

卅五、大地工程與水污染防治

陳 傲 季 張 固 宇

國立臺灣海洋大學河海工程系

摘 要

臺灣地區由於受多數畜牧與工業廢水，未經妥善之污水處理場改善水質後，再放流入溪流或海洋中，在全省各地已造成重大傷害與污染；不僅嚴重破壞了飲用水水質，也嚴重影響沿海之養殖與漁業之生存和發展。

對於上述之污染問題，若能以工程方法控制這些污染源之移流，使之不再污染地下與河川水，進而不致污染沿岸海域，將使污染防治工作和沿岸之生態環境保護的措施，能更竟其功。

本文首先提出以工程方法——皂土泥漿截水牆控制污染源移流之原理，即皂土泥漿之效用與在截水牆中所扮演角色。接著提出整個截水牆之施工過程和應注意之事項。最後則討論影響整個截水牆設計與施工之種種因素。皂土截水牆完工後之維護與監測，亦將在本文中討論之。

水污染之防治，不應只是工程上之問題，而應和其他有關學門同心協力，才能徹底解決污染問題，達到保護沿岸海洋生態環境之目的。

1. 前 言

臺灣地區由於多數畜牧與工業廢水以及垃圾掩埋場之滲出水，未經妥善之污水處理，就逕自放流入溪流或海洋中，已嚴重破壞吾人生存之環境，不僅污染了飲用水質，更嚴重影響沿海之養殖與漁業的生存和發展。

對於上述之污染問題，若能以工程方法控制這些污染源之移流，使之不再污染地下與河川水，進而不致污染沿岸海域，將使污染防治工作和沿岸的生態環境之保護措施，更能克竟其功。

以工程方法防治污染源之移流，過去經常使用之施工技術，不外乎滲出水收集系統 (leachate collectors)、黏土屏障 (clay barriers) 或版樁 (sheetings) 等。最近十年來，所發展的新技術皂土泥牆 (slurry cutoff) 之使用，則有凌駕其他施工法之趨勢，而廣為各業主所使用。

皂土泥牆之施工技術，包括開挖一個槽溝，其中注入主要由水和皂土混合所形成之泥漿，以維持槽溝壁之垂直與穩定。透過此穩定液之作用，使用任何適用之機具，由地面開始往下挖掘，使槽溝之寬度與深度均達要求之標準。當槽溝開挖至預定深度後，再回填土壤與皂土之混合料，藉著回填土之重量，可將槽溝中作為穩定液之皂土泥漿排出。此型式之泥牆，稱為 SB (Soil Bentonite) 截水牆。若填入槽溝中之回填料，為由水泥與皂土泥漿所混合者，則稱為 CB (Cement Bentonite) 截水牆。

本文即說明皂土泥漿截水牆能控制污染源移流之原理。整個截水牆之施工過程和影響截水牆設計與施工之種種因素，以及皂土泥牆完工後之維護與監測，也將在本文中討論之。

2. 皂 土

皂土在整個皂土泥牆之施工中，扮演最重要的角色，所以有必要在此簡述其特性。

皂土是一種柔軟、皂感性之岩石，大部份由黏土礦物之蒙脫土所組成。一般因產地不同，性質略有不同。國內所使用的美國產地皂土，約有 10% 不純物。細磨後之皂土與水混合之泥水，即用為槽溝挖掘之安定液。

2.1 使用皂土之原理

當使用於槽溝之挖掘與皂土泥漿截水牆時，皂土會迅速進行兩種作用。首先，它會在槽溝壁形成一層薄而潤韌之泥膜，稱為濾餅 (filter cake)。此一層低透水性之泥膜，減低了泥水自槽溝內往外逸流，以及地下水往槽溝內滲之機會。此外，泥水作用於濾餅上之水平壓力，使得槽溝可維持開放狀態，槽溝壁不致崩坍。

皂土的第二個作用為維持泥水之密度。泥水安定液必須具有懸浮力，防止溝壁剝落之土砂沉澱於槽溝底。皂土之密度 (64 pcf) 只略大於水 (62.4 pcf)，而土砂之密度則遠大於水。剝落之土砂懸浮於安定液中，勢必增加安定液之密度，如此可增加槽溝內之液壓，而增加槽溝壁之穩定 [Xanthakos, 1979]。

