

文章编号: 1007-2993(2023)03-0291-06

# 卢家湾大桥堆积体滑坡稳定性分析及处治措施研究

魏东旭 万 利 刘传利 郑国胜

(山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东济南 250031)

**【摘要】** 堆积体边坡普遍结构松散, 稳定性差, 多处于基本稳定或者临界滑动状态, 在降雨、地震、施工开挖扰动等条件下, 边坡极易因变形过大而失稳。以大永高速卢家湾大桥堆积体滑坡为例, 通过地质调绘结合勘探成果, 在掌握地层岩性、地质构造及水文地质条件等地质背景基础上, 用传递系数法和刚体极限平衡法分析了卢家湾大桥滑坡堆积体的稳定性, 并提出抗滑桩+锚杆的支护治理方案。利用有限元软件对加固后的边坡进行数值模拟, 结果表明: 边坡为复合型边坡, 长时间强降雨水下渗至地下, 地形上受工程建设开挖形成的临空面影响, 导致了该边坡的失稳; 经过计算, 综合治理后坡体稳定性系数为 1.2; 滑坡监测数据表明, 治理后坡体位移迅速收敛并趋于稳定, 表明滑坡治理方案有效。工程研究成果可为今后类似工程提供参考。

**【关键词】** 堆积体; 滑坡; 数值模拟; 支护方案

**【中图分类号】** P 642.22

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.006

## Stability Analysis and Treatment Measures of Lujiawan Bridge Accumulation Landslide

Wei Dongxu Wan Li Liu Chuanli Zheng Guosheng

(Shandong Transportation Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250031, Shandong, China)

**【Abstract】** The slope structure of accumulation body in southwest mountainous area is generally loose, and its stability is low. Most of them are in the basic stable or critical sliding state. Under the conditions of rainfall, earthquake, construction and excavation, the slope is prone to instability due to excessive deformation. Taking Lujiawan Bridge landslide of Da-Yong Expressway as an example, the stability of Lujiawan Bridge landslide accumulation was analyzed by the transfer coefficient method and rigid body limit equilibrium method based on the geological background of stratum lithology, structures and hydrogeological conditions through geological mapping and exploration results, and the anti-slide pile+anchor bolt support treatment scheme was proposed. The numerical simulation of the reinforced slope was conducted using finite element software, and the results showed that the slope was a composite type, with long-term heavy rainfall water seeping underground. The terrain was affected by the free surface formed by engineering construction excavation, resulting in the instability of the slope. After calculation, the stability coefficient of the slope after comprehensive treatment is 1.2. The landslide monitoring data shows that the displacement of the slope after treatment converges rapidly and tends to stabilize, indicating the effectiveness of the landslide treatment plan. The results can provide reference for similar projects in the future.

**【Key words】** accumulation body; landslide; numerical simulation; supporting scheme

### 0 引言

我国西南地区广泛分布着堆积物滑坡体, 其结构普遍松散, 极易造成滑坡失稳。国内外学者对堆积体滑坡开展了相关研究。王彦东等<sup>[1]</sup>利用现场冲刷试验及原位监测的手段, 分析了九寨沟震后崩滑堆积体渗流响应特征及启动机理, 指出滑坡的启动可以分为先期渗透、铲刮滑流、快速堆积以及局部饱和侵蚀

四个阶段。张国帅等<sup>[2]</sup>通过开展堆积体入渗试验, 模拟了堆积体的起动过程, 研究表明入渗条件下堆积体的结构稳定性会明显降低。Gray 等<sup>[3]</sup>通过试验发现, 堆积体失稳过程中, 堆积体形态会影响内部颗粒的接触方式, 进而改变堆积体的堆积稳定性。周伟杰等<sup>[4]</sup>采用极限平衡法计算安全系数, 分析不同降雨条件对于堆积体的影响规律, 指出久雨对堆积体稳定性影响

**基金项目:** 山东省交通规划设计院集团资助(KJ-2021-SJY-09)

**作者简介:** 魏东旭, 男, 1982 年生, 汉族, 河南商丘人, 硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 主要从事岩土工程设计及地质灾害评估方面的研究。E-mail: 554976548@qq.com

