

高边坡稳定性案例分析及支护结构优化设计

王德亮¹, 聂庆科¹, 黎培德², 占否平¹

(1. 河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031; 2. 大连西太平洋石油化工有限公司, 辽宁 大连 116600)

摘要:根据碾子沟煤矿土质高边坡再次失稳的情况, 结合现场勘察资料, 对滑坡失稳原因进行了分析。运用ABAQUS有限元分析软件并采用抗剪强度折减系数法进行了数值计算, 得出了土体在饱和状态下的安全系数及滑动面等参数, 并分析了滑坡潜在的破坏过程。根据相关规范规定, 运用折线滑动面及传递系数法隐式解的概念对滑体下滑力进行了计算, 为优化设计提供依据。通过优化支护结构设计, 减少了降雨对边坡的不利影响, 遏制了滑坡变形。

关键词:高边坡; 滑坡失稳; 支护; 折减系数法; 传递系数法

中图分类号:TD824.7; P642.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)07-0067-04

Case Analysis on High Slope Stability and Optimization Design of Supporting Structure/WANG De-liang¹, NIE Qing-ke¹, LI Pei-de², ZHAN Fou-ping¹ (1. Hebei Research Institute of Construction & Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China; 2. Dalian West Pacific Petrochemical Co., Ltd., Dalian Liaoning 116600, China)

Abstract: According to a case of once again high soil slope instability in Nianzigou coal mine and combined with the field survey data, the analysis is carried out on the causes of landslide instability. The numerical calculation is made by using ABAQUS finite element analysis software and the shear strength reduction coefficient method, the parameters of the safety factor and the sliding surface of the soil under the saturated state are obtained, and the potential damage process of the landslide is analyzed. Based on the relevant provisions of specifications, the landslide sliding force is calculated by using the concept of polyline sliding surface and implicit solution of transfer coefficient method to provide the basis for optimization. By optimizing the design of support structures, the adverse impact of rainfall on the slope is reduced and the slope deformation can be controlled.

Key words: high slope; landslide instability; support; reduction coefficient method; transfer coefficient method

0 引言

高边坡工程普遍存在于露天矿场及公路工程等项目中, 国内众多学者已开展了大量的研究工作^[1-6]。由于开挖方法不当、地下水变化及处置经验不足等原因往往引起高边坡失稳, 从而造成生命财产损失。

高边坡工程在治理设计时, 通常采用极限平衡法的力学理论方法结合数值分析等计算机技术进行分析, 分析滑坡破坏的原理, 得出滑动面及剩余下滑力等关键参数, 为优化设计提供理论依据^[7-8]。

本文针对碾子沟煤矿土质高边坡工程失稳案例进行了总结, 分析了边坡失稳的原因, 并根据分析情况进行了设计优化, 达到了治理滑坡的目的。

1 滑坡初次治理

该滑坡为碾子沟煤矿改扩建工程副斜井工业广场地灾治理的一部分, 滑坡纵向坡体长约145 m, 横向宽度约230 m, 主滑方向为316°, 滑坡总体为中部

平缓, 后缘及前缘陡峭, 后缘为滑坡拉张裂隙产生的陡坎, 前部为人工刷方形成的台阶, 坡体平均坡度约19°, 坡体前部坡度30°~40°, 滑体土厚度1.5~23.0 m, 平均厚度约16.0 m, 体积约为 $43.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为中型黄土滑坡。该滑坡为典型的土体内滑动, 其滑动面大致可按圆弧滑面考虑。滑体土主要为Q₄黄土状土及Q₂黄土, 受下伏K₁白垩系泥质砂岩作用, 地层结构特点使地下水易富集于坡体内相对隔水层顶部, 并对接触带进行软化, 降低了土体力学强度, 形成软弱带。本场地的抗震设防烈度为7度, 设计基本地震加速度值为0.10g, 设计地震分组为第三组, 特征周期0.45g。

