

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张 硕, 钟玉健, 罗 欣

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

CHEN Linwan, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, ZHANG Shuo, ZHONG Yujian, and LUO Xin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104068>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

考虑非饱和浸润层厚度和累积入渗量的改进Green-Ampt模型

An improved Green-Ampt model for rainfall infiltration in the inner dumping site of an open pit coal mine

王雪冬, 李世宇, 孙延峰, 张超彪, 王翠, 朱永东 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 64-71

二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163

土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价

Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment

金家庆, 徐超, 梁程, 刘若桐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 86-86

基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾覆破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104068

陈林万, 裴向军, 张晓超, 等. 不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 137-147.
CHEN Linwan, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, *et al.* A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 137-147.

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

陈林万^{1,2}, 裴向军^{1,2,3}, 张晓超^{1,3}, 张 硕⁴, 钟玉健^{1,3}, 罗 欣^{1,3}

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059; 4. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 黄土填方边坡在降雨入渗下容易发生滑坡。为了探讨降雨入渗下压实度对黄土填方边坡变形破坏机制、失稳模式以及滑动机理的影响, 基于室内降雨系统, 结合传感器监测和三维激光扫描技术, 开展了边坡压实度为 80%(低压实度)、90%(中压实度)、95%(高压实度)的降雨模型试验研究, 分析了压实度对填方边坡体积含水率、基质吸力以及变形破坏过程的影响规律。结果表明: 压实度的不同, 边坡首先破坏的位置不一。中、高压实度下的边坡最先破坏发生在坡脚处, 表现出滑塌破坏; 而低压实度则是在坡顶, 为湿陷沉降破坏。边坡压实度越大, 其变形破坏过程持续时间越长, 所需累积雨量就越大, 但滑动距离和滑面深度越小。随压实度的增加, 边坡破坏模式由深层整体破坏向浅层多级破坏转变。低压实度边坡为湿陷沉降-深层蠕滑拉裂式, 中压实度边坡为深层蠕滑拉裂式破坏, 而高压实度边坡则为浅层多级后退式失稳。

关键词: 黄土填方边坡; 压实度; 破坏模式; 降雨入渗; 模型试验

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0137-11

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

CHEN Linwan^{1,2}, PEI Xiangjun^{1,2,3}, ZHANG Xiaochao^{1,3}, ZHANG Shuo⁴, ZHONG Yujian^{1,3}, LUO Xin^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. College of Ecological Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China)

Abstract: Loess fill slope is prone to landslide under the condition of rainfall infiltration. The influence of compaction degree under rainfall infiltration on the deformation and failure mechanism and the instability mode and sliding mechanism of loess fill slope is explored. Based on the indoor rainfall system, combined with the sensor monitoring and 3D laser scanning technology, the rainfall model tests with slope compaction of 80% (low pressure compaction), 90% (medium compaction) and 95% (high pressure compaction) are carried out. The influence of compaction degree on the volume moisture content, matrix suction and deformation failure process of

收稿日期: 2021-04-26; 修订日期: 2021-11-23

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790445); 国家重点研发计划(2018YFC1504702)

第一作者: 陈林万(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事黄土填方边坡稳定性评价研究工作。E-mail: 1317783721@qq.com

通讯作者: 张晓超(1978-), 女, 教授, 主要从事黄土滑坡形成机理研究工作。E-mail: 31685032@qq.com

fill slope is analyzed. The results show that the first failure position of the slope is different with different compactness. The first failure of the slope under the medium and high compactness occurs at the foot of the slope, showing the collapse failure. However, the low degree of compaction is at the top of the slope, which is collapsible. The greater the compactness of the slope, the longer the duration of the deformation and failure process, and the more accumulated rainfall required, but the smaller the sliding distance and sliding surface depth. With the increase of compactness, the failure mode of the slope changes from deep overall failure to shallow multi-stage failure. The low-pressure compaction slope is of the collapsible settlement deep creep tensile failure, the medium compaction slope is of the deep creep tensile failure, and the high-pressure compaction slope is of the shallow multi-stage backward failure.

Keywords: loess fill slope; compactness; failure mode; rainfall infiltration; model test

压实度是影响填方边坡稳定的重要因素。填方边坡由于填方规模大、填筑速率快、填筑体不能快速固结等问题导致边坡压实度可能达不到设计标准,且在降雨作用下面临着边坡失稳等灾害隐患^[1],将给当地人民生命安全和经济建设带来一定威胁。因此,开展降雨作用下不同压实度对黄土填方边坡变形破坏模式的影响研究有着重要意义。

模型试验是研究边坡降雨入渗规律和变形破坏的重要手段^[2]。在降雨入渗方面,朱才辉等^[3-4]提出通过黄土电阻率的方法来研究重塑黄土的水分运移特性;许旭堂等^[5]认为高压实度土体阻碍水分运移能力大于低压实度土体;刘德仁等^[6]认为水分入渗速率随土体压实度增大而减小,湿润锋到达测点的时间也随压实度的增加而延长,说明增大边坡压实度,对边坡降雨入渗速率有减缓作用;李仁杰等^[7]通过一维土柱模型得出压实度越大温度场变化越大的规律,且土体含水率的改变对温度场的变化较压实度的变化更显著。也有学者认为土体压实度增大,土体耐溅蚀性增强^[8-9]。在路堤沉降方面,韩晓等^[10-12]通过模型试验,研究了压实度对路堤边坡沉降的影响,认为通过提高压实度可以对填筑体的沉降起到控制作用。此外,林宇亮等^[13-14]通过振动台试验研究了不同压实度铁路路堤边坡残余变形和加速度放大倍数分布规律。对于降雨诱发黄土填方边坡失稳的模型试验,学者们主要探讨了不同坡型的破坏模式。张硕等^[15-16]认为近直立型黄土填方边坡短时连续降雨导致的破坏是多级块体滑塌破坏,而长时间连续降雨导致冲蚀及流滑破坏。Chang等^[17]认为阶梯型黄土填方边坡变形破坏可分为沟槽侵蚀、局部破坏、坡趾破坏、中部破坏和坡顶破坏五个阶段;陈林万等^[18]将直线型黄土填方边坡的变形破坏机制分为坡顶冲沟破坏、坡脚

软化→局部牵引坍塌、整体失稳→块体分割、流滑破坏。

综上所述,目前对于不同压实度的模型试验研究主要集中在水分运移、降雨侵蚀以及路堤沉降变形等方面,少有学者考虑不同压实度对黄土填方边坡变形破坏模式的影响。基于此,本文借助传感器和三维激光监测,结合室内降雨模拟系统开展不同压实度的黄土填方边坡模型试验。通过监测数据和记录边坡破坏过程,分析不同压实度对黄土填方边坡的变形破坏过程、失稳模式以及滑动机理的影响,以为黄土地区的工程建设提供理论支撑。

