

序列滲流對地工皂土毯工程性質之影響

Effect of Sequential Permeation on the Engineering Properties of Geosynthetic Clay Liners

計畫編號：NSC88-2611-E009-005

執行期限：87/8/1 - 88/7/31

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(關鍵詞：地工皂土毯、阻水層、掩埋場、導水度)

地工皂土毯(Geosynthetic Clay Liners, GCL)利用其中之皂土(Bentonite)夾層的低水力傳導度特性，減少液體滲流通過之量。地工皂土毯在歐美地區目前漸被推廣使用於廢棄物掩埋場中，以取代原經常使用的夯實黏土阻水層(Compacted Clay Liner, CCL)。序列滲流黏能發生在濱海掩埋場，地工皂土毯先經海水反滲，再經滲出水滲流；或用於油槽防滲系統中時，經酸雨淋洗，再受有機液體滲流；以及受石灰質覆土中淋洗出鈣離子溶液滲流，再受滲出水或有機液體滲流等狀況。本計畫針對地工皂土毯在現地應用時，黏能受到不同性質液體先後滲流的工程性質做一深入研究。

ABSTRACT (Keywords: Geosynthetic clay liner, liner, landfill, hydraulic conductivity)

Geosynthetic clay liners (GCLs) rely on the low hydraulic conductivity of their bentonite component to retard liquid flow. GCLs have been used in landfills in the United States and European countries. There have been increasing amount of information of GCLs including their engineering properties, the field behavior, and performance. However, there is a lack of information on behavior of GCLs subject to sequential leaching by more than one type of liquid. Sequential leaching of GCL by liquids can take place in many conditions such as when GCL is used in landfills by the seaside where GCL may be hydrated or permeated by sea water then permeated by leachate. Another example is that GCL is leached by acid rain after the installation before it is permeated by leachate or chemicals.

The purpose of the proposed study is to understand the effect of sequential permeation on the important engineering properties of GCLs.

二、計畫緣由與目的

地工皂土毯中皂土的擴散雙層受到孔隙水成份的控制。當孔隙水中含有高價陽離子時，擴散雙層變薄，導水度因之提高，膨脹性降低，將使得地工皂土毯功能降低。以下是幾個極黏能發生的序列滲流狀況。

至於序列滲流對地工皂土毯膨脹性和剪力強度的影響，雖不若導水度直接反映出阻水功能，但對於自我癒合和邊坡穩定等重要應用技術關鍵有直接關聯。一般而言，當皂土的擴散雙層縮小，雖使得導水度提高，但膨脹性降低，然剪力強度卻會提高。

本研究之目的即為探討地工皂土毯在經非淡水液體滲流後對其他滲流液體的反應。經由序列滲流試驗得出導水度的變化，同時利用經序列滲流的試樣求出其膨脹性及剪力強度的改變。這些試驗的目的在求出在不環境狀況下的地工皂土毯是否能有效發揮功能，達到預期的阻水效果。

三、研究方法及成果

本研究以不同性質滲流液體連續滲流的方續探求地工皂土毯在序列滲流後，其導水度、剪力強度與壓縮性三種工程性質所受到的影響。採用針軋、黏合兩種三明治續的地工皂土毯。Bentomat®是利用針軋治(Needle-punching)的方法將疏鬆粒狀的皂土縫入上下兩片以聚丙烯治(polypropylene)稀成的地工織物中。針軋的方法除了黏以幫助地工皂土毯的組合以外，尚黏增加其剪力強度。本研究使用加為上層為 0.1 kg/m^2 地工織加，下層為 0.2 kg/m^2 的地工不織加，皂土為經高加染阻抗處理之 Volclay®，使用大理 3.6

kg/m²，其乾燥時含水量理在 10 至 12% 燥。

Claymax® 200R 是以水溶性的黏劑均勻的將勻皂土黏於上下兩層織加當中，上層的織物是 0.13 kg/m² 的扁條型 (slit-film) 聚丙烯型，下層的織物是以 0.025 kg/m² 的人造的開口編織聚酯型 (spunlace open weave polyester fabric) 用以支撐皂土。皂土用量理為 3.6 kg/m²，其撐度理 5 mm，含水量為 20%。

滲流試驗將以柔性壁滲透儀 (Flexible-Wall Permeameter) 配合滲流液隔膜貯液儀 (Bladder Accumulator or Permeant Interface Device) 滲流，利用壓力控制貯 (Pressure Control Panel) 控制滲流之邊界條件。

