

多向汇水条件下弃渣土体细颗粒启动机制研究

杨彪山¹, 查浩², 国鸿圆³

1. 成都市地质环境监测站, 成都 610042; 2. 四川省西南大地集团有限公司, 成都 610032;
3. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

摘要: 在汇水的影响下, 弃渣土体中的细颗粒容易启动、迁移和流失, 这不仅会改变其原有结构, 还会降低其稳定性, 从而引发各种地质灾害, 对工程建设及人员生命安全构成严重威胁。弃渣土体的布置位置通常为沟道中下部或沟口位置, 这使得弃渣土体中的细颗粒在实际工程中所承受的并非仅仅是单一的汇水作用, 而是来自多个方向、不均匀的汇水综合作用。然而现阶段针对弃渣土细颗粒的研究大多局限于降雨作用或单一方向的冲刷情况, 对于多向汇水对弃渣土体细颗粒启动、迁移及流失的影响规律尚缺乏深入研究。因此, 本文以西南某线性工程弃渣土体为研究对象, 通过自制渗透试验及理论推导, 深入分析了多向汇水对弃渣土细颗粒启动流失规律的影响, 并以此建立了不同汇水条件下弃渣土细颗粒的临界启动判据。结果表明, 组合汇水影响深度受弃渣土自身颗粒成分及汇水强度的共同影响, 即弃渣土细颗粒含量越高, 各部分汇水强度越小时, 影响深度就随之减小。研究成果对弃渣土体稳定性评价研究提供了一定的理论基础。

关键词: 多向汇水; 弃渣土体; 细颗粒启动条件; 影响深度

中图分类号: P64 **文献标识码:** A

Study on Initiation Mechanisms of Fine Particles in Spoil Soil under Multi-Directional Water Convergence Conditions

YANG Biaoshan¹, ZHA Hao², GUO Hongyuan³

1. Chengdu Geological Environment Monitoring Station, Chengdu 610042, China;
2. Southwest DaDi Group Co., Ltd., Sichuan Province, Chengdu 610032, China;
3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Under the influence of multi-directional water convergence, fine particles in spoil soil are prone to initiation, migration, and loss. These processes not only alter the original soil structure but also reduce stability, potentially triggering geological hazards and posing significant risks to engineering projects and human safety. Spoil soil is typically deposited in mid-lower gullies or near gully outlets, where fine particles are subjected to heterogeneous water convergence from multiple directions rather than unidirectional flow. However,

收稿日期: 2024-11-20 改回日期: 2024-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501000)

第一作者简介: 杨彪山(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程地质和人文地质领域研究及工作。E-mail: 37588347@qq.com

通讯作者: 查浩(1999—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事岩土工程方面的研究及工作。E-mail: 976172221@qq.com

引文格式: 杨彪山, 查浩, 国鸿圆. 多向汇水条件下弃渣土体细颗粒启动机制研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 88-96.

YANG Biaoshan, ZHA Hao, GUO Hongyuan. Study on initiation mechanisms of fine particles in spoil soil under multi-directional water convergence conditions[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 88-96.

existing studies on fine particle dynamics in spoil soil have focused predominantly on rainfall effects or single-directional scouring, with limited exploration of multi-directional water convergence impacts. This study investigates spoil soil from a linear engineering project in southwestern China through customized infiltration tests and theoretical derivations. The mechanisms of fine particle initiation and loss under multi-directional water convergence were analyzed, and critical initiation criteria for fine particles under varying convergence conditions were established. Results indicate that the influence depth of combined water convergence is jointly governed by the particle composition of the spoil soil and the intensity of water convergence. Specifically, higher fine particle content and lower water convergence intensity lead to reduced influence depth. These findings provide a theoretical foundation for evaluating the stability of spoil soil deposits.

Key words: Multi-directional water convergence; Spoil soil; Fine particle initiation criteria; Influence depth

0 引言

“十四五”期间,我国加强出疆入藏、中西部地区、沿江沿海沿边战略骨干通道建设,“八纵八横”高速铁路基本贯通,国家高速公路网络质量稳步提升,加速建设交通强国。而随着我国经济社会的快速发展,矿山开采、基础设施建设等各种工程活动频繁推进,不同规模的弃渣场随之出现。而弃渣土体在多向汇水作用下,细颗粒发生内部迁移被认为是弃渣土体滑坡形成的重要成因。就各向渗透条件下细颗粒启动因素及流失方式,国内外学者通过多种方法进行研究,取得了大量成果。

通常认为,渗流失稳与孔隙水压力和渗透力的增大有关,正是由于孔隙水压力的增大减小了土体的有效应力,进而降低了土体的抗剪强度,才最终导致土体的失稳破坏。失稳的过程中孔隙水压力的大小会随时发生变化,细颗粒迁移也会对孔压的大小产生影响,这些都导致了土体崩塌破坏具有随机性和不可预测性。一些学者认为,孔隙水压力的增大是由于持续汇水造成的^[1];也有一些学者认为孔隙水压力的增大是由于松散土体失稳后其质量瞬间转移到孔隙水压力上导致的^[2]。孔隙水压力的大小与土体的初始孔隙度有关,同时也发现,孔隙水压力的大小也与土体变形和孔压消散时间有关。陈晓清等^[3]发现砾石土中细颗粒的冲蚀现象;梁越等^[4]通过渗流试验发现土体内部的侵蚀作用会导致土体变形。但是,上述结论大部分都是在理想状态下利用固定粒径的纯砂进行试验得到的,只有少数研究是基于砂砾混合物展开的。对砂砾混合物而言,增加砾石土的含量会增大土体的峰值强度^[5];对于黏土-砾石土混合物而言,增加砾石土含量,会增大土体的

