

文章编号:1001-5485(2009)11-0037-05

膨胀土渠坡兼有排水功能的双层结构防护方案

张家发¹, 刘晓明^{1,2}, 焦赳赳³

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010;
2. 中铁大桥勘测设计院, 武汉 430030; 3. 香港大学 地球科学系, 香港)

摘要:渠坡防护对于南水北调膨胀土渠坡变形控制和稳定是非常必要的。通过工程背景和膨胀土特性的分析,认为膨胀土渠坡防护的目标是控制膨胀土的含水量变化,从而抑制膨胀土的裂隙性;指出仅考虑防渗功能的防护方案存在局限性。基于饱和和非饱和渗流理论,提出了兼有排水功能的双层结构防护方案;并充分利用非饱和粗、细颗粒土之间渗透性对比关系随着吸力的变化可以转变的规律,从多种途径实现控制膨胀土边坡含水量变化的目标,从而保证防护方案的长期有效性。

关键词:南水北调;膨胀土;裂隙;含水量;防护方案
中图分类号:TU471.91 **文献标识码:**A

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^[1]。正在建设中的南水北调中线工程输水总干渠全长约1400 km^[2],大型的跨流域调水工程不可能通过线路调整完全绕避膨胀土地区。设计渠线在膨胀土地区累计长度约340 km,其中强、中、弱膨胀土地区都有。合理控制膨胀土渠坡的变形,保障渠坡的稳定性,对于南水北调中线工程的安全运行意义重大,因此成为参建各方的重要目标及岩土工程界十分关心的研究课题。实现这一目标的手段之一是对渠坡采取合理的防护措施。防护措施有多种方案^[3],本文将运用非饱和渗流理论从控制大气影响的角度讨论和建议膨胀土渠坡的防护方案。

1 工程背景

南水北调中线工程总干渠跨越长江、淮河、黄河、海河4大流域,河南、河北、天津、北京2省2市。沿线膨胀土(岩)主要为Q₁-Q₃的黏性土及上第三系的黏土岩、泥灰岩。这些膨胀土的成岩程度很低,为了叙述方便,本文将膨胀土和膨胀岩统称为膨胀土。文献[4]给出了膨胀土在总干渠沿线的分布示意图。膨胀土自身特性非常不稳定,对气候作用敏感。散布于湖北、河南、河北境内的膨胀土地段,不仅不同地域的气候条件差异大,而且同一地区也季节变化明显,气候要素变幅大。以分布有强膨胀土的邯郸市为例,春

季风多干旱,夏季炎热多雨,秋季温和凉爽,冬季寒冷干燥,年平均气温13.5℃,极端最低气温-19℃,极端最高气温42.5℃,平均全年日照2557 h。各气候要素年际间变化也较大,分布有膨胀岩的新乡市2003年至2007年的气象资料统计见表1,其中2005年的日最大降雨量达439 mm,日最高和最低蒸发量分别为98.0、2.0 mm,日最大温差达21.7℃。

表1 新乡市2003-2007年气象资料统计表
Table 1 Statistics of weather data during the year 2003-2007 at Xinxiang City

年份	降雨量/ mm	蒸发量/ mm	日最高气 温/℃	日最低气 温/℃
2003	8 419	8 575	36.7	-10.4
2004	6 117	10 650	36.5	-10.3
2005	5 802	10 782	40.4	-8.2
2006	4 903	11 279	39.8	-7.4
2007	3 973	11 063	38.0	-6.3

总干渠在膨胀土地段的渠坡高度一般为8~21 m,最高达49 m。渠道输水设计水位以上的渠坡与大气关系密切,设计水位以下的渠坡有可能受到地下水位变化、渠道渗漏水流及冰期输水的影响,而水位变动带附近的渠坡运行环境更加复杂多变。

膨胀土渠坡设计希望通过采取处理措施以控制坡比。坡度越陡,工程量越小,且对工期和环境影响的控制越有利,但是输水安全对于渠坡处理技术的依赖性就越高。尽管如此,渠道开挖坡面斜长仍然会很长,开挖面面积很大,渠坡与大气形成大面积的接触边界。