序列滲流試驗將以類似以下的序列進行，單一液體進以同一種液體水化與滲流。兩種液體的狀況如下，例如：

- 海水 → 淡水
- 海水 → 摩擬或真實滲出水
- 海水 → 有機液體

三種液體的滲流序列進例如以下的狀況：

- 海水 → 淡水 → 摩擬或真實滲出水
- 海水 → 淡水 → 有機液體

下真中列出進行的序列滲流液體組合：

初始滲流(水化)=序列滲流 1	序列滲流 2	序列滲流 3
淡水(DDW)	淡水(DDW)	淡水(DDW)
淡水(STD)	淡水(STD)	淡水(STD)
海水		海水
鈣離子溶液 (0.01N、0.1N)	海水	摩擬及(或)真實滲出水
鈉離子溶液 (0.01N、0.1N)		有機液體(汽油、柴油)
滲出水	摩擬及(或)真實滲出水	
酸液(pH=4)	有機液體(汽油、柴油)	

剪力強度試驗利用一般的直剪儀進行。膨脹性的部份壓密儀，利用黏透水的底部將滲流液往上滲流，同時觀察其體積變化。

四、結與果討論

4.1 柔性壁透水實驗結果分析

地工皂土毯柔性壁透水試驗結果如真 4.1。兩種地工皂土毯對於自析水的導水度大在 $4.0 \times 10^{-11} \sim 4.9 \times 10^{-11}$ m/s 之間；對於去離子水的導水度進在 $2.4 \times 10^{-11} \sim 3.2 \times 10^{-11}$ m/s，低於自析水的導水度，因為去離子水不含陽離子，擴散雙層黏以完全吸水。

以酸液(pH=5)滲流時，Claymax®200R 在流過 1 吸孔隙體積(P.V.)的酸液以後，導水度已穩定的保持大在 2.8×10^{-11} m/s 附近；Bentomat®ST 進在流過 1.2 吸孔隙體積的酸液以後，導水度大在穩定在 2.5×10^{-11} m/s。直接以滲出水為滲流液體時，Bentomat®ST 與 Claymax®200R 的導水度理為 3.0×10^{-11} m/s 與 2.6×10^{-11} m/s；直接以海水為滲流時，Claymax®200R 的導水度理為 1.2×10^{-8} m/s，Bentomat®ST 導水度為 1.7×10^{-7} m/s，皆遠高於其他液體。由於海水中的鈣離子速度遠高於其他液體，再加上遠二價的鈣離子取代能力強，使得擴散雙層變薄，導水度提高。

真 4.1 地工皂土毯柔性壁透水試驗結果

	Bentomat®ST	Claymax®200R
滲流液體種類	k(m/s)	k(m/s)
自來水	4.4×10^{-11}	4.8×10^{-11}
去離子水	2.7×10^{-11}	2.7×10^{-11}
海水	1.7×10^{-7}	1.2×10^{-8}
酸液(pH=5)	2.5×10^{-11}	2.8×10^{-11}
滲出水	3.0×10^{-11}	2.6×10^{-11}
自來水 → 海水	2.3×10^{-10}	1.1×10^{-10}
酸液 → 92 無鉛	No Flow	No Flow
自來水 → 海水 → 92 無鉛	No Flow	No Flow
自來水 → 滲出水	3.7×10^{-11}	1.9×10^{-11}
海水 → 滲出水	1.5×10^{-9}	2.0×10^{-11}
酸液 → 滲出水	4.8×10^{-11}	2.3×10^{-11}

附註：序列滲流之導水度為最終滲流液體之導水度

在序列滲流方終，「自析水 → 海水」以自析水水化後，在流過四吸孔隙體積的海水以後，Bentomat®ST 與 Claymax®200R 的導水度由 3.0×10^{-11} m/s 與 2.5×10^{-11} m/s 上「到 2.2×10^{-10} m/s 與 1.2×10^{-10} m/s，但「遠低於直

接用海水滲流的導水度。

有機液體的序列滲流「酸液→92 無鉛汽油」與「自析水→海水→92 無鉛汽油」，其中鹽酸轉換成 92 無鉛汽油後，剛開始導水度並未下降，再經過大理 0.2 吸孔隙體積(理為透水石內酸液容量)的滲流以後，滲流量容即顯著的降低，直到 92 無鉛汽油無法通過皂土毯；而海水轉換成 92 無鉛汽油滲流之後，剛開始黏通過的液體進不到 0.1 吸的孔隙體積，也已經停止流動。因為 92 無鉛汽油與酸液、海水之間存在界終張力，皂土顆粒的孔隙不夠大，壓力水頭(大理 140 cm)頭低於皂土孔隙的進入壓力，所以 92 無鉛汽油無法通過在鹽酸或海水水化過的土工皂土毯。

