

文章编号: 1000-7598(2011)07-2017-08

颗粒运移对蒋家沟土体渗透性影响的试验研究

王志兵, 汪 稔, 胡明鉴, 陈能远, 吕士展

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘 要: 对蒋家沟流域泥石流源区两种分散性不同的土(G1 土具有强分散性, G2 土无分散性)进行室内土柱自滤试验, 研究了土柱在常水头(水头为 5 cm)渗流过程中颗粒运移对土柱不同部位渗透性的影响。入渗液采用了煮沸过的清水与浓度为 1 g/L 的悬浮液(悬浮颗粒的粒径范围为 1.6~104.74 μm)。在清水渗流过程中, 两种土样的入口处土层渗透性随着时间而增大, 出口处土层的渗透性先增大后减少。在悬浮液渗流过程中, 两种土的各土层的渗透性都有下降趋势, 但在入口处土层最为显著, G1 土样下降了一个数量级以上, G2 下降了近两个数量级, 且 G2 土所用时间较 G1 土短, 即 G2 土的渗透性减少速率更加明显; 两土柱中渗透流量都有显著减少。研究表明: 土体的分散性在颗粒运移过程逐渐占主导地位, 即强分散性土自身颗粒的运移明显, 能抵消一部分外来颗粒的积聚堵塞作用。从试验结束后土柱的外观图像观察也发现, 入渗的悬浮颗粒在土柱的各个位置都有分布, 但主要沉积在入口处, 这与土柱各层渗透性的变化相吻合。此外, 两种土流失的颗粒都只是集中于渗流的开始阶段, 流失颗粒粒径范围集中在数微米至数十微米之间。

关 键 词: 泥石流; 颗粒; 运移; 堵塞; 渗透性**中图分类号:** TU 411**文献标识码:** A

Effects of particle transport characteristics on permeability of soils from Jiangjiagou ravine

WANG Zhi-bing, WANG Ren, HU Ming-jian, CHEN Neng-yuan, LÜ Shi-zhan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Permeability variations of two types of soils (G1 soil with high dispersibility, G2 without) from debris flow source area in Jiangjiagou ravine (Yunnan province) due to fine particles transport were evaluated under constant head condition (the constant pressure head is 5 cm) in soils column. Boiled tap water and suspension of 1 g/L particles (the size range: 1.6–104.74 μm) was successively used as inflow water for both soil column experiments. During the stage of boiled tap water seepage flow, permeability coefficient of both the soil layers near the inlet of the column decrease, while that of both the soil layers near the outlet of the column first increased, then decreased. During the stage of particles suspension seepage flow, permeability coefficient of both the soil layers along the column decreased; and the most severe decreases of permeability occurred near the inlet of the columns. The permeability coefficient of soil G1 reduced by more than one order of magnitude; the permeability coefficient of soil G2 reduced by about two orders of magnitude; and the amount of time spent reaching those values in soil G2 was less than in soil G1. That is the rate of the decrease of permeability coefficient in soil G2 was more than in soil G1. Flow rate for both soils significantly decreased in this stage. The results show that the dispersion played a leading role in the seepage process. In other words, the process of itself particles release and transport can affect the pore concentration and offset the clogging effect induced by the deposition of the foreign particles. After the experiments, the pore space of both the soil layers near the inlet of the columns were almost filled by the foreign particles, and the filling rate gradually decreased along the column by observed with the naked eye, which was in agreement with the results of the permeability coefficient decrease of the soils along the column. In addition, the mass loss of particles only occurred in the first several tens of minutes, and the sizes of the loss particles from the two soils fell within the same range of 1–100 μm .

Key words: debris flow; fine particles; transport; clogging; permeability

1 引 言

降雨型滑坡或泥石流的形成与其岩土体的渗透

性密切相关, 当雨强超过了斜坡土体的入渗率, 雨水就会持续饱和表层土体, 土体的渗透性对其表层土体的稳定起重要作用^[1]。以往的研究表明: 天然

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 5079035); 中科院院长奖获得者科研启动专项基金 (No. 09120111A01)。

第一作者简介: 王志兵, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: illite@qq.com

斜坡中一般存在有渗透性突变的界面^[2-6], 或者土体在成壤过程中形成的黏土低渗透带^[7-9], 使土体渗透性存在空间上的变异, 斜坡表层的非饱和土体在降雨或暴雨期间会形成暂态的饱和带, 从而对斜坡的失稳方式有控制作用。

多孔介质中颗粒的运移和重排列或再沉积以及流失过程被称为自滤过程^[10] (self-filtration), 是包括岩土工程在内的众多学科中一个重要的研究课题, 如: ①农田灌溉引起土体渗透性的降低^[10-11]; ②石油开采过程中由于注水导致储层中微粒的运移与堵塞, 降低储层的渗透性^[12-13]; ③造成许多水利土坝或尾矿坝失事的一个重要因素之一即坝体的内部侵蚀作用, 也与颗粒的运移与流失密切相关^[14]; ④土颗粒或其他微粒等对减压井^[15]、土工织物^[16-17]、多孔混凝土路面^[18]等排水设施的堵塞作用; ⑤土壤细粒流失是造成近地表土层的粗化、结构恶化与营养流失的主要原因^[19]。这些都是由于土体颗粒运移、流失或积聚、堵塞而导致的有害效果。

