

底床沉積物沖蝕閾值試驗研究-以壤質砂土為例

洪瑞陽⁽¹⁾ 王咏潔^{*(2)}

摘要

近年來國內不少河川因水流流況及坡度的改變，經常發生河床及河岸大幅侵蝕，不但危及河床、河岸本身的穩定和公共用水安全，甚至威脅其構造物的穩定。本文係以台灣一般河道常見之壤質砂土，重組為沉積土樣進行沖蝕啟動特性與土壤性質的相關性研究。對土壤進行基本性質測試，再以循環式水槽進行土壤表面受水流沖蝕之實驗。將土壤以自來水混合後製成土壤試樣，靜置 48 小時使其自然壓密並達到相對穩定的狀態；針對不同的深度，將沖蝕土樣分為上、中、下三層，並各層施以三重覆的沖蝕試驗。以循環式水槽調整五種坡度流況，測量土壤在剪應力為 1.05、1.21、1.42、1.77、2.05 (Pa) 的情況下受沖蝕之情況，以此分析土壤臨界剪應力並將其無因次化以謝爾滋參數(τ_{c*})進行分析比較，討論土壤在不同深度下沖蝕閾值之變化；其結果為在中層時(土下 6 cm)維持較穩定不變的沖蝕閾值，而在上層(土下 0~6 cm)時，沖蝕閾值則隨著深度的變化，而逐漸上升。

(**關鍵詞**：壤質砂土、臨界剪應力、沖蝕啟動、土壤性質)

底床沉積物沖蝕閾值試驗研究-以壤質砂土為例

Assessment of erosion threshold of deposited sediments in river channels – An example of loamy sand

Rui-Yang Hung⁽¹⁾ Yung-Chieh Wang^{*,(2)}

ABSTRACT

In recent years, river discharge in Taiwan varies a lot. This situation often results in unstable conditions of river channels, and even threatens the stability of hydraulic structures and/or public water supply. This study investigated the relationship between the erosion initiation characteristic and soil properties using loamy sands. Geotechnical tests for basic

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系 碩士

⁽²⁾ 國立中興大學水土保持學系 助理教授 *通訊作者：wangyc@nchu.edu.tw

soil properties were first carried out, and then the flume experiments for obtaining the erosion threshold were carried out with a circulating rectangular flume. The soil specimens were completely mixed with tap water and reconsolidated by natural settlements for 48 hours to reach a relatively stable state. At different depths, the soil specimen was divided as the top, middle, and bottom layers, and three replicates erosion tests were carried out for each soil layer. Then the flume experiments were carried out for each soil layer under different bed shear stress conditions, which included 1.05, 1.21, 1.42, 1.77, and 2.05 (Pa). Consequently, the soil critical shear stress and its dimensionless form-Shields parameter were analyzed for the soil layers at different depths. As a result, a relatively stable erosion threshold was maintained in the middle layer (6 cm below soil surface). While in the upper layer (0 to 6 cm below the soil surface), the erosion threshold gradually increased with depth.

(**Keywords** : Loamy sand, critical shear stress, initiation of erosion, soil property)

前言

台灣本島地形為南北狹長的高山島，且山脈呈南北走向使得河川多為東西流向以及河川短小；更因為地勢高聳，河床坡度陡等原因，使得河川流速快、河川冲刷力大。當雨季來臨時，短延時、高強度的暴雨便會導致河床底部的嚴重淘刷，威脅河道中構造物的穩定，甚或危及公共用水之安全。故此，瞭解不同深度的河床底質冲刷啟動之水利條件，與其土壤物理特性之關係，為評估河道冲刷情況與維護河床安定的重要基礎。

臨界剪應力為評估明渠流中河床底質啟動條件的重要參數。臨界剪應力實驗分為現地實驗與實驗室實驗兩種。現地實驗可以減少對土壤的擾動，並獲得該地方土壤抗冲刷能力之數據，結果較為直觀。但由於儀器搬運與現場環境等等因素，較難以進行直接的冲刷實驗，而是以不同的實驗器材來檢測，獲得其他相關資料後，

