

文章编号: 1000 - 7598 (2014) 01 - 0189 - 08

南阳膨胀土渠道滑坡破坏特征与演化机制研究

陆定杰¹, 陈善雄¹, 罗红明¹, 戴张俊¹, 李扬帆¹, 陈平²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 河南省电力勘测设计院, 郑州 450007)

摘 要: 为了解河南南阳地区膨胀土渠道边坡滑坡机制, 基于南水北调中线工程南阳段 19 个滑坡的现场调研统计结果, 选取南阳段 TS105+400 处右岸滑坡为典型实例, 开挖探槽揭露滑坡内部结构, 对该区膨胀土渠道滑坡的破坏特征及演化机制进行了研究。结果显示, 该区滑坡多发生在 Q_2^{al+pl} 地层; 边坡的稳定性受中上部土体中的垂直节理及坡脚充填强膨胀土的缓倾长大裂隙共同控制, 滑动面由后缘陡倾裂隙及前缘缓倾长大裂隙组成。开挖卸荷导致垂直节理张开, 垂直节理向下可延伸 3 m 以上, 破坏边坡土体整体性, 且充当水分出入边坡的主要通道; 坡面以下深度 4~8 m 存在一个高湿度带, 带内土体强度小, 发育滑动面。气候造成的胀缩循环、开挖卸荷导致边坡垂直节理张开并向深部发展, 对边坡土体的强度衰减作用明显, 当垂直裂隙与前缘缓倾裂隙贯通后, 发生强(久)降雨, 裂隙充水软化, 即诱发边坡失稳。

关键词: 膨胀土; 渠道边坡; 滑坡; 成因机制

中图分类号: TU 434

文献标识码: A

Study of failure characteristics and evolution mechanism of canal slope of Nanyang expansive soil

LU Ding-jie¹, CHEN Shan-xiong¹, LUO Hong-ming¹, DAI Zhang-jun¹, LI Yang-fan¹, CHEN Ping²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Henan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of expansive soil canal slope slide, a study is conducted based on the statistical results of 19 landslides at the Nanyang Section of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. The right bank landslide at TS105+400 is selected as typical landslide. Excavating trench exposes internal structure of landslide. A series of geological survey has been done to study the characteristics and evolution mechanism of expansive soil landslide in the area by excavating trench slides. The results show that, most landslides in the area occurred in the Q_2^{al+pl} strata. Slope stability is jointly controlled by vertical joints in the upper layer soil and the gently dipping big fissures at the toe of the slope, which are filled with highly expansive clay. Sliding surface is composed of the steep tilting cracks at the trailing edge of slope and big gently dipping fractures at the toe of slope. Excavation unloading effect causes the vertical joints' opening. These joints can extend more than 3 meters into the slope, which destroys the integrity of the slope soil and serves as the main channel for water to go in and out of the slope; there is a high humidity area 4 to 8 meters below the surface of slope. Soil within the area is weak and the sliding surface develops in it. Wetting and drying cycles caused by climate and excavation unloading lead to the vertical crack to open and propagation deep into slope. This effect causes a dramatic attenuation of soil strength. The vertical cracks connected with the big gently dipping fissures at the toe of the slope eventually. The slope slides after these fissure and crack are filled with water after the occurrence of strong lasting precipitation.

Key words: expansive soil; canal slope; landslide; genetic mechanism

1 引 言

膨胀土边坡稳定性问题是工程建设的一大难题。由于膨胀土自身的结构性、胀缩性及强度衰减

特性, 导致膨胀土边坡频繁失稳, 造成巨大经济损失^[1-2]。在建的南水北调中线工程穿越膨胀土(岩)渠道累计长约 386.6 km^[3]。渠道沿线工程地质条件复杂, 渠坡失稳频繁。据不完全统计, 自开工以来,

收稿日期: 2012-11-01

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目课题(No. 2011BAB10B02)。

第一作者简介: 陆定杰, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事膨胀土边坡工程特性方面的研究工作。E-mail: chasorleo@gmail.com

通讯作者: 陈善雄, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土工程特性与处治技术方面的研究工作。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

南阳段出现滑坡 70 多处,其中不乏长度为 200 m、面积为 2 000 m² 的滑坡,这些滑坡严重影响了施工进度,增加了工程投资,对渠道的建设及安全运行构成较大威胁。

