

不同干湿作用下山区公路边坡土体性质劣化研究

吴国鹏^{1,2}, 于翔鹏^{1*}, 崔凯^{1,2}, 高虹¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:白龙江中游山区公路边坡土体物理力学性质在夏季集中式降雨与高地表温度形成的强烈干湿环境作用下极易发生劣化,致使公路边坡土体发生变形失稳等现象。为研究该类干湿作用下公路边坡土体劣化过程,选取化马滑坡土体为研究对象,对经历多次强烈干湿和日常干湿作用后土体的颗粒级配、密度、液塑限、抗剪强度、单轴抗压强度等指标进行测试。结果表明:以上指标在经历多次不同干湿循环后,均发生明显变化,且强烈干湿循环后试样各项指标变化速率均大于日常干湿循环;多次干湿作用下,土体内部砂粒含量降低,黏粒含量增多,孔隙增大致使试样颗粒均匀性增加,疏松度增大,磨圆度变差。

关键词:集中式降雨;公路边坡;干湿循环;土体劣化

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

白龙江中游山区属青藏高原向黄土高原过渡带,地层破碎,是中国地质灾害发育最为严重的地区之一。区内降雨量大、集中、蒸发强烈、地表温度较高。尤其以降雨为主而产生的滑坡、泥石流等灾害,时刻威胁着该地区公路等基础设施的安全。化马滑坡位于甘肃宕昌县境内,该滑坡由断裂带控制,坡体目前处于匀速蠕变阶段^[1],长期威胁国道212线的安全。该地区岩土体受长时暴晒后又遇暴雨,使该地区岩土体性质迅速

发生变化,影响滑坡体稳定性^[2],成为影响该地区公路边坡稳定性的主要因素之一。

研究表明:边坡土体物理性质、水理性质、力学性质变化规律的相关研究对山区公路边坡稳定性至关重要。剪应力和剪应变的相关研究更是其中重要一环,边坡土体破坏以剪切破坏为主,剪应力到达其抗剪强度时,即发生剪切破坏^[3],此时,坡体滑带土黏聚力趋近于0^[4];土体剪应力大于自身残余强度^[5],其临界剪

基处理设计及计算理论方面的研究,该文分析并论述了美国联邦公路管理局(FHWA)《深层水泥搅拌桩在路基及基础工程中的设计指南》中深层水泥搅拌桩的设计方法和计算步骤,并对比了中美标准在水泥搅拌桩设计上的差异性,限于篇幅,笔者将在其他论文中就具体计算实例进行介绍,以期为美国标准研究及美标地区岩土工程设计提供技术参考。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范:JTJ 79—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 中交第一公路勘察设计院有限公司. 公路软土地基路堤设计与施工技术细则:JTG/T D31—02—2013[S].

北京:人民交通出版社,2013.

- [3] Federal Highway Administration(FHA): FHWA-HRt—13—046 Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support[S],2013.
- [4] SLOAN J A. Column-Supported Embankments: Full-Scale Tests and Design Recommendations[D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA,2011.
- [5] 王甘林. 高速公路路堤荷载作用下变刚度复合地基优化设计方法研究[J]. 中外公路,2018,38(5):27—31.
- [6] 曾国东,王佳,徐奋强,等. 桩土复合路基基层剪切机理研究[J]. 中外公路,2019,39(2):19—22.

收稿日期:2022-09-12(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:42107206);甘肃省自然科学基金资助项目(编号:1308RJZA140);兰州理工大学红柳优秀青年人才计划项目

作者简介:吴国鹏,男,博士,讲师. E-mail:wg8811@126.com

* 通信作者:于翔鹏,男,博士研究生. E-mail:1846755669@qq.com

应力与正应力呈正相关^[6]。其次,边坡土体物理、水理性质的变化影响土体力学性能,随着塑性指数增大,土体残余强度亦随之增大^[7],黏粒含量、孔隙水含量、有效法向应力^[8]、矿物成分及其含量都会影响其剪切强度^[9]。外界环境变化亦会引起土体内摩擦角和黏聚力发生改变,边坡土体在酸性、碱性环境中力学性能发生明显改变^[10-11],冻融作用下使滑带土发生明显应变硬化效应,冻融前期相关参数变化较小,后期变大^[12]。吕光东^[13]采用UU试验探究了干湿作用下土体黏聚力和内摩擦角劣化规律;李长贵^[14]采用动态回弹模量试验探索干湿循环后动态回弹模量变化规律。

