

文章编号: 1007-2993(2023)05-0518-06

陕南某公路边坡稳定性及治理措施分析

史静¹ 张浩² 赵昕² 范红英²

(1. 陕西交通职业技术学院, 陕西西安 710018; 2. 陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西西安 710065)

【摘要】 陕南地区某典型三级边坡在治理施工时发生了大面积垮塌, 开挖后未及时防护是导致边坡失稳的直接原因, 秋季持续强降雨是促进边坡垮塌的间接原因。使用强度折减法并运用数值软件计算分析, 结果表明边坡卸载并在一级平台使用单锚点预应力锚索抗滑桩加固的治理效果最好。综合分析采用分级刷坡卸载+单锚点预应力锚索抗滑桩+综合排水系统+绿化措施的治理方案, 并对边坡开展表面位移、深层位移、地下水位等实时监测和视频监控, 可有效监控边坡稳定性, 确保公路运营安全。研究成果对类似边坡治理有一定借鉴作用。

【关键词】 公路; 边坡; 稳定性; 措施; 监测

【中图分类号】 P 642.22

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.002

Analysis of Slope Stability and Treatment Measures for a Highway in Southern Shaanxi

Shi Jing¹ Zhang Hao² Zhao Xin² Fan Hongying²

(1. Shaanxi College of Communications Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China)

【Abstract】 A typical third level slope in the southern Shaanxi region experienced large-scale collapse during treatment construction. Failure to timely protect after excavation was the direct cause of slope instability, while continuous heavy rainfall in autumn was the indirect cause of slope collapse. The strength reduction method and numerical software were used for calculation and analysis. The results show that the slope unloading and the use of single anchor point prestressed anchor cable anti-slip pile reinforcement at the first level platform has the best treatment effect. The comprehensive analysis adopts a treatment plan of graded slope unloading, single anchor point prestressed anchor cable anti-skid pile, comprehensive drainage system, and greening measures. Real time monitoring of surface displacement, deep displacement, groundwater level, video monitoring, and other aspects of the slope can effectively monitor slope stability and ensure highway operation safety. The research results have a certain reference value for similar slope treatment.

【Key words】 highway; slope; stability; measures; monitor

0 引言

2021 年 8 月中旬, 陕西各地遭遇持续降雨, 并出现短时超强降雨天气, 致使部分地区发生严重内涝、滑坡、泥石流等灾害。据统计, 2021 年 8 月 23 日至 9 月 23 日, 仅仅一个月时间, 陕西境内 6132 km 高等级公路累计发生水毁 409 处, 中断交通 37 处, 累计中断长度约 20 km, 直接经济损失 5.9 亿元。其中大部分水毁是由于强降雨导致边坡土体饱和, 随即发生

滑坡, 致使交通中断^[1-2]。

由此可见, 高速公路边坡的稳定性问题仍然尤为突出, 尤其是在降雨丰富地区, 影响边坡稳定性的因素较多^[3-4], 边坡的变形破坏有多方面原因, 若仅对其进行简单刷坡分级, 或采用单一加固措施, 很难同时保证边坡的局部和整体稳定^[5-6], 易给公路施工和运营留下很多安全隐患^[7]。因此, 边坡的变形失稳机制分析和治理设计仍是一项重要课题^[8-12], 还需建立

基金项目: 国家自然科学基金(52009002); 中国博士后科学基金(2021M692743); 陕西省自然科学基金(2021JQ-253); 陕西省交通运输厅科技项目(22-37K, 23-81X)

作者简介: 史静, 女, 1977 年生, 汉族, 陕西岐山人, 硕士, 副教授, 主要教学研究方向为地基与基础工程、路线设计及建筑材料等。E-mail: 108205955@qq.com

通讯作者: 张浩, 男, 1988 生, 汉族, 陕西大荔人, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土与隧道工程技术研究工作。E-mail: 772559115@qq.com

自动化监测系统来持续监测其稳定状况。

针对陕南地区典型不稳定公路边坡工程案例, 分析其变形失稳机制, 根据现场制约因素并结合数值分析结果, 给出合理可行的治理方案, 并对边坡进行自动化监测, 研究成果可为类似边坡治理提供借鉴。

