

DOI: 10.11779/CJGE202105001

换填及排水改造对北疆输水渠道稳定性的影响

邓铭江¹, 蔡正银^{2, 3}, 郭万里^{*3}, 黄英豪^{2, 3}, 张晨³

(1. 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 南京水利科学研究院土石坝破坏机理与防控技术水利部重点实验室,
江苏 南京 210024; 3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 北疆渠道渗漏严重, 膨胀性渠基土性质易劣化, 使得渠道滑坡频发。为解决这一难题, 建管部门对渠道进行了渠坡换填改造, 同时在渠底设置了渗水抽排系统。通过室内试验和数值计算, 分析了改造后渠坡的稳定性, 得到如下结论: ①换填料白砂岩的性质较为稳定, 抗剪强度指标 c , φ 值基本不受干湿循环、冻融循环的影响; ②滑弧由渠底贯通到渠顶, 主要穿过内部的膨胀土层, 而膨胀土的性质会随着“湿干”循环而劣化, 仅在渠坡表层设置 0.5 m 厚的碎石和 1.5 m 厚的白砂岩换填层起到的抗滑作用较低; ③渠道改造后滑坡发生量减小、渠坡稳定性提高, 主要是排水体系的作用, 将渗水及时抽排, 降低膜后水位, 保障了渠道内部膨胀土性质不再劣化, 显著提高了渠道的稳定性; ④为了保障渠道的长期稳定性, 建议对渠道渗水进行持续抽排作业, 将膜后水位控制在 2 m 以内。

关键词: 北疆; 输水渠道; 换填; 排水改造; 稳定性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0789-06

作者简介: 邓铭江(1960—), 男, 博士, 湖南耒阳人, 中国工程院院士, 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。

Influences of filling replacement and drainage modification on stability of water conveyance canals in North Xinjiang

DENG Ming-jiang¹, CAI Zheng-yin^{2, 3}, GUO Wan-li³, HUANG Ying-hao^{2, 3}, ZHANG Chen³

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory of Failure

Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China;

3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The leakage of canals in North Xinjiang is serious, and the behavior of expansive canal soil deteriorates rapidly, leading to frequent canal slides. In order to solve this problem, the canals are refilled and rebuilt, and a drainage system is set up at the bottom of the canals. Laboratory tests and numerical calculation are conducted to analyze the influences of reconstruction measures of canal slopes on their stability. The following conclusions are drawn: (1) The properties of white sandstone for filling replacement are relatively stable, and the shear strength indexes c and φ are basically not affected by the drying-wetting cycle and the freeze-thaw cycle. (2) The slide circle extends from the bottom to the top of the canals, mainly through the inner expansive soil layer. However, the properties of expansive soil will deteriorate with the drying-wetting cycle, and only 0.5 m-thick gravel and 1.5 m-thick white sandstone replacement layer on the surface of the canal slope shows a low resistance effect. (3) After canal reconstruction, the amount of landslide decreases, and the stability of canal slopes is improved, which is mainly due to the function of drainage system. The drainage system reduces the post-membrane water level, which ensures that the expansive soil inside the canals will not deteriorate, and significantly improves the stability of the canals. (4) In order to ensure the long-term stability of the canals, it is suggested to carry out continuous drainage operation for water seepage in the canals, and control the post-membrane water level within 2 m.

Key words: North Xinjiang; water conveyance canal; filling replacement; drainage modification; stability

0 引言

中国是一个水资源严重短缺的国家, 且水资源时空分布不均, 呈现出南丰北缺、东多西少的显著特点。为了调节水资源的地域分布, 国家相继修建了一大批

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0405100); 国家自然科学基金项目(51909170); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y319010); 中国博士后科学基金项目(2018M640500)

收稿日期: 2020-06-05

*通信作者(E-mail: guowljs@163.com)

