

膨胀土渠坡破坏机理及处理措施研究

蔡耀军^{1,2}

(1. 水利部长江勘测技术研究所,湖北武汉430011; 2. 长江勘测规划设计研究院,湖北武汉430010)

摘要:膨胀土渠坡失稳破坏频率大,是渠道运行的最大安全隐患。通过对膨胀土渠坡破坏机理深入分析认为,土体膨胀性及结构面发育程度是控制渠坡稳定的内因,雨水、地表水、渠水入渗是引起渠坡失稳的主要外因。结合国内外大量工程实例分析,特别是南水北调中线南阳段膨胀土试验成果,指出了针对膨胀土渠坡不同的破坏机理与地质环境条件,所采取的坡面防护、工程抗滑、坡顶防渗等综合措施,以及加强观测与反馈分析,深入进行工程研究的建议。

关键词:膨胀土;渠坡;破坏机理;处理措施

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A

1 概述

膨胀土因其自身特殊的膨胀性、多裂隙性和超固结性,在渠道开挖后极易产生变形破坏。在南水北调中线工程南阳膨胀土试验段约1 km渠道的开挖过程中,发生5处滑坡;渠道建成后1 a多时间再次发生5处滑坡。20世纪70年代引丹总干渠施工过程中,先后发生过13处滑坡;渠道建成31 a后的2005年,又发生了一处体积达45万m³的滑坡。河南刁南干渠建成约40 a来,渠坡失稳现象几乎不断。安徽引淮灌区一些渠道自建成以来经常出现滑坡,已经严重影响工程的正常运行。引额济乌工程部分渠道建于第三系膨胀岩中,2005年建成以来,每年秋季退水期都会出现渠坡破坏现象,有的地段甚至已经重建了两次。

美国加州北水南调工程渠道长245 km,其中有87 km通过膨胀土地区,渠道挖深5.2~5.4 m。1945~1951年施工建设,1949年部分渠道过水,1950年发现衬砌板变形,之后变形不断发展,1954年已有约25 km渠道遭破坏。70年代,美国垦务局采取3%的石灰对膨胀土进行改性处理,处理厚度0.6~0.77 m,对坡顶(7.6 m宽)也采用同样厚度进行处理(Jack G. Byers,

1980)^[1]。1976年处理施工完成,迄今已35 a,未再出现变形破坏。

印度Purna渠道长42 km,挖深一般在5 m左右。部分渠段经过具有强膨胀性的“黑棉土”地区。工程施工始于1955年,1968年竣工。建成后15 a内,每年在膨胀土渠段都会产生一些滑坡。1983年,采用含砾红土对坡面换填处理1 m,在坡脚用块石砌筑护脚,之后未再出现滑坡现象(D. N. Kulkarni, N. R. Sawalesh-warkar, 1988)^[2]。

南非Zukerbosch渠道长20 km,渠道挖深4 m左右,1983年竣工后一直运行良好,在膨胀土地区设计与施工采用了不同的处理方法(C. F. Watermeyer, 1984):①在膨胀土区,采用1.5 m非膨胀土换填,坡顶10~15 m范围覆盖1 m左右的非膨胀土。同时,两侧坡顶设置排水沟,一侧坡顶设置拦洪堤。②在裂隙中大量充填具有强膨胀性黏土的页岩分布区,对坡面和坡顶采用0.6 m厚非膨胀土予以覆盖保护。③坡顶植草皮,地面以下0.25 m处铺设土工防渗材料,严格限制地面林木生长,以防林木根系对土工膜和衬砌的破坏。

国内外膨胀土地区渠道工程成功与失败的事例众

收稿日期:2011-10-15

基金项目:国家“十二·五”科技支撑计划项目“施工期膨胀土开挖边坡稳定性预测技术”(2011BAB10B01)

作者简介:蔡耀军,男,所长,院副总工程师,教授级高级工程师,主要从事水利水电工程设计及管理工作。E-mail:caiyaojun88@163.com

多。目前,南水北调中线工程正在开挖施工之中,2011年雨季,受降雨影响,陶岔至沙河段发生了 10 余处规模不一的变形破坏,其中在桩号 TS106 渠段出现 2 处长约 100 m 的滑坡。