较大,且有较弱滞后性。黄帆等<sup>[5]</sup>以四川大住镇任河大桥滑坡滑带土为研究对象,对其抗剪强度参数进行了反演,为获取滑坡滑带土的参数指标提供了新思路。李焕焕等<sup>[6]</sup>对重庆乌江东岸堆积体滑坡提出了抗滑群桩+挡墙支护的综合治理措施。湛正刚等<sup>[7]</sup>针对RM水电区RS堆积体的综合治理,确定了全削减载及减重反压的综合治理方案。向宝山等<sup>[8]</sup>以九绵高速五里坡隧道为依托,探究松散堆积体隧道的围岩加固措施,提出采用加强超前小导管注浆及缩脚锚杆的治理方案。总结而言,对堆积滑坡体的稳定性开展分析研究并选择合理有效的加固治理措施,具有重要的工程意义。

卢家湾大桥场地上部为堆积体滑坡,下部存在基岩顺层的情况,在查明场区地质背景和堆积体结构的基础上,采用不平衡推力传递系数法和刚体极限平衡方法对滑坡体进行了稳定性分析,并提出对卢家湾大桥上、下部进行分区治理的方案,为确保治理后坡体的稳定,利用有限元软件对加固方案模拟分析,并对坡体现场监测,研究成果可为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

卢家湾大桥位于云南昭通地区,属预应力混凝土连续刚构桥,其中6#桥墩位于一山体边坡中部,紧邻陡坎(高约50 m)边缘,右侧为一不稳定堆积体滑坡,下伏基岩顺倾(见图1)。滑坡所处地貌属构造侵蚀深切峡谷,山体自然坡度 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。岩层产状为 $180^{\circ} \angle 23^{\circ}$ ,与坡向近似一致,为典型的顺层易滑地层,整个边坡区域岩体产状变化较大,岩体较破碎。



图1 路堑滑坡地貌图(处治后)

2020年3月初开始进行6#桥墩墩位平台及施工便道开挖,开挖对原地貌改变较大,形成新的临空面。期间经历长时间持续强降雨,雨水下渗至堆积体导致土体饱和,边坡后缘和坡面出现裂缝并逐步加剧,截至2020年4月中旬边坡后缘滑塌错台高度达1.5 m,边坡坡面隆起明显,后缘裂缝有继续扩大趋势,边坡整体外移情况十分严重,滑坡堆积体已严重威胁桥梁

施工及运营安全。

如图2所示,滑坡堆积体表现为三个相对独立的变形区。其中变形1区滑坡堆积体厚度约3~5 m,沿滑塌方向长约10 m,宽20~30 m,变形区后缘裂缝呈东西方向延伸,该区堆积体主要为黄色状块石及碎石土;变形2区滑坡堆积体厚度约5~10 m,沿滑塌方向长约25~30 m,宽30~40 m,变形区后缘裂缝呈西南—东北方向延伸,该区堆积体主要为黄灰色粉质黏土、碎石土及块石;变形3区滑坡堆积体厚度约10~13 m,沿滑塌方向长约50 m,宽95 m,变形区后缘裂缝呈西南—东北方向延伸,该区堆积体组成构造与变形II区一致,需要注意的是图2变形区分区不同于图3。将滑坡地形图按照图3所示进行划分,变形I区为主滑区,滑坡平面形态近似“圈椅”状,最长贯通裂缝约120 m,宽10~30 cm,地面高程650~700 m,主滑方向NE177°,投影面积 $5.2 \times 10^3 \text{ m}^2$ ,滑体厚度10.0~13.0 m,平均厚度11.0 m,体积约 $6.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为一中型中层牵引式堆积体滑坡。



图2 滑坡堆积体地貌图(处治前)

## 2 应急处置措施

发现裂缝后,对该坡体开展了变形监测。坡体地表位移监测数据显示,滑坡堆积体正在以3~6 mm/d的速率发生变形,降雨会加剧滑坡堆积体进一步变形,需要对边坡嵌顶裂缝及坡体内变形区进行注浆并用混凝土封堵。加快嵌顶外截水沟、边沟、及边坡体仰斜式排水管的施工进度,并对富水区加密仰斜排水孔,排出坡体内的地下水,避免因地表水下渗而进一步加剧滑坡堆积体变形,从而提高边坡体自身稳定性。暂停下部边坡桩墩位置土石方工程的开挖,以防止滑坡堆积体进一步发生变形。

