

棄土堆積邊坡之可能破壞機制研究

蘇苗彬¹ 蔡元喆²

關鍵詞：棄土場、破壞機制、細溝實驗。

摘 要

由於國內至今尚未對棄土場之規劃設計及施工管理做明確的規範，在不足的工程設計，任意棄置的結果，往往造成堆積物鬆散凌亂。一旦經由降雨與地下滲流的作用，可能引起細粒料流動，造成內部沖蝕加劇，而導致棄土堆積邊坡之強度降低，其可能是形成誘發山崩、地滑、土石流的主因，也可能造成泥砂來源的大量增加。故本研究主要目的，在於探討棄土堆積邊坡發生不同程度之內部沖蝕情況下，其對邊坡土壤強度所造成之影響，及其破壞之臨界狀況與臨界破壞機制。

本研究選擇臺北市福晉山莊廢土棄置場作為研究區，研究中進行 (1) 細溝試驗：模擬單向度滲流作用下，改變水壓力與夯實度兩者之關係，以建立其泥砂產生之相關性。(2) 直接剪力試驗：主要模擬土壤在現地級配之下，發生不同程度細粒料流失後，其剪力強度變化情形。(3) 砂箱驗證試驗：利用小尺寸的砂箱試驗，觀察、量測不同階段之滲流行為與下游泥砂產生之情況，以探討全程之破壞行為與破壞機制，最後進行邊坡分析以評估其穩定性。

研究過程中，藉由直接剪力試驗，細溝實驗，與砂箱驗證試驗，並綜合試驗結果，進行邊坡穩定分析，證實對於未夯實而處於疏鬆狀態之棄土邊坡，經由地下水滲流之作用造成細顆粒流失，土壤強度降低，進而發生破壞之觀念與機制確實存在與正確。

THE STUDY ON THE FAILURE MECHANISM OF THE DUMP-FILLED SLOPE

Miau-Bin Su

*Associate Professor, Graduate Institute of Civil Engineering,
National Chung Hsing University,
Taichung, Taiwan 40227, R.O.C.*

Yuan-Jer Tsai

*Master, Graduate Institute of Civil Engineering,
National Chung Hsing University,
Taichung, Taiwan 40227, R.O.C.*

Key Words: Dump Site, Failure Mechanism, Slot Test.

ABSTRACT

The major purpose of this research is to study the influence of dump-filled

¹ 國立中興大學土木工程研究所副教授

² 國立中興大學土木工程研究所碩士

slopes and its destruction of the critical state and critical mechanisms failure under different degrees of internal erosion for the dump-filled slopes. This research chooses the dumpsite in Fu Yin village of Taipei as the experimental site. The research proceeds Slot Test, Direct Shear Test and Sand Box Test. Finally the slope stability analysis is performed to access the stability.

During the process of this research, the result of tests are used to estimate the stability of slope and confirm that loose dump-filled slopes under the groundwater seepage will decrease the strength of soil and bring about failure. This failure mechanism is present and positive.

一、前言

由於國內至今尚未對棄土場之規劃設計及施工管理做明確的規定，在缺乏適當的工程設計，任意棄置的結果往往造成堆積物鬆散、凌亂。一旦經降雨與地下水滲流作用，經常會引起細粒料流動，造成內部沖蝕加劇，進而導致棄土邊坡強度降低，其可能形成誘發山崩、地滑、土石流的因素，也可能造成泥砂來源的大量增加。

本研究針對未夯實，而處於疏鬆狀態之棄土堆積邊坡，提出經由地下水滲流作用，造成細粒料流失，土壤強度降低，進而導致棄土邊坡破壞之觀念與機制，希望對此觀念與機制，做進一步的探討與研究，以期能掌握棄土堆積邊坡之可能的破壞機制。

內部沖蝕所造成之管湧 (piping) 是一種滲流水漸漸沖蝕，且在土壤中，留下大孔隙的現象，這些孔隙會繼續沖蝕，並在結構物之下，向後方發展，如果管湧沒有迅速地防止，則可能產生破壞，管湧破壞的臨界位置常位於坡趾的轉角上。含有砂土和沈泥的淤填物，例如廢棄礦物或礦渣壩，此類結構物只在非常少的工程設計和營建監督之下建造成的，可能由於逐漸沖蝕導致管湧破壞的情況相當常見。Kalin (1977) 認為管湧是一種土壤結構的破壞現象，乃是由地下水所引起的，這種現象亦可能由於人為的因素產生。沖洗出來而流失，裂縫變大，最後終於破壞。據 Khilar (1985) 之研究，管湧問題經常引起土石壩沖蝕破壞，它包含了兩個連續的步驟：

- (1) 土壤顆粒經由滲流力的作用，而彼此分散、脫離。
- (2) 因沖蝕作用，造成土壤顆粒的流失，而土壤的分散與脫離，並不一定會引起管湧，亦可能發生阻塞。一旦阻塞發生，流動停止，而內部裂縫可被修補，稱為「本身癒合」(self

healing) 功能。土壤孔隙大小是決定是否會發生阻塞的最大因素，若土壤顆粒等於或大於孔隙大小，則阻塞不可避免地會發生。相反的，若土壤顆粒遠小於孔隙大小 ($<1/100$)，則可能發生顆粒被洗出，造成管湧的破壞。

