

低滲透非塑性粉土內不織布排水效果與改善措施之試驗研究

林俊佑¹ 楊國鑫^{2*}

關鍵詞：低滲透性土壤、不織布排水層、薄砂層、水力傳導係數、防災。

摘要

為了改善地工擋土構造物以低滲透性土壤為回填土，在颱風豪雨下之滲流行為與排水能力，本研究設計一座橫向滲流裝置，以粉土為低滲透性土壤、地工不織布為排水材料、搭配不同厚度之薄砂層進行複合排水系統之短期與 7 日滲流試驗，並於試體上方施加垂直載重模擬覆土壓力。試驗結果發現，無載重時地工不織布對系統滲透性有顯著的提升，但排水效果隨著載重以及滲流時間的增加而減少，原因為不織布受壓後厚度（通水面積）減少以及細顆粒入侵造成排水層阻塞，使其排水效果降低。本研究亦發現設置薄砂層後不論有無載重其排水效果皆能有效發揮，且系統滲透性隨著薄砂層厚度增加而增加。依據本研究結果，建議在實務應用上，可在排水層上下加設一層薄砂層，以有效提升系統的排水效能，降低颱風豪雨造成基礎設施構造物，如道路邊坡與擋土結構物崩塌的災害。

EXPERIMENTAL STUDY ON MEASURES FOR IMPROVING THE DRAINAGE EFFICIENCY OF LOW-PERMEABILITY AND LOW-PLASTICITY SILT WITH NONWOVEN GEOTEXTILE DRAINS

Chun-Yu Lin Kuo-Hsin Yang

*Department of Civil and Construction Engineering
National Taiwan University of Science and Technology
Taipei, Taiwan 10607, R.O.C.*

Key Words : low-permeability soil, nonwoven geotextile drains, thin sand layer, hydraulic conductivity, disaster prevention.

ABSTRACT

Horizontal permeability tests were conducted experimentally to investigate the short-term and 7-days drainage efficiency (*i.e.*, permeability) of low-permeability soil with permeable nonwoven geotextile drains sandwiched between thin sand layers. The objective of this study was to improve the drainage design of geosynthetic reinforced low-permeability soil structures during heavy rainfall. The test variables included the number of drainage and sand layers, sand-layer thickness, normal pressure, and test duration. The test results indicated that system permeability was effectively improved as the number of drainage and sand layers and sand-layer thickness increased. The system permeability decreased as the applied normal pressure and test duration increased because the normal pressure compressed the thickness of the soil and the drainage layers, and fine soil particles

¹ 國立台灣科技大學營建工程系碩士班研究生

^{2*} 通訊作者，國立台灣科技大學營建工程系副教授

were likely to migrate through seepage over time, resulting in the clogging of drainage layers. The results also demonstrated that the sand layers effectively improved system permeability by preventing fine soil particles from clogging the drainage layers. The system permeability increased as sand-layer thickness increased, suggesting that in addition to functioning as a filter, the sand layers also provided a drainage function. The findings encourage the practical application of thin sand layers to mitigate the damage caused to infrastructure by typhoons or heavy rainfall, thereby achieving a safer and more sustainable environment.

一、前言

台灣地理環境在夏秋之際常有颱風來襲，往往夾帶大量豪雨，如果沒有做好道路邊坡與擋土設施的防護，將會造成嚴重的坡地災害，如擋土結構物倒塌、邊坡崩落、土石流等。當此類災害造成後，常造成交通中斷，更嚴重的會影響災民疏散與救災支援。因此，要如何克服上述的問題為當前相當重要的課題。目前在台灣，為了快速搶通災後受損或毀壞的道路邊坡，加勁擋土結構物（包含擋土牆與邊坡）已被廣泛的應用於坡地災害的修復工程中。加勁擋土結構物除了具有施工快速與簡易的優點外，有別於一般重力式擋土結構物，因為不需使用到大量的混凝土，為符合全球節能減碳共識的綠工法，此外其亦兼具美觀（與自然環境相容）、經濟、耐震、可承受較大變形等多項優點。

加勁擋土結構物的穩定性取決於回填土壤的剪力強度與透水性。一般而言，常用的加勁擋土結構物設計規範，如美國 Federal Highway Administration (FHWA) (Elias *et al.* 2001; Berg *et al.* 2009)，美國 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 2002)，美國 National Concrete Masonry Association (NCMA 2010) 和台灣台北市土木技師公會（台北市土木工程技師公會 2003）等皆建議使用強度高與透水好的粗顆粒土壤（如砂土或礫石）當作回填土，其細粒料含量（小於#200 篩如粉土或黏土）不能太高。以 FHWA 與 AASHTO 設計規範而言，加勁擋土牆（牆面傾角 $\geq 70^\circ$ ）之細顆粒含量不得超過 15%，加勁邊坡（牆面傾角 $< 70^\circ$ ）則有比較寬鬆的規定，為細顆粒含量不得超過 50%。圖 1 表示各設計規範對回填土粒徑分佈之要求。除此之外，如 FHWA 或 AASHTO 設計規範也同時要求回填土的塑性指數 (Plasticity Index)，對加勁擋土牆而言需 $PI < 6$ ，而對加勁邊坡需 $PI < 20$ 。若回填土不符合以上設計規範的建議則一般稱之為低滲透性土壤 (low-permeability soil)，排水不良土壤 (poorly draining soil) 或適用邊緣土壤 (marginal soil)。

如果回填土壤的細粒料含量過高則工程特性將由細粒料控制，由於這種土壤的顆粒尺寸相對較小，因此土壤滲透性差，遇到豪雨來襲會導致孔隙水壓累積與消散不及的問題。此外，當孔隙水壓累積，土壤長時間泡在水中，易造成土壤軟化，導致土壤本身剪力強度與土壤-加勁材界面剪力強度降低。以上所提到的問題會增加加勁擋土結構物的變形量（牆頂沉陷或牆面變形），降低加勁擋土結構物的穩定性。Koerner and Koerner [1] 調查了全世界 82 座加勁擋

土結構物破壞的案例，其中有 23 座被判定為嚴重變形，有 59 座被判定為倒塌，他們的調查結論認為土壤夯實不足、排水設計不良、細粒料含量過大、為影響加勁擋土結構物安全性的主要因素。

儘管上述有關加勁擋土結構物回填土的問題，然而在實際應用上為了施工方便與節省成本，以及滿足挖填土方需平衡的規定，往往就近以較低剪力強度與低透水性的現地土壤作為回填土。當颱風暴雨來襲時，雨水入滲到這類的回填土內，造成孔隙水壓累積，土壤剪力強度與土壤-加勁材界面剪力強度降低，最終導致系統不穩定甚至結構物崩塌（圖 2(a)）。為了改善加勁擋土結構物內的排水，實際施工上會在加勁擋土結構物內鋪設不織布 (nonwoven geotextile) 或土工複合物 (geocomposite) 當作排水層 (drainage layer)，然而常見的問題為長期下來不織布因直接接觸現地土壤，受現地土壤細顆粒阻塞，而喪失其排水的功能，導致系統內排水不良與孔隙水壓累積。為了克服上述的問題，其解決的方法為在不織布與細顆粒界面鋪設一層緩衝的粗顆粒層（砂或礫石），此粗顆粒層提供過濾兼排水的功能，此改善措施具有下列功用：(1) 加速加勁擋土結構物內排水與孔隙水壓之消散；(2) 排水層受覆土壓力作用後，厚度變薄，排水效果降低。但若加上粗顆粒層，整體排水效果受覆土壓力作用的影響較小；(3) 粗顆粒層可以有效防止細顆粒阻塞於不織布上，以確保長期排水之暢通；(4) 增加土壤與加勁材之介面摩擦力，提升系統穩定性。

有鑒於此，本文將呈現一系列低滲透性土壤與複合排水系統之橫向滲流試驗，探討低滲透性土壤之橫向滲流行為與改善措施之評估。本文也將探討不織布層數與薄砂層厚度的最佳設計。最後希望本研究成果能進一步提供抗強降雨設計的相關具體建議，以降低基礎設施構造物在豪雨下受損或毀壞，確保公路系統交通安全與通暢，達到建立永續安全家園的最終目標。