## 3 滑坡稳定性及滑坡影响因素分析

### 3.1 滑坡堆积体稳定性分析

由图3可知,上部滑坡体表现为三个相互关联的变形区,I区为主滑区,该区剩余下滑力最大,范围包含滑区II和滑区III,是控制该桥梁墩位稳定性的

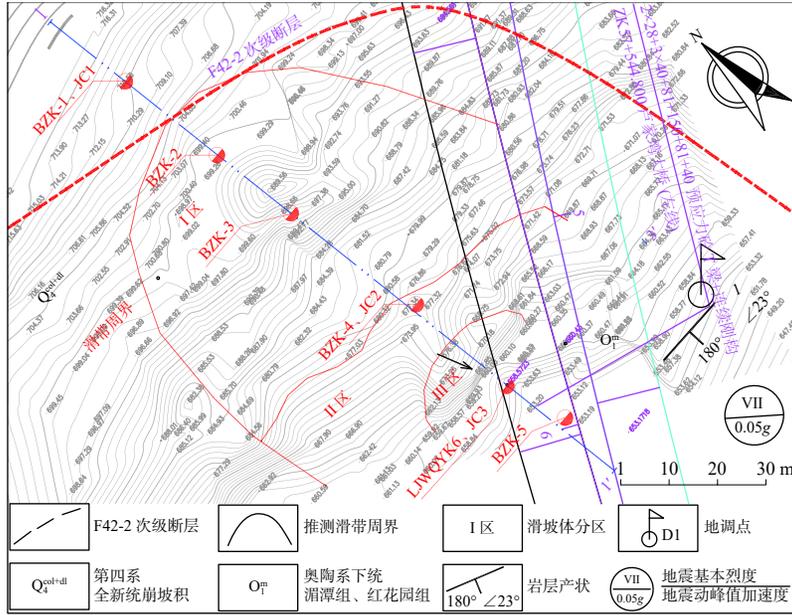


图3 路堑滑坡地形图

主控因素。

以主滑区为对象进行稳定性分析,采用传递系数法和较为严格的刚体极限平衡法计算滑坡的剩余下滑力。该滑坡为堆积体土质坡,滑带面位于岩土分界面呈折线形,中等风化砂岩顺倾,滑坡稳定性计算采用传递系数法时将主滑区划分为9条块(见图4)。

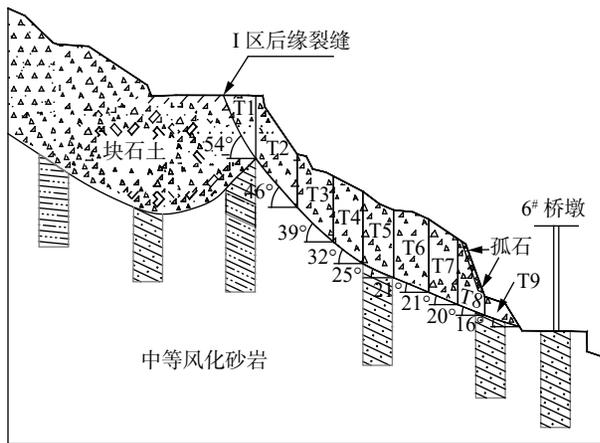


图4 主滑断面稳定性计算简图

表1给出了主滑区岩土体的相关参数,表2为剩余下滑力的计算结果。通过计算,主滑区I在正常工况(天然)下稳定系数为1.050,基本稳定,剩余下滑力1121.8 kN/m;在非正常工况I(暴雨)下稳定系数为0.972,处于不稳定状态,剩余下滑力1254.3 kN/m。

为使滑坡体的物理力学参数及剩余下滑力更符合工程实际,对刚体极限平衡方法——Morgenstern-Price法进行校核验证。滑坡体下部的桥梁主墩为重要结构物,正常工况(天然)下取安全系数 $F_{st}=1.30$ ,