关于降雨对边坡的影响,大部分学者将目光集中于边坡稳定性。倪梅三等^[15]在雨中模拟了一个内部渗流场,并使用液-固关系分析确定斜坡的稳定性;陈浩等^[16]使用有限元模拟雨中边坡的内部渗流场,并系统分析了不同降雨时间下的饱和、地下水线和压力;段炎冲等^[17]以整治前后某公路土质边坡为研究对象,对该边坡渗流场及其坝坡抗滑稳定性进行系统分析,验证了该边坡整治措施的合理性;杨柳^[18]采用有限元软件,模拟了不同降雨条件,分析了不同降雨条件下边坡的安全系数、塑性区位置和范围;王峻岭等^[19]采用有限元软件,简要分析了黄河大堤的渗流稳定性;林悦奇^[20]通过Geostudio软件分析了土坝的渗流稳定性。由此可见,国内外学者对滑带土在集中式降雨和普通降雨前后相关指标对比研究较少,尚缺乏较为系统的研究。

基于以上认识,该文选取白龙江中游化马滑坡边坡土体为研究对象,采用颗粒级配、密度、液塑限、抗剪强度、单轴抗压强度等试验对经历多次集中式降雨与普通降雨作用后边坡土体的工程地质相关性指标进行测试,以揭示化马边坡土体在集中式降雨和普通降雨形成的两种干湿作用下土体工程地质相关指标的劣化规律,为该地区公路建设和地质灾害防治提供有益参考。

1 试验研究

1.1 试验材料

试样选自化马滑坡边坡土体,由于该滑坡边坡土体出露于地表,极易受该地区集中式降雨与较高地表温度共同作用下形成的强烈干湿作用影响^[2],同时,该边坡土体虽然出露于地表,但成型采样较为困难。因此,试验采取该边坡土体的重塑样品,来研究多次强烈

干湿作用后该边坡土体的颗粒级配、密度、液塑限含水率、抗剪强度、黏聚力、内摩擦角、单轴抗压强度的变化规律。

1.2 研究区干湿环境特征

集中式降雨为西北地区常见的一种形式,持续干旱后,突降暴雨,使原本干旱高温的土体温度迅速下降,土体性质发生快速改变,是该地区地质灾害频发的主要原因,也是舟曲“8·8”特大泥石流爆发的主要原因之一^[19]。根据研究区气象站30年地表温度数据资料统计,该地区夏季地表温度最高为72.4℃,最低为7.3℃、平均地表温度为21.1℃。为采集不同降雨前后地表温湿度变化,研究采用温湿度仪对区内多个边坡进行监测。研究发现:在集中式降雨前,该地区公路边坡地表最高平均温度为73℃,空气平均湿度为26.6%,降雨后地表平均温度为30℃,空气平均湿度为98%,历时2h;在普通降雨前,该边坡土体地表平均温度为55℃,空气平均湿度为48.6%,降雨后地表温度为30℃,空气湿度为98%,历时2h。

1.3 试样制备

①通过液塑限联合测定仪测定该滑带土液限含水率为14.8%,配置含水率分别为10%、12%、14%、16%、18%的湿土各5kg,在保湿器内静置24h;②将上述配置好的土,通过轻型击实试验,制成土工试验标准圆柱体,确定该土体最优含水率为14%、最大干密度为2.05g/cm³;③最大限度节约样品,试验以最大干密度与最优含水率将该滑带土样品进行配置,将试样制成边长为7.07cm的立方体进行不同干湿循环试验;④公路边坡土体的应力-应变曲线采用无侧限抗压试验测定;通过环刀对标准立方体进行加工,测定试样剪应力与剪切位移关系及其黏聚力 c 、内摩擦角 φ 值变化规律。

