

## 堆积层滑坡抗滑桩最优桩位优化设计 ——以返岭前滑坡为例

刁之旺<sup>1</sup>, 贺可强<sup>1,\*</sup>, 田野<sup>1,2</sup>, 李精昆<sup>3</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 天合光能股份有限公司, 常州 213002;

3. 中建七局交通建设有限公司, 郑州 450003)

**摘要:** 抗滑桩桩位选择是影响抗滑桩支护效果的重要因素, 合理的抗滑桩桩位可以提供更有效的支护作用。以返岭前滑坡三为研究对象, 根据滑坡不同变形模式下的受力变形特点, 设计出推移式、牵引式、复合式 3 种工况, 并采用 Midas GTS NX 有限元软件建立其抗滑桩支护模型, 分析不同桩位下滑坡的位移量、塑性区以及稳定性变化等。通过抗滑桩安全贡献度这一参数, 确定出推移式滑坡、牵引式滑坡、复合式滑坡的抗滑桩最优加固位置分别为坡体  $l/L=0.58$  附近、 $l/L=0.1$  附近、 $l/L=0.2$  附近 ( $l$  为抗滑桩布设位置距坡脚长度;  $L$  为滑坡长度)。

**关键词:** 堆积层滑坡; 抗滑桩; 桩位优化

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)03-0027-11

## Optimal design of the anti-slide pile optimal position of accumulation layer landslides: taking the landslide of Fanlingqian as an example

DIAO Zhiwang<sup>1</sup>, HE Keqiang<sup>1,\*</sup>, TIAN Ye<sup>1,2</sup>, LI Jingkun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Trina Solar Co., Ltd., Changzhou 213002, China; 3. China Construction Seventh

Engineering Bureau Transportation Construction Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The selection of anti-slide pile position is an important factor affecting the supporting effect of anti-slide pile, and reasonable anti-slide pile position can provide more effective supporting effect. Taking the No. 3 landslide of Fanlingqian as the research object, according to the stress and deformation characteristics of the landslide under different deformation modes, three working conditions are designed: push type, traction type and composite type, and its anti-slide pile support model is established by Midas GTS NX finite element software, and the displacement, plastic zone and stability change of the landslide under different pile positions are analyzed. Based on the parameter of safety contribution of anti-slide piles, this study determines that the optimal reinforcement positions of anti-slide piles for push-type landslide, traction-type landslide and composite-type landslide are near slope body

收稿日期: 2023-05-08

基金项目: 山东省自然科学基金重点项目 (ZR2020KE004)

作者简介: 刁之旺 (1998—), 男, 山东德州人。硕士, 研究方向为边坡稳定性评价与预测。E-mail: 1348463642@qq.com。

\* 通信作者: 贺可强 (1960—), 男, 山东蓬莱人。博士, 教授, 主要从事地质灾害预测、评价与防治等方面的研究。

E-mail: keqianghe@sina.com。

$l/L=0.58$ ,  $l/L=0.1$  and  $l/L=0.2$ , respectively ( $l$  is the length of the anti-slip pile from the foot of the slope, and  $L$  is the length of the landslide).

**Key words:** accumulation layer landslide; anti-slide pile; pile position optimization

随着我国工程建设的发展,需要对大量工程和自然边坡进行人为支护,抗滑桩由于具有抗滑性能强、对滑体扰动小、施工安全、设桩位置灵活、投资较少且应用范围广,可以有效地适应工程地质条件并且及时调整设计方案的特点,在边坡的众多防治措施中,是目前采用较多的支护结构之一。桩的长度、截面形状和大小、材料性质及布设桩位等为抗滑桩设计参数,通过优化其参数能够节约材料,并且使抗滑桩支护效果更加高效。然而,对抗滑桩最优桩位的研究成果较少,得出的结论也不尽相同,因此如何对抗滑桩最优桩位选取成为了亟待解决的问题。

ELLIS等<sup>[1]</sup>、彭文哲等<sup>[2]</sup>使用有限元分析软件建立了抗滑桩数值模型,研究了边坡坡度和抗剪强度等对最优桩位及桩长的影响,分析了抗滑桩加固后的最危险滑动面变化规律。ITO等<sup>[3]</sup>通过公式推导确定出各种土质边坡抗滑桩最优桩位布设位置,从结果来看布设于边坡坡中和坡顶更有利于边坡稳定。WANG等<sup>[4]</sup>提出了一种适用于滑面以下2种不同强度基岩的抗滑桩的分析方法,建立了不同强度地层填埋场边坡第一软弱基岩基床反力模量与合理埋置长度之间的关系。ZHONG等<sup>[5]</sup>采用数值计算方法,可以直接得到载荷分布,有利于后续计算过程。NIAN等<sup>[6]</sup>、邹盛堂等<sup>[7]</sup>采用有限元折减法对抗滑桩边坡进行数值分析,研究边坡采用抗滑桩加固时最优桩位的合理位置。PAN等<sup>[8]</sup>以数值分析方法计算收敛,以塑性区贯通为边坡失稳判据,以强度折减法为计算原理研究加筋土质边坡抗滑桩的最佳位置和桩距,其结果表明:随着抗滑桩距坡脚位置距离的增大,安全系数先增大后减小,当抗滑桩距坡脚水平距离与坡脚长度之比在0.6左右时安全系数最大。SUN等<sup>[9]</sup>利用有限元分析软件对模型中的弹塑性和大变形动力固结进行分析,采用耦合非线性数值方法,研究桩的动力响应和抗震加固,并提出了考虑多种因素的筏板基础计算方法,结果表明:在地震荷载作用下,坡体和抗滑桩的位移响应随着地震动通过坡体向上传播而放大,地震加速度越大,抗滑桩变形越大,且桩身位移由上而下依次减小;不同高程点的动力矩在变化趋势上是相同的,动力矩随着输入地震波加速度的增大而增大。ZHANG等<sup>[10]</sup>通过模型试验和数值模拟的方法,从定性和定量的角度分析了锚杆抗滑桩土拱效应的演化机理和影响参数,分析土拱形成和演化的3个阶段,可知土拱的承载能力随着桩间距的增大而减小,增加土体压实度可以有效地提高土拱的承载能力,充分发挥边坡的抗滑作用。LIU等<sup>[11]</sup>利用ABAQUS软件对考虑和忽略土阻力对抗滑桩内力的影响进行了验证,结果表明土阻力对抗滑桩的影响是显著的,尤其是桩前土体的坡度小于 $40^\circ$ 时,为此,提出了考虑土阻力的抗滑桩内力计算公式。杨傲<sup>[12]</sup>、CAI等<sup>[13]</sup>、高长胜等<sup>[14]</sup>利用数值分析及相关的试验研究了抗滑桩加固边坡时所对应的桩后推力、临界桩间距、滑坡推力、边坡稳定性等问题,确定了滑坡中部附近为抗滑桩最优桩位。

