

行政院環境保護署

105 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

利用滲透灌注技術進行基質最佳稀釋比 例於地下水生物整治之應用研究

期末報告書（定稿）

主 辦 單 位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立臺灣大學／生物環境系統工程學系
專案主持人：范正成 教授
專案執行期間：104 年 11 月 17 日起至
105 年 11 月 16 日止

中 華 民 國 105 年 12 月 印製

「105 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒修正計畫書 ☐期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105 年度	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	范正成	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	利用滲透灌注技術進行基質最佳稀釋比例於地下水生物整治之應用研究		
專案連絡人	郭嘉峻	連絡專線	0919-291-603
政策性審查意見		計畫單位回覆	
1. 請依專案計畫書標準格式撰寫，勿刪除表單及格式，各項次說明或表格勿跨頁。		感謝委員意見，已修改如修正計畫書本文所示。	
2. 「差旅費」中，高鐵車資「說明」之欄位「協同主人」應更正為「協同主持人」。		感謝委員意見，已修改如 p.55 所示。	
3. 請分別於差旅費及租賃費之備註欄內補充說明。		感謝委員意見，已修改如 p.56 所示。	
4. 儀器維護不得重複編列。		感謝委員意見，已修改如 p.55 與 p.56 所示。	
5. 差旅費請依據行政院103 年7 月7 日公告之「國內出差旅費報支要點」編列。		感謝委員意見，已修改如 p.55 所示。	
6. 如編列參加成果發表會之相關費用，單據日期需於計畫執行期程內，始得核銷。		感謝委員意見，遵照辦理。	
7. 本計畫經費編列如有浮編不實之虞，期末檢具核銷審查未通過，將扣除該編列款項，不予以補助（或追繳）。		感謝委員意見，遵照辦理。	
技術性審查意見		計畫單位回覆	
委員 1			
1. 本計畫為延續第一年度成果，模擬現地土壤較細的質地，新增兩種極細砂粒來		感謝委員意見，由於黏土本身因質地較細，較接近不透水層的特性，因而含氯有機物通常無法滲透造成汙染。而在粉土層的部分，	

進行管柱試驗，建議能採用更細質地的土壤（粉土或黏土）來測試才具代表性。	已於本年度的計畫中新增粉土層(渥太華標準砂 A101 型，其粒徑皆小於#200)之管柱試驗，藉以完整的掌握現地各種不同土壤質地的狀況。
2. 基質稀釋比例之依據為何？應說明並預先規劃。	感謝委員意見，本研究使用之基質稀釋比例依據是參考廠商建議與實務工程上之經驗。未來針對基質適用稀釋比例將依據第一年之成果進行調整，如在可達到目標灌注高度的試體，將嘗試降低稀釋比例，期能使基質於試體中的持續時間提升；另在無法達到目標灌注高度的試體，則將提高稀釋比例，期改善無法有效滲透的情形。惟此稀釋比例的調整，仍將盡可能參照基質廠商與實務工程的建議與經驗。詳細內容已新增至計畫申請書中，詳見內文第 30、31 頁。
委員 2	
1. 本計畫應用大地工程中常用於土壤改良之滲透灌漿技術，進行基質注入技術適用性與成效之研究試驗，此技術在漿體可灌的條件下且灌注壓力控制在劈裂壓力以下，可使漿體均勻的注入欲改善之地層孔隙中，提升土壤的強度。本年度為模擬現地土壤較細的質地，新增兩種極細砂之土壤條件進行管柱試驗，並提出適用基質之建議。	感謝委員肯定。
2. 本計畫可發展本土之基質灌注技術，計畫研究方法及步驟具可行性，計畫之成果具應用性，可提升地下水污染生物整治成效。	感謝委員肯定。
委員 3	
1. 延續103 年研究結果，基質選用與篩選原則建置，請補充相關文獻與成果。	感謝委員意見，已補充 103 年度完整的研究成果，詳見內文第 23 頁。

2. 建議應模擬污染場址的土壤特性，作為實驗污染介質，以確保獲得實際可行性分析。	感謝委員意見，本計畫之目的係在於針對可能產生含氯有機物污染的土壤質地進行試驗，包括砂性土壤及坵土層等。針對不同質地土層適用的基質種類與其稀釋比例進行探討，期能有效且均勻的將基質注入土層中。此外，為測試未來模場試驗的可行性，於本研究中即針對渥太華標準砂A101型及渥太華標準砂403型依不同重量比例混合，以模擬現地之不同土壤條件進行灌注試驗，以做為模場試驗的先期研究。而至於實際汙染改善的情形，建議在未來模場試驗完成後，再加入生物、化學特性之相關試驗與分析，藉以更充分的探討基質與污染物之變化。 (註：渥太華標準砂 A101 型為粒徑 $99\% < 0.074\text{mm}$；渥太華標準砂403型粒徑介於0.2中等砂細砂之間，即 $D_{50}=0.2\text{mm}$)
委員 4	
1. 土壤不同深度之質地等級是變動的，去年以粗砂為研究質地，今年以中砂為研究質地，後面還有三年為較細質地，但實際剖面質地是多變的，建議設計不同質地剖面，於短時間內完成。	感謝委員意見，本團隊預計於第一及第二年計畫中，完成不同地層條件下，適合之灌注基質及其稀釋比例，希望透過此研究之成果，未來於第三年的模場試驗中，可先透過鑽探資料的分析以及現場的試水試驗，提出不同地層條件所對應的灌注基質及其稀釋比例；據此，在參照大地工程中之常用於現場的滲透灌漿技術進行灌注。承上題，為測試未來模場試驗的可行性，於本研究中即針對渥太華標準砂 A101 型及渥太華標準砂 403 型依不同重量比例混合，以模擬現地之不同土壤條件進行灌注試驗，以做為模場試驗的先期研究。 (註：渥太華標準砂 A101 型為粒徑 $99\% < 0.074\text{mm}$；渥太華標準砂 403 型粒徑介於 0.2 中等砂細砂之間，即 $D_{50}=0.2\text{mm}$)

2. 加入菌種或基質於地下不同深度之土壤或地下水層，是否能完整的保持其特性發揮其預想的目的很重要，因此此主題在污染現場之實用高。	感謝委員意見。同前所述，本研究以大地工程之物理角度出發，未針對菌種、基質之生化特性做詳細探討，待本研究技術成熟於第三年模場試驗驗證結束後，建議未來再加入生物、化學特性之相關研究，藉以更充分的探討基質與污染物之變化。
3. 消耗性器材編列太高。	感謝委員意見，已重新調整經費編列，內容請參閱內文第 54 頁。

委員 5

1. 已執行類似計畫，建議將既有成果與本計畫的關聯性加以說明。	感謝委員意見，本團隊以往曾針對滲透灌漿技術對土壤抗液化之補強工程已有成功之案例(黃建霖、范正成，2008，「超微粒水泥漿體滲透灌漿與灌注量之研究」)，研究中以低壓灌漿的方式，有效的將超微粒水泥灌注至不同質地的地層內，達到提高土壤強度及抗液化能力。再者，以本計畫探討的議題而言，傳統的重力式基質注入法，有著無法確認基質是否有效且均勻的滲透至土層中之問題。因此，本研究係利用以往滲透灌注技術之成果與經驗，藉以嘗試改善傳統方法無法有效且均勻灌注的問題。最後，本研究現有之成果為針對不同土壤條件提出建議基質之使用，在未來預計能以此標準能確立汙染場址中土壤之可灌性。
2. 執行前EPA 的成果的實際應用性建議評估（例如均質性、土壤質地限制...等等）。	感謝委員意見，本團隊以往曾針對滲透灌漿技術對土壤抗液化之補強工程已有成功之案例(參考文獻:黃建霖、范正成，超微細水泥灌漿材料於砂性粉土層之應用)研究中以低壓灌漿的方式，有效的將超微粒水泥灌注至不同質地的地層內(包含砂性土壤)，達到提高土壤強度及抗液化能力。而在黏土層的部分，由於黏土本身因質地較細，較接近不透水層的特性，因而含氯有機物通常無法滲透造成

	汙染。
3. 表一所示的三種商業化產品均有實場成功案例，建議評估其適用條件與產品特性，本技術是否能克服該類產品傳輸上的限制？	感謝委員意見，針對研究採用的三種商業化產品的實例方面，在本年度計畫中會嘗試進行成功案例的相關資料蒐集，針對其適用條件與限制進行探討。再者，彙整第一年度與本年度之滲透灌注試驗成果，藉以選擇合適的實場進行現地模場試驗。最後，亦於本年度將不同重量比例之渥太華標準砂 403 型與 A101 型混合，以模擬現地之不同土壤條件。
4. 表一所示的擬試驗土壤仍是以細砂為主，就實場而言，釋氫物質在砂質地土壤中的傳輸並非是主要的限制因子，就此類質地的土壤而言，傳統的灌注技術即具可行性，並非一定要採本技術才可。換言之，本技術所擬克服的關鍵之一是傳統灌注所不易達成的土壤質地，表一所示的土壤質地是否符合本計畫所需，建議評估。	感謝委員意見，一般基質注入工法仍以重力流方式注入，使其自然沈降並滲透土層，但此種方式不易確認基質是否能有效地滲透且均勻的散佈於欲整治範圍內的不同土層，故本團隊擬參照第一年及第二年的研究成果，提出不同地層條件所對應的灌注基質及其稀釋比例；據此，在參照大地工程中之常用於現場的滲透灌漿技術進行灌注，期望能改善無法有效滲透之地之土壤，如粉土層，本計畫在本年度將會新增渥太華標準砂 A101 型(其粒徑皆小於 200 號篩)，該砂之粒徑分佈屬於粉土之範圍，以此類土壤進行試驗，期望能提出針對各土壤條件其適用之基質與稀釋比例等灌注條件。
綜合性審查意見	計畫單位回覆
原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。	遵照辦理

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期中報告初審意見表

專案年度	105 年度	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
專案主題	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂		主持人：范正成 NO：08
專案名稱	利用滲透灌注技術進行基質最佳稀釋比例於地下水生物整治之應用研究		
評審委員	審查意見	計畫單位回覆	
委員一	1. 已完成預定之工作項目和目標。	感謝委員肯定。	
	2. 雖然基質稀釋比例的調整可以改善其無法有效滲透之現象，但也需考慮及探討改變基質稀釋比例對於地下水生物整治效率之影響。	感謝委員意見，本研究現階段為針對室內砂柱管柱試驗做不同土壤條件下其適用基質滲透性與持續性之探討，故生物整治之效率、微生物生長與基質濃度之關係並非本研究之探討範疇。	
委員二	1. 本計畫應用土壤改良之滲透灌漿技術，進行基質注入技術之研究試驗，針對基質注入砂柱試體滲透性及持續時間等指標，評估不同土層條件下之各種基質適用性。	感謝委員肯定。	
	2. 計畫結果顯示稀釋比例之改變可以改善無法有效滲透之現象。惟此結果似只適用特殊基質，而並無通用性。	感謝委員意見。本團隊於第一及第二年之計畫為於室內試驗中完成不同土壤條件下，適合之灌注基質及其稀釋比例，並期望能提出不同土壤條件之下其適用之滲透灌注基質與濃度之建議。緣此，本團隊期望第三年度計畫，能利用前兩年之研究成果，應用於現地實場中進行滲透灌注之驗證，並提出於實場中土壤適用之基質與其稀釋比例之建議或限制。	

	3. 建議針對說明使用之限制進行說明。	感謝委員建議。本研究前兩年之計畫為室內管柱試體，其為在特定粒徑之砂質土壤下，以室內重模之方式製作而成，其圍壓與土壤條件皆與現地所差異。緣此，本團隊規劃第三年度的研究計畫，期望能於實場中進行基質滲透灌注之模擬驗證，提出於現地土壤條件下適用的]基質及其稀釋比例與限制。
	4. 後續可補充如何進行實場應用。	感謝委員建議。有關實場之應用，本團隊期望於第三年度以大地工程中的馬歇爾管滲透灌注方式進行基質之注入，馬歇爾管之特色在於可分層灌注且可不需重複鑽孔即可達到重複灌注基質之優點，期望能利用此一技術，於第三年度中探討現地土壤條件下其適用之基質與適合之灌注濃度，並改善既有水井注藥灌注不均勻的狀況，詳細概念將於期末呈現。
	5. 主要成果符合計畫書之內容，目前進度並無落後情形。	感謝委員肯定。
委員三	1. 綜合去年研究結果與本年期中的研究結果，顯示稀釋比例影響不大而基質的差異也不顯著，未來在後續實驗規劃上如何呈現，對於線稀釋比例挑選與應用性，請做具體說明與描述。且建議於「第一年及今年度之成果後，進行現地土壤之實驗室試驗」是否符合原計畫目的？	感謝委員建議，本研究預計於第一及第二年之計劃中提出不同土壤條件下所適用之基質及其稀釋比例，第三年將於現地場址基質滲透之驗證，而原計畫第三年執行模場之整治將延至於第四年進行，整體研究架構請見期中報告第24頁。
委員四	1. 已依計畫進度及項目確實執行。	感謝委員肯定。
	2. 已完成初步結論、成果自評及後續工作說明，應可達成計畫目標。	感謝委員肯定。
委員五	1. 執行現況、流程及方法已說明。	感謝委員肯定。

	2. 計畫後續執行工作項目已說明。	感謝委員肯定。
	3. 計畫執行進度與預定進度相符，本計畫至期中報告時執行進度並無落後。	感謝委員肯定。
	4. 已有初步成果，初步成果與原計畫目標符合。	感謝委員肯定。
	5. 至期中報告時，整體研究成果符合預期。	感謝委員肯定。
	6. 已有初步研究成果，且已有初步討論。但對於成果的實務應用與潛在應用性仍待於期末報告時有更進一步的討論。	感謝委員建議，本團隊擬於第一及第二年的計劃中完成不同土壤條件下重模試體之適用灌注基質及其稀釋比例；因考量實場之地質與圍壓等條件，與室內之土壤重模試體不同，本團隊期望於第三年的研究計畫中，能利用前兩年之研究結果，於現地實場中進行驗證，並針對該實場之土壤條件提出適用之基質及其稀釋比例與其限制。
	7. 研究內容與計畫目的相符，但研究成果的實務應用性仍待期末時具體討論。	感謝委員建議，同上，本研究預計於期末報告中提出不同土壤條件下，適合之灌注基質及其稀釋比例，故在實用性方面可能要與第三年之實場驗證結果，方可提出其使用建議。
	8. 本計畫的目的之一乃在探討生物整治的基質添加，但基質的添加於不同階段有不一樣的需求，初期乃在創造適合環境（例如厭氧或好氧），或是增加ROI，或是在持續維持原已創造出（或改善完成）的環境...等等，所以最佳稀釋比宜有實際應用上的評估。換言之，本計畫的”成效評估”需以實際生物整治的需求為依據。	感謝委員意見，本研究以大地工程之物理角度出發，尚未針對基質之物化特性做詳細探討，未來待本研究技術成熟於第三年模場試驗驗證結束後，預計於第四年之模場整治中將加入生物、化學之特性，並提出整體基質使用之建議，詳見期中報告書之第24頁。

	9. 實驗設計均以”砂質土壤”為對象，建議評估其實務應用性，以國內的既有經驗而言，砂質場址的基質添加均相對容易。	感謝委員意見。以往實場中基質灌注的方式，通常是以重力方式直接將基質倒入井中進行注藥之動作，此一方法較不易確認基質能否於相對粒徑較小之土層中進行滲透；緣此，本研究預計於第三年的計畫中，使用馬歇爾管可分層滲透灌漿的方式進行基質之灌注，以解決基質在較細之土壤條件下無法有效滲透之情形；而有關粒徑更細之土壤，如黏性土壤，由於汙染物較難滲透至該地層，通常其受汙染之程度不大，故本研究並無針對此種土壤進行探討。
	10. 試驗條件之一是”黏性液體”，實務上很少將原高濃度的”黏性液體”加入地下含水層中，建議評估其實務應用性。	感謝委員意見。本研究所使用之基質皆參考各基質相關文獻加水依特定比例稀釋後進行灌注，故實驗上之基質並非原高濃度之基質。
本署 審查意見	無審查意見。	感謝肯定。

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期末報告初審意見表

專案年度	105 年度	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
專案主題	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂		主持人：范正成 NO：08
專案名稱	利用滲透灌注技術進行基質最佳稀釋比例於地下水生物整治之應用研究		
評審委員	審查意見	計畫單位回覆	
委員一	1. 研究為延續型計畫，成果詳實，針對第一年所得結果進行修正，並延續至第二年持續執行，將現地土壤變異性加以考量，結果並且顯示調整基質之稀釋比率對滲透率與殘留率有所影響，但影響有限。所得成果具實務參考價值。	感謝委員肯定。	
委員二	1. 本研究利用大地工程領域之滲透灌漿技術結合地下水污染整治之現地生物整治技術；透過此種整治方式提出不同地質條件下適用的基質及其最佳稀釋比例，包括：(1)不同土壤質地下適用基質之建議、(2)基質最佳稀釋比例試驗及(3)現地模場之驗證。	感謝委員意見。	
	2. 請說明如何透過此技術加強含氯污染物的生物整治成效。	感謝委員意見，於一般基質注入工法方面，傳統上皆利用重力流之方式，直接將基質注入水井之中，使其自然沈降並滲透，但此種方式較無法確認其基質是否能均勻的散佈於欲整治的範圍內，達到最佳整治效果。而本研究應用滲透灌漿之技術，搭配室內管柱模擬試驗，以評估基質在地質中適用特性之評估，其結果可為後續現地生物整治技術，其施工時土壤條件、基質使用上的參考。	

	3. 請說明如何比較本技術的整治效益。	感謝委員意見，於現地整治工法之成效優劣部份，基質是否可均勻的分佈在欲進行整治的污染含水層之間係為一重要之評估項目。故本研究透過應用滲透灌漿之技術，搭配室內管柱模擬試驗，探討其傳輸特性，以評估基質在地質中之適用特性，建議未來可於模場試驗中，應用本技術與一般重力流灌注方式進行試驗，並比較其傳輸特性之差異。
	4. 請進行成本分析，比較本技術和其他技術是否具成本上的優勢。	感謝委員意見，本研究已進行兩年度實驗室試驗，其成果未來建議可透過模場試驗驗證，並藉以了解滲透灌注技術與常用技術之差異，於成本分析上也可進行具體之評估。
委員三	1. 本計畫所規劃之稀釋基質比例，僅適用於部分土壤之特性，若未來實場之土壤特性改變，相關試驗成果、條件或比例，似乎不易應用參考。建議應有較完整之歸納說明。	感謝委員意見，本團隊於第一及第二年之計畫為於室內試驗中完成不同土壤條件下，適合之灌注基質及其稀釋比例，並期望能提出不同土壤條件之下其適用之滲透灌注基質與濃度之建議。緣此，未來建議可進行現地模場試驗，能利用前兩年之研究成果，應用於現地實場中進行滲透灌注之驗證，並提出於實場中土壤適用之基質與其稀釋比例之建議或限制。
	2. 砂柱孔隙率設定為38%，原因為何？若現地土壤孔隙率改變，將如何因應試驗之條件？	感謝委員意見，因考量現地土壤之孔隙率約38%，故本研究之砂柱孔隙率即設定為38%以模擬現地土壤之孔隙率條件。而於現地土壤孔隙率可能改變之部份，仍有待於現場進行灌注試驗時，驗證本研究之成果是否與現場之傳輸特性一致。
	3. 利用灌注滲透試驗，探討基質注入地下水之應用，未來實場應用之差異性，應予以釐清與探討，尤其是不同土壤質地，滲透性(透水係數)等，方能彰顯本試驗未來應用之可行性。	感謝委員意見，本團隊於兩年實驗室試驗獲致之成果，仍待實場應用驗證與探討，目前本研究僅是以不同質地之試驗砂進行試驗，未來若可在現地進行試驗時，即可針對本技術於各基質之擴散傳輸特性進行探討。

委員四	1. 研究內容與計畫目的相符，請補充說明自評表中各項期末達成率與發表論文之進度。	於國內研討會論文部份，目前已將本年度計畫成果發表於中華民國環境工程學會第廿八屆年會；而於國外期刊論文之部份，尚在撰寫中，將於 12 月底前完成投稿。
	2. 綜合去年研究結果與本年的研究結果，再次應證稀釋比例影響不大而基質的差異也不顯著，請具體說明本研究之應用性建議。	感謝委員意見，未來若要採用此技術於土壤整治，則可能需要提高稀釋比例，或者考慮現地圍壓之條件，在土壤劈裂壓力之下增加灌注壓力及以粒料粒徑較小之基質進行灌注，方可能改善基質滲透之情形。
委員五	1. 執行現況、流程及方法說明具體	感謝委員肯定。
	2. 計畫後續執行工作項目及內容已於5.4節說明	感謝委員意見。
	3. 計畫執行進度與預定進度相符	感謝委員肯定。
	4. 整體研究成果符合預期	感謝委員肯定。
	5. 據研究內容所提出之討論與建議合理，但部分成果的解讀與應用條件建議進一步討論	感謝委員意見。
	6. 研究內容與計畫目的相符	感謝委員意見。
	7. 研究成果具體：主要為論文發表	感謝委員意見。
	8. 研究成果的說明建議以實務操作參數加以探討，例如：報告中說明本技術可於現地操作，但現地操作的主要應用參數(稀釋比與土壤質地的關係、稀釋比與原添加基質黏滯度的關係、稀釋比與預期ROI的關係、施加期間壓力變化與其意義 …等等)仍建議具體說明討論	感謝委員意見，本研究以大地工程之物理角度出發，尚未針對基質之物化特性做詳細探討，未來可於模場試驗驗證結束後，並加入生物、化學之特性試驗，才可提出整體基質使用之建議。
	9. 本技術的應用限制條件(5.2.2節的結果仍待進一步的說明)或是適用條件(例如：土壤質地的建議…等)? 建議說明討論	感謝委員意見。本團隊於第一及第二年之成果為於室內試驗中完成不同土壤條件下，適合之灌注基質及其稀釋比例，然其結果係為各實驗砂柱之試驗結果，其相關之適用條件與限制還需待現地實場中進

		行滲透灌注之驗證後才可進行探討。
	10. 稀釋比除了需評估稀釋後擴散的程度與範圍外，仍需將整治所需的物化與生物條件列入(例如稀釋後所能提供的TOC與長效性...等等)，建議討論	感謝委員意見，同第8意見回覆，本研究以大地工程之物理角度出發，尚未針對基質之物化特性做詳細探討，未來可於模場試驗驗證結束後，並加入生物、化學之特性試驗，才可提出整體基質使用之建議。
	11. 本計畫已有具體的研究成果，但是土污基金模場計畫應是以應用性為主，本研究的成果如何應用？應用的條件為何？...等等，建議說明	感謝委員意見。本團隊於第一及第二年之成果為於室內試驗中完成不同土壤條件下，適合之灌注基質及其稀釋比例，然其結果係為各實驗砂柱之試驗結果，其相關之應用條件還需待現地實場中進行滲透灌注之驗證後才可進行探討並給予建議。

專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題		☒ 整治 ☐ 預防 ☐ 評估 ☐ 自訂					
申請機構系所		國立臺灣大學生物環境系統工程學系					
機構地址		臺北市羅斯福路四段一號					
計畫主持人		范正成		職等／職稱		教授	
協同主持人		林高弘		職等／職稱		助理研究員	
專案 名稱	中文	利用滲透灌注技術進行基質最佳稀釋比例於地下水生物整治之應用研究					
	英文	Application of the Most Appropriate Dilution Ratio of the Substrates Using the Permeation Injection Technique to Groundwater Bioremediation					
	關鍵字	滲透灌注技術、基質最佳稀釋比例、地下水生物整治					
執行期程		☒ 1 年期 ☐ 2 年期 (第____年) ☐ 3 年期 (第____年) 自 民 國 1 0 4 年 1 1 月 1 7 日 起 至 民 國 1 0 5 年 1 1 月 1 6 日 止					
計畫主持人		姓名：范正成 E-mail： 專線：02-23633011 jcfan@ntu.edu.tw 手機：0935981509					
專任助理		無					
經費 分析 總 表		專 案 預 估 經 費		金 額		編列說明	
		1.	人事費用		278,000	(1~5 項相加之 50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費		0	(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用		640,340	(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用		29,160	(差旅與租賃費用)	
		5.	雜支費用		52,500	(1~6 項相加之 5%為限)	
		6.	行政管理費		100,000	(1~5 項相加之 10%為限)	
				專案計畫申請總金額		1,100,000	(多年期計畫請列全程經費)

專案主持人 (簽名及蓋章)：_____ 范正成

日期：105 年 10 月 12 日

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案
105 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：105 年 12 月 8 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂		
申請機構系所	國立臺灣大學生物環境系統工程學系	計畫主持人	范正成
專案名稱	利用滲透灌注技術進行基質最佳稀釋比例於地下水生物整治之應用研究		
專案執行期程	☒ 1 年期 ☐ 2 年期 ☐ 3 年期	查核點	☐ 申請 ☐ 期中 ☒ 期末

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產 出發表日期、發表處、發表 名稱、影響指數等)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1	1			
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0			尚在撰寫中
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術						
	(2)技術平台						
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	5	5			
		(2)博士	2	2			
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中心					
		(4)形成實驗室					
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

項目				目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、 技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申 請 中	發明						
			新型/設計						
			合計						
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	3.技術移轉 (專利)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金 (仟元)							
	4.技術移轉 (應用技術)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)							
(2)品種/系(件數)									
C 產學研合作	6.促成合作研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額 (仟元)							
	8.促成取得業 界科專	件數							
		業界投資金額 (仟元)							
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)							

(三) 政策面

目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
項目							
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限）

本研究規劃四年期之計畫，利用大地工程領域之滲透灌漿技術結合地下水污染整治之現地生物整治技術；透過此種整治方式提出不同地質條件下適用的基質及其最佳稀釋比例，包括：(1)不同土壤質地適用基質之建議、(2)基質最佳稀釋比例試驗及(3)現地模場之驗證。

本計畫第一年度已完成滲透灌注試驗設備之建置、試驗流程與效益評估方式等規劃，並使用三種基質與四種不同級配土壤為研究材料，在基質於砂柱試體的滲透性及基質殘留於試體持續時間的考量下，提出不同土壤條件之適用基質種類。

在第二年度計畫中，考量到現地土壤條件的變異性，同時亦參考委員的建議，另增加不同試驗砂條件之試體，模擬現地土壤較細的質地，並提出其適用之基質建議。此外，再進一步針對不同土壤條件的適用基質，進行最佳化稀釋比例的灌注試驗。與前述相同，在灌注滲透性與基質殘留於砂柱試體的持續時間的考量下，提出不同土壤條件下，適用基質的最適用配比。

第三年度的計畫，擬綜合前兩年實驗室之研究成果，結合大地工程中的滲透灌注技術進行現地之試驗，預計利用馬歇爾管將基質以滲透灌漿技術注入地層中，並在附近若干點位取樣，藉此評估各基質在地層中之滲透性及持續性，以驗證前兩年本研究於室內管柱試驗之研究成果。

第四年度計畫期望能進行模場整治試驗，將第三年現地滲透灌漿技術之驗證結果結合生物、化學等層面，實際應用於土壤整治，並在最後提出滲透灌注技術於地下水污染生物整治之實際功效與各基質在工程面上之應用與參考建議。

透過此種整治方式之相關試驗成果，或可使未來相關含氯污染物的整治更具效益，包括成效提升、成本降低及灌注技術精進等。最後，在社會影響方面，此全新且具高效益之整治方式，可使含氯污染物的整治更具可行性，或可加速此類型污染廠址的整治速度與提高土地利用價值。

摘要

現地生物整治法係為現今常被應用於地下水受含氯有機物污染之整治方式。此法常利用重力流方式，使其自然沈降並擴散，但此種方式不易確認基質是否能有效的滲透且均勻的散佈於欲整治範圍。

爰此，本計畫應用大地工程中常用於土壤改良之滲透灌漿技術，進行基質注入技術之研究試驗，針對基質注入砂柱試體滲透性及持續時間等指標，評估不同土層條件下之各種基質適用性。

本年度計畫可分為二部分，第一部分改變基質 HRC 之稀釋比例，探討其在砂柱試體中之滲透性與持續性，期望能提出該基質適用稀釋比例之建議；第二部分針對極細砂試體進行滲透灌注之試驗，期望能提出適用之基質之建議。

由第一部分的試驗結果發現，稀釋比例之改變能改善基質滲透之情形，在 A 砂試體($D_{50}=0.45\text{mm}$)、B 砂試體($D_{50}=0.30\text{mm}$)及細砂試體($D_{50}=0.23\text{mm}$)中，提高 HRC 之稀釋比例至 1:20 可以灌注到目標高度。

第二部分的極細砂試體試驗，研究發現以滲透灌漿之技術無論是 EOS、HRC 或是 EcoClean 皆無法於 C 砂($D_{50}=0.01\text{mm}$)及 D 砂($D_{50}=0.05\text{mm}$)中滲透，而在 E 砂($D_{50}=0.25\text{mm}$)、F 砂($D_{50}=0.27\text{mm}$)中，HRC、EOS 及 EcoClean 三種基質僅可分別滲透至分別約為 50 及 60 公分；持續性方面在 E 砂即 F 砂中則分別高達 90%及 70%。

緣此，稀釋比例之改變可以改善無法有效滲透之現象。極細砂部分，HRC 之滲透性最佳，持續性部分三者皆差不多。針對滲透性較差的土壤，未來則建議朝向提高稀釋比例、增加灌注壓力等方向努力，以改善滲透不佳之情形。

關鍵字:現地生物整治、滲透灌漿、基質、含氯有機物、地下水汙染

Abstract

The method of in-situ bioremediation has been widely used to treat the groundwater polluted by chlorinated organic compounds. To inject the substrates into groundwater, the method by gravity flow is commonly used, so that the substrates or nutrients are injected, and then they will settle and diffuse freely. However, it is difficult to recognize whether the substrates are distributed effectively and evenly in the areas to be treated.

