



# 基層土壤粒徑對於土工皂土毯效能之影響

## Effect of Subgrade Soil on the Performance of Geosynthetic Clay Liner

計畫編號：NSC90-2211-E-009-067

執行期限：90/8/1 - 91/7/31

主持人：單信瑜 國立交通大學土木工程學系 副教授

### 一、中文摘要

土工皂土毯(Geosynthetic clay liners, GCLs)為一種新近發展出之土工合成材料，它在歐美國家已經被廣泛應用在廢棄物掩埋場中，主要因為它有兩大優點：一是工廠生產品質良好穩定；二是施工容易。本研究目的在了解土工皂土毯在礫石基層上之滲透性，使用自行設計之滲透儀以礫石為基層去求得針軋型(Needle-punched)與黏合型(Adhesive-bonded)土工皂土毯的滲透性，試驗完後量測其厚度與基重之變化量進而了解皂土受擠壓之改變情形。實驗結果顯示土工皂土毯之透流率，不管基層材料是砂、礫石或卵石，皆隨著有效圍壓增加而降低，即阻水能力增大。透流率受基層材料粒徑之影響，隨著有效應力之增加，而越來越不明顯。因此在高圍壓(138 kPa)時，不管基層材料是砂、礫石或卵石，土工皂土毯之透流率會相當近似。隨著基層材料粒徑的增大，皂土受擠壓產生的變化越大，其厚度變化差異也越大，基重改變量也越大。此外黏合型土工皂土毯受擠壓的影響比較小。

**關鍵詞：**土工皂土毯、基層材料、導水度、透流率

### ABSTRACT

Geosynthetic clay liners (GCLs) are a group of recently developed geosynthetic materials. GCLs have been used in landfills in the United States and European countries. GCLs have two major advantages: consistency in quality and ease of installation. The objective of this research is to study the hydraulic performance of GCLs on soils containing gravels. The hydraulic conductivity of needle-punched and adhesive-bonded geotextile-supported GCLs placed on gravel was measured using specially designed permeameter. Measurements of local thickness and mass per unit area of the specimens were taken after each test to quantify the migration of bentonite. Test results show that the hydraulic conductivity of both GCLs decreased with increasing confining stress. In general, migration of bentonite increased with increasing gravel size. Variation of thickness and migration of bentonite were generally less for the needle-punched product.

**Keywords:** Geosynthetic Clay Liner, Subgrade, Hydraulic conductivity, permittivity

### 二、緣由與目的

土工合成材料近年來逐漸在台灣的工程上被採用，而最常被採用的地方，也是最能大展長材的地方就是

廢棄物掩埋場。土工皂土毯與土工止水膜廣泛使用在掩埋場，在使用性、經濟性、及品保上有相當程度的優點。對於阻水材料的滲透性的求取，土工皂土毯與土工止水膜則因工廠製造有相當程度之品保，所以目前只以室內試驗求取。然而實驗室與現地的試驗環境有些許差異，比如現場的滲流液體、整地情況、施工情況等皆會影響現場的滲透性而與實驗室所得之滲透性有所差異。

本研究希望能模擬現地整地不平的實際情況，比較土工皂土毯在凹凸不平的介面進行實驗與平整介面實驗的差異性。傳統求取土工皂土毯滲透性的試驗方法是以柔性壁三軸滲透儀求取，此試驗方法是以兩片透水石上下夾著土工皂土毯作試驗，無法模擬出土工皂土毯因現地不平整介面而發生土工皂土毯內部皂土粉推擠移位的情況。本研究之試驗方法以礫石鋪設出與土工皂土毯的不平整介面，以求模擬土工皂土毯因現地情況而產生內部皂土推擠移位之情況。

### 三、研究方法及成果

#### 3.1 試驗材料及儀器

本實驗是採用美國 CETCO 公司所生產之針軋型皂土毯 Bentomat® ST (GCL-A) 與黏合型皂土毯 Claymax® 200R (GCL-B) 為實驗試體，以 25.4 mm 至 50.8 mm 之級配礫石跟 50.8 mm 至 76.2 mm 之卵石為基礎材料，再加以不同之有效應力，從中量測其滲透性之變化。