2 膨胀土渠坡破坏机理

受膨胀土矿物成分、结构特性的控制,膨胀土渠坡主要有 3 种变形破坏类型^[3]。

2.1 浅表性蠕变变形破坏

这类变形破坏与土体遇水膨胀、失水干缩以及土体多裂隙性密切相关,在各种坡度的膨胀土边坡上较常出现,在湖北郧县曾观察到 1:5 左右的自然边坡仍有蠕变变形现象。从野外调查结果看,蠕变变形破坏主要发生在中、强膨胀土地区,在弱膨胀土区少见,表明浅表性蠕变变形受土体膨胀性控制。通过变形体解剖发现,这类变形的深度一般在 1 m 左右,很少超过 2 m,其底边界较模糊,没有明显的滑动面。其变形主要发生在降雨期间,旱季基本稳定。从这一特征分析,蠕变变形的动力应主要来自土体含水量升高引起的膨胀力,在干湿循环、胀缩反复作用过程中,土体完整性不断遭受破坏、土体强度不断丧失,因此只要边坡所处的环境不变,蠕变变形就会持续进行下去。而且,土体膨胀性越强,膨胀干缩作用越强烈,蠕变变形就越发育。因此这一类变形也可称为膨胀-蠕变型。

2.2 受结构面控制的较深层或深层滑动破坏

该类滑坡的位置与发育程度受土体中的长大裂隙、层间软弱面的控制。受裂隙控制的滑坡深度多为 2~6 m,很少超过 8 m;受层间软弱面(岩性界面)控制的滑坡深度则受边坡高度与软弱面分布位置的影响,已发现的土质滑坡最大深度达 20 m 左右。长江流域重庆万州、四川苍溪等地 K-J 地层分布区,层间软弱带或泥化夹层十分发育,且普遍具有膨胀性,如万州 J_{2s} 地层的泥化夹层蒙脱石矿物含量高达 60%~80%,尽管地层近于水平,沿长江和嘉陵江两岸发育了一系列大型滑坡,单个体积可达数千万立方米。

由于滑坡受结构面的严格控制,因此该类滑坡均为折线型,后缘一般为陡倾的拉裂面,底滑面迁就已有的结构面,或大部分追踪已有结构面,少部分剪断土体。由单一裂隙面或层面构成底滑面的滑坡可称为“单一结构面滑坡”,由多个裂隙面和裂隙面之间被剪断的土体共同构成底滑面的滑坡可称为“复合型滑坡”。南阳膨胀土试验渠道开挖施工期发生的 5 处滑坡,均属于受单个裂隙面控制的单一结构面滑坡,其滑面近于水平,前缘局部甚至反倾坡内(见图 1)。试验

渠道建成后发生的 5 处滑坡则全部属于复合型滑坡(见图 2),表明土体中裂隙的相互贯通、直至产生滑动,有一个滞后过程。对南阳中 IV 区滑坡解剖发现,底滑面大部分追踪已有缓倾角裂隙面发育,总体上较为平整,因已有裂隙面不完全在一个平面上,底滑面略有起伏,其中已有裂隙面占底滑面的比例约为 63%。



图 1 单个裂隙面形成的滑面



图 2 剪断土体形成的滑带

膨胀土强度由土块强度和裂隙面强度两部分构成,由于具有超固结性,土块强度无论是天然含水量状态(非饱和)还是有荷饱和状态,都有较高的 C 、 φ 值。膨胀土裂隙面极其光滑,室内试验和现场大尺寸(40 cm × 40 cm)剪切试验均显示其强度极低,甚至低于土体的残余强度。因此,裂隙面是膨胀土内部最薄弱的部分,渠坡稳定性主要受裂隙控制,包括裂隙的产状、规模和发育密度。

从滑坡的发展历程与动态变化看,外部因素对滑坡的形成也有一定的影响,其中最为突出的是开挖引起的卸荷作用和雨水或渠水的入渗软化作用。由于膨胀土具有超固结性,渠道开挖引起的卸荷效应明显。在南阳膨胀土试验段挖深 10 m 左右的弱膨胀土区,通过预先埋设的多点位移计观测到渠底出现 10 mm 左右的回弹变形,在挖深 15 m 左右的中膨胀土区观测到 20 mm 左右的回弹变形,坡肩的钻孔倾斜仪观测到开挖引起 10~30 mm 的水平位移,且这一水平位移沿垂

