

边坡抗滑桩加固的三维有限元计算

张国信¹, 陈豫津¹, 王 谦^{2,3}, 钟秀梅^{2,3}, 周自强¹, 刘兴荣¹, 王运兴¹

(1. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本文以王山村滑坡为研究对象, 围绕其工程中静力抗滑稳定问题, 通过室内试验对影响王山村滑坡稳定性的地质构造、场地工程条件等内在因素进行分析评价。在此基础上, 利用大型商业软件 ABAQUS 对边坡抗滑桩加固模型进行有限元计算分析。通过对加固在边坡模型底部、中部及上部 3 个常见桩位稳定性系数的计算, 得到了 3 个桩位的稳定性系数。计算结果表明: 加固在模型中部桩位的安全系数最高, 为 1.58。为综合考虑静力作用下坡脚应力集中及动力作用下的坡顶加速度放大效应, 设计了加固在边坡中点附近的上部桩位和下部桩位, 并分别对其稳定性进行求解, 计算结果显示两种桩位都具有较高的安全系数, 分别为 1.35 和 1.56。最后通过对模型坡面上 5 种桩位安全系数的对比, 验证了上部桩及下部桩的可行性, 可作为工程实践的参考方案。

关键词: 抗滑桩; 三维有限元方法; 安全系数

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)09-0081-09

3D finite element computations for slope reinforcement with anti-slide piles

ZHANG Guoxin¹, CHEN Yujin¹, WANG Qian^{2,3}, ZHONG Xiumei^{2,3},

ZHOU Ziqiang¹, LIU Xingrong¹, WANG Yunxing¹

(1. Institute of Geological Hazards Prevention, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Gansu Earthquake Administration, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: With the Wangshan Village landslide as study subject, and with regard to the static anti-sliding stability in the project, indoor and field tests were conducted to analyze and evaluate the intrinsic factors affecting the stability of the Wangshan Village landslide, such as geological structures and site engineering conditions. The commercial software ABAQUS was used then to compute the model for slope reinforcement with anti-slide piles. The safety factors for the bottom pile, middle pile and top pile on the slope have been calculated and obtained. The calculation results show that the middle pile has the highest safety factor with 1.58. In view of the stress concentration at the foot of the slope under the static load and the acceleration amplification effect at the top of the slope under the dynamic load, the upper pile position and the lower pile position were designed around the middle of the slope, and the safety factors of two new positions were calculated. The results show that the safety factors of two positions are fairly high. Finally, comparison of the safety factors of five different pile positions on the slope has verified the feasibility of the upper pile and the lower pile, and the results can be taken as reference for the engineering works.

Key words: anti-slide pile; 3D finite element; safety factor

收稿日期: 2020-02-28; **修回日期:** 2020-07-03 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2020.09.014

基金项目: 甘肃省科学院青年科技创新基金项目“地震诱发黄土液化滑坡的特征研究——以永光村滑坡为例”(编号:2017QN-05); 甘肃省科学院地质灾害防治与生态地质环境修复创新团队项目(编号:CX201801); 甘肃省科技计划项目“城市区人工弃渣型泥石流启动过程及其防治措施研究”(编号:18JR3RA251); 陇原青年创新创业人才扶持计划项目(2018年)“人工弃渣型泥石流在兰州市城市建设中的破坏与防治研究”

作者简介: 张国信, 男, 汉族, 1987 年生, 助理研究员, 岩土工程专业, 硕士, 主要从事地质环境保护、地质灾害防治、生态环境修复、地质遗迹保护等方面的研究工作, 甘肃省兰州市城关区定西南路 211 号, 564540538@qq.com。

通信作者: 周自强, 男, 汉族, 1965 年生, 研究员, 主要研究方向为地质灾害防治与地质环境保护, 甘肃省兰州市城关区定西南路 211 号, zzzq0118@163.com。

引用格式: 张国信, 陈豫津, 王谦, 等. 边坡抗滑桩加固的三维有限元计算[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(9): 81-89.

ZHANG Guoxin, CHEN Yujin, WANG Qian, et al. 3D finite element computations for slope reinforcement with anti-slide piles[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9): 81-89.

0 引言

边坡稳定性分析一直是滑坡工程研究领域的核心问题。随着社会经济的不断发展,滑坡作为一种地质灾害,其严重的危害性已经给人类的生活造成了极大的影响。抗滑桩作为一种有效的滑坡治理工艺,以其施工简易、工期短、可以有效支挡滑体的滑动力等特点被广泛采用。抗滑桩的作用是利用抗滑桩插入滑动面以下的稳定地层对桩的抗力(锚固力)平衡滑动体的推力,增加其稳定性。当滑坡体下滑时受到抗滑桩的阻抗,使桩前滑体达到稳定状态。目前其分析方法大致可分为两类:基于土压力/位移分析的极限平衡法和有限元/有限差分数值计算方法。基于土压力/位移分析的极限平衡方法无法考虑桩与土的共同作用,不能真实地反映抗滑桩的摩擦机理。采用数值方法对抗滑桩一边坡系统的稳定性分析,可对边坡土体和抗滑桩分别进行单元离散,用弹性对其进行分析,反映桩-土之间相互作用的真实机理,是一个耦合的计算方法^[1]。抗滑桩在边坡的加固位置直接影响到边坡的稳定性,这也是抗滑桩加固设计的热门问题。总结国内外学者对抗滑桩加固位置的研究成果,大体可分为坡脚加固,坡体中部加固和坡顶加固3种^[2-17]。本文以上述文献所做成果为基础,基于三维有限元计算方法,通过设计一种新桩位来分析抗滑桩对边坡的加固能力。

