

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.258



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



薄层水流冲刷条件下斜坡土体的临界起动

王力, 陈琦珊, 占清华, 王世梅

(三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002)

摘要: 斜坡土体侵蚀是丘陵地区和水库岸坡普遍存在的灾害现象, 其主要动力因素是降雨或者波浪上爬产生的薄层水流对土体产生的冲刷剪切作用。为探索水流冲刷作用下的斜坡土体临界起动条件, 采用自主研发的冲刷起动试验装置, 开展斜坡土体的冲刷起动试验和理论研究。通过颗粒染色和高倍数电子显微等技术手段观测无黏性土颗粒的起动现象, 确定了无黏性岸坡土体的起动模式与水流流速的相互关系; 探索了不同干密度、不同黏粒含量及不同坡度与黏土斜坡临界起动流速的相互关系, 土体的黏粒含量、干密度及坡度对黏性土体的起动流速影响较大, 与干密度和土体坡度相比, 黏粒含量对黏土斜坡的起动流速影响更为明显。验证了无黏性岸坡土体的临界起动方程, 其中滚动起动流速方程具有较强的可靠性; 基于黏土的起动模式构建了黏土斜坡的起动力学平衡方程, 获得了黏土斜坡半经验半理论的起动流速方程, 用试验结果求解了起动流速方程的相关参数, 最终确定的起动流速公式与试验结果拟合度较好, 同时验证了起动流速公式的可靠性。

关键词: 临界起动流速; 坡面流; 土体侵蚀; 起动模式; 薄层水流

中图分类号: P512.23 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)02-0023-10

Critical incipient motion of slope soil under thin layer flow scouring

WANG Li, CHEN Yushan, ZHAN Qinghua, WANG Shimei

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: Slope soil erosion is common in hilly regions and reservoir bank slopes, as the primary driving force is brought by the thin overland water flow caused by rainfall or wave run-up, which results in the shear force and subsequently the incipient motion of soil. In order to explore the incipient motion conditions of slope soil under waterflow scouring, the incipient motion test and theoretical research of slope soil were carried out via self-developed testing device. The incipient motion phenomenon of cohesionless soil particles was observed by particle staining and high magnification electron microscopy, and the relationship between incipient motion mode of cohesionless bank slope soil and flow velocity was determined. This study also explored the

收稿日期: 2021-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(U21A2031); 中国博士后科学基金(2021M701969)

作者简介: 王力(1988-), 男, 博士(后), 副教授, 主要从事地质灾害预测评价, E-mail: wangli_ctgu@126.com。

占清华(通信作者), 女, 博士, E-mail: 546068523@qq.com。

Received: 2021-09-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. U21A2031); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2021M701969)

Author brief: WANG Li (1988-), postdoctor, associate professor, main research interest: prediction and evaluation of geological hazards, E-mail: wangli_ctgu@126.com.

ZHAN Qinghua (corresponding author), PhD, E-mail: 546068523@qq.com.

relationships among differing dry densities, clay contents, and slopes with the critical incipient motion velocity on a clay slope, the results showed that clay content, dry density, and soil gradient had a great impact on the incipient velocity. Compared with the dry density and gradient, clay content had a clearer impact on incipient velocity. The incipient motion velocity equation of cohesionless bank slope soil was verified, and the rolling incipient motion velocity equation was reliable. The incipient motion mode of clay was used to establish the mechanical balance equation of the clay slope. Then, a semi-empirical incipient motion velocity equation of the clay slope was deduced, of which the relevant parameters were solved using the test results. The proposed incipient motion velocity equation showed good fit with the test results, and the verification results demonstrate that the equation is reliable.

Keywords: incipient motion velocity; overland flow; soil erosion; incipient motion mode; thin layer flow

土壤侵蚀广泛存在于中国的大部分丘陵地区,尤其是位于西北的黄土高原地区^[1]。其中,主要的灾害现象表现为降雨产生的坡面径流而导致水土流失^[2],引起边坡失稳^[3]、公路或铁路路基的破坏^[4]。事实上,江、河、水库岸坡受水作用冲刷侵蚀影响同样强烈^[5-6],波浪在临界位置破碎后,直接冲击岸坡、上爬并回落,同样会导致水库岸坡受侵蚀和塌岸发生。这些侵蚀发生的实质是波浪水流冲刷导致的土体颗粒起动及流失的现象,因此,有必要研究岸坡土体被水流冲刷起动的力学机制和临界起动条件,这也是对其进行针对性防治工作的重要前提。

目前多数土体冲刷起动的研究主要考虑河床土体颗粒的受力平衡条件,构建了土体颗粒的起动流速公式^[7-9]。由于坡面重力项分力的作用,坡面土体比河床泥沙更容易起动^[10]。然而,由于学者们对无黏性土体的起动模式认识不统一,根据不同起动模式建立的斜坡土体起动预测公式的结果相差较大^[11-12]。Kang等^[13]在泥石流的侵蚀计算中提出了一种新的侵蚀模型,认为斜坡坡面的侵蚀破坏同时存在两种机制,即滚动破坏与滑动破坏,哪种机制占主导作用取决于流体提供的剪切力。在此基础上,Wang等^[14]推导了适用于无黏性土的岸坡土体临界起动流速方程,并提出了一种采用离散元颗粒流程序的起动流速方程验证方法,然而还没有通过试验手段进行验证。上述研究均是针对无黏性散粒土体。不同于无黏性土,除了受水流的拖曳力和上举力作用,黏土还存在颗粒间黏结力作用,因此,黏土的冲刷起动机理更为复杂。目前对黏性土体的起动问题研究主要包括3个方面:黏土的起动模式、黏土起动的临界条件以及黏土的抗侵蚀特性。关于黏土起动模式认识较为统一,绝大多数的研究均认为黏土是以微团的形式起动^[15-16]。而黏土的临界起动问题是目前的研究热点,学者们分别通过力学平衡方程^[17]、随机理论^[18]建立黏土中值粒径、密度等参