再利用公式之間轉換方式來得到臨界剪應力大小。

實驗室實驗使用的儀器主要為循環式矩形斷面渠槽、循環式環型水槽或是循環式管流水槽，皆為直接計算實驗中水流對槽底造成的剪應力大小。而在水槽內部則有不同設計，主要分為土樣固定式與補充式。土樣固定型水槽在將實驗前將土樣置入水槽後，持續進行土壤冲刷實驗直至達預設目標為止。土樣補充式水槽則在其槽底會設計一個實驗區域，該區域大多為一個圓孔，在此圓孔內可將底下土壤樣品，以推進器由實驗水槽外部向內推入渠道內部。在固定好土樣後，隨著水流的冲刷，土壤會減少而深度降低，再從槽底將土樣往上補充以替代冲刷所耗損的部份；如 Hobson (2008)、Navarro (2004)、Hoepner (2001) 和 Ravisangar et al. (2001, 2005) 等研究。前述實驗設備與 Sedflume (McNeil et al., 1996) 相似，但有兩個主要區別；首先，土樣在明渠流動條件下而

非封閉管流中被沖蝕；再者，臨界剪應力（ τ_c ）之值是由沖蝕率與底床沖蝕應力的非線性最小平方最佳化關係所決定，而非定義所施加的底床剪應力。

Wang and Sturm (2016) 以二氧化矽砂與高嶺土的混合沉積物進行實驗，檢測各個實驗土樣的含水量、乾總體密度、濕總體密度與粒徑分布。發現在 10% 高嶺土的土樣在製作時發現有較為明顯的土壤顆粒分層現象發生。El Ganaoui et al. (2007) 在三種不同流況的流域採集土樣，分別是緩和河流、湍急河流與海岸大陸棚間。三種土樣由於所處流況不同，使得其中值粒徑與含水量而不同，但均有土樣因深度而產生出分層現象，使得土壤上下層抗沖蝕能力不同；在表層的力學性質更接近蓬鬆層，臨界剪應力較小，而在深層部份的土壤接近黏性土壤，臨界剪應力較大。

由於臨界剪應力為沉積物輸送過程中的關鍵參數，本研究關注的是壤質砂土下在不同深度時的啟動閾值，以瞭解不同分層土壤其壓密程度與物理特性對抗沖蝕作用的影響。本研究以壤質砂土為研究對象，進行沖蝕啟動特性與土壤性質之間關係研究。參考前人研究成果，本研究以可補充型的渠槽進行土壤試樣之沖蝕實驗。以同一支土樣分成三種不同的土壤沖蝕層：土下 0~6cm 處(上層)、土下 6~12cm 處(中層)、土下 12~18cm 處(下層)，去觀察土樣不同深度時的壓密程度，並量測三層不同狀態之土樣在五種底床剪應力下的平均沖蝕率，求得沖蝕啟動臨界剪應力，以探討不同深度之沉積土壤的臨界剪應

力及其影響因子。

實驗材料與方法

1. 土樣製備

本實驗使用台灣主要河川(e.g. 高屏溪、濁水溪等(蔡光榮等, 2015; 經濟部水利署, 2013)常見之壤質砂土來進行實驗，並對土壤進行粒徑分析等基本土物實驗，以確保土壤基礎特性一致，使其不成為實驗之變因；再將壤質砂土與自來水以土重比水重以 5:2 的比例均勻混合攪拌(至少攪拌 15 分鐘以上，達到均勻混合)，得到一份過飽和的漿化物。將其倒入直徑 7.62cm、長度 30cm 的不鏽鋼土樣芯管中，靜置 48 小時使其自然沉降達到穩定，並將上方多餘水分抽出，以進行土壤性質與沖蝕實驗使用。

2. 土壤性質測試

基本土物性質測定，分為實驗前後兩部份，實驗前測定土壤水分係數及比重。在初步實驗中進行相同土樣在沖蝕實驗前、後之含水量之量測，乃因一次沖蝕實驗之沖蝕深度小，在相近深度之土層其含水量亦相似；但在後續實驗中發現土樣會隨著深度的增加，產生含水量及沖蝕情形的不同，故將土樣分成上、中、下三層的三層模型。為獲得與沖蝕實驗相同深度之土層含水量，在每次沖蝕實驗結束後測定當次實驗之含水量。並依照多次土壤沖蝕實驗之土壤沖蝕深度分佈情形，取土樣深度在土下 0~6cm 處(上層)、土下 6~12cm 處(中層)、土下 12~18cm 處(下層)的三層土樣，並將各層依等距(厚度 2 cm)分為三

