

# 安犹公路膨胀土路堑边坡浅层滑坡原因与对策

雷军伟<sup>1</sup>, 蔡树生<sup>2</sup>, 王月春<sup>1</sup>, 魏耀华<sup>1</sup>, 张锐<sup>2</sup>

(1.湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430056; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 分析安犹公路膨胀土路段工程地质特征, 测试不同深度土样的抗剪强度并计算边坡稳定系数, 在分析路堑边坡浅层滑坡原因及传统防护加固方案用于膨胀土边坡的不适用性的基础上, 针对安犹公路的特点, 提出改进的柔性支护方案。结果表明, 安犹公路地下水位较高, 土体具有弱膨胀性; 边坡开挖后干湿循环作用使 0~2 m 土体膨胀干密度降低, 继而使粘聚力和内摩擦角降低, 是导致边坡浅层滑坡的主要原因; 边坡浅层用土工格栅加筋以柔治胀, 并辅以有效的边坡内外防排水措施, 既能使边坡坡率维持在 1:1.5, 又能保证边坡的稳定性; 由于土质膨胀性较弱且属于已建工程, 在以往柔性支护结构的基础上适当加大加筋间距, 改进基底排水措施, 可降低 15% 造价, 同时缩短工期。

**关键词:** 公路; 边坡; 膨胀土; 滑坡; 抗剪强度; 柔性支护

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)02-0095-04

膨胀土含较多亲水性蒙脱石及其混层矿物, 具有显著吸水膨胀特性, 在大气干湿循环条件下易产生裂隙, 加速雨水下渗。此外, 膨胀土还具有超固结性。膨胀土边坡经常发生浅层失稳破坏, 且这种失稳很特殊, 许多边坡坡率降至 1:3 甚至 1:5 也会滑动, 但土样强度指标并不低。一些边坡在施工阶段就发生滑坡, 还有相当多的边坡完工后不滑坡, 而是几年后才发生滑坡。

对于膨胀土边坡失稳机理和防治技术的研究, 最初是采用常规黏土的评价方法计算膨胀土边坡的稳定性, 如极限平衡法。但膨胀土边坡是浅层渐进性破坏, 极限平衡法无法反映其稳定状态和破坏机制。之后, 许多学者从膨胀土自身胀缩性、裂隙性、超固结性和外部环境的干湿循环、大气降水等因素入手, 改进膨胀土边坡破坏失稳的评价方法, 但结果都不太理想。膨胀土防护常用方法有石灰桩法、换填法、支挡结构法。随着绿色公路概念的提出, 石灰桩法逐渐被淘汰; 换填法易造成大面积开挖和弃方处治问题; 刚性支挡结构如浆砌片石护坡、抗滑挡土墙、锚杆框架梁等是目前国内常用的膨胀土边坡防护与加固措施, 但随着时间的推移和干湿循环的影响, 刚性支挡结构往往在膨胀力的作用下发生破坏。该文以湖北省枝江市安福寺至猗亭区古老背公路工程枝江段(简称安犹公路)膨胀土路堑边坡浅层滑坡为例, 通过地质调查, 分析引起滑坡的主要原因和常规方法治理膨胀土边坡存在的问题, 提出柔性支护

新方案。

## 1 工程地质特征

安犹公路为双向四车道一级公路, 起于 276 省道与枝江市安福寺之字溪大道交叉处, 止于与猗亭交界处, 全长 7.3 km, 设计速度 80 km/h, 路基宽度 22.5 m。地处鄂西山地向江汉平原沉陷带过渡地段, 属于长江左岸的河流侵蚀堆积阶地垄岗地貌。线路工作区地貌主要属剥蚀堆积类型, 以河流阶地为主, 部分为构造剥蚀丘陵区。沿线各级阶地高程多为 50~180 m, 冲沟发育, 地形稍有起伏, 地表植被较发育。年平均降水量 1 097~1 482 mm, 年平均蒸发量 1 815.3 mm, 夏季多梅雨。地表水系较发育, 地下水主要赋存于第四系松散堆积物中, 埋藏较浅, 一般埋深 1~3 m; 主要接受大气降雨补给, 受季节影响, 水位动态变化较大, 富水性差; 一般情况下, 地下水在斜坡下部、冲沟底部或地形低洼处以下降泉形式排出地表, 多呈季节性变化特征。