以上研究表明,边坡抗滑桩最优桩位的设置是十分复杂的,且由于边坡类型的不同,设置位置也不同。本文以青岛市崂山区返岭前滑坡三为例,结合边坡与抗滑桩的相互作用关系,分析确定了不同类型边坡的最佳桩位,可为类似工况下抗滑桩的设计提供参考依据。

## 1 滑坡基本概况

返岭前滑坡三位于青岛市崂山区返岭社区,东邻黄海。滑坡平面面积约 $4.04 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,滑坡围椅状地形较明显,形态呈三角形,滑体平均厚度12 m,体积约 $48.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为中型滑坡;前缘高程3~5 m,距离海面5~10 m;后缘高程55~85 m。

滑坡三的破裂滑动已经使得公路一边产生了显著的可见裂缝,宽度在2~25 cm,而且出现了许多局部断裂和沉降现象,需对其进行必要的支护处理。本文选择滑坡三的主剖面(图1)建立Midas GTS NX有限元数值模型进行分析。

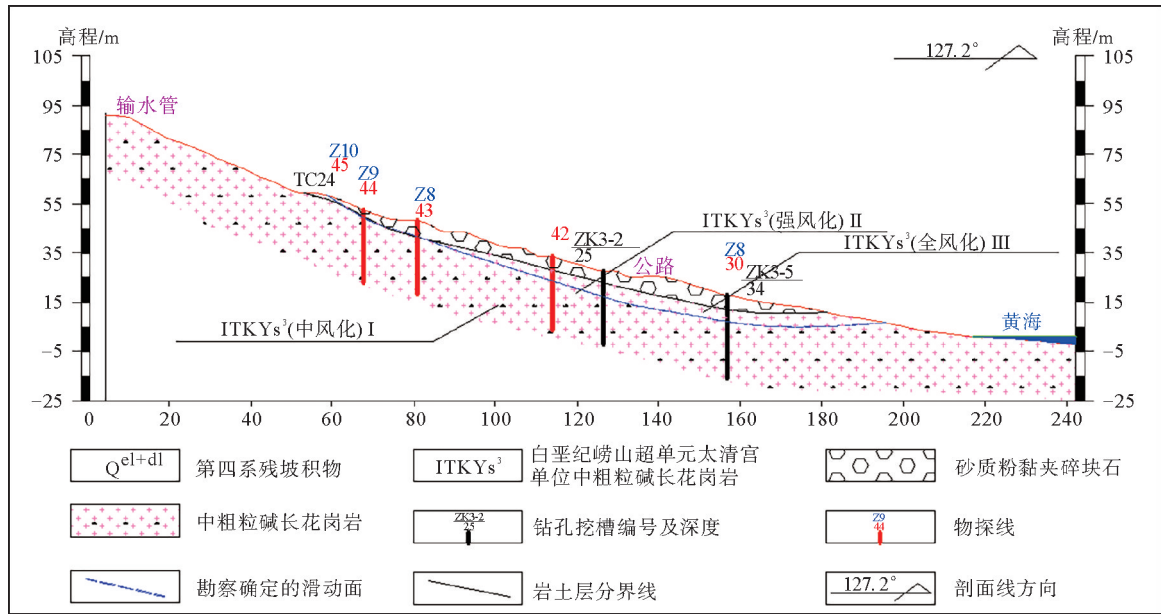


图 1 滑坡三主剖面

## 2 抗滑桩有限元模型的建立

### 2.1 工况设计分析

根据工程地质勘察资料,确定的数值分析物理力学参数见表 1。

表 1 物理力学参数

材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	重度 $\gamma/$ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和重度 $\gamma_b/$ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	饱和黏聚力 $c_b/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	饱和内摩擦 角 $\varphi_b/(\text{°})$	泊松 比 $\nu$
堆积体	92	19	20	27	26	23	20	0.33
基岩	54 300	27	27	220	220	38	38	0.23
抗滑桩	32	26	—	—	—	—	—	0.20

本文设计了推移式、牵引式、复合式 3 种工况,分析抗滑桩支护的最优桩位。

工况 1 推移式:边坡坡体为饱和水状态。此时边坡坡体的后缘出现较大位移与张拉裂缝,边坡变形和滑裂面逐渐从后向前发展,滑坡呈现推移式变形模式,如图 2 所示。

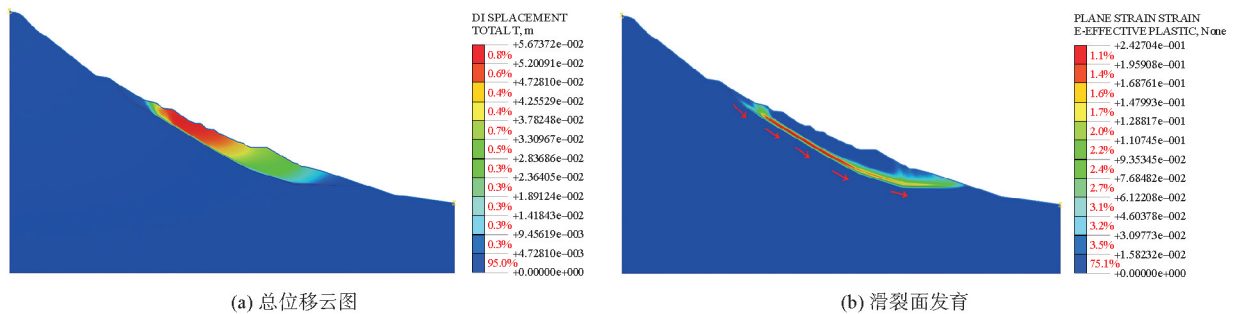


图 2 推移式工况下滑坡发育特征

工况 2 牵引式:在 Midas GTS NX 软件中将模型坡体的前缘进行切坡处理,边坡坡体为半饱和水状态,坡脚为饱和水状态。此时坡体前缘产生较大的位移,滑坡变形呈现出牵引式变形模式,如图 3 所示。