本文将有限元法与强度折减法相结合,以王山村滑坡为研究对象,对该滑坡建立理想的三维计算模型,并进行不同桩位下的稳定性分析。

1 王山村滑坡场地条件及特征

王山村滑坡位于西和县稍峪乡王山村,多年来处于相对稳定状态,由于受“5·12”汶川大地震(2008年)、“7·22”岷县地震(2013年)和“7·26”西和暴雨(2013年)的影响,近几年来,王山村老滑坡东部前缘出现局部滑塌、树木歪斜、地下水渗出等明显变形迹象,滑坡前缘已建护坡出现开裂、破碎等不利现象且紧邻民房,该滑坡前缘地带的王山村受到滑坡灾害的严重威胁。

1.1 滑体形态特征

根据王山村滑坡总体特征、实地地形及勘探结果等,可将该滑坡分为H1老滑坡和东侧复活形成的H1-1滑坡(见图1)。H1-1滑坡属于H1滑坡

的次级滑坡,平面形态上后缘较窄,前缘较宽,后缘无明显圈椅状形态,但滑移带可见明显下陷,滑坡中前部可见鼓胀凸起,剪出口位于前缘陡坎部位,西侧以小冲沟为界,东侧以山梁为界,北侧以前缘陡坎为界。主要是滑坡剪出口位于前缘陡坎部位,早期陡坎部位布设挡土墙拦挡,但挡土墙无基础并厚度小,无法有效抗滑,因此复活过程中摧毁了原有挡土墙并中间部位鼓胀凸起。



图1 王山村滑坡分区平面图

Fig.1 Distribution plan of the Wangshan Village landslide

H1-1滑坡后缘高程约1580m,前缘高程约为1555m,相对高差约25m。H1-1滑坡长约110m,上部宽约40m,中部宽约60m,下部宽约85m,主滑方向23°。高约2~6m。钻探资料表明,该滑体后部厚1.5~2.7m,中部厚4.3~8m,前部厚3.3~5.6m,总体积为 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。王山村滑坡典型剖面如图2所示。

1.2 滑坡变形特征

根据调查访问,该H1滑坡长期以来相对稳定,自2008年“5.12”汶川大地震以来,尤其受“7.22”岷县地震(2013年)和“7.26”西和暴雨(2013年)的影响,H1-1滑坡出现了明显的变形开裂和滑动变形,有逐年加剧的趋势。

根据相关资料和调查访问,2013年“7.26”暴雨期间,H1-1滑坡变形复活,主要为老滑坡东侧前缘(宽约90m)发生滑塌、树木歪斜,已建护坡破裂等,H1-1滑坡体东侧50m滑塌较为严重,土体垮塌滑移,完全摧毁原有护坡,经清理后,目前前缘呈弧形台坎。

1.3 滑坡物质结构及水文特征

1.3.1 滑体结构特征

钻探及调查结果表明,滑体物质组成主要为粉

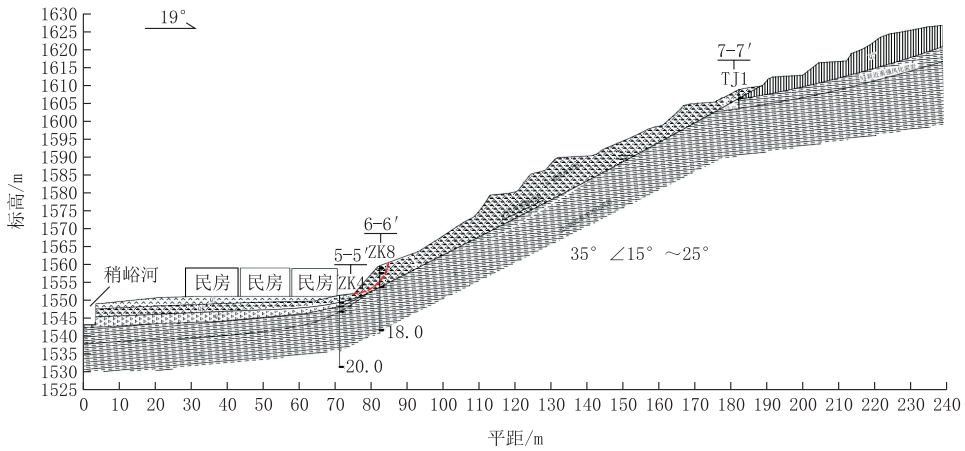


图 2 王山村滑坡典型斜坡剖面图

Fig.2 Typical slope section of the Wangshan Village landslide

质粘土(局部夹粉土、碎石土),局部夹泥岩的风化碎屑物。滑体后部厚 1.5~2.7 m,中部厚 4.3~8 m,前部厚 3.3~5.6 m。后缘滑动面倾角较陡,为 19°~27°;中部略缓,为 17°~22°;前缘较缓,为 12°~14°。其中,粉质粘土(局部夹粉土、碎石土)层厚 2.5~4.5 m,颜色呈灰黄、褐黄色,土质较均匀,呈稍湿、软塑、中密状态,部分有植物根系,局部夹有风化泥岩碎屑及碎石。碎石成分以强风化的泥岩夹砂砾岩为主,多呈不规则的块、片状,棱角分明。

