

高地下水位深挖方膨胀土渠坡运行期 变形特征及其影响因素

胡江¹, 杨宏伟², 李星¹, 马福恒¹

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029;
2. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100038)

摘要:以一调水工程南阳盆地一段高地下水位深挖方膨胀土渠坡为例,依据地质勘察、施工期和运行期资料,总结渠坡变形后的外观病害特征,阐述变形体潜在剪切变形带深度和几何形态,从工程与水文地质(土体膨胀性、裂隙结构面和地下水)、降雨等内外因素综合分析剪切变形机制,评判常用的防渗排水和加固支护处理措施的效果。结果表明:变形渠段地下水为上层滞水,埋深较浅,运行期受降雨影响明显,在多年反复湿胀干缩效应作用下,滞水区中短小裂隙逐步贯通,抗剪强度降低,渠坡产生侧向蠕动变形;潜在剪切变形带底面近水平、后缘面陡倾;防渗和排水措施能排出地下水并降低地下水位,抗滑桩和伞形锚等加固支护措施阻滑效果较好。

关键词:膨胀土;深挖方边坡;变形;地下水;加固

中图分类号:TV223 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0094-08

Slope deformation characteristics and influencing factors of deeply excavated expansive soil canal slopes with high groundwater level during operation periods//HU Jiang¹, YANG Hongwei², LI Xing¹, MA Fuheng¹ (1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. China South-to-North Water Diversion Central Route Corporation Limited, Beijing 100038, China)

Abstract: A deeply excavated expansive soil slope of a canal section with high groundwater level in the Nanyang basin of a water transfer project was investigated. According to the data of geological survey and the data during the construction and operation periods, the appearance disaster characteristics of the canal slope after deformation were summarized. The depth and the geometry of the potential shear deformation zone of the deformed body were described. The deformation mechanism was comprehensively analyzed from the internal and external factors such as engineering geology and hydrogeology (soil swelling, fracture structural plane and groundwater level) and rainfall. The effects of common anti-seepage, drainage, and reinforcement measures were evaluated. The results show that the groundwater in the deformed canal section is stagnant water in the upper layer, and the buried depth is shallow. The stagnant water is significantly affected by rainfall during the operation period. The short and small cracks in the upper layer gradually penetrate under the repeated wetting and drying cycles for many years. The shear strength decreases, and the canal slope has lateral creep deformation. The bottom surface of the potential shear deformed body is nearly horizontal, and the trailing edge surface is steep. Anti-seepage and drainage measures can reduce the groundwater level, and reinforcement and support measures such as anti-slide piles and umbrella anchors are effective.

Key words: expansive soil; deeply excavated slope; deformation; groundwater; reinforcement

膨胀土渠坡滑坡具有渐进性、季节性、滞后性和反复性等特征,我国南水北调中线、引江济淮和北疆供水等多个调水工程都面临膨胀土渠坡的变形破坏等问题^[1-3]。众多学者在膨胀土渠坡的变形机理、防渗排水和抗滑措施等方面开展了大量研究。例如:李青云等^[4]开展了挖方膨胀土渠坡变形破坏机理的现场和物理模型试验,发现降雨引起的渠坡施工

期浅层滑坡是膨胀性和重力作用的结果;钮新强等^[1]总结了南水北调中线工程膨胀土渠坡施工期滑坡案例,主要有浅表层胀缩型和深层结构面控制型两类;陆定杰等^[5]分析了南水北调中线工程南阳段膨胀土渠坡施工期滑坡事故,发现滑坡多发生在第四系中更新统 al-plQ₂层,滑动面由后缘陡倾裂隙面和前缘缓倾长大裂隙组成,坡面以下 4~8 m 深度存在

一个高湿度带;蔡耀军^[6]总结地质勘察资料发现,当挖深超过 10 m 且有长大裂隙或层间软弱面时,膨胀土渠坡破坏机理发生根本性变化,须采取抗滑桩和坡脚支护措施。然而,施工期采取的防渗排水和加固措施并不能完全保证运行期稳定,如南水北调中线工程通水运行后深挖方膨胀土渠坡受地下水影响显著,局部变形超过参考值,成为工程安全输水和高效运行的潜在隐患,以防为主结合加固处理的措施对保障工程的长期稳定性意义重大。

本文以一调水工程南阳盆地中一段挖深超过 15 m 的高地下水位深挖方渠坡为例,依据地质勘察、施工期和运行期资料^[7-9],总结渠坡变形后的外观病害特征,阐述变形体厚度和潜在剪切变形带几何形态,从工程与水文地质、降雨与地下水位等内外因素综合分析变形机制,评判加固处置措施效果,以期为类似工程运行管理和加固治理提供参考。

1 渠坡及变形体概况

1.1 渠坡概况

该调水工程总干渠膨胀土渠段以南阳盆地段最集中,该段渠坡具有挖深大、地质结构复杂等特点,挖深超过 10 m 的渠段长达 144 km,最大坡高超过 40 m,施工期发生滑坡约 100 处。以桩号 8+000 ~ 12+000 段为例开展研究,该段渠坡挖深 39 ~ 45 m。过水断面坡比 1 : 3,一级马道宽 5 m,一级马道以上每隔 6 m 设一级马道,除四级马道宽 50 m 外其余均为 2 m 宽,一至四级马道间渠坡坡比均为 1 : 2.5,四级马道以上渠坡坡比为 1 : 3。渠道全断面换填水泥改性土,过水断面、一级马道以上换填厚度分别为