该区域膨胀土主要分布于构造、剥蚀丘陵区的第四系中更新统黏土中, 土体中普遍夹有网纹状高岭土。膨胀土在构造、剥蚀丘陵区呈断续分布, 在猗亭河流侵蚀堆积阶地地区也有分布。该项目沿线约 4 km 路段处于膨胀土分布区, 共 9 处膨胀土路堑边坡发生滑坡, 滑坡最大垂直深度普遍为 1~2 m。

K9+160—240 右幅边坡先后在完成防护和沥青路面铺筑后出现坍塌(见图 1), 放缓至 1:2 仍不

稳定。该失稳边坡最高为 11 m, 位于 K9+100—280 挖方边坡的中段, 两端边坡处于稳定状态且土质较好。该失稳边坡土样的基本性质见表 1。室内试验结果表明: 该边坡的膨胀土具有典型的高液限土特点, 天然含水率较高, 细粒含量大, 液塑限高, 塑性指数大, 根据自由膨胀率和塑性指数判定为弱膨胀土。如何对失稳边坡进行经济有效的处治, 避免征地, 且不破坏新建未损坏的排水设施, 不扰动两端未失稳边坡, 成为需重点解决的技术难题。



(a) 坡率 1:1.5 且采用拱形骨架防护后的边坡



(b) 坡率降至 1:2 且完成路面铺装后再次滑坡

图 1 K9+160—240 右幅膨胀土路堑边坡浅层滑坡

表 1 安琥公路土样的基本性质指标

项目	指标值/%	项目	指标值/%
天然含水率	27.7	自由膨胀率	49.0
液限	57.8	砂粒含量	1.5
塑限	23.0	粉粒含量	39.4
塑性指数	35.0	黏粒含量	59.1

## 2 安琥公路边坡浅层滑坡原因

膨胀土路堑边坡按破坏形式分为潜伏断面滑坡、弧面渐进式破坏和浅表层坍塌, 该边坡属于浅表层坍塌破坏。浅表层坍塌破坏是指大气干湿循环导致边坡浅层土体反复胀缩开裂, 雨水从裂隙入渗, 导致强度降低, 引发浅表层土体坍塌破坏, 滑动深度一般为 1~2 m。膨胀土构成矿物具有特殊的双电层结构, 吸水性非常强。吸湿时, 水分子进入蒙脱石的双电层结构中, 导致土颗粒膨胀, 气体分子从水中溢出。期间土体结构的固体颗粒受气体冲击, 导致土颗粒之间的接触部位或胶结体出现一定薄弱或破坏, 边坡产生微小裂缝。浅层边坡的上覆压力较小,

在水的作用下, 土颗粒吸附的水膜变得越来越厚, 使土颗粒之间的间距变大, 粘结强度减弱, 且侵入的水分子越多, 粘结强度衰减程度越大, 干密度变小。另外, 某些胶结物还会被软化或溶解, 在土颗粒间起润滑作用。脱湿时, 水分子从土体中溢出, 对土骨架形成进一步冲击。胶结物从水中析出, 加剧土体结构破坏, 裂隙进一步形成。

考虑到抗剪强度降低是造成边坡失稳的直接原因, 对该边坡受干湿循环影响的 1.0 m 土和不受干湿循环影响的 2.2 m 土进行固结慢剪直剪试验, 结果见表 2。由表 2 可知: 非干湿循环区土 (2.2 m) 的粘聚力高达 21.5 kPa, 而干湿循环区域土 (1 m) 在受到多次干湿循环影响后其粘聚力降为 1 kPa。

表 2 K9+160—240 原状土样抗剪强度指标

取样深度/m	干密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	粘聚力 /kPa	有效内摩擦角 / $(^\circ)$
1.0	1.52	1.0	17.2
2.2	1.60	21.5	19.7

通过浸水试验对比两土样的粘聚力, 结果 (见图 2) 显示: 1.0 m 土样粘聚力衰减严重, 在水中浸泡一段时间后完全垮塌; 而 2.2 m 原状样基本保持原样, 能维持自身状态。