1.4 试验过程

为探究边坡土体在两类干湿循环过程中的物理、力学相关参数变化,试验采用可程式恒温恒湿试验机,设置温度、湿度、时间分别为73℃、26.6%、10h,30℃、98%、2h为一次干湿循环,称为强烈干湿;设置温度、湿度、时间分别为55℃、48.6%、10h,30℃、98%、2h为一次干湿循环,称为日常干湿。依据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,对分别完成0、3次、6次、9次、12次的强烈干湿和日常干湿循环后的试样进行颗粒级配、密度、液塑限含水率、抗剪强度、黏聚力、内摩擦角、单轴抗压强度等相关工程指标的测定分析。

2 试验结果

2.1 颗粒级配分析

采用筛分法和量筒法对两种不同干湿作用、不同养护次数滑带土进行粗颗粒和细颗粒的统计。结果如图 1 所示。

图 1 表明:两种干湿作用都对土体颗粒粒径有比较明显的影响,且强烈干湿影响较日常干湿严重;粒径大于 2 mm 时,两种养护作用下颗粒含量表现为上升趋势;粒径为 2~0.075 mm、0.075~0.005 mm 与小

于 0.005 mm 时,两种养护作用下,颗粒含量均表现为下降趋势。

试验同样反映出试样颗粒粒径含量对两种不同次数干湿循环有不同的响应速度,以粉粒为例,两种干湿条件下粉粒含量均呈下降趋势,3~6 次循环下降速度最快,9~12 次下降速度次之,0~3 次下降速度最慢,且强烈干湿作用下,下降速度大于日常干湿。

