

# 动水头作用下花岗岩风化土的内部侵蚀机理

王浩<sup>1</sup>, 严耿明<sup>2</sup>, 李传东<sup>1</sup>, 豆红强<sup>1</sup>

(1.福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108; 2.福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** [目的] 揭示动水头作用下花岗岩风化土侵蚀演化的动态过程, 研究动态水力条件对土体内部侵蚀发展的影响, 探明颗粒迁移规律与内部侵蚀机理, 为深入研究花岗岩边坡的破坏模式与促滑机理提供理论依据。[方法] 设计竖向土柱渗流装置, 开展上升水头与正弦水头条件下花岗岩风化土柱的渗流试验, 基于渗流土柱顶面与侧面的试验现象, 从渗流速度变化、颗粒流失量变化和渗流前后颗粒级配、质量变化等方面, 分析动水头作用下花岗岩风化土内部侵蚀的发育特征。[结果] ①花岗岩风化土粒径差异较大, 在骨架间存在微小孔隙, 渗流冲刷作用使得土颗粒通过土体骨架间的孔隙运移流失。在内部侵蚀过程中, 细颗粒流失量相对较多, 粗颗粒流失量较少。②土体内部侵蚀作用是渐进发展的过程, 在土体薄弱区域的结构最先产生变形与破坏。试验中渗流泉眼由土柱边界开始发展到土柱中部区域, 渗流通道沿着渗流方向自下而上发育, 水力条件短时间内发生显著变化会造成渗流通道快速贯通。③土体内部侵蚀作用将随渗流时间推进而趋于稳定, 但正弦水头将“激活”土颗粒运动, 加剧土体的内部侵蚀作用。加大水头变化幅度或减小水头变化周期, 能够加剧土体内部侵蚀作用, 导致水流运移速度加快以及颗粒迁移流失量增多。[结论] 水力条件变化对土体内部侵蚀作用存在显著影响, 正弦水头更能加剧颗粒迁移流失。

**关键词:** 模型试验; 花岗岩风化土; 动水头; 内部侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0080-11

中图分类号: S157.1, TU443

**文献参数:** 王浩, 严耿明, 李传东, 等. 动水头作用下花岗岩风化土的内部侵蚀机理[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 80-90. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.009; Wang Hao, Yan Gengming, Li Chuandong, et al. Internal erosion mechanism of weathered granite soil under changing hydrodynamic head [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 80-90.

## Internal Erosion Mechanism of Weathered Granite Soil Under Changing Hydrodynamic Head

Wang Hao<sup>1</sup>, Yan Gengming<sup>2</sup>, Li Chuandong<sup>1</sup>, Dou Hongqiang<sup>1</sup>

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108,

China; 2. College of Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic process of erosion evolution of granite weathered soil under the action of changing hydrodynamic head was determined to study the influence of dynamic hydraulic conditions on the development of internal erosion of soil, and to define the particle migration law and internal erosion mechanism, in order to provide a theoretical basis for the in-depth study of the destruction mode and slip-promoting mechanism of granite slopes. [Methods] A vertical soil column seepage device was designed to carry out seepage tests on granite-weathered soil columns under rising hydrodynamic head and sinusoidal head conditions. Based on the test observations at the top and sides of the seepage soil columns, the developmental characteristics of the internal erosion of granite weathered soils under the action of changing hydrodynamic head were analyzed in terms of the changes in seepage velocity, the amount of soil particles lost, particle gradation, and quality of the particles before and after seepage. [Results] ① Granite-weathered soil had large differences in particle size, and there were small pores in the soil matrix. Seepage and scouring effects transported soil particles through the pores in the soil matrix. The amount of fine particles lost

收稿日期: 2023-09-01

修回日期: 2023-10-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“花岗岩二元结构边坡中差异风化界面的黏粒集聚特征及其触滑机制研究”(41972268), “闽台高植被覆盖区台风暴雨型滑坡孕灾环境、成灾机制与动态预警”(U2005205); 福建省科技厅项目(2022Y4002); 福建省交通运输科技项目(202202); 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室自主课题(KLGHZ202105)

第一作者: 王浩(1978—), 男(汉族), 江苏省盐城市人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质方面的研究。Email: h\_wang@126.com。

through internal erosion was relatively large, and the amount of coarse particles lost was small. ② Internal erosion was a gradual development process, and the soil structure in the weak areas of the soil was the first to exhibit deformation and damage. In the test, the seepage springs progressed from the boundary of the soil column to the middle area of the soil column, and the seepage channels developed from bottom to top along the seepage direction. Significant changes in the hydraulic conditions within a short period of time resulted in rapid penetration of the seepage channels. ③ Internal soil erosion will stabilize with seepage time, but a sinusoidal hydrodynamic head will activate the movement of soil particles and intensify internal soil erosion. Increasing the magnitude or decreasing the period of the head change can increase the internal erosion of soil, resulting in faster water transport and increased loss of particles through migration. [Conclusion] Changes in hydraulic conditions had a significant effect on erosion within the soil, with sinusoidal heads exacerbating particle migration and loss.

**Keywords:** model test; weathered granite soil; dynamic head; internal erosion

福建省是国内花岗岩分布最广泛的地区,花岗岩类侵入岩大面积出露是福建典型的地质特征之一,深厚的花岗岩风化壳在降雨作用下易产生滑坡、泥石流等地质灾害。花岗岩风化壳具有多种类型的残存结构面、节理裂隙,由于上述结构的存在,水流能够轻松入渗到土体内部,使侵蚀作用能够发展到深部土体。渗透水流通过残存结构面和节理裂隙通道将土体中的细颗粒冲刷带走或者搬运填充其他节理通道,即土体内部侵蚀作用<sup>[1-5]</sup>。目前,针对花岗岩风化土内部侵蚀的水力驱动机制已经取得一定成果,Kenney等<sup>[6]</sup>认为土体内部不稳定是土体中细颗粒随着渗流发生流失所造成的;Burns等<sup>[7]</sup>认为渗流水通过物理和化学作用使细颗粒从土体骨架脱离剥落,当渗流速度大于临界值时,渗流水能够诱发脱落的细颗粒迁移流失;Chang等<sup>[8]</sup>通过试验研究发现只要达到临界水力梯度或者临界流速,土体就会发生内部侵蚀而导致细颗粒的流失。为深入研究渗流条件对颗粒迁移运动的影响,目前也已有部分学者通过改变水头发生条件来研究内部侵蚀机理,陈亮等<sup>[9]</sup>进行非稳定流作用下的管涌试验,结果表明在正弦水头作用下,土体的渗透系数随着渗流时间增加而逐渐增大;毛昶熙等<sup>[10]</sup>通过试验模拟洪峰和潮汐变幅对土体发生管涌的影响,发现由于洪峰和潮汐变幅发生时,高水位历时较短导致管涌发生的概率减小。但是,目前相关研究的对象大都针对的是粒径较大的无黏性土,对于非稳定渗流条件下花岗岩风化土的内部侵蚀机理还缺乏深入研究。

同时,非稳定渗流条件作用于风化土时,土-水相互作用较为活跃,能够打破土体的相对平衡状态,

加速花岗岩风化土体结构的劣化,并诱发地质灾害。福建地区夏季常见的短时强降雨属于典型的非稳定渗流条件,降雨会在较短时间内增大土体的孔隙水压力,急速扰动土体内的渗流场,打破土-水平衡条件,形成有利于颗粒迁移的渗流通道,加剧颗粒迁移进而导致边坡失稳破坏<sup>[11-13]</sup>。福建地区具有深厚花岗岩风化土堆积层的地质条件以及夏季台风频发的气象条件,风化土内部侵蚀机理是一个亟待解决的关键问题。鉴于此。本文采用花岗岩分布区的风化土作为试验材料,利用竖向土柱渗流装置对上升水头与正弦水头条件下的土柱进行渗流试验,分析不同水头作用下土体内部侵蚀的演化情况,揭示在不同水力驱动下花岗岩风化土的颗粒迁移规律与内部侵蚀机理,为深入研究花岗岩边坡的破坏模式与促滑机理提供理论依据。