长距离调水工程^[1]。其中，北疆输水渠道缓解了乌鲁木齐、克拉玛依等地区水资源短缺的问题，是名副其实的生命线工程^[2]。

北疆输水渠道为季节性供水，在渠道渗漏的区域，渠基土会经历“湿干”循环；北疆冬季气温低，最低温度可达-20℃，渠基土会经历“冻融”循环^[3-4]。渠道多年运行结果表明，膨胀土渠段滑坡频发，每年需要耗费大量的人力物力进行维修，主要原因在于膨胀性渠基土性质不稳定，在“湿干”循环、“冻融”循环作用下强度衰减，最终导致滑坡^[5-7]。为了解决这一难题，建管部门对渠道进行了改造，主要包括如下两条改造措施：①对渠坡的膨胀土进行换填，表层换为0.5 m 厚碎石层，中间层为1.5 m 厚白砂岩，内部依然为膨胀土；②在渠底设置排水设施，先将渠道渗漏的水集中到渠底，然后通过渠道沿线布置的竖向排水井进行抽排，避免渗水堆积造成对渠基土的劣化。

渠道改造前后，渠坡稳定性是否得到显著提高，目前尚无系统研究。首先，根据监测资料，改造前渠基土每年都会经历明显的干湿循环作用，导致渠道内部的膨胀土强度发生不可逆转的衰减，引起边坡稳定性系数的下降。其次，渠道在供水末期水位逐渐降低至0，在水位下降过程中，渠坡稳定性如何变化，是需要探索的问题。最后，渠道改造前大多数断面都存在不同高度的膜后水，改造后设置了排水系统，需要考察膜后水的存在对于渠坡稳定性的影响。

基于此，本文首先白砂岩开展了系列室内试验研究，测试了其强度指标在“干湿”循环、“冻融”循环条件下的变化规律，在此基础上分析了渠道改造措施对渠坡稳定性的影响，为渠道的建设和管理提供参考。

1 渠基土的强度特性

1.1 渠道换填改造方案

渠道换填之前，渠道总高度为7.5 m，上层为1.9 m厚白砂岩，下部都为膨胀土，典型断面如图1(a)所示。由于渠水入渗导致膨胀土强度衰减，渠道滑坡时有发生，因此，管理部门对渠坡进行了改造。主要包括两条措施：①将渠坡表层膨胀土置换为0.5 m厚碎石层和1.5 m厚白砂岩，如图1(b)所示。②在渠底设置排水设施，及时对渗水进行抽排，避免渗水堆积造成对渠基土的劣化，如图1(b)所示。

1.2 膨胀土强度特性

在室内单元试验中，“湿润”阶段是在常温下将初始状态的试样装在三瓣模中抽气饱和2 h，再浸泡12 h使试样达到饱和状态；“干燥”阶段为了使试样快速达到含水率 w_D (渠基土在自然风干状态下的含水率，约为最优含水率的0.7倍)，采用在温度设定为

60℃的烘箱中烘干，通过实时监测含水率实现；“冻结”阶段则以-20℃冻结为准，-20℃基本可以反映北疆地区冬季的平均温度；“融化”阶段以20℃状态下自然融化24 h为标准。则“湿干冻融”4个阶段的边界条件如表1所示。

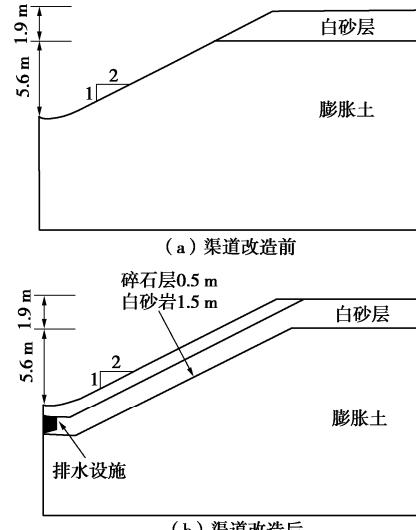


图1 北疆输水渠道断面图

Fig. 1 Sectional view of canal in North Xinjiang

表1 湿干冻融边界条件

Table 1 Conditions of wetting-drying and freeze-thaw cycle

状态	温度	时间
湿润	常温	抽气饱和
干燥	60℃	至含水率 w_D 为止
冻结	-20℃	24 h
融化	20℃	24 h

朱洵等^[3]，蔡正银等^[4]对膨胀土开展了“湿干”循环和“湿干冻融”循环下的三轴试验，以干密度1.48 g/cm³，最优含水率24.1%的土样为例，得到抗剪强度指标 c ， φ 值与循环次数 N 的关系为^[3-4]

