

文章编号: 1007-2993(2023)01-0060-06

# 高边坡稳定性评价及治理措施分析研究

刘海亭 朱有禄 杨鹏 聂守智

(中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710054)

**【摘要】** 以某高边坡工程为实例, 根据边坡的基本特征, 分析局部滑塌的形成原因, 对边坡潜在滑裂面进行综合分析确定, 并对稳定性进行定性与定量评价。经边坡治理方案比选论证, 最终采用分级刷坡卸载+桩板式抗滑挡土墙+锚索框架梁+截排水+绿化综合治理方案。治理思路充分考虑了桩与锚索的协同作用关系, 设计分析了刷坡后潜在滑裂面的变化和剩余下滑力的综合确定, 并对桩截面尺寸、桩距进行了优化。研究成果对类似高陡边坡治理有一定借鉴作用。

**【关键词】** 高边坡; 稳定性评价; 边坡治理

**【中图分类号】** P 642.22

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.01.011

## Stability Evaluation and Treatment Measures of High Slope

Liu Haiting Zhu Youlu Yang Peng Nie Shouzhi

(China Nonferrous Metal Industry Xi'an Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**【Abstract】** Taking a high slope as example, the cause of local slump was analyzed according to the basic characteristics of the high slope. The potential slip surface of high slope was determined by comprehensive analysis, and its stability was qualitatively and quantitatively evaluated. After the demonstration of various landslide control schemes, the comprehensive control scheme of graded brush slope unloading + pile-plate anti-slide retaining wall + anchor cable frame beam + drainage + afforestation was finally adopted. The synergistic relationship between pile and anchor cable was fully considered in the treatment. The change of potential sliding surface and the comprehensive determination of residual sliding force after slope brushing were designed and analyzed, and the pile section size and pile distance were optimized. The research results can be used in the treatment of similar high and steep slopes.

**【Key words】** high slope; stability evaluation; slope treatment

### 0 引言

我国是多山国家, 随着社会经济的快速发展, 山区建设常需挖山填壑形成高陡边坡, 边坡稳定性问题日渐突出<sup>[1]</sup>, 边坡分析和治理设计是一项重要课题。

工程实践中, 采用单一的加固措施往往不能同时保证边坡的局部稳定和整体稳定。为了保证工程安全, 常采用多措施组合进行边坡的加固, 边坡上部坡面(二级及以上)预应力锚索与一级边坡坡脚抗滑桩的组合是一种应用广泛的组合形式, 特别是对坡体位移变形有严格要求且工程治理空间有限时, 其应用更为广泛。阳泉市铁路边坡<sup>[2]</sup>、西南高速公路边坡<sup>[3]</sup>、骊山明圣宫滑坡<sup>[4]</sup>等采用该组合措施都取得了良好的加固效果。然而以往对锚索与抗滑桩组合结构的研究主要集中在锚拉桩<sup>[5-10]</sup>, 对坡面锚索+坡脚抗滑桩这种分离式组合结构研究较少。

以某地高边坡为例, 通过调查其基本特征, 查明滑塌原因, 对其潜在滑裂面进行综合分析确定, 采用锚索框架梁与抗滑桩板墙联合治理, 充分利用了两者的协调受力关系。按照两种模块计算其剩余下滑力, 取其保守值作为设计依据, 为类似高边坡工程治理设计提供参考。

### 1 高边坡基本特征

#### 1.1 高边坡特征

高边坡体位于吴起县宁塞川河右岸, 坡体前缘为迎宾大道, 后缘为缓坡。该坡体为黄土边坡, 长约 140 m, 坡高约 70 m。前期对坡体进行了分级刷坡绿化, 共分为八级, 每级边坡坡率为 1 : 0.50, 分级平台栽有树木。后缘缓坡坡度约 25° ~ 30°。坡体后缘有水力掏蚀而成的自然水沟, 深浅不一, 最深达 1.2 m, 坡面重力侵蚀严重、水土流失明显, 因长期雨水汇集、