改扩建项目场平工作时将滑坡中下部进行了大幅度开挖, 在滑坡前缘形成临空面, 且未及时进行支护工作。同时, 坡体下伏煤层开采及地下水抽取引起的地表变形, 导致滑床侧向应力减小。坡体中后部黄土冲沟、落水洞发育, 坡体表面缺乏有效的排水系统, 导致雨水下渗, 滑体浸水后在自重的作用下,

收稿日期: 2016-09-02; 修回日期: 2017-05-27

作者简介: 王德亮, 男, 汉族, 1983年生, 硕士, 从事技术管理工作, 河北省石家庄市建华南大街58号, wdlrain@163.com。

沿软弱带向临空方向发生蠕动或变形。随着时间的不断延续,最终贯通,形成滑坡。

根据滑坡体形成原因及构造形式,初次滑坡治理采用三级放坡的方式,三级坡面形成后原滑体将被挖尽。一级、二级坡面采用砌石骨架护坡的被动支护方式,三级坡面为锚索+框架梁主动支护结构。坡顶坡脚各设置排水沟,坡脚设置仰斜排水孔,典型剖面支护方式如图1所示。

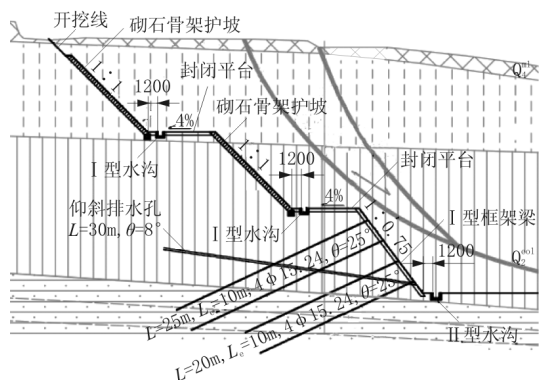


图1 滑坡初次支护方案

2 边坡再次失稳及原因分析

当三级坡开始开挖并施工锚索框架梁时,雨季到来,坡顶出现变形裂缝且存在变形加剧的趋势,一、二级坡面骨架护坡结构发生扭曲变形,失去支护作用。滑坡后缘为圈椅状裂缝、陡坎,缝宽20~40 cm,陡坎30~50 cm;滑坡后部为较平缓斜坡,平均坡度为14°,斜坡形态较规则,坡体纵向裂缝发育。初步估计平面面积约 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体土平均厚度约15.0 m,体积约为 $48.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,为推移式中型黄土滑坡。

为了保证边坡安全,临时采取了坡顶卸载、暂停坡底土方施工等措施,边坡变形趋于稳定。通过采取补勘及专家论证等方式,对新滑坡的形态及形成原因进行了分析,滑坡再生原因如下。

(1) 该区地质条件复杂,土质疏松,基岩顶面具有向外部倾斜的地貌,为滑坡形成、发展和溯源提供了地形地质条件。

(2) 滑坡治理施工期接近2年,由于各种原因施工进展缓慢,不符合滑坡治理的“治早、及时”的原则。

(3) 滑坡初次治理设计时一、二级坡面为砌石骨架护坡的被动支护方式,缺乏限制滑体顶部变形的主动约束力,三级坡面的主动加固(预应力锚索)因故无

法及时施加,致使坡体向临空面移动,产生局部裂缝。

(4) 雨季降水量大,阴雨连绵、持续时间长,是滑坡变形与形成的直接原因。进入雨季以来,项目区持续强降雨,前期防护无法及时形成,在微裂隙作用下,雨水大量渗入坡体,导致含水量增加,坡体水位增高,部分区域达到饱和状态,坡体软化,强度快速降低,造成坡体变形剧烈。

该滑坡再次变形失稳是不良地质条件、持续强降雨和无法及时实施坡体支护结构共同作用的结果,原设计不能在坡顶有雨水入渗的情况下及时遏制土体局部变形,不满足坡体安全要求,需要重新设计。