1 模型试验设计

1.1 试验土样基本性质

试验土样为采于延安市安塞区小南沟新鲜剖面的马兰黄土。严格按照《土工试验标准》对黄土试样进行室内基础试验,测得延安黄土的最大干密度 1.73 g/cm^3 ,最优含水率 15.7%,比重 2.7,液限 30.6%,塑限 21.4%,孔隙比 0.853,饱和渗透系数 $1.26 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。试样颗分曲线见图 1。

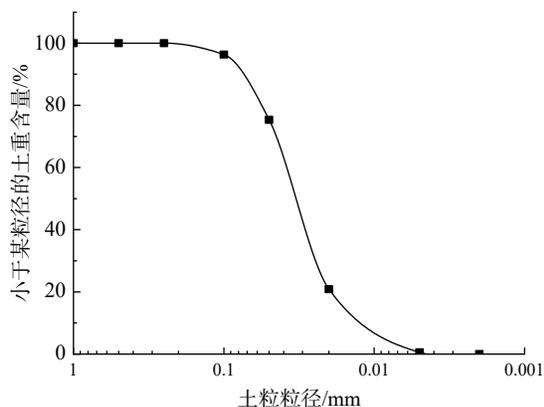


图 1 试验土样颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle distribution curve of the test soil sample

1.2 试验仪器

本次试验在地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)泥石流试验室进行。试

验设备包括模型箱、监测系统、采集系统以及降雨系统(图2)。

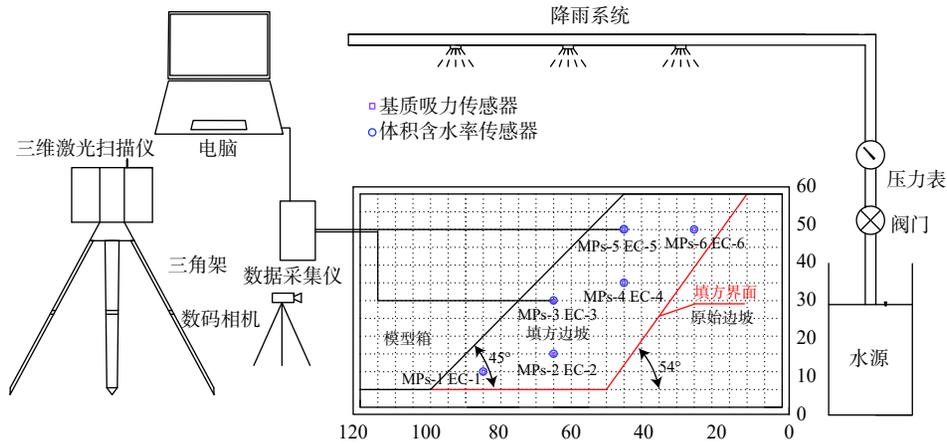


图2 滑坡模型试验装置示意图(单位:cm)

Fig. 2 Schematic diagram of the model tests on landslide (unit: cm)

(1) 模型箱

模型箱长×宽×高为1.2 m×0.4 m×0.6 m,三面为通角钢连接的透明有机玻璃,底部是0.2 mm厚不透水的高强度钢板,各接口采用玻璃胶密封,防止漏水。模型左侧边界外侧绘制5 cm×5 cm的网格,方便观测试验过程中边坡的变形破坏情况。

(2) 监测系统

监测系统由体积含水率传感器、基质吸力传感器、三维激光扫描仪及数码相机组成。传感器均采用美国Decagon公司生产的EC-5体积含水率传感器和MPS6基质吸力传感器;采用三维激光扫描仪对坡表有显著变形时进行扫描,获取坡面的三维点云数据;在模型箱正前方和左侧架设数码相机,对边坡的变形破坏过程进行动态监测。

(3) 采集系统

采集系统采用Em50采集仪,该采集仪在试验过程中自动采集,有着方便、快捷的特点。

(4) 降雨系统

降雨系统由水箱、供水阀门、压力表、供水水管以及低压超细雾化降雨喷头组成,喷头分2列3排布置,共6个,两两相邻间距30 cm。

1.3 试验方案设计

(1) 试验方案

试验的目的是探究降雨条件下不同压实度黄土边坡的降雨入渗特征、变形演化、破坏模式以及失稳机理。因此,设计坡度为45°的3组试验边坡,在最优含水率和最大干密度条件下设置3个压实度,分别为

80%(低压实度)、90%(中压实度)、95%(高压实度)。降雨强度是根据延安地区极端降雨和降雨均匀度共同确定的。据延安气象部门统计该地区1 h的最大降雨量为62 mm。开展降雨模型试验,只有当降雨均匀度大于80%才能满足试验要求。通过降雨均匀度试验得到当降雨强度为29.8 mm/h时,降雨均匀度为82%,且降雨有效面积为2 m²,满足试验要求。故将降雨强度设置29.8 mm/h。降雨类型采用连续均匀型。试验方案如表1所示。

表1 试验方案

试验组	压实度 /%	降雨强度 / (mm·h ⁻¹)	降雨类型	降雨时间	边坡角度 / (°)
E1	80	29.8	连续均匀型	直到边坡整体失稳	45
E2	90	29.8	连续均匀型	直到边坡整体失稳	45
E3	95	29.8	连续均匀型	直到边坡整体失稳	45

(2) 传感器布置

为了监测降雨过程中坡体内部的水文响应特征,在坡体内设置2个断面,模型箱左侧为基质吸力断面,右侧为体积含水率断面,1#、3#、5#、6#监测点距离坡面10 cm,2#、4#监测点距坡面25 cm。传感器埋设如图2所示。