收稿日期:2009-09-20

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAB04A10)

作者简介:张家发(1960-),男,安徽安庆人,教授级高级工程师,主要从事岩土工程和水工渗流研究,(电话)027-82820029(电子信箱)seep@public.wh.hb.cn。

膨胀土在复杂的气候、水文、地质条件下被大范围地开挖裸露,要想有效控制气候作用的影响,就应该采取适当的防护措施。

1969年开工的陶岔渠首工程设计坡比为1:3~1:4.5,然而在开挖过程中相继发生了13处滑坡。后来通过加固才稳定了边坡。膨胀土地区的边坡甚至有在1:6的缓坡条件下仍然失稳的实例^[1]。所以说,膨胀土渠坡的设计及其稳定性研究是南水北调中线工程建设的主要课题。目前列入膨胀土渠坡防护措施研究的方案主要包括:

(1) 一级马道以下的防渗封闭或缓冲保护层措施,防渗材料包括催化沥青、土工膜等,缓冲保护层为一定厚度的非膨胀土或改性土,表面均采用混凝土衬砌;

(2) 一级马道以上为护坡加地面排水措施,设计采用的护坡措施包括干砌石护坡、砌石联拱、混凝土六方块护坡、土工格栅等;

(3) 马道及坡顶的隔水防渗措施^[5]。

2 膨胀土的特性

胀缩性、裂隙性和超固结性被公认为膨胀土的典型特性^[1]。其中,胀缩性是其自身固有的特性,由其所含有的特殊黏土矿物成分、胶结物质成分和结构特征所决定。膨胀土超固结性则属于经历复杂沉积环境、地质作用历史后所具有的附加特性。与膨胀土对应,膨胀岩经历了长期的成岩作用。

膨胀土裂隙包括原生(构造)裂隙和次生裂隙。原生构造裂隙与超固结性一样,也是地质作用的结果。第三系膨胀岩虽然成岩程度不高,但是,由于经历了新生代构造运动,发育有构造裂隙。据在新乡潞王坟渠坡处理试验段的观察,典型裂隙间距为1~2m左右。图1是典型裂隙的照片,可见裂隙表面有冰花状铁锰质沉积,为地下水长期作用的结果。

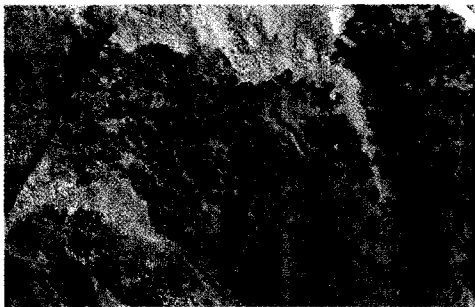


图1 新乡潞王坟膨胀岩典型裂隙照片

Fig.1 Photo of the expansive rock cracks at Luwangfen canal stretch at Xinxiang City

次生裂隙则是在开挖卸荷、气候作用、工程结构作用等条件下产生的裂隙。对于南水北调中线总干渠来说,卸荷作用和气候作用将是造成膨胀土次生裂隙的主要外在力量。原生裂隙在这些外在力量的作用下会扩展和张开,同时也会加剧次生裂隙的发育,并在一定程度上左右次生裂隙的发育规律。由此可见,次生裂隙是在工程条件下经受卸荷作用与气候作用的结果。

膨胀土裂隙的危害性体现在如下方面:

(1) 破坏土体完整性,其结果是降低边坡的稳定性,也降低了土体的抗侵蚀和抗冲刷能力;

(2) 增加土体与大气接触面积,促进蒸发,结果使裂隙进一步增加和扩展;

(3) 增强雨水和地表水入渗能力,其结果是使得土体产生膨胀力、降低强度、增加自重,从而降低坡体的稳定性,同时入渗水流还会增加裂隙内的水压力或通过冻胀作用促进裂隙的进一步扩展。