3 滑坡变形数值分析

为了进一步分析边坡稳定性情况及潜在滑动面特征,本文采用有限元软件 ABAQUS 对高边坡变形进行了数值分析,进一步揭示边坡变形及破坏特点。ABAQUS 是著名的非线性有限元分析软件之一,得到工业界和学术界广泛接受和认可。

边坡稳定性分析时,采用抗剪强度折减法^[9](SSRF; Shear Strength Reduction Factor),其定义为:在外荷载不变的情况下,边坡内土体所能提供的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比。折减后的抗剪强度参数可分别表达为:

$$c_m = c/F_r$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan\varphi/F_r)$$

式中: c 、 φ ——土体能够提供的抗剪强度; c_m 、 φ_m ——维持平衡所需要的或土体实际发挥的抗剪强度; F_r ——强度折减系数。

3.1 数值建模

选取坡顶卸载及放坡完成后的典型地质剖面作为分析对象,并建立二维分析模型。本构模型采用线弹性及 Mohr-Coulomb 模型。考虑雨水影响,土体按饱和状态进行分析,单元类型采用 CPE4(四节点平面应变单元),有限元分析模型如图2所示。

3.2 结果分析

利用 ABAQUS 提供的 Combine 函数,将安全系数 F_s 与竖向位移的变化关系绘制于图3中。由图可知,软件因不收敛终止计算时的折减系数为1.09,即此时的安全系数为1.09;同时,注意到位移曲线有一明显的拐点,若以位移的拐点作为评价标准,此时的安全系数为1.05,滑坡处于暂时稳定-变形状态。

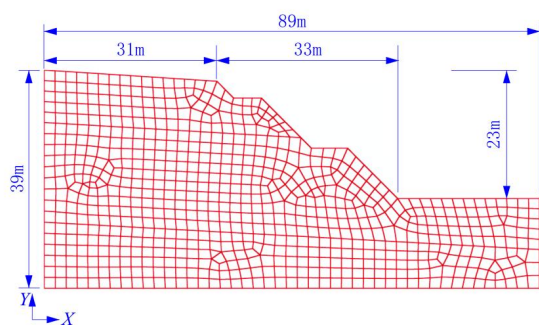
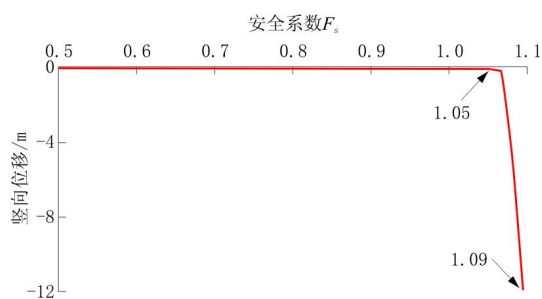


图2 有限元模型示意图

图3 安全系数 F_s 随竖向位移的变化关系

根据 F_s 与竖向位移的变化关系,提取了折减系数为 1.05 时刻的 PEMAG 塑性应变等值线图(见图 4)。图 4 与图 3 可清楚地表明土坡失稳的过程,开始时土坡坡脚出现屈服,然后塑性区向上延伸,直到抗剪强度折减系数为 1.05 时,塑性区扩展到坡顶,出现贯通现象,滑体位移开始迅速增加。

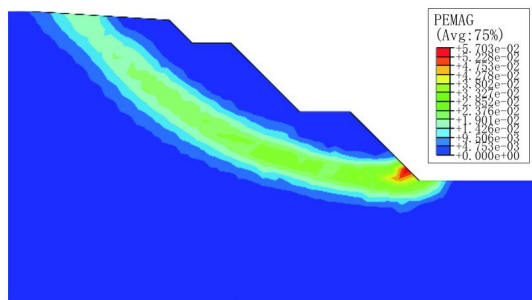


图4 塑性区等值线图

在滑坡稳定性分析中,还需要确定潜在滑动面的位置,根据数值计算结果,提取了计算终止时的位移等值线图,如图 5 所示。由图 5 可清楚地判断出滑动面的位置:滑动面总体大致成圆弧形,并通过坡角点。滑体前后宽度约 45 m,与现场勘察的滑体宽度相当。