2.2 密度分析

为研究边坡土体在两种不同干湿作用下密度的变化规律,采用环刀法对两种不同干湿作用下试样的密度进行测试,试验结果见图 2。

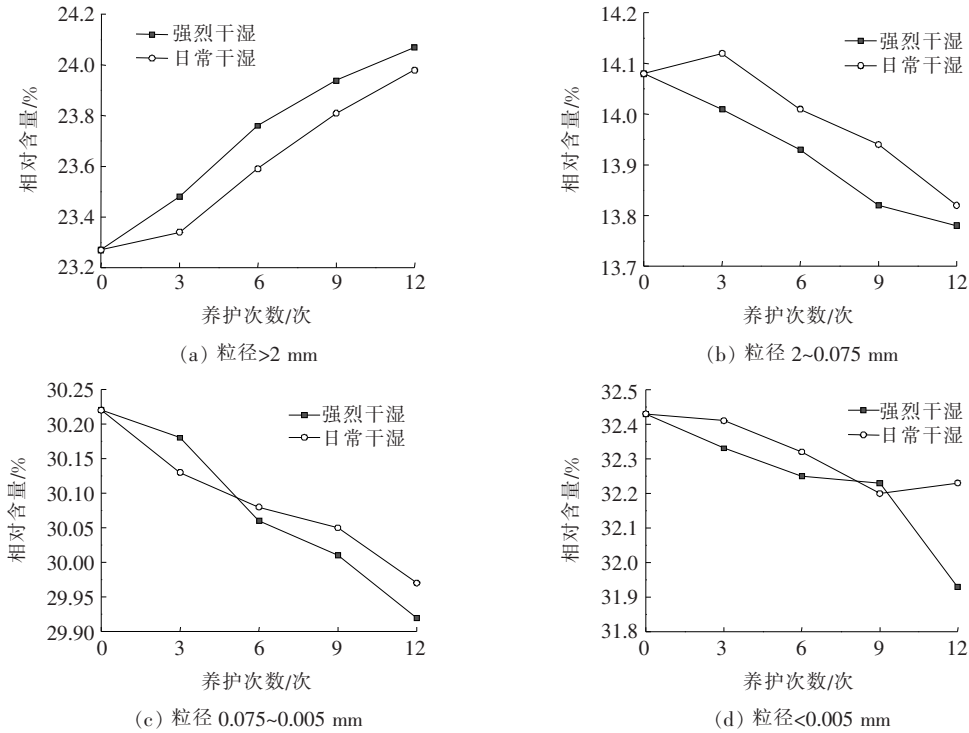


图 1 两种干湿作用下试样颗粒级配

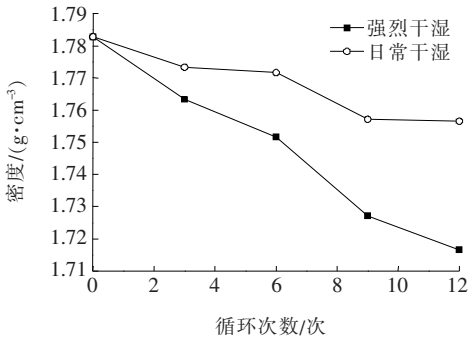


图 2 不同干湿循环后密度

图 2 表明:两种干湿作用都对滑带土密度有比较明显的影响,强烈干湿循环影响较日常干湿严重;两种

试验方案中,密度均呈下降趋势,强烈干湿循环后试样密度变化较大,同时,两种方案中试样密度改变呈相同趋势,表现为 6~9 次下降速度最大、0~3 次下降速度次之、3~6 次下降速度最慢的变化特征。

2.3 液塑限分析

为研究边坡土体在两种不同干湿作用下液、塑限的变化规律,采用液塑限联合测定仪测量,分析试样经历不同干湿作用后的塑限、液限,结果如图 3 所示。

图 3 表明:两种干湿作用都对边坡土体液塑限有比较明显的影响,强烈干湿循环影响较日常干湿循环严重;两种试验方案中,试样液塑限均呈下降趋势,强烈干湿循环后试样液塑限变化均要大于日常干湿循

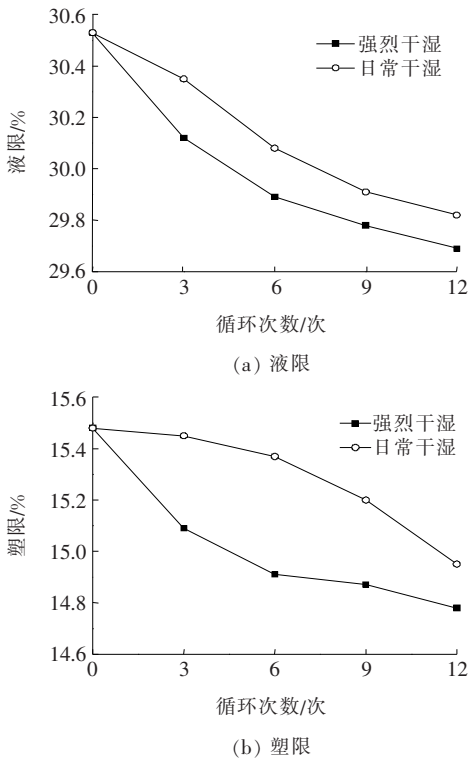


图3 不同干湿循环后试样液、塑限试验结果

环,且液限变化速度较塑限变化速度低,强烈干湿循环后试样液塑限变化速度均高于日常干湿。

2.4 剪应力与剪切位移

为研究边坡土体在两种不同干湿作用下抗剪强度的变化规律,采用直剪试验对两种不同干湿作用下试样的抗剪强度进行测试(抗剪试验选取不同次数两种干湿作用后,竖向压力为400 kPa的试样峰值剪切强度及其对应位移进行比较),直剪试验结果如图4所示。

图4表明:试样剪切强度对试验设计的两种干湿循环方案有明显劣化响应,同时试样对强烈干湿循环后试样的劣化响应要明显大于日常干湿。两种试验方案中,试验剪应力峰值强度呈下降趋势,峰值强度对应的剪切位移则呈上升趋势,强烈干湿循环后试样剪应力峰值强度要小于日常干湿。表明两种干湿作用下,试样的剪切强度随循环次数增大而减小,剪切强度对应的剪切位移则随之增大;同一竖向荷载作用下,强烈干湿作用下的剪切强度小于日常干湿,所对应的剪切位移则大于日常干湿;两种干湿作用下峰值强度变化规律相似。