## 1 花岗岩风化土竖向渗流试验设计

### 1.1 试验材料

试验采用的花岗岩风化土取样于福州市连江县黄岐镇 X135 县道的花岗岩风化土堆积层,通过室内土工试验获取得到花岗岩风化土的基本物理指标如表 1 所示,将原土样烘干并筛分可得到花岗岩风化土的原始颗粒级配详见表 2。

表 1 试验土体的基本物理指标

Table 1 Basic physical index of tested soil mass

土样类型	含水率/ %	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
风化土	12.208	1.814	2.641

表 2 试验土体的原始颗粒级配

Table 2 Original particle gradation of test soil mass

土粒类型 (粒径 $d$ 范围)	粉黏粒 ( $d \leq 0.075 \text{ mm}$ )	细砂 ( $0.075 \leq d \leq 0.25 \text{ mm}$ )	中砂 ( $0.25 \leq d \leq 0.5 \text{ mm}$ )	粗砂 ( $0.5 \leq d \leq 2 \text{ mm}$ )	砾粒 ( $2 \text{ mm} \leq d$ )
风化土含量	22.24%	9.19%	7.48%	16.74%	44.35%

2021年6月于福州大学滑坡与高边坡工程技术研究中心开展多组原始颗粒级配重塑土样的渗流预试验,但基于预试验发现,按照原始颗粒级配重塑土样进行渗流试验时,重塑土样密实度达不到原始状态,细颗粒极易迁移流失导致渗流呈泥浆状,无法有效观测颗粒迁移运动。为确保花岗岩风化土的竖向土柱渗流试验有效地开展,参考相关文献与标准<sup>[14-15]</sup>中对花岗岩风化土粒度成分以及粒径分级的描述,试验对风化土的颗粒级配进行了合理优化处理,在合理的区间内适当降低细颗粒比例,增加粗颗粒比例形成土体骨架。试验土样颗粒级配选用如图1所示。根据试验土样级配,称取各粒径土样所需质量,每次精度控制在0.5 g以内,将称量好的土样依次放入搅拌容器中进行混合均匀,静置3 h。静置后分层填装配置试验土样,分5层装入渗流土柱,每层厚度约20 mm,每层装填之后用橡胶锤进行击实,从而控制土样的压实度,各组土柱装填质量误差不超过5 g。在渗流试验前,将土柱充分浸润,使土样完全饱和。经预试验测试,级配优化后的各试验土柱质量区别较小,渗流后未出现渗流呈泥浆状的现象,相同渗流条件下颗粒流失状态相近,土体中孔隙发育程度基本一致。

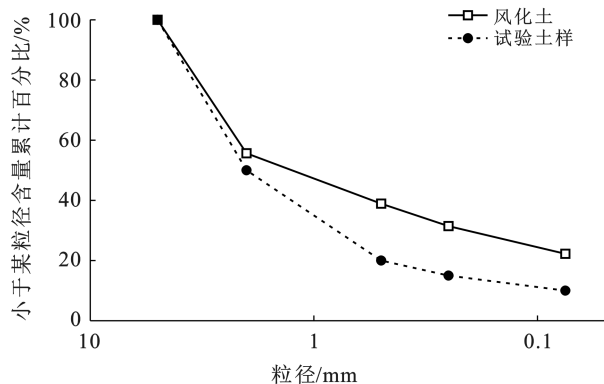


图1 试验土样级配曲线

Fig.1 Gradation curve of tested soil sample

## 1.2 试验设备

侧向渗流模型试验装置由竖向土柱模型、水头调节装置、数据与图像采集系统组成,装置布置图如图2所示。竖向土柱模型由上、中、下3个不同高度的透明圆柱体组合而成,土柱内径为100 mm,壁厚为5 mm,通过法兰盘、螺栓和硅胶密封圈连接固定。上部为溢流部分,下部为高度50 mm的进水部分,在进水部分充填石英砂作为缓冲层,底面为不透水的有机玻璃板。水头控制装置主要包括钢支架、水箱以及可调节转速的电动机3个部分。数据与图像采集系统包括计量设备、微距相机和浊度仪。试验通过集水箱

收集渗流水,量测单位时间渗流量换算得到渗透水流的流速。并从集水箱取样进行浊度测量,每次测量取样3次取平均值。渗流结束后,将渗流土柱的土体取出进行烘干,然后对烘干之后的土体进行称重,并取样进行粒径分析。

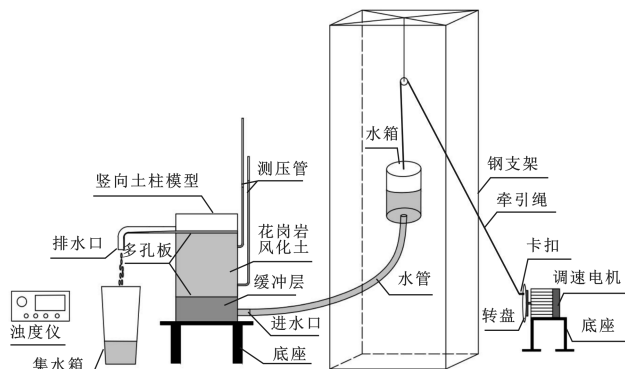


图2 竖向土柱渗流试验装置图

Fig.2 Diagram of vertical soil column seepage tested device

其中浊度仪主要用于测量渗透水流的浊度,并换算成细颗粒的浓度来表征花岗岩风化土的颗粒流失情况。通常认为水的浊度越高,水样的浑浊程度越大,水中所含的悬浮颗粒浓度越高。目前一些学者也进行了颗粒浓度与浊度关系的探索与研究<sup>[16-17]</sup>,证明了水中颗粒浓度与水的浊度值存在着一定的线性关系。为探究渗流试验水中的花岗岩风化土细颗粒浓度与水的浊度关系,将含有一定浓度的细颗粒( $d \leq 0.075$  mm)的初始水样中不断地注入蒸馏水来改变水样中细颗粒的浓度,每注入一次蒸馏水,对应测量一次水样的浊度值,最后得出水中的细颗粒浓度与水的浊度关系(如图3所示)。通过线性回归拟合分析,得到线性方程为 $y = 0.0028x - 0.00559$ ,其残差平方和为 $3.17135 \times 10^{-4}$ , $R^2$ 大于0.998,充分证明了两者的正相关性。因此,本试验采用浊度值表征水中细颗粒浓度的方法具备可行性。

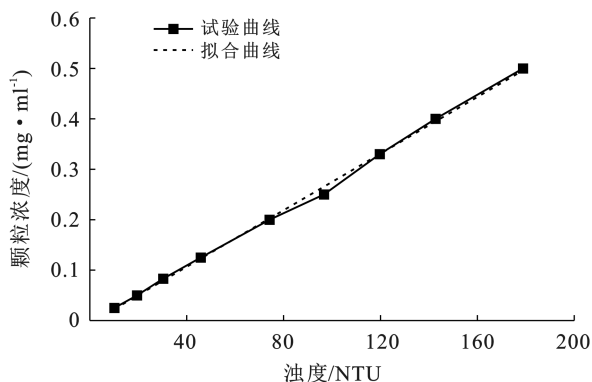


图3 细颗粒浓度与浊度的关系曲线

Fig.3 Relationship curve between fine particle concentration and turbidity

### 1.3 试验方案

竖向渗流试验侧重于探索水力条件变化对土体内部侵蚀发生与发展的影响,为了更好地判断水力梯度变化诱发土体内部侵蚀的演化过程,试验参照常规渗流试验并进行进一步优化:①设计了自下而上的渗流方式,模拟渗流过程中颗粒迁移和裂隙发展变化,能更精确观察并收集迁移溢流出的颗粒;②设计了上升水头与正弦水头条件下的渗流试验,以期得出在水力条件发生改变后,水流与土体之间相互作用的关系,从而进一步揭示不同水力条件对颗粒迁移现象的影响。着重观察是否存在波动水头“激活”颗粒迁移,并加剧颗粒