Therefore, in this project, a method of permeation grouting which has been often used in geotechnical engineering to improve the soil was applied. Using this method, experiments are conducted to evaluate the indexes of the permeability and persistence of the substrates in the column-shaped specimens, and to estimate the suitability of different substrates in different soil conditions.

In this year, the project is divided into two parts. First, the dilution ratio of the substrate of HRC is varied to investigate the permeability and persistence in the column-shaped specimens, so that appropriate dilution ratio for the substrate may be proposed. Second, tests of permeation grouting are conducted for the specimens with very fine sand, so that appropriate substrates may be suggested for the sites with similar soil conditions.

The results show the permeation of the substrates can be improved because of the change of dilution ratio. For the specimens made of Sand A($D_{50}=0.45\text{mm}$), Sand B($D_{50}=0.30\text{mm}$) and fine Sand($D_{50}=0.23\text{mm}$), while the dilution ratio for the substrate of HRC is 1:20, the targeted heights of permeation grouting can be achieved. It is found that the specimens with sand C and sand D(D_{50} are 0.01 and 0.05mm respectively) cannot be permeated by neither substrate EOS, HRC nor EcoClean. While the specimens with Sand E($D_{50}=0.25\text{mm}$) are used, the permeation heights for the substrates of HRC, EOS and EcoClean are 48, 42 and 43mm respectively. The persistence for all the three substrates is found 94% are remained 7 days after the clean water flow through the specimens.

Up to now, it is found the conditions in which the substrates cannot permeate the specimens may be improved by changing the dilution ratio. For Sand E, the permeability of HRC is found the best, while the persistence of the three substrates are similar. The tasks to be completed in this project are: (1) to find

the appropriate substrates for the specimens with sand F($D_{50}=0.27\text{mm}$); (2) to suggest the dilution ratio of the substrates for the specimens with Sand C, Sand D, Sand E and sand F.

Keywords: in-situ bioremediation, permeation grouting, substrate, chlorinated organic compound, groundwater pollution

目次

第一章 前言	II
第二章 研究目的	3
第三章 文獻回顧	4
3.1 現地生物整治技術	4
3.2 滲透灌注技術	8
3.3 乳化油管柱滲透試驗	17
3.4 砂柱試體製作與準備	19
3.4 案例介紹	20
第四章 研究方法與過程	25
4.1 工作架構與流程	25
4.2 實驗步驟及研究方法	29
第五章 結果與討論	58
5.1 改變稀釋比例之試驗	58
5.2 極細砂之試驗	58
5.3 結論	75
5.4 建議	75
第六章 參考文獻	77
附錄、試驗數據	

圖次

圖 3.1 微生物處理有機污染物之概念示意圖	5
圖 3.2 生物整治法原理示意圖	5
圖 3.3 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖	6
圖 3.4 好氧直接氧化作用反應機制示意圖	7
圖 3.5 注入井之現地地下水生物處理法示意圖	8
圖 3.6 土層灌漿型式示意圖	9
圖 3.7 底端灌漿球形理論示意圖	10
圖 3.8 砂柱灌漿試驗示意圖	12
圖 3.9 砂柱化學灌漿試驗示意圖	12
圖 3.10 可灌度試驗設備示意圖	13
圖 3.11 柱灌漿試驗示意圖	13
圖 3.12 氣體滲透量測設備示意圖	14
圖 3.13 滲透灌漿模擬試驗設備示意圖	15
圖 3.14 馬歇爾管低壓灌漿示意圖	16
圖 3.15 二重管低壓灌漿圖	17
圖 3.16 一維管柱傳輸試驗	18
圖 3.17 砂柱製作過程	20
圖 3.18 不同砂柱準備程序	20
圖 3.19 阿爾特斯空軍基地鑽孔示意圖	21
圖 3.20 達格威試驗場區域汙染示意圖	22
圖 3.21 功學社場址注入井與地下水流之方向	23
圖 4.1 整體研究架構	25
圖 4.2 甘特圖	26
圖 4.3 高速渦流攪拌機	29
圖 4.4 循環示攪拌路徑示意圖	29
圖 4.5 儲漿桶	30
圖 4.6 人工收集出流液	30

圖 4.7 空壓機.....	31
圖 4.8 空氣調節閥.....	31
圖 4.9 砂柱試體帽蓋.....	31
圖 4.11 試驗設計圖.....	32
圖 4.12 HRC 降解示意圖.....	34
圖 4.13 HRC 分子示意圖.....	35
圖 4.14 EcoClean 成分示意圖.....	35
圖 4.15 EOS® (Emulsified Oil Substrate)外觀圖.....	36
圖 4.16 HRC®(Hydrogen Release Compound)外觀圖.....	36
圖 4.17 EcoClean 外觀圖.....	36
圖 4.18 均質機(homogenizer).....	37
圖 4.19 渥太華標準砂 250 型.....	37
圖 4.20 渥太華標準砂 403 型.....	37
圖 4.21 渥太華 A101 型.....	37
圖 4.22 攪拌機(30QT MIXER).....	38
圖 4.23 500 毫升比重瓶.....	41
圖 4.24 加熱器.....	41
圖 4.25 #100 篩網.....	42
圖 4.26 過篩過程.....	43
圖 4.27 比重瓶.....	46
圖 4.28 鮑氏比重計.....	46
圖 4.29 土壤粒徑分析圖.....	47
圖 4.30 濾材.....	48
圖 4.31 第一年計劃流程.....	49
圖 4.32 第二年計劃流程.....	50
圖 4.33 試驗規劃流程圖.....	51
圖 4.34 乾式賈降法.....	52
圖 4.35 砂柱試體之劈裂現象.....	53

圖 4.36 基質高速拌合情形	54
圖 4.37 基質灌入過程	55
圖 4.38 定水頭模擬系統	55
圖 4.39 水質檢測器(含測量 pH 值功能)	57
圖 5.1 E 砂之灌注時間-高度關係圖	58
圖 5.2 重量濃度與時間關係圖	59
圖 5.3 E 砂試體之殘留率與時間關係圖	59
圖 5.4 pH 值與時間變化圖	60
圖 5.5 F 砂之灌注時間-高度關係圖	61
圖 5.6 重量濃度與時間關係圖	61
圖 5.7 F 砂試體之殘留率與時間關係圖	62
圖 5.8 pH 值與時間變化圖	62
圖 5.9 HRC 灌注中砂試體	64
圖 5.10 HRC 於中砂試體中之重量濃度與時間關係	64
圖 5.11 HRC 於中砂試體中之 pH 值與時間關係	65
圖 5.12 HRC 於中砂試體之殘留率與時間關係圖	65
圖 5.13 HRC 灌注 A 砂試體	66
圖 5.14 HRC 於 A 砂試體中之重量濃度與時間關係	66
圖 5.15 HRC 於 A 砂試體中之 pH 值與時間關係	66
圖 5.16 HRC 於 A 砂試體之殘留率與時間關係圖	67
圖 5.17 HRC 灌注 B 砂試體	67
圖 5.18 HRC 於 B 砂試體中之重量濃度與時間關係	68
圖 5.19 HRC 於 B 砂試體中之 pH 值與時間關係	68
圖 5.20 HRC 於 B 砂試體之殘留率與時間關係圖	68
圖 5.21 HRC 灌注細砂試體	69
圖 5.22 HRC 於細砂試體中之重量濃度與時間關係	69
圖 5.23 HRC 於細砂試體中之 pH 值與時間關係	70
圖 5.24 HRC 於細砂試體之殘留率與時間關係圖	70

圖 5.25 HRC 灌注 E 砂試體	71
圖 5.26 HRC 於 E 砂試體中之重量濃度與時間關係.....	71
圖 5.27 HRC 於 E 砂試體中之 pH 值與時間關係	72
圖 5.28 HRC 於 E 砂試體之殘留率與時間關係圖.....	72
圖 5.29 HRC 灌注 F 砂試體.....	73
圖 5.30 HRC 於 F 砂試體中之重量濃度與時間關係.....	73
圖 5.31HRC 於 F 砂試體中之 pH 值與時間關係	74
圖 5.32 HRC 於 E 砂試體之殘留率與時間關係圖.....	74

表次

表 4.1 原計畫預定完成試驗與實際預定完成試驗表	28
表 4.2 滲透灌注試驗設備名稱	32
表 4.3 各基質之基本特性	36
表 4.4 試驗砂土一覽表	38
表 4.5 土壤不同尺度範圍名稱之定義	39
表 4.6 中砂(403 型)基本物理性質	43
表 4.7 細砂(250 型)基本物理性質	43
表 4.8 A 砂基本物理性質	44
表 4.9 B 砂基本物理性質	44
表 4.10 C 砂(A101 型)基本物理性質	44
表 4.11 D 砂基本物理性質	44
表 4.12 E 砂基本物理性質	45
表 4.13 F 砂基本物理性質	45
表 4.13 去年度之灌注結果	54
表 4.14 第一部分 HRC 稀釋比例	54
表 4.15 第二部分極細砂試驗	54

第一章 前言

含氯有機溶劑常被廣泛應用於脫脂、電子零件清洗及乾洗等工業製程，台灣早期因環保觀念尚未建立，如工廠未能妥善處理製程所產生含氯廢棄物或是廢水，且任意棄置或是排放，則導致嚴重之土壤或地下水受到含氯有機物之污染，桃園 RCA 場址即為國內相當著名的含氯有機物污染場址。

近年來，許多國內外土壤及地下水中陸續發現受到含氯有機物的污染，其中以四氯乙烯(tetrachloroethylene, PCE)、三氯乙烯(trichloroethylene, TCE)及 1,2-二氯乙烷(1,2-dichloroethane)等污染物最為常見，因其比重比水大之緣故，亦稱為重質非水相液體(dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)。此類污染物質因其性質之緣故，在地下水中之傳輸與分佈時，遇到地下水位面之後仍會受重力影響，逐漸移動至更深之地層，直到阻水層或土壤顆粒非常密緻之地層(如黏土層)為止，其傳輸移動之過程深受地質影響，因而造成目前調查與整治上的困難。

針對上述含氯有機物的污染問題，逐漸發展成熟的現地生物整治法(*in-situ bioremediation*)，即為常見之地下水受含氯有機物污染的整治方法。此方法可經由基質(substrate)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。在注入基質方面，目前在市面上已經有許多的生物整治基質商品，如乳化油基質(Emulsified Oil Substrate, EOS®)、釋氫物質 HRC®系列產品(Regenesys Inc. USA)、PermeOx®系列產品(FMC Corporation, USA)，以及 EcoClean 系列產品(ECOCYCLE Inc. Japan)等，均為生物整治常用的食品級基質。上述生物整治常用之食品級基質，經過相關研究及實例之證明，可針對含氯有機物進行處理(張永宜，2007)、(簡華逸，2009 與黃宇伶，2012)。然而，於現地整治工法之成效優劣，仍需視其是否可均勻的分佈在欲進行整治的污染含水層之間而定。一般而言，影響傳輸成效最為顯著的因子即為場址地質條件。在較粗顆粒的場址地質條件下，可以選擇液滴粒徑較大之基質進行添加，即具有不錯的整治效果，但是同樣的基質如果遇到土壤粒徑較小之地層，例如粉土質土壤，則可能就容易導致乳化液阻塞孔隙，造成傳輸效果不理想而影響整治成效。而若改採用液滴粒徑較小之基質，雖然有較佳之滲透性，但其在地下含水層中之存留時間亦相對較短。因此，如何依不同的土壤質地選擇適合的基質進行整治工作，除了能有效達到基質擴散之效果外，亦可以大幅降低整治成本的費用。

再者，在基質注入工法方面，傳統上皆利用重力流之方式，直接將基質注入水井之中，使其自然沈降並滲透。然而，此種方式較無法確認其基質是否能均勻的散佈於欲整治的範圍內，如此其整治成效可能無法達到較佳之結果。

本計畫應用大地工程中常使用之滲透灌漿技術進行基質注入成效之相關試驗。此種滲透灌漿技術於大地工程領域中已應用多年，在許多研究及實地案例中，均已證實其可使漿體均勻注入欲改善地層的範圍內，使欲改善地層的相關特性有明顯的提升(黃建霖等人，2007；范正成等人，2009)。因此本研究應用滲透灌漿之技術，搭配室內管柱模擬試驗，以評估基質在地質中適用特性之評估，可為後續現地生物整治技術，其施工時土壤條件、基質使用上的參考。

第二章 研究目的

本計畫於第一年度參考施國琅(2008)所提出之室內滲透灌漿試驗與歐洲規範 NF P18-891，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)，而室內砂柱試驗使用渥太華標準砂 250 型(中砂)、渥太華標準砂 403 型(細砂)，以不同之混合比例製作 4 種不同的砂柱試體，用以模擬不同情況之地層條件。管柱試驗之評估方法以基質之滲透性及持續性為主，以探求在不同土壤條件下，何種基質具有較佳的滲透能力與較久之持續特性，期望能提出一套用於現地生物整治之基質注入技術及在不同地質條件下基質選用之參考。

本計畫已於第一年度之成果發現，在相同灌注條件下，EcoClean 之滲透性最佳，其次為 HRC，EOS 居後；而在模擬水流之情形下 HRC 殘留率最高，其次為 EOS，以 EcoClean 居後。故針對滲透性及持續性兩部分，提出不同級配之砂柱試體建議灌注之基質，滲透性方面 A 砂($D_{50}=0.45\text{mm}$)、B 砂($D_{50}=0.30\text{mm}$)及細砂($D_{50}=0.23\text{mm}$)方面，僅 EcoClean 能達到目標灌注高度；持續性試驗結果顯示，HRC 的殘留率最高，EOS 次之，而 EcoClean 較其他二者為差。

緣此，本計畫於今年度分為二部分，第一部分為調整稀釋比例：即利用第一年度之成果，調整 HRC 之稀釋比例探求滲透性與持續性之變化，期望提出建議之稀釋比例；第二部分為於細砂試體($D_{50}=0.23\text{mm}$)中添加不同比例之極細砂($D_{50}=0.01\text{mm}$)：期能模擬現地坵土之情形，針對坵土地層提出使用基質之建議與稀釋比例。

本計畫在第三章文獻回顧中，整理及介紹國內外有關滲透灌漿工法及基質等相關研究。第四章介紹滲透性、持續性評估之方法，並介紹室內滲透灌漿試驗之實驗材料、儀器設備、實驗流程與步驟及相關試驗之原理。第五章針對所得之試驗結果，進行數據分析及討論並，對研究結果進行總結，並提出相關的建議。第六章旨在說明後續的研究內容以及未來可行之研究方向。

第三章 文獻回顧

本研究之範疇係為應用地下水污染整治之現地生物整治技術，以及大地工程之滲透灌漿技術，期能結合此兩種領域之特長，達到有效改善含氯地下水污染之目的。因此，本章節將針對現地生物整治技術以及滲透灌注技術等相關文獻進行探討。

3.1 現地生物整治技術

現地生物整治 (in-situ bioremediation) 乃是自然界反應過程，藉由碳源（電子接受者）及微生物有機降解過程，去除或降低污染物的毒性，或轉成無毒性的型態，以達到整治之成果，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。以下則針對生物整治技術之相關原理、反應機制及常用之基質注入工法等進行說明。

3.1.1 生物整治技術之原理與反應機制

生物整治法 (bioremediation) 是一種以自然程序來清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，例如油品類的洩漏物。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 3.1 所示。本法係經由人工添加植入或自然發生的過程中，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，藉此降低或排除污染物之濃度，完成整治作業。

在其反應機制方面，係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，轉為無害的物質；再藉由抽水井使污染區地下水產生洩降錐，使污染物往抽水井方向移動。而被抽出的地下水可進行回收或經處理後排放。本法原理示意圖請參見圖 3.1 所示。

微生物雖然能夠清除有害化學物質，但必須有適當的溫度、營養物及充分的氧氣或無氧環境。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。

實場處理 DNAPL 案例的生物整治法有兩種，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：(1) 好氧氧化作用 (aerobic oxidation)：好氧氧化作用又可分為好氧直接氧化作用與好氧共代謝 (cometabolic) 氧化作用；(2) 厭氧還原脫氯作用 (anaerobic reductive dechlorination)。茲將此兩種反應機制之細節說明如後。



圖 3.1 微生物處理有機污染物之概念示意圖

(資料來源：行政院環保署，”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”，2008。)

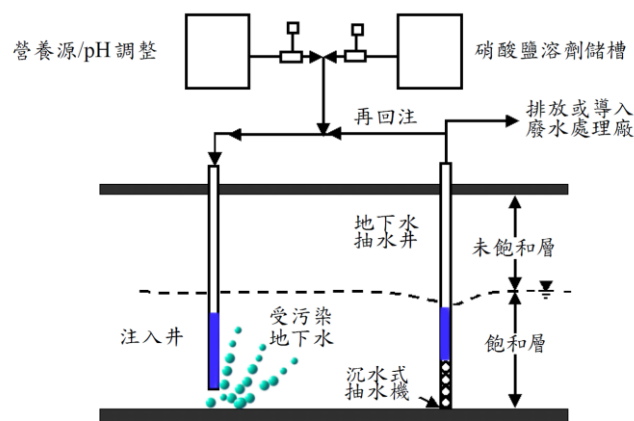


圖 3.2 生物整治法原理示意圖

(資料來源：行政院環保署，”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”，2008。)

(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 3.3 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（monooxygenase），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的環氧化物（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。

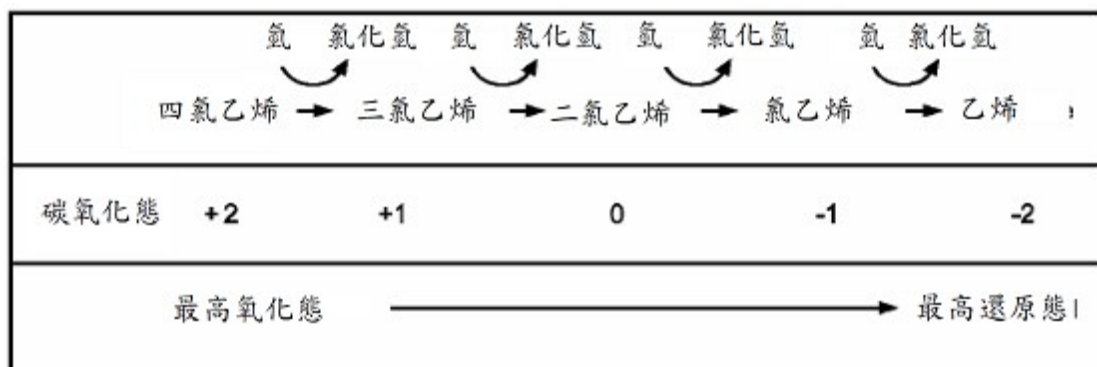


圖 3.3 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖

（資料來源：行政院環保署，”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”，2008。）

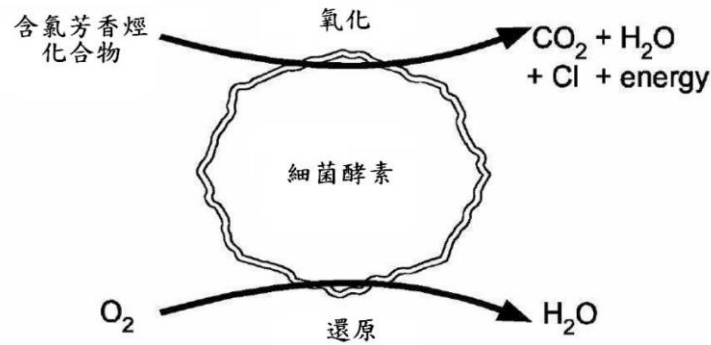


圖 3.4 好氧直接氧化作用反應機制示意圖

(資料來源：行政院環保署，”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”，2008。)

3.1.2 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（或其他物質）或加以處理後，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。

(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。

(4) 生物通氣法：

生物通氣法可將空氣加注於地下水含水層或土壤通氣層中，其目的是提供氧作為電子接受者，而促進生物分解污染物；此外亦有可能以空氣注

入的方式，促使污染區域的低沸點污染物揮發而被去除。

生物整治系統通常包括注入井、管線、井頭設備、監測井、廢水處理設備等。整治設備會隨著不同種類的污染物與場址特性，選取不同的設備或結合其他整治技術，以提升整體的整治成效。

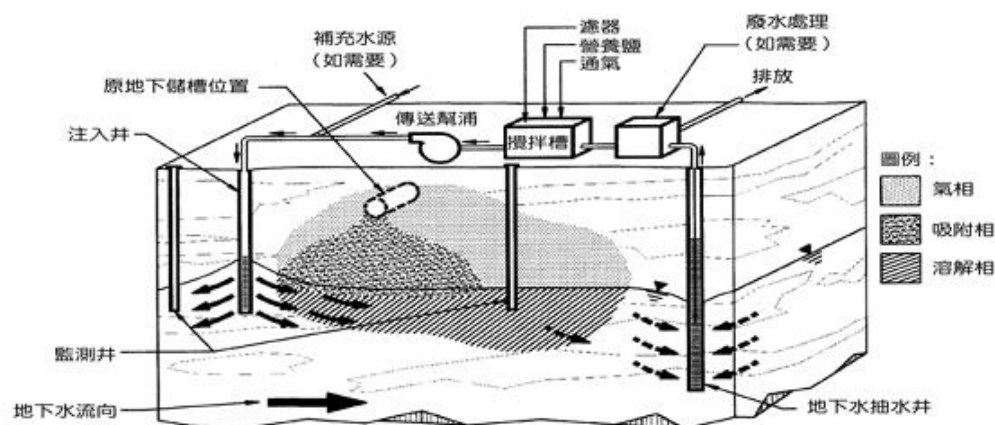


圖 3.5 注入井之現地地下水生物處理法示意圖

(資料來源：行政院環保署，”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”，2008。)

3.1.3 小結

綜合上述之文獻回顧可知，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，為受含氯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實為現地生物整治技術重要之課題。

3.2 滲透灌注技術

為使注入之基質能均勻的散佈於欲改良的土層範圍中，本計畫擬應用大地工程領域中常採用的土壤改良灌注技術進行研究。此技術依照灌漿對象的不同，大致可分為土壤之改良灌漿、岩盤之裂縫灌漿和結構物之補強

灌漿；其中以土壤之改良灌漿與本研究之應用範疇相似。在土壤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 3.6 所示。其中，以本研究之目的而言，係以滲透灌漿之方式較為適用。茲將滲透灌注技術之相關說明整理如下。

3.2.1 滲透灌漿

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

Magg (1938)指出水泥漿體在土層中的滲透範圍受到許多因素影響，例如：漿材種類、漿液黏滯度、漿液膠凝時間、土層的種類、土層的滲透係數、土壤孔隙率、灌漿壓力、灌漿速度及灌漿孔直徑等。而且 Magg 提出的球型擴散理論為近幾十年來最具代表性的灌漿原理，其滲透灌漿理論之模型圖，如圖 3.7 所示。

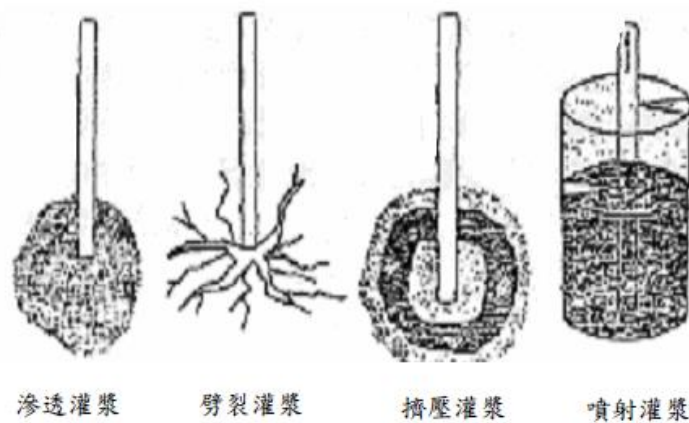


圖 3.6 土層灌漿型式示意圖
(摘自 倪至寬與林任峰，2006)

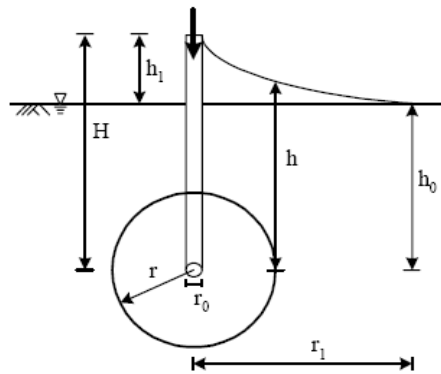


圖 3.7 底端灌漿球形理論示意圖
(摘自 地基處理手冊，1988)

3.2.2 既有的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。緣此，當地層的有效孔隙或裂隙尺寸 D_p 大於灌漿材料的顆粒尺寸 d ，其比值 R 大於 1 時，漿體才是可灌的。然而，在灌漿過程中，當漿液的濃度較大時，材料往往以兩粒或多粒的形式同時進入孔隙或裂隙，故而導致土壤孔隙的阻塞。因此，僅滿足 $R > 1$ 的條件是不夠的，還必須考慮由群粒堵塞作用帶來的附加影響。

