黏滯度特性即顯現出來。

建議未來在進行相關的研究試驗時，若在灌注壓力的操作下探討灌注高度與時間，此時與所選擇的基質較無相關，而土壤粒徑大小對結果的影響較大。但若要進一步探討灌注速率及流失率時，則基質的特性，即黏滯度的貢獻則亦必需同時被考慮進來(Ni and Lin, 2006; Dayaker et al., 2012)。

第五章 結論與建議



5.1 結論

本研究選用 3 種地下水污染現地生物整治常用基質，包括 EOS、HRC 及 EcoClean，以模擬滲透灌漿技術方式，灌注於以 3 種渥太華標準砂依不同粒徑分布所製成之 8 種砂柱進行室內試驗。由試驗結果顯示，灌注高度和灌注時間與試驗砂粒徑大小及基質黏滯度大小有關，當試驗砂粒徑越大、基質黏滯度越小，則灌注的效果越好；而要有較佳的基質殘留率則是在試驗砂粒徑較小、基質黏滯度較大的條件下才會得到。而當試驗砂中加入 5% 以上粒徑小於 0.074 mm 的細料(Fines)時，對於灌注效果會有顯著影響。

由試驗結果也顯示，在本研究設計的灌注壓力下，在屬於極細砂至粉砂質的土壤質地條件下，3 種基質均無法順利的進行灌注。參考前人研究文獻計算結果，此基質與試驗砂粒徑屬於「不可灌」條件，因此只能尋找粒徑更小之基質做為灌注材料，或是在不超過劈裂壓力下提高灌注壓力，才能順利進行灌注。

本研究以 Spearman 等級相關係數計算及參數迴歸，分析 36 組滲透灌注試驗結果，建立試驗砂 D_{10} 粒徑與基質黏滯度對灌注高度、灌注時間及流失率之關係式。除單獨以自然對數型態之 D_{10} 變數對平均流失率進行迴歸時，其公式之判定係數僅 0.634 外，其餘迴歸式之統計迴歸分析結果，其迴歸係數均達顯著水準判定係數可達 0.8，且顯示試驗砂 D_{10} 粒徑與基質黏滯度可以有效解釋灌注試驗結果。試驗砂 D_{10} 粒徑與基質黏滯度對灌注高度、灌注時間及流失率之關係式如下：


$$\text{Grouting Height}(cm) = 113.84 - 0.0083 \times \mu + 18.28 \times \ln D_{10}$$

$$\text{Grouting Time}(sec) = -13525 - 15.91 \times \mu - 10988 \times \ln D_{10}$$

$$\text{Grouting Rate}(cm/sec) = 0.0092 - 0.0059 \times \ln \mu + 0.340 \times D_{10}$$

$$\text{Outflow Rate}(\%/min) = 0.468 - 0.00080 \times \mu + 0.121 \times \ln D_{10}$$

由於本研究係在固定壓力下進行砂柱試驗，由其試驗結果經過迴歸得到參數間的關係式，故未來可由試驗砂粒徑及預定選用之灌注基質，由上述本研究所建立



的迴歸式中，即可以很快的評估其灌注的效果，包括灌注高度、時間和流出率。惟必須留意的是，其需在灌注壓力 2-2.5psi 之間， D_{10} 必須在 0.0022~0.225 mm 之間外，基質黏滯度 μ 則必須介於 13~175 centipoise，才能得到比較好的預測結果。


5.2 建議

滲透灌漿技術一般多應用在地層改良，透過灌注之漿體增加地層之強度，而本研究則嘗試將其應用在基質的灌注，探討基質與試驗砂之間的行為模式，並以統計迴歸方法，由實驗室的試驗數據推導出試驗砂粒徑與基質黏滯度對灌注結果的關係式。過去雖然也有前人提出相關因子的研究，但並未建立因子間之關係式。而本研究除了以試驗的方法瞭解主要因子的影響外，亦首次將相關的因子之間關係明確化，並推求得其關係式。

一般在進行地下水污染整治工作前，皆會先進行模場試驗，透過現地的試驗以取得全場整治所需要的操作參數。然模場試驗能夠變換的參數條件有限，若要進行多組不同參數條件的試驗，則需要花費大量的成本費用和較長的時間，並不符合經濟效益。因而本研究成果可以提供研究者未來在進行模場試驗之前評估參考的依據，針對其所選用的灌注基質，以及改善場址主要的地質條件，藉由本研究所建立的關係式，可以很快的得到量化的評估結果。

惟必須注意的是，本試驗係在固定壓力下針對不同基質與試驗砂粒徑分布進行灌注試驗，由於並沒有不同灌注壓力下的灌注結果，故在進行參數迴歸時無法納入灌注壓力當做自變數，而無法明確得知灌注壓力之影響。就常理而言，當灌注壓力增加時，應該可以達到更高的灌注高度及較短的灌注時間。建議未來如欲進一步應用在現場的試驗時，仍需要有更多的試驗研究，包括選用更多的土壤粒徑分布、不同的基質，以及在不同的稀釋比例與不同的灌注壓力能夠注入的基質量進行試驗，同時可以將所獲得的不同參數條件進行最佳化分析，以獲得最佳的操作參數而得到最佳之灌注效益。

本研究在固定的灌注壓力下進行管柱試驗，並以試驗砂有效粒徑及基質黏滯



度為迴歸之自變數，建立其與灌度高度、灌注時間、灌注速率及流失率之關係式。而研究中所使用的稀釋後的基質，其性質已接近一般的液體，而流體在孔隙介質中的傳輸行為亦可以滲透係數來表示。因試驗砂之滲透係數與其粒徑大小有關，本研究亦由各試驗砂之有效粒徑依照經驗式計算得到其滲透係數，建議未來的研究可將此參數納入相關性分析與迴歸式的自變數中，也許更能夠直接反應其關係式。

由於含氯有機物其比重比水重的特性，在地下環境中會隨著重力逐漸往下移動，直到含水層底部或不透水層底部為止，或是會在黏土層上方，由於無法克服進入的滲透壓，而逐漸在黏土層累積而形成 DNAPL Pool。由於此種污染物傳輸的特性，在極密緻的地層中(如黏土層)其含氯有機物的濃度相對較低，因此基質主要灌注的地層條件設計，可以優先考慮砂至砂土質地即可。