数与起动切应力或起动流速间的函数关系,或基于主导因素构建经验或半经验方程^[19],包括与黏聚力及中值粒径相关的切应力方程^[20],与淤积物干密度相关的切应力方程^[21]。然而,无论是哪种方法,确定的临界起动方程预测结果显著不同。黏土的抗侵蚀特性研究是黏土起动研究的另一个热点问题,同时也是构建黏土起动流速公式的关键。总体来说,学者们对黏土抗侵蚀特性的主要影响因素有一个共性认识,包括土体的黏聚力、抗剪强度、固结度及孔隙率等参数^[22-23],然而自然界中土体的物理力学参数复杂多变,导致实测同一地点黏土起动切应力的结果千差万别。

综上所述,对于无黏性土岸坡而言,土体的冲刷的起动模式仍旧没有统一标准;对于黏土,虽然对其起动模式的认识相对统一,但由于起动流速大、颗粒尺寸小,难以通过可视化的手段观察其运动模式,而且由于黏土颗粒间存在黏结力,建立黏土与颗粒粒径或黏结力相关的起动流速公式更是困难。笔者自主设计岸坡土体冲刷试验装置开展土体冲刷起动试验,在已有基础上进一步验证岸坡无黏性土体的起动模式,根据黏土的起动模式推导构建黏土斜坡的临界起动流速方程,并通过试验结果求解方程参数,验证其可靠性和通用性。

1 岸坡土体的冲刷起动试验研究

1.1 试验装置

分别开展无黏性与黏性斜坡土体的冲刷起动试验,确定斜坡无黏性土体的起动模式,探索斜坡黏性土体起动流速与斜坡坡角、土体干密度、黏粒含量等因素的相互关系,从而为求解黏性斜坡土体的起动流速方程的相关参数提供流速数据。采用自主研制的岸坡土体冲刷试验装置进行试验,装置示意图如图1所示,装置由水槽、水箱、出水口、高速显微摄像装置、冲刷水槽、液压杆、变频水泵、流速

仪、流量控制阀及可拆卸土样盒等部分组成,土样盒尺寸为 15 cm(长)×15 cm(宽)×10 cm(高)。

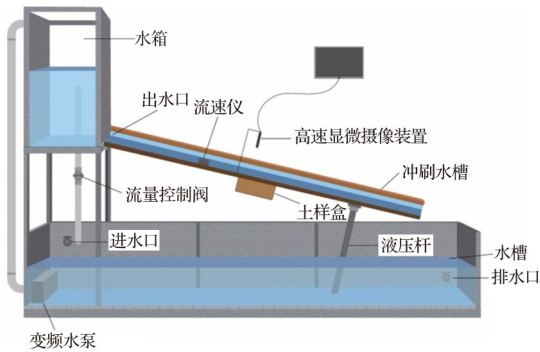


图 1 斜坡土体冲刷起动试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the scouring experiment device of slope soil

使用的高速显微摄像装置由型号 FHD-2160 高速工业相机、显微镜头和显示器组成,图片分辨率为 1080P 时帧数可达到 60,显微放大倍数达到 800 倍,电子显微镜工作距离 5~20 cm。使用的流速仪为型号 LS-300A 的便携式流速测算仪,下部旋桨直径为 $\phi 12$ mm,测量量程达 400 cm/s,精度达到 1 cm/s,数据采集时间可在 1~99 s 间任选。

相比其他冲刷试验装置,该装置具有以下特点:传统装置采用封闭管道实现高速水流,该设备采用水箱蓄水,并通过孔口出水即可实现高速水流冲刷,模拟实现了自然斜坡坡面水流冲刷过程;通常降雨在斜坡上产生的水流冲刷为薄层水流,水流厚度通过流速分布影响起动流速,该装置可模拟实际的斜坡冲刷,通过水箱出水口即可控制水流厚度,并可通过控制水箱蓄水位及调节流量控制阀控

制出水流速;冲刷水槽可调节坡度,实现从 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 区间段不同坡度斜坡的冲刷试验。

试验前通过蓄水后的出水试验,固定出水口开口宽度,使水流厚度固定在某一范围,为便于流速仪测量流速,出水水流厚度固定在 10~20 mm 范围。通过流量控制阀使水箱水位稳定在某一高度,测定此时的出水流速及水流厚度,按照此方法分别量测 0.10、0.15、0.20、0.30、0.40、0.50、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s 所对应的蓄水刻度线。装置实物照片如图 2 所示。



图 2 斜坡冲刷装置实物图

Fig. 2 Scouring experiment device

1.2 无黏性土坡的冲刷起动试验

1.2.1 试验土样

土样选自三峡库区秭归县凤凰山库岸段的全风化花岗岩土体,按《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)定义为砂类土,细分为含细粒土砂,测得试样的基本物理力学参数如表 1。联合使用筛析法及密度计法对试验用土进行颗粒分析试验,结果见图 3,颗粒中值粒径为 1.35 mm。

表 1 全风化花岗岩土体物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of fully weathered granite soil

比重 G_s	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_P/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
2.645	1.846	0.501	29.2	9.1	20.1	0	30.1

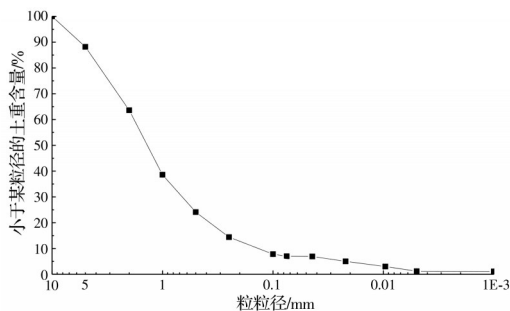


图 3 试验土的颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle gradation curve of test soil

