

• 滑坡堰塞湖灾害机理与防控 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202300380



## 渐进式滑坡锚索抗滑桩预应力张拉值计算

侯小强<sup>1</sup>, 王新飞<sup>1\*</sup>, 贾洪璐<sup>2</sup>, 安玉科<sup>3</sup>, 周重任<sup>1</sup>, 侯云龙<sup>4</sup>

(1.兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2.中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 050000;

3.甘肃省交通规划设计院有限公司, 甘肃 兰州 730030;

4.甘肃省工程地质研究院, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 依据渐进式滑坡蠕变特点, 现有锚索抗滑桩计算模型针对渐进式滑坡桩-锚-土三者相互作用过程考虑较少。针对这一问题, 将渐进式滑坡缓慢失稳的变形特征和预应力锚索抗滑桩从空载到满载动态工作过程相结合, 利用Winkler弹性地基梁理论, 优化了锚索抗滑桩桩-锚变形协调条件, 考虑桩后土压力渐进变化过程, 构建不同工况桩-锚-土协同工作的计算模型, 推导了预应力锚索抗滑桩施工阶段初张拉值的计算方法。结合工程算例和有限元软件数值模拟结果, 为获取较高精度的计算数值, 采用MATLAB软件编译程序进行计算分析。结果表明: 1) 渐进式滑坡“稳定-蠕动-失稳”阶段性变形特点决定了预应力锚索抗滑桩“空载-加载-满载”三阶段桩-锚动态内力变形过程, 明确了各阶段桩后可能存在的土压力模型, 单纯进行满载阶段锚索拉力设计不符合渐进式滑坡实际作用机理, 进一步证明施工阶段锚索预应力张拉值设计的重要性; 2) 渐进式滑坡推力由尚未产生的初始空载阶段至完全作用的满载阶段, 两阶段并非互相独立存在, 二者通过桩-锚变形协调条件相互作用, 表明了施工阶段抗滑桩预应力张拉力值大小受满载阶段桩锚内力及变形大小的影响; 3) 依据渐进式滑坡锚索抗滑桩动态内力变形过程, 保证抗滑桩受荷段和锚固段内力大小均衡相等, 优化了满载阶段全桩弯矩平衡设计原则, 确立了以静止土压力作为施工阶段预应力张拉值设计标准, 对比表明, 此计算方法优于其余4种现有算法, 同时有限元数值模拟结果与本文算法贴合度较高, 进一步验证了此计算方法的合理性和可靠性。研究成果可为渐进式滑坡中预应力锚索抗滑桩的设计计算和施工提供技术指导。

**关键词:** 渐进式滑坡; 锚索预应力; 桩锚协调变形; 土压力状态; 锚索设计拉力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)01-0138-10

渐进式滑坡<sup>[1-2]</sup>的演化模式是一个动态发展的过程, 且在一些规模较大的老滑坡中比较常见, 如舟曲的立节滑坡<sup>[3]</sup>、秭归县谭家湾滑坡<sup>[4]</sup>等, 其变形过程缓慢, 受降雨和地震等因素影响呈现阶段性, 完全失稳前一般存在较为明显的变形迹象, 便于治理和避险。预应力锚索抗滑桩是近年来广泛应用于渐进式滑坡治理的支挡结构形式<sup>[5]</sup>, 其基本原理是在抗滑桩悬臂端设置一排或多排预应力锚索, 使抗滑桩由原本的被动抗滑结构变为主动抗滑结构。由于锚索

拉力的作用, 可以有效改善抗滑桩工作时受力状态, 优化桩身内力形式, 提高抗滑能力, 且能够大幅度减小桩长和桩身截面面积, 从而降低工程造价, 节省成本。随着铁路、公路以及水利水电工程中边坡和滑坡防治工程的日益增加<sup>[6]</sup>, 研究渐进式滑坡锚索抗滑桩设计计算理论对解决此类工程问题意义重大。

目前, 国内锚索抗滑桩预应力值研究主要体现在满载阶段开展锚索设计理论和桩锚协同设计计算两个方面。Jinoh<sup>[7]</sup>和Martin<sup>[8]</sup>等通过建立3维有限元

收稿日期: 2023-05-21

基金项目: 中央引导地方科技发展基金项目(22ZY1QA005); 甘肃省交通运输科研基金项目(2022-028); 甘肃省交通运输厅科技项目(2021-25); 甘肃省自然资源厅重点科学技术研究项目(2022-006); 甘肃省重点研发计划-工业类项目资助(23YFGA0028)

作者简介: 侯小强(1977—), 男, 教授、正高级工程师。研究方向: 抗滑桩支挡结构与土的相互作用。E-mail: houxq@foxmail.com

\*通信作者: 王新飞, E-mail: 737278453@qq.com

网络出版时间: 2023-11-22 17:20:15 网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20231122.1114.001>

模型,研究锚索桩-土耦合作用关系,结果表明桩土相对刚度对桩的破坏模式有重要影响。Ochang等<sup>[9]</sup>基于耦合欧拉-拉格朗日分析研究荷载倾斜角对不同类型螺旋锚的抗拔能力的影响,并提出一种归一化的载荷能力关系。Zhao等<sup>[10]</sup>优化了预应力锚索h型抗滑桩结构内力和位移计算方法,基于优化方法可以明显降低前后桩峰值弯矩和桩顶位移。曾德荣等<sup>[11]</sup>将锚索抗滑桩受荷段按结构静力问题计算,锚索拉力视为外荷载施加在受荷段,锚固段按Winkler弹性地基梁计算,此法可以简化锚索抗滑桩的计算过程。王化卿等<sup>[12]</sup>根据抗滑桩桩后作用的滑坡推力以及桩前滑面以上岩土体抗力,先行计算出滑面处剪力,将锚索拉力设计为滑面处剪力的1/2~4/7,所得锚索设计拉力即为锚索初始预应力。桂树强<sup>[13]</sup>根据桩锚变形协调原理,将锚索的预应力按锚索设计拉力的60%~80%考虑,建立其力学和数学模型,求得锚索设计拉力,得到桩身内力分布的解析解,计算出的锚索拉力需根据桩顶位移控制条件进行反复校核,直到指标满足要求为止。金布格等<sup>[14]</sup>提出用控制桩顶水平位移的方法计算锚索设计拉力,将桩顶的最终位移控制作为设计标准。董建华等<sup>[15]</sup>研究地震作用下预应力锚索抗滑桩的工作机理和动力计算方法,建立了预应力锚索抗滑桩滑坡防治结构的动力计算模型进行地震响应分析。刘小丽等<sup>[16]</sup>以滑面处桩身弯矩为0为控制条件来计算锚索设计拉力,再根据桩-锚变形协调条件求得锚索预应力。王成汤等<sup>[17]</sup>开展了锚索抗滑桩加固堆积型滑坡的受力特性及其联合抗滑机制,通过室内试验和数值模拟对比分析锚索抗滑桩桩身变位、内力以及滑体深部水平位移的变化规律。