針軋型土工皂土毯 Bentomat® 是美國 CETCO 公司於 1989 開始生產，它是利用針軋的方法將疏鬆粒狀的皂土縫入上下兩片以聚丙烯製成的土工織物中。Bentomat® 中的皂土是使用大約 3.6 kg/m<sup>2</sup> 的專利鈉皂土 Volclay®，其乾燥時含水量約在 10 至 12 % 左右。而本實驗所使用之土工皂土毯種類為上層為 0.1 kg/m<sup>2</sup> 土工織布，下層為 0.2 kg/m<sup>2</sup> 的土工不織布，皂土為經高污染阻抗處理之 Volclay®，所組成之 Bentomat®ST。

Claymax® 是由美國 CETCO 公司於 1987 年開始生產，Claymax® 中的皂土用量約為 3.6 kg/m<sup>2</sup>，其厚度約為 5 mm，含水量則為 20 %。本實驗中，所使用的 Claymax® 是上層為 0.13 kg/m<sup>2</sup> 的織布，下層則為 0.025 kg/m<sup>2</sup> 開口編織的織布，所組成的 Claymax®200R。

本實驗所採用之基層材料分為 25.4 mm 至 50.8 mm 之級配礫石與 50.8 mm 至 76.2 mm 之卵石，其形狀介

於次圓狀形與圓狀形之間。25.4 mm 至 50.8 mm 之級配礫石為砂石場取得之礫石，所以其形狀因經過碎石過程，所以較為有菱有角，其形狀介於角狀形與次角狀形之間。而 50.8 mm 至 76.2 mm 之卵石為溪邊取得之卵石，因此形狀較為圓滑，其形狀介於次圓狀形與圓狀形之間。

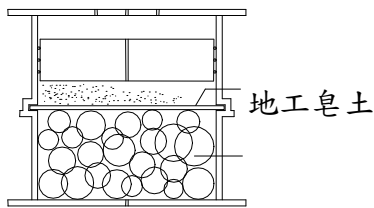


圖 1 滲透儀示意圖

滲透儀上下環高度均為 150 mm、內徑為 300 mm 由圖 3-1 可清楚看出上下環於銜接處為一往外凸出之環 此環內部留有 30 mm 寬之徑長與 9 mm 之孔隙高。此環功用為(一)預留 30 mm 徑長給土工皂土毯側向變形位移用。(二)9 mm 的孔隙高可以允許土工皂土毯自由側向位移。相較於柔性壁三軸滲透儀，本儀器有兩大特色：(1)尺寸比較大，使用大尺寸的礫石做實驗較不會受尺寸效應的影響，產生誤差。(2)特殊的環型設計，可允許試體產生某程度的側向位移變形，較能模擬出現實情況，較不會產生邊界的效應。此外在這環型設計裡上下各放置橡膠墊片也可以變成不允許側向變形的固定端。

實驗壓力控制採用美國 Boart Longyear Co.所製造之三軸/滲透儀控制面板(Triaxial/Permeability Panel S-500)，此一面板配合真空抽氣機及空壓機，可以提供實驗所需。

### 3.2 試驗步驟

#### 3.2.1 試體準備

將土工皂土毯從成捲之成品上剪下，直徑約 35 cm-36 cm，由於土工皂土毯在成捲之成品時，其含水量甚低，故在剪裁之前先在欲剪裁處附近，以灑水器先行噴灑少量水，使其水化後就不會有皂土散落。

#### 3.2.2 試體架設步驟

1. 將下環套置在底座，檢查並清除底座凹槽放置 O-ring 處有無砂粒，將事先準備好之基層材料鋪設至下環環內。加水至下環內，水面與基層材料同高。
2. 在下環外凸處先沿環撒適量之皂土粉，把土工皂土毯試體鋪設在基層材料上，再沿著試體內緣處撒適量之皂土粉，再將上環小心蓋於下環之上。
3. 倒砂入上環內試體上方，量約三公分厚度，將砂整平後倒入水至砂面以上，將活塞推入上環內壁。
4. 將預留孔(水頭流入孔)與上蓋之流入孔，以接頭與塑膠管將兩孔聯通，並將上環活塞上方注滿水，再蓋上上蓋，並鎖緊螺桿。