1.2.2 试验方案及步骤

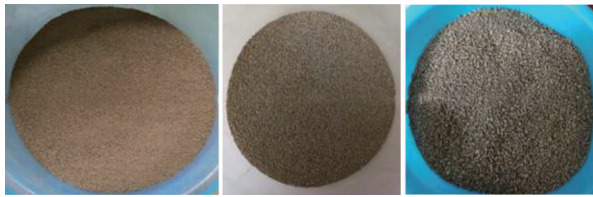
三峡库区塌岸调查时发现受冲刷作用的岸坡

坡度一般在 $15^{\circ}\sim 28^{\circ}$ 之间^[24],因此,确定对无黏性土岸坡冲刷试验的坡角为 16° 、 18° 、 20° 、 22° 、 24° 、 26° 、 28° ,共 7 组。无黏性土岸坡的冲刷起动试验主要包含制样和冲刷两个步骤,制样步骤如下:

1)用可拆卸式土样盒按天然干密度取一盒土样,近似按 d_{50} 、 $d_{50}\sim d_{75}$ 及 $d_{75}\sim d_{100}$ 粒组筛分备用,如图 4 所示;

2)为便于观察试验中颗粒运动过程,将筛分的粒组 d_{50} 、 $d_{50}\sim d_{75}$ 及 $d_{75}\sim d_{100}$ 土样对应用红色、橙色和绿色喷漆充分染色,如图 5 所示;

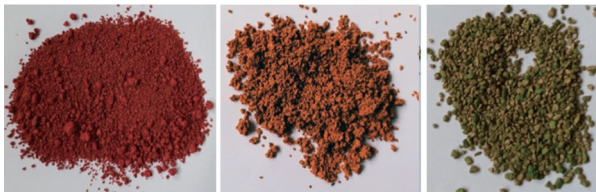
3)均匀混合染色后的土样,并用可拆卸式土样盒装样。



(a) d_{50} 粒组 (b) $d_{50}\sim d_{75}$ 粒组 (c) $d_{75}\sim d_{100}$ 粒组

图4 试验用土样分组

Fig. 4 Grouping of soil samples for test



(a) d_{50} 粒组 (b) $d_{50}\sim d_{75}$ 粒组 (c) $d_{75}\sim d_{100}$ 粒组

图5 染色后的土样

Fig. 5 Dyed soil sample

冲刷步骤如下:

1)将冲刷面板坡度调节至 28° ;

2)打开水泵,使水箱蓄水至 0.05 m/s 的刻度线(具体值应由经验值确定),装置土样;

3)打开出水口,试验时通过控制出水口宽度保证冲刷水流厚度分布在 $10\sim 20\text{ mm}$ 间,控制流量阀,按照 0.05 m/s 流速冲刷土样,观察显示屏土样是否冲刷起动,若没有起动,调节流量阀逐渐加大流速,每一阶段流速稳定 20 s ,直至观察显示屏中有比较明显的少量 d_{50} 粒组(红色)土颗粒起动,记录此时的流速和水流厚度,此流速即为无黏性土体颗粒的滚动起动流速;

4)测得滚动起动流速后,继续控制流量阀,继续增大冲刷流速,直至通过显示屏观察到 d_{50} 粒组(红色)和 $d_{50}\sim d_{75}$ 粒组(橙色)的土颗粒大量冲刷起动,记录此时的流速和水流厚度,此流速即为无黏性土体颗粒的滑动起动流速;

5)按 2° 的坡度递减冲刷面板坡度,重复上述操作。

1.2.3 试验结果

完成7组不同坡度的无黏性土岸坡冲刷试验,每组岸坡的冲刷起动现象比较相似,以 28° 岸坡的冲刷起动现象为例来说明水流冲刷下无黏性土颗粒的起动模式。水箱蓄水后使冲刷装置在最低流速状态下对土样进行冲刷,此时流速约为 0.05 m/s ,通过高速显微装置观察到仅有个别粒径非常小的红色颗粒(d_{50} 粒组)发生运动,被粗颗粒阻挡后运动停止,其余颗粒未见运动;进一步加大水流冲刷流速,当流速增加至 0.101 m/s 时,如图6所示,通过高速显微装置观察到视野中大部分红色颗粒(d_{50} 粒



(a) 滚动起动前 (b) 滚动起动瞬间

图6 滚动起动显微图

Fig. 6 Micrograph of rolling motion

组)均发生了沿相连颗粒的滚动运动,少量黄色颗粒($d_{50}\sim d_{75}$ 粒组)发生了滚动运动,此时斜坡土颗粒的状态即为所定义的滚动起动, 0.101 m/s 即为 28° 岸坡土体的滚动起动流速;流速进一步增加时,通过高速显微装置观察到绝大部分的土体颗粒均发生了滚动式的运动,其中包括绿色颗粒($d_{75}\sim d_{100}$ 粒组),当流速增加至 0.200 m/s 时,如图7所示,通过高速显微装置观察到视野中几乎全部颗粒开始出现快速运动,将此时颗粒的起动状态定义为滑动起动。显然,无黏性土体的起动模式与水流的冲刷流速直接相关。



(a) 滑动起动前 (b) 滑动起动瞬间

图7 滑动起动显微图

Fig. 7 Micrograph of sliding motion

通过调节冲刷槽坡度及顶推土样盒,一盒土样可完成全部7组试验,为保证起动流速结果的准确性,共装样两次,即每组坡度试验两次取平均值。同一组实验中,滑动起动流速是显著大于滚动起动流速的,受试验人员主观观测影响、土体颗粒相对位置变化以及流速仪测量误差,同一坡度不同组数的部分流速测量值存在偏差,但总体趋势与岸坡坡度变化一致。

取流速平均值作图如图8所示。坡度为 28° 时滚动起动流速为 0.095 m/s ,坡度为 16° 时滚动起动流速为 0.166 m/s , 12° 的坡度差使得滚动起动流速变化为 42.77% ;坡度为 28° 时滚动起动流速为 0.192 m/s ,坡度为 16° 时滚动起动流速为 0.501 m/s , 12° 的坡度差使得滑动起动流速变化为 61.68% ,滚动起动和滑动起动流速均与岸坡坡度明显相关,随坡度的减小起动流速显著增大。观察对比同一坡度时滚动起动流速和滑动起动流速的差别,发现坡

