

DOI: 10.11779/CJGE2014S2029

# 基坑滑坡治理中钢管微型桩简化计算方法研究

贺永强<sup>1</sup>, 杨仕教<sup>1\*</sup>, 罗辉<sup>2</sup>, 陈荣<sup>3</sup>

(1. 南华大学核资源工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湖南雁能设计研究院有限公司岩土设计研究中心, 湖南 衡阳 421001;

3. 南华大学环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 为适应基坑滑坡抢险工程临时稳定性和时间紧迫性需要, 在分析钢管微型桩作用基础上, 提出了一种钢管微型桩简化设计计算方法。将该方法应用于衡阳某基坑滑坡抢险工程设计中, 并利用二维岩土有限元分析软件 Soilworks 对设计方案进行有限元模拟, 验证设计方案的可行性。布置三个位移监测点对治理方案进行 2 个月的现场监测, 现场监测反馈治理效果表明: 建立的钢管微型桩简化设计计算方法用于基坑抢险工程设计是可行的。该方法简单实用, 对后续类似基坑抢险工程设计具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 微型桩; 钢管; 滑坡; 数值模拟; 位移监测

**中图分类号:** TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0174-06

**作者简介:** 贺永强(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程勘察设计与岩土工程灾害治理与研究工作。E-mail: heyongqiang4630@163.com。

## Simplified method for steel micropiles in treatment of excavation landslide

HE Yong-qiang<sup>1</sup>, YANG Shi-jiao<sup>1</sup>, LUO Hui<sup>2</sup>, CHEN Rong<sup>3</sup>

(1. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Geotechnical Engineering Research

Center, Hunan Yanneng Design Studies Ltd., Hengyang 421001, China; 3. School of Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** In order to meet the need of temporary stability and urgency of rescue project of excavation landslide, a simplified method is proposed for micropile design on the basis of the analysis of the role and the existing researches on micropiles. The approach is applied to the design in rescue project of excavation landslide in Hengyang, and the finite element simulation is carried out by using two-dimensional geotechnical analysis software Soilworks to verify the feasibility of the program. Three displacement monitoring points are arranged to monitor the treatment program for two months in the field. The treatment effect of field monitoring feedback shows that the proposed simplified method for steel micropiles is feasible. It is simple and practical, and it has good reference and guidance for the design other similar rescue projects.

**Key words:** micropile; steel pipe; landslide; numerical simulation; displacement monitoring

## 0 引言

基坑和边坡滑坡是一种常见的岩土工程灾害, 造成巨大生命财产损失和工期延长。钢管微型桩作为滑坡治理中一种新型有效处理方式, 因其施工工艺简单方便, 造价低, 施工条件受限小和快速控制滑坡等优点, 在工程应用中成为工程师治理滑坡<sup>[1-4]</sup>和边坡加固<sup>[5-7]</sup>常用处理方式。微型桩整治滑坡作用显著, 研究表明可以提高滑坡稳定性达到 26%<sup>[8]</sup>之多。

自 20 世纪 30 年代意大利的 Lizzi<sup>[9]</sup>首创了树根桩, 国内外学者在微型桩应用和研究中取得了较多研究成果和工程经验。数值模拟方面, 黄俊等<sup>[10]</sup>通过建立微型桩三维有限元数值分析模型, 探讨桩长、桩径、二

次注浆和水平荷载等因素对微型桩抗拔性能的影响规律。陈正等<sup>[11]</sup>运用有限元软件 ABAQUS 对现场柔性微型桩(长径比一般大于 50 左右)试验进行数值模拟, 探讨了微型桩在水平荷载作用下的工作性能。辛建平<sup>[12]</sup>将强度折减法与有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>相结合, 对同一排内均匀布置且具有纵向连系梁的微型桩进行数值分析, 得到了 3 排微型桩在破坏前不同滑坡推力下的内力分布规律。采用数值分析方法研究微型桩性质较为便捷, 但是由于岩土体本构方程缺陷及材料参数变异性, 建立一个符合实际情况的数值模型对结果