坡面径流和地下径流都会影响泥石流的启动:

①泥石流源区抗蚀性差的土体在遇水崩解破坏时分散出来的土粒会堵塞土壤孔隙, 降低土壤渗透性, 从而增强坡面径流, 增大土壤的侵蚀程度^[20]。在云南东川蒋家沟泥石流源区, 斜坡土体破坏形成坡面泥石流的一个常见的过程^[21]是由于坡面径流而形成片流、散流侵蚀, 从而形成含沙量很高的散坡流; 而源于泥石流源区的坡面径流中土颗粒含量的多寡会影响中部沟道土体的渗透性与饱和度, 进而影响泥石流发生的难易性^[22]; 同时细小黏粒(粒径小于0.005 mm)与水作用, 能在泥石流土体各粒级表面形成泥膜和高黏滞层, 起到润滑和黏滞作用^[23]。②土体斜坡中的地下径流由于具有一定的流速, 会携带土体中的细颗粒在粗颗粒间运移, 易引起土体塌落或局部坍塌^[24], 或者堵塞孔喉^[25], 导致径流路径发生堵塞或破坏而抬升地下水, 形成临时滞水面。文献^[26]通过对比斜坡模型降雨试验前后不同部位土体的颗粒级配特征, 得出土颗粒能够在降雨入渗过程中发生迁移并改变斜坡土体局部位置的渗透性。日本学者通过对浮石砾与火山灰组成的斜坡模型进行了人工降雨试验, 发现细粒的火山灰悬浮在孔隙流中, 能显著降低混合物的渗透性^[27]。显然对于松散堆积体斜坡, 无论是坡面径流还是地下径流, 水中携带的细土颗粒都将不同程度改变其流动路径上的土体的结构和渗透性等性质。

土体的渗透系数往往是边坡稳定性分析与计算的一个重要参数, 以往的研究都是将同一土层的渗

透系数假定为常数, 鲜有文献考虑土体在渗流过程中渗透性的改变。本文选取蒋家沟流域两种不同特性的土, 采用室内土柱渗透试验, 通过控制入渗液特性与入渗水头, 观测土柱中不同深度土层与整个土柱的渗透系数变化规律以及流失颗粒特征, 定量研究土体在自滤过程中颗粒运移与堵塞效应对其渗透性的影响。

2 试验设备、土样及方法

2.1 试验设备

试验仪器见图 1, 该试验装置主要是由圆柱形有机玻璃柱、测压管(5根)及供水箱、搅拌机及量筒组成。有机玻璃柱全长为 30 cm、内径为 19 cm, 底部安装一圆形带孔的有机玻璃板, 孔径为 4 mm, 在其上放置孔径为 2 mm 的钢丝网, 顶部放置了约 3 cm 厚的砾石层作缓冲层; 在柱身安装 5 根测压管用于连续观察不同深度上试样渗透水头的变化, 测压管间中心距为 5 cm, 渗透方式采用垂直向下。本文试验用水采用在煮沸过的自来水, 以减少水中气体的离析, 并在试验过程中保持水温不低于室温。

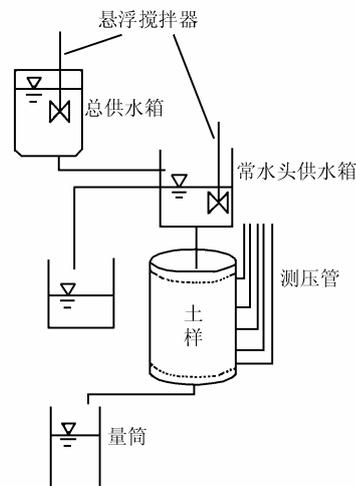


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic Diagram of the experimental apparatus

2.2 试验土样的物理性质

本试验使用的土样源于云南东川蒋家沟流域泥石流源区的两种不同岩性风化后形成的残积土, 它们的基本物理性质见表 1, G1 土样呈青灰色, 其母岩为千枚岩, 膨胀性弱, 具有高分散性, 属于强碱性土, 主要的黏土矿物为伊利石和绿泥石; G2 土样呈暗红色, 其母岩为板岩, 颗粒较为均匀, 黏聚性较好, 遇水有一定的水膨胀性, 基本无分散性, 主要的黏土矿物也为伊利石与绿泥石, 还含少量的伊利石-蒙脱石混层矿物。