由以上可知，對於確定土壤的穩定性，尤其是堆積鬆散之棄土邊坡，了解土壤內部沖蝕特性是非常重要的。內部沖蝕能改變地下水位，滲出水量，並在土地表面產生沉陷，而發生沉洞 (sink hole)，且常常導致土壩的完全破壞。

而據 Tsutomu Tanaka (1991) 之研究，歸納目前對於單向度滲流，造成土壤破壞的問題，主要探求其臨界梯度 (critical hydraulic gradient method)。Khilar (1985) 認為在土體滲流情況之下，若顆粒太小，則會流出孔隙之外，形成管湧，若顆粒太大，則會發生阻塞，他並確定土壤孔隙率與水力梯度為影響土壤發生管湧的變數。Leonards (1991) 設計了管湧試驗 (piping test) 與針孔試驗 (pinhole test) 二組實驗，來評估火力發電廠所產生的鍋爐礦渣 (boiler slag) 做為過濾料的適用性，並且了解其管湧與內部沖蝕的特性。實驗中並發現土壤的塑性指數高低與內部沖蝕的抵抗力並無直接相關性。Aitchison (1965) 對於土石壩的穩定性做出建議，認為若要防止管湧破壞，可利用夯實來控制其滲透性，並且在滲流湧出點設置過濾材料。

而在邊坡中堆積棄土，即是一般所謂之填土工程，乾密度的大小是評估其穩定性的重要因子之一，而水壓力產生之滲流力，將是導致土體發生管湧的主要因子。而由 Leonards 設計之管湧試驗與針孔試驗，證實了以單向度滲流，模擬土體發生管湧之觀點是可行的。而其中 Leonards 即是利用控制夯實度與水壓力的大小，來探討土體發生管湧與內部沖蝕的特性。

而據 Tsutomu Tanaka、Khilar、Aitchison 等人，亦都認為乾密度與水壓力，皆是影響土體發生管湧之變數。

二、研究方法與進行流程

1. 研究方法

本研究選擇臺北市福音山莊棄土場作為研究區，為瞭解棄土邊坡在發生不同程度之內部沖蝕情況，對邊坡土壤強度所造成之影響與其主要破壞臨界狀況與可能的破壞機制，設計了以下之研究方法與實驗。為達研究目的，進行之研究方法與內容概述如下：

(1) 材料特性試驗

赴棄土場調查現況，了解實際問題，並於現地進行地形測量，現地密度試驗，明坑採樣，且攜回實驗室進行一般物理試驗，藉以了解棄土之基本性質。

(2) 細溝實驗 (slot test)

以細溝實驗，在土體存有初始裂縫時，模擬單向度滲流作用下，改變水壓力與夯實度兩者的關係，以建立其泥沙產生的相關性，進而推估棄土場安定堆積所要求之乾密度的大小。

(3) 直接剪力試驗

由於棄土來源各異，而結構鬆散，凌亂，大小不一，取樣十分困難，為增加實驗準確性，採用 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 之大型剪力盒進行直剪試驗。

主要模擬土壤在現地級配之下，發生不同程度細粒料流失後，其剪力強度變化情形，以作為棄土邊坡穩定分析與破壞機制探討時之參考依據。

(4) 砂箱驗證實驗

了解邊坡內部之滲流行為乃是邊坡穩定分析所必要之依據，利用小尺寸的砂箱驗證實驗，觀察量測不同階段之滲流行為與下游泥沙產生之情況，以驗證本研究提出之土壤因內部沖蝕導致強度降低進而發生破壞之全行程行為與破壞機制。

(5) 現場驗證穩定分析

依據現場之地形資料，配合實驗室由細溝實驗，

直剪試驗，砂箱驗證等所得之沖蝕特性，剪力強度，泥沙產生量與破壞機制等資料，並綜合所有研究所得，確定棄土邊坡之破壞型式與機制。

2. 進行流程

本文最主要的觀念即是針對內部沖蝕的作用，提出對棄土邊坡可能引發的破壞型式與破壞機制，對此從事驗證與研究。而依此觀念將整體研究方法，包括準備，擬定研究的機制，設計實驗，預定的目的，及最後的檢討與驗證，等各階段之前後次序與相關性，以流程圖表示，如圖 1 所示。