1.5 m 和 1.0 m。护坡采用混凝土拱圈和拱内植草方式,各级马道均设有纵向排水沟,坡面设有横向排水沟。渠坡典型断面见文献[2]。

渠坡由第四系中更新统粉质黏土、黏土以及钙质结核粉质黏土组成。第一层为粉质黏土,硬塑,弱偏中等膨胀,胀缩、微及小裂隙和大裂隙较发育,大及长大裂隙在地下水较丰富的地带发育,常形成裂隙密集带;第二层为黏土,硬塑-硬可塑,中等膨胀,微及小裂隙较发育,大及长大裂隙不甚发育;第三层为钙质结核粉质黏土,硬塑,中等膨胀,裂隙不发育。裂隙结构面多光滑、抗剪强度低是渠坡稳定的控制性因素,也制约变形和滑坡形态与规模。裂隙面黏聚力为 10 kPa,内摩擦角为 10°。渠坡开挖范围内地下水主要为上层滞水,处于大气影响带下部,受雨水入渗补给,地下水位随季节变化大。

渠坡主要工程地质问题有土体胀缩和滑坡失稳,支护以提高过水断面稳定性为主。在过水断面设间距为 4.0 ~ 4.5 m 的方桩和坡面梁支护体系,一级马道以上渠坡依据开挖揭露的裂隙情况采取局部支护措施。如左 8+740 ~ 8+860 一级马道以上渠坡未设抗滑桩,右 11+650 ~ 11+800 三级渠坡 152.5 ~ 156.7 m 高程分布有裂隙密集带,在其坡脚和坡顶附近处分别设置桩长为 12 m、10 m 的抗滑桩,桩间距均为 4 m^[7-11]。

1.2 运行期变形体情况

通水运行后,部分渠段出现坡中拱圈拉裂、坡脚拱圈断裂翘起、过水断面衬砌板开裂隆起等刚性结构破损现象。依据变形监测结果,2016 年以来有 8 处渠坡变形未完全收敛(表 1),A 向(朝渠道内方

表 1 深挖方膨胀土渠坡变形体的基本情况

编号	桩号	膨胀性	挖深/m	边坡级数	一级马道以上抗滑措施	施工期滑坡情况	外观病害	病害变化情况
1	右 8+216 ~ 8+377	中	24	4	刷方减载和抗滑桩加固	发生较大规模滑坡	一、二级渠坡坡脚排水沟侧墙倾斜、顶部开裂,二、三、四级渠坡拱圈开裂	受连续降雨影响,变形加剧
2	右 9+246 ~ 9+500	中	40	6	未设抗滑桩	未发生大规模滑坡	三级渠坡拱圈出现裂缝,裂缝连线呈抛物线	变形一直增长,未见收敛
3	左 8+740 ~ 8+860	中	34 ~ 39	5	未设抗滑桩	未发生大规模滑坡	二级马道排水沟缩窄,侧壁与底板脱空;四级渠坡中上部拱圈出现连续性裂缝;过水断面衬砌板出现顺水流向裂缝	沟壁持续缩窄;出现裂缝拱圈数量增多,且裂缝宽度进一步扩展
4	左 9+070 ~ 9+575	中	39 ~ 45	7	三级渠坡坡脚设抗滑桩	五级渠坡以上滑动	二级渠坡坡脚拱圈出现裂缝,排水管长期出水等	二级渠坡坡脚个别拱圈断裂、翘起
5	右 9+585 ~ 9+740	中偏强	39 ~ 45	7	二级渠坡坡顶设抗滑桩	五至六级渠坡滑动	渠坡未见明显变形	
6	左 10+955 ~ 11+000	中	39 ~ 45	7	三级马道设抗滑桩	未发生大规模滑坡	渠坡三、四级渠坡坡脚排水沟断裂	衬砌板存在裂缝和翘起
7	左 11+400 ~ 11+450	中	39 ~ 45	7	三级马道设抗滑桩	未发生大规模滑坡	五级渠坡坡脚纵向排水沟束窄变形,但四级及以下渠坡未见明显变形	沟壁持续缩窄
8	右 11+650 ~ 11+800	中偏强	42	7	三级渠坡坡脚和靠近坡顶处设抗滑桩	五级渠坡以上滑动	二级渠坡坡脚拱圈存在细小裂缝;四级渠坡和四级马道大平台的排水沟有渗水点	二级渠坡坡脚拱圈裂缝增长,继而拱圈断裂、拱起

注:桩号中左、右分别指渠道左岸、右岸。

向) 累计位移超过了设计参考值 30 mm,存在较严重的剪切变形。

1.3 施工期滑坡情况

该段渠道开挖时共出现 14 处滑坡。底滑面完全或大部分追踪到长大裂隙面或平缓裂隙密集带,裂隙连通性好,是滑动面和剪出口的主要部位,且均位于大气影响带及过渡带,上层滞水丰富。大型滑坡采取清除、换填及抗滑桩加固处理,小型滑坡采取清除及换填处理。与表 1 中 8 处变形体相关的施工期 3 处滑坡的示意图见图 1,特征、成因及处理措施见表 2。