2.2 皂土的特性

皂土與水分子接觸之瞬間，就會迅速表現出下列之特性，使其對槽溝之施工與穩定，助益甚大。

(1)膨脹與水解：當細磨後之皂土與水混合後，水會濕潤皂土顆粒之內外部。水分子由於電化作用，會緊附於皂土的黏土顆粒表面。水分子亦會鑽入皂土顆粒內部，迫使皂土顆粒體積向外膨脹。如此，皂土的體積就會增加。水解後的皂土，體積可膨脹至原來的 10 至 12 倍 [Mitchell, 1976]。

(2)復硬性：當 5% 的皂土與 95% 的水 (以重量計) 混合之安定液，靜置數分鐘後，安定液將由黏液變成膠狀物質。受激盪後，膠體又會回復成泥水狀。當激盪停止時，膠體又會再度形成。此為皂土泥水之復硬性使然。

復硬性在槽溝的施工中，扮演非常重要的角色。因為膠體結構，使得安定液具懸浮力，得以將剝落的土砂維持懸浮態。

(3)分散性：黏土顆粒表面，一般均帶負電荷，皂土亦然。當帶負電荷之兩個顆粒表面互相接近時，會因庫倫力而互斥。顆粒表面互斥的結果，使得泥水中絕大部份的黏土顆粒都維持分散狀態。此為皂土和水一直維持混合狀態之原因。

3. 皂土泥水安定液

安定液中的皂土含量，一般在 4~7%，亦即以 4~7% 的皂土摻和 93~96% 的水 [Boyes, 1975]。這種皂土與水混合的安定液，能維持施工中的槽溝之穩定。由於安定液影響槽溝開挖時之安全和效率以及皂土泥牆之品質甚鉅，吾人對於皂土安定液之性能與影響其品質之因素需有正確認識。

3.1 皂土安定液的性質

皂土安定液既要維持挖掘槽溝之穩定，又得有適當的流性以利施工，其黏性、膠凝強度和密度就得控制得恰到好處。雖然如此，安定液之性質仍會隨槽溝之挖掘，而有所變化。表一所列即為新配製與挖掘黏溝時，安定液性質之變化情形 [Xanthakos, 1979]，這些都是施工時需加以注意的。

(1)黏性：安定液需維持一定的黏性，以穩定槽溝壁；黏性又不能太大，而妨礙槽溝之開挖。最理想的新配製安定液，其黏性應為 15 cp (centipoise) [D'Appolonia, 1980]，成效才會顯著。

(2)膠凝強度：膠凝強度代表安定液未被激盪以前之剪力強度，主要來自皂土晶片表面與邊緣之結合力。典型的膠凝強度，其平均值約為 15 psf [Xanthakos, 1979]。

表一 新配製與挖掘中的皂土泥水特性

參 數	新 配 製	開 挖 中
密 度 (g/cm ³)	1.01~1.04	1.10~1.24
粘 性 (Centipoises)	約 15	約 18~22
過 濾 液 損 漏 (ml)	<30	約 15~70
pH	7.5~12	10.5~12
含 水 量 (%)	約 93~97	約 78~82
皂 土 含 量 (%)	4~7	約 6
10 分 鐘 膠 凝 強 度 (Pascal)	7~30	約 20~40

膠凝強度為土壤顆粒抗拒位移之能力，而黏性則為量測流體流性之指標。因為皂土安定液有復硬之特性，在皂土安定液的穩定力學中扮演極為重要之角色。因此欲發揮安定液之穩定效果，其品質得按照建議值加以控制之。

(3)密度：含 4~7% 皂土的新配製安定液，其密度約為 65 pcf (1.04 g/cm³)，只略高於水。適當的密度，會增加安定液與地下水之液壓差，增加對砂土之浮力，而減少土砂之沉澱。然而隨著開挖之進行，剝落於槽溝內之土砂漸增，使得安定液之密度漸增。當槽溝之開挖完成後，懸浮於安定液中之土砂會逐漸沉澱於溝底。這些與時遞增之沉砂一定要設法清除掉，否則回填土壤-皂土或水泥-皂土之混合料時，易與之混合，而降低皂土載水牆之品質。