流失的现象。具体试验主要分为两个部分:①上升水头渗流试验,分别以  $\Delta i=0.2, \Delta i=0.4, \Delta i=0.6$  ( $i$  为水力梯度,  $\Delta i$  为单位时间内水力梯度变化幅度) 为变化幅度逐级提升水力梯度值,共设置  $X_1-X_3$  三组试验,试验设定水力梯度范围为  $i=0.2\sim 6.0$ 。研究水头增幅对花岗岩风化土内部侵蚀的影响规律,试验方案如图 4a 所示。②为正弦水头渗流试验,通过改变水头的变化幅度或变化周期,研究动水头对花岗岩风化土内部侵蚀的影响规律,共设置了  $T=8\text{ s}(\Delta i=0.2, \Delta i=0.3, \Delta i=0.4), \Delta i=0.4(T=4\text{ s}, T=8\text{ s}, T=12\text{ s})$  5 个试验方案,编号为  $Y_1-Y_5$ ,试验方案如图 4b 所示。

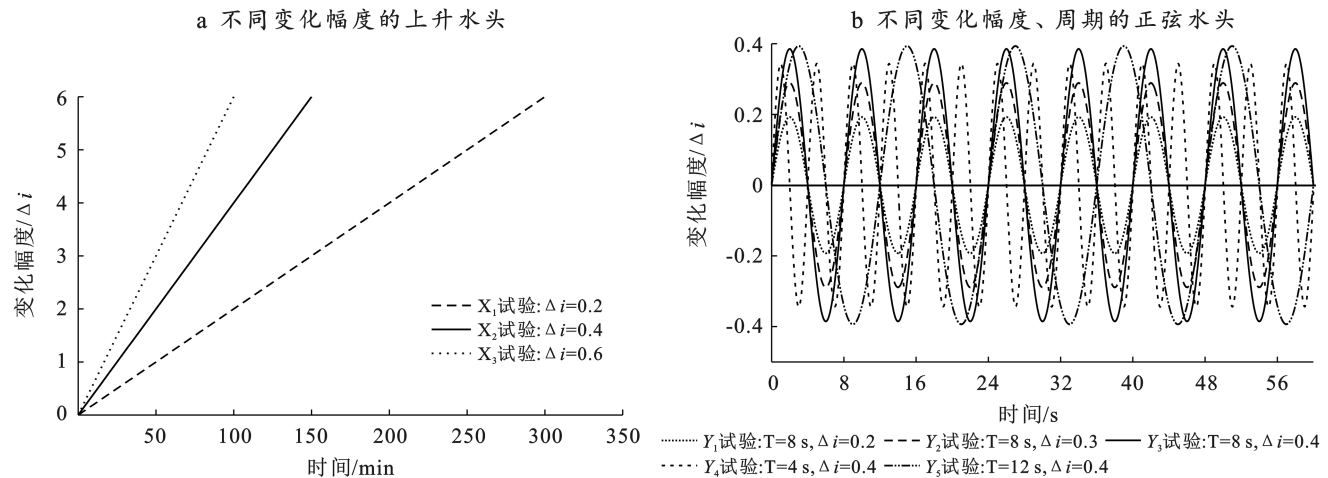


图 4 两种试验水头加载方式

Fig.4 Two tested hydrodynamic head loading methods

## 2 上升水头渗流试验分析

### 2.1 试验现象分析

2.1.1 渗流土柱顶面试验现象 2021年7月于福州大学滑坡与高边坡工程技术研究中心开展上升水头渗流试验,试验现象表明,渗流土柱顶面的渗流泉眼的发展过程是由小到大、由土柱边界到土柱中部的,流失颗粒由细颗粒逐渐发展到粗颗粒。上升水头试验的发展演化过程如图 5 所示,具体可以分为 3 个阶段:①渗流前期。土体内部侵蚀作用发展缓慢,颗粒迁移通道主要分布于土柱边界,流失的颗粒成分主要以细颗粒为主;②渗流中期。土体内部侵蚀作用有所增强,颗粒迁移通道由边界区域发展到了土柱中部区域,细颗粒的流失量增多,并会出现少量粗颗粒骨架逸出现象;③渗流末期。土柱顶面出现了由多个邻近的颗粒迁移通道发育形成的渗流路径,并将土体中大量细颗粒和少量粗颗粒带出,产生翻水冒砂的现象。此阶段土体形成了贯通的渗流主通道,土体内部侵蚀作用加剧,导致土体开始发生变形破坏。

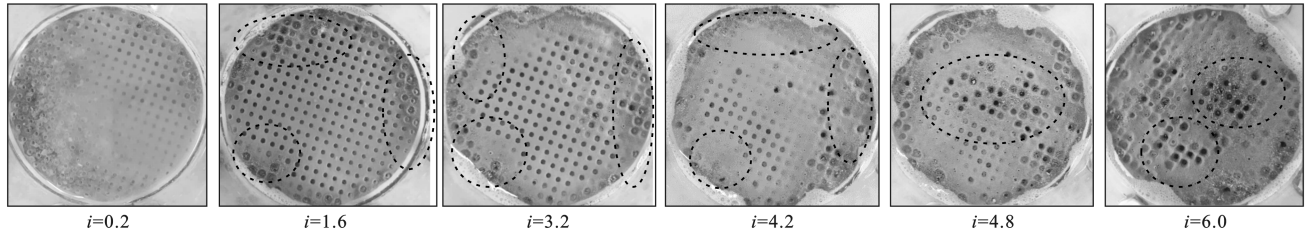
试验发现,  $X_2$  土柱相对于  $X_1$  土柱来说,渗流泉眼的出现、渗流泉眼发展到中部、中砂的逸出以及大渗流泉眼的形成相对应的水力梯度都更低。由此可知,随着上升水力梯度的增幅加大,土柱的内部侵蚀作用也随之加剧;  $X_3$  渗流土柱顶面泉眼发展变化过快,当水力梯度提升至 1.8 时,便出现较大的渗流泉眼,导致渗流土柱变形破坏。主要是因为短时间内上升水头幅度过大,引起土体内部水力梯度陡增,在局部位置产生突水通道,因而快速发展形成较大的渗流泉眼。

2.1.2 渗流土柱侧面试验现象 试验现象表明,渗流土柱侧面的渗流通道的发育过程是由纤细的横向渗流通道逐渐贯穿为明显的竖向渗流通道。上升水头渗流土柱侧面渗流通道的发展演化过程如图 6 所示,具体可以分为 3 个阶段:①渗流前期。随着水力梯度上升,渗流土柱最先产生的是细小的横向渗流通道;②渗流中期。较大的竖向渗流通道也会慢慢形成,并与横向渗流通道连接贯通,加速土体内部侵蚀作用;③渗流末期。当水力梯度进一步提升,竖向渗

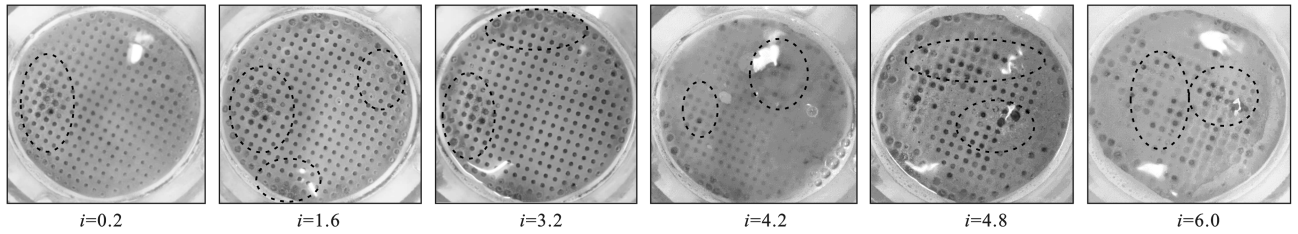
流通道发展扩大成为主要渗流通道,加速了颗粒的迁移流失,土体结构逐渐发生变形破坏。在渗透水流作