抗剪强度^[5];对于黏质沙土而言,沙含量的增加会使摩擦力随之增加并引起孔隙水压力的响应。Chen等^[6]通过野外试验发现孔隙水压力的大小会随着黏性颗粒含量的不同而不同。以上也只是定量地研究颗粒的某些组分在某一百分比下对抗剪强度的影响。

不少学者根据等效孔径的方法,提出土体中细颗粒沿孔隙通道迁移流失的理论模型^[7],并在等效粒径的基础上,通过对细颗粒启动受力进行分析,根据细颗粒启动形式,采用极限受力平衡法,得到细颗粒不同状态下起动的临界水力坡降计算公式^[8-9]。Liang等^[10]根据渗流试验结果,得到了细颗粒局部移动和全部失稳相对应的低、高临界水力坡降。Israr等^[11]引入应力折减系数,考虑土体内部颗粒间摩擦,建立土体渗透破坏理论模型。王明年等^[12]考虑应力折减,建立以细颗粒应力状态为渗透破坏临界条件,得到水力坡降计算公式。周雅等^[13]利用有压矩形管进行了细颗粒泥沙启动试验,得到了泥沙细颗粒的基本活动规律。梁越等^[14]利用应力动态联动式渗透变形试验系统,选用间断级配散粒土材料开展了潜蚀试验,建立了不同围压下细颗粒流失、体积变化及临界水力梯度等相关关系。刘垒雷等^[15]基于CFD-DEM方法,开展了不同细粒含量与间断比下不连续级配砂砾土渗蚀数值试验,从宏观角度研究了细粒含量与间断比对渗蚀的联合作用机理。

综上所述,在单一汇水条件下细颗粒的启动机制已取得了显著的成果^[16-21],但由于在多向汇水的条件下,多向汇水对弃渣土细颗粒的影响存在一个影响深度,在该影响深度以上细颗粒将受到各个不同方向的汇水作用,而在多向汇水条件下细颗粒的

启动机制还没有得到充分研究。因此,迫切地需要一种判别方法说明在多向汇水、渗流条件下细颗粒的启动规律。本文根据自制渗透试验及理论推导,对弃渣土细颗粒的启动流失规律的多向汇水影响及多向汇水影响深度进行分析。

1 多向汇水弃渣土体细颗粒渗透规律

1.1 汇水条件下细颗粒渗透试验

弃渣土体的颗粒级配十分特殊,在多向汇水的作用下,细颗粒极易发生启动、运移和流失的现象。

本文对西南某线性工程弃渣场现场取样开展了多项物理力学试验,得出弃渣土体天然密度为 1.923 g/cm^3 ,弃渣土体天然孔隙率为 28.65% ,弃渣土体天然含水率为 2.65% ,饱和含水率为 14.3% ,弃渣土体的最大干密度为 2.21 ,其对应的最优含水率为 7% 。

对于堆积体中粗细颗粒的界限划定,依据对其研究目的及研究尺度不同会有所差异,不少学者在进行室内试验时,通常将 $1\sim 2 \text{ mm}$ 作为粗细颗粒的界限粒径^[22]。赵惠林等^[23]在研究泥石流细颗粒浆体的有效浓度时,同样将 1 mm 作为粗细颗粒的分界粒径。故本文将 1 mm 用作粗颗粒与细颗粒的界限,粒径小于 1 mm 的弃渣土颗粒用作弃渣土体细颗粒。

为揭示细颗粒在不同方向汇水及组合汇水情况下的运移和流失现象,使用自制的渗流仪,通过改变汇水方向、强度、试验土样的颗粒级配等条件,分析细颗粒在不同级配条件下,不同汇水方向、强度条件下的启动、运移和流失规律。本次试验共设计 3 种汇水方向、2 种汇水强度、4 种不同细颗粒含量。其中,汇水方向分为垂直降雨、侧向汇水以及降雨与侧向汇水组合;汇水强度分别为 80 mm/h 和 100 mm/h 。降雨与侧向汇水组合汇水时,二者汇水强度预计设为相同强度试验装置及试验设计方案如图 1、表 1 所示。

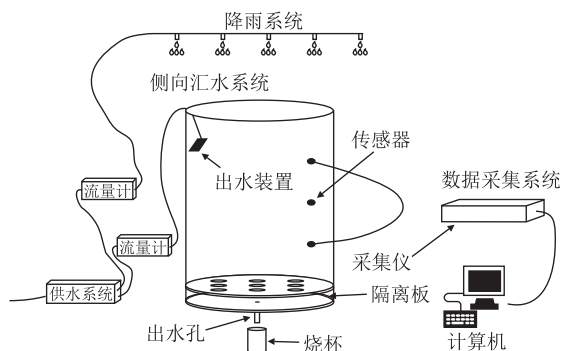


图 1 土柱试验模型

表 1 土柱渗透试验设计方案

试验编号	汇水条件	1 mm 以下 细颗粒含量/%	汇水强度/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$
D-1	垂直降雨	20	80
D-2	垂直降雨	20	100
D-3	垂直降雨	30	80
D-4	垂直降雨	30	100
D-5	垂直降雨	40	100
D-6	侧向汇水	20	80
D-7	侧向汇水	20	100
D-8	侧向汇水	30	80
D-9	侧向汇水	30	100
D-10	侧向汇水	40	100
D-11	降雨与侧向汇水组合	20	80/80
D-12	降雨与侧向汇水组合	20	100/100
D-13	降雨与侧向汇水组合	30	80/80
D-14	降雨与侧向汇水组合	30	100/100
D-15	降雨与侧向汇水组合	40	100/100