(4)濾餅：將皂土安定液灌入槽溝後，安定液就會滲入土層之空隙中，起膠凝作用。不但填補土壤顆粒之間隙，也對土壤產生固結作用而增加抗剪強度。如圖一 [李光雄, 1983] 所示，土壤空隙全部為膠凝作用而填滿時，透水性就會降低許多。由於安定液受液壓之作用，會繼續向土層滲入，經過膠凝帶之粗濾作用，使得安定液中的水與皂土顆粒分離。前者通過膠凝帶而逸入土層內；後者則留置於槽溝之壁面上，而形成一層厚 2~3 mm，透水係數約 10⁻⁹ cm/sec 之不透水泥膜，就是所謂的濾餅 (filter cake)。皂土的品質良好，所形成之濾餅薄而堅韌；若安定液中含有多量泥砂，形成之濾餅則呈現厚而脆弱。

濾餅之形成，對槽溝之穩定，影響甚大。其穩定槽溝之作用，主要為：(甲)減少安定液滲漏於周遭之土層中；(乙)在土壤空隙中起膠凝作用而固結土壤顆粒，以穩固槽溝壁；且因而使溝內之皂土泥水，由於靜水壓與安定液之呆重，作用於壁面，得以抵抗土層與地下水之橫向壓力而維持槽溝之開放狀態。