二、土壤與不織布基本參數試驗

2.1 土壤參數試驗

本研究採用之低滲透性土壤依統一土壤分類 (USCS) 為低塑性粉土 (ML)，在 FHWA 規範中屬適用邊緣回填土（如圖 1 所示）。此土壤黏土含量小於 3%，在進行土壤阿太保塑性限度試驗時，發現土壤無法捏成團，研判所選用的土壤塑性很低。用以改善排水效率的薄砂層由石英砂組

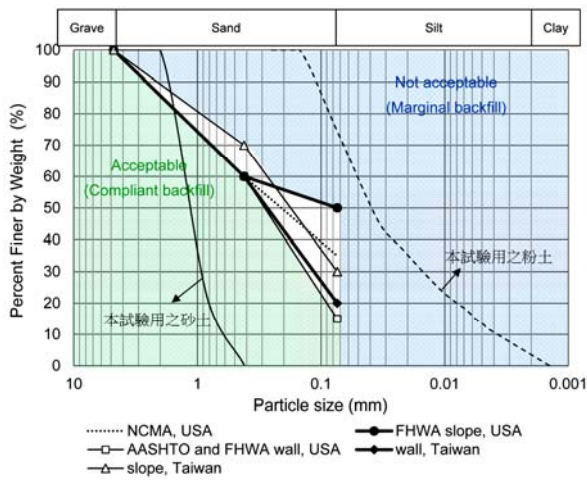


圖 1 美國與台灣規範之回填土壤粒徑範圍

表 1 土壤物理參數

Item	Symbol (Unit)	Reference	Silt	Sand
USCS			ML	SP
Specific gravity	G_s	ASTM-D854 [2]	2.62	2.65
Coefficient of uniformity	C_u	ASTM-D422, 452 [3,4]	13.78	2.06
			1.36	1.01
Maximum unit weight	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	ASTM-D4253, 4254 [5,6]	-	16.48
Minimum unit weight	$\gamma_{d,min}$ (kN/m ³)			14.15
Standard proctor compaction	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	ASTM-D698 [7]	15.61	-
	ω_{opt} (%)		18.06	

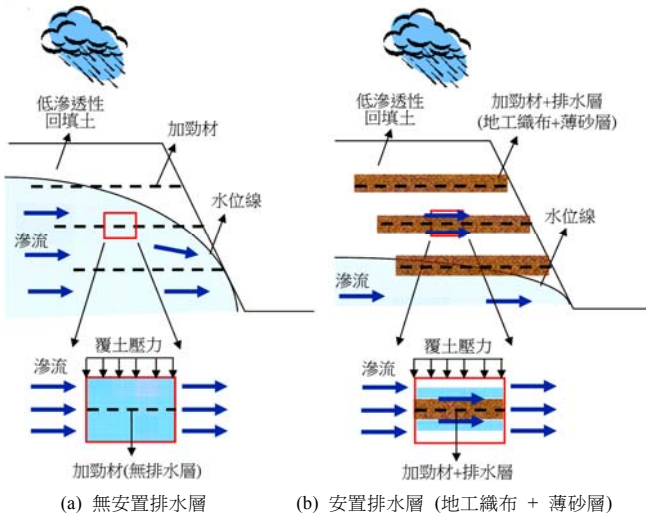


圖 2 邊坡降雨滲流示意圖

成，為不良級配的砂土 (SP)，在 FHWA 規範中屬優質回填土 (在規範可接受範圍內)。表 1 [2-7] 詳列土壤物理參數試驗結果及所參考的 ASTM 試驗規範。土壤之水力傳導係數由橫向滲流儀求得，在正向應力 $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ 作用下，粉土與砂土之水力傳導係數分別為 $k = 3.9 \times 10^{-7}$ 與 $1.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ，橫向滲流儀器與試驗方法將稍後介紹。

2.2 不織布參數試驗

本研究以佳寶樹脂有限公司出產的不織布 (型號 CP-A13) 作為排水材料，此織布為針孔不織布，主要材質為 PET (polyethylene terephthalate) 樹脂，依據土工織物厚度試驗 (ASTM-D5199) [8] 求得在 2 kPa 壓力下的平均厚度為 1.76 mm，單位面積重為 200 g/m²。不織布透水程度跟材料本身纖維組成與孔隙大小有很大的關係，不織布孔徑大小可由開孔徑試驗獲得 (ASTM-D4751) [9]。此試驗採用濕篩法量測不織布之開孔徑，並繪製開孔徑分佈圖，圖中停

留百分比為 95% 所對應的粒徑即為有效開孔徑 (Apparent Opening Size, O_{95})。試驗結果得知本試驗選用之不織布開孔徑為 $O_{95} = 0.11 \text{ mm}$ 。

土工織物縱向透水性 (Permittivity, ψ) 定義為單位厚度之垂直方向透水性，依照 ASTM-D4491 [10] 利用變水頭試驗量測特定水頭改變量所需的時間 Δt ，由式(1)、(2)計算求得不織布之縱向透水性與滲透係數。試驗方法先將不織布與夾具組裝，接著套入壓克力管以及下擋板，再將水由壓克力管倒入初始水頭高度 25 cm 處，移開下擋板同時開啟碼錶記錄水流至終點 0 cm 處之時間，反覆試驗 20 次後取約 10 次接近值平均。本試驗獲得不織布之縱向透水性 $\psi = 1.96 \text{ s}^{-1}$ 與縱向滲透係數 $k_{v,g} = 0.0035 \text{ m/s}$ 。不織布的橫向透水性 (Transmissivity, θ) 於第 6.1 節 (圖 15) 討論。

$$\psi = \left[\frac{a}{A_g \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \right] \quad (1)$$

其中

- ψ : 土工織物縱向透水性
- a : 變水頭壓克力管橫斷面積
- A_g : 土工織物試體橫斷面積
- Δt : 水頭高改變所需時間
- h_1 : 初始水頭高
- h_2 : 終點水頭高

$$k_{v,g} = \psi \times t_g \quad (2)$$

其中

- $k_{v,g}$: 土工織物縱向滲透係數
- t_g : 土工織物厚度

DeBerardino [11] 提到若在土壤與土工織物系統中，土工織物之開孔徑遠大於土壤顆粒之粒徑，這將造成不織布

無法有效留阻土壤顆粒，導致內部掏空與土壤流失等問題；反之，若土壤顆粒粒徑相對過大，於滲流過程中會阻塞不織布而降低系統的透水性。有鑑於此，土工織物應用於排水與過濾之設計中，需符合相關規範之要求。本研究依照 FHWA 設計規範 [12] 檢核本試驗採用之低滲透性土壤與不織布之組合是否符合過濾排水準則之要求。過濾排水準則有：(1) 土工織物對土壤之阻留準則 (Retention Criteria)；(2) 土工織物透水性準則 (Permittivity Criteria)；(3) 土工織物與土壤之相對透水性準則 (Permeability Criteria)。表 2 統整此三項過濾排水準則之公式與計算過程。檢核結果發現，選用之低滲透性土壤與不織布之組合符合過濾排水設計準則之所有要求。