向不连续,主要发生在结构面部位。卸荷效应对渠坡稳定性的影响主要体现在两个方面:① 土体发生回弹松弛,沿结构面出现剪切位移或拉张,坡肩出现拉张裂隙;② 渠坡附近土体渗透性增大,利于雨水、地表水或渠水入渗。南阳膨胀土试验段开挖时,发现上层滞水主要分布在地表下 1~5 m 的根孔和少数裂隙中,下部土体少有地下水活动迹象。但在渠道开挖建成后,发现渠坡变形与降水关系密切,变形发展呈现台阶状,与降水完全对应。同时,深部孔隙水压力探头、含水量探头等观测也显示,较深部位土体受到降水影响。表明渠道开挖后,渠坡周边土体渗透性增大,地下水活动范围加大。土体结构面的存在和雨水或地表水入渗是导致渠坡稳定性恶化的关键因素。

这一类滑坡特征鲜明,底滑面近于水平,甚至局部微微反倾,滑带厚度多小于 5 cm,有时仅仅一个光滑面,没有明显的影响带。膨胀土滑坡以数百立方米规模较为常见,但其滑动模式和动态特点却与三峡地区 K-J 水平地层中的巨型滑坡几乎完全一致。除了滑面强度极低以外,后缘拉裂带的水压力可能是一个重要的滑动动力来源,属于推移式整体滑动型。

2.3 坡脚软化引起的坍塌型破坏

膨胀土力学强度在没有围压的情况下随含水量升高而急剧下降,在浸泡情形下可以丧失殆尽,因此,中、强膨胀土边坡在坡脚遇水软化时极易产生坍塌型破坏。2011 年雨季,南水北调中线工程膨胀土渠段开挖期间遭遇多场降水,造成开挖基坑积水,引发了多处坍塌型边坡破坏。这类破坏没有明显的滑面,边界不规则。坡脚首先因浸泡而丧失强度,然后其后部土体因失去支撑而产生拉裂下挫。其单个规模一般为数十至数百立方米,厚度多在 1 m 左右。坍塌型破坏机理与土体的吸水性和崩解性密切相关,因而发生部位与土体膨胀性有很好的对应性。

3 膨胀土渠坡抗滑稳定处理技术研究

膨胀土渠坡破坏的内因是土体具有较强的胀缩性和发育有一定密度的长大裂隙(或层间软弱面),如浅表型蠕变和坍塌型破坏均与土体膨胀性密切相关,较深层滑动则取决于土体中结构面的发育程度。膨胀土渠坡破坏的外因主要是土体裸露于地表环境后发生干湿循环、地表水浸泡、开挖卸荷和降水入渗或地表水(包括渠水)入渗,入渗水不但可以软化结构面、引起结构面端部应力集中,还可以在后缘拉裂面直接产生静水推力^[4]。因此从渠坡破坏机理分析,对这 3 类破坏,需要分别采用封闭、护脚、抗滑等方法进行处理。

3.1 换填处理

换填的目的是减少膨胀土与外界水分之间的交换,使土体含水量始终处于一个基本稳定的量值,从而限制浅表土体的反复胀缩作用,防止外部水渗入土体裂隙。换填处理可以直接防止蠕变破坏和坍塌型破坏。采用与膨胀土力学性质和渗透性相近的非膨胀黏性土或改性处理后的膨胀土换填,比直接采用土工膜防渗具有以下 3 方面的优越性:① 这些换填材料具有较好的变形协调性;② 换填材料不阻碍毛细水运动,不会在处理界面引起含水量升高;③ 在衬砌断面可起到缓冲和匀化变形的作用。

