

DOI: 10.11779/CJGE2020S2009

# 北疆渠道膨胀土边坡破坏机制及加固措施

邓铭江<sup>1</sup>, 蔡正银<sup>2</sup>, 朱 涣<sup>2</sup>, 张 晨<sup>2</sup>

(1. 新疆额尔齐斯河流域开发建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 膨胀土渠道边坡稳定是北疆供水工程正常运行的前提。以北疆高寒区供水工程为例, 渠道膨胀土边坡在干湿交替、冻融循环作用下破坏明显, 主要表现为浅层膨胀土开裂造成坡面完整性的降低及其内部基土力学特性的劣化, 严重影响渠道膨胀土边坡的整体稳定性。以膨胀土渠道现场失稳断面实测资料为基础, 结合离心试验结果及复合材料中的界面理论, 对渠道膨胀土边坡的浅层破坏机制及加固措施进行研究。结果表明, 浅层膨胀土开裂是引起渠道浅层破坏的决定性因素, 且其具体破坏有别于传统的牵引式滑坡, 主要呈现出沿着渠坡浅层发生的膨胀土剥落破坏。此外, 膨胀土的持续失水过程造成了土颗粒间强黏结接触向及弱黏结接触的转化, 造成了膨胀土裂隙发育到一定深度后传播路径发生偏转, 裂隙贯穿浅层土体, 最终造成渠道膨胀土边坡发生浅层破坏。在此基础上, 提出在现场修坡完成需采取防护手段来降低浅层土体的开裂, 并建议在渠坡后缘出现张拉裂隙时及时采取抗滑支挡加固措施。

**关键词:** 供水渠道; 膨胀土边坡; 浅层裂隙; 破坏机制; 加固措施

中图分类号: TU196 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0050-06

**作者简介:** 邓铭江(1960—), 男, 博士, 中国工程院院士, 现任新疆科学技术协会副主席, 教授级高级工程师, 主要从事干旱区水资源研究与水利工程建设管理工作。E-mail: xjdmj@163.com。

## Failure mechanism and reinforcement measures of shallow slopes of expansive soils in Northern Xinjiang

DENG Ming-jiang<sup>1</sup>, CAI Zheng-yin<sup>2</sup>, ZHU Xun<sup>2</sup>, ZHANG Chen<sup>2</sup>

(1. Xinjiang Ertix River Basin Development Engineering Construction Management Bureau, Urumqi 830000, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The stability of canal slopes of expansive soils is the premise of normal operation of water supply projects in Northern Xinjiang. Taking the water supply project in the high and cold region of Northern Xinjiang as an example, the canal slopes at expansive soils are destroyed obviously under the action of alternate wet and dry, freeze-thaw cycle, which is mainly manifested as the reduction of slope integrity caused by the cracking of shallow expansive soils and the deterioration of internal mechanical properties of the basic soils, which seriously affects the overall stability of the canal slopes of expansive soils. Based on the field measured data of the failure section of expansive soil canals, combined with centrifugal test results and interface theory in composite materials, the shallow failure mechanism and reinforcement measures of canal slopes of expansive soil are studied. The results show that the cracking of shallow expansive soils is the decisive factor causing the failure of shallow canals, and the specific failure is different from that of the traditional traction landslides, which mainly exhibits the failure of spalling of shallow expansive soils along the canal slopes. In addition, the continuous water loss process of expansive soils results in the conversion of strong bond contact between soil particles to weak bond contact, and causes the propagation path deflection of expansive soil cracks after they develop to a certain depth, and the cracks penetrate into the shallow soils, finally causing shallow damage to the expansive soil slopes. On this basis, it is suggested that the protective measures should be taken to reduce the cracking of shallow soils after the slope repair, and the anti-sliding retaining reinforcement measures should also be taken in time when the tensile crack appears at the back edge of the canal slopes.