本研究所使用的試驗砂柱係以渥太華標準砂依不同的比例配製而成，依其粒徑大小分布，依序為中砂、細砂、極細砂及砂土，以模擬現地的土壤質地條件。而試驗砂柱係以乾式實降法，將標準砂均勻的置入管柱中。然在現地實際的地層條件並非如此的均質，而會有許多不均質的地質狀況，例如：在砂層地質中夾雜有砂土甚至是黏土的薄層；亦或是在許多的場址中，會有砂黏互層的情形。因此建議在未來的試驗研究中，可以考慮在製作砂柱試驗的過程，可以在不同的垂直深度配置不同粒徑的試驗砂，以更真實的模擬現地的地質條件。

本研究所建立的土壤與質基性質和灌注結果之關係式，或是在文獻回顧裡面所提到的「可灌性」，其實都是在描述於一定的條件下，是否能夠以低壓滲透灌漿方式將基質有效的注入散布於含水層中，但其注入後的傳輸距離仍有一定的限制，而非無限的傳輸。故未來如果欲應用本研究成果至現地的模場試驗時，建議可以在注入井下游處不同的距離內設置觀測井，由採樣分析結果了解基質的傳輸影響半徑，以做為全場整治設計時的參考依據。

由於本研究所選用的基質均為市面上商業化的產品，每種基質在各生產製造的公司均有建議之操作手冊，不過這些手冊的內容多強調在對於污染物的整治效果及其基質特性的介紹，較少針對預定注入的場址土壤質地的適用性進行說明。故

未來建議研究者在進行現地試驗時，可以同時參考廠商所提供的操作手冊資料和本研究之成果，而達到較佳之試驗規劃設計。

本研究雖然是以現場進行現地加強式生物整治時，注入基質的技術上評估應用滲透灌漿技術的可行性，但除了此生物性的整治工法外，在地下水污染現地的整治技術中，尚有以化學氧化進行改善的方式，即將化學藥劑注入至受污染的含水層中，讓化學藥劑與污染物接觸，進而分解或破壞污染物，而達到整治的目的，而此需要將化學藥劑注入至地下含水層中的方式，亦可以應用滲透灌漿的技術，也是建議未來可以研究的方向之一。

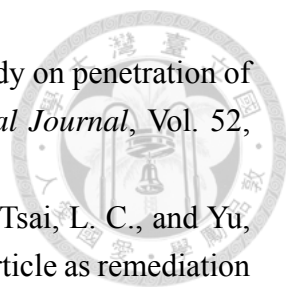
不過化學氧化整治法與現地加強式生物整治法其主要的做用機制並不相同，化學氧化法主要係將化學氧化試劑注入至地下受污染的含水層中，讓試劑與污染能夠接觸反應，達到分解或破壞污染的目的，而有整治的效果。而加強式生物整治法則是將基質注入至受污染的地下含水層中，讓微生物能夠將其當做碳源而生長的更好，進而可以分解污染物，達到整治的目的，因此希望能夠將注入的基質有效均勻分布在含水層中，讓更多的微生物可以產生作用，此與化學氧化的注入試劑目的略有差異，因此在研究試驗上也需有所不同。


雖然欲將大地工程常用的滲透灌漿技術應用在地下水污染的現地整治工作仍然有很長的路要走，但希望本研究的成果能提供給未來的研究者一個可用的參考。

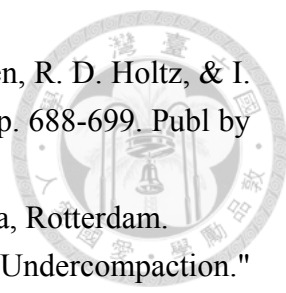
第六章 參考文獻

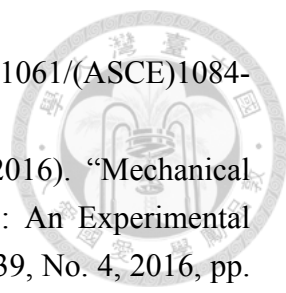


1. 米倉亮三、廖洪鈞、林英堂 (2002), “恆久性灌漿材料與其灌漿砂土之動態行為”, 地工技術, 第 93 期: 5-12 頁。
2. 地基處理手冊編寫委員會, 1988, 地基處理手冊, 中國建築工業出版社。
3. 行政院環保署, 2008, 土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊。
4. 郭育嘉, 2013, 應用現地乳化油生物屏障處理受含氯有機物污染之地下水, 國立中山大學環境工程研究所, 博士論文。
5. 陳逸明, 2009, 以乳化型基質處理受三氯乙烯污染之地下水, 國立中山大學環境工程研究所, 碩士論文。
6. 劉嘉庭, 2011, 利用乳化型釋碳基質提昇三氯乙烯污染地下水之生物降解效率: 現地模場試驗, 國立中山大學環境工程研究所, 碩士論文。
7. Akbulut, S. and Saglamer, A. (2002). “Estimating the Groutability of Granular Soil: A New Approach.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 17, No. 4, pp. 371-380. DOI: 10.1016/S0886-7798(02)00040-8.
8. ASTM D421-85 (2002). “Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants.” ASTM International, West Conshohocken, PA.
9. ASTM D422-63 (2002). “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.” ASTM International, West Conshohocken, PA.
10. ASTM D854-02 (2002). “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.” ASTM International, West Conshohocken, PA.
11. Axelsson, M., Gustafson G., and Fransson, A. (2009). “Stop Mechanism for Cementitious Grouts at Different Water-to-cement Ratio.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 24, No. 4, pp.390-397. DOI: 10.1016/j.tust.2008.11.001.
12. Borden, R. C. (2007). “Concurrent bioremediation of perchlorate and 1,1,1-trichloroethane in an emulsified oil barrier.” *Journal of Contaminant Hydrology*, Elsevier, Vol. 94, No. 1-2, pp. 13-33. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2007.06.002.
13. Burwell, E. B. (1985). “Cement and clay grouting of foundations: Practice of the corps of engineering.” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 84, No. 1, pp. 1551/1-1551/22.

