

## 季节性供水渠道边坡稳定性研究

朱锐, 黄英豪, 张晨, 郭万里, 陈皓

### Research on the slope stability of seasonally running canals

ZHU Rui, HUANG Yinghao, ZHANG Chen, GUO Wanli, CHEN Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20200302002>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于正交设计的膨胀土冻融循环试验研究

Experimental studies on freeze-thaw cycles of expansive soil based on orthogonal design

水利水电工程学报. 2017(2): 51 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.007>

#### 锚索应力增量法评价边坡稳定性

Evaluation of stability of toppling slope by increment method of anchoring cable stress

水利水电工程学报. 2019(2): 8 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.002>

#### 干湿循环作用下滑带土孔隙结构与基质吸力响应规律研究

Response laws of pore structure and matrix suction of slip zone soils under action of wetting-drying cycles

水利水电工程学报. 2018(3): 95 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.013>

#### 复杂双面边坡整体稳定性分析

Stability analysis of complex double-sided slope

水利水电工程学报. 2020(6): 72 <https://doi.org/10.12170/20190730001>

#### 降雨入渗边坡非饱和渗流过程及稳定性变化研究

Study on slope stability weakening process along with infiltration by rainfall

水利水电工程学报. 2019(3): 95 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.012>

#### 基于组合赋权模糊云理论的高边坡稳定性评价

Stability evaluation method for high slope based on fuzzy cloud theory combined with weights

水利水电工程学报. 2017(1): 10 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.002>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20200302002

朱锐, 黄英豪, 张晨, 等. 季节性供水渠道边坡稳定性研究 [J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 124-132. (ZHU Rui, HUANG Yinghao, ZHANG Chen, et al. Research on the slope stability of seasonally running canals[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1): 124-132. (in Chinese))

# 季节性供水渠道边坡稳定性研究

朱锐<sup>1,2</sup>, 黄英豪<sup>1</sup>, 张晨<sup>1</sup>, 郭万里<sup>1</sup>, 陈皓<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

**摘要:** 由于渠道季节性通、停水引起的干湿循环过程显著降低了渠基膨胀土的强度, 进而影响膨胀土渠道的稳定性。以北疆典型膨胀土渠道为例, 通过直接剪切试验对不同干湿循环次数下渠基膨胀土的力学特性和表面裂隙发育特征进行研究, 在此基础上对水位骤降期间渠道边坡的稳定性进行了数值计算。结果表明: 随着干湿循环次数的增加, 试样表面的裂缝发育不断加剧, 并在一定循环次数后逐渐趋于稳定; 试样的黏聚力发生较为显著的衰减, 而内摩擦角值则呈小幅度波动式衰减的趋势。在 5 次干湿循环后, 试样的黏聚力和内摩擦角分别降低了 36.5%~48.2% 和 10.8%~26.1%。此外, 随着运行年份(干湿循环次数)的增加, 渠道边坡稳定性呈逐年下降趋势; 排水时间对于渠道边坡的稳定性同样影响显著, 排水时间越长, 渠道边坡稳定性越高。建议该膨胀土渠道边坡排水时间不少于 12 d, 诊断、维修间隔不长于 5 年。研究成果对北疆供水工程建设与维护具有一定参考价值。

**关键词:** 干湿循环; 膨胀土; 裂隙; 强度指标; 边坡稳定性

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)01-0124-09

输水渠道是我国长距离调水工程的主要建筑物, 部分渠道受现场复杂环境约束, 为季节性供水。以北疆典型膨胀土渠道为例, 每年春季通水, 秋季停水, 该渠道 2015—2016 年通水期约 143 d (看作是湿润过程), 停水期约 222 d (看作是干燥过程), 渠道每年经历往复的干湿过程, 造成了膨胀土渠道的损毁异常严重<sup>[1]</sup>。目前, 对于干湿循环作用下膨胀土的基本特性和膨胀土边坡的稳定性问题已进行了大量研究。唐朝生等<sup>[2-3]</sup>对土体在干湿循环作用下裂隙的产生和发展规律进行了详细阐述和定量分析, 提出了量度指标体系; 吕海波等<sup>[4-5]</sup>对干湿循环作用下膨胀土的孔隙分布、裂隙拓展、强度特性进行了一系列研究, 认为干湿循环会对膨胀土体颗粒间的连接作用产生永久性破坏, 从而降低土体抗剪强度; 陈生水等<sup>[6-7]</sup>通过离心模型试验对膨胀土边坡在干湿循环等作用下的稳定性开展了研究, 认为干湿循环过程是膨胀土边坡破坏的根本原因。

