

膨胀土边坡高地下水位渠段运行期快速排水方案研究

文 / 吴 庚 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司

张智敏 长江勘测规划设计研究有限责任公司

陈雪兵 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司

王嘉希 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司

摘要: 在高地下水位膨胀土渠道渠段, 运行期主要渗控问题为渠坡渗流稳定、水泥改性土换填层稳定、衬砌板抗浮问题。为探索适用于南水北调中线膨胀土边坡高地下水位渠段运行期快速排水的有效措施和方案, 结合南水北调中线干线工程膨胀土边坡运行期间变形病害的特点, 根据工程经验综合概括膨胀土渠段的地下水快速排水方案, 讨论明确适用条件, 提出适合南水北调中线工程膨胀土坡面快速、有效排水的实用技术。

关键词: 水利工程; 南水北调中线工程; 膨胀土; 高地下水; 快速排水

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2025. 05. 078

引言

膨胀土和地下水是南水北调中线工程渠坡稳定的两大不利因素, 特别是在一些地段, 膨胀土与含水层相伴出现在渠坡或渠底, 使得渠坡稳定问题更加复杂。水对膨胀土渠坡的不利影响是多方面的, 一是雨水或地表水入渗引起土体含水量升高、土体强度下降; 二是入渗水进入土体裂隙, 导致裂隙面软化和扩展, 反复作用可使裂隙面逐步贯通; 三是地下水在坡体内形成静水压力、对衬砌结构或换填层形成扬压力, 引发土体滑动或衬砌隆起开裂。

如何针对不同的渠道水文地质结构、合理布置防渗排水系统使膨胀土坡体含水量不发生大的变化, 减少不利影响, 在中线总干渠通水前开展了大量卓有成效的研究^[1-7], 为工程顺利建设奠定了技术基础。但是运行期在地下水位变幅相对较大渠段, 降雨后地下水位升高, 渠坡土体饱和, 强度降低, 导致部分渠坡蠕动变形甚至产生滑坡, 过水断面渠道内、外水位差高于渠道衬砌板所能承受的范围, 导致衬砌板隆起、开裂或错台。在2021年的强降雨过程中, 总干渠多个渠段出现土体含水量接近饱和, 边坡蠕动变形, 渠道衬砌面板滑脱、运行道路出现裂缝和错台等地质危害, 对南水北调中线工程安全、供水安全、水质安全带来了风险隐患。

一、膨胀土渠道运行期主要渗控问题

(一) 渠坡稳定问题

根据膨胀土渠坡在水的作用下滑动破坏模式的不同, 可分为: 1) 大气影响带滑坡; 2) 裂隙组合面及中、强膨胀土夹层滑坡; 3) 坡脚软化滑坡。

1. 大气影响带滑坡

该类滑坡(变形体)主要发生在大气剧烈影响带

内, 在地表膨胀土在较长时间的自然环境作用下, 由膨胀土膨胀收缩, 土体结构产生破坏, 土体结构已经破坏, 形成碎裂的粒状或土块堆积体, 在大气降水情况下, 由于膨胀土遇水一崩解特性, 导致土体结构软化, 抗剪强度急剧下降, 发生流动变形, 形成小规模浅层滑坡。该类滑坡多自含水量较高的坡脚或相对隔水层附近发生流动变形开始, 进一步导致上缘拉裂, 在地下水或大气降水作用下发展成小规模的变形体, 且逐级向坡顶发展, 形成所谓的叠瓦式破坏。

2. 裂隙组合面及中、强膨胀土夹层滑坡

当坡体膨胀土内存在发育的缓倾角裂隙时, 由于地基卸载或土体膨胀变形作用, 多在开挖坡面形成错坎, 边坡较陡的情况下则易在后援形成大体平行坡体纵向的受拉带, 且逐步发展为纵向张开的拉裂缝, 当坡体中存在陡倾角裂隙时, 则直接导致裂缝张开。膨胀土坡体内的缓倾角裂隙发生错位变形或都倾角裂隙发生张开变形后, 大气降水或坡体内的渗流地下水降赋存于张开的裂隙中, 在陡倾角裂隙内形成作用裂隙切割提的水平向推力、在缓倾角的裂隙中形成扬压力减少切割体的有效重量, 从而导致被裂隙切割土体的稳定性, 形成滑坡体, 该类滑坡体的底滑面平缓, 部分滑坡体底滑面甚至呈反坡状态。

