

吴汉美, 李春娥, 段国凡. 山体滑坡影响下沟道系统中含沙水流流动稳定性研究[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 60–63.
[WU Hanmei, LI Chune and DUAN Guofan. Study on the Flow Stability of Sandy Water in Gully System under the Influence of Landslide[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 60–63. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.012.]

山体滑坡影响下沟道系统中含沙水流流动稳定性研究^{*}

吴汉美, 李春娥, 段国凡

(重庆大学城市科技学院, 重庆 永川 402167)

摘要: 为确定外界条件变动对沟道水流流动稳定性的影响, 对山体滑坡影响下沟道系统中含沙水流流动稳定性展开研究。利用射流冲击理论, 归纳泥沙颗粒的运动形式, 从而确定泥沙对水流紊动的作用效果, 完成山体滑坡影响下沟道系统含沙水流的运动特性分析。在此基础上, 根据摩阻流速规律, 定义垂线流速的分布公式, 再通过计算水流涡量数值的方式, 确定沟道出渗作用对含沙水流结构的实际影响。模拟实验结果表明, 在山体滑坡作用下, 沟道系统内的含沙浓度不断增大, 导致含沙水体泄流能力急剧提升, 降低沟道水流的稳定性流动能力。

关键词: 山体滑坡; 沟道系统; 含沙水流; 流动稳定性; 水流紊动; 摩阻流速; 垂线流速; 水流涡量

中图分类号: TV142.1; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)03-0060-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.012

山体滑坡是指在重力作用下, 整个山体斜坡或斜坡上某部分岩石沿软弱结构带发生剪切位移的现象, 会对山体表面土层产生沿斜坡方顺流向下的作用力, 所谓重力效果包括地下水动静压力、岩土本身重力两个力学物理量, 这种现象也被称为“土溜”“走山”“地滑”或“垮山”, 是一种较为常见的地质灾害行为。山体由滑坡体、滑坡壁、滑动面、滑坡床、滑坡裂缝等多个结构共同组成, 其中, 滑坡体指的是整个滑坡平面上所有可滑动的部分, 也叫滑体; 滑坡壁是指在滑坡体后缘脱离不动山体后暴露在分界面上的壁状结构; 滑动面是滑坡体不动岩与土体下滑结构的分界面, 也叫滑面; 滑坡床是指坡体下滑时所依附的不动岩及土体结构, 也可称为滑床; 滑坡裂缝是存在于滑体及其边缘结构之间的已成型裂缝, 包含拉张裂缝、剪切裂缝、羽毛状裂缝、鼓张裂缝和扇状裂缝五种表现形式^[1-2]。

在外界条件作用下, 沟道内水体流动情况会出现明显改变, 其中, 山体滑坡作为最常见的作用形式, 对水流流动特性的影响尤为明显。为更好确定外界条件变动对沟道水流流动稳定性造成的影响, 在射流冲击理论支持下, 分析泥沙颗粒的运动变化形式, 再根据泥沙对水流紊动的作用效果, 确定垂线流速分布公式及水流涡量条件。根据模型沙变化形式, 选取合理实验装置, 通过分析水体泄流能力的方法, 判定山体滑坡作用对

沟道系统中含沙水流流动稳定性的影响。

1 山体滑坡影响下沟道系统含沙水流运动特性分析

1.1 射流冲击理论

含沙流动水舌从泄水孔自由下落至水垫塘, 其泄洪作用会在水垫塘内部的一定区域中激起冲击射流。流动水舌从上至下落到水垫塘底部时, 由于水体的流动方向早已发生改变, 其自身动能会转化为压能, 对塘体底板结构产生较为强大的冲击力。根据紊动射流原理可知, 水体射流在流动过程中, 会与周围水流混掺在一起, 从而造成射流宽度不断扩张、水体流速快速减小。为扩张完全发展流动区的覆盖面积, 位于射流中心线上的水体流速会随射程的增加而不断缩小^[3]。在山体滑坡外力的作用下, 冲击射流可分为淹没射流和自由射流两种形式, 其中, 淹没射流在山体沟道系统内可进行自由扩散, 对含沙水体的冲击作用力度相对较低; 自由射流完全不受周围山体沟道介质的影响, 对含沙水流造成直接的物理冲击。