可以毫不夸张地说,原本深埋于地下、没有接受大气作用改造的膨胀土,在开挖裸露于大气条件下充分发育裂隙后,从强度特性、渗透特性和结构特性等多方面来说都完全变成了另外一种土体。膨胀土渠坡的防护就是要尽量避免这种改造作用,抑制膨胀土的裂隙性,使土体保持原有的完整性。

3 渠坡防护方案

根据上述膨胀土特性,膨胀土渠坡防护的目标是防止膨胀土裂隙的产生与扩展。卸荷裂隙的防止需要通过合理的边坡结构设计和施工控制实现。防止膨胀土因干缩作用而产生裂隙的关键是控制土体含水量的变化。以下主要从渗流控制角度,讨论控制含水量变化和防止裂隙发生与扩展的防护方案。

渠道工程施工期间,应该通过合理的施工组织和对开挖面采取临时的防护措施控制坡面含水量的变化,防止裂隙的产生和扩展。工程长期运行期间膨胀土渠坡含水量的控制有3种途径:防渗、排水、隔温。

3.1 防渗方案

防渗是目前膨胀土渠坡设计和科研中集中考虑的方案。纳入对比研究的防渗方式包括水泥砂浆喷护、黏土覆盖、膨胀土回填、改性膨胀土覆盖等。其中有的膨胀土回填方案还采用土袋或土工格栅加筋。从渗流控制角度看,这些方式的共同目标就是防止水分的入渗。然而,这些防渗层也有其局限和缺点:①防渗层都会阻碍坡体内地下水的排出;②隔

热性能与被防护的膨胀土非常相近,水泥砂浆喷护层甚至更差;③ 渗透性与被防护的膨胀土相近,甚至略强;④ 自身的性质也不稳定。

已有的工程经验表明,水泥砂浆喷护层会产生裂隙,不宜作为长期的防护层。黏土也会在干燥条件下产生裂隙,只是不像膨胀土那样迅速。甚至某些黏性土经击实,其胀缩性指标将增大,有可能形成“人工膨胀土”^[6]。回填膨胀土更是没有改变其固有的胀缩特性,相反,回填膨胀土失去了原有的超固结性和结构性,渗透性和接受降水入渗能力更强,含水量的变化更显著。对回填土进行改性和加筋,目的是约束其膨胀变形,但无论是掺纤维的改性土,还是土工格栅加筋土,都可能造成不均匀渗流和接触冲刷问题,土工格栅加筋土还无法约束收缩变形。

综合上述分析,这些防渗层不适合于地下水以下及地下水位变动带的渠坡;对于地下水位变动带以上的膨胀土渠坡,这些防渗层会在一定时期内起到防护作用,但是由于仍然会产生裂隙和不利于排水等原因,其长期有效性都不同程度地值得担心。

3.2 兼有排水功能的双层防护方案

在非饱和状态下,土体的含水量小于饱和含水量,随吸力水头的变化而变化,二者之间为非线性关系;同样,土的渗透性也随吸力水头而变化,用水力传导度表示。当吸力水头为零时,土体达到饱和,水力传导度等于饱和渗透系数;在非饱和状态下,水力传导度是吸力水头的非线性函数。

图 2 给出了一组材料的水力传导度曲线。其中细砾、混凝土砂和粉砂是 J. C. Stormont 的试验成果^[7],泥岩是西垣诚的试验成果^[8]。从中可以看到非饱和渗流理论告诉我们的一个道理:不同土体之间渗透性的大小对比关系是可以转换的。在饱和状态下,4 种材料的水力传导度等于各自的饱和渗透系数,相互之间的关系为细砾 > 混凝土砂 > 粉砂 > 泥岩;在非饱和状态下,各自的渗透性均随吸力水头的升高而下降,但是在同一吸力水头条件下水力传导度的斜率各不同,总体规律是粗粒土更容易排水,水力传导度下降更快,细粒土排水缓慢,甚至要达到一定的吸力水头(进气值)后才有实质性的排水,水力传导度相应地开始明显下降。在一定的吸力水头条件下,粗粒土与细粒土之间渗透性的对比关系就会发生转变,图 2 中当吸力水头 > 7 cm 时细砾就已经变成四者中渗透性最低的材料。粗、细粒土之间这种渗透性对比关系的转变,可用来指导防护方案的设计。