**Key words:** water supply canal; expansive soil slope; shallow crack; failure mechanism; retaining measure

## 0 引言

中国西北地区水资源时空分布不均, 局部地区缺水严重<sup>[1]</sup>, 为此国家修建了一批长距离输水渠道工程,

对缓解西北地区水资源供需矛盾起到了积极作用<sup>[2]</sup>。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405100)

收稿日期: 2020-08-07

但恶劣的气候条件及沿线复杂的地质条件共同作用对输水渠道的正常运行产生严重影响<sup>[3]</sup>。如全长 136.34 km 的北疆供水渠道总干渠段, 以沿线含膨胀土段的工程灾害最为严重, 主要表现为基土在干湿交替、冻融循环环境作用下的逐渐劣化, 造成渠道边坡失稳、滑坡及水胀等破坏, 严重影响了北疆输水渠道的安全运行。

大量工程实践表明, 由于膨胀土自身的特殊性质(裂隙性、胀缩性和超固结性), 造成膨胀土边坡破坏较一般黏性土边坡破坏, 具有明显的渐进性、浅层性、时间性和反复性等破坏特征。刘静德等<sup>[4]</sup>通过室内试验研究了膨胀土边坡的失稳模式, 阐述了浅层牵拉失稳破坏的形式, 同时强调了裂隙是影响边坡变形发展的关键因素。上述室内试验的内部应力与原型差异较大, 一般用做定性分析。而离心模型试验具有应力相等、时间缩尺等优势<sup>[5]</sup>, 是研究渠道边坡稳定较为理想的手段。陈生水等<sup>[6]</sup>对不同外部环境作用下膨胀土边坡的稳定性进行了研究, 发现外部作用引起的裂隙是造成膨胀土边坡失稳的根本原因, 并强调将强度及变形指标直接用于膨胀土边坡的变形和稳定分析是不合适的。

北疆渠道运行过程中膨胀土边坡的失稳, 本质上是由于土体水分的多少或形态的变化引起的工程问题。而渠道作为长距离输水的主要建筑物, 受水分的影响最为直接和长期。干湿循环会导致膨胀土渠道的滑坡破坏(大多为浅层), 而冻融循环会导致渠基土的冻胀融沉致使渠道结构破坏, 上述破坏已在通水近 20 a 的北疆供水工程总干渠得到广泛印证<sup>[3,7]</sup>。遗憾的是, 目前有关北疆渠道膨胀土边坡劣化的研究相对较少。鉴于此, 本文以北疆输水渠道现场失稳断面实测资料为基础, 结合离心试验结果, 对渠道膨胀土边坡的失稳过程及形成原因进行分析, 揭示渠道膨胀土边坡的破坏机理, 旨在为后续北疆输水渠道膨胀土边坡的安全运行提供基础。

## 1 现场断面失稳特征

### 1.1 现场断面地质及气候情况

失稳断面位于为北疆供水渠道总干渠挖方段, 渠段地势平坦, 地势东高西低(NW), 倾角为  $6^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。失稳断面一级马道高程约为 629.4 m, 设计开挖高程约为 623.8 m, 开挖深度约为 5.6 m, 过水断面坡比为 1:2(断面位于渠道左岸)。断面分布较厚的黄色膨胀土, 自由膨胀率为 0.9~1.1, 为中强膨胀土。在渠道开挖过程中发现裂隙面光滑呈油脂光泽并有擦痕, 小型褶皱和断裂发育完全。

渠道工程位于阿勒泰地区, 属温带大陆性气候, 冬季夜间最低气温达  $-40.3^{\circ}\text{C}$ , 夏季平均气温为  $20^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>。渠道采取季节性供水, 每年 4—9 月份通水, 其它时间停水。渠道每年的通水、停水以及沿线夏季高温、冬季严寒的气候特点共同作用对渠基膨胀土劣化明显。同时, 渠道穿越区域地下水位极深, 故在研究渠基土水分变化时可忽略地下水的影响。

### 1.2 断面失稳特征

断面在 10 月中旬发生失稳破坏, 此刻距渠道停水近 1 个月, 如图 1(a) 所示, 其中滑动区域整体呈不规则多边形分布, 纵长约 9.3 m, 宽为 15 m。滑动区域表面含水率极低, 裂隙发育程度较高, 呈明显的网状分布; 后缘裂隙位于渠顶马道附近(见图 1(c)), 高程为 629.4 m, 通过钢丝贯穿的方法大致确定裂隙深度约为 2 m, 这也北疆地区的气候影响深度基本一致<sup>[3]</sup>; 渠水位线以下浅层土体发生滑坡失稳并在坡脚位置形成堆积; 将部分滑动区域土体清除, 在其底部出现较明显的滑动面, 如图 1(b) 所示。需要注意的是, 与传统土质边坡的圆弧形滑动面不同<sup>[8]</sup>, 现场滑动面走向大致与原始坡面一致, 这也是膨胀土边坡浅层失稳的基本特征之一<sup>[9]</sup>。滑动区域前缘形态平缓, 剪出口明显, 基本沿水平方向向滑动区域内部延伸; 同时坡脚位置存在明显的积水现象。

