

DOI: 10.11779/CJGE2016S1040

# 季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术

徐丽丽, 刘丽佳, 徐昭巍, 张 滨

(黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 边坡防护对于季节冻土区膨胀土渠道边坡冻胀破坏和边坡稳定性是非常必要的。通过工程背景和膨胀土特性的分析, 认为季节冻土区膨胀土渠坡防护的目标是尽量抑制破坏区的含水率变化幅度, 从而保证膨胀土边坡的土体结构不被破坏, 抑制裂隙发育; 基于对土体的冻胀和膨胀特性理论研究, 提出了兼顾防水与排水的综合防护技术, 确保防护措施的长效性。

**关键词:** 季节冻土区; 膨胀土边坡; 防护技术

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)S1-0216-05

**作者简介:** 徐丽丽(1983-), 女, 哈尔滨人, 硕士, 工程师, 主要从事冻土工程、水利工程等方面的科研工作。E-mail: xulili83716@163.com。

## Integrated protection technology for expansive soil slopes in seasonally frozen zones

XU Li-li, LIU Li-jia, XU Zhao-wei

(Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Heilongjiang Harbin 150080, China)

**Abstract:** In seasonal frozen zones, protection technology for heaving damage and slope stability of expansive soil slopes is necessary. By analyzing the engineering background and characteristics of expansive soil, that it is considered protection goal of expansive soil slopes is to try to suppress the amplitude of the water content of the destruction zone so as to ensure that the soil structure of slope is not destroyed and crack development is restricted. Based on the theoretical researches on frost heaving and swelling characteristics of expansive soil, the comprehensive protection technology with both waterproofing and drainage is proposed to ensure the long-term effectiveness of protective measures.

**Key words:** seasonally frozen zone; expansive soil slope; protection technology

## 0 引 言

膨胀土具有特殊的工程性质, 在工程建设和运行中引起了很多问题。黑龙江省属于季节冻土区, 以强冻胀性粉质黏土和膨胀土居多。近年来, 随着吉林省哈达山水利枢纽工程、黑龙江省引嫩工程、引汤工程等水利工程修建, 膨胀土渠道边坡滑坡问题愈加凸显, 渠道工程破坏现象十分严重, 影响了输水工程的效益发挥, 造成了巨大的经济损失。

对于膨胀土边坡的治理, 已有诸多的学者进行研究。20世纪80年代—90年代初, 长江水利委员会综勘局在南阳地区做过膨胀土的物理力学特性、边坡稳定分析的方法和参数等方面的较系统的研究<sup>[1]</sup>。汪明元等<sup>[2]</sup>采用理想弹塑性模型模拟土工格栅与膨胀土的界面特性, 提出土工格栅可解决膨胀土边坡浅层与深层滑动问题。胡斌等<sup>[3]</sup>提出纤维增强复合塑料能增强膨胀土边坡安全系数, 减少滑动位移。王钊等<sup>[4]</sup>提出玻璃钢螺旋锚在修复膨胀土渠坡中的应用, 并与传统的方式进行对比。刘斯宏等<sup>[5]</sup>通过膨胀土土工袋浸水

变形及强度特性试验, 验证了土工袋具有提高膨胀土的强度和限制其变形等作用特点。

本文通过野外调研和试验研究分析季节冻土区膨胀土边坡破坏的机理原因, 提出季节冻土区膨胀土边坡冻害综合防护技术, 为本地区的膨胀土边坡治理提供必要的分析理论和防护措施。

## 1 工程背景

北引工程是以满足大庆石油化工用水为主, 同时解决沿途农业灌溉用水的大型水利建设工程, 途经讷河、富裕、依安、林甸、明水、青岗至大庆、安达。北引总干渠以乌裕河为界, 划分乌南和乌北两大段, 全长203 km。该地区属于寒温带季风气候, 冬季严寒少雪, 多西北风, 夏季温暖多雨, 约占年降水量70%~

**基金项目:** 水利部公益性行业科研专项(201001027); 黑龙江省自然科学基金项目(E0223)

**收稿日期:** 2015-11-30

80%, 年蒸发量大于降水量的 2~3 倍, 多东南风, 土壤季节性冻层每年从 10 月到次年的 5 月, 长达 7~8 个月。

乌北段 11+000—50+054 段渠道右侧为纯填方筑堤, 左侧挖方成型, 最大挖深达 10 m, 属于中高边坡。根据地质详勘报告, 该段土质为弱膨胀土、局部中等膨胀土和分散性土, 土壤成份以含蒙脱石、伊利石为主。本文选取乌北段 38+000 典型膨胀土滑坡段为研究对象, 该段工程于 2010 年 9 月末正式开工建设, 2011 年 4 月 20 日—2011 年 9 月 20 日渠道正常通水运行, 2011 年 9 月底渠道停水后发现渠道左侧边坡有两处大面积滑坡, 滑坡土方量达 3 万多立方米。