2.5 c、φ 值变化规律分析

为研究边坡土体在两种不同干湿作用下黏聚力和内摩擦角的变化规律,通过对上述剪应力和剪应变的关系进行研究,得出两种不同干湿循环次数下试样的

黏聚力和内摩擦角的变化规律见图5。

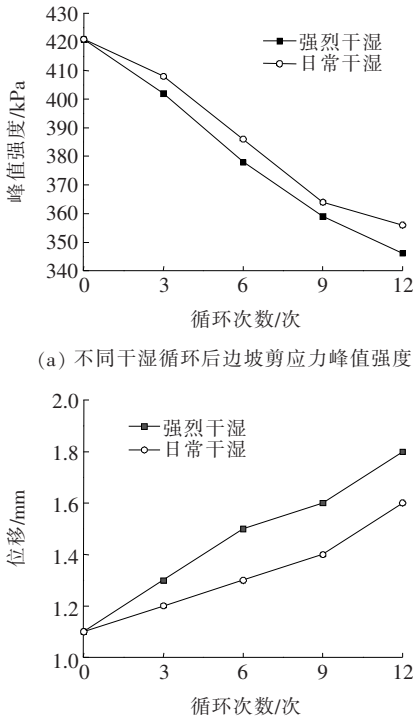


图4 直剪试验结果

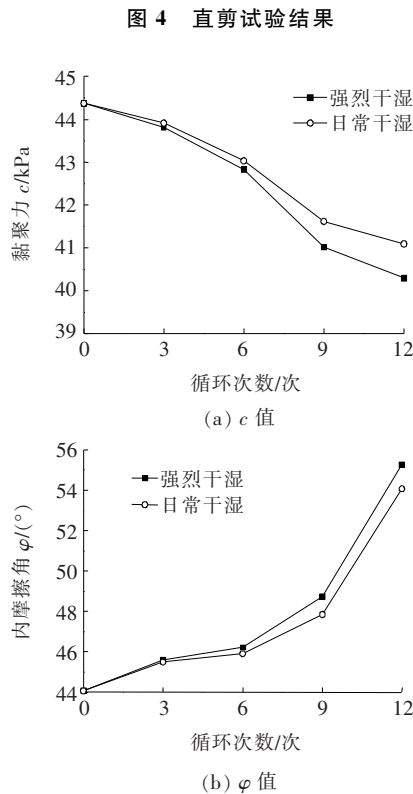


图5 不同次数干湿循环后边坡土体 c、φ 值

图5表明:试样黏聚力与内摩擦角对两种干湿循环方案有明显劣化响应,同时,试样对强烈干湿作用的

劣化响应要明显大于日常干湿。两种试验方案中,黏聚力随循环次数增加而减小,循环 6 次后,黏聚力减小出现明显拐点;内摩擦角则随循环次数增加而增大,循环 9 次后才出现明显拐点。

强烈干湿循环后试样黏聚力、内摩擦角的变化速率均大于日常干湿,两种干湿方案作用下黏聚力均表现出前 9 次干湿循环黏聚力下降速度不断增大,而在 9 次后减小速率开始变小;而内摩擦角均表现出前 3 次干湿循环内摩擦角上升速率大于 3~6 次,3~12 次循环中试样内摩擦角变化速率不断增大。

2.6 单轴抗压强度变化

采用单轴抗压试验对比分析两种不同干湿作用下试样抗压强度的变化规律(图 6),结果显示:两种干湿作用下,试样单轴抗压强度变化规律出现明显不同,在强烈干湿作用下,表现为 0~3 次试样抗压强度下降速率小于 3~12 次,3~12 次试样抗压强度下降速率基本相同,最后下降至 3.84 MPa;而在日常干湿作用下,则表现出抗压强度下降速率不断增大的趋势,最后下降至 3.97 MPa。无侧限单轴抗压试验同时反映出试样在强烈干湿作用下单轴抗压强度变化率大于日常干湿的试验规律。

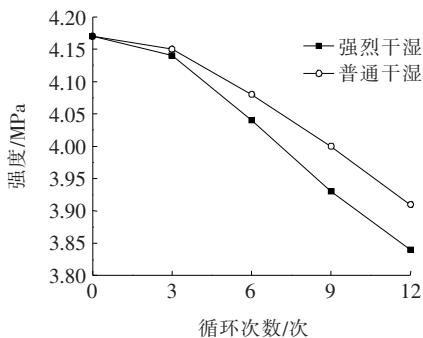


图 6 不同干湿循环后边坡土体抗压强度

3 分析与讨论

3.1 分析

以上结果充分表明:该公路边坡土体颗粒粒径、密度、液塑限、抗剪强度、 c 、 φ 值、单轴抗压强度在夏季集中式降雨与日常降雨这两种工况中产生明显变化:边坡土体砂粒含量、黏粒含量增加,粉粒含量减小,密度减小;对其液塑限变化而言,两种干湿循环下塑限和液限均有不同程度的降低,其中液限下降幅度大于塑限;对其强度性质而言,峰值抗剪强度、单轴抗压强度、黏