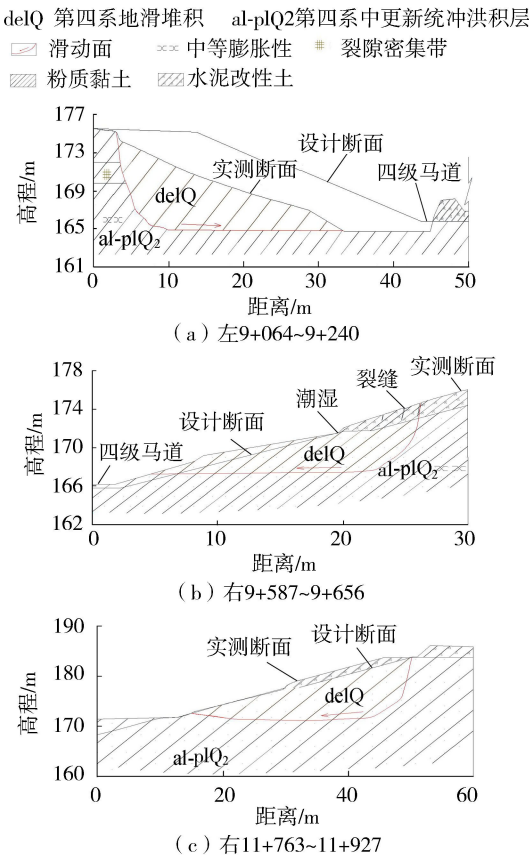


图 1 施工期渠坡滑坡示意图

表 2 深挖方膨胀土渠段施工期滑坡情况

桩号	发生部位	地质条件	滑坡变形过程及特征	成因	处理措施
左 9+064 ~ 9+240	五级渠坡至渠顶	土体弱偏中等膨胀性, Q ₂ 土体裂隙较发育且与渠坡倾向大体一致, 坡脚附近发育长大平缓裂隙密集带, 裂隙密集带土体中偏强膨胀性	2012 年 8 月 19 日强降雨后, 渠坡初次变形; 2013 年 7 月中旬降雨后滑动	优势倾向以倾渠道为主, 强降雨时渠坡沿软弱面向下蠕变变形、滑坡	刷方减载和抗滑桩加固
右 9+587 ~ 9+656	五至六级渠坡	土体中等膨胀性、裂隙较发育	2013 年 9 月 20 日, 四级马道以上渠坡滑坡, 前缘略反翘; 六级渠坡中下部及四级渠坡与五级马道结合处渗水	反复湿胀干缩效应作用下渠坡产生不可逆蠕变变形; 软弱结构面连续贯通, 强降雨时含水量达临界值	刷方减载和抗滑桩加固
右 11+763 ~ 11+927	五至七级渠坡	Q ₂ 土体具有中等膨胀性, 裂隙极发育且连通性较好, 大裂隙较发育, 倾向以缓至中等倾角为主, 其次为陡倾角	2012 年 9 月 15 日, 换填坡面出现多条顺渠道向裂缝, 最长 96 m, 宽 1 ~ 10 cm; 2012 年 9 月 29 日五级马道以上渠坡建基土体滑坡, 滑坡呈簸箕形	2 组长大裂隙组合对渠坡稳定极为不利, 渠坡结构裂隙面经地下水逐步渗入形成软弱面继而贯通	刷方减载和抗滑桩加固

2 渠坡变形特征及内外因素关系

2.1 渠坡变形体外观病害特征

表 1 中列举了 8 处变形体的外观病害特征。以 3 号和 8 号变形体为例说明变形体的外观病害。3 号变形体外观病害见图 2, 三、四级渠坡下部拱骨架裂缝连续、规律性强; 二级马道排水沟存在挤压变形^[2]。

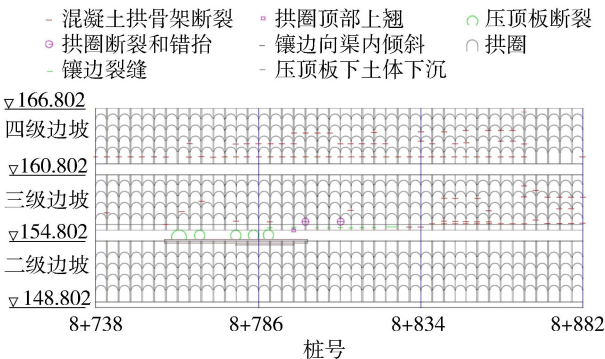


图 2 3 号变形体的外观病害(单位:m)

为查明裂缝的位置和走向,在 3 号变形体挖了 6 个探坑,存在裂缝和洇湿的有 5 个,如图 3 所示。左 8+840 断面三级渠坡坡脚探坑周边土体洇湿,坑底渗水;左 8+800 断面四级渠坡坡脚探坑深入原状土内 15 ~ 20 cm,坑底土体湿润,坑内少许积水,强降雨阶段坑内积水水位稳定,水深约 40 cm;左 8+818 断面四级马道探坑拱圈裂缝延伸至土体,在距离坑底约 10 cm 处消失,探坑周边及底部土体略微潮湿,但未见渗水。