针对膨胀土边坡工程,国内外学者开展了大量的工作,施建刚^[4]、陈善雄^[5]等采用非饱和土力学理论,研究了降雨入渗对边坡稳定性的影响,发现一定历时和强度的降雨可导致土坡失稳,符合降雨诱发膨胀土滑坡的自然规律。韦杰等^[6]研究了降雨/蒸发对膨胀土边坡稳定性的影响,阐述了降雨蒸发引起的干湿循环对边坡土体产生的强度衰减效应,是导致滑坡发生的重要原因。殷宗泽等^[7-8]研究了裂隙开展对膨胀土强度指标的影响,并提出考虑裂隙影响的边坡稳定分析方法,从不同的角度论证了多裂隙性是膨胀土边坡易于失稳的关键。目前,以地质特征为出发点,现场开挖揭露已发生滑坡,获取破坏边坡的内部特征,更真实地探究南阳膨胀土滑坡的演化机制的研究尚少。

本文基于滑坡现场调研资料,对南阳地区膨胀土渠道滑坡的地质、几何及力学特征进行了统计,基于滑坡统计特征选取南阳段 TS105+400 处右岸膨胀土渠道滑坡为代表性滑坡,对其进行现场开挖揭露,获取滑坡的内部特征,对滑坡的发生过程和形成原因进行分析,揭示膨胀土渠道滑坡机制,旨在为膨胀土渠道滑坡灾害的防治提供参考。

2 南阳渠道滑坡特征

2.1 区域地形地质及气候条件

南水北调中线工程南阳段地处南阳盆地西部。盆地处于伏牛山、武当山和大别山山系之间,西北部为秦岭山脉伏牛山系,东南部为大别山系,西南为武当山系,由汉水支流唐河、白河、湍河侵蚀冲而成,盆地地势北高南低,高程自 200 m 渐降至 80 m。南水北调中线工程南阳段始于南阳盆地的西

部边缘地带,沿伏牛山脉南麓山前岗丘地带及山前倾斜平原,总体呈北东方向穿越伏牛山南部山前冲洪裙及冲湖积平原后缘地带,渠段沿线地貌形态以低矮的丘陵、垄岗与河谷平原交替分布为特征。

本区出露的地层主要有奥陶系中统(O₂),上第三系(N)和第四系(Q),其中奥陶系中统(O₂),上第三系(N)埋深较深,多在河谷及近山地带出露,渠线分布较少,渠线挖方地层主要为第四系(Q),并可细分为 Q₃~Q₄及 Q₂地层。研究显示^[9],Q₃~Q₄地层主要为河湖相沉积,土体多为褐色黏土、粉质黏土,厚度较薄,有短小细密的卸荷裂隙发育,构造裂隙不发育,分布于平坦地形,具中~弱膨胀性。南阳段渠线挖方地层主要为冲洪积相沉积的 Q₂地层,该地层广泛分布于岗地、一级阶地,在垄岗斜坡中下部厚度较大。土体多为棕黄色黏土、棕黄色夹灰白色网纹状黏土,含褐色铁锰质结核,裂隙发育,局部发育大量钙质结核,膨胀性中等,钙质结核不发育时可能为强膨胀土。

南阳段地处湿润性大陆气候区,四季分明,夏季炎热多雨,冬季气候干燥。南阳市气象资料显示,该地区多年平均蒸发量为 1 725.7~1 879.5 mm,5~8 月份蒸发量最大,约占全年蒸发量的 25%。多年平均降雨量为 815 mm,降雨多集中在 6~9 月份,多年平均连续 4 个月降水量占全年降水量的 60%,可见南阳地区每年 6~9 月降雨量、蒸发量均很大,本时段该区经历频繁的干湿交替,统计发现滑坡也大都发生在本时段。

2.2 南阳膨胀土渠道滑坡特征

自 2011 年 10 月至 2012 年 9 月,采取现场取样、原位直剪试验、原位渗透试验、室内试验,以及 GPS/全站仪测绘、拍照、调研走访等手段对南水北调中线工程南阳段渠道滑坡进行了大量调查。分地质、几何及力学等 7 个滑坡特性,对调查的 19 个挖方渠道边坡滑坡进行了统计,统计结果列于表 1。

表 1 不同特性滑坡个数统计表

Table 1 Landslide numbers for different characteristics

挖深			地层岩性			后缘变形形式		前缘位置		后缘位置		土体膨胀性			裂隙充填物膨胀性		
9 m 以下	9~20 m	20 m 以上	Q	Q ₂ ^{al+pl}	Q ₂ ^{al} +Q ₂ ^{al+pl}	倒伏	下挫	坡底	坡中	坡底	坡中	弱	中	强	弱	中	强
2	16	1	1	14	4	4	15	15	4	3	16	4	10	5	0	0	19

调研结果显示,该区膨胀土渠道滑坡有以下特点:

(1) 渠道滑坡在第四系各地层均有发生,但多集中在 Q₂^{al+pl} 黏土地层;滑坡土体主要为棕红、红褐、

棕黄色,局部发育钙质结核或铁锰质结核;边坡土体一般具有中等膨胀性,埋深 9 m 以下且结核不发育可具有强膨胀性。

(2) 本区土体具有较强的结构性,近地表膨胀

土层柱状节理发育，边坡开挖形成后，构成渠坡坡顶，这些柱状节理多受开挖卸荷及超固结等因素影响，在开挖完成后连通并出现优选方向，易形成较长的顺渠陡倾裂隙。

(3) 现场开挖揭露土体显示，边坡中上部土体垂直裂隙密布，多由于开挖卸荷及干湿循环影响，开挖不久即张开，并向深部发展。现场可见多个边坡发育垂直裂隙，深度可达 3 m 以上，对边坡土体的切割作用显著。

(4) 在近渠底较深处多分布有棕黄色 Q_2^{al+pl} 黏土，表现出极强的结构性，倾斜长大裂隙发育，裂隙面多光滑，充填灰绿、灰白黏土，厚度为 1~5 mm 不等，对现场刮取的裂隙充填物，进行自由膨胀率试验，结果显示都具有强膨胀性。

(5) 滑坡几何形态方面，滑坡前缘基本位于坡脚，后缘到达坡顶位置，前缘沿渠底水平挤出，后缘下挫 1~3 m 不等，个别下挫可达 4~5 m。

可见，南阳地区具有代表性的膨胀土渠道滑坡，挖深都在 9~20 m 范围，位于地层，后缘位于坡顶发生陡倾下挫变形，前缘自渠底剪出，边坡中上部垂直裂隙密布，下部多发育强膨胀土充填裂隙。基于以上统计结果，为探究南阳膨胀土渠道边坡的内部破坏形态，对部分典型滑坡进行了开挖揭露研究，对滑坡体内部结构及滑动面进行了几何、力学及地层岩性等相关测绘、试验。下面以代表性滑坡 TS105+400 进行具体分析。

3 典型渠道滑坡内部破坏特征

3.1 滑坡实例概况

TS105+400 右岸滑坡位于南阳盆地中心，地形地貌为岗地，滑坡位于岗地边缘，地形呈近南北向扇形展布，地势东高西低，高程由 146.1 m 向西至温凉河逐渐降至 137 m 左右，岗顶面较平缓宽阔，岗坡舒缓，滑坡处地面向西南温凉河谷倾斜约 $4^\circ \sim 5^\circ$ ，岗顶自然坡度约 $2^\circ \sim 3^\circ$ 左右。

本渠段为深挖方渠段，滑坡处原地面高程为 146.1 m 左右，渠道设计开挖高程为 130.7 m，开挖深度为 16 m 左右，过水断面坡比为 1:2，一级马道高程为 141.4 m，一级马道以上渠坡坡比为 1:2，本渠段主体开挖完成后进行了坡脚改性土键槽开挖，渠底向上 5.6 m 边坡被削坡至 1:1，未立即开挖一级马道及以上土体，本文所述滑坡位于渠道右岸。

3.2 地质条件

滑坡处为垄岗地形，系山前冲洪积扇与冲洪积倾斜平原被冲沟、河流切割而形成，由第四系中更

新统 (Q_2^{al+pl}) 黏土组成，在滑坡地区开展了大量的调研取样工作进行土层厚度、高程测量，并采用自由膨胀率试验对土体膨胀性进行了判别。图 1 为紧邻滑坡上游边坡土层照片。



图 1 边坡土体分层照片

Fig.1 Soil stratification of landslide

由图 1 可见，该处边坡土体可分为 3 层：黏土，褐黄色，硬塑状态，含少量铁锰质结核。底界高程为 134.03~140.68 m，厚约 9.7~12.3 m。自由膨胀率为 42%，具弱膨胀性，微裂隙较发育。黏土，褐黄色夹灰绿色，硬塑状态，含少量黑色铁锰质结核及钙质团块，厚约 2.4~9.0 m。自由膨胀率为 56%，具弱偏中等膨胀性，垂直裂隙发育，长度多大于 0.2 m，线密度为 8~10 条/m，裂隙面较平直光滑，面附灰绿色黏土薄膜。黏土，棕黄夹灰绿色，硬塑状态，含少量黑色铁锰质结核。最大厚度约 2.3 m。自由膨胀率为 93%，具强膨胀性，裂隙极发育，纵横交错，主要为大裂隙及长大裂隙，裂隙面较平直光滑，充填灰绿色黏土。现场调查发现，该渠段地下水水位为 137.0 m 左右，埋深为 3~5 m。地下水高于渠底板为 4~6 m，根据施工开挖情况，高程 136 m 以上出现少许地下水出露，水量较小属上层滞水，基本分布在大气影响带内，因网状裂隙分布的随机性及粉质黏土孔隙小等原因，水量较小且分布不均匀，此处地下水多随开挖的进行而逐渐消失，坡脚即高程 131 m 左右出现稳定的地下水，存在排水问题。