$$c_{WD} = 17.64 + 4.4 \cdot e^{-2.04N}, \quad (1)$$

$$c_{WDFT} = 12.79 + 8.77 \cdot e^{-1.27N}, \quad (2)$$

$$\varphi = 11.51 + 3.33 \cdot e^{-0.39N}, \quad (3)$$

式中， c_{WD} 为“湿干”循环下的黏聚力(kPa)， c_{WDFT} 为“湿干冻融”循环下的黏聚力(kPa)， φ 为“湿干”循环或“湿干冻融”循环下的内摩擦角。

根据式(1)～(3)绘制了膨胀土在“湿干”循环和“湿干冻融”循环下 c ， φ 值的衰减曲线，如图2所示。由图2可得，膨胀土 c ， φ 值在“湿干”循环或“湿干冻融”循环5次后基本衰减到稳定状态。其中，“湿干冻融”循环下的黏聚力 c 值由22 kPa衰减至13 kPa左右，“湿干”循环下的黏聚力 c 值由22 kPa衰减至18 kPa左右；“湿干”循环与“湿干冻融”循环下的 φ 值衰减规律相同，由15°衰减至12°。

对渠道稳定性进行计算时，膨胀土的强度参数 c ， φ 值根据所处的环境，按照式(1)～(3)进行折减，

自然密度为 1.84 g/cm^3 , 饱和密度为 1.92 g/cm^3 。

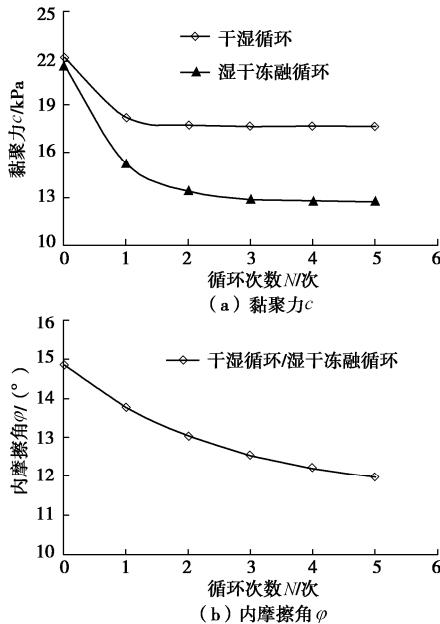


图 2 膨胀土强度参数的衰减规律

Fig. 2 Attenuation law of strength parameters of expansive soil

1.2 白砂岩强度特性

笔者先后从不同的料场采集了两批白砂岩土样, 编号分别为^{#1}白砂岩和^{#2}白砂岩, 主要区别在于细粒含量不同, 如表 2 所示, ^{#1}白砂岩细粒含量为 30.1%, ^{#2}白砂岩细粒含量为 20.1%。

表 2 ^{#1} 和 ^{#2} 白砂岩的粒组含量

Table 2 Granular content of white sandstones No. 1 and No. 2 (%)

土料	细砾含量 (5~2 mm)	砂粒含量 (2~0.075 mm)	细粒含量 (<0.075 mm)
^{#1} 白砂岩	4.7	65.2	30.1
^{#2} 白砂岩	4.0	75.9	20.1

^{#1}白砂岩开展了普通三轴 CD 试验, 得到的强度参数值如表 3 所示。制样压实度由 88.4% 增大到 96.0% 时, 黏聚力 c 由 12 kPa 增大到 41 kPa; 内摩擦角 φ 则基本不变, 为 32° 左右。

表 3 ^{#1} 白砂岩的抗剪强度值

Table 3 Strength values of white sandstone No. 1

试样状态	制样干密度(压实度)/%	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
普通状态	88.4	12	31.8
普通状态	90.9	18	32.0
普通状态	93.4	30	31.9
普通状态	96.0	41	32.0

