

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.01.021

干湿循环条件下黄土边坡变形特性研究

孙志杰, 杨烜宇

(山西省交通科技研发有限公司 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030032)

摘要: 黄土边坡在遭受反复降雨-日照作用时, 边坡坡表会发生剥落滑塌, 导致坡体稳定性降低, 且坡率不同对稳定性影响也不同。以不同坡率非对称黄土边坡为研究对象, 采用模型试验方法模拟了干湿循环条件下边坡的变形破坏过程, 探究了干湿循环下非对称边坡的变形响应特征及破坏模式。研究结果表明: 非对称边坡在干湿循环累积效应下呈现不同的变形特征。缓坡变形早于陡坡, 变形速率小于陡坡, 缓坡破坏表现形式为小范围坡表剥落和整体牵引式缓慢滑移。陡坡破坏表现形式为坡顶和坡面裂缝发展, 贯通, 突发局部崩塌。黄土边坡设计时不仅要考虑综合坡率, 还要考虑缓坡率带来的干湿循环坡表劣化问题, 加强坡面防护。

关键词: 非对称黄土边坡; 干湿循环; 变形; 光纤

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)01-0134-08

Deformation Characteristics of Loess Slope Under Dry-wet Cycles

SUN Zhijie, YANG Xuanyu

(Key Lab of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032, China)

Abstract: When the loess slope is subjected to repeated rainfall-sunshine action, the surface of slope will spall and collapse. It is one of the key factors of slope instability. Moreover, the slope ratio is also important on stability. The loess slope with different slope ratios were taken as an example, the deformation and failure characteristics of the slope in drying-wetting cycle were simulated and studied by the model test method. The research indicated that the deformation characteristics of different slopes are different. The deformation of gentle slope is earlier than that of steep slope, and the deformation rate of gentle slope is lower than that of steep slope. The failure modes of gentle slope contain surface spalling with small scale and overall traction type slow slip. In addition, the failure of steep slope is characterized by the development of cracks on the top and the surface. And the local collapse occurs with the cracks penetration. In conclusion, in the design of loess slope, it is necessary to consider not only the comprehensive slope rate, but also the deterioration of dry and wet cycle slope surface caused by gentle slope rate, and the slope surface protection should be considered.

Keywords: asymmetric loess slope; drying-wetting cycles; deformation; optical fiber

诱发黄土边坡地质灾害的原因有很多, 其中季节性强降雨是一个重要因素。降雨一方面改变土体参数和状态, 进而改变斜坡应力状态, 引起斜坡失稳, 另一方面, 降雨入渗形成的渗透压力使得土体抗剪能力降低, 降雨会直接导致边坡浅层土体含水率急剧增加, 从而引发土体变形特性和强度特性的改变, 是诱发滑坡的重要因素^[1-3]。

除此之外, 在我国黄土分布集中的北方地区, 降雨多集中发生在夏季, 白天则为高温条件, 此气候特征使得黄土在夏季遭受反复的湿润-干燥循环^[4]。

袁志辉等^[5-6]通过压实与原状黄土的干湿循环强度对比试验, 得出干湿循环对原状黄土与压实黄土的抗拉与抗剪强度均会产生劣化效应, 且会使原状黄土的结构强度逐渐消失的结论。胡长明等^[7]

收稿日期: 2021-10-20

修稿日期: 2021-11-18

基金项目: 山西省交通运输厅科技项目(2018-1-17; 2019-1-24); 山西交控集团科技项目(19-JKKJ-3; 19-JKKJ-16)

作者简介: 孙志杰(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事边坡工程病害机理、处治及监测预警工作。E-mail: 46395114@qq.com

开展考虑干密度、干湿循环幅度、干湿循环下限含水率三种影响因素的干湿循环三轴试验,得到不同因素影响下的压实黄土强度劣化曲线。李向宁等^[8]利用自主设计的黄土增减湿过程模拟装置研究干湿循环过程中压实黄土的胀缩变形特征,发现浸水直至土体饱和过程中,土体会持续膨胀;自然蒸发减湿过程中,土体体积随时间逐渐减小。杜京房等^[9]基于 Mein-Larson 降雨入渗模型,结合改进强度折减法分析了降雨和干湿循环对黄土边坡稳定性的影响。孙志杰等^[10]采用 FBG 监测技术,对黄土边坡模型在干湿循环作用下坡表变形的影响进行了研究。

综上可看出,当前学者对干湿作用下黄土强度参数研究较多,且多为选取坡体某个部位的原状试样和重塑试样进行三轴、直剪或其他土工试验。专门针对干湿循环作用下边坡实体的研究在膨胀土边坡^[11-13]、红黏土边坡^[14-16]等其他特殊土边坡多于黄土边坡^[9-10]。

受干湿作用影响,黄土边坡广泛发育浅表层变形,目前关于黄土边坡在干湿循环下变形特征的研究有待深入,并且研究表层变形与深层变形的关系具有重要意义。基于此,本文采用室内模型试验手段,采用分布式光纤监测技术,对不同干湿循环次数及循环幅度条件下的黄土边坡坡表及深部变形特征和机制进行了研究。