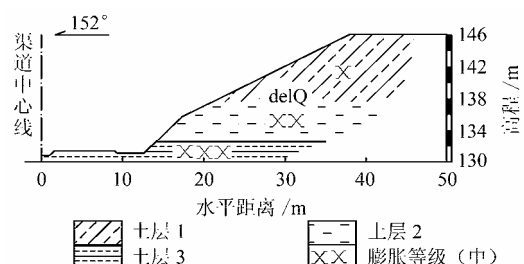


图 2 边坡地质剖面图 (单位: m)

Fig.2 Geologic profile of landslide (unit: m)

3.3 滑坡过程及形态

滑坡发生后,在现场搜集了滑坡经过及相关照片资料。

本渠段自2012年5月中开挖,6月初开挖完成,持续时间半个多月,开挖揭露土体结构性较强,挖坡稍陡即出现土体沿光滑界面垮塌现象;至6月中旬,即开挖完成后15d左右,桩号105+326~105+416段右岸,高程144m至坡顶施工便道间渠坡出现张拉裂缝,裂缝大体呈弧形,径向与边坡倾向大体一致,两端向坡下延伸,近直立,张开1~2cm,深度为20~30cm,延伸长度为20~40m,如图3所示。



图3 渠坡后缘裂隙
Fig.3 Crack at the crown of slope

2012年6月底,阴雨、晴天交替,该段渠坡变形加剧。渠坡坡顶下挫,张拉裂缝向两侧进一步发育,渠坡中上下下挫,坡度变缓,中前部 Q_2^{al+pl} 褐黄色及褐黄色夹灰绿色黏土层土体逐渐出现鼓胀。

2012年7月初,该区出现强降雨,渠坡变形加剧,并出现明显位移,滑体坡面破碎,结构疏松,局部积水,前缘一带土体呈饱水状,剪出口多见地下水渗出。

2012年7月底,采用GPS对滑坡范围进行了测绘,测得滑坡平面投影形态,如图4所示。滑坡总体呈不规则多边形,纵长为90m,最大宽度为30.4m。前缘位于坡脚处,高程为131.3m,后缘位于施工便道旁,高程为146.1m,滑坡前缘挤出较远,接近渠道中心线,形态平缓,前缘泡水,坡脚处土体成软塑状态挤出,剪出口明显,基本沿开挖底面向坡内延伸;边坡中部发育顺渠深切裂隙,裂隙间隔为80~100cm,长度为20~40m,倾角为80~90°,切割边坡土体,成块状、叠瓦状,并向坡下发生倒伏。中后部表现为下坐变形,坡面变缓,倾角约为23°,滑坡后壁陡倾,错落高度为1m左右。初步估算滑坡投影面积约为2100m²,滑坡体

体积为7000m³。

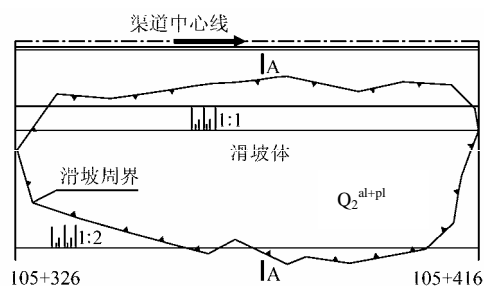
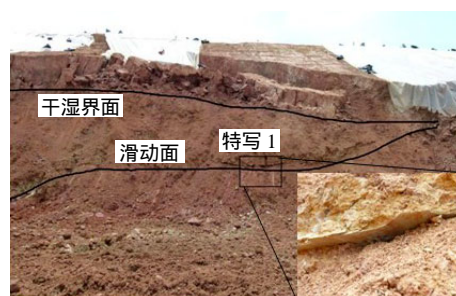