此外，多數地層其粒徑都是不均勻的分佈，含有大小不等的孔隙，灌漿材料的顆粒尺寸也很不均勻。如 D_p 採用土層中的最小孔隙以及 d 採用灌漿材料的最大顆粒，理論上就能確定其漿體的可灌性，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 and 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 。

3.2.3 室內滲透灌漿試驗

為了能選定適當之灌漿孔位、灌漿配比以及施灌壓力等，一般於正式施工前，皆會進行前導試驗以確認如此之施工方式是否能達到預定成效。然而，由於現地試驗的成本過高，因此亦可借助室內灌漿試驗之研究，初步觀察其灌注成果，作為現地試驗之參考。以下將相關室內灌漿試驗之文獻彙整如下。

Zebovitz et al. (1989) 使用 MC-500 型之超微粒水泥灌漿材料，進行三種不同種類砂之灌注模擬試驗，並在砂中加入粒徑小於 #200 (0.074mm) 之細粒料(Silt)，以研究細粒料含量與不同粒徑分佈之砂對漿體可灌性之影響；試驗結果顯示，灌注前後砂柱試體皆獲得明顯的改善，此外，細料的添加量只需 5%，對可灌性即有顯著的影響，其灌注試驗與滲透試驗設備如圖 3.8 所示。

Ozgurel et al. (2005) 建立之室內灌注模擬設備，如圖 3.9 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。

倪至寬與林任峰(2006)利用研究室建製的可灌度設備製作直徑 3.78 公分，高度 36.8 公分的試體，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，包括比重試驗、凝結時間試驗以及泌水試驗。此外，倪至寬等人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 3.10 所示。

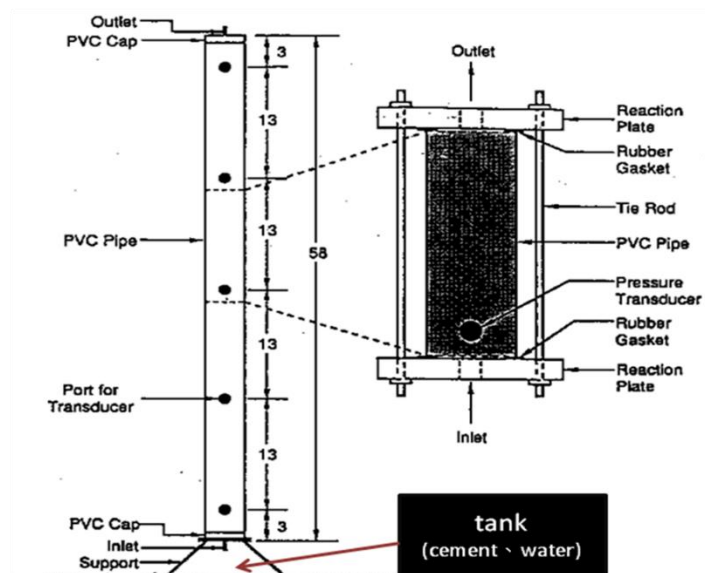


圖 3.8 砂柱灌漿試驗示意圖
(摘自 Zebovitz et al., 1989)

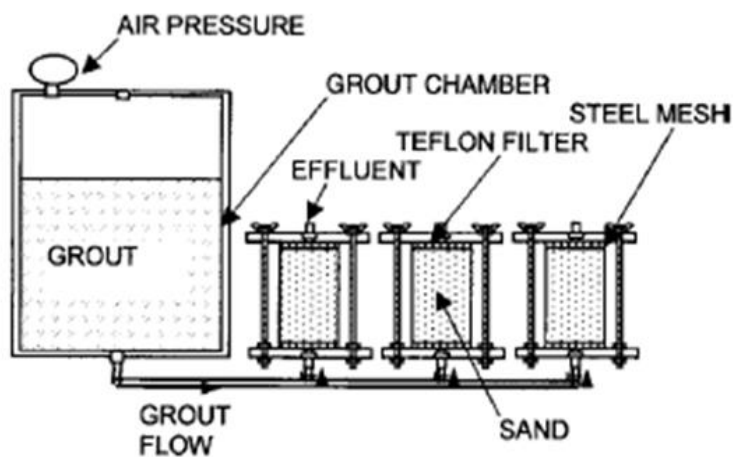


圖 3.9 砂柱化學灌漿試驗示意圖
(摘自 Ozgurel et al., 2005)

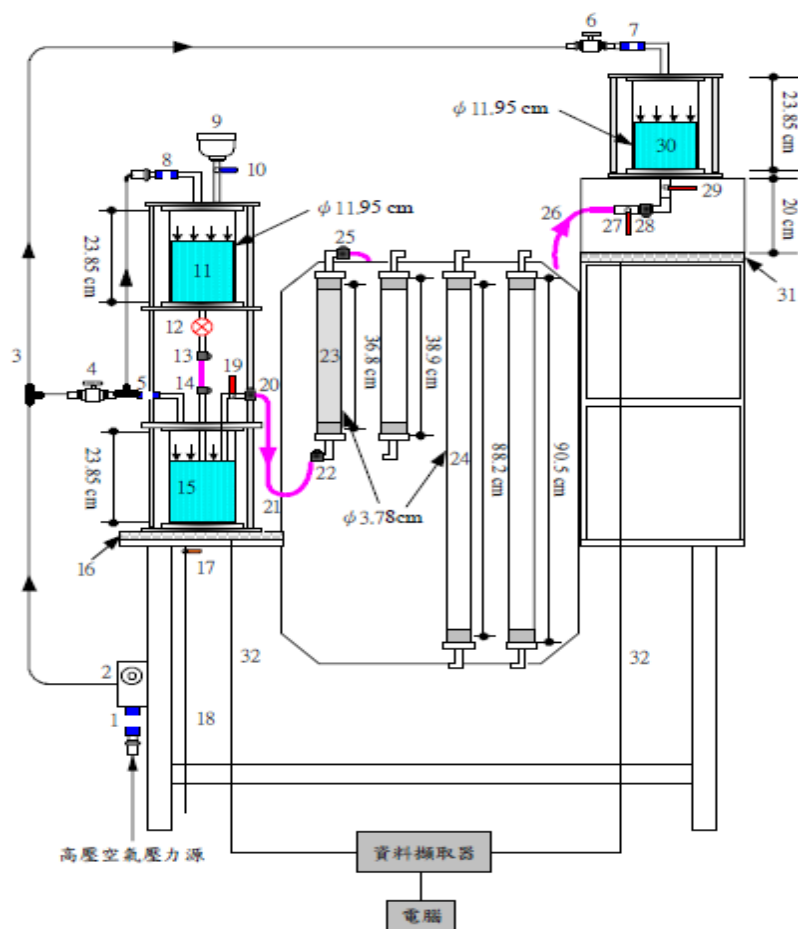


圖 3.10 可灌度試驗設備示意圖
(摘自 倪至寬與林任峰，2006)

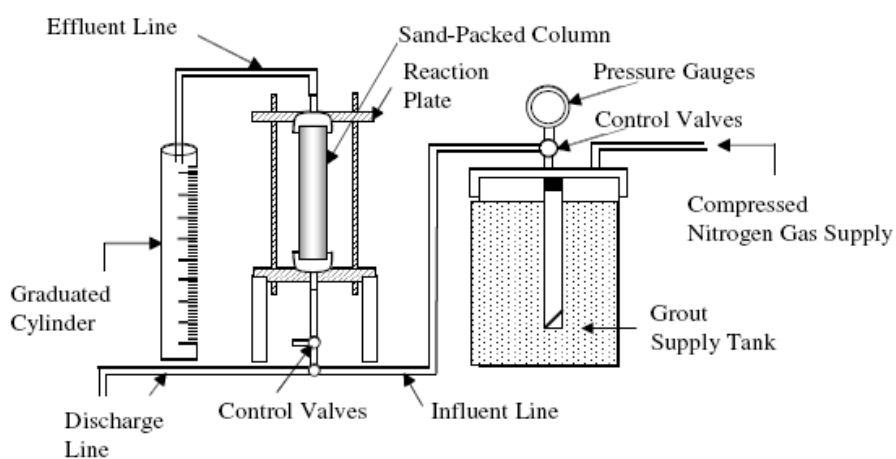


圖 3.11 柱灌漿試驗示意圖
(摘自 Schwarz and Chirumalla, 2007)

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 3.11 所示。

Saiyouri et al. (2008) 以 3 種不同水灰比之超微粒水泥漿體灌注於不同相對密度之砂柱試體並利用氣體傳導度之方式進行本質滲透性係數 (Intrinsic coefficient of permeability) 之量測，其結果顯示灌注前後試體之本質滲透性從 $10^{-4}(\text{m/s})$ 改善到 $10^{-7}(\text{m/s})$ 左右，其灌注設備如圖 3.12 所示。

范正成等 (2008) 設計一套滲透灌漿模擬試驗之設備，並建立試驗流程與步驟，其灌漿試驗設備如圖 3.13 所示。在試驗中發現，超微粒水泥漿體於同一灌注條件下，水灰比 1 至水灰比 5 之漿體在達到預定改良之試體高度時，所需的灌注量介於 1.16 倍至 1.63 倍的孔隙體積。於同一水灰比、不同級配之砂柱試體情況下，超微粒水泥漿體所需之灌注量有相近的孔隙體積倍數。此外，超微粒水泥漿體於較高的水灰比下，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。

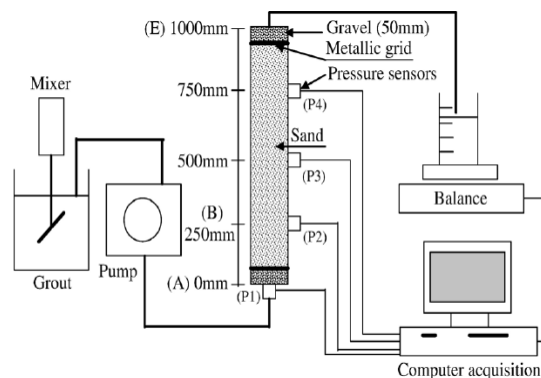


圖 3.12 氣體滲透量測設備示意圖
(摘自 Saiyouri et al., 2008)

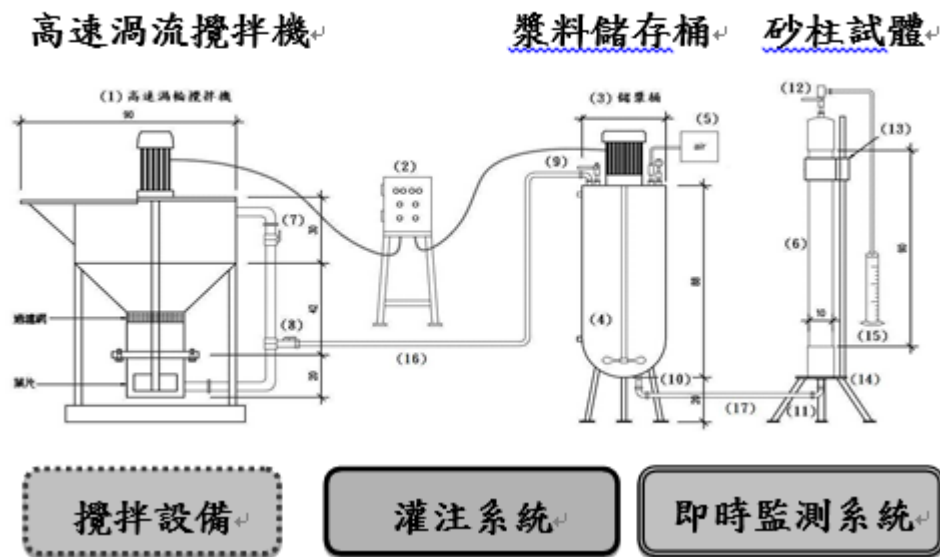


圖 3.13 滲透灌漿模擬試驗設備示意圖
(摘自 范正成等，2008)

3.2.4 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载力，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(Soga et al., 2004)，如示意圖 3.14。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；俟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，再將雙栓塞移至次級位置進行灌漿。

二重管低壓灌漿方面，係於灌注位置以傳統鑽機或手提氣動式鑽機，採用 $\phi 40.5\text{mm}$ 二重鑽桿進行鑽孔，首先以 2 徑混合方式將瞬結型漿液注

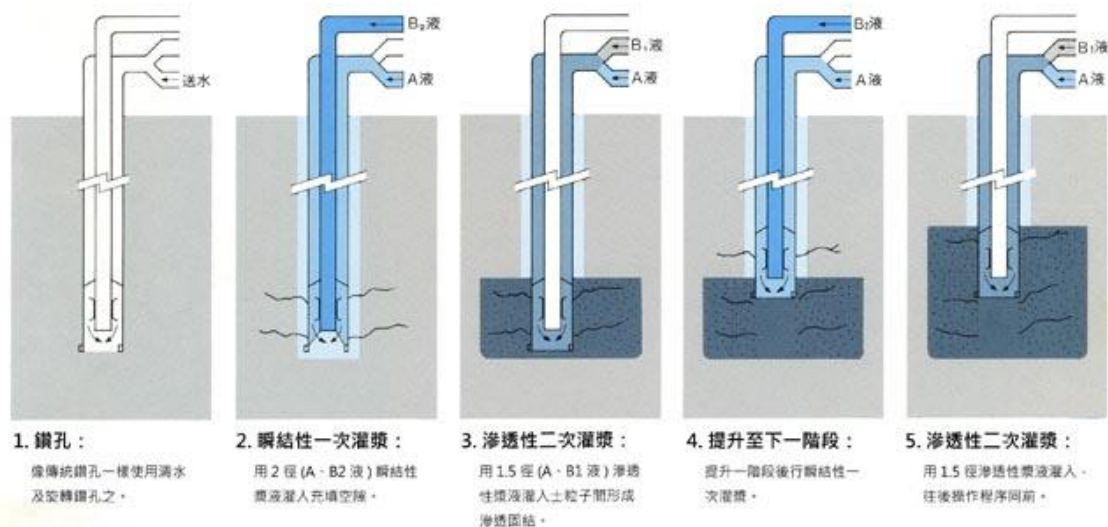


圖 3.15 二重管低壓灌漿圖

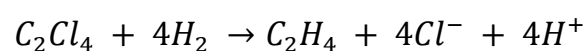
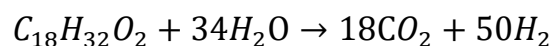
3.3 乳化油管柱滲透試驗

3.3.1 乳化油基質

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，因此較易與汙染物質接觸，油滴表面具有負電荷可減少被土壤沉積物捕捉避免阻塞，但由於其水溶性的特性，若使用在低滲透區土層時可能會受到地下水流影響而必須長期重複地添加。

EOS 成分中含有快速釋出基質及慢速釋出基質，快速釋出基質可在短時間內活化微生物，慢速釋出基質可供微生物長期生長約 3~5 年，而其中的氨基酸、維他命、礦物質等可使得土壤中的微生物生長達到最佳化。

生物降解的過程中，乳化油基質 EOS 中的大豆油($C_{18}H_{32}O_2$)為大量電子供給者，如下式所示大豆油本身會經由發酵反應生成氫氣及低分子有機物，生成的氫氣做為可作為高氧化數 TCE 的電子提供者，進而還原脫氯成低氧化態的乙烯，如式所示。



3.3.2 乳化油基質於管柱試驗

Borden 等人於 2006 年發表相關 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。

張書奇等人針對砂土、砂土與黏土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

林明德(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 3.17 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。

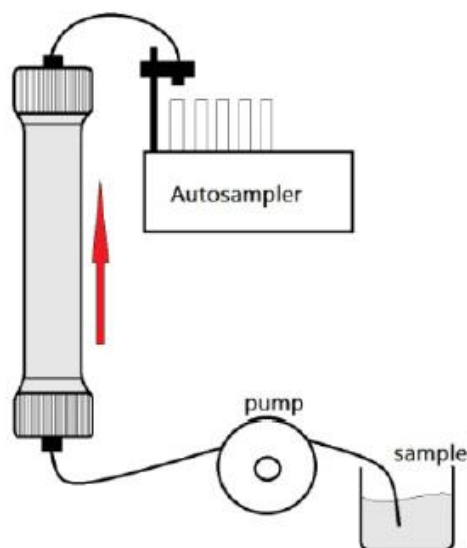


圖 3.16 一維管柱傳輸試驗
(摘自 林明德等，2011)

3.3.3 小結

綜合上述相關的文獻與資料的蒐集，將以不同孔隙大小的試驗砂去模擬現地土壤，以滲透灌漿技術將乳化油基質注入試體中。效益評估方面，烘乾秤重之方法雖為可行，但仍需考慮乳化液之揮發特性、成分，未來樣品分析前仍需進行多組檢量測試。

3.4 砂柱試體製作與準備

砂柱試體的製作因為灌注材料不同大致上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不同，本節將介紹有關室內滲透灌漿的砂柱式體製作。

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 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 90 公分高、直徑 10 公分之 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 3.18 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 5.1 公分、長 91.4 公分之 PVC 管。先在 PVC 管下方先放入尼龍網，再依序為 7.7 公分高的濾層分為別 1.3 公分(粒徑 4.74-2 公厘)、1.3 公分(粒徑 2.0-1.18 公厘)、5.1 公分(粒徑 1.18-0.84 公厘)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 100 公分、直徑 10 公分之 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 3.19 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%。

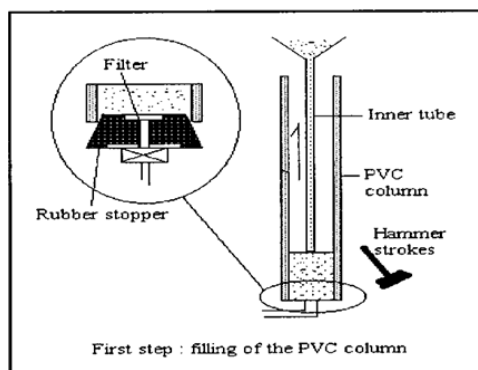


圖 3.17 砂柱製作過程
(摘自 Dano et al.2004)

Procedure	A	B	C	D	E
Top		3	3	18	75
			3	18	
		3	4	19	
			4	19	
1m		3	5	20	
			5	20	
		3	6	21	
			6	21	
		3	7	22	
Bottom			7	22	

圖 3.18 不同砂柱準備程序
(摘自 Saiyouri et al.,2008)

3.4 案例介紹

為了解現地場址中受地下水污染整治所使用的基質以及其適用之土壤限制條件，本研究將針對乳化油基質之案例進行國內外資料之蒐集彙整，其彙整結果概述如下：

3.4.1 阿爾特斯空軍基地

阿爾特斯空軍基地(Altus Air Force Base)位於美國奧克拉荷馬州，地處於奧克拉荷馬市西南方約 6.4 公里處。該地受到含氯有機溶劑之污染，如

四氯乙烯、三氯乙烯……等，該地也已於 2000 年 7 月開始進行整治。 Lee et al.(2000) 於 SS-17 場點以食用油基質 EOS 整治該地有所成效，其方法為將基質 EOS 注入滲透井，多個滲透井將形成一道滲透性反應牆(如圖 3.19 所示)，藉由推進水或是地下水流通過該反應牆將 EOS 逐漸滲透至整治場區，藉以達到整治汙染的功效。該場址之地質條件，以 SS-17 為例，其地質屬於中等塑性砂質黏土，地下水深度距地表大約 2.4~3.1 公尺，平均水力傳導度 8.7(ft/day)，平均水力梯度約為 0.003(ft/ft)，平均孔隙率約為 0.15。

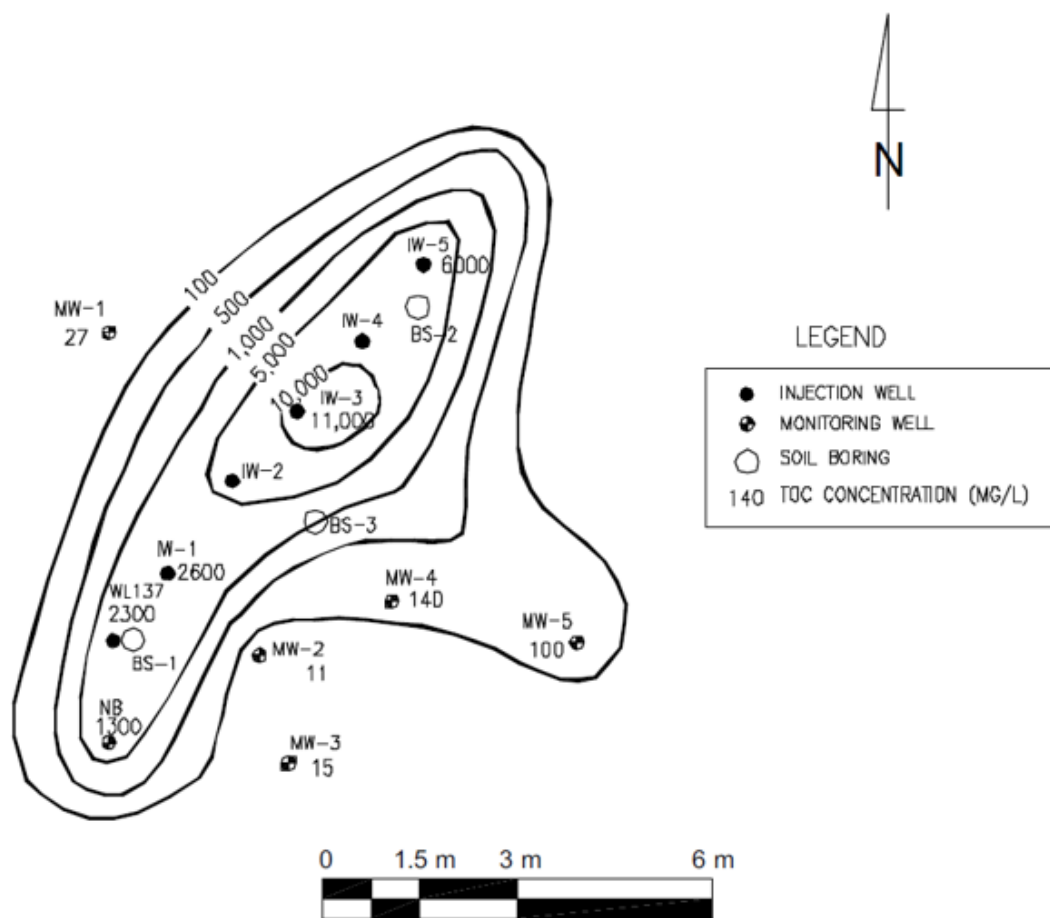


圖 3.19 阿爾特斯空軍基地鑽孔示意圖

(摘自 PILOTS TO ENHANCE TRICHLOROETHENE REDUCTIVE DECHLORINATION AND FERROUS SULFIDE ABIOTIC TRANSFORMATION, Michael D. Lee)

3.4.2 達格威試驗場

根據 Whiting et al(2008) 達格威試驗場為美軍生化武器之試驗場地，位於鹽城湖市西南方約 140 公里處，占地面積約 3243 平方公里。由於該地受到三氯乙烯 (2300 $\mu\text{g/L}$)、二氯乙烯 (<1 $\mu\text{g/L}$) 之汙染(如圖 3.20 所示)，整治之

方式為將乳化植物油、乳酸菌及溴化鈉等混合液約3000磅由四個鑽入井直接注入。該地之地質主要由四種黏土層與四種砂土層互相交錯為主，其中又以砂土層為目標整治區域，砂土層位於地表下約8公尺處深，該砂土層之上層又以砂質土壤為主，而下層以粉質土壤為主，該區域之地下水流方向為西北方向東南方，水力傳導速度約為0.00262(cm/sec)。

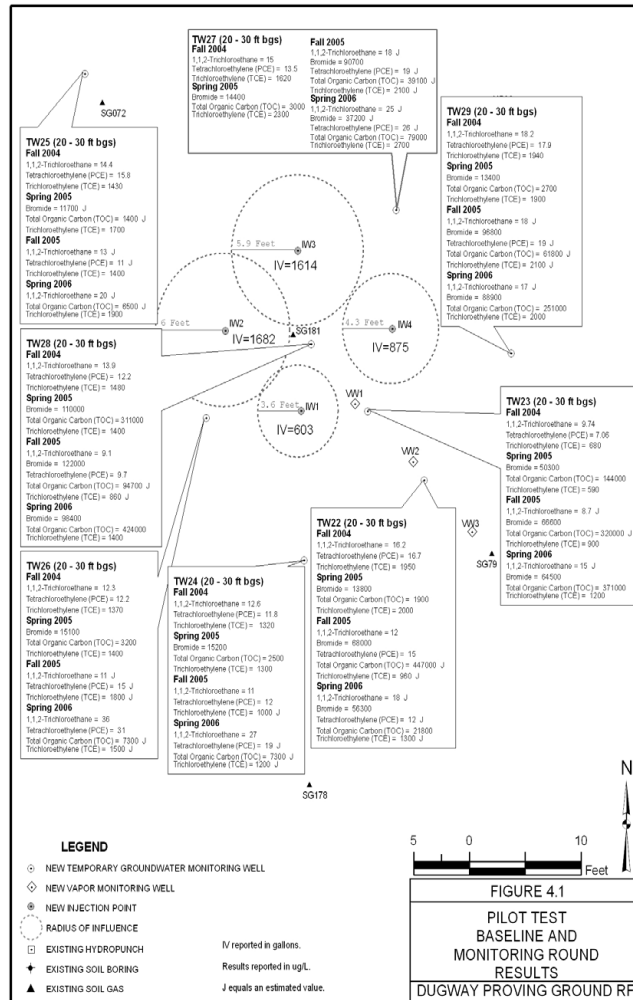


圖 3.20 達格威試驗場區域污染示意圖

(摘自 In Situ Biogeochemical Transformation of Chlorinated Ethenes Using Engineered Treatment Systems,2008)

3.4.3 功學社

根據功學社教育用品股份有限公司過嶺第一場地下水污染整治場址之污染整治計畫，功學社教育用品股份有限公司位於桃園縣中壢市過嶺里福嶺路 399 號，該場址曾經使用有機溶劑清洗銅管樂器等音樂製品，由於廢水沒有受到妥善地處理，導致該地受到有機溶劑之污染，目前已受到控管並且以 EOS 基質進行灌注之動作。該地總面積共 29,380.15 平方公尺，依經濟部中央地質調查所地質資料整合查詢系統查詢結果顯示，該地區地質

主要以紅土台地堆積層與沖積層兩種，以紅土台地堆積層佔絕大部分土地。地質鑽探之結果顯示主要以礫石夾紅色中、細砂為主，場址地表下約 53 公尺處開始出現細顆粒之黏質粉土，而地下水流向為由西南往東北方向流動（如圖 3.21 所示）。(資料來源:功學社教育用品股份有限公司過嶺第一場地下水汙染整治場址之汙染整治計畫，MWH Americas Inc., Taiwan Branch)