用下,部分细颗粒沿着竖向渗流通道自下而上迁移,会充填到横向渗流通道之中,产生淤堵效应。

a X<sub>1</sub>土柱



b X<sub>2</sub>土柱



c X<sub>3</sub>土柱

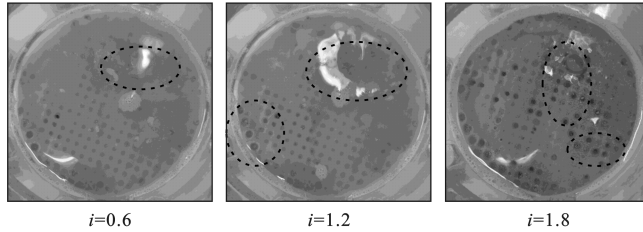
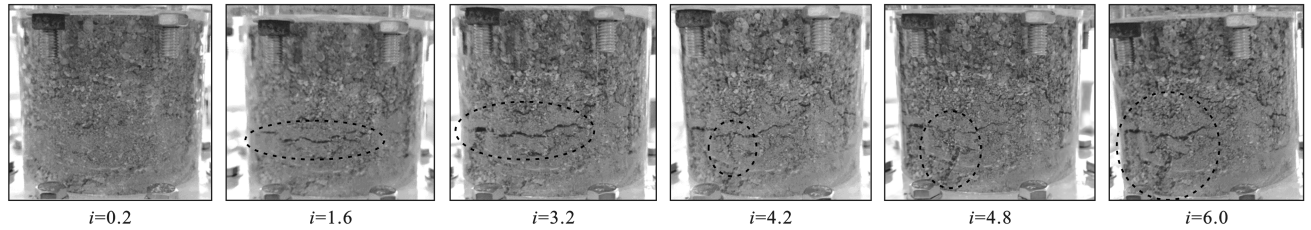


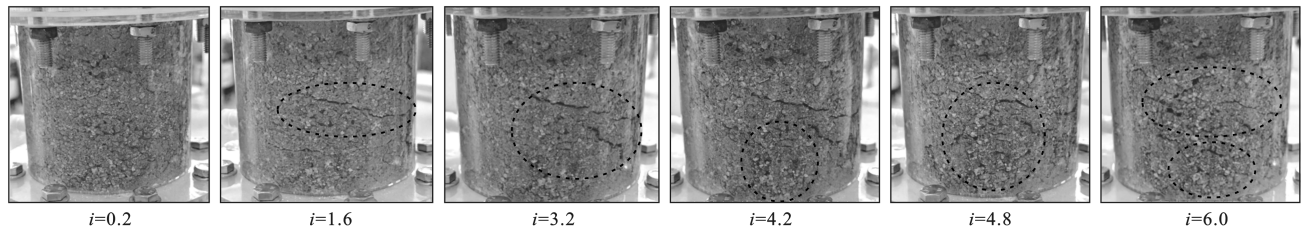
图 5 竖向渗流土柱顶面试验现象(圆圈标记渗流泉眼较为发育的区域)

Fig.5 Top surface test phenomenon of vertical seepage soil column (Circles mark more developed area of seepage spring)

a X<sub>1</sub>土柱



b X<sub>2</sub>土柱



c X<sub>3</sub>土柱

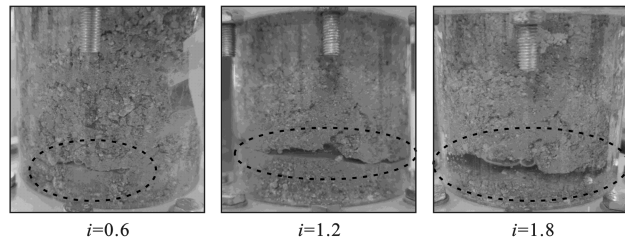


图 6 竖向渗流土柱侧面试验现象(圆圈标记渗流通道较为发育的区域)

Fig.6 Side test phenomenon of vertical seepage soil column (Circles mark more developed area of seepage channel)

试验发现,  $X_1$  试验从横向渗流通道开始发育最后形成主要的竖向渗流通道, 渗流通道主要位于土柱下方, 总体规模较小;  $X_2$  试验从两道渗流通道开始发展, 在渗流过程中自下而上形成一道贯通下部和中部的渗流通道, 并由此发育形成多组渗流通道;  $X_3$  试验渗流通道出现的时间比前两个试验更早, 土柱侵蚀范围比前两个试验更大, 表明上升水力梯度的增幅越大, 土柱的内部侵蚀作用强度越剧烈。

## 2.2 试验结果与分析

由于  $X_3$  试验提升的水头幅度过大造成渗流土柱快速变形破坏, 不能反映土体内部侵蚀渐进破坏过程。因此, 上升水头渗流试验仅对  $X_1$ ,  $X_2$  两组试验结果进行对比分析。

**2.2.1 渗流速度变化** 上升水头土柱渗流速度变化如图 7 所示。试验结果表明  $X_1$  和  $X_2$  试验的渗流速度与水力梯度均呈正相关关系。  $X_1$  试验的流速总体呈平稳增长趋势。当水力梯度达到 6.0 之后, 渗透流速出现陡增趋势, 这是由于此时渗流土柱内部形成了较大的贯通渗流通道, 使得出水量突然增大, 流速也随之增加。

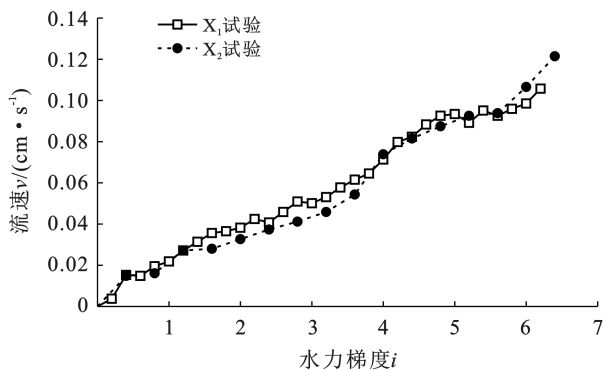


图 7 流速随水力梯度的变化关系

Fig.7 Relationship between flow velocity and hydraulic gradient

对应试验现象中土柱顶面出现较大的渗流泉眼和土柱侧面形成贯通的渗流通道。  $X_2$  试验曲线存在两个明显的陡增点。第一个是水力梯度为 3.2, 与试验现象中土柱中部出现渗流泉眼和产生竖向渗流通道相对应。第 2 个是水力梯度为 5.6, 与试验现象中土柱顶面出现较大的渗流泉眼和土柱侧面形成贯通中下部的渗流通道相对应。

**2.2.2 颗粒流失量变化** 上升水头土柱颗粒流失量变化如图 8 所示。试验结果表明  $X_1$ ,  $X_2$  试验的渗透水流颗粒浓度随着水力梯度增大而不断升高, 表明随着水力梯度的提升, 渗流土柱的颗粒流失量也越来

多。颗粒流失过程是非线性变化的, 在不同水力梯度作用阶段, 颗粒流失量差异较大。  $X_1$  试验在渗流中前期流失的颗粒浓度较低, 均小于  $0.5 \text{ mg/ml}$ , 该阶段渗流土柱总体维持稳定状态。当水力梯度达到 3.6 之后, 渗流土柱内产生了与横向的渗流通道贯通竖向渗流通道, 细颗粒迁移流失量开始增多, 颗粒浓度提升至  $0.5 \text{ mg/ml}$  以上。当水力梯度提升至 5.8 时, 渗流土柱中部形成了较大的渗流泉眼, 在水流的携带下大量细颗粒迁移流失。  $X_2$  试验中, 当水力梯度小于 2.8 时, 流失的颗粒浓度随着水力梯度的提升平缓升高, 土体内部侵蚀作用发展较为缓慢。当水力梯度达到 3.6 之后, 土体内部渗流通道发育贯通, 渗流泉眼增多, 细颗粒流失量增多, 导致流失颗粒浓度陡升至  $3.0 \text{ mg/ml}$  以上。当渗流水头提升至 5.2, 渗流土柱形成贯通的渗流通道, 大量不稳定的细颗粒被水流带走之后, 土体内部侵蚀稍有减弱, 使得流失颗粒浓度略有降低。对比两组试验的颗粒浓度变化曲线发现,  $X_2$  试验的细颗粒流失量明显多于  $X_1$  试验, 主要原因是  $X_2$  试验的上升水头变化幅度更大, 引起土体内部水力梯度变化更为剧烈, 导致颗粒流失量相应增多。从土体开始发生变形破坏对应的水力梯度来看,  $X_2$  试验的水力梯度明显小于  $X_1$  试验。由此表明, 加大水力梯度变化幅度, 能够促进土体内部渗流通道的发育, 加速细颗粒量迁移流失, 导致土体内部侵蚀作用增强。

