

中華水土保持學報, 28(2): 99-111 (1997)

坌質砂土管湧問題研究

蘇苗彬 施進村

Piping Problem in Loess & Sand

Min-Ming Su

Chin-Chun Shi

Department of Civil Engineering

Chung-Shan Institute of Technology

Tainan, Taiwan

中華水土保持學報第二十八卷第二期抽印本

REPRINTED FROM JOURNAL OF CHINESE SOIL AND WATER CONSERVATION VOL.28, NO.2

中華民國八十六年六月 June 1997

粉質砂土管湧問題研究

蘇苗彬^[1]

施進村^[2]

關鍵詞：粉質砂土、管湧、過濾

摘 要

粉質砂土，在台灣南部之曾文溪以南，台南、高雄一帶分佈極廣。其 # 200 篩以下的細顆粒含量相當大，又不具凝聚性，故抗沖蝕能力差，易為滲流水沖離，導致土壤細顆粒流失，產生管湧破壞。鑑於此，本研究探討粉質砂土做為填土材料，或地下開挖時之管湧產生特性，並研提防治管湧所需的過濾料設計。

研究中進行 1. 基礎土壤基本性質試驗：探討基礎土壤之一般物理性質，滲透係數及材料之 c 、 ϕ 值。2. 管湧試驗：分別探討粉質砂土作為填土材料，或地下開挖時之管湧潛能。3. 過濾料試驗：參考 Sherard 等 (1989) 發表之「無沖蝕過濾料試驗」，進行過濾料選定試驗，研提防治管湧所需的過濾料設計。由試驗結果顯示，粉質砂土發生管湧的潛能，隨材料乾密度增加，而顯著降低。開挖時，發生管湧破壞的潛能，隨開挖面增加而遞增，且隨材料乾密度增加而顯著降低。因此，粉質砂土不論做為填土材料或地下開挖，均應注意材料乾密度的控制，以降低管湧發生的潛能。防治此粉質砂土管湧所需過濾料之 D_{15s} ，介於 0.85 ~ 2.10mm；並隨 # 200 篩以下細顆粒含量增加，呈線性遞減。而 U. S. Army 之過濾料設計準則 $D_{15}/d_{85} \leq 5$ (D 及 d 分別代表濾料及土壤的粒徑)，應用於粉質砂土，雖較保守，但考慮現場施工，易造成粒料分離，則尚屬合理。

Piping Problem of Silty Sands

Miau-Bin Su

Associate Professor, Department of Civil Engineering,
National Chung-Hsing University,
Taichung, Taiwan 402, R. O. C.

Jin-Tren Shi

Engineer, Bureau of Hydraulics, Taiwan Province Government,
Taiwan 402, R. O. C.

[1] 中興大學土木工程研究所副教授

[2] 水利局工程師

Key Words: Silty Sand, Piping, Filtering

ABSTRACT

This study investigates the piping problem of silty sands. Filter requirement of the silty sands is discussed to provide design criteria in preventing for piping failure. Soil property and its piping potential are examined by using proper test set-up and "no erosion filter test" suggested by Sherard et al. (1989) is proceeded to design proper filter to prevent silty sands from piping. Test results indicate that by increasing the soil dry density (or the compaction ratio), the piping potential of silty sands decrease significantly. The result is true for silty sands employed as fill material, or arching action manifests owing to underground excavation.

The filter boundary D_{15b} of silty sands is in the range of 0.85mm to 2.10mm and decreases linearly when fine content increase. The current filter criterion $D_{15}/d_{85} \leq 5$ (D and d are diameter for filter and soil separately) suggested by U. S. Army et al. (1971) is conservative for silty sands; but it is reasonable if the segregation phenomenon is considered.

一、前言

本研究主要目的在探討粉質砂土作為一般填土材料，及地下開挖拱作用（Arching action）下之管湧發生的可能性，並進一步設計防治管湧所需的過濾料。

土層地下開挖，將造成局部解壓，使開挖孔上方的土壤，因解壓降伏，產生向下移動，形成一土拱（soil arch）。而該拱向下移動的趨勢，由拱與周圍固定土壤間的摩擦力來抵抗。在土壤力學上，拱作用係用以描述降伏土體上的荷重傳遞到鄰近穩定支撐的現象。該觀念應用於隧道工程，即為 NATM 工法之主要設計理念：Terzaghi (1943) [1] 認為土壤拱作用係現場或試驗室常遇到的現象之一，該現象存在於土體對橫跨的固定支承有相對運動時。

Bosscher 等 (1986) [2] 研究砂土邊坡之拱作用時指出，影響砂土拱作用形成的主要因素有 1. 相對密度 D_r (或土壤夯實度) 2. 開口大小 (或拱的跨徑) 3. 砂土的內摩擦角 ϕ 。其中 D_r 與 ϕ 角是相伴而生，屬一體兩面。而外加荷重 (靜力或動力)，將使土壤顆粒重新排列，可能導致原維持土壤的拱作用，因所存在於土體內部的剪應力消失而破壞拱的作用。

另外，管湧 (piping) 係指因滲流造成土體內部細顆粒流失，逐漸往上游擴大，形成流槽；如未及

時防治，將因土壤自持力不足，導致崩坍破壞。Kalin (1977) [3] 認為管湧係因地下水流動，導致土壤結構內部沖蝕破壞之現象。Parker (1964) [4] 指出，管湧係乾燥地區泥岩、頁岩、凝灰岩等地形發展的主要誘因；而該等岩材的收縮裂縫，則為內部沖蝕的發源地。至於人為管湧的產生，則為築堤、填擋水，造成上、下游面產生滲流之水力梯度；或者，開挖破壞土壤組織結構，提供地下滲流管道。

Khilar 等 (1985) [5] 則以力學觀點探討管湧現象，並指出管湧之發生包含下列兩個步驟：

1. 滲流力作用導致土壤顆粒分散。
2. 土壤顆粒分散後隨滲透水流 (seepage stream) 移動，惟該顆粒移動，究會造成管湧或阻塞 (plugging)，則視滲流水含土壤顆粒濃度 (particle concentration) 而定。

並指出，影響管湧的主要因素，為土壤顆粒相對土壤孔隙的大小。如果，土壤顆粒大於或等於孔隙尺寸，則發生阻塞；換言之，如果土壤顆粒遠小於孔隙大小 (如 $< 1/100$ 倍)，則將發生管湧。至於土壤顆粒尺寸介於前述兩者之間，是否發生管湧，將視滲流液所含的土壤顆粒濃度而定。即土壤顆粒濃度大於某臨界濃度 C_{pc} (Critical particle concentration)，將發生阻塞；反之，則產生管湧。

Vukovic 等 (1992) [6] 認為顆粒性多孔介質之管

湧, 只發生在水力梯度 (hydraulic gradient) 大於某一臨界值時。而影響多孔介質 (porous medium) 產生管湧的因素有 1. 材料的級配, 2. 材料的夯實度, 3. 水力梯度。所以避免管湧發生, 可從下列三個方向考量:

1. 提高材料的乾密度 (或夯實度), 以降低管湧之潛能。

2. 抽、排水降低水頭, 俾減小滲流之水力梯度。

3. 於填土或開挖材料下游, 提供適當過濾材料, 以減小滲流孔徑, 防止細顆粒流失, 造成管湧破壞。

鑑於此, 本文設計一系列試驗, 探討粉質砂土乾密度改變對產生管湧水力梯度的影響並檢討拱作用存在時, 受滲流應力產生破壞, 管湧的形成, 並選取防治管湧所需之過濾料, 以為工程界日後面對此類土壤, 研擬管湧防治措施之參考。

二、過濾料設計

過濾料的主要功能有二: 1. 防止土壤內部沖蝕及管湧的發生。2. 排水以降低土壤的超額孔隙水壓力, 亦即降低具有潛在危險性的上舉力。Hazen (1911) [7] 於本世紀初即從事過濾料研究, 結果發現, 過濾料設計可以過濾層的有效粒徑 (effective grain size) D_{10} , 作為主要評估參數。美國陸軍工程兵團 (U. S. Army Corps of Engineering) 及美國墾務局 (U. S. Bureau of Reclamation) 依試驗結果, 作成過濾料選擇的要求如下述:

1. 過濾料應較基礎土壤 (base-soil) 更具透水性, 俾免造成水壓力, 使過濾料與相鄰結構分離。

2. 過濾料的孔隙, 必須小到足以阻止基礎土壤顆粒貫穿過濾層, 避免造成過濾層阻塞, 致該過濾層破壞。

3. 過濾料必須有足夠厚度, 以提供所有粒徑形成良好的分佈; 並提供一適當的絕熱體, 避免基礎土壤受冰凍作用。

4. 過濾料外側, 需加一層較粗的過濾層; 或提供足夠小的狹縫開口, 以避免過濾料顆粒進入排水管。

Taylor (1948) [8] 指出, 如果三個完美球體的直徑大於小球直徑 6.5 倍, 則小球將通過三球所圍成的孔隙。換句話說, 三個球體的直徑, 必須小於或等於

小球直徑的 6.5 倍, 始能防止小球移動。但是, 對一般非均勻過濾料而言, 無法直接以過濾料直徑來表示開口大小; 只能以某一具有代表性的粒徑 D_l 來表示開口大小。因此, 一般研究者, 便以 D_l 及 d_l 作為過濾料研究的主要參數。並以容許停留比 (allowable retention ratio) R_R 作為評估過濾料試驗成功與失敗的指標。

$$R_R > D_l/d_l$$

另外, Bertram (1940) [9] 延續 Terzaghi 的研究, 建立下列過濾料設計準則:

$$D_{15}/d_{85} < 4 \sim 5 < D_{15}/d_{15}$$

上式前半部為防止管湧發生, 其中 D_{15}/d_{85} 稱為管湧比 (piping ratio); 後半部則為確定過濾料有足夠的滲透係數, 以避免過濾料與下游排水層間的水壓力及滲流力高漲。

美國陸軍等 (U. S. Army et al 1971) [10] 為防止土壤細顆粒進入過濾層, 也建立下列設計準則:

$$D_{15}/d_{85} \leq 5 \quad (\text{考慮管湧})$$

$$D_{50}/d_{50} \leq 25 \quad (\text{考慮滲透係數})$$

三、過濾料選定

Sherard 等 (1984) [11] 以高水壓力 ($4\text{kg}/\text{cm}^2$) 的細溝試驗 (slot-test) 和泥漿試驗 (slurry-test), 探討粉土和粘土的過濾料。惟前述試驗, 僅考慮防止基礎土壤貫入過濾層, 並不考慮過濾料兼具的排水性質。試驗結果發現, 阿太堡限度對過濾料選定並無影響; 且只要具有相同的粒徑分佈, 高擴散性與非擴散性粘土的過濾料需求相同。

前述細溝試驗及泥漿試驗, 對於 d_{85} 大於 0.1mm 之不透水材料, 並無法獲得令人滿意的過濾料設計。因此, Sherard 等 (1989) [12] 再提出「無沖蝕過濾料試驗」(No Erosion Filter Test, 簡稱 NEF Test), 該法亦採用高水壓力 ($4.2\text{kg}/\text{cm}^2$), 與細溝試驗最大不同, 係將初始裂縫由細溝試驗的 0.5 英吋 $\times$ 0.06 英吋, 改為直徑 0.1mm 的針孔; 並將基礎土壤厚度 (base-soil) 由細溝試驗的 6.5 英吋改為 1 英吋厚。其餘試體製作及試驗步驟, 與細溝試驗類似。

Sherard 等認為, NEF Test 對過濾料設計的成敗,

具有判斷明確的優點。即過濾料的 D_{15} 大於 D_{15b} 時，會發生內部沖蝕，致針孔擴大；如過濾料的 D_{15} 小於 D_{15b} ，則無內部沖蝕，針孔無擴大。又依該法所得之 D_{15b} ，具有惟一性，可視為土壤材料的特性之一；且土樣的含水量及夯實度，對試驗結果無顯著影響。所以，NEF Test 是目前較好的過濾料選定試驗方法。

Sherard 等採用 NEF Test 做過濾料選定試驗時，將基礎土壤依 # 200 篩以下細顆粒含量百分比分為 0-15%、15-40%、40-85%、85-100% 等四類，該試驗所得之 D_{15b} ，如表一所示。其中第四類（# 200 篩以下細顆粒含量 15-40%）之 D_{15b} ，表中僅表示介於第二、三類之間，且依細顆粒含量而定。而本研究之基礎土壤細顆粒含量屬於第四類，爰擬以試驗方法求出該粉質砂土之 D_{15b} ；並建立 D_{15b} 與 # 200 篩以下細顆粒含量之關係曲線，以供日後工程界施工、設計之參考。

表一 過濾料粒徑邊界值 D_{15b} (Sherard 等 1989)

土壤種類	# 200 篩以下細顆粒含量百分比 (%)	過濾料粒徑邊界值 D_{15b}
1	85 ~ 100	$D_{15b} = 7d_{85} \sim 12d_{85}$
2	40 ~ 85	$D_{15b} = 0.7 \sim 1.5\text{mm}$
3	0 ~ 15	$D_{15b} = 7d_{85} \sim 10d_{85}$
4	15 ~ 40	介於第二、三類之間，視細顆粒含量而定。

四、試驗方法

1. 一般管湧試驗

管湧的發生，係因水力梯度大於某一臨界值，致滲流力克服土壤顆粒間的抗剪強度，將細顆粒沖走。如下游無適當的濾料設置，以防止細顆粒流失，將逐漸往上游形成一流槽。使土體產生局部空洞，而降低自持力，致在外力或自重作用下，產生坍塌破壞。

針對工程設計之需要，以土壤乾密度及水力梯度為考量因子，進行一般管湧試驗，探討基礎土壤下游無過濾料設置之情況下，土壤乾密度由 1.78g/cm^3 （標準 proctor 夯實試驗夯實度 100%），逐漸遞減至 1.40g/cm^3 ，對產生管湧破壞所需水力梯度之影響。