三、滲流試驗介紹

3.1 土壤-排水層橫向滲流試驗

本研究進行一系列低滲透性粉土搭配不織布與薄砂層之複合排水系統滲流試驗，試驗變數有：不織布與薄砂層層數 (0、1、2 與 3 層)、薄砂層厚度 (0.5、10、15 與 20 mm)、時間 (0~7 天)、正向應力 (0、50、100、150 與 200 kPa)。總共進行 12 組滲流試驗，詳細試驗規劃如表 3 所示。1、2 組分別為純砂土與純粉土滲流試驗，其餘為純粉土加入不織布以及薄砂層之試驗。試驗的名稱以第 6 組作說明，1L w/sand-5 mm 表示粉土內加入單層不織布，每層砂層厚度為 5 mm (不織布上下各 2.5 mm 厚)。本試驗主要獲得土壤-排水層複合排水系統之短期與 7 日滲流作用下之水力傳導係數，用以評估各試驗變因對系統水力傳導係數之影響。圖 3 為本研究專門設計之土壤-排水層複合排水系統滲流裝置圖。此滲流儀裝置分為四個隔間：進水庫、土壤試體、出水庫、蓄水庫。土壤試體長寬高為 20 cm、10 cm、10 cm，大試體空間可容許進行各種複合排水系統 (如不同層數之排水層與不同厚度之薄砂層) 之滲流試驗。進水庫-試體與試體-出水庫之隔間皆開滿小細孔讓水通過，並用不織布阻隔以防止土壤顆粒於滲流過程中流失。在試體上方可施加載重，模擬土壤在加勁擋土結構物內不同深度受到不同覆土壓力的作用。

在試體準備方面，首先在試體箱內框周圍塗上矽牛油以防止滲流試驗開始後水從儀器內框縫隙間通過。然後將調配好最佳含水量之粉土置入試體箱內，施以靜壓夯實，並控制填土量以確保粉土達到其最大乾單位重。當粉土回填至預定高度後，開始鋪設不織布或不織布與薄砂層複層，鋪設過程以汽泡式水平儀尺確保鋪設之平整。為了確保鋪設均勻的砂層，薄砂層之相對密度控制為 85%，其厚度與平整度分別以游標卡尺與汽泡式水平尺控制。試體回填完成後加水飽和約等待 1~2 天。隨後蓋上載重板，在載重板與試體間以紙黏土外包保鮮膜的方式覆蓋試體上方以防止水從上部溢出。

在施加預訂載重後等壓密完成後 (約 1 天)，即以變水頭裝置進行短期滲流試驗，以量測在不同正向應力作用下之土壤-排水層系統水力傳導係數。在短期試驗最終載重

表 2 檢核本試驗選用之粉土與不織布之組合是否符合 FHWA 過濾排水準則

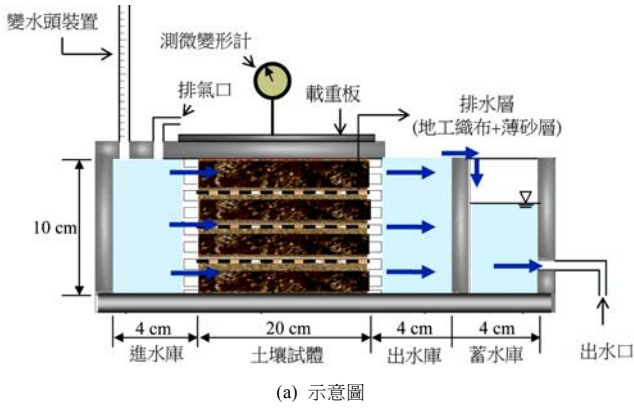
準則	土工織物對土壤之阻留 (Retention Criteria)	土工織物透水性 (Permittivity Criteria)	土工織物與土壤相對透水性 (Permeability Criteria)
要求	$O_{95(\text{geotextile})} \leq B D_{85(\text{soil})}$ 其中不織布之 $B = 1.8$	$\psi \geq 0.1 \text{ s}^{-1}$	$k_{(\text{geotextile})} \geq 10k_{(\text{soil})}$
計算	$0.11 \text{ mm} \leq 1.8 \times 0.095 = 0.17 \text{ mm}$	$1.96 \text{ s}^{-1} \geq 0.1 \text{ s}^{-1}$	$3.5 \times 10^3 \text{ m/s} \geq 10 \times 3.9 \times 10^{-7} = 3.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
是否符合	是	是	是

表 3 滲流試驗規劃

No.	Description	Number of drainage layers	Sand thickness of each layer (mm)	Sand thickness in total (mm)	Normal stress (kPa)	Time (day)
1	Pure sand	0	0	0	0, 50, 100, 150, 200	0 ~ 7
2	Pure silt	0	0	0		
3	1L w/o sand	1	0	0		
4	2L w/o sand	2	0	0		
5	3L w/o sand	3	0	0		
6	1L w/sand-5 mm	1	5	5		
7	2L w/sand-5 mm	2	5	10		
8	3L w/sand-5 mm	3	5	15		
9	1L w/sand-10 mm	1	10	10		
10	2L w/sand-10 mm	2	10	20		
11	1L w/sand-15 mm	1	15	15		
12	1L w/sand-20 mm	1	20	20		

200 kPa 完成後進行 7 日滲流試驗，此試驗先以定水頭裝置與回水系統提供一持續滲流 (水力坡降 $i = 3$ ，維持 7 日)，這是模擬當持續降雨下，加勁結構物內孔隙水壓升高，造成較高的水力坡降，探討在高水力坡降持續滲流下，系統滲透性隨時間之變化。圖 4 為整體滲流試驗裝置的照片。定水頭滲流試驗過程為水流經試體由出水庫之開口流經蓄水庫之出水口排出至回水系統 (圖 4 中橘色水桶)，再由抽水馬達抽至定水頭裝置的頭水箱，頭水箱內的水回流到進水庫後進入土壤試體。出水庫的水位需注意隨時加水保持在 10 cm，以維持試驗過程中試體上下游水頭差保持一定。在 7 日滲流試驗中，每天約 2~3 次以變水頭裝置量測系統水力傳導係數。系統水力傳導係數 k (m/s) 可由變水頭公式，下式(3)，求得，

$$k = \left[\frac{aL}{A_s(t_f - t_i)} \ln \frac{h_1}{h_2} \right] \quad (3)$$



(a) 示意圖



(b) 照片

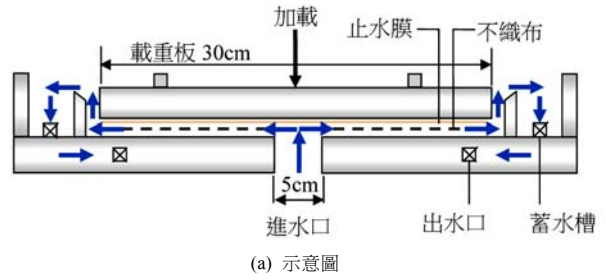
圖 3 土壤-排水層橫向滲流儀



圖 4 整體滲流試驗裝置照片

其中

- k : 系統水力傳導係數
- a : 變水頭壓力管橫斷面積
- L : 流經土壤長度
- A_s : 土壤試體橫斷面積
- t_f : 終點時間
- t_i : 初始時間
- h_1 : 初始水頭高
- h_2 : 終點水頭高



(a) 示意圖



(b) 照片

圖 5 土工織物水平透水裝置

最後，需要說明的是使用不同的邊界條件、試體大小、水力坡降等都會產生不同的試驗結果，然而討論這些變數已超出本文的範圍。上述變數在本試驗中都控制一致，因此不會對試驗所要觀察的結果與探討的趨勢有所影響。

3.2 土工織物透水試驗

為了具體量化土工織物在持續滲流下受土壤細顆粒阻塞而導致排水能力降低，本研究根據 ASTM D6574 [13] 設計一土工織物透水裝置用以量測不織布本身（不包含土壤）之水平（橫向）透水性，如圖 5 所示。此裝置包含進水口（直徑 5 cm）、出水口（量測出流量）、以及圓形載重板（直徑 30 cm）。不織布內之滲流由定水頭裝置提供，並銜接一水壓計以量測進水口處之壓力水頭，水由裝置下方由下往上滲流，在碰到載重板後透過不織布以輻射狀向外流出。不織布與載重板間鋪設一層橡皮止水膜，以防止水流經不織布與載重板間之縫隙。此裝置可於載重板上施加垂直載重，以探討不同正向應力對不織布滲透行為之影響。為了量測不織布在持續滲流下排水能力之改變，必須將每組 7 日滲流試驗完成後埋在橫向滲流裝置內之不織布取出。然後，將原本矩形的不織布（20 cm × 10 cm）剪裁成外徑 9 cm 及內徑 1.5 cm 的圓形不織布（保持內外徑比為 1：6）。此外，從土壤試體內取出的不織布須先浸水確保其飽和狀態，隨後即可進行不織布之透水試驗。不織布水平透水性 θ (m^2/s) 可由公式(4)計算之，

$$\theta = \frac{q \ln \frac{D_o}{D_i}}{\Delta h \times 2\pi} \quad (4)$$

其中

- q : 單位時間流量
 Δh : 總水頭差
 D_o : 不織布外徑
 D_i : 不織布內徑

四、短期滲流試驗結果與討論

表 4 統整短期滲流試驗結果，其中，括號內為改善率，即系統與純粉土在相同正向力作用下水力傳導係數之比值，比值越高表示排水改善效果越好。由表 4 得知，低滲透性的粉土 (Test 1) 受載後其水力傳導係數降低約 5 倍左右，滲透性受載重之影響相當大。反之，高滲透性之砂土 (Test 2) 幾乎不受載重影響。加入排水層對整體滲透性之影響討論如下：