1.2 泥沙颗粒运动形式

在山体滑坡影响下, 沟道系统中泥沙颗粒的运动形式主要可分为悬移质、推移质和中性悬浮质三种类型。其中, 悬移质泥沙颗粒运动可在沟

* 收稿日期: 2020-10-01 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 重庆市基金项目(KJQN201902505); 国家青年科学基金项目(51905824)

第一作者简介: 吴汉美(1987-), 女, 汉族, 重庆人, 硕士, 讲师, 主要从事景观水节能环保, 建筑、市政工程管理、风险控制研究。E-mail: wuhanmei815326@163.com

道系统垂直方向上产生一个向上的作用力, 并适当分担由含沙水体流动而带来的漩涡力量作用, 在此情况下, 处于流动水体中的泥沙颗粒可长期保持悬浮状态^[4]。悬移质描述的是沟道系统内周围水体的相对运动效果, 可消耗大量的水流势能。若含沙水体中同时存在悬移质和推移质两种形式的泥沙颗粒, 则可称为两相流沟道系统。当水体流动强度相对较小时, 推移质泥沙颗粒可在沟道床体表面保持滚动、跃移或滑动的运动状态, 又因泥沙颗粒可与沟道床体发生直接接触, 因而被称为接触质泥沙颗粒。由于组成沟道床体的泥沙颗粒间隙较大, 可在水流拖曳力作用下发生滚动作用, 因此, 在泥沙颗粒间摩擦力小于拖曳力的情况下, 更深层次的泥沙也会随水流开始运动^[5]。当粘性泥沙颗粒在沟道系统水流中的累积含量达到一定浓度后, 含沙水体将从牛顿流体直接转化为宾汉流体, 此时可将水流所具有的宾汉极限剪切力定义为 τ_a 。而当牛顿流体完全转化为宾汉流体后, 粘性泥沙颗粒也会具备一定的物理结构性状, 同时也会保留一定强度的结构化应力。当这种结构化应力作用大于含沙水流的剪切力数值时, 泥沙颗粒间便不会产生相对运动趋势。在该结构应力的作用下, 沟道系统水流中的部分泥沙颗粒不会继续沉降, 而是始终维持悬浮状态, 即中性悬浮质, 通常情况下, 可将这种悬浮质的最大粒径条件 D_a 表示为:

$$D_a = l \frac{\tau_a}{(\gamma_a - \gamma_0)} \quad (1)$$

式中: l 代表含沙水体流动系数; γ_a 代表泥沙悬浮质的流动容量; γ_0 代表泥沙悬浮质的静止容量。

1.3 泥沙对水流紊动的作用

泥沙对水流紊动作用的影响主要包含外来干扰和流动不稳定性两方面。

(1) 外来干扰(外因): 在发生山体滑坡的情况下, 若沟道系统内的含沙量保持不变, 水体便会处于充分紊流区之中, 此时泥沙颗粒也会在含沙水流中保持相对均匀的悬浮状态。由于悬浮泥沙颗粒具备消耗水流紊动力的能力, 会导致水流的紊动势能不断减弱, 同时对含沙水流的流动稳定性起到一定的抑制作用。若水体并未完全处于充分紊流区之中, 在水流速度达到一定数值条件时, 粗制泥沙颗粒与细制泥沙颗粒便会对沟道系统内含沙水流的流动稳定性造成完全不同的影响^[6]。

(2) 流动不稳定性(内因): 假设山体滑坡会直接作用于沟道系统内的含沙水流, 在不同细度条件泥沙颗粒的影响下, 含沙水流会出现明显的密度分布不均现象。在水体漩涡所穿越密度梯度层数值不断增加的情况下, 水流紊动作用的强度也会随之减弱。通常情况下, 越靠近沟道系统底部边壁处的水体含沙量越大, 水流的相对密度也就越大^[7]。由于整个沟道系统内水体流场密度是向上逐级递减的, 当山体滑坡引起漩涡不断向上运动时, 与之相关的泥沙颗粒将会处于密度更小的含沙水体之中, 在此过程中, 沟道系统必须克服