收稿日期: 2014-07-28

\*通讯作者

的可靠性尤为重要。模型试验方面, 闫金凯等<sup>[13]</sup>通过开展微型桩与滑坡相互作用的大型物理模型试验, 总结滑坡作用下微型桩的性状, 在试验结果的基础上提出一种微型桩防治滑坡的设计方法。陈强等<sup>[14]</sup>为探讨钢管微型桩对滑坡的加固机理, 通过离心模型试验, 分别从坡顶位移、坡面位移及坡内部位移分析了注浆钢管微型桩对滑坡的控制效果, 并讨论了钢管微型桩的受力特征。模型试验能够较真实的反应微型桩的性质, 模型比较大, 因此费时费力。设计计算理论方面, 丁光文<sup>[15]</sup>在分析微型桩加固机理的基础上, 介绍了微型桩的计算方法。周德培等<sup>[16]</sup>按照桩-土相互作用原则, 讨论了其中一种组合结构的抗滑机制, 并按照横向约束的弹性地基梁法提出了设计计算理论, 结合具体工程给出了设计计算方法。

综上所述, 微型桩的工作特性和计算理论研究滞后于工程应用, 限制其推广应用。相对于抗滑桩等传统支护措施, 微型桩的理论尚无一套完整成熟的计算理论, 在实践应用中多采用经验进行设计, 不能有效保障治理效果。本文在现有研究理论基础上, 提出一种适用于基坑滑坡抢险时间紧、安全可靠等要求的简化计算方法, 将该方法应用于衡阳某基坑滑坡抢险工程设计中, 并对设计方案进行有限元模拟, 以验证简化计算方法的可行性。现场监测反馈结果表明, 这种简化计算方法在基坑抢险工程中是可行的。

## 1 滑坡治理中钢管微型桩作用

作为一种新型抗滑支挡结构, 钢管微型桩在滑坡治理中的作用主要表现为:

(1) 增加滑面处抗剪能力: 钢管微型桩需进入滑面以下稳定地层一定深度, 从单根微型桩分析相当于抗滑桩, 与滑面共同作用, 抵抗滑坡体剩余下滑力, 增加了滑坡体的抗滑移能力。

(2) 改善土体力学性质: 在钢管桩周设置适量的注浆孔, 通过适当压力注浆可以将浆体与周围的松散土层形成一个复合体, 提高滑坡体的抗剪强度参数和变形能力, 间接改善了滑裂面的抗滑移能力。

(3) 阻渗作用: 通过压力注浆, 水泥浆体挤密渗透, 土体孔隙减少, 土体变得密实, 减小孔隙水压力, 阻隔地下水的渗透破坏。

(4) 整体抗滑作用: 在滑坡治理中采用单排钢管的情况较少, 多采用多排微型抗滑桩, 桩与桩之间间距较小, 加上桩顶连系梁的作用, 形成了一个空间刚架体系, 将桩间的岩土体和微型钢管桩体系视为一个整体, 外荷载由桩-土复合结构承担, 受力状态类似于挡土墙, 将不稳定滑坡体作用力传递到滑面以下稳定

地层中。钢管微型桩在岩土内的空间组合形成复合结构的骨架, 该结构具有较大的刚度和强度, 可承受较大的弯矩和剪力, 同时对桩间滑坡土体变形起约束作用, 提高滑坡体的整体稳定性。

## 2 钢管微型桩简化计算方法

### 2.1 滑坡抢险微型桩设计计算内容

基坑滑坡抢险任务, 首要目的是使滑坡体最快由欠稳定状态处于稳定状态, 避免对周边环境和工程施工造成影响。采用微型桩抢险设计主要内容包括: ①滑裂面参数确定; ②计算滑坡推力; ③微型桩桩间距、排距、排数和桩长计算。

其中滑裂面参数确定和滑坡推力计算按照 2.2 和 3.3 常规计算方法利用 Excel 等计算工具不会有过于冗长的计算。微型桩的设计计算有学者<sup>[15-16]</sup>进行过研究, 主要满足永久性工程可靠度要求高的需要, 计算较为复杂。笔者根据基坑滑坡抢险临时稳定性和时间紧迫性的特点在 2.4 中对其计算进行了简化计算。

### 2.2 利用反算法确定滑裂面参数

滑裂面参数反算是根据滑坡体变形特点和工程经验确定其现状稳定系数, 再根据稳定性验算公式建立方程反算求解。实际工程中, 因为摩擦角的变化幅度较小, 一般先假定内摩擦角  $\varphi$  反算内聚力  $c$ , 计算公式如下:

$$c = \frac{K_s \sum W_i \sin \alpha_i - \tan \varphi \sum W_i \cos \alpha_i}{L} \quad (1)$$