(a) 1.0 m 原状样



(b) 2.2 m 原状样

图 2 K9+160—240 原状土样泡水试验

从数值上看, 21.5 kPa 粘聚力可保证路基在使用期间边坡不发生垮塌。同时, 在上覆荷载较低的情况下, 膨胀土的胀缩性无法抑制, 土颗粒之间的间距增大, 相互咬合程度降低, 导致内摩擦角变小。对于新建公路, 直剪试验得到的数据大多是没有经历干湿循环的深层土, 参照该试验数据进行边坡设计和防护不准确, 这也是许多膨胀土边坡在使用后期常发生滑塌的原因之一。

综上, 分析该边坡失稳的原因如下: 边坡土体为弱膨胀土, 具有湿胀干缩特性。受大气干湿循环影响, 边坡浅层 (2 m) 范围内裂隙发育, 为降雨入渗提供了便利通道。在降雨条件下形成上层滞水区, 一

方面使浅层土体增湿膨胀,抗剪强度发生衰减,有效粘聚力完全丧失,有效内摩擦角也因土体膨胀而略有降低;另一方面,雨水入渗后浅层土体中孔隙水压力增加,有效应力降低。坡脚应力最为集中,最先失稳,上层坡体失去支撑,逐渐下滑,发生边坡的渐进式破坏。上述两个原因使膨胀土边坡相对于一般土质边坡更易发生浅层坍塌。采用JTG D30—2015《公路路基设计规范》中简化bishop对取样深度1.0 m的边坡进行稳定性分析,结果(见图3)显示:即使边坡放缓至1:2.5仍会发生滑塌(边坡稳定系数为0.97)。

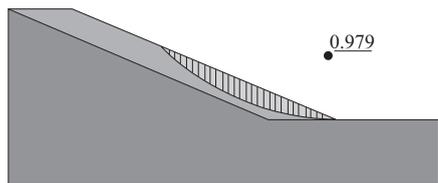


图3 K9+160—240右幅膨胀土路堑边坡稳定性

计算结果(坡率1:2.5)

### 3 边坡处治方案及原理

#### 3.1 常用边坡防护加固措施存在的问题

常用边坡加固方法有抗滑桩、挡土墙及结合这两种结构物进行加固,对于大面积膨胀土边坡坡面,主要采用全封闭浆砌片石、拱形骨架与植被防护等进行处治。

浆砌片石支挡是采用砂浆与毛石料砌筑的砌体结构,大多采用全封闭措施处治,以隔绝外界大气环境对土体的干扰。为单纯防止岩体胀缩,采用能隔

水隔热且有一定抗变形能力的全封闭工程措施,不能适应膨胀岩体的低强度和碎裂性。

拱形骨架植草防护是一种既能稳定路基边坡,又具有绿化效果的工程防护,在公路工程中得到广泛应用。对于膨胀土边坡,拱形骨架虽能减少坡面径流导致的冲刷并抵抗膨胀土边坡开挖时的卸荷应力释放和部分胀缩变形,但由于含水量变化使约束膨胀土体积发生变化,产生的巨大膨胀力足以造成坡体刚性结构严重破坏。

抗滑挡墙整治膨胀土滑坡,由于膨胀土工程地质性质特殊,土体结构复杂,滑坡发生后及时采用支挡工程,可减少边坡稳定性破坏,阻止土体进一步滑塌。在膨胀土处治中,刚性支挡虽然能提供足够的抗力,但也会为膨胀土积蓄可观的膨胀潜势,挡土墙在长期集中应力作用下易发生开裂破坏,影响边坡稳定。

综上,采用刚性支护和全封闭圬工护坡处理膨胀土路堑边坡不合理,不仅达不到防护处治目的,有时还可能带来工程安全隐患。因此,在进行膨胀土路基边坡处治方案设计时应根据膨胀土特有的性质和破坏规律,结合处治边坡的具体情况,提出切合实际且有经济性和针对性的处治措施,如柔性支护、刚柔相济等。