2 降雨诱发不同压实度黄土填方边坡变形破坏过程分析

2.1 低压实度黄土填方边坡变形破坏过程分析

低压实度边坡试验总共进行500 min,降雨245 min,

累积雨量共 121.7 mm。试验过程中传感器的读数变

化如图 3 所示,边坡变形破坏演化过程如图 4 所示。

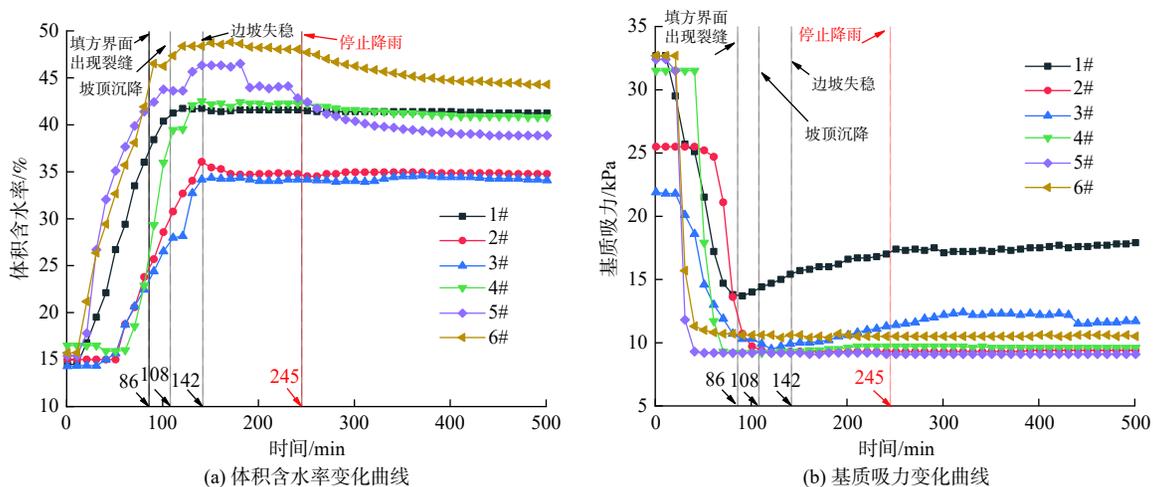


图 3 低压实度试验边坡传感器读数变化
 Fig. 3 Changes of the slope sensor reading in the low pressure compaction test

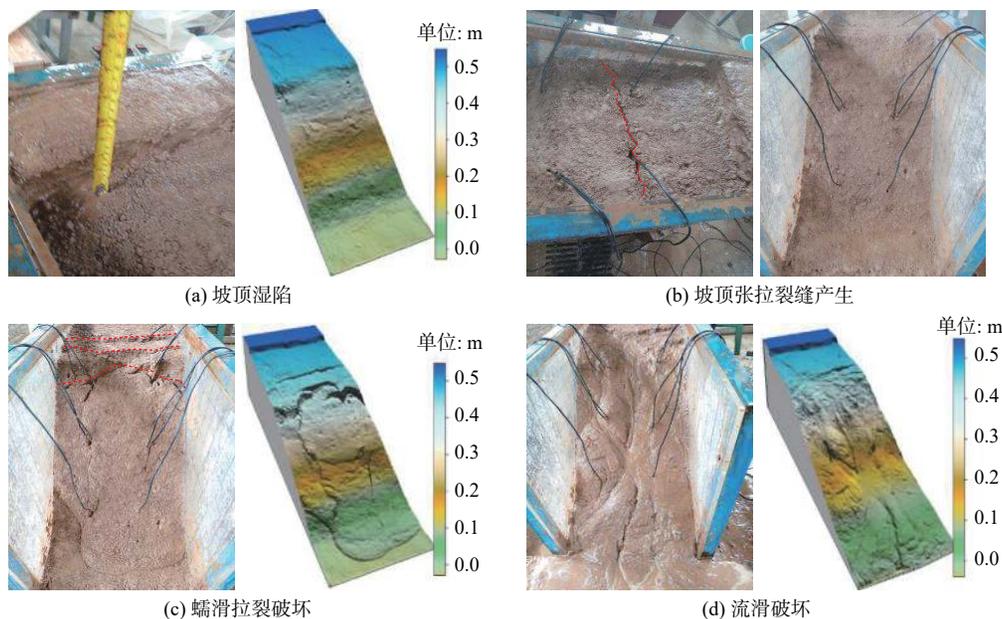


图 4 低压实度试验边坡变形破坏过程
 Fig. 4 Deformation and failure processes of the low pressure compaction test slope

在试验前期填方边坡的降雨入渗补给系数大于土体渗透系数,雨水以入渗为主,边坡没有发生变形破坏。随着降雨的持续入渗,土体湿润锋逐渐下移,到达传感器监测点后,传感器逐渐开始响应。含水率最先响应的是位于坡顶的 5#、6#监测点,响应时间都为 14 min,而基质吸力最先响应的是 1#监测点,响应时间为 17 min。随着降雨的持续,1#、3#、4#和 2#含水率分别在 19、33、43、53 min 依次响应,基质吸力则是 5#、6#、3#、4#和 2#分别在 20、23、28、43、55 min 依次

响应。各传感器响应后含水率随降雨入渗开始上升(图 3a),而基质吸力则在减小(图 3b),当降雨持续到 86 min 时,含水率还在持续增加,但基质吸力已经降低到最低点。此时位于原始边坡与填方边坡交界处出现长 40 cm 裂缝,在 108 min 时整个坡顶已经湿陷沉降,沉降量达 3 cm(图 4a),但含水率还未达到峰值,只有坡顶及坡脚的含水率接近峰值(图 3a),表明边坡内部还未饱和,深部土体未发生变形破坏。与此同时,中压实度与高压实度的试验边坡均未发生变形。随

后在坡顶产生 1 条平行于坡面的张拉裂缝,长度 40 cm (图 4b)。当降雨进行到 142 min 时,所有含水率都达到最大值,表明坡体已经到达饱和状态,土体的抗剪强度降低,当强度超过土体屈服强度时边坡整体失稳(图 4c)。边坡表现出前缘发生蠕动变形、坡肩局部垮塌、后缘张拉裂缝下错、张开度增大等特征。随着雨水的不断入渗,坡体湿润饱和和减缓了入渗速率。当降雨入渗率小于渗透系数时产生坡面径流;加之边坡失稳时内部应力调整,致使坡顶的张拉裂缝闭合,减弱

了优势通道,雨水很难渗入坡体深处。从 5#、6#含水率的下落(图 3a)和 1#、3#基质吸力的上升(图 3b)皆可以证明雨水以坡面径流为主。径流对边坡破坏主要是坡面侵蚀为主。因此,边坡表面呈泥流状态并向边坡前缘流动(图 4d)。

2.2 中压实度黄土填方边坡变形破坏过程分析

中压实度边坡试验共进行 500 min,降雨 394 min,累积雨量 195.7 mm。试验过程中传感器的读数变化如图 5 所示,边坡变形破坏演化过程如图 6 所示。