式中,  $W_i$  为  $i$  块滑体的重量,  $\alpha_i$  为各条块滑面与水平面的夹角,  $K_s$  为安全系数, 根据滑坡稳定状态确定。暂时稳定取 1.05~1.5, 临界稳定状态取 0.95~1.0。

### 2.3 滑坡推力计算

桩后滑坡推力计算最常用方法是按照传递系数法计算, 表达式如下:

$$P_i = P_{i-1} \psi + K_s T_i - R_i \quad (2)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i \quad (3)$$

$$R_i = W_i (\cos \alpha_i + A \sin \alpha_i) + c_i L_i \quad (4)$$

$$\psi = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i \quad (5)$$

式中  $P_i$  为  $i$  条块的推力(kN/m);  $P_{i-1}$  为第  $i-1$  条块的推力(kN/m);  $T_i$  计为  $i$  条块的下滑力(kN/m);  $R_i$  计为  $i$  条块的抗滑力(kN/m);  $\psi$  为传递系数;  $K_s$  为设计的安全系数;  $L_i$  为第  $i$  条块的滑面长度(m)。

### 2.4 微型桩参数简化计算

(1) 微型桩横向间距常见计算方法是塑性体受阻的绕流法和土拱效应, 保证两桩间的土体不被挤出。现有的研究中, 对较破碎的碎石土、砂性土、碎裂和散体结构的岩土体, 此时得出的两种结果基本相同。

从理论分析和工程经验角度, 提出桩间距可按 1.5~3.5 倍桩径考虑, 岩土好时取上限值, 差时取下限值<sup>[16]</sup>。

(2) 微型桩排距受约束较小, 可以考虑钢管注浆浆液加固半径, 尽量保证加固范围重合面积最小, 使改善滑坡土体的范围最大。

(3) 微型桩的破坏被认为是滑面处弯剪能力不足引起<sup>[13]</sup>, 且微型桩所受剪切作用远远大于拉压作用, 偏于安全考虑, 忽略微型桩砂浆的抗剪作用, 认为滑坡推力全部由钢管的抗剪力承担, 从而可以确定所用钢管微型桩的排数  $n$ :

$$n = \frac{P \times L_h \times 1000}{[\tau] \times A} \quad (6)$$

式中  $P$  为滑坡设桩处剩余下滑力 (kN/m),  $L_h$  为微型桩横向间距 (m);  $[\tau]$  为钢管抗剪强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>);  $A$  为钢管截面面积 (mm<sup>2</sup>)。

(4) 微型桩桩长包括滑面以上桩长和滑面以下锚固桩长。锚固桩长确定多按照土钉类似的抗拔承载力验算确定。常规方法是根据结构力学基本理论把微型桩简化一个刚架结构, 再把滑坡推力进行人为简化作用到微型桩上得到微型桩轴向拉力设计值。这样能够较能全面了解微型桩结构内力, 但是对简化模型和荷载可靠度要求较高, 有时简化效果并不是很理想。受锚杆传统设计方法启发, 设计微型桩时认为钢管抗拉设计值、钢管与锚固体之间抗拔力、锚固体与土体之间抗拔力三者同时达到极限值, 可按照下可确定最小桩锚固深度:

$$L_{a1} = \frac{N}{\xi_1 \pi D f_b} \quad (7)$$

$$L_{a2} = \frac{N}{\xi_2 \pi d f_{rb}} \quad (8)$$

式中  $L_{a1}$  为钢管与锚固砂浆间的锚固长度 (m);  $N$  为钢管设计抗拉力 (kN);  $\xi_1$  为钢管与砂浆黏结强度工作条件系数, 临时性可取 0.72;  $D$  为钢管直径 (m);  $f_b$  为钢管锚固砂浆间的黏结强度设计值 (kPa);  $L_{a2}$  为锚固体与稳定地层锚固长度 (m);  $\xi_2$  为锚固体与地层黏结工作条件系数, 临时性可取 1.33;  $d$  为微型桩直径;  $f_{rb}$  为地层与锚固体黏结强度特征值 (kPa)。

### 3 工程实例

#### 3.1 工程概况

衡阳市某大厦基坑位于华源路北侧, 交通便利。拟建地下室一层, 基坑开挖深度约 5.6 m, 原设计采用土钉支护方式。施工未按照设计要求分层开挖施工土钉, 一次性开挖到基坑底部后才施工土钉。