- 
14. Chadi, S. E. M., Jisuk, Y., May, E. K. (2015). "Experimental study on penetration of bentonite grout through granular soils." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 52, No.11, pp.1850-1860. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0422>.
 15. Chang, S. C., Chiang, P. Y., Yu, Y. H., Chen, T. W., Luo, Y. S., Tsai, L. C., and Yu, K. C. (2014). "Soybean oil nanoemulsion and magnetite nanoparticle as remediation enhancers for river sediment: from lab to field." *Journal of Soil and Groundwater Remediation*, Taiwan Association of Soil and Groundwater Environmental Protection, Vol. 1, No. 2, pp. 141-163. DOI: 10.6499/JSGR.2014.0102.004.
 16. Chang, Y. I., and Yang, C. C. (2007). "Treatment of Trichloroethylene in Aqueous Solution Using Nanoscale Zero-valent Iron Emulsion." Unpublished master's thesis. Kaohsiung Taiwan: Institute of Environmental Engineering of National Sun Yat-sen University.
 17. Chun, B. S., Lee, Y. J., and Chung, H. I. (2006). "Effectiveness of leakage control after application of permeation grouting to earth fill dam." *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 10, No. 6, pp. 405-414. DOI: 10.1007/BF02823979.
 18. Clarke, W.J., Boyd, M.D., and Helal, M. (1992). "Ultrafine cement tests and dam test grouting." *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 30, pp. 626-638.
 19. Dano, C., Hicher, P. Y., and Taillez, S. (2004). "Engineering Properties of Grouted Sands." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 328-338. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:3(328).
 20. Dayaker, P., Venkat Raman, K., Raju, K.V.B., (2012). "Study on permeation grouting using cement grout in sandy soils." *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp.5-10. DOI: 10.9790/1684-0440510.
 21. Engineer Manual (1995), "Engineering and Design-Chemical Grouting", Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
 22. Hayashi, S., Chai, X., Matsunaga, K., and Toki, A. (2006). "Drip injection of chemical grouts: A new apparatus." *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 29, No. 2, pp. 108-116. DOI: 10.1520/GTJ12643.
 23. Helal, M. and Krizek, R. J. (1992). "Preferred orientation of pore structure in cement-grouted sand." In R. H. Borden, R. D. Holtz, & I. Juran (Eds.), *Geotechnical Special Publication*, ASCE, 30 ed., Vol. 1, pp. 526-540, Publ by ASCE.
 24. Henn, R.W. (1996), "Practical Guide to Grouting of Underground Structures," New York: ASCE Press, pp. 6-49.
 25. Herndon, J. and Lenahan, T. (1976). "Grouting in Soils." Vol. 2: Design and Operations Manual, Federal Highway Administration, Halliburton Services, Duncan, Oklahoma, Technical Report.
 26. Huang, C. L., Fan, J. C., Liao, K. W., and Lien, T. S. (2013). "A methodology to build a groutability formula via a heuristic algorithm." *KSCE Journal of Civil*

- 
- Engineering*, KSCE, Vol. 17, No. 1, pp. 106-116. DOI: 10.1007/s12205-013-1847-y.
27. Huang, C. L., Fan, J. C., and Yang, W. J. (2007). "A study of applying micro-fine cement grout to sandy silt soil." *Sino-Geotech*, Sino-Geotechnics Research and Development Foundation, Vol. 111, No. 1, pp. 71-82.
 28. Huang, Y. L. and Kao, C. M. (2012). "Application of Long Lasting Substrate to Remediate Trichloroethylene Contaminated Groundwater." Unpublished master's thesis. Kaohsiung Taiwan: Institute of Environmental Engineering of National Sun Yat-sen University.
 29. Incecik, M. and Ceren, I. (1995). "Cement grouting model tests." *Bulletin of The technical University of Istanbul*, Vol. 48, No. 2, pp. 305-317.
 30. Ioannis N. M., Dimitrios N. C., Basil K. P., (2015). "Penetrability of microfine cement grouts: experimental investigation and fuzzy regression modeling." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 52, No. 7, pp. 868-882. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0297>.
 31. Ishihara, K., (1993). "Liquefaction and flow failure during earthquakes." *Geotechnique*, ICE, Vol. 43, No. 3, pp: 629-644. DOI: 10.1680/geot.1993.43.3.351.
 32. Jan, C. D., Kuo, F. H., and Chang, L. Y. (2011). "An experimental study on the time-dependent rheological parameters for kaolin slurries." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, CSWCS, Vol. 42, No. 3, pp. 196-206.
 33. Jian, H. Y. and Kao, C. M. (2009). "Use of In-situ Bioremediation to Treat Trichloroethylene Contaminated Groundwater." Unpublished doctoral dissertation. Kaohsiung Taiwan: Institute of Environmental Engineering of National Sun Yat-sen University.
 34. Jung, Y., Coulibaly, K. M., and Borden, R. C. (2006). "Transport of edible oil emulsions in clayey sands: 3D sandbox results and model validation." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 3, pp. 238-244. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:3(238).
 35. Kao, C. M., Chen, S. C., Wang, J. Y., Chen, Y. L., and Lee, S. Z. (2003). "Remediation of PCE-contaminated aquifer by an in situ two-layer bio-barrier: laboratory batch and column studies." *Water Research*, Elsevier, Vol. 37, No. 1, pp. 27-38. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00254-3.
 36. Kim, G. H. and Kim, J. H. (2004). "Sustainability of the in situ bio-barriers for contaminant containment in residual soils." *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 8, No. 2, pp. 189-195. DOI: 10.1007/BF02829119.
 37. Khayat, K. H., Ballivy, G., and Gaudreault, M. (1997). "High-performance cement grout for underwater crack injection." *Canadian Journal of Civil Engineering*, NRC Research Press, Vol. 24, No. 3, pp. 405-418. DOI: 10.1139/196-129.
 38. Krizek, R. J., Liao, H. J., and Borden, R. H. (1992). "Mechanical properties of