1 模型试验

1.1 试验材料

为了揭示非对称黄土边坡在反复干湿条件下坡体变形特征,试验材料应尽可能反应黄土边坡现场实际情况,本文模型试验用土选取边坡现场黄土,过 2 mm 直径的筛,采用分层压实法制作模型边坡。为保证两层土体间良好接触,在压实完成一层边坡土体并制作下一层之前,需将该层土体的表面刮毛。为防止在边坡制作过程中水分散失,坡顶和坡底平面土体的高度也应比设计高 5 cm,并且在试验前削坡到设计高度。同时用防水布覆盖表面,以保证坡体含水率不变。现场和室内边坡土体物理性质如表 1 所示。

表 1 边坡土体物理参数

土样名称	干密度 ρ_d /($g \cdot cm^{-3}$)	含水率 $w/\%$	比重	塑性指数
现场	1.55	10	2.67	11.3
室内	1.72	12	2.70	11.4

试验模型箱模型箱尺寸为:长×宽×高:2.0 m×1.0 m×1.0 m。前后面采用厚度为尺寸为 2 m×1 m 的钢化玻璃,左右面采用 0.3 m×1 m 的钢化玻璃。图 1 为制作完成的边坡模型。边坡坡率陡坡侧采用坡率为 1:0.25,缓坡侧采用坡率为 1:0.75。边坡模型坡高 100 cm,坡脚高度 20 cm,坡脚宽度 20 cm,坡顶平台宽度 80 cm。为保证坡面土体压实均匀及保持土体的含水率,开挖坡面时预留 2 cm 厚土体,随后进行开挖成试验所需的坡形。

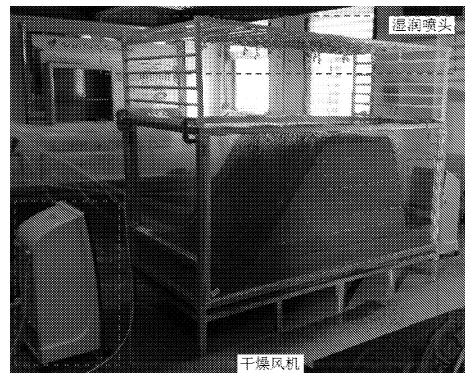
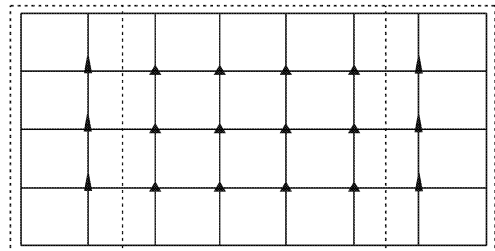


图 1 边坡干湿模拟

1.2 干湿模拟实现

本试验通过雾化喷头增湿模拟长持续时间的雨水的湿润作用,通过控制降雨持续时长来模拟湿润幅度,时长分别选用了 10 min、20 min 和 30 min。为尽可能实现边坡不同位置湿润的均匀性,共布设 18 个喷头,中间 4 排 12 个为广角喷头,喷射范围大,距离短,用于坡顶和坡面中上部湿润。两侧 1 排 3 个为长距喷头,喷射角度小,距离长,用于坡面下部和坡脚部位的湿润,雾化喷头布置如图 2 所示。

坡体下部及坡脚区域 坡体上部及坡顶区域 坡体下部及坡脚区域



(a) 雾化喷头布置平面图



(b) 雾化喷头现场布置图

图 2 湿润环境模拟

试验采用加快空气流动速度和提高温度的方法模拟自然条件下干燥作用。选用空调扇来模拟干燥作用。在高幅度干湿循环试验中还使用电热吹风机提高边坡上方空气的温度,使水分的蒸发加快以模拟高幅度的干燥作用。干燥模拟情况如图 3 所示。