4.1 土工不織布之影響

圖 6 為單層、雙層與三層不織布滲流試驗結果 (Tests 3 ~ 5)。研究發現，在無載重時，不論單、雙及三層不織布均能有效改善系統滲透性，提升系統水力傳導係數大約 15 ~ 30 倍，但受載後單層與雙層不織布的排水改善效果大幅降低，大約只提升 2 ~ 3 倍，只有三層不織布依然有效提升系統水力傳導係數約 15 ~ 30 倍。推測原因為，不織布受壓後其通水厚度減少以及細顆粒土壤受擠後入侵不織布造成不織布表層受到阻塞，因此降低了不織布的排水能力。

表 4 短期滲流試驗結果

No.	Description	System Permeability, $k \times 10^{-7}$ (m/s)				
		$\sigma_n = 0$ kPa	$\sigma_n = 50$ kPa	$\sigma_n = 100$ kPa	$\sigma_n = 150$ kPa	$\sigma_n = 200$ kPa
1	Sand	13473	12903	12785	12534	12449
2	Silt	24.16 (1)	4.91 (1)	4.38 (1)	4.08 (1)	3.90 (1)
3	1L w/o sand	310 (13)	8.6 (1.8)	5.9 (1.4)	5.7 (1.4)	5.4 (1.4)
4	2L w/o sand	503 (21)	12 (2.4)	8.9 (2.0)	7.8 (1.9)	7.5 (1.9)
5	3L w/o sand	706 (29)	155 (32)	89 (20)	68 (17)	55 (14)
6	1L w/sand-5 mm	665 (28)	84 (17)	39 (8.9)	31 (7.7)	25 (6.4)
7	2L w/sand-5 mm	937 (39)	387 (79)	200 (46)	151 (37)	139 (36)
8	3L w/sand-5 mm	1825 (76)	770 (157)	490 (112)	364 (89)	293 (75)
9	1L w/sand-10 mm	1905 (79)	945 (193)	406 (93)	194 (48)	179 (46)
10	2L w/sand-10 mm	2349 (97)	1009 (206)	691 (158)	501 (123)	410 (105)
11	1L w/sand-15 mm	2162 (89)	1009 (205)	860 (196)	760 (186)	709 (182)
12	1L w/sand-20 mm	2661 (110)	1179 (240)	992 (227)	864 (212)	849 (218)

註：() 內為改善率，即同正向力作用下系統與純粉土水力傳導係數之比值

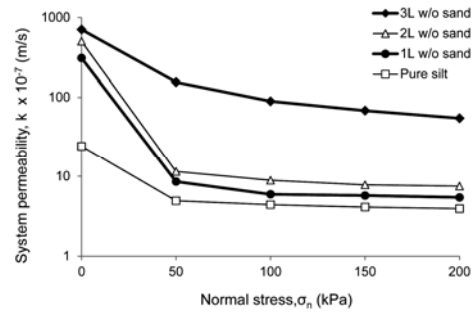


圖 6 加入不織布後系統水力傳導係數與正向應力關係

4.2 土工不織布加薄砂層

Ghosh and Yasuhara [14] 與 Raisinghani and Viswanadham [15] 提到土壤細顆粒會經由水的帶動而遷移，並可能阻塞於排水層中。但若在排水層周圍鋪設一層薄砂層當作濾層，可降低不織布受阻塞的機會，進而提升其排水能力。本研究結果亦證實上述的論點。如圖 7 所示，本研究發現，加入薄砂層後系統水力傳導係數不論有無載重作用皆獲得了明顯提升。如表 4，以載重 50 kPa 為例，在加入單層、雙層、三層不織布其系統排水改善率分別為 1.8、2.4、32 (Tests 3 ~ 5)。但在加入 5 mm 薄砂層後，改善倍率提升至 17、79、157 (Tests 6 ~ 8)。由此可知薄砂層的設置相當有效。值得一提的是，有別於在縱向 (垂直) 滲流的情況下薄砂層主要扮演過濾的功能，在橫向 (水平) 滲流的情況下，薄砂層除了可以當作過濾層防止細顆粒土壤入侵不織布外，同時也可以扮演排水的功能，提供額外的排水管道，以增加系統排水能力。

4.3 薄砂層厚度與層數之影響

圖 8 為單層不織布搭配 5、10、15、20 mm 薄砂層之系統水力傳導係數與正向應力關係 (Tests 6, 9, 11, 12)。試驗結果發現，系統水力傳導係數隨著薄砂層厚度的增加而提升，且當薄砂層厚度達到 15 mm 時，系統水力傳導係數隨著正向應力增加而減少之幅度緩和許多，系統水力傳導係數幾乎不受載重影響。因此，單層不織布之薄砂層的最佳厚度為 15 mm。

本研究更進一步比較等量的砂土集中或分層設置對系統水力傳導係數之影響。圖 9(a) 為等量的砂土分為一至二層後系統水力傳導係數與正向應力關係 (Tests 7, 9 與 10, 12)。試驗結果指出，在各種載重下，單層搭配 10 mm 薄砂層比起雙層搭配每層 5 mm 薄砂層之系統水力傳導係數來的高。相似的，單層搭配 20 mm 薄砂層比起雙層搭配每層 10 mm 薄砂層之系統水力傳導係數也來的高。這是因為多層配置的薄砂層會使細顆粒與砂層的界面數增加，增加薄砂層與細顆粒接觸的面積，導致在試體準備、施加正向力以及滲流過程中，增加了細顆粒入侵的機會，降低了薄砂層的排水效果。本研究在進水庫加入藍色墨水來觀察滲流狀況並證實以上論點，如圖 9(b) 所示。實驗觀察發現在同一不織布，下方的薄砂層變成藍色的濃度比上方薄砂層的濃度還要濃，這現象表示上層薄砂層受土壤細顆粒入侵導致其透水性較下層薄砂層還要低。