4 滑坡治理优化设计

4.1 剩余下滑力计算

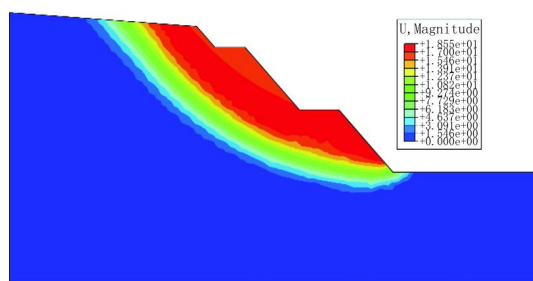


图5 位移等值线图

为了得出滑坡推力及剩余下滑力等参数,为滑坡治理优化设计提供理论数据,根据数值分析得出的滑动面对滑体进行分块处理,采用传递系数法隐式求解解^[10]。计算按暴雨工况、地震与暴雨组合工况进行考虑,按两种安全系数状态分别计算,计算暴雨工况时滑坡土体抗剪强度参数选择饱和状态值,计算结果见表 1。

表 1 剩余下滑力计算

工况名称	安全系数	剩余下滑力/kN
暴雨工况	1.20	929
暴雨工况	1.25	1006
暴雨+地震工况	1.20	1098
暴雨+地震工况	1.25	1175

4.2 滑坡优化设计

选取最不利工况作为设计依据,最终优化设计方案为:一级坡坡面设计为框架梁+锚杆,作为局部支护结构,一级平台为微型桩结构,桩顶设置框架梁,并设置一道预应力锚索,微型桩与锚索末端均穿过滑动面;二级坡坡面设置框架梁;三级坡坡面设置预应力锚索与框架梁结构,并设置一排抗滑桩,桩底嵌入基岩,桩顶设置预应力锚索,锚索末端穿过滑动面并进入稳定地层,如图 6 所示。

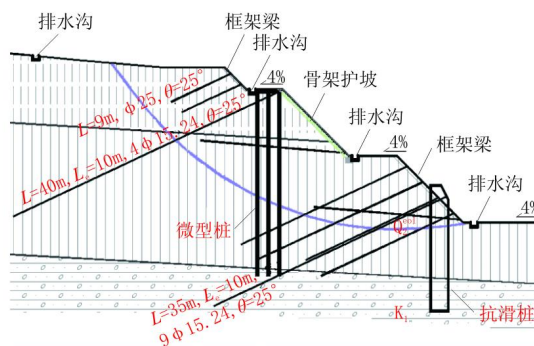


图6 滑坡治理优化设计方案

优化后的设计方案与原设计相比,强化了主动支护结构的作用,加强了坡顶与坡脚的防护设计,有

效防止坡顶局部变形引起推移式滑坡产生,多道主动支护结构均穿过滑动面,对于下滑力进行逐步分解平衡,降低降雨等不利天气对边坡的影响,有效遏制滑坡变形。

5 治理方案实施及治理效果

抗滑桩、预应力锚索及微型桩等主要支护结构的施工情况如下。

5.1 抗滑桩

抗滑桩是本次治理过程中主要的支护方式,根据工程特点,采用分段开挖、隔桩跳挖的施工方式,既减少了坡脚土方开挖对滑坡体的影响,又保证了施工进度。

抗滑桩采用大断面人工挖孔工艺,施工时从锁口盘、护壁、嵌固深度、清底、钢筋笼制作、混凝土灌注等质量控制点入手,严把质量关,桩身钢筋采用直螺纹连接技术。

抗滑桩桩间挡土板施工时,针对不同施工和地层条件,分别采用预制安装及植筋现浇两种施工方案。

5.2 预应力锚索

预应力锚索布置于抗滑桩、框架梁、肋柱挡墙、微型桩上。设计长度为12~45 m,分为4束及9束。成孔作业时,普通风动钻机无法将钻渣吹出孔外,且扭矩小,孔深超过30 m时很难成孔。对于孔深较长、土体含水量较大、需进入基岩的预应力锚索采取大功率履带钻施工方法。

