

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.386>



基于有限差分法的双层滑带滑坡抗滑桩的受力特征

章广成¹, 郑中存², 胡新丽¹, 丁柄栋¹, 曾鑫³, 郑子涵⁴

1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074
2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽合肥 230601
3. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 湖南长沙 410007
4. 武汉市汉阳市政建设集团有限公司, 湖北武汉 430050

摘要: 目前, 抗滑桩的变形与内力计算理论多针对单层滑带滑坡, 而三峡库区大部分堆积层滑坡发育双层滑带。鉴于此, 考虑双层滑带滑坡的物质组成差异, 构建了双层滑带滑坡—抗滑桩相互作用概化模型, 提出了双层滑移条件下的滑坡推力计算方法, 基于地基系数法和有限差分原理推导了双层滑带滑坡中抗滑桩受力特征的计算公式。之后, 以马家沟滑坡为工程案例, 采用数值模拟方法研究了双层滑带滑坡的推力分布规律, 并对理论计算方法进行了验证。结果表明, 该计算方法能很好的反映双层滑带滑坡滑移特征, 桩身的变形与内力分布具有明显的规律: 桩身位移沿桩顶往下逐渐减小, 伴有一定反弯现象; 桩身剪力和弯矩具有两个极大值和一个极小值, 剪力极大值位于滑面处, 弯矩极大值位于滑面下方 2~3 m, 极小值位于深层滑体内。滑坡推力分布形式和抗滑桩设计参数是影响桩体受力特征的重要因素。该方法可为双层滑带滑坡的抗滑桩设计提供理论依据。

关键词: 双层滑带滑坡; 抗滑桩; 变形与内力; 有限差分原理; 推力分布; 数值模拟。

中图分类号: P642

文章编号: 1000—2383(2026)08—3236—15

收稿日期: 2022-12-30

Mechanical Characters of Anti-Sliding Piles of Landslide with Double Sliding Zones Based on Finite Difference Method

Zhang Guangcheng¹, Zheng Zhongcun², Hu Xinli¹, Ding Bingdong¹, Zeng Xin³, Zheng Zihan⁴

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China
3. China Energy Engineering Group Hunan Electric Power Design Institute Co.Ltd, Changsha 410007, China
4. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co. Ltd., Wuhan 430050, China

Abstract: Existing theoretical analysis of the deformation and internal force of anti-sliding piles are mostly designed for single-sliding zone landslides, while most of the accumulation layer landslides in the Three Gorges reservoir area develop double sliding zones. Considering the difference in material composition of landslides with double sliding zones, a generalized model for the interaction between landslides with double sliding zones and anti-sliding is constructed. to study the internal force and deformation of anti-sliding piles. Then a calculation method of landslide thrust under double-layer sliding condition is proposed to derive the

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(No.42020104006)、地学长江计划项目(No.CUGCJ1802)。

作者简介: 郑中存(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事滑坡稳定性评价与防治方面的研究工作。ORCID: 0000-0003-4741-1635. E-mail: zheng-zhongcun@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 章广成, ORCID: 0000-0003-0130-5327. E-mail: zhangguangce@cug.edu.cn

引用格式: 章广成, 郑中存, 胡新丽, 丁柄栋, 曾鑫, 郑子涵, 2026. 基于有限差分法的双层滑带滑坡抗滑桩的受力特征. 地球科学, 51(8): 3236—3250.

Citation: Zhang Guangcheng, Zheng Zhongcun, Hu Xinli, Ding Bingdong, Zeng Xin, Zheng Zihan, 2026. Mechanical Characters of Anti-Sliding Piles of Landslide with Double Sliding Zones Based on Finite Difference Method. *Earth Science*, 51(8): 3236—3250.

equations of deformation and internal force of anti-slide pile in landslides with double sliding zones based on the foundation coefficient method and the finite difference principle. Numerical simulation method was used to research the distribution laws of landslide thrust and verify the newly proposed approach via the Majiagou landslide as example. The results of the theoretical and numerical simulation methods well show the sliding characteristics of landslides with double sliding zones. Meanwhile, the distribution of the deformation and internal forces show a great regularity: the displacement of the pile decreases gradually from the top to bottom accompanied by reverse bending phenomenon, the shear force and bending moment of the pile exist two maximum values and one minimum value, and the maximum values of the shear force are located at the sliding surface while the maximum values of the bending moment are located 2~3 m below the sliding surface, and the minimum value is located in the deep sliding body. In addition, the distribution of landslide thrust and the vital design parameters of anti-sliding piles are important factors that affect the mechanical characteristics of the pile. The proposed method can provide a theoretical reference for the design of anti-sliding piles of landslide with double sliding zones.

Key words: landslide with double sliding zones; anti-sliding piles; deformation and internal forces; finite difference theory; distribution of landslide thrust; numerical simulation.

0 引言

滑坡作为一种常见的地质灾害,其发生往往会给周围的人们和建筑设施等带来极大的危害,针对不同类型的滑坡,选择合适的防治措施尤为重要。滑坡的发育受斜坡的基础地质条件控制(周超等, 2020),特别是对于一些大型复杂的滑坡,由于坡体内部复杂的物质组成和应力状态,往往发育有多层滑动带(贺可强, 1998)。抗滑桩作为一种横向受力支挡结构,有效地将坡体下滑的驱动力传递到下部基岩(Liu *et al.*, 2020),在工程实践中得到广泛的应用。准确的了解抗滑桩与滑坡的相互作用,是加强抗滑桩结构设计必要前提(Hu *et al.*, 2017)。

目前,关于抗滑桩的内力计算,国内外很多学者都开展了理论分析研究。Ito and Matsui(1975)利用塑性变形理论和塑性流动理论,提出了岩土体塑性变形产生的抗滑桩侧向力估算方法。还有学者运用傅里叶级数函数和 Cesaro sum 方法,通过测斜数据推导出了桩体不同深度的挠度函数。悬臂桩法作为主流的抗滑桩内力计算方法,很多学者都对传统方法进行了改进。为避免计算结果受表中系数截断误差的影响,戴自航等(2002, 2003)基于地基系数法,将桩体进行等量差分,提出了计算弹性抗滑桩全桩内力的有限差分方法。钱同辉等(2011)同时考虑桩、梁和土之间的变形协调共同作用,提出了更适用于工程上多排桩的内力计算模型。苏爱军等(2018)考虑抗滑桩受荷段与抗滑段的接触关系,将桩体划分为3段,减小了传统“两段法”带来的误差。近年来,锚索抗滑桩由于更好的加固性能,在防治工程中受到推广(桂树强等, 2003),与普通抗滑桩

不同,需考虑锚索与抗滑桩的相互协调作用(桂树强, 2005)。杨佑发和许绍乾(2003)基于传统的“K-K法”,推导出了锚索抗滑桩的内力有限差分计算公式。吴润泽等(2015)通过将锚索桩模型划分为预应力施加和滑坡推力两个阶段,改进了锚索桩的内力计算方法。

在实际工程中,大型坡体往往地层复杂,滑床由多种岩性地层组成。王贵华等(2019)基于对桩—锚变形协调原理的分析,提出了复合多层条件下的锚索抗滑桩计算模型。詹红志等(2014)、董曼曼等(2017)考虑了多层滑床中地基系数的差异,改进了传统的抗滑桩内力计算方法。同时许多研究者利用物理模型试验和数值分析方法研究桩—岩(土)相互作用(郑颖人和赵尚毅, 2004; Li *et al.*, 2016; 王成汤等, 2020; 杨虎锋等, 2022),结果表明,这两种方法不仅可以更直观地得到内部应力应变特征,还可以验证理论计算结果的合理性。

三峡库区作为滑坡地质灾害频发区域,具有特殊的地层岩性组合和岸坡结构特征(李松林等, 2020),许多大型堆积层滑坡常发育双层滑面,如黄土坡滑坡(倪卫达等, 2013)、红石包滑坡(李英等, 2008)和史家坡滑坡等。Hu *et al.*(2017)通过布置多场综合信息监测平台,监测复杂多滑带滑坡抗滑桩的受力特征。杨登芳等(2022)、张杰豪等(2021)利用物理模型试验分别研究了多层滑带滑坡的变形演化过程和抗滑桩受力特征。

综上所述,前人的抗滑桩内力计算研究多针对单滑面滑坡和多层滑床滑坡,鲜有考虑双层滑带滑坡的复杂结构,对多滑面滑坡的研究局限于成因定性分析,缺少抗滑桩全桩内力计算方法,难以满足

双层滑带滑坡的抗滑桩结构设计需求。

为此,本文在构建双层滑带滑坡—抗滑桩相互作用概化模型的基础上,提出双层滑带滑坡的推力计算方法,考虑不同地层的地基系数的差异,建立了抗滑桩不同桩段的挠曲微分方程,而后结合有限差分法,提出了双层滑带条件下抗滑桩的内力计算模型,并且编写了相应的计算和图形处理程序,得到双层滑带滑坡中抗滑桩的受力特征。在此基础上,以三峡库区典型堆积层多层滑带滑坡为实例,利用FLAC3D数值模拟开展滑坡推力分布规律研究,并对计算模型进行合理性检验,为具有双层滑带的滑坡进行抗滑桩防治设计提供理论依据。