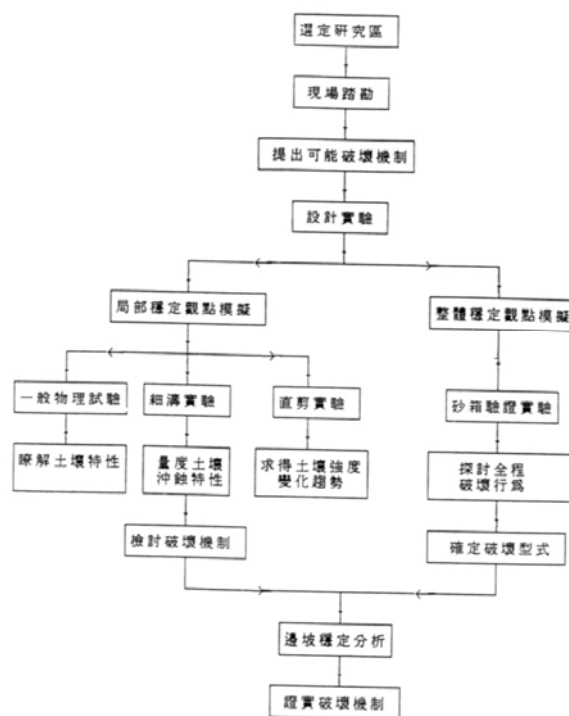


圖 1 本文研究流程。

三、試驗方法與結果

為瞭解福音山莊棄土場，研究區土壤之基本特性，攜回現場所挖掘之明坑土料帶回進行以下數類試驗。其中一般物理試驗包括測定廢棄土之含水量、比重、阿太堡限度、顆粒分析與修正夯實試驗，以瞭解土壤的基本特性。而以直接剪力試驗模擬土壤在現地級配下，發生不同程度細粒料流失後，其剪力強度變化情形。並利用細溝實驗，模擬土壤在現地級配之下，改變水壓力與夯實度兩者的關係，以建立泥沙產生的相關性，最後藉砂箱驗證實驗，探討整個模型因內部

沖蝕導致強度降低，進而發生破壞之全程行為與破壞機制。而一般物理試驗之結果列於表一與表二。

表一 福晉山莊棄土之一般物理試驗結果

坑 號	含水量 (%)	濕密度 (g/cm ³)	乾密度 (g/cm ³)	室內 夯 實 最大乾密度 (g/cm ³)	比 重
1	3.45	2.03	1.96	2.15	2.70
2	4.94	1.97	1.88	—	2.60
3	6.10	1.88	1.77	1.92	2.60
4	3.61	2.01	1.94	—	2.58
5	7.78	1.80	1.67	2.00	2.61
6	8.88	1.77	1.63	—	2.71
平 均	5.79	1.91	1.80	2.00	2.63

表二 福晉山莊棄土之阿太堡限度試驗結果

坑 號	阿 太 堡 限 度			土 壤 分 類	
	液 限	塑 限	塑性指數	USCS	AASHTO
1	25	15	10	SC	A-4(1)
	24	18	6	SM-SC	A-4(0)
	22	16	6	SM-SC	A-4(0)
	24	16	8	SM-SC	A-4(0)
	26	14	12	SC	A-6(1)
	26	16	10	SC	A-4(0)
	25	18	7	SM-SC	A-4(0)
	24	17	7	SM-SC	A-4(0)
3	29	NP	—	SM	A-4(2)
	26	NP	—	SM	A-4(1)
	27	NP	—	SM	A-4(1)
	27	16	11	SC	A-6(0)
	27	15	12	SC	A-6(1)
	25	17	8	SC	A-4(0)
	23	19	4	SM-SC	A-4(0)
	24	18	6	SM-SC	A-4(0)
5	26	NP	—	SM	A-4(2)
	22	NP	—	SM	A-4(2)
	21	NP	—	SM	A-4(2)
	22	NP	—	SM	A-4(2)
	17	NP	—	SM	A-4(1)
	23	NP	—	SM	A-4(2)
	21	NP	—	SM	A-4(2)
	23	NP	—	SM	A-4(2)
	23	NP	—	SM	A-4(2)

1. 廢棄土直接剪力試驗

由於研究區內之棄土，採用投下堆積法，所謂投下堆積法即是從窪地上方將棄土由上任意投下，所以堆積物之剪力強度變小，而且其堆積面無法進行整理，故堆積物之安定度相當小，任意向下傾卸其廢土，造成下邊坡土壤結構十分凌亂、鬆散。一旦經由降雨必然發生地表逕流進而產生沖蝕。因此利用直接剪力試驗，模擬土壤在現地級配之下發生不同程度細粒料流失後，其剪力強度變化情形。試驗方法以研究區所得之粒徑分布曲線與乾密度為準，將 #4 篩以上粗顆粒比例保持固定，依序將 #4 篩以下之細顆粒依比例減少 5、10、15、20、30、40、50%，控制與現地相同的含水量 ($w=5.79\%$) 進行飽和壓密不排水快剪，藉以探討 c, ϕ 值在 #4 篩以下顆粒經由內部沖蝕流失後，可能之變化趨勢。各種級配不同之試體直剪結果，其凝聚力，內摩擦角，垂直變位總量之綜合分析圖如圖 2 所示。

2. 廢棄土細溝試驗

模擬在現地級配之下，若土體中間已存有初始裂縫時，探求改變不同夯實程度與不同水壓力二者之關係，藉以了解，(1) 夯實度達到某一程度可以承受水壓力之大小，並探討在穩定情況時，因本身結構密度，配合顆粒過濾效果達到穩定滲流，而不發生內部沖蝕的現象。(2) 若超過其臨界水壓力，土壤因流失細粒料產生劇烈的內部沖蝕，而由內部淘空的結果，致使本身強度降低，結構潰散的現象。