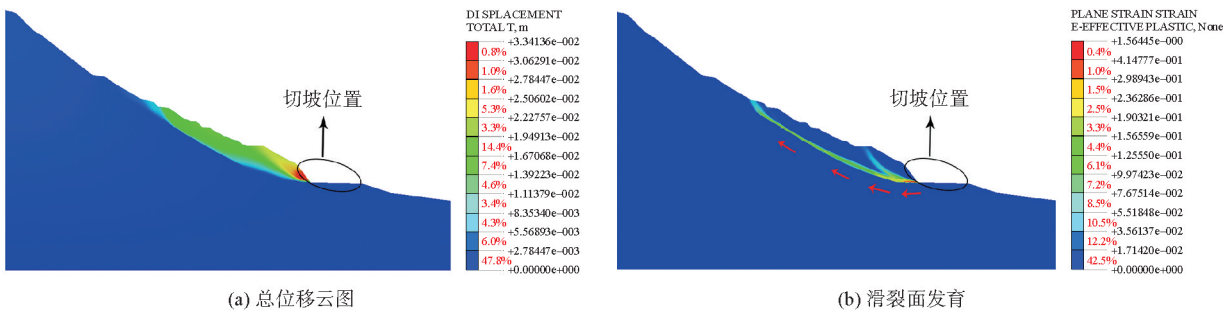


图 3 牵引式工况下滑坡发育特征

工况 3 复合式:将坡体的前缘进行同样切坡处理,边坡坡体、坡脚为半饱和水状态。此时坡体的前缘与后缘都产生了位移,滑坡变形呈现出复合式变形模式,如图 4 所示。

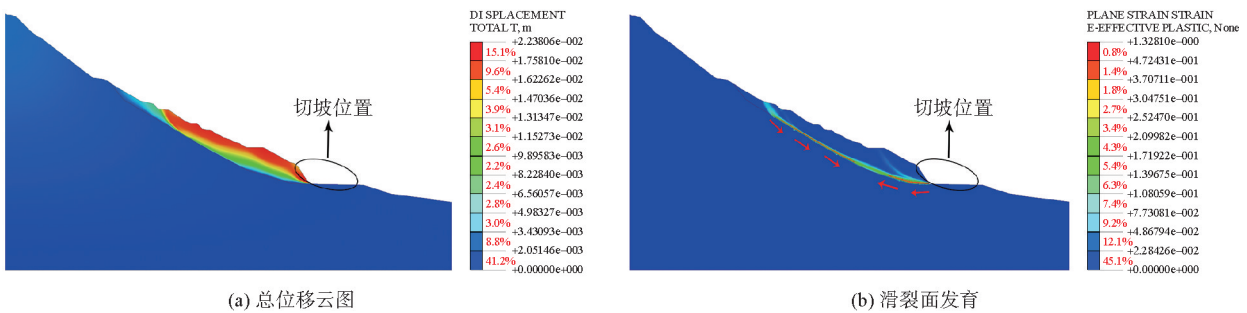


图 4 复合式工况下滑坡发育特征

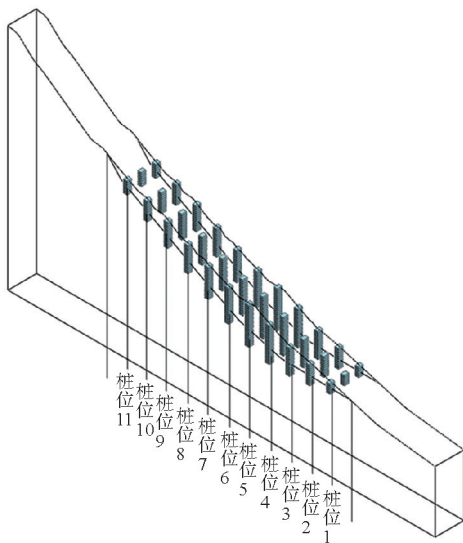
### 2.2 抗滑桩参数选取

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)<sup>[15]</sup>选取抗滑桩参数,如表 2 所示。

将自然状态下边坡的堆积体在水平方向平分为 12 等份,共计设置了 11 个桩位,设立的边坡抗滑桩加固模型(牵引式、复合式滑坡为桩位 3—桩位 11,共 9 个桩位)如图 5 所示,在此基础上研究各种变形模式下抗滑桩最优桩位设置。

表 2 抗滑桩参数取值

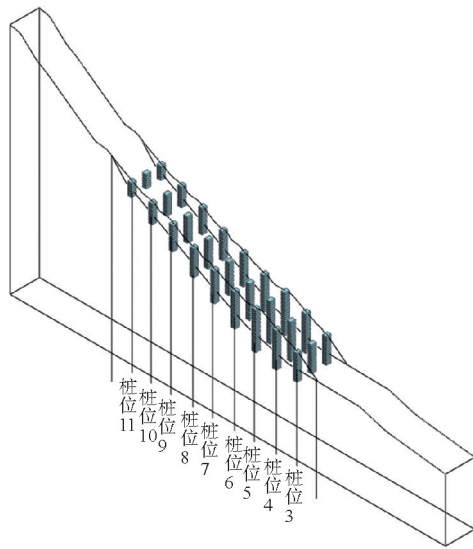
参数取值	嵌固长度	桩中距/m	截面宽度/m	截面长度/m
规范建议取值	1/3~2/5 桩长	5~10	1.5~2.5	2.0~3.5
本文取值	11/30 桩长	6	2.0	2.6