泥岩、砂质泥岩的风化碎屑物,分布于粉质粘土之下,厚 1.4~2.3 m,颜色为灰白、浅灰绿色,稍湿,硬塑状。

1.3.2 滑面(带)结构特征

根据钻孔揭露和 H1-1 前缘剪出口位置判定,H1-1 滑坡滑面处于粉质粘土和新近系岩层强风化层的接触带上。滑带埋深纵向具有中前部较深、后缘部位较浅的特点。中前部埋深 3~4.5 m,后缘埋深 < 3 m,总体中前部滑动带倾角约 15°,后缘滑动带倾角约 30°。滑动带埋深横向具有两侧较浅、中部较深的特点,埋深 3~5 m。滑带厚度平均 10 cm,物质成分为粉质粘土夹泥岩风化碎屑物,呈杂色,结构破碎,稍湿,软塑状态,含水量较高。

1.3.3 滑床结构特征

本次勘查时钻孔揭露,滑床岩体岩性为强风化的灰白、浅灰绿色泥岩,块、片状构造,岩心呈碎块或短柱状,为相对隔水层。

1.3.4 滑坡区的地下水特征

依据勘查区地下水的赋存类型和含水介质,区内地下水可分为第四系松散岩类孔隙水和碎屑岩类

孔隙裂隙水 2 种类型。

(1)第四系松散岩类孔隙水。主要赋存于勘查区河谷地貌第四系冲洪积含水层中。含水层岩性主要为砂卵砾石层和粘土层,含水层厚度在 0.5~5.5 m 之间,该类水主要接受大气降水补给和稍峪河地表水的补给,地下水径流方向和地表水基本一致,沿地形条件由高处向低处径流,在局部低洼地段以泉的形式排泄或再次补给地表水,该类水埋深在 1.5~2 m 之间,单井涌水量 300~500 m³/d,富水性中等。

另外在勘查区斜坡地带第四系残坡积碎石土中也有该类地下水,富水性较弱,下伏基岩面为相对隔水底板,该类水主要接受大气降水补给,沿坡体由高处向低处径流,在坡脚多以泉点的形式出露。

(2)碎屑岩类孔隙裂隙水。主要赋存于勘查区表层强风化泥岩风化裂隙中,其补给来源主要接受降水的渗入补给,补给区与其分布区基本一致。富水性较好,单泉流量在 0.3~0.5 L/s 之间。在本次勘查过程中,根据钻探勘查,王山村滑坡体和郭河不稳定斜坡体中均含有该类地下水,在 1-1'断面上,地下水埋深为 4.5~6.1 m;在 2-2'断面上,地下水埋深为 4.7~7 m(钻探完成后),在滑坡区域,地下水埋深变化幅度不大。含水层厚度视风化泥岩厚度而变化,下部未风化或弱风化泥岩可视为相对隔水层,地下水在泥岩风化层接触面汇集,一方面使得土体自重增加,另一方面改变斜坡上的静水压力。对勘查区滑坡稳定性和斜坡稳定性产生复杂影响。

1.4 c、φ 值确定

在试验分析和反演分析的基础上,本次滑带土

抗剪强度参数的确定还参考了附近同类地区滑坡的分析数据进行工程类比。经综合分析后,确定 c 、 φ 值,取值结果见表 1。

表 1 王山村滑坡滑带土抗剪强度参数取值

Table 1 Parameter values of soil shear strength along the Wangshan Village landslide zone

取值方式	天然状态		饱和状态	
	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
试验值	16.7	20.49	15	18.32
工程类比值	14~17	17~20	12~15	16~19
反演值	16	18.5	15	16
综合取值	16	18.5	15	16

2 边坡稳定性判断依据

2.1 屈服准则的选取

影响边坡失稳破坏的关键因素是岩土体的抗剪强度,当最大剪应力达到破坏极限时,土坡将失稳破坏。基于此,本文在用折减系数法求解边坡稳定问题时,采用的是理想弹塑性模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 破坏准则^[18]:

$$F = \frac{1}{3} I_1 \sin\varphi + \left(\cos\theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin\theta_\sigma \sin\varphi \right) \sqrt{J_2} - c \cos\varphi = 0 \quad (1)$$

式中: I_1 、 J_2 ——分别为应力张量的第 1 不变量和应力偏张量的第 2 不变量; θ_σ ——应力罗德角; φ ——土的内摩擦角; c ——土的粘聚力。

Mohr-Coulomb 准则应用比较广泛和可靠,但缺点是在三维应力空间中的屈服面存在尖顶和棱角的不连续点,因此,有必要对 Mohr-Coulomb 准则进行相应的改进;通过 M-C 准则与 D-P 准则之间的转换来为更好地实现数值模拟的可行性提供保障^[19]。目前,国际通用的大型有限元计算软件大多采用外角外接圆 D-P 准则。ABAQUS 软件中采用了扩展的 Mohr-Coulomb 准则,即外角外接圆 D-P 准则,该准则中偏应力空间中无拐角,流动势是完全光滑的,只有唯一的塑性流动方向^[20]。

2.2 边坡失稳的破坏依据

采用有限元强度折减法分析边坡稳定性的一个关键问题,是如何根据有限元计算结果来判别边坡是否处于破坏状态。目前有 4 类准则:(1)特征点位移法;(2)结构面某一幅值的广义剪应变的贯通;(3)计算不收敛;(4)结构面塑性区贯通^[21]。

上述边坡失稳的判据大致可以划分为 2 类:

第一类:以广义塑性应变或等效塑性应变从坡

脚到坡顶贯通作为边坡破坏的标志。

第二类:在有限元计算过程中采用力和位移的不收敛作为边坡失稳的标志。

本文采用的是第二类失稳判据。

3 无抗滑桩加固边坡稳定性分析

3.1 有限元模型

有限元计算分析采用 ABAQUS 商用有限元计算软件,建立均质土坡的简化三维有限元计算模型。模型网格划分如图 3 示。

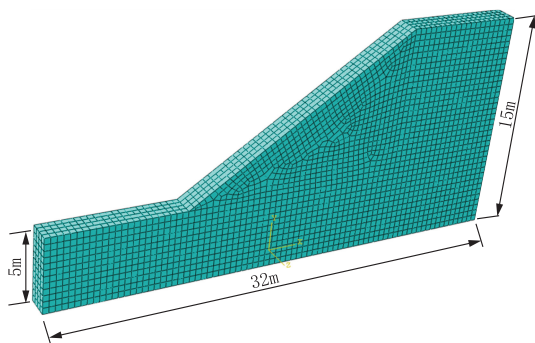


图 3 简化模型的网格划分

Fig.3 Simplified finite element model for the slope

模型的边界尺寸为:水平方向 32 m,模型高度 15 m,边坡坡面垂直高度 10 m,坡高比为 1:1.5。土体容重 $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E=70 \text{ MPa}$,内摩擦角 $\varphi=15^\circ$,粘聚力 $c=17 \text{ kPa}$,泊松比 $\nu=0.38$,且粘聚力和内摩擦角在折减过程中随场变量变化。在网格划分中,坐标取向沿高度方向为 Y 正方向,沿长轴方向为 X 方向,沿宽度方向为 Z 方向,长度单位为 m。

模型土体均为八节点六面体单元,采用缩减积分形式计算。节点总个数为 10710,单元总个数为 8128。在计算过程中,模型底面及 4 个侧面均采用人工边界约束。

3.2 荷载及工况

数值计算主要考虑以下 2 种工况:

(1)自重状态工况。在此工况下,荷载仅为重力作用,获得此状态下的应力、应变等结果。

(2)强度折减工况。在此工况下,采用强度折减法计算,获得此状态下的静力安全系数和最有可能滑动面等结果。

3.3 无桩边坡稳定性分析

图 4 为强度折减作用下,计算不收敛时刻土坡

模型的等效塑性应变云图。由图 4 分析可知,在计算过程中,等效塑性应变随时间的推进而不断增大,且逐渐向坡顶扩展,最终形成了一条从坡脚发展到坡顶的贯通面。破坏形式为贯通面整体滑移。

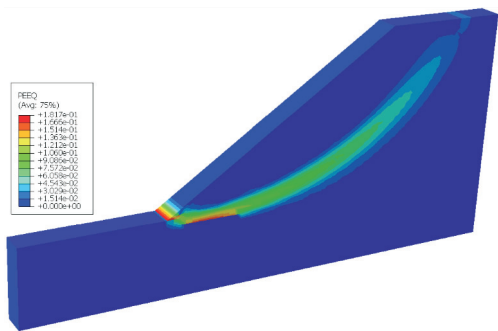


图 4 等效塑性应变响应云图

Fig.4 Distribution of the plastic zone of the slope

图 5 为土坡模型水平向位移响应云图,水平向土体最大位移为 0.054 m,发生在靠近坡脚处,如图中蓝色部分所示。

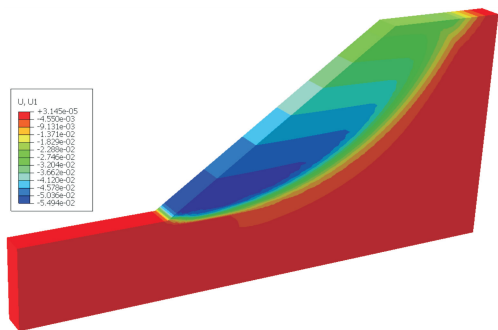


图 5 水平向位移响应云图

Fig.5 Response image of the horizontal displacement

随着场变量的变化,边坡的粘聚力和内摩擦角也随之减小,直至位移发生突变而造成模型破坏。此时,边坡内部发生着局部或整体的塑性形变,从图 4 等效塑性应变云图中可以看出,边坡发生了贯通面整体滑移破坏。以位移的拐点作为选择安全系数的判据,通过分析坡脚处水平位移随场变量的变化,绘制出边坡安全系数曲线(如图 6 所示),该边坡的安全系数为 1.17。

4 抗滑桩加固边坡稳定性分析

4.1 边坡中部抗滑桩加固

抗滑桩在边坡上的加固位置直接影响到边坡的稳定性,为探讨抗滑桩加固在坡面后的影响范围,本文以韦立德、年延凯等^[5,22-25]对边坡多种条件优化

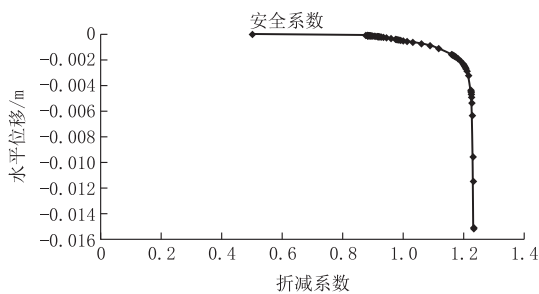


图 6 安全系数曲线

Fig.6 Curve of safety factors

布置分析为依据,从模型中部进行抗滑桩加固,来观察边坡中部加桩后对安全系数的影响。模型桩采用理想弹性模型,桩长 $L=9\text{ m}$,桩径 $D=0.8\text{ m}$,桩间距 $4D=3.2\text{ m}$;桩容重 $\gamma=24\text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E=300\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.2$;桩的强度在计算过程中不随场变量变化。由对称性分析模式建立有限元三维模型如图 7 所示。

