

工業廢水處理技術(七)

李公哲*

二十七、工業廢泥之土地掩埋法

不管是具「有害性」(hazardous) 或「無害性」(nonhazardous) 之工業廢水污泥，它的最後處置是愈來愈困難，也愈來愈貴，而在各類處置方法中，仍以土地掩埋法 (landfilling) 較為便宜，然其規劃及設計仍需相當嚴謹與週密，以免造成二次污染問題。雖然土地掩埋法與衛生掩埋法 (Sanitary landfill) 有甚多原則及考慮因素極為類似，然對許多具有害性之工業廢水污泥而言，則需作更多的規劃預備工作，以下各節之說明尤適用於具有害性工業廢水污泥之土地掩埋作業之應用。

(一) 基本考慮⁽¹⁾

任何工業廢水污泥進行土地掩埋時，每個基本條件應加以考慮：

1. 土地掩埋地必需够大，足做將來需擴大此掩埋地的可能需求；
2. 土地掩埋地必需考慮有污泥緩衝儲存 (surge capacity) 或調勻設備 (equalization facility)，以備一旦工業製程或產量改變時，致使污泥性質或體積變化甚大時之應變儲存；
3. 土地掩埋地必需在不同季節或氣候條件下均可使用；
4. 土地掩埋地之結構上及環境上均為可接受，且無洪水、坍方等危險，更需注意者，為不可產生水、空氣、噪音及地下水污染等問題。
5. 對於污泥，必先瞭解它是否有爆炸性 (explosive)、腐蝕性 (corrosive)、毒性 (toxic) 及揮發毒害性 (volatile hazards)，是否會因不同污泥之混合會引起爆炸、腐蝕、毒害，甚而毒性氣體等。如工業廢水污泥或混合後有上述之著火性、毒性及揮發毒害性等性質，則不可任意加以工地掩埋。
6. 從工程觀點，污泥應適於利用機械設備加以運作掩埋，假如其性質不適合，則需加以脫水 (dewatering)、或先與飛灰 (fly ash)、土壤 (soil) 混合、甚至需加以化學固化 (chemical fixation)。污泥在土地掩埋時，雖然不一定要完全乾燥，但至少應適合於掩埋之機械作業及在掩埋後污泥性質必需很穩定 (stable)。一般而言，為瞭解工業廢水污泥是否有長期之穩定性，宜決定表二十九所示之污泥性質。

雖然不一定所有污泥均需瞭解表二十九之性質，惟根據表二十九之資料，吾人可判斷土地掩埋時之夯壓能力 (compaction capability)，荷重 (ability to withstand load) 及邊坡穩定性 (slope stability)。

* 本小組委員
臺大環境工程研究所教授

表二十九 工業廢水污泥土地掩埋時之長期穩定性相關性質

含水率 (%)
固體含量 (%重量化)
密度 (kg/m ³)
透水率 (cm/sec)
壓縮指數 (compression index)
剪力 (shear strength)
顆粒大小
未受限壓縮力 (unconfined compressive strength)
液限 (liquid limit)
塑限 (plastic limit)

(二) 土地掩埋地之選址規範

土地掩埋地場地之選擇，其規範主要分成四大類：(1)工程，(2)環境，(3)法令規章，及(4)經濟。規範又可分成「必要規範」(fixed criteria) 及「彈性規範」(Flexible criteria)。「必要規範」之意義為一個場地不符合是項規範時，則應加以放棄不用；「彈性規範」之意義為是項條件可放寬，特別可用來作為各個不同替代方案 (alternative) 選擇評等 (rank) 之用。

一般常用之「必要規範」如表三十所示⁽¹⁾：

表三十 工業廢水污泥土地掩埋場址選擇之「必要規範」

不可位於斷層區 (active fault zone)
不可位於100年內之洪水平原 (flood plain)
不可位於海水可倒灌區 (coastal high-hazard area)*
不可位於濕澤地 (wetland)*
不可位於生態敏感區 (critical habitat)*
不可位於地下含水層補注區 (recharge zone)*
不可位於任何建築物財產線 (property line) 之200呎內*
不可位於任何自來水源或家畜水源之500呎內*
不可與水運有關之水體直接接觸*
不可與地下水高水位距離在5呎內*