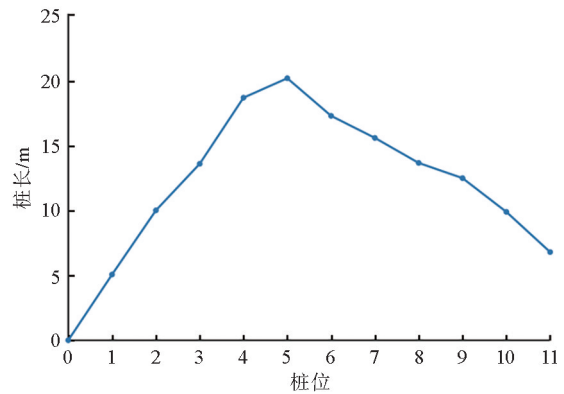
(a) 推移式滑坡的抗滑桩加固



(b) 牵引式滑坡的抗滑桩加固



(c) 复合式滑坡的抗滑桩加固



(d) 不同桩位抗滑桩桩长分布

图 5 抗滑桩加固模型及桩长分析

### 3 计算结果分析

#### 3.1 不同桩位加固边坡的位移场演化规律分析

##### 3.1.1 推移式滑坡的抗滑桩加固分析

选取代表性桩位进行分析,推移式抗滑桩加固分析如图 6、图 7 所示。

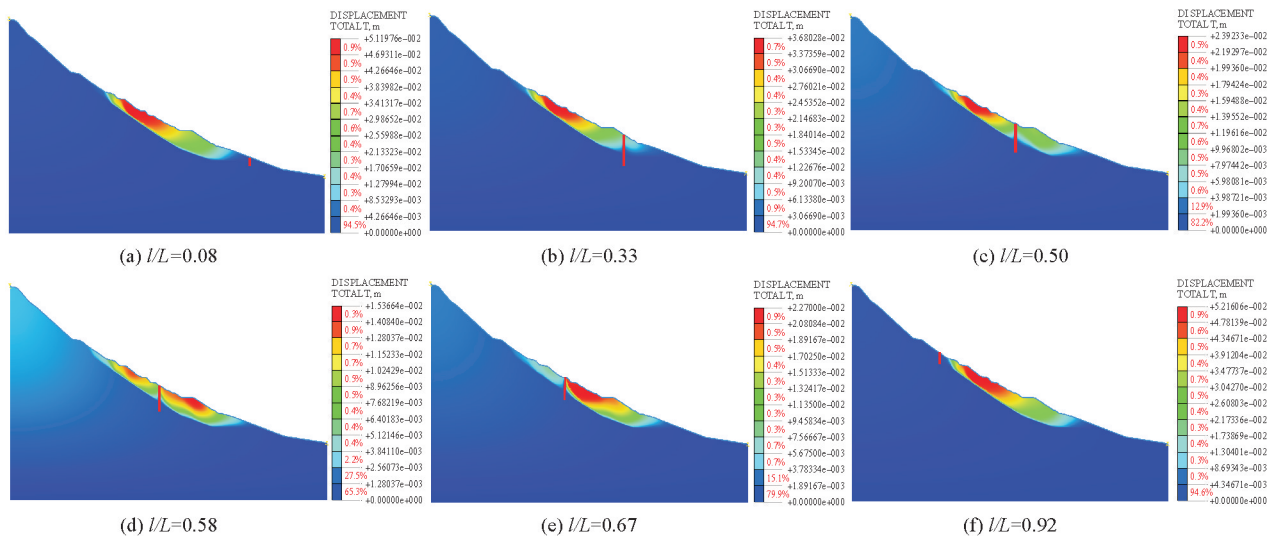


图 6 不同桩位推移式滑坡位移云图

由数值模拟分析可知,随着抗滑桩后移,坡体位移场范围及大小逐渐缩小,稳定性逐渐提高,直至  $l/L = 0.58$  位置处,滑坡稳定性最高,且此时坡体被抗滑桩分隔为 2 个位移发育区,坡体位移减小量最大。随着抗滑桩继续向后转移,桩后区域土体被抗滑桩有效限制,但桩前区域坡体位移不断发育,并逐渐在桩前形成新张拉破坏区域,抗滑桩支护效果逐渐降低。当抗滑桩的最优桩位布置在滑坡坡体中后部的位置 ( $l/L = 0.50 \sim 0.67$ ) 时,采用抗滑桩支护的防护作用是最好的。

