

“自保护、自协调”锚拉桩结构体系计算方法研究

王延宁^{1,2,3}, 王振⁴, 张祥恒^{1,2,3*}, 姜晓峰^{1,2,3}, 王晨⁵, 陈谦^{1,2,3}

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 浅海与陆域深部地质钻探山东省工程研究中心, 山东烟台 264004; 3. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004; 4. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 5. 烟台鲁东勘察测绘有限公司, 山东烟台 264004)

摘要:本研究针对传统锚拉桩挡土墙在地震及复杂地质条件下易发生破坏的问题,探讨了新型锚索自保护装置对结构性能的改进效果。通过建立两阶段力学模型,采用有限单元法结合 Matlab 编程进行数值模拟计算,系统分析了该新型挡土结构的受力特性。研究发现,锚索自保护装置在超载时能产生可控塑性变形,有效避免锚索脆性破坏,使结构具备自适应调节能力。数值计算表明,该装置能通过塑性变形耗散能量,显著降低结构内力峰值,改善整体受力状态,为传统挡墙注入了动态响应的“生命力”。这些研究成果为提升挡土结构安全性提供了理论基础,但关于装置参数优化及长期性能等方面仍需进一步研究。

关键词:“自保护、自协调”锚拉桩;自保护装置;结构体系;力学模型;挡土墙

中图分类号:TU472;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0130-05

Study on calculation method about self-protection and self-coordination anchored pile structural system

WANG Yanning^{1,2,3}, WANG Zhen⁴, ZHANG Xiangheng^{1,2,3*}, JIANG Xiaofeng^{1,2,3}, WANG Chen⁵, CHEN Qian^{1,2,3}

(1. Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Neritic and Continental Deep Geological Drilling, Yantai Shandong 264004, China; 3. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China; 4. China Ordnance Industry Survey & Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 5. Yantai Ludong Survey and Mapping Co., Ltd., Yantai Shandong 264004, China)

Abstract: This study investigates the performance improvement of traditional anchored pile retaining walls equipped with novel anchor cable self-protection devices under seismic and complex geological conditions. A two-stage mechanical model was established and analyzed using finite element method coupled with Matlab program for numerical simulation, and the mechanical characteristics are systematically analyzed. The results demonstrate that the self-protection device can generate controlled plastic deformation under overload conditions, effectively preventing brittle failure of anchor cables while endowing the structure with self-adaptive adjustment capability. Numerical calculation reveals that the device dissipates energy through plastic deformation, significantly reducing peak internal forces and improving overall stress distribution, thereby introducing dynamic “vitality” to conventional retaining structures. These findings provide theoretical foundations for enhancing the safety of retaining structures, though further research is required regarding device parameter optimization and long-term performance evaluation.

Key words: self-protection and self-coordination anchored pile; self-protection device; structural system; mechanical model; retaining wall

收稿日期:2025-05-26; 修回日期:2025-07-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.020

第一作者:王延宁,男,汉族,1987年生,高级工程师,水工环地质专业,硕士,主要从事地质灾害治理及岩土工程研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,371908633@qq.com。

通信作者:张祥恒,男,汉族,1990年生,高级工程师,地质学专业,主要从事地质灾害治理及岩土工程研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,1246232527@qq.com。

引用格式:王延宁,王振,张祥恒,等.“自保护、自协调”锚拉桩结构体系计算方法研究[J].钻探工程,2025,52(S1):130-134.

WANG Yanning, WANG Zhen, ZHANG Xiangheng, et al. Study on calculation method about self-protection and self-coordination anchored pile structural system[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):130-134.

0 引言

锚拉桩挡墙作为大型边坡工程中最广泛采用的结构形式,其核心功能是通过锚索与混凝土桩的协同作用,将边坡侧向荷载传递至深层稳定岩土体^[1-2]。据统计,我国山地城镇、高速公路、铁路、水利工程中约65%的高边坡治理工程采用此类结构。然而,实际工程中因复杂地质环境(如断层破碎带、软岩蠕变区)、强震作用(地震动峰值加速度 $>0.3g$)、运营期超量堆载(如露天矿堆载超设计值30%以上)以及挡墙后回填土强夯超载(夯击能超过设计标准1.5倍)等极端工况,常导致锚索拉力骤增^[3-4]。监测数据显示,此类超载事件可使锚索应力超过设计值1.8~2.5倍,进而引发桩体开裂、挡墙倾覆等灾难性破坏^[5-6],相关事故在近十年工程案例中占比高达23%^[7-8]。

