

DOI: 10.11779/CJGE201911001

考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究

蔡正银¹, 陈皓^{1,2}, 黄英豪¹, 张晨¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 膨胀土渠道由于季节性的通水和停水, 其边坡实际处于干湿循环的状态, 非常容易引起边坡失稳。采用离心模型试验对干湿循环作用下的膨胀土渠道边坡稳定性进行了探讨, 研究了渠道边坡的破坏机理。研究发现, 由于渠道的反复通水和停水, 渠道边坡土体经历了多次干湿循环, 每次循环后边坡土体裂缝逐渐扩展, 渠水不断入渗, 饱和区逐渐扩大。渠基土的膨胀性越强, 每次干湿循环后的裂隙扩展越严重, 渠水入渗作用也越强, 渠道越容易破坏。研究还发现, 由于通水和停水造成的渠道干湿循环破坏模式主要表现为渠坡整体发生浅层失稳破坏, 这一破坏模式与前人研究发现的牵引式滑坡具有较大不同之处。

关键词: 干湿循环; 膨胀土; 渠道边坡; 离心模型试验

中图分类号: TU475 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)11-1977-06

作者简介: 蔡正银(1965—), 男, 江苏海安人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术方面的工作。E-mail: zycai@nhri.cn。

Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles

CAI Zheng-yin¹, CHEN Hao^{1,2}, HUANG Ying-hao¹, ZHANG Chen¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The canal of expansive soils is in the state of wetting-drying cycle because of seasonal water level fluctuations, and its slope instability is easily induced. The centrifugal model tests are carried out to study the stability of a canal slope of expansive soils under wetting-drying cycles, and its failure mechanism is investigated. It is found that the soil of the canal slope undergoes various wetting-drying cycles due to the repeating water level fluctuations in the canal. After each cycle, the cracks in the soil gradually expand, the water in the canal infiltrates continuously, and the saturated area gradually increases. The stronger the expansive capability of foundation soils, the more severe the crack extension after each wetting-drying cycle, the stronger the infiltration of canal water, and the more easily the canal is destroyed. The main failure mode of the canal caused by wetting-drying cycles of water level fluctuations is shallow instability, which is quite different from the retrogressive landslide discovered by other researchers.

Key words: wetting-drying cycle; expansive soil; canal slope; centrifugal model test

0 引言

中国北疆供水工程位于阿勒泰地区, 供水明渠沿线地质条件复杂, 分布大量的膨胀土。该地区属温带大陆性气候, 夏季炎热, 冬季寒冷, 为了减少冻胀破坏, 渠道采取季节性供水, 每年4—9月份通水, 其它时间停水。渠道在每年历经一次通水—停水的干湿循环交替作用下渠坡表面极易产生裂隙, 坡面土体崩解、强度降低, 导致渠道滑坡失稳频繁发生, 每年造成的经济损失难以估量, 这个问题已经引起各方面的高度关注。

在有关膨胀土边坡稳定性研究方面, 国内外学者

进行了大量的试验和理论研究, 许多成果来自于现场测试和小比尺模型试验。Ng等^[1]和詹良通等^[2]对膨胀土原型边坡进行较长时间的降雨入渗监测, 对边坡变形及破坏模式进行了详细的分析。Dai等^[3]对南水北调中线工程南阳段19个滑坡的总结结果进行了研究, 深入分析了滑坡产生的原因。Cheng等^[4]对降雨入渗条件下小比尺膨胀土边坡模型进行研究, 发现其浅层破

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2017YFSF020086); 水利部推广项目(SF-201704); 国家自然科学基金项目(51879166)

收稿日期: 2018-12-25

*通讯作者(E-mail: chenhao4912@163.com)

坏具有明显的牵引性和多重滑动性，边坡失稳主要受膨胀变形控制。Greco 等^[5]研究了降雨入渗条件下膨胀土边坡的稳定性，对雨水入渗深度、滑坡与含水率的关系及浸润线扩展进行了系统的分析。