#### 3.2 安瓠公路边坡柔性处治方案

由于常规边坡防护与加固方案用于膨胀土路堑边坡存在不足,根据该膨胀土路堑边坡的破坏特点及产生原因,采用柔性支护方案进行治理(见图4)。

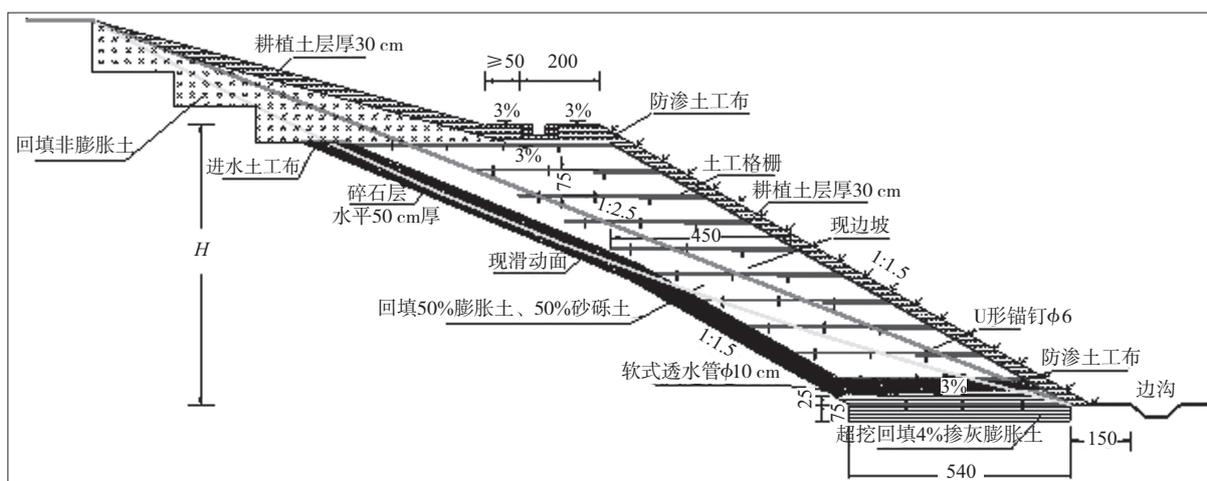


图4 K9+160—240右幅膨胀土路堑边坡滑塌处治方案(单位:cm)

柔性支护是将土工格栅分层摊铺反包,回填膨胀土压实形成足够厚度的加筋体,再对坡顶进行封

闭、坡体内外综合疏排水。格栅与填土间的摩擦力和咬合力可提供足够的抗剪强度,使加筋体构成一

整体抵抗边坡的作用,即使在雨水渗透下也可保证边坡具有足够的抗剪强度。柔性支护允许边坡产生一定变形,可释放开挖边坡的大部分应力和膨胀力。充足的加筋体厚度(大于干湿循环显著影响区深度)可防止或隔绝风化作用对坡内膨胀土的影响,阻止裂隙发育和浅表层滑塌。

根据该边坡的土质情况、实际工况,对常用柔性支护方案进行优化:

(1) 基底排水设计的优化。常规柔性支护基底渗沟位于边沟以下,对于新建公路较好实施,对于已建好的公路则难以实现。该边坡所在路堑段均已铺筑完路面和边沟,故只对已坍塌部分进行处治,保留未坍塌的边坡及其边沟。为此,将基底渗沟设置为高于边沟,基底渗水沿纵向排水,在处治边坡终点沿横向排至边沟。另外,考虑到边坡坡脚是最易发生剪切破坏的区域,且边坡坡脚土体已严重湿化,为保证柔性支护体基底土体的强度,将柔性支护体基底超挖 50 cm 并回填石灰改良土。这样,即使后期基底有渗水,土体仍可保持较大的抗剪强度。

(2) 加筋体加筋间距优化。常规柔性支护体每层加筋体的加筋间距为 50 cm。该边坡坡体自由膨胀率不高,刚达到弱膨胀土标准,且根据加筋体稳定性分析结果(见图 5),将加筋间距适当增大,仍可满足柔性支护体整体稳定性。为提高柔性支护结构的经济性和施工便利性,将加筋间距提升至 75 cm。