针对上述问题,学术界与工程界近年来研发了以形状记忆合金(SMA)锚具^[9]、软钢阻尼锚索为代表的自保护技术体系。这些技术通过材料屈服耗能机制,使锚索在10%~15%大变形范围内仍能维持80%以上抗力,已在千米级隧道工程中实现规模化应用(如成昆铁路复线软岩隧道支护)^[10]。但与传统锚拉桩挡墙的适配性矛盾尤为突出,表现在:锚索大变形与结构体系小变形的不适应^[11-12];锚索抗力预设定与按结构体系刚度分配的不一致。但是,这部分工作目前还未见文献报道。

本文在使用锚索自保护技术的前提下^[13-15],构建一个适应于大变形的结构体系,在此基础上建立其计算模型。

1 “自保护、自协调”锚拉桩结构体系

基于锚索自保护技术条件下,首先提出“自保护、自协调”锚拉桩结构体系,这种结构体系具有以下要素:

(1)锚索的抗力是设计预先设定的,与边坡变形无关,与结构体系刚度无关;

(2)锚索的安全是由自保护技术提供的,不依赖其强度的预留;

(3)整体结构体系由单元结构组合而成,单元结构间只存在方向性约束。

要素(1)意味着:在锚索抗力不变的情况下,可提供设计人员想要的任何变形值(理论上可以实现);锚索抗力不再按传统的刚度分配计算方法

确定。

要素(2)意味着锚索可以一次张拉到设计抗力,不必再预留强度,节省锚索材料,且不用担心锚索破坏。

要素(3)是与要素(1)、(2)匹配的大变形结构体系。这种结构体系由一系列单元结构组成,容许在需要变形的方向,单元结构之间产生大变形,但结构不会破坏。而在其他方向,单元结构之间变形受到约束,保持结构体系的整体性。

这种结构体系能够提供足够的变形量,为短时超载(地震、冲击等)耗能、体系内部受力不均协调、失效预示等提供了可能。挡墙的破坏模式有可能从传统的彻底倒塌改变为大变形稳定或暂时稳定。

这种结构体系由锚索自保护延伸到结构体系的自保护,使其结构具有免疫能力,称为“自保护”能力。大变形能力使结构体系具有内部受力重分布能力,称之为“自协调”能力。这就形成了“自保护、自协调”锚拉桩结构体系。从这个角度出发,可认为这是一种具有抗风险、自调节的智能挡墙。将传统挡墙被动受力状态改变为自保护、自适应的主动协调受力状态,挡墙由此变活,具有生命力。

2 结构体系力学模型的建立

文献[13-15]均提出应该考虑预应力施加阶段和工作阶段分别来建立锚拉抗滑桩的力学模型,但是又都没有定量分析预加固力的大小和分布形式,更没有涉及到锚索抗力与结构体系刚度无关的内容。“自保护、自协调”锚拉桩结构体系的锚索预应力可以一次张拉到设计限力,考虑张拉阶段更具有实际意义。这是基于以下2个方面考虑:一是锚索的初始张拉力比较大,可以产生较大的预加固力,同时也防止抗滑桩产生反向破坏;二是抗滑桩在预应力施加阶段和工作阶段的力学模型不同,不能简单地把两个阶段叠加起来同时考虑。

第一阶段为抗滑桩施工完毕到锚索张拉到设计限值阶段。此阶段桩体要发生向坡体内侧的挠曲变形,对坡后土体产生预加固力作用。这一阶段对滑面上、下均按弹性地基梁考虑才更符合实际受力模式,计算模型如图1所示。本阶段挠曲线微分方程为:

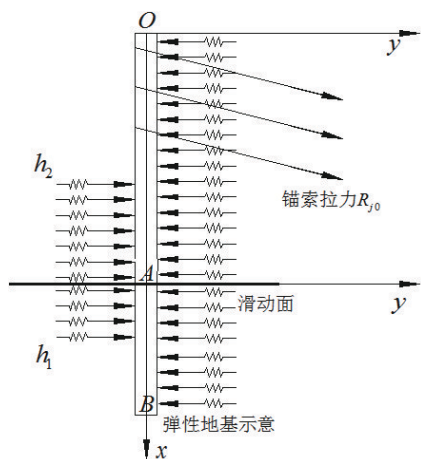


图1 张拉阶段

$$\begin{cases} EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = -K_1 B_p y_1 & (\text{滑面以上}) \\ EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = -K_2 B_p y_1 & (\text{滑面以下}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} K_1 = c_1 + m_1 x^{\frac{1}{n_1}} \\ K_2 = c_2 + m_2 x^{\frac{1}{n_2}} \end{cases}$$