- 
- microfine cement/sodium silicate grouted sand.” In R. H. Borden, R. D. Holtz, & I. Juran (Eds.), *Geotechnical Special Publication*, 30 ed., Vol. 1, pp. 688-699. Publ by ASCE.
39. Kutzner, C. (1996). “Grouting of Rock and Soil.” A. A. Balkema, Rotterdam.
 40. Ladd, R. S. (1978). "Preparing Test Specimens Using Undercompaction." *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23, DOI: 10.1520/GTJ10364J. ISSN 0149-6115.
 41. Liao, K.W., Fan, J.C., and Huang, C.L. (2011). "An artificial neural network for groutability prediction of permeation grouting with microfine cement grouts." *Computers and Geotechnics*, Elsevier, Vol. 38, No. 8, pp. 978-986. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.07.008.
 42. Lin, C. H., Kuo, M. C., Tom., Su, C. Y., Liang, K. F., and Han, Y. L. (2012). “A nutrient injection scheme for in situ bioremediation.” *Journal of Environmental Science and Health*, Taylor & Francis Online, Part A, Vol. 47, No. 2, pp. 280-288. DOI: 10.1080/10934529.2012.640907.
 43. Lin, C. L. and Lin, M. D. (2010). “Transport Assessment of Applying Nano-scale Zero-valent Iron Emulsion in Groundwater.” Unpublished master’s thesis. Taichung Taiwan: Institute of Environmental Engineering of National Chung Hsing University.
 44. Magg, E. (1938), “Ueber die Verfestigung und Dichtung des Bangrundes (injektionen)”, Course on soil mech., Zurich Tech. School.
 45. Markou, I. N. and Atmatzidis, D. K. (2002). “Properties and performance of a pulverized fly ash grout.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 8, pp. 682-691. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:8(682).
 46. Markou, I. N. and Atmatzidis, D. K. (2003). “Mechanical behavior of a pulverized fly ash grouted sand.” *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 26, No. 4, pp. 450-460. DOI: 10.1520/GTJ11252J.
 47. Ni, C. K., James, and Lin, J. F. (2006). “The study of permeation grouting with microfine cement grout.” *Scholarly Journal of National Taipei University of Technology*, Vol. 39, No. 2, pp.77-94.
 48. Nyer E. K. and Geogory B. P. (2004). “Treatment Technology: Special delivery.” *Groundwater Monitoring and Remediation*, Wiley, Vol. 24, No. 1, pp. 34-40. DOI: 10.1111/j.1745-6592.2004.tb00701.x.
 49. Ozgurel, H. G. and Vipulanandan, C. (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. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:12(1457).
 50. Perret, S., Khayat, K. H., Gagnon, E., and Rhazi, J. (2002). “Repair of 130-year old masonry bridge using high-performance cement grout.” *Journal of Bridge*

- 
- Engineering*, ASCE, Vol. 7, No. 1, pp. 31-38. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2002)7:1(31).
51. Rangeard, D., Phan, P. T., Martinez, J., and Lambert, S., (2016). "Mechanical Behavior of Fine-Grained Soil Reinforced by Sand Columns: An Experimental Laboratory Study." *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 39, No. 4, 2016, pp. 648-657. DOI: [10.1520/GTJ20150152](https://doi.org/10.1520/GTJ20150152).
 52. Saiyouri, N., Bouasker, M., and Khelidj, A. (2008). "Gas Permeability Measurement on Injected Soils with Cement Grout." *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Vol. 38, No.1, pp.95-103. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.08.015.
 53. Schwarz, L.G. and Chirumalla, M. (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*.
 54. Sze, K. L. and Fan, J. C. (2008). "A Study on Permeation Grouting and Quantity of Injection with Microfine Cement Grout." Unpublished master's thesis. Taipei, Taiwan. Graduate Institute of Bioenvironmental Systems Engineering of Nation Taiwan University.
 55. Tekin, E. and Akbas, S. O. (2011). "Artificial neural networks approach for estimating the groutability of granular soils with cement-basis grouts." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, IAEG, Vol. 70, No. 1, pp. 153-161. DOI: 10.1007/s10064-010-0295-x.
 56. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice", 1st edition, John Wiley & Sons, Inc, N.Y.
 57. Zebovitz, S., Krizek, R. J., and Atmatzidis, D. K. (1989). "Injection of fine sands with very fine cement grout." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 12, pp. 1717-1733. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:12(1717).

附錄 A 滲透灌漿模擬砂柱試驗結果



本研究利用滲透灌漿技術將3種基質灌注於8種試驗土中(G砂及H砂無法灌注故無數據)，以目視法觀察其滲透現象並記錄基質上升高度與所需時間，其試驗結果如下所示：

滲透性試驗

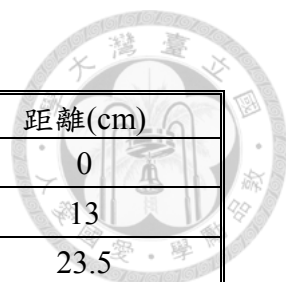
A 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
120	28.5	60	18
200	40	120	28
270	48	180	36
300	51	300	53
480	62	360	58
570	66	510	68
720	73.5	660	75
930	82	960	85
1280	90	1250	90

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
60	10	60	11
120	18	150	20
150	24	240	31
240	33	480	55
480	51	560	63
600	68	600	68
720	77	760	83
820	90	800	90



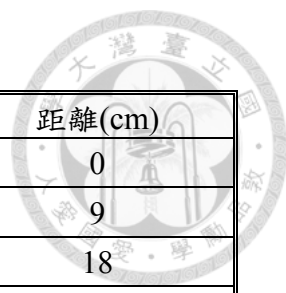
c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
30	8	30	13
60	15	60	23.5
120	25	120	36
180	36	280	64
240	48	300	68
300	60	360	76
480	78	480	84
500	80	720	90
740	90		

B 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
60	8	60	8.5
90	14	120	14
180	24	180	21
300	34	300	29.5
480	49	480	45.5
600	57	720	58.5
1200	77.5	960	67.5
1620	89	1080	71.5
		1620	86.5

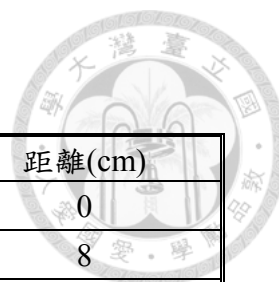


b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
60	11	60	9
150	21	150	18
270	29.5	270	25.5
330	41	360	38
510	55	600	48.5
720	63	720	59
1320	87	960	69
		1440	87

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
60	10	60	12
120	17	120	21
300	34	180	26
540	53	360	40
600	59	480	54
760	69	720	75
960	84	980	85
1080	90	1050	90



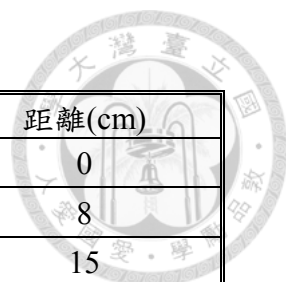
C 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
120	7	180	8
180	9.5	300	13
300	15	900	27
1200	35	1200	33
1500	43	1800	46
2220	58.5	2400	60
3000	75	3600	84
3600	85		