(1) 試驗儀器

使用立臥兩用壓克力圓柱形容器，本壓克力圓柱型容器分為上、下兩截，第一截（下半截）尺寸為 $\phi 10\text{cm} \times 10.2\text{cm}$ ，裝置時，以螺帽固定於具有四支可調高度腳架之底版下。第二截（上半截）尺寸為 $\phi 10\text{cm} \times 17.8\text{cm}$ ，置於第一截圓柱筒上，其間以四支具有螺紋之不銹鋼棒，連接腳架後，再以螺帽固定。其頂蓋版上有二孔，用以進水、排水及排氣。於試驗前，以 6kg/cm^2 之高水壓力測試 24 小時，無漏水及破裂情事。

(2) 試體製作

試驗基礎土壤夯實後之乾密度，由 1.78kg/cm^3 （標準 proctor 夯實試驗夯實度 100%），逐漸降低為 1.725（現地密度）、1.65、1.60、1.55、1.50、1.45、 1.40g/cm^3 ，以作為試驗控制因子，其試體製作如后述：

- ①壓克力圓柱形容器第一截底部加鐵絲網後，將模型粘土置於容器高 0-2cm 及 8-10cm 處，並貼緊管壁，以防止管壁流發生。
- ②將含水量為標準夯實試驗 $\text{O.M.C} \pm 2\%$ 之粉質砂土，分二十次以定體積夯實方式夯入容器，層與層間並以藥刀劃割，以利粘結。夯實後土樣厚度 10cm，乾密度為擬試驗之乾密度。
- ③土樣頂加鐵絲網後，將試體置於水槽飽和 24 小時
- ④土樣飽和後，裝上第二截圓柱形容器，並加滿 # 4 ~ 3/8 英吋礫石，以擾流，俾產生靜水壓力。
- ⑤加水至礫石層，至水從排氣孔溢出止。而後，將試體水平擺置如圖 1 所示。

(3) 試驗步驟如下：

- ①突然打開水閥，加定水頭水壓力。
- ②每 30 分鐘量測排水量一次，量測後，將排出水烘乾，稱排出土壤顆粒重。
- ③觀察排出水之色澤、流量。如色澤清晰，且排水流量，連續維持 4 小時以上穩定，則視為穩定滲流；可改變水壓力，繼續試驗，至產生管

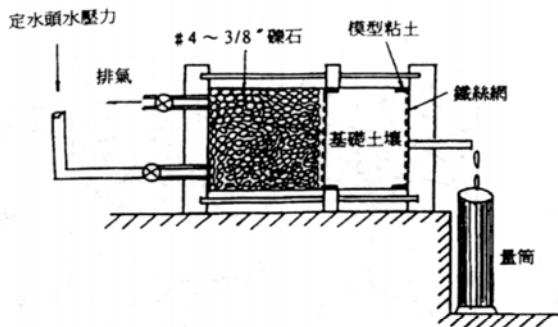


圖1 一般管湧試驗示意圖

湧破壞止。如排出水色澤混濁，則不改變水壓力，繼續試驗，至管湧產生止。

- ④管湧產生後，即關閉水閥，並拆模觀察試體之變化。

2. 底部開口管湧試驗

首先以土壤乾密度為現地乾密度 ($1.725\text{g}/\text{cm}^3$)，開口孔徑 5.0cm 之試體，分別進行底部開口管湧試驗及底部開口壓力試驗，以確立拱作用之破壞機制。再以固定孔徑，改變土樣乾密度；及固定土樣乾密度，改變孔徑的方式，繼續進行底部開口管湧試驗。據以探討材料乾密度及拱跨徑，對產生管湧破壞水力梯度之影響趨勢。

(1) 試驗儀器

使用立臥兩用圓柱形容器，除底版改為可旋轉開孔式外，餘與前述同。

(2) 試體製作

本試驗試體製作的方式有二：(1)孔徑固定為 5.0cm，基礎土壤的乾密度由 $1.78\text{g}/\text{cm}^3$ ，逐漸降低為 1.725 (現地密度)、1.65、1.60、1.55、1.50、1.40/ cm^3 。(2)乾密度固定為 $1.725\text{g}/\text{cm}^3$ ，孔徑則為 3.2cm、4.5cm、5.0cm、5.8cm、7.0cm。

至於試體製作程序，除改用可旋轉開孔式底版，且第一截容器底不加鐵絲網，及礫石層改為 3cm 厚外；餘與一般管湧試驗同，如圖 2 所示。

(3) 試驗步驟

底部開口管湧試驗步驟如下：

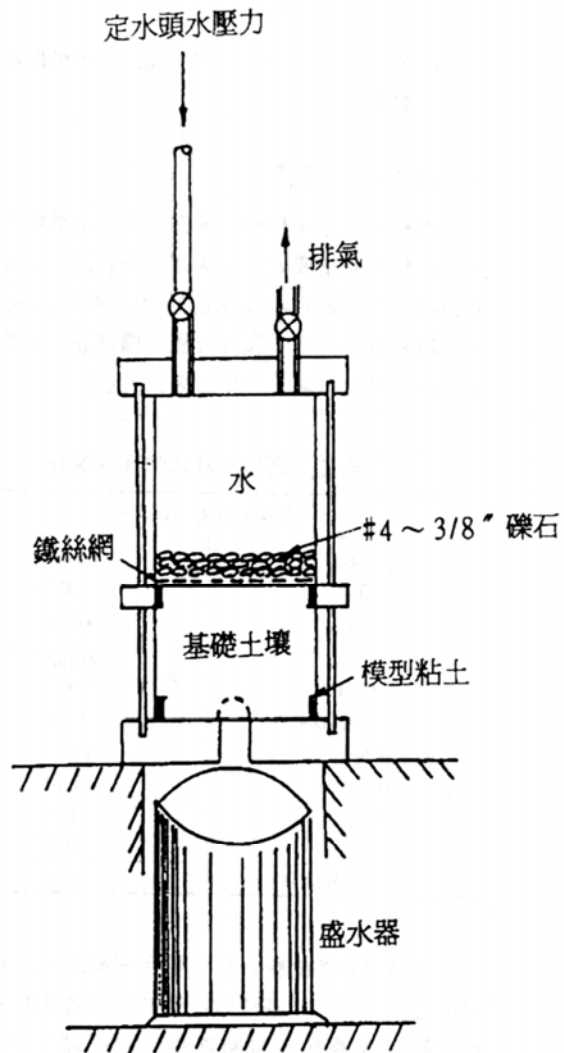


圖2 底部開口管湧試驗示意圖

- ①打開水閥加定水頭水壓力（壓力在 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上，以儲氣槽之氣壓加於不銹鋼水箱，產生定水頭水壓水； $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下，則以定水頭透水試驗之設備，加定水頭水壓），再旋開底孔蓋，造成底部開孔。
- ②每小時量測排水量一次，量測後，將排出水烘乾，稱排出土壤顆粒重。
- ③觀察排出水色澤、流量。如排出水由初始坍孔之濁水轉清後，流量與色澤連續維持 4 小時以上穩定，則視為穩定滲流；可改變水壓力，繼續試驗，至產生管湧破壞止。如排出水持續混濁，則不改變水壓力，繼續試驗，至產生管湧