此外, 膨胀土渠道内经历循环往复的水位升降过程, 基于多年来的现场实际观测可知, 北疆膨胀土渠道边坡在水位骤降期间常发生失稳破坏。水位骤降期间边坡的稳定性一直以来都是研究热点和工程难题, 诸多学者对此进行了探索。时铁城等<sup>[8-9]</sup>探讨了库水位骤降对于坝坡稳定性的影响, 认为库水位的骤降会导致坝坡安全系数的降低, 且排水速度越快, 坝坡安全系数越低。贾官伟等<sup>[10-11]</sup>分别通过离心模型试验探讨了水位变化对土质边坡稳定性的影响, 认为边坡内水位的下降速度显著滞后于边坡外水位, 由此产生指向边坡外的渗流, 是造成松散土质边坡发生多重浅层牵引式滑坡的重要原因。上述研究揭示了水位变化诱发坝

收稿日期: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405100); 国家自然科学基金资助项目(51709185, 51879166, 51909170); 中央级公益性科研院所基金基本科研业务费项目(Y319010); 中国博士后科学基金资助项目(2018M640500)

作者简介: 朱锐(1992—), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 主要从事环境岩土方面研究。E-mail: yzzhurui@163.com  
通信作者: 陈皓(E-mail: chen hao4912@163.com)

坡、河堤、松散土质边坡等发生失稳的原因,但针对水位骤降期间渠道边坡稳定性的研究则鲜见报道。

鉴于此,以北疆典型膨胀土渠道为研究对象,通过直剪试验对渠基膨胀土的抗剪强度进行了研究,得到渠基膨胀土在不同干湿(WD)循环次数下的抗剪强度指标并捕捉其裂隙发育特征,进而展开定量分析。在此基础上,通过数值软件计算渠道边坡在水位骤降后的安全系数,探讨不同干湿循环次数以及不同排水速率对于渠道边坡稳定性的影响。研究结果可为北疆膨胀土渠道的建设及维护提供一定的参考。

## 1 直剪试验材料与方

试验土料取自北疆供水工程现场,所取土料为中等胀缩等级的青色膨胀土,具有区域代表性。通过液塑限联合测定仪等设备进行了一系列试验,测得土体液塑限分别为 61.3% 和 20.1%,自由膨胀率为 74%,最大干密度为  $1.69 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为 18.8%,颗分曲线如图 1 所示。

由于现场渠道浅层基土经过多年换填施工,掺有一定的砂砾石杂质,为更好地探究渠基土强度衰减机理,拟采用重塑试样进行直剪试验研究。此外,由于渠道季节性运行的特点,浅层渠基土经历往复的干湿过程,本质上是土体含水率以恒定幅度变化的过程。土体湿化过程对应饱和状态,可用抽气饱和法模拟;土体干燥过程对应非饱和状态,可通过自然风干过程来模拟。试验共配制 12 组试样,每组分别配制了 4 个平行样。试验中设计了统一的干湿循环幅度,即含水率为 8%~23%,其中,8% 为自然风干含水率,23% 为饱和含水率,干密度为  $1.5 \text{ g/cm}^3$  的试样记为 S1,干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的试样记为 S2,干湿循环次数均为 5 次。试验过程如下:

(1)制样。将土料碾碎过 2 mm 筛后,配制初始含水率为 18.8% 的土样,将配制好的土样用塑料袋密封静置 24 h,以便含水率均匀,再制备高 20 mm、直径 61.8 mm 的环刀试样。

(2)干湿循环。制样完成后将试样进行抽气饱和,完成后置于实验室中自然风干(控制实验室环境温度和湿度分别为  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$  和  $(50 \pm 5)\%$ <sup>[12]</sup>),于每天同一时刻记录试样的质量来计算其含水率,当相邻的两天试样质量变化不超过 0.1 g 时认为风干过程已完成,此时试样含水率约为 8%,误差小于  $\pm 0.3\%$ 。风干过程完成后通过数码相机对环刀试样进行图像拍摄开展裂隙发育特征研究,且每次拍摄均在同一高度。至此视为完成一次干湿循环试验。

(3)直剪试验。将达到目标干湿循环次数的试样进行抽气饱和,随后立刻放入应变控制式直剪仪中,每组试样分别在不同垂直压力(100、200、300、400 kPa)下进行快剪试验,剪切速率控制为 1.2 mm/min,根据土工试验规程<sup>[13]</sup>,控制最大剪切变形为 4 mm。剩余的试样则继续进行如上步骤的干湿循环。如此循环往复,直到所有试样全部完成直剪试验为止。

另外,为了对裂隙进行定量分析,需对拍摄出的原始照片进行处理,将处理过程分为 3 个步骤:(1)原始图像转换为灰度图像;(2)灰度图像经过阈值分割转化为二值图像;(3)二值图像去噪后得到仅包含裂隙的清晰图像,典型试样如图 2 所示。