^{#1}白砂岩开展了干湿、冻融循环下的三轴 CD 试验, 具体操作是先根据表 1 中的边界条件将试样养护至预定循环次数, 然后再进行三轴加载剪切。得到的强度参数 c , φ 值与循环次数 N 的关系如表 4 所示。

两批土料的物理性质相近, 但是, 由于^{#2}白砂岩的细颗粒含量更低, 为 20.1%, 低于^{#1}白砂岩的 30.1%。因此, 三轴 CD 试验结果表明, ^{#2}白砂岩的黏聚力 c 显著低于^{#1}白砂岩。其中^{#1}白砂岩的压实度都为 95%,

普通状态下(编号 Y1-1)的 c 为 3.9 kPa, 内摩擦角为 33.2° , 如表 4 所示。对白砂岩试样分别进行 1, 3, 7 次干湿循环、冻融循环后, 黏聚力 c 与干湿、冻融循环次数之间未呈现相关关系, 甚至平行试验之间的差异都大于不同循环次数之间的差异; 干湿循环、冻融循环下试样的内摩擦角 φ 则基本较为稳定, 为 32° 左右。

表 4 干湿循环、冻融循环条件下^{#2}白砂岩的强度值

Table 4 Strength values under wetting-drying cycle and freeze-thaw cycle

试样状态	试样编号	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
普通状态	Y1-1	3.9	33.2
干湿循环 1 次	W1-1	4.7	33.6
干湿循环 1 次	W1-2	2.0	31.9
干湿循环 3 次	W3-1	3.9	31.8
干湿循环 3 次	W3-2	9.2	32.3
干湿循环 7 次	W7-1	5.1	33.2
干湿循环 7 次	W7-2	3.2	32.5
冻融循环 1 次	F1-1	3.7	33.1
冻融循环 1 次	F1-2	6.0	33.4
冻融循环 3 次	F3-1	0.5	32.8
冻融循环 3 次	F3-2	8.9	31.4
冻融循环 7 次	F7-1	1.0	33.0
冻融循环 7 次	F7-2	5.4	32.9

注: 进行了平行试验, 试样编号 1 和 2 表示的平行试样。

综上所述, 干湿循环、冻融循环条件下白砂岩的强度参数 c , φ 值与循环次数之间未呈现出明显的相关关系, 即干湿循环、冻融循环对白砂岩的强度影响不大。因此, 利用白砂岩进行换填, 可以认为白砂岩的强度不会随着渠道运行年份而改变。

对渠道稳定性进行计算时, 综合两种白砂岩土料试验所得的 c 值范围为 0~40 kPa, 将计算的 c 值取平均值, 为 20 kPa; 白砂岩的 φ 较为稳定, 定为 $\varphi=32^\circ$; 自然密度为 1.89 g/cm^3 , 饱和密度为 2.13 g/cm^3 。

2 渠坡稳定性

2.1 计算方案

渠坡稳定性计算采用有限元强度折减法^[8], 渠道断面有限元网格如图 3 所示。计算中基本假设如下:

(1) 实际监测结果表明, 北疆渠道冻深在 2 m 以内, 因此, 2 m 深度以内的土体才会经历“冻融”循环, 该区域内的土体所采用的强度参数为“冻融”循环作用下的强度参数。

(2) 若渠道发生渗漏, 防渗膜后浸润线以下的饱和区域会经历“湿干”循环, 该区域内的土体所采用的强度参数为“湿干”循环作用下的强度参数。

(3) 同时满足(1)和(2)的区域土体会经历“湿干冻融”循环, 所采用的土体强度参数为“湿干冻融”循环作用下的强度参数。

(4) 若膜后水位为 0, 即渠道没有发生渗漏, 渠基土没有经历“湿干”循环作用; 土体没有水分补充,

则“冻融”作用的影响也较小。因此,膜后水位为0,渠道土体都采用 $N=0$ 时的强度参数。

计算主要涉及3种土料,白砂岩的强度参数为 $c=20\text{ kPa}$, $\varphi=32^\circ$,自然密度为 1.89 g/cm^3 ,饱和密度为 2.13 g/cm^3 。砂砾石的初始强度参数为 $c=0\text{ kPa}$, $\varphi=40^\circ$,自然密度为 2.30 g/cm^3 ,饱和密度为 2.53 g/cm^3 。膨胀土的强度参数随着工况的变化而变化,按照式(1)~(3)确定,自然密度为 1.84 g/cm^3 ,饱和密度为 1.92 g/cm^3 。