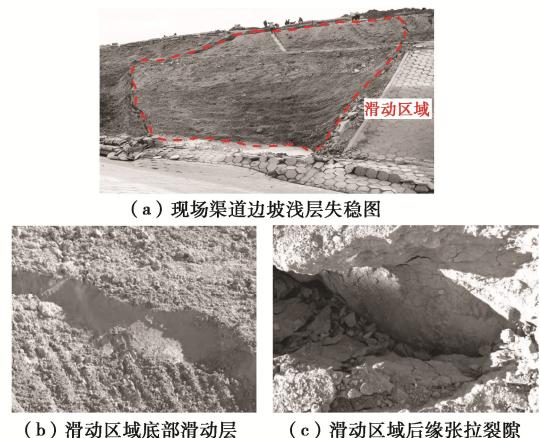


图 1 北疆渠道现场典型断面失稳破坏图

Fig. 1 Typical section of instability failure of canal in Northern Xinjiang

图 2 为断面失稳后的实测剖面。渠坡浅层土体较初始状态整体发生下沉, 沉降量约为 0.5 m。在滑动区域表面发现两处明显的张拉裂隙, 呈明显的 V 形分布, 开度约为 20 cm, 最大发育深度约为 1.2 m。在坡脚形成的堆积体高度约为 1 m。在实测过程中, 发现两条较明显的滑动面(潜在滑动面 1 和 2), 如图 2 所示, 其中潜在滑动面 1 位于 627.2~629 m 高程, 潜在滑动面 2 位于 625.6~629 m 高程; 两处滑动面后缘相

交，且后缘张拉裂隙均可视为由于滑动区域整体下沉导致张拉裂隙向边坡深部的自然延伸；同时在626 m高程附近，潜在滑动面2的滑线向水平方向发生发生弯折。

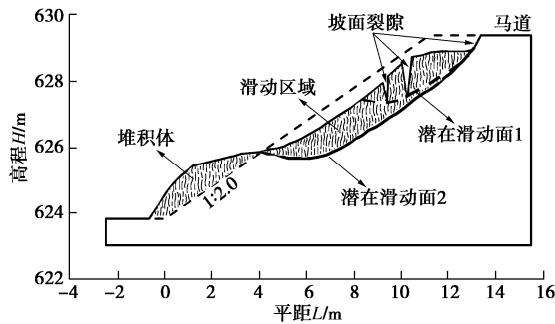


图2 北疆渠道失稳破坏断面实测剖面图

Fig. 2 Typical section of instability failure of canal in Northern Xinjiang

## 2 断面破坏过程

### 2.1 离心模型试验

考虑到上节对渠道断面破坏特征的描述均为最终状态，而膨胀土边坡的破坏具有长期性和渐进性。这里采用土工离心模型试验对膨胀土边坡的破坏过程进行模拟。

试验在南京水利科学研究院60 g·t离心机上进行，试验用土为取自渠道现场的黄色中等膨胀土，具体物理性质及矿物组成可参考文献[10, 11]。试验选用的模型箱尺寸为680 mm×350 mm×425 mm（长×宽×高），结合现场渠道实际情况最终确定试验的模型比尺为N=50。考虑渠道剖面对称性，以渠道中轴线为界模型渠道断面的尺寸为：渠高100 mm，渠底宽度130 mm，渠坡坡比1:2，渠肩宽度270 mm，渠底土层厚度为200 mm。采用先分层击实，后按模型设计进行切削的方法制作模型渠道边坡，模型目标干密度为1.48 g/cm<sup>3</sup>，对应压实度为95%。

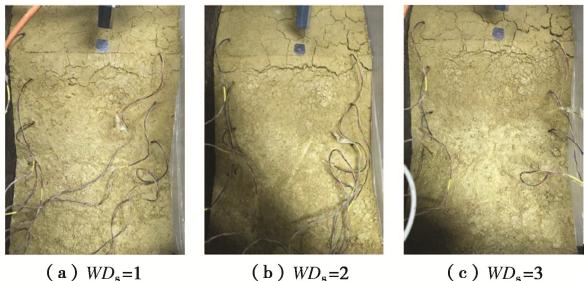
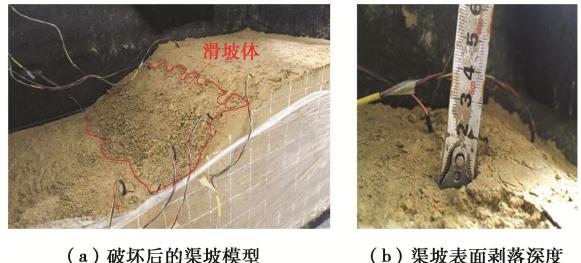