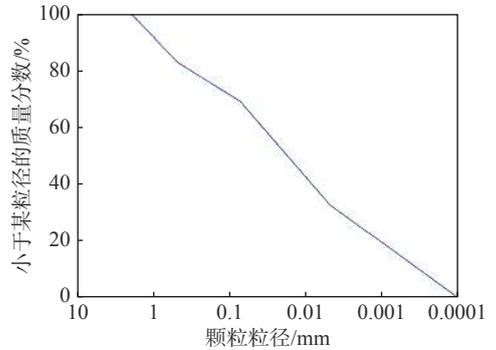


图 1 颗分曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve

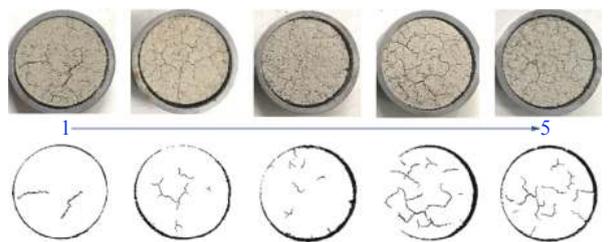


图 2 试样实拍

Fig. 2 Photograph of specimens

## 2 直剪试验结果

### 2.1 裂隙演化特征

为获得试样表面裂隙图像构成要素,选取表面裂隙率和裂隙网络分形维数表征膨胀土试样的裂隙演化过程<sup>[14]</sup>。其中,表面裂隙率为裂隙面积与总面积之比,从总体上反映了土体的开裂程度。基于土体裂隙网络具有统计意义上自相似结构的特点,选取盒分形维数法用于裂隙网络分析,描述试样表面裂隙的分布情况和复杂度<sup>[15-16]</sup>。

图3为裂隙演化特征随干湿循环次数的变化曲线。从图3(a)可以看出,在第1次干湿循环后,试样S1、S2的表面裂隙率均达到3.5%左右,随着干湿循环次数的增加,试样S1、S2分别稳定在约7.1%和7.3%。可以认为,随着干湿循环次数的增加,试样S1、S2的表面裂隙率均由快速增长转变为趋于稳定。从图3(b)可以看出,随着干湿循环次数的增加,试样的裂隙网络分形维数均呈现逐步递增的趋势。当土体经历5次干湿循环后,试样S1、S2的裂隙网络分形维数分别为1.28、1.43,这表明干湿循环作用显著促进了试样表面裂隙的发育。

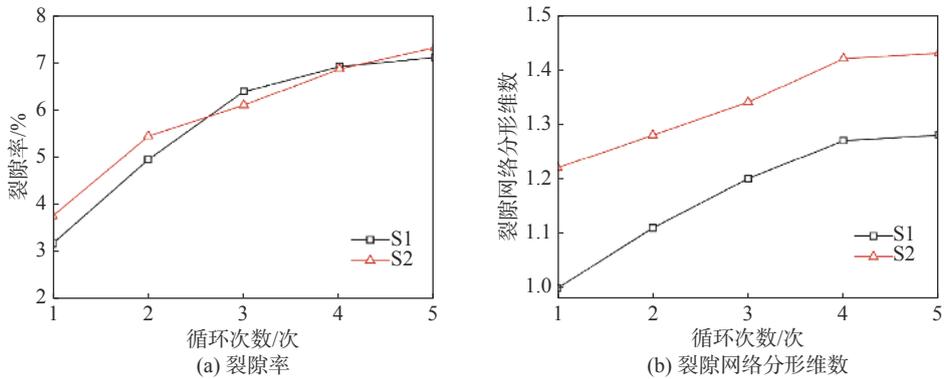


图3 裂隙演化特征随干湿循环次数的变化曲线

Fig. 3 Curve of crack characteristics variation with wetting-drying cycles

### 2.2 抗剪强度指标

图4(a)和4(b)分别为试样S1、S2的抗剪强度值随法向应力的变化曲线。可以看出,随着法向应力的增长,试样的抗剪强度值均显著增大。在干湿循环过程中,土体结构性破坏,试样的抗剪强度值均随之衰减。当干湿循环次数达到4次后,抗剪强度值衰减幅度逐渐减小,且趋于稳定。相较于试样S1的抗剪强度值,试样S2明显较高,可以认为干密度对土体的抗剪强度值有着显著的影响。