重複試驗，來進行後續實驗與測定。

土壤比重試驗依照 ASTM-D854(2006) 標準流程進行，比重為土壤顆粒在同樣體積之下，與攝氏 4 度的蒸餾水之密度的比值，是為無因次當量。土壤含水量是在渠槽實驗每次結束後，依 ASTM-D2216(2005) 標準流程刮取土樣並封裝入土壤水分稱量盒並稱重，再將稱量盒打開放入烘箱中，以攝氏 105℃ 烘乾 24 小時後蓋上蓋子再次稱重，即可得到其含水量。粒徑分析試驗，為統計每次渠槽沖蝕實驗 3 層模型各自的總沖蝕長度後，另外製作土樣，採取此土樣深度土下 0~6cm 處(上層)、土下 6~12cm 處(中層)、土下 12~18cm 處(下層)的三層土樣，取 50g 烘乾土壤為粒徑分析使用，以確認實驗土樣在攪拌後是否有發生明顯分層現象。參考 ASTM-D422-63(2002) 實驗流程，使用 152H 比重計進行實驗。

3. 渠道沖蝕實驗

水槽部分全長 10m，寬、高各 0.4m，渠槽前方有一個不鏽鋼定水頭箱，保持水頭的穩定。渠頂為一個蓄水箱，蓄水箱與入口流段間設有網狀不銹鋼板，以利於整流與消除氣泡，達到穩態水頭與降低共振的效果，並且通過蜂巢式整流板，使水流中較大尺度的漩流消失並導正其入流角度。入流端有一個電動坡度調節器，可以調整整個水槽實驗渠道之坡度。渠尾有一個手動水位調節尾水堰控制水位高低。實驗區域設置在水槽入流端後 8.4m 處，從槽底開一個直徑為 7.62cm 的圓孔，可將

土樣從圓孔置入渠槽內，使其頂部恰與水槽底部接合。實驗開始後在從底下隨著沖蝕變化將土樣以油壓式千斤頂加活塞推入渠道內。渠尾外有一個蓄水池，並附有三角形量水堰以測量流量。

渠道由兩面玻璃邊壁與不鏽鋼底板所組合而成，兩種材料皆為光滑的表面，這使的水流較難發展完全到穩定狀態。為考量更接近於自然河道狀態，在不鏽鋼底板上鋪設一層礫石面，去模擬河道中起伏的沙丘及增加糙度，使其產生紊流。礫石粒徑為參考前人研究儀器(Hobson, 2008)，鋪設中值粒徑為 3.3mm 的小礫石。

實驗訂定不同坡度及流量以產生 5 種不同剪應力大小的流況，由小到大是 1.05、1.21、1.42、1.77、2.05 (Pa)。將靜置後之土樣鋼管置入渠道出水口下游 8.4m 處的實驗區域後蓋上鐵蓋避免在調整流況時土樣表面發生沖蝕，調整流量，並以渠尾手動式尾水堰調整渠道內水深，使流況達設定剪應力流況，其中流量大小與水深由曼寧公式計算，使流況呈現穩定均勻流，以符合平均斷面法之假設。確定達設定目標後，等待並確保穩定後，接上位移電子記錄器，掀開鐵蓋進行沖蝕實驗。

在進行這類型實驗時，土樣表面通常有一層疏鬆層(不足 1mm)，疏鬆層本身結構較土樣本身脆弱鬆軟，此狀況也在前人的研究中如 El Ganaouiet et al. (2007)、Wang and Sturm (2016) 等皆有提及。在 Walter et al.(2011)、Parchure et al.(1985) 中提及到沖蝕一開始會產生絮狀物隨機沖蝕，之後才會產生與時間無關的沖蝕

(time-independent erosion)，可以經由外推至零沖蝕率來識別清晰的沖蝕閾值。故本研究中，於沖蝕實驗開始時，為避免此區土壤影響實驗結果，先等待至穩定沖蝕才開始紀錄。實驗開始後土樣由槽底向上推出，進入渠道沖蝕；為使土壤受力均為表面剪應力，實驗時均維持土樣表面恰與渠底鋪石相切齊；當土樣表面略低於此高度，則上推以補充土樣。由位移記錄器來紀錄一次實驗總花費時間與總上升土樣高度。實驗時訂定一次循環停止標準，為能看出明顯的沖蝕變化，當沖蝕深度達 5mm 以上，即停止實驗。

土樣沖蝕量隨時間變化由位移計電子記錄器收集並記錄，沖蝕量的初始數據以深度(mm)作為單位，並隨沖蝕時間而增加。在單場實驗中，土樣的沖蝕深度與時間呈線性正向關係，故以單場實驗所記錄之沖蝕深度與實驗延時做線性迴歸，求得其斜率，定義為沖蝕最佳擬合斜率(m/s)，並以方程式(1)換算為實測質量沖蝕率 $E_{(exp)}$ (kg/m²/s)。

$$E_{(exp)} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \rho_b \quad (1)$$