1 边坡灾害概况

1.1 地形地貌及地质条件

该公路边坡位于山体前缘, 山体为构造侵蚀与流水切割低山地貌, 自然山体上陡下缓, 坡度范围 $28^{\circ} \sim 55^{\circ}$, 坡形呈直线一波状起伏, 山体植被茂盛。线路在右侧为挖方, 左侧为填方, 施工开挖右侧形成临空面, 坡体上部为堆积的松散残坡积层, 路堑边坡上覆第四系残坡积层含碎石粉质黏土及碎石土, 整体为土质边坡, 自稳性差, 容易坍塌且诱发山体滑坡。

1.2 原设计治理方案

该挖方边坡长 195 m, 原设计采用 3~4 级锚杆格构护面墙进行防护, 每 8 m 一级, 坡率均为 $1:0.75$, 每级坡顶设 3 m 宽平台, 原设计防护断面见图 1。

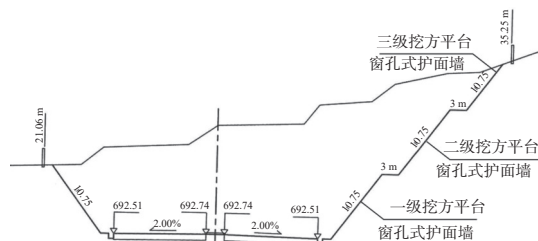


图 1 原设计防护断面图

1.3 变形失稳情况

在边坡开挖后立即进行支护施工, 当第 2—4 级坡面防护工程完成时, 恰逢秋季持续强降雨, 在对第 1 级边坡进行防护施工的过程中, 右侧挖方边坡发生边坡塌方。经分析, 雨水从上部山体裂缝流入边坡内部的土石交界面, 导致土体饱和, 最后产生垮塌。受持续降雨影响, 边坡随后又发生了两次塌方, 该段边坡坡顶线外公墓部分滑塌, 滑体为软塑—流塑状态, 隧道出口被垮塌后的土体掩埋(见图 2、图 3)。

随着边坡垮塌持续发生, 边坡坡顶出现多条地裂缝(见图 4), 裂缝长度 15 m, 宽度 5 cm, 均为连贯折线型裂缝, 表明边坡已处于蠕变阶段, 进一步发展可能形成滑坡, 根据裂缝的平面形态特征, 圈定了边坡土体变形的周界, 呈“圈椅状”贯通裂缝。

1.4 应急处理措施

现场紧急对已经发生垮塌的边坡及时采用防水土工布进行覆盖, 坡脚使用土石堆载反压, 对坡体及坡顶“圈椅状”贯通裂缝采用水泥砂浆灌填封闭, 坡体上设置多个位移监测点(见图 5)。



图 2 边坡垮塌后的现状



图 3 边坡垮塌掩埋隧道洞口现状



图 4 边坡上部外缘的地裂缝



图 5 现场临时措施现状

2 边坡灾害补充勘查

2.1 地质构造

该边坡涉及的断层为 F_{2-1} 和 F_{2-2} 断层, F_{2-1} 和 F_{2-2} 断层破碎带宽度 50~60 m, 断层带内碎裂岩发育, 断层严重影响带宽度 25 m, 边坡整体位于两条断层中间的破碎影响带内, 受断层挤压影响, 边坡覆盖层表层为坡积土, 土体成分较杂, 土石混合, 其下为第四系松散的碎石和粉质黏土, 下伏泥盆系灰岩。

2.2 地层结构

根据边坡形态特征, 结合变形破坏迹象, 沿主滑方向布置 5 条勘探线, 11 个勘探点, 勘探钻孔间距 25 m、深度 32 m, 补充勘查的岩芯照片见图 6, 典型

地质剖面见图7。据补充勘探揭露,边坡地层自上而下主要为:含碎石粉质黏土(层厚10 m)、碎石土(层厚3 m)、全风化灰岩(层厚5 m)、强风化灰岩(7 m)。灰岩岩体结构、构造已破坏,岩体破碎,岩芯多呈碎石状,节理裂隙发育。