細溝試驗儀器為參考 Sherard (1984) 之規範來設計，其儀器介紹如下：

(1) 立臥兩用壓克力容器

為便於過濾層與土壤試體之夯製與觀察，因而選擇兩截式之高強度壓克力容器。在上下壓克力圓筒間，設置四支具有螺紋之鋁棒連結腳架，並以螺帽固定圓筒，板上分別有二孔用以進水、排水及排氣。

(2) 不鏽鋼水箱

不鏽鋼水箱為提供細溝試驗之供水容器，供水容量可達 100 公升。不鏽鋼水箱與儲氣槽之塑膠管上設置一個調壓閥及氣壓錶，藉以做壓力調整與輸送。

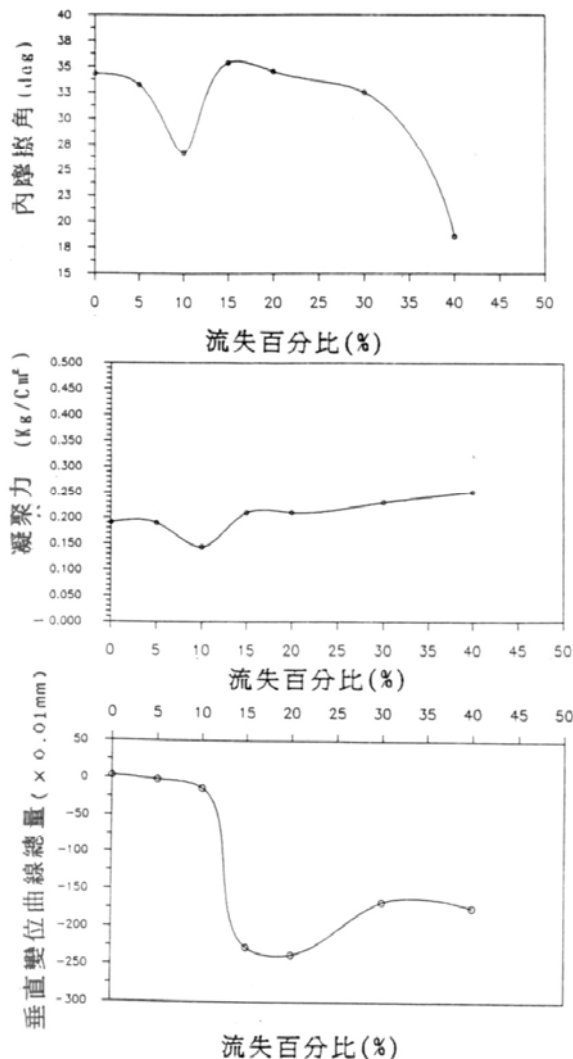


圖 2 直剪試驗結果之凝聚力、內摩擦角與垂直變位曲線總量之綜合分析圖。

而在試體製作方面由研究區得之現地級配為準，以現地密度 (1.8 g/cm^3) 逐次降低為 1.75 、 1.7 、 1.65 、 1.6 、 1.55 、 1.5 、 1.45 g/cm^3 分別計算各篩號所佔重量，控制含水量為現地含水量。試體製作依序為：

- (1) 首先放入 #4 篩以上之粗顆粒於壓克力圓筒下層，加水飽和後以夯鎚夯實，再以一長條金屬片寬 1.5 cm ，厚 0.5 cm 放入礫石中心。
- (2) 然後將 #4 篩以下之細顆粒分 7 層夯入容器，最後小心抽出長條金屬片形成初始裂縫，最後放上鐵絲網，蓋上頂板。試體夯實採用定體積方式，不計夯實能量，將 #4 篩以下的土壤分 7 層夯實至壓克力容器內，各層間以長藥刀割割，以利上下層黏結。

試體夯製完成後，將壓克力圓筒垂直放置，水流突然打開，水壓力控制固定，大小視各別試驗不同而定，範圍為 2 至 0.25 kg/cm^2 不等，在試驗期間，控制施加之氣壓。在開始排水時，每隔 10 分鐘，測量 1 分鐘流出的水量，並加以烘乾，分別計算排出之水量，與排出之顆粒重量。實驗期間持續觀察透明壓克力管壁。

- (1) 若 #4 篩以下之上層土壤有明顯裂縫，剝落，且排水持續保持混濁，即代表此種乾密度之下，無法承受目前之水壓力，而造成嚴重內部沖蝕，即判定其為破壞。通常裂縫發生於開始排水之後之 2 小時以內，並且持續記錄至 4 小時，在 4 小時之後，排出之水量全部在 10 ml/min 以下，甚至完全阻塞。
- (2) 若 #4 篩以下之上層土壤，在試驗期間無剝落現象，且排水量最後保持穩定清晰，在 4 小時後水量保持在 10 ml/min 以下，即判定如此之水量無法再使內部發生嚴重沖蝕，由於土壤結構與下層粗顆粒過濾效果，可抵抗如此高之水壓力，並且此種乾密度與水壓力配合之下試體屬於穩定。
- (3) 試驗結束後，打開頂蓋，將其中試體小心取出，烘乾，秤重，計算試驗期間土壤流失總重。