其中 $\frac{\Delta D}{\Delta t}$ 為沖蝕最佳擬合斜率(m/s)， ρ_b 為乾總體密度(kg/m³)。

而質量沖蝕率與底床剪應力之關係依 Lick(1982)與其他人的研究，可以表示為：

$$E = M(\tau - \tau_c)^n \quad (2)$$

其中 E 是質量沖蝕率(kg/m²/s)， τ 為底床剪應力(Pa)， τ_c 是臨界剪應力(Pa)(當 $E \approx 0$ 時)， M 、 n 為經驗參數。

為了得到其中 M 、 n 及 τ_c ，我們針對每一層進行五種底床剪應力的三重複實

驗，再將這五個剪應力與其產生之質量沖蝕率使用 MATLAB 撰寫之非線性擬合法-高斯牛頓法，擬合最佳迴歸方程式。

結果與討論

1. 土壤基本性質

土壤比重依照 ASTM-D854(2006)標準流程進行實驗，在烘乾完並其土壤使用 #10 篩過篩後即進行實驗。實驗為三重複後取平均，得到土壤顆粒比重為 2.542。

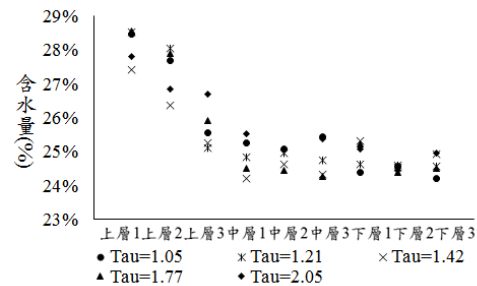


圖 1.在不同土層之土壤含水量

Fig 1. Soil water content in the different layers.

圖 1 是全部實驗土樣在不同土層下的含水量，圖中由上層下層從左到右排列。各組含水量最高皆發生在上層土樣，最高為 28.53%。最低值則發生在中、下層土樣，最低為 24.19%。整體含水量呈現隨土樣深度的增加，有明顯降低的趨勢。這在前人的研究如 Wang and Sturm (2016) 也有著相似的結果。

粒徑分析依照不同沖蝕深度，每層進行三重複實驗以驗證整管土樣是否於沉降過程中，粒徑分佈方面有垂直性的差異，

即是一管土樣鋼管中是否有顆粒大小分層的現象。圖 2 表示不同沖蝕深度下，土壤粒徑分佈狀態。基於烘乾重的質量含量之粒徑分布分類，並區分砂粒 (ξ_{sa} (%), 63-200 μm)，粉粒 (ξ_{si} (%), 2-63 μm) 和黏粒含量 (ξ_{cl} (%), <2 μm)。分析三層各三重複的粒徑分布曲線，中值粒徑上層平均為 0.158mm、中層平均為 0.157mm、下層平均為 0.157mm；平均砂粒含量為 82.63%，標準差為 0.8%，平均粉粒含量為 13.80%，標準差為 0.7%，平均黏粒含量為 3.57%，標準差為 0.1%。結果顯示每次實驗都維持相近的粒徑分佈情形，因此判斷土樣粒徑並未因沉降與深度不同而有所差異，即未發生分層現象，確定各層粒徑分布非為本研究中土壤抗沖蝕能力之主要變因。

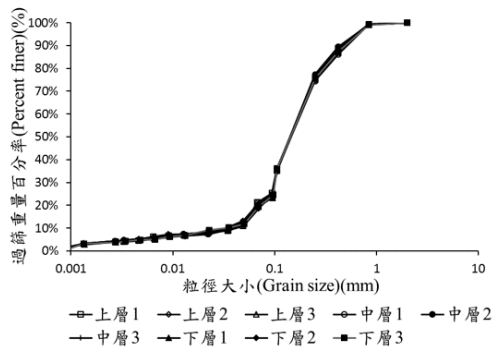


圖 2.各沖蝕層壤質砂土粒徑分析
 Fig 2. Particle grading curve of the loamy sand samples used in the experiments.