式中: K_1 、 K_2 ——分别为滑面以上及以下的弹性抗力系数; EI ——桩土综合刚度; y_1 ——桩在第一阶段的位移。

针对滑面处变形连续条件,可以求解得到桩身位移和内力,以及桩侧岩土反力的解析解。受篇幅所限,在此不再赘述。

第二阶段为抗滑桩的工作阶段,锚索在这个过程中的拉力始终保持在设计限力。滑面以上按底端受弹性固结的悬臂梁计算,滑面以下按弹性地基梁计算,计算模型如图2所示。注意到:(1)本阶段的计算模型在滑面以上很容易考虑为在桩顶受到集中力,底端弹性固结的悬臂梁,笔者认为预应力的作用在第一阶段中已经考虑,在锚索预应力不再增长的情况下,如果再考虑锚索的拉力属于重复考虑;(2)本阶段作用于抗滑桩上的滑坡推力,应该是经过修正的滑坡推力,修正示意图如图3所示。这一阶段的挠曲线微分方程为:

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} = -K_2 B_p y_2 \quad (\text{滑面以下}) \quad (2)$$

式中: y_2 ——第二阶段的桩身位移。

以上2个阶段也可以归纳为预应力锚索桩主动加固阶段与被动承载阶段。叠加2个阶段的计算结

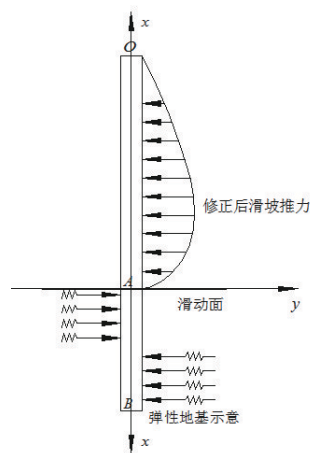


图2 工作阶段

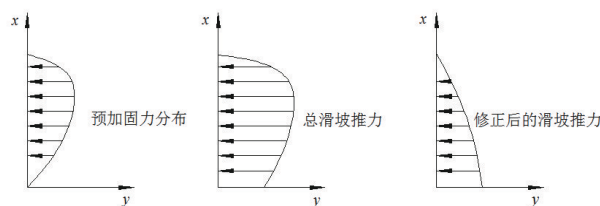


图3 滑坡推力修正示意

果即为最终桩身位移和内力。

3 抗滑桩有限单元法计算模型的建立

利用杆系有限单元法可以灵活方便地解决一些无法或者难以用解析解分析的复杂问题。目前有许多大型的有限元分析软件,但是相对建模复杂,设计参数众多,影响结果因素众多,即使一切输入正确,得到的结果大多也不是很理想,因此很难应用于设计实践。本文主要针对前述建立的计算模型提出与之相适应的杆系有限元计算模式,简化分析和设计。

3.1 单元矩阵

将抗滑桩问题处理为杆系有限元,将抗滑桩视为纯弯梁,用两节点杆单元对抗滑桩进行离散,每个节点有2个未知位移:水平位移 w_i , 转角 θ_i 。其局部坐标下的单元刚度矩阵为:

$$K^e = \frac{EI}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & 6l_e & 4l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: l_e ——单元长度; E ——桩体材料弹性模量; I ——为抗滑桩的截面惯性矩。

3.2 荷载矩阵

在预应力张拉阶段,作用于抗滑桩的主动荷载只有 n 根锚索的设计张力 T_i 。

在工作阶段,作用于抗滑桩的主动荷载是经过修正的滑坡推力。可以将单元内的滑坡推力看作均匀分布。单元推力矩阵为:

$$f^e = \frac{1}{12} q l_e [6, l_e, 6, -l_e]^T \quad (4)$$

3.3 弹性地基梁矩阵

抗滑桩的变形在受到桩侧土体压力作用时,土体产生的作用力可以由弹性地基局部变形理论计算。地基土对地基梁反力集度与地基梁挠度间的

$$K_d^e = k_d l_e \begin{bmatrix} 0.371428571 & 0.052380952 l_e & 0.128571428 & -0.03095238 l_e \\ 0.052380952 l_e & 0.009523809 l_e^2 & 0.03095238 l_e & -0.001339285 l_e^2 \\ 0.128571428 & -0.03095238 l_e & 0.371428571 & -0.052380952 l_e \\ -0.03095238 l_e & -0.001339285 l_e^2 & -0.052380952 l_e & 0.009523809 l_e^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.4 整体分析