图3 离心模型试验结果

Fig. 3 Results of centrifugal model tests

在试验过程中通过放水—开机—停机—排水的方法模拟渠道内的通—停水过程。离心试验的通水湿润、

脱水干燥时间分别设置为80 min和124 min，分别对应原型渠道通水124 d及停水216 d，离心试验进行3次循环，具体试验过程可参考文献[14]。图3为不同干湿循环对应的膨胀土渠道边坡表面图像。可以看出，渠坡模型经历3次干湿循环后发生破坏，整个边坡面剥蚀严重。尤其是沿水位线附近，先期产生的横向裂缝已经发育成为形成一道明显的剥蚀沟，深度在6~8 mm之间（见图4（b）），对应原型30~40 cm，且剥落滑塌的土块堆积于坡体中下部和底部，坡顶未出现较大位移沉降；此外，坡面产生显著剥蚀滑动带，并伴随显著的崩解剥落。



(a) 破坏后的渠坡模型 (b) 渠坡表面剥落深度

图4 膨胀土渠道边坡离心试验破坏特征

Fig. 4 Failure characteristics of centrifugal tests on canal slope expansive soils

### 2.2 断面破坏过程

渠道膨胀土边坡的失稳与其内部裂隙分布有关，裂隙的存在显著降低了浅层土体的抗剪强度；同样在通水期，裂隙也为渠水进入渠身提供了渗流通道，进一步加剧了渠坡的破坏。上述离心试验结果表明，北疆高寒区膨胀土渠道边坡在运行过程中的破坏主要呈现出片状剥落的破坏特征，这也与传统的膨胀土边坡牵引式滑坡存在较大差异，其中原因主要是由于裂隙发育方向由竖直方向向水平方向发生了偏转。此外，如图5所示，针对本文研究的北疆渠道膨胀土，蔡正银等<sup>[12-13]</sup>在研究其内部裂隙的开展规律时也发现了类似的裂隙先竖向向下发育，到达一定深度后再水平向偏转的发育特征，这说明在对北疆渠道膨胀土边坡进行研究时，应考虑裂隙，特别是裂隙传播路径发生偏转这一现象对渠道膨胀土边坡整体稳定性的影响。

需要说明的是，由于条件所限，仅进行了干湿循环作用下渠道膨胀土边坡的离心试验。但蔡正银等<sup>[14]</sup>研究也指出，湿干冻融耦合循环中的冻融过程主要加剧了试样裂隙的开展深度，同时冻融过程易造成试样内部裂隙的破碎断裂，但对裂隙在经历多次循环中表现出的先竖直向下发育，到达一定深度后发育方向发生水平向偏转这一发育模式并未产生影响，故这里将其近似为实际干湿交替、冻融循环下渠坡的破坏过程。

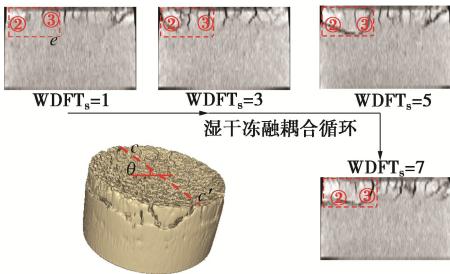
图 5 三维重建后土体内部的裂隙分布<sup>[13-14]</sup>

Fig. 5 Distribution of cracks in soils after 3D reconstruction

基于渠道现场失稳断面实测及离心模型试验结果, 将停水后北疆渠道膨胀土边坡发生的浅层失稳破坏主要归因于渠道浅层土体的剥落。前述可知, 膨胀土渠道边坡在经历多次干湿循环后, 浅层土体已被完全分割为多个土块, 且能较容易地从试样表面剥离, 这说明土块已完全与其周围及底部土体脱离; 类似的, Khan 等<sup>[15]</sup>的现场试验中也出现了与裂隙试验相类似土块剥落的现象, 这也从侧面说明现实中确定存在离心试验中出现浅层土体剥落这种失稳模式。同时, 坡面土体的剥落也将导致滑动区域上覆压力降低, 这也会加快渠坡失稳。需要说明的是, 渠坡浅层土体的剥落将贯穿渠坡破坏的全过程。