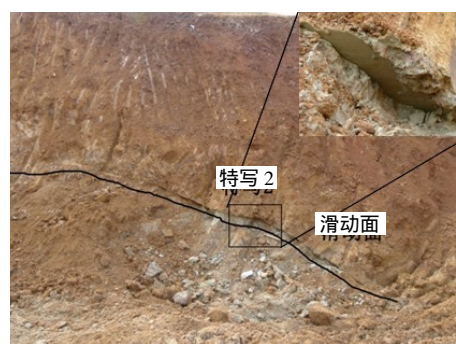
图4 滑坡平面图
Fig.4 Landslide plan

3.4 滑坡揭露内部特征及分析

2012年7月底,排尽渠道积水后,调查人员在滑坡体中开挖探槽,以查明滑坡深度,确定滑动面。滑坡体前缘清除后,揭露出两条不同埋深的界面,如图5所示。



(a) 干湿界面及滑动面



(b) 滑动面

图5 干湿界面及滑动面照片
Fig.5 Photos of wet-dry interface and sliding surface

图5中干湿界面埋深为1~2m,是土体含水率发生急剧变化的下界限,此面以上土体含水率低,强度高,此面以下土体含水率较高,土质软、强度低。本界面为层状松散破碎颗粒,未见明显滑动面及擦痕,界面以上为砖红色、红褐色含少量铁锰质结核黏土,埋深较浅处还可偶见钙质结核出露。土体含水率为10%左右,系开挖完成后水分散失,沿

开挖面形成的一层坚硬板状土体，因土体垂直裂隙发育、深部支撑土体泡水软化及滑坡中前部土体运动等因素，致使这层土体原生垂直节理张开，切割土层形成土块，又失去底部支撑向坡下倒伏，该层土体顶面基本保持开挖形成的坡面形态，多发生刚体平移及转动。

图 5 还反映边坡清方时在边坡下部揭露的滑动面，该面由滑坡的两侧逐渐深入滑坡体，空间上类似椭球面，除边缘部分外，大部分埋深为 4~6 m，倾向为 330°，倾角为 17°~28°，基本为底部第 3 层黏土中发育的长大裂隙，裂隙面灰白色，具蜡状光泽。滑动面上、下各分布有一层 20~30 cm 黄色夹灰白色黏土，土体很软，可见明显的擦痕。干湿界面与滑动面之间土体为黄褐色黏土，边坡中部垂直节理多发育切入此层，并在此层与原生缓倾长大裂隙贯通。多数垂直节理张开并充填坡上冲蚀而下的表层细土。

图 6 为 GPS 测量的探槽处的滑坡剖面形态。此处的边坡滑动面，分布于 131.6~145.5 m 高程，滑动面后缘陡倾，为后缘张拉裂隙向边坡深部的自然延伸，在约 140 m 处，向坡下发生弯折，此处土体含水率较高，处于软塑状态；滑动面转折段向下延伸至 134 m 高程，转化为边坡中下部原生长大裂隙。

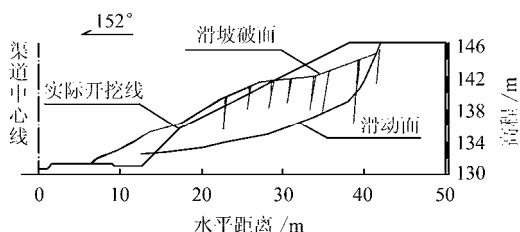


图 6 A-A 剖面图
Fig.6 A-A section

滑坡后缘边界，由多条顺渠陡立张拉裂隙组合而成，后缘错落高度为 1 m 左右，裂隙倾角为 80°~90°，裂隙垂直方向上多沿原生垂直节理发育，水平向平整度较低，呈些许锯齿状。滑坡后部表层土体硬塑，坡面变缓，其倾角约 24°，在约 142 m 左右出现平台，边坡中、上部开挖揭露顺渠深切裂隙，裂隙间隔 80~100 cm，倾角为 80°~90°。后期边坡清方时，在滑坡两翼变形较小处均发现充填碎土的垂直张开裂隙，这些裂隙深度都在 3 m 以上，深切坡体，如图 7 所示。

滑动面剪出口，位于约 131 m 高程，此处有稳定地下水出露，土体处于饱和状态，浅表层因长

期浸泡呈泥浆状，具一定流动性。此层土体水量相对稳定，处于饱和状态，裂隙多不明显，系边坡滑动中倒伏拉伸发生很大塑性变形所致。



图 7 深切裂隙图

Fig.7 Photo of deep propagation cracks

分别在滑动面以上 A 点、滑动面 B 点及滑动面以下 C 点取样，如图 8 所示，进行含水率、密度及自由膨胀率试验，结果见表 2。表 3 为现场直剪试验及参考文献[10 - 12]得到的滑坡处膨胀土强度参数。可见滑动面土体含水率明显高于两侧土体，具有强膨胀性，整个边坡土体的膨胀性随深度逐渐由中变强。裂隙面的抗剪强度亦远小于周围土体，是膨胀土边坡中天然的弱面。