度较小时无黏性土岸坡发生滑动起动和滚动起动的流速差距显著大于坡度较大时的情形。同时发现坡度较大时,尤其是接近岸坡土体的内摩擦角时,滑动起动流速和滚动起动流速差距较小。当水流冲刷流速不稳定时可能同时发生滚动起动和滑动起动。

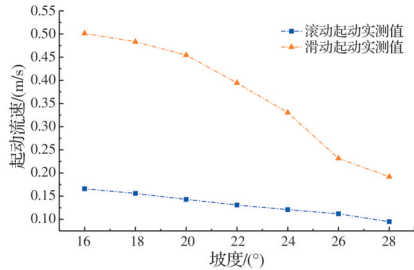


图 8 无黏性土岸坡冲刷起动流速

Fig. 8 Incipient motion velocity of erosion on non-cohesive soil bank slope

1.3 黏性土坡的冲刷起动试验

1.3.1 试验土样

黏性土土样选自三峡库区某岸坡,考虑到黏性土斜坡的起动对象主要是粒径很小的微团聚体,将土样过 1 mm 筛后按不同颗粒级配成分组成不同颗粒级配的 3 大类土。重制后的 3 种土的颗粒级配曲线如图 9 所示,其中 3 种土的比重分别为 2.693、2.694 和 2.703,3 种土的中值粒径分别为 0.066、0.057、0.052 mm。

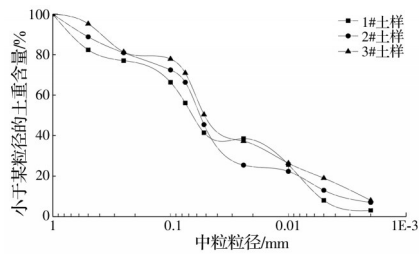


图 9 3 种土的颗粒级配曲线

Fig. 9 Gradation curve of three kinds of soil particles

1.3.2 试验方案及步骤

黏性土起动流速主要取决于土体黏结力,确定土团的黏结力十分复杂,研究表明,黏结力又与土体的颗粒级配(黏粒含量、代表粒径)、干密度等物理特性相关,因此,冲刷试验将考虑干密度及黏粒含量为试验控制因素,同时考虑塌岸调查中消落带斜坡的冲磨蚀角一般较小,绝大部分分布在 10°~30°内。基于此最终确定的黏土斜坡冲刷起动试验方案如表 1 所示,共完成不同坡度、不同黏粒含量和不同干密度的斜坡土体冲刷试验共 54 组。

将上述 3 种土体按试验方案所定的干密度进行制样并饱和,饱和制样及装样于斜坡冲刷装置如

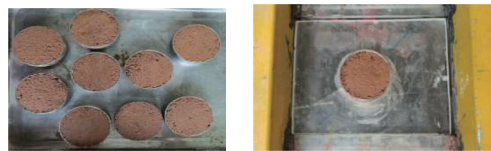
表 2 黏土斜坡冲刷起动试验方案

Table 2 Experiment plan for scouring and incipient motion of clay slope

斜坡坡度/(°)	黏粒含量 S/%	干密度/(g·cm ³)
5、10、15、20、25、30	8	1.4、1.5、1.6
	13	1.4、1.55、1.7
	19	1.4、1.5、1.6

注:黏粒含量即粒径在 0.005 mm 以下的颗粒的含量。

图 10 所示。装样后冲刷步骤与无黏性冲刷试验相似,观察显示屏及目测土样是否冲刷起动,若没有起动,调节流量阀逐渐加大流速,每一阶段流速稳定 30 s,直至观察显示屏中有明显的土体起动,每次稳定流速时均记录此时的流速。



(a) 饱和后的环刀样 (b) 土样装样后

图 10 土样制样与装置

Fig. 10 Soil sample preparation and installation

1.3.3 试验结果

按试验方案进行了 54 组黏土斜坡土体的冲刷起动试验,由于试验土体为重塑土,每组斜坡的冲刷起动现象比较相似。因此,以干密度为 1.4 g/cm³、黏粒含量 S 为 8% 时的冲刷起动试验组为例来描述黏土斜坡土体的冲刷起动现象。

试验从坡度 30° 开始,起始流速 0.1 m/s 作用下,土样无变形迹象,调节流量阀逐渐加大流速,每一阶段流速稳定 30 s,流速增大至 0.2 m/s 时发现环刀侧壁土体有土体流失(图 11(a)),主要原因为土体与环刀贴合不紧密,侧壁土体水流快速下渗,水流渗透力导致侧壁土体颗粒流失。由于冲刷水流流速较大,试验中很难观察到微团颗粒流失情况,主要观察试验中部土体表面变化情况,当流速增大至 0.30 m/s 以后,开始发现中部土体有明显的土颗粒流失现象,随即土体开始迅速流失,如图 11(b)所示,具体土团流失情况可在室内通过逐帧观察电子



(a) 环刀侧壁土体流失 (b) 土体开始冲刷起动

图 11 黏土起动现象

Fig. 11 Clay soil sample incipient motion phenomenon

显微镜所录视频获取。其余各组试验现象基本相似。

由于黏土起动模式是以微团聚体的形式,肉眼仅能观测到大的土团起动,同时因为斜坡冲刷流速较大,直接观测屏幕同样很难观察到微团起动。因此,通过室内逐帧观察电子显微摄像装置所记录的大土团起动前录像,确定微团大量冲刷起动时的流速为起动流速。