滑坡段左侧为高平原的前缘, 呈斜坡状, 边坡高度 7.40~11.60 m, 边坡岩性主要为低液限黏土。勘测期渠道左侧地下水位高程 169.51~170.69 m, 高出该渠段设计渠底高程, 由于渠道开挖, 渠道左侧地下水从渠道边坡溢出, 对渠道边坡稳定不利。渠土的土质为弱膨胀土, 具有膨胀土破坏的显著特征。

2 膨胀土边坡冻害破坏的现状与原因分析

根据多次现场调研、室内试验研究, 分析北引 38+000 滑坡段破坏的主要原因:



图 1 滑坡破坏情况  
Fig. 1 Landslide destruction

(1)膨胀土的广义应力历史决定了膨胀土的结构特征具有超固结性, 在开挖后, 因其超固结应力释放而失去平衡, 裂隙就会发展。加之降雨、降雪融解以及长时间供水期的浸泡, 使强度降低。就北引 38+000 的具体情况来说, 引嫩工程已经运行 30 多年, 此段 70 年代曾经发生过滑坡的问题, 并做过处理, 此段边坡并不完全是真正意义上的挖方坡面, 是一个扰动过的边坡, 强度很低。

(2) 2010 年冬季前的削坡作业后未能及时对弱膨胀土坡进行处理, 开挖后渠坡暴露于大气之中, 没有良好的植被保护和畅通的坡面排水系统, 导致土体

结构裂隙发育, 融雪雨水下渗, 在自然风化作用下反复胀缩循环, 渠坡表面浅层土体形成松散土层, 强度极低。

(3)2010 年北引 38+000 已发生过较大的滑动破坏, 膨胀土渠坡中分布着不同产状和成因的裂隙。这些裂隙性破坏了边坡的整体性, 有些裂隙较长, 可达 20 m 左右, 互相贯通后形成层次连续的裂隙面, 在经过一个冻融周期的作用及供水期渠水的浸泡、雨水的侵蚀作用下强度衰减, 土体软化形成裂隙软弱面, 最终坡体沿着裂隙软弱面失稳破坏。

(4) 由于地下水位高、夏季降水多, 膨胀土边坡土体水分补给充分, 在饱水条件下, 膨胀土湿化、膨胀及蠕变会降低土体强度而使抗滑力减小; 由于土体长期处于饱水状态, 在低温条件下, 其冻胀率急剧增大, 极易产生冻胀破坏。

3 膨胀土的特性与冻胀性

3.1 膨胀土的特性

试验所用土样为北引干渠 38+000 段现场取样, 在室内进行了常规土工试验、冻胀特性试验、膨胀特性试验及化学分析, 对土样的各项特性指标进行研究。

表 1 土样物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil samples					
内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	土粒比 重	自由膨胀 率/%	冻胀率 /%	制样密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
14.2	29.8	2.7	60	4.13	1.54

表 2 土样化学成分

Table 2 Chemical composition of soil samples (%)					
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	烧失量
60.43	15.39	5.75	2.8	1.6	1.96

由土样的化学成分分析中可以看出, 在土样中, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较多, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 等碱金属和碱土金属含量也较为丰富, 由于这些金属离子的存在, 促使伊利石转变为蒙脱石, 使土样的亲水性进一步增强。

3.2 膨胀土的冻胀性

在相同冻结条件下, 含水率是膨胀土冻胀量和冻胀力大小的决定因素。当土中含水率超过起始冻胀含水率后, 随着含水率的增加, 冻胀量也增加。

在试验室进行不同含水率的膨胀土冻胀性试验结果如图 2。

通过 8 组不同含水率的膨胀土冻胀性试验统计得到, 当含水率小于 20% 时, 土样冻胀量甚微, 冻胀率小于 1%, 为非冻胀土。当土样含水率超过 22% 时, 随着含水率的增大, 土样的冻胀量明显增大, 判断土

样的起始冻胀含水率为 20%~22%，将土样的起始含水率定为 22%较为准确、安全。

经过一个冻融循环后的土样，自上而下（间隔 5 cm）分层取样测其含水率，经过冻融循环后，土体的含水率有所增大，且上部的含水率要大于下部含水率。在补水的开放系统中，冻融过程是土颗粒密度场、水分场、应力场重新排列的过程，水分迁移明显。