在桩锚协同设计计算方面,毛明章等<sup>[18]</sup>考虑桩锚之间协调变形作用,分析预应力锚索抗滑桩协同工作机理,将坡体内侧位移加入到方程中,建立桩锚协调变形计算模型。石海洋等<sup>[19]</sup>采用力法求解锚索抗滑桩的结构内力,并提出锚索与抗滑桩的荷载分担比初步可按照30%~40%进行设计。陈占<sup>[20]</sup>将抗滑桩受荷段采用挠曲变形理论,锚固段采用弹性地基梁理论,计算锚索抗滑桩桩锚变形协调下桩的变形与内力,通过控制滑面处变形和桩身内力形式来计算锚索初始预应力值和锚索自由段长度。王贵华等<sup>[21]</sup>基于桩-锚变形协调原理,构建了复合多层滑床条件下锚索抗滑桩计算分析模型,提出复合多层嵌固段抗滑桩内力和变形计算方法,结论表明:传统算法较为保守,改进算法可以减小桩顶位移及桩身内力。戴自航等<sup>[22]</sup>未考虑桩锚变形协调条件,将锚索拉力视为集中力作用于抗滑桩受荷段,利用有限差分法对锚索抗滑桩的桩身变形和内力进行了计算。周

德培等<sup>[23]</sup>将抗滑桩受荷段视为超静定结构,考虑桩锚变形协调条件,按地基系数法确定锚索拉力及抗滑桩锚固段桩身内力。陈昌富等<sup>[24]</sup>基于加权残值法建立了考虑预应力损失的锚索抗滑桩内力与变形计算方法。上述锚索抗滑桩设计方法大多基于最大滑坡推力进行锚索拉力最终设计值的计算,对于施工阶段锚索初始张拉值设计方法研究较少,尤其是针对渐进式滑坡变形特点的锚索抗滑桩初始预应力设计理论尚无人研究。由于渐进式滑坡独特的变形特征,锚索抗滑桩的受力状态和工作机理在时空演化规律上与渐进式滑坡的动态蠕变过程具有一致性,因此,目前研究成果不适用于渐进式滑坡作用下锚索抗滑桩预应力值计算。

基于此,结合渐进式滑坡的变形特点和锚索抗滑桩的实际动态工作过程,考虑了锚索-抗滑桩-土体各阶段桩后土压力空载和满载两阶段对锚索抗滑桩工作机理的影响,构建了锚索抗滑桩不同阶段的计算模型,并优化桩锚变形协同条件,推导渐进式滑坡锚索抗滑桩初始预应力计算方法,结合具体算例进行验证该方法的合理性。

## 1 基本计算原理

渐进式滑坡的动态变形模式和锚索抗滑桩的动态工作过程是由“桩-锚-土”的协调变形共同完成的。抗滑桩在施工成桩后施加预应力张拉时,桩后滑坡推力尚未开始作用,坡体处于空载工作状态,随着坡体变形达到最大值时,滑坡推力全部作用于抗滑桩,此时锚索抗滑桩处于满载工作状态。为此根据锚索抗滑桩桩土相互作用工作过程,依据锚索抗滑桩内力和变形将其按照初始阶段到满载阶段开展锚索预应力初始设计拉力计算方法研究。

### 1.1 锚索预应力空载阶段

锚索抗滑桩的初始预应力阶段,其主要受锚索张拉产生的桩土相互作用,桩后岩土体产生一定的被动挤压,其土压力状态与所张拉的初始锚索预应力数值大小有密切关系,当所施加的锚索预应力不断增大,桩后坡体将产生向上运动的趋势,使桩后土压力先后表现为主动土压力、静止土压力及被动土压力状态。

### 1.2 锚索预应力满载阶段

锚索抗滑桩承受全部滑坡推力作用,抗滑桩内力和变形达到最大,锚索拉力也达到最大值,此时锚索抗滑桩承受的荷载为满载阶段。现有预应力锚索抗滑桩锚索预应力设计计算理论研究较多<sup>[10-15]</sup>,本文在现有抗滑桩的研究资料基础之上,对文献<sup>[10]</sup>锚索设计拉力计算条件进行了优化,满载阶段抗滑桩桩身弯矩的分布形式是最能直接、准确反映抗滑桩

受力状态以及变形形式的力学参数,从锚索抗滑桩全桩内力均衡分布形式出发分析满载阶段抗滑桩的受力状态和稳定性。

### 1.3 桩-锚协调变形条件

预应力锚索抗滑桩桩-锚协同变形即考虑锚索作用点处锚索的水平伸长量与桩身水平位移相协调。初始阶段受锚索初始张拉力作用,抗滑桩桩顶产生倾向于坡体内侧的位移;满载阶段滑坡推力完全作用于抗滑桩桩身之上,锚索产生张拉变形,抗滑桩产生向远离坡体一侧的桩顶位移。

图1为初始阶段桩身位移示意图。图1中,  $a_0$  为初始阶段桩顶位移,  $\theta$  为锚索与水平面夹角。由图1可见,初始阶段由于锚索预应力张拉作用,抗滑桩产生趋向坡体内部方向的桩身变形。

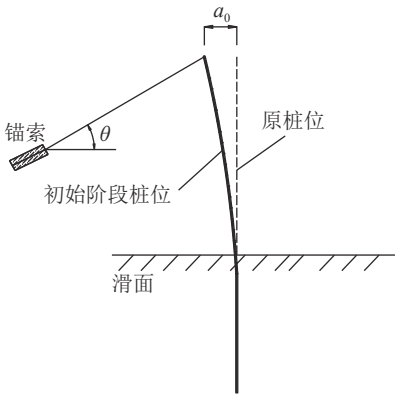


图1 初始阶段桩身位移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pile body displacement in the initial stage

图2为满载阶段桩身位移示意图。由图2可见,满载阶段滑坡推力增加到最大值,抗滑桩处于满载阶段,桩顶位移达到最大值,桩顶位移远离坡体。图2中:  $a_1$  为满载阶段下的桩顶最终位移;  $\Delta$  为满载阶段下的锚索变形量。考虑到实际工程中锚索的长度较长,同时锚索受力过程中会产生弹性伸长量,且预应力锚索抗滑桩桩顶位移一般严格控制在桩长的0.5%以内,微小的桩顶位移相较于锚索长度和桩身高度不足以使夹角  $\theta$  产生较大变化,因此,满载阶段未考虑锚索与水平面夹角  $\theta$  变化。此时,桩-锚协调变形方程应为:

$$\Delta = (a_0 + a_1) \cdot \cos \theta \quad (1)$$

预应力锚索抗滑桩的桩顶位移  $a_i$ 、锚索变形量  $\Delta$  的计算方法为:

$$a_i = X_0 + \phi_0 h_1 + \Delta_q - \Delta_T \quad (2)$$

$$\Delta = \delta \cdot (A - T) \quad (3)$$

$$\delta = \frac{4l}{NE_g \pi d^2} \quad (4)$$

式(1)~(4)中:  $a_i$  为桩顶位移;  $X_0$ 、 $\phi_0$  分别为抗滑桩锚固段顶端处桩的位移和转角;  $h_1$  为抗滑桩滑面以