许多学者通过离心模型试验来研究膨胀土边坡稳定问题。陈生水等^[6]、王国利等^[7]利用离心模型试验对干湿循环条件下膨胀土边坡的稳定性进行研究，发现随着干湿循环次数的增加，边坡裂隙逐渐发育，削弱了土体的抗剪强度，并为水分入渗提供了良好的通道，最终导致边坡的渐进式破坏。饶锡保等^[8]进行了南阳膨胀土渠道边坡稳定性离心模型试验，研究了模拟渠道输水运行过程中的渠道边坡变形和稳定情况。徐光明等^[9]通过离心模型试验研究了降雨入渗条件下膨胀土渠道边坡的稳定性，采用控制注水浸泡时间来模拟短期和长期的雨水入渗。陈永辉等^[10]研究了一套可以在离心机中模拟降雨入渗的装置，并通过离心模型试验研究了将雨条件下膨胀土边坡失稳的全过程，揭示了降雨入渗条件下膨胀土边坡的破坏机理。

综上所述，目前对于膨胀土边坡的研究主要集中在降雨入渗引起的边坡稳定性，对于膨胀渠道边坡经历通水—停水这种反复干湿循环作用下稳定性的研究较少。鉴于此，本文利用离心模型试验对不同的两种膨胀土边坡干湿循环作用下的稳定性进行研究，旨在探讨其在干湿循环作用下土体裂缝的发展、渠水入渗规律及其对渠坡变形和稳定性的影响，揭示膨胀土边坡在反复通水—停水条件下的破坏机理。

1 北疆供水渠道概况

本研究以北疆供水工程膨胀土渠段为对象。该渠道断面为梯形，渠高 5 m，渠水深度约 4 m，两边渠坡坡比均为 1:2，如图 1 所示。每年 4—9 月为渠道的供水期，由于渠道渗漏，此时渠基表面土体湿化，渠水缓慢渗入渠身，渠基土经历“湿化”过程。每年 9 月，渠道开始停水，直至次年 3 月。在此过程中，渠水完全放干，渠基土经历“干燥”过程。渠基土的这种干湿过程每年循环一次，正是这种循环导致了渠道边坡的渐进破坏。

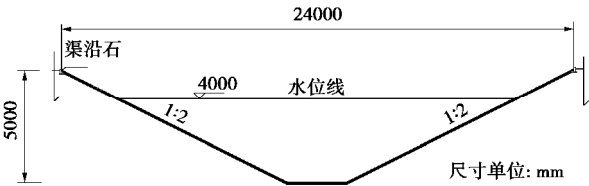


图 1 渠道断面示意图
Fig. 1 Cross section of canal

必须指出，每年冬季渠道表面土体冻结，而春天融化，冻融过程也会导致膨胀土的劣化。本文试验忽

略了冻融过程的影响，关于干湿和冻融耦合问题将会另撰文讨论。

北疆供水工程区的膨胀土分为两种，如图 2 所示，一种为青色膨胀土，自由膨胀率为 76%，属于中等膨胀性土；另一种为黄色膨胀土，自由膨胀率为 90%，属于强膨胀性土。两种膨胀土的基本性质和粒径分布曲线分别见表 1 和图 3。



(a) 青色膨胀土 (b) 黄色膨胀土
图 2 试验用青色及黄色膨胀土

Fig. 2 Gray and yellow expansive soils for tests

表 1 土样基本性质

Table 1 Basic properties of soils

土样名称	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性 指数	自由膨 胀率/%
青色膨胀土	61.3	20.1	41.2	76
黄色膨胀土	57.1	17.6	39.5	90