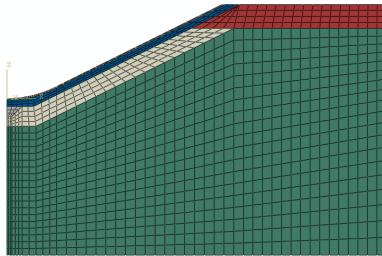


图3 渠道断面有限元网格

Fig. 3 Mesh of canal section

实践表明,退水时为渠坡稳定最危险工况,此时渠水快速降低至0,但渗漏区域的膜后水位并未消散。因此,渠坡稳定性计算选择的工况为渠水位为0,计算年份为0~5 a,膜后水位高度为0~5 m,综合不同运行年数和不同膜后水位高度,共产生 $6\times6=36$ 种典型工况,并分别计算了改造前和改造后不同工况下的渠坡稳定性系数,如表5,6所示。

表5 渠道换填前各工况下渠坡稳定性系数

Table 5 Stability of canals under various conditions before reconstruction

$N/\text{次}$	膜后水位					
	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
0	1.78	1.73	1.67	1.61	1.56	1.50
1	1.78	1.49	1.43	1.38	1.33	1.28
2	1.78	1.42	1.37	1.31	1.27	1.22
3	1.78	1.39	1.34	1.29	1.24	1.19
4	1.78	1.37	1.32	1.28	1.23	1.18
5	1.78	1.35	1.31	1.26	1.22	1.17

注: N 表示循环次数,一年表示渠基土经历一次“湿干”、“冻融”或“湿干冻融”循环。

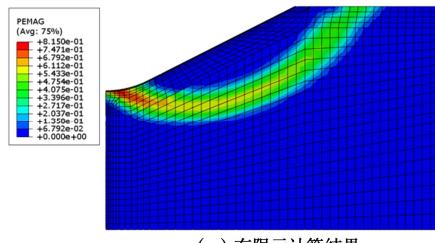
表6 渠道换填后各工况下渠坡稳定性系数

Table 6 Stability of canals under various conditions after reconstruction

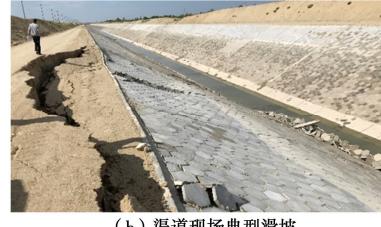
$N/\text{次}$	膜后水位					
	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
0	1.82	1.76	1.71	1.65	1.60	1.53
1	1.82	1.56	1.51	1.46	1.39	1.35
2	1.82	1.51	1.46	1.41	1.36	1.31
3	1.82	1.48	1.44	1.39	1.34	1.29
4	1.82	1.47	1.42	1.38	1.33	1.28
5	1.82	1.46	1.41	1.37	1.32	1.27

以表5中 $N=0$ 、膜后水位为0 m的工况为例,由强度折减法计算得到滑弧如图4(a)所示,滑弧由渠底贯通至渠顶。选取渠道现场典型滑坡断面,如图4

(b)所示,滑坡从渠底贯通到渠顶马道,滑弧范围与有限元计算结果相匹配。由此可见,本文采取的计算方案是合理的。



(a) 有限元计算结果



(b) 渠道现场典型滑坡

Fig. 4 Typical landslide of expansive soil canal

《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013)^[9]规定,边坡稳定性状态分为稳定、基本稳定、欠稳定和不稳定4种状态,如表7所示。