3. 坡脚软化滑坡

对于高地下水位渠段, 在渠道开挖成型后, 地下水自坡脚外渗逸, 由于新形成的坡面表层土卸载后基本处于无压应力状态, 从膨胀土特性表现形式方面看, 在无压自由条件下、在饱和水作用且具有无压临空面条件下, 膨胀土将自行在水中崩解, 非饱和状态下的黏结强度将完全丧失, 使其在渗水作用下表面发生剥离式崩解

和软化，并且随着时间推移不断向坡体土内部衍生，坡脚软化区域增大，导致边坡土体失去支撑，坡体应力条件进一步恶化。坡脚软化这一不利条件与坡体内存在的裂隙面使得渠坡滑动风险叠加，将可能导致膨胀土渠道边坡失稳产生滑坡。

(二) 渠道衬砌及换填层抗浮稳定问题

在渠道运行期，渠道侧坡衬砌面板下方的防渗土工膜下实测扬压力水头与渠道水位差应满足关系式：

$$H_x - H_q \leq C$$

式中：

H_x ——渠道断面防渗土工膜下实测地下水位(m)；

H_q ——渠道同期实测运行水位(m)；

C ——与渠道边坡系数有关，可按表1取值。

表 1 C 与边坡系数关系

坡比	1 : 2.0	1 : 2.5	1 : 3.0	1 : 3.5
C (m)	0.115	0.120	0.125	0.130

不满足上述关系时，相关部位衬砌板有隆起风险。

根据C与边坡系数关系表可知，当不同坡比下衬砌面板后地下水高于渠道运行水位11.5cm~13cm时，渠道侧坡混凝土衬砌面板将处于不稳定状态。以方城段为例，根据对方城段渠道衬砌板隆起发生时间和发生渠段的分析，衬砌板失稳部位均位于高地下水渠段，且在渠道的渠坡或渠底存在透水层，如典型的153+950~159+200渠段，每年5月-10月地下水位均高于渠道设计水位，且153+950~156+415、157+350~159+200渠坡均存在透水层，157+350~159+200渠段渠坡衬砌板下为砂垫层，因此，从2014~2021年，该渠段均有衬砌板隆起现象。

二、膨胀土渠坡快速排水型式

针对高地下水位膨胀土渠道运行期渠坡渗流稳定、水泥改性土换填层稳定、衬砌板抗浮问题，采取“堵”、“截”的方式处理地下水往往工程费用较高，且受制于施工场地限制。而“排”的方式可以实现快速排水的目的，进而有效解决高地下水位膨胀土渠道运行时频繁遭遇地下水位“陡升缓降”引起的渗控问题。按照排水设施作用部位的不同，分为过水断面排水和一级马道以上渠坡排水。

(一) 过水断面排水

过水断面排水设施有两类，一类是布置在水泥改性土换填层下膨胀土基面的排水设施，以及布置深入渠坡

或渠底的排水设施，结构形式主要排水盲沟、排水井等；有另一类是设置在水泥改性土换填层上的排水设施，结构形式主要有塑料排水盲沟、粗砂垫层等。

(二) 过水断面以上渠坡排水

一级马道以上膨胀土渠坡，强膨胀土渠道渠坡开挖后，坡面和渠底有渗水时，应在渗水范围内布置排水盲沟；强膨胀土坡面及渠底存在长大裂隙面、层间结合面等长大结构面以及裂隙密集带，无论开挖时有无渗水，均应在长大结构面和裂隙密集带的底层高程处布设排水盲沟。为降低渠坡深层地下水位，提高渠坡稳定性，可在边坡坡顶处靠近马道位置设置排水井。

三、膨胀土渠坡快速排水技术

根据大量调查，南水北调中线工程总干渠渠道排水设施主要包括：

(1) 防渗复合土工膜下方的排水垫层、排水盲沟，记为S1；

(2) 布置在保护膨胀土的换填层内与排水垫层联通的排水盲沟，记为S2-1；布置在保护膨胀土的换填层与渠道地基之间的排水盲沟，记为S2-2；S2=S2-1+S2-2；

