

DOI: 10.11779/CJGE2020S2001

竖向排水井对北疆膨胀土渠道稳定性的作用分析

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: 北疆输水渠道是周期性供水渠道, 渠水渗漏会使得渠基土经历“干湿”循环作用, 将显著降低膨胀性渠基土的强度, 进而影响渠道的稳定性。为了降低渠水渗漏对渠坡稳定性的威胁, 建管部门对渠道进行了渗水速排系统改造。其中, 竖向排水井的主要作用是将渗水集中抽排; 此外, 还可能发挥类似抗滑桩的作用。因此, 针对该问题开展了数值分析, 结果表明: 若竖向排水井抽排作业将渗漏断面的膜后水位降低至 0 m, 可以确保渠道断面在最危险工况下稳定性系数 F_s 大于 1.35, 渠坡处于稳定状态; 若不进行渗水抽排, 膜后水位大于 1 m 的断面在运行 10 年以上时, F_s 将小于 1.05, 渠坡处于欠稳定或不稳定状态。仅分析竖向排水井作为抗滑桩的作用, 排水井在当前位置(桩心距离渠沿 6 m)起到的抗滑作用基本可以忽略, 滑弧将会出现在排水井前方; 将排水井向靠近渠坡的方向移动至渠沿时, 单根排水井对渠坡抗滑保护范围最大, 为 44 m。

关键词: 膨胀土; 渠道; 干湿循环; 边坡稳定性; 排水井

中图分类号: TU443; TV223

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0001-06

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 vertical drainage wells on stability of expansive soil 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 water conveyance canal in North Xinjiang is a periodic water supply canal, and the “wetting-drying” circulation caused by canal water leakage may significantly reduce the strength of expansive soils and further affect the stability of the expansive soil canals. In order to reduce the threat of canal leakage to the stability of canal slopes, the Construction and Management Department has carried out the transformation of the seepage quick drainage system. Based on this, the stability characteristics of the canals before and after the reform are analyzed through numerical calculation. The results show that if the water level behind the membrane of the leakage section is reduced to 0 m by the vertical drainage well pumping operation, the stability factor of the section under the most dangerous condition is greater than 1.35, which means the canal slope is stable. If the seepage pumping is not carried out, when the section with water level greater than 1 m after membrane is operated for more than 10 years, the stability factor will be less than 1.05, and the canal slope is understable or unstable. Only the function of the vertical drainage wells as the anti-slide piles is analyzed, then the function can be ignored, and the sliding arc will appear in front of the drainage wells. If the location of a drainage well is moves forward, the maximum protection range of a single pile is 44 meters when the drainage well moves to the edge of the canal.

Key words: expansive soil; canal; wetting-drying cycle; slope stability; drainage well

0 引言

我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 (2017YFC0405102); 国家自然科学基金项目 (51909170, 51879166); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (Y319010); 中国博士后科学基金项目 (2018M640500)

收稿日期: 2020-08-07

***通信作者** (E-mail: guowlj@163.com)

长距离调水工程。其中,长距离输水明渠是线性工程,经常会不可避免地穿越膨胀土地区。据统计,膨胀土广泛分布于我国新疆、甘肃、河南等 20 几个省份,面积超过 10 万 km^2 ,其中,膨胀土渠道滑坡破坏异常严重,主要原因是膨胀土是工程界典型的“问题土”,在干湿循环等因素的影响下,具有明显强度衰减性^[1-4]。

明渠输水过程中,渠水难免发生渗漏,渗漏的渠水对渠基土进行浸泡,将显著降低渠基土的强度,进而导致滑坡^[5-7]。此外,新疆输水渠道大都为季节性供水,一般在春季通水,秋季停水,例如,上述新疆输水渠道每年 4 月下旬通水,9 月中旬停水。渠道通水期间,渠水入渗,渠道处于湿润状态;停水期间,渠身内的水回渗,渠道处于变干的非饱和状态。从水分变化的角度出发,渠基土每年经历反复的“干湿”循环过程,才造成膨胀土渠道的损毁异常严重^[8-10]。