##### 3.1.2 牵引式滑坡的抗滑桩加固分析

选取代表性桩位进行分析,牵引式抗滑桩加固分析如图 8、图 9 所示。

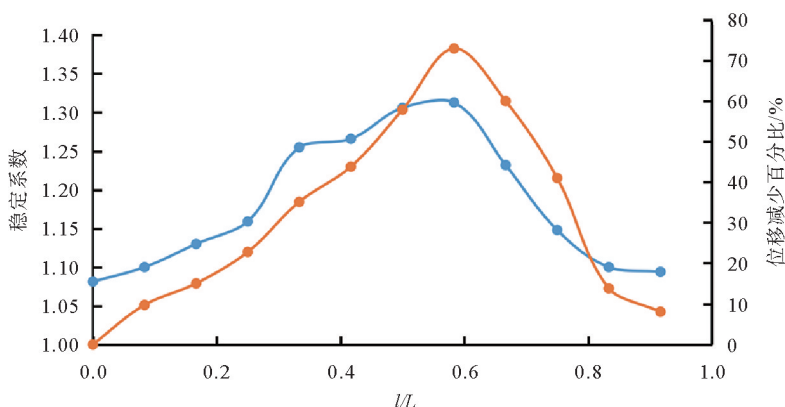


图 7 推移式滑坡稳定系数及最大位移折减曲线

—●— 稳定系数; —●— 位移减少百分比

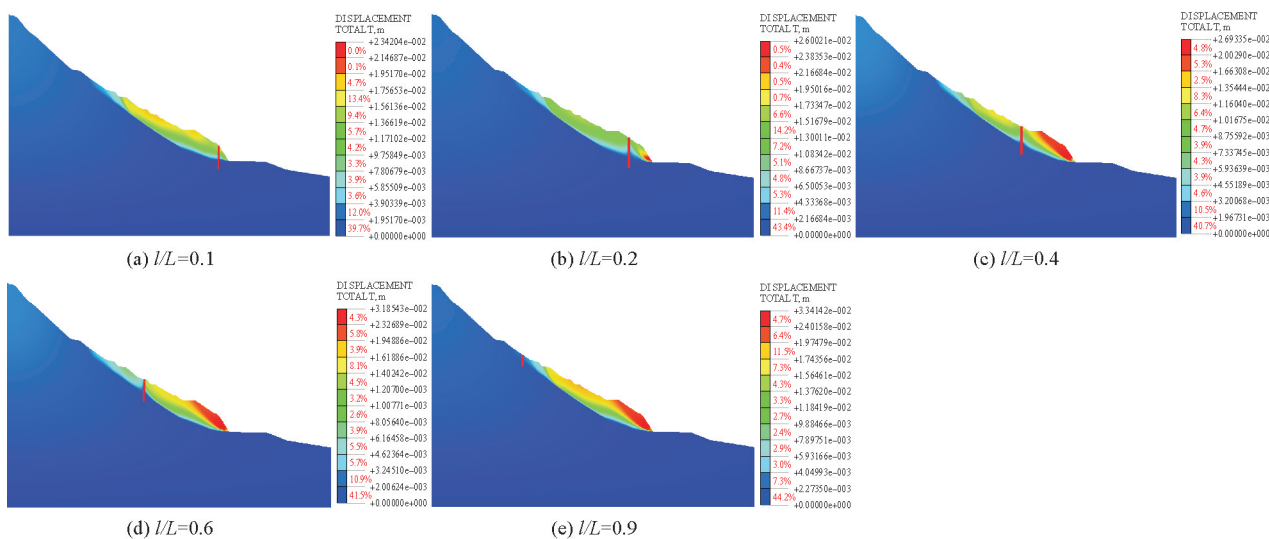


图 8 不同桩位牵引式滑坡位移云图

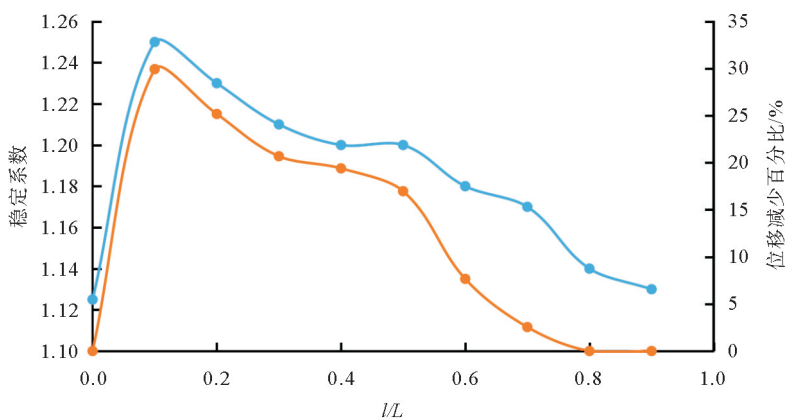


图 9 牵引式滑坡稳定系数及最大位移折减曲线

—●— 稳定系数; —●— 位移减少百分比

由数值模拟分析可知,随着抗滑桩后移,稳定性逐渐降低,滑坡前缘牵引段的位移场大小和范围不断增加,抗滑桩桩后区域位移场大小和范围逐渐减小,但由于牵引式滑坡首先在前缘发生破坏,当抗滑桩向后转移时,其对滑坡前缘的支挡效果逐渐减弱。抗滑桩的最优桩位布置在滑坡坡体前缘位置( $l/L =$

0.1~0.2)时可以有效提升滑坡的稳定性,此时抗滑桩支护效果最好。

### 3.1.3 复合式滑坡的抗滑桩加固分析

选取代表性桩位进行分析,复合式抗滑桩加固分析如图 10、图 11 所示。

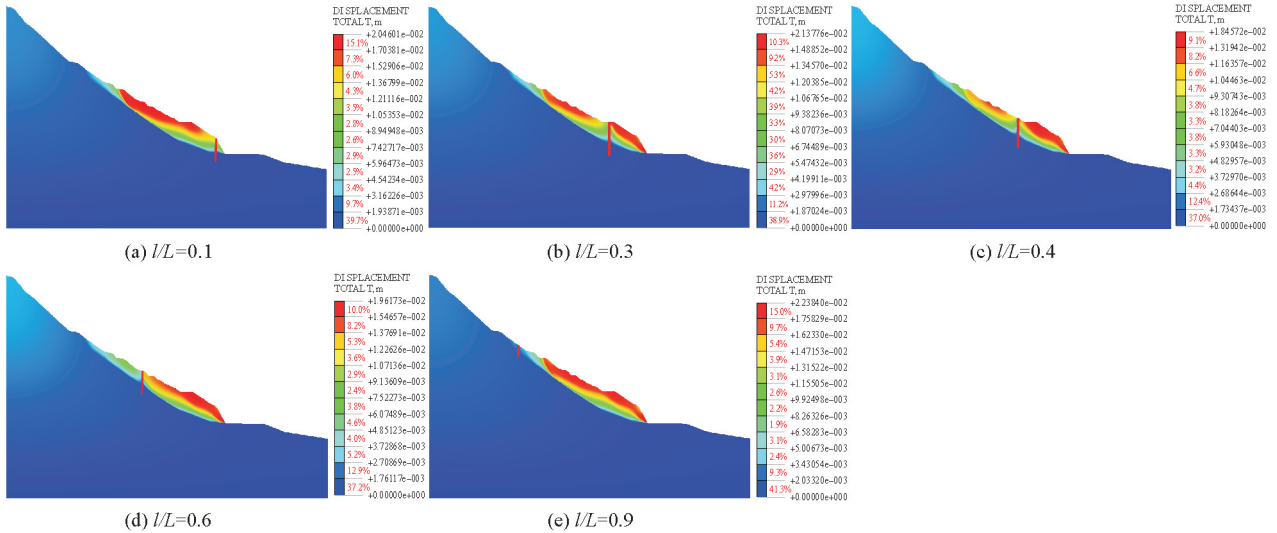


图 10 不同桩位复合式滑坡位移云图

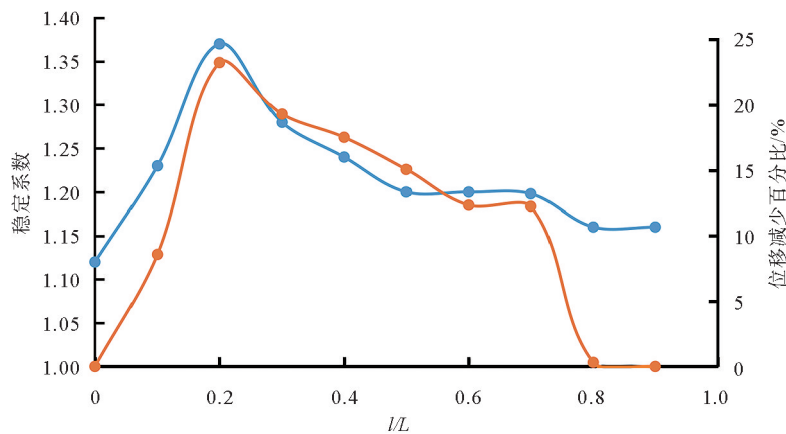


图 11 复合式滑坡稳定系数及最大位移折减曲线

—●— 稳定系数; —●— 位移减少百分比

由数值模拟分析可知,抗滑桩在不同桩位加固复合式滑坡时,当抗滑桩布设位置在滑坡前缘时,滑坡位移场主要集中在后缘区域,滑坡稳定性较高。随着抗滑桩从前缘向后转移,滑坡位移发育区域由桩后转移至桩前,并逐渐在桩前形成新复合式变形区域,稳定性逐渐降低,抗滑桩支护效果减弱,即抗滑桩的最优桩位布置在边坡坡体的中前部( $l/L=0.2\sim 0.4$ )时抗滑桩的支护效果最好。