上受荷段长度;  $\Delta_q$ 、 $\Delta_T$  分别为滑坡推力  $q$  及锚索拉力  $T$  作用下桩顶的位移;  $\delta$  为锚索的柔度系数,即单位力作用下锚索的弹性伸长量;  $A$ 、 $T$  分别为锚索的设计拉力和初始预应力;  $l$ 、 $d$  分别为锚索自由段长度和单束锚索直径;  $E_g$  为锚索的弹性模量;  $N$  为单孔锚索的束数。

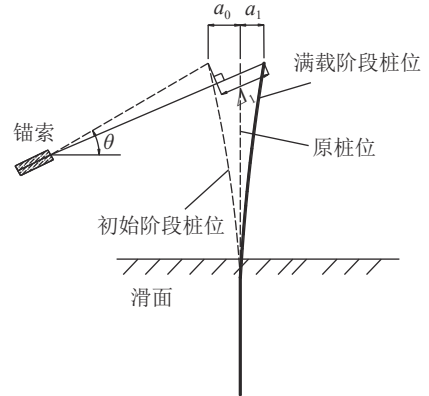


图2 满载阶段桩身位移示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pile body displacement in the full-load stage

## 2 初始阶段锚索预应力

初始阶段滑坡推力未产生作用,锚索初始张拉力作用抗滑桩,使得桩后产生土压力,根据库伦土压力理论计算出抗滑桩桩后主动土压力、静止土压力、被动土压力大小,利用抗滑桩受荷段侧应力与土压力互等原则,得出不同土压力类型下锚索初始张拉力数值,探究不同土压力设计原则下锚索抗滑桩桩身内力特点,为满载阶段计算锚索设计拉力提供合理的初始张拉值。

将锚索抗滑桩受荷段视为悬臂梁,利用结构力学理论计算初始阶段锚索抗滑桩受荷段内力及变形,如图3所示。

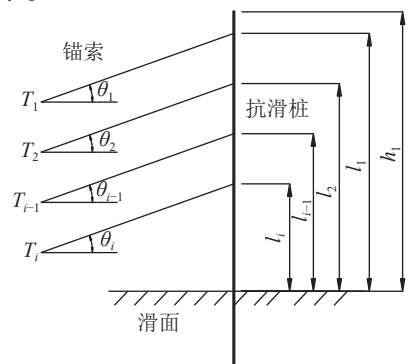


图3 初始阶段抗滑桩计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of anti-skid pile calculation in the initial stage

$$\text{剪力: } Q_y = \frac{E_j y^2}{2h_1} - \sum_{i=0}^n T_i \cos \theta_i \quad (5)$$

$$\text{弯矩: } M_y = \frac{E_j y^3}{6h_1} - \sum_{i=0}^n T_i l_i \cos \theta_i \quad (6)$$

$$\text{桩后侧应力: } \sigma_y = \frac{Q_y S_z^*}{Ib} \quad (7)$$

$$\text{侧应力之和: } \sigma_\Delta = b \int_0^{h_1} \sigma_y dy \quad (8)$$

锚索张拉值:

$$\sum_{i=0}^n T_i \cos \theta_i = \frac{E_j (h_1^2 S_z^* - 6)}{6h_1 S_z^*} \quad (9)$$

式(5)~(9)中:  $i$ 为锚索根数,  $i=0,1,2,3,\dots,n$ ;  $h_1$ 为抗滑桩受荷段高度;  $b$ 为桩截面宽度;  $y$ 为抗滑桩桩顶至计算点距离;  $T_i$ 为初始阶段第 $i$ 根锚索的初始张拉值;  $\theta_i$ 为第 $i$ 根锚索与水平面夹角;  $l_i$ 为第 $i$ 根锚索距滑面距离;  $I$ 为桩截面惯性矩;  $S_z^*$ 为桩截面静距;  $E_j$ 为桩后土压力类型,分别为主动土压力、静止土压力、被动土压力。

利用结构力学力矩分配法,即可求出不同锚索的初始张拉值,在求出锚索预应力的情况下,可以结合锚固段地层条件,依据Winkler弹性地基梁理论<sup>[25]</sup>,假设地基为连续线弹性介质,根据地基的刚度特性,设想桩与地基之间通过均匀分布具有特定刚度的弹性支座连接,基于以上假定进行初始阶段锚索抗滑桩锚索段的内力及变形计算,得出不同桩后土压力类型下预应力锚索抗滑桩全桩剪力、弯矩、变位、转角。

### 3 满载阶段锚索设计拉力计算

#### 3.1 满载阶段受荷段计算

满载阶段锚索抗滑桩受荷段承担的荷载主要有滑坡推力及锚索设计拉力 $A_i$ ,滑坡推力采用3种不同分布形式<sup>[26]</sup>(三角形、矩形、梯形)。因为三角形和矩形均为梯形的一种特殊形式,因此本次采用梯形计算图示,如图4所示。

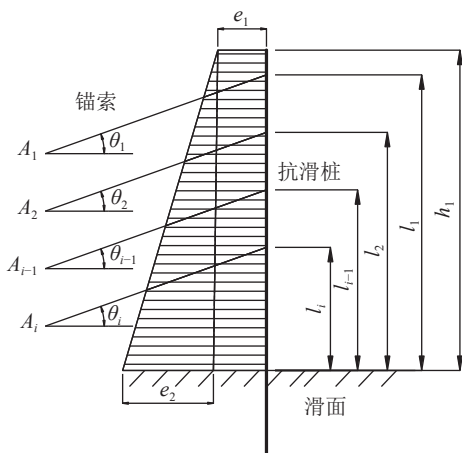


图4 满载阶段滑坡推力梯形作用抗滑桩计算示意图

Fig. 4 Calculation diagram of anti-skid pile in full-load stage

利用结构力学力法和位移法可求受荷段内力及变位:

$$\text{剪力: } Q'_y = \frac{e_1 y^2}{2} + \frac{e_2 y^3}{6h_1} - \sum_{i=0}^n A_i l_i \cos \theta_i \quad (10)$$

$$\text{弯矩: } M'_y = e_1 y + \frac{e_2 y^2}{2h_1} - \sum_{i=0}^n A_i \cos \theta_i \quad (11)$$

$$\text{位移: } x'_y = x_0 - \phi_0 (h_1 - y) + \frac{e_1}{EI} \left( \frac{h_1^4}{8} - \frac{h_1^3 y}{6} + \frac{y^4}{24} \right) + \frac{e_2}{EI h_1} \left( \frac{h_1^5}{30} - \frac{h_1^4 y}{24} + \frac{y^5}{120} \right) - \sum_{i=0}^n \frac{A_i \cos \theta_i y^2}{6EI} (3l_i - y) \quad (12)$$

$$\text{转角: } \phi'_y = \phi_0 - \frac{e_1}{6EI} (h_1^3 - y^3) - \frac{e_2}{24EI h_1} (h_1^4 - y^4) - \sum_{i=0}^n \frac{A_i \cos \theta_i y}{2EI} (2l_i - y) \quad (13)$$