進行各種乾密度與水壓力配合之試驗，判定其穩定與破壞，並記錄結果；並將乾密度對水壓力關係圖分別就穩定與破壞二種情況之各點，繪至圖 3，分別代表穩定與破壞包絡線。

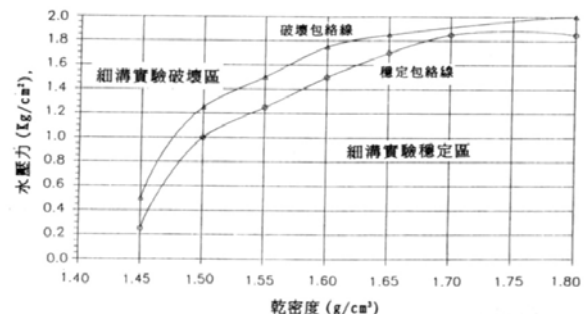


圖 3 乾密度、水壓力穩定與破壞包絡線。

3. 砂箱驗證試驗

本試驗主要藉縮小模型試驗對棄土邊坡內部滲流

行為作探討，並觀察量測其各階段不同之滲流行為，內部與坡面細顆粒流失之現象與下游泥砂產生之情況，最終目的在於探討在整個模型因內部沖蝕而導致強度降低，進而發生破壞與泥砂流失之全程行為與破壞機制。砂箱以不鏽鋼板和強化玻璃製造，尺寸為長 200 cm×高 100 cm×寬 100 cm。一側為 20 cm 寬之水箱，設有排水蜂巢板，以利形成均勻流場。一側為排水漏斗，以盛接下游輸出之水量與泥砂。模型高度為 40 公分，坡度分別為 35° 及 40°，由計算堆積總體積，在實際堆積成型後，得到室內模型土樣之最小乾密度為 1.6 g/cm³，此為實驗控制之乾密度。水箱開始蓄水達至水位 16 cm 穩定後，開始調整進水流量。在進水箱中之水位不再持續上升時，即視為已達平衡之穩定滲流狀態，其間每隔 30 分鐘收集下游所排出之顆粒，烘乾秤重。每隔 2~4 小時後，再加大入水流量，重覆上述步驟。俟邊坡發生破壞後，即停止試驗。在整個實驗過程中，因調大入水量後，皆會導致排出之泥砂量增加，形成一個高峰，但隨後之泥砂量便有逐漸減少之趨勢。可知其內部土壤在一個新水位，因較高的滲流力造成初期排出之泥砂量較大，俟內部水流於內部漸次形成新的流路之後，流出之泥砂便趨減少而穩定，排出之水質亦漸清晰。實驗過程中觀察，邊坡表面原被細顆粒所覆蓋，逐次受內部沖蝕與表面沖蝕而排出，細顆粒流失的結果造成粗顆粒裸露，土壤顆粒間膠結強度明顯降低。而且沖蝕的程度隨著時間而增大，並在邊坡中形成內部流路與坡面上之細溝，更加劇沖蝕力。第一組試驗於入水量 8,106 g/min，水位 28 cm 時，邊坡發生破壞，其排出顆粒重量達到最大，表示若邊坡發生破壞時，下游會產生嚴重之泥砂問題，河道亦可能發生淤積。第二組試驗因坡度較陡 (40°)，本身原處於較不安定的狀態，故於入水量為 3,696 g/min，水位 22 cm 時，即發生破壞情況，且發生破壞的時間，遠小於第一組之試體。

四、分析與討論

在研究中以直接剪力實驗模擬土壤在現地密度，現地級配之下，發生不同程度之細粒料流失後，其剪力強度變化情形，並探討可能之破壞機制，以作為邊坡穩定分析與破壞機制探討時之主要參考依據。而以細溝實驗，在土體存有初始裂縫時，模擬單向度滲流作用下，改變水壓力與夯實兩度者的關係，以建立其

泥砂產生的相關性，並根據實驗結果進行分析，以推估棄土場安定堆積所要求之乾密度的大小。並以整體穩定性觀點，以小尺寸的砂箱驗證實驗，觀察量測不同階段之滲流行為與下游泥砂產生之情況，並探討在整個模型，因內部沖蝕導致強度降低進而發生破壞之全程行為與破壞機制。最後配合實驗室由細溝實驗，直剪試驗，砂箱驗證等所得之沖蝕特性，剪力強度，泥砂產生量與破壞機制等資料進行穩定性分析，並綜合所有研究所得，確定棄土邊坡因內部沖蝕，導致之破壞型式與機制。以下就直接剪力實驗，細溝實驗，砂箱驗證實驗之結果加以分析與討論。

1. 直剪試驗結果分析與討論

綜合直剪結果如下：

- (1) 在試體 #4 篩以下流失至 10% 時，凝聚力與內摩擦角雙雙達到一個最低的組合。此時，土壤結構強度達到一個最低的狀態，代表若現地土壤經由內部沖蝕到達 #4 篩以下流失 10% 時，其強度最低，為第一個破壞臨界狀況。
- (2) 若土體未破壞，而持續流失至 10~15% 時，則由於整體結構重新組合，反而由粗顆粒表現出較高的摩擦力，此時土體結構強度再度增強。
- (3) 又土體持續流失至 15~30% 之間，土壤強度又再度下降，此時凝聚力表現有輕微上升趨勢，但其內摩擦角卻急遽下降，強度快速減少，有可能發生土石流的危險。
- (4) 假如土體流失至 30~40% 之間，則由其內摩擦角可看出土體正處於不穩定狀態，強度急速減少，隨時都有發生破壞的可能，而且自然界中，無法存在此種級配之土壤而流失 #4 篩以下超過 40% 之土體。