## 3.2 不同桩位下坡体的滑裂面演化规律研究

### 3.2.1 抗滑桩加固推移式滑坡

由图 12 可以得出:在坡体前缘、后缘设置抗滑桩时,坡体滑裂面基本为一条完整的曲面,支护效果不佳。随着抗滑桩从前缘向坡中转移,滑裂面逐渐以抗滑桩为界被分为前后 2 个部分,滑裂面在  $l/L=0.58$  处较均匀地分开,此时,达到最优支护效果。伴随着抗滑桩桩位逐渐向边坡坡体的后方布置,桩位上方的滑裂面在不断减小,而其下方的滑裂面在不断变大,抗滑桩的支护效果又渐渐减小。

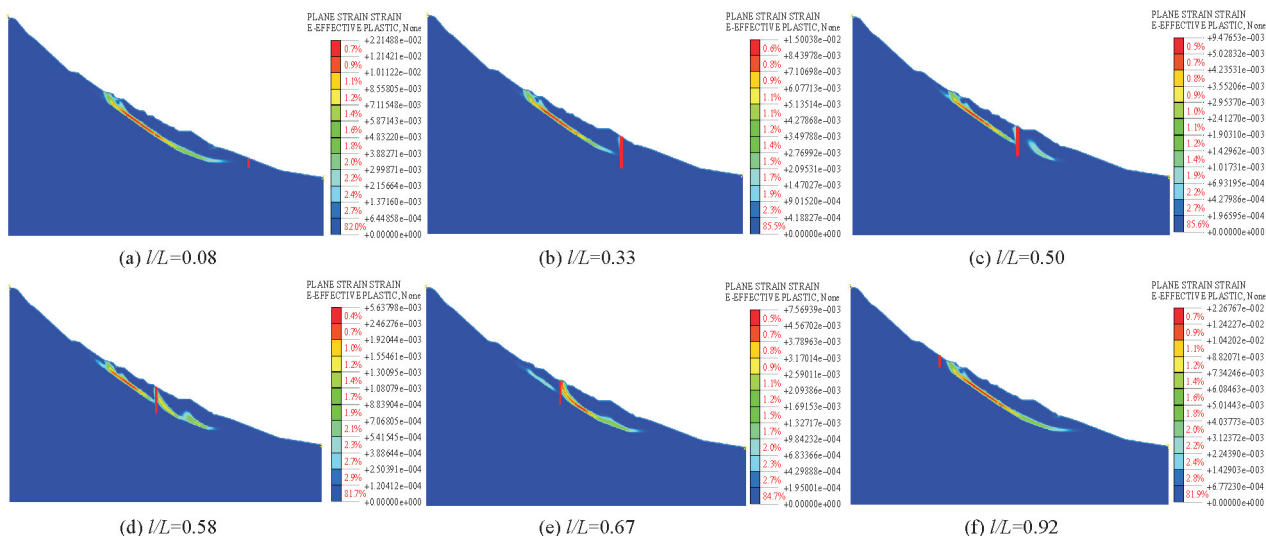


图 12 不同桩位推移式滑坡滑裂面发育

### 3.2.2 抗滑桩加固牵引式滑坡

由图 13 可以得出:在边坡坡脚( $l/L=0.1$ )处设置抗滑桩时,抗滑桩的阻挡使牵引式滑坡的滑裂面发育得不明显,此时抗滑桩的支护效果最好。随着抗滑桩向后转移,桩前形成前后相通的滑裂面,并在其下缘形成从坡脚开始向后发展到桩位处的整体滑裂面,抗滑桩的支撑作用逐渐减弱,趋于失效。

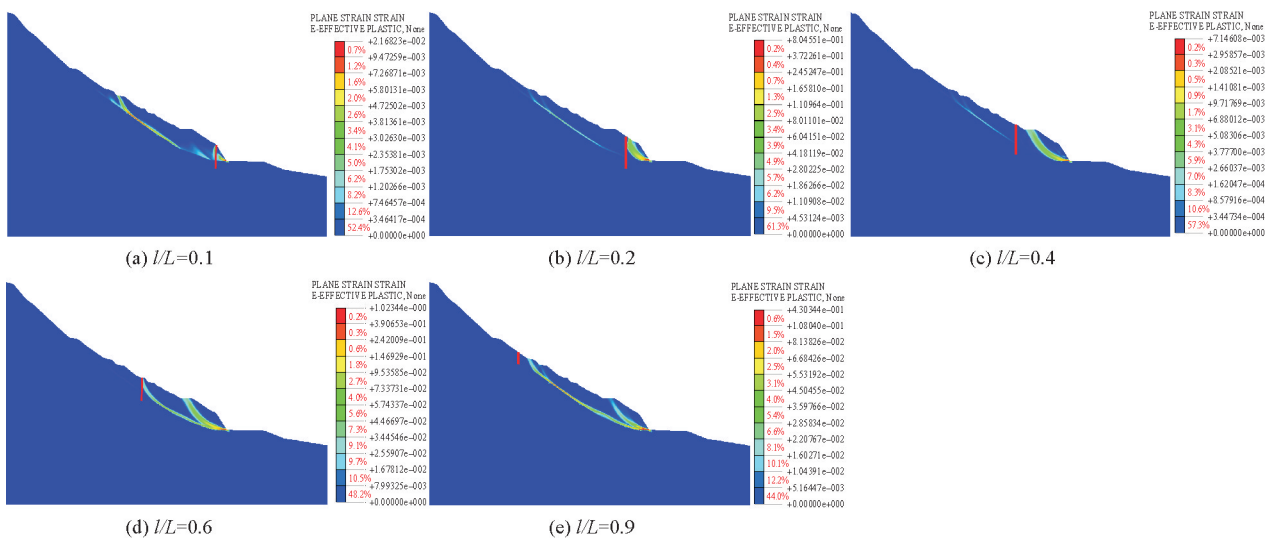


图 13 不同桩位牵引式滑坡滑裂面发育

### 3.2.3 抗滑桩加固复合式滑坡

由图 14 可以得出:如果抗滑桩桩位设置在滑坡前缘处( $l/L=0.2$ ),滑坡前缘滑裂面发育较不明显,但对后缘破裂面的限制较小。随着抗滑桩后移,前缘破裂面逐渐发育,滑坡后缘破裂面区域逐渐缩小。当抗滑桩移动到滑坡尾缘时,类似于牵引式滑坡,从坡脚向后延伸到抗滑桩位置的整体滑动面开始在坡脚下形成,因此抗滑桩的最佳加固位置位于滑坡的前缘。