1 双层滑带滑坡推力计算

1.1 弹性地基系数法简介

传统的地基系数法在对单滑带滑坡弹性抗滑桩进行内力计算时,将受荷段视为悬臂桩,嵌固段视为弹性地基梁,抗滑桩受力如图 1 所示。

假设埋设在坡体中的抗滑桩同时受到左侧主动岩土压力 $q(z)$ 和右侧被动岩土压力 $p(z)$ 的作用。在实际运用中,将抗滑桩以滑动面为界,分为受荷段和嵌固段以进行受力和变形分析,基于弹性地基梁理论,建立抗滑桩在滑坡剩余下滑力作用下全桩长的挠曲控制方程组:

$$\frac{d^4x}{dz^4} + 4\lambda^4 x = \begin{cases} q(z)/EI & (0 < z < h_1) \\ 0 & (h_1 < z < H) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\lambda = \sqrt[4]{Kb_0/4EI}$,称为桩土变形系数(m^{-1}); H 表示抗滑桩长(m); h_1 表示抗滑桩受荷段桩长(m); K 为地基系数(kN/m^3); b_0 为抗滑桩计算宽度(m)。

1.2 双层滑带滑坡推力计算

对于双层滑带滑坡,考虑坡体中存在双层滑

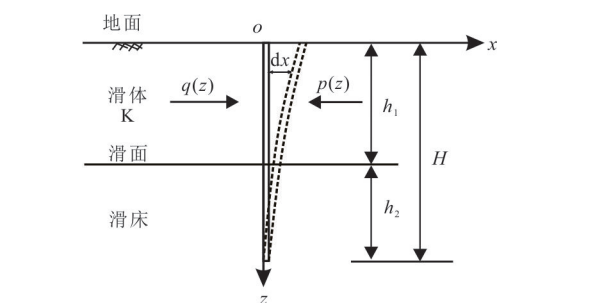


图 1 单滑带滑坡抗滑桩受力分析示意图
Fig.1 Schematic of force analysis of anti-sliding piles in landslide with single sliding zone

面,以各层滑面为分界面划分桩体,根据弹性地基梁理论以及简化计算的目的,基本假定如下:

- (1)抗滑桩按弹性地基梁考虑;
- (2)视抗滑桩—岩土体相互作用为平面问题,将滑坡简化具有一定厚度的岩土层;
- (3)坡体中发育两层滑面,分别位于基覆界面和基岩中的软弱层;
- (4)浅层滑体和深层滑体部分的推力大小分别为 $q_1(z)$ 、 $q_2(z)$;
- (5)浅层滑体的地基系数随深度线性增大,深层滑体和滑床的地基系数为常数;
- (6)抗滑段滑动面接近水平,不考虑桩侧摩阻力和黏着力、桩身轴力以及桩底应力的影响。

基于上述假定,考虑双层滑带滑坡中坡体物质组成和地基系数的差异,建立双层滑带滑坡—抗滑桩相互作用概化模型,如图 2 所示。

剩余推力法作为传统的滑坡推力计算方法,在对双滑带滑坡进行剩余推力计算时,需要考虑双层滑体的双层滑移和相互之间作用力。在简化滑面为多段折线型的基础上,不考虑相邻条块之间的力和地下水的作用,对双层滑带滑坡的条块单元划分和受力分析如图 3 所示,其中 3b 和 3c 分别表示编号为 i 的浅层滑体条块和对应其正下方编号为 $j+1$ 的深层滑体条块。

- (1)对于浅层滑体条块 i :
下滑力:
$$T_i = W_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \cos (\alpha_{i-1} - \alpha_i), \quad (2)$$

抗滑力:
$$R_i = [W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin (\alpha_{i-1} - \alpha_i)] \tan \phi_1 + c_i l_i, \quad (3)$$

剩余下滑力:

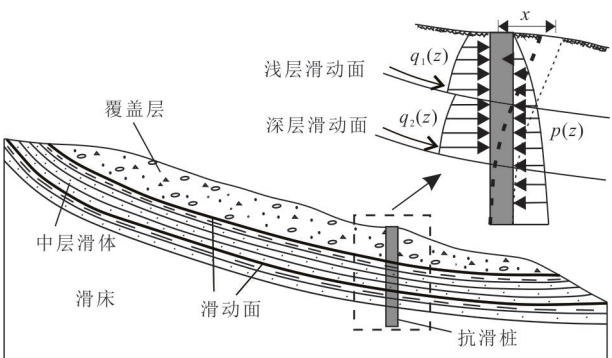


图 2 双层滑带滑坡—抗滑桩相互作用概化模型
Fig.2 Conceptual model of landslide with double sliding zones-anti-sliding pile interaction

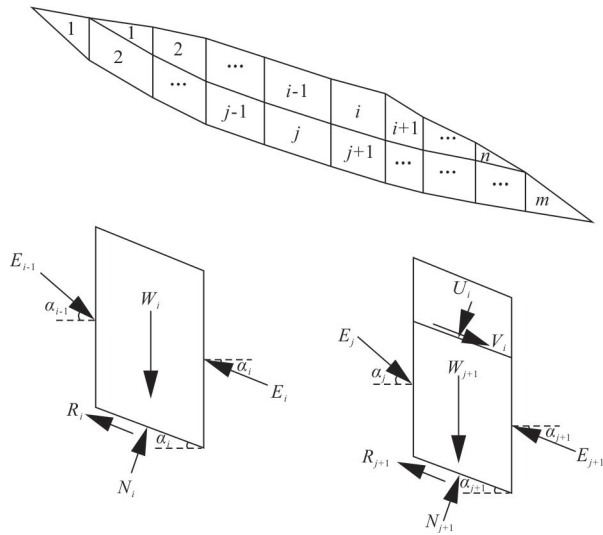


图3 双层滑带滑坡单元划分及受力分析图

Fig.3 Diagram of division and force analysis of unit of landslide with double sliding zones

a. 双层滑体条块划分; b. 浅层滑体条块受力; c. 深层滑体条块受力

$$E_i = W_i \sin \alpha_i - \frac{W_i \cos \alpha_i \tan \phi_1 + c_i l_i}{K_{s2}} + E_{i-1} \phi_{i-1}, \quad (4)$$

其中:

$$\phi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan \phi_1}{K_{s1}} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i), \quad (5)$$

式中: E_i 为第 i 条块对 $i+1$ 条块的剩余推力; W_i 为第 i 条块自重; ϕ_i 为第 i 条块底部摩擦角; c_i 为第 i 条块底部粘聚力; α_i 为第 i 条块底坡角; l_i 为第 i 条块底边长度。

在对深层滑体条块 $j+1$ 进行受力分析时, 应考虑因浅层滑体滑动带来的力的作用, 设条块 i 底面对条块 $j+1$ 的法向力和切向力分别为 U_i 和 V_i , 根据条块力的平衡可得:

$$U_i = W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i), \quad (6)$$

$$V_i = [W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)] \tan \phi_1 + c_i l_i. \quad (7)$$

可将浅层条块 i 对深层条块 $j+1$ 的作用力 U_i 和 R_i 分界为水平力 P_i 和竖直力 Q_i :

$$P_i = V_i \cos \alpha_i - U_i \sin \alpha_i, \quad (8)$$

$$Q_i = V_i \sin \alpha_i + U_i \cos \alpha_i. \quad (9)$$

(2) 对于深层条块 $j+1$:

下滑力:

$$T_{j+1} = (W_{j+1} + Q_i) \sin \alpha_{j+1} + P_i \cos \alpha_{j+1} +$$

$$E_j \cos(\alpha_j - \alpha_{j+1}), \quad (10)$$

抗滑力:

$$R_{j+1} = [(W_{j+1} + Q_i) \cos \alpha_{j+1} - P_i \sin \alpha_{j+1} + E_j \sin(\alpha_j - \alpha_{j+1})] \tan \phi_2 + c_{j+1} l_{j+1}, \quad (11)$$

剩余下滑力:

$$E_{j+1} = (W_{j+1} + Q_i) \sin \alpha_{j+1} + P_i \cos \alpha_{j+1} - \frac{[(W_{j+1} + Q_i) \cos \alpha_{j+1} + P_i] \tan \phi_2 + c_{j+1} l_{j+1}}{K_{s2}}, \quad (12)$$

$$+ E_j \phi_j$$

其中:

$$\phi_{j+1} = \cos(\alpha_j - \alpha_{j+1}) - \frac{\tan \phi_2}{K_{s2}} \sin(\alpha_j - \alpha_{j+1}), \quad (13)$$

式中: 符号 E_j 、 W_j 、 ϕ_j 、 c_j 、 α_j 、 l_j 意义同前。

利用式(4)和式(12)可分别计算浅层滑体与深层滑体部分的剩余推力。

1.3 滑坡推力分布函数

滑坡推力分布形式直接影响抗滑桩上的内力分布及大小, 选择正确的滑坡推力分布图式是桩体内力分布计算结果准确与否的关键。滑体的土性和厚度的差异, 决定了抗滑桩上的滑坡推力分布图形的多样性, 一般认为受荷段桩后推力的分布形式有矩形、梯形或三角形以及抛物线形(戴自航, 2002)。

为提高推力函数的适用性和简化计算过程, 本文依据文献(戴自航和彭振斌, 2002)中不同形式的推力分布函数提出统一的滑坡推力拟合函数, 如下:

$$q(z) = \left[a \left(\frac{z}{h_1} \right)^2 + b \left(\frac{z}{h_1} \right) + 1 - \frac{a}{3} - \frac{b}{2} \right] \frac{E_n}{h_1}, \quad (14)$$

式中: $q(z)$ 为不同深度 z 处的滑坡推力 (kPa), h_1 为滑动面以上桩长 (m), a 、 b 均为常数; E_n 为滑坡单宽剩余推力 (kN/m)。如表 1 所示, a 、 b 取不同值可实现矩形、三角形、抛物线型推力的拟合。 ζ 为深度系数, ζh_1 为滑坡推力合力距桩顶的距离。