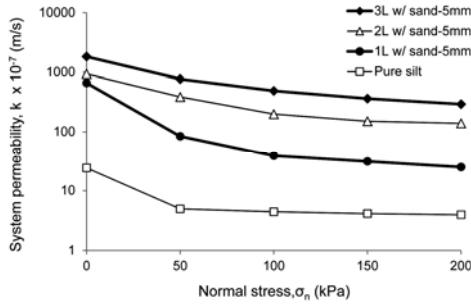


圖 7 加入不織布與薄砂層後系統水力傳導係數與正向應力關係

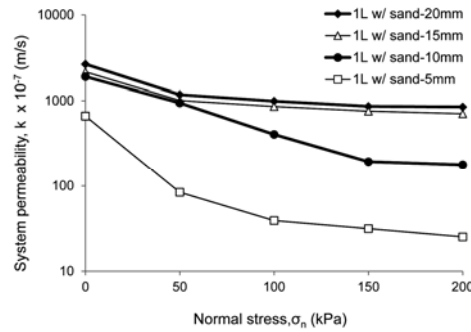


圖 8 單層不織布不同砂層厚度下系統水力傳導係數與正向應力關係

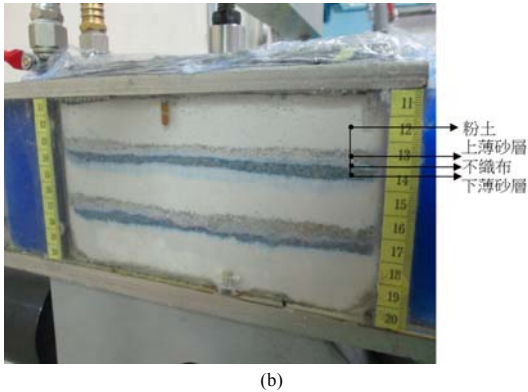
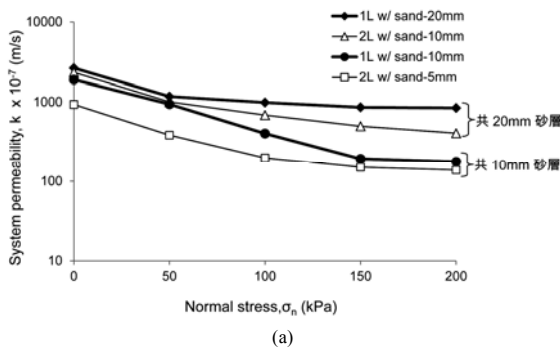


圖 9 (a) 等量砂分一至二層下系統水力傳導係數與正向應力關係；(b) 雙層不織布搭配 10 mm 薄砂層於藍色墨水滲流下之照片

五、7 日滲流試驗結果與討論

本節討論 7 日滲流下系統滲透性之變化。本研究將前述短期試驗最終載重 200 kPa 完成後作為 7 日滲流試驗之起點 (即 day 0)，然後提供一穩定持續的滲流直到第 7 天結束。在 7 日滲流試驗中，每天約 2~3 次以變水頭裝置量測系統水力傳導係數。實驗觀察到，幾乎所有的試驗其系統水力傳導係數皆在 7 天前達到穩定，不再隨時間下降。表 5 統整 7 日滲流試驗結果，其中，括號內代表改善率，即 7 天滲流後系統與純粉土水力傳導係數之比值，比值越高表示排水改善效果越好。

圖 10 為 7 日滲流試驗 Test 6 的結果。Mlynarek *et al.* [16] 指出過濾機制共分為下列五個過程：(1) 過濾層形成 (Cake build-up)；(2) 過濾層破壞 (Cake break)；(3) 細顆粒土壤流失；(4) 過濾層再度形成；(5) 過濾系統達到穩定。本試驗結果也呈現類似的過濾機制。如圖 10 所示，試驗初期系統水力傳導係數隨時間增加而減少，經過短暫穩定後過濾層破壞 (此時細顆粒不斷流失)，接著過濾層再次形成，最後達到穩定狀態。此外，如圖 10 所示，純粉土試體的水力傳導係數亦有稍稍降低的趨勢 (從一開始的 3.9×10^{-7} m/s 到第 7 天的 2.03×10^{-7} m/s)，這可能是因為鋪設在試體與出水庫間的不織布 (防止土壤顆粒於滲流過程中流失) 逐漸累積著粉土細顆粒。然而相較於橫向不織布與薄砂層對系統水力傳導係數的影響來看，左右側不織布對試驗結果影響不大。

5.1 土工不織布之影響

圖 11 為純粉土與單層、雙層及三層不織布系統水力傳導係數與時間關係 (Tests 3~5)。一般而言，所有試驗結果皆顯示系統水力傳導係數隨時間的增加而降低。如表 5，單、雙及三層不織布在 7 日滲流一開始之系統水力傳導係數分別為 5.41×10^{-7} 、 7.51×10^{-7} 、 54.7×10^{-7} m/s，但在 7 日滲流的第 7 天系統水力傳導係數大幅降低至 2.51×10^{-7} 、 3.15×10^{-7} 、 7.56×10^{-7} m/s，降幅約 2~7 倍。原因為持續滲流下不織布纖維孔隙受到粉土顆粒阻塞，使系統水力傳導係數逐漸降低。此外，本研究也觀察到不織布層數越多，系統水力傳導係數達到穩定所需的時間越長，如單層不織布系統水力傳導係數約在滲流四天後達到穩定、雙層則為五天、三層為八天，最終系統水力傳導係數大小依序為三層、雙層、單層及純粉土。

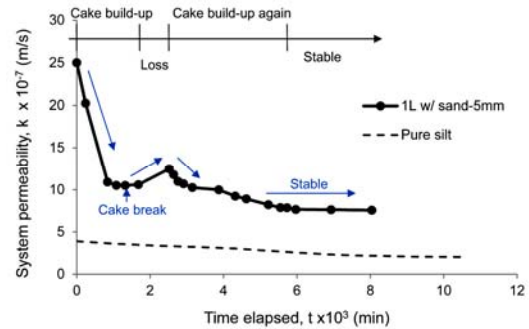


圖 10 本研究所觀察到之過濾機制

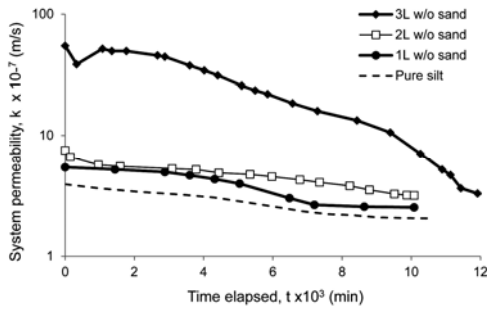


圖 11 加入不織布後系統水力傳導係數與時間關係

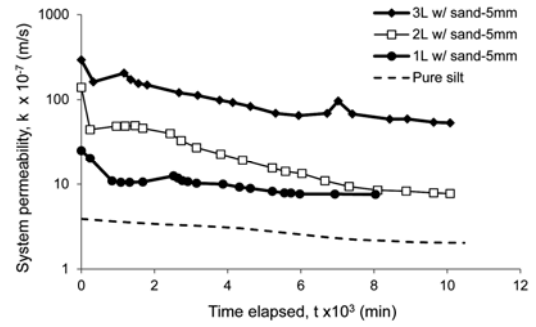


圖 12 不織布加薄砂層後系統水力傳導係數與時間關係

表 5 7 日滲流試驗結果

No.	Description	System Permeability, $k \times 10^{-7}$ (m/s)							
		day0	day1	day2	day3	day4	day5	day6	
2	Silt	3.90	3.45	3.32	3.03	2.58	2.26	2.11	2.03 (1)
3	1L w/o sand	5.41	5.18	4.93	4.31	3.52	2.63	2.54	2.51 (1.2)
4	2L w/o sand	7.51	5.52	5.28	4.82	4.53	4.06	3.51	3.15 (1.6)
5	3L w/o sand	54.7	49.5	44.5	31.3	22.1	16.1	12.1	7.56 (3.7)
6	1L w/sand-5 mm	25.0	10.6	10.7	9.23	7.71	7.60	7.42	7.42 (3.7)
7	2L w/sand-5 mm	139	49.4	27.9	19.5	13.8	9.53	8.32	7.73 (3.8)
8	3L w/sand-5 mm	293	160	117	88.5	66.4	70.2	61.4	53.1 (26)
9	1L w/sand-10 mm	179	60.4	45.7	39.3	32.2	22.9	12.6	10.1 (5.0)
10	2L w/sand-10 mm	410	90.2	71.4	59.6	53.5	41.6	22.7	15.8 (7.8)
11	1L w/sand-15 mm	709	123	71.9	48.9	38.4	22.7	15.7	11.3 (5.6)
12	1L w/sand-20 mm	849	156	86.3	64.7	53.6	44.9	27.3	13.6 (6.7)