止。

- ④管湧產生後，即關閉水閘，並拆模觀察試體之變化。

3. 過濾材料選定

本研究之過濾材料，選自高屏溪里港地區之天然河砂。該河砂主要成分為次圓形頁岩碎屑，但夾雜部分白色石英質砂岩及淡棕色砂岩。過濾材料採樣後，於試驗室進行比重、顆粒分析及標準 proctor 夯實試驗等一般物理性試驗，結果如表二所示。

表二 過濾料基本物理性質表

高屏溪里港地區河砂	
G_s	2.69
形狀	次圓形
$\gamma_{d_{max}}$	1.905 g/cm ³
$\gamma_{d_{min}}$	1.575 g/cm ³
O.M.C	7.0%
D ₁₀ (mm)	0.03
D ₁₅ (mm)	0.063
D ₅₀ (mm)	0.70
D ₆₀ (mm)	1.0
C_u	33.3
統一土壤分類	SM

過濾材料的配製，除了要合乎擬設計過濾料 D_{15} 粒徑之要求外；亦應注意避免夯實時產生粒料分離。為了避免過濾料夯實時產生粒料分離，U. S Army (1971) 規定， C_u 值不得大於 20；而 Sherard 等 (1984) 經數次試驗後認為，實務上，過濾料大於 # 4 篩以上粗粒料不得大於 60%；惟前述均就現場施工而言。在室內試驗有限容量下，可能應採取更保守的 C_u 值，以避免過濾料夯實時，粒料分離，造成粗顆粒聚集於管壁周側。鑑於此，並經試驗前多次測試結果，選用 $C_u = 2.7 \sim 4.0$ ，作為本試驗過濾材料配製的級配參數。

本研究之基礎土壤 # 200 篩以下細顆粒含量為 35.98%，依 Sherard 等之分類原則，屬第四類土壤。該類土壤防治管湧所需過濾料之 D_{15b} ，需由試驗決定；且隨 # 200 篩以下細顆粒含量改變而不同。因此，為了解土樣之 # 200 篩以下細顆粒含量改變時，對過濾料需求的影響，除就基礎土壤進行試驗外；亦以人為方式配製 # 200 篩以下細顆粒含量 5%，15%，

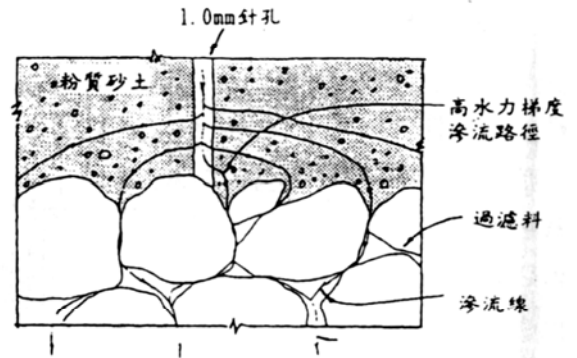


圖3 成功的過濾料試驗圖

25%，40%，50%之土樣進行過濾料試驗。其中細顆粒含量 5% 之 $d_{85} = 0.22\text{mm}$ ，依 Sherard 等建議之過濾料設計準則，其 $D_{15b} = 1.54 \sim 2.2\text{mm}$ ；至於，細顆粒含量 50%，依前述準則， $D_{15b} = 0.7 \sim 1.5\text{mm}$ 。因此，本試驗之 D_{15} 範圍選為 $0.7 \sim 2.5\text{mm}$ ，並依各篩號重量百分比及前述級配原則，配製十五組過濾料。

粉質砂土因屬無凝聚性土壤，如果過濾料選定成功 (i. e. $D_{15} \leq D_{15b}$)，在高水壓力作用下，除位於過濾料與基礎土壤間的土壤顆粒，會被沖洗流出，造成初始微量微濁的排出水外；而後，因過濾料與基礎土壤間的孔隙，由土壤顆粒填滿，產生過濾效果，排出水變成完全清澈，流量趨於穩定。又因無明顯內部沖蝕 (internal erosion)，使原針孔未擴孔，如圖 3 所示。

如果過濾料選定失敗 (i. e. $D_{15} > D_{15b}$)，土壤會貫穿過濾層，產生內部沖蝕，使排出水色濁，且針孔擴孔成為火山口，如圖 4 所示。

但是，圖 3 所示之成功的過濾料選定判斷準則，必須要在過濾料有足夠的厚度，可形成良好的粒徑分佈，始能產生。否則，即使採用 $D_{15} < D_{15b}$ 之過濾料，仍可能厚度不足，造成基礎土壤細顆粒貫穿過濾層，產生如圖 4 之破壞機制，誤導過濾料粒徑之選擇。

過濾料選定試驗，計試驗 54 組，係先就基礎土壤試驗，求出其防治管湧，所需過濾料之 D_{15b} 後；再以人為方式配製各種不同 # 200 篩以下細顆粒含量百分比之粉質砂土，進行試驗，以尋求該等粉質砂土防治管湧所需之過濾料。

(1) 試驗儀器 (同前)

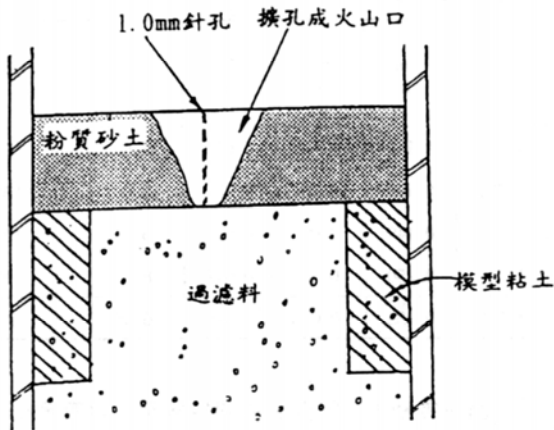


圖4 失敗的過濾料試驗圖

(2) 試體製作

- ①圓柱形容器底部加鐵絲網，再放置 # 4 ~ 3/8 英吋礫石 7.5cm，做為過濾料的過濾層，其上再加鐵絲網，以分隔該層與過濾料。
- ②將含水量為標準 proctor 夯實試驗 $O.M.C \pm 2\%$ 之過濾料，分十四次以定體積夯實方式夯入容器。夯實後厚度 7cm，乾密度為過濾材料 γ_{dmax} 之 95%，並加水飽和。
- ③模型粘土搓成條狀，置於容器高 14.5 ~ 17.5cm 處，並壓緊管壁，以防止管壁流。
- ④依步驟 2 再夯入過濾料，夯實後厚度 3cm。
- ⑤將含水量為標準 proctor 夯實試驗 $O.M.C \pm 2\%$ 之土樣，分五層以定體積夯實方式夯入容器，層與層間並以藥刀劃割，以利粘結。夯實後厚度 1 英吋 (2.54cm)，乾密度為現場平均乾密度 1.725g/cm^3 (約 $0.97 \gamma_{dmax}$)。
- ⑥以直徑 1.0mm 之細針，刺穿基礎土壤，造成初始裂縫，再於土壤上方加置鐵絲網，以防止表面沖蝕。
- ⑦再放入 # 4 ~ 3/8 英吋礫石 8cm，以擾流，俾產生靜水壓力。
- ⑧試體製作完妥後，垂直放置，並加水於基礎土壤上方之礫石孔隙，至水由排氣孔溢出。