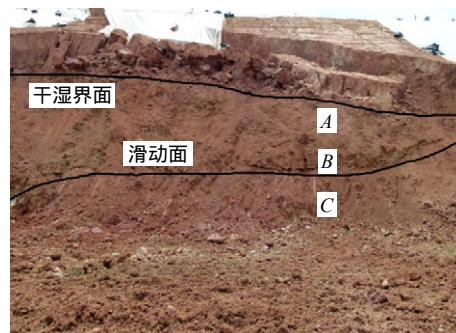


图 8 取样位置示意图

Fig.8 Schematic of sampling location

表 2 土体试验

Table 2 Results of soil experiments

位置	含水率 w/%	密度 ρ/(g/cm ³)	自由膨胀率 w _f /%
滑动面上部 A 点	18.87	1.93	67.6
滑动面 B 点	22.27	2.00	99.3
滑动面下部 C 点	16.93	2.07	91.3

表 3 土体强度指标推荐值

Table 3 Recommended values of soil strength index

项目	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0~3 m 残余剪强度	18	18
3~7 m 饱和固结抗剪强度	26	16
7 m 以下天然快剪强度	30	18
裂隙面抗剪强度	10	7

膨胀土的结构性是导致膨胀土边坡滑动的重要因素,现场探槽亦揭露出了大量裂隙,从现场揭露情况看,主要有两组影响显著的裂隙分布。中后部顺渠陡倾裂隙;中前部强膨胀土裂隙,清方过程共揭露出3条长大裂隙,均构成滑动面。裂隙调查统计结果如表4所示。

表4 边坡结构面统计

Table 4 Parameters statistics of landslide

组别	倾向 /(°)	倾角 /(°)	高程/m	位置	备注
渠坡	28	27			
JGM1	270	24	133.5	105+410	剪出口
JGM2	268	37	133.1	105+408	剪出口
JGM3	293	7	132.6	105+380	
JGM4	230	23	133.2	105+380	剪出口
JGM5	263	17	139.5	105+330	
JGM6	257	20	136.2	105+332	
JGM7	275	80~90	136.0~142.0		广泛分布于渠坡

渠道中上部发育近垂直裂隙可分为两类。一类为原生垂直节理张开所致。在边坡开挖完成后,渠坡中上部土体暴露,土体含水率出现较大波动,产生胀缩循环作用。此外,开挖形成临空面,土体失去侧向支撑,产生卸荷回弹,导致垂直裂隙张开并发展,边坡开挖工程中,切坡稍陡即出现边坡垮塌现象。现场开挖可见,该组多条裂隙切入土体2~3m,基本穿透边坡中部第2层土,与下部强膨胀层联通,成为水分向下层缓倾结构面渗透的主要通道。图9(a)所示为现场清方过程中暴露的张开垂直裂隙,其宽度为1~3cm,深度在4m以上。另一类裂隙为渠坡变形及土体失水等因素造成的次生裂隙。这类裂隙位于滑坡中部,高程在132.0~136.0m范围内,表层倾角为80°~90°,裂隙深度一般1m左右,裂隙面较平直粗糙,基本无充填,为先存垂直节理,揭露初期处于闭合状态,一旦土体失水立即张开,并向深部发展,由于深部土体含水率高,有较强的塑性变形能力,因此,此类裂隙多终止于干湿界面。

边坡中下部主要发育强膨胀土裂隙。该组裂隙位于第3层土中,裂隙极其发育、且多充填、具蜡状光泽,如图9(b)所示,充填物以亲水矿物蒙脱石、伊利石为主,且揭露出多组长大裂隙。坡脚处揭露顺坡向缓倾角长大裂隙,倾角为7°~27°,裂隙面平直光滑,有镜面光泽,充填灰白色黏土矿物泥膜,呈软塑状,具有强膨胀性,构成滑坡的滑动面。清方发现,靠近渠底的JGM1、JGM2及JGM3构成了本滑坡的前缘剪出口,图9(c)、图9(d)分别为

JGM1、JGM2照片。

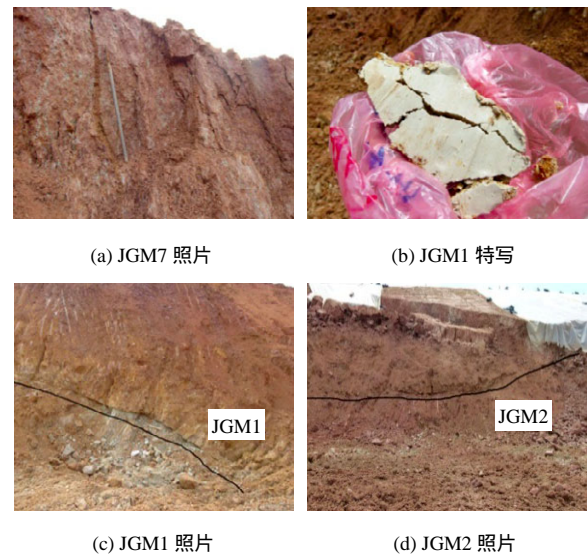


图9 结构面照片

Fig.9 Cracks photos

4 渠道滑坡演化规律及机制分析

由典型滑坡探槽开挖及现场清方揭露出的滑坡内部结构可以发现,南阳膨胀土渠道滑坡破坏主要受边坡中上部垂直节理及坡脚缓倾充填强膨胀土裂隙共同控制。

(1) 边坡中上部 Q_2^{al+pl} 中膨胀土层,垂直节理广泛发育,边坡开挖形成临空面、开挖扰动,加之膨胀土自身的超固结性,使得土体产生向外回弹,导致临近坡肩处的垂直节理张开,在坡肩形成密集分布的垂直裂缝。