表 1 试验土样的物理性质
Table 1 Physical properties of soil samples

砾石	各土粒所占比例/%			孔隙率 /%	干密度 /(g/cm ³)	相对密度	pH 值 (水溶液)	CEC /(cmol/kg)	ESP /%	主要黏土矿物
	砂粒	粉粒	黏粒							
52.53	27.34	13.35	6.78	36.84	1.77	2.81	9.13	2.79	51.0	伊利石、绿泥石
22.61	28.52	30.14	18.37	43.89	1.53	2.71	7.40	23.09	0.7	伊利石、绿泥石、 伊利石-蒙脱石混层

2.3 试验方法及原理

试验土样分 5 层装填击实，两种土样的干密度按表 1 所示值控制。对试样由下至上供水采用毛细饱和法，饱和速率控制每 20 min 提升 1 cm，主要是完全排除试样中的空气，同时 G1 土样具有强分散性，饱和水头不能太大，以免破坏土样的内部结构。与此同时，随着水位上升，接通相应的测压管；在达到所需的水头（5 cm）后保持一段时间，此时各根测压管的液面应在同一水平面。试验首先以煮沸过的自来水（不加堵塞颗粒）渗流一定时间后，将入渗液改为浓度为 1 g/L 的悬浮液，图 2 为悬浮液中悬浮颗粒粒径级配曲线。

原状土体（试验土样）的孔径大小为数十微米至 150 μm 左右^[25]，悬浮颗粒直径基本都小于 100 μm，能保证悬浮颗粒在孔径中随水流而运移。入渗液分别采用不含悬浮颗粒的清水和含土颗粒（浓度为 1 g/L）的悬浮液，用于对比入渗液中土颗粒的含量对土体渗透性的影响，悬浮液浓度不宜过大，以免悬浮颗粒在试验土体表面淤积，阻碍入渗液下渗到土柱所有土层中。

在无黏性土的无限坡的沿坡渗流过程中，土体承受的水力梯度为坡角的正弦值，本文中土柱的有效渗流长度为 20 cm，故试验选用 5 cm 高的常水头能模拟坡角约为 14.5°的斜坡沿坡渗流情况，同时在坡面径流中坡面水流厚度一般较薄，水头也不宜太高。

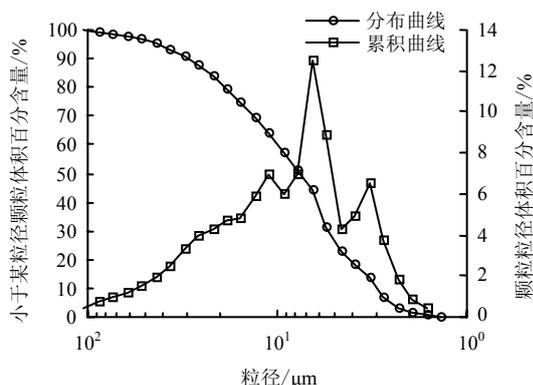


图 2 入渗悬浮液中悬浮颗粒的级配曲线
Fig.2 Inflow particle size distribution of the suspension

在试验过程中实时记录各测压管水头值和每 5 min 内渗流流量，根据达西原理计算各土层及整个土柱的渗透系数。使用 Microtrac 激光粒度仪（型号为 S3500）测量渗出液中颗粒粒径范围，此激光粒度仪的测量范围为 0.02~2 800 μm。通过渗透系数的变化与渗出液中土颗粒粒径分布、累积质量等了解土样中土颗粒运移、流失和积聚堵塞效应对土体渗透性的影响。

3 结果及讨论

2 种土样在不同渗流阶段的渗透系数 k 均分别对初始渗透系数 k_0 做归一化处理，各土样分层依据按照测压管间隔，从入口至出口依次分为第 1~4 层。

3.1 入渗液浓度为清水阶段

3.1.1 各土层渗透系数的变化规律

从图 3 可以看出：2 种土在清水（入渗液浓度为 0 g/L）渗透过程中，各土层的渗透性变化不同，靠近渗流入口处土层的渗透性都有增大趋势，而靠近渗流出口处土层的渗透性有减少的趋势，愈靠近出口或入口，这种趋势愈明显。对整个土柱，2 种土样的渗透系数在初始阶段都略有增大，且在后续阶段基本保持恒定。

在渗流入口处，G2 土样的土层渗透系数比 G1 土样的增大趋势更加明显（G2 的 k_1/k_{10} 值为 2.51，G1 的为 1.49，见表 2）。表明在渗流入口处土层中，在 G2 土样有更多相互连通的孔隙空间形成，但并不一定是有更多的颗粒发生运移而造成的，当颗粒运移后而无后续颗粒补充，从而形成较多的孔隙空间；从图 6 也可看出，G2 土样的颗粒流失质量明显低于 G1 土样；而 G1 土样具有较强的分散性，能够在渗流过程中释放较多的可运移的颗粒，在渗流过程始终形成较高的孔隙悬浮液浓度，能持续影响土样的孔隙空间形态，增大渗流阻力，因而其渗透系数增大较不明显。在靠近渗流出口土层，G1 土样的渗透系数比 G2 土样下降更为明显，可能是 G1 土的分散性强有关，有更多的微颗粒发生了运移与流失。此外，2 种土在出口处土层的渗透系数变化趋势都为先略微增大再下降，说明土柱在渗流过程中存在土颗粒的先运移与流失，再沉积与积聚的特点。