(3) 穿过保护膨胀土的换填层，与S2联通的排水减压管(井)，记为S3；

(4) 穿过保护膨胀土的换填层，竖直插入渠底地基强透水层的排水减压管(井)，记为S4；

(5) 在过水断面以上渠坡，穿过保护膨胀土的换填层，以仰孔插入坡体以内一定深度的自流渠坡排水孔，记为S5；

(6) 与排水垫层、排水盲沟、排水减压管、减压井联通的排水通道，记为S6；

(7) 排水通道出口处设置的逆止阀，记为S7；

(8) 在一级边坡坡顶设置的纵横向排水盲沟，记为S8。

(9) 在一级边坡坡顶设置的降水井，记为S9。

(10) 在过水断面以上渠坡设置的排水盲沟，记为S10；

(11) 在过水断面以上渠坡设置的排水井，记为S11；

(一) 渠道过水断面排水型式选择

根据渠道一级马道高程至渠道底板高程所在部位的地层结构和地层渗透特性将渠基分为4类：

I类：一级马道高程至渠道底板高程以下5m深度范

围的地层均为弱透水地层（渗透系数 $\leq 10^{-5}$ cm/s）；

II类：一级马道高程至渠底高程之间，揭露一定厚度的单层或多层透水地层（渗透系数 $\geq 10^{-4}$ cm/s）；

III类：渠底高程揭露透水地层（渗透系数 $\geq 10^{-4}$ cm/s）；

IV类：渠底以下存在埋深小于5m的透水地层（渗透系数 $\geq 10^{-4}$ cm/s）；

渠道所在区域常年地下水位与相应渠道设计水位相对位置关系分为3类：

A类：常年地下水位高于渠道设计水位；

B类：常年地下水位低于渠道设计水位，高于渠道底板高程；

C类：常年地下水位低于渠道底板高程。

表2则针对各类地层结构分类和地下水位分类列出了排水措施，加上其他地表和地下集、排水连接管、沟等，以及必要的抽排设备，就可以构成完整的控制方案。

表2 过水断面渠道排水措施

地层结构分类	地下水位分类	排水措施
I	A	S1+S2-1+S6+S7
I	B	S1+S2-1+S6+S7
I	C	S1+S2-1+S6+S7
II	A	S1+S2+S6+S7+S8
II	B	S1+S2+S6+S7+S8
II	C	S1+S2-1+S6+S7
III	A	S1+S2+S3+S6+S7+S9
III	B	S1+S2+S3+S6+S7+S9
III	C	S1+S2+S6+S7
IV	A	S1+S2+S4+S6+S7+S9
IV	B	S1+S2+S4+S6+S7+S9
IV	C	S1+S2+S6+S7

(二) 渠道过水断面以上排水型式选择

(1) 一级马道以上渠坡均为弱透水层

在斜坡段换填层下合理设置排水垫层（即S2-2），可以控制降水入渗、蒸发和温度变化对于膨胀土的影响。此外，在过水断面以上渠坡，穿过保护膨胀土的换填层，以仰孔插入坡体以内一定深度的自流排水孔，即措施S5。

(2) 一级马道以上渠坡揭露一定厚度的透水地层

对于深挖方膨胀土渠道一级马道以上的地层存在中、强透水层时，除了对膨胀土（岩）进行换填处理，

宜沿揭穿的中、强透水层底板或略低于中强透水层底板沿渠道纵向布置排水盲沟集水（或每隔一定间距设置排水井），同时间隔一定距离采用PVC短管穿过换填土层将排水软管集水排出换填层以外的坡面排水沟网，以控制换填层承受的水压力。为了应对强降雨工况的渠坡稳定问题，在需要防护的渠坡马道平台以及各级边坡坡脚设置排水盲沟（排水井），即S10、S11。

结语

(1) 在高地下水位膨胀土渠道渠段，运行期主要渗控问题为渠坡渗流稳定、水泥改性土换填层稳定、衬砌板抗浮问题。

(2) 根据南水北调中线工程大量实践成果，综合概括了膨胀土渠段的地下水快速排水方案，明确了不同情况下的适用条件，提出适合南水北调中线工程膨胀土坡面快速、有效排水的实用技术，为膨胀土边坡快速排水处理提供了指南。

(3) 南水北调中线一期工程投入运行多年，针对补充实施了排水措施的部位，有必要针对膨胀土渠坡加强监测和跟踪研究，适时全面评价快速排水技术的渗流控制效果，尤其是长期运行效果，有利于将来进一步完善渗流控制体系或者工程运行维护方案。

参考文献

[1] 南水北调中线膨胀土渠道工程特性研究[J]. 水利规划设计, 2008, 2: 43-47.

[2] 陈建斌, 孔令伟, 郭爱国等. 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 674-682.

[3] 武良金, 吴福生, 刘永强等. 塑料盲沟材料性能指标初探[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(3): 264-267.

[4] 白成亮, 刘会迎, 杨世胜. 塑料盲沟取代传统碎石盲沟的可行性讨论[J]. 公路与汽运, 2006, (4): 103-105.

[5] 陈新苗. 引江济淮膨胀土工程特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, (7): 1072-1075

[6] 钮新强, 蔡耀军, 谢向荣, 阳云华, 冷星火. 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(03): 1-4+26.

[7] 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(09): 1376.