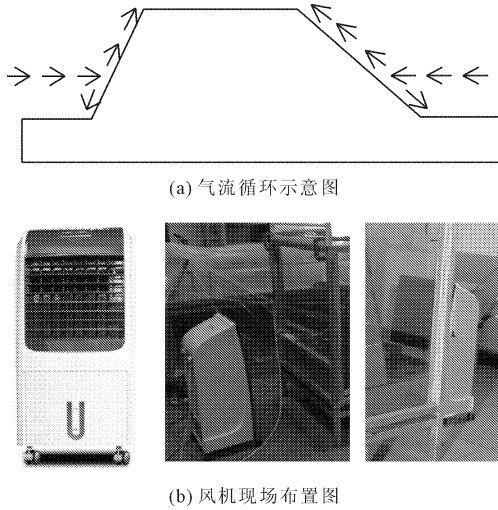


图 3 干燥环境模拟

为了解两侧边坡不同部位所处的温湿度环境,试验还布置了 5 个温、湿度传感器。选用瑞士原装进口 DB115436 管状电压型温湿度传感器进行监测,如图 4 所示。

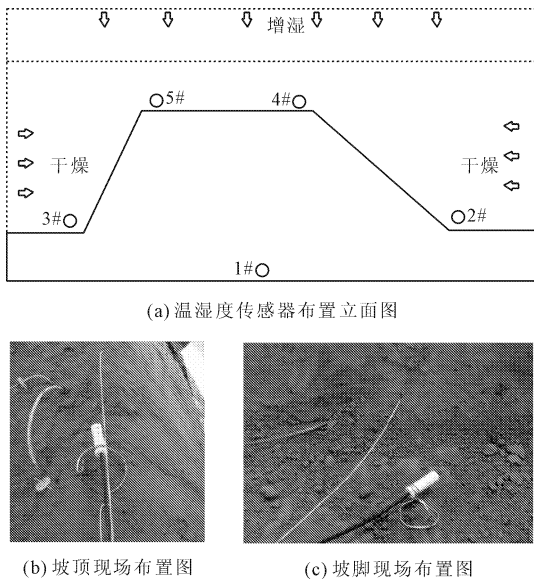


图 4 干湿环境监测

如图 5 为试验过程中温湿度监测曲线,可看出,干湿系统达到了预期目标,实现了对边坡温湿度环境的改变。

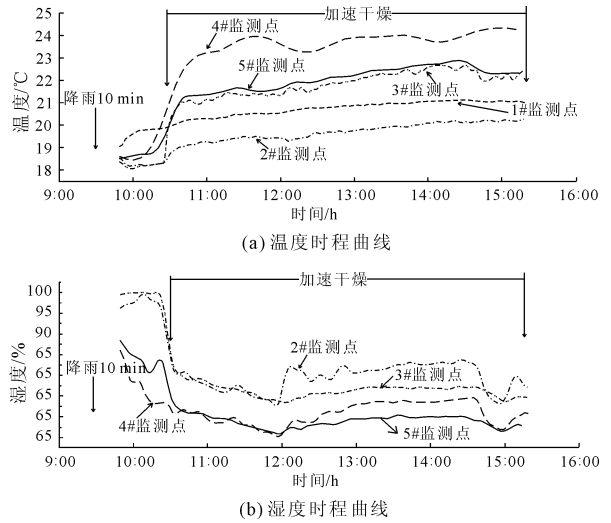


图 5 温湿度时程曲线

1.3 分布式光纤布设

模型边坡在填筑过程中,通过植入分布式光纤,来监测边坡土体变形特征。为增强光纤与土体的耦合作用,使得土体能够与光纤协调变形。选用 0.9 mm 聚氨酯光纤,并对光纤进行了加工,如图 6 所示。

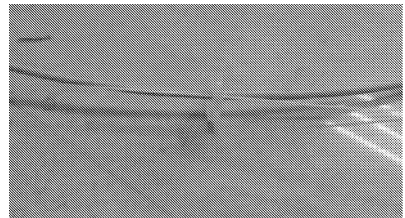


图 6 带“耳朵”2 mm 聚氨酯光纤

分布式光纤在模型边坡中布置示意图如图 7 所示。

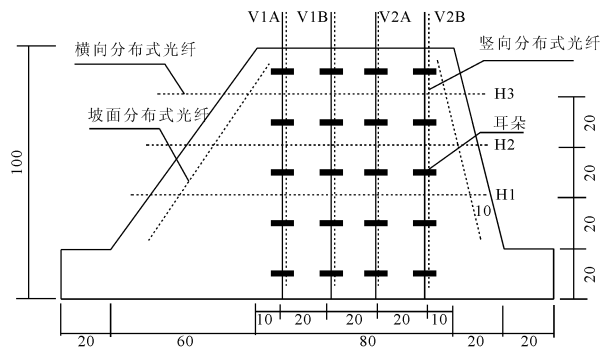
各部位光纤埋设情况如下:

(1) 坡体内水平方向。为监测在干湿循环下不同深度处边坡的变化,在水平向土体标高 30 cm、50 cm、70 cm 处分别埋设了分布式光纤(以模型箱底部为标高 0 处),为了排除温度变化对水平向分布式光纤的影响,在埋设分布式应变测量光纤的同时,并行埋设分布式测温光纤,如图 8(a)所示。

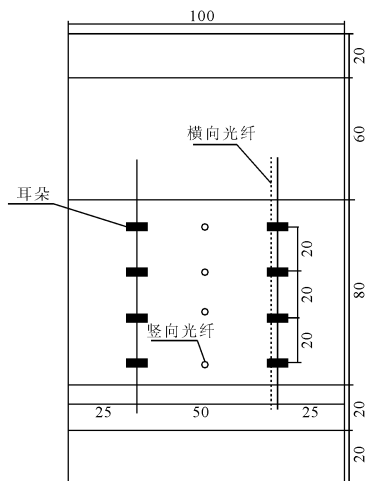
(2) 坡体内垂直方向。在边坡模型的坡体中间,埋设竖向分布式光纤。竖向分布式光纤从标高处开始,直到边坡顶部,同时并行埋设分布式测温光纤,如图 8(b)所示。