5. 將流入壓力管、流出壓力管跟圍壓壓力管三條管子，插入調壓盤，檢查有無漏水現象。
6. 依照規劃加上所須之壓力，並按時紀錄流量變化。

表 1 實驗規劃表

編號	試體	基層材料	起始有效圍壓(kPa)	加壓過程(kPa)
No.1	GCL-A	砂	13.8	13.8-34.5-69-138
No.2	GCL-A	礫石級配	13.8	13.8-69-138
No.3	GCL-A	礫石級配	34.5	34.5-69-138
No.4	GCL-A	卵石	34.5	34.5-69-138
No.5	GCL-B	砂	13.8	13.8-34.5-69-138
No.6	GCL-B	礫石級配	13.8	13.8-69-138
No.7	GCL-B	礫石級配	34.5	34.5-69-138
No.8	GCL-B	卵石	34.5	34.5-69-138

#### 3.2.3 厚度與基重之量取

本實驗之厚度量取是在試體完成最後一階段之加壓(138 kPa)，以最快速將試體取出滲透儀使其不再吸水，並馬上以針插入試體量取皂土之厚度。

厚度量取之取點以平均分布取點為原則，並刻意將最厚與最薄之點取入，總共取 60 個點，統計其厚度之分布情況，計算厚度變化標準差，了解其厚度變化之差異性。

Bentomat® ST 之基重量取：將試驗完後之試體經量取厚度之後，以剪刀將試體剪成矩形之小塊試體，量取矩形之長、寬，計算其面積，將剪好之小塊試體放進烘箱內，經 24 小時烘乾後取出，量取其重量，將重量除以先前計算之面積即得 Bentomat® ST 之基重(含表面土工織物重)。Claymax®200 之基重量取：將試驗完後之試體經量取厚度之後，將上表面之土工織物去除，以銅圈用壓模之方式，將皂土嵌入銅圈中，再以刮刀沿銅圈壁將皂土刮出，收集刮出之皂土，並將之放進烘箱內，經 24 小時烘乾後取出，量取皂土重量，量取銅圈內徑，計算其截面積，將皂土重量除以銅圈截面積即得到 Claymax®200 之基重(不含表面土工織物重)。

## 四、結與果討論

圖 2 與 3 為兩種皂土毯之透流率，不管基層材料是砂、礫石或卵石，皆隨著有效圍壓增加而降低，當有效圍壓加壓至 138 kPa 時，其透流率就相差不多，這與 Fox et al.(2000)所提之結果吻合。此外 Fox et al.(2000)以柔性壁三軸滲透儀做出之單壓載重試驗與階段加壓試驗，綜合出來的結果，隨著有效圍壓增大，透流率會很明顯的降低。可是在本研究所見透流率下降的趨勢是相當的平緩，推測原因可能是因為 Fox et al.(2000)研究之試體，底部為剛性透水石，所以比本研究為柔性之砂層較容易受到有效應力之影響。所以本研究中之透流率下降的趨勢比 Fox et al.(2000)平緩許多。

在 No.1~No.4 中，GCL-A 當起始壓力為 34.5 kPa 時，不管基層材料為 25.4 mm~50.8 mm 礫石級配或是

50.8 mm~76.2 mm 卵石，其透流率皆與以砂為基層材料之透流率相差不多，而起始壓力為 13.8 kPa、基層材料為 25.4 mm~50.8 mm 礫石級配這組之透流率，在有效圍壓 13.8 kPa 之透流率約是以砂為基層材料這組的 2 倍，有效圍壓增加至 69 kPa 時，透流率降至 1.5 倍，最終有效圍壓增加至 138 kPa 時，其透流率就大約一樣。推測其原因 No.2 由於起始有效圍壓為低有效應力(13.8 kPa)，所以試體在此階段產生較大量之吸水膨脹現象，且受礫石級配影響(有尖銳之菱角)，經過階段加壓過程，即造成大量之皂土往側向擠壓，此時之試體透流率較大，隨著有效圍壓增加，皂土再經壓密，阻水能力又慢慢提高，最後所得之透流率在高有效應力時就趨近一樣。最後得到一個結論：以不發生刺破(Puncture)之前提下，透流率受基層材料粒徑之影響，隨著有效應力之增加，而越來越不明顯。