著名的非饱和土力学专家 D. G. Fredlund 曾

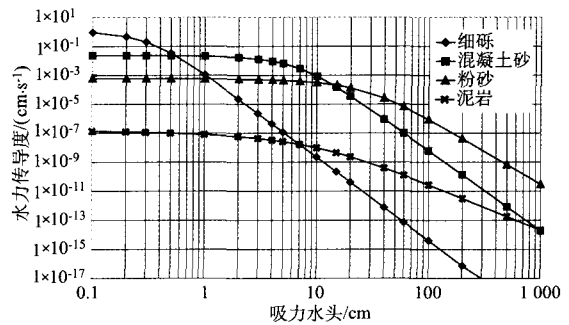


图 2 典型土的水力传导度曲线

Fig. 2 Hydraulic conductivity vs. suction head of typical soils

经介绍过一些国家采用砂土作为覆盖层处理膨胀土的例子。在他和 Yang Hong 等合著的文章^[9]中,通过非均质土柱的入渗试验研究了粗粒土的毛细障碍作用。采用细砂、中砂和碎石砂 3 种材料组合成 3 个双层介质的土柱,均为较粗粒土在下,较细粒土在上。在柱顶模拟降雨条件,通过土柱含水量剖面和土柱底的排水量监测,证实了土柱下部较粗粒土对入渗水流越过分层界面的阻碍作用,而且土层颗粒越粗,阻碍作用越大。当入渗水流突破毛细障碍进入下部土层时,对应的分界面处吸力水头就是 Baker 等所称的“进水值”^[10]。J. C. Stormont 等采用图 2 中的细砾、混凝土砂和粉砂组合为 3 个双层介质土柱,下部均为较粗粒土,也进行了降雨入渗模拟试验^[7],结果说明,下部为粗砂时比下部为细砾时入渗水流可以更容易地在比较高的吸力水头下就突破毛细障碍。这意味着下部土层颗粒较粗时,对入渗水流阻碍作用较大。

本文第 1 作者曾经通过土柱的排水试验和数值模拟,对比研究均质土柱和非均质土柱排水过程的差别。其中,均质壤土土柱与壤土之间夹有砂层的土柱的对比表明,当水位匀速下降到砂层底面以下一定距离后,由于砂层已经快速疏干,渗透性转而低于相邻的壤土层,从而阻碍了上覆壤土层的排水,使其含水量高于均质土柱对应时刻和对应位置的含水量^[11]。

史文娟通过开展非均质土柱蒸发模拟试验,研究了夹砂层对水分运动的影响。结果表明:夹砂层阻碍了下伏土层的毛细上升高度和速度,明显降低了地下水的蒸发量^[12]。

孙志忠等根据野外观测资料,分析了不同粒径块石层下地温状况,认为块石材料孔隙性大,可以起到热量屏蔽的作用^[13]。根据以上运用非饱和渗流理论的分析,可知:粗粒土在入渗时不容易进水,在排水时很容易疏干,因而更经常地处于低含水量、甚

至干燥状态;孔隙中充盈气体,用于渠坡防护,会比下伏膨胀土热传导性低,具有隔热保温作用,有利于控制膨胀土的温度变化,从而抑制蒸发作用和热胀冷缩作用。

通过以上分析,再考虑到粗粒土本身的特点,在斜坡上非均质土层中作为夹层的粗粒土可以起到以下作用:

(1) 在低吸力和接近饱和条件下,排水很快,防止水分在膨胀土坡面的滞留和入渗,制约其含水量的变化;

(2) 在高吸力条件下,阻碍入渗水流通过,制约降雨入渗对下伏膨胀土层含水量的影响;

(3) 在高吸力条件下起隔温和阻碍毛细运动的作用,制约下伏膨胀土层的蒸发和含水量的变化;

(4) 在高吸力条件下阻碍上覆土层的排水,有利于其保持水分和植被生长;