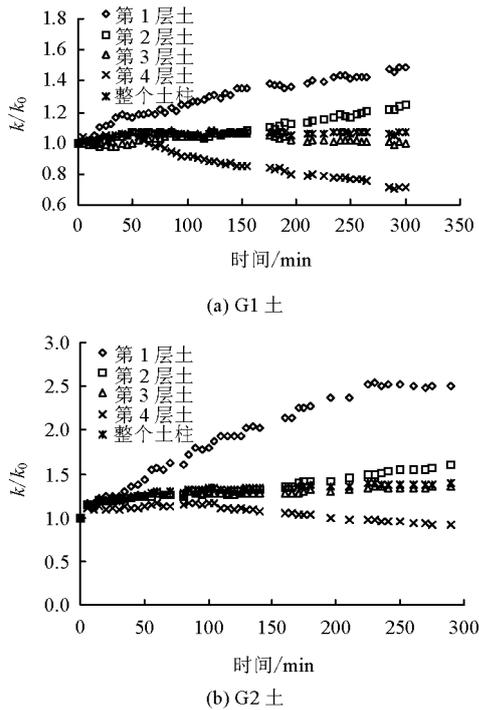


图3 在清水渗流阶段各土层及整个土柱的渗透系数变化规律曲线

Fig.3 Permeability coefficient variations of every soil layer and the whole soil column during the course of boiled tap water seepage flow

在清水渗流阶段，2种土体在渗流入口处主要发生颗粒的运移与流失，在渗流出口主要为的颗粒运移流失与积聚。但由于土体特性不同（主要为自身释放可运移颗粒的能力），而使得2种土的渗透系数变化大小呈现差异性。总体看来，清水渗流对整个土体的渗透性影响并不明显(G1土仅增大了1.07倍，G2土增大了1.39倍，见表2)。

表2 各土层在初始与结束阶段的渗透系数

Table 2 Permeability coefficient of every soil layer and the whole soil column

土样 编号	土层 序号	入渗液浓度为 0 g/L			入渗液浓度为 1 g/L		
		初始渗 透系数	结束渗 透系数	比值	初始渗 透系数	结束渗 透系数	比值
		/(10 ⁻³ m/s)			/(10 ⁻³ m/s)		
G1	1	4.28	6.37	1.49	5.99	0.49	0.08
	2	2.34	2.92	1.25	2.92	1.66	0.57
	3	3.48	3.49	1.00	3.44	2.07	0.60
	4	4.61	3.27	0.71	3.27	1.42	0.44
	0	3.44	3.67	1.07	3.62	1.04	0.29
G2	1	2.53	6.33	2.51	5.88	0.07	0.012
	2	1.71	2.75	1.61	2.62	1.18	0.45
	3	1.57	2.13	1.36	2.11	1.18	0.57
	4	2.14	1.96	0.92	1.94	1.35	0.69
	0	1.73	2.40	1.39	2.34	0.22	0.09

注：比值为对应阶段渗透试验结束时与初始时渗透系数的比值，土层序号1~4和文中相同，序号0表示整个土柱。

3.1.2 渗流流量的变化规律

2种土在清水渗流阶段的渗流流量变化趋势基本相同，都是在初始阶段有微量增加后趋于平稳。G1土样在渗流过程中渗流流量约为1.84 cm³/s，G2土约为1.07 cm³/s。

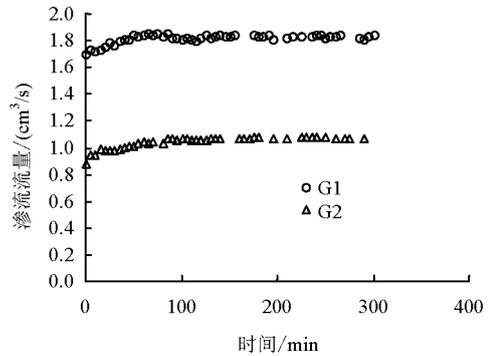


图4 在清水渗流阶段渗流流量变化曲线
Fig.4 Flow rate variations during the course of boiled tap water seepage flow

3.1.3 渗出液的颗粒特征

由于渗流出口处放置了孔径为2 mm的钢丝滤网，能阻止粒径较大的土颗粒流失，渗出液中的颗粒粒径特分布征如图5所示。2种土样的流失颗粒粒径分布曲线均呈双峰型，流失颗粒粒径范围 G1土样为2.31~62.23 μm，G2土样为2.75~52.33 μm，两种土样的流失颗粒粒径尺寸比较接近，只是G2土样的粒径范围略窄。由于较大的颗粒会占据已流失颗粒的空间，形成反滤拱，阻止细颗粒的进一步移动，最后导致细颗粒在底层的积聚。在颗粒流失质量对时间曲线（图6）中也可以看出，颗粒流失只是集中在渗流的开始阶段，后期渗出液的颗粒浓度太小而不能测得。此外，G2土样累积流失颗粒质量总量要明显低于G1土样。