目前,新疆部分膨胀土输水渠道已经进行了渗水速排改造:输水过程中渗漏的渠水会先汇集到渠底纵向排水管,然后通过横向排水管导流至竖向排水井,最后积水由竖向排水井抽排返回渠道。已建成的竖向排水井一般距离渠坡 4~5 m,沿渠道纵向按照每 500 m 一座的密度修建。设计的初始目的是抽排渗漏的渠水,但是,在运行过程中竖向排水井又相当于抗滑桩,对渠坡可能会起到一定的抗滑保护作用。该保护作用的具体范围有多大,如何布置竖向排水井可以使该保护作用发挥更充分,需要开展系统的研究。

本文针对上述新疆输水渠道,选择典型断面,通过数值计算分析了现有竖向排水井对渠道稳定性的影响,并研究了不同竖井布置方式的影响范围,对北疆输水渠道的建设与管理提供参考。

1 工程概况

北疆输水渠道沿线泥岩分布较广,属中一强膨胀性渠基土,如图 1 所示,类似滑坡已累计超过 30 km,建管单位每年都要耗费大量的人力、物力进行抢修。

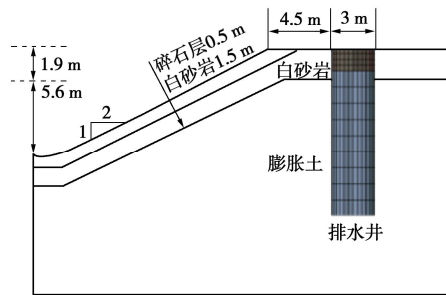


图 1 典型膨胀土渠道滑坡

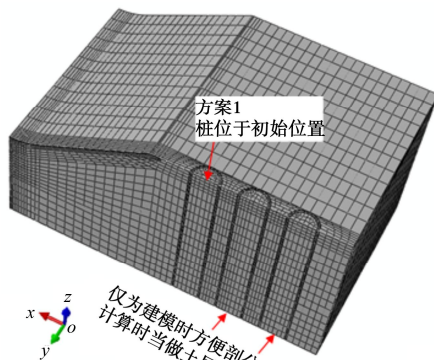
Fig. 1 Typical landslide of expansive soil canal

为了解决膨胀土渠道滑坡频发的问题,建管部门对沿线膨胀土渠段进行了改造,主要包括如下两条措施:①对渠坡表层 2 m 厚的膨胀土进行置换,表层置换为 0.5 m 厚碎石层,中间层置换为 1.5 m 厚白砂岩,内部依然为膨胀土,断面示意图如图 2 (a) 所示。②在渠底和沿线设置排水设施,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,排水井材料为钢筋混凝土,外径为 3 m,距离渠沿 4.5 m,沿渠道纵向以每 500 m 一座的密度进行修建,如图 2 (a) 所示。

应用有限元软件建立渠道边坡三维有限元模型,其中,渠道位于初始位置时的有限元网格如图 2 (b) 所示。计算采用有限元强度折减法^[11],Z 轴方向为高度方向,渠底以下的土层深度为 12.5 m;Y 轴方向为渠道纵向,计算的范围为 50 m。



(a) 渠道土层示意图



(b) 三维有限元网格

图 2 渠道模型三维网格划分

Fig. 2 3D mesh of canal model

计算主要涉及三种土料,参数如下:

(1) 笔者对白砂岩开展了系列室内试验^[12],白砂岩的制样密度状态由压实度 88.4%增大到 96.0%时,黏聚力 c 由 12 kPa 增大到 40 kPa,摩擦角 φ 则基本不变,为 32° 左右。相比于青色泥岩,白砂岩的性质较为稳定,66%的成分为石英,受到干湿循环影响程度较小。根据监测资料,现场碾压白砂岩压实度并非都高于 96%, c 值可能小于 40 kPa,为简化计算,将白