表7 边坡稳定性状态划分

Table 7 Division of slope stability states

稳定性系数 F_s	$F_s < 1.0$	$1 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < F_{st}$	$F_s > F_{st}$
稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

注: F_{st} 为边坡稳定安全系数,一级、二级和三级安全等级的永久边坡,一般工况对应的 F_{st} 分别为1.35,1.30,1.25。本计算边坡取 $F_{st}=1.35$ 。

若以 F_s 是否大于1.35来划分渠道是否稳定,由表5可见,在渠坡改造前,由17种工况下的渠坡 F_s 小于1.35,主要集中在膜后水位高、循环次数大的工况;表6可见,渠坡改造后,减小到只有7种工况下的渠坡 F_s 小于1.35。从这个角度分析,渠坡改造在一定程度上提高了渠道的稳定性。

2.2 膜后水位的影响

根据表5中渠坡改造前的计算结果,以 N 为0,1,2,5为例,绘制了 F_s 随膜后水位高度的变化曲线,如图5所示。

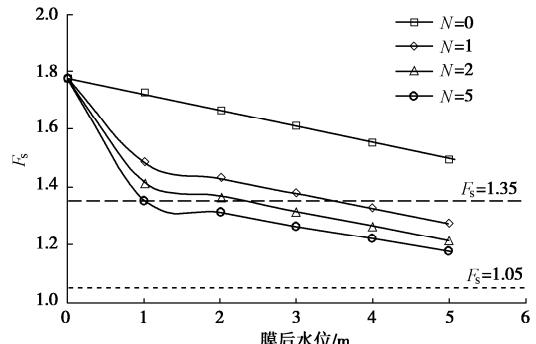


图5 膜后水位对 F_s 的影响

Fig. 5 Influences of post-membrane water level on F_s

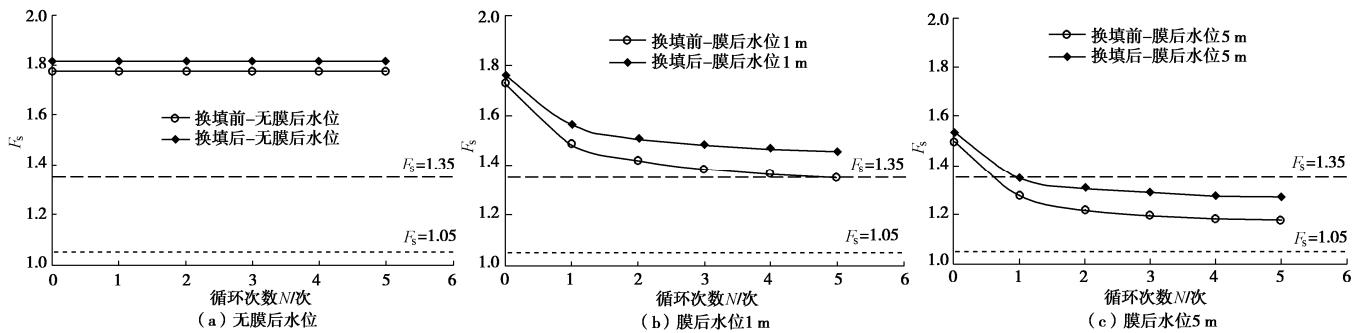


图 6 换填前后渠坡稳定性系数

Fig. 6 Stability coefficient of canals before and after replacement

由图 5 可得, 渠坡稳定性变化规律受到膜后水位高度的显著影响, 呈现如下 3 大特点:

(1) 膜后水位为 0 的断面在多年运行期内的渠坡稳定性系数 F_s 保持不变, 都为 1.78, 大于 1.35, 渠坡处于稳定状态。这是由于膜后水位为 0, 渠基土始终保持干燥状态, 自重不变; 且未经历干湿循环作用, 强度指标不变, 因此, 渠坡稳定性系数不变。