**作者简介:** 刘海亭, 男, 1986 年生, 汉族, 陕西西安人, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事岩土勘察设计工作。E-mail: 406546276@qq.com

土质自身较为疏松和坡脚应力集中未采取防护措施等原因,坡体中前部发生大面积滑塌,大量树木倾倒,水土流失严重(见图1)。

### 1.2 变形特征

边坡开挖坡脚后,在长期雨水下渗的情况下发生蠕变滑动,坡体第五级平台出现多道宽10~20cm的裂缝,前缘临空,坡脚应力集中,于2017年雨季滑塌,滑体长约35m,纵向(南北向)上窄下宽,后缘宽约32m,中部宽约69m,前缘宽约95m,滑体平均厚度约10m,滑塌体规模约 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,主滑方向 $138^\circ$ ,属小型牵引式滑坡。从地形上看,该滑坡呈“圈椅状”,具有较明显的后壁,壁高约6.0m。该滑塌属于黄土层内推移式滑塌。

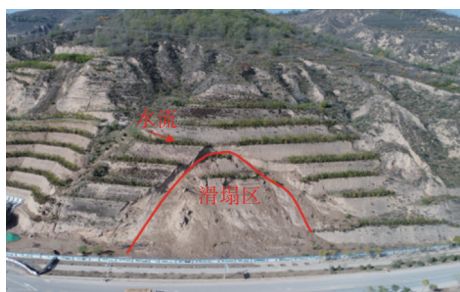


图1 边坡现状全貌

## 2 高边坡滑塌原因分析

现场调查发现在滑塌范围以外的第六级和第七级边坡坡顶平台西侧各有一个简易养护水池,其防渗塑料膜已严重破损。边坡多处平台呈现外高内低的地形,不利于水的排出。由于五级平台中间低,左侧高,恰好与冲沟相连,坡体左侧冲沟水流汇集至第五级平台中部,致使局部土体饱和,引发局部滑塌。

### 3 稳定性计算及分析评价

#### 3.1 定性评价

边坡高度达70m,虽然进行了刷坡卸载,但每级边坡坡度较陡,整体坡率约1:0.90。根据《黄土边坡强度参数的选取及应用》<sup>[11]</sup>和同期对邻近类似高边坡的理论分析成果,对高度70m的边坡而言,当边坡坡率为1:1.33时边坡稳定系数为1.00,整体坡率远远小于已有研究成果和同期邻近边坡分析确定的坡率,边坡变形甚至整体滑坡是必然的,综合分析认为边坡处于不稳定状态,属于不稳定斜坡。

#### 3.2 定量评价

##### (1)潜在滑裂面的确定

已发生小范围滑塌的部分,滑面根据勘察结果可以确定。

通过定性评价该坡体整体不稳定,因此存在潜

在的深层滑裂面。有如下几种可能:

①根据前述的整个边坡后缘存在水力掏蚀的水沟,以此为边坡滑塌圆弧入口,坡脚一定范围为圆弧出口,利用理正给定圆弧出入口范围搜索危险滑裂面,滑弧最深达23.8m。

②理正自动搜索最危险滑裂面,多数从第五级平台沿边坡坡脚剪出,也符合实际发生滑塌的现状。或从五级至八级沿一至四级边坡坡面或平台剪出,以浅表层剪出为主。

③参照边坡规范塌滑区影响范围和软件自动搜索,结合人工判断等综合因素确定,潜在滑裂面入口在已刷坡坡顶一定范围内,出口位于坡脚应力集中处。

第一种潜在滑裂面较为保守,当采用灰土换填后,对掏蚀深度范围内全部回填密实,改变雨水下渗路径,滑坡后缘水沟隐患方可消除。

第二种潜在滑裂面较为冒进,前五级以内可以加固,五级以上未考虑;或多为浅表层滑裂面,有发生深层滑塌的可能。

通过对以上两种潜在滑裂面的综合分析,反复搜索试算得出第三种滑面在符合规范要求的前提下,较为贴近现实情况(见图2)。

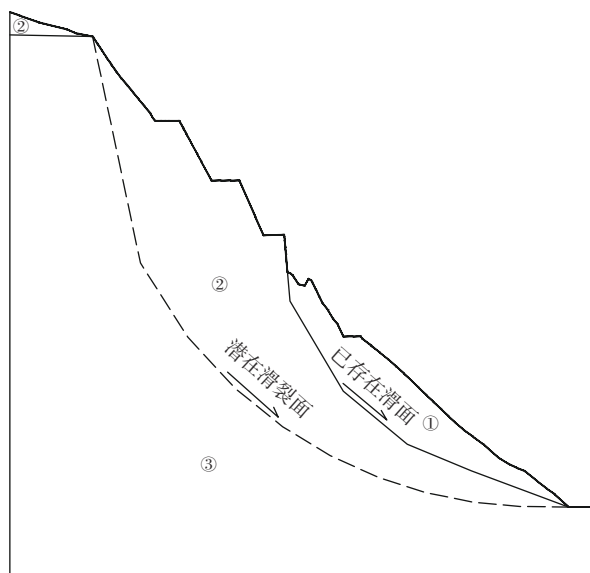


图2 第三种滑面剖面搜索结果

#### (2)定量评价

①根据《公路滑坡防治设计规范》(JTG/T 3334—2018),通过恢复原有地形,取安全系数为0.95反算滑面参数。

②在室内常规试验成果的基础上,参考勘察资料和相关研究成果<sup>[12]</sup>,确定地层的物理力学性质指标统计结果(见表1)。

③根据该地区多年平均降水量,对持续降雨的饱和土层剖面进行数值模拟。结合当地多年工程经验,饱和状态按照雨水下渗最大达5 m计算。

整个边坡根据潜在滑裂面采用圆弧滑动法计算安全系数,稳定性计算采用 Bishop 法,利用理正软件进行计算。

表1 稳定性计算参数

地层名称	天然重度 (/kN·m <sup>-3</sup> )	饱和重度 (/kN·m <sup>-3</sup> )	天然抗剪强度		饱水抗剪强度	
			c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
③层黄土	15	18.6	26	22	18	18
④-1层强风化砂岩	19	20	50	28	45	23
滑坡滑带		18.6			18	18

在自重工况下,已发生滑塌区处于欠稳定状态,整个边坡处于不稳定状态;在自重+暴雨工况下,整个边坡和滑塌区处于不稳定状态。计算结果和现场已滑塌实际情况基本相符(见表2)。

表2 稳定性计算结果

剖面	工况	稳定安全系数	稳定性评价	备注
1-1	I	0.857	不稳定	
	II	0.804	不稳定	
2-2	I	1.011	欠稳定	滑塌体
	II	0.928	不稳定	
2-2	I	0.868	不稳定	边坡整体
	II	0.829	不稳定	
3-3	I	0.943	不稳定	
	II	0.864	不稳定	

#### 4 治理思路分析

滑坡推力较大,单纯在坡脚采用抗滑桩难以支挡,即便可以支挡,也存在冒顶现象;多级抗滑桩费用高,桩长较长;全部按分级刷坡卸载可以消除滑坡推力,但土方量太大(见表3)。

表3 滑坡推力计算

剖面	工况	安全系数	滑坡推力/(kN·m <sup>-1</sup> )
1-1剖面	I	1.30	2249.708
	II	1.10	1724.310
2-2剖面	I	1.30	2795.849
	II	1.10	2070.175
3-3剖面	I	1.30	1106.757
	II	1.10	841.073

工程实践中,采用多措施组合进行边坡的加固,

边坡上部坡面(二级及以上)预应力锚索与一级边坡坡脚抗滑桩的组合即是一种应用广泛的组合形式。

##### (1)协同作用思路分析

刷坡后可能存在次级滑面,预应力锚索可对该滑面进行加固,从而使下滑力集中于主滑面;随之设桩处滑坡推力将会减小。

##### (2)力的分配

根据赵晓彦等研究成果<sup>[13]</sup>,坡面预应力锚索与坡脚抗滑桩组合加固边坡设计中,宜先将锚索预应力设计值取为加固前边坡剩余下滑力的0.3~0.5倍,既而将锚固后边坡设桩处的剩余下滑力作为抗滑桩的设计荷载。