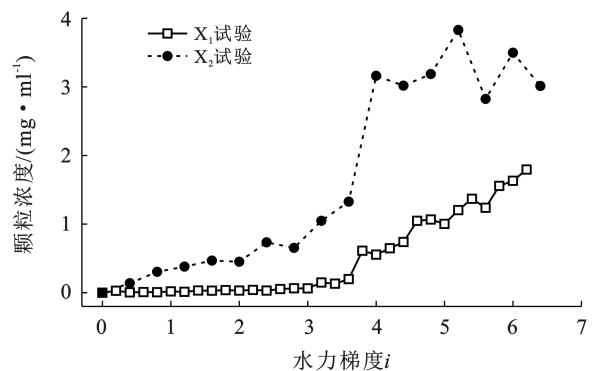


图 8 流失颗粒浓度随水力梯度的变化关系

Fig.8 Relationship between concentration of lost particles and hydraulic gradient

**2.2.3 渗流前后颗粒级配、质量变化** 上升水头土柱颗粒级配变化如图 9 所示。试验结果表明两组试验在渗流之后, 细颗粒比例均有所减少, 粗颗粒比例相对增加。受粗颗粒骨架和多孔板制约的影响, 渗流过程中流失的颗粒主要为粉黏粒、细砂和中砂, 其中粉黏粒和细砂等细颗粒流失量较大。渗流之后  $X_1$  试验粗颗粒的比例明显大于  $X_2$  试验的比例, 表明  $X_2$  试验

相较于  $X_1$  试验的细颗粒流失量更大。其主要原因是由于水力梯度变化幅度加大,土体遭受的冲击力增大,细颗粒更容易从粗颗粒骨架中脱落剥离并被水流携带流走。

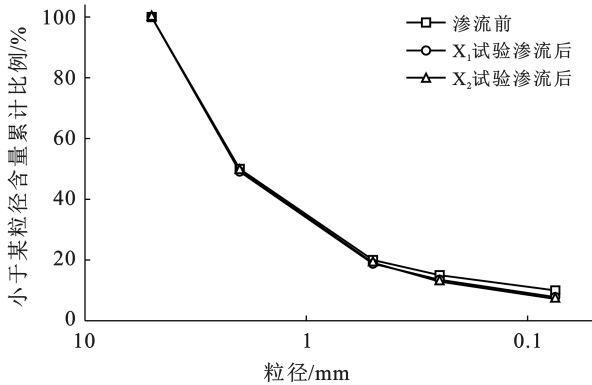


图 9 上升水头试验颗粒级配变化

Fig.9 The change of particle gradation in rising head test

上升水头土柱颗粒质量变化如图 10 所示。在渗流结束后,  $X_1$ 、 $X_2$  渗流土柱的总质量较渗流之前均有不同程度的减少。其中  $X_1$  土柱质量减少 43.5 g,  $X_2$  土柱质量减少 55.3 g。这表明  $X_2$  土柱相较于  $X_1$  土柱质量颗粒流失量更多。以上现象出现的主要原因是  $X_2$  水头增幅更大,水力侵蚀作用更强烈,使得  $X_2$  渗流土柱内部渗流通道更多,从而加速渗透水流冲走细颗粒,因此上升水头增幅加大,土体内部侵蚀作用增强。此结果与前面渗流土柱流失的颗粒浓度变化(图 8)以及渗流前后土样颗粒级配变化(图 9)得到的结论具有一致性。

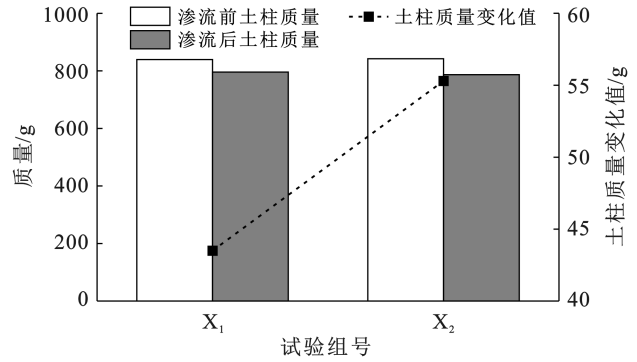


图 10 渗流前后土柱质量变化

Fig.10 Quality change of soil column before and after seepage

### 3 正弦水头渗流试验分析

2021 年 7 月于福州大学滑坡与高边坡工程技术研究中心开展正弦水头渗流试验,由于 5 组正弦水头的试验现象具有一定的相似性,因此选取具有代表性的  $Y_3$  渗流土柱进行正弦水头渗流试验现象分析。

#### 3.1 试验现象分析

正弦水头渗流土柱顶面渗流通道的发展演化过程如图 11 所示,具体可以分为 4 个阶段:①渗流前期。渗流泉眼主要分布于土柱边界,逸出的细颗粒在泉眼周围堆积;②渗流中期。流失的细颗粒增多,逸出的细颗粒堆积淤堵了渗流泉眼,细颗粒堆积层增厚;③渗流后期。边界渗流泉眼几乎被流失的细颗粒所淤堵,渗流泉眼逐渐向土柱中部发展;④渗流末期。土柱中部的渗流泉眼明显增多,局部边界被淤堵的渗流泉眼也重新被冲破,形成新的渗流通道,并开始带出少量中砂。

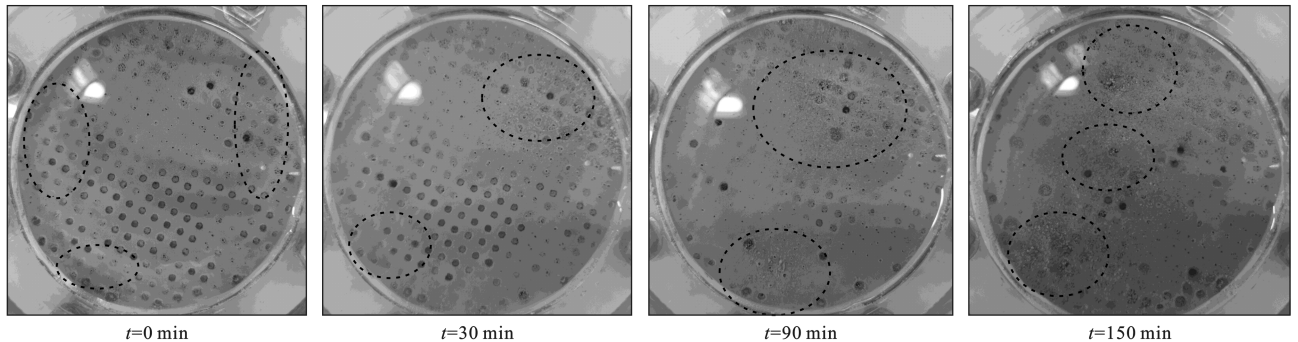


图 11  $Y_3$  渗流土柱顶面试验现象(圆圈标记渗流泉眼较为发育的区域)

Fig.11 Phenomenon of  $Y_3$  seepage soil column top surface test (Circles mark more developed area of seepage spring)