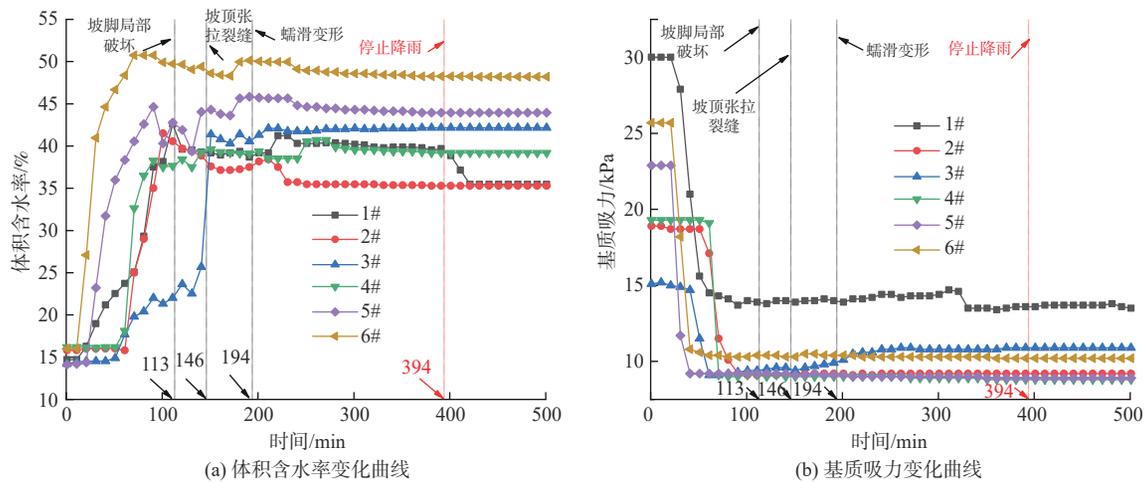


图 5 中压实度试验边坡传感器读数变化

Fig. 5 Changes of the sensor reading of slope in the medium compaction test

与第一组试验(E1)相比,相同位置传感器响应时间都有所滞后,位于坡体中下部 10 cm 深处 2#含水率滞后最大,缓慢了 18 min,位于坡顶 10 cm 深处 6#含水率最小,缓慢 3 min。随着降雨的进行各含水率增加(图 5a)、基质吸力减小(图 5b)。试验进行到 113 min 时,在坡脚中部出现“圈椅”状的局部滑塌(图 6a),此时 6#含水率已经过峰值,基质吸力都已到最低(图 5b)。坡脚局部滑塌范围向边坡两侧和坡顶发展,最终发展成为宽约 40 cm、长约 15 cm 的滑体向前缘滑塌(图 6a)。之后坡顶发育微小的张拉裂缝,并有增长加宽的趋势。在降雨历时 146 min 时,距坡肩 20 cm 和 15 cm 处发育 2 条平行于坡面的张拉裂缝,张开度都在 0.5 cm 左右,并且大量的次级裂缝发育(图 6b),这表明坡顶张拉应力集中,并随着降雨入渗在不断增加。此时 3#、5#含水率读数都在增加(图 5a)。随着降雨的持续,坡顶张拉裂缝张开度不断增大,雨水沿着裂缝向坡体内部入渗,使内部土体饱和,孔隙水压力增大,有效应力减小,土体抗剪强度降低,致使在 194 min 时边坡出现蠕滑张拉变形(图 6c),坡顶张拉裂隙张开度最

大达 2 cm(图 6d),裂缝的加宽使雨水能快速入渗到坡体内部,这也解释了在边坡蠕滑张拉破坏时,边坡含水率有所增加的原因。雨水进入坡体内部后软化土体,滑面逐渐形成并贯通,当边坡的下滑力大于抗滑力时,滑坡发生,向边坡前缘滑动(图 6e),之后边坡呈流滑破坏(图 6f)。

2.3 高压实度黄土填方边坡变形破坏过程分析

高压实度边坡试验共进行 500 min,降雨 420 min,累积雨量为 208.6 mm。试验过程中传感器的读数变化如图 7 所示,边坡变形破坏演化过程如图 8 所示。

高压实度边坡各测点含水率的响应时间较前 2 组试验(E1、E2)都要晚。和试验一(E1)相比,时间相差最大的是位于坡中 25 cm 深处 2#传感器,相差 31 min;相差最小的是位于坡顶 10 cm 深处的 5#传感器,相差 10 min。与试验二(E2)相比,响应时间相差最大的是位于坡顶 6#传感器,相差 18 min,相差最小的是位于坡体 25 cm 深处的 4#传感器,相差仅 1 min。降雨历时 127 min 时,在边坡坡脚左侧发生局部滑塌(图 8a),此时含水率读数都达到最大值(图 7a),基质吸力除了