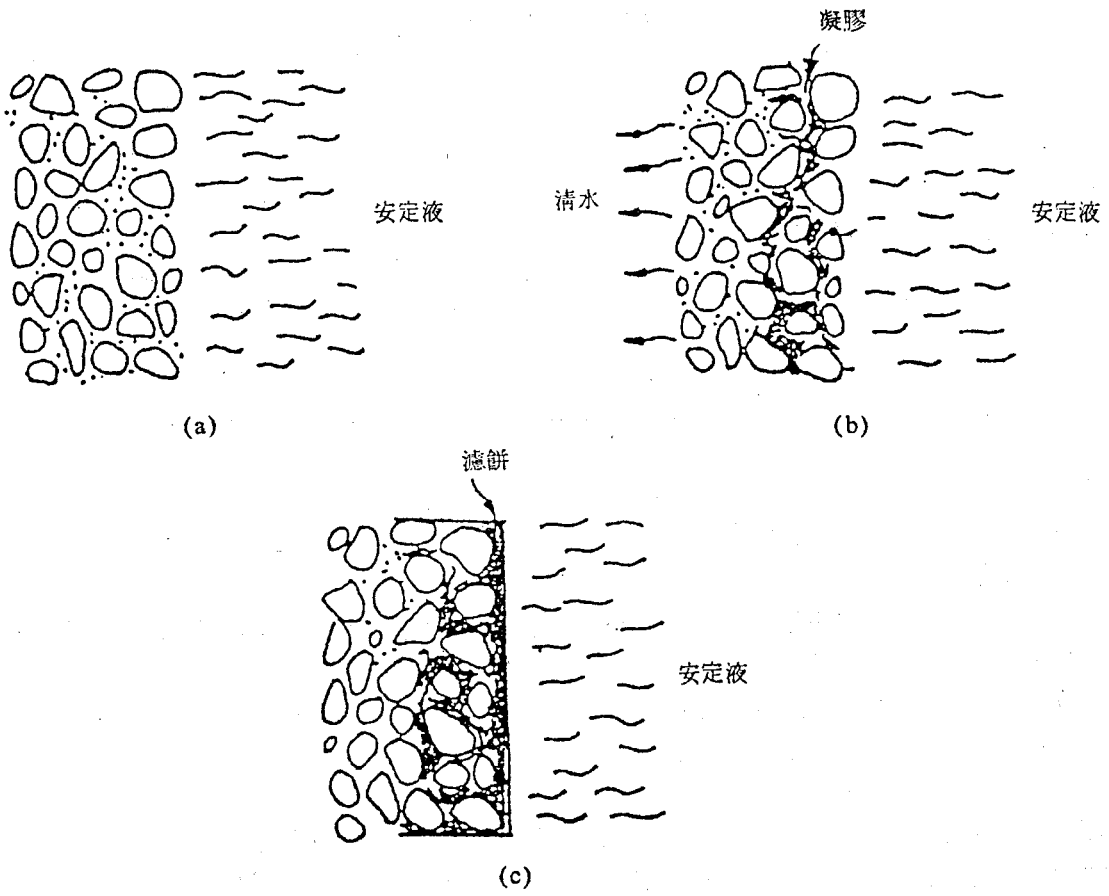
3.2 影響皂土安定液性能的因素

影響皂土安定液性能的因素甚多，在設計皂土泥牆與挖掘槽溝時，都需詳加探討，才能增加皂土安定液之效用，減少問題之發生與不必要之浪費。這些因素為：

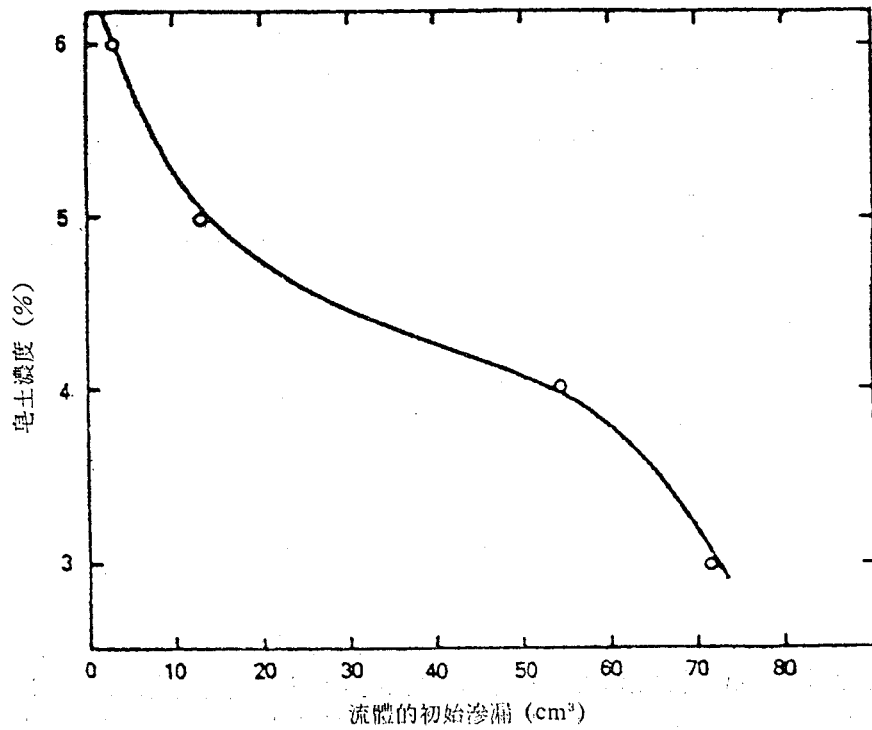
3.2.1 濾餅之性能

濾餅欲發揮其穩定槽溝之效用，必須：(甲)在安定液與土壤接觸之瞬間，能迅速形成；(乙)具備高膠凝強度；(丙)具備低透水性。這些效用，主要依下列諸因素而定：

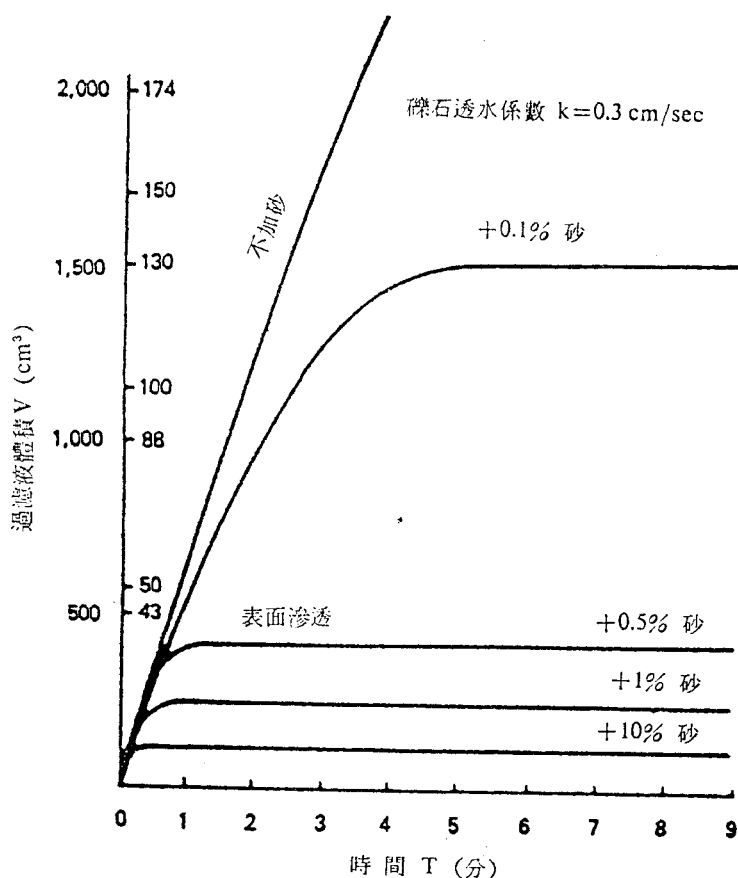
(1)安定液的性質：安定液中皂土的質與量影響濾餅之成效甚鉅。安定液中的皂土濃度較高時，不但會減少安定液之滲漏，且會增加槽溝周圍土壤之膠結強度。皂土濃度對安定液初始滲漏之影響，可由圖二窺知 [Hutchinson, 1975]。為了減少安定液之滲漏與維持槽溝之穩定，安定液中的皂土濃度最好維持在 4.5% 附近。



