

坡面降雨和坡脚浸泡对土坡影响的模型试验研究

王一冰¹, 朱宝强¹, 周成¹, 谭昌明², 韩利彪¹

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 降雨是诱发边坡失稳破坏的重要因素, 为研究降雨条件下土质边坡的滑动破坏规律, 为了便于制模和坡土位移的 PIV 观测, 开展了无黏性土降雨滑坡的模型试验, 利用体积含水率传感器测试了降雨条件下坡土不同位置处含水率的变化特征, 利用 PIV 技术研究了边坡渐进变形破坏的发展过程, 分析了变形场特征, 并进一步研究了长时间降雨坡脚浸泡导致的破坏规律。结果表明: 持续降雨入渗条件下坡土体积含水率依次可分为初始平稳期、上升期和最终稳定期三个阶段, 坡脚土体的积水会导致边坡进一步滑移破坏。边坡破坏模式为渐进式滑移变形破坏; 根据边坡速度场和位移场随厚度分布特征, 可将坡土从下往上分为稳定层、剪切层和随动层。

关键词: 土质边坡; 坡面降雨; 坡脚浸泡; 变形破坏

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)02-0021-06

Model Test on the Effects of Rainfall on the Surface and Inundation at Slope Toe on Landslides

WANG Yibing¹, ZHU Baoqiang¹, ZHOU Cheng¹, TAN Changming², HAN Libiao¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Sichuan Provincial Highway Planning, Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Rainfall is an important factor in inducing instability of slopes. In order to analyze the sliding failure mechanism of soil slope under rainfall conditions, model test on cohesionless soil slope under rainfall was conducted, the variation of moisture content at different depth and position of the slope was measured by means of the volumetric moisture content sensor. Progressive failure of the slope and the deformation characteristics was analyzed by the PIV technology. The failure mechanism of the slope by long-term immersion at the slope toe under rainfall was studied as well. The test results show that the volume moisture content of the slope under continuous rainfall infiltration condition can be divided into three stages: initial stable stage, rising stage and final stable stage, and inundation of water at slope toe will further pull sliding of slope. The slope exhibits a model of progressive deformation to failure, and according to the distribution characteristics of velocity or displacement within the thickness of slope soil, the slope soil can be divided into the no-flow zone, the shear zone and the rigid zone from the slip surface to the slope surface.

Keywords: soil slope; rainfall on the slope surface; immersion at the slope toe; deformation and failure

我国地质地理条件复杂, 气候条件时空差异大, 是突发性地质灾害(滑坡、崩塌、泥石流等)多发的

国家。据突发性地质灾害的分类统计, 我国 90% 的滑坡由大气降雨直接诱发或与气象因素相关。而第

收稿日期: 2019-12-07

修稿日期: 2019-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167); 四川省重点研发项目(20ZDYF2914)

作者简介: 王一冰(1996—), 女, 四川广安人, 硕士研究生, 研究方向为环境岩土工程。E-mail: 951283894@qq.com

通信作者: 周成(1970—), 男, 江苏连云港人, 教授, 主要从事岩土试验和计算分析及环境岩土工程新技术等方面工作。

E-mail: czhou@scu.edu.cn

四系松散堆积层因其强度低等特点,易发生降雨型滑坡,如我国福建地区每年台风暴雨季期间都会有大量的滑坡发生^[1]。因此,研究降雨条件下土质边坡的变形破坏机理对防灾减灾具有重要的现实意义。

国内外学者利用有限元方法广泛开展了针对降雨边坡的水土特性和变形破坏的研究^[2-6],得出了不同降雨模式下土坡的破坏特征。还有一些学者开展了一系列的土坡降雨模型试验研究,利用较大尺寸的边坡模型,陈宇龙等^[7]试验研究了堆积体土坡在降雨条件下渗流、变形和破坏的规律,并引入声发射作为预警的判据;Ram 等^[8]针对砂土边坡的研究结果表明,降雨强度与滑动起始时间、初始滑移面位置之间存在一定的关系。利用小型土坡模型试验,许旭堂等^[9]以降雨时间、坡度和坡土密实度为变量,分析了雨水入渗对坡土变形和吸力的影响,揭示了降雨诱发土坡失稳的破坏模式;Wu 等^[10]试验证实了松散土坡中孔隙水压力、含水率和边坡裂隙对边坡滑动失稳产生很大影响。利用离心模型试验,詹良通等^[11]研究了降雨诱发粉土边坡的失稳模式,并获得了降雨强度与边坡失稳时降雨历时的关系数据;梁树等^[12]试验揭示了降雨入渗对膨胀土边坡的影响。

长时间降雨导致坡脚水位上升,坡脚在水的浸泡作用下崩解破坏,也将威胁边坡稳定。利用土坡模型试验,江强强等^[13]发现水位升降过程对边坡滑动影响程度不同,滑坡的失稳模式为牵引式滑坡;李子晗^[14]分析了高水位长期浸泡作用下砂土堤防渗流场和水土压力的变化特征。利用离心模型试验,Zhang 等^[15]监测并总结了边坡的孔隙水压力、土压力、变形和演化特征;林萼等^[16]发现水位变动条件下粉质黏土边坡的中下部首先形成局部破裂面,并逐步向上发展至坡顶形成完整滑裂面;苗发盛等^[17]揭示了三峡岸坡水位变动条件下坡体位移和孔压等的变化规律。

我国南方地区存在大量由无黏性土回填形成的土坡,土坡稳定性与坡土抗剪强度关系紧密^[18],无黏性土的抗剪强度与降雨过程中土体含水率的变化有关,调查显示,降雨是无黏性土边坡最主要的触发因素之一。因此,对无黏性土边坡的水土特性和变形破坏规律的研究具有重要的理论意义和工程应用价值。另一方面,考虑到降雨后砂性土风干较快便于进行下一轮试验和便于坡土位移 PIV 观测(砂性土不粘槽壁),因此本文试验选用砂性土模拟无黏

性土坡,进行降雨滑坡机理的模拟研究。

本文开展砂性土边坡在降雨和坡脚浸泡条件下滑动破坏的框架式模型试验,利用体积含水率传感器测定了降雨条件下坡土不同深度和位置的含水率的变化特征,利用 PIV 技术揭示了边坡渐进变形和破坏的发展过程,分析了变形场特征,并进一步研究了长时间降雨坡脚浸泡导致的破坏规律。

1 坡面降雨和坡脚浸泡模型试验

采用模型试验模拟原型降雨滑坡,需要解决试验的相似率问题。其中几何相似一般土工模型试验容易满足,但很难做到满足应力相似,所以一般最好采用离心模型试验。本文选用框架式模型试验模拟降雨滑坡,和前人的土工模型试验一样,由于坡土较薄难以满足应力相似,因此只能采取近似满足应力水平($s = \tau/\tau_f$)相似的做法,即采用人工降雨降低坡土的抗剪强度,从而使坡土的剪应力比上抗剪强度的值提高,研究土坡模型和原型相似的降雨破坏机理。