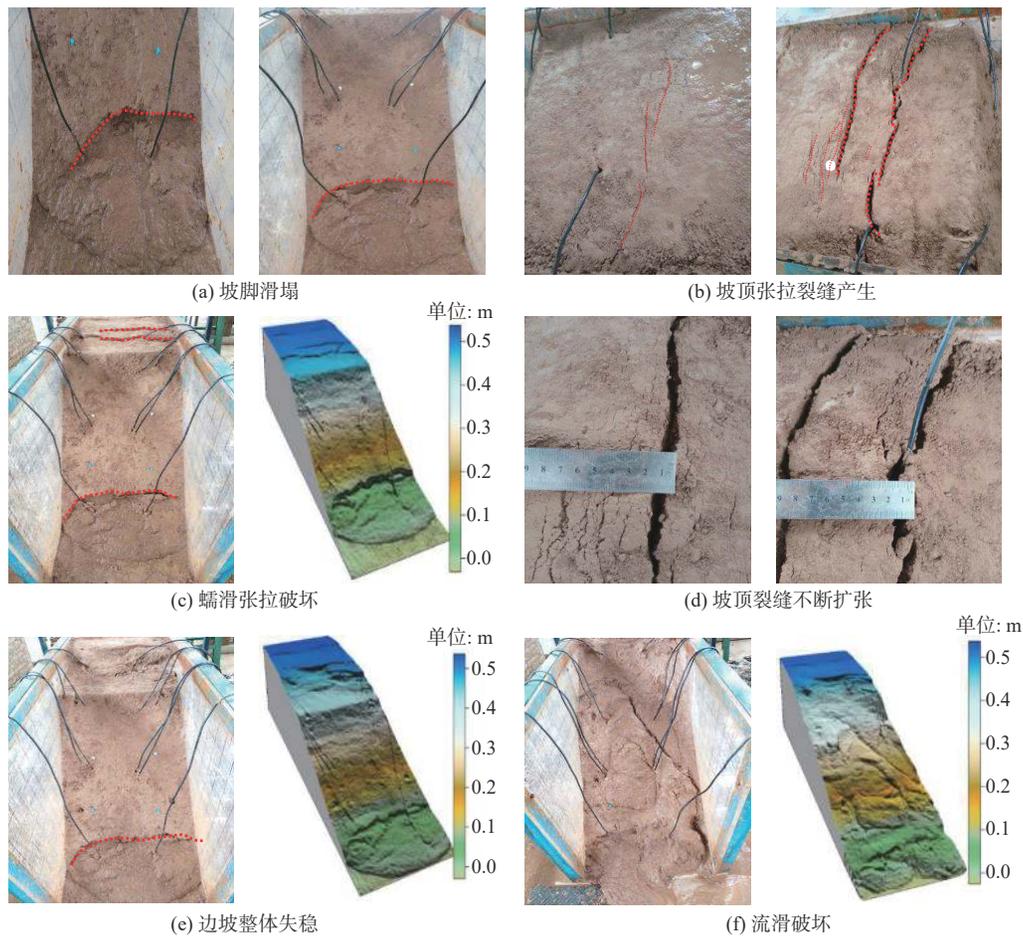


图 6 中压实度试验边坡变形破坏过程

Fig. 6 Deformation and failure processes of the medium compaction test slope

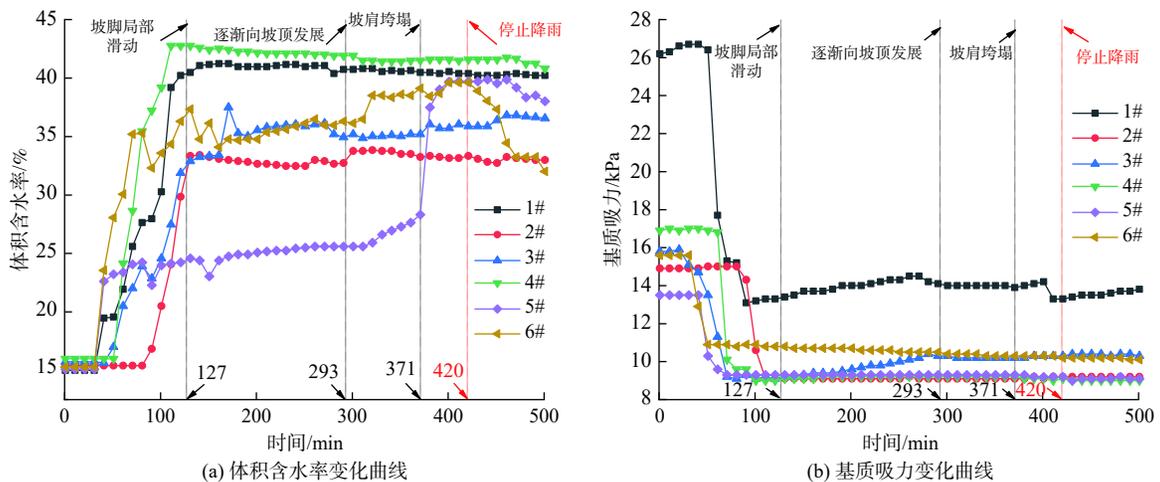


图 7 高压实度试验边坡传感器读数变化

Fig. 7 Changes of the slope sensor reading in the high pressure compaction test

6#外都降低到最小值(图 7b), 表明土体达到饱和状态。在 267 min 时, 边坡中部出现滑动, 可见明显的滑坡后壁, 滑动面浅, 同时在滑体上发育 2 条鼓胀裂缝(图 8b)。在 293 min 时, 再次出现局部滑塌, 滑塌后壁

接近坡顶, 坡体下部形成“滑塌腔”, 上部土体再次失去支撑力, 土体在自重力和降雨入渗的共同作用下, 坡肩向临空面垮塌(图 8c)。之后边坡无大的变形破坏, 主要以坡面侵蚀为主(图 8d)。

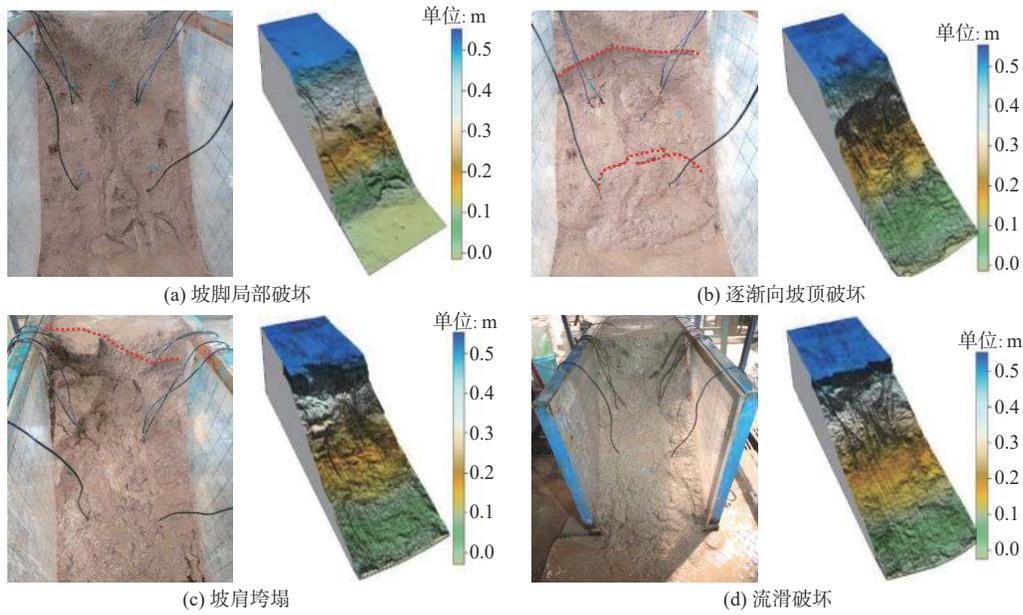


图 8 高压实度试验边坡变形破坏过程

Fig. 8 Deformation and failure processes of the high pressure compaction test slope