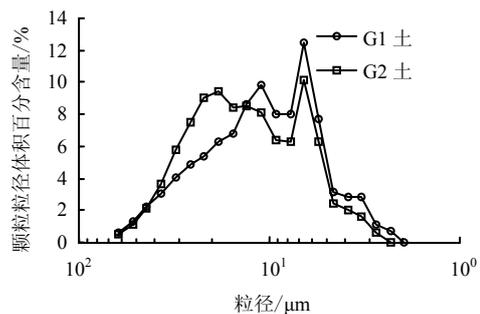


图5 流失颗粒的粒径范围
Fig.5 Particle size distribution of the of loss particles

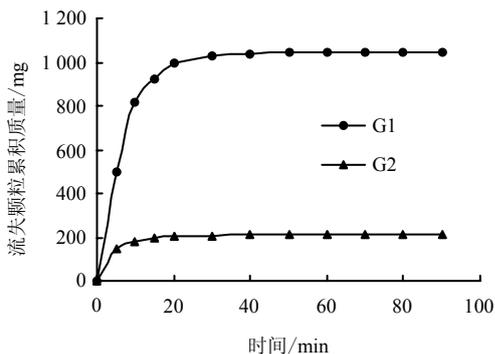


图 6 流失颗粒累积质量

Fig.6 Cumulative mass loss of particles for both soils

3.2 入渗液浓度为 1g/L 阶段

3.2.1 各土层渗透系数的变化规律

总体看来, 2 种土在入渗液浓度为 1 g/L 的渗透过程中, 各土层及整个土柱的渗透性变化的变化趋势大致相同, 即渗透系数都是随着渗流进行呈现降低的趋势, 此趋势在第 1 层土中尤为显著, 可以看出: G1 土样第 1 层土的渗透系数降低了一个数量级, G2 土样则下降了近两个数量级 (G1 的 k_1/k_{10} 值为 0.08, G2 的为 0.012, 见表 2)。可能原因是, 与其他土层相比, 在第 1 层土孔隙中具有较高的悬浮浓度。

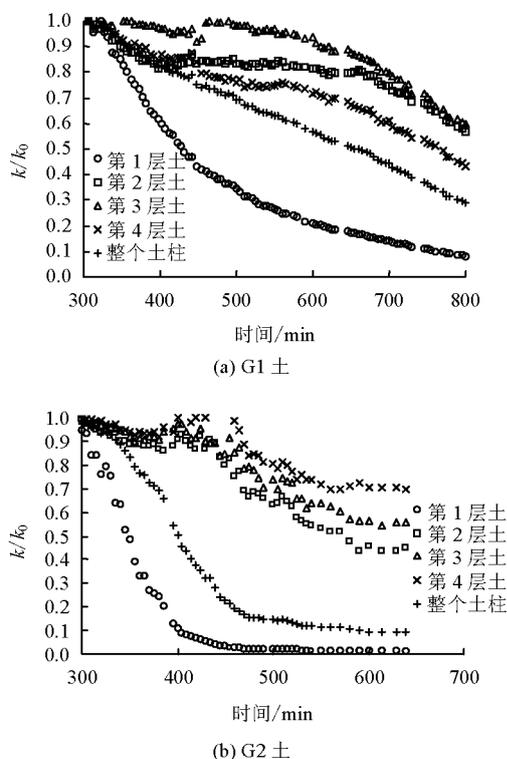


图 7 在悬浮液渗流阶段各土层及整个土柱的渗透系数随时间变化规律曲线

Fig.7 Permeability coefficient variations of every soil layer and the whole soil column during the course of particles suspension seepage flow

2 种土对渗透系数降低速率响应有显著的区别, 对于整个土柱的渗透性而言, G1 土样呈现近似线性下降, G2 土样分急剧下降和平缓下降两个阶段; 对于第 1 层土的渗透系数, G1 土样降低一个数量级约耗时 500 min, 而 G2 土样降低近一个数量级仅耗时 100 min 左右, 降低两个数量级所耗时约 240 min。

从而可以认为 G1 土样中颗粒的堵塞效应没有 G2 土样明显, 原因可能是 G1 土样具有强分散性, 自身土颗粒的运移作用明显, 能抵消一部分外来颗粒的积聚堵塞作用, G1 土中颗粒运移、沉积与再运移、再沉积这种动态过程明显, 渗透系数降低的数量级与降低速率都较 G2 土样低; 而 G2 土样基本不具分散性, 土样本身颗粒的分散与运移作用不明显, 外来颗粒更容易堵塞其孔隙, 渗透系数下降量级较大、下降速率较快。