图6 地勘芯样

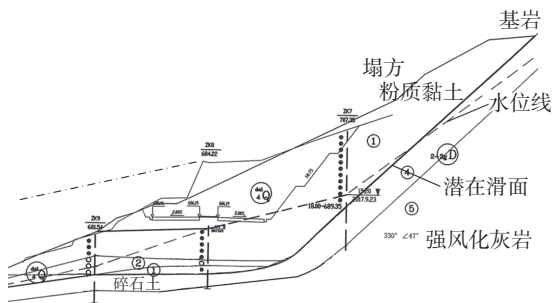


图7 典型地质剖面图

2.3 地下水情况

补充勘察期间为丰水期,各勘探点均遇到地下水,地下水位埋深0.70~15.20 m,相应标高673.94~717.97 m,为赋存在覆盖层中的孔隙潜水及全风化灰岩中的基岩裂隙水。

2.4 滑坡分布特征

根据补充勘察,结合坡体变形特征及垮塌周界,可确定滑坡范围。滑坡纵向长度约120 m,宽度103~180 m,坡度35°,滑体平均厚度约15 m,主滑方向58°;滑坡潜在滑面位于冲洪积与残坡积交界带,属于土石交界面(见图8)。

3 边坡失稳机制分析

根据工程地质测绘、钻探及室内土工试验结果,经综合分析得出边坡稳定性主要影响因素与失稳机制。

(1) 地质构造

边坡位于两条断层影响带之间,影响带宽度50~60 m,几乎包含了整个边坡,受断层挤压影响,坡体土石混杂,稳定性较差(见图9)。

(2) 坡体结构及物质组成

根据勘察揭露,边坡基覆界面上陡下缓,坡脚临近古河道,阶地纵向堆积物与山坡残坡积横向堆积物交叠出现。边坡覆盖层以粉质黏土为主,沿坡体上薄下厚分布,平均层厚约15 m,坡脚覆盖层下部分布有



图8 滑坡分布平面图

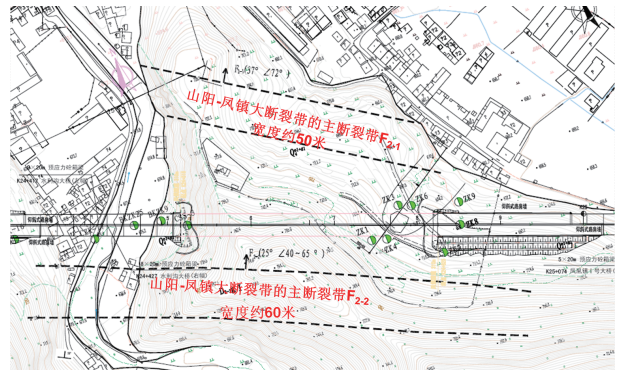


图9 断层构造位置图

层厚约2 m的碎石土。边坡下伏基岩为全风化-强风化灰岩,节理裂隙发育,完整性差。

(3) 持续降雨

降雨使土体重度增大甚至饱和,其抗剪强度降低,导致坡体上覆的残破积层沿土体内部软弱面和下伏全风化灰岩带接触带发生滑动,秋季持续强降雨为边坡滑动提供了充分的水环境条件。

(4) 工程活动

路堑边坡开挖形成临空面,为滑体剪出破坏提供空间。由于原设计边坡支护深度不足,且支护结构尚未完成,排水措施未能及时跟进,导致边坡出现失稳。

4 边坡稳定性分析

4.1 强度折减法

强度折减法是指对土体黏聚力 c 和内摩擦角 φ 逐步折减直到边坡达到破坏,此时的折减系数即为边坡的安全系数 F_s ,折减系数即边坡内土体发挥的最大抗剪强度与外荷载在边坡内产生的实际剪应力之比。抗剪强度折减法较传统的方法具有如下优点:

- (1) 能够对复杂地质边坡计算分析;
- (2) 考虑了岩土的本构关系以及变形对应力的影响;
- (3) 能够模拟边坡的滑移过程和滑面形状,通常由剪应变增量或者位移增量确定滑移面的形状和位置;
- (4) 土体与支护结构的共同作用下能够较真实地

模拟土体的应变状态;