(2) 膜后水位为 0~1 m 的断面, 在多年运行期内 F_s 大于 1.35, 渠坡处于基本稳定状态。

(3) 膜后水位大于 1 m 的断面, 经过多年运行以后, F_s 会小于 1.35 大于 1.05, 渠坡处于基本稳定状态。

2.3 仅白砂岩换填

仅考虑白砂岩换填的影响, 不考虑纵横向排水体系的作用, 即相对于改造前只需要将换填层的计算参数进行修改, 计算结果见表 6。其中, 以膜后水位为 0, 1, 5 m 时的工况为例, 渠坡稳定性系数 F_s 与 N 的关系曲线如图 6 所示。

图 6 (a) 表明, 若渠道不发生渗漏, 膜后水位为 0, 渠道换填后的 F_s 保持在 1.82, 相比于换填前的 $F_s=1.78$, 略有提高。图 6 (b), (c) 表明, 在相同的膜后水位下, 换填前和换填后的 F_s 都会随着 N 的增加而降低, 在相同工况下, 换填后的 F_s 都略高于换填前, 平均约提高 0.1。

由图 6 可见, 仅换填对于渠坡稳定性系数 F_s 的提高效果并不明显。主要原因在于, 换填的碎石层和白砂岩层, 虽然强度性质较为稳定, 不会随着“湿干”或“冻融”作用而衰减。但是, 由图 4 (a) 可见, 滑弧是由渠底贯通到渠顶, 主要穿过内部的膨胀土层, 渠坡表层共 2 m 厚的换填层起到的抗滑作用较低。

2.4 白砂岩换填且渗水抽排

理论上讲, 若渠道防渗体系完好, 防渗膜后应当不存在水的集聚。然而, 实际观测表明, 一旦发生渗漏, 渗漏水将会集聚在渠道防渗膜后。因此, 在对北疆输水渠道进行改造时, 除了对渠坡表层膨胀土进行换填之外, 还在渠道设置了排水系统, 将渗漏的渠水及时抽排, 降低渗漏水位, 减小甚至杜绝渗水对渠基土强度的衰减作用。

根据监测资料, 2017 年运行期内膜后水位在 2 m 以上的断面占比较大, 断面最高水位几乎与同时刻渠道内运行水位相同。相比较而言, 2018 年在渠道运行期内加强了渗水抽排作业, 抽排效果显而易见, 监测结果表明运行期间膜后水位相比去年同期有着较大程度的下降, 膜后水位多集中在 2 m 以下。以里程为 10~18 km 渠段为例, 对 2017 年和 2018 年膜后水位监测结果进行对比, 如图 7 所示。2017 年渠道沿线膜后水位大都在 2~5 m; 2018 年加强渗水抽排作业以后, 膜后水位基本都降低到 2 m 以内, 其中, 约一半的井点降低到了 1 m 以内。

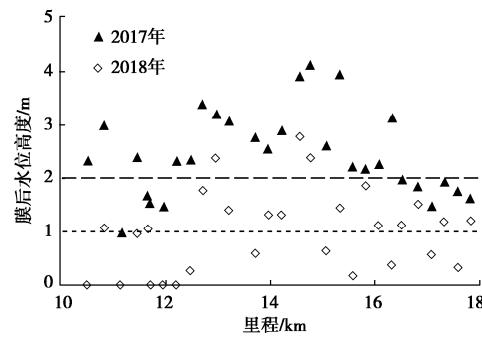


图 7 2017 年和 2018 年膜后水位监测结果

Fig. 7 Monitoring results of post-membrane water level in 2017 and 2018

以表 5, 6 中的结果为依据, 若换填后经过渗水抽排作业, 将膜后水位保持在 2 m 以下, 如图 8 (a) 所示, 经过多年运行, 渠坡稳定性系数 F_s 都保持在 1.41 以上, 大于 1.35, 渠坡处于稳定状态。若渗水抽排能保持膜后水位在 1 m 以下, 如图 8 (b) 所示, 经过多年运行后, F_s 都保持在 1.46 以上, 大于 1.35, 渠坡处于稳定状态。相反, 在渠道改造前渠底没有设置排水系统, 膜后渗水无法排出, 膜后水位的可能高度范围为 0~5 m, 由图 8 可见, 渠坡改造前只要出现膜后水位, 即便膜后水位仅为 1 m, 经过多年运行以后 F_s 也会低于 1.35, 渠坡将处于欠稳定状态。