针对不同的阶段,分别将杆单元矩阵 K^e 、弹性地基梁矩阵 K_d^e 、荷载单元矩阵 f^e 进行集成,形成结构体系总刚度矩阵 K 和总荷载矩阵 f ,则平衡方程可以表达为:

$$KA = f \quad (8)$$

笔者根据上述原理,应用 Matlab 语言对“自协调、自保护”锚拉桩结构体系的不同阶段分别编制了相应的计算程序。该程序可用于计算在初始张拉阶段所形成的预加固力分布形式以及不同阶段抗滑桩的内力和变形。可考虑滑坡推力和桩前土体抗力按其他曲线分布(对应三角形、梯形、抛物线形)的情况,地基系数 k 按其他曲线(K, C, M 法之外)分布的情况或者按实验数据用插值函数进行插值的情况。同时做适当的调整也可以分析普通锚拉桩的内力、变形、锚索的拉力。

4 算例分析

以某大型边坡典型剖面为例进行分析说明。其桩截面为 $a \times b = 1.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的矩形,桩长 25 m ,桩间距为 4 m 。C30 混凝土,弹性模量 $E_h = 2.55 \times 10^7 \text{ kPa}$ 。滑面以上 $L = 17 \text{ m}$,滑面以下 $h = 8 \text{ m}$ 。考虑开挖完毕后的情况,不考虑桩前剩余抗滑力。按挖孔灌注桩考虑,取滑面以上 $m = 1.1 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$,滑面以下 $K = 2 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 。对于矩形截面取计算宽度 $B_p = b + 1 = 2.5 \text{ m}$ 。 $EI =$

关系为:

$$P_d = k_d w \quad (5)$$

式中: k_d ——地基土对梁挠度的抗力系数,或者称为弹性地基梁的基床系数。

根据最小势能原理可得地基刚度矩阵为:

$$K_d^e = \int_e N^T k_d N dx \quad (6)$$

式中: N ——单元的形函数,选取不同的类型的单元, N 有不同的具体形式。

对于两节点 Hermite 单元的地基刚度矩阵的具体表达式是:

$0.8 E_h I = 4.98 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。滑坡推力荷载采用矩形分布图式,短期荷载 $q_2 = 300 \text{ kN/m}$ 。在抗滑桩上设置 2 排自保护预应力锚索,为使抗滑桩在长期荷载作用下内力合理,选择自保护装置设计限力为 1200 kN ,其布置简图如图 4 所示。

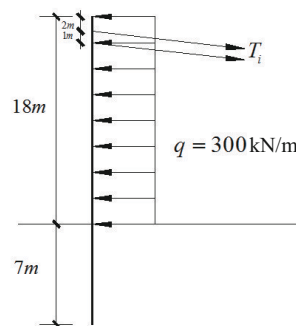


图4 “自协调、自保护”锚拉桩布置

采用程序计算的不同阶段计算结果见图 5。

5 结论

(1)在初始张拉力作用下,桩对岩土体所产生即时的主动加固作用。证明初始预应力能快速有效对滑体产生反推力,在桩身发挥抗滑作用前大大限制滑体滑移量,对及时防止滑坡进入累进变形阶段意义重大。主动支护力的定量计算对评估施工期,尤其是应急抢险情况下滑坡的稳定性极为重要。