3.2.2 渗流流量的变化规律

2 种土的渗流流量在入渗液浓度为 1 g/L 时的变化趋势基本相同, 都呈显著下降趋势。G1 土样在渗流过程中渗流流量对时间变化规律更趋于线性下降, 似乎没有趋于稳定的倾向; G2 土则可以分为急剧下降阶段与平稳阶段 (如图 8 所示)。

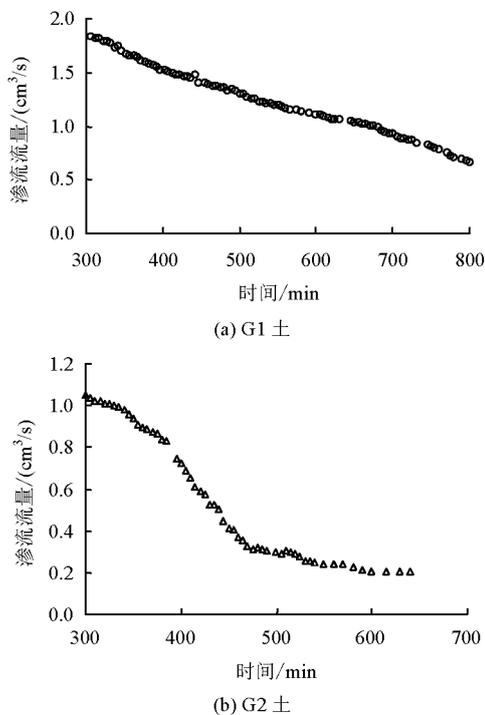


图 8 在悬浮液渗流阶段渗流流量变化曲线

Fig.8 Flow rate variations during the course of particles suspension seepage flow

已有对颗粒的物理堵塞作用的研究^[28-29]大都采用常流速方式, 根据达西定律, 常流速方式由于渗流流速不变, 颗粒的运移堵塞作用主要使土层承

受的水头坡度增大,从而降低土层的渗透系数;而本文采用的常水头渗流方式,颗粒的堵塞作用能显著降低渗流流速,对土层中水头坡度影响不大。

造成土体中颗粒运移的主要原因是水力剪切力与分散作用^[10,30-31],水力剪切力与渗流流速相关。在常水头渗流方式下,水力剪切力会随着渗流流速的下降而减少,因而随着渗流的进行,土体自身的分散性在颗粒运移中逐渐占据主导作用。对强分散性土(G1土),土颗粒发生运移和再次运移的机率要高,对土体孔隙的堵塞作用不如非分散性土(G2土)显著;同时也表明具有强分散性的土中颗粒的运移与沉积堵塞效应更持久。

3.2.3 渗出液的颗粒特征

由于本阶段是紧接清水渗透后的试验,渗出液的颗粒浓度仍然太小而不能测得,可能近似为0。其原因是由于在出口放置了滤网,在底层形成滤拱。此外,当渗流出口处的土层孔隙中积聚较多的细颗粒,能够减慢颗粒的扩散作用,限制了土样本身的颗粒释放^[10]。

3.2.4 渗透试验后土柱图像

试验结束后,从有机玻璃柱的外表可以明显看到入渗的砖红色悬浮颗粒(二值化图像中的白色部分)在青灰色土体(二值化图像中的黑色部分)孔隙的积聚作用(如图9所示)。颗粒沉积比较明显的范围达到15 cm以上,根据颗粒充填孔隙程度的不同,土柱可以分成3段:第1段(入口至7 cm)的土柱孔隙大多数都有砖红色悬浮颗粒沉积,第2段(7~15 cm)土柱的孔隙只被部分被砖红色悬浮颗粒沉积,第3段(15 cm至出口),仅有零星的砖红色悬浮颗粒沉积于孔隙中。这与前面各土层的渗透系数变化规律相吻合。

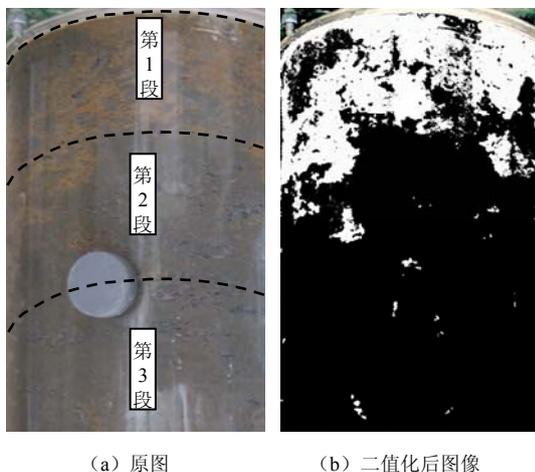


图9 试验结束后土柱中悬浮颗粒在孔隙中分布特征
Fig.9 Distribution characteristics of suspension particles in pores after experiment