* 除非特別經過允許。

工業廢水土地掩埋之場地選擇的「彈性規範」，主要有如⁽¹⁾：

1. 工程方面

- (1) 場地大小：應可有適當之設計年限 (Design period)；
- (2) 場地位置：場地儘可能接近工廠，以減有污泥搬運費用，同時與水源之距離至少五百呎，與工廠財產線之距離至少二百呎；
- (3) 場地進出路線：進出路線應避免擁擠，且不受天候影響；
- (4) 地形 (Topography)：儘可能利用原有自然條件避免移土 (earth-moving)；

(5) 地質：必需避免地震帶、斷層、山崩、坍方、地下礦場等地質特性區域；
(6) 土壤：掩埋地與下水高水位之距離至少5呎，且需有自然黏土襯底 (clay liner)，或有黏土可用來襯底。同時，場地也取得掩埋後覆土 (cover) 用的土壤。

2. 環境方面

- (1) 地面水：必需在一百年的洪水平原之外。可能的話，應在五百年的洪水平原之外。必需避免在濕澤地，也必需與航運有關水體無直接接觸。
- (2) 地下水：掩埋地與地下水高水位至少需有 5 呎的距離，必需避免在地下水補注區，也必需避免單源含水層 (sole-source aquifer)。
- (3) 空氣：位置必需使空氣污染及臭味問題之衝擊為最小；
- (4) 生態：必需避開生態敏感區及濕澤地，尤其不可危及稀少野生動植物之生存及繁殖；
- (5) 噪音：儘量使車輛之進出及機械操作的聲音為最小；
- (6) 土地使用：應避開人口稠密地區及公園風景區等；
- (7) 文化資源：必需避免設於古蹟性 (archaeological)、歷史性及古生物性 (paleontological) 地區。

3. 法律及公眾方面

- (1) 法令：符合政府有關法令的規定，對於地方的都市計畫及分區使用法規也應遵守。有關水土保持 (erosion control) 之有關法令也應符合；
- (2) 公衆：場址應為公衆所能接受。

4. 經濟方面

- (1) 土地取得：考慮土地之地價及其他相關費用；
- (2) 整地及開發：考慮挖方、整地、襯底、道路開發等費用；
- (3) 年費用：考慮年費用（即包括建設費之年費用及年操作維護費用之總和），一般而言，土地掩埋係為較低建設費，而較高操作維護費。
- (4) 剩餘價值 (Salvage value)：對工業廢水污泥（特別對於有害性工業廢水污泥）應較不考慮其剩餘價值。

（二）土地掩埋法之規劃及設計

工業廢水污泥土地掩埋法規劃及設計過程中，首當為現場踏勘 (Site reconnaissance) 及研究場址有關之地形、地質、測量圖及空照圖等。現場踏勘則先對場址有關之背景資料加以研討，現場則對地面之植物覆面 (vegetative cover)、土壤種類、坡度等均應詳加調查。對所有調查過之可能場址，則應用上節之選址規範，甄選出最適之掩埋地。

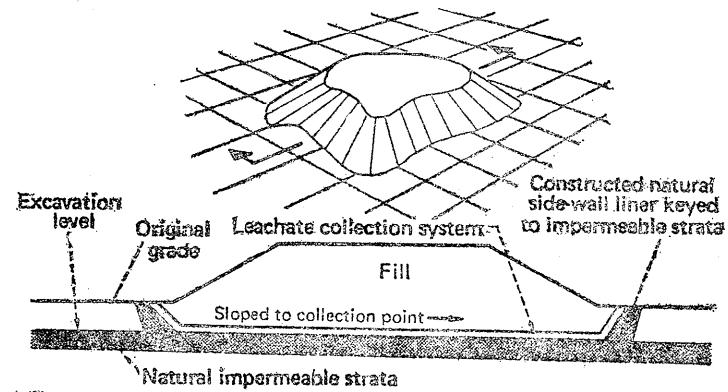
土地掩埋之規劃及設計過程中，有兩個最主要的設計限制因子，一為應用自然或人為襯底 (liner) 以控制掩埋場滲漏水 (leachate) 污染，另一為場址及其附近地面水之控制。土壤之透水率 (permeability) 小於 1×10^{-4} cm/sec 較適合作掩埋地。