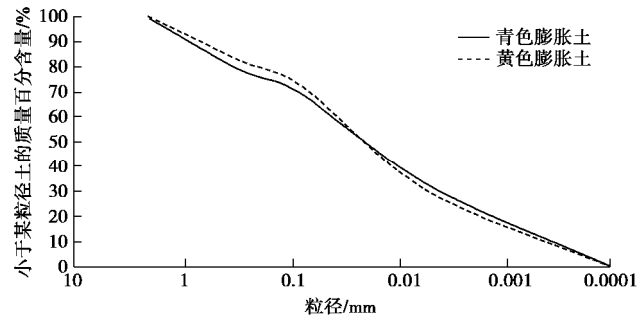


图 3 土样粒径分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of soil particles

2 膨胀土渠道边坡离心模型试验方案

2.1 试验设备

试验采用南京水利科学研究院 60 g·t 中型土工离心机，如图 4 所示。该离心机有效半径为 2.24 m，最大加速度为 200g，有效载重为 3 kN，挂篮空间为 0.9 m×0.8 m×0.8 m。挂篮侧面搭载了摄像系统，可以完成对离心机室、模型箱等部位的监视及录像。该离心机配备了先进的数据采集系统，可在试验过程中对模型的变形、土压力、孔压等物理量进行实时测量。

2.2 模型比尺

在离心模型试验中，模型与原型除了保持几何相

似以外, 模型应力与原型应力也相似, 这是离心模型与 1g 模型的最大差别。离心模型试验中原型与模型各物理量的相似关系如表 2 所示。



图 4 南京水利科学研究院 60 g-t 土工离心机
Fig. 4 60 g-t geo-centrifuge in NHRI

表 2 离心模型试验相似率 (原型/模型)

Table 2 Similarity ratios of centrifugal model tests (prototype/ model)

物理量	相似率	物理量	相似率
加速度	1/n	渗透系数	n
长度	n	渗流时间	n ²
质量	n ³	含水率	1
应力	1	位移	1
应变	1	密度	1
弯矩	n ³	颗粒尺寸	1

试验选用的模型箱尺寸为 0.68 m×0.35 m×0.425 m(长×宽×高), 根据此尺寸结合现场渠道实际情况, 选择本次试验的模型比尺为 $n=50$ 。为了节省模型空间, 并考虑渠道剖面对称性, 本试验以渠道中轴线为界只模拟渠道剖面的一半, 模型渠道的断面如图 5 所示。这样渠道模型的尺寸为: 渠高 100 mm, 渠底宽度 130 mm, 渠底坡比 1:2, 渠肩宽度 270 mm, 渠底土层厚度为 200 mm。

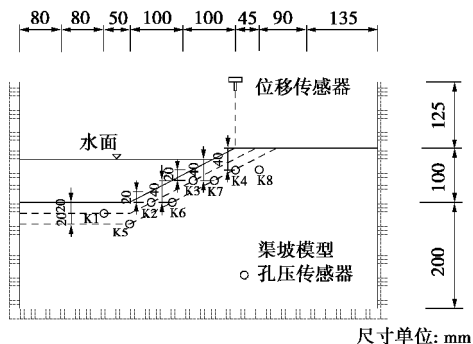


图 5 模型渠道断面示意图
Fig. 5 Cross section of model canal

2.3 模型试验方案与测点布置

现场渠基土为膨胀土与白砂岩交错混杂的土体, 试验时为更好地模拟膨胀土渠道边坡在干湿循环下的劣化灾变机理及过程, 模型制作时将渠基土视为均质土体, 采用单一膨胀土作为渠基土。

本研究共设置了 2 组离心模型试验, 主要针对青色 (M1) 和黄色 (M2) 两种膨胀土, 每种膨胀土控制渠基土干密度均为 1.5 g/cm³, 初始含水率均为 18.8%。

模型渠道的制备方法如下: 首先将两种烘干后的膨胀土分别碾碎并过 5 mm 筛, 并加水配至指定含水率, 用塑料土工膜包好备用。干密度 1.5 g/cm³ 控制分别称取备好的土样, 在模型箱中采用击实法制备土样, 共分 6 层击实。最后按图 5 所示尺寸开挖出模型渠道剖面。

本试验过程中主要关注渠道的变形和渠水的入渗与干燥过程。对于渠道的入渗过程, 采用孔压计来进行测量。所选用的孔压计为半导体应变感应膜微型孔压传感器, 尺寸为 $\phi 13 \times 12.5$ mm, 共分为 2 层布置, 第一层为 K1~K3, 离渠坡土体表层垂直距离 20 mm, 第二层为 K4~K7 离渠坡土体表层垂直距离 40 mm, K8 距离坡顶也为 40 mm。渠道顶部的变形采用位移传感器进行测量, 选用的设备为德国 Wenglor 公司生产的激光位移传感器。各传感器的布置如图 5 所示。