砂岩强度参数固定为 $c=20$ kPa, $\varphi=32^\circ$, 湿密度为 1.89 g/cm³, 饱和密度为 2.13 g/cm³。

(2) 碎石料的初始强度参数为 $c=0$ kPa, $\varphi=40^\circ$, 由于渠道高度为 7.5 m, 按照平均重度 20 kN/m³ 进行估算, 作用在渠道土体 7.5 m 深处的自重应力约为 150 kPa, 对碎石料而言, 在 150 kPa 这样一个较小的自重应力下, 碎石料的强度非线性特性还不足以充分发挥, 因此, 在计算中将砂砾石的内摩擦角 φ 视为定值 40° ; 同时, 认为碎石料的强度不会随着干湿循环而折减, 即 φ 都为 40° , 密度为 2.30 g/cm³, 饱和密度为 2.53 g/cm³。

(3) 对于渠基土的计算参数, 青色泥岩受到明显的干湿循环作用影响, 陈皓^[13]针对新疆渠道泥岩开展了“干湿”循环下的系列直剪试验, 试样的湿密度为 1.84 g/cm³, 饱和密度为 1.92 g/cm³, 得到强度参数如式 (1) 和式 (2) 所示^[13]。

$$c=29.22e^{(-N/1.65)}+14.09 \quad (1)$$

$$\varphi=5.82-0.2N \quad (2)$$

式中, N 为干湿循环次数, 对北疆输水渠道而言渠道经历一次完整干湿循环的时间为 1 a。

(4) 排水井的材料为钢筋混凝土, 强度参数为 $c=30$ MPa, $\varphi=50^\circ$, 密度为 2.4 g/cm³。

2 渗水速排系统改造效果分析

2.1 渠坡稳定性

根据现场监测资料, 2018 年渠道最高运行水位约为 6 m, 在渠道输水时, 由于水荷载作用于衬砌上, 对渠坡稳定性起到了保护作用, 渠道滑坡发生可能性降低。实际上, 根据渠道管理处提供的资料, 滑坡通常发生在降水阶段, 这是由于水位骤降时, 一方面, 水荷载消失, 降低了对渠坡的保护作用; 另一方面, 膨胀土性渠基土经过输水期渗漏渠水浸泡, 抗剪强度降低, 抗滑稳定系数降低。

鉴于水位骤降工况是最危险工况, 在计算过程中, 假设水位从最高 6 m 骤降至 0 m, 则膜后水位的高度范围可能为 $0\sim6$ m。其中, 膜后水位为 0 m, 表示该渠段无渗漏, 膜后无水; 膜后水位为 6 m, 表示该渠段渗漏严重, 膜后水位与渠道水位相同。

计算采用强度折减法, 图 3 给出了无膜后水位、膜后水位为 $1, 3, 6$ m 这几种代表性工况下的渠坡稳定性系数 F_s 与渠道运行时间的关系图。

《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, 欠稳定和四种状态, 如表 1 所示。

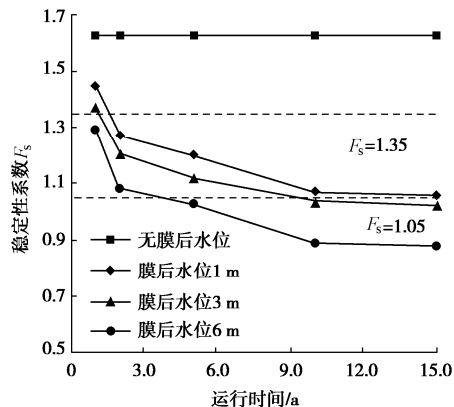


图 3 渠坡稳定性系数 F_s 与运行时间的关系

Fig. 3 Relationship between stability factor F_s and operation years

表 1 边坡稳定性状态划分

Table 1 Division of slope stability state

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 $1.35, 1.30$ 和 1.25 。本计算边坡取 $F_{st}=1.35$ 。

由图 3 可得, 在渠道多年运行过程中, 渠坡稳定性系数 F_s 的变化规律受到膜后水位高度的显著影响, 呈现如下几大特点:

(1) 渠坡稳定性系数 F_s 随着渠道运行时间的增加而减小, 且在运行 10 a 之后, F_s 基本不再变化。

(2) 无膜后水位的断面在多年运行期内的渠坡稳定性系数 F_s 保持不变, 且大于 1.35 , 根据表 1, 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 F_s 不变。

(3) 膜后水位为 $0\sim1$ m 的断面, 在多年运行期内 F_s 大于 1.05 , 渠坡处于基本稳定状态。

(4) 膜后水位大于 1 m 的断面, 经过多年运行以后, F_s 将小于 1.05 , 渠坡处于欠稳定或不稳定状态。

进一步地, 分析了加高渠道潜在滑动面的区域, 如图 4 中灰色区域所示。可能发生浅层滑坡, 滑弧起点在渠沿, 滑弧终点在渠坡中部; 深层滑坡, 滑弧起点距离渠沿约 5 m, 滑弧终点为渠底。

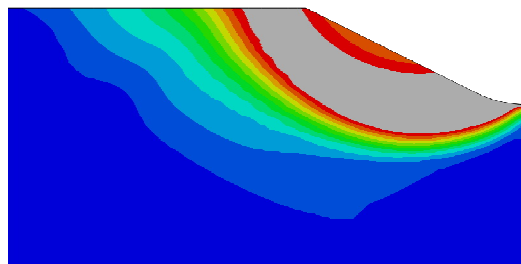


图 4 潜在滑弧的位置 (灰色为潜在滑动带)

Fig. 4 The position of potential slip circles

综上所述,若渠道渗漏严重,膜后水位较高,渠道在周期性供水、停水过程中经历干湿循环作用,膨胀性渠基土的强度会持续降低,渠坡的稳定性降低,最终使渠道处于不稳定状态;相反,若渗水速排系统持续作业,将渠道膜后水位控制在较低甚至无膜后水位的状态,则渠坡将处于稳定或基本稳定状态。因此,为了提高渠坡稳定性,渠道管理部门已对部分滑坡较严重的渠段进行了渗水速排改造。

2.2 单桩布置方案

渗水速排改造增加了横向排水管和竖向排水井,竖向排水井的主要作用是将渗水抽排,降低膜后水位;同时,竖向排水井的作用实际上又相当于抗滑桩,本节主要分析竖向排水井对渠坡稳定性的影响。

一方面,如前所述,渠水位为 0 m 时对渠道而言是最危险工况;另一方面,假设渗水速排效果较好,能够将渗漏渠水及时抽排,保证膜后水位为 0,则渠基土不会经历干湿循环的作用。竖向排水井建成之后的典型工况为渠水位和膜后水位都为 0,即计算中不考虑水分场的影响,土体强度参数都采用 $N=1$ 时的参数。

目前,北疆渠道竖向排水井的外边缘距离渠坡水平距离为 4.5 m,竖向排水井长为 14 m,外径为 3 m,如图 5 所示。

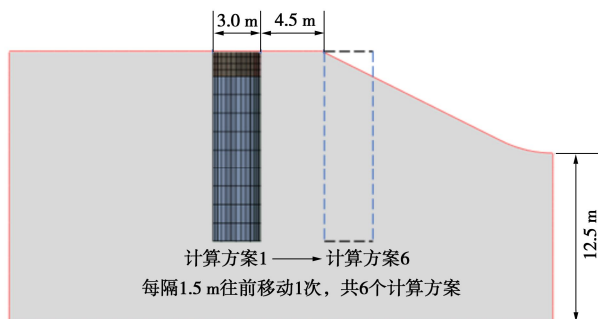


图 5 不同方案竖向排水井的位置示意图

Fig. 5 Diagram of drainage wells at different positions

根据排水井的位置共设计了 6 套计算方案:方案 1 是排水井处于原始位置,方案 2 至方案 6 则是将排水井往靠近渠坡的方向移动,具体方案如表 2 所示。

表 2 数值计算方案

Table 2 Numerical schemes

方案编号	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
排水井状态	初始位置	前移 1.5 m	前移 3.0 m	前移 4.5 m	前移 6.0 m	前移 7.5 m
排水井圆心坐标	-6.0 m	-4.5 m	-3.0 m	-1.5 m	0 m	1.5 m