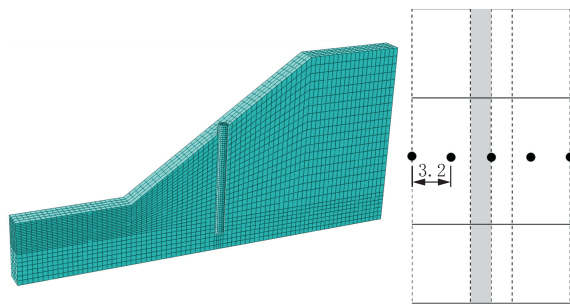


图 7 抗滑桩加固模型及桩距示意图(单位:m)

Fig.7 Model of slope reinforcement with anti-slide piles and spacing of piles (unit: m)

通过对模型的计算,得到了边坡等效塑性应变、水平向位移及安全系数曲线(如图 8 所示)。从图 8(c)中可以看出,在模型中部加固抗滑桩后,边坡模型的安全系数达到了 1.85,这与之前无抗滑桩加固的边坡相比,安全系数提高了 0.68。可见,抗滑桩加固后的边坡稳定性有了很大的提高。从图 8(a)、(b)中可以看出,抗滑桩有效地阻止了边坡上部土体的下滑,同时也减小了对下部土体的水平推力,起到了稳固滑面的效果。在图 8(a)中,当土体强度随折减系数减小到一定程度时,出现了“越顶现象”和桩前后的两条塑性贯通区;位移的最大值出现在坡面上半部分,如图 8(b)蓝色部分所示。这是由于抗滑桩加固后虽然提高了边坡整体的稳定性,但桩前后各自形成 2 个“新的”边坡;这 2 个新的边坡又以各自的形变影响着边坡整体的稳定性。但从安全系

数上可以分析出,尽管出现了2个塑性应变贯通区和“越顶现象”,但边坡的稳定性还是很高的。只有当模型的场变量从1增大到1.9时才出现了双贯通面和“越顶现象”,此时,土体静强度从原本的 $c=17$ kPa和 $\varphi=15^\circ$ 折减到了 $c=9$ kPa和 $\varphi=8^\circ$ 。通过计算坡底和坡顶处加固抗滑桩后的边坡稳定系数,用于和中部桩进行比较分析,结果为加固后坡底处的安全系数为1.01,坡顶处为0.96,这与中部桩的计算结果相差甚远。

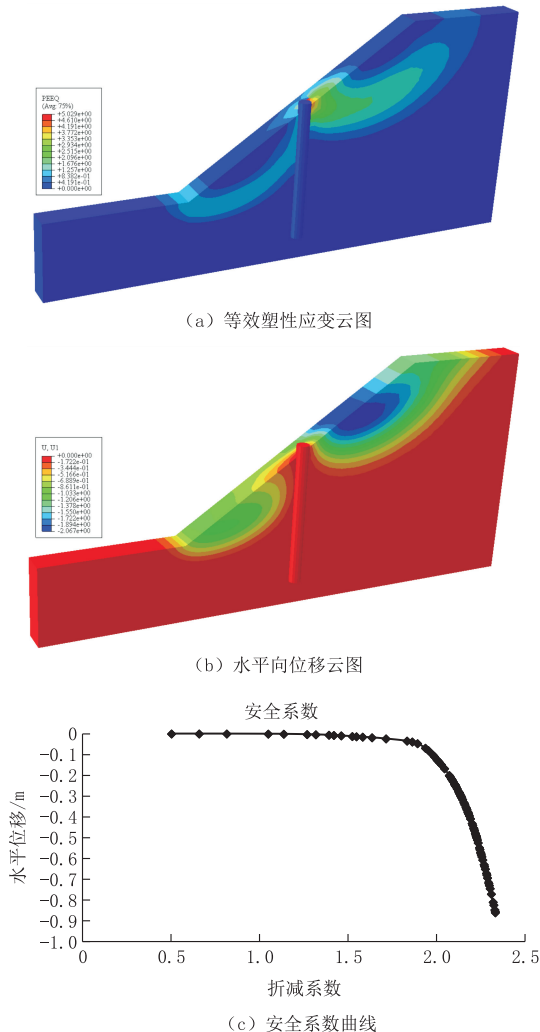


图8 抗滑桩中部加固后有限元计算结果

Fig.8 Calculation results for the middle of the slope after reinforcement

4.2 抗滑桩加固优化方案

从以上计算可知,抗滑桩在边坡中部加固后大幅度提高了边坡的稳定性,但是在桩的上部和下部还是出现了塑性破坏。假设在图8(a)中2个贯通面的中部各设计一根抗滑桩,用以阻断塑性区的贯

通来减小边坡土体的破坏,但这样的加固方式会产生很大的工程造价,不切合实际。为避免2个贯通面对边坡产生的累加破坏,设计了一种新的抗滑桩加固位置。以边坡中部加固为基础,在2个贯通面的中部到整个坡面的中部的中点处各设计一根抗滑桩,如图9上部桩和下部桩位置所示,上部桩和下部桩距中部桩都为2.5 m。

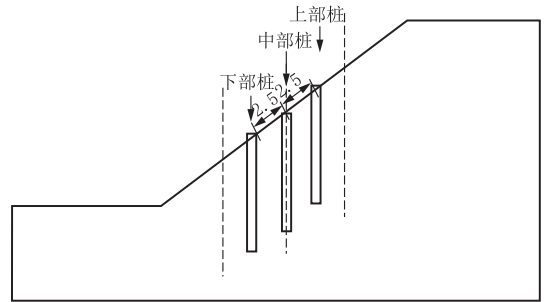


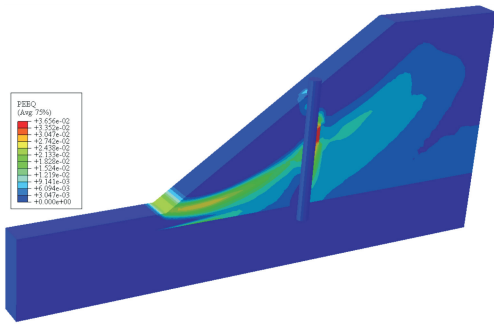
图9 抗滑桩加固方案(单位:m)