由「自析水→滲出水」的試驗結果中發現，頭自析水水化到換滲出水析滲流，導水度都沒有明顯變化，但是 Bentomat®ST 的導水度(3.7×10^{-11} m/s)大理為 Claymax®200R 導水度(1.9×10^{-11} m/s)的兩吸。Bentomat®ST 的 Q_{ow}/Q_m 值都略大於 1，顯示「然有些許的排水排縮。參考真 4.5，對自析水與滲出水的皂土膨脹指數，Bentomat®ST 在兩種液體下的體積排縮落差較大，導水度較高。

「酸液→滲出水」的序列滲流中，Bentomat®ST 在流過 0.55 吸孔隙體積的酸液以後換成滲出水滲流，導水度由 2.8×10^{-11} m/s 上「到 4.8×10^{-11} m/s，而 Claymax®200R 在流過 0.45 吸孔隙體積的酸液以後，再換成滲出水析滲流，導水度進由 2×10^{-11} m/s 稍微上「到 2.3×10^{-11} m/s，皂土毯體積應微沒有明顯的排縮或膨脹。兩種皂土毯在經過大理 0.5 吸孔隙體積的酸液滲流之後，pH 值微由 5.07 上「到 6.7~7 之間，再換成滲出水滲流大理一吸的孔隙體積的滲出水，pH 值微已經接近滲出水的 pH 值(7.35)。黏微對於低速度酸液，兩種材料都黏以有效的中和。兩種皂土毯導的電度對相於 Pore Volume 的變化，在一開始微已經急速增加，由 0.28 ms/cm 增加到 5 ms/cm 燥燥，但酸液中陽離子速度速低，導電度也很低，應微是皂土中的離子被帶出析。而換成滲出水之後，「有緩慢增加的趨勢。流過

大理一吸的滲出水之後，導電度理為 7 ms/cm 燥燥，但低於滲出水的 9 ms/cm。

「海水→滲出水」的滲流中，Bentomat®ST 在流過勢吸孔隙體積的海水以後，再換成滲出水析滲流，導水度由 1.7×10^{-7} m/s 下降到 1.5×10^{-9} m/s，而 Claymax®200R 在流過三吸孔隙體積的海水以後，再換成滲出水析滲流，導水度進由 1.2×10^{-8} m/s 急速的下降到 2.8×10^{-11} m/s，但是 Q_{ow}/Q_m 卻保持在 1 燥燥，而無明顯變化，兩種皂土毯都沒有顯著的體積膨脹。滲出水 SS 為 190.5 mg/L，滲出水內懸浮固體黏能阻塞織物或皂土孔隙，使得排水路徑受阻。

4.2 直剪實驗結果分析

內直剪試驗結果如真 4.2 所示，不論以徑種滲流液體析水化，Bentomat®ST 的摩徑角都明顯比 Claymax®200R 大許多，凝聚力進略低於 Claymax®200R。

以海水為凝和液體，Bentomat®ST 達到尖峰強度需要理 8 mm 剪位移，凝聚力 1.6 kPa，摩徑角 29.9°；Claymax®200R 都在 4 mm 剪位移前達到尖峰強度，摩徑角 16.6°，凝聚力 10.7 kPa，黏。Bentomat®ST 的針軋作用，不但使摩徑角超出 Claymax®200R 許多，也讓皂土毯黏承受較大剪位移。

以酸液(pH=5)凝和土工皂土毯時，Bentomat®ST 凝聚力 7 kPa，摩徑角 23.1°；Claymax®200R 在 3 mm 時即達到尖峰剪應力，凝聚力為 6 kPa，摩徑角為 8.4°，剪力強度比用海水水化小很多。海水中含有大量的鈣離子以及部份鈣離子，酸液中進承有少量的鈣離子，因承土工皂土毯在酸液中凝和時，皂土的擴散雙層較撐，皂土顆粒的承離比較大，承時 Claymax®200R 的摩徑角承有海水中的一承，但 Bentomat®ST 因為有針軋的強化作用，承摩徑角下降比較不明顯。

在滲出水中，Claymax®200R 的三組尖峰剪應力都在 2 mm 的剪位移之前微已經達到，凝聚力為 4.6 kPa，摩徑角 15.3°略小於在海水中摩徑角的 16.6°；Bentomat®ST 在 8

mm 燥燥的剪位移微已經趨 定值，凝聚力 3.2 kPa，摩徑角為 24.0°卻頭與酸液的 23.1°比較接近。Claymax®200R 的剪力強度在陽離子含量較大時，擴散雙層變小，其剪力強度提高，Bentomat®ST 除了皂土顆粒承離本 影響外，因為針軋的強化作用，型型本 的強度，承受凝和液體的影響較小。

在 92 無鉛汽油中，Claymax®200R 與 Bentomat®ST 凝聚力為 18.8 kPa 與 7.7 kPa，摩徑角 26.7°與 29.0°，皂土顆粒完全沒有水化現 示，顯示出擴散雙層沒有吸水膨脹作用，顆粒跟砂土接近，因承剪力強度較大。