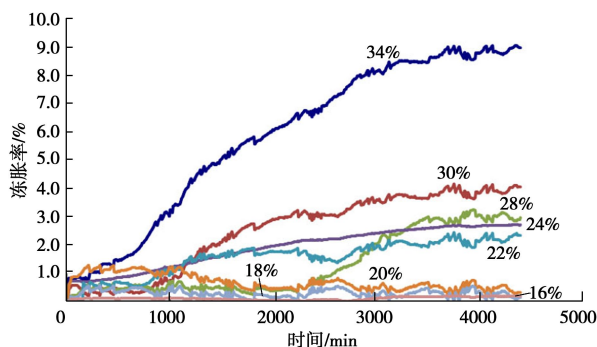


图 2 膨胀土冻胀特性曲线

Fig. 2 Characteristic curves of frost-heave of expansive soil

## 4 防护综合技术

### 4.1 设计原则

影响季节冻土区膨胀土边坡稳定的基本因素是膨胀土的膨胀性、裂隙性、湿化和冻胀性等。对于这类特殊土的处理，主要是从坡面防护、加固处理两个方面考虑，针对北部引嫩的具体情况，试验区的处理原则是：

（1）边坡开挖并清坡后，迅速施工，避免雨蚀。

（2）对于弱膨胀土考虑防渗为主，保护层材料采用“复合土工膜+混凝土护面”。

（3）对于中（局部强）膨胀土，采用换填的办法，换填材料采用“EPS 颗粒改良土”措施，选择合适的处理厚度。

（4）对于破坏严重的地段，采用“防排水综合处理”或“加筋膨胀土”结构。

### 4.2 防护方案

#### （1）防排水处理

格宾网箱结构是将镀锌钢丝采用机器编织网箱框架，内部填充卵石，具有适应变形能力强、透水性好、整体性强的特点<sup>[6]</sup>。将格宾网箱结构应用在固脚中，可以增大固脚排水，有效的降低高边坡地下水位，抑制弱膨胀土边坡的滑坡破坏。固脚深度要达到土体冻深以下，降低冻胀破坏。

护坡表面采取原方案设计，铺设混凝土板+土工膜。采用格宾固脚加大排水，坡后铺设格宾网箱能有效降低高边坡地下水位，沿渠道方向每隔 50 m 铺设

一道格宾网箱，使地下水集中排入渠道中。格宾网箱与处理区压实膨胀土间铺设复合土工膜或 GCL，防止外水入渗，见图 3。

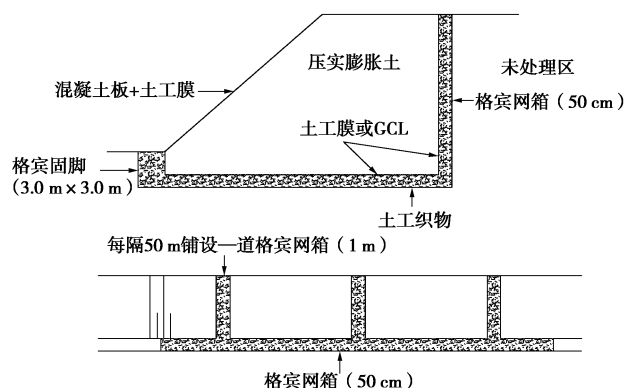


图 3 防排水处理方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of treatment by water prevention and drainage

#### （2）加筋土处理

对于加筋土技术的研究，国内外学者已经做了大量的工作，形成了丰富的理论和工程经验，也有很多相关试验验证了土工合成材料加筋可以改善冻融循环条件下土体的工程性质。Kinney 等<sup>[7]</sup>指出在寒区的道路或机场的建设中使用土工合成材料，可以减少冻胀量、增加边坡和路堤稳定性、增加排水通道并起坡面防护的作用；Henry 等<sup>[8]</sup>使用土工复合材料毛细屏障来减轻寒区路面结构的冻胀危害。

笔者曾经通过加筋处理及未处理两组室内冻土力学模型试验对比分析，研究在冻融循环作用下土工织物加筋膨胀土边坡的运行机制和效果，表明土工织物加筋能有效抑制结构不均匀冻胀<sup>[9]</sup>。