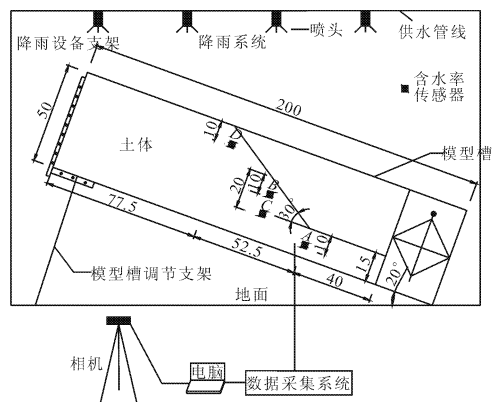
框架式模型试验是指在框架模型槽内用相似材料制作模型,在模型满足主要边界条件和几何相似以及应力水平近似的情况下测量坡土的变形和降雨饱和特性等数据,并利用这些数据揭示和阐明滑坡的发展机理。

1.1 坡面降雨模型试验

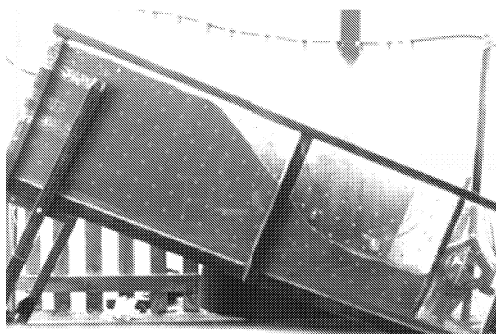
坡面降雨模型试验装置由框架式模型槽、降雨系统和数据采集系统三部分组成,如图 1 所示。试验模型槽长、宽、高分别为 200 cm、50 cm、50 cm。槽侧面安装 1 cm 厚的有机玻璃板以便实时监测边坡变形情况,玻璃板内侧为打印有控制点的透明贴膜以便 PIV 系统确定控制点的精确坐标,槽底面铺设 6 cm 厚的硬质垫层以模拟基岩。由于滑坡概率随着坡度的增加而升高,考虑到降雨条件下边坡滑动的难易性,经过多次尝试,最终确定模型槽的坡度为 20°,槽内坡积土相对模型槽底板的夹角为 30°。

降雨模拟系统采用喷头式模拟系统,由喷头、供水管线和流量计三部分组成。模型边坡有效降雨面积约 1 m²,流量计采用 lzs-15 型浮子流量计,可为试验边坡提供 0~100 mm/h 的降雨强度。数据采集系统由位移测量系统和体积含水率传感器两部分组成。位移数据由 PIV 系统测得,试验过程中采用相机和计算机获取实时位移图像,利用 GeoPIV 程序处理滑坡图像,分析边坡土体位移场^[19]。体积含水率传感器采用美国 Decagon 公司的 EC5 小型土壤水

分传感器,该传感器由探针和壳体两部分组成,具有精度高、操作简便、适用范围广泛、防水能力强和对周围土体扰动小等优点。传感器埋设位置分别在坡脚下部 10 cm(A 点)、坡中上部 10 cm(B 点)、坡中下部 20 cm(C 点)和坡顶下部 10 cm(D 点),如图 1 所示。



(a) 模型示意图(单位: cm)



(b) 模型实物图

图 1 坡面降雨模型试验装置图

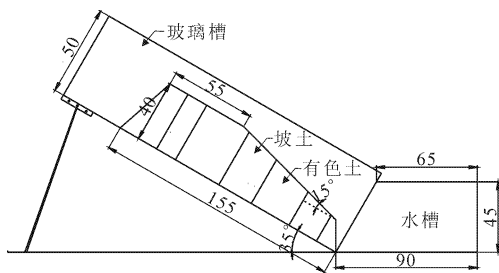
由于试验中很难模拟真实气象条件下的波动型降雨历时过程,因此模型试验中的降雨过程设计采用恒值的人工降雨强度,通过控制降雨历时来设定降雨量。根据四川地区的经验,时降雨强度大于 70 mm 或日降雨强度超过 200 mm 时,滑坡灾害发生的概率将会明显增加。本文试验选定降雨强度为 100 mm/h,降雨类型为持续平稳型降雨,试验降雨共持续 6 h。

1.2 坡脚浸泡试验

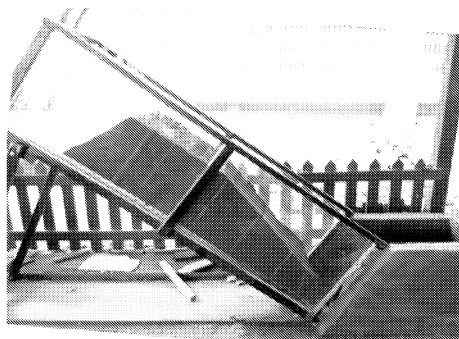
为研究长时间降雨导致的坡脚浸泡问题,在坡

面降雨模型试验的基础上,在模型槽右侧底部增加一个水槽蓄水,以模拟坡脚浸泡工况。设计水槽底长、顶长、宽、高分别为 90 cm、65 cm、50 cm、45 cm。为方便观测和记录坡土的变形,在坡土与玻璃接触的表面位置注入条状有色土进行位移标记,坡脚浸泡模型如图 3 所示。考虑到坡脚浸泡工况下坡体底部无支撑,为保证边坡模型的顺利制作,槽内堆积土相对模型槽底板的夹角为 15°。随后将模型槽坡度缓慢升至 35°。

试验过程中用直径 3 cm 的塑料水管,以 0.01 m³/min 的速度往水槽内蓄水,蓄水过程一共 15 min,在此过程中用照相机记录坡土正面和侧面的变化过程。



(a) 模型示意图(单位: cm)



(b) 模型实物图

图 2 坡脚浸泡模型试验装置图

1.3 试验材料

为研究降雨条件下无黏性土边坡的变形破坏特征,选取砂性土作为试验用土,考虑到降雨条件下边坡滑动的难易性,经过多次尝试,确定模型边坡的填筑干密度控制为 1.5 g/cm³,初始含水率控制为 7%,其基本物理力学参数见表 1。

表 1 试验用砂性土的基本参数指标

有效粒径 D_{10}/mm	连续粒径 D_{30}/mm	限制粒径 D_{60}/mm	不均匀系 数 C_u	曲率系 数 C_c	比重 G_s	最大干密度 $\rho_{d\max}$ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最小干密度 $\rho_{d\min}$ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa
0.14	0.33	0.80	5.71	0.97	2.755	1.88	1.44	39	0

2 试验结果与分析

2.1 坡面降雨试验结果与分析

(1) 坡土体积含水率随降雨历时的变化过程。将各测点的体积含水率随降雨历时的变化过程见图 3, 从图 3 可以看出, 在降雨入渗的过程中, 边坡内部各位置土体含水率都会出现不同程度的增长, 最终达到一个稳定状态, 据此可以将含水率变化过程大致分为三个阶段: 初始平稳期、上升期和最终稳定期。