聚力发生下降,峰值抗剪强度对应位移、内摩擦角则出现增大现象。

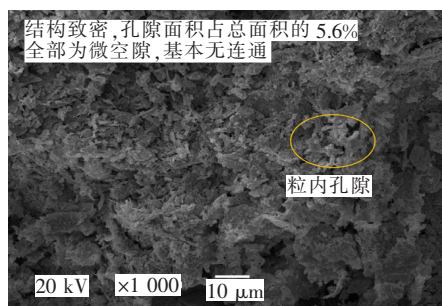
对比两种干湿循环,试验结果表明:集中式降雨作用下化马滑坡边坡土体物理、水理、力学性质变化均大于日常降雨工况,但由于循环次数有限或者试样在养护箱中未能完全再现集中式降雨与日常降雨这两种工况,导致两种工况下该边坡土体物理、水理、力学性质变化规律都基本相似,未出现明显不同。

3.2 讨论

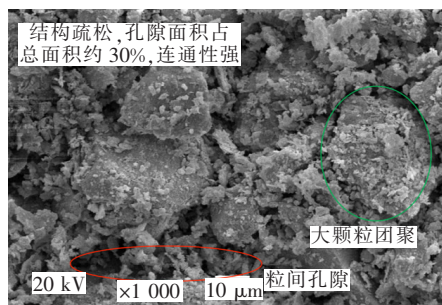
研究所选取的干湿作用对边坡土体最重要的评价指标 c 、 φ 值随着干湿循环次数增加发生明显变化,集中式降雨和日常降雨作用下,黏聚力分别下降了 9.2%、7.9%,内摩擦角分别上升了 25.4%、20.6%。其中,两种干湿作用下黏聚力曲线与内摩擦角曲线趋势基本一致,曲线拐点均出现在 6 次循环,而内摩擦角在两种干湿循环 9 次时,出现第 2 个拐点,两者均呈变化速率不断增加的指数变化趋势。同时,该边坡土体粉粒含量变小,部分转换为黏粒,但试样内部孔隙在强烈的干湿作用下越来越大,使试样黏聚力缓慢减小。干湿作用下试样内部发生反复失水与吸水,产生反复的内部机械摩擦,这种摩擦不仅使较大的粉粒含量减少,也使粉粒的磨圆度变差,增加了机械咬合力即增大了内摩擦角。试样含水率、抗剪强度、抗压强度等指标的降低为其提供了有力的佐证,12 次干湿循环后边坡土体电镜照片为试样干湿循环作用下孔隙增大提供了直接证据(图 7)。图 7 表明:未经干湿循环土体中颗粒粒径分布分散,颗粒均匀性较差,但颗粒较为密实,磨圆度较好,孔隙较少;多次干湿后试样颗粒均匀性增加,但颗粒较为疏松,磨圆度变差,孔隙较大。

4 结论

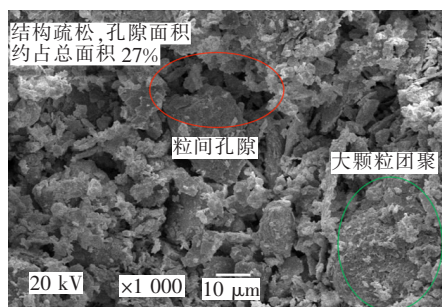
(1) 化马滑坡边坡土体物理、水理、力学性质在夏季集中式降雨与日常降雨两种干湿工况下产生明显变化,具体表现为:边坡土体砂粒含量、黏粒含量、峰值抗剪强度对应位移、内摩擦角增加;粉粒含量、密度、塑限和液限、峰值抗剪强度、单轴抗压强度、黏聚力均有不同程度降低。两种干湿作用下边坡土体最重要的评价指标 c 、 φ 值随着干湿循环次数增加发生明显变化,集中式降雨和日常降雨作用下,黏聚力分别下降了 9.2%、7.9%,内摩擦角分别上升了 25.4%、20.6%,两者均呈变化速率不断增加的指数变化趋势。