(3) 坡表面沿坡面方向。在两个坡面在离坡面 10 cm 的土体下,埋设分布式光纤传感器,观测在干湿循环中坡面土体的变化。在坡面上按照“U”型埋

设,为便于后期标记及数据分析,从左至右,将光纤标记为 1#、2#、3#、4# 应变段。如图 9 所示。

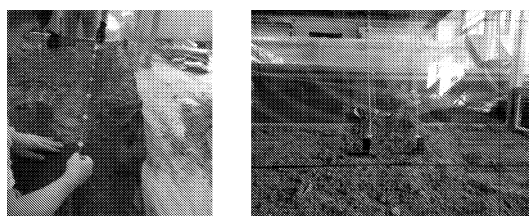


(a) 立面图



(b) 平面图

图 7 模型边坡光纤埋设示意图(单位:cm)



(a) 水平方向

(b) 垂直方向

图 8 坡体内光纤埋设

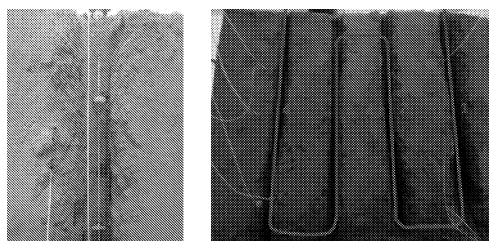


图 9 坡表光纤铺设

光纤变形数据采集采用德国 fibrisTerre 公司 FTB2505 型布里渊光频域分布式光纤应变/温度解

调仪。该解调仪空间分辨率 0.2 m,最高采样分辨率 0.05 m,应变测试精度 $\pm 2 \mu\epsilon$,应变测试范围 $\pm 15\,000 \mu\epsilon$ 。

1.4 干湿循环过程

模型边坡静置 2 d 之后,各采集系统采集初始值,开始对模型边坡进行干湿循环作用,记录坡体内光纤应变,直至边坡破坏,试验结束。自然条件下干湿循环幅度的不同表现在增湿强度与时间的不同、干燥时间的不同、温度和相对湿度的不同。因此本试验湿润工况分为 10 min、15 min、30 min 三个工况;干燥工况通过加速蒸发以加快气流速度和提高空气温度实现,干燥时间 12 h。

根据宋洋等的研究成果^[17],干湿循环作用下非饱和土边坡经过 3~4 次循环后,将达到相对稳定的状态。故本试验每个湿润-干湿工况进行 4 个循环,在前一个工况的基础上,进行下一个工况的 4 个循环。试验工况表如表 2 所示。

表 2 试验工况表

工况号	采集序号	循环次数	湿润幅度/min
Step1	#1 - #4	1、2、3、4	10
Step2	#5 - #8	1、2、3、4	20
Step3	#9 - #12	1、2、3、4	30
Step4	#13 - #16	1、2、3、4	30

试验共进行 4 个大循环,16 个小循环,由于当湿润幅度增加到 30 min 时,边坡变形明显,故 Step4 工况仅增加了循环次数,未增大湿润幅度。

2 光纤监测结果分析

2.1 坡体内水平应变分布规律

如图 10 所示为分布式光纤监测到的坡体内部不同深度处水平测线的应变曲线。

从整体来看,随着干湿循环幅度的增加和干湿循环次数的增加,土体所受应变从压应变向拉应变转化。且随着干湿循环的累计效应,土体应变持续增大。

土体应变增加幅度随干湿循环幅度的增大而增大。随着埋设深度的增加,土体水平应变值增大。同一埋置深度处两侧应变值存在的差异,初步分析是两方面导致。一部分是土体填筑过程中两侧压实度控制差异引起的,另一部分是两侧坡面破坏不对称所致。右侧由于滑动破坏,在土体的拉动作用下,所以右侧的土体中的光纤受拉,而左侧土体未发生滑动,且在整个干湿循环中基本为滑动,所以可知左侧土体较为稳固,这说明左侧土体的压实度较好。