1.2 组合汇水影响深度划分

依据试验过程及结果分析,可以发现在组合汇水试验中,位于土层表部的弃渣土会受到来自两个方向的汇水作用,弃渣土细颗粒的启动及流失方向在原单一汇水的基础上发生的一定程度的改变。

在土柱表层,侧向汇水的宏观现象在一定程度上会被垂直降雨所弱化,这是由于位于表层的弃渣土细颗粒在受到侧向汇水作用的基础上还受到了竖直方向的汇水作用。但当渗流达到一定深度时,由于在渗流过程中水流受渗流通道及弃渣土颗粒间孔隙宽度的影响,水流变由不同方向的不同水流演化为沿着渗流通道的单一水流,弃渣土细颗粒受到的不同方向的渗流作用也演化为单一方向的整体渗流作用(图 2)。



图 2 影响深度示意图

通过试验过程分析可以发现,在组合汇水试验中,弃渣土受到叠加渗流作用时,渗流作用湿润峰为不规则的曲线,而当弃渣土受到单一渗流作用时,湿润峰会发育出较为平滑的波峰与波谷,如图 3 所示。

因此,本文以试验过程中出现平滑湿润峰处划定为组合汇水影响深度,以此得到组合汇水D-1~D-5试验中组合汇水影响深度,如表2所示。

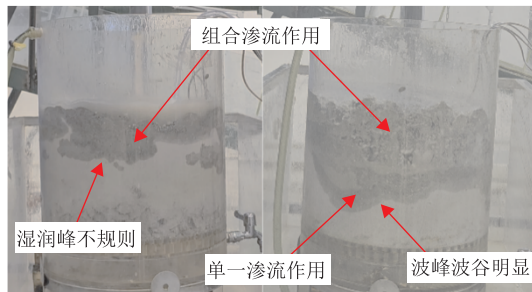


图3 影响深度上下湿润锋对比

横向对比组合汇水试验中D-1~D-5的渗流作用改变的土层深度,可以发现,在组合汇水试验中,组合汇水强度越大,组合汇水影响深度越大,而细颗粒含量越大,组合汇水影响深度越小。

表2 组合汇水影响深度

试验编号	1 mm 以下细颗粒含量/%	汇水强度/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	影响深度/mm
D-11	20	80/80	88
D-12	20	100/100	112
D-13	30	80/80	79
D-14	30	100/100	104
D-15	40	100/100	89

2 细颗粒流失机制分析

依据第1节试验细颗粒渗透试验,可观测到细颗粒启动情况及渗流通道的贯通情况,发现不同的汇水方向下,细颗粒的启动及流失情况也各不相同,进而可以分析不同汇水方向及组合汇水条件下细颗粒流失机制。

2.1 细颗粒流失宏观现象

(1) 垂直降雨条件下细颗粒流失宏观现象

弃渣土体仅受到垂直降雨的单向汇水影响时,土柱表面的细颗粒在被水润湿后在重力、渗流力的作用下启动,从粗颗粒间的孔隙中向土层下方运移。土柱内部的细颗粒则被水润湿后在重力、渗流力和孔隙水压力的作用下启动。在汇水过程中,土层表面的细颗粒渐渐流失,体现出的宏观现象为土柱表面土层逐渐粗化,如图4所示。

由于垂直降雨的汇水方式土层表面的湿润程度较为均匀,故土层表面各处的粗化程度也较为平均。

垂直降雨渗透试验中,细颗粒在渗流过程中收渗透作用的影响向水流方向运移,逐渐形成渗流通道,而渗流通道附近的细颗粒会优先顺着水流流失,



图4 土层表面颗粒粗化

这使渗流通道的宽度会渐渐扩大,如图5所示。



图5 渗流通道的宽度扩大

细颗粒在流失的过程中,会遭遇渗流通道宽度不足以颗粒通过,此时渗流通道就会发生堵塞,而堵塞后如在渗流结束前在此渗流通道旁边生成了新的渗流通道,那么在此处沉积的细颗粒部分会沿着新的渗流通道继续运移,剩余的部分将会沉积于此。表现出的宏观现象为在不断粗化的土层中出现部分明显细化部分,如图6所示。

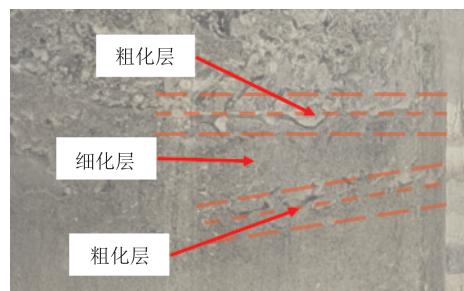


图6 颗粒粗化层与细化层相间分布

当数条渗流通道贯通后,由粗颗粒孔隙形成的渗流通道不再变宽,渗流通道周围达到启动条件的细颗粒也基本流失完成,在不改变其他汇水条件的情况下,将不再有大量细颗粒运移。此时,土柱下方出水孔也基本不再有细颗粒渗出。

(2) 侧向汇水条件下细颗粒流失宏观现象

弃渣土体受到侧向汇水的影响时,土层表面也会由于受到汇水的影响而发生粗化。但由于侧向汇水对土层表面的湿润程度不均匀,这导致在此条件下土层表面的粗化是不均匀的,如图7所示。