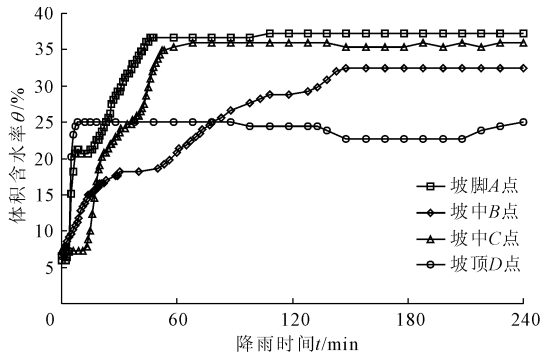


图 3 体积含水率随降雨历时的变化曲线

初始平稳期内, 由于雨水还未入渗到各测点, 所以各测点的含水率基本保持不变, A、B、C、D 四个测点的初始体积含水率大小依次为 5.9%、6.9%、6.8% 和 6.6%。由于试验砂土渗透系数较大, 降雨初期雨水入渗速率非常快, 所以初始平稳期持续时间很短。

在上升期内, 埋深均为 10 cm 的坡脚 A 点、坡中上部 B 点和坡顶 D 点三个测点, 由于埋深较浅, 因此传感器随降雨响应的时间都相对较短。降雨 4 min 后, 各测点附近土体含水率开始增加; 降雨 7 min 后, 坡顶 D 点附近土体体积含水率率先达到峰值, 大小为 25.1%, 但土体并未饱和; 降雨 46 min 后, 坡脚 A 点附近土体最早达到饱和状态, 体积含水率大小为 36.7%; 降雨 148 min 后, 坡中上部 B 点附近土体达到饱和状态, 体积含水率大小为 32.5%。埋深为 20 cm 的坡中下部 C 点, 由于埋深较深, 因此传感器随降雨响应的时间相对较长。降雨 13 min 后, 雨水才入渗到此处, 随后, 该处附近土体含水率开始迅速增大; 降雨 58 min 后, 体积含水率达到峰值, 大小为 35.42%, 土体达到饱和状态。

在最终稳定期内, 顺坡向同一埋深为 10 cm 的三个测点, 越靠近坡脚, 含水率越大, 例如坡脚 A 点、坡中上部 B 点、坡顶 D 点三个测点附近土体体

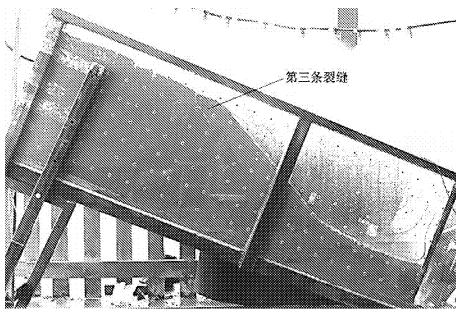
积含水率大小依次为 36.7%、32.5% 和 25.1%; 在垂直坡面方向, 边坡下部土体含水率大于上部土体, 例如坡中下部 C 点(埋深 20 cm)和上部 B 点(埋深 10 cm)两个测点附近土体体积含水率大小依次为 35.42% 和 32.5%。

(2) 边坡渐进变形破坏过程。边坡随降雨历时的破坏过程见图 4。降雨 7 min 后, 坡顶 D 点附近土体含水率率先达到峰值为 25.1%, 随后在降雨 12 min 后, 坡顶后缘位置开始产生第一条裂缝; 降雨 31 min 后, 坡顶后缘位置开始产生第二条裂缝; 降雨 66 min 后, 坡顶已产生三条裂缝, 该过程中坡土含水率一直保持稳定值为 25.1%。此后, 受降雨持续入渗的影响, 裂缝逐渐向下发展。从图 4(a) 和图 4(b) 可以看出, 降雨 2 h 后, 距坡肩约 10 cm 位置处的第三条裂缝的长度已达到 10 cm, 坡土开始沿着第三条裂缝缓慢向下滑动。降雨 4 h 后, 坡土沿滑动面缓慢向下滑动, 发生渐进滑移变形破坏, 如图 4(c) 和图 4(d) 所示。

进一步利用 PIV 系统分析降雨过程中边坡土体的位移场变化情况。由于 PIV 技术基于土体小变形假定, 当降雨时间较长时, 模型边坡土体位移较大, 将会导致两张分析图片之间相关性较差, 此时分析出的位移矢量图中乱点较多, 误差很大, 不能反映边坡土体的实际位移信息, 因此利用 PIV 技术只分析了边坡在降雨 120 min 以内的坡土位移变形情况。

根据 PIV 系统处理得到的不同时刻边坡土体位移矢量数据发现, 在降雨 10 min 时, 坡土整体的变形较小, 最大位移出现在坡脚处, 为 13.96 mm; 随着降雨持续入渗, 边坡上部土体的位移矢量开始增大, 表明该处土体的变形增加, 同时土体位移矢量的方向为顺坡面向下, 表明坡土开始产生缓慢下滑; 在降雨 30 min 时, 边坡上部土体产生的位移变形较大, 最大位移量为 32.67 mm; 在降雨 60 min 时, 最大位移量增至 53.19 mm, 位移方式以顺坡向滑移为主; 此后, 随着降雨继续入渗, 坡土不断下滑, 在降雨 120 min 时, 坡土最大位移达到 86.22 mm。进一步将坡土中位移较大的点连成一条曲线, 发现该曲线与图 4(c) 中试验边坡最终的滑动面形态基本相符。

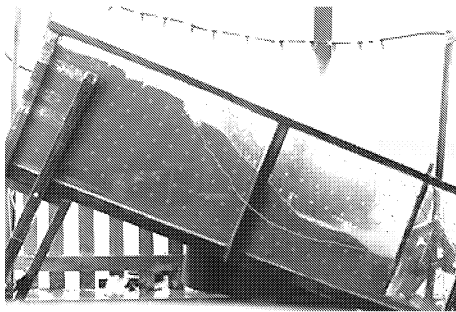
在模型边坡中上部距离坡肩 10 cm 位置处取一个特征断面, 利用 PIV 整理出该断面上各网格的土体位移信息, 将该断面坡土顺坡向位移和滑移速度沿边坡土体深度的分布示于图 5。