为便于测量渠道边坡的变形情况, 在模型侧面划分了变形标志网格节点, 用于记录试验前各标志点坐标的变化, 并据此可以绘出整个边坡的位移场变化图。完成模型制作后, 记录好各个网格节点坐标, 准备模型试验。制备好的模型如图 6 所示。



图 6 制备好的模型
Fig. 6 Model after installation

2.4 试验工况及过程模拟

本次试验主要模拟渠道反复通水—停水过程, 以此研究干湿循环对膨胀土渠坡稳定性的影响。具体试验过程如下:

(1) 通水阶段: 在 1g 条件下将水位升至预定水位线处 (模型水深 80 mm), 然后将离心机加速度从 1g 升至 50g。现场每年通水期持续约 140 d, 按渗流相似关系推算出模型此阶段运行时间为 80 min。

(2) 停水阶段: 停机将水排出模型箱外, 然后将离心机加速度从 1g 升至 50g, 并在模型箱顶部采用卤素灯光照加热渠坡土体, 配合离心机产生的强迫对流来对渠坡进行干燥。模型干燥装置如图 7 所示。渠道停水期每年约 216 d, 按模型相似率此阶段运行时间为 124 min, 试验结束后停机。

(3) 重复步骤(1)和(2),直至渠道边坡产生破坏为止。



图7 用于模型干燥的光照装置

Fig. 7 Illumination system for drying of model

3 干湿循环对膨胀土渠道边坡稳定性的影响分析

3.1 渠基土裂隙发育及破坏模式

两组模型每次干湿循环完毕后的情况如图8~10所示,所有图片中的模型拍摄时的位置从上到下依次为:坡顶、坡面和坡底。必须指出,图10中的最终破坏状态对于模型M1是指第5次通水结束后的状态,对于模型M2是指第4次通水结束后的状态。两组模型中,模型M1经历5次干湿循环后(第5次只有通水过程)边坡明显发生破坏,而模型M2经历4次干湿循环后(第4次只有通水过程)边坡明显出现破坏。可见膨胀性越大,边坡在干湿循环作用下越容易破坏。从模型最终破坏形态来看,模型M1和M2边坡表面都已严重崩解,几乎难以辨认出原有的坡面,水位线处坡面剥落崩解严重,崩解后的小土块滑落堆积于坡脚处。模型M1最终破坏时,左上角出现明显张拉裂隙,其水平方向宽度3~4 mm,垂直方向深度为5 mm,如图11所示。模型M2坡面处出现严重崩塌剥落并堆积于坡脚处,经量测模型滑面深度在6~8 mm。



(a) 模型M1 (b) 模型M2
图8 第一次干湿循环完毕后的模型

Fig. 8 Model after first wetting-drying cycle

对比不同循环次数下的同一模型,可以看出随着循环次数的增加,渠坡表面的裂隙不断发育,裂隙条数逐渐增加,分布渐渐变密,土体崩解逐步加强,且裂隙主要集中在坡体上部,下部裂隙不明显。其原因有两点:首先,越靠近坡顶蒸发作用越明显,干湿循环幅度越大,所以裂隙发育越明显。越靠近底部蒸发

作用越不明显,干湿循环幅度小,所以裂隙发育不明显。其次是因为在边坡水位骤降的情况下,坡面与坡底存在水头差,导致水分不断从坡面流向坡底,坡面水头差大,失水快,裂隙发育明显,坡底水头差小,失水少,裂隙发育不明显。



(a) 模型M1 (b) 模型M2
图9 第二次干湿循环完毕后的模型

Fig. 9 Model after second wetting-drying cycle



(a) 模型M1 (b) 模型M2
图10 模型最终破坏图

Fig. 10 Final failure patterns of models



图11 模型M1 坡顶张拉裂隙

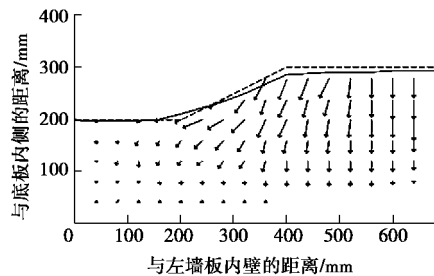
Fig. 11 Tension cracks on top of model M1