2. 沖蝕率與影響因子

總體密度為沉積物中相對固相的度量衡，已經證明它們在實驗室與現地研究中對細粒沉積物侵蝕行為有其重要作用，

因此我們在分析其沖蝕性與總體密度間的關係性(圖 3)時，得到非常顯著的影響。

總體密度-沖蝕最佳擬合斜率隨著底床剪應力的增大而使其相關性的絕對值斜率逐漸增大，當 $\tau = 1.05$ 時為 2.291×10^{-7} ，到 $\tau = 2.05$ 時為 1.698×10^{-6} ，上升了約 7.5 倍，由此結果可得知，總體密度一定程度上影響了沖蝕率的變化。

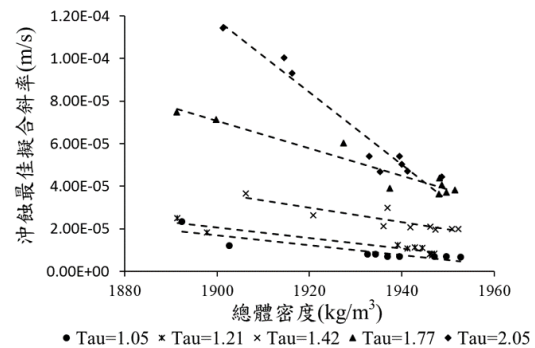


圖 3.總體密度-沖蝕最佳擬合斜率之關係
 Fig 3. The slope (mm/s) of the best-fit line of the displacement data as function of bulk density.

Jacobs et al. (2011) 基於土壤層的結構，顯示了三個不同的區域分別沉積物的最小 ($n_{sasi, \min}$ (%)) 和最大顆粒孔隙率 ($n_{sasi, \max}$ (%)) (如圖 4)，顆粒孔隙率 (n_{sasi} (%)) 表示砂土顆粒與粉土顆粒之間的孔隙。在最小顆粒孔隙率 ($n_{sasi} < n_{sasi, \min}$) ('I') 之下，顆粒被互相擠壓，並碾碎重疊，如沉積岩中可以發現。當砂或粉粒顆粒相互接觸時 ($n_{sasi, \min} < n_{sasi} < n_{sasi, \max}$)，可能發生相對緻密 ("II") 或鬆散 ("III") 堆積結構，這些不同堆積結構會造成顆粒間的接觸面有所不同，影響其

抵抗沖蝕能力的變化。當這些顆粒不互相接觸時($n_{sasi} > n_{sasi,max}$) ('IV'), 會出現類似流沙或黏土-水基質的疏鬆結構; 依結果可以看出其壤質砂土的各層樣本大約是坐落於相對緻密("II")或鬆散("III")堆積結構之間, 而較上層的土樣較下層的土樣較為鬆散, 導致其抗蝕性有所影響。

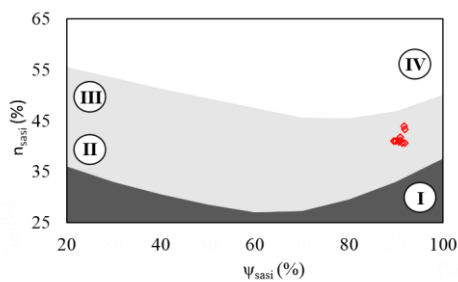


圖 4. 顆粒孔隙率(n_{sasi})隨著砂-坩 (ψ_{sasi}) 體積比的變化, (\diamond) 表示實驗組。存在結構過渡區: 從砂 - 坩架構 (淺灰色區域) 到黏土 - 水基質 (白色區域) (改編自: Jacobs et al., 2011)。

Fig 4. Granular porosity (n_{sasi}) as function of the sand-silt volume fraction ratio (ψ_{sasi}) for (\diamond); For each set a transition in structures exists: from a sand-silt skeleton (light-grey area) to a clay-water matrix (white area) (Adapted from: Jacobs et al., 2011).

3. 沖蝕率與臨界剪應力

本研究中, 在渠道中進行五種不同底床剪應力之三重複實驗, 來進行土樣之沖蝕實驗, 其流況均為完全發展之紊流。為求得方程式(2)中質量沖蝕率(E)與底床剪應力(τ)之關係, 分別將相同製成手法之土樣, 在五種不同底床剪應力下相對應其發

生的質量沖蝕率(如圖 5), 並以高斯牛頓法來進行擬合, 求得公式(2)中的 M 、 n 與 τ_c 值。因進行三重複實驗, 每層土樣皆產生三條擬合曲線, 每條曲線使用五個資料點來進行擬合(圖 5)。

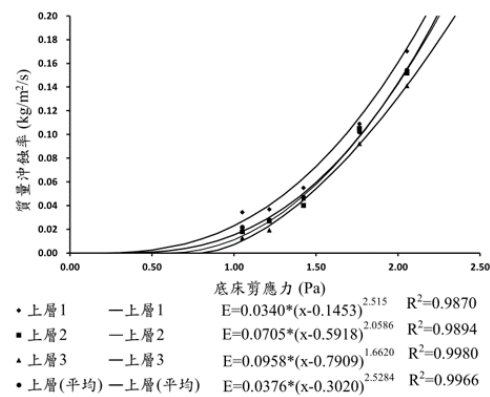


圖 5. 質量沖蝕率與底床剪應力關係圖, 以上層土層之沖蝕實驗為例。

Fig 5. Correlation between erosion rate and bed shear stress, taking the example of the top layer samples.