(5)求解安全系数时,无需假定滑移面的形状,也无需进行条状划分。

4.2 工况分析

基于勘探成果和室内试验数据,根据反算法和工程经验综合确定滑坡稳定性的计算参数(见表1、表2),其中表1中的抗剪强度指标为暴雨工况下饱和状态下岩土的内聚力和内摩擦角。采用数值分析软件对单锚点预应力锚索抗滑桩(锚索锚固于桩顶)治理后的位移云图进行模拟。抗滑桩截面尺寸2 m×3 m,间距6 m,锚索长度35 m。根据抗滑桩位置分为5种工况:抗滑桩位于一级边坡坡底、抗滑桩位于一级边坡坡顶、抗滑桩位于二级边坡坡顶、抗滑桩位于卸载后边坡坡底、抗滑桩位于卸载后一级边

坡坡顶。滑坡稳定性采用暴雨工况进行数值模拟,对边坡安全系数、潜在滑裂面位置以及抗滑稳定性进行分析。5种工况对应的位移等效云图见图10—图14,结果表明,图10—图13对应工况下的位移云图其滑裂面很明显,位移较大,边坡的抗滑稳定性差,对应的边坡稳定安全系数分别为0.92、1.05、0.95、1.14,均不满足暴雨工况下边坡安全系数小于1.15的要求。从图14可以看出,对应工况下薄弱面变短,位移线上部的滑体体积明显减小,剪切带表现出明显的回缩现象,边坡破坏模式由深层滑动变为浅层表面滑动;最大位移发生在抗滑桩的顶部位置,这充分说明预应力锚索抗滑桩阻止了其上部土体向下滑动的趋势,增加了边坡的整体稳定性,该工况下边坡安全系数为1.36,满足规范要求。

表1 边坡土体物理力学参数

地层	天然重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	渗透系数 ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	界面强度 折减因子 R
粉质黏土	19.2	20	2.8	0.35	13	13	0.0005	0.68
碎石土	19	20.5	3.5	0.33	18	10	0.08	0.68
全风化灰岩	20	21	5	0.32	20	15	0.007	0.68
强风化灰岩	20.5	21.3	6	0.31	24	20	0.003	0.68

表2 抗滑桩计算参数取值表

弹性模量 E/MPa	抗弯刚度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$	抗压强度 EA/kN	等效抗弯刚度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1})$	等效抗压刚度 $EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	等效厚度 d/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 ν
3.5×10^7	1.56×10^6	2.45×10^7	5.1×10^5	1.85×10^7	0.632	25	0.15

4.3 治理方案选择

考虑到滑体厚度大、结构复杂、后部裂缝分布多、土体结构严重破坏,应进行适当卸载。如果采用全挖方案,不仅工程量和费用巨大,而且开挖后形成的高陡边坡会产生新的稳定性问题。如果直接采用锚索或抗滑桩治理,由于滑体厚度大,锚索或抗滑桩的长度、尺寸均过大,施工难度大,成本高。根据前述数值模拟分析结果,经综合考虑,采用对滑坡体进行适量减载,同时在滑坡剪出口附近实施支护加固,从根源上解决边坡的不稳定,降低施工的难度。通过上述综合分析,采取以滑体减载为主、单锚点预应力锚索抗滑桩加固支护、坡体表面和内部截排水、局部护坡加固的综合治理方案。

5 边坡治理方案

(1)由于边坡下滑段位于隧道右侧,为了防止山体下滑力影响隧道左洞安全,对山体进行局部卸载,向右卸载后距离隧道外轮廓线6 m处设置6根抗滑桩,抗滑桩采用2 m×3 m矩形截面,桩长24 m,桩间

距6 m。

(2)在路线左侧外轮廓线5 m处设置10根抗滑桩,其中,前段6根抗滑桩采用2 m×3 m矩形截面,桩长为26 m,后段4根抗滑桩采用1.8 m×2.4 m矩形截面,桩长30 m,桩间距6 m。

(3)对于隧道出口右侧边坡产生滑塌的路段,首先对第1级边坡以上的滑塌体进行修整,并在原第1级挖方平台处设置抗滑桩,共15根,设置2 m×3 m矩形截面锚索抗滑桩,桩长为27 m,桩间距为6 m,桩顶设置1根锚索,轴向拉力设计值600 kN。