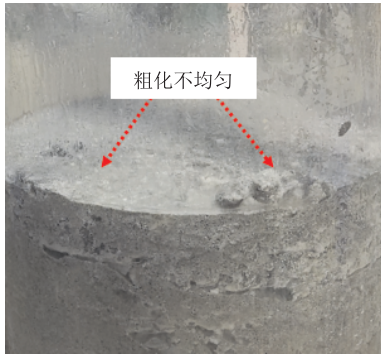


图7 侧向汇水土层粗化

由图7可知,靠近汇水处的土层颗粒粗化相对更严重且粗化速度更快,而远离汇水处的部分粗化程度远不如靠近土层处。

在侧向汇水渗透试验中,弃渣土上部的细颗粒受到渗流力是与汇水方向相同的,而土层中仍然是由渗流通道附近的细颗粒优先顺着水流方向流失,这导致了此条件下细颗粒的启动方向与垂直降雨相差较大,上部渗流通道的方向与竖直方向呈一定角度,并偏向汇水方向。由于渗流通道的方向发生了偏移,导致土柱内部也出现了部分粗化的现象,表现为土柱中上部远离汇水处及土柱下部靠近汇水处粗化程度不高,其余部位粗化程度较高。且细颗粒在运移的过程中仍会发生堵塞、沉积,故在侧向汇水的条件下,土柱各部的粗化程度都各不相同,体现出的宏观现象为土柱内存在粗化、堵塞相间分布,如图8所示。而当有足够的渗流通道贯通之后,粗颗粒孔隙间形成的渗流通道不再变宽,渗流通道周围达到启动条件的细颗粒也基本流失完成,在不改变其他汇水条件的情况下,将不再有大量细颗粒启动。



图8 粗化与堵塞相间分布

(3) 组合汇水条件下细颗粒流失宏观现象

当弃渣土体受到垂直降雨与侧向汇水组合汇水影响时,土层表面受到垂直降雨和侧向汇水的同时

作用,粗化速度明显快于各个方向的单向汇水。土层表面受到的汇水作用虽然也并非均匀的,但土层表面的颗粒粗化的不均匀性并没有侧向汇水剧烈,这是由于组合汇水弱化了侧向汇水渗流力给土层带来的不均匀性。

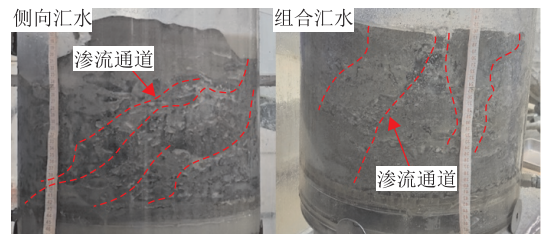


图9 侧向汇水与组合汇水渗流通道差异

在组合汇水试验中,弃渣土体细颗粒并非受到单一方向的渗流力,故渗流方向有不确定性,但仍呈现出一定的规律性。在靠近侧向汇水处的一侧,土中细颗粒相较于侧向汇水受到了更多的垂直降雨带来的渗流力,故在此部位产生的渗流通道整体来看是向下发展的。而在土柱中部及侧向汇水侧的另一侧,细颗粒受到更多的由侧向汇水带来的渗流作用,故渗流通道会像单一侧向汇水那样总体与竖直方向呈一定的角度。但由于是组合作用,侧向汇水的作用在宏观上被弱化,故偏移的角度整体上小于单一侧向汇水偏移的角度,如图9所示。此外,由于组合汇水会产生更多的渗流通道,土柱内部的堵塞现象也有所减弱,土柱中下部的粗化现象也较为均匀。

2.2 渗流作用下的细颗粒状态分析

从弃渣土体土柱渗透试验可以发现,弃渣土体中的细颗粒主要为以下几种:①自由堆积于粗颗粒骨架空隙内;②密实堆积于粗颗粒骨架内;③粗颗粒与细颗粒密实组合堆积。自由堆积在粗颗粒骨架内的细颗粒,在渗流作用下达到启动条件后将会启动、运移、流失,并堆积在骨架内孔隙大小小于其粒径处。密实堆积于粗颗粒骨架内细颗粒,在天然状态下会聚集成块,在渗流作用下,表面粒径最小的细颗粒将会最先启动并流失,在表面的细颗粒流失一部分后,骨架内的密实状态会渐渐转为松散状态,此时粒径稍大的颗粒也会随着渗流力及重力等的作用下启动。处于与粗颗粒密实组合堆积的细颗粒,在渗流作用下无法形成有效的渗流流失通道,绝大部分处于该状态的细颗粒将不会在渗流作用下流失。

考虑到弃渣土体级配的复杂性,依据上文对弃渣土体颗粒成分的分析,以粒径1 mm为界限,将粒径大于1 mm的弃渣土体颗粒划分为粗颗粒,将粒径小于1 mm的颗粒称为细颗粒。由于多向汇水条

件的复杂性和弃渣土体内孔隙随机性，细颗粒的启动受到汇水方向、汇水强度、骨架结构以及颗粒大小等多因素的影响。理论上细颗粒只要达到启动条件并且存在可供移动的渗流通道，细颗粒都会启动并顺着水流运移。