5.3 微型桩

滑坡的滑动面位于基岩与第四系地层交界面附近,滑面附近地层含水量很大,且滑面以上存在一层厚度0.4~8 m的砾石土,砾石含量约50%,充填土为粉质粘土。因此,为减少水对滑动面的影响,成孔时不得采用泥浆护壁工艺。

采用风动潜孔钻成孔施工时,由于地层含水量大,钻屑无法吹出,地层中的粘性土包裹在钻杆上,形成“抱钻”现象,钻杆提出很困难,强行提出后,钻孔出现缩径现象,致使微型桩钢筋笼无法正常下入。

为保证微型桩成孔质量,最终采用冲击钻施工工艺。施工时增加配重钻杆,利用大重力势能穿透砾石土层,同时利用冲击对卵砾石地层的挤密、护壁作用,解决了风动钻机施工工艺卵砾石层的坍塌、排渣困难和缩径问题。

通过对支护结构进行的长期沉降观测、位移观测

及锚索应力观测,沉降、位移及应力均在设计范围内,通过半年的监测数据来看,坡顶最大累计水平位移值15 mm,最大竖向位移值13 mm,各检测指标数值已趋于稳定,支护结构可靠,边坡稳定性显著提高。

6 结语

(1)滑坡治理应严格按照“治早、及时”的原则进行,对于因特殊情况工程进度不能按计划进行的项目,应加强对潜在滑坡体的监测,建立预警机制,必要时采取坡顶卸载、坡脚堆载的方式减缓滑坡的变形。

(2)采用ABAQUS有限元软件并应用抗剪强度折减系数法模拟滑坡变形,能够直观地体现滑坡变形及发展过程,并得出滑坡体稳定性状态及安全系数,分析出潜在滑动面。

以安全系数 F 与竖向位移的变化关系曲线出现拐点时的状态作为边坡稳定性评价及潜在滑动面曲线的判定标准,能够反映边坡失稳时的状态,在实际工程应用中有着较好的指导意义。

(3)对于永久性的边坡支护结构,特别是对于变形要求较严的工程项目,设计时应充分考虑天气情况等不利因素的影响。坡顶位置应考虑雨水入渗可能产生推移式滑坡的可能,及时采用主动支护方式,遏制坡体局部变形,避免因局部变形产生推移式滑坡。局部主动支护结构对于土体变形可起到防微杜渐的作用,避免大范围滑坡体的形成。

参考文献:

- [1] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,(5):1437-1472.
- [2] 巨能攀,赵建军,邓辉,等.公路高边坡稳定性评价及支护优化设计[J].岩石力学与工程学报,2009,(6):1152-1161.
- [3] 付宏渊,曾铃,王桂尧,等.降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J].岩土力学,2012,(8):2359-2365.
- [4] 唐栋,李典庆,周创兵,等.考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J].岩土力学,2013,(11):3239-3248.
- [5] 宋国龙.露天煤矿边坡稳定性实例分析及优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):30-35.
- [6] 罗雪贵,武富强,杨嘉凯,等.预应力锚索+系统挂网锚杆在人工高边坡支护中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):72-79.
- [7] 邹广电,魏汝龙.土坡稳定分析普遍极限平衡法数值解的理论及方法研究[J].岩石力学与工程学报,2006,(2):363-370.
- [8] 李春忠,陈国兴,樊有维.基于ABAQUS的强度折减有限元法边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2006,(5):207-212.
- [9] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [10] GB 50330—2013.建筑边坡工程技术规范[S].