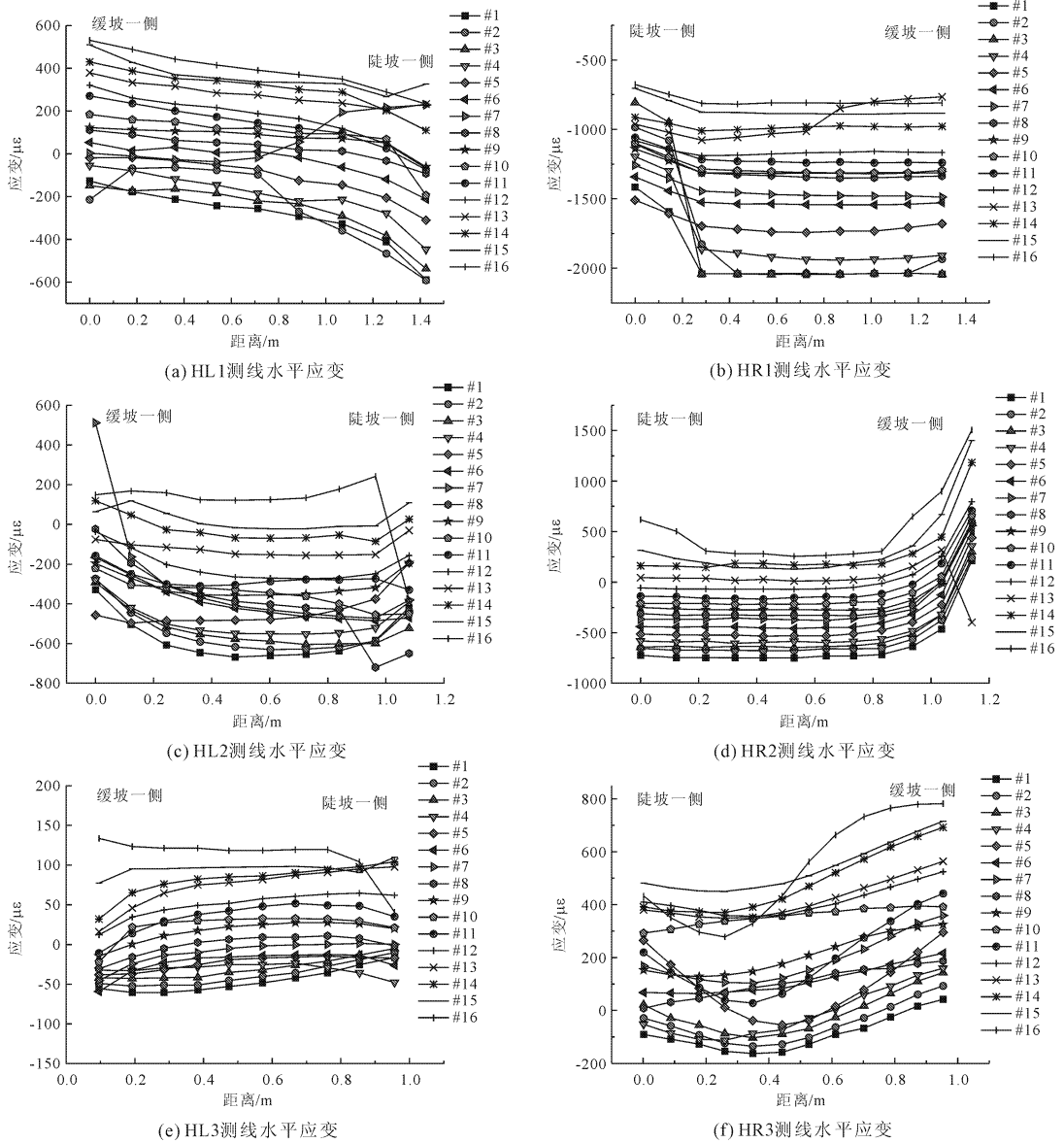


图 10 坡体内水平应变曲线

缓坡由于迎水面积大,故土体含水率较陡坡侧更早达到饱和。抗剪强度降低的更快,更容易发生浅层滑动,这在试验中也得到证实。表现在缓坡一侧坡表一定范围内应变曲线陡增。比较明显的如图 10(b)、图 10(d)。

将不同埋深的水平光纤采集的不同工况的应变按循环次数顺序制作水平应变云图,如图 11 所示。

图 11 中,每条应变云图从下至上代表干湿循环方向下,水平应变分布规律变化趋势。从云图可直观判别两侧坡体不同的破坏形式,左侧坡度较缓一侧为局部浅层滑塌,最大影响深度约 5 cm,位于坡体的中部;右侧坡度较陡一侧为整体崩塌式滑坡,从坡顶裂缝位置开始,剪出口位置位于 H1 测线高度