(4)对第1、2级坡面采用锚墩进行加固,锚墩为1.5 m×1.5 m,厚度0.5 m,镶嵌在锚杆框架梁中间,每个锚墩设置一根锚索,锚索施加500 kN的预应力。根据地质断面,锚索长30~40 m,可锚入中等风化基岩。

(5)在坡顶距离坡口线5 m处增设坡顶截水沟,缓坡设置拱形骨架护坡进行防护,出口边坡内部设置支撑渗沟,并在抗滑桩之间设置仰斜式排水管,每两根桩之间纵向设置一排,上下间距2 m,竖向可设置

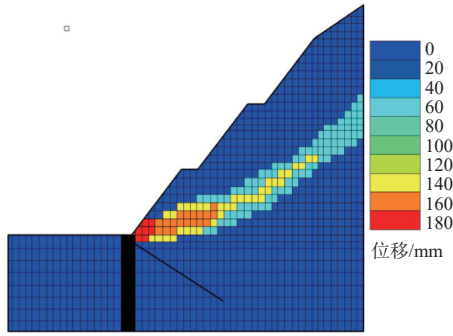


图 10 一级边坡坡底抗滑桩等效位移云图

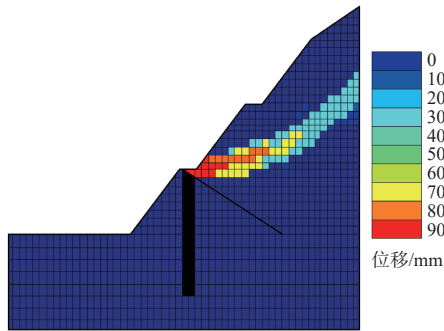


图 11 一级平台抗滑桩等效位移云图

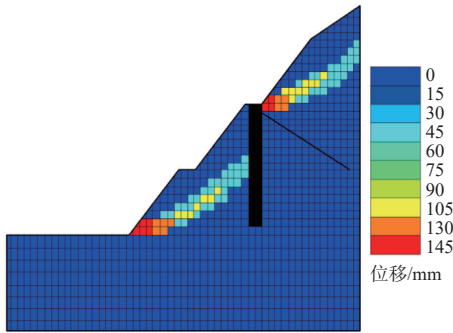


图 12 二级平台抗滑桩等效位移云图

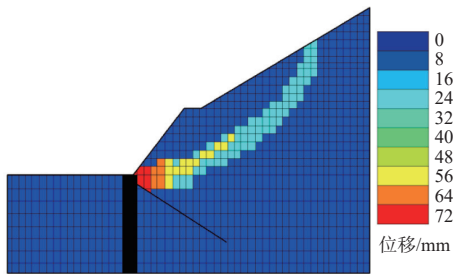


图 13 卸载后一级边坡坡底抗滑桩等效位移云图

3根,每根仰斜式排水管长度15~20m。边坡内部支撑渗沟设置和细部断面见图15和图16。

6 边坡监测及运行状况

引起边坡土体抗剪强度降低的原因很多,如土层较厚、土质疏松、降雨量丰富、地下水位高等。综合本项目特点及影响因素,确定边坡监测的主要内容如表3所示。