2.3 渗流作用下的细颗粒力学分析

在渗流作用影响之前，弃渣土体内的细颗粒处于力学平衡状态。在受到渗流作用影响后，细颗粒原有的力学平衡被打破，如此时细颗粒临界启动的方向有可供细颗粒运移的通道，在达到启动条件后细颗粒随即便离开原有位置，随着水流运移。在实际工程环境下，弃渣土体所受的汇水方向并非仅受试验中的垂直降雨与侧向汇水，在未对弃渣场设置排导槽的情况下，弃渣土还将受到所在沟道的后部汇水影响。因此，根据汇水的条件与方向不同，将细颗粒启动方式分为：单向汇水条件下启动和多向汇水组合条件下启动。根据汇水方向的不同又分为：垂直降雨条件下启动、两侧汇水条件下启动、弃渣土体后部汇水条件下启动。多向汇水组合即在上述 3 种单向汇水条件的相互组合的条件下的汇水方式。

在单向汇水条件下，弃渣土细颗粒受单一方向汇水作用后达到临界状态时，如汇水方向或运移方向有可供弃渣土细颗粒运移的通道，细颗粒便会沿此方向启动并运移。此时细颗粒的受力状态即可用二维平面的力学分析表示，如图 10 所示。

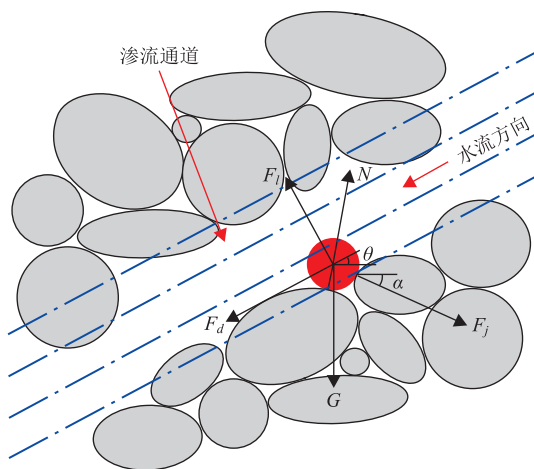


图 10 单向汇水条件下细颗粒受力分析

而当弃渣土细颗粒受到多向组合汇水的渗流作用时，根据细颗粒所处位置不同受到的各个方向的渗流作用也各不相同，此时弃渣土细颗粒的受力状态无法仅用二维平面受力分析表示，而需依据其在空间中各个方向的受力综合分析。

(1) 位于影响深度以上的细颗粒

在弃渣斜坡表层，各个不同方向的汇水对弃渣土细颗粒的渗流作用是分散的，因此，位于此位置的弃渣土细颗粒的受力分析需将各个方向的汇水作用分别考虑。此时细颗粒的堆积状态如图 11 所示。

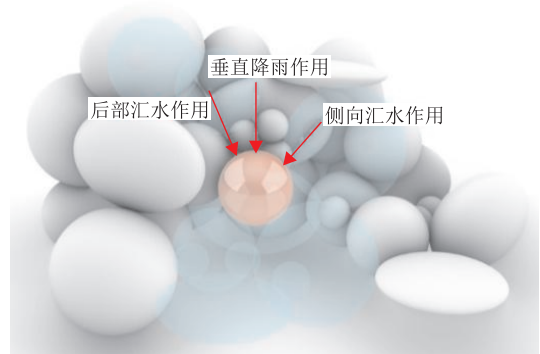


图 11 多向汇水条件下细颗粒受力分析

此外，位于此位置的细颗粒在受到多向组合汇水作用并达到临界启动状态时，临界启动的方向与可供细颗粒运移的孔隙或通道并不一定处于同一方向。此时临界启动方向将会额外为细颗粒提供支持力，直到细颗粒达到往孔隙或通道启动的力学条件后，细颗粒才会启动并运移。故在细颗粒实际启动方向的竖直平面内对多向汇水条件下的细颗粒作受力分析，即位于斜坡表层的弃渣土细颗粒在多向组合汇水条件下启动时受力状态分析如图 12 所示。可以发现弃渣土细颗粒所受作用力大多都不在实际启动方向的竖直平面内，因此，在多向汇水条件下分析实际启动方向平面内的弃渣土细颗粒的受力时，需要考虑先将细颗粒不同方向的受力投影至启动平面，再在启动平面对细颗粒作受力分析如图 13 所示。

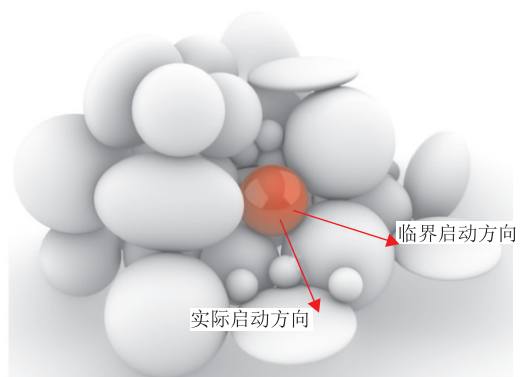


图 12 多向汇水条件下细颗粒实际启动方向

(2) 位于影响深度以下的细颗粒

与弃渣斜坡表层不同，各方向的汇水作用渗流至弃渣土体深部时已不是分散的汇水作用，这是因为各方向汇水在渗流过程中，受到土层和渗流通道

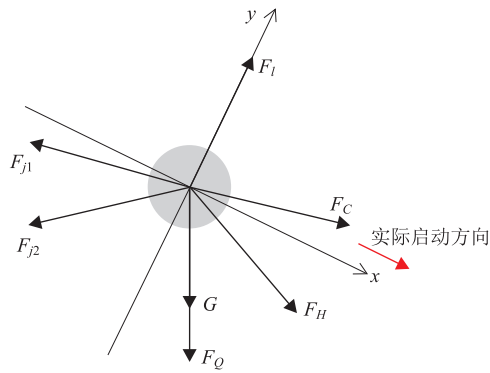


图 13 实际启动方向竖直平面受力分析

的影响,已合并为一个整体的渗透水流。此时弃渣土细颗粒将受到这个整体渗透作用,因此其受力分析可近似地类比为单向汇水时的细颗粒受力分析。

3 汇水条件下细颗粒启动机理分析

在多向汇水条件下,细颗粒将受到多个方向的渗流作用,而位于弃渣土体表部的细颗粒与弃渣土体深部的细颗粒所受到的渗流作用是不相同的,甚至同处于弃渣土体的表部不同位置的颗粒也会依据与各个汇水方向作用处的距离不同而受到不同的渗流作用。因此,本文将分别讨论弃渣土体不同部位细颗粒启动机理。