3 降雨诱发不同压实度黄土填方边坡破坏模式分析

3.1 低压实度黄土填方边坡破坏模式

低压实度填方边坡的变形破坏表现出明显湿陷

沉降、滑体溃散、滑动距离长、明显的张拉裂缝、滑面较清晰、整体失稳时间短等特点。破坏模式为湿陷沉降-深层蠕滑拉裂, 共经历 4 个阶段, 如图 9 所示。

(1) 坡顶湿陷沉降阶段。在降雨初期, 边坡压实度最小, 土体疏松处于无压实状态, 为雨水的下渗提

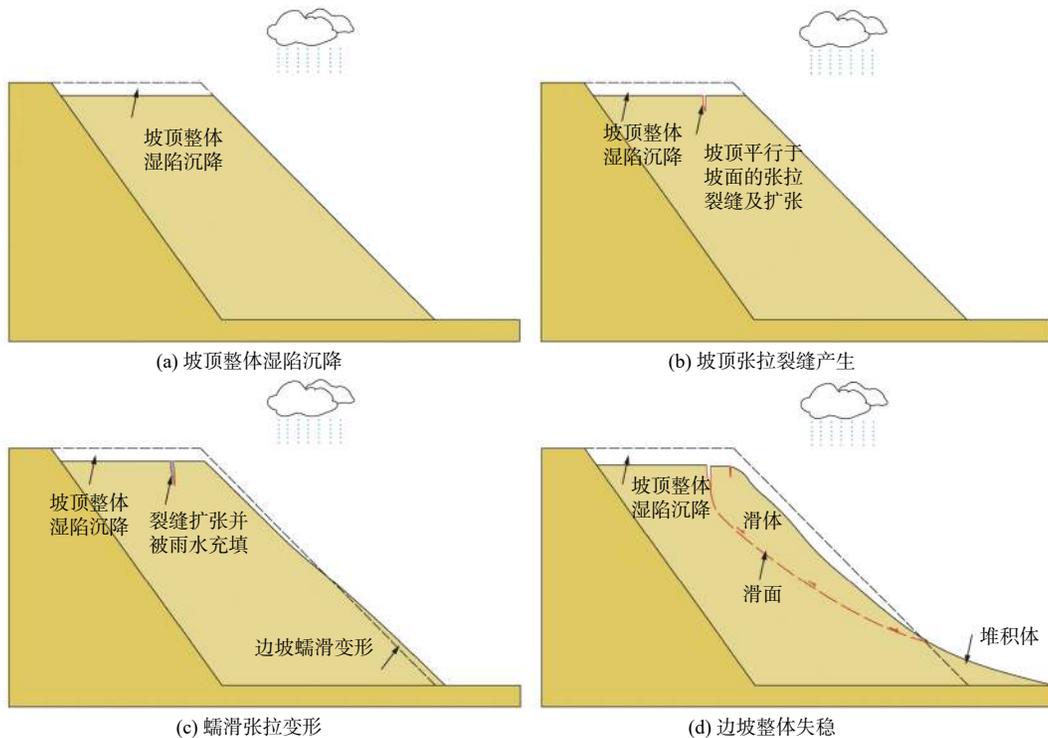


图 9 低压实度试验边坡破坏模式

Fig. 9 Failure modes of the low pressure compaction test slope

供了有利条件。黄土有极强的水敏性和结构性,遇水后颗粒之间的胶结物会立刻湿润打滑,土体颗粒之间势必产生错动,颗粒的错动改变了原有的结构特征,结构发生改变后土体坍塌,最后整个坡顶在土体自重力和雨水入渗的共同作用下产生湿陷沉降(图 9a)。

(2)坡顶裂缝产生及扩展阶段。坡顶是拉应力集中区,在雨水下渗的同时,坡体有向边坡临空面滑动的趋势。随着雨水的入渗,坡顶由弹性区向塑性区转变,当超过土体的屈服强度时发生破坏,在坡顶产生张拉裂缝,它的产生为雨水的下渗提供了优势通道,雨水润湿土体,裂缝不断向更深、更宽发展,并相互贯通,最后形成滑坡后壁(图 9b)。

(3)蠕滑张拉阶段。雨水在沿着裂缝快速下渗过程中,会产生静水压力和动水压力,这“二力”和坡体自重力的相互作用下,驱使边坡向临空面产生蠕动变

形。变形的同时坡顶张拉裂隙会受到拉应力的作用继续产生张拉破坏,裂缝会逐渐变宽且向边坡内部延伸。裂缝张拉和边坡蠕滑是相互影响、相互制约的,这样二者形成了“互馈作用”,加速边坡变形破坏(图 9c)。

(4)失稳破坏阶段。雨水沿着坡顶张拉裂缝和填方交界面入渗到坡体深处后不能及时排出,坡体内形成局部饱水层,软化范围不断增大,导致孔隙水压力不断增加而有效应力减小,当抗剪强度超过土体的屈服强度时滑面贯通产生塑性变形,边坡失稳,滑坡产生(图 9d)。

3.2 中压实度黄土填方边坡破坏模式

中压实度填方边坡的破坏特点为滑动面深,后缘可见明显的张拉裂缝。其破坏模式总结为深层蠕滑张拉破坏,共经历 4 个阶段,如图 10 所示。

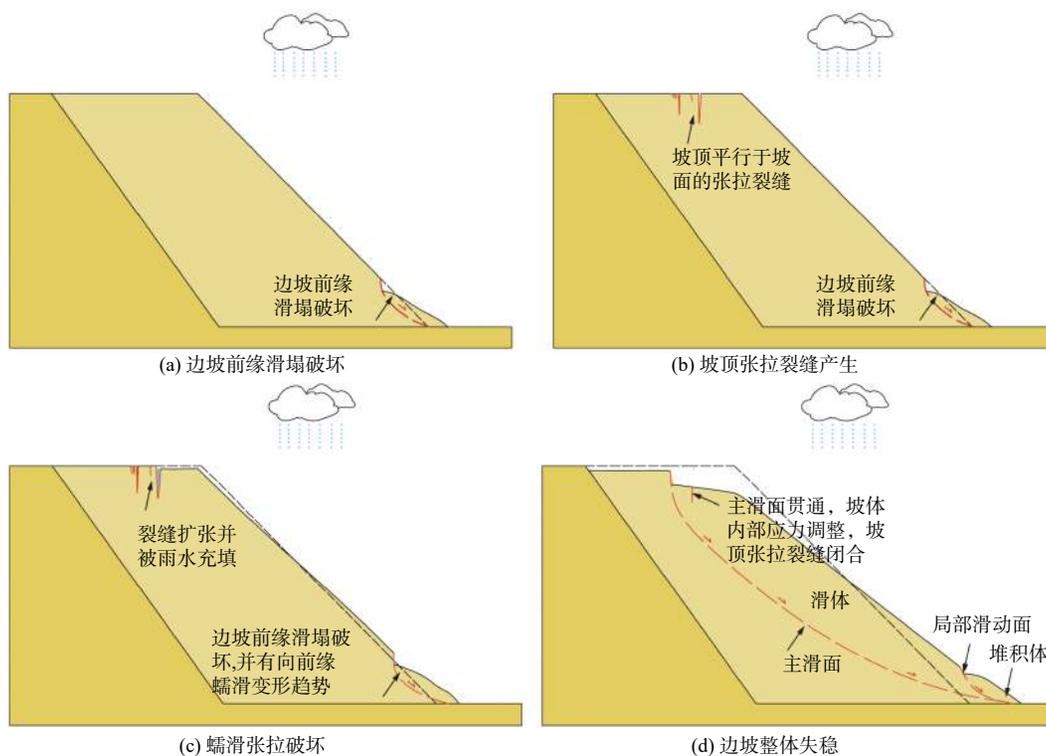


图 10 中压实度试验边坡破坏模式

Fig. 10 Failure modes of the medium compaction test slope

(1)边坡前缘滑塌阶段。在降雨初期雨水主要以入渗为主,但随着试验的进行,土体含水率增加,基质吸力下降,坡体表面逐渐开始饱和,降雨水入渗补给系数小于土体渗透系数时将产生坡面径流。边坡前缘原本是剪切应力集中区,当坡面径流的雨水在此汇聚后将会加速土体软化;同时处于非饱和状态的黄土