(a) 降雨2 h侧面图



(b) 降雨2 h正面图



(c) 降雨4 h侧面图

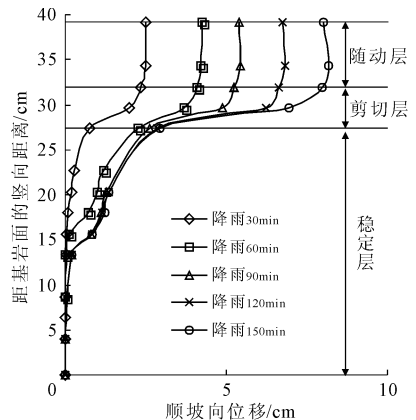


(d) 降雨4 h正面图

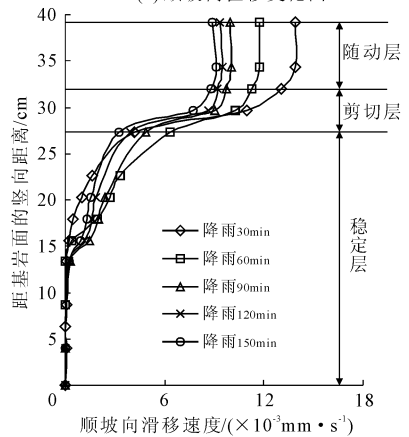
图 4 边坡渐进变形破坏过程

土坡的滑移破坏一般可以从土体的剪应力增加或抗剪强度降低两个方面去分析其成因,而降雨是

影响二者的主要因素,降雨的入渗使得边坡的滑移呈现出渐进变形的特点。针对土坡的渐进式变形破坏,往往是先形成一个剪切区,然后从此区发展渐进地形成潜在的滑移面,在坡体渐进变形达到阈值时,坡体沿滑移面破坏,发生整体性滑动。据此将剪切区定义为剪切层,剪切层以上的整体滑动区定义为随动层,剪切层以下的稳定坡体定义为稳定层。从图 5 可以看出,降雨入渗初期,由于土体含水率变化较大,剪切层内坡土滑移速率较高;随着降雨持续入渗,由于坡土含水率不再发生明显变化,降雨入渗达到稳定状态(见图 3),剪切层内坡土滑移速率也逐渐趋于恒定。另外在图 5(b)中,60 min 曲线和其它曲线趋势不一致,这是因为在降雨 60 min 后,随着坡土含水率达到峰值,土体浸泡软化,抗剪强度迅速降低,导致降雨 60 min 对应的特征断面处坡土的顺坡向滑移速度显著提高,而后就逐渐趋于稳定值了。



(a) 顺坡向位移变化图



(b) 顺坡向滑移速度变化图

图 5 模型边坡某特征断面顺坡向位移与滑移速度沿坡土深度分布曲线

根据位移和速度沿坡土深度方向的分布特征(见图 5),将位移和速度值逐渐增大且渐趋收敛于一常数值的土层区域,约 32 cm ~ 39 cm 厚,近似认

为是随动层^[20];将速度和位移值变化率最大的土层区域,约 27 cm ~ 32 cm 厚,近似认为是剪切层;剪切层以下区域近似认为是稳定层(0 ~ 27 cm)。

2.2 坡脚浸泡试验结果与分析

坡脚不同时刻坡体形状变化如图 6 所示。从图 6 可以看出,由于试验模型尺寸较小,以及模型槽玻璃边壁对土的吸附作用,随着蓄水深度的增加,整个坡土没有出现整体性的滑动,而是坡脚出现了土体被不断软化和间歇性崩塌的现象。

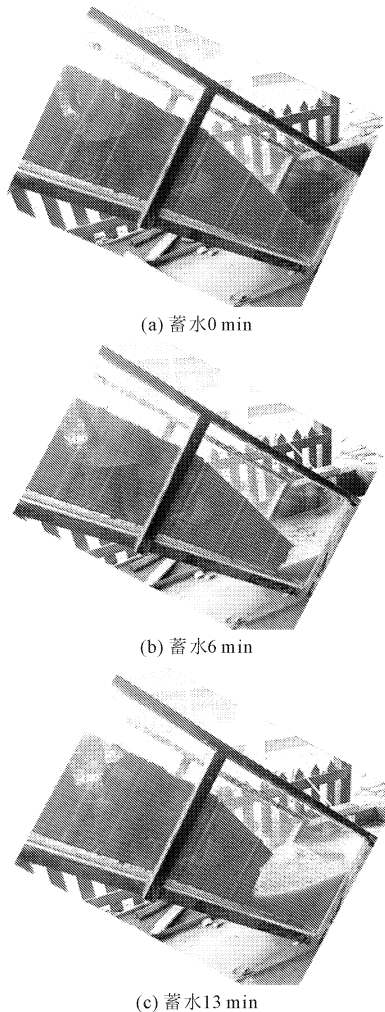


图 6 蓄水不同时刻坡脚破坏图

为了对比坡脚在水的浸泡作用下的变化情况,将不同时刻坡脚的崩岸顺序绘制到同一张图形中,如图 7 所示,图中虚线部分代表不同蓄水时刻的坡脚轮廓线。

从图 7 可以看出,在 0 ~ 1 min、4 min ~ 7 min 和 9 min ~ 13 min 时间段内,随着水位的增加,先对坡脚有较大的软化和崩解,之后分别在 2 min、8 min 和 15 min 时刻依次发生崩塌。由此可知,在长时间降雨浸泡作用下,岸坡坡脚由于软化和崩解效应,会出

现坡脚土体被水流冲走的现象,进而引发整个坡体的滑动。

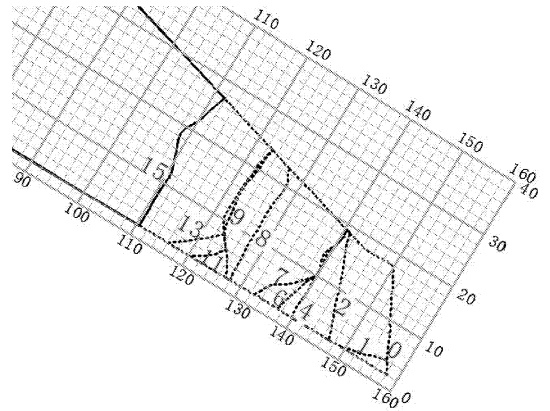


图 7 坡脚形态随浸泡时间变化过程(单位:min)

3 结 论

通过对砂性土边坡进行坡面降雨和坡脚浸泡模型试验,可以得出以下结论:

(1) 降雨入渗过程中,坡土含水率的变化过程大致可以分为三个阶段:初始平稳期、上升期和最终稳定期。随着含水率的增大,边坡最终发生渐进滑移变形破坏。

(2) 根据模型试验土坡的渐进式变形破坏和沿坡土厚度的位移分布特征,可以将坡土由下至上大致分为三层:稳定层、剪切层和随动层。往往是先形成一个剪切区,在坡体渐进变形达到阈值时,坡体沿滑移面破坏,发生整体性滑动。剪切层以上的整体滑动区定义为随动层,剪切层以下的稳定坡体定义为稳定层。

(3) 随着坡脚水位的增加,岸坡坡脚由于软化和崩解效应,会最终引发坡脚崩岸,出现坡脚土体被水流冲走的现象,进而破坏边坡的整体稳定性。

参考文献:

- [1] 林兴旺,简文彬,董岩松,等. 台风暴雨条件下福建某滑坡体的渗流稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 66-72.
- [2] An B, Zhu C, Liu K, et al. The influence of rainfall on landslide stability of an open-pit mine: the case of haizhou open-pit mine[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 3367-3378.
- [3] Ben L, Farshid V, Koo H B, et al. Yumokjeong Landslide: an investigation of progressive failure of a hillslope using the finite element method[J]. Landslides, 2015, 12(5): 997-1005.