3.1 单一汇水条件下细颗粒启动机理分析

单一汇水条件下细颗粒临界启动示意图如图 14 所示。

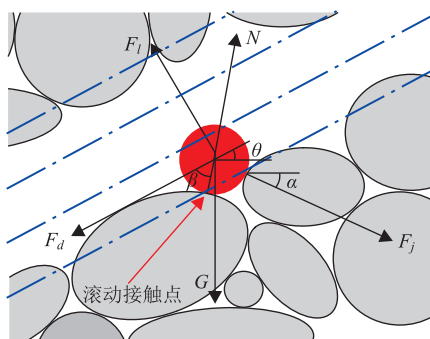


图 14 细颗粒临界启动示意图

当弃渣土细颗粒受到单一汇水作用下,颗粒将受到自身重力 \$G\$, 流动流体上举力 \$F_i\$, 周边粗颗粒给予的支持力 \$N\$, 启动颗粒与周边粗颗粒相互之间的粘附力 \$F_j\$, 以及渗流作用对细颗粒的拖曳力 \$F_d\$ 作用。故当弃渣土细颗粒达到临界启动条件时,可以认为此时颗粒所受合力矩不为零,细颗粒便会绕一滚动接触点滚动。

即在颗粒启动的临界条件下,细颗粒所受合力

矩条件为:

$$F_d \cdot R \sin(\beta - \theta) + F_i \cdot R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \theta\right) -$$

$$F_j \cdot R \sin(\pi - \beta - \alpha) - G \cdot R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = 0 \quad (1)$$

式中: \$R\$ 为弃渣土颗粒半径; \$\alpha\$ 为弃渣土颗粒间粘附力与水平线夹角; \$\beta\$ 为弃渣土可移动颗粒相对位置角; \$\theta\$ 为水流方向与水平线夹角。

当细颗粒受到单一汇水作用并达到启动条件时,认为此时细颗粒所处环境已致此状态下细颗粒受到的自身重力 \$G\$ 需考虑其浮重度,即:

$$G = \frac{\pi d^3 (\gamma_s - \gamma_w)}{6} \quad (2)$$

式中: \$d\$ 为颗粒等效直径; \$\gamma_s\$ 为颗粒重度; \$\gamma_w\$ 为水的重度。

当渗流通道中的液体流动时,将会给予弃渣土细颗粒流动流体上举力 \$F_i\$, 其计算式如下式所示:

$$F_i = C_l \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_w v^2}{2} \quad (3)$$

式中: \$C_l\$ 为颗粒在液体中的拖曳力系数; \$d\$ 为颗粒等效直径; \$\rho_w\$ 为液体的密度; \$v\$ 为流体作用在颗粒上的瞬时流速。

由于可移动细颗粒周边粗颗粒给予的支持力 \$N\$ 方向与颗粒滚动接触点位于同一直线,故支持力 \$N\$ 未在合力矩条件中体现。而启动颗粒与周边粗颗粒相互之间的相互作用力除了颗粒之间的粘附力 \$F_j\$ 外,还需考虑颗粒间的范德华力、毛细水压力、双电层排斥力等,但这些微观力的数量级均小于颗粒间的粘附力 \$F_j\$, 故此细颗粒启动时克服的颗粒间的粘附力考虑为颗粒与颗粒间的抗剪强度,即:

$$F_j = \sigma' \tan \varphi' + c' \quad (4)$$

式中: \$\sigma'\$ 为启动颗粒有效应力; \$\varphi'\$ 为弃渣土体的有效内摩擦角; \$c'\$ 为弃渣土体的有效黏聚力,砂性土 \$c' = 0\$。

弃渣土体细颗粒在液体渗流过程中所受的拖曳力是物体在流体中移动遭受到平行移动方向的阻力,拖曳力的大小与物体在流体中的运动速度、物体形状、流体性质等密切相关,而拖曳力的计算方法一般使用阻力系数法,其计算式为:

$$F_d = C_d \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_w v^2}{2} \quad (5)$$

式中: \$C_d\$ 为颗粒在液体中的拖曳力系数。

通过对于作用在单位土体上的渗透力的分析^[24],得到了关于单位土体的孔隙比及土体颗粒等效粒径的拖曳力计算方法:

$$F_d = \frac{1}{6} \pi d^2 \gamma_w i (d + ed_{\text{等}}) \quad (6)$$

式中： d 为颗粒等效直径； $d_{\text{等}}$ 为土体的等效粒径； γ_w 为水的重度； i 为弃渣土颗粒启动时的临界水力梯度； e 为弃渣土体的孔隙比。

将式 2~式 4、式 6 代入式 1，即为：

$$\frac{1}{6} \pi d^2 \gamma_w i (d + ed_{\text{等}}) \cdot R \sin(\beta - \theta) +$$

$$i = \frac{24\sigma' \tan \varphi' R \sin(\pi - \beta - \alpha) + 4\pi d^3 (\gamma_s - \gamma_w) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) - 3C_l \cdot \pi d^2 \rho_w v^2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \theta\right)}{4\pi d^2 \gamma_w (d + ed_{\text{等}}) \sin(\beta - \theta)} \quad (8)$$