非正常工况I(暴雨)下安全系数 $F_{st}=1.20$ 。由试验或者工程类比法选取 $c$ 值,反算内摩擦角 $\phi$ 值。计算结果见表3。

表1 主滑断面稳定性计算表

工况	条块序号	条块重/ (kN·m <sup>-1</sup> )	滑面 长度/m	滑面 倾角/(°)	滑带面参数	
					$c$ /kPa	$\phi$ /(°)
正常工况	1	966.2	14.4	54	18.0	29.0
	2	2131.8	13.1	46	17.0	27.0
	3	1827.8	10.4	39	17.0	27.0
	4	1751.4	7.8	32	17.0	27.0
	5	1811.2	7.3	25	17.0	27.0
	6	2165.6	8.2	21	15.5	25.0
	7	1725.8	6.8	21	15.5	25.0
	8	1106.2	6.3	20	15.5	25.0
	9	445.2	7.9	16	15.5	25.0
非正常 工况(暴雨)	1	1014.5	14.4	54	16.0	27.0
	2	2238.4	13.1	46	15.0	26.0
	3	1919.2	10.4	39	15.0	26.0
	4	1839.0	7.8	32	14.5	26.0
	5	1901.8	7.3	25	14.5	26.0
	6	2273.9	8.2	21	14.5	26.0
	7	1812.1	6.8	21	14.5	26.0
	8	1161.5	6.3	20	14.5	26.0
	9	467.5	7.9	16	14.5	26.0

对比表2和表3可知,不平衡推力传递系数法和刚体极限平衡方法计算结果基本吻合。

表2 主滑断面稳定性计算结果

滑面	正常工况		非正常工况(暴雨)	
	稳定系数 $F_s$	剩余下滑力 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	稳定系数 $F_s$	剩余下滑力 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )
主滑断面	1.050	1121.8	0.972	1254.3

表3 滑坡计算参数取值及计算结果

滑面	工况	滑带面参数		稳定系数 $F_s$	安全系数 $F_{sa}$	剩余下滑力 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )
		$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$			
主滑断面	天然	15.5	27.0	1.047	1.30	1160
	暴雨	14.5	26.0	0.970	1.20	1220

### 3.2 滑坡影响因素

#### (1) 降雨及地表水

降雨是滑坡变形发展加剧的主要影响因素。该边坡所处地区常年降雨, 滑坡的变形拉裂缝在雨后增大变宽, 持续强降雨和地表水下渗导致地下水(松散岩类孔隙水)量增加, 滑坡体饱和重度变大, 加速滑面的形成并降低滑带土抗剪强度, 下滑力增大, 产生变形滑移。

#### (2) 地质构造及物质组成

该滑坡所处区域属单向斜坡地形, 物质组成属碎石土、碎块石土夹含碎石粉质黏土等复合型边坡, 其中粉质黏土属相对隔水层, 大气降水在碎块石土与含碎石粉质黏土界面和基岩面处径流汇集, 具备软化滑带土的基本条件, 加剧滑坡体向下滑移。

#### (3) 人类工程活动

人类施工活动对滑坡起诱发作用。卢家湾大桥6#桥墩平台在开挖过程中形成临空面, 为滑坡的产生提供了必要条件。工程建设改变了原斜坡的应力条件及水文地质条件, 同时边坡坡脚开挖前未进行坡体预加固, 开挖后防护不及时、坡体排水工程严重滞后, 岩土体抗剪强度大幅度衰减, 诱发了坡体失稳。

## 4 滑坡治理方案

### 4.1 治理方案验算

经综合分析, 拟采用抗滑桩+锚杆的支护方案对该滑坡进行治理, 并对孤石所在位置进行锚杆加固。为验算该治理方案, 基于极限平衡分析软件建立了二维分析模型, 分析计算天然工况与暴雨工况下的安全系数, 并考虑地震力对安全系数的影响(该地区抗震设防烈度为7度, 设计基本地震加速度为 $0.1g$ )。滑坡验算参数取值及验算结果见表4。

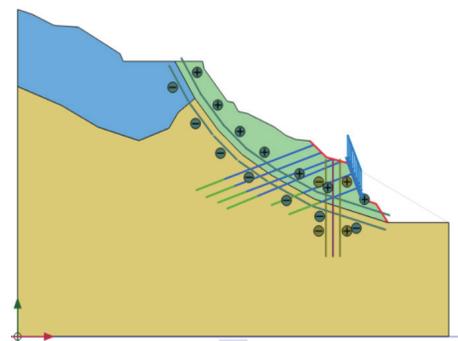
根据验算结果, 天然工况下边坡稳定系数为1.216, 较治理前的稳定系数1.050提高了15.8%; 暴雨工况下边坡稳定系数为1.207, 较治理前的稳定系数0.972提高了24.2%。在地震力作用下, 天然工况

与暴雨工况的稳定系数分别为1.009与1.002, 均小于无地震作用力时的边坡稳定系数, 表明地震作用力对边坡稳定性有一定影响, 在进行边坡治理时要充分考虑该地区的抗震设防烈度。