(a) 未干湿循环试样



(b) 强烈干湿12次



(c) 日常干湿12次

图7 12次干湿循环后边坡土体电镜照片

(2) 多次干湿作用下,土体内部砂粒含量降低,黏粒含量增多,孔隙增大致使试样颗粒均匀性增加,疏松度增大,磨圆度变差,加之该地区降雨前后较大的温度、湿度差使得土体迅速劣化,影响滑坡体稳定性,成为引起该地区滑坡频发的主要原因之一。

参考文献:

- [1] 杨为民,黄晓,张春山,等.白龙江流域坪定—化马断裂带滑坡特征及其形成演化[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(2):574—583.
- [2] 崔凯,王珮,谌文武,等.不同干湿作用下斜坡表层千枚岩劣化实验研究[J].工程地质学报,2019,27(2):230—238.
- [3] TCHALEMKE J S. Similarities between Shear Zones of Different Magnitudes[J]. Geological Society of America, Bulletin, 1970, 81: 47—52.
- [4] SKEMPTON A W. Residual Strength of Clays in Land-

slide, Folded Strata, and the Laboratory [J]. Geotechnique, 1985, 35(1): 3—18.

- [5] CHANDLER R J. Back Analysis Techniques for Slope Stabilization Works: A Case Record [J]. Geotechnique, 1977, 27(4): 479—495.
- [6] STARK T D, EID H T. Slope Stability Analysis in Stiff Fissured Clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 335—343.
- [7] KANJI M A. The Relationship between Drained Friction Angles and Atterberg Limits of Natural Soils [J]. Geotechnique, 1974, 24(4): 671—674.
- [8] TIWARI B, MARUI H. Objective Oriented Multistage Ring Shear Test for Shear Strength of Landslide Soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(2): 217—222.
- [9] BHAT D R, BHANDARY N P, YATABE R. Residual-State Creep Behavior of Typical Clayey Soils [J]. Natural Hazards, 2013, 69(3): 2161—2178.
- [10] 蒋秀姿,文宝萍.缓慢复活型滑坡滑带土的蠕变性质与特征强度试验研究[J].岩土力学,2015,36(2):495—501,549.
- [11] 汤文,姚志宾,李邵军,等.水化学作用对滑坡滑带土的物理力学特性影响试验研究[J].岩土力学,2016,37(10):2885—2892.
- [12] 吴国鹏,谌文武,崔凯,等.冻融作用下全风化千枚岩力学性质研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(3):388—394.
- [13] 吕光东.干湿循环作用下粉质黏土抗剪强度的试验研究[J].中外公路,2022,42(4):180—184.
- [14] 李长贵,胡健坤.干湿循环作用下高液限粉土动态回弹模量试验研究[J].中外公路,2021,41(3):347—351.
- [15] 倪梅三,华跃,曾学敏.基于 Geostudio 的某土石坝稳定性流固耦合分析[J].矿业快报,2008(2):23—25.
- [16] 陈浩,杨春和,任伟中.蠕动滑坡变形机制的理论分析与模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3705—3711.
- [17] 段炎冲,安再展,李光耀,等.基于 GeoStudio 的某土石坝整治前后渗流及坝坡稳定分析[J].西北水电,2013(6):74—77.
- [18] 杨柳.山西浑源县落子洼村滑坡形成机理初步分析[J].西部探矿工程,2018,30(9):12—13,16.
- [19] 王峻岭,杨利乐.基于 GeoStudio 的黄河大堤渗流稳定性分析[J].中国水运,2008,8(8):162,164.
- [20] 林悦奇. Geostudio 软件在土坝渗流稳定分析中的应用[J].水利规划与设计,2018(3):154—158.
- [21] 胡凯衡,葛永刚,崔鹏,等.对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J].山地学报,2010,28(5):628—634.