对比分析同一模型在不同循环次数时的形态,不难看出,边坡破坏最初始于坡面水位线附近,由于反复的干湿循环,此处裂隙发育最为明显,土体很快崩解并被水流侵蚀剥落,堆积于坡脚处。同时在水分浸泡的作用下,渠坡表面土体强度减弱,承载力降低,导致坡面裂隙进一步增强,坡脚处出现隆起,渠坡整体发生浅层失稳破坏。这一破坏模式与前人研究发现的牵引式滑坡具有较大不同之处。

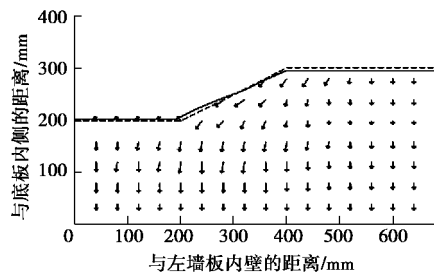
3.2 干湿循环对渠基土变形的影响

通过对边坡模型侧面的网格节点进行了量测和读取,得到模型网格节点的位移矢量图,如图12所示。图中虚线为边坡初始位置,实线为最终破坏时边坡位置。从图中不难看出,对于膨胀性较低的青色土模型

M1, 越靠近坡顶的位置, 沉降越大, 靠近边坡表面的土体水平位移分量较大, 而远离边坡表面的土体则主要以竖向沉降为主, 其中最大值发生在最左侧坡顶, 达到 14.7 mm。边坡主要以浅表层滑动为主, 深层土体几乎没有侧向位移, 坡脚处由于土体的侧向滑动而出现了少许隆起。



(a) 模型M1



(b) 模型M2

图 12 模型破坏时的位移矢量图

Fig. 12 Displacement vectors of failure models

而对于膨胀性较大的黄色土模型 M2, 坡顶沉降并不明显, 坡底均出现了少许隆起。渠道坡面主要以竖向沉降为主, 仅靠近边坡表面土体出现水平位移分量。坡体最大位移出现在边坡中部, 其值为 7.2 mm, 方向沿斜坡向下。

从表面来看, 模型 M1 比模型 M2 位移大, 实际上模型 M1 比模型 M2 多一个干湿循环。此外, 模型 M2 膨胀性强, 所以模型 M2 的沉降反而小。

3.3 渠基土孔压变化情况

模型 M1 和 M2 通水各阶段孔隙水压力的变化如图 13~15 所示。可以发现对于青色土模型 M1, 第一次循环后仅有最浅层的 K1, K2, K3 检测到了孔隙水压读数, 其值与对应位置的静水压力相符, 说明此时水分入渗较浅, 仅在坡底及坡中表层下部 20 mm 左右; 第二次湿化开始后, M1 中除了 K4 和 K7 外均检测到孔压读数, 说明经过第一次干湿循环之后, 边坡裂缝已有所发育, 导致第二次湿化时水分进一步渗入到达坡底和坡中土体下部 40 mm 处; 最终湿化后所有孔压计均出现读数, 且读数和各自位置对应的静水压力相等, 这说明在边坡裂隙进一步发育的情况下, 水分充分入渗到土体内部, 边坡浅层部位已经完全饱和。

对于黄色土模型 M2, 第一次循环后 K1, K2, K3, K5, K6 就检测到了孔隙水压读数, 其值与对应位置的静水压力相符, 说明经过第一次干湿循环后,

坡底和坡中表层下部 40 mm 处已达到饱和; 而且对于模型的第一次湿化孔压图, 孔压呈现不断下降的过程, 这是由于黄色土吸水性较强, 且初始含水率较低, 水分入渗较为迅速且入渗量较大, 导致水位线发生了一定程度的下降。第二次湿化开始后, 除 K8 外所有孔压计均能检测到读数, 说明经过第一次干湿循环之后, 边坡裂缝已有所发育, 水分继续入渗, 但入渗速度明显变缓, 孔压读数不再呈现下降趋势。