2014 年 1 月, 项目部在施工基坑 BC 段土钉时,

钻孔后未及时注浆, 基坑外侧地下排污水管破裂导致污水渗入基坑, 形成水流, 直接导致该段发生牵引式滑塌。滑塌平面图如图 1 所示。

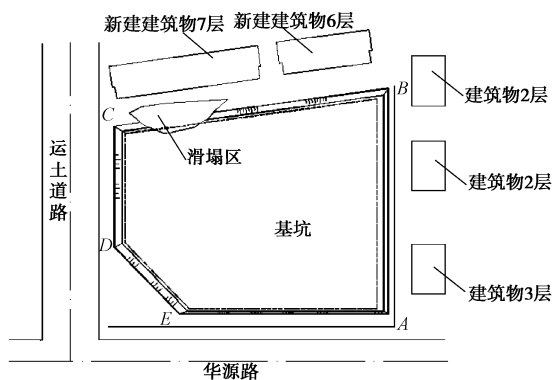


图 1 基坑坍塌平面图

Fig. 1 Plan of pit collapse

#### 3.2 治理方案设计计算

基坑滑坡段外侧有栋新建 7 层建筑物, 框混结构, 采用预应力管桩基础, 基础埋深约 9.5 m。现场测量, 建筑物外边线距离坡顶张拉裂缝位置处约 4.5 m, 为尽快控制滑坡影响程度, 降低滑坡带来的损失, 保障原有建筑物安全和工程顺利进行, 抢险方案采用微型桩。

根据现场裂缝情况确定滑裂面, 采用式 (1)~(5) 对滑坡设桩处的推力进行计算, 计算值为 232.8 kN/m。设计采用钻孔直径  $D$  为 130 mm 的微型桩, 内插 Q235 钢管直径  $d$  为 45 mm, 壁厚为  $\delta=3$  mm, 抗剪强度设计值为 115 N/mm<sup>2</sup>, 抗拉强度设计值为 200 N/mm<sup>2</sup>。滑坡体基本为杂填土, 考虑钢管注浆对填土性质提高效果明显, 则桩横向间距为  $L_h=3.5 \times 130=455$  mm, 取 500 mm。则每排桩所承受的推力为  $232.8 \times 0.5=116.4$  kN。

微型桩的排数  $n=116.4 \times 1000 / (115 \times 395.64) = 2.56$ , 取整  $n=3$ 。根据以往相关工程经验, 采用 0.2~0.3 MPa 注浆压力作用下, 杂填土中浆液影响半径可以达到 0.8~1.2 m, 所以钢管微型桩排距取 0.8 m。

不考虑微型桩中砂浆抗拉作用, 单根钢管的抗拉力设计值为  $N=395.64 \times 200=79.128$  kN。设计采用 M25 水泥砂浆, 则  $f_b$  为 2100 kPa, 按式 (7) 计算钢管与砂浆锚固长度  $L_{a1}$  所得结果小于 0.5 m。杂填土、粉砂、强风化泥岩与锚固体黏结强度特征值分别 16, 28, 80 kPa。设桩处杂填土稳定层厚约 1.7 m, 提供的抗拔力为 14.77 kN。粉砂层厚约 3.3 m, 提供的抗拔力为 50.16 kN。则微型桩进入强风化泥岩锚固长度为 0.33 m。可计算锚固体与稳定地层的锚固长度  $L_{a2}$  为

1.7+3.3+0.33=5.33 m。综上计算桩锚固长度至少取 5.76 m, 设桩处滑裂面以上桩长约为 2.6 m, 则桩长为 7.93 m, 为了施工下料方便, 桩长取值 9 m。桩与桩之间采用直径为 25 mm 的钢筋焊接连接, 治理方案剖面图如图 2 所示。