垂直向下的重力作用, 因此会大量消耗由水体稳定流动而带来的水流动能。

2 沟道出渗对含沙水流结构的影响

在水体运动特性原理的支持下, 按照摩阻流速计算、垂线流速分布公式定义以及水流涡量确定的处理流程, 分析沟道出渗对含沙水流结构的影响, 完成山体滑坡影响下沟道系统中含沙水流的流动稳定性研究。

2.1 摩阻流速

摩阻流速可直接反应边界摩阻作用对含沙水体流速的影响。根据公式 $u_0 = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_0}}$ 可知, 计算水体摩阻流速首先要测量沟道系统量测床面的剪切应力数值, 同时明确山体滑坡作用对沟道渠流床面切应力的摩阻阻力 f 、含沙水体流动系数 χ 、挟沙流动系数 λ 。常规的剪切应力测量方法包含直接测量和间接测量两类。其中, 直接测量法可获得较为直观的剪切应力数值, 但需要在沟道渠流床面放置电阻式探头, 在山体滑坡作用下, 难以把握仪器的测量精确性, 从而易导致剪切应力数值出现较大偏差^[8-9]。间接测量法虽不能测得底层含沙水体的流动速度, 但可根据泥沙颗粒的线性分布公式, 求取剪切应力的实际作用数值。在上述物理量的支持下, 联立公式(1), 可将山体滑坡影响下沟道系统含沙水体的摩阻流速表示为:

$$\frac{u'}{u_0} = \frac{1}{D_a} \ln \frac{\lambda(p + p_0)}{f\chi} / \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_0}} \quad (2)$$

式中: p 代表山体滑坡影响下沟道系统所具备的物理动能; p_0 代表山体滑坡影响下含沙水体所具备的物理动能。

2.2 垂线流速分布公式

在山体滑坡影响下, 沟道系统含沙水体的垂向流速可表示为:

$$V_1 = \frac{u'}{u_0} - \int_{e_0}^{e_1} \left(\frac{U}{W} \right) \quad (3)$$

式中: e_0 代表含沙水体在垂直方向上的最小受力分量; e_1 代表含沙水体在垂直方向上的最大受力分量, U 代表含沙水流所具备的物理动能; W 代表含沙水流所具备的物理势能。在 $\frac{u'}{u_0}$ 的物理数值不断趋近于实值 1 的情况下, 山体滑坡对沟道系统含沙水体的水平流速可表示为:

$$V_2 = \sqrt{\mu \frac{u'}{u_0} + \xi(F_1^2 + F_2^2)} \quad (4)$$

式中: μ 代表山体滑坡作用在水平方向上的力学分量; ξ 代表山体滑坡影响下沟道系统所具备的物理承力条件; F_1 代表含沙水体所受的流动阻力; F_2 代表含沙水体所受的静止阻力。

设 ϑ' 代表含沙水体垂向流速与水平流速的交叠系数, 联立公式(3)和公式(4), 可将山体滑坡影响

下沟道系统中含沙水流的垂线流速分布公式定义为:

$$V = \int_{p_0}^{p_1} \frac{\vartheta'(V_1 V_2 + 1)}{1 + \sqrt{s_0^2 + h_0^2}} \circ \quad (5)$$

式中: p_1 代表泥沙颗粒在垂线方向上的最大分布系数; s_0 代表含沙水体水平流动阻力的作用范围条件; h_0 代表含沙水体垂直流动阻力的作用范围条件。

2.3 水流涡量

山体滑坡影响下沟道系统含沙水流涡量由正向涡流、负向涡流两部分共同组成^[10]。正向涡流是指在沟道系统内泥沙颗粒下方及回流区域中后部床面形成的小范围涡状流体, 具备正向的流动作用效果(图1); 负向涡流是指在沟道系统泥沙颗粒迎流面上部边界层及其分离区内部剪切而成的涡状流体, 常表现为舌尖状, 沿含沙水体的流动方向逐渐减小, 具备负向的流动作用效果(图2)。