(2) 坡肩裂隙张开,为边坡土体干湿循环创造了水分运移通道,成为雨水渗入及水分蒸发的天然通道。这些裂隙的存在将土体的渗透性提升6~7个数量级^[13],使得深部土体含水率随气候发生剧烈波动,土体经历干湿循环,强度发生衰减^[14-18],并趋于稳定,裂隙的存在破坏了边坡的整体性,使得一定范围的土体成为一定程度上的孤立土柱或土墙。这部分土墙,丧失了侧壁的摩擦强度,重量基本转移至深部土层,在变相增加边坡的下滑力的同时削弱了抗滑力。

(3) 坡肩张拉裂隙张开后,遇见强降雨,势必成为雨水的储存空间,现场开挖可见此类裂隙延伸深度3m以上的,充满水后将产生很大的静水压力,对边坡的失稳起到重要作用^[7]。

(4) 中后部垂直裂隙随干湿循环及边坡蠕变的发展继续扩张,最终会切入底部原有的充填强膨胀

土的缓倾长大裂隙，为水分进入提供了通道。由于上部土体水分散失较快，深部水分蒸发缓慢，水分的进入和散失存在速度差异，往往几场雨过后，表层土体水分很快蒸发，而内部土体依然保持较高含水率，产生“表硬内软”必然会在坡内深度 3~4 m 形成一高湿度带，也就形成了低强度带。上部土体支撑进一步减弱，向坡下发生倒伏，坡脚受挤鼓胀，同时致使后缘张拉应力加大，后缘裂隙发展变宽，边坡上部土体下挫。

边坡“表硬内软”现象继续发展，高含水率带逐渐向下发展，并与坡脚先存缓倾强膨胀土裂隙贯通，遇久雨或强降雨等不利工况，即形成连贯的滑动面，便沿坡脚顺坡缓倾夹层剪出，形成前缘由充填强膨胀土缓倾裂隙，后部由深切垂直节理构成的连续滑动面，发生大规模的整体滑动。

依据表中参数，采用 GEO-Slope/W 对边坡稳定进行极限平衡分析，计算模型如图 10 所示，土体分为 3 层，并存在一条由坡脚至坡顶的缓倾裂隙（图中黑线所示）。分析结果显示，当边坡土体经历干湿循环，强度衰减达到表 3 所示强度时，边坡的安全系数为 0.975。从表 5 可见，采用不同方法得到的边坡稳定性安全系数均较小。

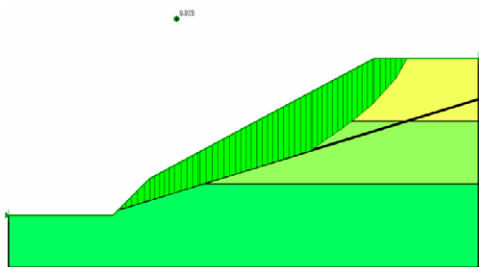


图 10 模型及滑动面图

Fig.10 Model and landslide surface

表 5 安全系数
Table 5 Safety factors

方法	Ordinary	Janbu	Bishop	G-Janbu
安全系数	1.000	1.002	1.008	0.975

5 结 论

(1) 渠道滑坡形成受膨胀土中各种裂隙控制，后缘主要受土体中垂直裂隙控制，滑动面中下部受坡脚缓倾充填强膨胀土长大裂隙控制。

(2) 滑体的物质主要为第四系中更新统(Q_2^{al+pl})冲洪积物，渠坡中下部存在长大裂隙，裂隙面充填灰白色黏土，通过对土样进行自由膨胀率试验，判定裂隙膨胀土的膨胀潜势为强。