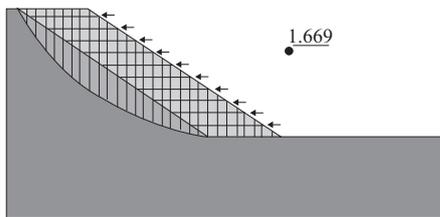


图 5 K9+160—240 右幅膨胀土路堑边坡处治后稳定性计算结果(坡率 1:1.5)

由于减少了基底渗沟工程量,增加了格栅加筋间距,相对于常规柔性支护方案,优化后方案的造价减少 15%左右,工期缩短 5 d。

### 3.3 安猿公路边坡防护后稳定性分析

防护后的边坡,位于边坡表面的加筋土强度得到提高,有效粘聚力增大。格栅反包增加了土体的紧密程度,土颗粒之间的嵌挤增加,内摩擦角增大。位于边坡内侧的土体基本土性参数不变(见表 3)。采用 JTG/T D32—2012《公路土工合成材料应用技术规范》中加筋土边坡稳定性分析方法对治理后的

边坡进行分析,结果(见图 5)显示:边坡放缓到 1:1.5 也能保持稳定。

表 3 K9+160—240 右幅膨胀土路堑边坡处治后数值计算参数

材料	有效粘聚力 /kPa	有效内摩擦角 /(°)
加筋土	5.0	18.2
加筋体以外土体	21.5	19.7
土与格栅界面	8.9	6.8

## 4 结论

(1) 安猿公路边坡垮塌为浅表层边坡坍塌破坏。大气环境的干湿循环使表层土体反复胀缩开裂,裂隙发育,坡脚最先失稳,上层坡体失去支撑,逐渐下滑,发生边坡的渐进式破坏。

(2) 大气干湿循环对膨胀土的影响非常大。安猿公路膨胀土路堑边坡在经历多次增湿—脱湿过程后,粘聚力由 21.5 kPa 下降到 5 kPa,内摩擦角降低 2.5°。粘聚力的丧失和内摩擦角的减小是边坡失稳的主要原因。

(3) 针对安猿公路边坡破坏的特殊性,采用柔性支护方法对垮塌部分进行处治,保留未垮塌边坡及其附属设施,并增大加筋间距。治理后边坡坡度在 1:1.5 的情况下也能保持稳定,且工程造价降低、工期缩短。

## 参考文献:

- [1] 廖世文.膨胀土与铁路工程[M].北京:中国铁道出版社,1984.
- [2] 包承钢.非饱和土性状及膨胀土边坡的稳定问题[J].岩土工程学报,2004,26(1).
- [3] 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).
- [4] 鲁志方,杨晓华,晏长根.土工格室植被护坡防膨胀土边坡开裂机理研究[J].公路,2016(4).
- [5] 徐胜文.膨胀土路堑边坡处治方法研究综述[J].低温建筑技术,2010(1).
- [6] 程展林,李青云,郭熙灵,等.膨胀土边坡稳定性研究[J].长江科学院院报,2011,28(10).
- [7] 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.
- [8] 丁国权,袁俊平.膨胀土边坡防护机理分析及防护方法比较[J].岩土工程技术,2018,32(2).

(下转第 102 页)

活跃度最大的因素。在裂隙面和软弱夹层共同作用下,渠坡稳定性急剧下降,渠坡安全系数在 0.814 左右,渠坡将产生滑移失稳破坏。从存在随机分布裂隙面的 5 个渠坡来看,裂隙面的产状、组合特征、裂隙倾角都会影响渠坡的安全系数。

### 2.3 抗滑桩对含裂隙面深挖方膨胀渠坡支护的稳定性分析

考虑软弱夹层的存在,分析仅采用抗滑桩支护时存在裂隙面深挖方膨胀渠坡的稳定性。各工况下渠坡安全系数见表 5。

表 5 各工况下采用抗滑桩支护时渠坡的安全系数

渠坡编号	裂隙面	抗滑桩	安全系数	渠坡编号	裂隙面	抗滑桩	安全系数
1	0	1	0.981	2-3	1	1	0.952
2-1	1	1	0.928	2-4	1	1	0.954
2-2	1	1	0.977	2-5	1	1	0.918