土體因材料流失，或含水量增加土體軟化等，皆有可能使得本身強度降低，如此破壞包絡線可能因此改變。圖 4 包絡線 1 為材料初始強度特性，此時在此種應力態並不會發生破壞，但若土體本身強度下降時，在相同之應力狀態之下，即可能發生破壞（包絡線 2）。

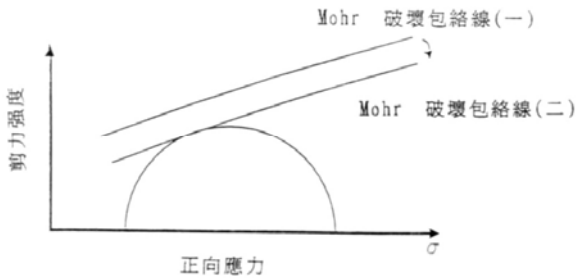


圖 4 土壤強度降低，包絡線下降示意圖。

2. 細溝實驗結果分析

經由量測不同乾密度與不同水壓力互相配合之下，排出水量與排出土量，得到個別時間排水量與個別時間排出顆粒重量之關係圖。現就判定穩定與破壞之兩種狀況，分別討論如下：

(1) 穩定方面

- (a) 在實際過程中，判定其結果為穩定的標準即為排出的水量穩定，而且清晰，並且由壓克力表面觀察土體，並無明顯裂縫與剝落之現象，觀察試驗結果，雖然初始時間之排水量皆大，而且混濁，但幾乎所有的試體在 2 小時以後，水量皆持續穩定清晰並無阻塞現象，水量維持於 10 ml/min 以下，代表此種結構之土壤可以抵抗目前之水壓力，並且下層之粗顆粒礫石，發揮了過濾之效果。
- (b) 試驗結束之後，打開頂蓋觀察初始裂縫之變化，發現大部份皆由泥砂所填充且密合，代表在水流沖擊之下，裂縫壁四周土體軟化並補足此裂縫使其不再擴大。

(2) 破壞方面

- (a) 在實際過程中，從壓克力表面可明顯看出土體表面已有剝落現象，代表其中初始裂縫不僅無法封閉，甚至有擴大的現象。此時觀察排出水量仍然持續混濁，代表土壤結構在目前水壓力下，無法承受已遭破壞，而且粗顆粒並無法發揮過濾的效果。假使因流失土量過大，且阻塞了顆粒間的孔隙，造成了流路阻塞，以致上層滲流無法流出，造成內部持續剝落，甚至形成中空結構時，因而發生上部之土壤過重而崩塌，整個試體發生完全破壞現象。

- (b) 試驗結束，打開頂蓋觀察初始裂縫變化，不是十分明顯擴大，就是因為裂縫明顯淘究以致造成上部結構崩毀落下，導致頂蓋與土體最上層有一段距離明顯蓄水。

而由圖 3 乾密度與水壓力關係圖，得到穩定與破壞之兩條包絡線，由此可知若位於穩定包絡線之下情況皆屬穩定，而位於破壞包絡線之上，皆屬破壞。即土壤在固定乾密度之下，若承受超過破壞包絡線之水壓力，則土體有可能因上層土壤細粒料流失過多而產生危險。

在經細溝試驗後，表現出穩定與破壞二者不同結果。在本試驗範圍內，提出乾密度所能承受最大水壓力之維持穩定關係式。

條件：

$$1.45 \leq R_d \leq 1.8$$

$$0.25 \leq I < 2.0$$

式中

R_d ：乾密度，(g/cm³)

I ：水壓力，(kg/cm²)

穩定界限之經驗關係式為：

$$I = 0.25 + 1.75 \{1 - \exp [(-11.5)(R_d - 1.45)]\} \quad (1)$$

可整理得：

$$[\ln Y] = 17.236 + (-11.5)[X] \quad (2)$$

式中

$$Y = 2 - I$$

$$X = R_d$$

3. 砂箱驗證實驗之穩定性分析

由砂箱實驗所得之破壞時破壞面與地下水位，綜合地形剖面與土壤參數，選擇以圓弧形切片法進行穩定分析，計算流程如下：

- (1) 由實驗結果，所得之二組破壞面如圖 5 及圖 6 所示，已知飽和單位土重為 2.068 t/m³，邊坡角度分別為 35 及 40 度，破壞時之地下水位為 28 與 22 公分，將其破壞圓弧進行切片，分別計算各切片之面積與土重。

破壞時水位 28 cm

R : 20.8 cm

α : 103°

θ : 35°

γ_{sat} : 2.068(t/m³)