##### (3)合理性分析

考虑到规范要求,例如桩顶位移、桩距、锚索钢绞线根数等,抗滑桩与锚索协同作用应合理可行,符合实际。避免出现锚索设计预应力较大,钢绞线根数较多,而抗滑桩桩径较小;或者预应力锚索设计吨位过小而抗滑桩截面过大。

##### (4)成本及安全分析

成本控制是设计的关键环节之一,材料供应、运距、价格需重点考虑,抗滑桩的桩距也是影响成本的一个重要方面。同时施工条件、难易程度、安全有无保障等需综合考虑。

#### 5 治理方案总体部署

根据以上分析,综合考虑在清理滑塌堆积体的基础上,可采用分级刷坡卸载+桩板式抗滑挡土墙+锚索框架梁+截排水+绿化综合治理方案(见图3、图4)。

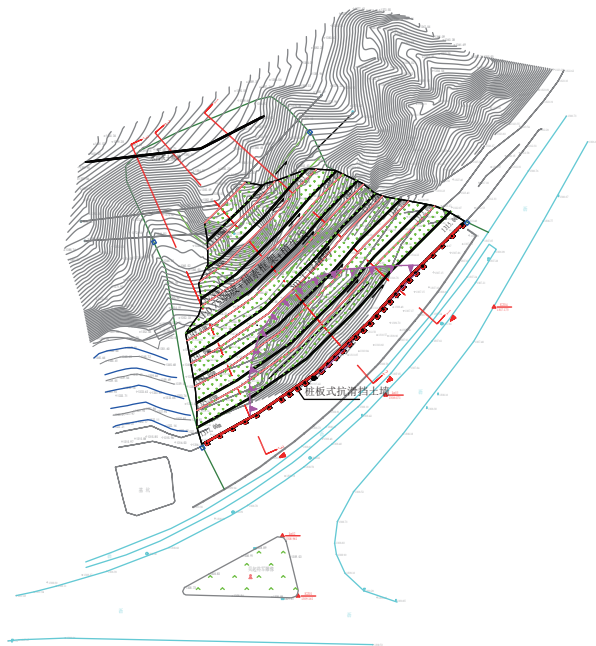


图3 边坡治理设计平面布置图



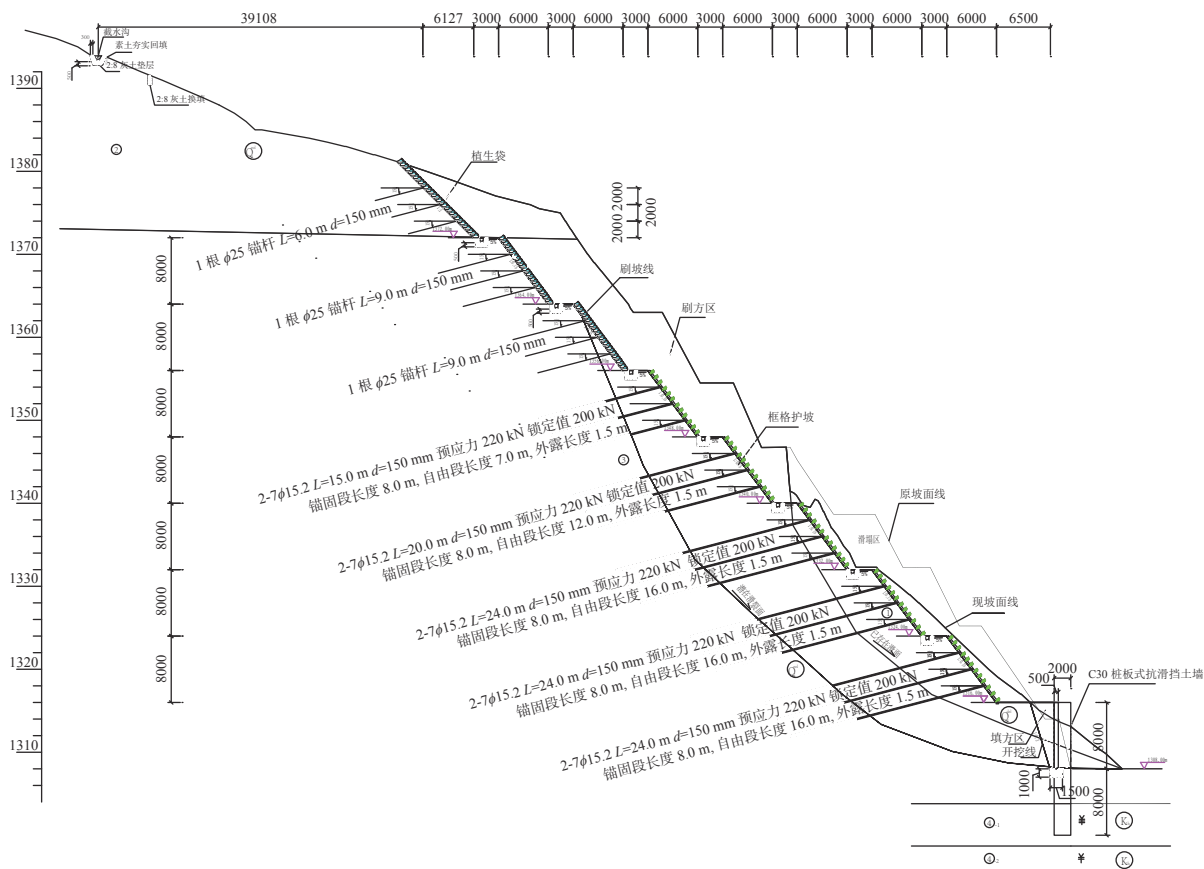


图 4 2-2 主断面设计图

设计思路为坡面采用锚索和坡脚抗滑桩联合加固边坡。首先在清理部分滑坡堆积体的基础上分级刷坡卸载,减少现有坡体的滑坡推力;其次根据已刷坡卸载后边坡潜在滑裂面计算剩余下滑力,采用锚索加固以抵抗部分下滑力;最后在坡脚设置桩板式抗滑挡土墙,抵抗加锚索后潜在滑裂面的剩余下滑力或主动土压力,实现桩板式抗滑挡土墙和锚索的协同作用。