2.3 单桩保护范围

如何表征单根桩对渠坡的保护范围,本文是根据三维计算桩前的位移云图分布来判定,现以方案 6 的

位移分布图进行说明。为更直观显示桩对桩前渠基土位移的影响,现将桩后的位移云图用灰色表示,桩前位移云图则正常表示,如图 6 所示,在桩周附近的土体位移相对较小,离桩越远则位移越大,当离桩的距离大到某个值时(图 6 中为 14 m),位移分布不再变化,说明桩对 14 m 之外的土体几乎无影响,根据对称原理,可以认为,桩在此处对于渠坡的保护范围为 $14 \text{ m} \times 2 = 28 \text{ m}$ 。

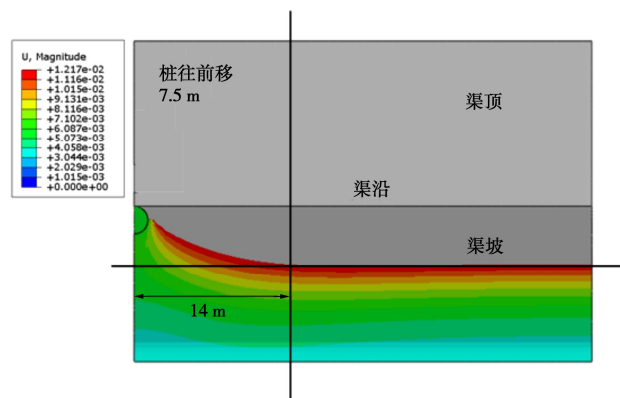


图 6 方案 6 单桩保护范围示意图

Fig. 6 Schematic diagram of protection scope of single pile in Scheme 6

根据如上判别方法,得出方案 5 桩向前移动 6 m,即桩心位于渠沿时,单桩保护范围最大,为 $22 \text{ m} \times 2 = 44 \text{ m}$,如图 7 所示。

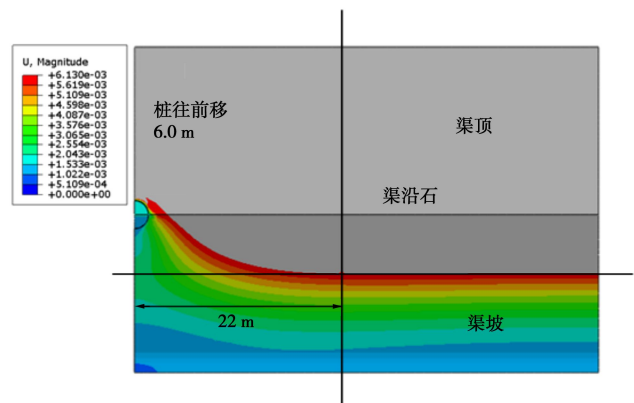


图 7 方案 5 单桩保护范围示意图

Fig. 7 Schematic diagram of protection scope of single pile in Scheme 5

当桩处于原始位置时,桩周围的土体位移与其他部位的土体位移基本无差别,可以认为桩的保护范围为 0,如图 8 所示。

为了进一步证明图 8 中认为桩的保护范围为 0 m 是合理的,选取排水井圆心所在断面处的位移云图,如图 9 所示。

图 9 显示,尽管滑弧无法穿过排水井,但是在排

水井的前方依然形成了贯穿的滑动区域。因此, 可以认为排水井在原始位置时对于渠坡的抗滑稳定作用有限, 即排水井能够减小滑动范围, 使得滑动区域位于排水井前方, 而不至于穿过排水井, 但是无法彻底避免发生滑坡。在此基础上, 若将排水井往靠近渠坡方向移动, 则能够对其周围渠坡起到抗滑保护作用, 6 种计算方案计算结果如图 10 所示。