具有极强的水敏性,遇水后基质吸力的降低导致土体抗剪强度的减小,近而在边坡前缘形成局部滑塌破坏(图 10a)。

(2)(3)(4)阶段分别是坡顶张拉裂缝产生及扩展(图 10b)、蠕滑张拉破坏(图 10c)、边坡整体失稳阶段(图 10d),与试验一(E1)的基本相同,在此不做

赘述。

3.3 高压实度黄土填方边坡破坏模式

高压实度填方边坡的破坏表现出多级、渐进、滑

面浅且不明显、滑体滑动距离短、需累积雨量多、失稳时间长的特点。其破坏模式总结为浅层多级后退破坏,共经历3个阶段,如图11所示。

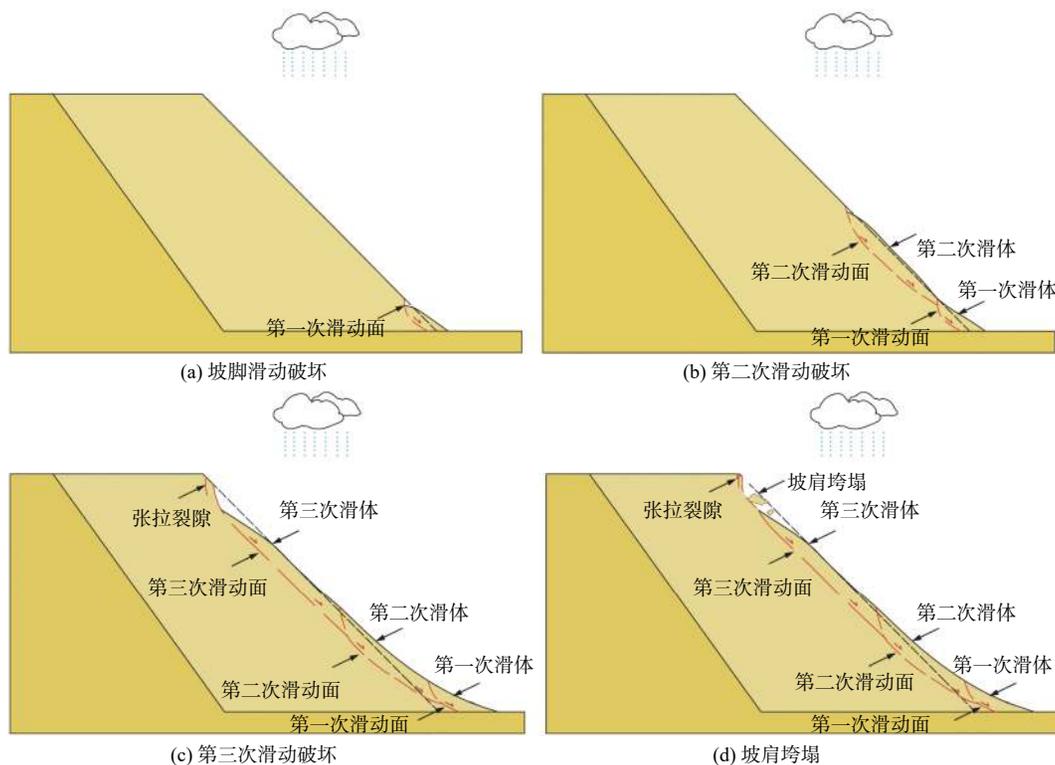


图 11 高压实度试验边坡破坏模式

Fig. 11 Failure modes of the high pressure compaction test slope

(1) 边坡前缘局部滑塌阶段(图 11a), 与试验二(E2)大致相同, 不再赘述。

(2) 逐渐向坡顶发展阶段。边坡前缘局部滑塌形成的滑坡后壁又是第二次局部滑动的前缘, 且在雨水侵蚀下滑坡后壁向坡体内凹陷, 这样使得上部土体失去下部支撑, 力学平衡被打破, 在自重应力作用下局部滑塌, 同时雨水入渗也加剧了边坡局部滑塌破坏。填方边坡局部失稳和侧压力的释放会导致局部失稳后土体下移, 从而增加了边坡荷载(图 11b、图 11c)。

(3) 坡肩垮塌阶段。边坡在最后一次局部滑动后, 坡顶已经有裂缝产生, 并为雨水入渗到边坡深处提供优势通道。雨水在裂缝中不仅软化裂缝边界, 还将产生渗透作用, 使得裂缝向更深处延伸, 同时还具有一定的静水压力推动坡体向临空面发展, 在动、静水压力和自身重力多重作用下, 坡肩向边坡前缘垮塌(图 11d)。

不同压实度的黄土填方边坡在降雨入渗条件下, 失稳前都表现出不同的破坏阶段, 但失稳后却表现出

不同程度的泥流破坏, 这可能是边坡在失稳过程中产生的孔隙水压力上升引起有效应力连续下降导致高流动性的液化破坏^[19]。

4 分析与讨论

压实度对黄土填方边坡的破坏模式影响较大, 这可能和填料的孔隙结构有关。对于压实度低的填方边坡, 颗粒孔隙主要是以大直径的架空孔隙和粒间孔隙为主, 此类孔隙的连通性好, 则水分的流动路径短且过水断面大, 土体的渗透系数大^[20-21], 在雨水的作用下土体颗粒陷入大孔隙中发生湿陷沉降。同时坡顶拉应力区产生的张拉裂缝为雨水下渗提供优势通道, 水流快速下渗后不能及时排出土体, 导致孔隙水压力上升, 有效应力减小, 抗剪强度降低。随着雨水的持续入渗, 边坡潜在滑面塑性区不断增大, 当塑性区增大到一定时, 滑面贯通, 边坡失稳, 表现出先遇水湿陷沉降再蠕滑-拉裂的失稳破坏。对于中压实度的填方边坡, 由于压实度增大, 土体紧密接触, 没有发生

湿陷沉降破坏,表现出蠕滑-拉裂的破坏模式。而高压实度土体颗粒胶结程度、颗粒分布均匀以及定向性较好,加之没有产生大的张拉裂缝,雨水很难入渗到坡体中,所以表现出浅层多级滑动的失稳方式。

黄土在增湿过程中土体颗粒之间的分子引力减小,胶结程度减弱以及土-水之间的毛细力减小,导致黄土水敏性增强、土体结构改变,进而引发边坡失稳。在今后的研究中可以通过掺入材料对黄土进行改良,改变填料的工程特性,以此提高黄土填方边坡的稳定性。