## 6 分项设计

### 6.1 刷坡卸载

#### (1) 刷坡设计

对 1-7 级坡体采取 1 : 0.75 的坡率进行刷坡卸载,第八级边坡按 1 : 100 刷坡,共分为 8 级,每级坡高按 8.0 m 进行刷坡,马道宽按 3.0 m 留设。其中第一级边坡坡脚平台按 7 m 留设。

#### (2) 刷坡后潜在滑裂面的变化分析

采用理正软件自动搜索刷坡后的最危险的潜在滑裂面多为浅表层滑裂面。考虑到刷坡前的滑裂面较深,将刷坡前的滑裂面添加后,仍不满足规范安全系数要求,通过比较分析选取最不利的滑裂面即刷坡前的最危险滑裂面进行设计。为保险起见,在设计完锚索后验证刷坡后搜索的浅表层潜在滑裂面是否达到安全储备要求,和刷坡前的滑裂面进行再次比较。

#### (3) 滑坡推力综合确定

对同一个断面,利用理正岩土软件边坡稳定分析模块和抗滑桩模块对其剩余下滑力计算,参数相同,划分的滑块数目相同,计算结果却有一定的差别,剩余下滑力多则相差几十到几百 kN/m。按照安全、保守设计的原则,务必选择大值作为设计依据(见表 4)。

表 4 刷坡卸载后剩余下滑推力计算

剖面	工况	安全系数	滑坡推力/(kN·m <sup>-1</sup> )
1-1剖面	I	1.30	1667.958
	II	1.10	1092.634
2-2剖面	I	1.30	1780.418
	II	1.10	1128.953
3-3剖面	I	1.30	501.017
	II	1.10	289.746