(3) 滑坡发生的原因与机制主要有以下 3 个方面：膨胀土由于胀缩变形、风化等形成各种成因的裂隙面以及自身存在的结构面或软弱夹层，构成渠道滑坡潜在的滑动面；人工开挖使得滑坡体中下部超固结性黏土卸荷，引起土体结构松弛和应力状态改变，导致土体抗剪强度的衰减，同时渠坡产生卸荷裂隙，使得膨胀土中原有紧闭的裂隙逐渐张开，破坏了土体的结构强度，并成为边坡土体水分运移的通道；在雨季，连续降水通过渠坡各种裂隙渗入斜坡土体中，在潜在滑动面处停滞，使滑带土饱和，吸水软化，黏聚力下降，力学强度衰减，在上覆土体自重、外载或其他因素影响作用和诱发下形成滑坡。

(4) 针对以上结论，建议现场施工过程中加强坡顶截水，开挖后采用塑料薄膜对坡面进行及时防护，并在渠底开挖集水沟，及时排空坡脚积水。对开挖过程中，在坡脚发现长大裂隙渠段时，为保持渠道边坡的长期稳定，需酌情采取加大换填厚度、坡面梁、挡土墙或抗滑桩等加固措施。

参 考 文 献

- [1] 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 Shang-fa, WEN Shi-yi, LENG Xing-huo, 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.
- [2] 钟东雄. 牵引式滑坡处治技术探讨[J]. 交通标准化, 2009, (23): 81 - 84.
ZHONG Dong-xiong. Pull-type landslide treatment technology[J]. *Communication Standardization*, 2009, (23): 81 - 84.
- [3] 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 Xing-huo, CHEN Shang-fa, CHENG De-hu. 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.
- [4] 施建刚, 陈善雄, 余飞. 降雨对膨胀土路堤填筑质量的影响及其对策[J]. 土工基础, 2006, 20(1): 1 - 4.
SHI Jian-gang, CHEN Shan-xiong, YU Fei. The effect of rainfall on constructing quality of expansive soil subgrade and its countermeasures[J]. *Soil Engineering and*

- Foundation**, 2006, 20(1): 1 - 4.
- [5] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 447 - 450.
CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rainwater[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 447 - 450.
- [6] 韦杰, 曹雪山, 袁俊平. 降雨/蒸发对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 工程勘察, 2010, (4): 8 - 13.
WEI Jie, CAO Xue-shan, YUAN Jun-ping. Influences of precipitation and evaporation on the stability of expansive soil slopes[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2010, (4): 8 - 13.
- [7] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2010, 34(12): 2155 - 2161.
YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influence of fissuring on slope stability of expansive soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 34(12): 2155 - 2161.
- [8] 殷宗泽, 韦杰, 袁俊平, 等. 膨胀土边坡的失稳机理及其加固[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 1 - 6.
YIN Zong-ze, WEI Jie, YUAN Jun-ping, et al. Mechanism of slope slide of expansive soil and reinforcement for the slope[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(1): 1 - 6.
- [9] 冯玉勇, 徐卫亚, 王思敬, 等. 南阳膨胀土的工程地质特征和填筑适宜性[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1645 - 1651.
FENG Yu-yong, XU Wei-ya, WANG Si-jing, et al. Engineering geological characteristics and suitability for embankment of Nanyang expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(10): 1645 - 1651.
- [10] 胡波, 龚壁卫, 程展林, 等. 膨胀土裂隙面强度的直剪试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊 1): 246 - 248.
HU Bo, GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin, et al. Direct shear test on shear strength of fissure-plane in expansive soil[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2011, 33(Supp.1): 246 - 248.
- [11] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 裂隙对膨胀土强度影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(9): 100 - 104.
XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study on strength of expansive soil under influence of cracks[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2010, 41(9): 100 - 104.
- [12] 胡波, 龚壁卫, 程展林. 南阳膨胀土裂隙面强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2942 - 2946.
HU Bo, GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin. Test study of shear strength of fissure-plane in Nanyang expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(10): 2942 - 2946.
- [13] 赵旻, 阳云华, 冯建伟, 等. 南水北调中线工程南阳膨胀土裂隙的再认识[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(增刊 2): 72 - 74.
- [14] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797 - 3802.
LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3797 - 3802.
- [15] 崔激, 张志耕, 闫澍旺. 膨胀土的干湿循环性状及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 24 - 27.
CUI Wei, ZHANG Zhi-geng, YAN Shu-wang. Cyclic behavior of expansive soils and its application in slope stability analysis[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2010, 8(5): 24 - 27.
- [16] 张家俊, 龚壁卫, 胡波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2729 - 2734.
ZHANG Jia-jun, GONG Bi-wei, HU Bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 2729 - 2734.
- [17] 慕现杰, 张小平. 干湿循环条件下膨胀土力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 280 - 283.
MU Xian-jie, ZHANG Xiao-ping. Research on mechanical properties of expansive soil under wetting-drying cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 280 - 283.
- [18] MORRIS P H, GRAHAMS, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1992, 29(2): 263 - 277.