经过渠坡换填及渗水抽排改造, 近几年运行结果表明, 渠道滑坡显著减少。结合换填计算结果和渠道运行事实, 渠道滑坡发生量减小、渠坡稳定性提高, 主要是排水体系的作用, 将渗水及时抽排, 降低膜后

水位, 保障了渠道内部膨胀土性质不再劣化, 显著提高了渠道的稳定性; 相反, 换填土体本身性质的改变对提高渠坡稳定性的作用有限。

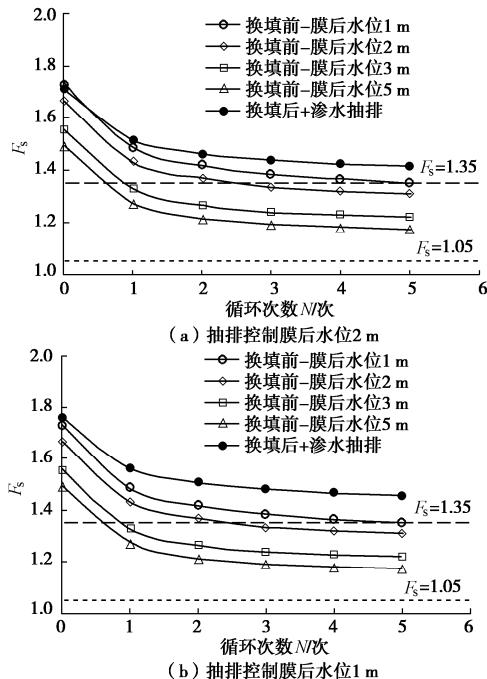


图 8 换填及渗水抽排后渠坡稳定性系数

Fig. 8 Coefficient of slope stability after filling replacement and drainage modification

3 结论和建议

(1) 白砂岩在干湿循环、冻融循环条件下, 强度参数 c 值略有变化, φ 值则基本保持在 32° 左右, 因此, 可以认为, 白砂岩的强度基本不受干湿循环、冻融循环的影响。

(2) 滑弧由渠底贯通到渠顶, 主要穿过内部的膨胀土层, 而膨胀土的性质会随着“湿干”循环而劣化, 渠坡表层 0.5 m 厚的碎石和 1.5 m 厚的白砂岩换填层起到的抗滑作用较低。

(3) 渠道改造后滑坡发生量减小、渠坡稳定性提高, 主要是排水体系的作用, 将渗水及时抽排, 降低膜后水位, 保障了渠道内部膨胀土性质不再劣化, 显著提高了渠道的稳定性。

(4) 为了保障渠道的长期稳定性, 建议对渠道渗水进行持续抽排作业, 将膜后水位控制在 2 m 以内。

参考文献:

- [1] 王 浩, 游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 265–271. (WANG Hao, YOU Jin-jun. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 265–271. (in Chinese))

- [2] 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 Canal Frost Damage in Salt and Cold Region[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [3] 朱 涣, 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))
- [4] 蔡正银, 朱 涣, 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): 4555–4563. (in Chinese))
- [5] 唐朝生, 施 斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376–1384. (TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376–1384. (in Chinese))
- [6] 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): 109–117. (in Chinese))
- [7] 王正中, 刘少军, 王 翼, 等. 寒区弧底梯形衬砌渠道冻胀破坏的尺寸效应研究[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 803–813. (WANG Zheng-zhong, LIU Shao-jun, WANG Yi, et al. Size effect on frost heave damage for lining trapezoidal canal with arc-bottom in cold regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(7): 803–813. (in Chinese))
- [8] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381–3388. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381–3388. (in Chinese))
- [9] 建筑边坡工程技术规范: GB 50330[S]. 2013. (Technical Code for Building Slope Engineering: GB 50330[S]. 2013. (in Chinese))