将试验结果绘制为同一干密度不同黏粒含量斜坡土体的起动流速如图12所示。由图12可知,在同一干密度条件下,不同黏粒含量的斜坡土体的起动流速均随坡角的增大而减小,斜坡坡度对黏土起动流速的影响相对较大,但随着黏粒含量的增大这种影响逐渐减小;黏粒含量对斜坡土体的起动流速影响非常大,如干密度为 1.4 g/cm^3 、坡度为 5° 时,黏粒含量为19%时的起动流速为 0.549 m/s ,而黏粒含量为8%时的起动流速为 0.338 m/s ,起动流速差达62.42%。当干密度增加时,如干密度为 1.6 g/cm^3 、坡度为 5° 时,黏粒含量为19%时的起动流速为 0.918 m/s ,而黏粒含量为8%时的起动流速为 0.518 m/s ,起动流速差为77.22%,表明土体干密

度增加时,黏粒含量对起动流速的影响逐渐增大。

对比同一黏粒含量不同干密度斜坡土体的起动流速结果可知,不同干密度斜坡土体的起动流速均随坡角的增大而减小,但随着黏粒含量的增大这种影响逐渐减小;干密度对斜坡土体的起动流速影响非常大,如黏粒含量为8%、坡度为 5° 时,干密度为 1.6 g/cm^3 时的起动流速为 0.518 m/s ,而干密度为 1.4 g/cm^3 时的起动流速为 0.338 m/s ,起动流速差达53.25%。当黏粒含量增加时,如黏粒含量为19%、坡度为 5° 时,干密度为 1.6 g/cm^3 时的起动流速为 0.918 m/s ,而干密度为 1.4 g/cm^3 时的起动流速为 0.549 m/s ,起动流速差为67.21%,表明当土体黏粒含量增大时,干密度对起动流速的影响逐渐增大。同时也说明,相比于干密度,黏粒含量的增加对岸坡土体的起动流速影响更为明显。

2 岸坡土体的临界起动流速方程

2.1 无黏性土岸坡的临界起动方程验证

滚动起动和滑动起动的流速方程分别如式(1)、式(2)所示^[14]。

$$u_b = \sqrt{\frac{16(\tan \varphi \cos \theta - \sin \theta) \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) gD}{C_D(4 + \tan \varphi)}} \quad (1)$$

$$u_b = \sqrt{\frac{4 \cos(\alpha + \theta) \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) gD}{3C_D \left(\sin \alpha + \frac{\cos \alpha}{4} + \frac{5}{12} \right)}} \quad (2)$$

式中: C_D 为拖曳力系数,取值为 0.4 ^[14]; D 为土颗粒直径; ρ 为水体密度; ρ_s 为土颗粒干密度; g 为重力加速度; θ 为岸坡坡角; φ 为散体颗粒的内摩擦角; u_b 为水流底部流速。用试验数据验证式(1)和式(2)时,需将 u_b 转化为实测泥沙起动的水流垂线平均流速 U ,韩其为等^[25]提出 U 与底部摩阻流速 u_* 的关系表达式为

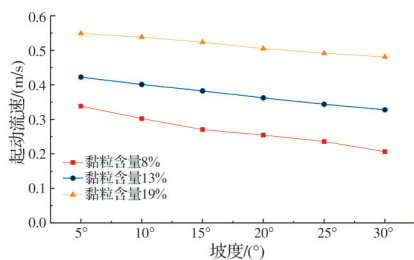
$$\frac{U}{u_*} = 6.5 \left(\frac{H}{D} \right)^{\frac{1}{4 + \lg(H/D)}} \quad (3)$$

沿水面垂线分布的速度函数 u 与摩阻流速 u_* 的关系如式(4)所示^[26]。

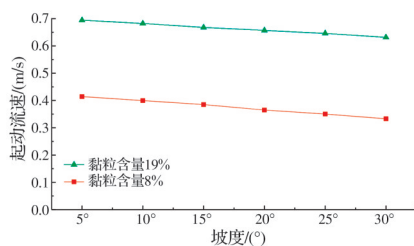
$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \lg \left(30.2 \frac{\chi y}{k_s} \right) \quad (4)$$

泥沙起动时底部流速 u_b 作用位置为泥沙颗粒圆心的 $D/6$ ^[25],即表层土体颗粒的 $2D/3$ 处, k_s 为等效粗糙高度, χ 为修正系数,一般常取 $\chi = 1$, $k_s = 2D$,将上述参数代入到式(4)中,则 u_b 与 u_* 的关系为

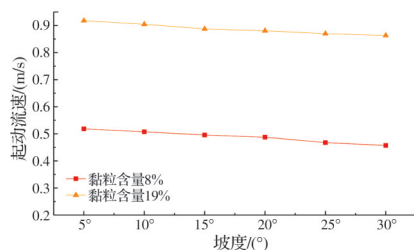
$$u_b = 5.767 u_* \quad (5)$$



(a) 干密度为 1.4 g/cm^3



(b) 干密度为 1.5 g/cm^3



(c) 干密度为 1.6 g/cm^3

图12 同一干密度不同黏粒含量土体斜坡的起动流速

Fig. 12 Incipient motion velocity of soil slope with the same dry density and different clay content

冲刷水流厚度 H 为 15 mm, D 取中值粒径 1.35 mm, 代入式(3)中, 并与式(5)比较可得砂土冲刷时 U 和 u_b 的关系为

$$U = 1.641u_b \quad (6)$$

式(1)、式(2)计算所得的临界起动流速与试验结果对比如图 13 所示。由图可见, 滚动起动流速的计算值与实测值基本相近且变化趋势基本一致, 说明滚动起动流速预测公式具有较强的可靠性; 而滑动起动流速计算值与实测值差距较大, 具体表现为计算值随坡度变化不显著, 而实测值变化明显, 分析与试验测量和观测精度相关, 但是两者结果在同一个数量级, 实际应用时滑动起动流速预测公式可作为参考。