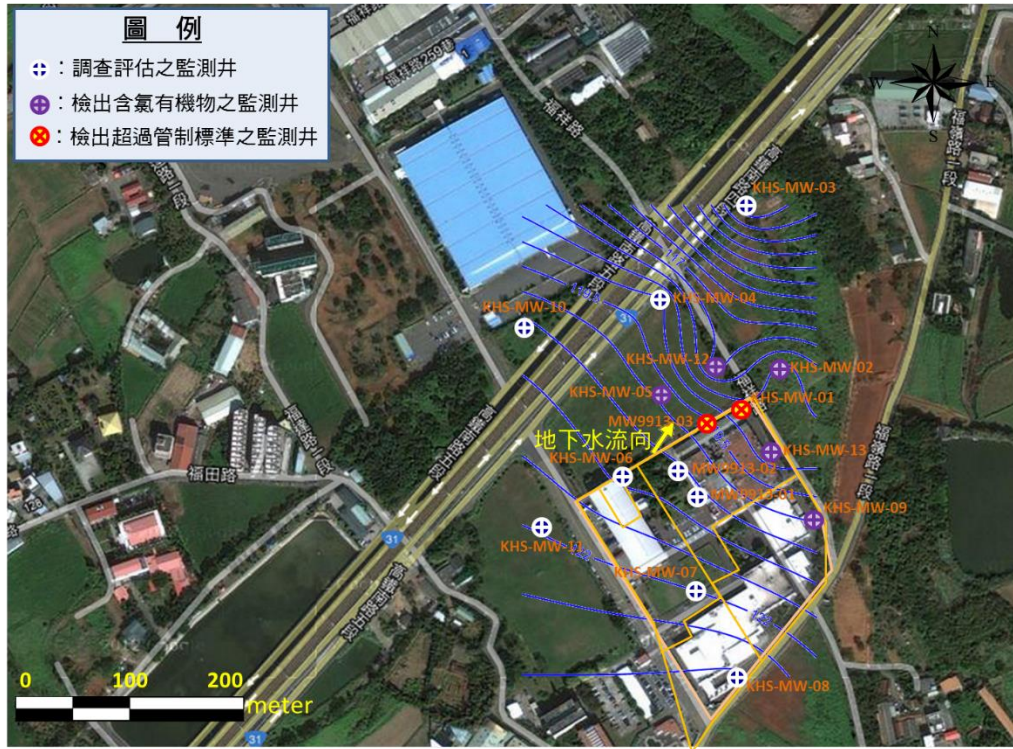


圖 3.21 功學社場址注入井與地下水流之方向

(摘自功學社教育用品股份有限公司過嶺第一場地下水汙染整治場址之汙染整治計畫)

3.4.4 台南市永康區某含氯乙烯之汙染場址

許茹婷等人以現地生物降解法針對含氯乙烯汙染場址進行整治，研究地點為台南市永康區某含氯乙烯類有機物質之汙染場址，利用 EcoClean 於現地培養脫鹵菌種(DHC 菌)，並利用該菌種將三氯乙烯等高氧化數含氯有機物質降解成毒性較低之乙烯，模場試驗為期 160 天，共分成兩階段注藥，第一階段注藥量為 5500 公升，帶地下水氧化還原電位升高後，再注入 5000 公升藥劑。

研究場址為台南市永康區，場址內多為工商業用地，2001 年於地表下 10 公尺發現其地下含水層受到四氯乙烯及三氯乙烯之汙染，由於地表上多是民房或建築物故不利於大規模之整治施工，因此利用場址內少數之空地

進行生物整治之灌注，以地下水流傳導之特性將生物藥劑擴散至整治之區域。於模場中設置一口注藥井及五口監測井，監測井與注藥井距離為0.54~0.92 公尺不等，其注藥井與監測井如圖 3.22 所示。

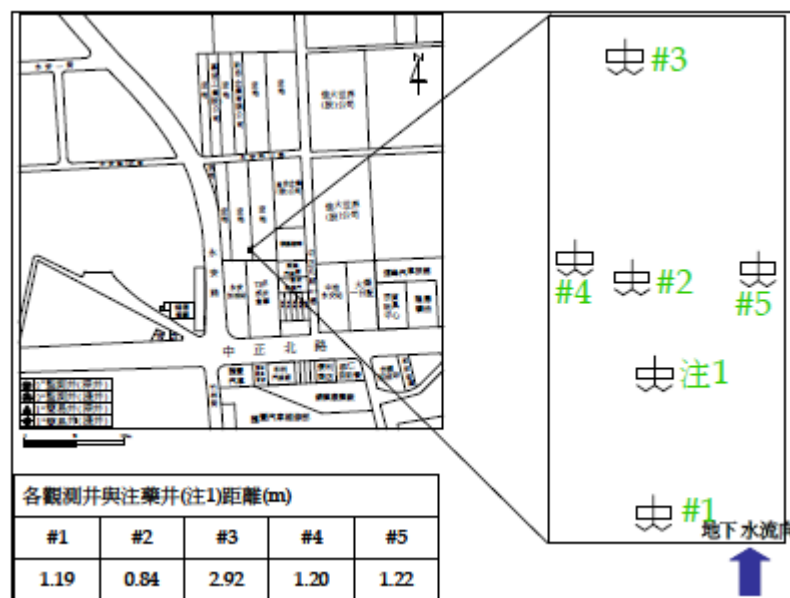


圖 3.22 許茹婷等人於台南市永康區進行之模場試驗示意圖

3.4.5 小結

根據場址文獻之蒐集，於基質之注入方式方面，常挑選欲整治區域之地下水流之上游進行，於若干個注入井中加入基質，而注入井會形成一道類似生物反應牆之機制，地下水流通過反應牆將基質帶往下游土壤進而整治，而土壤條件也會受到限制，其質地常為玢質砂土、粉砂或是礫石等孔隙較大之土壤較有利於基質之滲透。於成果方面，經過二年多之整治，阿爾特斯空軍基地之三氯乙烯濃度從 $9.9 \mu\text{M}$ 以減少至小於 $0.043 \mu\text{M}$ ；而達格威試驗場在5個月內三氯乙烯之濃度從 $2300(\mu\text{g/L})$ 減少至 $1400(\mu\text{g/L})$ 。

第四章 研究方法與過程

4.1 工作架構與流程

本計畫於今年之目的主要分為二部分，第一部分在於建立不同土壤條件下，基質 HRC 及其最適用之稀釋比例；第二部分為針對極細砂做適用基質之灌注試驗，期望能依照試驗之結果，提出極細砂土壤之建議使用基質及稀釋比例，並提出一套用於現地生物整治之基質注入技術及不同地質條件下基質選用之參考。去年度及今年度之計畫中，主要著重於室內滲透灌注試驗的部分，期能透過試驗條件的控制，找出不同土壤條件下之適用基質種類，再針對該基質的稀釋比例及注入條件，以進行最佳化之調整及測試。在第三年計畫中，參照室內試驗的結果進行模場試驗之驗證，預計於現地實場中進行基質之灌注，以大地工程常用的滲透灌漿方式，利用馬歇爾管將基質滲透灌注於地層之中，並針對現地土壤條件提出適用基質之建議與其稀釋比例之參考；而第四年計畫則應用第三年之現地灌注經驗進行模場整治之計畫，期能提出一套用於現地生物整治之基質注入技術及不同地質條件下基質選用之參考。整體研究架構如圖 4.1 所示。

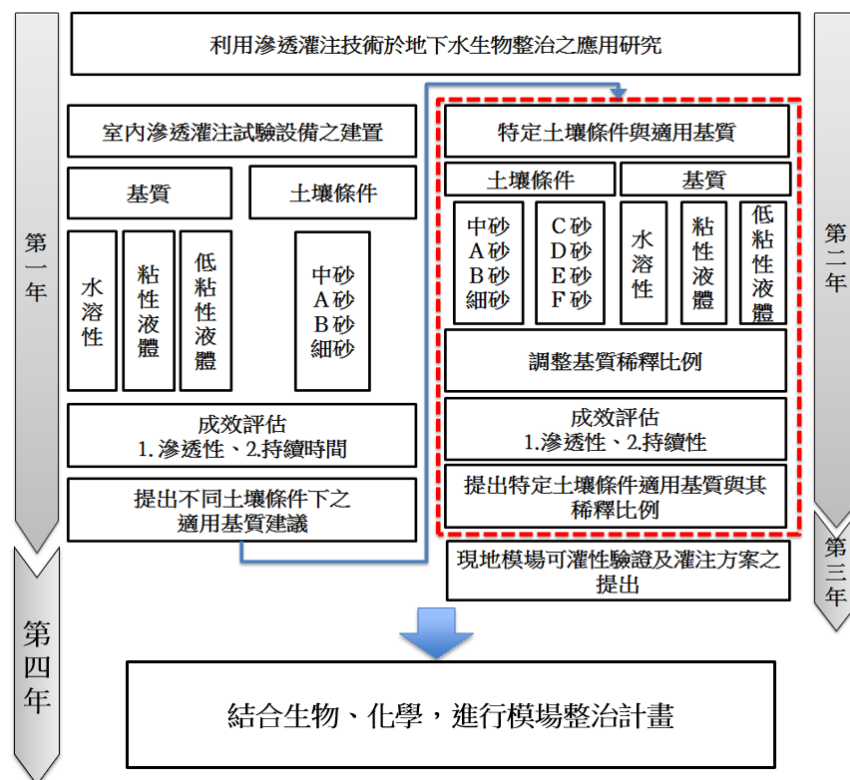


圖 4.1 整體研究架構

(註：有關各試驗砂土之代號說明，請見 4.2.2.2 節)

依據圖 4.1，本研究於第二年之試驗旨在探討稀釋比例之改變對於滲透結果之影響，與在極細砂之土壤條件的地層中適用之基質建議及稀釋比例。基於上述，本研究排定第二年之工作進度及預期完成工作項目如圖 4.2 所示。而本計畫於期中報告之成果，皆已依照期程安排完成各工作項目之內容。各項成果詳述如後。

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備 註
1.室內試驗方法之規劃及確立													
2.砂柱試體等耗材設備之建置完成													
3.蒐集實場成功案例，並提出未來模場試驗之建議場址													
4.第一階段滲透灌注試驗(計 8 支試體)													
5.第二階段滲透灌注試驗(計 24 支試體)													
6.第三階段滲透灌注試驗(計 8 支試體)													
7.基質滲透性及持續時間之成效評估						※							
8.提出不同土壤條件下適用基質與稀釋比例之建議												※	
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	15%	25%	35%	45%	50%	55%	65%	75%	85%	95%	100%	
預定查核點	期中		1. 砂柱試體等耗材設備之建置完成 2. 完成 3 支劈裂壓力試驗 3. 至少完成 13 支滲透試驗，並提出初步成效評估之結果。										
	期末		4. 完成 40 支滲透試驗，包含 4 支劈裂壓力試驗，共完成 44 支試驗。 5. 提出基質灌注成效評估之結果 6. 提出不同土壤條件之適用基質與稀釋比例建議										

圖 4.2 甘特圖

本研究於期中已完成稀釋比例調整與極細砂之試驗。稀釋比例部分試驗內容為 1 種基質、4 種砂(中砂、A 砂、B 砂及細砂)共 4 組二重複，計為 8 支管柱試驗；極細砂試驗部分也已完成 3 種基質、3 種砂(C 砂、D 砂及 E 砂)共 9 組二重複試驗，計為 18 支管柱試驗，加上劈裂試驗 3 支砂柱試驗，故在期中以前已完成 29 支管柱試驗。值得注意的是，原期中查核點為完成劈裂壓力試驗試體 3 支與 13 支砂柱試驗共 16 支砂柱試驗，但於期中試驗期間發現 C 砂與 D 砂之試驗試體灌注成果不如預期，故新增 13 支砂柱試驗試體進行試驗。(有關各試驗砂土之代號說明，請見 4.2.2.2 節)

本研究於期末也完成了 E 砂、F 砂之灌注以及改變稀釋比例之試驗，2 種砂、3 種基質，共 6 組二重複試驗，計有 12 支試體，以及稀釋比例之改變，2 種砂、1 種基質，共 2 組二重複試驗，計有 4 支試體。

根據期中灌注 E 砂之結果，本研究將於未來進行 5%極細砂之試體灌注，預計在期末將完成 5%極細砂與三種基質共 3 組二重複與 1 支劈裂壓力試驗，共 7 支管柱試驗；而後將選擇較適用之基質進行稀釋比例之調整，將進行 1 種基質、四種砂(C 砂、D 砂、E 砂與 F 砂)，共 4 組二重複、8 支管柱試驗，故於期末總計將進行 15 支管柱試驗。故本研究預定完成之試驗修正如下表。

表 4.1 原計畫預定完成試驗與實際預定完成試驗表

原計畫預定試驗	支數	實際預定完成之試驗	支數	已完成
HRC 之稀釋比例改變試驗	8	HRC 之稀釋比例改變試驗	8	✓
C 砂之劈裂壓力試驗	1	C 砂之劈裂壓力試驗	1	✓
C 砂之試驗	6	C 砂之試驗	6	✓
D 砂之劈裂壓力試驗	1	D 砂之劈裂壓力試驗	1	✓
D 砂之試驗	6	D 砂之試驗	6	✓
		E 砂之劈裂壓力試驗	1	✓
		E 砂之試驗	6	✓
		F 砂之劈裂壓力試驗	1	✓
		F 砂之試驗	6	✓
C 砂之適用基質之稀釋比例	2	C 砂之適用基質之稀釋比例	2	✓
D 砂之適用基質之稀釋比例	2	D 砂之適用基質之稀釋比例	2	✓
		E 砂之適用基質之稀釋比例	2	✓
		F 砂之適用基質之稀釋比例	2	✓
現地土壤之劈裂試驗	1	現地土壤之劈裂試驗	0	
現地土壤之試驗	2	現地土壤之試驗	0	
合計	29		44	

(註：有關各試驗砂土之代號說明，請見 4.2.2.2 節)

4.2 實驗步驟及研究方法

本研究為了提出基質之稀釋比例建議，以及極細砂試體中基質適用性之參考。以下將針對滲透灌注設備、試驗材料、基質滲透模擬試驗之規劃、基質滲透模擬試驗之流程與步驟及效益評估等部分進行說明。

4.2.1 滲透灌注設備

本研究參考施國琅(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，其中包含高速渦流攪拌機及氣壓式灌漿設備，其分別說明如下：

4.2.1.1 高速渦流攪拌機(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流攪拌機(High colloidal mixer)，如圖 4.3 所示，拌合轉速約為 1780 rpm，設計上以循環式的攪拌路徑使基質得到充分的拌合，如圖 4.4 所示。此外，攪拌設備上裝置有三個球閥，其功能分別為循環式的攪拌路徑之開關、使漿體輸送到儲漿桶之開關及清洗設備排水之開關。



圖 4.3 高速渦流攪拌機

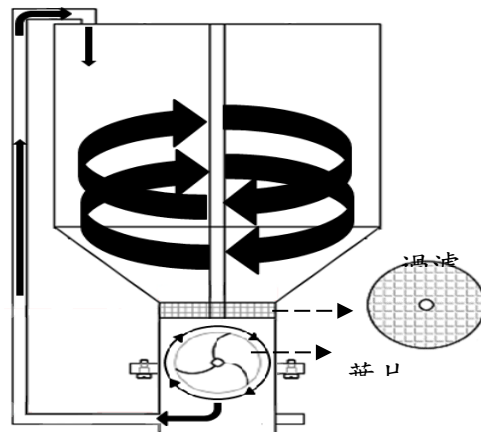


圖 4.4 循環示攪拌路徑示意圖
(摘自 施國琅，2008)

4.2.1.2 儲漿桶

儲漿桶(如圖 4.5 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。



圖 4.5 儲漿桶



圖 4.6 人工收集出流液

4.2.1.3 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/cm²(約 170psi)，為提供試驗時所需之空氣壓力，如圖 4.7、圖 4.8 所示。



圖 4.7 空壓機



圖 4.8 空氣調節閥

4.2.1.4 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，於 PVC 管內放入試驗砂後，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 4.9、圖 4.10 所示。



圖 4.9 砂柱試體帽蓋



圖 4.10 三向通路

表 4.2 滲透灌注試驗設備名稱

設備編號	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)~(12)	(13)	(14)	(15)	(16)、(17)
名稱	高速渦流攪拌機	電力控制系統	儲漿桶	慢速攪拌機	壓力控制置系統 (空壓機)	PVC 模具	開關球閥	活動管夾	三角支架	量筒 (1000ml)	管線

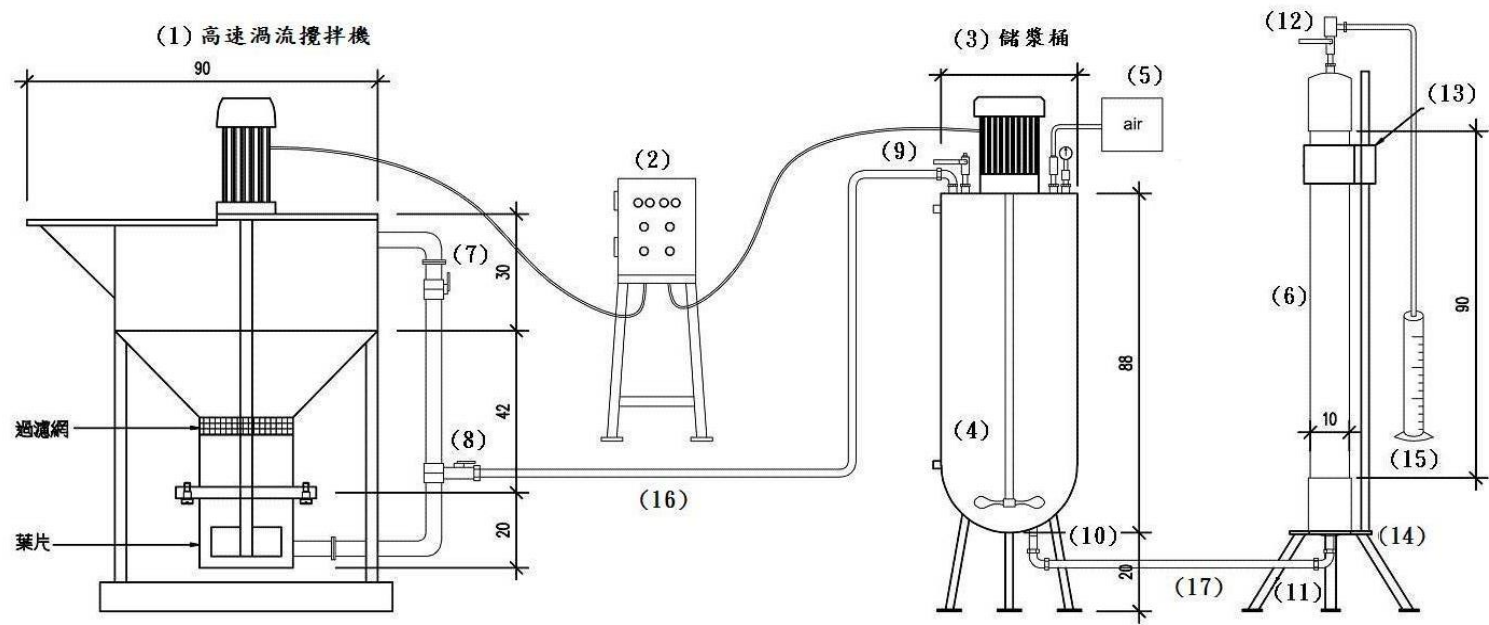


圖 4.11 試驗設計圖

4.2.2 試驗材料

本研究於試驗材料之部分，分為基質、試驗砂土與濾材，各材料之介紹與其相關試驗分述如下：

4.2.2.1 基質之選用及其性質

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。近年來針對厭氧鹵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，將氫氣提供給厭氧鹵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(Regenesys 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)。以下則針對本研究預計採用的三種不同基質進行介紹。

(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 (部份產品外添有維他命 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 比重介於 0.96 ~ 1.00 g/ml；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。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（Method Patent），已廣泛使用於世界諸多先進國家。

(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，主要成分有甘油及乳酸鹽類(Glycerol, Tripolylactate)，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，如圖 4.4 所示。

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。

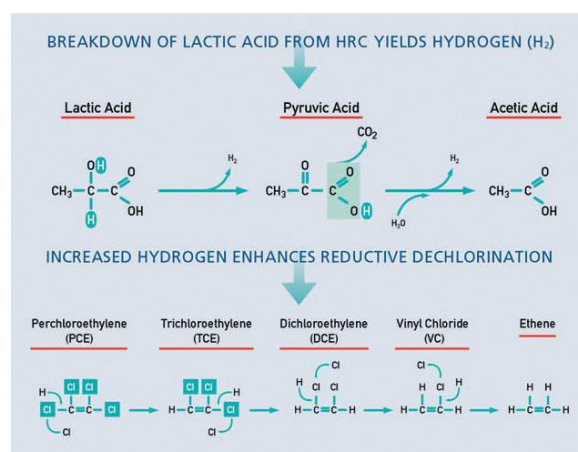


圖 4.12 HRC 降解示意圖

(摘自 A COMPREHENSIVE PERFORMANCE ANALYSIS
OF HYDROGEN RELEASE COMPOUND)

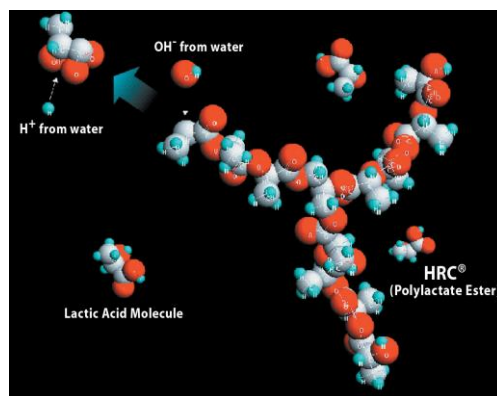


圖 4.13 HRC 分子示意圖

(摘自 A COMPREHENSIVE PERFORMANCE ANALYSIS
OF HYDROGEN RELEASE COMPOUND)

(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，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洲其他國家。EcoClean 適用於含氯有機物之厭氧生物整治，屬於粉末狀，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。



圖 4.14 EcoClean 成分示意圖

(摘自:Biostimulants for Soil and Groundwater Bioremediation, ECOCYCLE
CORPORATION JAPAN)

表 4.3 各基質之基本特性

項目	顏色	比重	氣味	毒性	平均粒徑	酸鹼值	黏滯性 (20℃,centipoise)
EOS	乳白色	0.96~1.00(g/ml)	樹脂、油味	無	約 1.0μm	弱酸性	370~380
HRC	琥珀色	1.3(g/ml)	油味	無	NA	中性	190~200
EcoClean	白色	NA	無味	無	NA	中性	40~45



圖 4.15 EOS® (Emulsified Oil Substrate)外觀圖



圖 4.16 HRC®(Hydrogen Release Compound)外觀圖



圖 4.17 EcoClean 外觀圖

然而於現地灌場址中，注入基質的方法可分為推進水灌注與直接注入，其分述如下：

a.推進水灌注

將基質原液以水稍加稀釋後從注入點灌入，並以推進水(chase water)緩慢地從注入點流入，以水流將基質均勻散佈至整個施作場址。

b.直接注入

將基質原液以較大量的水稀釋，一般稀釋率的範圍為 1：10~1：30，不同基質有不同之稀釋建議。本研究將針對第一年之結果在建議範圍之內調整各基質之稀釋比例，而詳細基質之稀釋比例將於後續滲透灌注模擬試驗規劃作介紹。

c.基質之拌合時間

為使基質能更均勻的分散至水中，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。本研究即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 4.18 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。



圖 4.18 均質機(homogenizer)

4.2.2.2 試驗砂土與相關試驗

本研究進行所使用之砂料為渥太華標準砂 250 型(中砂)與 403 型(細砂)，其外觀為黃褐色如圖 4.19、圖 4.20 所示，其粒徑大小的選擇參考 Wentworth (1992)之定義，403 型範圍介於中等砂與細砂之間，為模擬現地使用時所遇到的情況，此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。本研究將選用此兩種砂依不同比例配成 4 種不同級配之試體：中砂、A 砂、B 砂、細砂(如表所示)，試驗砂混合方式為將依重量比例計算之砂品以分層置入方式置於攪拌機中，攪拌機為 30QT-MIXER(圖 4.22 所示)，以 91RPM 之轉速攪拌 30 分鐘使兩種砂能均勻混合。



圖 4.19 渥太華標準砂 250 型



圖 4.20 渥太華標準砂 403 型



圖 4.21 渥太華 A101 型



圖 4.22 攪拌機(30QT MIXER)

表 4.4 試驗砂土一覽表

種類	名稱	說明
中砂	渥太華標準砂 250 型	粒徑介於粗砂與中等砂之間 (D50=0.55mm)
A 砂	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
B 砂	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
細砂	渥太華標準砂 403 型	粒徑介於 0.2 中等砂細砂之間 (D50=0.2mm)
C 砂	渥太華標準砂 A101 型	渥太華標準砂 A101 型 (99%<0.074mm)
D 砂	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
E 砂	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
F 砂	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

表 4.5 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

(摘自 Wentworth ,1992)

1.試驗砂土基本性質試驗

(1)試驗砂土之比重

比重 (specific gravity, 簡稱 GS) 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 : D854-58 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:

a.參考資料:美國材料試驗學會 (ASTM D854-58)

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。

b.試驗步驟:

(1)將已稱重之烘乾土樣 W_s (如為自然含水量之土樣,俟試驗後再烘乾、冷卻、稱重),置入比重瓶(如圖所示)內,此時應注意,不使任何土壤顆粒漏失。使用容積比重瓶時加水至 3/4 滿。有塞之比重瓶加水至 1/2 滿。

(2)比重瓶至於加熱器(如圖所示)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。

(3)將比重瓶添加蒸餾水至刻畫之標線,並將外面清洗及擦拭乾淨。量測比重瓶和內容物之重量, W_b , 和其溫度 $T_x (^{\circ}\text{C})$ 。

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

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

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， $^\circ\text{C}$



圖 4.23 500 毫升比重瓶



圖 4.24 加熱器

(2)試驗砂土之篩分析

a.參考資料：美國材料試驗學會 (ASTM： D421-85)

試驗土壤主要由兩種中砂(渥太華標準砂 250 型)、細砂(渥太華標準砂 403 型)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。

b.試驗步驟：

- (1)將適量之烘乾土樣稱重(W_s)，至 0.1%精確度。
- (2)將此土樣，置於容器中，加水淹沒並靜置二小時以上。
- (3)攪動浸於水中之土樣，並將此含有懸浮細料之濁水倒入一套重疊篩上。此套篩是 16 號篩在上，200 號在下。
- (4)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。
- (5)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%。
- (6)將標準篩(蓋，4，10，20，40，100，200 號篩及底盤)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。
- (7)搖篩之後，量稱停留在各篩上之試樣重。

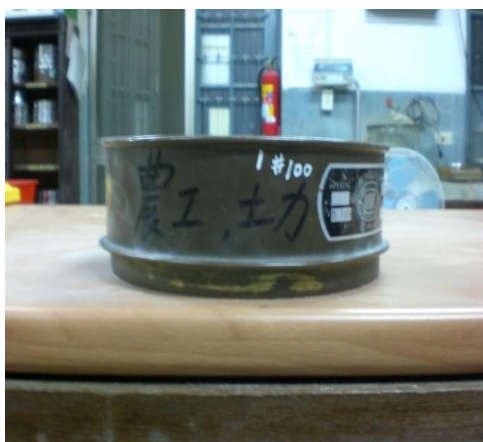


圖 4.25 #100 篩網



圖 4.26 過篩過程

表 4.6 中砂(403 型)基本物理性質

項目	內容
比重	2.65
D10(mm)	0.13
D30(mm)	0.18
D60(mm)	0.22
AASHTO 分類法	A-3(細砂)

表 4.7 細砂(250 型)基本物理性質

項目	內容
比重	2.65
D10(mm)	0.35
D30(mm)	0.45
D60(mm)	0.55
AASHTO 分類法	A-1-b(砂)