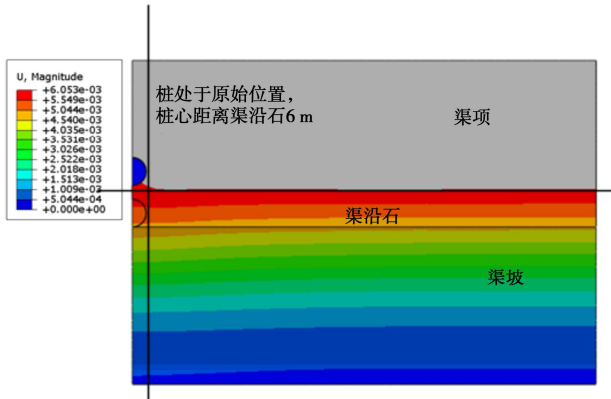


图 8 方案 1 单桩保护范围示意图

Fig. 8 Schematic diagram of protection scope of single pile in Scheme 1

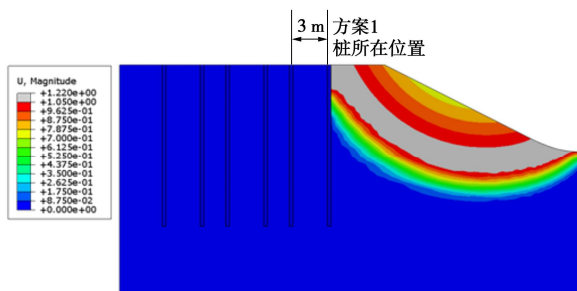


图 9 方案 1 排水井圆心所在断面的位移云图

Fig. 9 Displacements of section of pile center in Scheme 1

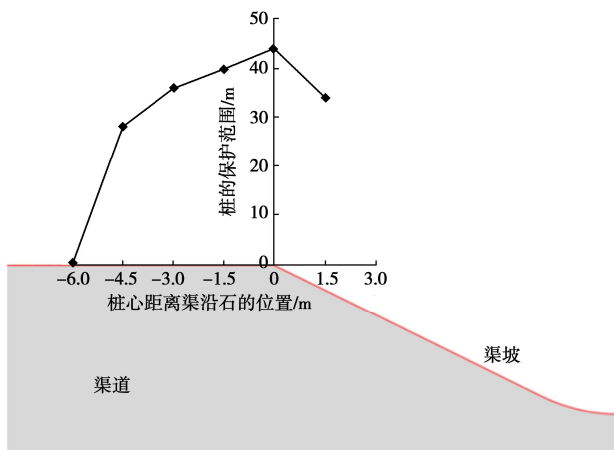


图 10 桩在不同位置时的保护范围

Fig. 10 Protection range for piles at different locations

图 10 显示: 排水井圆心距离渠沿-6 m 时, 即北疆总干渠当前竖向排水井所在位置, 竖向排水井作为抗滑桩的作用基本可忽略; 若排水井往靠近渠沿的方向移动, 则单桩对渠坡的保护范围逐渐加大, 当排水井圆心刚好位于渠沿时, 保护范围达到最大, 为 44 m。若将排水井继续往前移动, 移到渠坡上时, 单桩保护范围并不能持续加大, 而是呈减小的趋势, 比如, 圆心位于 1.5 m 处时, 单桩保护范围下降到 28 m。

综上所述, 不考虑排水系统降低膜后水位的作用, 仅分析竖向排水井作为抗滑桩的作用, 北疆总干渠排水井当前所在位置起到的抗滑作用基本可以忽略, 滑弧出现在排水井前方。若往前移动排水井的位置, 则将排水井移动到渠沿 (圆心所在位置) 时, 单桩保护范围最大, 为 44 m, 如图 11 所示。

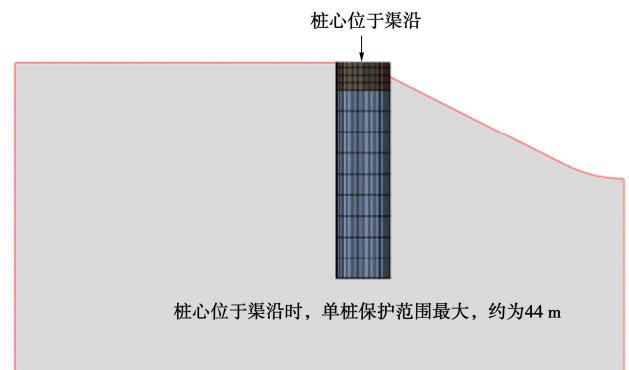


图 11 单桩保护范围最大时桩所在位置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of pile position under maximum protection range of a single pile