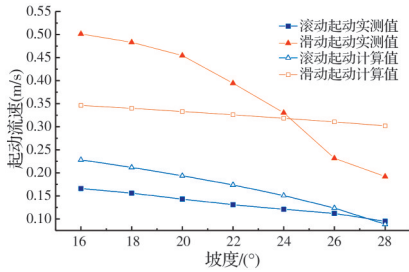


图 13 临界起动流速与实测流速结果对比

Fig. 13 Comparison of incipient motion velocity and actual measured velocity

2.2 黏性土岸坡的临界起动方程

2.2.1 黏性土斜坡冲刷起动力学机制

黏土斜坡冲刷起动试验表明黏土的起动流速与其颗粒粒径及黏粒含量显著相关, 根据黏土以微团形式起动的特点, 分析黏土斜坡冲刷起动的力学状态, 建立黏性土体起动流速预测方程, 并通过黏土斜坡冲刷起动试验结果求解预测方程的相关参数。

黏性土体微团一般受水流拖曳力 F_x 、水流上举力 F_y 、水下浮容重 w 的作用, 同时还存在微团间的黏结力 N 。式(7)~式(9)为洪大林^[27]总结前人研究成果给出的作用力的计算公式。

$$F_x = aC_x \frac{\pi D_0^2}{4} \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (7)$$

$$F_y = aC_y \frac{\pi D_0^2}{4} \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (8)$$

$$w = a \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho) g D_0^3 \quad (9)$$

式中: a 为形状系数; C_x 、 C_y 分别为拖曳力和上举力系数; D_0 为微团聚体直径。微团间的黏结力通常用式(10)计算。

$$N = \xi D_0 \left(\frac{\gamma'}{\gamma'_{\max}} \right)^{3.25} \quad (10)$$

式中: ξ 为黏结力系数; γ' 、 γ'_{\max} 分别为土体的干容重及固结稳定状态下干容重。影响微团间的黏结力因素众多, 如土的物理力学特性、干密度、颗粒级配等因素, 式(10)应用时十分复杂。大量研究均表明黏土的冲刷起动多以细颗粒组成的微团聚体的形式发生, 其中粒径小于 0.25 mm 的那部分团聚体称为微团聚体, 假定微团聚体为球体, 则式(7)~式(9)中的形状系数 a 为 1, 公式可进一步简化。

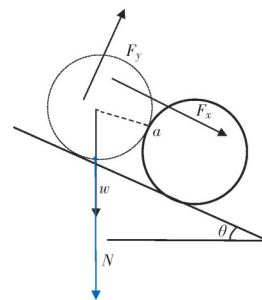
2.2.2 黏性土起动的力学模式

考虑微团的真实形态进行受力分析十分复杂, 假定黏土微团的形态仍近似于球形, 力学分析过程建立的平面二维状态情形如图 14(a) 所示。水流拖曳力与水流上举力作用位置距离圆心为 $D_0/6$, 黏结力其作用方向、大小十分复杂, 但一般的共性认识是作用于土团两侧及底部^[15], 参考已有研究结果, 考虑到对团聚体分析的实际情况, 假定黏结力作用于微团聚体与下部颗粒接触处, 作用方向竖直向下。对微团土体进行起动受力分析, 无论起动后土体微团如何运动, 起动瞬间土体微团在各种力作用下沿微团中的 a 点产生力矩, 建立平衡方程为

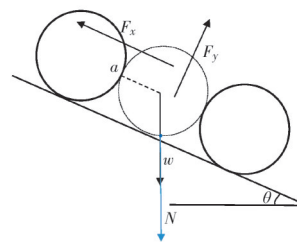
$$F_x \left(\frac{D_0}{2} - \frac{D_0}{6} \right) + F_y \left(\frac{D_0}{2} + \frac{D_0}{6} \right) - N \cos \theta \frac{D_0}{2} - w \cos \theta \frac{D_0}{2} = 0 \quad (11)$$

整理式(11)得

$$\frac{F_x}{3} + \frac{2F_y}{3} = (N + w) \frac{\cos \theta}{2} \quad (12)$$



(a) 向下冲刷



(b) 向上冲刷

图 14 黏土微团受力起动示意图

Fig. 14 Incipient motion diagram of clay cluster under stress

将式(1)~式(4)带入式(6),进一步整理可得

$$\rho u_b^2 = \frac{\left[12\xi D_0 \left(\frac{\gamma'}{\gamma'_{\max}} \right)^{3.25} + 12 \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho) g D_0^3 \right] \cos \theta}{C_x \pi D_0^2 + 2C_y \pi D_0^2} \quad (13)$$

黏土微团的重力项远小于黏结力,对式(13)进一步整理可得

$$u_b = \sqrt{\frac{12\xi \cos \theta}{\rho \pi D_0 (C_x + 2C_y)} \left(\frac{\gamma'}{\gamma'_{\max}} \right)^{3.25}} \quad (14)$$

若针对波浪上爬研究,水流拖曳力沿斜坡向上(如图14(b)所示),此时黏土发生微聚团起动的力学平衡方程仍为式(7),即同一坡度的黏土斜坡向下或向上的临界冲刷拖曳力基本相同。

分析式(14)可知,黏土斜坡的冲刷起动流速与黏结力、干密度等参数正相关,与微团粒径负相关,由于微团粒径分布范围极广,实际运用式(14)计算黏土的起动流速十分困难,考虑到微团粒径、黏结力系数等都与黏性泥沙的含量相关,因此式(14)可用 S 、 γ'/γ'_{\max} 及 $\cos \theta$ 等为变量的函数形式表示为

$$u_b = f\left(S, \frac{\gamma'}{\gamma'_{\max}}, \cos \theta\right) \quad (15)$$

对于同一类土,土体的最大干容重 γ'_{\max} 与土粒重度 γ_s 的比值通常为一常数,考虑到式(14)的具体形式和各变量的关系,式(15)可表示为

$$u_b = a S^b \left(\frac{\gamma'}{\gamma_s} \right)^c \cos^d(\theta) \quad (16)$$