处,影响深度为缓坡测 2.5 倍,约 12 cm 左右。

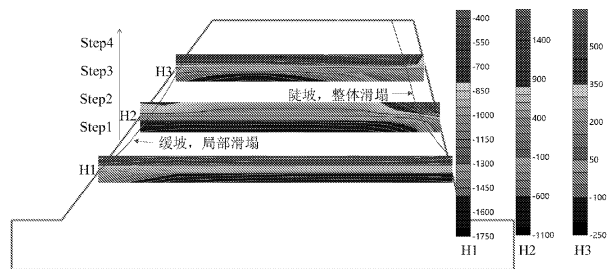


图 11 各监测线水平应变云图

2.2 坡体内垂直应变分布规律

如图 12 所示为坡体内垂直应变曲线,试验布置的两根光纤,有一根在压实过程中损坏,未采集到数

据。

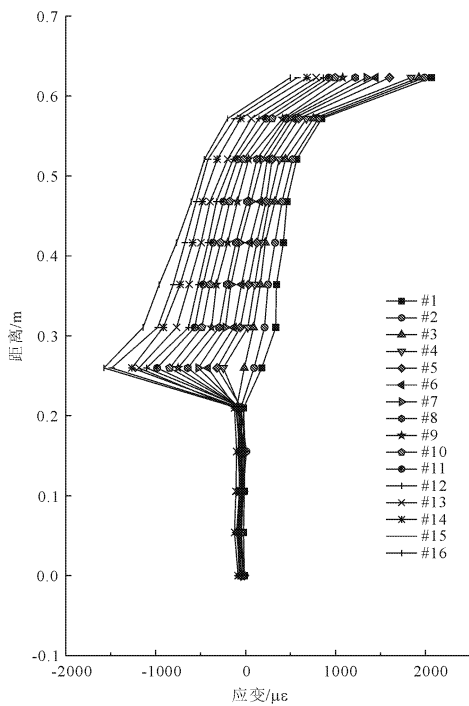


图12 坡体内垂直应变曲线

从图12中可以判断,随着干湿循环幅度和次数的增加,分布式光纤监测曲线的应变呈减小的趋势,这表明随着干湿循环的进行,土体的沉降变形趋于稳定。但是下面20 cm左右的土体应变值始终在0左右,表明在整个干湿循环过程中,此处的土体影响不大。20 cm~25 cm范围内,光纤应变有一明显压缩变形,分析一方面是由于边坡坡脚部位土体应力集中所致。另一方面是由于坡脚高度部位土层整体达到饱和状态。

2.3 坡表应变分布规律

图13为边坡坡表沿坡面方向应变曲线。光纤埋置深度10 cm,1#、4#应变段为靠近玻璃侧光纤采集,2#、3#应变段为靠近坡体中间光纤采集,具体位置见图9。

从图13中可看出,陡坡段光纤在采集一次数据之后无读数,但采集的应变曲线规律与缓坡光纤一致。即坡顶和坡底水平段应变为一恒定值,坡面应变变化幅度比较大。考虑到1#、4#光纤可能受模型箱的尺寸效应相较于2#、3#比较明显,所以在分析时,将1#、4#分为一组、2#、3#分为一组进行分析。为分析方便将图中4个应变段进行放大,如图14所示。

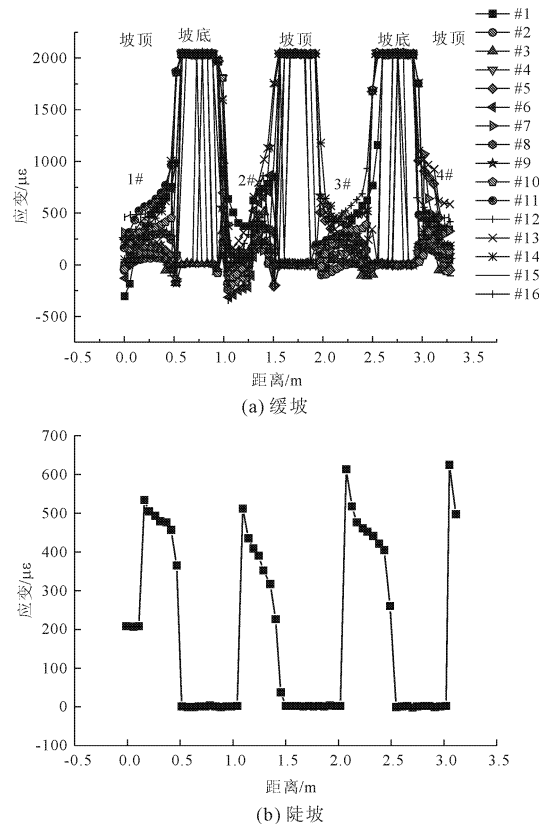


图13 坡表应变曲线

从图14(a)和图14(d)可看出,1#、4#应变段从坡顶到坡底,总体上应变逐渐增大,结合边坡最终破坏照片,可以得知,造成这种原因的因素是边坡在破坏时呈“喇叭状”破坏,所以边坡顶部的应变较坡底小。并且从图中可以发现,随着时间的推移,最大应变出现的位置逐渐从坡底最大转为坡中间最大。这是由于随着下部土体的破坏,坡体中间开始形成凌空面。总体上1#光纤、4#光纤应变段的总体规律是刚开始坡底应变最大,随着干湿循环的进行,最大应变出现在坡体中间,然后最大应变出现在坡体顶部。并且可以得知的是坡面破坏时的“喇叭状”破坏是造成上述分布规律的直接因素,当然由于土体压实度的不均一性使得两侧土体的变形存在差异,导致了1#光纤、4#光纤应变段在时间上存在的差异。

从2#光纤、3#光纤应变段从坡顶到坡底沿着光纤,刚开始应变逐渐增大,结合现场图可知这是由于破底部开始破坏的原因;然后随着破坏的进行,应变先较小后增大,这是由于随着干湿循环的进行,边坡在坡顶处张拉裂隙发育,在坡脚处剪切裂隙发育,所以应变呈现出上述分布规律。