表 4.8 A 砂基本物理性質

項目	內容
比重	2.65
D10(mm)	0.2
D30(mm)	0.3
D60(mm)	0.52
AASHTO 分類法	A-1-b(砂)

表 4.9 B 砂基本物理性質

項目	內容
比重	2.65
D10(mm)	0.16
D30(mm)	0.22
0D60(mm)	0.33
AASHTO 分類法	A-3(細砂)

表 4.10 C 砂(A101 型)基本物理性質

項目	內容
比重	2.61
D10(mm)	0.003
D30(mm)	0.007
D60(mm)	0.012
AASHTO 分類法	A-4(粉土)

表 4.11 D 砂基本物理性質

項目	內容
比重	2.62
D10(mm)	0.004
D30(mm)	0.013
D60(mm)	0.2
AASHTO 分類法	A-4(粉土)

表 4.12 E 砂基本物理性質

項目	內容
比重	2.63
D10(mm)	0.02
D30(mm)	0.19
D60(mm)	0.3
AASHTO 分類法	A-4(粉土)

表 4.13 F 砂基本物理性質

項目	內容
比重	2.63
D10(mm)	0.07
D30(mm)	0.25
D60(mm)	0.3
AASHTO 分類法	A-4(粉土)

(3)試驗砂土之鮑氏比重計分析法

a.參考資料：美國材料試驗學會 (ASTM： D422-63)

b.試驗步驟：

- (1)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(分散劑之溶液也可用 4.2(10)中之任一種)。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。
- (2)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，見圖)，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。
- (3)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。
- (4)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。

(5)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 30 公分，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。

(6)最初讀數之時間為 15 秒，然後是 30 秒，1 分，2 分記讀比重計讀數。

(7)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 30 秒重行放入。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。

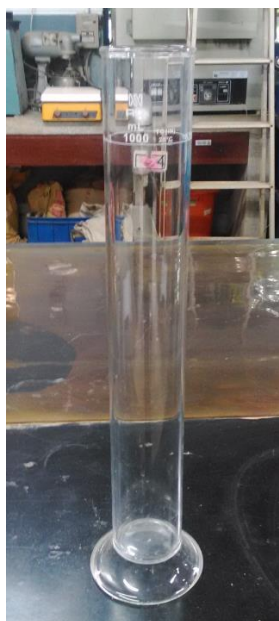


圖 4.27 比重瓶



圖 4.28 鮑氏比重計

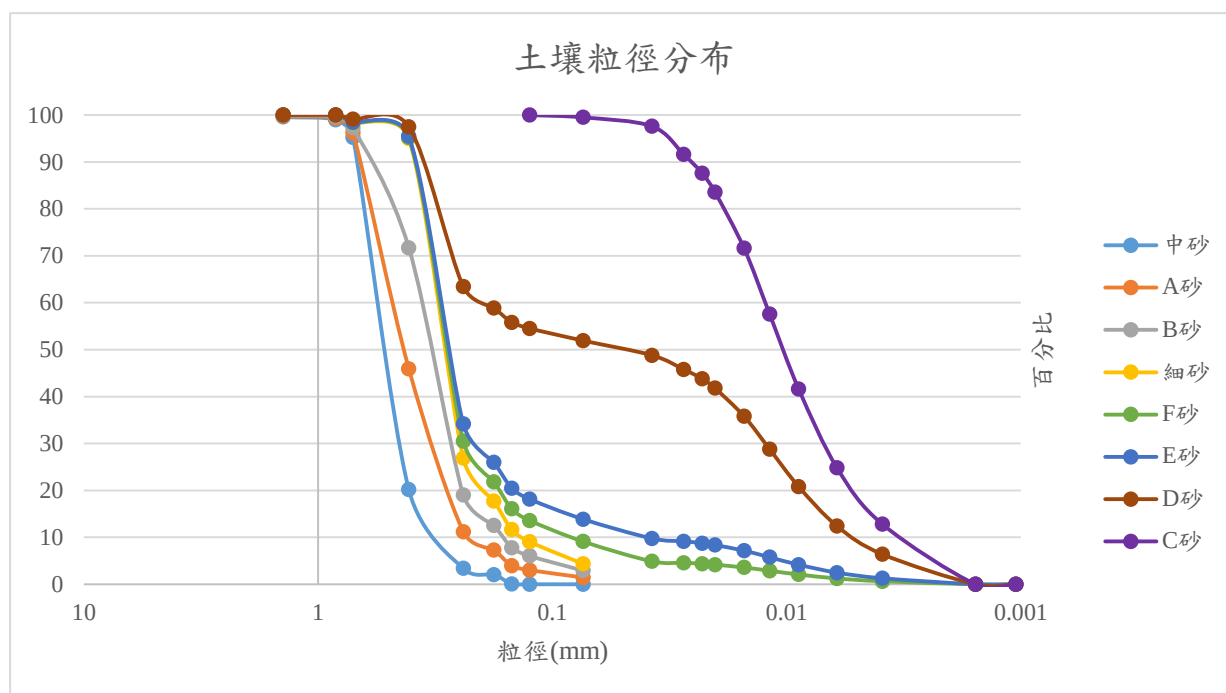


圖 4.29 土壤粒徑分析圖

4.2.2.3 濾材

本研究在砂柱試體之頂端及底端皆置入濾材，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)提出濾材的 D_{15} 與試驗砂的 D_{85} 之比值需小於等於 4 到 5 之間，及下式所示：

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

$D_{15(F)}$: 濾材之 D_{15}

$D_{85(S)}$: 試驗砂之 D_{85}

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

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

$D_{15(F)}$: 濾材之 D_{15}

$D_{15(S)}$: 試驗砂之 D_{15}

基於以上二式即可計算出所需濾材的粒徑大小。



圖 4.30 濾材

4.2.4 滲透灌注模擬試驗規劃

本研究於第一年之結果發現在砂質土壤之情形下，滲透性而言已 EcoClean 最佳，其次為 HRC、EOS，持續性而言以 HRC 最佳，其次 EOS、EcoClean，故三者基質比較之下，HRC 較為適用，如圖 4.31 第一年計劃流程所示。

延續第一年計畫之成果，於第二年將進行兩部分之試驗進行。第一部分為根據第一年之結果，調整最適用基質(HRC)之稀釋比例以探求最佳注入稀釋比例之建議。實驗設計中，將針對 HRC 能完全有效達到目標滲透高度之試驗組，降低其稀釋比例，以探求能完全滲透試體之較小稀釋比例，而針對無法達到有效滲透至目標高度之 A 砂、B 砂及細砂之試體則提高其稀釋比例，來觀察稀釋比例之改變是否能改善無法有效滲透之情形，茲將第二年之試驗流程表示如圖 4.32 所示。

本研究之第二部分為針對極細砂之試體進行基質滲透之試驗，針對極細砂以 EOS、HRC 及 EcoClean 三種基質做滲透型及持續性之試驗。本研究透過極細砂與細砂之不同混拌比例，共分為 C 砂、D 砂、E 砂、F 砂之試體，在期中以前已完成 C 砂、D 砂及 E 砂之試驗。

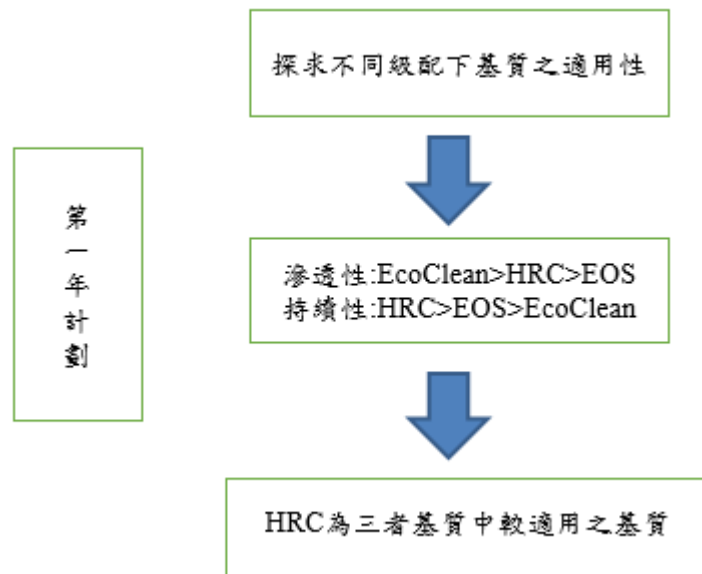


圖 4.31 第一年計劃流程

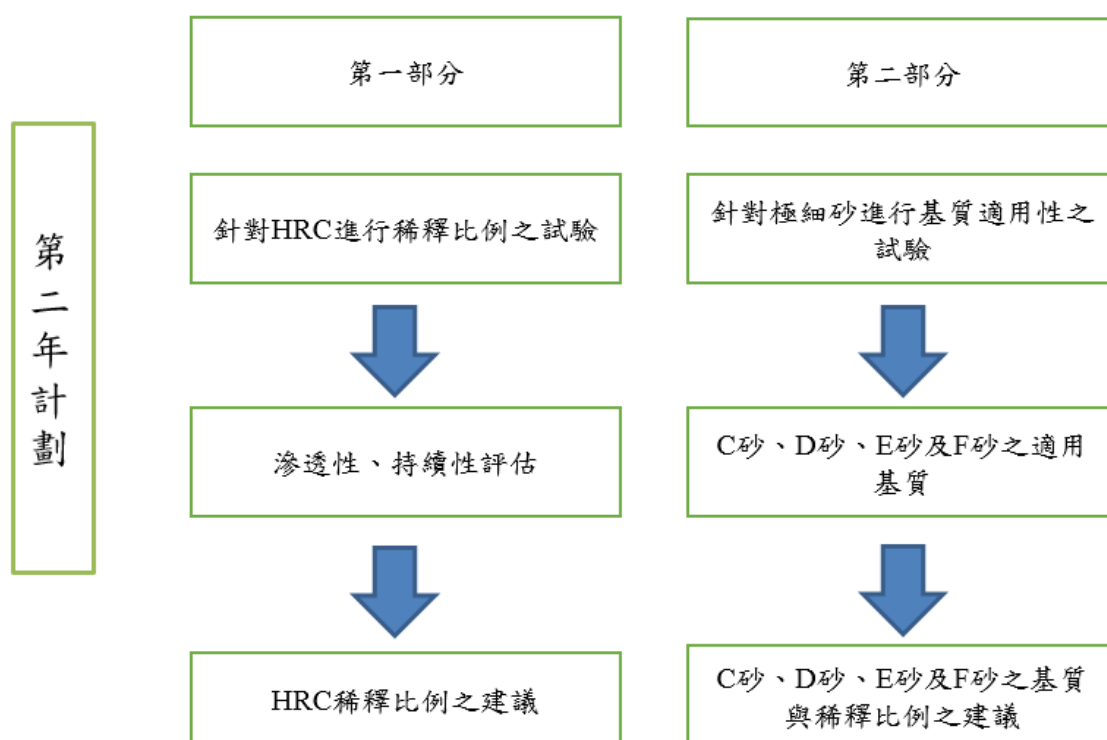


圖 4.32 第二年計劃流程

本研究之砂柱試體孔隙率為 38%，決定孔隙率後即可求得砂柱試體在固定體積(即 PVC 圓柱模之體積)下，所需放入砂之重量；砂柱體填充完畢後接著以壓力灌水的方式，進行試體之飽和，從灌水階段中找出試驗砂土本身不會發生劈裂下所能承受的灌注壓力。決定壓力後，接著進行營養鹽之製作。Reschke(2000)指出，拌合設備對漿體的特性有著很大的影響，由於基質粒徑較小，亦需特製的攪拌設備，使其漿體更能均勻且達到充分的乳化，因此本研究在進行滲透灌漿模擬試驗時，參考 Taiwan Hard Rock Eng. Co.,Ltd 之現地攪拌設備，規劃設計了一套實驗室使用之高速渦流攪拌機(High speed vortex 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)。

本研究進行之室內滲透灌漿模擬試驗所使用的壓力，主要以各砂柱之劈裂壓力以下進行漿體之灌注，並於試體出口處藉由人工的方式記錄不同情況下漿體的單位時間流量與基質上升之高度。灌注體積約為砂柱體孔隙體積的 1.5 倍，故本研究在固定體積下灌入完畢後即停止試驗。灌注階段完成後以微小水流從灌注口入流，用以模擬地下水流來觀察 EOS 在砂柱體內之滯流現象，並從出流口處蒐集出流溶液，以烘乾秤重法及 pH 值來評估溶液中基質之含量，藉以判斷不同粒徑

分布的砂柱試體中基質停滯量的差異。其試驗規劃如圖 4.33 所示。

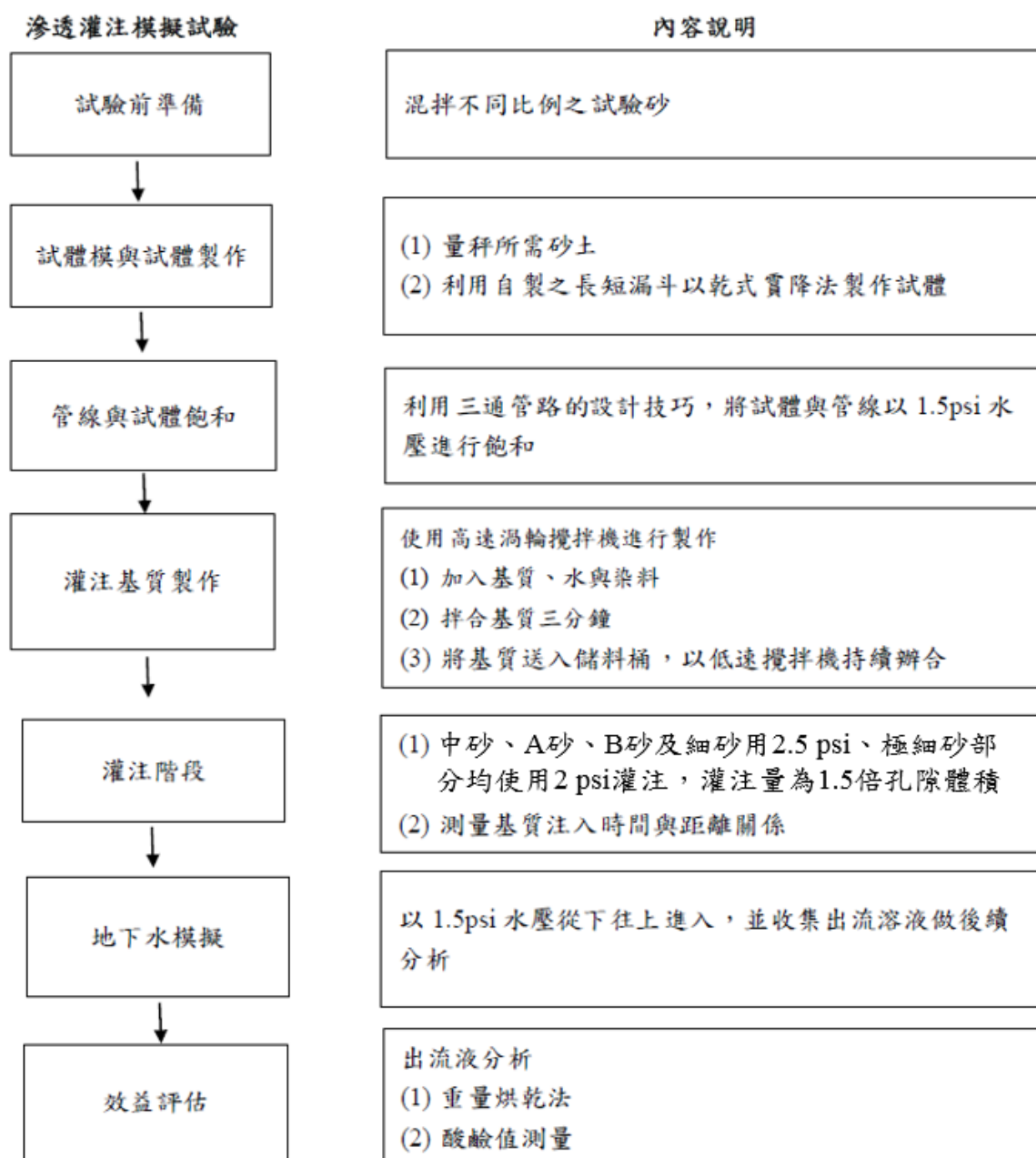


圖 4.33 試驗規劃流程圖

4.2.5 滲透灌注模擬試驗步驟

本研究將基質滲透灌注試驗規劃為以下各項工作項目，分別為試體模製作、試體製作、管線與試體飽和、劈裂壓力試驗、灌注基質製作、灌注階段與地下水流模擬階段等。其研究流程圖如圖所示，各試驗工作步驟詳述如下。

(1) 試驗前準備

(1)使用鉸手將止洩帶、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) 試體之製作

本研究將砂柱試體之孔隙率設定約為 38%，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，利用乾式賈降法分別量稱後分成四等份，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，於試體完成後並確認其試體長度。



圖 4.34 乾式賈降法

(3)管線與試體飽和

利用三通管路的設計，將管線與試體以 1.5psi 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，故為避免試驗中產生此種現象，本研究即進行劈裂壓力試驗。試驗結果得出中砂、A 砂、B 砂與細砂之劈裂壓力約為 4.5psi，C 砂、D 砂及 E 砂約為 4.2psi，研究即將此劈裂壓力紀錄，做為往後灌注壓力之參考，如圖 4.35 所示。



圖 4.35 砂柱試體之劈裂現象

(5)基質灌注液製作

(1)計算試體與基質所需的重量

(2)將量秤好之基質、水、染料慢慢倒入拌合 3~4 分鐘，如圖 4.36 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。

本研究於今年度使用之稀釋比例是參考第一年度之成果，第一年度之成果顯示，HRC 於中砂試體中可以達到目標灌注高度，而 A 砂、B 砂及細砂之條件下皆無法達到目標灌注高度，針對可以達到目標灌注高度之試驗組將降低稀釋比例，反之若無法達到目標灌注高度之試驗組，將增加稀釋比例。而第二部分針對極細砂之滲透灌注，由於第一年之成果顯示，在細砂條件下 EOS 及 HRC 無法達到滲透至目標灌注高度，故直接提高稀釋比例，詳細稀釋比例請參考表 4.13、表 4.14、表 4.15。

表 4.13 去年度之灌注結果

基質/稀釋比例	中砂試體之灌注情形	A 砂試體之灌注情形	B 砂試體之灌注情形	細砂試體之灌注情形
HRC(1:10)	達到灌注高度 (90 公分)	未達灌注高度 (87 公分)	未達灌注高度 (83 公分)	未達灌注高度 (72 公分)
EOS(1:10)	達到灌注高度 (90 公分)	未達灌注高度 (87 公分)	未達灌注高度 (85 公分)	未達灌注高度 (57 公分)
EcoClean(1:20)	達到灌注高度 (90 公分)	達到灌注高度 (90 公分)	達到灌注高度 (90 公分)	達到灌注高度 (90 公分)

表 4.14 第一部分 HRC 稀釋比例

基質	中砂試體	A 砂試體	B 砂試體	細砂試體
HRC	降低稀釋 比例(1:5)	提高稀釋 比例(1:20)	提高稀釋 比例(1:20)	提高稀釋 比例(1:20)

表 4.15 第二部分極細砂試驗

使用基質	C 砂之 稀釋比例	D 砂之 稀釋比例	E 砂之 稀釋比例	F 砂之 稀釋比例
HRC	1:20	1:20	1:20	1:20
EOS	1:20	1:20	1:20	1:20
EcoClean	1:20	1:20	1:20	1:20

根據第二部分極細砂中觀察三種基質中，何種基質具有較佳之滲透性與較持久之持續性作為適用基質之建議，並根據該基質灌注之結果是當調整其稀釋比例，如該基質未能有效滲透於試體中則考慮提高其稀釋比例，反之，若可以有效滲透試體，則降低其稀釋比例以觀察稀釋比例之改變是否會對滲透性及持續性之結果有所改變。



圖 4.36 基質高速拌合情形

(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，中砂試體、A 砂試體、B 砂試體及細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，而極細砂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，灌注完預設灌注量(1.5 倍孔隙體積)後即結束灌注動作，如圖 4.37 所示。

(7)模擬水流進入

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(如圖所示)，與砂柱試體高差約 30 公分，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。



圖 4.37 基質灌入過程



圖 4.38 定水頭模擬系統

(8)效益評估

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。

滲透性部分，採用目視法(Zebovitz et al., 1989、Ozgurel et al., 2005、施國琅，

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。

在持續時間的評估方面，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。

1.重量烘乾法

重量烘乾法是參考 Borden(2006)針對管柱試驗出流液之分析方法，將樣品置於烘箱內利用高溫將水分去除，秤得殘留物重量以推算樣品溶液中之基質含量。

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。為了解決此一情形，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，在烘乾溫度 105℃、烘乾時間 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%，其關係如式(1)所述：

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

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)

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

本研究參考林靜齡(2010)之總固體物重量分析法，將乾淨之燒杯置於 105℃ 之烘箱中用以去除水分，而後將烘乾後燒杯置於乾燥箱中冷卻 2 小時，並秤得其燒杯淨重(W_1)；取定量(30~50g)之樣品於秤完重之燒杯，以前段所述之條件置於 105℃ 烘箱中 24 小時，取出烘乾後之樣品置於乾燥箱中冷卻 2 小時，秤得重量為(W_2)，將 W_1 與 W_2 帶入式(4)可得樣品濃度：

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

C:樣品濃度(%)

w_z :樣品重量(公克)

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

三種基質雖然呈現中性或偏弱酸，但根據文獻及試驗發現因為基質稀釋於水中會釋放氫離子的現象，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。



圖 4.39 水質檢測器(含測量 pH 值功能)

第五章 結果與討論

5.1 極細砂之試驗

5.1.1 C 砂與 D 砂之試驗結果

本研究針對 C 砂與 D 砂進行基質適用性之試驗，分別以 EOS(稀釋比例 1:20)、HRC(稀釋比例 1:20)及 EcoClean(稀釋比例 1:20)進行灌注，發現此三種基質皆無法在 C 砂及 D 砂之試體中滲透進入試體之中。

5.1.2 C 砂與 D 砂之綜合討論

以 1:20 之稀釋比例三種基質皆無法滲透進入試體之中。根據 Incecik and Ceren (1995)提出滲透灌注之可灌性為砂土粒徑之 D_{10} 及灌注液中粒料之粒徑 D_{90} 之比值需大於 10 為可灌，而本研究使用之基質之粒徑大約為 $1(\mu m)$ ，而 C 砂與 D 砂之 D_{10} 分別為 $0.003(mm)$ 與 $0.004(mm)$ ，其比值大約為 3、4，推測由於未滿足可灌性公式，故在此類土壤之條件下滲透灌漿之技術較不建議使用。

5.1.3 E 砂之試驗

E 砂試驗-滲透性

由試驗之結果可以發現，在 E 砂之試體下，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。

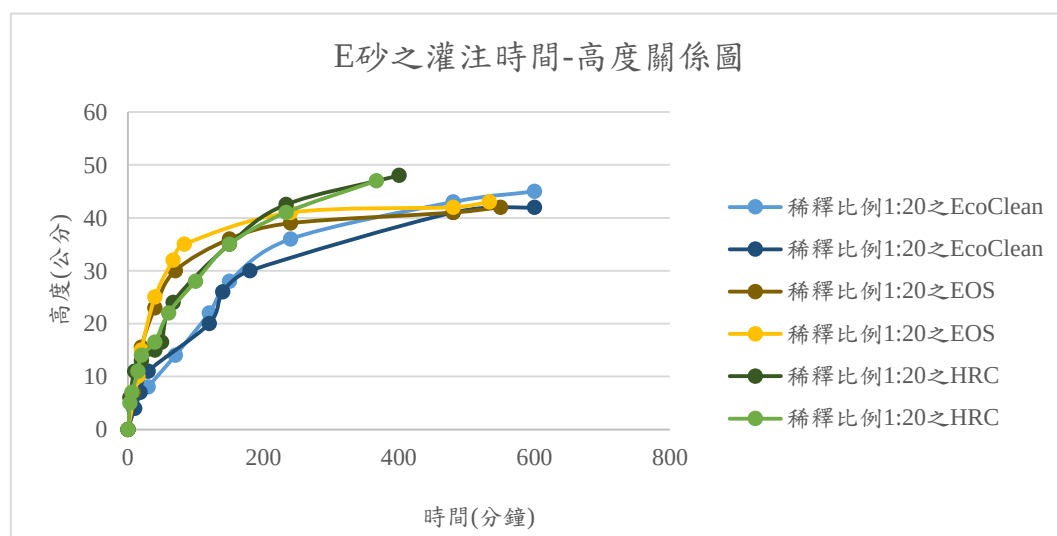


圖 5.1 E 砂之灌注時間-高度關係圖

E 砂之試驗-持續性

(1)重量烘乾法

由持續性之結果可以觀察到，三者出流液之濃度皆甚低，最大出流濃度約為 0.15%。殘留率部分，在水流進入 7 天之後，三種基質在試體中之殘留率皆大於 90%。

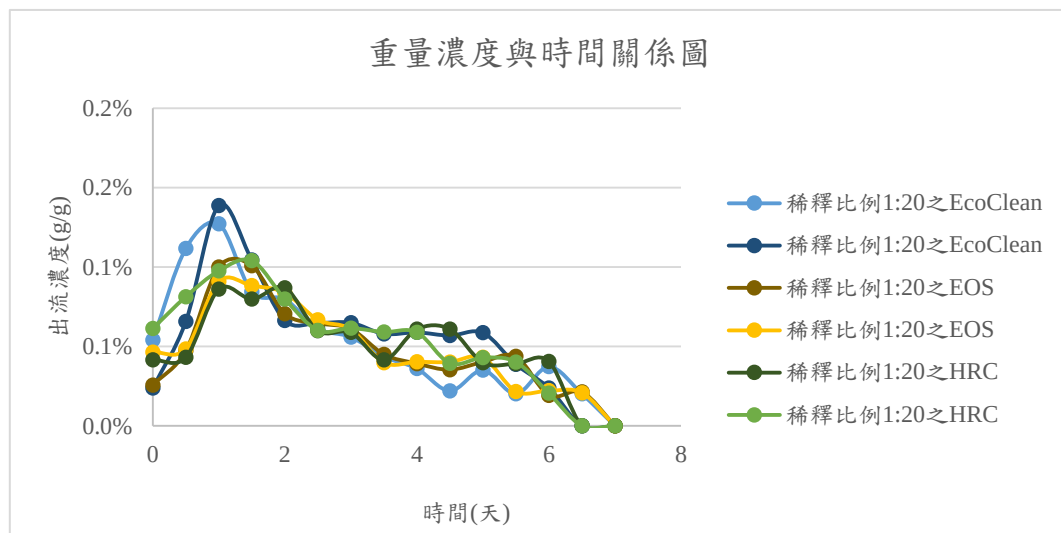


圖 5.2 重量濃度與時間關係圖

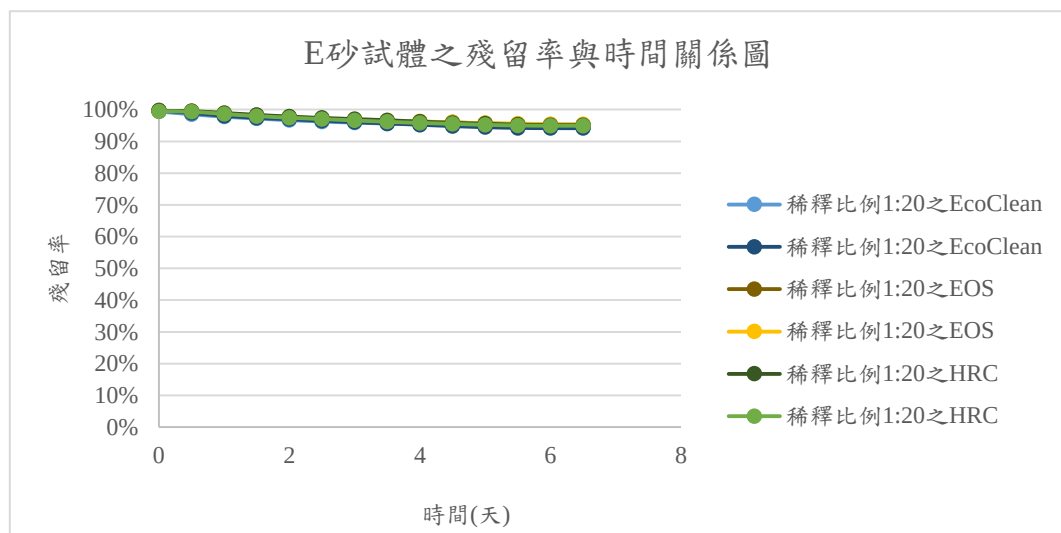


圖 5.3 E 砂試體之殘留率與時間關係圖

(2)酸鹼值測量

由酸鹼值之結果顯示，HRC 以稀釋比例 1:20 灌注 E 砂，在水流進入後約 1 天後，出流溶液之 pH 值逐漸上升，直到第 4 天半後 pH 上升至約 7.3 左右；而 EOS 以稀釋比例 1:20 灌注，在水流進入後約 1 天半後，出流溶液之 pH 值上升至 7.2 左右，顯示出流液中含基質之含量甚低；EcoClean 以稀釋比例 1:20 灌注之試驗中，水流進入後約 1 天半後，出流溶液之 pH 值上升至約 7.2，顯示出流液中基質之含量甚低。