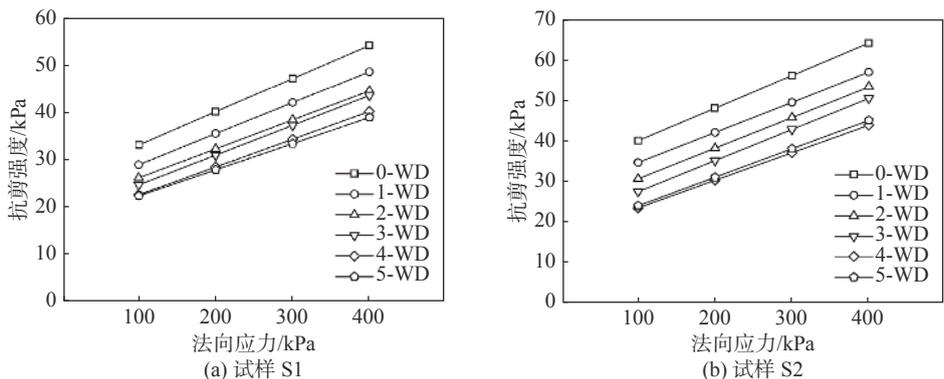


图4 抗剪强度随法向应力的变化曲线

Fig. 4 Curve of shear strength variation with normal stress

图 5 为试样黏聚力和内摩擦角随干湿循环次数增长的变化曲线。从图 5(a) 可以看出: 随着干湿循环次数的增加, 试样 S1、S2 的黏聚力均显著衰减; 在前 3 次干湿循环过程中, 试样黏聚力的衰减幅度较大, 且干密度越大黏聚力衰减幅度越大; 随着干湿循环次数的增加, 试样黏聚力逐渐趋于稳定。从图 5(b) 可以看出, 随着干湿循环次数的增加, 试样 S1、S2 的内摩擦角均呈小幅度波动式衰减的趋势, 试样 S2 的内摩擦角始终略大于试样 S1。

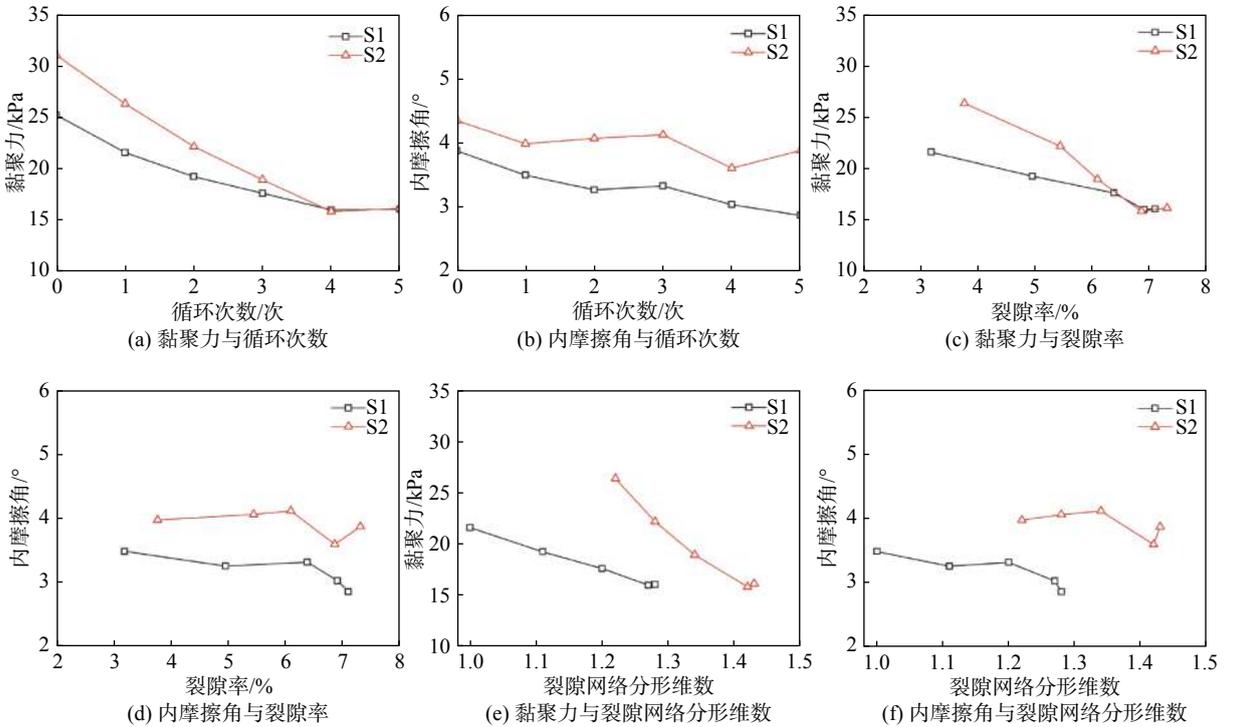


图 5 抗剪强度指标定量分析

Fig. 5 Quantitative analysis results of shear strength parameters

为探索干湿循环作用下膨胀土的强度衰减机理, 必须建立起抗剪强度指标与裂隙特征之间的关系。图 5(c)~(f) 分别为黏聚力、内摩擦角与裂隙率、分形维数之间的关系曲线。可以看出, 随着表面裂隙率和裂隙网络分形维数的增加, 试样 S1、S2 的黏聚力均产生显著的衰减, 而其内摩擦角均呈波动式衰减的趋势。这表明干湿循环过程加剧了试样土体裂隙的发育, 土体由于裂隙的不断拓展被分割成大小不一的块体, 导致试样土体的结构性不断被破坏, 膨胀土体颗粒间的胶结能力也由于裂隙的存在而削弱, 进而引发黏聚力的下降和内摩擦角的小幅衰减。对于不同干密度的试样而言, 其土体干密度越大, 黏聚力和内摩擦角的衰减速率越快、衰减幅度越大。分析结果均与上文一致, 可以认为干湿循环作用造成的土体裂隙发育显著削弱了渠基膨胀土的抗剪强度指标。