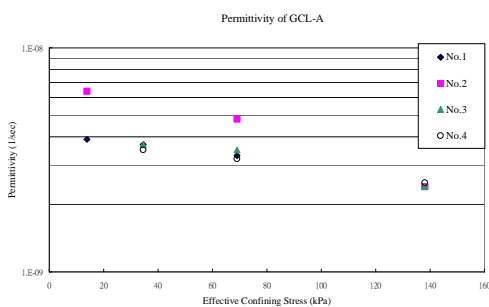


圖 2 GCL-A 之透流率

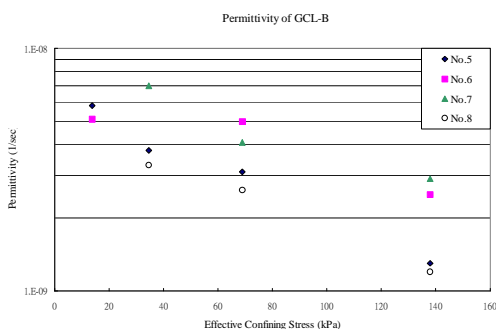


圖 3 GCL-B 之透流率

表 2 本研究之透流率

編號	試體	基層材料	13.8kPa (1/sec)	34.5kPa (1/sec)	69kPa (1/sec)	138kPa (1/sec)
No.1	GCL-A	砂	$3.9 \times 10^{-9}$	$3.7 \times 10^{-9}$	$3.3 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$
No.2	GCL-A	礫石級配	$6.4 \times 10^{-9}$	N/A	$4.8 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$
No.3	GCL-A	礫石級配	N/A	$3.7 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$
No.4	GCL-A	卵石	N/A	$3.5 \times 10^{-9}$	$3.2 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-9}$
No.5	GCL-B	砂	$5.8 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$
No.6	GCL-B	礫石級配	$5.1 \times 10^{-9}$	N/A	$5.0 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-9}$
No.7	GCL-B	礫石級配	N/A	$7.0 \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-9}$	$2.9 \times 10^{-9}$
No.8	GCL-B	卵石	N/A	$3.3 \times 10^{-9}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-9}$

在 No.5~No.8 中，GCL-B 很明顯受到基層材料不同粒徑之影響差異性較 GCL-A 大，No.2 與 No.3 兩組使用之基層材料為 25.4 mm~50.8 mm 礫石級配，其所

得之透流率明顯比 No.8 以 50.8 mm~76.2 mm 卵石還要大。推測其原因，可能是因為本研究所使用之礫石級配有尖銳之菱角，而 GCL-B 為黏合型土工皂土毯，保護皂土能力較 GCL-A(針軋型)差許多，因此雖然粒徑尺寸較大，但顆粒形狀更具影響性，可知 GCL-B(黏合型)之透流率受基層材料之形狀影響比其粒徑大小之影響還要大。從圖 2 可發現 No.8 之透流率比 No.5 略小，分析其原因可能為基層材料為大顆粒之卵石，雖然經階段加壓產生皂土之側向位移，被擠壓後較薄部份之皂土含量較少，但受有效應力較大(應力集中)，使得透流率會些微下降，而較厚部份，經擠壓後皂土含量較大，即使有效應力略小，但皂土含量較多稍微使透流率下降，綜合以上因素使得 No.8 之透流率略小於 No.5。

No.5~No.8 在起始壓力之影響，從 No.6 與 No.7 比較其透流率，在有效圍壓為 69 kPa 時，起始壓力為 13.8 kPa 之 No.6 比起始壓力 34.5 kPa 之 No.7，透流率還要大，這比 GCL-A 結果一樣，但在有效圍壓為 138 kPa 時，卻反而 No.7 比 No.5 透流率還要大，由於其差異不大，推測可能是因皂土受到擠壓影響，所得透流率些許誤差。在 GCL-A 得到之結論：透流率受基層材料粒徑之影響，隨著有效應力之增加，而越來越不明顯。在 GCL-B 部份也有這趨勢，但 No.6 與 No.7 受到基層材料形狀之影響，導至在有效圍壓 138 kPa 時，透流率仍未趨於一致，推測在更高之有效圍壓下，應會趨於一致。