2 双层滑带滑坡抗滑桩内力计算

如图 4 所示, 设抗滑桩全长为 H , 以滑面为界, 全桩分 3 段, 从上往下桩长依次为 h_{11} , h_{12} , h_2 , 即受荷段桩长 $h_1 = h_{11} + h_{12}$, 嵌固段桩长 h_2 。桩后滑坡推力按式(14)所给函数分布。桩的截面尺寸为 $a_L \times b_L$ (长 $\times$ 宽), 桩的抗弯刚度为 EI (E 为桩的弹性模量, I 为惯性矩)。为满足双层滑带滑坡的多物质组成结构特征, 桩前不同深度岩土体的地基系数分别取 $K_1(z) = mz$ ($0 < z < h_{11}$), $K_1 = K_2 = K$ ($h_{11} < z < H$)。

令:

表 1 滑坡推力分布函数

Table 1 Distribution functions of landslide-thrust

滑坡岩土类型	滑坡推力分布形式	a	b	滑坡推力分布函数
岩石	矩形或平行四边形	0	0	$q(z) = \frac{E_n}{h_1}$
松散介质(砂土)	三角形	0	2	$q(z) = \frac{2E_n z}{h_1^2}$
介于砂土和粘土	梯形	0	$12\zeta - 6$	$q(z) = \frac{(12\zeta - 6)E_n}{h_1^2} z + \frac{(4 - 6\zeta)E_n}{h_1}$
粘土	抛物线形	$36\zeta - 24$	$18 - 24\zeta$	$q(z) = \frac{(36\zeta - 24)E_n}{h_1^3} z^2 + \frac{(18 - 24\zeta)E_n}{h_1^2} z$

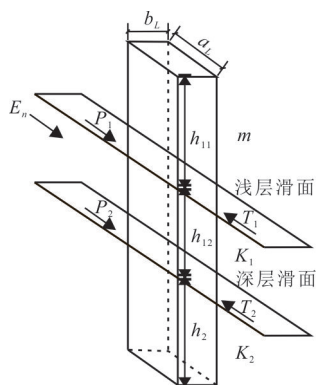


图 4 双层滑带滑坡抗滑桩受力分析示意图

Fig.4 Schematic of force analysis of anti-sliding piles in landslide with double sliding zones

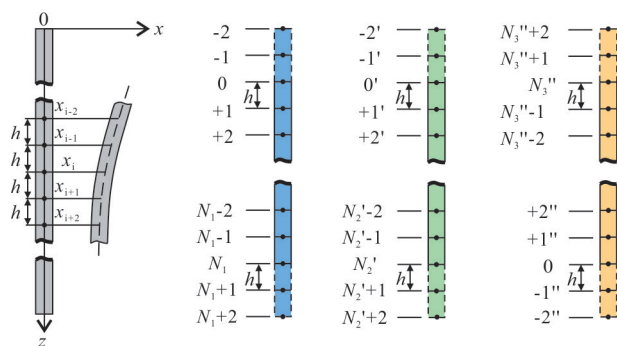


图 5 桩身挠曲和各段差分点划分

Fig.5 Diagram showing bending and division of differential points at each section of pile

a. 桩身挠曲; b. h_{11} 段; c. h_{12} 段; d. h_2 段

$$Q(z) = \left[a \left(\frac{z}{h_1} \right)^2 + b \left(\frac{z}{h_1} \right) + 1 - \frac{a}{3} - \frac{b}{2} \right] \frac{E_n L}{h_1}$$

式中: L 为桩间距(m).

将各桩段按等长 h 进行离散, 根据中心差分法的原理, 在每段上下分别多增设两个虚拟节点, 离散后的桩段节点如图 5 所示.

(1) 浅层受荷段桩体内力推导

浅层受荷桩体 ($0 < z < h_{11}$) 的挠曲微分方程为:

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + b_0 m z x = Q_1(z). \quad (15)$$

由桩顶往下至第一层滑动面采用等量分段 h 将桩长离散化, 如图 5b 所示, 则任意节点 n 处的控制差分方程为:

$$\frac{EI}{h^4} (x_{n+2} - 4x_{n+1} + 6x_n - 4x_{n-1} + x_{n-2}) + b_0 m z x = Q_1(z), \quad (16)$$

即:

$$x_{n-2} - 4x_{n-1} + (6 + \frac{h^5}{EI} m n b_0) x_n - 4x_{n+1} + x_{n+2} = Q_1(z), \quad (17)$$

桩身弯矩: $EI \frac{d^2 x}{dz^2} = M_t$, 有限差分可得:

$$\frac{EI}{h^2} (x_{-1} + x_1 - 2x_0) = M_t, \quad (18)$$

即:

$$x_{-1} = 2x_0 - x_1 + \frac{h^2 M_t}{EI}, \quad (19)$$

桩身剪力: $EI \frac{d^3 x}{dz^3} = P_t$, 有限差分可得:

$$\frac{EI}{2h^3} (-x_{-2} + 2x_{-1} - 2x_1 + x_2) = P_t, \quad (20)$$

即:

$$x_{-2} = 2x_{-1} - 2x_1 + x_2 - \frac{2h^3 P_t}{EI}, \quad (21)$$

一般抗滑桩桩顶自由, 弯矩 $M_t = 0$, 剪力 $P_t = 0$, 代入式(19)、式(21)可得:

$$x_{-1} = 2x_0 - x_1, \quad (22)$$

$$x_{-2} = 2x_{-1} - 2x_1 + x_2. \quad (23)$$

令(17)中 $n=0$, 可得:

$$x_{-2} - 4x_{-1} - 4x_1 + x_2 = Q_1(0). \quad (24)$$

将式(22)和式(23)代入式(24),可得:

$$x_0 = 2x_1 - x_2 + \left(1 - \frac{a}{3} - \frac{b}{2}\right) \frac{E_n h^4}{2EIh_1}. \quad (25)$$

令: $a_{-1} = 2, b_{-1} = 1, c_{-1} = 0$,

$$a_0 = 2, b_0 = 1, c_0 = \left(1 - \frac{a}{3} - \frac{b}{2}\right) \frac{E_n h^4}{2EIh_1},$$

则式(22)和(25)可表达为:

$$x_{-1} = a_{-1}x_0 - b_{-1}x_1 + c_{-1}, \quad (26)$$

$$x_0 = a_0x_1 - b_0x_2 + c_0. \quad (27)$$

仿此,可得:

$$\begin{cases} x_n = a_n x_{n+1} - b_n x_{n+2} + c_n \\ x_{n-1} = a_{n-1} x_n - b_{n-1} x_{n+1} + c_{n-1} \\ x_{n-2} = a_{n-2} x_{n-1} - b_{n-2} x_n + c_{n-2} \end{cases} \quad (28)$$

将式(28)代入式(17)整理可得:

$$\begin{aligned} & \left(a_{n-2}a_{n-1} - b_{n-2} + 6 + \frac{h^5}{EI} mnb_0 - 4a_{n-1} \right) x_n \\ &= (a_{n-2}b_{n-1} - 4b_{n-1} + 4) \\ & x_{n+1} - x_{n+2} + (4 - a_{n-2})c_{n-1} \\ & - c_{n-2} + \frac{Q_1(z)h^4}{EI} \end{aligned} \quad (29)$$

若令:

$$\begin{cases} d_n = a_{n-2}a_{n-1} - b_{n-2} + 6 + \frac{h^5}{EI} mnb_0 - 4a_{n-1} \\ a_n = \frac{a_{n-2}b_{n-1} - 4b_{n-1} + 4}{d_n} \\ c_n = \frac{(4 - a_{n-2})c_{n-1} - c_{n-2} + \frac{Q_1(z)h^4}{EI}}{d_n} \\ b_n = 1/d_n \end{cases} \quad (30)$$

则式(29)仍可以表达成(28)所示.

(2) 中层受荷段桩体内力推导

深层受荷桩体($h_{11} < z < h_1$)挠曲微分方程为:

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + kb_0 x = Q_2(z). \quad (31)$$

该段仍为受荷段,将桩长离散化,如图5(c)所示,则任意节点 n 处的控制差分方程为

$$\frac{EI}{h^4} (x_{n+2} - 4x_{n+1} + 6x_n - 4x_{n-1} + x_{n-2}) + kb_0 x_n = Q_2(z), \quad (32)$$

整理变换得:

$$\begin{aligned} x_{n+2} &= 4x_{n+1} - (6 + \frac{h^4}{EI} kb_0) x_n + 4x_{n-1} - x_{n-2} + \\ & \frac{Q_2(z)h^4}{EI}. \end{aligned} \quad (33)$$

(3) 嵌固段桩体内力推导

嵌固段桩体($h_1 < z < H$)的挠曲微分方程为:

$$\frac{d^4 x}{dz^4} + 4\lambda^4 x = 0. \quad (34)$$

该段为嵌固段,将桩长离散化,如图5d所示,则任意节点 n 处的控制差分方程为:

$$\frac{1}{h^4} (x_{n+2} - 4x_{n+1} + 6x_n - 4x_{n-1} + x_{n-2}) + 4\lambda^4 x = 0, \quad (35)$$

即:

$$x_{n-2} - 4x_{n-1} + (6 + 4\lambda^4 h^4) x_n - 4x_{n+1} + x_{n+2} = 0. \quad (36)$$

引入桩底边界条件时,主要有3种情况:

① 桩底为自由支承(弯矩 $M=0$,剪力 $P=0$),可得:

$$x_{-1} = 2x_0 - x_1, x_0 = \frac{2x_1 - x_2}{1 + 2\lambda^4 h^4},$$

令:

$$a_{-1} = 2, b_{-1} = 1, a_0 = \frac{2}{1 + 2\lambda^4 h^4}, b_0 = \frac{1}{1 + 2\lambda^4 h^4},$$

则有:

$$\begin{cases} x_{-1} = a_{-1}x_0 - b_{-1}x_1 \\ x_0 = a_0x_1 - b_0x_2 \end{cases} \quad (37)$$

② 桩底为铰支承(弯矩 $M=0$,位移 $x=0$),有:

$$x_{-1} = 2x_0 - x_1, x_0 = 0,$$

令: $a_{-1} = 2, b_{-1} = 1, a_0 = 0, b_0 = 0$.