### 3 断面破坏机理

前述可知, 膨胀土渠道边坡浅层破坏与其裂隙发育程度存在必然关系, 而膨胀土裂隙在发育过程中存在明显的方向性, 故这里从裂隙发育方向性角度对渠道膨胀土边坡的破坏机理进行阐述。

大量研究表明, 裂隙传播路径发生偏转这一问题与土体所处的应力状态存在直接联系<sup>[16]</sup>, 其中基于断裂力学研究土体开裂破坏的方向已成为主流。断裂力学中裂隙存在 3 种断裂形式, 即 I 型断裂、II 型断裂及 III 型断裂, 如图 6 (a) ~6 (c) 所示。

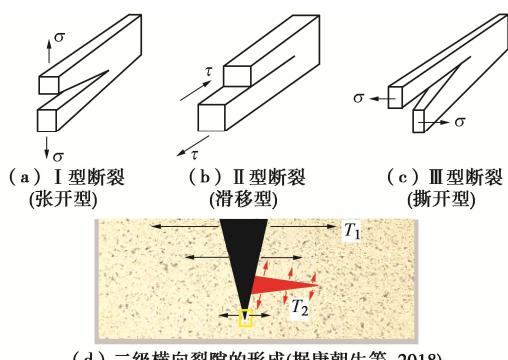


图 6 裂隙的 3 种断裂模式及二级裂隙的形成过程

Fig. 6 Three fracture modes of fracture and formation process of secondary fracture

在实际岩土工程中, 裂隙通常以 I 型、II 型或 I 型 II 型混合的形式存在。唐朝生等<sup>[17]</sup>将裂隙的生成归因于土体发生张拉破坏的结果, 即认为土体裂隙是由

纯 I 型断裂引起。当裂隙生成后, 土体含水率沿裂隙面分布不均, 进而在裂隙面上形成新的张拉应力场, 裂隙面上土颗粒在裂隙面张拉应力场及土体表层横向张拉应力场共同作用下发生应力集中, 最终造成在初始裂隙面上形成二次横向裂隙, 如图 6 (d) 所示; 若将土体的持续失水也可视为裂隙尖端部分 (图 6 (d) 黄色区域) 土体上覆压力 ( $\sigma_z$ ) 的降低, 此应力状态下裂隙发育方向发生偏转也可视为由 II 型断裂造成的; 同样, 柴波等<sup>[18]</sup>对具有膨胀性的红层岩土体进行干湿循环后发现, 土体内部裂隙不仅受到失水收缩的张拉破坏, 还存在由于吸水膨胀微裂隙尖端压应力集中引起的压剪破坏。故在对外部环境作用下裂隙的发育路径进行分析的过程中, 应同时考虑 I 型和 II 型断裂过程共同作用的影响。

但采用上述机理对土体内部裂隙发育方向发生偏转现象进行解释时也存在一些问题。例如唐朝生等<sup>[17]</sup>提出的二级横向裂隙 (见图 6 (d)) 生成机制实质上土体在裂隙面某薄弱处的二次 I 型断裂, 这种断裂模式可以对表面的剥落现象进行解释, 但对裂隙发生的偏转这一核心问题并未涉及。同样, 考虑 I 型和 II 型断裂过程共同作用导致的裂隙偏转时, 在判断裂隙在何时发生偏转这个问题上存在较大争议, 同时推导过程假设较多且较为复杂。由图 6 (d) 可知, 上部裂隙相对于下部未开裂土体存在 2 种传播路径, 即沿着裂隙走向继续向下传播或传播方向发生偏转。参考复合材料学中关于界面强度于纤维增韧效果间的相互关系<sup>[19]</sup>, 拟从界面黏结强度角度对失水过程中土体裂隙传播路径发生偏转的机理进行解释。