將沖蝕率的計算值 $E_{(cal)}$ 與實驗測量值 $E_{(exp)}$ 進行比較(圖 6), 兩者之線性迴歸式(3)表示為:

$$E_{(cal)} = 1.005E_{(exp)} \quad (3)$$

雖然些略微高估, 但可以確定具有相當的精度 ($R^2=0.9908$)。

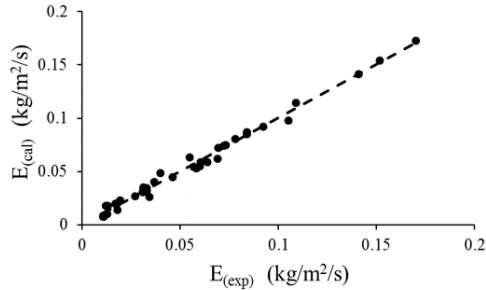


圖 6.實驗測量值 $E_{(exp)}$ 與計算值 $E_{(cal)}$ 之關係比較

Fig 6. Comparisons of experimental $E_{(exp)}$ and computed $E_{(cal)}$.

然而可以發現，透過高斯牛頓法，以迭代試誤方式去找到 M 、 τ_c 、 n 值，其 M 、 τ_c 之數值隨著土層的增加而呈現出上升趨勢， M 值由 0.034 上升至 0.0958，其標準差為 0.0159； τ_c 值由 0.1453 上升至 0.9155，其標準差為 0.252； n 值則隨著土層的增加而呈現出下降的趨勢，由非線性逐漸轉變為線性， n 值由 2.515 下降至 1.0556，其標準差為 0.5252。由於下層土層受到上層土層自然壓密而產生更大的填充密度，填充密度大的填料可能產生更大的土粒與土粒間的內部摩擦，從而使 τ_c 增加。然而，另一種可能為由於較低的滲透率 (Head, 1980)，孔隙水壓力梯度的耗散率降低，產生明顯內聚力，這增強了土壤抵抗破壞的特性，因此減少可沖蝕性。

4. 臨界剪應力無因次化參數

為了能進行定量分析，透過方程式 (4)：

$$\tau_{c*} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w)D_{50}} \quad (4)$$

τ_{c*} 是無因次化之謝爾滋參數， τ_c 為實驗擬合求得之臨界剪應力， γ_s 為土壤顆粒密度， γ_w 是水之密度， D_{50} 為土壤中值粒徑。並將各層 τ_{c*} 以方程式 (5)：

$$d_* = \sqrt[3]{\frac{(G_s - 1)gD_{50}^3}{\nu^2}} \quad (5)$$

將中值粒徑 D_{50} 無因次化。此處 d_* 為無因次化的 D_{50} ， G_s 為土壤比重 ($G_s = \gamma_s / \gamma_w$)， g 是重力加速度， ν 為水的運動黏滯度。本研究中的粒徑分析並非與水槽沖蝕實驗以同一管土樣進行，而是以相同手法重新製作一管相似之土樣，但由粒徑分析結果 (圖 2) 可判斷本研究中的土樣之處理與方法針對每層土樣粒徑分佈，並沒有顯著之影響。將臨界剪應力與其中值粒徑無因次化後可得表 1。

表 1.

沖蝕位置	編號	τ_{c*}	d_*
上層	1	0.0613	4.1564
	2	0.2448	4.2396
	3	0.3287	4.2203
	平均	0.1260	4.2054
中層	1	0.3712	4.2441
	2	0.3864	4.1184
	3	0.3634	4.1622
	平均	0.3737	4.1749
下層	1	0.3549	4.1617
	2	0.3806	4.2189
	3	0.3761	4.1815
	平均	0.3722	4.1874

可看出上層的壤質砂土土樣明顯隨深度，無因次化之謝爾滋參數有增大後趨於穩定的趨勢(中層與下層兩者相差不大)。觀察圖 7，發現研究中的資料由上層至下層逐漸遠離於謝爾滋曲線上，代表本實驗之試驗土樣-壤質砂土在較下層的深度時，表現出較強的抗沖蝕狀態。