式(10)~(13)中,  $A_i$ 为满载阶段第 $i$ 根锚索的设计拉力,  $e_1$ 、 $e_2$ 为滑坡推力矩形分布时分量,  $E$ 为弹性模量,其余同上。

#### 3.2 满载阶段锚固段

满载阶段锚索抗滑桩内力设计基于全桩弯矩平衡设计原则,即:全桩正负弯矩面积相等原则。传统锚固段计算方法,采用查表的方式,计算步骤繁杂且误差较大,本文基于“m”法<sup>[27]</sup>解析解公式,利用MATLAB程序进行抗滑桩锚固段内力和变位计算,省去查表的繁琐步骤,同时提高计算精度,利用MATLAB积分函数对全桩弯矩积分,即可求出满载阶段正负弯矩面积相等时锚索设计拉力。

“m”法影响函数值 $A_{1-4}$ 、 $B_{1-4}$ 、 $C_{1-4}$ 、 $D_{1-4}$ 的计算方法:

$$A_1 = 1 + \sum_{K=1}^n (-1)^K \frac{(5K-4)!!}{5K!} (\alpha y)^{5K} \quad (14)$$

$$B_1 = y + \sum_{K=1}^n (-1)^K \frac{1}{\alpha} \frac{(5K-3)!!}{(5K+1)!} (\alpha y)^{5K+1} \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{\alpha^2}{2} \left[ y^2 + \sum_{K=1}^n (-1)^K \frac{2}{\alpha^2} \cdot \frac{(5K-2)!!}{(5K+2)!} (\alpha y)^{5K+2} \right] \quad (16)$$

$$D_1 = \frac{\alpha^3}{6} \left[ y^3 + \sum_{K=1}^n (-1)^K \frac{6}{\alpha^3} \cdot \frac{(5K-1)!!}{(5K+3)!} (\alpha y)^{5K+3} \right] \quad (17)$$

式(14)~(17)中,  $\alpha$ 为桩的变形系数,  $K$ 取值为1,2,3, ...,  $n$ 。

其余影响函数值可分别由 $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 对 $y$ 微分得到:

$$A_2 = \frac{1}{\alpha} \frac{dA_1}{dy}, \quad B_2 = \frac{1}{\alpha} \frac{dB_1}{dy},$$

$$C_2 = \frac{1}{\alpha} \frac{dC_1}{dy}, \quad D_2 = \frac{1}{\alpha} \frac{dD_1}{dy} \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{1}{\alpha^2} \frac{d^2 A_1}{dy^2}, \quad B_3 = \frac{1}{\alpha^2} \frac{d^2 B_1}{dy^2},$$

$$C_3 = \frac{1}{\alpha^2} \frac{d^2 C_1}{dy^2}, \quad D_3 = \frac{1}{\alpha^2} \frac{d^2 D_1}{dy^2} \quad (19)$$

$$A_4 = \frac{1}{\alpha^3} \frac{d^3 A_1}{dy^3}, \quad B_4 = \frac{1}{\alpha^3} \frac{d^3 B_1}{dy^3},$$

$$C_4 = \frac{1}{\alpha^3} \frac{d^3 C_1}{dy^3}, \quad D_4 = \frac{1}{\alpha^3} \frac{d^3 D_1}{dy^3} \quad (20)$$

因此,满载阶段抗滑桩锚固段内力变位计算矩阵可得:

$$\begin{pmatrix} x_y'' \\ \phi_y'' \\ \alpha \\ M_y'' \\ \frac{\alpha^2 EI}{Q_y''} \\ \frac{\alpha^3 EI}{Q_y''} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \phi_0 \\ \alpha \\ M_0 \\ \frac{\alpha^2 EI}{Q_0} \\ \frac{\alpha^3 EI}{Q_0} \end{pmatrix} \quad (21)$$

全桩弯矩公式为:

$$M_y = M_y' + M_y'' \quad (22)$$

令全桩正负弯矩面积相等,即对全桩弯矩积分,积分函数为零:

$$\int_0^H M_y dy = \int_0^{h_1} M_y' dy + \int_0^{h_2} M_y'' dy = 0 \quad (23)$$

抗滑桩锚固段顶端弯矩  $M_0$  和剪力  $Q_0$  可由受荷段计算得到,锚固段转角  $\phi_0$  和位移  $x_0$  要根据桩底的边界条件(自由端、铰支端、固定端)来确定,对全桩弯矩积分求出满载阶段锚索设计拉力  $A_i$  后,将设计拉力  $A_i$  代入式(10)~(21),即可求得满载阶段锚索抗滑桩的剪力、弯矩、变位、转角。

### 3.3 施工阶段锚索预应力张拉值

根据满载阶段桩体最终位移,确定锚索抗滑桩的状态类型,结合初始阶段的桩身变位,利用桩锚协调条件,根据式(1)~(4)计算锚索预应力张拉值。桩锚协调变形条件下的锚索初始预应力张拉值:

$$T_i = A_i - \frac{\Delta_i N E_g \pi d^2}{4l} \quad (24)$$

桩锚协调变形下锚索预应力大小与初始预应力阶段计算得到的锚索预应力相接近,进行此步骤的计算可以对初始阶段锚索预应力进行验证,提高其准确和合理性。

## 4 算例分析

某滑坡经计算长期荷载作用的滑坡设计推力为  $E_p=1\ 000\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,“桩-桩”中距为6 m,抗滑桩上所受滑坡推力按梯形分布,水平分量分别为  $400\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$  及  $800\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,有限元模型如图5所示,滑坡推力分布如图6所示。滑坡体容重  $\gamma=19\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,内摩擦角  $\phi=26^\circ$ ,其治理措施采用了预应力锚索抗滑桩,桩顶位置设置一根锚索,锚索与水平面倾角为  $20^\circ$ ,抗滑桩采用 C30 混凝土浇筑,弹性模量  $E_w=3.0\times 10^7\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,桩截面为  $b\times a=1.5\ \text{m}\times 2.0\ \text{m}$ ,桩长为18 m,滑面以上桩长为  $h_1=10\ \text{m}$ ,滑面以下桩长  $h_2=8\ \text{m}$ ,滑动面以下的地基系数按“m”法计算,地基系数随深度变化的比例系数  $m=80\ 000\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-4}$ ,桩底按自由端考虑。