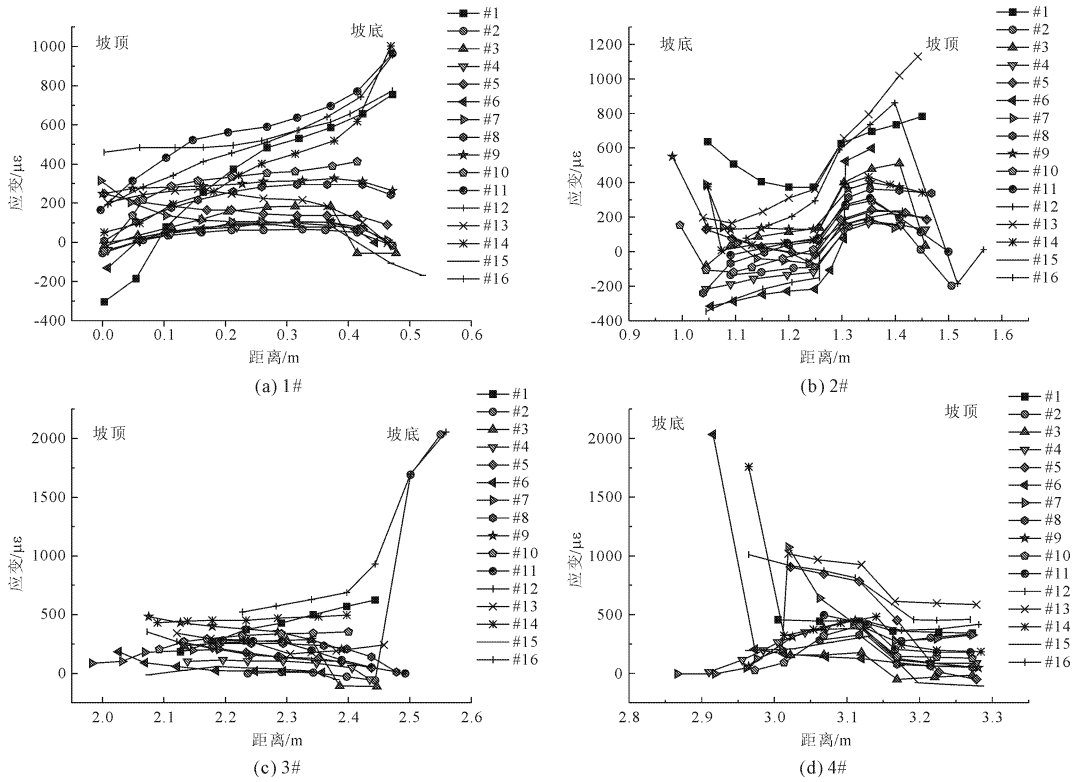


图 14 坡表重点部位应变曲线

3 分析与讨论

随着时间的推移,坡顶处的应变由小到大,这是由于随着干湿循环进行,边坡在坡顶处张拉裂隙发育(见图 15),在坡脚处应变逐渐增大,这是由于坡脚处的剪切应变逐渐增大的结果;对比图 15 中的两图可以发现,两侧土体的变形差异较大,这主要是因为土体的密实度差异及颗粒级配的差异所致。

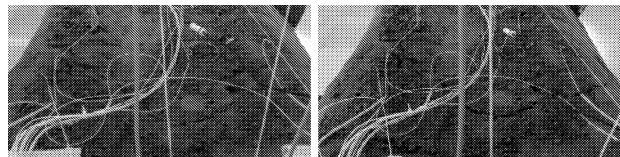
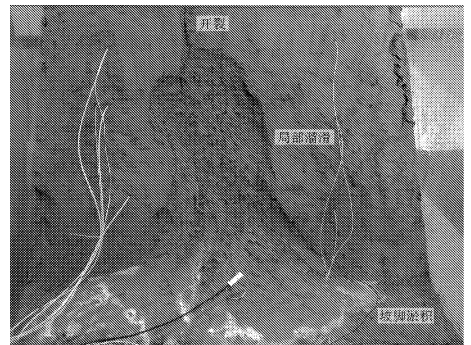


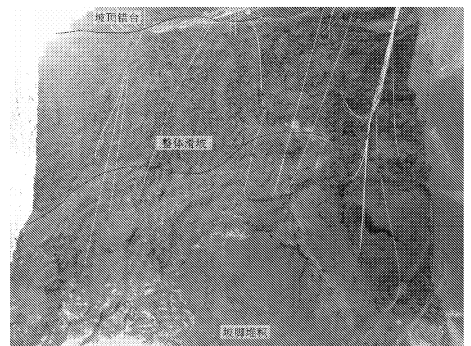
图 15 坡顶裂缝发展

与此同时坡体裂缝作为诱发滑塌的重要因素,也在同步增大。图 16 为两侧边坡最终呈现不同的破坏模式,缓坡侧以整体变形为主,从坡体小范围滑塌到逐渐扩大;陡坡侧从坡顶及坡面出现裂缝导致不均匀沉降,到裂缝逐渐扩展贯通,直至边坡发生突然崩塌。