註：() 內為改善率，即 7 天滲流後系統與純粉土水力傳導係數之比值

5.2 土工不織布加薄砂層

圖 12 為單層、雙層及三層不織布加 5 mm 薄砂層之系統水力傳導係數與時間關係 (Tests 6~8)。試驗結果發現，加入薄砂層後，系統水力傳導係數遠大於純粉土，其中又以三層之最終系統水力傳導係數大於雙層與單層。如表 5，在滲流第 7 天，加入單層、雙層、三層不織布其改善率分別為 1.2、1.6、3.7 (Tests 3~5)。在加入 5 mm 薄砂層後改善率提升至 3.7、3.8、26 (Tests 6~8)。可見薄砂層在改善持續滲流作用下排水效能的重要性。

5.3 薄砂層厚度與層數之影響

圖 13 為單層不織布搭配 5、10、15、20 mm 薄砂層之 7 日滲流結果 (Tests 6, 9, 11, 12)。試驗結果發現，薄砂層厚度越大者其最終系統水力傳導係數就越大。其改善率分別為 3.7、5.0、5.6 與 6.7。圖 14 所示為比較等量的砂分為一至二層之影響 (Tests 7, 9 與 10, 12)。如在短期試驗結果指出，將薄砂層集中設置其排水效果較佳，7 日試驗結果亦發現，薄砂層集中設置之系統水力傳導係數高於分散設

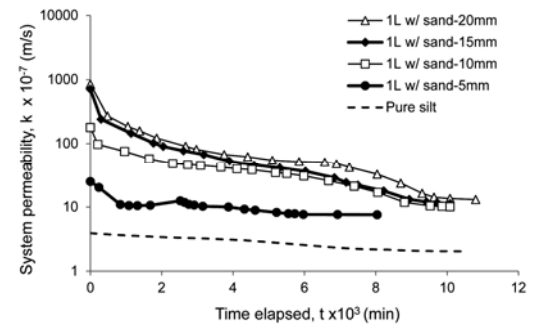


圖 13 單層不織布不同砂層厚度下系統水力傳導係數與時間關係

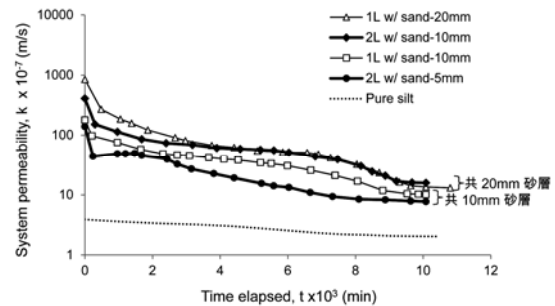


圖 14 等量砂分一至二層下系統水力傳導係數與時間關係

置。但如表 5 所示，比較單層不織布加入 15 mm 薄砂層 (Test 11) 與三層不織布每層加入 5 mm 薄砂層 (Test 8)，其結果為特例。試驗結果顯示，三層不織布每層加入 5 mm 薄砂層的改善率高於單層不織布加入 15 mm 薄砂層的改善率，這結果與其他薄砂層厚度組合之趨勢相反，其原因還有待進一步研究了解。

六、不織布阻塞情況分析

6.1 不織布透水試驗結果

本節探討不織布經過 7 日滲流試驗後其水平透水性之變化，此結果將用來量化不織布受細顆粒阻塞後透水性降低之程度。試驗結果統整於表 6 中，其中 up, middle 與 down

分指土壤試體內上中下層所取出的不織布。圖 15 為純不織布水平透水試驗結果，圖標 Fresh 指自然狀態下（未埋入土內）新鮮的不織布；Sand-compressed 是指新鮮不織布置於砂土中並給予 200 kPa 正向應力持續施壓一天；Silt-compressed 為置於粉土中施壓 200 kPa 一天。圖 15 的目的在於比較新鮮與以砂土及粉土為邊界受壓的不織布，這三種不織布透水性變化與細顆粒在表面阻留的程度。對照土

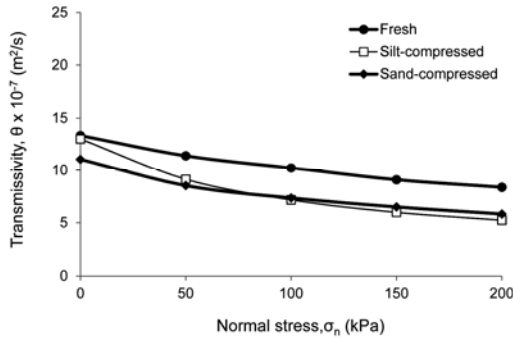


圖 15 不織布水平透水性與正向應力關係

表 6 不織布經 7 日滲流後其橫向透水試驗與阻留度結果

No.	Description	DOR (%)	Transmissivity, $\theta \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$				
			$\sigma_n = 0 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 50 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 100 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 150 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 200 \text{ kPa}$
3	1L w/o sand	797.19	6.10	5.17	4.61	4.18	3.94
6	1L w/sand-5 mm	236.87	7.07	4.96	4.05	3.42	3.02
9	1L w/sand-10 mm	31.52	8.59	5.70	4.46	3.92	3.46
11	1L w/sand-15 mm	30.67	9.02	6.45	5.34	4.58	3.96
12	1L w/sand-20 mm	12.79	9.92	6.83	5.61	4.82	4.25
4	2L up w/o sand	552.37	8.50	6.58	5.99	5.25	4.85
7	2L up w/sand-5 mm	105.91	9.68	6.78	5.83	5.20	4.85
10	2L up w/sand-10 mm	74.94	9.76	6.66	5.72	5.04	4.45
4	2L down w/o sand	413.33	8.46	6.29	5.65	5.07	4.61
7	2L down w/sand-5 mm	52.28	10.73	8.46	7.20	6.48	5.81
10	2L down w/sand-10 mm	42.01	10.73	8.15	6.83	6.14	5.39
5	3L up w/o sand	146.30	5.57	4.50	3.88	3.42	3.03
8	3L up w/sand-5 mm	98.25	8.98	7.02	6.01	5.07	4.58
5	3L middle w/o sand	124.15	9.06	6.93	5.70	4.90	4.35
8	3L middle w/sand-5 mm	58.06	10.17	8.25	7.15	6.37	5.57
5	3L down w/o sand	121.26	9.95	7.64	6.41	5.56	4.93
8	3L down w/sand-5 mm	50.00	9.48	7.71	6.72	5.75	5.04

註：up, middle 與 down 分指試體內上中下層不織布

壤力學之觀念，新鮮不織布之過壓密比為 1；受 200 kPa 預壓後的不織布，其過壓密比小於等於 1。試驗結果發現，不織布水平透水性隨正向應力增加而減少，此結果與 Ling *et al.* [17] 及 Raisinghani and Viswanadham [15] 研究結果趨勢相同。受壓的不織布其水平透水性小於新鮮不織布，原因為受壓的不織布曾經受過 200 kPa 正向應力的預壓，其纖維受壓縮而變形，因此受壓的不織布孔隙比及厚度均較新鮮不織布為小，導致通水面積變小而降低了不織布水平透水性。此外，以粉土為邊界壓縮的不織布除了纖維受壓縮而變形外，其表層尚有粉土細顆粒入侵，阻塞部分表面通水面積，造成其透水性稍稍小於以砂土為邊界壓縮的不織布。

圖 16 為 7 日滲流試驗後取出的單層不織布（註明為 Retrieved）之水平透水試驗結果。其中，新鮮（Fresh）與受壓（Sand-compressed）的不織布其透水性差異來自於預壓力之貢獻，受壓與 7 日滲流試驗後取出（Retrieved）的不織布其透水性差異為細顆粒隨持續滲流遷移並阻塞於不織布內部之結果。試驗結果顯示，7 日滲流後不織布水平透水性比新鮮不織布降低了至少 2 倍，預壓力與細顆粒阻塞對不織布透水的影響約各占一半。試驗結果亦發現，砂層對不織布有保護效果，可以減少不織布受細顆粒入侵與阻塞等的影響，但在高正向應力作用下，薄砂層厚度影響的效果變的較不明顯。

Giroud *et al.* [18] 發現，土工合成材埋在土壤中的長期排水效果會隨時間遞減，其影響因子包括長期壓縮、潛變、土壤入侵與阻塞、生物及化學的阻塞等。本研究試驗結果亦支持上述論點。因此，需將試驗中求得的不織布透水性除上一個安全因子以考量現地不織布透水性長期折減的效果。