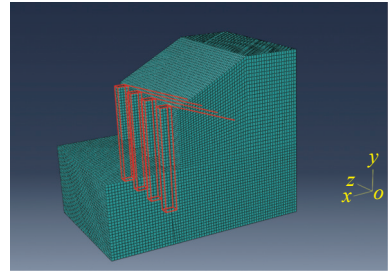


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

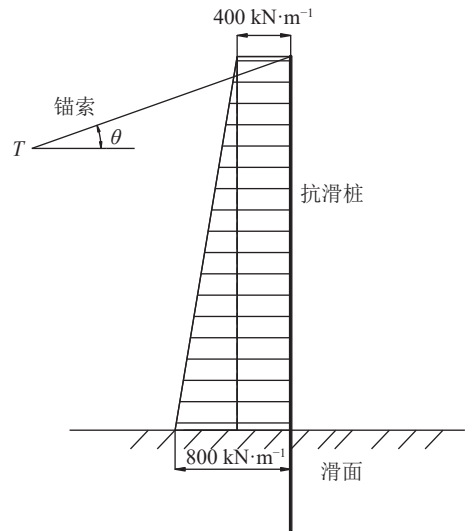


图 6 滑坡推力作用示意图

Fig. 6 Schematic diagram of landslide thrust action

锚索采用  $1\ 860\ \text{MPa}$ 、 $\phi 15.2\ \text{mm}$  高强度低松弛预应力钢绞线,单束截面面积  $140\ \text{mm}^2$ ,锚索自由段长度为  $13\ \text{m}$ ,其弹性模量  $E_g=1.8\times 10^8\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,每孔按10束计。

#### 1) 抗滑桩的判定

依据《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509—2020)抗滑桩变形系数计算要求,通过计算可得:

桩截面模量为:

$$W = \frac{1}{6}ba^2 = \frac{1}{6} \times 1.5 \times 2^2 = 1 \text{ m}^3.$$

桩截面惯性矩为:

$$I = \frac{1}{12}ba^3 = \frac{1}{12} \times 1.5 \times 2^3 = 1 \text{ m}^4.$$

桩抗弯刚度为:

$$EI = 0.8E_w I = 0.8 \times 3.0 \times 10^7 \times 1 = 2.4 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2.$$

桩变形系数为:

$$\alpha = \left( \frac{mB_p}{EI} \right)^{\frac{1}{5}} = \left( \frac{80\,000 \times (1.5 + 1)}{2.4 \times 10^7} \right)^{\frac{1}{5}} = 0.384 \text{ 4 m}^{-1}.$$

抗滑桩基本参数见表1。

表 1 抗滑桩参数

Tab. 1 Anti-skid pile parameters			
截面模量/m <sup>3</sup>	抗弯刚度/(10 <sup>7</sup> kN·m <sup>2</sup> )	变形系数/m <sup>-1</sup>	计算深度/m
1	2.4	0.384	3.07

桩的计算深度:  $\alpha h_2 = 0.384 \times 8 = 3.07 > 2.5$ , 因此, 本设计资料下抗滑桩属于弹性抗滑桩<sup>[25]</sup>。

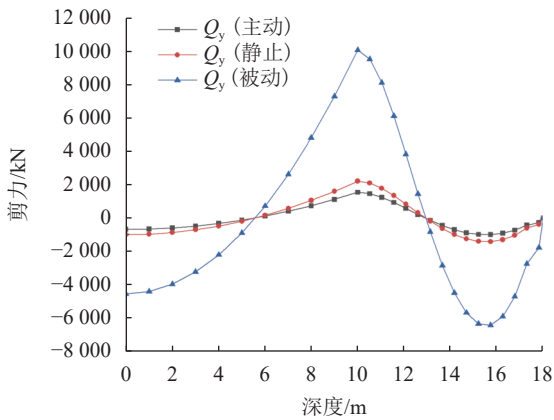
2) 初始阶段锚索抗滑桩设计

根据式(7)~(10)可计算得初始预应力阶段桩后不同土压力类型时抗滑桩内力及变位, 具体计算结果见表2, 初始阶段桩身剪力、弯矩如图7所示。

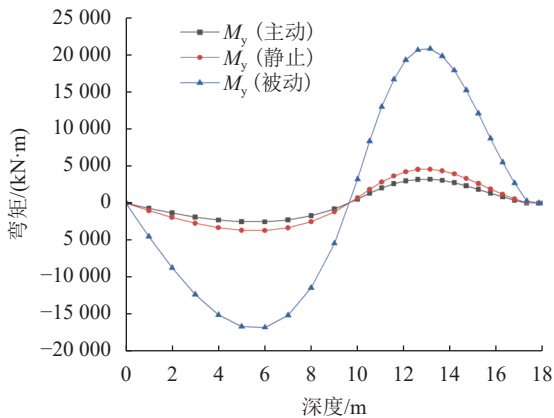
表 2 初始阶段抗滑桩内力变位

Tab. 2 Internal force shift of antiresistant pile in initial stage

土压力类型	土压力 E/(kN·m <sup>-1</sup> )	三角形分布 E <sub>f</sub> /(kN·m <sup>-1</sup> )	初始 预应力/kN	滑面处 剪力/kN	滑面处 弯矩/(kN·m)	滑面处 位移/m	滑面处 转角/(°)	桩顶 位移/m
主动	370.50	444.60	728	1 539	570	0.003 4	-0.051 6	-0.008 7
静止	533.90	640.68	1 059	2 208	728	0.004 8	-0.006 8 8	-0.012 5
被动	2 432.95	2 919.54	4 833	10 055	3 239	0.021 8	-0.321 0	-0.057 1



(a) 剪力



(b) 弯矩

图 7 初始锚索预应力阶段桩身剪力、弯矩对比

Fig. 7 Comparison of pile shear and bending moment in the prestress stage of initial anchor cable

由图7可见: 通过计算可得, 初始锚索预应力阶段抗滑桩桩顶产生趋向于坡体内的位移, 且抗滑桩

桩顶位移满足《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509—2020)要求的0.5%~1.0%; 同时, 不同的锚索预应力对应不同的桩后土压力状态, 3种土压力临界状态时锚索抗滑桩内力可求。通过主动土压力、静止土压力以及被动土压力状态下锚索抗滑桩内力状态对比分析, 确定满载阶段锚索抗滑桩锚索设计拉力的计算区间。由表2可知, 静止土压力状态下抗滑桩初始预应力、滑面处剪力、弯矩极值以及桩顶位移等指标满足抗滑桩力学演化规律。由此表明, 本锚索抗滑桩设计资料采用静止土压力状态作为设计标准进行锚索设计拉力计算。