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
120	7	120	10
240	14	210	16.5
480	21.5	480	24
690	32	750	35
900	40	1080	52
1080	47.5	1800	68
1200	56.5	2880	81
1500	65.5	3000	83
1800	71		
2940	83		



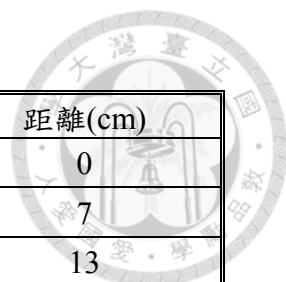
c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
60	12	60	8
120	18	120	15
300	27	300	24
480	39	480	37
720	55	720	48
900	65	840	61
1150	87	960	72
1300	90	1080	83
		1200	90

D 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
120	4.5	120	6
240	8.5	240	10
360	10.5	480	16.5
540	16.5	600	18.5
900	22	900	24
1680	35	1080	26.5
2400	43	1560	33.5
3000	51.5	2040	41
3600	58	2400	46
4800	62	3600	54.5
		4800	57

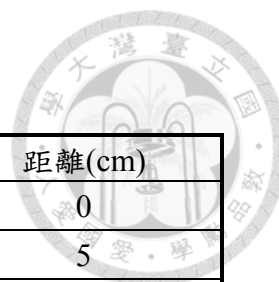


b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
60	6	60	7
300	13	300	13
480	20	900	28
900	28	1200	38
1200	41	1800	51
2400	68	2400	66
2580	70	2520	68
2760	71	2820	69
3060	72	3120	70
3480	73	3450	71

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
130	10	60	7
300	18	270	16
420	30	480	26
720	43	780	38
840	51	1200	53
1350	70	1500	67
1650	90	1800	90



E 試驗柱砂

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:20

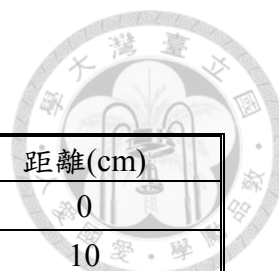
時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
420	6	180	5
1500	10	1980	12
2460	16.5	3960	23
3600	26	8400	36
5400	33	12480	48
8460	44	19620	59
12180	51		
17460	61.5		

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
480	12	300	10
900	18	1200	25
1260	24	3600	37
3000	37	5400	41
4320	44	7200	46
8160	51	14400	53
13800	56	21600	62
18600	61		

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
300	5	300	5
600	9	600	10
900	13	900	15
1800	24	1800	27
3600	31	3600	35
7200	38	7200	43
14400	47	14400	51
21600	57	21600	54



F 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
480	7	900	10
1200	15.5	1200	15
2400	23	2400	25
4200	30	4000	32
9000	36	5000	35
14400	39	14400	41
28800	41	28800	42
33000	42	32000	43

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
180	6	180	5
600	11	360	7
1200	13	900	11
2400	15	1200	14
3000	16.5	2400	16.5
4000	24	3600	22
9000	35	6000	28
14000	42.5	9000	35
21000	48	14000	41

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
480	4	600	4
1800	8	1080	7
4200	14	1800	11
7200	22	7200	20
9000	28	8400	26
14400	36	10800	30
28800	43	28800	41
36000	45	36000	42

基質灌注完畢後，以低壓水流流入砂柱試體已評估其持續性，水流進入後取試體之出流液，以烘乾、測量 pH 值之方法推估試體中基質之殘留量，其試驗結果如下所示：



持續性試驗

A 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	1.96%	4.88		0	1.88%	4.89	
10	2.24%	4.82	99.39%	10	3.14%	4.86	99.27%
20	2.75%	4.81	98.67%	20	3.78%	4.85	98.27%
30	3.48%	4.78	97.77%	30	4.03%	4.84	97.14%
40	3.49%	4.80	96.76%	40	4.62%	4.86	95.88%
50	4.31%	4.77	95.63%	50	4.64%	4.79	94.54%
60	4.56%	4.76	94.34%	60	4.82%	4.76	93.17%
80	4.63%	4.71	91.68%	80	4.88%	4.75	90.35%
100	4.67%	4.70	88.98%	100	5.05%	4.74	87.47%
120	4.79%	4.79	86.23%	120	5.01%	4.85	84.55%
150	4.82%	4.95	82.05%	150	4.99%	5.10	80.20%
180	4.98%	5.12	77.79%	180	5.09%	5.18	75.81%
290	4.81%	6.24	65.02%	270	4.95%	6.35	62.71%
480	0.93%	6.96	50.86%	440	1.48%	7.01	46.84%
560	0.35%	7.01	49.00%	540	0.51%	7.06	43.96%
660	0.21%	7.12	47.79%	690	0.22%	7.12	42.38%
1440	0.20%	7.04	43.14%	1470	0.14%	7.13	38.37%
1680	0.07%	7.02	42.18%	1710	0.09%	7.18	37.60%

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	4.01%	3.77		0	4.07%	3.94	
30	4.71%	3.80	96.21%	30	4.54%	3.80	96.25%
60	4.76%	3.72	92.09%	60	4.37%	3.77	92.37%
120	3.74%	3.89	84.70%	120	3.33%	3.84	85.67%
240	1.59%	4.92	75.44%	240	1.23%	4.86	77.72%
400	0.53%	5.93	70.51%	380	0.68%	6.01	73.85%
550	0.34%	6.15	68.61%	540	0.15%	6.32	71.93%
810	0.35%	6.51	66.01%	790	0.28%	6.48	70.36%
980	0.27%	6.55	64.49%	960	0.17%	6.60	69.25%
1190	0.25%	6.55	62.90%	1160	0.22%	6.79	68.13%
1640	0.27%	6.83	59.51%	1620	0.28%	6.85	64.81%
2650	0.10%	6.88	54.03%	2520	0.10%	7.09	59.81%
2830	0.22%	6.96	53.19%	2700	0.15%	7.07	59.15%

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	3.52%	5.37		0	3.50%	5.36	
30	3.44%	5.45	97.40%	30	3.55%	5.36	97.36%
60	3.55%	5.52	94.78%	60	3.35%	5.41	94.78%
120	3.35%	5.57	89.62%	120	3.40%	5.46	89.73%
240	2.85%	5.46	80.34%	240	3.41%	5.42	79.54%
480	2.54%	5.55	64.20%	480	2.32%	5.4	62.38%
960	1.52%	5.66	39.89%	960	1.68%	5.56	38.43%
1440	1.03%	5.76	24.63%	1440	1.24%	5.71	20.95%
1920	0.72%	6.67	14.18%	1920	0.49%	6.37	10.59%
2160	0.81%	6.77	9.61%	2160	0.45%	6.6	7.78%
2400	0.49%	6.79	5.73%	2700	0.09%	6.9	4.16%
2700	0.37%	6.89	2.54%	3000	0.16%	6.89	3.23%
3000	0.28%	6.85	0.10%				