6.2 不織布受細顆粒阻塞之程度

本節探討不織布經 7 日滲流後其受土壤細顆粒阻塞情況。不織布阻留度 (Degree of Retention, DOR) 定義為細顆粒殘留於不織布內的重量與不織布自重的比值，以百分比%表示，由公式(5)計算，計算結果統整於表 6。阻留度越高代表不織布受到細顆粒阻塞之情況越嚴重，可與不織布透水性之量測結果相互對應。阻留度的量測方式為將試驗完後排除附著於不織布表層之細顆粒，隨後將不織布置於烘箱內烘乾後稱重，即可得知有多少重量的細顆粒土壤殘留於

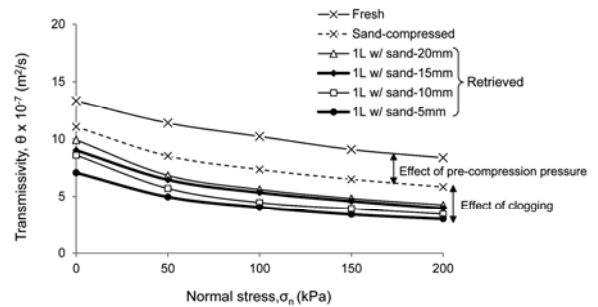


圖 16 7 日滲流試驗後單層不織布水平透水性與正向應力關係

埋設在試體內的不織布取出，浸泡在水中，目的為盡可能不織布上。此外，值得一提的是，在單層不織布無薄砂層保護下 (Test 3)，其 DOR 約 800%，其中在試體準備的過程 (無進行滲流試驗)，因夯實粉土而造成細顆粒入侵不織布所造成的阻留度約為 110%，其於 690% 為持續滲流細顆粒阻塞所造成。

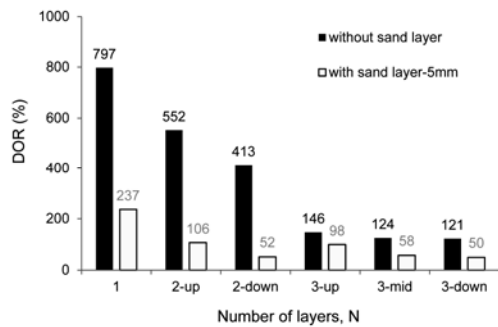
$$DOR = \frac{W_{soil}}{W_{geotextile}} \times 100\% \quad (5)$$

其中

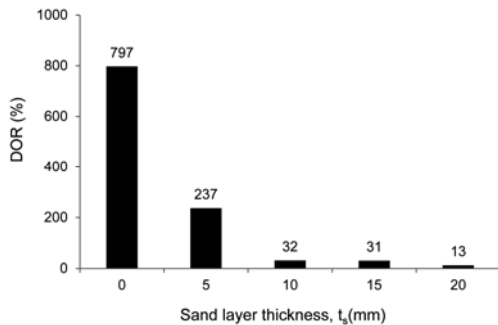
- DOR : 阻留度
- W_{soil} : 殘留於不織布上之土壤重量
- $W_{geotextile}$: 不織布重量

分析結果得知，設置薄砂層之不織布其阻留度遠小於未設置薄砂層之不織布，這是因為薄砂層保護不織布使其受到細顆粒入侵或阻塞的程度大大減少，此外，無論在有無薄砂層之情況均顯示越上層不織布其阻留度越高，這可能是上層不織布受切向滲流而造成較嚴重的阻塞情況，下層不織布之流向較接近橫向滲流 (與不織布鋪設方向平行)，因此不織布受滲流所造成的細顆粒阻塞情況較不嚴重。

圖 17(a) 為加入與未加入薄砂層對不織布阻留度之影響。研究發現未加入薄砂層之不織布，其阻留細顆粒程度相當高，如 Test 3 的 DOR 可高達 800%。加入 5 mm 薄砂層後無論不織布層數或是鋪設位置 (上、中、下層)，其阻留度皆降低許多。圖 17(b) 為單層搭配不同薄砂層厚度對不織布阻留度之影響，計算結果指出，不織布之阻留度隨著薄砂層厚度的增加而減少，薄砂層的設置使不織布阻留度降低，有效減少阻塞於不織布上的細顆粒土壤量。



(a) 有無薄砂層



(b) 不同薄砂層厚度

圖 17 不織布阻留度之比較

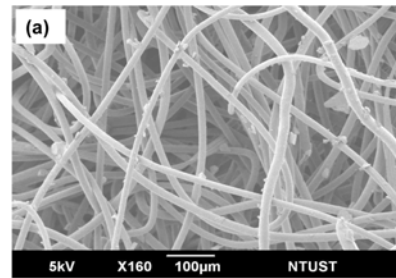
本研究使用電子式掃描設備 SEM (Scanning Electron Microscope) 觀察不織布表層經過 7 日滲流後受細顆粒阻塞之情形。圖 18 為試驗前後不織布表層照片 (放大 160 倍)。圖 18(a) 為新鮮不織布，其纖維間孔隙相當乾淨並無細顆粒阻塞，但在 7 日滲流後，可看見不織布纖維附著了很多細顆粒 (圖 18(b))，而設置薄砂層後不織布纖維阻塞情況改善了很多 (圖 18(c))，表示薄砂層的設置發揮其功效。

最後，如圖 19 所示，本研究探討不織布在 7 日滲流後其孔隙比與滲透係數之關係。不織布受細顆粒阻塞後之孔隙比可由公式(6)計算，其中，不織布厚度 $t_g = 1.764$ mm，不織布纖維密度為 $\rho_f = 0.45$ g/cm³，粉土固體密度 $\rho_s = 2.62$ g/cm³，土壤與不織布單位面積之質量 (m_s 與 m_g) 分別為阻塞於不織布上之土壤重量與不織布本身自重除以不織布試體面積 200 cm²。不織布孔隙比越小代表 7 日滲流後受細顆粒阻塞程度越大。不織布水平滲透係數由公式(7)計算。

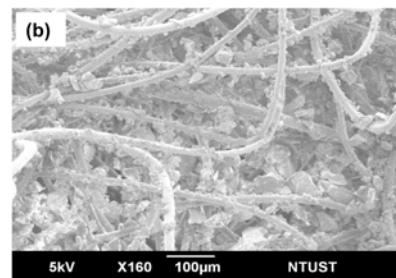
$$e_g = \frac{t_g}{\frac{m_g}{\rho_f} + \frac{m_s}{\rho_s}} - 1 \quad (6)$$

其中

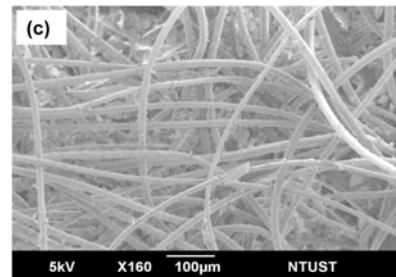
- e_g : 不織布孔隙比
- m_g : 不織布單位面積質量
- m_s : 土壤單位面積質量



(a) 新鮮不織布 DOR = 0%



(b) 無薄砂層 DOR = 413%



(c) 有薄砂層 DOR = 52%

圖 18 以 SEM (× 160 倍) 觀察不織布表層受細顆粒阻塞之情形

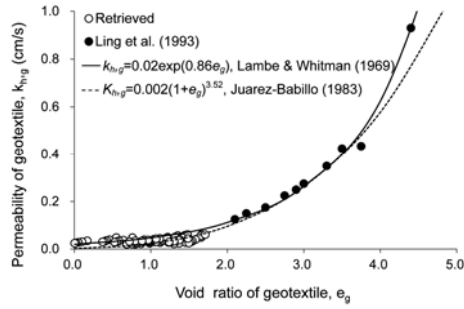


圖 19 不織布在持續滲流後孔隙比與水平滲透係數之關係

- t_g : 不織布厚度
 ρ_f : 不織布纖維密度
 ρ_s : 土壤固體密度

$$k_{h,g} = \frac{\theta}{t_g} \quad (7)$$

其中

- $k_{h,g}$: 土工織物水平滲透係數
 t_g : 土工織物厚度

由試驗結果得知，不織布水平滲透係數隨其孔隙比增加而增加，此結果與 Ling *et al.* [17] 水平滲流試驗結果相當符合，也與 Lambe and Whitman [19] 及 Juarez-Babillo [20] 之經驗公式相當接近。本研究結果驗證不織布之孔隙比與水平滲透性呈唯一關係 (unique relationship)。