3) 满载阶段锚索抗滑桩设计

根据式(10)~(23), 利用MATLAB程序可计算满载阶段锚索抗滑桩的内力和变位。选用现有4种不同计算方法与本文方法进行对比分析抗滑桩内力状态, 同时利用ABAQUS有限元软件模拟满载工况, 验证本文方法合理性。其中方法1<sup>[12]</sup>为设计拉力取滑面处剪力的1/2, 方法2<sup>[12]</sup>为设计拉力取滑面取剪力的4/7, 方法3<sup>[16]</sup>为使滑面处弯矩为0, 方法4<sup>[13]</sup>的初始预应力是设计拉力的60%, 具体计算结果见表3, 满载阶段桩身剪力、弯矩如图8所示, 桩身转角、位移如图9所示。

由图8、9和表3可知: 方法1中满载阶段设计拉力最小, 依次递增, 方法4设计拉力最大; 滑面处剪力均为正值, 随着设计拉力的增大, 滑面处剪力呈现减小的趋势; 滑面处弯矩随着设计拉力的增大, 同样呈现减小的趋势, 但设计拉力达到一定值时滑面处弯矩变为0, 甚至负值, 此现象表明锚索拉力在抗滑桩满

载工作阶段承担的贡献越来越大; 桩身位移随着设计拉力的增加而减小, 在受荷段减小幅度较为明显, 在滑面以下 2 m 之后减小幅度减慢, 在滑面以下 4 m 之后桩身发生反方向微小位移, 同时设计拉力越大, 反向位移越小, 表明在同样地层条件下, 锚索设计拉力越大, 反向位移越小, 锚固力越小。

表 3 不同设计拉力下抗滑桩桩身内力

Tab. 3 Internal force of anti-skid pile pile under different design tension

方法	锚索设计拉力/kN	滑面处剪力/kN	滑面处弯矩/(kN·m)	滑面处位移/m	滑面处转角/(°)
1	2 041	4 082.1	7 487.5	0.011 9	-0.201 0
2	2 230	3 904.5	5 711.5	0.010 7	-0.172 0
3	2 838	3 333.2	0	0.006 7	-0.097 4
4	3 041	3 142.4	-1 909.4	0.005 4	-0.068 8
本文方法	2 615	3 542.7	2 093.7	0.008 1	-0.120 0

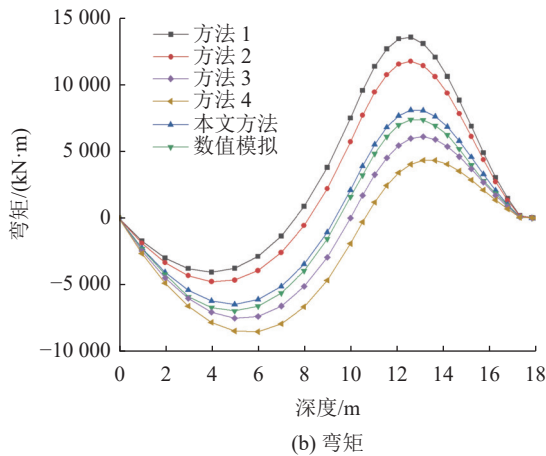
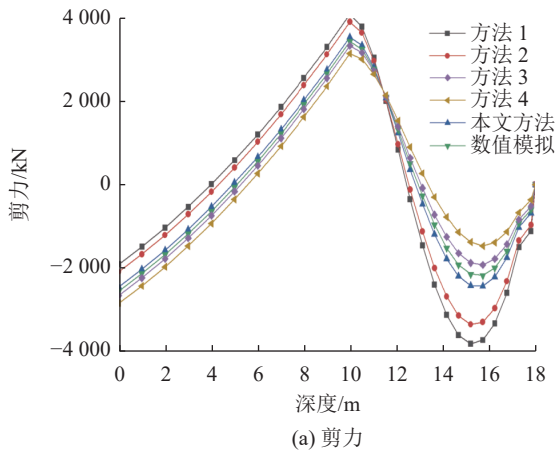


图 8 满载锚索设计拉力阶段桩身剪力、弯矩对比

Fig. 8 Comparison of shear force and bending moment of pile body in tensile stage of full load anchor cable design

由上述分析可知, 为控制抗滑桩受荷段和锚固段弯矩平衡, 将抗滑桩全桩弯矩正负面积之比作为一个新的比较参数, 以此对比分析不同计算方法下抗滑桩的桩身受力情况。其中, 方法 1、方法 2 的桩身

弯矩图正负面积之比分别为 3.63、2.37, 表明锚索设计拉力过小, 导致受荷段弯矩过小, 锚固段弯矩过大; 本文方法中弯矩图正负弯矩面积之比为 1, 即其受荷段弯矩与锚固段弯矩分布基本一致, 受力形式较为合理; 方法 3、方法 4 中弯矩图正负弯矩面积之比分别为 0.55、0.30, 表明锚索设计拉力过大, 导致受荷段弯矩过大, 锚固段弯矩过小; 从全桩弯矩分布形式来看: 方法 1、2、3、4 均属于受力不均的情况。

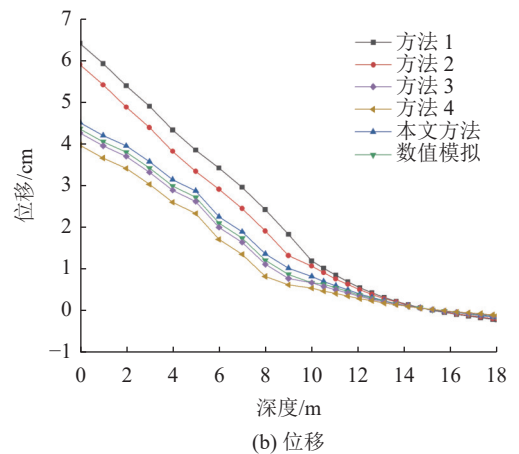
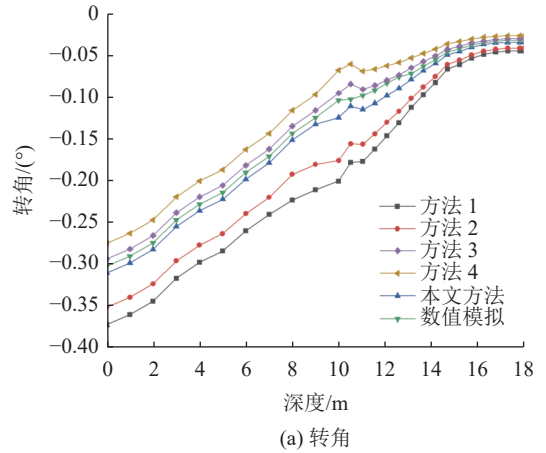


图 9 满载锚索设计拉力阶段桩身转角、位移对比

Fig. 9 Comparison of angle and displacement of pile body in tensile stage of full load anchor cable design

通过有限元模型模拟本算例满载工况下锚索抗滑桩的支护过程, 提取桩身内力、变位等关键参数。由图 8、9 可知: 其中数值模拟得到的桩身弯矩图正负面积之比为 0.96, 桩顶最大位移为 4.32 cm, 本文方法所得桩身弯矩图正负面积之比为 1, 桩顶最大位移为 4.51 cm, 数据证明两种方法得到的桩身内力形式基本一致, 桩身变位在合理误差范围之内, 能够一定程度验证本文设计方法的合理性和可靠性。