五、試驗結果與分析

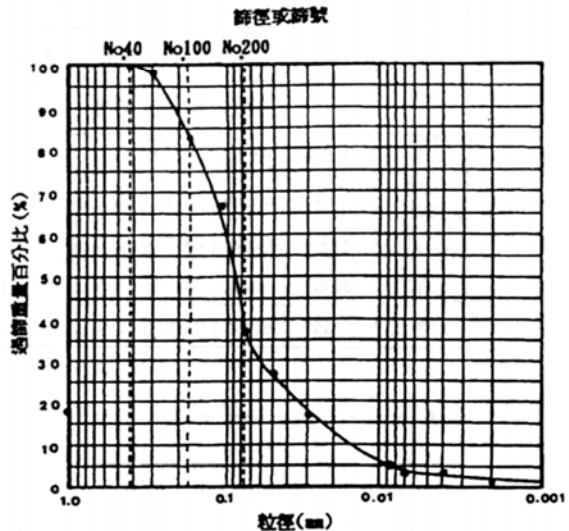


圖5 基礎土壤顆粒分析曲線圖

1. 試驗土壤基本性質

使用之土樣取自地下直接開挖，攜回試驗室進行比重、現地密度、顆粒分析等一般物理性試驗後；再等量混合，作為透水試驗、標準 proctor 夯實試驗、直接剪力試驗、管湧試驗及過濾料試驗的基礎土壤。基礎土壤之一般物理性試驗包括比重、現地密度、及顆粒分析等。結果總結如表三及圖 5 所示。另外其滲透係數平均值為 $5.4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 。

為了解粉質砂土乾密度改變，對其摩擦角之影響，試驗中，改變土樣的乾密度，由標準 Proctor 夯實試驗夯實度 100% 之 1.78g/cm^3 ，逐漸遞減為 1.725 (現地乾密度)、1.65、1.60、1.55、1.50、1.45、1.40 (g/cm^3)，其含水量則控制為 $O.M.C \pm 2\%$ ，並據以進行快剪試驗。以了解乾密度改變，對 C 、 ϕ 值變化的影響。

各土壤乾密度試驗所得之摩擦角，相對於土壤乾密度及夯實度之關係圖，如圖 6 及圖 7 所示。粉質砂土之摩擦角，隨土壤乾密度 (或夯實度) 增加，而呈線性顯著遞增；且對材料乾密度 (或夯實度) 的變化，相當敏感。因此，以粉質砂土為填土材料，對土壤夯實度的品質管制應相當嚴謹；否則，夯實後的土壤剪力強度，可能會超出原設計者所能掌握的範圍。

2. 一般管湧試驗

一般管湧試驗，係以改變土壤乾密度的方式，探

表三 基礎土壤基本物理性質表

取樣位置	比重	顆粒分析 (%)			通過 # 200 篩百分比 (%)	γ_d g/cm ³	d_{85} mm	d_{60} mm	d_{10} mm	C_u	統一土壤分類
		砂土	粉土	粘土							
#2 抽水試驗井	2.654	64.38	32.62	3.0	35.62	1.690	0.149	0.10	0.018	5.6	SM
#3 抽水試驗井	2.641	65.39	32.11	2.5	34.61	1.721	0.170	0.10	0.02	5.0	SM
#4 抽水試驗井	2.649	62.29	34.71	3.0	37.70	1.739	0.149	0.09	0.013	6.9	SM
#5 抽水試驗井	2.659	64.02	33.38	2.6	35.98	1.748	0.150	0.10	0.012	8.3	SM
平均	2.651	64.02	33.21	2.77	35.98	1.725	0.155	0.098	0.016	6.45	SM

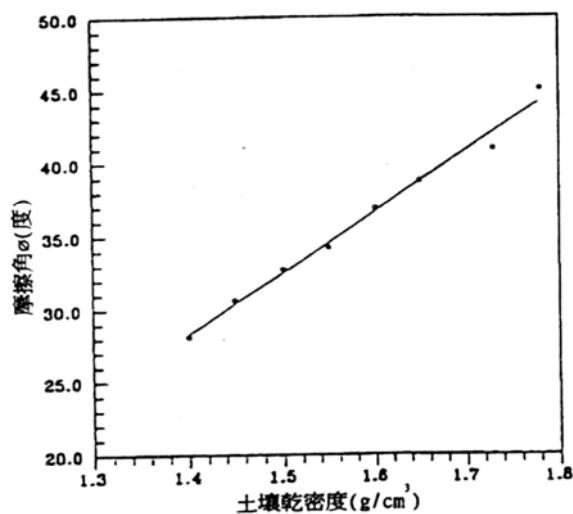


圖 6 摩擦角與土壤乾密度關係圖

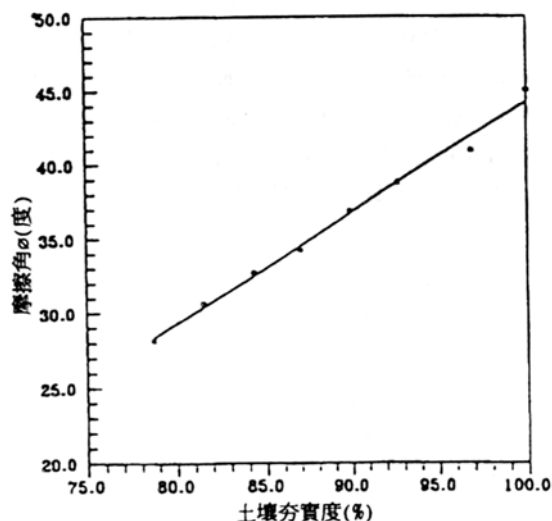


圖 7 摩擦角與土壤夯實度關係圖

討粉質砂土，因夯實或開挖解壓，對管湧潛能的影響。試驗過程中，每隔 30 分鐘量測排出水量及排出土壤顆粒重一次。經整理後，可得各個不同乾密度之排出水流量與時間關係，及個別時間內排出土壤顆粒重量。並據以分析，研判管湧破壞是否發生。

(1) 排出水流量分析

如果，產生滲流之水力梯度小於臨界水力梯度，因無細顆粒流失，則重新排列後的土壤顆粒結構，會漸趨於穩定，使排水呈穩定滲流。反之，若水力梯度大於臨界水力梯度，滲流將克服土壤顆粒間之摩擦阻力，導致細顆粒流失。排水流量，一直呈現不穩定；直到土壤結構破壞，流槽產生，導致排水流量突然劇增。