8 号变形体二级渠坡坡脚拱圈隆起开裂,三、四级渠坡坡中部拱圈拉裂,四级渠坡和四级马道大平台排水沟有不同程度渗水,具体外观病害分布见图 4。外观和探坑揭露病害表明,拱骨架裂缝大多未延伸至土体内,但三、四级渠坡坡脚有渗水,即大气降水透过了改性土换填层。



图3 3号变形体的外观病害和探坑检查结果(单位:m)

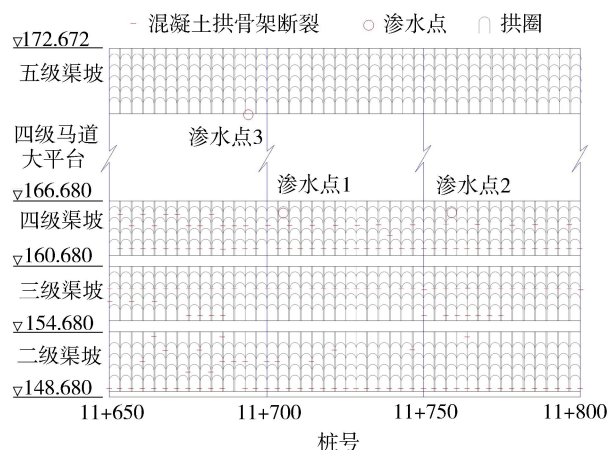


图4 8号变形体的外观病害(单位:m)

2.2 变形体几何形态

通过变形监测数据判断变形体几何形态,以内部变形是否存在突变判断潜在剪切变形带。以4号变形体为例,测斜管和测压管的布置见图5。左9+300断面的典型观测日的内部变形见图6,各测斜管最大变形处测值与降水量的变化过程见图7(图中IN05表示桩号断面上编号为05的测斜管)。选取2021年3月5日的内部A向累计位移和2021年

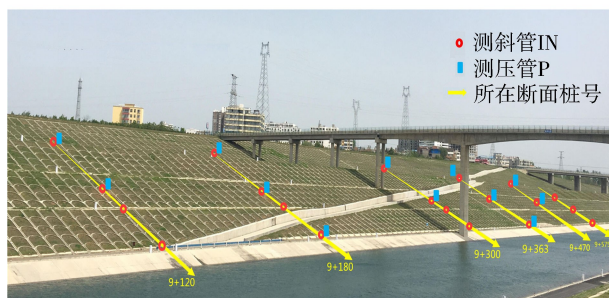
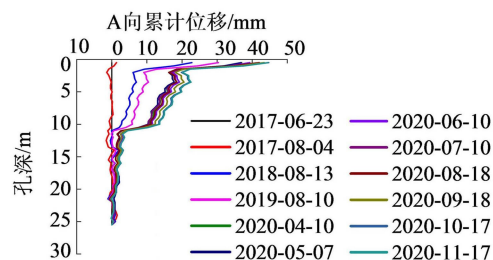
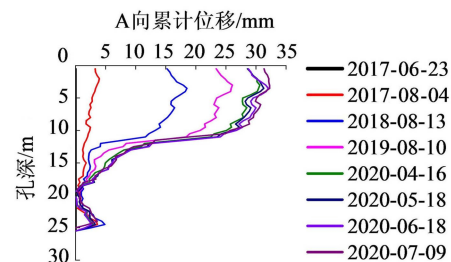