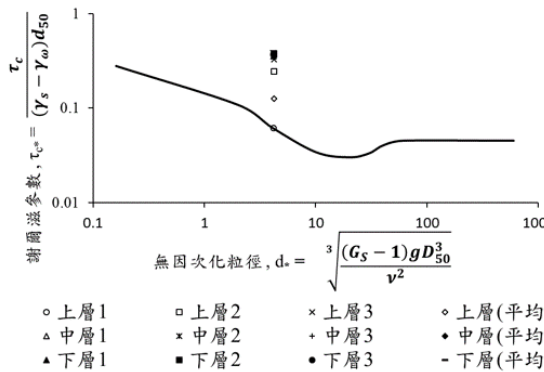


圖 7.本研究土樣無因次化啟動剪應力於謝爾滋曲線比較圖(Shield's data from: Sturm, 2010)。

Fig 7. Shields diagram – the samples of loamy sand (Shield's data from: Sturm, 2010).

5. 啟動流速

在獲得無因次化之謝爾滋參數(τ_{c*})後，以 Keulegan (1938)所提出之方程式(6)：

$$V_c = 5.75 \sqrt{\tau_{c*} (G_s - 1) g D_{50}} \log \left(\frac{12.2R}{k_s} \right) \quad (6)$$

計算不同情況下的啟動流速； V_c 為啟動流速， G_s 為土壤比重， R 為水力半徑， k_s 為粗糙高度。

比較不同沖蝕土層的啟動流速，在相同的底床剪應力情況之下，愈下層的土樣受到來自上層土樣的重力壓密，形成更堅

固、抵抗沖蝕愈強的土體，啟動流速則相對上升，由上層時約 0.1379(m/s)隨土層往下沖蝕其啟動流速上升至約 0.3703(m/s)，大約上升約 2.7 倍，而在大約於上層與中層交界處後往下沖蝕，啟動流速則趨於平穩狀態；而在相同土層中，不同底床剪應力則無造成啟動流速明顯的變化。

結論與建議

本研究係以壤質砂土重組沉積土樣為主要材料，進行土砂沉積物在水中的沖蝕啟動特性的研究。使用之前由#10 篩過篩以確保土壤顆粒為土壤範疇並且完全分離，之後進行實驗土樣製作。土壤試樣製作先將粉碎土壤以自來水混合，並倒入金屬管模等至穩定(本研究為沉降 48hr)。實驗為循環水槽之設計，以可補充式土樣水槽來進行實驗，使沖蝕現象更接近於自然情況下的河床表面沖蝕。

本研究找出壤質砂土沉積土在不同土層深度，分別為 0~6cm 處(上層)、土下 6~12cm 處(中層)、土下 12~18cm 處(下層)，受到沖蝕的臨界剪應力變化。並將其臨界剪應力無因次化，繪製於謝爾滋曲線圖上進行比較。發現在不同土壤深度下，土壤粒徑分佈變化不大，但可以發現土壤產生含水量的分層現象，而造成不同土層受水流沖蝕時，啟動特性會有所不同。單只看上層土樣的話，可以明顯看到，無因次臨界剪應力 τ_{c*} 由 0.0613 變化到 0.3287(由上層 1 到上層 3)，比中層平均 0.3737 和下層平均 0.3722 明顯來的小，而後兩者的差異變化較不明顯。三者土壤顆粒分佈變化

都不大，而不同層的含水量與總體密度從有明顯的變化後趨於平穩，因此判斷壤質砂土本身的抗沖蝕性主要是受到顆粒間摩擦力的影響，而其中含水量較低的土層因內部摩擦增大而導致與含水量較高的土層顯現出明顯的差異。而在中層土層以後，因土壤顆粒間的結合趨近穩定，使得之後的土樣之抗沖蝕性變化較不明顯，趨於平穩。

本研究將底床剪應力無因次化後，以方程式(5)計算不同土層之土樣，在不同均勻流況下的啟動流速，可作為以壤質砂土為主之河段進行土壤沖蝕模擬及集水區輸砂模式之參考。然而自然沉積物很少由單一尺寸而是由不同粒徑顆粒組成。例如，潮灘地區沉積物通常是由黏粒、粉粒與砂粒組成的細粒料混合沉積物，希望未來實驗考慮多方面採集，以不同粒徑含量或不同含水量的細粒現地土壤為實驗土樣；亦或是加入黏結力、應力歷史和生物性等多方探討，並以定量分析方式來更清楚了解各項因素對於土壤沖蝕啟動之關係。