### 3 数值模型的建立

数值模型采用 SEEP/W 模块计算渠道边坡在不同工况下的暂态渗流场, 在此基础上, 将暂态孔隙水压力分布用于渠道边坡的极限平衡分析中(SLOPE/W 模块), 从而得到不同计算工况下的渠道边坡安全系数, 并基于此评估该膨胀土渠道边坡的稳定性状态<sup>[17]</sup>。

### 3.1 计算模型与边界

计算模型基于北疆现场渠道断面尺寸进行设定,考虑到渠道剖面的对称性,取渠道剖面的一半进行模拟,具体尺寸如图6所示。另外,所模拟渠道地处干旱地区,地下水位较深,建模时不予考虑,仅考虑渠道通、停水(水位升降)过程对渠道边坡稳定性的影响,通过在  $G-F-E$  上设置随时间变化的水压力边界函数模拟现场渠道内水位上升-恒定-下降的过程,即由于水分入渗造成的渠道边坡湿润过程。参考文献 [18] 的边界条件设置,  $A-B$ 、 $B-C$ 、 $A-G$  设为透水边界,  $C-D$ 、 $D-E$  均设为不透水边界。

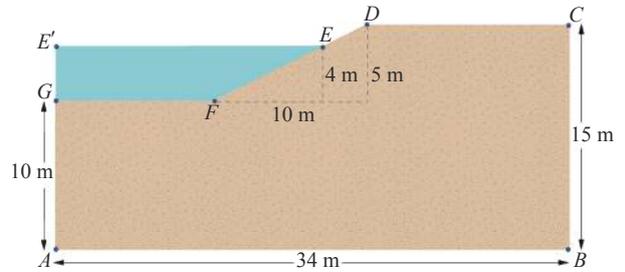


图6 模型尺寸

Fig. 6 Model size

此外,鉴于 Morgenstern-Price 法能够较好地揭示土条间的相互作用力,未作简化,故数值计算采用 Morgenstern-Price 法进行渠道边坡的稳定性分析。

### 3.2 模型参数

渠基膨胀土的力学参数由直剪试验确定,如图5所示。为最大程度探究渠道劣化过程中的稳定性变化,数值模拟过程中选取强度衰减更为明显的参数进行计算,即试样 S1 的抗剪强度参数。此外,基于陈皓等 [19-20] 的研究可知,在不同干湿循环过程中,渠水入渗深度不一,图7为离心模型试验所得土体劣化区域随干湿循环次数的变化范围,将不同干湿循环次数后的渠基膨胀土强度指标赋予相应劣化区域,以探究渠道边坡稳定性变化过程。

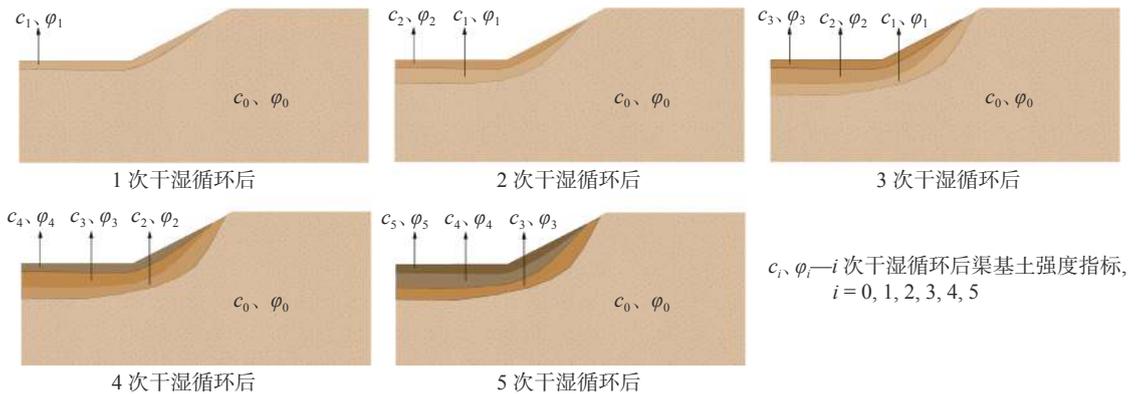


图7 基于干湿劣化区域<sup>[19-20]</sup>提出的强度折减法

Fig. 7 Strength reduction method based on wetting-drying areas<sup>[19-20]</sup>

土水特征曲线基于 Fredlund-Xing 模型进行拟合,计算参数参考文献 [21] 中的研究。渠基土的渗透系数为各向同性,均不考虑干湿循环作用的影响,饱和渠基土的渗透系数为 0.691 2 m/d,非饱和渠基土的渗透系数基于 SWCC 曲线自动估算。