B 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10



時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	1.52%	4.85		0	1.74%	4.82	
10	1.78%	4.78	99.66%	10	2.17%	4.79	99.59%
20	2.25%	4.76	99.24%	20	2.70%	4.75	99.09%
30	2.57%	4.76	98.74%	30	2.71%	4.73	98.53%
40	2.60%	4.74	98.20%	40	2.71%	4.75	97.96%
50	3.14%	4.74	97.61%	50	2.82%	4.71	97.39%
60	3.30%	4.77	96.94%	60	3.44%	4.70	96.74%
80	3.34%	4.77	95.56%	80	3.61%	4.79	95.28%
100	3.85%	4.76	94.07%	100	3.60%	4.72	93.78%
120	3.96%	4.75	92.45%	120	3.92%	4.72	92.22%
300	5.21%	4.78	75.32%	280	5.30%	4.73	76.90%
420	4.78%	5.76	62.88%	370	5.16%	4.93	67.13%
480	3.18%	6.13	57.92%	400	4.97%	5.53	63.98%
720	0.44%	7.21	48.91%	450	3.82%	6.20	59.41%
1500	0.18%	7.31	43.95%	750	0.33%	7.33	46.47%
1740	0.12%	7.33	43.21%	1530	0.33%	7.37	41.11%

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	4.34%	3.86		0	4.10%	3.87	
30	4.51%	3.90	97.25%	30	4.31%	3.82	97.38%
60	4.43%	3.84	94.46%	60	4.33%	3.83	94.69%
120	4.60%	3.89	88.84%	120	4.64%	3.94	89.11%
240	2.91%	4.34	79.49%	240	3.05%	4.39	79.53%
280	2.06%	4.44	77.43%	380	1.74%	4.63	72.57%
450	0.83%	5.00	72.35%	540	0.88%	5.72	68.21%
560	0.67%	5.83	70.65%	790	0.21%	6.51	65.36%
820	0.24%	6.51	68.19%	960	0.09%	6.43	64.82%
1490	0.32%	6.42	64.26%	1160	0.07%	6.51	64.48%
1640	0.25%	6.44	63.37%	1620	0.22%	6.67	63.09%
2550	0.18%	6.55	59.30%	2520	0.07%	6.68	60.37%
2700	0.21%	6.67	58.68%	2700	0.20%	6.61	59.85%

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	3.36%	5.68		0	3.39%	5.38	
60	3.49%	5.61	96.33%	60	3.27%	5.37	96.43%
120	3.33%	5.45	92.68%	120	3.24%	5.40	92.95%
180	3.22%	5.38	89.17%	180	3.31%	5.42	89.44%
480	2.84%	5.35	72.95%	480	3.02%	5.47	72.49%
960	2.26%	5.37	51.10%	960	2.46%	5.52	49.02%
1680	1.09%	6.11	29.57%	1680	1.27%	6.01	25.07%
2160	0.78%	6.44	21.54%	2160	0.62%	6.59	16.98%
2880	0.24%	6.53	14.98%	2880	0.34%	6.74	10.81%
3200	0.27%	6.61	13.53%	3200	0.22%	6.51	9.21%

C 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	1.12%	5.16		0	1.10%	5.26	
15	1.21%	5.13	99.83%	15	1.11%	5.14	99.83%
30	1.26%	5.03	99.64%	30	1.12%	5.10	99.67%
45	1.61%	4.95	99.42%	60	1.77%	5.07	99.23%
80	3.74%	4.85	98.49%	90	3.32%	4.92	98.47%
120	4.11%	4.86	96.92%	120	3.64%	4.84	97.42%
180	4.47%	4.87	94.34%	180	4.09%	4.86	95.10%
270	4.95%	4.89	90.10%	210	4.40%	4.85	93.83%
370	5.19%	4.90	85.04%	310	4.93%	4.93	89.16%
560	4.85%	4.97	75.51%	500	5.17%	4.98	79.57%
900	0.87%	7.11	65.79%	840	1.02%	7.02	69.05%
1680	0.13%	7.26	61.90%	1620	0.15%	7.10	64.49%
1800	0.08%	7.26	61.78%	1720	0.11%	7.24	64.36%

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	3.07%	3.83		0	3.24%	3.90	
30	3.72%	3.86	98.98%	30	3.51%	3.82	98.99%
60	3.79%	3.96	97.86%	60	3.67%	3.85	97.91%
120	4.49%	3.89	95.38%	120	4.26%	3.93	95.53%
240	4.47%	4.10	90.00%	240	4.70%	4.25	90.16%
400	2.97%	4.41	84.05%	380	3.48%	4.29	84.44%
560	1.26%	4.81	80.66%	540	1.57%	5.02	80.40%
750	0.22%	6.33	79.25%	790	0.38%	6.32	77.95%
980	0.18%	6.32	78.79%	960	0.42%	6.36	77.27%
1190	0.22%	6.23	78.37%	1160	0.29%	6.49	76.56%
1640	0.21%	6.43	77.39%	1620	0.34%	6.52	75.10%
2650	0.23%	6.52	75.15%	2520	0.21%	6.65	72.60%
2830	0.19%	6.46	74.77%	2880	0.19%	6.65	71.89%

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	3.48%	5.4		0	3.44%	5.32	
60	3.44%	5.3	96.68%	60	3.47%	5.36	96.68%
120	3.36%	5.33	93.41%	120	3.53%	5.38	93.32%
180	3.12%	5.4	90.30%	180	3.29%	5.36	90.05%
480	2.90%	5.49	75.86%	480	3.19%	5.36	74.50%
960	2.33%	5.61	55.77%	960	2.50%	5.46	52.65%
1680	1.59%	5.84	33.19%	1680	1.82%	5.96	27.76%
2160	0.72%	6.33	24.32%	2160	0.85%	6.31	17.50%
2880	0.32%	6.45	18.35%	2880	0.27%	6.64	11.05%
3200	0.13%	6.52	17.21%	3200	0.33%	6.67	9.51%