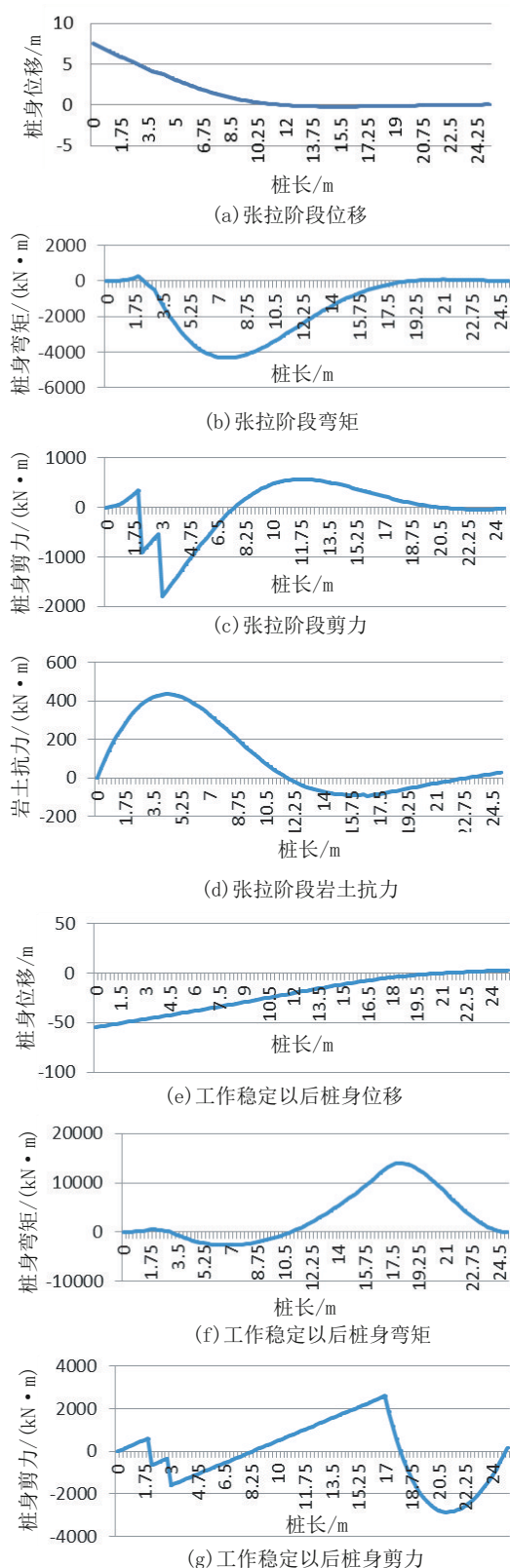


图5 采用程序计算的不同阶段计算结果

(2)“自保护,自协调”锚拉桩体系的桩顶位移比悬臂桩小,比普通锚拉桩大,所以“自保护,自协调”锚拉桩体系是介于悬臂桩与普通锚拉桩之间的一种体系。即可以改变悬臂桩那种不利的受力状态,又可以放松对桩顶位移的控制,从而防止锚索超载。

参考文献:

- [1] 孙裴俊,刘宜平.水库大坝在爆炸作用下的工程防护措施研究进展[J].防护工程,2023,45(6):50-57.
- [2] 万军利.破碎堆积体路堤边坡新型支挡结构加固特性[J].铁道建筑,2023,63(9):141-147.
- [3] 王彩蒙,宇云飞,朱常志,等.超载下桩锚支护基坑的受力与变形分析[J].河北农业大学学报,2020,43(3):136-140.
- [4] 胡瀚,董诏,张文伟.无黏结预应力锚索在水电站崩塌体边坡支护中的应用[J].人民长江,2021,52(S2):175-177.
- [5] 辛公锋,周海祚,张文亮,等.桩帽对复合地基支承路堤稳定和渐进破坏影响分析[J].岩土工程学报,2022,44(S1):63-67.
- [6] 王景芝,陈磊,蒋林君,等.顶部荷载作用下河堤挡墙抗滑变形分析[J].路基工程,2023(4):124-129.
- [7] 吴静,郭德宇,张乐文,等.金沙江溪洛渡水电站拱坝及边坡稳定性分析研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(10):2478-2495.
- [8] 田光,李硕.露天矿复杂边坡支护关键技术研究与发展[J].采矿技术,2025,25(2):171-175.
- [9] 董建华,秦兆贤,何鹏飞.形状记忆合金式锚杆的提出及抗拔承载力特性分析[J].土木工程学报,2023,56(4):103-118.
- [10] 杨建民,舒东利,张涵,等.软岩隧道初期支护沉降机理及其工程措施研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(4):545-550.
- [11] 幸芊,洪兆远,刘成章,等.顺层岩质边坡的溃屈和倾倒机制研究及工程分析[J].岩土工程技术,2025,39(2):207-215.
- [12] 许贤,蔡晖映,孙凤先,等.基于线性规划的张拉整体结构位移优化控制[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(11):2093-2100.
- [13] 邓继辉.预应力锚拉结构自保护技术及其设计方法研究[D].重庆:重庆大学,2005.
- [14] 叶晓明,张军辉,邓继辉.一种锚拉结构自保护、自适应的基本条件[J].地下空间与工程学报,2005(1):120-124.
- [15] 许锡宾,叶晓明,邓继辉,等.边坡自保护/自协调锚拉结构体系[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(1):90-92.

(编辑 王文)