式中: a 、 b 、 c 和 d 为待求解参数; γ_s 为黏性土粒重度。上述参数将采用黏土斜坡土体冲刷起动试验的结果来进行拟合求解。

2.2.3 黏性土起动公式的参数求解

将试验数据代入式(16)中拟合求解参数,试验测得的流速为平均水深流速 U ,需要将试验测得的起动流速进行换算。

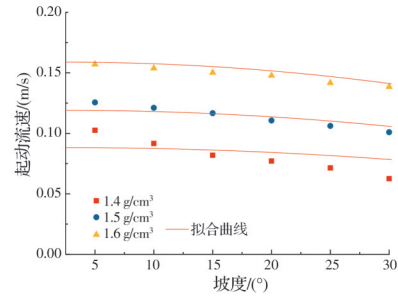
冲刷水流厚度 H 为15 mm, D 取0.066 mm,代入式(3)中,并与式(5)比较可得黏土冲刷时 U 和 u_b 的关系为

$$U = 3.300 6u_b \quad (17)$$

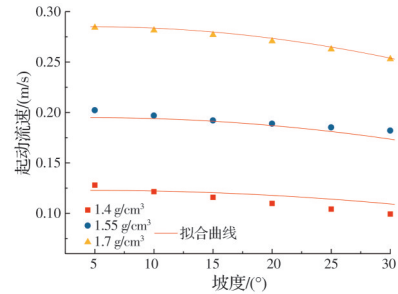
应用式(17)将试验测得的起动流速转化为时均流速 u_b ,将54组测得的试验数据代入式(16)中,应用最小二乘法进行拟合求解,求得式中参数 $a = 8.5$ 、 $b = 4.34$ 、 $c = 0.68$ 、 $d = 0.83$ 。 γ_s 为黏性土粒重度,取2.70。将上述参数代入式(16)中可得

$$u_b = 8.5 \left(\frac{\gamma'}{2.70} \right)^{4.34} S^{0.68} \cos^{0.83}(\theta) \quad (18)$$

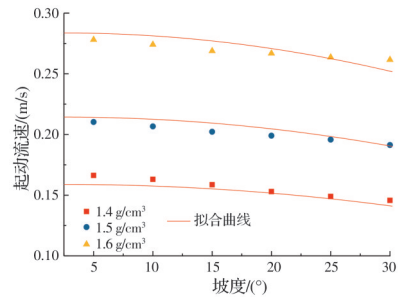
式(18)的拟合相关系数 R^2 为0.997,式(18)与试验结果的对比情况如图15所示。由图15可知,黏粒含量为8%的干密度为1.4 g/cm³时,起动流速较小,此时,式(18)计算值与试验值偏差较大,其余情况的试验结果与公式值拟合效果较好。



(a) 黏粒含量为8%



(b) 黏粒含量为13%



(c) 黏粒含量为19%

图15 起动时均流速公式的拟合结果图

Fig. 15 Fitting result diagram of the average flow velocity formula of incipient motion

为验证起动时均流速公式,开展了一组干密度为1.6 g/cm³、黏粒含量 S 为13%的冲刷试验,将试验结果通过式(14)换算为底部流速,并与公式计算值进行对比如图16所示。从图中可见,试验值与计算值虽然不完全吻合,但是趋势基本一致,这也说明起动流速计算公式的正确性。

为进一步验证式(18)的可靠性,选择他人的斜坡土体起动试验结果进行验证,然而关于薄层水流条件下斜坡黏性土体起动的试验研究较少,尤其是考虑到黏粒含量、干密度等土体特性的试验研究,目前的相关研究主要集中于河床黏性土的冲刷试验,在此条件下式(18)的余弦项 $\cos^{0.83}(\theta)$ 值为1。

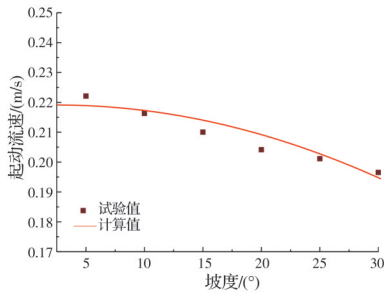


图 16 试验值与计算值的验证

Fig. 16 Verification of experimental and calculated values

选择宗全利等^[28]对荆江段河岸黏性土体的冲刷试验结果进行对比验证,其试验采用的黏性土黏粒含量为 24.6%,将其起动切应力试验值转化为水流摩阻流速,绘制干密度及对应的起动摩阻流速值见图 17,为便于与本文公式值进行比较,采用文献^[28]的起动流速是其拟合公式值。

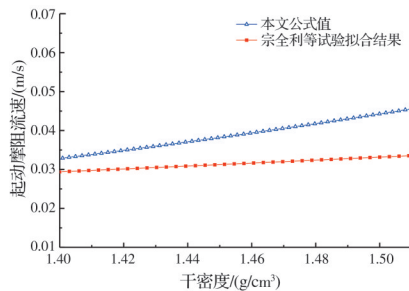


图 17 黏土起动公式与实测值对比图

Fig. 17 Verification of the universality of the incipient motion velocity formula

式(18)为时均流速的表达式,将 u_b 和 u_* 的关系式(13)代入式(5)即可获得摩阻流速形式的表达式形式,并取 $\cos^{0.83}(\theta)$ 为 1,即

$$u_* = 1.474 \left(\frac{\gamma'}{2.70} \right)^{4.34} S^{0.68} \quad (19)$$

式(19)的计算结果与宗全利等试验值的对比如图 17 所示,构建的起动方程相关参数取决于冲刷起动试验,由于试验条件、试验手段等都有较大差别,计算值较宗全利等的试验值偏大,但整体数值均在一个数量级范围,且计算值能明显反映出干密度对黏性土体的起动状态的影响,这也与绝大多数的研究相符^[27]。就总体预测效果而言,本文的黏性土流速计算公式可用于物理性质较为相似的黏性土土样起动流速预测。

3 结论

针对薄层水流对坡面土体的侵蚀问题,自主研发了斜坡土体冲刷试验装置,探索了无黏性和黏性岸坡土体的临界起动条件,主要的工作和结论如下:

1)通过颗粒染色和高倍数电子显微等技术手段观测了无黏性土颗粒的起动现象,确定了无黏性岸坡土体的起动模式与水流流速的相互关系。并且验证了作者提出的无黏性岸坡土体临界起动方程,其中滚动起动流速方程具有较强的可靠性。