正弦水头渗流土柱侧面渗流通道发育情况图 12 所示,具体可以分为 4 个阶段:①渗流前期。渗流土柱下部出现少许渗流通道;②渗流中期。下部渗流通道向上发育形成 V 型渗流通道;③渗流后期。细颗粒的不断流失使 V 型渗流通道下部开始形成较大的竖向渗流通道。同时,在渗流土柱上部也开始

出现些许渗流通道;④渗流末期。竖向渗流通道不断发育扩大,在渗流通道内明显观察到颗粒粗化严重。此时,渗流土柱上部渗流通道与下部渗流通道贯通相连。

综合正弦水头渗流试验现象发现,渗流过程中颗粒迁移通道率先出现于土柱边界区域。随着边界泉

眼被逸出的细颗粒堆积淤堵,颗粒迁移通道发展到土柱中部区域。在正弦水头的持续作用下,中部颗粒迁移通道不断发展扩大,使得渗流出水量相应变大。在水流的携带下大量细颗粒和少量粗颗粒逸出。在自

下而上渗流作用下,渗流通道最先发育于土柱下部,并逐渐向上发育产生多组渗流通道。在渗流过程中,各渗流通道逐渐连通,最后在土体中形成上下贯通的渗流通道。

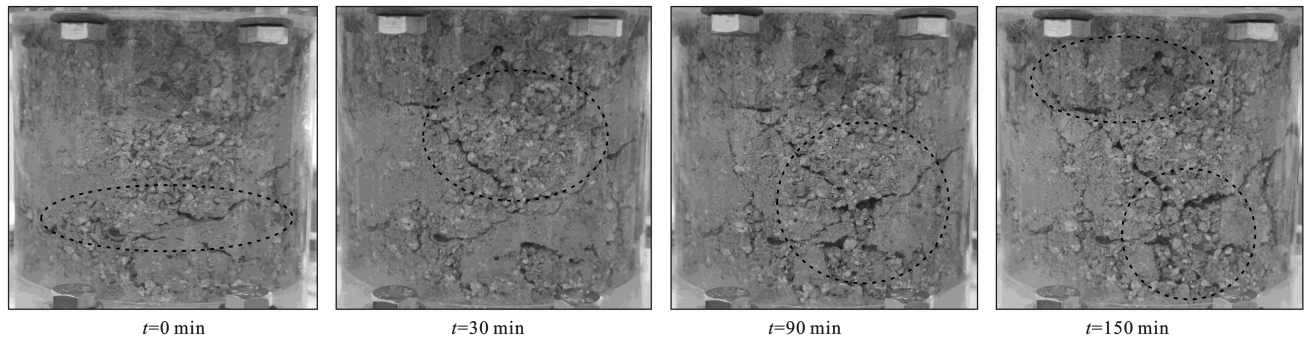


图 12  $Y_3$  渗流土柱侧面试验现象 (圆圈表示渗流通道较发育的地区)

Fig.12 Side test phenomenon of  $Y_3$  seepage soil column (Circles mark more developed area of seepage channel)

### 3.2 试验结果与分析

3.2.1 渗流速度变化 正弦水头土柱渗流速度变化如图 13 所示,试验结果表明渗流速度总体上都是随着渗流时间增加而不断增大。

(1)  $Y_1, Y_2, Y_3$  试验组。从曲线变化趋势来看,不同变化幅度的  $Y_1, Y_2, Y_3$  三组试验前期渗流速度的增速都比较缓慢,随着渗流发展,渗流速度增速明显加快。其主要原因是渗流前期试验土柱密实度较好,土体渗透性较低,水流只能沿着颗粒之间的孔隙缓慢渗流。在渗流作用下,渗流土柱逐渐形成了贯通的渗流通道,从而加快了水流的运移速度。对比这三组试验的渗流速度变化关系,总体上  $Y_3$  渗流土柱的水流速度最大, $Y_2$  次之, $Y_1$  最小。三组试验均出现流速陡增现象,其中  $Y_1$  在 120 min 左右出现流速陡增, $Y_2$  试验在 80 min 左右, $Y_3$  试验在 60 min 左右。由此表明随着水头变化幅度的加大,风化土内部侵蚀作用增强,渗流土柱内部渗流通道更加发育,使得水流运移速度加快。

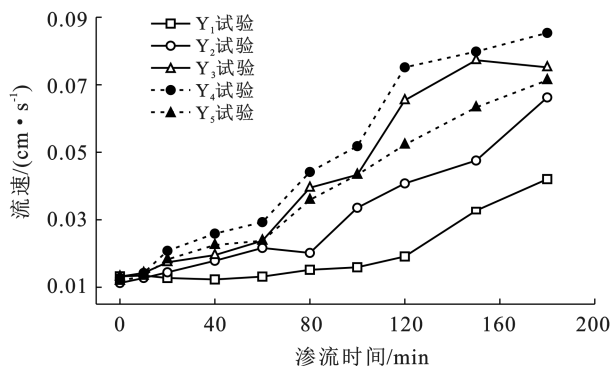


图 13  $Y_1$ — $Y_5$  试验流速变化

Fig.13 Changes of flow rate in  $Y_1$ — $Y_5$  test

(2)  $Y_3, Y_4, Y_5$  试验组。不同变化周期的  $Y_3, Y_4, Y_5$  三组试验的渗流速度随着渗流时间增加而不断增大,由 0.01 cm/s 增大至 0.08 cm/s。原因是在渗流作用下,土体内部孔隙通道不断发育,为水流运移创造了空间,使得水流速度逐渐增大。对比三组试验流速和渗流时间的关系曲线发现,其变化趋势较为一致。在相同的渗流时间下  $Y_4$  试验的渗流速度最快, $Y_5$  最慢, $Y_3$  的渗流速度处于两者之间。 $Y_5, Y_3, Y_4$  三组试验的水头变化周期依次减小,由此认为降低变化水头周期能够提升渗透水流的流速,即水头变化频率越高,水的流速越快,土体内部侵蚀越剧烈。

3.2.2 颗粒流失量变化 正弦水头土柱颗粒流失量变化如图 14 所示,随着渗流时间增加,流失的细颗粒浓度总体是不断增加的。

(1)  $Y_1, Y_2, Y_3$  试验组。在渗流前期主要表现出  $Y_2$  和  $Y_3$  土柱流失的细颗粒浓度大体相当, $Y_1$  土柱相对较少的特征。随着渗流不断发展, $Y_1$  土柱流失的颗粒浓度缓慢增加, $Y_2$  平稳增加直至 150 min 出现浓度大幅陡增, $Y_3$  则在 80 min 左右流失颗粒浓度出现大幅增加的现象。上述现象表明水头变化幅度越大,水流对土体的冲击力越强,导致细颗粒流失量增多。通过对比发现颗粒流失变化曲线与渗流速度变化曲线具有较强的一致性,随着动水头作用时间的推移,土体逐渐发育形成渗流通道,加速了水的运移速度,增强了水流冲刷驱动能力,使得细颗粒迁移流失增多。

(2)  $Y_3, Y_4, Y_5$  试验组。三组试验曲线的变化趋势较为一致,流失颗粒浓度陡增点出现时间较为同步,大致出现于 60 min 左右。但是,渗流发展 160 min 后, $Y_3$  和  $Y_5$  试验曲线出现了下降趋势,而  $Y_4$  曲线仍旧继续上升。主要因为水头变化对土体内部侵蚀具有一

定的增强作用,随着水头变化周期减小,水流变动频率更快,致使细颗粒流失量越多。在渗流过程中,水力侵蚀土体,逐渐扩展土体内部孔隙通道,加速细颗粒的流失。土体颗粒经过迁移流失、重新排列之后趋于稳定,变化频率较低的水头条件对土体侵蚀作用开始减弱,而高频率变化的水头条件依然能够侵蚀土体,使细颗粒从土体骨架中脱离流失,因此,高频率变化的水头导致土体内部侵蚀作用更剧烈。