(5) 粗粒土不像黏性土等防渗材料一样由于气候作用而产生裂隙,比防渗材料具有性能稳定、长期有效的优势,不仅自身不会产生裂隙,还会切断相邻土层的裂隙扩展路径。

根据粗粒土作为夹层时的优良特性和巧妙作用机理,建议膨胀土渠坡宜采用双层结构的防护方案,表层为混凝土护坡,也可以采用粘性土或回填土料,下部为粗粒土层,简称为(兼有排水功能的)双层结构防护方案。这种双层结构方案可以从多方面控制膨胀土渠坡含水量的变化,抑制膨胀土裂隙的产生和扩展。

4 方案设计原则和防护效果初步研究

兼有排水功能的双层结构防护方案表层采用粘性土或回填土料时,可以起到一定的防渗作用,还可以起到绿化作用,从而防止粗粒土的流失,既有工程作用,又有生态环境效果。其厚度以利于植被生长为宜。

粗粒土料的选择要考虑多种因素。首先,其力学特性应使防护层在坡面上的稳定性满足设计需要,其次,其饱和和非饱和水力特性要有利于多功能作用的发挥。图3是图2中细砾与泥岩水力传导度比值随吸力水头的变化曲线。二者比值为1时对应的吸力水头可以称为渗透性对比关系的转变临界点。根据3.2节的讨论和图3可以提出粗粒土水力特性的原则性要求。

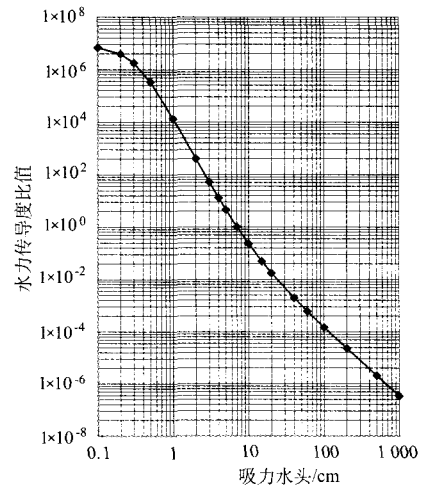


图3 细砾和泥岩水力传导度比值随吸力水头变化曲线

Fig. 3 The rate of hydraulic conductivity vs. suction head for pea gravel and mudstone

(1) 粗粒土与表层土之间的转变临界点对应的吸力水头值较低。当降雨入渗时,除非表层土底面附近接近饱和,否则入渗水流不会轻易地进入粗粒土层。

(2) 粗粒土与膨胀土之间饱和和渗透系数有显著差别。当粗粒土层含水量较高或接近饱和时,顺坡向的水流阻力远小于垂直层面进入膨胀土的阻力,水流难以下渗,很快顺坡向排走。

(3) 上下土层之间的水力传导度比值与吸力水头呈高度非线性关系,也就是随着吸力水头远离转变临界点,土层之间的渗透性有显著的差异。

(4) 粗粒土尽可能用窄级配料,其良好的大孔隙性将使得保温隔热效果更好。

选取新乡潞王坟膨胀岩渠坡处理试验段的典型剖面,利用当地的实际气象资料,对渠坡的饱和和非饱和非稳定渗流过程进行了数值模拟,对比研究了裸坡、黏土防护及双层结构防护方案下渠坡对于气候作用响应的差异。研究表明,兼有排水功能的双层结构防护方案可以更好地限制渠坡受到的大气影响^[14]。

粗粒土层厚度初步建议取30~50 cm,具体厚度需要结合料源及其成本和施工便利性进一步研究确定。

5 结语

(1) 南水北调中线膨胀土渠坡防护的目标是制约膨胀土的裂隙性,关键是控制复杂气候条件下膨胀土坡的含水量变化。

(2) 开挖施工时,开挖面一方面要经历卸荷作用,一方面要裸露于大气接受蒸发、降水入渗与冲刷或者冻胀作用,容易导致裂隙的快速产生和扩展,所以合理的施工组织 and 临时防护措施非常重要。施工期保持开挖面土体的完整性,是永久防护方案长期有效性的重要前提之一。