通过研究分析，结合季节冻土区膨胀土边坡的特点，采用土工织物加筋的方法处理膨胀土边坡时，高强度土工织物与膨胀土一起构成一定厚度的加筋土层，利用土工织物与土体接触面的摩擦作用，使土体中的垂直应力和水平应力经土工织物面层水平扩散，转化为土工织物与土界面的剪应力，它的作用是约束膨胀土的膨胀变形和冻胀变形，有助于表层土体应力状态的改善，阻止加筋土体发生侧向移动。

护坡表面铺设混凝土板+土工膜。土工织物加筋处理区外设置格宾网箱，增强排水，能有效降低高边坡地下水位，采用格宾固脚加大排水。格宾网箱与土工织物加筋处理区间铺设复合土工膜或 GCL，防止外水入渗，见图 4。

#### （3）EPS 颗粒改良土处理

对于中（局部强）膨胀土，通常可以采用换填的办法，膨胀土的改良可采用石灰浆灌注、粉煤灰矿渣

灌注水泥浆、掺合料等以改变膨胀土的化学成分和力学性能, 改善膨胀土的胀缩性能<sup>[10]</sup>。在国内外对膨胀的改良措施多采用化学改良, 其方法简单施工易于掌握, 但是会对环境造成一定程度的破坏,

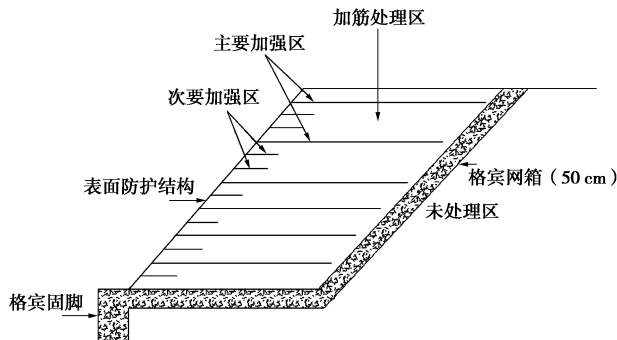


图4 土工织物加筋膨胀土处理方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of treatment by geotextiles

在膨胀土中掺入一定比例的 EPS 颗粒, 可使膨胀土变为非膨胀土, 同时 EPS 颗粒具有防渗和保温的双重功能, 改变基土的温度场, 减少冻胀引起的变形, 可以抑制渠坡的冻胀破坏。

笔者曾经通过不同掺量的 EPS 改良土的膨胀率、冻胀率试验, 对比研究 EPS 改良膨胀土对土体的膨胀性、冻胀性的抑制作用效果。其中, 素土与掺入 EPS 颗粒的膨胀土的膨胀性对比试验表明, 膨胀土中掺入一定比例的 EPS 颗粒, 可以抑制其膨胀性, 且 EPS 掺量在 0.3%~0.6% 之间效果最好。素土与掺入 EPS 颗粒的膨胀土的冻胀性对比试验表明, EPS 颗粒掺量在 0.2% 以上, 就可明显减小膨胀土的冻胀变形<sup>[11]</sup>。

采用 EPS 颗粒改良膨胀土处理方案, 护坡表面铺设混凝土板+土工膜。同时采用格宾固脚加大排水, 在 EPS 改良膨胀土处理区外铺设格宾网箱, 能有效降低地下水位, 将渠坡内水排入渠道中, 见图 5。

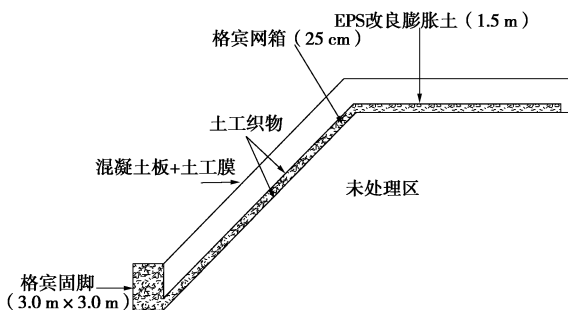


图5 EPS 改良膨胀土处理方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of treatment by EPS

## 5 结 论

对于深季节冻土区膨胀土边坡的冻害防护, 其核心问题是要同时解决边坡的膨胀性破坏和冻胀性破坏

问题, 关键是控制冻融循环条件下膨胀土坡的含水率变化。

(1) 在渠道边坡开挖时, 开挖面经过卸荷作用, 暴露于大气中, 加之在自然风化、降水融雪入渗和冻融循环作用各种结构面软化, 导致膨胀土体强度迅速衰减, 裂隙发育。