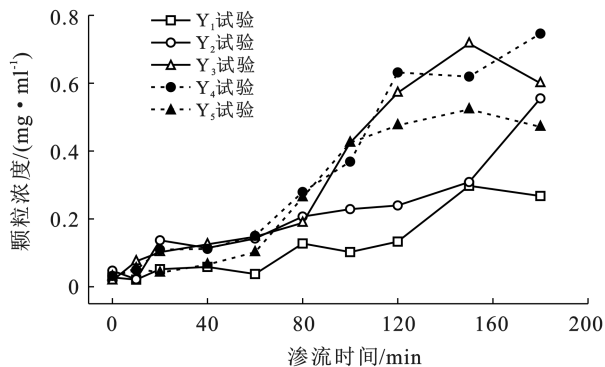


图 14 Y<sub>1</sub>—Y<sub>5</sub> 试验流失颗粒变化

Fig.14 Changes of loss particles in Y<sub>1</sub>—Y<sub>5</sub> test

3.2.3 渗流前后颗粒级配、质量变化 正弦水头土柱颗粒级配变化如图 15 所示。5 组试验在渗流结束之后,细颗粒比例均减小,粗颗粒比例则相对增加。由于细颗粒在水流的驱动下极易发生迁移运动,而粗颗粒粒径较大,质量相对较重,需要较大的水压力才能驱动其发生迁移。正弦水头是围绕内部侵蚀快速发展期相对应的水力梯度附近发生上下波动的,在此变化水头条件下,细颗粒极易就发生迁移流失,粗颗粒受到的阻力较大并不会轻易流失。

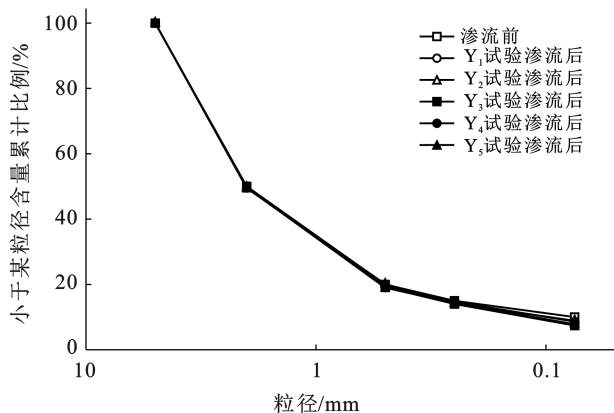


图 15 Y<sub>1</sub>—Y<sub>5</sub> 试验的颗粒级配变化

Fig.15 Changes of particle size distribution in Y<sub>1</sub>—Y<sub>5</sub> test

上升水头土柱颗粒质量变化如图 16 所示。在渗流结束之后,5 组试验的渗流土柱质量均有不同程度的减轻。

(1) Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub> 试验组。不同变化幅度的 Y<sub>1</sub>,

Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub> 三组试验中, Y<sub>3</sub> 土柱质量减少最多, 质量减少了 34.1 g, Y<sub>2</sub> 次之质量减少值为 29.2 g, Y<sub>1</sub> 土柱质量仅减少了 16.9 g。随着水头变化幅度加大, 水流对细颗粒的冲击和搬运能力增强, 致使更多的细颗粒迁移流失, 因此, 水头变化幅度最大的 Y<sub>3</sub> 试验, 土柱质量下降最显著。

(2) Y<sub>3</sub>, Y<sub>4</sub>, Y<sub>5</sub> 试验组。不同变化周期的 Y<sub>3</sub>, Y<sub>4</sub>, Y<sub>5</sub> 三组试验中水头变化周期最小的 Y<sub>4</sub> 试验土柱质量变化最为显著, 减轻了 36.5 g, 其次为 Y<sub>3</sub> 试验土柱, 质量减少了 34.1 g, 水头变化周期最大的 Y<sub>5</sub> 试验土柱质量变化最少, 减轻质量为 32.1 g。由此表明, 水头变化周期越小, 水头振荡频率越高, 使得土体颗粒迁移流失量增多。

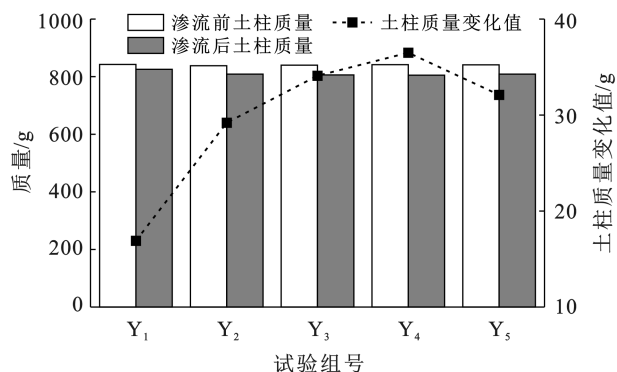


图 16 Y<sub>1</sub>—Y<sub>5</sub> 渗流土柱质量变化

Fig.16 Changes of Y<sub>1</sub>—Y<sub>5</sub> seepage soil column mass

## 4 讨论

### 4.1 上升水头试验规律分析 (X<sub>1</sub>—X<sub>3</sub>)

通过上述试验结合现有研究, 可以总结得到以下规律: 随着水头逐级提升, 土体内部孔隙通道不断扩大与贯通, 渗流速度不断加快, 水流驱动颗粒发生迁移运动效果越显著<sup>[18-20]</sup>, 导致细颗粒的流失量不断增加; 随着渗流的进行一段时间之后, 细颗粒逸出量减少, 溢出水流逐渐恢复清澈, 水流倾向从已有的渗流通道运移流走, 对土体的内部侵蚀作用趋于稳定<sup>[21]</sup>; 上升水头增幅越大, 水力条件变化越剧烈<sup>[22]</sup>, 土体内部侵蚀作用相应增强, 短时间内水头变化幅度过大会直接造成土体变形破坏。

### 4.2 正弦水头试验规律分析 (Y<sub>1</sub>—Y<sub>5</sub>)

在正弦水头条件下, 颗粒流失量与渗流速度变化是密切相关的。在内部侵蚀过程中, 颗粒迁移流失扩展了孔隙通道并加速水流运移; 而正弦水头的渗流速度加快, 水流的冲刷驱动力增强, 加速土体颗粒迁移流失。结合现有的模型试验和数值模拟<sup>[23-26]</sup>, 可以证明颗粒迁移与水流运移是相互促进、共同发展的。由图 17 可以看出, 各试验的细颗粒流失总量, 随着正弦

水头的变化幅度加大或变化周期减小,土体中的颗粒流失量增多。竖向土柱渗流试验中水头变化幅度对渗流土柱的侵蚀作用影响大于变化周期,即花岗岩风化土内部侵蚀对于水头变化幅度这个变量更为敏感。与上升水头试验相比,正弦水头颗粒流失量呈现出阶段性上升的趋势,产生这种现象的原因是变动的水流扰动了渗流场,“激活”颗粒运动状态,将细颗粒冲刷带走,从而加剧内部侵蚀作用。陈亮<sup>[9]</sup>、毛昶熙等<sup>[10]</sup>设计的稳定流与非稳定流的试验也均证明了土体在非稳定流作用下管涌发生和破坏时间较稳定流作用有所提前,管涌发生的临界水力梯度也有所降低。

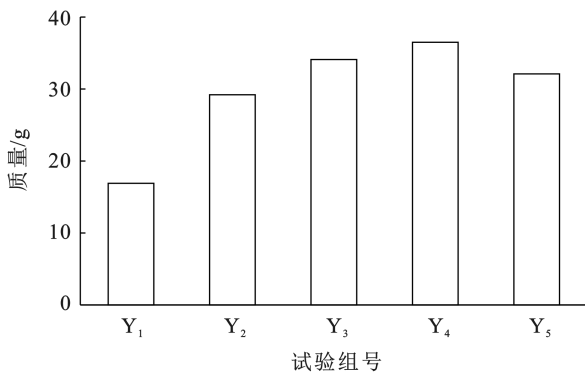


图 17 正弦水头试验细颗粒流失量

Fig.17 Fine particle loss of sinusoidal head test

## 5 结论

(1) 由于花岗岩风化土粒径差异较大,在骨架间存在微小孔隙。渗透水流在孔隙间流动并不断冲刷土体骨架使细颗粒脱落流失,产生土体内部侵蚀现象。在内部侵蚀过程中,细颗粒流失量相对较多,粗颗粒流失量较少。