### 3.3 计算工况

选取排水速率、干湿循环次数(运行年数)作为计算变量。其中,北疆现场渠道停水历时一般为 12~16 d 左右,即水位下降速率约为 0.33~0.25 m/d,故数值计算过程中分别设置排水速率及时间为 0.50 m/d (8 d)、0.33 m/d (12 d)、0.25 m/d (16 d)、0.20 m/d (20 d),以探讨排水时间对于膨胀土渠道边坡稳定性的影响,如图8所示。将渠道每年的通停水过程视为一次完整的干湿循环,基于直剪试验结果采用强度折减法(图7)进行计算,探讨干湿循环次数(渠道运行年数)对于膨胀土渠道边坡稳定性的影响。

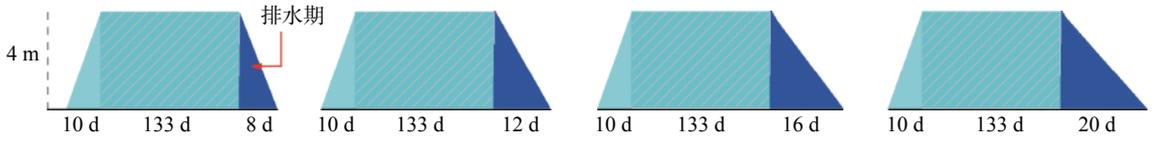


图 8 水位下降示意

Fig. 8 Diagram of water-level falling time

### 4 数值计算结果

在土质边坡水位骤降过程中, 边坡安全系数随水位降低而逐渐减小, 基于此, 选取渠水位下降至 0 m 时的渠道边坡安全系数进行对比分析。此外, 根据规范<sup>[22]</sup>, 以边坡安全系数  $F_{st}$  为评价指标, 边坡的稳定性状态可分为以下 4 种: 稳定、基本稳定、欠稳定和不稳定, 考虑到该膨胀土渠道边坡是永久边坡, 且属于重大工程, 故  $F_{st}$  取 1.35。

图 9 和 10 分别为渠道边坡安全系数随干湿循环次数、排水时间的变化曲线, 其中蓝色虚线表示安全系数为 1.35, 红色虚线表示安全系数为 1.05。从图 9 可以看出, 在不同排水工况下, 渠道边坡安全系数均随干湿循环次数的增长而降低。当排水时间为 8 d 时, 渠道边坡安全系数在 1 次干湿循环过后即低于 1.35, 当经历 5 次干湿循环作用后, 其安全系数已略低于 1.05; 当排水时间为 12 和 16 d 时, 渠道边坡安全系数分别在 2 次和 3 次干湿循环后接近于 1.35, 而当 5 次干湿循环作用后, 其安全系数分别为 1.10 和 1.15; 当排水时间为 20 d 时, 渠道边坡安全系数在 3 次干湿循环后略低于 1.35, 当 5 次干湿循环作用后, 其安全系数为 1.19。另外, 从图 10 可以看出, 在不同干湿循环次数下, 渠道边坡安全系数均随着排水时间的增长而升高。当干湿循环次数为 0 次和 1 次时, 渠道边坡安全系数均始终高于 1.35; 当干湿循环次数为 2 次和 3 次时, 渠道边坡安全系数分别在排水时间为 8 d 和 8、12 d 时低于 1.35, 但均显著高于 1.05; 当干湿循环次数为 4 次和 5 次时, 渠道边坡安全系数均始终低于 1.35, 其中当排水时间为 8 d、干湿循环次数为 5 次时, 渠道边坡安全系数已略低于 1.05, 但仍高于 1.00。