(下转第 32 页)

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.02.005

清水及硫酸溶液浸泡下花岗岩残积土 强度演化特征研究

林其隆^{1,3}, 黄真萍^{1,2,3}, 曹洋兵^{1,2,3}, 孙加梁^{1,3,4}

- (1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116;
2. 福州大学 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室), 福建 福州 350116;
3. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350116;
4. 武汉市建筑工程质量监督站, 湖北 武汉 430019)

摘要: 为了揭示不同浸泡环境下花岗岩残积土的强度演化特征, 考虑到花岗岩残积土的结构损伤与介质溶解, 以不同硫酸溶液浓度和浸泡时间作为试验变量, 开展清水及硫酸溶液浸泡下试样的波速测试、快剪试验以及质量测试。研究表明: 试样浸泡在清水中时, 其黏聚力、内摩擦角和纵波波速均随浸泡时间增加呈指数衰减, 28 d~40 d后稳定, 硫酸溶液中则随硫酸浓度增加呈指数衰减, 浓度增加到5%后趋于稳定; 分别以黏聚力、内摩擦角和纵波波速的定义损伤变量, 在清水浸泡下随浸泡时间增长而增大, 浸泡28 d~40 d后稳定, 在硫酸溶液浸泡下随硫酸浓度增加而增大, 浓度增加到5%后趋于稳定; 黏聚力和纵波波速演化特征相似, 可通过纵波波速推算黏聚力。

关键词: 花岗岩残积土; 强度演化; 硫酸溶液; 浸泡; 纵波波速

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)02-0027-06

Strength Evolution Characteristics of Granite Residual Soil Immersed in Distilled Water and Sulfuric Acid Solution

LIN Qilong^{1,3}, HUANG Zhenping^{1,2,3}, CAO Yangbing^{1,2,3}, SUN Jialiang^{1,3,4}

- (1. College of Environmental and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;
2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources (Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention), Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;
3. Fujian Provincial Universities Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou, Fujian 350116, China;
4. Wuhan Construction Project Quality Supervision, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: In order to reveal the strength evolution characteristics of the granite residual soil under different immersing environment. By considering the structural damage and medium dissolution of the granite residual soil, this paper took the different sulfuric acid solutions concentration and immersing time as the variables, the wave velocity test, fast shear test and quality test of the sample immersed in clear water and sulfuric acid solutions were carried out. The results show that: cohesion, internal friction angle and P-wave velocity of granite residual soil samples decreased exponentially with the increase of immersion time when immersed in clear water, and are stable after 28~40 days. In sulfuric acid solution, they decreased exponentially with the increase of sulfuric acid concentration immersed, and stabilized af-

收稿日期: 2019-11-17

修稿日期: 2019-12-15

基金项目: 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金资助项目(FJKLGH2017K004, FJKLGH2017K002); 福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT170056)

作者简介: 林其隆(1996—), 男, 福建闽侯人, 硕士研究生, 研究方向为特殊岩土工程性质及其成灾机制。E-mail: 596087738@qq.com

通讯作者: 黄真萍(1965—), 女, 浙江台州人, 教授, 主要从事地质灾害及其防治、岩土体稳定性分析与治理等方面的工作。

E-mail: zhphuanguang@126.com

ter the concentration increased to 5%. The deterioration variables are defined by cohesion, internal friction angle and longitudinal wave velocity, they increase with the increase of immersion time and then became stable after 28 ~ 40 days in clear water. When immersed in sulfuric acid solutions, they increased with the increase of sulfuric acid concentration, and then tended to be stable after the concentration increased to 5%. The evolution characteristics of cohesion and P - wave velocity are similar, it is feasible to calculate cohesion by P - wave velocity. With the increase of sulfuric acid concentration, the loss rate of soil mass gradually increases.

Keywords: granite residual soil; strength evolution; sulfuric acid solutions; immerse; P - wave velocity

花岗岩残积土在我国东南沿海地区广泛分布,厚度多为 20 m ~ 35 m^[1],在季节性炎热多雨气候及区域 SO₄²⁻ 酸雨环境作用下,土体结构易被损伤破坏,强度急剧劣化,从而造成以该类土体作为承载体或建筑环境的地基、边坡及洞室的破坏失稳灾害。因此,开展花岗岩残积土在清水及硫酸溶液浸泡下强度演化特征研究具有重要理论价值与工程意义。

迄今为止,关于酸性溶液浸泡作用下花岗岩残积土力学参数演化特征研究较少。姬凤玲等^[2]研究了硫酸溶液对花岗岩残积土物理力学特性的影响;孙银磊等^[3]研究了盐酸浸泡后花岗岩残积土化学成分及抗拉特性变化特征;汤连生等^[4]研究了酸碱处理后不同 pH 值花岗岩残积土的动力响应特征;金旭等^[5]探讨了不同 pH 值的酸及浸泡时间对土的崩解特性的影响。总体上看,上述研究对酸性溶液浓度划分跨度较大,未充分考虑表征花岗岩残积土结构特性的波速演化特征与表征花岗岩残积土溶解程度的质量演化特征。除此之外,与本文主题相关的花岗岩残积土与水耦合作用下的非饱和特征与力学特性研究较多,取得了重要的进展,主要有:多次干湿循环对土 - 水特征曲线和孔径分布的影响^[6];基于水 - 土特征曲线分析水土特征滞回圈的原因^[7];基于土 - 水特征曲线提出基质吸力预测方法^[8];高液限状态下物理特性和剪切特性的试验研究^[9];饱和与非饱和状态下的抗剪强度对比研究^[10];不同原位测试方法对典型剖面的力学特性研究^[11];不同湿热环境下花岗岩残积土的损伤机理^[12];周期剪切荷载作用下强度与变形参数变化规律^[13];不同干湿循环作用下花岗岩残积土小应变刚度特性^[14];非饱和状态下的浸泡崩解机制与崩解速率^[15]。上述研究可为本文强度劣化原因分析提供重要支撑,但并未直接涉及清水及硫酸溶液浸泡下花岗岩残积土强度演化特征。

综上所述,为克服现有研究中存在的问题,本文以花岗岩残积土为对象,将 H₂SO₄ 溶液浓度设置精

细化,开展清水及 H₂SO₄ 溶液作用下的浸泡试验,考虑花岗岩残积土的结构损伤与介质溶解,进行浸泡后试样的波速测试、快剪试验和质量测试,揭示不同浸泡环境下花岗岩残积土的强度演化特征,并从介质溶解角度讨论了强度劣化原因。

1 试样制备及研究方案

1.1 试样来源与制备

本文所用花岗岩残积土试样介于可塑状至硬塑状,呈灰黄色,通过 X 射线衍射可知其主要矿物成分为石英、长石及高岭土,原岩结构已全部破坏。土体干强度中等,无摇晃反应。土体颗粒粒径大于 0.5 mm 占 1.2%,0.075 mm ~ 0.5 mm 占 17.7%,小于 0.075 mm 占 81.1%,塑性指数 I_p 为 10.8。用静压法制备环刀试样(高 20 mm、直径 61.8 mm),压实度 96%。

1.2 试验方案

试验目的是揭示清水(相当于酸性溶液浓度为 0)及硫酸溶液浸泡下花岗岩残积土强度演化特征。为此,将不同 H₂SO₄ 溶液浓度和浸泡时间作为试验变量,本次设置的浓度分别为 0%、1%、3%、5% 和 7%,设置的浸泡时间分别为 1 d、2 d、4 d、7 d、10 d、13 d、16 d、20 d、24 d、28 d、40 d。具体试验流程为:在环刀试样上下两面先后用滤纸以及透水石进行覆盖,并将凡士林抹在环刀外侧,避免试验过程中酸液腐蚀环刀,再用保鲜膜裹紧并用塑料材质的细绳系缚好;残积土试样浸泡在清水和不同浓度 H₂SO₄ 溶液中;达到设定浸泡时间后,先后进行波速测试以及快剪试验,最后选取浸泡在不同浓度溶液中 40 d 后的试样,在 105℃ 的烘干箱中烘干,并称取烘干后试样的质量。