1. 土地掩埋法之型式⁽¹⁾

一般而言，工業廢水污泥之土地掩埋形式計有四種：

- (1) 面積法 (Area method)

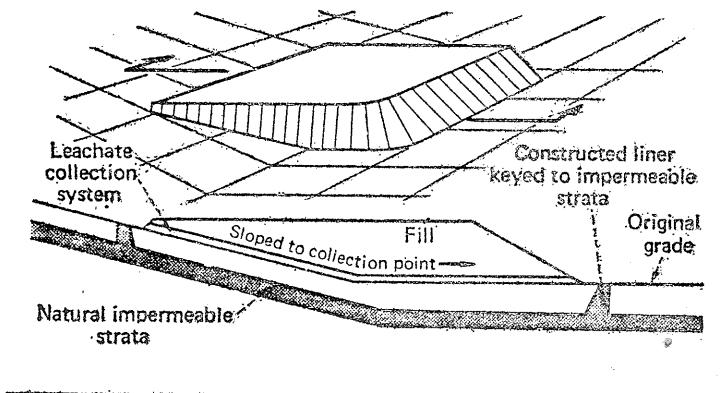
面積法如圖五十所示。圖五十所示為一利用在平地上掩埋工業廢水污泥之方法。需注意者，為此法應用該地之自然不透水層（natural, impermeable strata）做為襯底外，且在掩埋地四周圍建造垂直的襯底與平面上之襯底相連接，使兩者襯底形成一個碗狀（bowl），而可與地下水完全隔絕。此法之掩埋可自原來地面開始，也可將地面開挖後再開始掩埋，以增加可掩埋體積（如圖五十所示）。



圖五十 面 積 法

(2) 斜坡法 (Slope/Ramp method)

斜坡法如圖五十一所示。此法主要為將工業廢水污泥掩埋在具有自然襯底之水邊斜坡地，而一邊可形成一阻絕構造。

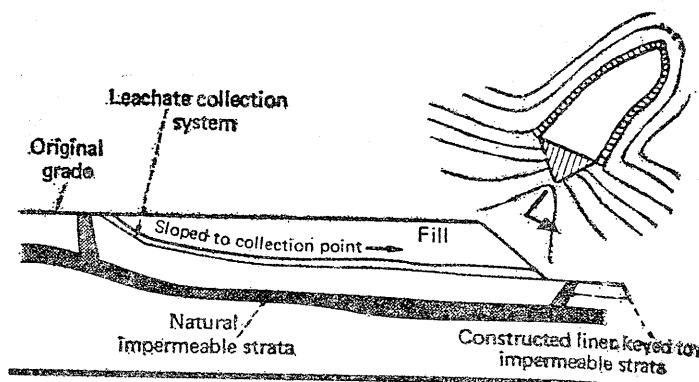


圖五十一 斜 坡 法

(3) 窪谷法 (Canyon/Pit/Quarry method)

窪谷法是將工業廢水污泥掩埋在具有三邊阻絕之山谷地，而谷地具有良好之天然不透水層作為襯底。此法因在山谷地通常會有泉水及地下水湧出等問題，故地面水控制及地下水保護較為複雜，即需將地面水導引開，而地下水也需加以收集導離。典型之窪谷法如圖五十二所示。

2. 地面水控制問題



圖五十二 窹 法

地面水控制之主要目的為導引開流向掩埋地的地面逕流 (runoff)，及排掉落在掩埋地上之雨水。

地面逕流的控制通常為建造導流溝渠 (diversion channel)，而沿著掩埋場四周全部建造。一般而言，溝渠之尺寸應以二十五年或五十年發生一次之暴雨來設計。