### 6.2 桩与锚索协同作用

#### (1) 锚索框架梁设计

在滑裂面(1-5 级边坡)采用预应力锚索加固。刷坡卸载后最大下滑力为 1780.418 kN,通过反复试算,最终按锚索抵抗 50% 的剩余下滑力设计,设计倾角为 15°,水平间距为 2.5 m,垂直间距为 2.0 m,即在边坡上沿坡面布置锚索 15 排,分 5 级边坡布置,每

级边坡3排,锚索长度15~24 m不等。

依据规范计算出单根锚索锚固力设计值为154 kN,实际设计锚固力取160 kN。根据预应力张拉值和钢绞线的极限抗拉强度,加以一定的安全储备,采用2索1860级1×7-φ15.2锚索。

锚索张拉力设计值为220 kN,锁定值为200 kN,选用OVM15-2锚具锁定。锚索钻孔直径 $D=150$  mm,单根钢绞线直径 $d=0.0152$  m;注浆材料采用M30水泥砂浆,锚固长度为8.0 m。

通过布设锚索,各断面稳定性系数均不能满足《建筑边坡工程技术规范》要求,即安全储备不足。3-3断面剩余下滑力较小,但坡脚边坡高度为8.0 m,主动土压力 $E_a=287.517$  kN(见表5)。

表5 施加锚索后的安全系数及下滑力计算表

剖面	工况	安全系数	滑坡推力/(kN·m <sup>-1</sup> )
1-1剖面	I	1.075	751.176
2-2剖面	I	1.061	888.765
3-3剖面	I	1.277	44.651

框架梁采用C25钢筋混凝土,断面尺寸为宽0.25 m,高0.30 m,受压和受拉钢筋为3φ16(HRB335),箍筋为φ8@250。计算结果表明 $M=125.97$  kN·m, $M_{\max}=59.16$  kN·m, $M>1.5M_{\max}=88.74$  kN·m。满足要求。

### (2) 抗滑桩优化设计

按照节约成本的原则,桩截面尺寸及桩距为设计的主要对象。注意桩与锚索的协调性,避免“头重脚轻”或“头轻脚重”。在满足规范<sup>[14]</sup>要求的前提下,考虑到紧邻国道边,仅对以下两种桩型进行对比(见表6)。

表6 主断面抗滑桩类型对比表

截面尺寸/(m×m)	桩距/m	根数/根	总方量/m <sup>3</sup>	总配筋量/t	造价
1.5×2.0	4.0	21	1008	12.94	低
1.75×2.0	4.5	19	1064	13.05	高

通过上述对比,主断面选取抗滑桩截面规格为1.5 m×2.0 m的方桩,桩长16.0 m,悬臂段8.0 m,嵌固端8.0 m,桩间距4.0 m(中对中),共布置21根桩,混凝土板墙尺寸为4.0 m×0.5 m×0.8 m。箍筋均为双枝箍。

滑塌体两边抗滑桩截面规格为1.25 m×1.5 m的方桩,桩长14.0 m,悬臂段8.0 m,嵌固端6.0 m,桩间距6.0 m(中对中),共布置10根桩,混凝土板墙尺寸为6.0 m×0.5 m×0.8 m。箍筋均为双枝箍。

### 6.3 截排水

在滑坡体每级平台处设置排水沟,坡顶设置截排水沟,设计时综合考虑地形条件,与已有的现场排水系统尽量结合。设计时综合考虑地形条件。设计洪峰流量由《滑坡防治工程设计与施工技术规范》提供的公式推求。

$$Q_p = \phi S_p F$$

$$Q = WC\sqrt{RI}$$

式中: $Q_p$ 为设计频率地表水汇水流量, m<sup>3</sup>/s; $\phi$ 为径流系数; $S_p$ 为设计降雨强度, mm/h; $F$ 为汇水面积, km<sup>2</sup>; $Q$ 为过流量, m<sup>3</sup>/s; $W$ 为过流断面面积, m<sup>2</sup>; $C$ 为流速系数, m/s; $R$ 为水力半径, m; $I$ 为水力坡降。