该高速公路12月份通车后,自1月开始对边坡

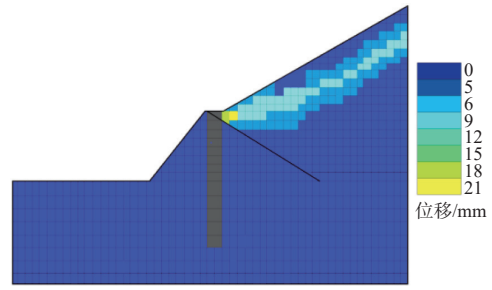


图 14 卸载后一级平台抗滑桩等效位移云图

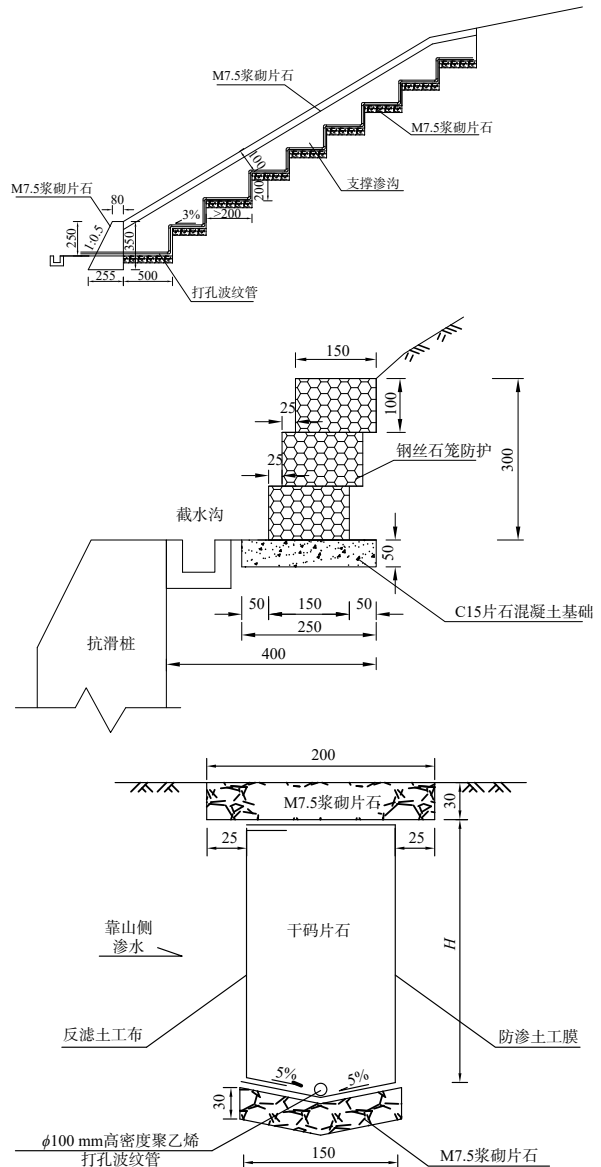


图 15 支护和排水细部断面图(单位:cm)

进行运营监测,边坡地下水位随降雨量变化曲线见图17,边坡位移随降雨量变化曲线见图18。由图17和图18可以看出,该地区1—3月雨量较少,从4月份开始降雨量迅速增大,地下水位仅在5—8月变化较明显,其他月份变化不大。边坡表面位移和深层位移从3月末开始变形增大,随着雨季的到来,6—8月

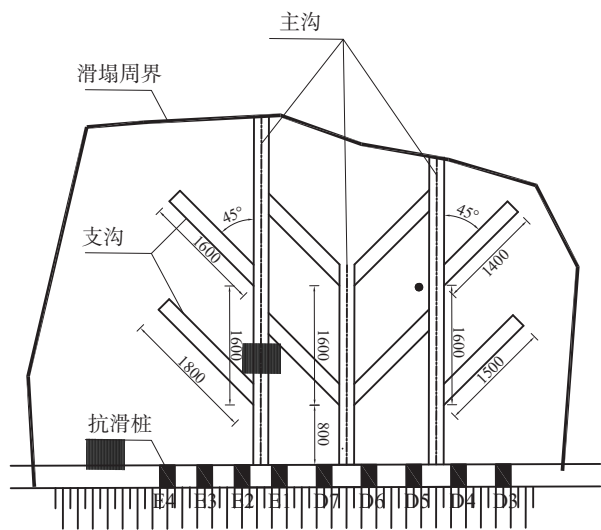


图 16 边坡内部支撑渗沟设置图(单位:cm)

表 3 边坡监测内容

序号	监测内容	使用设备	监测数量
1	表面位移	GNSS系统	4
2	深层位移	测斜仪	3
3	地下水位	孔隙水压力计	3
4	视频监控	球形监控摄像头	1

表面监测点 BJ04 的累计位移值达到 98.2 mm, 已达到监测预警值。经综合分析, 该监测点位移值过大是表面土层局部松动导致的。根据后期监测曲线显示, 位移曲线 9 月份以后已趋于平缓, 公路经过一整年运营后, 在第二个雨季的累计位移基本保持不变, 边坡处于稳定状态。