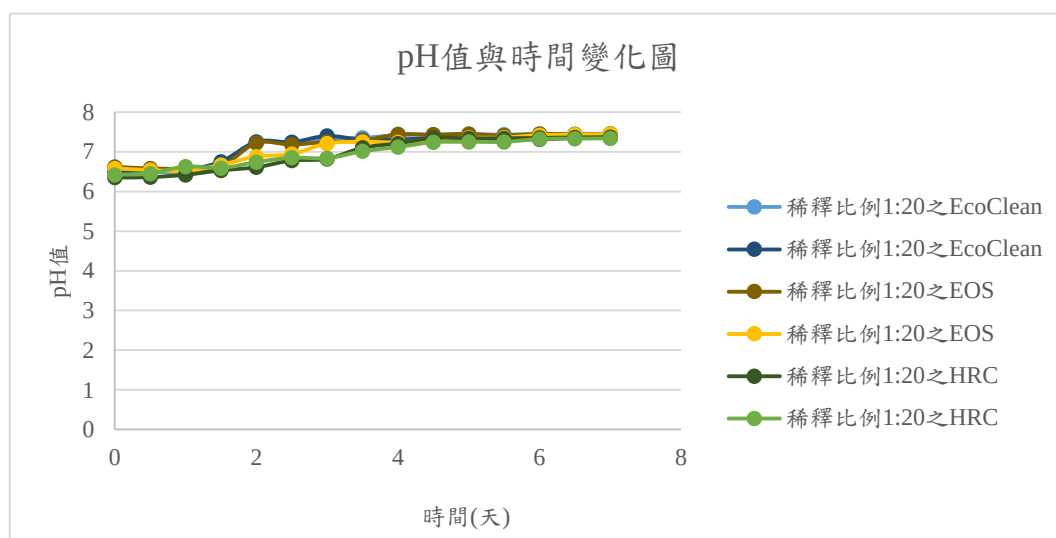


圖 5.4 pH 值與時間變化圖

5.1.4 F 砂之試驗

F 砂試驗-滲透性

由試驗之結果可以發現，在 F 砂之試體下，基質之滲透情形也會大幅地下降，HRC 以 1:20 之稀釋比例灌注至 300 分鐘後，灌注高度約為 62 公分；而 EOS 同樣以稀釋比例 1:20 灌注至 300 分鐘後，灌注高度約為 60 公分；而 EcoClean 以稀釋比例 1:20 灌注至 500 分鐘後，灌注高度同樣約為 60 公分，此一結果顯示，三種基質在 F 砂試驗中，其滲透性結果差異並不大。

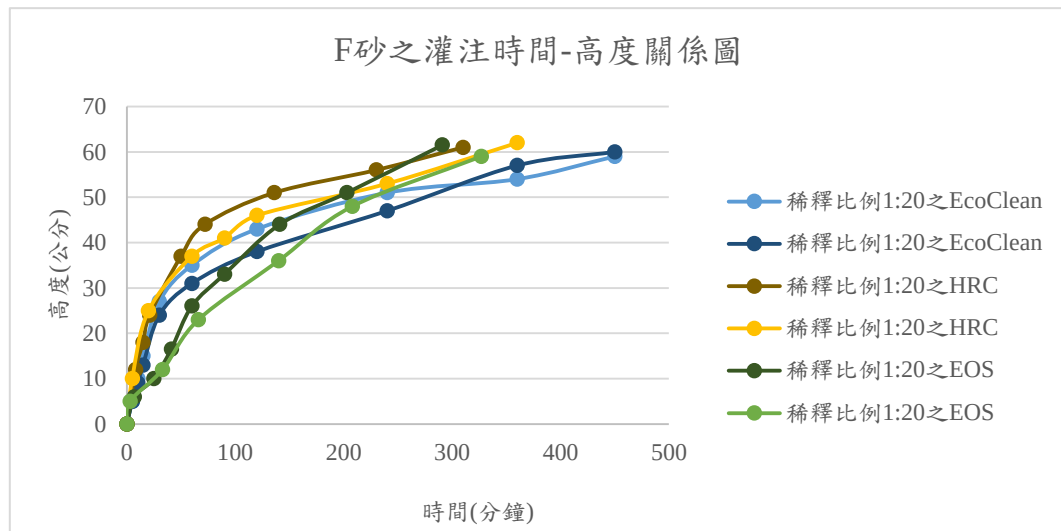


圖 5.5 F 砂之灌注時間-高度關係圖

F 砂試驗-持續性

(1)重量烘乾法

由持續性之結果可以觀察到，三者出流液之濃度皆低，最大出流濃度約為 0.9%。殘留率部分在水流進入 7 天之後，三種基質在試體中之殘留率約為 75%，其中又以 EOS 與 HRC 之殘留率較 EcoClean 為高。

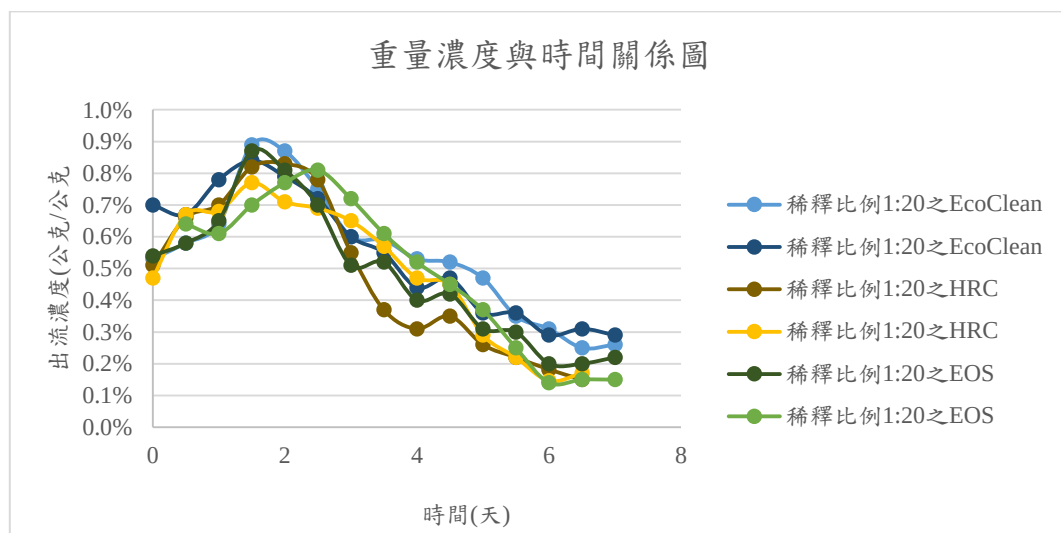


圖 5.6 重量濃度與時間關係圖

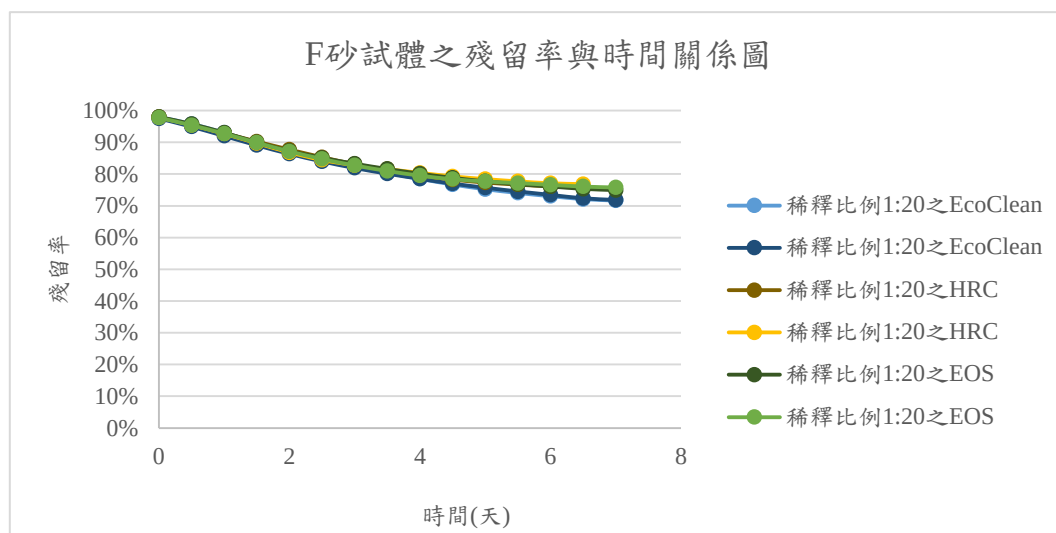


圖 5.7 F 砂試體之殘留率與時間關係圖

(2)酸鹼值測量

由酸鹼值之結果顯示，HRC 以稀釋比例 1:20 灌注 F 砂，在水流進入後出流溶液之 pH 值逐漸上升，直到第 4 天半後 pH 上升至約 6.5；而 EOS 以稀釋比例 1:20 灌注，在水流進入後約 2 天後，出流溶液之 pH 值上升至 7 左右，顯示出流液中含基質之含量甚低；EcoClean 以稀釋比例 1:20 灌注之試驗中，水流進入後約 2 天半後，出流溶液之 pH 值上升至約 7.2，顯示出流液中基質之含量甚低。

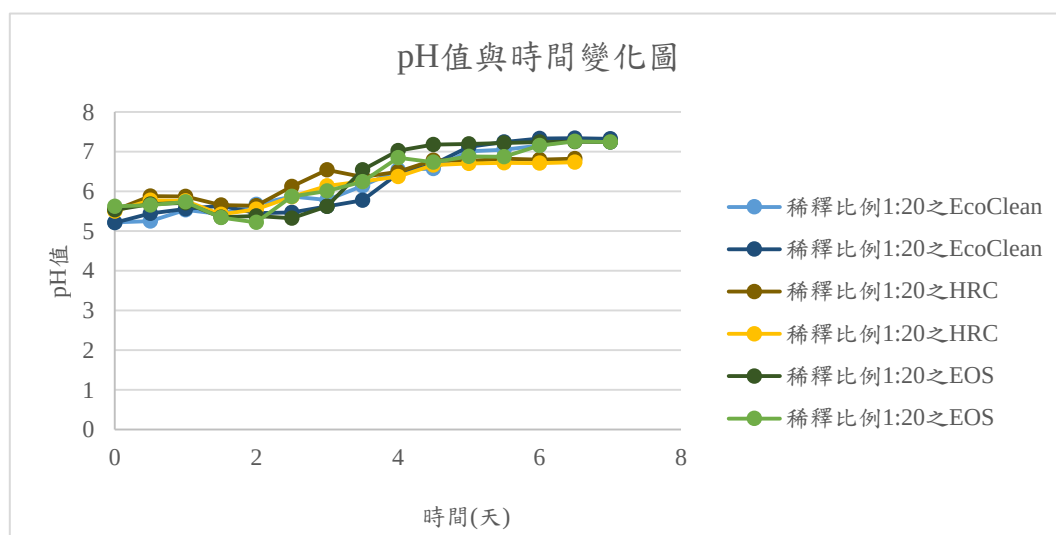


圖 5.8 pH 值與時間變化圖

5.1.5 E、F 砂試驗之綜合討論

極細砂於 10%之條件下，但對於滲透之情形有明顯之變化。前人文獻指出極

細砂混合細砂比例對於混合後之砂有很大之影響，一般而言極細砂之比例以 5% 以下、5%~12%、12% 以上有不同特性之分界，極細砂含量在 5% 以下時，極細砂無法填塞細砂之孔隙，使得混合砂之孔隙不易受到阻塞；而在 5%~12% 時極細砂開始填塞細砂之孔隙間距，而開始改變混合後之特性；而在極細砂含量 12% 以上時，此時細砂之間完全被極細砂所填滿、被極細砂完全阻隔，導致細砂之間沒有直接接觸，此時混合後砂之孔隙被極細砂所控制，也因此僅加入 10% 極細砂之試驗其結果與細砂試驗之結果變化甚大。

故在 E 砂及 F 砂之試驗中，由於細砂間之孔隙被極細砂所填塞，基質滲透之效果會大幅地下降，需要更長之時間滲透，當欲灌注之體積滲透完畢後所需之時間甚長，E 砂約需時 400 分鐘，F 砂則約需時 300 分鐘，而滲透高度而言，三種基質之間之滲透情形並無太大差別，三種基質在 E 砂中滲透高度大約為 40 公分，而在 F 砂則大約為 60 公分。

5.2 改變稀釋比例

本研究於第一部分針對 HRC 做稀釋比例的改變，分別以稀釋比例 1:5 灌注中砂試體、稀釋比例 1:20 灌注 A 砂試體、B 砂試體及細砂試體，並進行二重複之試驗。滲透過程中紀錄基質滲透之高度與所對應之時間並繪製如圖，待滲透完畢後水流進入試體收集出流液，將出流液做重量烘乾濃度檢測與 pH 值測量，各試體出流量分別為：中砂為 11.6(公克/分鐘)、A 砂為 8.3(公克/分鐘)、B 砂 4(公克/分鐘)、細砂 3(公克/分鐘)、E 砂 1.8(公克/分鐘)、F 砂 2(公克/分鐘)。並以式(1)與式(4)計算其殘留率並繪製如圖，相關之實驗數據繪製如下。

5.2.1 改變稀釋比例之試驗

(1) 中砂試體

本研究於使用 HRC 以 1:10 之稀釋比例進行灌注至中砂試體，灌注結果可達到預期之灌注高度，故針對 HRC 降低其稀釋比例至 1:5，來觀察稀釋比例之變化對於滲透性之影響。其結果顯示 HRC 稀釋比例降低至 1:5 仍可灌注至目標高度，所需時間大約 17 分鐘，而以 1:10 之稀釋比例灌注所需時間大約 13 分鐘。

持續性方面，稀釋比例 1:5 之 HRC 灌注中砂試體，在水流進入試體後約 10 小時後出流液濃度降至最低，pH 值也約在 10 小時達到穩定點，而其殘留率大約為 70%，而稀釋比例 1:10 之 HRC，在水流進入試體後約 8 小時後出流液濃度降至最低，pH 值大約在 7 小時達到穩定點，而其殘留率大約為 60%。

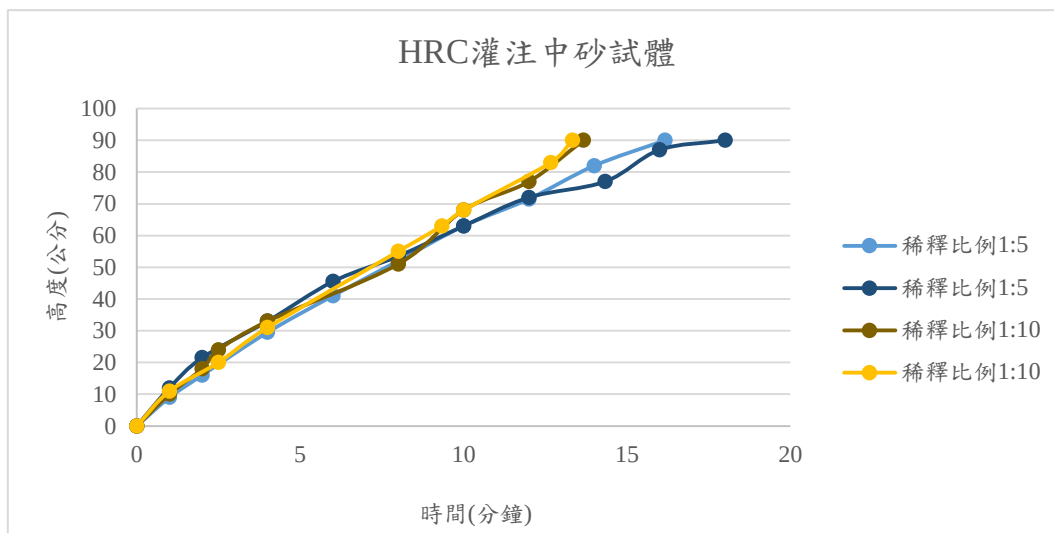


圖 5.9 HRC 灌注中砂試體

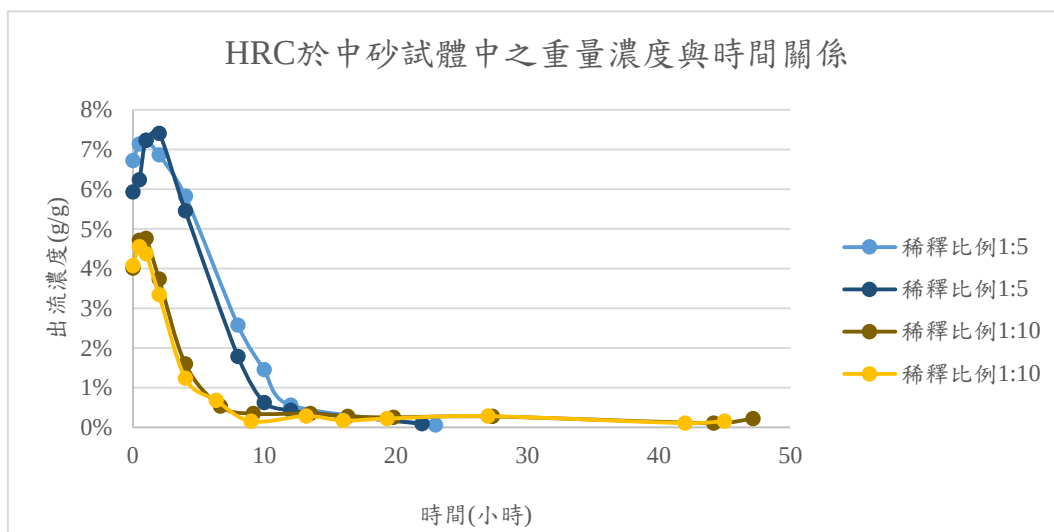


圖 5.10 HRC 於中砂試體中之重量濃度與時間關係

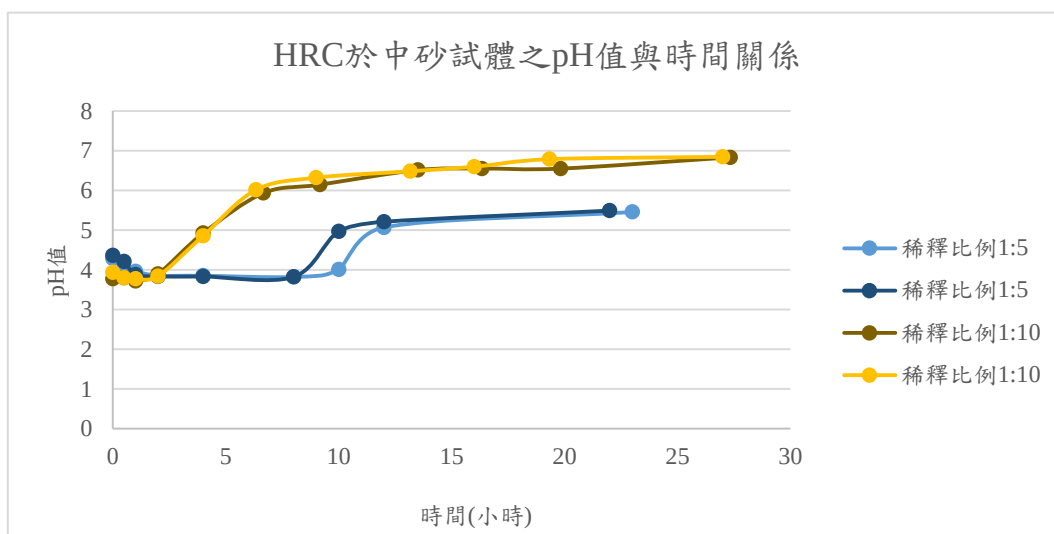


圖 5.11 HRC 於中砂試體中之 pH 值與時間關係

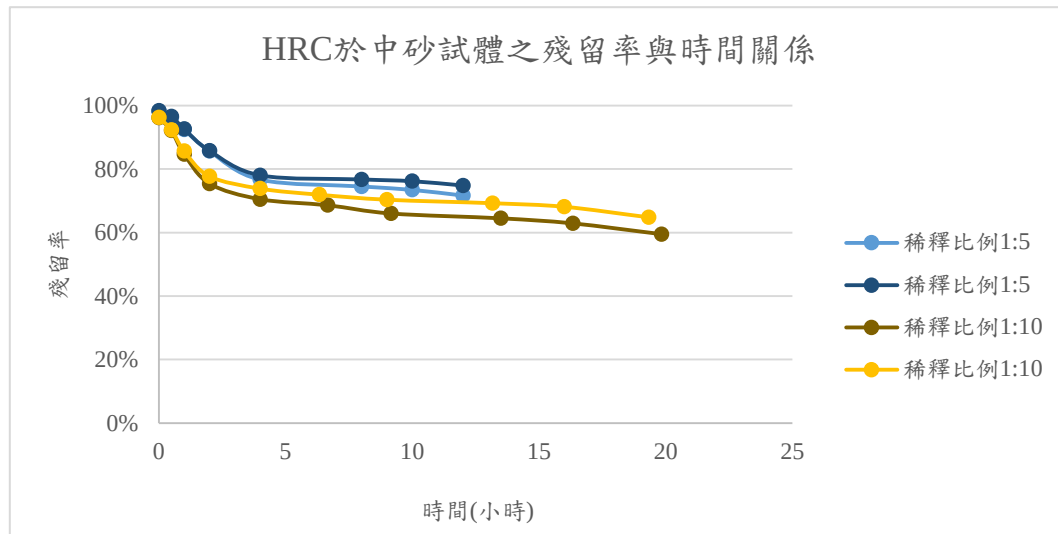


圖 5.12 HRC 於中砂試體之殘留率與時間關係圖

(2)A 砂試體

本研究於第一年使用 HRC 以 1:10 之稀釋比例進行灌注 A 砂試體，灌注之結果未達到預期之灌注高度，其高度約為 85 公分，故今年針對 A 砂試體提高稀釋比例至 1:20，來觀察稀釋比例之變化。其結果顯示，HRC 稀釋比例提高至 1:20 可灌注至目標高度，所需時間大約 17~20 分鐘，而以 1:20 之稀釋比例灌注 25 分鐘後可達到最大灌注高度。

持續性方面，稀釋比例 1:10 之 HRC 灌注 A 砂試體，在水流進入試體後約 12 小時後出流液濃度降至最低，pH 值約在 12 小時後達到穩定點，而其殘留率大約為 60%，而稀釋比例 1:20 之 HRC，在水流進入試體後約 6 小時後出流液濃度降至最低，10 小時後出流液之 pH 值達到穩定，而其殘留率也大約為 60%。