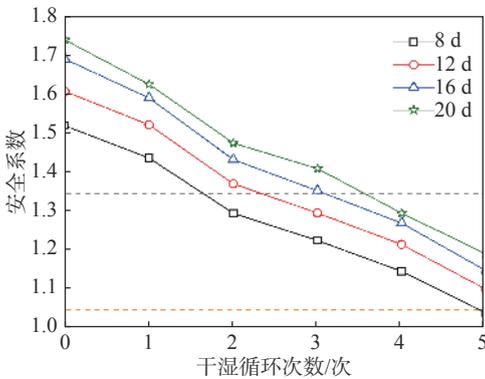


图 9 渠道边坡安全系数随干湿循环次数变化曲线

Fig. 9 Curve of slope safety factors variation with wetting-drying cycles

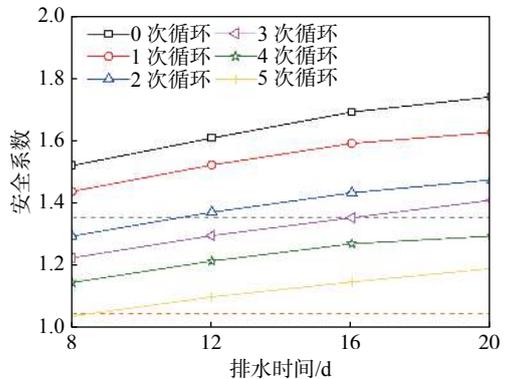


图 10 渠道边坡安全系数随排水时间变化曲线

Fig. 10 Curve of slope safety factors variation with falling time

前已述及, 渠道每年的通、停水过程视为一次干湿循环, 可以认为干湿循环次数即为渠道运行年数, 故将渠道边坡在不同计算工况下的稳定性状态进行划分, 如表 1 所示。可以看出, 随着运行年数(干湿循环次数)的增加, 渠道边坡逐渐从稳定状态变为基本稳定状态和欠稳定状态, 稳定性呈逐年下降趋势。因此, 在计算膨胀土渠道边坡稳定性时, 需考虑渠基膨胀土由于干湿循环作用产生的强度衰减。此外, 从表 1 还可

看出,排水时间对于渠道边坡的稳定性影响显著,排水时间越长,渠道边坡稳定性越高。当排水时间为8和12 d时,渠道边坡分别在运行第2年和第3年由稳定状态变为基本稳定状态,其中当排水时间为8 d时渠道边坡在运行第5年由基本稳定状态变为欠稳定状态;当排水时间为16和20 d时,渠道边坡在运行第4年均由稳定状态变为基本稳定状态。

表1 膨胀土渠坡安全系数及稳定性状态  
Tab. 1 Safety factor and stability state of expansive soil canal slope

排水时间/d	未运行渠道	运行第1年	运行第2年	运行第3年	运行第4年	运行第5年
8	1.52(稳定)	1.44(稳定)	1.29(基本稳定)	1.22(基本稳定)	1.15(基本稳定)	1.04(欠稳定)
12	1.61(稳定)	1.52(稳定)	1.37(稳定)	1.30(基本稳定)	1.22(基本稳定)	1.10(基本稳定)
16	1.69(稳定)	1.59(稳定)	1.43(稳定)	1.35(稳定)	1.27(基本稳定)	1.15(基本稳定)
20	1.74(稳定)	1.63(稳定)	1.48(稳定)	1.41(稳定)	1.29(基本稳定)	1.19(基本稳定)

为保障该膨胀土渠道的安全、稳定的运行,渠道边坡需要保持稳定状态或基本稳定状态,基于此,建议该膨胀土渠道边坡排水时间不少于12 d,诊断、维修间隔不长于5年。

## 5 结 语

(1)渠基膨胀土试样表面的裂隙发育随着干湿循环次数的增加而不断加剧,并在一定干湿循环次数后逐渐达到稳定,干密度为1.5和1.6 g/cm<sup>3</sup>试样的最终裂隙率分别为7.1%和7.31%,裂隙网络分形维数分别为1.28和1.43。基于此,渠基膨胀土的强度显著衰减,在5次干湿循环后,干密度为1.5和1.6 g/cm<sup>3</sup>试样的黏聚力分别降低了36.5%和26.1%,内摩擦角分别降低了48.2%和10.8%。

(2)随着运行年数(干湿循环次数)的增加,渠道边坡逐渐从稳定状态变为基本稳定状态和欠稳定状态,稳定性呈逐年下降趋势。基于直剪试验和数值计算结果,建议该膨胀土渠道边坡的诊断、维修间隔不长于5年。

(3)水位骤降期的排水时间对于渠道边坡的稳定性影响显著,排水时间越长,渠道边坡稳定性越高。基于数值计算结果,建议该膨胀土渠道边坡排水时间不少于12 d。

## 参 考 文 献:

- [1] 蔡正银,黄英豪. 咸寒区渠道冻害评估与处治技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (CAI Zhengyin, HUANG Yinghao. Evaluation and treatment technology of canal frost damage in saline and cold regions[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [2] 唐朝生,王德银,施斌,等. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2298-2305. (TANG Chaosheng, WANG Deyin, SHI Bin, et al. Quantitative analysis of soil desiccation crack network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2298-2305. (in Chinese))
- [3] RAO S M, REDDY B V V, MUTTHARAM M. The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils[J]. Engineering Geology, 2001, 60(1/4): 223-233.
- [4] 吕海波,曾召田,赵艳林,等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802. (LÜ Haibo, ZENG Zhaotian, ZHAO Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797-3802. (in Chinese))
- [5] ATAHU M K, SAATHOFF F, GEBISSA A. Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(2): 337-348.