圖一 安定液的膠凝作用和濾餅之形成過程



圖二 濾餅形成時，皂土濃度對滲漏之影響



圖三 加砂含量對皂土泥水透過礫石床之影響

(2)槽溝周圍的土壤性質：槽溝周圍土壤含有許多大孔隙時，在濾餅形成之前，必有大量的安定液會滲漏掉。隨著土壤的透水係數降低，滲漏現象會趨於緩和。此可由圖三之曲線說明之 [Hutchinson, 1975]。圖三中顯示，濾餅形成之時間，在細砂中為 30 秒，而礫石床則需 3,600 秒。

(3)濾餅形成時間：安定液在槽溝中需有一段時間之滲漏後，才能在安定液與槽溝壁之交界處產生膠體之堆積，以形成濾餅。為確定濾餅在靜水壓之條件下，有充份時間形成之，槽溝之開挖與回填，至少有 24 時之延滯 [D'Appolonia, 1980]。

(4)安定液與地下水位間之水力坡度：水力坡度會影響濾餅之形成與效應 [D'Appolonia, 1980]。安定液與地下水間的水頭差加大時，會迫使安定液與交界之土層面密切膠結，因而增進濾餅之效用，減少滲漏。

(5)安定液或地下水之污染度：水中含有鹽類或使用高鹼性水，以及槽溝中有水泥存在時，都會污染安定液而降低濾餅之效用。

3.2.2 膠凝強度

安定液的膠凝強度，使得挖掘槽溝時，與安定液混合之細料土，會懸浮於安定液中，而不致沉澱於溝底。膠凝強度達 15 psf 時，安定液就有能力懸浮粒徑為 1 mm 之粗粒砂。隨著膠凝強度增加，安定液所能支撐之土壤粒徑也跟著加大。

3.2.3 密度

安定液之密度，會影響槽溝壁之穩定。密度高的安定液，可抗拒高地下水位與軟弱土層施加於溝壁之水壓與土壓力。安定液之密度較低時，抗拒這些壓力的成效就顯著降低。

挖掘時，掉入槽溝內的土砂，並非完全懸浮於安定液中；絕大部份之土砂，終究會沉積於溝底。沉積之土砂，對槽溝之穩定無直接效應；然而對完工後的截水牆之透水性，以及回填材料時施工之難易度，影響甚大。因此沉積於溝底的土砂與安定液混合體之密度，需較回填料至少低 15 pcf，以利回填料之施工。

3.2.4 化學與物理添加劑

安定液中可加入多種添加劑以加強其粘性，膠凝強度，密度，或減少安定液之滲漏。雖然如此，添加劑之使用，最好經由現地工程師之同意，以免某些化學添加劑會與某些污染物作用而減低安定液之效用。