对于陶瓷基复合材料而言 (陶瓷为基体、陶瓷与纤维间的接触面称为界面), 陶瓷基体断裂应变较纤维相对较小, 在对连续纤维增韧的陶瓷基复合材料施加轴向拉伸荷载时, 陶瓷基体首先出现裂隙, 随着荷载的增加, 裂隙一般延着垂直于纤维的方向拓展发育。当陶瓷基体裂隙发育到达界面时, 若界面为弱黏结 (弱界面黏结), 裂隙传播路径将在界面发生偏转; 若界面为强黏结 (强界面黏结), 裂隙则会沿着初始路径直接穿透纤维继续传播。

类似的, 在非饱和/饱和土中也存在类似强界面/弱界面黏结的问题。唐朝生等<sup>[17]</sup>认为在低含水率下, 土颗粒以团聚体的形式存在, 团聚体间的由于毛细作用存在接触点, 土体内部拉应力通过接触点进行传播 (见图 7 (b)), 此刻土颗粒间的连接可视为强黏结, 宏观表现为土体抗拉强度的增加; 而高含水率土壤团聚体极易发生崩解, 团聚结构逐渐变为分散结构, 土颗粒间的毛细作用逐渐消失, 此刻土体内部拉应力则主要受到颗粒间摩擦力的影响, 土颗粒间的连接明显

弱于含水率较低状态，可视为弱黏结。考虑到实际条件下土体经历单向边界条件作用，试验土样的初始状态为饱和，如图7(a)所示，土体内部土颗粒分布较为均匀；随着试验的继续，试样的持续失水造成其顶部近环境边界区域首先开裂，同时出现沿深度方向继续向下传播的发育趋势，对应土体含水率自上而下存在较大差异，其中含裂隙部分的含水率较低，而不含裂隙部分含水率则相对较高。故可将试样上部裂隙区域（低含水率）视为基体，下部无裂隙区域（高含水率）视为弱黏结界面。基体裂隙向下传播过程中，由于弱黏结界面的存在造成裂隙尖端两侧能量状态存在较大差异，遵循最小耗能原理<sup>[19]</sup>，裂隙沿着弱黏结界面，以能量释放最短路径发生偏转。

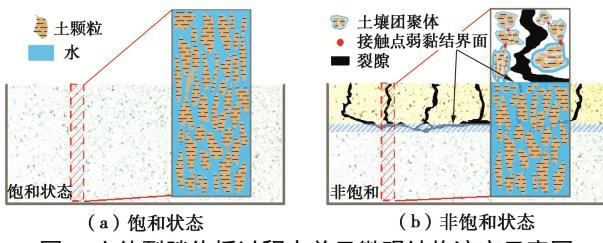


图7 土体裂隙传播过程中单元微观结构演变示意图

Fig. 7 Schematic diagram of unit microstructure evolution in soil fracture propagation

## 4 讨论与建议

上述可知，膨胀土渠道的失稳与其内部的裂隙存在直接联系。考虑到本次北疆地区渠坡土体的内摩擦角明显大于渠道坡面倾角（渠坡的坡比为1:2），渠坡在自身重力作用下抗滑力大于下滑力，尤其在通水期，所以整体的安全性较高，暂时不具备失稳的可能。但停水后在渠道现场及离心模型试验中均出现渠坡浅层土体的剥落，导致滑动区域上覆压力的持续降低；同时滑动区域后缘张拉裂隙的生成及拓展，致使在渠坡一定深度形成剪切带，最终造成了渠道的浅层失稳破坏。因此，从上述分析得到的渠坡失稳机理出发，以降低渠坡浅层土体裂隙的发育程度为切入点，结合渠道的实际运行情况，为北疆膨胀土渠道边坡提出切实可行的防护和处理意见。

首先是继续坚持总干渠膨胀土段所实行的换填措施，在渠道建设中常对膨胀土段进行换填处理<sup>[8-9]</sup>，北疆渠道现场膨胀土段的换填深度为2 m，沿深度方向向下依次为0.5 m砂砾石及1.5 m的白砂岩，此措施在降低膨胀土的偏转潜能及冻敏感性方面取得了良好的效果；其次需加强对渠道膨胀土边坡换填后的保护，建议在现场修坡完成后对渠道膨胀土边坡采取及时的防护手段，如覆盖塑料薄膜、土工袋压坡等方法以减少因水分散失导致的浅层土体开裂，有效降低渠坡的

失稳风险；最后是在裂隙发育程度较高区域内增加抗滑支挡措施（如抗滑桩、抗滑锚索或挡土墙等），考虑到滑动区域后缘张拉裂隙的存在对渠坡整体稳定性造成严重影响，同时后缘张拉裂隙的发育方向常出现偏转，进一步促进渠坡浅层土体发生破坏，故增加抗滑支挡可有效的防止渠道在裂隙持续发育影响下沿结构面产生的滑坡。