比較 GCL-A 與 GCL-B，發現 GCL-B 之透流率較容易受到基層材料形狀之影響，由於 GCL-B 為黏合型土工皂土毯，僅表面之土工織物，防止其皂土散落出來，對其內部皂土並無束縛力，不像 GCL-A(針軋型)內部有密密麻麻之纖維線，有著些許束縛力防止側向位移，而且 GCL-A 表面之土工織物與 GCL-B 不同，其抗刺破之能力較佳，所以較不受有尖銳菱角之基層材料影響，所以 GCL-A 透流率也比 GCL-B 較不受基層材料形狀影響。

本研究採用厚度為試驗完取出試體所量測之厚度，每一組試驗最終的有效圍壓皆為 138 kPa。在 GCL-A 部份，以起始有效圍壓 13.8 kPa，基層材料為 25.4 mm~50.8 mm 礫石之 No.2，其厚度變化標準差 3.39 為最大，大於同樣基層材料，但起始有效圍壓為 34.5 kPa 之 No.3 的 2.34，由此可知當起始壓力(水化壓力)越小時，造成的厚度差異性越大，推測其原因可能是起始圍壓較低時，土工皂土毯大量吸水膨脹，且受礫石級配影響(有尖銳之菱角)，有效圍壓增加後，造成大量之皂土往側向擠壓，所以所得之厚度差異性較大。而以起始有效圍壓 34.5 kPa，基層材料為 50.8 mm~76.2 mm 卵石之 No.4，其厚度變化標準差因粒徑較大，所以其值 3.20 比較小粒徑之 No.3 大，而其最大厚度差 17 mm，最厚部份有 20 mm，最薄部份僅有 3 mm，3 mm 之厚度僅剩上下之土工織物包裹少量之皂土，觀察剩 3 mm 之原因是土工皂土毯在大顆粒之卵石基層擠壓下，其表面之土工織物受剪力拉扯，即將發生刺破(Puncture)，故把皂土全已擠壓至側邊，僅剩少量皂土。而以 25.4 mm~50.8 mm 礫石

為基層材料，所得最小厚度有 5 mm，也沒有刺破 (Puncture)之跡象，比以 50.8 mm~76.2 mm 卵石為基層材料擠壓程度輕微一些，由此可知基層材料粒徑越大，其厚度變化差異也越大。

GCL-B 之厚度變化與 GCL-A 類似，以初始圍壓 13.8 kPa，基層材料為 25.4 mm~50.8 mm 礫石之 No.6，所得厚度變化標準差為 3.24，比同樣基層材料，但起始壓力為 34.5 kPa 之 No.7 的 2.75。而以 50.8 mm~76.2 mm 卵石為基層材料之 No.8，其厚度變化標準差為 3.31，因顆粒粒徑較大，因此比同樣起始圍壓為 13.8 kPa，基層材料為 25.4 mm~50.8 mm 礫石之 No.6 略大。觀察 No.6~No.8 之最大厚度差，可發現 No.6 與 No.8 皆大於 No.7，理由同 GCL-A。

表 3 厚度變化比較表

編號	試體	基層材料	起始有效圍壓 (kPa)	標準差 (mm)	最大厚度 (mm)	最大厚度差 (mm)	最小厚度 (mm)	平均厚度 (mm)
No.1	GCL-A	砂	13.8	N/A	N/A	N/A	N/A	10.0
No.2	GCL-A	礫石	13.8	3.39	15	20	5	10.1
No.3	GCL-A	礫石	34.5	2.34	12	17	5	10.25
No.4	GCL-A	卵石	34.5	3.20	17	20	3	9.85
No.5	GCL-B	砂	13.8	N/A	N/A	N/A	N/A	9.7
No.6	GCL-B	礫石	13.8	3.24	14	18	4	9.72
No.7	GCL-B	礫石	34.5	2.75	13	17	4	9.67
No.8	GCL-B	卵石	34.5	3.31	15	18	3	9.57

比較 GCL-B 與 GCL-A 之值，可以發現 GCL-B 之最大厚度差差值比 GCL-A 縮小許多，No.7 與 No.6、No.8 之最大厚度差值為 1 與 2，而 No.3 與 No.2、No.3 之最大厚度差為 3 與 5，其差距縮小許多，推測其原因，當受到有效圍壓擠壓皂土，皂土亦擠壓土工織物，GCL-B 表面之土工織物較有彈性，經皂土擠壓後產生較大的應變，產生受力退縮之現象，因此皂土就產生較少之側向位移，所以厚度之差異性比較小，而 GCL-A 表面之土工織物勁度較大，所以當受到有效圍壓時，其允許變位較有限，受力後退縮量較小，因此受力後會產生較大量之皂土側移，造成其厚度差異性較 GCL-B 大。