4 结论

本文对蒋家沟流域泥石流源区两种不同分散性的土(G1为强分散性土,G2土不具有分散性)进行了室内土柱常水头渗透试验,通过改变入渗液中土颗粒含量,研究了颗粒运移与堵塞作用对土体渗透性的影响,结果表明:

(1)在清水渗透过程中,对2种土都表现为:入口处土层的渗透系数逐渐增大,出口处土层的渗透系数先增大后减小,各自的渗透流量基本能稳定不变,流失的颗粒粒径都在数微米至数十微米之间。区别在于:分散性强的土G1能运移的颗粒较多,在水中不易沉积和积聚,影响孔隙中土颗粒浓度,因而在入口处能增大渗流阻力,在出口处更容易流失。

(2)在入渗液为1 g/L的悬浮液的渗透过程中,2种土样各土层与整个土柱的渗透系数都呈现下降趋势;其中以入口处土层渗透系数下降尤为显著,G1土样下降了一个数量级以上,G2土样下降了近两个数量级,且G2土样下降的速率比G1土样快。第1层土与整个土柱的渗透性和渗透流量,G1土都呈现近线性下降的规律,而G2土呈现急剧下降阶段与平缓下降两个阶段。

(3)强分散性土自身颗粒的分散与悬浮作用明显,能影响土体中孔隙流的形态与浓度,能增大颗粒的再运移与再沉积机率,并在土体渗流过程中逐渐占据主导地位,能抵消一部分外来颗粒的沉积作用。

(4)试验后的土柱中悬浮颗粒在土体孔隙中充填规律为从入口至出口呈现减少趋势,这与各土层渗透系数变化规律相一致。

(5)本次试验在清水渗流阶段的渗透系数对渗流时间曲线上无峰值点,随着渗流时间的持续,渗透系数的改变值是不是会更加明显?此外,由于蒋家沟泥石流源区的土体为非均质的土石混合物,不同地质成因的松散堆积物,内部存在孔径较大的大孔隙,易形成优先流,如何模拟此种状态的下土体渗透性的变异性,这些也是研究的重点。

参考文献

- [1] KENNETH GAVIN, XUE JIAN-FENG. A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008,(35): 223-230.
- [2] 徐则民. 水岩化学作用对斜坡水文地质及滑坡的影响[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(5): 15-23.
XU Ze-min. Effect of chemical water-rock interaction on hydrogeology and landslide of slope[J]. *Journal of*

- Natural Disasters**, 2000, 22(1): 127–130.
- [3] 黄润秋, 徐则民, 许模. 地下水的致灾效应及异常地下水诱发地质灾害[J]. *地球与环境*, 2005, 33(3): 1–9. HUANG Run-qiu, XU Ze-ming, XU Mo. Hazardous effects of underground water and extraordinary water flow-induced geohazards[J]. **Earth and Environment**, 2005, 33(3): 1–9.
- [4] LOURENCO S D N, SASSA K, FUKUOKA H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: implications for rainfall-induced landslides, **Geomorphology**, 2006, (73): 115–130.
- [5] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. *地下空间*, 1999, 19(4): 303–310, 316.
- [6] VIEIRA B C, FERNANDES N F. Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity[J]. **Hydrological Processes**, 2004, (18): 791–805.
- [7] DRIESE S G, MCKAY L D, PENFIELD C P. Lithologic and pedogenic influences on porosity distribution and groundwater flow in fractured sedimentary saprolite: A new application of environmental sedimentology[J]. **Journal of sedimentary research**, 2001, 71(5): 843–857.
- [8] MCKAYA L D, DRIESE S G, SMITH K H, et al. Hydrogeology and pedology of saprolite formed from sedimentary rock, eastern Tennessee, USA[J]. **Geoderma**, 2005, 126(1/2): 27–45.
- [9] CHIGIRA M, NAKAMOTO M, NAKATA E. Weathering mechanisms and their effects on the landsliding of ignimbrite subject to vapor-phase crystallization in the Shirakawa pyroclastic flow, northern Japan[J]. **Engineering Geology**, 2002, 66(1/2): 111–125.
- [10] DIKINYA O, HINZ C, AYLMOORE G. Decrease in hydraulic conductivity and particle release associated with self-filtration in saturated soil columns[J]. **Geoderma**, 2008, (146): 192–200.
- [11] HAJRA M G, REDDI L N, GLASGOW L A, et al. Effects of ionic strength on fine particle clogging of soil filters[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2002, 128(8): 631–639.
- [12] 蒲春生, 张绍槐. 非膨胀粘土的分散和运移[J]. *石油钻采工艺*, 1992, (1): 63–71.
- [13] 王正波, 岳湘安, 韩冬. 粘土矿物及流体对低渗透岩心渗流特性的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(2): 89–92, 95. WANG Zheng-bo, YUE Xiang-an, HAN Dong. Effect of clay mineral and fluid on flow characteristics of the low-permeability cores[J]. **Petroleum Geology and Recovery Efficiency**, 2007, 14(2): 89–92, 95.
- [14] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [15] 吴昌瑜, 张伟, 李思慎, 等. 减压井机械淤堵机制与防治方法试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 20(10): 3181–3187. WU Chang-yu, ZHANG Wei, LI Si-shen, et al. Research on mechanical clogging mechanism of relief well and its control method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 20(10): 3181–3187.
- [16] 周蓉, 刘逸新. 土工织物淤堵程度的量化方法探讨[J]. *纺织学报*, 2001, (4): 54–56. ZHOU Rong, LIU Yi-xin. A study on permeability forecast of needle punched non-woovenb for geotextile use[J]. **Journal of Textile Research**, 2001, (4): 54–56.
- [17] 束一鸣. 针刺织物用于粉土反滤的实践[J]. *水利学报*, 2002, (11): 95–98, 102. SHU Yi-ming. Application of needle-punched geotextile of silt as reversed filter[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (11): 95–98, 102.
- [18] DEO O, SUMANASOORIYA M, NEITHALATH N. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: Experiments and modeling[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE**, 2010, 22(7): 741–751.
- [19] 李光录, 吴发启, 刘秉正, 等. 黄土区侵蚀对土壤内在性质的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 1997, 11(1): 45–52. LI Guang-lu, WU Fa-qi, LIU Bing-zheng, et al. The effect of erosion on soil properties on the loess plateau area[J]. **Journal of Arid Land Resources and Environment**, 1997, 11(1): 45–52.
- [20] 黄义端, 田积莹, 雍绍萍. 土壤内在性质对侵蚀影响的研究[J]. *水土保持学报*, 1989, 3(3): 9–14. HUANG Yi-duan, TIAN Ji-ying, YONG Shao-ping. The interior soil properties affecting soil erosion in loess plateau[J]. **Journal of Soil and Water Conservation**, 1989, 3(3): 9–14.
- [21] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [22] BLIJENBERG H M. Application of physical modelling of debris flow triggering to field conditions: Limitations