(3) 仅考虑防渗功能的防护方案在一定程度上和一定时期内会起到作用,但是其应用不仅要考虑边坡地下水条件,长期效果也值得担心。

(4) 本文基于非饱和渗流理论,提出了兼有排水功能的双层结构防护方案。该方案可以从多种途径制约膨胀土边坡含水量的变化:当用于渠道水位以下时,可以与垫层结合起来设计;用于渠道水位以上时,可以兼顾生态环境需要。更关键的是该方案的长期有效性更有保障。

(5) 粗、细粒土之间渗透性对比关系可以互相转变的规律,可以更广泛地指导渗流控制方案的设计创新。例如,本文提出的双层结构防护方案也可以供设计垃圾填埋场的覆盖层时参考。

致谢:作者就本文的有关内容与水利部岩土力学与工程重点实验室程展林教授级高级工程师等进行过有益的讨论,特此致谢。

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.
 [2] 肖万格, 吴泽宇. 南水北调中线一期工程总干渠总体布置原则及特点[J]. 水利水电快报, 2006, (18): 14-

17.
 [3] 冯光愈, 王湘凡. 南水北调中线工程总干渠膨胀土边坡稳定问题[J]. 人民长江, 1993, (3): 9-14.
 [4] 赵旻, 蔡耀军, 阳云华, 等. 南水北调中线一期工程渠线工程地质工作概述[J]. 人民长江, 2007, (9): 1-4.
 [5] 蔡耀军, 赵旻, 罗岚, 等. 膨胀土渠道处理措施研究资源[J]. 环境与工程, 2008, (2): 35-37.
 [6] 李生林, 施斌, 杜延军. 中国膨胀土工程地质研究[J]. 自然杂志, 1997, (2): 82-86.
 [7] STORMONT J C, ANDERSON C E. Capillary Barrier Effect from Underlying Coarse Soil Layer[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(8): 641-648.
 [8] 西垣誠, 竹下祐二. 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究[R]. 岡山: 岡山大学工学部土木工学科, 平成5年5月.
 [9] YANG Hong, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. A study of Infiltration on Three Sand Capillary Barriers [J]. Can. Geotech. J. 2004, 41: 629-643
 [10] BAKER R S, HILLEL D. Laboratory Tests of a Theory of Fingering during Infiltration into Layered Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54: 20-30.
 [11] 张家发. 地下水位匀速下降条件下层状非均质多孔介质给水度的初步研究[J]. 水利学报, 1988, (8): 9-17.
 [12] 史文娟, 汪志荣, 沈冰, 等. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J]. 水土保持学报, 2004, (6): 167-170.
 [13] 孙志忠, 马巍. 块石层对其下部路基土体温度的影响[J]. 铁道工程学报, 2003, (4): 59-61.
 [14] 刘晓明. 气候作用下膨胀岩渠坡的响应特征及防护方案研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2009.

(编辑: 刘运飞)

A Protection Scheme of Double Layers with Drainage Function for Expansive Soil Slopes by Canal

ZHANG Jia-fa¹, LIU Xiao-ming^{1,2}, JIAO Jiu-jiu¹

- (1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
 2. China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance & Design Institute, Wuhan 430050, China;
 3. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Slope protection is necessary for the deformation control and stability of the expansive soil slopes by the main canal of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. After analyzing the project background and the properties of expansive soil, the target of slope protection is suggested to be set to control the water content change and to restrain the crack for expansive soil. The defects of the slope protection scheme only with waterproof function are pointed out. On the basis of the theory of saturated-unsaturated water flow, a protection scheme of double layers with water drainage function is proposed. Taking advantage of the law that the comparative relationship of permeability between unsaturated coarse and fine soil would switch over, this kind of scheme would achieve the aim to omnidirectionally control the water content change for expansive soil slope. The more important is that this kind of scheme would be efficient for long time.

Key words: South-to-North Water Transfer; expansive soil; crack; water content; protection scheme