③ 桩底为固定支承(位移 $x=0$,转角 $\theta=0$),有:

$$x_{-1} = x_1, x_0 = 0,$$

令: $a_{-1} = 0, b_{-1} = -1, a_0 = 0, b_0 = 0$.

可以看出,3种桩底边界条件具有相同形式的迭代方程,可表示为:

$$\begin{cases} x_n = a_n x_{n+1} - b_n x_{n+2} \\ x_{n-1} = a_{n-1} x_n - b_{n-1} x_{n+1} \\ x_{n-2} = a_{n-2} x_{n-1} - b_{n-2} x_n \end{cases} \quad (38)$$

代入式(37)整理可得:

$$\begin{aligned} & [a_{n-2}a_{n-1} - b_{n-2} - 4a_{n-1} + (6 + 4\lambda^4 h^4)] x_n + \\ & (-a_{n-2}b_{n-1} + 4b_{n-1} - 4) x_{n+1} + x_{n+2} = 0 \end{aligned} \quad (39)$$

令:

$$\begin{cases} c_n = a_{n-2}a_{n-1} - b_{n-2} - 4a_{n-1} + 6 + 4\lambda^4 h^4 \\ a_n = \frac{a_{n-2}b_{n-1} - 4b_{n-1} + 4}{c_n} \\ b_n = 1/c_n \end{cases} \quad (40)$$

则式(39)仍可表达成式(38).

根据桩在基覆界面和滑动面处的连续性,依次满足位移连续、转角连续、剪力连续和弯矩连续条

件,可得到方程组式(41)和式(42).

$$\begin{cases} x_{N_1} = x'_0 \\ x_{N_1+1} - x_{N_1-1} = x'_{+1} - x'_{-1} \\ x_{N_1-2} - 2x_{N_1-1} + 2x_{N_1+1} - x_{N_1+2} = \\ x'_{-2} - 2x'_{-1} + 2x'_{+1} - x'_{+2} \\ x_{N_1-1} + x_{N_1+1} - 2x_{N_1} = x'_{-1} + x'_{+1} - 2x'_0 \end{cases}, \quad (41)$$

$$\begin{cases} x''_{N_3} = x'_{N_2} \\ x''_{N_3+1} - x''_{N_3-1} = x'_{N_2+1} - x'_{N_2-1} \\ x''_{N_3+2} - 2x''_{N_3+1} + 2x''_{N_3-1} - x''_{N_3-2} = \\ x'_{N_2+2} - 2x'_{N_2+1} + 2x'_{N_2-1} - x'_{N_2-2} \\ x''_{N_3-1} + x''_{N_3+1} - 2x''_{N_3} = x'_{N_2-1} + x'_{N_2+1} - 2x'_{N_2} \end{cases}, \quad (42)$$

求解此方程组,可得到桩身在浅层滑面和深层滑面附近处截面的位移,再利用式(28)、式(33)、式(40)通过迭代法可求得桩身任意截面处的位移,进而推导出相应的桩身内力. 桩体任意截面处的内力计算公式为:

$$M_n = \frac{EI}{h^2} (x_{n-1} + x_{n+1} - 2x_n), \quad (43)$$

$$Q_n = \frac{EI}{2h^3} (x_{n+2} - 2x_{n+1} + 2x_{n-1} - x_{n-2}), \quad (44)$$

式中: x_n 、 Q_n 、 M_n 分别为抗滑桩任意截面处的位移、剪力和弯矩.

为了便于计算结果的输出,让上述推导过程程序化和可视化,根据本文所提出的理论方法,编写了相应程序来计算双层滑带滑坡中抗滑桩各段的位移、内力情况. 通过已知参数计算出各段差分点系数,由式(30)、(40)构成语句,采用循环结构实现迭代过程,计算各段系数 a_n 、 b_n 、 c_n 、 d_n ,然后利用边界连续条件由式(41)、(42)构成各段虚拟点位移方程组矩阵,采用主元消去法求解位移矩阵,得到边界处虚拟点位移. 最后由式(28)、(33)、(40)采用循环结构迭代计算出全桩位移,进而利用式(43)、式(44)推导出全桩内力,同时采用plot命令语句将计算结果以图形的形式输出. 程序计算流程如图6所示.

3 工程实例分析

3.1 工程概况

马家沟滑坡位于湖北省秭归县归州镇彭家坡村,处于长江支流吒溪河左岸. 滑坡长537 m,宽150~210 m,滑体平均厚度12.7 m,总面积约9.68 km²,总方量约127.8×10⁴ m³. 主滑方向290°,整体

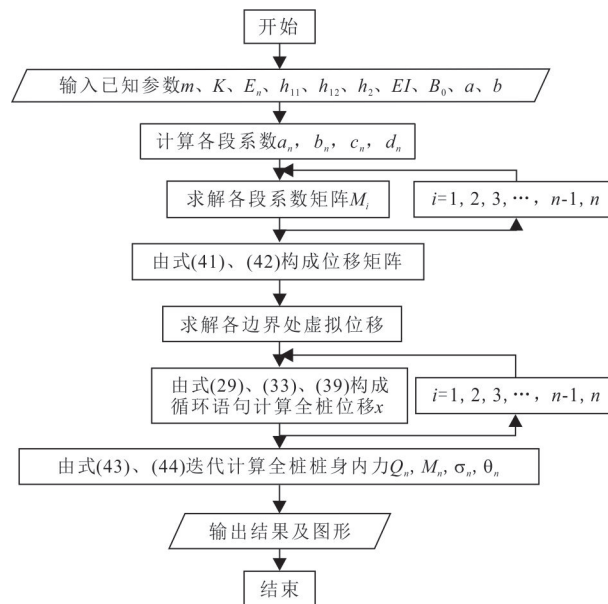


图6 计算流程图

Fig.6 The calculation flow chart

为顺向坡. 滑床地层为侏罗系上统遂宁组(J₃S),岩性以灰白色长石石英砂岩、细砂岩为主,夹紫红色粉砂质泥岩、泥岩;滑体部分为第四系松散堆积物,主要由崩坡积物、残坡积物和人工堆积物组成. 坡体主要发育两层滑面,浅层滑动面位于基覆界面处,平均深度12.5 m;深层滑动面发育于基岩软弱层中,平均深度25.0 m.

考虑坡体物质组成差异,采用不同的地基系数:浅层滑体为松散堆积物,地基系数的比例系数取 $m=3\ 000\text{ kN/m}^4$;深层滑体和基岩为粉砂质泥岩、砂岩、砂质泥岩互层,相应的地基系数(董曼曼等, 2017)分别为 1.5×10^5 、 3.9×10^5 、 $2.5\times 10^5\text{ kN/m}^3$;利用等效法对多层地基系数进行深度加权换算,由式(45):

$$K_a = \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2 + K_3 h_3}{h}, \quad (45)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 分别为不同岩体的地基系数, h_1 、 h_2 、 h_3 为相应岩体的厚度, h 为总厚度.

综合确定深层滑体和滑床的地基系数 $K=205\ 000\text{ kN/m}^3$. 抗滑桩采用C30钢筋混凝土,桩间距 $L=8\text{ m}$,截面尺寸 $3\text{ m}\times 2\text{ m}$,桩的弹性模量 $E=30\text{ GPa}$,抗滑桩总长 $H=40\text{ m}$,第一层滑面以上桩长 $h_{11}=12.5\text{ m}$,第二层滑面以上桩长 $h_1=25.0\text{ m}$,滑面以下嵌固段 $h_2=15\text{ m}$. 在进行计算时,采用等量差分段 $h=0.01\text{ m}$.

表 2 滑坡岩土体物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock and soil

材料类型	密度(kg/m ³)	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	体积模量(MPa)	剪切模量(MPa)
浅层滑体(碎石土)	2 110	35	27	905	611
深层滑体(砂质泥岩)	2 450	45	42	9 506	6 310
滑床(砂岩)	2 500	70	50	15 000	10 000
浅层滑带土	2 110	11	14	75	32
深层滑带土	2 230	12	15	84	45

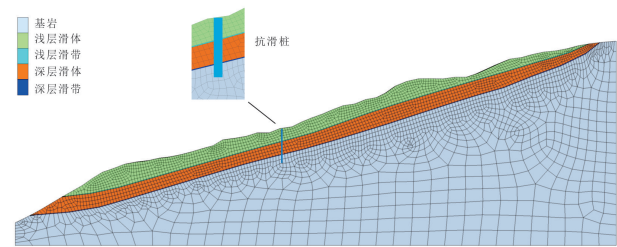


图 7 马家沟双层滑带滑坡数值计算模型
Fig.7 Numerical calculation model of Majiagou landslide with double sliding zones

3.2 数值概化模型

为检验本文所提出的计算方法的合理性,采用数值模拟方法对程序算法结果进行验证.具体方法为:通过将马家沟滑坡剖面模型导入ANSYS,建立假三维数值计算模型,模型尺寸为550 m×200 m×20 m.模型以四边形网格为主进行划分,并对滑带附近的网格进行细分,共划分为23 376个节点和18 675个网格单元,如图7所示,然后导入FLAC3D中进行计算.滑体、滑床和滑带均采用摩尔-库伦本构模型,抗滑桩采用pile结构单元,沿坡体模型拉伸方向同时布置多根单排pile桩单元.模型的左右边界和底部边界施加固定约束,顶部边界自由.所采用的岩土体物理力学参数见表2.