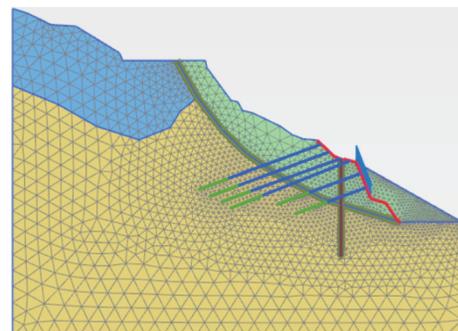
表4 滑坡验算参数取值及验算结果表

滑面	工况	滑带面参数		地震加速度	稳定系数 $F_s$
		$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$		
主滑断面	天然	15.5	27.0		1.216
		15.5	27.0	0.1g	1.009
	暴雨	14.5	26.0		1.207
		14.5	26.0	0.1g	1.002

同时建立分析模型(见图5), 图5(a)为模型图, 由三个土体部分构成, 包括岩石、碎石土以及主滑面土。图5(b)为网格图, 网格设置很细(Fine), 由4446个单元、36903个节点组成。利用有限元分析软件对该治理方案天然工况进行分析, 研究抗滑桩的受力及边坡稳定性变化。土体采用摩尔-库仑模型, 滑坡计算的后缘以滑坡I区后缘裂缝为准。在后缘裂缝处设置软弱结构面并添加正负界面单元; 锚索采用点对点单元模拟, 考虑到孤石斜卧覆盖着陡坡上, 采用线荷载单元进行模拟, 线荷载值为 $370.4\text{ kN/m}$ , 因软件输入数值量纲为 $\text{kN/m/m}$ , 故输入 $52.92\text{ kN/m/m}$ ; 抗滑桩采用板单元模拟。相关参数见表5。



(a) 边坡治理加固示意图



(b) 模型单元关联图

图5 边坡治理有限元分析模型

表 5 天然工况相关参数

材料	滑带面参数		弹性模量 $E$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	抗弯刚度 $EI$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1}$ )	轴向刚度 $EA$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )
	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$			
主滑面土	15.5	27.0			
抗滑桩			$3\times 10^7$	$2.68\times 10^8$	$2.625\times 10^8$
土工格栅					3000

通过对加固后的边坡稳定性进行模拟分析,发现滑坡安全系数较加固前提高,加固前安全系数约为 1.073,经过抗滑桩治理后,安全系数为 1.2,提高了边坡稳定性。有限元软件中指定  $EA$ 、 $EI$  值为平面外方向上单位宽度的刚度,故从滑桩内力分析(见图 6)中可以看出抗滑桩轴力、剪力及弯矩的绝对值最大值分别是 1657 kN/m、1613 kN/m 及 9248 kN·m/m,