#### 4) 验证初始阶段锚索预应力

将所采用锚索的相关参数代入式 (4) 可得, 本设计资料所选用锚索柔度  $\delta = 4.0 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{kN}^{-1}$ , 对本文方法下锚索设计拉力进行初始预应力校核。

将初始预应力阶段和满载设计拉力阶段相关数据代入式(24)可得锚索初始预应力为1 067.5 kN,初始预应力阶段桩后静止土压力状态下锚索初始预应力为1 059 kN,两者误差在0.79%,可以忽略不计,因

此最终锚索初始预应力应为1 067.5 kN。

### 5)结果对比分析

满载设计阶段5种计算方法对比分析结果见表4。

表4 满载阶段不同计算方法对比分析

Tab. 4 Comparative analysis of different calculation methods in the full load stage

方法	弯矩图正负面积比	受力特点	适用范围	优缺点
1、2	大于1	头轻脚重:受荷段弯矩小,锚固段弯矩大	适用于滑坡推力较小,滑体深度较浅、桩锚固段长度较长的抗滑桩结构	锚索设计拉力较小,但桩身位移较大,对锚固地层岩性要求不高,但抗滑桩能力较弱
本文方法	等于1	上下均衡:受荷段弯矩与锚固段弯矩大致相同	适用于滑坡推力较大,滑体深度较深,且滑体深度与桩锚固段长度大致相同的抗滑桩结构	锚索设计拉力适中,桩身受力形式均衡,具有较为合理的抗滑能力和锚固能力
3、4	小于1	头重脚轻:受荷段弯矩大,锚固段弯矩小	适用于滑坡推力较大,滑体深度较深,但桩锚固段深度较浅的抗滑桩结构	锚索设计拉力较大,但桩身锚固能力较弱,对锚固地层岩性要求较高

基于本文计算方法,预应力锚索抗滑桩具有理想的抗滑能力和锚固能力,桩身内力形式均衡合理,能够较好地发挥控制桩身变位的优势,预应力锚索起到良好锚拉加固的效果,同时不会造成锚索设计拉力的浪费,充分体现锚索抗滑桩力学机制的优点。

## 5 结论

1)基于渐进式滑坡的徐变特点和锚索抗滑桩的实际工作演化过程,考虑锚索-抗滑桩-滑坡土体各阶段桩后土压力对锚索抗滑桩工作机理的影响,构建了初始空载和满载两阶段桩锚协同变形的计算模型,对比分析两个阶段的桩身位移和内力分布,直观反映渐进式滑坡支护中锚索抗滑桩的工作过程。

2)根据锚索抗滑桩动态工作过程,依据初始预应力阶段抗滑桩的受力变形特点,改进锚索抗滑桩的桩锚协调变形条件,同时考虑桩后土压力状态对锚索初始张拉力不可忽略的影响作用,避免预应力张拉值过小导致的桩顶位移、抗滑桩内力以及变形过大,预应力张拉值过大引起的桩身内力、变位过大和锚索预应力的浪费,为实现锚索预应力张拉值、桩身位移和内力介于两者之间,因此提出满载阶段全桩弯矩平衡的设计方法。

3)考虑多种工况条件下的锚索抗滑桩桩身变位形式,依据全桩弯矩平衡设计原则,通过算例对比分析不同计算方法,结合有限元数值模拟验证,结果表明:本文计算方法在桩身位移、变位控制以及桩身内力形式均优于其它算法,同时与数值模拟结果较为贴合,验证了弯矩平衡设计方法的合理性。但目前研究适用于均质地基条件下施工阶段锚索抗滑桩的设计计算,对于多层复合地基条件下施工阶段锚索抗滑桩预应力张拉值的计算准确和适用性有待进一步讨论。

### 参考文献:

[1] Lu Yingfa, Huang Xuebin, Liu Defu. Mechanism and stabil-

ity analyses of progressive failure of thrust-type landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2):333-345. [卢应发, 黄学斌, 刘德富. 推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2):333-345.]

[2] Tan Fulin, Hu Xinli, Zhang Yuming, et al. Study of progressive failure processes and stabilities of different types of landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Supp2): 597-606. [谭福林, 胡新丽, 张玉明, 等. 不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊2): 597-606.]

[3] Zhong Yan, Chen Guan, Meng Xingmin, et al. Analysis of the transformation mechanism and prediction of a landslide debris flow multi-hazards chain in an alpine canyon area: A case study in Zhouqu[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2022, 58(3):372-384. [钟艳, 陈冠, 孟兴民, 等. 高山峡谷区滑坡-泥石流灾害链成灾模式与危险性评价——以舟曲立节为例[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(3):372-384.]

[4] Zhang Fuling, Deng Maolin, Zhou Jian, et al. Basic deformation characteristics and mechanism of Tanjiawan landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(1):78-83. [张富灵, 邓茂林, 周剑, 等. 长江三峡库区谭家湾滑坡基本变形特征及机理分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(1):78-83.]

[5] Yang Min, Zhao Hua. The stability study and simulation of soil landslide based on bishop method[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1757(1):012196.

[6] Meng Jingjing, Mattsson H, Laue J. Three-dimensional slope stability predictions using artificial neural networks[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2021, 45(13):1988-2000.

[7] Won J, You K, Jeong S, et al. Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(4):304-315.