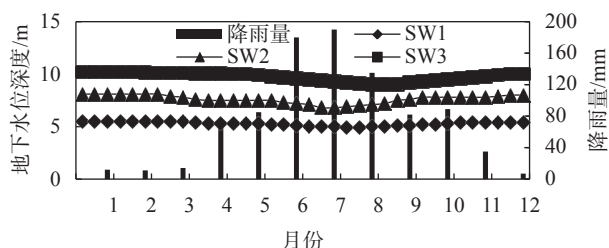


图 17 地下水位随降雨量变化曲线

深层监测点 SJ03 的累计位移值为 19.7 mm, 其他监测点的位移变化趋势基本一致, 其中 1—3 月可认为缓慢蠕滑阶段, 4—8 月为等速变形阶段, 9—10 月为蠕变阶段, 11—12 月基本趋于稳定。通车后第一年监测的变形数据表明, 该边坡变形基本受降水量影响控制。单锚点预应力锚索抗滑桩抗滑效果良好, 边坡整体稳定。

7 结论

(1)通过补充勘查, 地质测绘和综合分析, 该边坡失稳是由地质构造、坡体结构、持续降雨和工程开挖

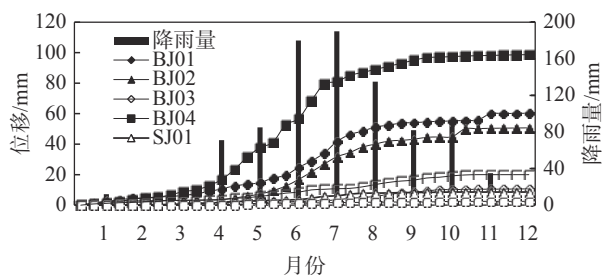


图 18 位移随降雨量变化曲线

诸因素综合作用而导致的。地质构造和坡体结构是内因, 持续降雨和工程开挖是外因。

(2)5 种治理工况的数值分析表明, 对第 2、3 级边坡卸载, 并在第 1 级平台使用单锚点预应力锚索抗滑桩支护的治理效果最好。据此, 采用分级刷坡卸载+单锚点预应力锚索抗滑桩+综合排水系统+绿化措施的治理方案。

(3)边坡监测数据及工后运行状况表明, 边坡变形已趋于稳定, 治理方案可行。

参 考 文 献

- [1] 刘海亭, 朱有禄, 杨 鹏, 等. 高边坡稳定性评价及治理措施分析研究[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(1): 60-65.
- [2] 王瑞春, 王雪彤. 复杂条件下路堑边坡失稳变形机制分析和治理设计[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(6): 469-476.
- [3] 宋 章, 王 科, 崔建宏, 等. 路堑边坡滑坡成因机制浅析及防治对策[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(4): 27-31.
- [4] 徐兴华, 尚岳全, 王迎超. 碎石土滑坡综合治理及评价决策方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(2): 484-492.
- [5] 牌立芳, 赵 金, 吴红刚, 等. 滑坡治理工程的下托式抗滑桩-隧道组合体系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 59-66.
- [6] 张 浩. 公路涎流冰形成机理与防治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [7] 胡 强, 田 冲. 湖州妙西宝峰寺滑坡稳定性分析评价与防治措施研究[J]. 科技通报, 2019, 35(7): 200-202.
- [8] 毛 峰, 张桂涛. 滑坡复活因素分析及其稳定性计算[J]. 土工基础, 2019, 33(3): 363-365.
- [9] 张 浩, 赵 昕, 李 昂, 等. 郑家垣隧道-滑坡斜交体系变形特征与治理方案[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 182-188.
- [10] 曾玉梅, 杨 星, 范安军, 等. 山区公路泥岩危岩崩塌分析评价及防护设计[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 1-3.
- [11] 李 鹏, 苏生瑞, 曾 金, 等. 堆积层-基岩接触面滑坡形成机理物理模型试验研究[J]. 西安工业大学学报, 2020, 40(6): 623-630.
- [12] 曾 朋, 金煜翔, 钟志辉. 某分级、分层、分区域破坏滑坡的稳定性分析及治理[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(3): 151-156.