(2) 排出土壤顆粒分析

當產生滲流之水力梯度小於臨界水力梯度，因無土壤細顆粒沖離現象，所以，排水色澤清晰，排出土壤顆粒重很小。

如果，水力梯度大於臨界水力梯度，導致細顆粒被水流沖離，使排水色澤變濁。土壤細顆粒持續被水流帶走，排水量及排出土壤顆粒重隨時間增加而增加；終致土壤結構破壞，管湧產生，土壤顆粒突然大量流失。

(3) 土壤乾密度對管湧的影響

發生（或不發生）管湧水力梯度與土壤乾密度（夯實度）關係圖（如圖 8）可知，提高土壤乾密度（或夯實度），可顯著地增加土壤剪力強度，並降低發生管湧的潛能（potentiality）。

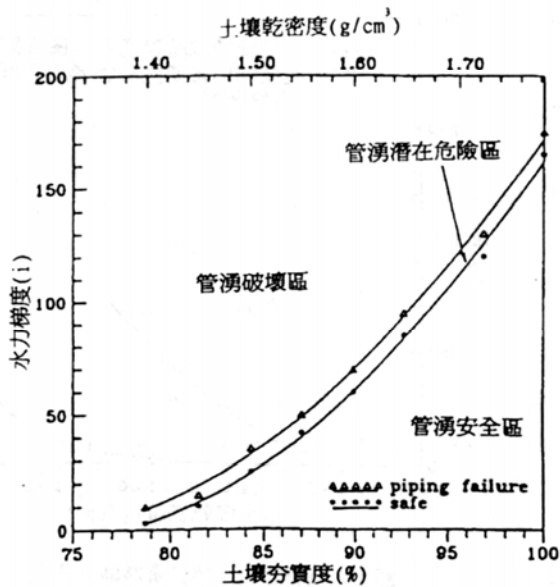


圖8 一般管湧試驗 - 管湧潛能與土壤夯實度及乾密度關係圖

圖8為發生(或不發生)管湧破壞之水力梯度,與材料乾密度之關係圖,可用於自然土壤開挖之安全評估。如果現地條件位於管湧安全區外,則應以抽、排水工法降低壓力水頭,減少管湧發生的潛能。至於發生(或不發生)管湧破壞之水力梯度,與材料夯實度之關係,適用於填土材料之品質管制,即在已知水力梯度的設計條件下,夯實砂土的夯實度必須達到某種要求,始能避免管湧破壞。

3. 底部開口管湧試驗

底部開口管湧試驗主要的目的,在探討粉質砂土之拱作用,如在高水壓力作用下,管湧破壞之影響因素。惟為確立該拱作用之破壞機制,究係滲流水造成之管湧破壞,或因水壓力破壞。先就同樣拱跨徑及材料乾密度之粉質砂土,分別進行底部開口管湧試驗及壓力試驗。並俟確立拱作用係因管湧破壞後,再繼續探討材料乾密度及拱跨徑,與管湧破壞水力梯度間之關係。

底部開口管湧試驗計試驗11組,其中固定孔徑,改變土樣乾密度進行7組;而固定土樣乾密度,改變孔徑進行5組,分別探討乾密度及孔徑,對管湧的影響。本試驗以每小時量測排出水流量,土壤顆粒重一次,整理底部開口管湧試驗成果,其流量與時間關係

及個別時間內排出土壤顆粒重量,並據以研判是否發生管湧破壞。試驗結果分析如後:

(1) 排出土壤顆粒分析

試驗開始,底孔蓋旋開後,造成局部解壓;又因土體承受水壓力作用,因而產生坍孔,造成相當大量的土壤顆粒流失。該土壤顆粒流失量與孔徑及所形成的拱高有關。而後,因坍孔造成拱表面局部解壓,表面造成沖蝕,導致仍有相當數量的土壤顆粒排出,使排出水混濁。

此時,如果土體內產生滲流之水力梯度小於臨界水力梯度,因土體內無細顆粒流出;所以,當表面鬆動的顆粒掉落後,表面沖蝕會趨於平衡,形成良好的拱作用。因此,排出土壤顆重會逐漸減少。最後,排出水色澤轉清。

但是,如果坍孔後,因水壓力造成之水力梯度大於臨界水力梯度,滲流將克服土壤顆粒間摩擦阻力,導致土體內細顆粒流失。因此,加劇表面沖蝕,使排出土壤顆粒,由坍孔後的遞減趨勢,逐漸變為遞增趨勢。逐漸造成流槽,土壤顆粒大量流失,產生管湧破壞。

(2) 排出水流量分析

排出水流量,在試驗開始時,因解壓坍孔,土壤顆粒大量排出,使排出水含有大量土壤顆粒,導致量測到的流量稍大。而後,因表面沖蝕,滲流有效路徑減短,致水力梯度增大;因此,排出水流量有增加的趨勢。此時,如果水壓力造成之水力梯度小於臨界水力梯度,土體內無細顆粒流失,流量漸趨於穩定。

如果,水壓力所造成的滲流大於臨界水力梯度,造成細顆粒流失。因下游無過濾設施,土壤顆粒會持續流出。在內部及表面沖蝕交互作用下,水力梯度會繼續增,導致突然產生管湧破壞,排出水流量激增。

(3) 底部開口管湧試驗的影響因素

① 土壤乾密度

拱作用係藉由降低土壤顆粒與固定土壤間的摩擦力,將外力傳遞到鄰近固定土體或支承。因粉質砂土屬顆粒性材料,由直接剪力試驗結果可知,摩擦角 ϕ 隨材料乾密度增加,而呈線性遞增。因此材料乾密度愈大,除可形成一較堅實的拱外,更可提高土壤剪力

表四 底部開口管湧試驗成果彙整表 ($d_1 = 5.0\text{cm}$, $\gamma_d = 1.4 \sim 1.78 \text{ g/cm}^3$) 及 ($\gamma_d = 1.725 \sim 1.78 \text{ g/cm}^3$, $d_1 = 7.0 \sim 3.2\text{cm}$)

d_1 (cm)	γ_d (g/cm ³)	項目	
		發生管湧破壞之 水力梯度	不發生管湧破壞之 水力梯度
5.0	1.40	$i \geq 1.0$	-
5.0	1.50	$i \geq 1.0$	-
5.0	1.55	$i \geq 3.7$	$i \leq 1.0$
5.0	1.60	$i \geq 6.5$	$i \leq 2.2$
5.0	1.65	$i \geq 18.2$	$i \leq 8.9$
5.0	1.725	$i \geq 32.5$	$i \leq 22.4$
5.0	1.78	$i \geq 52.5$	$i \leq 38.9$
3.2	1.725	$i \geq 38.5$	$i \leq 31.1$
4.5	1.725	$i \geq 34.3$	$i \leq 26.7$
5.0	1.725	$i \geq 32.5$	$i \leq 22.4$
5.8	1.725	$i \geq 24.4$	$i \leq 17.0$
7.0	1.725	$i \geq 17.6$	$i \leq 9.1$