- posed by boundary conditions[J]. **Engineering Geology**, 2007, (91): 25–33.
- [23] 李树德. 滑坡型泥石流形成机理[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 519–522.
LI Shu-de. Formation mechanism of the landslide-type debris flow[J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis**, 2006, 34(4): 519–522.
- [24] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264–2271.
XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2264–2271.
- [25] 王志兵, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土的特性及其对斜坡失稳的意义[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 206–211.
WANG Zhi-bing, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Characteristics of gravelly soil and their implications for slope instability in Jiangjiagou ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 206–211.
- [26] 矫滨田, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 土体降雨滑坡中细颗粒运移及效应[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1014–1016.
JIAO Bing-tian, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. The movement of fine grains and its effects on the landslide and debris flow caused by raining[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(7): 1014–1016.
- [27] OKADA Y, OCHIAI H. Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests[J]. **Engineering Geology**, 2008, 97: 1–14.
- [28] REDDI L N, XIAO M, HAJRA M G, et al. Permeability reduction of soil filters due to physical clogging. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2000 (126): 236–246.
- [29] LEE I M, PARK Y J, REDDI L N. Particle transport characteristics and filtration of granitic residual soils from the Korean peninsula[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(2): 472–482.
- [30] SCHELDE K, MOLDRUP P, JACOBSEN, O H, et al. Diffusion-limited mobilization and transport of natural colloids in macroporous soil[J]. **Vadose Zone Journal**, 2002, (1):125–136.
- [31] 费祥俊. 高浓度浑水的宾汉极限剪应力[J]. 泥沙研究, 1981, (3): 13–23.
FEI Xiang-jun. Bingham yield stress of sediment-water mixture with hyperconcentration[J]. **Journal of Sediment Research**, 1981, (3): 13–23.

上接第 2016 页

- [6] GRASSELLI G, EGGER B. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(1): 25–40.
- [7] AMADEI B, WIBOWO J, STURE S, et al. Applicability of existing models to predict the behavior of replicas of natural fractures of welded tuff under different boundary conditions[J]. **Geotechnical and Geology Engineering**, 1998, 16(2): 79–128.
- [8] SIMON R. Analysis of fault-slip mechanics in hard rock mining[D]. Montreal: McGill University, 1999.
- [9] 刘远明. 基于直剪试验的非贯通节理岩体扩展贯通研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [10] 刘远明, 夏才初. 基于岩桥力学性质弱化机制的非贯通节理岩体直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1467–1472.
LIU Yuan-min, XIA Cai-chu. Research on rock mass containing discontinuous joints by direct shear test based on weakening mechanism of rock bridge mechanical properties [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1467–1472.
- [11] ESTERHUIZEN J J B, FLIZ G M, DUNCAN J M. Constitutive behavior of geosynthetic interface[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(10): 834–840.
- [12] SKEMPTON A W. Long term stability of clay slopes [J]. **Geotechnique**, 1964, 14(2): 77–101.