(2) 由于高地下水位的作用, 仅考虑防渗功能的防护方案是无法起到很好的效果的, 必须同时兼顾排水, 尽量降低处理区土体的含水率变化幅度。

(3) 本文提出了同时具有防水和排水功能的防护技术, 可以抑制膨胀土边坡的膨胀变形破坏和冻胀变形破坏问题。由于长期处于饱和状态, 膨胀土边坡土体的膨胀变形一直处于最大值, 在低温条件下, 土体的冻胀率会急剧增大, 导致边坡冻胀破坏, 普通的防护措施无法到达长期有效。

(4) 对于膨胀土边坡的防护技术, 综合考虑生态环保方面, 减少了换填方量和工程弃土, 同时不采用化学改良, 减少对土体的污染, 对生态的破坏。

## 参考文献:

- [1] 包承纲. 南水北调中线工程膨胀土渠坡稳定问题及对策[J]. 人民长江, 2003(5): 4 - 6. (BAO Cheng-gang, North water transfer project expansive soil canal slope stability problems and countermeasures[J]. Yangtze River. 2003(5): 4 - 6. (in Chinese))
- [2] 汪明元, 徐 晗, 包承纲, 等. 膨胀土边坡加筋效果与机理研究[C]// 中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程会议论文集(下册). 重庆, 2007: 437 - 442. (WANG Ming-yuan, XU Han, BAO Chen-gang, et al. Expansive soil slope reinforcement effect and mechanism[C]// Tenth Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference Proceedings of China Civil Engineering Society. Chongqing, 2007: 437 - 442. (in Chinese))
- [3] 胡 斌, 王新刚, 连宝琴. 纤维类材料改善膨胀土工程性能的适用性探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 615 - 618. (HU Bin, WANG Xin-gang, LIAN Bao-qin. Applicability exploration of improving engineering properties of expansive soil with fiber materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 615 - 618. (in Chinese))
- [4] 王 钊, 陈春红, 王金忠. 玻璃钢螺旋锚在修复膨胀土渠坡中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(4): 1 - 5. (WANG Zhao, CHEN Chun-hong, WANG Jin-zhong. Application of FRP screw anchor in repairing of canal slope of expansive soils[J]. Journal of SICHUAN University

- (Engineering Sciences Edition), 2007, **39**(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [5] 刘斯宏, 白福青, 汪易森, 等. 膨胀土土工袋浸水变形及强度特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, **7**(6): 54 - 58. (LIU Si-hong, BAI Fu-qing, WANG Yi-sen, et al. Experimental study on wetting induced deformation and strength characteristics of soil bag filled with expansive soil[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, **7**(6): 54 - 58. (in Chinese))
- [6] 张焕洲, 谢平, 戴秋红, 等. 格宾网材在黄石长江干堤兴堤段的应用[J]. 人民长江, 2002, **33**(9): 38 - 39. (ZHANG Huan-zhou, XIE Ping, DAI Qiu-hong. Gabion material used in Huangshi Yangtze Dike embankment[J]. Yangtze River, 2002, **33**(9): 38 - 39. (in Chinese))
- [7] KINNEY T, CONNOR B. Geosynthetic reinforcement of paved road embankments on polygonal ground[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1990, **4**(2): 102 - 112.
- [8] HENRY K S, STORMONT J C. Geocomposite capillary barrier drain for limiting moisture changes in pavement subgrades and base courses[R]. Hanover: US Army Cold Regions and Research Engineering Laboratory, 2002.
- [9] 徐丽丽, 张滨, 李兆宇, 等. 冻融环境下加筋膨胀土边坡力学模型试验与研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2014, **5**(3): 234 - 237. (XU Li-li, ZHANG Bin, LI Zhao-yu, et al. Experimental study of reinforced expansive soil slope in freeze-thaw environment[J]. Journal of Engineering Heilongjiang University, 2014, **5**(3): 234 - 237. (in Chinese))
- [10] 缪林昌, 刘松玉. 论膨胀土的工程特性及工程措施[J]. 水利水电科技进展, 2001, **21**(2): 37 - 40. (LIAO Lin-chang, LIU Song-yu. Expansive soil engineering characteristics and engineering measures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, **21**(2): 37 - 40. (in Chinese))
- [11] 徐丽丽, 刘丽佳, 曲祥民. EPS 颗粒改良膨胀土的膨胀特性、冻胀特性试验研究[C]// 第八届中国土工合成材料学术会议论文集. 天津, 2012: 376 - 378. (XU Li-li, LIU Li-jia, QU Xiang-min. Experimental Study on expansion characteristics, frost heave characteristics of EPS beads improved expansive soils[C]// Eighth China Geosynthetics Conference Proceedings. Tianjin, 2012: 376 - 378. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)