Fig.9 Plan of anti-slide pile reinforcement (unit: m)

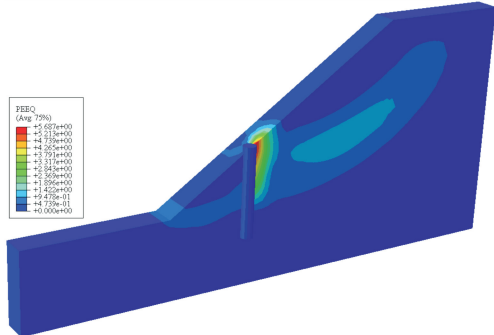
这样设计的依据是,在静力作用下坡底应力较为集中,所以往往将抗滑桩设计在坡面的下部,可是将抗滑桩设计在坡底处会导致边坡上部土体发生破坏。在动力作用下,坡顶对地震动的放大效应会大于坡底,造成坡顶应力集中致使边坡失稳,但若将抗滑桩放在坡顶,又会导致桩体下部土体易于破坏。所以将抗滑桩设计在边坡中点附近,既能提高边坡的安全系数,又能综合考虑到静力和动力2种作用下的边坡稳定性,下面分别对这2种桩位进行计算与讨论。

通过对这2种边坡抗滑桩加固方案进行有限元计算,得到了等效塑性应变区的变化如图10所示。上部桩和下部桩都很好地阻断了塑性应变区的贯通,在桩后边坡上应力较为集中。上部桩方案的边坡安全系数为1.35,如图10(a)所示,下部桩方案的边坡安全系数为1.56,如图10(b)所示,且2个桩位的安全系数都小于中部桩加固后的安全系数1.58,大于无桩、坡顶加固及坡顶加固后的安全系数1.17(如图11所示)。

图12为场变量变化到1.23时刻(即无桩边坡失稳时刻),无桩边坡、中部桩、下部桩及上部桩加固后的坡面水平向位移曲线。如图12(a),无桩坡面的水平向位移从坡顶到坡底呈线性增长趋势,大小从坡顶的0.025 m增加到坡底的0.053 m,这也说明了静力下边坡失稳时坡底应力较为集中,位移较大。



(a) 上部桩方案等效塑性应变云图



(b) 下部桩方案等效塑性应变云图

图 10 2 种抗滑桩加固方案的有限元计算结果

Fig.10 Calculation results for reinforcement with the upper pile and lower pile

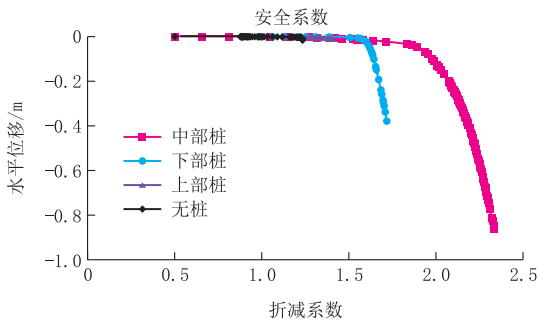


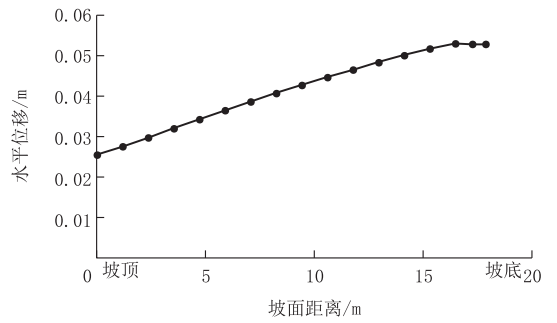
图 11 无桩边坡及 3 种桩位加固后的安全系数曲线

Fig.11 Curve of safety factors

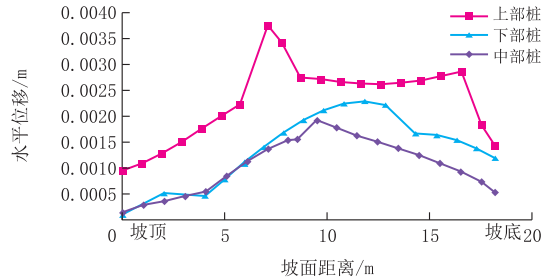
图 12(b)为中部桩、下部桩及上部桩位加固后坡面水平向位移曲线,坡面土体受抗滑桩及“土拱效应”的影响,土体的位移呈现出非线性不均匀滑动,且位移远小于无桩边坡;在场变量变化到 1.23 时刻,中部桩加固后的坡面水平向位移最小,上部桩表现为最大,下部桩介于这两者之间,说明中部桩对加固滑面起到的作用最大。

4.3 抗滑桩加固优化方案对比

通过计算上述 5 种桩位(见图 13)的安全系数如表 2 所示。从表 2 中可以看出,点 c(中部桩)处的桩位安全系数最高,这和韦立德等^[5]所做的结论



(a) 无桩边坡坡面水平向位移曲线



(b) 3 种桩位加固后边坡坡面水平向位移曲线

图 12 无桩边坡及 3 种桩位加固后的坡面水平位移曲线

Fig.12 Horizontal displacement of the slope without piles vs the slope reinforced with the piles at the three locations