2 试验结果分析

2.1 清水浸泡下强度演化特征

图 1 为清水浸泡下试样纵波波速与浸泡时间的关系特征。由图 1 可知,花岗岩残积土试样的纵波

波速随着浸泡时间的增大先急剧减小,而后缓慢减小,最终趋于稳定,其中急剧减小主要发生在浸泡 0 ~ 16 d,从 885 m/s 减小到 690 m/s,缓慢减小发生在浸泡 16 d ~ 28 d,从 690 m/s 减小到 648 m/s,浸泡 28 d ~ 40 d 后纵波波速基本稳定。采用指数函数进行拟合,可获得如下纵波波速 - 浸泡时间关系式:

$$V_p = 324.115 + 263.013e^{-\frac{t}{11.621}}, R^2 = 0.9612 \quad (1)$$

式中: V_p 为纵波波速(m/s); t 为浸泡时间(d,下同); R^2 为决定系数(下同)。

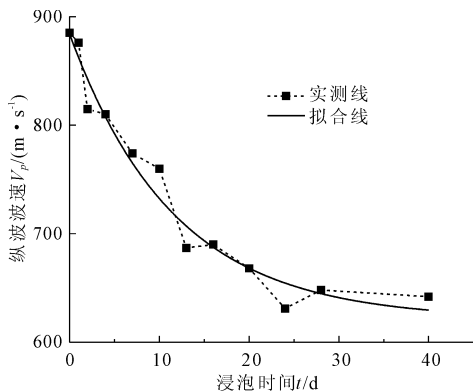


图 1 清水浸泡下纵波波速随浸泡时间变化曲线

图 2 为清水浸泡下试样黏聚力与浸泡时间的关系特征。由图 2 可知,花岗岩残积土试样的黏聚力随着浸泡时间的增大先震荡式减小,而后缓慢减小,最终趋于稳定,其中震荡式减小主要发生在浸泡 0 ~ 16 d,从 28.1 kPa 减小到 18.5 kPa,缓慢减小为浸泡 16 d ~ 28 d,浸泡 28 d ~ 40 d 后黏聚力基本稳定。采用指数函数进行拟合,可获得如下黏聚力 - 浸泡时间关系式:

$$c = 13.580 + 14.891e^{-\frac{t}{13.808}}, R^2 = 0.9410 \quad (2)$$

式中: c 为黏聚力(kPa,下同)。

图 3 为清水浸泡下试样内摩擦角与浸泡时间的关系特征。由图 3 可知,花岗岩残积土试样的内摩擦角随着浸泡时间的增大先急剧减小,而后震荡式缓慢减小,最终趋于稳定,其中急剧减小主要发生在浸泡 0 ~ 16 d,从 27.7° 下降到 21.7°,震荡式缓慢减小为浸泡 16 d ~ 28 d,从 21.7° 减小到 21.1°,浸泡 28 d ~ 40 d 后内摩擦角基本稳定无变化。采用指数函数进行拟合,可获得如下内摩擦角 - 浸泡时间关系式:

$$\varphi = 21.522 + 6.046e^{-\frac{t}{5.352}}, R^2 = 0.9598 \quad (3)$$

式中: φ 为内摩擦角(°,下同)。

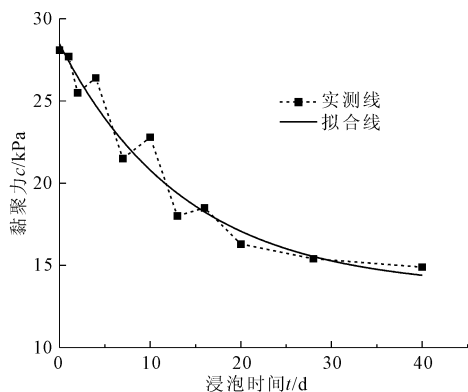


图 2 清水浸泡下黏聚力随浸泡时间变化曲线

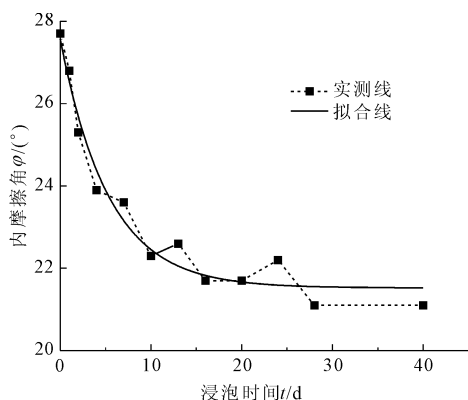


图 3 清水浸泡下内摩擦角随浸泡时间变化曲线

2.2 硫酸溶液浸泡下强度演化特征

图 4 为不同浓度 H_2SO_4 溶液浸泡 40 d 后试样纵波波速与 H_2SO_4 浓度的关系特征。由图 4 可知,花岗岩残积土试样纵波波速随着 H_2SO_4 浓度的增大先急剧减小,而后缓慢减小并趋于稳定,其中急剧减小主要发生在 H_2SO_4 浓度 0% ~ 3% 范围内,从 642 m/s 降低到 431 m/s,缓慢减小并趋于稳定发生在 H_2SO_4 浓度 3% ~ 7% 阶段,波速从 431 m/s 下降到 406 m/s,同时此阶段曲线斜率逐渐变小,纵波波速逐渐趋于稳定。采用指数函数进行拟合,可获得如下纵波波速 - 硫酸浓度关系式:

$$V_p = 408.849 + 232.938e^{-\frac{\omega}{1.281}}, R^2 = 0.9964 \quad (4)$$

式中: ω 为硫酸浓度(% ,下同)。

图 5 为不同浓度 H_2SO_4 溶液浸泡 40 d 后试样黏聚力与 H_2SO_4 浓度的关系特征。由图 5 可知,花岗岩残积土试样的黏聚力随着硫酸浓度的增大先急剧减小,而后缓慢减小趋于稳定,其中急剧减小主要发生在 H_2SO_4 浓度 0% ~ 3% 范围内,黏聚力从 14.86 kPa 减小到 6.96 kPa,缓慢减小并趋于稳定发生在 H_2SO_4 浓度 3% ~ 7% 阶段,黏聚力从 6.96 kPa 减小到 5.25 kPa,同时此阶段曲线斜率逐渐变小,黏