(2) 土体内部侵蚀作用是一个渐进发展的过程,在土体薄弱区域的结构最先产生变形与破坏。土柱试验中渗流泉眼均是从土柱边界开始发展到土柱中部区域;流失的颗粒成分主要以细颗粒为主,在渗流后期也会出现少许粗颗粒逸出;渗流通道是沿着渗流方向自下而上发育,并最终在土体形成上下贯通的渗流通道,但水力条件短时间内发生显著变化会造成渗流通道快速贯通,土体直接变形破坏。

(3) 稳定增长的水头条件下,水流对周围土体的内部侵蚀作用趋于稳定。正弦水头能“激活”细颗粒运动,加大水头变化幅度或减小水头变化周期,能够加剧土体内部侵蚀作用,导致水流运移速度加快以及颗粒迁移流失量增多。

## 参考文献 (References)

[1] Ke Lin, Aakahashi A. Strength reduction of cohesionless

soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow [J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(4):698-711.

[2] Indraratna B, Nguyen V T, Rujikiatkamjorn C. Assessing the potential of internal erosion and suffusion of granular soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(5):550-554.

[3] To P, Scheuermann A, Williams D J. Quick assessment on susceptibility to suffusion of continuously graded soils by curvature of particle size distribution [J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(5):1241-1248.

[4] 张瑞豪,肖洋,邵社刚,等.黑土区坡耕地侵蚀沟演变对土壤粒径分布及蓄水性的影响[J].*水土保持通报*, 2023, 43(2):1-8.

Zhang Ruihao, Xiao Yang, Shao Shegang, et al. Effects of erosion gully evolution on particle size distribution and water storage properties in sloping cropland of a black soil area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2):1-8.

[5] 杨青松,倪世民,王军光,等.粗颗粒土壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J].*水土保持学报*, 2022, 36(4):30-36.

Yang Qingsong, Ni Shimin, Wang Janguang, et al. Characteristics of erosion and sediment particles on coarse texture soil slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4):30-36.

[6] Kenney T C, Lau D. Internal stability of granular filters: Reply [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1986, 23(3):420-423.

[7] Burns B, Barker R, Ghataora G S. Investigating internal erosion using a miniature resistivity array [J]. *NDT & E International*, 2006, 39(2):169-174.

[8] Chang Dongsheng, Zhang Limin. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(9):1454-1467.

[9] 陈亮,雷文,张红宇,等.非稳定流作用下管涌发生发展的室内试验及理论分析[J].*岩土工程学报*, 2013, 35(4):655-662.

Chen Liang, Lei Wen, Zhang Hongyu, et al. Laboratory simulation and theoretical analysis of piping mechanism under unsteady flows [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4):655-662.

[10] 毛昶熙,段祥宝,蔡金傍,等.洪峰过程非稳定渗流管涌试验研究与理论分析[J].*水利学报*, 2005, 36(9):1105-1114,1120.

Mao Changxi, Duan Xiangbao, Cai Jinbang, et al. Piping experimental study and theoretical analysis of unsteady seepage flow during flood peak [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(9):1105-1114,1120.

[11] 王保亮,李泳,苟万春,等.降雨作用下土体细颗粒迁移

- 特征及其对崩塌的影响[J].工程科学与技术,2017,49(增刊2):40-50.
- Wang Baoliang, Li Yong, Gou Wanchun, et al. Fine grain migration and its impact on soil failures under rainfall infiltration [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017,49(Suppl.2):40-50.
- [12] 熊传祥,王涛,鲁晓兵.降雨作用下崩岗形成细观机理模拟[J].山地学报,2013,31(6):710-715.
- Xiong Chuanxiang, Wang Tao, Lu Xiaobing. Meso-mechanical simulation of slope disintegration erosion under rainfall [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(6):710-715.
- [13] 邓龙洲,张丽萍,郭燕虹,等.侵蚀性风化花岗岩坡地降雨产流及水文过程研究[J].水土保持学报,2018,32(2):67-73.
- Deng Longzhou, Zhang Liping, Wu Yanhong, et al. Characteristics of rainfall runoff and hydrological dynamics on the erosive weathered granite slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):67-73.
- [14] 谈勋勋.压实花岗岩风化土的微观结构及其渗流特征研究[D].广西 桂林:桂林理工大学,2021.
- Tan Xunxun. Research on microstructure and seepage characteristics of compacted granite weathered soil [D]. Guangxi Guilin: Guilin University of Technology, 2021.
- [15] 建设部.土的工程分类标准:GB/T50145-2007[S].北京:中国计划出版社,2007.
- Ministry of construction, Standard for Classification of Soil Works: GB/T50145-2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [16] Guerrero M, Rütger N, Szupiany R N. Laboratory validation of acoustic Doppler current profiler (ADCP) techniques for suspended sediment investigations [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 23(1): 40-48.
- [17] Ambarwulan W, Verhoef W, Mannaerts C M, et al. Estimating total suspended matter concentration in tropical coastal waters of the Berau estuary, Indonesia [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(16): 4919-4936.
- [18] 白冰,张鹏远,宋晓明,等.渗透作用下多孔介质中悬浮颗粒的迁移过程研究[J].岩土工程学报,2015,37(10):1786-1793.
- Bai Bing, Zhang Pengyuan, Song Xiaoming, et al. Transport processes of suspended particles in saturated porous media by column seepage tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1786-1793.
- [19] 陈星欣,白冰,于涛,等.粒径和渗流速度对多孔介质中悬浮颗粒迁移和沉积特性的耦合影响[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2840-2845.
- Chen Xingxin, Bai Bing, Yu Tao, et al. Coupled effects of particle size and flow rate on characteristics of particle transportation and deposition in porous media [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(Suppl.1):2840-2845.
- [20] 蒋思晨,白冰.悬浮颗粒形状对其在多孔介质中迁移和沉积特性的影响[J].岩土力学,2018,39(6):2043-2051.
- Jiang Sichen, Bai Bing. Influence of particle shape on the suspended particle transport and deposition in porous media [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(6): 2043-2051.
- [21] 彭怡,王玉宽,傅斌,等.紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J].水土保持通报,2010,30(2):142-144.
- Peng Yi, Wang Yukuan, Fu Bin, et al. Particle characteristics and influencing factors of eroded purple soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010,30(2):142-144.
- [22] 赵纯,高照良,李永红,等.连续径流冲刷条件下工程堆积体土壤侵蚀特征[J].水土保持通报,2022,42(6):61-67.
- Zhao Chun, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Soil erosion characteristics of engineering deposits under continuous runoff scouring [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):61-67.
- [23] 倪小东,赵帅龙,王媛.非稳定流作用下管涌发生发展的细观数值模型试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3154-3161.
- Ni Xiaodong, Zhao Shuailong, Wang Yuan. Numerical analysis of generation and evolution of piping mechanism in meso-level under unsteady flow [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016,47(9):3154-3161.
- [24] 王志兵.泥石流源区土体颗粒运移堵塞效应及其斜坡破坏模式[D].北京:中国科学院大学,2011.
- Wang Zhibing. Particle transport plugging effect of soil and its slope failure mode in debris flow source area [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [25] 梁健伟,房营光.极细颗粒黏土渗流特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(6):1222-1230.
- Liang Jianwei, Fang Yingguang. Experimental study of seepage characteristics of tiny-particle clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6):1222-1230.
- [26] 段金贵,王怀星,姚姬璇,等.黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J].水土保持通报,2022,42(5):33-40.
- Duan Jingui, Wang Huaixing, Yao Jixuan, et al. Experimental study on microbial mineralization reinforcement and erosion resistance of loess slope surface [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5): 33-40.