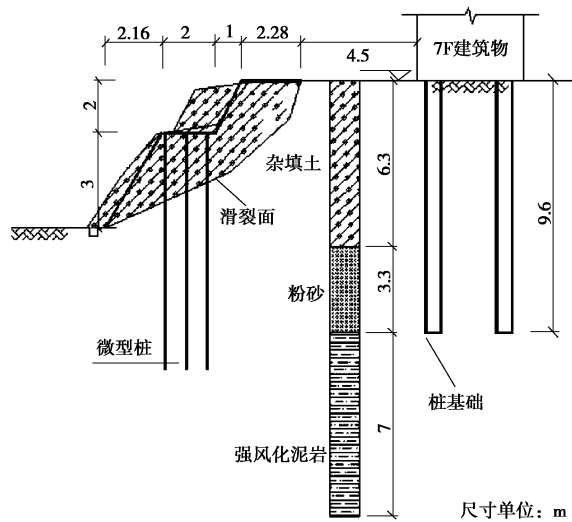


图 2 基坑坍塌治理剖面图

Fig. 2 Treatment profile of pit collapse

3.3 治理方案数值模拟

为了验证简化计算方法可行性, 利用二维有限元岩土软件 Soilworks 建立有限元模型对设计方案进行了有限元模拟。

(1) 计算模型

有限元模拟的可靠性一定程度上取决于所选取的计算模型。根据滑坡范围, 建立 30 m×16 m 的二维有限元模型。所建立的钢管微型桩模型 (见图 3)。由于建筑物基础采用预应力管桩基础持力层为风化岩大于基坑深度, 房屋荷载对模型影响较小, 所以模拟未考虑其作用。

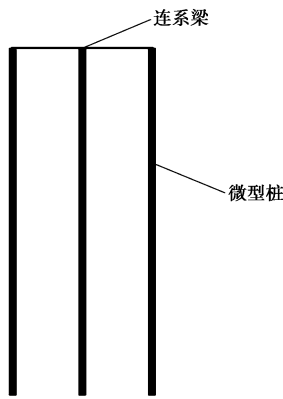


图 3 微型桩模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram for micropile model

Soilworks 具有智能生成面、智能划分网格等高级

网格划分的功能, 建模方便。数值单元总 1223 单元, 单元网格划分如图 4 所示。

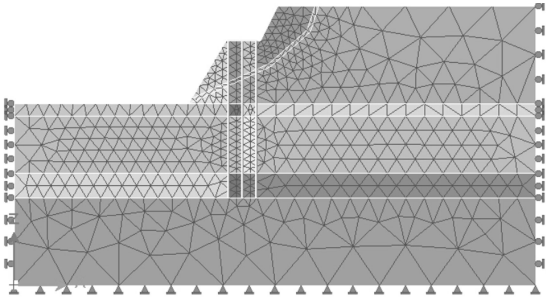


图 4 计算模型网格

Fig. 4 Mesh of computational model

(2) 计算参数

有限元模拟采用的岩土体参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

岩土体名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比
杂填土	18.3	8.0	10	8	0.30
粉砂	19.5	0	25	27	0.28
强风化泥岩	22.5	38.0	34	80	0.25
滑裂面土体	18.3	6.5	5	6	0.35

(3) 模拟结果与分析

利用 Soilworks 模拟设计方案, 主要是为了分析微型桩所受的剪力及对滑裂面的阻隔作用, 选择性截取微型桩所受剪力云图 (图 5) 和模型最大剪切应变云图 (图 6)。

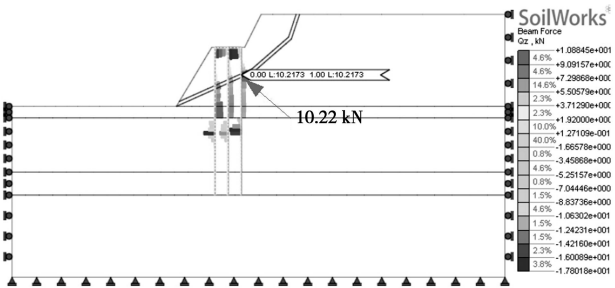


图 5 微型桩剪力云图

Fig. 5 Shear contours of micropile

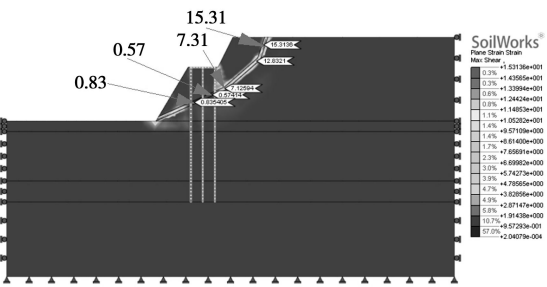


图 6 最大剪切应变云图

Fig. 6 Contours of maximum shear strain

从模拟结果(图5)来看,微型桩剪力设计值45.5 kN,而微型桩所受的剪力最大值10.22 kN,相当于设计值的22.5%,偏于安全。从图6可以看出,在微型桩加固范围内,最大剪切为0.57~0.83,未加固滑裂面最大剪切应变为7.13~15.31,两者相差约8.6~26.8倍,说明微型桩、桩间连系梁及桩间土体形成一个有效整体共同阻隔滑裂面,起到治理滑坡的作用。