- [8] Martin G R, Chen C Y. Response of piles due to lateral slope movement[J]. *Computers & Structures*, 2005, 83(8/9): 588–598.
- [9] Kwon O, Lee J, Kim G, et al. Investigation of pullout load capacity for helical anchors subjected to inclined loading conditions using coupled Eulerian-Lagrangian analyses[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111: 66–75.
- [10] Zhao Lianheng, Liao Weifu, Li Liang, et al. Improved calculation method for the internal force of h-type prestressed anchor cable antislide piles[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(11): 1–11.
- [11] Zeng Derong, Ling Tianqing, Fan Caoyuan. Design and construction of pre-stressed anchor cables in controlling landslide[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(5): 51–54. [曾德荣, 凌天清, 范草原. 预应力锚索在滑坡治理中的设计与施工[J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(5): 51–54.]
- [12] 王化卿, 李传珠, 刘励忠, 等. 预应力锚索抗滑桩设计与施工[M]. 滑坡文集(第7集). 北京: 中国铁道出版社, 1990: 103–109.
- [13] Gui Shuqiang. Design method for using stabilizing piles with pre-stressed anchored cables in landslide remediation works[J]. *Earth Science*, 2005, 30(2): 233–240. [桂树强. 预应力锚索抗滑桩结构计算方法[J]. *地球科学*, 2005, 30(2): 233–240.]
- [14] 金布格, 依申柯. 锚杆抗滑桩组合结构的计算[M]. 滑坡文集(第5集). 北京: 中国铁道出版社, 1986: 117–120.
- [15] Dong Jianhua, Wu Xiaolei, Lian Bo, et al. Study on dynamic calculation method for landslide prevention structure of anti-slide pile with pre-stressed anchor cable[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(11): 72–82. [董建华, 吴晓磊, 连博, 等. 预应力锚索抗滑桩滑坡防治结构的动力计算方法研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(11): 72–82.]
- [16] Liu Xiaoli, Zhou Depei, Yang Tao. A method for computing the prestressing force of the anti-slide pile with prestressed cable[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(3): 317–320. [刘小丽, 周德培, 杨涛. 预应力锚索抗滑桩设计中确定锚索预应力值的一种方法[J]. *工程地质学报*, 2002, 10(3): 317–320.]
- [17] Wang Chengtang, Wang Hao, Zhang Yufeng, et al. Model test and numerical simulation study on the mechanical characteristics of the anchored slide-resistant pile for stabilizing the colluvial landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3343–3354. [王成汤, 王浩, 张玉丰, 等. 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[J]. *岩土力学*, 2020, 41(10): 3343–3354.]
- [18] Mao Mingzhang, Zou Xianfeng. Research on mechanism of collaborative working of prestressed anchor anti-slide piles [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(Supp2): 1552–1555. [毛明章, 邹先锋. 预应力锚索抗滑桩协同工作机理[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(增刊2): 1552–1555.]
- [19] Shi Yanghai, Wang Xianneng. Application of the structural mechanics method to calculate the internal force sharing ratio of anchor cable and anti-slide pile for retaining structure [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 92–97. [石洋海, 王贤能. 力法计算锚索抗滑桩内力分担比及其应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 92–97.]
- [20] Chen Zhan. Designing and calculating prestressed anchor cable-pile[J]. *Earth Science*, 2001, 26(4): 352–356. [陈占. 预应力锚索桩设计与计算[J]. *地球科学*, 2001, 26(4): 352–356.]
- [21] Wang Guihua, Li Changdong, Chen Wenqiang, et al. Study on mechanical characteristics of anchor cable anti-slide pile under the condition of composite multi-layer sliding bed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(11): 2219–2230. [王贵华, 李长冬, 陈文强, 等. 复合多层滑床条件下锚索抗滑桩受力特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2219–2230.]
- [22] Dai Zihang, Shen Pusheng, Peng Zhenbin. Study on the finite difference method in calculation of internal forces of prestress-anchored antislide piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(3): 407–413. [戴自航, 沈蒲生, 彭振斌. 预应力锚固抗滑桩内力计算有限差分法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(3): 407–413.]
- [23] Zhou Depei, Wang Jiansong. Design method of retaining pile with prestressed cable[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 247–250. [周德培, 王建松. 预应力锚索桩内力的一种计算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(2): 247–250.]
- [24] Chen Changfu, Zeng Songlin, Liu Yijun. Calculation of the internal forces of pile-anchor cable structure considering the prestressed loss based on weighted residual method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(12): 4569–4576. [陈昌富, 曾松林, 刘一俊. 考虑预应力损失桩-锚结构内力计算的加权残值法[J]. *岩土力学*, 2018, 39(12): 4569–4576.]
- [25] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [26] Dai Zihang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 517–521. [戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 517–521.]
- [27] Dai Zihang, Peng Zhenbin. Finite difference method based on “m” method of internal forces calculation of stabilizing

piles[J].Journal of Central South University of Technology, 2001,32(5):461-464.[戴自航,彭振斌.基于抗滑桩内力计

算“m”法的有限差分法[J].中南工业大学学报,2001,32(5): 461-464.]

## Calculation of the Prestressed Tension Value of the Progressive Landslide Anchor Cable

HOU Xiaoqiang<sup>1</sup>, WANG Xinfei<sup>1\*</sup>, JIA Honglu<sup>2</sup>, AN Yuke<sup>3</sup>, ZHOU Zhongren<sup>1</sup>, HOU Yunlong<sup>4</sup>

(1.School of Civil Eng., Lanzhou Jiaotong Univ., Lanzhou 730070, China; 2.China Construction Road and Bridge Group Co., Shijiazhuang 050000, China;

3.Gansu Provincial Transportation Planning and Design Inst. Co., Lanzhou 730030, China;

4.Gansu Provincial Inst. of Eng. Geology, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** According to the characteristics of progressive landslide creep, the existing calculation model of anti-skid pile gives less consideration to the interaction process of progressive landslide pile-anchor-soil. In response to this issue, the deformation characteristics of progressive landslides and the dynamic working process of prestressed anchor anti-skid piles from no-load to full load are combined. Using Winkler's elastic foundation beam theory, the anchor cable resistance pile-anchor deformation coordination conditions were optimized. Considering the gradual change of soil pressure behind the piles, a calculation model for pile anchor soil collaborative work under different working conditions was constructed. The calculation method for the initial tension value during the construction stage of prestressed anchor anti-skid piles was derived. Combined with engineering examples and numerical simulation results of finite element software, to obtain high-precision calculation values, MATLAB software was used to compile programs for calculation analysis. The results show that: ① The stage deformation characteristics of "stability-peristalsis-instability" of progressive landslide determine the three-stage process of "no-load-load-full load" dynamic internal force deformation process. The possible soil pressure model after each stage pile is specified, the design of the full load stage does not conform to the actual mechanism of progressive landslide. This further proves the importance of the prestressed tension value design of the anchor cable in the construction stage; ② Progressive landslide thrust from the initial no-load stage which has not been generated to the full load stage. Both phases are not independent of each other, the two interact through pile-anchor deformation, which shows that the prestress tension value of the anti-skid pile in the construction stage is affected by the internal force and deformation of pile anchor in the full load stage; ③ According to the dynamic internal force deformation process of the progressive landslide anchor cable resistance pile, the internal force balance of the bearing section and the anchorage section of the anti-skid pile is ensured to be equal, the design principle of full pile bending moment balance in full load stage is optimized, and the static soil pressure as the design standard of the prestressed initial tension value in the construction stage is established. Comparison shows that this calculation method outperforms the remaining four existing algorithms, at the same time, the finite element numerical simulation results and the proposed algorithm fit is high. The rationality and reliability of this calculation method are further verified. The research results can provide technical guidance for the design, calculation and construction of prestressed anchor cable anti-skid pile in progressive landslide.

**Key words:** progressive landslide; anchor cable prestress; coordinated deformation of pile anchor; soil pressure state; anchor cable design tension

(编辑 张凌之)

引用格式: Hou Xiaoqiang, Wang Xinfei, Jia Honglu, et al. Calculation of the prestressed tension value of the progressive landslide anchor cable[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(1): 138-147. [侯小强, 王新飞, 贾洪璐, 等. 渐进式滑坡锚索抗滑桩预应力张拉值计算[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(1): 138-147.]