3.3 滑坡推力分布形式分析

滑坡推力分布形式作为影响抗滑桩受力计算结果准确性的重要因素,本文在数值模拟过程中进一步研究了双层滑带滑坡的推力分布特征,并代入理论计算中进行对比分析.

根据计算结果,双层滑带滑坡的推力分布具有明显的分段性特征:以浅层滑面S1为界,上下滑体推力均近似呈梯形分布,为研究两者之间的相关性,通过单个改变滑体与滑体参数,进行数值模拟得到相应的计算结果,并对结果进行对比分析,总结出上下两层滑带的参数是影响双层滑带滑坡推力分布形式的主要因素,对比参数选取和结果分别

表 3 物理力学参数组合
Table 3 Combination of physical and mechanical parameters

参数滑带		黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	体积模量(MPa)	剪切模量(MPa)
参数 1	S1	11	14	75	32
	S2	12	15	84	45
参数 2	S1	13	16	150	70
	S2	12	15	84	45
参数 3	S1	9.5	12	40	15
	S2	12	15	84	45
参数 4	S1	11	14	75	32
	S2	14	17	160	90
参数 5	S1	11	14	75	32
	S2	10	14	40	25

如表3、图8所示.

由图8可以看出,在不同的滑带参数取值情况下,桩后滑坡推力分布规律基本一致.但当浅层滑带力学参数增大时,浅层滑面S1处的滑坡推力有所减小,深层滑面S2处的滑坡推力有所增大;当深层滑带力学参数增大时,浅层滑面S1处的滑坡推力有所增大,深层滑面S2处的滑坡推力

有所减小.对于参数2和参数5,当深层滑带力学参数大于浅层滑带时,上下部分的滑坡推力均遵循梯形分布形式;而当深层滑带力学参数小于浅层滑带时,在深层滑带上方约5 m处滑坡推力出现最大.马家沟滑坡浅层滑带位于基覆界面处,深层滑带位于基岩内软弱夹层,浅层滑带力学参数小于深层滑带,类似于参数1、3和4组合,即滑坡推力遵循分段式梯形分布.

为进一步量化马家沟双层滑带滑坡的推力分布规律,对不同参数组合下的推力分布曲线进一步开展分析.设桩顶推力为 P_0 ,浅层滑面处突变前后推力分别为 P_1 、 P_0' ,深层滑面处推力为 P_2 .各参数组合下的推力特征值如表4所示.

对于遵循分段式梯形推力分布的参数1、3和4

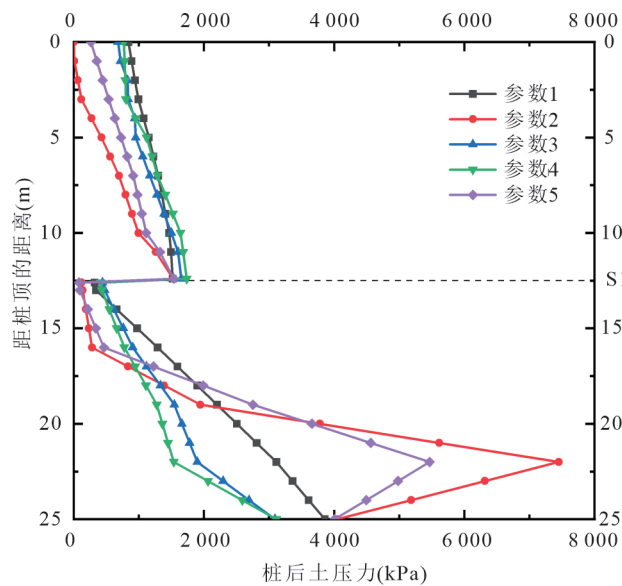


图 8 滑坡推力分布曲线
Fig.8 Distribution curve of landslide thrust

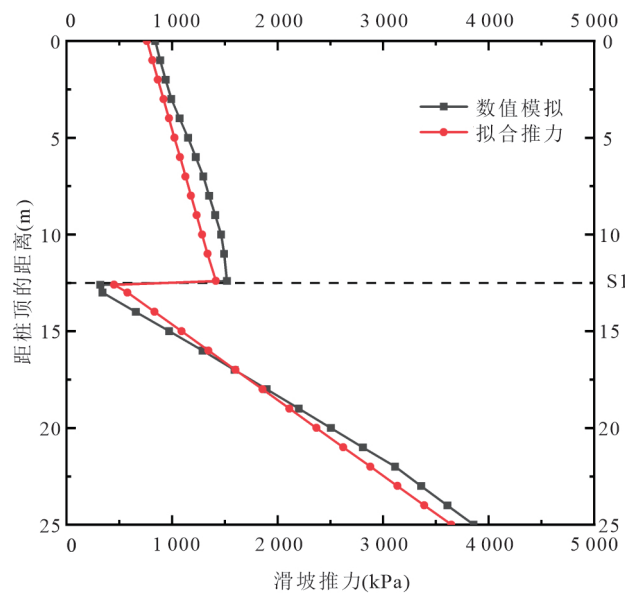


图 9 滑坡推力拟合曲线
Fig.9 Fitting curves of landslide thrust

表 4 推力特征值对比

Table 4 Characteristic value of landslide thrust comparison

	P_0 (kPa)	P_1 (kPa)	ζ_1	P_0' (kPa)	P_2 (kPa)	ζ_2
参数 1	111.3	190.1	0.54	40.2	482.3	0.64
参数 2	1.2	191.5	0.66	15.6	506.7	0.66
参数 3	89.7	206.3	0.57	55.5	386.5	0.63
参数 4	97.8	217.2	0.56	52.4	389.8	0.63
参数 5	44.1	192.7	0.60	10.4	501.2	0.66

组合,滑坡推力的深度系数 ζ 值相近,因此理论计算时,设浅层滑体和深层滑体推力均为梯形分布,上下推力大小分别由式(4)和式(12)确定.利用改进的剩余推力法对马家沟滑坡进行推力计算,结果表明浅层滑体推力 E_1 和深层滑体推力 E_2 分别为1719.45 kN/m、3198.24 kN/m.推力分布函数采用式(14)形式,上下两层的推力深度系数 ζ 分别取0.55和0.63.拟合后滑坡推力曲线如图9所示,可以看出,此时的滑坡拟合推力与数值模拟结果基本一致.

3.4 理论计算与数值模拟结果对比分析

利用有限元法得到的抗滑桩变形与内力分布更能反映实际坡体在滑移过程中抗滑桩的受力状态.参考图9~11,采用分段式梯形推力分布对本文理论方法进行了计算,并与数值模拟结果进行了对比分析,结果显示,两者计算结果虽然在量值上有一定差异,但分布规律基本一致,表明本文对双层滑带滑坡中抗滑桩的内力计算方法是可靠的.

3.4.1 桩体位移分析 由图10桩身位移图可以看出,抗滑桩桩身位移沿桩顶向下呈逐渐减小的趋势,至嵌固端下部35 m深左右基本趋于零,理论计算与数值模拟结果具有相似的规律;在浅层滑面S1以上,桩身顺滑体滑移方向产生弯曲变形,而在深层滑面S2上方深度15~25 m处有一定反弯的迹象,但反弯量远小于上部桩体的弯曲量,是因为双层滑带滑坡的分段式梯形分布中,深层滑体的滑坡推力要大于浅层滑体部分的滑坡推力,这一结果刚好反映实际双层滑带滑坡在滑移过程中,不同深度的滑体滑移程度不同,会产生相对运动,从而在桩体横向位移变形曲线上呈现反弯趋势.数值分析结果也具有相似的规律,由于不同深度滑体的相互作用作用,在位移曲线上体现出一定的反弯现象.

3.4.2 桩体剪力分析 通过图11桩身剪力分布图可以看出,理论计算与数值模拟的桩身剪力分布具有相似的规律:在浅层滑体内,在深度0~7 m范围内,桩身剪力呈较小的负值,而后随着埋深的增加而不断增加,在12.5 m浅层滑面S1处达到第一个极大值;在深层滑体内,剪力随着埋深的增加先减小后又增大,在25 m深层滑面S2处达到第二个极大值.数值模拟结果具有相似的规律,但在深度0~12.5 m范围内的负剪力分布范围更为明显.