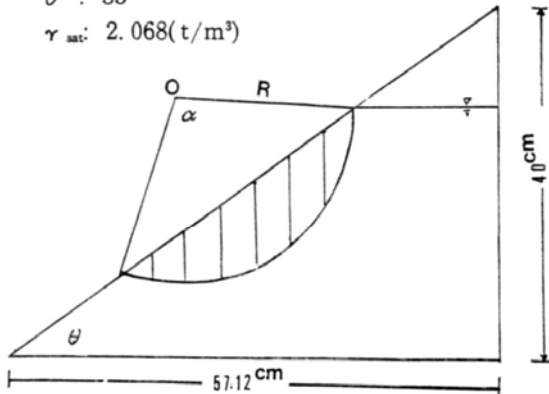


圖 5 第一組砂箱驗證之穩定性計算切片圖。

破壞時水位 22 cm

R : 16.0 cm

α : 143°

θ : 40°

γ_{sat} : 2.068(t/m³)

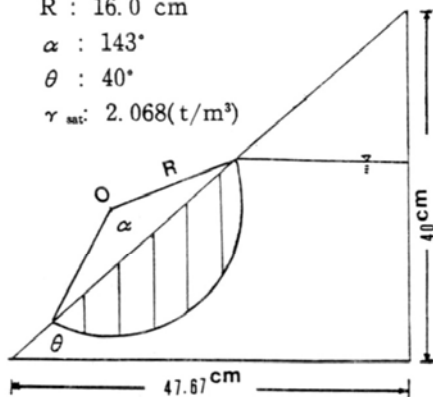


圖 6 第二組砂箱驗證之穩定性計算切片圖。

- (2) 假設滲流方向為水平，破壞時之水力梯度 i 為 0.611 與 0.642。則滲流力 (seepage force) 為 $F_{s,f}$ ：

$$F_{s,f} = \gamma_w \Sigma(i)(A)$$

其中

γ_w ：水之單位重，(t/m³)

i ：破壞時之水力梯度

A ：切片面積，(m²)

求得以上之資料計算安全係數 $F.S.$ ：

$$F.S. = \frac{\Sigma C \Delta l + \Sigma [w \cos \theta - F_{s,f}(\sin \theta)] \tan \phi}{\Sigma [w \sin \theta + F_{s,f}(\cos \theta)]}$$

式中

C ：凝聚力，(t/m²)

ϕ ：內摩擦角

w ：各切片之土重，(ton)

Δl ：破壞圓弧之長度，(m)

代入以上資料，可得：

第一組安全係數：

$$F.S. = \frac{(0.374)C + [130.16] \tan \phi \times (10^{-4})}{(230.708) \times (10^{-4})}$$

第二組安全係數：

$$F.S. = \frac{C(0.399) + [166.38] \tan \phi \times (10^{-4})}{(261.63) \times (10^{-4})}$$

而在理論上， C 、 ϕ 借可用土壤力學試驗求得，但實際上，因為實地土壤多為非均質性，數個試驗結果並不足以作為整個計算地區之代表，而且不容易取得不擾動樣品等等因素，故本文採用逆算法做為穩定分析之基礎。所謂逆算法，就是依邊坡發生崩塌之後在平衡狀態時，其安全係數為 1.0 之觀念，可逆算出 C 值與 $\tan \phi$ 之值，而求得之 C 與 $\tan \phi$ 值分別作為 Y 軸與 X 軸之截距而成為 $C - \tan \phi$ 之關係圖，根據經驗，可在圖上定出適當之 C 值，即可由此 C 值導出 $\tan \phi$ 值或 ϕ 值，而此 C 與 $\tan \phi$ 值，即為該滑動面之土質強度平均值。

故令上兩式為 1，分別逆算其 C 與 $\tan \phi$ 值，可得兩條直線關係式，再解其交點，得：

$$C = 0.042 \text{ t/m}^2$$

$$\phi = 29.4^\circ$$

其結果如圖 7 所示，而此交點之 C 、 ϕ 值正可代表棄土邊坡發生破壞時之臨界土壤強度參數。

五、結 論

本研究主要針對未夯實，而處於疏鬆狀態之棄土堆積邊坡，提出經由地下水滲流作用，造成細粒料流失，土壤強度降低，進而導致棄土邊坡破壞之觀念與機制，而對此觀念與機制，做進一步的探討與破究。在研究中以臺北市福晉山莊棄土場為現場，進行棄土堆積邊坡之可能破壞機制研究，並對提出之機制加以驗證。其結論如下：