高边坡周边截水沟设计断面尺寸为倒梯形,沟净宽度0.8 m,沟净深度0.4 m,沟底净宽0.4 m,壁厚20 cm。经验算校核,该断面实际流量为0.44 m<sup>3</sup>/s,大于最大洪峰流量0.375 m<sup>3</sup>/s,符合要求。

### 6.4 绿化工程

平台采用乔灌草混播模式,选取当地适应的乡土树种绿化。边坡坡面均采用生态袋绿化,抗滑桩板墙采用爬山虎绿化。

### 7 监测

变形监测是边坡安全监控中的重要内容,对边坡变形的监测资料进行及时、合理、有效的分析,获取边坡变形规律和安全状况是边坡变形监测的重要工作之一,可以为判断边坡的安全状况和稳定性提供科学依据<sup>[15]</sup>。因此,建议加强边坡灾害的监测工作,重点加强地面变形监测、地表裂缝监测。在每个断面的坡顶、五级平台中部、三级平台中部、一级平台板墙顶和四级边坡、二级边坡的混凝土梁上共布置6个监测点、用全站仪进行水平位移和垂直位移监测,观测区应建立相应的观测系统,其中用水平位移观测网的基准点必须设置于变形影响范围以外的稳定地段,且不得少于3个。

### 8 结论

(1)综合分析确定高边坡的潜在滑裂面,采用定性、定量评价方式对高边坡进行稳定性评价。

(2)采用分级刷坡卸载+桩板式抗滑挡土墙+锚索框架梁+截排水+绿化综合治理方案。考虑了锚索与桩的协同作用机理,从力的分配、合理性、成本和安全等方面综合分析。

(3)分析刷坡前后潜在滑裂面的变化情况,选取保守值作为设计依据。对抗滑桩截面尺寸、桩距进行优化分析比较。

(4)建议加强监测工作,重点加强地面变形监测、地表裂缝监测。

#### 参 考 文 献

- [1] 何良. 某滑坡的稳定性分析与防治对策研究[J]. 低碳世界, 2015, (25): 129-130.
- [2] 李俊堂. 抗滑桩锚索组合在高陡岩石滑坡治理中的应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(32): 126-127.
- [3] 马跃. 某公路预应力锚索和抗滑桩联合加固[J]. 四川建材, 2007, (6): 200-201.
- [4] 殷跃平, 康卫东, 方长生, 等. 基于绿色设计的骊山明圣宫滑坡防治工程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, (3): 19-22.
- [5] 李成芳, 叶晓明, 李有文. 考虑土拱效应预应力锚拉桩土压力研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1683-1689.
- [6] 李登峰, 胡卸文, 赵晓彦, 等. 花岗岩残积土边坡水平拱高竖向变化规律[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 1024-1032.
- [7] 刘小丽, 张占民, 周德培. 预应力锚索抗滑桩的改进计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (15): 2568-2572.
- [8] 李俊才, 岳颖锋, 茅奇辉, 等. 软土基坑支护中的锚拉桩结构设计[J]. 岩土力学, 2008, (9): 2551-2555.
- [9] 苏美选, 戴自航, 林智勇. 预应力锚索抗滑桩支撑结构体系数值模拟研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, (3): 50-53.
- [10] 郑明新, 蒋新龙, 殷宗泽, 等. 预应力锚索抗滑桩工程效果的数值计算评价[J]. 岩土力学, 2007, (7): 1381-1386.
- [11] 雷晓锋. 黄土边坡强度参数的选取及应用[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [12] 白宇. 吴起县大路沟特大型黄土滑坡治理设计优化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [13] 赵晓彦, 黄金河, 周一文, 等. 坡面锚索与坡脚抗滑桩联合加固边坡设计方法[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 489-495.
- [14] DZ/T 0219—2006 滑坡防治工程设计与施工技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 王东. 基于监测数据的凉水井滑坡数值模拟与预测预报[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.

收稿日期: 2021-10-11