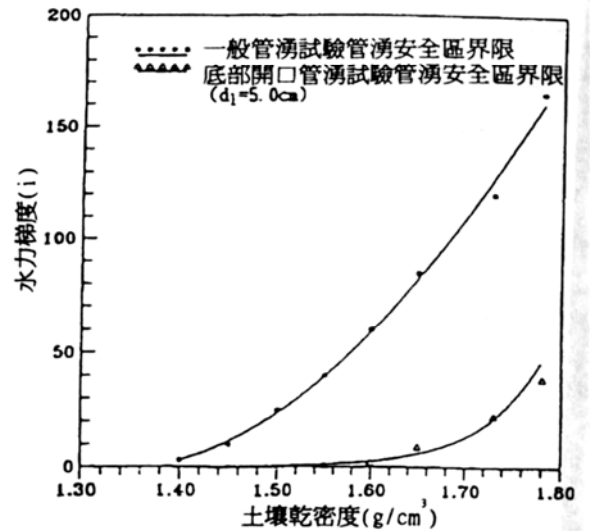


圖 10 底部開口對管湧潛能之影響

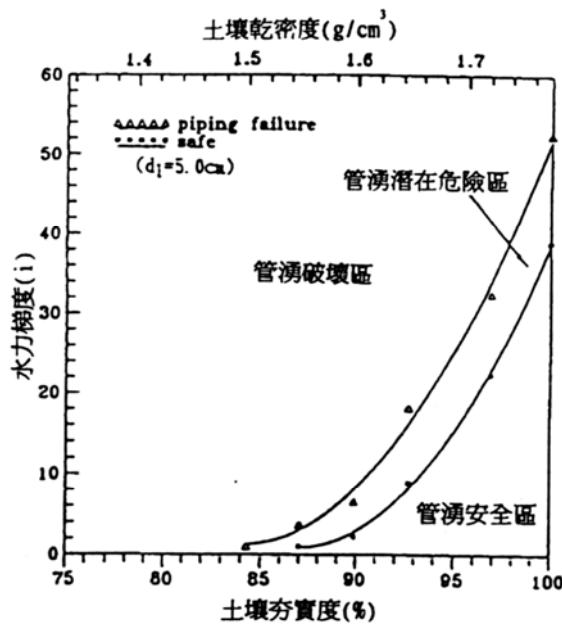


圖 9 底部開口管湧試驗－管湧潛能與土壤夯實度及乾密度關係圖

強度，增加抗沖蝕能力。

由試驗結果，整理繪製「底部開口管湧試驗成果彙整表（如表四），發生（或不發生）管湧之水力梯度與材料乾密度（或夯實度）關係圖（如圖 9～圖 10）。由圖可知，提高土壤的乾密度（或夯實度）可顯著降低管湧發生的潛能。另由前述圖表可知， γ_d ，

$= 1.50\text{g/cm}^3$ 雖然拱作用形成，但因拱組織鬆散，抗沖蝕能力差，故在飽和水作用下，仍產生管湧破壞。至於 $\gamma_d = 1.40\text{g/cm}^3$ 之飽和粉質砂土，因材料過於鬆散，試驗時並無拱作用形成，呈坍塌破壞。

②開孔大小

開孔愈大，孔蓋旋開解壓後，坍孔造成土體內部鬆動的影響範圍愈大，材料乾密度會因而較顯著地降低。另拱的勁度（stiffness），亦因開孔增加而減小，導致拱承受外力更易變形，造成土壤顆粒間的相對位移增加，使土壤乾密度降低，增加管湧潛能。由試驗結果管湧之水力梯度與拱跨徑關係可知，粉質砂土發生管湧之水力梯度，隨拱跨徑增加，而呈線性遞減。飽和粉質砂土無法形成拱作用，呈坍塌破壞。因此，粉質砂土如欲形成拱作用，材料本身必須具備相當程度的緊密性。否則，將因飽和水作用產生管湧破壞；或者，根本無法形成拱作用。

(4) 由上述可知，材料乾密度對拱作用發生管湧潛能的影響，比開孔大小來得更顯著。因此，飽和粉質砂土地下開挖，除應設計適當支撐間距外，對於開挖解壓的影響，更應審慎評估。否則，整個拱作用變化，可能超出原設計所預期的。

(5) 由管湧安全區與材料乾密度關係可知，如粉質砂土局部支撐破壞，只要產生 5 公分小孔，即使有拱作用產生，管湧安全區域，仍會迅速減小。因此，在高地下水位粉質砂土地下開挖或明挖，支撐系

統的緊密性，應予注意，以降低管湧發生的潛能。

4. 過濾料試驗

過濾材料之 D_{15} 粒徑選擇是否適當，可由試驗中每分鐘量測之排水量及排出水色澤，並配合針孔是否擴孔，據以研判過濾料試驗之成敗。最後，再據以推求粉質砂土防治管湧所需之 D_{15b} 。

(1) 過濾料試驗成敗分析

a. 排水量分析

成功的過濾料在試驗一開始時，試體的滲流線由針孔向周圍輻射，稍後，土壤顆粒隨滲流線逐漸填滿過濾料與土樣接觸面間之孔隙，使過濾料滲透係數變小，致排水量有減小的趨勢。因土體無內部沖蝕，且過濾料與土樣接觸面間的孔隙，由土壤顆粒填滿，形成過濾機構，排出水流量趨於穩定，成為穩定滲流。若針孔或土體內部產生顯著的內部沖蝕時，排水量會突然加劇。而後，因部份進入過濾層且貫穿之土樣具較粗顆粒，逐漸累積構成一孔隙過大之過濾層，排水有減小的趨勢，最後趨於定值，則為失敗。

b. 排出水色澤

試驗開始時，會有部分位於過濾料與試驗土樣接觸面之土壤顆粒，被滲流水沖離，造成排出水色澤微濁。隨後，土壤顆粒隨滲流水，填滿過濾料與土樣接觸面之孔隙，建立過濾機構，排出水色澤迅速轉清，並持續維持排出水清澈。若過濾料無法形成有效的過濾機構，造成土壤細顆粒流失；甚至針孔或土體內部產生嚴重內部沖蝕，使排出水突然變濁。則為失敗。

c. 針孔變化分析

成功的過濾料試驗，因能在短時間內建立良好的過濾機構，故土體無內部沖蝕發生。使針孔維持無擴孔；也可能土壤顆粒承受滲流力，重新排列組合，使原針孔坍孔。當過濾料粒徑太大，無法形成有效的過濾機構，造成土壤細顆粒流失，致產生內部沖蝕。使得針孔形成一表面為火山口形擴孔；或除原針孔擴孔外，另形成數孔。則為失敗的過濾料。

過濾料選定試驗共試驗 54 組，其中基礎土壤（# 200 篩以下細顆粒含量 35.98% 之現地土樣）過濾料選定 14 組。試驗結果， $D_{15} \leq 1.3\text{mm}$ 8 組屬成功的過濾料試驗； $D_{15} \geq 1.4\text{mm}$ 6 組屬失敗的過濾料試驗。因此，取 $D_{15b} = 1/2 (1.4\text{mm} + 1.3\text{mm}) = 1.35\text{mm}$ 。