工業廢水污泥掩埋面應有坡度，以排掉落在其上之雨水，坡度大小與掩埋面上是否易受侵蝕 (erosion) 有關，如為易受侵蝕，則坡度宜為 0.5—1.0%。

地面逕流收集後應加以沉澱處理，以去除被冲刷侵蝕下來之土壤等。一旦掩埋完成，則掩埋面上之坡度至少應 2%，以利雨水之排除。

再者，邊坡如小於 5 : 1，則每掩埋十呎應有一個梯形丘 (terrace 或稱 bench)，而更大的邊坡 (最大為 3 : 2)，則每掩埋二十呎也需有一個梯影丘。

3. 地下水的保護

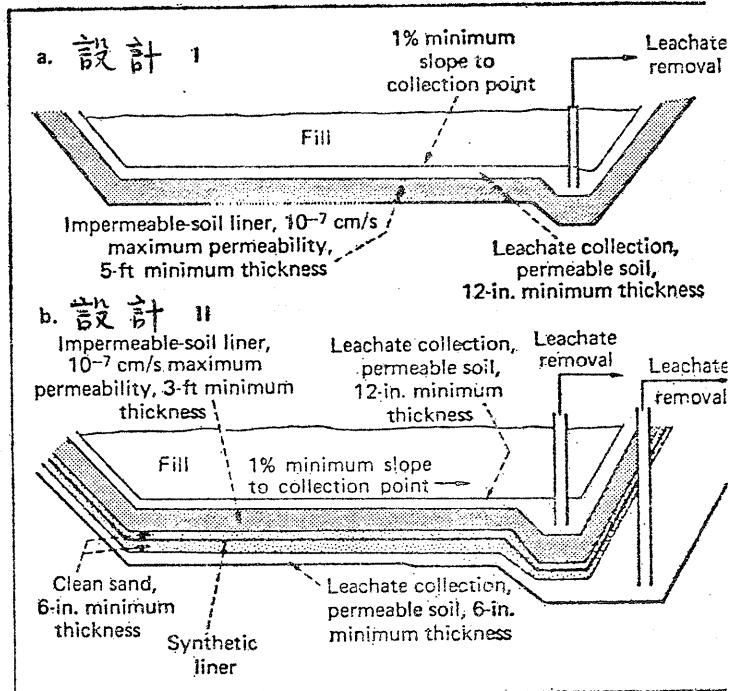
避免工業廢水污泥掩埋場滲透水污染地下水則需從多方面著手，包括有使地面水不流入掩埋場而建造截流溝渠，同時避免將過濕的污泥加以掩埋及應有土壤覆土及掩埋面上綠化 (vegetation) 等。

再者，更可使用不透水襯底來保護地下水；尤有害性污泥更需在掩埋地及四周均需加以襯底。襯底的材料除了可應用現地具有襯底作用之自然不透水層外，也可利用其他天然與人工合成材料做為襯底材料，需注意者，人工合成材料之襯底僅可做為天然襯底之輔助襯底。

如果掩埋地區之年蒸發量比降雨量多 20 吋或 20 吋以上，則在掩埋地及其四周應有相當於 10 呎厚透水率 10^{-7} cm/sec (約 0.1 ft/yr) 自然土壤的襯底。如果當地無法有上述之自然襯底，則可應用圖五十三所示之二種替代襯底方案之設計。

設計 I 之特點為被掩埋之污泥底下有二層土壤，上層為 12 吋厚之可透水土壤，以收集滲漏水，下層為 5 呎厚之不透水土壤 (透水率不大於 10^{-7} cm/sec)，以做為襯底。該二層土壤應有坡度以利滲漏水之收集。

設計 II 之特點為在被掩埋之污泥底下有六層式〔或稱三明治 (Sandwich) 式〕的保護工。最上層為最小 12 吋厚之可透水土壤，以收集滲漏水，中間一層為至少 3 呎厚，透水率最大為 10^{-7} cm/sec 的不透水土壤，以做為土壤襯底，再底下為最小 6 吋的乾淨砂，然後底下