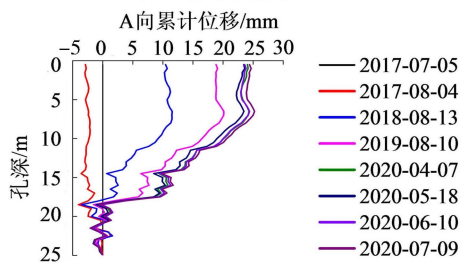
图5 4号变形体测斜管和测压管布置



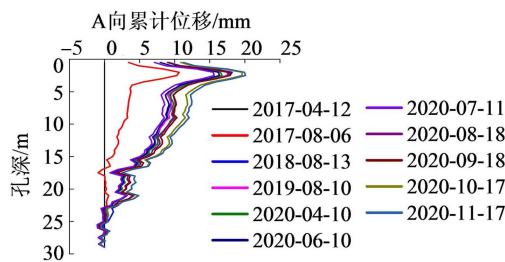
(a) 左岸一级马道测点IN05



(b) 左岸二级马道测点IN06



(c) 左岸三级渠坡测点IN03



(d) 左岸四级马道测点IN04

图6 左9+300断面各测斜管A向累计位移变化

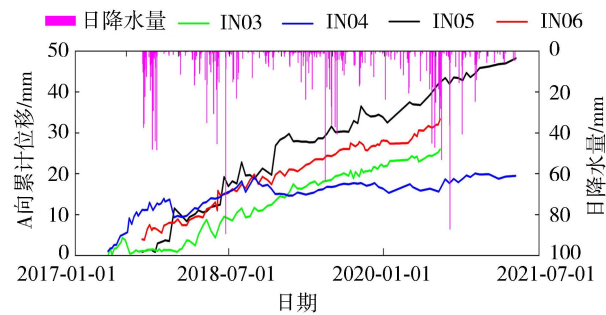


图7 左9+300断面各测斜管最大位移和降水量变化

3月16日的表面变形,绘制左9+120、左9+300断面的变形示意图,结果见图8。

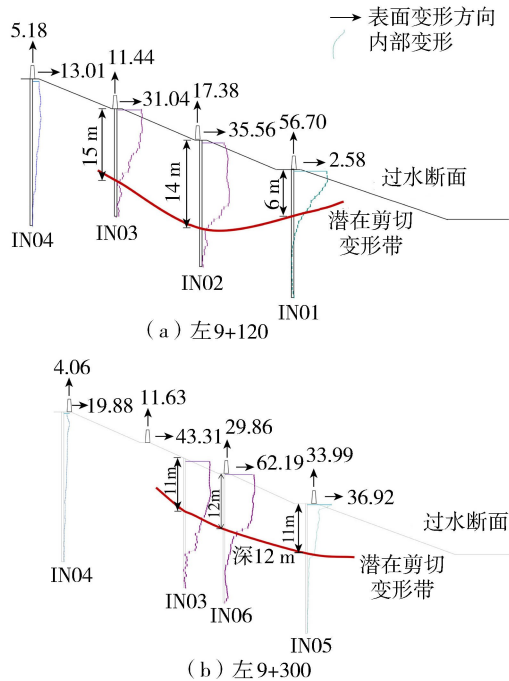


图8 左9+120和9+300断面的变形体示意图(单位:mm)

从图6和图7看,变形体仍在发展,还处于蠕变阶段。变形具有明显的季节性和间歇性,雨季发展快;经过季节性干湿循环后,来年雨季蠕变复活,又产生新的蠕变。结合图2~4、图8中的外观变形、病害和内部变形可知,两个断面变形体范围为一至四级马道范围内渠坡。由于过水断面抗滑桩的阻滑作用,变形体前缘沿二级渠坡坡脚剪出,一级马道反翘;后缘到达四级渠坡。

表3 变形体潜在剪切变形带深度

编号	桩号	变形体深度
1	右8+216~8+377	三级马道以下12.5m深度处存在软弱夹层
2	右9+246~9+500	二、三级马道变形范围分别为孔口以下8m和10m内
3	左8+740~8+860	应急处置后三级马道以下6m深度处存在剪切变形,变形体深度2~8m
4	左9+070~9+575	一、二、三级马道变形范围分别为孔口以下11m、12m和18m内,最大变形量47.01mm
5	右9+585~9+740	二、三级马道孔口以下14m内,最大变形量41.7mm
6	左10+955~11+000	一、二、三级马道变形范围为孔口以下4m、11m、14m内,二级马道以下最大变形量32.65mm
7	左11+400~11+450	三、五级马道变形范围为孔口以下13m、10.8m内,最大变形量34.99mm
8	右11+650~11+800	二、三级渠坡已经产生变形,二级马道以下约10m深度处存在剪切变形;变形体前缘位于二级渠坡坡脚

同样地分析其他变形体几何形态,结果列于表3。变形体范围主要在一至四级马道范围内,变形垂直于水流方向指向渠道过水断面,7号变形体五级渠坡也存在变形。当设置了抗滑桩时(1号、4~8号变形体),一、二、三级马道以下变形深度分别为4~11m、9~15m、9~18m。变形体深度基本处于渠坡抗滑桩桩底以下或接近桩底,及过水断面方桩+坡面梁框架支护体系上部或顶部,出口位于一级马道附近。变形体特征基本一致,均为底面近水平和后缘面陡倾。

已有研究表明^[12],膨胀土大气影响带深0~3m,过渡带深3~7m。浅层滑动主要受胀缩裂隙控制,滑体厚一般为2~6m。由文献[12]可知,南阳地区膨胀土的大气影响深度为5.1~5.3m,急剧层深度为2.3~2.4m,比一般经验值偏大。由表3可知,考虑到在雨季长时间降雨作用下,坡面以下7m深度区域内可能处于饱和状态。深挖方渠坡的浅层变形和滑动规模相对较大。

2.3 变形体受地下水位影响机制

为监测渠坡换填土隔断大气降水的效果,在右9+300断面四级马道布置了3支土壤水分传感器(HRC_上、HRC_中和HRC_下),埋深分别为30cm、60cm和80cm,2019年8月至2021年4月的测值过程线见图9。

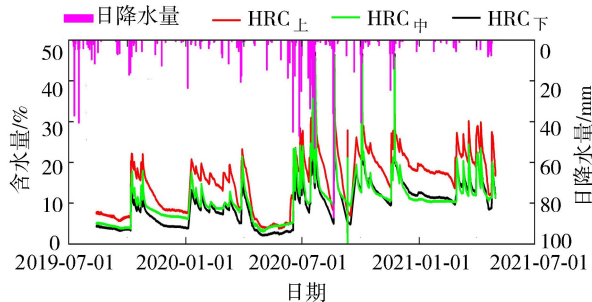


图9 换填层土壤含水量与降水量过程线

由于地表径流和水分蒸发等原因,入渗量要小于降水量。有效降水量计算方法见文献[2,13],这里有效雨量系数取0.84,前期降雨影响选取15d。采用灰色关联度量降雨与换填层土体含水量的相