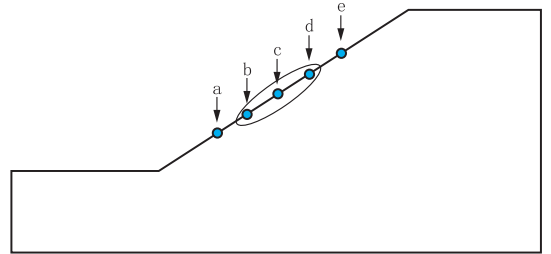


图 13 5 个位置桩位示意

Fig.13 Five position of the piles

相一致,即边坡中部加桩后的安全系数较高。点 b(下部桩)和点 d(上部桩)处安全系数较无桩时大,接近于中部桩的安全系数,也证明了这 2 种桩位具有较高的安全性。点 a(坡脚桩)和点 e(坡顶桩)处的抗滑桩加固方案得到了较小的安全系数,且都小于无桩时的安全系数 1.17,说明抗滑桩并不一定会增加边坡的安全性,若加固位置不当,也会给边坡的稳定性造成威胁。

表 2 5 个桩位的安全系数

Table 2 Safety factors of the five pile positions

桩位	无桩	a	b	c	d	e
安全系数	1.17	1.01	1.56	1.58	1.35	0.96

5 结论

(1)通过对王山村滑坡的物理力学实验分析,影响该滑坡稳定性的主要因素为上覆黄土的大孔隙、架空孔隙结构等特征、地形地貌特征,以及人类工程活动、地震载荷的施加。

(2)通过对边坡抗滑桩加固模型的有限元计算,得到了5种桩位的安全系数,并对其安全系数进行了分析比较,得到了较为稳定的加固桩位,本次计算证明,中部桩位加固后的安全系数最高。

(3)为考虑不同地区的降雨及地震情况,在中部桩的周边设计了上部桩和下部桩位;既考虑到静力下坡底应力较为集中,又考虑到动力下加速度的放大效应,可为工程实践提供参考方案。

(4)通过对本文计算结果进行分析,可对工程实践提出以下建议:若此地区常降雨且常发生地震,可考虑中部桩;若此地区有常降雨而不常发地震,可考虑下部桩;若此地区无常降雨而地震多发,可考虑上部桩。

(5)抗滑桩的加固位置应根据边坡的具体情况而定,无论是静力还是动力都没有绝对稳定的加固桩位;应在实践中不停摸索,来选择一个较为稳定的参考依据。

参考文献(References):

- [1] 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,2009.
FEI Kang, ZHANG Jianwei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [2] 邹盛堂,戴自航.抗滑桩加固土坡效果及合理桩位的三维有限元分析[J].福州大学学报(自然科学版),2012,40(5):664-669.
ZOU Shengtang, DAI Zihang. 3-dimension FEM analysis of effect on soil slopes reinforced by anti-slide piles and reasonable pile locations[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2012,40(5):664-669.
- [3] 戴自航,徐祥.边坡抗滑桩设计计算的三维有限元法[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2572-2578.
DAI Zihang, XU Xiang. 3D finite element method for design computations of anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(12):2572-2578.
- [4] 唐晓松,刘明维,叶海林.基于ABAQUS的抗滑桩三维有限元分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(S2):1614-1618.
TANG Xiaosong, LIU Mingwei, YE Hailin. 3-Dimension FEM analysis on anti-slide piles based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010,6(S2):1614-1618.

- [5] 韦立德,杨春和,高长胜.基于三维强度折减有限元的抗滑桩优化探讨[J].岩土工程学报,2005,27(11):115-117.
WEI Lide, YANG Chunhe, GAO Changsheng. Optimization of slide-resistant piles based on strength reduction method with 3D FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(11):115-117.
- [6] 张德文,张建民.桩基础抗震性能的简易评价方法[J].西北地震学报,2013,35(1):69-83.
ZHANG Dewen, ZHANG Jianmin. Simplified method for evaluating seismic performance of pile foundation[J]. Northwestern Seismological Journal, 2013,35(1):69-83.
- [7] 谭捍华,赵炼恒,李亮,等.抗滑桩预加固边坡的能量分析方法[J].岩土力学,2011,32(S2):190-197.
TAN Hanhua, ZHAO Lianheng, LI Liang, et al. Energy analysis method for pre-reinforcing slopes with anti-slide piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(S2):190-197.
- [8] 年廷凯,栾茂田,杨庆.阻滑桩加固土坡稳定性分析与桩基的简化设计[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):29-35.
NIAN Tingkai, LUAN Maotian, YANG Qing. Stability analysis of slopes with stabilizing piles and their simplified design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(19):29-35.
- [9] 敖贵勇,张玉芳,赵尚毅,等.埋入式抗滑桩承担的滑坡推力分析[J].工程力学,2020,37(S1):187-192.
AO Guiyong, ZHANG Yufang, ZHAO Shangyi, et al. Analysis of landslide thrust acting on embedded anti-slide pile[J]. Engineering Mechanics, 2020,37(S1):187-192.
- [10] 孙书伟,朱本珍,马惠民,等.微型桩群与普通抗滑桩抗滑特性的对比试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(10):1564-1570.
SUN Shuwei, ZHU Benzhen, MA Huimin, et al. Model tests on anti-sliding mechanism of micropile groups and anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(10):1564-1570.
- [11] 张华员,吴歌.有侧限边坡支护方法研究及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(2):73-76,92.
ZHANG Huayuan, WU Ge. Research on slope lateral confinement method and the application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(2):73-76,92.
- [12] 章为民,顾行文,任国峰,等.刚性抗滑桩的桩土相互作用机理与极限阻滑力研究[J].土木工程学报,2017,50(10):86-94.
ZHANG Weimin, GU Xingwen, REN Guofeng, et al. Pile-soil interaction mechanism and ultimate lateral load on rigid stabilizing pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2017,50(10):86-94.
- [13] 邓晓飞,于漂罗,唐书君,等.青海大通西山滑坡稳定性分析及防治方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):16-21.
DENG Xiaofei, YU Piaoluo, TANG Shujun, et al. Analysis on landslide stability in Datong County and the control plan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):16-21.
- [14] 张颖,孙兆涛,裴仲文.FLAC3D在边坡数值分析及位移监测中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):57-61.
ZHANG Ying, SUN Zhaotao, PEI Zhongwen. Application of