由表 5 可知:仅存在软弱夹层的不利条件下,抗滑桩的支护效果较差,安全系数为 0.981,达不到设计规范要求;同时存在裂隙面和软弱夹层的情况下,使用抗滑桩支护渠坡的效果更差,安全系数在 0.946 上下波动,不利于渠坡的稳定。在裂隙面和软弱夹层共同影响下膨胀渠坡的稳定性更差,单采用抗滑桩不足以使渠坡保持稳定,采用桩梁组合支护体系才能保障膨胀渠坡的稳定性。

### 3 结论

利用 ABAQUS 软件建立有无裂隙面和软弱夹层、有无桩等条件下深挖方膨胀土渠坡模型,计算各条件下渠坡的安全系数,分析其对带裂隙深挖方膨胀渠坡稳定性的影响。结论如下:

- (1) 桩梁组合支护下带裂隙膨胀渠坡滑动面呈受裂隙和软弱面控制的偏折线状推移式滑动(沿裂隙面和软弱夹层),最大位移出现在坡脚附近。
- (2) 裂隙面与软弱夹层都会降低渠坡的稳定性,单一因素下软弱夹层对渠坡安全系数的减小幅

度比裂隙面大;裂隙面的产状、组合特征、裂隙倾角都会对渠坡安全系数产生一定影响。

- (3) 裂隙面和软弱夹层共同作用下,渠坡安全系数在 0.814 左右,渠坡将产生滑移失稳破坏。
- (4) 考虑软弱夹层的存在,抗滑桩支护下,深挖方膨胀渠坡的安全系数为 0.92~0.98,不足以使渠坡保持稳定;桩梁组合支护下,渠坡安全系数达到 1.460,能保障深挖方膨胀渠坡的稳定性。

### 参考文献:

[1] 包承纲,刘特洪.豫西南膨胀土的工程地质特性和渠道边坡的稳定性问题[A].非饱和土的理论与实践学术讨论会论文集[C].1992.

[2] 刘协强.抗滑桩在公路边坡加固治理中的应用研究[D].长沙:中南大学,2007.

[3] 李小雷,张泽坤,罗威,等.H型抗滑桩加固膨胀土滑坡的有限元分析及优化设计[J].路基工程,2016(6).

[4] 颜天佑.膨胀土挖方渠道抗滑桩加固措施效果分析[A].膨胀土岩土工程技术国际学术研讨会论文集[C].2014.

[5] 王东海.南水北调深挖方膨胀土渠坡滑坡机理及抗滑措施优化[D].长沙:长沙理工大学,2014.

[6] 卢再华,陈正汉,曹继东.原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J].岩土力学,2001,22(3).

[7] 费康,彭勤.ABAQUS岩土工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2017.

[8] 周娟.南水北调深挖方膨胀土渠坡抗滑桩作用机理分析[D].长沙:长沙理工大学,2014.

[9] 张胜军.深挖方膨胀土渠道膨胀土工程特性测试分析报告[R].武汉:水利部长江勘测技术研究所,2013.

[10] 易万胜.带裂隙膨胀土力学性能多尺度计算及坡体滑移路径研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

[11] 李颖,陈诚,解林.南水北调中线膨胀土试验段深挖方渠坡柔性支护技术[J].工程抗震与加固改造,2016(4).

[12] 高建新,赵东城,王珊珊.抗滑桩+坡面梁新型支护型式在膨胀土处理中的应用[J].河南水利与南水北调,2019(5).

收稿日期:2019-07-03

(上接第 98 页)

[9] 陈强,韩军,刘自楷,等.武汉绕城高速公路生态防护膨胀土边坡失稳的几种形式及加固处理[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊 2).

[10] 徐丽丽,刘丽佳,徐昭巍,等.季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术[J].岩土工程学报,2016,38(增刊 1).

[11] 张良以,陈铁林,张顶立.降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J].岩土工程学报,2019,41(1).

[12] 张锐,刘正楠,郑健龙,等.膨胀土侧向膨胀力及其对重力式挡墙的作用[J].中国公路学报,2018,31(2).

[13] 肖杰,杨和平.膨胀土边坡浅层坍塌破坏原因剖析[J].公路交通科技,2016,33(7).

[14] 张锐,郑健龙,颜天佑,等.南水北调中线工程浅层滑坡综合防治研究[J].水利水电技术,2014,45(10).

收稿日期:2019-07-04