上述公式得到了单一汇水条件下弃渣土细颗粒启动的临界水力梯度，考虑了弃渣土的等效粒径和颗粒的等效直径，还考虑弃渣土体的孔隙比、有效应力等相关参数。

3.2 多向汇水影响深度以上的细颗粒启动判据

由于此时细颗粒将会直接分别受到各个方向的汇水作用。在此条件下颗粒达到启动条件时，颗粒将受到自身重力 G 、流动流体上举力 F_l 、垂直降雨对细颗粒的拖曳力 F_Q 、后部汇水对细颗粒的拖曳力 F_H 、侧向汇水对细颗粒的拖曳力 F_C 以及启动颗粒与周边粗颗粒相互之间的粘附力 F_{j1} 及 F_{j2} 。在不考虑细颗粒自身自转的情况下，当细颗粒最终实际启动方向确定后，可以认为细颗粒受到各个力学作用在细颗粒最终启动方向所在竖直平面外的分力已达到了力学平衡。而此时细颗粒在实际启动方向所在平面将受到上述力学作用的分力，受力分析如图 15 所示。

当弃渣土细颗粒达到启动条件处于临界启动状态时，可以认为颗粒受力达到以下条件：

$$F_C \cos\theta_{FC} \cos\alpha_{FC} + F_H \cos\theta_{FH} \cos\alpha_{FH} + (G + F_Q \cos\alpha_{FQ}) \cos\theta_{FQ} + \theta_{FH} = F_{j1} \cos\theta_{j1} \cos\alpha_{j1} + F_{j2} \cos(\theta_{j1} + \theta_{j2}) \cos\alpha_{j2} \quad (9)$$

式中： α_i 为 F_i 作用力与颗粒实际启动平面的夹角。

$$D = \frac{24 \tan \varphi' (\sigma'_{j1} \cos\theta_{j1} \cos\alpha_{j1} + \sigma'_{j2} \cos(\theta_{j1} + \theta_{j2}) \cos\alpha_{j2} - 4\pi d^3 (\gamma_s - \gamma_w) \cos(\theta_{FQ} + \theta_{FH}))}{C_d 3\pi d^2 \rho_w} \quad (14)$$

当多向汇水条件下各方向汇水作用在弃渣土表层细颗粒上的瞬时流速满足式(14)时，此状态下的细颗粒已达到临界启动状态。上述公式除考虑细颗粒本身的启动条件外，还考虑了多向汇水条件下弃渣土细颗粒受各向汇水分散交叉影响的作用。

3.3 多向汇水影响深度以下的细颗粒启动判据

各个不同方向的汇水作用水流在弃渣土体中渗流的过程中，其水流会受到土层及渗流通道的影响，最终损失原有方向的流速转变为流经渗流通道的水流。此时各个汇水方向的水流将会合并为一个整体

$$C_l \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_w v^2}{2} \cdot R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \theta\right) = \sigma' \tan \varphi' R \sin(\beta - \theta - \alpha) + \frac{\pi d^3 (\gamma_s - \gamma_w)}{6} \cdot R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \quad (7)$$

即可得到单一汇水条件下细颗粒启动时的临界水力梯度：

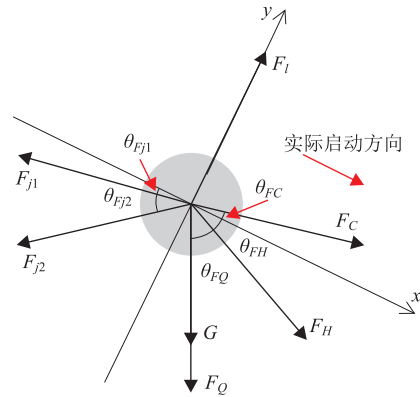


图 15 多向汇水条件下表层细颗粒受力分析

将式(5)代入式(9)，即可得到多向汇水条件下弃渣土体细颗粒启动临界状态关系式：

$$A \cdot v_c^2 + B \cdot v_H^2 + C \cdot v_Q^2 = D \quad (10)$$

式中： v_c 为侧向汇水作用在细颗粒上的瞬时流速，m/s； v_H 为后部汇水作用在细颗粒上的瞬时流速； v_Q 为垂直降雨作用在细颗粒上的瞬时流速。

而式中 A 、 B 、 C 、 D 均为关于各个方向汇水作用瞬时流速的参数系数，其中：

$$A = \cos\theta_{FC} \cos\alpha_{FC} \quad (11)$$

$$B = \cos\theta_{FH} \cos\alpha_{FH} \quad (12)$$

$$C = \cos\alpha_{FQ} \cos(\theta_{FQ} + \theta_{FH}) \quad (13)$$

的渗流趋势，且这个整体趋势仍受原有的各个方向汇水作用的汇水强度影响。此时弃渣土细颗粒将受到这个整体渗透作用，因此其受力分析可近似地类比为单向汇水时的细颗粒受力分析。

位于弃渣土体深部的细颗粒将受到一个整体的、单一的渗流作用。此时位于弃渣土体深部的细颗粒变可以沿用前文叙述推导了单一汇水条件下的细颗粒启动条件，即多向汇水条件下弃渣土深部细颗粒启动条件为：

$$i_D = \frac{24\sigma' \tan \varphi' \cdot \sin(\pi - \beta - \alpha) + 4\pi d^3 (\gamma_s - \gamma_w) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) - 3C_r \pi d^2 \rho_w v^2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \theta\right)}{4\pi d^2 \gamma_w (d + ed_K) \sin(\beta - \theta)} \quad (15)$$