D 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:10

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.22%	5.86		0	0.31%	5.69	
30	0.26%	5.78	99.93%	30	0.32%	5.65	99.91%
60	0.48%	5.61	99.82%	60	0.42%	5.59	99.80%
120	0.86%	5.34	99.44%	90	0.53%	5.48	99.67%
240	2.83%	5.13	97.34%	120	0.66%	5.26	99.50%
480	3.87%	5.12	89.70%	270	2.89%	5.12	96.97%
800	4.54%	5.26	76.91%	360	3.50%	5.10	94.23%
1080	2.00%	6.75	68.22%	620	4.48%	5.24	84.37%
1230	0.41%	7.02	66.51%	800	4.42%	5.34	76.77%
1420	0.05%	7.17	66.10%	1200	0.55%	7.09	67.32%
1530	0.05%	7.18	66.05%	1350	0.05%	7.22	66.89%
1710	0.05%	7.23	65.96%	1550	0.04%	7.31	66.80%
1800	0.05%	7.24	65.92%	1650	0.05%	7.33	66.76%
2400	0.04%	7.25	65.68%	1720	0.05%	7.36	66.73%
				2400	0.04%	7.34	66.46%

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:10

時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (分鐘)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	2.66%	3.87		0	2.58%	3.745	
30	3.06%	3.88	99.18%	30	3.24%	3.743	99.17%
60	3.39%	3.87	98.27%	60	3.61%	3.735	98.19%
210	4.71%	3.87	92.50%	210	4.59%	3.732	92.35%
240	4.66%	3.87	91.16%	240	4.58%	3.714	91.04%
300	4.71%	3.89	88.49%	300	4.66%	3.753	88.41%
420	4.38%	3.88	83.31%	420	4.24%	3.739	83.33%
600	2.15%	4.36	77.72%	580	2.57%	4.12	78.15%
795	0.44%	6.32	75.32%	755	0.74%	5.98	75.40%
1130	0.18%	6.52	74.33%	1090	0.14%	6.565	74.00%
1560	0.13%	6.49	73.69%	1290	0.16%	6.848	73.72%
1630	0.21%	6.52	73.58%	2300	0.12%	6.738	72.39%
2560	0.15%	6.78	71.99%	2360	0.18%	6.69	72.30%
2690	0.13%	6.61	70.88%				

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	3.30%	5.33		0	3.45%	5.35	
30	3.22%	5.34	98.51%	30	3.53%	5.55	98.53%
60	3.25%	5.39	97.04%	60	3.48%	5.62	97.05%
120	2.88%	5.42	94.24%	120	3.12%	5.57	94.26%
240	2.68%	5.51	89.17%	240	2.89%	5.61	89.18%
480	2.58%	5.67	79.58%	480	2.78%	5.51	79.61%
960	2.13%	5.77	62.40%	960	2.32%	5.77	62.38%
1440	1.92%	5.92	47.62%	1440	1.91%	5.90	48.09%
1920	1.52%	5.98	35.07%	1920	1.72%	6.12	35.83%
2160	1.21%	5.97	30.09%	2160	1.26%	6.15	30.81%
2400	0.67%	6.49	26.66%	2400	0.62%	6.49	27.65%
2700	0.24%	6.71	24.59%	2700	0.27%	6.71	25.78%
3000	0.29%	6.87	23.38%	3000	0.21%	6.67	24.78%

E 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:20



時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.54%	5.53		0	0.64%	5.62	
0.5	0.58%	5.68	97.98%	0.5	0.61%	5.65	97.75%
1	0.65%	5.71	95.77%	1	0.70%	5.73	95.39%
1.5	0.87%	5.21	93.03%	1.5	0.77%	5.34	92.75%
2	0.81%	5.11	90.01%	2	0.81%	5.22	89.90%
2.5	0.70%	5.12	87.29%	2.5	0.72%	5.87	87.15%
3	0.51%	5.62	85.11%	3	0.61%	6.01	84.75%
3.5	0.52%	6.54	83.26%	3.5	0.52%	6.24	82.72%
4	0.40%	7.02	81.60%	4	0.45%	6.55	80.97%
4.5	0.42%	7.18	80.13%	4.5	0.37%	6.53	79.50%
5	0.31%	7.19	78.81%	5	0.25%	6.68	78.38%
5.5	0.30%	7.22	77.72%	5.5	0.14%	6.67	77.68%
6	0.20%	7.24	76.82%	6	0.15%	7.15	77.16%
6.5	0.20%	7.25	76.10%	6.5	0.15%	7.26	76.62%
7	0.22%	7.24	75.34%	7	0.16%	7.24	76.06%

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:20

時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.47%	5.52		0	0.51%	5.5	
0.5	0.67%	5.88	97.95%	0.5	0.66%	5.77	97.89%
1	0.68%	5.87	95.52%	1	0.70%	5.76	95.45%
1.5	0.77%	5.65	92.91%	1.5	0.82%	5.42	92.71%
2	0.71%	5.64	90.24%	2	0.83%	5.55	89.74%
2.5	0.69%	6.12	87.72%	2.5	0.78%	5.86	86.84%
3	0.65%	6.54	85.31%	3	0.55%	6.14	84.45%
3.5	0.57%	6.36	83.12%	3.5	0.37%	6.25	82.79%
4	0.47%	6.49	81.24%	4	0.31%	6.37	81.57%
4.5	0.45%	6.78	79.59%	4.5	0.35%	6.66	80.38%
5	0.29%	6.77	78.26%	5	0.26%	6.7	79.28%
5.5	0.22%	6.82	77.34%	5.5	0.22%	6.72	78.42%
6	0.15%	6.80	76.68%	6	0.18%	6.71	77.69%
6.5	0.17%	6.82	76.11%	6.5	0.15%	6.73	77.10%