图1 正向水体涡流



图2 负向水体涡流

仅从沟道出渗作用的角度来看, 正向水体涡流和负向水体涡流均能减小含沙水体泥沙颗粒附近的流动涡量数值, 且能够在一定程度上维持水体的流动稳定性。设 x_1 代表山体滑坡影响下沟道系统含沙水体的正向涡流速率, x_2 代表山体滑坡影响下沟道系统含沙水体的负向涡流速率, 联立公式(5), 可将沟道出渗作用下的水流涡量数值表示为:

$$x = \frac{1}{V} (\ln \frac{x_1}{\eta_1 \Delta g_1} + \ln \frac{x_2}{\eta_2 \Delta g_1}) \quad (6)$$

式中: η_1 代表涡状流体的正向流速转化量; η_2 代表涡状流体的负向流速转化量, Δg_1 代表正向涡流的单位水体回流量, Δg_2 代表负向涡流的单位水体回流量。在不考虑其它外界干扰条件下, 通过上述分析完成山体滑坡影响下沟道系统中含沙水流的流动稳定性研究。

3 水流流动稳定性实验

为验证山体滑坡作用对沟道系统中含沙水流流动稳定性的影响, 设计如下模拟实验。由于实验按照含沙量由高到低的顺序进行, 在整个实验过程中需要不断调节含沙量的实时浓度, 因此水池低必须预留一部分容积, 以满足后续的调节加水需求。

3.1 实验装置

实验在长2 m、宽2 m、高1 m的长方体混凝土水池中进行, 边墙厚度大约10 cm。为方便布置传感器设备, 在一侧的水池边墙中预留一个20 cm长的缺口, 在其上放置一块内部布置线钻孔测点的灰塑料板用于挡水。在水池的缺口处布置一个门槽, 形成一个人工控制的闸门结构。实验水池的具体结构见图3。



图3 实验水池

3.2 模型沙选择

为避免粗颗粒泥沙发生沉淀, 选取细黄土颗粒作为实验添加物质, 以保证泥浆浓度可达到理想数值水平。本次实验所选取的黄土颗粒粉级数值处于0.005 mm ~ 0.05 mm之间, 在使用的黄土总质量中大约占比50% ~ 70%。实验所用黄土中约含有10% ~ 25%的粘土颗粒(粉级数值小于0.005 mm), 沙土颗粒(粉级数值大于0.05 mm)的质量水平约占实验总用土量的20%。在实验过程中, 通过筛分处理的方式, 配置410 kg/m³、775 kg/m³、990 kg/m³、1 115 kg/m³四种含沙量不同的水体, 模拟山体滑坡作用, 分析外力影响下沟道水流流动稳定性变化情况。

3.3 泄流能力

水体泄流能力可表示沟道水流的稳定性流动能力, 通常情况下, 前者的数值水平越高, 后者的稳定性能力也就越低。在上述实验条件下, 得出山体滑坡影响下, 不同浓度含沙水体泄流能力的实际变化情况。结果如表1所示。分析表1可知, 在水体含沙量等于0的情况下, 沟道系统水流的泄流能力最低, 5次实验结果的平均值仅为0.47 N/m; 在水体含沙量等于1 115 kg/m³的情况下, 沟道系统水流的泄流能力高, 5次实验结果的平均值达到1.28 N/m, 与初始最小值相比上升了0.81 kg/m³; 水体含沙量等于410 kg/m³、775 kg/m³、990 kg/m³时, 沟道系统水流的泄流能力平均值分

别为 0.66 N/m、0.90 N/m、1.00 N/m。综上可知, 在山体滑坡影响下, 随水体含沙量数值的提升, 沟道系统水流的泄流能力逐渐增强, 导致含沙水流的流动稳定性持续降低。

表 1 水体泄流能力变化情况

含沙量/(kg/m ³)	泄流能力/(N/m)				
0	0.46	0.49	0.43	0.45	0.50
410	0.65	0.68	0.62	0.63	0.72
775	0.88	0.94	0.85	0.86	0.97
990	0.99	1.03	0.96	0.98	1.05
1 115	1.27	1.30	1.22	1.24	1.36