4. 施工方法

4.1 截水牆型式

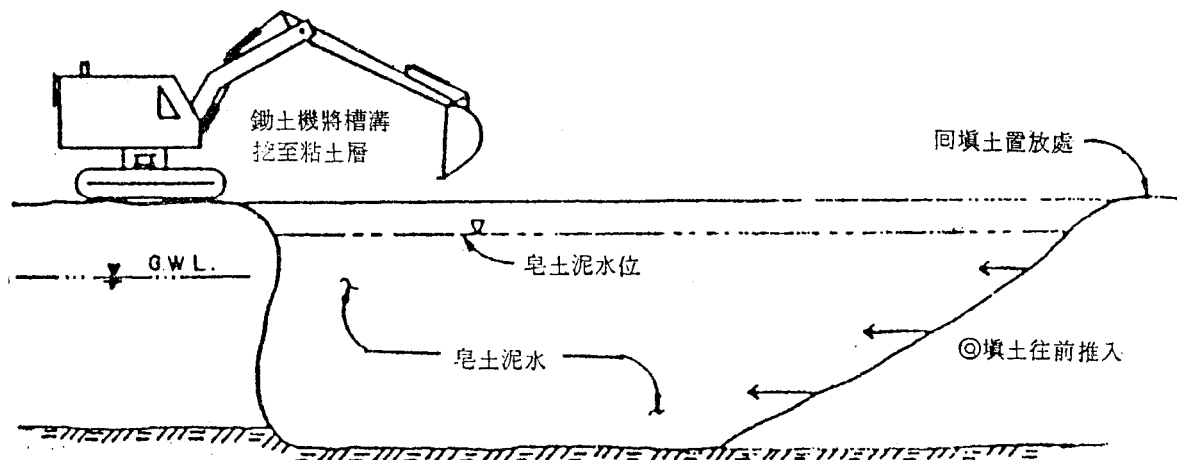
皂土截水牆一般可分為土壤-皂土 (SB) 泥牆與水泥-皂土 (CB) 泥牆兩種。SB 截水牆使用皂土與土壤之拌合土作為回填材料；而 CB 截水牆則使用皂土與水泥之拌合材料作為回填土。

SB 泥牆技術在美國之使用，已約有 40 年歷史。若挖掘槽溝時，所開挖出來的土壤可適用為回填材料，SB 系統會因額外所需的材料數量甚少而顯得甚為經濟。在安定液之穩定作用下完成槽溝之開挖後，可加入更多的皂土泥水與鄰近土壤拌合形成回填料。拌合回填料時，可使用堆土機進行之。堆土機也用來將拌合好的回填料推入槽溝中。當推土入槽溝時，槽溝中之安定液會往前推進，以利後續進行之開挖槽溝工作，如圖四所示。開挖與回填同步進行，使施工得以持續外，也使得填滿槽溝和拌合回填料所需之新配製皂土泥水，只需少量即可。

CB 牆之使用，在歐洲至少有 15 年以上之歷史，美國亦約有 10 年光景。因為回填料需使用新的材料，且水泥費用較高，CB 之回填料，將比 SB 之花費大許多。此增加之費用，可經由良好操作回填料之拌合作改善之。

4.2 施工設備

施工設備之基本要求為，有能力在設計之壁厚下，垂直開挖槽溝至所要求之深度。在此要求下，有許多挖掘機具均可適用，例如沖水挖土機、鋤土機、蛤壳斗和振動樑等。所有挖掘槽溝的機具，性能各有千秋。通常根據地質狀況，施工要求，環境條件及工程數量等因素來選擇機具。對於各式機種之特徵和針對土質的適應性應有深入瞭解的必要，而安全和效率則是先決條件 [掘井陽三等，1980]



圖四 SB 截水牆施工斷面圖

。不論何種挖掘方式，操作手要能够掌握操作要領，維持挖掘槽溝的垂直精度，並且避免過份擦撞槽溝壁。壁面崩坍情況，常導因於操作不當，而非機具之選擇錯誤 [李光雄，1983]。因此，欲保障槽溝開挖之安全，一定得保持機具垂直方向操作的平穩。

沖水挖土機，對於壁厚之控制較優。因為對壁面的擦撞機會減少，使得槽溝壁之穩定性增高。此機種之最大開挖深度約為 20 m，但隨著科技之進步，此種機具將可改良而延展其挖掘深度。鋤土機由於其開挖速度頗為快速，為最經濟之機種。至於蛤壳斗，最大深度可達 76 m，但其效率較其他方法為低，開挖之單價也相對地提高。