5 结论

(1)随着降雨的持续入渗,不同压实度下黄土填方边坡都呈现出含水率增加、基质吸力减小的规律,当基质吸力到达最低点时,填方边坡没有发生破坏,表明降雨诱发黄土填方边坡失稳有一定的滞后性。

(2)水分迁移速率随压实度的增大而减小,边坡的破坏时间随压实度的增大而加长;压实度越大的边坡所需要的累积雨量越大,但滑动距离和滑面深度较小。

(3)压实度的不同,边坡首先破坏位置不一。中、高压实度条件下的边坡破坏首先发生在坡脚位置,表现出滑塌破坏;而低压实度边坡破坏则是发生在坡顶,为湿陷沉降破坏。

(4)黄土填方边坡的破坏模式随压实度的变化而不同。低密度度边坡为湿陷沉降-深层蠕滑拉裂破坏,中压实度坡体为深层蠕滑拉裂破坏,高压实度边坡为多级渐进后退式破坏失稳。

参考文献 (References) :

- [1] 张炜,张继文,于永堂.黄土高填方关键技术问题与工程实践[J]. *岩土工程技术*, 2016, 30(1): 12 - 19. [ZHANG Wei, ZHANG Jiwen, YU Yongtang. Key technical issues and engineering practices in project construction of loess deep filled foundation[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2016, 30(1): 12 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 罗先启,程圣国,牛恩宽.滑坡物理模型试验畸变修正及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊1): 3082 - 3088. [LUO Xianqi, CHENG Shengguo, NIU Enkuan. Research on aberration correction and application in landslide geomechanical model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup 1): 3082 - 3088. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 朱才辉,张世斌.降雨条件下压实黄土水分入渗规律模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(6): 1117 - 1124. [ZHU Caihui, ZHANG Shibin. Rainfall infiltration laws of compacted loess based on laboratory model tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 1117 - 1124. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张世斌,朱才辉,袁继国.降雨条件下重塑黄土中水分迁移模型试验研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(5): 621 - 630. [ZHANG Shibin, ZHU Caihui, YANG Jiguo. Laboratory model tests on moisture migration in remolded loess under rainfall conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(5): 621 - 630. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 许旭堂,简文彬,吴能森,等.降雨入渗影响下边坡中的非饱和渗流特性[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 922 - 932. [XU Xutang, JIAN Wenbin, WU Nengsen, et al. Unsaturated seepage characteristics of slope under rainfall infiltration[J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 922 - 932. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘德仁,徐硕昌,肖洋,等.浸水入渗条件下压实黄土水-气运移规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(12): 3260 - 3270. [LIU Deren, XU Shuochang, XIAO Yang, et al. Experimental study on the law of water-air migration in compacted loess under the condition of immersion infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3260 - 3270. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李仁杰,王旭,张延杰,等.大气作用下浅层非饱和黄土温度变化及其影响因素研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(4): 766 - 774. [LI Renjie, WANG Xu, ZHANG Yanjie, et al. Experimental tests on temperature change of shallow unsaturated loess under atmospheric action and its influencing factors[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 766 - 774. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 周春梅,王宇,吕雷,等.雨滴溅蚀下压实黄土变形破坏规律研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6): 93 - 98. [ZHOU Chunmei, WANG Yu, LYU Lei, et al. Research on deformation of compacted loess under raindrop splash erosion[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 93 - 98. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孙吉书,邱博超,肖田.降雨作用下路堤边坡水毁机理及影响因素分析[J]. *河北科技大学学报*, 2021, 43(4): 415 - 423. [SUN Jishu, QIU Bochao, XIAO

- Tian. Analysis on water damage mechanism and influencing factors of embankment slope under rainfall[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 43(4): 415 - 423. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 韩晓,张孟喜,李嘉洋,等. 高强土工格室加筋砂土地基模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 27 - 33. [HAN Xiao, ZHANG Mengxi, LI Jiayang, et al. Model test of sand foundation reinforced with high-strength geocell[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(3): 27 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 孙州,张孟喜,姜圣卫. 条形荷载下土工格室加筋砂土路堤模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 170 - 175. [SUN Zhou, ZHANG Mengxi, JIANG Shengwei. Model tests on sand embankment reinforced with geocell subjected to strip loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup 2): 170 - 175. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 郑建国,曹杰,张继文,等. 基于离心模型试验的黄土高填方沉降影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 560 - 571. [ZHANG Jianguo, CAO Jie, ZHANG Jiwen, et al. Analysis of influencing factors of high loess-filled foundations based on centrifugal model tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(3): 560 - 571. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 林宇亮,杨果林,钟正. 不同压实度铁路路堤边坡地震响应振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3285 - 3291. [LIN Yuliang, YANG Guolin, ZHONG Zheng. Shaking table test on seismic response of railway embankment slopes with different compaction degrees[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3285 - 3291. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 林宇亮,杨果林. 不同压实度路堤边坡的地震残余变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3631 - 3638. [LIN Yuliang, YANG Guolin. Seismic residual deformation behavior of embankment slopes of different compaction degrees[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(9): 3631 - 3638. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张硕,裴向军,黄润秋,等. 黄土填方边坡降雨入渗特征及变形破坏模式的模型试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 32 - 41. [ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Model test on seepage characteristics and deformation failure modes of loess fill slope under rainfall[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(9): 32 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [16] ZHANG Shuo, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test study on the hydrological mechanisms and early warning thresholds for loess fill slope failure induced by rainfall[J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105135.
- [17] CHANG Zhilu, HUANG Faming, HUANG Jinsong, et al. Experimental study of the failure mode and mechanism of loess fill slopes induced by rainfall[J]. *Engineering Geology*, 2021, 280: 105941.
- [18] 陈林万,张晓超,裴向军,等. 降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 151 - 160. [CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall Full text replacement[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 151 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [19] CHEN H, LEE C F, LAW K T. Causative mechanisms of rainfall-induced fill slope failures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(6): 593 - 602.
- [20] 李华,李同录,张亚国,等. 不同干密度压实黄土的非饱和渗透性曲线特征及其与孔隙分布的关系[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 979 - 986. [LI Hua, LI Tonglu, ZHANG Yaguo, et al. Relationship between unsaturated permeability curve and pore-size distribution of compacted loess with different dry density[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(8): 979 - 986. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 马亚维,谌文武,毕骏,等. 干密度对黄土渗透系数的影响[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 165 - 170. [MA Yawei, CHEN Wenwu, BI Jun, et al. Influence of dry density on coefficient of permeability of unsaturated loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup 1): 165 - 170. (in Chinese with English abstract)]

编辑:张明霞