- FLAC3D in landslide numerical analysis and displacement monitoring[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018,45(3):57—61.
- [15] 郑明新,殷宗泽,吴继敏,等.滑坡防治工程效果的模糊综合评价研究[J].*岩土工程学报*,2006,28(10):1224—1229.
ZHENG Mingxin, YIN Zongze, WU Jimin, et al. Post-fuzzy comprehensive evaluation of effectiveness of landslide control [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28 (10):1224—1229.
- [16] 李乾坤,石胜伟,韩新强,等.国内地质灾害机理与防治技术研究现状[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2013,40(7):52—54.
LI Qiankun, SHI Shengwei, HAN Xinqiang, et al. Research status of geological hazard mechanism and prevention technology in China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013,40(7):52—54.
- [17] 祁志强,谭建国,曹继军,等.微型桩在三峡库区黄土坡滑坡区塌岸防治工程中的应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2005,32(S1):187—190.
QI Zhiqiang, TAN Jianguo, CAO Jijun, et al. Application of micro piles in bank collapse prevention project in loess slope landslide area of Three Gorges Reservoir area[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2005,32 (S1):187—190.
- [18] 邓楚键,何国杰,郑颖人.基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J].*岩土工程学报*,2006,28(6):735—739.
DENG Chujian, HE Guojie, ZHENG Yingren. Studies on Drucker-Prager yield criterions based on M-C yield criterion and application in geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006,28(6):735—739.
- [19] 张学岩,闫湛旺.岩土塑性力学基础[M].天津:天津大学出版社,2006:78—83.
ZHANG Xueyan, YAN Shuwang. *Fundamentals of geotechnics plasticity*[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2006: 78—83.
- [20] 时卫民,郑颖人.摩尔-库仑屈服准则的等效变换及其在边坡分析中的应用[J].*岩土工程技术*,2003(3):155—159.
SHI Weimin, ZHENG Yingren. Equivalent transformation of Mohr-Coulomb Criterion and its application in slope stability analysis[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2003(3): 155—159.
- [21] 吕庆,孙红月,尚岳全.强度折减有限元法中边坡失稳判据的研究[J].*浙江大学学报(工学版)*,2008,42(1):83—87.
LÜ Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan. Slope failure criteria of shear strength reduction finite element method[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(1):83—87.
- [22] 年廷凯,徐海洋,刘红帅.抗滑桩加固边坡三维数值分析中的几个问题[J].*岩土力学*,2012,33(8):2521—2526,2535.
NIAN Tingkai, XU Haiyang, LIU Hongshuai. Several issues in three-dimensional numerical analysis of slopes reinforced with anti-slide piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012,33 (8):2521—2526,2535.
- [23] 彭文哲,赵明华,肖尧,等.抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2020,47(5):23—30.
PENG Wenzhe, ZHAO Minghua, XIAO Yao, et al. Stability analysis of anti-slide pile reinforced slope and determination of optimal pile position[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020,47(5):23—30.
- [24] 雷文杰,郑颖人,冯夏庭.滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J].*岩土力学*,2006,27(6):950—954.
LEI Wenjie, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Analysis of pile location on landslide control[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006,27(6):950—954.
- [25] 郭明伟,李春光,王水林.基于有限元应力的三维边坡稳定性分析[J].*岩石力学与工程学报*,2012,31(12):2494—2500.
GUO Mingwei, LI Chunguang, WANG Shuilin. Three-dimensional slope stability analysis based on finite element stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012,31(12):2494—2500.

(编辑 王建华)

(上接第 74 页)

- [9] 刘海兵,凤城国贸工程超深基坑桩锚支护设计与施工[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(5):86—91.
LIU Haibing. Design and construction of the ultra-deep foundation pile-anchor supporting in Fengcheng International Trade Project[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019,46(5):86—91.
- [10] JGJ/T 199—2010,型钢水泥土搅拌墙技术规程[S].
JGJ/T 199—2010, Technical specification for soil mixed wall[S].
- [11] 李先经,王会军,刘心起.王家官庄旧村改造基坑支护设计与施工实践[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(1):69—74.
LI Xianjing, WANG Huijun, LIU Xinqi. Design and construction of the foundation pit support for Wangjiaguazhuang old village reconstruction [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,49(1):69—74.
- [12] 张璞,柳荣华.SMW 工法在深基坑工程中的应用[J].*岩石力学与工程学报*,2000,19(S1):1104—1107.
ZHANG Pu, LIU Ronghua. The application of SMW method in foundtion pit[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000,19(S1):1104—1107.
- [13] 易智宏,贺浩.超深基坑止水帷幕 TRD 与防渗墙工法对比分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2016,43(12):82—84.
YI Zhihong, HE Hao. Comparison analysis on water-stop curtain methods of TRD and cut-off wall for ultra deep foundation pit[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016,43(12):82—84.

(编辑 周红军)