### 3.4 监测结果

为了反馈微型桩设计方案治理滑坡效果,在治理方案施工完成后在桩顶平台设置了三个水平位移和竖向位移监测点,从2014年1月30日至2014年3月30日,共监测了15次,水平位移最大值为67.2 mm,竖向位移最大值为40.8 mm。桩前土方清理完成后也没有显著的大变形。说明滑坡趋于稳定,治理效果较好。

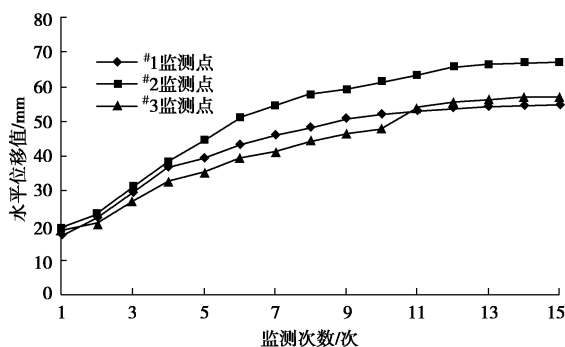


图7 水平位移监测数据

Fig. 7 Monitoring data of horizontal displacement

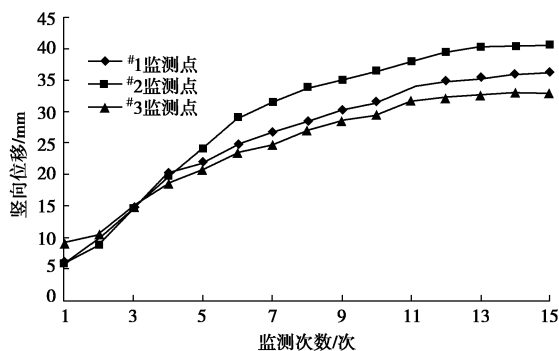


图8 竖向位移监测数据

Fig. 8 Monitoring data of vertical displacement

## 4 结 论

本文为满足基坑滑坡抢险工程临时稳定性和时间紧迫性需要,根据现有研究成果,提出一种简化计算方法,可得出以下3点结论。

(1)根据有限元模拟和现场监测反馈的结果,提出的简化计算方法在基坑抢险工程中是可行的,对后续类似抢险工程具有借鉴意义。

(2)从监测结果可知,钢管微型桩是一种柔性支护结构,开始位移变化速率较大,但是随着变形增加,位移变化速率逐渐降低,最终位移达到稳定值。

(3)通过对基坑滑坡抢险设计方案的研究,建议在分析滑坡抢险方案时除采用简化的计算方法,可结合有限元软件对方案进行验算分析,相互验证,施工过程中加强监测,为后期类似工程的设计施工总结经验。