表五 過濾料試驗成果彙整表

# 200 篩以下 細顆粒含量 百分比 (%)	d_{85} (mm)	D_{15b} (mm)	D_{15b}/d_{85}	Sherard (1989) 建議之設計準則
5	0.22	2.10	9.55	$7d_{85} \sim 10d_{85}$
15	0.21	1.74	8.29	$7d_{85} \sim 10d_{85}$
25	0.20	1.45	7.25	-
35.98	0.155	1.35	8.70	-
40	0.149	1.10	7.38	$0.7\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$
50	0.130	0.85	6.50	$0.7\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$

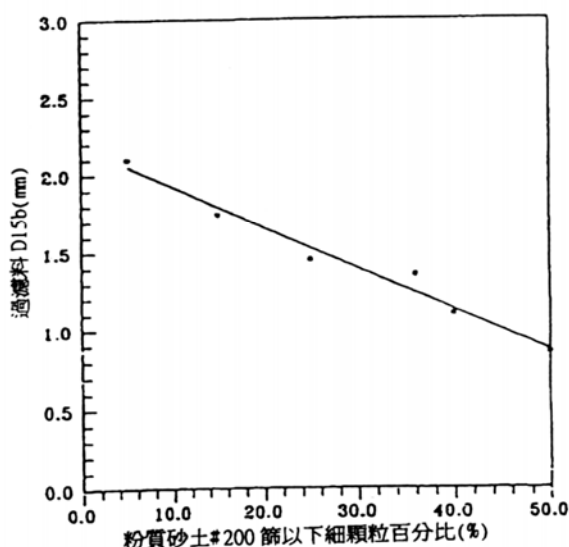


圖 11 過濾料粒徑與粉質砂土 # 200 篩以下細顆粒含量關係圖

至於人為配製 # 200 篩以下細顆粒含量 5%、15%、25%、40%、50% 之土樣計試驗 40 組。試驗後，依前述原則求得各土樣之 D_{15b} ；再就各不同 # 200 篩以下細顆粒含量之粉質砂土，防治管湧所需之 D_{15b} 彙整如表五後；再繪製 D_{15b} 與 # 200 篩以下細顆粒含量百分比關係圖，如圖 11。由該圖可知，粉質砂土之 $D_{15b} = 0.85 \sim 2.10\text{mm}$ ，並隨 # 200 篩以下細顆粒含量增加，呈線性遞減。

粉質砂土的 # 200 篩以下細顆粒含量百分比，大部份在 15~40% 間。因此，無法直接應用 Sherard 等建議之設計準則，判斷防治管湧所需過濾料之 D_{15b} 。鑑於此，本文繪製各不同 # 200 篩以下細顆粒含量粉質砂土，防治管湧所需過濾料之 D_{15b} ，與細顆粒含量百分比關係圖如圖 11，以彌補此一缺憾。該圖可

用以評估現場各不同 # 200 篩以下細顆粒含量粉質砂土，防治管湧所需過濾料之 D_{15b} ，在實務上有其意義。

六、結論與建議

本研究以試驗方法，探討粉質砂土做為填土材料，或地下開挖之管湧特性；並尋求防治管湧所需之適當過濾料設計。該等試驗成果，經分析、討論，獲致以下結論與建議：

粉質砂土的摩擦角，隨土壤乾密度增加，呈線性增加；其發生管湧的潛能，隨材料乾密度（或夯實度）增加，而顯著降低。粉質砂土地下開挖，如欲形成拱作用，材料本身必須具備相當程度的緊密性；否則，將因飽和水作用產生管湧破壞，或根本無拱作用形成。粉質砂土所形成之拱作用，因地下水滲流發生管湧破壞之潛能，除隨拱跨徑增加而遞增外；更因材料乾密度降低，而顯著增加。粉質砂土支撐系統，只要局部破壞，即使產生拱作用，仍將使管湧安全區驟減，顯著地提高發生管湧破壞之潛能。

防治烏山頭地區粉質砂土管湧所需過濾料之 D_{15b} ；介於 0.85mm ~ 2.10mm，並隨粉質砂土 # 200 篩以下細顆粒含量增加，呈線性遞減。按 U. S. Army 等過濾料設計準則 $D_{15}/d_{85} \leq 5$ ，應用於粉質砂土雖較保守；但是，如考慮現場施工，易造成粒料分離，品質較難掌握，則尚屬合理。

因材料的乾密度（或夯實度），為影響粉質砂土管湧潛能的主要因素。因此，粉質砂土做為堤、填土材料時，應注意夯實度的控制，以降低發生管湧的潛能。地下水位以下之粉質砂土地下開挖，應依現場材料乾密度及擬支撐間距，研擬適當的抽水或排水計畫。以降低水頭，避免因地下水滲流，破壞土壤之拱作用。本文係以試驗方法，探討地下水滲流，對粉質砂土拱作用之影響。因此，僅能就試驗成果定性分析，無法做事先預測。故建議往後能以數值分析，探討地下水滲流破壞拱作用之力學模式。俾與試驗成果相互驗證，及提供良好預測模式，使粉質砂土管湧防治對策更臻完美。地工織物雖因人類使用年限不長，耐久性令人存疑。惟近年來臺灣地區天然砂源逐漸枯竭，未來大量使用地工織物作為過濾材料，成為必然的趨勢。因此，地工織物作為各類土壤過濾材料之適

用性，應進一步研究，並建立適當之設計準則，俾應工程實需。

參考文獻

1. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, J. Wiley and Sons, Inc., New York.
2. Bosscher, P. J., and Gray, D. H. (1986), "Soil Arching in Sandy Slopes," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 112, No. 6, pp. 626-645.
3. Kailin, M. (1977), "Hydraulic Piping-theoretical and Experimental Findings," *Can. Geotech.* Vol. 14, pp. 107-124.
4. Parker, G. G. (1964), "Piping, A Geomorphic Agent in Land form Development of Dryland," *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.*, Vol. 65, pp. 103-113.
5. Khilar, K. C., Fogler, H. S., and Gray, D. H. (1985), "Model for Piping-Plugging in Earth Structure," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 111, No. 7, pp. 833-846.
6. Vukovi'c, M. and Pusi'c, M. (1992), *Soil Stability and Deformation Due to Seepage*, Water Resources Publication.
7. Hazen, A. (1911), "Discussion of 'Dam on Sand Foundation' by A. C. Koeing," *Trsaction*, ASCE, Vol. 73, pp. 199-203.
8. Taylor, D. W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, Wiley, New York.
9. Bertram, G. E. (1940), "An Experimental Investigation of Protective Filters," Publication of the graduate School of Engineering, Harvard University, No. 167.
10. U. S. Army, U. S. Navy, and U. S. Air Force (1971), "Dewater and Groundwater Control for Deep Excavation," TM5-8-8-5, NAVFAC p-418, AFM88-5.
11. Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., and Talbot, J. R. (1984), "Filter for Silts and Clays," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 110, No. 6, pp. 701-719.

12. Sherard, J. L., and Dunnigan, L. P. (1989),
"Critical Filters for Impervious Soils," *Journal of
Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.115,
No.7, pp.927-947.
-

86年 1月22日 收稿

86年 1月30日 修正

86年 2月20日 接受