表 4 基重變化比較表

編號	試體	基層材料	起始有效圍壓 (kPa)	基重平均值 (g/cm <sup>2</sup> )	基重變化標準差 (g/cm <sup>2</sup> )	最大基重 (g/cm <sup>2</sup> )	最小基重 (g/cm <sup>2</sup> )
No.1	GCL-A	砂	13.8	0.589	N/A	N/A	N/A
No.2	GCL-A	礫石	13.8	0.587	0.0587	0.69 0.67 0.64	0.48 0.50 0.53
No.3	GCL-A	礫石	34.5	0.590	0.0523	0.68 0.67 0.64	0.51 0.53 0.54
No.4	GCL-A	卵石	34.5	0.591	0.0585	0.68 0.67 0.65	0.46 0.50 0.54
No.5	GCL-B	砂	13.8	0.440	N/A	N/A	N/A
No.6	GCL-B	礫石	13.8	0.447	0.0448	0.53 0.47 0.47	0.36 0.38 0.40
No.7	GCL-B	礫石	34.5	0.425	0.0383	0.48	0.34

						0.47	0.36
						0.47	0.37
No.8	GCL-B	卵石	34.5	0.432	0.0479	0.50	0.33
						0.49	0.35
						0.49	0.37

GCL-A 與 GCL-B 基重變化比較，由表 4 可發現，GCL-B 之基重變化標準差比 GCL-A 之基重變化標準差略小，可得知 GCL-A 較 GCL-B 產生較大之基重改變，其原因為當受到有效圍壓擠壓皂土，皂土亦擠壓土工織物，GCL-B 表面之土工織物較有彈性，經皂土擠壓後產生較大的應變，產生受力退縮之現象，因此皂土就產生較少之側向位移，所以基重之差異性比較小，而 GCL-A 表面之土工織物勁度較大，所以當受到有效圍壓時，其允許變位較有限，受力後退縮量較小，因此受力後會產生較大量之皂土側移，造成其基重差異性較 GCL-B 大。

## 五、結論

以下為本研究之研究結論：

1. 土工皂土毯之透流率，不管基層材料是砂、礫石或卵石，皆隨著有效圍壓增加而降低，即阻水能力增大。
2. 透流率受基層材料粒徑之影響，隨著有效應力之增加，而越來越不明顯。因此在高圍壓(138 kPa)時，不管基層材料是砂、礫石或卵石，土工皂土毯之透流率會相當近似。
3. 起始壓力(水化壓力)越小時，階段加壓後，越容易使皂土受到擠壓，造成的厚度差異性越大，基重改變也越大。
4. 隨著基層材料粒徑變大，造成試體相對之位移變大，進而皂土被推擠移位之情況也隨之嚴重，其厚度變化差異也越大，基重改變量也變大。
5. 受正向應力時 當地工皂土毯與基層材料接觸之另一面為自由端時 黏合型土工皂土毯較針軋型土工皂土毯容易受到擠壓 造成內部皂土側移。若另一端為固定端 Fox et al.(2000)之研究得到之結果與本研究相反 針軋型土工皂土毯較黏合型土工皂土毯容易受到擠壓 造成內部皂土側移。
6. 本研所得之厚度變化與基重變化 相較於 Fox et al.(2000) 由於 Fox et al.(2000)試驗之基層材料較圓滑 且其試體另一端為固定端，所以本研究厚度與基重變化較其研究結果為大。

## 六、參考文獻

1. Fox, P. J., De Battista, D. J. and Mast, D. G. "Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners Under Gravel Cover Soils," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, pp.179-201, 2000.
2. Fox, P. J., Triplett, E. J., Kim, R. H., and Olsta, J. T. "Field Study of Installation Damage for Geosynthetic Clay Liners," *Geosynthetics International*, IFAI,

St.paul,5 (5),pp.491-520,1998.

3. Shan, H. -Y., and Daniel, D. E. "Result of Laboratory Tests on a Geotextile/Bentonite Liner Material," 1991.