根据国外学者的室内试验研究和已建工程的实践经验,单纯从防止含水量交换角度考虑,在换填厚度超过 0.6 m 后可减少 80% 的水份变化,可对边坡起到良好的保护作用^[6-7]。从防止渠底膨胀土吸湿膨胀角度考虑,根据膨胀土有荷饱水膨胀试验,在上部荷载达到 50 kN、即 3 m 厚换填土时,可防止挖方渠道底板抬升变形。综合考虑现场施工条件、大规模施工时质量控制因素等,建议对不同膨胀土、不同挖深渠道进行不等厚度处理,见表 1。

表 1 膨胀土渠道坡面及渠底处理厚度 m

渠道挖深	弱膨胀土	中膨胀土	强膨胀土
<10	1.0 / 1.0	1.2 / 1.5	1.5 / 2.0
10~20	1.0 / 1.5	1.5 / 2.5	2.0 / 3.0
>20	1.0 / 2.0	2.0 / 3.0	2.0 / 3.0

注:表中数据表示坡面/渠底处理厚度,对于自由膨胀率在 50% 以下的膨胀土,非过水断面在进行格构等防冲处理后可不作换填处理。

为保证渠道在长期运行环境下换填层的保护效果,换填材料的渗透性应控制在 10^{-6} cm/s 以下。坡肩是最有利于雨水和地面积水入渗的部位,因此除了坡面换填处理,需要特别加强对坡肩的防渗处理。当采用换填处理方案时,坡肩换填厚度一般采用 0.6~1.0 m;当采用土工膜防渗时,埋置深度不应小于 0.5 m,地表可以植草,但应禁止树木生长。从国外膨胀土地区渠道工程处理的成功经验看,坡肩处理宽度多在 7~15 m 之间。南阳膨胀土试验段坡肩处理宽度在 5 m 时,未能起到明显的保护作用。根据南阳膨胀土试验段开挖期间的卸荷影响观测,在挖深 15 m 左右时,侧向卸荷影响范围可达 10 m 左右,即渠道两侧 10 m 范围内土体的渗透性会因开挖而增强。因此,对于挖深超过 10 m 的渠段,坡肩防渗处理宽度不应小于 10 m。考虑到南水北调中线工程膨胀土地区渠道设计坡比和挖深情况,建议对坡顶从坡肩到截水沟 13 m 范围进行防渗。

3.2 渠坡抗滑处理

在渠道挖深较小(如小于 10 m)、土体膨胀性较弱

时,一般不需要作专门的抗滑工程处理。但在渠道挖深较大、且土体中发育长大裂隙或层间软弱面时,除了采用换填、防渗措施外,还应进一步采取抗滑措施,防止渠道建成后,在卸荷、雨水或渠水长期入渗影响下,使结构面逐步发展贯通而产生滑坡。抗滑设计宜按照以下原则进行。

(1) 在渠道施工前,可根据渠道挖深和土体膨胀性确定需要进行抗滑处理的部位。当渠道挖深小于 10 m 时,渠道稳定问题以膨胀变形、浅表蠕变破坏为主;弱膨胀土渠坡除了受层间软弱面控制的滑坡外,很少见到受裂隙面控制的较深层滑坡;中-强膨胀土的结构面往往比较发育,但当土体中钙质结核发育时(如钙质结核密度超过 15 个/ m^2),往往不容易形成长大裂隙。因此,可将挖深大于 10 m 且土体膨胀性达到中-强等级、土体中钙质结核不十分发育的渠段,初步定为需要进行抗滑处理的渠段。渠道开挖过程中,还需通过施工地质勘察,进一步细化明确需要处理的部位。

(2) 抗滑措施以轻型构件和机具处置为主。膨胀土滑坡形态及破坏机理决定了此类滑坡的滑动力很小,在南阳膨胀土试验段曾经采用过直径 10 cm、长 5~6 m 的一排木桩成功处理正在滑动边坡的例子。因此推荐采用直径 10~15 cm、长 5~6 m 的钢筋混凝土预制桩,或长度 6~9 m、由 3 根直径 10~15 mm 焊接在一起的锚筋桩。预制桩可借助反铲等机械的振动力直接压入渠坡;锚筋桩可通过直径为 56 mm 的先导孔送入,并灌入水泥浓浆。