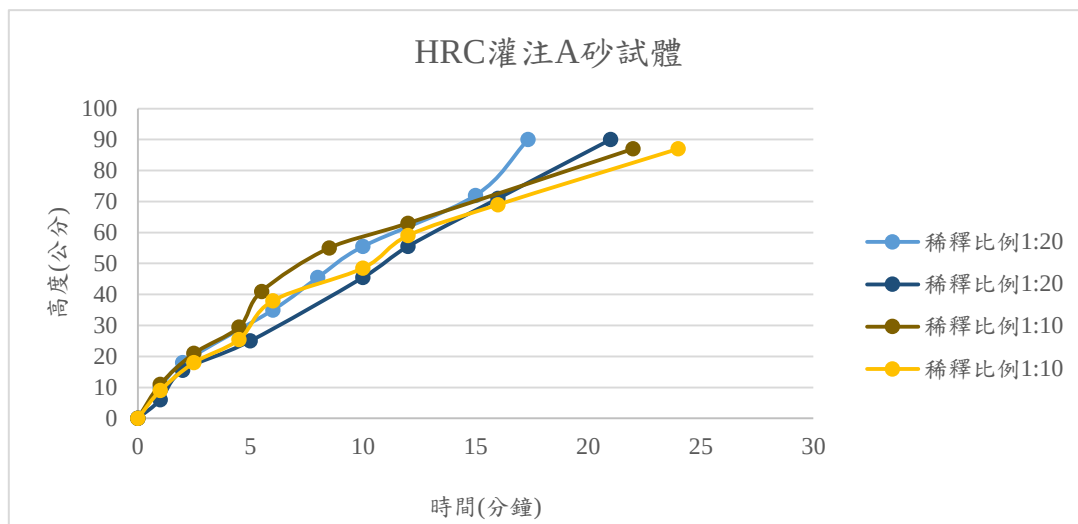


圖 5.13 HRC 灌注 A 砂試體

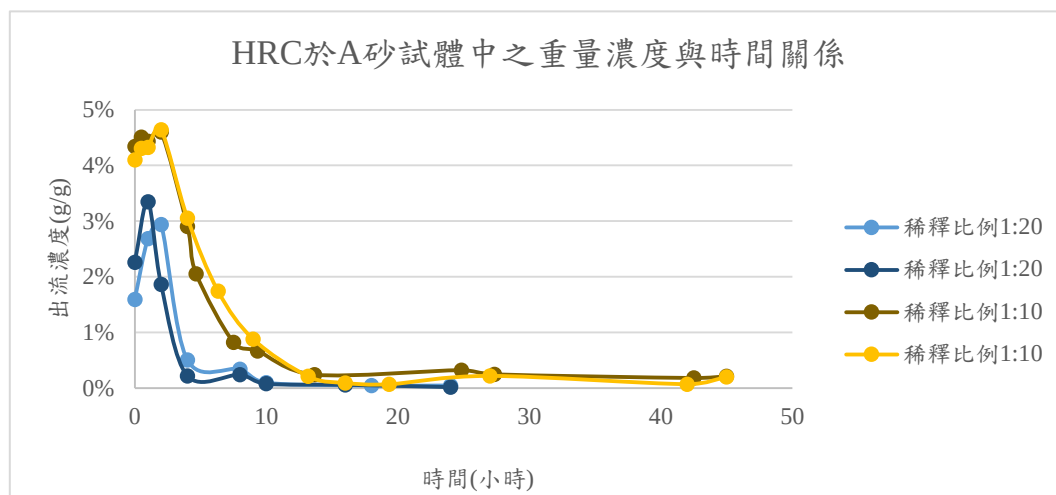


圖 5.14 HRC 於 A 砂試體中之重量濃度與時間關係

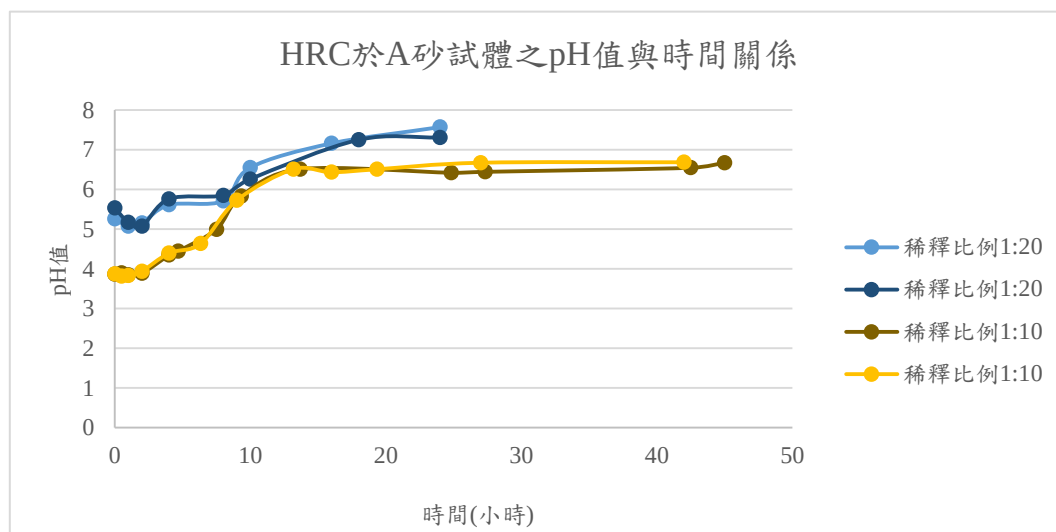


圖 5.15 HRC 於 A 砂試體中之 pH 值與時間關係

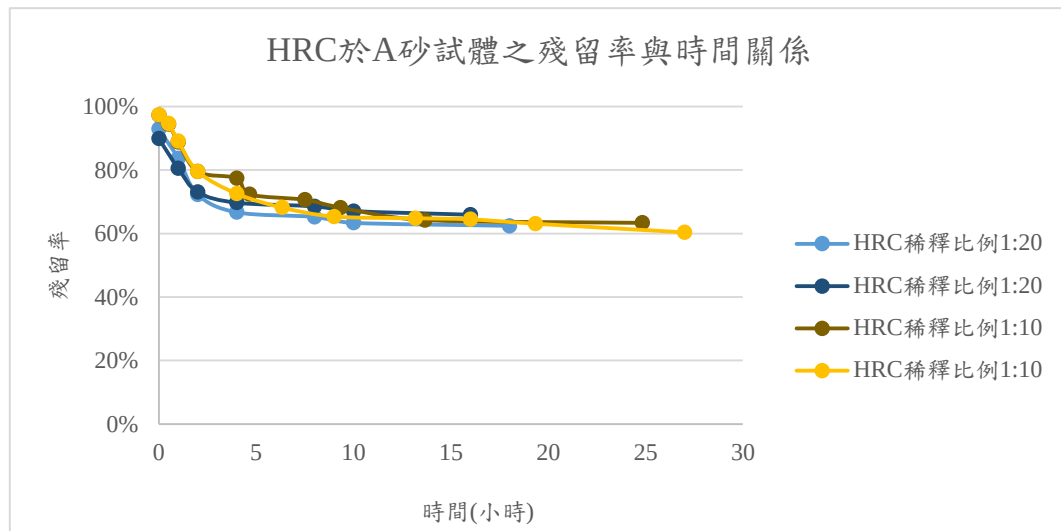


圖 5.16 HRC 於 A 砂試體之殘留率與時間關係圖

(3)B 砂試體

本研究於第一年使用 HRC 以 1:10 之稀釋比例進行灌注 B 砂試體，灌注之結果未達到預期之灌注高度，其高度約為 83 公分，故今年針對 B 砂試體提高稀釋比例至 1:20，來改善灌注之情形。其結果顯示，HRC 稀釋比例提高至 1:20 可灌注至目標高度，所需時間大約為 37 分鐘。

持續性方面，稀釋比例 1:10 之 HRC 灌注 B 砂試體，在水流進入試體後約 12 小時後出流液濃度降至最低，pH 值約在 13 小時候達到穩定，其殘留率大約為 80%，而稀釋比例 1:20 之 HRC，在水流進入試體後約 10 小時後出流液濃度降至最低，pH 值在 10 小時候達到穩定，而其殘留率也大約為 80%。

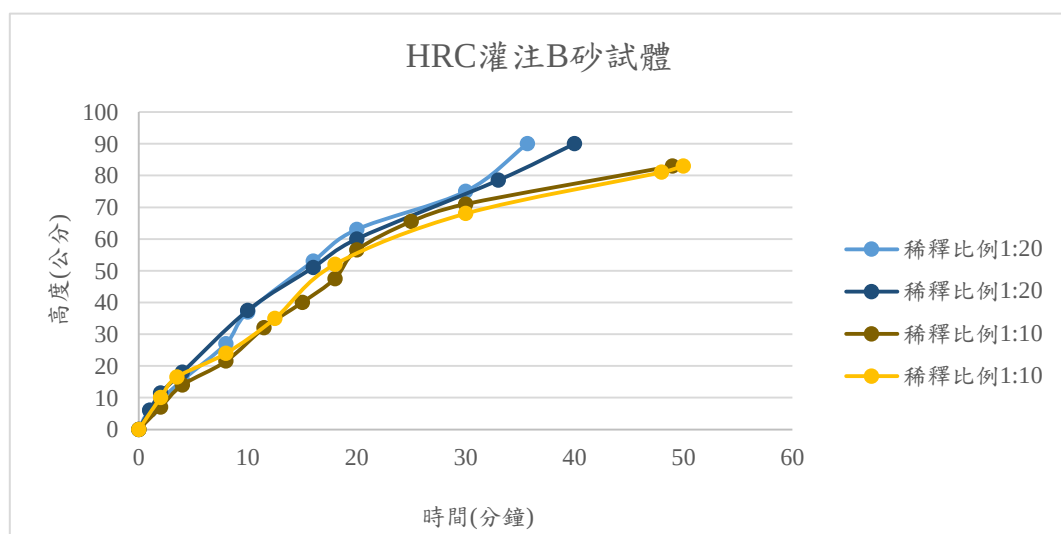


圖 5.17 HRC 灌注 B 砂試體

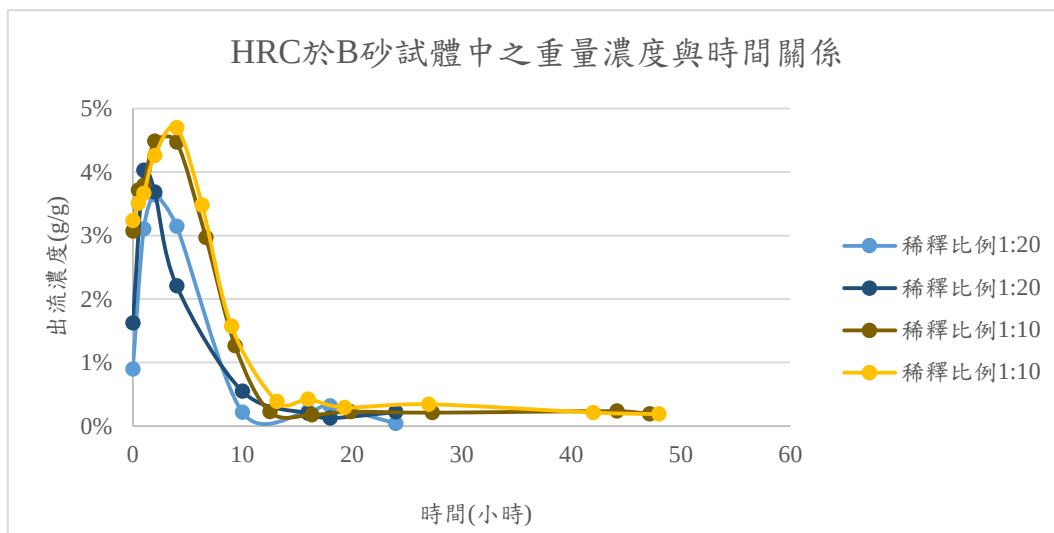


圖 5.18 HRC 於 B 砂試體中之重量濃度與時間關係

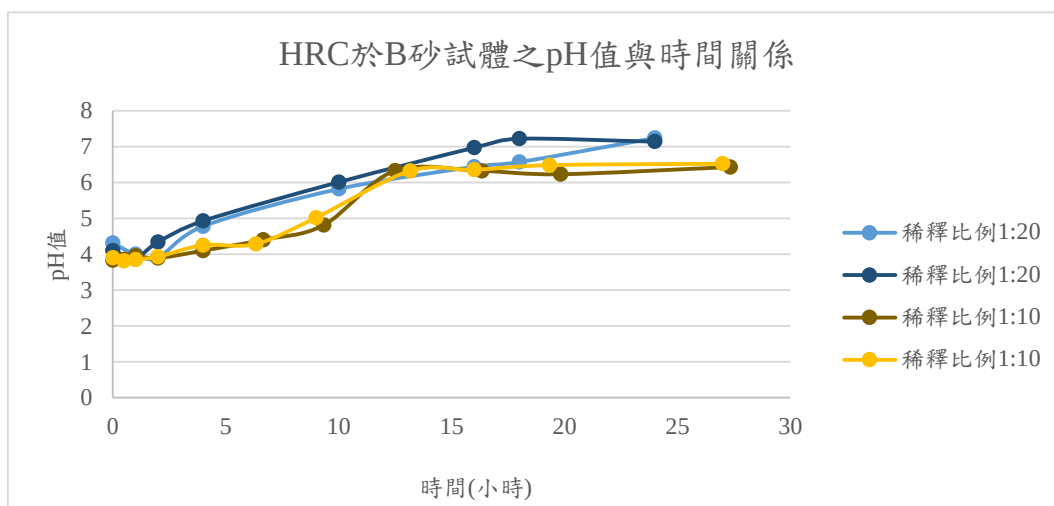


圖 5.19 HRC 於 B 砂試體中之 pH 值與時間關係

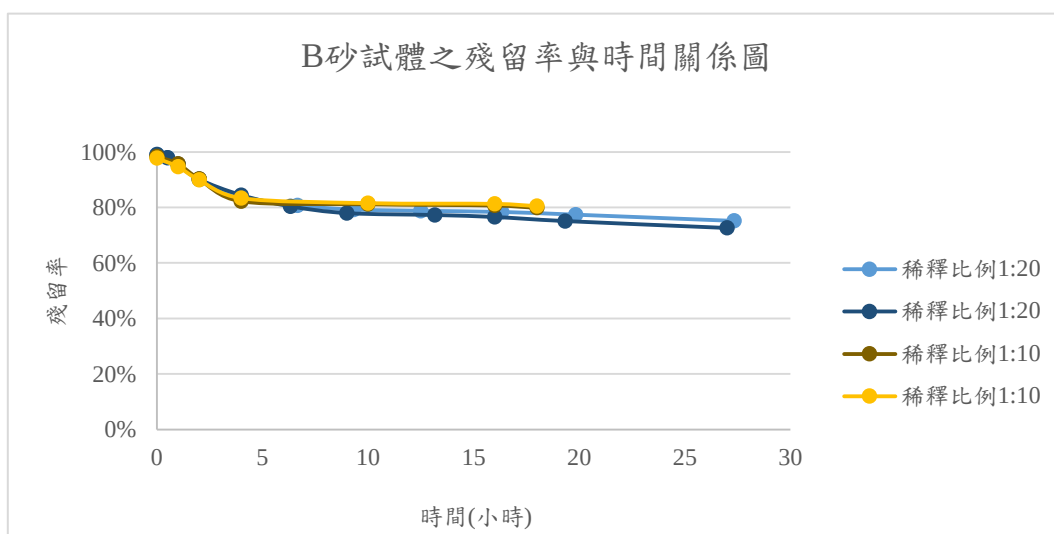


圖 5.20 HRC 於 B 砂試體之殘留率與時間關係圖

(4)細砂試體

本研究於使用 HRC 以 1:10 之稀釋比例進行灌注細砂試體，灌注之結果未達到預期之灌注高度，其高度約為 70 公分，故今年針對 B 砂試體提高稀釋比例至 1:20，來改善灌注之情形。其結果顯示，HRC 稀釋比例提高至 1:20 可灌注至目標高度，所需時間大約 45~50 分鐘，而以 1:20 之稀釋比例灌注 50 分鐘後可達到最大灌注高度。

持續性方面，稀釋比例 1:10 之 HRC 灌注細砂試體，在水流進入試體後約 15 小時後出流液濃度降至最低，pH 值在 12 小時後達到穩定，而其殘留率大約為 75%，而稀釋比例 1:20 之 HRC，在水流進入試體後約 10 小時後出流液濃度降至最低，pH 值在約 10 小時後達到穩定，而其殘留率約為 70%。

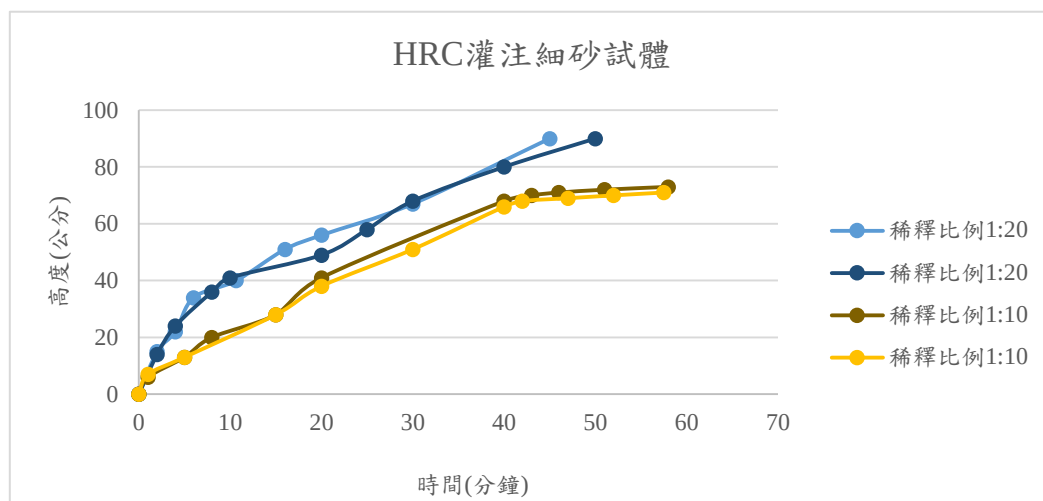


圖 5.21 HRC 灌注細砂試體

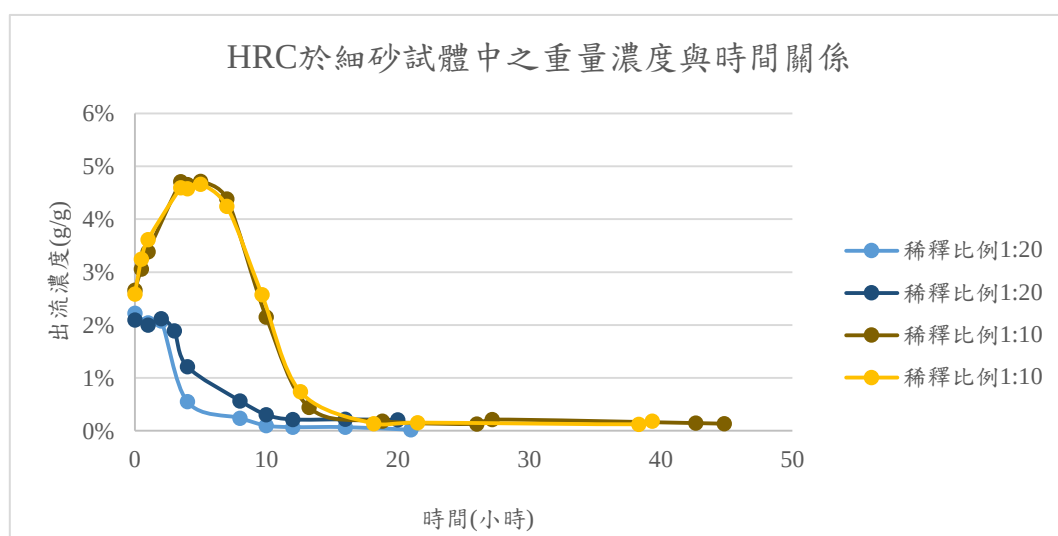


圖 5.22 HRC 於細砂試體中之重量濃度與時間關係

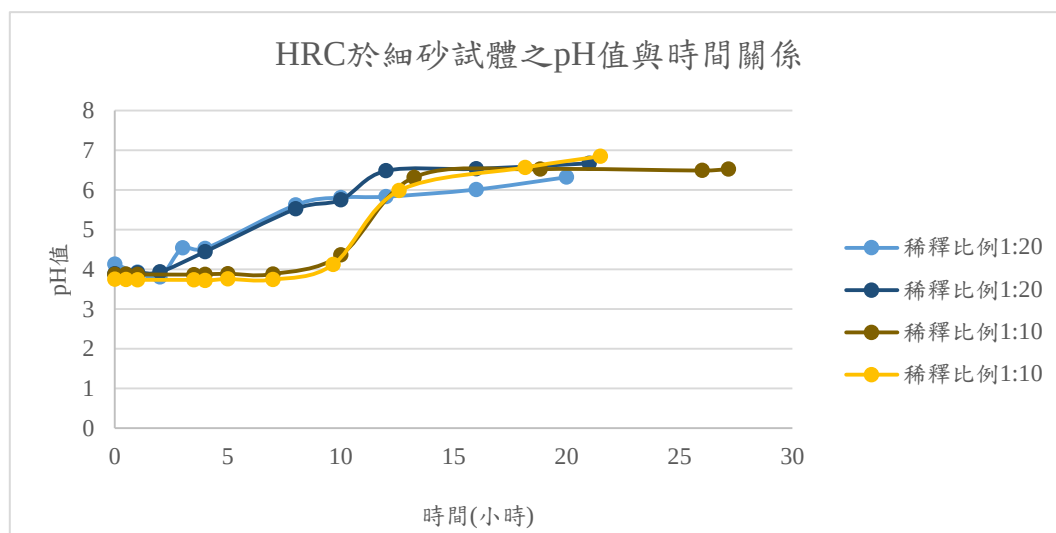


圖 5.23 HRC 於細砂試體中之 pH 值與時間關係

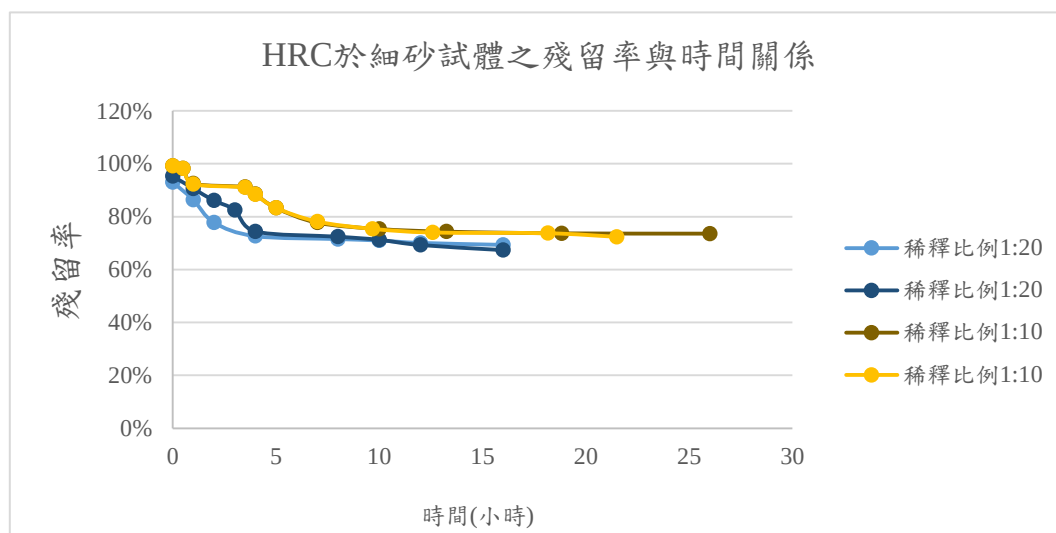


圖 5.24 HRC 於細砂試體之殘留率與時間關係圖

(5)C、D 砂試體

C 砂為 100%渥太華 A101 型標準砂，D 砂為 50%渥太華 A101 型標準砂與 50%渥太華標準砂 403 型混合而成，根據 5.1.1 節之試驗結果，發現在此二種粒徑分布下之試驗砂中，三種基質皆無法滲透進入試體，本研究嘗試從原有之稀釋比例 1:20 提高稀釋比例至 1:30，期望能在提高稀釋比例、降低基質濃度的條件下將基質嘗試滲透灌注於試體之中，然而提高稀釋比例後之試驗結果仍無法改善無法滲透之結果，故未來若於此粒徑分布之土壤下進行整治，則較建議使用其他整治之工法。

(6)E 砂試體

本研究使用 HRC 以 1:20 之稀釋比例進行灌注 E 砂試體，灌注之結果未達到預期之灌注高度，其高度約為 45 公分，故針對 E 砂試體提高稀釋比例至 1:30，來改善灌注之情形。其結果顯示，HRC 稀釋比例提高至 1:30 灌注高度約為 50 公分。

持續性方面，稀釋比例 1:20 之 HRC 灌注 E 砂試體，在水流進入試體後約 6 天後出流液濃度降至最低，而其殘留率大約為 95%，而稀釋比例 1:30 之 HRC，在水流進入試體後約 10 小時後出流液濃度降至最低，pH 值在約 6 天後達到穩定，而其殘留率也超過 90%。

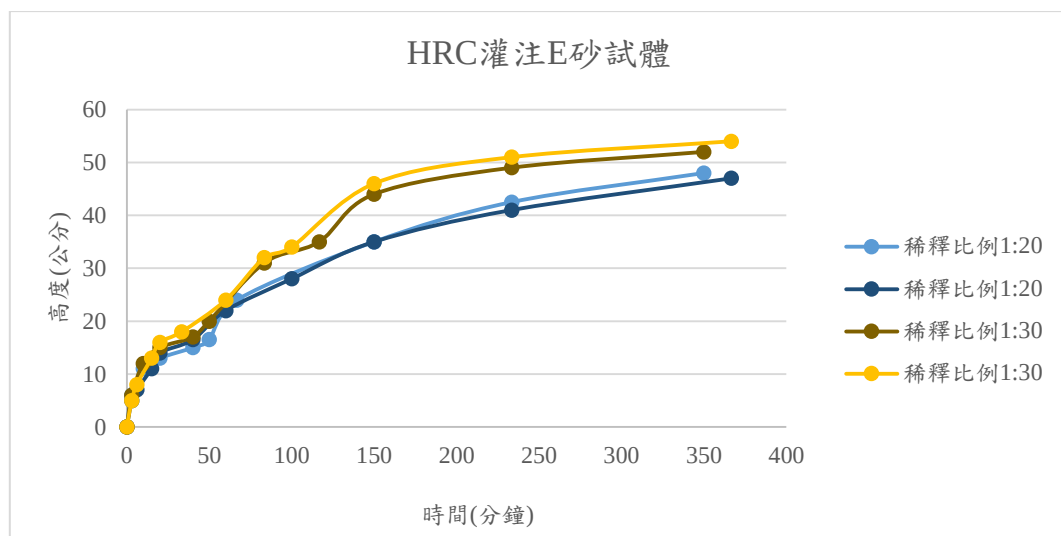


圖 5.25 HRC 灌注 E 砂試體

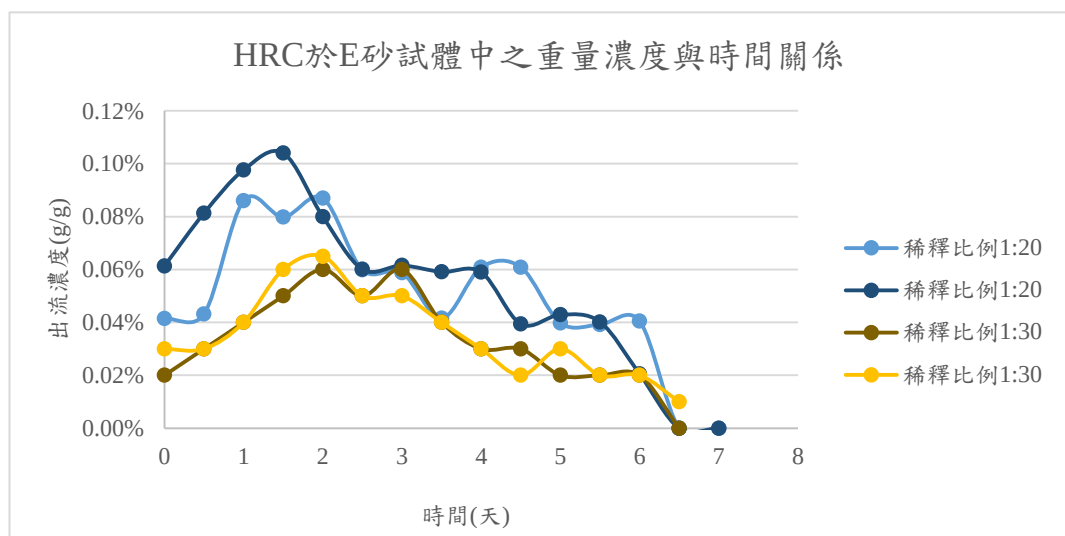


圖 5.26 HRC 於 E 砂試體中之重量濃度與時間關係

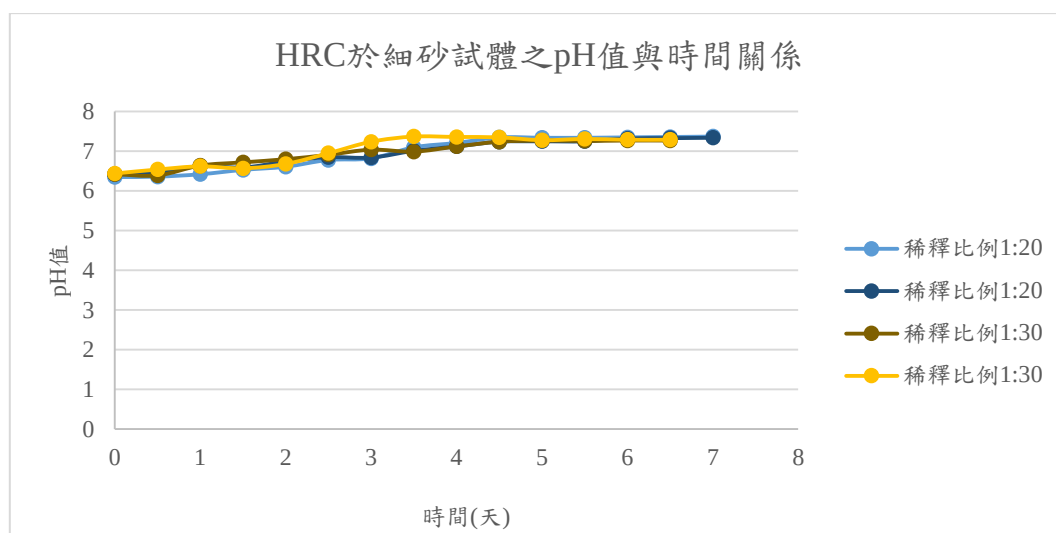


圖 5.27 HRC 於 E 砂試體中之 pH 值與時間關係

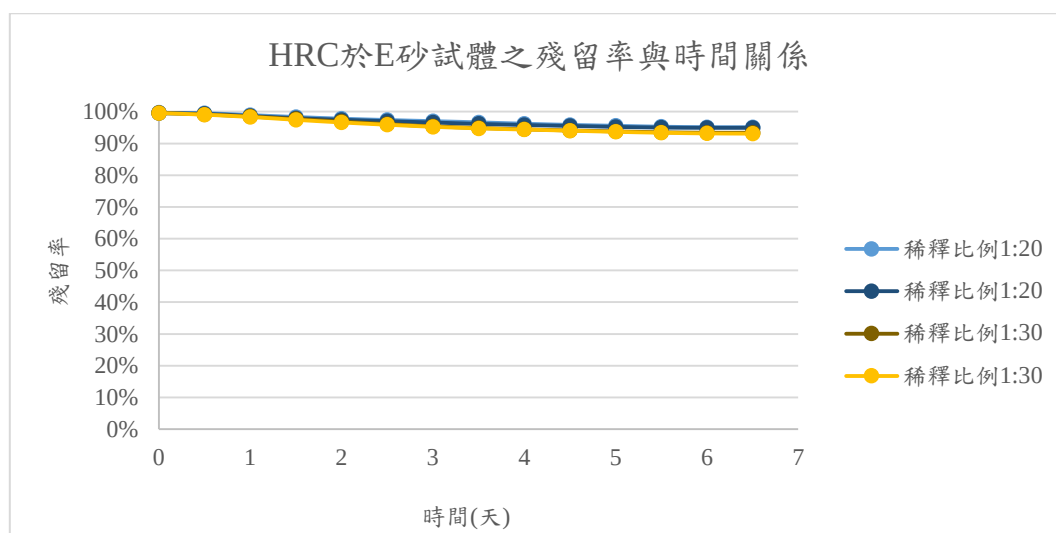


圖 5.28 HRC 於 E 砂試體之殘留率與時間關係圖

(7)F 砂試體

使用 HRC 以 1:20 之稀釋比例進行灌注 F 砂試體，灌注之結果未達到預期之灌注高度，其高度約為 60 公分，故針對 F 砂試體提高稀釋比例至 1:30，來改善灌注之情形。其結果顯示，HRC 稀釋比例已 1:20 灌注其灌注高度約為 60 公分，而提高稀釋比例至 1:30 後，其灌注高度可上升至約 65 公分。