式中： i_D 为多向汇水条件下弃渣土深部细颗粒启动时的临界水力梯度。

事实上,虽然多向汇水条件下弃渣土体深部的水力梯度仍受到各个汇水方向汇水强度的影响,但在实际工程中,各个方向的汇水条件会随区域降雨时间的进行而不断发生变化,因此很难获得多向汇水条件下的弃渣土深部水力梯度。且由于弃渣土的宽级配性及渗流的非饱和性,想要获得一个多向汇水条件下整体的渗流趋势,还需要后续更为深入的研究。

4 结论

本文对多向汇水条件下弃渣土体细颗粒渗透迁移规律进行研究,开展了多向汇水条件下土柱渗透试验,并通过分析弃渣土细颗粒流失机制,对多向汇水条件下弃渣土细颗粒进行力学分析,推导多向汇水条件下细颗粒启动条件,得到了以下结论:

(1) 对组合汇水条件下组合汇水影响深度进行分析,发现影响深度受弃渣土自身颗粒成分及组合汇水强度的影响,弃渣土细颗粒含量越高,组合汇水影响深度越小,组合汇水各部分汇水强度越大,影响深度越大。

(2) 弃渣土体中的细颗粒主要为以下几种:
①自由堆积于粗颗粒骨架空隙内;
②密实堆积于粗颗粒骨架内;
③粗颗粒与细颗粒密实组合堆积。

(3) 对渗流作用下的细颗粒进行力学分析,得到了单一汇水条件下细颗粒启动时的临界水力梯度以及多向汇水条件下影响深度上下的细颗粒启动条件。

参考文献

- [1] CUI Y, ZHOU X J, GUO C. Experimental study on the moving characteristics of fine grains in wide grading unconsolidated soil under heavy rainfall [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(3): 417-431.
- [2] CHEN N S, ZHOU W, YANG C L, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content [J]. *Geomorphology*, 2010, 121(3-4): 222-230.
- [3] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 106-116.
- [4] 梁越, 代磊, 魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(6): 1133-1140.
- [5] 夏鹏. 砂砾土动力行为特征与抗液化强度评价研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [6] CHEN H X, ZHANG L M, ZHANG S. Evolution of debris flow properties and physical interactions in debris-flow mixtures in the Wenchuan earthquake zone [J]. *Engineering Geology*, 2014, 82(Part B): 136-147.
- [7] INDRARATNA B, VAFAI F. Analytical model for particle migration within base soil-filter system [J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 1997, 123(2): 100-109.
- [8] 王霜, 陈建生, 钟启明. 散粒土管涌临界水力梯度的研究 [J]. *水电能源科学*, 2018, 36(9): 114-117.
- [9] HUANG Z, BAI Y C, XU H J. A theoretical model to predict the critical hydraulic gradient for soil particle movement under two-dimensional seepage flow [J]. *Water*, 2017, 9(11): 828.
- [10] LIANG Y, YE H T C J, ZHA Y Y. On set of suffusion in gap-graded soils under upward seepage [J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(5): 849-860.
- [11] ISRAR J, INDRARATNA B. Study of critical hydraulic gradients for seepage-induced failures in granular soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 2019, 145(7): 04019025.
- [12] 王明年, 江勇涛, 于丽, 等. 砂性土细颗粒起动临界水力坡降计算方法 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2515-2524.
- [13] 周雅, 马洪蛟, 陈大可, 等. 细颗粒原状土起动流速试验研究 [J]. *人民长江*, 2016, 47(16): 92-94, 98.
- [14] 梁越, 李越, 许彬, 等. 考虑围压影响的间断级配土潜蚀规律试验研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 53(1): 80-86.
- [15] 刘奎雷, 邓刚, 李维朝, 等. 不同细粒含量与间断比下不连续级配砂砾土渗蚀的 CFD-DEM 数值模拟 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(7): 2677-2689.
- [16] 丁子玥, 许增光, 曹成, 等. 渗流侵蚀模拟中离散元模型参数影响性分析 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 143-152.
- [17] 蔡沛辰, 毛雪松, 胡仪熙, 等. 渗流管涌作用下松散堆积层结构演化规律 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(9): 3813-3823.
- [18] 崔先泽, 周钰鋈, 范勇, 等. 渗流条件下夹层砂土中细颗粒迁移沉积特性试验研究 [J]. *水利学报*, 2024, 55(8): 977-989.
- [19] 黄鹏, 雷学文, 王新志, 等. 间断级配珊瑚砂地基渗流侵蚀稳定性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2024, 45(11): 3366-3377.
- [20] 窦智, 刘万明, 陈舟, 等. 穿越层状多孔介质的非达西渗流特征研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(4): 101-107.
- [21] 梁越, 冉裕星, 许彬, 等. 细颗粒含量影响渗流侵蚀规律的细观机理研究 [J/OL]. *岩土工程学报*, 2024, 1-8 [2024-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240506.0907.006.html>.
- [22] 王硕楠. 沟道泥石流堆积体复活启动机制研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- [23] 赵惠林, 陈英燕. 泥石流细颗粒浆体的有效浓度 [J]. *泥沙研究*, 1992, 18(2): 20-25.
- [24] 吴良骥. 无黏性土管涌临界坡降的计算 [J]. *水利水运科学研究*, 1980, 4(1): 90-95.