## 4 抗滑桩加固最优桩位的确定

### 4.1 抗滑桩安全贡献参数的确定

在应用抗滑桩支护方式来加固边坡时,各抗滑桩的安全贡献值范围均满足稳定性要求;同时也改善了

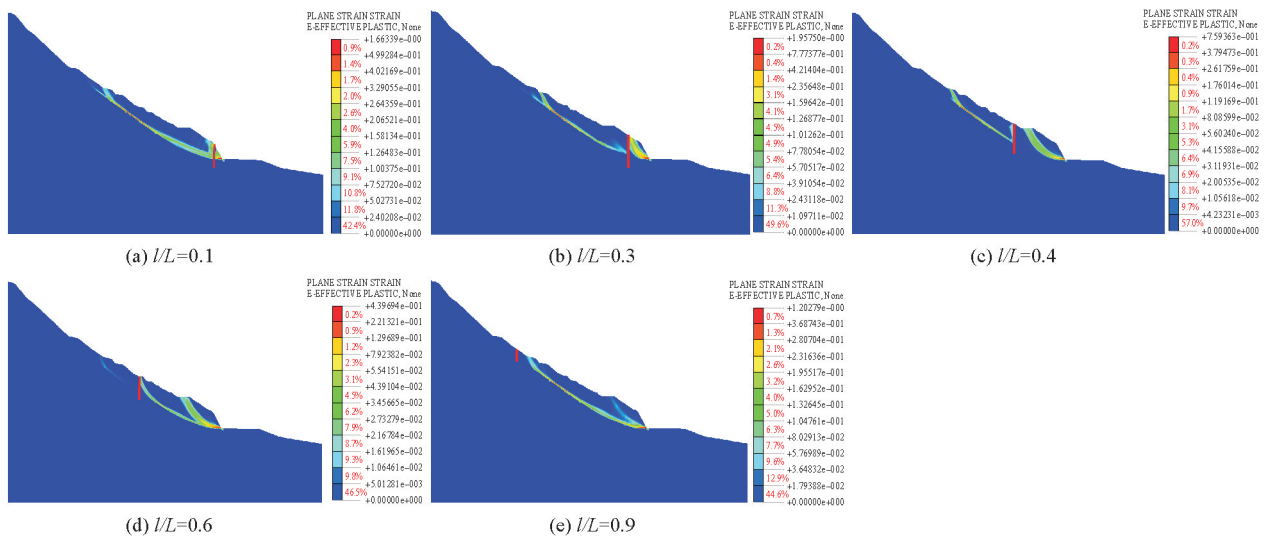


图 14 不同桩位复合式滑坡滑裂面发育

边坡的稳定性,提高了抗滑桩加固前后边坡稳定系数差  $\Delta K$ 。当不一样大小的抗滑桩能够让边坡具有相同的稳定系数时,抗滑桩的体积越小,那么它的安全贡献越大,即抗滑桩的安全贡献和抗滑桩的体积成反比关系。据此对安全贡献度做出如下定义:支护范围内单位体积抗滑桩使滑坡稳定系数提高的贡献量,公式如下:

$$K^* = \frac{\Delta K S}{abl^*} \quad (1)$$

式中: $K^*$  为安全贡献度; $\Delta K$  为抗滑桩加固前后边坡稳定系数之差; $S$  为桩间距,  $m$ ;  $a$  为桩截面长度,  $m$ ;  $b$  为桩截面宽度,  $m$ ;  $l^*$  为桩的长度,  $m$ 。

文献[16]在滑坡中布设了 6 个桩位,抗滑桩间距为 4 m,抗滑桩截面尺寸为 2 m×3 m,滑坡无桩时稳定系数为 1.02,根据式(1)可以求得各桩位抗滑桩安全贡献度如表 3 所示。

表 3 抗滑桩安全贡献度计算结果

项目	桩位 1	桩位 2	桩位 3	桩位 4	桩位 5	桩位 6
稳定系数	1.185	1.190	1.195	1.345	1.350	1.205
抗滑桩安全贡献度	0.0103	0.0059	0.0049	0.0085	0.0083	0.0058

根据抗滑桩安全贡献度计算结果可以确定出抗滑桩最优桩位为桩位 1,与文献[16]确定结果一致,此结果表明,该参数能够在抗滑桩设计过程中优化抗滑桩的设计参数,从而以最小的设计成本确定满足工程要求的方案。

#### 4.2 不同变形类型滑坡最优桩位选择

将章节 3 中的计算结果代入式(1),计算出不同工况下各个桩位的抗滑桩安全贡献度,并将其绘制成曲线,如图 15—17 所示。从图中可以看出:抗滑桩安全贡献度的变化趋势与对应的稳定系数变化趋势是相同的。推移式滑坡在采用抗滑桩加固时,随着抗滑桩桩位设置后移,

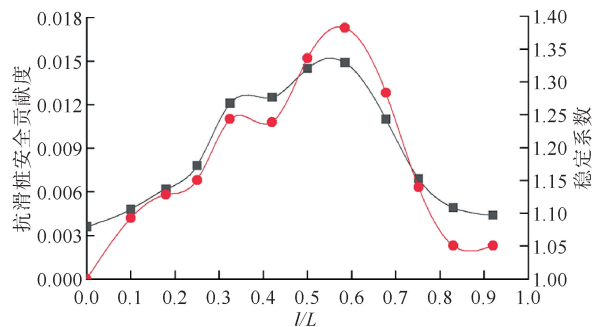


图 15 推移式滑坡抗滑桩安全贡献度与稳定系数曲线  
 ■ 稳定系数; ● 抗滑桩安全贡献度

其安全贡献度出现了先变大后变小的趋势,在中后缘  $l/L=0.58$  处时达到最大安全贡献度,边坡的中后部为抗滑桩最优桩位位置,此结论与文献[17]中一致。牵引式滑坡在采用抗滑桩加固时,其安全贡献度在边坡的  $l/L=0.1$  处为最大值,随着抗滑桩桩位后移,其安全贡献度逐渐减小,支护效果逐渐减弱,故抗滑桩最优桩位在边坡坡脚处,与文献[18]中结论一致。复合式滑坡采用抗滑桩支护方式时,在边坡的  $l/L=0.2$  处时安全贡献度最大,伴随着抗滑桩桩位后移,对应的安全贡献度急速变小,同时抗滑桩桩位对边坡坡脚的支护作用也在变小,当抗滑桩桩位向后移动至边坡中后缘时,对应的安全贡献度更小,此时抗滑桩的支挡效果不佳,所以复合式滑坡的最优桩位在边坡前缘,这与文献[19]计算结果一致。