这是由于在双层滑移的过程中,浅层滑体与深层滑体会产生相对运动,浅层滑体的滑移速率更快,深层滑体会产生相对向后的运动.从图8,图9

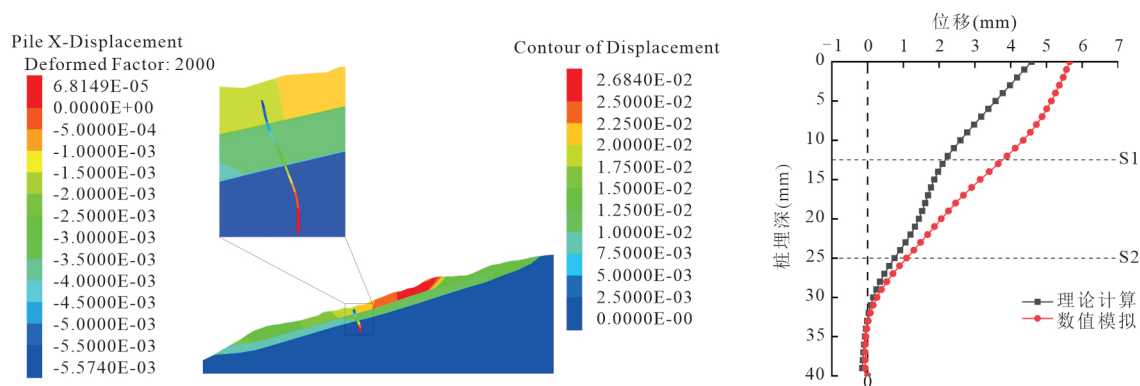


图 10 双层滑带滑坡桩身位移图

Fig.10 Displacement diagram of anti-sliding piles in landslide with double sliding zones

a. 桩身位移数值结果;b. 桩身位移分布曲线

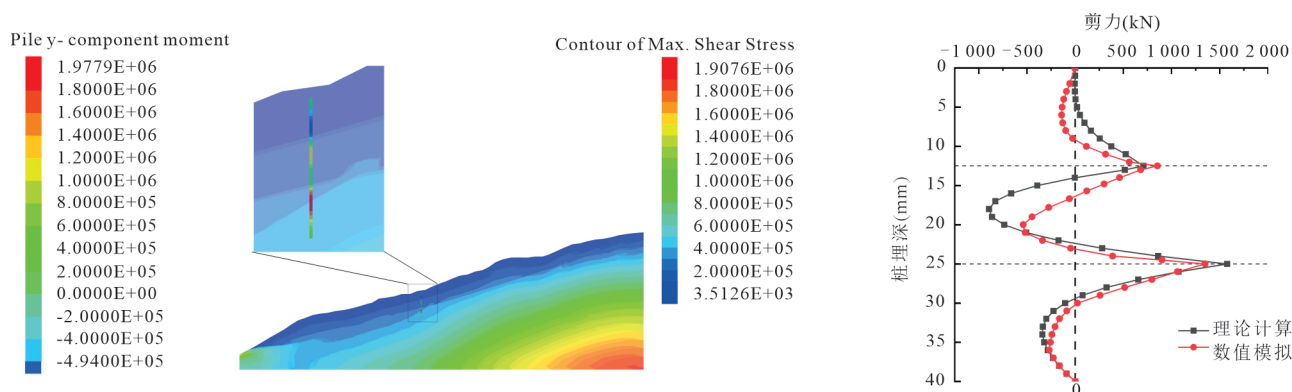


图 11 双层滑带滑坡桩身剪力图

Fig.11 Shear force diagram of anti-sliding piles in landslide with double sliding zones

a. 桩身剪力数值结果;b. 桩身剪力分布曲线

中的滑坡推力分布曲线可以看出,在浅层滑面S1附近,滑坡推力会突变式减小,与此同时,抗滑桩埋藏位置较深,此时桩前抗滑力较大,桩身在两层滑体的相对运动过程中受到“反弯”作用,从而产生剪力向负值增大的趋势;对于理论计算模型,由于深层滑体中抗滑桩前的地基抵抗力采用K法计算,岩土体抗力要比上层滑体要大的多,在深度12.5~18.0 m范围内剪力不断减小;在深度范围18~25 m内,滑坡推力快速增大,桩身剪力不断增大;而后在滑面以下的嵌固端内,桩体不受滑坡推力的作用,只受岩土体抗力作用,剪力随深度增加逐渐减小,在桩底处回到零值。数值分析结果的一致性规律进一步验证了理论计算方法的合理性。

3.4.3 桩体弯矩分析 通过图12桩身弯矩图可以发现,双层滑带滑坡中抗滑桩桩身弯矩主要有3个极值点,具体体现为:在浅层滑体中,在深度0~10 m左右,桩体弯矩为较小负值,往下弯矩逐渐增大,

在15 m左右达到第一个极大值;在深层滑体内,弯矩又逐渐减小,在23 m左右达到极小值,往下弯矩又继续增大,在深度28 m左右达到第二个极大值;而后桩身弯矩快速减小,至桩底降为零。

数值模拟的桩身弯矩分布规律与理论计算结果基本一致:弯矩的两个极大值分别位于浅层滑面S1和深层滑面S2下方,但比理论结果的位置深2~3 m,一个极小值位于深层滑面S2上方2~3 m处。同时数值模拟在浅层滑体深度范围内多一部分明显的负弯矩,这是因为在深度0~12.5 m范围桩身更加突出的反弯现象造成的。

4 影响因素分析

双层滑带滑坡中抗滑桩的变形特征与内力分布受诸多因素的影响,主要包括滑坡推力分布形式和抗滑桩设计参数(截面尺寸、桩底支承条件等)两个方面。因此,本节基于上文提出的理论模型,计算

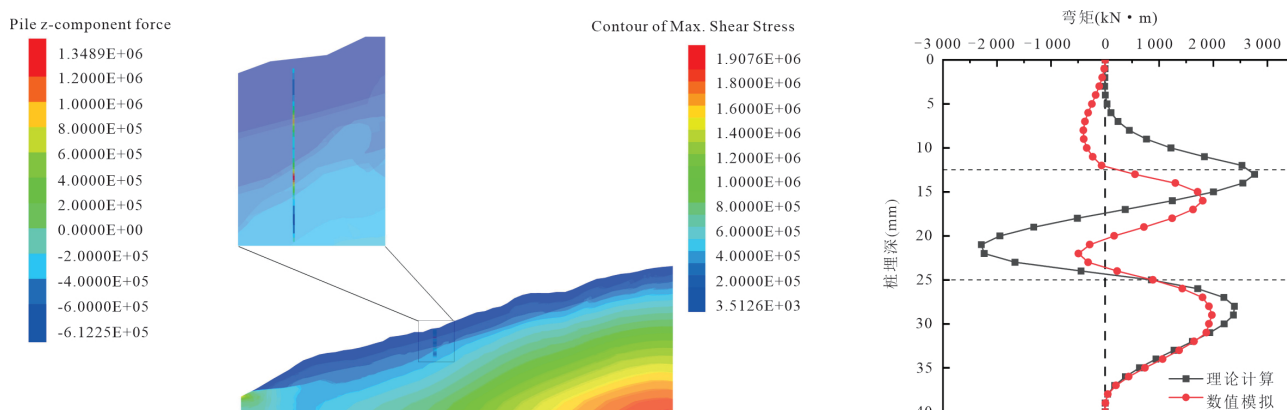


图 12 双层滑带滑坡桩身弯矩图

Fig.12 Bending moment diagram of anti-sliding piles in landslide with double sliding zones

a. 桩身弯矩数值结果; b. 桩身弯矩分布曲线

并讨论滑坡推力分布形式和抗滑桩设计参数对内力分布的影响。

4.1 滑坡推力分布形式的影响

在研究双层滑带滑坡的推力分布形式时,由于上下两层滑体的相对滑移,推力呈分段式梯形分布,但当两层滑体的相对运动程度逐渐减小时,滑坡推力也逐渐趋于常见的几种分布规律。因此本节讨论了不同推力分布形式对桩身内力与变形的影响。假定抗滑桩截面尺寸:长 $\times$ 宽=3 m $\times$ 2 m,桩底为自由支承。

由图 13 可看出,不同的推力分布形式下抗滑桩受力特征相似。滑坡推力分布形式对抗滑桩桩身位移变化规律有一定的影响:深层滑体中抗滑桩的位移增长幅度较小,均具有一定程度的反弯现象,其中分段式梯形推力分布形式反弯程度最大;在浅层滑体中,抗滑桩桩身位移增长幅度区别较大:矩形 $>$ 梯形 $>$ 分段式梯形 $>$ 抛物线型 $>$ 三角形,5 种不同推力分布形式下桩顶位移分别为 8.8 mm, 5.1 mm, 4.6 mm, 4.5 mm 和 2.7 mm。

对于矩形与梯形推力分布,上部滑体的滑坡推力相比其他分布形式较大,因而在 0~12.5 m 深度范围内桩身剪力值呈先增大后减小再增大,并在浅层滑面 S1 处达到极大值。抛物线型、矩形、三角形、梯形和分段式梯形推力分布条件下桩身剪力最大值(绝对值)分别位于 12.5 m、6.5 m、25 m、25 m 和 25 m 处。

不同推力形式下的桩身弯矩分布规律一致,弯矩最大值(绝对值)均位于浅层滑面 S1 下方 2~3 m。对于抛物线型与矩形分布,桩身弯矩将全部为正值,尽管仍存在极小值,弯矩分布规律不变,但桩身

整体处于桩前受压、桩后受拉状态。

4.2 抗滑桩截面尺寸的影响

在研究抗滑桩截面尺寸对桩身内力与变形的影响时,滑坡推力采用分段式梯形分布,桩底为自由支承。

由图 14 可知,抗滑桩截面尺寸对抗滑桩内力整体分布规律影响较小,对位移、剪力和弯矩的极值影响较大。随着截面尺寸的增大,桩顶位移逐渐减小,桩身截面尺寸越大,减小效果愈弱。当截面长度和截面宽度增加相同幅度时,桩顶位移分别减小 5.17% 和 14.85%,可见截面宽度影响更大。同时随着抗滑桩截面尺寸的增大,深层滑体桩身段的“反弯”效果逐渐减弱。

由图 14b 可知,随着抗滑桩尺寸的增大,桩身剪力逐渐增大,剪力极大值的位置不变,分别位于浅层滑面 S1 与深层滑面 S2 处,而剪力极小值的深度逐渐增大。剪力在 S2 处的极大值的增幅要大于 S1 处的极大值的增幅,同时桩身最大剪力的增幅随桩截面尺寸增逐渐减弱,由 26.1% 降至 0.8%。