### 参考文献:

- [1] 谢晓华, 刘吉福, 庞奇思. 微型桩在某滑坡处治工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2001(2): 110 - 111. (XIE Xiao-hua, LIU Ji-fu, PANG Qi-si. Application of micropiling in a landslide treatment engineering[J]. West China Exploration Engineering, 2001(2): 110 - 111. (in Chinese))
- [2] 朱宝龙, 胡厚田, 张玉芳, 等. 钢管压力注浆型抗滑挡墙在京珠高速公路 K108 滑坡治理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 399 - 405. (ZHU Bao-long, HU Hou-tian, ZHANG Yu-fang, et al. Application of steel-tube bored grouting anti-slide retaining wall to treatment of landslide K108 in Beijing-Zhuhai expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 399 - 405. (in Chinese))
- [3] 丁光文, 王 新. 微型桩复合结构在滑坡整治中的应用[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 47 - 50. (DING Guang-wen, WANG Xing. Application of micropile compound structure to a landslide treatment engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [4] 李乾坤, 石胜伟, 韩新强, 等. 某滑坡治理工程微型组合抗滑桩应用效果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 62 - 67. (LI Qian-kun, SHI Sheng-wei, HAN Xin-qiang, et al. Effects of the micro-piles to stabilize a slope [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 62 - 67. (in Chinese))
- [5] 孙祺华. 钢花管微型桩在路基边坡加固防护中的应用[J]. 公路交通技术, 2013(5): 17 - 20. (SUN Qi-hua. Application of steel floral tube micropiles in reinforcement and protection of roadbed slopes[J]. Technology of Highway and Transport, 2013(5): 17 - 20. (in Chinese))
- [6] 林春秀, 张泳雄, 刘容识, 等. 顶微型桩在软岩边坡加固中的应用[J]. 土工基础, 2006, 20(5): 11 - 12. (LIN Chun-xiu, ZHANG Yong-xiong, LIU Rong-shi, et al. Application of minni-piles on the top of cutling for the reinforcement of soft rock slope[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(5): 11 - 12. (in Chinese))

- [7] THOMPSON M J, WHITE D J. Design of slope reinforcement with small-diameter piles[C]// Geotechnical Special publication. Reston, American Society of Civil Engineers, 1998: 67 - 73.
- [8] 王树丰, 张遵遵, 赵 欣. 桩芯配筋微型桩抗滑特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, **39**(3): 49 - 53. (WANG Shu-feng, ZHANG Zun-zun, ZHAO Xin. Model experimental research on anti-sliding characteristics of micropiles with center reinforcement arrangement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, **39**(3): 49 - 53. (in Chinese))
- [9] LIZZI F. Root piles to correct landslides[R]. Chicago, ASCE, Convention and Exposition, 1978.
- [10] 黄 俊, 周 峰, 王旭东. 微型桩抗拔承载特性的数值模拟分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, **33**(5): 75 - 83. (HUANG Jun, ZHOU Feng, WANG Xu-dong. Numerical simulation analysis of uplift bearing characteristics of micropiles[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, **33**(5): 75 - 83. (in Chinese))
- [11] 陈 正, 梅 岭, 梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2219 - 2224. (CHEN Zheng, MEI Ling, MEI Guo-xiong. Numerical simulation of lateral bearing capacity of flexible micropile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2219 - 2224. (in Chinese))
- [12] 辛建平, 郑颖人, 唐晓松, 等. 三排微型桩内力分布的数值模拟[J]. 重庆建筑, 2012, **11**(9): 71 - 75. (XIN Jian-ping, ZHEN Ying-ren, TANG Xiao-song, et al. Numerical simulation of internal force distribution of three -row micropiles[J]. Chongqing Architecture, 2012, **11**(9): 71 - 75. (in Chinese))
- [13] 闫金凯, 门玉明. 基于模型试验的滑坡防治微型桩设计方法[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(3): 355 - 361. (YAN Jin-kai, MEN Yu-ming. Model tests based design method of micropiles for landslide reinforcement[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(3): 355 - 361. (in Chinese)).
- [14] 陈 强, 陈炜韬, 刘世东, 等. 注浆钢管微型桩加固滑坡的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2011, **46**(5): 758 - 763. (CHEN Qiang, CHEN Wei-tao, LIU Shi-dong, et al. Model test on application of grouting steel-tube micropiles to landslide reinforcement[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, **46**(5): 758 - 763. (in Chinese))
- [15] 丁光文. 微型桩处理滑坡的设计方法[J]. 西部探矿工程, 2001(4): 15 - 17. (DING Guang-wen. A design method for micropile to reinforced slope[J]. West China Exploration Engineering, 2001(4): 15 - 17. (in Chinese))
- [16] 周德培, 王唤龙, 孙宏伟. 微型桩组合抗滑结构及其设计理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(7): 1353 - 1362. (ZHOU De-pei, WANG Huan-long, SUN Hong-wei. Micro-pile composite structure and its design theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(7): 1353 - 1362. (in Chinese))
- [17] 石胜伟, 梁 炯. 基于土拱效应微型组合抗滑桩距径比的研究[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(增刊): 755 - 760. (SHI Sheng-wei, LIANG Jiong. Based on soil arching effect study of miniature antislide's ratio of distance and diameter[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(S0): 755 - 760. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)