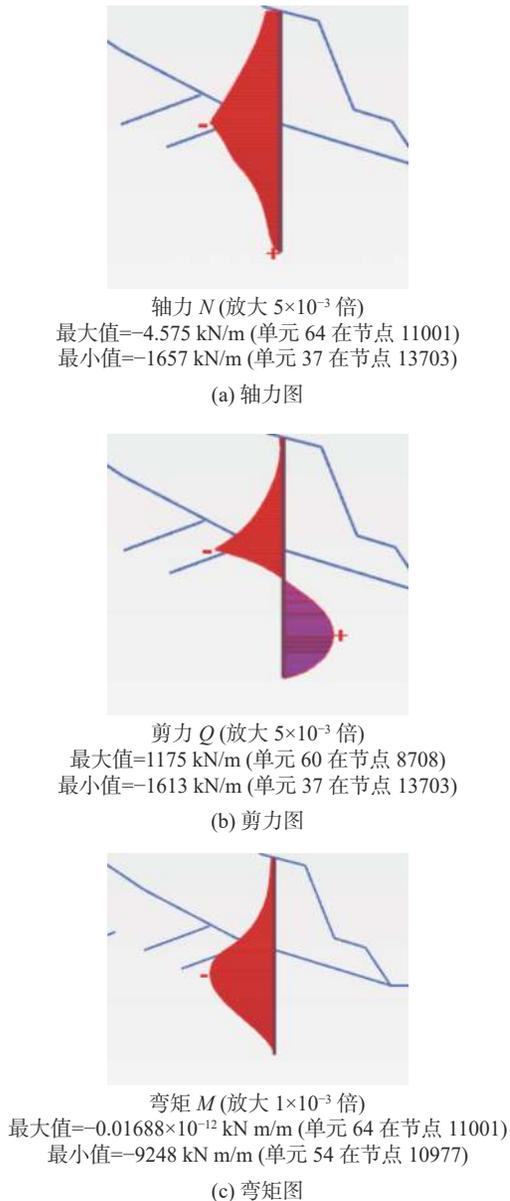


图 6 抗滑桩内力分析图

桩体受力充分,起到了抗滑加固作用,为桥梁工程施工安全提供保障。其中无线荷载情况下的安全系数比有线荷载下的安全系数低 0.015,表明孤石对边坡稳定性有一定的影响,但在进行锚杆加固后影响不大,因此在滑坡治理过程中保留孤石,不作进一步处理。

图 7 为治理前后位移云图。由于采用强度折减法分析,因此图中所示位移不代表真实的边坡位移。对比图 7(a)和图 7(b)可以看出,经过抗滑桩及其他加固措施处治后滑坡堆积体位移范围有所减小,边坡土体实现了稳定,初步表明治理方案可行。

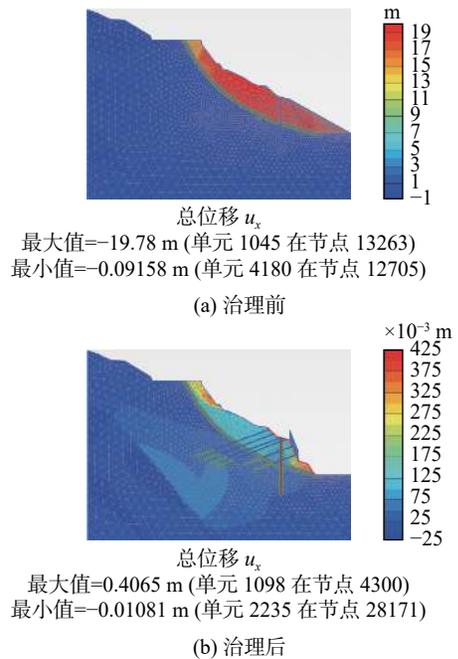


图 7 边坡位移云图

#### 4.2 治理方案的确定

根据有限元分析结果,结合现场的实际情况,综合考虑施工扰动、桥梁加载及时间效应等因素对顺向坡的影响,可知桥墩区顺向坡安全储备不足。现状边坡较陡,堆积体结构松散,需减少对原有山体的扰动,降低上部堆积体因放缓边坡而失稳的风险。针对在坡脚位置存在的一块  $8\text{ m}\times 7\text{ m}\times 2\text{ m}$  的孤石,考虑爆破清除可能会引起上部边坡失稳,结合计算结果,选择保留孤石对边坡整体稳定更为有利。

经综合分析,最终确定的滑坡治理设计方案如下:

(1)对孤石采用 4 孔单点锚索加固,自上而下锚索长度分别为 26 m、22 m,锚索应避免抗滑桩,孤石下部采用 2 m 高路堑墙加固。

(2)孤石上部边坡设置 4 m 宽抗滑桩平台,设置 1 排矩形截面抗滑桩,抗滑桩截面尺寸  $2.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ ,桩长 30 m(考虑坡体基岩顺倾,确保桩体穿越下部顺层潜在滑面,且于潜在滑面以下嵌岩深度不小于 8

m), 抗滑桩间距 6.0 m, 桩头增设 3 根 6 束锚索, 自上而下锚索长度分别为 41 m、37 m、37 m; 平台内侧设置 2 排锚杆格梁。

(3) 坡脚位置增设长 20 m 的仰斜式泄水孔, 孔内插设硬塑透水管(110 mm), 内端头用 2 层无纺布包裹, 排水孔仰角 10°, 间距 5 m, 梅花型布置, 富水地段加密泄水孔。