由图 14c 可知,桩身弯矩随截面尺寸的增大总体呈不断增大的趋势,同时最大桩身弯矩作用深度逐渐增大,由 28.6 m 增至 29.8 m,但仍然处于浅层滑面 S2 的下方;随着桩截面尺寸的增大,浅层滑体内的桩身负弯矩的范围逐渐减小,而深层滑体内的桩身负弯矩的范围逐渐增大。

4.3 桩底支承条件的影响

抗滑桩桩底支承条件与嵌固段的桩体长度和岩土体力学性质和风化破碎程度有关,因此研究不同桩底支承条件下抗滑桩内力与变形特征具有重要意义。在研究桩底支承条件对桩身内力与变形的

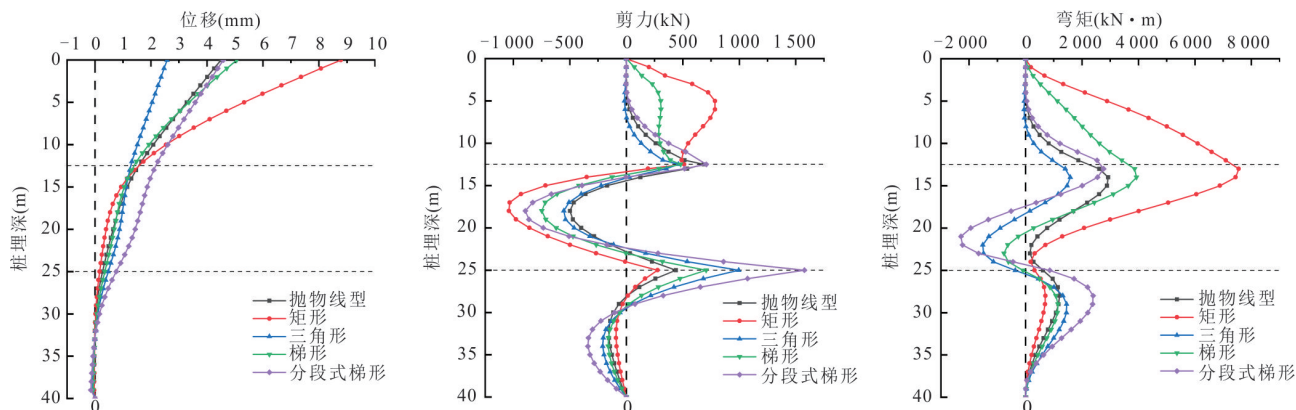


图 13 不同地基系数下双层滑带滑坡抗滑桩的变形和内力分布图

Fig.13 Displacement and internal forces diagram of anti-sliding piles in landslide with double sliding zones under different foundation coefficients

a. 位移图; b. 剪力图; c. 弯矩图

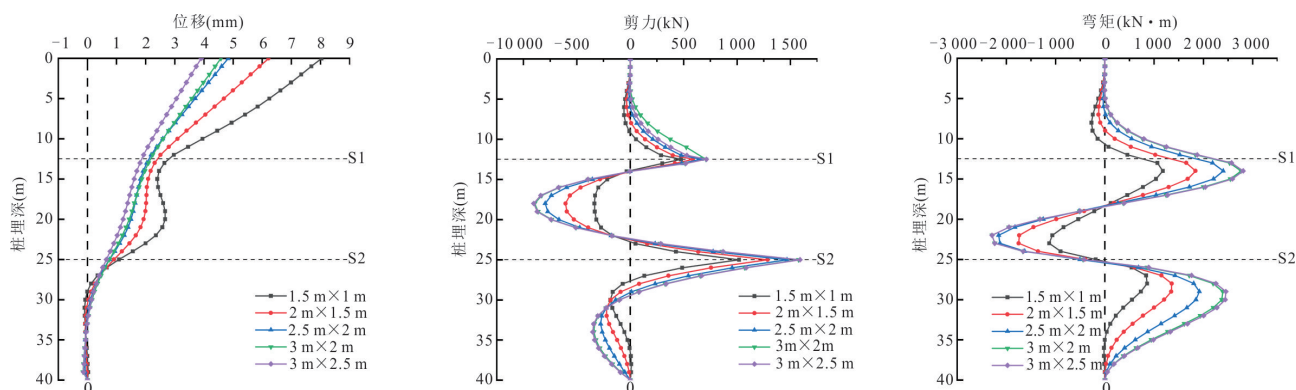


图 14 不同截面尺寸的双层滑带滑坡抗滑桩的变形和内力分布图

Fig.14 Displacement and internal forces diagram of anti-sliding piles in landslide with double sliding zones under different size

a. 位移图; b. 剪力图; c. 弯矩图

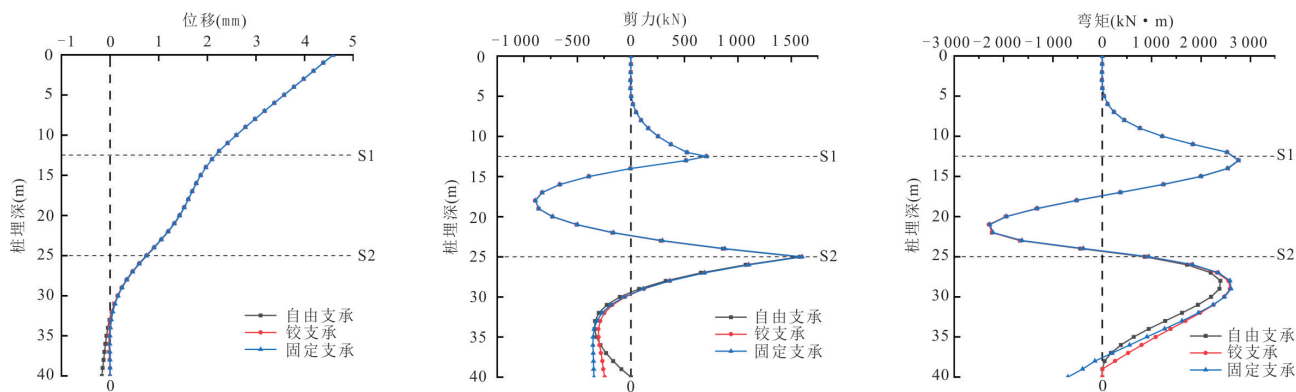


图 15 不同桩底支承条件下双层滑带滑坡抗滑桩的变形和内力分布图

Fig. 15 Displacement and internal forces diagram of anti-sliding piles in landslide with double sliding zones under different bearing condition

a. 位移图; b. 剪力图; c. 弯矩图

影响时,滑坡推力采用分段式梯形分布,抗滑桩截面尺寸为 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。

由图 15 可知,不同桩底支承条件下上部受荷段的桩身变形与内力几乎没有差别,但嵌固段差别较

大;桩底约束条件为自由支承时,桩底位移为负值,而对于铰支承与固定支承,桩底位移趋于零;对于嵌固段的桩身剪力,3种桩底支承条件下剪力先减小为负值,再逐渐增大.当桩底约束为自由支承时,桩底剪力趋于零,而当桩底约束为铰支承和固定支承时,桩底剪力不为零,并且在数值上(绝对值) $Q_{\text{固定}} > Q_{\text{铰支}} > Q_{\text{自由}}$;3种桩底支承条件下嵌固段的桩身弯矩先增大后减小,桩底约束条件为自由支承和铰支承时,桩底弯矩趋于零,为固定支承时,桩底弯矩为负值.

5 结论

(1)本文基于传统的剩余推力法,考虑不同滑体之间的相互作用,提出了双层滑带滑坡的推力计算方法,并给出了适用性更强的滑坡推力拟合函数.

(2)改进了传统的弹性地基系数法:考虑双层滑带滑坡的物质组成差异和运动特征,分别建立受荷段和嵌固段的挠曲微分方程,并利用有限差分法求解抗滑桩任一截面的位移和内力,同时编写相应的计算程序实现迭代求解方程.

(3)利用FLAC3D有限元数值分析提出双层滑带滑坡的分段式梯形推力分布规律,上下两层滑体部分的推力 E_1 、 E_2 分别为1 719.45 kN/m、3 198.24 kN/m,合力作用点分别距离分段桩体顶部 $0.55h_{11}$ 和 $0.63h_{12}$ (h_{11} 和 h_{12} 分别为上下两段受荷桩长),从而确定滑坡的推力分布函数,与数值结果吻合较好,并代入理论进行抗滑桩内力计算.

(4)理论计算得到的抗滑桩受力特征,相比数值模拟结果分布规律基本一致:桩身位移沿桩顶往下逐渐减小,伴随一定反弯现象;桩身剪力和弯矩具有两个极大值,一个极小值:剪力极大值位于滑面处,弯矩极大值位于滑面下方2~3 m,剪力和弯矩的极小值均位于深层滑体中.表明本文所建理论模型是可靠的,能够较好的反映双层滑带滑坡中抗滑桩的受力特征.

(5)滑坡推力分布形式和抗滑桩设计参数(截面尺寸、桩底支承条件)是影响抗滑桩受力特征的重要因素,尤其是假设推力分布形式与实际区别较大时,桩身受力偏差很大.因此,在进行抗滑桩结构设计时,要合理的确定计算参数.

References

Dai, Z. H., 2002. Study on Distribution Laws of Landslide-

Thrust and Resistance of Sliding Mass Acting on Antislid Piles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(4): 517—521(in Chinese with English abstract).

Dai, Z. H., Peng, Z. B., 2002. Finite Difference Method Based on “M-K” Method for Calculation of Internal Forces of a Whole Stabilizing Pile. *Rock and Soil Mechanics*, 23(3): 321—324, 328(in Chinese with English abstract).