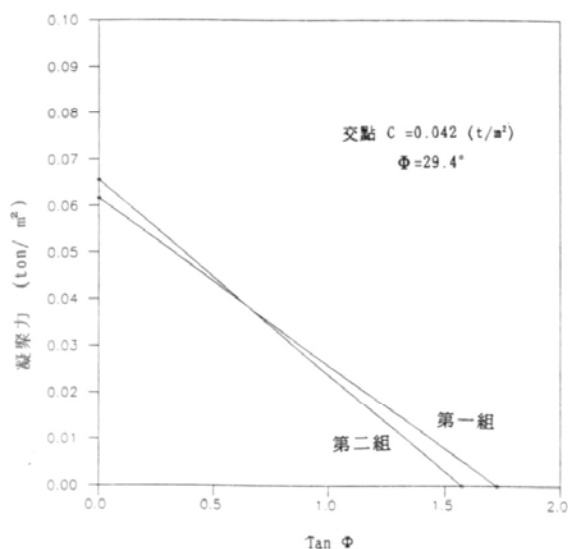


圖 7 逆算法之 C 對 $\tan \phi$ 之關係圖。

- (1) 研究過程中，藉由直接剪力試驗，細溝實驗，與砂箱驗證試驗，並綜合試驗結果，進行邊坡穩定分析，證實對於未夯實而處於疏鬆狀態之棄土邊坡，經由地下水滲流之作用造成細顆粒流失，土壤強度降低，進而發生破壞之觀念與機制確實存在與正確。
- (2) 以直剪試驗模擬在現地級配之下，發生不同程度之細顆粒流失後，其 c 、 ϕ 值變化情形，結果顯示在 #4 篩以下流失 10% 時，其 c 、 ϕ 值皆達到一個最低的組合，此時土壤強度最低。根據 Mohr-Coulomb 破壞準則，此種破壞機制乃是經由土壤本身強度的降低，導致破壞包絡線下降，並受滲流力作用，其有效應力改變而產生破壞。
- (3) 細溝實驗模擬單向度滲流作用下，改變乾密度與水壓力兩者的關係，以建立泥砂產生的相關性，由實驗結果得到乾密度對水壓力之穩定與破壞之兩條包絡線。可提供設計安全棄土場時，推估安定堆積所要求之乾密度大小。
- (4) 經由砂箱試驗，藉全程觀察其破壞過程與現象，使得由於地下水位升高，滲流力增加，導致內部淘空，而使邊坡發生破壞的機制得以驗證，並且破壞後產生大量之泥砂，可知棄土邊坡破壞，實為產生大量泥砂的來源。

- (5) 由穩定分析，藉逆算法求得棄土區破壞之平均臨界 C 、 ϕ 值，而其值與直剪試驗所得之結果比較，有較低的趨勢，亦即當邊坡發生管湧破壞時，其強度不僅要考慮因細顆粒流失所造成 C 、 ϕ 值之降低，同時亦應考慮嚴重管湧時，土壤發生液化對土壤強度降低所造成之影響。
- (6) 對於未經妥善夯實之邊坡，其發生管湧破壞之潛能相當大，並且將是下游泥砂的主要來源。當面對棄土場設計問題，應藉由直剪所得之 C 、 ϕ 值變化趨勢，配合細溝實驗所檢定之乾密度大小，做合理評估計算的依據。最後以其臨界之土壤參數做整體之邊坡穩定性分析，如此便可掌握整體棄土邊坡因內部沖蝕導致之破壞機制，以及防止棄土邊坡破壞的發生。

參考文獻

1. 工業技術研究院能源與資源研究所 (1990)，「崩塌地調查」，規劃與設計手冊。
2. 臺灣省礦物局 (1989)，「瓷土，火粘土捨石場水土保持技術規範」。
3. 洪如江 (1984)，「工程地質在自然邊坡之作用」，地工雜誌，第 7 期，第 35~42 頁。
4. 蔡光榮、曾仁宏、林金柄 (1985)，「中橫公路土石堆之穩定分析研究(一)」，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 73-45 號。
5. Aitchison, G.D. and C.C. Woo (1965), "Some Interactions of Compaction, Permeability, and Post-Construction. Deformation Affecting the Probability of Piping Failure in Some Earthe Dams", 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, Vol. 2, p. 442.
6. Holtz, R.D. and W.D. Kovacs (1981), "An Introduction to Geotechnical Engineering", Practice Hall., Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
7. Istomina, V.S. (in Russian) (1957), "Soil Stability to Seepage", Moscow (Indirectly Cited).

8. Kalin, M. (1977), "Hydraulic Piping Theoretical and Experimental Findings", *Can. Geotech. J.*, Vol. 14, No. 1, pp. 107~124.
9. Khilar, K.C., H.S. Fogler, and D.H. Gray (1985), "Model for Piping-Plugging in Earthen Structures", *J. Geotech. Eng.*, Vol. 111, No. 7, pp. 833~847.
10. Leonards, G.A., A.B. Huang, and Ramos Jose (1991), "Piping and Erosion Test at Conner Run Dam", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 108~117.
11. Sheard, J.L., R.S. Decker, and N.L. Ryker (1972), "Piping in Earth Dams of Dispersive Clay", Proceedings, ASCE Specialty Conference on the Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Purdue University, June 1972, Vol. 1, Part 1.
12. Tsutomu, Tanaka and Eiji Toyokuni (1911), "Seepage Failure Experiments on Multi-Layered Sand Solumns", *JSSMFE*, Vol. 31, No. 4, pp. 13~36.
13. Varnes, David J. (1978), "Landslides Analysis and Control", Chapter 2 National Academy of Sciences Washington, D.C.
14. Vaughan, P.R. and H.F. Sores (1982), "Design of Filters for Clay Cores Dams", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Jan.
15. Vukovic and Milenko Pusic (1992), "Soil Stability and Deformation due to Seepage", Water Resources Publications.