7	0.47%		75.81%	7	0.51%		76.83%
---	-------	--	--------	---	-------	--	--------

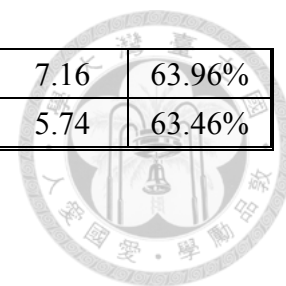
c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.55%	5.53		0	0.53%	5.62	
0.5	0.56%	5.68	98.00%	0.5	0.58%	5.65	98.00%
1	0.70%	5.71	95.73%	1	0.64%	5.73	95.81%
1.5	0.84%	5.21	92.96%	1.5	0.89%	5.34	93.05%
2	0.79%	5.11	90.03%	2	0.87%	5.22	89.88%
2.5	0.72%	5.12	87.31%	2.5	0.75%	5.87	86.97%
3	0.60%	5.62	84.93%	3	0.60%	6.01	84.54%
3.5	0.55%	6.54	82.86%	3.5	0.59%	6.24	82.40%
4	0.44%	7.02	81.08%	4	0.53%	6.55	80.38%
4.5	0.47%	7.18	79.44%	4.5	0.52%	6.53	78.49%
5	0.36%	7.19	77.95%	5	0.47%	6.68	76.71%
5.5	0.36%	7.22	76.65%	5.5	0.35%	6.67	75.23%
6	0.29%	7.24	75.48%	6	0.31%	7.15	74.04%
6.5	0.31%	7.25	74.40%	6.5	0.25%	7.26	73.04%
7	0.29%	7.24	73.32%	7	0.26%	7.24	72.12%

d. 基質 HRC 稀釋比例 1:30

時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.34%	5.67		0	0.35%	5.74	
0.5	0.37%	5.95	97.44%	0.5	0.37%	5.82	97.41%
1	0.48%	6.05	94.38%	1	0.41%	5.88	94.60%
1.5	0.52%	6.07	90.78%	1.5	0.50%	5.57	91.32%
2	0.55%	6.10	86.93%	2	0.51%	5.68	87.69%
2.5	0.57%	6.12	82.90%	2.5	0.54%	5.95	83.91%
3	0.51%	6.11	79.01%	3	0.53%	6.24	80.06%
3.5	0.48%	6.24	75.45%	3.5	0.49%	6.37	76.38%
4	0.35%	6.49	72.46%	4	0.44%	6.66	73.04%
4.5	0.31%	6.58	70.08%	4.5	0.33%	6.85	70.26%
5	0.29%	6.87	67.92%	5	0.26%	6.98	68.14%
5.5	0.18%	7.12	66.23%	5.5	0.22%	7.14	66.41%
6	0.15%	7.15	65.06%	6	0.16%	7.1	65.04%

6.5	0.12%	7.13	64.10%	6.5	0.14%	7.16	63.96%
7	0.34%	5.67	63.67%	7	0.35%	5.74	63.46%



F 試驗砂柱

a. 基質 EOS 稀釋比例 1:20

時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.03%	6.62		0	0.05%	6.58	
0.5	0.05%	6.58	99.74%	0.5	0.05%	6.54	99.66%
1	0.10%	6.57	99.47%	1	0.09%	6.52	99.50%
1.5	0.10%	6.63	98.75%	1.5	0.09%	6.67	98.85%
2	0.07%	7	98.13%	2	0.08%	6.88	98.23%
2.5	0.06%	7.18	97.64%	2.5	0.07%	6.94	97.69%
3	0.06%	7.25	97.19%	3	0.06%	7.21	97.23%
3.5	0.05%	7.28	96.81%	3.5	0.04%	7.25	96.87%
4	0.04%	7.44	96.50%	4	0.04%	7.24	96.58%
4.5	0.04%	7.43	96.24%	4.5	0.04%	7.3	96.29%
5	0.04%	7.45	95.96%	5	0.04%	7.35	95.99%
5.5	0.04%	7.41	95.66%	5.5	0.02%	7.36	95.76%
6	0.02%	7.45	95.43%	6	0.02%	7.42	95.60%
6.5	0.02%	7.44	95.29%	6.5	0.02%	7.43	95.45%
7	0.00%	7.46	95.21%	7	0.00%	7.45	95.37%

b. 基質 HRC 稀釋比例 1:20

時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.04%	6.35		0	0.06%	6.42	
0.5	0.04%	6.36	99.70%	0.5	0.08%	6.45	99.49%
1	0.09%	6.42	99.53%	1	0.10%	6.63	99.36%
1.5	0.08%	6.53	98.94%	1.5	0.10%	6.59	98.63%
2	0.09%	6.61	98.34%	2	0.08%	6.74	97.97%
2.5	0.06%	6.78	97.81%	2.5	0.06%	6.85	97.46%
3	0.06%	6.82	97.38%	3	0.06%	6.84	97.03%
3.5	0.04%	7.1	97.02%	3.5	0.06%	7.01	96.59%
4	0.06%	7.21	96.65%	4	0.06%	7.12	96.17%
4.5	0.06%	7.35	96.21%	4.5	0.04%	7.24	95.81%
5	0.04%	7.34	95.85%	5	0.04%	7.25	95.52%
5.5	0.04%	7.34	95.57%	5.5	0.04%	7.25	95.22%
6	0.04%	7.35	95.28%	6	0.02%	7.32	95.00%
6.5	0.00%	7.36	95.13%	6.5	0.00%	7.33	94.92%
7	0.00%	7.37	95.13%	7	0.00%	7.34	94.92%

c. 基質 EcoClean 稀釋比例 1:20

時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率	時間 (天)	出流液 濃度	pH 值	殘留率
0	0.05%	6.51		0	0.02%	6.51	
0.5	0.11%	6.5	99.40%	0.5	0.07%	6.54	99.68%
1	0.13%	6.477	98.54%	1	0.14%	6.55	98.94%
1.5	0.08%	6.72	97.78%	1.5	0.10%	6.75	98.07%
2	0.08%	7.25	97.19%	2	0.07%	7.25	97.45%
2.5	0.06%	7.24	96.68%	2.5	0.06%	7.24	96.98%
3	0.06%	7.34	96.26%	3	0.06%	7.4	96.51%
3.5	0.04%	7.35	95.90%	3.5	0.06%	7.3	96.07%
4	0.04%	7.42	95.62%	4	0.06%	7.31	95.65%
4.5	0.02%	7.43	95.41%	4.5	0.06%	7.34	95.23%
5	0.04%	7.44	95.20%	5	0.06%	7.3	94.82%
5.5	0.02%	7.43	95.00%	5.5	0.04%	7.32	94.47%
6	0.04%	7.45	94.80%	6	0.02%	7.31	94.24%
6.5	0.02%	7.44	94.59%	6.5	0.00%	7.35	94.16%
7	0.00%	7.43	94.52%	7	0.00%	7.35	94.16%