圖五十三 二種土地掩埋法替代襯底方案之設計

爲一層合成材料布襯底 (synthetic-membrane liner)，最底下層則爲第二個滲透水收集層 (詳見圖五十三)。設計 II 包括有二層襯底及二層滲透水收集層，故建造費用高出許多。

4. 氣體之收集

如被掩埋之工業廢水污泥爲有機性，則會被生物分解而產生甲烷氣，二氧化碳、硫化氫及其他可能具有毒或臭味性氣體，故掩埋地應設有通氣系統 (Venting system)。

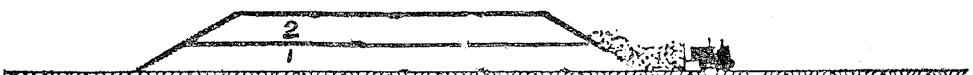
四 工業廢水污泥土地掩埋場操作上之特殊問題

1. 掩埋「小格」(cell) 舉設次序

土地掩埋時，將污泥倒下鋪成「小格」，而「小格」之建造方式則可有不同次序，以面積法為例，可從一端開始，而在另一端結束〔如圖五十四 (A) 所示〕，也可由地面向上鋪成多層〔如圖五十四 (B) 所示〕，然對具有害性工業廢水污泥之土地掩埋而言，一般較常用前者，因為在掩埋過程中，掩埋使用到之面積較小，可減少滲漏水問題。



圖五十四(A) 面積法之「小格」鋪設法之一



圖五十四(B) 面積法之「小格」鋪設法之二

再者，以斜坡法為例，污泥之掩埋可由高處，漸漸掩埋至低處如圖五十五（A）所示，也可由低處漸漸掩埋至高處如圖五十五（B）所示。然對具有害性之廢水污泥而言，一般較常用前者，因為前者較不易在掩埋場積聚地面水，而可減少產生滲漏水之機會。



圖五十五(A) 斜坡法之「小格」鋪設法之一



圖五十五(B) 斜坡法之「小格」鋪設法之二

2. 覆土問題

每天掩埋後，應對「小格」覆上 6 吋的土壤，以隔絕污泥，避免鳥及動物之侵入，或火災；但並非所有工業廢水污泥均需覆土，如一些無機性廢渣或污泥等，並不被風吹起，也不吸引鳥、動物或發生火災之慮，則不需每日例行性之覆土。

當掩埋場用完後，先舖上一層 6 吋厚，透水率不大於 10^{-7} cm/sec 之天然土壤，用覆土加以土封 (seal)，然後再加上一層 18 吋厚的天然土壤，以便可種植淺根植物 (shallow-rooted plants)，但如為深根植物 (deep-rooted plants)，則需 3 呎。

3. 地下水的監視

工業廢水污泥，特別是有害性污泥，其地下水的監視應為連續進行，有關之監視計畫 (monitoring program)，應在進行污泥掩埋前就加以擬定，而從一開始掩埋起，就開始監視，且如為有害性污泥，在掩埋地用完關閉後，仍需繼續監視地下水二十年。

監視取樣通常來自監視井 (monitoring well)，加上地面逕流及滲漏水收集系統。同時應定期檢查掩埋地是否有土壤冲刷浸蝕及坍方等現象。地下水之取樣一般應包括兩部份，一為通氣層 (aeration zone)，主要為取自掩埋地下面之滲漏水收集系統，另一為飽和層 (saturated zone)，此主要為地下水的監視，需取自掩埋地附近之地下水。

取樣的次數則視掩埋地之場地條件而定，一般至少每季一次，但必須有一年是每個月均取樣，以建立背景資料。如果地下水流速為 82~164 ft/yr，可改為每半年取樣一次，如果地下水流速大於該值，則改為一季取樣一次。如有地下水被污染之可疑時，則取樣頻率宜再增加。

地下水檢驗之項目，應含比導電度，pH，氯鹽，總溶解固體，有機碳及可能存在於有害性污泥中之物質。如果欲作進一步之全盤瞭解時，則應再加上飲用水中之其他項目，及鎳、氟化物及酚類等。