关性,灰色关联度计算方法见文献[14],各层含水量与有效降水量的相关度分别为 0.743、0.723 和 0.713,灰色关联度都大于 0.6,相关性较好。可见,换填层土壤含水量与降雨关系密切。

开挖揭示渠段普遍存在上层滞水。上层滞水位于大气影响带下部的粉质黏土和黏土中裂隙密集带中,受雨水入渗补给。上层滞水埋藏较浅,埋深一般为 2~4 m,且随季节变化大,在长时间降雨期水位上升,略低于地表。渠道形成后,渠肩部分的地下水位会下降 1~3 m,影响范围至渠肩后 10~30 m。

渠段埋设了渗压计和测压管监测地下水位,监测结果也显示发生变形的渠段渠坡地下水位较高。部分施工期发生滑坡的渠段如 1 号、4 号、5 号和 8 号变形体在运行过程中仍有严重变形现象。以左 9+300 断面三级渠坡为例,地下水位和降水量过程线见图 10,渠坡地下水位较高,且与降水量存在一定的相关性,与渠道水位关系不大。有效降水量与地下水位、变形的灰色关联度分别为 0.639 和 0.610,均大于 0.6,相关性较好。

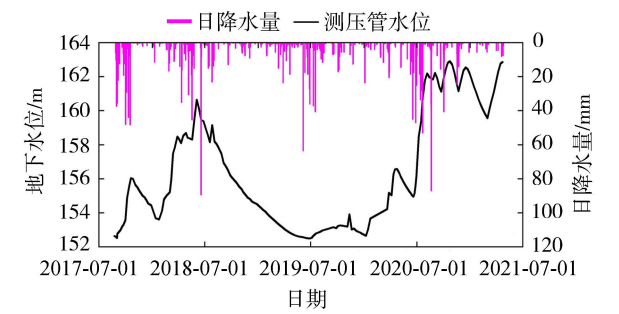


图 10 地下水位与降水量过程线

分析变形体地下水位与降水量的关系,结果见表 4。

膨胀土边坡胀缩变形或破坏主要是由于土体含水量反复变化引起的。该段运行期变形主要发生在地下水位较高的二至四级渠坡。可见,坡表采用水泥改性土换填后,未完全隔绝膨胀土与大气的水汽交换。在持续降雨期间,雨水入渗导致渠坡土体含水量升高;少雨季节,含水量下降。上层滞水区内的

膨胀土反复胀缩,土体中的裂隙与陡倾角长大裂隙逐步贯通,抗剪强度降低,由此产生变形。变形体是原有裂隙贯通引起的沿裂隙面的侧向变形形成的。

3 渠坡变形体成因及加固处置措施

3.1 变形体成因

各段深挖方膨胀土渠坡变形体成因类似,是受工程与水文地质、环境与荷载因素共同影响的结果^[12,15]。渠坡上部主要为 Q₂ 粉质黏土,下部及渠底由 Q₁ 粉质黏土、钙质结核粉质黏土组成。Q₂、Q₁ 粉质黏土、黏粒含量高,具中等膨胀性。变形体所在渠段渠坡地下水位较高,且与降雨情况存在一定的关联性。

内因方面,土体具中等膨胀性,裂隙较发育,不乏缓倾角长大裂隙和裂隙密集带。外因方面,卸荷作用使原来的裂隙贯通,重力作用使局部应力集中,增加土体的侧向变形;同时,渠坡虽采用改性土换填保护,但未能完全隔绝膨胀土与大气的水汽交换,地下水位受降雨补给、埋深较浅,随季节变化明显;在多年往复干湿循环作用下,膨胀土反复胀缩,导致土体中的短小裂隙逐步贯通,裂隙逐年增多、规模逐年增大,进一步导致膨胀土抗剪强度降低,地表水入渗,加速软化裂隙结构面,使力学强度降低,渠坡产生蠕动变形。

从工程与水文地质(土体的膨胀性、裂隙结构面与地下水位)、降雨等因素综合分析变形机制,结果见表 5。

3.2 变形体加固处置措施

变形体一般采取应急与永久加固相结合的处置措施^[9,16-20]。结合渠坡变形范围,应急处理采用四级及部分三级渠坡自上而下刷方减载的措施,并采用复合土工膜和弱膨胀土回填处理,坡面恢复拱圈和植草防护。

永久加固处置包括防渗排水和加固措施^[9,16-18]。在渠顶设防渗墙,降低渠坡地下水位,复合土工膜铺接至防渗墙部位,形成完整封闭的防渗系统。考虑地下水位埋深较浅,采用排水盲沟和排

表 4 变形体断面地下水分布及其与降水量的关系

编号	桩号	地下水分布	地下水位与降水量的关系
1	右 8+216~8+377	三级渠坡地下水位较高	地下水位与降水量存在较强关联性
2	右 9+246~9+500	施工时滑坡,地下水沿剪出口渗出,坡脚积水	滑坡发生在强降雨后
3	左 8+740~8+860	四级渠坡坡脚探坑内积水,三级渠坡坡脚有渗水	渗水与降水相关性好
4	左 9+070~9+575	二、三级渠坡地下水位较高	地下水位与降水量存在较强关联性
5	右 9+585~9+740	渠坡地下水位较低	地下水位与降水量相关性不大
6	左 10+955~11+000	一、二、三级马道地下水位较高,且补给较好	地下水位受降雨入渗影响较大
7	左 11+400~11+450	五级渠坡地下水位高,水位一般低于测压管孔口 0.93~3.21 m	地下水位与降水量相关性较好
8	右 11+650~11+800	测压管水位较高,六级、三级马道测压管水位仅低于孔口高程 0.73 m、1.12 m	地下水位较高,有 3 处渗水点