- [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 Shengshui, ZHENG Chengfeng, WANG Guoli. 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 Guoli, CHEN Shengshui, XU Guangming. 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] 时铁城, 阮建飞, 张晓. 库水位骤降情况下土石坝坝坡稳定分析[J]. *人民黄河*, 2014, 36(2): 93-94, 97. (SHI Tiecheng, RUAN Jianfei, ZHANG Xiao. Slope stability analysis of earth dam during rapid drawdown of reservoir water level[J]. *Yellow River*, 2014, 36(2): 93-94, 97. (in Chinese))
- [9] 岑威钧, 王建, 王帅, 等. 水库骤降期偶遇地震作用时高土石坝抗震安全性分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊2): 308-313. (CEN Weijun, WANG Jian, WANG Shuai, et al. Seismic safety of high earth-rock dams during earthquakes coupling with rapid drawdown of reservoirs[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Suppl2): 308-313. (in Chinese))
- [10] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(9): 1798-1803. (JIA Guanwei, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1798-1803. (in Chinese))
- [11] 杨春宝, 朱斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(7): 1261-1271. (YANG Chunbao, ZHU Bin, KONG Linggang, et al. Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(7): 1261-1271. (in Chinese))
- [12] TANG C S, CUI Y J, TANG A M, et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3/4): 261-266.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [14] 吴珺华, 杨松. 干湿循环下膨胀土裂隙发育与导电特性[J]. *水利水运工程学报*, 2016(1): 58-62. (WU Junhua, YANG Song. Crack growth and electro-conductive properties of expansive soil under drying-wetting cycles[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(1): 58-62. (in Chinese))
- [15] PEITGEN H O, JÜRGENS H, SAUPE D. Chaos and fractals: new frontiers of science[M]. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [16] 易顺民, 黎志恒, 张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(3): 38-42. (YI Shunmin, LI Zhiheng, ZHANG Yanzhong. The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(3): 38-42. (in Chinese))
- [17] 张桂荣, 程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊1): 476-482. (ZHANG Guirong, CHENG Wei. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water lever fluctuations and rainfall infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Suppl1): 476-482. (in Chinese))
- [18] 郝忠, 周峰, 付操, 等. 基于正交实验的库水位骤降边坡渗透稳定敏感性分析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(5): 29-35. (HAO Zhong, ZHOU Feng, FU Cao, et al. Sensitivity analysis of seepage stability of slope during sudden drop of reservoir water level based on orthogonal experiment[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2019, 41(5): 29-35. (in Chinese))
- [19] 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. (CAI Zhengyin, CHEN Hao, HUANG Yinghao, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(11): 1977-1982. (in Chinese))
- [20] 陈皓. 膨胀土渠道在干湿循环作用下的稳定性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2019. (CHEN Hao. Study on stability of canal slope of expansive soil under drying-wetting cycles[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2019. (in Chinese))
- [21] 朱洵. 湿干冻融耦合作用下膨胀土渠道破坏机制及稳定性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2019. (ZHU Xun. Failure mechanism and stability analysis for expansive soil channel under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[D].

Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2019. (in Chinese))

- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))

## Research on the slope stability of seasonally running canals

ZHU Rui<sup>1,2</sup>, HUANG Yinghao<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>1</sup>, GUO Wanli<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1,2</sup>

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** The wetting-drying process caused by seasonally running of canals can significantly reduce the strength of expansive soil below the canal structure, thereby affecting the stability of expansive soil canal. Taking the typical expansive soil canal in North Xinjiang as an example, the mechanical properties and the development characteristics of surface cracks of expansive soil below the canal structure were studied in the direct shear laboratory with wetting-drying cycles. On this basis, the numerical calculation of the canal slope stability during the water-level falling period was carried out. The results show that with the increase of wet-dry cycles, the cracks on the surface of the tested soil samples are growing and gradually stabilized after a certain number of cycles. The cohesion of the samples decreases significantly, while the internal friction angle decreases in a small fluctuating manner. After five wetting-drying cycles, the cohesion and internal friction angle decreased by 36.5%~48.2% and 26.1%~10.8%, respectively. Additionally, with the increase of running years (wetting-drying cycles), the canal slope stability decreased year by year. The drainage time also has a significant effect on the canal slope stability. The longer the drainage time is, the higher the canal slope stability is. It is suggested that the drainage time of the expansive soil canal slope would better be more than 12 days, and the interval between diagnosis and maintenance would better be no longer than 5 years. The research results have a certain reference value for the construction and maintenance of water supply projects in Xinjiang.

**Key words:** wetting-drying cycle; expansive soil; crack; strength parameters; slope stability