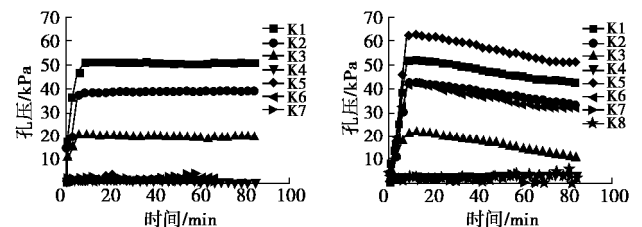


图 13 第一次通水后的孔压图

Fig. 13 Pore pressures after first wetting

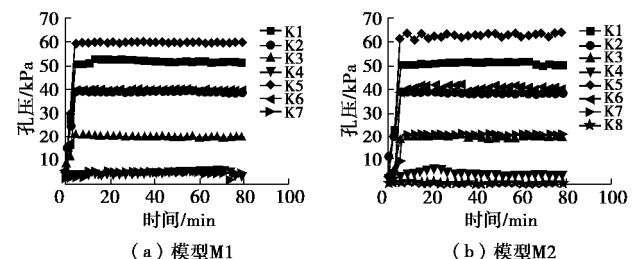


图 14 第二次通水后的孔压图

Fig. 14 Pore pressures after second wetting

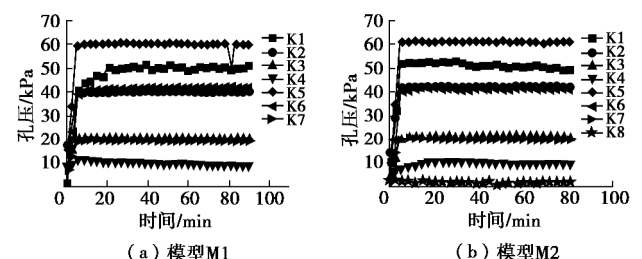


图 15 最后一次通水后的孔压图

Fig. 15 Pore pressures after final wetting

3.4 饱和区变化

图 16~18 是试验得到的 M1 和 M2 模型经过第一、第二次干湿循环及最终干湿循环 (模型 M1 为 5 次循环, 模型 M2 为 4 次循环) 后的边坡内土体饱和度的变化, 其中最终的饱和度为拆模后取样实测, 第一、第二次的饱和度是根据试验中孔压传感器稳定阶段时的平均值反算而得 (即通过测量值与相应位置的静水压力值比较来判断该区域是否达到饱和)。对于青色土模型 M1, 从图中可以看出, 首次通水时渗透区可到达坡面垂直下方 20 mm 处; 经过第一次干湿循环后在第二次通水试验结束时渗透区范围已达到表面下方 49 mm 处。此后水分入渗深度随干湿循环次数逐步扩张, 入渗作用逐渐增强, 最终饱和区纵向深度达 70 mm。从饱和区的变化可以推断, 经过每次干湿循环后, 边坡裂