表 5 变形体变形成因

编号	桩号	变形成因
1	右 8+216 ~ 8+377	地下水位较高,未能及时排出,导致回填土和原状土之间的结合面土体含水量偏大,造成土体软化所致
2	右 9+246 ~ 9+500	裂隙在渠道开挖卸荷作用下贯通后导致
3	左 8+740 ~ 8+860	膨胀土与大气仍存在水汽交换,膨胀土含水量变化后土体强度降低和胀缩变形导致坡体内原有裂隙贯通引起的
4	左 9+070 ~ 9+575	
5	右 9+585 ~ 9+740	多年往复湿胀干缩效应作用下,膨胀土反复胀缩,导致土体中的短小裂隙逐步贯通,裂隙逐年增多、规模逐年增大,进一步导致膨胀土抗剪强度降低,渠坡产生蠕动变形
6	左 10+955 ~ 11+000	
7	左 11+400 ~ 11+450	
8	右 11+650 ~ 11+800	坡体中强膨胀土含水量变化后土体强度降低和胀缩变形导致坡体内原有裂隙贯通引起的沿裂隙面的变形

水井相结合的排水措施。在二、三级马道及渠坡坡脚设排水盲沟,在二、三级渠坡坡顶设置排水井,分别降低坡表以下 2 m 和换填土与岩土层结合面内等浅层、坡表以下 5 m 内相对深层的地下水。采用微型桩、抗滑桩和伞形锚等加固支护变形渠坡。一级马道以上的渠坡如发生变形采取微型桩、抗滑桩和伞形锚等局部支护措施。若施工期已采取了抗滑桩、微型桩等处理措施,在一级马道靠近二级渠坡坡脚设置抗滑桩,增加渠坡的阻滑力,提高渠坡的抗滑稳定安全系数。

1 号变形体应急处理对四级及部分三级渠坡刷方减载;永久加固在渠顶设防渗墙,在二级马道、三级坡脚设排水孔;刷方减载后敷设复合土工膜,二级渠坡新增两排微型桩,实施后渠坡地下水位下降,变形趋于收敛。3 号变形体应急处理实施了伞形锚加固和集水槽排水等措施;永久加固采取二级渠坡坡脚增设排水盲沟,三级渠坡增设伞形锚支护,处置后变形速率有所减缓,但未完全收敛;此后,在三级渠坡增设 6 排伞形锚,变形终趋于收敛。8 号变形体应急处理对四级渠坡刷方减载;永久加固在二、三级渠坡分别设微型桩,二、三级马道设排水盲沟,二、三级渠坡坡顶附近设排水井,实施后渠坡地下水位显著下降,排水降压效果较好,变形趋于收敛。4 号、5 号、6 号和 7 号变形体已在二、三级马道及二级渠坡坡脚设排水盲沟,在二级、三级渠坡坡顶设排水井,采取应急措施,降低了地下水位,变形速率有所减缓,并将进一步永久加固。

4 结 论

- a. 深挖方膨胀土渠段渠坡受大气和环境影响更显著,运行过程中应加强巡视检查和安全监测。
- b. 变形的深挖方渠段为中膨胀土,地下水为上层滞水,埋深较浅。渠坡表层虽采用改性土换填,但未能完全隔绝膨胀土与大气的水汽交换。坡面形成后,上层滞水仍受降雨补给,地下水位随季节变化,一级马道以上渠坡在多年反复干湿循环下,短小裂隙逐步贯通,裂隙结构面加速软化,渠坡产生蠕动

- 变形。
- c. 采取排水和抗滑支护相结合的加固处置措施,可有效降低地下水位,减少干湿循环对浅层膨胀土的影响,同时提升渠坡浅层的抗滑能力,有利于阻止高地下水位深挖方膨胀土渠坡的变形。

参考文献:

[1] 钮新强,蔡耀军,谢向荣,等. 南水北调中线膨胀土边坡变形破坏类型及处理[J]. 人民长江,2015,46(3):1-4. (NIU Xinqiang, CAI Yaojun, XIE Xiangrong, et al. Failure types of expansive soil slope in Middle Route Project of South-to-North Water Diversion and its treatment [J]. Yangtze River, 2015, 46(3):1-4. (in Chinese))

[2] 胡江,张吉康,余梦雪,等. 深挖方膨胀土渠道边坡变形特征分析与预测[J]. 水利水运工程学报,2021(4):1-9. (HU Jiang, ZHANG Jikang, YU Mengxue, et al. Characteristics analysis and prediction of slope deformation of deeply-excavated expansive soil canal [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4):1-9 (in Chinese))

[3] 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))

[4] 李青云,程展林,龚壁卫,等. 南水北调中线膨胀土(岩)地段渠道破坏机理和处理技术研究[J]. 长江科学院院报,2009,26(11):1-9. (LI Qingyun, CHENG Zhanlin, GONG Biwei, et al. Failure mechanism and treatment technology of expansive soil slope of Middle Route Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(11):1-9. (in Chinese))