3.4 泥沙颗粒对水流稳定性的影响

山体滑坡会产生大量的泥沙颗粒, 这些泥沙颗粒对水流的稳定性会产生一定的影响, 因此, 以高含量、中含量和低含量泥沙颗粒为条件, 分析水流稳定性, 结果如图 4 所示。分析图 4 可知, 虽然随着实验时间的增加, 不同泥沙颗粒含量下的水流稳定系数均呈现下降的趋势, 但是泥沙颗粒含量较高条件下的水流稳定系数始终低于中含量和低含量条件下的水流稳定系数, 说明泥沙颗粒的含量对水流稳定性具有一定影响, 泥沙颗粒含量越低, 水流稳定性越强。

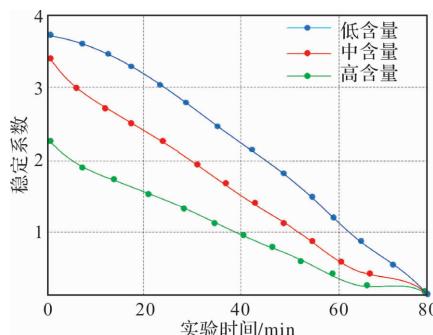


图 4 不同泥沙颗粒含量水流稳定性对比

4 结束语

山体滑坡作为常见的外力干扰作用, 可使沟道系统内的含沙浓度在短时间内快速增大, 从而引起含沙水体泄流能力的持续增强, 造成水流流动稳定性的下降。在射流冲击理论的支持下, 可知泥沙颗粒会加强水体的摩阻流速, 进而影响水流的正、负涡流总量。由此可认为, 在山体滑坡的影响下, 降低沟道系统内的含沙浓度水平, 是提升水流流动稳定性的有效手段。

参考文献

- [1] 李金华, 岳鹏举, 苏培莉, 等. 动水流速对浆液留核稳定性的影响研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 154–156.
- [2] 王丽英, 王红梅, 骆文进. 堆积层滑坡中桩-拱抗滑支护体系的稳定性分析[J]. 科技通报, 2018, 34(5): 78–82.
- [3] 张凌越, 李文杰, 杨胜发, 等. 利用 PTV 测量细颗粒泥沙粒径和沉速[J]. 水力发电学报, 2018, 37(7): 20–28.
- [4] 郭世兴, 王健, 吕莎. 多泥沙河流防洪水库泄洪排沙规模研究——以陕西省王瑶水库为例[J]. 水力发电, 2019, 45(9): 57–60, 83.
- [5] 闫红杰, 史雅君, 周萍, 等. 河床泥沙起动流速公式修正及可靠性验证[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(17): 297–301.
- [6] 蒋昌波, 刘易庄, 邓斌. 出渗对大颗粒泥沙周边水流结构及受力影响试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 15(3): 515–525.
- [7] 许新发, 黄志文, 周苏芬, 等. 不同整治工程条件下赣江尾闾河网水流特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(7): 7–13.
- [8] 张磊, 关见朝, 王友胜, 等. 悬移质泥沙输移扩散方程适用条件的讨论[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 694–702.
- [9] 吴启和. 近坝消能区过水围堰水流特性研究——以富春江水电站船闸改建工程为例[J]. 人民长江, 2018, 49(14): 105–109.
- [10] 侯素珍, 李婷, 郭彦, 等. 西柳沟河床泥沙组成分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 6–10.

Study on the Flow Stability of Sandy Water in Gully System under the Influence of Landslide

WU Hanmei, LI Chune and DUAN Guofan

(City College of Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 402167, China)

Abstract: In order to determine the influence of external conditions on the flow stability of gully, the flow stability of sand-bearing water in gully system under the influence of landslides is studied. By means of jet impingement theory, the movement forms of sediment particles are summarized, and the effect of sediment on flow turbulence is determined. On this basis, according to the law of frictional velocity, the distribution formula of vertical velocity is defined, and the actual influence of channel seepage on the structure of sand-bearing water flow is determined by calculating the vorticity of water flow. The simulation results show that under the action of landslides, the sediment concentration in the gully system increases continuously, which leads to a sharp increase in the discharge capacity of the sand-bearing water body and reduces the stability and flow capacity of the gully.

Key words: landslide; channel system; sandy current; flow stability; flow turbulence; friction velocity; vertical velocity; vorticity of water flow