典型断面治理方案如图 8 所示。

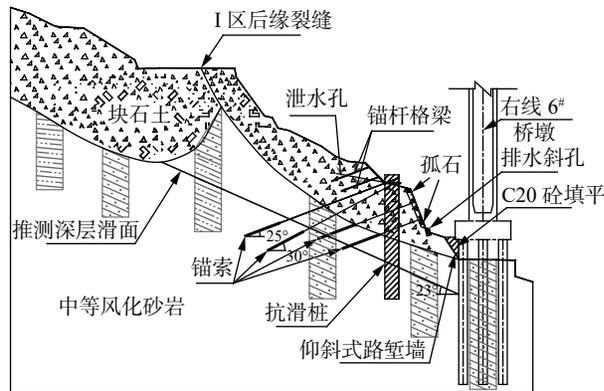


图 8 典型断面治理方案

## 5 滑坡监测

为及时掌握滑坡动态, 在临时加固和永久治理过程中, 分别在滑坡前后缘和外侧布置位移监测点, 根据后期位移监测结果, 绘制地表位移监测  $s-t$  曲线图(见图 9)。2020 年 3 月 22 日—4 月 30 日, 期间未采取任何措施, 滑坡发生较大位移, 监测点 JC1、JC2 数据显示滑坡每周位移增量约 21~42 mm; 4 月 30 日应急措施实施后, 地表累计位移曲线、拐点累计位移数据趋于减慢, 滑坡每周位移增量约 5~10 mm, 说明应急处置措施的实施遏制了滑坡的进一步变形, 应急处置措施得当。2020 年 7 月 20 日永久治理方案实施后, 滑坡监测点 JC1、JC2 位移数据在 8 月之后趋于收敛, 之后几个月坡体未产生变形, 监测点 JC1 最终累计位移约 180 mm 处, JC2 在累计位移 150 mm 左右趋于稳定, 说明滑坡治理达到了预期效果, 保证了大桥的安全。

## 6 结论

(1) 卢家湾大桥 6#桥墩所处滑坡位于顺层中等风化基岩上, 滑体主要成分为结构松散的碎石土堆积体。采用传递系数法对滑坡稳定性进行计算, 得到天然工况下稳定系数为 1.050, 暴雨工况下稳定性系数为 0.972, 坡体处于不稳定状态。同时采用刚体极限平衡法对该稳定性分析结论进行了验证。

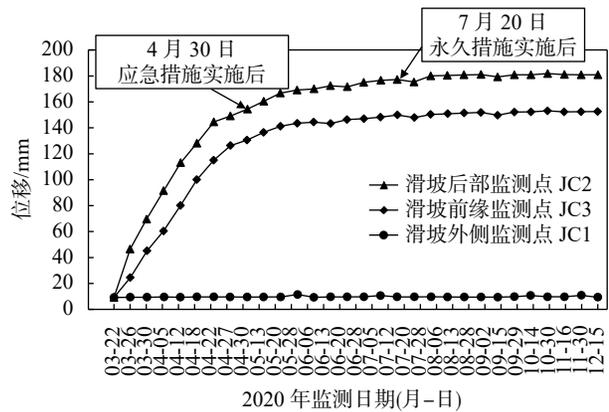


图 9 地表位移监测  $s-t$  曲线

(2) 滑坡采用抗滑桩+锚索综合治理方案。有限元数值模拟分析表明, 治理后坡体天然工况下稳定系数由治理前的 1.073 提高至 1.2, 表明该治理方案可行, 具备治理效果。

(3) 滑坡监测数据表明, 经综合治理后坡体位移迅速收敛并趋于稳定, 滑坡治理达到了预期效果, 保证了大桥的安全。

## 参考文献

- [1] 王彦东, 梁 靖, 裴向军. 九寨沟震后核心景区崩滑堆积体冲刷启动机制研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1048-1060.
- [2] 张国帅, 王晓亮, 夏建新. 入渗条件下颗粒堆积体稳定性试验研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(5): 68-73.
- [3] GRAYJM N T, GAIJAR P, KOKELAAR K. Particle-size segregation in dense granular avalanches[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(1): 73-85.
- [4] 周伟杰, 徐卫亚, 王如宾, 等. 暴雨及久雨作用下东岭信滑坡堆积体的渗流特性及稳定性分析[J]. 三峡大学学报, 2020, (4): 28-33.
- [5] 黄 帆, 向先超, 段隆臣, 等. 四川大竹镇任河大桥滑坡滑带土抗剪强度参数反演研究[J]. 施工技术, 2015, 44(S2): 209-212.
- [6] 李焕焕, 傅少君, 惠建伟. 某大型堆积体边坡抗滑群桩治理方案分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(11): 1028-1036.
- [7] 湛正刚, 程瑞林, 孙 卫, 等. 水库区大型堆积体灾变分析及对策研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 194-200, 208.
- [8] 向宝山, 吴枋胤, 白 皓, 等. 松散堆积体隧道围岩变形特征及围岩加固技术研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 403-409.

收稿日期: 2022-02-17