3 结 论

通过数值计算, 分析了北疆渗水速排系统对渠道稳定性的作用, 其中, 重点分析了竖向排水井作为抗滑桩时的抗滑效果, 主要结论如下:

(1) 渠道渗漏断面存在膜后水, 渠坡稳定性系数 F_s 与不存在膜后水位的断面相比会显著下降。其中, 膜后水位大于 1 m 的断面在运行 10 a 以上时, F_s 将小于 1.05, 处于欠稳定或不稳定状态; 渗水速排系统开展持续抽排作业, 将膜后水位控制在低水位甚至是无水位的状态, 渠坡将长期处于稳定状态。

(2) 不考虑排水系统降低膜后水位的作用, 仅分析竖向排水井作为抗滑桩的作用, 北疆总干渠排水井当前所在位置起到的抗滑作用基本可以忽略, 滑弧将会出现在排水井前方。

(3) 将排水井向靠近渠坡的方向移动, 则将排水井移动到渠沿 (圆心所在位置) 时, 单根排水井对渠坡抗滑保护范围最大, 为 44 m。

参考文献:

- [1] 张良以, 陈铁林, 张顶立. 降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 70 - 77. (ZHANG Liang-yi, CHEN Tie-lin, ZHANG Ding-li. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 70 - 77. (in Chinese))
- [2] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(5): 141 - 161. (KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(5): 141 - 161. (in Chinese))
- [3] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2155 - 2161. (YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2155 - 2161. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] OH S, NING L. Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes[J]. Engineering Geology, 2015, **184**: 96 - 103.
- [6] 陈善雄, 戴张俊, 陆定杰, 等. 考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2014, **45**(12): 1442 - 1449. (CHEN Shan-xiong, DAI Zhang-jun, LU Ding-jie, et al. Stability analysis of expansive soil slope considering fracture distribution and strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(12): 1442 - 1449. (in Chinese))
- [7] 周跃峰, 程展林, 龚壁卫, 等. 新疆某渠道边坡填料的剪胀特性与变形失稳研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(增刊 2): 4406 - 4414. (ZHOU Yue-feng, CHENG Zhan-lin, GONG Bi-wei, et al. The dilatancy and instability of an infilled material in a canal slope in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(S2): 4406 - 4414. (in Chinese))
- [8] 岑威钧, 王蒙, 石从浩, 等. 降雨条件下多裂隙膨胀岩渠坡稳定性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, **35**(2): 10 - 14. (CENG Wei-jun, WANG Meng, SHI Cong-hao. Stability analysis of multi-fissure expansive rock canal slope under rainfall conditions[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, **35**(2): 10 - 14. (in Chinese))
- [9] 温世亿. 膨胀土渠坡若干关键技术问题研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. (WEN Shi-yi. Research on Several Key Technical Problems of Expansive Soil Canal Slopes[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese))
- [10] KHAN M S, HOSSAIN S, AHMED A, et al. Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in texas[J]. Engineering Geology, 2016, **219**: S0013795216304616.
- [11] 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))
- [12] 邓铭江, 蔡正银, 郭万里, 等. 北疆白砂岩特殊物理力学性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 1): 1 - 5. (DENG Ming-jiang, CAI Zheng-yin, GUO Wan-li[J]. Experimental study on special physical and mechanical properties of white sandstone in North Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 1 - 5. (in Chinese))
- [13] 陈皓. 膨胀土渠道在干湿循环作用下的稳定性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019. (CHEN Hao. Study on Stability of Canal Slope of Expensive Soil under Drying-wetting Cycles[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2019. (in Chinese))

(编校: 明经平)