(3) 一旦确定抗滑处理部位后,宜采取主动抗滑措施,以维持土体自身的强度。从以往的滑坡事件看,超过 70% 的滑坡剪出口位于单级坡的坡脚附近,少数滑坡剪出口位于边坡中部。按单级坡 6 m 高度考虑,无论剪出口在坡脚还是中部,采用 2 排、桩长 6 m 的抗滑桩,可保证本级边坡的稳定。为了使抗滑桩更好地发挥作用,建议第 1 排桩布置在边坡中部,桩间距 2.5 m;第 2 排桩布置在坡脚以上 2 m 处,桩间距 2.0 m。在渠道开挖到相应深度后,及时实施抗滑处理。

(4) 应适当加强坡脚处理。坡脚是应力相对集中区,也是局部地下水的汇流区,土体容易受到环境影响改变而软化。建议非过水断面的坡脚砌筑 1 m 高、0.2~0.3 m 厚的护墙;过水断面坡脚每 10 m 设置 1 个深 1 m、沿渠道长 1 m、宽 2 m 的混凝土支墩,一方面遏制坡脚土体软化;另一方面为衬砌板提供支撑。

3.3 过水断面的防渗排水处理

对于膨胀土(岩)渠道,过水断面防渗排水处理过多或不足都是有害的。

(1) 在单一膨胀土或泥质膨胀岩区,经过坡面、坡肩、坡底换填处理后,渠坡膨胀土已经处于一个基本封闭的环境,且渠坡土体地下水贫乏,只要确保换填层的渗透性达到或小于 10^{-6}cm/s ,不再需要额外的防渗透与排水措施。此时,在衬砌板下若设置砂石垫层、土工膜,不仅不能起到防渗作用,反而有利渠水向坡内缓慢渗透,并在渠水退落时产生扬压力。美国、以色列、南非等国外工程均在换填层上直接浇筑衬砌板。南阳膨胀土渠道试验段通过 2009~2010 年的观测,揭示衬砌板下的土工膜不能起到隔绝渠水入渗的作用,渠道充水后,砂石垫层很快形成一个地下水库。引额济乌工程膨胀岩渠段采用白砂岩换填(现场估计压实后渗透性为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$)、砂石垫层、土工膜、混凝土衬砌板这样一种结构形式,自 2005 年建成以来,每年退水期都发生大量黏土岩滑坡。经研究发现,渠水入渗、渠道退水时地下水排泄不畅是产生滑坡的主要原因。目前,在我国膨胀土渠道工程中普遍采用换填+砂石垫层+土工膜的结构形式。土工膜能减少渗漏,但不能隔绝渗漏,因此用在膨胀土渠道过水断面,并不能起到保护膨胀土的作用。这一结构措施主要存在 3 方面的问题:① 现场土工膜焊接或粘结密封达不到室内密封水平,特别是逆止阀周边密封质量难以控制;② 逆止阀本身容易出现关闭不严和堵塞现象;③ “地下水库”对膨胀土含水量控制不利。

(2) 当膨胀土(岩)渠坡分布含水层或含水透镜体时,需要根据含水情况(水量、水头、渗透性)和水文地质环境影响评估,采取截、排措施。截渗处理可以彻底解决问题,并避免出现环境问题,但工程投资较大。采用导管引出地下水,是普遍采用的方法,当其水头低于渠水位时,运行期间不需排水,但在通水前和检修期间需要抽排处理;当其水头高于渠水位时,运行期间可通过自排方式降低水压力。

(3) 泥灰岩渠坡设计应根据地下水位选择处理层材料。南水北调中线工程沿线泥灰岩一般具有弱膨胀性,土体强度较高,不存在滑动稳定问题。但地表泥灰岩受溶蚀作用影响具有中-强渗透性。当地下水位在所有工况下都低于渠底板时,处理层应采用不透水的黏性土或改性膨胀土;当地下水位可能高于渠底板时,处理层应采用透水性良好的砾石料,并在衬砌板下铺设土工膜减少渠水入渗,同时设置集水井并考虑在检修期和通水之前进行抽排。