4. 筒裝污泥之土地掩埋問題

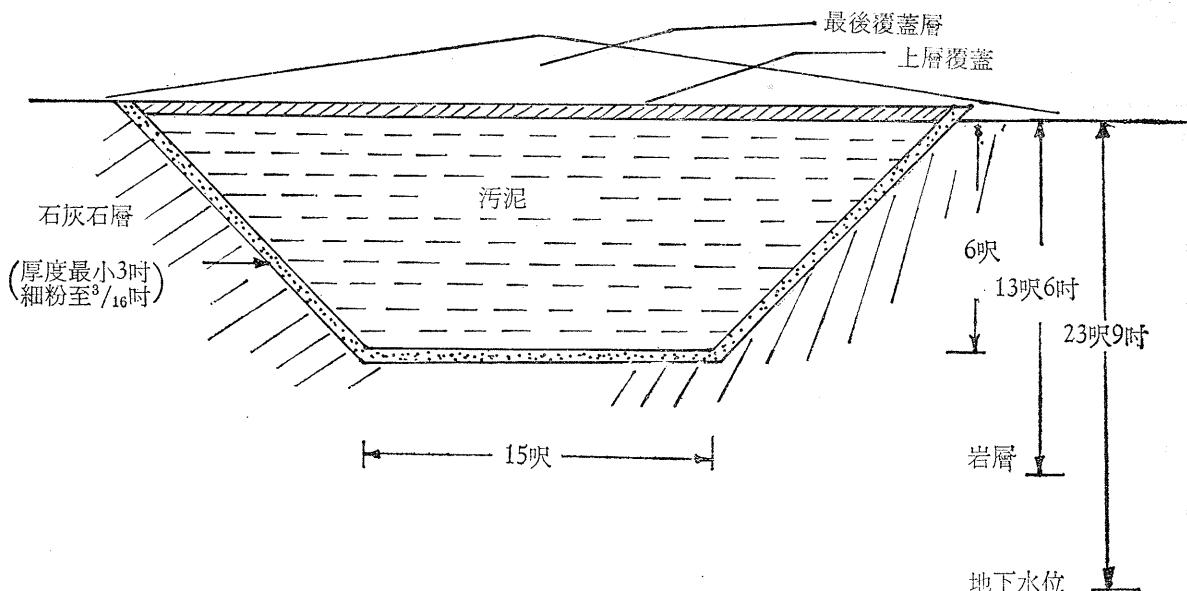
有些有害性污泥，可能被裝在 55 加侖之圓筒內，則在土地掩埋時，該圓筒的四周，應以

足够的吸收劑 (Sorbent) 加以包敷，以便萬一圓筒破漏或破裂時，漏出物可被吸收劑吸收。當然，筒裝污泥在土地掩埋時，應不可加以夯壓，且放置及覆土均應特別小心，以免使圓筒破損。

(四)特殊汚泥土地掩埋時之特殊設計——以重金屬汚泥為例

以上所談為工業廢水污泥（或較一般性的有害性污泥）之土地掩埋法，然對某些特殊工業廢水污泥，土地掩埋時，則需事先預作特殊襯底，或其他固化隔絕處理，現以重金屬污泥為例說明如下⁽²⁾。

一般工業廢水中如含有重金屬（如電鍍廢水），常應用最簡單而經濟之化學沉降法（Chemical Precipitation），即加入石灰或氫氧化鈉，調整 pH 至 8.0—11.0，使重金屬變化氫氧化物藉沉澱除去。沉澱下來之重金屬污泥，如任意加以棄置，一遇酸性水，則重金屬會再溶出，而造成二次污染問題。吾人可應用一層石灰石（limestone）作為土地掩埋地之襯底（見圖五十六），如此可使重金屬污泥之土地掩埋地之滲出水具有鹼性，同時滲漏水也可使其 PH 在 7.0 至 10.0 之間，可減少重金屬離子被溶出，而避免污染地下水。



圖五十六 重金屬汚泥之石灰石襯底掩埋

參考資料

- (1) Duvel, W. A., "Solid Waste disposal: Landfilling", Chemical Engineering, July 2, 1979.
- (2) 李公啓，「電鍍廢水之污染防治」，六九年近代工程技術討論會。