參數列表

D_{50}	中值粒徑
d_*	無因次化中值粒徑
$\frac{\Delta D}{\Delta t}$	沖蝕最佳擬合斜率
E	質量沖蝕率
$E_{(cal)}$	以高斯牛頓法所擬合結果 所計算之沖蝕率

$E_{(exp)}$	以方程式(1)推估之沖蝕率
G_s	土壤比重
g	重力加速度
k_s	粗糙高度
R	水力半徑
R^2	決定係數
τ	底床剪應力
τ_c	臨界剪應力
τ_{c*}	無因次化之謝爾滋參數
γ_s	土壤顆粒密度
γ_ω	水之密度
M	土壤經驗係數
n	土壤經驗係數
n_{sasi}	顆粒孔隙率
$n_{sasi, max}$	最大顆粒孔隙率
$n_{sasi, min}$	最小顆粒孔隙率
Ψ_{sasi}	砂-粉體積比
ν	水的運動黏滯度
ξ_{sa}	砂粒含量
ξ_{si}	粉粒含量
ξ_{cl}	黏粒含量

誌謝

本研究成果承蒙科技部 105-2625-M-005 -012 - 和 106-2625-M-005 -013 - 計畫補助，謹致謝忱。

參考文獻

1. 經濟部水利署(2013)，濁水溪下游抑制揚塵河川公地管理研究。
2. 蔡光榮、陳穎慧、江介倫、陳怡睿 (2015)，高屏溪河床質理化特性受極端降雨事件影響之空間分佈趨勢分析，中國礦冶工程學會，第 59 卷第 3 期。
3. ASTM-D422-63 (2002). “Standard test method for particle-size analysis of solids.” West Conshohochen, P., American Society for Testing and Materials.
4. ASTM-D854 (2006). “Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer.” West Conshohochen, P., American Society for Testing and Materials.
5. ASTM-D2216 (2005). “Moisture content of soil.” West Conshohochen, P., American Society for Testing and Materials.
6. El Ganaoui, O. E., Schaaff, E., Boyer, P., Amielh, M., Anselmet, F. & Grenz, C. (2007). “Erosion of the Upper Layer of Cohesive Sediments: Characterization of Some Properties.”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.133(9):1087-1091.
7. Head, K. H. (1980). Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests. Pentech Press, London, ISBN: 0-7273-1302-9.
8. Hobson, P. M. (2008). “Rheologic and flume erosion characteristics of georgia sediments from bridge foundations.” Master thesis, School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, US.
9. Hoepner, M. A., 2001. “Stability of cohesive sediments from flume and rheometer measurements.” M.S. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, US.
10. Jacobs, W., Le Hir, P., Van Kesteren, W., Cann, P. (2011). “Erosion threshold of sand–mud mixtures.” Continental Shelf Research, 31, S14–S25.
11. Keulegan, G. H. (1938). “Laws of Turbulent Flow in Open Channels.” Research Paper RP1151. Journal of Research of National Bureau of Standards.
12. Lick, W. (1982). “The transport of contaminants in the great lake.” Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 10, 327-253.

13. McNeil, J., Taylor, C., and Lick, W. (1996). “Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/ (ASCE) 0733-9429(1996)122:6(316), 316–324.
14. Navarro, H. R. (2004). “Flume measurements of erosion characteristics of soils at bridge foundations in Georgia.” , Master thesis, School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, US
15. Ravisangar, V., Dennett, K. E., Sturm, T. W., and Amirtharajah, A. (2001). “Effect of sediment pH on resuspension of kaolinite sediments.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:6(531), 531–538.
16. Ravisangar, V., Sturm, T. W., and Amirtharajah, A. (2005). “Influence of sediment structure on erosional strength and density of kaolinite sediment beds.” *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:5(356), 356–365.
17. Parchure, T. M., Mehta, A. J. (1985). “Erosion of soft cohesive sediment deposits.” *Journal of Hydraulic Engineering* 111(10), 1308–1326.
18. Sturm, T. W. (2010). *Open Chanel Hydraulics* (2nd ed.), New York: McGraw-Hill: 420-421
19. Wang, Y.C. & Sturm, T. W., M.ASCE. (2016). “Effects of physical properties on erosional and yield strengths of fine-grained sediments.” *Journal of Hydraulic Engineering*: 04016049.

108 年 09 月 20 日收稿

108 年 10 月 29 日修改

108 年 11 月 15 日接受