七、結論與建議

本文針對低滲透性土壤加入不織布以及薄砂層之複合排水系統，在短期與 7 日滲流作用下排水效能進行研究。於本研究，土工不織布為排水層提供排水功能，薄砂層則為過濾兼排水層。研究目的為探討低滲透性土壤之橫向滲流行為與改善措施之評估。根據試驗結果，歸納出以下結論：

1. 在短期與 7 日滲流下，不織布與薄砂層皆能有效改善系統之滲透性。系統滲透性隨著排水層層數與砂層厚度增加而提升。
2. 在短期滲流下，系統滲透性隨著正向應力增加而降低 (約 6 ~ 70 倍)，主要因為系統受壓後不織布厚度 (通水面積) 變薄且細顆粒土壤入侵造成不織布阻塞而降低排水效果。但加入薄砂層後，系統水力傳導係數不論有無載重作用皆獲得了明顯改善，改善率為 6.4 ~ 240 倍，與正向力大小與薄砂層厚度有關。
3. 當薄砂層厚度達到 15 mm 時，系統水力傳導係數隨著正向應力增加而降低之幅度明顯緩和許多，系統水力傳導係數幾乎不受載重影響。因此，建議單層不織布之薄砂層鋪設厚度為 15 mm。
4. 7 日滲流試驗結果顯示，系統水力傳導係數隨著時間增加而逐漸降低 (降低約 2 ~ 7 倍)，主要因為，細顆粒

經由滲流力的帶動下逐漸阻塞於不織布纖維內層中，造成系統水力傳導係數降低。使用薄砂層皆能獲得較佳之長期滲透性，改善率為 3.7 ~ 26 倍，薄砂層越厚改善效果越好。

5. 7 日滲流試驗後試體內不織布水平透水性以及不織布阻留度之結果顯示，薄砂層厚度增加可使不織布透水性降低幅度減少，也使不織布阻留度下降。例如，單層不織布無薄砂層層與單層不織布 20 mm 薄砂相比，不織布阻留度下降約 62 倍。本研究証明了薄砂層可以有效減少不織布受細顆粒阻塞之程度。

依據上述研究成果，於實務設計與施工中，若加勁擋土結構物內的回填土屬低滲透性土壤，建議考慮在排水層上下加設一層薄砂層或粗顆粒層，因為此粗顆粒層只占整體回填土體積的少部分，並不會增加太多的工程成本以及造成太大的施工不便，但卻能大大的有效提升系統的排水效能。此外，在未來研究建議方面，單獨砂土層的效果以及不織布滲透性與薄砂層透水性的選擇為兩項相當重要的研究議題，以比較評估僅具砂土層及砂土與織布複合材料之過濾排水特性與功效。最後，因為本研究著重於土壤、不織布與薄砂層複合排水系統的滲流試驗，建議在後續研究裡，可進行整體加勁擋土結構物的物理試驗或數值模擬，以綜合評估在強降雨下加勁擋土結構物內之滲流行為與穩定性，並探討薄砂層的最佳化設計，如最佳鋪設厚度、層數、位置對整體結構物透水性的影響。

符號表

A_g	土工織物試體橫斷面積 (m^2)
A_s	土壤試體橫斷面積 (m^2)
a	變水頭壓克力管橫斷面積 (m^2)
C_u	均勻係數 (dimensionless)
C_c	曲率係數 (dimensionless)
D_{85}	累積通過百分比 85% 所對應的粒徑大小 (m)
D_o	不織布外徑 (m)
D_i	不織布內徑 (m)
DOR	阻留度 (%)
e_g	不織布孔隙比 (dimensionless)
G_s	比重 (dimensionless)
h_1	初始水頭高 (m)
h_2	終點水頭高 (m)
i	水力坡降 (dimensionless)
k	系統水力傳導係數 (m/s)
$k_{h,g}$	土工織物水平滲透係數 (m/s)
$k_{v,g}$	土工織物垂直滲透係數 (m/s)
L	滲流流經土壤試體長度 (m)
m_g	不織布單位面積質量 (g/m^2)

m_s	土壤單位面積質量 (g/m^2)
O_{95}	土工織物有效開放孔徑 (m)
q	單位時間流量 (m^3/s)
t_f	終點時間 (s)
t_g	土工織物厚度 (m)
t_i	初始時間 (s)
W_{soil}	殘留於不織布上之土壤重量 (N)
$W_{\text{geotextile}}$	不織布重量 (N)
Δh	總水頭差 (m)
Δt	水頭高改變所需時間 (s)
$\gamma_{d,\text{max}}$	最大單位重 (N/m^3)
$\gamma_{d,\text{min}}$	最小單位重 (N/m^3)
θ	土工織物水平透水性 (m^2/s)
ρ_f	不織布纖維密度 (g/m^3)
ρ_s	土壤固體密度 (g/m^3)
ω_{opt}	最佳含水量 (%)
ψ	土工織物縱向透水性 (s^{-1})
σ_n	正向應力 (N/m^2)

參考文獻

- Koerner, R. and Koerner G., "The importance of drainage control for geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth walls," *Journal of GeoEngineering*, TGS, Vol. 6, No. 1, pp. 3–13 (2011).
- ASTM, D854, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer," (2010).
- ASTM, D422, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils," (2007).
- ASTM, D452, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Surfacing for Asphalt Roofing Products," (2008).
- ASTM, D4253, "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table," (2006).
- ASTM, D4254, "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density," (2006).
- ASTM, D698, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort ($600\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$)," (2007).
- ASTM, D5199, "Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics," (2006).
- ASTM, D4751, "Standard test method for determining apparent opening size of a geotextile," (2004).
- ASTM, D4491, "Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity," (2009).
- DeBerardino, S. J., "Drainage principle and the use of geosynthetics," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 11, pp. 449–459 (1992).
- FHWA "Geosynthetic design and construction guidelines," *Federal Highway Administration Demonstration*, HI-95-038, April (1998).
- ASTM, D6574, "Standard test method for determining the (in-plane) hydraulic transmissivity of a geosynthetic by radial flow," (2011).
- Ghosh, C. and Yasuhara, K., "Clogging and flow characteristics of a geosynthetic drain confined in soils undergoing consolidation," *Geosynthetics International*, Vol. 11, No. 1, pp. 19–34 (2004).
- Raisinghani, D. V. and Viswanadham, B. V. S., "Evaluation of permeability characteristics of a geosynthetic-reinforced soil through laboratory tests," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28, pp. 579–588 (2010).
- Mlynarek, J., BogumiLewandowski, J., Andrel R., and Gilles, B., "Soil-geotextile system interaction," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 10, No. 2, pp. 161–176 (1991).
- Ling, H. I., Tatsuoka, F., Wu, T. H., and Nishimura, J., "Hydraulic conductivity of geotextiles under typical operational conditions," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 12, pp. 509–542 (1993).
- Giroud, J. P., Zornberg, J. G., and Zhao, A., "Hydraulic design of geosynthetic and granular liquid collection layer," *Geosynthetics International*, Vol. 7, No. 4-6, pp. 433–452 (2000).
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V., "Soil mechanics," *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, NY, USA, pp. 281–294 (1969).
- Juarez-Babillo, E., "General permeability change equation for soils," In Proceedings of International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials, ed. C. S. Desai, University of Arizona, Tucson, AZ, USA pp. 205–209 (1983).

102年8月28日	收稿
103年3月26日	修改
103年7月8日	接受