聚力逐渐趋于稳定。采用指数函数进行拟合,可获得如下黏聚力-硫酸浓度关系式:

$$c = 4.559 + 10.580e^{-\frac{\omega}{2.478}}, R^2 = 0.9661 \quad (5)$$

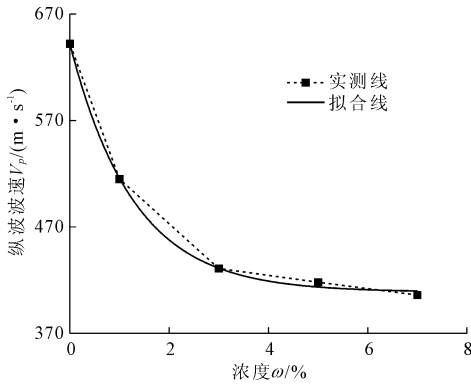


图 4 硫酸中浸泡 40 d 后纵波波速随 H_2SO_4 浓度变化曲线

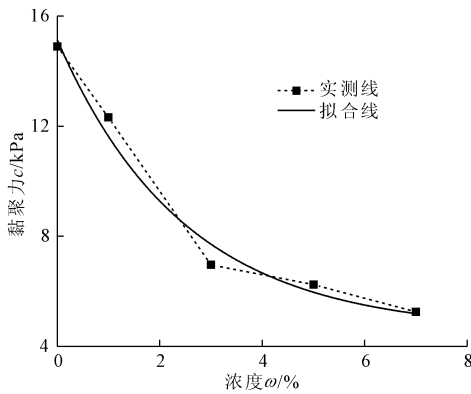


图 5 硫酸中浸泡 40 d 后黏聚力随 H_2SO_4 浓度变化曲线

图 6 为不同浓度 H_2SO_4 溶液浸泡 40 d 后试样内摩擦角与 H_2SO_4 浓度的关系特征。由图 6 可知,花岗岩残积土试样的内摩擦角随 H_2SO_4 浓度的增大减小,其 H_2SO_4 浓度 0% ~ 7% 阶段内摩擦角总体从 21.1° 减小到 10.29° ,其中,浓度 5% ~ 7% 阶段内土体内摩擦角下降 1.44° ,而浓度 0% ~ 1% 阶段内,土体内摩擦角却下降 2.79° ,平均下降速率是前者的 3.88 倍。采用指数函数进行拟合,可获得如下内摩擦角-硫酸浓度关系式:

$$\varphi = -16.965 + 38.335e^{-\frac{\omega}{19.648}}, R^2 = 0.9598 \quad (6)$$

2.3 损伤演化特征

为定量表征不同浓度溶液浸泡下花岗岩残积土损伤特征,定义强度和波速损伤变量。其中,强度损伤变量计算公式如下:

$$D = \frac{(R_0 - R_i)}{R_0} \quad (7)$$

式中: R_0 为试样初始黏聚力、内摩擦角; R_i 为试样浸泡后黏聚力、内摩擦角; D 为强度损伤变量。

参考文献[16],定义波速损伤变量如下:

$$D_V = 1 - \left(\frac{V_i}{V_0}\right)^2 \quad (8)$$

式中: V_0 为试样初始纵波波速; V_i 为试样浸泡后纵波波速; D_V 为试样的波速损伤变量。

图 7 为花岗岩残积土试样的黏聚力、内摩擦角和纵波波速三者定义的损伤变量与浸泡时间的关系特征,由图 7 可知,黏聚力、内摩擦角和纵波波速损伤变量随着浸泡时间的增加而增加,并逐渐趋于平稳。总体来说,三种损伤变量在 0 d ~ 16 d 快速增加,16 d ~ 28 d 小幅度增加,28 d 后趋于平稳,其中黏聚力和纵波波速定义的损伤变量变化量值相近,而内摩擦角损伤变量在 10 d 后的数值变化较前两者小。

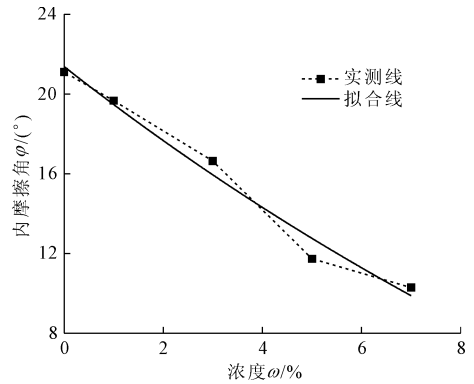


图 6 硫酸中浸泡 40 d 后内摩擦角随 H_2SO_4 浓度变化曲线

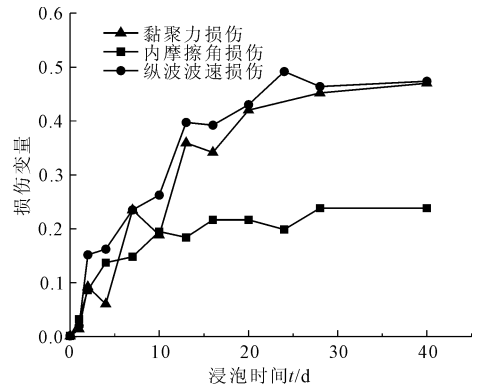


图 7 清水浸泡下损伤变量随浸泡时间变化曲线

由图 7 可知,随浸泡时间变化的黏聚力和纵波波速损伤变量曲线变化特征十分相似,将浸泡在清水中所采集到的黏聚力和纵波波速数据绘制成图 8,由图 8 可知,二者呈强相关关系,说明土体浸泡在清水中,黏聚力和纵波波速受损伤程度基本保持同步,进一步用对数函数进行拟合,拟合公式如下:

$$c = -106.899 + 21.609 \ln(V_p - 362.856), R^2 = 0.9732 \quad (9)$$

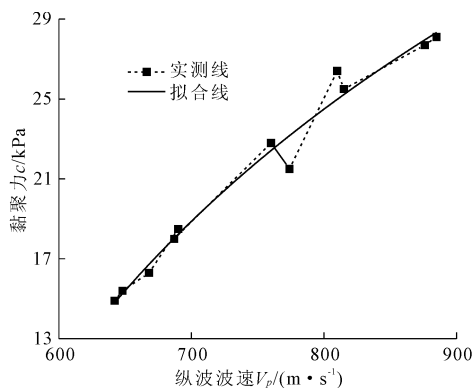


图8 清水浸泡下黏聚力与纵波波速关系曲线

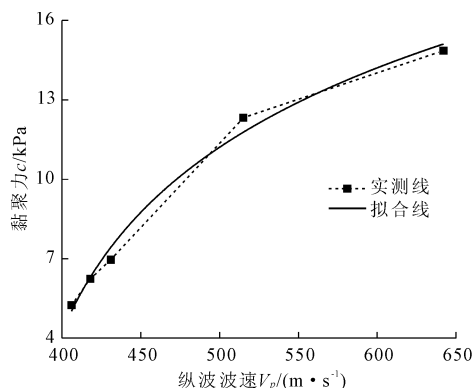
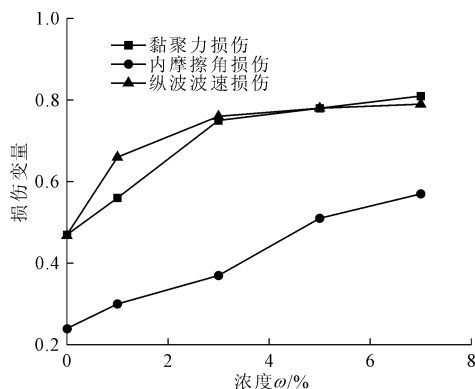