在干湿循环的初期,土体表层结构不是非常致密,分布有一定孔隙,水分易进入土体。在松散土体中,以孔隙气压为主导的抵抗力,使得水分不能完全



(a) 缓坡



(b) 陡坡

图 16 边坡破坏模式

填充孔隙,由此达到了非饱和状态。随着水分不断入渗,土体表层结构中的孔隙气被完全排出,此时达

到饱和状态,此时土体表现出塑性特征。但是由于水分入渗深度有限,只能在土体表层形成一层饱水层。随着深度的增加,含水率逐渐减少。而由于水分进入使得土体孔隙变小,发生一定程度的湿缩现象。当停止外界水分供给,开始对土体进行升温烘干,表层土体中的水分迅速蒸发,土颗粒受水分向上蒸发的牵引作用,逐渐聚拢,脱离下层土体,进而形成了硬壳构造。在表层硬壳之下,存在一层空腔,阻断了水分的蒸发和热量的传递,使得结皮下土体保持湿润状态。由于干缩,使得表层产生了大量龟裂。随着下一次干湿循环,水分沿着龟裂裂缝进入空腔,一方面水分在空腔内流动,使得上部土体发生变形,另一方面,水分继续向下入渗,形成下一层结皮。当干湿交替作用不断累积,土体表层结皮深度不断加大,土体发生累积大变形,甚至发生破坏。

4 结 论

通过不同坡率非对称黄土边坡的室内模型试验,研究了干湿交替作用下不同坡度边坡土体的变形规律,结合光纤监测结果和破坏情况得到了土体的演化特征。研究结论如下:

(1) 干湿循环模拟系统可实现对模型边坡的干燥和湿润模拟;分布式光纤模型边坡浅表层 10 cm 内应变具有较好的分辨效果。

(2) 缓坡在干湿交替前期变形量较大,随着循环作用的增加,土体变形速率趋于减小。而陡坡在前期变形量较小,循环次数越多,土体变形速率逐渐变大,易发生突发性破坏。

(3) 非对称边坡在干湿循环累积效应下呈现不同的变形特征。缓坡变形早于陡坡,变形速率小于陡坡,缓坡破坏表现形式为小范围坡表剥落和整体牵引式缓慢滑移。陡坡破坏表现形式为坡顶和坡面裂缝发展,贯通,突发局部崩塌。

参考文献:

[1] Zhou D, Zhang Z, Li J, et al. Seepage-stress coupled modeling for rainfall induced loess landslide[J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters, 2019,9(1):14-20.

[2] 常金源,包 含,伍法权,等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J]. 岩土力学,2015,36(4):89-95.

[3] 巨玉文,齐 琼,董 震,等. 山西西部地区黄土地质灾害与降雨的关联性分析[J]. 自然灾害学报,2016(1):81-87.

[4] Ye W, Zhang Y. Effect of dry-wet cycle on the formation of loess slope spalling hazards[J]. Civil Engineering Journal, 2018,4(4):785-795.

[5] 袁志辉,倪万魁,唐 春,等. 干湿循环下黄土强度衰减与结构强度试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(7):1894-1902.

[6] 袁志辉,倪万魁,唐 春,等. 干湿循环效应下黄土抗拉强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1):3670-3677.

[7] 胡长明,袁一力,王雪艳,等. 干湿循环作用下压实黄土强度劣化模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(12):2804-2818.

[8] 李向宁,倪万魁,王熙俊,等. 干湿循环过程中压实黄土的胀缩变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(1):179-188.

[9] 杜京房,全 飞. 干湿循环与降雨对黄土边坡稳定性的影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2020,45(4):783-791.

[10] 孙志杰,苗鹏勇. 干湿交替环境下黄土边坡坡表变形演化规律模型试验[J]. 科学技术与工程,2018,18(10):117-123.

[11] 蔡正银,陈 皓,黄英豪,等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(11):1977-1982.

[12] 朱 洵,李国英,蔡正银,等. 湿干循环下膨胀土渠道边坡的破坏模式及稳定性[J]. 农业工程学报,2020,36(4):159-167.

[13] 王德咏,周树津,韩雨薇,等. 干湿循环下花岗岩残积土路堑边坡稳定性研究[J]. 公路,2021,66(1):1-6.

[14] 蒋 浩,陈开圣. 干湿循环下红黏土路堤边坡稳定性分析方法研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2019,36(6):104-108.

[15] 陈开圣. 干湿循环下红黏土边坡裂隙演变规律[J]. 建筑科学与工程学报,2019,36(5):52-61.

[16] 刘锦程,张艳美,张笑峰. 干湿循环对非饱和土特性影响研究现状与展望[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):69-75.

[17] 宋 洋,刘思源,王晨煜. 含水率和干湿循环对原状黄土变形特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(2):148-155.