2)探索了不同干密度、不同黏粒含量及不同坡度与黏性岸坡土体临界起动流速的相互关系。试验结果表明:土体的黏粒含量、干密度及坡度对黏性土体的起动流速影响较大,相比于干密度和土体坡度,黏粒含量对黏土斜坡的起动流速影响更为明显。

3)根据黏性土在水流冲刷条件下以微团起动的特点,构建了黏土斜坡的起动力学平衡方程,推导获得了黏土斜坡半经验半理论的起动流速方程,并根据黏土斜坡的冲刷起动试验结果求解了起动流速方程的相关参数,最终确定的起动流速方程与试验结果拟合度较好,同时验证了起动流速方程的可靠性。

参考文献

- [1] PENG J B, FAN Z J, WU D, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China [J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 79-90.
- [2] LI M L, ZHANG X C, YANG Z J, et al. The rainfall erosion mechanism of high and steep slopes in loess tablelands based on experimental methods and optimized control measures [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(9): 4671-4681.
- [3] WANG G L, LI T L, XING X L, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 7933-7944.
- [4] JIA C F, SUN B P, YU X X, et al. Analysis of runoff and sediment losses from a sloped roadbed under variable rainfall intensities and vegetation conditions [J]. *Sustainability*, 2020, 12(5): 2077.
- [5] BAO Y H, GAO P, HE X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir - A unique geomorphological unit [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [6] BAO Y H, TANG Q, HE X B, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Hydrology Research*, 2015, 46(2): 212-221.
- [7] KOVACS A, PARKER G. A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 267: 153-183.
- [8] BONG C H J, LAU T L, GHANI A A, et al.

- Sediment deposit thickness and its effect on critical velocity for incipient motion [J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2016, 74(8): 1876-1884.
- [9] HOSSEIN N M M, HOSSEIN K, RASOUL M S. Laboratory analysis of incipient motion velocity for non-uniform non-cohesive sediments movement in rectangular flumes [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 9(1): 1-6.
- [10] 李林林, 张根广, 吴彰松, 等. 正负坡上均匀散粒体泥沙起动流速的研究[J]. *泥沙研究*, 2016(5): 54-59.
LI L L, ZHANG G G, WU Z S, et al. Incipient motion velocity of non-cohesive uniform sediment particles on the positive and negative slopes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2016(5): 54-59. (in Chinese)
- [11] 周双, 张根广, 王新雷, 等. 均匀泥沙相对暴露度的试验研究[J]. *泥沙研究*, 2015(6): 40-45.
ZHOU S, ZHANG G G, WANG X L, et al. Study on relative exposure degree of uniform sediment [J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(6): 40-45. (in Chinese)
- [12] 李林林, 张根广, 王愉乐. 任意坡面上均匀沙起动概率及起动流速的计算公式[J]. *泥沙研究*, 2018, 43(3): 38-43.
LI L L, ZHANG G G, WANG Y L. Threshold probability and incipient motion velocity of uniform sediment on arbitrary slopes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(3): 38-43. (in Chinese)
- [13] KANG C, CHAN D. Modeling of entrainment in debris flow analysis for dry granular material [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(10): 04017087.
- [14] WANG L, WANG S M, GUO F. Incipient motion mode and incipient velocity of soil erosion [J]. *Taiwan Water Conservancy*. 2021, 69(3): 46-58.
- [15] 韩其为, 何明民. 细颗粒泥沙成团起动及其流速的研究[J]. *湖泊科学*, 1997, 9(4): 307-316.
HAN Q W, HE M M. The incipient motion and velocity of aggregated fine particles [J]. *Journal of Lake Science*, 1997, 9(4): 307-316. (in Chinese)
- [16] ZHAO G S, VISSER P J, PEETERS P, et al. Headcut migration prediction of the cohesive embankment breach [J]. *Engineering Geology*, 2013, 164: 18-25.
- [17] ZUO L Q, ROELVINK D, LU Y J, et al. On incipient motion of silt-sand under combined action of waves and currents [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 69: 116-125.
- [18] VAN PROOIJEN B C, WINTERWERP J C. A stochastic formulation for erosion of cohesive sediments [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115 (C1): C01005.
- [19] KIMIAGHALAM N, CLARK S P, AHMARI H. An experimental study on the effects of physical, mechanical, and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31 (1): 1-15.
- [20] VAN RIJN L C, WALSTRA D J R, VAN ORMONDT M. Unified view of sediment transport by currents and waves. IV: Application of morphodynamic model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133 (7): 776-793.
- [21] WU W M, PERERA C, SMITH J, et al. Critical shear stress for erosion of sand and mud mixtures[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2018, 56 (1): 1-15.
- [22] NING C E, WAN Z H. *Mechanics of sediment transport* [M]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1999.
- [23] SALEM H S, RENNIE C D. Practical determination of critical shear stress in cohesive soils [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 143(10): 04017045.
- [24] 汤明高, 许强, 黄润秋. 三峡库区典型塌岸模式研究[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(2): 172-177.
TANG M G, XU Q, HUANG R Q. Types of typical bank slope collapses on the Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 172-177. (in Chinese)
- [25] 韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
HAN Q W, HE M M. *Characteristics of incipient sediment and incipient velocity* [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [26] ZHOU S, ZHANG G G, WANG Y L. Unified standard of sediment incipient motion and corresponding relationships between different threshold parameters based on probability theory [J]. *Taiwan Water Conservancy*, 2019, 67(3): 16-23.
- [27] 洪大林. 黏性原状土冲刷特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
HONG D L. *The experiment study on the scouring characteristics of cohesive undisturbed soil* [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [28] 宗全利, 夏军强, 张翼, 等. 荆江段河岸黏性土体抗冲特性试验[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 567-574.
ZONG Q L, XIA J Q, ZHANG Y, et al. Experimental study on scouring characteristics of cohesive bank soil in the Jingjiang reach [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 567-574. (in Chinese)