5. 皂土截水牆之應用

防止因污染物滲入地下而污染地下水，進而污染河水與沿岸海域，一直是工程師努力之焦點。欲達此目標，有許多變數需詳加考慮：(1)地下水流之品質與流向；(2)廢料之性質；(3)工址與鄰近區域之水文地質特性；以及(4)人類健康所承擔之風險。

當現址為垃圾掩埋場時，首要目標為如何防止垃圾滲出水之移流，以免使周遭環境惡化。為此，現址之地質、地下水域和土壤狀況，都得詳加調查，才能選擇最佳方法以防止污染源滲入地下或滲出水之移流。若滲出水已入滲至地下水域，已受污染之地下水勢將隨著地下水之水力坡度而移流至他處。為防止滲出水經由地下水之橫向移流，就得建造不透水截水牆防堵之。隨著現址之地理條件，截水牆通常往下嵌入低透水性之土層內，以封住污染源在地下之橫向移流。垃圾掩埋場或有毒廢料棄置場，常以此法作為補救措施。

有部份降落於掩埋場之雨水也會穿透掩埋場之廢料，而形成另一種型式之滲出水。任何與廢料接觸後而積聚於滲出水處之污染物，終將經由滲出水運轉至他處。由此可知，滲出水基本上有兩種型式：(1)流質狀廢料；和(2)因入滲而產生之流體；分別稱為主要與次要滲出水。多數的有毒工業廢料為液體，因此而成為主要滲出水。滲出水不論為溶液或溶劑，都會影響自然土壤，襯層或截水牆之透水性。此在設計皂土截水牆前都需詳加考慮。最好能以欲防堵之污染源與皂土截水牆之材料，進行多組透水試驗，才能使皂土截水牆之功效，完全發揮。

6. 結 論

皂土截水牆應用於污染源移流之控制，已廣為世人所認同。主要的兩種型式截水牆 SB 與 CB 雖有些微不同，在某種條件下，其技術是互通的。

設計皂土截水牆時，需考慮其為永久性或暫時性結構，預期之載重，施工限制等等因素。施工規範中更應考慮皂土截水牆之安全係數；例如，壁厚在多數情況下都較需求者為大；容許皂土泥水性質之變異；並使承包商在選擇材料、機具和技術時有較大之彈性空間。皂土截水牆之經濟，便捷，與控制污染源滲流之效，終將使其應用更為廣泛。

參 考 文 獻

- 李光雄。地下連續壁之挖掘安全與品質控制，高層建築工程技術研習會講義，財團法人臺灣營建研究中心，1983年9月，pp. 117-159。
- 掘井陽三等(1980)。地下連續壁工法(鹿島出版會)。
- Boyes, R.G.H. (1975). "Structural and Cut-Off Diaphragm Walls," Applied Science Publishers Ltd., London, Enbland.
- D'Appolonia, D.J. (1980). "Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs," J. of Geot., Division, ASCE, pp. 399-417.

- Hutchinson, M. T., Daw, G. P., Sholton, P. G. and James, A. N. (1975). "The Properties of Bentonite Slurries Used in Diaphragm Wall and Their Control," Institute of Civil Engineering, London.
- Mitchell, J. K. (1976). "Fundamentals of Soil Behavior," John Wiley & Sons, Inc.
- Xanthakos, P. P. (1979). "Slurry Walls," McGraw-Hill Book Company, New York.

Geotechnical Consideration in Water Pollution Control

S. Chern and K. Y. Chang

*Dept. of Harbor and River Engr.,
National Taiwan Ocean University*

ABSTRACT

Deteriorating water quality in Taiwan is endangering not only the quality of drinking water but also the existence and development of mariculture in nearcoast of Taiwan. The toxic substances that contaminate stream and ground-water are derived from the inflow of pollutants from the catchment basin, mainly poultry and industrial wastes.

The above mentioned problem can be partly solved by constructing slurry cutoff wall to intercept and impede the flow of fluid underground.

In this paper, the description of the theories regarding the functions of bentonite slurries, and the various backfill materials is presented. The procedures for planning a slurry wall installation are given. The factors considered in slurry wall design are then presented, followed by a outline of accepted construction practices. Finally, the necessary methods to monitor and maintain a completed slurry wall are also discussed.