Dai, Z. H., Shen, P. S., Peng, Z. B., 2003. A New Mode for Calculating Internal Forces of Stabilizing Pile. *China Civil Engineering Journal*, 36(4): 99—104(in Chinese with English abstract).

Dong, M. M., Wang, L. Q., Ge, Y. F., et al., 2017. Mechanical Characteristics of Anti-Sliding Pile Considering Comprehensive Foundation Coefficient of Sliding Bed on Composite Inclined Rock Mass. *Rock and Soil Mechanics*, 38(10): 3000—3008(in Chinese with English abstract).

Gui, S. Q., 2005. Design Method for Using Stabilizing Piles with Pre-Stressed Anchored Cables in Landslide Remediation Works. *Earth Science*, 30(2): 233—240(in Chinese with English abstract).

Gui, S. Q., Yin, K. L., Luo, P., 2003. A Study on Applications of Stabilizing Piles with Pre-Stressed Anchor Cables in Landslides Remediation Works. *Rock and Soil Mechanics* (S2): 239—243, 248(in Chinese with English abstract).

He, K. Q., 1998. An Analysis on the Multilayered Slide Law of the Large-Scale Accumulative Landslides. *Metal Mine*(7): 15—18(in Chinese with English abstract).

Hu, X. L., Tan, F. L., Tang, H. M., et al., 2017. In-Situ Monitoring Platform and Preliminary Analysis of Monitoring Data of Majiagou Landslide with Stabilizing Piles. *Engineering Geology*, 228: 323—336. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.001>

Ito, T., Matsui, T., 1975. Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles. *Soils and Foundations*, 15(4): 43—59. https://doi.org/10.3208/sandf1972.15.4_43

Li, C. D., Wu, J. J., Tang, H. M., et al., 2016. Model Testing of the Response of Stabilizing Piles in Landslides with Upper Hard and Lower Weak Bedrock. *Engineering Geology*, 204: 65—76. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.002>

Lin, S. S., Liao, J. C., 2006. Lateral Response Evaluation of Single Piles Using Inclinator Data. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(12): 1566—1573. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:12\(1566\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:12(1566))

Liu, D. Z., Hu, X. L., Zhou, C., et al., 2020. Model Test Study of a Landslide Stabilized with Piles and Evolutionary Stage Identification Based on Thermal Infrared Temper-

- ature Analysis. *Landslides*, 17(6): 1393—1404. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01355-0>
- Li, S. L., Xu, Q., Tang, M. G., et al., 2020. Study on Spatial Distribution and Key Influencing Factors of Landslides in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 45(1): 341—354(in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Yan, E. C., Li, Z. C., 2008. Research on Real-Time Stability of Hongshibao Landslide in Badong of the Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 29(S1): 412—416(in Chinese with English abstract).
- Ni, W. D., Tang, H. M., Hu, X. L., et al., 2013. Research on Deformation and Stability Evolution Law of Huangtupo Riverside Slump-Mass No. I. *Rock and Soil Mechanics*, 34(10): 2961—2970(in Chinese with English abstract).
- Qian, T. H., Xia, W. C., Chao, Z. G., et al., 2011. A Calculation Approach for Frame Anti-Sliding Piles. *Earth Science*, 36(6): 1143—1148(in Chinese with English abstract).
- Su, A. J., Huo, X., Wang, J. T., et al., 2018. Three-Section Method for Calculating Internal Force and Deformation of Cantilevered Anti-Slide Pile. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(3): 512—519(in Chinese with English abstract).
- Wang, C. T., Wang, H., Zhang, Y. F., et al., 2020. Model Test and Numerical Simulation Study on the Mechanical Characteristics of The Anchored Slide-Resistant Pile For Stabilizing The Colluvial Landslide. *Rock and Soil Mechanics*, 41(10): 3343—3354(in Chinese with English abstract).
- Wang, G. H., Li, C. D., Chen, W. Q., et al., 2019. Mechanical Characteristics of Anchored Slide-Resistant Piles Under the Condition of Composite Multilayer Sliding Bed. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(11): 2219—2230(in Chinese with English abstract).
- Wu, R. Z., Zhou, H. Q., Hu, Y., et al., 2015. An Improved Method for Calculating Anti-Sliding Pile with Prestressed Anchor Cable Based on Finite Difference Theory. *Rock and Soil Mechanics*, 36(6): 1791—1800(in Chinese with English abstract).
- Yang, D. F., Hu, X. L., Xu, C., et al., 2021. Model Test on the Deformation Evolution Characteristics of Landslide with Multiple Sliding Zone. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(2): 300—308(in Chinese with English abstract).
- Yang, H. F., Xing, B. C., Jiang, H., et al., 2022. Analogical Model Tests on Repeated Surficial Failure of Dry Granular Slopes Confined by Retaining Walls. *Frontiers in Earth Science*, 10: 973205(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. F., Xu, S. Q., 2003. Finite Difference “K-K” Method of Calculation of Anchor-Stabilizing Piles. *Rock and Soil Mechanics*, 24(1): 61—64(in Chinese with English abstract).
- Zhan, H. Z., Wang, L. Q., Wang, C. S., et al., 2014. Study of Mechanical Characters of Anti-Sliding Piles Considering Different Foundation Coefficients of Sliding Bed. *Rock and Soil Mechanics*, 35(S2): 250—256(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Hu, X. L., Xu, C., et al., 2021. Mechanical Characteristics of Anti-Slide Pile of Multi-Layer Sliding Zone Accumulation Layer Based on Physical Model Test. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(4): 171—178(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. R., Zhao, S. Y., 2004. Application of Strength Reduction FEM in Soil and Rock Slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(19): 3381—3388(in Chinese with English abstract).
- Zhou, C., Yin, K. L., Cao, Y., et al., 2020. Landslide Susceptibility Assessment by Applying the Coupling Method of Radial Basis Neural Network and Adaboost: A Case Study from the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 45(6): 1865—1876(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 戴自航, 2002. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究. *岩石力学与工程学报*, 21(4): 517—521.
- 戴自航, 彭振斌, 2002. 抗滑桩全桩内力计算“M-K”法的有限差分法. *岩土力学*, 23(3): 321—324, 328.
- 戴自航, 沈蒲生, 彭振斌, 2003. 弹性抗滑桩内力计算新模式及其有限差分法. *土木工程学报*, 36(4): 99—104.
- 董曼曼, 王亮清, 葛云峰, 等, 2017. 考虑滑床复合倾斜岩体综合地基系数的抗滑桩受力特征研究. *岩土力学*, 38(10): 3000—3008.
- 桂树强, 2005. 预应力锚索抗滑桩结构计算方法. *地球科学*, 30(2): 233—240.
- 桂树强, 殷坤龙, 罗平, 2003. 预应力锚索抗滑桩治理滑坡应用研究. *岩土力学*(S2): 239—243, 248.
- 贺可强, 1998. 大型堆积层滑坡的多层滑移规律分析. *金属矿山*(7): 15—18.
- 李松林, 许强, 汤明高, 等, 2020. 三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因子. *地球科学*, 45(1): 341—354.
- 李英, 晏鄂川, 李作成, 2008. 三峡库区巴东红石包滑坡稳定性动态分析. *岩土力学*, 29(S1): 412—416.
- 倪卫达, 唐辉明, 胡新丽, 等, 2013. 黄土坡临江 I 号崩滑体变形及稳定性演化规律研究. *岩土力学*, 34(10): 2961—2970.
- 钱同辉, 夏文才, 朝泽刚, 等, 2011. 考虑空间协同作用框架式抗滑桩的计算方法. *地球科学*, 36(6): 1143—1148.
- 苏爱军, 霍欣, 王杰涛, 等, 2018. 悬臂式抗滑桩内力计算的“三段法”. *岩土工程学报*, 40(3): 512—519.

- 王成汤, 王浩, 张玉丰, 等, 2020. 锚索抗滑桩加固堆积型滑坡的受力特性模型试验与数值模拟研究. 岩土力学, 41(10): 3343—3354.
- 王贵华, 李长冬, 陈文强, 等, 2019. 复合多层滑床条件下锚索抗滑桩受力特征研究. 岩石力学与工程学报, 38(11): 2219—2230.
- 吴润泽, 周海清, 胡源, 等, 2015. 基于有限差分原理的预应力锚索抗滑桩改进计算方法. 岩土力学, 36(6): 1791—1800.
- 杨登芳, 胡新丽, 徐楚, 等, 2022. 基于物理模型试验的多层滑带滑坡变形演化特征. 地质科技通报, 41(2): 300—308.
- 杨虎锋, 邢本聪, 蒋虎, 等, 2022. 挡墙限制型散粒体斜坡堆积特征模型试验. 地球科学, 47(3): 974—986.
- 杨佑发, 许绍乾, 2003. 锚索抗滑桩内力计算的有限差分“K-K”法. 岩土力学, 24(1): 61—64.
- 詹红志, 王亮清, 王昌硕, 等, 2014. 考虑滑床不同地基系数的抗滑桩受力特征研究. 岩土力学, 35(S2): 250—256.
- 张杰豪, 胡新丽, 徐楚, 等, 2021. 基于物理模型试验的多层滑带堆积层滑坡—抗滑桩受力特征. 地质科技通报, 40(4): 171—178.
- 郑颖人, 赵尚毅, 2004. 用有限元强度折减法求滑(边)坡支挡结构的内力. 岩石力学与工程学报, 23(20): 3552—3558.
- 周超, 殷坤龙, 曹颖, 等, 2020. 基于集成学习与径向基神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价. 地球科学, 45(6): 1865—1876.