持續性方面，稀釋比例 1:20 之 HRC 灌注 E 砂試體，在水流進入試體後約 6 天後出流液濃度降至最低，而其殘留率大約為 75%，而稀釋比例 1:30 之 HRC，在水流進入試體後約 6 天後出流液濃度降至最低，而其殘留率約為 65%。

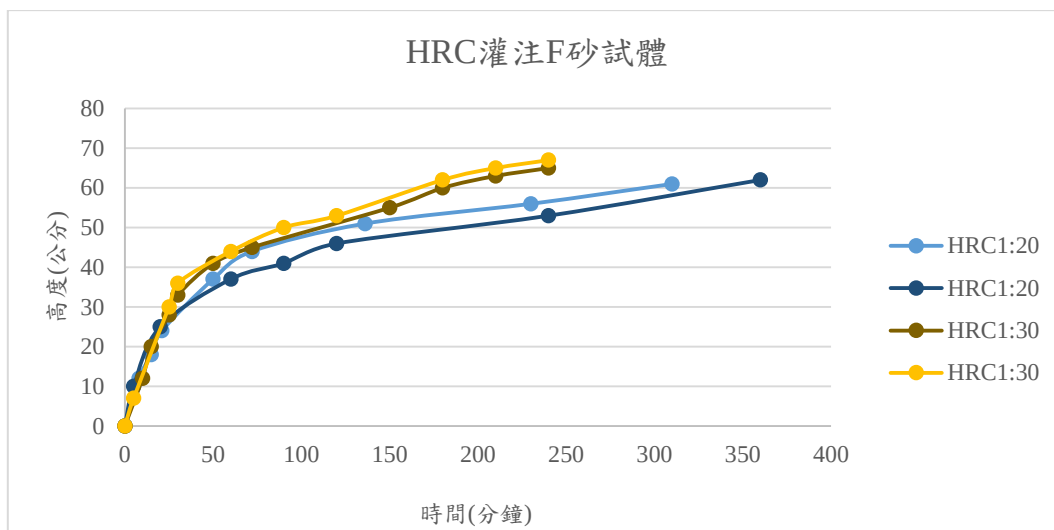


圖 5.29 HRC 灌注 F 砂試體

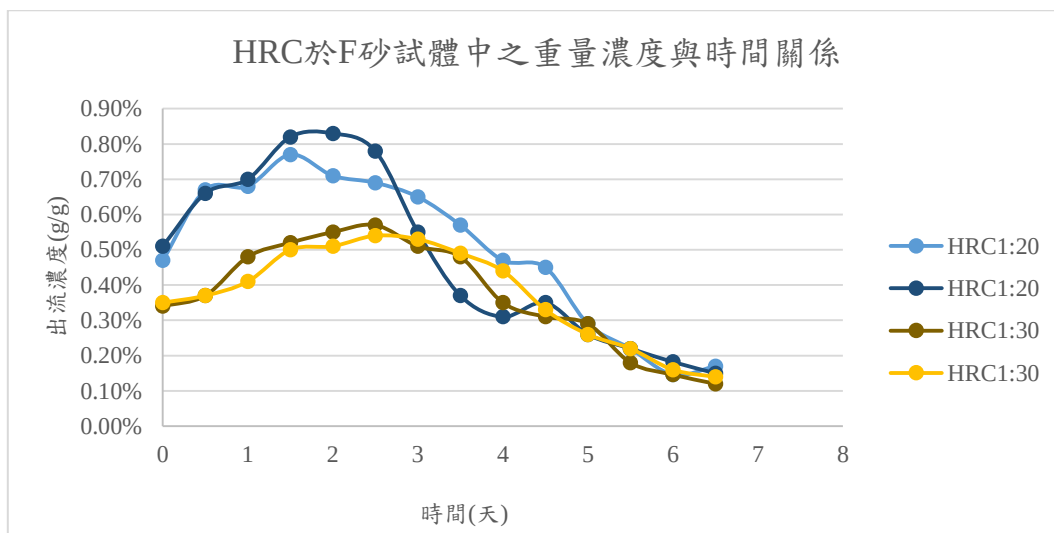


圖 5.30 HRC 於 F 砂試體中之重量濃度與時間關係

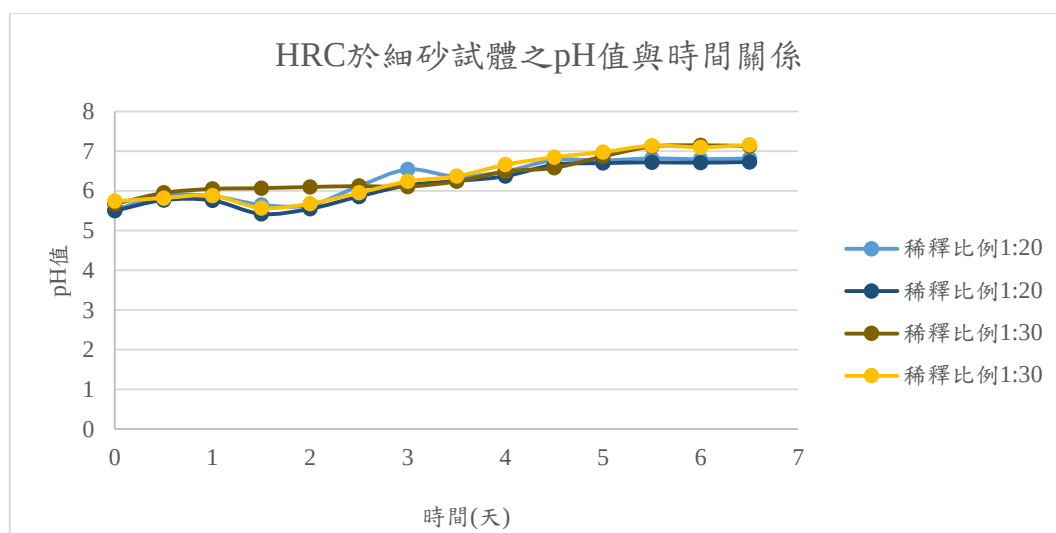


圖 5.31 HRC 於 F 砂試體中之 pH 值與時間關係

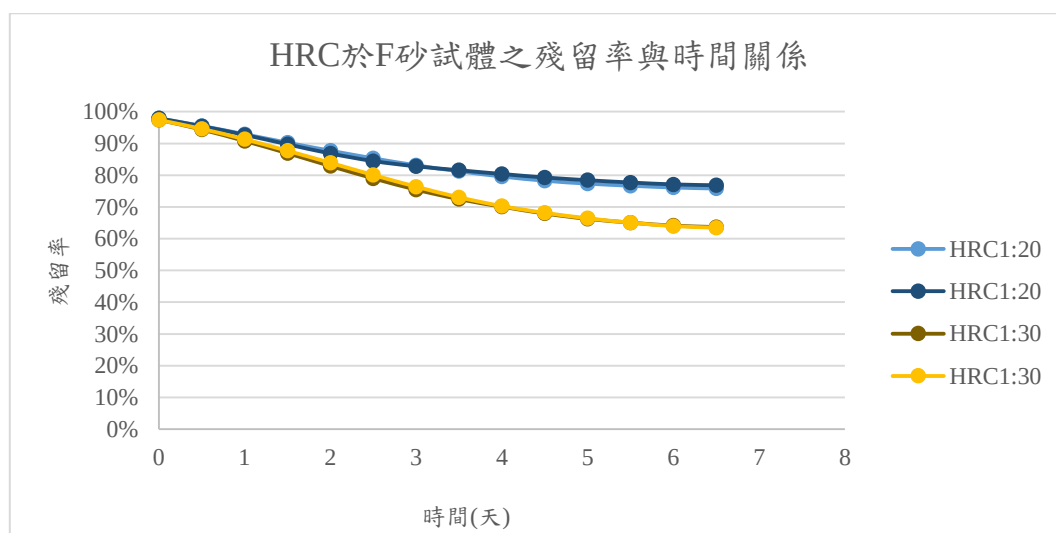


圖 5.32 HRC 於 E 砂試體之殘留率與時間關係圖

5.2.2 稀釋比例改變之綜合討論

中砂試體之部分，即使稀釋比例降低至 1:5 仍可達到目標灌注高度，而在 A 砂試體、B 砂試體及細砂試體中提高稀釋比例至 1:20 皆可以改善滲透之情形，以達到目標灌注高度，E 砂、F 砂提高稀釋比例至 1:30 後雖然可以提高其滲透性，但效果較不顯著；C 砂、D 砂不論以 1:20 稀釋比例或是提高至 1:30 之稀釋比例灌注皆無法將基質灌入砂柱試體之中，整體而言即使稀釋比例有大幅度之調整，但對於滲透之速度以及滲透之結果僅小幅地改變。

於持續性部分，中砂試體以 HRC 稀釋比例降低為 1:5 後其殘留率約上升 5%；而 A 砂試體中，提高稀釋比例至 1:20 後，其殘留率與稀釋比例 1:10 大約相同；

B 砂試體中，提高稀釋比例至 1:20 後，其殘留率與稀釋比例 1:10 大約相同；細砂試體中，提高稀釋比例至 1:20 後，其殘留率較稀釋比例 1:10 約降低 15%；C 砂及 D 砂試體因無法將基質灌入故無持續性之討論；E 砂試體中，提高稀釋比例至 1:30 後，其殘留率變化並無明顯差異；F 砂試體中，提高稀釋比例至 1:30 後，其殘留率較稀釋比例 1:20 約降低 10%，由此可發現，稀釋比例較高者其殘留率也較低，且試體試驗砂粒徑越小，改變稀釋比例後其殘留率之變化也越小。

5.3 結論

1. 調整稀釋比例對滲透之情形有所影響，但影響有限。

本研究以稀釋比例 1:10 之 HRC 基質灌注中砂試體可以達到目標灌注高度，於今年度降低稀釋比例降低至 1:5 仍可達到目標灌注高度。而無法達到目標灌注高度之 A 砂、B 砂、細砂試驗，提高稀釋比例至 1:20 後皆可達到目標灌注高度，E 砂、F 砂試體提高稀釋比例後雖然仍無法將基質灌注至目標灌注高度，但仍可小幅度地改善基質之滲透性，故調整稀釋比例可以改善滲透之結果。但以稀釋比例之變化與滲透之結果觀察，雖然稀釋比例有顯著之調整，但滲透之結果及滲透之速度僅有小幅地變化。

持續性部分試驗，整體而言，稀釋比例越高其殘留率會越小，反之稀釋比例越低其殘留率越大，且試體粒徑越小，稀釋比例之改變對於持續性之變化也越小。

2. 極細砂之試驗中，HRC 滲透性方面表現較佳，EOS 在持續性方面表現較佳，但三種基質之滲透性與持續性差異不大。

根據試驗結果，滲透性之比較 HRC 較佳，而 EOS 與 EcoClean 之滲透性相對稍差；持續性方面，EOS 與 HRC 之殘留率較 EcoClean 稍佳。整體而言，雖然三者之間並無明顯之差別。

5.4 建議

以 HRC 以稀釋比例 1:5 灌注中砂試體仍可有效地滲透，而 A 砂試體、B 砂試體以及細砂試體在改變稀釋比例至 1:20 之後，均可有效地滲透至最大高度。

C 砂與 D 砂之試驗中，以本研究之滲透灌漿技術而言，三種基質不論以稀釋比例 1:20 或 1:30 皆無法於試體中滲透，故未來可嘗試尋找粒料粒徑較小之基質，並透過實驗室試驗於各試驗砂條件下進行灌注，以提升滲透灌注之效果。

而 E 砂、F 砂之試驗中，三種基質以 1:20 之稀釋比例可以滲透，然而滲透之情形並非理想，其中以 HRC 之滲透性稍佳於 EOS 與 EcoClean，而持續性方面

EOS 與 HRC 稍優於 EcoClean。故未來若要採用此技術於土壤整治，則可能需要提高稀釋比例，或者考慮現地圍壓之條件，在土壤劈裂壓力之下增加灌注壓力及以粒料粒徑較小之基質進行灌注，方可能改善基質滲透之情形。

第六章 参考文献

1. Akada(1999), Toyama, “*Bioremediation Product Series*”.
2. Anna Willett, Birnstingl and Stephen S(2005), “*A COMPREHENSIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF HYDROGEN RELEASE COMPOUND*”.
3. ASTM C136-06 (2006), “*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*”, Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.
4. ASTM D422-63 (2007), “*Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*”, Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.
5. ASTM D854-02 (2002), “*Determination of Specific Gravity of Soils*”, Annual Book of ASTM Specification, Philadelphia, PA.
6. Dano, C., Hicher, P. Y. and Taillez, S.(2004) , “*Engineering Properties of Grouted Sands*”*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* ,Vol. 130, No. 3, pp. 328-338.
7. EcoCycle Corporation, Japan(2008), “*Field Experience in Bioremediation of Soil and Groundwater Contaminated with Chlorinated solvents and Hexavalent Chromiun in Japan*”.
8. Edward Sudicky,Walter Illman(2013), “*Computational and Experimental Investigation of ContaminantPlume Response to DNAPL Source Zone Architectureand Depletion in Porous and Fractured Media*”.
9. Fiore,S and M.C. Zanetti(2011),“*Evaluation of Hydrogen/Oxygen Release Compounds for the Remediation of VOCs*”, *American Journal of Environmental Sciences*,pp.468-476.
10. Ishihara,K.(1993),”*Liquefaction and flow failure during earthquakes*”,*Geotechnique* 43(3):629-644
11. Kapo M. Coulibaly¹; Cameron M. Long²; and Robert C. Borden, P.E.(2006), “*Transport of Edible Oil Emulsions in Clayey Sands:One-Dimensional Column Results and Model Development*”.
12. Ladd(1978),” *Preparing specimens using undercompaction. ASTM, Geotechnical Testing Journal*”, GTJODJ, 1(1): 16-23
13. Magg (1938),“*Ueber die Verfestigung und Dictung des Bangrundes (injektionen)*”, *Course on soil mech.*, Zurich Tech. School.
14. Meichin Yeh(2009), “*Pantented Methods for in situ Bioremediation*”.
15. Michael D. Lee(2003), “*PILOTS TO ENHANCE TRICHLOROETHENE REDUCTIVE DECHLORINATION AND FERROUS SULFIDE ABIOTICTRANSFORMATION*”
16. Mohamed, A. B. (1981) ,“*Effective stress strains strength behavior of silicate*

grouted sand”.

17. MWH Americas Inc., Taiwan Branch(2014), 功學社教育用品股份有限公司過嶺第一場地下水汙染整治場址之汙染整治計畫
18. Ozgurel, H. G., and C. Vipulanandan. (2005), “*Effect of Grain Size and Distribution on Permeability and Mechanical Behavior of Acrylamide Grouted Sand*”, Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering ASCE, Vol.131, No.12, pp.1457-146
19. Regenesi, “3-D MICROEMULSION FACTORY EMULSIFIED”.
20. Regenesi, “Hydrogen Release Compound INSTALLATION INSTRUCTIONS”
21. Kapo M. Coulibaly and Robert C. Borden(2006), “*Transport of Edible Oil Emulsions in Clayey Sands:One-Dimensional Column Results and Model Development*”.
22. Saiyouri, N., Bouasker, M. and Khelidj, A. (2008), “*Gas Permeability Measurement on Injected Soils with Cement Grout*” Cement and Concrete Research, Vol. 38,No.1 , pp.95-103.
23. Schwarz, L. G., and M. Chirumalla. (2007), “*Effect of injection pressure on permeability and strength of microfine cement grouted sand*” , Grouting for Ground Improvement: GSP 168 Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechniques.
24. Soga, K., Au, S.K.A., Jafari, M.R., Bolton, M.D. (2004), “*Laboratory Investigation of Multiple Grout Injections into Clay*” Geotechnique, Vol. 54, No. 2, pp. 81–90.
25. Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1948),” *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley&Sons”, New York.
26. Whiting et al(2008),”*In Situ Biogeochemical Transformation of Chlorinated Ethenes Using Engineered Treatment Systems*”
27. Zebowitz, S., R. J. Krizek, and D. K. Atmatzidis. (1989), “*Injection of Fine Sands with Very Fine Cement Grout*”, Journal Geotechnical Engineering, n12, pp.1717-173
28. 于洋、劉召安，2011，「一種礦用智能乳化液控制系統」。
29. 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。
30. 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」。
31. 林永昇、周偉龍，2014，「乳化安定性快速檢測系統」。
32. 林靜齡，林明德，2010，「乳化奈米零價鐵於地下水之傳輸性評估」。碩士論文，國立中興大學環境工程研究所。
33. 施國琅(2008)，「超微粒水泥漿體滲透灌漿與灌注量之研究」，碩士論文，國立

臺灣大學生物環境系統工程研究所。

34. 范正成、黃建霖、施國琅、黃聖修、莊偉成，2008，「超微粒水泥漿體滲透灌與注量之研超微粒水泥漿體滲透灌與注量之研究」，九十七年度農業工程研討會，台北市。
35. 范正成、黃建霖、莊偉成、連琮勛，2009，「超微粒水泥漿體滲透灌對砂柱試力傳導度之影響」，九十八年度農業工程研討會，台中市。
36. 倪至寬、林任峰，2006，「超細水泥漿液滲透灌漿之研究」，臺北科技大學學報，95 年 09 號。
37. 張永宜、楊金鐘，2007，「乳化奈米級零價鐵處理水溶液中之三氯乙烯」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所。
38. 張書奇、江蓬鈺，2014，「以奈米乳化液與奈米氧化鐵作為河川底泥污染整治助劑之研究：由實驗室到模場試驗」。
39. 連宗勛(2010)，「應用禁忌演算法於超微粒水泥漿體滲透灌漿在砂性粉土層之可灌性研究」，碩士論文，生物環境系統工程學研究所。
40. 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
41. 陳逸明，高志明，2009，「以乳化型基質處理受三氯乙烯污染之地下水」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所。
42. 黃宇伶，高志明，2012，「以長效型基質處理受三氯乙烯污染之地下水」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所。
43. 黃建霖、范正成、楊文仁，2007，「超微細水泥灌漿材料於砂性粉土層之應用」，地工技術，第 111 期 71-82 頁。
44. 劉嘉庭，高志明，2010，「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」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所。
45. 蔡昀達，2007，「地下水生物整治技術及案例介紹」。
46. 簡華逸，高志明，2009，「應用現地生物整治技術處理受三氯乙烯污染之地下水」，博士論文，國立中山大學環境工程研究所。

附錄、試驗數據

滲透灌漿模擬砂柱試驗結果

本研究利用滲透灌漿技術將三種基質灌注於 8 種試驗土中(C 砂及 D 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

中砂

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		

d.基質 HRC 稀釋比例 1:5

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
60	9	60	12
120	16	120	21.5
240	29.5	240	33
360	41	360	45.5
480	52	480	53.5
600	63	600	63
720	71.5	720	72
840	82	860	77
970	90	960	87
		1080	90

A 砂

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

d.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
60	10	60	6
120	18	120	15.5
360	35	300	25
480	45.5	600	45.5
600	55.5	720	55.5
900	72	960	71
1040	90	1260	90

B 砂

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.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
60	6	60	6
240	15.5	120	11.5
480	27	240	18
600	37	600	37.5
960	53	960	51
1200	63	1200	60
1800	75	1980	78.5
2140	90	2400	90

細砂

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

d.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
120	15	120	14
240	22	240	24
360	34	480	36
640	40	600	41
960	51	1200	49
1200	56	1500	58
1800	67	1800	68
2700	90	2400	80
		3000	90

E 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
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

d.基質 HRC 稀釋比例 1:30

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
180	6	180	5
600	12	360	8
1200	15	900	13
2400	17	1200	16
3000	20	2000	18
5000	31	3600	24
7000	35	5000	32
9000	44	6000	34
14000	49	9000	46
21000	52	14000	51
		22000	54

F 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

d. 基質 HRC 稀釋比例 1:30

時間(s)	距離(cm)	時間(s)	距離(cm)
0	0	0	0
600	12	300	7
900	20	1500	30
1500	28	1800	36
1800	33	3600	44
3000	41	5400	50
4320	45	7200	53
9000	55	10800	62
10800	60	12600	65
12600	63	14400	67
14400	65		

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(8 種試驗土中由於 C 砂及 D 砂無法灌注故無此部分數據)，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

中砂

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%				

d.基質 HRC 稀釋比例 1:5

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	6.72%	4.28		0	5.93%	4.36	
30	7.14%	4.05	98.15%	30	6.23%	4.21	98.37%
60	7.23%	3.96	96.22%	60	7.23%	3.88	96.57%
120	6.87%	3.86	92.45%	120	7.40%	3.83	92.66%
240	5.82%	3.85	85.66%	240	5.45%	3.83	85.78%
480	2.57%	3.82	76.67%	480	1.78%	3.82	78.03%
600	1.45%	4.01	74.52%	600	0.62%	4.97	76.75%
720	0.55%	5.07	73.45%	720	0.42%	5.21	76.19%
1380	0.05%	5.46	71.67%	1320	0.09%	5.49	74.83%

A 砂

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%

d. 基質 HRC 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	1.60%	5.53		0	2.26%	5.26	
60	2.68%	5.17	92.94%	60	3.35%	5.07	89.91%
120	2.94%	5.07	83.66%	120	1.86%	5.15	80.53%
240	0.51%	5.76	72.28%	240	0.22%	5.61	73.03%
480	0.34%	5.85	66.70%	480	0.24%	5.71	69.72%

600	0.10%	6.26	65.26%	600	0.08%	6.55	68.57%
1080	0.05%	7.25	63.36%	960	0.06%	7.16	67.07%
1440	0.05%	7.31	62.43%	1440	0.02%	7.57	65.94%

B 砂

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. 基質 HRC 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	0.90%	4.31		0	1.62%	4.1	
60	3.10%	4	98.99%	60	4.03%	3.9	98.98%
120	3.64%	3.9	95.53%	120	3.68%	4.34	95.38%
240	3.15%	4.78	84.44%	240	2.21%	4.93	90.00%
600	0.22%	5.82	77.27%	600	0.55%	6.01	84.05%
960	0.23%	6.44	75.10%	960	0.20%	6.97	79.25%
1080	0.31%	6.57	72.60%	1080	0.12%	7.22	75.15%
1440	0.04%	7.24	71.89%	1440	0.22%	7.14	74.77%

細砂

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%

d. 基質 HRC 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	2.22%	3.88		0	2.10%	4.13	
60	2.04%	3.91	93.06%	60	2.00%	3.92	95.33%
120	2.08%	3.93	86.35%	120	2.12%	3.81	90.64%
240	0.55%	4.44	77.79%	180	1.89%	4.54	86.07%
480	0.24%	5.52	72.64%	240	1.21%	4.52	82.53%
600	0.10%	5.75	71.53%	480	0.57%	5.62	74.41%
720	0.07%	6.48	70.98%	600	0.31%	5.81	72.42%
960	0.07%	6.53	70.07%	720	0.22%	5.83	71.24%
1260	0.02%	6.67	69.33%	960	0.22%	6.01	69.27%
				1200	0.21%	6.32	67.34%

E 砂

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%

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	0.02%	6.42		0	0.03%	6.44	
0.5	0.03%	6.39	99.64%	0.5	0.03%	6.54	99.57%
1	0.04%	6.64	99.14%	1	0.04%	6.62	99.06%
1.5	0.05%	6.72	98.49%	1.5	0.06%	6.57	98.34%
2	0.06%	6.80	97.70%	2	0.07%	6.68	97.44%
2.5	0.05%	6.91	96.90%	2.5	0.05%	6.95	96.62%
3	0.06%	7.04	96.11%	3	0.05%	7.24	95.90%
3.5	0.04%	6.99	95.39%	3.5	0.04%	7.37	95.25%
4	0.03%	7.12	94.89%	4	0.03%	7.36	94.74%
4.5	0.03%	7.24	94.46%	4.5	0.02%	7.35	94.38%
5	0.02%	7.27	94.10%	5	0.03%	7.28	94.02%
5.5	0.02%	7.26	93.81%	5.5	0.02%	7.31	93.66%
6	0.02%	7.27	93.52%	6	0.02%	7.29	93.38%
6.5	0.00%	7.27	93.38%	6.5	0.01%	7.29	93.16%
7	0.02%	6.42	93.38%	7	0.03%	6.44	93.09%

F 砂

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%