[5] 陆定杰,陈善雄,罗红明,等. 南阳膨胀土渠道滑坡破坏特征与演化机制研究[J]. 岩土力学,2014,35(1):195-202. (LU Dingjie, CHEN Shanxiong, LUO Hongming, et al. Study of failure characteristics and evolution mechanism of canal slope of Nanyang expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (1): 195-202. (in Chinese))

[6] 蔡耀军. 膨胀土渠坡破坏机理及处理措施研究[J]. 人

- 民长江, 2011, 42 (22): 5-9. (CAI Yaojun. Study on failure mechanism of expansive soil canal slope and treatment measures [J]. Yangtze River, 2011, 42 (22): 5-9. (in Chinese))
- [7] 胡江, 马福恒, 李星, 等. 南水北调中线干线工程陶岔管理处专项安全鉴定现场安全检查报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2021.
- [8] 宋斌, 李迷, 沈金刚, 等. 南水北调中线一期工程总干渠陶岔渠首~沙河段浙川段设计单元竣工工程地质报告(施工二标)[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2014.
- [9] 韩正国, 刘少华, 张智敏, 等. 南水北调中线一期工程总干渠渠首分局管辖段(浙川段)变形体处理专题报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2021.
- [10] 陈尚法, 温世亿, 冷星火, 等. 南水北调中线一期工程膨胀土渠坡处理措施[J]. 人民长江, 2010, 41 (16): 65-68. (CHEN Shangfa, WEN Shiyi, LENG Xinghuo, et al. Treatment measures for expansive-soil canal slope of Phase I Works of Middle Route Project of S-N Water Diversion [J]. Yangtze River, 2010, 41 (16): 65-68. (in Chinese))
- [11] 冷星火, 陈尚法, 程德虎. 南水北调中线一期工程膨胀土渠坡稳定分析[J]. 人民长江, 2010, 41 (16): 59-61. (LENG Xinghuo, CHEN Shangfa, CHENG Dehu. Analysis on slope stability of expansive soil canal of Phase I Works of Middle Route Project of S-N Water Diversion [J]. Yangtze River, 2010, 41 (16): 59-61. (in Chinese))
- [12] 阳云华, 赵旻, 郭伟, 等. 南阳盆地膨胀土大气影响深度及其工程意义[J]. 人民长江, 2007, 38 (9): 11-13. (YANG Yunhua, ZHAO Yu, GUO Wei, et al. Air influenced depth to expansive soil in Nanyang Basin and its engineering significance [J]. Yangtze River, 2007, 38 (9): 11-13. (in Chinese))
- [13] 李铁锋, 丛威青. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17 (1): 33-35. (LI Tiefeng, CONG Weiqing. A method for rainfall-induced landslides prediction based on Logistic regression and effective antecedent rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17 (1): 33-35. (in Chinese))
- [14] 李明超, 任秋兵, 孔锐, 等. 多维复杂关联因素下的大坝变形动态建模与预测分析[J]. 水利学报, 2019, 50 (6): 687-698. (LI Mingchao, REN Qiubing, KONG Rui, et al. Dynamic modeling and prediction analysis of dam deformation under multidimensional complex relevance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (6): 687-698. (in Chinese))
- [15] 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. (CEN Weijun, WANG Meng, SHI Conghao, et al. Stability study of an expensive channel slope with fissures due to rainfall infiltration [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35 (2): 10-14. (in Chinese))
- [16] 张文胜, 程德虎, 张灏, 等. 深挖方膨胀土边坡伞形锚加固处理及效果监测[J]. 人民珠江, 2017, 38 (9): 84-87. (ZHANG Wensheng, CHENG Dehu, ZHANG Hao, et al. Slope anchor umbrella strengthening treatment and monitoring the effect of deep excavation expansion [J]. Pearl River, 2017, 38 (9): 84-87. (in Chinese))
- [17] 邓铭江, 蔡正银, 郭万里, 等. 竖向排水井对北疆膨胀土渠道稳定性的作用分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (增刊2): 1-6. (DENG Mingjiang, CAI Zhengyin, GUO Wanli, et al. Influences of vertical drainage wells on stability of expansive soil canals in North Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (Sup2): 1-6. (in Chinese))
- [18] 袁俊平, 韩春雷, 丁巍, 等. 膨胀土边坡防护方案比选研究[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (1): 68-72. (YUAN Junping, HAN Chunlei, DING Wei, et al. Comparison study of four protection schemes for expansive soil slope [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (1): 68-72. (in Chinese))
- [19] 刘泽, 陈丽, 何矾, 等. 边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (4): 65-70. (LIU Ze, CHEN Li, HE Fan, et al. Stability analysis of flexible protection structure for slope reinforced anchor 3D-geomat [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (4): 65-70. (in Chinese))
- [20] 高玉峰, 王迪, 张飞. 三维土质边坡稳定性分析方法研究现状与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43 (5): 456-464. (GAO Yufeng, WANG Di, ZHANG Fei. Current research and prospects of 3D earth slope stability analysis methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (5): 456-464. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-17 编辑: 俞云利)