缝不断扩张, 渠水不断入渗, 饱和区逐渐扩大。

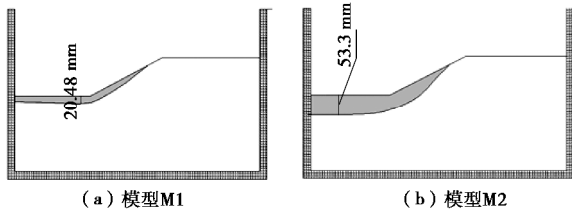


图 16 第一次通水后的饱和区示意图

Fig. 16 Sketch of saturated zone after first wetting

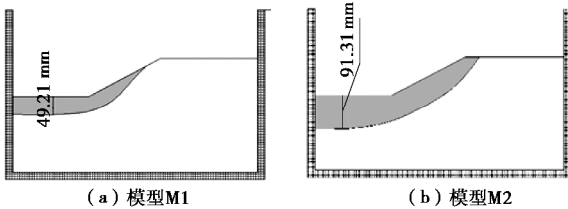


图 17 第二次通水后的饱和区示意图

Fig. 17 Sketch of saturated zone after second wetting

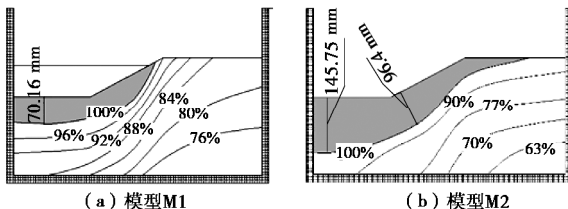


图 18 最后一次通水后的饱和区示意图

Fig. 18 Sketch of saturated zone after final wetting

对于黄色土模型 M2, 其入渗速率明显高与模型 M1, 最终饱和区也明显比模型 M1 大, 说明膨胀性越大, 边坡裂缝扩张越严重, 渠水入渗越明显。

4 结 论

通过 2 组膨胀土渠道干湿循环离心模型试验, 研究了渠道边坡裂隙演化规律及变形情况, 探讨了渠道边坡中的孔隙水压力和饱和区变化, 得出以下 3 点结论。

(1) 随着干湿循环次数的增加, 膨胀土渠坡裂隙不断扩张, 膨胀性越强, 裂隙发育程度越高, 经过多次循环后造成膨胀土边坡的破坏。

(2) 从变形模式来看, 渠道水位升降造成的干湿循环作用下渠坡破坏模式有别于传统的牵引式滑坡, 其破坏均始于坡面水位线附近的裂隙发育造成的崩解剥落滑塌, 而非由坡底向上逐级牵引破坏。

(3) 随着干湿循环次数的增加, 渠水的入渗越来越强, 饱和区也越来越大。膨胀性越强, 入渗越明显, 相应的饱和区也越大。

参考文献:

- [1] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(2): 143 - 157.
- [2] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(2): 151 - 158.

(ZHAN Liang-tong, NG C W W, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(2): 151 - 158. (in Chinese))

- [3] DAI Z, CHEN S, LI J. The failure characteristics and evolution mechanism of the expansive soil trench slope[C]// 2nd Pan-American Conference on Unsaturated Soils. New York, 2017.
- [4] CHENG Z L, DING J, RAO X, et al. Physical model tests of expansive soil slope[C]// *Geo-Congress*. San Diego, 2013: 731 - 740.
- [5] GRECO R, GUIDA A, DAMIANO E, et al. Soil water content and suction monitoring in model slopes for shallow flowslides early warning applications[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts*, 2010, **35**(3/4/5): 127 - 136.
- [6] 陈生水, 郑澄锋, 王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(6): 795 - 799. (CHEN Sheng-shui, ZHENG Cheng-feng, WANG Guo-li. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(6): 795 - 799. (in Chinese))
- [7] 王国利, 陈生水, 徐光明. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J]. *水利水运工程学报*, 2005(4): 6 - 10. (WANG Guo-li, CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming. Centrifuge model test on stability of expansive soil slope under alternation between drying and wetting[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2005(4): 6 - 10. (in Chinese))
- [8] 饶锡保, 陈 云, 曾 玲. 膨胀土渠道边坡稳定性离心模型试验及有限元分析[J]. *长江科学院院报*, 2002, **19**(增刊 1): 105 - 107. (RAO Xi-bao, CHEN Yun, ZENG Ling. Centrifugal model test and FEM study on slope stability of expansive soil channel of Water Transfer Project from South to North[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002, **19**(S1): 105 - 107. (in Chinese))
- [9] 徐光明, 王国利, 顾行文, 等. 雨水入渗与膨胀性边坡稳定性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(2): 270 - 273. (XU Guang-ming, WANG Guo-li, GU Xing-wen, et al. Centrifuge modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(2): 270 - 273. (in Chinese))
- [10] 程永辉, 程展林, 张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 1): 416 - 421. (CHENG Yong-hui, CHENG Zhan-lin, ZHANG Yuan-bin. Centrifugal model tests on expansive soil slope under rainfall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S1): 416 - 421. (in Chinese))