## 5 结 论

基于现场失稳断面监测，结合离心模型试验结果，对北疆渠道膨胀土边坡的破坏机制及加固措施进行了研究，得到如下结论：

(1) 渠道运行过程中渠基膨胀土内部裂隙是引起渠道边坡发生浅层失稳的决定性因素，且破坏模式有别于传统的牵引式滑坡，主要呈现出渠坡浅层土体的剥落破坏。

(2) 从裂隙发育方向性角度对渠道膨胀土边坡的破坏机理进行阐述，结合复合材料界面理论探讨了膨胀土在含水率持续降低下裂隙的发育过程，提出土体的持续失水过程易造成土颗粒间强黏结接触向及弱黏结接触的转化，进而解释了土体裂隙发育到一定深度后传播路径发生偏转这一现象。

(3) 建议在现场修坡完成后对渠道膨胀土边坡采取及时的防护手段以减少因水分散失导致的浅层土体开裂，有效降低渠坡的失稳风险。当渠坡后缘出现张拉裂隙时，及时采取抗滑桩、抗滑锚索或挡土墙等抗滑支挡措施。

## 参考文献:

- [1] 邓铭江. 新疆水资源及可持续利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (DENG Ming-jiang. Water Resource of Xinjiang and Sustainable Use[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1189 – 1203. (DENG Ming-jiang. "Three Water Lines" strategy: its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1189 – 1203. (in Chinese))
- [3] 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 Zheng-yin, HUANG Ying-hao. Evaluation and Treatment Technology of Frost Damage in Canals in Saline and Cold Regions[M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese))
- [4] 刘静德, 李青云, 龚壁卫. 南水北调中线膨胀岩膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 826 – 830. (LIU

- Jing-de, LI Qing-yun, GONG Bi-wei. Swelling properties of expansive rock in middle route project of South-to-North Water Diversion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 826 – 830. (in Chinese))
- [5] 张晨, 蔡正银, 黄英豪, 等. 输水渠道冻胀离心模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(1): 109 – 117. (ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Centrifuge modelling of frost-heave of canals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(1): 109 – 116. (in Chinese))
- [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] MORGENSEN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Géotechnique, 1965, **15**(1): 79 – 93.
- [8] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (CHENG Zhan-lin, GONG Bi-wei. Expansive Soil Slope[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [9] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1 – 15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 1 – 15. (in Chinese))
- [10] 朱洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环及干密度对膨胀土力学特性影响的试验研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(3): 286 – 294. (ZHU Xun, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Research on mechanical properties of expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw and density[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(3): 286 – 294. (in Chinese))
- [11] 朱洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(6): 1233 – 1241. (ZHU Xun, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of expansive soils under the cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(6): 1233 – 1241. (in Chinese))
- [12] 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 Zheng-yin, CHEN Hao, HUANG Ying-hao, 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))
- [13] 蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(8): 1381 – 1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(8): 1381 – 1389. (in Chinese))
- [14] 蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, **40**(12): 4555 – 4563. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Influences of freeze-thaw process on evolution characteristics of fissures in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(12): 1 – 9. (in Chinese))
- [15] KHAN M S, HOSSAIN S, AHMED A, et al. Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in Texas[J]. Engineering Geology, 2017, **219**: 118 – 129.
- [16] DONKOR P, OBONYO E. Compressed soil blocks: Influence of fibers on flexural properties and failure mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2016, **121**: 25 – 33.
- [17] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1415 – 1423. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1415 – 1423. (in Chinese))
- [18] 柴波, 殷坤龙, 简文星, 等. 红层水岩作用特征及库岸失稳过程分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, **40**(4): 1092 – 1098. (CHAI Bo, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Analysis of water-rock interaction characteristics and bank slope failure process of red-bed[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, **40**(4): 1092 – 1098. (in Chinese))
- [19] 李黎, 曹明莉. 混杂纤维增强水泥基复合材料弯曲韧性与纤维增强指数的定量关系[J]. 复合材料学报, 2018, **35**(5): 1349 – 1353. (LI Li, CAO Ming-li. Quantitative relationship between flexural toughness and fiber reinforcing index of hybrid fiber reinforced cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, **35**(5): 1349 – 1353. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)