4 结论与讨论

(1) 渠坡膨胀变形、浅表性蠕变、坍塌型破坏,可以通过换填非膨胀土或改性土进行处理。

(2) 当渠道挖深超过 10 m 且土体发育长大裂隙或层间软弱面时,需要采取抗滑措施。推荐采用预制的微型桩、锚筋桩,适当加强坡脚支护措施。

(3) 对于膨胀土或泥质膨胀岩渠道,在进行换填处理后,衬砌板下再设置砂石垫层和土工膜没有任何积极意义,但对于坡肩应做好防渗处理。

(4) 目前学术界和工程界对膨胀土渠道衬砌结构和抗滑处理技术存在较大的分歧,这不仅关系工程投资,更涉及工程安全。建议南水北调中线工程监测方案中,专门针对这一问题布置相应的监测设施,进一步观测和评估衬砌结构和抗滑工程的工作状态,为膨胀土渠坡处理研究提供完整、翔实的现场监测依据。

参考文献:

[1] Jack Byers. Treatment of Expansive Clay Canal lining[C]//Proceed-

ings of the 4th International Conference on Expansive Soils, Colorado: [s. n.], 1980.

[2] D. N. Kulkarni, N. R. Sawaleshwarkar. Expansive Soils in Canals: Purna project - A Case Study[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Expansive Soils, Xi'an: CRC Press, 1987.

[3] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[4] 蔡耀军, 赵旻. 膨胀土渠道处理措施研究[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(1), 35 - 37.

[5] W. G. Holtz, J. P. Bara. Comparison of the Expansive soils in the Middle Californian Basin[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Expansive Soils, Texas: A&M Press, 1972.

[6] R. K. Katti. Effect of CNS On Active Pressure Development in expansive Soil[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Expansive Soils. CRC Press, 1987.

(编辑: 喻伟)

Study on failure mechanism of expansive soil canal slope and treatment measures

CAI Yaojun^{1,2}

(1. Changjiang Reconnaissance Technology Research Institute, Ministry of Water Resources, Wuhan 430011, China; 2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The failure possibility of an expansive soil canal slope is large, which is the greatest threat to the canal operation safety. Through further analysis of failure mechanism of expansive soil canal slope, it is shown that the expansibility of soil body and development degree of structural plane are the internal causes for controlling the stability of canal slope; the infiltration of rainwater, surface water and canal water is the external cause. Referring to many projects both at home and abroad, especially the experimental results of expansive soil of Nanyang section of Middle Route Project of South - to - North Water Diversion, it is pointed out that the comprehensive measures including slope surface protection, anti - sliding and anti - seepage of slope top and the measure of strengthening the monitoring should be adopted according to different failure mechanisms and geological and environmental conditions.

Key words: expansive soil; canal slope; failure mechanism; treatment measure

· 简讯 ·

第六次长江流域水文协作会议在江西召开

2011年11月12日,第六次长江流域水文协作会在江西召开。会议由长江水利委员会水文局主持,出席会议的有江西、青海、西藏、云南、四川、重庆、湖北、湖南、安徽、江苏、上海、贵州、甘肃、陕西、河南、广西、福建、广东、浙江等省(直辖市、自治区)水文(水资源)(勘测)局(中心、总站)有关负责人和代表,黄委水文局、淮委水文局、珠委水文局、太湖局水文局有关负责人应邀出席会议。

会议强调,近年来,围绕“大水文”的发展定位,水利部明确提出“三夯实、五强化”的工作布局,即:夯实水文人才基础、夯实水文法规基础、夯实水文站网基础;强化水文管理、强化水文监测、强化水文服务、强化水文科技工作、强化水文文化建设。这八个方面高度概括了水文工作的发展目标,指明了水文工作

的发展方向。贯彻好、实践好以“三夯实、五强化”为内容的大水文发展理念,是流域水文当前和今后一个时期必须共同努力的历史性新任务。

会议强调,要积极落实流域“大水文”的重点任务。要紧紧围绕“十二五”规划目标,在九个方面重点突破:一是要在制度建设上有突破;二是要在强化水文管理上有突破;三是要在完善水文监测站网上有突破;四是要在增强水文监测能力上有突破;五是要在拓展水文服务上有突破;六是要在推进水文科技发展上有突破;七是要在优化水文人才队伍上有突破;八是要在弘扬水文文化上有突破;九是要在凝聚水文发展合力上有突破。

(长江)