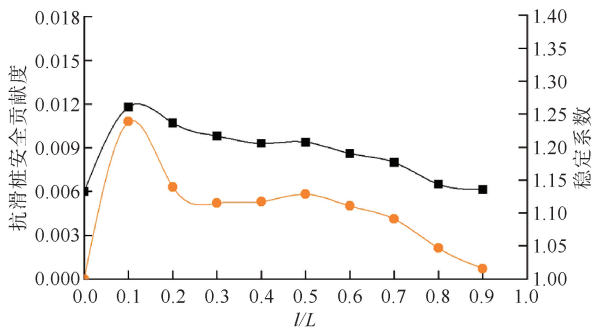


图16 牵引式滑坡抗滑桩安全贡献度与稳定系数曲线  
—■— 稳定系数; —●— 抗滑桩安全贡献度

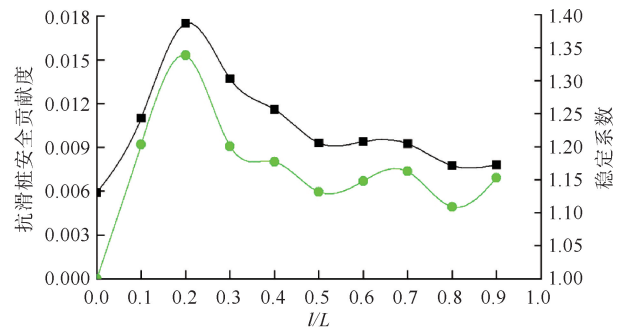


图17 复合式滑坡抗滑桩安全贡献度与稳定系数曲线  
—■— 稳定系数; —●— 抗滑桩安全贡献度

## 5 结论

本文设计了推移式、牵引式、复合式3种工况,定义  $l/L$  为抗滑桩布设位置距坡脚长度与滑坡长度之比值,采用 Midas GTS NX 有限元软件建立抗滑桩支护模型,通过抗滑桩安全贡献度这一参数分析出不同桩位下滑坡的位移量、塑性区以及稳定性等变化,得出以下结论:

- 1) 推移式滑坡采用抗滑桩加固时,边坡的稳定系数及其最大位移折减曲线随  $l/L$  的变大出现先大后小的抛物线趋势,在边坡的中后缘( $l/L=0.58$ )处最大,此时的抗滑桩支护效果最优;
- 2) 牵引式滑坡采用抗滑桩加固时,边坡的稳定系数及其最大位移折减曲线在边坡的坡脚( $l/L=0.1$ )时最大,抗滑桩有效地阻挡了破裂面,抗滑桩支护方式的效果也得到最大程度展现,同时抗滑桩桩位设置距离坡脚越远,相对应它的支护效果越低;
- 3) 复合式滑坡采用抗滑桩加固时,稳定系数及最大位移折减曲线与牵引式滑坡相似,在前缘( $l/L=0.2$ )时最大,抗滑桩桩位设在边坡坡体中后缘时,可以有效限制边坡后缘的变形破坏,然而,边坡前缘牵引段的坡体稳定状态不能被抗滑桩加强。
- 4) 通过联合抗滑桩支护方式的支护效果和工程造价,提出了抗滑桩的安全贡献度,依据定义评价抗滑桩支护效果,从而推导得出推移式滑坡的最优桩位位于边坡的坡体中后缘( $l/L=0.58$ 附近),牵引式滑坡的最优桩位位于边坡的前缘( $l/L=0.1$ ),复合式滑坡的最优桩位位于边坡的前部( $l/L=0.2$ )。

### 参考文献(References):

- [1] ELLIS A E, DURRANI K I, REDDISH J D. Numerical modelling of discrete pile rows for slope stability and generic guidance for design[J]. Géotechnique, 2010, 60(3):185-195.
- [2] 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.
- [3] ITO T, MATSUI T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. Soils and Foundations, 1975, 15(4):43-59.
- [4] WANG H, WANG P, QIN H, et al. Method to control the deformation of anti-slide piles in Zhenzilin Landslide[J]. Applied Sciences, 2020, 10(8):28-31.

- [5] ZHONG W, YANG T, HE N, et al. Load-computational methods of anti-slide piles[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(9): 8529-8539.
- [6] NIAN T K, CHEN G Q, YANG Q, et al. Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in nonhomogeneous and anisotropic soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(8): 1092-1103.
- [7] 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.
- [8] PAN J Q, WANG Z Y, DONG T X, et al. Analysis on the best position and the pile distance of anti-slide pile of reinforced soil slope[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 61(1): 012107.
- [9] SUN F, KONG J M, CAI Q, et al. The dynamic responses of anti-slide piles reinforced in the rubble soil landslide[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 99/100: 379-382.
- [10] ZHANG S F, LI C, QI H, et al. Soil arch evolution characteristics and parametric analysis of slope anchored anti-slide pile[J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(11): 4121-4132.
- [11] LIU X Y, CAI G J, LIU L L, et al. Investigation of internal force of anti-slide pile on landslides considering the actual distribution of soil resistance acting on anti-slide piles[J]. *Natural Hazards: Journal of the International Society*, 2020, 102: 1369-1392.
- [12] 杨傲. 桩土共同作用的抗滑桩加固边坡稳定性分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.  
YANG Ao. The stability analysis of slope stability of pile soil is reinforced by pile soil[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- [13] CAI F, KEIZO U. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles[J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(1): 73-84.
- [14] 高长胜, 魏汝龙, 陈生水. 抗滑桩加固边坡变形破坏特性离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(1): 145-148.  
GAO Changsheng, WEI Rulong, CHEN Shengshui. Centrifugal model tests on deformation of slopes reinforced with piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(1): 145-148.
- [15] GB 50330—2013, 建筑边坡工程技术规范[S].  
GB 50330—2013, Technical code for building slope engineering[S].
- [16] 雷文杰. 沉埋桩加固滑坡体的有限元设计方法与大型物理模型试验研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2006.  
LEI Wenjie. Study on design method of deeply buried piles stabilizing slides and large scaled model tests[D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [17] 杨光华, 张有祥, 张玉成, 等. 基于边坡变形场的抗滑桩最优加固位置探讨[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(S1): 8-13.  
YANG Guanghua, ZHANG Youxiang, ZHANG Yucheng, et al. Optimal site of anti-landslide piles based on deformation field of slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(S1): 8-13.
- [18] 代祥. 库岸滑坡治理抗滑桩内力分析及数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.  
DAI Xiang. Internal force analysis and numerical simulation of anti-slide pile in reservoir bank landslide[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.
- [19] 谭福林. 基于不同演化模式的滑坡-抗滑桩体系动态稳定性评价方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.  
TAN Fulin. Evaluation method for dynamic stability of landslide stabilizing pile system with different evolution models[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)