图10 硫酸浸泡下黏聚力与纵波波速关系

图9为花岗岩残积土试样的黏聚力、内摩擦角和纵波波速三者定义的损伤变量与 H_2SO_4 浓度的关系特征。由图9可知,黏聚力、内摩擦角和纵波波速损伤变量随着 H_2SO_4 浓度的增加而增加,增长速度先快后慢,最终趋于平稳。在相同 H_2SO_4 浓度下,纵波波速和黏聚力的损伤变量曲线较为相近,且均比内摩擦角大。其中,黏聚力和纵波波速的损伤变量在浓度0%~3%阶段增加较快,浓度3%~7%阶段无明显变化,基本趋于稳定,突变点在3%;内摩擦角损伤变量则在浓度0%~5%阶段快速增长,浓度5%~7%阶段增长速度有所下降,整体曲线随着浓度增加有趋于平稳的趋势。

图9 硫酸中浸泡40 d后损伤变量随 H_2SO_4 浓度变化曲线

由图9可知,随 H_2SO_4 浓度变化的黏聚力和纵波波速损伤变量曲线变化特征十分相似,将不同浓度 H_2SO_4 溶液中浸泡40 d后所采集到的黏聚力和纵波波速数据绘制成图10,由图10可知,二者呈强相关关系,说明土体浸泡在不同浓度 H_2SO_4 溶液中,二者是同步受到影响,进一步用对数函数进行拟合,拟合公式如下:

$$c = -16.301 + 5.566 \ln(V_p - 359.957),$$

$$R^2 = 0.9821 \quad (10)$$

3 结论

(1) 浸泡在清水中的花岗岩残积土试样,其黏聚力、内摩擦角和纵波波速随浸泡时间增加先快速减小,后缓慢减小,最终趋于稳定,且三者随浸泡时间的变化特征均呈指数衰减。

(2) 浸泡在不同浓度 H_2SO_4 溶液中的花岗岩残积土试样,其黏聚力、内摩擦角和纵波波速均随 H_2SO_4 浓度增加而下降,且呈指数衰减。

(3) 分别以黏聚力、内摩擦角和纵波波速定义试样的损伤变量,均随浸泡时间增长而增大,后趋于稳定,随着 H_2SO_4 浓度增加,先增大后趋于稳定,其中黏聚力和纵波波速定义的损伤变量变化特征基本一致。

(4) 黏聚力、纵波波速可采用对数函数进行拟合,拟合程度高,说明通过纵波波速推算黏聚力具有一定可行性。

参考文献:

- [1] 杨茂长. 福建沿海地区花岗岩残积土工程特性探讨[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(1): 41-43.
- [2] 姬凤玲, 李强. 酸性溶液对花岗岩残积土物理力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1506-1510, 1530.
- [3] 孙银磊, 汤连生. 化学成分对花岗岩残积土抗拉张力学特性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(3): 7-13.
- [4] 汤连生, 巫燕萍, 赵占仑, 等. 循环荷载下土中动应力响应特征及pH值变化对其影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12): 78-82, 90.
- [5] 金旭, 熊传祥, 钟富林. 酸污染条件下花岗岩残积土崩解特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 194-198.
- [6] Kong Lingwei, Sayems Hossain Md, Tian Huihui. Influ-

- ence of drying-wetting cycles on soil - water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance (NMR) spin - spin relaxation time (T₂) relaxometry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(2):208-216.
- [7] 汤连生, 颜波, 李振嵩, 等. 花岗岩残积土水土特征曲线的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008(4):62-65, 79.
- [8] 丁少林, 左昌群, 刘代国, 等. 非饱和残积土土 - 水特性研究及基质吸力估算[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3):98-103.
- [9] 陈晓平, 周秋娟, 蔡晓英. 高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6):901-908.
- [10] Rahman A S A, Noor M J M, Jais I B M, et al. Shear strength of granitic residual soil in saturated and unsaturated conditions[J]. AIP Conference Proceedings 2020, 2018;0200031-0200039.
- [11] Fonseca A V D, Carvalho J, Ferreira C, et al. Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24(5):1307-1348.
- [12] 樊秀峰, 简文彬, 陈晓贞. 湿热风化环境下残积土性能劣化试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3):1-5, 23.
- [13] 李江, 邓斌. 花岗岩残积土在周期荷载下力学特性的实验研究[J]. 岩土力学, 1989(4):31-43.
- [14] 尹松, 孔令伟, 张先伟. 炎热多雨气候影响下残积土小应变刚度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4):743-751.
- [15] 张抒, 唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6):1668-1674.
- [16] 樊秀峰, 简文彬. 砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3):557-563.

(上接第 26 页)

- [4] Sony P, Ahmad R, Kabul B. et al. Determination of unsaturated soil properties and slope deformation analysis due to the effect of varies rainfall[J]. Procedia Engineering, 2015, 125(5):376-382
- [5] 曾铃, 付宏渊, 何忠明, 等. 饱和 - 非饱和渗流条件下降雨对粗粒土路堤边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10):3614-3620.
- [6] 丁金华, 陈仁朋, 童军, 等. 基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1):159-168.
- [7] 陈宇龙, 黄栋. 降雨型堆积体滑坡大尺寸模型试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(4):576-580.
- [8] Ram K R, Kwansue J, Hajime N, et al. Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall[J]. Catena, 2014, 122:27-41.
- [9] 许旭堂, 简文彬, 吴能森, 等. 降雨诱发残积土坡失稳的模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2):270-279.
- [10] Wu L Z, Huang R Q, Xu Q, et al. Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures[J]. Environmental Earth Sciences, 2005, 73(12):8519-8531.
- [11] 詹良通, 刘小川, 泰培, 等. 降雨诱发粉土边坡失稳的离心模型试验及雨强 - 历时警戒曲线的验证[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10):1784-1790.
- [12] 梁树, 谢强, 郭永春, 等. 降雨入渗条件下膨胀土基坑边坡离心试验[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2):249-255.
- [13] 江强强, 焦玉勇, 宋亮, 等. 降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11):4361-4370.
- [14] 李子晗. 高水位长期浸泡堤防工程多工况试验及数值模拟计算研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2018:26-58.
- [15] Zhang S, Pei X J, Wang S Y, et al. Centrifuge model testing of a loess landslide induced by rising groundwater in Northwest China[J]. Engineering Geology, 2019, 259:1-14.
- [16] 林葳, 罗方悦, 张嘎. 水位变动条件下土坡变形累积致损特性[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(6):73-76.
- [17] 苗发盛, 吴益平, 谢媛华, 等. 水位升降条件下牵引式滑坡离心模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(2):605-613.
- [18] 黄细超, 任光明, 周纵横, 等. 浅层滑坡中的地下水作用机理及治理方法概述[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5):181-188.
- [19] White D, Randolph M, Thompson B. An image-based deformation measurement system for the geotechnical centrifuge[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2015, 5(3):1-12.
- [20] 朱宝强, 周成. 无限长土坡速度场或位移场函数分析研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2):210-215.