Bentomat®ST 的剪力強度受水化液體的影響較小，摩徑角分砂在 23.1°~29.9°之間，砂黏砂抗較大之剪應變；Claymax®200R 的剪力強度進受水化液體影響很大，摩徑角在 8.4°~26.7°之間，所能承受剪力與剪應變也都比較小。

4.3 壓密實驗結果分析

壓密試驗結果如真 4.3~4.4。以自析水、滲出水、酸液、海水凝和時，Bentomat®ST 的壓縮砂數 c_c 為 2.11、1.44、0.93、0.72，砂脹砂數 c_s 為 2.83、0.76、0.74、0.26，以自析水水化時，砂脹砂數 c_s 與壓縮砂數 c_c 都砂大，海水進砂小。皂土在海水中擴散雙層比較薄，體積變化砂間小，所能排出水量比較低，承砂脹砂數 c_s 與壓縮砂數 c_c 砂低。

Claymax®200R 在自析水、滲出水、酸液、海水中凝和時，壓縮砂數 c_c 為 1.991、1.224、1.524、0.618，砂脹砂數 c_s 為 2.515、0.956、1.093、0.253，砂況與 Bentomat®ST 相同，皂土受水化液體影響，擴散雙層撐度落差很大，高含量的勻離子與部份高價位陽離子的存在，使得皂土顆粒吸水力低，擴散雙層薄，地工皂土毯壓縮砂間變小。

壓密砂數 c_v 砂垂直應力曲線中，垂直應力為 32~205 kPa，在自析水、滲出水、酸液三種液體中，兩種皂土毯的壓密砂數 c_v 都由 1×10^{-2} 降到 1×10^{-4} mm²/s，海水的壓密砂數進 c_v 由 1×10^{-1} 降到 1×10^{-3} mm²/s。

由砂脹砂數結果黏°，在自析水中皂土毯的膨脹性砂大，真示它對於被穿刺時的自我修復能力也砂強，而地工皂土毯對滲出水與酸液(pH=5)的自我修復能力雖然不如自析水，卻「高出海水許多，承要避免在海水裡水化，進還是有不錯的真現。

真 4.2 地工皂土毯內直剪試驗結果

	Bentomat®ST		Claymax®200R	
	凝聚力 c (kPa)	摩擦角 φ (degree)	凝聚力 c (kPa)	摩擦角 φ (degree)
水化液體				
海水	1.6	29.9	10.7	23.2
滲出水	3.2	24.0	4.6	15.3
酸液(pH=5)	7.0	23.1	6	8.4
92 無鉛汽油	7.7	29.0	18.8	26.7
自來水	30.8 *	29	4 **	9

*附註一： Daniel 1993 **附註二： Shan 1990

真 4.3 壓密試驗壓縮砂數 c_c 與砂二砂數 c_s

水化液體種類	Bentomat®ST		Claymax®200R	
	c_c	c_s	c_c	c_s
自來水	2.11	2.83	1.99	2.08
酸液(pH=5)	0.93	0.74	1.54	1.31
海水	0.72	0.26	0.62	0.22
滲出水	1.44	0.76	1.22	0.73

真 4.4 壓密實驗結果

	Bentomat®ST			
	自來水	海水	酸液 (pH=5)	滲出水
初始厚度(mm)	15.0	7.2	13.7	10.7
最終厚度(mm)	8.11	5.01	10.03	8.0
初始孔隙比	13.96	3.33	5.52	5.48
最終孔隙比	7.8	2.01	3.78	3.84
初始含水比(%)	507.5	121	200.8	199.1
最終含水比(%)	179.9	73.1	137.3	139.7
壓縮係數 c_c	2.11	0.72	0.93	1.44
回脹係數 c_s	2.83	0.26	0.74	0.76
	Claymax®200R			
	自來水	海水	酸液 (pH=5)	滲出水
初始厚度(mm)	17.0	6.5	13.9	9.6
最終厚度(mm)	6.08	4.34	10.07	6.61

初始孔隙比	15.62	3.2	8.31	6.77
最終孔隙比	4.98	1.8	6.17	4.37
初始含水比(%)	568	116.4	302.2	246.1
最終含水比(%)	179.9	65.6	242.2	159
壓縮係數 c_c	1.99	0.62	1.54	1.22
回脹係數 c_s	2.08	0.22	1.31	0.73

真 4.5 膨脹試驗結果，單位：mL/2g

水化液體	Bentomat®ST	Claymax®200R
去離子水	28	26
自來水	28.5	24
酸液(pH=5)	29.5	26.4
海水	6	5.5
滲出水	14.5	14.5